



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



Διπλωματική εργασία: Δημοσθένης Τσακνιάς

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτρης Κουτσογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2011

---

Το σκίτσο στο εξώφυλλο έχει χρησιμοποιηθεί έπειτα από έγγραφη άδεια του Josh, από το <http://www.cartoonsbyjosh.com/>. Στην ιστοσελίδα του υπάρχει μια σειρά από σκίτσα σχετικά με την κλιματική αλλαγή.

Στη γιαγιά μου Σοφία  
και τη μνήμη του παππού μου Δημοσθένη



## Ευχαριστίες

Γράφοντας αυτές τις γραμμές της διπλωματικής μου εργασίας αρχίζω να συνειδητοποιώ ότι σηματοδοτούν το τέλος της και ταυτόχρονα το τέλος της πενταετούς πορείας μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Φυσικά, αυτός ο στόχος δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς τη συμβολή κάποιων ανθρώπων που με στήριξαν και με καθοδήγησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο.

Πρώτα από όλα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου, Δημήτρη Κουτσογιάννη, ο οποίος από την πρώτη στιγμή έδειξε εμπιστοσύνη στο πρόσωπο μου, αφιέρωσε πολλές ώρες από τον χρόνο του έχοντας τη διάθεση και την όρεξη να με βοηθήσει σε οποιοδήποτε ζήτημα και αν προέκυπτε. Νιώθω ότι αποκόμισα πολλές γνώσεις όντας φοιτητής του και αισθάνομαι ευγνώμων απέναντι του που δεν μου αρνήθηκε ποτέ τίποτα, για το πολύπλευρο ενδιαφέρον του, αλλά και για τη σημαντική του βοήθεια στο επόμενο βήμα των σπουδών μου. Ο ιδιαίτερος τρόπος σκέψης του επηρέασε σε σημαντικό βαθμό και τον δικό μου και ενδεχομένως αυτό να είναι το μεγαλύτερο όφελος που απέκτησα από τη συνεργασία μας τον τελευταίο χρόνο.

Αυτή η εργασία δε θα είχε γραφεί χωρίς το συμφοιτητή και καλό μου φίλο, Δημήτρη Μπουζιώτα, καθώς η διπλωματική μου αποτελεί τη συνέχεια του θέματος που αναλάβαμε να παρουσιάσουμε από κοινού στο συνέδριο της EGU. Τον ευχαριστώ για την ευγενική του παραχώρηση, ενώ είμαι βέβαιος πως κανείς από τους δυο μας δεν πρόκειται να ξεχάσει τα ξενύχτια, τις ανησυχίες, αλλά κυρίως τις χαρές που μοιραστήκαμε κατά την προετοιμασία της παρουσίασης μας.

Ευχαριστώ το Νίκο Λαντζούνη, ο οποίος με τις τεχνικές του γνώσεις με γλίτωσε από πολύ κόπο και χρόνο, όπως και τον Παναγιώτη Δημητριάδη για το ενδιαφέρον του στην εξέλιξη της διπλωματικής μου.

Πέρα από τις γνώσεις που μου πρόσφερε η σχολή είχα την τύχη να κάνω μέσω αυτής παρέα με τους: Άγγελο, Αλέξανδρο, Γιώργο, Νίκο, αλλά και όλους τους συμφοιτητές μου που συμμετέχουν στη συντονιστική ομάδα του φόρουμ [www.mqnp.gr](http://www.mqnp.gr). Τους ευχαριστώ για τις όμορφες εμπειρίες που ζήσαμε τα τελευταία χρόνια.

Δίπλα σε κάθε βήμα μου ήταν η Καίτη, η οποία έδειξε μεγάλη υπομονή και κατανόηση την τελευταία χρονιά. Η συμπαράσταση της αποτέλεσε απαραίτητο εφόδιο για την επιτυχή εκπλήρωση της παρούσας εργασίας.

Δεν ξέρω με τι λόγια θα μπορούσα να ευχαριστήσω όλη την οικογένεια μου, τους γονείς μου και τα αδέρφια μου, Γιώργο και Σοφία. Η στήριξη τους ήταν αυτονόητη, όπως και η εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, ακόμη και αν διατηρούσαν επιφυλάξεις για κάποιες επιλογές μου. Τους ευχαριστώ για την αρωγή τους.



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	ii
Περίληψη.....	vii
Abstract.....	viii
1. Εισαγωγή.....	- 1 -
1.1. Εισαγωγή.....	- 1 -
1.2. Αντικείμενο της εργασίας.....	- 2 -
1.3. Διάρθρωση της εργασίας.....	- 3 -
2. Μαθηματικό υπόβαθρο.....	- 5 -
2.1. Προσαρμογή συνάρτησης κατανομής.....	- 5 -
2.1.1. Συνήθεις συναρτήσεις κατανομής στην υδρολογία.....	- 5 -
2.1.2. Κλασική εμπειρική συνάρτηση κατανομής.....	- 6 -
2.1.3. Θέσεις σχεδίασης.....	- 6 -
2.1.4. Κατανομές ακραίων τιμών.....	- 7 -
2.1.5. Εκτίμηση παραμέτρων συναρτήσεων κατανομής.....	- 8 -
2.1.5.1. Μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας.....	- 9 -
2.2. Η έννοια της περιόδου επαναφοράς.....	- 9 -
2.3. Διαλείπουσα συμπεριφορά βροχόπτωσης.....	- 10 -
2.4. Δυναμική Hurst – Kolmogorov.....	- 11 -
2.4.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	- 11 -
2.4.2. Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας.....	- 12 -
2.4.3. Ταυτόχρονη εκτίμηση τυπικής απόκλισης και συντελεστή Hurst.....	- 15 -
2.4.4. Εκτίμηση ποσοστημορίων κατανομής.....	- 16 -
3. Κλίμα της Μεσογείου και κλιματικά μοντέλα.....	- 17 -
3.1. Το κλίμα της Μεσογείου.....	- 17 -
3.2. Μεσόγειος: Ένα “καυτό σημείο” της κλιματικής αλλαγής.....	- 18 -
3.3. Κλιματικά μοντέλα.....	- 19 -



3.4.	Προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων.....	- 24 -
3.5.	Reanalysis data (Δεδομένα Πλήρους Επεξεργασίας).....	- 26 -
3.6.	Κλιματικοί δείκτες ημερήσιας κλίμακας.....	- 27 -
4.	Μεθοδολογία ανάλυσης.....	- 29 -
4.1.	Καταβιβασμός κλίμακας (downscaling) εξόδων κλιματικών μοντέλων.....	- 29 -
4.1.1.	Δυναμικός καταβιβασμός κλίμακας.....	- 29 -
4.1.2.	Στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας.....	- 31 -
4.2.	Σημειακή σύγκριση σταθμών.....	- 31 -
4.2.1.	Εξεταζόμενοι σταθμοί.....	- 31 -
4.2.2.	Μέθοδος BLUE.....	- 35 -
4.2.3.	Μη γραμμικός μετασχηματισμός.....	- 38 -
4.2.4.	Επιφανειακός καταβιβασμός κλίμακας ακραίων βροχοπτώσεων.....	- 39 -
4.2.5.	Αιτιολόγηση της μεθόδου.....	- 41 -
4.3.	Σύνοψη της διαδικασίας ανάλυσης.....	- 45 -
5.	Αποτελέσματα.....	- 47 -
5.1.	Σταθμοί με βροχοπτώσεις.....	- 47 -
5.2.	Σταθμοί με μέγιστη θερμοκρασία.....	- 61 -
6.	Συμπεράσματα.....	- 70 -
	Βιβλιογραφία.....	- 72 -
	Παράρτημα Α – Βελτιστοποίηση παραμέτρων μη γραμμικού μετασχηματισμού.....	- 78 -
	Παράρτημα Β – Αποτελέσματα για τους σταθμούς με βροχοπτώσεις.....	- 82 -
	Παράρτημα Γ – Αποτελέσματα για τους σταθμούς με μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία.....	- 116 -

## Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες κυριαρχεί η άποψη ότι η κλιματική αλλαγή είναι ανθρωπογενής, λόγω των αυξημένων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η παραπάνω άποψη έχει παγιωθεί εκτός των άλλων και από τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων, οι προβλέψεις των οποίων έχουν εκτενώς χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σε θέματα κοινωνικής και οικονομικής πολιτικής, με ειδική έμφαση στα ακραία γεγονότα. Επιπλέον, υπάρχει μια γενική πεποίθηση ότι τα ακραία γεγονότα θα είναι πιο συχνά στο μέλλον.

Προκειμένου να αξιολογηθεί κατά πόσο τα κλιματικά μοντέλα παρέχουν μια αληθοφανή βάση για την πρόγνωση των ακραίων, εξετάζεται η ικανότητά τους στην αναπαραγωγή των ετήσιων μεγίστων τιμών της ημερήσιας θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, καθώς και μιας σειράς από κλιματικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πιθανών περιόδων ξηρασιών, καυσώνων και πλημμυρών. Επιπρόσθετα, προσαρμόζονται κατανομές πιθανοτήτων που περιγράφουν τα ακραία γεγονότα των παραπάνω μεταβλητών. Τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων συγκρίνονται με τα παρατηρημένα δεδομένα από σταθμούς της Μεσογείου, η οποία είναι μια από τις περιοχές που παρουσιάζουν τρωτότητα έναντι της κλιματικής αλλαγής.

Η στατιστική σύγκριση υπέδειξε ότι οι ιστορικές χρονοσειρές δεν μπορούν να προσομοιωθούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Επομένως, εγείρονται σοβαρά ερωτήματα για τη χρήση των κλιματικών μοντέλων σε υδρολογικές εφαρμογές.

## Abstract

During the last decades, it has been a common belief that climate change is man-made, due to the increasing amounts of CO<sub>2</sub> emissions. This belief is also consolidated by climate model outputs, whose projections have widely been used to support decision making for social and financial policies, with special focus on extreme events. Moreover, it is a general perception that extreme events will be more frequent in the future.

To evaluate whether climate models provide a credible basis for predictions of extremes, we study their ability to reproduce annual extreme values of daily temperature and precipitation, as well as a series of climate indices which are used in order to investigate the occurrence of droughts, heat waves and floods. Furthermore, we fit probability distributions which describe the extreme events in both cases. The results from climate models are compared to observed data from stations in the Mediterranean, which is one of the most vulnerable areas to climate change.

The statistical comparison indicated that the observed time series cannot be simulated satisfactorily. Therefore, serious concerns are risen about the use of climate models to hydrological applications.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Εισαγωγή

Η μελέτη του κλίματος έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, ενώ οι ανησυχίες για τις μεταβολές του κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα είναι συνεχώς εντεινόμενες, ιδιαίτερα όσον αφορά την επιρροή του ανθρώπινου παράγοντα και κατά πόσο είναι ικανός να προκαλέσει μια τόσο έντονη μεταβολή στη φύση<sup>†</sup>. Τα ισχυρά αριθμητικά μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί από ερευνητικά ινστιτούτα θεωρούνται ικανά να προσομοιώσουν το κλίμα και τις βασικότερες από τις διεργασίες που το διέπουν. Τα αποτελέσματα τους χρησιμοποιούνται εκτεταμένα και έχει κυριαρχήσει η άποψη ότι μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη μελέτη μεταβολών που ενδέχεται να συμβούν στο μέλλον. Η χρήση των κλιματικών μοντέλων βρίσκει πολλές εφαρμογές και δεν περιορίζεται στο να δοθεί μια εικόνα του κλίματος κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, αλλά επεκτείνεται και στον υδρολογικό σχεδιασμό έργων, στη χάραξη γενικών πολιτικών, στις μελλοντικές χρήσεις γης, τη γεωργία και γενικότερα στις επιστήμες του περιβάλλοντος.

Ωστόσο, δεν έχει εξεταστεί εκτενώς η αξιοπιστία τους και η ικανότητα τους να αποδώσουν πιστά την πραγματικότητα. Εγείρονται λοιπόν ορισμένα βασίμα ερωτήματα και διατυπώνονται επιφυλάξεις σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης τους. Σε ποιο βαθμό μπορούμε να τα χρησιμοποιούμε για μελλοντικές προβλέψεις και ιδιαίτερα για υδρολογικούς σκοπούς; Είναι δυνατόν να υπάρχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τη στιγμή που το κλίμα είναι εξαιρετικά σύνθετο και η αβεβαιότητα κυριαρχεί στη φύση; Είναι ικανοποιητική η απόδοση των κλιματικών μοντέλων στην προσομοίωση του κλίματος του παρελθόντος, και αν ναι, τότε πώς μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι είναι αξιόπιστα όσον αφορά τις προβλέψεις για το μέλλον; Η πολυπλοκότητα, η αβεβαιότητα και η δυναμική Hurst – Kolmogorov είναι

---

<sup>†</sup> Για την αμφισβήτηση που υπάρχει σχετικά με την επιρροή του ανθρώπου στην κλιματική αλλαγή ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην ιστοσελίδα [www.hk-climate.org](http://www.hk-climate.org).

χαρακτηριστικά που δεν μπορούν να αγνοηθούν και να μελετηθούν μόνο τα ντετερμινιστικά χαρακτηριστικά του κλίματος. Άλλωστε, το κλίμα είναι εγγενώς ασταθές και οι εκτιμήσεις για την κατάσταση του στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα βασίζονται, αναμφισβήτητα, σε απλοποιήσεις που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη μελέτη των μελλοντικών μεταβολών.

## 1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι η στατιστική σύγκριση των εξόδων των κλιματικών μοντέλων και των δεδομένων πλήρους επεξεργασίας με τις ιστορικές ημερήσιες παρατηρήσεις της βροχόπτωσης και της μέγιστης θερμοκρασίας. Το γεγονός ότι έχουν δοθεί αποτελέσματα για τις παραπάνω μεταβλητές από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα καθιστά εφικτή την παραπάνω σύγκριση με χρονοσειρές πολλών ετών. Στόχος της είναι να εξετάσει κατά πόσο είναι ικανά να προσομοιώσουν το κλίμα του παρελθόντος με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στα ακραία γεγονότα.

Τα ακραία γεγονότα αναμένεται, σύμφωνα με τις προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων, να είναι συχνότερα, να έχουν μεγαλύτερη ένταση και συνακόλουθα μεγαλύτερες συνέπειες όχι μόνο για τις τοπικές κοινωνίες αλλά και σε παγκόσμια κλίμακα. Προβλέπεται ότι οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής θα είναι ραγδαίες και ότι θα επηρεάσουν κάθε πτυχή της ζωής στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, επιφέροντας δραματικές αλλαγές στο περιβάλλον, την οικονομία, την κοινωνία και την πολιτική. Συνοπτικά, θα υπάρξει αύξηση των πλημμυρών, ξηρασίες, ερημοποίηση περιοχών, αύξηση των τιμών των τροφίμων, πανδημίες, ενώ αναμένεται να αυξηθεί και η μετανάστευση από περιοχές που θα πληγούν από ακραία καιρικά φαινόμενα (European Environment Agency, 2010).

Στα πλαίσια της εργασίας, μέσω της ανάλυσης και επεξεργασίας των εξόδων των κλιματικών μοντέλων επιχειρείται η εξαγωγή των μεγίστων ετησίων τιμών, τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτών και ταυτόχρονα μελετώνται κάποιοι από τους κλιματικούς δείκτες

που έχουν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες αναλύσεις (π.χ. Alexander et al., 2006, Frich et al., 2002) των ημερησίων χρονοσειρών για την μελέτη των ακραίων γεγονότων.

### 1.3. Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια και τρία παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης και τους στόχους της εργασίας.

Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο της εργασίας, αποτελούμενο κυρίως από θεμελιώδεις έννοιες της θεωρίας πιθανοτήτων και της στατιστικής. Γίνεται επισκόπηση των στατιστικών κατανομών που θα χρησιμοποιηθούν, δίνεται η έννοια της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχής και αναλύεται η δυναμική Hurst – Kolmogorov, όχι μόνο ως προς τη μαθηματική περιγραφή της αλλά και ως προς το φυσικό της νόημα.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίδονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κλίματος της Μεσογείου, η μεταβλητότητα που παρουσιάζει και το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για τις ιδιαιτερότητες της. Παράλληλα, αναλύεται ο τρόπος συμπεριφοράς των κλιματικών μοντέλων, η μορφή των αποτελεσμάτων τους ως επιφανειακά στοιχεία καθώς επίσης και οι προβλέψεις τους για το κλίμα της Μεσογείου κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Ταυτόχρονα δίνονται οι ορισμοί των κλιματικών δεικτών που συνηθίζεται να μελετώνται στις ημερήσιες χρονοσειρές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές μεθοδολογίες μετατροπής των επιφανειακών αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων σε επιφάνειες μικρότερου καννάβου ή ακόμη και σε σημείο. Παρατίθενται οι σταθμοί των οποίων οι χρονοσειρές χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική σύγκριση, καθώς και τα κριτήρια επιλογής τους. Περιγράφεται η μέθοδος BLUE και η τροποποιημένη της μορφή που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Αιτιολογείται η μεθοδολογία και περιγράφεται η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης για κάποιους από τους εξεταζόμενους σταθμούς ως προς τη βροχόπτωση και τη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία. Παρατίθενται συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλους τους σταθμούς και γίνεται εκτενής σχολιασμός τους.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση, και τίθενται κάποιοι προβληματισμοί ως προς την ικανότητα των κλιματικών μοντέλων να προσομοιώσουν το κλίμα.

Στο παράρτημα Α γίνεται αξιολόγηση των λογισμικών Mathematica, Matlab και του προσθέτου solver του Excel ως προς τη δυνατότητα τους να κάνουν βελτιστοποίηση του μη-γραμμικού μετασχηματισμού στο μεγάλο πλήθος δεδομένων που εισάγονται για την ανάλυση της εργασίας. Στα παραρτήματα Β και Γ γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για όλους τους σταθμούς για τη βροχόπτωση και την ημερήσια θερμοκρασία, αντίστοιχα, με την παράθεση όλων των διαγραμμάτων και πινάκων με τα αποτελέσματα για κάθε κλιματικό μοντέλο.



## 2. Μαθηματικό υπόβαθρο

### 2.1. Προσαρμογή συνάρτησης κατανομής

#### 2.1.1. Συνήθεις συναρτήσεις κατανομής στην υδρολογία

Εφόσον μια χρονοσειρά προέρχεται από μια στάσιμη στοχαστική ανέλιξη έχει νόημα ο προσδιορισμός της μίας και μοναδικής περιθώριας συνάρτησης κατανομής της υπόψη μεταβλητής. Μέσω της συνάρτησης κατανομής είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της υδρολογικής αβεβαιότητας και η πραγματοποίηση προγνώσεων, καθώς κάθε τιμή της μεταβλητής συνδέεται με μια πιθανότητα υπέρβασης. Στη βιβλιογραφία διατίθεται ένα μεγάλο φάσμα μοντέλων κατανομών πιθανοτήτων, ορισμένα από τα οποία ενδείκνυνται για υδρολογικές εφαρμογές (Κουτσογιάννης, 1997). Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από τη φύση της εξεταζόμενης ανέλιξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχουν θεωρητικοί λόγοι για τους οποίους μια υδρολογική μεταβλητή αναμένεται να ακολουθεί συγκεκριμένο τύπο κατανομής, ενώ άλλες φορές ο τύπος της κατανομής επιλέγεται με βάση την υδρολογική εμπειρία ή ακόμη τα ιδιαίτερα στατιστικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δείγματος (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004).

Συχνά, οι ετήσιες υδρολογικές μεταβλητές ακολουθούν κανονική κατανομή, ενώ οι μηνιαίες ακολουθούν κατανομή Γάμα (η κανονική αποτελεί ειδική περίπτωση της), η οποία θεωρείται κατάλληλη για δείγματα με μη μηδενικό συντελεστή ασυμμετρίας. Ομοίως, και οι μεταβλητές στην ημερήσια χρονική κλίμακα ακολουθούν τη Γάμα, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι παρουσιάζονται κάποιες ιδιαιτερότητες, όπως οι σχετικά μεγάλοι συντελεστές μεταβλητότητας, η ασυμμετρία και η διαλείπουσα συμπεριφορά της βροχόπτωσης. Επίσης, για τις ακραίες τιμές υπάρχει οικογένεια κατανομών, η οποία περιγράφεται εκτενώς στην ενότητα 2.1.4.

### 2.1.2. Κλασική εμπειρική συνάρτηση κατανομής

Εστω η τυχαία μεταβλητή  $X$  με συνάρτηση κατανομής  $F(x)$  και το δείγμα της  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

Η εμπειρική συνάρτηση κατανομής είναι κλιμακωτή και ορίζεται από τη σχέση

$$\hat{F}(x) = \frac{n_x}{n} \quad (2.1)$$

όπου  $n_x$  είναι ο αριθμός των τιμών του δείγματος που δεν υπερβαίνουν την τιμή  $x$ . Η  $\hat{F}(x)$  αποτελεί σημειακή εκτίμηση της άγνωστης συνάρτησης κατανομής του πληθυσμού (Κουτσογιάννης, 1997).

### 2.1.3. Θέσεις σχεδίασης

Ως θέση σχεδίασης  $q_i$  της τιμής  $x_{(i)}$  του διατεταγμένου δείγματος ορίζεται η εμπειρική πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής. Με βάση τον κλασικό ορισμό της εμπειρικής κατανομής έχουμε

$$\hat{F}(x_{(i)}) = \frac{n+1-i}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

οπότε η θέση σχεδίασης, δηλαδή η πιθανότητα υπέρβασης είναι

$$q_i = 1 - \hat{F}(x_{(i)}) = \frac{i-1}{n} \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

Επειδή, όμως, για  $n = 1$  είναι μηδενική η πιθανότητα υπέρβασης χρησιμοποιείται η τυχαία μεταβλητή

$$U_i = 1 - F(X_{(i)}) \quad (2.4)$$

Αποδεικνύεται ότι η  $U_i$  είναι ανεξάρτητη της  $F$  και έχει μέση τιμή

$$E[U_i] = \frac{i}{n+1} \quad (2.5)$$

Η απλούστερη εκτίμηση της  $U_i$  είναι η μέση τιμή της, δηλαδή

$$q_i = \frac{i}{n+1} \quad (2.6)$$

η οποία είναι γνωστή στη βιβλιογραφία και ως θέση σχεδίασης *Weibull* ή *αμερόληπτη ως προς την πιθανότητα υπέρβασης θέσης σχεδίασης*. Η περίοδος επαναφοράς της μέγιστης τιμής της κατανομής Weibull είναι  $T = n+1$  (Κουτσογιάννης, 1997).

#### 2.1.4. Κατανομές ακραίων τιμών

Η προσαρμογή κατανομών σε περιπτώσεις ακραίων τιμών είναι απαραίτητη στην τεχνική υδρολογία, καθώς οι μετρήσεις παροχών δεν είναι ποτέ αρκετές για να υποστηρίξουν αποφάσεις που έχουν να κάνουν με τον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό μιας κατασκευής. Ιδιαίτερα στις πλημμύρες που λαμβάνουν χώρα σε αστικές περιοχές οι μετρητικοί σταθμοί είναι λίγοι, με χαρακτηριστικό το παράδειγμα της Αθήνας, όπου δεν υπάρχει κανένας σταθμός στον Ιλισό και τον Κηφισό ποταμό παρά τα περιστατικά πλημμυρών που έχουν προκαλέσει (Koutsoyiannis, 2006). Σύμφωνα με τη θεωρία της στατιστικής των ακραίων τιμών η συνάρτηση κατανομής  $H(x)$  των μεγίστων τιμών μιας ιδεατώς κατανεμημένης τυχαίας μεταβλητής έχει ασυμπτωτική μορφή και είναι γνωστή ως κατανομή Generalized Extreme Values (GEV) (Jenkinson, 1955). Η ασυμπτωτική κατανομή των ακραίων δεν εξαρτάται από τη μητρική κατανομή της τυχαίας μεταβλητής· αντίθετως υπάρχουν ομάδες κατανομών που συγκλίνουν στην ίδια μαθηματική έκφραση (Gumbel, 1958).

Η συνάρτηση κατανομής και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της GEV δίνονται από τις εξισώσεις (2.7) και (2.8), αντίστοιχα.

$$H(x) = e^{-\left(1 + \frac{\kappa \cdot x}{\lambda} - \kappa \cdot \psi\right)^{-1/\kappa}}, \quad \kappa \cdot x \geq \kappa \cdot \lambda \cdot \psi - \lambda \quad (2.7)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{1}{\lambda} e^{-\left(1 + \frac{\kappa \cdot x}{\lambda} - \kappa \cdot \psi\right)^{-1/\kappa}} \cdot \left(1 + \frac{\kappa \cdot x}{\lambda} - \kappa \cdot \psi\right)^{-1-1/\kappa} \quad (2.8)$$

με τα  $\kappa$ ,  $\psi$ ,  $\lambda$  να είναι οι παράμετροι σχήματος, θέσης και κλίμακας, αντίστοιχα. Η σημαντικότερη παράμετρος είναι το  $\kappa$  από το οποίο καθορίζεται η συμπεριφορά της

κατανομής στην ουρά της. Ταυτόχρονα, είναι η πιο αβέβαιη παράμετρος, δεδομένου ότι εκτιμάται με βάση την ασυμμετρία, η οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί πάντα με ακρίβεια (Koutsoyiannis, 2004).

Αν στην (2.7) είναι  $\kappa = 0$ , τότε έχουμε μια ειδική περίπτωση της GEV, που είναι γνωστότερη ως συνάρτηση Gumbel. Παρά το γεγονός ότι πρόκειται για μια ειδική περίπτωση των συναρτήσεων ακροτάτων είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την περιγραφή ακραίων φαινομένων. Η εκτεταμένη χρήση της και η αμφισβήτηση που έχει δεχθεί για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έχουν αναλυθεί σε σχετικές εργασίες (Koutsoyiannis, 2004, Coles et al., 2003). Η συνάρτηση κατανομής της και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της είναι

$$H(x) = e^{-e^{-\frac{x-\psi}{\lambda}}} \quad -\infty < x < \infty \quad (2.9)$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x-\psi}{\lambda}} e^{-e^{-\frac{x-\psi}{\lambda}}} \quad (2.10)$$

Αν στην (2.7) έχουμε  $\kappa\psi = 1$ , τότε προκύπτει η συνάρτηση Fréchet σύμφωνα με τις σχέσεις (2.11) και (2.12).

$$H(x) = e^{-\left(\frac{\kappa x}{\lambda}\right)^{1/\kappa}} \quad x \geq 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{1}{\lambda} e^{-\left(\frac{\kappa x}{\lambda}\right)^{1/\kappa}} \left(\kappa \cdot \frac{x}{\lambda}\right)^{-1+1/\kappa} \quad (2.12)$$

### 2.1.5. Εκτίμηση παραμέτρων συναρτήσεων κατανομής

Εστω τυχαία μεταβλητή  $X$  με γνωστό τύπο συνάρτησης κατανομής, ο οποίος περιέχει τις άγνωστες παραμέτρους  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ , τότε, η πυκνότητα πιθανότητας της  $X$  είναι μια συνάρτηση  $f_x(x, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$ . Οι συνήθεις μέθοδοι της στατιστικής για την εκτίμηση των παραμέτρων είναι η μέθοδος των ροπών, η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας και η μέθοδος των L – ροπών. Με την προσαρμογή μιας θεωρητικής κατανομής σε ένα δείγμα

τιμών είναι εφικτός ο συνεπής τρόπος παρουσίασης της κατανομής συχνοτήτων, και ταυτόχρονα είναι πιο εύληπτη η σύγκριση με άλλα δείγματα που περιγράφουν την ίδια μεταβλητή. Στα πλαίσια της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας, για αυτό και στο επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται παρουσίαση μόνο αυτής της μεθόδου.

### 2.1.5.1. Μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας

Μια από τις καλύτερες μεθόδους για την εκτίμηση παραμέτρων είναι αυτή της μέγιστης πιθανοφάνειας (Fisher, 1922). Οι τιμές των εκτιμητριών είναι οι τιμές των παραμέτρων που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας. Αν λοιπόν  $X$  είναι η τυχαία μεταβλητή και  $X_i$  είναι οι τιμές που παίρνει το δείγμα της μεταβλητής, τότε η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι

$$f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n, \theta_1, \dots, \theta_r) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i, \theta_1, \dots, \theta_r) \quad (2.13)$$

Η μεγιστοποίηση της παραπάνω σχέσης γίνεται με αριθμητικές μεθόδους, καθώς η αναλυτική επίλυση είναι ιδιαίτερος δύσκολη (Κουτσογιάννης, 1997).

## 2.2. Η έννοια της περιόδου επαναφοράς

Ο όρος *περίοδος επαναφοράς* είναι από τους πλέον σημαντικούς στον τομέα της υδρολογίας και χρησιμοποιείται κατά κόρον στο σχεδιασμό έργων. Η περίοδος επαναφοράς  $T$ , μιας δεδομένης τιμής  $x$  της τυχαίας μεταβλητής  $X$  ορίζεται ως ο μέσος αριθμός χρονικών διαστημάτων (εν προκειμένω υδρολογικών ετών) που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων της τυχαίας μεταβλητής με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής  $x$ . Για παράδειγμα, αν η τιμή της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης είναι 90 mm και η περίοδος επαναφοράς αυτής της τιμής είναι 70 έτη, τότε κατά μέσο όρο θα μεσολαβήσουν 70 έτη μέχρι να επανεμφανιστεί βροχόπτωση ίση ή μεγαλύτερη των 90 mm, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι θα

περάσουν ακριβώς 70 έτη μέχρι την επόμενη εμφάνιση αυτής της τιμής. Σύμφωνα με τον Κουτσογιάννη (1997) ο μαθηματικός ορισμός της για μία τυχαία, συνεχή μεταβλητή για την οποία ισχύει ότι η εμφάνιση μιας τιμής της είναι στοχαστικά ανεξάρτητη από τις προηγούμενες και τις επόμενες της είναι:

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{F_{1x}(x)} = \frac{1}{1 - F_x(x)} \quad (2.14)$$

Προκύπτει λοιπόν ότι η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας υπέρβασης.

Τα παραπάνω ισχύουν για μεγάλες τιμές των υδρολογικών μεταβλητών, μπορούν όμως να οριστούν εύκολα, με αντίστοιχο τρόπο, και για μικρά μεγέθη, π.χ. για την απορροή ενός ποταμού κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας ως

$$T = \frac{1}{P(X \leq x)} = \frac{1}{F_x(x)} \quad (2.15)$$

### 2.3. Διαλείπουσα συμπεριφορά βροχόπτωσης

Η *διαλείπουσα συμπεριφορά της βροχόπτωσης (probability dry)* είναι μία από τις βασικές ιδιαιτερότητες των ημερησίων χρονοσειρών της βροχόπτωσης. Η διαλείπουσα συμπεριφορά της βροχόπτωσης είναι η πιθανότητα μη κατακρήμνισης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας και αποτελεί σημαντική πληροφορία για τη μελέτη του ύψους κατακρημνίσεων σε μικρές χρονικές κλίμακες, ενώ με τη βοήθεια της είναι δυνατός ο εντοπισμός ξηρών περιόδων. Συνεπώς, η διαλείπουσα συμπεριφορά της βροχόπτωσης ορίζεται ως  $P(x \leq 1 \text{ mm})$ , όπου  $P$  η πιθανότητα μη βροχόπτωσης και  $x$  το ημερήσιο ύψος βροχής. Είναι προφανές ότι μεγαλύτερες τιμές του *probability dry* αναμένονται στις πιο ξηρές περιοχές. Για λόγους συνέχειας τα κλιματικά μοντέλα δίνουν στις εξόδους τους βροχόπτωση κάθε ημέρα, επομένως επιλέχθηκε η μελέτη του *probability dry* να γίνει θέτοντας ως κατώφλι του

ημερησίου ύψος το 1 mm κατακρημνίσεων. Με το ίδιο σκεπτικό, μια ημέρα χαρακτηρίζεται ως υγρή όταν το ύψος βροχόπτωσης υπερβαίνει το 1 mm.

## 2.4. Δυναμική Hurst – Kolmogorov

### 2.4.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Θεμελιώδες στοιχείο των χρονοσειρών μετεωρολογικών (και όχι μόνον) φαινομένων αποτελεί η δυναμική Hurst-Kolmogorov<sup>†</sup>. Ο Βρετανός μηχανικός Hurst ήταν ο πρώτος που την παρατήρησε (από τη φυσική της σκοπιά) κατά τη μελέτη του φράγματος του Ασουάν μέσω των χρονοσειρών απορροών του ποταμού Νείλου. Πιο συγκεκριμένα, διαπίστωσε ότι τα έτη με μεγάλες απορροές τείνουν να ομαδοποιούνται, ενώ το ίδιο ισχύει και για τα έτη με μικρές απορροές. Περίπου 10 χρόνια πριν από το Hurst, ο Kolmogorov είχε περιγράψει μαθηματικά το ίδιο φαινόμενο βασιζόμενος στη μελέτη φαινομένων τύρβης με το μοντέλο που εισήγαγε και είναι γνωστό ως *στοχαστική ανέλιξη αυτοόμοια (Self-Similar) ή απλής ομοιοθεσίας (Simple Scaling Stochastic Process, SSS)*. Στην ομοιοθεσία οφείλεται η διαφοροποίηση των χρονοσειρών με μακρά εμμονή σε σχέση με μια χρονοσειρά από ανεξάρτητες και τυχαίες μεταβλητές. Εν γένει, στις ιστορικές χρονοσειρές εμφανίζονται διακυμάνσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, οι οποίες μπορούν να μελετηθούν με βάση το συντελεστή Hurst, ο οποίος υποδεικνύει την ύπαρξη ή μη της εμμονής. Αξίζει να σημειωθεί, ότι εκτός της χρονικής κλίμακας, η συμπεριφορά ομοιοθεσίας παρουσιάζεται και στη χωρική (Koutsoyiannis, Paschalis and Theodoratos, 2011).

Οι κλιματικές αλλαγές είναι στενά συνδεδεμένες με το φαινόμενο Hurst-Kolmogorov, για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η μελέτη του όταν γίνονται αναλύσεις σχετικά με τις μεταβολές που επηρεάζουν το κλίμα (Koutsoyiannis, 2003). Είναι σαφές, λοιπόν, ότι ένα επιτυχημένο κλιματικό μοντέλο οφείλει να έχει την ικανότητα να αναπαράγει χρονοσειρές με

<sup>†</sup> Εναλλακτικές ονομασίες της: ομοιοθεσία, εμμονή μακράς κλίμακας (*scaling*), φαινόμενο Ιωσήφ.

διακυμάνσεις στις χρονικές κλίμακες (Anagnostopoulos et al., 2010). Σε επόμενα εδάφια αποδεικνύεται ότι σε χρονοσειρές με υψηλό συντελεστή Hurst αυξάνεται η αβεβαιότητα. Επιπρόσθετα, η αβεβαιότητα και η αδυναμία προβλέψεων γίνεται μεγαλύτερη όταν αντί για κλιματικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, εξετάζονται υδρολογικές μεταβλητές, όπως οι κατακρημνίσεις και η απορροή, καθώς και όταν από μοντέλα με αραιό κάρναβο μετακινούμαστε σε μικρότερη χωρική κλίμακα.

#### 2.4.2. Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας

Η δυναμική Hurst - Kolmogorov μπορεί να κατανοηθεί ως επαλληλία τυχαίων διακυμάνσεων σε πολλές χρονικές κλίμακες. Εξετάζοντας, λοιπόν, το φαινόμενο από μαθηματικής πλευράς, θεωρούμε μία στάσιμη στοχαστική ανέλιξη  $X_i$  με  $i = 1, 2, \dots$  σε διακριτό χρόνο. Η μέση τιμή της ανέλιξης είναι  $\mu := E[X_i]$  και η αυτοσυνδιασπορά της  $\gamma_j := \text{COV}[X_i, X_{i+j}]$ , ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης της είναι  $\rho_j := \text{CORR}[X_i, X_{i+j}] = \gamma_j / \gamma_0$  και η τυπική της απόκλιση  $\sigma := \sqrt{\gamma_0}$  (Koutsoyiannis, 2002).

Εστω  $k$  θετικός ακέραιος αριθμός ο οποίος αναπαριστά της χρονική κλίμακα της  $X_i$ , τότε η συναθροισμένη ανέλιξη θα είναι:

$$Z_i^{(k)} := \frac{1}{k} \sum_{l=1+k \cdot (i-1)}^{i \cdot k} X_l \quad (2.16)$$

Επίσης, ο κλασματικός Gaussian θόρυβος (*Fractional Gaussian Noise FGN*) που αναπαράγει την ομοιοθεσία περιγράφεται μαθηματικά από την (2.17), με τα  $X_i$  και  $Z_i^{(k)}$  να ακολουθούν την κανονική κατανομή:

$$(Z_i^{(k)} - \mu) =_d \left(\frac{k}{l}\right)^{H-1} \cdot (Z_j^{(l)} - \mu) \quad (2.17)$$

Στην παραπάνω σχέση το σύμβολο  $=_d$  δείχνει την ισότητα στην από κοινού κατανομή των δύο μελών. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συναθροισμένης ανέλιξης σε οποιαδήποτε



κλίμακα  $k$  μπορούν να υπολογιστούν με βάση τις σχέσεις (2.16) και (2.17). Καταλήγουμε, λοιπόν, ότι η μέση τιμή της  $Z_i^{(k)}$  είναι:

$$E[Z_i^{(k)}] = \mu \quad (2.18)$$

Θέτοντας  $i = j = l = 1$  έχουμε τη διασπορά:

$$\gamma_0^{(k)} = k^{2H-2} \gamma_0 \quad (2.19)$$

Ως  $H$  ορίζεται ο συντελεστής Hurst, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί σχεδιάζοντας το διπλό λογαριθμικό διάγραμμα της τυπικής απόκλισης σε κάθε κλίμακα  $k$  με την αντίστοιχη κλίμακα, ενώ στη συνέχεια παίρνουμε την κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων των σημείων που έχουν προκύψει (Montanari, Rosso and Taqqu, 1997). Ο συντελεστής Hurst παίρνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα (0,1). Για  $0 < H < 0.5$  υποδεικνύεται η ύπαρξη αντι-εμμονής, δηλαδή μία μείωση στις τιμές της χρονοσειράς είναι πιθανό να ακολουθείται από μία αύξηση τους, ενώ από την άλλη πλευρά για  $0.5 < H < 1$  εμφανίζεται εμμονή (μία αύξηση στις τιμές της χρονοσειράς είναι πιθανό να ακολουθείται από περαιτέρω αύξηση. Τέλος για  $H = 0.5$  έχουμε ανεξαρτησία των τιμών, πρόκειται δηλαδή για λευκό θόρυβο. Σύμφωνα με τον Koutsoyiannis (2002), η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της είναι ανεξάρτητη της κλίμακας συνάθροισης  $k$  με βάση τη σχέση:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = \frac{1}{2} [(j+1)^{2H} + (j-1)^{2H}] - j^{2H}, \quad j > 0 \quad (2.20)$$

ή προσεγγιστικά:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = H \cdot (2H - 1) \cdot j^{2H-2} \quad (2.21)$$

Η (2.21) υποδεικνύει ότι η αυτοσυσχέτιση συνδέεται με την υστέρηση με μια σχέση δύναμης.

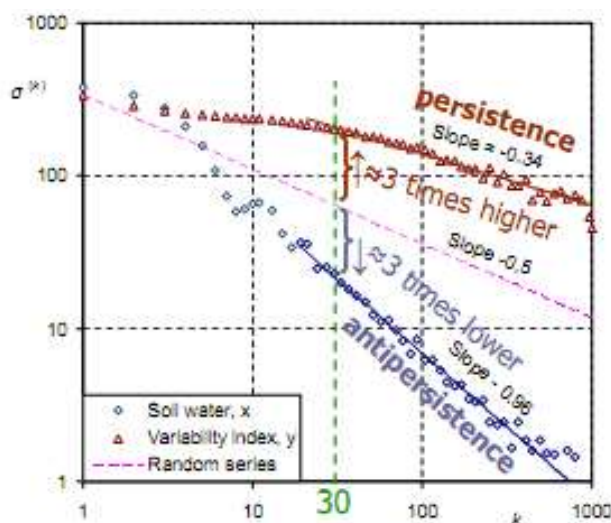
Μία μεταβλητή με τυχαία ανέλιξη έχει αβεβαιότητα που εκφράζεται με τη διακύμανση της εκτιμήτριας της μέσης τιμής της, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n} \quad (2.22)$$

Ειδικά για χρονοσειρές που χαρακτηρίζονται από τη δυναμική Hurst – Kolmogorov δεν ισχύει η σχέση (2.22), αλλά με βάση τις (2.16) και (2.19) παίρνουμε:

$$\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n^{2-2H}} \quad (2.23)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν έχουμε μία χρονοσειρά που εμφανίζει εμμονή και μία που εμφανίζει αντι-εμμονή είναι σαφές ότι η εκτίμηση του τυπικού σφάλματος μεταβάλλεται με τελείως διαφορετικό τρόπο. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1, από όπου προκύπτει εύκολα ότι στην κλιματική κλίμακα των 30 ετών η δυνατότητα πρόβλεψης για τη χρονοσειρά με εμμονή ( $H = 0.66$ ) είναι 9 φορές χειρότερη σε σχέση με τη χρονοσειρά που έχει αντι-εμμονή ( $H = 0.02$ ). Συνεπώς, για μεγάλες χρονικές κλίμακες η προγνωσιμότητα μειώνεται όταν η χρονοσειρά έχει υψηλό συντελεστή Hurst και αυξάνεται όταν εμφανίζεται αντι-εμμονή (Koutsoyiannis, 2010).



Σχήμα 2-1: Διπλό λογαριθμικό διάγραμμα της τυπικής απόκλισης με την κλίμακα συνάθροισης για χρονοσειρές που παρουσιάζουν εμμονή και αντι-εμμονή με συντελεστές Hurst 0.66 και 0.02, αντίστοιχα. Πηγή: (Koutsoyiannis, 2010)

Όπως έχει αποδειχθεί (Beran, 1994) μία συνεπής εκτιμήτρια της τυπικής απόκλισης είναι:

$$S^2 = \frac{1}{n - n^{2H-1}} S^2 = \frac{1}{n - n^{2H-1}} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.24)$$

Η εκτίμηση  $S$  δεν είναι αμερόληπτη (ως μη γραμμικός μετασχηματισμός), για αυτό προτιμάται μία πιο συνεπής εκτιμήτρια (η οποία είναι σχεδόν αμερόληπτη για γνωστό συντελεστή Hurst και για κανονική κατανομή της  $X_i$ ):

$$S := \sqrt{\frac{n-0.5}{n-n^{2H-1}}} S = \sqrt{\frac{n-0.5}{(n-n^{2H-1}) \cdot (n-1)}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.25)$$

Η ανωτέρω σχέση έχει προκύψει με τη μέθοδο Monte Carlo και είναι εύκολο να παρατηρηθεί

ότι για  $H = 0.5$  καταλήγουμε στην  $S = \sqrt{\frac{n-0.5}{(n-1)}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$  που αποτελεί πολύ καλή

προσέγγιση της πραγματικής αμερόληπτης εκτιμήτριας μιας ανεξάρτητης μεταβλητής η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Από την ίδια μελέτη Monte Carlo βρέθηκε ότι στην περίπτωση της SSS ανέλιξης ισχύει ότι:

$$\text{var}[S] \approx \frac{(0.1 \cdot n + 0.8)^{\lambda(H)} \sigma^2}{2 \cdot (n-1)}, \quad \lambda(H) := 0.088 \cdot (4H^2 - 1)^2 \quad (2.26)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις (2.25) και (2.26) ισχύουν για μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή (Koutsoyiannis, 2003).

### 2.4.3. Ταυτόχρονη εκτίμηση τυπικής απόκλισης και συντελεστή Hurst

Στη συνέχεια περιγράφεται ένας αλγόριθμος για την εκτίμηση του συντελεστή Hurst έτσι ώστε να είναι συνεπής με τις ανελίξεις ομοιοθεσίας (Koutsoyiannis, 2003). Η τυπική απόκλιση της μέγιστης κλίμακας που χρησιμοποιείται πρέπει να υπολογίζεται από τουλάχιστον 10 τιμές, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί σχετικά αξιόπιστη. Από τις σχέσεις (2.25), (2.19) και με την θεώρηση ότι  $E[S] = \sigma$  προκύπτει:

$$s^{(k)} \approx c_k(H) k^H \sigma, \quad c_k(H) := \sqrt{\frac{n/k - (n/k)^{2H-1}}{n/k - 0.5}} \quad (2.27)$$

Μια συστηματική προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση του σφάλματος από τη σχέση:

$$e^2(\sigma, H) := \sum_{k=1}^{n/10} \frac{(\ln \sigma^{(k)} - \ln s^{(k)})^2}{k^p} = \sum_{k=1}^{n/10} \frac{(\ln \sigma + H \ln k + \ln c_k(H) - \ln s^{(k)})^2}{k^p} \quad (2.28)$$

με  $1/k^p$  συντελεστής βάρους για το σφάλμα σε κάθε κλίμακα και για  $p = 0$  τα βάρη είναι ίσα, ενώ για  $p = 1, 2, \dots$ , τα βάρη μειώνονται αυξανόμενης της κλίμακας, μιας και για μεγάλες κλίμακες το δείγμα είναι μικρότερο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αβεβαιότητα. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος είναι δύσκολο να γίνει αναλυτικά, αντ' αυτού προτείνεται η αριθμητική διαδικασία.

#### 2.4.4. Εκτίμηση ποσοστημορίων κατανομής

Τα παραπάνω αποτελέσματα αλλάζουν σε σημαντικό βαθμό τις εκτιμήσεις των ποσοστημορίων μιας κατανομής συγκριτικά με τις εκτιμήσεις της κλασικής στατιστικής. Για μία κανονικά κατανεμημένη μεταβλητή  $X_i$  σύμφωνα με την κλασική στατιστική το  $u$ -ποσοστημόριο της είναι:

$$X_u = \bar{X} + S \cdot \zeta_u \quad (2.29)$$

με  $\zeta_u$  το  $u$ -ποσοστημόριο της τυπικής κανονικής κατανομής. Τα κλασικά όρια για επίπεδο εμπιστοσύνης  $\gamma$  είναι

$$x_{u1,2} = x_u \pm \zeta_{(1+\gamma/2)\varepsilon_u}, \quad \mu\varepsilon \quad \varepsilon_u = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{\zeta_u^2}{2}} \quad (2.30)$$

Για ανεξίτηλες ομοιοθεσίας με γνωστό συντελεστή Hurst η εκτιμήτρια του  $u$ -ποσοστημορίου για κάθε κλίμακα  $k$  είναι (Koutsoyiannis, 2003):

$$Z_u^{(k)} = k\bar{X} + \zeta_u \cdot k^H \cdot S \quad (2.31)$$

Επειτα από αλγεβρικές πράξεις τα όρια εμπιστοσύνης υπολογίζονται ως:

$$z_{u1,2}^{(k)} = z_u \pm \zeta_{(1+\gamma/2)\varepsilon_u} \quad \mu\varepsilon \quad \varepsilon_u^{(k)} = k \frac{S}{n^{1-H}} \sqrt{1 + \frac{\zeta_u^2 \cdot (0.1n + 0.8)^{\lambda(H)}}{2 \left(\frac{k}{n}\right)^{2-2H} \cdot (n-1)}} \quad (2.32)$$

### 3. Κλίμα της Μεσογείου και κλιματικά μοντέλα

#### 3.1. Το κλίμα της Μεσογείου

Η Μεσόγειος ανήκει στην κλιματική κλάση Csa και Csb σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης Koppen. Στη συγκεκριμένη ταξινόμηση το γράμμα 'C' υποδηλώνει ότι το κλίμα είναι υγρό με ήπιους χειμώνες, με μέση μηνιαία θερμοκρασία μεγαλύτερη των 10°C κατά το θερμότερο μήνα του έτους, ενώ το ψυχρότερο μήνα η μέση θερμοκρασία είναι μεταξύ των -3°C και 18°C. Το γράμμα 's' υποδηλώνει ότι το καλοκαίρι είναι ξηρό, με τη μέση κατακρήμνιση του ξηρότερου μήνα του θερμού εξαμήνου να είναι μικρότερη από 40 mm και μικρότερη από το ένα τρίτο της κατακρήμνισης του υγρότερου μήνα του ψυχρού εξαμήνου. Το γράμμα 'a' δείχνει ότι το καλοκαίρι είναι μεγάλο και θερμό, με μέση μηνιαία θερμοκρασία του θερμότερου μήνα του έτους μεγαλύτερη από 22°C και για τουλάχιστον 4 μήνες παρατηρούνται μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 10°C. Τέλος, το γράμμα 'b' δείχνει ότι υπάρχουν μεγάλα και δροσερά καλοκαίρια με μέση μηνιαία θερμοκρασία του θερμότερου μήνα του έτους μικρότερη από 22°C, ενώ για τουλάχιστον 4 μήνες παρατηρούνται μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 10°C (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2010).

Συνοπτικά, το Μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από ήπιους υγρούς χειμώνες και ήπια, ζεστά και ξηρά καλοκαίρια. Το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνίσεων είναι 300-900 mm, το οποίο προφανώς μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία. Ο τύπος Csa, που είναι και ο συνηθέστερος για τη Μεσόγειο, παρουσιάζεται στις ηπειρωτικές περιοχές, ενώ ο τύπος Csb στις παράκτιες περιοχές, όπου είναι συνηθισμένη η ύπαρξη συννέφων σε μικρό υψόμετρο και ομίχλη (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι κλίμα παρόμοιο με το Μεσογειακό συναντάται στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α., στη νοτιοδυτική Αυστραλία και σε ένα τμήμα της κεντρικής Χιλής.

### 3.2. Μεσόγειος: Ένα “καυτό σημείο” της κλιματικής αλλαγής

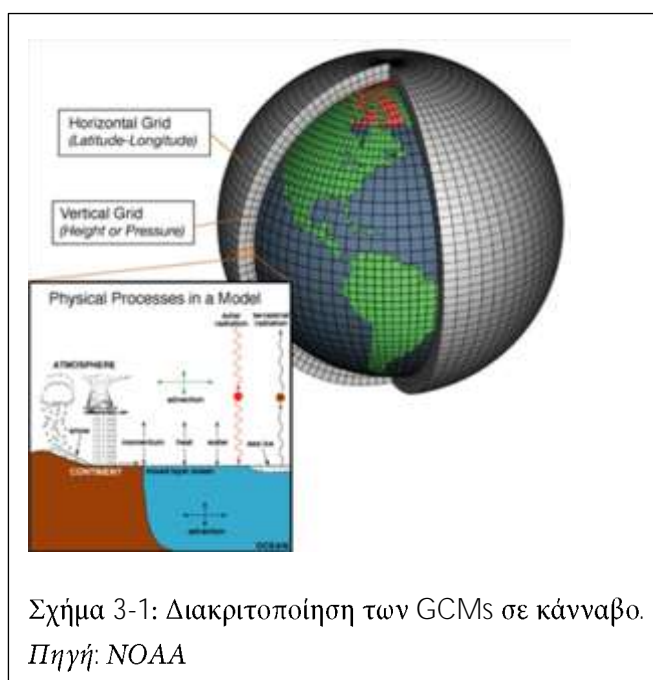
Οι περιοχές της Μεσογείου βρίσκονται στην ουσία σε μια μεταβατική κλιματική ζώνη, μεταξύ της Βόρειας Αφρικής (όπου εμφανίζονται αρκετά συχνά παρατεταμένες ξηρασίες και πολύ υψηλές θερμοκρασίες) και της κεντρικής Ευρώπης (με σχετικά μεγάλα ύψη βροχοπτώσεων). Ταυτόχρονα, υψηλές πιέσεις και καθοδικές κινήσεις κυριαρχούν πάνω από την περιοχή (ιδιαίτερα στο ανατολικό της κομμάτι), με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ξηρές συνθήκες κατά τους θερινούς μήνες. Η μεταβλητότητα των κλιματικών συνθηκών το καλοκαίρι συνδέεται με τους μουσώνες που λαμβάνουν χώρα στην Ασία και την Αφρική (Alpert et al., 2006). Ένα ευρύ φάσμα από μεταβλητές και φαινόμενα, μεταξύ αυτών ο άνεμος, η πίεση, η θερμοκρασία, οι καταιγίδες και η ομίχλη επηρεάζονται από το σχηματισμό και το πέρασμα υποτροπικών αντικυκλώνων. Πέρα από τις κινήσεις πλανητικής κλίμακας, η ορογραφία της περιοχής ποικίλλει και η επιρροή τοπικών παραγόντων όπως ο μεγάλος όγκος νερού της Μεσογείου θάλασσας και η εγγύτητα της οροσειράς των Άλπεων καθιστούν το κλίμα της περιοχής αρκετά σύνθετο. Με βάση τα παραπάνω είναι πιθανό σχετικά μικρές μεταβολές στις προαναφερθείσες ζώνες να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο κλίμα της Μεσογείου, το οποίο έχει θεωρηθεί ως ευάλωτο απέναντι στην κλιματική αλλαγή (Giorgi and Lionello, 2008). Μάλιστα, στο παρελθόν, έχουν παρατηρηθεί μεγάλες κλιματικές μεταβολές και σε συνδυασμό με την αύξηση των συγκεντρώσεων χημικών ουσιών που επιτείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει επισημανθεί ως μια περιοχή “Hot-spot” της κλιματικής αλλαγής (Giorgi, 2006).

Η μεταβλητότητα που εμφανίζει το μεσογειακό κλίμα κεντρίζει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας όχι μόνο στη σύγχρονη εποχή και τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά ήδη από το παρελθόν. Όπως αναφέρουν οι Luterbacher et al. (2006) το ερώτημα για το κατά πόσο έχει αλλάξει το κλίμα στη Μεσόγειο από την κλασική εποχή και εάν η εκτεταμένη αποψίλωση δασών είναι υπεύθυνη για αυτές τις μεταβολές συζητιόταν ήδη από το 18<sup>ο</sup> αιώνα. Ο Mann (1790) χρησιμοποιώντας γραπτές πηγές είχε συμπεράνει ότι το κλίμα γινόταν προοδευτικά θερμότερο και ξηρότερο και απέδιδε αυτό το φαινόμενο στις αλλαγές των

χρήσεων γης. Από την άλλη πλευρά, πολλοί διαφωνούσαν με αυτή την άποψη και πιο συγκεκριμένα ο Ideler (1832) άσκησε κριτική στο Mann ότι έδειχνε πολύ μεγάλη εμπιστοσύνη στις πηγές του. Το ίδιο ερώτημα για την αποψίλωση και την αναδάσωση είχε συζητηθεί εκτενώς κατά το 19<sup>ο</sup> αιώνα. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι υπάρχει μακρά παράδοση στις συζητήσεις και τις μελέτες για τη μεταβλητότητα του κλίματος της Μεσογείου, καθώς επίσης και για την αξιοπιστία των πηγών που μπορούν να αξιολογήσουν κατά πόσο λαμβάνει χώρα μία αξιοσημείωτη μεταβολή.

### 3.3. Κλιματικά μοντέλα

Η ζήτηση για τις κλιματικές προβλέψεις του 21<sup>ο</sup> αιώνα είναι συνεχώς αυξανόμενη, όχι μόνο σε παγκόσμιο, αλλά και σε τοπικό επίπεδο, ενώ ιδιαίτερα έντονος είναι ο προβληματισμός για την επιρροή της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους. Πολλές μελέτες που προσπαθούν να προσομοιώσουν τις κλιματικές συνθήκες βασίζονται στη χρήση των προβλέψεων των κλιματικών μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models – GCMs), από τα οποία έχουν παραχθεί αποτελέσματα που δίνουν εκτιμήσεις όχι μόνο για το μέλλον, αλλά και για το παρελθόν (Randall et al., 2007). Στην ουσία, πρόκειται για υπολογιστικά προγράμματα που προσομοιώνουν τις φυσικές διεργασίες. Τα κλιματικά μοντέλα αποτελούνται από ένα πλήθος διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες έχουν διακριτοποιηθεί και επιλυθεί σε 3-διάστατο κάρναβο (Σχήμα 3-1).



Σύμφωνα με τους Χριστοφίδη και Μαμάση (2009) μπορούμε να κάνουμε τον παραλληλισμό με ένα υπολογιστικό μοντέλο αυτοκινήτου το οποίο αναπαριστά την σύγκρουση ενός

πραγματικού αυτοκινήτου. Για τη λειτουργία του μοντέλου είναι απαραίτητη η είσοδος δεδομένων σε αυτό, η επεξεργασία τους και τέλος η έξοδος του μοντέλου, δηλαδή τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στον παραπάνω παραλληλισμό μπορούμε να υποθέσουμε ότι η είσοδος του μοντέλου είναι η ταχύτητα του αυτοκινήτου, το σημείο της σύγκρουσης κλπ. και ως αποτελέσματα έχουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στα σώματα των επιβατών κατά τη σύγκρουση. Πριν γίνει χρήση οποιουδήποτε μοντέλου πρέπει να έχουμε υπόψη ότι έχουν γίνει απλοποιήσεις και δεν μπορούν να υποκαταστήσουν πλήρως την πραγματικότητα. Αν επιχειρούσαμε να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο με αυτή τη δυνατότητα θα έπρεπε να έχουμε γνώση όλων των δεδομένων και παραμέτρων του προβλήματος σε κάθε χωρική και χρονική κλίμακα, κάτι που είναι ανέφικτο, καθώς τα δεδομένα είναι άπειρα, ενώ δεν είναι δυνατή η κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων που να δέχονται άπειρες πληροφορίες. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα που επικαλείται ο Knutti, (2008) ότι δεν υπάρχει εξίσωση που να μπορεί να περιγράψει την ανάπτυξη των δέντρων, παρόλο που αυτά παίζουν καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση της επιφάνειας της Γης και αλληλεπιδρούν με τις ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, νερού και ενέργειας. Σε περιβαλλοντικές συνθήκες η ανάπτυξη των δέντρων παραμετροποιείται σε σχέση με τις διαθέσιμες ποσότητες νερού, το είδος των δέντρων, τυχόν ανταγωνιστικούς οργανισμούς, τη θερμοκρασία, κλπ. Ως εκ τούτου, τα κλιματικά μοντέλα λειτουργούν κατά βάση ντετερμινιστικά, επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις Navier – Stokes και λαμβάνοντας υπόψη κατά κύριο λόγο τα φαινόμενα της ρευστομηχανικής, της θερμοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας. Τα παραπάνω φαινόμενα έχουν κατανοηθεί και μελετηθεί από την επιστήμη της φυσικής, ωστόσο δεν πρέπει να αμελείται το γεγονός ότι η στοχαστικότητα ενυπάρχει στη Φύση μαζί με το ντετερμινισμό και δεν μπορεί να γίνει διαχωρισμός αυτών (Koutsoyiannis, 2010).

Τα κλιματικά μοντέλα δέχονται κριτική όσον αφορά τη μεθοδολογία που ακολουθούν στην εκτίμηση των παραμέτρων. Χαρακτηριστικά έχουν εντοπιστεί τα εξής προβλήματα (IPCC, 2007):



- Είναι αβέβαιη η μεθοδολογία που ακολουθείται για κάποιες φυσικές διεργασίες με κυριότερες την εκτίμηση της εξάτμισης, το σχηματισμό των συννέφων και την κίνηση των θαλασσιών ρευμάτων.
- Το διάστημα εμπιστοσύνης που δίνεται από την έκθεση της IPCC είναι μόλις 60%, ποσοστό σαφώς χαμηλότερο από αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως, δηλαδή 95% ή ακόμη και 99% στις υδρολογικές εφαρμογές.
- Κατά το σχεδιασμό των σεναρίων γίνονται αρκετές υποθέσεις, οι οποίες αθροιστικά είναι ικανές να δώσουν πολύ μεγάλα σφάλματα.
- Έχουν υποτιμηθεί οι προσπάθειες που γίνονται για περιορισμό και σταθεροποίηση των εκπομπών αερίων που επιτείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου<sup>†</sup>. Οι υποθέσεις που έχουν γίνει για τις ποσότητες αυτών των αερίων θεωρούνται αρκετά υψηλές.

Το γεγονός ότι έχουν παραχθεί αποτελέσματα για το τι συνέβαινε από τη μέση του 19<sup>ου</sup> αιώνα μέχρι και σήμερα καθιστά εφικτή τη σύγκριση τους με τις ιστορικές μετρηθείσες παρατηρήσεις. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκε να εξεταστεί η ημερήσια βροχόπτωση και η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία, μεταβλητές για τις οποίες εντοπίστηκαν συνολικά εννέα κλιματικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας. Από αυτά θα χρησιμοποιηθούν τρία Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Πίνακας 3-1), καθώς τα υπόλοιπα δίνουν αποτελέσματα από το 1960 και έπειτα, ενώ ήταν επιθυμητό η σύγκριση να ξεκινήσει από το 19<sup>ο</sup> αιώνα, σύμφωνα με το σενάριο 20<sup>th</sup> Century Climate in Coupled Models (20C3M). Ο λόγος που είναι επιθυμητή η σύγκριση με μοντέλα που έχουν αποτελέσματα για πολλά χρόνια είναι ότι έτσι αυξάνεται η αξιοπιστία της στατιστικής ανάλυσης, ενώ για τη μελέτη του κλίματος χρησιμοποιούνται συνήθως 50 έτη. Ως πηγές δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι ιστοσελίδες: <https://esg.llnl.gov:8443/index.jsp> και [http://www.cccma.ec.gc.ca/cgi-bin/data/cgcm3/cgcm3\\_a2](http://www.cccma.ec.gc.ca/cgi-bin/data/cgcm3/cgcm3_a2).

---

<sup>†</sup> Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και της θερμοκρασίας της γης. Ωστόσο, με μια προσεκτική παρατήρηση των χρονοσειρών των δύο μεταβλητών μπορεί να διαπιστωθεί ότι πρώτα αυξάνεται η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας της Γης και στη συνέχεια οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Co2-temperature-plot.svg>). Δηλαδή, η σχέση αίτιου – αιτιατού είναι αντίθετη με αυτή που πιστεύεται ευρέως.

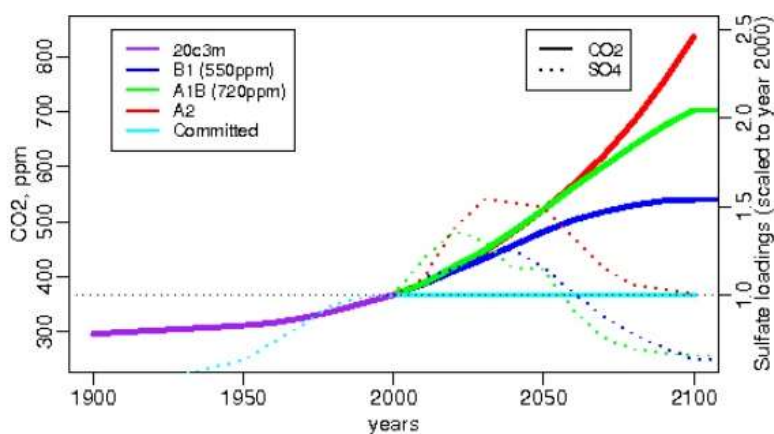
Τα αρχεία είναι διαθέσιμα σε μορφή netcdf, το οποίο είναι ένα format για την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων επιστημονικού χαρακτήρα και χρησιμοποιείται κυρίως για την έρευνα στον τομέα του κλίματος. Ο χειρισμός και η επεξεργασία αυτών των αρχείων έγινε μέσω του προγράμματος Matlab και του λογισμικού του Unidata/UCAR, που επιτρέπει το άνοιγμα τους σε λογιστικό φύλλο spreadsheet.

Πίνακας 3-1: Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας που χρησιμοποιήθηκαν

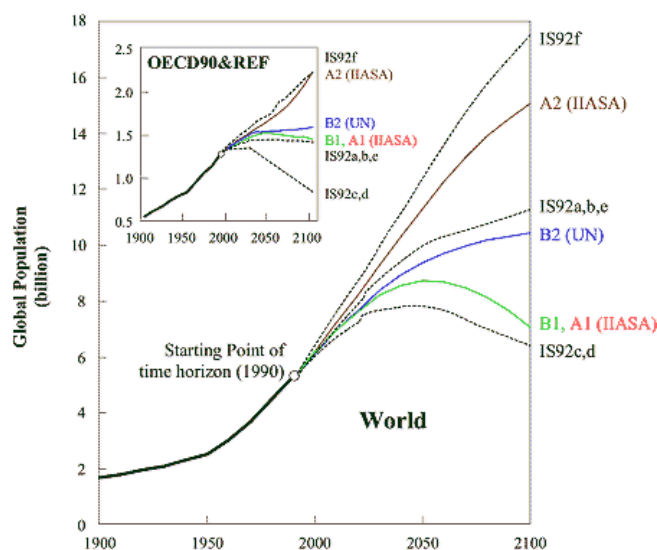
IPCC Report	Name	Ερευνητικό Κέντρο	Ανάλυση (°)	Πλήθος σημείων καννάβου (Γεωγραφικό πλάτος x μήκος)	Χρονική περίοδος	Σενάριο	
						20C3M	SRES A2
AR4	ECHAM5	Max-Planck Institute for meteorology & Deutsches Klimarechenzentrum	1.88 x1.88	96x192	1860-2000	✓	×
AR4	CSIRO	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	1.88 x1.88	96x192	1871-2010	✓	✓
AR4	CGCM3-T63	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.81 x 2.81	64x128	1850-2010	✓	✓

Τα επιλεγμένα κλιματικά μοντέλα (ECHAM5, CSIRO, CGCM3) έχουν δώσει αποτελέσματα με βάση το σενάριο 20C3M και τα δύο τελευταία και για το σενάριο SRES. Το σενάριο 20C3M βασίζεται στις μετρήσεις που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ιδιαίτερα όσον αφορά τις συγκεντρώσεις χημικών ουσιών που θεωρούνται υπεύθυνες για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το 20C3M αποτελούν τις αρχικές συνθήκες για τα σενάρια SRES, που δίνουν προβλέψεις για το κλίμα κατά τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Το SRES διαιρείται σε 4 υποσενάρια (A1, A2, B1, B2) ανάλογα με τις υποθέσεις που γίνονται για τη μελλοντική ανάπτυξη, συνεπώς οδηγούνται σε διαφορετικές υποθέσεις όσον αφορά τις συγκεντρώσεις χημικών ουσιών. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες όπως η πληθυσμιακή εξέλιξη, η οικονομική ανάπτυξη και οι τεχνολογικές αλλαγές (IPCC, 2007). Στο Σχήμα 3-2 έχουμε τις εκτιμήσεις των σεναρίων του CGCM3, με τις συνεχείς γραμμές να απεικονίζουν τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> συναρτήσει του χρόνου, ενώ με τις

διακεκομμένες απεικονίζεται ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης αερίων του θείου προς την αντίστοιχη τιμή του 2000. Χαρακτηριστικό στοιχείο της αβεβαιότητας που κυριαρχεί στα κλιματικά μοντέλα είναι ότι για το 2100 το σενάριο A2 εκτιμά τον πληθυσμό της Γης στα 15 δισεκατομμύρια, ενώ το σενάριο B1 κάνει εκτίμηση για περίπου δισεκατομμύρια κατοίκους (Σχήμα 3-3). Βεβαίως, είναι σαφές ότι αυτή η διαφορά είναι πολύ σημαντική και ο τρόπος ζωής και εξέλιξης της οικονομίας και της τεχνολογίας θα είναι τελείως διαφορετικός αν ο πληθυσμός ανέρχεται στα 15 αντί των 7 δις. Αν, λοιπόν, γίνει αποδεκτός ο συλλογισμός ότι το κλίμα αλλάζει λόγω της επιρροής του ανθρώπου, τότε είναι αναμενόμενο να προκύψουν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα για το μέλλον, ιδιαίτερα αν οι προβλέψεις γίνονται για το 2050 ή ακόμη περισσότερο για το 2100.



Σχήμα 3-2: Η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και το κλάσμα της μέσης ποσότητας του θείου ως προς την τιμή του 2000, σύμφωνα με τα υποσενάρια του SRES από το CGCM3. Πηγή: IPCC, 2007



Σχήμα 3-3: Η πληθυσμιακή εξέλιξη σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με τα σενάρια της IPCC.

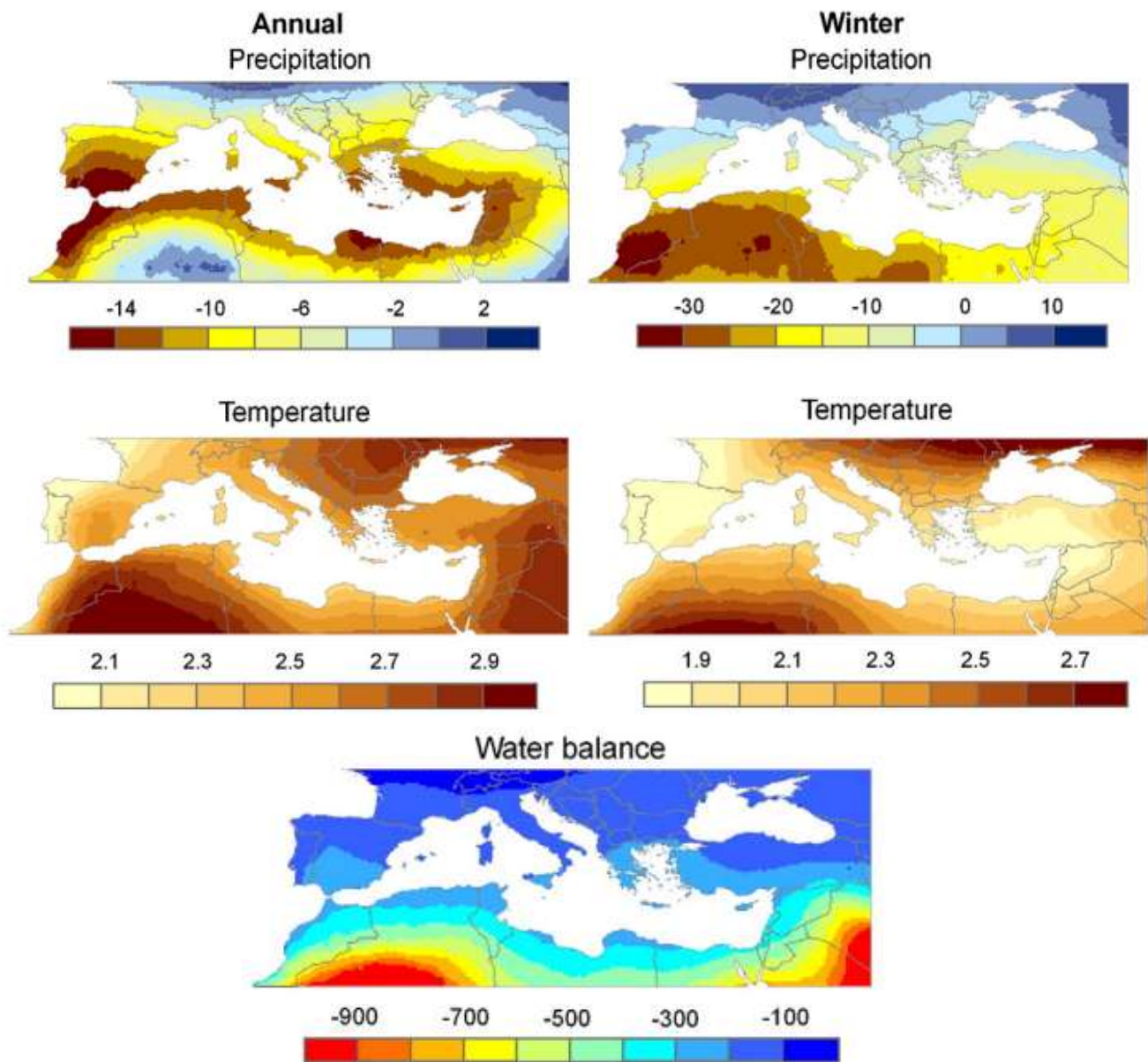
Πηγή: IPCC, 2007

Για τους σκοπούς της εργασίας επιλέχθηκε το υποσενάριο A2, το οποίο περιγράφει έναν πολύ ετερογενή κόσμο, με τον πληθυσμό της γης να αυξάνεται έντονα, την οικονομική ανάπτυξη να είναι πρωταρχικώς κατευθυνόμενη σε τοπικό επίπεδο, ενώ η τεχνολογική ανάπτυξη είναι σχετικώς περιορισμένη. Η επιλογή του σεναρίου A2 έγινε με τη λογική ότι κάνει τις πιο δυσοίωνες προβλέψεις για το μέλλον, άρα αναμένονται περισσότερα ακραία γεγονότα.

### 3.4. Προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων

Οι προβλέψεις για το μέλλον γίνονται συνήθως μέσω των κλιματικών μοντέλων, τα οποία εν γένει περιγράφουν αύξηση της θερμοκρασίας, έντονη μείωση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και αυξητικές τάσεις της έντασης, διάρκειας και συχνότητας των ακραίων γεγονότων, δηλαδή των ξηρασιών, των πλημμυρών και των καυσώνων. Την ίδια στιγμή αναμένεται από την IPCC μείωση των ημερών με θερμοκρασίες υπό το μηδέν. Η αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων αποδίδεται στη μεγαλύτερη χωρητικότητα υδάτινης μάζας σε μια θερμότερη ατμόσφαιρα, καθώς παρατεταμένο χρονικό διάστημα ξηρασιών ακολουθείται από έντονα καιρικά φαινόμενα. Επιπλέον, οι ξηρασίες αναμένονται εντονότερες στις περιοχές που θα μειωθεί η μέση βροχόπτωση και από την άλλη πλευρά, οι πλημμύρες θα αυξηθούν όπου

αυξηθεί και η μέση τιμή της βροχόπτωσης. Επιπρόσθετα, προβλέπεται ότι τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να λάβουν χώρα ακόμη και αν οι αλλαγές στη μέση τιμή των κλιματικών μεταβλητών είναι μικρές (IPCC, 2007).



Σχήμα 3-4: (α) Μέση ετήσια και χειμερινή μεταβολή (%) της βροχόπτωσης για την περίοδο 2040-2070 σε σχέση με την περίοδο 1960-1990, (β) Μέση ετήσια και χειμερινή μεταβολή (%) της θερμοκρασίας για την περίοδο 2040-2070 σε σχέση με την περίοδο 1960-1990, (γ) Μέση ετήσια μεταβολή του υδατικού ισοζυγίου (mm) όπως προβλέφθηκε από εννέα κλιματικά μοντέλα. Πηγή: (García-Ruiz et al., 2011)

Ειδικά για την εξεταζόμενη περιοχή προβλέπεται αύξηση της θερμοκρασίας ακόμη και κατά 6°C κατά τόπους, όπως επίσης και μείωση των βροχοπτώσεων (Alpert et al., 2008). Σύμφωνα με αυτές τις προβλέψεις, είναι πρόδηλο από το Σχήμα 3-4, ότι το κλίμα θα αλλάξει σε σημαντικό βαθμό και ότι η Μεσόγειος οδηγείται προς ερημοποίηση με έντονες ξηρασίες. Αυτές οι «δραματικές» αλλαγές θα προκαλέσουν σημαντικότητα προβλήματα βιωσιμότητας στην ποιότητα, ποσότητα και διαχείριση των υδατικών πόρων. Ταυτόχρονα, αναμένεται μεγαλύτερη κατανάλωση νερού και αύξηση της εξάτμισης, φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν το υδατικό ισοζύγιο και το διαμοιρασμό των κατακρημνίσεων σε εξατμοδιαπνοή, απορροή και υπόγεια ύδατα.

Εν γένει, αναμένεται η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην περιοχή της Μεσογείου να είναι μεγαλύτερη από ότι στις άλλες περιοχές της Γης, ενώ παράλληλα, θα αυξηθούν και οι υψηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη πλευρά, η βροχόπτωση αναμένεται να παρουσιάσει μείωση τόσο όσον αφορά τη συχνότητα αλλά και την ένταση της, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πιθανότητα για εμφάνιση λειψυδρίας. Αντιστοίχως, η χιονόπτωση αναμένεται να είναι μειωμένη όχι μόνο στην περιοχή της Μεσογείου, αλλά στο μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης (European Environment Agency, 2010).

### 3.5. Reanalysis data (Δεδομένα Πλήρους Επεξεργασίας)

Τα reanalysis data (δεδομένα πλήρους επεξεργασίας) χρησιμοποιούνται στην κλιματολογία και την μετεωρολογία για την αφομοίωση των μεταβλητών που προέρχονται από τις ιστορικές παρατηρήσεις σε συνδυασμό με ένα αριθμητικό μοντέλο. Εν γένει, καλύπτουν αρκετές δεκαετίες και δίνουν αποτελέσματα από την επιφάνεια της γης μέχρι και τη στρατόσφαιρα. Πρόκειται για δεδομένα μη-πραγματικού χρόνου και η χρήση τους προορίζεται για μελέτες του υδρολογικού κύκλου και για την επαλήθευση μοντέλων (Schneider et al., 2010). Ταυτόχρονα, η χρήση τους επεκτείνεται στην αξιολόγηση της μεταβλητότητας του κλίματος, στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των προβλέψεων που γίνονται από τα κλιματικά μοντέλα, αλλά και για τη μελέτη ακραίων γεγονότων. Τα αποτελέσματα

τους επηρεάζουν τον τομέα της ενέργειας, της γεωργίας, των υδατικών πόρων και της ασφάλειας. Οι ιστορικές παρατηρήσεις στις οποίες βασίζονται προέρχονται κυρίως από δορυφορικές μετρήσεις (ιδιαίτερα μετά το 1970) ενώ υποστηρίζονται από μετρήσεις από αεροσκάφη και από πλωτήρες στον ωκεανό. Πρέπει να σημειωθεί ότι συστήνεται να γίνεται χρήση τους κατά κύριο λόγο για τη μελέτη φαινομένων που δεν λαμβάνουν χώρα κοντά στην επιφάνεια της γης, δεδομένου ότι πολλές από τις επιφανειακές παρατηρήσεις αγνοούνται και δεν χρησιμοποιούνται. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα ώστε να ενσωματωθούν και αυτά τα δεδομένα στη διαδικασία της πλήρους επεξεργασίας, έτσι ώστε να αξιοποιηθούν και οι επίγειες μετρήσεις προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των reanalysis δεδομένων (Kalnay, 2000). Στα πλαίσια της εργασίας θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα που έχουν παραχθεί από το European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Τα δεδομένα που διατίθενται ελεύθερα στο διαδίκτυο καλύπτουν τη χρονική περίοδο από το Σεπτέμβριο του 1957 μέχρι τον Αύγουστο του 2002, ανά 6 ώρες, σε ανάλυση καννάβου  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ . Τα δεδομένα βρίσκονται σε μορφή αρχείων grid και το άνοιγμα τους γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού Mathematica.

### 3.6. Κλιματικοί δείκτες ημερήσιας κλίμακας

Για τη μελέτη των ακραίων γεγονότων και των αλλαγών που συντελούνται έχει καθοριστεί μια σειρά από κλιματικούς δείκτες που εξετάζουν τις ημερήσιες χρονοσειρές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας. Αυτοί οι δείκτες έχουν μελετηθεί μέσω των ιστορικών παρατηρήσεων (Alexander et al., 2006, Frich et al., 2002) αλλά και των κλιματικών μοντέλων (Schmidli et al., 2005) για τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τις αλλαγές που συντελούνται. Μάλιστα, από τις παραπάνω μελέτες έχουν προκύψει αποτελέσματα σε μορφή καννάβου που καλύπτουν ένα μεγάλο τμήμα της γης, έπειτα από ανάλυση πολλών μετεωρολογικών σταθμών.

Οι δείκτες που θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία αποτελούν ένα υποσύνολο αυτών που έχουν μελετηθεί σε αντίστοιχες εργασίες αλλά και αυτών που έχουν οριστεί από την

*Εξειδικευμένη Ομάδα για την Ανίχνευση της Κλιματικής Αλλαγής (Expert Team on Climate Change Detection and Indices – ETCCDI).*

Συγκεκριμένα, για την περίπτωση των βροχοπτώσεων θα εξεταστούν τα ακόλουθα:

1. Μέσο ετήσιο πλήθος ημερών με ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο των 10, 20 και 30 mm (συμβολίζονται αντίστοιχα *R10mm*, *R20mm* και *R30mm*) με το οποίο επιτρέπεται η εξέταση των ημερών με έντονη και πολύ έντονη βροχόπτωση.
2. Μέγιστο πλήθος συνεχόμενων ημερών χωρίς βροχόπτωση (δηλαδή με ύψος κατακρημνίσεων μικρότερο του 1 mm, όπως έχει οριστεί και για την εξέταση της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχής). Ο δείκτης αυτός είναι ενδεικτικός της εμφάνισης ξηρασίας και συμβολίζεται ως *CDD* (*Consecutive Dry Days*).
3. Μέση ένταση βροχόπτωσης των υγρών ημερών, δηλαδή το μέσο ύψος βροχής των ημερών με ύψος κατακρημνίσεων μεγαλύτερο του 1 mm (*Simple Precipitation intensity index, SDII*).
4. Ύψος βροχής που αντιστοιχεί στο 90-ποσοστημόριο των υγρών ημερών (*Prec90p*).

Για τη μέγιστη θερμοκρασία μελετώνται οι ακόλουθοι δείκτες:

1. Μέσο πλήθος θερινών ημερών ανά έτος, δηλαδή μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία μεγαλύτερη των 25°C (*Summer days SU*).
2. Μέσο πλήθος ημερών με έντονο κρύο ανά έτος, δηλαδή μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία μικρότερη των 0°C (*Icing days ID*).
3. Θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο 90-ποσοστημόριο.
4. Μέσος αριθμός καυσώνων ανά έτος, όπου καύσωνας ορίζεται η ύπαρξη τουλάχιστον έξι συνεχόμενων ημερών με μέγιστη θερμοκρασία μεγαλύτερη αυτής που αντιστοιχεί στο 90-ποσοστημόριο (*Warm Spell Duration Index, WSDI*).



## 4. Μεθοδολογία ανάλυσης

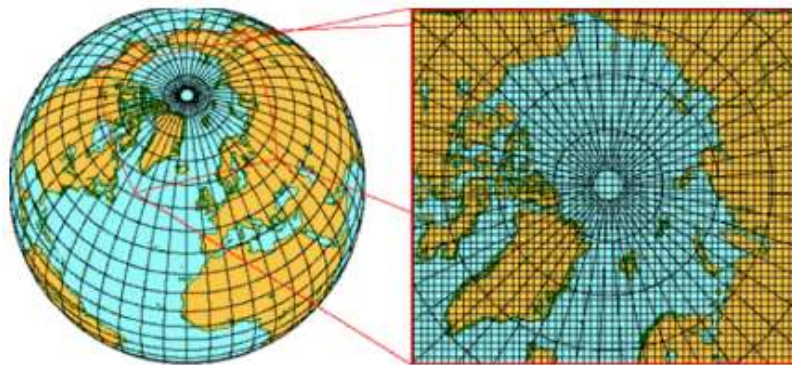
### 4.1. Καταβιβασμός κλίμακας (downscaling) εξόδων κλιματικών μοντέλων

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων και των reanalysis δεδομένων είναι σε μορφή καννάβου ως επιφανειακές τιμές με κάθε φατνίο να έχει διαστάσεις  $1.88^\circ \times 1.88^\circ$  (ή  $2.81^\circ \times 2.81^\circ$  για το CGCM3), πρέπει να γίνει καταβιβασμός της κλίμακας τους σε σημείο ώστε να συγκριθούν με τις ιστορικές παρατηρήσεις. Η μεθοδολογία που ακολουθείται από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τις οδηγίες της IPCC είναι ο δυναμικός και ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας (*dynamical, statistical downscaling*). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η χρήση των αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων σε κλίμακα μικρότερων διαστάσεων ή ακόμη και σε σημείο, όπως επιθυμείται στην περίπτωση της παρούσας εργασίας.

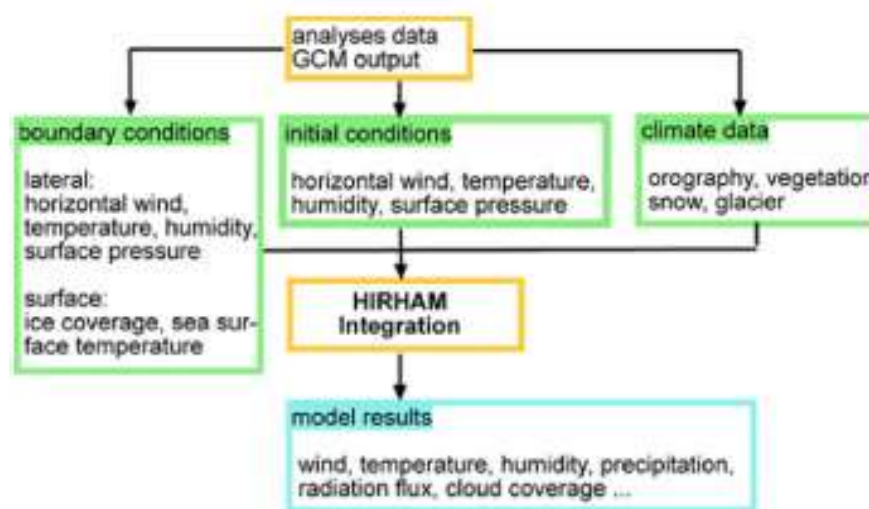
#### 4.1.1. Δυναμικός καταβιβασμός κλίμακας

Με το δυναμικό καταβιβασμό κλίμακας γίνεται εφαρμογή ενός τοπικού κλιματικού μοντέλου (*Regional Climate Model*) με το οποίο μπορεί να γίνει καλύτερη αναπαράσταση του φυσικού εδάφους για την περιοχή ενδιαφέροντος, ενώ γίνεται πιο αποτελεσματική η προσομοίωση των τοπικών χαρακτηριστικών. Με αυτό τον τρόπο γίνεται καταβιβασμός κλίμακας των τιμών από τον κλίμακα των GCMs στον κλίμακα των RCMs, που έχει διαστάσεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων (Σχήμα 4-1). Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς για να παραχθούν τα αποτελέσματα, καθώς είναι απαραίτητη η χρήση supercomputer, με αποτέλεσμα και το κόστος τους να είναι ιδιαίτερος υψηλό. Παρά το γεγονός ότι προκύπτει ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης, το οποίο ενδεχομένως να έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από τα μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι οι αρχικές συνθήκες έχουν εισαχθεί με βάση τα GCMs, όπως απεικονίζεται και στο σχετικό διάγραμμα ροής (Σχήμα 4-2). Επομένως, αν τα μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας δεν μπορούν να προσομοιώσουν ικανοποιητικά το κλίμα μιας περιοχής, τότε τα RCM θα μεταφέρουν την ανακρίβεια και τα στατιστικά τους σφάλματα, επιτείνοντας την

αβεβαιότητα. Δεν είναι λοιπόν, σαφές πώς η σύζευξη ενός ελαττωματικού GCM με ένα RCM θα μπορεί να δώσει αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με όσα θα έδινε ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας (Kundzewicz and Stakhiv, 2010).



Σχήμα 4-1: Αριστερά: Κάνναβος των GCMs (~3.75°). Δεξιά: Κάνναβος των RCMs (~0.5°). Και στις δύο περιπτώσεις απεικονίζεται μόνο κάθε δεύτερος παράλληλος και μεσημβρινός. (Πηγή: <http://www.awi.de/en/home/>)



Σχήμα 4-2: Διάγραμμα ροής για τον καταβιβασμό κλίμακας των αποτελεσμάτων των GCMs σε RCMs (Πηγή: <http://www.awi.de/en/home/>)

#### 4.1.2. Στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας

Από την άλλη πλευρά, ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας κάνει χρήση στατιστικών μεθόδων σε παραμέτρους που επιλέγεται να μελετηθούν. Γίνεται χρήση κάποιου στατιστικού μοντέλου το οποίο συσχετίζει μεταβλητές μεγάλης κλίμακας (*predictors*) με μεταβλητές που αναφέρονται σε χωρικά μικρότερη κλίμακα (*predictands*). Έπειτα, τα αποτελέσματα των GCMs εισάγονται στο στατιστικό μοντέλο και εκτιμούν τους κλιματικούς δείκτες και χαρακτηριστικά που εξετάζονται σε τοπικό ή και σημειακό επίπεδο. Βασικό πλεονέκτημα του στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας είναι η σχετικά μικρή απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς που επιτρέπει την εύκολη εξαγωγή συμπερασμάτων. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει μελέτη για κάποια συγκεκριμένη περιοχή ως προς τα κλιματικά χαρακτηριστικά της (Wilby et al., 2004). Οι συνήθεις μέθοδοι που ακολουθούνται είναι οι εξής:

α) Ταξινόμηση με βάση το σχήμα του καιρού: Οι ημέρες ομαδοποιούνται σε ένα πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων καιρού με βάση τα κοινά τους στοιχεία. Η μεταβλητή *predictand* καθορίζεται με βάση τον κυρίαρχο τύπο καιρού και αναπαράγεται από τις κλιματικές συνθήκες μέσω συναρτήσεων παλινδρόμησης. Η επιτυχία της μεθόδου είναι περιορισμένη στην προσομοίωση των παρατεταμένων υγρών ή ξηρών περιόδων.

β) Μοντέλα παλινδρόμησης: Αποτελούν μία εύκολη και απλή μεθοδολογία για την εξαγωγή είτε γραμμικών είτε μη γραμμικών σχέσεων που να συνδέουν τη μικρή με τη μεγάλη χωρική κλίμακα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η μέθοδος παρεμβολής Kriging, η πολλαπλή παλινδρόμηση, η διατήρηση του συντελεστή συσχέτισης.

#### 4.2. Σημειακή σύγκριση σταθμών

##### 4.2.1. Εξεταζόμενοι σταθμοί

Για την αξιολόγηση και στατιστική σύγκριση των κλιματικών μοντέλων και των reanalysis δεδομένων με τις ιστορικές παρατηρήσεις επελέγησαν 16 σταθμοί για την βροχόπτωση και 12

σταθμοί για τη μέγιστη θερμοκρασία, ενώ η σύγκριση θα είναι σημειακή, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στα υποκεφάλαια 4.2.2 και 4.2.3. Όλοι οι σταθμοί βρίσκονται στην περιοχή που ορίζεται με γεωγραφικές συντεταγμένες: 32° N – 45° N και -06° E – 37° E, με την πλειοψηφία αυτών να βρίσκεται σε χώρες που βρέχονται από τη Μεσόγειο θάλασσα, ενώ έχουν προστεθεί και οι μετεωρολογικοί σταθμοί του Βελιγραδίου και του Σαράγιεβο.

Τα κριτήρια με τα οποία επελέγησαν οι σταθμοί ήταν:

(α) Διαθέσιμες χρονοσειρές με δεδομένα τουλάχιστον 65 ετών σε ημερήσια κλίμακα και με όσο το δυνατό λιγότερα κενά<sup>†</sup>. Άλλωστε, για την εξαγωγή ασφαλών στατιστικών συμπερασμάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων για τουλάχιστον 50 έτη, ειδικά αν μελετώνται φαινόμενα ισχυρής μεταβλητότητας.

(β) Οι σταθμοί να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στην περιοχή της Μεσογείου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι πιο οικονομικά και τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες (Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία) έχουν περισσότερους σταθμούς με διαθέσιμες μετρήσεις.

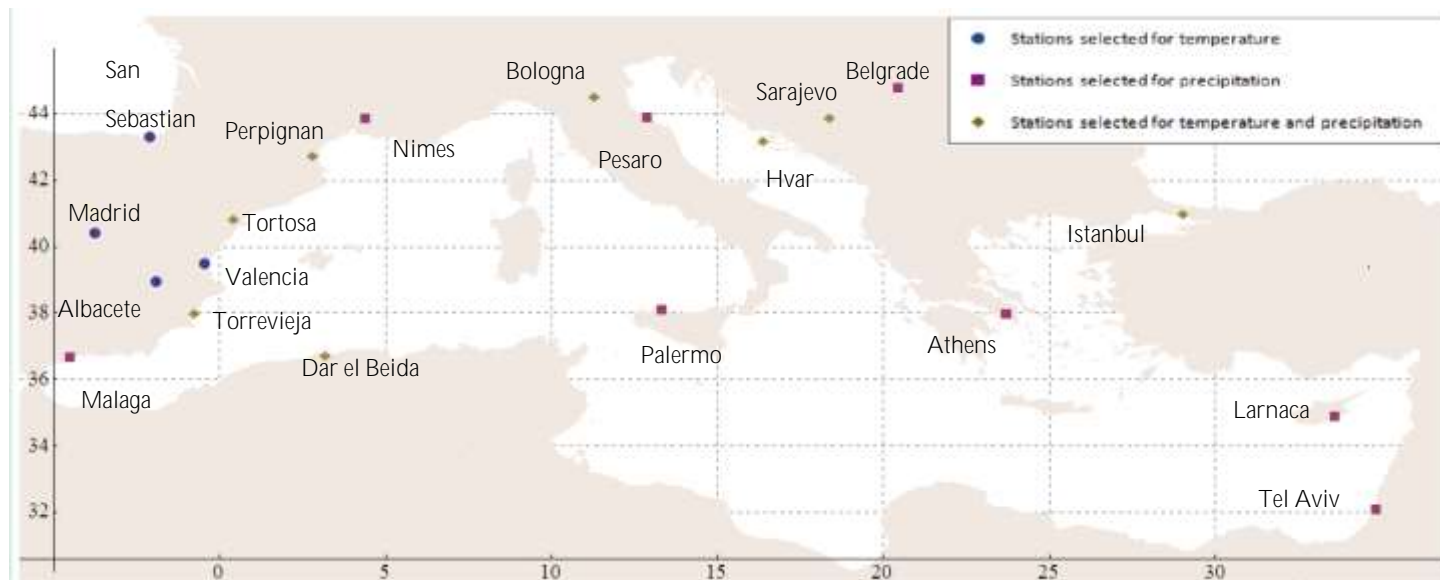
(γ) Η διαθεσιμότητα των δεδομένων στο διαδίκτυο. Ως πηγές δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν η ολλανδική ιστοσελίδα <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?someone@somewhere>, και το Αστεροσκοπείο Αθηνών για την περίπτωση της Αθήνας.

Η προαναφερθείσα ιστοσελίδα διαθέτει, εκτός των άλλων, δεδομένα από κλιματικά μοντέλα, δεδομένα πλήρους επεξεργασίας, καθώς και ιστορικές παρατηρήσεις για μετεωρολογικές μεταβλητές, όπως την ελάχιστη θερμοκρασία, τη χιονόπτωση, κλπ, σε μηνιαία, ημερήσια και εξάωρη χρονική κλίμακα. Οι βάσεις δεδομένων που παρέχουν τις ιστορικές παρατηρήσεις είναι η ECA&D και η GHCN-D, οι οποίες υποστηρίζονται από το Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) και το National Climatic Data Center (NCDC/NOAA), αντίστοιχα.

---

<sup>†</sup> Λόγω του γεγονότος ότι η χρονική κλίμακα είναι ημερήσια, δεν κατέστη εφικτό να βρεθούν χρονοσειρές χωρίς ελλειπίες τιμές. Μάλιστα, τα περισσότερα κενά εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, περίοδο για την οποία δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη μέτρηση σε αρκετές περιπτώσεις.

Η γεωγραφική κατανομή των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζεται στο Σχήμα 4-3, ενώ ο Πίνακας 4-1 και ο Πίνακας 4-2 περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση τους και το μήκος των χρονοσειρών για τη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία και την ημερήσια βροχόπτωση, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-3: Χάρτης της περιοχής της Μεσογείου με τους σταθμούς που εξετάστηκαν

Πίνακας 4-1: Σταθμοί με μετρήσεις θερμοκρασιών

A/A	Σταθμός	Χώρα	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Μήκος χρονοσειράς (έτη)	Περίοδος τιμών
1	Bologna	Ιταλία	44.50 N	11.35 E	53	194	1814-2007
2	Hvar	Κροατία	43.17 N	16.45 E	20	116	1876-2008
3	Perpignan	Γαλλία	42.73 N	2.87 E	43	109	1901-2011
4	Tortosa	Ισπανία	40.82 N	0.48 E	48	70	1941-2011
5	Istanbul	Τουρκία	40.97 N	29.08 E	33	77	1929-2007
6	Torreveija	Ισπανία	37.97 N	-0.70 E	1	73	1927-1999
7	Albacete - Los Llanos	Ισπανία	38.95 N	1.85 E	704	107	1901-2011
8	San Sebastian	Ισπανία	43.30 N	2.05 E	259	81	1930-2010
9	Dar-El-Beida	Αλγερία	36.72 N	3.25 E	25	72	1940-2011

Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων

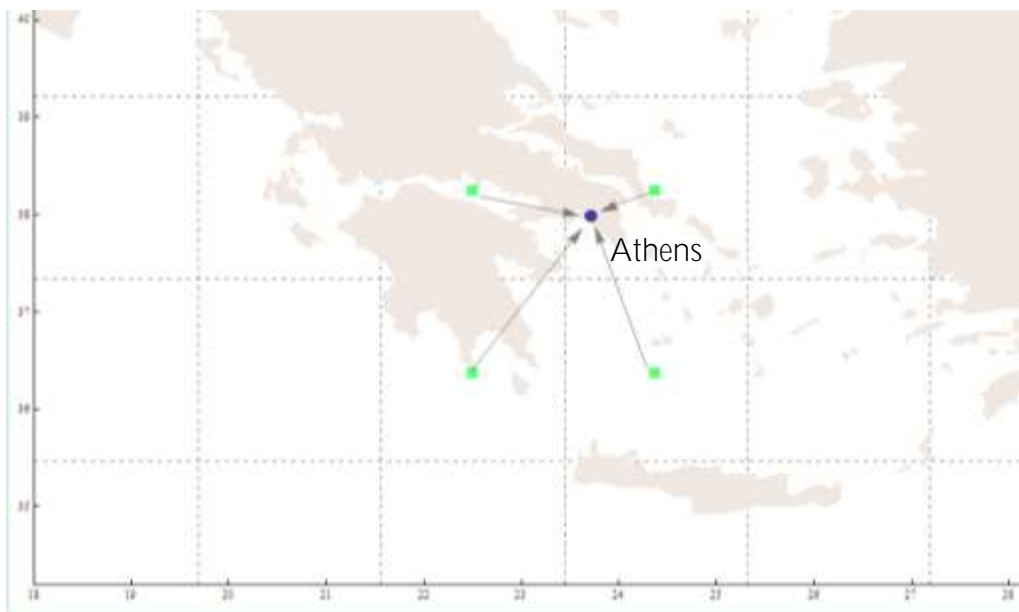
10	Valencia	Ισπανία	39.47 N	0.37 E	11	65	1935-1999
11	Madrid	Ισπανία	40.41 N	3.68 E	667	90	1930-2009
12	Sarajevo	Βοσνία - Ερζεγοβίνη	43.87 N	18.43 E	630	105	1901-2005

Πίνακας 4-2: Σταθμοί με μετρήσεις βροχοπτώσεων

A/A	Σταθμός	Χώρα	Γεωγραφικό πλάτος (°)	Γεωγραφικό μήκος (°)	Υψόμετρο (m)	Μήκος χρονοσειράς (έτη)	Περίοδος τιμών
1	Αθήνα	Ελλάδα	37.58 N	23.43 E	95	110	1900-2010
2	Hvar	Κροατία	43.17 N	16.45 E	20	152	1857-2008
3	Larnaca	Κύπρος	34.88 N	33.63 E	1	94	1916-2009
4	Palermo	Ιταλία	38.11 N	13.35 E	37	157	1852-2008
5	Perpignan	Γαλλία	42.73 N	2.87 E	43	99	1901-1999
6	Torre Vieja	Ισπανία	37.97 N	-0.70 E	1	73	1927-1999
7	Tortosa	Ισπανία	40.82 N	0.48 E	48	89	1910-1999
8	Istanbul	Τουρκία	40.97 N	29.08 E	33	76	1929-2004
9	Tel Aviv	Ισραήλ	32.10 N	34.78 E	4	67	1939-2005
10	Bologna	Ιταλία	44.50 N	11.35 E	53	195	1813-2007
11	Malaga	Ισπανία	36.67 N	-4.49 E	7	70	1942-2011
12	Belgrade	Σερβία	44.80 N	20.47 E	132	75	1935-2009
13	Sarajevo	Βοσνία - Ερζεγοβίνη	43.87 N	18.43 E	630	105	1901-2005
14	Dar El Beida	Αλγερία	36.72 N	3.25 E	24	71	1940-2011
15	Nimes	Γαλλία	43.86 N	4.41 E	59	83	1920-2005
16	Pesaro	Ιταλία	43.91 N	12.90 E	11	138	1871-2008

#### 4.2.2. Μέθοδος BLUE

Αρχικά, κατά το πρώτο στάδιο της ανάλυσης, έγινε χρήση μιας από τις μεθόδους του στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας για να μετατραπούν οι επιφανειακές τιμές σε σημειακές και συγκεκριμένα προτιμήθηκε η γραμμική παρεμβολή μέσω της μεθόδου Best Linear Unbiased Estimation (BLUE). Η μέθοδος BLUE προτάθηκε από τον Kitanidis (1993), και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε υδρολογικές εφαρμογές, ιδιαιτέρως όταν υπάρχει έλλειψη χωρικής ή χρονικής πληροφορίας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής της μπορούν να βρεθούν στις εξής εργασίες: (Koutsoyiannis et al., 2008; Anagnostopoulos et al., 2010; Αλεξοπούλου, 2010). Η στατιστική παρεμβολή θα γίνει επί των ημερησίων χρονοσειρών και όχι επί των μεγίστων ετησίων, ώστε να υπάρχει φυσικό νόημα στα αποτελέσματα. Θα χρησιμοποιηθούν, λοιπόν, τα 4 πλησιέστερα σημεία του καννάβου στον εξεταζόμενο σταθμό (Σχήμα 4-4) και θα εξαχθεί μια νέα χρονοσειρά για κάθε σταθμό και κάθε μοντέλο (ή reanalysis δεδομένα, αντίστοιχα).



Σχήμα 4-4: Σχηματική απεικόνιση των φατνίων του καννάβου και του εξεταζόμενου σταθμού

Με βάση τη μέθοδο BLUE η βέλτιστη χρονοσειρά εξάγεται από την (4.1).

$$\tilde{x} = \lambda_1 \cdot x_1 + \lambda_2 \cdot x_2 + \lambda_3 \cdot x_3 + \lambda_4 \cdot x_4 \quad (4.1)$$

Στην παραπάνω σχέση  $x_i$  είναι η επιφανειακή τιμή κάθε φατνίου και  $\lambda_i$  είναι ο αντίστοιχος συντελεστής βάρους, έτσι ώστε  $\lambda_i \geq 0$ , για να υπάρχει φυσική συνέπεια και  $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$  για την αμεροληψία. Οι συντελεστές  $\lambda_i$  έχουν προκύψει από την μεγιστοποίηση του συντελεστή αποδοτικότητας της ακόλουθης σχέσης.

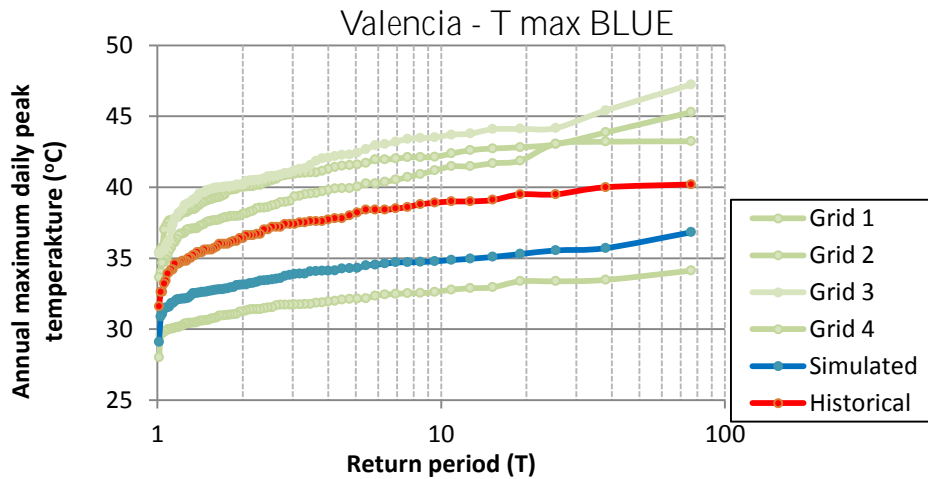
$$eff = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{x}_i)^2}{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2} = 1 - \frac{e^2}{\sigma^2} \quad (4.2)$$

με  $X$  την ιστορική χρονοσειρά,  $\bar{X}$  τη μέση τιμή της ιστορικής χρονοσειράς,  $e^2$  το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και  $\sigma$  την τυπική απόκλιση της ιστορικής χρονοσειράς.

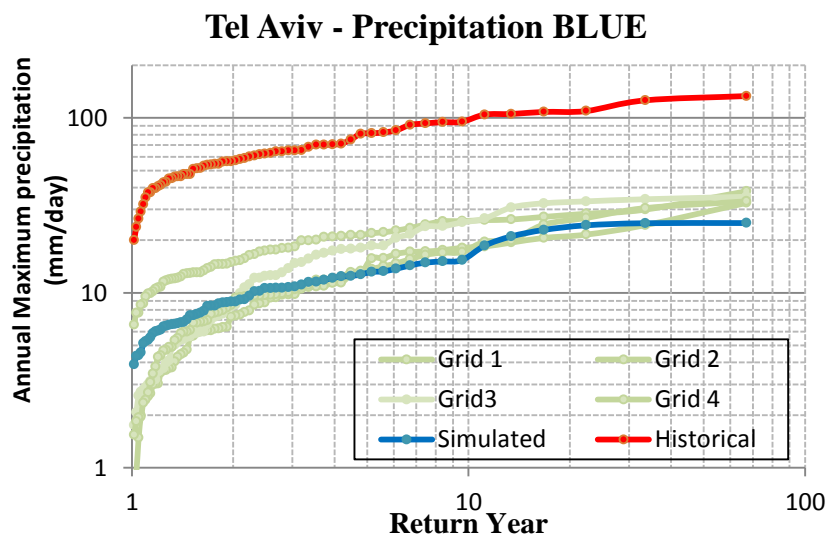
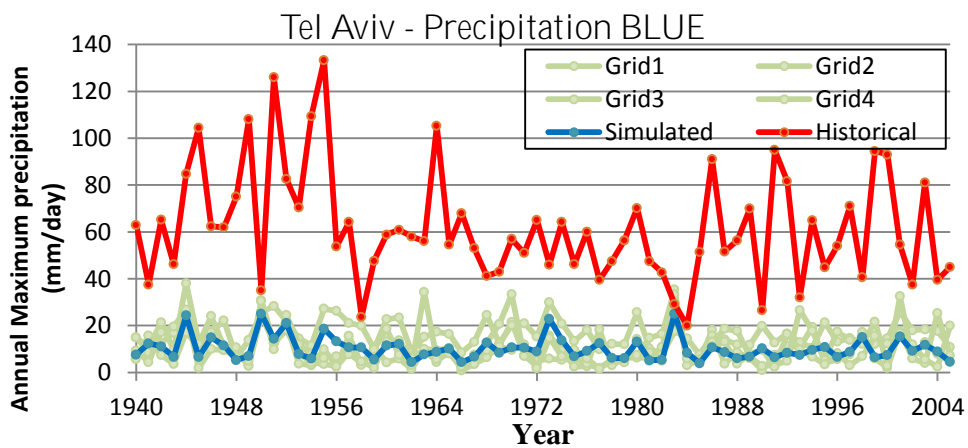
Άλλες μέθοδοι με σταθερούς συντελεστές βαρύτητας, όπως αυτή της χωρικής παρεμβολής, θα αποτύγχαναν καθώς δεν θα λαμβάνονταν υπόψη παράγοντες όπως η ορογραφία, ή το μικροκλίμα της εκάστοτε περιοχής. Αντιθέτως, η γραμμική μέθοδος BLUE επιτρέπει στις χρονοσειρές των κλιματικών μοντέλων (ή reanalysis δεδομένων) να προσαρμοστούν όσο περισσότερο γίνεται στις αντίστοιχες ιστορικές χρονοσειρές.

Παρά την επιτυχή εφαρμογή της γραμμικής BLUE στη μηνιαία και ετήσια χρονική κλίμακα, δεν συνιστάται η εφαρμογή της για μικρότερες, όπως είναι η ημερήσια. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι εξομαλύνονται οι μέγιστες τιμές και δεν μπορεί να γίνει ικανοποιητική σύγκριση των ακραίων, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 4-5 και στο Σχήμα 4-6 για την περίπτωση της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ημερήσιας βροχόπτωσης, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, προτιμάται να γίνει χρήση της τροποποιημένης μεθόδου BLUE, μέσω ενός μη-γραμμικού μετασχηματισμού (Tsaknias et al., 2011).





Σχήμα 4-5: Εμπειρική κατανομή των μεγίστων ετησίων μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας για τα επιφανειακά στοιχεία, την προσομοιωμένη (μέσω BLUE) και την ιστορική χρονοσειρά για την περίπτωση του σταθμού στη Valencia



Σχήμα 4-6: Χρονοσειρά και εμπειρική κατανομή των μεγίστων ετησίων βροχοπτώσεων για τα γειτονικά φατνία, την προσομοιωμένη (μέσω BLUE) και την ιστορική χρονοσειρά για την περίπτωση του Tel Aviv

#### 4.2.3. Μη γραμμικός μετασχηματισμός

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, κάθε τιμή του καννάβου  $x_i$  αθροίζεται με ένα σταθερό συντελεστή  $a$  και στη συνέχεια υψώνεται σε μια δύναμη  $c$ , με τα  $a, c$ , μη αρνητικοί αριθμοί ώστε να υπάρχει φυσική συνέπεια (Σχέση (4.3)).

$$y_i = (a + x_i)^c \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια και σε αντιστοιχία με τη μέθοδο BLUE έχουμε:

$$\tilde{y} = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \cdot y_i \quad (4.4)$$

όπου για τα  $\lambda_i$  ισχύει ό,τι και στη γραμμική BLUE.

Συνδυάζοντας τις (4.3) και (4.4) καταλήγουμε στην τελική, προσομοιωμένη χρονοσειρά.

$$\tilde{x} = y^{-1} = \left( \sum_{i=1}^4 \lambda_i \cdot (a + x_i)^c \right)^{1/c} - a \quad (4.5)$$

Οι συντελεστές  $a, c, \lambda_i$ , προκύπτουν έπειτα από ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος:

$$Er = e^2 + (e_m^2 + e_s^2) \cdot q + t \cdot e_{sk}^2 \quad (4.6)$$

με  $e^2$  να είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως είχε οριστεί στην (4.2),  $e_m, e_s, e_{sk}$  το σφάλμα της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης και της ασυμμετρίας, αντίστοιχα. Τα  $q, t$  πρέπει να είναι σχετικά μεγάλοι αριθμοί, ώστε να τιμωρείται η απόκλιση από τα αντίστοιχα μεγέθη. Μεγαλύτερη σημασία δίνεται στις παραμέτρους θέσης και διασποράς, για αυτό θέτουμε  $q > t$ . Μάλιστα, στα πλαίσια της εργασίας ελήφθη  $q = 1000$  και  $t = 250$ . Με αυτό τον τρόπο, επιτρέπεται στην προσομοιωμένη χρονοσειρά να έχει παρόμοια στατιστικά χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη ιστορική και ταυτόχρονα να προσαρμόζεται σε αυτή όσο περισσότερο

γίνεται μέσω της ελαχιστοποίησης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Η βελτιστοποίηση έγινε με τη βοήθεια του add-in solver του Excel. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία βελτιστοποίησης και την επιλογή του σχετικού λογισμικού μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Α.

#### 4.2.4. Επιφανειακός καταβιβασμός κλίμακας ακραίων βροχοπτώσεων

Οι τιμές των βροχοπτώσεων από τις εξόδους των κλιματικών μοντέλων και των δεδομένων πλήρους επεξεργασίας είναι οι επιφανειακά μέσες εντάσεις τους, οι οποίες είναι εύλογο να αποκλίνουν σε σχέση με τις σημειακές μετρήσεις των σταθμών όταν εξετάζονται τα ακραία γεγονότα. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η χρήση του συντελεστή σημειακής αναγωγής<sup>†</sup> ο οποίος έχει τις ακόλουθες ιδιότητες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

Α) Είναι πάντα μεγαλύτερος από 1, καθώς όταν καταγράφεται μέγιστη ένταση στη θέση του σταθμού, είναι απίθανο την ίδια στιγμή να καταγράφεται μέγιστη ένταση σε όλη την εξεταζόμενη επιφάνεια.

Β) Είναι αύξουσα συνάρτηση της έκτασης του φατνίου, καθώς μεγαλύτερη έκταση συνεπάγεται και μεγαλύτερο συντελεστή σημειακής αναγωγής.

Γ) Είναι φθίνουσα συνάρτηση της διάρκειας βροχής.

Δ) Είναι ο αντίστροφος του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής

Ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής προσδιορίζεται έπειτα από εκτεταμένες εμπειρικές διερευνήσεις και έχουν υπάρξει σχετικά αποτελέσματα για τις ΗΠΑ και τη Μεγάλη Βρετανία. Από τα πινακοποιημένα αποτελέσματα του National Environmental Research Council (1975) με εύρος διάρκειας βροχόπτωσης 1min – 25 ημέρες και έκτασης 1 – 30000km<sup>2</sup> προσδιορίστηκε ο ακόλουθος συντελεστής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

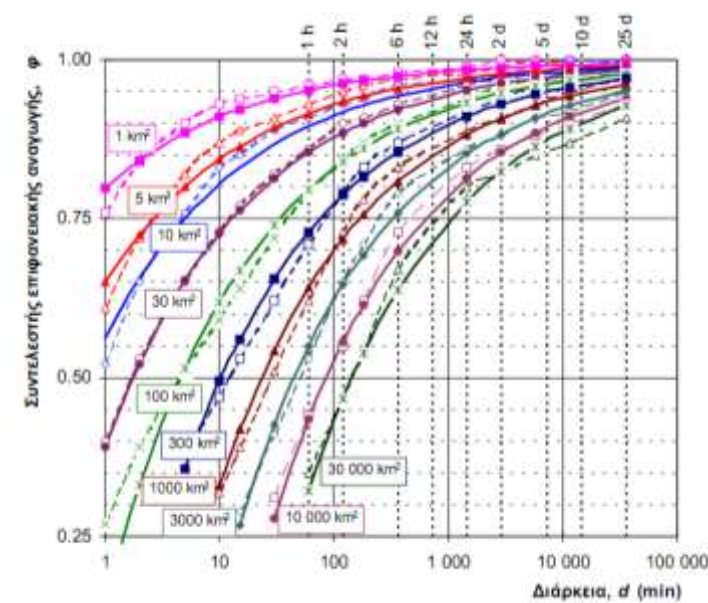
---

<sup>†</sup> Ο συντελεστής ορίζεται συνήθως ως επιφανειακής αναγωγής (areal reduction factor) και κάνει αναγωγή των σημειακών μετρήσεων σε επιφανειακές.

$$\varphi = 1 - \frac{0.048A^{0.36-0.01\ln A}}{d^{0.35}} \geq 0.25 \quad (4.7)$$

με  $\varphi$  το συντελεστή επιφανειακής αναγωγής,  $d$  την διάρκεια βροχής σε ώρες, και  $A$  η έκταση σε  $\text{km}^2$ . Ο συντελεστής σημειακής αναγωγής είναι προφανώς  $1/\varphi$ .

Στο Σχήμα 4-7 εμφανίζεται η μεταβολή του συντελεστή, με βάση τις παρατηρημένες τιμές και την εμπειρική σχέση, όπως αυτή προέκυψε για την Μ. Βρετανία. Βέβαια, η περιοχή μελέτης μας δεν είναι η Μ. Βρετανία, αλλά η Μεσόγειος, ωστόσο οι Collier and Hardaker (1996) έδειξαν ότι η μεταβολή είναι παντού σχεδόν ίδια. Ο ισχυρισμός τους επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 4-8 με τις διαφορές που εμφανίζονται για τον ίδιο συντελεστή μεταξύ ΗΠΑ και Μ. Βρετανίας να είναι αρκετά μικρές, ειδικά αν εξετάζεται η ημερήσια χρονική κλίμακα.



Σχήμα 4-7: Μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής συναρτήσει της έκτασης του φατνίου και της διάρκειας βροχής, σύμφωνα με την εξίσωση (4.7) και τις πινακοποιημένες τιμές. Πηγή: (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\varphi$  όπως ορίστηκε από τη σχέση (4.7) τίθεται  $d = 24\text{h}$  και για τον υπολογισμό του εμβαδόν κάθε φατνίου θα γίνει η παραδοχή ότι το σχήμα της Γης είναι σφαιρικό με ακτίνα  $R = 6400\text{km}$ . Συνεπώς, το εμβαδόν  $A$  υπολογίζεται ως εξής:

- Για τα κλιματικά μοντέλα CSIRO και ECHAM5 με πλήθος φατνίων  $96 \cdot 192 = 18432$

$$\text{θα είναι } A = \frac{4\pi R^2}{18432} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 6400^2}{18432} = 28000 \text{ km}^2, \text{ άρα } \varphi = 0.78$$

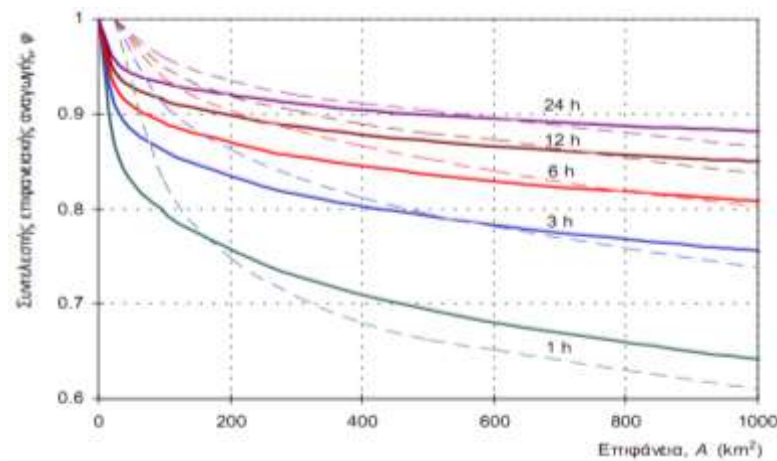
- Για το κλιματικό μοντέλο CGCM3 με πλήθος φατνίων  $64 \cdot 128 = 8192$  θα είναι

$$A = \frac{4\pi R^2}{8192} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 6400^2}{8192} = 62800 \text{ km}^2, \text{ άρα } \varphi = 0.75$$

- Για τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας από την ERA με πλήθος φατνίων

$$72 \cdot 144 = 10368 \text{ θα είναι } A = \frac{4\pi R^2}{10368} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 6400^2}{10368} = 50000 \text{ km}^2, \text{ άρα } \varphi = 0.76$$

Το σφάλμα που προκύπτει στους παραπάνω υπολογισμούς, από την παραδοχή ότι η γη έχει σφαιρικό σχήμα είναι αμελητέο.

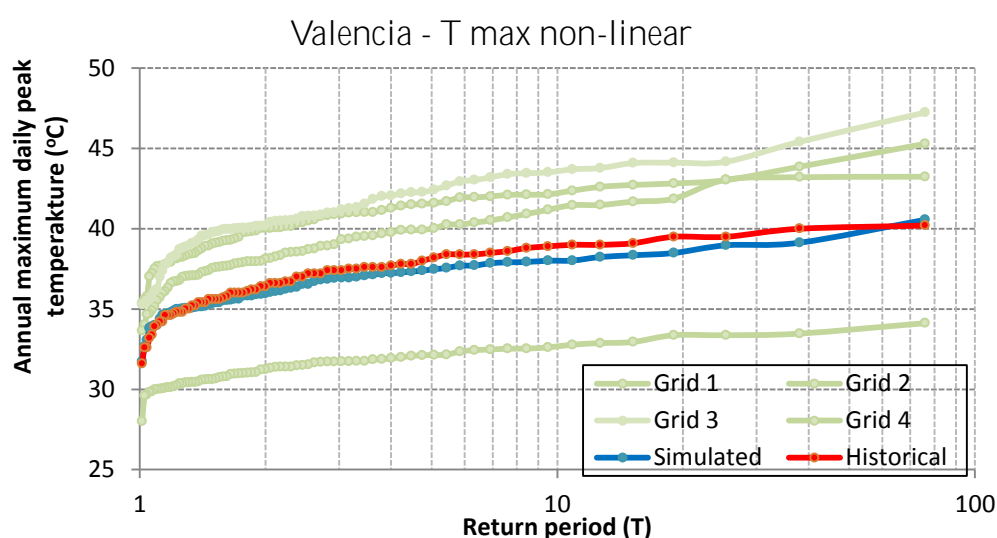


Σχήμα 4-8: Μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής αναγωγής στις ΗΠΑ (διακεκομμένες γραμμές) και στη Μ. Βρετανία (συνεχείς γραμμές). Πηγή: (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

#### 4.2.5. Αιτιολόγηση της μεθόδου

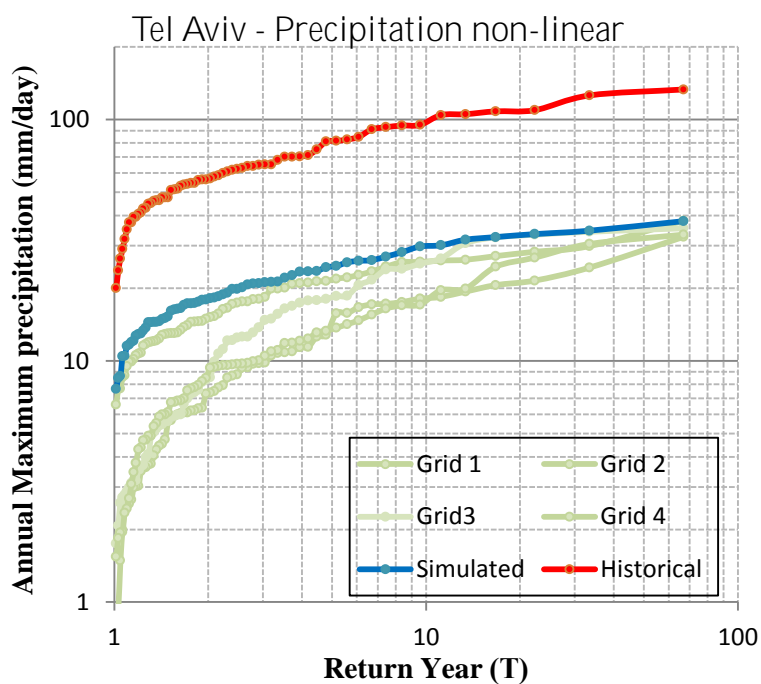
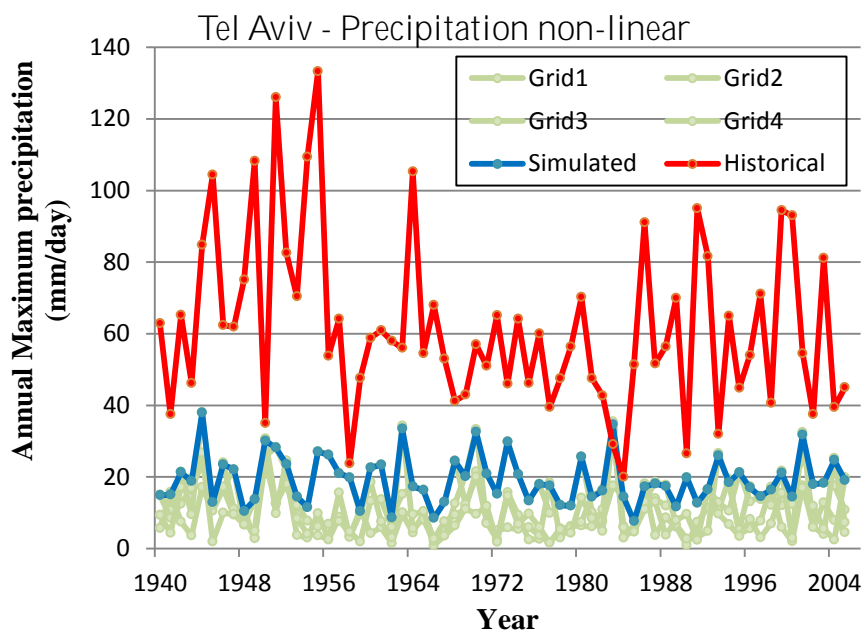
Λόγω του γεγονότος ότι η εργασία επικεντρώνεται στα ετήσια μέγιστα των ημερησίων χρονοσειρών είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς και μιας υψηλής τιμής του συντελεστή αποδοτικότητας. Για να αιτιολογηθεί η χρήση του μη γραμμικού μετασχηματισμού θα αναφερθούν δύο παραδείγματα εφαρμογής του. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4-9 έχουμε την

εμπειρική κατανομή των ετησίων ακραίων ημερήσιων μεγίστων θερμοκρασιών σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα για τον σταθμό της Valencia και τα αποτελέσματα του μοντέλου Γενικής Κυκλοφορίας CSIRO. Οι ακραίες τιμές των φατνίων βρίσκονται εκατέρωθεν των μεγίστων ιστορικών και η τελική προσομοίωση είναι εμφανώς αποτελεσματική. Από την άλλη πλευρά, είναι προφανής η διαφορά ανάμεσα στην ιστορική και προσομοιωμένη κατανομή των ακραίων στο Σχήμα 4-5 όπου εφαρμόστηκε η BLUE στη συνήθη μορφή της, δηλαδή τη γραμμική.



Σχήμα 4-9: Εμπειρική κατανομή των μεγίστων ετησίων μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας για τα φατνία, την προσομοιωμένη (μέσω του μη γραμμικού μετασχηματισμού) και την ιστορική χρονοσειρά για την περίπτωση του σταθμού στη Valencia

Ομοίως, η προσομοίωση των ακραίων βροχοπτώσεων από CSIRO για την περίπτωση του σταθμού στο Tel Aviv είναι καλύτερη στο Σχήμα 4-10 σε σύγκριση με το Σχήμα 4-6. Βέβαια, και στις δύο περιπτώσεις, τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων υποτιμούν σημαντικά τις ακραίες μετρηθείσες τιμές και η απόκλιση τους είναι κάθε άλλο παρά αμελητέα. Παρόλα αυτά, ο μη γραμμικός μετασχηματισμός αποδίδει καλύτερα και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 4-10: Χρονοσειρά και εμπειρική κατανομή των μεγίστων ετησίων βροχοπτώσεων για τα φατνία, την προσομοιωμένη (μέσω του μη γραμμικού μετασχηματισμού) και την ιστορική χρονοσειρά για την περίπτωση του Tel Aviv

Με βάση τα παραπάνω και όπως ήταν αναμενόμενο, όταν οι ακραίες τιμές των φατνίων διαφέρουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες ιστορικές, τότε και η προσομοιωμένη χρονοσειρά θα αποκλίνει σημαντικά. Από την άλλη πλευρά, όταν η ιστορική χρονοσειρά βρίσκεται

ανάμεσα στις χρονοσειρές των φατνίων, τότε είναι πιθανότερη η καλύτερη συμπεριφορά των κλιματικών μοντέλων (ή των reanalysis data αντίστοιχα).

Μία εναλλακτική πρόταση για στατιστικό καταβιβασμό κλίμακας είναι να γίνει η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που ακολουθήθηκε, δηλαδή να τροποποιηθεί η ιστορική χρονοσειρά και να υπολογιστούν χρονοσειρές παρατηρήσεων για κάθε γειτονικό φατνίο. Δεν επιλέχθηκε, όμως, η παραπάνω λύση καθώς θα αλλοιώνονταν οι ιστορικές παρατηρήσεις και τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτών. Οι μετρήσεις αποτελούν τη σημαντικότερη πληροφορία στον τομέα της Υδρολογίας και συνήθως δεν είναι επιθυμητή η τροποποίηση τους, αν δεν υπάρχει ιδιαίτερος λόγος (π.χ. διαδικασία ομογενοποίησης, ελλειπίες χρονοσειρές). Άλλωστε με την προτεινόμενη μεθοδολογία για την εξαγωγή των χρονοσειρών των κλιματικών μοντέλων είναι εφικτή η διατήρηση των ιστορικών στατιστικών χαρακτηριστικών αλλά και η όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή τους με τη βοήθεια του συντελεστή αποδοτικότητας.

Προηγούμενες ερευνητικές δημοσιεύσεις (Koutsoyiannis et al., 2008, Anagnostopoulos et al., 2010) που προσπάθησαν να αξιολογήσουν την ικανότητα των κλιματικών μοντέλων χρησιμοποιώντας μηνιαίες χρονοσειρές με παρόμοια μεθοδολογία δέχθηκαν κριτική ως προς το γεγονός ότι δεν έχει νόημα η σημειακή σύγκριση. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Randall et al., (2007) υπάρχει αξιοσημείωτο επίπεδο εμπιστοσύνης στα κλιματικά μοντέλα τα οποία μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε χωρικές κλίμακες αντίστοιχες των ηπειρωτικών και παραπάνω. Ωστόσο, αν ο παραπάνω ισχυρισμός είναι αληθής, τότε δεν έχουν φυσικό νόημα τα RCM όπως και οι υπόλοιποι μέθοδοι στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας. Επιπλέον, δεν θα είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα που προέρχονται από μελέτες που επικεντρώνονται στις προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων για μία λεκάνη απορροής, δηλαδή σε σχετικά μικρή χωρική κλίμακα. Επιπρόσθετα, κατά την αξιολόγηση της αξιοπιστίας τους που έγινε από τους Anagnostopoulos et al., (2010) για τις Η.Π.Α. βρέθηκε ότι τα αποτελέσματα στην ηπειρωτική κλίμακα είναι χειρότερα από τα αντίστοιχα κατά τη σημειακή σύγκριση.



Επίσης, απορρίπτεται η ύπαρξη κάποιας αμεροληψίας καθώς η εκτίμηση που γίνεται είναι αμερόληπτη (το άθροισμα των συντελεστών βάρους κάθε φατνίου ισούται με τη μονάδα), ενώ μεταξύ των άλλων, εξετάζεται ο συντελεστής συσχέτισης ο οποίος αμελεί πιθανή μεροληψία.

#### 4.3. Σύνοψη της διαδικασίας ανάλυσης

Συγκεντρωτικά, η διαδικασία που εφαρμόζεται σε κάθε εξεταζόμενο σταθμό κατά την ανάλυση των ιστορικών παρατηρήσεων, των εξόδων των κλιματικών και των δεδομένων πλήρους επεξεργασίας είναι η ακόλουθη:

- i. Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος από τη σχέση (4.6) έτσι ώστε να βρεθούν οι συντελεστές βάρους  $\lambda_i$ , και οι σταθεροί όροι  $c$  και  $a$  για κάθε κλιματικό μοντέλο και για τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας.
- ii. Με βάση τους παραπάνω όρους υπολογίζεται η προσομοιωμένη χρονοσειρά για κάθε περίπτωση και στη συνέχεια τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, συντελεστής ασυμμετρίας, συντελεστής συσχέτισης, συντελεστής αποδοτικότητας, συντελεστής Hurst, probability dry).
- iii. Οι ημερήσιες τιμές ταξινομούνται σε μήνες και έτη, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι αθροιστικές μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις καθώς και ο συντελεστής Hurst σε κάθε περίπτωση.
- iv. Υπολογίζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των μηνιαίων βροχοπτώσεων.
- v. Σχεδιάζονται οι χρονοσειρές των ετησίων βροχοπτώσεων, καθώς και ο δεκαετής κινούμενος μέσος όρος τους, έτσι ώστε να παρατηρηθεί πόσο κοντά στην πραγματικότητα βρίσκονται τα κλιματικά μοντέλα.
- vi. Εξάγεται η μεγαλύτερη τιμή κάθε έτους και για τις περιπτώσεις των κλιματικών μοντέλων και των reanalysis data γίνεται πολλαπλασιασμός με το συντελεστή σημειακής αναγωγής, όπως αυτός υπολογίστηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.4.

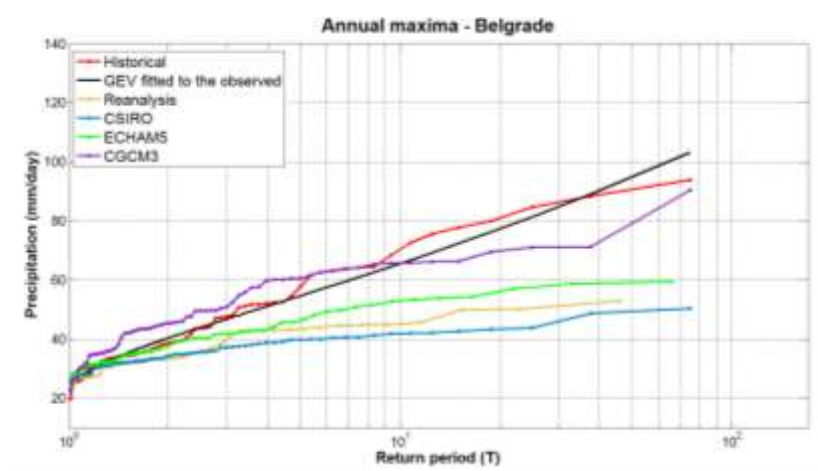
- vii. Σχεδιάζεται η εμπειρική κατανομή των ακραίων τιμών για κάθε περίπτωση, όπως αυτή έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 2.1.3. Η σχεδίαση γίνεται έχοντας στον οριζόντιο άξονα την περίοδο επαναφοράς σε ημιλογαριθμική κλίμακα.
- viii. Για την περίπτωση των ιστορικών μεγίστων γίνεται προσαρμογή της Γενικευμένης κατανομής Ακραίων Τιμών, έχοντας πρώτα υπολογίσει τις παραμέτρους  $\kappa$ ,  $\psi$ ,  $\lambda$  με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Παρά το γεγονός ότι συνήθως προσαρμόζεται η κατανομή Gumbel, προτιμήθηκε η GEV η οποία δίνει καλύτερα αποτελέσματα για μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Έχει δειχθεί (Koutsoyiannis, 2004) ότι για μικρές περιόδους επαναφοράς (5-10 έτη) η διαφορά των προαναφερθέντων κατανομών είναι αμελητέα, όμως για μεγάλες περιόδους επαναφοράς ( $T > 50$  έτη) η Gumbel μπορεί να υποτιμήσει τα μέγιστα, ενώ τέλος για  $T > 1000$  έτη η μεταξύ τους διαφορά είναι τάξης μεγέθους.
- ix. Σχεδιάζονται οι χρονοσειρές των ετησίων μεγίστων βροχοπτώσεων και υψηλότερων ημερησίων θερμοκρασιών και υπολογίζονται οι συντελεστές συσχέτισης και αποδοτικότητας με την ιστορική χρονοσειρά, καθώς και ο συντελεστής Hurst.
- x. Υπολογίζονται οι ημερήσιοι δείκτες, όπως έχουν οριστεί στο υποκεφάλαιο 3.6 και σχεδιάζονται τα αντίστοιχα ραβδογράμματα για τα:  $R10mm$ ,  $R20mm$  και  $R30mm$ ,  $CDD$ ,  $SDII$ ,  $Prec90p$ ,  $SU$ ,  $ID$ ,  $Temp90p$ ,  $WSDI$ .

## 5. Αποτελέσματα

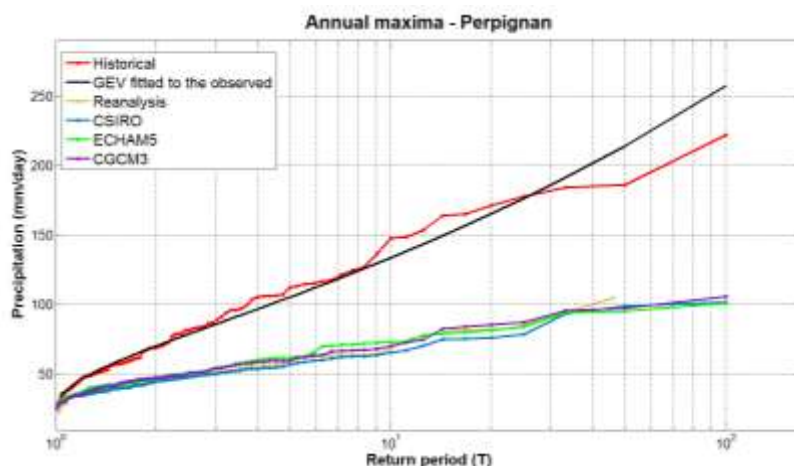
Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε δύο χαρακτηριστικούς σταθμούς για τη βροχόπτωση και τη μέγιστη θερμοκρασία. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μελέτη της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχής, διαγράμματα διασποράς για το συντελεστή Hurst καθώς και οι υπόλοιποι κλιματικοί δείκτες που επιλέχθηκε να εξεταστούν. Με βάση τα ακόλουθα διαγράμματα, αλλά και με όσα έχουν παρατεθεί στα Παραρτήματα Β και Γ μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των κλιματικών μοντέλων και των Δεδομένων Πλήρους Επεξεργασίας.

### 5.1. Σταθμοί με βροχοπτώσεις

Επιλέγεται να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στους σταθμούς Belgrade (Σερβία) και Perpignan (Γαλλία). Έχουν σχεδιαστεί: α) οι εμπειρικές κατανομές των ιστορικών και προσομοιωμένων χρονοσειρών, καθώς και η προσαρμογή στην ιστορική της Γενικευμένης κατανομής ακραίων Τιμών, β) οι χρονικές ακολουθίες των ακραίων βροχοπτώσεων ανά έτος, γ) οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των μηνιαίων βροχοπτώσεων, δ) οι χρονοσειρές των ετήσιων βροχοπτώσεων με τον κινούμενο 10-ετή μέσο όρο, ε) ραβδόγραμμα του μέσου ετήσιου πλήθους ημερών με ύψος βροχόπτωσης μεγαλύτερο των 10, 20 και 40 mm, στ) ραβδογράμματα με τις 5 μεγαλύτερες σε διάρκεια συνεχόμενες ημέρες χωρίς βροχόπτωση.

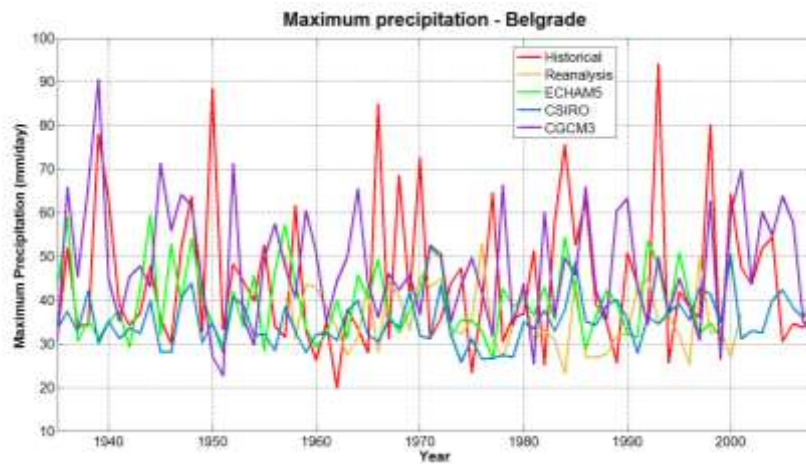


Σχήμα 5-1: Εμπειρική κατανομή της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης για τις προσομοιωμένες χρονοσειρές, την ιστορική και την προσαρμοσμένη της κατανομή GEV για το σταθμό του Belgrade

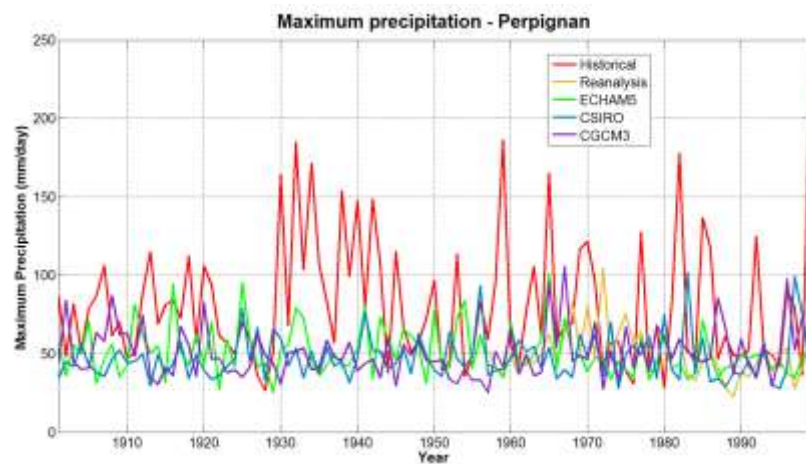


Σχήμα 5-2: Εμπειρική κατανομή της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης για τις προσομοιωμένες χρονοσειρές, την ιστορική και την προσαρμοσμένη της κατανομή GEV για το σταθμό του Perpignan

Υπάρχει σημαντική απόκλιση στην ποσοτική εκτίμηση του μέγιστου ύψους βροχόπτωσης, όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί στα διαγράμματα των εμπειρικών κατανομών. Οι προσομοιωμένες χρονοσειρές δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο για μικρές περιόδους επαναφοράς ( $T < 5$  έτη), ενώ για μεγαλύτερες υπάρχουν πολύ σημαντικές αποκλίσεις που καθιστούν απαγορευτική την εφαρμογή των κλιματικών μοντέλων στον υδρολογικό σχεδιασμό έργων που καλούνται να αντιμετωπίσουν πλημμυρικά γεγονότα. Η ένταση των ακραίων βροχοπτώσεων υποτιμάται στο σύνολο των σταθμών, και δεν υπάρχει ούτε μία περίπτωση που να προσεγγίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι στο σταθμό του Perpignan το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης της ιστορικής χρονοσειράς είναι περίπου 220 mm/day, ενώ το αντίστοιχο ύψος από τις προβλέψεις των GCMs είναι μόλις 100 mm/day. Από την άλλη πλευρά, η κατανομή GEV μπορεί να προσαρμοστεί στις μέγιστες βροχοπτώσεις παρέχοντας αξιόπιστα αποτελέσματα στην πλειονότητα των σταθμών, αν και παρατηρούνται κάποιες διαφορές και σε αυτή την περίπτωση.



Σχήμα 5-3: Χρονοσειρές των ακραίων ετησίων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Belgrade



Σχήμα 5-4: Χρονοσειρές των ακραίων ετησίων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Perpignan

Ταυτόχρονα, οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης και του συντελεστή αποδοτικότητας για τη χρονική αλληλουχία των ακραίων γεγονότων δεν είναι σε καμία περίπτωση ικανοποιητικές με τη μέση τιμή τους να είναι κοντά στο 0 και αρνητική, αντίστοιχα (Πίνακας 5-1 και Πίνακας 5-2). Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν όταν εξετάζεται η ημερήσια χρονική κλίμακα, όπου τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι προσομοιωμένες χρονοσειρές είναι ασυσχέτιστες με τις αντίστοιχες ιστορικές. Επιπρόσθετα, οι σχεδόν μηδενικές τιμές του συντελεστή συσχέτισης φανερώνουν ότι δεν μπορεί να αναπαραχθεί η χρονική αλληλουχία των υγρών και ξηρών περιόδων. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ο μέγιστος συντελεστής συσχέτισης που παρατηρείται είναι στο σταθμό Larnaca για το CGCM3 και είναι μόλις 0.07, ενώ για τις μέγιστες βροχοπτώσεις η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στο Palermo και είναι 0.19. Παράλληλα, οι

αρνητικές τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας υποδεικνύουν ότι τα κλιματικά μοντέλα δε μπορούν να αναπαράγουν τις ιστορικές χρονοσειρές και ότι ακόμη και η εκτίμηση της βροχόπτωσης μέσω της μέσης τιμής θα είχε υψηλότερο συντελεστή αποδοτικότητας.

Πίνακας 5-1: Συντελεστής συσχέτισης για τις χρονοσειρές ημερησίων και μεγίστων ετησίων βροχοπτώσεων

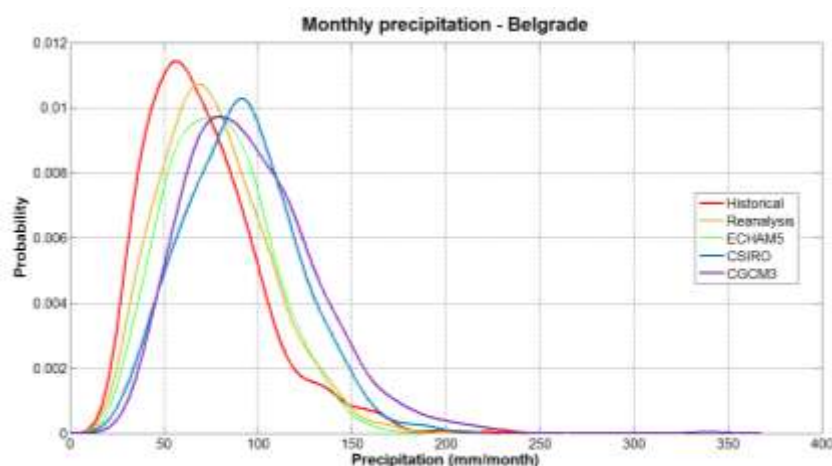
	Συντελεστής συσχέτισης - Ημερήσια				Συντελεστής συσχέτισης - Μέγιστα ετήσια			
	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Athens	0.04	0.02	0.02	0.00	-0.07	-0.17	0.09	0.22
Hvar	0.03	0.03	0.00	0.02	0.09	0.06	-0.15	-0.17
Larnaca	0.04	0.05	0.07	0.04	0.02	-0.05	0.15	-0.17
Palermo	0.06	0.05	0.03	0.03	-0.21	0.19	-0.09	-0.07
Perpignan	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.08	0.15	-0.02	-0.04
Torre Vieja	0.00	0.00	0.02	0.01	0.03	-0.14	0.10	0.04
Tortosa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	-0.08	-0.12	0.06
Istanbul	0.00	0.00	-0.01	0.01	-0.10	-0.14	-0.05	-0.04
<b>Tel Aviv</b>	0.03	0.04	0.09	0.03	-0.04	-0.09	0.13	0.21
Bologna	0.01	0.01	-0.01	-0.01	-0.09	-0.02	-0.01	-0.22
Malaga	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.14	-0.05	0.04
Belgrade	-0.01	-0.01	0.02	0.00	0.10	0.04	0.08	0.40
Sarajevo	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.07	-0.10	0.03	0.01
Dar el Beida	0.04	0.05	0.01	0.08	-0.21	-0.06	-0.10	0.01
Nimes	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.10	-0.15	-0.07	-0.10
Pesaro	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	-0.02	0.11	0.06
<b>Μέση τιμή</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	-0.03	-0.03	0.00	0.01

Πίνακας 5-2: Συντελεστής αποδοτικότητας για τις χρονοσειρές ημερησίων και μεγίστων ετησίων βροχοπτώσεων

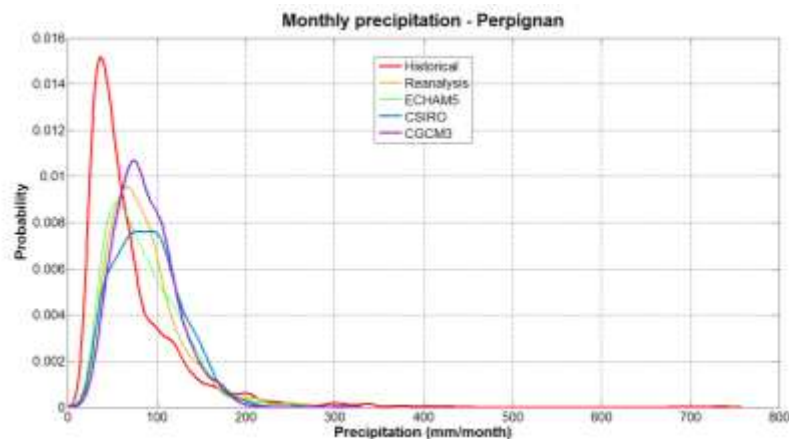
	Συντελεστής αποδοτικότητας - Ημερήσια				Συντελεστής αποδοτικότητας - Μέγιστα ετήσια			
	CSIRO	ECHAM	CGCM	Reanalysis	CSIRO	ECHAM	CGCM	Reanalysis
Athens	-0.23	-0.51	-0.24	-0.62	-0.82	-1.03	-0.91	-5.14
Hvar	-0.49	-0.64	-0.53	-0.57	-1.05	-0.77	-0.82	-4.73
Larnaca	-0.29	-0.74	-0.46	-0.07	-0.94	-0.65	-0.79	-1.88
Palermo	-0.43	-0.60	-0.48	-0.35	-1.62	-0.85	-0.64	-4.32
Perpignan	-0.42	-0.44	-0.35	-0.43	-0.89	-0.59	-0.75	-2.72
Torre Vieja	-0.20	-0.26	-0.20	-0.37	-0.48	-0.57	-0.42	-0.98
Tortosa	-0.40	-0.46	-0.42	-0.49	-0.73	-0.67	-0.77	-2.80

Istanbul	-0.47	-0.57	-0.32	-0.47	-0.69	-0.98	-1.03	-4.91
Tel Aviv	-0.06	-0.16	-0.11	-0.05	-3.43	-2.31	-2.33	-4.18
Bologna	-0.53	-0.48	-0.71	-0.77	-2.41	-2.31	-1.85	-5.20
Malaga	-0.40	-0.58	-0.20	-0.78	-0.70	-1.14	-1.35	-2.16
Belgrade	-0.70	-0.71	-0.71	-0.55	-0.38	-1.15	-0.56	-4.90
Sarajevo	-0.82	-0.07	-0.71	-0.75	-0.65	-1.28	-0.68	-6.41
Dar el Beida	-0.26	-0.58	-0.41	-0.81	-0.86	-0.87	-0.71	-1.45
Nimes	-0.35	-0.47	-0.49	-0.48	-0.63	-0.79	-0.49	-1.95
Pesaro	-0.62	-0.55	-0.60	-0.77	-0.22	-0.66	-0.20	-2.31
<b>Μέση τιμή</b>	<b>-0.42</b>	<b>-0.49</b>	<b>-0.43</b>	<b>-0.52</b>	<b>-1.03</b>	<b>-1.04</b>	<b>-0.89</b>	<b>-3.50</b>

Από τις κατανομές των μηνιαίων βροχοπτώσεων προκύπτει ότι γενικώς τα κλιματικά μοντέλα έχουν μικρότερο συντελεστή ασυμμετρίας σε σχέση με τις ιστορικές, δίνοντας περισσότερα ύψη βροχοπτώσεων κοντά στη μέση τους τιμή. Σε μεμονωμένους σταθμούς υπάρχει σχετικά καλή συμπεριφορά των κλιματικών μοντέλων σε ορισμένα από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κατανομών, όπως στην περίπτωση του σταθμού Belgrade (Σχήμα 5-5). Εν γένει, όμως, δεν μπορεί να θεωρηθεί καλή η απόδοση τους, κάτι που φαίνεται χαρακτηριστικά από το Σχήμα 5-6 για το σταθμό του Perrignan (αλλά και από την πλειονότητα των σταθμών στο Παράρτημα Β), όπου δεν προσομοιώνεται κανένα από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων τιμών.

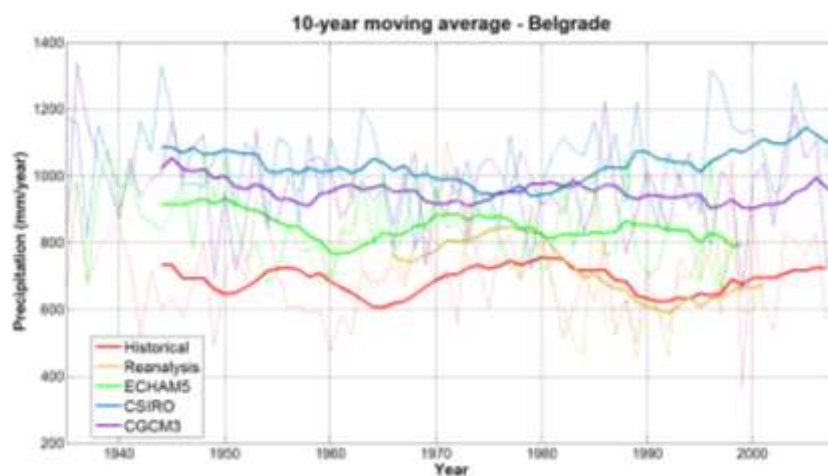


Σχήμα 5-5: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας για τις μηνιαίες βροχοπτώσεις των προσομοιωμένων και της ιστορικής χρονοσειράς για το σταθμό του Belgrade



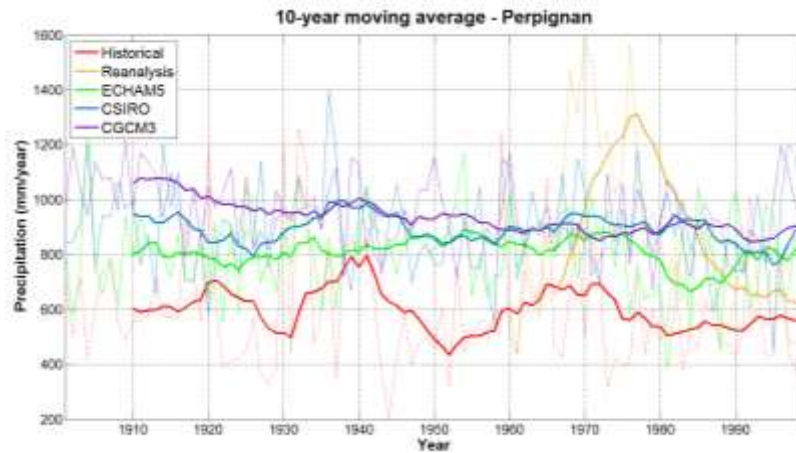
Σχήμα 5-6: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας για τις μηνιαίες βροχοπτώσεις των προσομοιωμένων και της ιστορικής χρονοσειράς για το σταθμό του Perpignan

Από τις χρονοσειρές των ετησίων βροχοπτώσεων και του κινούμενου 10-ετή μέσου όρου προκύπτουν μεγάλες αποκλίσεις, που αναδεικνύουν ότι τα κλιματικά μοντέλα είναι αναξιόπιστα όχι μόνο στην ημερήσια, αλλά και στις μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, ικανοποιητικά αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν μόνο σε λίγες περιπτώσεις (π.χ. Σχήμα 5-7 για τα Reanalysis data ή το CSIRO στο σταθμό της Αθήνας). Γενικά, υπάρχει συστηματικό σφάλμα στην πλειονότητα των σταθμών και δεν μπορούν να προσομοιωθούν ούτε οι ποσοτικές τιμές των κατακρημνίσεων, ούτε η χρονική αλληλουχία αυτών. Επιπρόσθετα, δεν αναπαράγονται ούτε οι διακυμάνσεις, κατά συνέπεια υποτιμάται και ο συντελεστής Hurst.

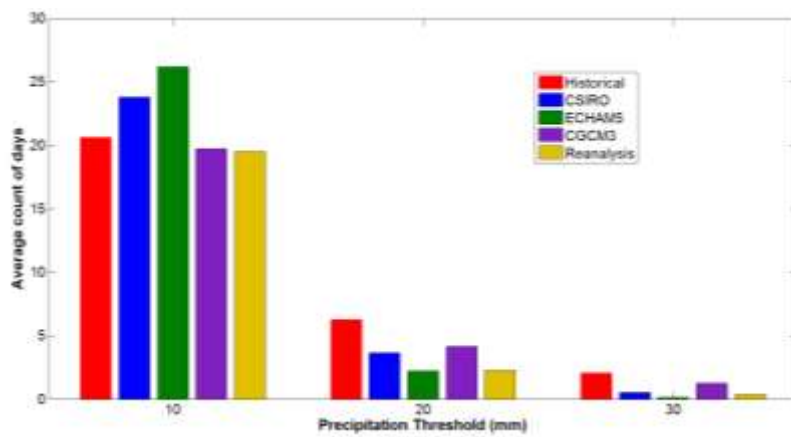


Σχήμα 5-7: Ετήσιες βροχοπτώσεις και ο κινούμενος 10-ετής μέσος όρος τους για το σταθμό του Belgrade

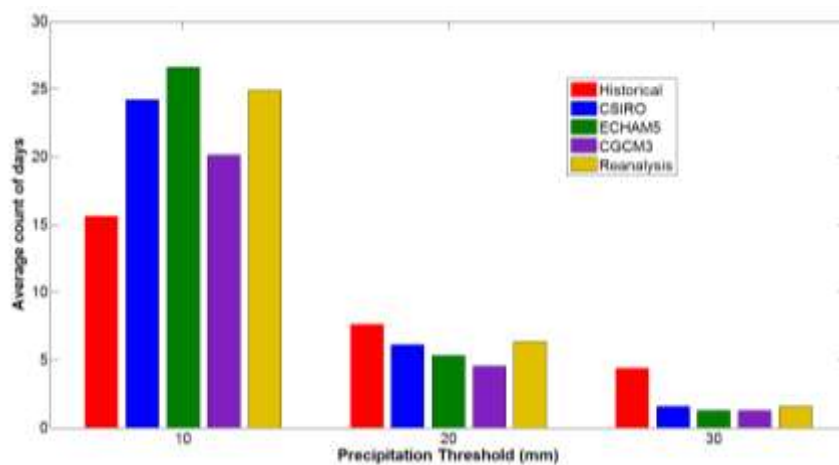




Σχήμα 5-8: Ετήσιες βροχοπτώσεις και ο κινούμενος 10-ετής μέσος όρος τους για το σταθμό του Perpignan



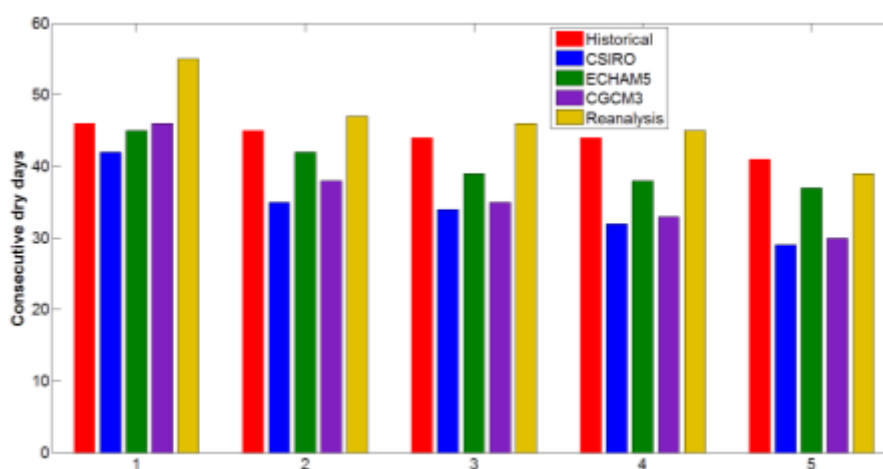
Σχήμα 5-9: Μέσο ετήσιο πλήθος ημερών με βροχόπτωση μεγαλύτερη από τα οριζόμενα κατώφλια για το σταθμό στο Belgrade



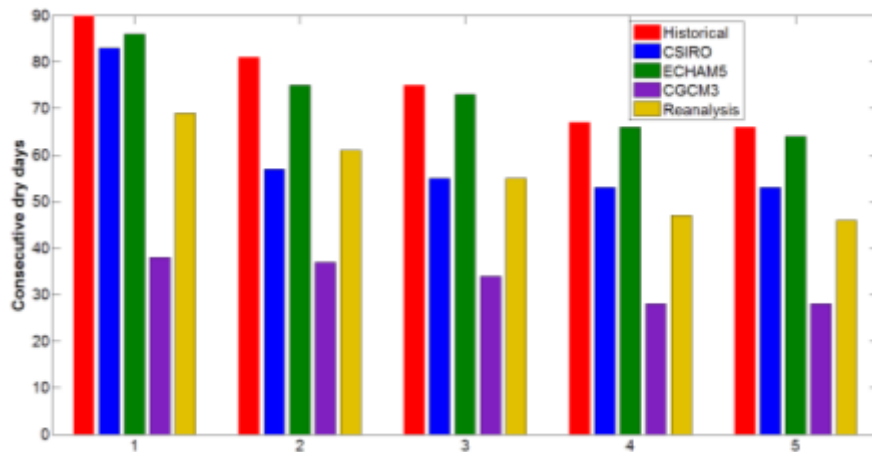
Σχήμα 5-10: Μέσο ετήσιο πλήθος ημερών με βροχόπτωση μεγαλύτερη από τα οριζόμενα κατώφλια για το σταθμό στο Perpignan

Από τα παραπάνω ραβδογράμματα έχουμε το μέσο πλήθος ημερών ανά έτος όπου η βροχόπτωση ξεπερνά τα αντίστοιχα κατώφλια (10 mm, 20 mm και 30 mm). Ο δείκτης αυτός είναι χρήσιμος για την εξέταση της συχνότητας των ακραίων φαινομένων. Παρατηρείται ότι τα κλιματικά μοντέλα υπερεκτιμούν το R10mm, αλλά υπάρχει σχετικά καλή προσομοίωση του R20mm και υποτίμηση του R30mm. Μεταξύ των προσομοιωμένων χρονοσειρών, το CSIRO είναι αυτό που δίνει τις καλύτερες προβλέψεις, κυρίως όσον αφορά το R20mm. Βέβαια, όπως θα φανεί και σε επόμενα εδάφια (probability dry) τα κλιματικά μοντέλα υπερεκτιμούν τη συχνότητα μικρών και μεσαίων υψών βροχής, ενώ δεν είναι τόσο καλή η συμπεριφορά τους στην εκτίμηση της συχνότητας των πολύ υγρών ημερών, αλλά και στην ένταση τους, όπως έχει ήδη περιγραφεί.

Στα Σχήμα 5-11 και 5-12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πέντε μεγαλύτερες σε διάρκεια περιόδους χωρίς βροχόπτωση (δηλαδή με ύψος κατακρημνίσεων μικρότερο του 1 mm). Από ότι φαίνεται η συμπεριφορά του ECHAM5 είναι αρκετά ικανοποιητική και τα αποτελέσματα του μπορούν να θεωρηθούν ως αξιόπιστα. Από την άλλη πλευρά, το CSIRO και τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας έχουν χειρότερη απόδοση, ενώ το CGCM3 βρίσκεται εκτός πραγματικότητας και δεν μπορεί να προσομοιώσει τον δείκτη CDD. Επομένως, η ικανότητα της αναπαραγωγής περιόδων ξηρασίας ποικίλλει, αναλόγως το μοντέλο που χρησιμοποιείται.

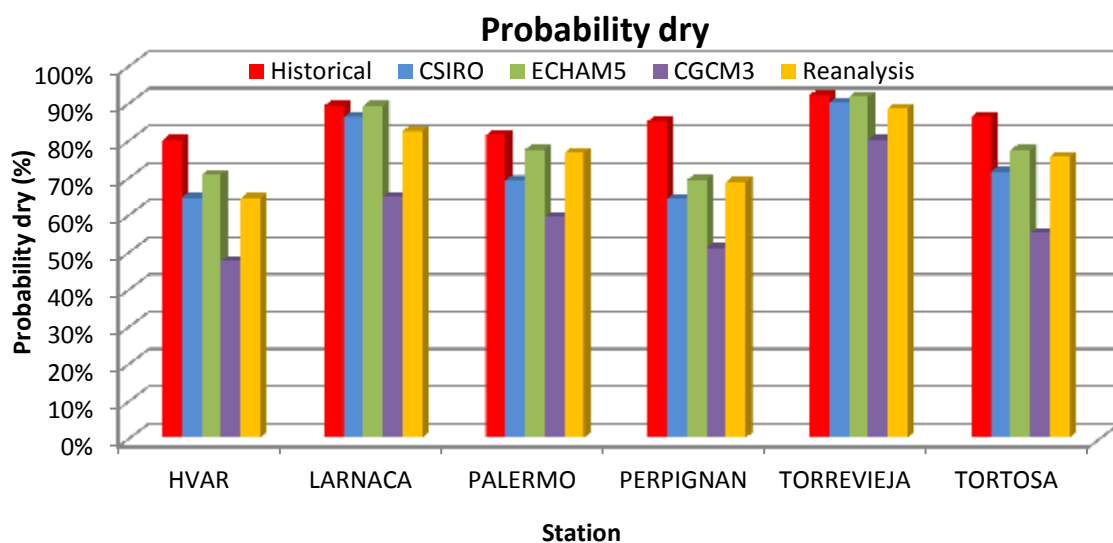


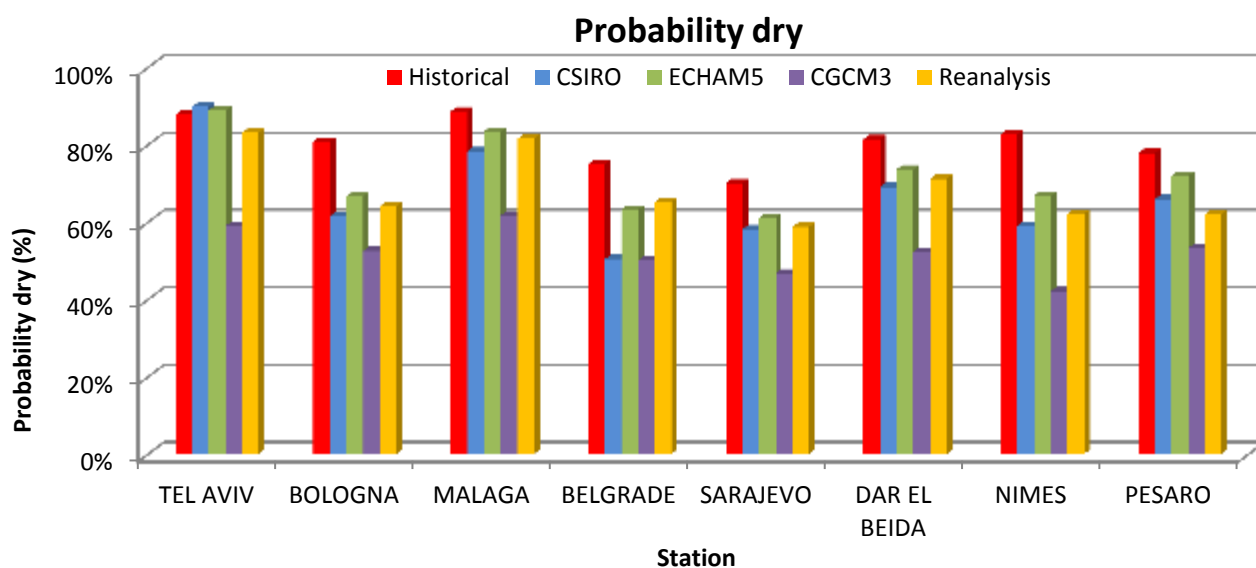
Σχήμα 5-11: Πλήθος συνεχόμενων ημερών χωρίς βροχόπτωση για το σταθμό στο Belgrade



Σχήμα 5-12: Πλήθος συνεχόμενων ημερών χωρίς βροχόπτωση για το σταθμό στο Perrignan

Στη συνέχεια (Σχήμα 5-13), παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχόπτωσης για όλους τους σταθμούς με το κατώφλι για τον χαρακτηρισμό μιας ημέρας ως υγρής ή όχι να έχει οριστεί στο 1 mm/day. Γενικώς, η πιθανότητα βροχόπτωσης υπερεκτιμάται από τα κλιματικά μοντέλα, αν και σε ορισμένους σταθμούς (κυρίως σε αυτούς με μικρότερο γεωγραφικό πλάτος) τα CSIRO και ECHAM5 μπορούν να αποδώσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματικότητα. Από την άλλη πλευρά, το CGCM3 αποκλίνει σημαντικά από τις ιστορικές παρατηρήσεις και δίνει βροχόπτωση πολύ πιο συχνά σε σχέση με την πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα του προαναφερθέντος μοντέλου σε καμία περίπτωση δεν αντιστοιχούν στο Μεσογειακό κλίμα, αντιθέτως τείνουν προς περιοχές με ωκεάνιο κλίμα, όπου οι υγρές ημέρες είναι σαφώς συχνότερες.

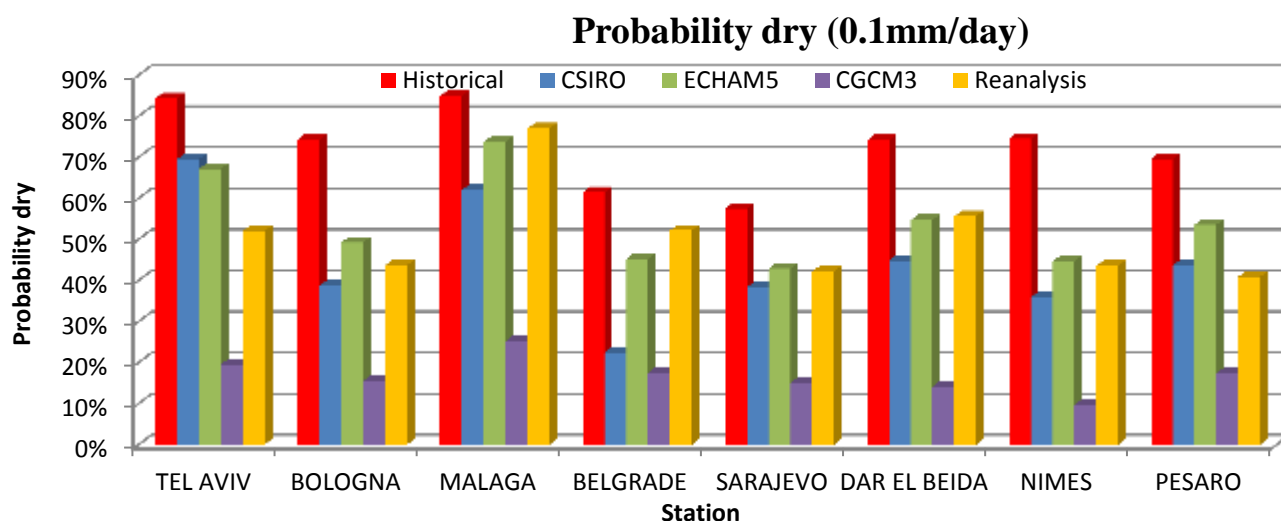
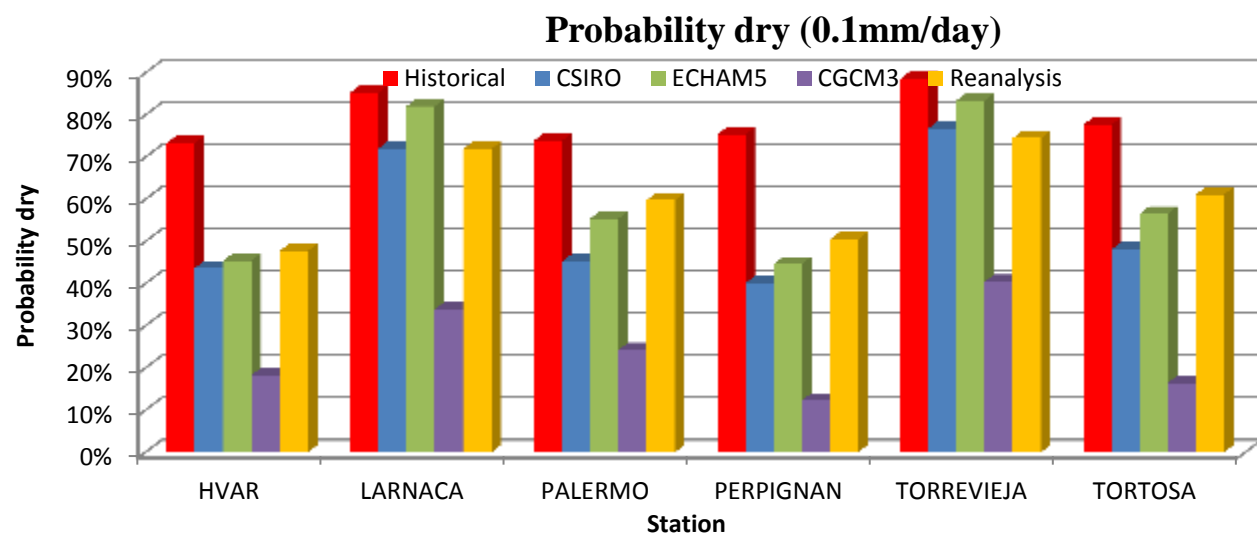




Σχήμα 5-13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχής σε όλους τους σταθμούς

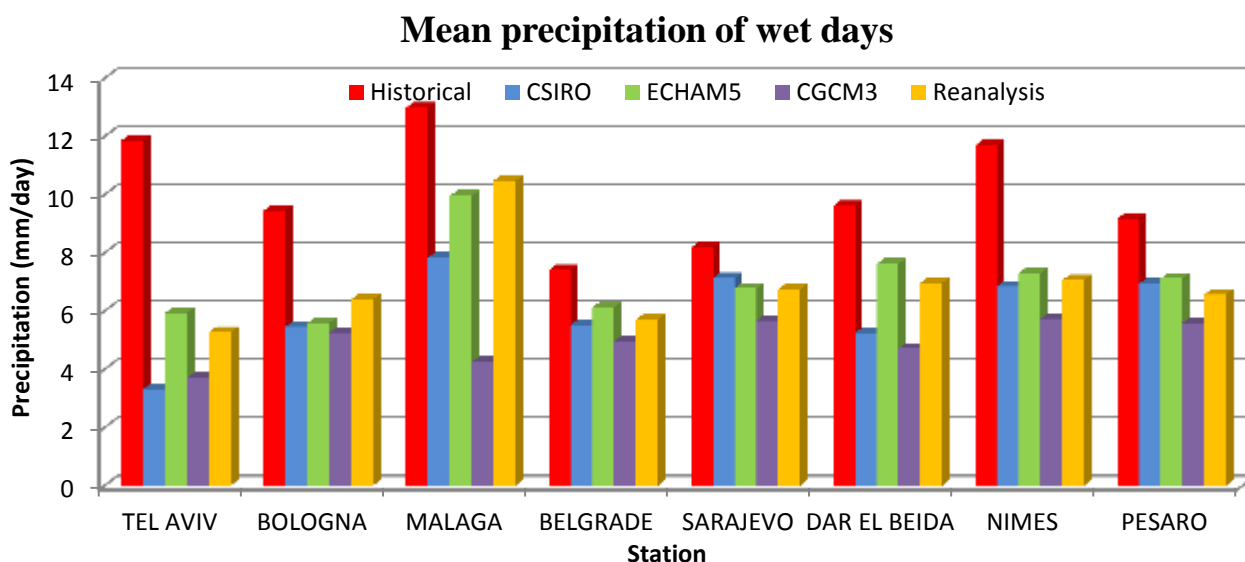
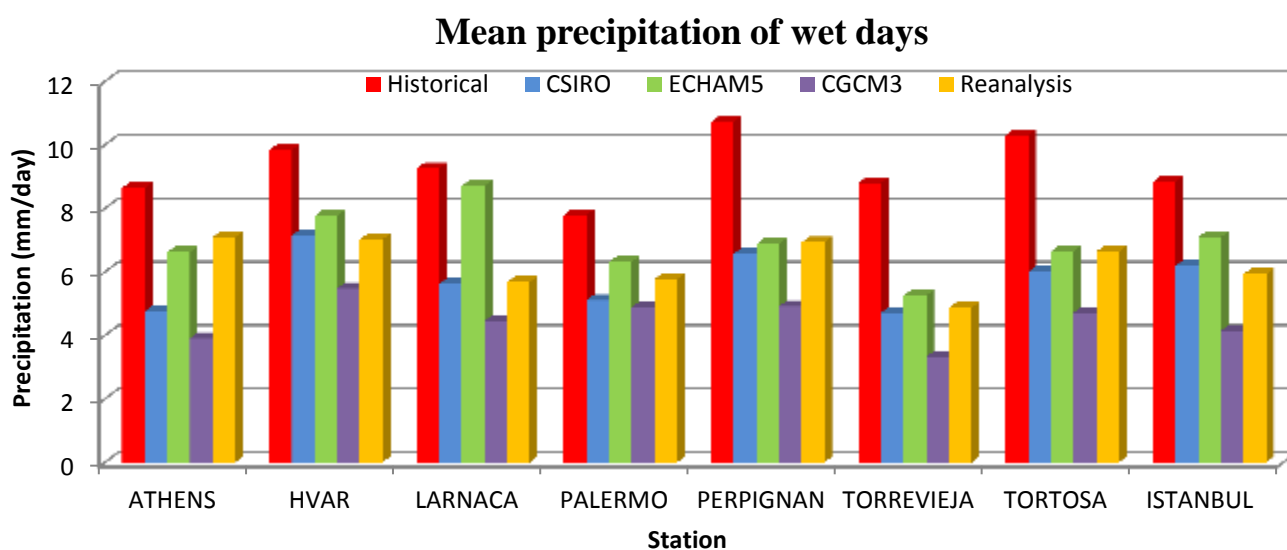
Επιλέχθηκε, επίσης, να μελετηθεί η διαλείπουσα συμπεριφοράς της βροχόπτωσης θέτοντας αυτή τη φορά ως κατώφλι το 0.1 mm/day. Από το Σχήμα 5-14 είναι εμφανές ότι όλα τα κλιματικά μοντέλα και τα Δεδομένα Πλήρους Επεξεργασίας αποτυγχάνουν να αποδώσουν πιστά την πραγματικότητα και ότι δίνουν βροχή πολύ συχνότερα από ότι έχει παρατηρηθεί. Ειδικά το CGCM3 είναι τελείως ακατάλληλο για την εκτίμηση της συχνότητας βροχοπτώσεων αναφέρεται χαρακτηριστικά το γεγονός ότι στο σταθμό του Nimes η εκτίμηση της διαλείπουσας συμπεριφοράς είναι μόλις 9%, ενώ από την ιστορική χρονοσειρά η αντίστοιχη πιθανότητα είναι 72%.

Τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν για λόγους συνέχειας κάθε ημέρα ένα πολύ μικρό ύψος βροχής, ωστόσο θα έπρεπε αυτό το ύψος να είναι σχεδόν μηδενικό. Για αυτό το λόγο, άλλωστε, οι συντελεστές ασυμμετρίας των προσομοιωμένων χρονοσειρών είναι συστηματικά μικρότεροι από τις αντίστοιχες ιστορικές (Παράρτημα Β), οι οποίες, όπως αναμενόταν, παρουσιάζουν έντονα θετική ασυμμετρία ως κατανομές ανεστραμμένου J. Υπενθυμίζεται ότι στη συνάρτηση σφάλματος της σχέσης (4.6) έχει ληφθεί υπόψη η διατήρηση της ασυμμετρίας, κάτι που από ότι φαίνεται δεν επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό, λόγω των εξόδων των GCMs και των Reanalysis Data.



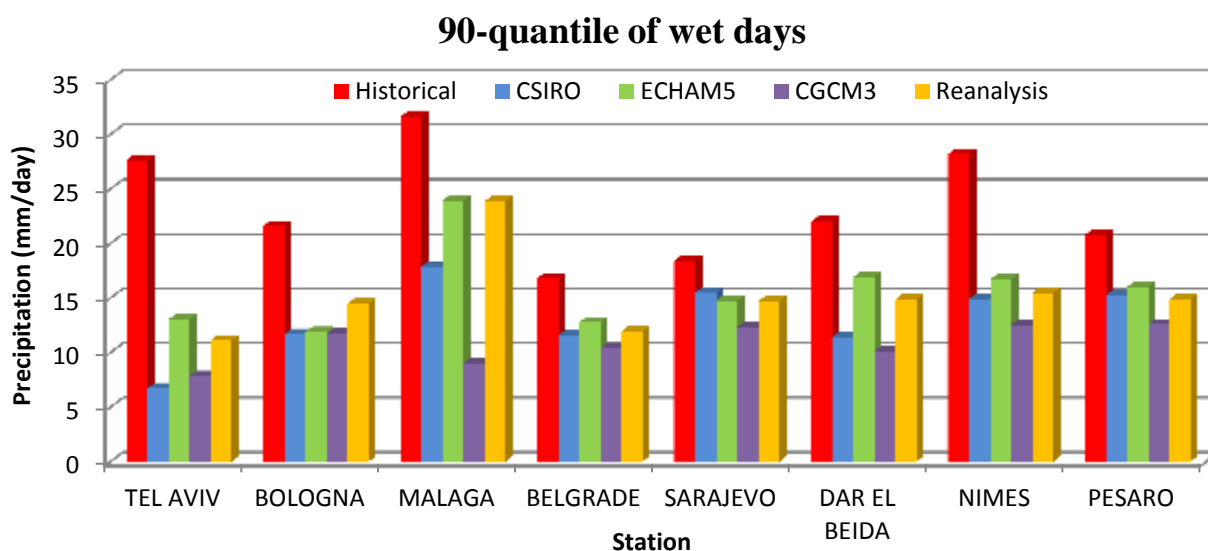
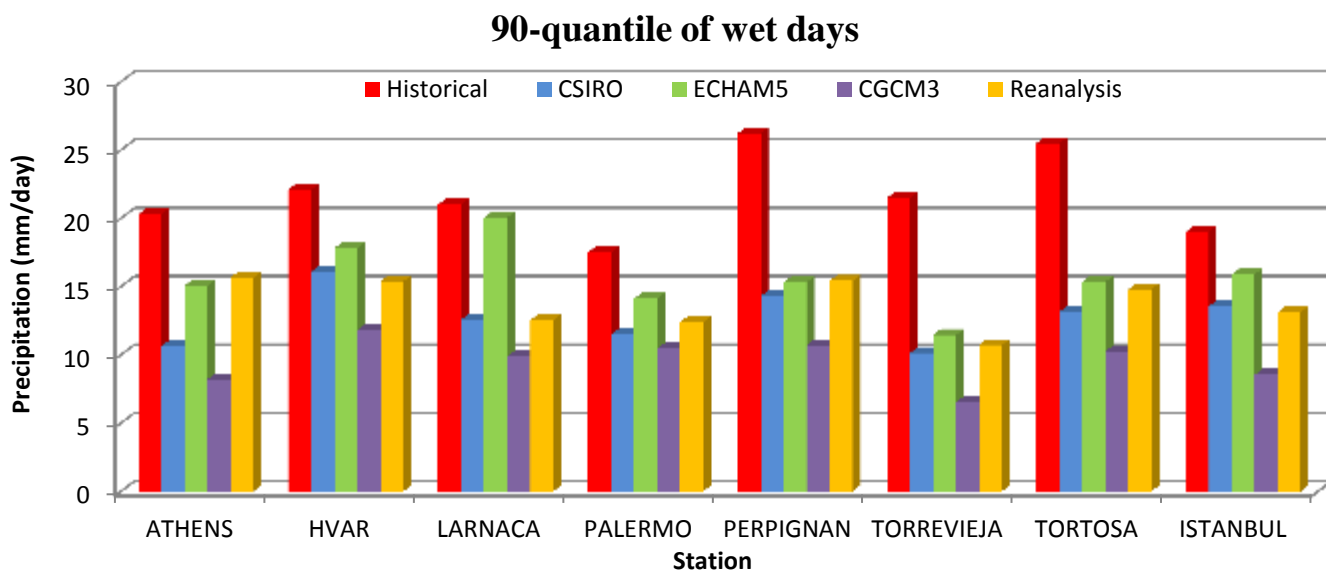
Σχήμα 5-14: Πιθανότητα ύψους κατακρημνίσεων μικρότερου από 0.1 mm/day σε όλους τους σταθμούς

Τα προαναφερθέντα ενισχύονται και από το Σχήμα 5-15 όπου αναπαρίσταται το μέσο ύψος βροχοπτώσεων των υγρών ημερών, από όπου συνάγεται το συμπέρασμα ότι ακόμη και αν οι αθροιστικές βροχοπτώσεις των GCMS ήταν κοντά στις ιστορικές αυτό θα οφειλόταν στο άθροισμα πολλών μικρών τιμών και όχι στην καλή αναπαράσταση της πραγματικότητας. Παρά το γεγονός ότι η μέση τιμή της συνολικής βροχόπτωσης προσομοιώνεται με σχετική ακρίβεια, υπάρχει σημαντική υποτίμηση της μέσης τιμής όταν εξετάζονται μόνο οι υγρές ημέρες.



Σχήμα 5-15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του μέσου ύψους κατακρημνίσεων των υγρών ημερών σε όλους τους σταθμούς

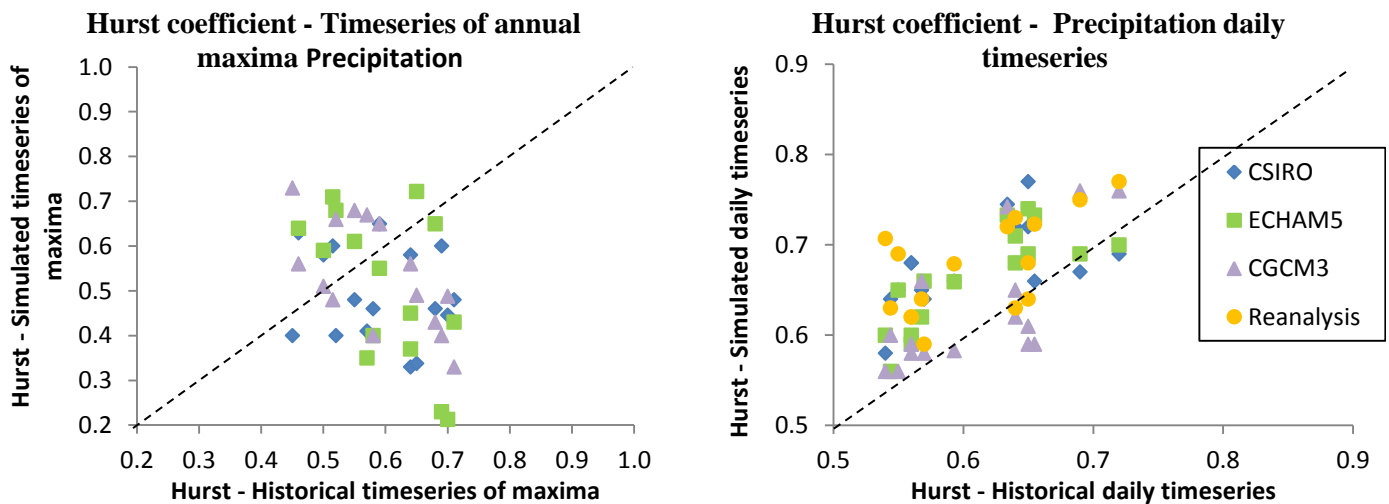
Άλλη μια ένδειξη της συστηματικής υποτίμησης των έντονων βροχοπτώσεων είναι τα ύψη των κατακρημνίσεων που αντιστοιχούν στο 90% - ποσοστημόριο των ημερήσιων κατανομών (Σχήμα 5-16). Σε όλους τους σταθμούς είναι εμφανής η διαφορά των ιστορικών παρατηρήσεων σε σχέση με τις προβλέψεις που γίνονται από τα κλιματικά μοντέλα. Για άλλη μια φορά, το CGCM3 έχει την χειρότερη απόδοση και απέχει σημαντικά από την πραγματική κατάσταση.



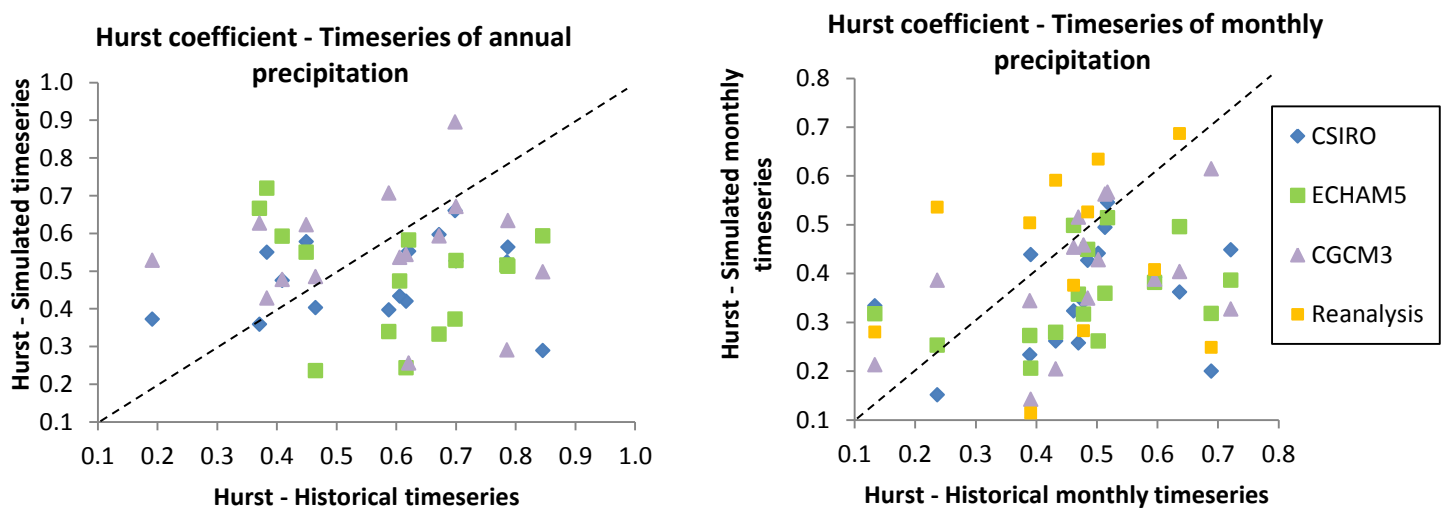
Σχήμα 5-16: Ύψος κατακρημνίσεων που αντιστοιχεί στο 90% - ποσοστημόριο των υγρών ημερών σε κάθε σταθμό

Ακολούθως, σχεδιάζονται τα διαγράμματα διασποράς για τον συντελεστή Hurst, όπου τα αποτελέσματα ποικίλλουν ανάλογα με την εξεταζόμενη χρονική κλίμακα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται υποτίμηση του συντελεστή στην ετήσια και μηνιαία κλίμακα (Σχήμα 5-18), ενώ στην ημερήσια υπερεκτιμάται (Σχήμα 5-17β). Αξίζει να σημειωθεί ότι στις μικρές χρονικές κλίμακες η βροχόπτωση δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή, επομένως είναι λογικό να εμφανίζονται μικρές τιμές του Hurst. Από την άλλη πλευρά, οι ετήσιες βροχοπτώσεις ακολουθούν συνήθως την κανονική κατανομή, με αποτέλεσμα να αναμένονται σχετικά

υψηλότερες τιμές του, κάτι που δεν ισχύει σε όλους τους σταθμούς. Επιπλέον, όσον αφορά το συντελεστή Hurst στις χρονοσειρές των ετησίων μεγίστων έχει βρεθεί ότι συνήθως δεν υπάρχει εμμονή (Bouziotas et al., 2011 και Papalexίου, 2011). Αυτή η άποψη δείχνει να επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 5-17α, αν και σε ορισμένους σταθμούς εμφανίζονται τιμές κοντά στο 0.70.



Σχήμα 5-17: Διάγραμμα διασποράς του συντελεστή Hurst για τις (α) μέγιστες ετήσιες και (β) τις ημερήσιες βροχοπτώσεις των προσομοιωμένων και των ιστορικών χρονοσειρών

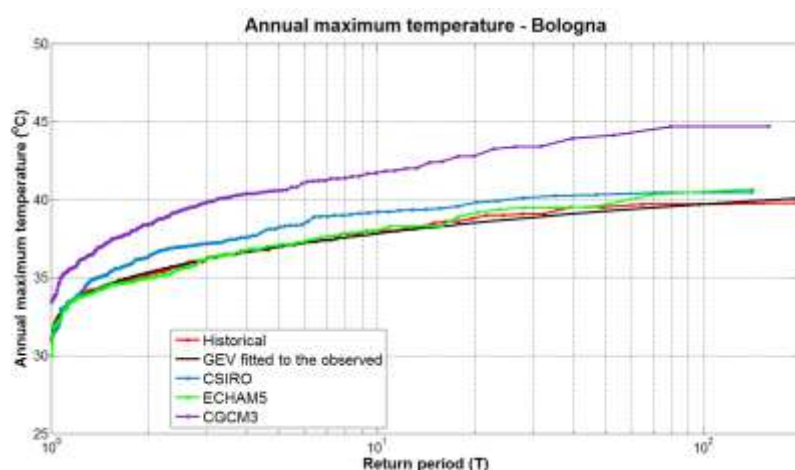


Σχήμα 5-18: Διάγραμμα διασποράς του συντελεστή Hurst για τις (α) ετήσιες και (β) τις μηνιαίες βροχοπτώσεις των προσομοιωμένων και των ιστορικών χρονοσειρών

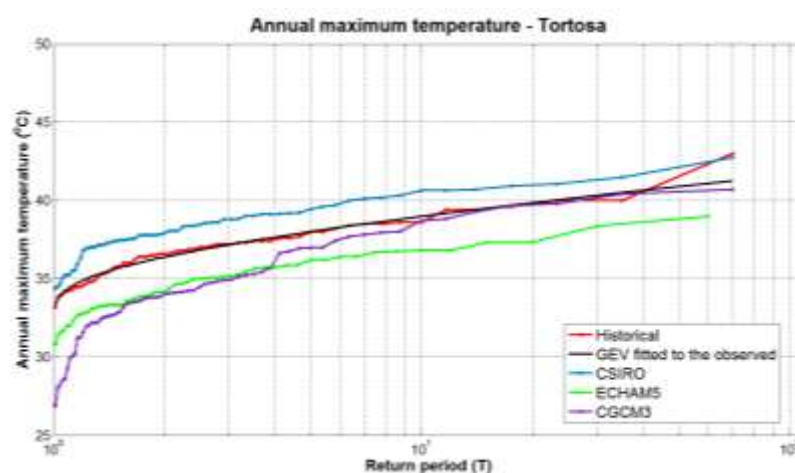


## 5.2. Σταθμοί με μέγιστη θερμοκρασία

Επιλέγεται να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα στους σταθμούς Bologna (Ιταλία) και Tortosa (Ισπανία). Εχουν σχεδιαστεί: α) οι εμπειρικές κατανομές των ιστορικών και προσομοιωμένων χρονοσειρών, καθώς και η προσαρμογή στην ιστορική της Γενικευμένης κατανομής ακραίων Τιμών, β) οι χρονικές ακολουθίες των ακραίων βροχοπτώσεων ανά έτος.



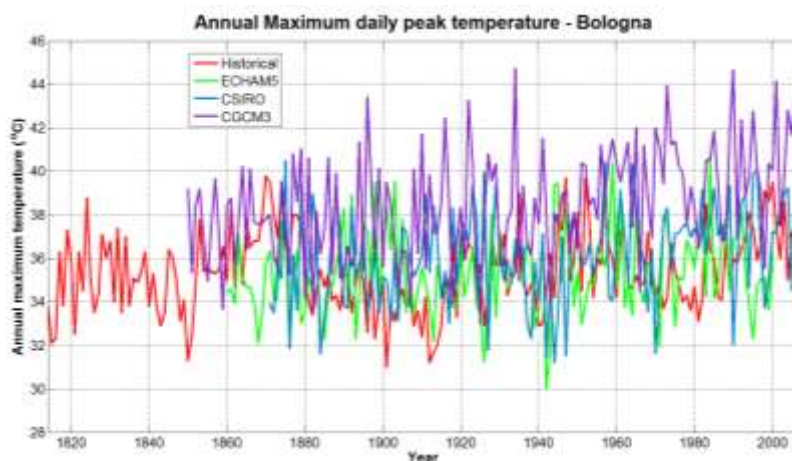
Σχήμα 5-19: Εμπειρική κατανομή της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης για τις προσομοιωμένες χρονοσειρές, την ιστορική και την προσαρμοσμένη της κατανομή GEV για το σταθμό του Bologna



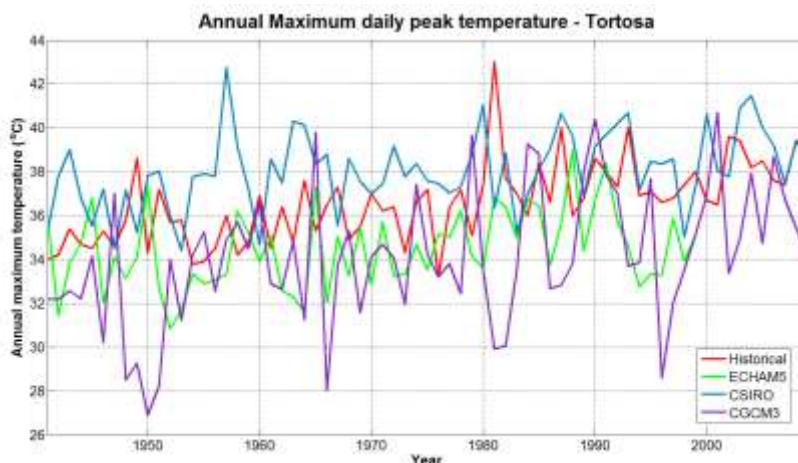
Σχήμα 5-20: Εμπειρική κατανομή της μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης για τις προσομοιωμένες χρονοσειρές, την ιστορική και την προσαρμοσμένη της κατανομή GEV για το σταθμό του Tortosa

Από τις εμπειρικές κατανομές των παραπάνω σταθμών (αλλά και από το σύνολο τους, στο Παράρτημα Γ) οι ακραίες τιμές των μέγιστων ημερησίων θερμοκρασιών μπορούν να προσομοιωθούν σχετικά ικανοποιητικά από τα κλιματικά μοντέλα. Στις περισσότερες

περιπτώσεις η κατανομή των ιστορικών ακραίων βρίσκεται είτε εντός του εύρους των προσομοιωμένων ακραίων κατανομών, είτε προσεγγίζεται σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό από κάποιο κλιματικό μοντέλο, όχι μόνο για μικρές περιόδους επαναφοράς, αλλά και για περιόδους περίπου 100 ετών. Επιπρόσθετα, η κατανομή GEV μπορεί να προσαρμοστεί επιτυχώς στις διατεταγμένες ακραίες ιστορικές μέγιστες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-21: Χρονοσειρές των ακραίων ετησίων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Bologna



Σχήμα 5-22: Χρονοσειρές των ακραίων ετησίων βροχοπτώσεων για το σταθμό του Tortosa

Ωστόσο, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5-21 και το Σχήμα 5-22 δεν υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των ακραίων ιστορικών παρατηρήσεων και των κλιματικών μοντέλων. Σύμφωνα, μάλιστα με τον Πίνακα 5-3 ο μέγιστος συντελεστής συσχέτισης των ακραίων τιμών είναι 0.28 στο San Sebastian για το CSIRO. Αυτό το γεγονός αποδεικνύει ότι η καλή εκτίμηση των εμπειρικών κατανομών των CGMs, δεν οφείλεται τόσο στην καλή λειτουργία τους, αλλά

κυρίως στο γεγονός ότι το εύρος των ακραίων θερμοκρασιών είναι περιορισμένο και σχετικά εύκολα προβλέψιμο. Σε αντίθεση με τις κατακρημνίσεις, δεν είναι πιθανό να παρουσιαστεί μια πολύ μεγάλη τιμή θερμοκρασίας. Είναι αξιοσημείωτο, άλλωστε, το γεγονός ότι οι περισσότερες τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας των μεγίστων ετησίων είναι αρνητικές (Πίνακας 5-4). Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα κλιματικά μοντέλα λειτουργούν περισσότερο ως γεννήτριες τυχαίων τιμών, παρά ως αξιόπιστο εργαλείο για την εκτίμηση ακραίων τιμών.

Οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης και αποδοτικότητας των ημερησίων χρονοσειρών είναι σχετικά υψηλές, γεγονός που οφείλεται στην εποχική μεταβλητότητα, δηλαδή τα κλιματικά μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν τις θερμές (καλοκαίρι) και τις ψυχρές περιόδους (χειμώνας).

Πίνακας 5-3: Συντελεστής συσχέτισης των μεγίστων θερμοκρασιών σε όλους τους σταθμούς

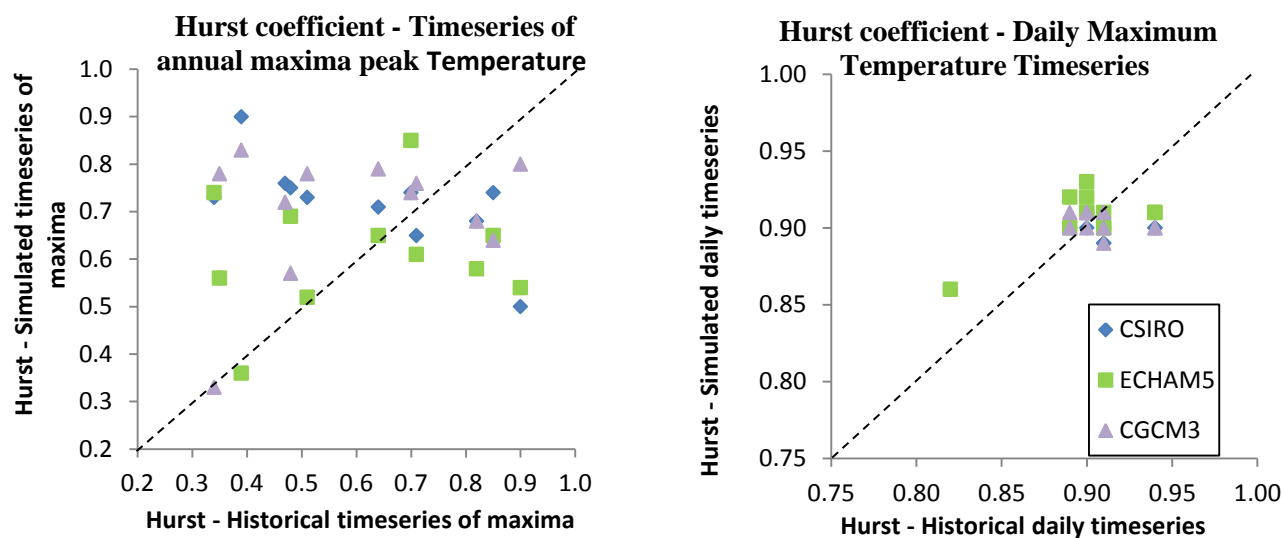
	Συντελεστής συσχέτισης					
	Ημερήσιες			Μέγιστες ετήσιες		
	CSIRO	ECHAM	CGCM3	CSIRO	ECHAM	CGCM3
Bologna	0.80	0.83	0.81	0.01	0.02	0.10
Hvar	0.74	0.78	0.85	0.09	-0.11	-0.04
Perpignan	0.57	0.36	0.52	-0.05	0.16	0.05
Tortosa	0.40	0.71	0.79	0.23	0.20	0.05
Istanbul	0.71	0.45	0.71	-0.14	-0.20	0.14
Torre Vieja	0.82	0.61	0.80	-0.14	-0.09	-0.05
Albacete	0.36	0.74	0.42	0.11	0.09	-0.03
San Sebastian	0.63	0.58	0.61	0.28	0.16	0.04
Dar el Beida	0.39	-0.13	0.48	0.12	-0.08	0.12
Valencia	0.78	0.72	0.79	0.13	-0.08	-0.03
Madrid	0.80	0.70	0.83	0.22	0.34	0.14
Sarajevo	0.74	0.63	0.75	0.02	0.13	0.05

<b>Μέση τιμή</b>	0.65	0.58	0.69	0.07	0.05	0.05
------------------	------	------	------	------	------	------

Πίνακας 5-4: Συντελεστής αποδοτικότητας των μεγίστων θερμοκρασιών σε όλους τους σταθμούς

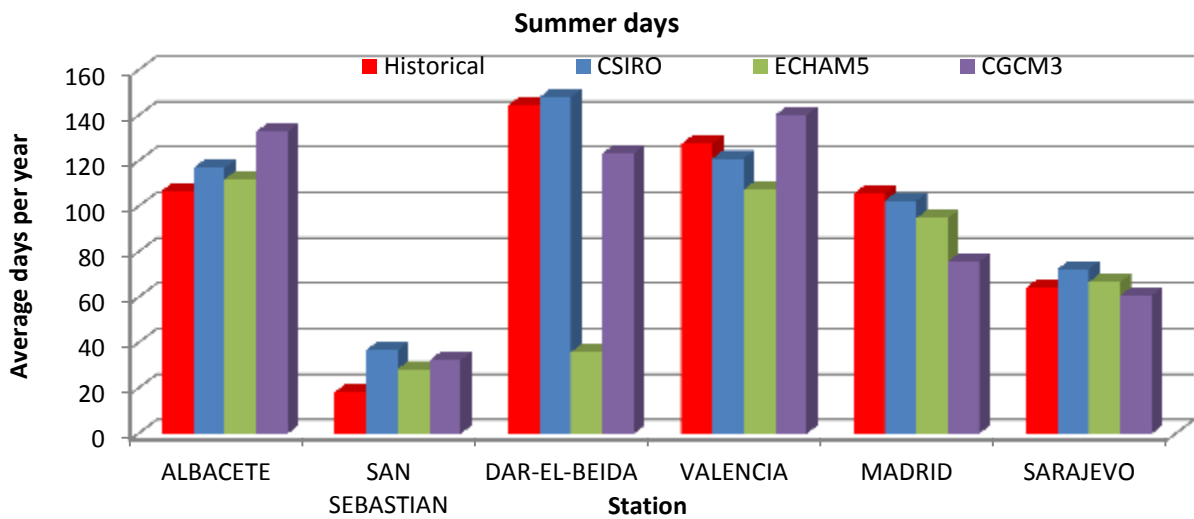
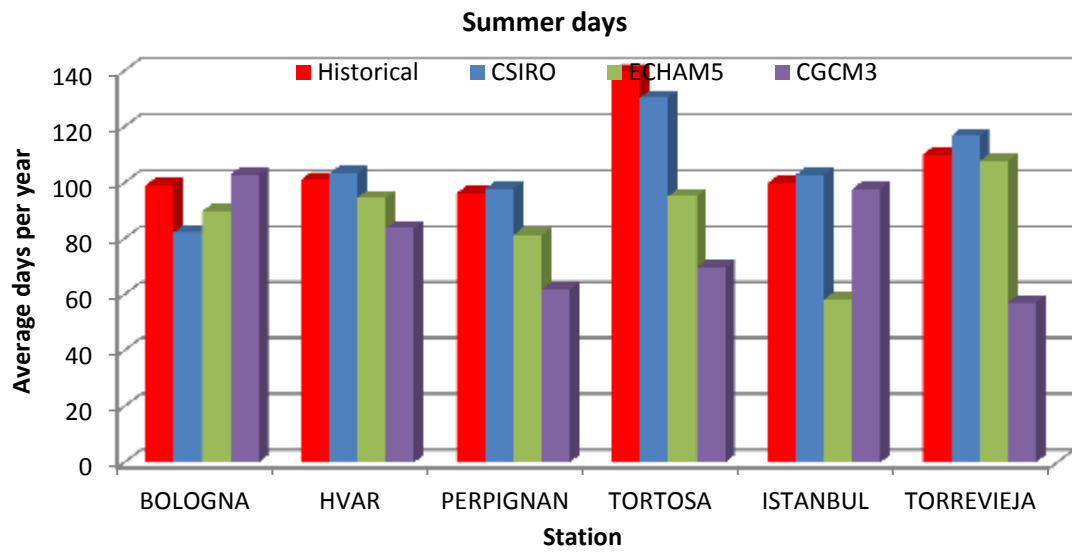
	Συντελεστής αποδοτικότητας					
	Ημερήσιες			Μέγιστες ετήσιες		
	CSIRO	ECHAM	CGCM3	CSIRO	ECHAM	CGCM3
Bologna	0.63	0.68	0.56	-1.53	-1.10	-4.14
Hvar	0.46	0.33	0.63	-0.86	-4.35	-5.71
Perpignan	0.16	-0.21	0.06	-1.19	-1.21	-5.07
Tortosa	-0.22	0.24	0.27	-1.21	-1.61	-4.70
Istanbul	0.45	0.15	0.56	-0.59	-2.35	-2.15
Torre Vieja	0.65	0.15	0.18	-1.19	-1.52	-5.24
Albacete	-0.20	0.55	-0.08	-2.32	-1.31	-1.50
San Sebastian	0.33	0.14	0.22	-6.47	-7.99	-2.57
Dar el Beida	-0.14	-0.07	-0.46	-3.30	-33.49	-0.77
Valencia	0.57	0.24	-0.17	-0.53	-0.74	-3.42
Madrid	0.63	0.28	0.17	-3.32	-0.82	-2.32
Sarajevo	0.52	0.39	0.55	-2.21	-1.15	-1.36
<b>Μέση τιμή</b>	0.32	0.24	0.21	-2.06	-4.80	-3.25

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς για τον συντελεστή Hurst για τις ακραίες ετήσιες και τις ημερήσιες χρονοσειρές. Συγκεκριμένα, οι τιμές του Hurst είναι σχετικά χαμηλές, μάλιστα υπάρχουν και  $H < 0.5$ , για τα μέγιστα ετήσια, καθώς όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 5.1 δεν αναμένεται εμμονή στις παρατηρήσεις των ακραίων τιμών, δεδομένου μάλιστα ότι δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Αντιθέτως, ο Hurst είναι πολύ υψηλός στις μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες, όπου η εμμονή είναι από τα βασικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών. Μάλιστα, τα κλιματικά μοντέλα μπορούν να αποδώσουν πολύ ικανοποιητικά τις τιμές του, άρα έχουν τη δυνατότητα να αναπαράγουν τις εμφανιζόμενες διακυμάνσεις των χρονοσειρών.

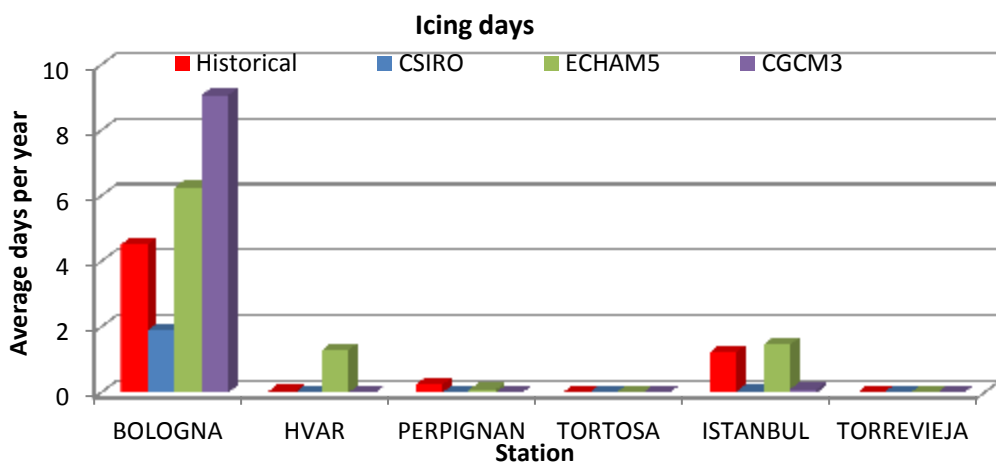


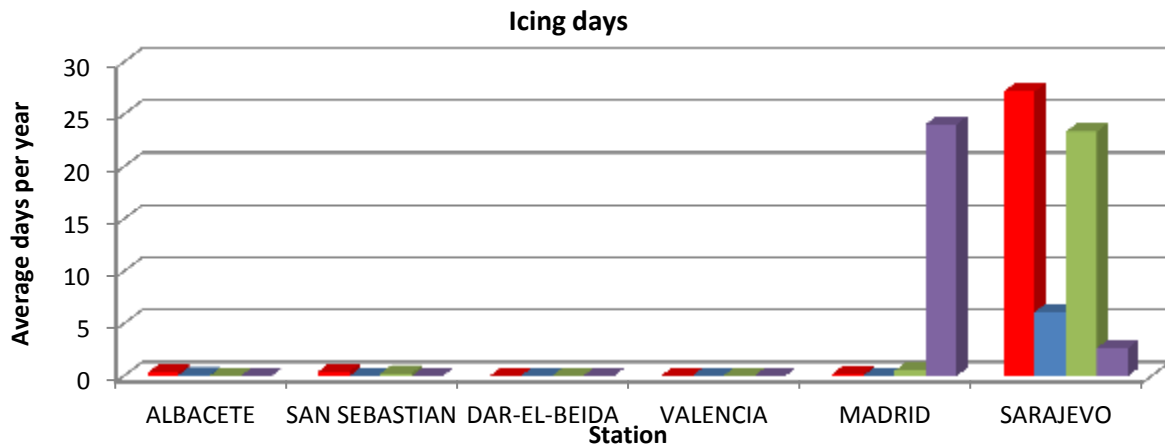
Σχήμα 5-23: Διάγραμμα διασποράς του συντελεστή Hurst για τις (α) ακραίες ετήσιες και (β) τις μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες των προσομοιωμένων και των ιστορικών χρονοσειρών

Κατά την μελέτη των κλιματικών δεικτών προκύπτει ότι η συμπεριφορά των κλιματικών μοντέλων είναι σχετικώς ικανοποιητική, αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου αποτυγχάνουν να προσεγγίσουν τις πραγματικές τιμές. Για το μέσο ετήσιο πλήθος των θερινών ημερών (*SU*) το CSIRO δίνει τα ακριβέστερα αποτελέσματα, ενώ από την άλλη πλευρά, το ECHAM5 υποτιμά το πλήθος τους. Για τον κλιματικό δείκτη *IC* παρατηρείται ότι είναι συνήθως 0, δεδομένου ότι στο Μεσογειακό κλίμα, και ιδιαιτέρως στα χαμηλά υψόμετρα που βρίσκονται οι επιλεγμένοι σταθμοί, είναι σχετικά σπάνια η εμφάνιση ημερών όπου δεν ξεπερνιούνται οι  $0^{\circ}\text{C}$ . Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι οι σταθμοί Bologna και Sarajevo όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές του δείκτη δεν βρίσκονται κοντά στη Μεσόγειο και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από άλλους τύπους κλίματος. Οι θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στο 90%-ποσοστημόριο μπορούν να προβλεφθούν, επίσης, σε ικανοποιητικό βαθμό και τα αποτελέσματα είναι αρκετά αξιόπιστα. Αυτή είναι άλλη μια ένδειξη ότι τα κλιματικά μοντέλα και σε συνδυασμό με τον μη γραμμικό μετασχηματισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη βελτιστοποίηση μπορούν να αναπαράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ιστορικής χρονοσειράς.

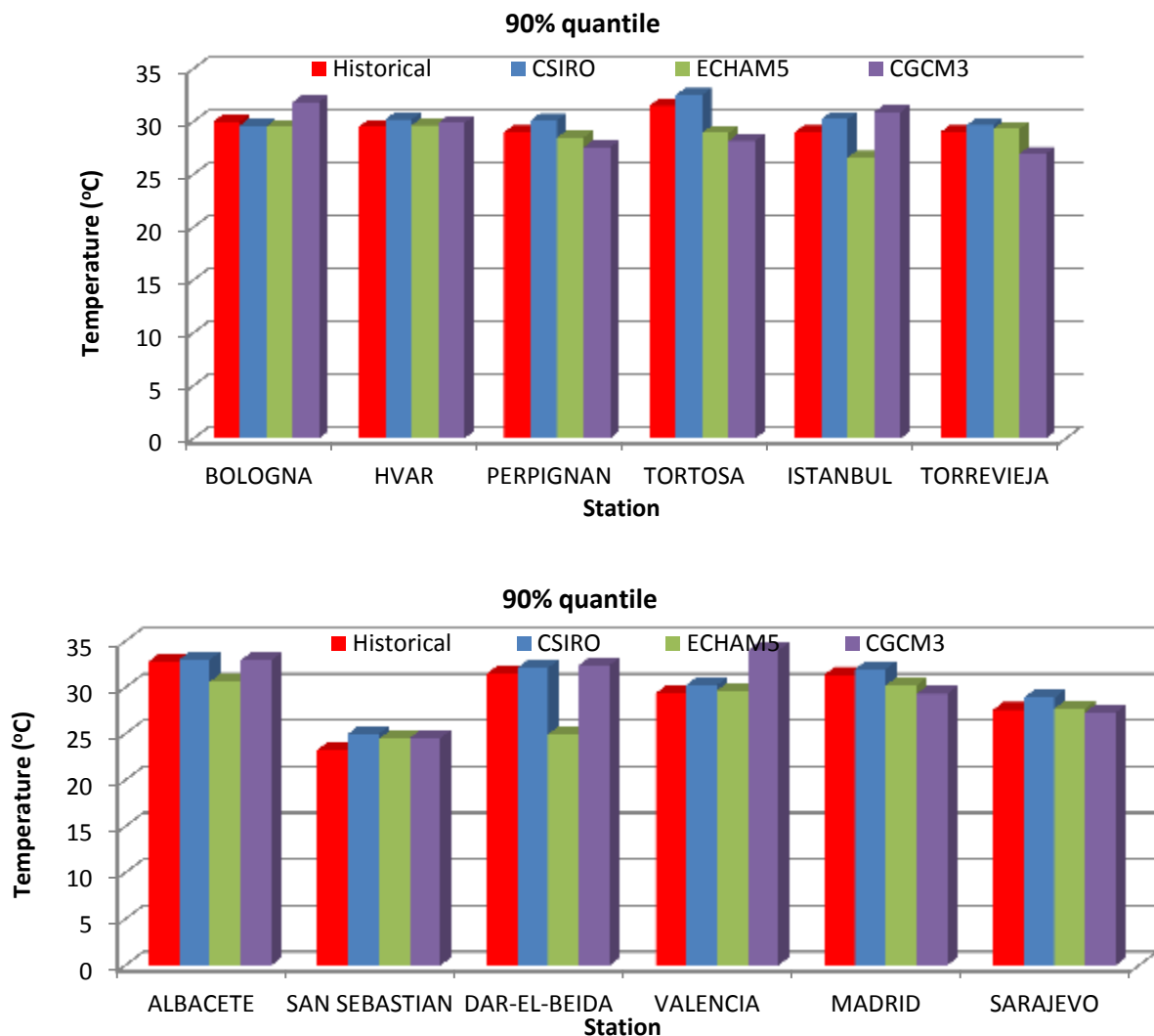


Σχήμα 5-24: Μέσο ετήσιο πλήθος θερινών ημερών ( $T > 25^{\circ}\text{C}$ )

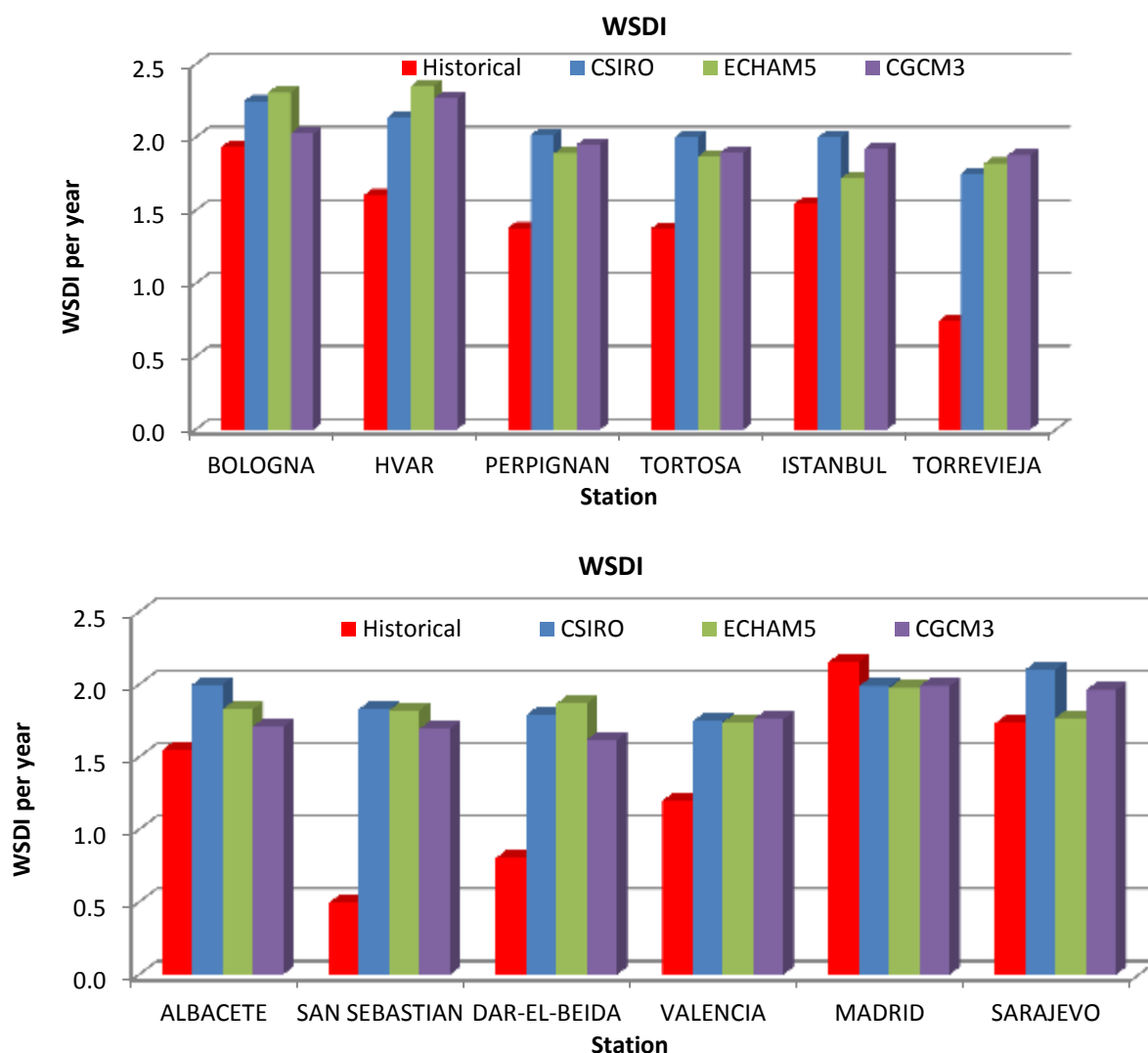




Σχήμα 5-25: Μέσο ετήσιο πλήθος πολύ κρύων ημερών ( $T < 0^{\circ}\text{C}$ )



Σχήμα 5-26: Θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο 90% - ποσοστημόριο



Σχήμα 5-27: Μέσο ετήσιο πλήθος καυσώνων (τουλάχιστον 6 συνεχόμενες ημέρες με θερμοκρασία μεγαλύτερη αυτής που αντιστοιχεί στο 90% - ποσοστημόριο)

Παρά τη σχετικά καλή συμπεριφορά τους στους προαναφερθέντες κλιματικούς δείκτες, δεν επιτυγχάνεται καλή αναπαραγωγή του WSDI, ο οποίος είναι ο βασικός δείκτης εκτίμησης καυσώνων. Από το Σχήμα 5-27 είναι προφανές ότι υπερεκτιμάται συστηματικά η συχνότητα τους από όλα τα κλιματικά μοντέλα. Εφόσον, λοιπόν, κατά τις παρελθοντικές προβλέψεις δε γίνεται καλή εκτίμηση του δείκτη, είναι αναμενόμενο οι προβλέψεις που αφορούν το μέλλον να δίνουν περισσότερα ακραία γεγονότα και πιο συχνή εμφάνιση ενός καύσινα.



## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η στατιστική σύγκριση των ιστορικών χρονοσειρών ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας και βροχόπτωσης με τις εξόδους των κλιματικών μοντέλων και των δεδομένων πλήρους επεξεργασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην μελέτη των ακραίων γεγονότων για να διαπιστωθεί το επίπεδο αξιοπιστίας που παρέχεται. Τα ποσοτικά αποτελέσματα που προέκυψαν καθιστούν σαφές ότι τα κλιματικά μοντέλα αδυνατούν να αναπαράγουν τις πραγματικές (ιστορικές) διακυμάνσεις των μεταβλητών που μελετήθηκαν. Μάλιστα όταν εξετάζονται οι ετήσιες μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης η αδυναμία πρόβλεψης τους είναι εντονότερη.

Ειδικά για την περίπτωση της θερμοκρασίας, αναπαράγεται η εποχική μεταβλητότητα και κάποια από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ακραίων, όμως οι μικρές τιμές των συντελεστών συσχέτισης και αποδοτικότητας ενισχύουν το επιχείρημα των Von Storch et al. (2001) ότι συμπεριφέρονται ως γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Οι κλιματικοί δείκτες μπορούν να προσομοιωθούν σε ικανοποιητικό βαθμό, εκτός του WSDI, που χρησιμοποιείται για τον πιθανό εντοπισμό καυσώνων.

Όσον αφορά την ημερήσια βροχόπτωση, παρατηρήθηκε σημαντική υπερεκτίμηση της πιθανότητας βροχόπτωσης και την ίδια στιγμή συστηματική υπεκτίμηση της έντασης της κατά τις υγρές ημέρες και ιδιαίτερος των μεγίστων ετησίων κατακρημνίσεων. Επιπρόσθετα, δεν μπορούν να αναπαραχθούν ούτε τα στατιστικά χαρακτηριστικά των κατανομών, ούτε η χρονική διαδοχή υγρών και ξηρών περιόδων, ενώ τα αποτελέσματα για τους κλιματικούς δείκτες ποικίλλουν. Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, το γεγονός ότι τα κλιματικά μοντέλα και τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας αποτυγχάνουν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες τις χρονικές κλίμακες, από την ημερήσια μέχρι τον δεκαετή κινούμενο μέσο όρο.

Συνάγεται, λοιπόν, το βασικό συμπέρασμα ότι τα κλιματικά μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας δεν μπορούν να παρέχουν το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας για υδρολογικές εφαρμογές και χάραξη πολιτικών για τη βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων. Τα αποτελέσματα της εργασίας αναδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση της απόδοσης τους

και υποδεικνύεται ότι τα κλιματικά μοντέλα δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε υδρολογικές εφαρμογές αβίαστα και χωρίς τεκμηρίωση. Αυτά τα ευρήματα δεν είναι άνευ προηγουμένου στην υδρολογική κοινότητα, αλλά έχουν ήδη υπάρξει αντίστοιχοι προβληματισμοί για την αξιοπιστία τους και τη δυνατότητα τους να έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαχείριση υδατικών πόρων (Koutsoyiannis et al., 2008, Anagnostopoulos et al., 2010, Kundzewicz and Stakhiv, 2010, Kiem and Verdon-Kidd, 2011).

Σύμφωνα με τον Koutsoyiannis (2010), η κακή απόδοση των κλιματικών μοντέλων ενδεχομένως δεν οφείλεται σε λάθη τους, αλλά αντικατοπτρίζουν τον εγγενώς απρόβλεπτο χαρακτήρα του κλίματος και τη διττή λειτουργία της Φύσης, η οποία καθορίζεται ταυτοχρόνως από στοχαστικούς και ντετερμινιστικούς παράγοντες. Τυχόν απλοποιήσεις σε λιγότερο περίπλοκα συστήματα μπορούν να δώσουν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα. Συνεπώς, όταν αναφερόμαστε στο κλίμα, το οποίο είναι εξαιρετικά περίπλοκο σύστημα και για το οποίο δεν υπάρχει γνώση όλων των παραγόντων που το επηρεάζουν, ο βαθμός αβεβαιότητας των προβλέψεων μεγαλώνει.

## Βιβλιογραφία

Alexander et al. (2006) 'Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation', *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, Mar.

Alpert, P., Baldi, M., Ilani, R., Krichak, S., Price, C., Rodo, X., Saaroni, H., Ziv, B., Kischka, P., Barkan, J., Mariotti, A. and Xoplaki, E. (2006) 'Relations between climate variability in the Mediterranean region and the Tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust', *Developments in Earth and Environmental Sciences*, vol. 4, no. C, pp. 149-177.

Alpert, P., Krichak, S.O., Shafir, H., Haim, D. and Osetinsky, I. (2008) 'Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean', *Global and Planetary Change*, vol. 63, no. 2-3, Sep, pp. 163-170.

Anagnostopoulos, G., Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Christofides, A. and Mamassis, N. (2010) 'A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 55, no. 7, Oct, pp. 1094-1110.

Beran, J. (1994) *Statistics for Long-Memory Processes*, New York, USA: Chapman & Hall.

Bouziotas, D., Deskos, G., Mastrantonas, N., Tsaknias, D., Vaggelidis, G., Papalexiou, S.-M. and Koutsoyiannis, D. (2011) 'Long-term properties of annual maximum daily river discharge worldwide', European Geosciences Union General Assembly, Vienna.

Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis *Environment Canada*, [Online], Available: [http://www.cccma.ec.gc.ca/data/cgcm3/cgcm3\\_forcing.shtml](http://www.cccma.ec.gc.ca/data/cgcm3/cgcm3_forcing.shtml).

Coles, S., Pericchi, L.R., Sisson, S. and. (2003) 'A fully probabilistic approach to extreme rainfall modelling', *Journal of Hydrology*, vol. 273, no. 1-4, Mar, pp. 35-50.

European Environment Agency (2010) *The European Environment, State and Outlook, Adapting to Climate Change*.

Fisher, R.A. (1922) 'On the mathematical foundations of theoretical statistics', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pp. 309-368.

- Frich, P., Alexander, L.V., Della-Maria, P., Gleason, P., Haylock, M., Klein Tank, A.M. and Peterson, T. (2002) 'Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century', *Climate Research*, vol. 19, Jan, pp. 193-212.
- García-Ruiz, J., López-Moreno, I., Vicente-Serrano, S., Lasanta-Martínez, T. and Beguería, S. (2011) 'Mediterranean water resources in a global change scenario', *Earth-Science Reviews*, vol. 105, no. 3-4, Apr, pp. 121-139.
- Giorgi, F. (2006) 'Climate change Hot-spots', *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 8, Apr.
- Giorgi, F. and Lionello, P. (2008) 'Climate change projections for the Mediterranean region', *Global and Planetary Change*, vol. 63, no. 2-3, Sep, pp. 90-104.
- Gumbel, E.j. (1958) *Statistics of Extremes*, New York: Columbia University Press.
- Ideler, J. (1832) 'Ueber die angeblichen Veranderungen des Klima'.
- IPCC (2007) *Summary for Policymakers, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University.
- Jenkinson, J.A. (1955) 'The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) value of meteorological elements', *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 81, p. 158–171.
- Kalnay, E. (2000) *Report from the First Planning Workshop for the Next US Global Reanalysis*.
- Kiem, A. and Verdon-Kidd, D.C. (2011) 'Steps toward “useful” hydroclimatic scenarios for water resource management in the Murray-Darling Basin', *Water Resources Research*, vol. 47, Jun.
- Kitanidis, P.K. (1993) *Geostatistics. In: Handbook of Hydrology*, New York.
- Knutti, R. (2008) 'Should we believe model predictions of future climate change?', *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 366, no. 1885, Dec, p. 4647–4664.
- Koutsoyiannis, D. (2002) 'The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy', *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, vol. 47, Apr, p. 573-595.

Koutsoyiannis, D. (2003) 'Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics', *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, vol. 48, Feb.

Koutsoyiannis, D. (2004) 'Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, no. 4, Aug, pp. 575-590.

Koutsoyiannis, D. (2006) 'The underestimation of probability of extreme rainfall and flood by prevailing statistical methodologies and how to avoid it', EU COST Action C22: Urban Flood Management, Athens.

Koutsoyiannis, D. (2010) 'A random walk on water', *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 585-601.

Koutsoyiannis, D., A., E., N., M. and A., C. (2008) 'On the credibility of climate predictions', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, no. 4, Aug, pp. 671-684.

Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Mamassis, N. and Christofides, A. (2008) 'On the credibility of climate predictions', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, no. 4, Aug, pp. 671-684.

Koutsoyiannis, D., Paschalis, A. and Theodoratos, N. (2011) 'Two-dimensional Hurst-Kolmogorov process and its application to rainfall fields', *Journal of Hydrology*, vol. 398, no. 1-2, Feb, pp. 91-100.

Kundzewicz, Z.W. and Stakhiv, E., (2010) 'Are climate models "ready for prime time" in water resources management applications, or is more research needed?', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 55, no. 7, Oct, pp. 1085-1089.

Luterbacher et al. (2006) *Mediterranean Climate Variability Over the Last Centuries: A Review*.

Mann, A. (1790) 'Ueber die allmahlichen Veränderungen der Temperatur und des Bodens in verschiedenen Climates, nebst Untersuchungen über die Ursachen dieser Veränderungen'.

Montanari, A., Rosso, R. and Taqqu, M.S. (1997) 'Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: identification, estimation and simulation,', *Water Resources Research*, vol. 33, pp. 1035-1044.

Papalexiou, S.M., Kallitsi, Steirou, Xirouchakis, Drosou, Mathios, Adraktas-Rentis, Kyprianou, Vasilaki and Koutsoyiannis (2011) 'Long-term properties of annual maximum daily rainfall worldwide', European Geosciences Union General Assembly, Vienna.

Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman, R. and Fichefet, T. (2007) 'Climate models and their evaluation'.

Reichler, T. and Kim, J. (2008) 'How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate?', *American Meteorological Society*, vol. 89, no. 3, March, pp. 303-311.

Schmidli, J., Goodess, C.M., Frei, C., Haylock, M.R., Hurrell, J.W., Ribalaygua, J. and Schmith, T. (2005) 'Statistical and Dynamical Downscaling of Precipitation: An Evaluation and Comparison of Scenarios for the European Alps', *Journal of Geophysical Research*.

Schneider, U., Becker, A., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M. and Rudolf, B. (2010) *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, Global Precipitation Climatology Centre (GPCC).

Tsaknias, D., Bouziotas, D., Koutsoyiannis, D., Christofides, A. and Efstratiadis, A. (2011) 'Statistical comparison of observed temperature and rainfall extremes with climate model outputs', European Geosciences Union General Assembly 2011, Vienna, Austria.

Von Storch, H. and Muller, P. (2001) 'Noise in the climate system—ubiquitous, constitutive and concealing', *Springer*.

Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. and Mearns, L.O. (2004) *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*, IPCC.

Αλεξοπούλου, Α. (2010) *Αξιολόγηση δορυφορικών βροχομετρικών δεδομένων*, Αθήνα.

Ευστρατιάδης, Α. και Κουτσογιάννης, Δ. (2004) *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και Διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ. (1997) *Στατιστική Υδρολογία*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ. (1999) *Τεχνική Υδρολογία*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μαμάσης, Ν. και Κουτσογιάννης, Δ. (2010) *Κλιματολογία και κλιματική αλλαγή*, Αθήνα.

Παπαλεξίου, Σ.-Μ. (2005) *Πιθανοτική και εννοιολογική διερεύνηση της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Χριστοφίδης, Α. και Μαμάσης, Ν. (2009) *HK-climate*, [Online], Available: <http://www.hk-climate.org/el/>.





## Παράρτημα Α – Βελτιστοποίηση παραμέτρων μη γραμμικού μετασχηματισμού

Η βελτιστοποίηση που γίνεται στις χρονοσειρές των φατνίων για κάθε κλιματικό μοντέλο και για τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας σε κάθε σταθμό, όπως έχει περιγραφεί στο υποκεφάλαιο 4.2.3 είναι ιδιαίτερος απαιτητική υπολογιστικά. Το μεγάλο πλήθος των τιμών από τις ημερήσιες χρονοσειρές σε συνδυασμό με τη φύση του μη-γραμμικού μετασχηματισμού καθιστούν τη βελτιστοποίηση χρονοβόρα και είναι αβέβαιο αν η τελική λύση δίνει ολικό ή τοπικό ακρότατο. Δεδομένου ότι αυτή η διαδικασία έπρεπε να εφαρμοστεί 4 και 3 φορές για την περίπτωση της βροχόπτωσης και της μέγιστης θερμοκρασίας, αντίστοιχα, σε κάθε σταθμό ήταν απαραίτητο να επιλεγεί το λογισμικό που θα δίνει γρηγορότερα αποτελέσματα και όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή στη συνάρτηση σφάλματος (σχέση (4.6)).

Επιλέχθηκε, λοιπόν να εξεταστεί ο σταθμός της Αθήνας για τη βροχόπτωση και της Μαδρίτης για τη μέγιστη θερμοκρασία από το κλιματικό μοντέλο CSIRO με τη βοήθεια των προγραμμάτων Matlab (R2011a), Mathematica 8 και του add-in solver του Microsoft Excel 2010. Στο παρόν παράρτημα δίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους παραπάνω σταθμούς, καθώς και ο αντίστοιχος κώδικας για κάθε λογισμικό.

- MATLAB

Η ελαχιστοποίηση έγινε με τις συναρτήσεις *fmincon* και *ga*, οι οποίες αντιστοιχούν στη βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς και στους γεννητικούς αλγορίθμους, αντίστοιχα.

Αρχικά, γράφτηκε η συνάρτηση *obfun* η οποία ορίζει τη συνάρτηση σφάλματος και στη συνέχεια γίνεται η βελτιστοποίηση. Ο κώδικας έχει ως εξής:

```
function error=obfun(x)
```

```
%The file data.mat contains the gridded time series (grid1, grid2, grid3,  
%grid4) and the historical one  
load data.mat
```

```

% non linear transformation
sim=@(x1, x2, x3, x4, x5, x6) (x(1)*(gri d1+x(5)). ^x(6) + x(2)*(gri d2+x(5)). ^x(6)
+ x(3)*(gri d3+x(5)). ^x(6) + x(4)*(gri d4+x(5)). ^x(6)). ^(1/x(6)) - x(5);

% error caused by mean, stdev and skew di fference
meaer = 1000*(mean(sim(x))-mean(hi stori cal )) ^2;
stder = 1000*(std(sim(x))-std(hi stori cal )) ^2;
skewer = 250*(skewness(sim(x))-skewness(hi stori cal )) ^2;

di f = (sim(x)-hi stori cal ). ^2;
ertot = mean(di f);

% total error
error = meaer+stder+skewer+ertot;
end

```

Για την περίπτωση των γεννητικών αλγορίθμων η βελτιστοποίηση γίνεται ως εξής:

```

[x, fval] = ga(@obfun, [6], [], [], [1, 1, 1, 1, 0, 0], [1], [0, 0, 0, 0, 0, 0.1],
[1, 1, 1, 1, 100, Inf]);

```

Για την περίπτωση της ελαχιστοποίησης υπό περιορισμούς χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος *SQP*<sup>†</sup>.

```

[x, fval] = fmincon(@obfun, [0.2, 0.2, 0.3, 0.3, 5, 21], [], [],
[1, 1, 1, 1, 0, 0], [1], [0.001, 0.001, 0.001, 0.001, 0, 0.1], [1, 1, 1, 1, 100,
Inf]);

```

- Mathematica

Χρησιμοποιήθηκε ο κάτωθι κώδικας, όπου η συνάρτηση *fob* ορίζει τον μη γραμμικό μετασχηματισμό και στη συνέχεια με την *objective* πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση:

```

fob[w1_?Numeri c0, w2_?Numeri c0, w3_?Numeri c0, w4_?Numeri c0, c_?Numeri c0,
pow_?Numeri c0] := ({w1, w2, w3, w4}. (Pi ck[(c+#)^pow, hi stori cal , _?Numeri c0]
&/@ {gri d1, gri d2, gri d3, gri d4}))^(1/pow)-c;

```

<sup>†</sup> Αξίζει να σημειωθεί ότι δοκιμάστηκαν και οι υπόλοιποι αλγόριθμοι από αυτούς που διαθέτει το MATLAB, ωστόσο ήταν ιδιαίτερος αργός και δεν έδιναν τόσο καλή λύση συγκριτικά με τον SQP.

```

objective[w1_?NumericQ, w2_?NumericQ, w3_?NumericQ, w4_?NumericQ,
c_?NumericQ, pow_?NumericQ] := Abs[1000*(Mean[historical] -
Mean[fob[w1, w2, w3, w4, c, pow]])^2 + Total[(historical -
fob[w1, w2, w3, w4, c, pow])^2]/Length[ath]];

```

```

results=NMinimize[{objective[w1, w2, w3, w4, c, pow], w1+w2+w3+w4==1 && 0<w1<1
&& 0<w2<1, 0<w3<1 && 0<w4<1 && 0.1<c, 0.1<pow}, {w1, w2, w3, w4, c, pow}]

```

Το Mathematica δεν μπόρεσε να δώσει αποτελέσματα και κατέληγε έπειτα από σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα σε μη πραγματική λύση. Ο ίδιος κώδικας δοκιμάστηκε και με τέσσερα διανύσματα των 20000 τιμών το καθένα και βρέθηκε πραγματική λύση, αν και οι υπολογισμοί ήταν χρονοβόροι.

- Solver – Excel

Εγινε χρήση του αλγορίθμου GRG Nonlinear για την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης.

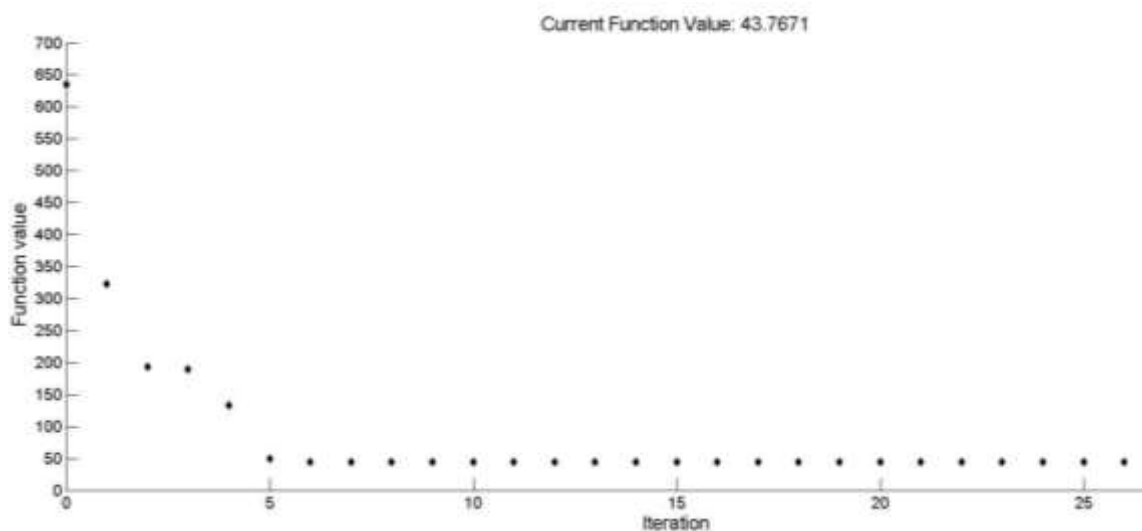
Πίνακας Α-1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση με τα συγκρινόμενα προγράμματα

		Τιμή συνάρτησης σφάλματος		Απαιτούμενος χρόνος	
		Μέγιστη Θερμοκρασία (Μαδρίτη)	Βροχόπτωση (Αθήνα)	Μέγιστη Θερμοκρασία (Μαδρίτη)	Βροχόπτωση (Αθήνα)
MATLAB R2001a	<b>Γεννητικοί αλγόριθμοι</b>	194.1	21734	207 sec	108 sec
	<b>Αλγόριθμος SQP</b>	43.8	21650.4	13.5 sec	28 sec
Mathematica 8		-	-	-	-
Solver - Excel		44.0	21653.4	26.7 sec	40.6 sec

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα Α-1 η βελτιστοποίηση μέσω του αλγορίθμου SQP του Matlab επιτυγχάνεται γρηγορότερα από τους γεννητικούς αλγορίθμους και από τον solver του Excel. Όσον αφορά την εύρεση του ακροτάτου είναι αβέβαιο αν τα τελικά αποτελέσματα δίνουν τοπικό ή μέγιστο (ειδικά στην περίπτωση της βροχόπτωσης), ωστόσο ο Solver και ο SQP δίνουν παρόμοια αποτελέσματα, ενώ για τους γεννητικούς αλγορίθμους είναι δεδομένο ότι το ακρότατο είναι τοπικό. Πάντως και στις τρεις περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά τα τελικά αποτελέσματα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο αλγόριθμος SQP είναι αυτός που ενδείκνυται για τις βελτιστοποιήσεις, ωστόσο η διαφορά με τον solver είναι σχετικά μικρή. Παρατηρούμε, μάλιστα ότι υπάρχει ταχύτατη σύγκλιση, καθώς μόλις από την 5<sup>η</sup> επανάληψη προσεγγίζεται η τελική τιμή της συνάρτησης ελαχιστοποίησης για την περίπτωση του σταθμού της Μαδρίτης (Σχήμα Α-1).

Λόγω της μικρής διαφοράς στους απαιτούμενους χρόνους, της μεγαλύτερης εξοικείωσης του γράφοντος με το Microsoft Excel και την δυνατότητα εποπτικού ελέγχου που προσφέρεται προτιμήθηκε τελικώς η χρήση του Solver.



Σχήμα Α-1: Σύγκλιση της συνάρτησης σφάλματος με τη χρήση του αλγορίθμου SQP για την περίπτωση της μέγιστης θερμοκρασίας στο σταθμό της Μαδρίτης

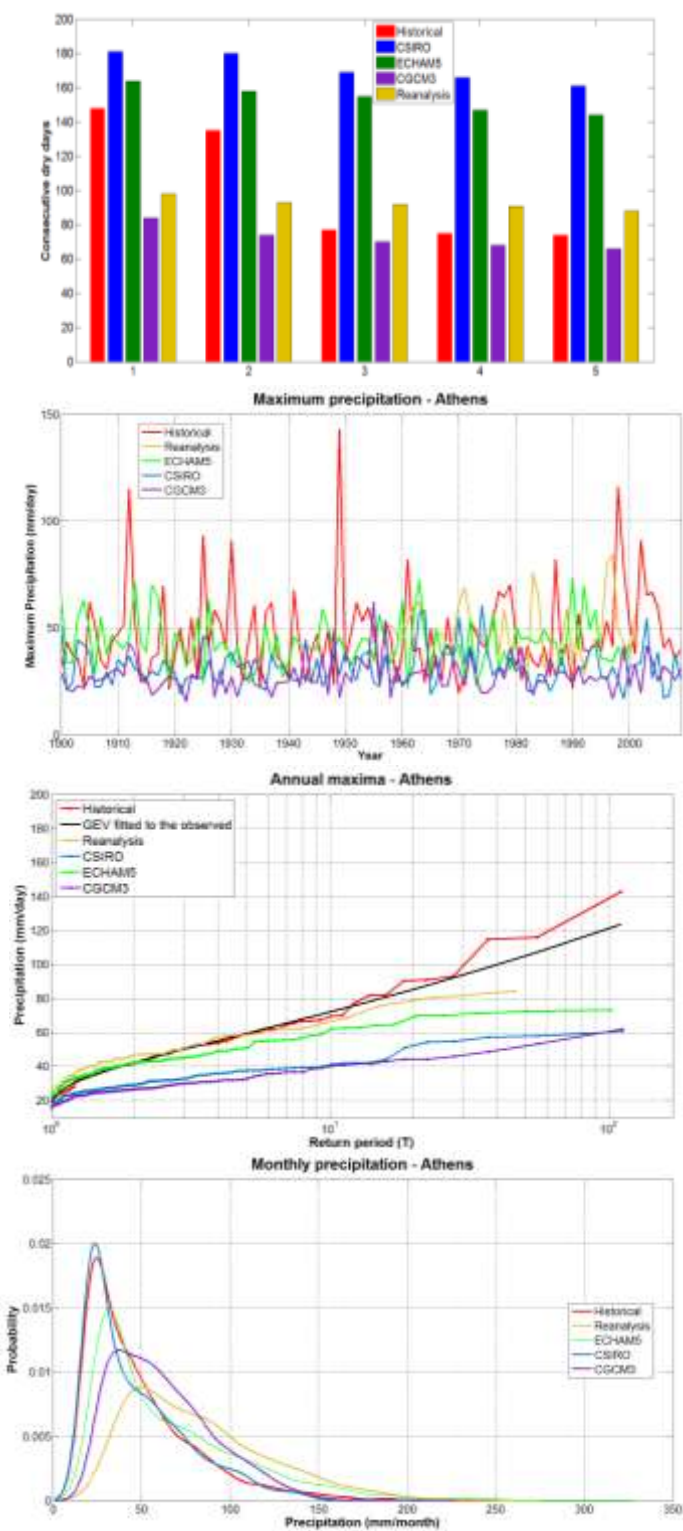
## Παράρτημα Β – Αποτελέσματα για τους σταθμούς με βροχοπτώσεις

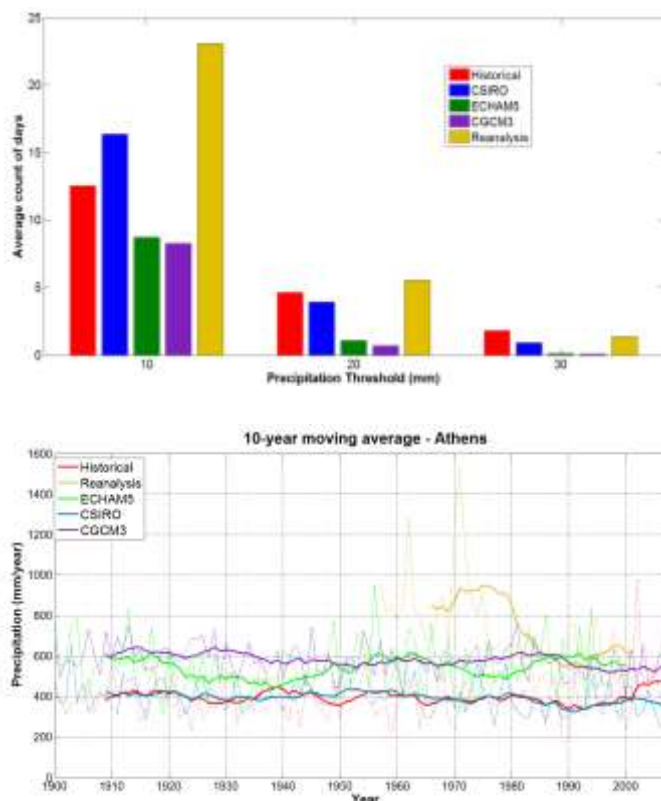
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση και τη στατιστική σύγκριση ανάμεσα στις ιστορικές παρατηρήσεις, τις εξόδους των κλιματικών μοντέλων και τα αποτελέσματα από τα Reanalysis data για τις βροχοπτώσεις στους εξεταζόμενους σταθμούς.

Εχουν σχεδιαστεί, κατά σειρά, τα εξής διαγράμματα:

- α) Ραβδογράμματα με τις πέντε μεγαλύτερες σε διάρκεια περιόδους ξηρασίας, δηλαδή συνεχόμενες ημέρες με ύψος βροχής μικρότερο από 1 mm/day.
- β) Χρονοσειρές των μεγίστων ετησίων βροχοπτώσεων.
- γ) Η εμπειρική κατανομή των ακραίων ετησίων βροχοπτώσεων και η προσαρμογή της Γενικευμένης κατανομής Ακραίων Τιμών στις παρατηρημένες τιμές.
- δ) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με τις μηνιαίες βροχοπτώσεις
- ε) Ραβδογράμματα με το μέσο ετήσιο πλήθος ημερών με βροχόπτωση μεγαλύτερη από τα οριζόμενα κατώφλια (10 mm, 20 mm, 30 mm), τα οποία αντιστοιχούν στους κλιματικούς δείκτες R10mm, R20mm και R30mm, αντίστοιχα.
- στ) Χρονοσειρές των αθροιστικών ετησίων βροχοπτώσεων και ο κινούμενος δεκαετής μέσος όρος τους.

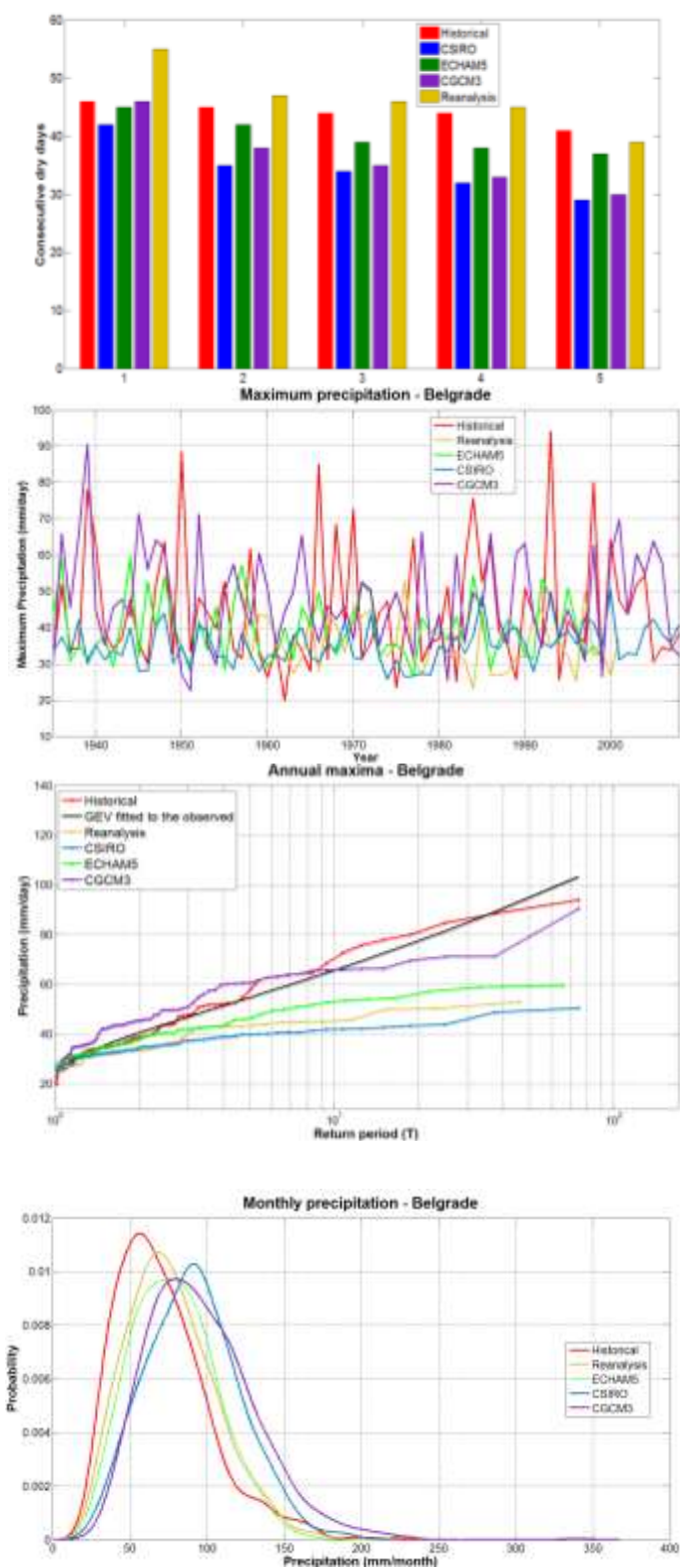
1) Athens





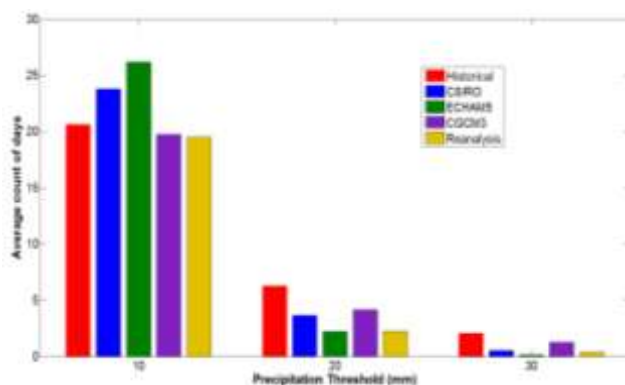
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.04	0.02	0.02	0.00
Efficiency	-	-0.23	-0.51	-0.24	-0.62
Average	3.78	1.51	1.50	2.53	2.37
Standard Deviation	7.60	3.27	4.05	3.51	5.08
Skewness	4.45	3.86	4.46	2.79	3.62
Probability dry	0.62	0.71	0.79	0.46	0.67
H daily	0.63	0.75	0.73	0.74	0.72
H annual	0.41	0.48	0.59	0.48	-
H monthly	0.43	0.26	0.28	0.20	0.59
SDII	8.64	4.75	6.62	3.91	7.10
Prec90p	20.29	10.62	15.06	8.22	15.66
<b>GEV κ</b>	0.13	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.35	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	51.24	-	-	-	-
H maxima	0.52	0.60	0.71	0.48	-
Correlation maxima	-	-0.07	-0.17	0.09	0.22
Efficiency maxima	-	-0.82	-1.03	-0.91	-5.14

2) Belgrade



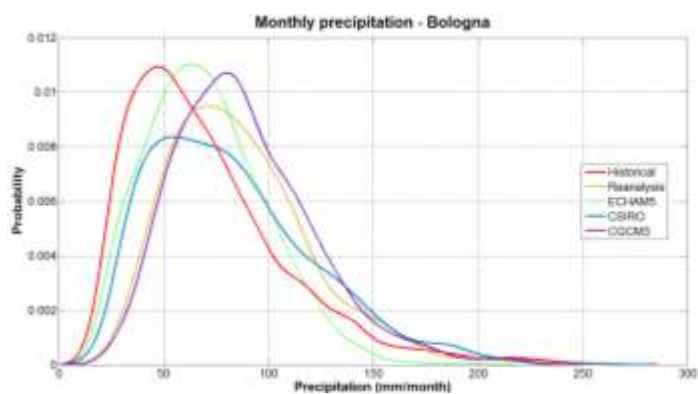
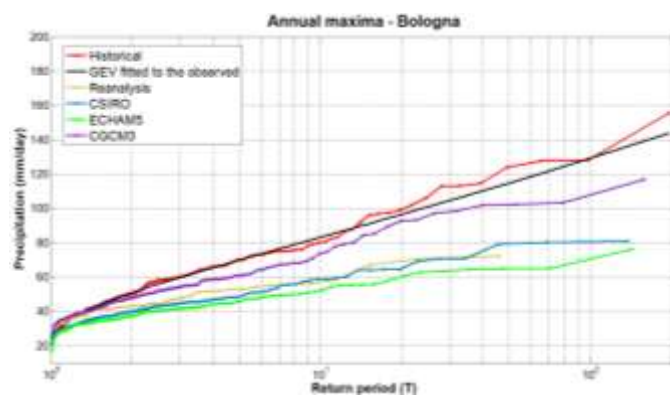
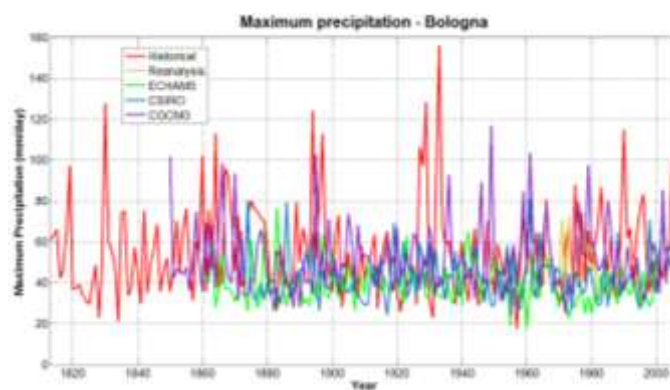
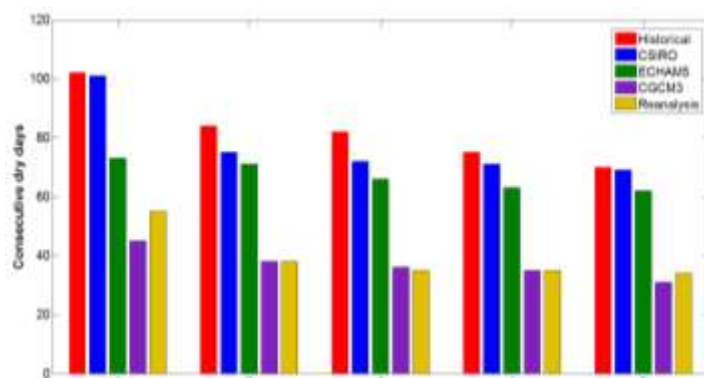


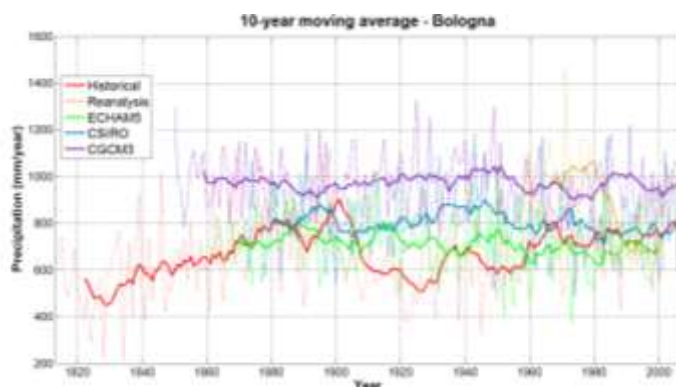
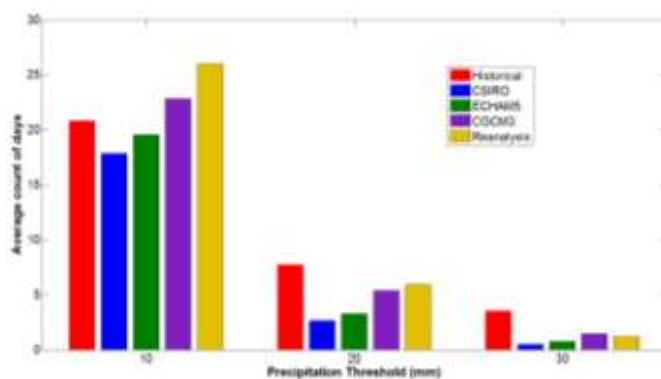
Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	-0.01	-0.01	0.02	0.00
Efficiency	-	-0.70	-0.71	-0.71	-0.55
Average	1.91	2.85	2.33	2.63	1.98
Standard Deviation	5.10	4.10	4.29	4.33	3.94
Skewness	5.18	2.21	2.90	3.86	2.87
Probability dry	0.75	0.50	0.63	0.50	0.65
H daily	0.54	0.64	0.56	0.60	0.63
H annual	0.38	0.55	0.72	0.43	-
H monthly	0.48	0.43	0.45	0.35	0.53
SDII	7.40	5.51	6.13	4.95	5.71
Prec90p	16.80	11.57	12.77	10.40	11.94
<b>GEV <math>\kappa</math></b>	0.16	-	-	-	-
<b>GEV <math>\psi</math></b>	0.30	-	-	-	-
<b>GEV <math>\lambda</math></b>	36.36	-	-	-	-
H maxima	0.64	0.58	0.37	0.18	
Correlation maxima	-	0.10	0.04	0.08	0.40
Efficiency maxima	-	-0.38	-1.15	-0.56	-4.90

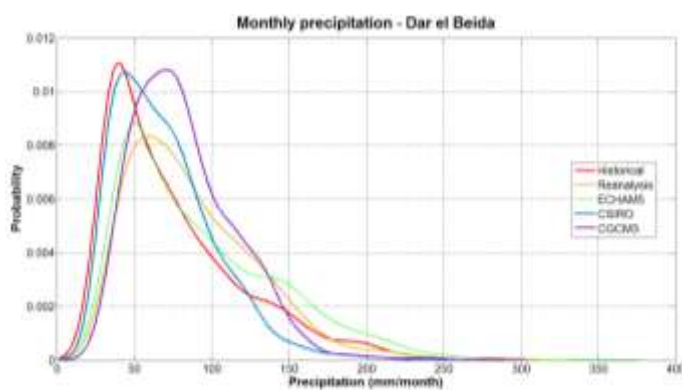
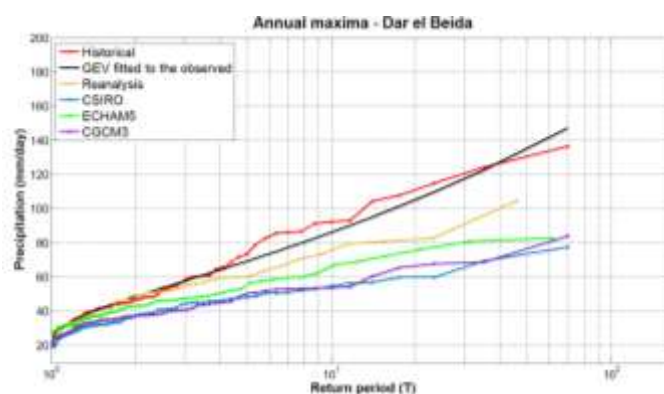
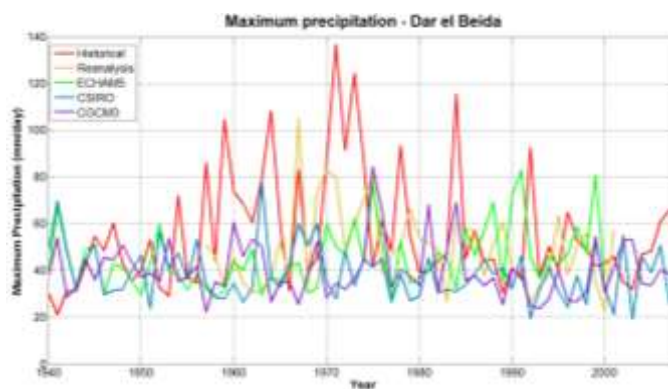
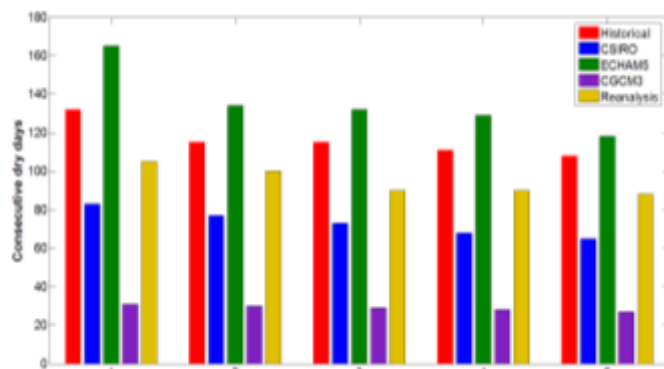
3) Bologna

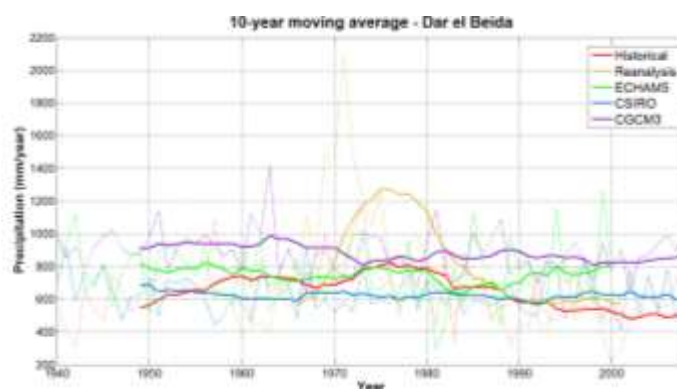
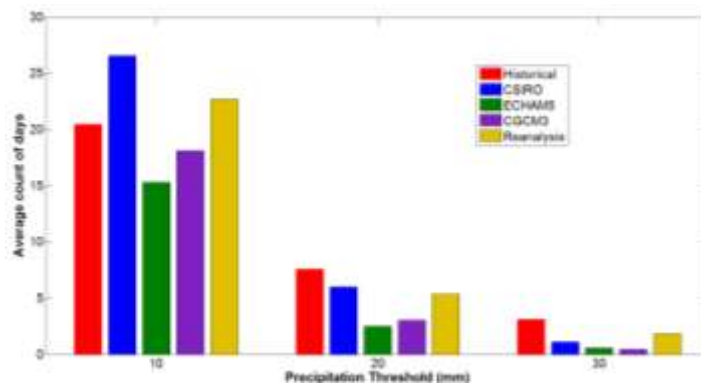




	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.01	0.01	-0.01	-0.01
Efficiency	-	-0.53	-0.48	-0.71	-0.77
Average	1.82	2.20	1.95	2.67	2.39
Standard Deviation	5.93	4.12	3.88	4.67	4.76
Skewness	6.27	3.53	3.40	4.16	3.30
Probability dry	0.81	0.62	0.67	0.53	0.64
H daily	0.56	0.68	0.59	0.58	0.62
H annual	0.79	0.52	0.52	0.29	-
H monthly	0.64	0.36	0.50	0.40	0.69
SDII	9.45	5.46	5.59	5.25	6.40
Prec90p	21.60	11.69	11.88	11.71	14.49
<b>GEV κ</b>	0.06	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.35	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	45.22	-	-	-	-
H maxima	0.50	0.58	0.59	0.51	
Correlation maxima	-	-0.09	-0.02	-0.01	-0.22
Efficiency maxima	-	-2.41	-2.31	-1.85	-5.20

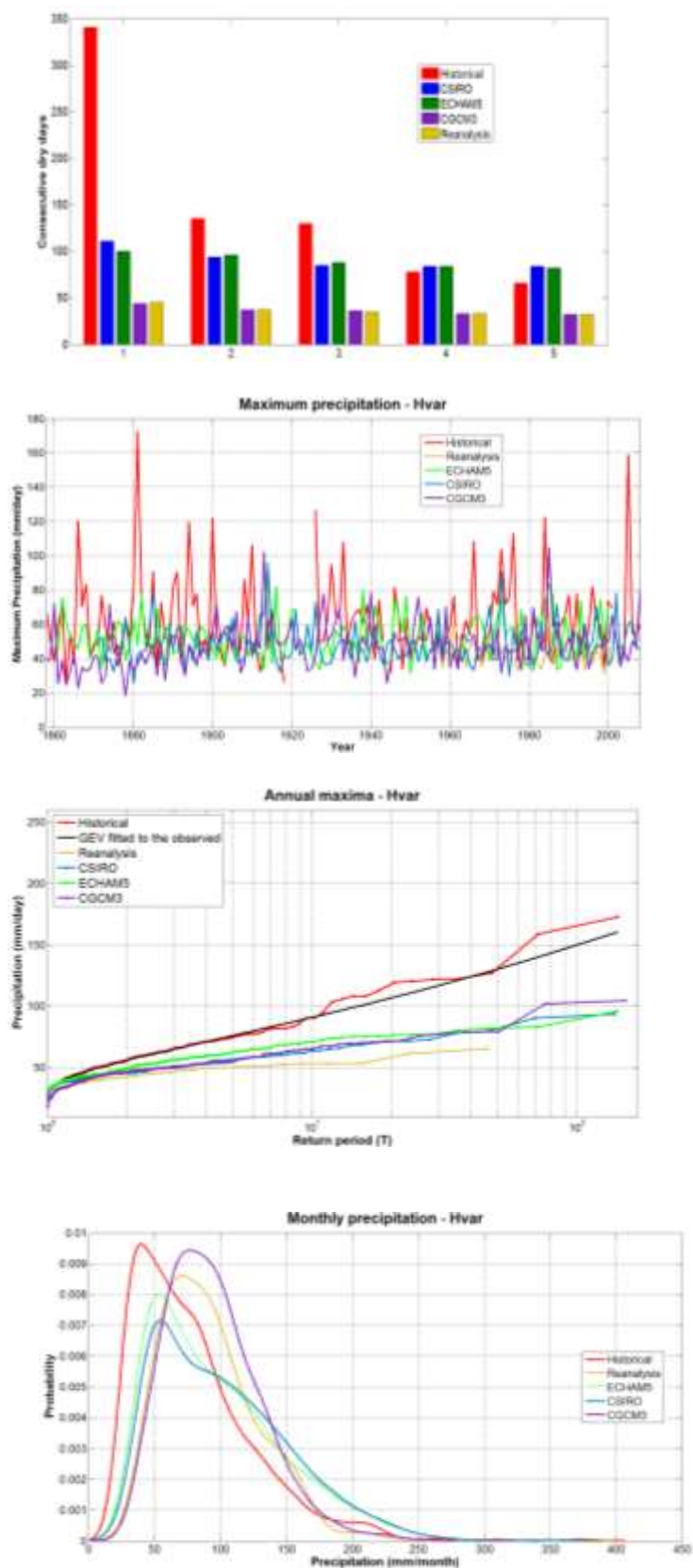
4) Dar el Beida

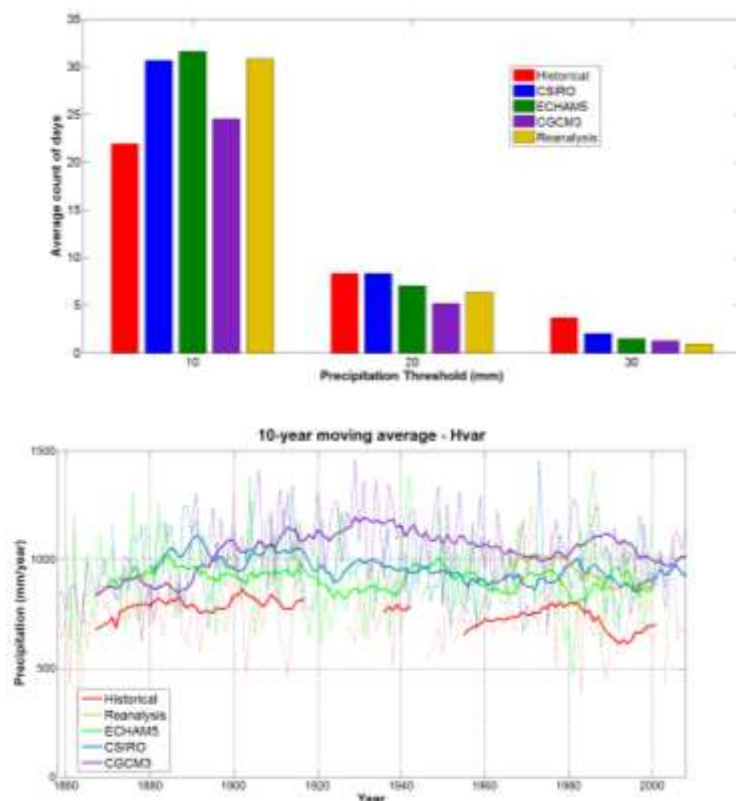




	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.04	0.05	0.01	0.08
Efficiency	-	-0.26	-0.58	-0.41	-0.81
Average	1.82	1.73	2.10	2.43	2.08
Standard Deviation	6.03	3.67	4.83	3.87	4.88
Skewness	6.57	3.96	3.51	3.45	4.29
Probability dry	0.81	0.69	0.74	0.52	0.71
H daily	0.66	0.66	0.73	0.59	0.72
H annual	0.79	0.56	0.51	0.63	-
H monthly	0.47	0.26	0.36	0.52	0.82
SDII	9.61	5.23	7.62	4.71	6.97
Prec90p	22.00	11.42	16.91	10.12	14.87
<b>GEV κ</b>	0.22	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.34	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	43.01	-	-	-	-
H maxima	0.65	0.34	0.72	0.49	
Correlation maxima	-	-0.21	-0.06	-0.10	0.01
Efficiency maxima	-	-0.86	-0.87	-0.71	-1.45

5) Hvar

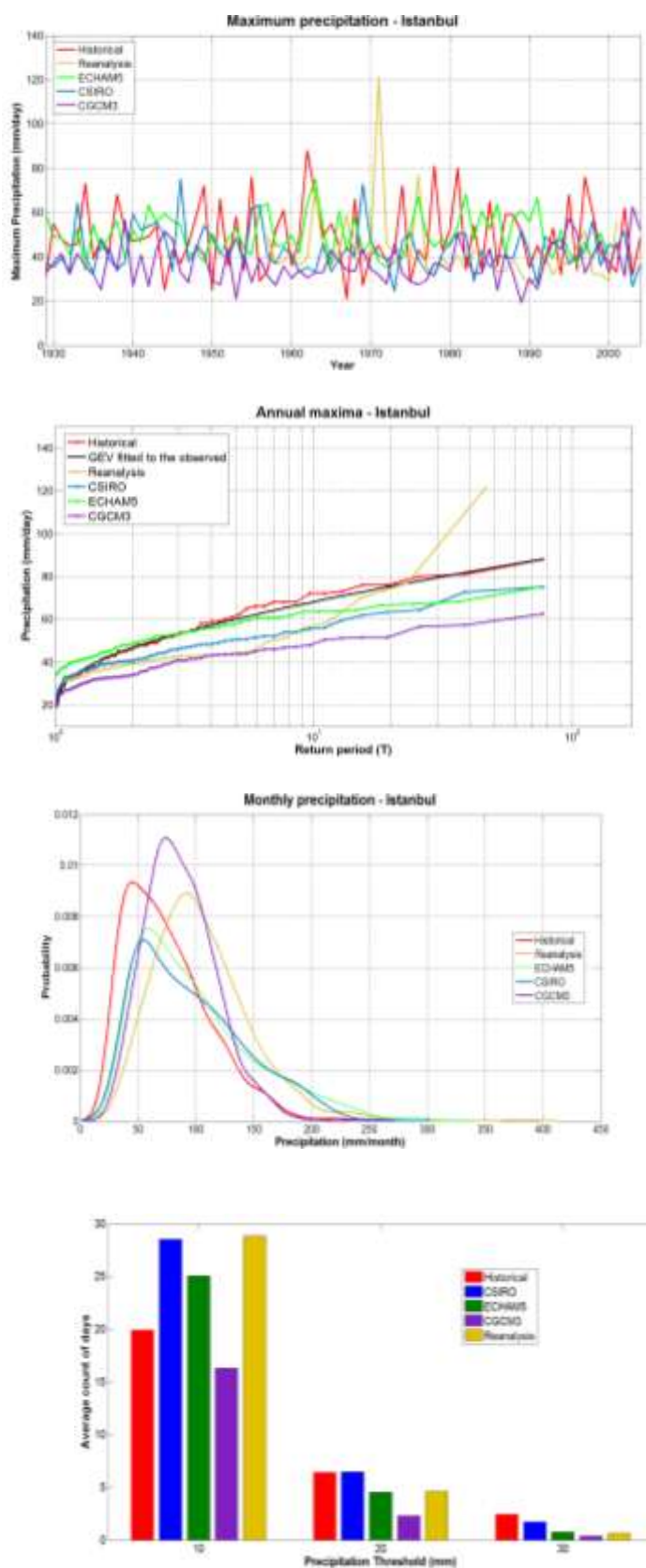




	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.03	0.03	0.00	0.02
Efficiency	-	-0.49	-0.64	-0.53	-0.57
Average	1.87	2.63	2.41	2.92	2.58
Standard Deviation	6.33	5.18	5.32	4.53	4.94
Skewness	6.72	3.12	3.50	3.48	2.81
Probability dry	0.80	0.65	0.71	0.47	0.64
H daily	0.65	0.72	0.69	0.59	0.64
H annual	0.70	0.66	0.37	0.90	-
H monthly	0.69	0.20	0.32	0.61	0.25
SDII	9.84	7.14	7.76	5.48	7.02
Prec90p	22.10	16.09	17.81	11.82	15.38
<b>GEV κ</b>	0.14	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.31	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	68.94	-	-	-	-
H maxima	0.57	0.41	0.35	0.67	-
Correlation maxima	-	0.09	0.06	-0.15	-0.17
Efficiency maxima	-	-1.05	-0.77	-0.82	-4.73

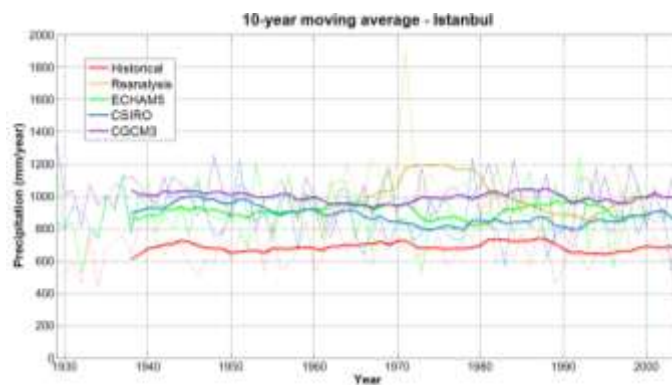


6) Istanbul



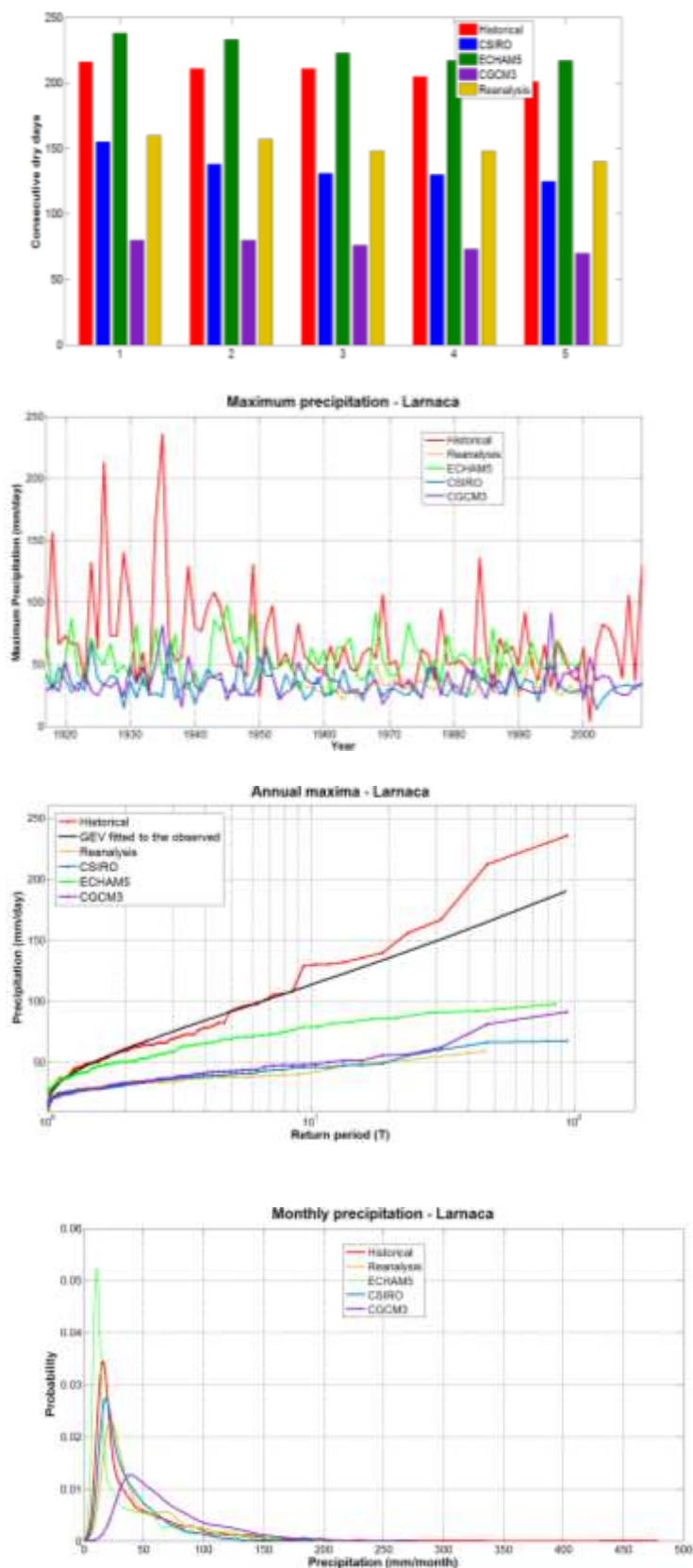


Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων

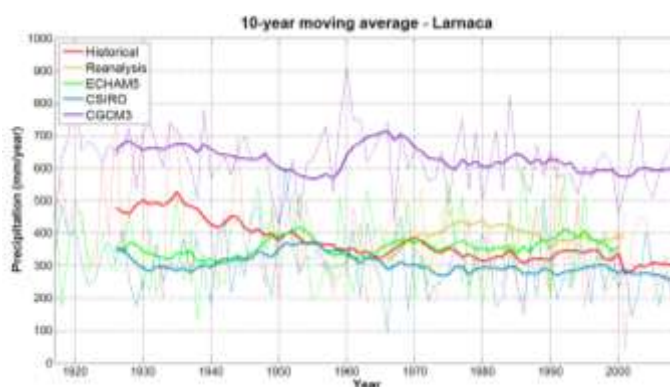
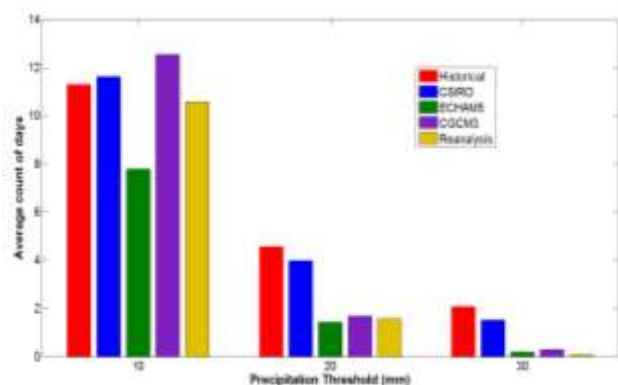


	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	-0.01	0.01
Efficiency	-	-0.47	-0.57	-0.32	-0.47
Average	5.50	2.41	2.48	2.74	2.78
Standard Deviation	8.12	4.54	5.08	3.57	4.71
Skewness	3.20	3.14	3.31	3.14	3.18
H daily	0.65	0.77	0.74	0.61	0.68
H annual	0.61	0.43	0.47	0.54	-
H monthly	0.24	0.15	0.25	0.39	0.54
SDII	8.84	6.19	7.10	4.15	5.93
Prec90p	19.00	13.55	15.89	8.53	13.12
<b>GEV κ</b>	-0.09	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.30	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	57.71	-	-	-	-
H maxima	0.52	0.40	0.68	0.66	
Correlation maxima	-	-0.10	-0.14	-0.05	-0.04
Efficiency maxima	-	-0.69	-0.98	-1.03	-4.91

7) Larnaca

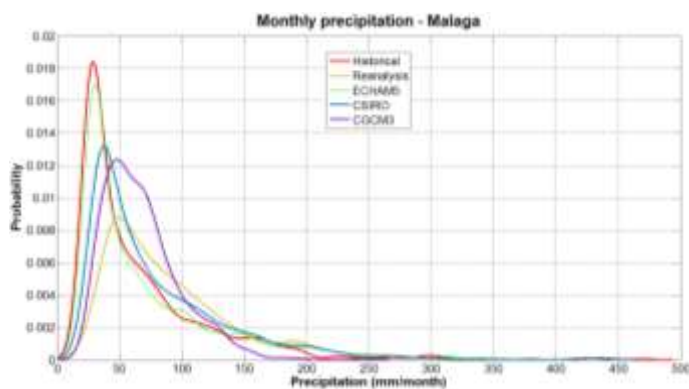
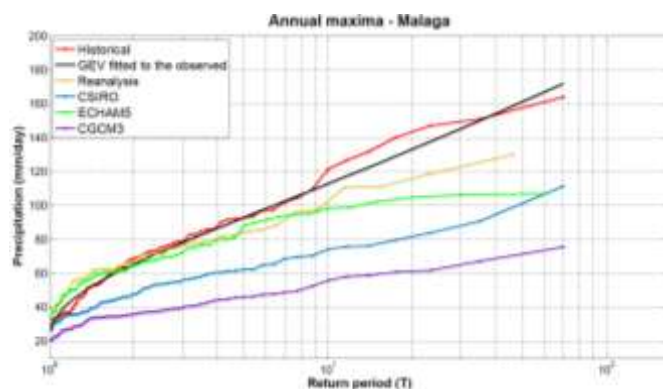
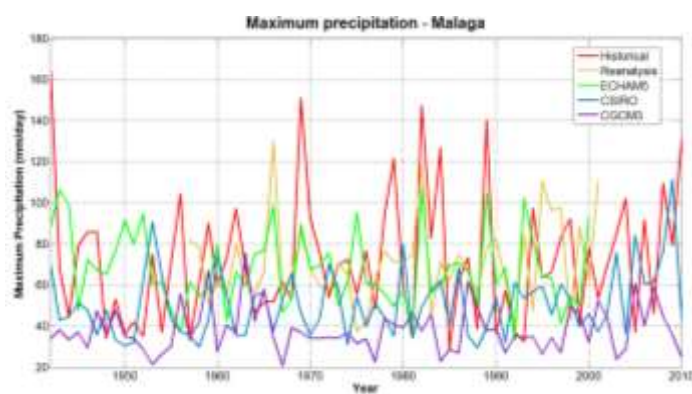
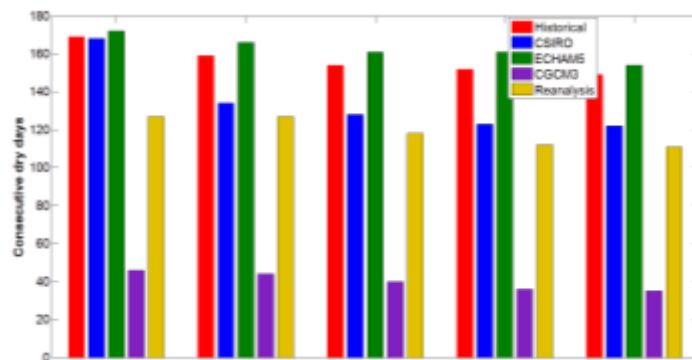


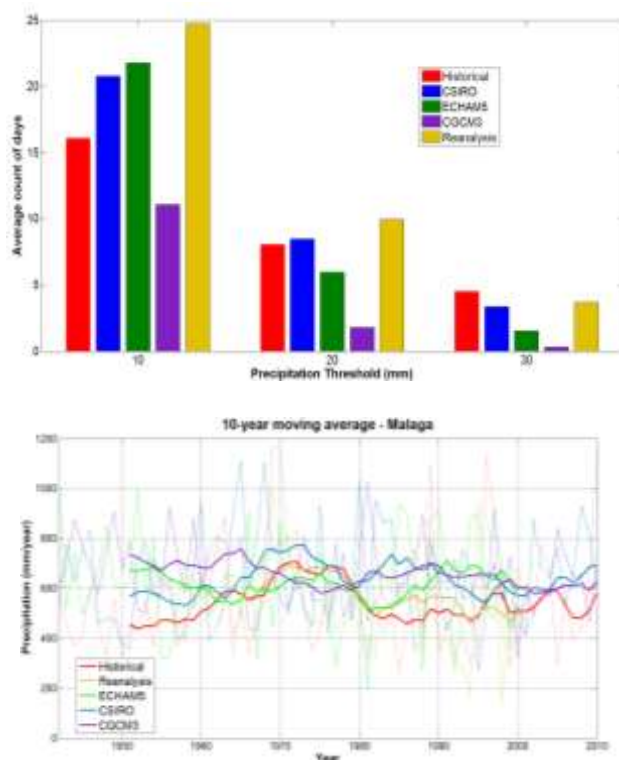
Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.04	0.05	0.07	0.04
Efficiency	-	-0.29	-0.74	-0.46	-0.07
Average	1.02	0.84	0.96	1.75	1.05
Standard Deviation	4.79	2.76	4.01	3.31	3.03
Skewness	10.31	5.56	6.70	4.02	4.44
Probability dry	0.89	0.86	0.89	0.65	0.82
H daily	0.69	0.67	0.69	0.76	0.75
H annual	0.67	0.60	0.33	0.59	-
H monthly	0.39	0.44	0.21	0.14	0.11
SDII	9.26	5.62	8.71	4.46	5.68
Prec90p	21.00	12.57	20.05	9.88	12.54
<b>GEV κ</b>	0.09	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.47	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	52.26	-	-	-	-
H maxima	0.69	0.60	0.23	0.40	
Correlation maxima	-	0.02	-0.05	0.15	-0.17
Efficiency maxima	-	-0.94	-0.65	-0.79	-1.88

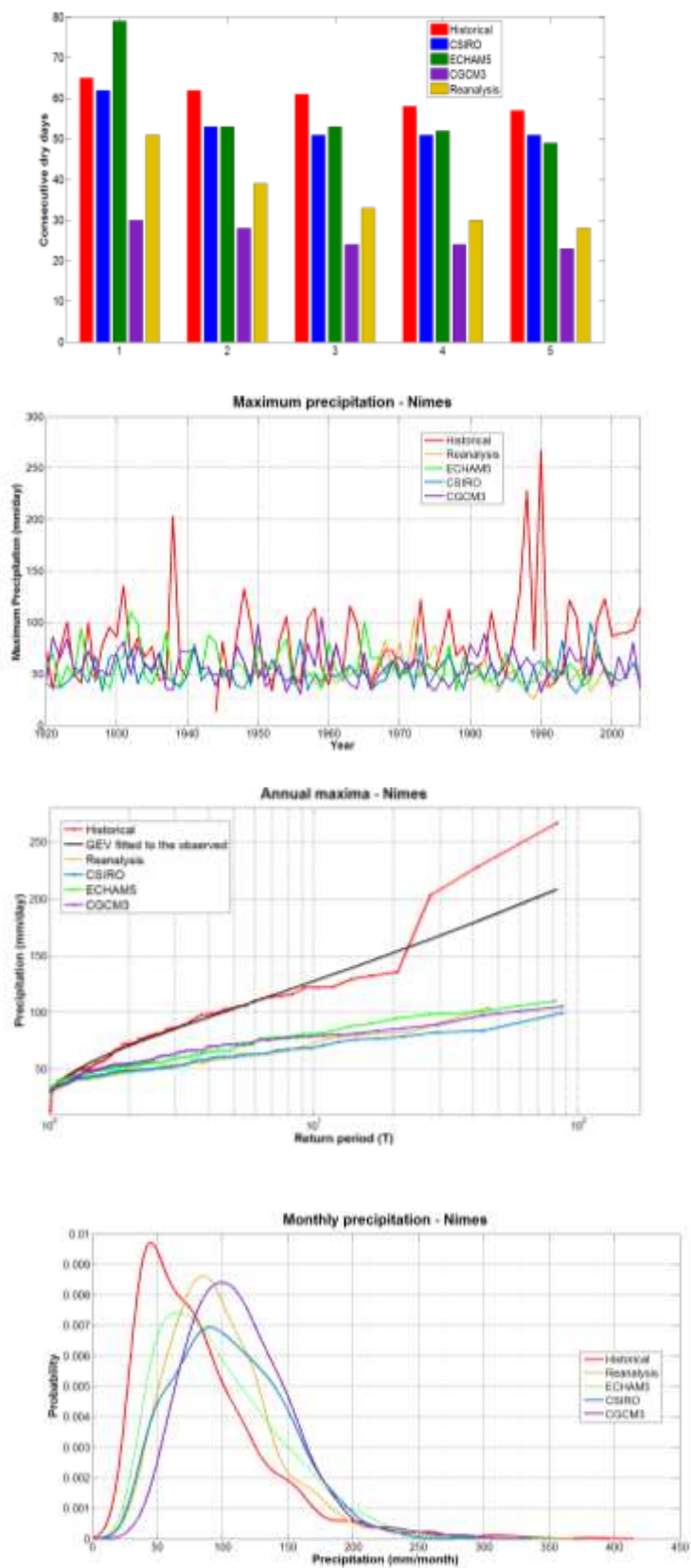
8) Malaga



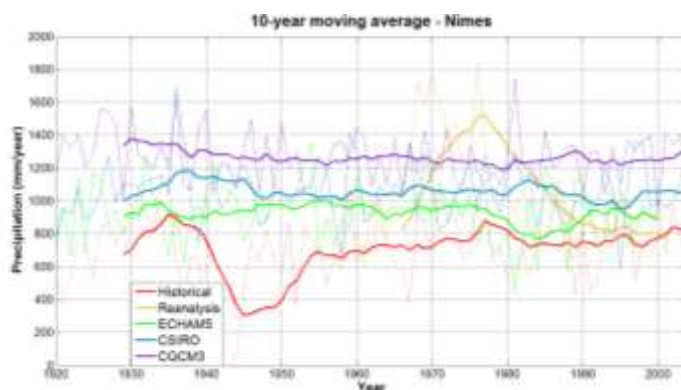
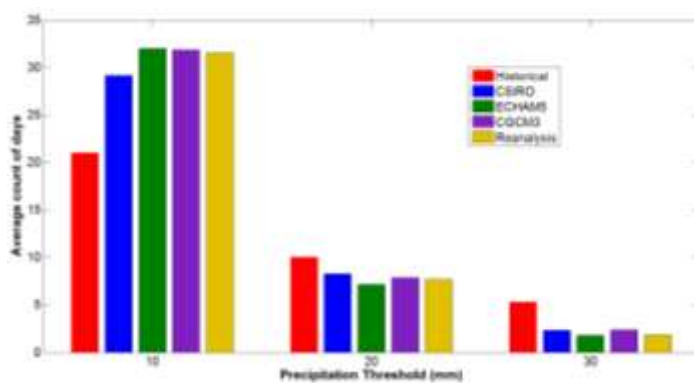


	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.05	0.03	0.03	0.03
Efficiency	-	-0.40	-0.58	-0.20	-0.78
Average	1.50	1.76	1.69	1.80	1.56
Standard Deviation	6.89	4.78	5.63	3.26	6.32
Skewness	8.50	4.42	5.28	4.17	4.99
Probability dry	0.89	0.78	0.83	0.62	0.82
H daily	0.64	0.73	0.71	0.65	0.63
H annual	0.46	0.40	0.24	0.49	-
H monthly	0.48	0.34	0.32	0.46	0.28
SDII	12.98	7.83	9.96	4.24	10.48
Prec90p	31.60	17.88	23.93	9.02	23.87
<b>GEV κ</b>	0.08	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.40	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	56.83	-	-	-	-
H maxima	0.45	0.40		0.73	
Correlation maxima	-	0.03	0.14	-0.05	0.04
Efficiency maxima	-	-0.70	-1.14	-1.35	-2.16

9) Nimes

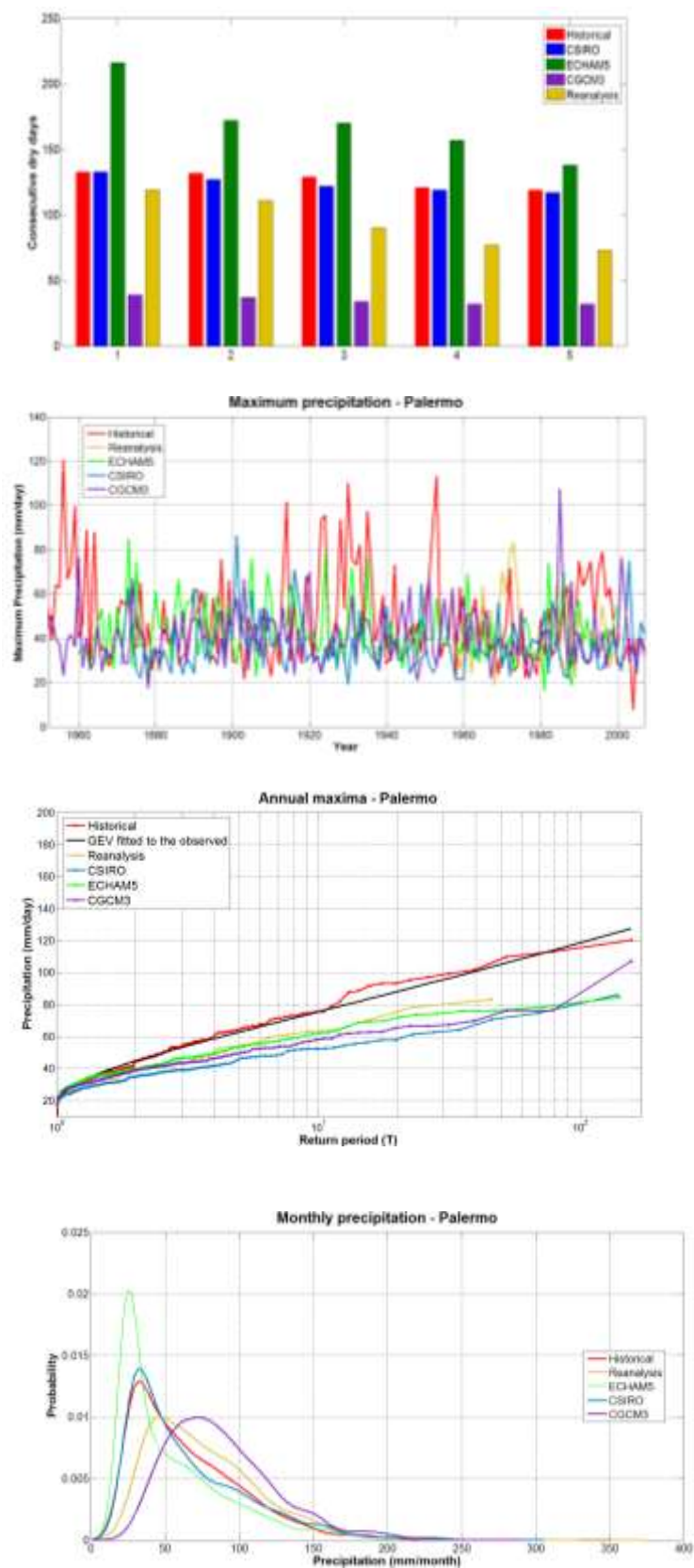


Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



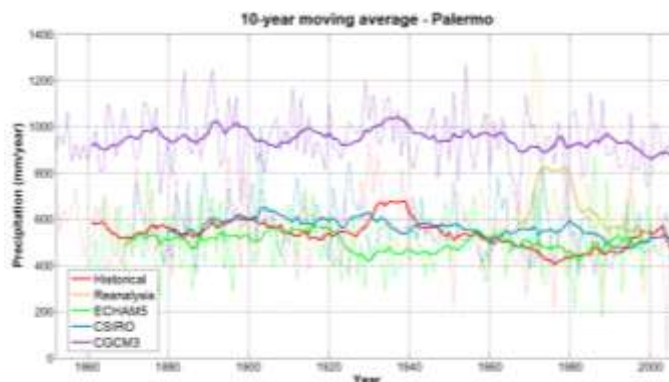
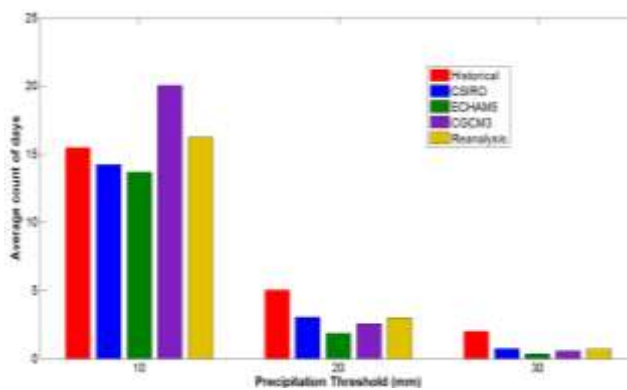
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	0.01	0.01
Efficiency	-	-0.35	-0.47	-0.49	-0.48
Average	2.07	2.90	2.52	3.48	2.76
Standard Deviation	7.87	5.27	5.48	5.39	5.34
Skewness	8.60	3.18	3.84	3.60	3.34
Probability dry	0.83	0.59	0.67	0.42	0.62
H daily	0.59	0.66	0.66	0.58	0.68
H annual	0.85	0.29	0.59	0.50	-
H monthly	0.72	0.45	0.39	0.33	0.84
SDII	11.68	6.84	7.30	5.73	7.06
Prec90p	28.20	14.93	16.70	12.55	15.49
<b>GEV κ</b>	0.10	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.44	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	60.70	-	-	-	-
H maxima	0.70	0.45	0.21	0.49	
Correlation maxima	-	-0.10	-0.15	-0.07	-0.10
Efficiency maxima	-	-0.63	-0.79	-0.49	-1.95

10)Palermo



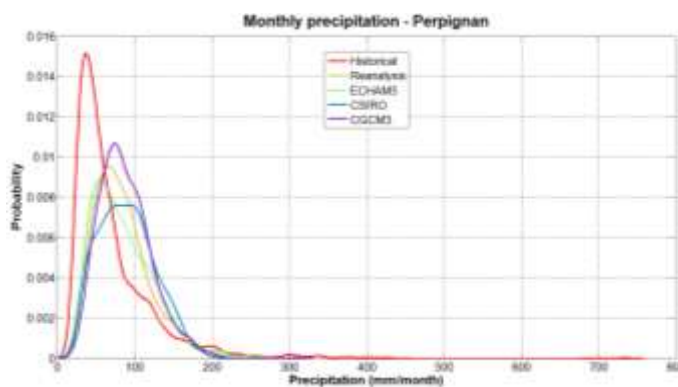
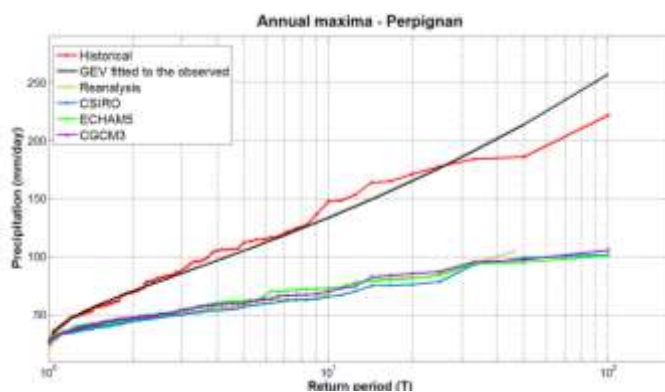
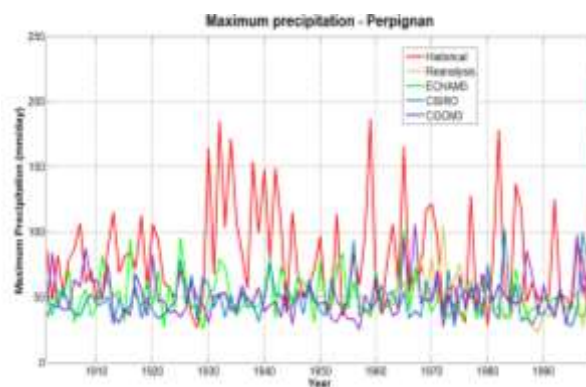
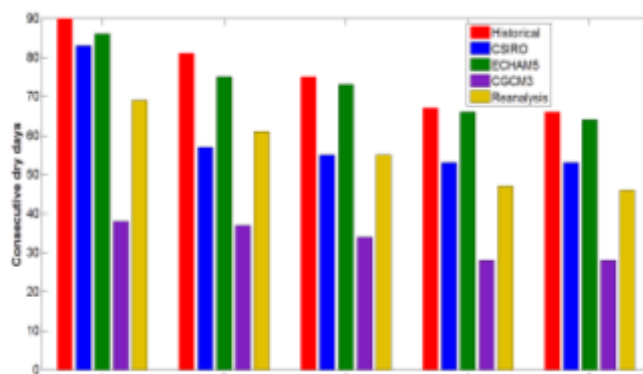


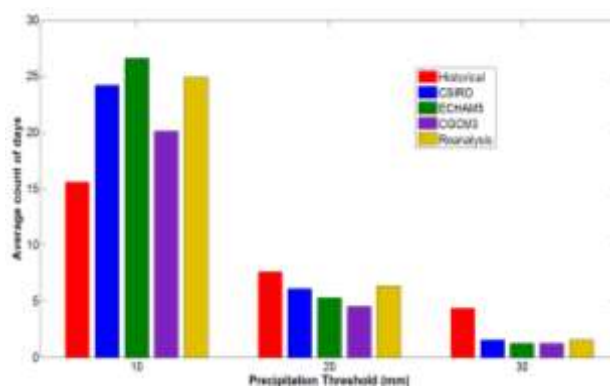
Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.06	0.05	0.03	0.03
Efficiency	-	-0.43	-0.60	-0.48	-0.35
Average	1.58	1.74	1.58	2.05	1.47
Standard Deviation	5.24	3.69	4.06	3.57	3.85
Skewness	7.05	3.84	4.48	3.86	4.98
Probability dry	0.81	0.69	0.77	0.59	0.77
H daily	0.64	0.72	0.68	0.62	0.73
H annual	0.70	0.53	0.53	0.67	-
H monthly	0.39	0.23	0.27	0.34	0.50
SDII	7.79	5.11	6.32	4.88	5.77
Prec90p	17.50	11.47	14.11	10.44	12.40
<b>GEV κ</b>	0.06	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.39	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	53.75	-	-	-	-
H maxima	0.68	0.46	0.65	0.43	
Correlation maxima	-	-0.21	0.19	-0.09	-0.07
Efficiency maxima	-	-1.62	-0.85	-0.64	-4.32

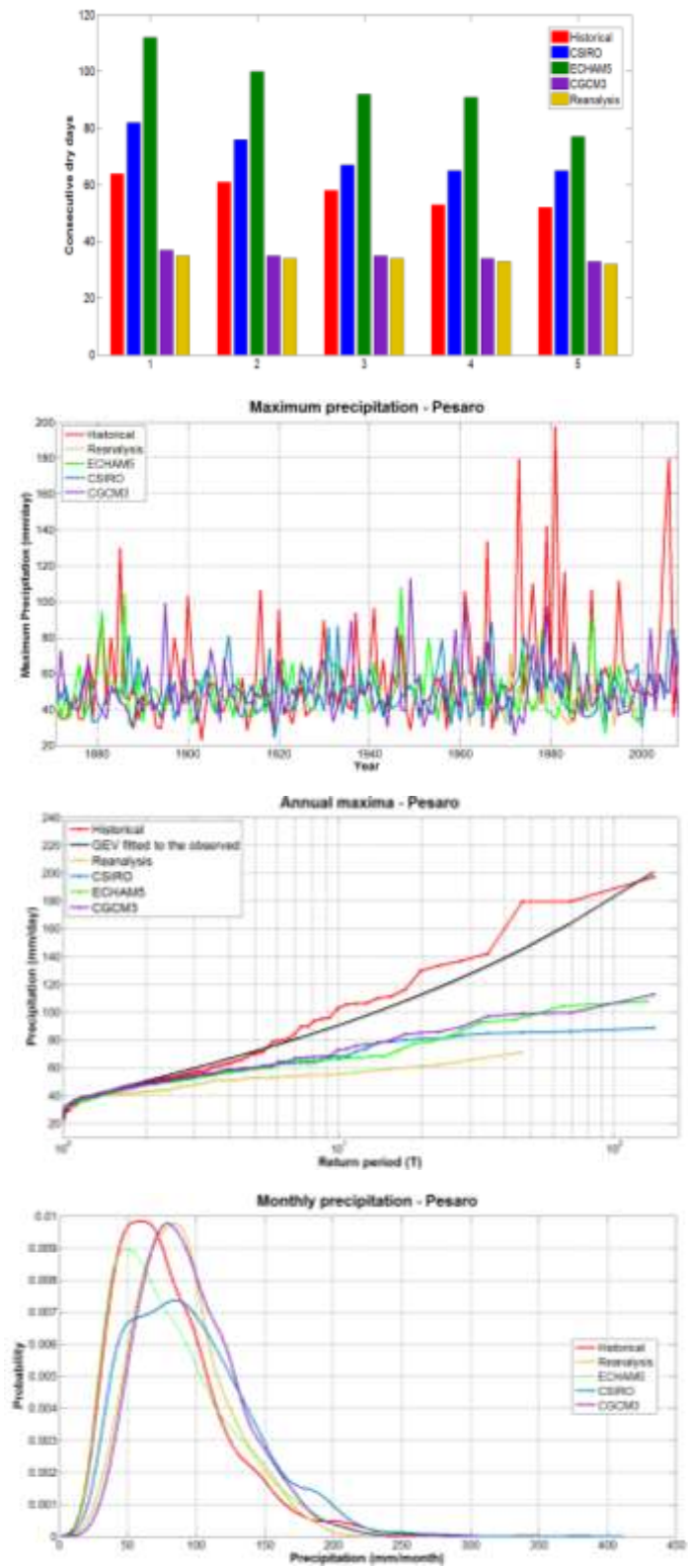
11)Perpignan

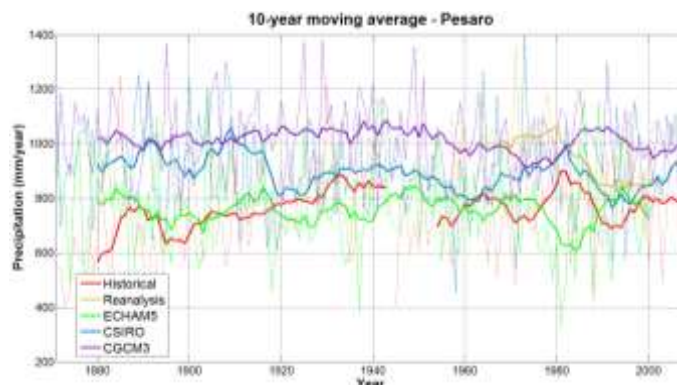
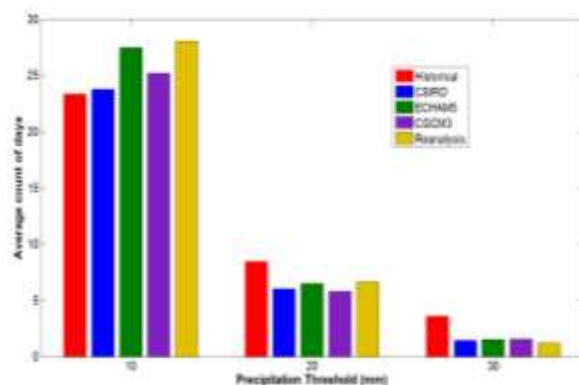




	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	0.01	0.00
Efficiency	-	-0.42	-0.44	-0.35	-0.43
Average	1.66	2.46	2.22	2.59	2.25
Standard Deviation	7.45	4.80	4.92	4.40	4.93
Skewness	9.70	3.45	4.00	4.23	3.81
Probability dry	0.85	0.64	0.69	0.51	0.69
H daily	0.55	0.65	0.65	0.56	0.69
H annual	0.59	0.40	0.34	0.71	-
H monthly	0.51	0.49	0.36	0.56	0.85
SDII	10.72	6.57	6.88	4.92	6.93
Prec90p	26.22	14.30	15.31	10.71	15.41
<b>GEV κ</b>	0.21	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.42	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	82.96	-	-	-	-
H maxima	0.64	0.33	0.45	0.56	
Correlation maxima	-	-0.08	0.15	-0.02	-0.04
Efficiency maxima	-	-0.88	-0.58	-0.75	-2.71

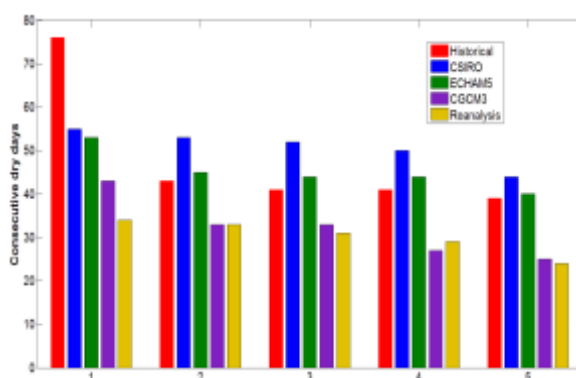
12) Pesaro



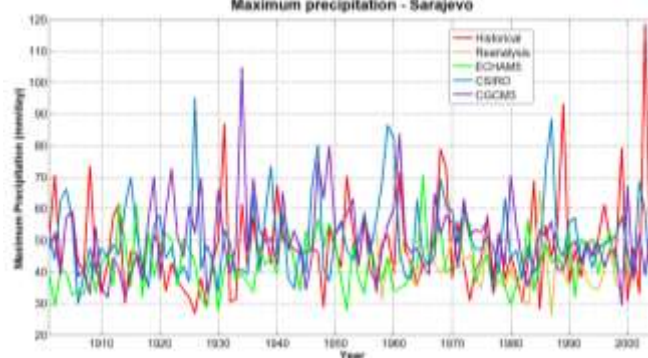


	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.01	0.01	0.00	0.00
Efficiency	-	-0.62	-0.55	-0.60	-0.77
Average	2.46	2.46	2.08	2.77	2.59
Standard Deviation	5.04	5.04	4.86	4.84	4.94
Skewness	3.50	3.50	3.97	3.81	3.08
Probability dry	0.78	0.66	0.72	0.53	0.62
H daily	0.57	0.64	0.66	0.58	0.59
H annual	0.62	0.55	0.58	0.26	-
H monthly	0.60	0.39	0.38	0.39	0.41
SDII	9.16	6.94	7.12	5.60	6.57
Prec90p	20.80	15.26	16.03	12.58	14.89
<b>GEV κ</b>	0.28	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.33	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	44.70	-	-	-	-
H maxima	0.58	0.46	0.40	0.40	
Correlation maxima	-	0.06	-0.02	0.11	0.06
Efficiency maxima	-	-0.22	-0.66	-0.20	-2.31

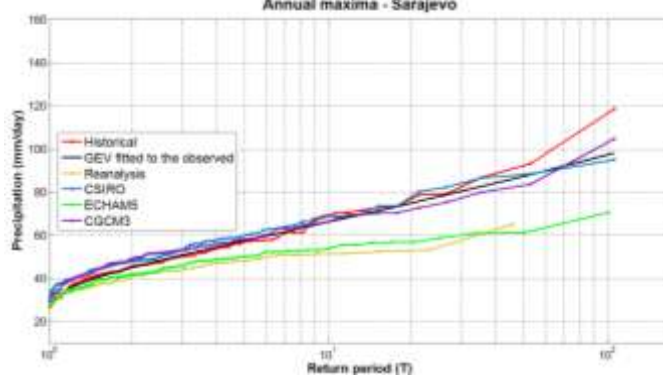
13) Sarajevo



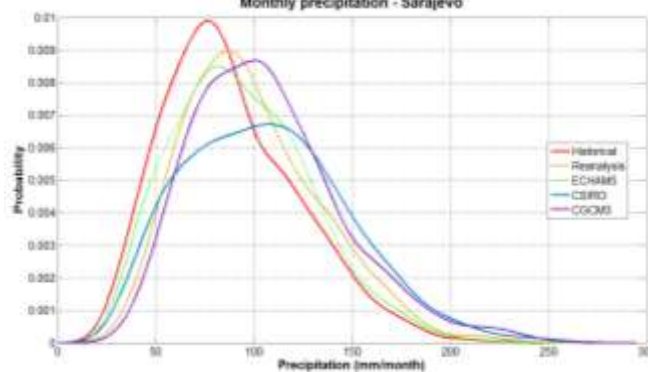
Maximum precipitation - Sarajevo



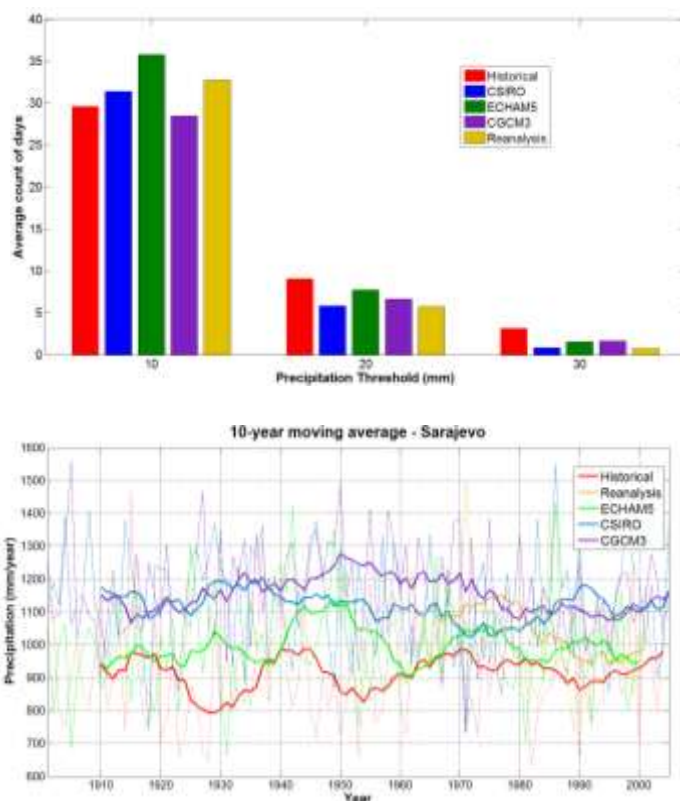
Annual maxima - Sarajevo



Monthly precipitation - Sarajevo

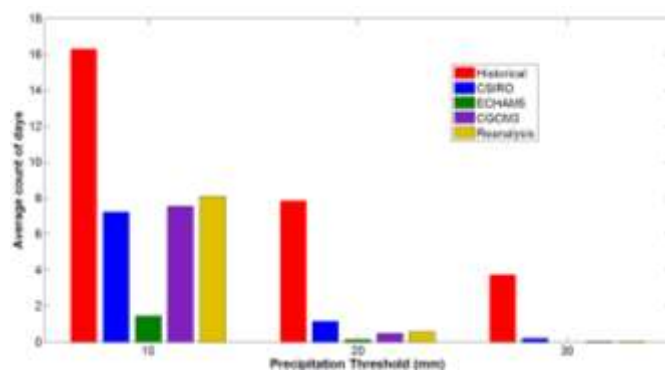
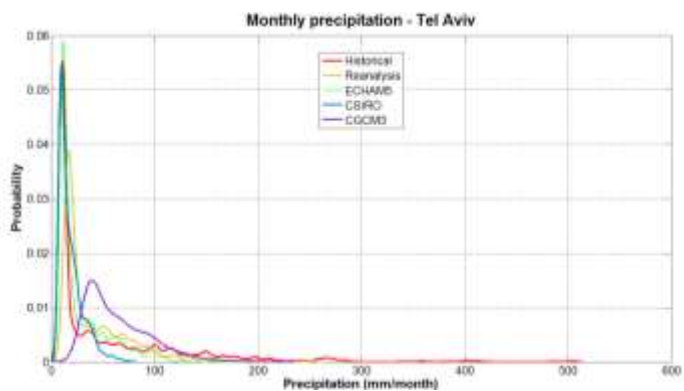
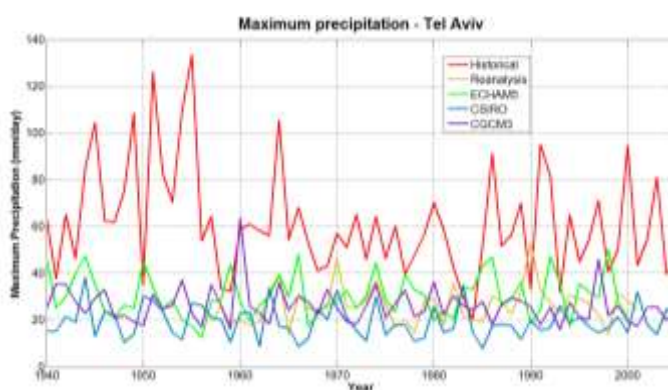
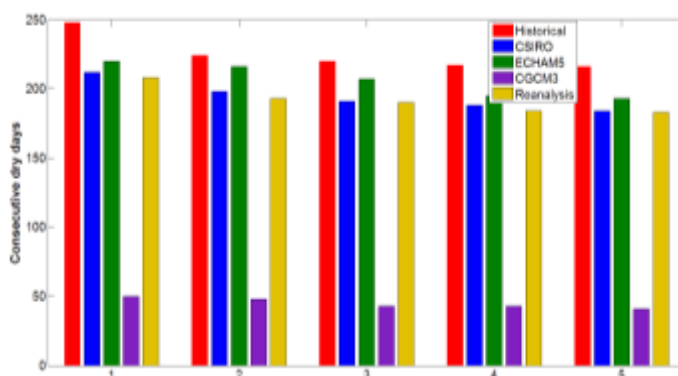


Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



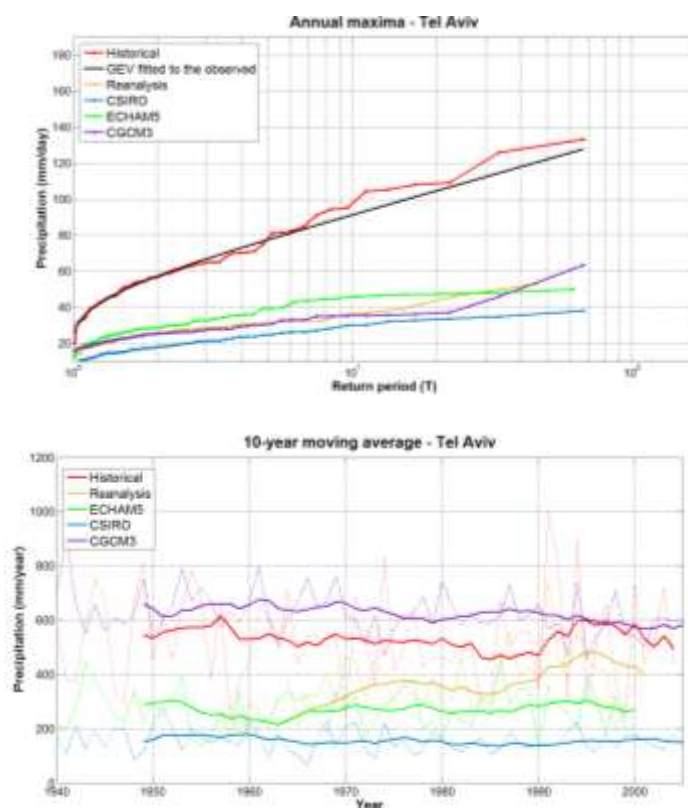
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	0.00	-0.01
Efficiency	-	-0.82	-0.07	-0.71	-0.75
Average	2.51	3.08	2.72	3.17	2.86
Standard Deviation	5.96	5.42	4.91	5.00	4.92
Skewness	4.23	2.90	2.73	3.31	2.53
Probability dry	0.70	0.58	0.61	0.47	0.59
H daily	0.56	0.68	0.60	0.59	0.62
H annual	0.45	0.58	0.55	0.62	-
H monthly	0.46	0.32	0.50	0.45	0.38
SDII	8.18	7.13	6.78	5.67	6.75
Prec90p	18.40	15.50	14.74	12.36	14.70
<b>GEV κ</b>	0.08	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.24	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	56.78	-	-	-	-
H maxima	0.46	0.63	0.64	0.56	
Correlation maxima	-	0.07	-0.10	0.03	0.01
Efficiency maxima	-	-0.65	-1.28	-0.68	-6.41

14) Tel Aviv



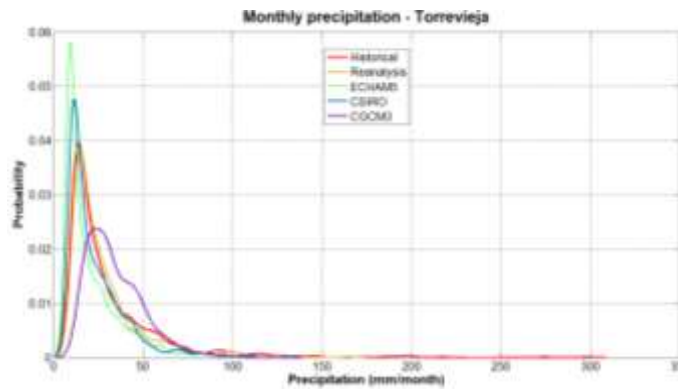
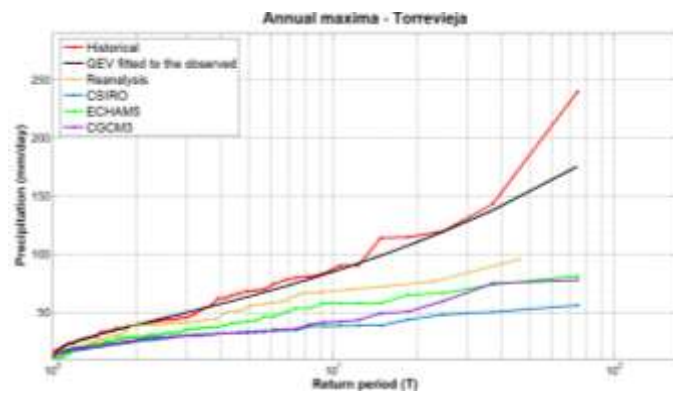
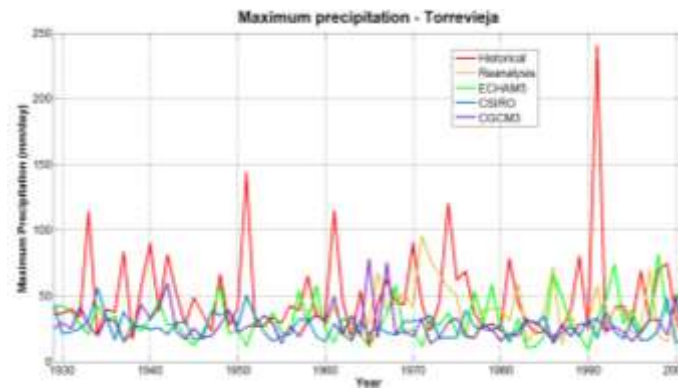
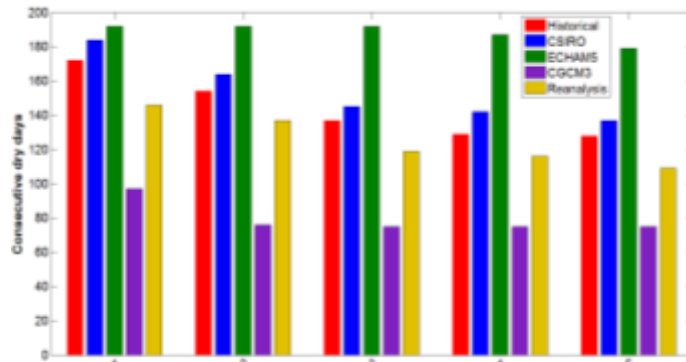


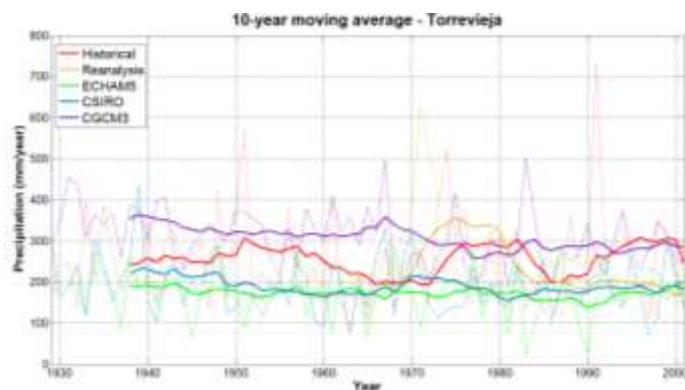
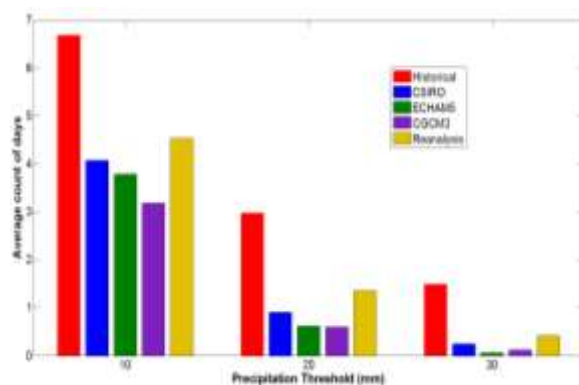
Στατιστική σύγκριση ακραίων παρατηρημένων θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων με τα αποτελέσματα κλιματικών μοντέλων



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.03	0.04	0.09	0.03
Efficiency	-	-0.06	-0.16	-0.11	-0.05
Average	1.46	0.43	0.74	1.72	0.99
Standard Deviation	6.19	1.37	2.58	2.65	2.61
Skewness	7.49	7.04	5.78	3.30	4.21
Probability dry	0.88	0.90	0.89	0.59	0.83
H daily	0.72	0.69	0.70	0.76	0.77
H annual	0.19	0.37	0.10	0.53	-
H monthly	0.13	0.33	0.32	0.21	0.28
SDII	11.86	3.32	5.93	3.69	5.27
Prec90p	27.62	6.72	13.03	7.83	11.12
<b>GEV κ</b>	0.02	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.35	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	50.76	-	-	-	-
H maxima	0.71	0.48	0.43	0.33	
Correlation maxima	-	-0.04	-0.09	0.13	0.21
Efficiency maxima	-	-3.43	-2.31	-2.33	-4.18

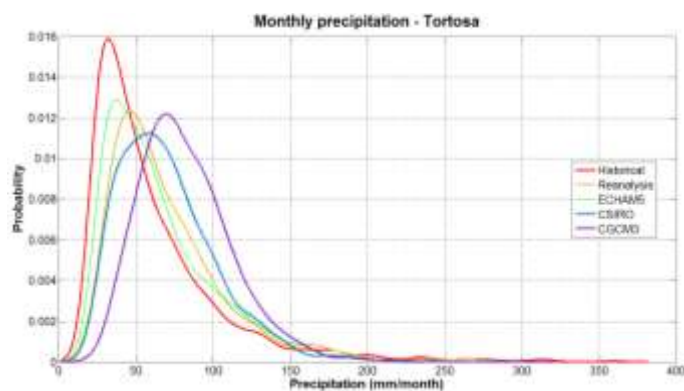
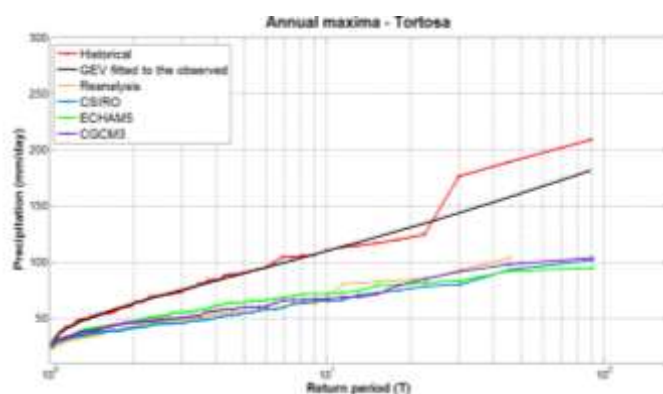
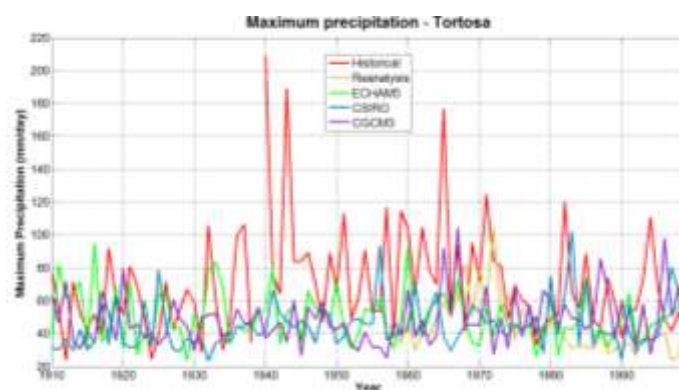
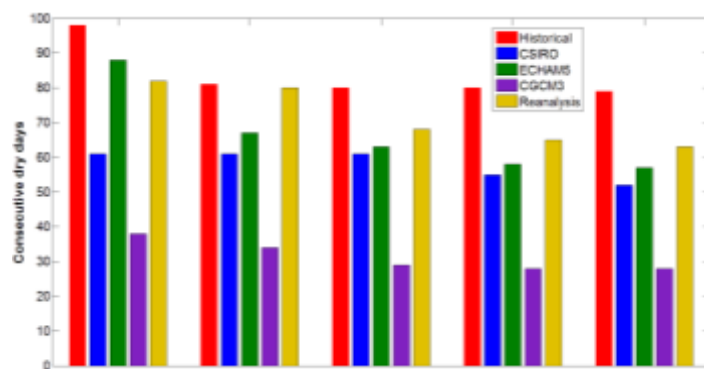
15)Torre Vieja

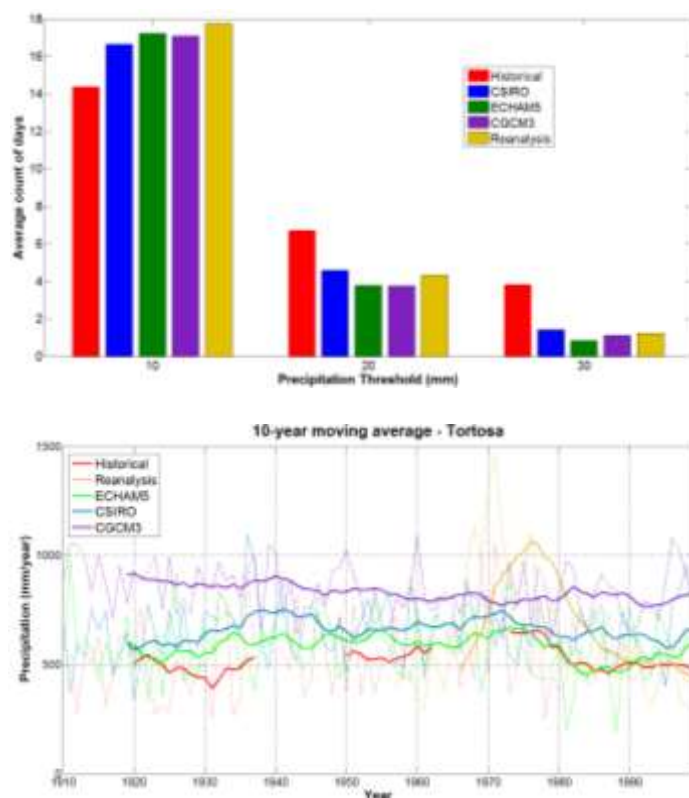




	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	0.02	0.01
Efficiency	-	-0.20	-0.26	-0.20	-0.37
Average	0.69	0.52	0.48	0.85	0.62
Standard Deviation	4.37	1.98	2.20	2.02	2.60
Skewness	17.05	6.88	9.18	7.36	9.70
Probability dry	0.92	0.90	0.92	0.80	0.88
H daily	0.57	0.65	0.62	0.66	0.64
H annual	0.62	0.42	0.24	0.54	-
H monthly	0.50	0.44	0.26	0.43	0.63
SDII	8.80	4.72	5.26	3.33	4.87
Prec90p	21.50	10.13	11.44	6.52	10.71
<b>GEV κ</b>	0.30	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.48	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	45.59	-	-	-	-
H maxima	0.55	0.48	0.61	0.68	
Correlation maxima	-	0.03	-0.14	0.10	0.04
Efficiency maxima	-	-0.48	-0.57	-0.42	-0.98

16) Tortosa





	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3	Reanalysis
Correlation	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Efficiency	-	-0.40	-0.46	-0.42	-0.49
Average	1.46	1.81	1.60	2.30	1.69
Standard Deviation	6.51	4.13	4.37	4.15	4.38
Skewness	9.57	4.28	5.00	4.48	4.70
Probability dry	0.86	0.71	0.77	0.55	0.75
H daily	0.54	0.58	0.60	0.56	0.71
H annual	0.37	0.36	0.67	0.63	-
H monthly	0.52	0.55	0.51	0.57	0.83
SDII	10.31	6.00	6.65	4.72	6.64
Prec90p	25.50	13.15	15.35	10.25	14.80
<b>GEV κ</b>	0.12	-	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.38	-	-	-	-
<b>GEV λ</b>	75.38	-	-	-	-
H maxima	0.59	0.65	0.55	0.65	
Correlation maxima	-	0.07	-0.08	-0.12	0.06
Efficiency maxima	-	-0.73	-0.67	-0.77	-2.80



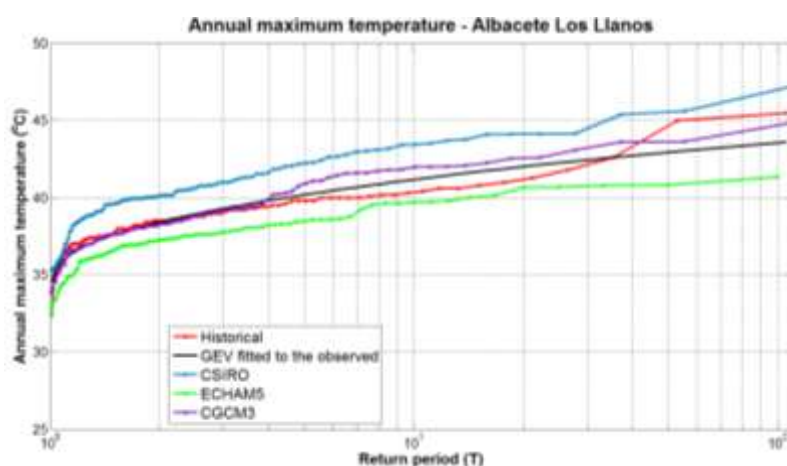
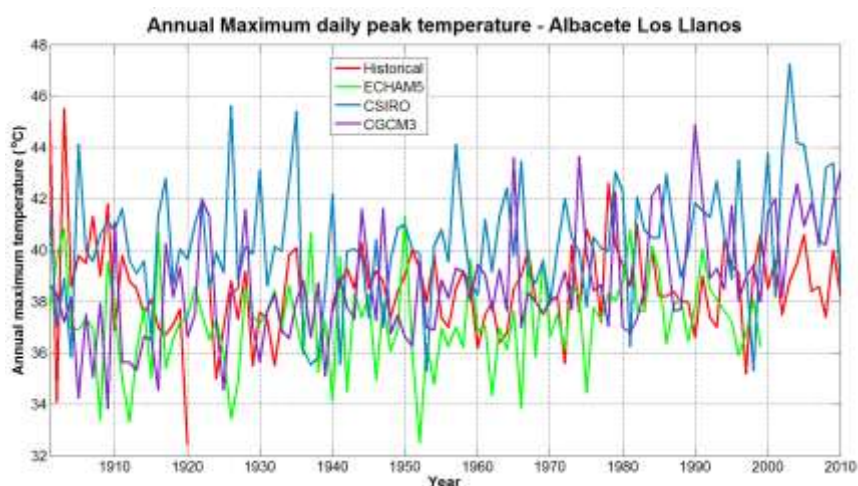
## **Παράρτημα Γ – Αποτελέσματα για τους σταθμούς με μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία**

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που προέκυψαν από την ανάλυση και τη στατιστική σύγκριση ανάμεσα στις ιστορικές παρατηρήσεις, τις εξόδους των κλιματικών μοντέλων και τα αποτελέσματα από τα Reanalysis data για τη μέγιστη θερμοκρασία στους εξεταζόμενους σταθμούς.

Παρουσιάζονται, κατά σειρά, τα εξής αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την ανάλυση:

- α) Χρονοσειρές των ακραίων ετησίων μεγίστων θερμοκρασιών.
- β) Η εμπειρική κατανομή των ακραίων ετησίων μεγίστων θερμοκρασιών και η προσαρμογή της Γενικευμένης κατανομής Ακραίων Τιμών στις παρατηρημένες τιμές.
- γ) Πίνακας με τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε σταθμό για τις ιστορικές και προσομοιωμένες τιμές.

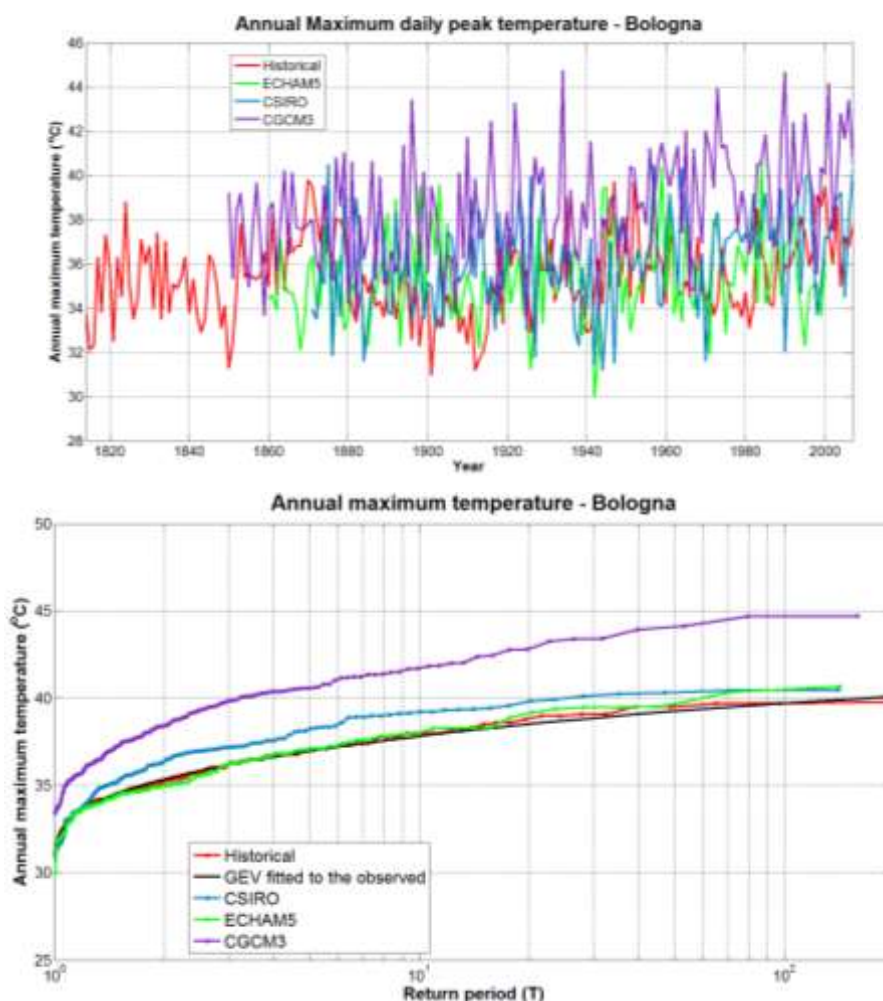
1) Albacete – Los Llanos



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	20.26	20.83	19.95	20.96
Standard Deviation	8.85	8.37	7.70	8.60
Skewness	0.16	0.33	0.24	0.25
Correlation	-	0.36	0.74	0.42
Efficiency	-	-0.20	0.55	-0.08
Correlation maxima	-	0.11	0.09	-0.03
Efficiency maxima	-	-2.32	-1.31	-1.50
<b>GEV <math>\kappa</math></b>	-0.17	-	-	-
<b>GEV <math>\psi</math></b>	0.05	-	-	-
<b>GEV <math>\lambda</math></b>	37.77	-	-	-
Hurst daily	0.91	0.89	0.90	0.90
Hurst maxima	0.71	0.65	0.61	0.76
Summer days	107.00	116.96	112.10	133.00
Icing days	0.29	0.08	0.00	0.00
90% - quantile	32.80	33.02	30.62	32.94
WSDI	1.55	2.00	1.83	1.71

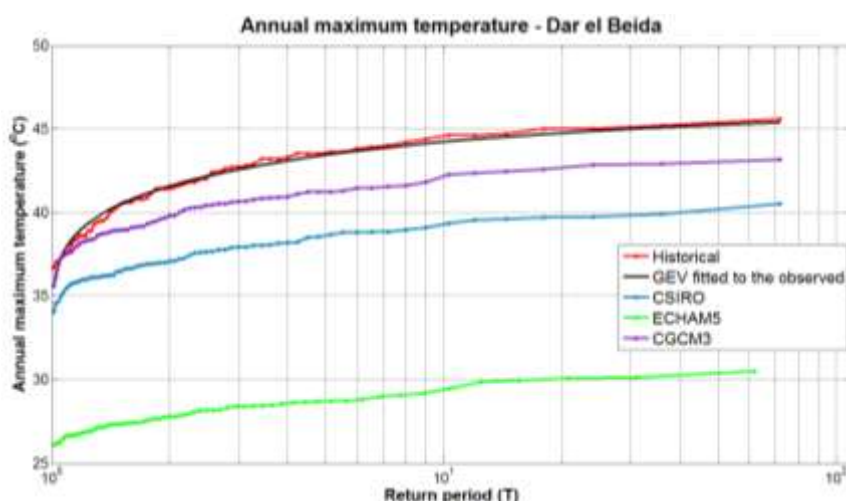
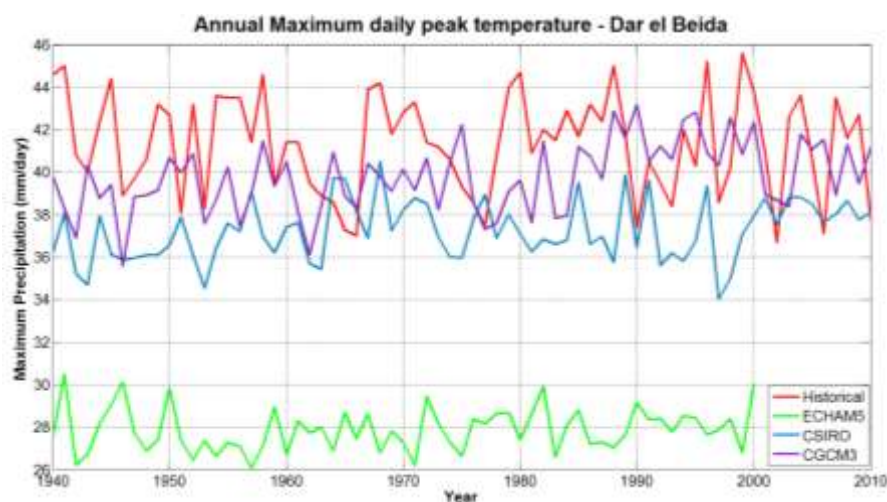


2) Bologna



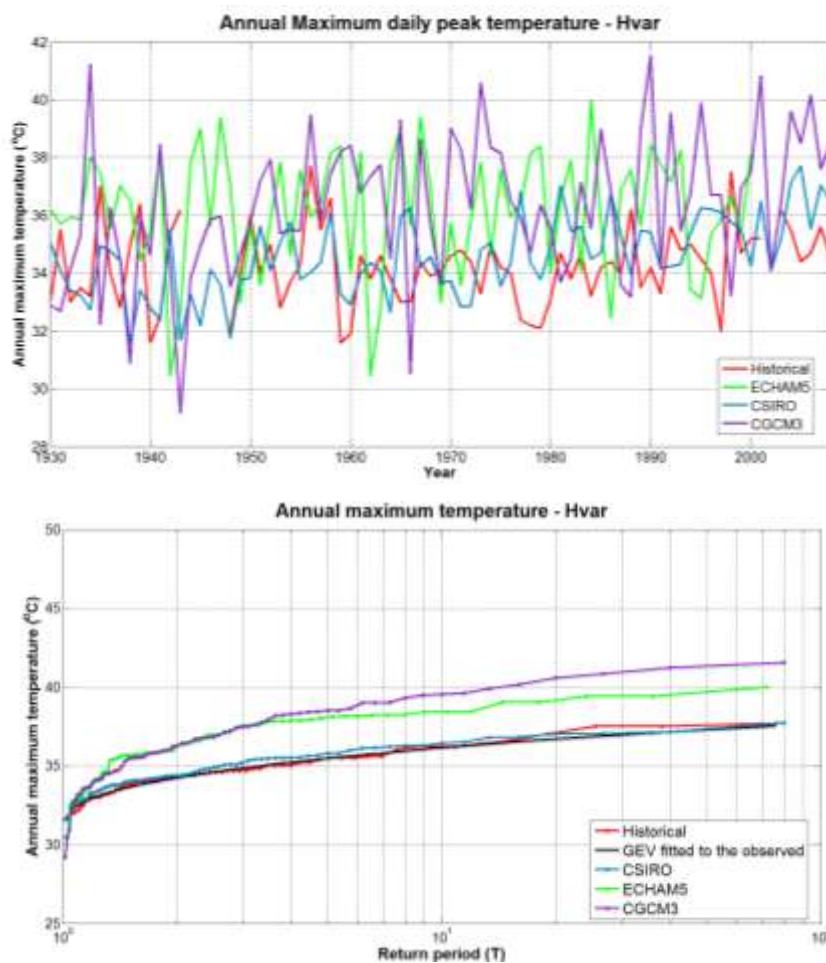
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	17.32	17.32	17.45	16.75
Standard Deviation	9.54	8.55	8.91	10.85
Skewness	-0.05	0.24	0.00	0.16
Correlation	-	0.80	0.83	0.81
Efficiency	-	0.68	0.56	0.68
Correlation maxima	-	0.01	0.02	0.10
Efficiency maxima	-	-1.53	-1.10	-4.14
<b>GEV <math>\kappa</math></b>	-0.23	-	-	-
<b>GEV <math>\psi</math></b>	0.05	-	-	-
<b>GEV <math>\lambda</math></b>	34.73	-	-	-
Hurst daily	0.82	0.86	0.86	0.68
Hurst maxima	0.82	0.68	0.58	0.68
Summer days	99.12	82.24	89.77	102.88
Icing days	4.53	1.90	6.26	9.08
90% - quantile	30.00	29.61	29.53	31.83
WSDI	1.93	2.25	2.30	2.03

3) Dar el Beida



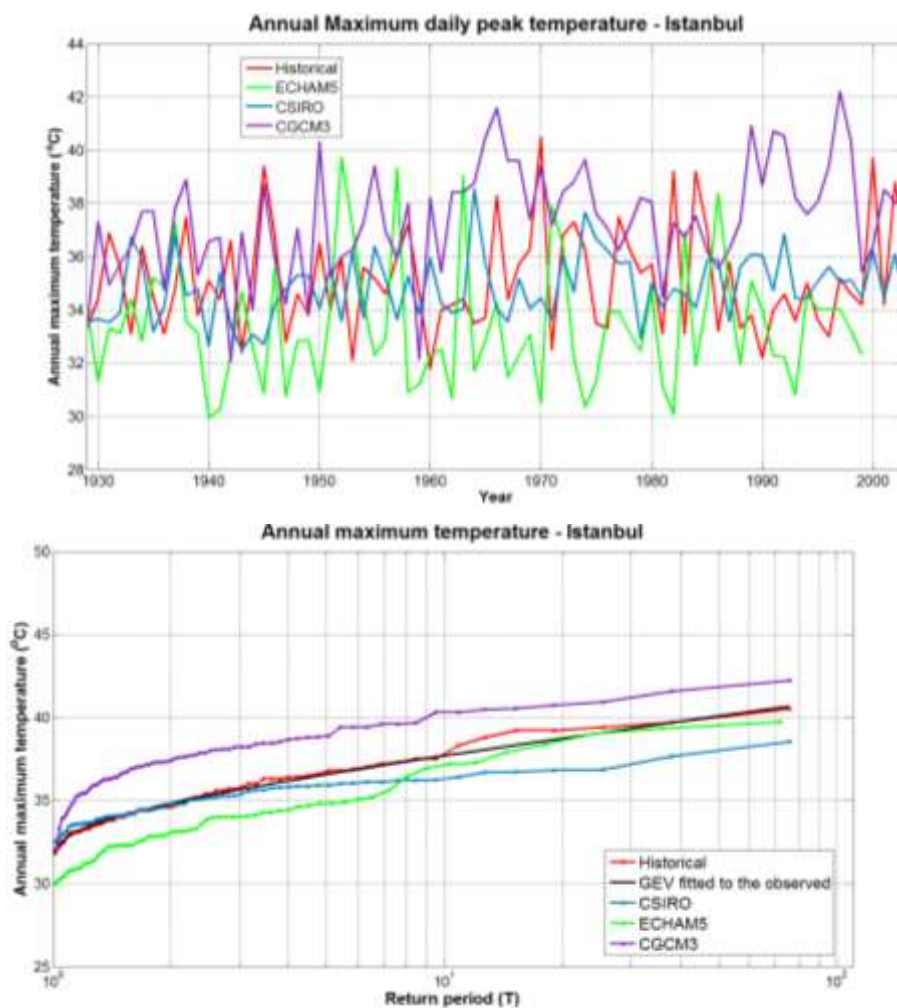
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	23.43	23.64	16.52	21.21
Standard Deviation	6.33	6.01	7.66	7.84
Skewness	0.13	0.23	0.22	0.38
Correlation	-	0.39	-0.126	0.47
Efficiency	-	-0.14	-0.07	-0.46
Correlation maxima	-	0.11	-0.08	0.12
Efficiency maxima	-	-3.29	-33.48	-0.76
<b>GEV <math>\kappa</math></b>	-0.46	-	-	-
<b>GEV <math>\psi</math></b>	0.061	-	-	-
<b>GEV <math>\lambda</math></b>	40.73	-	-	-
Hurst daily	0.9	0.9	0.93	0.9
Hurst maxima	0.39	0.9	0.36	0.83
Summer days	144.56	148.16	35.90	123.45
Icing days	0	0	0	0
90% - quantile	31.5	32.14	24.96	32.42
WSDI	0.80	1.78	1.86	1.61

4) Hvar



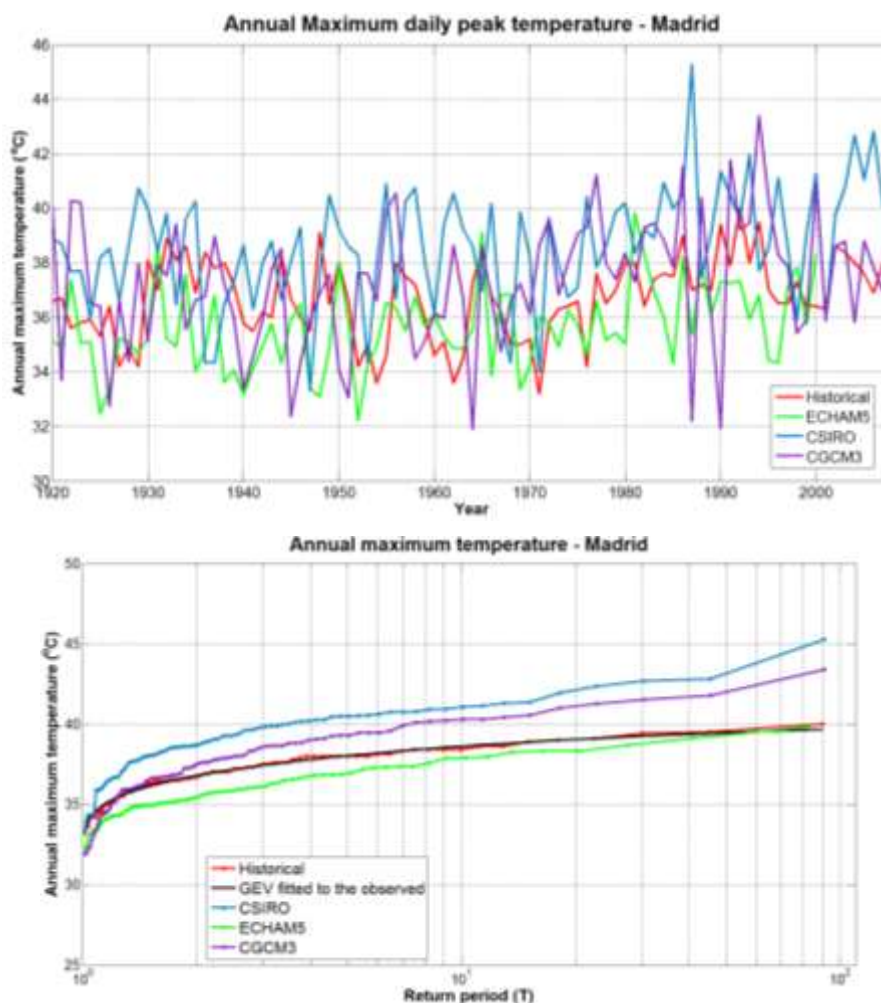
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	20.31	20.31	18.37	18.92
Standard Deviation	6.74	6.73	8.22	7.11
Skewness	0.05	0.31	0.12	0.61
Correlation	-	0.74	0.78	0.85
Efficiency	-	0.46	0.33	0.63
Correlation maxima	-	0.09	-0.11	-0.04
Efficiency maxima	-	-0.86	-4.35	-5.71
<b>GEV κ</b>	-0.21	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.04	-	-	-
<b>GEV λ</b>	33.77	-	-	-
Hurst daily	0.94	0.90	0.91	0.90
Hurst maxima	0.47	0.76		0.72
Summer days	101.09	103.32	94.59	83.71
Icing days	0.04	0.00	1.30	0.00
90% - quantile	29.50	30.19	29.63	29.86
WSDI	1.61	2.14	2.35	2.27

5) Istanbul



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	18.50	19.43	16.43	17.21
Standard Deviation	8.18	7.44	7.61	9.47
Skewness	-0.15	-0.15	0.03	0.34
Correlation	-	0.71	0.45	0.71
Efficiency	-	0.45	0.15	0.56
Correlation maxima	-	-0.14	-0.20	0.14
Efficiency maxima	-	-0.59	-2.35	-2.15
<b>GEV κ</b>	-0.03	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.05	-	-	-
<b>GEV λ</b>	34.25	-	-	-
Hurst daily	0.90	0.91	0.91	0.91
Hurst maxima	0.35	0.56	0.56	0.78
Summer days	99.77	102.83	58.24	97.76
Icing days	1.24	0.04	1.46	0.11
90% - quantile	29.00	30.22	26.59	30.90
WSDI	1.55	2.00	1.72	1.92

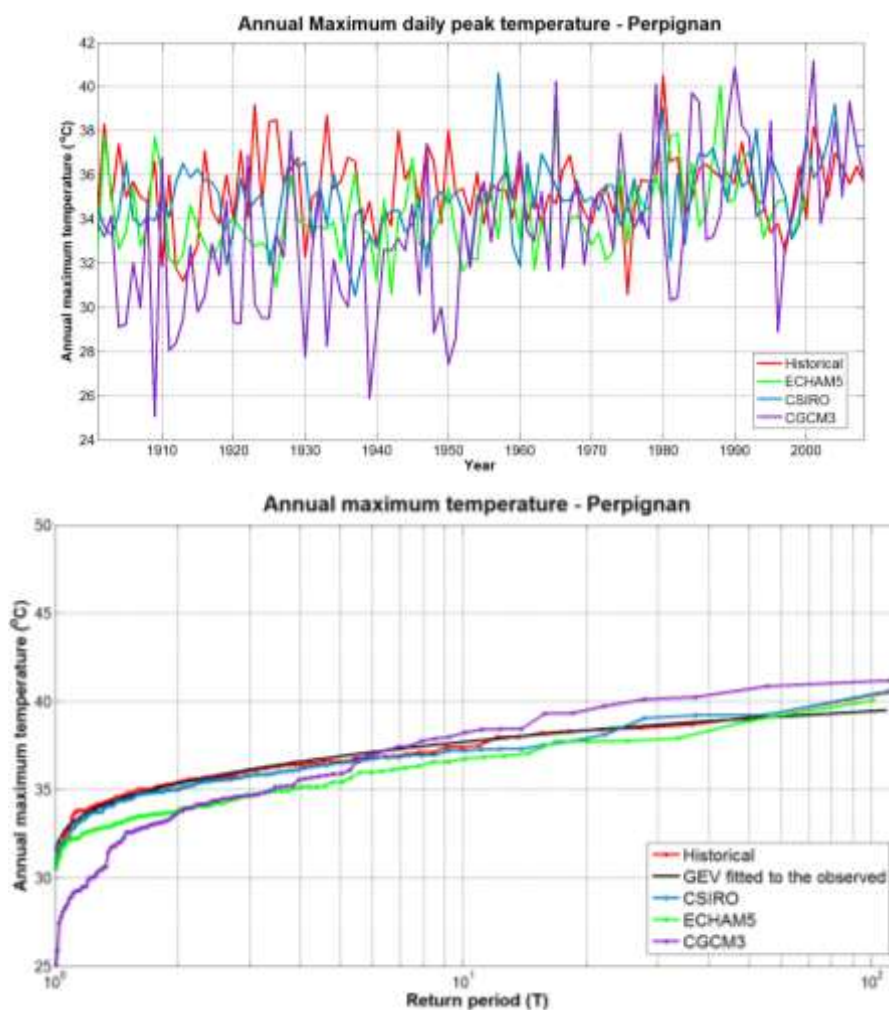
6) Madrid



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	19.29	19.56	17.02	14.32
Standard Deviation	8.50	8.19	9.14	10.73
Skewness	0.19	0.50	0.29	0.21
Correlation	-	0.80	0.70	0.83
Efficiency	-	0.63	0.28	0.17
Correlation maxima	-	0.22	0.34	0.14
Efficiency maxima	-	-3.32	-0.82	-2.32
<b>GEV κ</b>	-0.35	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.04	-	-	-
<b>GEV λ</b>	26.26	-	-	-
Hurst daily	0.91	0.90	0.91	0.91
Hurst maxima	0.85	0.74	0.65	0.64
Summer days	105.74	102.66	94.86	75.70
Icing days	0.20	0.02	0.48	24.06
90% - quantile	31.40	32.00	30.23	29.31
WSDI	2.16	1.99	1.98	1.99

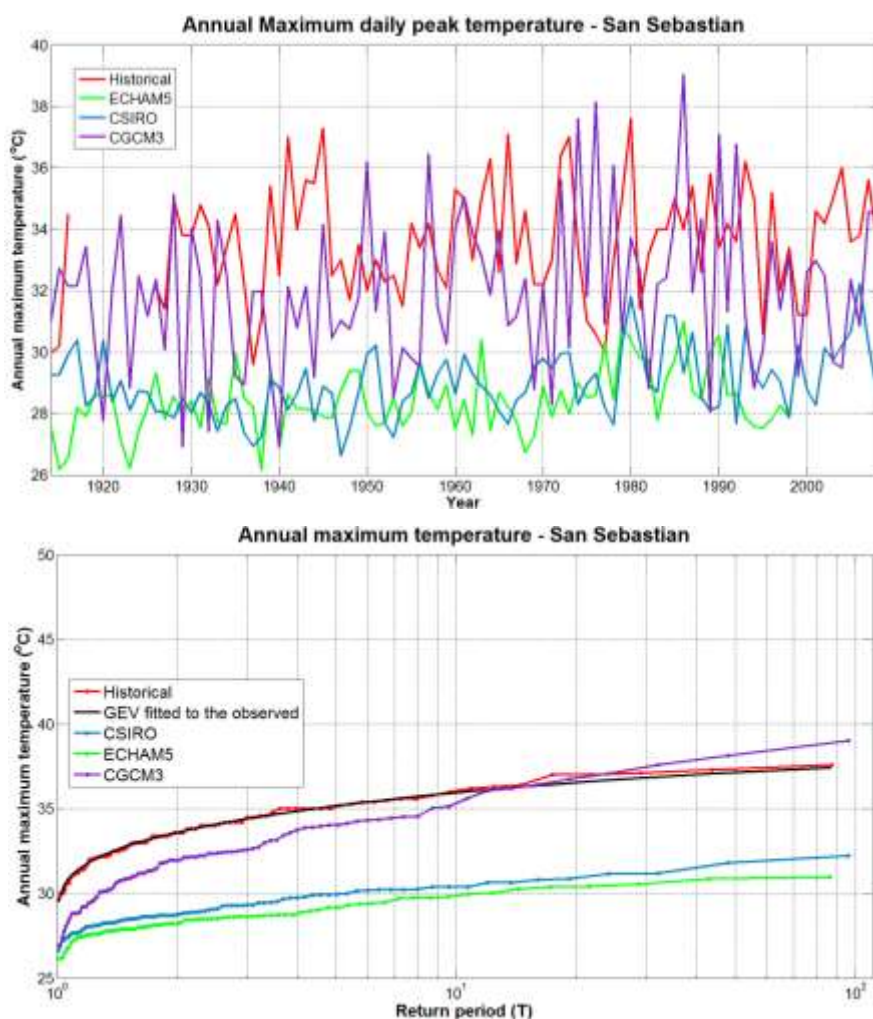


7) Perpignan



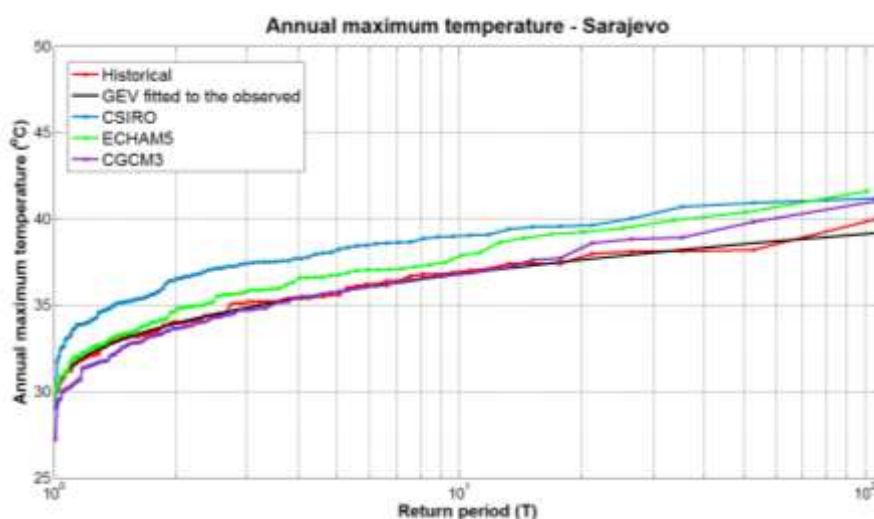
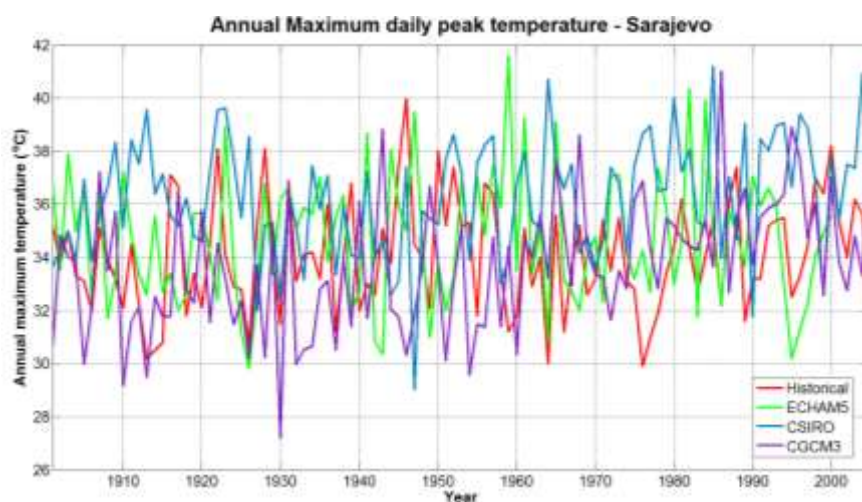
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	19.87	19.87	18.21	18.12
Standard Deviation	6.87	6.87	7.23	6.27
Skewness	0.01	0.41	0.25	0.69
Correlation	-	0.57	0.36	0.52
Efficiency	-	0.16	-0.21	0.06
Correlation maxima	-	-0.05	0.16	0.05
Efficiency maxima	-	-1.19	-1.21	-5.07
<b>GEV κ</b>	-0.25	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.05	-	-	-
<b>GEV λ</b>	34.75	-	-	-
Hurst daily	0.91	0.89	0.90	0.89
Hurst maxima	0.64	0.71	0.65	0.79
Summer days	96.21	97.74	81.16	61.75
Icing days	0.24	0.00	0.09	0.00
90% - quantile	29.00	30.11	28.48	27.54
WSDI	1.38	2.02	1.89	1.95

8) San Sebastian



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	16.23	18.35	15.90	16.23
Standard Deviation	5.79	4.51	5.98	5.79
Skewness	0.08	0.50	0.16	0.62
Correlation	-	0.63	0.58	0.61
Efficiency	-	0.33	0.14	0.22
Correlation maxima	-	0.28	0.16	0.04
Efficiency maxima	-	-6.47	-7.99	-2.57
<b>GEV κ</b>	-0.30	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.06	-	-	-
<b>GEV λ</b>	32.98	-	-	-
Hurst daily	0.94	0.90	0.91	0.90
Hurst maxima	0.70	0.74	0.85	0.74
Summer days	18.41	36.95	28.52	32.36
Icing days	0.44	0.00	0.26	0.00
90% - quantile	23.30	25.03	24.45	24.56
WSDI	0.49	1.83	1.82	1.69

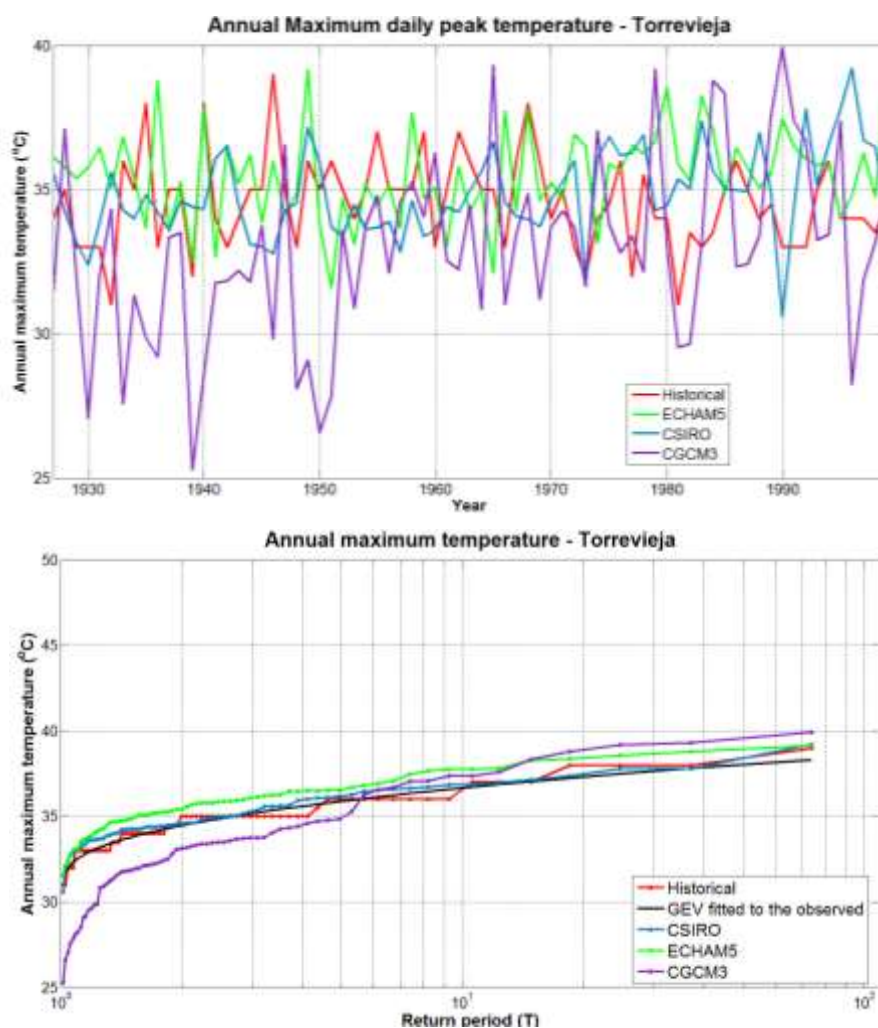
9) Sarajevo



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	15.07	16.12	15.04	15.26
Standard Deviation	9.90	8.97	9.77	8.54
Skewness	-0.23	0.27	-0.15	0.25
Correlation	-	0.74	0.63	0.75
Efficiency	-	0.52	0.39	0.55
Correlation maxima	-	0.02	0.13	0.05
Efficiency maxima	-	-2.21	-1.15	-1.36
<b>GEV <math>\kappa</math></b>	-0.20	-	-	-
<b>GEV <math>\psi</math></b>	0.06	-	-	-
<b>GEV <math>\lambda</math></b>	33.25	-	-	-
Hurst daily	0.89	0.90	0.90	0.90
Hurst maxima	0.51	0.73	0.52	0.78
Summer days	64.42	72.53	66.80	60.92
Icing days	27.17	6.11	23.35	2.68
90% - quantile	27.60	28.91	27.72	27.31
WSDI	1.73	2.10	1.77	1.96

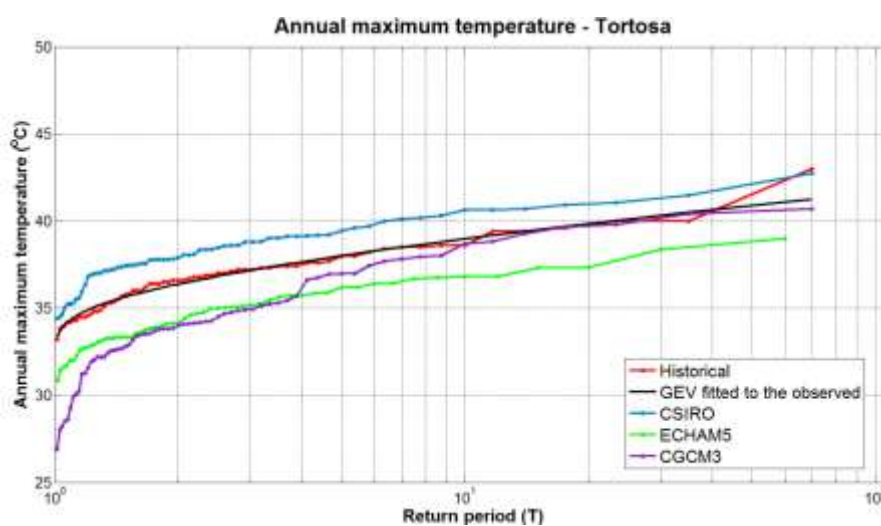
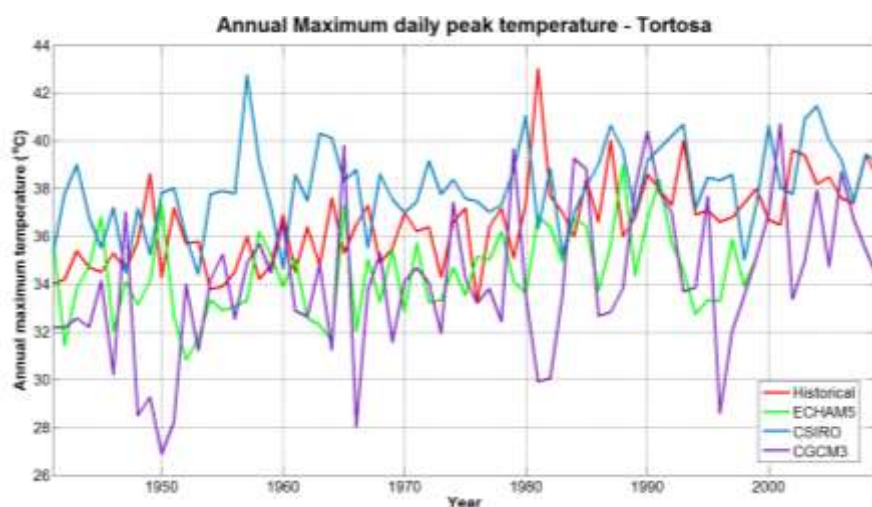


10) Torrevieja



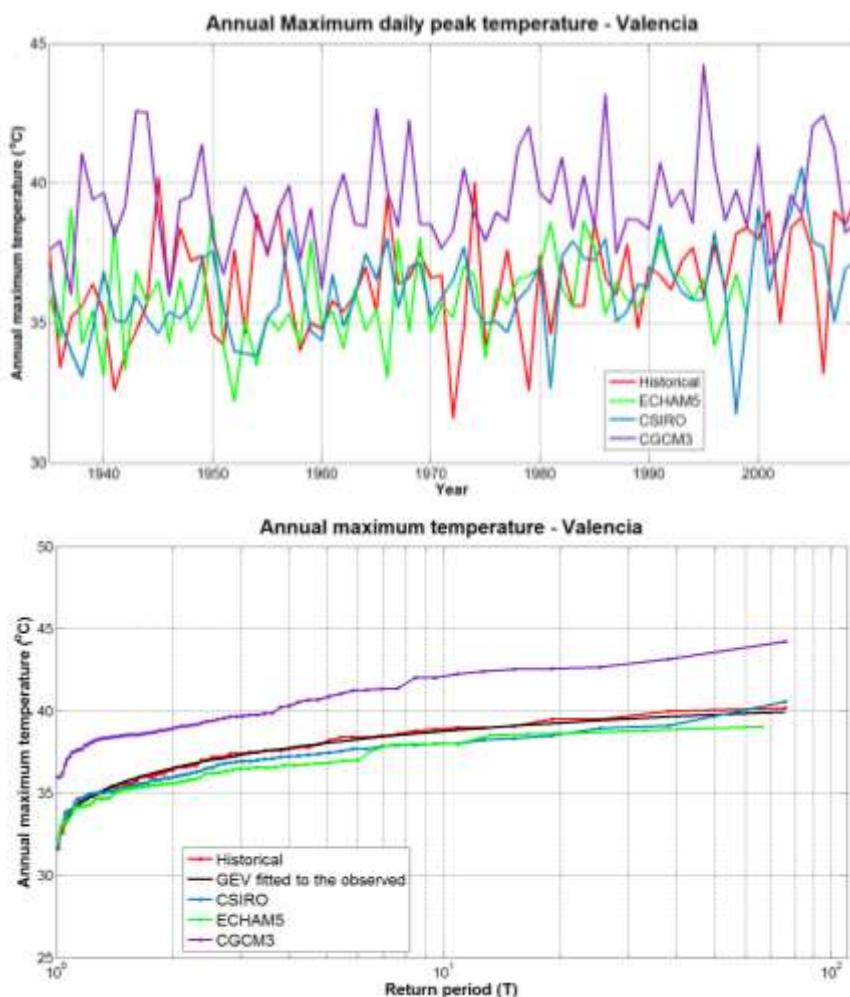
	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	21.70	21.89	20.90	18.19
Standard Deviation	5.52	5.40	5.97	5.85
Skewness	-0.04	0.33	0.33	0.62
Correlation	-	0.82	0.61	0.80
Efficiency	-	0.65	0.15	0.18
Correlation maxima	-	-0.14	-0.09	-0.05
Efficiency maxima	-	-1.19	-1.52	-5.24
<b>GEV κ</b>	-0.20	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.04	-	-	-
<b>GEV λ</b>	33.94	-	-	-
Hurst daily	0.90	0.91	0.91	0.91
Hurst maxima	0.48	0.75	0.69	0.57
Summer days	110.12	116.75	107.64	57.12
Icing days	0.00	0.00	0.00	0.00
90% - quantile	29.00	29.65	29.29	26.95
WSDI	0.74	1.75	1.82	1.88

11)Tortosa



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	22.48	22.36	19.40	18.49
Standard Deviation	6.87	6.94	6.73	6.34
Skewness	-0.09	0.33	0.28	0.62
Correlation	-	0.40	0.71	0.79
Efficiency	-	-0.22	0.24	0.27
Correlation maxima	-	0.23	0.20	0.05
Efficiency maxima	-	-1.21	-1.61	-4.70
<b>GEV κ</b>	-0.10	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.04	-	-	-
<b>GEV λ</b>	35.82	-	-	-
Hurst daily	0.90	0.91	0.92	0.91
Hurst maxima	0.90	0.50	0.54	0.80
Summer days	139.78	130.45	95.24	69.67
Icing days	0.00	0.00	0.00	0.00
90% - quantile	31.50	32.53	28.93	28.16
WSDI	1.38	2.00	1.86	1.90

12)Valencia



	Historical	CSIRO	ECHAM5	CGCM3
Average	22.18	22.20	20.33	21.00
Standard Deviation	5.74	5.74	6.73	9.48
Skewness	-0.10	0.32	0.24	0.13
Correlation	-	0.78	0.72	0.79
Efficiency	-	0.57	0.24	-0.17
Correlation maxima	-	0.13	-0.08	-0.03
Efficiency maxima	-	-0.53	-0.74	-3.42
<b>GEV κ</b>	-0.37	-	-	-
<b>GEV ψ</b>	0.05	-	-	-
<b>GEV λ</b>	35.87	-	-	-
Hurst daily	0.89	0.90	0.92	0.91
Hurst maxima	0.34	0.73	0.74	0.33
Summer days	127.53	121.20	107.48	140.28
Icing days	0.00	0.00	0.00	0.01
90% - quantile	29.40	30.30	29.69	34.01
WSDI	1.20	1.75	1.74	1.76