



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

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

Διπλωματική εργασία

Δημοσθένης Τσακνιάς

Επιβλέπων Καθηγητής

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Αθήνα, 22 Ιουλίου 2011

Εισαγωγή

- Ανησυχία για τις κλιματικές μεταβολές κατά τον 21^ο αιώνα
- Αύξηση ακραίων γεγονότων
- Χρήση κλιματικών μοντέλων στον υδρολογικό σχεδιασμό, τη χάραξη πολιτικών και η επιρροή τους στις επιστήμες του περιβάλλοντος

Προβληματισμοί

- Είναι τα κλιματικά μοντέλα αξιόπιστα;
- Μπορούν να έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις υδρολογικές εφαρμογές; (Kundzewicz and Stakhiv, 2010);
- Είναι δυνατόν να προσομοιωθεί το κλίμα από ένα ισχυρό ντετερμινιστικό αριθμητικό μοντέλο;

Η Μεσόγειος: Ένα «καυτό σημείο» της κλιματικής αλλαγής (I)

- Κλιματική κλάση Csa και Csb (Κατάταξη Koppen)
- Το κλίμα των γειτονικών περιοχών επηρεάζει τη Μεσόγειο.
 - Βόρεια Αφρική: Παρατεταμένες ξηρασίες, υψηλές θερμοκρασίες
 - Κεντρική Ευρώπη, Άλπεις: Μεγάλα ύψη βροχοπτώσεων
- Η μεταβλητότητα του κλίματος της επηρεάζεται από μουσώνες στην Ασία και την Αφρική (Alpert et al., 2006), από υποτροπικούς αντικυκλώνες, το μεγάλο όγκο νερού και την ορογραφία της ευρύτερης περιοχής.
- Μικρές μεταβολές στις γειτονικές περιοχές μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο κλίμα της Μεσογείου.
- Οι μεγάλες κλιματικές μεταβολές κατά το παρελθόν και η αύξηση των αερίων που επιτείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου την καθιστούν ιδιαίτερα τρωτή.
- Μεσόγειος θάλασσα: **Hot-spot** της κλιματικής αλλαγής, Ακραία γεγονότα μεγαλύτερης έντασης, συχνότητας, διάρκειας (Giorgi, 2006; Diffenbaugh et al., 2007)

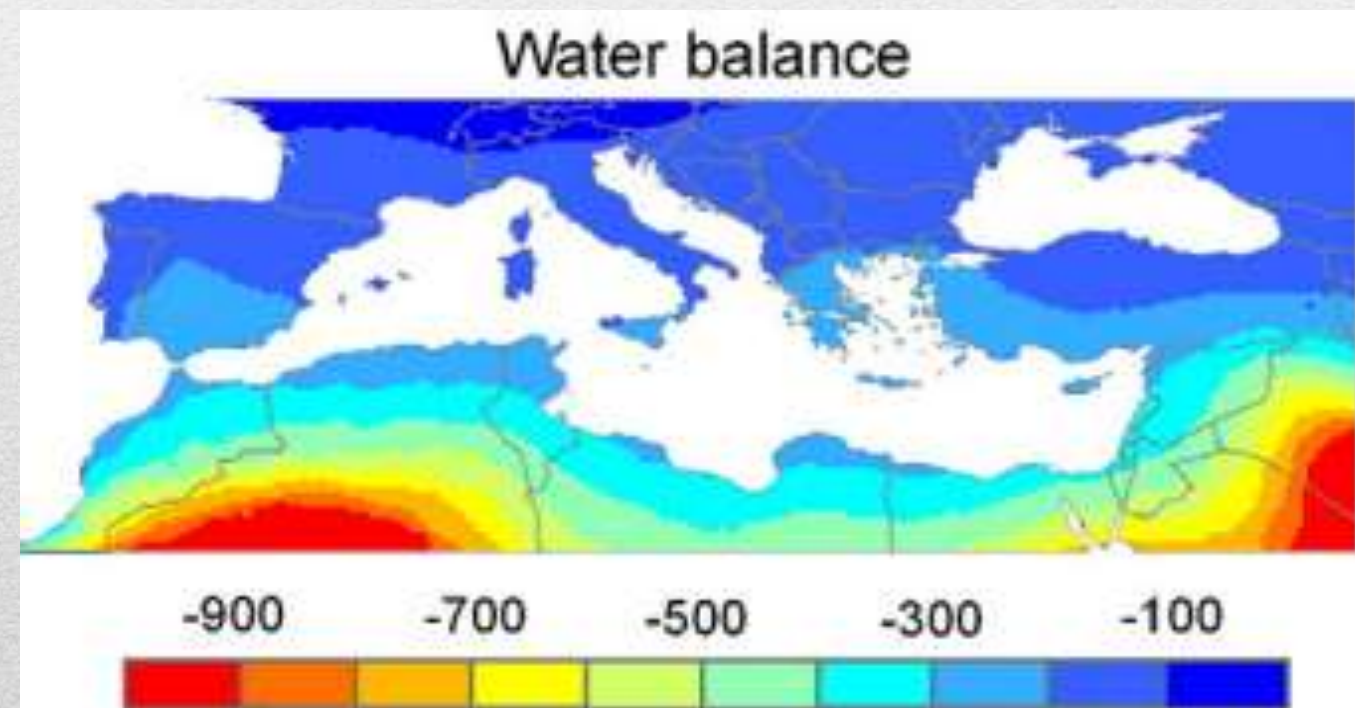
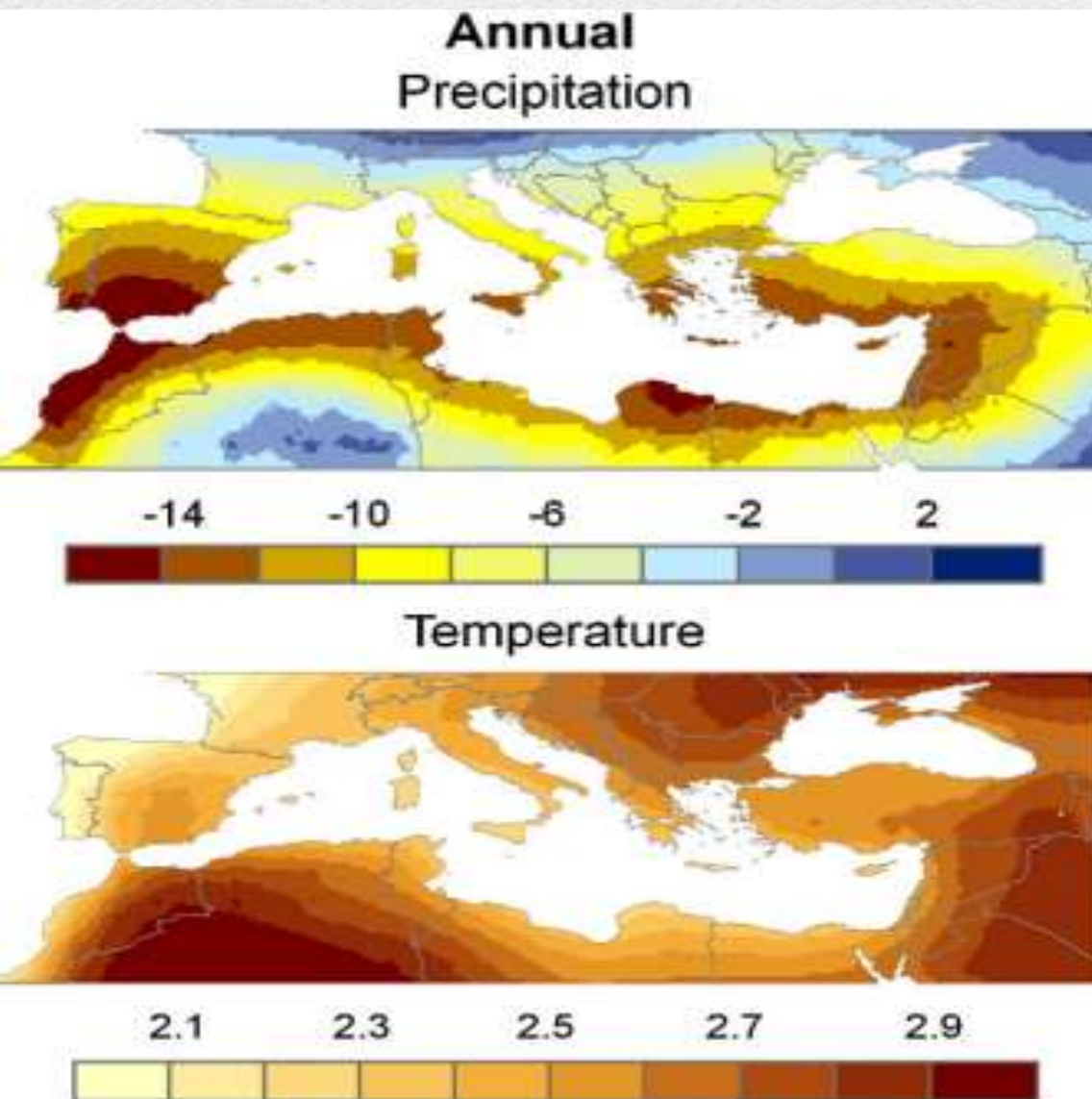
Η Μεσόγειος: Ένα «καυτό σημείο» της κλιματικής αλλαγής (II)

- 18^{ος} αιώνας

Mann (1790): Το κλίμα γίνεται θερμότερο και ξηρότερο λόγω αλλαγών χρήσεων γης

Ideler (1832): Αμφισβήτηση πηγών του Mann

- 21^{ος} αιώνας

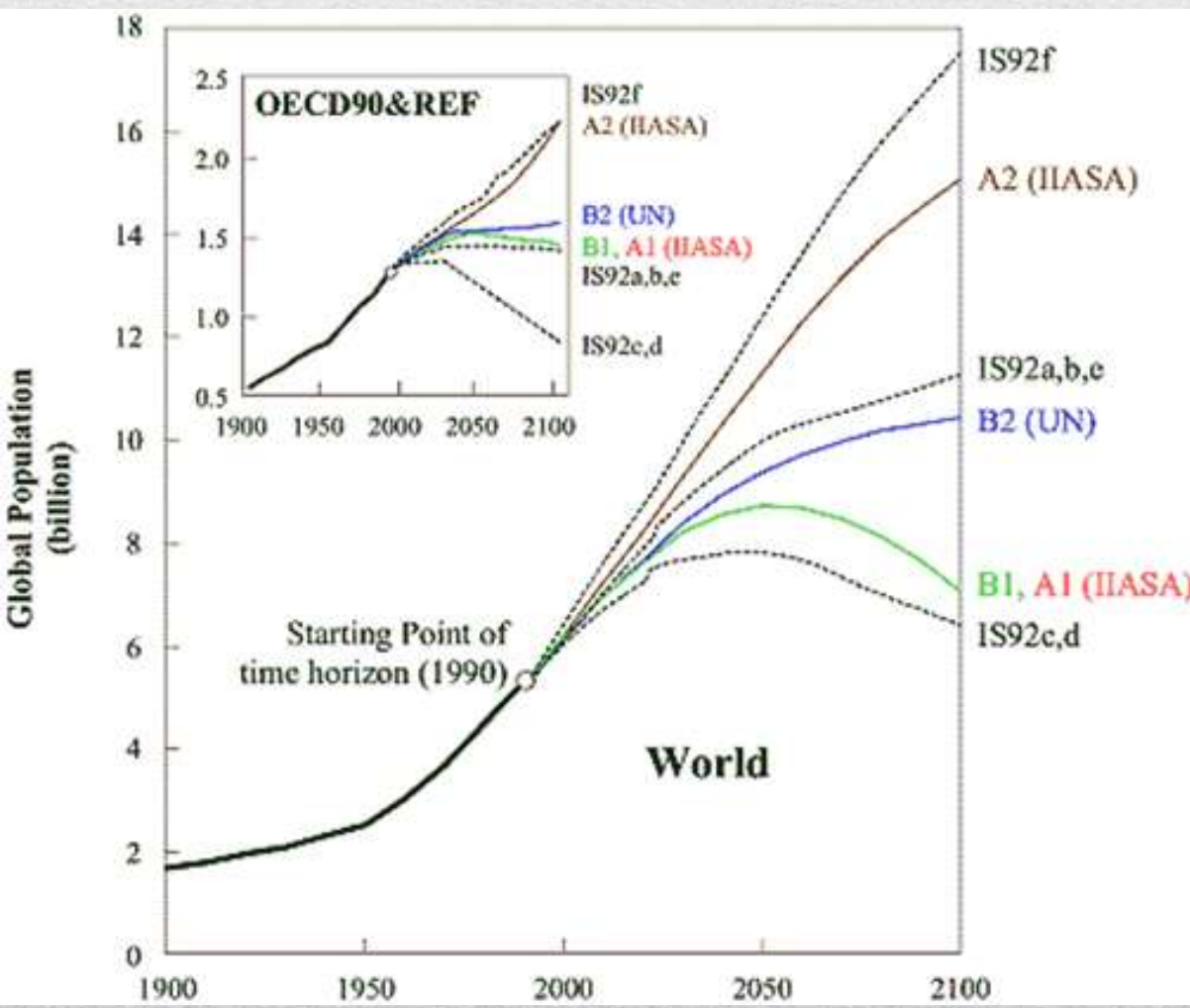
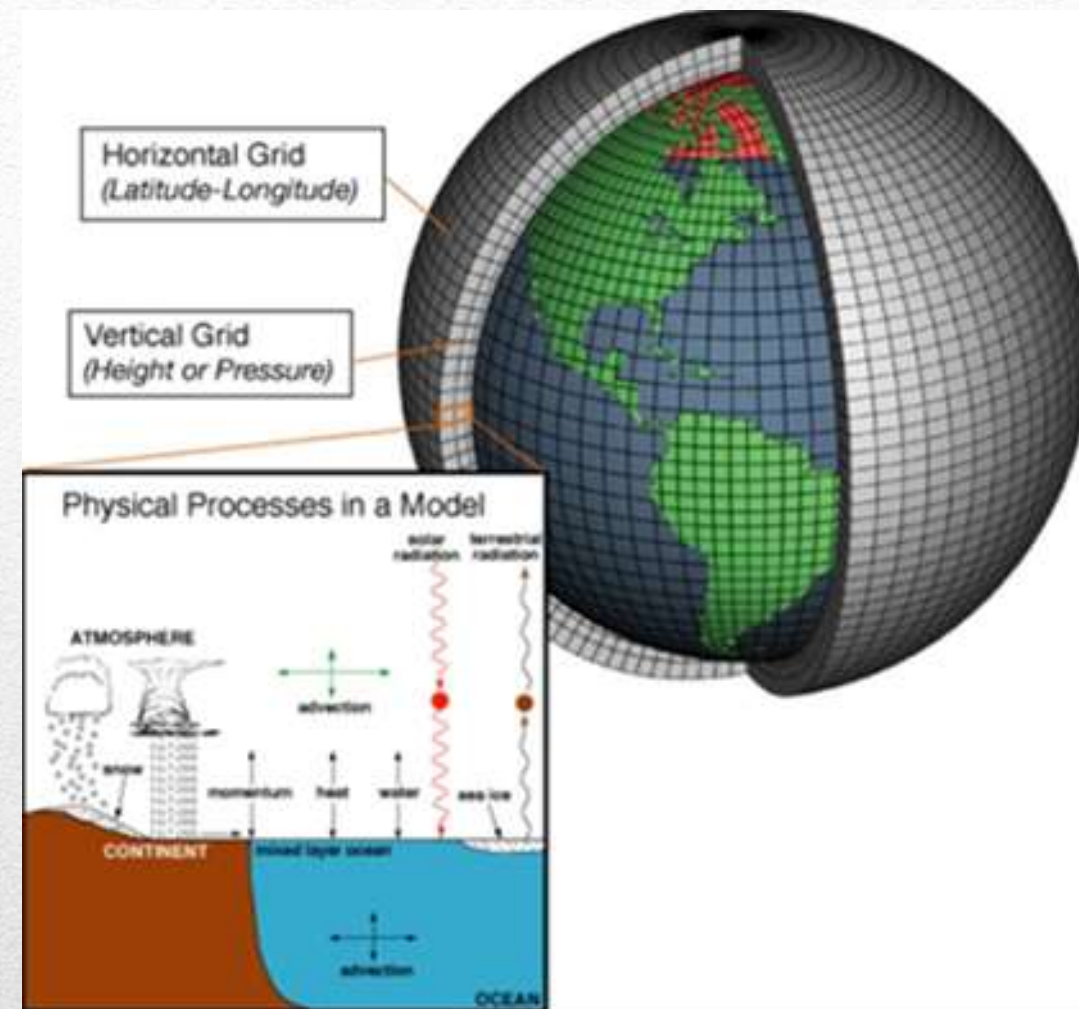


Μεταβολή (%) βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ύψους (mm) υδατικού ισοζυγίου για την περίοδο 2040-2070 σε σχέση με 1960-1990 με βάση τα κλιματικά μοντέλα.

Πηγή: Garcia-Ruiz et al. (2011)

Κλιματικά μοντέλα και Reanalysis data (I)

- General Circulation Models (GCMs): Επίλυση διαφορικών εξισώσεων σε κάβναβο 3 διαστάσεων
Νόμοι μεταφοράς θερμότητας, ρευστομηχανικής, θερμοδυναμικής
- Προσομοιώνουν το κλίμα στο μέλλον αλλά και κατά το παρελθόν (Randall et al., 2007)



- 20C3M: Σενάριο 20^{ου} αιώνα
- SRES: Σενάριο 21^{ου} αιώνα. Εκτιμήσεις για εξέλιξη πληθυσμού, τεχνολογίας, οικονομίας, ξεκινούν με βάση το 20C3M

Κλιματικά μοντέλα και Reanalysis data (II)

- Reanalysis data: Αφομοίωση μεταβλητών ιστορικών παρατηρήσεων (συνήθως δορυφορικών). Μελέτη υδρολογικού κύκλου, επαλήθευση μοντέλων (Schneider et al., 2010). Ωστόσο, η αξιοπιστία τους για μεταβλητές κοντά στην επιφάνεια της Γης αμφισβητείται.

Κριτήρια επιλογής των GCMs και Reanalysis data

- Χρονοσειρές μεγάλου μήκους
- Διαθεσιμότητα δεδομένων στο internet

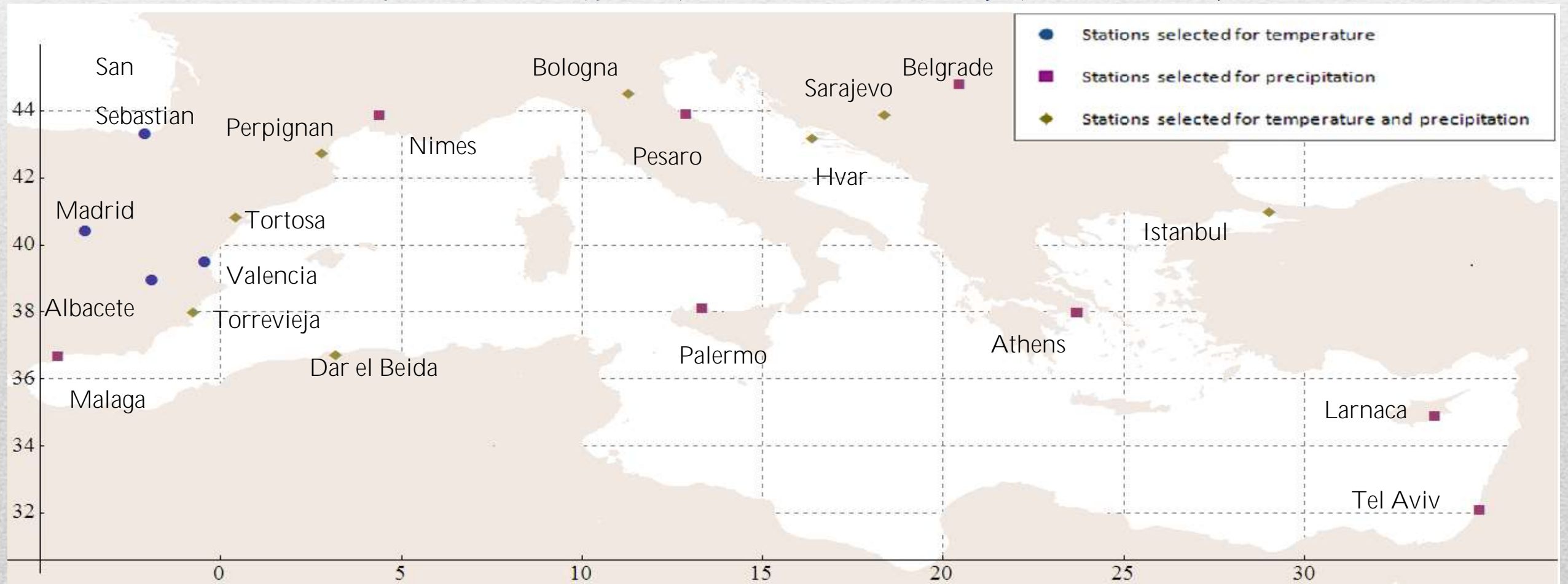
Δεδομένα: http://www.cccma.ec.gc.ca/cgi-bin/data/cgcm3/cgcm3_a2 και <https://esg.llnl.gov:8443/index.jsp>

IPCC Report	Όνομα	Ινστιτούτο	Ανάλυση (°) (Γεωγρ. Πλάτος x Μήκος)	Πλήθος σημείων καννάβου	Έτη	Σενάρια	
						20C3M	SRES A2
AR4	ECHAM5	Max-Planck Institute for meteorology & Deutsches Klimarechenzentrum	1.9 x 1.9	96x192	1860-2000	✓	✗
AR4	CSIRO	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	1.9 x 1.9	96x192	1871-2010	✓	✓
AR4	CGCM3	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.81 x 2.81	64x128	1850-2010	✓	✓
-	ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	2.50 x 2.50	72 x 144	1957 - 2002	-	-

Σταθμοί σημειακής σύγκρισης

Κριτήρια επιλογής σταθμών

- Χρονοσειρές μήκους τουλάχιστον 70 ετών με όσο το δυνατόν λιγότερες ελλιπείς τιμές
 - Δεδομένα χωρίς περαιτέρω επεξεργασία
 - Καλή γεωγραφική κατανομή σταθμών
 - Διαθεσιμότητα δεδομένων (<http://climexp.knmi.nl> και E.A.A.)
-
- Συνολικά 12 σταθμοί για θερμοκρασία και 16 για βροχόπτωση



Στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας εξόδων GCMs και reanalysis data

Μέσω του στατιστικού καταβιβασμού κλίμακας επιτρέπεται η σύγκριση των επιφανειακών φατνίων με σημείο.

Η μέθοδος BLUE έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε παλαιότερες αναλύσεις (π.χ. Koutsoyiannis et al., 2008; Anagnostopoulos et al., 2010). Ωστόσο, σε μικρές χρονικές κλίμακες οι ακραίες τιμές εξομαλύνονται.

Μη γραμμικός μετασχηματισμός: $y_i = (a + x_i)^c$



x_i η έξοδος των GCMs στα 4 πλησιέστερα φατνία του σταθμού και a, c μη αρνητικοί συντελεστές

Από την BLUE ισχύει: $\tilde{y} = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \cdot y_i$

με λ_i μη-αρνητικός συντελεστής βάρους (φυσική συνέπεια) και $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ (αμεροληψία)
Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε:

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

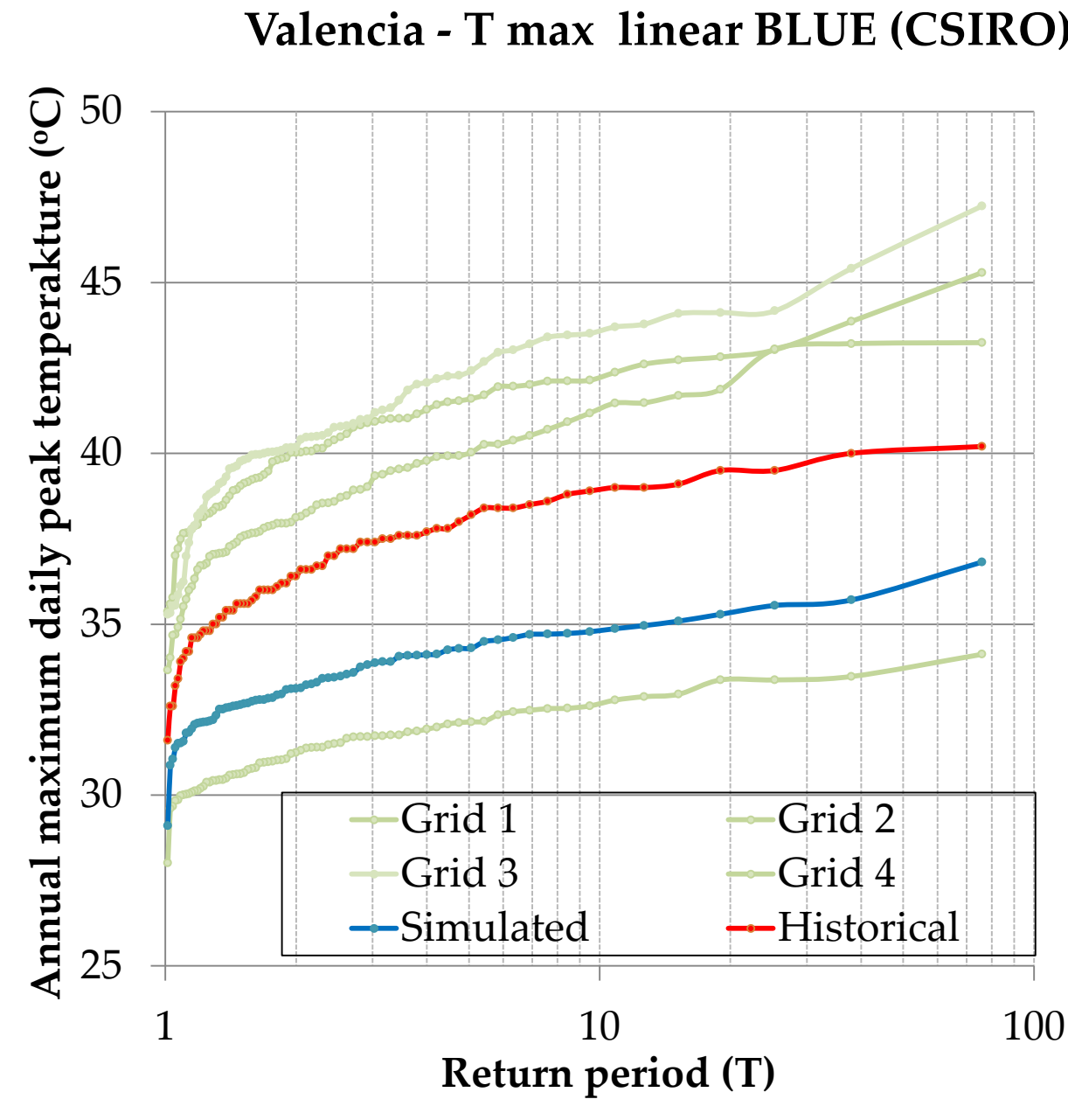
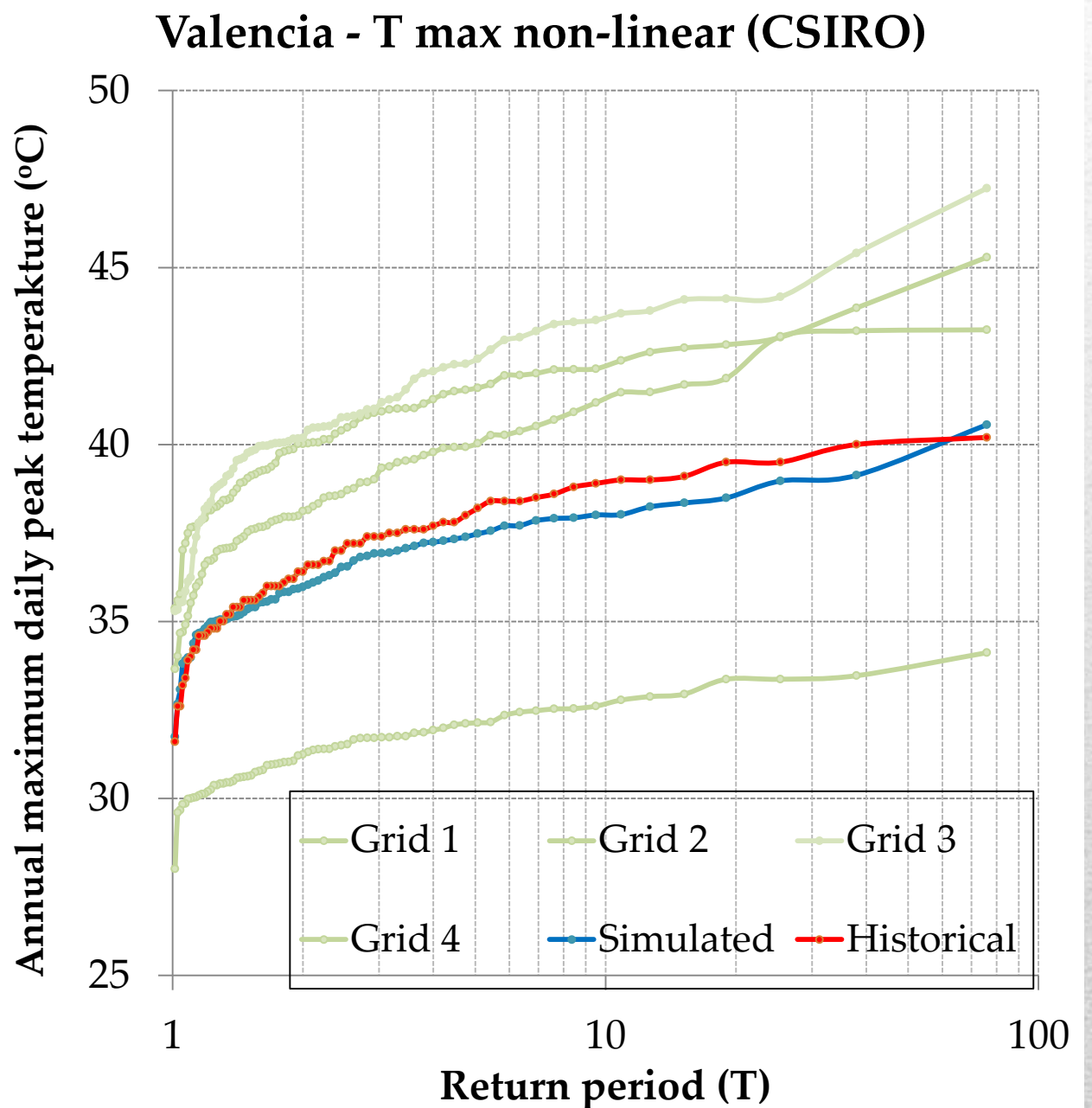
όπου \tilde{x} η βέλτιστη προσομοιωμένη χρονοσειρά για κάθε GCM.

Η βελτιστοποίηση των συντελεστών a, c, λ_i εφαρμόζεται με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος: $Er = e^2 + (e_m^2 + e_s^2) \cdot q + e_{sk}^2 \cdot t$

e^2 : μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρόβλεψης, e_m, e_s και e_{sk} σφάλμα εκτίμησης μέσης τιμής, τυπικής απόκλισης και συντελεστή ασυμμετρίας, αντίστοιχα. Αυτές οι αποκλίσεις τιμωρούνται δίνοντας μεγάλες τιμές στα q, t (με $q > t$).

Αιτιολόγηση μεθοδολογίας (I)

- Ο στατιστικός καταβιβασμός κλίμακας επιτρέπει την όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή των προσομοιωμένων χρονοσειρών στις ιστορικές. Άλλες μέθοδοι (π.χ. σταθεροί χωρικοί συντελεστές βάρους) οδηγούν σε μεγαλύτερα σφάλματα και μικρότερους συντελεστές αποδοκότητας στην κλίμακα των GCMs (Koutsoyiannis et al., 2008).



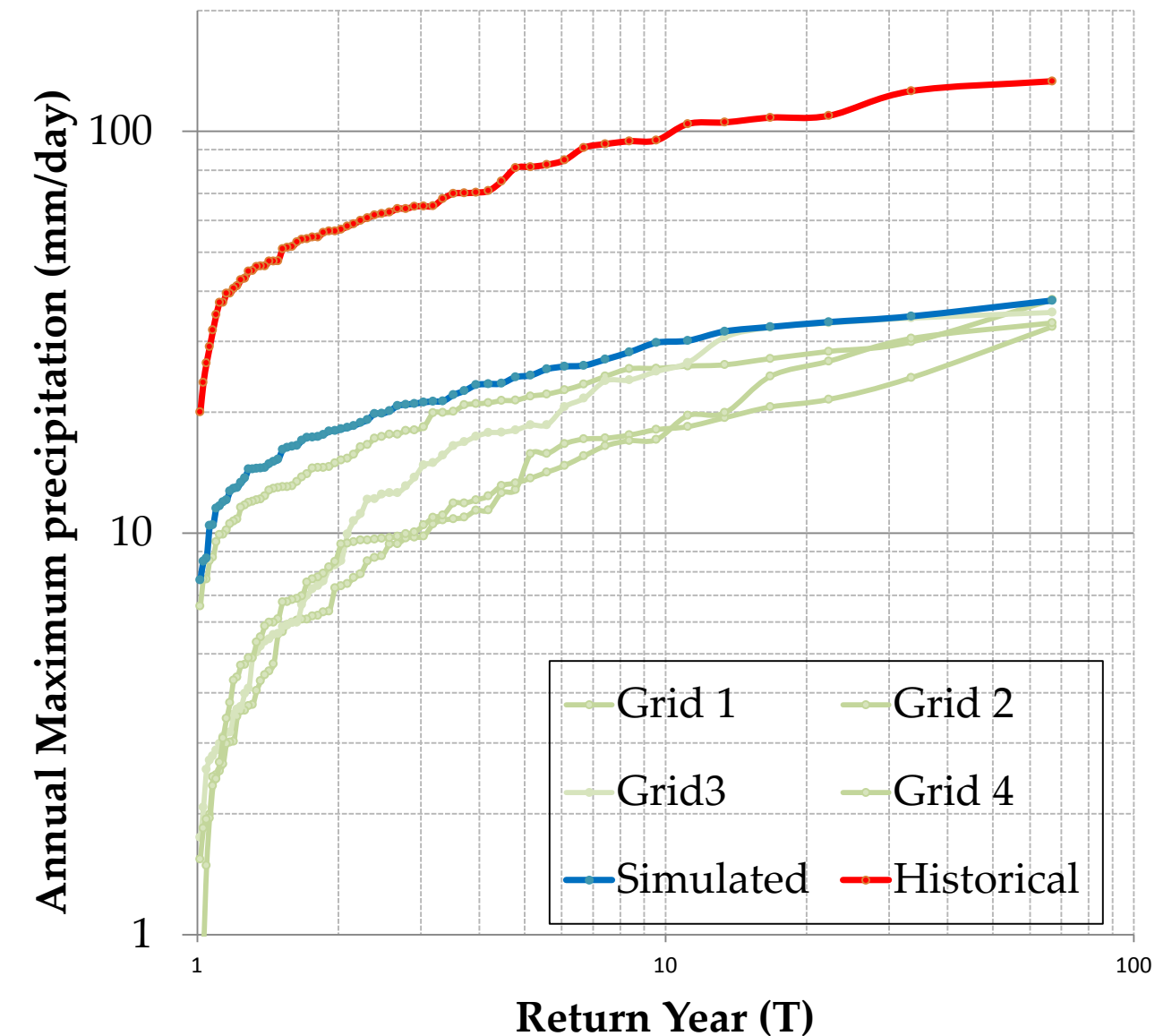
Εμπειρική κατανομή χρονοσειρών στα 4 γειτονικά φατνία του καννάβου, της προσομοιωμένης και της ιστορικής χρονοσειράς. Αριστερά: Μη γραμμικός μετασχηματισμός, Δεξιά: Γραμμική BLUE

Αιτιολόγηση μεθοδολογίας (II)

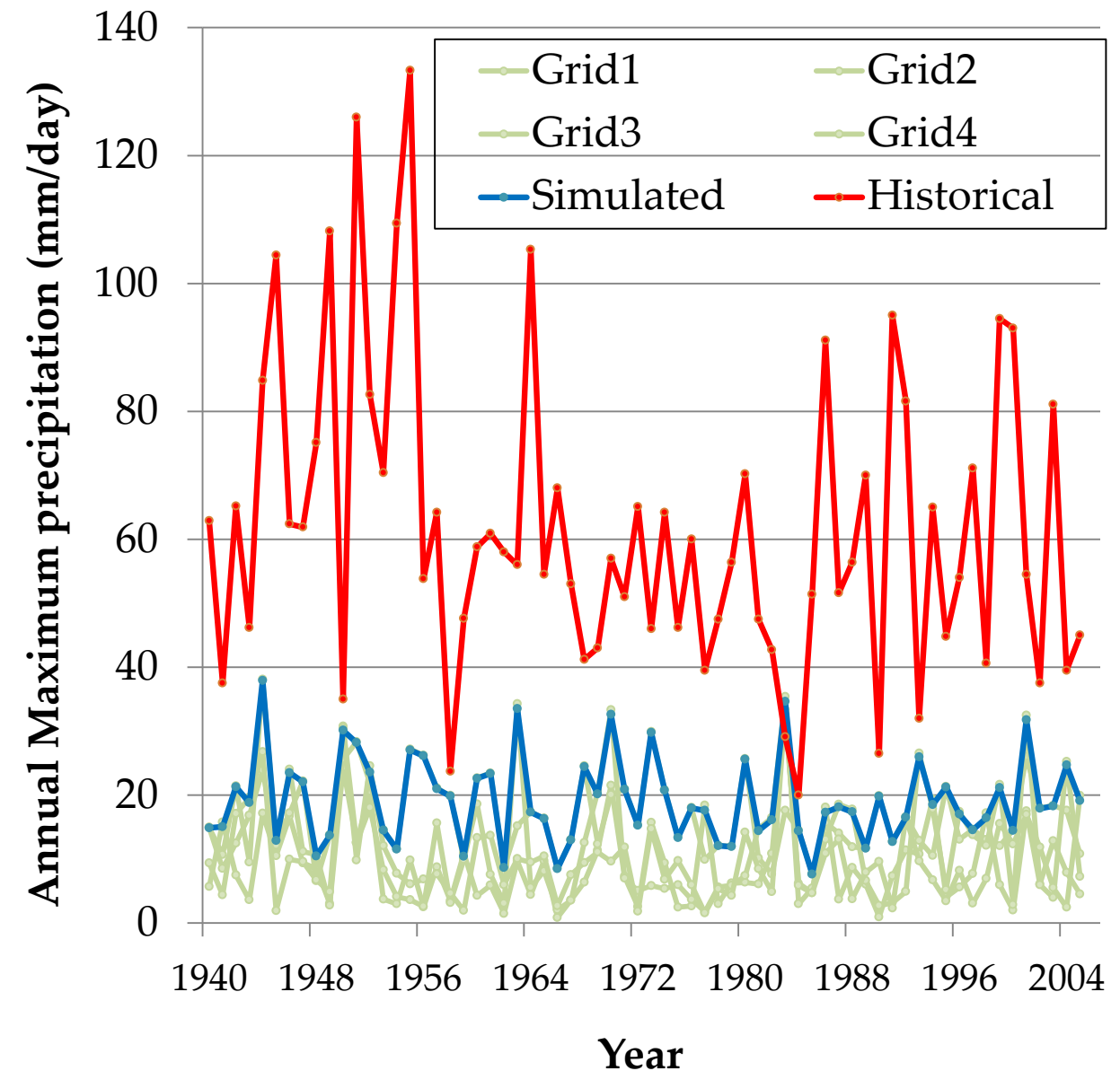
- Συντελεστής επιφανειακής αναγωγής $\phi(A, d)$ στις ακραίες βροχοπτώσεις

Αριστερά: Εμπειρική κατανομή χρονοσειρών στα 4 γειτονικά φατνία του καννάβου, της προσομοιωμένης και της ιστορικής χρονοσειράς.
Δεξιά: Χρονοσειρές ακραίων ετησίων τιμών

Tel Aviv - Precipitation non-linear (CSIRO)



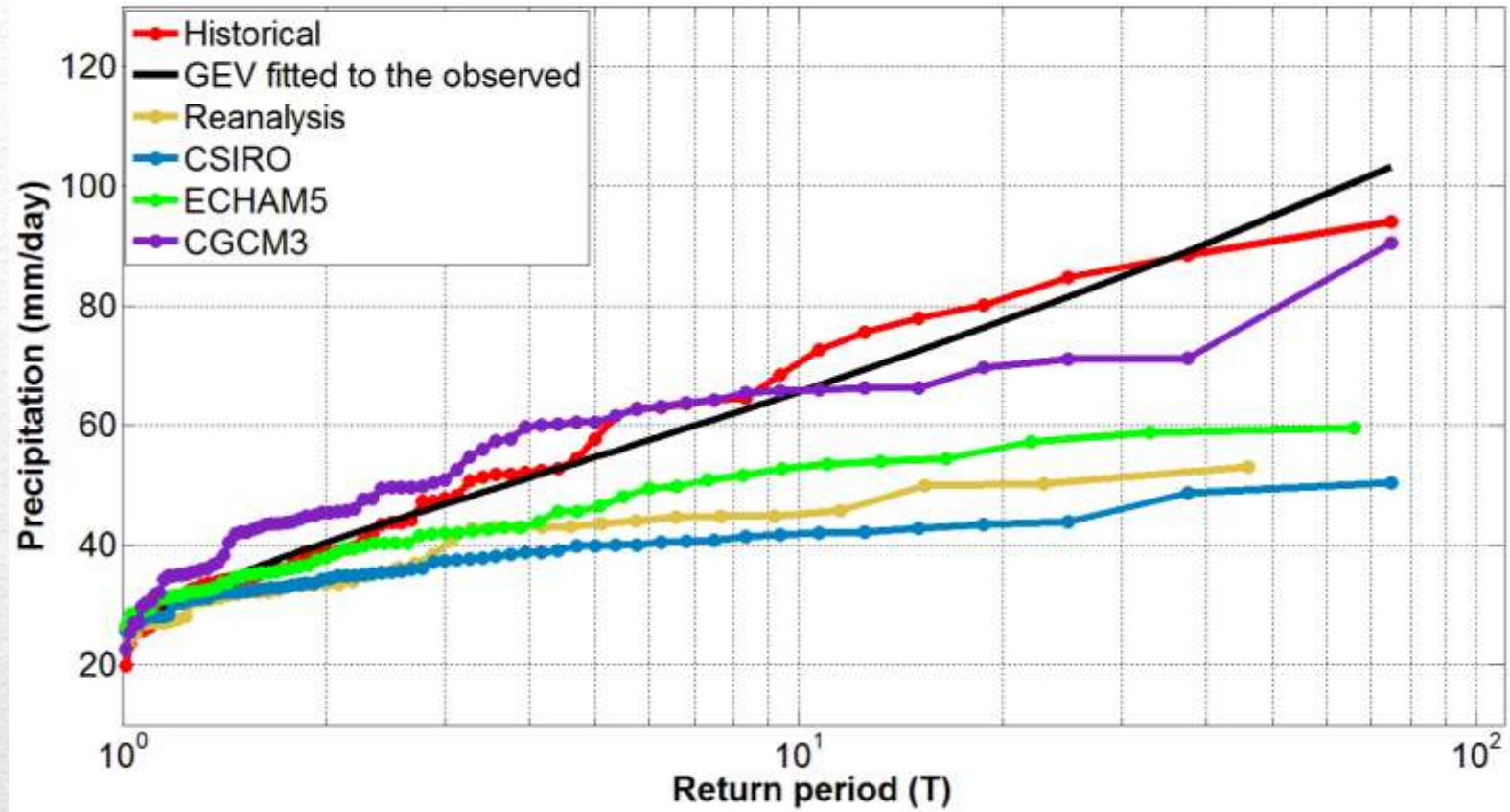
Tel Aviv - Precipitation non-linear (CSIRO)



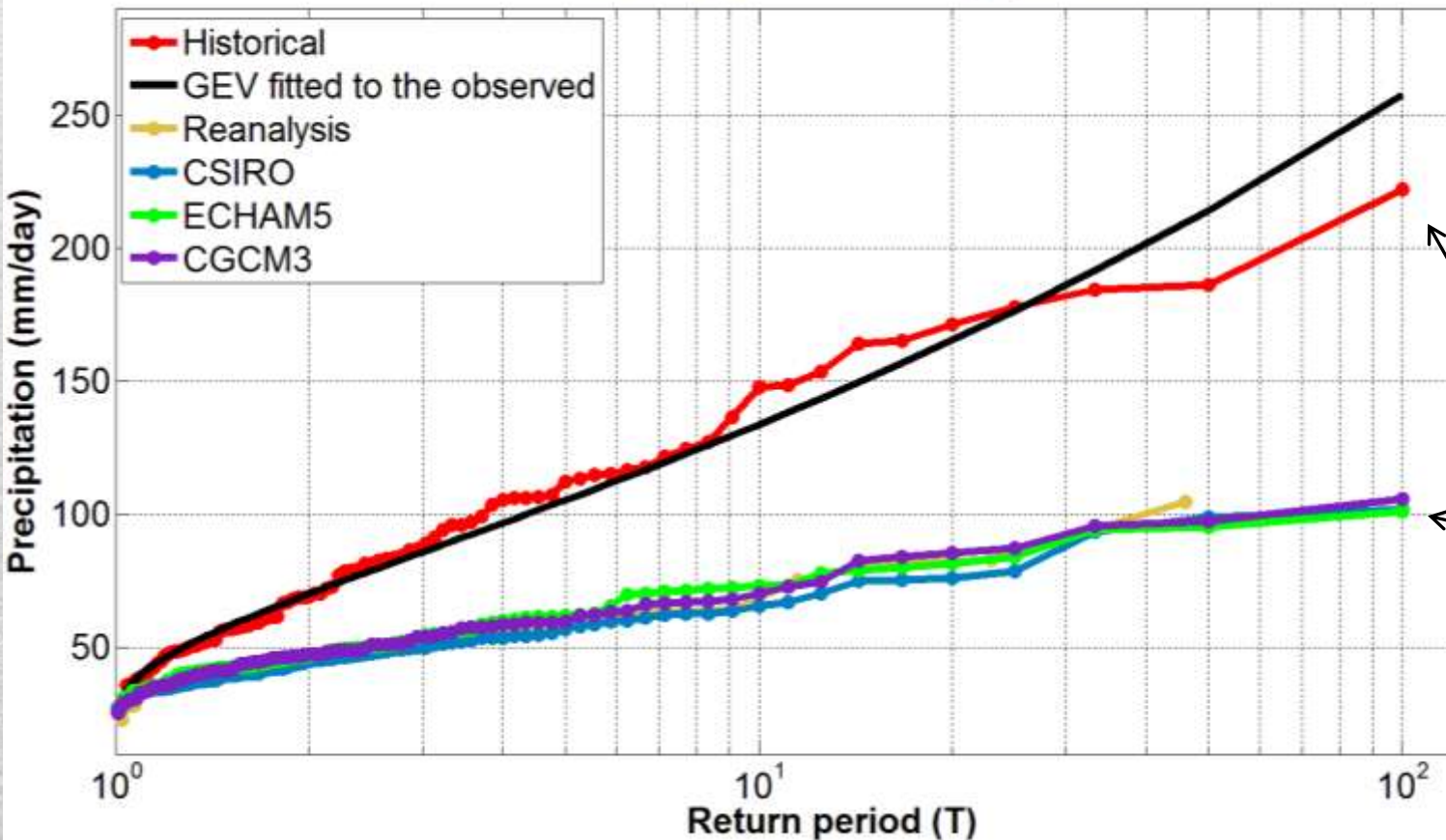
Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (I)

Εμπειρική κατανομή
μεγίστων ετησίων
βροχοπτώσεων και
προσαρμογή της κατανομής
GEV στην ιστορική
χρονοσειρά

Annual maxima - Belgrade



Annual maxima - Perpignan



Η εκτίμηση των GCMs και των reanalysis data είναι δύο φορές μικρότερη της πραγματικής

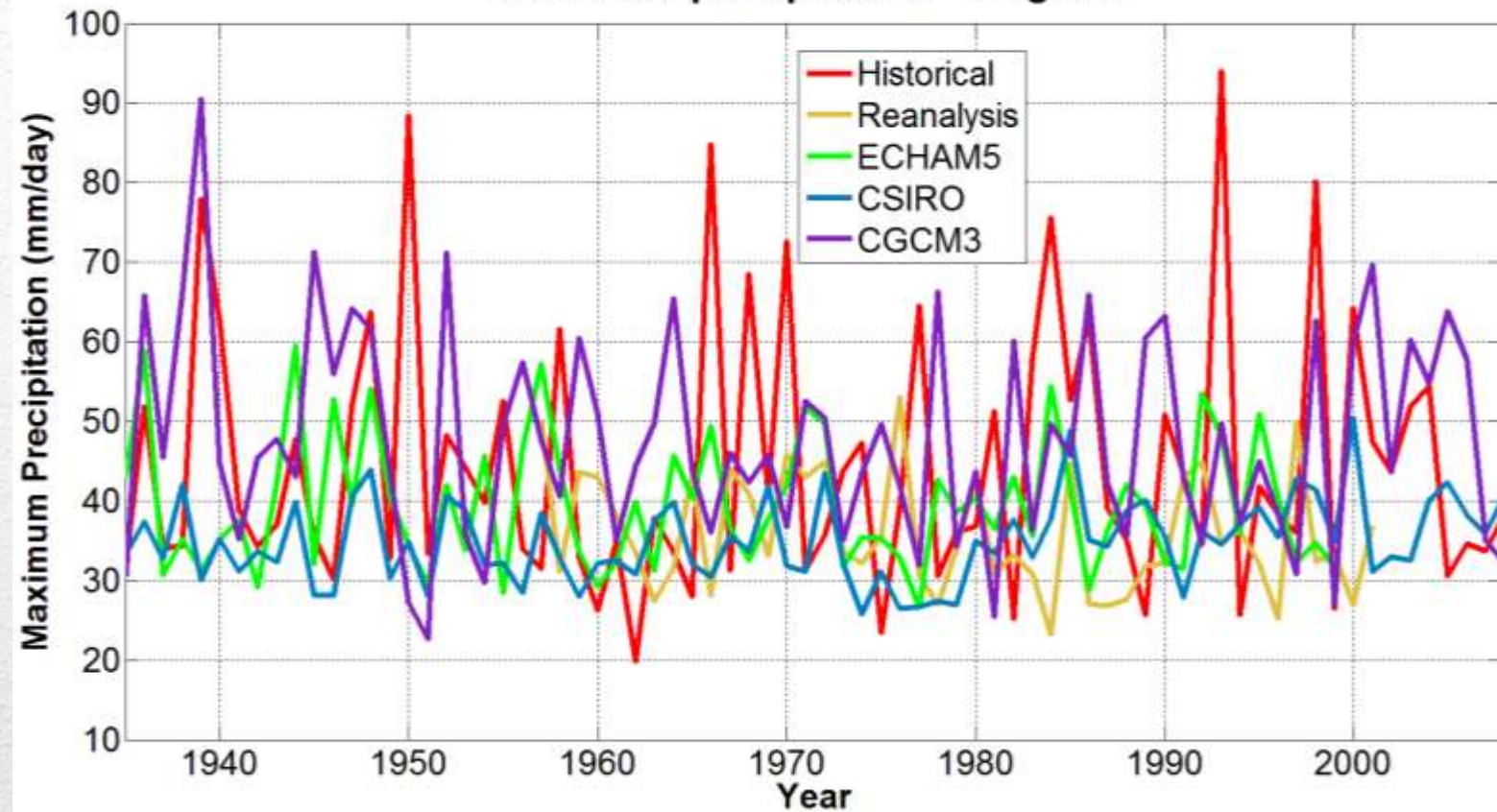
Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (II)

Χρονοσειρές ετησίων
ακραίων κατακρημνίσεων

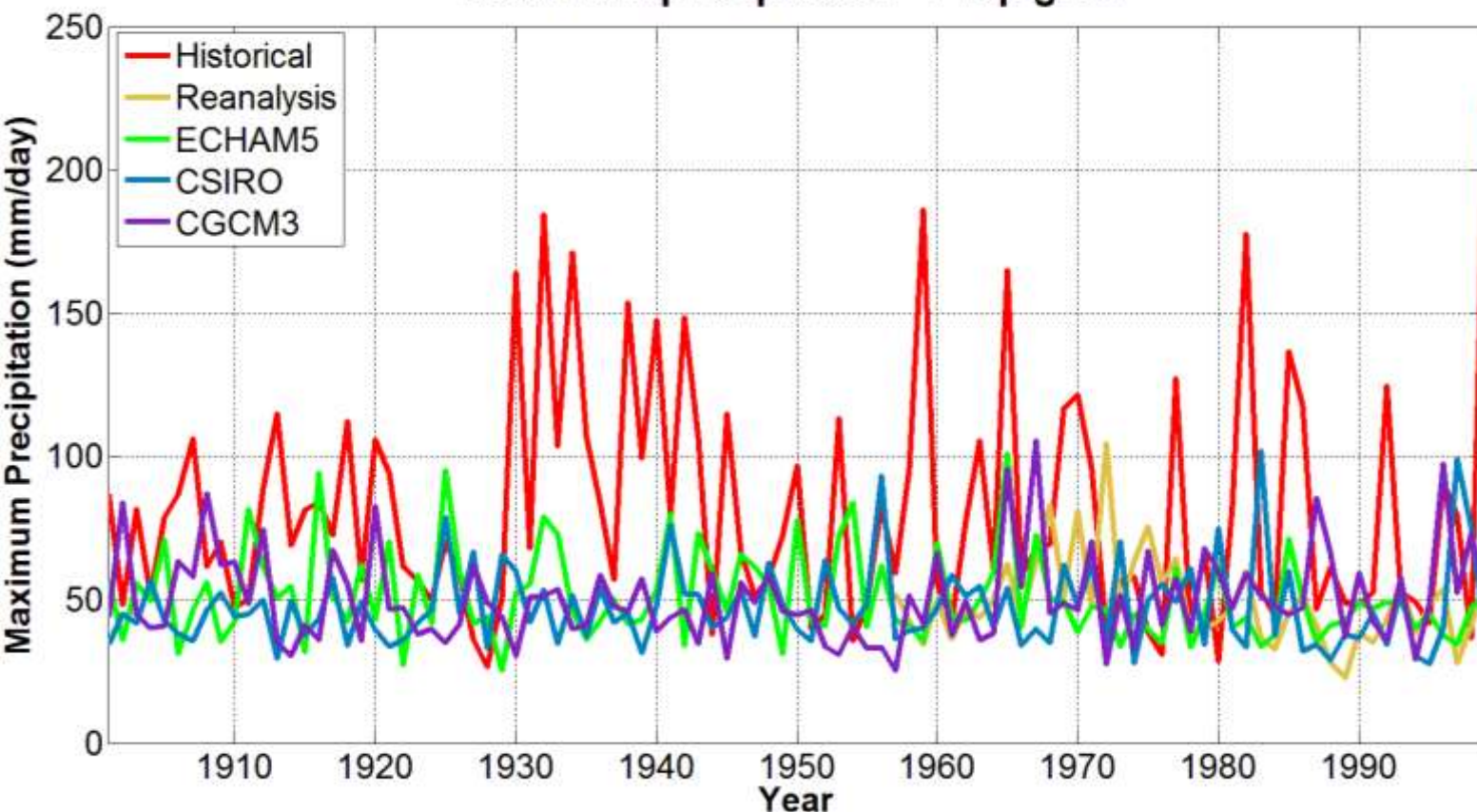
Χρονοσειρές ακραίων

	Correl	Efficiency
CSIRO	-0.03	-1.03
ECHAM5	-0.03	-1.04
CGCM3	0.00	-0.89
Reanalysis	0.01	-3.50

Maximum precipitation - Belgrade



Maximum precipitation - Perpignan



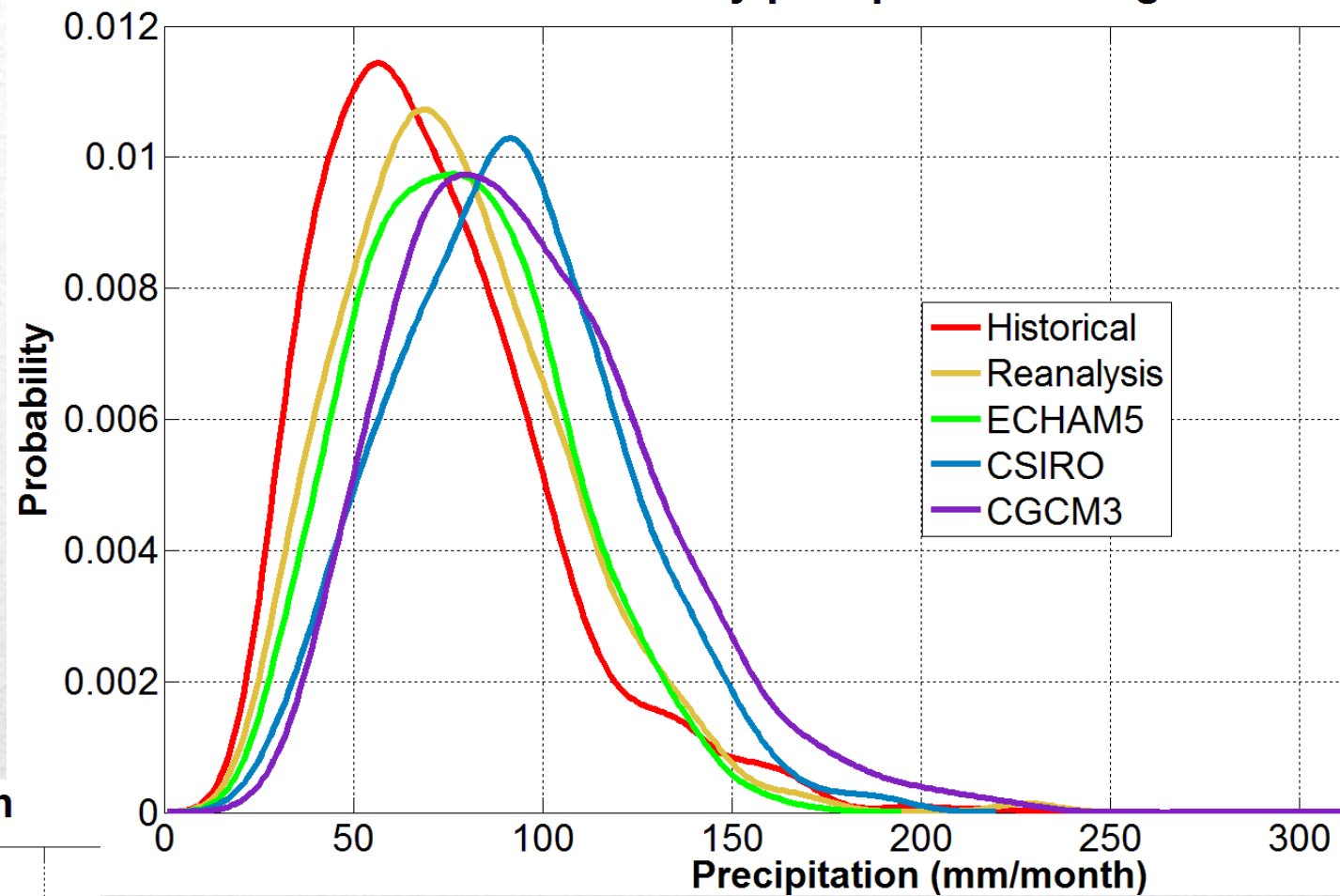
Ημερήσιες χρονοσειρές

	Correl	Efficiency
CSIRO	0.02	-0.42
ECHAM5	0.02	-0.49
CGCM3	0.02	-0.42
Reanalysis	0.02	-0.52

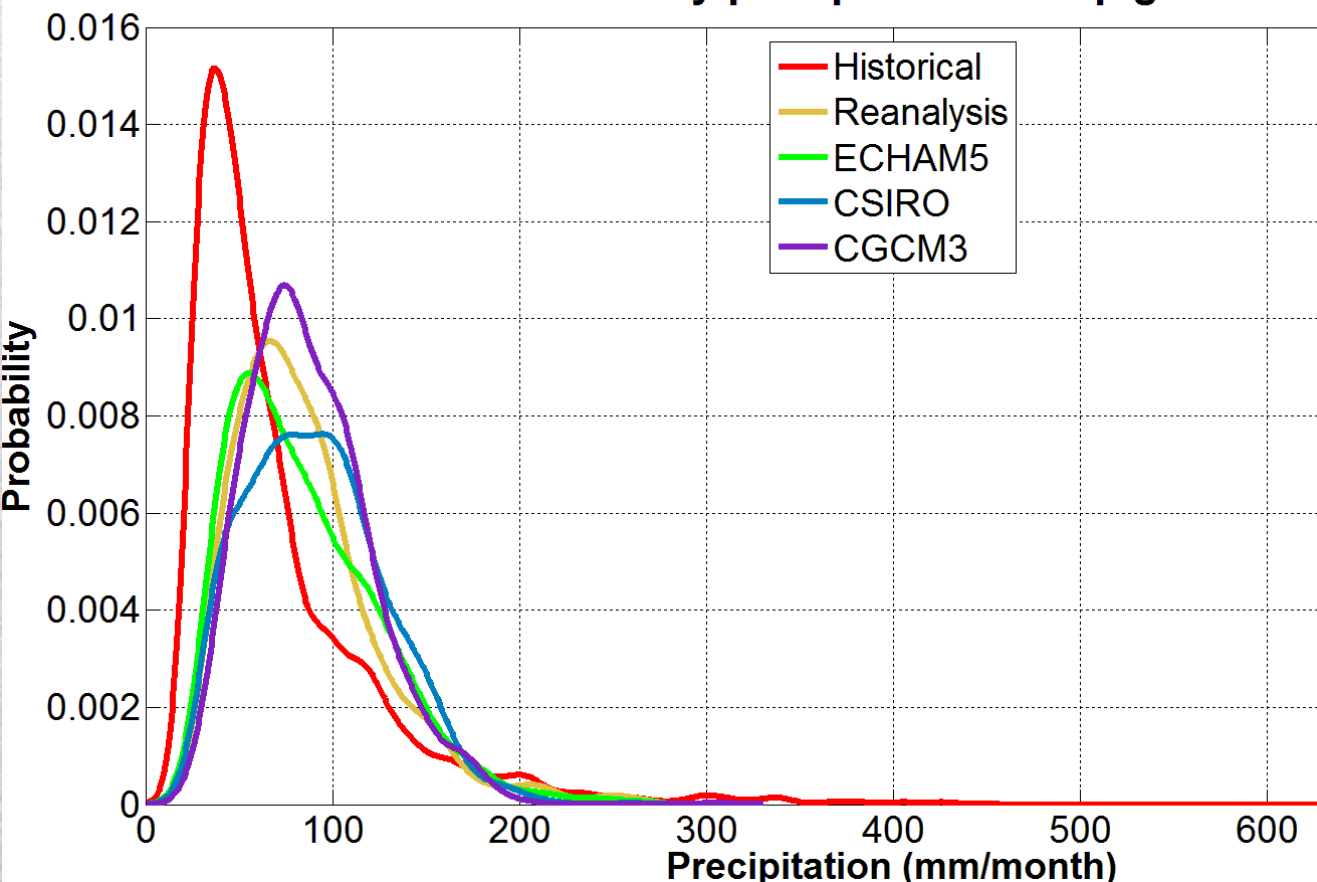
Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (III)

Χρονοσειρές μηνιαίων
κατακρημνίσεων

Monthly precipitation - Belgrade



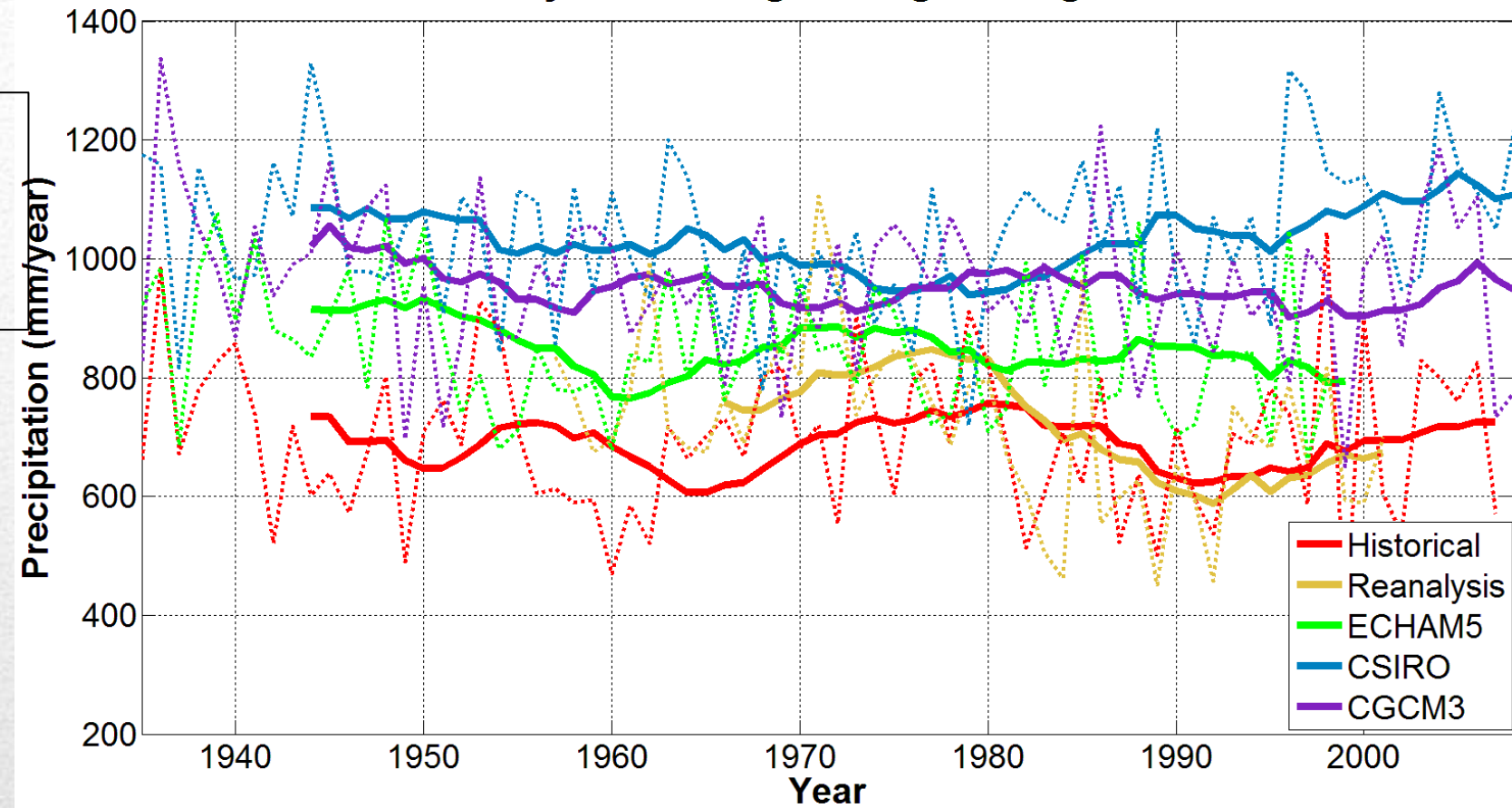
Monthly precipitation - Perpignan



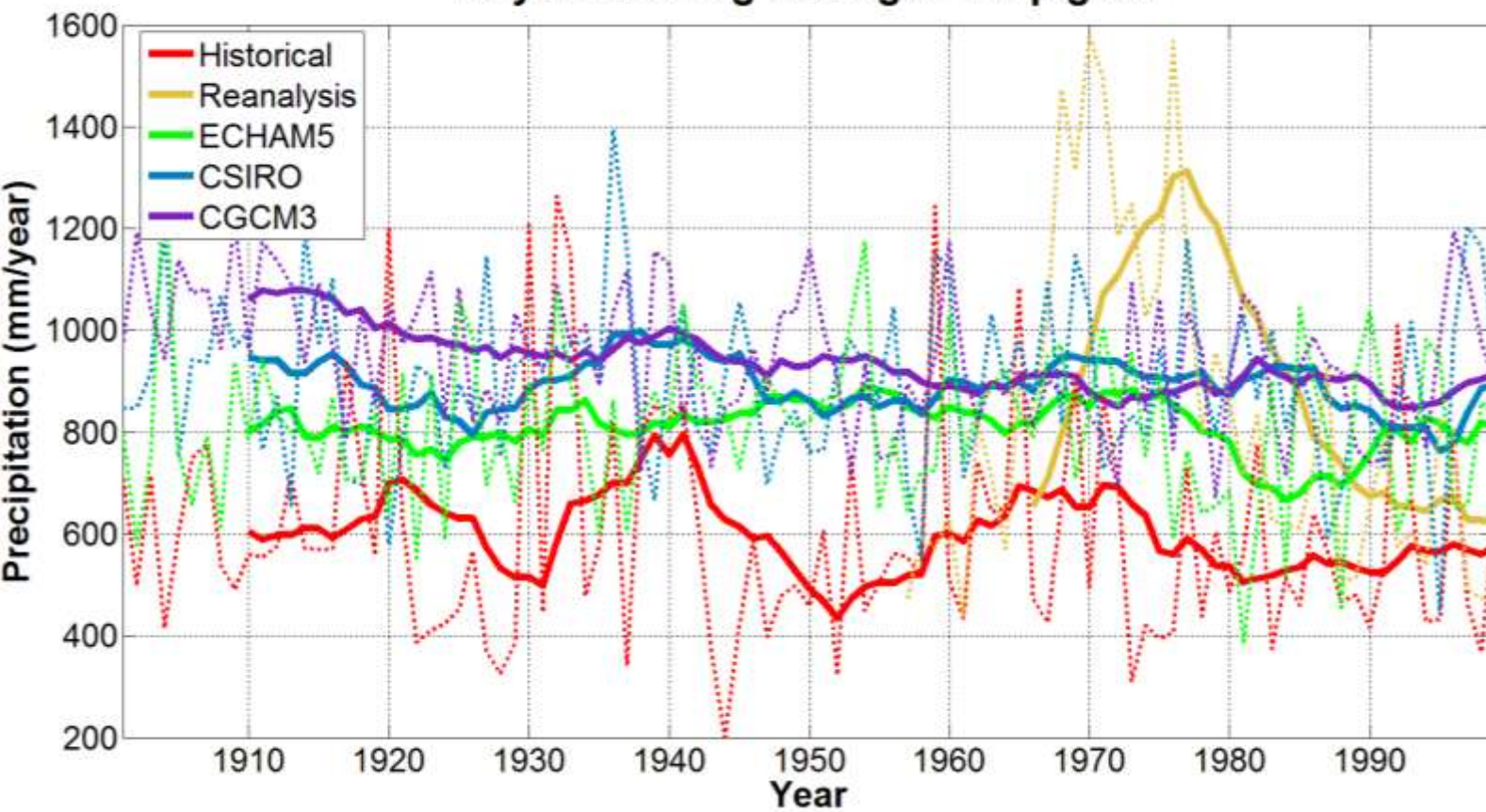
Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (IV)

Χρονοσειρές ετησίων
κατακρημνίσεων και ο 10-
ετής κινούμενος μέσος όρος

10-year moving average - Belgrade



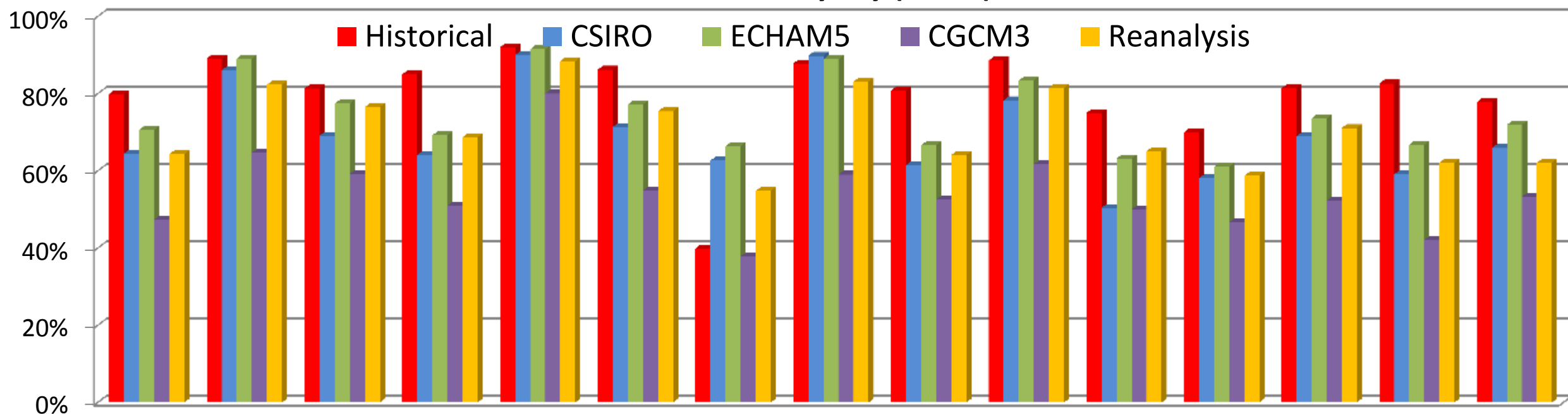
10-year moving average - Perpignan



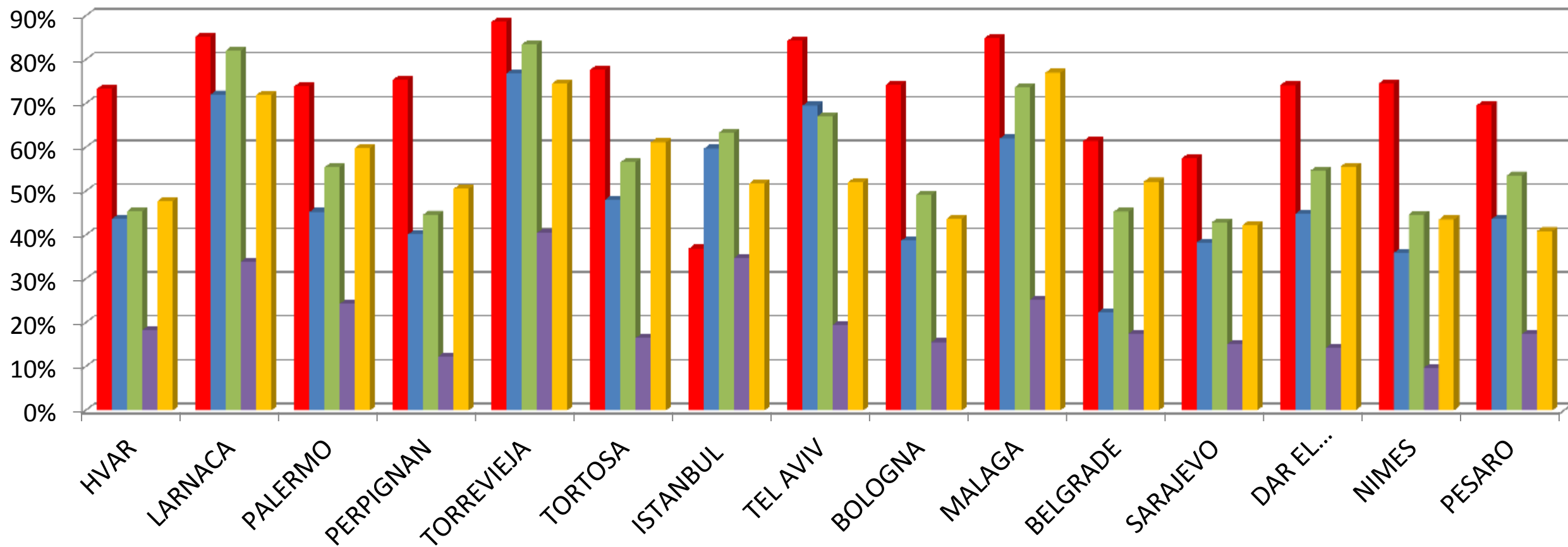
Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (V)

Διαλείπουσα συμπεριφορά βροχής (πιθανότητα μη βροχόπτωσης)

Probability dry (1 mm)

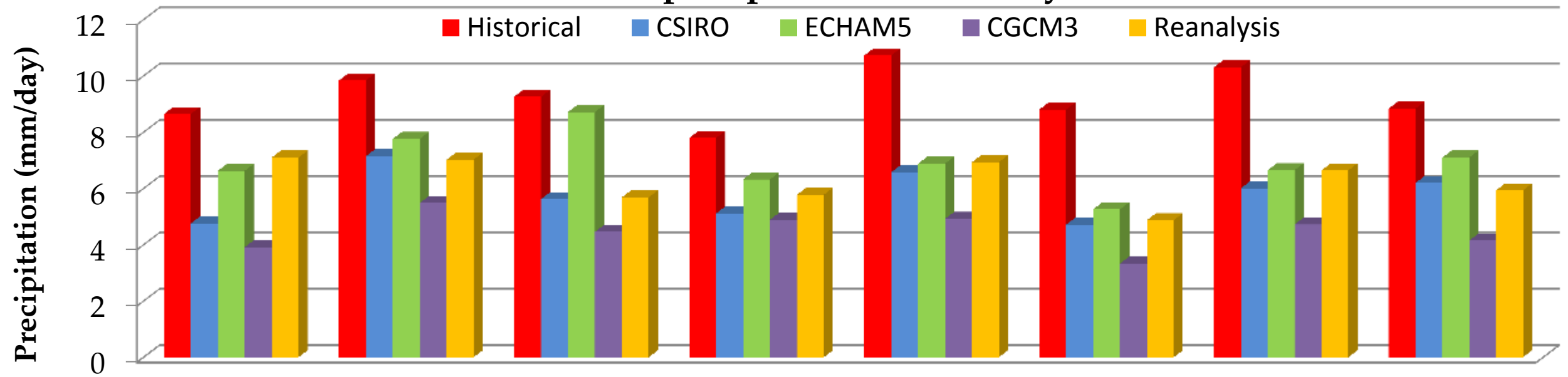


Probability dry (0.1mm)

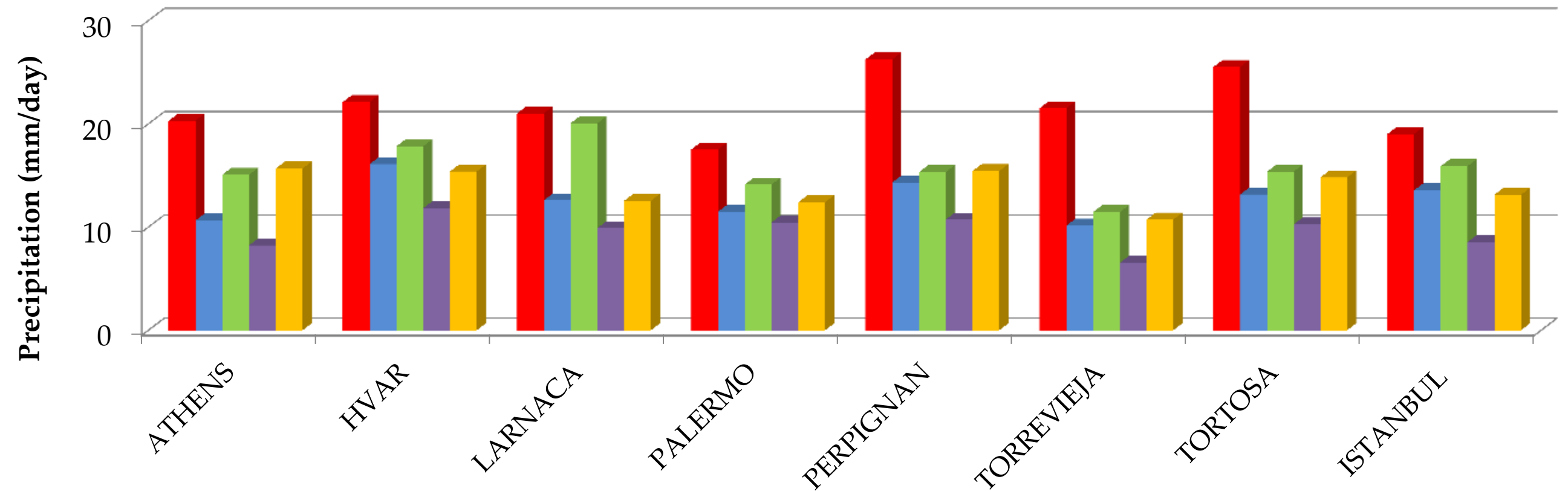


Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (VI)

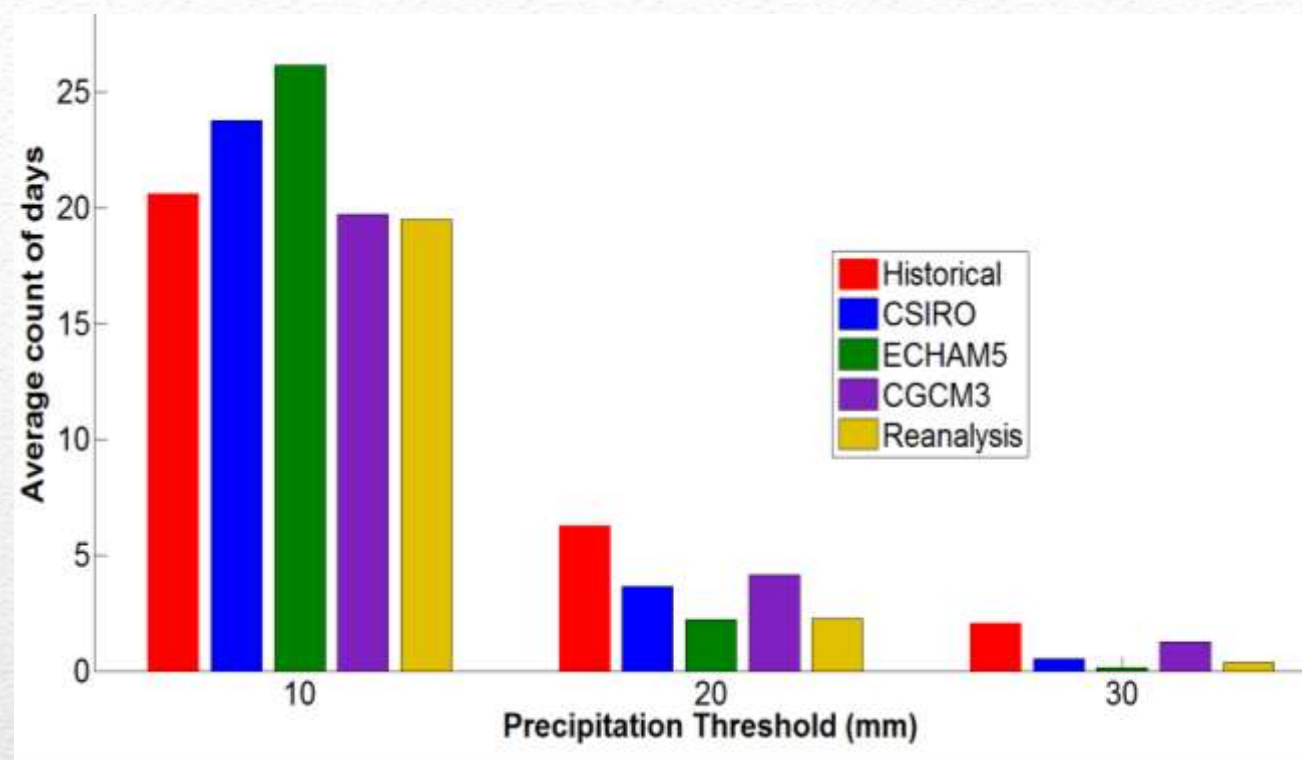
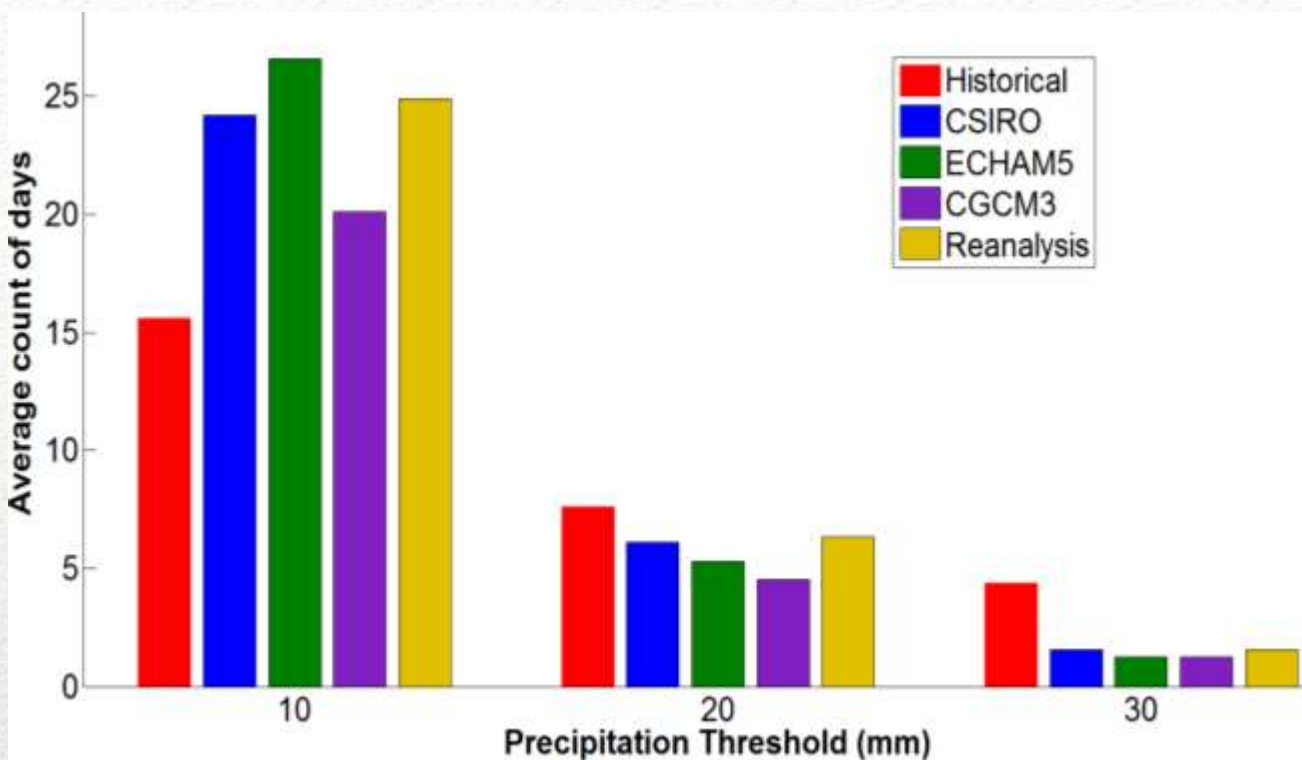
Mean precipitation of wet days



90-quantile of wet days



Αποτελέσματα βροχοπτώσεων (VII)

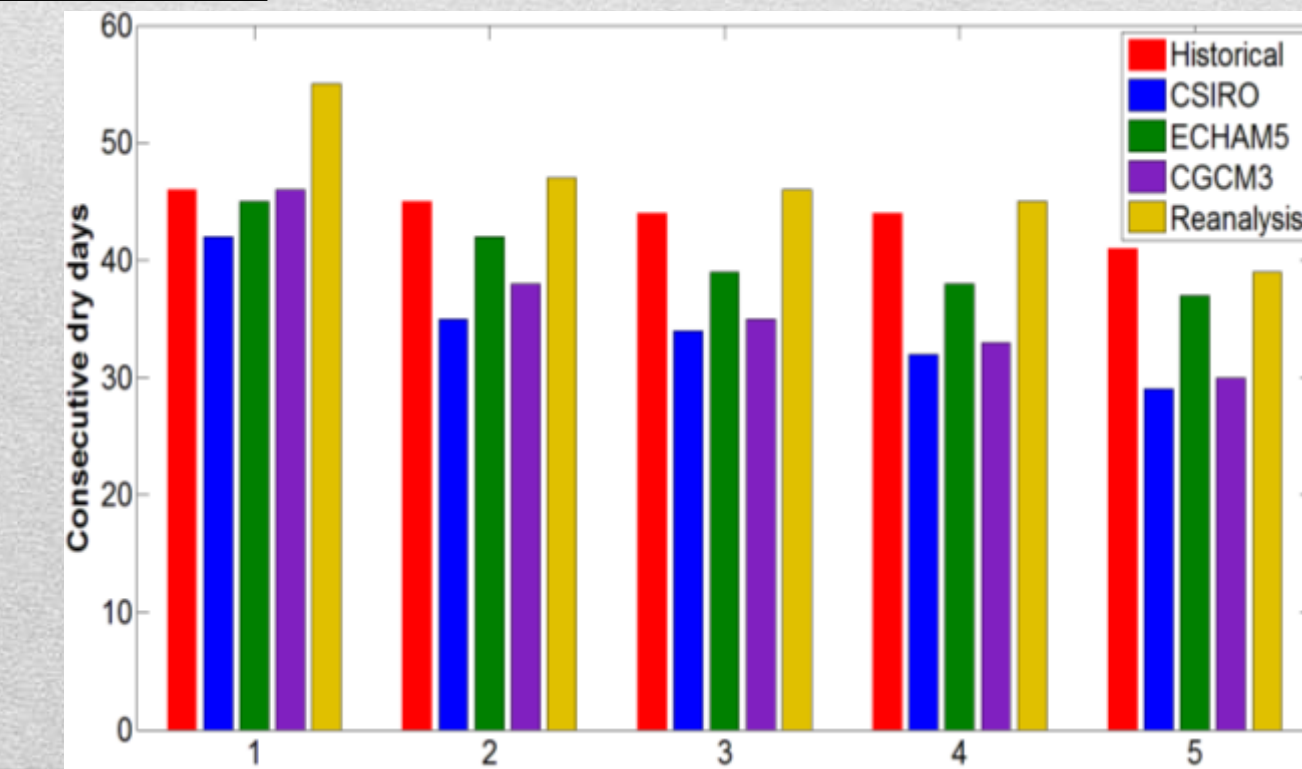
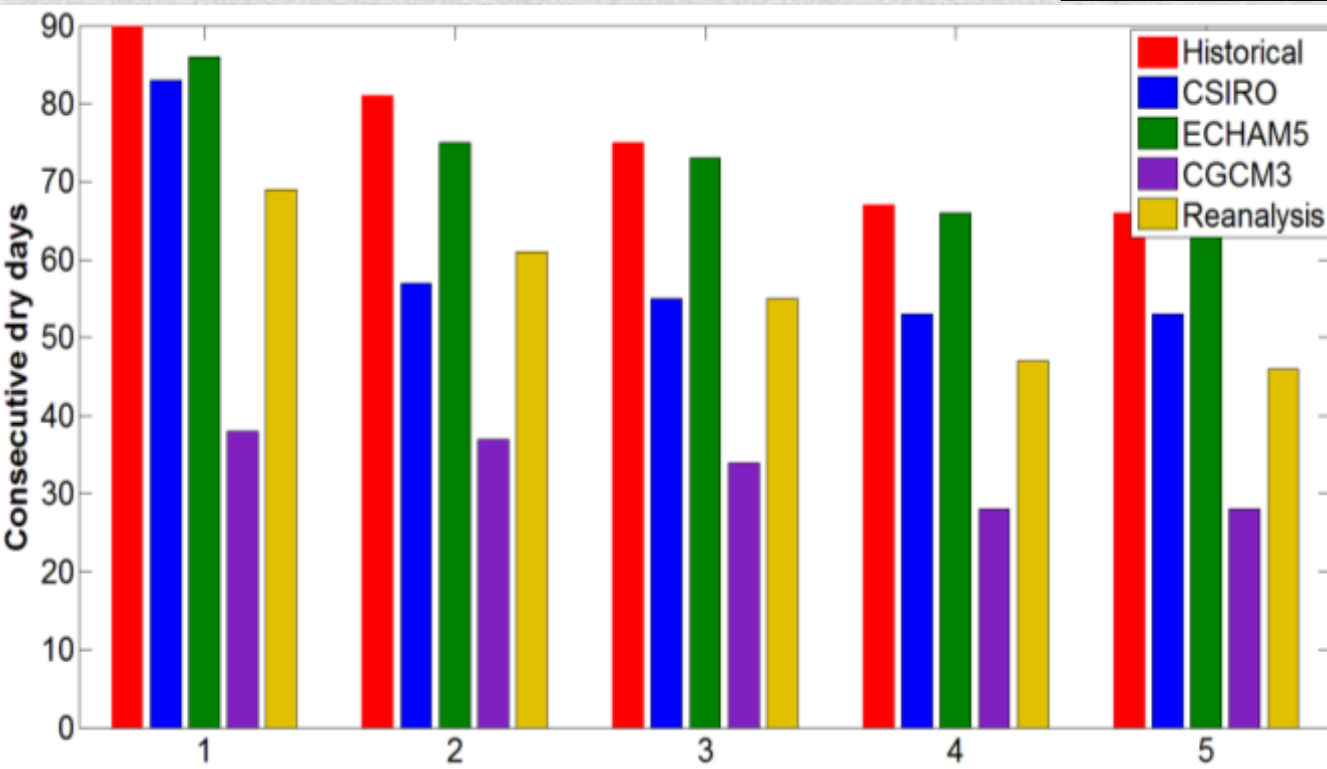


Κατώφλια βροχόπτωσης

Perpignan

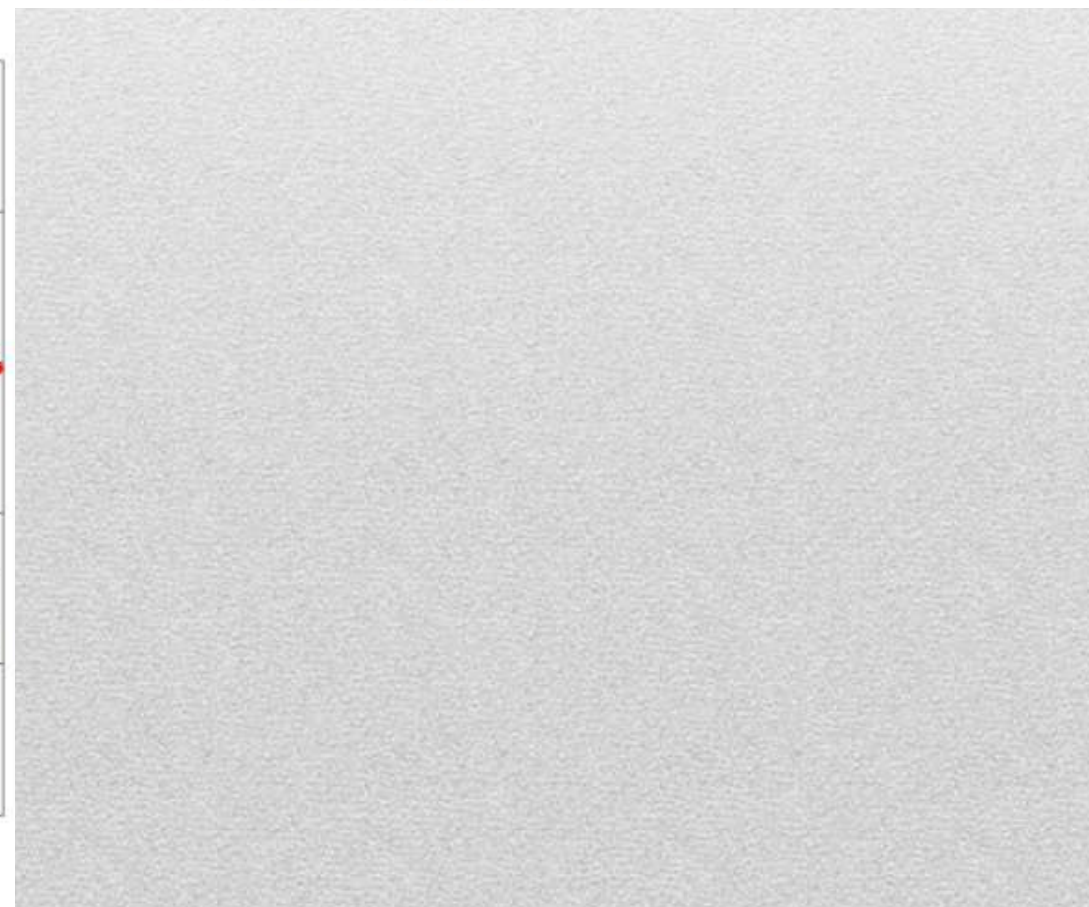
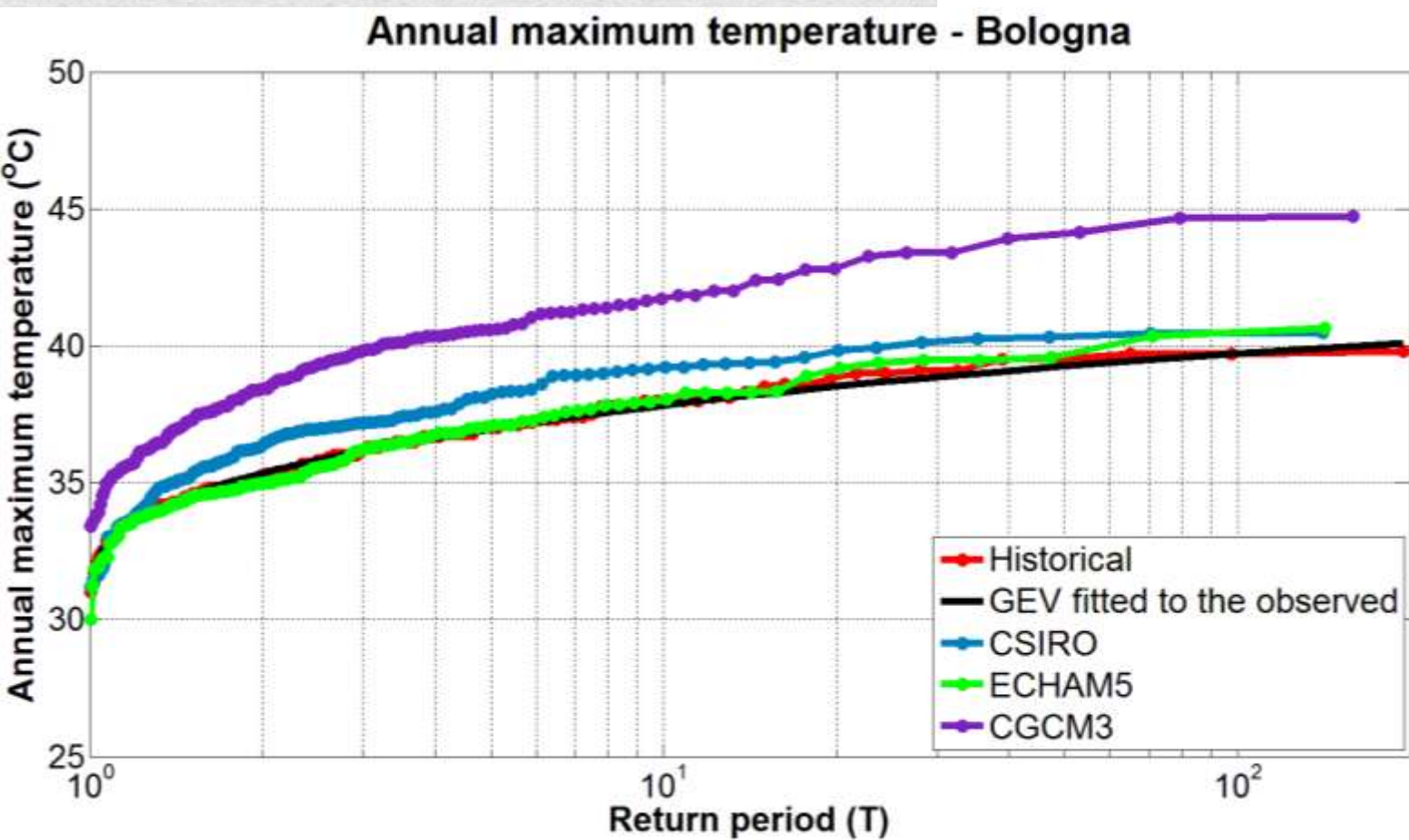
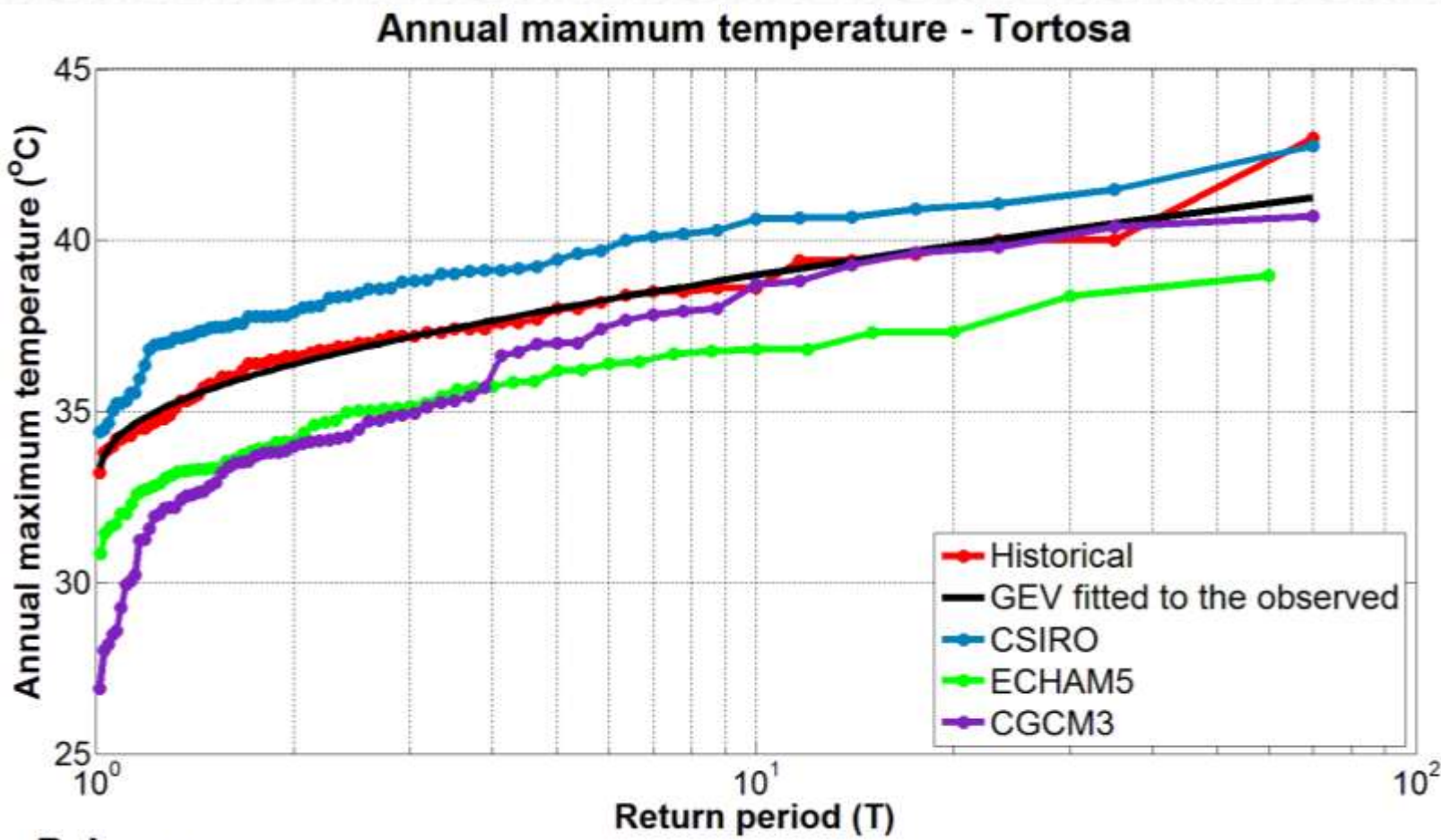
Belgrade

CDD



Αποτελέσματα θερμοκρασιών (I)

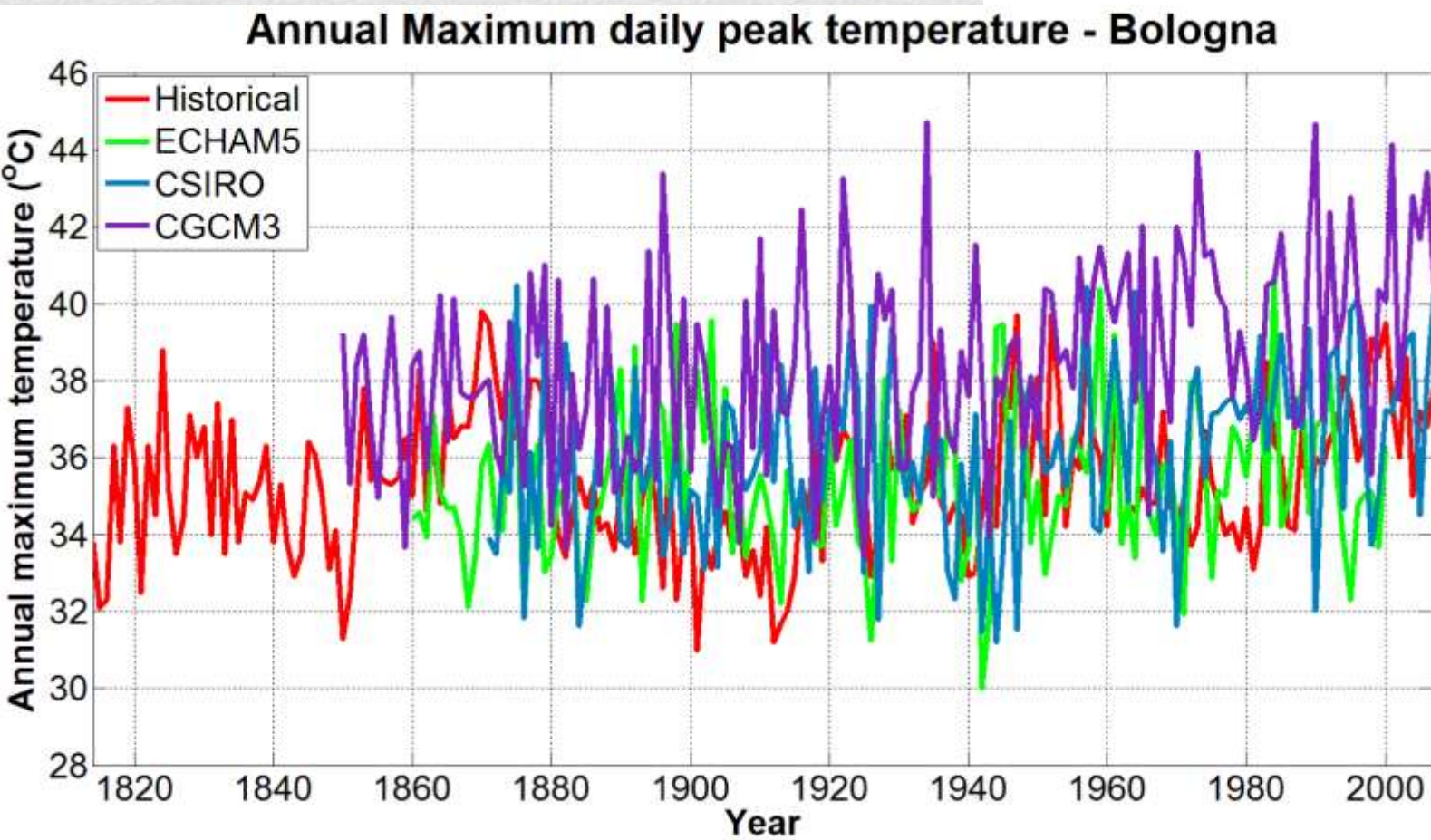
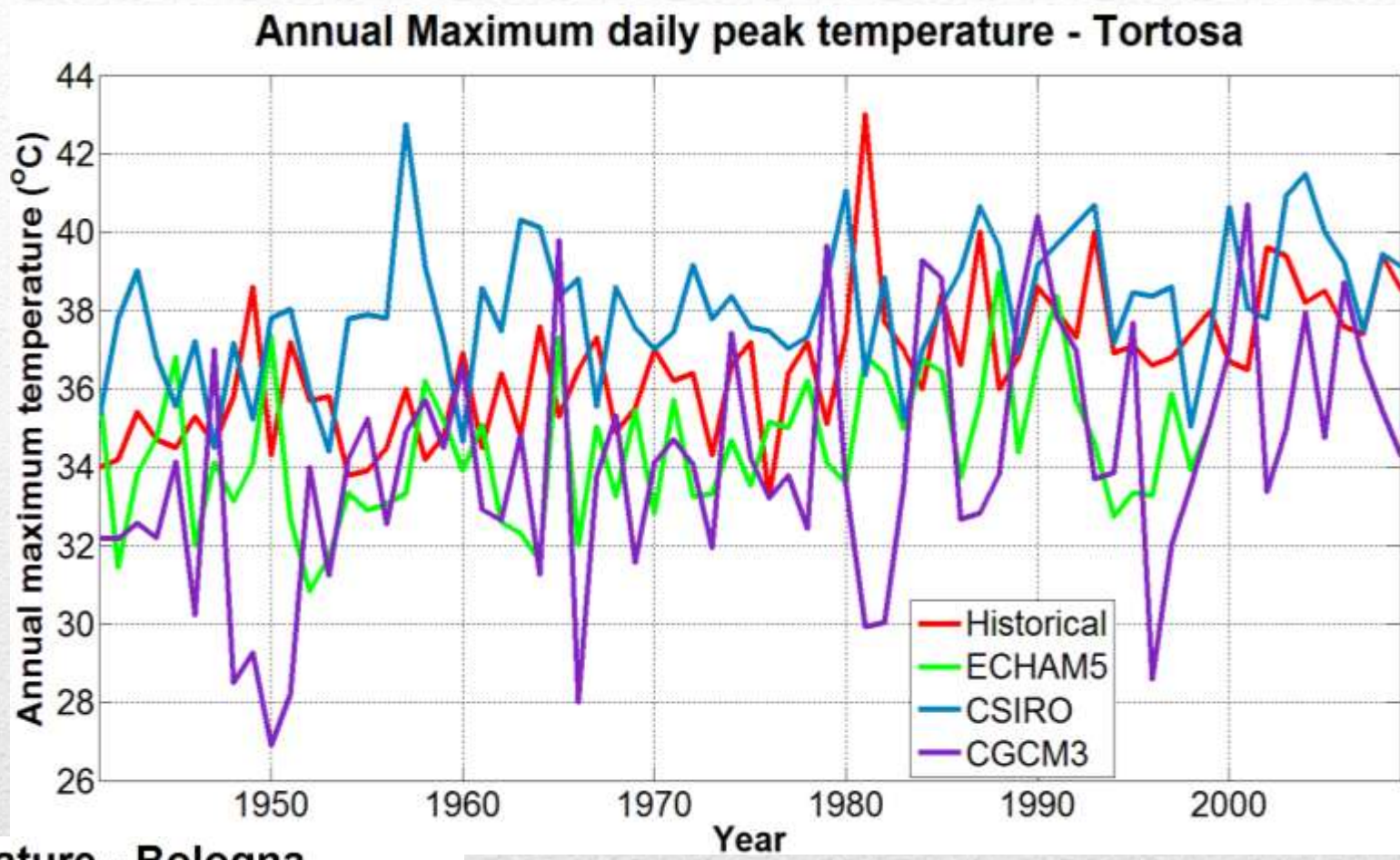
Εμπειρική κατανομή
μεγίστων ετησίων
θερμοκρασιών και
προσαρμογή της κατανομής
GEV στην ιστορική
χρονοσειρά



Αποτελέσματα θερμοκρασιών (II)

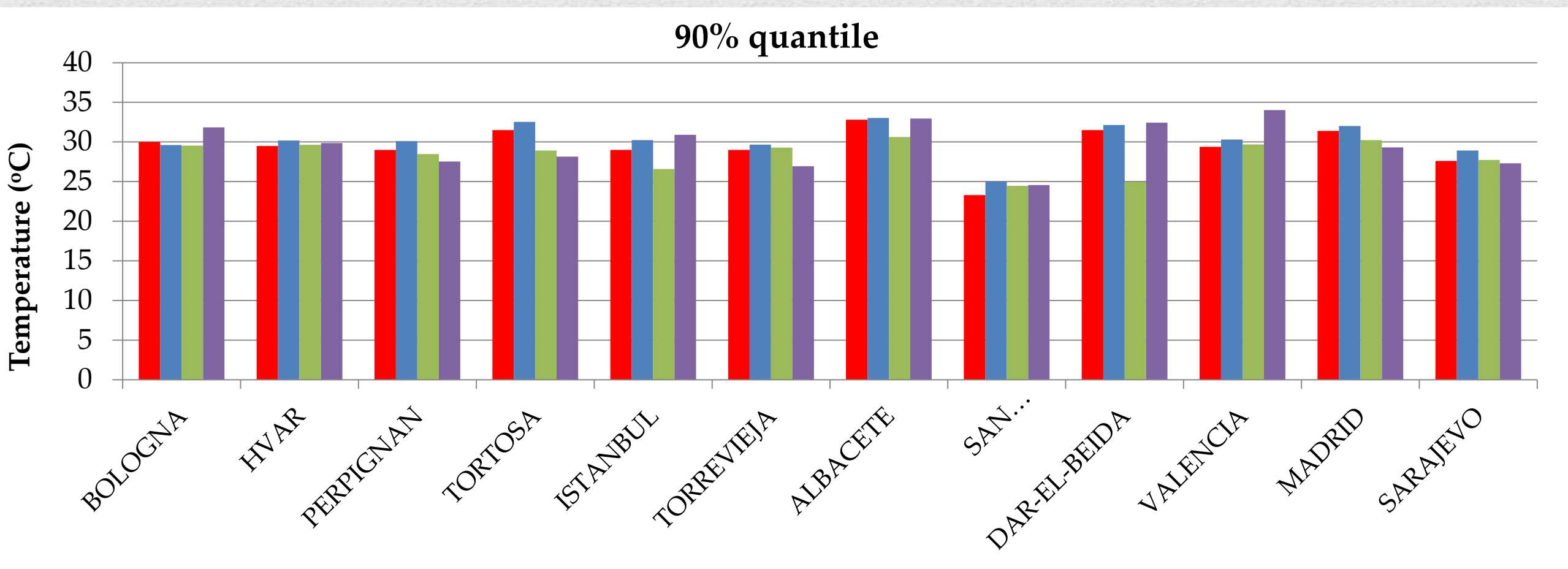
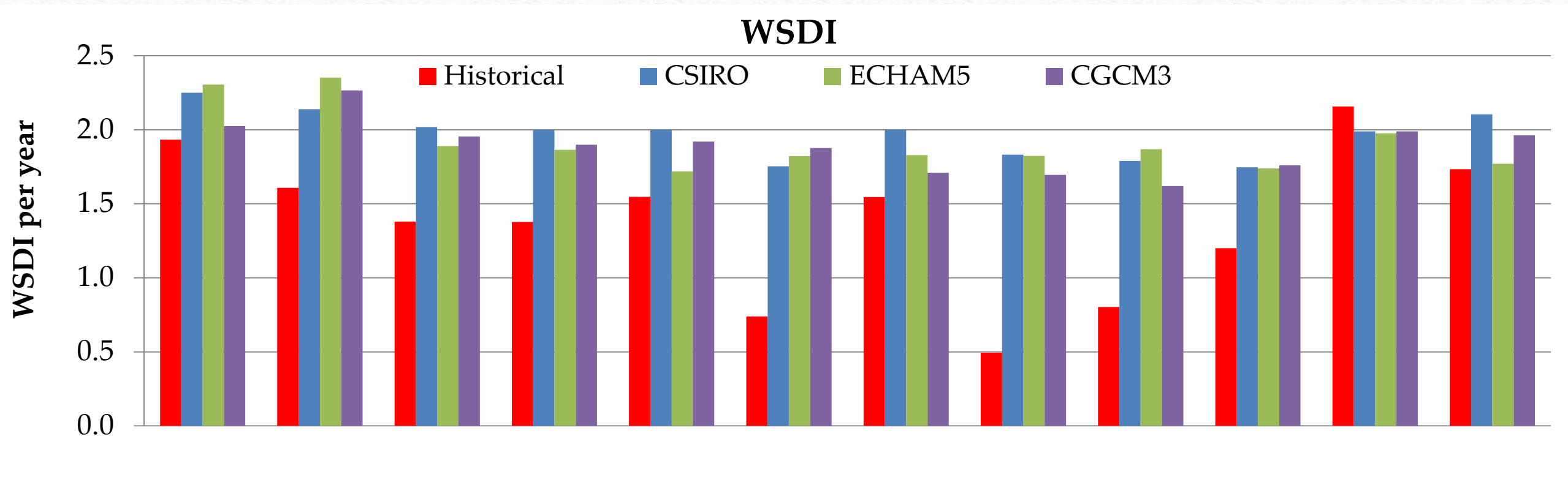
Χρονοσειρές ακραίων ετησίων θερμοκρασιών

Χρονοσειρές ακραίων		
	Correl	Efficiency
CSIRO	0.07	-2.06
ECHAM5	0.05	-4.80
CGCM3	0.05	-3.25



Ημερήσιες χρονοσειρές		
	Correl	Efficiency
CSIRO	0.65	0.32
ECHAM5	0.58	0.24
CGCM3	0.69	0.21

Αποτελέσματα θερμοκρασιών (III)



Συμπεράσματα

- Τα κλιματικά μοντέλα και τα reanalysis data αδυνατούν να αναπαράγουν τις ιστορικές παρατηρήσεις θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων, ιδιαιτέρως όταν εξετάζονται τα ακραία γεγονότα.
- Μηδενικοί συντελεστές συσχέτισης, αρνητικοί συντελεστές αποδοτικότητας
- Πολύ καλή προσαρμογή της κατανομής GEV στα ακραία γεγονότα
- Θερμοκρασία
 - Αναπαραγωγή εποχικής μεταβλητότητας
 - Αποδίδονται ικανοποιητικά τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών
 - Καλή προσομοίωση των κλιματικών δεικτών, εκτός του WSDI, ο οποίος εξετάζει τους καύσωνες
- Βροχόπτωση
 - Συστηματική υποτίμηση της έντασης ακραίων βροχοπτώσεων
 - Σημαντική υποτίμηση διαλείποντος φαινομένου
 - Υποεκτιμάται η ένταση της κατά τις υγρές ημέρες
 - Αδυναμία αναπαραγωγής υγρών και ξηρών περιόδων
 - Μέτρια απόδοση των κλιματικών δεικτών
 - Μη ικανοποιητικά αποτελέσματα των στατιστικών χαρακτηριστικών σε όλες τις χρονικές κλίμακες

Μπορούν τα GCMs να έχουν «πρωταγωνιστικό ρόλο» στην Υδρολογία;

- Δεν παρέχεται το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας για σχεδιασμό υδρολογικών έργων και τη χάραξη πολιτικών βιώσιμης διαχείρισης υδατικών πόρων.
- Τα GCMs δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται αβίαστα και χωρίς τεκμηρίωση.
- Επιβεβαιώνονται οι προβληματισμοί που έχουν τεθεί στην υδρολογική κοινότητα (Koutsoyiannis et al., 2008; Anagnostopoulos et al., 2010; Kundzewicz and Stakhiv, 2010; Kiem and Verdon-Kidd, 2011).
- Επαληθεύεται ο εγγενώς απρόβλεπτος χαρακτήρας του κλίματος και η επιρροή του από ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς παράγοντες ταυτοχρόνως. Η πολυπλοκότητα του κλίματος και η αδυναμία να υπάρξει άπειρη πληροφορία καθιστούν οποιαδήποτε μακροχρόνια πρόβλεψη εξαιρετικά αβέβαιη.

Ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας

