



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ
ΕΥΡΩΠΗ ΤΟΝ 21^ο ΑΙΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ
ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ RCP8.5**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΣΟΦΙΑΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Μαθηματικός

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2017



ΣΟΦΙΑΛΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

©2017- Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΤΟΝ 21^ο ΑΙΩΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ RCP8.5

Υποβλήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας,

στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών

«Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον»

του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κατράγκου Ελένη, Επίκουρη Καθηγήτρια Α.Π.Θ, Επιβλέπουσα

Ζάνης Πρόδρομος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ, Μέλος

Πυθαρούλης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ, Μέλος



Ευχαριστώ το πρόγραμμα ECA&D (<http://www.ecad.eu>) για την παροχή των παρατηρησιακών δεδομένων E-OBS.

Ευχαριστώ το Earth System Grid Federation (ESGF) διότι μέσω της ιστοσελίδας του πραγματοποιήθηκε η πρόσβαση στα δεδομένα των προσομοιώσεων από το προγράμμα του Euro-CORDEX.

Ευχαριστώ τις υποδομές του GRNET-ARIS μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του περιοχικού κλιματικού μοντέλου WRF 3.7.1.

Ευχαριστώ το Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης (ΚΗΔ) του ΑΠΘ, καθώς μέσω των υποδομών του, μου δόθηκε η δυνατότητα να αναλύσω τα δεδομένα της παρούσης εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ.Τσιγαρίδη από το Columbia University της Νέας Υόρκης, για τη παροχή των δεδομένων του παγκόσμιου μοντέλου γενικής κυκλοφορίας NASA GISS_E2.

Ευχαριστώ τους καθηγητές και μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ.Ζάνη Πρόδρομο και κ.Πυθαρούλη Ιωάννη γιατί με το ήθος τους και τις επιστημονικές τους γνώσεις, στάθηκαν αρωγοί στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στην Επίκουρη Καθηγήτρια και επιβλέπουσα της εργασίας, κ.Κατράγκου Ελένη, καθώς οι γνώσεις, η προσωπικότητα και η ανιδιοτελής βοήθεια της αποτέλεσαν εφαλτήριο για την ολοκλήρωση τόσο της διπλωματικής μου εργασίας όσο και των μεταπτυχιακών μου σπουδών.



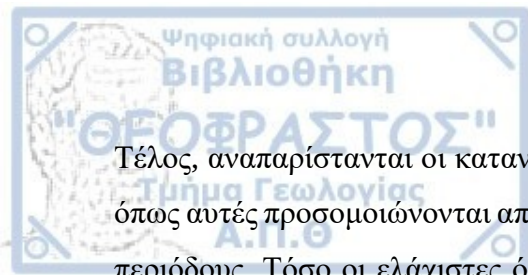
Περίληψη

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης μελετάται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής πάνω από την Ευρώπη για τον 21^ο αιώνα, με χρήση περιοχικής κλιματικής προσομοίωσης, οδηγούμενης από το σενάριο RCP8.5. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.7.1 του κλιματικού μοντέλου WRF καθώς και τα RACMOE22, REMO2009, RCA4, CCLM4, ALADIN53, WRF331 από το πρόγραμμα του Euro-CORDEX, για την ανάλυση αβεβαιότητας των κλιματικών μοντέλων με τη χρήση σμήνους προσομοιώσεων. Όλες οι κλιματικές προσομοιώσεις χαρακτηρίζονται από χωρική διακριτοποίηση 0.44°. Οι μεταβλητές που αναλύθηκαν είναι αυτές της θερμοκρασίας και του υετού. Η χρονική ανάλυση των μεταβλητών πραγματοποιήθηκε σε τρεις περιόδους, σε αντιστοιχία με τις περιόδους αναφοράς της 5^{ης} έκθεσης (AR5) του IPCC: 1986-2005, 2046-2065 και 2080-2099. Επίσης, η χωρική ανάλυση τους πραγματοποιήθηκε σε οκτώ υποπεριοχές, σε αντιστοιχία με τις περιοχές μελέτης του προγράμματος PRUDENCE.

Σε πρώτη φάση, γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης των περιοχικών κλιματικών προσομοιώσεων με τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS. Το μοντέλο WRF οδηγούμενο από το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας NASA_GISS_E2 υποεκτιμά τη θερμοκρασία και υπερεκτιμά τον υετό. Η απόδοση του μοντέλου WRF 3.7.1 οφείλεται σε δομικά σφάλματα του WRF αλλά και σε μετάδοση σφαλμάτων του μοντέλου παγκόσμιας κλίμακας μέσω της χρήσης οριακών συνθηκών.

Έπειτα, αναλύονται οι χρονοσειρές και οι γραμμικές τάσεις των εποχιακών και ετήσιων ανωμαλιών της θερμοκρασίας και του υετού για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1986-2005. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές θετικές ανωμαλίες εμφανίζονται την εποχή του καλοκαιριού, κυρίως στις περιοχές της Ιβηρικής Χερσονήσου, στις Άλπεις, στη Μεσόγειο και στη Σκανδιναβία, με τα κλιματικά μοντέλα ωστόσο να παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα. Όσον αφορά τον υετό, τα κλιματικά μοντέλα εκτιμούν μείωση του ετήσιου υετού στη Νότια Ευρώπη και αύξηση στη Βορειανατολική Ευρώπη. Το σήμα των αλλαγών για τον υετό είναι πιο έντονο την εποχή του καλοκαιριού.

Στη συνέχεια, μελετώνται οι μέσες ετήσιες διαφορές για τη θερμοκρασία και τον υετό, ανάμεσα στις δύο μελλοντικές περιόδους και την περίοδο αναφοράς.



Τέλος, αναπαρίστανται οι κατανομές της ημερήσιας θερμοκρασίας και του ημερήσιου νετού, όπως αυτές προσομοιώνονται από το WRF 3.7.1 για την Ιβηρική Χερσόνησο, σε τρεις χρονικές περιόδους. Τόσο οι ελάχιστες όσο και οι μέγιστες μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες εκτιμάται ότι θα αυξηθούν σε ένταση, ενώ οι ελάχιστες θα αυξηθούν και σε συχνότητα κυρίως την εποχή του χειμώνα. Επίσης, εκτιμάται μείωση των ημερών με μηδενικό ή μικρό νετό (<3mm) και αύξηση της έντασης των ακραίων βροχοπτώσεων.



Abstract

This postgraduate dissertation examines the phenomenon of climate change over Europe for the 21st century, using climate simulation driven by the RCP8.5 scenario. The regional climate model WRF version 3.7.1 was used, along with the regional models RACMOE22, REMO2009, RCA4, CCLM4, ALADIN53, WRF331 from the Euro-CORDEX program, to assess the multi-model ensemble uncertainty. All climate simulations are characterized by spatial resolution of 0.44°. The variables analyzed are those of temperature and precipitation. The temporal analysis of the variables was carried out over three periods, corresponding to the IPCC 5th Report (AR5) reporting periods: 1986-2005, 2046-2065 and 2080-2099. Also, their spatial analysis was carried out in eight sub-areas, corresponding to the study areas of the PRUDENCE program.

First, the regional climatic simulations are evaluated with the E-OBS observational data. The WRF model driven by the NASA_GISS_E2 global model underestimates the temperature and overestimates the precipitation. The performance of the WRF 3.7.1 model is due to WRF structural failures, but also to global model error transmission through the use of boundary conditions.

Then, the time series and linear trends of seasonal and annual temperature and precipitation anomalies, for the period 1986-2099, are analyzed. Higher temperature positive anomalies are estimated in the summer, mainly in the Iberian Peninsula, the Alps, the Mediterranean and Scandinavia, with climatic models, however, showing great uncertainty. As for precipitation, climate models estimate a reduction in the total annual rainfall in southern Europe and an increase in northeast Europe. The sign of the changes for the precipitation is more intense during the summer season.

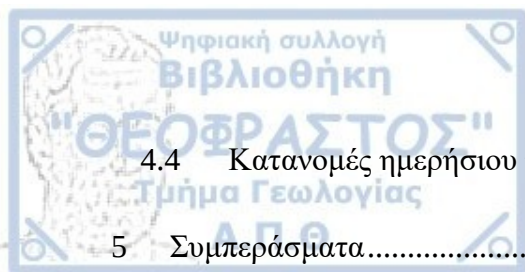
The average annual differences in temperature and precipitation between the two future periods and the reference period, according to WRF 3.7.1 and Euro-CORDEX models, are also studied.

Finally, distribution of daily temperature and precipitation in Iberian Peninsula for the three time periods, simulated by WRF 3.7.1, is shown and discussed. Both the minimum and maximum average daily temperatures are estimated to increase in intensity while the minimum will increase in frequency mainly in the winter. Also, a reduction in days with zero or small precipitation (<3mm) and an increase in the intensity of extreme rainfall is estimated.



Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Κλιματικά Μοντέλα	2
1.1.1	Παγκόσμια και Περιοχικά κλιματικά μοντέλα	4
1.1.2	Παραμετροποίηση.....	5
1.1.3	Αξιολόγηση.....	5
1.2	Κλιματικά σενάρια	6
1.2.1	IPCC Scenarios	6
1.3	Αβεβαιότητες	9
1.4	CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment)	11
2	Δεδομένα και Μεθοδολογία	12
2.1	Το μοντέλο πρόγνωσης και έρευνας καιρού WRF	12
2.2	Κλιματικά Μοντέλα Euro-CORDEX.....	14
2.3	Το παγκόσμιο μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS E2	15
2.4	The Representative Concentration Pathway (RCP 8.5).....	15
2.5	Επίγεια παρατηρησιακά δεδομένα (E-OBS).....	16
2.6	Μεθοδολογία.....	17
2.6.1	Στατιστική σημαντικότητα	19
2.6.2	Mann-Kendall test.....	19
2.6.3	Θηκόγραμμα	20
2.6.4	Probability Density Function plot (PDF plot).....	21
2.6.5	Quantile-Quantile plot	22
3	Θερμοκρασία	23
3.1	Αξιολόγηση	23
3.2	Χρονοσειρές και τάσεις.....	29
3.3	Κλιματικές προβολές	35
3.4	Κατανομές μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών	37
4	Υετός	41
4.1	Αξιολόγηση	41
4.2	Χρονοσειρές και τάσεις.....	47
4.3	Κλιματικές προβολές	53

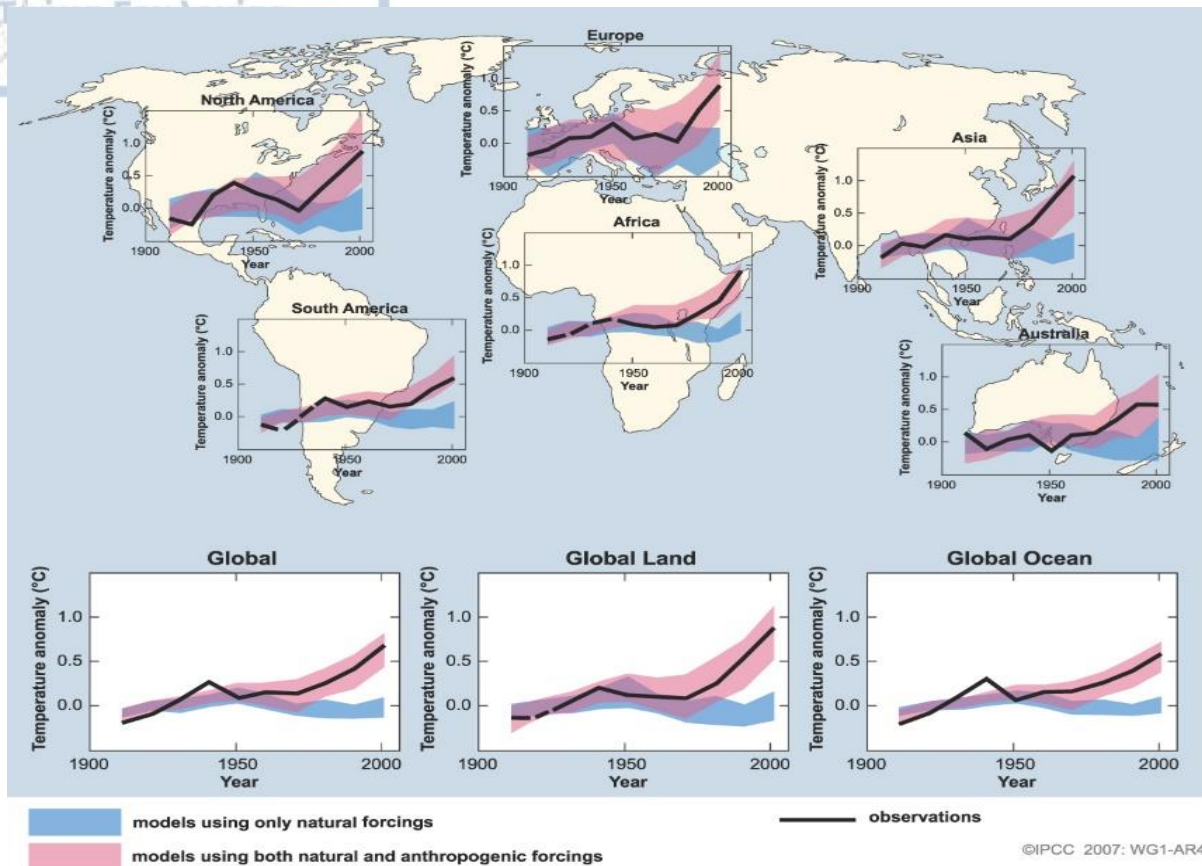


4.4	Κατανομές ημερήσιου νετού	55
5	Συμπεράσματα.....	58
6	Βιβλιογραφία	60

Ως κλίμα ορίζεται ο μέσος καιρός, ή πιο αυστηρά, η στατιστική περιγραφή, με τους όρους του μέσου και της μεταβλητότητας, μετεωρολογικών στοιχείων για μια χρονική περίοδο πάρα πολλών ετών (IPCC, 2014a). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO), η εγκεκριμένη περίοδος για την μεσοποίηση αυτών των στοιχείων είναι τα 30 έτη, κυρίως για στατιστικούς λόγους. Ως μετεωρολογικά στοιχεία συνήθως εννοούνται μεταβλητές επιφάνειας, όπως ο άνεμος, η βροχή και η θερμοκρασία.

Είναι γνωστό ότι το κλίμα του πλανήτη μεταβάλλεται στο πέρασμα των αιώνων. Διάφορα φυσικά αίτια, ενδό- και εξωπλανητικά, αλλοίωσαν τα χαρακτηριστικά του κλίματος στο παρελθόν, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ψυχρών και θερμών μακροχρόνιων περιόδων.

Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του παρόντος κλίματος, αρχής γενομένης από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, αποδίδεται κυρίως στον ανθρωπογενή παράγοντα και όχι αποκλειστικά σε φυσικά αίτια. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, με πρώτη και κύρια την καύση ορυκτών καυσίμων, επηρεάζουν το κλίμα, συμβάλλοντας στην αύξηση των εκπομπών και των συγκεντρώσεων των θερμοκηπικών αερίων. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν πολύ πιο ικανοποιητικά το φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης, όταν εκτελούνται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την αυξημένη συγκέντρωση των θερμοκηπικών αερίων (ανθρωπογενής παράγοντας) όσο και τις φυσικές παρεμβάσεις που οδηγούν στην μεταβολή του κλίματος. Εν αντιθέσει, όταν εκτελούνται χρησιμοποιώντας μόνο τα φυσικά αίτια αγνοώντας τον ανθρωπογενή παράγοντα, τότε υπάρχει μεγάλη απόκλιση της προσομοιωμένης θερμοκρασίας από την πραγματική. (Σχήμα 1.1)



Σχήμα 1.1: Διαφορά θερμοκρασίας από τη μέση ετήσια θερμοκρασία της περιόδου 1901-1950. Με μαύρο παρουσιάζονται τα πραγματικά δεδομένα, με μπλε οι προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη μόνο τον φυσικό παράγοντα και με κόκκινο οι προσομοιώσεις μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τόσο τον ανθρώπινο όσο και τον φυσικό παράγοντα (IPCC, 2014b)

Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), ως κλιματική αλλαγή ορίζεται η αλλαγή της κατάστασης του κλίματος που μπορεί να αναγνωριστεί (χρησιμοποιώντας στατιστικούς ελέγχους) με αλλαγές στη μέση κατάσταση ή/και στη μεταβλητότητα διάφορων κλιματικών στοιχείων και διαρκούν τουλάχιστον μια δεκαετία. Αυτές οι αλλαγές οφείλονται είτε σε φυσικές εσωτερικές διεργασίες του κλιματικού συστήματος είτε σε εξωπλανητικούς παράγοντες ή στην ανθρώπινη παρέμβαση στη σύνθεση της ατμόσφαιρας και στην χρήση γης.

1.1 Κλιματικά Μοντέλα

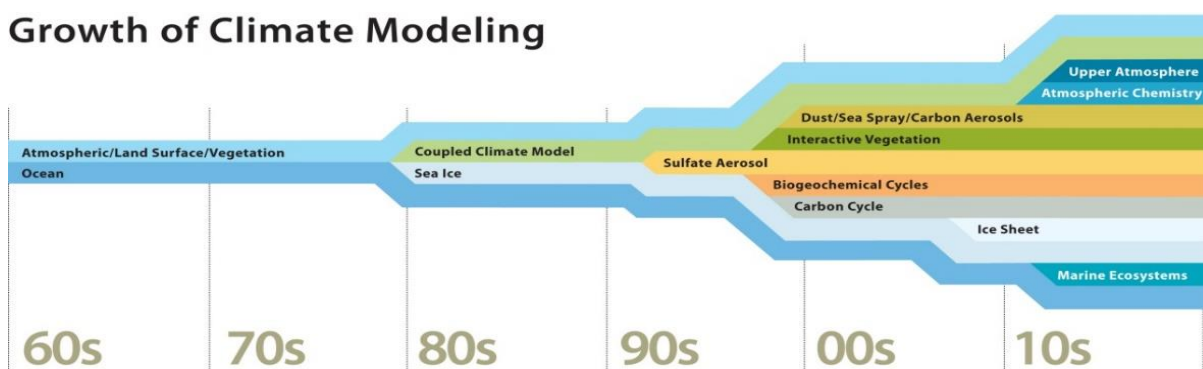
Καταλυτικό ρόλο στη μελέτη και στη προσομοίωση του κλίματος παίζουν τα κλιματικά μοντέλα. Αυτά αποτελούν μια αριθμητική αναπαράσταση του κλιματικού συστήματος βασιζόμενα πάνω σε θεμελιώδεις αρχές της Φυσικής, της Χημείας και της Βιολογίας.

Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τις παραπάνω θεμελιώδεις αρχές είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και για την επίλυση τους χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι, όπως τα σχήματα πεπερασμένων διαφορών. Στα περισσότερα μοντέλα γίνεται χρήση πεπερασμένων διαφορών ώστε να λυθούν οι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται πάνω σε ένα πλέγμα διακριτών σημείων χωρικά. Στην ουσία, το αποτέλεσμα των υπολογισμών για ένα πεδίο σε ένα σημείο του πλέγματος, αφορά την μέση τιμή του πεδίου στη κυψελίδα του πλέγματος.

Οι διαστάσεις της κυψελίδας πλέγματος καθορίζονται από την οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου, η οποία ορίζεται ως η μέση απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικά σημεία του πλέγματος. Το κριτήριο επιλογής για την οριζόντια διακριτοποίηση του μοντέλου εξαρτάται τόσο από το μέγεθος της περιοχής ολοκλήρωσης όσο και από την χωρική κλίμακα του φαινομένου που πρόκειται να μελετηθεί.

Ανάλογη της ραγδαίας εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι και η πρόοδος των κλιματικών μοντέλων, καθώς η ισχυροποίηση των υπερυπολογιστών έκανε δυνατή την αύξηση της χωρικής ανάλυσης και τη δημιουργία πιο ευέλικτων αριθμητικών μοντέλων. Έτσι, οι ερευνητές κατόρθωσαν να δημιουργήσουν μοντέλα συζευγμένα, δηλαδή να συμπεριλαμβάνουν διεργασίες μεταξύ των στοιχείων του κλιματικού συστήματος (πχ ωκεανός-ατμόσφαιρα), και όχι μόνο ατμοσφαιρικές διεργασίες όπως παλαιότερα (**Σχήμα 1.2**). Σήμερα, τα κλιματικά μοντέλα είναι πιο σύγχρονα και αποτελεσματικά από την αρχή της δημιουργίας τους, όμως πολύ πιο απαιτητικά όσον αφορά την υπολογιστική και αποθηκευτική δύναμη.

Growth of Climate Modeling



Σχήμα 1.2: Η χρονική εξέλιξη των κλιματικών μοντέλων (πηγή: <http://www2.ucar.edu/sites/default/files/news/2011/>)

1.1.1 Παγκόσμια και Περιοχικά κλιματικά μοντέλα

Περιοχή ολοκλήρωσης ορίζεται η περιοχή του πλανήτη που προσομοιώνει το κλιματικό μοντέλο. Ένα μοντέλο λέγεται παγκόσμιο (General Circulation Model-GCM) ή περιοχικό (Regional Climate Model-RCM) εάν η περιοχή ολοκλήρωσης του είναι όλη η γη ή μια περιοχή αυτής, αντίστοιχα.

Υπάρχουν παγκόσμια μοντέλα γενικής κυκλοφορίας που είναι ατμοσφαιρικά, δηλαδή περιλαμβάνουν τις διεργασίες που συμβαίνουν μόνο στην ατμόσφαιρα, καθώς και ωκεάνια που περιλαμβάνουν μόνο τις ωκεάνιες διεργασίες. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και συζευγμένα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, τα οποία προφανώς είναι πιο σύνθετα και λαμβάνουν υπόψη περισσότερες διεργασίες του κλιματικού συστήματος. Ωστόσο, η χωρική τους ανάλυση, λόγω μεγάλων απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους, είναι χαμηλή (100 – 200 Km) και μπορούν να προσομοιώσουν μόνο τα φαινόμενα που χαρακτηρίζονται για τη μεγάλη τους χωρική κλίμακα.

Η ανάγκη για την κατασκευή αξιόπιστων εκτιμήσεων για το κλίμα σε τοπικό επίπεδο, οδήγησε τους επιστήμονες στον δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας ή αλλιώς στα περιοχικά κλιματικά μοντέλα. Με τον δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας γίνεται α) εμφύτευση του πλέγματος του μοντέλου με την υψηλότερη χωρική ανάλυση (περιοχικό) στο πλέγμα του μοντέλου με την χαμηλότερη χωρική ανάλυση (παγκόσμιο), β) χρήση πλευρικών οριακών συνθηκών από μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας, οι οποίες «οδηγούν» το περιοχικό μοντέλο. Τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα είναι και αυτά σύνθετα και συνήθως καλύπτουν συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, ενώ στις μέρες μας είναι εφικτό να προσομοιώσουν περιοχή με χωρική ανάλυση της τάξης των 11 km σε επίπεδο ηπείρου ή και ακόμα μεγαλύτερη (~3 Km) για πιο περιορισμένες γεωγραφικές περιοχές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να αναπαριστούν φυσικές διαδικασίες που δεν μπορεί να αναπαραστήσει ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας σε τοπικό επίπεδο με μεγάλη ακρίβεια.

Γενικά, η επιστημονική κοινότητα επικεντρώνεται στην βελτιστοποίηση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων, μιας και αποτελούν το αποτελεσματικότερο ως τώρα εργαλείο για τη προσομοίωση του κλίματος σε περιοχικό επίπεδο. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι εμφανίζουν δυο μειονεκτήματα. Πρώτον, υιοθετούν τα λάθη του πληροφοριοδότη τους, δηλαδή του μοντέλου γενικής κυκλοφορίας, μέσω των οριακών συνθηκών. Συνήθως, μια καλή πρακτική

είναι να επιλέγεται μία περιοχή ολοκλήρωσης για το περιοχικό μοντέλο, μακριά από τα πλευρικά όρια (Laprise et al., 2012). Δεύτερον, τα περιοχικά μοντέλα, λόγω των πολλών διεργασιών που μπορεί να περιλαμβάνουν στις εξισώσεις τους και του πυκνού πλέγματος τους, απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλο υπολογιστικό κόστος και χρόνο, πρόβλημα στο οποίο η ανάπτυξη των υπερυπολογιστών δίνει τη λύση.

1.1.2 Παραμετροποίηση

Στο κλιματικό σύστημα συμβαίνουν φαινόμενα που λόγω της χωρικής και χρονικής τους κλίμακας δεν γίνεται να αναλυθούν σε επίπεδο πλεγματού κελιού από τα κλιματικά μοντέλα (πχ η κατακόρυφη μεταφορά). Οι επιδράσεις των φαινομένων αυτών λαμβάνονται υπόψη από τα κλιματικά μοντέλα με τη χρήση των παραμετροποιήσεων. Αυτές είναι εμπειρικές σχέσεις που σκοπό έχουν να προσεγγίσουν και να περιγράψουν κάποια διεργασία.

Σήμερα, υπάρχουν αρκετές παραμετροποιήσεις και σχήματα φυσικής για τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στο κλιματικό σύστημα. Η επιλογή της παραμετροποίησης ή ενός σχήματος είναι σημαντική γιατί μπορεί να επηρεάσει αρκετά τα αποτελέσματα μιας κλιματικής προσομοίωσης. Στην βιβλιογραφία, υπάρχουν μελέτες όπου οι προσομοιώσεις του ίδιου κλιματικού μοντέλου, με διαφορετικές παραμετροποιήσεις για την ίδια περιοχή ολοκλήρωσης, είχαν σημαντικές διαφορές. (García-Díez et al., 2015)

1.1.3 Αξιολόγηση

Ένα μείζον ζήτημα που απασχολεί τους ερευνητές είναι πόσο αξιόπιστη μπορεί να θεωρηθεί μια προσομοίωση που γίνεται από ένα κλιματικό μοντέλο για το μελλοντικό κλίμα.

Η πρακτική που εφαρμόζεται για την αξιολόγηση ενός κλιματικού μοντέλου είναι η εκτέλεση του για μια παρελθοντική περίοδο υπο την οδήγηση δεδομένων επανάλυσης (hindcast προσομοίωση) και έπειτα η σύγκριση της προσομοίωσης του με παρατηρησιακά δεδομένα. Τα δεδομένα επανάλυσης αποτελούν αριθμητική περιγραφή της πρόσφατης κλιματικής κατάστασης που διορθώνονται από παρατηρησιακά δεδομένα, έχοντας αναλυθεί με διάφορες μεθόδους για την αξιοπιστία τους. Επομένως, διασφαλίζοντας αρχικά ότι το μοντέλο οδηγήθηκε από αξιόπιστες οριακές συνθήκες, μένει να διαπιστωθεί κατά πόσο συγκλίνει ή αποκλίνει από την πραγματικότητα, συγκρίνοντας την προσομοίωση με τις παρατηρήσεις.

Αρα, αν ένα κλιματικό μοντέλο προσομοιώνει αρκετά καλά το παρελθοντικό κλίμα, δηλαδή αναπαράγει σωστά τις διεργασίες του κλιματικού συστήματος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος.

Η αξιολόγηση ενός κλιματικού μοντέλου είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς μόνο έτσι μπορεί να εντοπιστούν πιθανά σφάλματα στην αναπαραγωγή διάφορων φυσικών διεργασιών.

1.2 Κλιματικά σενάρια

Κλιματικό σενάριο είναι μια ευλογοφανής και απλουστευμένη αναπαράσταση των μελλοντικών συγκεντρώσεων των θερμοκηπικών αερίων που βασίζεται σε μια σειρά υποθέσεων για τα αίτια των εκπομπών αυτών (κοινωνικά, πολιτικοοικονομικά κλπ) (IPCC, 2014b). Η δημιουργία τους έχει σκοπό να ερευνηθούν πιθανές επιπτώσεις της ανθρώπινης παρέμβασης στο μελλοντικό κλίμα. Το κύριο εργαλείο για την ανάπτυξη κλιματικών σεναρίων αποτελούν οι κλιματικές προβολές, παρ'όλα αυτά χρειάζονται επιπρόσθετες πληροφορίες για την δημιουργία αξιόπιστων σεναρίων. Αξίζει να τονιστεί ότι ένα σενάριο δεν αποτελεί πρόγνωση της μελλοντικής κατάστασης του κλίματος αλλά μια όσο το δυνατόν ρεαλιστική εκτίμηση.

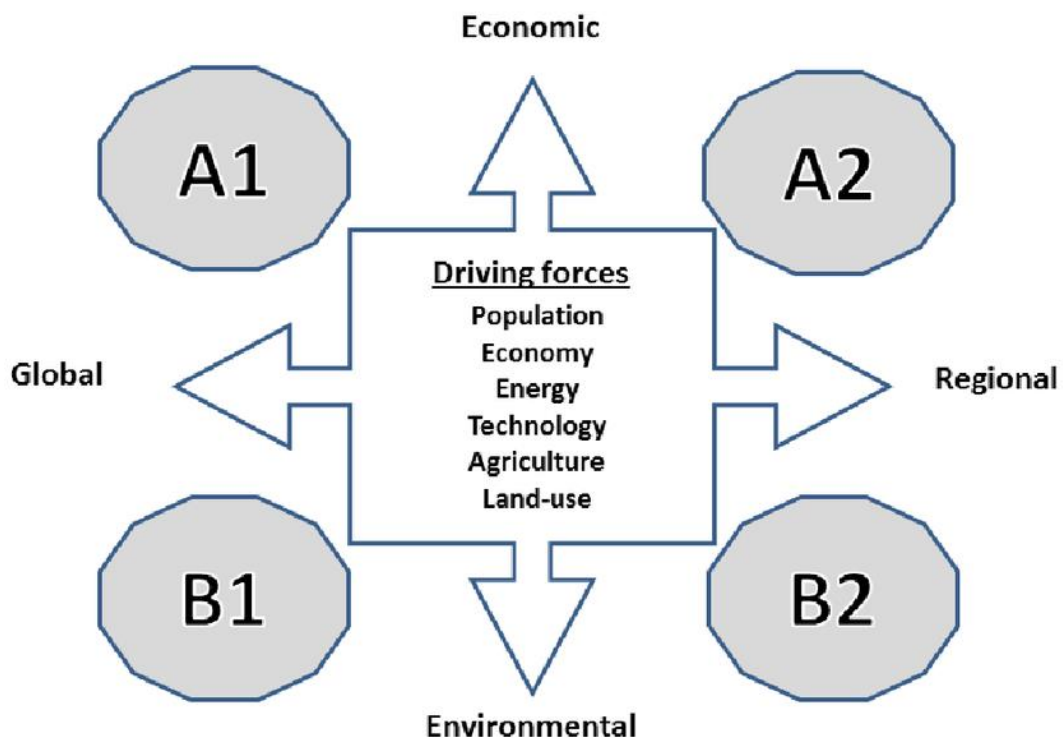
Τα χρησιμοποιούμενα από τους επιστήμονες κλιματικά σενάρια, δημιουργούνται και αναπτύσσονται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για τη Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC).

1.2.1 IPCC Scenarios

Τα SRES (Special Report on Emission Scenarios) μπορεί να αποτελούν τη δεύτερη και πιο βελτιωμένη γενιά σεναρίων την οποία δημοσίευσε το IPCC, μετά την πρώτη γενιά των IS92, ωστόσο είναι σενάρια αναφοράς και δε λαμβάνουν υπόψη καμία τωρινή ή μελλοντική στρατηγική περιορισμού των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων (πχ Πρωτόκολλο του Κιότο).

Τα SRES σενάρια αναπτύχθηκαν στην τέταρτη αναφορά αξιολόγησης του IPCC (AR4) και χωρίστηκαν σε τέσσερις οικογένειες:

- **A1:** Αυτή η οικογένεια υποθέτει ότι θα συνεχιστεί η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη και η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού ως το 2050 (μετά φθίνει). Επίσης, εκτιμάται ότι θα εξαληφθούν οι πολιτιστικές και οικονομικές διαφορές μεταξύ των κοινωνιών. Χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες με κριτήριο την τεχνολογική ανάπτυξη στον ενεργειακό κλάδο
 1. A1F1: προβλέπεται χρήση ορυκτών καυσίμων
 2. A1T1: προβλέπεται χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας
 3. A1B: προβλέπεται ισορροπημένη εκμετάλλευση όλων των πηγών ενέργειας
- **A2:** Αυτό το σενάριο δεν υιοθετεί την κοινωνικοοικονομική ομοιογένεια της προηγούμενης κατηγορίας σεναρίων. Έτσι κάθε κοινωνία διατηρεί τα χαρακτηριστικά της και η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη έχουν τοπικό προσανατολισμό. Η τεχνολογική άνθιση είναι βραδεία σε σχέση με τα άλλα σενάρια ενώ ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται ραγδαία.
- **B1:** Αυτή είναι ίσως η πιο αισιόδοξη οικογένεια σεναρίων, καθώς εκτιμάται ένα μέλλον όπου θα υπάρξουν οικουμενικές λύσεις για τη προστασία του περιβάλλοντος, με εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ενώ για την αύξηση του πληθυσμού και την πορεία της οικονομίας υπάρχει ταύτιση με την οικογένεια A1.
- **B2:** Η διαφορά της συγκεκριμένης οικογένειας από την προηγούμενη είναι ότι αυτή υποθέτει ετερογένεια μεταξύ των κοινωνιών σε θέματα οικονομικής και τεχνολογικής εξέλιξης, ενώ ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού δεν είναι τόσο ραγδαίος όσο εκτιμάται από τα σενάρια A1 και B1.



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση των σεναρίων SRES με τους κύριους προσανατολισμούς για την εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος.

Αργότερα, το 2014, το IPCC στην πέμπτη αναφορά αξιολόγησης του (AR5), εισήγαγε τη νεότερη γενιά κλιματικών σεναρίων RCP (Representative Concentration Pathways): RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5. Οι αριθμοί δηλώνουν το radiative forcing που προβλέπεται το 2100. Αυτά τα σενάρια κατασκευάστηκαν ώστε με καθορισμένο συνδυασμό συγκεντρώσεων θερμοκηπικών αερίων και αερολυμμάτων να οδηγούν σε συγκεκριμένο radiative forcing ως το 2100.

Το radiative forcing είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης ενός παράγοντα στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γη-ατμόσφαιρα. Μετράται σε Watt/m^2 και ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο στη κορυφή της ατμόσφαιρας εξαιτίας συγκεκριμένου παράγοντα.

Εν ολίγοις, ένα σενάριο RCP υποθέτει ποιά θα είναι η πορεία των συγκεντρώσεων των θερμοκηπικών αερίων κατά την διάρκεια του 21^{ου} αιώνα και έπειτα εκτιμά την αλλαγή στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Γη-ατμόσφαιρα σε σχέση με την περίοδο 1986-2005 (van Vuuren et al., 2011). Παραδείγματος χάρη, το σενάριο RCP4.5 εκτιμά ότι οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων θα αυξάνονται μέχρι το 2040 (μέγιστο) και έπειτα

θα μειώνονται, ενώ το 2100 κάθε τετραγωνικό μέτρο στη κορυφή της ατμόσφαιρας θα δέχεται κατά μέσο όρο 4.5W περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τη περίοδο 1986-2005.(Πίνακας 1.1)

Πίνακας 1.1: Οι εκτιμήσεις των σεναρίων RCP για την πορεία των μελλοντικών συγκεντρώσεων των θερμοκηπικών αερίων και του radiative forcing (W/m^2) μέχρι το 2100. (IPCC, 2014a)

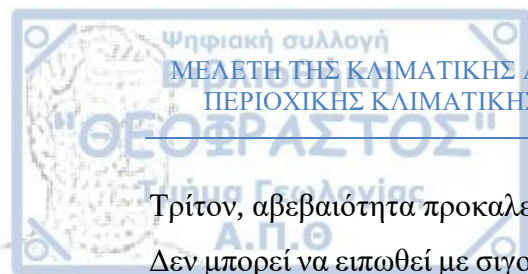
Σενάριο	Χαρακτηριστικά
RCP2.6	Μέγιστο RF το 2040 στα $3 W/m^2$ και σταθεροποίηση του στα $2.6 W/m^2$ το 2100. Οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων μειώνονται συνεχώς μέχρι το 2100.
RCP4.5	RF στα $4.5 W/m^2$ το 2100 και σταθεροποίηση του στα μέσα του επόμενου αιώνα. Οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων μειώνονται ελάχιστα και με αργό ρυθμό μέχρι το 2100.
RCP6	RF στα $6 W/m^2$ το 2100 και σταθεροποίηση του στα μέσα του επόμενου αιώνα. Η εκπομπή των θερμοκηπικών αερίων αυξάνει σταδιακά.
RCP8.5	Αύξηση του RF μέχρι τα $8.5 W/m^2$ το 2100. Η εκπομπή των θερμοκηπικών αερίων αυξάνει συνεχώς μέχρι το τέλος του αιώνα. Υψηλή ατμοσφαιρική ρύπανση.

1.3 Αβεβαιότητες

Από τη μία πλευρά, τα κλιματικά μοντέλα και σενάρια αναπτύσσονται ραγδαία μέχρι σήμερα, ταυτόχρονα με την ανάπτυξη στο χώρο των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Από την άλλη πλευρά, υπάρχει μια σειρά από αβεβαιότητες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος.

Αβεβαιότητα πηγάζει από το γεγονός ότι δεν είμαστε σίγουροι για τις εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων στο μέλλον και τι σχέση θα έχουν αυτές με τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας, της τεχνολογίας κλπ.

Δεύτερον, δεν υπάρχει αρκετή θεωρητική γνώση της φυσικής του κύκλου του άνθρακα, των χημικών αντιδράσεων και πολλών διαδικασιών που συμβαίνουν στο κλιματικό σύστημα, ώστε να γνωρίζουμε ακριβώς πως θα επηρεαστούν οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα. Αυτό γίνεται φανερό από την στιγμή που το ίδιο κλιματικό μοντέλο με το ίδιο σενάριο εκπομπών αλλά με διαφορετικές παραμετροποιήσεις, προσομοιώνει διαφορετικά την μελλοντική κλιματική κατάσταση (IPCC, 2014b).

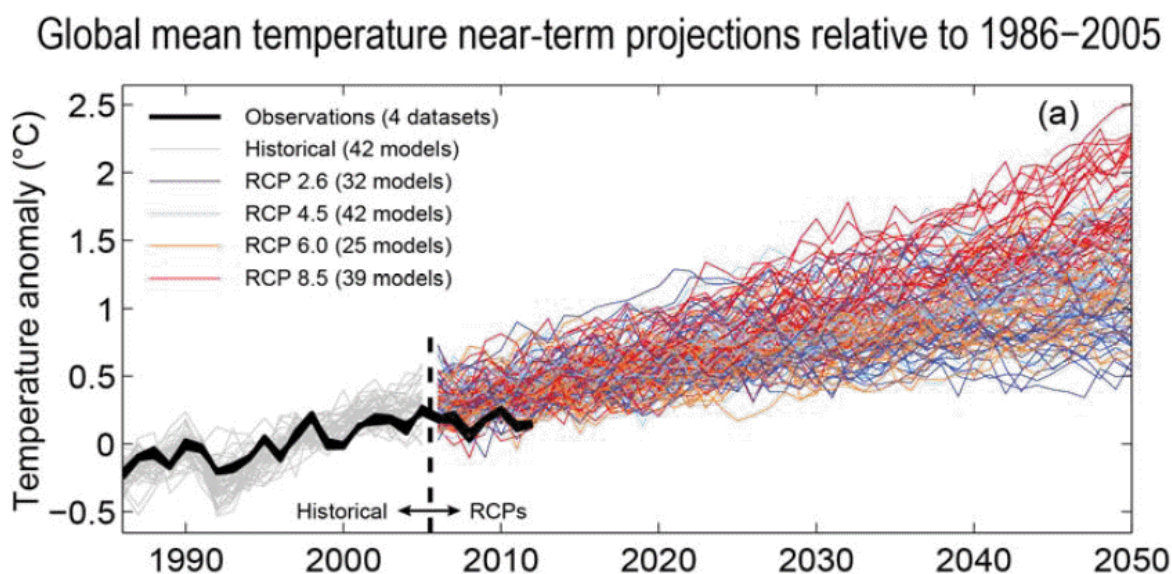


Τρίτον, αβεβαιότητα προκαλεί και ο παράγοντας της φυσικής μεταβλητότητας του κλίματος. Δεν μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά πως θα αντιδράσει το κλιματικό σύστημα στις μελλοντικές αλλαγές, πόσο μάλλον κάτω από την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα.

Τέταρτον, υπάρχουν πολλές διαδικασίες που συμβαίνουν σε τοπικό επίπεδο και δεν μπορούν να προσομοιωθούν από τα κλιματικά μοντέλα, λόγω της πολύ μικρής τους χωρικής κλίμακας. Επομένως, δεν είναι γνωστό πως θα επηρεάσουν αυτές οι διαδικασίες το τοπικό κλίμα της περιοχής στην οποία συμβαίνουν.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό είναι ότι τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν προσεγγιστικές και όχι αναλυτικές μεθόδους για την επίλυση των εξισώσεων, με αποτέλεσμα να εισάγεται σφάλμα στους υπολογισμούς.

Λόγω των παραπάνω αβεβαιοτήτων, οι επιστήμονες δεν αρκούνται σε μια μόνο προσομοίωση ενός κλιματικού μοντέλου για τη μελέτη του κλίματος. Συνηθίζεται οι μελέτες να περιέχουν ένα σύνολο από κλιματικές προσομοιώσεις (ensemble). Σε ένα σμήνος μπορεί να υπάρχουν προσομοιώσεις από ένα κλιματικό μοντέλο με διαφορετικό κάθε φορά σενάριο εκπομπών, ή προσομοιώσεις ενός κλιματικού μοντέλου με διαφορετικές παραμετροποιήσεις για ένα φαινόμενο καθώς και προσομοιώσεις από διαφορετικά μοντέλα με το ίδιο σενάριο εκπομπών. Εν ολίγοις, σε ένα ensemble μπορούν να γίνουν διάφοροι συνδυασμοί μεταξύ των μοντέλων, των παραμετροποιήσεων και των σεναρίων. Στην ουσία, η χρήση των ensembles είναι η καλύτερη μέθοδος με την οποία ένας ερευνητής μπορεί να εξάγει όσο το δυνατόν πιο ασφαλή συμπεράσματα σε συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα, καθώς έτσι αποκτά καλύτερη εικόνα του εύρους των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν. (Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4: Ensemble κλιματικών προσομοιώσεων στο πλαίσιο του προγράμματος CMIP5, υπο την οδήγηση σεναρίων RCP για την μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας σε σχέση με τη περίοδο 1986-2005. Με μαύρο είναι τα παρατηρησιακά δεδομένα (IPCC, 2014b)

1.4 CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment)

Το Παγκόσμιο Πρόγραμμα για την Έρευνα του Κλίματος (WRCP) ίδρυσε το 2009 ειδικό τμήμα για τον δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας, μέσω του οποίου δημιουργήθηκε το CORDEX, με σκοπό να παράγει περιοχικές κλιματικές προσομοιώσεις για όλες τις περιοχές του πλανήτη (Giorgi & Gutowski, 2015). Οι κύριοι στόχοι του CORDEX είναι να παρέχει ένα συντονισμένο πλαίσιο για τις αξιολογήσεις και τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων, καθώς και να αποτελέσει ένα σημείο αναφοράς για τους ερευνητές που ασχολούνται με την μελέτη του κλίματος.

Το Euro-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net/>) είναι κλάδος του CORDEX που παράγει ensembles κλιματικών προσομοιώσεων με χρήση διάφορων δυναμικών και εμπειρικών-στατιστικών μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας, με περιοχή ολοκλήρωσης την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης.

Η κοινότητα του Euro-CORDEX απαρτίζεται από επιστήμονες που εθελοντικά προσφέρουν τις υπηρεσίες τους ώστε να προετοιμαστούν στρατηγικές αντιμετώπισης της κλιματικής μεταβολής. Χάρη στο Euro-CORDEX, η Ευρώπη είναι από τις λίγες περιοχές του κόσμου για την οποία οι κλιματικές προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με χωρική ανάλυση μόλις τα 10 km.

2 Δεδομένα και Μεθοδολογία

Στην εργασία αναλύθηκαν οι μεταβλητές του υετού και της θερμοκρασίας επιφάνειας (στα δύο μέτρα πάνω από το έδαφος), ύστερα από εκτέλεση (run) του κλιματικού μοντέλου WRF (Weather Research and Forecasting model) οδηγούμενο από το παγκόσμιο μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS_E2 (Goddard Institute for Space Studies) και του σεναρίου RCP8.5.

2.1 Το μοντέλο πρόγνωσης και έρευνας καιρού WRF

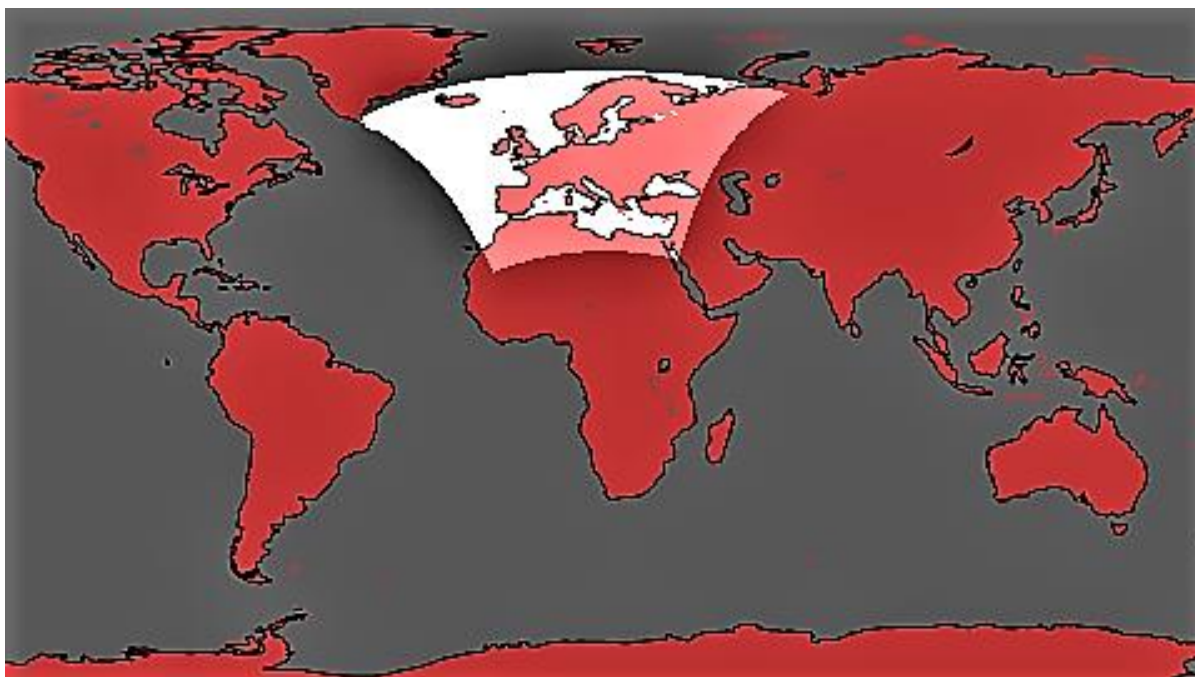
Το WRF (<http://www.wrf-model.org/>) είναι ένα αριθμητικό σύστημα πρόγνωσης καιρού σχεδιασμένο για να εξυπηρετεί τις ανάγκες της επιχειρησιακής πρόγνωσης και της ατμοσφαιρικής έρευνας. Η αριθμητική πρόγνωση καιρού αναφέρεται στη προσομοίωση και πρόγνωση της κατάστασης της ατμόσφαιρας με ένα υπολογιστικό μοντέλο, του οποίου ένα είδος λογισμικού αποτελεί το WRF.

Το συγκεκριμένο κλιματικό μοντέλο διαθέτει δύο δυναμικούς (υπολογιστικούς) πυρήνες (λύσεις), ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων και μια αρχιτεκτονική λογισμικού που επιτρέπει παράλληλο υπολογισμό και δυνατότητα επέκτασης του συστήματος. Το μοντέλο εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες που κυμαίνονται από μέτρα έως εκατοντάδες χιλιόμετρα.

Το WRF επιτρέπει στους ερευνητές να παράγουν προσομοιώσεις που αντικατοπτρίζουν είτε πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, αναλύσεις) είτε εξιδανικευμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Βρίσκεται σήμερα σε επιχειρησιακή χρήση στο NCEP και σε άλλα κέντρα πρόβλεψης διεθνώς. Χρησιμοποιείται εκτενώς για την έρευνα και την πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο σε ολόκληρο τον κόσμο.

Το WRF προσφέρει δύο δυναμικές λύσεις για τον υπολογισμό των εξισώσεων της ατμοσφαιρικής ρύθμισης και οι παραλλαγές του μοντέλου είναι γνωστές ως WRF-ARW (Advanced Research WRF) και WRF-NMM (μη υδροστατικό μοντέλο μέσης κλίμακας). Το Advanced Research WRF (ARW) υποστηρίζεται από την NCAR Mesoscale και Microscale Meteorology Division. Η παραλλαγή WRF-NMM βασίστηκε στο μοντέλο Eta και αργότερα στο μη υδροστατικό μοντέλο μέσης κλίμακας, που αναπτύχθηκε στο NCEP. Το WRF-NMM (NMM) υποστηρίζεται από το Development Dock Center (DTC).

Συγκεκριμένα, για την εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 3.7.1 του μοντέλου με οριζόντια διακριτοποίηση (resolution) 0.44° , που αντιστοιχεί περίπου σε 40-50 km ανάμεσα σε δύο γειτονικά σημεία πλέγματος. Η περιοχή ολοκλήρωσης αφορά την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης, συγκεκριμένα είναι η περιοχή που περιορίζεται από την παράλληλο των 22° έως την παράλληλο των 72° και από τον μεσημβρινό των -44° έως τον μεσημβρινό των 64° . (Σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1: Η περιοχή ολοκλήρωσης της κλιματικής προσομοίωσης με το περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF371.

Το πλέγμα αποτελείται από 10918 σημεία, 106 σημεία στη διεύθυνση Βορρά-Νότου και 103 σημεία στη διεύθυνση Δύσης-Ανατολής. Οι παραμετροποιήσεις κάτω από τις οποίες έτρεξε το κλιματικό μοντέλο αναφέρονται συνοπτικά στο **Πίνακα 2.1**.

Πίνακας 2.1: Τα σχήματα παραμετροποιήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την περιοχική κλιματική προσομοίωση.

Model	Institute	Parameterization					
		Microphysics	Radiation	Land Surface	Boundary Layer	Convection	Surface layer
WRF371	NCAR	WRF double-moment 6-class	Rapid Radiative Transfer Model	NOAH	Yonsei University	Grell-Freitas	MM5

2.2 Κλιματικά Μοντέλα Euro-CORDEX

Παράλληλα με το WRF 3.7.1, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα των μεταβλητών της θερμοκρασίας και του υετού από τις κλιματικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος Euro-CORDEX (**Πίνακας 2.2**). Το χρονικό διάστημα των προσομοιώσεων αφορά τη περίοδο 1976-2100, ενώ η χωρική ανάλυση είναι και εδώ 0.44°. Για την ιστορική προσομοίωση του κλίματος (μέχρι 31/12/2005) κάθε περιοχικό μοντέλο οδηγείται από διαφορετικό παγκόσμιο μοντέλο, ενώ για την κλιματική προβολή (2006-2100) όλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5. Να σημειωθεί ότι το κλιματικό μοντέλο WRF331F χρησιμοποιήθηκε μόνο στις αξιολογήσεις των ιστορικών προσομοιώσεων καθώς δεν ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα της κλιματικής προβολής του. Η πρόσβαση στα δεδομένα έγινε μέσω της ιστοσελίδας ESGF (Earth System Grid Federation) <https://esgf.llnl.gov/>

Πίνακας 2.2: Τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα και τα παγκόσμια μοντέλα-οδηγοί τους, που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα Euro-CORDEX.

Model	Institute	GCM
RCA4	Meteo-France/ National Center for Meteorological Research	CCCMa-CanESM2
WRF331F	Institut Pierre Simon Laplace/Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques	IPSL-INERIS
REMO2009	Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology	MPI-M-MPI-ESM-MR
ALADIN53	Meteo-France/ National Center for Meteorological Research	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
RACMOE22	Royal Netherlands Meteorological Institute, De Bilt, The Netherlands	ICHEC-EC-EARTH
CCLM4	Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community)	MPI-M-MPI-ESM-LR

2.3 Το παγκόσμιο μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS E2

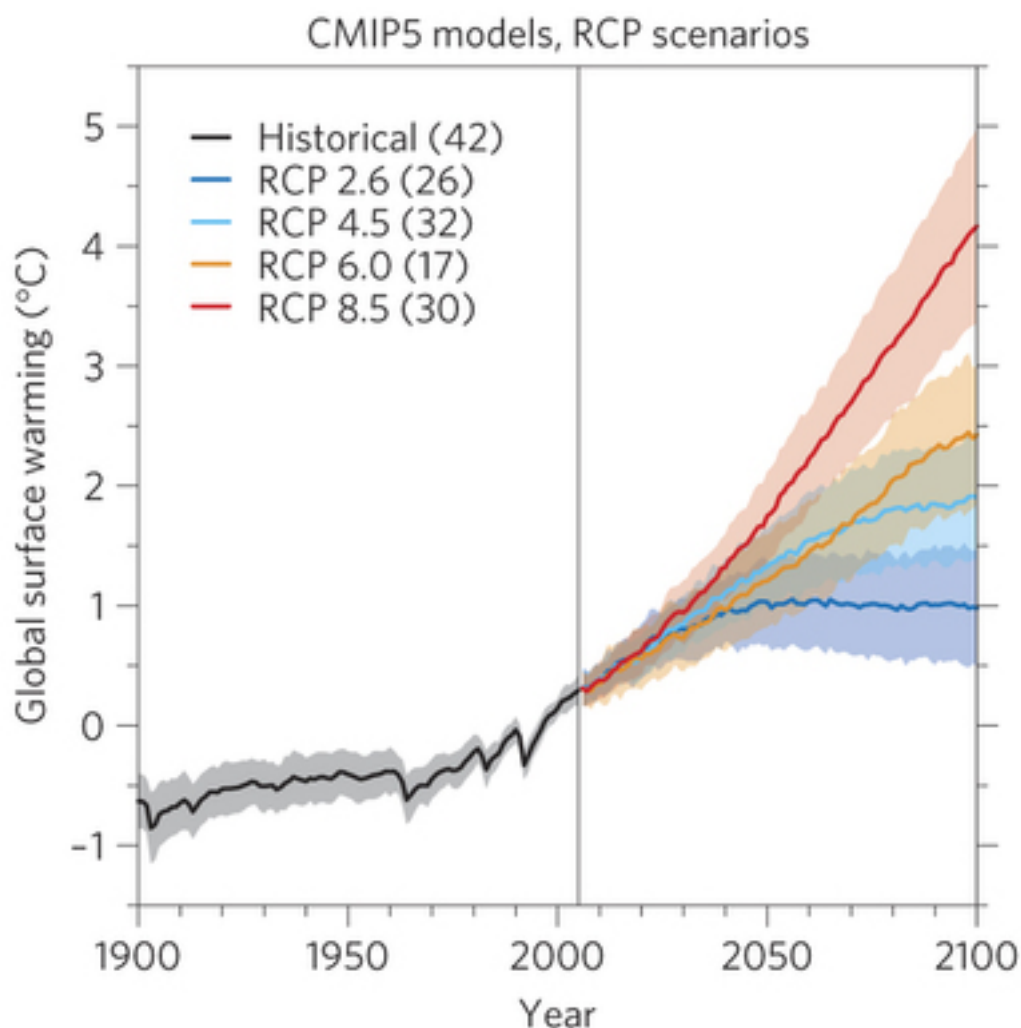
Το μοντέλο γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας NASA GISS_E2 (Schmidt et al., 2006) χαρακτηρίζεται από χωρική ανάλυση 2.5° γεωγραφικού μήκους κατά 2° γεωγραφικού πλάτους και 40 κάθετα επίπεδα. Η υδροστατική προσέγγιση εισάγεται με τη χρήση της πίεσης ως κατακόρυφη συντεταγμένη. Χρησιμοποιούνται συντεταγμένες σίγμα (σ) που ακολουθούν το έδαφος στα 23 επίπεδα κάτω από 150 mb. Πάνω από αυτό το επίπεδο, χρησιμοποιείται η ισοβαρική συντεταγμένη, ενώ η κορύφη του μοντέλου έγκειται στα 0.1 mb. Η κατακόρυφη ανάλυση βελτιώνεται κοντά στα κατώτατα όρια, με έξι επίπεδα κάτω των 825 mb.

2.4 The Representative Concentration Pathway (RCP 8.5)

Το σενάριο RCP8.5 αναπτύχθηκε από την ομάδα MESSAGE και το IIASA (Integrated Assessment Framework at the International Institute for Applied Systems Analysis) στην Αυστρία (Riahi et al., 2007). Σύμφωνα με το σενάριο, οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων συνεχώς θα αυξάνονται μέχρι το 2100, φτάνοντας σε πολύ υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης στο τέλος του 21^{ου} αιώνα. Είναι το πιο απαισιόδοξο σενάριο σε σχέση με τα υπόλοιπα RCP και αποτελεί νεότερη έκδοση του σεναρίου A2 των SRES. (Σχήμα 2.2)

Εν συντομία, το μέλλον που εκτιμά το εν λόγω σενάριο έχει ως εξής:

- Τριπλάσιες ποσότητες CO₂ στην ατμόσφαιρα το 2100 σε σχέση με σήμερα
- Ραγδαία αύξηση των εκπομπών μεθανίου
- Αυξημένη χρήση γης λόγω αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού
- Ο ανθρώπινος πληθυσμός θα φτάσει τα 12 δις μέχρι το 2100
- Αργός ρυθμός ανάπτυξης της τεχνολογίας
- Μεγάλη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα
- Καμία στρατηγική αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής

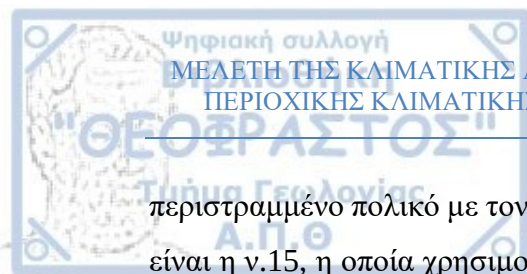


Σχήμα 2.2: Ensemble κλιματικών προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος CMIP5 για την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας υπό την οδήγηση σεναρίων RCP (2006 και μετά). Με έντονο χρώμα είναι η διάμεσος και σκιαγραφημένο είναι το φάσμα της αβεβαιότητας για το σύνολο των μοντέλων υπό το εκάστοτε σενάριο. (IPCC, 2007)

2.5 Επίγεια παρατηρησιακά δεδομένα (E-OBS)

Για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων ενός κλιματικού μοντέλου για μια κλιματική κατάσταση στο παρελθόν, απαιτείται η σύγκριση τους με πραγματικά δεδομένα.

Ένα σετ δεδομένων που ανταποκρίνονται πολύ ικανοποιητικά στην πραγματικότητα, αποτελούν τα δεδομένα E-OBS (Haylock et al., 2008). Πρόκειται για ημερήσια δεδομένα πλεγματικής μορφής που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης (γεωγραφικό πλάτος από 25°N έως 75°N και γεωγραφικό μήκος από -40°W έως 75°E) και αφορούν μόνο περιοχές της ξηράς. Το πλέγμα τους χαρακτηρίζεται από οριζόντια διακριτοποίηση 0.44° και θεωρείται

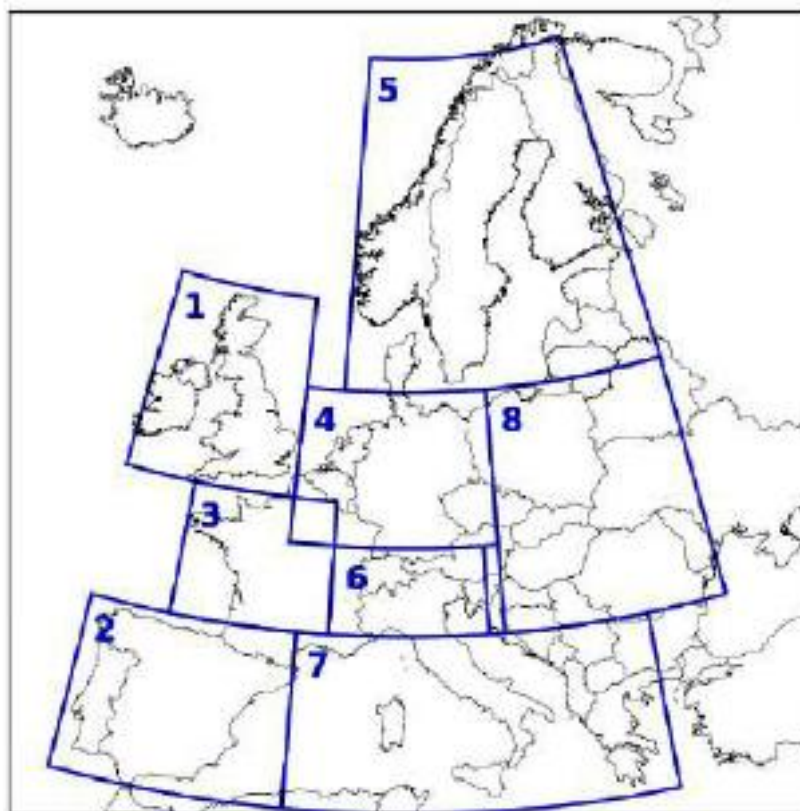


περιστραμμένο πολικό με τον βόρειο πόλο στις 39. 25⁰ N και 162⁰W. Η νεότερη έκδοση τους είναι η v.15, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία και καλύπτει την χρονική περίοδο από 01-01-1950 έως 31-12-2016.

Τα δεδομένα E-OBS ανήκουν στη βάση δεδομένων European Climate Assessment and Dataset (ECA&D) η οποία συντονίζεται από το Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων ενημερώνεται από επίγειες παρατηρήσεις, από κώδικες METAR/SYNOP, από δορυφορικές εικόνες κ.α, για εκατοντάδες περιοχές ανα την Ευρώπη. Μετά την συλλογή τους ακολουθείται διαδικασία ανάλυσης και γενικότερα γίνονται ποιοτικοί έλεγχοι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή αποτύπωση της πραγματικότητας.

2.6 Μεθοδολογία

Η περίοδος ολοκλήρωσης για την «ιστορική» (historical) προσομοίωση είναι η 1975-2005, ενώ για την κλιματική προβολή (projection) είναι η 2006-2099 και οδηγείται από το σενάριο RCP 8.5. Πιο συγκεκριμένα, η χρονική αυτή περίοδος χωρίστηκε σε τρεις εικοσαετίες (1986-2005, 2046-2065, 2080-2099) με την περίοδο 1986-2005 να θεωρείται περίοδος αναφοράς, σε αντιστοιχία με τις περιόδους αναφοράς της 5^η έκθεσης (AR5) του IPCC (IPCC, 2014a). Όσον αφορά την περιοχή ολοκλήρωσης, η μελέτη περιορίστηκε στην ανάλυση οκτώ υποπεριοχών, όπως αυτές καθορίστηκαν στα πλαίσια του προγράμματος PRUDENCE (Christensen & Christensen, 2007): 1)Βρετανικές νήσοι (**BI**), 2)Ιβηρική Χερσόνησος (**IP**), 3)Γαλλία (**FR**), 4)Κεντρική Ευρώπη (**ME**), 5)Σκανδιναβία (**SC**), 6)Άλπεις (**AL**), 7)Μεσόγειος (**MD**) και 8)Ανατολική Ευρώπη (**EA**) (**Σχήμα 2.3**). Κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από ομοιογένεια ως προς τις κλιματικές παραμέτρους.



Σχήμα 2.3: Οι υποπεριοχές *PRUDENCE* (Christensen & Christensen, 2007)

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση των κλιματικών παραμέτρων για τις παραπάνω χρονικές περιόδους και υποπεριοχές, εφαρμόστηκε μάσκα ξηράς ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρερμηνείες που θα οφείλονταν στις διαφορετικές ιδιότητες που παρουσιάζουν η θάλασσα και η ξηρά. Οι κλιματικοί μέσοι όροι που θα αναφερθούν παρακάτω αφορούν περιοχές μόνο πάνω από ξηρά.

Επιπρόσθετα, για την σύγκριση των προσομοιώσεων του WRF με τα παρατηρησιακά δεδομένα των E-OBS, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει χωρική παρεμβολή των σημείων πλέγματος του WRF σε αυτών των E-OBS, μιας και τα πλέγματα τους ήταν διαφορετικά. Η διγραμμική παρεμβολή είναι η μέθοδος που εφαρμόστηκε (bilinear interpolation).

Τα δεδομένα της θερμοκρασίας και του υετού μεσοποιήθηκαν και αναλύθηκαν σε εποχιακή και ετήσια βάση, υπολογίζοντας τις μέσες ετήσιες και εποχιακές διαφορές για τις δύο μελλοντικές περιόδους (2046-2065 και 2080-2099) από την περίοδο αναφοράς (1986-2005), για όλες τις παραπάνω περιοχές. Ως εποχές ορίστηκαν οι 1) Χειμώνας (**DJF**), 2) Άνοιξη (**MAM**), 3) Καλοκαίρι (**JJA**), 4) Φθινόπωρο (**SON**).

2.6.1 Στατιστική σημαντικότητα

Για την στατιστική σημαντικότητα των μέσων ετήσιων διαφορών της θερμοκρασίας και του υετού, μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων από την περίοδο αναφοράς, πραγματοποιήθηκε δίπλευρος έλεγχος με τη μέθοδο T-student για ζευγαρωτές παρατηρήσεις, σε επίπεδο σημαντικότητας 95%. Η τιμή του στατιστικού t του test για ένα σημείο πλέγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$t = \frac{X}{\sigma \sqrt{N}}$$

όπου X = η μέση τιμή των μέσων ετήσιων διαφορών της εκάστοτε χρονικής περιόδου από την περίοδο αναφοράς,

σ = η τυπική απόκλιση των παραπάνω διαφορών,

N = ο αριθμός των διαφορών

Η μηδενική υπόθεση (οι διαφορές των μέσων τιμών προσεγγίζουν το μηδέν) απορρίπτεται και υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά, σε περίπτωση που η απόλυτη τιμή του στατιστικού t είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή t_a για βαθμούς ελευθερίας $N-1$. (Μαχαίρα, 1998)

2.6.2 Mann-Kendall test

Το Mann-Kendall test είναι ένα μη παραμετρικό τεστ που σκοπό έχει να ελέγξει αν υπάρχει μονοτονική τάση των τιμών μιας μεταβλητής στο χρόνο. (Mann, 1945)

Αν $X_1, X_2, \dots, X_N$ είναι διαδοχικές παρατηρήσεις στο χρόνο μιας τυχαίας συνεχούς μεταβλητής X , το τεστ θέτει δύο υποθέσεις:

- H_0 = δεν υπάρχει μονοτονική αύξηση ή μείωση στις τιμές των παρατηρήσεων
- H_1 = υπάρχει μονοτονία στις παρατηρήσεις

Το στατιστικό του Mann-Kendall test καθορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

$$\text{Όπου } \operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{αν } \theta > 0 \\ 0, & \text{αν } \theta = 0 \\ -1, & \text{αν } \theta < 0 \end{cases}$$

Όταν $n \geq 8$, το στατιστικό S , προσεγγιστικά, ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή 0 και διασπορά που δίνεται από τον τύπο

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

Συνεπώς, το Z ακολουθεί την κανονική τυποποιημένη κατανομή:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, & \text{αν } S > 0 \\ 0, & \text{αν } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma}, & \text{αν } S < 0 \end{cases}$$

Η υπόθεση ότι δεν υπάρχει τάση απορρίπτεται (H_0), όταν η τιμή του Z είναι κατ' απόλυτη τιμή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή Z_α , όπου α το επίπεδο σημαντικότητας.

2.6.3 Θηκόγραμμα

Με τον σκοπό να αποκτηθεί μια πρώτη εικόνα για την κατανομή των ημερήσιων τιμών των μεταβλητών της θερμοκρασίας και του υετού, για κάθε μια εικοσαετία και υποπεριοχή, κατασκευάστηκαν τα θηκογράμματα.

Τα θηκογράμματα είναι ένας τρόπος παρουσίασης των κυριότερων χαρακτηριστικών της κατανομής μιας μεταβλητής (Μαχαίρα, 1998). Αν με F_L και F_U συμβολίσουμε το πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο των παρατηρήσεων μιας μεταβλητής (F_L = η τιμή στο 25% των παρατηρήσεων, F_U = η τιμή στο 75% των παρατηρήσεων), για την κατασκευή ενός θηκογράμματος ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- Υπολογίζονται η διάμεσος, τα τεταρτημόρια F_L , F_U και το ενδοτεταρτημοριακό πλάτος $\delta = F_U - F_L$



- Σχεδιάζεται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με τυχαίο μήκος βάσεων, με τη μία βάση τοποθετημένη στο F_L και την άλλη στο F_U . Το ύψος του ορθογώνιου είναι ίσο με το ενδοτεταρτημοριακό πλάτος δ , ενώ μέσα στο ορθογώνιο, παράλληλα στις βάσεις, χαράσσεται και η διάμεσος.
- Χαράσσονται δύο ευθείες από το μέσο των βάσεων μέχρι τα σημεία $F_L - 1.5 \cdot \delta$ (κάτω εσωτερικός φράχτης) και $F_U + 1.5 \cdot \delta$ (άνω εσωτερικός φράχτης). Σαν εξωτερικοί φράχτες θεωρούνται οι τιμές $F_L - 3 \cdot \delta$ (κάτω εξωτερικός φράχτης) και $F_U + 3 \cdot \delta$ (άνω εξωτερικός φράχτης).
- Οι παρατηρήσεις που βρίσκονται μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών φραχτών λέγονται πιθανά σημεία, ενώ οι παρατηρήσεις εκτός των εξωτερικών φραχτών ορίζονται ως παράτυπα σημεία (outliers) και σημειώνονται με ($^{\circ}$).

2.6.4 Probability Density Function plot (PDF plot)

Μία άλλη μέθοδος οπτικοποίησης της κατανομής των μεταβλητών, στην παρούσα εργασία, αποτέλεσαν τα διαγράμματα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Η ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων βασίζεται στον ορισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Η πιθανότητα η τιμή μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής X να βρίσκεται σε ένα διάστημα τιμών dx , μπορεί να μεταβάλλεται στο σύνολο των διαφορετικών διαστημάτων και δίνεται συναρτήσει της τυχαίας μεταβλητής X (Μαχαίρα, 1998). Η συνάρτηση αυτή, $f_x(x_i) = P(X=x_i)$, για συνεχή τυχαία μεταβλητή X ($X \in R$) λέγεται συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και ικανοποιεί τις συνθήκες:

$$f_x(x) \geq 0 \text{ και } \int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1.$$

Η κατανομή πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής X ορίζεται από την αθροιστική συνάρτηση κατανομής $F_x(x)$ και δηλώνει την πιθανότητα η συνεχής μεταβλητή X να πάρει τιμή μικρότερη από μια τιμή x :

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(u) du$$

Σε ένα διάγραμμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής X , στον οριζόντιο άξονα x αναπαρίστανται οι δυνατές τιμές X_i που μπορεί να πάρει η μεταβλητή X και στον κάθετο άξονα y αναπαρίστανται οι τιμές της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για τις διάφορες τιμές X_i .

2.6.5 Quantile-Quantile plot

Σε ένα q-q plot σκοπός είναι να συγκριθούν οι κατανομές δύο ή περισσότερων μεταβλητών ή να συγκριθεί η κατανομή μιας μεταβλητής με μια θεωρητική κατανομή. Η αναπαράσταση των κατανομών γίνεται σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου τοποθετούνται μερικά ή όλα τα ποσοστιαία σημεία της κατανομής μιας μεταβλητής έναντι των ίδιων ποσοστιαίων σημείων κατανομών άλλων μεταβλητών. Μέσω ενός τέτοιου διαγράμματος, μπορεί κάποιος εύκολα να αναγνωρίσει τυχόν αποκλίσεις της κατανομής μιας μεταβλητής από μια θεωρητική κατανομή (ως απόκλιση από τη διαγώνιο γραμμή), διαφορές στη μεταβλητότητα (ως ευθείες γραμμές με διαφορετική κλίση) και ασυμμετρίες (εμφάνιση καμπύλης στην κατανομή). (García-Díez et al., 2015)

Στη παρούσα εργασία, έγινε σύγκριση της κατανομής των ημερήσιων τιμών θερμοκρασίας και υετού, όπως αυτές προσομοιώνονται από το κλιματικό μοντέλο του WRF (y άξονας), έναντι των παρατηρησιακών δεδομένων E-OBS (x άξονας).

Τέλος, να σημειωθεί ότι για την τεχνική επεξεργασία των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν τα πακέτα προγραμματισμού R, IDL και το λογισμικό της CDO (Climate Data Operator). Η αποθήκευση και επεξεργασία των κλιματικών αρχείων Netcdf έγινε μέσω της πλατφόρμας UI (User Interface) του ΚΗΔ (Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης).

3 Θερμοκρασία

Πριν τη κλιματική προβολή κρίθηκε αναγκαία η αξιολόγηση του WRF 3.7.1, οδηγούμενο από το παγκόσμιο μοντέλο NASA GISS_E2, ώστε να φανεί σε ποιές περιοχές και εποχές η προσομοίωση της θερμοκρασίας παρουσιάζει αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Γενικότερα, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται χρονική και χωρική ανάλυση της θερμοκρασίας.

3.1 Αξιολόγηση

Στο **Σχήμα 3.1** αναπαρίστανται οι διαφορές της μέσης εποχιακής θερμοκρασίας ανάμεσα στα δεδομένα E-OBS και το WRF371, οδηγούμενο από το NASA GISS_E2, για την περίοδο 1986-2005 (WRF371-E OBS). Το WRF371 με «οδηγό» το παγκόσμιο μοντέλο, φαίνεται να υποεκτιμά τη θερμοκρασία παντού και σε όλες τις εποχές σε βαθμό που εξαρτάται από την εποχή και την περιοχή.

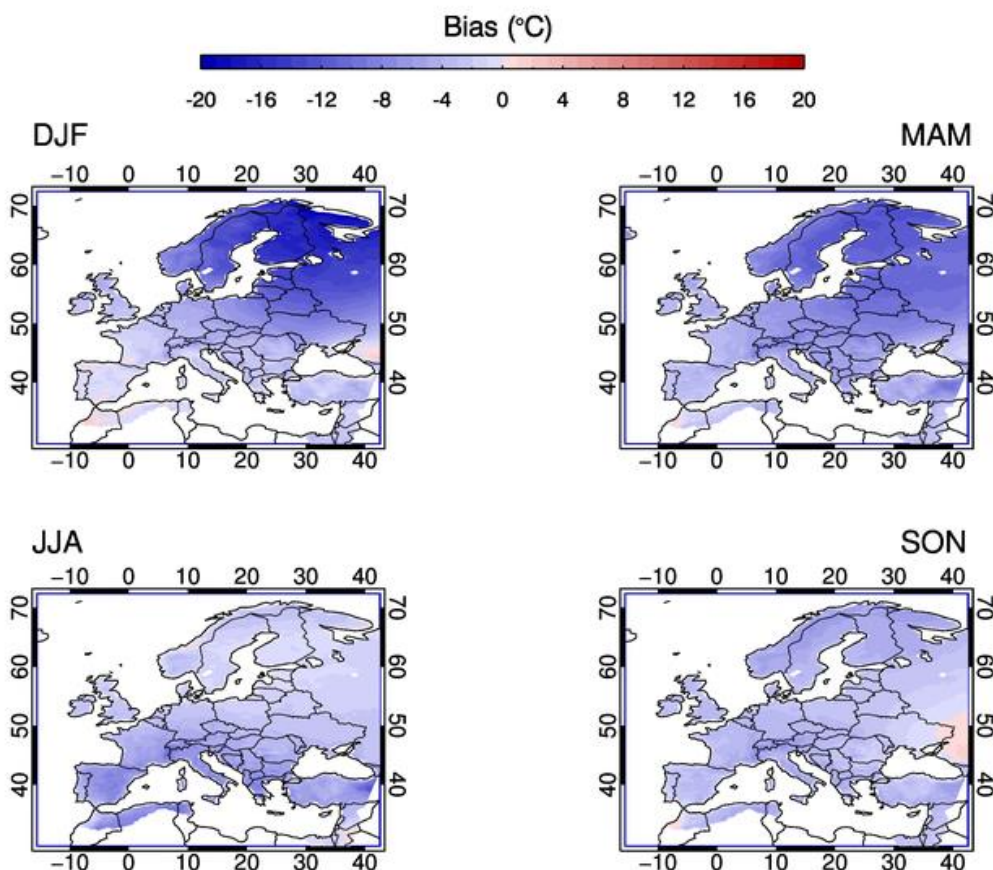
Τον χειμώνα, οι τιμές bias στη Νότια και Δυτική Ευρώπη είναι πολύ μικρότερες (-0.4°C και -1.8°C στην IP και στη MD, αντίστοιχα) σε σχέση με τη Βόρεια και ΒΑ Ευρώπη (-12.7°C και -6.3°C στη SC και στην EA, αντίστοιχα) (**Πίνακας 3.1**). Την εποχή αυτή οι περιοχές της Βόρειας και ΒΑ Ευρώπης, στο μεγαλύτερο μέρος τους, καλύπτονται από χιόνι. Είναι γνωστό ότι η συγκεκριμένη έκδοση του WRF εμφανίζει προβλήματα στη προσομοίωση της θερμοκρασίας πάνω από χιονοκαλυμμένες περιοχές (<http://www.atmos.washington.edu/~cliff/WRFWorkshop2013.ppt>). Επίσης, σε μελέτη που έγινε στα πλαίσια του προγράμματος Euro-CORDEX με τη χρήση σμήνους κλιματικών προσομοιώσεων με διαφορετικά σχήματα παραμετροποίησης της φυσικής, αποδείχθηκε ότι στις χιονοκαλυμμένες περιοχές (ΒΑ Ευρώπη, Άλπεις) υπερεκτιμάται αρκετά το albedo (αντανάκλαση ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος) στην επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της θερμοκρασίας. (Garcia-Diez et al, 2015)

Η άνοιξη είναι η εποχή που χαρακτηρίζεται από το μεγαλύτερο bias κατά μέσο όρο (-5.5°C). Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται ξανά στη Σκανδιναβία και την Ανατολική Ευρώπη, ενώ έχει αυξηθεί το bias σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές, σε σχέση με το χειμώνα.

Το καλοκαίρι το μεγαλύτερο bias εμφανίζεται στη Μεσόγειο (-6°C) και το μικρότερο στη Σκανδιναβία (-1.2°C).

Το φθινόπωρο είναι η εποχή με το μικρότερο bias κατά μέσο όρο (-3.3°C). Η χωρική κατανομή των διαφορών μοιάζει να είναι ομοιόμορφη.

Η περιοχή με τη μεγαλύτερη τιμή bias κατά μέσο όρο για όλες τις εποχές είναι η Σκανδιναβία (-6.9°C), ενώ οι περιοχές στις οποίες η θερμοκρασία προσομοιώνεται καλύτερα είναι η Ιβηρική Χερσόνησος (-2.8°C) και η Βρετανία (-2.9°C).



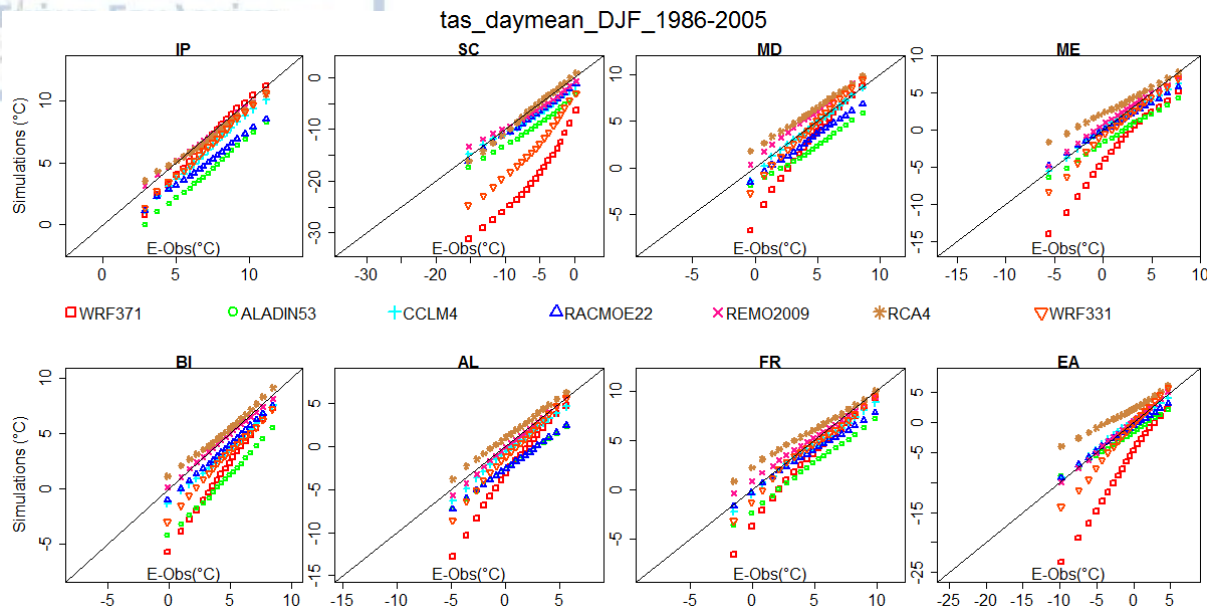
Σχήμα 3.1: Διαφορές μέσης εποχιακής θερμοκρασίας (bias σε $^{\circ}\text{C}$) μεταξύ των EOBS και του WRF371, οδηγούμενο από το παγκόσμιο μοντέλο NASA GISS_E2, για την περίοδο 1986-2005. (WRF371 – EOBS)

Πίνακας 3.1: Διαφορές μέσης εποχιακής θερμοκρασίας (bias σε °C) μεταξύ των EOBS και του WRF371, οδηγούμενο από το παγκόσμιο μοντέλο NASA GISS_E2, για την περίοδο 1986-2005. (WRF371 – EOBS)

Περιοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο
AL	-3.1	-6.0	-5.8	-4.6	-4.8
BI	-2.9	-3.7	-2.1	-3.0	-2.9
IP	-0.4	-2.8	-5.4	-2.6	-2.8
SC	-12.7	-10	-1.2	-4	-6.9
FR	-1.7	-4	-4.4	-3.3	-3.3
MD	-1.8	-4.2	-6	-3.5	-3.8
ME	-4	-5.8	-3.2	-3.3	-4
EA	-6.3	-7.5	-3	-2.7	-4.8
Μ.Ο	-4.6	-5.5	-3.8	-3.3	

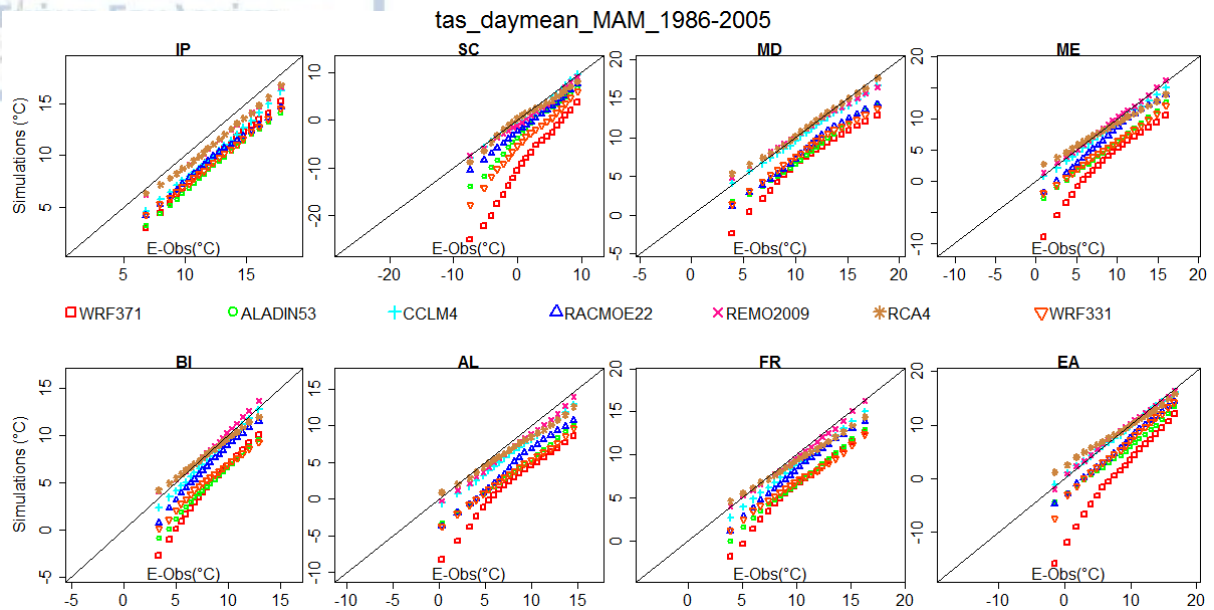
Με στόχο την σύγκριση των προσομοιώσεων του WRF371 με τις προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, κατασκευάστηκαν q-q plots με τις μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες της περιόδου αναφοράς 1986-2005, για όλες τις εποχές και για όλες τις υποπεριοχές.

Τον χειμώνα (**Σχήμα 3.2**) τα περισσότερα κλιματικά μοντέλα φαίνεται να υποεκτιμούν τη θερμοκρασία σε όλες σχεδόν τις περιοχές. Ο βαθμός υποεκτίμησης και το εύρος των προσομοιωμένων τιμών μικραίνει πηγαίνοντας από τα μικρά ποσοστιαία σημεία προς τα μεγαλύτερα, δηλαδή τα περισσότερα μοντέλα έχουν την τάση να υποεκτιμούν περισσότερο τις ελάχιστες θερμοκρασίες, απ' ότι τις μέγιστες. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός της παρόμοιας συμπεριφοράς των δυο κλιματικών προσομοιώσεων με WRF στην περιοχή της Σκανδιναβίας και της Ανατολικής Ευρώπης, όσον αφορά τη σοβαρή υποεκτίμηση των ελαχίστων θερμοκρασιών του χειμώνα, γεγονός που υποδηλώνει ότι σχετίζεται και με δομικό σφάλμα του μοντέλου και όχι αποκλειστικά από την επιλογή συγκεκριμένων παραμετροποιήσεων.



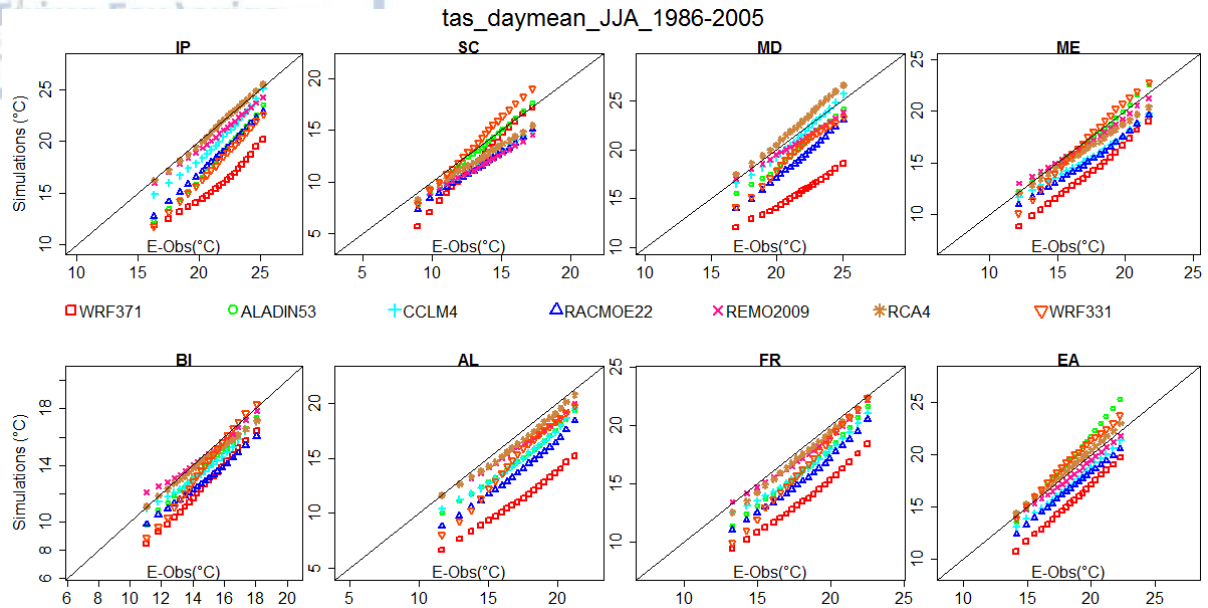
Σχήμα 3.2: Quantile-Quantile plot μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών (°C) του χειμώνα, προσομοιωμένων από το WRF371 και τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιωμένες τιμές. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Την άνοιξη (Σχήμα 3.3) η εικόνα των κατανομών μοιάζει αρκετά με αυτήν του χειμώνα, με τη διαφορά ότι τα μεγάλα ποσοστιαία σημεία υποεκτιμώνται περισσότερο σε όλες σχεδόν τις προσομοιώσεις. Η μεγαλύτερη υποεκτίμηση παρουσιάζεται και πάλι από τις δύο εκδόσεις του WRF στα μικρά ποσοστιαία σημεία, στις περιοχές της Σκανδιναβίας, των Άλπεων και της Ανατολικής Ευρώπης.



Σχήμα 3.3: Quantile-Quantile plot μέσω ημερήσιων θερμοκρασιών (°C) της άνοιξης, προσομοιωμένων από το WRF371 και τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιωμένες τιμές. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

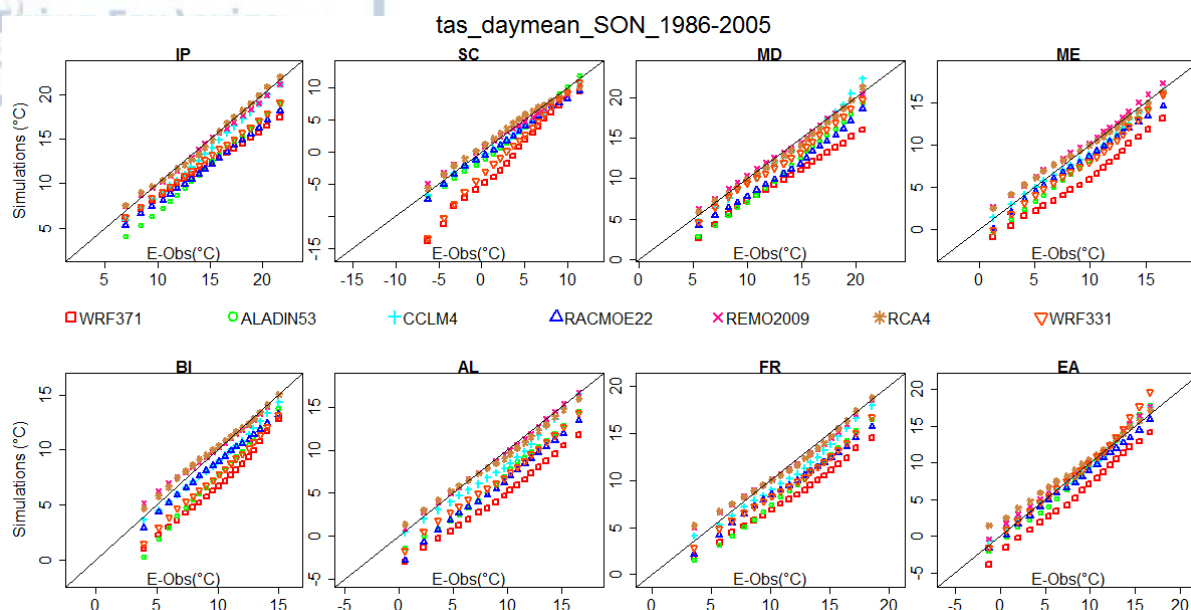
Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.4) συνεχίζεται η συστηματική υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από την πλειοψηφία των κλιματικών μοντέλων, σε όλες τις περιοχές, ωστόσο πηγαίνοντας προς τα μεγάλα ποσοστιαία σημεία, δεν παρατηρείται πλέον η ελάττωση του bias και του εύρους των προσομοιωμένων τιμών. Επίσης, οι δύο εκδόσεις του WRF δεν παρουσιάζουν παρόμοιες κατανομές σε καμία περιοχή, που σημαίνει ότι οι επιλογές των παραμετροποιήσεων (κατακόρυφη μεταφορά, ακτινοβολία, μικροφυσική) μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά του μοντέλου τους θερμούς μήνες.



Σχήμα 3.4: Quantile-Quantile plot μέσω ημερήσιων θερμοκρασιών (°C) του καλοκαιριού, προσομοιωμένων από το WRF371 και τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιωμένες τιμές. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.5) οι προσομοιώσεις από όλα τα κλιματικά μοντέλα χαρακτηρίζονται πολύ ικανοποιητικές, σε σχέση με τις προηγούμενες εποχές, καθώς οι τιμές bias φαίνεται να έχουν μικρύνει αρκετά σε όλες τις περιοχές. Μόνο οι δύο εκδόσεις του WRF εξακολουθούν να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις, στα μικρά ποσοστιαία σημεία στη Σκανδιναβία.

Συνοψίζοντας, η πλειονοψηφία των κλιματικών μοντέλων έχει την τάση να υποεκτιμά τη θερμοκρασία, κυρίως τις ελάχιστες μέσες θερμοκρασίες, σε όλες τις περιοχές της Ευρώπης. Ο βαθμός υποεκτίμησης εξαρτάται από την εποχή και την περιοχή. Το WRF371 είναι το κλιματικό μοντέλο που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές bias σε όλες τις εποχές και περιοχές, εκτός από την Ιβηρική Χερσόνησο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συστηματικό αρνητικό bias που χαρακτηρίζει τις δύο εκδόσεις του WRF, είναι χαρακτηριστικό ακόμα και όταν οδηγούνται από δεδομένα επανάλυσης (Katragkou et al., 2015). Πρόκειται επομένως για ένα δομικό σφάλμα του μοντέλου, το οποίο ενισχύεται από το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας που οδηγεί το WRF, που επίσης χαρακτηρίζεται από ψυχρό bias, όπως έδειξε η σύγκριση του NASA GISS_E2 με τα δεδομένα επανάλυσης ERA interim. (Γκοτόβου, 2017)

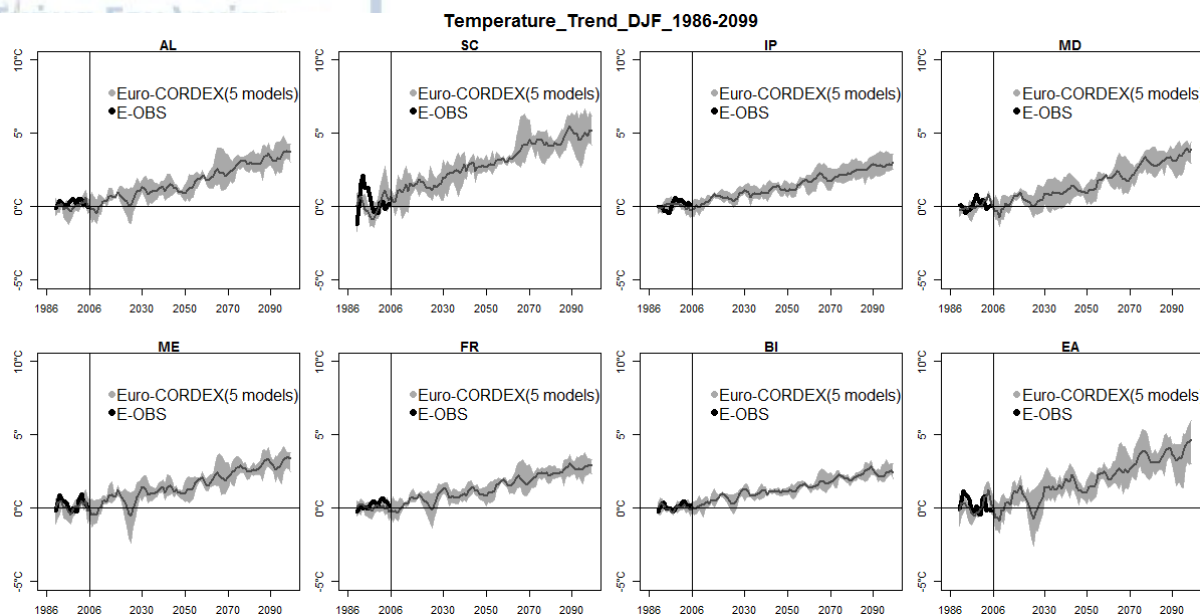


Σχήμα 3.5: Quantile-Quantile plot μέσω ημερήσιων θερμοκρασιών (°C) του φθινοπώρου, προσομοιωμένων από το WRF371 και τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιωμένες τιμές. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

3.2 Χρονοσειρές και τάσεις

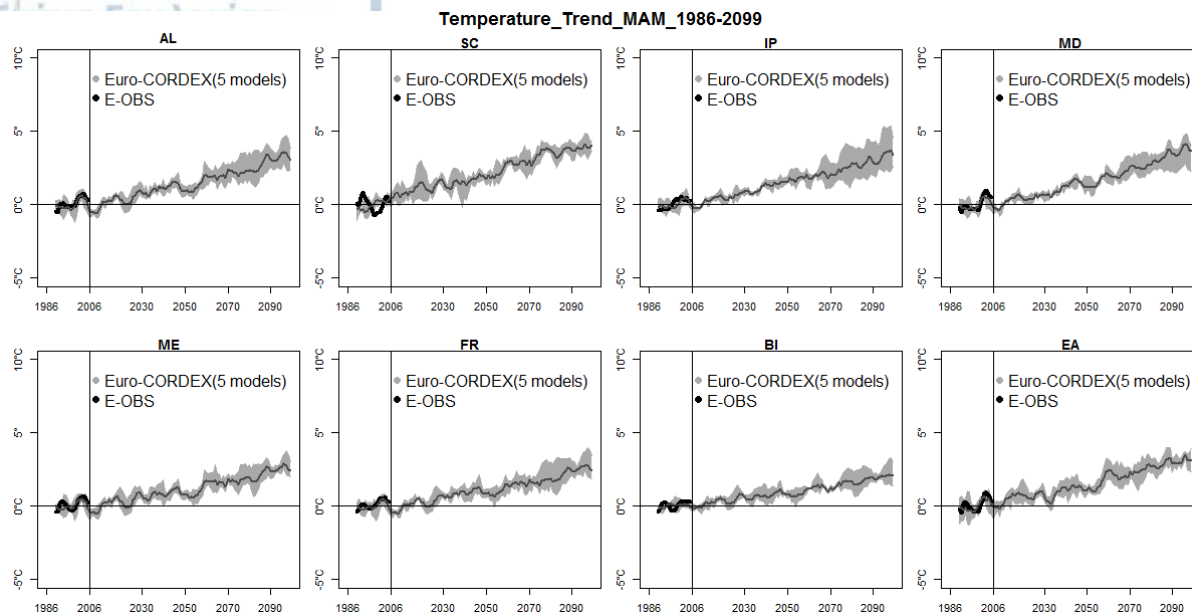
Το επόμενο βήμα μετά την αξιολόγηση του WRF371 και τη σύγκριση του με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, ήταν να υπολογιστούν οι ανωμαλίες της εποχιακής και ετήσιας θερμοκρασίας της περιόδου 1986-2009. Μία εποχιακή θερμοκρασιακή ανωμαλία, υπολογίζεται αφαιρώντας το κλιματικό μέσο όρο της εποχής για την περίοδο 1986-2005, από τη μέση θερμοκρασία της εποχής για το συγκεκριμένο έτος.

Τον χειμώνα (**Σχήμα 3.6**) σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, η μεγαλύτερη τάση παρουσιάζεται στη περιοχή της Σκανδιναβίας, ωστόσο με αβεβαιότητα που αγγίζει τους 0.2°C/decade (0.43-0.63°C/decade) (**Πίνακας 3.2**). Μεγάλη αβεβαιότητα χαρακτηρίζει και την περιοχή της Ανατολικής Ευρώπης (0.27-0.53°C/decade). Η Βρετανία είναι η περιοχή με τη μικρότερη θετική τάση (~0.25°C/decade).



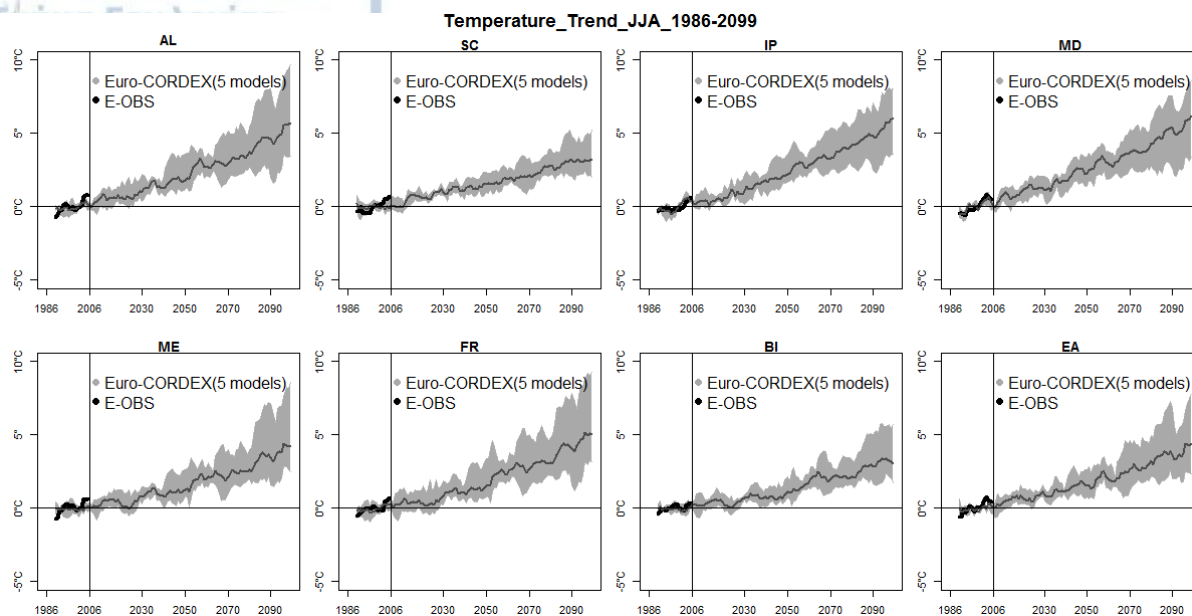
Σχήμα 3.6: Χρονοσειρές ανωμαλιών θερμοκρασίας (°C) τον χειμώνα για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (*bold*) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Την άνοιξη (**Σχήμα 3.7**) οι ανωμαλίες που εκτιμούν τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, είναι πιο μικρές σε σχέση με του χειμώνα, σε όλες τις περιοχές, εκτός από την Ιβηρική Χερσόνησο, η οποία ωστόσο χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα (0.21-0.48°C/decade). Η μικρότερη τάση εμφανίζεται και πάλι στη Βρετανία (~0.2°C/decade).



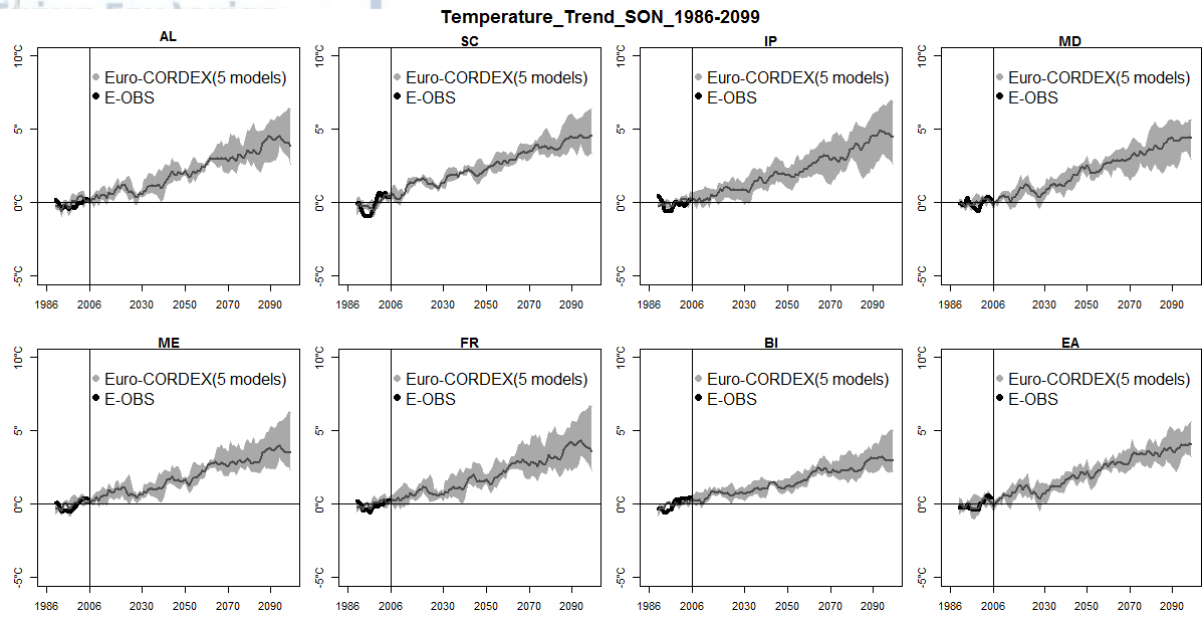
Σχήμα 3.7: Χρονοσειρές ανωμαλιών θερμοκρασίας (°C) την άνοιξη για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (*bold*) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.8) σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, οι Άλπεις, η Ιβηρική Χερσόνησος και η Μεσόγειος θα παρουσιάσουν τις μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αλλαγές συγκριτικά με άλλες περιοχές και εποχές, ωστόσο το εύρος της αβεβαιότητας είναι πολύ μεγάλο για όλες τις περιοχές.



Σχήμα 3.8: Χρονοσειρές ανωμαλιών θερμοκρασίας (°C) το καλοκαίρι για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (*bold*) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Το φθινόπωρο, το εύρος της αβεβαιότητας που προκύπτει από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-Cordex, είναι πιο μικρό για όλες τις περιοχές, σε σχέση με το καλοκαίρι. Η Ιβηρική Χερσόνησος, η Σκανδιναβία, οι Άλπεις και η Μεσόγειος χαρακτηρίζονται από τις μεγαλύτερες τάσεις και η Βρετανία από τη μικρότερη.



Σχήμα 3.9: Χρονοσειρές ανωμαλιών θερμοκρασίας (°C) το φθινόπωρο για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (bold) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Τέλος, παρατηρώντας τις τάσεις των ετήσιων θερμοκρασιακών ανωμαλιών (Πίνακας 3.2) που εκτιμούν τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, συμπεραίνεται ότι οι Άλπεις, η Μεσόγειος, η Ιβηρική Χερσόνησος και η Σκανδιναβία είναι οι περιοχές όπου οι θερμοκρασιακές αλλαγές θα είναι πιο έντονες. Αντίθετα, τη μικρότερη επίδραση συγκριτικά με άλλες περιοχές, φαίνεται να δέχεται η περιοχή της Βρετανίας.

Οι εκτιμήσεις του WRF371 για τις θερμοκρασιακές αλλαγές δείχνουν να μη συμφωνούν με αυτές των μοντέλων του Euro-CORDEX. Συγκεκριμένα, σε όλες τις περιοχές, κυρίως το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, εκτιμά πολύ μικρότερες θερμοκρασιακές αλλαγές, σε σχέση με τα υπόλοιπα κλιματικά μοντέλα. Ένα τεχνικό σφάλμα που αφορά τον κώδικα της έκδοσης του WRF371 οδηγεί το μοντέλο με εσφαλμένες οριακές συνθήκες εδάφους και έχει ως αποτέλεσμα να μην υπολογίζεται σωστά η μεταβλητή της υγρασίας του εδάφους. Για την ακρίβεια, κάθε φορά που γίνεται επανεκκίνηση του μοντέλου (μία φορά το χρόνο), η υγρασία του εδάφους ξεκινάει από τις αρχικές συνθήκες και όχι από τα αρχεία επανεκκίνησης (restart files). Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει τις κλιματικές διεργασίες στο σύνολο τους, καθώς ρυθμίζει τα διαθέσιμα ποσά ενέργειας για εξάτμιση (λανθάνουσα/αισθητή θερμότητα) και επομένως τη θερμοκρασία και την υγρασία στην ατμόσφαιρα άρα και τον νετό.

Πίνακας 3.2: Γραμμικές τάσεις των ανωμαλιών της εποχιακής (°C/decade) και ετήσιας θερμοκρασίας της περιόδου 1986-2099, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1986-2005. Σε παρένθεση φαίνεται το εύρος της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις προσομοιώσεις των πέντε κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX. Με κόκκινο είναι οι στατιστικώς σημαντικές τιμές, σε επίπεδο 95%.

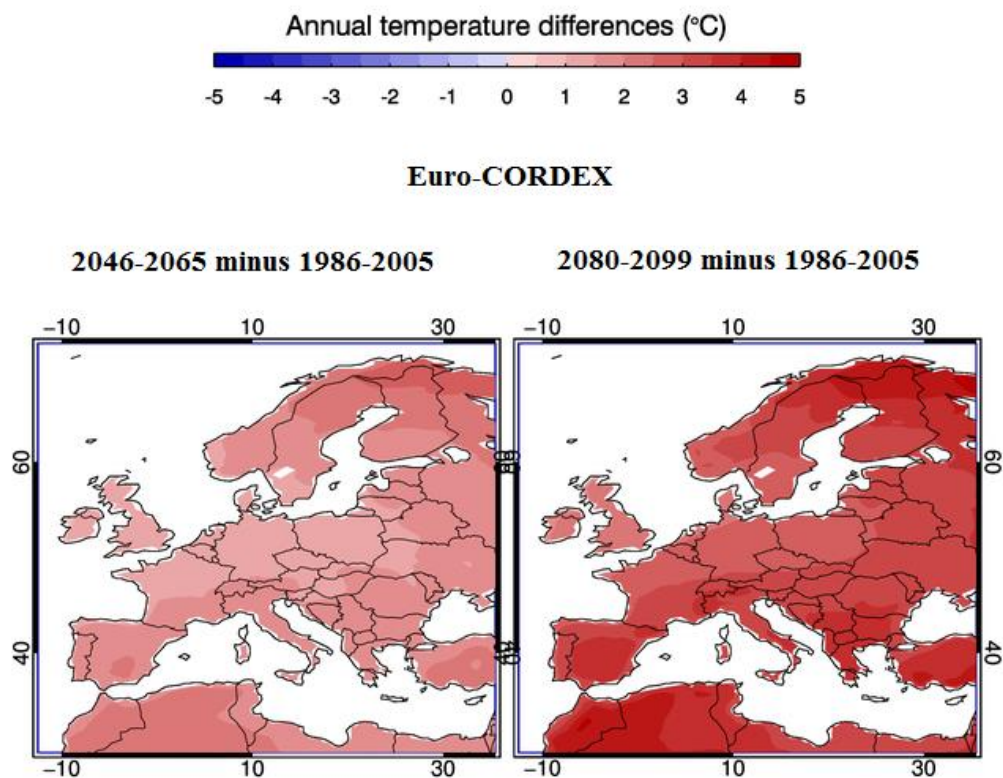
	Annual (°C/decade)		DJF		MAM		JJA		SON	
	Euro-CORDEX (5 models)	WRF371	Euro-CORDEX (5 models)	WRF371	Euro-CORDEX (5 models)	WRF371	Euro-CORDEX (5 models)	WRF371	Euro-CORDEX (5 models)	WRF371
AL	0.43 (0.28-0.45)	0.31	0.36 (0.26-0.42)	0.38	0.33 (0.24-0.42)	0.31	0.59 (0.31-0.80)	0.21	0.44 (0.34-0.59)	0.32
IP	0.41 (0.27-0.55)	0.33	0.29 (0.22-0.35)	0.26	0.34 (0.21-0.48)	0.34	0.55 (0.35-0.75)	0.35	0.46 (0.30-0.63)	0.38
SC	0.41 (0.34-0.53)	0.46	0.50 (0.43-0.63)	0.82	0.40 (0.35-0.46)	0.37	0.32 (0.23-0.48)	0.25	0.45 (0.37-0.58)	0.38
MD	0.44 (0.28-0.54)	0.27	0.37 (0.26-0.42)	0.35	0.38 (0.26-0.43)	0.27	0.55 (0.32-0.75)	0.20	0.46 (0.31-0.59)	0.25
ME	0.33 (0.24-0.48)	0.30	0.32 (0.24-0.38)	0.44	0.26 (0.21-0.31)	0.29	0.38 (0.23-0.70)	0.11	0.38 (0.30-0.54)	0.29
FR	0.35 (0.24-0.51)	0.27	0.29 (0.21-0.33)	0.31	0.26 (0.20-0.35)	0.27	0.47 (0.28-0.79)	0.19	0.41 (0.30-0.59)	0.31
BI	0.27 (0.16-0.37)	0.27	0.25 (0.21-0.28)	0.29	0.20 (0.17-0.27)	0.26	0.32 (0.22-0.51)	0.20	0.31 (0.26-0.43)	0.32
EA	0.39 (0.28-0.52)	0.25	0.42 (0.27-0.53)	0.41	0.32 (0.29-0.36)	0.09	0.40 (0.23-0.67)	0.08	0.42 (0.33-0.53)	0.17

3.3 Κλιματικές προβολές

Σε αυτή την ενότητα μελετώνται οι μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές αλλαγές, μεταξύ των μελλοντικών περιόδων 2046-2065, 2080-2099 και της περιόδου αναφοράς 1986-2005, σε αντιστοιχία με τις περιόδους της 5^{ης} Έκθεσης (AR5) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC).

Στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές αλλαγές μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων από την περίοδο αναφοράς, όπως αυτές εκτιμώνται από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX. Όλες οι περιοχές χαρακτηρίζονται από στατιστικώς σημαντικές αλλαγές. Όσον αφορά την περίοδο 2046-2065, στη Σκανδιναβία εκτιμάται η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή αύξηση (~2.3°C) και στη Βρετανία η μικρότερη (~1.3°C) (**Πίνακας 3.3**). Η αβεβαιότητα στο σύνολο των περιοχών, κυμαίνεται από 0.8°C έως 1.1°C. Στην περίοδο 2080-2099, οι αλλαγές της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες σε όλες τις περιοχές, ωστόσο εξίσου μεγάλη είναι και η αβεβαιότητα που προκύπτει (από 1.4°C έως 2.1°C). Η μικρότερη αλλαγή αναμένεται και πάλι στη Βρετανία (2.6°C) ενώ οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αυξήσεις εκτιμώνται στις Άλπεις, την Ιβηρική Χερσόνησο, τη Σκανδιναβία και κυρίως στη Μεσόγειο (4.3°C). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με την 5^η έκθεση αναφοράς (AR5) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC, 2014) η οποία αναφέρει ότι με τη χρήση του σεναρίου RCP8.5, τα μοντέλα εκτιμούν θερμοκρασιακή αύξηση, ως το τέλος του αιώνα, στη Βόρεια Ευρώπη, που κυμαίνεται από 3.8°C έως 5.7°C και στη Νότια Ευρώπη, που κυμαίνεται από 3.7°C έως 5.5°C.

Όσον αφορά τις εκτιμήσεις από το WRF371, αυτές συμφωνούν με τα μοντέλα του Euro-CORDEX ως προς το σήμα των θερμοκρασιακών αλλαγών (εκτός από ΕΑ), ωστόσο η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι το WRF371 εκτιμά μικρότερες θερμοκρασιακές αυξήσεις σε όλες τις περιοχές. (**Πίνακας 3.3**) Εξαίρεση αποτελεί η περιοχή της Βρετανίας, όπου το WRF371 συμφωνεί με το μέσο όρο των εκτιμήσεων των μοντέλων του Euro-CORDEX.



Σχήμα 3.10: Μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές διαφορές (°C), μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων και της περιόδου αναφοράς. Οι τιμές αφορούν το μέσο όρο των κλιματικών προβολών από τα μοντέλα του Euro-CORDEX. Όλες οι τιμές είναι στατιστικώς σημαντικές.

Πίνακας 3.3: Μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές αλλαγές (°C) μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων και της περιόδου αναφοράς, σύμφωνα με τις κλιματικές προβολές από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX και του WRF371. Με κόκκινο είναι οι στατιστικώς σημαντικές αλλαγές. Σε παρένθεση αναπαρίστανται το εύρος της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις κλιματικές προβολές των μοντέλων του Euro-CORDEX.

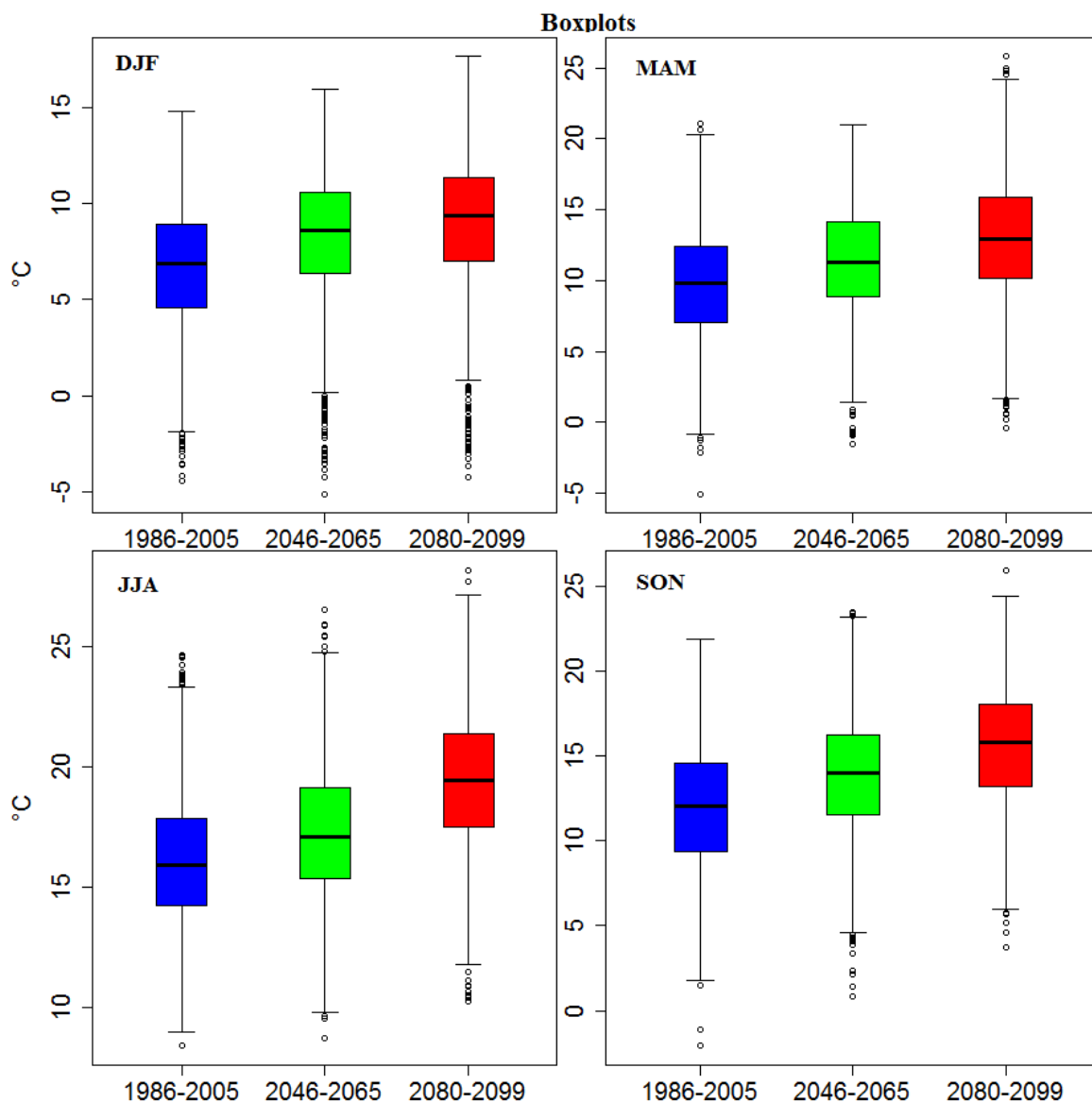
Subregions	Annual temperature differences (°C)			
	2046-2065 minus 1986-2005		2080-2099 minus 1986-2005	
	Euro-CORDEX	WRF371	Euro-CORDEX	WRF371
AL	1.9(1.6-2.7)	0.8	4.1(3.6-5.4)	2.6
IP	2.1(1.7-2.8)	1.5	4.1(3.7-5.3)	3.1
SC	2.3(2.1-2.9)	1.2	4.1(3.5-5)	3.9
MD	2.1(1.6-2.7)	0.4	4.3(3.8-5.2)	2.1
ME	1.5(1.2-2.2)	0.6	3.4(2.8-4.7)	2.3
FR	1.7(1.4-2.5)	0.9	3.6(2.9-5)	2.4
BI	1.3(1.1-1.9)	1.6	2.6(2.1-3.6)	2.6
EA	1.8(1.3-2.3)	0.8	3.9(3.3-4.7)	1.3

3.4 Κατανομές μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών

Παρακάτω αναλύονται οι κατανομές των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών στην Ιβηρική Χερσόνησο, προσομοιωμένες από το WRF371, για όλες τις εποχές στις τρεις μελετώμενες περιόδους. Στην ενότητα 3.1, αποδείχθηκε ότι στην Ιβηρική Χερσόνησο η προσομοίωση της θερμοκρασίας από το WRF371, με οδηγό το παγκόσμιο μοντέλο, εμφανίζει το μικρότερο bias συγκριτικά με άλλες περιοχές. Οι περιοχές με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από την πραγματικότητα στο παρόν κλίμα (bias), αναμένεται να έχουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις κλιματικές προβολές για το μελλοντικό κλίμα. (Boberg & Christensen, 2012)

Από τα θηκογράμματα του Σχήματος 3.11 φαίνεται η μετατόπιση των κατανομών της θερμοκρασίας προς τις μεγαλύτερες τιμές, με την πάροδο του χρόνου. Δεύτερον, παρατηρείται αύξηση της συχνότητας των ημερών με ακραίες ελάχιστες μέσες θερμοκρασίες στις δύο μελλοντικές περιόδους. Ακραίες θεωρούνται βάση της κλιματολογίας της περιοχής στην εκάστοτε χρονική περίοδο. Παραδείγματος χάρη, οι 0°C είναι ακραία ελάχιστη μέση

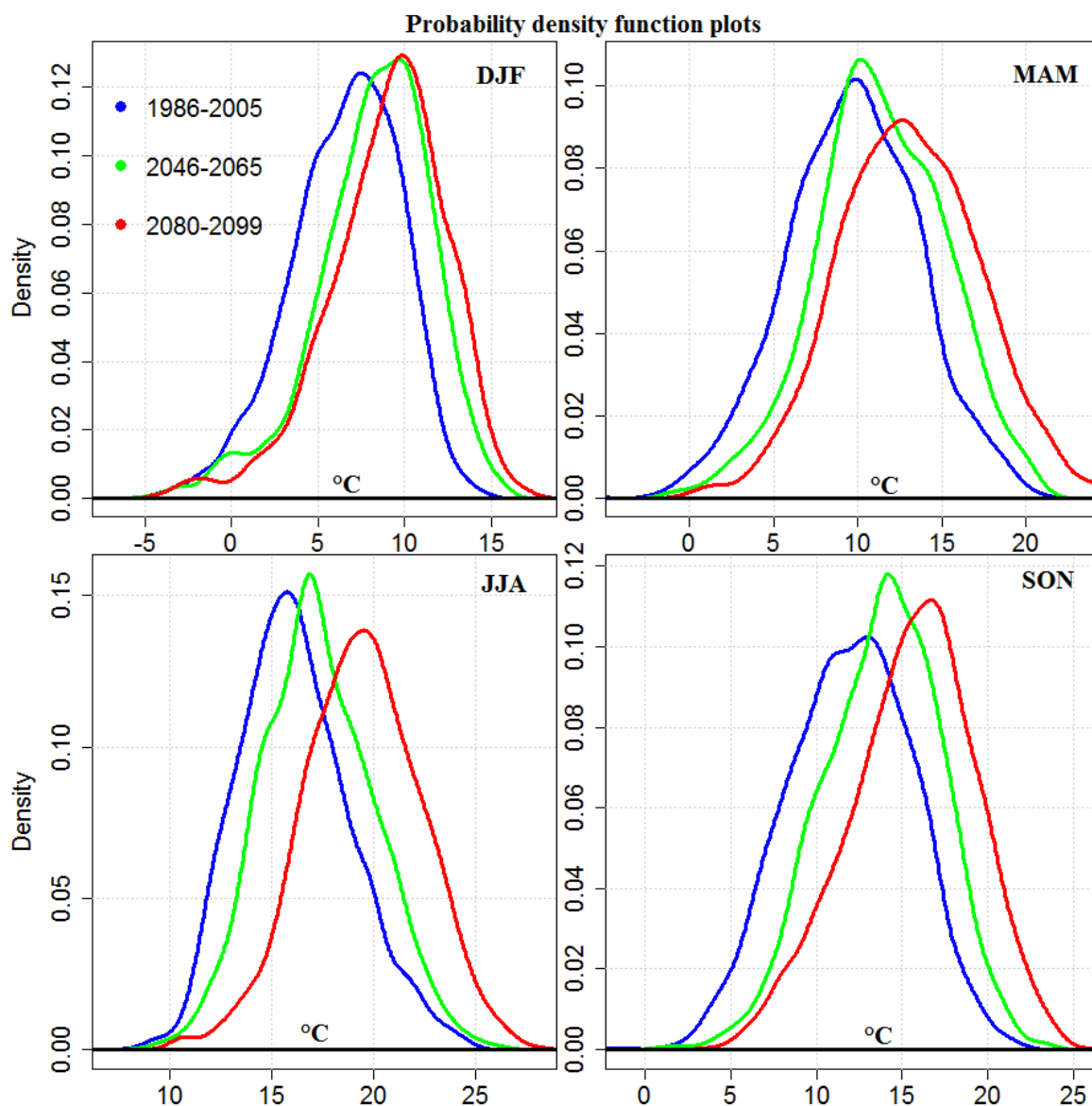
θερμοκρασία για την περίοδο 2080-2099, όχι όμως για την περίοδο 1986-2005. Στη παρούσα εργασία, ακραία ελάχιστη (μέγιστη) θερμοκρασία θα θεωρείται εκείνη η θερμοκρασία που είναι μικρότερη (μεγαλύτερη) από το 5° (95°) ποσοστιαίο σημείο της κατανομής των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών.



Σχήμα 3.11: Θηκογράμματα των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών, προσομοιωμένων από το WRF371 στην Ιβηρική Χερσόνησο, για όλες τις εποχές σε τρεις χρονικές περιόδους.

Τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας (**Σχήμα 3.12**) αποτέλεσαν ένα άλλο μέσο οπτικοποίησης των κατανομών της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας. Γίνεται αντιληπτή και από αυτά τα διαγράμματα, η αλλαγή στο θερμοκρασιακό καθεστώς, καθώς οι καμπύλες που εκφράζουν τις δύο μελλοντικές περιόδους είναι μετατοπισμένες προς τα δεξιά (προς

μεγαλύτερες τιμές) της κατανομής των θερμοκρασιών της περιόδου 1986-2005. Δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αλλαγή στην κύρτωση ή στη λόξωση των καμπυλών, ωστόσο, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, είναι εμφανής η αύξηση της συχνότητας των ημερών με ακραίες ελάχιστες θερμοκρασίες στις μελλοντικές περιόδους (peak στην αριστερή ουρά των καμπυλών που εκφράζουν τις μελλοντικές περιόδους).

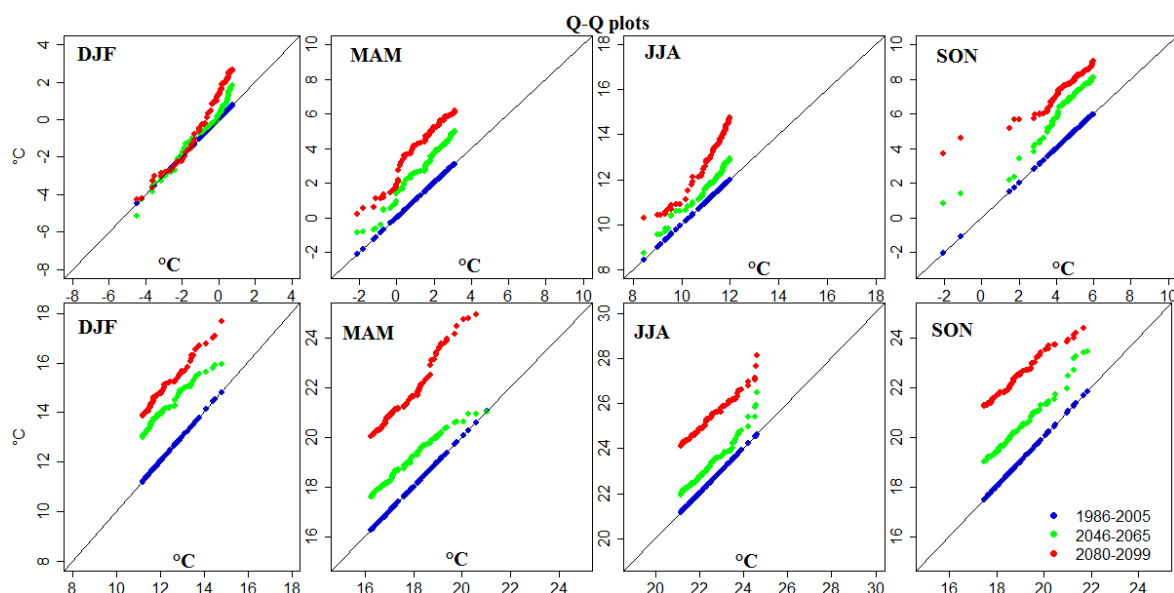


Σχήμα 3.12: Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών, προσομοιωμένων από το WRF371 στην Ιβηρική Χερσόνησο, για όλες τις εποχές σε τρεις χρονικές περιόδους.

Τέλος, στο **Σχήμα 3.13** αναπαρίστανται οι κατανομές των ελάχιστων και μέγιστων μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών, προσομοιωμένων από το WRF371, για όλες τις εποχές στις τρεις χρονικές περιόδους. Για την περίοδο 2046-2065, σε όλες τις εποχές οι ελάχιστες

θερμοκρασίες είναι αυξημένες περίπου κατά 1°C από τις ελάχιστες θερμοκρασίες της περιόδου 1986-2005, με εξαίρεση τον χειμώνα που δεν παρατηρείται ουσιώδης αλλαγή. Στις μέγιστες θερμοκρασίες εκτιμάται αύξηση περίπου 1°C την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ το χειμώνα και το φθινόπωρο οι αλλαγές είναι μεγαλύτερες ($\sim 2^{\circ}\text{C}$). Για την περίοδο 2080-2099, εκτιμάται αύξηση των ελάχιστων θερμοκρασιών κατά 2°C την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ το φθινόπωρο η αύξηση είναι ακόμα μεγαλύτερη ($\sim 3^{\circ}\text{C}$), σε σύγκριση με τις ελάχιστες θερμοκρασίες της περιόδου 1986-2005. Τον χειμώνα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά. Στις μέγιστες θερμοκρασίες εκτιμάται αύξηση περίπου 4°C σε όλες τις εποχές.

Συνοψίζοντας, οι ακραίες θερμοκρασίες αυξάνουν σε ένταση, ενώ οι ακραίες ελάχιστες θερμοκρασίες εκτιμάται ότι θα αυξηθούν και σε συχνότητα στην Ιβηρική Χερσόνησο ως το τέλος του αιώνα.



Σχήμα 3.13: Ιβηρική Χερσόνησος. Οι κατανομές των ελάχιστων (πάνω σχήματα) και μέγιστων (κάτω σχήματα) μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών για κάθε εποχή σε τρεις χρονικές περιόδους, σύμφωνα με το WRF371.

4 Υετός

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται χωρική και χρονική ανάλυση των προσομοιωμένων τιμών της μεταβλητής του υετού, από το WRF371 και τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, με τρόπο παρόμοιο του κεφαλαίου 3 για την θερμοκρασία.

4.1 Αξιολόγηση

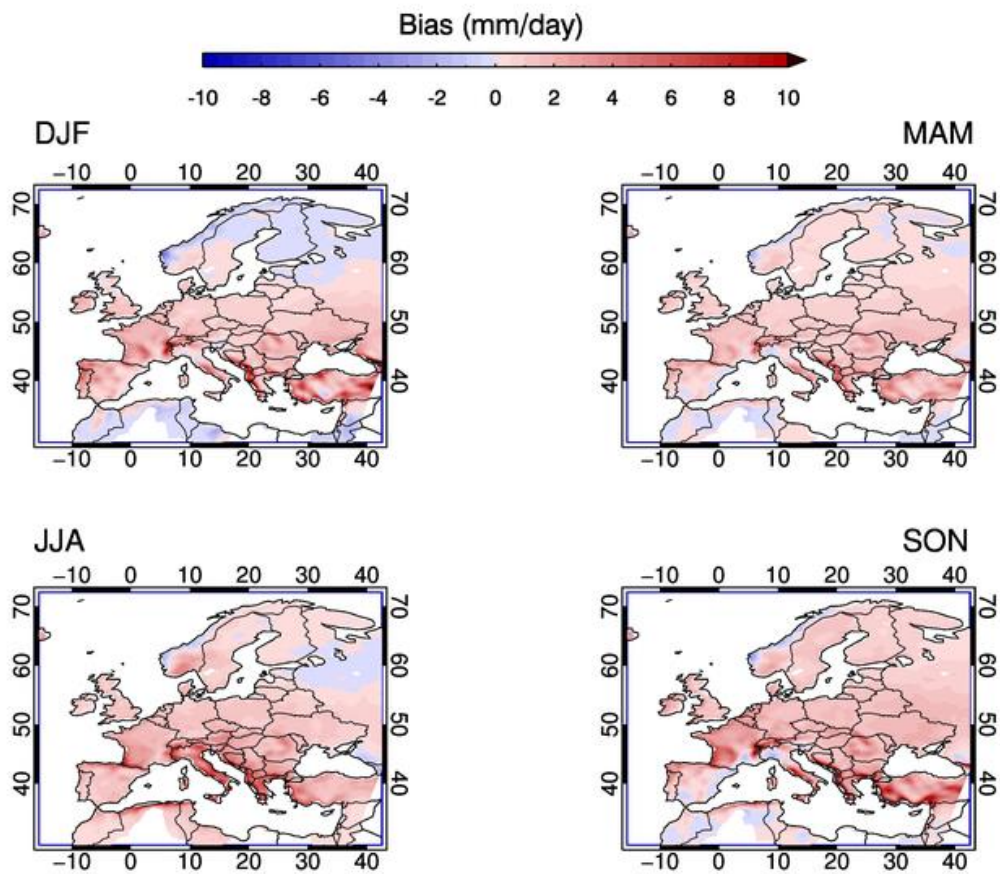
Στο **Σχήμα 4.1** αναπαρίσταται το μέσο εποχιακό bias (mm/day) για τον υετό την περίοδο 1986-2005, ανάμεσα στα E-OBS και το WRF371, οδηγούμενο από το NASA GISS_E2 (WRF371-EOBS).

Τον χειμώνα, όλες οι περιοχές, πλην της Σκανδιναβίας, χαρακτηρίζονται από θετικές τιμές bias. Το bias είναι μεγαλύτερο σε περιοχές της Ευρώπης με μεγάλο υψόμετρο (Άλπεις, Δειναρικές Άλπεις, Πυρηναία Όρη κλπ). Περιοχές όπως η Μεσόγειος και η Γαλλία οι οποίες συμπεριλαμβάνουν σημεία πλέγματός που βρίσκονται πάνω στα οροπέδια αυτά, διακρίνονται για το μεγάλο σχετικό bias. (**Πίνακας 4.1**)

Την άνοιξη, από αρνητικές τιμές bias χαρακτηρίζονται μόνο οι ακτές της Νορβηγίας. Οι περιοχές οι οποίες συμπεριλαμβάνουν σημεία πλέγματος που βρίσκονται πάνω σε μεγάλα υψόμετρα, εξακολουθούν και την άνοιξη να έχουν το μεγαλύτερο bias συγκριτικά με τις άλλες περιοχές. Ειδικά η Μεσόγειος χαρακτηρίζεται από ακόμα μεγαλύτερες τιμές bias σε σχέση με τον χειμώνα. Να σημειωθεί ότι η άνοιξη είναι η εποχή με το μικρότερο μέσο εποχιακό bias κατά μέσο όρο (64%).

Το καλοκαίρι, χαρακτηριστική είναι η πολύ μεγάλη υπερεκτίμηση της βροχόπτωσης στη περιοχή της Μεσογείου. Μεγάλο σχετικό bias εμφανίζεται επίσης στις περιοχές των Άλπεων και της Γαλλίας. Η Ιβηρική Χερσόνησος και η Σκανδιναβία προσομοιώνονται πολύ πιο ικανοποιητικά σε σχέση με τις άλλες περιοχές. Γενικά, το καλοκαίρι είναι η εποχή που εμφανίζεται το μεγαλύτερο σχετικό bias κατά μέσο όρο (126%), με το μεγαλύτερο ποσοστό να σημειώνεται στη Μεσόγειο.

Το φθινόπωρο, το χωρικό μοτίβο των τιμών bias είναι παρόμοιο με του καλοκαιριού. Η διαφορά είναι ότι το bias στη Μεσόγειο μειώθηκε και αυξήθηκε στις υπόλοιπες περιοχές της Νότιας Ευρώπης.



Σχήμα 4.1: Μέσες εποχιακές διαφορές για τον υετό (bias σε mm/day), μεταξύ των E-OBS και του WRF371, οδηγούμενο από το παγκόσμιο μοντέλο NASA GISS_E2, για την περίοδο 1986-2005. (WRF371-EOBS)

Πίνακας 4.1: Μέσο εποχιακό σχετικό bias (%) μεταξύ WRF371 (οδηγούμενο από το NASA GISS_E2) και E-OBS, για τον υετό (mm), την περίοδο 1986-2005. (WRF371-EOBS)

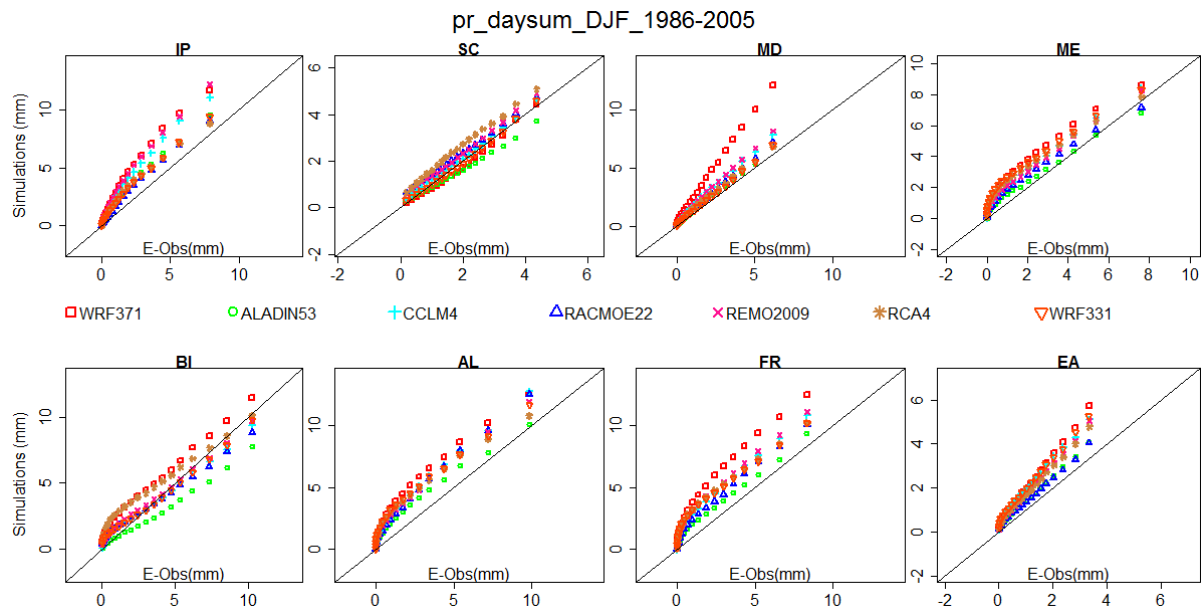
Περιοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	M.O
AL	83%	49%	101%	63%	74%
BI	38%	43%	57%	61%	49.7%
IP	97%	67%	32%	83%	69.7%
SC	-6.6%	18%	22%	40%	18.3%
FR	109%	81%	146%	134%	117.5%
MD	103%	130%	527%	177%	234%
ME	62%	52%	62%	101%	69.2%
EA	83%	72%	68%	107%	82.5%
M.O	71.5%	64%	126%	95.7%	

Σε γενικές γραμμές, η προσομοίωση του υετού από το WRF371, οδηγούμενο από το NASA GISS_E2, χαρακτηρίζεται από μεγάλες θετικές τιμές bias σε όλες σχεδόν τις εποχές και περιοχές, ειδικά στη Μεσόγειο το καλοκαίρι. Η μεγάλη υπερεκτίμηση εν μέρει σχετίζεται με τη χρήση των οριακών συνθηκών του μοντέλου NASA_GISS_E2 (Γκοτόβου, 2017) καθώς στις προσομοιώσεις τύπου hindcast, το μοντέλο WRF371 αντιπροσώπευε με μεγαλύτερη ακρίβεια τον υετό (Katrakou et al, 2017). Επίσης, το θέμα της μη ικανοποιητικής προσέγγισης των θερινών βροχοπτώσεων σε ορεινές περιοχές έχει εκτενώς συζητηθεί στη βιβλιογραφία και έχει αποδειχθεί ότι το σχετικό bias για τη βροχόπτωση μειώθηκε με τη βελτίωση του σχήματος ανω-μεταφοράς και με την υψηλότερη χωρική ανάλυση των προσομοιώσεων. (Torma et al., 2011) (Prein et al., 2016)

Για την σύγκριση των προσομοιώσεων από το WRF371 με τις προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, κατασκευάστηκαν q-q plots με τα ημερήσια ποσά υετού, για κάθε εποχή της περιόδου 1986-2005, με τρόπο παρόμοιο του κεφαλαίου 3 για τη θερμοκρασία.

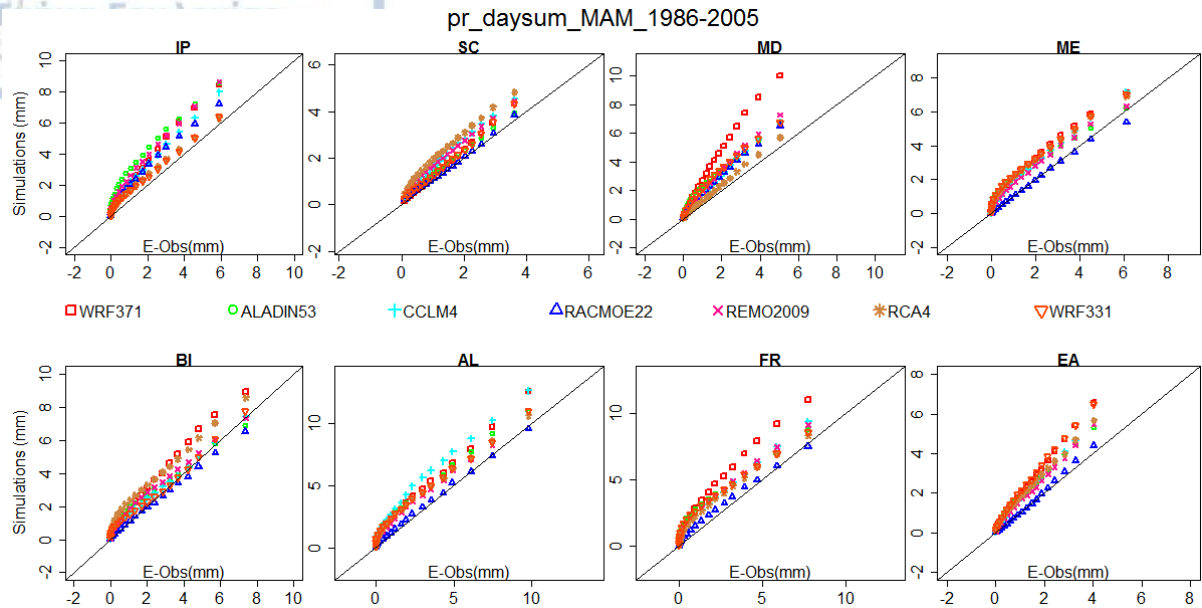
Τον χειμώνα (**Σχήμα 4.2**) φαίνεται ότι τα κλιματικά μοντέλα στην πλειοψηφία τους υπερεκτιμούν τον υετό σχεδόν σε όλες τις περιοχές. Από τα μικρά προς τα μεγάλα ποσοστιαία σημεία μεγαλώνει το bias και το εύρος των προσομοιωμένων τιμών. Στη Σκανδιναβία οι

προσομοιώσεις από όλα τα κλιματικά μοντέλα χαρακτηρίζονται αρκετά ικανοποιητικές, ενώ στη Μεσόγειο χαρακτηριστική είναι η μεγάλη υπερεκτίμηση από το WRF371.



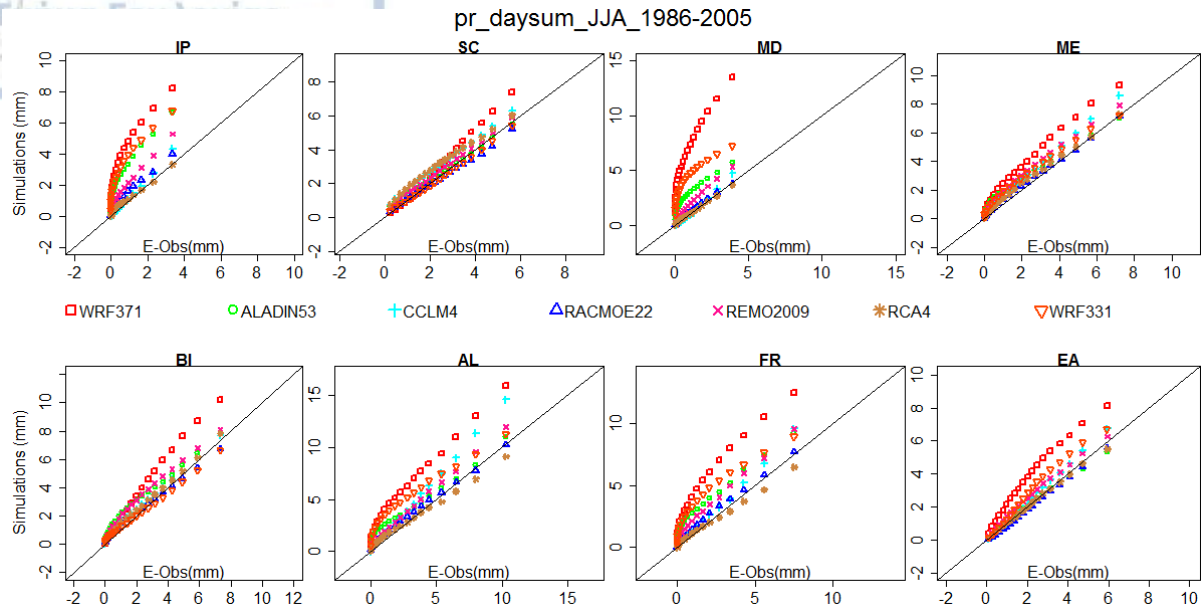
Σχήμα 4.2: Quantile-Quantile plot για τα προσομοιωμένα ημερήσια ποσά υετού (mm) τον χειμώνα, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα αναπαρίστανται οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Η συστηματική υπερεκτίμηση του υετού από τα κλιματικά μοντέλα, συνεχίζεται και την άνοιξη (Σχήμα 4.3) με το μοτίβο των κατανομών να παραμένει σχεδόν αναλλοίωτο.



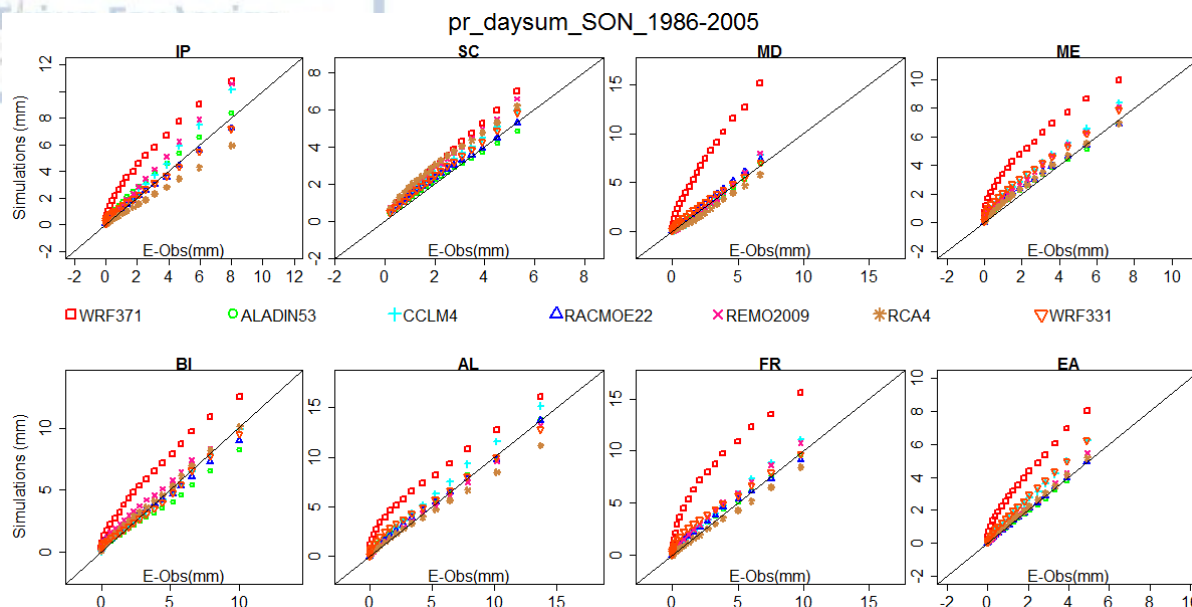
Σχήμα 4.3: Quantile-Quantile plot για τα προσομοιωμένα ημερήσια ποσά υετού (mm) την άνοιξη, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5° μέχρι το 95° ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα αναπαρίστανται οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Χαρακτηριστικό του καλοκαιριού (Σχήμα 4.4) είναι η αύξηση των τιμών bias και του εύρους των προσομοιωμένων τιμών, από τα μικρά προς τα μεγάλα ποσοστιαία σημεία. Επιπλέον χαρακτηριστικό αποτελεί η παρόμοια κατανομή που εμφανίζουν οι δύο εκδόσεις του WRF στην Ιβηρική Χερσόνησο, τη Μεσόγειο και τη Γαλλία, με τη διαφορά ότι το WRF331 παρουσιάζει μικρότερες τιμές bias.



Σχήμα 4.4: Quantile-Quantile plot για τα προσομοιωμένα ημερήσια ποσά υετού (mm) το καλοκαίρι, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα αναπαρίστανται οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Το φθινόπωρο (Σχήμα 4.5) όλες οι περιοχές προσομοιώνονται αρκετά ικανοποιητικά από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, συγκριτικά με άλλες εποχές. Το WRF371 εξακολουθεί να παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από τα δεδομένα E-OBS, κυρίως στη Μεσόγειο και τη Γαλλία.



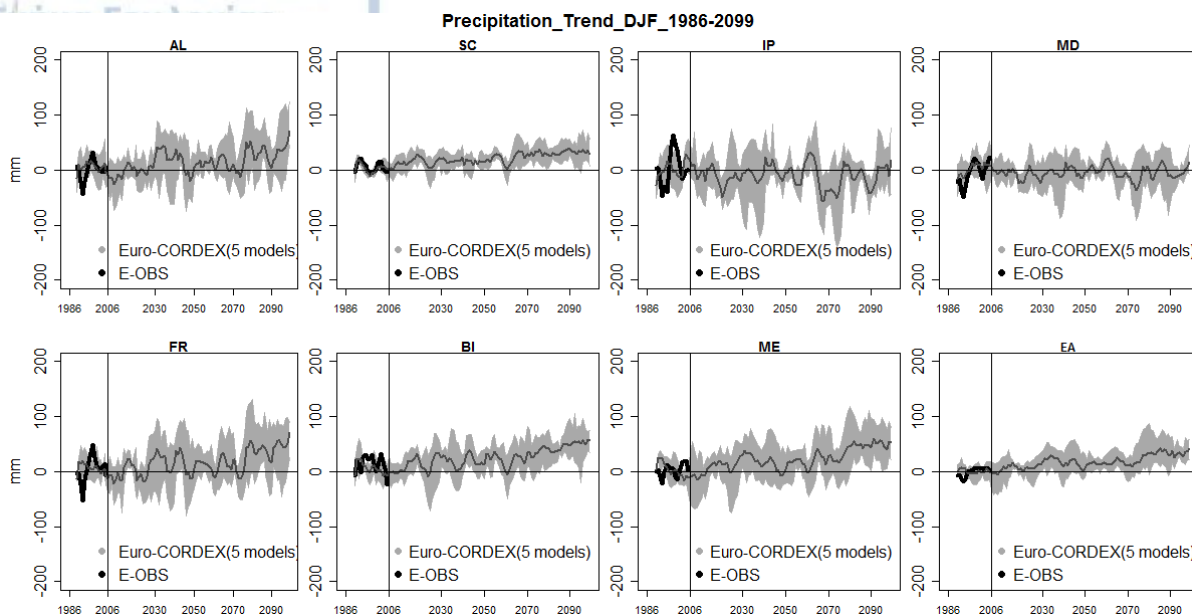
Σχήμα 4.5: Quantile-Quantile plot για τα προσομοιωμένα ημερήσια ποσά υετού (mm) το φθινόπωρο, έναντι των E-OBS, για την περίοδο 1986-2005. Αναπαρίστανται 19 ποσοστιαία σημεία (από το 5^ο μέχρι το 95^ο ανά 5%). Στον οριζόντιο άξονα αναπαρίστανται οι τιμές των E-OBS και στον κάθετο οι προσομοιώσεις από τα κλιματικά μοντέλα. Απόκλιση από τη διαγώνιο σημαίνει απόκλιση από τα δεδομένα E-OBS.

Γενικά, η πλειοψηφία των κλιματικών μοντέλων έχει την τάση να υπερεκτιμά συστηματικά τον υετό σε όλες σχεδόν τις περιοχές, ωστόσο σε πολύ μικρότερο βαθμό από το WRF371. Η Σκανδιναβία είναι η περιοχή με το μικρότερο bias κατά μέσο όρο σε κάθε εποχή, ενώ το φθινόπωρο ο υετός προσομοιώνεται καλύτερα σε όλες σχεδόν τις περιοχές, συγκριτικά με άλλες εποχές, από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX.

4.2 Χρονοσειρές και τάσεις

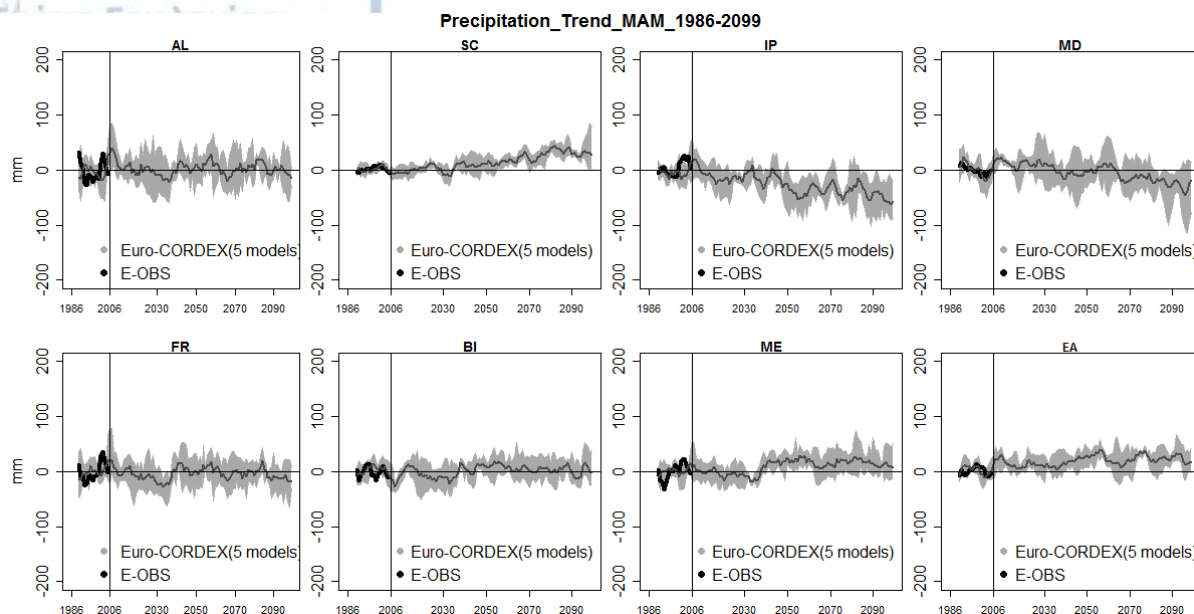
Στην ενότητα αυτή υπολογίζονται οι ανωμαλίες των εποχιακών (mm/decade) και ετήσιων ποσών υετού για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1986-2005. Ο υπολογισμός των ανωμαλιών έγινε παρόμοια με τον υπολογισμό των ανωμαλιών για τη θερμοκρασία στο κεφάλαιο 3.

Τον χειμώνα (Σχήμα 4.6) τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX εκτιμούν αύξηση των ποσών υετού σε όλες τις περιοχές της Ευρώπης, εκτός από την Ιβηρική Χερσόνησο και την Μεσόγειο (Πίνακας 4.2). Ωστόσο, οι αλλαγές στις περιοχές αυτές (IP, MD) θεωρούνται στατιστικώς μη σημαντικές. Τη μεγαλύτερη και στατιστικώς σημαντική τάση παρουσιάζουν οι περιοχές της Κεντρικής Ευρώπης (~ 4.5 mm/decade) και της Βρετανίας (~ 4.3 mm/decade).



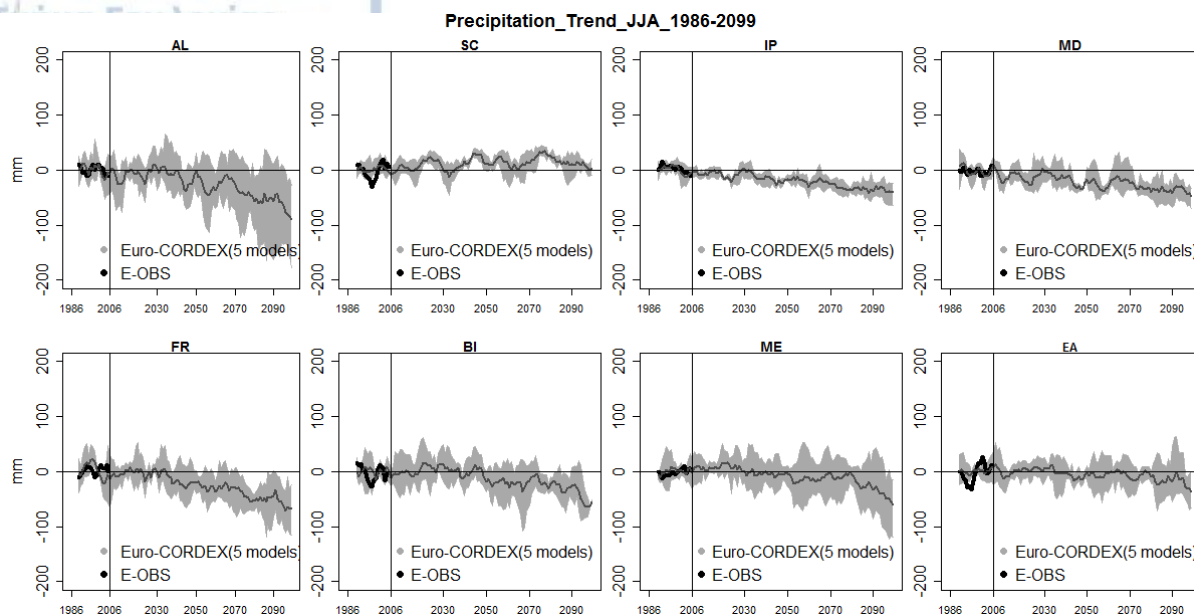
Σχήμα 4.6: Χρονοσειρές ανωμαλιών των ποσών υετού (mm) των χειμώνα για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (bold) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Την άνοιξη (Σχήμα 4.7) η μόνη περιοχή για την οποία προβλέπεται σημαντική μείωση των ποσών υετού, σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, είναι η Ιβηρική Χερσόνησος (~ -4.8 mm/decade). Αντιθέτως, αύξηση των ποσών υετού εκτιμάται στη Σκανδιναβία (~ 3.8 mm/decade) και την Ανατολική Ευρώπη (~ 1.9 mm/decade).



Σχήμα 4.7: Χρονοσειρές ανωμαλιών των ποσών υετού (mm) την άνοιξη για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (bold) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Το καλοκαίρι (Σχήμα 4.8) μόνο η περιοχή της Σκανδιναβίας χαρακτηρίζεται από θετική και στατιστικώς σημαντική τάση (~ 1.4 mm/decade), σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX. Στις υπόλοιπες περιοχές εκτιμάται μείωση των ποσών υετού. Οι Άλπεις και η Γαλλία εμφανίζουν τις μεγαλύτερες αρνητικές τάσεις, ωστόσο με μεγάλη αβεβαιότητα από πλευράς κλιματικών μοντέλων (από -14.8 mm/decade έως -0.1 mm/decade και από 10 mm/decade έως -3.1 mm/decade, αντίστοιχα).

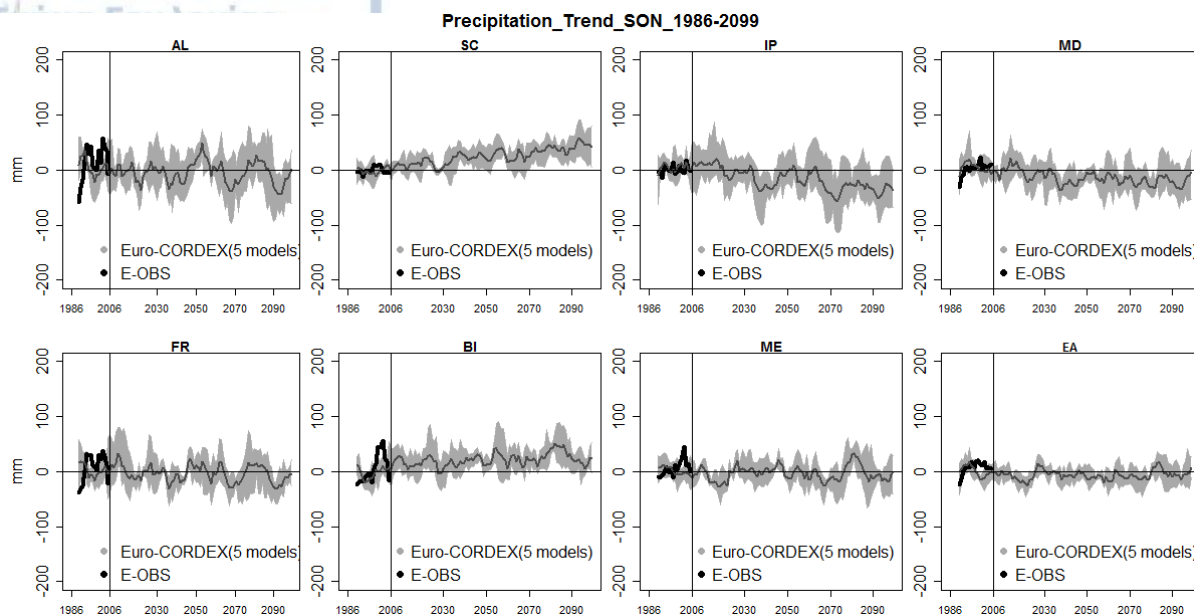


Σχήμα 4.8: Χρονοσειρές ανωμαλιών των ποσών υετού (mm) το καλοκαίρι για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (bold) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Το φθινόπωρο (**Σχήμα 4.9**) στατιστικώς σημαντική αύξηση των ποσών υετού εκτιμάται, από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, στη περιοχή της Σκανδιναβίας (~ 4.5 mm/decade) και της Βρετανίας (~ 2.6 mm/decade), ενώ σημαντικές μειώσεις ποσών υετού εκτιμάται ότι θα δεχθούν οι περιοχές της Νότιας Ευρώπης (IP, MD).

Συνοψίζοντας, σε όλες τις περιοχές εκτιμώνται στατιστικώς σημαντικές αλλαγές στα ετήσια ποσά υετού, σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX (**Πίνακας 4.2**). Η μεγαλύτερη μείωση προβλέπεται στην Ιβηρική Χερσόνησο (~ -1.43 mm/year) και τη Μεσόγειο (~ -1 mm/year). Αύξηση ποσών υετού, σε σχέση με τη περίοδο 1986-2005, εκτιμάται στη Βρετανία (~ 0.33 mm/year), στη Κεντρική Ευρώπη (~ 0.29 mm/year), στη Ανατολική Ευρώπη (~ 0.28 mm/year) και κυρίως στη Σκανδιναβία (~ 1.26 mm/year).

Από την άλλη πλευρά, οι εκτιμήσεις του WRF371 συμφωνούν ως προς το σήμα των αλλαγών, με τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, στην Ιβηρική Χερσόνησο και τη Μεσόγειο, ωστόσο εκτιμά πολύ μεγαλύτερες ανωμαλίες και στις δύο περιοχές (-3.15 mm/year και -1.78 mm/year, αντίστοιχα). Στις υπόλοιπες περιοχές το WRF371 δεν εκτιμά στατιστικώς σημαντικές αλλαγές στον ετήσιο υετό.



Σχήμα 4.9: Χρονοσειρές ανωμαλιών των ποσών υετού (mm) το φθινόπωρο για την περίοδο 1986-2099, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1986-2005. Με μαύρο (bold) φαίνονται τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για την περίοδο 1986-2005. Το γκρι φάσμα αναπαριστά την αβεβαιότητα που προκύπτει από τις 5 προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX (ALADIN53, REMO2009, RACMOE22, RCA4, CCLM4). Από το 2006 και μετά, τα κλιματικά μοντέλα οδηγούνται από το σενάριο RCP8.5.

Πίνακας 4.2: Γραμμικές τάσεις των ανωμαλιών του εποχιακού (mm/decade) και ετήσιου υετού της περιόδου 1986-2099, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1986-2005. Σε παρένθεση φαίνεται το εύρος της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις προσομοιώσεις των πέντε κλιματικών μοντέλων του Euro-CORDEX. Με κόκκινο είναι οι στατιστικώς σημαντικές τιμές, σε επίπεδο 95%.

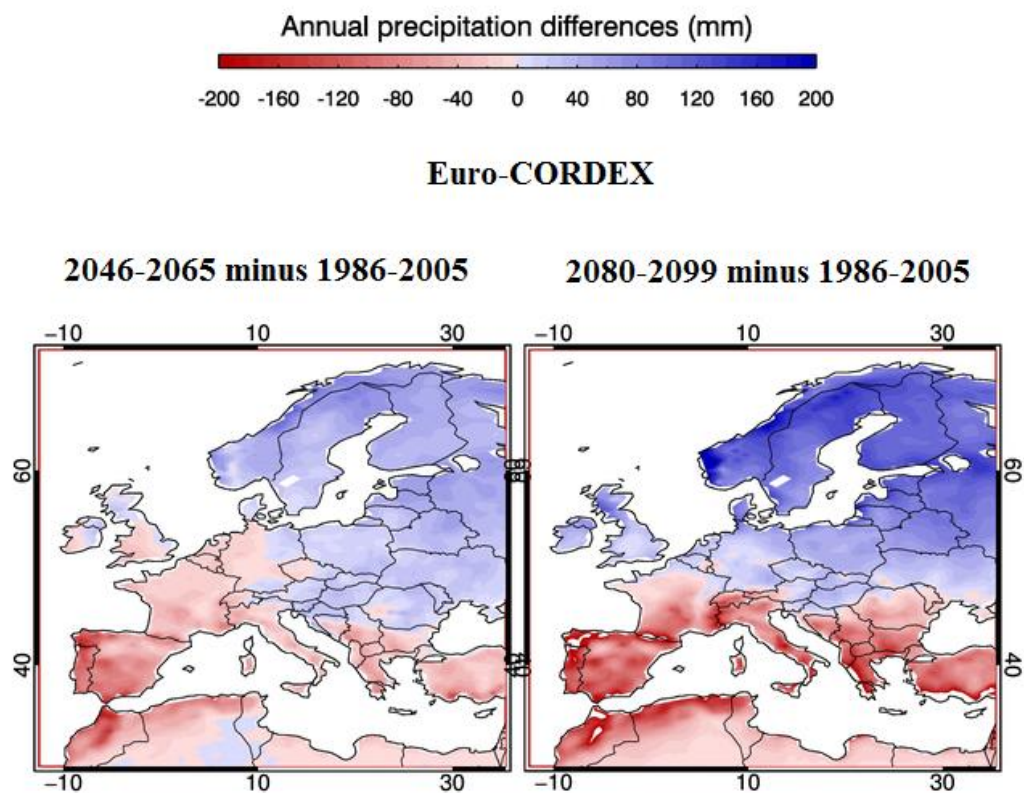
Precipitation Trend (mm/decade)										
	Annual (mm)		DJF		MAM		JJA		SON	
	Euro-CORDEX(5 models)	WRF371	Euro-CORDEX(5 models)	WRF371	Euro-CORDEX(5 models)	WRF371	Euro-CORDEX(5 models)	WRF371	Euro-CORDEX(5 models)	WRF371
AL	-0.41(-2.87 έως 1.08)	-0.76	3.13(0.14 έως 7)	0.7	0.03(-11.1 έως 2.9)	-2.9	-6.2(-14.8 έως -0.1)	-2.7	-1.1(-3 έως 1)	-2.7
IP	-1.43(-2.01 έως -0.69)	-3.11	-1.1(-2.6 έως 0.45)	-6	-4.8(-6 έως -5.4)	-7.5	-3.8(-5.5 έως -2.2)	-7	-4.6(-6 έως 0.25)	-10.6
SC	1.26(0.58 έως 1.87)	0.24	2.9(0.9 έως 5.5)	3	3.8(2.4 έως 4.7)	-1	1.4(0.58 έως 2.15)	0.5	4.5(2 έως 6.4)	-0.06
MD	-1(-1.96 έως -0.1)	0.057	-0.3(-2.3 έως 1.9)	-0.23	-3.4(-7.3 έως 0.3)	-2	-3.6(-6 έως -2.5)	9.2	-2.7(-4 έως 0.28)	-6.4
ME	0.29(-0.71 έως 1.28)	1.2	4.5(1.4 έως 8.6)	3.2	2.1(1.7 έως 2.9)	0.8	-3.6(-8.3 έως 0.46)	1.9	-0.1(-0.9 έως 0.9)	6.2
FR	-0.4(-1.34 έως 0.5)	-0.13	3.8(0.1 έως 8.4)	0.8	-0.4(-1.4 έως 0.1)	-2.4	-6.1(-10 έως -3.1)	1.8	-1.3(-2.1 έως -0.4)	-1.5
BI	0.33(-0.29 έως 0.9)	0.24	4.3(1.3 έως 6.7)	3	0.68(-0.61 έως 1.5)	-0.5	-4.2(-6 έως -1.9)	-3.2	2.6(2.4 έως 2.7)	3.1
EA	0.28(-0.35 έως 0.91)	1.51	3.1(2.1 έως 5.8)	2	1.9(1.2 έως 3.2)	1.3	-1.9(-4.8 έως 1.9)	8.6	-0.3(-0.01 έως 0.1)	3.2

4.3 Κλιματικές προβολές

Σε αυτή την ενότητα μελετώνται οι μέσες ετήσιες αλλαγές στα ποσά νετού (mm), μεταξύ των μελλοντικών περιόδων 2046-2065, 2080-2099 και της περιόδου αναφοράς 1986-2005, σε αντιστοιχία με τις περιόδους της 5^{ης} Έκθεσης (AR5) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC).

Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζονται οι αλλαγές στον ετήσιο νετό μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων από την περίοδο αναφοράς, όπως αυτές εκτιμώνται από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX. Αξιοσημείωτο είναι το δίπολο των αλλαγών που εμφανίζεται στην Ευρώπη. Στη Βόρεια και Βορειανατολική Ευρώπη (SC, EA) αναμένεται αύξηση των ποσών νετού, ενώ στις νότιες χώρες (MD, IP) εκτιμώνται αρνητικές αλλαγές, σε σχέση με την περίοδο 1986-2005. Και για τις δύο μελλοντικές περιόδους το σήμα των αλλαγών για τον ετήσιο νετό παραμένει το ίδιο, ωστόσο στη περίοδο 2080-2099, σε όλες τις περιοχές οι αλλαγές είναι πιο έντονες. Για την περίοδο 2046-2065, η αβεβαιότητα για το σύνολο των περιοχών κύμινεται από 6.2mm έως 82mm (**Πίνακας 4.3**). Τη μικρότερη αβεβαιότητα εκφράζει η Βρετανία και τη μεγαλύτερη η Μεσόγειος. Η μεγαλύτερη μείωση του ετήσιου νετού αναμένεται στην Ιβηρική Χερσόνησο (~ -89.2mm) και τη Μεσόγειο (~ -35.2mm), ενώ στη Σκανδιναβία εκτιμάται αύξηση (~54.2mm). Στη περίοδο 2080-2099, η αβεβαιότητα για το σύνολο των περιοχών μεγαλώνει (από 41mm έως 115mm). Με τη μικρότερη αβεβαιότητα χαρακτηρίζεται η Κεντρική Ευρώπη, ενώ εξαιρετικά αβέβαιη ως προς τις αλλαγές στον ετήσιο νετό χαρακτηρίζεται από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX, η περιοχή της Μεσογείου. Μεγάλη μείωση στον ετήσιο νετό αναμένεται στην Ιβηρική Χερσόνησο (~ -148mm) και στη Μεσόγειο (~ -125.5mm) ενώ πιο υγρές συνθήκες, σε σχέση με τη περίοδο 1986-2005, αναμένονται στη Βρετανία, την Ανατολική και Κεντρική Ευρώπη και κυρίως την Σκανδιναβία (~136.7mm).

Όσον αφορά τις εκτιμήσεις από το WRF371, αυτές συμφωνούν με τα μοντέλα του Euro-CORDEX ως προς το σήμα των αλλαγών στην Ανατολική και Κεντρική Ευρώπη, τις Άλπεις και τη Μεσόγειο, ωστόσο η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι το WRF371 εκτιμά μεγαλύτερες αλλαγές. Στις υπόλοιπες περιοχές, το WRF371 δεν εκτιμά στατιστικώς σημαντικές αλλαγές στον ετήσιο νετό.



Σχήμα 4.10: Διαφορές μέσου ετήσιου υετού (mm), μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων και της περιόδου αναφοράς. Οι τιμές αφορούν το μέσο όρο των κλιματικών προβολών από τα μοντέλα του Euro-CORDEX. Όλες οι τιμές είναι στατιστικώς σημαντικές.

Πίνακας 4.3: Αλλαγές στον μέσο ετήσιο υετό (mm) μεταξύ των δύο μελλοντικών περιόδων και της περιόδου αναφοράς, σύμφωνα με τις κλιματικές προβολές από τα κλιματικά μοντέλα του Euro-CORDEX και του WRF371. Με κόκκινο είναι οι στατιστικώς σημαντικές αλλαγές. Σε παρένθεση αναπαρίσταται το εύρος της αβεβαιότητας που προκύπτει από τις κλιματικές προβολές των μοντέλων του Euro-CORDEX.

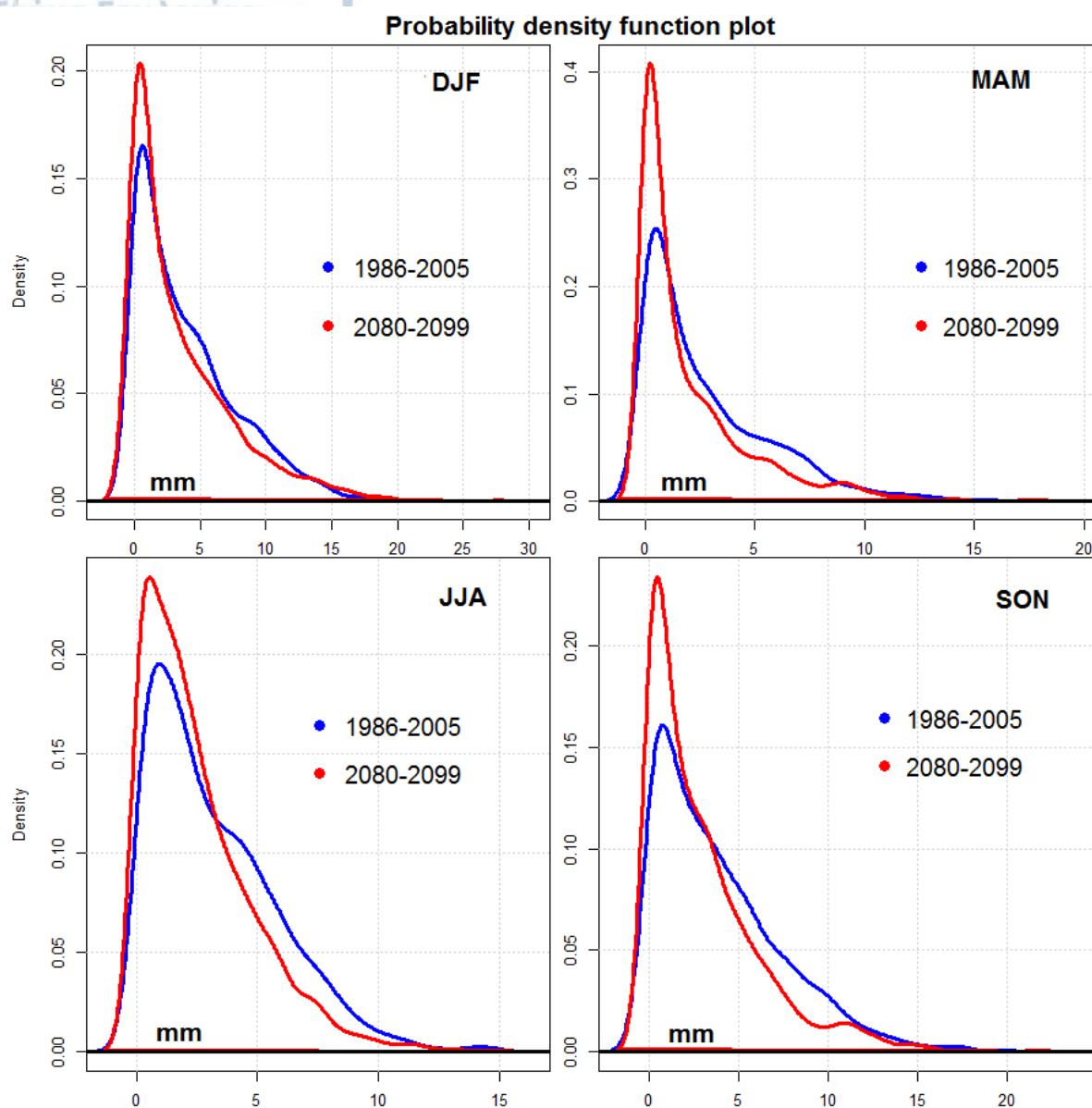
Subregions	Annual precipitation differences (mm)			
	2046-2065 minus 1986-2005		2080-2099 minus 1986-2005	
	Euro-CORDEX	WRF371	Euro-CORDEX	WRF371
AL	-14.9 (-58 έως 3.3)	-50	-58.7 (-134 έως 19)	-86
IP	-89.2 (-115 έως -44)	-1.5	-148 (-178 έως -100)	-260
SC	54.2 (25 έως 57)	13.4	136.7 (102 έως 156)	36.6
MD	-35.2 (-62 έως 22)	233	-125.5 (-190 έως -93)	65
ME	6.25 (-26 έως 11)	164	25.2 (4 έως 45)	206
FR	-28 (-63 έως -4)	179	-43.2 (-79 έως -22)	-17
BI	0.5 (-11 έως 4.8)	87	45.9 (22 έως 79.6)	-7
EA	23.7 (-3 έως 67)	104	29.7 (-9 έως 61)	107

4.4 Κατανομές ημερήσιου υετού

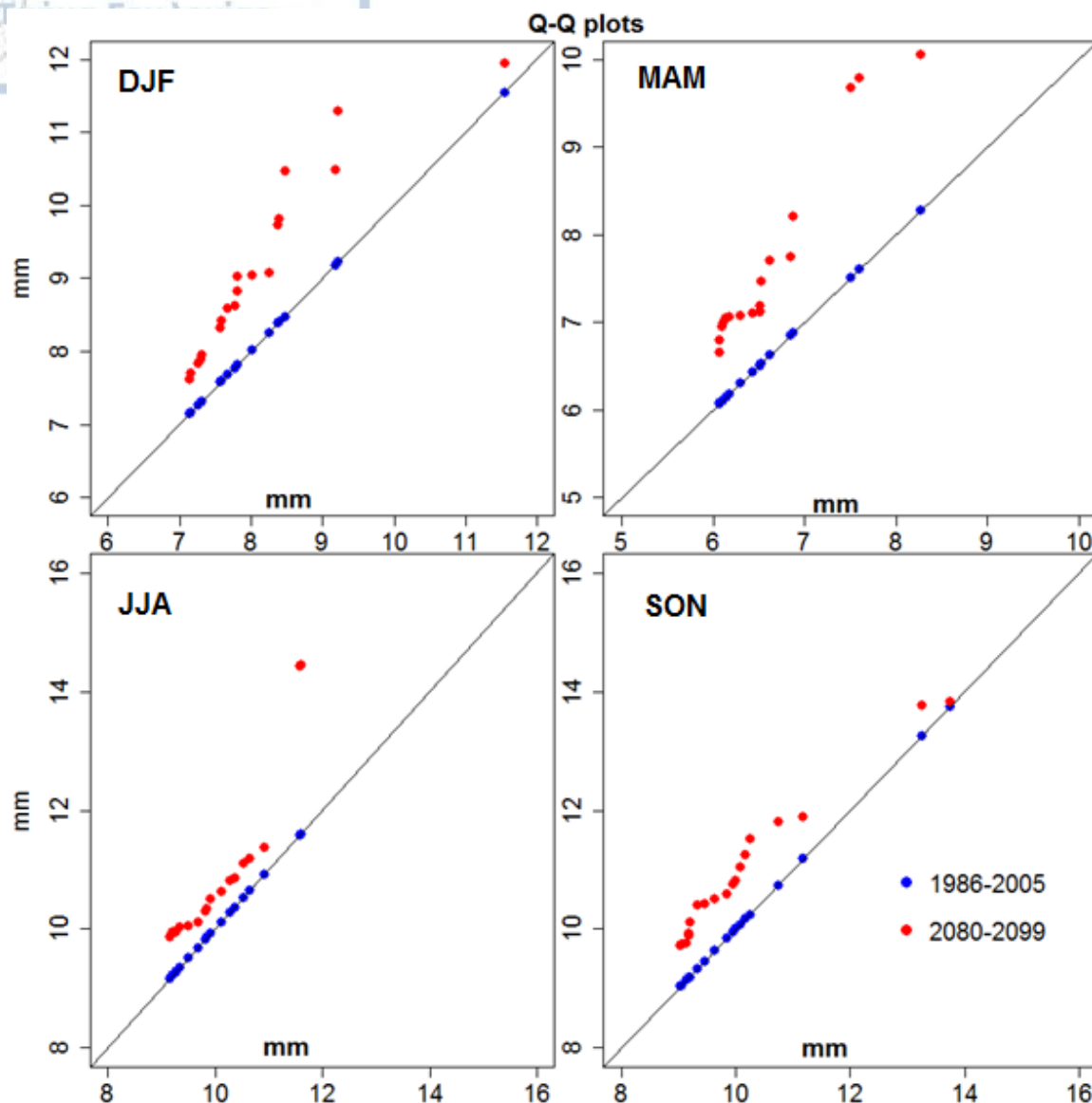
Παρακάτω αναλύεται η κατανομή του ημερήσιου υετού στην Ιβηρική Χερσόνησο, προσομοιωμένου από το WRF371, για όλες τις εποχές σε δύο χρονικές περιόδους.

Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζονται τα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής του ημερήσιου υετού. Το WRF371 εκτιμά αύξηση της συχνότητας των ημερών με μηδενικό ή μικρό υετό (< 3mm) και μείωση των ημερών με υετό μεγαλύτερο από 3mm, ως το τέλος του 21^{ου} αιώνα για την Ιβηρική Χερσόνησο.

Στο **Σχήμα 4.12** γίνεται σύγκριση, ανάμεσα στην περίοδο 2080-2099 και τη περίοδο αναφοράς, για το τελευταίο 1% της κατανομής του ημερήσιου υετού, όπως προσομοιώνεται από το WRF371. Εκτιμάται ότι οι ακραίες βροχοπτώσεις στην Ιβηρική Χερσόνησο θα αυξηθούν σε ένταση ως το 2100.



Σχήμα 4.11: Διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής του ημερήσιου υετού, προσομοιωμένου από το WRF371 στην Ιβηρική Χερσόνησο, για όλες τις εποχές σε δύο χρονικές περιόδους.



Σχήμα 4.12: Quantile-Quantile plot. Αναπαράσταση των σημείων του τελευταίου 1% της κατανομής των ημερήσιων ποσών υετού στην Ιβηρική Χερσόνησο, προσομοιωμένων από το WRF371, για κάθε εποχή σε δύο χρονικές περιόδους.

5 Συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής πάνω από την Ευρώπη για τον 21^ο αιώνα, με τη χρήση περιοχικών κλιματικών προσομοιώσεων, οδηγούμενων από το σενάριο RCP8.5. Οι προσομοιώσεις προέρχονται από το κλιματικό μοντέλο WRF371, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του ΑΠΘ, καθώς και από τα RACMOE22, REMO2009, CCLM4, ALADIN53, RCA4, WRF331 τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της αβεβαιότητας στις κλιματικές προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις από τα προαναφερθέντα κλιματικά μοντέλα, διενεργήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος Euro-CORDEX. Κάθε περιοχικό κλιματικό μοντέλο οδηγήθηκε από διαφορετικό παγκόσμιο μοντέλο και όλες οι προσομοιώσεις αφορούν σε χωρική διακριτοποίηση 0.44°. Η θερμοκρασία και ο υετός είναι οι δύο μεταβλητές που αναλύθηκαν.

Σε πρώτη φάση, έγινε αξιολόγηση των κλιματικών προσομοιώσεων με τα παρατηρησιακά δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές, την περίοδο 1986-2005. Αποδείχθηκε ότι τα κλιματικά μοντέλα στην πλειοψηφία τους υποεκτιμούν τη θερμοκρασία σε όλες σχεδόν τις περιοχές της Ευρώπης, κυρίως την εποχή της άνοιξης. Όσον αφορά τα ποσά υετού, τα κλιματικά μοντέλα δείχνουν να τα υπερεκτιμούν συστηματικά σε όλες τις περιοχές, με το WRF371 να διακρίνεται για τις μεγάλες τιμές bias το καλοκαίρι στη Νότια Ευρώπη.

Έπειτα, αναλύθηκαν οι χρονοσειρές και οι γραμμικές τάσεις των ετήσιων και εποχιακών ανωμαλιών της θερμοκρασίας και του υετού για την περίοδο 1986-2099. Εκτιμάται ότι οι μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αλλαγές (αυξήσεις) θα συμβούν στις περιοχές της Μεσογείου, των Άλπεων, της Ιβηρικής Χερσονήσου και της Σκανδιναβίας (~0.4°C/decade). Τη μικρότερη επίδραση φαίνεται να δέχεται η περιοχή της Βρετανίας (0.27°C/decade). Όσον αφορά τα ποσά υετού, αυτά εκτιμάται ότι θα μειωθούν αρκετά στη Νότια Ευρώπη, κυρίως στην Ιβηρική Χερσόνησο (~ -14.6 mm/decade), ενώ θα αυξηθούν επίσης σημαντικά στη Βόρεια Ευρώπη, κυρίως στη Σκανδιναβία (~12.6 mm/decade). Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις του IPCC για τις μελλοντικές αλλαγές στη θερμοκρασία και τα ποσά υετού στην Ευρώπη, σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5.

Τέλος, στην Ιβηρική Χερσόνησο αναλύθηκαν οι κατανομές της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και του ημερήσιου υετού, όπως αυτές προσομοιώνονται από το WRF371 για



όλες τις εποχές σε τρεις χρονικές περιόδους. Στην Ιβηρική Χερσόνησο, ως το τέλος του αιώνα, πέρα από τη γενικότερη αύξηση της θερμοκρασίας, αναμένεται αύξηση της συχνότητας των ακραίων ελάχιστων θερμοκρασιών και αύξηση της έντασης των ακραίων βροχοπτώσεων σε σχέση με την περίοδο 1986-2005.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να δώσουν το εναύσμα για μελέτη κι άλλων μεταβλητών, πέρα της θερμοκρασίας και του υετού. Η μελέτη των μεταβλητών, όπως της υγρασίας εδάφους και της ακτινοβολίας, θα μπορούσε ίσως να εξηγήσει τη κακή απόδοση της θερμοκρασίας και του υετού, από το WRF371, σε ορισμένες περιοχές και εποχές. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να δοθεί ιδιαίτερη βάση στην ανάλυση των ακραίων τιμών της θερμοκρασίας και του υετού καθώς δείχνουν ιδιαίτερη μεταβλητότητα στο πέρασμα του χρόνου.

- Boberg, F., & Christensen, J. H. (2012). Overestimation of Mediterranean summer temperature projections due to model deficiencies. *Nature Climate Change*, 2(6), 433–436. <https://doi.org/10.1038/nclimate1454>
- Christensen, J. H., & Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9210-7>
- García-Díez, M., Fernández, J., & Vautard, R. (2015). An RCM multi-physics ensemble over Europe: multi-variable evaluation to avoid error compensation. *Climate Dynamics*, 45(11–12), 3141–3156. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2529-x>
- Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467–490. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., & New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(20). <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- IPCC. (2014a). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. *Ipcc*, 31. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2014b). *Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Katragkou, E., García-Díez, M., Vautard, R., Sobolowski, S., Zanis, P., Alexandri, G., ... Jacob, D. (2015). Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: Evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geoscientific Model Development*, 8(3), 603–618. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-603-2015>

- Laprise, R., Kornic, D., Rapaić, M., Šeparović, L., Leduc, M., Nikiema, O., Luca, A.D., D., & E., Alexandru, A., Lucas-Picher, P., de Elía, R., Caya, D., Biner, S. (2012). *Considerations of domain size and large-scale driving for nested regional climate models: Impact on internal variability and ability at developing small-scale details. Climate Change: Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects.* <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0973-1>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Prein, A. F., Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., ... Jacob, D. (2016). Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Climate Dynamics*, 46(1–2), 383–412. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2589-y>
- Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887–935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>
- Schmidt, G. A., Ruedy, R., Hansen, J. E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., ... Yao, M. S. (2006). Present-day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in situ, satellite, and reanalysis data. *Journal of Climate*, 19(1), 153–192. <https://doi.org/10.1175/JCLI3612.1>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Γκοτόβου, Ι.: *Μελέτη της επίδρασης οριακών συνθηκών σε περιοχικές κλιματικές προσομοιώσεις και αξιολόγηση με δορυφορικά δεδομένα*, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2017.
- Πυθαρούλης, Ι.: *Σημειώσεις του μαθήματος Συνοπτική Μετεωρολογία*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009



Τολικά, Κ.: Σημειώσεις του μαθήματος *Κλιματική Ανάλυση*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης, 2016

Μαχαίρα, Φ.: *Στατιστική*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1998