



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

Εκτίμηση προστιθέμενης αξίας κλιματικής
προσομοίωσης υψηλής ανάλυσης για την
περιοχή της Ευρώπης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΤΗΣΗΣ

Έρις Παπακωνσταντίνου-Πρεσβέλου

Θεσσαλονίκη, 2019



ΙΡΙΣ ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ-ΠΡΕΣΒΕΛΟΥ

Πτυχιούχος Φυσικός Α.Π.Θ

© 2019. All rights reserved.



ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΑΞΙΑΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών
“Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον”
του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

- Ελένη Κατράγκου, Επίκουρη Καθηγήτρια Α.Π.Θ, Επιβλέπουσα
- Πρόδρομος Ζάνης, Καθηγητής Α.Π.Θ
- Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ



Have no fear of perfection; you'll never reach it. Nothing in life is to be feared; it is only to be understood.

Marie Skłodowska Curie



Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που μου προσέφεραν τη βοήθεια και στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλα την επιβλέπουσά μου, την επίκουρη καθηγήτρια κ. Ελένη Κατράγκου, για την άψογη συνεργασία που είχαμε και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε σε κάθε βήμα της εργασίας μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή κ. Πρόδρομο Ζάνη, μέλος της εξεταστικής μου επιτροπής που ήταν παρών όποτε τον χρειάστηκα, μοιραζόμενος τις εξαιρετικές γνώσεις και την εμπειρία του. Ευχαριστώ επίσης την αναπληρώτρια καθηγήτρια και μέλος της επιτροπής μου κ. Χριστίνα Αναγνωστοπούλου, για τη σημαντική στήριξη και βοήθειά της κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού μου. Η ολοκλήρωση της εργασίας μου φυσικά δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των υποψήφιων διδασκτόρων του τομέα, Στέργιο Κάρτσιο, Βασίλη Παυλίδη, Μαρία Καρυπίδου και Γιάννη Σοφιάδη που με στήριξαν σε όλα τα στάδια της εργασίας μου και μοιράστηκαν μαζί μου τις γνώσεις και την εμπειρία τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη το Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης Α.Π.Θ. για την υποδομή υπολογιστών και τον αποθηκευτικό χώρο που μας παρείχε, τα οποία διευκόλυναν σε μεγάλο βαθμό την πραγματοποίηση της εργασίας μου. Οι κλιματικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στην υποδομή GRNET της εθνικής υπερυπολογιστικής υπηρεσίας ARIS, την οποία ευχαριστώ θερμά για τον υπολογιστικό χρόνο που μας διέθεσε. Δεν πρέπει να παραλείψουμε να ευχαριστήσουμε το πρόγραμμα EU-FP6 UERRA, το Copernicus Climate Change Service και το πρόγραμμα ECA&D για τα δεδομένα E-OBs που μας παρείχαν. Ακόμη ευχαριστούμε τη MeteoSwiss που μας διέθεσε τα δεδομένα EURO4M-APGD, καθώς επίσης και τον Thomas Landelius από το Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο (SMHI) για την παροχή των MESAN.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου τους κοντινούς μου ανθρώπους που ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή την προσπάθεια. Τους γονείς μου που με στήριξαν τόσο οικονομικά, όσο και ψυχολογικά καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου και που χωρίς αυτούς δεν θα είχα φτάσει εδώ που είμαι και τον σύντροφό μου για την απεριόριστη συμπαράσταση και εμπύχωση που μου έδειξε.

Τρις Παπακωνσταντίνου-Πρεσβέλου

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της χωρικής ανάλυσης σε περιοχικές κλιματικές προσομοιώσεις. Ο κύριος στόχος είναι η εκτίμηση της προστιθέμενης αξίας των κλιματικών προσομοιώσεων υψηλής ανάλυσης που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο του EURO-CORDEX. Η ανάλυση αφορά προσομοιώσεις EURO-CORDEX σε τρεις διαφορετικές χωρικές αναλύσεις: χαμηλή (~50km), υψηλή (~12km) και πολύ υψηλή (convective-permitting (CP)) (~3km). Οι προσομοιώσεις χαμηλής και υψηλής ανάλυσης καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή της Ευρώπης, ενώ αυτή της πολύ υψηλής ανάλυσης αφορά την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων. Πραγματοποιείται αξιολόγηση της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, υπολογίζοντας βασικά μεγέθη απόδοσης των μοντέλων (π.χ. bias) και αναγνωρίζοντας τις περιοχές που αποκλίνουν από τις παρατηρούμενες τιμές. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση είναι: τα E-OBs v.19 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση (12km), τα MESAN reanalysis για τη θερμοκρασία (5km) και τα EURO4M-APGD για τη βροχόπτωση (5km). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κατά τη θερμή περίοδο τα bias της προσομοίωσης υψηλής ανάλυσης πάνω από όλη την Ευρώπη, βελτιώνονται σε σχέση με της χαμηλότερης για τη μέγιστη (0.7°C) και μέση θερμοκρασία (0.2°C), αλλά χειροτερεύουν για την ελάχιστη (0.3°C). Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, τα bias διαφέρουν για τη μέγιστη και μέση θερμοκρασία (βελτίωση 0.2°C και επιδείνωση 0.3°C αντίστοιχα στην υψηλή ανάλυση), αλλά για την ελάχιστη θερμοκρασία η τιμή του απόλυτου bias παραμένει ίδια. Για τη βροχόπτωση πάνω από τις Άλπεις, τα bias δεν αλλάζουν σημαντικά στην πολύ υψηλή ανάλυση (CP) όταν συγκρίνονται με την υψηλή ανάλυση το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο, αλλά το καλοκαίρι το μοντέλο γίνεται σημαντικά ξηρότερο (το bias αυξάνεται κατά 24%).



Abstract

In the current study the effect of spatial resolution in regional climate simulations is being investigated. The focus is on the added value of high-resolution climate simulations, which are performed in the framework of EURO-CORDEX. The analysis includes EURO-CORDEX simulations in three different domain resolutions: coarse ($\sim 50\text{km}$), fine ($\sim 12\text{km}$) and convective-permitting (hereafter CP) ($\sim 3\text{km}$). The coarse and fine resolution simulations cover the whole European domain, while the CP is over the greater Alpine region. An evaluation of the mean, maximum and minimum temperature and precipitation is performed, calculating basic performance metrics (e.g. bias) and identifying the regions which deviate from observed values. The evaluation datasets used in this study are: E-OBs v.19 for temperature and precipitation (12km), the MESAN reanalysis for temperature (5km) and the EURO4M-APGD for precipitation (5km). The results show that during the warm season in the finer resolution simulations at 12km compared to the coarser, the bias in maximum and mean temperature improves by 0.7°C and 0.2°C respectively, but deteriorates for minimum temperature by 0.3°C (over all domain). During the cold season, the biases differ for maximum and mean temperature (improve by 0.2°C and deteriorate by 0.3°C respectively in finer resolution), but for minimum temperature the absolute bias remains almost unchanged. Concerning precipitation over the Alps, the biases don't change much at the CP domain (3km) when compared to the finer domain during winter, spring and autumn, but in summer the model becomes considerably drier (bias increases by 24%).



Ακρωνύμια

AGCMs Atmospheric General Circulation Models

AOGCMs Atmospheric Oceanic General Circulation Models

AV Added Value

CDO Climate Data Operators

CLM4 Community Land Model version 4

CORDEX COordinated Regional Downscaling EXperiment

CPMs Convection-Permitting Models

CPS Convective-Permitting Simulations

EBMs Energy Balance Models

ECA&D European Climate Assessment & Dataset

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EMICs Earth Models of Intermediate Complexity

ENSEMBLES Ensemble-Based Prediction of Climate Changes and Their Impacts

ESMs Earth System Models

EURO4M-APGD European Reanalysis and Observations for Monitoring-Alpine
Precipitation Grid Dataset

GCMs General Circulation Models

GDD Global Driving Data

GRIMS Global/Regional Integrated Modeling System

HIRLAM High Resolution Limited Area Model



IFS Intergrated Forecast System

LUCAS Land Use and Climate Across Scales

MESAN MESoscale ANalysis system

MM5 Mesoscale Model 5th generation

MP Multi-Physics

MYNN Mellor-Yamada Nakanishi and Niino

NARCCAP North American Regional Climate Change Assessment Program

OGCMs Oceanic General Ciculation Models

PRUDENCE Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects

RCMs Regional Climate Models

RCPs Representative Concentration Pathways

WCRP World Climate Research Program

WDM6 WRF Double Moment 6-class scheme

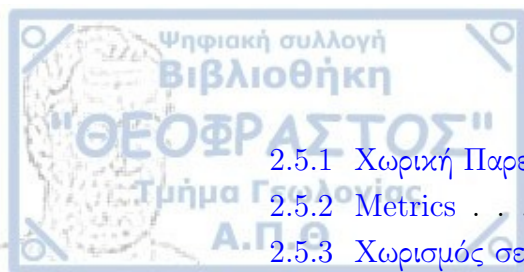
WRF Weather Research and Forecasting

YSU YonSei University



Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	ii
Abstract	iii
Ακρωνύμια	iv
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Κλιματικά μοντέλα	1
1.1.1 Δομή και Λειτουργία	2
1.1.2 Παραμετροποιήσεις	3
1.2 Τύποι Μοντέλων	4
1.3 Τεχνικές Υποβιβασμού Κλίμακας	5
1.3.1 Στατιστικός Υποβιβασμός	5
1.3.2 Δυναμικός Υποβιβασμός	6
1.4 Αξιολόγηση Περιοχικών Μοντέλων	8
1.5 Προστιθέμενη Αξία	9
1.6 CORDEX	10
1.7 Convection-Permitting Simulations	12
1.8 Σκοπός Εργασίας	14
2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	15
2.1 Προσομοιώσεις	15
2.1.1 EURO-CORDEX 0.44°& 0.11°	15
2.1.2 CORDEX-CPS 0.15°& 0.03°	15
2.2 ERA-Interim	16
2.3 Παρατηρησιακά δεδομένα	17
2.3.1 E-OBs	17
2.3.2 EURO4M-APGD	17
2.3.3 MESAN	18
2.4 Αβεβαιότητα Παρατηρήσεων	19
2.5 Μεθοδολογία	22



2.5.1 Χωρική Παρεμβολή & Διόρθωση Θερμοκρασίας	22
2.5.2 Metrics	23
2.5.3 Χωρισμός σε υποπεριοχές	23
2.5.4 Στατιστική Σημαντικότητα	24
2.5.5 Q-Q plots	26
2.5.6 Χρονοσειρές & Τάσεις	26
2.5.7 Διαγράμματα Taylor	27
2.6 Εργαλεία Προγραμματισμού	28
3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	29
3.1 EURO-CORDEX 0.44°& 0.11°	29
3.1.1 Μέση Θερμοκρασία	29
3.1.2 Μέγιστη Θερμοκρασία	43
3.1.3 Ελάχιστη Θερμοκρασία	56
3.1.4 Βροχόπτωση	69
3.2 CORDEX-CPS 0.15°& 0.03°	80
3.2.1 Μέση Θερμοκρασία	80
3.2.2 Μέγιστη Θερμοκρασία	85
3.2.3 Ελάχιστη Θερμοκρασία	90
3.2.4 Βροχόπτωση	95
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	113

1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κλιματικά μοντέλα

Τα κλιματικά μοντέλα είναι εργαλεία που προσπαθούν να αναπαραστήσουν τις μέσες κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε έναν τόπο ή σε ολόκληρη τη Γη και τις αλλαγές τους με την πάροδο του χρόνου. Σε αντίθεση με τα κοινά μετεωρολογικά μοντέλα καιρού τα οποία κάνουν βραχυπρόθεσμες προγνώσεις των συνθηκών της ατμόσφαιρας, τα κλιματικά μοντέλα κάνουν προβλέψεις για το κλίμα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα που μπορεί να αφορούν είτε την επόμενη εποχή (*seasonal predictions*) είτε ακόμα και τον επόμενο αιώνα (*climate projections*). Η χρήση τους όμως δεν περιορίζεται εκεί, αλλά χρησιμοποιούνται και σε ποικίλες άλλες εφαρμογές, όπως προσομοιώσεις του παλαιοκλίματος από τη γέννηση της Γης έως σήμερα, μελέτες ευαισθησίας και απόδοσης της κλιματικής αλλαγής και μελέτες αξιολόγησης. Η γνώση που παρέχουν είναι σημαντική όχι μόνο για την επιστημονική κοινότητα, αλλά και για την ίδια την κοινωνία η οποία χρειάζεται πολλές φορές να προσαρμοστεί στις νέες κλιματικές συνθήκες.

Ουσιαστικά, πρόκειται για μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τις βασικές συνιστώσες του κλιματικού συστήματος (ατμόσφαιρα, ωκεανός, επιφάνεια της Γης, κρύοσφαιρα), καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Βασίζονται σε βασικές αρχές της φυσικής, της χημείας και της βιολογίας, οι οποίες εκφράζονται από συστήματα μερικών διαφορικών εξισώσεων στο χώρο και στο χρόνο. Λόγω της πολυπλοκότητάς τους, τα συστήματα αυτά δεν έχουν αναλυτική λύση και επιλύονται προσεγγιστικά με αριθμητικές μεθόδους. Οι εξισώσεις μεταφράζονται σε κώδικα γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και επιλύονται υπολογιστικά σε υπερυπολογιστές που διαθέτουν χιλιάδες επεξεργαστές και χιλιάδες petabytes¹ διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο. Έτσι, καθίστανται δυνατές προσομοιώσεις του κλίματος για πολλά έτη στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, που διαφορετικά θα ήταν αδύνατες ή εξαιρετικά χρονοβόρες.

Τα κλιματικά μοντέλα είναι σημαντικά εργαλεία που βοηθούν στη βελτίωση της γνώσης μας γύρω από το κλιματικό σύστημα. Παρέχουν πληροφορίες για την εξέ-

¹1 petabyte=10¹⁵bytes=1000 terabytes

λιξη του κλίματος στη διάρκεια του χρόνου, τις αιτίες των κλιματικών αλλαγών και την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα σε αυτές. Επιτρέπουν ακόμη τη διεξαγωγή πειραμάτων που δείχνουν την ευαισθησία απόκρισης διαφορετικών διαταραχών (*perturbations*) σε κλιματικές μεταβλητές. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα στη λήψη αποφάσεων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, δίνοντας κίνητρο στις αρχές να κινητοποιηθούν για το ζήτημα, βασιζόμενες σε επιστημονικά στοιχεία.

1.1.1 Δομή και Λειτουργία

Για κάθε μία από τις συνιστώσες του κλιματικού συστήματος υπάρχει ένα σετ εξισώσεων που βασίζεται στους θεμελιώδεις νόμους της φυσικής για τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Για την επίλυσή τους η Γη χωρίζεται σε ξεχωριστά τριδιάστατα κελιά, τα οποία συνιστούν το **πλέγμα** του μοντέλου. Οι εξισώσεις επιλύονται σε κάθε κελί και οι τιμές των μεταβλητών που προκύπτουν, αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές της περιοχής του κελιού. Επιπλέον, τα κελιά επικοινωνούν με τα γειτονικά τους και ανταλλάσσουν ορμή, θερμότητα και υγρασία.

Το πλέγμα χαρακτηρίζεται από τη **χωρική ανάλυση** (*spacial resolution*), η οποία εκφράζει το οριζόντιο μέγεθος των κελιών και μετρείται είτε σε μοίρες γεωγραφικού μήκους/πλάτους, είτε σε χιλιόμετρα. Όσο μικρότερο το μέγεθος των κελιών τόσο καλύτερη ή υψηλότερη η ανάλυση του πλέγματος και τόσο πιο ποιοτική η κλιματική πληροφορία που παράγει το μοντέλο. Εκτός από τη χωρική ανάλυση, σημαντικό τμήμα του μοντέλου είναι και η επιλογή του χρονικού βήματος στο οποίο επιλύονται οι εξισώσεις του. Πρόκειται για τη **χρονική ανάλυση** (*temporal resolution*) του μοντέλου, η οποία εξαρτάται από την περίοδο μελέτης και από κάποια κριτήρια ευστάθειας. Προφανώς, μικρότερα χρονικά βήματα συνεισφέρουν σε περισσότερο χρονικά λεπτομερείς υπολογισμούς, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τον εκτελεστικό χρόνο των προσομοιώσεων. Επιλέγεται λοιπόν ένα τέτοιο χρονικό βήμα, ώστε οι εξισώσεις να επιλύονται αρκετά συχνά και οι λύσεις τους να είναι ευσταθείς.

Είναι σαφές ότι η αύξηση της ανάλυσης (χωρικής και χρονικής) επιφέρει και την παράλληλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση προσομοιώσεων. Μικρό μέγεθος των κελιών και πολλά χρονικά βήματα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των υπολογιστικών πράξεων που πρέπει να εκτελεστούν. Παρόλα αυτά, η βελτίωση των υπολογιστών με την πάροδο των ετών επιτρέπει την εκτέλεση προσομοιώσεων ολοένα σε καλύτερη ανάλυση και σε χρόνους που έχουν μειωθεί αισθητά σε σχέση με το παρελθόν.

Κάθε μοντέλο για να λειτουργήσει χρειάζεται δεδομένα εισόδου, τα οποία παρέχονται από παρατηρήσεις ή άλλα μοντέλα. Αρχικά, χρειάζεται **αρχικές συνθήκες**

(*initial conditions*), δηλαδή πληροφορίες για την κατάσταση της ατμόσφαιρας κατά την έναρξη της προσομοίωσης ($t=0$). Επιπλέον, στην περίπτωση των μοντέλων περιορισμένης περιοχής χρειάζονται πληροφορίες για τις μεταβλητές στα όρια της περιοχής που ονομάζονται **οριακές συνθήκες** (*boundary conditions*) και δίδονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Τέτοιες μεταβλητές είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία, η πίεση και τα πεδία του ανέμου. Κάποιες φορές, οι προσομοιώσεις περιγράφουν την αντίδραση του κλιματικού συστήματος σε ένα εξωτερικό αίτιο που ονομάζεται **κλιματικός εξαναγκασμός** (*climate forcing*). Πρόκειται ουσιαστικά για ένα αίτιο που προκαλεί ενεργειακή ανισορροπία στο κλιματικό σύστημα και το οποίο προέρχεται από κάποιον εξωτερικό παράγοντα ή τον άνθρωπο. Αυτό το αίτιο αν είναι αρκετά επίμονο, τότε μπορεί να έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας της Γης μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία. Παραδείγματα αποτελούν οι εκρήξεις ηφαιστείων, οι αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία, οι μεταβολές στις ποσότητες των θερμοκηπικών αερίων και αεροζόλ κ.τ.λ.

1.1.2 Παραμετροποιήσεις

Παρά τη συνεχή βελτίωση της χωρικής ανάλυσης, υπάρχουν διαδικασίες που συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα από το πλέγμα του μοντέλου και συνεπώς δεν μπορούν να αναλυθούν από αυτό. Τέτοιες διαδικασίες είναι για παράδειγμα η τύρβη στο ατμοσφαιρικό και ωκεάνιο οριακό στρώμα, η αλληλεπίδραση της κυκλοφορίας με τη μικρής κλίμακας τοπογραφία, οι καταιγίδες και η μικροφυσική των νεφών (Goosse et al., 2010). Επιπλέον, υπάρχουν διαδικασίες που είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες ή δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως για να αναπαρασταθούν λεπτομερώς στα μοντέλα.

Για όλες αυτές τις διαδικασίες κατασκευάζονται σχήματα παραμετροποιήσεων, δηλαδή απλοποιημένα μοντέλα τα οποία βασίζονται σε εμπειρικές διαδικασίες. Πρόκειται για ξεχωριστές ρουτίνες που παραμετροποιούν μια διαδικασία και καλούνται από το μοντέλο ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Κάποια σχήματα καλούνται σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ άλλα κρατώνται σταθερά για περισσότερα βήματα μέχρι να επανακληθούν. Τα βασικά σχήματα παραμετροποιήσεων περιγράφουν την επιφάνεια της Γης, τη βλάστηση, το οριακό στρώμα, τη μικροφυσική των νεφών, την ανωμεταφορά και την ακτινοβολία.

Παρότι μπορεί να συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα, οι διαδικασίες που παραμετροποιούνται είναι σημαντικές και επηρεάζουν την ακρίβεια των μοντέλων, αποτελώντας βασική πηγή αβεβαιότητας στις προσομοιώσεις. Ένας λόγος είναι ότι τα σχήματα παραμετροποιήσεων μπορεί να αλληλεπιδράσουν με άλλα σχήματα μέσω των αλλαγών που προκαλούν στις μεταβλητές του μοντέλου. Για παράδειγμα, το σχήμα που περιγράφει τις διαδικασίες ανάπτυξης των νεφών επηρεάζει άμεσα το σχήμα της ακτινοβολίας, καθώς τα νέφη ανακλούν, σχεδάζουν ή επανεκπέμπουν την ακτινοβολία

που δέχονται. Επιπλέον, μόνο περιορισμένος αριθμός διαδικασιών είναι δυνατός μέσα σε ένα σχήμα, γιατί είναι αρκετά δύσκολο να αναπαραχθούν βασικές φυσικές διεργασίες για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Stensrud, 2007). Συνεπώς, οι παραμετροποιήσεις αποτελούν προσεγγίσεις και δεν μπορούν να ισχύουν σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση, αποτελώντας μόνο απλοποιήσεις διαδικασιών που συμβαίνουν στη φύση.

1.2 Τύποι Μοντέλων

Ένα κλιματικό μοντέλο περιγράφει φαινόμενα που συμβαίνουν σε χωρικές κλίμακες της τάξης των εκατοστών (π.χ. ατμοσφαιρική τύρβη) έως της τάξης των χιλιάδων χιλιομέτρων (π.χ. ENSO) και σε χρονικές κλίμακες από μερικά λεπτά (π.χ. ατμοσφαιρικά βαρυτικά κύματα) έως δισεκατομμύρια χρόνια (π.χ. εξέλιξη του κλίματος από τη δημιουργία της Γης). Συνεπώς, είναι απαραίτητο να διαχωριστούν εκείνες οι διαδικασίες που θα αναπαρασταθούν αναλυτικά σε κάθε μελέτη και εκείνες που θα αγνοηθούν ή θα απλοποιηθούν. Ανάλογα με την εφαρμογή σχεδιάζονται μοντέλα που είτε είναι πολύπλοκα και περιγράφουν πολλές διαδικασίες, είτε είναι απλά και γρήγορα και στοχεύουν στην μελέτη ενός στοιχείου εις βάθος.

Στα απλά κλιματικά μοντέλα ανήκουν τα μοντέλα του ισοζυγίου ενέργειας (EBMs), τα οποία προσομοιώνουν τις αλλαγές ενέργειας που συμβαίνουν στο ισοζύγιο της Γης-ατμόσφαιρας. Στην απλούστερη μορφή τους δεν περιέχουν χωρική διάσταση, αλλά υπολογίζουν τις μεταβλητές ως μέσους όρους σε όλη τη Γη. Ακολουθούν τα μοντέλα μέτριας πολυπλοκότητας (EMICs), τα οποία περιέχουν πάντα την αναπαράσταση της γεωγραφίας της Γης, αλλά χρησιμοποιούν και κάποιες παραμετροποιήσεις. Στους πλέον πολύπλοκους τύπους μοντέλων ανήκουν τα **παγκόσμια ή μοντέλα παγκόσμιας κυκλοφορίας GCMs**, τα οποία αναπαριστούν το κλιματικό σύστημα σε όλη την επιφάνεια του πλανήτη. Αυτά διακρίνονται σε ατμοσφαιρικά μοντέλα (AGCMs), ωκεάνια (OGCMs), ή σε συνδυασμό αυτών (AOGCMs).

Τα τελευταία χρόνια έχουν ενσωματωθεί περισσότερες συνιστώσες όπως γήινος και θαλάσσιος κύκλος του άνθρακα, δυναμική βλάστηση και κρυόσφαιρα, οδηγώντας στα λεγόμενα “Earth System Models” (Goosse et al., 2010). Τα ESMs είναι τα πλέον σύγχρονα μοντέλα της εποχής μας και παρέχουν αποτελέσματα για την απόκριση του κλιματικού συστήματος σε εξωτερικά αίτια, με τους βιοχημικούς κύκλους να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

Παρότι τα μοντέλα που καλύπτουν όλη την επιφάνεια της Γης είναι πολύ χρήσιμα εργαλεία, δεν μπορούν να περιγράψουν χαρακτηριστικά μικρής κλίμακας λόγω της χαμηλής ανάλυσης που διαθέτουν (100-500km). Χαρακτηριστικά επιφανείας όπως

βουνά, υδάτινοι όγκοι, κάλυψη γης ή διαδικασίες όπως νέφη κατακόρυφης ανάπτυξης και θαλάσσιες αύρες έχουν κλίμακες μικρότερες από 100km και συνεπώς δεν μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια (π.χ. ακτογραμμές) ή αναλυτικά (π.χ. ανωμεταφορά) από αυτά. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε αφορμή για τη δημιουργία και ανάπτυξη των περιοχικών μοντέλων, τα οποία στοχεύουν στη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης, εστιάζοντας σε μία συγκεκριμένη περιοχή.

1.3 Τεχνικές Υποβιβασμού Κλίμακας

Οι απαιτήσεις για γνώση πάνω στο κλίμα έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής. Οι αρμόδιοι φορείς χρειάζονται όλο και περισσότερες πληροφορίες σε εθνική και τοπική κλίμακα για να αντιμετωπίσουν τους κινδύνους και τις συνέπειες που αυτή επιφέρει. Οι κλιματικές προσομοιώσεις του μελλοντικού κλίματος από τα παγκόσμια μοντέλα είναι ένα μέσο αξιολόγησης της κλιματικής αλλαγής, αλλά δεν είναι κατάλληλες για τις ανάγκες του τοπικού σχεδιασμού. Γι' αυτό το λόγο, σχεδιάζονται προσομοιώσεις σε μικρότερες κλίμακες που μπορούν να αναδείξουν τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής σε τομείς όπως η αγροτική παραγωγή, η συχνότητα ασθενειών και η ασφάλεια τροφίμων.

Ο υποβιβασμός κλίμακας (*downscaling*) είναι ο τρόπος λοιπόν, με τον οποίο εξάγονται πληροφορίες για το κλίμα σε μικρότερες χωρικές κλίμακες, που είναι κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν στη λήψη αποφάσεων. Η βασική του υπόθεση είναι ότι το τοπικό κλίμα καθορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικών (π.χ. κυκλοφορία, θερμοκρασία, υγρασία) και των τοπικών χαρακτηριστικών (π.χ. οροσειρές, υγρά στοιχεία) (Trzaska and Schnarr, 2014). Επομένως, αυτές οι σχέσεις ατμοσφαιρικών συνθηκών και τοπικού κλίματος είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν μέσω της διαδικασίας του υποβιβασμού. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ανήκουν σε δύο γενικές κατηγορίες: το στατιστικό και το δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας. Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στις βασικές αρχές και των δύο κατηγοριών, ωστόσο θα δωθεί περισσότερη έμφαση στο δυναμικό υποβιβασμό που είναι και το αντικείμενο μελέτης.

1.3.1 Στατιστικός Υποβιβασμός

Ο στατιστικός υποβιβασμός (*statistical downscaling*) περιλαμβάνει τη δημιουργία εμπειρικών σχέσεων που μετασχηματίζουν τα μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικά ενός GCM (*predictors*) σε τοπικής κλίμακας μεταβλητές (*predictands*) (Surampalli et al., 2013). Οι *predictors* μπορεί να είναι μεταβλητές όπως η ατμοσφαιρική πίεση, το γεωδυναμικό ύψος και τα πεδία του ανέμου, ενώ τα *predictands* η βροχόπτωση, η

θερμοκρασία, και η ροή. Έπειτα, έχοντας τις μεταβλητές μεγάλης κλίμακας από τα GCMs οι σχέσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν για να προβλέψουν τα μελλοντικά χαρακτηριστικά του τοπικού κλίματος (Wilby et al., 2002). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο στατιστικό υποβιβασμό ανήκουν σε τρεις γενικές κατηγορίες: τις γραμμικές μεθόδους, τους τύπους καιρού και τις γεννήτριες καιρού.

Οι μέθοδοι του στατιστικού υποβιβασμού δεν έχουν υπολογιστικό κόστος και δεν απαιτούν τεράστιο όγκο δεδομένων, σε αντίθεση με τη μοντελοποίηση των πολύπλοκων φυσικών διαδικασιών που γίνεται από αριθμητικά μοντέλα, γι' αυτό είναι αρκετά εύχρηστες. Πλεονέκτημα επίσης, αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να πραγματοποιήσουν προβλέψεις για συγκεκριμένες τοποθεσίες, ακόμα και σε χωρική κλίμακα της τάξης του σταθμού. Παρόλα αυτά, όπως όλες οι μέθοδοι έχουν κάποια μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, βασίζονται στην υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ των μεταβλητών μεγάλης κλίμακας και των τοπικών παραμένει έγκυρη κάτω από διαφορετικά αίτια που επηρεάζουν το πιθανό μελλοντικό κλίμα (Zorita and von Storch, 1999), γεγονός το οποίο είναι άγνωστο αν συμβαίνει. Επιπλέον, θεωρείται ότι οι σχέσεις εξάρτησης είναι αρκετά ισχυρές και ότι οι μεγάλης κλίμακας μεταβλητές εμπεριέχουν το σήμα της κλιματικής αλλαγής του μέλλοντος. Τέλος, τα αποτελέσματα του στατιστικού υποβιβασμού είναι άμεσα εξαρτώμενα από τις προσομοιώσεις των παγκόσμιων μοντέλων, γι' αυτό και είναι μεγάλης σημασίας η εκτέλεση αξιόπιστων κλιματικών προσομοιώσεων (Trzaska and Schnarr, 2014).

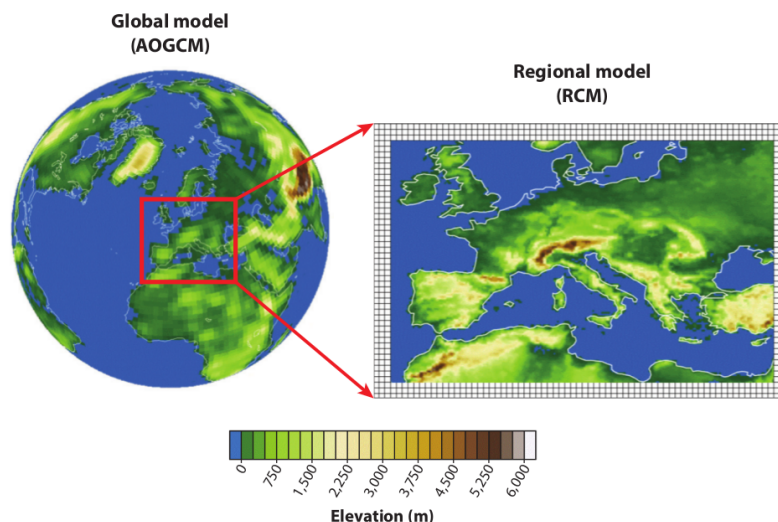
1.3.2 Δυναμικός Υποβιβασμός

Ο δυναμικός υποβιβασμός (*dynamical downscaling*) βασίζεται στη χρήση **περιοχικών κλιματικών μοντέλων RCMs** πάνω από μία περιοχή και σε υψηλότερη ανάλυση. Η χρήση των περιοχικών μοντέλων δεν περιορίζεται μόνο στην έρευνα, αλλά έχει και άμεση εφαρμογή στην κοινωνία για την αντιμετώπιση καταστροφών που σχετίζονται με το κλίμα. Τα RCMs είναι πιο χρήσιμα σε μελέτες μελλοντικών κινδύνων όπως πλημμύρες, ξηρασίες, κατολισθήσεις κτλ., γιατί παρέχουν πληροφορία σε τοπική κλίμακα σε αντίθεση με τα παγκόσμια μοντέλα.

Τα RCMs είναι στην ουσία ατμοσφαιρικά μοντέλα περιορισμένης περιοχής που περιγράφουν τη θερμοδυναμική των ανώτερων εδαφικών στρωμάτων (Giorgi et al., 2001) και πιθανά άλλες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος. Τα GCMs παρέχουν τα μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικά πεδία (π.χ. πίεση, άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία) στα οριζόντια και κατακόρυφα όρια των RCMs, τα οποία με τη σειρά τους λύνουν τις εξισώσεις και ανάγουν την κλιματική πληροφορία σε χωρική ανάλυση της τάξης των 10-50km. Λόγω της υψηλότερης ανάλυσής τους μπορούν να περιγράψουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια χαρακτηριστικά όπως πολύπλοκη ορογραφία, ακτογραμμές και

ανομοιογένειες επιφανείας, καθώς τις φυσικές διεργασίες που συνδέονται με αυτά.

Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μετάβαση από το παγκόσμιο στο περιοχικό μοντέλο ονομάζεται **“one way nesting”** και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Το περιοχικό μοντέλο προκειμένου να ολοκληρώσει τις εξισώσεις του στο χρόνο χρειάζεται αρχικές και οριακές συνθήκες που παρέχονται είτε από παγκόσμια μοντέλα, είτε από παγκόσμιες αναλύσεις παρατηρήσεων. Οι αρχικές συνθήκες εφαρμόζονται σε όλη την περιοχή του μοντέλου, ενώ οι οριακές επιβάλλονται στα όρια αυτής ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης μεθόδου η πληροφορία μεταφέρεται μόνο από έξω προς τα μέσα και δεν υπάρχει ανάδραση από το περιοχικό στο παγκόσμιο μοντέλο, ενώ σε άλλες μεθόδους όπως το **“two way nesting”** υπάρχει επικοινωνία μεταξύ των δύο. Κάποιες φορές, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με πολλαπλά πλέγματα το ένα μέσα στο άλλο (εμφωλευμένα), με σκοπό τη σταδιακή βελτίωση της ανάλυσης.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής “one way nesting” (Giorgi and Gutowski, 2015).

Οι οριακές συνθήκες είναι πολύ σημαντικές για τη λειτουργία του μοντέλου. Η ανανέωσή τους πρέπει να γίνεται τακτικά (συνήθως ανά 6 ώρες), ώστε να μη χάνεται πολύτιμη πληροφορία που επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επιρροή των οριακών συνθηκών είναι μεγάλη κοντά στα όρια της περιοχής, αλλά μειώνεται βαθμιαία προς το εσωτερικό της. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να δημιουργηθούν σφάλματα, αφού η μεγάλης κλίμακας ροή πρέπει να ταξιδέψει μια συγκεκριμένη απόσταση μέσα στο εσωτερικό της περιοχής του RCM, προτού αρχίσει να παρουσιάζει σωστά τη μικρής κλίμακας ροή που οφείλεται σε εσωτερικά αίτια (Leduc and Laprise, 2009). Συνεπώς, έχει ιδιαίτερη σημασία η επιλογή του μεγέθους του τομέα (*domain*) που τρέχει το μοντέλο, έτσι ώστε η περιοχή μελέτης που εστιάζουμε να βρίσκεται αρκετά μακριά από τα όρια. Σύμφωνα με τους Laprise et al. (2012), στα μέσα γεωγραφικά πλάτη ο τομέας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος (~ 200x200 σημεία πλέγματος), ώστε το πέρασμα από

το GCM στο RCM να είναι μιας τάξης μεγέθους.

Τα περιοχικά μοντέλα έχουν υποστεί σημαντική βελτίωση την τελευταία δεκαετία, ωστόσο δεν παύουν να υφίστανται και δυσκολίες ή προκλήσεις που πρέπει να ξεπερασθούν. Τα κελιά του πλέγματος είναι μικρότερα σε ένα RCM και κατ' επέκταση χρειάζονται περισσότεροι υπολογισμοί για τις διαδικασίες σε κάθε ένα από αυτά και περισσότερα δεδομένα εισόδου. Συνεπώς, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται δραματικά και μπορεί ακόμα και να ξεπεράσει αυτόν που χρειάζεται ένα GCM για την εκτέλεση κλιματικών προβολών (Wilby et al., 2009). Ακόμη, δεδομένου ότι ένα RCM είναι εμφωλευμένο μέσα σε ένα GCM, συνεπάγεται ότι η ποιότητα των αποτελεσμάτων του είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ακρίβεια των δεδομένων του GCM και των σφαλμάτων του (Seaby et al., 2013). Αυτό σημαίνει ότι τα σφάλματα του GCM διαδίδονται στο RCM κατά τη διαδικασία της μετάβασης. Επιπλέον, το ίδιο το RCM προσθέτει τα δικά του σφάλματα που οφείλονται στον τρόπο σχεδιάσής του.

Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη λοιπόν, τόσο τα θετικά όσο και τα αρνητικά που συνοδεύουν τη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων και να εκτελούνται οι απαραίτητες διαδικασίες για την εκτίμηση των σφαλμάτων τους. Μια τέτοια διαδικασία είναι και η συστηματική αξιολόγηση των μοντέλων.

1.4 Αξιολόγηση Περιοχικών Μοντέλων

Για την όσο το δυνατό πιο πιστή αναπαράσταση του κλιματικού συστήματος, απαραίτητο βήμα είναι η αξιολόγηση των μοντέλων. Η αξιολόγηση βασίζεται στη σύγκριση των προσομοιούμενων ποσοτήτων για το πρόσφατο παρελθόν με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις, με σκοπό να αναδειχθεί αν το μοντέλο αναπαριστά σωστά την πραγματικότητα. Αυτός ο τρόπος αποτελεί μόνο μια προσέγγιση για την αξιολόγηση της δυνατότητας του μοντέλου να αναπαριστά το μελλοντικό κλίμα. Σύμφωνα με τους Giorgi et al. (2001), παρά το γεγονός ότι μια καλή προσομοίωση του παρόντος κλίματος δεν σημαίνει απαραίτητα πιο ακριβής προσομοίωση της μελλοντικής κλιματικής αλλαγής, υπάρχει περισσότερη αξιοπιστία για τη συμπεριφορά του μοντέλου όταν αυτό είναι ικανό να αναπαραστήσει ικανοποιητικά το παρόν κλίμα.

Οι προσομοιώσεις σχεδιάζονται έτσι ώστε να οδηγούνται από οριακές συνθήκες που αναπαριστούν την παρατηρούμενη κατάσταση, τις ιδανικές οριακές συνθήκες (*perfect boundary conditions*). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό ονομάζονται "reanalysis" και προκύπτουν από την αφομοίωση παρατηρήσεων (*data assimilation*) σε κλιματικά μοντέλα. Παρότι τα reanalysis εμπεριέχουν σφάλματα που μπορεί να οφείλονται στην έλλειψη σταθμών (άρα και παρατηρήσεων) και σε σφάλματα του μοντέλου, αποτελούν την καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού κόσμου για την

αξιολόγηση των μοντέλων (Giorgi and Gutowski, 2015). Οι προσομοιώσεις που χρησιμοποιούν reanalysis ως αρχικές και οριακές συνθήκες ονομάζονται “evaluation”.

Μια συνήθης σύγκριση που επιλέγεται στη διαδικασία αξιολόγησης είναι η σύγκριση των στατιστικών του κλίματος που παράγονται από το μοντέλο με αυτά των παρατηρήσεων. Η σύγκριση θα αναδείξει τις συστηματικές αποκλίσεις (*bias*) που σχετίζονται κυρίως με τη φυσική και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου (Giorgi et al., 2001). Τα πειράματα αξιολόγησης είναι πολύ σημαντικά, αφού επιτρέπουν την αναγνώριση σφαλμάτων που προέρχονται από την ίδια τη διαμόρφωση (*configuration*) του RCM και αναδεικνύουν τις προβληματικές περιοχές που χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση. Για όσο το δυνατόν πιο ισχυρά αποτελέσματα, θεμιτή είναι η χρήση σμήνους προσομοιώσεων (*ensemble*) με σκοπό την εκτίμηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Αν πολλά μοντέλα δίνουν παρόμοια αποτελέσματα τότε υπάρχει μεγαλύτερη εμπιστοσύνη για το αποτέλεσμα, ενώ αντίθετα όταν υπάρχει μεγάλο εύρος (*spread*) τα αποτελέσματα είναι περισσότερο αβέβαια.

1.5 Προστιθέμενη Αξία

Η αξιολόγηση της ύπαρξης προστιθέμενης αξίας (*added value*) είναι πολλές φορές δύσκολη, αφού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η κλίμακα, η περιοχή, η κλιματική μεταβλητή, η εποχή και η συγκεκριμένη εφαρμογή (Giorgi and Gutowski, 2015). Τα αποτελέσματα δεν είναι ξεκάθαρα, καθώς πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η καλύτερη χωρική ανάλυση βελτιώνει κάποια μόνο στοιχεία των προσομοιώσεων, ενώ άλλα τα χειροτερεύει. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει ότι τα μεγάλης κλίμακας χαρακτηριστικά μπορεί να υποβαθμίζονται εντός του τομέα του περιοχικού μοντέλου (Castro et al., 2005; Separovic et al., 2008). Επιπρόσθετα, σφάλματα που τυχόν υπάρχουν στο GCM μεταφέρονται στο RCM και εκεί μπορεί να διογκωθούν περαιτέρω (Laprise et al., 2008).

Παρόλα αυτά, με την αύξηση της χωρικής ανάλυσης οι εξισώσεις κίνησης επιλύονται με περισσότερη ακρίβεια και αναπαριστώνται καλύτερα τα επιφανειακά χαρακτηριστικά (π.χ. ορογραφία, ακτογραμμές) που είναι σημαντικά για το τοπικό κλίμα ή ακόμα και σε συνοπτική-πλανητική κλίμακα. Λόγω της πιο αντιπροσωπευτικής αναπαράστασης της ορογραφίας και δεδομένης της εξάρτησης της θερμοκρασίας από το ύψος, βελτιώνεται η επίλυση θερμοβαθμίδων κοντά στην επιφάνεια σε περιοχές με πολύπλοκο ανάγλυφο (Prömmel et al., 2010; Di Luca et al., 2013). Επιπλέον, σε πλέγματα υψηλής ανάλυσης αναμένονται βελτιώσεις τόσο στα σφάλματα αποκοπής, όσο και στις αναπαραστάσεις των διαδικασιών μικρής κλίμακας και της αλληλεπίδρασής της με τη μεγάλη κλίμακα κυκλοφορία (Di Luca et al., 2015). Οι παραπάνω λόγοι υποδεικνύουν κάποια πλεονεκτήματα της υψηλής ανάλυσης, ωστόσο αξίζει να διερευ-

νηθεί το κατά πόσο αυτά τα στοιχεία είναι αρκετά ώστε να αναδείξουν την ύπαρξη προστιθέμενης αξίας.

Σύμφωνα με τους [Di Luca et al. \(2015\)](#), η προστιθέμενη αξία μπορεί να βρεθεί μέσω της σύγκρισης της σχετικής απόδοσης του RCM και των δεδομένων που το οδηγούν. Η σύγκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναφορά τις παρατηρήσεις και υπολογίζοντας ένα στατιστικό μέγεθος d που αντιστοιχεί στην απόσταση των προσομοιούμενων μεγεθών από τα παρατηρούμενα (π.χ. σφάλμα). Η σχέση που ορίζει την προστιθέμενη αξία (AV) είναι:

$$AV = d(X_{GDD}, X_{OBS}) - d(X_{RCM}, X_{OBS}) \quad (1.1)$$

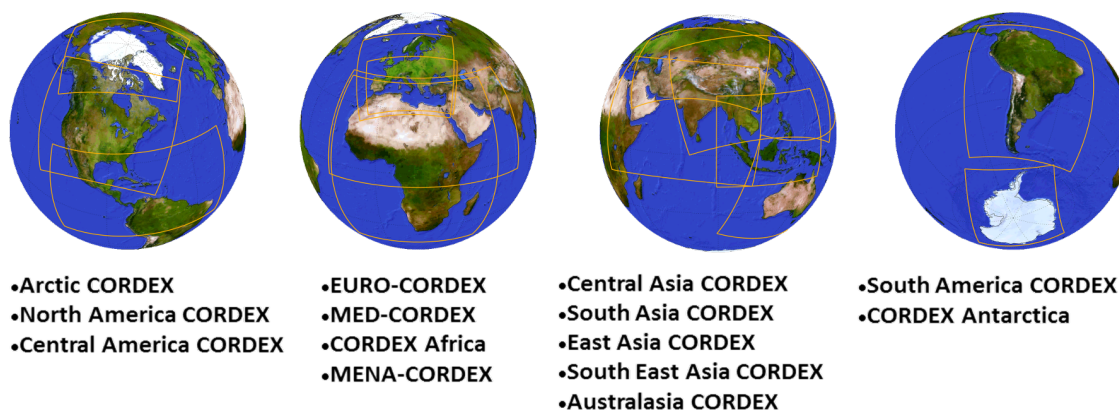
όπου X η μεταβλητή που εξετάζεται, η οποία αντιστοιχεί στα δεδομένα που οδηγούν το RCM (GDD), στα δεδομένα του RCM και στις παρατηρήσεις (OBS). Σύμφωνα με τη αυτή τη σχέση, φαίνεται να υπάρχει προστιθέμενη αξία στην περίπτωση που το μέγεθος d του RCM είναι μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο μέγεθος των δεδομένων που το οδηγούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή του στατιστικού μεγέθους εξαρτάται από τον/την εκάστοτε ερευνητή/τρια και δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος να αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου σε όλους τους τομείς ([Gleckler et al., 2008](#)).

Τα RCMs ενδέχεται να προσθέτουν αξία σε περιοχές με πολύπλοκα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και σε κλίμακες μικρότερες από αυτές που αναλύουν τα κοινά GCM-s. Γι' αυτό το λόγο είναι καλό να υπάρχουν δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης ως αναφορά για τις προσομοιώσεις ([Chan et al., 2012](#); [Torma et al., 2015](#); [Prein et al., 2016](#)). Επιπλέον, μπορεί να υπάρξει βελτίωση στην προσομοίωση της κατανομής συχνοτήτων (*frequency distribution*) των ακραίων καιρικών φαινομένων ([Laprise et al., 2008](#); [Giorgi, 2006](#)). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ακόμη η μελέτη του κατά πόσο βελτιώνεται η κλιματική πληροφορία όταν βελτιώνεται η ανάλυση στο ίδιο το RCM. Η σχέση (1.1) μπορεί να εφαρμοστεί για τη διερεύνηση της ύπαρξης προστιθέμενης αξίας μεταξύ δύο διαφορετικών χωρικών αναλύσεων της ίδιας προσομοίωσης. Αυτός είναι και ο στόχος της παρούσας εργασίας που θα αναπτυχθεί περαιτέρω στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.

1.6 CORDEX

Το πρόγραμμα CORDEX δημιουργήθηκε εξαιτίας της ανάγκης για πληροφορίες σχετικά με την κλιματική αλλαγή σε περιοχική έως τοπική κλίμακα. Η γνώση αυτή είναι αναγκαία για την εκτίμηση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής και την ανάπτυξη των απαραίτητων στρατηγικών αντιμετώπισης και προσαρμογής. Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγράμματα περιοχικής κλίμακας όπως το PRUDENCE ([Christensen et al., 2007](#)), το ENSEMBLES ([van der Linden and Mitchell, 2009](#)) και

το NARCCAP (Mearns et al., 2009), τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες επιπτώσεων. Το CORDEX αποτελεί τη νέα γενιά προσομοιώσεων με σκοπό να υπάρξει μια συντονισμένη παγκόσμια προσπάθεια για τη μελέτη και την εφαρμογή των τεχνικών υποβιβασμού κλίμακας. Οι περιοχές του περιλαμβάνουν τις περισσότερες χερσαίες περιοχές του κόσμου και απεικονίζονται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Οι 14 περιοχές του CORDEX (<https://www.wcrp-climate.org/>)

Το CORDEX τελεί υπό την αιγίδα του WCRP και έχει τρεις βασικούς στόχους:

- i να παρέχει ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση και την πιθανή βελτίωση των τεχνικών υποβιβασμού κλίμακας για τη χρήση τους σε κλιματικές προβολές σε περιοχική κλίμακα.
- ii να οργανώσει μια διεθνή προσπάθεια για την παραγωγή υψηλής ανάλυσης κλιματικής πληροφορίας πάνω από περιοχές σε όλη τη Γη που θα χρησιμοποιηθούν σε μελέτες επιπτώσεων και προσαρμογής.
- iii να προάγει την αλληλεπίδραση και την επικοινωνία μεταξύ των επιστημόνων που ασχολούνται με τα παγκόσμια μοντέλα και αυτών που ασχολούνται με τα περιοχικά μοντέλα.

Στην πρώτη φάση του προγράμματος γίνεται αξιολόγηση των μοντέλων, κατά την οποία πραγματοποιούνται πειράματα με “ιδανικές οριακές συνθήκες” για συγκεκριμένες περιοχές. Τα πειράματα αυτά οδηγούνται από αναλύσεις παρατηρήσεων οι οποίες περιέχουν ένα σύνολο παρατηρούμενων μεταβλητών από το έδαφος και από δορυφόρους, αποτελώντας την καλύτερη δυνατή επιλογή για να οδηγήσουν τα περιοχικά μοντέλα. Στο πλαίσιο του CORDEX χρησιμοποιούνται τα δεδομένα ERA-Interim reanalysis (Dee et al., 2011) από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό ECMWF που καλύπτουν την περίοδο 1989-2008. Σκοπός των ομάδων που δουλεύουν σε αυτό το κομμάτι είναι η σχεδίαση και η εξαγωγή μεγεθών (*metrics*) που αξιολογούν την απόδοση των περιοχικών μοντέλων.

Κατά τη δεύτερη φάση του προγράμματος πραγματοποιούνται σειρές προσομοιώσεων του μελλοντικού κλίματος σε περιοχική κλίμακα, που οδηγούνται από παγκόσμια μοντέλα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα σενάρια RCPs που αντιστοιχούν σε διαφορετικό ποσό κλιματικού εξαναγκασμού (*radiative forcing*) στο τέλος του 21^{ου} αιώνα. Τέσσερα σενάρια έχουν επιλεγεί με τιμές κλιματικού εξαναγκασμού 2.9, 4.5, 6.0 και 8.5 W/m², τα οποία αναφέρονται αντιστοίχως ως RCP2.9, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5. Η συνολική περίοδος των προσομοιώσεων είναι από το 1951-2100. Εξαιτίας της υπολογιστικής δυσκολίας, δεν μπορούν όλα τα μοντέλα να τρέξουν στο σύνολο της περιόδου, γι' αυτό και έχουν επιλεγεί ως περίοδοι προτεραιότητας τα διαστήματα 1981-2010 και 2041-2070. Οι προσομοιώσεις των διάφορων ομάδων πραγματοποιούνται τουλάχιστον σε αυτά τα δύο διαστήματα, ώστε να υπάρχει μια ομάδα προσομοιώσεων με κοινή περίοδο για σύγκριση και ανάλυση.

Το EURO-CORDEX αποτελεί το τμήμα του CORDEX που αφορά την περιοχή της Ευρώπης. Για τις προσομοιώσεις αξιολόγησης και τις κλιματικές προβολές έχουν χρησιμοποιηθεί 12 διαφορετικά GCMs, τα οποία έχουν υποστεί υποβιβασμό κλίμακας και 10 διαφορετικά RCMs. Οι χωρικές αναλύσεις του πλέγματος είναι 50km (0.44°) και 12km (0.11°). Η συγκεκριμένη εργασία αναλύει κλιματικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης που έχουν πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο του EURO-CORDEX, με σκοπό την αξιολόγηση και την διερεύνηση της προστιθέμενης αξίας τους.

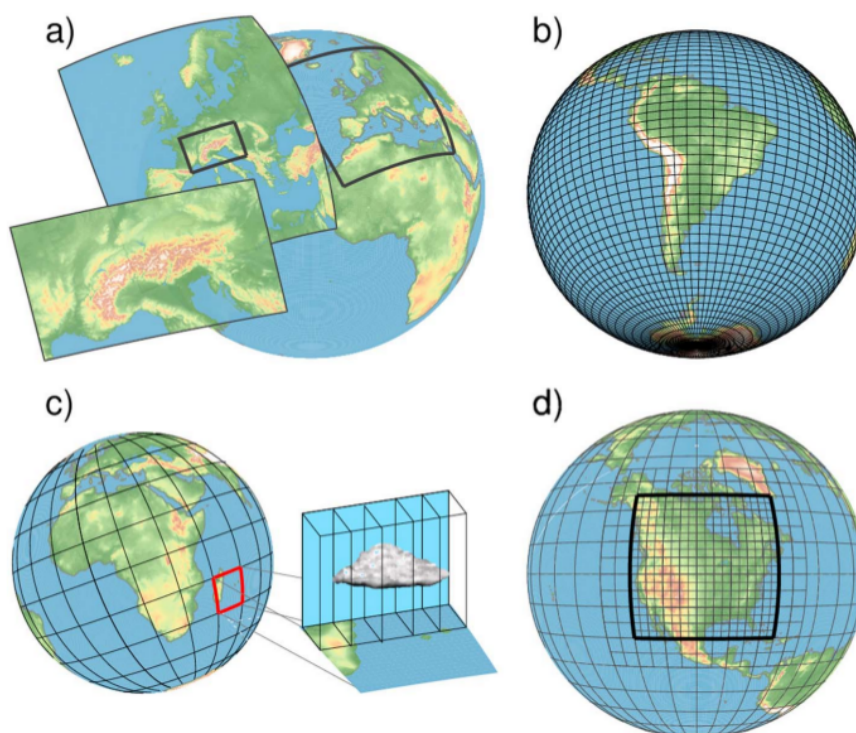
1.7 Convection-Permitting Simulations

Τα κοινά παγκόσμια ή περιοχικά μοντέλα, εξαιτίας της σχετικά αδρής χωρικής τους ανάλυσης (GCMs:100km/RCMs:10km), δεν επαρκούν ώστε να παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες σε τοπική κλίμακα. Οι διαδικασίες που δεν μπορούν να αναλυθούν από τα μοντέλα πρέπει να παραμετροποιηθούν, εισάγοντας ταυτόχρονα σημαντικά σφάλματα και αβεβαιότητα στις μελλοντικές προσομοιώσεις (Déqué et al., 2007). Σημαντική διαδικασία ανάμεσα σε αυτές είναι και η ανωμεταφορά (*deep convection*) που παραμετροποιείται μέσω των αντίστοιχων σχημάτων (*convection parametrization schemes*).

Η παραμετροποίηση της ανωμεταφοράς είναι δύσκολη, γιατί στη διαδικασία εκκίνησης της αλληλεπιδρούν διαδικασίες που δρουν σε διαφορετικές κλίμακες, από τη μικροκλίμακα έως τη συνοπτική κλίμακα. Ακόμη, τα σχήματα ανωμεταφοράς μπορεί να αλληλεπιδράσουν με άλλα σχήματα, όπως μικροφυσική νεφών, ακτινοβολία και πλανητικό οριακό στρώμα, διαδίδοντας έτσι τα σφάλματα και σε άλλες πτυχές του μοντέλου. Η χρήση των σχημάτων ανωμεταφοράς έχουν ως αποτέλεσμα σφάλματα στον ημερήσιο κύκλο της βροχόπτωσης (Brockhaus et al., 2008), υποεκτίμηση των ξηρών ημερών και υπερεκτίμηση των χαμηλών εντάσεων βροχής (Berg et al., 2013) και υποεκτίμηση της

έντασης της ωριαίας βροχόπτωσης (Prein et al., 2013a).

Λύση σε αυτές τις ευάλωτες σε σφάλματα προσομοιώσεις μπορούν να αποτελέσουν τα “**convection-permitting models (CPMs)**”, δηλαδή μοντέλα που επιτρέπουν την αναλυτική επίλυση της ανωμεταφοράς, έχοντας χωρική ανάλυση μικρότερη από 4km. Όπως συνάγεται λοιπόν, τα μοντέλα αυτά δεν χρησιμοποιούν το σχήμα της ανωμεταφοράς που αποτελεί μεγάλη πηγή σφαλμάτων. Επιπλέον, τα μοντέλα CPMs έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναλύσουν καλύτερα τη μικρής κλίμακας ορογραφία και τις μεταβολές στα επιφανειακά πεδία (Prein et al., 2015). Κατά συνέπεια, μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο και ετερογένειες επιφάνειας (π.χ. ακτές, αστικές περιοχές, υγρότοποι) (Prein et al., 2013b).



Σχήμα 1.3: Οπτικοποίηση των τεσσάρων διαφορετικών προσεγγίσεων των μοντέλων για την πραγματοποίηση “Convection-permitting” προσομοιώσεων. *a)* μοντέλα περιορισμένης περιοχής, *b)* παγκόσμιες CPM κλιματικές προσομοιώσεις, *c)* υπερ-παραμετροποιήσεις, *d)* μοντέλα μεταβλητής ανάλυσης (Prein et al., 2015).

Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων CPS γίνεται με τέσσερις προσεγγίσεις (Σχήμα 1.3). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη (1.3a) είναι η χρήση εμφωλευμένων περιοχών σε ολοένα μειωμένη χωρική ανάλυση και με οριακές συνθήκες από GCM ή reanalysis, μέχρις ότου να το μοντέλο φτάσει κλίμακες που να μπορεί να αναλυθεί η ανωμεταφορά (CP). Η δεύτερη (1.3b) είναι να τρέξει το μοντέλο απευθείας σε CP κλίμακες παγκόσμια, τεχνική που έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος και γι’ αυτό περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος της προσομοίωσης. Η τρίτη (1.3c) αφορά τη χρήση υπερ-παραμετροποιήσεων, που σημαίνει ότι κάθε κελί του παγκόσμιου μοντέλου περιέχει ένα διδιάστατο μοντέλο

που επιτρέπει την επίλυση των διαδικασιών που εμπλέκονται τα νέφη (*cloud resolving model*). Η τέταρτη προσέγγιση (1.3d) χρησιμοποιεί μοντέλα μεταβλητής ανάλυσης, με σκοπό να ξεχωρίσει τις περιοχές ενδιαφέροντος που θα έχουν υψηλή ανάλυση, από τις υπόλοιπες που θα έχουν χαμηλή.

1.8 Σκοπός Εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως βασικό στόχο να εκτιμήσει αν προκύπτει προστιθέμενη αξία από κλιματικές προσομοιώσεις σε υψηλή ανάλυση. Για το σκοπό αυτό μελετώνται διαφορετικές προσομοιώσεις που αφορούν την περιοχή της Ευρώπης και των Άλπεων, ώστε να διαπιστωθεί αν η υψηλότερη ανάλυση βελτιώνει ή όχι τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση. Η διερεύνηση της προστιθέμενης αξίας εστιάζεται στη θερμοκρασία (μέση, μέγιστη, ελάχιστη) και τη βροχόπτωση. Αρχικά, γίνεται μια περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και της μεθοδολογίας για την ανάλυσή τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα ανάλογα με την περιοχή μελέτης και τέλος αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα. Η δουλειά που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής, δίνει στοιχεία μόνο για κάποιες από τις πτυχές του πολύπλοκου ερωτήματος της προστιθέμενης αξίας και μια κατεύθυνση για μελλοντική μελέτη.

2 | ΔΕΔΟΜΕΝΑ & ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Προσομοιώσεις

2.1.1 EURO-CORDEX 0.44° & 0.11°

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιούνται προσομοιώσεις με το μοντέλο WRF έκδοση 3.8.1, οδηγούμενες από τα δεδομένα reanalysis ERA-Interim (Dee et al., 2011). Οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί με βάση το πρωτόκολλο του EURO-CORDEX ως εξής: (i) για την περιοχή της Ευρώπης με χωρική ανάλυση 0.44° (~50km) και σε one-way εμφωλευμένο πλέγμα 0.11° (~12km) με κοινή διαμόρφωση στο μοντέλο (*configuration*) και (ii) για την περιοχή της Ευρώπης με χωρική ανάλυση 0.44° στο πλαίσιο του Flagship Pilot Study-LUCAS (Davin et al., 2019) που στο εξής θα αναφέρεται ως LUCAS. Η πρώτη προσομοίωση αφορά την περίοδο 1989-2008, με τον πρώτο χρόνο 1989 να λειτουργεί ως spin up προκειμένου το μοντέλο να φτάσει σε ισορροπία. Η δεύτερη αναφέρεται στα έτη 1986-2015 με το έτος 1985 να χρησιμοποιείται ως spin up. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα κοινά έτη 1990-2008. Οι παραμετροποιήσεις που επιλέχθηκαν για τις προσομοιώσεις φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

2.1.2 CORDEX-CPS 0.15° & 0.03°

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του EURO-CORDEX Flagship Pilot Study για τις convective-permitting simulations (Coppola et al., 2018) και στο εξής θα αναφέρεται ως CPS. Οι προσομοιώσεις CPS επιτρέπουν την αναλυτική επίλυση της ανωμεταφοράς και δεν χρησιμοποιούν το αντίστοιχο σχήμα παραμετροποίησης (*convection scheme*). Το περιοχικό μοντέλο WRF έτρεξε για την περίοδο 2000-2010, με το έτος 1998 να λειτουργεί ως spin up για το έδαφος και το χιόνι και το 1999 ως spin up της προσομοίωσης. Η παρούσα ανάλυση αφορά την περίοδο 2000-2005 με την περιοχή προσομοίωσης να περιλαμβάνει δύο τομείς: (i) την περιοχή της Ευρώπης σε ανάλυση 0.15° (~15km) και (ii) την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων σε ανάλυση 0.03° (~3km). Η διαμόρφωση του μοντέλου WRF και τα αντίστοιχα σχήματα παραμετροποίησης που

Πίνακας 2.1: Παραμετροποιήσεις του μοντέλου WRF στις τρεις προσομοιώσεις.

Schemes	EURO-CORDEX	LUCAS	CORDEX-CPS
Microphysics	WDM6 (Lim and Hong, 2010)	Thompson (Thompson et al., 2008)	WDM6 (Lim and Hong, 2010)
Convection	Grell-Freitas (GF) (Grell and Freitas, 2014)	Kain-Fritsch (KF) (Kain, 2004)	Grell-Freitas (GF) (only in 0.15°) (Grell and Freitas, 2014)
Shallow Convection	embedded in GF	-	GRIMS (Hong et al., 2013)
SW/LW Radiation	RRTMG (Iacono et al., 2008)	RRTMG (Iacono et al., 2008)	RRTMG (Iacono et al., 2008)
Planetary Boundary Layer	YSU (Hong et al., 2006)	MYNN2 (Nakanishi and Niino, 2006)	YSU (Hong et al., 2006)
Land Surface	CLM4 (Lawrence et al., 2011) (Oleson et al., 2010)	CLM4 (Lawrence et al., 2011) (Oleson et al., 2010)	NOAH-MP (Niu et al., 2011)
Surface Layer	Revised MM5 (Jiménez et al., 2012)	MYNN (Nakanishi and Niino, 2006)	Revised MM5 (Jiménez et al., 2012)

χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση της CPS το σχήμα παραμετροποίησης για την ανωμεταφορά ενεργοποιείται μόνο για την εξωτερική περιοχή.

2.2 ERA-Interim

Τα ERA-Interim είναι ένα παγκόσμιο σετ δεδομένων reanalysis της ατμόσφαιρας που παρέχεται από τον οργανισμό ECMWF. Τα δεδομένα καλύπτουν την περίοδο από το 1979 έως το 2019. Δίδονται σε πλεγματικά σημεία και περιέχουν επιφανειακές παραμέτρους (ξηρά και ωκεανούς) ανά 3ωρο και παραμέτρους της ανώτερης ατμόσφαιρας (ατμόσφαιρα, στρατόσφαιρα) ανά 6ωρο. Η χωρική ανάλυση της βάσης δεδομένων είναι περίπου 80km και αφορά 60 κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 0.1hPa. Το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το IFS, συζευγμένο (*coupled*) με ωκεάνιο μοντέλο ([Berrisford et al., 2011](#)).

Τα ERA-Interim αποτελούν μία προσπάθεια εξέλιξης των προηγούμενων δεδομένων reanalysis ERA-40 που αφορούσαν την περίοδο 1957-2002 ([Uppala et al., 2005](#)). Βασικός στόχος ήταν η αντιμετώπιση ορισμένων προβλημάτων στην αφομοίωση δεδομένων που δημιουργούνταν κατά τη διάρκεια παραγωγής των ERA-40. Αυτά οφείλονταν κυρίως στην αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου, την ποιότητα της στρατοσφαιρικής κυκλοφορίας και τη χρονική συνέχεια στα γεωδυναμικά πεδία. Σαν

δεύτερος στόχος ήταν η βελτίωση τεχνικών ζητημάτων όπως η συλλογή δεδομένων, ο έλεγχος ποιότητας και η βελτίωση σφαλμάτων που συνεισφέρουν σημαντικά στην ποιότητα των προϊόντων reanalysis (Dee et al., 2011).

2.3 Παρατηρησιακά δεδομένα

2.3.1 E-OBs

Για την αξιολόγηση της προσομοίωσης του EURO-CORDEX 0.44° & 0.11° χρησιμοποιήθηκε η βάση πλεγματικών δεδομένων E-OBs έκδοση 19.0e. Το πλέγμα των E-OBs καλύπτει την περιοχή της Ευρώπης (25°N-71.5°N, 25°W-45°E) και τα δεδομένα αφορούν ημερήσιες τιμές μέσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας και βροχόπτωσης σε κάθε σημείο πλέγματος (Cornes et al., 2018). Πρόκειται για ένα σετ δεδομένων αποτελούμενο από παρατηρήσεις σταθμών οι οποίες έχουν υποστεί χωρική παρεμβολή. Η συγκεκριμένη έκδοση αφορά μια βάση δεδομένων “ensemble” που περιέχει 100 μέλη, από τα οποία έχει προκύψει μία μέση τιμή και ένα εύρος. Τα E-OBs αρχικά βασίστηκαν στη βάση δεδομένων ECA&D, αλλά στη συνέχεια προστέθηκαν και άλλα αρχεία με περισσότερους σταθμούς. Είναι ελεύθερα για χρήση (*open data*) και διατίθενται μέσω της ιστοσελίδας του Copernicus Climate Change Service¹.

Η περίοδος στην οποία αναφέρεται η συγκεκριμένη έκδοση των E-OBs είναι από το 1950-2018. Ωστόσο, για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 1990-2008 που αντιστοιχεί στην περίοδο της κλιματικής προσομοίωσης. Τα δεδομένα διατίθενται σε δύο διαφορετικές αναλύσεις (0.1° & 0.25°) σε κανονικό πλέγμα. Επιλέχθηκε η υψηλότερη ανάλυση 0.1° που είναι και η πιο κοντινή στην ανάλυση του μοντέλου, προκειμένου να γίνει η σύγκριση μεταξύ των παρατηρησιακών δεδομένων και αυτών του μοντέλου.

2.3.2 EURO4M-APGD

Τα δεδομένα EURO4M-APGD χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προσομοίωσης CORDEX-CPS ως προς τη βροχόπτωση πάνω από την περιοχή των Άλπεων και τη διερεύνηση της προστιθέμενης αξίας της υψηλότερης ανάλυσης (3km/15km). Πρόκειται για μια βάση πλεγματικών δεδομένων βροχόπτωσης που αφορά την περιοχή των Ευρωπαϊκών Άλπεων και έχει δημιουργηθεί στο πλαίσιο του προγράμματος EURO4M που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Isotta et al., 2014). Η περιοχή οριοθετείται από τις συντεταγμένες 4.8°-17.5°E, 43°-49°N και 47.6° στη Γαλ-

¹http://surfobs.climate.copernicus.eu/dataaccess/access_eobs.php

λία. Τα δεδομένα EURO4M-APGD δεν είναι ανοιχτά, αλλά παρέχονται έπειτα από αίτημα στη MeteoSwiss².

Αποτελείται από μετρήσεις βροχομέτρων (περισσότερα από 8500 συνολικά) που έχουν εγκατασταθεί από τις εθνικές και τοπικές μετεωρολογικές και υδρολογικές υπηρεσίες εφτά χωρών της περιοχής και αναφέρονται στην περίοδο 1971-2008. Οι μετρήσεις έχουν υποστεί χωρική παρεμβολή σε δύο φάσεις προκειμένου να τοποθετηθούν σε πλέγμα: στο πρώτο βήμα για να περιορισθούν τα συστηματικά σφάλματα που συνδέονται με μετρήσεις σε μεγάλα ύψη και στο δεύτερο για να δοθεί έμφαση σε μετρήσεις ανάλογα με την απόστασή τους από το σημείο ανάλυσης. Η χωρική διακριτοποίηση της βάσης είναι 5km σε κανονικό πλέγμα και η χρονική της ανάλυση ημερήσια. Περιλαμβάνει τόσο το ημερήσιο ποσό βροχής όσο και το ισοδύναμο ποσό νερού από χιόνι σε mm.

2.3.3 MESAN

Η βάση δεδομένων reanalysis MESAN δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος EURO4M, το οποίο πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη έγινε η αξιολόγηση και η περιγραφή του περιοχικού σετ δεδομένων με το μοντέλο HIRLAM ανάλυσης 0.2° (~ 22km) σε τρισδιάστατο πλέγμα (3D) πάνω από την Ευρώπη (25°W-45°E, 30°-75°N) (Dahlgren et al., 2016). Στη δεύτερη προκειμένου να ενισχυθεί η κλιματική πληροφορία, έγινε υποβιβασμός του σετ σε διδιάστατο πλέγμα (2D) χρησιμοποιώντας το σύστημα MESAN για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση και μια δυναμική μέθοδο προσαρμογής (DYNAD) για τον άνεμο (Landelius et al., 2016). Σκοπός του προγράμματος ήταν να αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη βάση πλεγματικών δεδομένων για το κλίμα που να καλύπτει ολόκληρη την Ευρώπη. Τα δεδομένα MESAN παρέχονται μετά από επικοινωνία με τον Tomas Landelius³.

Τα δεδομένα MESAN χρησιμοποιούνται εδώ για την αξιολόγηση της προσομοίωσης CORDEX-CPS πάνω από τις Άλπεις ως προς τη θερμοκρασία (μέση, μέγιστη, ελάχιστη). Η χωρική ανάλυση που διαθέτουν είναι 0.05° σε περιστραμμένο πλέγμα. Εν γένει, περιλαμβάνουν τα πεδία του ανέμου στα 10m, τη μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία και ειδική υγρασία πάνω από ξηρά και τη συσσωρευμένη βροχόπτωση σε 24 ώρες. Η χρονική περίοδος που αναφέρονται είναι η 1989-2010 και η χρονική ανάλυση των μεταβλητών 3 ώρες.

²<https://www.meteoswiss.admin.ch/home.html>

³tomas.landelius@smhi.se

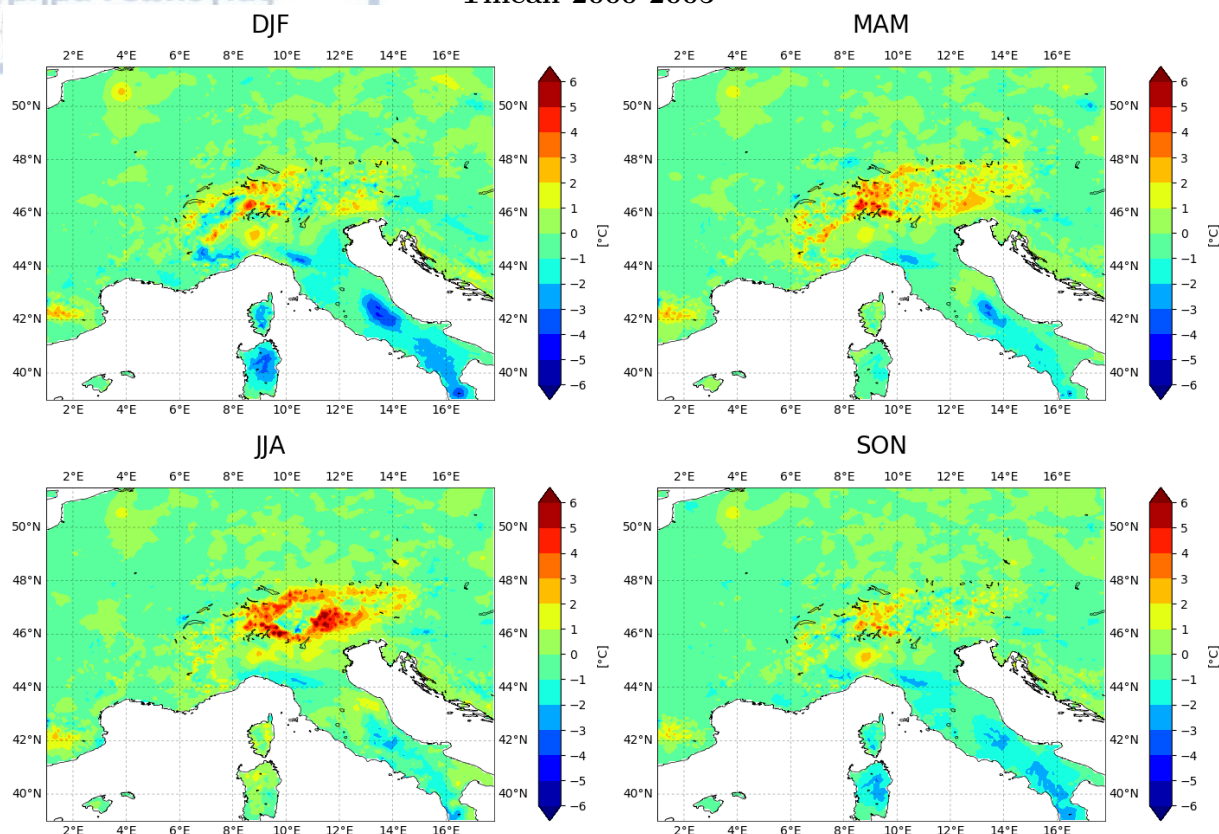
2.4 Αβεβαιότητα Παρατηρήσεων

Η διαθεσιμότητα παρατηρησιακών δεδομένων υψηλής ανάλυσης είναι πολύ βασικό κομμάτι στη μελέτη του κλιματικού συστήματος. Τα παρατηρησιακά δεδομένα χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των μοντέλων ως αρχικές συνθήκες και ως αναφορά για την αξιολόγησή τους. Η αξιολόγηση των μοντέλων στηρίζεται κατά βάση σε πλεγματικά δεδομένα παρατηρήσεων και επιπλέον σε πλεγματικά δεδομένα τηλεπισκόπησης και δεδομένα reanalysis από μοντέλα. Επομένως, η αξιοπιστία των μοντέλων εξαρτάται από την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η αβεβαιότητα των παρατηρήσεων επηρεάζει αναπόφευκτα τη διαδικασία αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων και εισάγει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα (Ring et al., 2016; Prein and Gobiet, 2017). Οι αβεβαιότητες μπορεί να πηγάζουν από πληθώρα παραγόντων, όπως δυσλειτουργίες και σφάλματα οργάνων, αντικατάσταση συσκευών, αλλαγή τοποθεσίας σταθμού ή αλλαγές στον περιβάλλοντα χώρο. Επιπλέον, η διαδικασία πλεγματοποίησης των σημείων περιλαμβάνει πολλές υποθέσεις και αβεβαιότητες που επηρεάζουν το τελικό προϊόν. Για παράδειγμα, σε περιοχές με μικρή κάλυψη σταθμών ή με σύνθετη τοπογραφία και για μεταβλητές με μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα, τα πλεγματικά δεδομένα εμφανίζουν προβλήματα (Wagner et al., 2007). Συνεπώς, καμία βάση δεδομένων δεν αντικατοπτρίζει ακριβώς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, αλλά αποτελεί μόνο μια προσέγγιση αυτών (Kotlarski et al., 2017).

Στα Σχήματα 2.1-2.3 γίνεται παρουσίαση των μέσων διαφορών μεταξύ των δεδομένων MESAN και E-OBs (στο πλέγμα των E-OBs). Το Σχήμα 2.1 αναφέρεται στη μέση θερμοκρασία πάνω από την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων για την περίοδο 2000-2005 για κάθε εποχή. Φαίνεται ότι υπάρχουν περιοχές με σημαντικές διαφορές σε όλες τις εποχές, κυρίως στην Ιταλική Χερσόνησο και πάνω στην οροσειρά των Άλπεων. Την ψυχρή περίοδο εμφανίζονται ενισχυμένες οι αρνητικές διαφορές στην Ιταλική Χερσόνησο και τα νησιά Σαρδηνία και Κορσική, δηλαδή τα MESAN είναι ψυχρότερα από τα E-OBs στις περιοχές αυτές (~ -1 με -2°C). Τη θερμή περίοδο είναι ενισχυμένες οι θετικές διαφορές στις Άλπεις ($\sim 1^{\circ}\text{C}$). Να σημειωθεί ότι τοπικά οι διαφορές φτάνουν μεγαλύτερες τιμές, κατά τη θερμή περίοδο μεγαλύτερες από 6°C στις Άλπεις και κατά την ψυχρή μικρότερες από -4°C στην Ιταλία.

MESAN-EOBS (0.1°)
T_{mean} 2000-2005



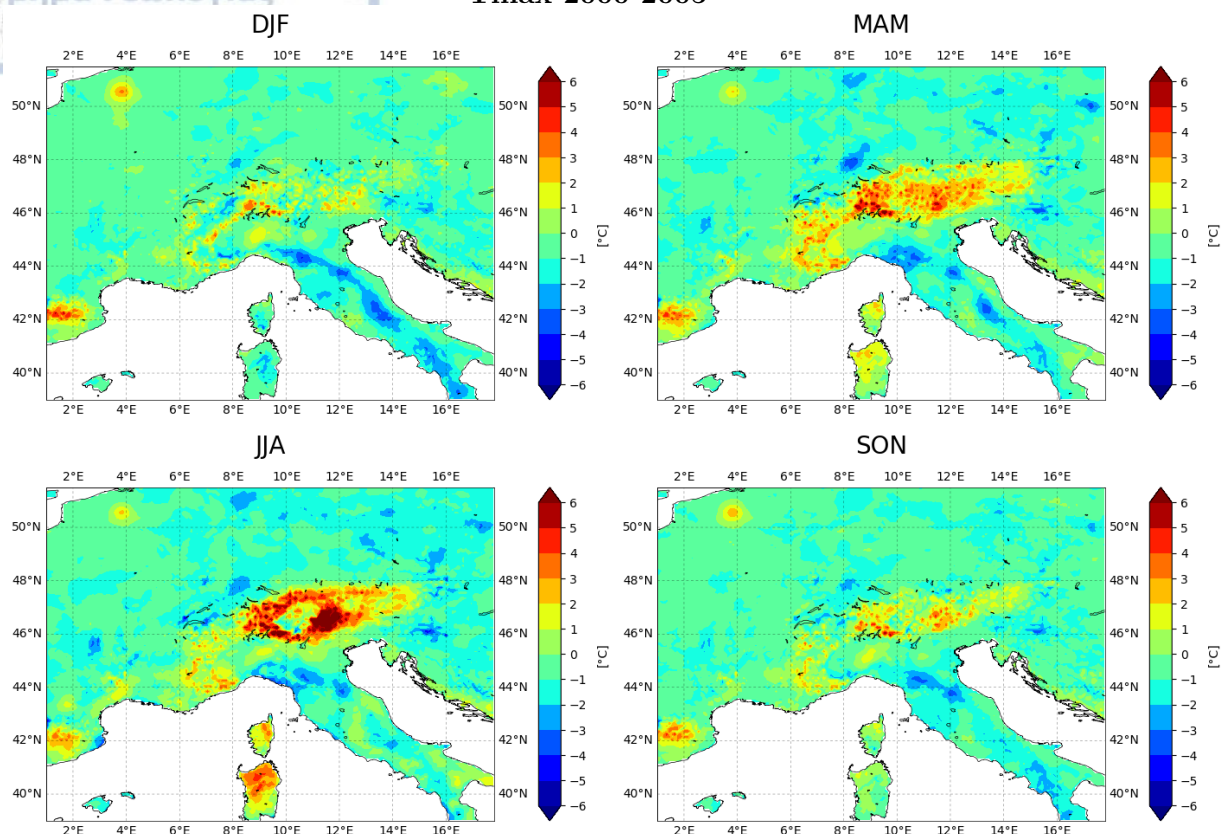
Σχήμα 2.1: Μέσες διαφορές MESAN-EOBS (°C) της μέσης θερμοκρασίας για τις 4 εποχές στο πλέγμα των E-OBs (0.1°) για την περίοδο 2000-2005.

Το Σχήμα 2.2 αφορά τη μέγιστη θερμοκρασία. Οι διαφορές είναι κι εδώ θετικές πάνω από τις Άλπεις τη θερμή περίοδο ($\sim 1^{\circ}\text{C}$) και αρνητικές στην Ιταλία την ψυχρή ($\sim -1.2^{\circ}\text{C}$), ενώ τοπικά φαίνεται οι θετικές τιμές να είναι ακόμα μεγαλύτερες από της μέσης θερμοκρασίας. Επιπλέον, στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τις Άλπεις υπάρχουν τμήματα με αρνητικές διαφορές (κυμαίνονται κυρίως στους -1 με -3°C).

Το Σχήμα 2.3 αναφέρεται στην ελάχιστη θερμοκρασία. Εδώ είναι εμφανές ότι οι διαφορές τη θερμή περίοδο πάνω από τις Άλπεις είναι περίπου 1°C και πάνω από την Ιταλία $\sim -1.3^{\circ}\text{C}$ την ψυχρή περίοδο. Τοπικά έχουν αυξηθεί το χειμώνα στην Ιταλική Χερσόνησο σε σχέση με αυτές τις μέγιστης και της μέσης, ενώ έχουν μειωθεί στις Άλπεις τη θερμή περίοδο.

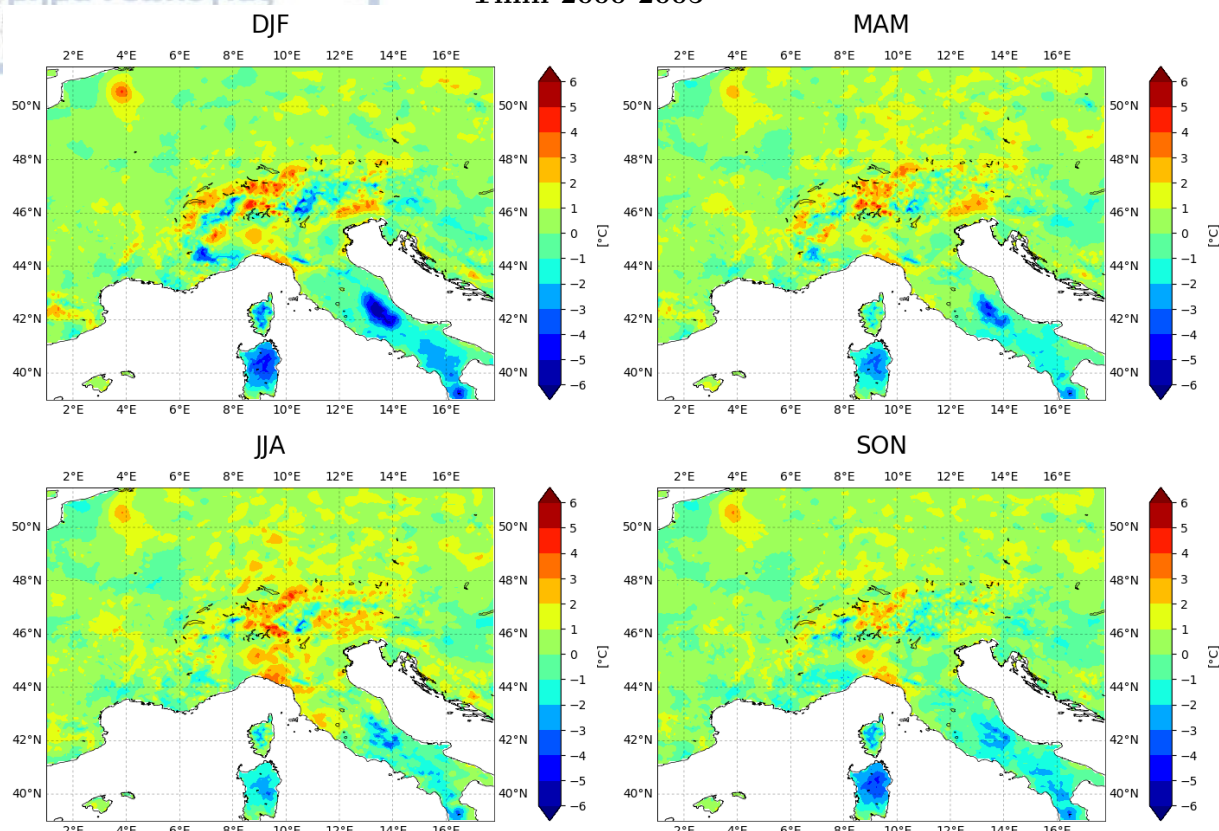
Επομένως, φαίνεται ότι οι περιοχές μέγιστης αβεβαιότητας παραμένουν οι ίδιες για όλες τις μεταβλητές και όλες τις εποχές, με κάποιες διαφορές ανάλογα την περίπτωση. Η οροσειρά των Άλπεων παρουσιάζει μέγιστη αβεβαιότητα για τη μέγιστη θερμοκρασία το καλοκαίρι, ενώ η Ιταλία και τα γειτονικά νησιά για την ελάχιστη θερμοκρασία το χειμώνα.

MESAN-EOBS (0.1°)
Tmax 2000-2005



Σχήμα 2.2: Μέσες διαφορές MESAN-EOBS (°C) της μέγιστης θερμοκρασίας για τις 4 εποχές στο πλέγμα των E-OBs (0.1°) για την περίοδο 2000-2005.

MESAN-EOBS (0.1°) Tmin 2000-2005



Σχήμα 2.3: Μέσες διαφορές MESAN-EOBS (°C) της ελάχιστης θερμοκρασίας για τις 4 εποχές στο πλέγμα των E-OBS (0.1°) για την περίοδο 2000-2005.

2.5 Μεθοδολογία

2.5.1 Χωρική Παρεμβολή & Διόρθωση Θερμοκρασίας

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των δεδομένων της προσομοίωσης με αυτά των παρατηρήσεων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι τα πλέγματα να είναι κοινά. Επειδή σπάνια αυτό συμβαίνει, επιλέγεται συνήθως η αναγωγή από το πλέγμα με την υψηλότερη (*finer*) προς το πλέγμα με τη χαμηλότερη ανάλυση (*coarser*). Γίνεται επομένως μια μεσοποίηση των τιμών του πιο λεπτομερούς πλέγματος, έτσι ώστε οι τιμές που θα προκύψουν να αντιστοιχούν στο πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Η μέθοδος χωρική παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτό το σκοπό είναι αυτή του πλησιέστερου γείτονα (*nearest neighbor*). Επιπλέον, εφαρμόστηκε μάσκα ξηράς (*landmask*) προκειμένου να απομονωθούν μόνο οι τιμές που αφορούν την ξηρά, ενώ οι τιμές πάνω από θάλασσα δεν λήφθηκαν υπόψη στα αποτελέσματα.

Ακόμη, δεδομένου ότι η ορογραφία του πλέγματος του μοντέλου είναι διαφορετική από αυτή του πλέγματος των παρατηρήσεων, εμφανίζονται διαφορές στη θερμοκρασία η

οποία έχει άμεση εξάρτηση από το ύψος. Για το λόγο αυτό, μετά τη χωρική παρεμβολή χρειάζεται να γίνει διόρθωση της θερμοκρασίας των δεδομένων που ανάχθηκαν στο νέο πλέγμα με βάση τη διαφορά των υψών παρατηρήσεων και μοντέλου σε κάθε σημείο. Η διόρθωση σε κάθε πλεγματικό σημείο i υπολογίστηκε μέσω του τύπου:

$$corr_i = \Delta h_i \cdot \gamma \quad (2.1)$$

όπου Δh_i η διαφορά υψών (π.χ. WRF-E-OBS) σε κάθε σημείο του πλέγματος και γ η θερμοβαθμίδα που θεωρείται κατά προσέγγιση σταθερή και ίση με $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$. Στη συνέχεια, η διόρθωση προστέθηκε στη θερμοκρασία που έχει το κάθε σημείο για την εξαγωγή της νέας θερμοκρασίας.

2.5.2 Metrics

Για την αξιολόγηση της προσομοίωσης ως προς τη θερμοκρασία (μέση, ελάχιστη & μέγιστη) χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος του μέσου bias (*mean bias*). Πρόκειται ουσιαστικά για τη μέση τιμή της απόκλισης των δεδομένων του μοντέλου από τις παρατηρήσεις σε κάθε σημείο του πλέγματος i και δίνεται από τον τύπο:

$$MB_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (M_t - O_t) \quad (2.2)$$

όπου M_t και O_t οι αντίστοιχες τιμές του μοντέλου και των παρατηρήσεων σε κάθε χρονική στιγμή t και N το σύνολο των χρονικών στιγμών. Για τη βροχόπτωση υπολογίστηκε επιπλέον το κανονικοποιημένο μέσο bias (*normalized mean bias*) που δίνεται από τη σχέση:

$$NMB_i = \frac{\sum_{t=1}^N (M_t - O_t)}{\sum_{t=1}^N O_t} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

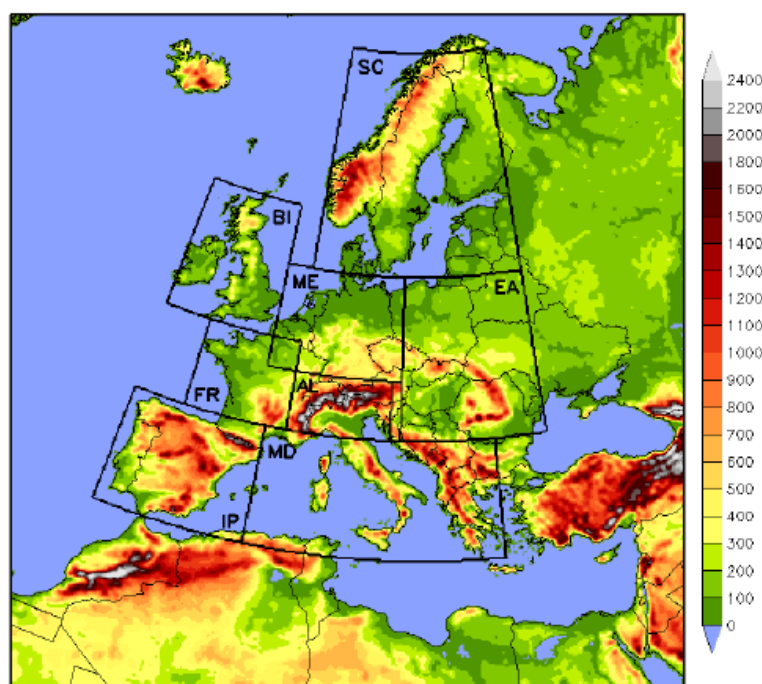
Για τις προσομοιώσεις EURO-CORDEX 0.44° & 0.11° τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν για ολόκληρη την περιοχή της Ευρώπης χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε εποχή του χρόνου (χειμώνας (DJF), άνοιξη (MAM), καλοκαίρι (JJA), φθινόπωρο (SON)) για την περίοδο 1990-2008. Για την προσομοίωση CORDEX-CPS ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία αλλά για την περιοχή των Άλπεων και για την περίοδο 2000-2005. Οι μέσες μηνιαίες τιμές προέκυψαν από τη μέσοποίηση των ημερήσιων τιμών για κάθε μεταβλητή στην περίοδο αναφοράς.

2.5.3 Χωρισμός σε υποπεριοχές

Στην περίπτωση των προσομοιώσεων EURO-CORDEX, προκειμένου να διερευνηθούν λεπτομερώς οι αποκλίσεις του μοντέλου σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή, πραγ-

ματοποιήθηκε ανάλυση και για επιμέρους υποπεριοχές της Ευρώπης. Αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| i Άλπεις (AL) | v Κεντρική Ευρώπη (ME) |
| ii Βρετανικοί Νήσοι (BI) | vi Μεσόγειος (MD) |
| iii Ανατολική Ευρώπη (EA) | vii Ιβηρική Χερσόνησος (IP) |
| iv Γαλλία (FR) | viii Σκανδιναβική Χερσόνησος (SC) |



Σχήμα 2.4: Περιοχές PRUDENCE (Kotlarski et al., 2014)

Οι συγκεκριμένες περιοχές είχαν προσδιορισθεί αρχικά από το πρόγραμμα PRUDENCE (Christensen and Christensen, 2007) και έκτοτε χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία (Kotlarski et al., 2014; Garcíá-Díez et al., 2015; Katragkou et al., 2015).

2.5.4 Στατιστική Σημαντικότητα

Οι διαφορές (bias) που υπολογίστηκαν μεταξύ του μοντέλου και των παρατηρήσεων ελέγχθηκαν ως προς τη στατιστική σημαντικότητά τους. Για τη θερμοκρασία (μέση, μέγιστη, ελάχιστη) χρησιμοποιήθηκε το Welch's t-test, δεδομένου ότι αυτή ακολουθεί την κανονική κατανομή. Για τη βροχόπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα μη παραμετρικό τεστ, το Mann-Widney που δεν έχει ως προϋπόθεση η μεταβλητή να ακολουθεί κάποια κατανομή. Η στατιστική σημαντικότητα ελέγχθηκε σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

2.5.4.1 Welch's t-test

Το Welch's t-test είναι ένα παραμετρικό τεστ που χρησιμοποιείται για να ελέγξει την υπόθεση ότι δύο ανεξάρτητοι πληθυσμοί έχουν ίσους μέσους όρους (Zhenqiu and Yuan, 2010). Αποτελεί παραλλαγή του Student's t test το οποίο θεωρεί ίσες διασπορές ανάμεσα στα δείγματα, ενώ το Welch's test προτιμάται συνήθως όταν οι διασπορές ή το μέγεθος των δειγμάτων δεν είναι ίσα. Ως βασική προϋπόθεση το Welch's test θεωρεί ότι οι δύο πληθυσμοί ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Το στατιστικό Welch που ελέγχει τη μηδενική υπόθεση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$t_w = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}} \quad (2.4)$$

όπου $\bar{y}_1, \bar{y}_2$ οι μέσες τιμές των δειγμάτων, s_1, s_2 οι τυπικές τους αποκλίσεις και N_1, N_2 το πλήθος του κάθε δείγματος. Το στατιστικό t_w ακολουθεί περίπου την κατανομή Student με βαθμούς ελευθερίας df_w που δίνεται από τον τύπο:

$$df_w = \frac{(s_1^2/N_1 + s_2^2/N_2)^2}{\frac{(s_1^2/N_1)^2}{N_1 - 1} + \frac{(s_2^2/N_2)^2}{N_2 - 1}} \quad (2.5)$$

2.5.4.2 Mann-Widney U test

Το Mann-Widney U test είναι ένα μη παραμετρικό τεστ που χρησιμοποιείται για να ελέγξει αν δύο ανεξάρτητα δείγματα έχουν επιλεγθεί από πληθυσμούς που ακολουθούν την ίδια κατανομή. Είναι το αντίστοιχο του t-test, αλλά ως μη παραμετρικό δεν απαιτεί για τη χρήση του οι πληθυσμοί να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη κατανομή. Η μηδενική του υπόθεση λέει ότι η πιθανότητα είναι ίδια (50%) μια τυχαία τιμή από το ένα δείγμα να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από μια τυχαία τιμή από ένα δεύτερο δείγμα.

Το τεστ απαιτεί τον υπολογισμό ενός στατιστικού U , το οποίο είναι το μικρότερο από τα U_1, U_2 που ορίζονται παρακάτω:

$$U_1 = R_1 - \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} \quad (2.6)$$

$$U_2 = R_2 - \frac{N_2(N_2 + 1)}{2} \quad (2.7)$$

όπου N_1, N_2 το πλήθος του κάθε δείγματος και R_1, R_2 το άθροισμα των κατατάξεων για κάθε δείγμα. Ως κατάταξη νοείται η θέση που κατέχει η τιμή στο δείγμα (σε αύξουσα σειρά). Στη συνέχεια ελέγχεται η τιμή του στατιστικού από πίνακες με βάση τον πλήθος του δείγματος N και το επίπεδο σημαντικότητας α που έχει οριστεί.

2.5.5 Q-Q plots

Τα quantile-quantile plots ή για συντομία q-q plots είναι ουσιαστικά διαγράμματα σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που συγκρίνουν τις κατανομές πιθανότητας δύο μεταβλητών. Αναπαριστούν τα ποσοστημόρια (quantiles) μίας μεταβλητής (άξονας y) σε συνάρτηση με τα ίδια ποσοστημόρια μιας δεύτερης μεταβλητής ή θεωρητικής κατανομής (άξονας x). Μέσω των q-q plots γίνονται φανερές αποκλίσεις από τη θεωρητική κατανομή (αποκλίσεις από τη διαγώνιο γραμμή), biases (μετατοπίσεις), διαφορές στη μεταβλητότητα (ευθείες γραμμές με διαφορετική κλίση) ή ασυμμετρίες (καμπυλότητα κατανομής) (García-Díez et al., 2013).

Τα ποσοστημόρια Q_i μπορούν να υπολογιστούν αφού βρεθεί η θέση τους R_i στο δείγμα (σε αύξουσα σειρά) μέσω του τύπου:

$$R_i = \frac{i(N+1)}{t} \quad (2.8)$$

όπου i ο αριθμός που αντιστοιχεί στο ποσοστημόριο (π.χ. για $i=1$ το πρώτο, για $i=2$ το δεύτερο κ.τ.λ.), N το πλήθος του δείγματος και t το ανά πόσα χωρίζονται (π.χ. για $t=20$ ανά 5%, για $t=10$ ανά 10% κ.τ.λ.). Αν ο δεκαδικός $a.b$ είναι η θέση R_i που προέκυψε, το ποσοστημόριο Q_i καθορίζεται από τον τύπο:

$$Q_i = X(a) + 0.b \cdot (X(a+1) - X(a)) \quad (2.9)$$

όπου $X(a)$ και $X(a+1)$ οι τιμές στις θέσεις a και $a+1$ του δείγματος.

Τα q-q plots που κατασκευάστηκαν ανά 5% συγκρίνουν την κατανομή μιας μεταβλητής του μοντέλου WRF με την κατανομή της αντίστοιχης μεταβλητής των δεδομένων αναφοράς για κάθε υποπεριοχή. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τις διαφορετικές αναλύσεις του μοντέλου στο ίδιο διάγραμμα. Κύριος στόχος ήταν να διερευνηθεί αν τα σφάλματα εμφανίζονται για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας ή βροχόπτωσης μέσα στο εύρος της κατανομής, αν είναι συστηματικά ανάλογα με τη διαμόρφωση του μοντέλου και αν βελτιώνονται με την υψηλότερη ανάλυση.

2.5.6 Χρονοσειρές & Τάσεις

Για την περαιτέρω διερεύνηση της προστιθέμενης αξίας της προσομοίωσης υψηλής ανάλυσης του EURO-CORDEX κατασκευάστηκαν διαγράμματα της μεταβολής της μέσης εποχιακής θερμοκρασίας και συνολικής εποχιακής βροχόπτωσης σε συνάρτηση με το έτος. Από αυτά υπολογίστηκαν οι τάσεις ανά εποχή για κάθε υποπεριοχή για όλες τις χρονοσειρές (παρατηρήσεις, προσομοιώσεις στις διαφορετικές αναλύσεις και διαμορφώσεις μοντέλου). Στόχος ήταν να εξετασθούν οι διαφορές μεταξύ των τάσεων και να διαπιστωθεί ποια περίπτωση είναι πιο κοντά στις παρατηρήσεις και αν υπάρχει

συστηματικότητα ως προς κάποια περιοχή ή εποχή. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων ήταν η απλή γραμμική παλινδρόμηση.

2.5.7 Διαγράμματα Taylor

Τα διαγράμματα Taylor αναπαριστούν ταυτόχρονα μεγέθη που σχετίζονται με την απόδοση των μοντέλων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση διαφορετικών μοντέλων ή για την ανάδειξη διαφορών που προκύπτουν από αλλαγές σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο (Taylor, 2001). Συγκρίνουν δύο πεδία, το προσομοιούμενο από το μοντέλο και το παρατηρούμενο, με σκοπό να αναδείξουν το βαθμό συμφωνίας τους. Στο διάγραμμα αναπαριστώνται τα εξής μεγέθη: συντελεστής συσχέτισης, η κεντρική ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς μεταξύ δύο πεδίων (CRSMD) και η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση ως ένα σημείο στο διδιάστατο χώρο. Όλα αυτά τα στατιστικά μαζί μπορούν να παρέχουν συμπεράσματα για τη συμφωνία μεταξύ των πεδίων, αναδεικνύοντας αν το μοντέλο αναπαριστά με ακρίβεια την παρατήρηση. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών f, r ορίζεται ως:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{s_f s_r} \quad (2.10)$$

όπου f_n, r_n οι τιμές τους σε N διακριτά σημεία (στο χώρο ή στο χρόνο), $\bar{f}$ και $\bar{r}$ οι μέσες τιμές και s_f, s_r οι τυπικές αποκλίσεις τους. Η κεντρική ρίζα της μέσης τετραγωνικής διαφοράς ορίζεται από τον τύπο:

$$CRMSD = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2 \right\}^{1/2} \quad (2.11)$$

όπου δεν συμπεριλαμβάνεται η διαφορά των μέσων τιμών των δύο μεταβλητών.

Στο διάγραμμα Taylor αναπαριστώνται σημεία σε πολικές συντεταγμένες: ένα είναι το σημείο αναφοράς (παρατηρήσεις) και τα άλλα προσομοιούμενες ποσότητες (μοντέλα). Η ακτινική απόσταση από το σημείο (0,0) είναι ανάλογη της τυπικής απόκλισης της μεταβλητής, η διαφορά $CRMSD$ μεταξύ του μοντέλου και του σημείου αναφοράς είναι ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης και η συσχέτισή τους δίνεται από την αζιμούθια θέση του προσομοιούμενου πεδίου. Το σημείο αναφοράς αναπαριστάται στον άξονα x που δείχνει την κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$s'_f = \frac{s_f}{s_r} \quad (2.12)$$

2.6 Εργαλεία Προγραμματισμού

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CDO για την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και η γλώσσα προγραμματισμού Python με την οποία έγινε τόσο επεξεργασία όσο και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιήθηκε επίσης η υπολογιστική συστοιχία του Α.Π.Θ. που συντηρείται από το Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης, η οποία παρείχε τα απαραίτητα εργαλεία και αποθηκευτικό χώρο για τη διεξαγωγή της μελέτης.

3 | ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

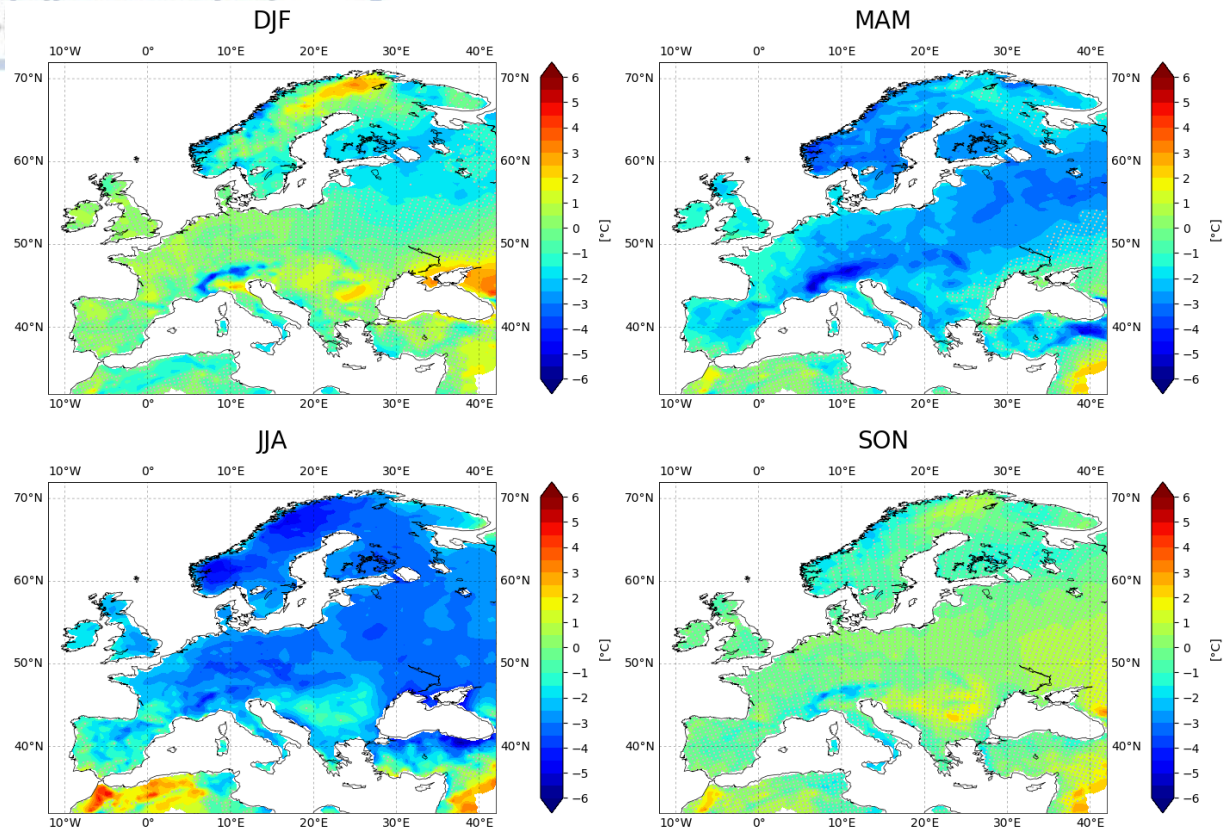
3.1 EURO-CORDEX 0.44° & 0.11°

Στο κεφάλαιο 3.1 παρουσιάζονται και αναλύονται οι προσομοιώσεις τύπου “evaluation” που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του EURO-CORDEX. Γίνεται αρχικά η αξιολόγηση του μοντέλου για τις μεταβλητές μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία και υετός με τα παρατηρησιακά δεδομένα της βάσης E-OBs v19. Για τη θερμοκρασία, η οποία υπάρχει διαθέσιμη σε δύο χωρικές αναλύσεις (0.11° και 0.44°), πραγματοποιείται επιπλέον και εκτίμηση προστιθέμενης αξίας.

3.1.1 Μέση Θερμοκρασία

3.1.1.1 Μέσο Bias (0.44°)

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το bias της μέσης θερμοκρασίας στα 2m για την περιοχή της Ευρώπης. Η ψυχρή περίοδος (χειμώνας, φθινόπωρο) χαρακτηρίζεται από μικρές τιμές bias στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης. Το μοντέλο εμφανίζει ψυχρό bias στην περιοχή των Άλπεων και της Νορβηγίας και τις δύο εποχές και στη ΒΑ Ευρώπη το χειμώνα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1, την ψυχρή περίοδο (DJF, SON) η μέση τιμή του bias πάνω από όλη την Ευρώπη κυμαίνεται περίπου στα -0.3°C. Ωστόσο, υπάρχουν και περιοχές που το μοντέλο είναι ελάχιστα πιο θερμό από τις παρατηρήσεις (BI, FR, ME το χειμώνα). Η θερμή περίοδος (άνοιξη, καλοκαίρι) χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές αρνητικού bias, που σημαίνει ότι τόσο την άνοιξη και ακόμα περισσότερο το καλοκαίρι το μοντέλο εμφανίζεται πιο ψυχρό σε όλη σχεδόν την περιοχή της Ευρώπης. Η μέση τιμή του bias κατά τη θερμή περίοδο (MAM, JJA) κυμαίνεται στα -2.3°C. Τα μεγαλύτερα αρνητικά bias το καλοκαίρι εμφανίζονται πάνω από τις περιοχές της Σκανδιναβίας (-3.2°C) και της κεντρικής Ευρώπης (-3.0°C) και τα μικρότερα στη νότια Ευρώπη (IP -1.2°C, MD -1.6°C).

Mean Bias (0.44°)T_{mean} 1990-2008

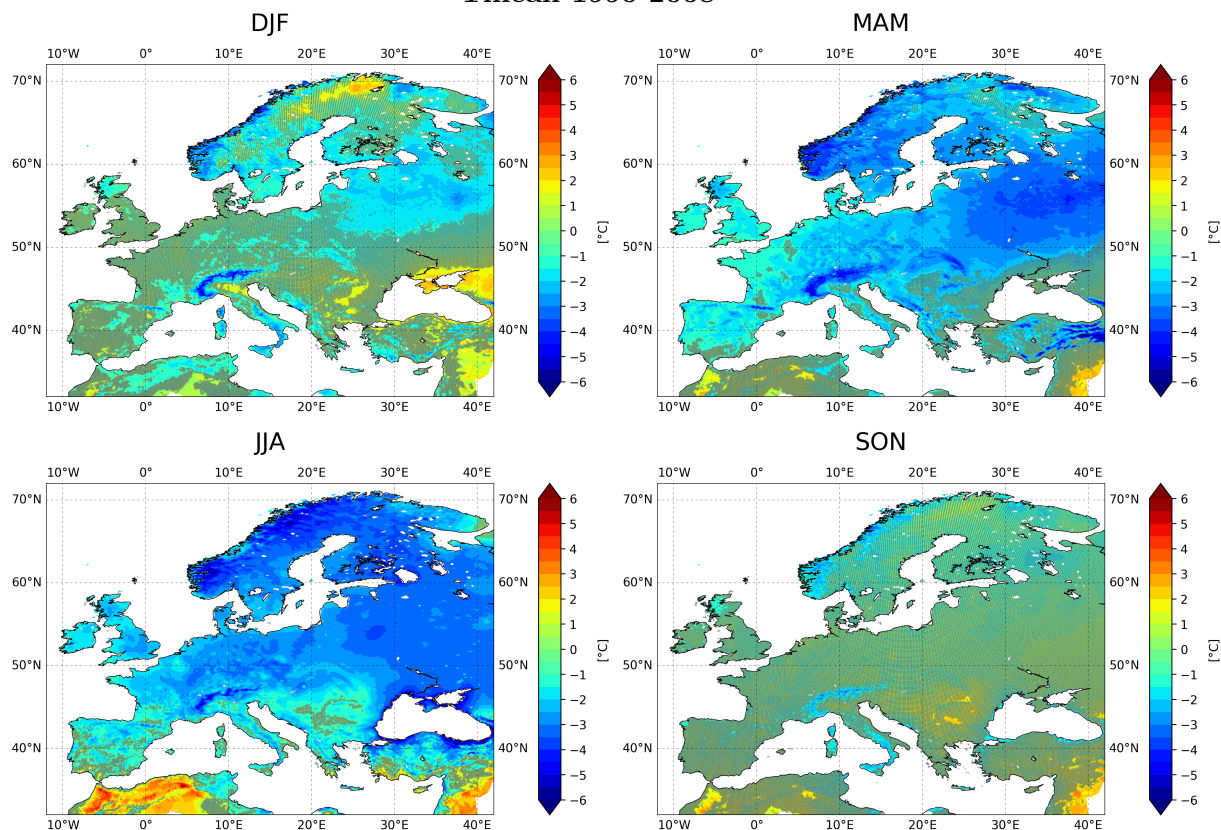
Σχήμα 3.1: Μέσο bias (WRF-EOBs) της μέσης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα του WRF (0.44°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Πίνακας 3.1: Μέσο bias ($^{\circ}\text{C}$) της μέσης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.44° για την περίοδο 1990-2008.

Bias T _{mean} 0.44° [$^{\circ}\text{C}$]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-0.7	-3.1	-2.9	-0.9	-1.9
BI	0.3	-1.5	-2.1	-0.4	-0.9
EA	-0.1	-2.5	-2.8	0.3	-1.3
FR	0.2	-1.7	-2.3	-0.4	-1.1
IP	-0.1	-1.6	-1.2	-0.4	-0.8
MD	-0.5	-1.8	-1.6	-0.5	-1.1
ME	0.1	-2.2	-3.0	-0.1	-1.3
SC	-1.0	-2.6	-3.2	-0.7	-1.9
seasonal average	-0.2	-2.1	-2.4	-0.4	

3.1.1.2 Μέσο Bias (0.11°)

Mean Bias (0.11°)

T_{mean} 1990-2008

Σχήμα 3.2: Μέσο bias (WRF-EOBs) της μέσης θερμοκρασίας (°C) στο πλέγμα του WRF (0.11°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι σκούρες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι αντίστοιχοι χάρτες του μέσου bias για την υψηλότερη χωρική ανάλυση (0.11°). Τα μοτίβα είναι παρόμοια με αυτά της χαμηλότερης ανάλυσης (0.44°), με μικρές διαφορές κυρίως στις περιοχές πολύπλοκης ορογραφίας (Άλπεις, Απέννινα Όρη, Πυρηηναία) όπου εμφανίζονται περισσότερες χωρικές λεπτομέρειες. Παρόλα αυτά, φαίνεται να έχει αυξηθεί κατ' απόλυτη τιμή το bias το χειμώνα (πιο ψυχρό μοντέλο) στα 0.11° συγκριτικά με τα 0.44°, ενώ το καλοκαίρι έχει μετριαστεί το ψυχρό bias. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από τον Πίνακα 3.2, όπου το χειμερινό bias αυξήθηκε κατά 0.5°C (απόλυτη τιμή) στα 0.11° σε σχέση με τα 0.44° και το θερινό bias μειώθηκε κατά 0.3°C (απόλυτη τιμή). Χαρακτηριστικό είναι ότι στις περιοχές των Βρετανικών Νήσων, της Γαλλίας και της κεντρικής Ευρώπης τα bias στα 0.11° έχουν αλλάξει πρόσημο και από θετικό που ήταν στα 0.44° έγιναν πλέον αρνητικά.

Πίνακας 3.2: Μέσο bias ($^{\circ}\text{C}$) της μέσης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.11° για την περίοδο 1990-2008.

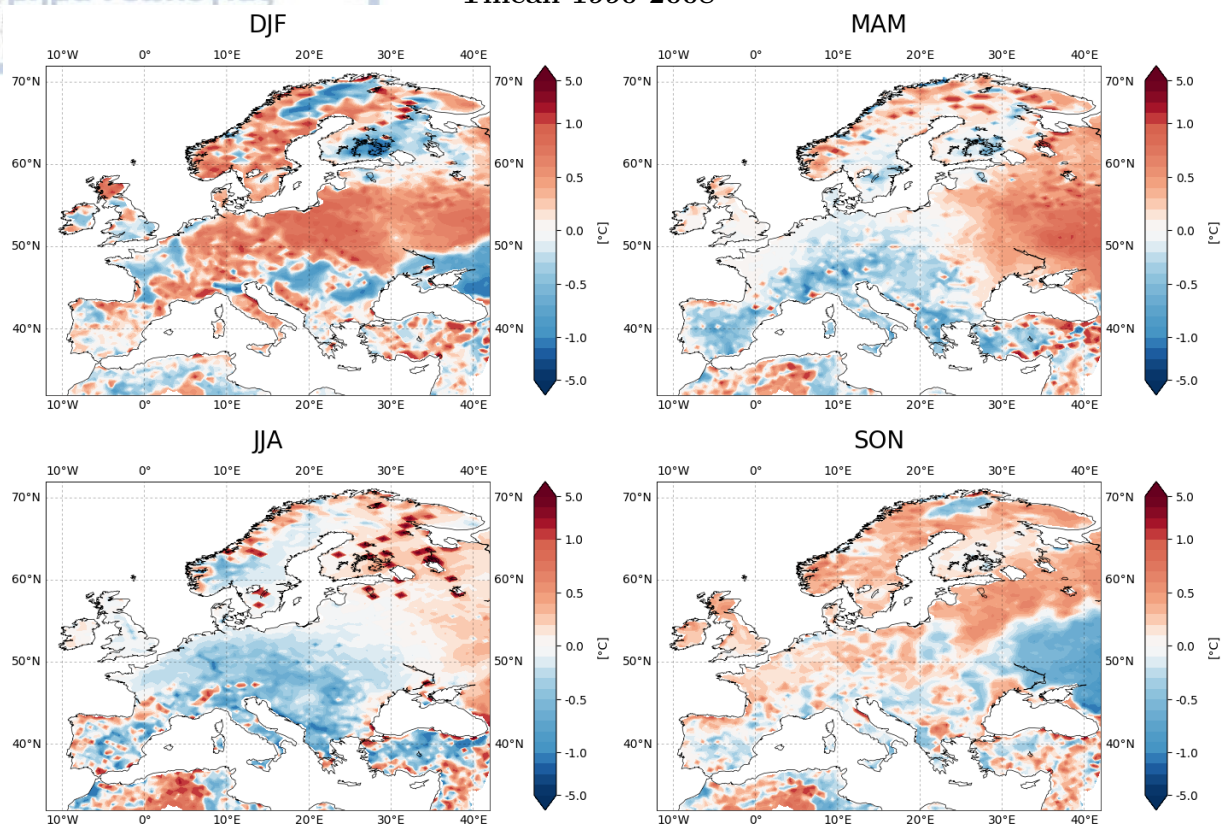
Bias Tmean 0.11° [$^{\circ}\text{C}$]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-1.1	-2.6	-2.4	-0.8	-1.7
BI	-0.2	-1.5	-2.0	-0.6	-1.1
EA	-0.8	-2.5	-2.5	0.0	-1.5
FR	-0.4	-1.6	-2.1	-0.5	-1.2
IP	-0.4	-1.3	-0.9	-0.3	-0.7
MD	-0.7	-1.5	-1.1	-0.3	-0.9
ME	-0.6	-2.0	-2.7	-0.3	-1.4
SC	-1.3	-2.7	-3.2	-0.9	-2.0
seasonal average	-0.7	-2.0	-2.1	-0.5	

3.1.1.3 Διαφορές μέσου bias (0.11° - 0.44°)

Στους χάρτες που ακολουθούν (Σχήμα 3.3) φαίνονται οι διαφορές των απόλυτων bias ($|MB_{0.11^{\circ}}| - |MB_{0.44^{\circ}}|$) για κάθε εποχή για τη μέση θερμοκρασία. Τα θερμά χρώματα αντιστοιχούν σε θετικές διαφορές, δηλαδή μεγαλύτερο απόλυτο bias για την υψηλότερη ανάλυση και σχετική επιδείνωση του αποτελέσματος. Τα ψυχρά χρώματα υποδεικνύουν αρνητικές διαφορές και μικρότερο bias για την υψηλότερη ανάλυση, δηλαδή σχετική βελτίωση του αποτελέσματος. Σημειώνεται ότι με την απόλυτη τιμή ελέγχεται η αύξηση ή ελάττωση του απόλυτου bias, χωρίς να μας ενδιαφέρει η αλλαγή του προσήμου. Δηλαδή, αν το μοντέλο έχει αρχικά -0.1 και μετά αλλάζει σε $+0.1$, θα ληφθεί υπόψιν σαν καμία αλλαγή. Αυτό βεβαίως δε σημαίνει ότι δεν άλλαξε κάτι στο μοντέλο: απεναντίας, όπως φάνηκε παραπάνω το μοντέλο γίνεται θερμότερο/ψυχρότερο το καλοκαίρι/χειμώνα όταν αλλάζει η χωρική ανάλυση. Στην προκειμένη περίπτωση εξετάζεται το σφάλμα σε απόλυτο μέγεθος, το οποίο μπορεί να παραμένει το ίδιο ακόμα κι αν αλλάζει το πρόσημο.

Κατά το χειμώνα (DJF) η προσομοίωση υψηλότερης ανάλυσης (0.11°) παρουσιάζει μεγαλύτερο σφάλμα (απόλυτο bias) από την προσομοίωση χαμηλής ανάλυσης (0.44°) κυρίως στη ζώνη γεωγραφικών πλατών $50-60^{\circ}$ στην κεντρική και ανατολική Ευρώπη ($\sim 0.5-1^{\circ}\text{C}$). Το καλοκαίρι το απόλυτο σφάλμα μειώνεται (0.5°C) κυρίως στη ζώνη με γεωγραφικό μήκος $10-30^{\circ}$. Την άνοιξη και το φθινόπωρο οι διαφορές είναι μικρότερες ($<0.5^{\circ}\text{C}$), είτε θετικές είτε αρνητικές, ανάλογα με την περιοχή.

Mean Bias $|0.11^\circ| - |0.44^\circ|$
T_{mean} 1990-2008

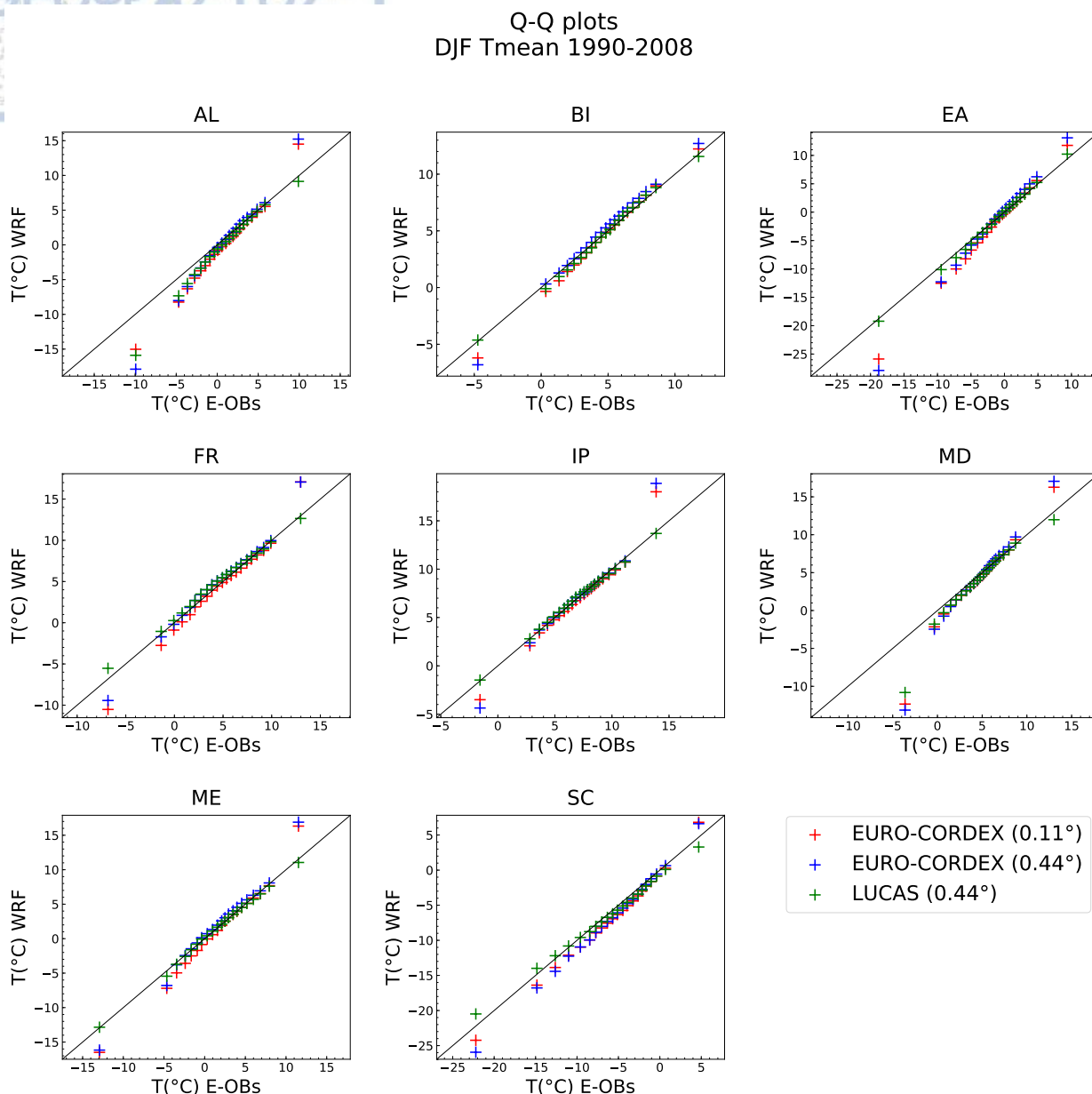


Σχήμα 3.3: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.11}| - |MB_{0.44}|$) της μέσης θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$) στο πλέγμα των 0.44° ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008.

3.1.1.4 Q-Q plots

Για κάθε μία από τις παραπάνω περιοχές έχουν κατασκευαστεί τα quantile-quantile plots της μέσης θερμοκρασίας και για τις δύο χωρικές αναλύσεις (Σχήματα 3.4-3.7). Σε αυτά αναπαριστώνται τα ποσοστημόρια ανά 5% της κατανομής των ημερήσιων τιμών της μέσης θερμοκρασίας, καθώς και τα ακραία σε κάθε εποχή της περιόδου 1990-2008. Η διαγώνιος ορίζει τα σημεία εκείνα, στα οποία οι τιμές της προσομοίωσης ισούνται με αυτές των δεδομένων αναφοράς. Πάνω από τη διαγώνιο γραμμή το μοντέλο υπερεκτιμά τα αποτελέσματα και κάτω από αυτή τα υποεκτιμά. Στα σχήματα που ακολουθούν συμπεριλαμβάνεται και η προσομοίωση LUCAS που έχει πραγματοποιηθεί με διαφορετική διαμόρφωση μοντέλου (*configuration*). Σκοπός είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η επίδραση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου μπορεί να είναι μεγαλύτερη/μικρότερη ή συγκρίσιμη με αυτή που έχει η διαφορετική διαμόρφωση του μοντέλου.

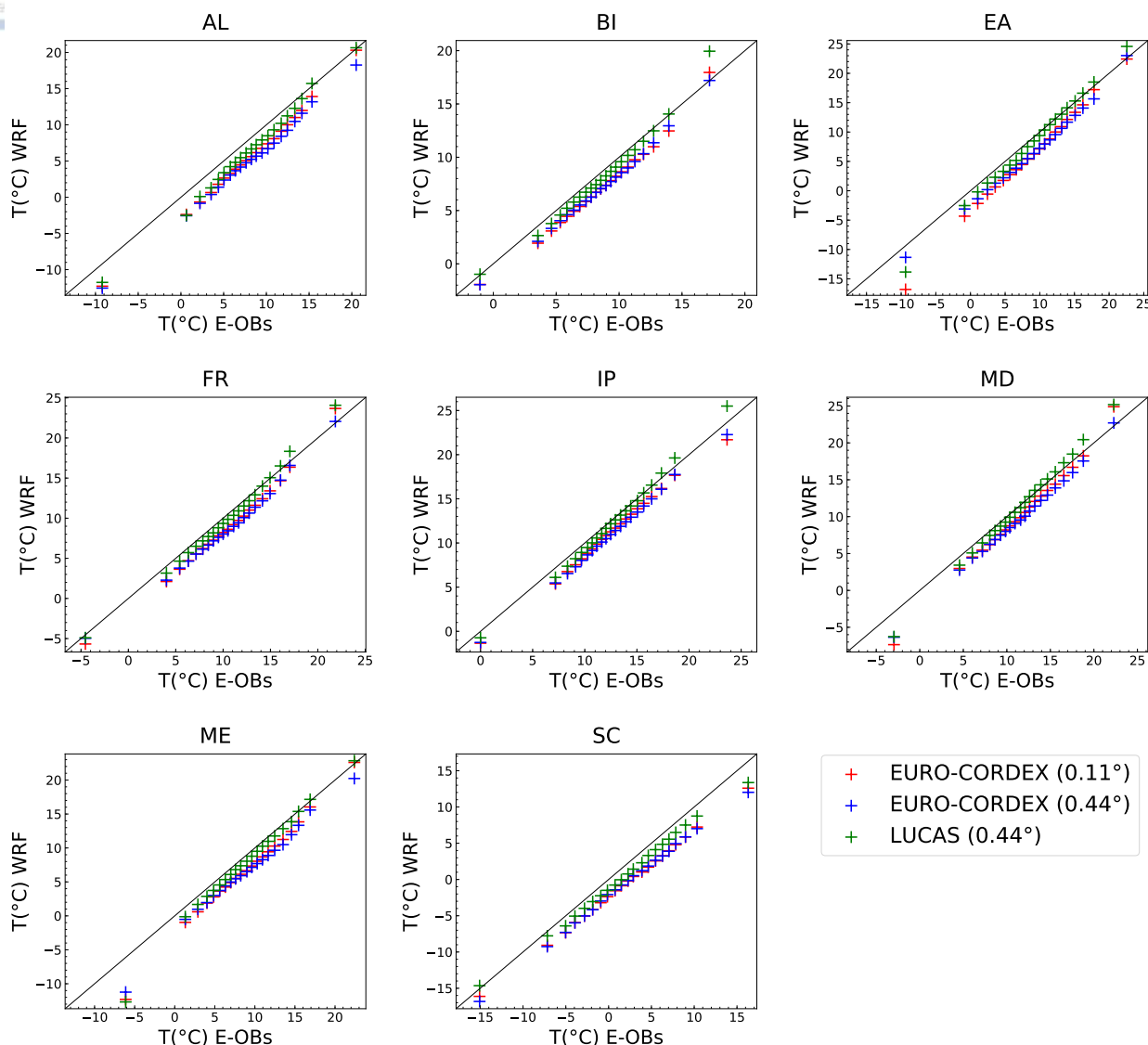
Στο Σχήμα 3.4 που αφορά το χειμώνα φαίνεται ότι στις περισσότερες περιοχές υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ μοντέλου και παρατηρήσεων κατά κύριο λόγο στο κεντρικό τμήμα της κατανομής. Στην περιοχή των Άλπεων (AL) και της ανατολικής Ευρώπης (EA) είναι φανερό ότι υπάρχει υποεκτίμηση σε τιμές θερμοκρασιών κάτω



Σχήμα 3.4: Q-Q plots για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

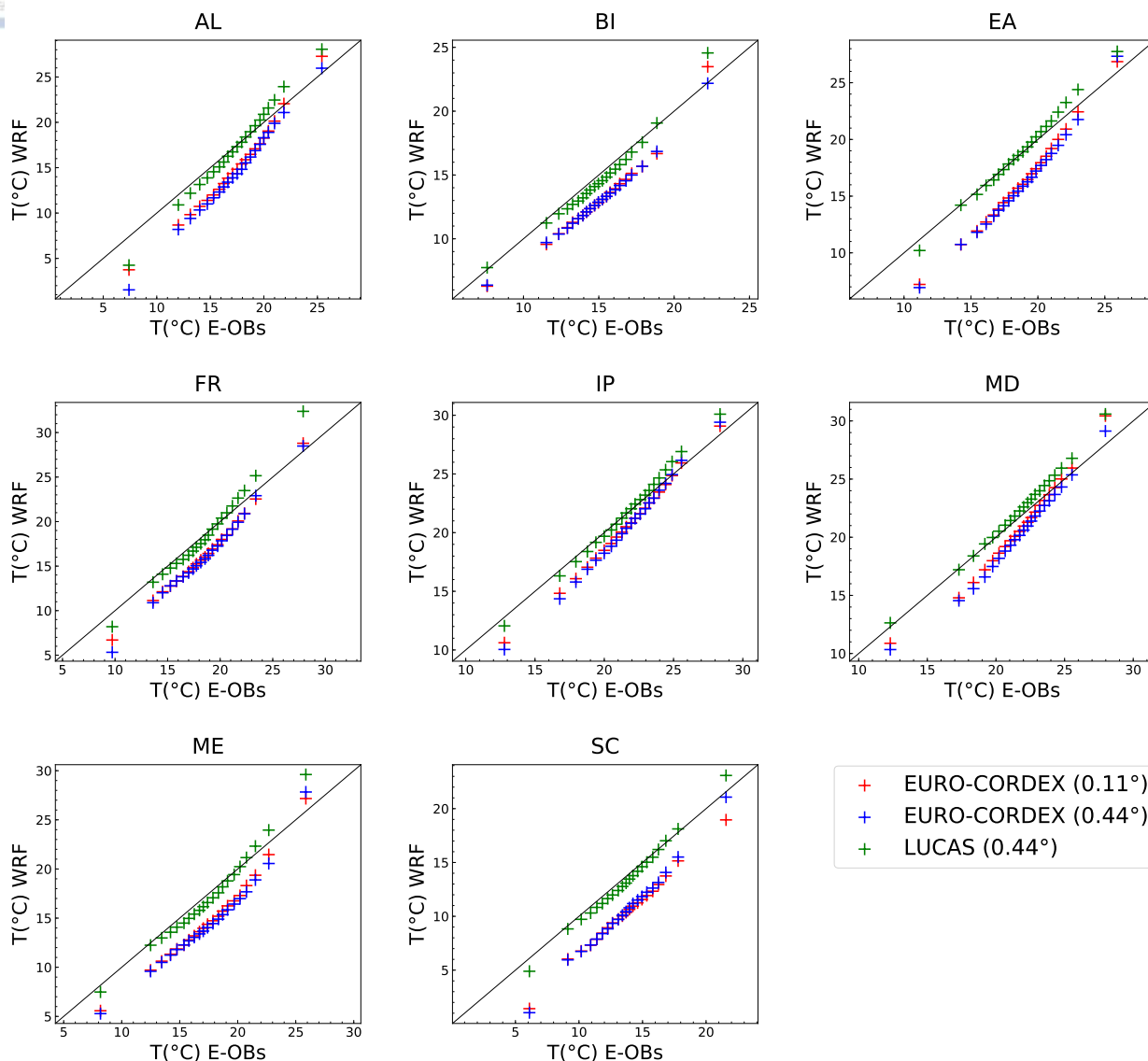
των 0°C και στην περιοχή της Μεσογείου (MD) κάτω των 5°C από όλες τις προσομοιώσεις. Στις περιοχές της Βρετανίας (BI), Γαλλίας (FR), Ιβηρικής (IP) και κεντρικής Ευρώπης (ME) οι προσομοιώσεις EURO-CORDEX υποεκτιμούν τις χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ η προσομοίωση LUCAS φαίνεται να συμφωνεί περισσότερο με τις παρατηρήσεις. Επιπλέον, οι EURO-CORDEX υπερεκτιμούν πάντα τις ακραία υψηλές θερμοκρασίες και υποεκτιμούν τις ακραία χαμηλές. Η καλύτερη χωρική ανάλυση (EURO-CORDEX 0.11°) φαίνεται να βελτιώνει κατά κανόνα τα αποτελέσματα στις ακραίες τιμές της κατανομής της μέσης θερμοκρασίας σε σχέση με την αντίστοιχη χαμηλότερή της (EURO-CORDEX 0.44°) (περιοχές AL, BI, EA, IP, MD).

Για την άνοιξη (Σχήμα 3.5) επικρατεί τελείως διαφορετική εικόνα σε όλες τις υπο-

Q-Q plots
MAM Tmean 1990-2008

Σχήμα 3.5: Q-Q plots για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

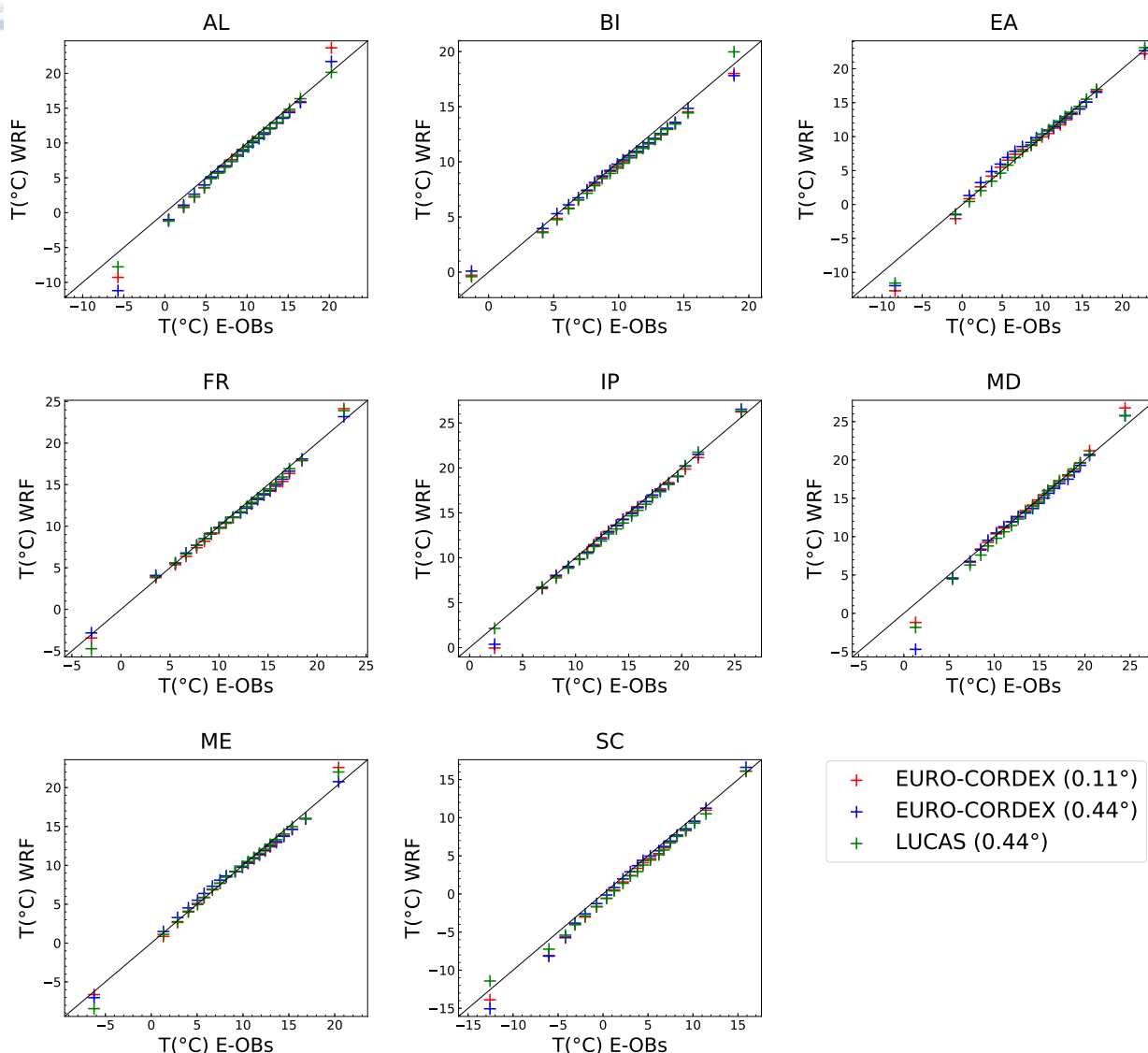
περιοχές της Ευρώπης. Εδώ είναι συστηματική η υποεκτίμηση της θερμοκρασίας από τα μοντέλα στο μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών, εκτός από τις πιο υψηλές που υπερεκτιμώνται σε κάποιες περιοχές. Η συστηματική υποεκτίμηση των χαμηλών θερμοκρασιών (π.χ. AL, MD, ME) και από τις τρεις προσομοιώσεις δηλώνει γενικό σφάλμα του μοντέλου που δεν έχει βελτιωθεί από τις διαφορετικές παραμετροποιήσεις. Η προσομοίωση EURO-CORDEX 0.44° παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση από τη διαγώνιο και η LUCAS τη μικρότερη στις περισσότερες περιπτώσεις, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η διαμόρφωση συνεισφέρει στη βελτίωση του αποτελέσματος για τη μέση θερμοκρασία την άνοιξη. Η χωρική ανάλυση 0.11° του EURO-CORDEX πολλές φορές συμπίπτει με την 0.44°, αλλά φαίνεται να βελτιώνει τα αποτελέσματα στις υψηλές τιμές θερμοκρασίας

Q-Q plots
JJA Tmean 1990-2008

Σχήμα 3.6: Q-Q plots για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

(π.χ. MD, AL).

Για το καλοκαίρι (Σχήμα 3.6) το σήμα είναι ακόμα πιο ξεκάθαρο. Σε όλες τις περιοχές η προσομοίωση LUCAS είναι πιο αντιπροσωπευτική των παρατηρήσεων, ενώ οι EURO-CORDEX βρίσκονται αρκετά κάτω από τη διαγώνιο. Οι χαμηλές τιμές θερμοκρασίας της EURO-CORDEX στην Ιβηρική και τη Μεσόγειο βελτιώθηκαν με την αλλαγή της διαμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι σχετίζονταν με συγκεκριμένες διαδικασίες που βελτιώθηκαν με την αλλαγή του αντίστοιχου σχήματος παραμετροποίησης. Ακόμη, σε κάποιες περιπτώσεις (MD, AL, ME, EA) η 0.11° δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την 0.44° . Συνεπώς, μπορεί να εξαχθεί το

Q-Q plots
SON Tmean 1990-2008

Σχήμα 3.7: Q-Q plots για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

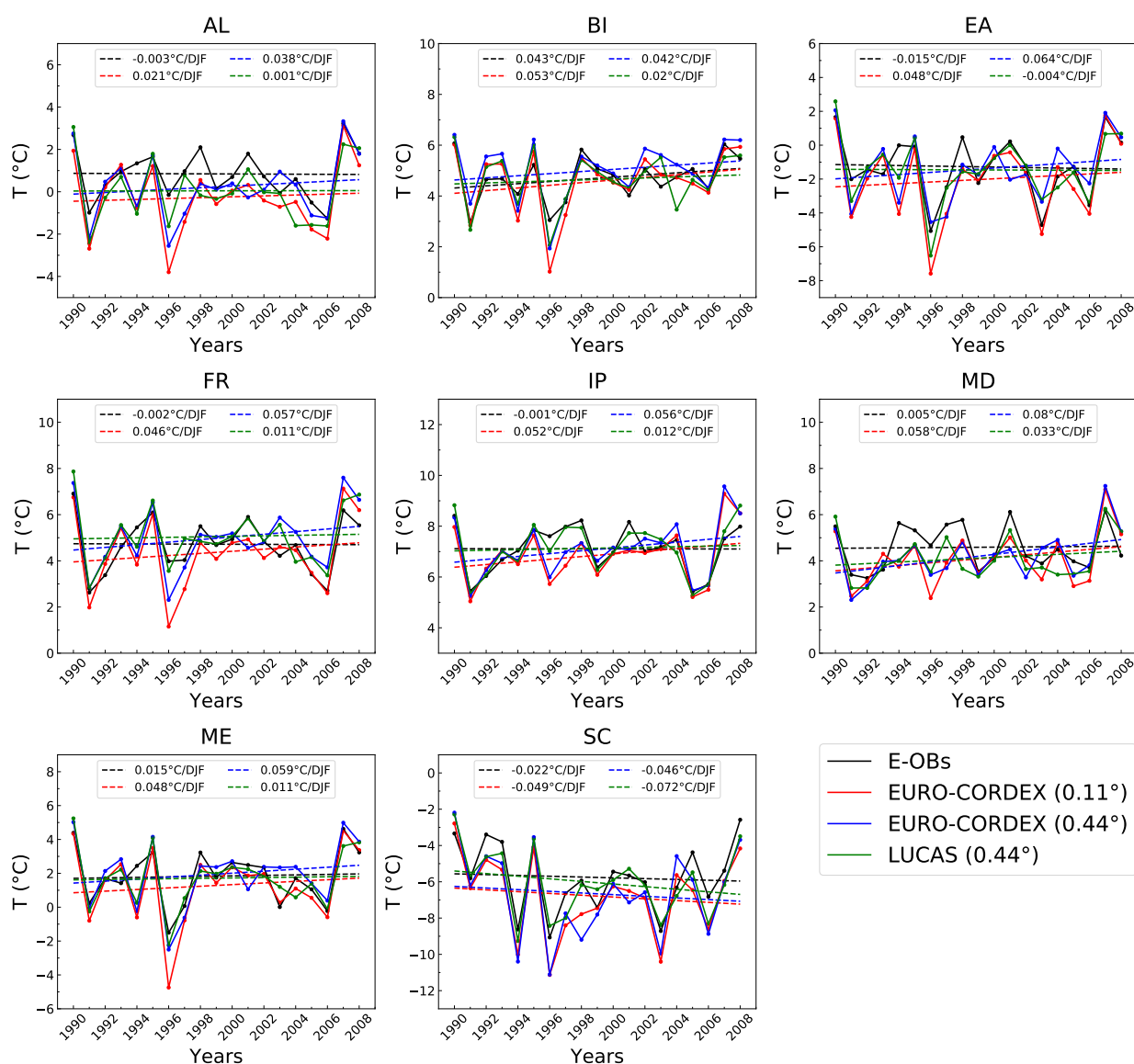
συμπέρασμα ότι οι αλλαγές στις παραμετροποιήσεις του μοντέλου παίζουν πολύ πιο καθοριστικό ρόλο από τη διαφορά στη χωρική ανάλυση στην περίπτωση της θερινής μέσης θερμοκρασίας.

Τέλος, το φθινόπωρο (Σχήμα 3.7) η συμπεριφορά είναι πολύ παρόμοια για όλες τις προσομοιώσεις. Σε όλες τις περιοχές και οι τρεις βρίσκονται πολύ κοντά ή και πάνω στη γραμμή των παρατηρήσεων, δηλαδή τις έχουν προσεγγίσει σε αρκετά καλό βαθμό, τουλάχιστον στο κύριο τμήμα της κατανομής. Φαίνεται ωστόσο, ότι οι ακραία χαμηλές (υψηλές) θερμοκρασίες υποεκτιμώνται (υπερεκτιμώνται) τις περισσότερες φορές και από τις τρεις προσομοιώσεις, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων.

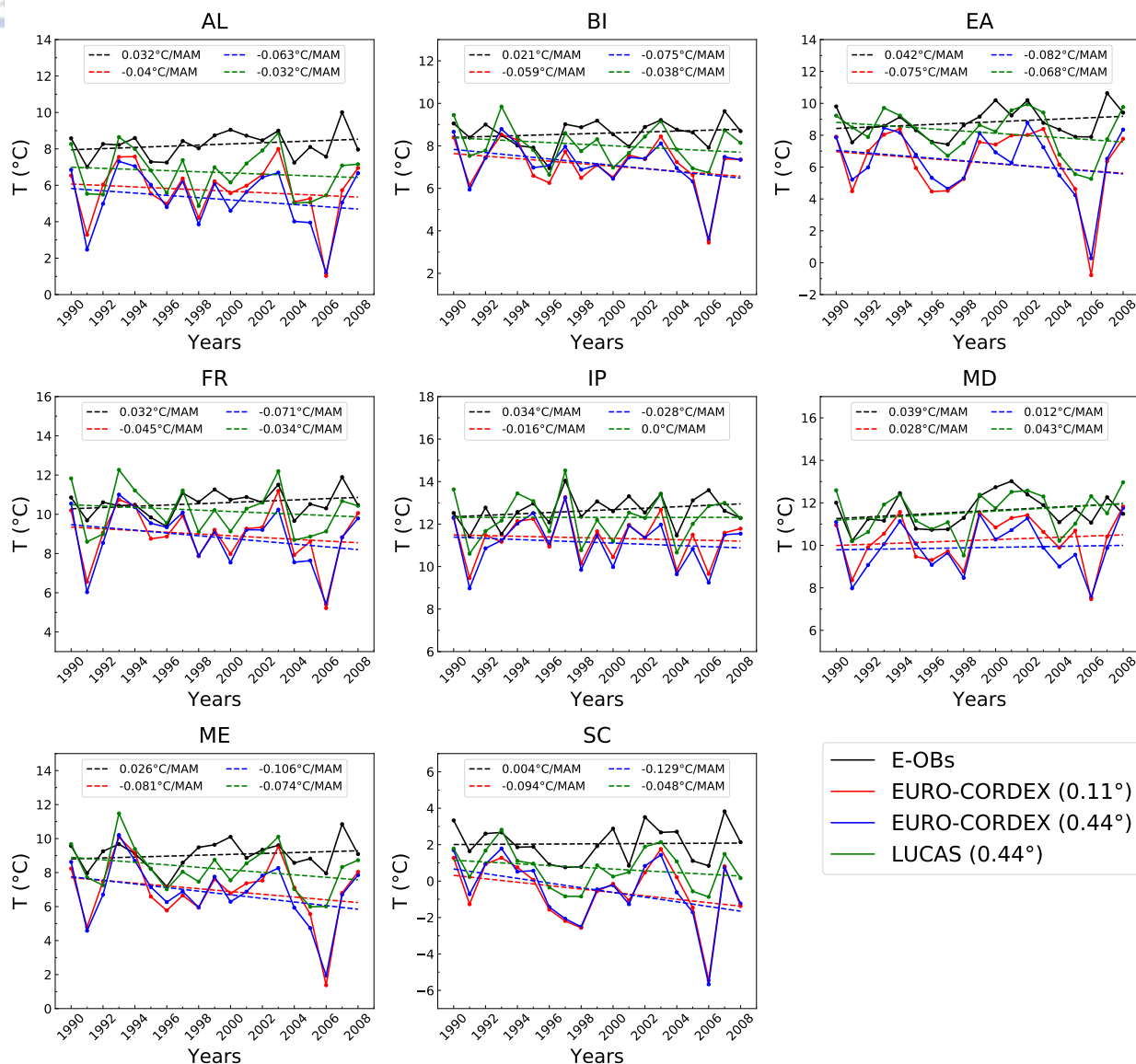
3.1.1.5 Χρονοσειρές & Τάσεις

Στα σχήματα που ακολουθούν (3.8-3.11) απεικονίζονται τα διαγράμματα της μέσης εποχικής θερμοκρασίας συναρτήσει του έτους για κάθε εποχή και κάθε υποπεριοχή της Ευρώπης. Οι τιμές θερμοκρασίας αποτελούν μέσους όρους των τριών μηνών της αντίστοιχης εποχής για κάθε έτος. Οι χρωματιστές γραμμές αναφέρονται στις διαφορετικές προσομοιώσεις, ενώ η μαύρη στις παρατηρήσεις και οι αντίστοιχες διακεκομμένες αποτελούν τις τάσεις των χρονοσειρών οι οποίες αναγράφονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.3. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να διερευνηθεί κατά πόσο τα μοντέλα

Timeseries & Trends
DJF Tmean 1990-2008



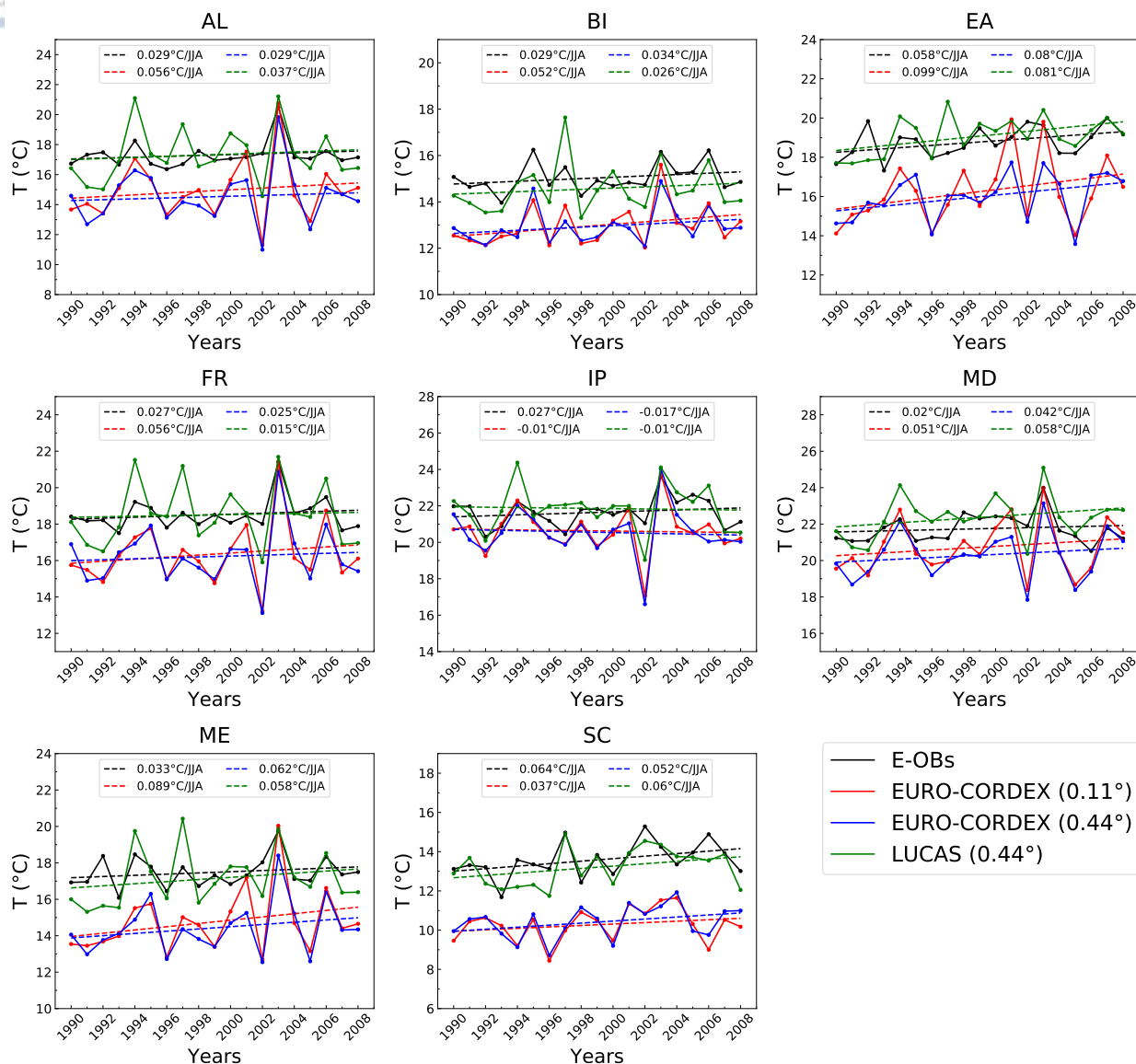
Σχήμα 3.8: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

Timeseries & Trends
MAM Tmean 1990-2008

Σχήμα 3.9: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

συμφωνούν ή διαφωνούν ως προς τις τάσεις τους με τις παρατηρήσεις. Επιπλέον, να μελετηθεί αν η διαφορά στη χωρική ανάλυση από τη μία και στη διαμόρφωση μοντέλου από την άλλη, επιφέρει βελτίωση στις τάσεις.

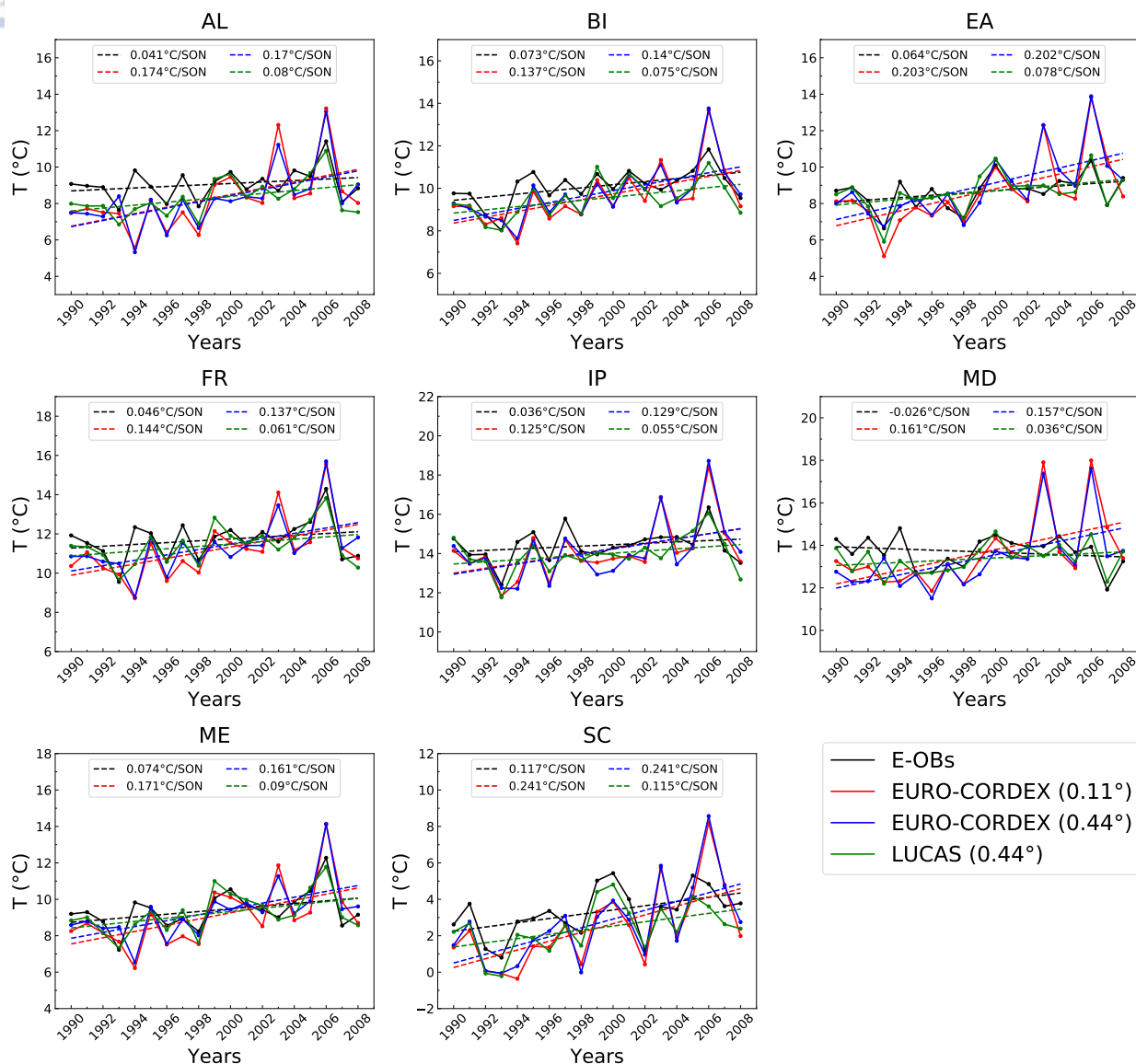
Για τη μέση θερμοκρασία το χειμώνα (Σχήμα 3.8), οι τρεις προσομοιώσεις συμφωνούν με τις παρατηρήσεις ως προς το πρόσημο της τάσης για τις περιοχές των Βρετανικών Νήσων, της Μεσογείου, της κεντρικής Ευρώπης και Σκανδιναβίας (BI, MD, ME, SC), ενώ η LUCAS συμφωνεί επιπλέον και για την ανατολική Ευρώπη (EA). Στις ίδιες περιοχές, εκτός Μεσογείου, όλες παρουσιάζουν επιπλέον συμφωνία ως προς την τάξη μεγέθους. Την άνοιξη (Σχήμα 3.9) υπάρχει συμφωνία μοντέλων-παρατηρήσεων

Timeseries & Trends
JJA Tmean 1990-2008

Σχήμα 3.10: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

μόνο για την περιοχή της Μεσογείου, τόσο ως προς το πρόσημο όσο και την τάξη μεγέθους. Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.10) υπάρχει συμφωνία και για τα τρία μοντέλα για όλες τις περιοχές εκτός της Ιβηρικής (πρόσημο και τάξη). Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.11) όλες οι προσομοιώσεις συμφωνούν ως προς το πρόσημο σε όλες τις περιοχές εκτός από τη Μεσόγειο. Ως προς την τάξη μεγέθους, οι προσομοιώσεις EURO-CORDEX συμφωνούν με τις παρατηρήσεις μόνο για τη Σκανδιναβία, ενώ αντίθετα η LUCAS συμφωνεί για όλες τις περιοχές πλην της Μεσογείου. Φαίνεται λοιπόν, ότι η διαφορά στη διαμόρφωση είναι μεγάλη μόνο για το φθινόπωρο, ενώ διαφορά λόγω χωρικής ανάλυσης δεν διακρίνεται σε καμία εποχή για τη μέση θερμοκρασία.

Timeseries & Trends SON Tmean 1990-2008



Σχήμα 3.11: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέση θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

Πίνακας 3.3: Τάσεις της μέσης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}/\text{εποχή}$) ανά υποπεριοχή για τις τρεις προσομοιώσεις (EURO-CORDEX 0.44 $^{\circ}$, 0.11 $^{\circ}$ & LUCAS) και τις παρατηρήσεις (E-OBs).

Trends Tmean [$^{\circ}\text{C}/\text{DJF}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.038	0.021	0.001	-0.003
BI	0.042	0.053	0.020	0.043
EA	0.064	0.048	-0.004	-0.015
FR	0.057	0.046	0.011	-0.002
IP	0.056	0.052	0.012	-0.001
MD	0.080	0.058	0.033	0.005
ME	0.059	0.048	0.011	0.015
SC	-0.046	-0.049	-0.072	-0.022

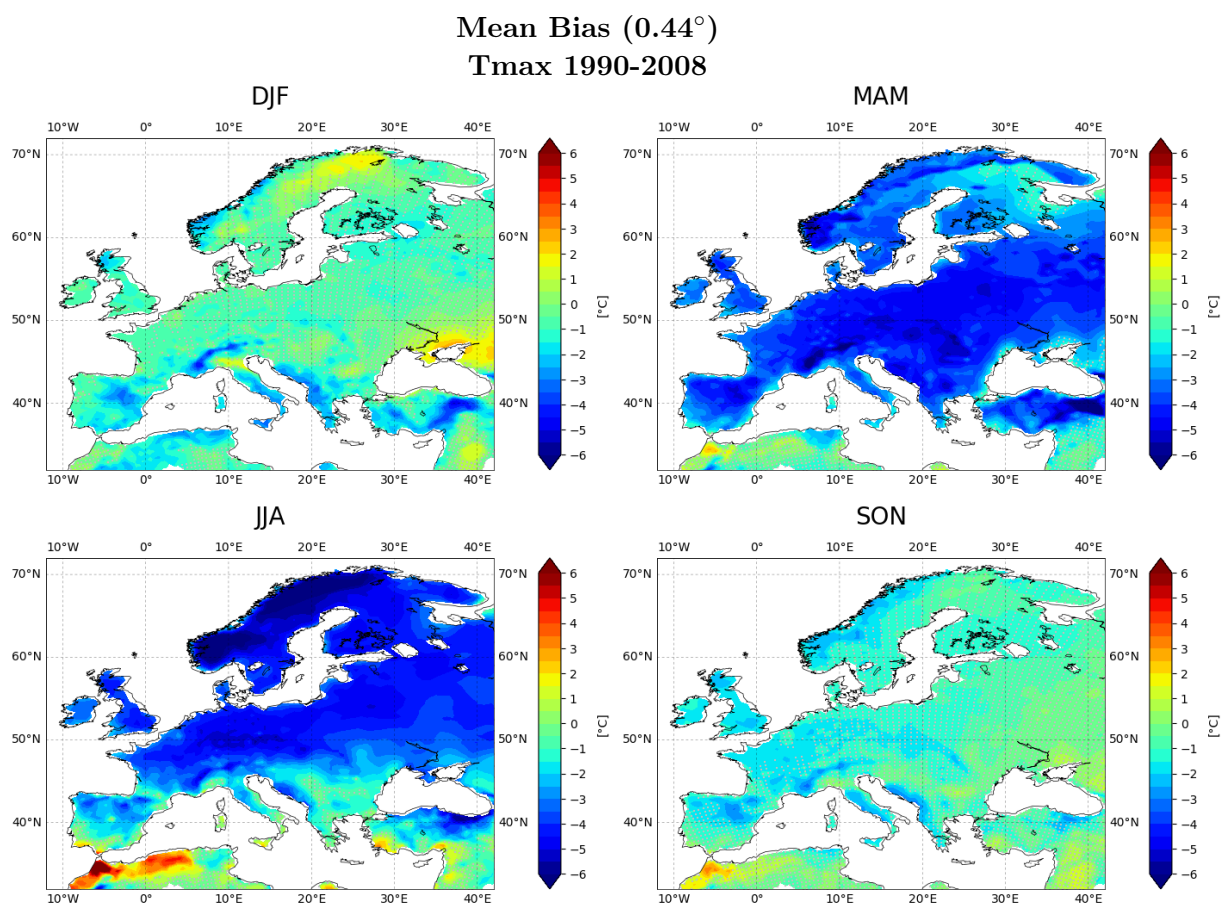
Trends Tmean [$^{\circ}\text{C}/\text{MAM}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	-0.063	-0.040	-0.032	0.032
BI	-0.075	-0.059	-0.038	0.021
EA	-0.082	-0.075	-0.068	0.042
FR	-0.071	-0.045	-0.034	0.032
IP	-0.028	-0.016	0.000	0.034
MD	0.012	0.028	0.043	0.039
ME	-0.106	-0.081	-0.074	0.026
SC	-0.129	-0.094	-0.048	0.004

Trends Tmean [$^{\circ}\text{C}/\text{JJA}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.029	0.056	0.037	0.029
BI	0.034	0.052	0.026	0.029
EA	0.080	0.099	0.081	0.058
FR	0.025	0.056	0.015	0.027
IP	-0.017	-0.010	-0.010	0.027
MD	0.042	0.051	0.058	0.020
ME	0.062	0.089	0.058	0.033
SC	0.052	0.037	0.060	0.064

	Trends Tmean [°C/SON]			
	0.44°	0.11°	LUCAS	E-OBs
AL	0.170	0.174	0.080	0.041
BI	0.140	0.137	0.075	0.073
EA	0.202	0.203	0.078	0.064
FR	0.137	0.144	0.061	0.046
IP	0.129	0.125	0.055	0.036
MD	0.157	0.161	0.036	-0.026
ME	0.161	0.171	0.090	0.074
SC	0.241	0.241	0.115	0.117

3.1.2 Μέγιστη Θερμοκρασία

3.1.2.1 Μέσο Bias (0.44°)



Σχήμα 3.12: Μέσο bias (WRF-EOBs) της μέγιστης θερμοκρασίας (°C) στο πλέγμα του WRF (0.44°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Το Σχήμα 3.12 απεικονίζει το μέσο bias για τη μέγιστη θερμοκρασία κατά την περίοδο 1990-2008 σε χωρική ανάλυση 0.44° και ο Πίνακας 3.4 τις τιμές του bias για κάθε εποχή και υποπεριοχή. Το χειμώνα και το φθινόπωρο οι τιμές του bias είναι σχετικά μικρές σε όλη την Ευρώπη (-1.3°C), με εξαιρέσεις τις Ευρωπαϊκές και Δειναρικές Άλπεις (και την προέκτασή τους μέχρι την Ελλάδα), τα Απέννινα Όρη και τα Πυρηναία (φτάνουν έως -1.8°C). Την άνοιξη και το καλοκαίρι το μοντέλο εμφανίζεται πολύ ψυχρότερο από τις παρατηρήσεις, με εκτεταμένο ψυχρό bias σε όλη την Ευρώπη την άνοιξη και στο μεγαλύτερο τμήμα αυτής το καλοκαίρι (πλην τμημάτων των Μεσογειακών χωρών). Οι τιμές του bias κυμαίνονται κατά μέσο όρο στους -3.4°C τη θερμή περίοδο, ενώ περιοχικά φτάνουν υψηλότερες τιμές (EA: -4.5°C, AL: -4.4°C, MD: -4.3°C την άνοιξη και SC: -4.7°C, MD: -4.5°C το καλοκαίρι). Οι μικρότερες τιμές το καλοκαίρι εμφανίζονται στη Μεσόγειο (-1.0°C) και την Ιβηρική Χερσόνησο (-1.3°C). Συμπερασματικά, την άνοιξη το μοντέλο εμφανίζεται πολύ ψυχρό σε όλες τις περιοχές (<-3.1°C), ενώ το καλοκαίρι μειώνεται το ψυχρό bias στη Νότια Ευρώπη (~2°C). Επιπλέον, σε όλες τις εποχές το μοντέλο εμφανίζεται συστηματικά πιο ψυχρό στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο (π.χ. Άλπεις, Απέννινα, Πυρηναία).

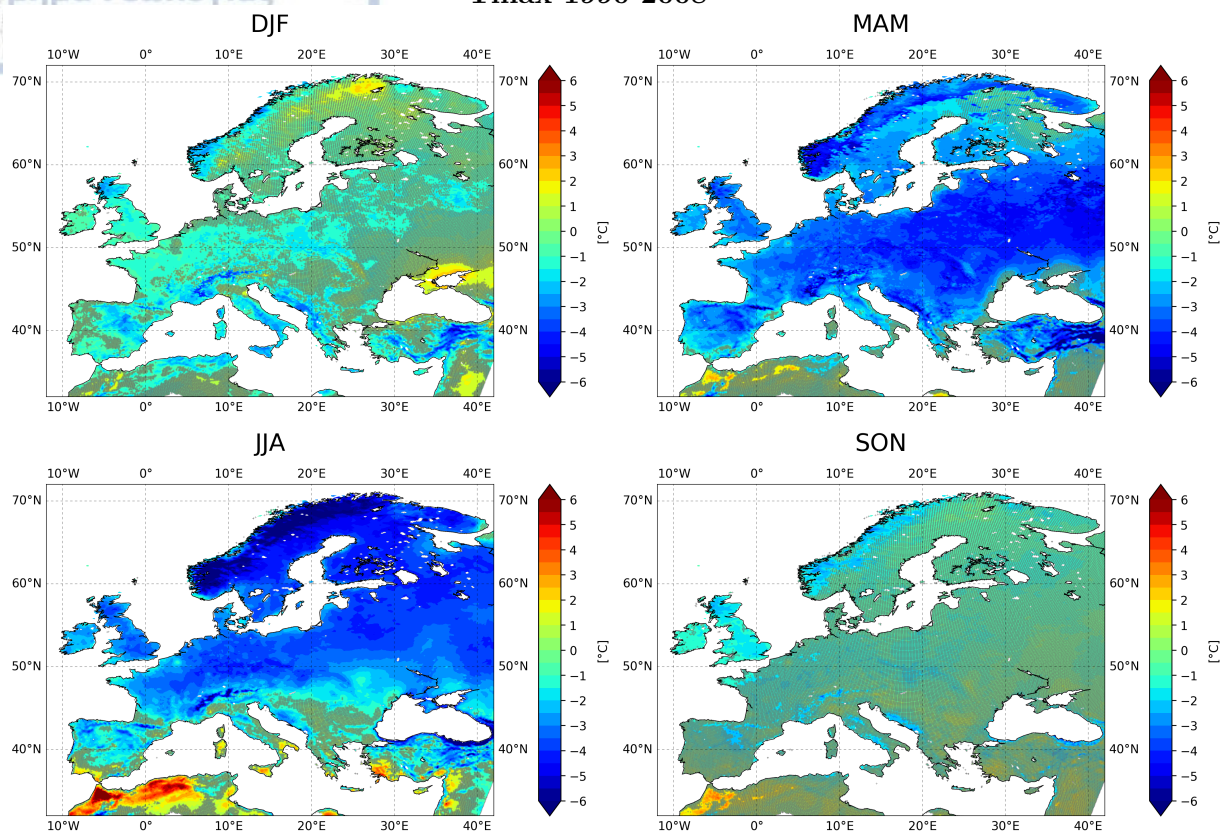
Πίνακας 3.4: Μέσο bias (°C) της μέγιστης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.44° για την περίοδο 1990-2008.

Bias Tmax 0.44° [°C]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-1.3	-4.4	-3.2	-1.5	-2.6
BI	-0.9	-3.2	-3.5	-1.7	-2.3
EA	-0.7	-4.5	-3.4	-1.0	-2.4
FR	-0.9	-3.6	-3.3	-1.7	-2.4
IP	-1.4	-3.1	-1.3	-1.3	-1.8
MD	-1.8	-3.1	-1.0	-1.3	1.8
ME	-0.8	-4.3	-4.5	-1.5	-2.8
SC	-0.7	-3.2	-4.7	-1.2	-2.5
seasonal average	-1.1	-3.7	-3.1	-1.4	

3.1.2.2 Μέσο Bias (0.11°)

Στην υψηλότερη ανάλυση (Σχήμα 3.13) τα bias φαίνεται να περιορίζονται χωρικά σε μικρότερες περιοχές. Το χειμώνα, ψυχρά bias διαγράφουν τις περιοχές της πολύ-πλοκης ορογραφίας με περισσότερη λεπτομέρεια απ' ότι στην ανάλυση 0.44°. Κατά την ψυχρή περίοδο η μέση τιμή του bias αλλάζει από -1.3°C στην χαμηλή ανάλυση σε -1.1°C στην υψηλή. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5, ο χειμώνας και στις δύο αναλύσεις

Mean Bias (0.11°)
Tmax 1990-2008



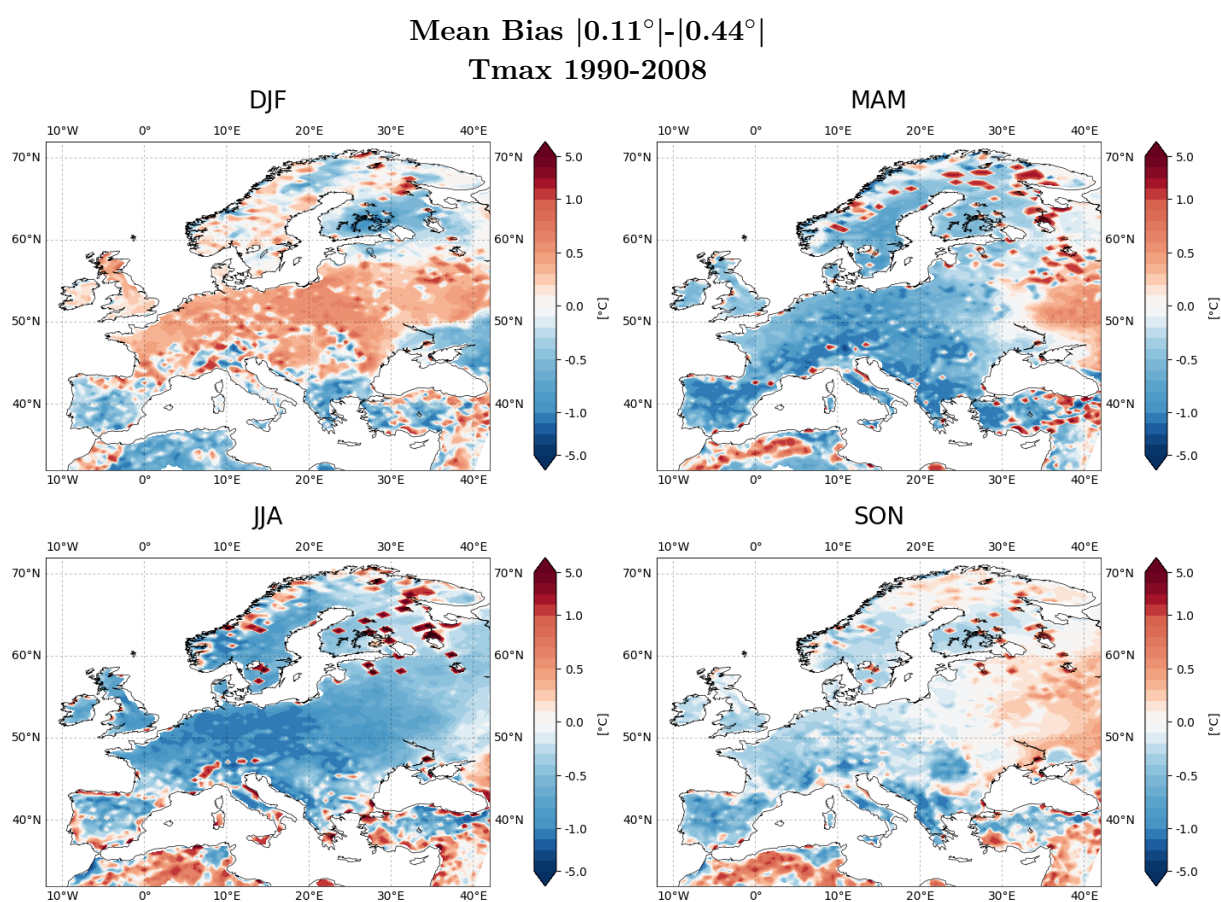
Σχήμα 3.13: Μέσο bias (WRF-EOBs) της μέγιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα του WRF (0.11°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι σκούρες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Πίνακας 3.5: Μέσο bias ($^{\circ}\text{C}$) της μέγιστης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.11° για την περίοδο 1990-2008.

Bias Tmax 0.11° [$^{\circ}\text{C}$]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-1.4	-3.4	-2.5	-0.9	-2.1
BI	-1.1	-2.7	-2.8	-1.5	-2.0
EA	-1.0	-3.9	-2.6	-0.8	-2.1
FR	-1.1	-2.9	-2.6	-1.3	-2.0
IP	-1.2	-2.3	-0.9	-0.8	-1.3
MD	-1.5	-2.3	-0.5	-0.7	-1.3
ME	-1.1	-3.5	-3.4	-1.2	-2.3
SC	-0.6	-2.8	-4.2	-1.1	-2.2
seasonal average	-1.1	-3.0	-2.4	-1.0	

εμφανίζει ίδια μέση τιμή bias (αν και περιοχικά υπάρχουν διαφορές), σε αντίθεση με το φθινόπωρο στο οποίο η μέση τιμή μειώθηκε στην υψηλή ανάλυση κατά 0.4°C . Κατά τη θερμή περίοδο υπάρχει αισθητή μείωση του bias: από -3.4°C που ήταν στα 0.44° έγινε -2.7°C στα 0.11° . Αξιοσημείωτο είναι ότι και την άνοιξη και το καλοκαίρι υπήρχε μείωση του bias στην υψηλή χωρική ανάλυση σε όλες τις περιοχές της Ευρώπης. Η μείωση ξεκινά από 0.4°C και φτάνει έως 1.1°C στην κεντρική Ευρώπη το καλοκαίρι. Οι μικρές τιμές bias που υπήρχαν στη νότια Ευρώπη το καλοκαίρι, στην υψηλή ανάλυση μειώνονται περαιτέρω (IP: -0.9°C , MD: -0.5°C).

3.1.2.3 Διαφορές μέσου bias (0.11° - 0.44°)



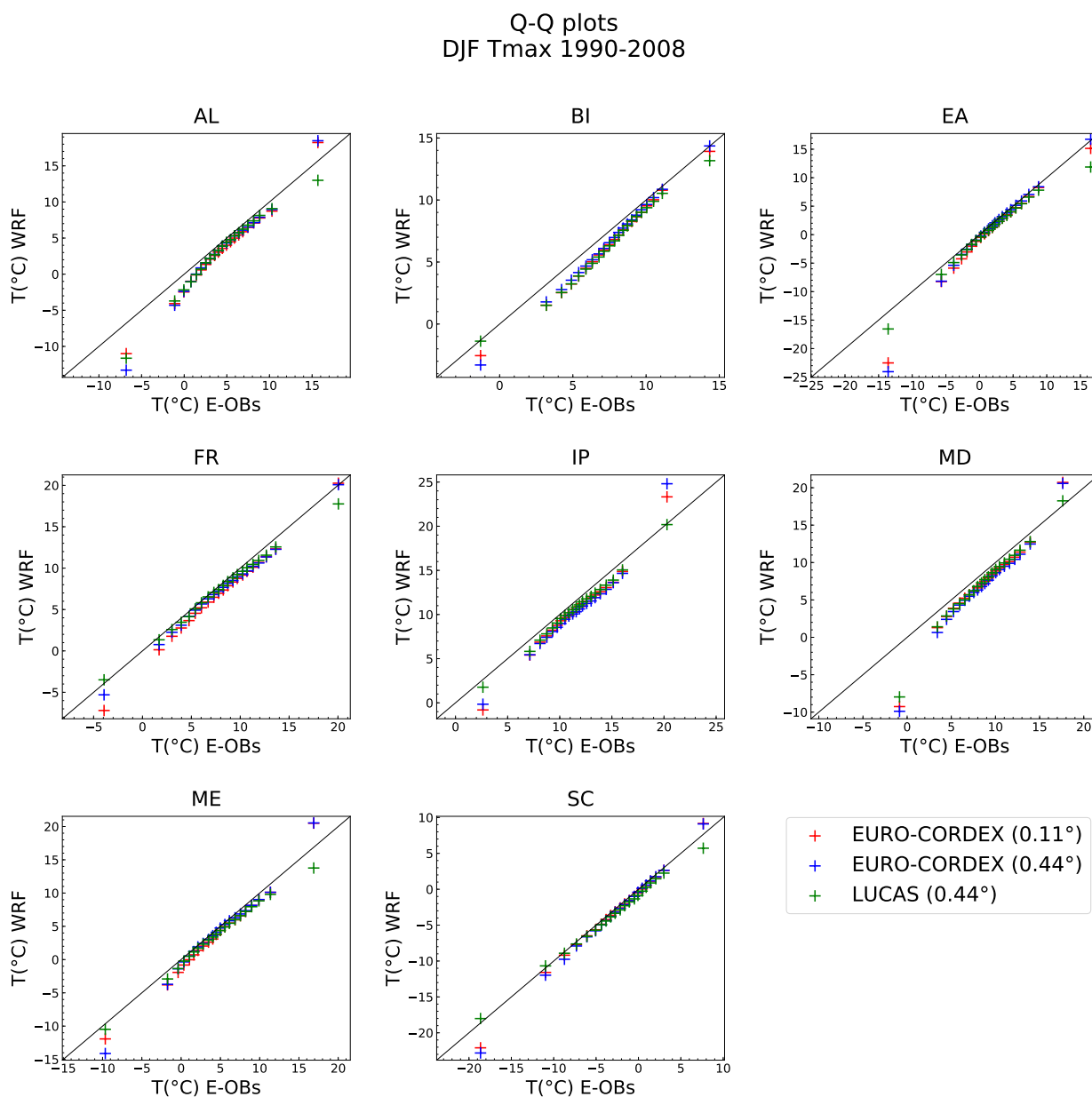
Σχήμα 3.14: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.11^{\circ}}| - |MB_{0.44^{\circ}}|$) της μέγιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα των 0.44° ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008.

Στο Σχήμα 3.14 φαίνονται οι διαφορές των απόλυτων τιμών bias στις δύο χωρικές αναλύσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία. Φανερή βελτίωση (μπλε χρώμα) στο bias της υψηλότερης ανάλυσης (0.11°) σε σχέση με τη χαμηλότερη (0.44°), υπάρχει την άνοιξη και το καλοκαίρι. Το φθινόπωρο υπάρχει επίσης μείωση στο bias της υψηλής ανάλυσης, ενώ το χειμώνα κάποιες περιοχές εμφανίζουν μεγαλύτερο bias στα 0.11° (κυρίως στη ζώνη γεωγραφικών πλατών $45-60^{\circ}$). Επιπλέον, το χειμώνα οι περιοχές κυρίως της νότιας Ευρώπης εμφανίζουν μικρότερο σφάλμα στα 0.11° (IP, MD). Συμπερασματικά,

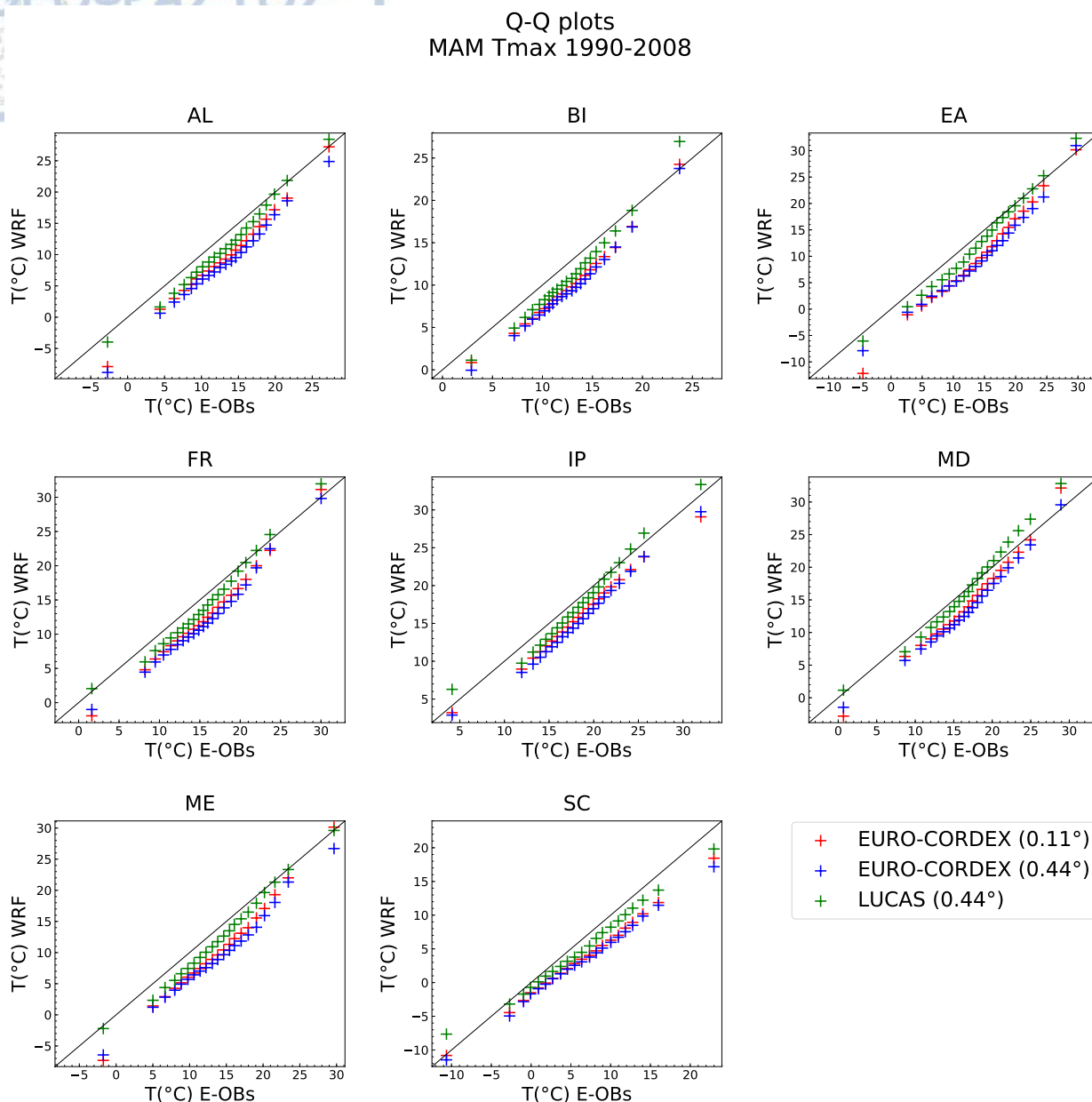
τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τη μέγιστη θερμοκρασία η ανάλυση 0.11° βελτιώνει αρκετά τα αποτελέσματα σε όλες τις εποχές εκτός του χειμώνα, στον οποίο υπάρχει μείωση και αύξηση του σφάλματος ανάλογα με την περιοχή.

3.1.2.4 Q-Q plots

Από τα q-q plots του χειμώνα (Σχήμα 3.15) είναι φανερό ότι σε όλες σχεδόν τις περιοχές της Ευρώπης παρατηρείται υποεκτίμηση της μέγιστης θερμοκρασίας στο κύριο τμήμα της κατανομής. Για τις Άλπεις και τις Βρετανικές Νήσους η υποεκτί-

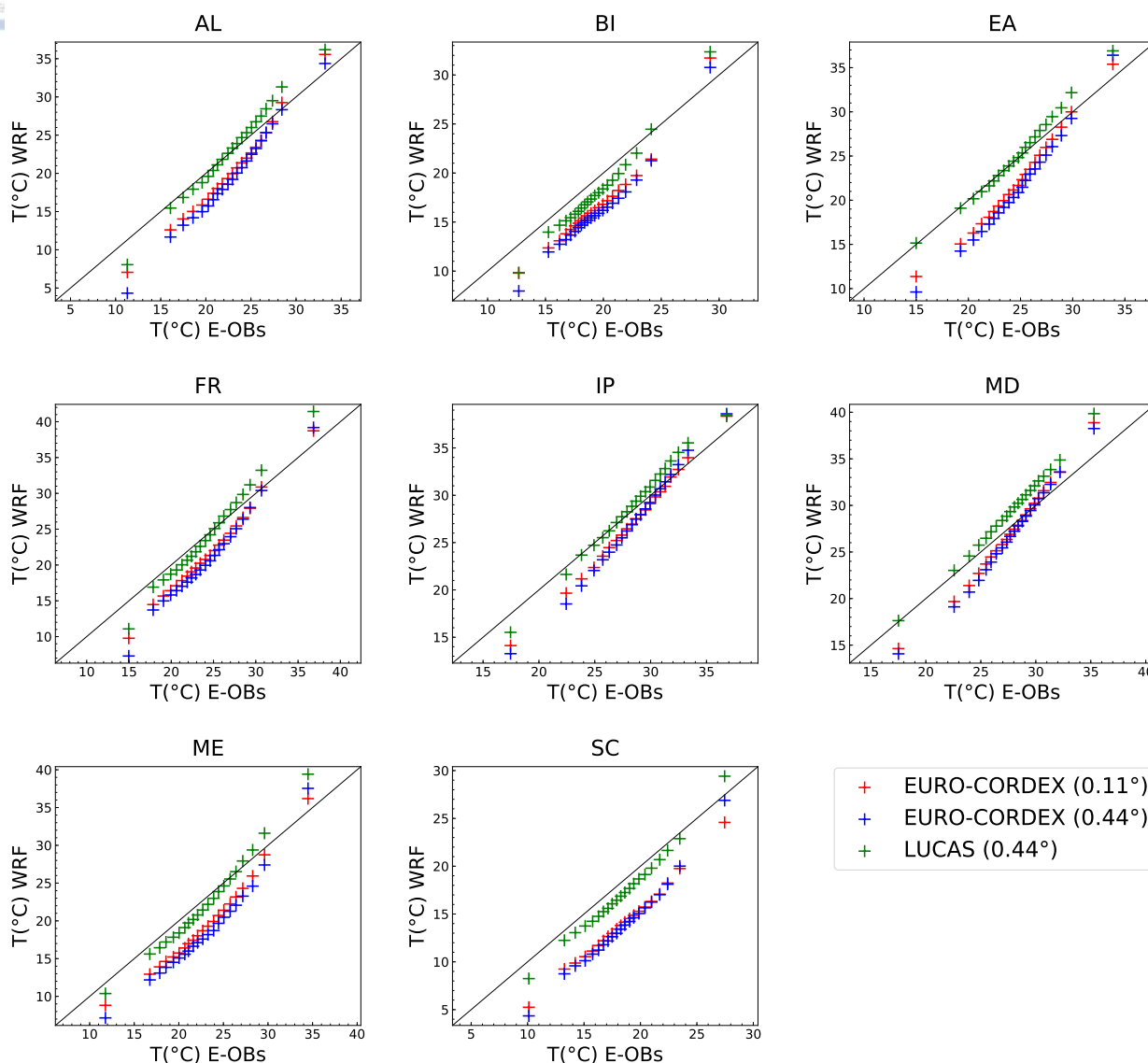


Σχήμα 3.15: Q-Q plots για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.



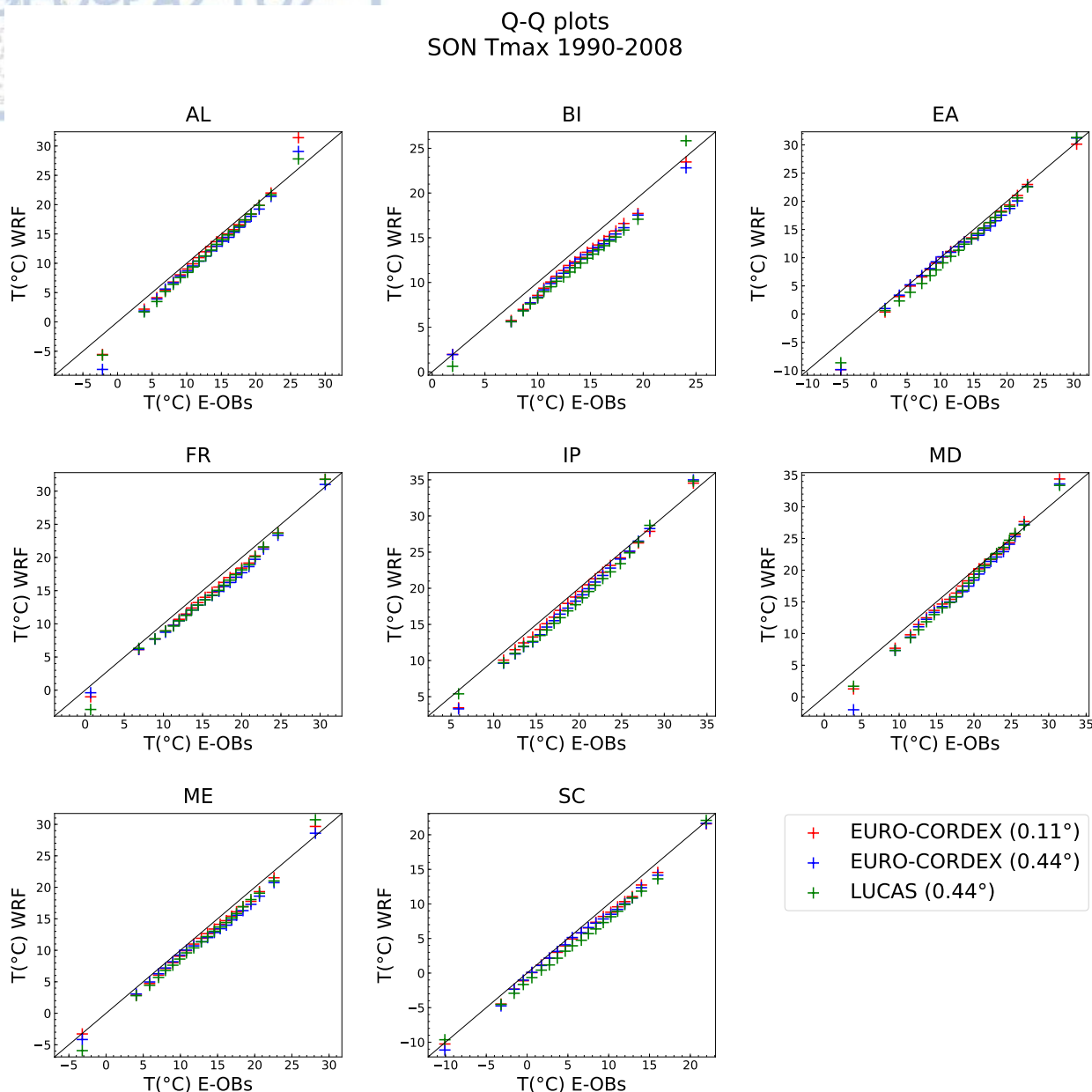
Σχήμα 3.16: Q-Q plots για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

μηση είναι μεγαλύτερη για τις μικρότερες θερμοκρασίες, ενώ για τις υπόλοιπες είναι περίπου η ίδια εκτός από τις ακραίες τιμές. Οι προσομοιώσεις EURO-CORDEX υποεκτιμούν τις ακραία χαμηλές τιμές, ενώ υπερεκτιμούν συνήθως τις ακραία υψηλές. Επίσης, δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές ανάμεσα στις τρεις προσομοιώσεις, αλλά σε κάποιες περιοχές η LUCAS είναι πιο αντιπροσωπευτική (FR, IP). Η 0.11° προσομοιώνει καλύτερα τις ακραίες χαμηλές τιμές από την 0.44°, ωστόσο η LUCAS εμφανίζει μικρότερο σφάλμα στην αναπαράσταση των ακραίων στις περισσότερες περιπτώσεις. Η υποεκτίμηση στις χαμηλές τιμές στις Άλπεις είναι συστηματική σε όλες τις προσομοιώσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για γενικό σφάλμα του μοντέλου.

Q-Q plots
JJA Tmax 1990-2008

Σχήμα 3.17: Q-Q plots για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

Την άνοιξη (Σχήμα 3.16) η εικόνα είναι αρκετά πιο ξεκάθαρη. Εδώ φαίνεται ότι σε όλες σχεδόν τις περιοχές η LUCAS πλησιάζει περισσότερο τις παρατηρήσεις και ακολουθεί η EURO-CORDEX 0.11°. Σε όλα τα εύρη των θερμοκρασιών και οι τρεις προσομοιώσεις υποεκτιμούν σταθερά τη μέγιστη θερμοκρασία. Εξαίρεση αποτελούν οι ακραία υψηλές θερμοκρασίες που υπερεκτιμώνται σε πολλές περιοχές. Στην Ιβηρική και τη Μεσόγειο η LUCAS έχει την τάση να υπερεκτιμά τη μέγιστη θερμοκρασία στις υψηλότερες τιμές. Η EURO-CORDEX 0.44° βρίσκεται πιο μακριά από τη διαγώνιο γραμμή από τις τρεις. Η διαφοροποίησή της από την 0.11° είναι πιο αισθητή στις υψηλές τιμές θερμοκρασίας συστηματικά σε όλες τις περιοχές.

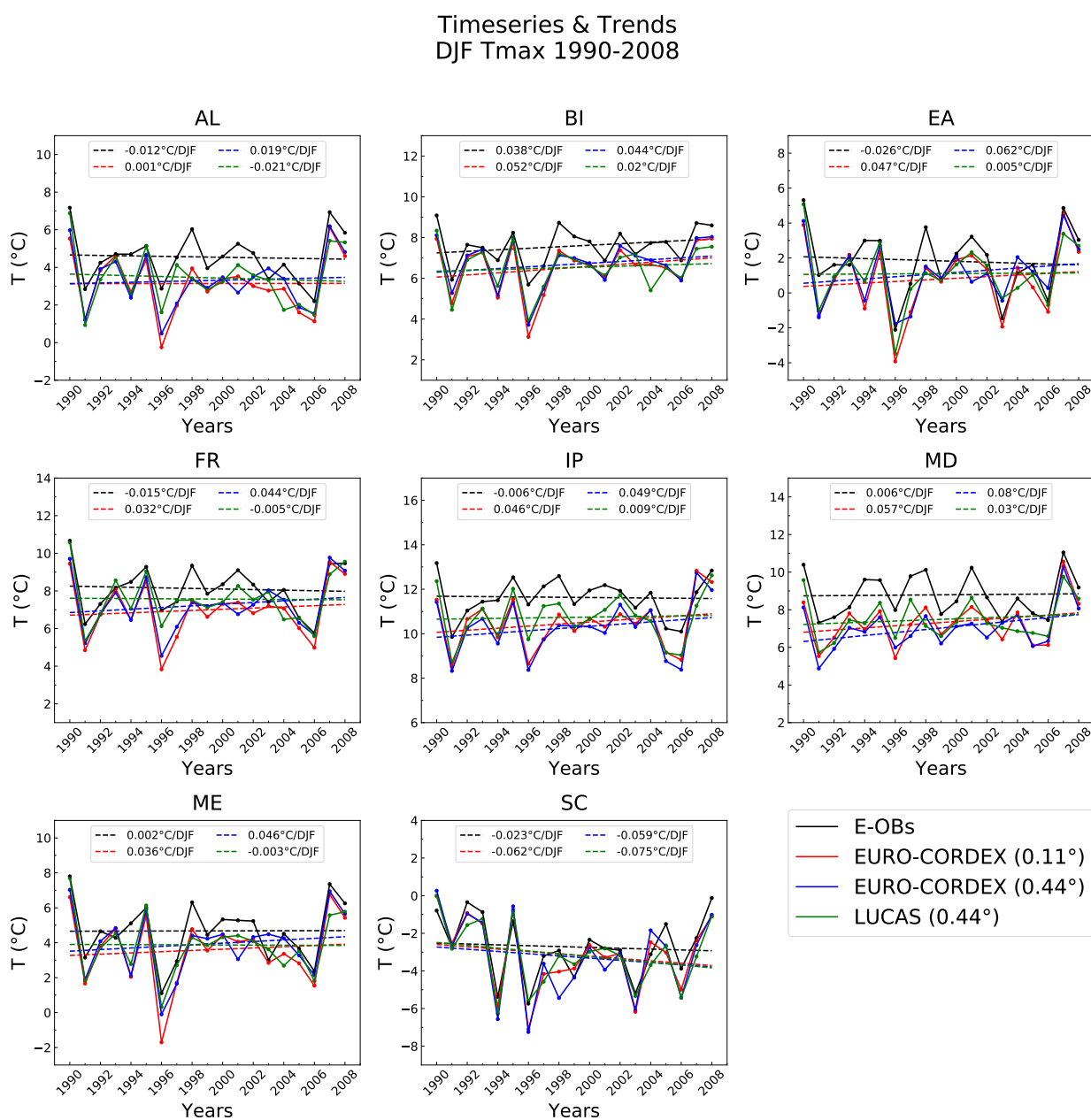


Σχήμα 3.18: Q-Q plots για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

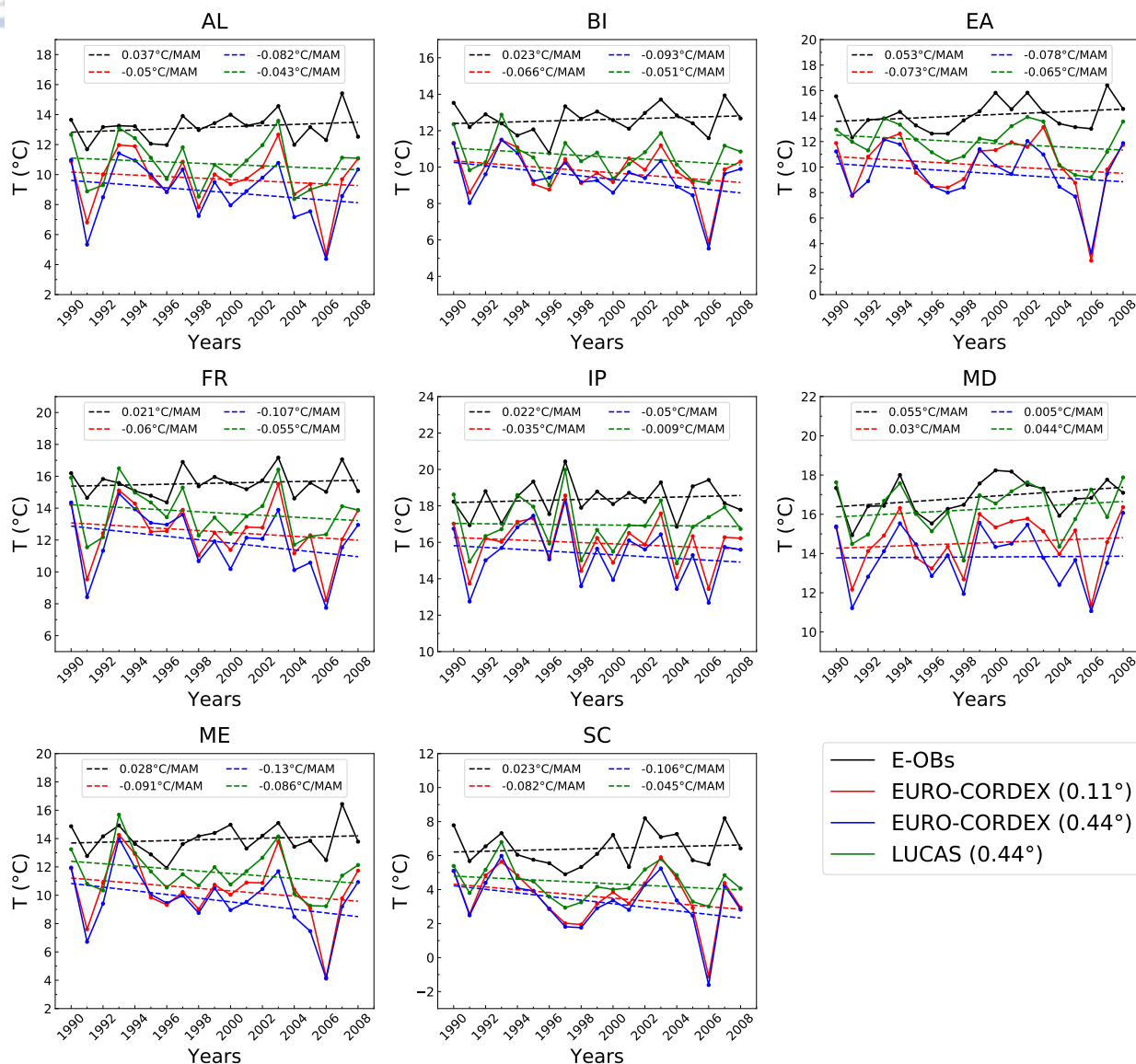
Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.17) εξακολουθεί να υπάρχει υποεκτίμηση της μέγιστης θερμοκρασίας στις περισσότερες περιοχές, ωστόσο η LUCAS τείνει να την υπερεκτιμά στις υψηλές τιμές της κατανομής σε πολλές περιοχές (AL, EA, FR, IP, MD, ME). Αυτό το χαρακτηριστικό είναι κοινό και για τις προσομοιώσεις EURO-CORDEX στις περιοχές της Ιβηρικής και της Μεσογείου. Η LUCAS βρίσκεται πιο κοντά στη διαγώνιο στις περισσότερες περιοχές, εκτός από τις δύο της νότιας Ευρώπης (IP, MD) στις οποίες εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα από τις EURO-CORDEX στις υψηλές τιμές. Επιπλέον, η 0.11° προσομοιώνει καλύτερα τη μέγιστη θερμοκρασία από την αντίστοιχή της στα 0.44° (π.χ. BI, FR, ME). Όσον αφορά τα ακραία η 0.11° είναι πιο αντιπροσωπευτική, τουλάχιστον για τις ακραία χαμηλές τιμές.

Στο Σχήμα 3.18 που αναφέρεται στο φθινόπωρο, τα αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις EURO-CORDEX και LUCAS είναι συγκρίσιμα. Στις περισσότερες περιοχές η 0.11° είναι πιο κοντά στις παρατηρήσεις σε σχέση με την 0.44° (IP, BI), ενώ σε άλλες οι διαφορές τους είναι πολύ μικρές (π.χ. EA). Επιλέον, σε όλες τις περιοχές παρατηρείται μικρή υποεκτίμηση από όλες τις προσομοιώσεις σε σχέση με τις παρατηρήσεις σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών, πλην των ακραία υψηλών.

3.1.2.5 Χρονοσειρές & Τάσεις

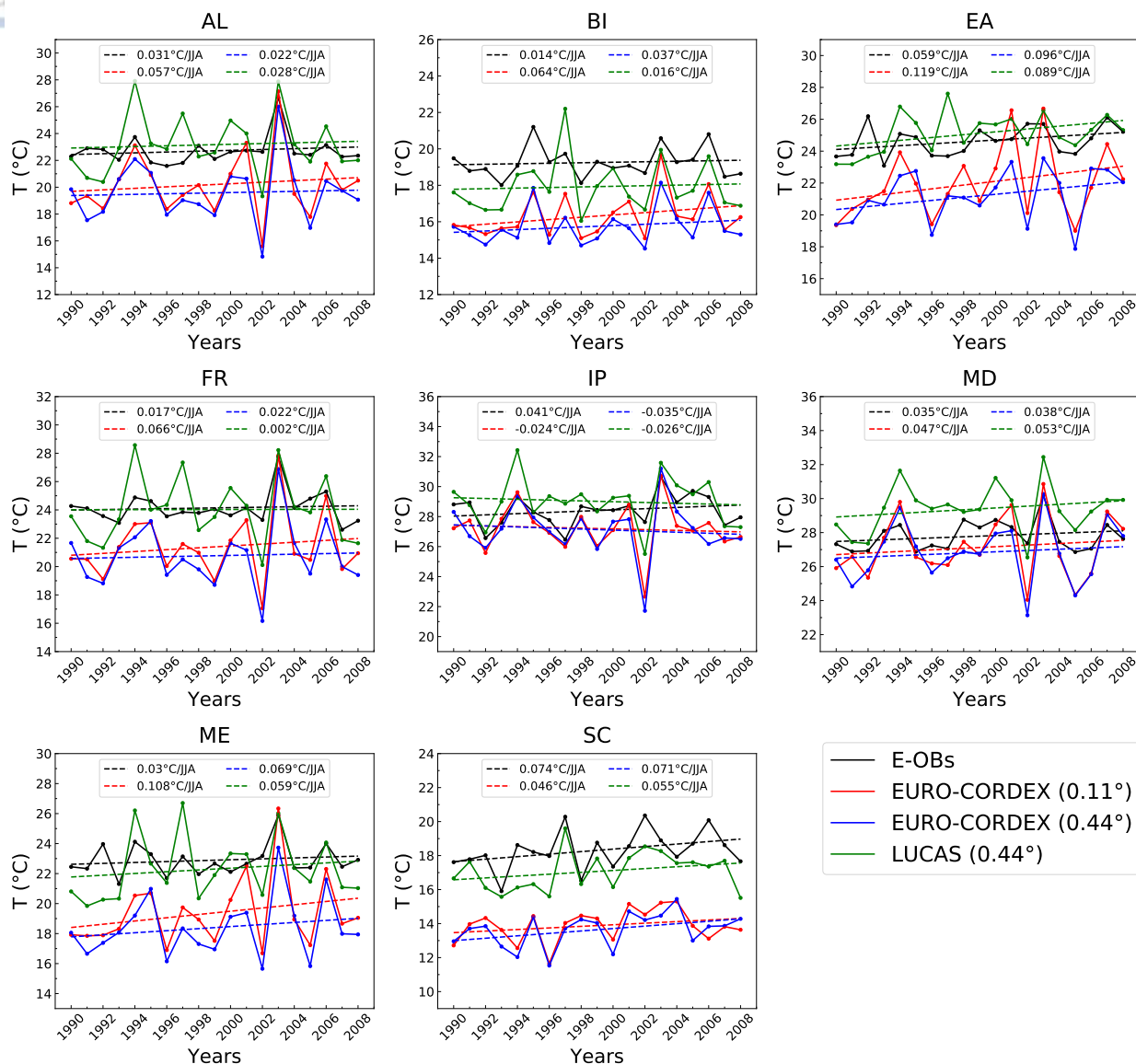


Σχήμα 3.19: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

Timeseries & Trends
MAM Tmax 1990-2008

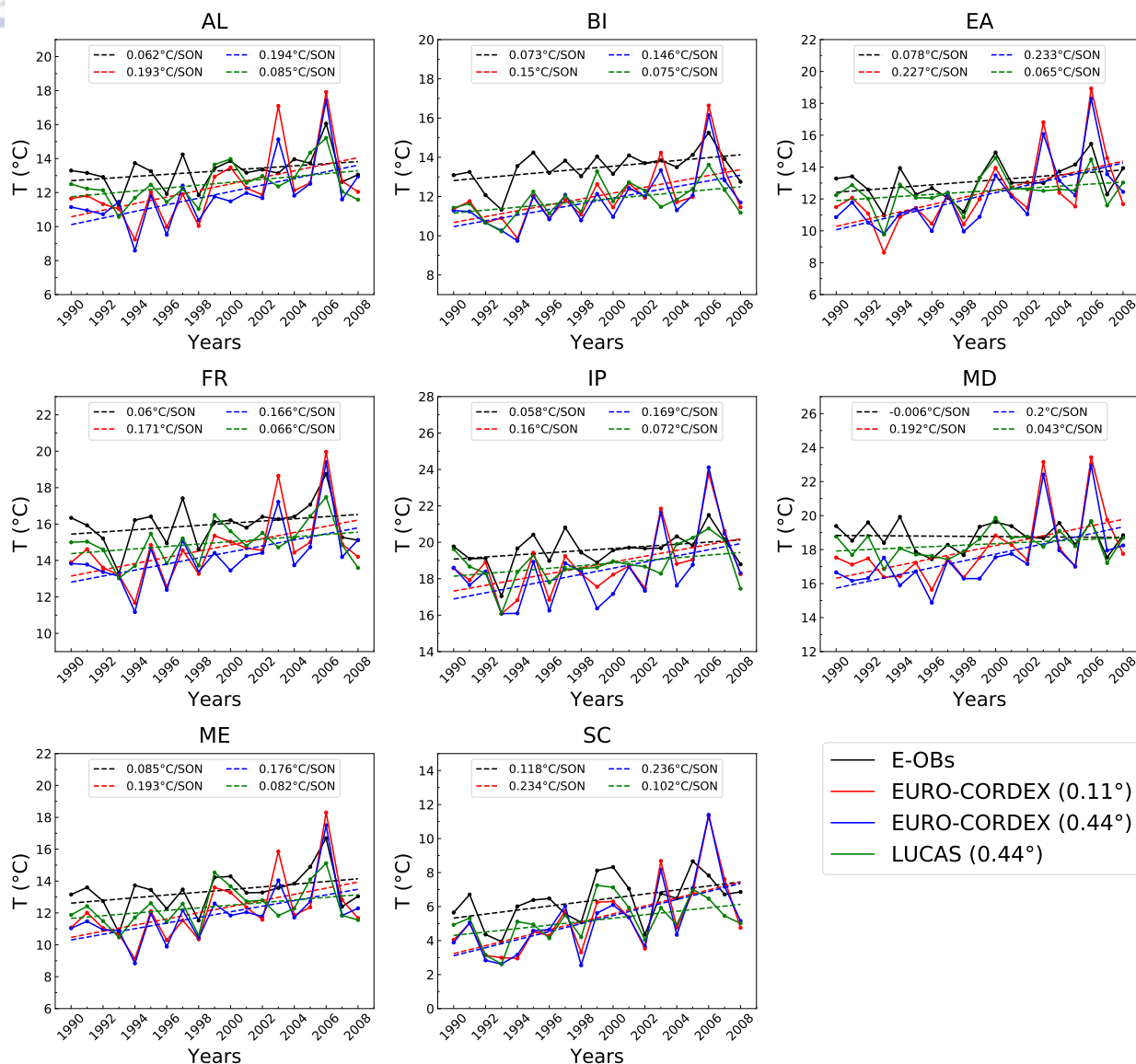
Σχήμα 3.20: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

Οι χρονοσειρές της μέγιστης εποχικής θερμοκρασίας και οι τάσεις τους για κάθε περιοχή απεικονίζονται στα Σχήματα 3.19-3.22. Αναλυτικότερα οι τιμές των τάσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.6. Το χειμώνα (Σχήμα 3.19) οι τάσεις και των τριών προσομοιώσεων συμφωνούν με αυτή των παρατηρήσεων, ως προς το πρόσημο, για τις περιοχές των Βρετανικών νήσων, της Μεσογείου και της Σκανδιναβίας. Επιπλέον, η LUCAS συμφωνεί με τις παρατηρήσεις στις Άλπεις και τη Γαλλία, ενώ η EURO-CORDEX στην κεντρική Ευρώπη. Από αυτές μόνο στις Βρετανικές νήσους και τη Σκανδιναβία υπάρχει επιπλέον συμφωνία ως προς την τάξη μεγέθους της τάσης από όλες τις προσομοιώσεις. Η LUCAS συμφωνεί στην τάξη και στις Άλπεις. Την άνοιξη (Σχήμα 3.20) υπάρχει

Timeseries & Trends
JJA Tmax 1990-2008

Σχήμα 3.21: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

συμφωνία προσήμου της τάσης των μοντέλων και των παρατηρήσεων μόνο για την περιοχή της Μεσογείου, ενώ ως προς την τάξη μεγέθους της τάσης συμφωνούν μόνο οι προσομοιώσεις EURO-CORDEX 0.11° και LUCAS. Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.21) όλες οι προσομοιώσεις συμφωνούν στο πρόσημο της τάσης σε όλες τις περιοχές εκτός της Ιβηρικής. Ως προς την τάξη μεγέθους ωστόσο, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ αυτών. Όλες συμφωνούν στις περιοχές Άλπεις, Βρετανία, Μεσόγειος και Σκανδιναβία. Οι EURO-CORDEX 0.11° και 0.44° συμφωνούν για τη Γαλλία, ενώ η EURO-CORDEX 0.44° και LUCAS συμφωνούν για την ανατολική και κεντρική Ευρώπη. Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.22) όλες οι προσομοιώσεις συμφωνούν στο πρόσημο της τάσης σε όλες τις

Timeseries & Trends
SON Tmax 1990-2008

Σχήμα 3.22: Χρονοσειρές και τάσεις για τη μέγιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

περιοχές, πλην της Μεσογείου. Από αυτές, μόνο στη Σκανδιναβία υπάρχει ταυτόχρονη συμφωνία στην τάξη μεγέθους της τάσης και από τις τρεις. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι η LUCAS συμφωνεί ως προς την τάξη μεγέθους σε όλες τις περιοχές που παρατηρήθηκε συμφωνία στο πρόσημο. Κατά συνέπεια, η LUCAS ξεχωρίζει για τη συμφωνία της στις τάσεις κυρίως το φθινόπωρο και λιγότερο τις άλλες εποχές, ενώ σημαντικές διαφορές για τις δύο χωρικές αναλύσεις δεν υπάρχουν.

Πίνακας 3.6: Τάσεις της μέγιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}/\text{εποχή}$) ανά υποπεριοχή για τις τρεις προσομοιώσεις (EURO-CORDEX 0.44 $^{\circ}$, 0.11 $^{\circ}$ & LUCAS) και τις παρατηρήσεις (E-OBs).

Trends Tmax [$^{\circ}\text{C}/\text{DJF}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.019	0.001	-0.021	-0.012
BI	0.044	0.052	0.020	0.038
EA	0.062	0.047	0.005	-0.026
FR	0.044	0.032	-0.005	-0.015
IP	0.049	0.046	0.009	-0.006
MD	0.080	0.057	0.030	0.006
ME	0.046	0.036	-0.003	0.002
SC	-0.059	-0.062	-0.075	-0.023

Trends Tmax [$^{\circ}\text{C}/\text{MAM}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	-0.082	-0.050	-0.043	0.037
BI	-0.093	-0.066	-0.051	0.023
EA	-0.078	-0.073	-0.065	0.053
FR	-0.107	-0.060	-0.055	0.021
IP	-0.050	-0.035	-0.009	0.022
MD	0.005	0.030	0.044	0.055
ME	-0.130	-0.091	-0.086	0.028
SC	-0.106	-0.082	-0.045	0.023

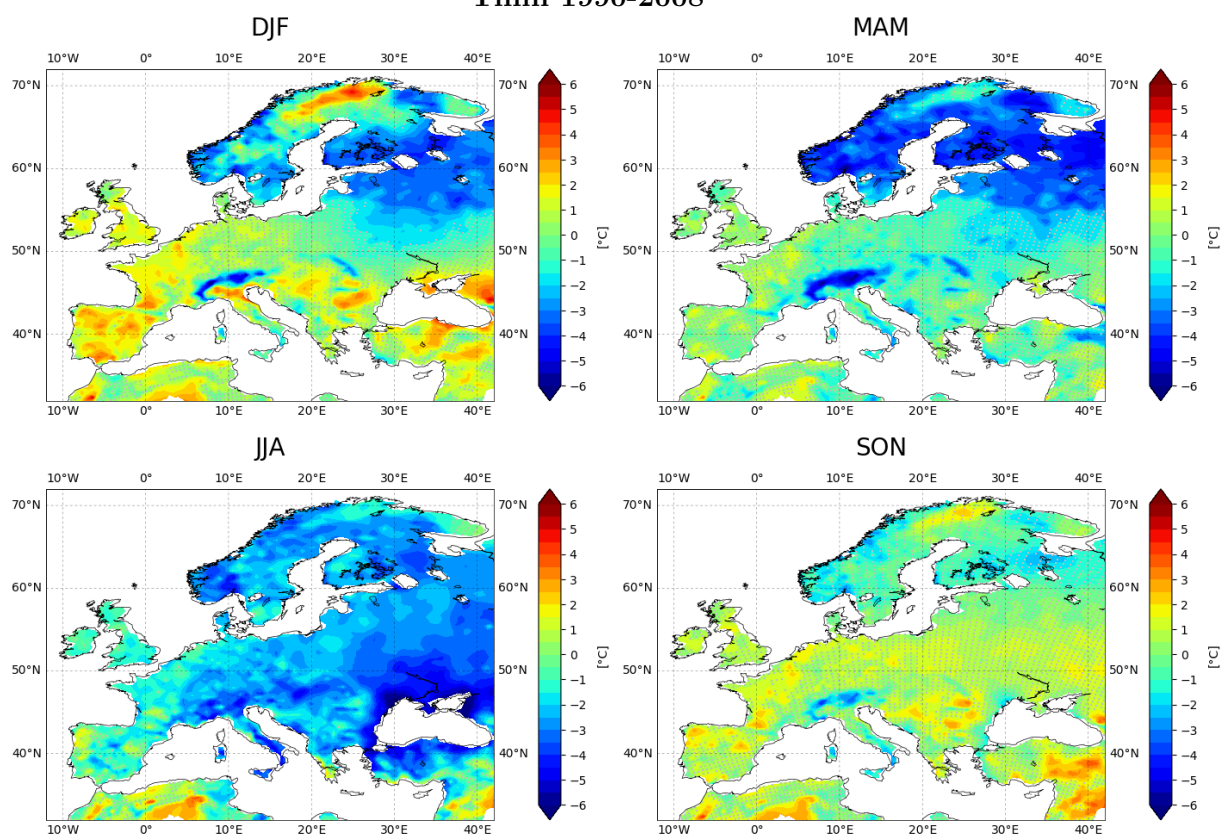
Trends Tmax [$^{\circ}\text{C}/\text{JJA}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.022	0.057	0.028	0.031
BI	0.037	0.064	0.016	0.014
EA	0.096	0.119	0.089	0.059
FR	0.022	0.066	0.002	0.017
IP	-0.035	-0.024	-0.026	0.041
MD	0.038	0.047	0.053	0.035
ME	0.069	0.108	0.059	0.030
SC	0.071	0.046	0.055	0.074

	Trends Tmax [°C/SON]			
	0.44°	0.11°	LUCAS	E-OBs
AL	0.194	0.193	0.085	0.062
BI	0.146	0.150	0.075	0.073
EA	0.233	0.227	0.065	0.078
FR	0.166	0.171	0.066	0.060
IP	0.169	0.160	0.072	0.058
MD	0.200	0.192	0.043	-0.006
ME	0.176	0.193	0.082	0.085
SC	0.236	0.234	0.102	0.118

3.1.3 Ελάχιστη Θερμοκρασία

3.1.3.1 Μέσο Bias (0.44°)

Mean Bias (0.44°)
Tmin 1990-2008



Σχήμα 3.23: Μέσο bias (WRF-EOBs) της ελάχιστης θερμοκρασίας (°C) στο πλέγμα του WRF (0.44°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Η ελάχιστη θερμοκρασία (Σχήμα 3.23) φαίνεται ότι παρουσιάζει ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά από τη μέγιστη και τη μέση που αναλύθηκαν παραπάνω. Το χειμώνα εμφανίζεται έντονο ψυχρό bias στη ζώνη γεωγραφικού μήκους 20-40°, το οποίο διατηρείται και την άνοιξη, αλλά η πλειονότητα των περιοχών εμφανίζει θερμό bias (BI, FR, IP, MD, ME). Την άνοιξη τα μεγαλύτερα ψυχρά bias παρατηρούνται στις Άλπεις και τη Σκανδιναβία (AL: -2.3°C, SC: -3.3°C). Το καλοκαίρι όλη η Ευρώπη χαρακτηρίζεται από ψυχρό bias με μέγιστες τιμές στις περιοχές Άλπεις, ανατολική Ευρώπη και Σκανδιναβία (AL: -2.9°C, EA: -2.9°C, SC: -2.6°C). Το φθινόπωρο παραμένει μόνο το ψυχρό bias στις Άλπεις και τμήματα της Σκανδιναβίας αν και αρκετά μειωμένο, ενώ θερμά bias υπάρχουν στις υπόλοιπες περιοχές. Η ψυχρή περίοδος (DJF, SON) εν γένει χαρακτηρίζεται από μικρό θερμό bias (0.4°C) και η θερμή (MAM, JJA) από ψυχρό (-1.5°C).

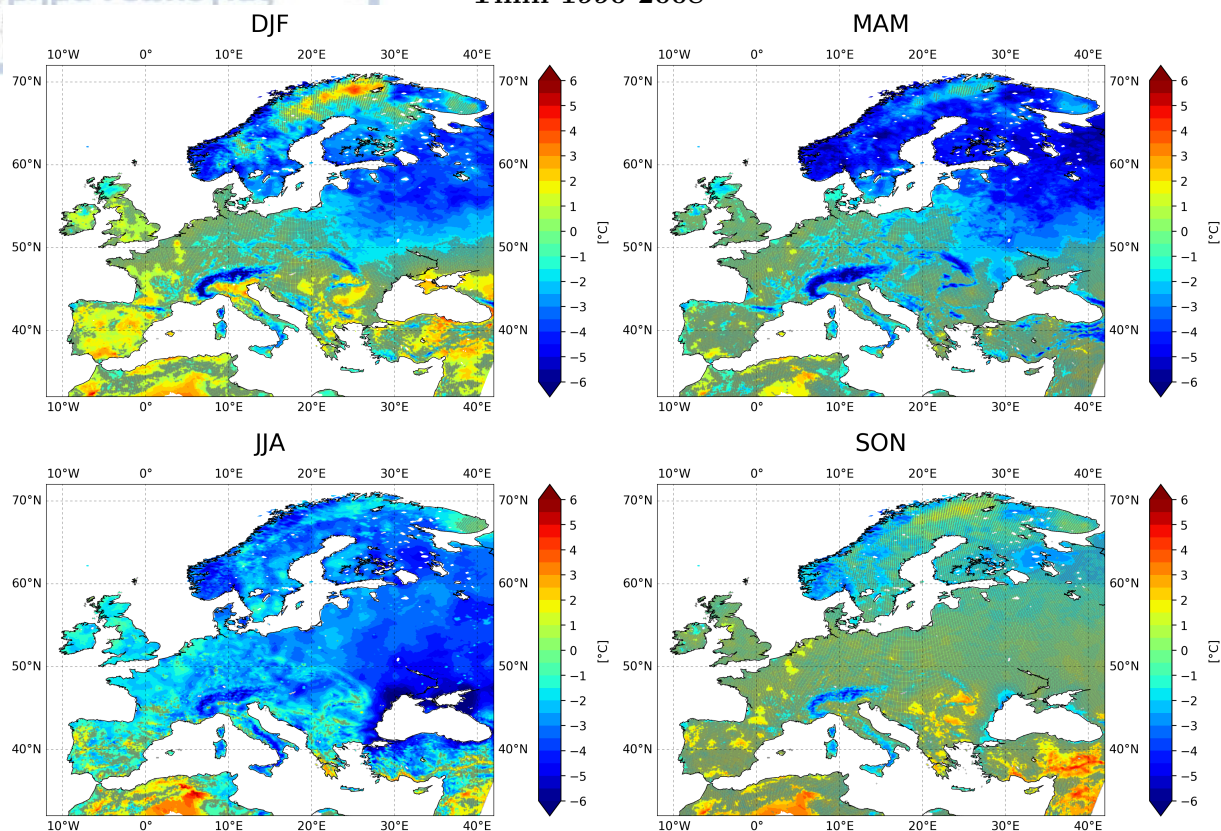
Πίνακας 3.7: Μέσο bias (°C) της ελάχιστης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.44° για την περίοδο 1990-2008.

Bias Tmin 0.44° [°C]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-0.4	-2.3	-2.9	-0.6	-1.6
BI	1.2	0.1	-1.1	0.7	0.2
EA	-0.2	-1.2	-2.9	0.8	-0.9
FR	1.3	0.0	-1.6	0.9	0.2
IP	1.6	0.0	-0.9	0.8	0.4
MD	0.4	-0.8	-2.1	0.2	-0.6
ME	0.7	-0.5	-2.1	0.9	-0.3
SC	-1.9	-3.3	-2.6	-0.7	-2.1
seasonal average	0.3	-1.0	-2.0	0.4	

3.1.3.2 Μέσο Bias (0.11°)

Στο Σχήμα 3.24 που αναφέρεται στην ελάχιστη θερμοκρασία σε υψηλότερη ανάλυση (0.11°) παραμένει το ψυχρό bias στη ΒΑ Ευρώπη το χειμώνα και την άνοιξη, το οποίο φαίνεται να επεκτείνεται σε μεγαλύτερη περιοχή. Έτσι, το bias στην περιοχή της ανατολικής Ευρώπης έχει αυξηθεί αισθητά το χειμώνα (1°C) και το ίδιο συμβαίνει και στην περιοχή των Άλπεων και της Σκανδιναβίας. Το φθινόπωρο παρουσιάζει επίσης διόγκωση του bias για τις ίδιες περιοχές (εκτός EA). Συνολικά, την ψυχρή περίοδο η μέση τιμή του bias δεν άλλαξε ως απόλυτο μέγεθος, αλλά απέκτησε αντίθετο πρόσημο και πλέον είναι αρνητικό (-0.4°C). Ακόμη, την άνοιξη όλα τα bias έχουν μεγαλώσει στην υψηλή ανάλυση και το μοντέλο τείνει να γίνεται πιο ψυχρό. Το καλοκαίρι παρουσιάζει

Mean Bias (0.11°)
Tmin 1990-2008



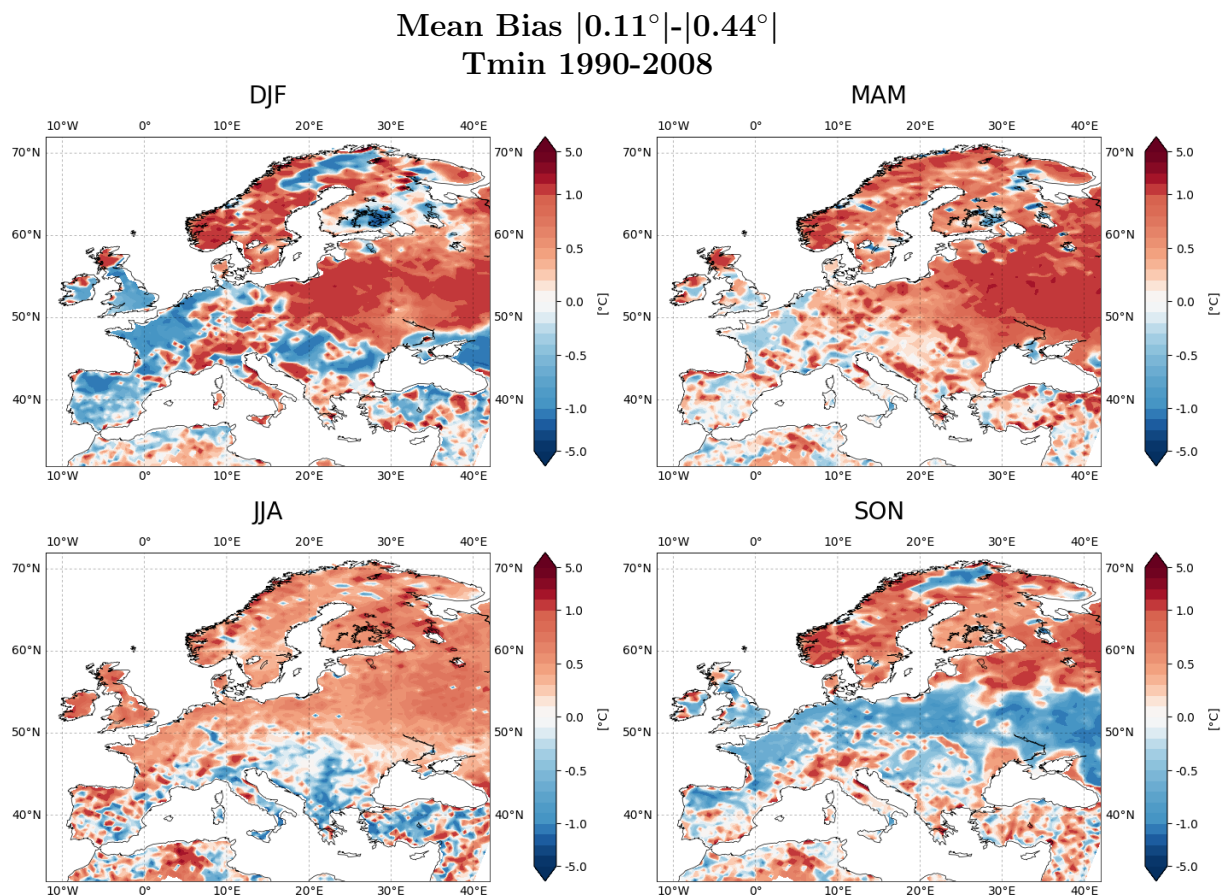
Σχήμα 3.24: Μέσο bias (WRF-EOBs) της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα του WRF (0.11°) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι σκούρες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

Πίνακας 3.8: Μέσο bias ($^{\circ}\text{C}$) της ελάχιστης θερμοκρασίας ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.11° για την περίοδο 1990-2008.

Bias Tmin 0.11° [$^{\circ}\text{C}$]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	-1.3	-2.4	-2.7	-0.9	-1.8
BI	0.3	-0.5	-1.7	0.0	-0.5
EA	-1.2	-1.9	-3.1	0.1	-1.5
FR	0.3	-0.4	-1.9	0.2	-0.5
IP	0.9	-0.2	-0.8	0.5	0.1
MD	-0.1	-0.9	-1.6	0.1	-0.6
ME	-0.4	-0.9	-2.3	0.1	-0.9
SC	-2.5	-3.9	-3.0	-1.4	-2.7
seasonal average	-0.5	-1.4	-2.1	-0.2	

ζονται μικρότερα bias μόνο στη νότια Ευρώπη (IP, MD) και τις Άλπεις, συγκριτικά με τη χαμηλή ανάλυση. Κατά τη θερμή περίοδο η μέση τιμή του bias αυξήθηκε περαιτέρω (-1.8°C).

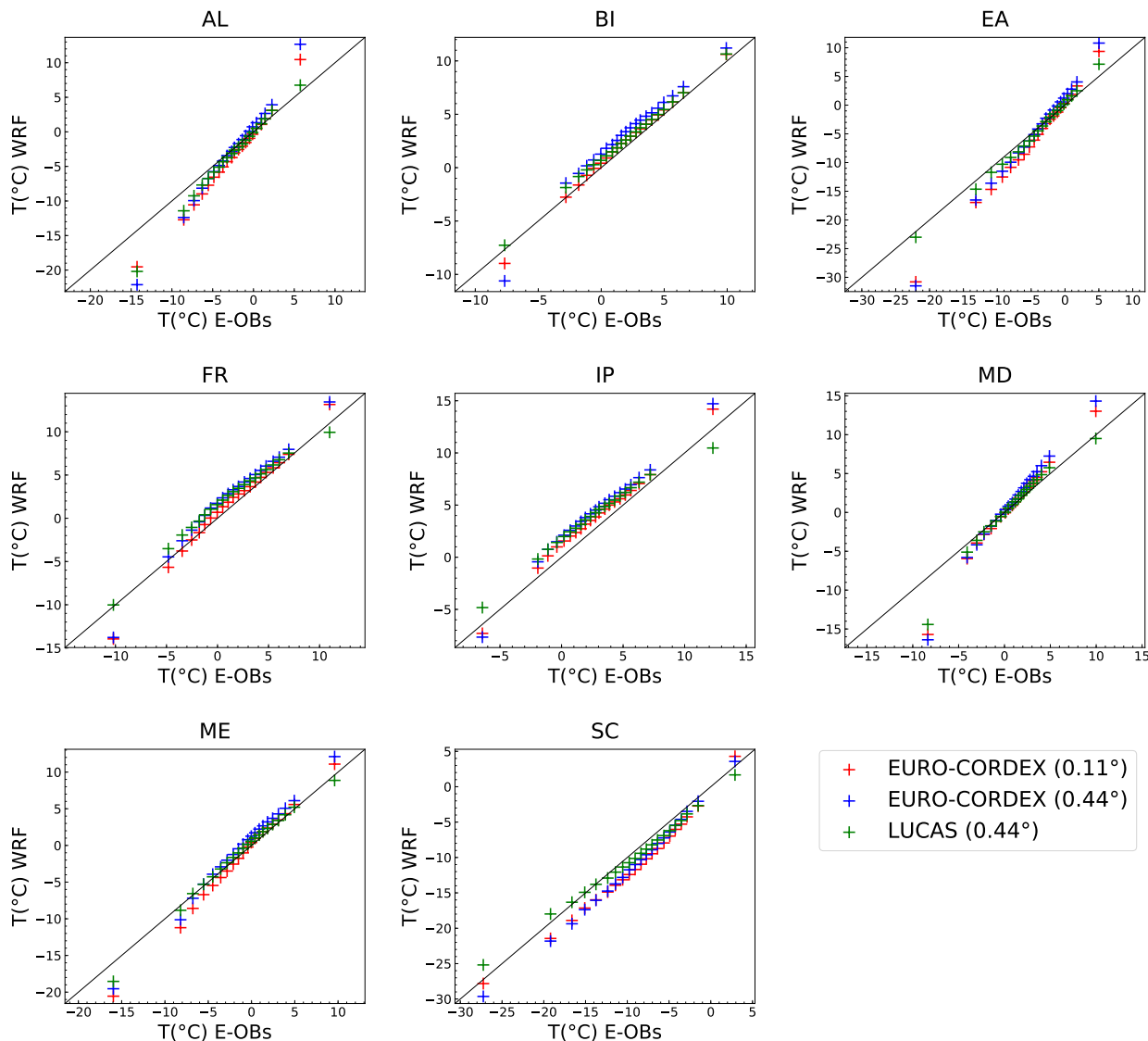
3.1.3.3 Διαφορές μέσου bias (0.11° - 0.44°)



Σχήμα 3.25: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.11^{\circ}}| - |MB_{0.44^{\circ}}|$) της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα των 0.44° ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008.

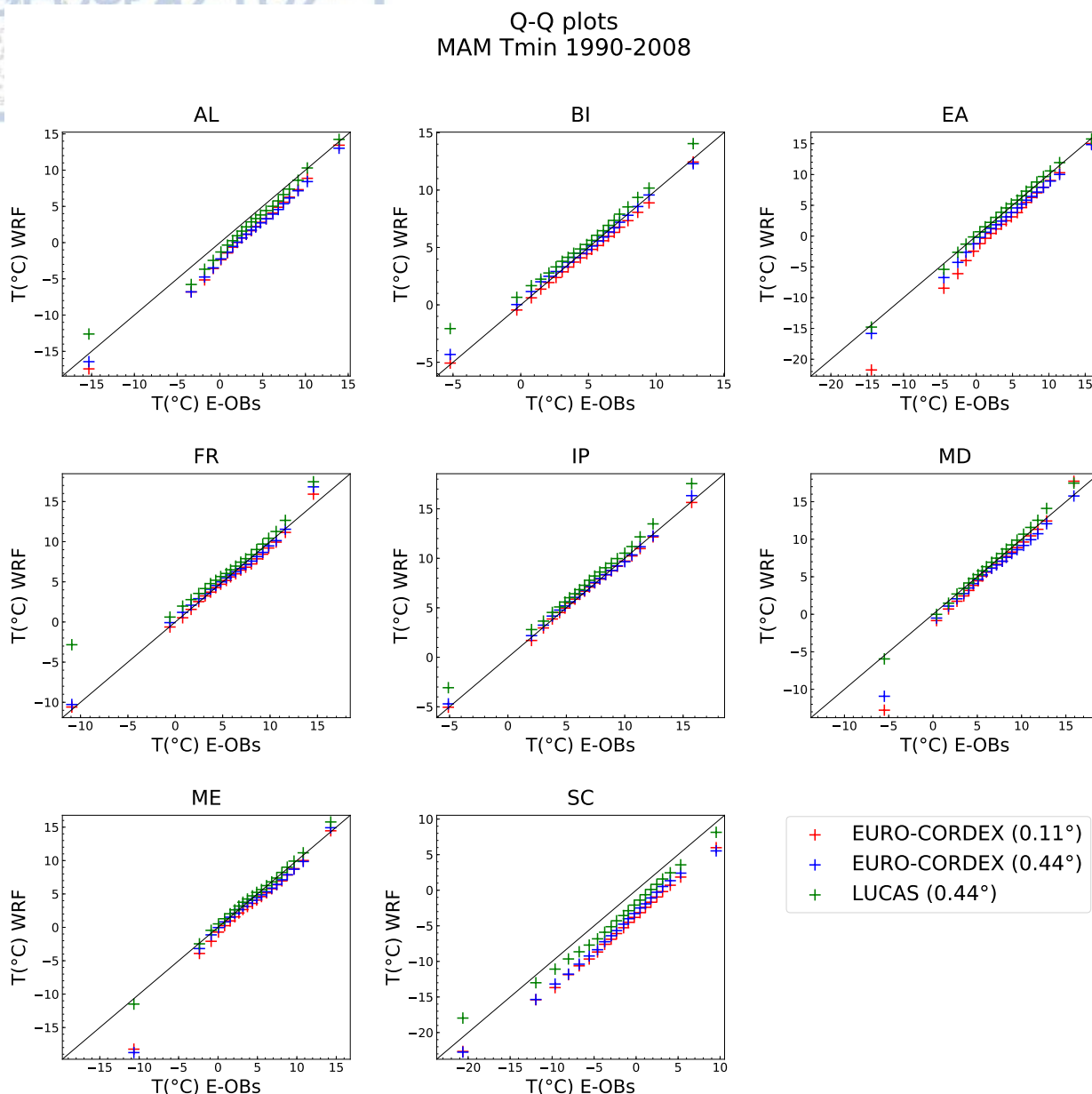
Εξαιτίας των έντονων ερυθρών χρωμάτων στο Σχήμα 3.25 γίνεται φανερό ότι η ανάλυση 0.11° επιδεινώνει τα αποτελέσματα περίπου $0.6-1^{\circ}\text{C}$ στην περιοχή της ανατολικής Ευρώπης και της Σκανδιναβίας κατά το χειμώνα και την άνοιξη. Ωστόσο, φαίνεται να υπάρχει βελτίωση του απόλυτου σφάλματος στις περιοχές κυρίως της δυτικής και νότιας Ευρώπης το χειμώνα ($0.3-1^{\circ}\text{C}$). Το καλοκαίρι, εξακολουθεί να υπάρχει επιδείνωση στη ζώνη γεωγραφικού πλάτους πάνω από τις 50° , ενώ προς το νότο υπάρχουν τμήματα με μικρότερο σφάλμα στα 0.11° κατά $0.1-0.5^{\circ}\text{C}$ (IP, MD, AL). Το φθινόπωρο η ζώνη πλατών πάνω από τις 55° χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο σφάλμα στην υψηλή ανάλυση, ενώ κάτω από τις 55° η βελτίωση του σφάλματος υπολογίζεται περίπου στους 0.5°C (με εξαίρεση τις Άλπεις όπου χειροτερεύει).

3.1.3.4 Q-Q plots

Q-Q plots
DJF Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.26: Q-Q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

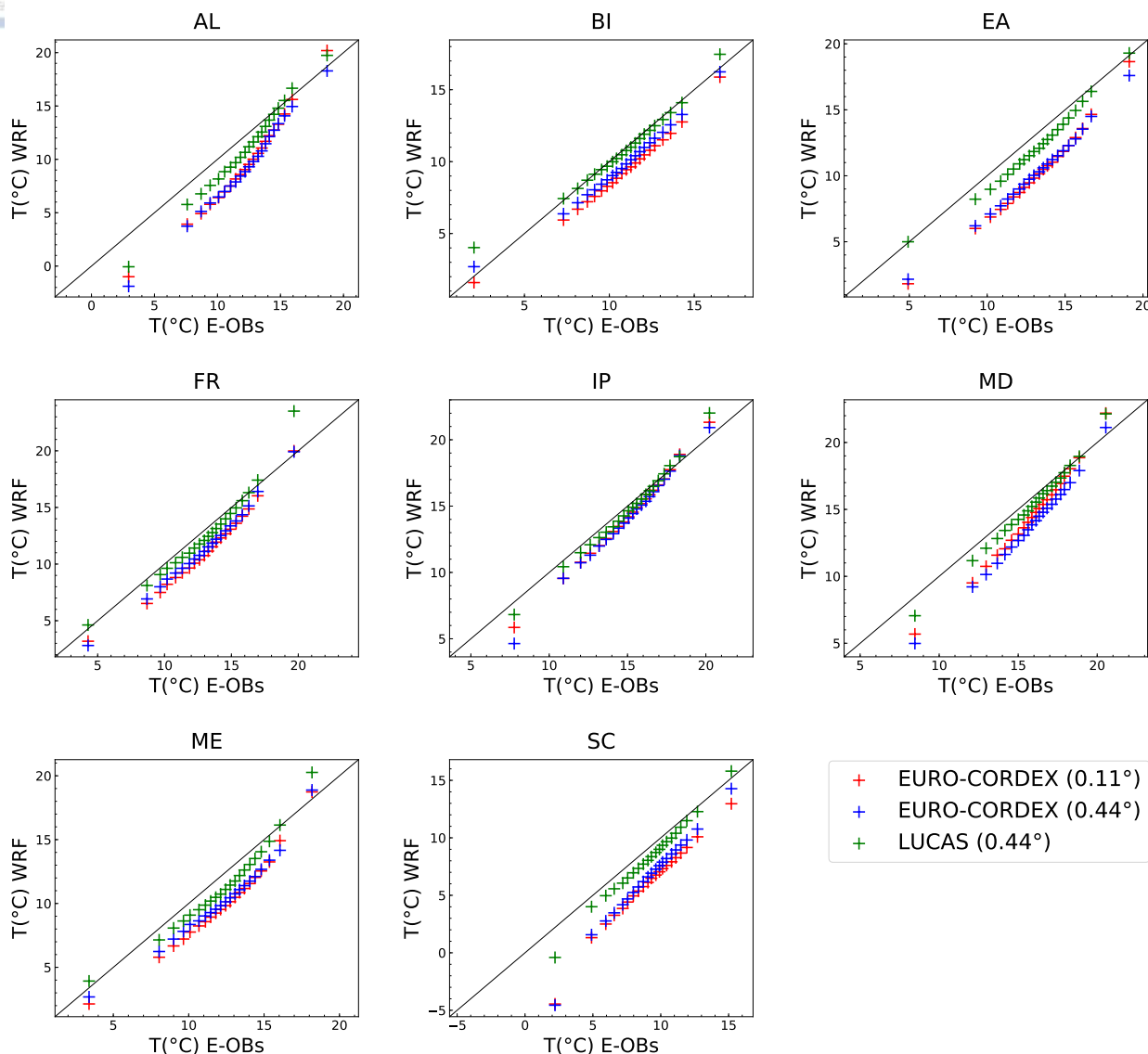
Στο Σχήμα 3.26 το οποίο απεικονίζει τα q-q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία κατά το χειμώνα, οι περιοχές φαίνεται να χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τις περιοχές που παρουσιάζουν εμφανή υπερεκτίμηση σε όλο το εύρος ελάχιστων θερμοκρασιών (BI, IP, FR), τις περιοχές που παρουσιάζουν υποεκτίμηση στις χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και υπερεκτίμηση στις υψηλότερες (AL, EA, ME, MD) και τέλος τις περιοχές που εμφανίζουν υποεκτίμηση στο μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (SC). Για την πρώτη κατηγορία η προσομοίωση EURO-CORDEX 0.11° πλησιάζει πιο κοντά στη διαγώνιο (ιδιαίτερα σε IP, FR), δηλαδή τις παρατηρήσεις, ενώ οι άλλες δύο βρίσκονται πιο μακριά με τη EURO-CORDEX 0.44° να εμφανίζει συνήθως μεγαλύτερη



Σχήμα 3.27: Q-Q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

απόκλιση. Για τη δεύτερη και τρίτη κατηγορία, η LUCAS καταφέρνει να απεικονίσει καλύτερα τα παρατηρησιακά δεδομένα σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. SC, EA στις χαμηλές θερμοκρασίες) και σε άλλες οι διαφορές είναι πολύ μικρές (MD). Επίσης, στην πλειονότητα των περιπτώσεων η 0.11° προσεγγίζει περισσότερο τις ακραίες τιμές από την αντίστοιχή της στα 0.44°, αλλά και σε αυτή την περίπτωση η LUCAS βρίσκεται πιο κοντά στις παρατηρήσεις.

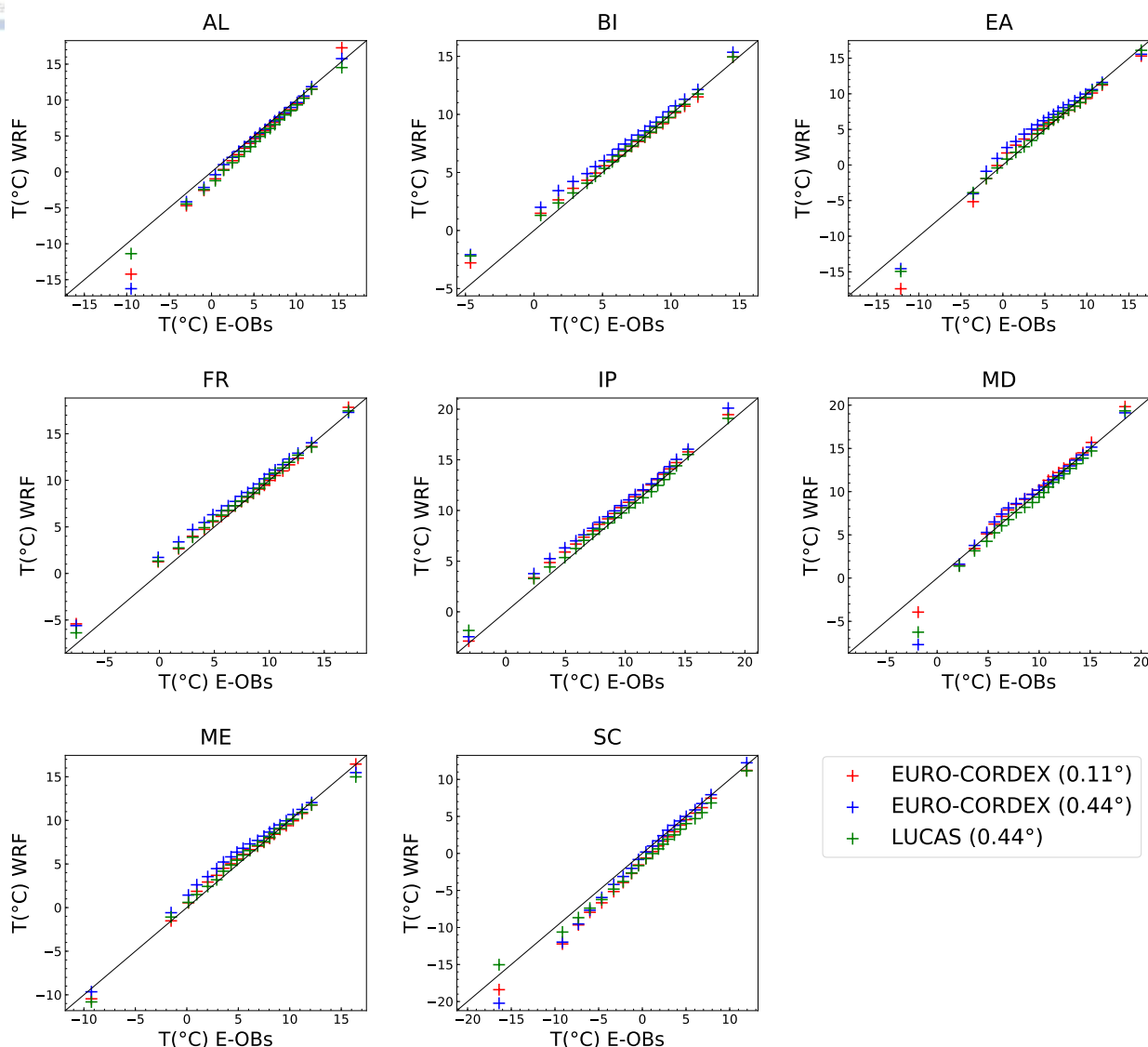
Την άνοιξη (Σχήμα 3.27) εμφανίζεται συστηματική υποεκτίμηση των ελάχιστων θερμοκρασιών στις Άλπεις και τη Σκανδιναβία σε όλο το εύρος των τιμών και από τις τρεις προσομοιώσεις. Οι υπόλοιπες περιοχές προσομοιώνονται αρκετά κοντά στις παρατηρήσεις, ελαφρώς κάτω ή πάνω από τη διαγώνιο γραμμή ανάλογα με την προ-

Q-Q plots
JJA Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.28: Q-Q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

σομοίωση. Στην ανατολική Ευρώπη και τη Σκανδιναβία είναι φανερό ότι η προσομοίωση LUCAS βρίσκεται πιο κοντά στη διαγώνιο και ακολουθεί η EURO-CORDEX 0.44°. Στις υπόλοιπες περιοχές, δεν είναι τόσο ξεκάθαρη αυτή η διαφοροποίηση των κατανομών και πολλές φορές η μία συμπίπτει με την άλλη. Στην περίπτωση της Βρετανίας και της Γαλλίας οι πιο κοντινές προσομοιώσεις σε αυτή της παρατηρούμενης κατάστασης είναι οι EURO-CORDEX, με την 0.11° να είναι πιο αντιπροσωπευτική στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.28) η συμπεριφορά των κατανομών σε κάθε προσομοίωση διαφοροποιείται αισθητά. Σε όλες τις περιοχές φαίνεται ότι η προσομοίωση LUCAS

Q-Q plots
SON Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.29: Q-Q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

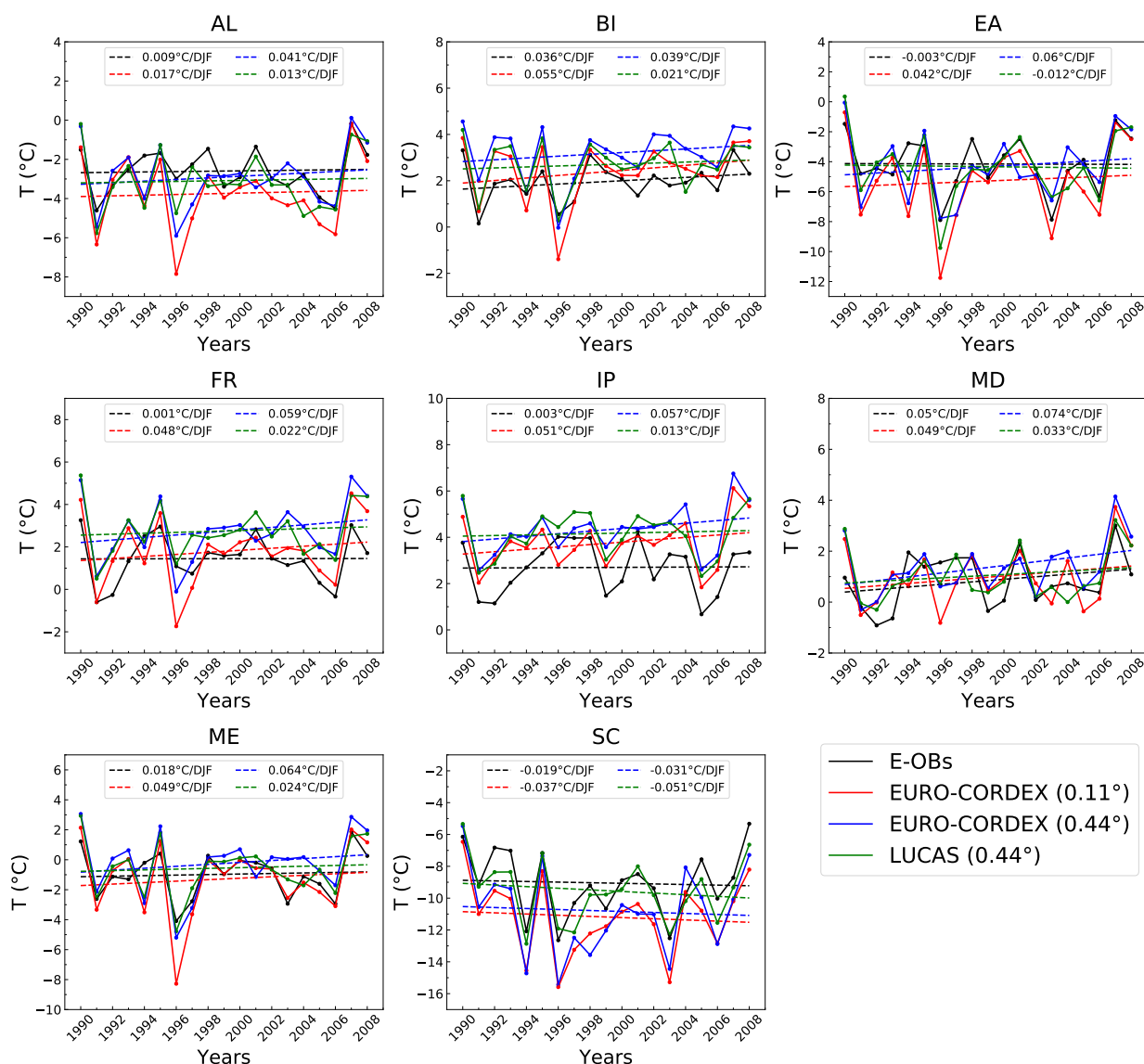
πετυχαίνει να αντικατοπτρίσει με περισσότερη ακρίβεια τις παρατηρήσεις. Στη Βρετανία, τη Γαλλία, την κεντρική Ευρώπη και τη Σκανδιναβία η EURO-CORDEX 0.44° ακολουθεί, ενώ η 0.11° βρίσκεται πιο μακριά από όλες από τη διαγώνιο. Ωστόσο, στις Άλπεις, την ανατολική Ευρώπη και την Ιβηρική Χερσόνησο δεν είναι σαφές ποια από τις δύο αναλύσεις δίνει πιο κοντινά στα παρατηρησιακά αποτελέσματα.

Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.29) όλες οι κατανομές είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη όπως και στη διαγώνιο. Στη Βρετανία, τη Γαλλία, την κεντρική και την ανατολική Ευρώπη, η EURO-CORDEX 0.44° έχει το μεγαλύτερο σφάλμα από τις τρεις. Στη Σκανδιναβία ωστόσο, δεδομένου ότι όλες υποεκτιμούν την ελάχιστη θερμοκρασία, η EURO-CORDEX 0.44° προσεγγίζει καλύτερα τις παρατηρήσεις.

3.1.3.5 Χρονοσειρές & Τάσεις

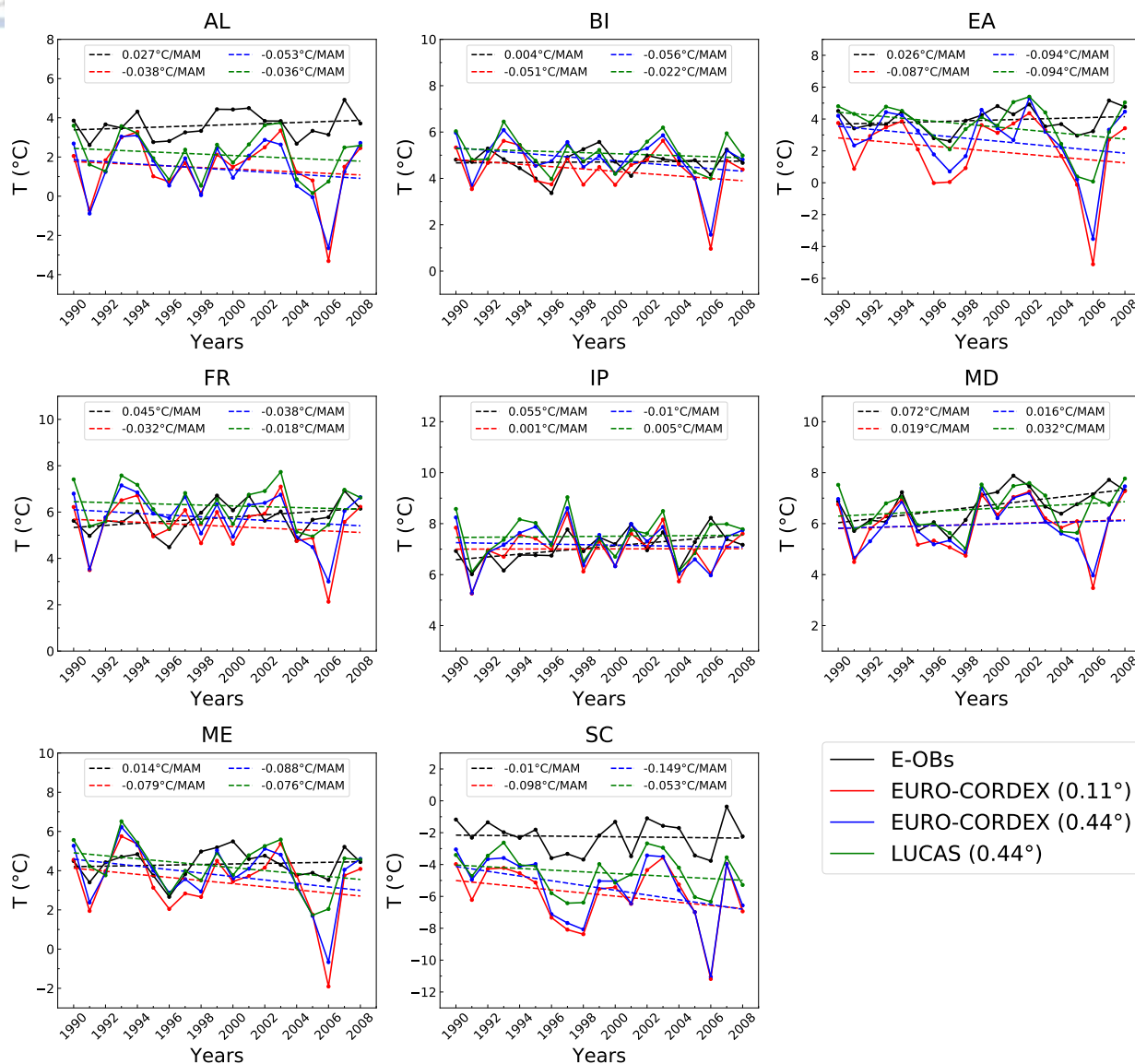
Οι χρονοσειρές της ελάχιστης θερμοκρασίας της περιόδου 1990-2008 φαίνονται στα Σχήματα 3.30-3.33 και οι αντίστοιχες τάσεις στον Πίνακα 3.9. Το χειμώνα (Σχήμα 3.30) οι τάσεις που δείχνουν τα μοντέλα συμφωνούν με την τάση των παρατηρήσεων, ως προς το πρόσημο, σε όλες τις περιοχές (εκτός ΕΑ για τις EURO-CORDEX), ενώ υπάρχει επιπλέον συμφωνία στην τάξη μεγέθους μόνο για κάποιες (BI, MD, ME, SC). Την άνοιξη (Σχήμα 3.31) υπάρχει συμφωνία (πρόσημο και τάξη) για τη Μεσόγειο και

Timeseries & Trends
DJF Tmin 1990-2008



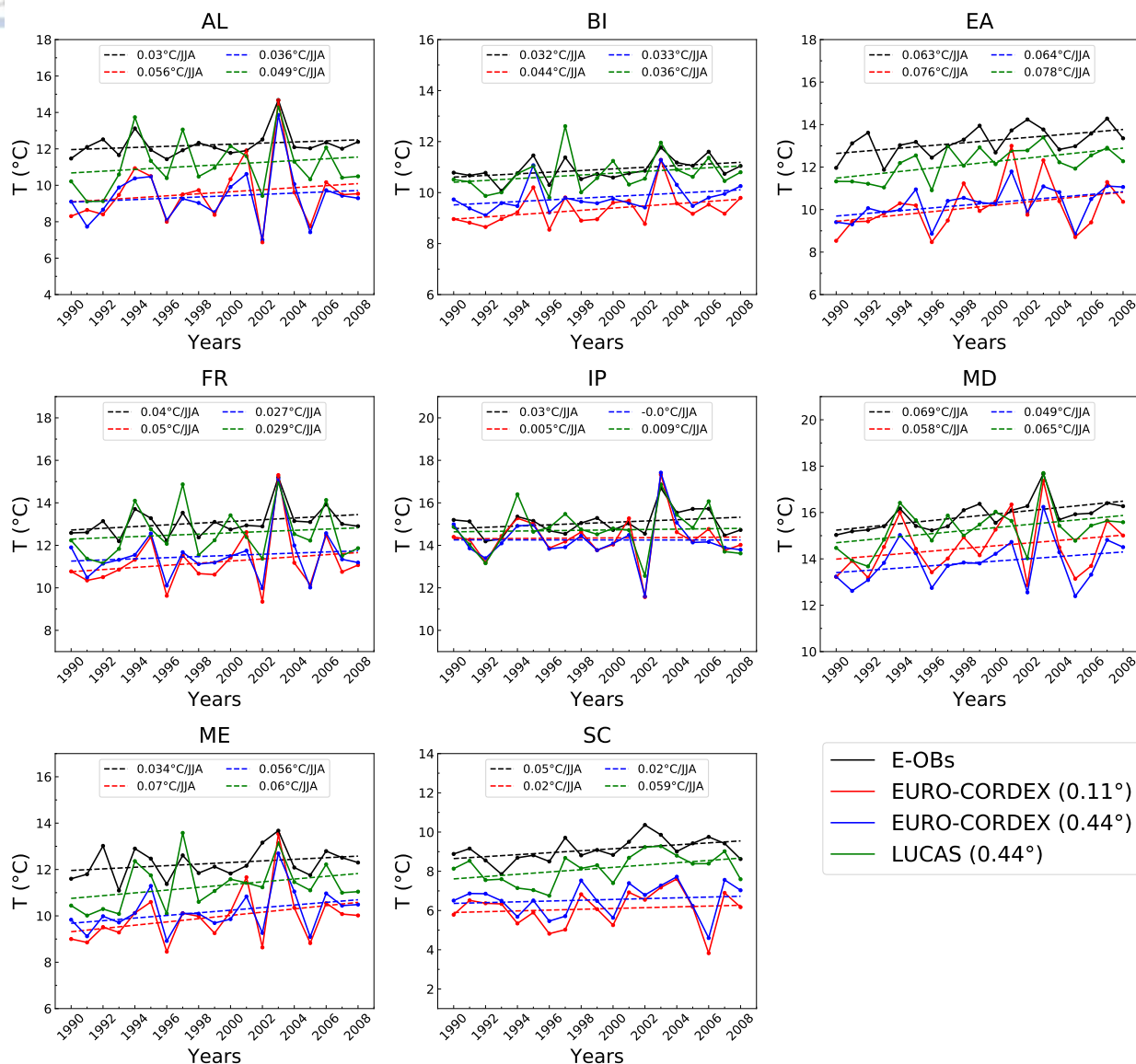
Σχήμα 3.30: Χρονοσειρές και τάσεις για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

για τις τρεις, ενώ για τη Σκανδιναβία μόνο για την 0.11° και τη LUCAS (η 0.44° συμφωνεί μόνο στο πρόσημο). Το προσημο της τάσης της Ιβηρικής πιάνουν επίσης η 0.11°

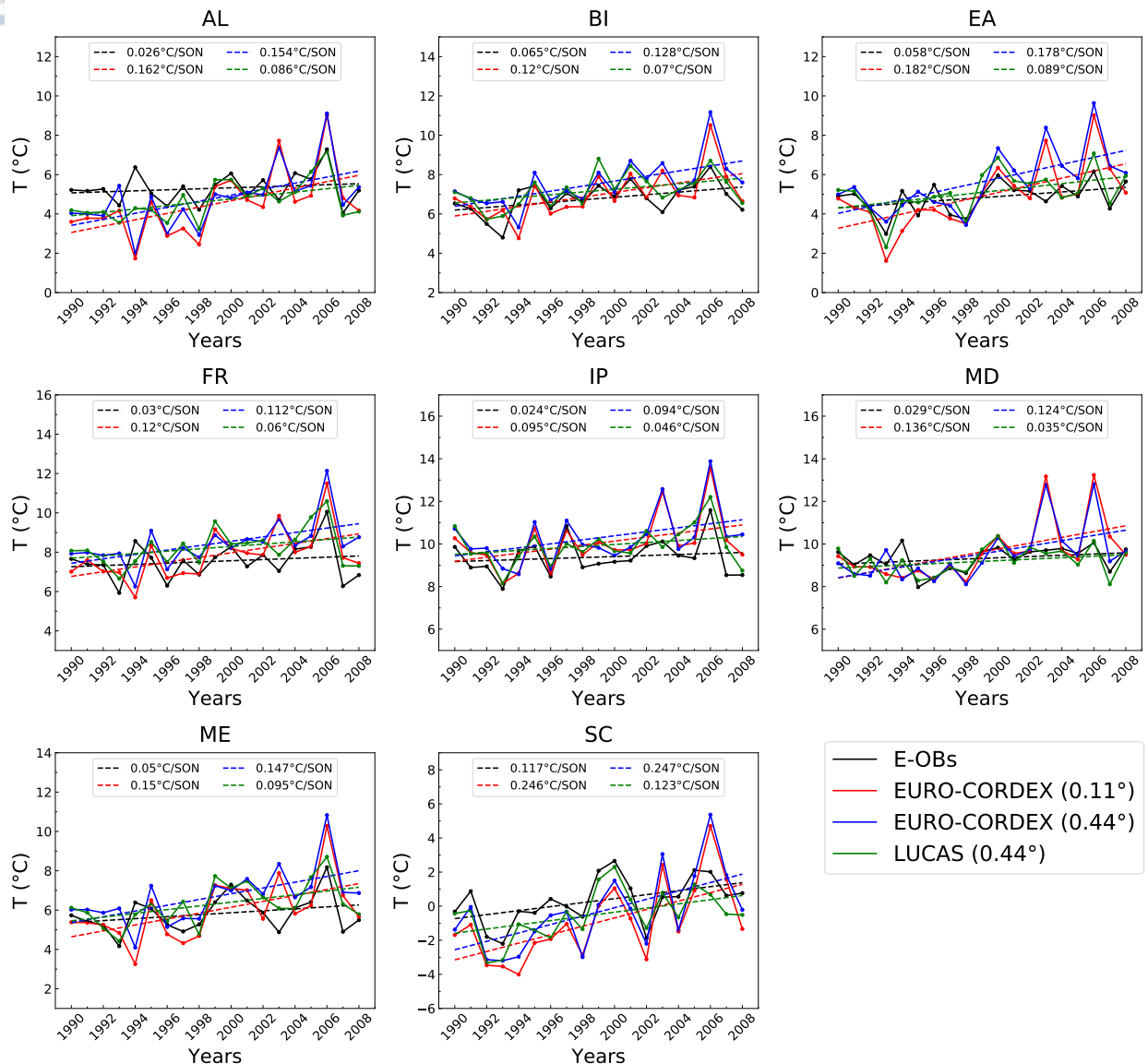
Timeseries & Trends
MAM Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.31: Χρονοσειρές και τάσεις για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

και η LUCAS. Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.32) και οι τρεις προσομοιώσεις συμφωνούν ως προς το πρόσημο και την τάξη μεγέθους της τάσης τους για όλες τις περιοχές πλην της Ιβηρικής, για την οποία συμφωνούν μόνο στο πρόσημο. Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.33) ενώ όλες οι προσομοιώσεις πετυχαίνουν το πρόσημο της τάσης σε όλες τις περιοχές, μόνο η LUCAS είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις παρατηρήσεις σε όλες. Οι EURO-CORDEX είναι της ίδιας τάξης μόνο στην Ιβηρική και τη Σκανδιναβία.

Timeseries & Trends
JJA Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.32: Χρονοσειρές και τάσεις για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

Timeseries & Trends
SON Tmin 1990-2008

Σχήμα 3.33: Χρονοσειρές και τάσεις για την ελάχιστη θερμοκρασία για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

Πίνακας 3.9: Τάσεις της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}/\text{εποχή}$) ανά υποπεριοχή για τις τρεις προσομοιώσεις (EURO-CORDEX 0.44 $^{\circ}$, 0.11 $^{\circ}$ & LUCAS) και τις παρατηρήσεις (E-OBs).

Trends Tmin [$^{\circ}\text{C}/\text{DJF}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.041	0.017	0.013	0.009
BI	0.039	0.055	0.021	0.036
EA	0.060	0.042	-0.012	-0.003
FR	0.059	0.048	0.022	0.001
IP	0.057	0.051	0.013	0.003
MD	0.074	0.049	0.033	0.050
ME	0.064	0.049	0.024	0.018
SC	-0.031	-0.037	-0.051	-0.019

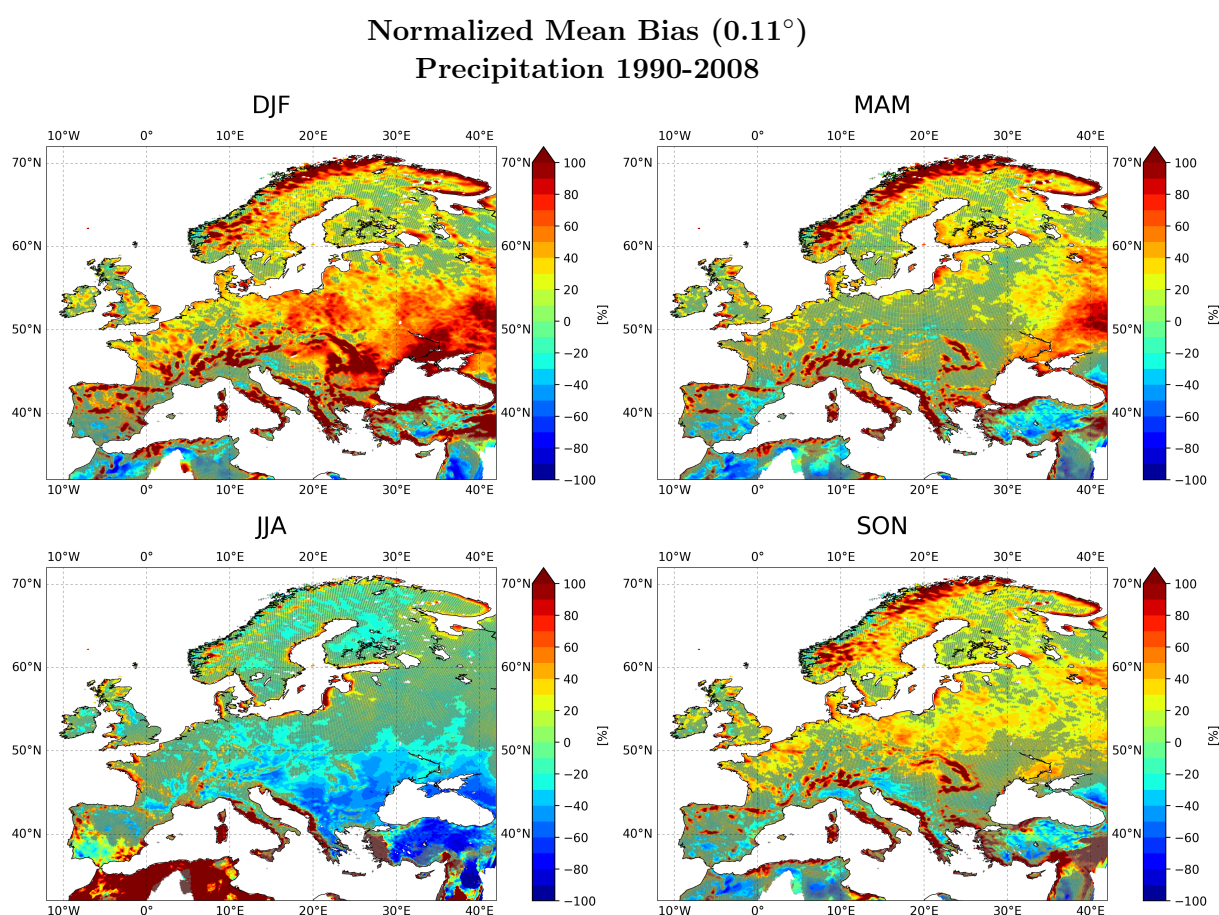
Trends Tmin [$^{\circ}\text{C}/\text{MAM}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	-0.053	-0.038	-0.036	0.027
BI	-0.056	-0.051	-0.022	0.004
EA	-0.094	-0.087	-0.094	0.026
FR	-0.038	-0.032	-0.018	0.045
IP	-0.010	0.001	0.005	0.055
MD	0.016	0.019	0.032	0.072
ME	-0.088	-0.079	-0.076	0.014
SC	-0.149	-0.098	-0.053	-0.010

Trends Tmin [$^{\circ}\text{C}/\text{JJA}$]				
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.036	0.056	0.049	0.030
BI	0.033	0.044	0.036	0.032
EA	0.064	0.076	0.078	0.063
FR	0.027	0.050	0.029	0.040
IP	0.000	0.005	0.009	0.030
MD	0.049	0.058	0.065	0.069
ME	0.056	0.070	0.060	0.034
SC	0.020	0.020	0.059	0.050

	Trends Tmin [$^{\circ}\text{C}/\text{SON}$]			
	0.44 $^{\circ}$	0.11 $^{\circ}$	LUCAS	E-OBs
AL	0.154	0.162	0.086	0.026
BI	0.128	0.120	0.070	0.065
EA	0.178	0.182	0.089	0.058
FR	0.112	0.120	0.060	0.030
IP	0.094	0.095	0.046	0.024
MD	0.124	0.136	0.035	0.029
ME	0.147	0.150	0.095	0.050
SC	0.247	0.246	0.123	0.117

3.1.4 Βροχόπτωση

3.1.4.1 Μέσο Bias (0.11 $^{\circ}$)



Σχήμα 3.34: Κανονικοποιημένο μέσο bias (WRF-EOBs) της βροχόπτωσης (%) στο πλέγμα του WRF (0.11 $^{\circ}$) ανά εποχή για την περίοδο 1990-2008. Οι σκούρες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

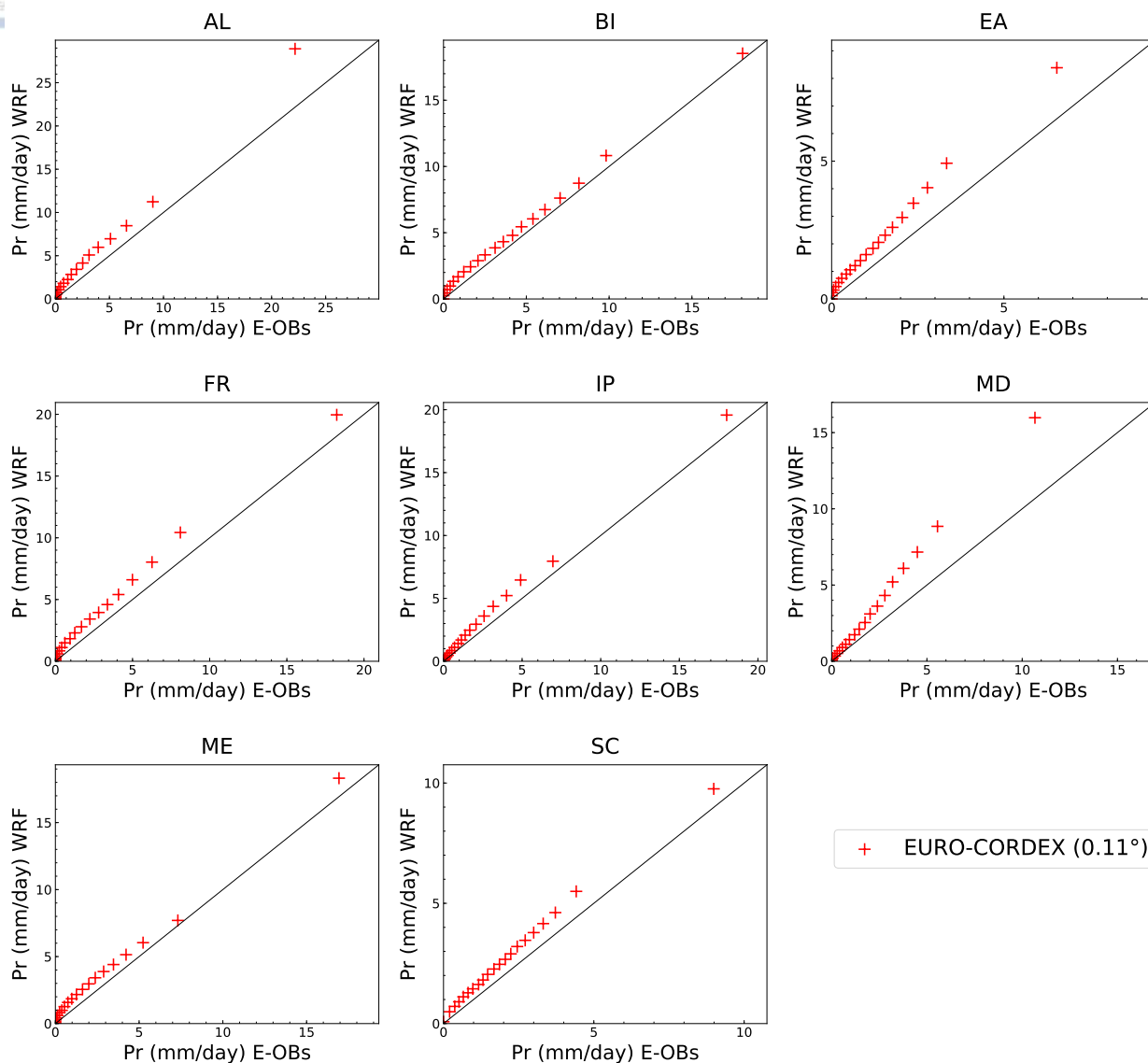
Το εποχικό bias της βροχόπτωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.34 και οι τιμές του για τις διάφορες υποπεριοχές στον Πίνακα 3.10. Όλες τις εποχές το μοντέλο είναι πιο υγρό από τις παρατηρήσεις. Τα μεγαλύτερα υγρά bias παρατηρούνται κατά το χειμώνα και ιδιαίτερα στις περιοχές που περιλαμβάνουν τμήματα με έντονο ανάγλυφο (AL: 50%, EA: 60.4%, MD: 58.1%). Την άνοιξη και το φθινόπωρο το μοντέλο εξακολουθεί να είναι πιο υγρό, με μικρότερα bias όμως ανά περιοχή και μέγιστα στη Μεσόγειο (MAM: 45.2%, SON: 41.1%) και τη Σκανδιναβία (MAM: 34.3%, SON: 30.6%). Το καλοκαίρι το μοντέλο συμπεριφέρεται ως πιο ξηρό σε κάποιες περιοχές (AL, EA, ME) με μέγιστο στην ανατολική Ευρώπη (-23.7%). Επιπλέον, υπάρχουν περιοχές με μικρές τιμές bias (BI, FR, SC) και άλλες που διατηρούν το υψηλό υγρό bias της ψυχρής περιόδου (IP: 30.8%, MD: 57.3%). Η περιοχή της Μεσογείου χαρακτηρίζεται από συστηματικό υγρό bias σε όλες τις εποχές, που οφείλεται στην υπερεκτίμηση της βροχής πάνω στις οροσειρές της (Απέννινα Όρη, Δειναρικές Άλπεις, Πίνδος). Ιδιαίτερα στην προσήμενη πλευρά των Δειναρικών Άλπεων το μοντέλο δίνει όλη τη βροχή, με αποτέλεσμα η περιοχή πίσω από αυτές, στις 20-30° γεωγραφικού μήκους, να μην έχει πλέον να δώσει άλλο και να υποεκτιμά τα ποσά βροχής στην περιοχή.

Πίνακας 3.10: Κανονικοποιημένο μέσο bias (%) της βροχόπτωσης ανά υποπεριοχή και εποχή σε χωρική ανάλυση 0.11° για την περίοδο 1990-2008.

Bias Precipitation 0.11° [%]					
	DJF	MAM	JJA	SON	annual average
AL	50.0	32.3	-6.7	20.7	24.1
BI	22.4	21.3	4.8	20.9	17.4
EA	60.4	16.0	-23.7	26.5	19.8
FR	40.1	21.0	3.9	22.6	21.9
IP	34.7	8.8	30.8	10.3	21.2
MD	58.1	45.2	57.3	41.1	50.4
ME	32.5	13.8	-8.7	23.7	15.3
SC	34.2	34.3	1.3	30.6	25.1
seasonal average	41.6	24.1	7.4	24.6	

3.1.4.2 Q-Q plots

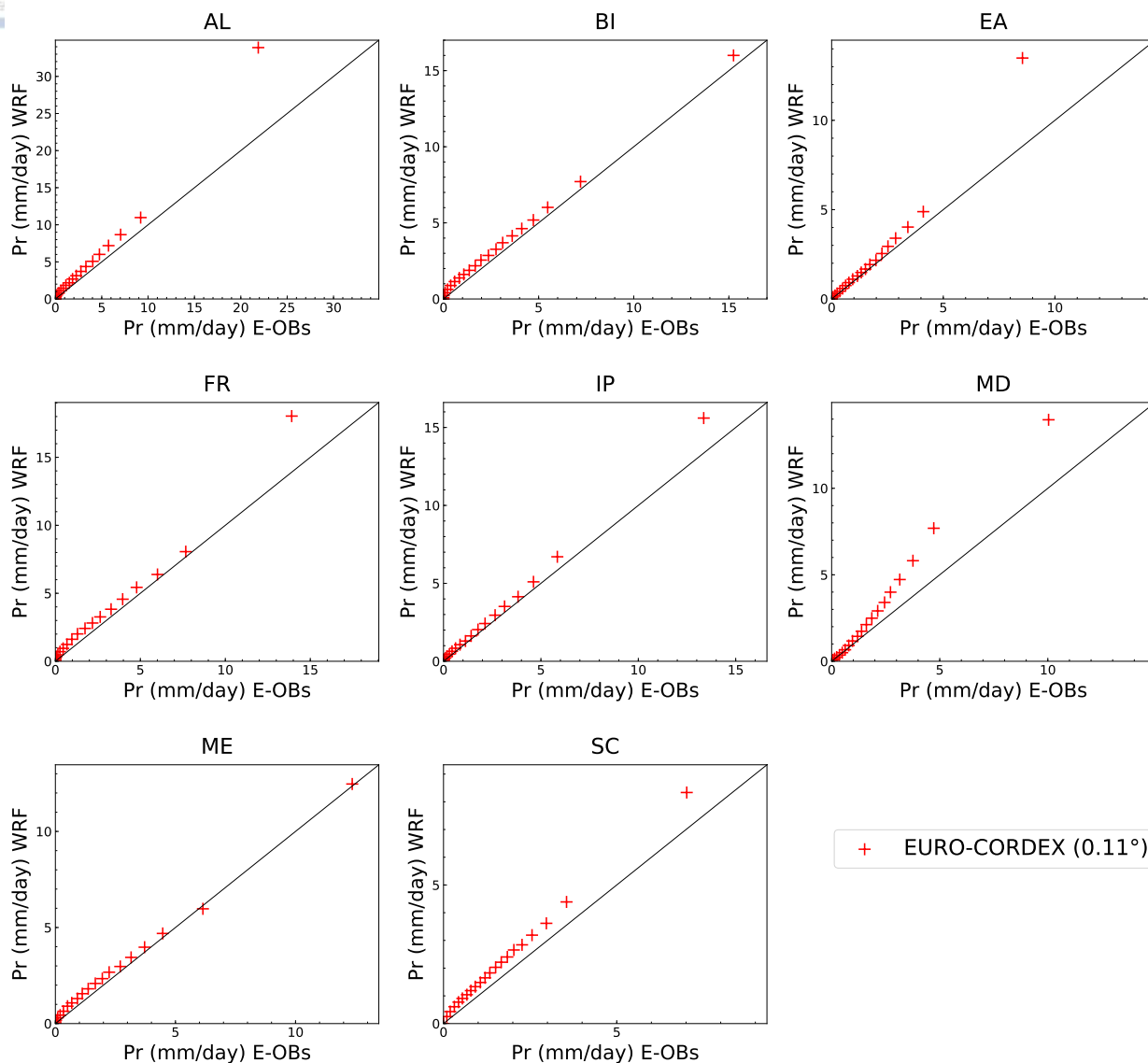
Τα q-q plots για τη βροχόπτωση παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.35-3.38 που ακολουθούν ανά εποχή και ανά υποπεριοχή. Το Σχήμα 3.35 αναφέρεται στο χειμώνα της περιόδου 1990-2008. Σε όλες τις περιοχές κυριαρχεί υπερεκτίμηση του ποσού βροχόπτωσης ανά ημέρα σε όλα τα ποσά βροχής. Επιπλέον, φαίνεται η συσσώρευση των σημείων σε μικρές τιμές που υποδεικνύει ότι τα πιο συχνά επεισόδια είναι μικρής

Q-Q plots
DJF Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.35: Q-Q plots για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

έντασης. Καλύτερη συμφωνία του μοντέλου με τις παρατηρήσεις υπάρχει στην περιοχή των Βρετανικών νήσων και της κεντρικής Ευρώπης, ενώ απόκλιση εμφανίζεται όσο μεγαλώνουν οι τιμές ημερήσιας βροχής στη Μεσόγειο και την ανατολική Ευρώπη. Σε όλες τις περιοχές τα ακραία υπερεκτιμώνται, με μεγαλύτερο σφάλμα στις περιοχές των Άλπεων και της Μεσογείου.

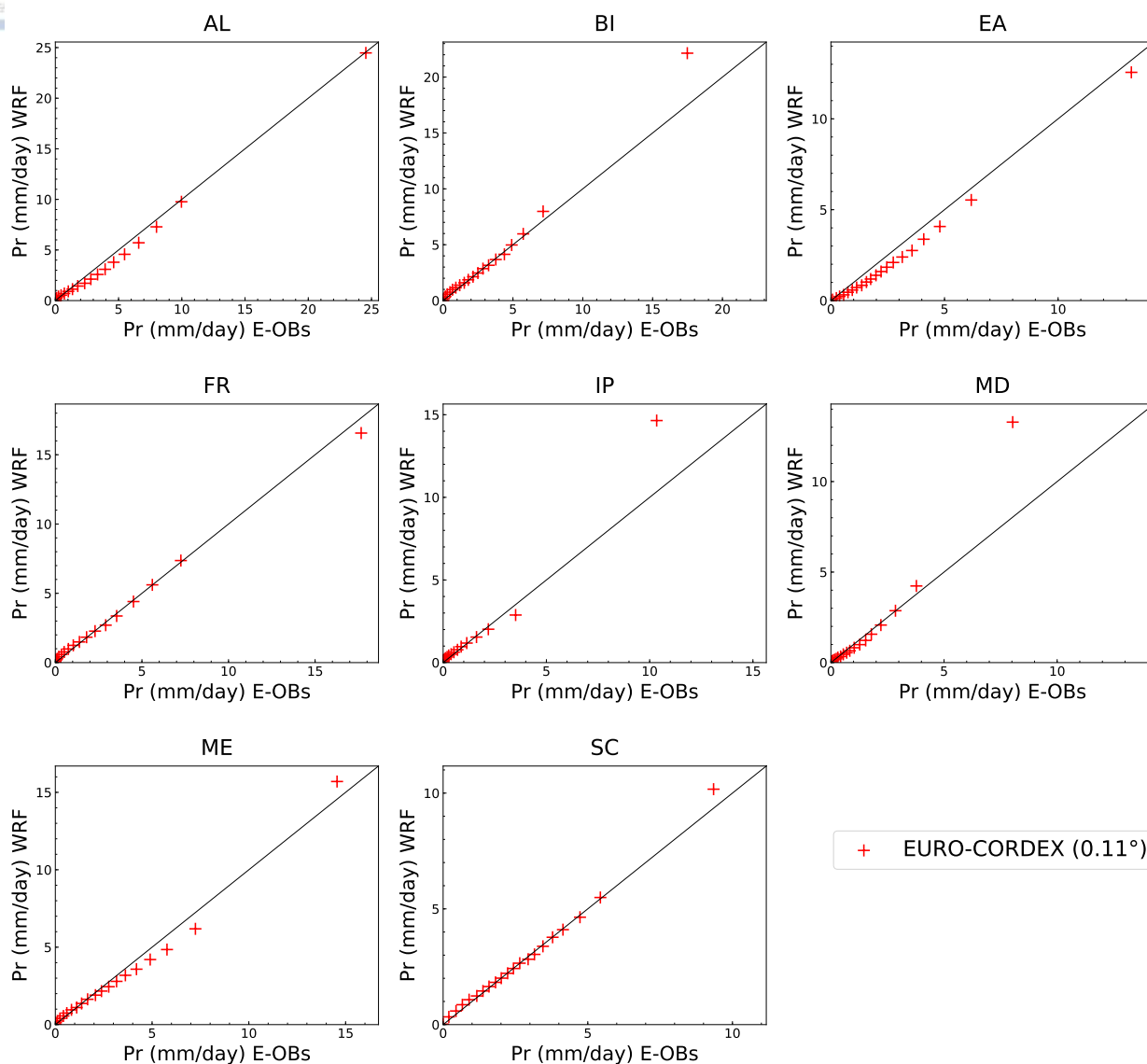
Την άνοιξη (Σχήμα 3.36) η υπερεκτίμηση στη βροχόπτωση είναι μειωμένη σε σχέση με το χειμώνα, με εξαίρεση τη Μεσόγειο και τη Σκανδιναβία που έχουν παρόμοια συμπεριφορά με το χειμώνα. Πολύ καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις παρουσιάζει η κεντρική Ευρώπη και οι Βρετανικές Νήσοι, ακόμη και στις ακραίες τιμές. Στις υ-

Q-Q plots
MAM Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.36: Q-Q plots για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

πόλοιπες περιοχές το μοντέλο υπερεκτιμά τα ημερήσια ποσά στα ακραία με μέγιστες αποκλίσεις τις Άλπεις, την ανατολική Ευρώπη και Μεσόγειο.

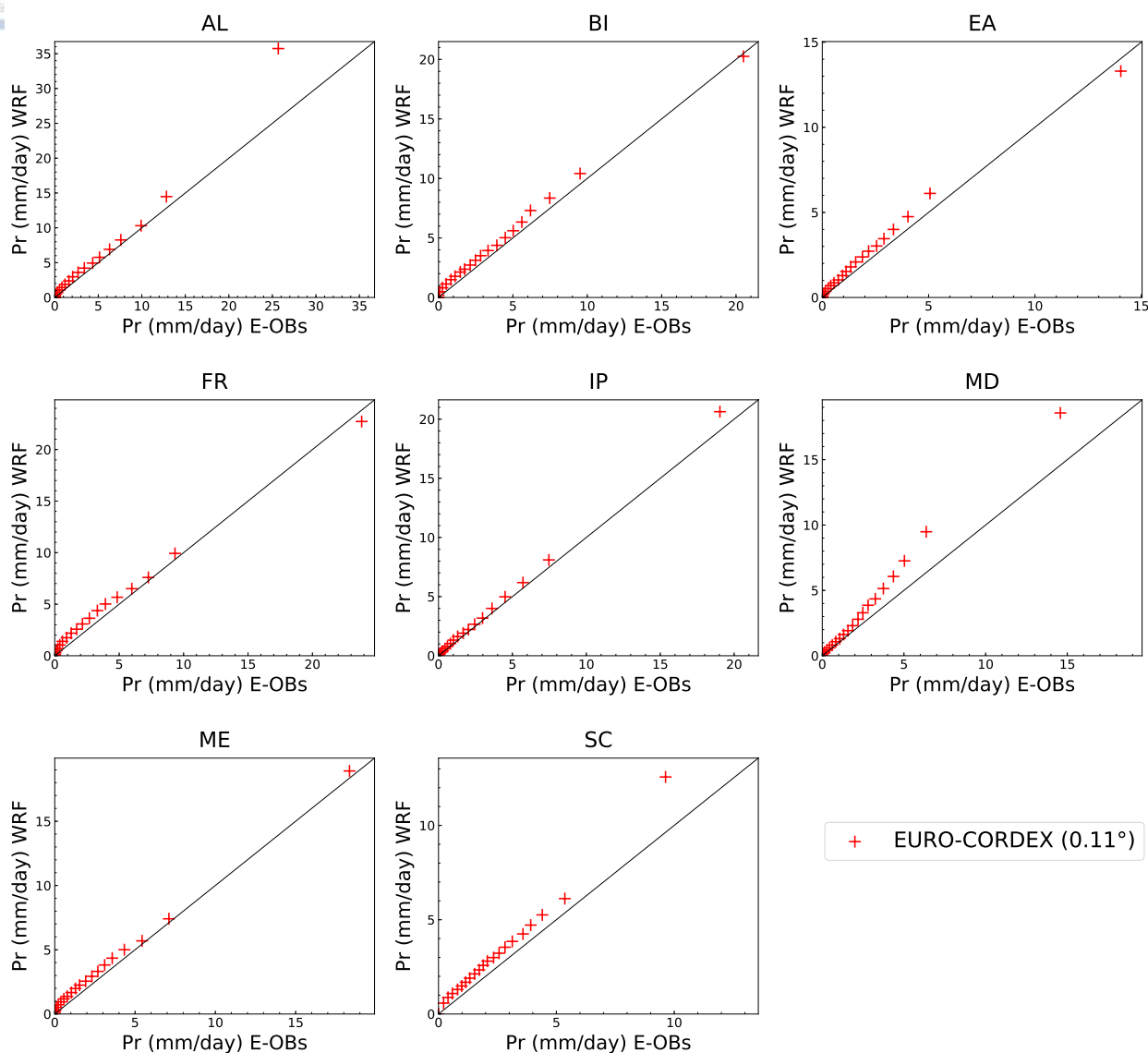
Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.37) υπάρχουν περιοχές που εμφανίζουν υποεκτίμηση της ημερήσια βροχόπτωσης (AL, EA, ME) και άλλες που προσεγγίζουν τις παρατηρήσεις τουλάχιστον για κάποιο εύρος τιμών (BI, FR, IP, MD, SC). Για παράδειγμα, στη Βρετανία πάνω από τα 5mm/day υπάρχει υπερεκτίμηση και στη Μεσόγειο άνω των 4mm/day. Οι ακραίες τιμές ημερήσιας βροχόπτωσης υπερεκτιμώνται σε 5 από τις 8 περιοχές (BI, IP, MD, ME, SC), σε δύο υποεκτιμώνται (EA, FR) και μόνο στις Άλπεις προσομοιώνονται ικανοποιητικά. Επίσης, οι τιμές βροχής της κύριας κατανομής στη

Q-Q plots
JJA Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.37: Q-Q plots για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

Σκανδιναβία και τη Γαλλία βρίσκονται αρκετά κοντά στις παρατηρήσεις το καλοκαίρι.

Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.38) υπάρχει υπερεκτίμηση της ημερήσιας βροχόπτωσης σε όλες τις περιοχές. Το μεγαλύτερο σφάλμα εμφανίζει η περιοχή της Μεσογείου, ιδιαίτερα όσο μεγαλώνουν τα ποσά βροχής. Τα ακραία υπερεκτιμώνται σε πολλές περιοχές (AL, IP, MD, ME, SC), σε άλλες υπάρχει υποεκτίμηση (EA, FR) και μόνο στις Βρετανικές νήσους υπάρχει σχετικά καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις.

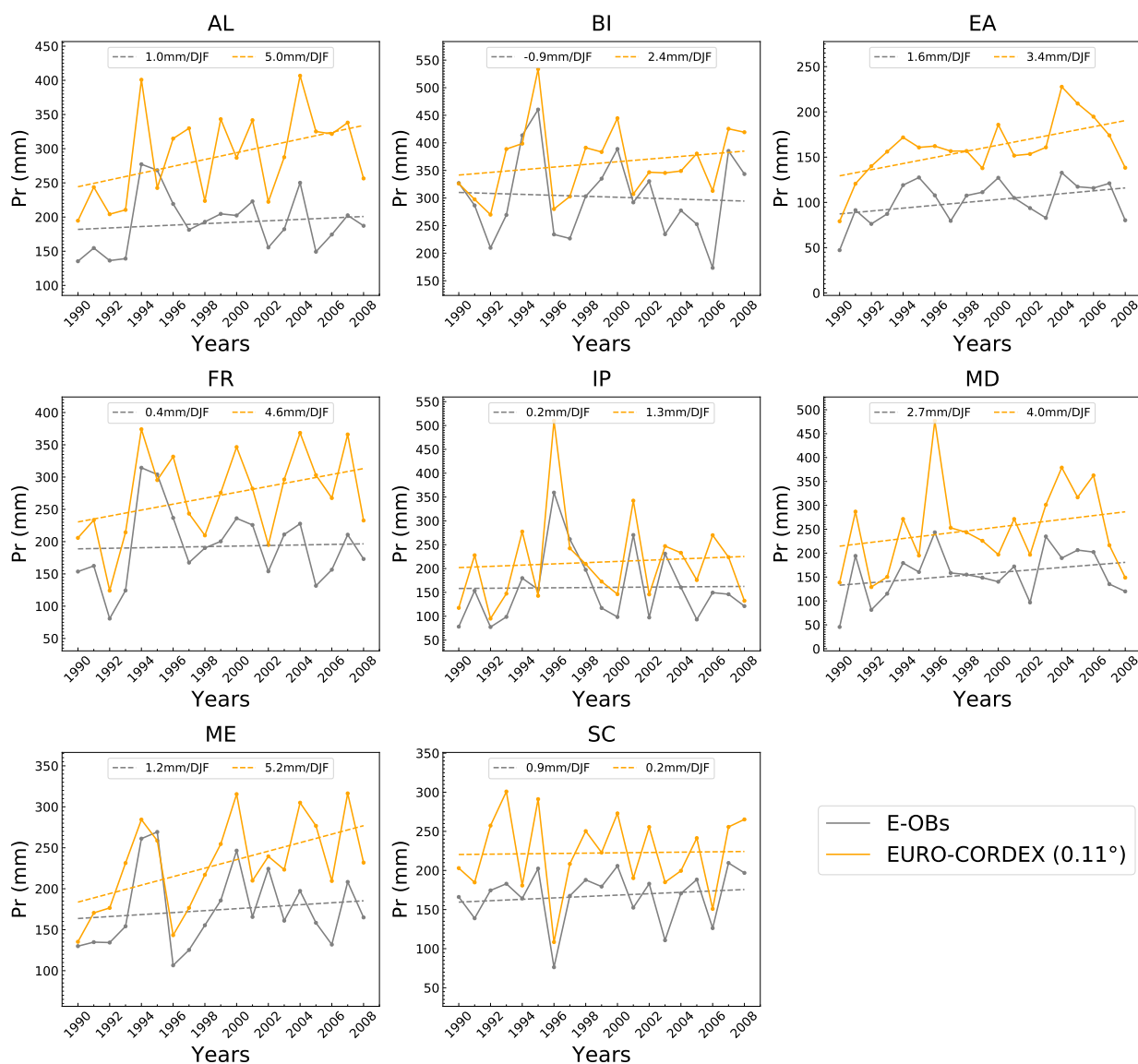
Q-Q plots
SON Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.38: Q-Q plots για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

3.1.4.3 Χρονοσειρές & Τάσεις

Στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήματα 3.39-3.41) φαίνονται οι χρονοσειρές του συνολικού ποσού βροχής ανά εποχή και περιοχή και οι αντίστοιχες τάσεις τους στον Πίνακα 3.11. Το συνολικό ποσό βροχής έχει προκύψει ως άθροισμα των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης για μια συγκεκριμένη εποχή.

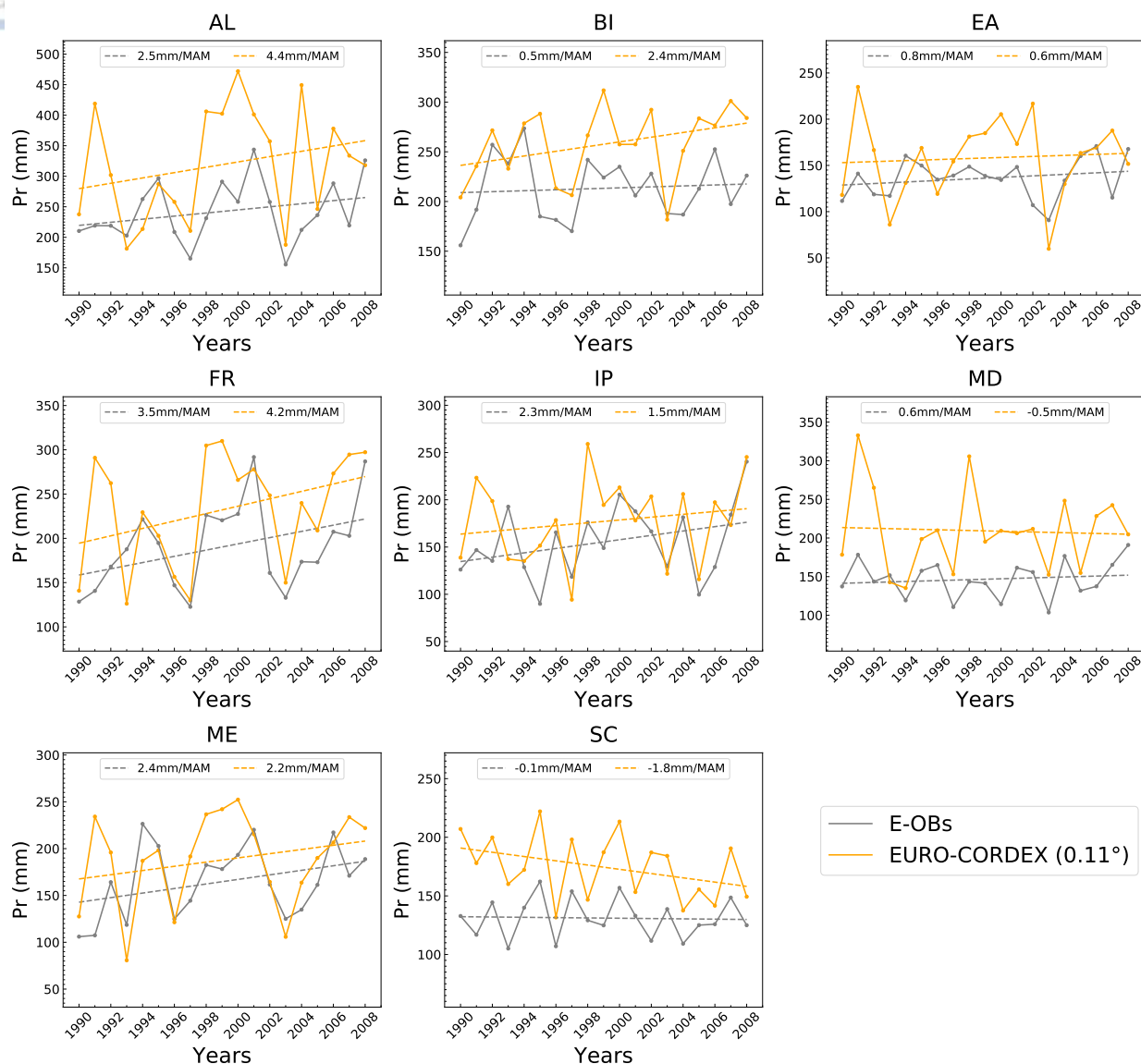
Timeseries & Trends
DJF Precipitation 1990-2008



Σχήμα 3.39: Χρονοσειρές και τάσεις για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το χειμώνα (DJF) της περιόδου 1990-2008.

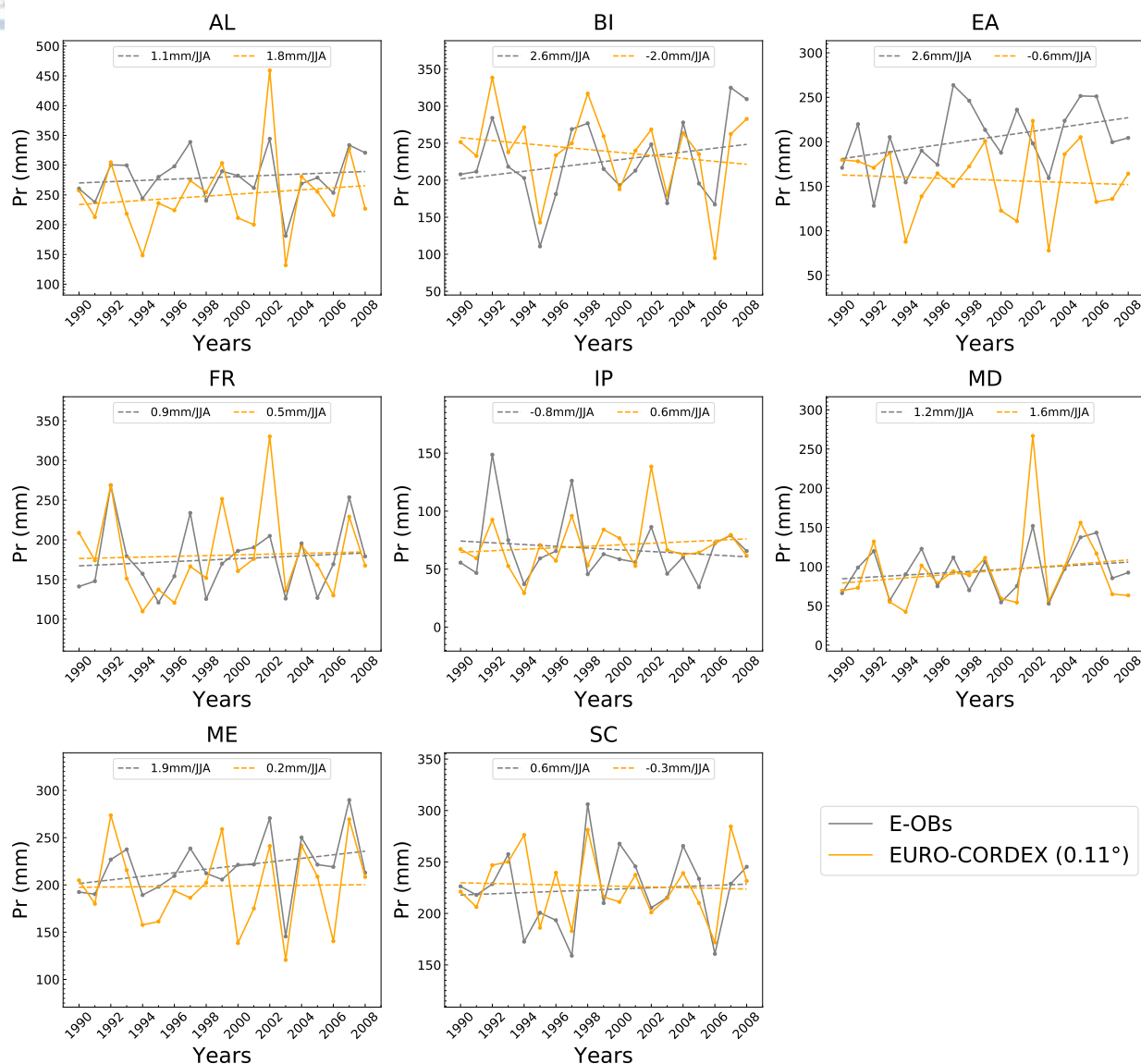
Το χειμώνα (Σχήμα 3.39) η τάση του μοντέλου συμφωνεί με την τάση των παρατηρήσεων ως προς την τάξη μεγέθους και το πρόσημό της στις περιοχές Άλπεις, ανατολική Ευρώπη, Μεσόγειος, κεντρική Ευρώπη και Σκανδιναβία, ενώ μόνο ως προς

Timeseries & Trends MAM Precipitation 1990-2008

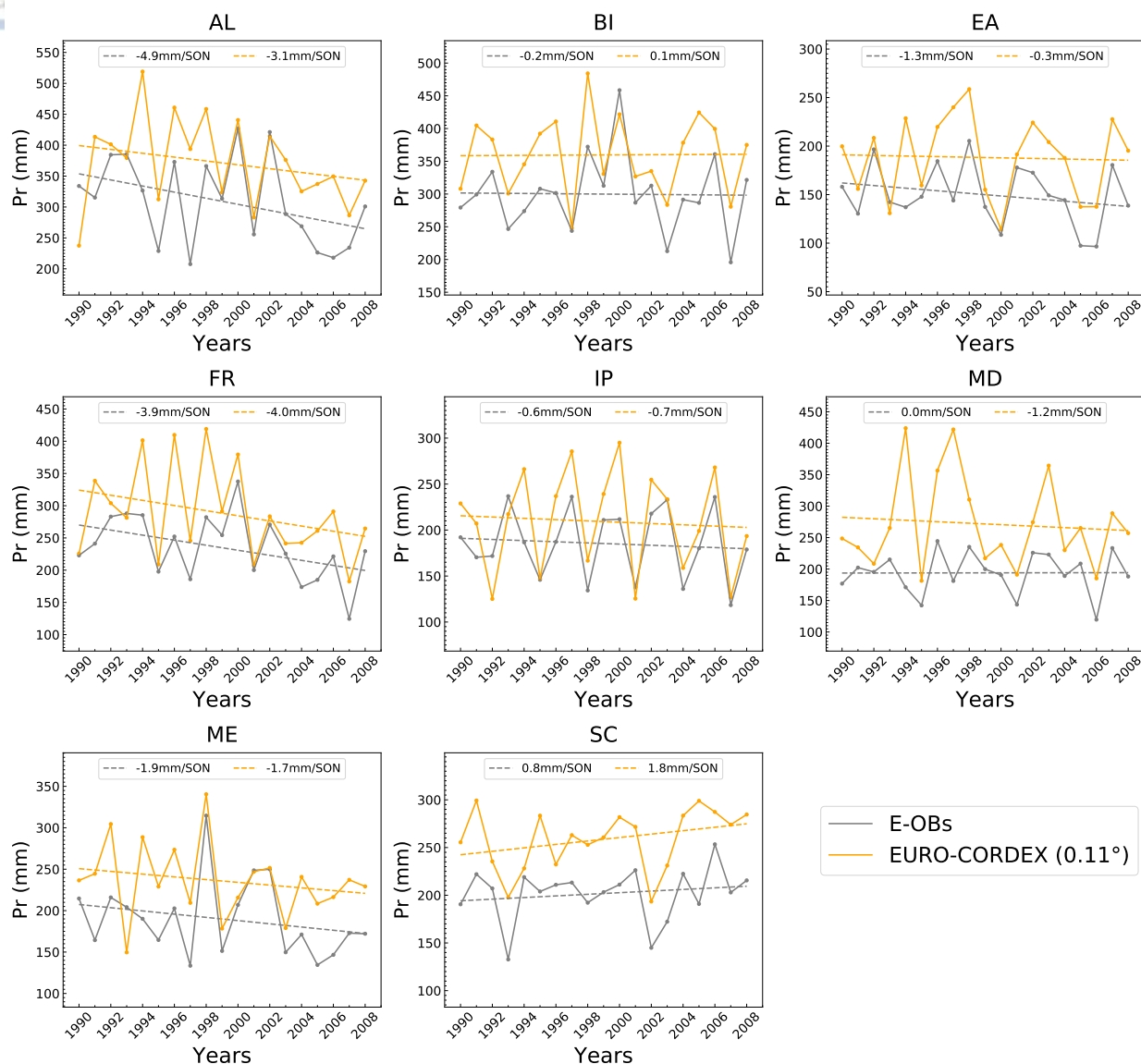


Σχήμα 3.40: Χρονοσειρές και τάσεις για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά την άνοιξη (MAM) της περιόδου 1990-2008.

το πρόσημο στη Γαλλία και Ιβηρική. Την άνοιξη (Σχήμα 3.40) η τάση συμφωνεί στο πρόσημο σε όλες τις περιοχές πλην της Μεσογείου, ενώ στη τάξη μεγέθους σε Άλπεις, ανατολική Ευρώπη, Γαλλία, Ιβηρική και κεντρική Ευρώπη. Το καλοκαίρι (Σχήμα 3.41) υπάρχει συμφωνία τάξης μεγέθους και προσήμου στις Άλπεις, Γαλλία και Μεσόγειο και επιπλέον μόνο στο πρόσημο στην κεντρική Ευρώπη. Το φθινόπωρο (Σχήμα 3.42) υπάρχει συμφωνία (πρόσημο και τάξη) στις ίδιες περιοχές με το καλοκαίρι και επιπλέον στην Ιβηρική, ενώ ως προς το πρόσημο μόνο για την ανατολική Ευρώπη και Σκανδιναβία.

Timeseries & Trends
JJA Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.41: Χρονοσειρές και τάσεις για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το καλοκαίρι (JJA) της περιόδου 1990-2008.

Timeseries & Trends
SON Precipitation 1990-2008

Σχήμα 3.42: Χρονοσειρές και τάσεις για τη βροχόπτωση για κάθε περιοχή κατά το φθινόπωρο (SON) της περιόδου 1990-2008.

Πίνακας 3.11: Τάσεις του ποσού βροχόπτωσης (mm/εποχή) ανά υποπεριοχή για την προσομοίωση EURO-CORDEX 0.11° και τις παρατηρήσεις (E-OBs).

Trends Prec [mm/DJF]		
	0.11°	E-OBs
AL	5.0	1.0
BI	2.4	-0.9
EA	3.4	1.6
FR	4.6	0.4
IP	1.3	0.2
MD	4.0	2.7
ME	5.2	1.2
SC	0.2	0.9

Trends Prec [mm/MAM]		
	0.11°	E-OBs
AL	4.4	2.5
BI	2.4	0.5
EA	0.6	0.8
FR	4.2	3.5
IP	1.5	2.3
MD	-0.5	0.6
ME	2.2	2.4
SC	-1.8	-0.1

Trends Prec [mm/JJA]		
	0.11°	E-OBs
AL	1.8	1.1
BI	-2.0	2.6
EA	-0.6	2.6
FR	0.5	0.9
IP	0.6	-0.8
MD	1.6	1.2
ME	0.2	1.9
SC	-0.3	0.6

Trends Prec [mm/SON]		
	0.11°	E-OBs
AL	-3.1	-4.9
BI	0.1	-0.2
EA	-0.3	-1.3
FR	-4.0	-3.9
IP	-0.7	-0.6
MD	-1.2	0.0
ME	-1.7	-1.9
SC	1.8	0.8

3.2 CORDEX-CPS 0.15° & 0.03°

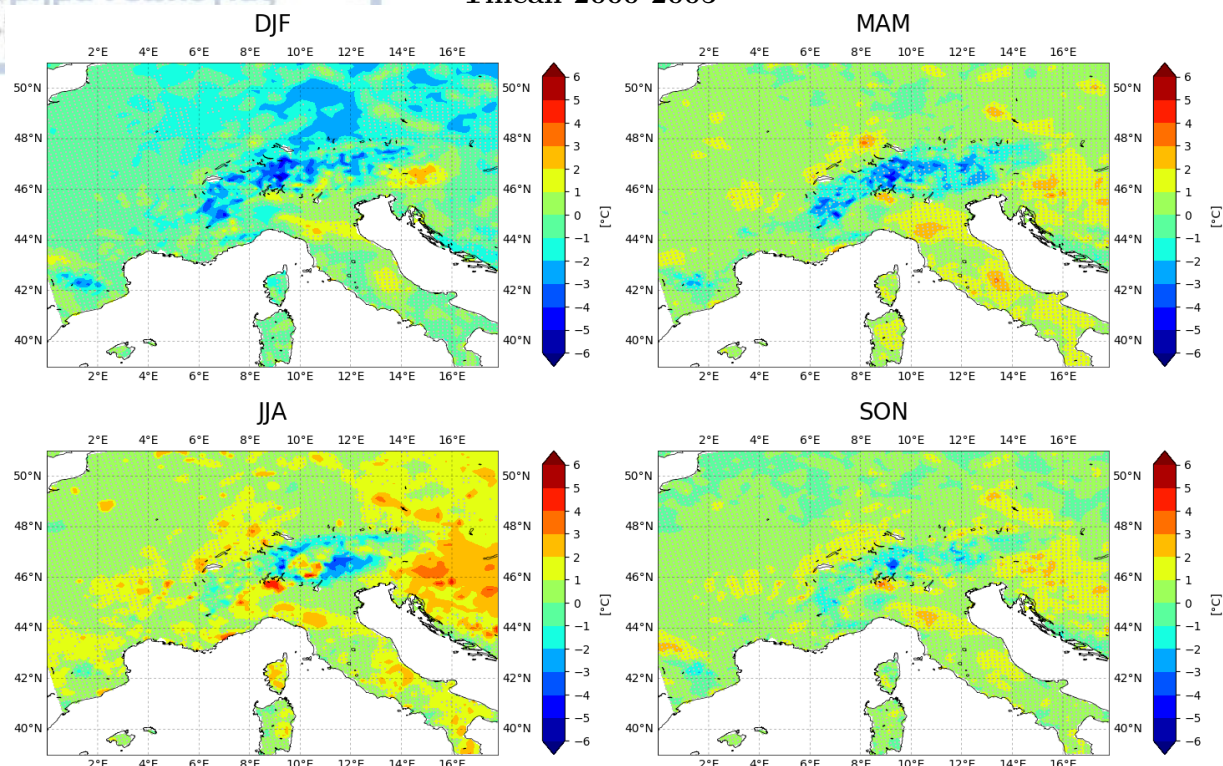
Στο κεφάλαιο 3.2 γίνεται αξιολόγηση της προσομοίωσης CORDEX-CPS για την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων σε δύο αναλύσεις (0.15° & 0.03°). Οι μεταβλητές που αξιολογούνται είναι η μέση, μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία σε σχέση με τα δεδομένα MESAN και ο υετός σε σχέση με τα EURO4M. Εκτός από την αξιολόγηση και την ανάλυση των σφαλμάτων της προσομοίωσης, γίνεται επιπλέον σύγκριση των δύο αναλύσεων με σκοπό τη διερεύνηση της προστιθέμενης αξίας.

3.2.1 Μέση Θερμοκρασία

3.2.1.1 Μέσο Bias (0.15°)

Στο Σχήμα 3.43 απεικονίζεται το bias της μέσης θερμοκρασίας στα 2m για την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων κατά τη διάρκεια της περιόδου 2000-2005. Το χειμώνα (DJF) παρουσιάζεται ψυχρό bias κυρίως στη ζώνη γεωγραφικών πλατών 45-48° όπου βρίσκεται η οροσειρά των Άλπεων, αλλά και βόρεια αυτής. Το καλοκαίρι (JJA) κυριαρχεί το θερμό bias στο ανατολικό τμήμα της περιοχής και σε μεμονωμένα τμήματα των Άλπεων και της Ιταλίας. Επιπλέον, ένα τμήμα του ψυχρού bias που κυριαρχούσε το χειμώνα παραμένει στη ζώνη 45-48°. Την άνοιξη (MAM) το μοντέλο εμφανίζεται ψυχρότερο στην ίδια ζώνη, ενώ το φθινόπωρο (SON) το ψυχρό bias εξασθενεί αρκετά. Συνολικά, το χειμώνα το bias παρουσιάζει αρνητική μέση τιμή (-0.8°C) σε όλη την περιοχή και τις υπόλοιπες τρεις εποχές παρουσιάζει θετικές τιμές (0.4°C, 0.9°C, 0.4°C άνοιξη, καλοκαίρι και φθινόπωρο αντίστοιχα), με μέγιστη το καλοκαίρι.

Mean Bias (0.15°) T_{mean} 2000-2005

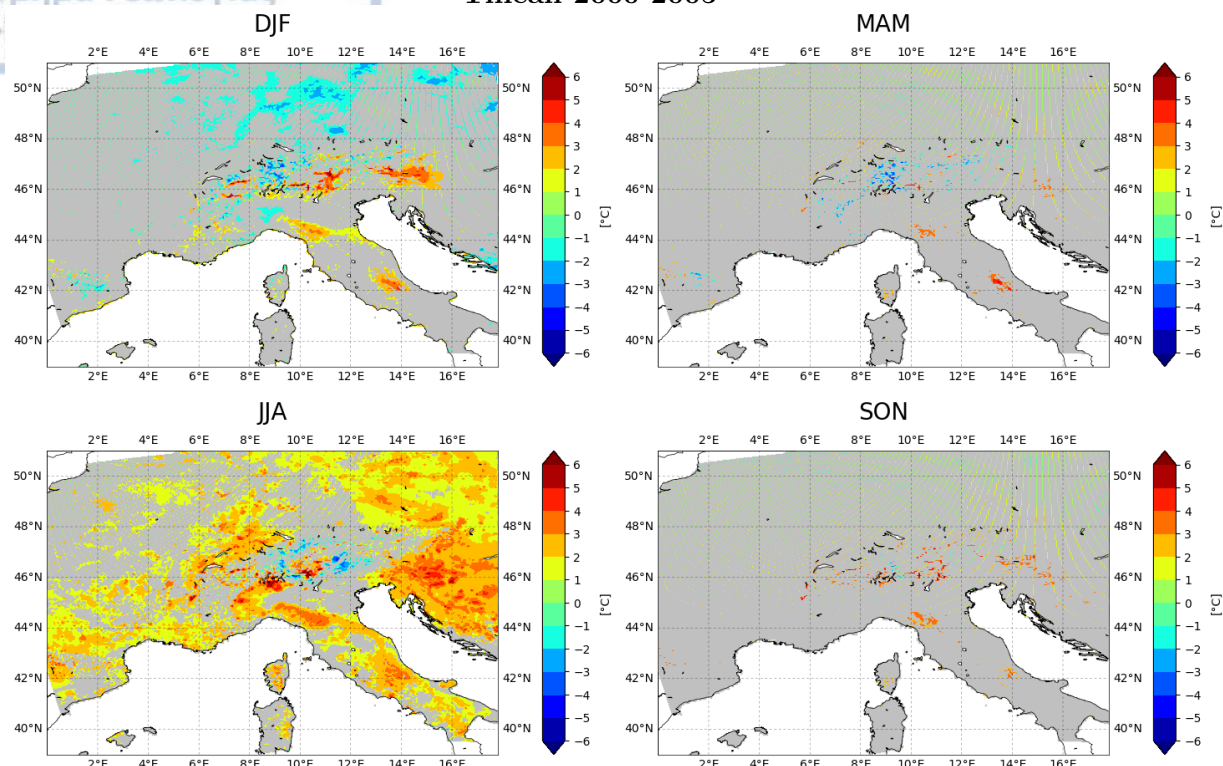


Σχήμα 3.43: Μέσο bias (WRF-MESAN) της μέσης θερμοκρασίας (°C) στο πλέγμα του WRF (0.15°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

3.2.1.2 Μέσο Bias (0.03°)

Το Σχήμα 3.44 παρουσιάζει το μέσο bias για την υψηλότερη ανάλυση στα 3km. Εδώ φαίνεται να μετριάζεται το ψυχρό bias του χειμώνα τόσο ακριβώς πάνω από την οροσειρά των Άλπεων όσο και βορειότερα, αλλά ταυτόχρονα εντείνεται το θερμό bias που εμφανιζόταν νότια και ανατολικά της οροσειράς. Το καλοκαίρι είναι ακόμα πιο έντονη η επέκταση και ενίσχυση του θερμού bias σε μεγάλο τμήμα της περιοχής, με μέγιστο στα ανατολικά της οροσειράς. Υψηλές τιμές εμφανίζονται επίσης και στο κεντρικό τμήμα της. Την άνοιξη ιδιαίτερα και λίγο το φθινόπωρο, το ψυχρό bias που υπήρχε στα 15km έχει περιοριστεί κατά πολύ. Η μέση τιμή του bias για όλη την περιοχή αυξήθηκε για την άνοιξη (0.6°C), το καλοκαίρι (1.5°C), και το φθινόπωρο (0.9°C), αλλά μειώθηκε για το χειμώνα (-0.3°C).

Mean Bias (0.03°)
T_{mean} 2000-2005

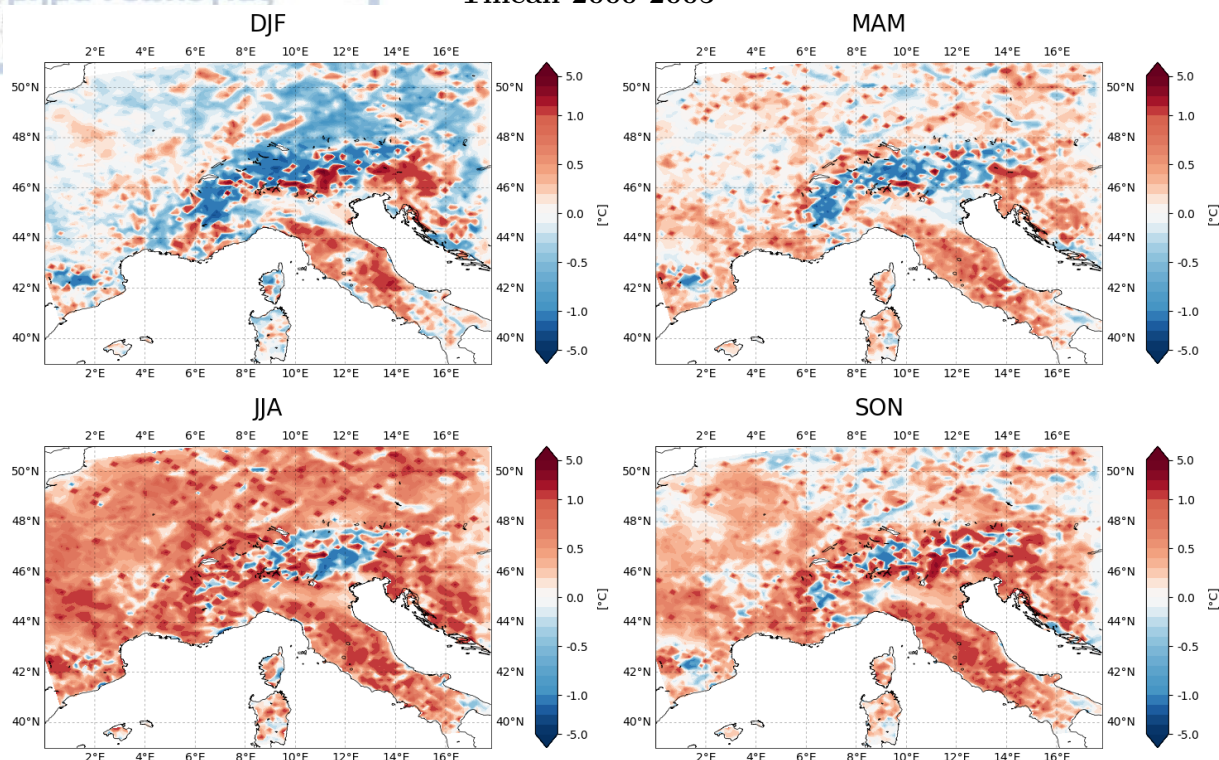


Σχήμα 3.44: Μέσο bias (WRF-MESAN) της μέσης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα των MESAN (0.05°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι γκριζες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

3.2.1.3 Διαφορές μέσου bias (0.03° - 0.15°)

Στο Σχήμα 3.45 φαίνονται οι διαφορές του απόλυτου bias της χαμηλότερης (0.15°) από την υψηλότερη ανάλυση (0.03°) για τη μέση θερμοκρασία. Τα θερμά χρώματα υποδηλώνουν επιδείνωση του bias στην υψηλότερη ανάλυση, ενώ τα ψυχρά υποδηλώνουν βελτίωση. Από τις τέσσερις εποχές η πιο εμφανής βελτίωση φαίνεται να υπάρχει το χειμώνα, όπου σε μεγάλα τμήματα των Άλπεων και βορειότερα το bias μειώνεται κατά απόλυτη τιμή περίπου (0.5 - 1°C). Ωστόσο, στη ζώνη γύρω από τις 46° το bias είναι μεγαλύτερο στα 3km, όπως και σε ένα μεγάλο τμήμα της Ιταλίας. Τις υπόλοιπες εποχές η εικόνα είναι διαφορετική: την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο υπάρχει βελτίωση κυρίως στο κεντρικό τμήμα της οροσειράς των Άλπεων, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές επικρατεί επιδείνωση του bias ($>0.5^{\circ}\text{C}$). Φαίνεται δηλαδή, ότι καθώς περνάμε από την ψυχρή στη θερμή περίοδο η βελτίωση στην υψηλότερη ανάλυση περιορίζεται σε ένα μικρό τμήμα της περιοχής και ταυτόχρονα το μοντέλο γίνεται περισσότερο θερμό από πριν.

Mean Bias $|0.03^\circ| - |0.15^\circ|$
T_{mean} 2000-2005

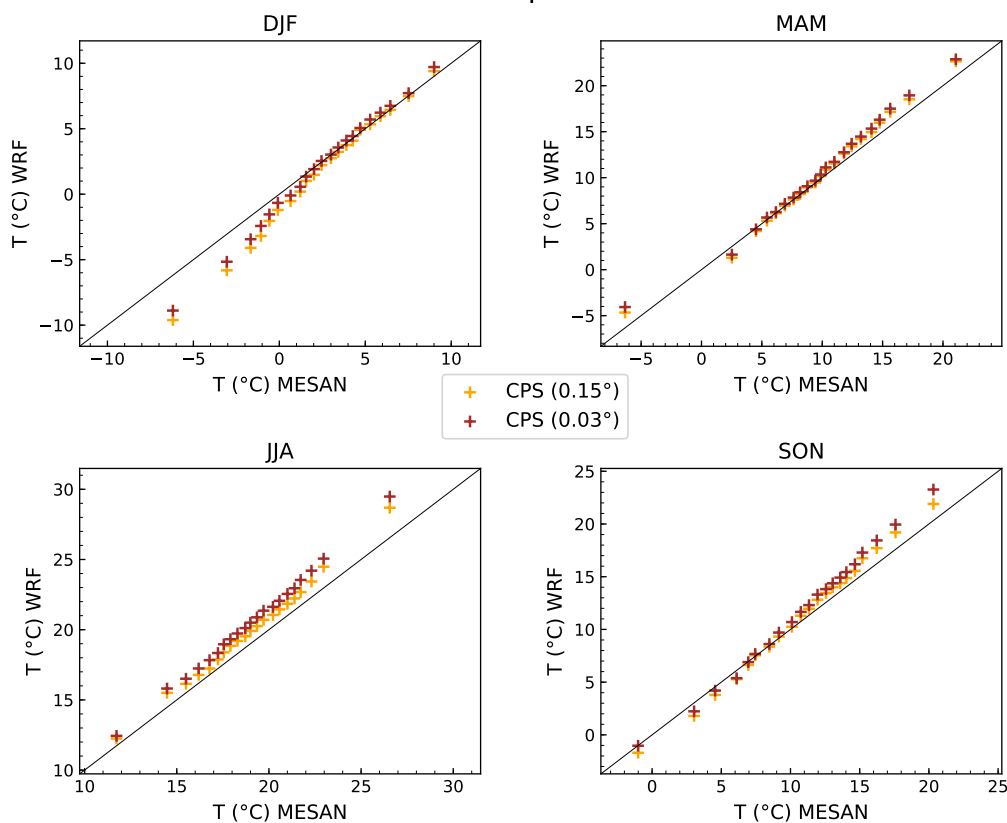


Σχήμα 3.45: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.03^\circ}| - |MB_{0.15^\circ}|$) της μέσης θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$) στο πλέγμα των 0.15° ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005.

3.2.1.4 Q-Q plots

Τα q-q plots του σχήματος 3.46 αναφέρονται στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων που αναλύθηκε και παραπάνω για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005. Κατά το χειμώνα, το μοντέλο υποεκτιμά αισθητά τη μέση θερμοκρασία για χαμηλές τιμές θερμοκρασιών μέχρι και τους 2°C . Οι προσομοιώσεις στις αναλύσεις 0.15° και 0.03° διαφοροποιούνται κυρίως για χαμηλές θερμοκρασίες (-6 έως 2°C), όπου η υψηλότερη ανάλυση βρίσκεται πιο κοντά στα δεδομένα αναφοράς. Από και έπειτα οι αναλύσεις βρίσκονται αρκετά κοντά η μία με την άλλη και προσεγγίζουν τη διαγώνιο. Το καλοκαίρι είναι φανερό ότι υπάρχει υπερεκτίμηση της μέσης θερμοκρασίας και από τις δύο αναλύσεις. Ωστόσο, σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών η χαμηλή ανάλυση (0.15°) βρίσκεται πιο κοντά στις παρατηρήσεις. Την άνοιξη παρουσιάζεται υπερεκτίμηση για θερμοκρασίες πάνω από τους 10°C περίπου, αλλά και σε ακραία χαμηλές τιμές ($<-5^\circ\text{C}$). Μικρές διαφορές εμφανίζονται λόγω διαφορετικής ανάλυσης, με την χαμηλότερη να παρουσιάζει ελαφρώς μικρότερα θερμά bias στις περιοχές υπερεκτίμησης. Το φθινόπωρο, στις περιοχές υποεκτίμησης της θερμοκρασίας (-1 έως 7°C) η υψηλότερη ανάλυση βρίσκεται πιο κοντά στη διαγώνιο, ενώ στις περιοχές υπερεκτίμησης ($>10^\circ\text{C}$) η χαμηλότερη ανάλυση αντικατοπτρίζει καλύτερα τα δεδομένα αναφοράς.

Q-Q plots
Tmean 2000-2005
Alps



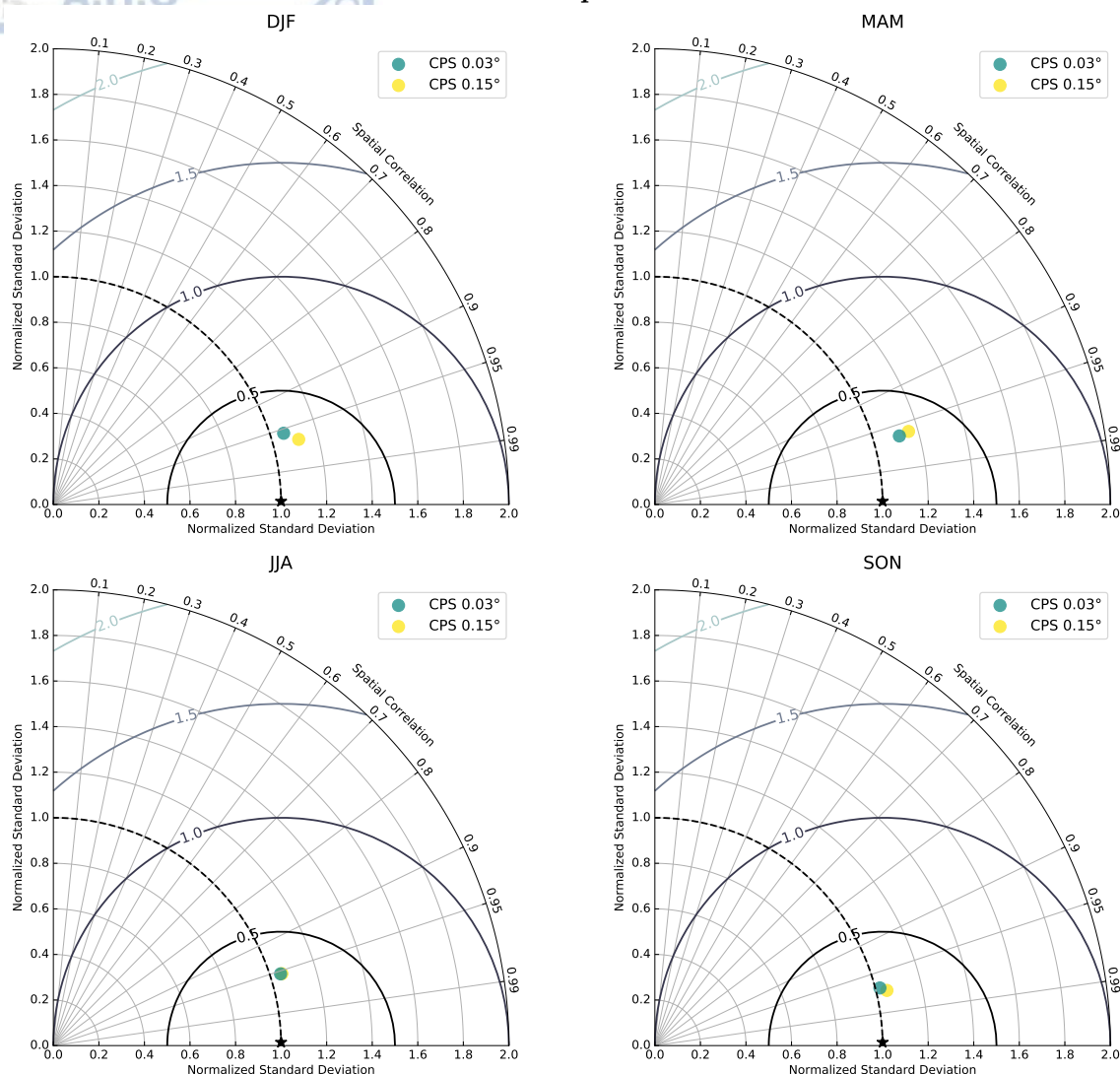
Σχήμα 3.46: Q-Q plots της μέσης θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

3.2.1.5 Διαγράμματα Taylor

Στα διαγράμματα Taylor που φαίνονται στο Σχήμα 3.47 για κάθε εποχή κάθε σημείο αναπαριστά τα βασικά μεγέθη που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 (συσχέτιση, CRMSD, κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση) για τις δύο αναλύσεις του μοντέλου (0.15°, 0.03°) στην περιοχή των Άλπεων. Όσο πιο κοντά βρίσκονται τα σημεία στη διακεκομμένη μαύρη γραμμή, τόσο πιο κοντά βρίσκεται η τυπική τους απόκλιση σε αυτή των δεδομένων αναφοράς (στην προκειμένη MESAN). Επιπλέον, η ακτινική τους απόσταση δείχνει πόσο καλή είναι η συσχέτισή τους με τα δεδομένα αναφοράς και η θέση τους σε σχέση με τα ημικύκλια δείχνει το σφάλμα τους CRMSD.

Σε όλες τις εποχές η συσχέτιση των μοντέλων και των παρατηρήσεων είναι μεγάλη (>0.95). Το χειμώνα και το φθινόπωρο η ανάλυση 0.15° παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη συσχέτιση από την 0.03°, ενώ τις άλλες δύο εποχές οι διαφορές είναι μικρότερες. Όσον αφορά την τυπική απόκλιση, η 0.03° εμφανίζει μικρότερη τιμή σε όλες σχεδόν τις εποχές. Το CRMSD είναι μεγαλύτερο για την 0.03° για το χειμώνα και το φθινόπωρο.

Taylor Plots T_{mean} 2000-2005 Alps



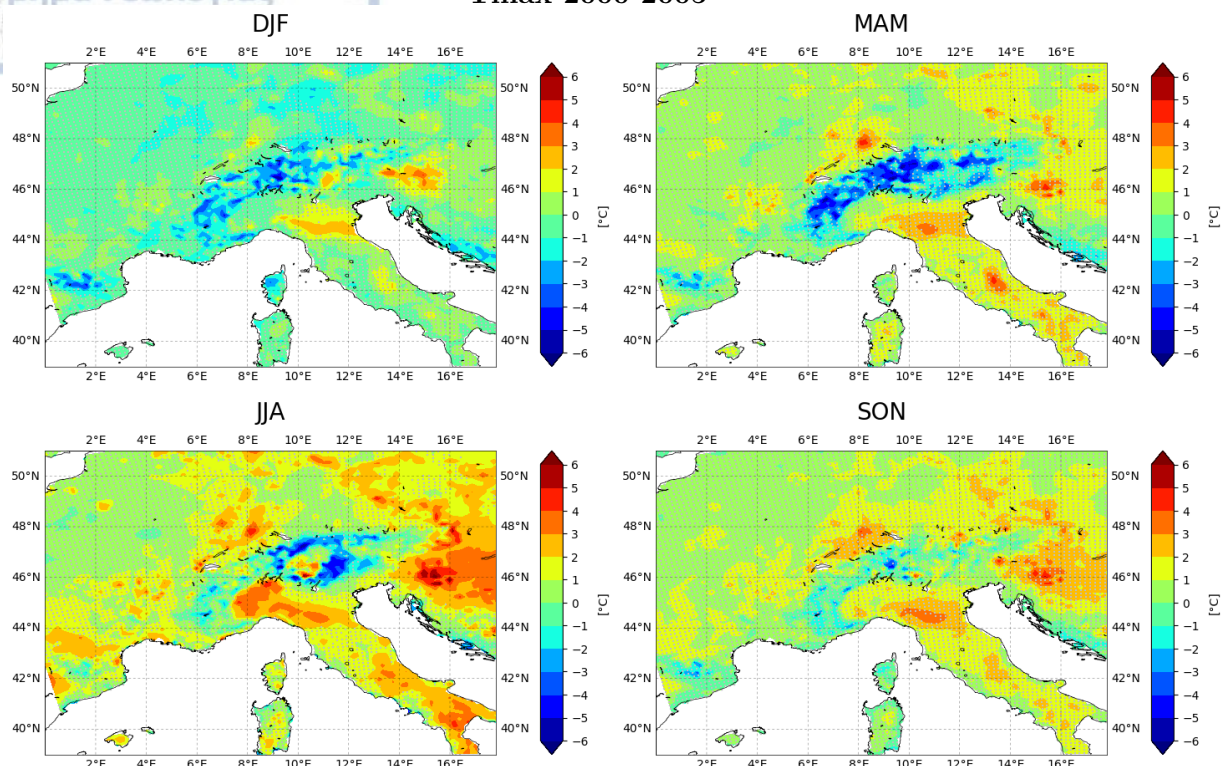
Σχήμα 3.47: Διαγράμματα Taylor της μέσης θερμοκρασίας στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

3.2.2 Μέγιστη Θερμοκρασία

3.2.2.1 Μέσο Bias (0.15°)

Το Σχήμα 3.48 αναφέρεται στο bias της μέγιστης θερμοκρασίας το χειμώνα. Χαρακτηριστικό είναι το ψυχρό τμήμα στα υψίπεδα των Άλπεων που φτάνει και τους -4°C , ενώ υπάρχουν και τμήματα που χαρακτηρίζονται από θερμό bias στα νότια και ανατολικά αυτής ($2-4^{\circ}\text{C}$). Την άνοιξη όλες αυτές οι περιοχές ενισχύονται και επεκτείνονται, ιδιαίτερα το ψυχρό bias πάνω περιοχές έντονης ορογραφίας των Άλπεων που φτάνει τους -6°C τοπικά. Το καλοκαίρι ενισχύεται το θερμό bias που κυριαρχεί σε πολλά μικρά τμήματα της περιοχής, με εντονότερο αυτό στη ζώνη γεωγραφικών μηκών

Mean Bias (0.15°) Tmax 2000-2005



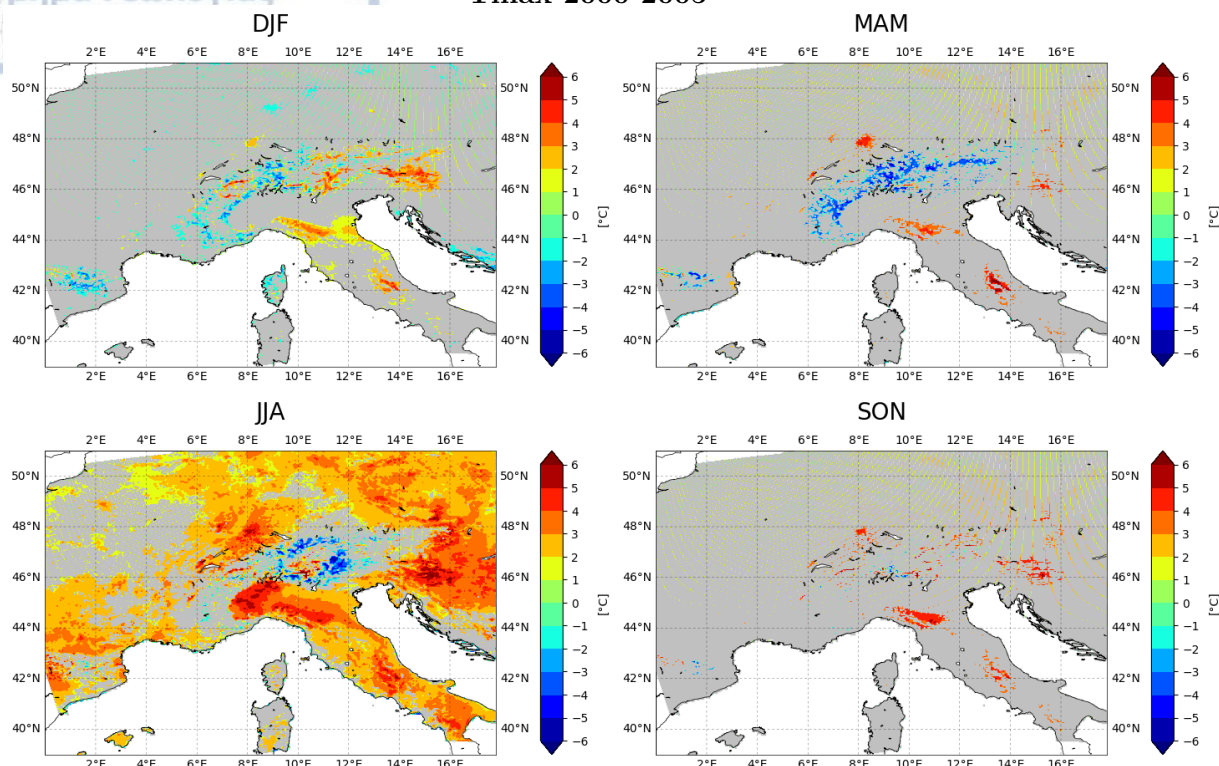
Σχήμα 3.48: Μέσο bias (WRF-MESAN) της μέγιστης θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$) στο πλέγμα του WRF (0.15°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

$14-18^\circ$. Ωστόσο, εξακολουθεί το μοντέλο να είναι πιο ψυχρό σε τμήμα των Άλπεων. Το φθινόπωρο οι σημαντικές διαφορές περιορίζονται στο βόρειο τμήμα της Ιταλίας ($3-4^\circ\text{C}$) και στη ζώνη μηκών $14-18^\circ$. Με βάση τις μέσες τιμές του bias της ευρύτερης περιοχής που περιγράφεται, ο χειμώνας χαρακτηρίζεται από ψυχρό bias (-0.5°C), ενώ οι υπόλοιπες εποχές από θερμό, με μέγιστο το καλοκαίρι ($0.6, 1.2, 0.8^\circ\text{C}$ για άνοιξη, καλοκαίρι και φθινόπωρο αντίστοιχα).

3.2.2.2 Μέσο Bias (0.03°)

Αντίστοιχα σχήματα για την υψηλότερη ανάλυση (0.03°) φαίνονται στο Σχήμα 3.49. Το χειμώνα φαίνεται να έχει περιορισθεί χωρικά το αρνητικό bias και έχουν εμφανιστεί περισσότερες θετικές τιμές στη ζώνη $46-48^\circ$ γεωγραφικών πλατών. Επιπλέον, εξακολουθεί το μοντέλο να είναι θερμότερο στο βόρειο τμήμα της Ιταλίας. Την άνοιξη το μοντέλο υποεκτιμά τη μέγιστη θερμοκρασία στα υψίπεδα των Άλπεων, αλλά σε μικρότερη έκταση από την χαμηλότερη ανάλυση (0.15°). Το καλοκαίρι το μοντέλο υπερεκτιμά τη μέγιστη θερμοκρασία σε μεγάλα τμήματα της περιοχής, πιο εκτεταμένα από αυτά που φάνονταν στη χωρική ανάλυση 0.15° . Οι περιοχές με τις μεγαλύτερες

Mean Bias (0.03°)
Tmax 2000-2005



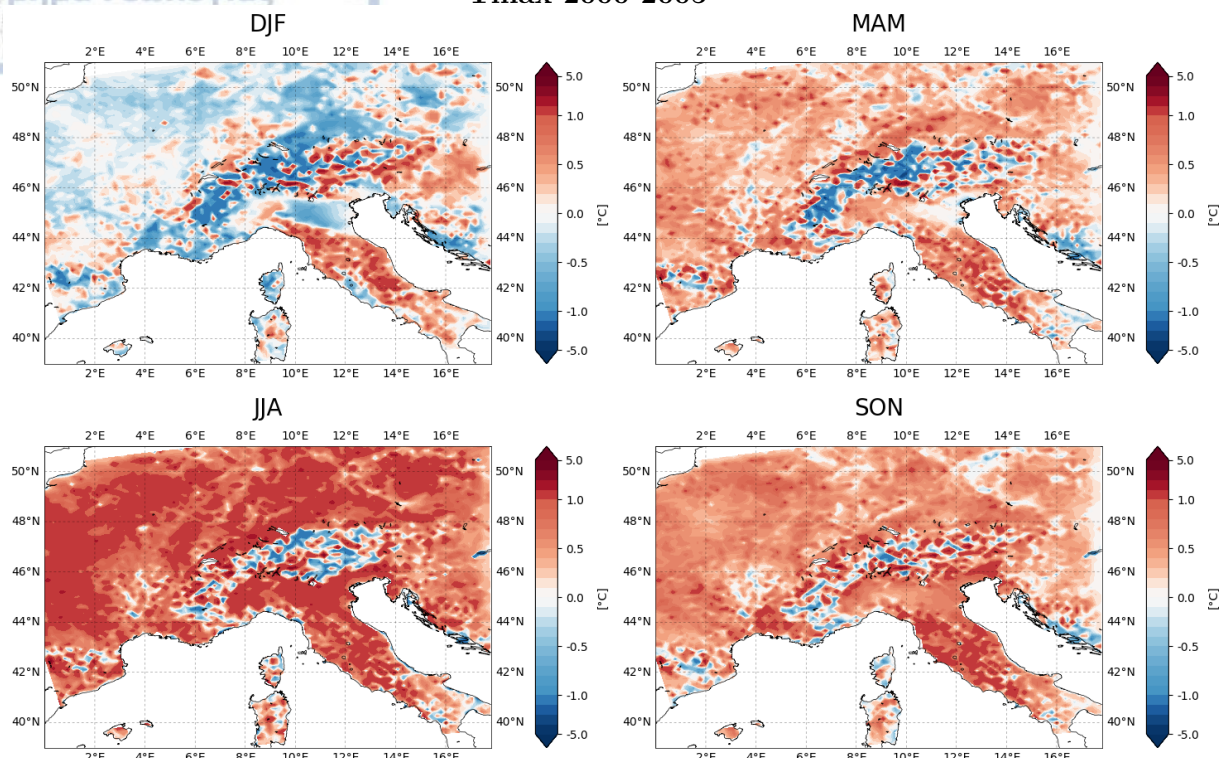
Σχήμα 3.49: Μέσο bias (WRF-MESAN) της μέγιστης θερμοκρασίας (°C) στο πλέγμα των MESAN (0.05°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι γκριζες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

τιμές θετικού bias ανήκουν στη ζώνη 44-46° γεωγραφικών πλατών νότια των Άλπεων και ανατολικότερα στη ζώνη 14-18° γεωγραφικών μηκών. Ακόμη, στο ανατολικό τμήμα της οροσειράς εμφανίζονται και κάποιες σημαντικές αρνητικές τιμές. Το φθινόπωρο σημαντικές τιμές θετικού bias εμφανίζονται μόνο τοπικά με πιο έντονο αυτό στην περιοχή της βόρειας Ιταλίας. Συνολικά, η μέση τιμή του bias της περιοχής έπεσε μόνο για το χειμώνα (-0.1°C) αλλά για τις υπόλοιπες εποχές αυξήθηκε (0.8, 1.9, 1.4°C για άνοιξη, καλοκαίρι και φθινόπωρο αντίστοιχα).

3.2.2.3 Διαφορές μέσου bias (0.03°-0.15°)

Από τις διαφορές του μέσου απόλυτου bias (Σχήμα 3.50) μπορούμε να δούμε πιο καθαρά τις αλλαγές που επήλθαν με τη βελτίωση της ανάλυσης. Από τις τέσσερις εποχές μόνο το χειμώνα φαίνεται να υπάρχει βελτίωση σε μεγάλο τμήμα της περιοχής. Συγκεκριμένα, η βελτίωση του bias είναι μεγαλύτερη στο κεντρικό τμήμα της οροσειράς (44-48° γεωγ. πλάτη) που κατά τόπους ξεπερνά τον 1°C κατ' απόλυτη τιμή. Όμως, υπάρχουν και περιοχές επιδείνωσης του bias τόσο στην ίδια την οροσειρά όσο και στον κύριο κορμό της Ιταλίας. Την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο

Mean Bias $|0.03^\circ| - |0.15^\circ|$
Tmax 2000-2005



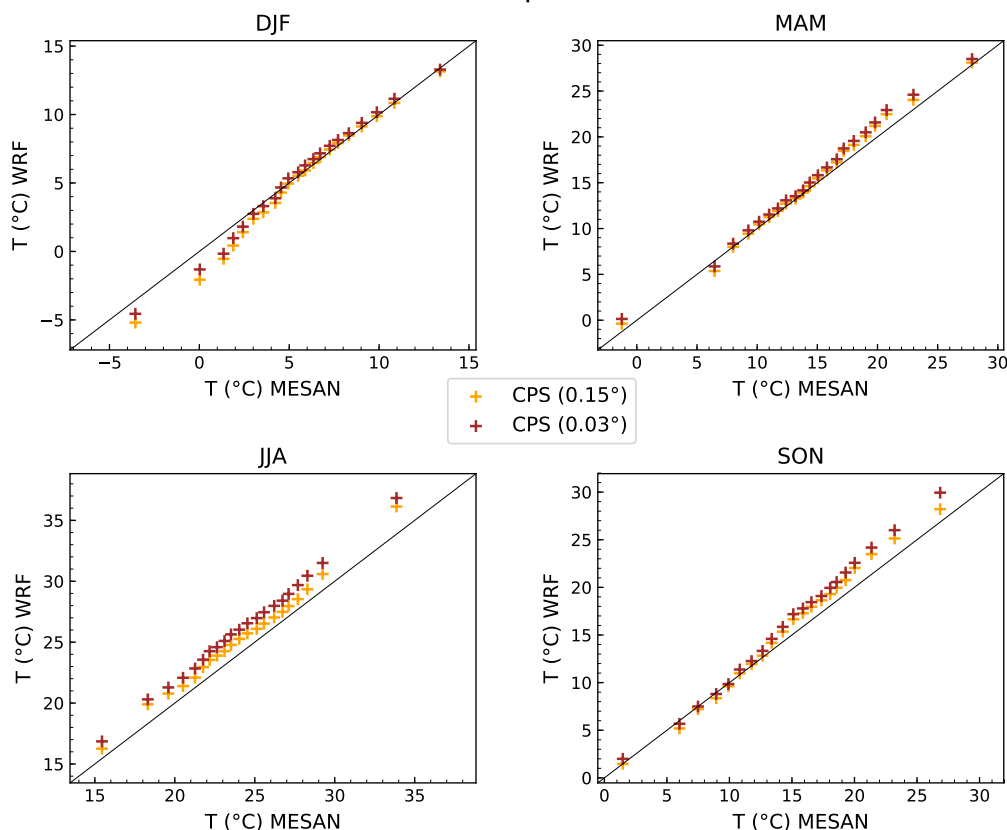
Σχήμα 3.50: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.03^\circ}| - |MB_{0.15^\circ}|$) της μέγιστης θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$) στο πλέγμα των 0.15° ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005.

κυριαρχεί επιδείνωση του bias στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής που εξετάζουμε, με εξαίρεση τμήματα της οροσειράς των Άλπεων. Εκεί και στις τρεις εποχές φαίνεται να υπάρχει βελτίωση ($>0.5^\circ\text{C}$) με μεγαλύτερες τιμές την άνοιξη. Το καλοκαίρι υπάρχει η μεγαλύτερη επιδείνωση στην ευρύτερη περιοχή (αυξήθηκε 0.7°C κατά μέσο όρο στα 0.03°).

3.2.2.4 Q-Q plots

Στα q-q plots της μέγιστης θερμοκρασίας (Σχήμα 3.51) το χειμώνα, η μέγιστη θερμοκρασία υποεκτιμάται από το μοντέλο μέχρι τους 5°C , ενώ πάνω από αυτούς υπερεκτιμάται ελαφρώς. Η ανάλυση 0.03° παρουσιάζει πιο κοντινή συμπεριφορά με τα δεδομένα αναφοράς μέχρι τους 5°C , ενώ μετά από αυτό το όριο οι δύο αναλύσεις βρίσκονται πολύ κοντά. Την άνοιξη κατά κύριο λόγο υπερεκτιμάται η μέγιστη θερμοκρασία και οι αναλύσεις δε διαφέρουν σημαντικά. Το καλοκαίρι σε όλο το εύρος θερμοκρασιών το μοντέλο είναι θερμότερο από τα MESAN. Εδώ φαίνεται επιπλέον ότι η χαμηλότερη ανάλυση (0.15°) βρίσκεται πιο κοντά στη διαγώνιο και άρα αντιπροσωπεύει καλύτερα τα δεδομένα αναφοράς. Το φθινόπωρο στις χαμηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζεται μικρή υποεκτίμηση, ενώ οι υψηλότερες υπερεκτιμώνται. Άνω των 15°C εμφανίζεται και

Q-Q plots Tmax 2000-2005 Alps



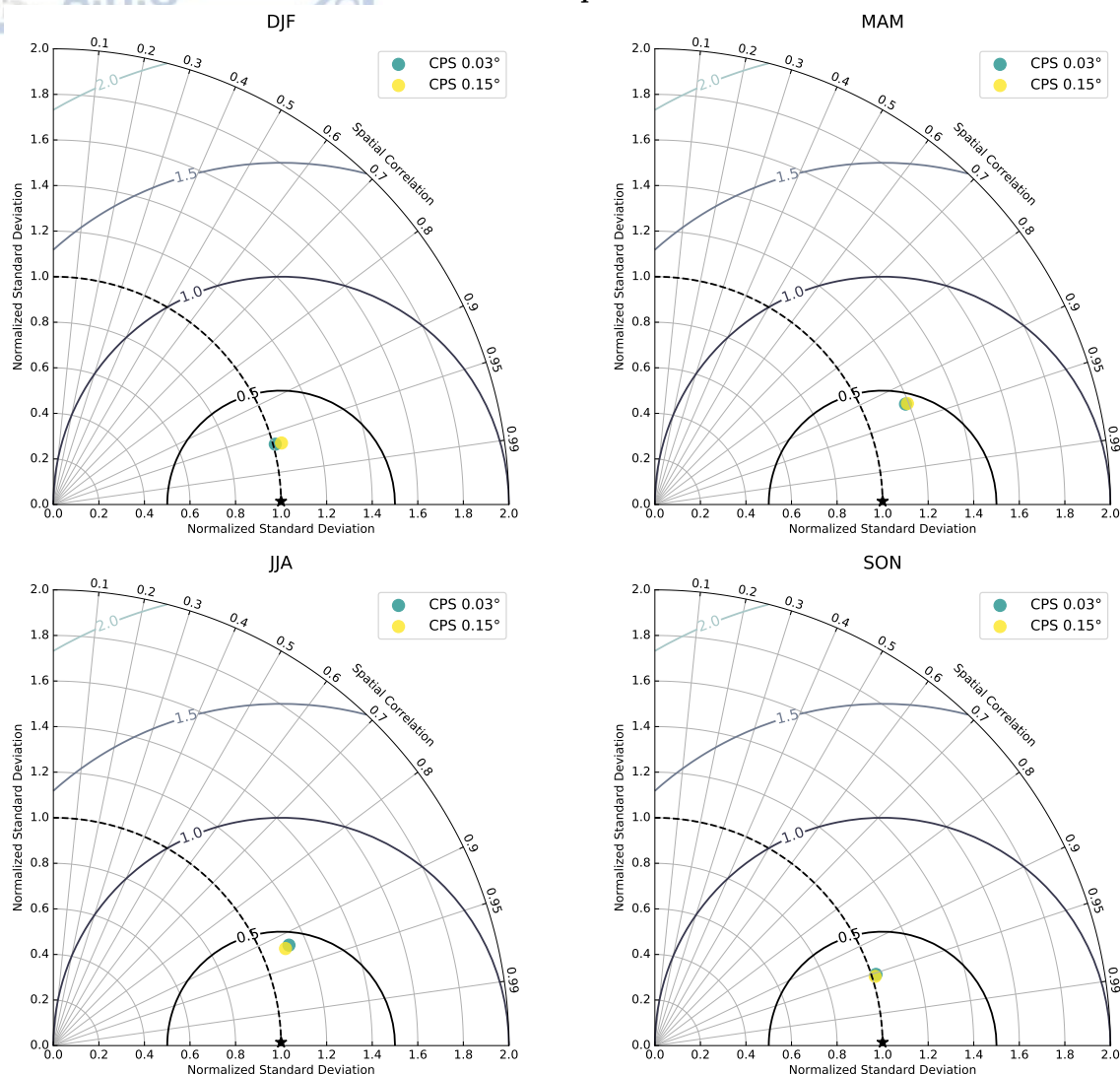
Σχήμα 3.51: Q-Q plots της μέγιστης θερμοκρασίας στην περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

διαφοροποίηση στην ανάλυση, όπου η 0.15° βρίσκεται και πάλι πιο κοντά στα MESAN.

3.2.2.5 Διαγράμματα Taylor

Για τη μέγιστη θερμοκρασία τα διαγράμματα Taylor φαίνονται στο Σχήμα 3.52. Σε όλες τις εποχές η συσχέτιση με τα δεδομένα αναφοράς είναι υψηλή (άνω του 0.9). Το χειμώνα ξεπερνά το 0.95 και το CRMSD είναι μικρότερο από 0.5. Οι διαφορετικές αναλύσεις δεν διαφοροποιούνται ιδιαίτερα, μόνο ως προς την τυπική απόκλιση που είναι ελαφρώς μικρότερη για την 0.03°. Την άνοιξη οι δύο αναλύσεις είναι πολύ κοντά για όλα τα μεγέθη, με τη συσχέτιση άνω του 0.9, την τυπική απόκλιση στο 1.2 και το CRMSD κοντά στο 0.5. Το καλοκαίρι η τυπική απόκλιση της 0.15° είναι ελαφρώς μικρότερη από την 0.03°. Το φθινόπωρο οι δύο αναλύσεις δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές: έχουν υψηλή συσχέτιση και τυπική απόκλιση κοντά σε αυτή της αναφοράς.

Taylor Plots T_{max} 2000-2005 Alps



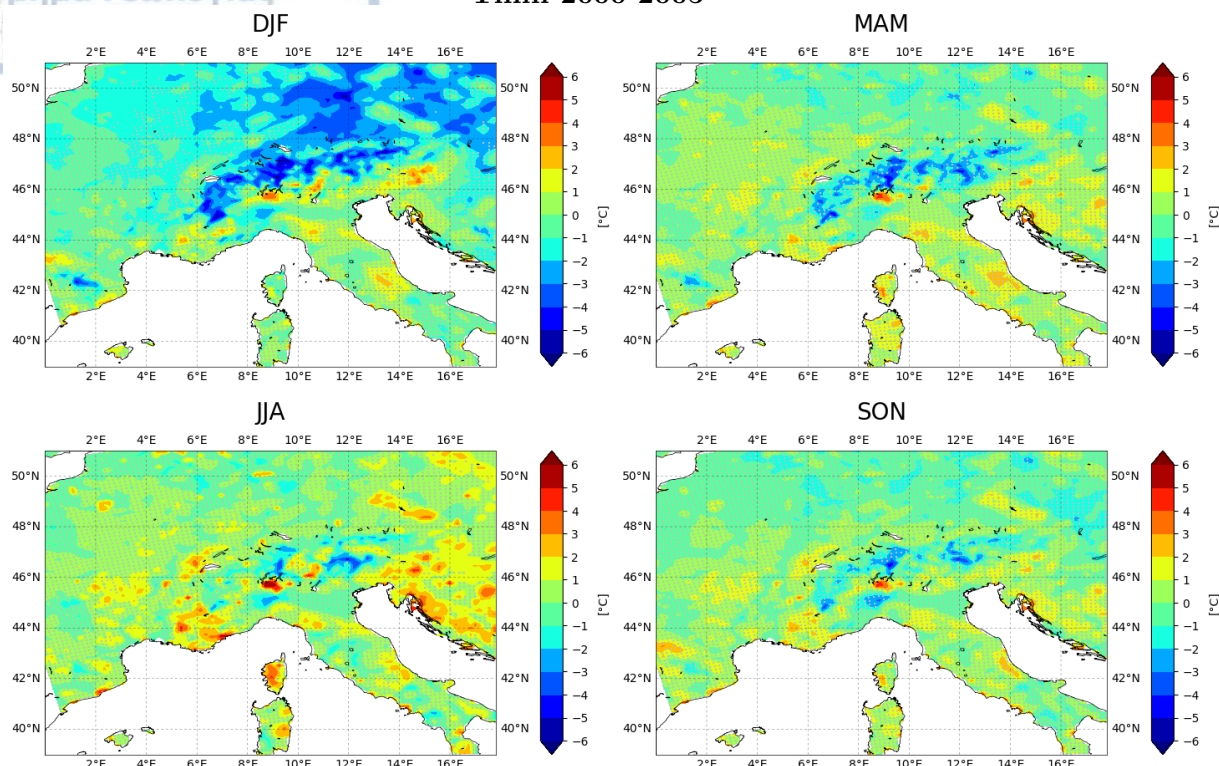
Σχήμα 3.52: Διαγράμματα Taylor της μέγιστης θερμοκρασίας στην περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

3.2.3 Ελάχιστη Θερμοκρασία

3.2.3.1 Μέσο Bias (0.15°)

Το μέσο bias της ελάχιστης θερμοκρασίας για τις τέσσερις εποχές φαίνεται στο Σχήμα 3.53. Το χειμώνα το μοντέλο εμφανίζεται πιο ψυχρό από τις παρατηρήσεις τόσο στην οροσειρά των Άλπεων, όσο και βόρεια και ανατολικά αυτής (περίπου -3 με -4°C). Την άνοιξη το ψυχρό bias εξακολουθεί να υπάρχει στην περιοχή των Άλπεων. Το καλοκαίρι το ψυχρό bias έχει περιοριστεί και έχουν εμφανιστεί περιοχές με θερμό bias (2-4°C περίπου). Το φθινόπωρο δεν υπάρχουν τόσο μεγάλες τιμές bias παρά μόνο κάποια μεμονωμένα θερμά ή ψυχρά τμήματα. Η μέση τιμή του bias στις τέσσερις εποχές

Mean Bias (0.15°) Tmin 2000-2005



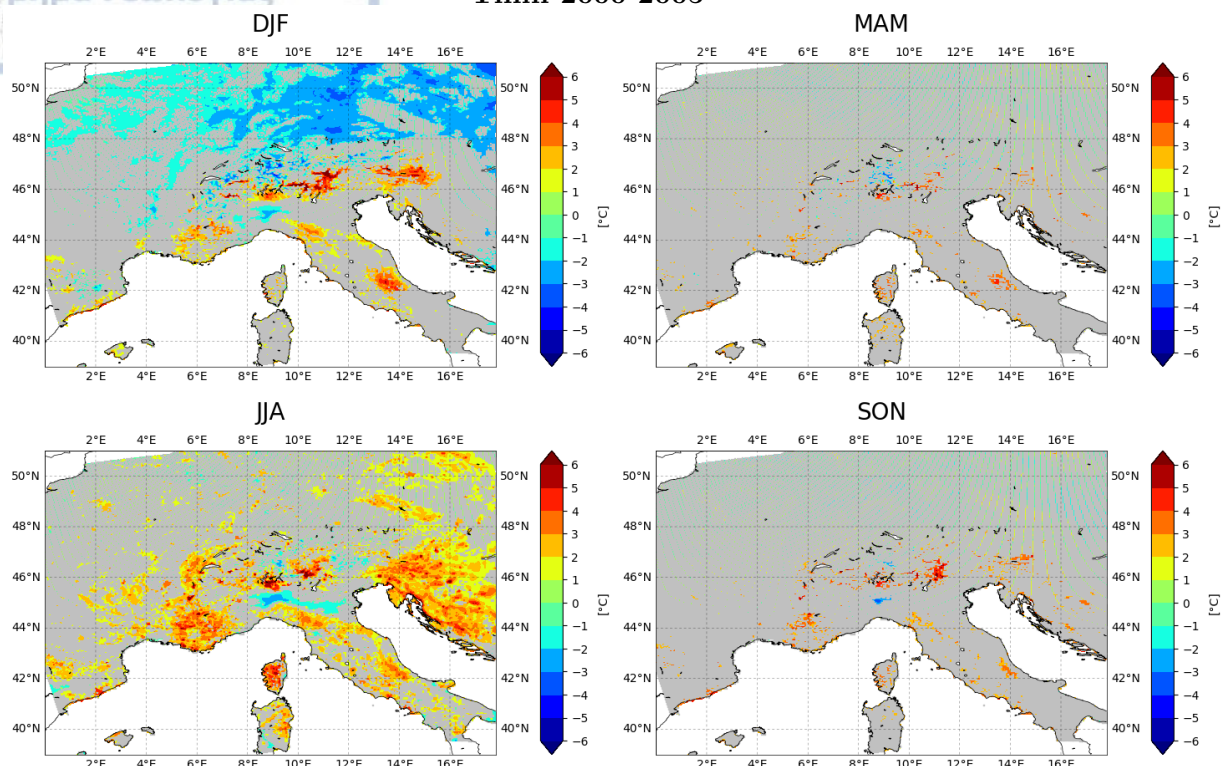
Σχήμα 3.53: Μέσο bias (WRF-MESAN) της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα του WRF (0.15°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

για όλη την περιοχή παρουσιάζει μεγάλη τιμή για το χειμώνα (-1.2°C) και μικρότερες για τις υπόλοιπες εποχές (0.1°C για άνοιξη/φθινόπωρο και 0.4°C για καλοκαίρι).

3.2.3.2 Μέσο Bias (0.03°)

Στην υψηλότερη ανάλυση (0.03°) το μέσο bias της ελάχιστης θερμοκρασίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.54. Το χειμώνα οι τιμές του ψυχρού bias είναι αισθητά μειωμένες σε σχέση με την ανάλυση 0.15° (περίπου -2 με -3°C), αλλά το θερμό bias έχει αυξηθεί στις περιοχές που υπήρχε και στα 0.15° . Το καλοκαίρι κυριαρχούν θετικές τιμές bias αυξημένες σε σχέση με τη χαμηλότερη ανάλυση. Κατά τις ενδιάμεσες εποχές εμφανίζονται μόνο κάποιες μικρές περιοχές θετικού bias, σε αντίθεση με την ανάλυση 0.15° που εμφάνιζε αρνητικές τιμές. Η μέση τιμή του bias βελτιώθηκε το χειμώνα (-0.6°C), και χειροτέρεψε στις υπόλοιπες εποχές (0.3°C για άνοιξη/φθινόπωρο και 0.8°C για καλοκαίρι).

Mean Bias (0.03°)
Tmin 2000-2005

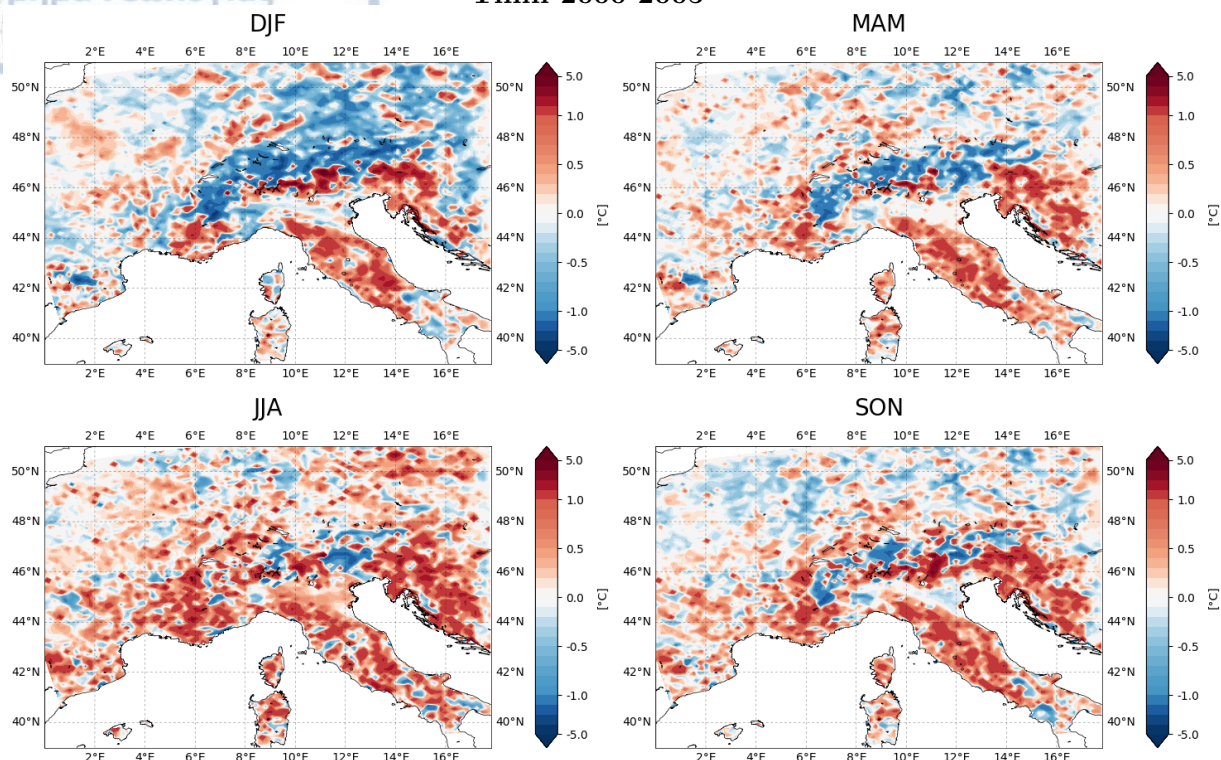


Σχήμα 3.54: Μέσο bias (WRF-MESAN) της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) στο πλέγμα των MESAN (0.05°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι γκριζες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

3.2.3.3 Διαφορές μέσου bias (0.03° - 0.15°)

Οι διαφορές του bias για τις δύο αναλύσεις για την ελάχιστη θερμοκρασία φαίνονται στο Σχήμα 3.55. Το χειμώνα και εδώ φαίνεται να υπάρχει βελτίωση στο bias σε εκτεταμένη περιοχή στις Άλπεις και βόρεια αυτών, ενώ υπάρχει επιδείνωση περίπου στις 46° γεωγραφικό πλάτος, αλλά και στην περιοχή της Ιταλίας. Στις υπόλοιπες εποχές μειώνεται η περιοχή βελτίωσης και περιορίζεται αποκλειστικά στην περιοχή των Άλπεων, με μεγαλύτερη έκταση την άνοιξη. Ειδικά το καλοκαίρι οι περιοχές που το bias έχει επιδεινωθεί στην υψηλή ανάλυση είναι περισσότερες και πιο εκτεταμένες.

Mean Bias $|0.03^\circ| - |0.15^\circ|$
Tmin 2000-2005

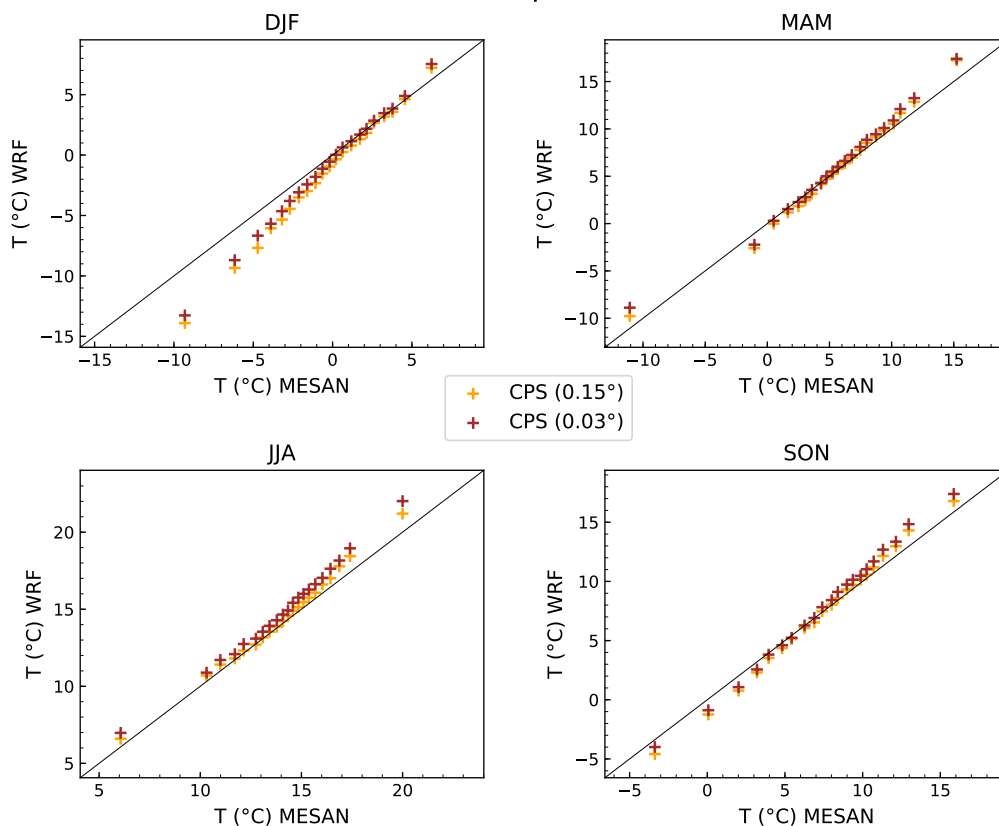


Σχήμα 3.55: Διαφορές απόλυτου μέσου bias ($|MB_{0.03^\circ}| - |MB_{0.15^\circ}|$) της ελάχιστης θερμοκρασίας ($^\circ\text{C}$) στο πλέγμα των 0.15° ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005.

3.2.3.4 Q-Q plots

Τα q-q plots για την ελάχιστη θερμοκρασία φαίνονται στο Σχήμα 3.56. Το χειμώνα το μοντέλο υποεκτιμά την ελάχιστη θερμοκρασία μέχρι τους 0°C και την υπερεκτιμά μόνο στις ακραία υψηλές τιμές. Η ανάλυση 0.03° υποεκτιμά λιγότερο την ελάχιστη θερμοκρασία και άρα αναπαριστά πιο ικανοποιητικά τα δεδομένα αναφοράς, κυρίως στο εύρος μέχρι τους 0°C . Το καλοκαίρι συμβαίνει το αντίθετο, καθώς υπάρχει υπερεκτίμηση σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Εδώ, η ανάλυση 0.15° είναι πιο κοντά στα δεδομένα αναφοράς. Στις ενδιάμεσες εποχές οι δύο αναλύσεις βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη, ιδιαίτερα την άνοιξη. Το φθινόπωρο η υψηλή ανάλυση είναι πιο αντιπροσωπευτική για τις χαμηλές θερμοκρασίες μέχρι τους 5°C , ενώ η εικόνα αντιστρέφεται στις υψηλές τιμές που η 0.15° δίνει πιο κοντινές προβλέψεις με τα δεδομένα αναφοράς.

Q-Q plots
Tmin 2000-2005
Alps

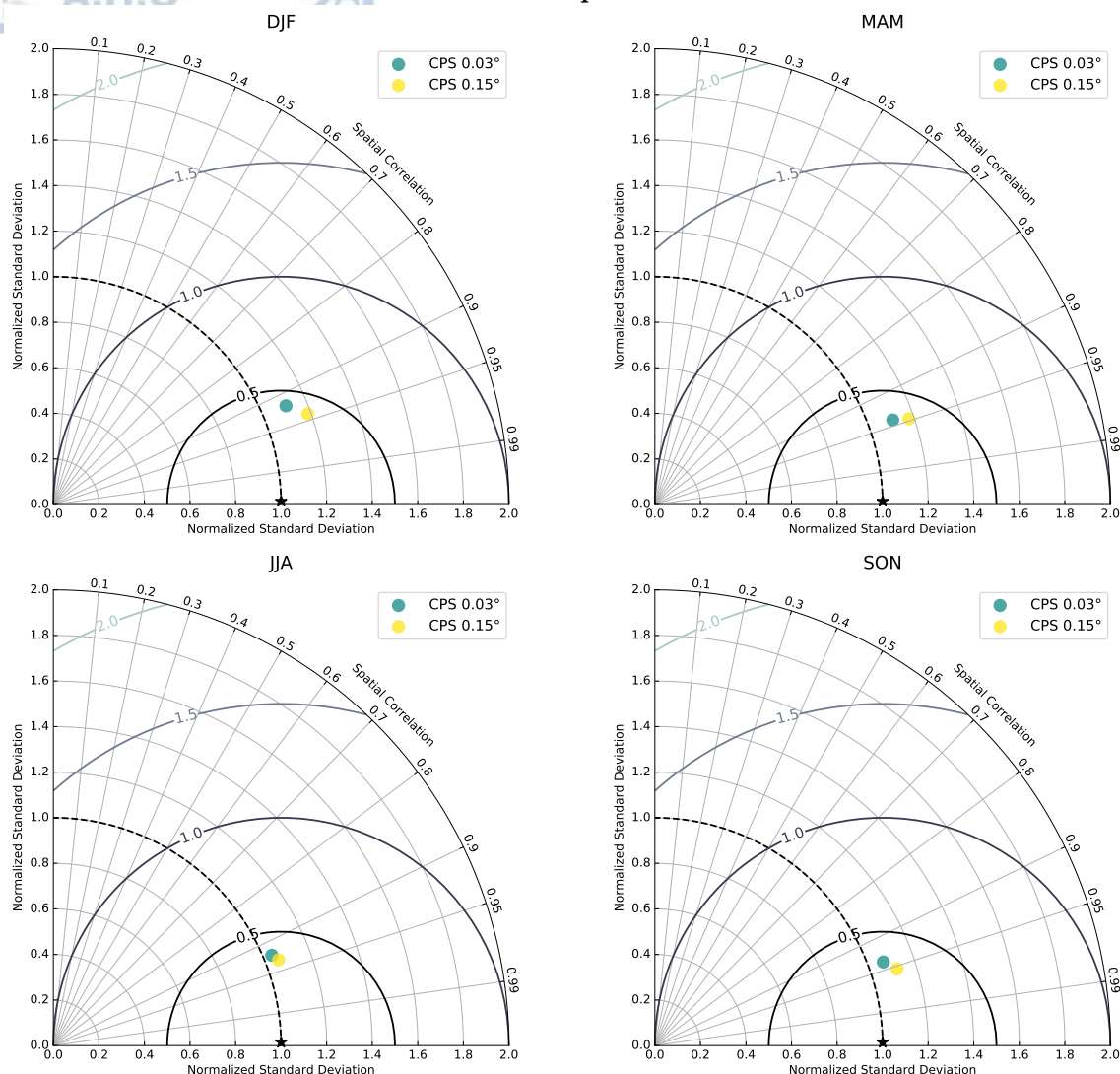


Σχήμα 3.56: Q-Q plots της ελάχιστης θερμοκρασίας στην περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

3.2.3.5 Διαγράμματα Taylor

Στα διαγράμματα Taylor της ελάχιστης θερμοκρασίας (Σχήμα 3.57) φαίνεται να υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ μοντέλου και δεδομένων αναφοράς σε όλες τις εποχές (>0.9). Η συσχέτιση διαφοροποιείται ελαφρώς μεταξύ των αναλύσεων και η 0.15° εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη σε όλες τις εποχές. Επιπλέον, το CRMSD είναι λίγο μεγαλύτερο για την 0.03° , ενώ η τυπική απόκλιση σε σχέση με την αναφορά είναι μικρότερη για την 0.03° σε όλες τις περιπτώσεις.

Taylor Plots Tmin 2000-2005 Alps



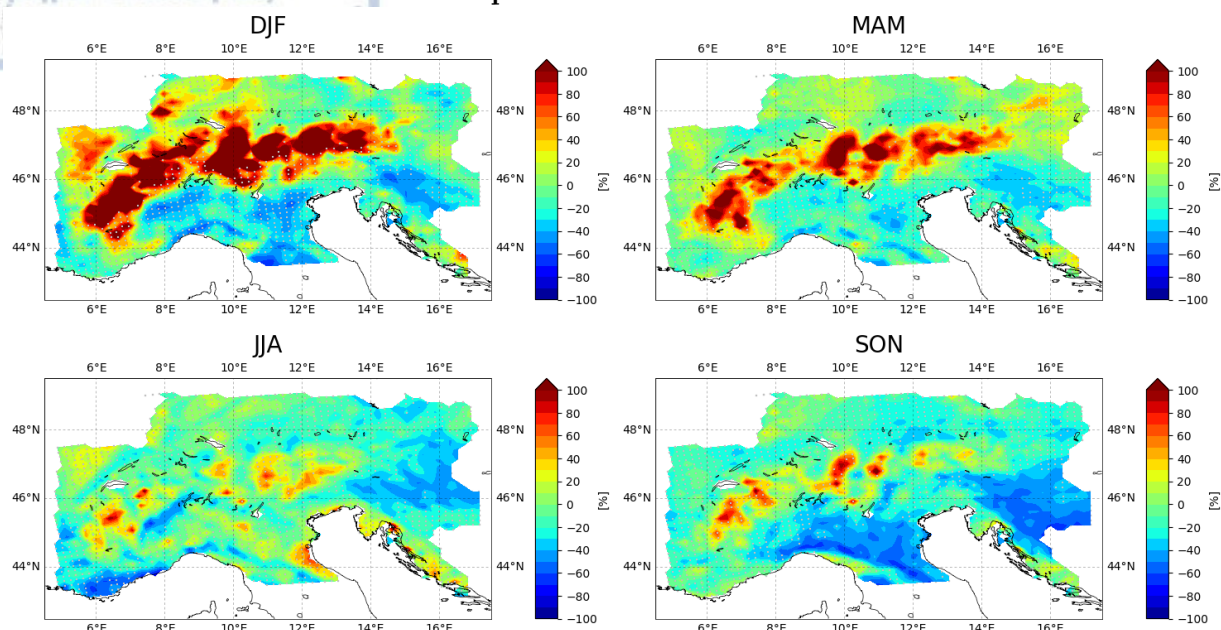
Σχήμα 3.57: Διαγράμματα Taylor της ελάχιστης θερμοκρασίας στην περιοχή των Άλπεων για τις 4 εποχές για την περίοδο 2000-2005.

3.2.4 Βροχόπτωση

3.2.4.1 Μέσο Bias (0.15°)

Στο Σχήμα 3.58 φαίνεται το κανονικοποιημένο bias της βροχόπτωσης για την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων σε ανάλυση 0.15°. Το χειμώνα το μοντέλο συμπεριφέρεται ως πιο υγρό σε σχέση με τις παρατηρήσεις, κυρίως στην περιοχή έντονης ορογραφίας που το bias φτάνει το 100%. Ξηρό bias (-40 έως -70%) παρατηρείται στη ζώνη γεωγραφικού μήκους 8-12° και 14-16° για γεωγ. πλάτος μικρότερο των 46°. Την άνοιξη το υγρό bias συρρικνώνεται σε έκταση, αλλά παραμένει στην ίδια περιοχή και αντίστοιχα συμβαίνει για το ξηρό bias. Το καλοκαίρι έχουν περιοριστεί αρκετά οι περιοχές όπου

Normalized Mean Bias (0.15°) Precipitation 2000-2005



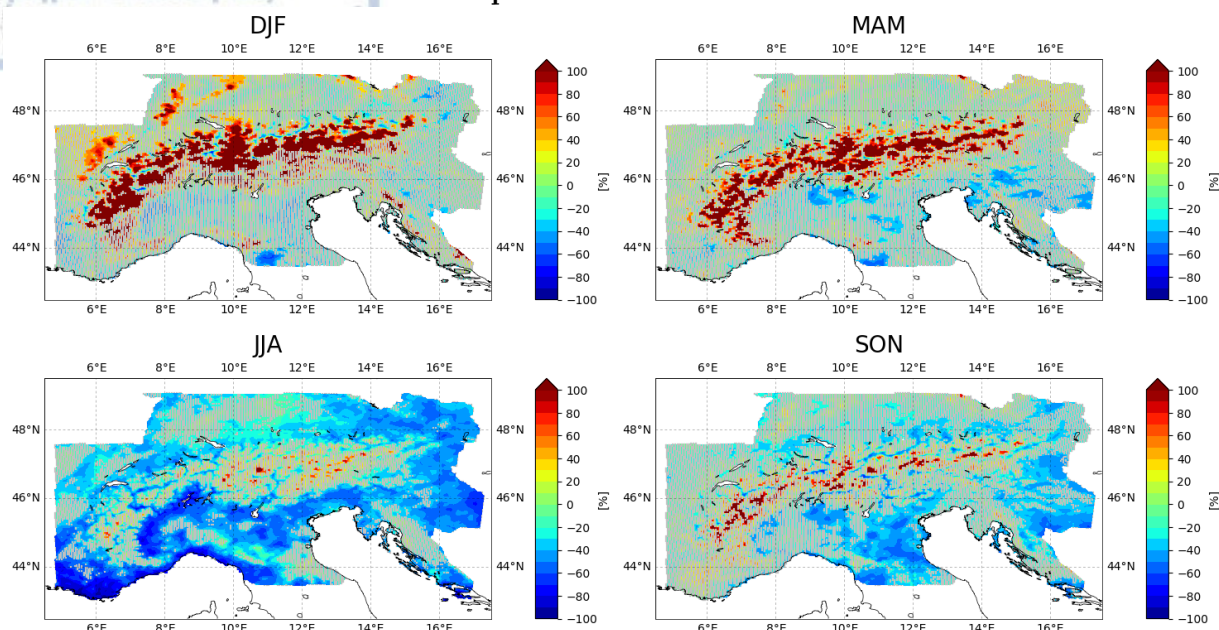
Σχήμα 3.58: Κανονικοποιημένο μέσο bias (WRF-EURO4M) της βροχοπτώσης (%) στο πλέγμα του WRF (0.15°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι κουκκίδες υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

το μοντέλο υπερεκτιμά τη βροχοπτώση. Επιπλέον, υπάρχουν περιοχές με σημαντικό ξηρό bias (-40 έως -70%) στη ζώνη $6-8^\circ$ και $13-17^\circ$ γεωγ. μήκους. Το φθινόπωρο εμφανίζονται μεγάλες περιοχές όπου το μοντέλο παρουσιάζει πιο ξηρή συμπεριφορά συγκριτικά με τις παρατηρήσεις. Αυτές είναι οι ζώνες $8-12^\circ$ και $13-17^\circ$ γεωγ. μήκων με τιμές bias έως και -70%. Μικρές περιοχές υγρού bias εξακολουθούν να υφίστανται σε τμήμα της οροσειράς των Άλπεων. Η μέση τιμή του bias στην ευρύτερη περιοχή μελέτης έχει θετικές τιμές που μειώνονται από το χειμώνα (15.9%) προς την άνοιξη (5.0%) και αρνητικές τιμές που μειώνονται από το καλοκαίρι (-9.9%) προς το φθινόπωρο (-18.0%).

3.2.4.2 Μέσο Bias (0.03°)

Στο Σχήμα 3.59 φαίνεται το κανονικοποιημένο bias για την υψηλότερη ανάλυση (0.03°). Οι περιοχές υγρού bias το χειμώνα που κάλυπταν μεγάλο τμήμα της οροσειράς έχουν μειωθεί σε έκταση στην υψηλή ανάλυση, αλλά κατέχουν και τώρα τιμές που φτάνουν στο 100%. Την άνοιξη το bias κατανέμενεται σε πιο ευρεία περιοχή και μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε σχέση με τη χαμηλή ανάλυση, λόγω της πιο λεπτομερούς ανάλυσης της ορογραφίας από το μοντέλο. Επιπλέον, υπάρχουν τμήματα με ξηρό bias (μέχρι -60%) που καταλαμβάνουν περιοχές νότια και ανατολικά της οροσειράς στις ίδιες περιοχές που εμφανίζονται και στην ανάλυση 0.15° . Το καλοκαίρι χαρακτηρίζεται από

Normalized Mean Bias (0.03°) Precipitation 2000-2005



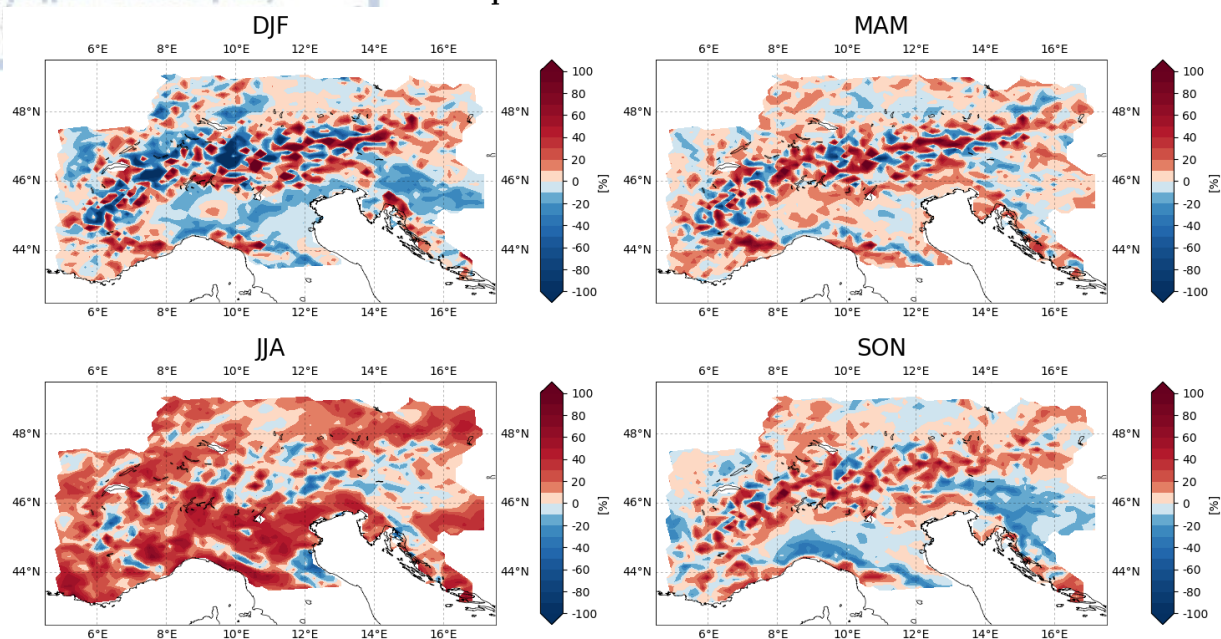
Σχήμα 3.59: Κανονικοποιημένο μέσο bias (WRF-EURO4M) της βροχόπτωσης (%) στο πλέγμα των EURO4M (0.05°) ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005. Οι γκριζες περιοχές υποδηλώνουν μη στατιστικά σημαντικές τιμές σε επίπεδο σημαντικότητας 95%.

έντονο και αρκετά εκτεταμένο ξηρό bias σε πολύ μεγάλο τμήμα γύρω από την οροσειρά των Άλπεων. Αυτό δεν υπήρχε στην ανάλυση 0.15° ή ήταν πολύ περιορισμένο. Εδώ φτάνει πολύ υψηλές τιμές (-60 έως -70%) ιδιαίτερα σε τμήματα νότια της οροσειράς. Το φθινόπωρο υποχωρεί αρκετά σε έκταση και ισχύ και περιορίζεται στις ζώνες γεωγ. μήκους $10-12^\circ$ και $14-17^\circ$. Συνολικά, για την ευρύτερη περιοχή η μέση τιμή του bias μειώθηκε (κατ' απόλυτο ποσοστό) στην υψηλή ανάλυση το χειμώνα (14.9%), την άνοιξη (3.9%) και το φθινόπωρο (-16.6%), αλλά αυξήθηκε το καλοκαίρι (-33.4%).

3.2.4.3 Διαφορές μέσου bias ($0.03^\circ-0.15^\circ$)

Στο Σχήμα 3.60 φαίνονται οι διαφορές των απόλυτων τιμών του κανονικοποιημένου bias μεταξύ των δύο αναλύσεων ($0.03^\circ-0.15^\circ$). Από τις τέσσερις εποχές το χειμώνα φαίνεται να υπάρχει η μεγαλύτερη βελτίωση στην υψηλή ανάλυση. Η βελτίωση αφορά σε μεγαλύτερο βαθμό περιοχές της έντονης ορογραφίας (φτάνει και 100%), αλλά και σε μικρότερο βαθμό (10-50%) τμήματα της ευρύτερης περιοχής (νότια, ανατολικά και βόρεια της οροσειράς). Ωστόσο, υπάρχουν τμήματα που το bias έχει χειροτερέψει έως και 100%, κυρίως πάνω στην οροσειρά. Την άνοιξη η εικόνα είναι μεικτή, με τμήματα βελτίωσης και επιδείνωσης του bias στις περιοχές έντονης ορογραφίας. Το καλοκαίρι κυριαρχεί επιδείνωση του bias (10-60%) στην υψηλή ανάλυση στην περιοχή γύρω από την οροσειρά, με κάποια μικρά τμήματα βελτίωσης. Το φθινόπωρο πάνω στην οροσειρά

Normalized Mean Bias $|0.03^\circ| - |0.15^\circ|$
Precipitation 2000-2005



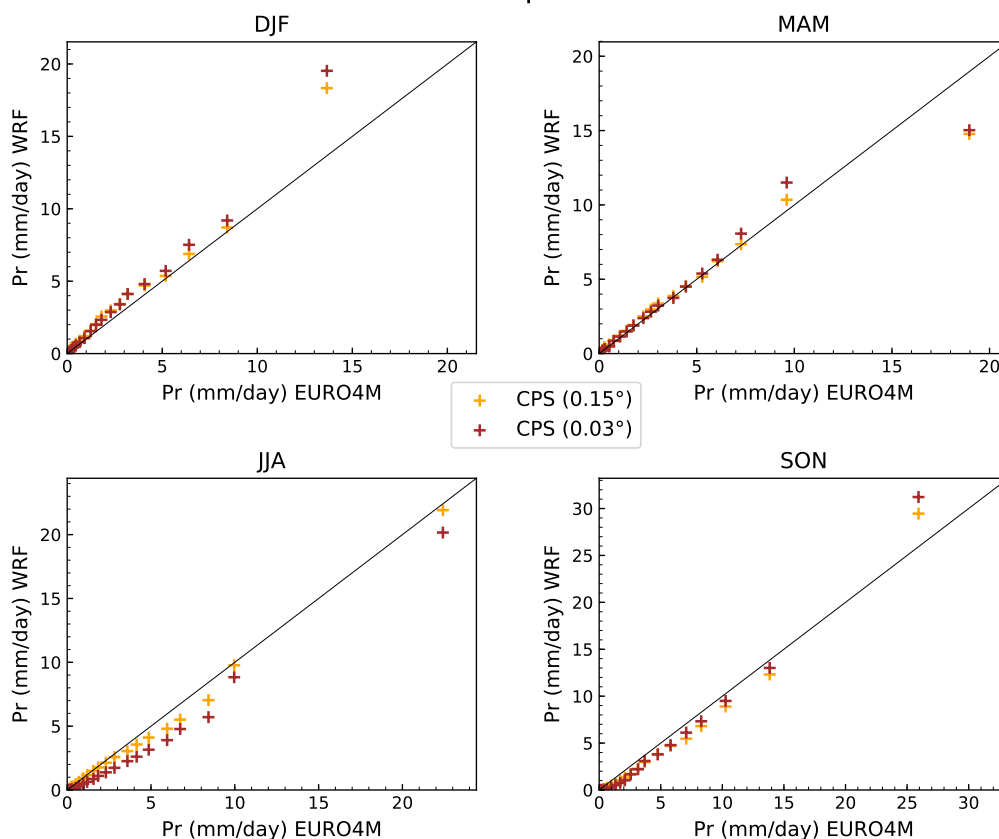
Σχήμα 3.60: Διαφορές απόλυτου κανονικοποιημένου μέσου bias ($|NMB_{0.03^\circ}| - |NMB_{0.15^\circ}|$) της βροχόπτωσης (%) στο πλέγμα των 0.15° ανά εποχή για την περίοδο 2000-2005.

κυριαρχεί επιδείνωση του bias, ενώ νότια και ανατολικά αυτής το bias έχει βελτιωθεί στην υψηλότερη ανάλυση (10-40%).

3.2.4.4 Q-Q plots

Στα q-q plots της βροχόπτωσης (Σχήμα 3.61) το χειμώνα το μοντέλο υπερεκτιμά τη βροχόπτωση κυρίως σε τιμές άνω των 2mm/day. Ιδιαίτερα στα ακραία ($>13\text{mm/day}$) η υπερεκτίμηση είναι πολύ μεγάλη. Η διαφορά στην ανάλυση διακρίνεται για τιμές βροχής άνω των 5mm τη μέρα, όπου η ανάλυση 0.15° είναι πιο αντιπροσωπευτική των παρατηρήσεων. Την άνοιξη στις μικρές τιμές βροχής υπάρχει καλή συμφωνία μοντέλου-παρατηρήσεων, άνω των 7mm/day εμφανίζεται υπερεκτίμηση και για τα ακραία υποεκτίμηση. Οι δύο αναλύσεις δε διαφοροποιούνται για μικρές τιμές βροχόπτωσης, ενώ η ανάλυση 0.15° είναι πιο κοντά στις παρατηρήσεις για το ενδιάμεσο εύρος τιμών. Το καλοκαίρι σε όλες τις τιμές βροχόπτωσης εμφανίζεται υποεκτίμηση, αλλά μικρότερη για την ανάλυση 0.15° . Ιδιαίτερα στις μικρές τιμές βροχής ($<2\text{mm/day}$) η 0.15° είναι σε καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις. Τέλος, το φθινόπωρο υπάρχει υποεκτίμηση των τιμών από το μοντέλο μέχρι τα 14mm/day, αλλά τα ακραία υπερεκτιμώνται. Η ανάλυση 0.03° είναι πιο αντιπροσωπευτική από την 0.15° στο εύρος τιμών 7-14mm/day, ενώ για τα ακραία η 0.15° βρίσκεται πιο κοντά στις παρατηρήσεις.

Q-Q plots Precipitation 2000-2005 Alps

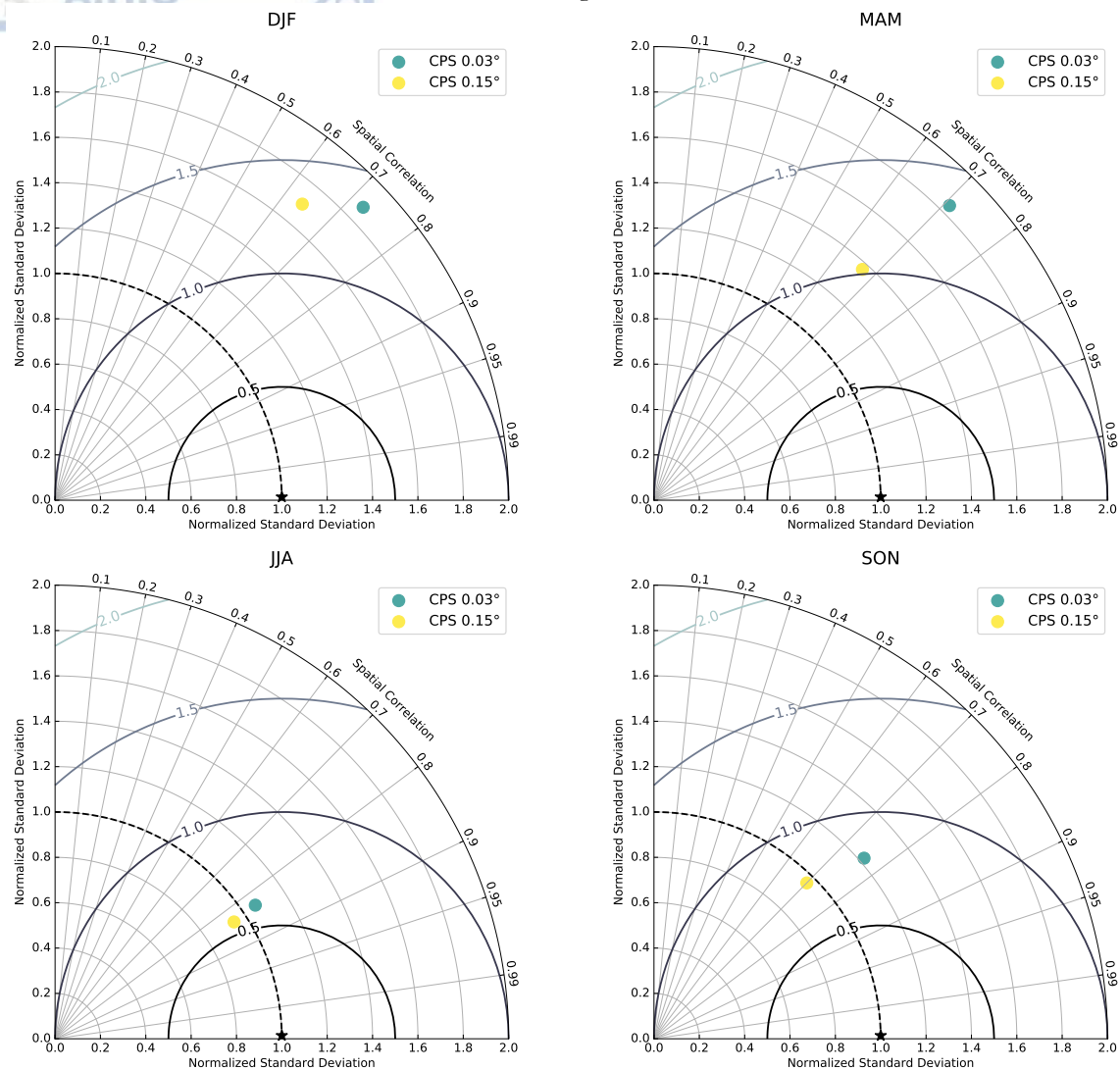


Σχήμα 3.61: Q-Q plots της βροχόπτωσης στην περιοχή των Άλπεων για κάθε εποχή της περιόδου 2000-2005.

3.2.4.5 Διαγράμματα Taylor

Τα διαγράμματα Taylor για τη βροχόπτωση στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων φαίνονται στο Σχήμα 3.62. Η συσχέτιση ξεπερνά το 0.6 για όλες τις εποχές, με μεγαλύτερη το καλοκαίρι (>0.8). Σε όλες τις εποχές πλην το καλοκαίρι, η ανάλυση 0.03° εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή συσχέτισης από την 0.15° . Το CRMSD έχει μεγαλύτερες τιμές το χειμώνα (κοντά στο 1.3) και μικρότερες το καλοκαίρι (κοντά στο 0.6). Υπάρχει επίσης διαφοροποίηση μεταξύ των αναλύσεων ως προς την τιμή του CRMSD, ειδικά την άνοιξη και λιγότερο το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, όπου η ανάλυση 0.03° έχει μεγαλύτερο. Τέλος, σε όλες τις εποχές η τυπική απόκλιση για την ανάλυση 0.15° είναι μικρότερη από αυτή της ανάλυσης 0.03° . Ειδικά για το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οι τυπικές αποκλίσεις είναι κοντά στη μονάδα, που σημαίνει ότι είναι πολύ κοντά σε αυτή των παρατηρησιακών δεδομένων.

Taylor Plots Precipitation 2000-2005 Alps



Σχήμα 3.62: Διαγράμματα Taylor της βροχόπτωσης στην περιοχή των Άλπεων για τις 4 εποχές για την περίοδο 2000-2005.

4 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το ερώτημα αν υπάρχει προστιθέμενη αξία στις κλιματικές προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης παραμένει δύσκολο και γενικά συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν, παρά μόνο για συγκεκριμένες προσομοιώσεις με μεμονωμένες διαμορφώσεις μοντέλων. Η παρούσα εργασία διερεύνησε μόνο κάποιες από τις πτυχές του ζητήματος και περισσότερη μελέτη χρειάζεται ώστε να υπάρχει αρκετή εμπιστοσύνη στο αποτέλεσμα. Τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση σχολιάζονται παρακάτω.

Θερμοκρασία

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για την περιοχή της Ευρώπης το μοντέλο είναι συστηματικά πιο ψυχρό από τις παρατηρήσεις ($1-3^{\circ}\text{C}$) κατά τη θερμή περίοδο, ενώ κατά την ψυχρή εμφανίζει μικρό θερμό ή ψυχρό bias ($0-1^{\circ}\text{C}$). Σύμφωνα με τους [Katragkou et al. \(2015\)](#) όλα τα μοντέλα του EURO-CORDEX εμφανίζονται πιο ψυχρά τόσο το καλοκαίρι, όσο και το χειμώνα και μάλιστα τα χειμερινά bias είναι μεγαλύτερα. Στη δική μας περίπτωση, το bias του χειμώνα παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, ενώ το θερινό bias παρουσιάζει αυξημένες αρνητικές τιμές σε σχέση με το ensemble. Η υψηλή χωρική ανάλυση βελτιώνει τα αποτελέσματα για τη μέση, αλλά κυρίως για τη μέγιστη θερμοκρασία τη θερμή περίοδο, μειώνοντας το μέσο σφάλμα του μοντέλου πάνω από όλη την Ευρώπη κατά 0.7°C . Κατά την ψυχρή περίοδο ωστόσο, το σφάλμα επιδεινώνεται στην υψηλή ανάλυση σε κάποιες περιοχές. Το μοντέλο εμφανίζει την τάση για υποεκτίμηση της ελάχιστης θερμοκρασίας όλο το χρόνο, επιδεινώνοντας το σφάλμα κυρίως τη θερμή περίοδο εκτός από τις περιοχές της νότιας Ευρώπης.

Οι κατανομές των θερμοκρασιών δείχνουν ότι την ψυχρή περίοδο οι διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων στις διαφορετικές χωρικές αναλύσεις και διαμορφώσεις είναι μικρές και το ποια είναι ποιο αντιπροσωπευτική εξαρτάται από την περιοχή και το εύρος θερμοκρασίας. Αντίθετα, κατά τη θερμή περίοδο οι διαφορές είναι πιο εμφανείς και φαίνεται ότι η θερινή υποεκτίμηση μειώνεται με τη χρήση κατάλληλης διαμόρφωσης στο μοντέλο. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η διαμόρφωση παίζει πολύ καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα, καθώς μπορεί να διορθώσει συγκεκριμένες διαδικασίες που δεν

παραμετροποιούνται σωστά, μειώνοντας έτσι το σφάλμα. Υπάρχουν περιπτώσεις το καλοκαίρι, όπου η υψηλή ανάλυση δίνει πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από την αντίστοιχη χαμηλότερή της, ωστόσο αυτό συμβαίνει σε συγκεκριμένες περιοχές και εύρος θερμοκρασίας και όχι για όλες τις μεταβλητές (κυρίως για τη μέγιστη). Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι η υψηλή ανάλυση βελτιώνει τα αποτελέσματα για τις ακραία χαμηλές τιμές της κατανομής στις περισσότερες περιοχές το χειμώνα και το καλοκαίρι.

Εστιάζοντας περισσότερο πάνω από την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων, φαίνεται ότι το μοντέλο έχει την τάση να γίνεται πιο θερμό στην πολύ υψηλή χωρική ανάλυση καθόλη τη διάρκεια του χρόνου. Το ψυχρό bias το χειμώνα βελτιώνεται στην υψηλή ανάλυση ($\sim 0.5^{\circ}\text{C}$), ενώ αντίθετα τις υπόλοιπες εποχές τα θερμά bias διογκώνονται περαιτέρω και ιδιαίτερα το καλοκαίρι ($\sim 0.6^{\circ}\text{C}$). Η βελτίωση το χειμώνα αφορά τις χαμηλότερες θερμοκρασίες της κατανομής, ενώ το καλοκαίρι το σφάλμα αυξάνεται σε όλο το εύρος θερμοκρασιών. Στην περιοχή της έντονης ορογραφίας των Άλπεων εμφανίζεται βελτίωση σε όλες τις εποχές, ωστόσο η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα παρατηρήσεων και γι' αυτό το λόγο δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

Βροχόπτωση

Το μοντέλο είναι συστηματικά πιο υγρό σε όλες τις περιοχές το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο. Το χειμώνα το μέσο bias πάνω από όλη την Ευρώπη κυμαίνεται στα 41.6%, ενώ το καλοκαίρι το μοντέλο έχει την τάση να γίνεται ξηρότερο και οι τιμές κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα (7.4%). Οι περιοχές της ανατολικής Ευρώπης και των Άλπεων χαρακτηρίζονται από μεγάλα υγρά bias το χειμώνα (60.4% και 50.0% αντίστοιχα) και ξηρά bias το καλοκαίρι (-23.7% και -6.7% αντίστοιχα). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι αυτή η αλλαγή του προσήμου στο bias της βροχής, εμφανίζεται παράλληλα με ισχυρή υποεκτίμηση της θερμοκρασίας στις περιοχές αυτές το καλοκαίρι. Συνολικά, μόνο οι περιοχές της νότιας Ευρώπης (Μεσόγειος, Ιβηρική) διατηρούν υψηλές τιμές bias στις περισσότερες εποχές, που πιθανά οφείλονται στις οροσειρές της (Δειναρικές Άλπεις, Απέννινα Όρη και Πυρηναία) όπου το bias τοπικά φτάνει το 100%. Ωστόσο, το εξαιρετικά μεγάλο σχετικό bias στη νότια Ευρώπη μπορεί να είναι υπερτιμημένο, δεδομένου ότι η θερινή βροχόπτωση σε αυτές τις περιοχές είναι πολύ μικρή και μία υπερεκτίμηση του ποσού βροχής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο σχετικό bias, ενώ η απόλυτη τιμή του είναι μικρή. Σύμφωνα με τους [Kotlarski et al. \(2014\)](#), το ψυχρό και υγρό bias τις περισσότερες εποχές και στις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης συναντάται στην πλειονότητα των πειραμάτων, υποδεικνύοντας ότι πρόκειται για κοινό σφάλμα των μοντέλων. Στην παρούσα μελέτη δεν επιβεβαιώνεται αυτό το συμπέρασμα, καθώς αυτό συμβαίνει μόνο σε κάποιες περιπτώσεις, κυρίως την άνοιξη αλλά όχι το καλοκαίρι (και οι δύο αυτές εποχές εμφανίζουν υψηλά αρνητικά bias). Σε κάποιες

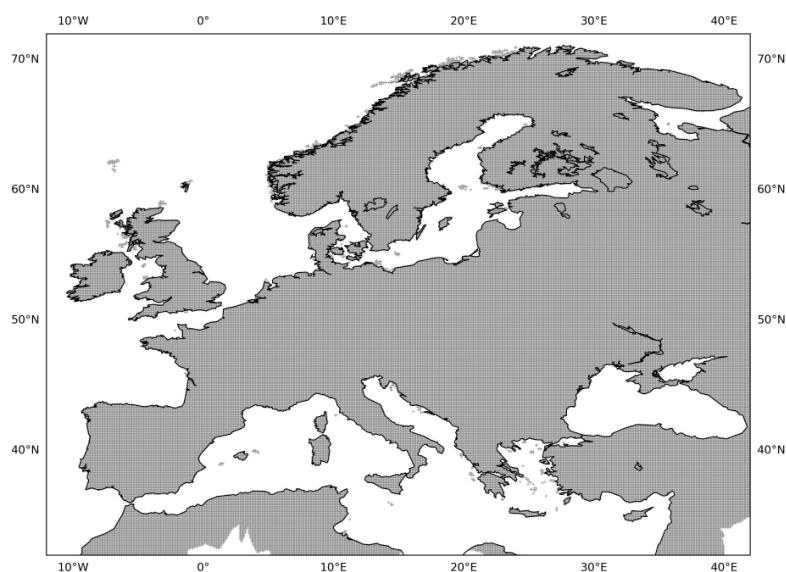
μάλιστα περιοχές το καλοκαίρι συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή το ψυχρό bias συνδέεται με ξηρό bias το καλοκαίρι (AL, EA, ME).

Στην ευρύτερη περιοχή των Άλπεων τα σφάλματα της βροχόπτωσης παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των χωρικών αναλύσεων μόνο το καλοκαίρι. Το χειμώνα, την άνοιξη και το φθινόπωρο, το συνολικό bias της ευρύτερης περιοχής άλλαξε μόνο κατά 1-1.5% στην πολύ υψηλή ανάλυση, ενώ αντίθετα το καλοκαίρι το μοντέλο είναι αρκετά πιο ξηρό και το bias επιδεινώθηκε κατά 24%. Οι κατανομές της βροχόπτωσης δείχνουν ότι η χαμηλότερη ανάλυση είναι πιο αντιπροσωπευτική για τις μεγάλες τιμές βροχής (και τα ακραία) για τις περισσότερες εποχές και ότι για το καλοκαίρι αφορά όλο το εύρος των τιμών. Για την περιοχή της πολύπλοκης ορογραφίας τα αποτελέσματα δείχνουν βελτίωση του σφάλματος σε κάποια τμήματα της οροσειράς και επιδείνωση σε κάποια άλλα, οδηγώντας σε μη καταληκτικό συμπέρασμα για την προστιθέμενη αξία της υψηλής χωρικής ανάλυσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Το καλοκαίρι όμως, η επιδείνωση στην υψηλή ανάλυση αφορά πολύ μεγαλύτερη περιοχή και δεν εστιάζεται μόνο στην περιοχή έντονου αναγλύφου.

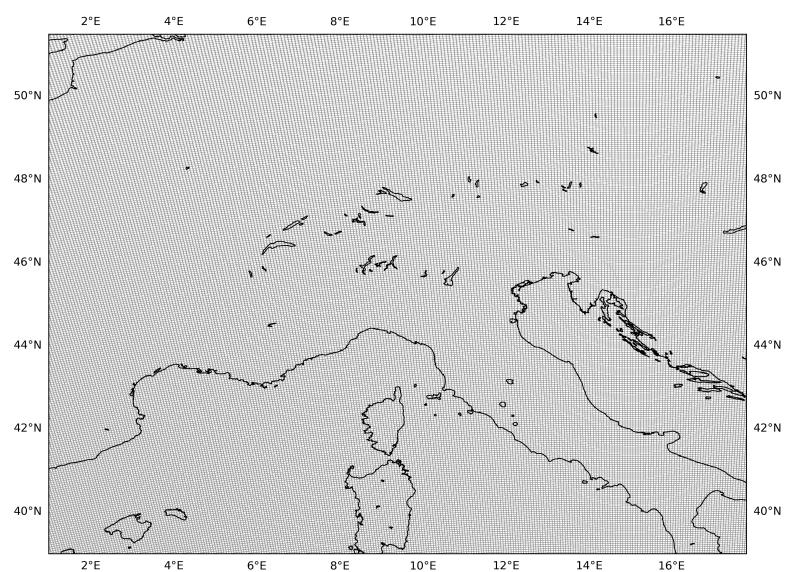
Μελλοντική μελέτη

Ένα επόμενο βήμα στην αναζήτηση της προστιθέμενης αξίας είναι η προσομοίωση της κατανομής συχνοτήτων των ακραίων τιμών, διότι εκεί υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βελτιώνεται το αποτέλεσμα. Οι [Prein et al. \(2016\)](#) πραγματοποίησαν μελέτη τόσο για τη μέση όσο και για την ακραία βροχόπτωση και έδειξαν ότι στην υψηλή ανάλυση τα εποχικά bias μειώνονται σε μεγάλα τμήματα των περιοχών σε τουλάχιστον 6 από τις 8 προσομοιώσεις. Ακόμη, ενδιαφέρον έχει η μελέτη της χρονικής συμπεριφοράς των μοντέλων σε χρονικές κλίμακες μικρότερες της ημέρας. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι προσομοιώσεις CPS αναπαριστούν καλύτερα τον ημερήσιο κύκλο της βροχόπτωσης ([Prein et al., 2013a](#); [Ban et al., 2014](#); [Fosser et al., 2014](#)). Τέλος, η χρήση σμήνους προσομοιώσεων θα οδηγούσε σε ένα πιο στέρεα συμπεράσματα, καθώς τα αποτελέσματα δεν θα εξαρτώνται μόνο από μία συγκεκριμένη προσομοίωση, αλλά θα διαμορφώνεται άποψη για τη συνολική εικόνα των μοντέλων.

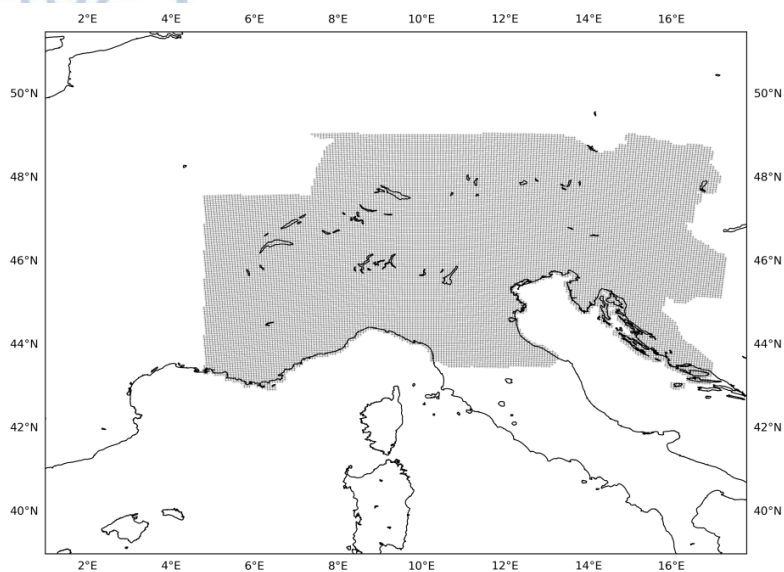
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχήμα 1: Το πλέγμα των δεδομένων E-OBs στα 0.1°.



Σχήμα 2: Το πλέγμα των δεδομένων MESAN στα 0.05°.



Σχήμα 3: Το πλέγμα των δεδομένων EURO4M στα 0.05°.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- N. Ban, J. Schmidli, and C. Schär. Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13):7889–7907, 2014.
- P. Berg, S. Wagner, H. Kunstmann, and G. Schädler. High resolution regional climate model simulations for Germany: part I—validation. *Climate Dynamics*, 40(1):401–414, 2013.
- P. Berrisford, D. P. Dee, P. Poli, R. Brugge, M. Fielding, M. Fuentes, P. W. Kållberg, S. Kobayashi, S. Uppala, and A. Simmons. The ERA-Interim archive Version 2.0. (1):23, 2011.
- P. Brockhaus, D. Lüthi, and C. Schär. Aspects of the diurnal cycle in a regional climate model. *Meteorologische Zeitschrift*, 17:433–443, 2008.
- C. L. Castro, R. A. Pielke Sr., and G. Leoncini. Dynamical downscaling: Assessment of value retained and added using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D5), 2005.
- S. C. Chan, E. J. Kendon, H. Fowler, S. Blenkinsop, C. A. T. Ferro, and D. B. Stephenson. Does increasing the spatial resolution of a regional climate model improve the simulated daily precipitation? *Climate Dynamics*, 41, 2012.
- J. H. Christensen and O. B. Christensen. A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81:7–30, 2007.
- J. H. Christensen, T. R. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81(1):1–6, 2007.
- E. Coppola, S. Sobolowski, E. Pichelli, F. Raffaele, B. Ahrens, I. Anders, N. Ban, S. Bastin, M. Belda, D. Belusic, A. Caldas-Alvarez, R. M. Cardoso, S. Davolio, A. Dobler, J. Fernandez, L. Fita, Q. Fumiere, F. Giorgi, K. Goergen, I. Güttler,

- T. Halenka, D. Heinzeller, Ø Hodnebrog, D. Jacob, S. Kartsios, E. Katragkou, E. Kendon, S. Khodayar, H. Kunstmann, S. Knist, A. Lavín-Gullón, P. Lind, T. Lorenz, D. Maraun, L. Marelle, E. van Meijgaard, J. Milovac, G. Myhre, H.-J. Panitz, M. Piazza, M. Raffa, T. Raub, B. Rockel, C. Schär, K. Sieck, P. M. M. Soares, S. Somot, L. Srnec, P. Stocchi, M. H. Tölle, H. Truhetz, R. Vautard, H. de Vries, and K. Warrach-Sagi. A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics*, 2018.
- R. C. Cornes, G. van der Schrier, E. J. M. van den Besselaar, and P. D. Jones. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17):9391–9409, 2018.
- P. Dahlgren, T. Landelius, P. Källberg, and S. Gollvik. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part 1: Three-dimensional reanalysis with the regional High-Resolution Limited-Area Model (HIRLAM). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698):2119–2131, 2016.
- E. L. Davin, D. Rechid, M. Breil, R. M. Cardoso, E. Coppola, P. Hoffmann, L. L. Jach, E. Katragkou, N. de Noblet-Ducoudré, K. Radtke, M. Raffa, P. M. M. Soares, I. Sofiadis, S. Strada, G. Strandberg, M. H. Tölle, K. Warrach-Sagi, and V. Wulfmeyer. Biogeophysical impacts of forestation in Europe: First results from the LUCAS Regional Climate Model intercomparison. *Earth System Dynamics Discussions*, pages 1–31, 2019. (under review).
- D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Källberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656):553–597, 2011.
- M. Déqué, D. P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, and B. van den Hurk. An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81(1):53–70, 2007.
- A. Di Luca, R. de Elía, and R. Laprise. Potential for small scale added value of RCM's downscaled climate change signal. *Climate Dynamics*, 40(3):601–618, 2013.



A. Di Luca, R. de Elía, and R. Laprise. Challenges in the Quest for Added Value of Regional Climate Dynamical Downscaling. *Current Climate Change Reports*, 1(1):10–21, 2015.

G. Fosser, S. Khodayar, and P. Berg. Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Climate Dynamics*, 44:45–60, 2014.

M. Garcíá-Díez, J. Fernández, and R. Vautard. An RCM multi-physics ensemble over Europe: Multi-variable evaluation to avoid error compensation. *Climate Dynamics*, 45:1–16, 2015.

M. García-Díez, J. Fernández, L. Fita, and C. Yagüe. Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671):501–514, 2013.

F. Giorgi. Regional climate modeling: Status and perspectives. *Journal de Physique IV France*, 139:101–118, 2006.

F. Giorgi and W. J. Gutowski. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1):467–490, 2015.

F. Giorgi, B. Hewitson, J. Christensen, M. Hulme, H. Von Storch, P. Whetton, R. Jones, L. Mearns, and C. Fu. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter 10, Regional Climate Information – Evaluation and Projections, pages 583–638. Cambridge University Press, 2001.

P. J. Gleckler, K. E. Taylor, and C. Doutriaux. Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6), 2008.

H. Goosse, P. Y. Barriat, W. Lefebvre, M. F. Loutre, and V. Zunz. *Introduction to climate dynamics and climate modeling*. 2010. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>.

G. A. Grell and S. R. Freitas. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(10):5233–5250, 2014.

S.-Y. Hong, Y. Noh, and J. Dudhia. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9):2318–2341, 2006.

S.-Y. Hong, H. Park, H.-B. Cheong, J.-E. Kim, M.-S. Koo, J. Jang, S. Ham, S.-O. Hwang, B.-K. Park, E.-C. Chang, and H. Li. The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49, 2013.

- M. J. Iacono, J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(D13103), 2008.
- F. A. Isotta, C. Frei, V. Weigluni, M. Perčec Tadić, P. Lassègues, B. Rudolf, V. Pavan, C. Cacciamani, G. Antolini, S. M. Ratto, M. Munari, S. Micheletti, V. Bonati, C. Lussana, C. Ronchi, E. Panettieri, G. Marigo, and G. Vertačnik. The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *International Journal of Climatology*, 34(5):1657–1675, 2014.
- P. A. Jiménez, J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Montávez, and E. García-Bustamante. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3):898–918, 2012.
- J. S. Kain. The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1):170–181, 2004.
- E. Katragkou, M. García-Díez, R. Vautard, S. Sobolowski, P. Zanis, G. Alexandri, R. M. Cardoso, A. Colette, J. Fernandez, A. Gobiet, K. Goergen, T. Karacostas, S. Knist, S. Mayer, P. M. M. Soares, I. Pytharoulis, I. Tegoulis, A. Tsikerdekis, and D. Jacob. Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: Evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geoscientific Model Development*, 8(3):603–618, 2015.
- S. Kotlarski, K. Keuler, O. B. Christensen, A. Colette, M. Déqué, A. Gobiet, K. Goergen, D. Jacob, D. Lüthi, E. van Meijgaard, G. Nikulin, C. Schär, C. Teichmann, R. Vautard, K. Warrach-Sagi, and V. Wulfmeyer. Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7:1297–1333, 2014.
- S. Kotlarski, P. Szabó, S. Herrera, O. Räty, K. Keuler, P. M. Soares, R. M. Cardoso, T. Bosshard, C. Pagé, F. Boberg, J. M. Gutiérrez, F. A. Isotta, A. Jaczewski, F. Kreienkamp, M. A. Liniger, C. Lussana, and K. Pianko-Kluczyńska. Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. *International Journal of Climatology*, 39(9):3730–3749, 2017.
- T. Landelius, P. Dahlgren, S. Gollvik, A. Jansson, and E. Olsson. A high-resolution regional reanalysis for Europe. Part 2: 2D analysis of surface temperature, precipitation and wind. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698):2132–2142, 2016.

- R. Laprise, R. de Elía, D. Caya, S. Biner, P. Lucas-Picher, E. Diaconescu, M. Leduc, A. Alexandru, L. Separovic, and Canadian Network for Regional Climate Modelling and Diagnostics. Challenging some tenets of regional climate modelling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1):3–22, 2008.
- R. Laprise, D. Kornic, M. Rapaić, L. Separovic, M. Leduc, O. Nikiema, A. Di Luca, E. Diaconescu, A. Alexandru, P. Lucas-Picher, R. de Elía, D. Caya, and S. Biner. Considerations of Domain Size and Large-Scale Driving for Nested Regional Climate Models: Impact on Internal Variability and Ability at Developing Small-Scale Details. In *Climate Change*, pages 181–199, Vienna, 2012. Springer Vienna.
- D. M. Lawrence, K. W. Oleson, M. G. Flanner, P. E. Thornton, S. C. Swenson, P. J. Lawrence, X. Zeng, Z.-L. Yang, S. Levis, K. Sakaguchi, G. B. Bonan, and A. G. Slater. Parameterization improvements and functional and structural advances in Version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(1), 2011.
- M. Leduc and R. Laprise. Regional climate model sensitivity to domain size. *Climate Dynamics*, 32:833–854, 2009.
- K. S. Lim and S.-Y. Hong. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, 138(5):1587–1612, 2010.
- L. O. Mearns, W. Gutowski, R. Jones, S. Leung, R. and McGinnis, A. Nunes, and Y. Qian. A Regional Climate Change Assessment Program for North America. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(36):311–311, 2009.
- M. Nakanishi and H. Niino. An Improved Mellor-Yamada Level 3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog. *Boundary-Layer Meteorology*, 119:397–407, 2006.
- G.-Y. Niu, Z.-L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari, and Y. Xia. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12), 2011.
- K. W. Oleson, D. M. Lawrence, G. B. Bonan, M. G. Flanner, E. Kluzek, P. J. Lawrence, S. Levis, S. C. Swenson, P. E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C. L. Heald, J.-F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, S. Running, K. Sakaguchi, A. G. Slater, R. Stöckli, A. Wang, Z.-L. Yang, X. Zeng, and X. Zeng. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). 2010.

- A. F. Prein and A. Gobiet. Impacts of uncertainties in European gridded precipitation observations on regional climate analysis. *International Journal of Climatology*, 37(1):305–327, 2017.
- A. F. Prein, A. Gobiet, M. Suklitsch, H. Truhetz, N. K. Awan, K. Keuler, and G. Georgievski. Added value of convection permitting seasonal simulations. *Climate Dynamics*, 41(9):2655–2677, 2013a.
- A. F. Prein, G. J. Holland, R. M. Rasmussen, J. Done, K. Ikeda, M. P. Clark, and C. H. Liu. Importance of Regional Climate Model Grid Spacing for the Simulation of Heavy Precipitation in the Colorado Headwaters. *Journal of Climate*, 26(13):4848–4857, 2013b.
- A. F. Prein, W. Langhans, G. Fosser, A. Ferrone, N. Ban, K. Goergen, M. Keller, M. Tölle, O. Gutjahr, F. Feser, E. Brisson, S. Kollet, J. Schmidli, N. P. M. van Lipzig, and R. Leung. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2):323–361, 2015.
- A. F. Prein, A. Gobiet, H. Truhetz, K. Keuler, K. Goergen, C. Teichmann, C. Fox Maule, E. van Meijgaard, M. Déqué, G. Nikulin, R. Vautard, A. Collette, E. Kjellström, and D. Jacob. Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? *Climate Dynamics*, 46(1):383–412, 2016.
- K. Prömmel, B. Geyer, J. M. Jones, and M. Widmann. Evaluation of the skill and added value of a reanalysis-driven regional simulation for Alpine temperature. *International Journal of Climatology*, 30(5):760–773, 2010.
- C. Ring, B. Mannig, F. Pollinger, and H. Paeth. Uncertainties in the simulation of precipitation in selected regions of humid and dry climate. *International Journal of Climatology*, 36(10):3521–3538, 2016.
- L. P. Seaby, J. C. Refsgaard, T. O. Sonnenborg, S. Stisen, J. H. Christensen, and K. H. Jensen. Assessment of robustness and significance of climate change signals for an ensemble of distribution-based scaled climate projections. *Journal of Hydrology*, 486:479–493, 2013.
- L. Separovic, R. de Elía, and R. Laprise. Reproducible and Irreproducible Components in Ensemble Simulations with a Regional Climate Model. *Monthly Weather Review*, 136(12):4942–4961, 2008.
- D. J. Stensrud. *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge University Press, 2007.

R. Y. Surampalli, T. C. Zhang, C. S. P. Ojha, B. Gurjar, R. D. Tyagi, and C. M. Kao. *Climate Change Modeling, Mitigation, and Adaptation*. American Society of Civil Engineers, 2013.

K. E. Taylor. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7):7183–7192, 2001.

G. Thompson, P. R. Field, R. M. Rasmussen, and W. D. Hall. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12):5095–5115, 2008.

C. Torma, F. Giorgi, and E. Coppola. Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain—Precipitation over the Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9):3957–3972, 2015.

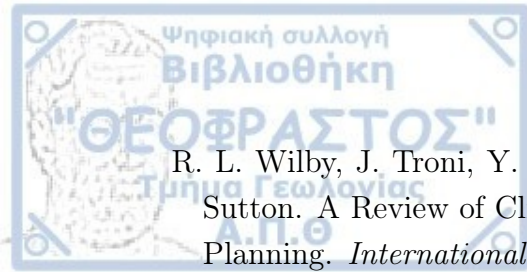
S. Trzaska and E. Schnarr. A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development (USAID), 2014. African and Latin American Resilience to Climate Change Project (ARCC).

S. M. Uppala, P. W. Kållberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van De Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Hólm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612):2961–3012, 2005.

P. van der Linden and J. F. B. Mitchell. ENSEMBLES: climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. *Met Office Hadley Centre FitzRoy Road Exeter EX1 3PB UK*, 160, 2009.

S. Wagner, H. Kunstmann, and A. Bardossy. Uncertainties in water balance estimations due to scarce meteorological information: a case study for the White Volta catchment in West Africa. In *Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007)*, Perugia, 2007. IAHS Publications 313.

R. Wilby, C. Dawson, and E. M. Barrow. SDSM – A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17:145–157, 2002.



R. L. Wilby, J. Troni, Y. Biot, L. Tedd, B. C. Hewitson, D. M. Smith, and R. T. Sutton. A Review of Climate Risk Information for Adaptation and Development Planning. *International Journal of Climatology*, 29:1193 – 1215, 2009.

L. L. Zhenqiu and K.-H. Yuan. *Welch's t test*. 2010.

E. Zorita and H. von Storch. The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison With More Complicated Methods. *Journal of Climate*, 12:2474–2489, 1999.