



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

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ
ΠΕΡΙΟΧΙΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΓΚΟΤΟΒΟΥ ΙΩΑΝΝΑ

Πτυχιούχος Φυσικός

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2017



ΓΚΟΤΟΒΟΥ ΙΩΑΝΝΑ

Πτυχιούχος Φυσικός Α.Π.Θ.

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



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΙΚΕΣ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ
ΔΟΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας,
στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών
«Μετεωρολογία, Κλιματολογία και Ατμοσφαιρικό Περιβάλλον»
του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κατράγκου Ελένη, Επίκουρη Καθηγήτρια Α.Π.Θ., Επιβλέπουσα
Καρακώστας Θεόδωρος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος
Φείδας Χαράλαμπος, Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Επίκουρη καθηγήτρια και επιβλέπουσα της μεταπτυχιακής μου διατριβής, κ. Ελένη Κατράγκου. Την ευχαριστώ για την άψογη συνεργασία που είχαμε από όταν βρισκόμουν ακόμη στο προπτυχιακό επίπεδο των σπουδών μου, για την συνεχή καθοδήγηση και στήριξή της, τόσο σε επιστημονικά όσο και σε προσωπικά θέματα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, για τη συμπαράσταση και τη βοήθεια που μου παρείχαν σε κάθε βήμα της διατριβής μου. Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Καρακώστα, του οποίου οι συμβουλές με βοήθησαν σημαντικά όλα τα χρόνια των μεταπτυχιακών σπουδών μου, καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χαράλαμπο Φείδα, για τις χρήσιμες υποδείξεις του και την καθοριστική συμβολή του στην εξέλιξη της εργασίας μου.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω δύο από τους υποψήφιους διδάκτορες του τομέα, τον Στέργιο Κάρτσιο και τον Βασίλη Παυλίδη, για τη βοήθεια που μου προσέφεραν στην επεξεργασία των δεδομένων, αλλά και την υποψήφια διδάκτορα του τομέα και φίλη μου Γεωργία Λάζογλου για τη στήριξη και το ενδιαφέρον της.

Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω στην οικογένειά μου για τη στήριξη που μου προσέφερε, τόσο σε συναισθηματικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο, και τη συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Κέντρο Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης (ΚΗΔ) του ΑΠΘ για τη διάθεση πόρων και τον κ. Κώστα Τσιγαρίδη από το Columbia University της Νέας Υόρκης για τη παροχή των πεδίων του NASA GISS ModelE2. Ευχαριστώ την βάση δεδομένων E-OBS από το πρόγραμμα EU-FP6 ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) και τον πάροχο των δεδομένων, το πρόγραμμα ECA&D (<http://www.ecad.eu>) και το CM SAF του EUMETSAT για την παροχή των δορυφορικών δεδομένων.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

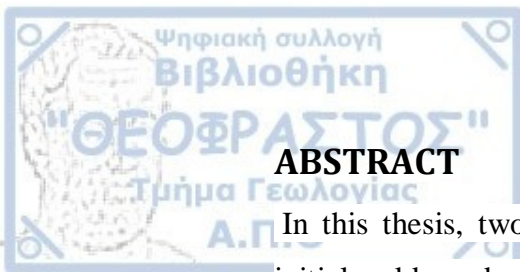
Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης γίνεται αξιολόγηση δύο περιοχικών κλιματικών προσομοιώσεων, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς τις οριακές συνθήκες, και ερευνάται η επίπτωση των διαφορετικών οριακών συνθηκών στην κλιματολογία του περιοχικού μοντέλου. Επιστημονικός στόχος είναι να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο ένα μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας οδηγεί ένα περιοχικό κλιματικό μοντέλο και να ποσοτικοποιηθεί η επίπτωση αυτή σε βασικές κλιματικές παραμέτρους.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF (WRF-ARW) έκδοση 3.7.1, με χωρική ανάλυση 0.44° . Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου σε δύο προσομοιώσεις: το μοντέλο WRF οδηγήθηκε α) από δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim και β) από το παγκόσμιο μοντέλο NASA GISS E2, για τη χρονική περίοδο 1990-2008 και την περιοχή της Ευρώπης. Αξιολογήθηκε η επίδοση των δύο προσομοιώσεων για θερμοκρασία και βροχόπτωση με δεδομένα επίγειων παρατηρήσεων, καθώς και για ακτινοβολία μικρού και μεγάλου μήκους κύματος που φτάνουν κατερχόμενες στο έδαφος και ποσοστό της νεφοκάλυψης με δορυφορικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν ότι το μοντέλο WRF και στις δύο περιπτώσεις είναι πιο ψυχρό (κατά 1.6°C όταν οδηγείται από τα ERA-Interim και κατά 4.5°C όταν οδηγείται από το GISS Model E2 κατά μέσο πάνω από την Ευρώπη) και πιο υγρό (κατά $0,1 \text{ mm/day}$ όταν οδηγείται από τα ERA-Interim και κατά $1,4 \text{ mm/day}$ όταν οδηγείται από το GISS Model E2 κατά μέσο όρο πάνω από την Ευρώπη) σε σχέση με την κλιματολογία των παρατηρήσεων. Η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος με κατεύθυνση προς τα κάτω στην επιφάνεια της Γης υποεκτιμάται για κάθε περιοχή και εποχή και από τις δύο προσομοιώσεις, κατά -34.67 W m^{-2} όταν οδηγείται από τα ERA-Interim και κατά -42.12 W m^{-2} όταν οδηγείται από το GISS Model E2 κατά μέσο όρο πάνω από την Ευρώπη για όλες τις εποχές. Η εικόνα για την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος στο έδαφος είναι λιγότερο ξεκάθαρη. Υποεκτίμηση παρατηρείται κατά τη θερινή περίοδο (καλοκαίρι – φθινόπωρο) στην ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος σε σχέση με την κλιματολογία και των δύο σετ



δορυφορικών δεδομένων και για τις δύο προσομοιώσεις. Η αξιολόγηση με τα δεδομένα SARAH δίνει μεγαλύτερες τιμές διαφορών το καλοκαίρι, ίσες με -30.91 W m^{-2} όταν το WRF οδηγείται από τα δεδομένα επανάλυσης και -64.36 W m^{-2} όταν οδηγείται από το μοντέλο παγκόσμιας κυκλοφορίας. Το ποσοστό της νεφοκάλυψης υπερεκτιμάται συστηματικά και από τις δύο προσομοιώσεις, κατά 10.72% όταν το WRF οδηγείται από τα ERA-Interim και κατά 16.02% όταν οδηγείται από το GISS ModelE2 κατά μέσο όρο για κάθε εποχή πάνω από ολόκληρη την Ευρώπη.

Η μελέτη της διαφοράς των πεδίων που οδηγούν το περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF έδειξε ότι στη βόρεια Ευρώπη το χειμώνα το μοντέλο παγκόσμιας κυκλοφορίας NASA GISS E2 δίνει υψηλότερες πιέσεις και χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τα δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim και στη νότια Ευρώπη το αντίστροφο. Το περιοχικό κλιματικό μοντέλο αποδεικνύεται ότι ακολουθεί με συνέπεια τα πεδία παγκόσμιας κλίμακας χωρίς να διαπιστώνονται ασυνέπειες στην απόδοση της κλιματολογίας για την περιοχή της Ευρώπης. Επομένως, το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας NASA GISS E2 μπορεί να θεωρηθεί ως κατάλληλο υποψήφιο μοντέλο για μελέτες δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας, στο πλαίσιο προσομοιώσεων μελλοντικών περιοχικών κλιματικών προβολών.

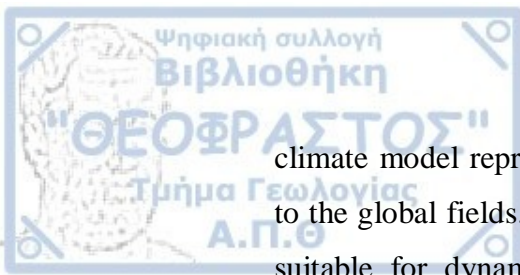


ABSTRACT

In this thesis, two regional climate simulations, which differ only in the initial and boundary conditions, are evaluated and the impact of the different boundary conditions on the model climatology is investigated. The scientific aim is to understand how a regional climate model is forced by a general circulation model and quantify this impact on basic climate parameters.

The simulations have been performed with the regional climate model WRF (WRF-ARW) version 3.7.1 with a special resolution of 0.44° . Two climate simulations were performed: one hindcast, driven by the ERA-Interim reanalysis, and one historical, driven by the NASA GISS ModelE2, during the period 1990-2008 and covering the European region. The two simulations are evaluated with the EOBS climatology for temperature and precipitation and with satellite data for surface downward longwave and shortwave radiation and cloud fractional cover. The results showed that both simulations are colder (1.6°C for the hindcast simulation and 4.5°C for the historical simulation on average over Europe) and wetter (0.1 mm/day for the hindcast simulation and 1.4 mm/day for the control simulation on average over Europe) than the EOBS climatology. Surface downward longwave radiation is underestimated over the whole region, with biases of -34.67 W m^{-2} for the hindcast simulation and -42.12 W m^{-2} for the historical simulation on average over Europe. Surface incoming shortwave radiation is underestimated in summer and autumn. Evaluated with the SARA climatology, WRF forced by the ERA-Interim reanalysis gives summer shortwave radiation bias equal to -30.91 W m^{-2} on average over Europe, while WRF forced by the GISS ModelE2 results in greater values of bias (-64.36 W m^{-2} on average over Europe). Cloud fractional cover is overestimated by both simulations (10.72% for the hindcast simulation and 16.02% for the historical simulation on average over Europe for every season).

The study of the differences of the forcing fields showed that in winter over northern Europe NASA GISS ModelE2 results in higher values of sea-level pressure and lower values of temperature compared to the ERA-Interim reanalysis data. The opposite is observed over southern Europe. The regional

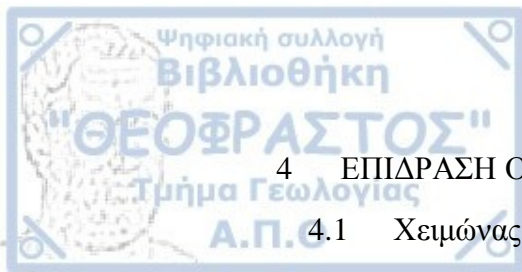


climate model represents the climatology of the European region according to the global fields. Consequently, the general circulation model GISS E2 is suitable for dynamical downscaling studies, in the framework of future regional climate projections.



Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1	Κλιματικά μοντέλα.....	12
1.2	Παγκόσμια και περιοχικά κλιματικά μοντέλα.....	14
1.3	Η χωρική ανάλυση και το πλέγμα των μοντέλων.....	15
1.4	Πλευρικές οριακές και αρχικές συνθήκες.....	17
1.5	Υποβιβασμός κλίμακας.....	19
1.6	Εσωτερικά πλέγματα και αλληλεπίδρασή τους.....	21
1.6.1	Απλά ένθετα πλέγματα (One-way interaction).....	21
1.6.2	Αμφίδρομα ή επάλληλα πλέγματα (Two-way interaction)....	22
1.7	Αξιολόγηση κλιματικών μοντέλων.....	23
1.8	Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι.....	24
2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	29
2.1	Παρατηρησιακά δεδομένα.....	29
2.1.1	Πλεγματικά επίγεια δεδομένα E-OBS.....	29
2.1.2	Δορυφορικά δεδομένα.....	29
2.2	Δεδομένα μοντέλων.....	33
2.2.1	Περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF.....	33
2.2.2	Παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο NASA GISS.....	34
2.2.3	Δεδομένα επανάλυσης.....	35
2.3	Μεθοδολογία.....	35
3	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	40
3.1	Θερμοκρασία.....	40
3.2	Βροχόπτωση.....	45
3.3	Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.....	50
3.4	Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.....	55
3.5	Ποσοστό νεφοκάλυψης.....	65
3.6	Συνολική αξιολόγηση των παραμέτρων.....	72



4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ....	73
4.1	Χειμώνας.....	73
4.2	Καλοκαίρι.....	78
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη σύγχρονη εποχή, η παγκόσμια μελέτη του κλίματος είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί ένα συνεχώς εξελισσόμενο τομέα της επιστήμης, εν όψει και των αλλαγών των κλιματικών συνθηκών που παρατηρούνται (Ahrens, 2005). Η μελέτη του κλίματος βασίζεται τόσο στις μετρήσεις και τις παρατηρήσεις από διάφορους επίγειους σταθμούς ή δορυφόρους, όσο και στην πρόγνωση που παρέχουν τα κλιματικά μοντέλα. Τα κλιματικά μοντέλα αποτελούν το σημαντικότερο εργαλείο για την προσομοίωση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών σε ολόκληρο τον πλανήτη. Η προσομοίωση αυτή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική και αξιόπιστη, αφού τέτοιες αλλαγές δεν επηρεάζουν απλά όλο το φάσμα των δραστηριοτήτων των ανθρώπων, αλλά είναι κρίσιμες ακόμα και για την ανθρώπινη ύπαρξη. Για το λόγο αυτό γίνονται συνεχώς σημαντικές προσπάθειες, έτσι ώστε να προστίθενται κάθε φορά επιπλέον γνώσεις πάνω σε αυτό το μείζον για την κοινωνία μας ζήτημα.

Επομένως, η εκτίμηση των παγκόσμιων κλιματικών συνθηκών που θα επικρατούν στο μέλλον, δεν μπορεί παρά να στηρίζεται στα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων παγκόσμιας κυκλοφορίας (GCMs) και των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs), τα οποία λόγω της υψηλότερης χωρικής ανάλυσης που διαθέτουν, είναι σε θέση να προσομοιώνουν καλύτερα την επίδραση της τοπογραφίας της μελετώμενης περιοχής.

Για να λειτουργήσουν τα RCMs χρειάζεται να τους παρέχονται αρχικές (initial conditions) και πλευρικές οριακές συνθήκες (boundary conditions), από GCMs ή από δεδομένα επανάλυσης (reanalysis data). Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι η εκτιμήσεις που κλίματος που θα προκύψουν από ένα RCM θα εξαρτώνται, εκτός από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του RCM, και από το παγκόσμιο μοντέλο ή τα δεδομένα επανάλυσης που παρείχαν τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Μάλιστα, στα RCMs η επίδραση των οριακών συνθηκών είναι πολλές φορές σημαντική ακόμα και μακριά από τα όρια.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι πριν τη χρήση ενός μοντέλου για την παραγωγή μελλοντικών κλιματικών σεναρίων, κρίνεται απαραίτητο να έχει γίνει αξιολόγησή του.

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής Διατριβής Ειδίκευσης είναι να

αξιολογηθούν τα δεδομένα που προκύπτουν από το περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF, όταν αυτό οδηγείται από δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim και όταν οδηγείται από δεδομένα του μοντέλου παγκόσμιας κυκλοφορίας NASA GISS ModelE2. Επιπλέον, ερευνάται η επίδραση που έχουν οι αρχικές και οριακές συνθήκες στα αποτελέσματα της περιοχικής κλιματικής προσομοίωσης. Η περίοδος που εξετάζεται είναι από το 1990 έως το 2008 (19 χρόνια).

Η ανάπτυξη του θέματος της εργασίας γίνεται σε 5 επιμέρους κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η εργασία και το οποίο αποτέλεσε την αφορμή για την εκπόνησή της. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα των μοντέλων (περιοχικό και παγκόσμιο), τα δεδομένα επανάλυσης και τα παρατηρησιακά δεδομένα (επίγεια και δορυφορικά) που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αξιολόγηση των δεδομένων που προέκυψαν από τις δύο προσομοιώσεις με τις διαφορετικές αρχικές συνθήκες. Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετώνται οι διαφορές των δεδομένων που έδωσαν τις αρχικές και οριακές συνθήκες και το πώς οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται στις διαφορές των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιώσεων. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας και επιχειρείται να δοθούν κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.1 Κλιματικά μοντέλα

Ένα κλιματικό μοντέλο μπορεί να οριστεί ως μια μαθηματική αναπαράσταση του κλιματικού συστήματος, που βασίζεται στους νόμους της φυσικής, της βιολογίας και της χημείας (Goosse et al., 2010). Οι εξισώσεις που προκύπτουν από τους νόμους αυτούς επιλύονται αριθμητικά. Εκτός, όμως, από τους νόμους αυτούς, στα κλιματικά μοντέλα χρειάζεται να εισαχθούν δεδομένα από παρατηρήσεις ή άλλα μοντέλα. Για ένα κλιματικό μοντέλο που περιγράφει σχεδόν όλα τα στοιχεία του κλιματικού συστήματος, απαιτείται σχετικά μικρή ποσότητα δεδομένων: η ηλιακή ακτινοβολία, η ακτίνα και η περίοδος περιστροφής της Γης, η τοπογραφία, πληροφορίες για τους ωκεανούς, το έδαφος κλπ. Βέβαια, για ένα μοντέλο

που αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των πάγων τους, πληροφορίες με τη μορφή οριακών συνθηκών πρέπει να παρέχονται για όλα τα υποσυστήματα του κλιματικού συστήματος, ακόμα και για αυτά που δεν περιλαμβάνονται ρητώς στο μοντέλο: τη συμβολή της βλάστησης, την τοπογραφία των πάγων κλπ. Αυτά τα δεδομένα που εισάγονται χωρίζονται συχνά σε οριακές συνθήκες (που καθορίζονται στην πορεία της προσομοίωσης) και εξωτερικούς εξαναγκασμούς (όπως οι αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία), που οδηγούν σε αλλαγές στο κλίμα.

Οι απλοποιήσεις είναι αναπόφευκτες όταν σχεδιάζεται ένα κλιματικό μοντέλο, καθώς οι διαδικασίες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κυμαίνονται σε κλίμακες τάξης από κάποια εκατοστά μέχρι το μέγεθος της Γης. Επίσης, οι χρονικές κλίμακες διαφέρουν εξίσου, από την τάξη των δευτερολέπτων μέχρι δισεκατομμυρίων χρόνων. Έτσι, πρέπει να επιλεχθούν οι διαδικασίες που πρέπει απαραίτητα να συμπεριληφθούν στις προσομοιώσεις και εκείνες που μπορούν να παραλειφθούν ή να συμπεριληφθούν απλοποιημένες. Η επιλογή αυτή βέβαια εξαρτάται από τους στόχους της εκάστοτε έρευνας, αλλά και τη διαθέσιμη τεχνολογία. Επίσης, τα πιο απλοποιημένα μοντέλα, πολλές φορές κάνουν πιο εύκολα κατανοητές τις βασικές διεργασίες και αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα διάφορα τμήματα του κλιματικού συστήματος. Έτσι, τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται συχνά για να αναλύσουν τα αποτελέσματα πιο περίπλοκων μοντέλων, στα οποία τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος μπορεί να μην είναι ευδιάκριτα, λόγω του μεγάλου αριθμού των διεργασιών που προσομοιώνονται και των λεπτομερειών που παρέχονται.

Όλοι οι τύποι μοντέλων μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του κλιματικού συστήματος και δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο που να είναι κατάλληλο για όλους τους σκοπούς. Έτσι, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος κλιματικών μοντέλων, από τα απλά μέχρι τα πιο πολύπλοκα, που διαμορφώνει την ιεραρχία των μοντέλων (Hierarchy of models) (Goosse et al., 2010). Τελικά, τις περισσότερες φορές ο καλύτερος τρόπος για να γίνουν κατανοητές οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα είναι ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων διαφορετικού τύπου μοντέλων.

Κατά το σχεδιασμό ενός μοντέλου, πρώτα πρέπει να αποφασιστεί ποιες μεταβλητές και διαδικασίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και ποιες πρέπει να θεωρηθούν σταθερές. Στις περισσότερες κλιματικές μελέτες πρέπει να αναπαρασταθεί η φυσική συμπεριφορά της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και των πάγων που επιπλέουν σε αυτούς. Όμως, όλο και πιο συχνά απαιτείται να συμπεριληφθούν ο κύκλος του άνθρακα στην ξηρά και τη θάλασσα, η δυναμική βλάστηση και οι πάγοι που βρίσκονται στην ξηρά. Έτσι δημιουργούνται τα μοντέλα του γήινου συστήματος (Earth system models).

Ανάλογα με την περιοχή ολοκλήρωσης (domain) του κάθε μοντέλου, δηλαδή την περιοχή της γης που καλύπτεται, τα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models - GCMs), τα οποία είναι παγκόσμια μοντέλα, και μοντέλα περιορισμένης περιοχής (Limited-Area Models - LAMs) ή περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models - RCMs) (<https://www.meted.ucar.edu>).

1.2 Παγκόσμια και περιοχικά κλιματικά μοντέλα

Όταν τα κλιματικά μοντέλα λειτουργούν σε πλανητική κλίμακα υποθέτοντας ότι η ατμόσφαιρα είναι συνεχής ονομάζονται μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models - GCMs). Στα μοντέλα αυτά περιλαμβάνονται τα ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (Atmospheric General Circulation Models - AGCMs), που λαμβάνουν υπόψη μόνο τις διαδικασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και τα ωκεάνια μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (Ocean General Circulation Models - OGCMs), που λαμβάνουν υπόψη την κυκλοφορία στην υδρόσφαιρα. Αργότερα αναπτύχθηκαν και ατμοσφαιρικά-ωκεάνια συζευγμένα μοντέλα (Atmosphere Ocean General Circulation Model - AOGCM), που περιλαμβάνουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, αλλά και τα πιο διευρυμένα συζευγμένα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (Coupled General Circulation Model - CGCM) (Goosse et al., 2010).

Η χωρική ανάλυση των GCMs λόγω περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων είναι χαμηλή, οπότε αυτά δεν είναι σε θέση να προσομοιώσουν ικανοποιητικά την επίδραση της τοπικής και περιοχικής

τοπογραφίας. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs). Τα RCMs χρησιμοποιούν ως αρχικές και οριακές συνθήκες τα μεγάλης κλίμακας πεδία που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των GCMs. Η χωρική τους ανάλυση για προσομοιώσεις πολλών δεκαετιών ή αιώνων φτάνει από 50 έως 25km.

Η χρήση των RCMs είναι απαραίτητη σε περιοχές με ποικίλα χαρακτηριστικά τοπογραφίας. Για παράδειγμα, η Ελλάδα διακρίνεται από απότομη ορειογραφία, από τις ορεινές περιοχές στη θάλασσα, περίπλοκες ακτογραμμές και πολλά νησιά. Έτσι, στην περίπτωση αυτή ο υποβιβασμός κλίμακας είναι απαραίτητος, καθώς απαιτείται υψηλή χωρική ανάλυση για τη μελέτη του κλίματος σε τέτοιες συνθήκες. Για τέτοιες περιοχές, ακόμα και χωρική ανάλυση 10km, που είναι από τις υψηλότερες που χρησιμοποιείται στα υδροστατικά μοντέλα, δεν μπορεί να θεωρηθεί αρκετή (Im et al., 2010).

1.3 Η χωρική ανάλυση και το πλέγμα των μοντέλων

Η οριζόντια χωρική διακριτοποίηση (grid-spacing) ή χωρική ανάλυση (spatial resolution) ενός μοντέλου σημείων πλέγματος είναι η μέση απόσταση ανάμεσα στα γειτονικά σημεία πλέγματος της ίδιας μεταβλητής. Ένα μοντέλο με μικρού μεγέθους πλεγματικά κελιά λέγεται υψηλής ανάλυσης (Neelin, 2011). Όσο υψηλότερης χωρικής ανάλυσης είναι το μοντέλο, τόσο περισσότερα πλεγματικά κελιά έχει το πλέγμα του και τόσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις του κάθε πλεγματικού κελιού. Άρα απαιτείται και περισσότερος υπολογιστικός χρόνος, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται για να υπολογιστούν οι τιμές στα σημεία πλέγματος. Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η ανάλυση τόσο αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος του μοντέλου, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι περίπου ανάλογο με τον υπολογιστικό χρόνο. Για παράδειγμα, για να διπλασιαστεί η ανάλυση του πλέγματος χρειάζεται $2^3=8$ φορές περισσότερος υπολογιστικός χρόνος. Με διπλασιασμό του αριθμού των χρονικών βημάτων, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται κατά $2^4=16$ φορές. Όταν η χωρική ανάλυση γίνεται υψηλότερη, το χρονικό βήμα πρέπει να μειώνεται και απαιτούνται περισσότερα βήματα. Για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα, θα πρέπει η ταχύτερη κυματική

διαταραχή να μην είναι δυνατό να διανύσει απόσταση μεγαλύτερη ή ίση από την οριζόντια χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου. Έτσι, διαμορφώνεται η συνθήκη ευστάθειας των Courant – Friedrichs – Lewy ή συνθήκη Courant (Courant et al., 1928), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c}$$

όπου Δt είναι το χρονικό βήμα, Δx η απόσταση ανάμεσα στα γειτονικά σημεία πλέγματος και c η ταχύτητα διάδοσης της ταχύτερης κυματικής διαταραχής. Αν η παραπάνω συνθήκη δεν ισχύει, υπάρχει αστάθεια και η προσομοίωση αποτυγχάνει (blowup).

Η επιλογή ενός μοντέλου υψηλής ή χαμηλής ανάλυσης γίνεται ανάλογα με την κλίμακα των φαινομένων που θα μελετηθούν και την περιοχή ολοκλήρωσης. Τα κλιματικά μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας είναι μοντέλα χαμηλότερης ανάλυσης απ' ό,τι, για παράδειγμα, τα μοντέλα πρόγνωσης καιρού ή τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα. Για την ακρίβεια, όταν η χωρική ανάλυση μιας περιοχής πρέπει να είναι υψηλή (μικρότερη από 50km) προτιμούνται τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα. Τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα αναπαριστούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το ανάγλυφο και την κατανομή ξηράς-θάλασσας (Zanis et al, 2015), και προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια φαινόμενα περιοχικής και τοπικής κλίμακας, σε σχέση με τα κλιματικά μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας. Έτσι, για τον ένα τύπο μοντέλων (GCMs) μια χωρική διακριτοποίηση της τάξης των 50km για παράδειγμα, μπορεί να θεωρείται υψηλή, ενώ για τον άλλο (RCMs) να θεωρείται χαμηλή.

Στα μοντέλα σημείων πλέγματος, για παράδειγμα σε ένα μοντέλο οριζόντιας χωρικής διακριτοποίησης 50km, κάθε σημείο πλέγματος στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει μια περιοχή με έκταση $50 \times 50 = 2500 \text{ km}^2$ και είναι τοποθετημένο στο κέντρο της. Έτσι, το κεντρικό σημείο πλέγματος αναπαριστάνει τη μέση τιμή του πεδίου στα 2500 km^2 , που είναι το εμβαδόν του πλεγματικού κελιού. Πρακτικά, όμως, τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται αναπαριστάνουν την ατμόσφαιρα με 3-διάστατες κυψελίδες (grid-box) και όχι με 2-δισδιάστατα πλεγματικά κελιά, οπότε οι τιμές στα σημεία πλέγματος αντιστοιχούν στη μέση τιμή του πεδίου στον όγκο της κυψελίδας.

1.4 Πλευρικές οριακές και αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες (initial conditions) των μοντέλων αποτελούν ένα σύνολο αρχικών τιμών όλων των κύριων μεταβλητών, δηλαδή των μεταβλητών εκείνων που εμφανίζονται στις προγνωστικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Στα RCMs, επειδή η περιοχή ολοκλήρωσης είναι συγκεκριμένη, προκύπτει το πρόβλημα των τιμών στα όρια της περιοχής. Έτσι, χρειάζονται κάποιες πληροφορίες για τα όρια αυτά (Pielke, 2002). Η διαδικασία καθορισμού των τιμών των εξαρτημένων μεταβλητών που απαιτούνται για να αρχίσει η ολοκλήρωση των εξισώσεων του μοντέλου ονομάζεται αρχικοποίηση (initialization). Οι τιμές που εκχωρούνται στην περιφέρεια της περιοχής ολοκλήρωσης ονομάζονται πλευρικές οριακές συνθήκες (lateral boundary conditions - LBC). Δηλαδή, τα μοντέλα περιορισμένης περιοχής έχουν πλευρικά και κατακόρυφα όρια, ενώ τα παγκόσμια μοντέλα που καλύπτουν όλη τη γη έχουν μόνο κατακόρυφα όρια.

Οι πλευρικές οριακές συνθήκες μπορεί να προέρχονται από συστήματα αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation systems), προγνωστικές τιμές από κάποια προσομοίωση ενός μοντέλου μεγαλύτερης περιοχής (π.χ. από ένα παγκόσμιο μοντέλο) και κλιματολογικές ή σταθερές τιμές, για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (όπως χαρακτηριστικά του εδάφους). Παρά τη μεγάλη ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, που επιτρέπουν όλο και καλύτερες παραμετροποιήσεις των φυσικών διεργασιών σε όλο και υψηλότερες αναλύσεις, αλλά και τα νέα δεδομένα για τις αρχικές συνθήκες που βελτιώνονται συνεχώς, πάντα θα υπάρχει περιορισμός στην προγνωσιμότητα με ένα περιοχικό μοντέλο, λόγω των πλευρικών οριακών συνθηκών.

Τα RCMs πολλές φορές χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα των GCMs για μια συγκεκριμένη περιοχή ως οριακές συνθήκες και η προσομοίωση γίνεται σε πολύ υψηλότερη χωρική ανάλυση. Έτσι, υπάρχει μια πρόκληση στο να διατηρηθεί η συμβατότητα της προσομοίωσης μέσα στην περιοχή και της λύσης μεγάλης κλίμακας που δίνει το παγκόσμιο μοντέλο. Η βασική υπόθεση πίσω από αυτά είναι ότι το RCM μπορεί να παράγει κλιματικές πληροφορίες υψηλής ανάλυσης από χαμηλής ανάλυσης πλευρικές οριακές συνθήκες και ότι αυτό μπορεί να γίνει με τρόπο αξιόπιστο και υπολογιστικά

αποτελεσματικό. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των δύο χωρικών αναλύσεων, τόσο πιο αποτελεσματική είναι η προσέγγιση. Όμως η αύξηση αυτή της αποτελεσματικότητας γίνεται σε βάρος της αξιοπιστίας.

Στα RCMs η επίδραση των οριακών συνθηκών είναι μεγάλη, ακόμα και μακριά από τα όρια, οπότε θα πρέπει τα πλευρικά όρια να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος. Έτσι, η επιλογή της περιοχής ολοκλήρωσης θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά, για να αποφευχθούν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν αν τα πλευρικά όρια δεν βρίσκονται αρκετά μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος. Αν αυτό δε συμβεί, τα πλευρικά όρια μπορεί να καθορίσουν τις λύσεις. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες είναι καλό να ανανεώνονται αρκετά συχνά. Συνήθεις χρόνοι είναι κάθε 3 ή 6 ώρες.

Επιπλέον, όλα τα μοντέλα (και τα GCMs) απαιτούν καθορισμό οριακών συνθηκών στην κορυφή και στη βάση της περιοχής ολοκλήρωσης, οι οποίες ονομάζονται άνω και κάτω οριακές συνθήκες αντίστοιχα (upper and lower boundary conditions). Η κορυφή των μοντέλων τοποθετείται πάνω από την Τροπόπαυση. Για το πώς αλλάζουν οι μεταβλητές πάνω από την κορυφή κατά την προγνωστική περίοδο γίνονται υποθέσεις. Τα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιούν άνω οριακές συνθήκες τέτοιες που να προϋποθέτουν ότι δεν επιτρέπεται κατακόρυφη κίνηση μέσω της κορυφής του μοντέλου. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα όταν βαρυντικά κύματα ανακλώνται στην κορυφή του μοντέλου. Αν δεν αντιμετωπιστούν τα κύματα αυτά, μπορεί να αναπηδούν σε όλα τα ύψη και να επηρεάζουν τις κατακόρυφες κινήσεις, οπότε για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό έχουν αναπτυχθεί τρόποι όπως η πρόσθεση ενός στρώματος απορρόφησης ή απόσβεσης κοντά στην κορυφή του μοντέλου. Η βάση του μοντέλου ορίζεται από τη διεπαφή του κατώτατου επιπέδου της ατμόσφαιρας του μοντέλου με την τοπογραφία ή την επιφάνεια της θάλασσας του μοντέλου. Η ακρίβεια με την οποία αυτή οριακή συνθήκη αναπαριστά τις συνθήκες στην επιφάνεια της Γης εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά και παραμετροποιήσεις της συγκεκριμένης επιφάνειας που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, αλλά και την πηγή πληροφοριών για τη χιονοκάλυψη, τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους, τον τύπο του εδάφους και την

κάλυψη με βλάστηση. Αφού τα περισσότερα μοντέλα προβλέπουν τις συνθήκες κοντά στην επιφάνεια χρησιμοποιώντας αρχές του ενεργειακού ισοζυγίου, εισάγονται λάθη λόγω του ανεπαρκούς χειρισμού του εδάφους, της ανακλαστικότητας, της ποσότητας του υετού που είναι διαθέσιμη για εξάτμιση από την επιφάνεια, τη θερμοκρασία της θάλασσας, την κάλυψη από βλάστηση και άλλες λεπτομέρειες που σχετίζονται στην αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών που κάνει το μοντέλο.

1.5 Υποβιβασμός κλίμακας

Σε κάποιες περιπτώσεις που απαιτείται η προσομοίωση μιας περιοχής με υψηλή ανάλυση, εφαρμόζεται η τεχνική του *δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας (dynamical downscaling)*: τα ατμοσφαιρικά πεδία ενός μοντέλου παγκόσμιας κλίμακας (GCM) τροφοδοτούν ένα περιοχικό κλιματικό μοντέλο (RCM) για να προσομοιώσει την περιοχή με υψηλότερη ανάλυση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Δηλαδή, τα αποτελέσματα ενός GCM μπορούν να οδηγήσουν (force) ένα RCM, το οποίο επικεντρώνεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. ήπειρο) και μπορεί να προσομοιώνει τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών τοπικής κλίμακας καλύτερα. Τα ατμοσφαιρικά πεδία που τροφοδοτούν ένα RCM του ορίζουν με τον τρόπο αυτό τις οριακές συνθήκες. Πολύ σημαντική είναι η επιλογή του πλέγματος της περιοχής ενός RCM, ώστε να είναι αρκετά μεγάλο και να αναπτύσσονται όλες οι ατμοσφαιρικές διεργασίες, χωρίς να γίνεται υπολογιστικά μη ρεαλιστικό.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στο γεγονός ότι μπορεί στην περιοχή ολοκλήρωσης του RCM να μεταφέρονται λάθη που προήλθαν από την ελλιπή ανάλυση ενός φαινομένου (λόγω χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης) στο μοντέλο μεγαλύτερης κλίμακας, το οποίο παρείχε τις πλευρικές οριακές συνθήκες. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων του RCM επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα των αποτελεσμάτων που παράγονται από το μοντέλο που παρέχει τις πλευρικές οριακές συνθήκες. Τα σφάλματα στα αποτελέσματα των GCMs θα μεταφερθούν στην περιοχή ολοκλήρωσης των RCMs και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να ενισχυθούν κιάλας. Για το λόγο αυτό, ιδανικά οι οριακές συνθήκες θα έπρεπε να βασίζονται σε

παρατηρήσεις. Έτσι, στην παρούσα εργασία, γίνεται αξιολόγηση του περιοχικού κλιματικού μοντέλου WRF, όταν αυτό οδηγείται από τα δεδομένα του παγκόσμιου μοντέλου NASA GISS E2, αλλά και από τα δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim, που επέχουν, στην ουσία, θέση παρατηρήσεων.

Βέβαια, εκτός από το δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας, στις μεθόδους υποβιβασμού κλίμακας ανήκει και ο *στατιστικός υποβιβασμός κλίμακας (statistical downscaling)*. Στη μέθοδο αυτή, ένα μοντέλο αναπτύσσεται για την περιοχή ενδιαφέροντος, που σχετίζει στατιστικά τις μεγάλης κλίμακας μεταβλητές με τις περιοχικές και τοπικές μεταβλητές. Έπειτα, τα αποτελέσματα ενός RCM εισάγονται ως δεδομένα σ' αυτό το στατιστικό μοντέλο για να προσεγγιστεί το αντίστοιχο περιοχικό και τοπικό κλίμα. Τα στατιστικά μοντέλα που προκύπτουν μέσω του στατιστικού υποβιβασμού κλίμακας χωρίζονται σε τρεις ευρείες κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν (Giorgi et al., 2001; Τολίκα, 2005):

- *Γεννήτριες καιρού (Weather Generators)*. Είναι στατιστικά μοντέλα παρατηρούμενων ακολουθιών από καιρικές μεταβλητές. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι είναι οι Αλυσίδες Markov (Markov chain approach) και οι Ακολουθίες (spell length approach).
- *Συναρτήσεις Μετάβασης (Transfer functions)*. Οι πιο κοινές συναρτήσεις μετάβασης προέρχονται από στατιστικές μεθόδους, όπως τη γραμμική και πολλαπλή παλινδρόμηση, την Κανονική Συσχετική Ανάλυση (CCA), τη διαδικασία αποσύνδεσης (Singular Value Decomposition) και την τεχνολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, με σκοπό τη δημιουργία εμπειρικών συναρτήσεων και σχέσεων που συνδέουν άμεσα και ποσοτικά τις ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές.
- *Συνοπτική Προσέγγιση – Τύποι Καιρού (Weather typing)*. Η προσέγγιση αυτή σχετίζει τις αλλαγές στη συχνότητα των συνοπτικών καταστάσεων ή των τύπων κυκλοφορίας με τις αλλαγές στο τοπικό ή περιοχικό κλίμα για μια ορισμένη περιοχή.

1.6 Εσωτερικά πλέγματα και αλληλεπίδρασή τους

Η «εμφώλευση» (nesting), μέσα σε ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, άλλων μοντέλων μικρότερης κλίμακας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Έτσι, το κάθε πλέγμα μπορεί να είναι ένθετο στο αμέσως χαμηλότερης ανάλυσης ή περισσότερα του ενός πλέγματα ανεξάρτητα μεταξύ τους να είναι ένθετα στο ίδιο εξωτερικό πλέγμα ή να γίνει συνδυασμένη εφαρμογή τους.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι πλευρικές οριακές συνθήκες ενός μοντέλου περιορισμένης περιοχής, συνήθως προέρχονται από μια προσομοίωση που έχει γίνει από κάποιο μοντέλο με μεγαλύτερη περιοχή ολοκλήρωσης. Αν οι πληροφορίες για τις οριακές συνθήκες ρέουν προς μία κατεύθυνση, από το μοντέλο που έχει εκτελέσει την προσομοίωση στη μεγαλύτερη περιοχή ολοκλήρωσης προς το μοντέλο με τη μικρότερη περιοχή ολοκλήρωσης, τότε τα πλέγματα χαρακτηρίζονται ως απλά ένθετα πλέγματα. Αν, όμως, οι πληροφορίες ρέουν και προς τις δύο κατευθύνσεις, διαμορφώνονται τα αμφίδρομα ή επάλληλα πλέγματα (<https://www.meted.ucar.edu>).

1.6.1 Απλά ένθετα πλέγματα (One-way interaction)

Αν ένα πλέγμα υψηλής διακριτοποίησης είναι ένθετο μέσα σε ένα πλέγμα χαμηλής διακριτοποίησης, ο πιο απλός τρόπος για να οριστούν οι πλευρικές οριακές συνθήκες του είναι να γίνει κατάλληλη παρεμβολή των προγνωστικών τιμών του πλέγματος χαμηλής διακριτοποίησης στα πλευρικά όρια του πλέγματος υψηλής διακριτοποίησης σε κάθε χρονικό βήμα και η προσομοίωσή του να γίνει με αυτές τις οριακές τιμές.

Οι υπολογισμοί του πλέγματος υψηλής ανάλυσης δεν έχουν καμία επίδραση στο πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Έτσι, η πληροφορία μεταφέρεται μόνο από το μεγαλύτερο και χαμηλής διακριτοποίησης πλέγμα στο μικρότερο και υψηλότερης διακριτοποίησης πλέγμα. Για να συμβεί αυτό, η πρόγνωση του πλέγματος χαμηλής διακριτοποίησης πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί πιο πριν ή να γίνει σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόγνωση του ένθετου πλέγματος. Οι τιμές των σημείων πλέγματος του πλέγματος χαμηλής ανάλυσης που βρίσκονται στο εσωτερικό του πλέγματος υψηλής ανάλυσης αγνοούνται από το τελευταίο.

1.6.2 Αμφίδρομα ή επάλληλα πλέγματα (Two-way interaction)

Μερικά μοντέλα περιορισμένης περιοχής εκτελούν τις προσομοιώσεις με μια μικρή περιοχή υψηλότερης ανάλυσης, η οποία είναι ένθετη σε πλέγμα χαμηλότερης ανάλυσης μέσα στο ίδιο μοντέλο. Αυτό είναι απαραίτητο επειδή υπάρχουν περιορισμοί στη μνήμη και την ταχύτητα των υπολογιστών, οι οποίοι απαγορεύουν την ύπαρξη ενός πλέγματος υψηλής ανάλυσης που να καλύπτει ολόκληρη την περιοχή ολοκλήρωσης. Οι πληροφορίες για τις εξωτερικές οριακές συνθήκες των δύο αυτών πλεγμάτων παρέχονται από κάποια εξωτερική πηγή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των απλών ένθετων πλεγμάτων. Όμως, οι διασυνδέσεις των δύο πλεγμάτων μέσα στο ένθετο πλέγμα καθορίζονται από προγνώσεις μέσα στο μοντέλο. Όπου το πλέγμα υψηλής ανάλυσης καλύπτει εκείνο με τη χαμηλή ανάλυση, οι προγνωστικές μεταβλητές για το πλέγμα χαμηλής ανάλυσης ενημερώνονται με βάση την πρόγνωση υψηλής ανάλυσης. Η πρόγνωση χαμηλής ανάλυσης, με τη σειρά της, επηρεάζει εκείνη με την υψηλή ανάλυση παρέχοντας τις οριακές συνθήκες.

Έτσι, σε αντίθεση με την περίπτωση της παραγράφου 1.6.1, όπου η λύση του μοντέλου χαμηλής ανάλυσης παρείχε τις οριακές συνθήκες για το ένθετο πλέγμα του μοντέλου υψηλής ανάλυσης, οπότε υπήρχε επίδραση μόνο της πρώτης λύσης στη δεύτερη, εδώ και η δεύτερη λύση επηρεάζει την πρώτη. Έτσι, είναι απαραίτητο οι υπολογισμοί να γίνονται και στα δύο πλέγματα ταυτόχρονα. Δηλαδή, αυτά τα πλέγματα βασίζονται σε αμφίδρομη ροή της πληροφορίας (two-way interaction). Στην κατηγορία αυτή, το πλέγμα υψηλής ανάλυσης δεν αντικαθιστά το πλέγμα χαμηλής ανάλυσης στην περιοχή που καταλαμβάνει, αλλά συμπίπτει με αυτό.

Η αλληλεπίδραση και προς τις δύο κατευθύνσεις είναι ιδιαίτερα επωφελής για διάφορους λόγους. Ένας από τους λόγους αυτούς είναι το γεγονός ότι επιτρέπει στις μικρής κλίμακας διεργασίες που έχουν επιλυθεί στο πλέγμα υψηλής ανάλυσης να επηρεάσουν τη ροή μεγαλύτερης κλίμακας στο πλέγμα χαμηλής ανάλυσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η χρήση διεργασιών στις οριακές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο (real-time) σε ένα μοντέλο με τα ίδια χαρακτηριστικά μειώνει την επίδραση των σφαλμάτων που συνδέονται με τη χρήση οριακών συνθηκών από ένα

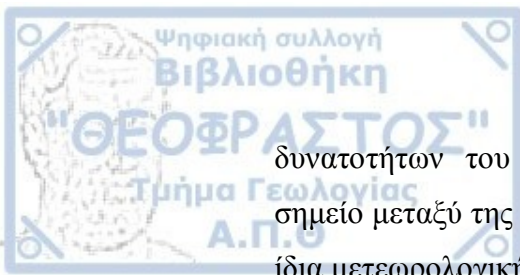
μοντέλο με παλαιότερα δεδομένα και διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. κατακόρυφη συντεταγμένη, τοπογραφία και φυσικές παραμετροποιήσεις).

1.7 Αξιολόγηση κλιματικών μοντέλων

Παρόλο που τα μοντέλα σχεδιάζονται πολύ προσεκτικά, δεν είναι σίγουρο ότι ένα μοντέλο θα είναι επαρκές για τη συγκεκριμένη χρήση για την οποία προορίζεται: κάποιες διαδικασίες που μπορεί να θεωρηθούν αρχικά αμελητέες μπορεί να αποδειχθεί τελικά ότι είναι αρκετά σημαντικές, μια παραμετροποίηση μπορεί να μην είναι έγκυρη στις συγκεκριμένες συνθήκες που ενδιαφέρουν ή να μην είναι συμβατή με τις άλλες υποθέσεις που χρησιμοποιούνται, η επιλογή των παραμέτρων μπορεί να μην είναι η βέλτιστη κ.ο.κ.. Έτσι, τα κλιματικά μοντέλα πρέπει να ελέγχονται για να αξιολογηθεί η ποιότητα και η απόδοσή τους. Σ' αυτό το πλαίσιο, πάντα είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι επιστημονικοί στόχοι της έρευνας που θα διεξαχθεί χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο μοντέλο.

Ένα πρώτο βήμα είναι να εξασφαλισθεί ότι το μοντέλο λύνει τις εξισώσεις ικανοποιητικά. Δηλαδή, αυτό έχει να κάνει μόνο με την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου και όχι με τη συμφωνία μοντέλου και πραγματικότητας. Ελέγχεται, έτσι, ότι δεν υπάρχουν σφάλματα στον κώδικα. Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να λυθούν οι εξισώσεις του μοντέλου θα πρέπει να είναι επαρκώς ακριβείς, κάτι που επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους. Η πιο καθιερωμένη από αυτές είναι να συγκρίνεται η αριθμητική λύση με την αναλυτική, για εξιδανικευμένες περιπτώσεις, για τις οποίες είναι διαθέσιμη ακριβής λύση.

Το επόμενο βήμα είναι να αξιολογηθεί εάν το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Για να γίνει αυτό, τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να συγκριθούν με παρατηρήσεις που έχουν αποκτηθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Η αξιολόγηση των μοντέλων με τη χρήση παρατηρήσεων μπορεί να διακριθεί σε δύο ευρύτερες κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκει η υποκειμενική αξιολόγηση (subjective validation), όπου ένα ή περισσότερα προγνωστικά πεδία συγκρίνονται ποιοτικά με τις παρατηρήσεις. Στη δεύτερη κατηγορία υπόκειται η ποσοτική αξιολόγηση (point and pattern quantitative validation). Ο ποσοτικός έλεγχος των



δυνατοτήτων του μοντέλου προκύπτει από αντιστοίχιση σημείο προς σημείο μεταξύ της πρόγνωσης του μοντέλου και των παρατηρήσεων, για την ίδια μετεωρολογική παράμετρο.

Επιπλέον, για να αξιολογηθεί ένα μοντέλο είναι χρήσιμο να γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του με εκείνα ενός άλλου μοντέλου, που έχει αναπτυχθεί ανεξάρτητα. Αν και όλα τα μοντέλα έχουν ως βάση τους τις ίδιες εξισώσεις, εκείνες που εκφράζουν τους νόμους της διατήρησης, διαφέρουν ως προς τις διάφορες παραμετροποιήσεις. Αν προκύψουν παρόμοια αποτελέσματα μοντέλων δεν σημαίνει απαραίτητα ότι αυτά δίνουν μια ρεαλιστική αναπαράσταση του ατμοσφαιρικού συστήματος, όμως τέτοια πειράματα είναι χρήσιμα για να διαπιστωθεί αν ανεξάρτητοι ερευνητές που χρησιμοποιούν διαφορετικά αποτελέσματα μπορούν να αναπαράγουν ο ένας τα αποτελέσματα του άλλου. Εκτός από τη σύγκριση ανεξάρτητων μοντέλων μεταξύ τους, μια άλλη λύση είναι να συγκρίνονται τα αποτελέσματα που δίνει το ίδιο μοντέλο, όταν έχει εκτελέσει προσομοιώσεις με διαφορετικές παραμετροποιήσεις, γίνεται δηλαδή μιας μορφής μελέτη ευαισθησίας.

1.8 Οι μετεωρολογικοί δορυφόροι

Η παρατήρηση της γης από το διάστημα μέσω των δορυφόρων έχει συνεισφέρει σημαντικά, τα τελευταία χρόνια, στη μελέτη του περιβάλλοντος και του παγκόσμιου κλίματος, αλλά και την παρατήρηση και την πρόγνωση των καιρικών συνθηκών. Το βασικό πλεονέκτημα της δορυφορικής τηλεπισκόπησης (satellite remote sensing), δηλαδή της διαδικασίας λήψης πληροφοριών με τη χρήση ανιχνευτικών συσκευών που φέρονται από τους δορυφόρους παρατήρησης της γης, είναι ότι παρέχει δεδομένα με παγκόσμια κάλυψη. Έτσι, καλύπτονται και περιοχές όπου οι παρατηρήσεις από την επιφάνεια της γης είναι λίγες ή και ανύπαρκτες, όπως ωκεανούς και απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Τα δορυφορικά δεδομένα είναι απαραίτητα για την παραμετροποίηση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων προσομοίωσης των δυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα τμήματα του κλιματικού συστήματος.

Μέσω των δορυφόρων γίνεται καταγραφή πολύ υψηλής διακριτικής

ικανότητας σε όλες τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα καταγραφικά συστήματα που φέρουν οι δορυφόροι ονομάζονται ραδιόμετρα και αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται τα δεδομένα του δορυφόρου, επιλέγονται και οι φασματικές περιοχές στις οποίες αυτός λειτουργεί. Μάλιστα, τα φασματικά κανάλια μπορούν να συνδυαστούν για να γίνει παρατήρηση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ή να μετρηθούν διάφορες περιβαλλοντικές μεταβλητές. Επίσης και το ύψος της τροχιάς του κάθε δορυφόρου εξαρτάται από την αποστολή του (Φείδας και Καρτάλης, 2003). Ανάλογα με το ύψος της τροχιάς τους οι δορυφόροι διακρίνονται σε:

- **Δορυφόρους χαμηλής τροχιάς**, με ύψος μεταξύ 800 και 1500 km. Σε αυτούς περιλαμβάνονται οι δορυφόροι:
 - *Ισημερινής τροχιάς (equatorial-orbiting satellites)*: η τροχιά τους βρίσκεται μέσα στο ισημερινό επίπεδο.
 - *Πλάγιας ή σχεδόν πολικής τροχιάς (oblique-orbiting or near-polar orbiting satellites)*: η απόκλιση της τροχιάς τους είναι διαφορετική των 90°.
 - *Πολικής τροχιάς (polar-orbiting satellites)*: η τροχιά τους έχει απόκλιση 90°, αφού βρίσκεται στο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της γης.

Στην κατηγορία των δορυφόρων *πολικής τροχιάς* ανήκουν και οι δορυφόροι NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) της NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<http://www.noaa.gov>), καθώς επίσης και οι Metop της EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites). Οι δορυφόροι αυτοί καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια της Γης και μπορούν να περάσουν πάνω από το Βόρειο και το Νότιο Πόλο αρκετές φορές τη μέρα. Η ταχύτητα για έναν δορυφόρο σε πολική τροχιά ύψους 800 km κυμαίνεται γύρω στα 7.5 km/s.

Από το προηγμένο ραδιόμετρο πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), των δορυφόρων αυτών προέρχονται τα δεδομένα CLARA-A1 που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του μοντέλου. Το πρώτο ραδιόμετρο AVHRR (AVHRR/1)

είχε 4 φασματικά κανάλια, το επόμενο (AVHRR/2) είχε 5 κανάλια, ενώ το ραδιόμετρο AVHRR/3 που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιεί 6 ανιχνευτές που συλλέγουν πληροφορίες από διαφορετικές φασματικές ζώνες με διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι, η ποικιλία των διαφορετικών μηκών κύματος επιτρέπει πολυφασματική ανάλυση, για πιο ακριβή καθορισμό των διάφορων μεταβλητών.

Πίνακας 1.1: Οι φασματικές περιοχές του οργάνου AVHRR/3.

<i>Ραδιόμετρο</i>	<i>Κανάλι</i>	<i>Φασματική περιοχή(μm)</i>
AVHRR/3	1	0.58-0.68
	2	0.72-1.00
	3A	1.58-1.64
	3B	3.55-3.93
	4	10.30-11.30
	5	11.50-12.50

➤ **Δορυφόρους υψηλής τροχιάς**, με ύψος 36000km.

Περιστρέφονται στο επίπεδο του ισημερινού και με γωνιακή ταχύτητα ίση με αυτή της γης, οπότε βρίσκονται στάσιμοι πάνω από συγκεκριμένες περιοχές της. Έτσι, οι δορυφόροι αυτοί ονομάζονται γεωστάσιμοι (geostationary earth observation satellites, GEOs'). Το χαρακτηριστικό αυτό συνεπάγεται μειωμένο κόστος στη χρήση τους, αφού δε χρειάζεται οι επίγειοι σταθμοί να ακολουθούν τα ίχνη τους. Η ταχύτητά τους είναι περίπου 3 km/s.

Ένας γεωστάσιμος δορυφόρος καλύπτει θεωρητικά μια περιοχή που εκτείνεται σε μια γωνία 81° από το σημείο πάνω στη Γη που βρίσκεται κάτω από το δορυφόρο. Αυτό αντιστοιχεί σε άνω του 40% της επιφάνειας της Γης. Πρακτικά, όμως, η κάλυψη που είναι χρήσιμη είναι λιγότερη από αυτό. Για έναν μετεωρολογικό δορυφόρο, η παραμορφωμένη προοπτική που υπάρχει λόγω της καμπυλότητας της Γης, μειώνει την περιοχή που μπορεί να μελετηθεί σε 70° από το σημείο πάνω από το οποίο βρίσκεται ο δορυφόρος. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί

στο 1/3 της επιφάνειας της Γης. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Μετεωρολογικών Δορυφόρων EUMETSAT θέτει και ένα επιπλέον όριο για τα μετεωρολογικά προϊόντα, οπότε η κάλυψη περιορίζεται στις 60°.

Έτσι, τουλάχιστον τρεις δορυφόροι χρειάζονται για να καλύψουν ολόκληρη τη Γη, εκτός από τις πολικές περιοχές.

Στην κατηγορία των γεωστάσιμων δορυφόρων ανήκουν οι μετεωρολογικοί δορυφόροι Meteosat (Meteorological Satellite), που περιστρέφονται σε τροχιά ύψους 35800km. Οι τελευταίοι από τους δορυφόρους Meteosat πρώτης γενιάς (Meteosat-5, 6 και 7) φέρουν το πολυφασματικό ραδιόμετρο MVIRI (Meteosat Visible and Infrared Imager), το οποίο καταγράφει σε τρεις φασματικές περιοχές (ορατό, θερμικό υπέρυθρο και υπέρυθρο). Οι δορυφόροι δεύτερης γενιάς Meteosat MSG (Meteosat-8 και 9) φέρουν το ραδιόμετρο SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager), που έχει δώδεκα φασματικά κανάλια (όπως αυτά φαίνονται στον Πίνακα 1.2), ενώ καταγράφει και στέλνει τα δορυφορικά δεδομένα κάθε 15 min. Τέσσερα κανάλια χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στην περιοχή του ορατού ενώ τα υπόλοιπα οκτώ κανάλια καταγράφουν συγκεκριμένα μήκη κύματος στην υπέρυθρη φασματική περιοχή. Το σετ δεδομένων SARAH, που επίσης χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την αξιολόγηση του μοντέλου, προέρχεται από τα κανάλια στο ορατό των δύο αυτών ραδιομέτρων.

Πίνακας 1.2: Οι φασματικές περιοχές των οργάνων MVIRI και SEVIRI.

<i>Ραδιόμετρο</i>	<i>Κανάλι</i>	<i>Φασματική περιοχή(μm)</i>
MVIRI	1	0.50-0.90
	2	5.70-7.10
	3	10.50-12.50
SEVIRI	1	0.56-0.71
	2	0.74-0.88
	3	1.50-1.78
	4	3.48-4.36
	5	5.35-7.15
	6	6.85-7.85
	7	8.30-9.10
	8	9.38-9.94
	9	9.80-11.80
	10	11.00-13.00
	11	11.40-15.40
	12	0.60-0.90

2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Παρατηρησιακά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι δεδομένων για την αξιολόγηση των δεδομένων του μοντέλου. Αυτά είναι το πλεγματοποιημένο σύνολο παρατηρησιακών δεδομένων E-OBS (ENSEMBLES Observations gridded dataset) και δύο σετ δορυφορικών δεδομένων, τα CLOUDS, Albedo and Radiation dataset (CLARA) και τα Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat (SARAH).

2.1.1 Πλεγματικά επίγεια δεδομένα E-OBS

Το σετ δεδομένων E-OBS βασίζεται σε δεδομένα της ECA&D (European Climate Assessment and Dataset). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την έκδοση 12.0 των E-OBS και είναι διαθέσιμα μέσω της ιστοσελίδας <http://www.ecad.eu> από τον Οκτώβριο του 2015. Καλύπτουν την περίοδο από 01-01-1950 έως 30-06-2015 και την περιοχή μεταξύ των γεωγραφικών πλατών 25–75°N και μηκών 40W–75°E σε περιστραμμένο πολικό πλέγμα ανάλυσης 0.44°, με το βόρειο πόλο στις 39.25°N, 162°W (Haylock et al., 2008). Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας αποτελούν ημερήσιες τιμές μέσης θερμοκρασίας του αέρα κοντά στο έδαφος και βροχόπτωσης που φτάνει στο έδαφος.

2.1.2 Δορυφορικά δεδομένα

Τα σύνολα των δορυφορικών δεδομένων προέρχονται από το CM SAF (Satellite Application Facilities for Climate Monitoring), που είναι μέρος του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Μετεωρολογικών Δορυφόρων EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) (<http://www.eumetsat.int>).

Το πρώτο σετ δεδομένων είναι το CLARA-A1 (Karlsson et al., 2012), που προέρχεται από μετρήσεις του ραδιομέτρου πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας AVHRR, το οποίο βρίσκεται στους δορυφόρους NOAA και Metop. Τα δεδομένα παρέχουν παγκόσμια κάλυψη και περιλαμβάνουν προϊόντα που σχετίζονται με τα νέφη, την ανακλαστικότητα του εδάφους

και την ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος. Τα δεδομένα αυτά δημοσιεύτηκαν το 2012 και περιλαμβάνουν ημερήσιες και μηνιαίες μέσες τιμές για την περίοδο από το 1982 έως το 2009 (28 χρόνια). Διατίθενται σε δύο τύπους πλέγματος: ένα παγκόσμιο πλέγμα με χωρική ανάλυση 0.25° και δύο πλέγματα που καλύπτουν τις πολικές περιοχές με ανάλυση 25 km.

Το σετ δεδομένων SARAH (Müller et al., 2015) προέρχεται από δορυφορικές παρατηρήσεις των ορατών καναλιών των ραδιομέτρων MVIRI και SEVIRI των δορυφόρων Meteosat. Τα δεδομένα δίνουν την κλιματολογία της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος (solar surface irradiance), της κανονικοποιημένης άμεσης ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος (surface direct normalized irradiance) και της ενεργού ανακλαστικότητας των νεφών (effective cloud albedo). Καλύπτουν τη χρονική περίοδο από το 1983 έως το 2013 (31 χρόνια) και την περιοχή που περικλείεται μεταξύ των $\pm 65^\circ$ γεωγραφικού πλάτους και $\pm 65^\circ$ γεωγραφικού μήκους. Δημοσιεύτηκαν το 2015 και περιλαμβάνουν ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες μέσες τιμές σε κανονικό πλέγμα χωρικής ανάλυσης $0.05^\circ \times 0.05^\circ$.

2.1.2.1 Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος (Surface incoming shortwave radiation – SIS) και από τα δύο σετ δορυφορικών δεδομένων και συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές της ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία αυτή επίσης συναντάται στη βιβλιογραφία με τις ονομασίες global irradiance ή solar surface irradiance.

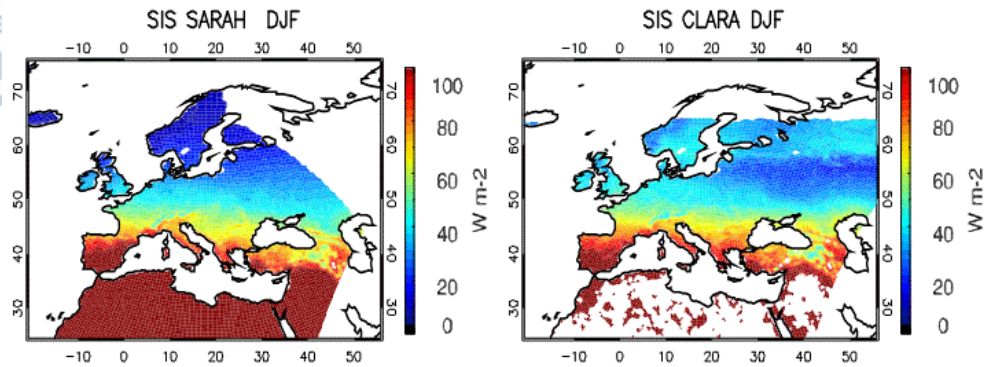
Το σετ δεδομένων των CLARA προέρχεται από δορυφόρους πολικής τροχιάς και έχει χωρική ανάλυση $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, ενώ των SARAH προέρχεται από γεωστάσιμους δορυφόρους και έχει ανάλυση $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. Τα CLARA παρέχουν παγκόσμια κάλυψη, ενώ τα SARAH καλύπτουν την Ευρώπη, την Αφρική και τον Ατλαντικό Ωκεανό. Η μεταβλητή SIS αναπαριστά την πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας που φτάνει σε μία οριζόντια μοναδιαία επιφάνεια του εδάφους με μήκος κύματος μεταξύ 0.2 και 4 μm και μετράται σε W/m^2 .

Η επικύρωση της SIS και για τα δύο σετ δεδομένων γίνεται με σύγκρισή τους με επίγειες μετρήσεις που γίνονται στο πλαίσιο του παγκόσμιου δικτύου BSRN (Baseline Surface Radiation Network) (Ohmura et al. 1998).

Η ακρίβεια του σετ δεδομένων SARAH για τις μηνιαίες μέσες τιμές (μέση απόλυτη διαφορά των μηνιαίων μέσων τιμών) εκτιμάται ότι είναι 5.5 W/m^2 , ενώ η αντίστοιχη συνολική ακρίβεια του σετ CLARA είναι 10 W/m^2 . Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι διαφορές των τιμών ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος, εκφρασμένες σε Wm^{-2} , για τα δεδομένα του σετ SARAH μείον του CLARA. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος, για τα δεδομένα SARAH και CLARA. Παρατηρείται ότι στη βόρεια Ευρώπη (Σκανδιναβία και βόρεια Ρωσία) τα δύο σετ δεδομένων διαφέρουν ως προς τις περιοχές τις οποίες καλύπτουν, λόγω του διαφορετικού τύπου δορυφόρου από τον οποίον προέρχονται. Η διαφορά αυτή συνδέεται και με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.1, αφού φαίνεται ότι στην περιοχή της Σκανδιναβίας οι διαφορές που προκύπτουν είναι αρκετά μεγαλύτερες για τις τρεις από τις τέσσερις εποχές, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιοχές.

Πίνακας 2.1: Απόλυτες διαφορές (SARAH-CLARA) των τιμών ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (σε Wm^{-2}) με έντονη γραφή και σχετικές διαφορές (%) μέσα στις παρενθέσεις.

Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
AL	0.43 (-0.03)	12.24 (6.44)	23.75 (9.87)	0.65 (0.35)
BI	-8.19 (-31.54)	15.86 (10.34)	14.61 (7.51)	0.51 (-0.09)
EA	-1.43 (-3.50)	7.16 (3.96)	22.79 (9.87)	0.33 (-0.18)
FR	-3.27 (-6.36)	28.51 (16.26)	21.91 (9.33)	2.53 (2.66)
IP	1.56 (0.83)	17.94 (8.04)	23.39 (7.85)	9.13 (5.67)
MD	-3.39 (-4.94)	10.41 (5.04)	16.31 (5.86)	4.75 (2.74)
ME	-3.7 (-11.27)	17.65 (10.66)	22.65 (10.46)	0.43 (0.15)
SC	-17.71 (-151.35)	-32.54 (-25.00)	1.56 (0.71)	-21.76 (-48.04)



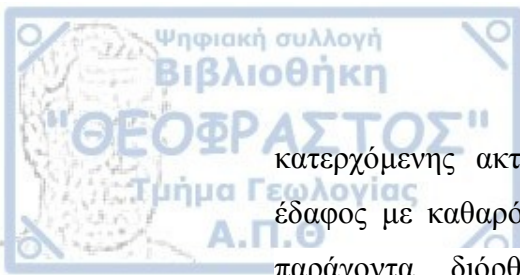
Σχήμα 2.1: Η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος των σετ δεδομένων SARAH (αριστερά) και CLARA (δεξιά) για την εποχή του χειμώνα.

2.1.2.2 Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος κατερχόμενη

Η κατερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος (Surface downward longwave radiation – SDL) προέρχεται από το σετ δεδομένων CLARA και χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές. Η SDL ορίζεται ως η θερμική ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και τα νέφη που φτάνει στο έδαφος με μήκος κύματος 4-100 μm και μετράται σε W/m^2 . Οι τιμές της SDL επικυρώνονται μέσω σύγκρισης με επίγειες μετρήσεις από το δίκτυο BSRN και η συνολική ακρίβεια (σε απόλυτες διαφορές) του συνόλου δεδομένων έχει εκτιμηθεί ότι είναι $8 \text{ W}/\text{m}^2$.

2.1.2.3 Ποσοστό νεφοκάλυψης

Το ποσοστό της νεφοκάλυψης (cloud fractional cover – CFC) προέρχεται από το σετ δεδομένων CLARA (μέσες μηνιαίες τιμές) και είναι γεωμετρικό κλάσμα (geometric fraction): προέρχεται απευθείας από αποτελέσματα μεθόδων cloud screening ή cloud masking. Το CFC ορίζεται ως το ποσοστό των pixel με νεφοκάλυψη ανά πλεγματοειδές κελί (grid square), συγκρινόμενο με το συνολικό αριθμό των αναλυμένων pixel στο πλεγματοειδές κουτί (grid box). Εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) και έχει ακρίβεια περίπου 10% (για απόλυτες διαφορές). Το σετ δεδομένων της νεφοκάλυψης των CLARA-A1, καθώς και πληροφορίες υψηλής ανάλυσης για την τοπογραφία χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί το σετ δεδομένων της SDL. Μάλιστα, το σετ αυτό υπολογίζεται από τις μέσες μηνιαίες τιμές της



κατερχόμενης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος με καθαρό ουρανό που προέρχεται από τα ERA-Interim και τον παράγοντα διόρθωσης νεφών (cloud correction factor – CCF) πολλαπλασιασμένο με το σετ δεδομένων του ποσοστού νεφοκάλυψης των CLARA-A1 σε πλέγμα με ανάλυση 0.25°.

2.2 Δεδομένα μοντέλων

2.2.1 Περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού WRF-ARW (Advanced Research Weather Research and Forecasting model) (Skamarock et al., 2008) και μάλιστα η έκδοση 3.7.1.. Το WRF λειτουργεί επιχειρησιακά και στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας (<http://meteo.geo.auth.gr>) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Pytharoulis et al., 2014). Αναπτύχθηκε από το Εθνικό Κέντρο Ατμοσφαιρικών Ερευνών των ΗΠΑ (National Center for Atmospheric Research – NCAR) σε συνεργασία με την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration), της Υπηρεσίας Καιρού της Πολεμικής Αεροπορίας (Air Force Weather Agency – AFWA), του Ναυτικού εργαστηρίου Ερευνών (Naval Research Laboratory), του Πανεπιστημίου της Οκλαχόμα (the University of Oklahoma), και της Ομοσπονδιακής Διοίκησης της Αεροπορίας (Federal Aviation Administration – FAA). Είναι ένα μη-υδροστατικό περιοχικό κλιματικό μοντέλο (RCM), σχεδιασμένο για μετεωρολογική έρευνα αλλά και επιχειρησιακή πρόγνωση (<http://www.wrf-model.org>, <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>). Χρησιμοποιεί το πλέγμα Arakawa C και κατακόρυφες συντεταγμένες Eta.

Υπάρχουν δύο παραλλαγές του δυναμικού πυρήνα του WRF: το Advanced Research WRF (WRF-ARW), που χρησιμοποιείται εδώ, αλλά και το Nonhydrostatic Mesoscale Model WRF (WRF-NMM).

Το WRF προσφέρει πολλές φυσικές παραμετροποιήσεις. Η παραμετροποίηση μικροφυσικής που χρησιμοποιήθηκε είναι η WRF double-moment 6-class scheme (WDM6; Lim and Hong, 2010) και η παραμετροποίηση της ακτινοβολίας -μικρού και μεγάλου μήκους κύματος-

είναι η νεότερη έκδοση του Rapid Radiative Transfer Model (RRTMG; Iacono et al., 2008). Ως εδαφικό μοντέλο επιλέχθηκε το NOAH (Chen et al., 1996). Οι παραμετροποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το οριακό στρώμα (PBL) και το επιφανειακό στρώμα είναι οι Yonsei University scheme (YSU) και MM5 similarity, αντίστοιχα. Το σχήμα κατακόρυφης ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Grell-Freitas. Η χωρική ανάλυση του μοντέλου είναι 0.44° και το χρονικό βήμα είναι 240s. Οι διαστάσεις της περιοχής ολοκλήρωσης (domain) στις διευθύνσεις δύση-ανατολή, νότος-βορράς και στην κατακόρυφο είναι 134, 131 και 31, αντίστοιχα, μέχρι τα 50hPa. Όσον αφορά τα όρια της περιοχής ολοκλήρωσης, όταν το περιοχικό μοντέλο έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάλυσης (hindcast), το εύρος είναι 5 κελιά, ενώ όταν έχει οδηγηθεί από το παγκόσμιο μοντέλο (historical) είναι 10.

2.2.2 Παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο NASA GISS

Οι αρχικές και οριακές συνθήκες για το περιοχικό κλιματικό μοντέλο προέρχονται από το NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) ModelE2 (Schmidt et al., 2006), που περιλαμβάνεται στην πέμπτη φάση του Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). Η βάση δεδομένων του CMIP5 αποτελείται από κλιματικές προσομοιώσεις με συνεισφορά από ινστιτούτα από όλο τον κόσμο (Taylor et al., 2009, 2012) και έχει ως στόχο να παρέχει μια βάση κλιματικών προσομοιώσεων και ερευνών. Το ModelE2 είναι ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (AGCM), με οριζόντια ανάλυση $2^\circ \times 2.5^\circ$ και 40 κατακόρυφα επίπεδα. Η πίεση χρησιμοποιείται ως κατακόρυφη συντεταγμένη (υδροστατική προσέγγιση). Κάτω από τα 150 hPa χρησιμοποιούνται σίγμα (σ) συντεταγμένες και πάνω από τα 150 hPa ισοβαρικά επίπεδα, έως τα 0.1 hPa που είναι και η κορυφή του μοντέλου. Το GISS ModelE2 περιλαμβάνει μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η οριζόντια ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του εδάφους και η υγρασία σε διάφορα βάθη του, η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας και η πίεση επιφανείας. Οι παραμετροποιήσεις διαφέρουν ως συνάρτηση του βαθμού αλληλεπίδρασης στη σύνθεση της ατμόσφαιρας, τον κύκλο του άνθρακα, το ωκεάνιο μοντέλο και το ατμοσφαιρικό πλέγμα.

2.2.3 Δεδομένα επανάληψης

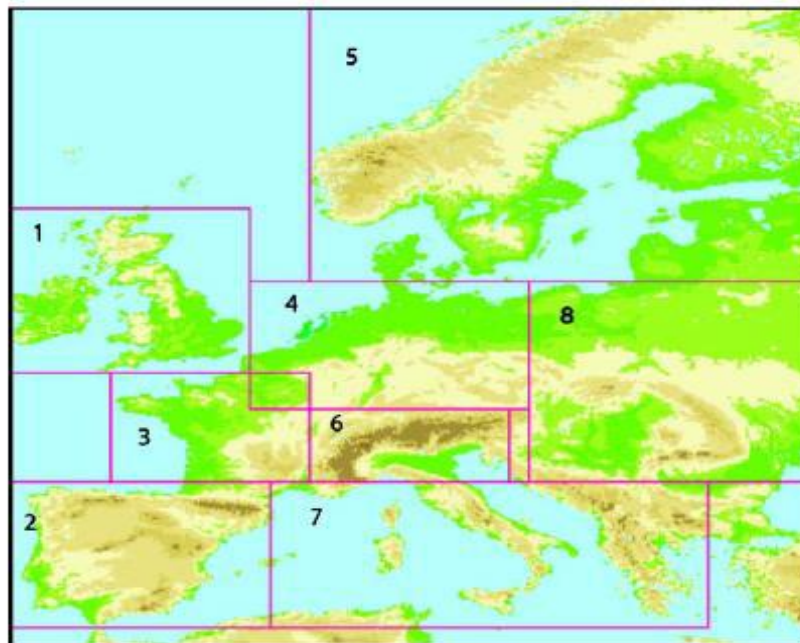
Τα δεδομένα επανάληψης δίνουν μια αριθμητική περιγραφή του πρόσφατου κλίματος, που παράγεται από το συνδυασμό ενός αριθμητικού μοντέλου που προσομοιώνει μία ή περισσότερες πτυχές του γήινου συστήματος με παρατηρήσεις, για να δημιουργηθεί μια σύνθετη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος. Τα σύνολα δεδομένων που δημιουργούνται έτσι μπορεί να είναι πολύτιμα για την ατμοσφαιρική έρευνα, καθώς παρέχουν μια γεωγραφικά συνεκτική καταγραφή της παγκόσμιας ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας, που περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές. Η επανάληψη των παρελθοντικών καιρικών/κλιματικών δεδομένων δίνει μια ξεκάθαρη εικόνα του παρελθόντος καιρού/κλίματος, που δεν επηρεάζεται από αλλαγές στις μεθόδους.

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις του περιοχικού κλιματικού μοντέλου, στα οποία αυτό έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάληψης ERA-Interim. Τα ERA-Interim (Dee et al., 2011) είναι παγκόσμια ατμοσφαιρικά δεδομένα επανάληψης που ξεκινούν από το 1979 και φτάνουν μέχρι κάποια στιγμή κοντά στον παρόντα χρόνο. Παράγονται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Προγνώσεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF), που είναι μία ανεξάρτητη διακυβερνητική οργάνωση. Τα προϊόντα περιλαμβάνουν 3-ωρες τιμές των παραμέτρων επιφανείας, που περιγράφουν τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες των κυμάτων των ωκεανών και της επιφάνειας του εδάφους, αλλά και 6-ωρες τιμές παραμέτρων της ανώτερης ατμόσφαιρας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν χωρική ανάλυση 0.75° σε 60 κατακόρυφα επίπεδα από την επιφάνεια μέχρι τα 0.1 hPa και παρέχονται ανά 6 ώρες.

2.3 Μεθοδολογία

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας (tas), βροχόπτωσης (pr), ατμοσφαιρικής πίεσης επιφανείας (ps), ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος (rsds και rlds) και νεφοκάλυψης (clt) του WRF και των παρατηρησιακών δεδομένων (επίγειων και δορυφορικών) για την περίοδο 1990-2008 (19 χρόνια). Επίσης,

χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας (TT) και πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας (PMSL) του NASA GISS ModelE2 και των ERA-Interim για την ίδια περίοδο. Όλες οι εποχιακές τιμές προήλθαν από μέσες μηνιαίες τιμές. Οι εποχές ορίστηκαν ως εξής: ο χειμώνας περιλαμβάνει τους μήνες Δεκέμβριο – Ιανουάριο – Φεβρουάριο (γι' αυτό συμβολίζεται ως DJF), η άνοιξη τους μήνες Μάρτιο – Απρίλιο – Μάιο (MAM), το καλοκαίρι αποτελείται από τους Ιούνιο – Ιούλιο – Αύγουστο (JJA) και το φθινόπωρο από τους Σεπτέμβριο – Οκτώβριο – Νοέμβριο (SON). Η ανάλυση έγινε για όλο τον ευρωπαϊκό χώρο και για τις υποπεριοχές του, όπως αυτές περιγράφονται από τους Christensen και Christensen (2007), δηλαδή: Άλπεις (AL), Βρετανικές νήσοι (BI), Ανατολική Ευρώπη (EA), Γαλλία (FR), Κεντρική Ευρώπη (ME), Μεσόγειος (MD), Ιβηρική χερσόνησος (IP) και Σκανδιναβική χερσόνησος (SC). Οι περιοχές αυτές, παρά το γεγονός ότι δεν έχουν ίση χωρική έκταση, παρουσιάζουν ομογενή κλιματικά χαρακτηριστικά.

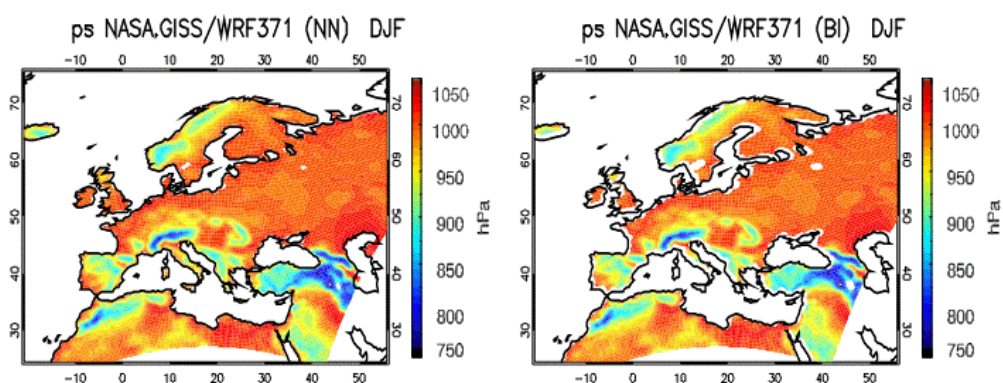


Σχήμα 2.2: Οι υποπεριοχές της Ευρώπης που μελετήθηκαν (Christensen and Christensen, 2007).

Λόγω του διαφορετικού πλέγματος του μοντέλου και των παρατηρησιακών δεδομένων, ήταν απαραίτητο να γίνει χωρική παρεμβολή (interpolation) των δεδομένων του μοντέλου για τα πεδία της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης και της ατμοσφαιρικής πίεσης επιφανείας στο πλέγμα των E-OBS

(ανάλυσης 0.44°). Επίσης, έπρεπε να γίνει παρεμβολή των δορυφορικών δεδομένων στο πλέγμα του WRF με ανάλυση 0.44° , για να διευκολυνθεί η σύγκριση με τις προσομοιώσεις του WRF. Η προσαρμογή των δορυφορικών δεδομένων στα δεδομένα του μοντέλου έγινε με τη μέθοδο του «κοντινότερου γείτονα» (nearest neighbor). Η ίδια μέθοδος επιλέχθηκε και για την παρεμβολή των δεδομένων του WRF στα δεδομένα των EObs, ενώ έγινε δοκιμή και της διγραμμικής παρεμβολής (bilinear interpolation), όμως τα αποτελέσματα δεν ήταν τόσο ικανοποιητικά. Το ίδιο συνέβη και με άλλες μεθόδους που εξετάστηκαν παλαιότερα (Παυλίδης, 2015).

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται δύο διαγράμματα της ατμοσφαιρικής πίεσης επιφανείας που δίνει το WRF όταν οδηγείται από το NASA GISS ModelE2 για το χειμώνα. Στην πρώτη περίπτωση έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του κοντινότερου γείτονα (NN) και στη δεύτερη η διγραμμική παρεμβολή (BI).



Σχήμα 2.3: Η ατμοσφαιρική πίεση επιφανείας του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, επεξεργασμένη με τη μέθοδο του κοντινότερου γείτονα (αριστερά) και τη διγραμμική παρεμβολή (δεξιά) για την εποχή του χειμώνα.

Λόγω της μεγάλης εξάρτησης της θερμοκρασίας από το υψόμετρο, έγινε υψομετρική διόρθωση των δεδομένων θερμοκρασίας του μοντέλου (με τη θερμοβαθμίδα των 6°C km^{-1}), για την αποφυγή λαθών που οφείλονται στη διαφορετική ορειογραφία μοντέλου και παρατηρήσεων.

Η επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή μέσων τιμών (ημερήσιων, μηνιαίων, εποχιακών) έγινε με το πρόγραμμα Climate Data Operators (CDO), που περιέχει απλές αριθμητικές και στατιστικές παραμέτρους, ενώ λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων έγινε χρήση scripts. Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων έγινε μέσω του προγραμματιστικού



περιβάλλοντος της Interactive Data Language (IDL), ενώ η εξαγωγή των μέσων όρων των πινάκων έγινε με τη χρήση του προγράμματος Excel του Microsoft Office.

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιούνται οι σχέσεις που φαίνονται παρακάτω, όπου M οι τιμές του μοντέλου, O οι παρατηρήσεις και N ο αριθμός των δεδομένων.

- Bias: είναι η διαφορά μοντέλο – μετρήσεις των χωρικά μεσοποιημένων ετήσιων ή εποχιακών μέσων τιμών, για μια επιλεγμένη υποπεριοχή (Kotlarski et al., 2014). Έτσι, οι απόλυτες διαφορές των τιμών προκύπτουν σύμφωνα με τη σχέση:

$$B_i = M_i - O_i$$

- Relative Bias: είναι οι σχετικές διαφορές των τιμών, εκφρασμένες σε ποσοστό επί τοις εκατό. Προκύπτουν ως εξής:

$$B_{R_i} = \frac{M_i - O_i}{O_i} \cdot 100\%$$

- Modified Normalized Mean Bias (MNMB): χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βροχόπτωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$MNMB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{M_i - O_i}{\frac{M_i + O_i}{2}} \cdot 100\%$$

Για την περίπτωση αυτή προτιμήθηκε το MNMB και όχι η σχέση των σχετικών διαφορών, αφού κατά το καλοκαίρι ιδιαίτερα στις περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο συχνά παρατηρούνται και μηδενικές τιμές βροχόπτωσης, επομένως η σχέση που δίνει τις σχετικές διαφορές δεν μπορεί να οριστεί. Το MNMB παίρνει τιμές από -200 έως 200%.

- Fractional Gross Error (FGE): συμπεριφέρεται συμμετρικά σε σχέση με την υπερεκτίμηση και την υποεκτίμηση, χωρίς να υπερτονίζει τις ακραίες τιμές. Παίρνει τιμές από 0 έως 2 και υπολογίζεται ως εξής:



$$FGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_i - O_i|}{\frac{M_i + O_i}{2}}$$

- Mean Absolute Gross Error (MAGE): είναι ο μέσος όρος των απόλυτων διαφορών ανάμεσα στα δεδομένα του μοντέλου και των παρατηρήσεων. Εκφράζεται στις ίδιες μονάδες μέτρησης με τα δεδομένα και δίνεται από τη σχέση:

$$MAGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i|$$

3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΑ- ΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Πριν τη χρήση ενός μοντέλου είναι πολύ σημαντικό να έχει γίνει σωστή αξιολόγησή του, έτσι ώστε να εντοπιστούν πιθανά σφάλματα. Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια να λυθούν, όσο είναι δυνατόν, τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην απόδοση του μοντέλου, με σκοπό να παραχθούν αξιόπιστα μελλοντικά κλιματικά σενάρια. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αξιολόγηση και των δύο μελετώμενων περιοχικών κλιματικών προσομοιώσεων για πέντε παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτές είναι: η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος, η βροχόπτωση που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος κατερχόμενη, η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος που φτάνει στο έδαφος και το ποσοστό της νεφοκάλυψης.

3.1 Θερμοκρασία

Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται οι διαφορές θερμοκρασίας στα 2m (tas) του WRF που οδηγείται από τα ERA-Interim με τα E-OBS. Η υποεκτίμηση της θερμοκρασίας είναι το βασικό χαρακτηριστικό των αποτελεσμάτων για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές.

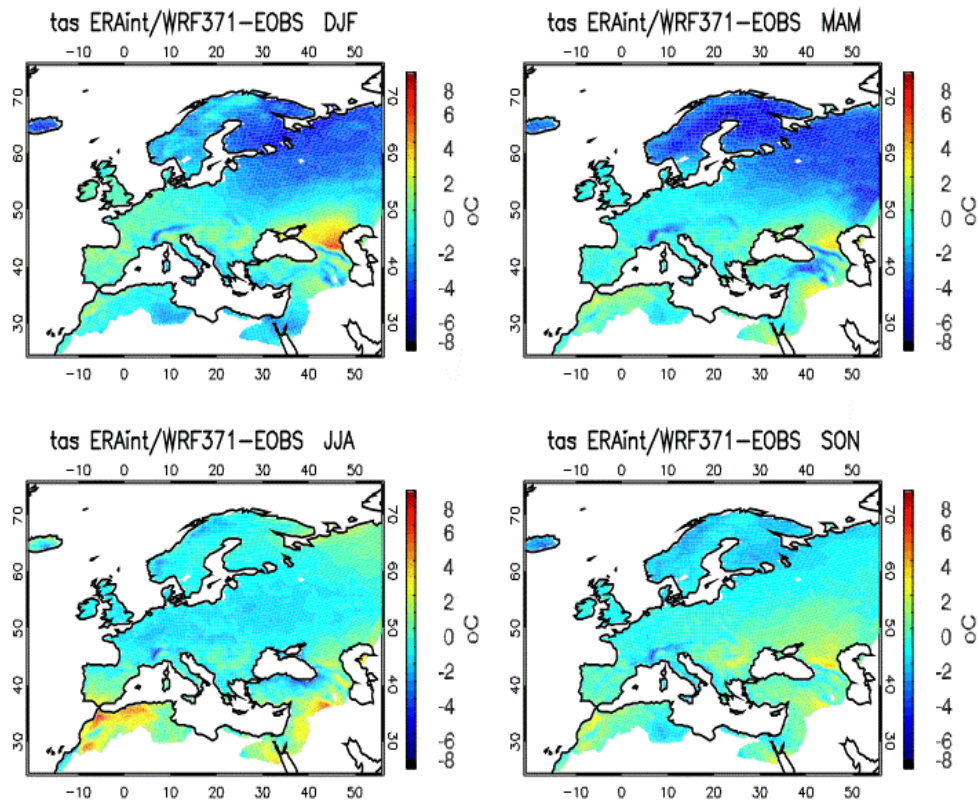
Το χειμώνα παρατηρείται υποεκτίμηση σε όλη την Ευρώπη, με τιμές bias που κυμαίνονται από -0.2 έως -4.3°C, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Το WRF είναι κυρίως ψυχρότερο πάνω από την περιοχή της βορειοανατολικής Ευρώπης, φαινόμενο το οποίο βιβλιογραφικά αποδίδεται εν μέρει στην αδυναμία του WRF να αποδώσει σωστά τις ενεργειακές ροές σε περιοχές με χιονοκάλυψη (Katragkou et al., 2015).

Ειδικότερα την άνοιξη φαίνεται ότι το bias γίνεται μεγαλύτερο πάνω από τη Σκανδιναβία. Η ανάλυση της ίδιας προσομοίωσης με διάφορα μοντέλα EURO-CORDEX έδειξε ότι την άνοιξη πολλά μοντέλα δίνουν συστηματική υποεκτίμηση της θερμοκρασίας (Πίνακας 3.3.1 από Παυλίδης, 2015), ακόμα και αν το χειμώνα έχουν θετικό bias.

Το καλοκαίρι το μοντέλο είναι ψυχρότερο από τις μετρήσεις, σε μικρότερο όμως βαθμό από τις άλλες εποχές, με μικρότερη υποεκτίμηση στη νότια Ευρώπη (-0.2 στην Ιβηρική και -0.7°C στη Μεσόγειο) και μεγαλύτερη στην

κεντρική Ευρώπη (-2.2°C). Οι ενδιάμεσες εποχές φθινόπωρο και άνοιξη μοιράζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των εποχών καλοκαίρι και χειμώνα, αντίστοιχα.

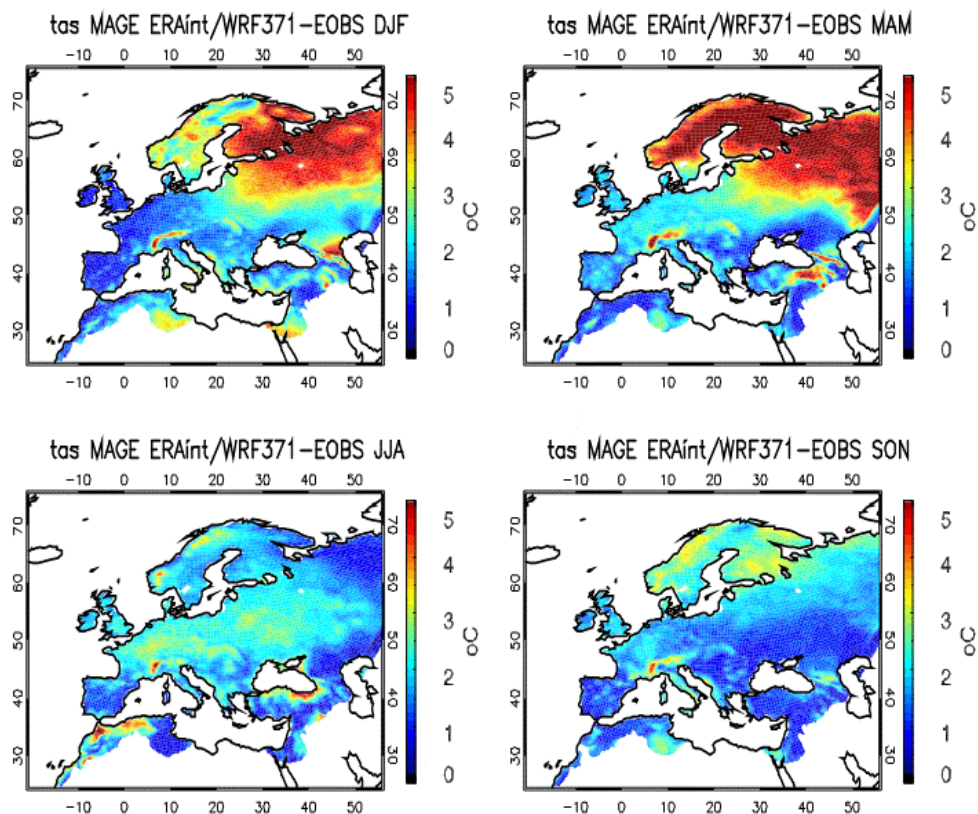
Το συνολικό σφάλμα στην κλιματική προσομοίωση αποδίδεται στο Σχήμα 3.2, στο οποίο φαίνεται καθαρά ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα στην προσομοίωση εμφανίζονται στην βορειοανατολική Ευρώπη τις εποχές χειμώνας - άνοιξη ($4-5^{\circ}\text{C}$) και τα μικρότερα στη θερμότερη εποχή του χρόνου ($1-2^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 3.1: Απόλυτες διαφορές θερμοκρασίας (bias σε $^{\circ}\text{C}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.1: Απόλυτες διαφορές θερμοκρασίας (bias σε °C) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

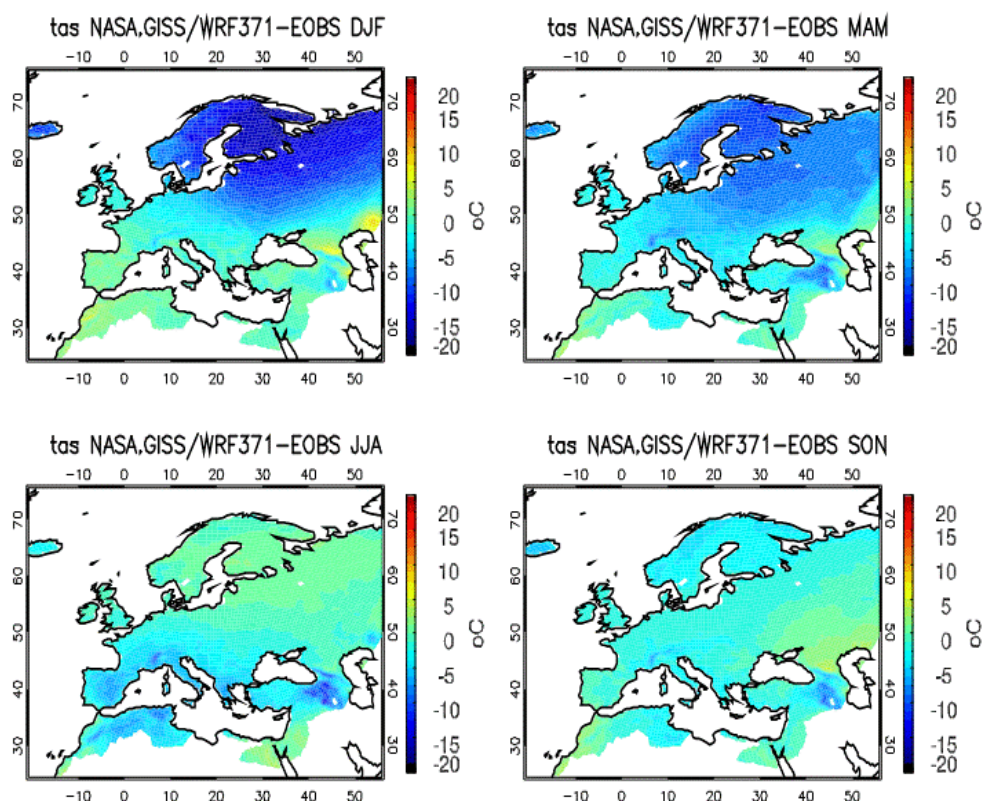
Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο. Περιοχής
AL	-1.4	-2.3	-2.0	-2.0	-1.9
BI	-0.7	-1.4	-1.7	-1.6	-1.4
EA	-1.7	-1.9	-1.9	-0.8	-1.6
FR	-0.7	-1.7	-1.9	-1.7	-1.5
IP	-0.6	-1.1	-0.2	-0.8	-0.7
MD	-1.6	-1.1	-0.7	-1.1	-1.1
ME	-1.0	-1.7	-2.2	-1.5	-1.6
SC	-3.4	-4.3	-1.7	-2.3	-2.9
Μ.Ο. Εποχής	-1.4	-1.9	-1.5	-1.5	-1.6



Σχήμα 3.2: Mean Absolute Gross Error (MAGE) της θερμοκρασίας του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η θερμοκρασία στα 2m, όταν το μοντέλο οδηγείται από δεδομένα του μοντέλου παγκόσμιας κλίμακας NASA GISS ModelE2. Γενικά, το WRF371 οδηγούμενο από το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας NASA GISS οδηγεί σε παρόμοια συμπεριφορά το χειμώνα και την άνοιξη, δηλαδή μεγαλύτερα αρνητικά bias στη βορειοανατολική Ευρώπη (-13,7 και -10.2°C, αντίστοιχα), κάτι το οποίο ενδεχομένως σχετίζεται με τις εσωτερικές φυσικές διεργασίες του περιοχικού κλιματικού μοντέλου. Η επίπτωση των οριακών συνθηκών, οδηγεί γενικότερα σε πολύ μεγαλύτερα bias σε όλο το πλέγμα και όλες τις εποχές (Πίνακας 3.2). Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται την άνοιξη, όταν το αρνητικό bias αυξάνεται κατά 4°C κατά μέσο όρο από όλη την Ευρώπη και οι μικρότερες διαφορές το φθινόπωρο (2°C κατά μέσο όρο για όλη την Ευρώπη).

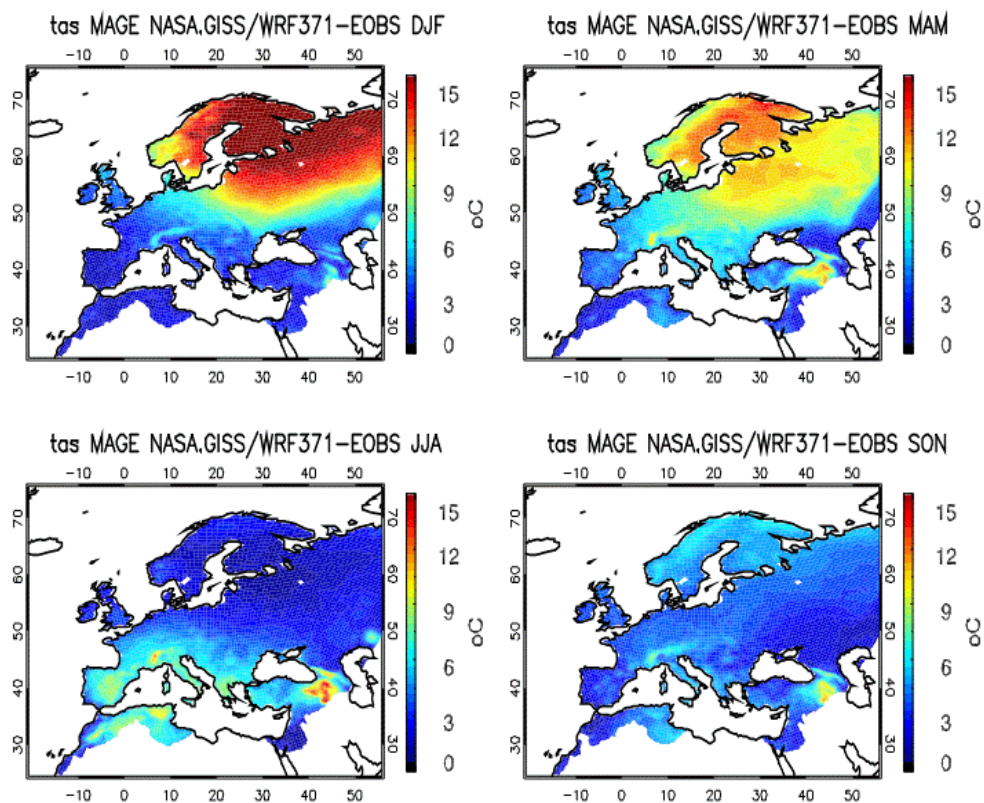
Αντίστοιχα διαμορφώνεται το χειμώνα και το MAGE (Σχήμα 3.4), με τις μεγαλύτερες τιμές έως 15°C στα βόρεια το χειμώνα και τις μικρότερες στη βόρεια-ανατολική περιοχή το καλοκαίρι (3°C).



Σχήμα 3.3: Απόλυτες διαφορές (bias σε °C) θερμοκρασίας του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.2: Απόλυτες διαφορές θερμοκρασίας (bias σε °C) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο. Περιοχής
AL	-3.5	-6.4	-6.1	-4.5	-5.1
BI	-3.3	-4.1	-2.4	-3.0	-3.2
EA	-6.8	-7.7	-3.1	-3.1	-5.2
FR	-2.2	-4.7	-4.8	-3.3	-3.8
IP	-0.5	-3.3	-5.7	-2.3	-3.0
MD	-2.1	-4.6	-6.3	-3.8	-4.2
ME	-4.6	-6.2	-3.5	-3.4	-4.4
SC	-13.7	-10.2	-1.0	-4.3	-7.3
Μ.Ο. Εποχής	-4.6	-5.9	-4.1	-3.5	-4.5



Σχήμα 3.4: Mean Absolute Gross Error (MAGE) της θερμοκρασίας του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

3.2 Βροχόπτωση

Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται οι τιμές του Modified Normalized Mean Bias (MNMB) της βροχόπτωσης (pr) του WRF, όταν αυτό έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάλυσης, σε σχέση με τις τιμές των E-OBS. Το μοντέλο γενικά φαίνεται υπερεκτιμά τη βροχόπτωση για όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι. Η υπερεκτίμηση αφορά κυρίως την ανατολική περιοχή του πλέγματος, ενώ η υποεκτίμηση τους θερινούς μήνες τη νότιο-ανατολική Ευρώπη (Βαλκάνια) κυρίως.

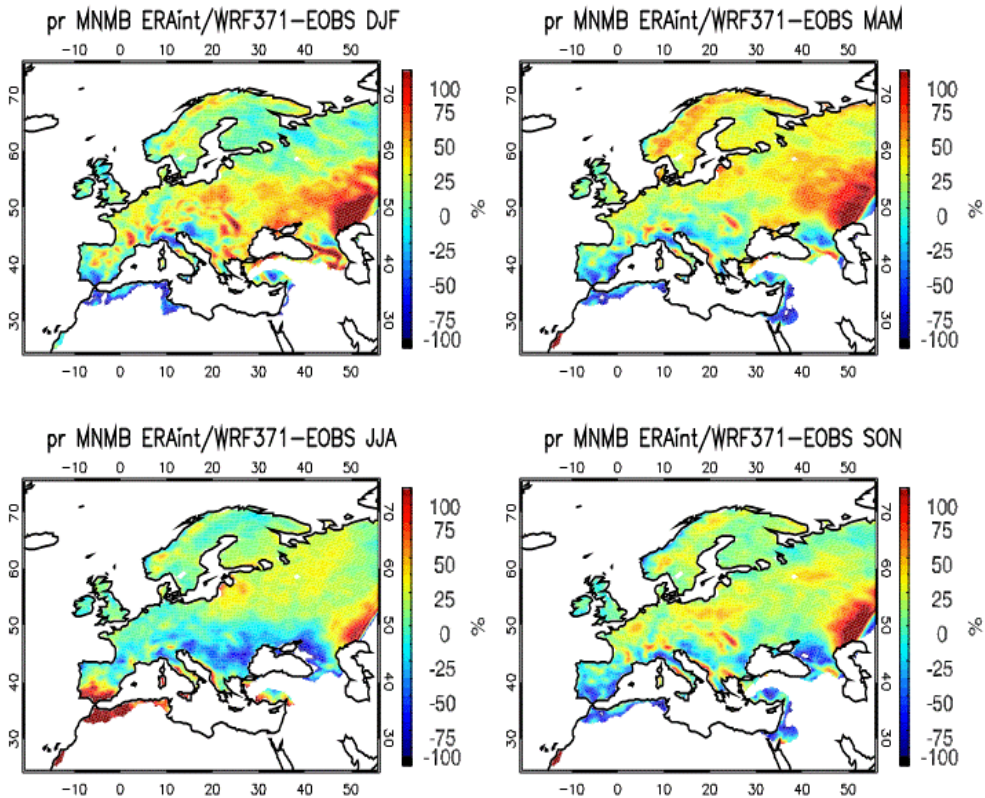
Το *χειμώνα*, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 3.3, οι διαφορές σε όλες τις περιοχές είναι θετικές, εκτός των Βρετανικών νήσων με διαφορά ίση με -0.2 mm/day. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στην κεντρική Ευρώπη με τιμές από 0.4 έως 0.6 mm/day.

Κατά την *άνοιξη*, υποεκτίμηση εμφανίζεται στην Ιβηρική χερσόνησο (-0.2 mm/day) και υπερεκτίμηση στις υπόλοιπες περιοχές, η οποία είναι περισσότερο αυξημένη στα βόρεια. Όλες οι βόρειες περιοχές εμφανίζουν υπερεκτίμηση άνω του 30%. Η μέγιστη διαφορά εμφανίζεται στη Σκανδιναβία με 0.4 mm/day.

Το *καλοκαίρι* το μοντέλο φαίνεται να υποεκτιμά τη βροχόπτωση στις περισσότερες από τις περιοχές (με τιμές διαφορών έως -0.5 mm/day), με εξαίρεση τις πιο βόρειες.

Οι διαφορές του Πίνακα 3.3 για το *φθινόπωρο* παίρνουν τιμές από -0.3 έως 0.3 mm/day, με τις περισσότερες περιοχές να παρουσιάζουν υπερεκτίμηση.

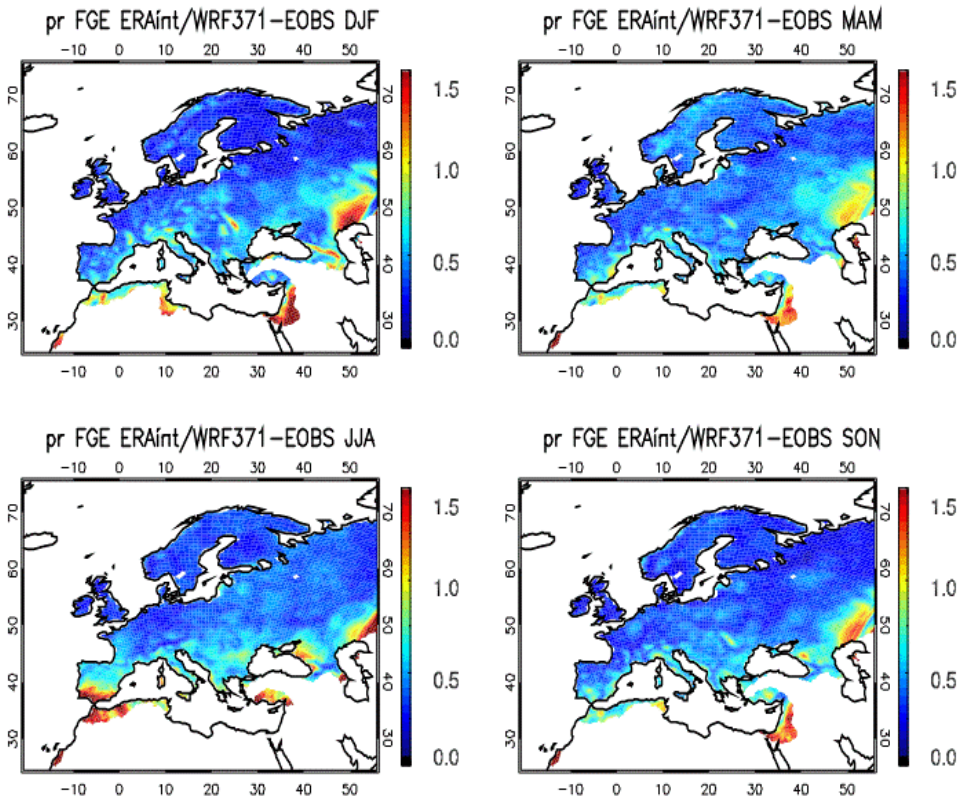
Η εκτίμηση του σφάλματος (Σχήμα 3.6) δείχνει μεγαλύτερες τιμές σφάλματος (>100%) σε όλες τις εποχές πάνω από την Κασπία, ενδεχομένως λόγω της αδυναμίας του μοντέλου να αποτυπώσει σωστά σε χαμηλή ανάλυση τις γεωγραφικές ιδιαιτερότητες της περιοχής, της εγγύτητας στα πλευρικά όρια του μοντέλου και της βάσης δεδομένων E-OBS η οποία δεν έχει μεγάλη πυκνότητα σταθμών στη περιοχή αυτή, επομένως τα δεδομένα E-OBS αναμένεται να μην έχουν μεγάλη ακρίβεια. Στις υπόλοιπες περιοχές το σφάλμα κυμαίνεται από 0.3 έως 0.6, ανάλογα με την περιοχή και την εποχή.



Σχήμα 3.5: MNMB της βροχόπτωσης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.3: Απόλυτες διαφορές βροχόπτωσης (bias σε mm/day) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	0.5	0.3	-0.5	0.0	0.1
BI	-0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.1
EA	0.4	0.2	-0.2	0.2	0.2
FR	0.6	0.3	-0.1	0.3	0.3
IP	0.0	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2
MD	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
ME	0.4	0.3	-0.1	0.3	0.2
SC	0.1	0.4	0.2	0.1	0.2
<i>Μ.Ο. Εποχής</i>	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.1



Σχήμα 3.6: FGE της βροχόπτωσης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται οι τιμές του MNMB της βροχόπτωσης, όταν το WRF οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2. Γενικά, το WRF371 φαίνεται να είναι πολύ πιο υγρό οδηγούμενο από το μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας NASA GISS σε σχέση με τα ERA-Interim. Η βροχόπτωση υπερεκτιμάται συστηματικά κυρίως στη νότια Ευρώπη, κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις ERA-Interim/WRF371 προσομοιώσεις. Αντίθετα, η υπερεκτίμηση της βροχόπτωσης κοντά στις ανατολικές πλευρικές συνθήκες, παραμένουν συστηματικές και στις δύο προσομοιώσεις.

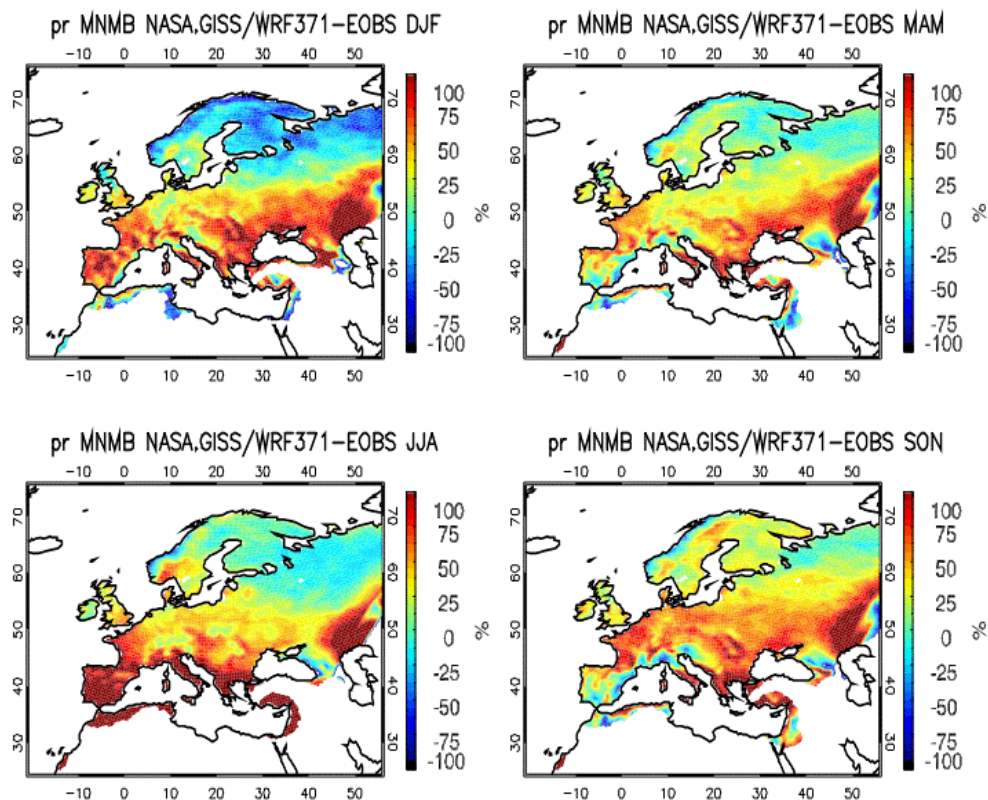
Το *χειμώνα* παρατηρείται πολύ έντονη υπερεκτίμηση της βροχόπτωσης (τιμές του MNMB μέχρι και 100%) για όλες σχεδόν τις περιοχές της Ευρώπης με γεωγραφικά πλάτη νοτιότερα των 55° , που αντιστοιχούν σε απόλυτες διαφορές μέχρι 2 mm/day. Αντίθετα, στη βόρεια Ευρώπη σημειώνεται υποεκτίμηση, με απόλυτες διαφορές -0.5mm/day στη Σκανδιναβία.

Κατά την *άνοιξη*, το μοντέλο εμφανίζεται πιο υγρό από τις παρατηρήσεις σε ολόκληρη την Ευρώπη, με απόλυτες διαφορές έως 2 mm/day.

Το ίδιο παρατηρείται και το καλοκαίρι με διαφορές από 0.3 έως 4.7 mm/day. Οι μεγαλύτερες διαφορές σημειώνονται στις νότιες περιοχές, όπου εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές του MNMB, μέχρι και 100%. Αυτό βέβαια συνδέεται και με τις μικρές απόλυτες τιμές βροχόπτωσης που παρατηρούνται κατά την εποχή αυτή στις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο, που αντιστοιχούν σε μεγάλο σχετικό σφάλμα.

Το φθινόπωρο, υπερεκτίμηση εμφανίζεται ξανά σε όλη την Ευρώπη, με τιμές διαφορών από 0.4 ως 3 mm/day. Μάλιστα, την πιο υγρή κλιματολογία σε σύγκριση με τις παρατηρήσεις εμφανίζουν και πάλι οι νότιες περιοχές (τιμές του MNMB έως 100%).

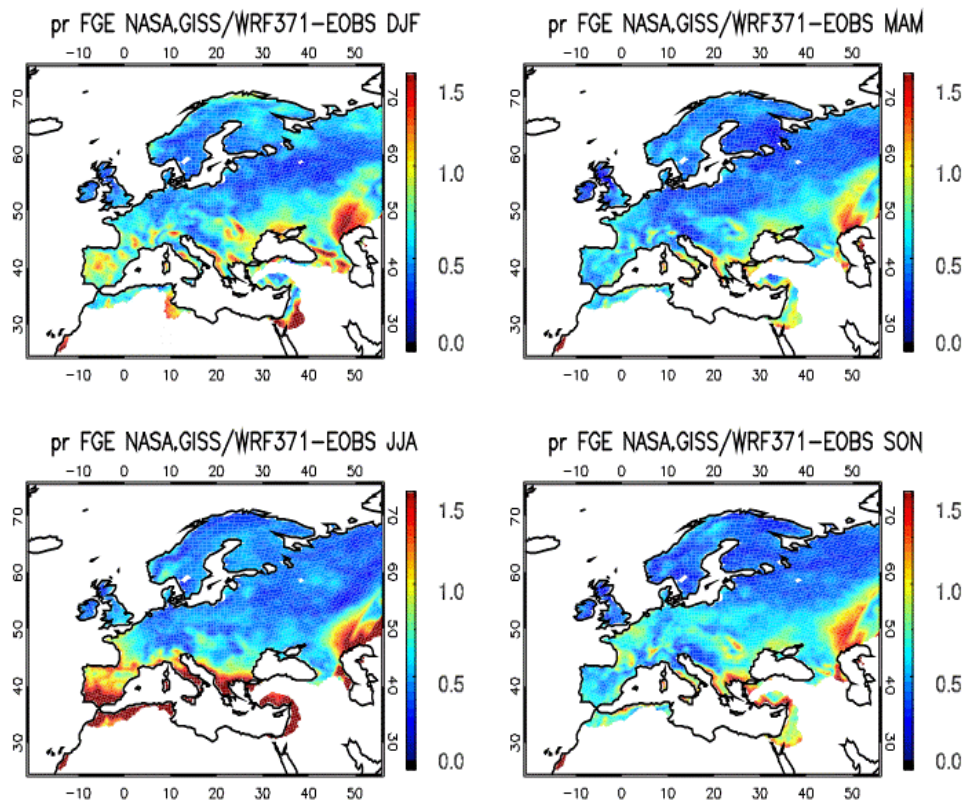
Το Σχήμα 3.8 παρουσιάζει το σφάλμα (FGE) της βροχόπτωσης το οποίο υποδεικνύει τα μεγαλύτερα σφάλματα (>1) στη νότια Ευρώπη το καλοκαίρι και στη γειτονική περιοχή της Κασπίας όλες τις εποχές. Το χειμώνα το FGE ξεπερνά το 0.5, στις περισσότερες περιοχές της Ευρώπης, ενώ το καλοκαίρι οι Μεσογειακές περιοχές χαρακτηρίζονται από FGE γύρω στο 1.5.



Σχήμα 3.7: MNMB της βροχόπτωσης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.4: Απόλυτες διαφορές βροχόπτωσης (bias σε mm/day) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο. Περιοχής
AL	1.6	1.0	2.3	1.3	1.6
BI	0.5	0.7	0.9	1.3	0.9
EA	0.8	0.8	1.2	1.1	1.0
FR	2.0	1.4	2.2	2.6	2.1
IP	1.8	0.8	2.2	1.1	1.5
MD	1.9	2.0	4.7	3.0	2.9
ME	0.8	0.6	1.1	1.6	1.0
SC	-0.5	0.0	0.3	0.4	0.1
Μ.Ο. Εποχής	1.1	0.9	1.9	1.6	1.4



Σχήμα 3.8: FGE της βροχόπτωσης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα E-OBS για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

3.3 Ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Στο Σχήμα 3.9 φαίνονται οι σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος με κατεύθυνση προς τα κάτω στην επιφάνεια της Γης (rlds), μεταξύ του WRF, που έχει οδηγηθεί από δεδομένα ERA-Interim, και των δορυφορικών δεδομένων CLARA. Είναι φανερό ότι το μοντέλο εμφανίζει μια ξεκάθαρη τάση υποεκτίμησης της ακτινοβολίας, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

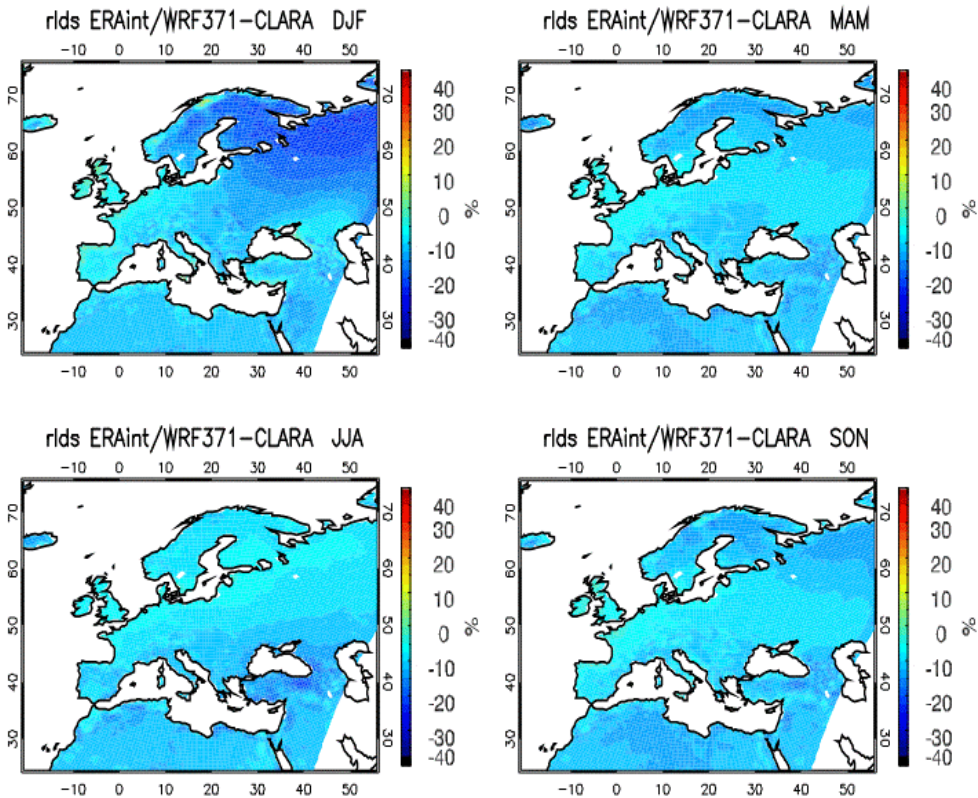
Το χειμώνα οι διαφορές κυμαίνονται από -21 έως -45 W m^{-2} . Η υποεκτίμηση είναι πιο έντονη σε σύγκριση με τις άλλες εποχές για τις περιοχές της βορειοανατολικής Ευρώπης (άνω του -30%), με απόλυτες διαφορές -45 W m^{-2} στη Σκανδιναβία και περίπου 40 W m^{-2} στην ανατολική Ευρώπη.

Την άνοιξη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9, η υποεκτίμηση που υπήρχε το χειμώνα στις βόρειες περιοχές λαμβάνει μικρότερες τιμές, με σχετικές διαφορές περίπου -10% (και απόλυτες γύρω στα -35 W m^{-2}), ενώ η υποεκτίμηση στη Μεσόγειο εντείνεται (-51.35 W m^{-2}).

Οι διαφορές αυτές στη Μεσόγειο αυξάνονται το καλοκαίρι, λαμβάνοντας τιμές έως -85.79 W m^{-2} . Αντίθετα, η κλιματολογία των βόρειων περιοχών προσεγγίζεται καλύτερα το καλοκαίρι (-32.57 W m^{-2} στη Σκανδιναβία).

Το φθινόπωρο παρατηρείται ξανά πιο έντονη υποεκτίμηση στη βόρεια Ευρώπη, με τιμές που φτάνουν το -15% . Στις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο επίσης παρατηρείται υποεκτίμηση, αν και αυτή είναι λιγότερο έντονη και πιο περιορισμένη σε έκταση, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εποχές (μέχρι -10% ή -17.67 W m^{-2}).

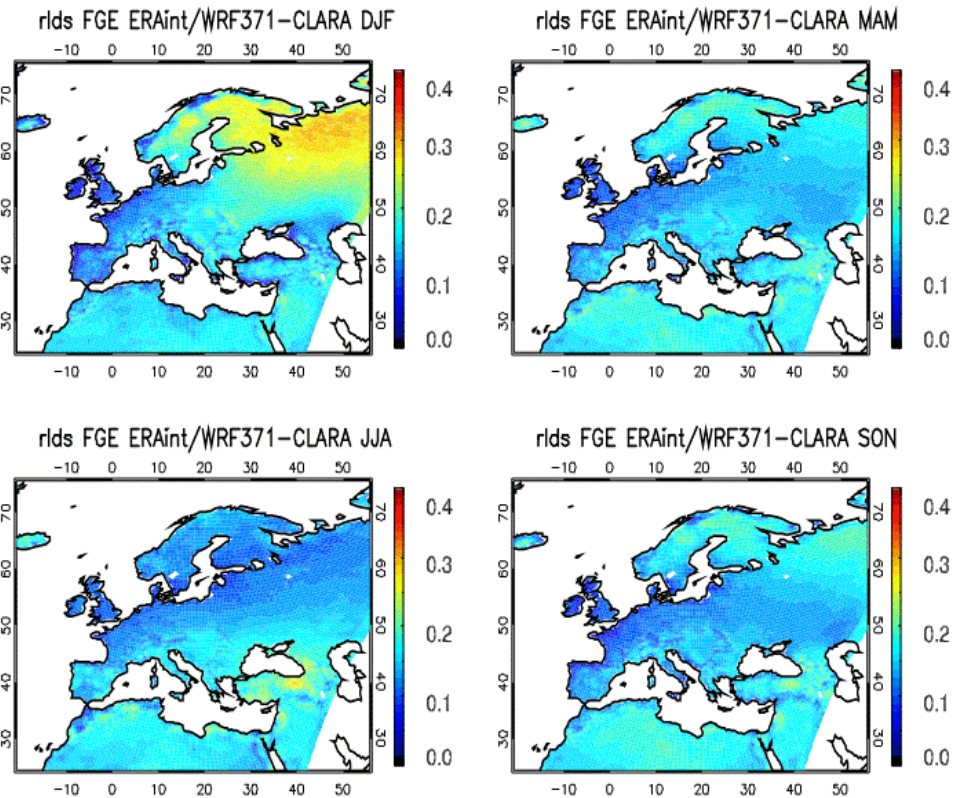
Από το Σχήμα 3.10, όπου απεικονίζεται το FGE της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, όταν το μοντέλο οδηγείται από δεδομένα επανάλυσης, φαίνεται ότι ο χειμώνας εμφανίζει τα μεγαλύτερα σφάλματα (0.3 στις βόρειες περιοχές, 0.2 στις πιο νότιες). Την άνοιξη και το φθινόπωρο στη βόρεια Ευρώπη το σφάλμα περιορίζεται στο 0.2 , με τις υπόλοιπες περιοχές να λαμβάνουν μικρότερες τιμές, ενώ το καλοκαίρι στο 0.1 .



Σχήμα 3.9: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.5: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	-31.06	-35.25	-42.01	-35.40	-35.93
BI	-21.24	-24.09	-29.57	-25.04	-24.99
EA	-39.93	-36.98	-42.90	-35.03	-38.71
FR	-28.02	-29.11	-35.18	-27.84	-30.04
IP	-27.26	-33.85	-41.50	-33.70	-34.08
MD	-26.01	-51.35	-85.79	-17.67	-45.21
ME	-29.91	-29.04	-34.68	-29.84	-30.87
SC	-45.07	-34.80	-32.57	-37.76	-37.55
Μ.Ο. Εποχής	-31.06	-34.31	-43.03	-30.29	-34.67



Σχήμα 3.10: FGE της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των σχετικών διαφορών της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος προς τα κάτω στο έδαφος για το WRF, που έχει οδηγηθεί από δεδομένα του παγκόσμιου μοντέλου, με τα δορυφορικά δεδομένα CLARA. Εδώ η τάση υποεκτίμησης αφορά επίσης όλες τις εποχές, όμως είναι πιο έντονη απ' ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση (Σχήμα 3.9), ιδιαίτερα το χειμώνα και την άνοιξη (κατά 9 W m^{-2} και 13.3 W m^{-2} κατά μέσο όρο σε ολόκληρη την Ευρώπη) και λιγότερο το καλοκαίρι και το φθινόπωρο (κάτω των 5 W m^{-2}).

Το χειμώνα η μεγάλη υποεκτίμηση της ακτινοβολίας για περιοχές με γεωγραφικά πλάτη από 50° και πάνω, αποτυπώνεται με τιμές διαφορών που φτάνουν μέχρι και -40% ή -79.63 W m^{-2} , όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.6.

Την άνοιξη η υποεκτίμηση παραμένει στις ίδιες περιοχές, αλλά με αρκετά μικρότερες τιμές σχετικών διαφορών (μέχρι -20%). Έτσι, οι τιμές των απόλυτων διαφορών κυμαίνονται από -39 W m^{-2} στα νότια ως -58.44 W m^{-2} στη Σκανδιναβία.

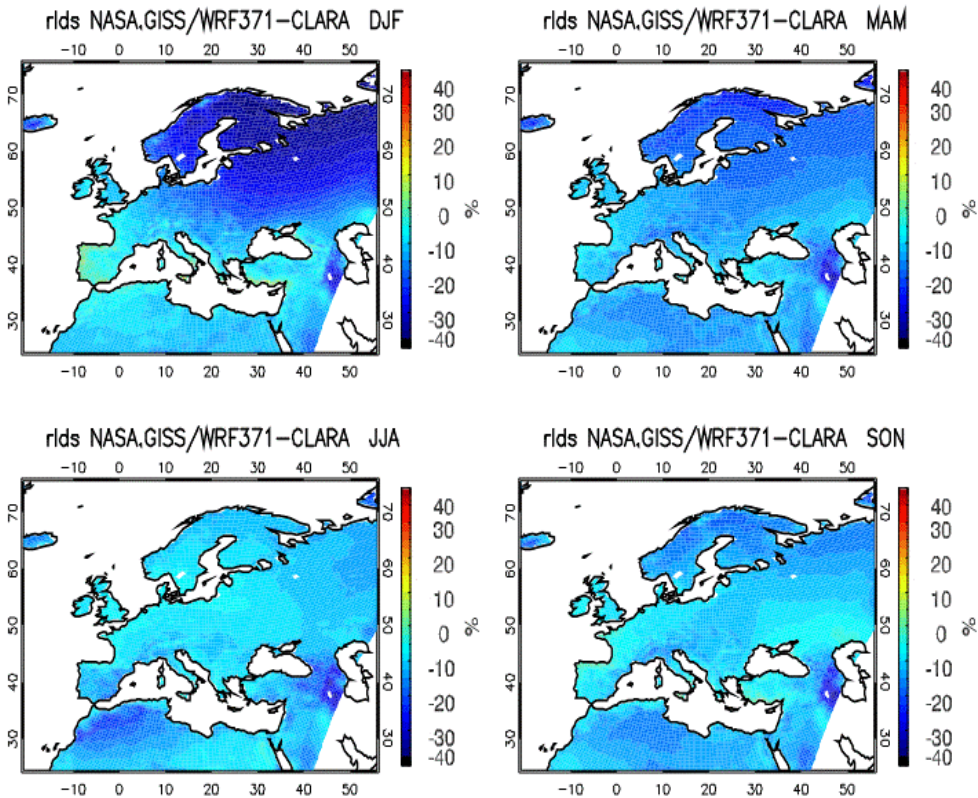
Στο καλοκαίρι του Σχήματος 3.11 μεγάλο μέρος της μελετώμενης περιοχής παρουσιάζει πολύ μικρές σχετικές διαφορές ακτινοβολίας, ενώ η μεγαλύτερη υποεκτίμηση παρουσιάζεται στα νότια. Μικρότερη υποεκτίμηση εμφανίζουν και οι πιο βόρειες περιοχές της Ευρώπης, με διαφορές που δεν ξεπερνούν το -10% (μόνο κατά την εποχή αυτή οι απόλυτες διαφορές παίρνουν τιμές κάτω των -40 W m^{-2}).

Οι διαφορές στη βόρεια Ευρώπη γίνονται πιο αρνητικές το φθινόπωρο (μέχρι -20%), με απόλυτες διαφορές στη Σκανδιναβία -47.49 W m^{-2} . Γενικά, από τον Πίνακα 3.6 φαίνεται ότι το φθινόπωρο είναι η εποχή όπου η συμπεριφορά του μοντέλου είναι πιο ρεαλιστική, με τιμές διαφορών από -17.87 έως -47.49 W m^{-2} .

Επιπλέον, σε όλες τις εποχές διακρίνεται μια περιοχή στα δυτικά της Κασπίας θάλασσας (με γεωγραφικό πλάτος $38-42^\circ \text{B}$ και γεωγραφικό μήκος $45-50^\circ \text{A}$) στην οποία παρατηρείται σταθερά υποεκτίμηση, γύρω στο -20%. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο ανατολικό όριο της μελετώμενης περιοχής.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι όταν το μοντέλο οδηγείται από τα δεδομένα επανάλυσης (Σχήμα 3.9), η υποεκτίμηση ιδιαίτερα το χειμώνα και την άνοιξη λαμβάνει μικρότερες τιμές σε σχέση με το Σχήμα 3.11, όμως η γενικότερη πορεία των δύο σετ δεδομένων είναι παρόμοια.

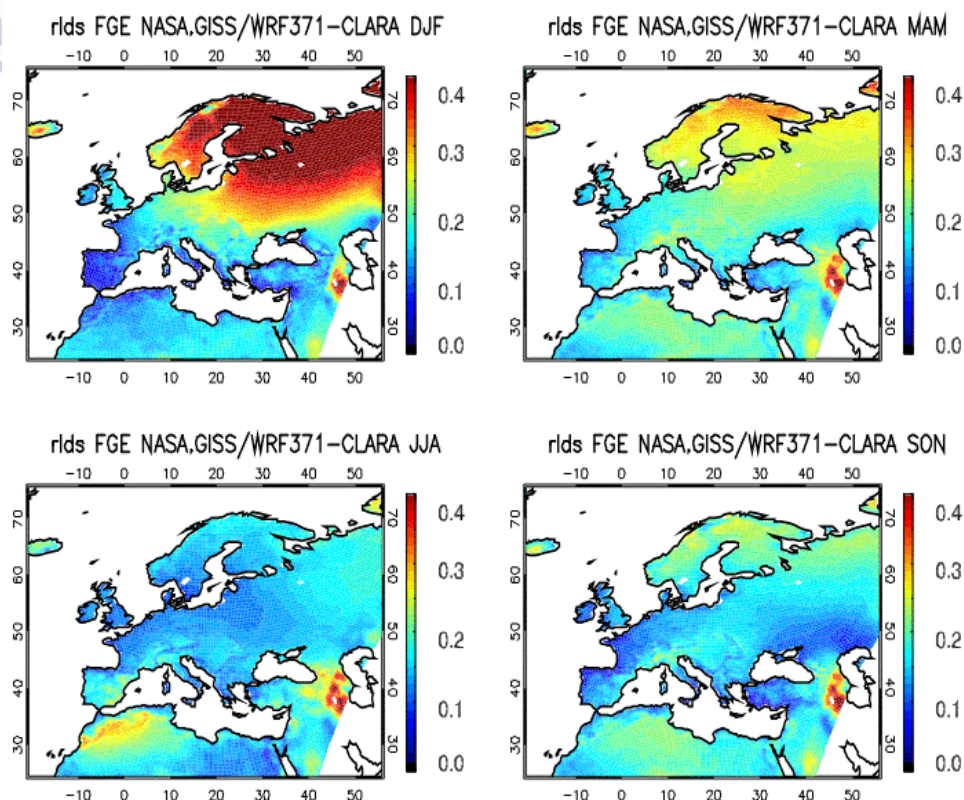
Στο Σχήμα 3.12, οι μεγαλύτερες τιμές του FGE εμφανίζονται το χειμώνα στη βόρεια Ευρώπη (0.4). Καθώς το γεωγραφικό πλάτος μειώνεται, μειώνεται και η τιμή του σφάλματος και καταλήγει στις Μεσογειακές χώρες να είναι γύρω στο 0.1. Αυτό το χωρικό μοτίβο ακολουθεί το FGE και κατά τις υπόλοιπες εποχές, με τιμές 0.2-0.3 τις μεταβατικές εποχές (άνοιξη – φθινόπωρο) και 0.1-0.2 το καλοκαίρι. Οι χώρες που βρίσκονται στα δυτικά (Βρετανία, Γαλλία) προσεγγίζονται καλύτερα από το μοντέλο (όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις) και εμφανίζουν το μικρότερο σφάλμα, γύρω στο 0.1.



Σχήμα 3.11: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.6: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο. Περιοχής
AL	-34.66	-50.22	-44.24	-42.99	-43.03
BI	-37.66	-39.43	-32.62	-33.43	-35.79
EA	-58.27	-53.40	-39.22	-40.55	-47.86
FR	-30.91	-40.36	-35.82	-28.70	-33.95
IP	-18.26	-39.25	-47.24	-32.62	-34.34
MD	-17.98	-52.89	-90.05	-17.87	-44.70
ME	-47.52	-46.89	-36.25	-35.12	-41.45
SC	-79.63	-58.44	-37.91	-47.49	-55.87
Μ.Ο. Εποχής	-40.61	-47.61	-45.42	-34.85	-42.12



Σχήμα 3.12: FGE της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

3.4 Ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται τα εποχιακά διαγράμματα των σχετικών διαφορών της κατερχόμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (rsds), που προέκυψαν από δεδομένα του WRF, που έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάλυσης, με τα δορυφορικά δεδομένα CLARA. Γενικά, φαίνεται ότι εκτός από την εποχή του χειμώνα, σε όλες τις άλλες εποχές η rsds υπερεκτιμάται ελαφρώς στην νότια Ευρώπη ($\text{bias} < 25 \text{ W m}^{-2}$) και υποεκτιμάται στη βόρεια ($\text{bias} > -40 \text{ W m}^{-2}$). Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική για το WRF όταν ενεργοποιείται το σχήμα κατακόρυφης μεταφοράς Grell-Deneyi (GD) (Katragkou et al., 2015), το οποίο προφανώς ρυθμίζει τη νέφωση κατακόρυφης ανάπτυξης και μορφοποιεί ανάλογα και την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος. Άλλα σχήματα κατακόρυφης ανάπτυξης (π.χ. Kain-Fritsch) δίνουν διαφορετική γεωγραφική συμπεριφορά

στην ακτινοβολία και στη νέφωση (Katragkou et al., 2015). Στο συγκεκριμένο πείραμα έχει χρησιμοποιηθεί το σχήμα κατακόρυφης ανάπτυξης Grell-Freitas, το οποίο είναι μια εξέλιξη του GD, οπότε διατηρεί τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά.

Για τις περιοχές με γεωγραφικά πλάτη άνω των 65° δεν υπήρχαν δορυφορικά δεδομένα ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος για το χειμώνα. Το ίδιο παρατηρείται και κατά την άνοιξη, για πολύ περιορισμένες βέβαια περιοχές. Το χειμώνα οι διαφορές είναι πολύ μεγάλες, αφού η υπερεκτίμηση φτάνει το 100% σε αρκετές περιοχές, κυρίως της κεντρικής ανατολικής Ευρώπης και σημειώνονται τιμές απόλυτων διαφορών γύρω στα 18 W m^{-2} , σύμφωνα με τον Πίνακα 3.7.

Την άνοιξη παρατηρείται υπερεκτίμηση στο μεγαλύτερο μέρος της μελετώμενης περιοχής, με τις μεγαλύτερες σχετικές διαφορές να εμφανίζονται στη νότια Ευρώπη, με τιμές γύρω στο 40% (έως 75% στις Άλπεις). Ελαφριά υποεκτίμηση εμφανίζεται στη βόρεια Ευρώπη, με τις απόλυτες διαφορές στη Σκανδιναβία να φτάνουν έως -15.25 W m^{-2} .

Το καλοκαίρι φαίνεται ότι το μοντέλο έχει πιο ρεαλιστική συμπεριφορά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εποχές, αφού οι περισσότερες περιοχές με μεγάλα γεωγραφικά πλάτη παρουσιάζουν μικρές διαφορές ακτινοβολίας. Στα νότια, όμως εμφανίζεται υπερεκτίμηση σε όλες τις περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο, με απόλυτες διαφορές γύρω στα 15 W m^{-2} .

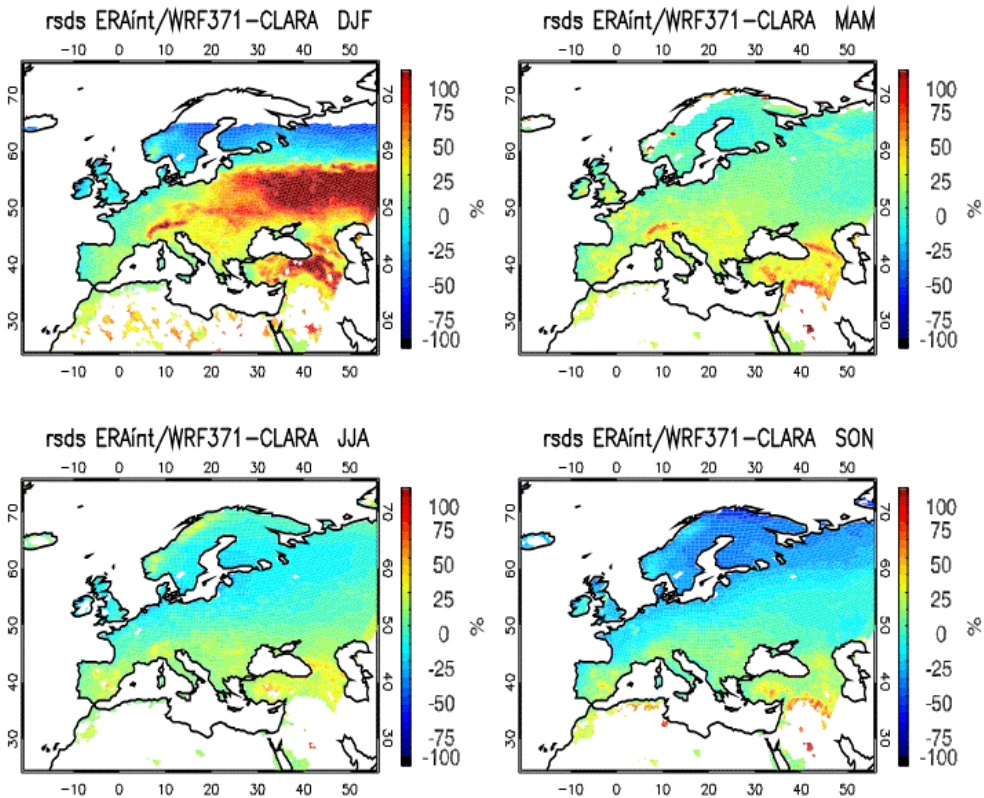
Το φθινόπωρο στα βόρεια, εμφανίζεται πιο έντονη υποεκτίμηση, όπως έγινε και το χειμώνα. Οι τιμές των διαφορών είναι μικρότερες του -50%. Οι χώρες της νότιας Ευρώπης εμφανίζουν υπερεκτίμηση, με μέγιστες τιμές που φτάνουν τοπικά το 60%, ενώ οι περιοχές της κεντρικής Ευρώπης εμφανίζουν τις πιο μικρές διαφορές ακτινοβολίας.

Οι σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας του μοντέλου από τα δορυφορικά δεδομένα SARAH, φαίνονται στο Σχήμα 3.14, ενώ στον Πίνακα 3.9 δίνονται οι απόλυτες διαφορές της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος. Οι κυριότερες διαφορές στα δεδομένα SARAH και CLARA εντοπίζονται το χειμώνα και το φθινόπωρο στα μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη, εκεί που οι τιμές της ακτινοβολίας είναι πολύ μικρές και αναμένεται η αβεβαιότητα να είναι μεγαλύτερη (βλ. Πίνακα 2.1).



Το χειμώνα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες σχετικές διαφορές του μοντέλου από τα δεδομένα SARAH, κάτι που συνέβαινε και με τα δεδομένα CLARA, με υπερεκτίμηση σε ολόκληρη σχεδόν την Ευρώπη. Η υπερεκτίμηση συνεχίζεται και την άνοιξη στα βόρεια και βορειοανατολικά, με απόλυτες διαφορές άνω των 9 W m^{-2} . Αντίθετα, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο σημειώνεται υποεκτίμηση σε όλες τις υποπεριοχές, με τις μεγαλύτερες διαφορές να εμφανίζονται στις χώρες στα κεντρικά της Ευρώπης (έως -56.85 W m^{-2} το καλοκαίρι και έως -24.99 W m^{-2} το φθινόπωρο).

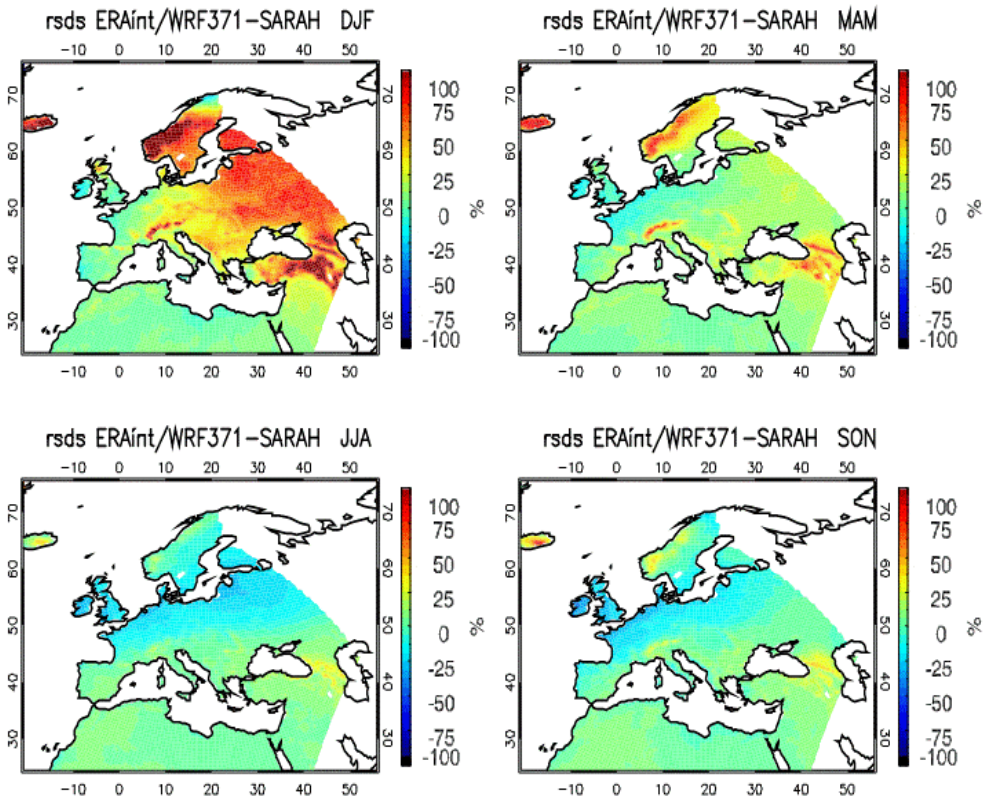
Μελετώντας το FGE της ακτινοβολίας που δίνεται στο Σχήμα 3.15 σε σχέση με τα SARAH, διακρίνεται το χειμώνα η περιοχή με τα μεγαλύτερα σφάλματα στη βόρεια και κεντρική Ευρώπη. Στις πιο βόρειες περιοχές οι τιμές φτάνουν το 0.8, ενώ στις νοτιότερες χώρες κυμαίνονται από 0.5 έως 0.6. Στη νοτιοδυτική Ευρώπη οι τιμές του σφάλματος δεν ξεπερνούν το 0.3. Την άνοιξη, το FGE στις περιοχές με μεγάλη υπερεκτίμηση (βλ. Σχήμα 3.14) παίρνει τιμές γύρω στο 0.6, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη δεν ξεπερνά το 0.3. Σε αντιστοιχία και με την προαναφερόμενη υποεκτίμηση, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο στις περιοχές με γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 50 και 60°B , το σφάλμα παίρνει τιμές άνω του 0.4, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη είναι μικρότερο του 0.2.



Σχήμα 3.13: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.7: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

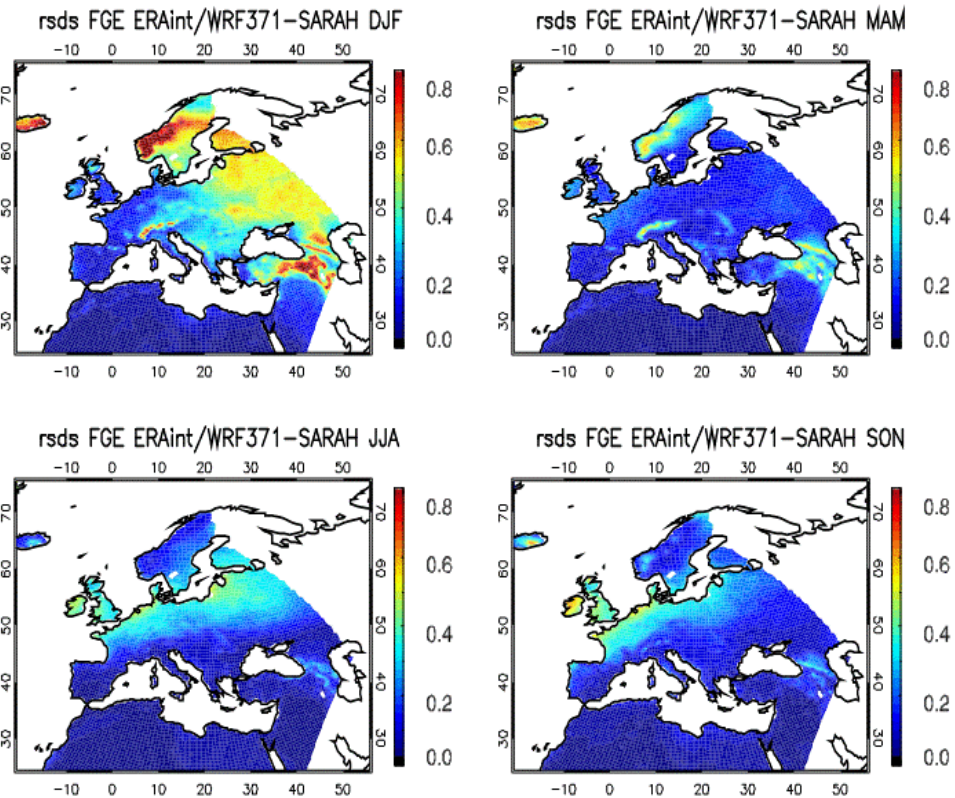
<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	17.26	33.64	8.33	-3.17	14.02
BI	-9.87	-4.26	-41.98	-24.18	-20.07
EA	16.57	16.51	-8.01	-8.21	4.22
FR	-1.53	10.6	-19.42	-22.47	-8.21
IP	0.47	16.07	16.23	-2.82	7.49
MD	9.33	25.38	12.43	-0.40	11.69
ME	2.94	4.19	-29.82	-20.2	-10.72
SC	-8.54	-15.25	-35.96	-28.71	-22.12
<i>Μ.Ο. Εποχής</i>	3.33	10.86	-12.28	-13.77	-2.96



Σχήμα 3.14: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα SARAH, για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.8: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα SARAH για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	16.82	21.40	-15.42	-3.82	4.75
BI	-1.68	-20.12	-56.85	-24.69	-25.84
EA	18.01	9.35	-30.8	-8.53	-2.99
FR	1.75	-18.06	-41.49	-24.99	-20.70
IP	-1.10	-1.86	-7.09	-11.95	-5.50
MD	12.44	14.88	-3.71	-5.14	4.62
ME	6.64	-13.46	-52.51	-20.64	-19.99
SC	8.50	21.96	-39.43	-6.71	-3.92
Μ.Ο. Εποχής	7.67	1.76	-30.91	-13.31	-8.70



Σχήμα 3.15: FGE της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του μοντέλου, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα SARAH για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται διαγράμματα αντίστοιχα με εκείνα του Σχήματος 3.13, με τη διαφορά ότι εδώ το μοντέλο έχει οδηγηθεί από δεδομένα του NASA GISS ModelE2. Το μοτίβο του χειμώνα είναι σχεδόν το ίδιο με εκείνο της ίδιας εποχής του Σχήματος 3.13. Πιο αναλυτικά, υποεκτίμηση στις πιο βόρειες περιοχές, μεγάλη υπερεκτίμηση με σχετικές διαφορές μέχρι 100% στις πιο νότιες γειτονικές τους (απόλυτες διαφορές γύρω στα 20 W m^{-2}). Μια μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με το Σχήμα 3.13 είναι η υποεκτίμηση στην Ιβηρική χερσόνησο, με διαφορές μικρότερες του -20%, καθώς και τα καλύτερα αποτελέσματα που διακρίνονται στις άλλες Μεσογειακές χώρες (0.9 W m^{-2} εδώ, ενώ προηγουμένως ήταν περίπου 9 W m^{-2}).

Η εποχή της άνοιξης επίσης εμφανίζει τα ίδια χαρακτηριστικά με το αντίστοιχο διάγραμμα του προηγούμενου σχήματος, με λίγο αυξημένη υπερεκτίμηση στις βόρειες περιοχές, ενώ σημειώνεται η μοναδική περίπτωση θετικής απόλυτης διαφοράς για τη Σκανδιναβία (1.79 W m^{-2}) και

επίσης αυξημένες τιμές διαφορών (μέχρι 80%) στις περιοχές μέγιστης υπερεκτίμησης.

Το *καλοκαίρι* στη νότια Ευρώπη παρουσιάζεται αισθητή υποεκτίμηση, με τιμές διαφορών μέχρι -40%. Μάλιστα, κατά την εποχή αυτή οι απόλυτες διαφορές για όλες τις περιοχές είναι αρνητικές, από -5.15 W m^{-2} στα βόρεια έως -97.27 W m^{-2} στα νότια.

Για το *φθινόπωρο*, οι διαφορές που προκύπτουν από το WRF που έχει οδηγηθεί από το GISS ModelE2, εμφανίζουν παρόμοιο μοτίβο με εκείνες του φθινοπώρου του Σχήματος 3.13. Για την εποχή αυτή οι τιμές των απόλυτων διαφορών σε όλες τις περιοχές είναι αρνητικές, όπως συνέβαινε και το καλοκαίρι, και κυμαίνονται από -4.61 έως -32.49 W m^{-2} .

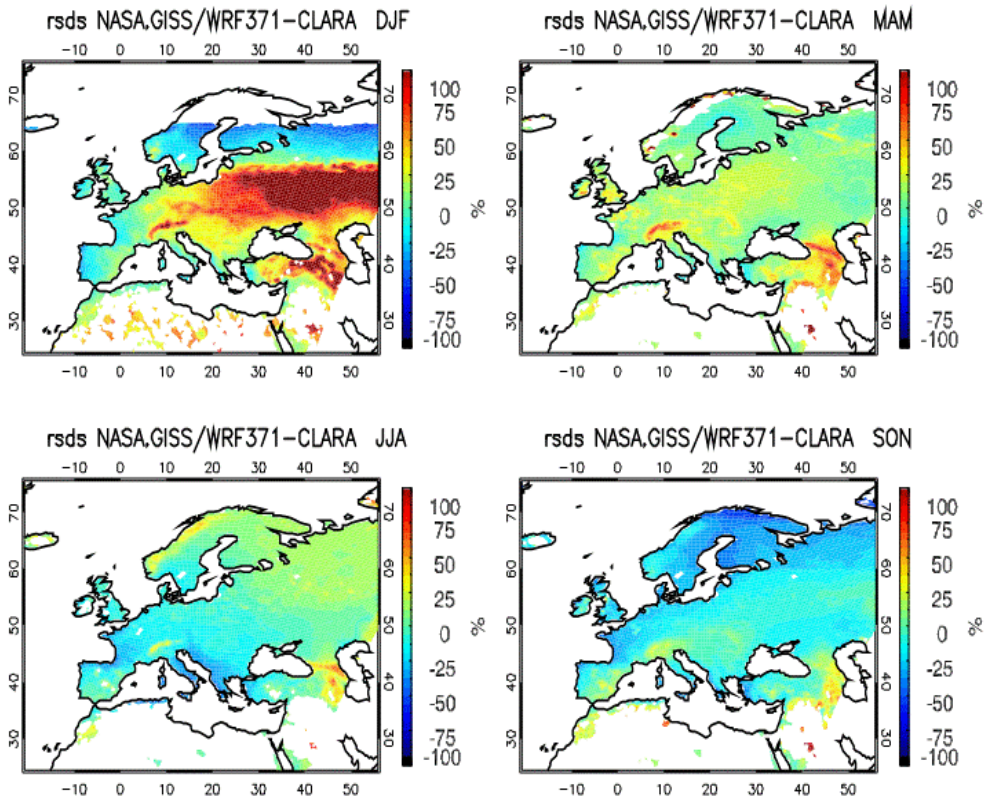
Να σημειωθεί εδώ ότι η περιοχή που βρίσκεται στο ανατολικό άκρο της ευρύτερης περιοχής μελέτης, σε όλες τις εποχές χαρακτηρίζεται από μεγάλη υπερεκτίμηση της ακτινοβολίας: μικρότερη το φθινόπωρο (έως 30%) και μεγαλύτερη το χειμώνα (μέχρι και 100%).

Η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος είναι η μόνη περίπτωση από τις μεταβλητές που μελετήθηκαν όπου τα δύο σχήματα εμφανίζουν παρόμοια εικόνα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, τα διαγράμματα που δίνουν τα δεδομένα του μοντέλου όταν αυτό έχει οδηγηθεί από το παγκόσμιο μοντέλο εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες διαφορές από τα παρατηρησιακά δεδομένα σε σύγκριση με όταν το μοντέλο έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάλυσης.

Στο Σχήμα 3.17 φαίνονται οι σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας του WRF από τα δεδομένα SARAH, όταν το WRF οδηγείται από δεδομένα του παγκόσμιου μοντέλου. Το φαινόμενο της μεγάλης υπερεκτίμησης το *χειμώνα* παρατηρείται και εδώ και μάλιστα πιο έντονο από ότι στο Σχήμα 3.14, αφού είναι πολλές οι περιοχές της ανατολικής Ευρώπης που εμφανίζουν σχετικές διαφορές μέχρι και 100%. Το ίδιο συμβαίνει και στις Άλπεις. Βέβαια, οι απόλυτες διαφορές δεν ξεπερνούν τα 22 W m^{-2} (Πίνακας 3.10), οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο ρόλος που παίζει η λίγη ακτινοβολία τη συγκεκριμένη εποχή. Στις χώρες της Μεσογείου το μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα τα δορυφορικά δεδομένα και εμφανίζονται σχετικές διαφορές έως 25%. Την *άνοιξη* εμφανίζονται οι ίδιες περιοχές μέγιστων

διαφορών που αναφέρθηκαν για την ίδια εποχή στο Σχήμα 3.14, με παρόμοιες, μάλιστα, τιμές, αλλά λίγο πιο εκτεταμένη την υπερεκτίμηση στη Σκανδιναβία και τις νοτιότερες περιοχές (απόλυτες διαφορές μέχρι 40.09 W m^{-2}). Το *καλοκαίρι* και το *φθινόπωρο* σε ολόκληρη την Ευρώπη παρατηρείται υποεκτίμηση, η οποία είναι πιο έντονη το καλοκαίρι (Πίνακας 3.10). Οι θερινές απόλυτες διαφορές μέχρι και -111.98 W m^{-2} στη Μεσόγειο, όπου προφανώς κατά την εποχή αυτή οι τιμές της ακτινοβολίας που προσπίπτει στις περιοχές αυτές είναι πολύ μεγάλες, επομένως οι σχετικές διαφορές δεν ξεπερνούν το 40%. Σημειώνεται δηλαδή εδώ το αντίστροφο φαινόμενο από εκείνο που σχολιάστηκε κατά το χειμώνα της βόρειας Ευρώπης.

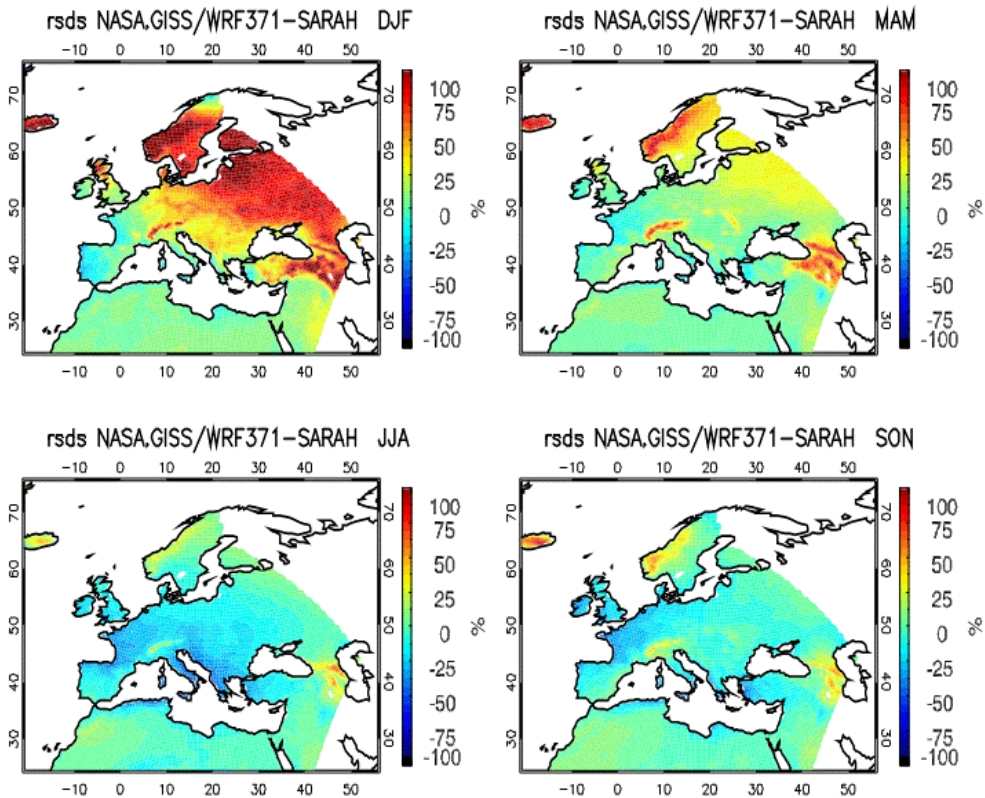
Το χειμώνα στις βορειότερες περιοχές το FGE παίρνει τιμές έως και 0.8, ενώ νοτιότερα οι τιμές μειώνονται και στα νοτιοδυτικά το σφάλμα δεν ξεπερνά το 0.4 (Σχήμα 3.18). Την άνοιξη εμφανίζονται οι γνωστές περιοχές (βόρεια Ευρώπη, Άλπεις, Μαύρη θάλασσα) με FGE 0.5 έως 0.7, ενώ στην υπόλοιπη Ευρώπη οι τιμές βρίσκονται κάτω του 0.3. Το καλοκαίρι στη νότια Ευρώπη, το σφάλμα παίρνει μεγάλες τιμές (0.6-0.7 για κάποιες περιοχές), κάτι που παρατηρείται και το φθινόπωρο, αφού εκεί και σε περιοχές όπως η Γαλλία και η Βρετανία σημειώνεται σφάλμα γύρω στο 0.6 τη συγκεκριμένη εποχή.



Σχήμα 3.16: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA, για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.9: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

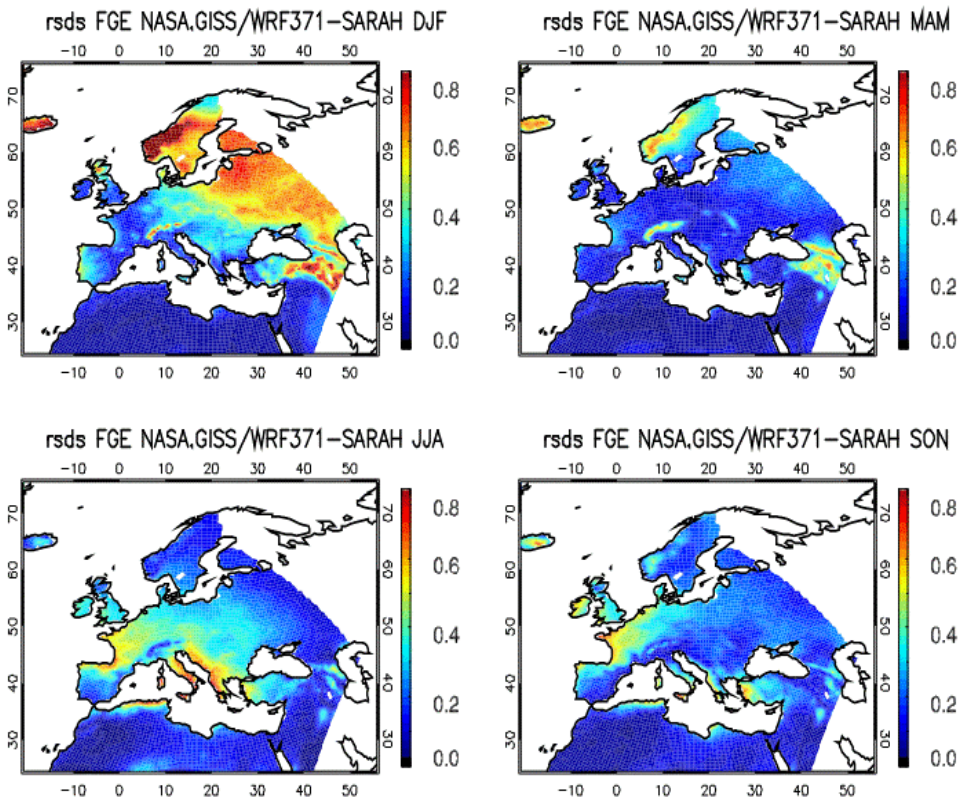
<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	15.22	37.65	-39.36	-4.61	2.23
BI	-4.98	8.65	-35.19	-22.32	-13.46
EA	19.92	19.08	-35.22	-11.94	-2.04
FR	-4.83	6.09	-63.87	-32.49	-23.78
IP	-11.94	5.50	-49.71	-16.81	-18.24
MD	0.65	-1.71	-97.27	-27.00	-31.33
ME	7.66	13.11	-38.99	-21.98	-10.05
SC	-5.12	1.79	-5.15	-25.03	-8.38
<i>Μ.Ο. Εποχής</i>	2.07	11.27	-45.60	-20.27	-13.13



Σχήμα 3.17: Σχετικές διαφορές της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα SARAH, για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.10: Απόλυτες διαφορές ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (bias σε $W m^{-2}$) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα SARAH για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

Υποπεριοχή	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Μ.Ο. Περιοχής
AL	14.79	25.41	-63.11	-5.26	-7.04
BI	3.21	-7.21	-49.77	-22.83	-19.15
EA	21.35	11.91	-58.01	-12.27	-9.26
FR	-1.55	-22.58	-85.7	-35.02	-36.21
IP	-13.52	-12.46	-73.12	-26.04	-31.29
MD	3.80	-12.09	-111.98	-31.83	-38.03
ME	11.36	-4.54	-61.76	-22.41	-19.34
SC	11.66	40.09	-11.44	-2.60	9.43
Μ.Ο. Εποχής	6.39	2.32	-64.36	-19.78	-18.86



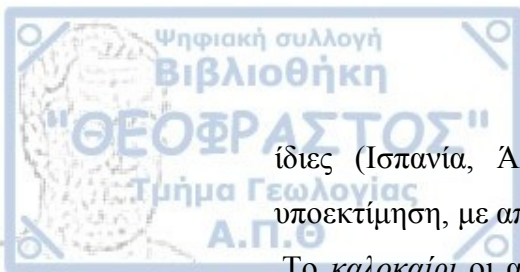
Σχήμα 3.18: FGE της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος του μοντέλου, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα SARAH για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

3.5 Ποσοστό νεφοκάλυψης

Στο Σχήμα 3.19 φαίνονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις σχετικές διαφορές των δεδομένων του ποσοστού νεφοκάλυψης (clt) που δίνει το WRF, όταν έχει οδηγηθεί από δεδομένα επανάλυσης, με τα δορυφορικά δεδομένα CLARA. Σε γενικές γραμμές το μοντέλο υπερεκτιμά τη νεφοκάλυψη, κάτι που φαίνεται και από τον Πίνακα 3.11.

Το χειμώνα σε όλες τις περιοχές παρατηρείται υπερεκτίμηση του ποσοστού νεφοκάλυψης, η οποία είναι πιο έντονη στη βόρεια Ευρώπη (οι σχετικές διαφορές φτάνουν τοπικά το 100%). Οι απόλυτες διαφορές στις βόρειες περιοχές κυμαίνονται γύρω στο 17-18%, ενώ στη Μεσόγειο τη συγκεκριμένη εποχή σημειώνεται η μικρότερη τιμή του Πίνακα 3.11 (0.07%).

Την άνοιξη δεν εμφανίζονται τόσο μεγάλα τοπικά μέγιστα όπως το χειμώνα, οι περιοχές όμως με τη μεγαλύτερη υπερεκτίμηση παραμένουν οι

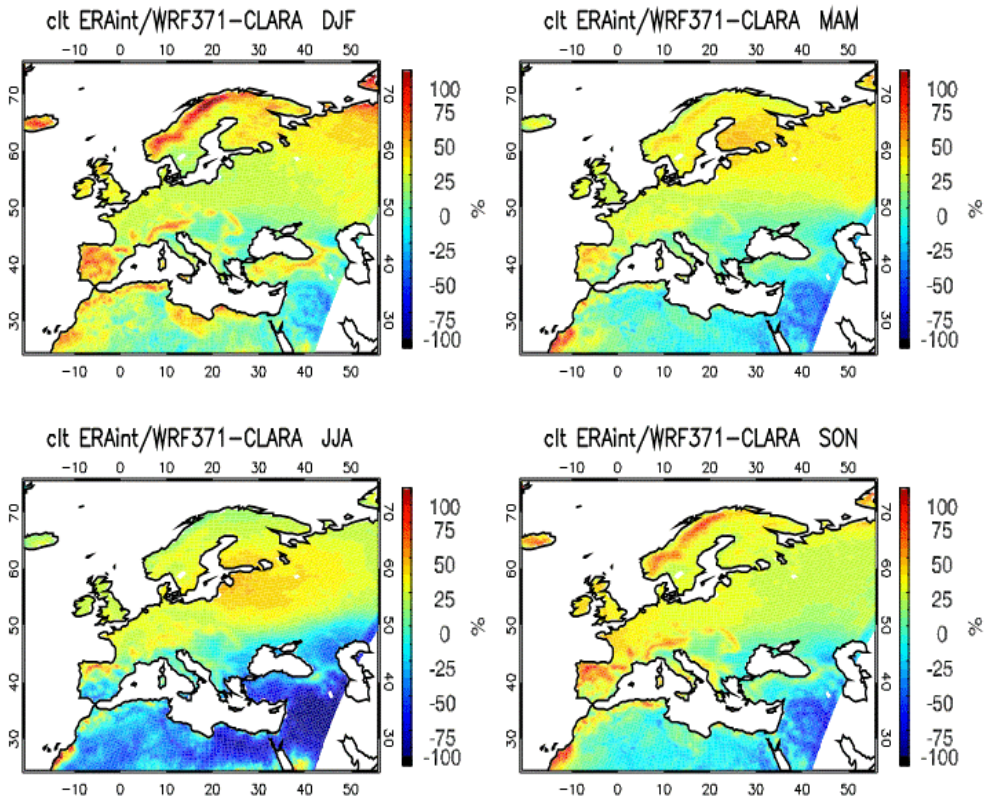


ίδιες (Ισπανία, Άλπεις, Σκανδιναβία), ενώ στη Μεσόγειο εμφανίζεται υποεκτίμηση, με απόλυτες διαφορές γύρω στο -2.10%.

Το *καλοκαίρι* οι απόλυτες διαφορές στη νότια Ευρώπη κυμαίνονται από -1% στην Ιβηρική χερσόνησο έως 18.69% στη Μεσόγειο, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές από 6 έως 14,5%.

Το *φθινόπωρο*, από τις 50° γεωγραφικού πλάτους και πάνω όλες οι περιοχές χαρακτηρίζονται από υπερεκτίμηση, οι περισσότερες με σχετικές διαφορές γύρω στο 25 με 40%. Τις μεγαλύτερες σχετικές διαφορές, έως 75%, εμφανίζουν περιοχές που και στις άλλες εποχές διακρίνονταν ως μέγιστα.

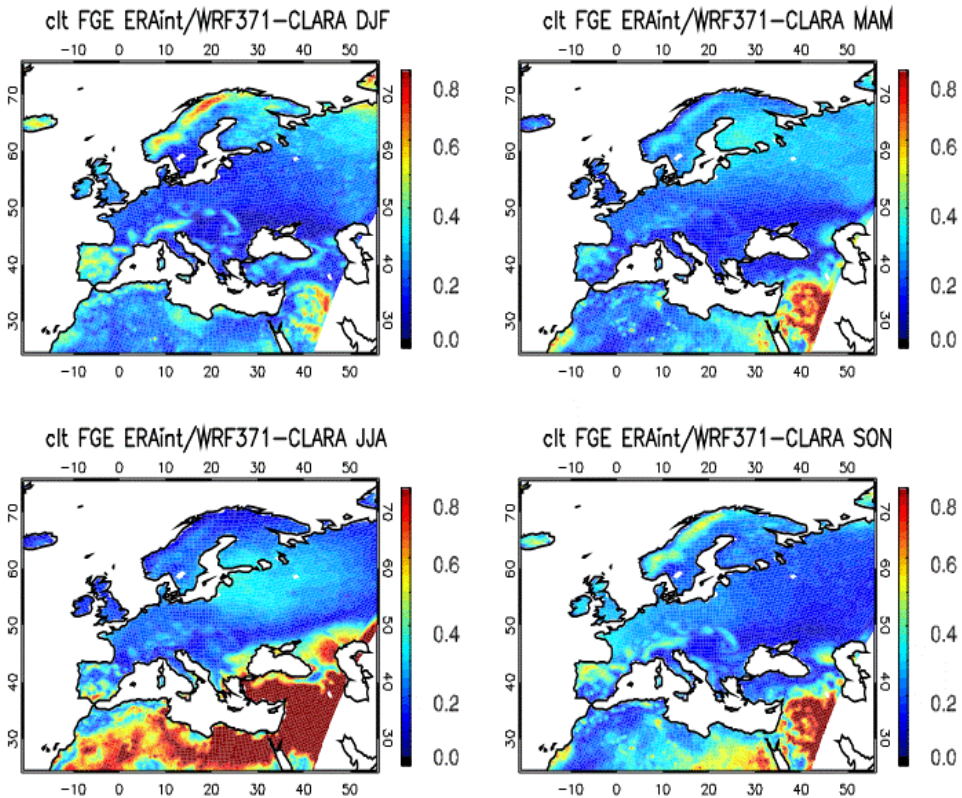
Στο Σχήμα 3.20, όπου δίνεται το FGE της νεφοκάλυψης για όλες τις εποχές, παρατηρείται ότι η βόρεια Ευρώπη παρουσιάζει μεγαλύτερο σφάλμα σε σύγκριση με τις άλλες περιοχές για όλες τις εποχές, με μεγαλύτερες τιμές το χειμώνα (άνω του 0.4). Άλλη μία περιοχή με συστηματικά αυξημένο σφάλμα είναι η νοτιοδυτική Ευρώπη (Ιβηρική χερσόνησος), με τις μεγαλύτερες τιμές σφάλματος να εμφανίζονται επίσης το χειμώνα. Στις υπόλοιπες περιοχές το FGE παίρνει τιμές κάτω του 0.4.



Σχήμα 3.19: Σχετικές διαφορές του ποσοστού νεφοκάλυψης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA, για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.11: Απόλυτες διαφορές του ποσοστού νεφοκάλυψης (bias σε ποσοστό επί τοις εκατό) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

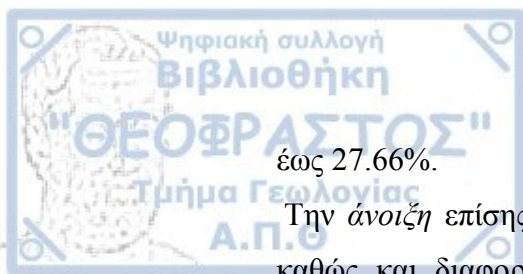
<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	11.37	9.71	7.24	13.98	10.58
BI	17.17	13.33	12.92	19.78	15.80
EA	6.93	5.80	6.02	9.07	6.96
FR	11.67	12.35	10.71	18.86	13.40
IP	15.58	8.98	-1.00	14.53	9.52
MD	0.07	-2.10	18.69	-21.41	-1.19
ME	12.32	12.92	13.00	16.59	13.71
SC	18.26	18.19	14.50	16.85	16.95
<i>Μ.Ο. Εποχής</i>	11.67	9.90	10.26	11.03	10.72



Σχήμα 3.20: FGE του ποσοστού νεφοκάλυψης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Στο Σχήμα 3.21 φαίνονται οι σχετικές διαφορές της νεφοκάλυψης, όπως αυτές υπολογίζονται για τα δεδομένα του περιοχικού μοντέλου, που οδηγείται από το παγκόσμιο, με τα δορυφορικά δεδομένα CLARA. Τόσο από το σχήμα αυτό όσο και από τον Πίνακα 3.12 φαίνεται ότι η υπερεκτίμηση της νεφοκάλυψης σημειώνεται σε όλες τις περιοχές και όλες τις εποχές του χρόνου.

Γενικά, παρατηρείται ότι για τις τρεις εποχές (χειμώνας, άνοιξη, φθινόπωρο) το μοτίβο που σχηματίζουν οι σχετικές διαφορές και που εμφανίζεται στο Σχήμα 3.21 είναι αντίστοιχο με εκείνο του Σχήματος 3.19. Η διαφορά έγκειται στο ότι στο Σχήμα 3.21, οι διαφορές είναι λίγο πιο έντονες, για παράδειγμα στις περιοχές που υπάρχει μέγιστο υπερεκτίμησης το χειμώνα η υπερεκτίμηση εμφανίζεται πιο εκτεταμένη γεωγραφικά και με διαφορές που φτάνουν μέχρι και το 100% στη βόρεια Ευρώπη. Στις περισσότερες περιοχές της υπόλοιπης Ευρώπης εμφανίζονται σχετικές διαφορές περίπου 40-50%, ενώ οι απόλυτες διαφορές κυμαίνονται από 9.53



έως 27.66%.

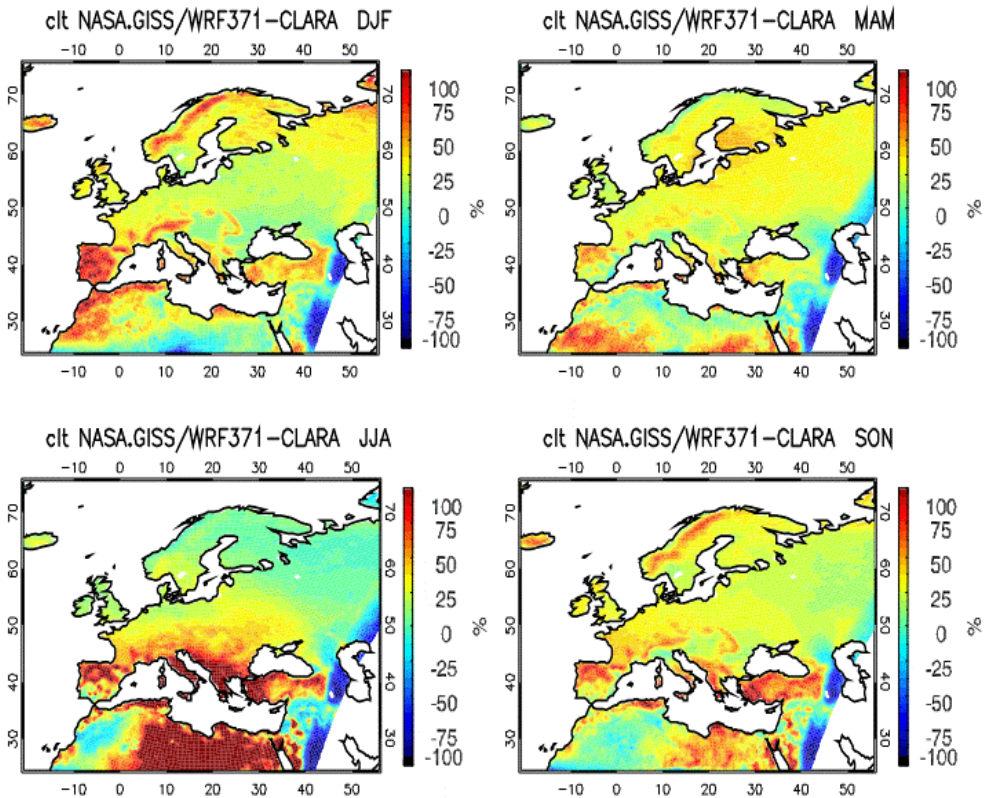
Την *άνοιξη* επίσης εμφανίζονται τα προηγούμενα μέγιστα υπερεκτίμησης, καθώς και διαφορές μέχρι 60% στην περιοχή της Φινλανδίας και των Βαλτικών χωρών, κάτι που παρατηρήθηκε και την *άνοιξη* του Σχήματος 3.19.

Το *καλοκαίρι* η εικόνα είναι αρκετά διαφορετική σε σχέση με όλα τα προηγούμενα: υπερεκτίμηση με σχετικές διαφορές έως και 100% παρατηρείται στο μεγαλύτερο τμήμα της νότιας Ευρώπης (οι απόλυτες διαφορές κυμαίνονται από 20 έως 31.04%). Οι βόρειες χώρες παρουσιάζουν επίσης υπερεκτίμηση, όμως οι τιμές των σχετικών διαφορών της νεφοκάλυψης δεν ξεπερνούν το 30%.

Το *φθινόπωρο* εμφανίζει παρόμοια εικόνα με εκείνη του Σχήματος 3.19, με υπερεκτίμηση στις δυτικές και βόρειες χώρες της Ευρώπης και τιμές διαφορών έως 75%. Η υπερεκτίμηση, όμως, εδώ παρατηρείται σε όλες τις χώρες γύρω από τη Μεσόγειο και μάλιστα με μεγαλύτερες τιμές διαφορών. Η υπόλοιπη Ευρώπη εμφανίζει επίσης υπερεκτίμηση, με τιμές σχετικών διαφορών έως 40%.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο νοτιοανατολικό άκρο της μελετώμενης περιοχής και συγκεκριμένα στις περιοχές με γεωγραφικά μήκη που ξεκινούν από 40°Α, σχηματίζεται μια ευδιάκριτη λωρίδα συνεχούς υποεκτίμησης, με τιμές σχετικών διαφορών που φτάνουν για όλες τις εποχές μέχρι -70%.

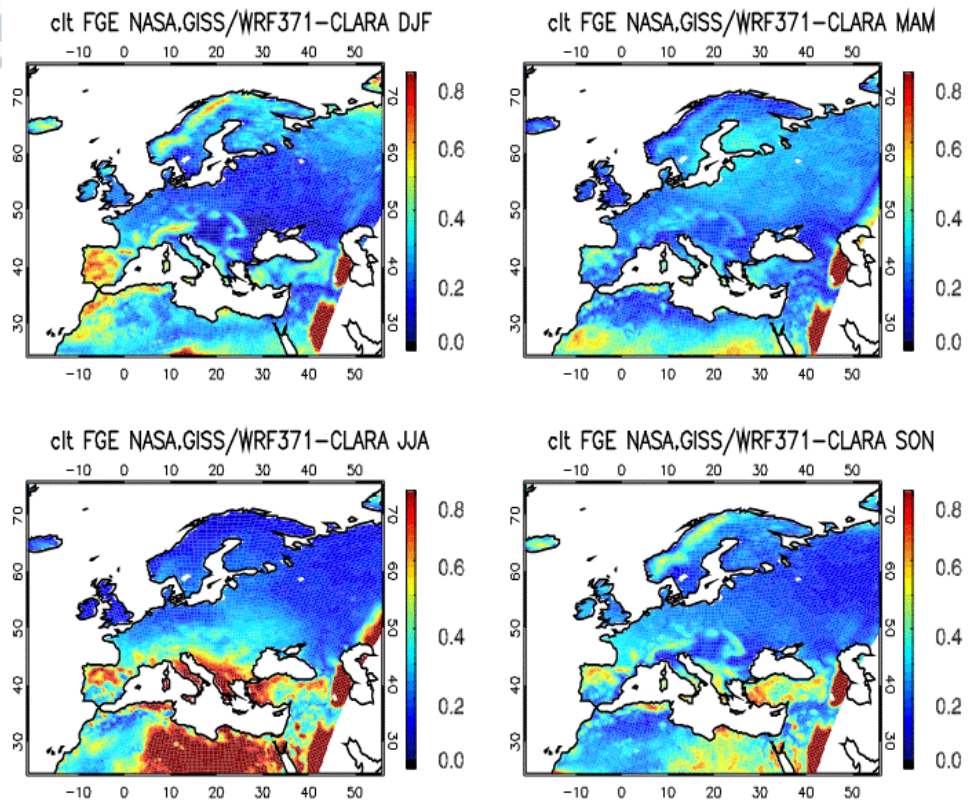
Στο Σχήμα 3.22, όπου απεικονίζεται το FGE της νεφοκάλυψης, όταν το WRF οδηγείται από το NASA GISS, φαίνεται ότι το χειμώνα, την *άνοιξη* και το *φθινόπωρο* το σφάλμα εμφανίζεται αυξημένο στις βόρειες περιοχές (έως 0.5). Αντίθετα, το *καλοκαίρι* στη βόρεια Ευρώπη το σφάλμα περιορίζεται κάτω του 0.1, ενώ στη νότια φτάνει το 0.8.



Σχήμα 3.21: Σχετικές διαφορές του ποσοστού νεφοκάλυψης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA, για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

Πίνακας 3.12: Απόλυτες διαφορές του ποσοστού νεφοκάλυψης (bias σε ποσοστό επί τοις εκατό) του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές και όλες τις υποπεριοχές για το διάστημα 1990-2008.

<i>Υποπεριοχή</i>	<i>Χειμώνας</i>	<i>Άνοιξη</i>	<i>Καλοκαίρι</i>	<i>Φθινόπωρο</i>	<i>Μ.Ο. Περιοχής</i>
AL	19.07	12.51	24.92	16.88	18.35
BI	16.07	11.75	7.94	16.93	13.17
EA	9.53	14.08	17.19	13.99	13.70
FR	18.65	14.39	20.56	21.61	18.80
IP	27.66	12.42	20.88	18.14	19.78
MD	10.08	7.34	31.04	13.73	15.55
ME	14.58	15.60	13.59	18.59	15.59
SC	16.50	17.07	3.41	15.94	13.23
<i>Μ.Ο. Εποχής</i>	16.52	13.15	17.44	16.98	16.02



Σχήμα 3.22: FGE του ποσοστού νεφοκάλυψης του WRF3.7.1, που οδηγείται από δεδομένα NASA GISS ModelE2, με δεδομένα CLARA για όλες τις εποχές για το διάστημα 1990-2008.

3.6 Συνολική αξιολόγηση των παραμέτρων

Συνοψίζοντας όσα ειπώθηκαν στις παραγράφους 3.1-3.5 για την αξιολόγηση των δεδομένων του WRF και για να διαμορφωθεί μία συνολική εικόνα της αξιολόγησης κάθε παραμέτρου για την κάθε περιοχική κλιματική προσομοίωση, παρατίθεται ο Πίνακας 3.13. Στον πίνακα αυτόν περιλαμβάνονται επιγραμματικά τα βασικά αποτελέσματα των προηγούμενων παραγράφων.

Πίνακας 3.13: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης όλων των παραμέτρων και για τις δύο περιοχικές κλιματικές προσομοιώσεις.

Προσομοιώσεις Παράμετροι	ERAint/WRF	NASA GISS/WRF
Θερμοκρασία	Υποεκτίμηση	Υποεκτίμηση
Βροχόπτωση	Υπερεκτίμηση	Υπερεκτίμηση (ιδιαίτερα στα κεντρικά και νότια)
Ακτινοβολία μεγάλου μ.κ.	Υποεκτίμηση	Υποεκτίμηση
Ακτινοβολία μικρού μ.κ.	Υπερεκτίμηση την ψυχρή περίοδο (αβεβαιότητα δεδομένων) Κατά τόπους υποεκτίμηση τη θερμή περίοδο	Υπερεκτίμηση την ψυχρή περίοδο (αβεβαιότητα δεδομένων) Υποεκτίμηση τη θερμή περίοδο
Ποσοστό νεφοκάλυψης	Υπερεκτίμηση	Υπερεκτίμηση (ιδιαίτερα στα νότια)

4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

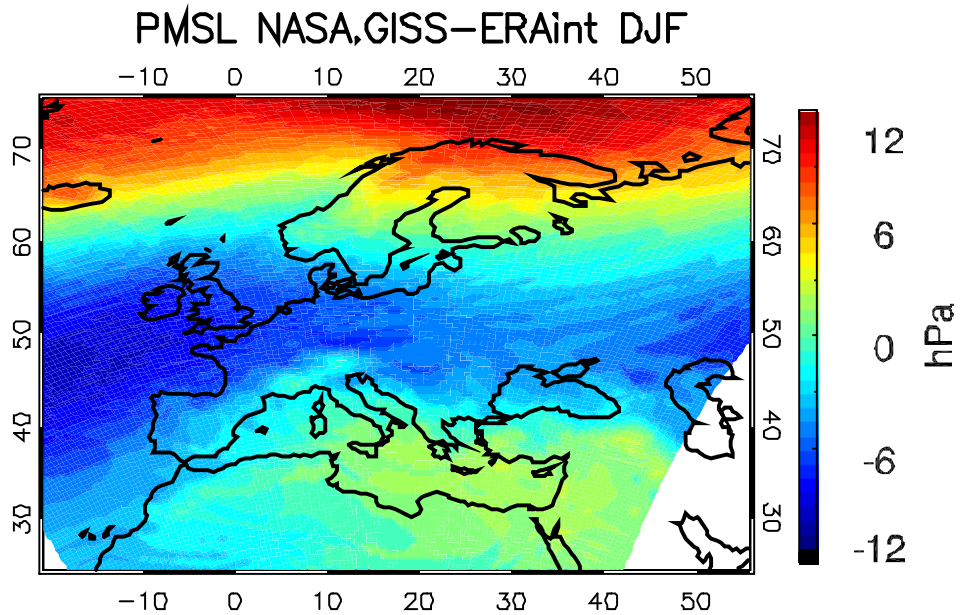
4.1 Χειμώνας

Για το κεφάλαιο αυτό, έγινε επεξεργασία των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 και των δεδομένων ERA-Interim, από τα οποία οδηγείται το WRF3.7.1, και παρουσιάζονται αρχικά οι μεταξύ τους διαφορές, για την εποχή του χειμώνα.

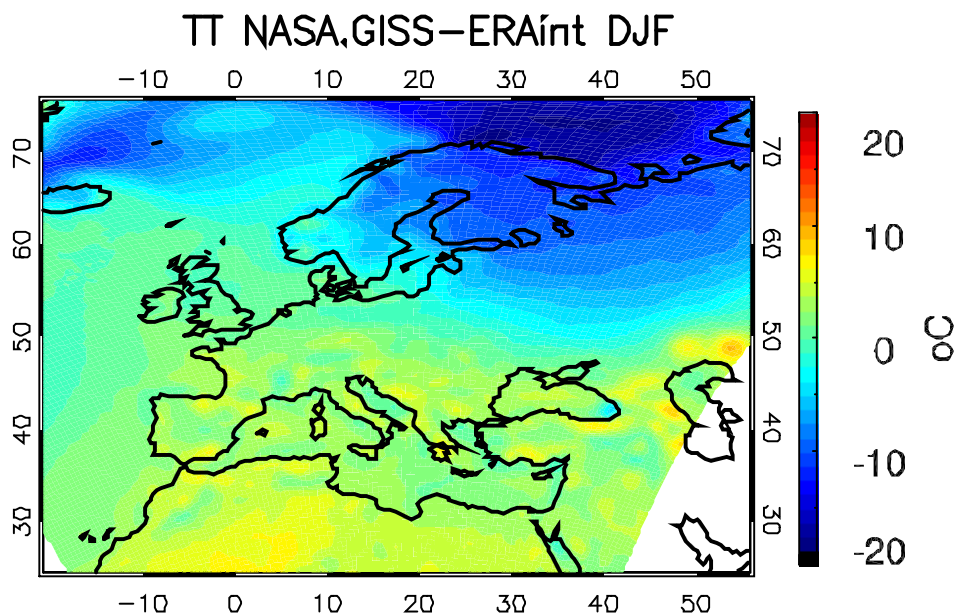
Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται οι διαφορές πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας (PMSL) των δεδομένων του GISS ModelE2 με τα δεδομένα ERA-Interim, για το χειμώνα της περιόδου 1990-2008. Όπως φαίνεται, η κατανομή των διαφορών είναι ζωνική, ξεκινώντας με θετικές διαφορές έως 10hPa στα πιο μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Κατεβαίνοντας προς τα νότια, οι τιμές των διαφορών συνεχώς μειώνονται φτάνοντας μέχρι τα -10hPa στις περιοχές με γεωγραφικό πλάτος γύρω στις 50°. Στη νότια Ευρώπη παίρνουν πάλι τιμές κοντά στο μηδέν.

Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται οι αντίστοιχες διαφορές θερμοκρασίας (TT) των δύο σετ δεδομένων, οι οποίες επίσης εμφανίζουν κάποια ζωνική κατανομή. Στα πιο μεγάλα γεωγραφικά πλάτη τα δεδομένα του NASA GISS ModelE2 είναι πιο ψυχρά από εκείνα των ERA Interim (με διαφορές που είναι μεγαλύτερες των -10°C), ενώ καθώς το γεωγραφικό πλάτος μειώνεται η κατάσταση αντιστρέφεται. Στην νότια Ευρώπη σημειώνονται διαφορές έως +5°C.

Το μοτίβο που περιγράφηκε για τα δύο αυτά σχήματα, για να γίνει πιο κατανοητό, συνοψίζεται ως εξής: το NASA GISS ModelE2 εμφανίζει αυξημένες πιέσεις στα βόρεια και μειωμένες στα νότια, σε σχέση με τα ERA-Interim. Επιπλέον, το ModelE2 συνδέεται με χαμηλότερες θερμοκρασίες στη βόρεια Ευρώπη και υψηλότερες στη νότια. Αφού τα δεδομένα αυτά δίνουν τις οριακές συνθήκες στο περιοχικό μοντέλο WRF, αναμένεται ότι το WRF όταν οδηγείται από το παγκόσμιο μοντέλο σε σύγκριση με όταν οδηγείται από τα δεδομένα επανάλυσης θα εμφανίζει υψηλότερες πιέσεις και χαμηλότερες θερμοκρασίες στα βόρεια και χαμηλότερες πιέσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες στα νότια.



Σχήμα 4.1: Διαφορές πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 με τα δεδομένα ERA-Interim, για το χειμώνα για το διάστημα 1990-2008.



Σχήμα 4.2: Διαφορές θερμοκρασίας των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 με τα δεδομένα ERA-Interim, για το χειμώνα για το διάστημα 1990-2008.

Ενώ τα δύο προηγούμενα σχήματα παρουσιάζουν τις διαφορές των δεδομένων από τα οποία οδηγήθηκε το WRF, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι διαφορές που προέκυψαν μεταξύ των δεδομένων του WRF όταν αυτό

οδηγείται από το παγκόσμιο μοντέλο GISS ModelE2 και όταν οδηγείται από τα δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνονται οι διαφορές για την εποχή του χειμώνα, για όλες τις μεταβλητές που μελετήθηκαν.

Το μοτίβο των διαφορών της θερμοκρασίας του Σχήματος 4.2 διατηρείται στα αποτελέσματα της θερμοκρασίας (tas) που δίνει το WRF (Σχήμα 4.3). Όταν το WRF οδηγείται από το παγκόσμιο μοντέλο (NASA GISS/WRF) δίνει πολύ ψυχρότερο κλίμα στη βόρεια Ευρώπη (έως -20°C) σε σχέση με το WRF που οδηγείται από τα δεδομένα ERA-Interim (ERAint/WRF), σε συμφωνία με τις μεγάλες αρνητικές διαφορές του Σχήματος 4.2 στην περιοχή αυτή. Αντίθετα, στις πιο νότιες περιοχές της Ευρώπης εμφανίζονται μηδενικές έως ελαφρώς θετικές διαφορές (στις περιοχές της Μεσογείου).

Αντίστοιχη πορεία έχει και η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (rls), με διαφορές έως $-50\text{W}/\text{m}^2$ στα βόρεια, οι οποίες σε φτάνουν σε τιμές $+20\text{W}/\text{m}^2$ στη νότια Ευρώπη.

Οι διαφορές της πίεσης επιφανείας (ps) που δίνει το WRF επίσης ακολουθούν παρόμοια πορεία με εκείνες της πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας του Σχήματος 4.1. Ενώ στη βόρεια Ευρώπη οι διαφορές παίρνουν θετικές τιμές (έως $+8\text{hPa}$), αυτές ακολουθούν πτωτική πορεία καθώς το γεωγραφικό πλάτος μειώνεται. Έτσι, από το γεωγραφικό πλάτος των 55° και κάτω, οι διαφορές είναι αρνητικές με τιμές έως -12hPa .

Αν γίνει σύγκριση του διαγράμματος της πίεσης επιφανείας με εκείνο της βροχόπτωσης (pr), φαίνεται ότι σε γενικές γραμμές διακρίνεται μια σχέση μεταξύ τους, δείχνοντας ενδεχομένως την επίδραση των βαρομετρικών συστημάτων. Πιο αναλυτικά, στις περιοχές όπου το NASA GISS/WRF δίνει πιο χαμηλές πιέσεις από το ERAint/WRF, φαίνεται να είναι και πιο υγρό και αντιστρόφως. Έτσι, οι διαφορές της βροχόπτωσης στη νότια Ευρώπη είναι θετικές, με τιμές έως και $4\text{mm}/\text{day}$.

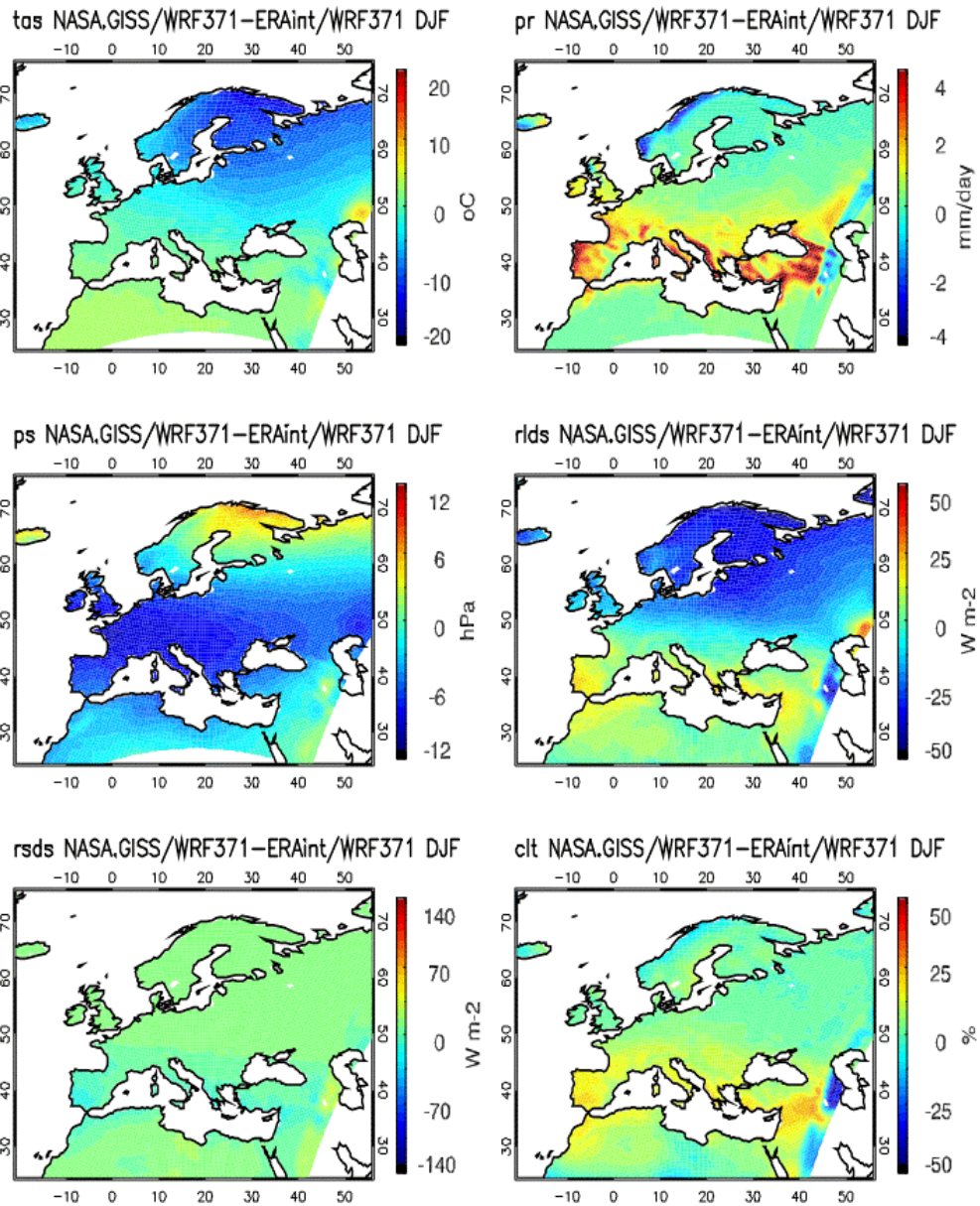
Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, στις περιοχές όπου εμφανίζονται θετικές (αρνητικές) διαφορές στη βροχόπτωση εμφανίζονται αντίστοιχα και θετικές (αρνητικές) διαφορές στο ποσοστό της νεφοκάλυψης (clt). Στη νότια Ευρώπη, όπου όπως αναφέρθηκε το NASA GISS/WRF δίνει μεγαλύτερες τιμές βροχόπτωσης από το ERAint/WRF, δίνει και μεγαλύτερες τιμές



νεφοκάλυψης (θετικές διαφορές έως +25%). Αντίθετα, στα βόρεια οι τιμές των διαφορών στη νεφοκάλυψη είναι από μηδενικές έως ελαφρώς αρνητικές.

Τέλος, αντίστροφη συσχέτιση εμφανίζουν το ποσοστό της νεφοκάλυψης με την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (rsds). Στη νότια Ευρώπη με τις θετικές διαφορές νεφοκάλυψης, η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος εμφανίζει ελαφρώς αρνητικές διαφορές (έως -20 W/m^2), ενώ όσο το γεωγραφικό πλάτος αυξάνεται οι διαφορές της ακτινοβολίας γίνονται θετικές, φτάνοντας τιμές έως $+20 \text{ W/m}^2$, ενώ οι διαφορές στο ποσοστό νεφοκάλυψης των αντίστοιχων περιοχών λαμβάνουν ελαφρώς αρνητικές τιμές.

Συμπερασματικά, κατά το χειμώνα, το WRF όταν οδηγείται από το NASA GISS ModelE2 είναι πιο ψυχρό και πιο ξηρό στη βόρεια Ευρώπη σε σχέση με όταν αυτό οδηγείται από τα ERA-Interim. Αντίθετα, στη νότια Ευρώπη εμφανίζεται θερμότερο και υγρότερο όταν οδηγείται από το NASA GISS ModelE2.



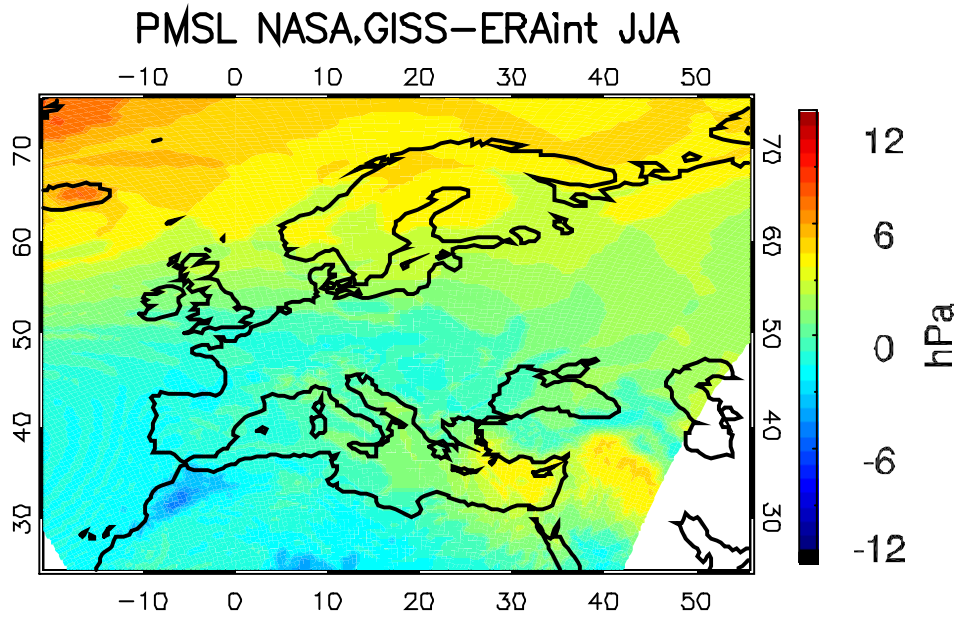
Σχήμα 4.3: Διαφορές όλων των μεταβλητών που μελετήθηκαν, μεταξύ του WRF που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2 και του WRF που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim για το χειμώνα για το διάστημα 1990-2008.

4.2 Καλοκαίρι

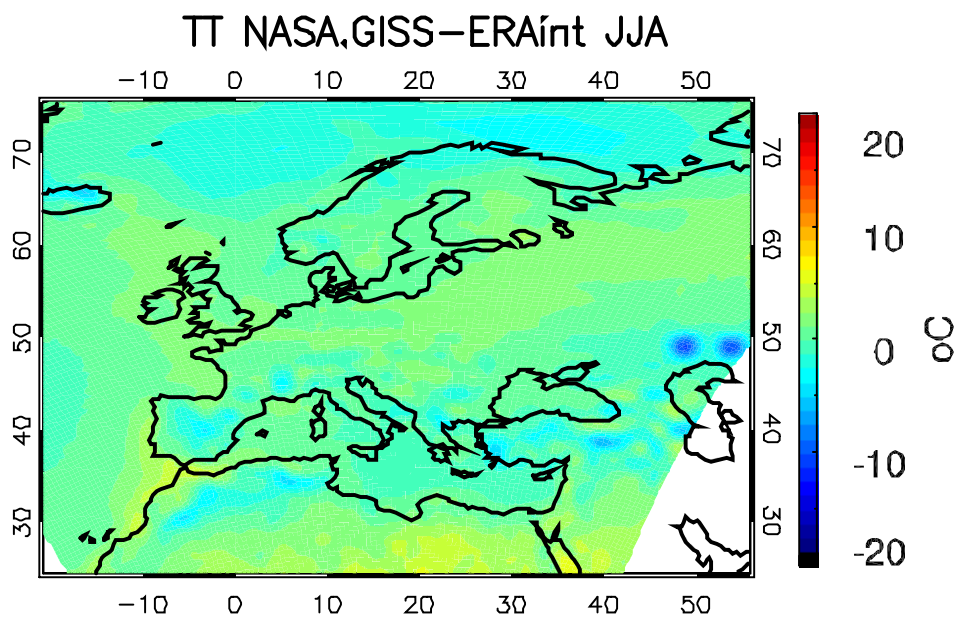
Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι διαφορές πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας (PMSL) μεταξύ των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 και των δεδομένων ERA-Interim για το καλοκαίρι της περιόδου 1990-2008. Στη βόρεια Ευρώπη το καλοκαίρι παρατηρούνται θετικές διαφορές έως +5hPa, οι οποίες μειώνονται καθώς μειώνεται και το γεωγραφικό πλάτος. Έτσι, στη νότια Ευρώπη οι τιμές τους είναι μηδενικές ή και ελαφρώς αρνητικές (έως -2hPa).

Το μοτίβο, δηλαδή, των διαφορών είναι παρόμοιο με εκείνο του χειμώνα (Σχήμα 4.1), αφού και εδώ διακρίνεται κάποια ζωνικότητα. Οι διαφορές, όμως, εμφανίζονται πιο εξασθενημένες κατά το καλοκαίρι, αφού στο Σχήμα 4.1 οι τιμές τους κυμαίνονταν από +10hPa στα βόρεια έως -10hPa στα νότια.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι διαφορές θερμοκρασίας (TT) μεταξύ των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 και των δεδομένων ERA-Interim για το καλοκαίρι. Όπως φαίνεται, εδώ δεν υπάρχει τόσο έντονη διαφοροποίηση των τιμών τους με το γεωγραφικό πλάτος όσο υπήρχε το χειμώνα (Σχήμα 4.2). Μάλιστα, οι διαφορές είναι ελαφρώς θετικές στη βόρεια Ευρώπη (έως +3°C) και ελαφρώς αρνητικές στη νότια (έως -3°C σε κάποιες περιοχές). Αντίθετα, το χειμώνα οι διαφορές της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σετ δεδομένων ήταν θετικές στα νότια και έντονα αρνητικές στα βόρεια.



Σχήμα 4.4: Διαφορές πίεσης στη μέση στάθμη θάλασσας των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 με τα δεδομένα ERA-Interim, για το καλοκαίρι για το διάστημα 1990-2008.



Σχήμα 4.5: Διαφορές θερμοκρασίας των δεδομένων του NASA GISS ModelE2 με τα δεδομένα ERA-Interim, για το καλοκαίρι για το διάστημα 1990-2008.

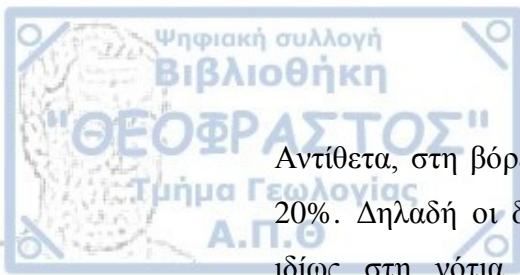
Σε συμφωνία με το Σχήμα 4.5, η θερμοκρασία (tas) του Σχήματος 4.6 εμφανίζει μικρές αρνητικές διαφορές στα νότια (έως -5°C), οι οποίες καθώς το γεωγραφικό πλάτος αυξάνεται μηδενίζονται και έπειτα μετατρέπονται σε θετικές (έως $+5^{\circ}\text{C}$). Φαίνεται δηλαδή ότι η μικρή διαφοροποίηση των διαφορών της TT του Σχήματος 4.5, επέφερε μικρές διαφορές και στην tas, αντίθετα με το χειμώνα, όπου οι έντονες διαφορές της TT επέφεραν διαφορές στην tas έως -15°C .

Οι διαφορές της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος (rls) εμφανίζουν διαφορετική πορεία από εκείνες της tas, σε αντίθεση με το χειμώνα όπου παρουσίαζαν παρόμοια πορεία, αφού εδώ παρατηρούνται θετικές διαφορές ακτινοβολίας στα νότια (έως $+20\text{Wm}^{-2}$) και μηδενικές έως ελαφρώς αρνητικές στα βόρεια.

Η πίεση επιφανείας (ps) το καλοκαίρι εμφανίζει αρνητικές διαφορές στα νότια και θετικές στα βόρεια, κάτι το οποίο συνέβαινε και το χειμώνα. Όμως εδώ αν και έχουμε πάλι έντονα αρνητικές διαφορές στα νότια (έως -12hPa), παρατηρούνται και μεγάλες θετικές διαφορές στα βόρεια (έως $+8\text{hPa}$) οι οποίες μάλιστα καταλαμβάνουν ολόκληρη τη βόρεια Ευρώπη, σε αντίθεση με τις διαφορές που εμφανίζονταν στα βόρεια το χειμώνα. Η εικόνα αυτή έρχεται σε αντίθεση με εκείνη των διαφορών της PMSL των δύο εποχών, αφού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διαφορές της PMSL εμφανίζονται πιο εξασθενημένες κατά το καλοκαίρι και πιο έντονες και καλύτερα γεωγραφικά καθορισμένες το χειμώνα.

Η κατανομή των διαφορών βροχόπτωσης (pr) εμφανίζεται ξανά να σχετίζεται με την πίεση επιφανείας, αφού στα νότια που το NASA GISS/WRF δίνει χαμηλές πιέσεις, φαίνεται να είναι και πιο υγρό από το ERAint/WRF (με διαφορές έως $+4\text{mm/day}$). Αντίθετα, στα βόρεια όπου οι διαφορές της πίεσης είναι θετικές, οι διαφορές βροχόπτωσης γίνονται ελαφρώς αρνητικές. Συνολικά, το καλοκαίρι το NASA GISS/WRF εμφανίζεται αρκετά πιο υγρό από το ERAint/WRF, σε σχέση με το χειμώνα.

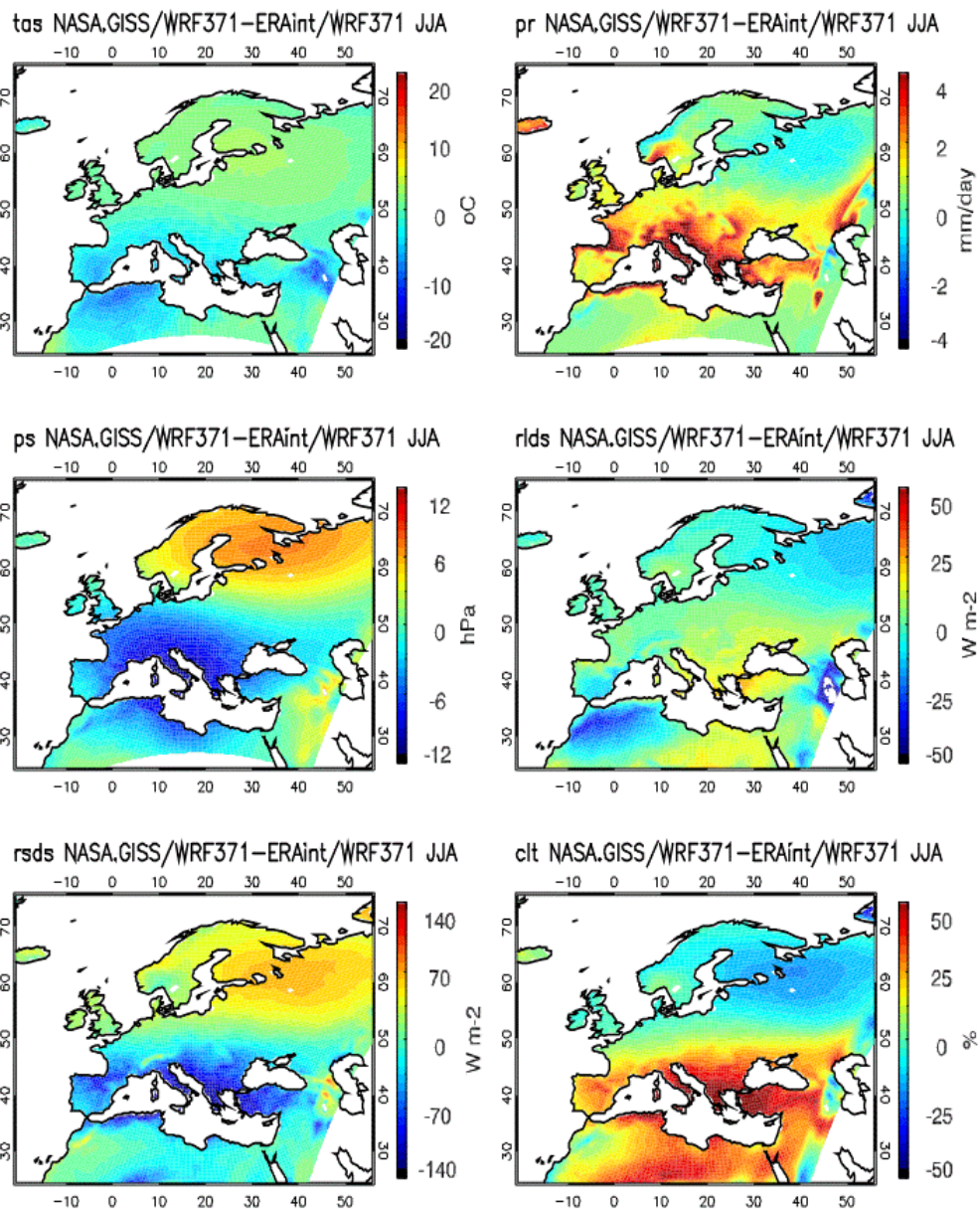
Επιπλέον, ξεκάθαρη είναι και το καλοκαίρι η σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης και του ποσοστού της νεφοκάλυψης (clt), αφού στη νότια Ευρώπη όπου το NASA GISS/WRF είναι υγρότερο, δίνει και μεγαλύτερο ποσοστό νεφοκάλυψης από το ERAint/WRF (με διαφορές έως $+50\%$).



Αντίθετα, στη βόρεια Ευρώπη οι διαφορές είναι αρνητικές, με τιμές έως -20%. Δηλαδή οι διαφορές στο ποσοστό της νεφοκάλυψης το καλοκαίρι, ιδίως στη νότια Ευρώπη, είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που παρατηρήθηκαν το χειμώνα.

Ακόμη πιο ξεκάθαρη σε σχέση με το χειμώνα είναι το καλοκαίρι η αρνητική συσχέτιση του ποσοστού νεφοκάλυψης και της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (rsds). Στη νότια Ευρώπη, η ακτινοβολία εμφανίζει διαφορές έως -90W/m^2 . Στην κεντρική Ευρώπη οι διαφορές είναι μηδενικές, ενώ στη βόρεια είναι θετικές, με τιμές έως $+70\text{W/m}^2$. Αντίστοιχα οι διαφορές της νεφοκάλυψης είναι θετικές στα νότια (έως +50%), στα κεντρικά μηδενίζονται και στα βόρεια εμφανίζονται αρνητικές, έως -20%. Έτσι, και στην ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (όπως παρατηρήθηκε και στη νεφοκάλυψη), οι διαφορές μεταξύ των NASA GISS/WRF και ERAint/WRF είναι πολύ εντονότερες κατά το καλοκαίρι απ' ότι το χειμώνα.

Σε γενικές γραμμές, το καλοκαίρι το WRF όταν οδηγείται από τα δεδομένα του GISS ModelE2 είναι πιο ψυχρό και πιο υγρό στη νότια Ευρώπη από ότι όταν οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim. Αντίθετα, στη βόρεια Ευρώπη είναι θερμότερο και ελάχιστα ξηρότερο. Δηλαδή η πορεία των διαφορών της βροχόπτωσης το καλοκαίρι είναι παρόμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε το χειμώνα, ενώ η θερμοκρασία διαφοροποιείται.



Σχήμα 4.6: Διαφορές όλων των μεταβλητών που μελετήθηκαν, μεταξύ του WRF που οδηγείται από δεδομένα του NASA GISS ModelE2 και του WRF που οδηγείται από δεδομένα ERA-Interim για το καλοκαίρι για το διάστημα 1990-2008.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης χρησιμοποιήθηκε το περιοχικό κλιματικό μοντέλο WRF. Μελετήθηκαν τα αποτελέσματα που αυτό δίνει σε δύο περιπτώσεις: όταν οδηγείται από το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE2 και όταν οδηγείται από δεδομένα επανάλυσης ERA-Interim. Τα αποτελέσματα αυτά αξιολογήθηκαν με παρατηρησιακά δεδομένα, τόσο επίγεια όσο και δορυφορικά. Μελετήθηκαν οι διαφορές μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής προέλευσης των αρχικών και οριακών συνθηκών και κατά πόσο αυτές επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Κατά την αξιολόγηση του μοντέλου βρέθηκε ότι αυτό υποεκτιμάει συστηματικά τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει με διεύθυνση προς τα κάτω στο έδαφος και στις δύο μελετώμενες περιπτώσεις οριακών συνθηκών. Μάλιστα, όταν αυτό οδηγείται από το παγκόσμιο μοντέλο η υποεκτίμηση είναι ελαφρώς πιο έντονη.

Η βροχόπτωση υπερεκτιμάται σχεδόν σε ολόκληρη την Ευρώπη (με κάποιες μεμονωμένες εξαιρέσεις) και για τις δύο προσομοιώσεις. Στο NASA GISS E2/WRF η υπερεκτίμηση είναι μεγαλύτερη απ' ό τι στο ERAint/WRF.

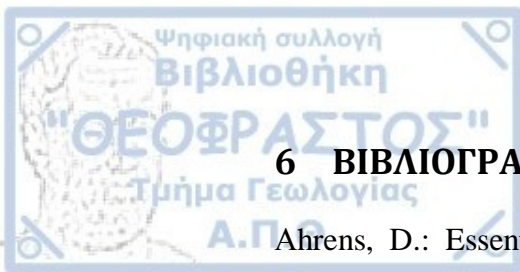
Κατά το χειμώνα και την άνοιξη, κυριαρχεί κατά κύριο λόγο η υπερεκτίμηση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος και για τις δύο προσομοιώσεις, όταν αυτό αξιολογείται από τα δεδομένα CLARA, με εξαίρεση ένα κομμάτι της βόρειας Ευρώπης κατά το χειμώνα, για το οποίο όμως υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα και στα δορυφορικά δεδομένα (σχετικές διαφορές μεταξύ των SARAH και CLARA έως -151.35%). Για το καλοκαίρι και το φθινόπωρο η κατάσταση είναι λιγότερο ξεκάθαρη, θα μπορούσε να ειπωθεί, όμως, ότι η υποεκτίμηση κυριαρχεί στα βόρεια, με εξαίρεση το καλοκαίρι για το NASA GISS/WRF που αξιολογείται με τα δεδομένα CLARA.

Το ERAint/WRF υπερεκτιμά το ποσοστό της νεφοκάλυψης στη βόρεια Ευρώπη και το υποεκτιμά ελαφρώς στη νότια. Το NASA GISS E2/WRF, όμως, εμφανίζει υπερεκτίμηση σε ολόκληρη την Ευρώπη για όλες τις εποχές και με μεγαλύτερες τιμές διαφορών απ' ό τι το ERAint/WRF.

Κατά τη μελέτη των δεδομένων που παρέχουν τις οριακές συνθήκες στο WRF προέκυψε ότι το χειμώνα το παγκόσμιο μοντέλο δίνει στα βόρεια υψηλότερες πιέσεις και χαμηλότερες θερμοκρασίες από τα δεδομένα επανάλυσης και στα νότια το αντίστροφο. Το μοτίβο αυτό εμφανίζεται στην πίεση στη μέση στάθμη θάλασσας που δίνουν τα δύο σετ δεδομένων και το καλοκαίρι, με μικρότερες, όμως, διαφορές. Αντίθετα, το NASA GISS ModelE2 δίνει θερμοκρασία η οποία το καλοκαίρι εμφανίζεται να είναι ελαφρώς υψηλότερη στα βόρεια και χαμηλότερη στα νότια από τα ERA-Interim. Πάντως, η θερμοκρασία το καλοκαίρι δεν εμφανίζει μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο σετ δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση φαίνεται η έντονη επίδραση των οριακών συνθηκών στα τελικά κλιματολογικά πεδία του περιοχικού μοντέλου, αφού τα μοτίβα που εμφανίζονται στη χωρική απεικόνιση των παραμέτρων των δεδομένων επανάλυσης και το παγκόσμιου μοντέλου εμφανίζονται και στην απεικόνιση των αντίστοιχων παραμέτρων από το περιοχικό μοντέλο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτει ότι τα αποτελέσματα που δίνει το WRF επηρεάζονται από τα πεδία τα οποία το οδηγούν. Όταν το περιοχικό μοντέλο οδηγείται από δεδομένα επανάλυσης δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με όταν οδηγείται από δεδομένα άλλου μοντέλου (παγκόσμιου). Αυτό ήταν αναμενόμενο, άλλωστε, αφού τα δεδομένα επανάλυσης είναι διορθωμένα με παρατηρησιακά δεδομένα με μεθόδους αφομοίωσης (data assimilation). Αντίθετα, πιθανά λάθη του παγκόσμιου μοντέλου μεταφέρονται και «επιβαρύνουν» και την απόδοση του περιοχικού μοντέλου. Έτσι, συνήθως για να γίνει η αξιολόγηση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων χρησιμοποιούνται συνθήκες που προέρχονται από δεδομένα επανάλυσης, για να είναι πιο ευδιάκριτες οι αστοχίες του ίδιου του περιοχικού μοντέλου.

Μελλοντικά, η έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί στη μελέτη και των υπόλοιπων παραμέτρων που αποτελούν τις αρχικές και οριακές συνθήκες και στο πώς μπορεί να μειωθεί η μεταφορά των λαθών τους στα μοντέλα. Μεγάλη πρόκληση, σε κάθε περίπτωση, αποτελεί η εύρεση της προέλευσης των σφαλμάτων των μοντέλων και στο πώς είναι δυνατόν αυτά να αποφευχθούν.



6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahrens, D.: Essentials of Meteorology, Thomson Brooks/Cole, ISBN: 0-495-11558-4, 454 pp, 2005.

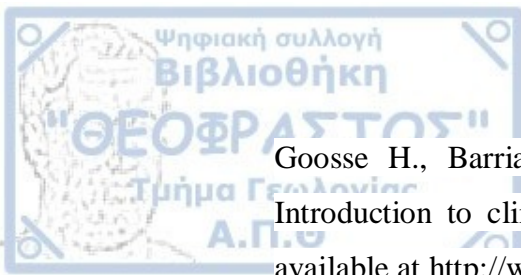
Chen, F., Mitchell, K., Schaake, J., Xue, Y., Pan, H., Koren, V., Duan, Y., Ek, M. and Betts, A.: Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, 101, 7251-7268, 1996.

Christensen, J. H. and Christensen, O. B.: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Clim. Change*, 81, 7–30, doi:10.1007/s10584-006-9210-7, 2007.

Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H.: Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen*, 100: 32–74, doi:10.1007/BF01448839, 1928.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, a. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. a., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, a. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, a. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, a. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N. and Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137(656), 553-597, doi:10.1002/qj.828, 2011.

Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, J., Hulme, M., von Storch, H., Whetton, P., Jones, R., Mearns, L., Fu, C.: Regional Climate Information – Evaluation and Projections. Chapter 10, IPCC 2001, 2001.



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

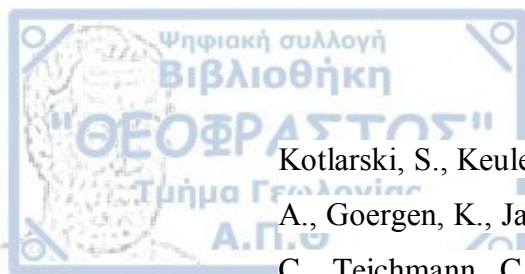
Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D. and New, M.: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201, 2008.

Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A. and Collins, W. D.: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *J. Geophys. Res.*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944, 2008.

Im, E. S., Coppola, E., Giorgi, F., Bi, X.: Validation of a high resolution regional climate model for the Alpine region and effects of a subgrid-scale topography and land use representation. *J Clim* 23: 1854–1873, DOI: 10.1175/2009JCLI3262.1, 2010.

Karlsson, K.G., Riihelä, A., Müller, R., Meirink, J. F., Sedlar, J., Stengel, M., Lockhoff, M., Trentmann, J., Kaspar, F., Hollmann, R., Wolters, E.: CLARA-A1: CM SAF cLouds, Albedo and Radiation dataset from AVHRR data - Edition 1 - Monthly Means / Daily Means / Pentad Means / Monthly Histograms. Satellite Application Facility on Climate Monitoring. doi:10.5676/EUM_SAF_CM/CLARA_AVHRR/V001, 2012.

Katragkou, E., García-Díez, M., Vautard, R., Sobolowski, S., Zanis, P., Alexandri, G., Cardoso, R. M., Colette, A., Fernandez, J., Gobiet, A., Goergen, K., Karacostas, T., Knist, S., Mayer, S., Soares, P. M. M., Pytharoulis, I., Tegoulis, I., Tsikerdekis, A., and Jacob, D.: Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble *Geosci. Model Dev.*, 8, 603–618, 2015.



Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., and Wulfmeyer, V.: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EUROCORDEX RCM ensemble, *Geosci. Model Dev.*, 7, 1297–1333, doi:10.5194/gmd-7-1297-2014, 2014.

Lim, K.-S. S., and Hong, S.-Y.: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models, *Monthly Weather Review*, vol. 138, pp. 1587–1612, doi: 10.1175/2009MWR2968.1, 2010.

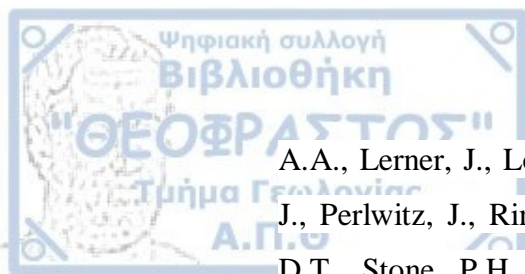
Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Cremer, R., Trentmann, J., Hollmann, R.: Surface Solar Radiation Data Set - Heliosat (SARAH) - Edition 1. Satellite Application Facility on Climate Monitoring, doi:10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V001, 2015.

Neelin, D.: *Climate Change and Climate Modeling*, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-60243-3, 298 pp, 2011.

Ohmura, A. , Dutton, E., Forgan, B., Fröhlich, C., Gilgen, H., Hegner, H., Heimo, A., König-Langlo, G., Mcarthur, B., Müller, G., Philipona, R., Pinker, R., Whitlock, C. H., and Wild, M.: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WRMC), a new precision radiometry for climate research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2115 – 2136, doi:10.1175/1520-0477(1998)0792.0.CO;2, 1998.

Pielke, R. A.: *Mesoscale Meteorological Modeling*, Academic Press, ISBN: 0125547668, 676 pp, 2002.

Schmidt, G., Ruedy, R., Hansen, J.E., Aleinov, I., Bell, N., Bauer, M., Bauer, S., Cairns, B., Canuto, V., Cheng, Y., Del Genio, A., Faluvegi, G., Friend, A.D., Hall, T.M., Hu, Y., Kelley, M., Kiang, N.Y., Koch, D., Lacis,



A.A., Lerner, J., Lo, K.K., Miller, R.L., Nazarenko, L., Oinas, V., Perlwitz J., Perlwitz, J., Rind, D., Romanou, A., Russell, G.L., Sato, M., Shindell, D.T., Stone, P.H., Sun, S., Tausnev, N., Thresher, D., and Yao, M-S.: Present-day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in situ, satellite, and reanalysis data, *J. Climate*, 19, 153–192, doi:10.1175/JCLI3612.1, 2006.

Pytharoulis, I., Tegoulas, I., Kotsopoulos, S., Bampzelis, D., Karacostas, T., Katragkou, E.: Evaluation of the operational numerical weather predictions of the WaveForUs project. In: Proc. 12th Int. Conf. of Meteorology, Climatology and Physics of the Atmosphere. Heraklion, Greece, 28-31 May, 96-101, 2014.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G.: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH, 2008.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A.: A summary of the CMIP5 experiment design. *PCDMI Rep.*, 33 pp, 2009.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A.: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1, 2012.

Zanis P., Katragkou, E., Ntogras, C., Marougianni, G., Tsikerdekis, A., Feidas, H., Anadranistakis, E., Melas, D.: Transient high-resolution regional climate simulation for Greece over the period 1960–2100: evaluation and future projections, *Climate Research*, 64: 123–140, doi: 10.3354/cr01304, 2015.

Παυλίδης, Β.: Αξιολόγηση κλιματικών προσομοιώσεων κλιματικών μοντέλων για την περιοχή της Ευρώπης για την περίοδο 1990-2008,



Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 154 σελ., 2015.

Τολικά, Κ.: Εκτιμώμενες κλιματικές αλλαγές στον ελληνικό χώρο κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα με τη χρήση κλιματικών μοντέλων, Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 312 σελ., 2005.

Φείδας, Χ., Καρτάλης, Κ.: Σημειώσεις του μαθήματος Δορυφορική Μετεωρολογία – Κλιματολογία, 96 σελ., 2003.

Ιστοσελίδες

<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>

<http://www.ecad.eu>

<http://www.esa.int>

<http://www.eumetcal.org>

<http://www.eumetsat.int>

<http://www.meted.ucar.edu>

<http://www.noaa.gov>

<http://www.wrf-model.org>