

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ WRF

ΕΛΙΟ ΣΙΔΕΡΗΣ

A.E.M.: 1441

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ρ.Ε.Π. ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΟΖΑΝΗ 2016

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ WRF» σκοπό έχει την προσομοίωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας υπό το πρίσμα του σεναρίου RCP4.5 του Διακυβερνητικού Οργανισμού για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change –IPCC). Πρόκειται για μια περιοχή μεγάλου αγροτικού και ενεργειακού ενδιαφέροντος, ιδιότητες που καθιστούν ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μελλοντικές μεταβολές κλιματικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, το ύψος του οριακού στρώματος, κ.α., καθώς αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά την γεωργική απόδοση των εκτάσεων, την ικανότητα ενεργειακής παραγωγής αλλά και την ποιότητα του αέρα.

Πρωτεύοντα ρόλο στη συγγραφή της παρούσας διατριβής διαδραμάτισε το ελλειπές υπόβαθρο και η ανομοιογένεια, σε γνωστικό επίπεδο, στις ενδεχόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή. Μέσα από την διπλωματική αυτή εργασία επιχειρείται η παρουσίαση των βασικών αρχών που διέπουν το φαινόμενο αυτό, αλλά και η αναλυτική αποτύπωση, για πρώτη φορά, των επιπτώσεων του παγκόσμιου αυτού φαινομένου σε μια ζωτικής σημασίας από οικονομική άποψη περιοχή της Ελλάδας.

Το περιεχόμενο του παρόντος ταξινομείται σε 5 κεφάλαια, τα οποία σε γενικές γραμμές καλύπτουν την έννοια της κλιματικής αλλαγής, τις μεθόδους προσομοίωσης και επεξεργασίας κλιματικών και μετεωρολογικών παραμέτρων, καθώς και των μαθηματικών που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, τη μεθοδολογία χρήσης τους, τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής.

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο, θεωρώ σκόπιμο να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Διότι παραδίδοντας τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, καθώς μου έδωσε τη δυνατότητα να σπουδάσω παρά τις δύσκολες οικονομικές συγκυρίες της εποχής και επειδή πάντα μου παρείχε αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη στις επιλογές μου.

Επίσης, πρέπει να αποδωθούν ευχαριστίες στα πρόσωπα που αποτελούν το ανθρώπινο δυναμικό της σχολής, τα οποία με όρεξη και υπομονή μεταδίδουν τις γνώσεις και τις εμπειρίες τους στους φοιτητές.

Κλείνοντας, να ευχαριστήσω την διδάσκουσα κα. Ραφαέλλα Σωτηροπούλου, γιατί στάθηκε αρωγός πλάι μου και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση της Διπλωματικής Εργασίας και, τον κ. Ιωάννη Στεργίου για την καταλητική συμβολή και συμπαράστασή του καθ' όλη την διάρκεια, τόσο στο προγραμματιστικό όσο και στο υπολογιστικό μέρος της συγκεκριμένης εργασίας.

Κοζάνη, Νοέμβριος 2016

Σιδέρης Έλιο

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια ερευνητική δραστηριότητα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, η οποία εστιάζεται στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας. Η περιοχή αυτή, με έκταση 9.451 km² (7,16% της χώρας) και πληθυσμό 291.731 κατοίκους (2,58% της χώρας, Eurostat 2012) αποτελεί μια χωροταξική ενότητα με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά φυσικά γνωρίσματα, αναφορικά με τη συνύπαρξη ορεινών περιοχών και ομαλών εκτάσεων, το ποικιλόμορφο φυσικό περιβάλλον με τη πλούσια πανίδα και χλωρίδα και το μεγαλύτερο στη χώρα δυναμικό επιφανειακών υδάτων. Κυρίαρχη είναι η θέση της Δυτικής Μακεδονίας ως το ενεργειακό κέντρο της χώρας και η συμβολή της στη συνολική παραγωγή σε εθνικό επίπεδο (κατά το 2010-12 οι θερμικές και υδροηλεκτρικές μονάδες της Περιφέρειας συμμετείχαν με ποσοστό από 52% έως 55% στην συνολική παραγωγή στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Δεδομένης της σημασίας των κλιματικών παραμέτρων και των μεταβολών τους για την υπο εξέταση περιοχή, σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η εκτίμηση τους για το έτος 2050. Προκειμένου να εκτιμηθεί το κλίμα της περιοχής, υπό τις τρέχουσες αλλά και τις μελλοντικές συνθήκες, αρχικά, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του με τη χρήση του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου (Global Climate Model –GCM) NASA GISS ModelE. Η προσομοίωση κάλυπτε την περίοδο 1880 έως 2055. Ως περίοδος βάσης χρησιμοποιήθηκε το διάστημα 2006 – 2015 (τρέχουσες συνθήκες), ενώ ως περίοδος αναφοράς τα έτη 2046 – 2055 (μελλοντικές συνθήκες). Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το GCM δεν έχουν μεγάλη διακριτική ικανότητα, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία της δυναμικής μείωσης της κλίμακας (dynamical downscaling) με χρήση πολλαπλών διαδοχικών υποπεριοχών (nested domains) ώστε να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα των αποτελεσμάτων. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, αν και είναι ιδιαίτερα αυξημένων απαιτήσεων από άποψη υπολογιστικής ισχύος, αλλά και εξαιρετικά χρονοβόρα, κρίθηκε απαραίτητη για την εξαγωγή όσο το δυνατό πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF, για τις τρέχουσες και μελλοντικές συνθήκες, με σύγκριση των οποίων υπολογίστηκαν οι κλιματολογικές μεταβολές στις μετεωρολογικές παραμέτρους ενδιαφέροντος (θερμοκρασία, βροχόπτωση, ταχύτητα ανέμου κ.λπ). Καθώς τα αποτελέσματα του GCM και κατ’

επέκταση του μετεωρολογικού μοντέλου, αντικατοπτρίζουν την κλιματολογία της περιοχής και όχι την μετεωρολογία της, προκειμένου να γίνει ρεαλιστική αποτύπωση των μελλοντικών συνθηκών, το μετεωρολογικό μοντέλο εφαρμόστηκε εκ νέου στην περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση παρατηρούμενων τιμών για τα έτη 2006 – 2015. Ο συνδυασμός των κλιματολογικών μεταβολών, όπως αυτές προέκυψαν από την χρήση του μετεωρολογικού μοντέλου με τη χρήση πολλαπλών διαδοχικών υποπεριοχών, με τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μετεωρολογικού μοντέλου με χρήση των παρατηρούμενων τιμών, επέτρεψε την ρεαλιστική προβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων ενδιαφέροντος.

Στη συνέχεια, προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις στα αποτελέσματα από την χρήση των πολλαπλών υποπεριοχών με τη μέθοδο της δυναμικής μείωσης της κλίμακας, αλλά και να εξακριβωθεί το αν είναι τελικά αναγκαία η χρήση τόσο μεγάλης υπολογιστικής ισχύος για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου, επιλέχθηκε ως βάση η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται η ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου και με προβολή της στα εκάστοτε κελιά όλων των 4 διαδοχικών υποπεριοχών, έγινε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Abstract

This thesis presents a research activity of the Mechanical Engineering Department of the University of Western Macedonia, which focuses on the region of Western Macedonia. This region, with an area of 9.451 km² (7,16% of the country) and a population of 291 731 inhabitants (2.58% of the country, Eurostat 2012) is a territorial unit with special characteristics physical traits, regarding coexistence of mountain areas and smooth areas with diverse natural surroundings, rich fauna and flora and the largest surface water resources in the country. Western Macedonia has a dominant role, being the energy center of the country and contributing to the overall production nationwide (during 2010-12 the thermal and hydropower plants of the Region contributed from 52% to 55% to the total production of the interconnected system).

Given the importance of climatic parameters and their changes for the area of concern, the aim of this study is their estimation for the year 2050. In order to assess the climate of the region, under current and future conditions, initially, a simulation with the use of the global climate model (Global climate model -GCM) NASA GISS ModelE was conducted. The simulation covered the period 1880 to 2055. The period 2006-2015 was used as a base period (current conditions), while the reference period was 2046-2055 (future conditions). Since the GCM's output has a coarse resolution, the methodology of dynamical downscaling was followed, using multiple consecutive sub regions (nested domains) to increase the output's resolution. This methodology, although it is particularly demanding in terms of computing power and also extremely time consuming, was necessary so as to extract much more reliable results. For this purpose, the mesoscale meteorological model WRF was used, with current and future conditions, and by comparison, the climatic changes of the meteorological parameters of interest (temperature, rainfall, wind speed, etc.) were calculated. As the GCM's and the meteorological model's results reflect the climatology of the area and not the meteorology, in order to have a realistic depiction of future conditions, the meteorological model was reapplied to the area of interest using the observed values of the period 2006 - 2015. The combination of climate change, as it was estimated from the use of the meteorological model using multiple nested domains, and the results

from the simulation of the meteorological model using the observed values, provides a realistic future projection of the meteorological parameters of interest.

The methodology used and the results of the simulations are presented in detail below.

Περιεχόμενα	
Πρόλογος	3
Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη	5
Abstract	7
Κεφάλαιο 1-Κλιματική αλλαγή και κλιματικά μοντέλα.....	12
1.1 Κλίμα και Κλιματική Αλλαγή	12
1.1.1 Ορισμός.....	12
1.1.2 Αίτια.....	13
1.1.3 Επιπτώσεις	17
1.2 Κλιματικά Μοντέλα	20
1.2.1 Τύποι κλιματικών μοντέλων	24
1.2.2 Υποβιβασμός κλίμακας και περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs).....	25
1.2.3 Αξιολόγηση κλιματικών μοντέλων.....	28
1.3 Σενάρια εκπομπών RCP	29
1.4 Η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στον ελλαδικό χώρο	30
Κεφάλαιο 2-NASA GISS GCM ModelE και WRF	33
2.1 Μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS GCM ModelE	33
2.1.1 Εισαγωγή	33
2.1.2 Φιλοσοφία μοντέλου	33
2.1.3 Φυσική του μοντέλου.....	34
2.1.4 Διαμόρφωση του μοντέλου	35
2.1.5 Σύνθεση της ατμόσφαιρας	37
2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF.....	37
2.2.1 Πρόγραμμα geogrid.....	40
2.2.2 Πρόγραμμα ungrib.....	41
2.2.3 Πρόγραμμα metgrid.....	41
2.2.4 Εξισώσεις του μετεωρολογικού μοντέλου WRF	42
2.2.5 Επιλογές του μοντέλου WRF.....	43
Κεφάλαιο 3- Μεθοδολογία προσομοίωσης	47
3.1 Επιλογή των κατάλληλων περιοχών και η συγκέντρωση δεδομένων	47
3.2 Προσομοίωση κλιματικών και μετεωρολογικών δεδομένων	49
Κεφάλαιο 4- Παρουσίαση αποτελεσμάτων	52

4.1 Θερμοκρασία εδάφους.....	52
4.2 Πλανητικό οριακό στρώμα.....	61
4.3 Ταχύτητα και φορά ανέμου.....	69
4.4 Βροχόπτωση.....	71
Κεφάλαιο 5- Συμπεράσματα- Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία.....	75
Βιβλιογραφία.....	77
Ιστοσελίδες.....	79

Κεφάλαιο 1-Κλιματική αλλαγή και κλιματικά μοντέλα

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, τα αίτια και οι επιπτώσεις του. Ακόμη γίνεται αναφορά στα κλιματικά μοντέλα, τα μόνα εργαλεία που έχει μέχρι σήμερα η επιστημονική κοινότητα στα χέρια της για την εκτίμηση των κλιματικών μεταβολών, στους βασικούς τύπους κλιματικών μοντέλων και στο πως είναι δυνατή η χρήση των αποτελεσμάτων ενός παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου σε μια μικρή περιοχή μέσω της μεθοδολογίας δυναμικής μείωσης (ή δυναμικού υποβιβασμού) κλίμακας.

1.1 Κλίμα και Κλιματική Αλλαγή

1.1.1 Ορισμός

Κλίμα είναι η σύνθεση των στοιχείων του καιρού, των διαφόρων δηλαδή μετεωρολογικών στοιχείων που προκύπτουν έπειτα από μακροχρόνιες παρατηρήσεις (Ahrens C.D.). Το κλίμα αποτελεί την μέση καιρική κατάσταση, το μέσο καιρό. Ορίζεται από το σύνολο των στατιστικών πληροφοριών οι οποίες περιγράφουν τις μεταβολές του καιρού σε μια περιοχή για ένα συγκεκριμένο μεγάλο χρονικό διάστημα (Ahrens C.D.).

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες, τόσο φυσικοί όσο και ανθρωπογενείς, οι οποίοι καθορίζουν το κλίμα της γης. Οι κύριοι παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα μιας περιοχής είναι οι εξής (Ahrens C.D.):

- Η ηλιακή ακτινοβολία και το γεωγραφικό πλάτος του τόπου
- Γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας
- Η κατανομή ξηρών και θαλασσών
- Το γήινο ανάγλυφο
- Η φύση και η κατάσταση του εδάφους
- Τα θαλάσσια ρεύματα

Λόγω της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων το κλίμα της γης δεν είναι ομοιόμορφο αλλά χωρίζεται σε κλιματικές περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά.

Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο παράγοντας που στην ουσία παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην διαμόρφωση του κλίματος. Το σύστημα γης και

ατμόσφαιρας βρίσκεται σε μια ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας. Η λεπτή αυτή ισορροπία προσδιορίζει και το παγκόσμιο κλίμα. Αν για κάποιο λόγο η ισορροπία αυτή διαταραχθεί, το κλίμα του πλανήτη είναι πιθανό να υποστεί μια σειρά μεταβολών (κλιματική αλλαγή).

Η κλιματική αλλαγή είναι μια αλλαγή στη στατιστική κατανομή των καιρικών συνθηκών, όταν η αλλαγή διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (δηλαδή, δεκαετίες εκατομμύρια χρόνια) (United Nations, 1992). Η κλιματική αλλαγή μπορεί να αναφέρεται στην αλλαγή σε μέσες καιρικές συνθήκες, ή στη χρονική μεταβολή του καιρού σε μακροπρόθεσμες μέσες συνθήκες (δηλαδή, περισσότερα ή λιγότερα ακραία καιρικά φαινόμενα). Η κλιματική αλλαγή προκαλείται από παράγοντες όπως βιοτικές διαδικασίες, διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνονται από τη Γη, τεκτονικών πλακών, και ηφαιστειακές εκρήξεις. Ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επίσης εντοπιστεί ως σημαντική αιτία της πρόσφατης αλλαγής του κλίματος, που συχνά αναφέρεται ως η υπερθέρμανση του πλανήτη. (United Nations, 1992).

Οι επιστήμονες εργάζονται ενεργά για να κατανοηθεί το παρελθόν και το μέλλον του κλίματος με τη χρήση παρατηρήσεων και αριθμητικών μοντέλων. Γενικά, τα μοντέλα κυκλοφορίας έχοντας ως βάση τις φυσικές επιστήμες, χρησιμοποιούνται συχνά σε θεωρητικές προσεγγίσεις αρχικά για την αποτύπωση με την μέγιστη ακρίβεια των κλιματικών δεδομένων του παρελθόντος, και στη συνέχεια για να κάνουν κάνουν μελλοντικές προβλέψεις. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούν μια σύνδεση ανάμεσα στις αιτίες και στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

1.1.2 Αίτια

Στην ευρύτερη κλίμακα, ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια λαμβάνεται από τον Ήλιο και ο ρυθμός με τον οποίο χάνεται στο διάστημα προσδιορίζει τη θερμοκρασία ισορροπίας και το κλίμα της Γης (Ahrens C.D). Αυτή η ενέργεια διανέμεται σε όλο τον κόσμο από τους ανέμους, τα ωκεάνια ρεύματα και άλλους μηχανισμούς που επηρεάζουν τα κλίματα των διαφόρων περιοχών (Ahrens C.D).

Οι παράγοντες που μπορούν να διαμορφώσουν το κλίμα ονομάζονται κλιματικές επιδράσεις ή «εξαναγκαστικοί μηχανισμοί» (forcing mechanisms) (USA EPA). Αυτοί περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως διακυμάνσεις στην ηλιακή ακτινοβολία,

μεταβολές της τροχιάς της Γης, παραλλαγές στην ανακλαστικότητα των ηπείρων και των ωκεανών, την δημιουργία βουνών και ηπείρων και αλλαγές στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου. Υπάρχει μια ποικιλία των ανατροφοδοτήσεων στη κλιματική αλλαγή που μπορεί είτε να ενισχύσει είτε να μειώσει τον αρχικό εξαναγκασμό. Μερικά μέρη του κλιματικού συστήματος, όπως οι ωκεανοί και οι πάγοι, ανταποκρίνονται πιο αργά στις κλιματικές επιδράσεις και στις μεταβολές τους, ενώ άλλα ανταποκρίνονται πιο γρήγορα. Υπάρχουν επίσης βασικοί παράγοντες που αν γίνει υπέρβαση συγκεκριμένου ορίου, μπορεί να γίνει πολύ απότομη αλλαγή.

Οι εξαναγκαστικοί μηχανισμοί μπορεί να είναι είτε «εσωτερικοί» (internal) είτε «εξωτερικοί» (external). Εσωτερικοί εξαναγκαστικοί μηχανισμοί είναι οι φυσικές διεργασίες εντός του ίδιου του κλιματικού συστήματος (π.χ., η κυκλοφορία της θερμότητας). Εξωτερικοί εξαναγκασμένοι μηχανισμοί μπορούν να είναι είτε φυσικοί (π.χ., μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία) είτε ανθρωπογενείς (π.χ., αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου).

Είτε ο αρχικός εξαναγκασμένος μηχανισμός είναι εσωτερικός ή εξωτερικός, η απόκριση του κλιματικού συστήματος μπορεί να είναι γρήγορη (π.χ., μια ξαφνική ψύξη λόγω αερομεταφερόμενης ηφαιστειακής τέφρας που αντανακλούν το φως του ήλιου), αργή (π.χ. θερμική διαστολή του ζεστού νερού ωκεανών), ή ένας συνδυασμός (π.χ. ξαφνική απώλεια της ανακλαστικής ικανότητας (albedo) στον αρκτικό ωκεανό, καθώς λιώνει ο θαλάσσιος πάγος, που ακολουθείται από μια πιο σταδιακή θερμική διαστολή του νερού). Ως εκ τούτου, το κλιματικό σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί απότομα. Από την άλλη, η πλήρης απόκριση των εξαναγκαστικών μηχανισμών θα μπορούσε να μην αναπτυχθεί πλήρως για αιώνες ή και περισσότερο (USA EPA).

Όσον αφορά στους εσωτερικούς εξαναγκαστικούς μηχανισμούς, οι επιστήμονες γενικά καθορίζουν τις πέντε συνιστώσες του κλιματικού συστήματος της Γης για να συμπεριλάβει την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα, την κρυόσφαιρα, την λιθόσφαιρα (περιορίζεται στα επιφανειακά εδάφη, πετρώματα και ιζήματα), και τη βιόσφαιρα (USA EPA). Φυσικές αλλαγές στο κλιματικό σύστημα ("εσωτερικός εξαναγκασμός") έχει ως αποτέλεσμα την εσωτερική "μεταβλητότητα του κλίματος". Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν τον τύπο και την κατανομή των ειδών, καθώς και αλλαγές στα ωκεάνια ρεύματα (USA EPA).

Ο ωκεανός είναι ένα βασικό μέρος του κλιματικού συστήματος, στον οποίο οι αλλαγές συμβαίνουν σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα απ' ό τι στην ατμόσφαιρα, καθώς διαθέτει εκατοντάδες φορές περισσότερη μάζα και, συνεπώς, πολύ υψηλή θερμική αδράνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα βάθη των ωκεανών να εξακολουθούν να υστερούν σήμερα στη ρύθμιση της θερμοκρασίας από τις επιπτώσεις της μικρής εποχής των παγετώνων των περασμένων αιώνων.

Βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις (από χρόνια σε λίγες δεκαετίες), όπως η νότια ταλάντωση του Ελ Νίνιο, η δεκαετής ταλάντωση του Ειρηνικού, η ταλάντωση του Βόρειου Ατλαντικού, και η ταλάντωση της Αρκτικής, αντιπροσωπεύουν μεταβλητότητα του κλίματος και όχι αλλαγή του κλίματος. Σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, η μετατροπές στις διεργασίες των ωκεανών, όπως η κυκλοφορία της θερμότητας διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην ανακατανομή της θερμότητας από τη διεξαγωγή μιας πολύ αργής και εξαιρετικά βαθιάς κίνησης του νερού και της μακροπρόθεσμης ανακατανομής της θερμότητας στους ωκεανούς του κόσμου (USA EPA).

Η βιόσφαιρα επηρεάζει το κλίμα μέσω του ρόλου της στους κύκλους του άνθρακα και του νερού και μέσω μηχανισμών όπως η ανακλαστική ικανότητα (albedo), η εξατμισοδιαπνοή, ο σχηματισμός νεφών, και η αποσάρθρωση. Παραδείγματα του πώς η βιόσφαιρα μπορεί να έχει επηρεάσει το κλιματικό παρελθόν περιλαμβάνουν:

- παγετώνες 2.300.000.000 χρόνων, οι οποίοι προκλήθηκαν από την εξέλιξη της φωτοσύνθεσης, η οποία κατανάλωσε όλο το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και εισήγαγε ελεύθερο οξυγόνο.
- άλλοι παγετώνες 300.000.000 χρόνια πριν με ένασμα την μακροπρόθεσμη ταφή των αποσυνθετούμενων-ανθεκτικών κατάλοιπων των φυτών (δημιουργώντας μια δεξαμενή άνθρακα και σχηματίζοντας άνθρακα)
- τον τερματισμό της Paleocene–Eocene Thermal Maximum πριν 55 εκατομμύρια χρόνια από την άνθηση θαλάσσιου φυτοπλακτόν
- την αντιστροφή της υπερθέρμανσης του πλανήτη 49 εκατομμύρια χρόνια πριν, διάρκειας 800 χιλιάδων ετών λόγω της αρκτικής άνθισης Azolla

- την παγκόσμια ψύξη κατά τα τελευταία 40 εκατομμύρια χρόνια που οφείλεται στην επέκταση οικοσυστημάτων grass-Grazer

Με βάση τους εξωτερικούς εξαναγκαστικούς μηχανισμούς, οι μικρές διακυμάνσεις στην τροχιά της Γης οδηγούν σε αλλαγές στην εποχιακή κατανομή του ηλιακού φωτός που φθάνει στην επιφάνεια της Γης και διανέμεται σε όλη την υδρόγειο.

Αν και γενικά παρατηρείται μικρή αλλαγή ετησίως στην μέση ηλιοφάνεια μιας ευρείας περιοχής, μπορεί να υπάρχουν ισχυρές αλλαγές στη γεωγραφική και εποχιακή κατανομή της. Οι τρεις τύποι των τροχιακών μεταβολών είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων της εκκεντρότητας της Γης, των αλλαγών στην κλίση του άξονα περιστροφής της Γης, και της μετάπτωσης του άξονα του πλανήτη. Συνδυαζόμενοι, αυτοί οι τύποι μεταβολών παράγουν μεταβλητές γνωστές ως κύκλους Μιλάνκοβιτς που έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο κλίμα, ενώ είναι αξιοσημείωτη η συσχέτισή τους με περιόδους εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών, με την υποχώρηση της έκτασης των ερήμων με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Σαχάρα, και για την εμφάνισή τους στη στρωματογραφική καταγραφή.

Άλλο ένα σοβαρό αίτιο της κλιματικής αλλαγής αποτελούν οι ηφαιστιακές εκρήξεις. Οι εκρήξεις θεωρούνται ότι είναι αρκετά μεγάλες ώστε να επηρεάζουν το κλίμα της Γης με κλίμακα άνω του 1 έτους και είναι αυτές που συνεισφέρουν πάνω από 100.000 τόνους SO₂ στη στρατόσφαιρα. Αυτό οφείλεται στις οπτικές ιδιότητες του SO₂ και στα θειικά αερολύματα, τα οποία σε μεγάλο βαθμό απορροφούν ή σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργώντας ένα παγκόσμιο στρώμα ομίχλης θειικού οξέος. Κατά μέσο όρο, τέτοιες εκρήξεις συμβαίνουν αρκετές φορές ανά αιώνα, και προκαλούν ψύξη (εμποδίζοντας την μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης) για μια περίοδο λίγων χρόνων. Μικρές εκρήξεις, με εκπομπές λιγότερο από 0.1 μεγατόνους διοξειδίου του θείου στη στρατόσφαιρα, επηρεάζουν σε μικρό βαθμό την ατμόσφαιρα, καθώς οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι συγκρίσιμες με αυτές της φυσικής μεταβλητότητας. Ωστόσο, επειδή οι μικρότερες εκρήξεις συμβαίνουν σε πολύ μεγαλύτερη συχνότητα, έχουν σημαντική επίπτωση στην ατμόσφαιρα της Γης.

Κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ετών, η κίνηση των τεκτονικών πλακών αναδιαμορφώνει τη Γη και τους ωκεανούς και τροποποιεί τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό βαθμό το κλίμα και την κυκλοφορία των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Η θέση των ηπείρων καθορίζει τη γεωμετρία των ωκεανών και επομένως επηρεάζει τα πρότυπα της ωκεάνιας κυκλοφορίας. Οι θέσεις των θαλασσών είναι σημαντικές ως προς τον έλεγχο της μεταφοράς της θερμότητας και της υγρασίας σε όλη την υδρόγειο, και, έχει ως αποτέλεσμα, τον προσδιορισμό του παγκόσμιου κλίματος.

Τέλος, στο πλαίσιο της μεταβολής του κλίματος, οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζουν το κλίμα. Η επιστημονική συναίνεση για την κλιματική αλλαγή είναι ότι το κλίμα αλλάζει, οι αλλαγές αυτές σε μεγάλο βαθμό προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες, και πως οι αλλαγές αυτές είναι σε μεγάλο βαθμό μη αναστρέψιμες. Η μεγαλύτερη ανησυχία από τις επιπτώσεις των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο κλίμα είναι η αύξηση των επιπέδων CO₂ λόγω των εκπομπών από την καύση ορυκτών καυσίμων, από αεrolύματα (τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα) και το CO₂ που απελευθερώνεται από την παραγωγή τσιμέντου. Άλλοι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των χρήσεων γης, είναι η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος στην στρατόσφαιρα, η κτηνοτροφία και η αποψίλωση των δασών που επηρεάζουν το κλίμα, και το μικροκλίμα.

1.1.3 Επιπτώσεις

Η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στο σύνολο της οικονομίας και στο φυσικό περιβάλλον είναι πλέον επιστημονικά ακλόνητες. Απειλούν, δε, όλους τους τομείς της ανθρώπινης ζωής αλλά και την επιβίωση όλων των ζωντανών οργανισμών στον πλανήτη, από τους κοραλλιογενείς υφάλους ως την Αρκτική. Ήδη παρατηρούνται σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και στους ανθρώπινους πληθυσμούς – όπως η τήξη των θαλάσσιων πάγων στην Αρκτική – ακόμα και με τη σημερινή αύξηση της θερμοκρασίας στους 0,8 °C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις σοβαρές και ζημιογόνες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής σε όλο τον κόσμο, σύμφωνα με τις εκθέσεις του ΟΗΕ.

Η κλιματική αλλαγή, όπως αυτή εκτιμάται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφόρων κλιματικών μοντέλων με χρήση ευρέως αποδεκτών

σεναρίων μελλοντικών εκπομπών (σενάρια IPCC, SRES και RCPs) φαίνεται πως είναι εξωφρενικά ακριβή υπόθεση. Καταστροφή περιουσιακών στοιχείων, βίαιοι εκτοπισμοί, ξηρασίες, εξαφανίσεις ειδών και πολλά αντίστοιχα φαινόμενα θα έχουν επιπρόσθετο κόστος για την παγκόσμια οικονομία. Μέχρι το 2030, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να κοστίσει στην παγκόσμια οικονομία 700.000.000.000 δολάρια ετησίως, σύμφωνα με τους ερευνητές.

Εκατοντάδες εκατομμύρια άνθρωποι θα εκτοπιστούν μέχρι το 2050. Όπως αναφέρει ο Αντόνιο Γκουτέρες, Υπάτος Αρμοστής του ΟΗΕ για τους Πρόσφυγες, το 2008, 36.000.000 άνθρωποι εκτοπίστηκαν λόγω φυσικών καταστροφών. Από αυτούς τους ανθρώπους, τουλάχιστον 20.000.000 εγκατέλειψαν τα σπίτια τους λόγω καταστροφών που σχετίζονταν με την αλλαγή του κλίματος, όπως η ξηρασία και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, δήλωσε ο Γκουτέρες. Ο Εσωτερικός Οργανισμός Μετανάστευσης υπολογίζει ότι 200.000.000 άνθρωποι μέχρι το 2050 θα αναγκαστούν να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους λόγω των περιβαλλοντικών αλλαγών.

Εξάπλωση δάγκειου πυρετού και ελονοσίας. Η θανατηφόρα λοιμώδης νόσος της ελονοσίας, στοίχισε 627.000 ζωές το 2012. Ωστόσο, η ταχύτερα αναπτυσσόμενη λοιμώδης νόσος στον κόσμο είναι ο δάγκειος πυρετός, με μια 30πλάσια αύξηση στην συχνότητα εμφάνισης της νόσου κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών, αναφέρει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας. Καθώς οι θερμοκρασίες σε πολλές περιοχές του πλανήτη ανεβαίνουν και τα μοτίβα των βροχοπτώσεων αλλάζουν εντείνοντας την υγρασία, τα χωροκατακτητικά κουνούπια (*invasive mosquito species*) που μεταφέρουν ασθένειες είναι πιθανόν να εξαπλώνονται σε ευρύτερες περιοχές και να βρίσκουν κατάλληλες συνθήκες για την εγκατατάστασή τους ενώ η διάρκεια ζωής και αναπαραγωγής τους μπορεί να διαρκεί και να ζουν περισσότερους μήνες το χρόνο, σύμφωνα με το Συμβούλιο Άμυνας των φυσικών πόρων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι η περιοχή της Μεσογείου θεωρείται μια από τις πλέον ευπαθείς περιοχές σε τέτοιου είδους φαινόμενα και για το λόγο αυτό έχουν χρηματοδοτηθεί προγράμματα που σκοπό έχουν την μελέτη της επέκτασης των περιοχών που είναι κατάλληλες για εγκατάσταση κουνουπιών – φορέων μεταδοτικών ασθενειών (π.χ Life- Conops).

Οι πυρκαγιές θα οκταπλασιαστούν μέχρι το 2100. Για κάθε ένα βαθμό Κελσίου που αυξάνεται η θερμοκρασία, η περιοχή που καίγεται από πυρκαγιές θα αυξηθεί κατά έναν παράγοντα δύο έως τέσσερα.

Ένα επιπλέον 8% του παγκόσμιου πληθυσμού θα βιώσει λειψυδρία μέχρι το 2100. Το 2013, περίπου, 1,3 δισεκατομμύρια άνθρωποι ζούσαν σε περιοχές με λειψυδρία. Οι ερευνητές υπολόγισαν ότι ένα επιπλέον 8% του πληθυσμού, θα εισέλθει σε κατάσταση «νέας ή επιβαρυντικής λειψυδρίας αποκλειστικά και μόνο λόγω της αλλαγής του κλίματος με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2 βαθμούς Κελσίου μέχρι το 2100».

Απειλούνται 136 από τα πιο ιστορικά μέρη του κόσμου. Αν η παγκόσμια θερμοκρασία αυξηθεί κατά ένα βαθμό Κελσίου, πάνω από 40 από τις τοποθεσίες παγκόσμιας κληρονομιάς θα βυθιστούν μέσα στα επόμενα 2.000 χρόνια, ενώ αν η θερμοκρασία αυξηθεί 3 βαθμούς Κελσίου, ο αριθμός αυτός ανέρχεται σε 136 θέσεις. Ιστορικά κέντρα πόλεων όπως η Βενετία, η Κωνσταντινούπολη, και η Αγία Πετρούπολη, είναι από τα πρώτα που επηρεάζονται (WWF COP21).

Κάποια μικρά νησιωτικά έθνη θα χαθούν. Νησιά με χαμηλό υψόμετρο στις τροπικές περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτα στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας. «Έχει προταθεί ότι η ίδια η ύπαρξη ορισμένων κρατών απειλείται από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας που συνδέεται με την υπερθέρμανση του πλανήτη», εξηγεί η IPCC (IPCC, 2007).

Το 100% των υφάλων απειλούνται με εξαφάνιση μέχρι το 2050. Η κλιματική αλλαγή δημιουργεί δυσμενείς συνθήκες για την επιβίωση των κοραλλιογενών υφάλων. Εάν οι παγκόσμιες και τοπικές απειλές για τους υφάλους συνεχιστούν, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, όλοι οι ύφαλοι είναι πιθανό να εξαφανιστούν μέχρι το 2050, σύμφωνα με ευρήματα του Ινστιτούτου Παγκόσμιων Πόρων (IPCC, 2007).

Η αύξηση της οξύτητας των ωκεανών που δημιουργείται από υψηλότερα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα σημαίνει λιγότερα ανθρακικά ιόντα, ένα βασικό συστατικό για την κατασκευή του σκελετού των κοραλλιών. Από την προβιομηχανική εποχή, τα επίπεδα ανθρακικών ιόντων των ωκεανών έχουν μειωθεί κατά 25% σύμφωνα με την έκθεση (IPCC, 2000).

Επιπλέον 20.000.000 περισσότερα παιδιά θα πεινάσουν μέχρι το 2050. Μια έκθεση από το Παγκόσμιο Πρόγραμμα Τροφίμων (World Food Programme, 2006) αναφέρει ότι αναμένονται ακραία καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, ξηρασίες,

πυρκαγιές δασών, και τροπικούς κυκλώνες που θα βλάψουν τα καλλιεργήσιμα εδάφη, απειλώντας την ασφάλεια των τροφίμων για εκατομμύρια ανθρώπους. Οι κλιματικές επιπτώσεις στην απόδοση των καλλιεργειών θα αυξήσουν τον αριθμό των υποσιτισμένων παιδιών κατά περίπου 11.000.000 στην Ασία, 10.000.000 στην Αφρική και 1.400.000 στις ΗΠΑ και τη Λατινική Αμερική, ανέφερε η έκθεση.

1.2 Κλιματικά Μοντέλα

Τα κλιματικά μοντέλα είναι τα πλέον προηγμένα εργαλεία που διατίθενται σήμερα για την προσομοίωση της απόκρισης του παγκόσμιου κλιματικού συστήματος στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, στο σύνολο των ανθρωπίνων διαστηριοτήτων, αλλά και στις φυσικές πλανητικές μεταβολές στο κλίμα. Τα αριθμητικά αυτά μοντέλα (μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ή GCMs), αναπαριστούν φυσικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς, την κρύοσφαιρα και την επιφάνεια της γης. Αν και απλούστερα μοντέλα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμιο ή περιφερειακό επίπεδο για την εκτίμηση της απόκρισης του κλίματος, μόνο τα GCMs, ενδεχομένως σε συνδυασμό με ένθετα περιφερειακά μοντέλα, έχουν την δυνατότητα να παρέχουν γεωγραφικά και φυσικά συνεπείς εκτιμήσεις των παραμέτρων της κλιματικής αλλαγής που απαιτούνται στην ανάλυση των επιπτώσεων. Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων ξεκίνησε την δεκαετία του '60 μετά την ανάπτυξη σχετικά ισχυρών σε επεξεργαστική ισχύ ηλεκτρονικών υπολογιστών (computers). Όλα σχεδόν τα σημερινά μοντέλα προέρχονται από την πρωτοποριακή δουλειά των S. Manabe και R. Weatherald του Γεωφυσικού Εργαστηρίου Ρευστοδυναμικής στην Washington (Gribbin, 1992). Αυτοί διατύπωσαν μια θεωρία σχετικά με την παγκόσμια ενεργειακή ισορροπία μεταξύ του ποσοστού της θερμότητας που φτάνει στην Γη από τον Ήλιο, του ποσοστού που ακτινοβολείται από το έδαφος, του ποσοστού που παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα και εκείνου που τελικά διαφεύγει στο διάστημα. Στην κατάσταση ισορροπίας το ποσοστό που φτάνει από τον Ήλιο και εκείνο που ακτινοβολείται στο διάστημα από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας είναι τα ίδια, οι ατμοσφαιρικές αναδράσεις όμως καθιστούν την επιφάνεια της Γης θερμότερη σε σχέση με το αν ο πλανήτης μας δεν είχε ατμόσφαιρα. Στην πρώτη τους μελέτη (1967) οι S. Manabe και R. Weatherald κατέληξαν ότι αν διπλασιαζόταν η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία θα αύξανε κατά 2° C. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σύγχρονα κλιματικά

μοντέλα που εφαρμόζονται με βάση τα ίδια χαρακτηριστικά του φαινομένου του θερμοκηπίου, που χρησιμοποιήθηκαν στη δεκαετία του 1960, δίνουν παρόμοιες προβλέψεις. Δίκαια λοιπόν ο S. Manabe αποκαλείται «παππούς των κλιματικών προσομοιώσεων» (Gribbin, 1992).

Τα χρησιμοποιούμενα σήμερα κλιματικά μοντέλα ποικίλουν σημαντικά ως προς τα δεδομένα που προσφέρουν, σχετιζόμενα άμεσα από τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε για να τα πραγματοποιήσει την προσομοίωση και από τα κλιματικά χαρακτηριστικά που μελετώνται (Gribbin, 1992). Για παράδειγμα, τα απλούστερα μοντέλα μπορούν να υπολογίσουν τη μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης από τις εξισώσεις που περιγράφουν την ισορροπία μεταξύ ανακλαστικότητας-λευκαύγειας της Γης, του ποσοστού της ηλιακής ενέργειας που φτάνει σε αυτήν και των μέσων ιδιοτήτων της ακτινοβολίας της γήινης ατμόσφαιρας, δηλαδή ποιες συχνότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απορροφά και ποιες αφήνει να διαφύγουν. Ένα τέτοιο μοντέλο ονομάζεται «αδιάστατο», επειδή η πραγματική θερμοκρασιακή κατανομή στην επιφάνεια της υψήλιου αντικαθίσταται από ένα μοναδικό αριθμό, τη μέση τιμή της, σαν η υψήλιος να συρρικνωνόταν σε ένα μοναδικό αδιάστατο σημείο. Τέτοιου είδους μοντέλα είναι απλά αλλά πολύ χρήσιμα. Ερμηνεύουν για παράδειγμα γιατί η επιφάνεια της Γης είναι θερμότερη από αυτήν της Σελήνης και δείχνουν πώς δρα το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου (Gribbin, 1992).

Από την άλλη μεριά, ένα τρισδιάστατο μοντέλο περιλαμβάνει ένα σετ αριθμών που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία δυο διαφορετικών σημείων όχι μόνο στην επιφάνεια της Γης σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και μήκη αλλά και σε ποικίλα ύψη στην ατμόσφαιρα. Τα περιπλοκότερα από αυτά τα μοντέλα είναι γνωστά ως GCM (General Circulation Models) ή Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας. Αν ένα GCM τροφοδοτηθεί από μια ακολουθία αριθμών που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία και σε άλλες φυσικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας πάνω σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα που καλύπτει όλη την υδρόγειο, θα υπολογιστεί πως θα μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου η συνολική κατανομή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου, του θαλάσσιου πάγου, της εδαφικής υγρασίας και άλλων κλιματικών μεταβλητών. Φυσικά όλα αυτά απαιτούν πολύ ισχυρούς ηλεκτρονικούς

υπολογιστές, συνήθως με πολλούς επεξεργαστές και δυνατότητες παράλληλου προγραμματισμού, αλλά και πολύ χρόνο.

Τα πιο βελτιωμένα από αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν όχι μόνο την αλληλεπίδραση ενός ή περισσότερων θερμοκηπικών αερίων με το γήινο κλίμα αλλά και το πώς οι κλιματικές αλλαγές που θα προκύψουν από το καθένα από αυτά μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωση των υπολοίπων και μέσω αυτής εκ νέου το κλίμα της Γης (φαινόμενο της ανάδρασης). Το πιο γνωστό από αυτά τα φαινόμενα είναι η θετική συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικών υδρατμών (Gribbin, 1992). Αύξηση στη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα οδηγεί σε θέρμανση της κατώτερης τροπόσφαιρας και ενίσχυση της εξάτμισης υδρατμών από τις μεγάλες ωκεάνιες επιφάνειες. Όμως οι υδρατμοί αποτελούν το ισχυρότερο αέριο του θερμοκηπίου, οπότε ενίσχυση της συγκέντρωσής τους προκαλεί επιπλέον θέρμανση και εξατμίσεις κ.ο.κ. Σε μερικά από τα πρώτα κλιματικά μοντέλα, αυτοί, το φαινόμενο το αγνοούσαν ή το συμπεριλάμβαναν εκ των υστέρων στα αρχικά αποτελέσματα. Στον πραγματικό κόσμο όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, αφού ακριβέστερες προσομοιώσεις δείχνουν ότι με τη βοήθειά του το φαινόμενο του θερμοκηπίου εξαιτίας του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται τρεις φορές ισχυρότερο.

Υπάρχουν και άλλες αναδράσεις που μπορούν να συμπεριληφθούν (Gribbin, 1992). Για παράδειγμα ο θαλάσσιος πάγος που καλύπτεται από χιόνι λειτουργεί όπως ένας πολύ καλός καθρέφτης και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ανακλά άφθονη εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, ιδιαίτερα το χειμώνα. Η ανοιχτή θάλασσα απορροφά περίπου διπλάσια εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια σε σχέση με τον πάγο. Μερικά GCMs συμπεριλαμβάνουν στους υπολογισμούς τους και τις επιπτώσεις από την αυξημένη τήξη του θαλάσσιου πάγου εξαιτίας της ανόδου της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, όπως αυτή προβλέπεται από την άμεση ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, έστω και αν λειτουργεί σε μια σχετικά περιορισμένη περιοχή στη Γη.

Μερικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους και τις μεταβολές στη νεφοκάλυψη. Τα νέφη παίζουν διπλό ρόλο στον καθορισμό της θερμικής ισορροπίας της υδρογείου. Από τη μια ανακλούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ενώ ορισμένα είδη τους μπορούν να παγιδεύσουν ισχυρά την υπέρυθη ακτινοβολία συμβάλλοντας στη θέρμανση της τροπόσφαιρας. Τα GCMs δεν τα καταφέρνουν καλά με τα νέφη, ίσως και

γιατί ακόμα δεν κατανοούμε ικανοποιητικά το ρόλο τους, πράγμα που για αρκετούς ερευνητές (Βαρώτσος, 2001) αποτελεί την «Αχίλλειο πτέρνα» τους.

Μέχρι τα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας, τα GCMs δεν αποτελούσαν παρά μόνο έναν πολύ γενικό οδηγό. Δεν μπορούσαν να φανερώσουν με λεπτομέρειες το τι θα συμβεί στο εσωτερικό καθενός παραλληλεπίπεδου «κουτιού» στα οποία υποδιαιρούσε το μοντέλο την υφήλιο (με τη βοήθεια του τρισδιάστατου πλέγματος για το οποίο έγινε λόγος πριν), ενώ πολλές χώρες είχαν έκταση μικρότερη απ το εμβαδό της επιφάνειας ενός από αυτά τα νοητά «κουτιά». Παράλληλα, σημαντικά κλιματικά φαινόμενα όπως τα νέφη ήταν πολύ μικρότερα από το μέγεθος κάθε «κουτιού», συνεπώς αντί για την αντίστοιχη νεφοκάλυψη έπρεπε να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή της. Έτσι σε μια τέτοια προσομοίωση του κλίματος χώρες μικρής έκτασης όπως η Ελλάδα ή φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μικρή κλίμακα όπως ο σχηματισμός των νεφών απουσίαζαν εντελώς είτε εμφανίζονταν ομοιόμορφα κατανεμημένα. Δηλαδή οι προσομοιώσεις αυτές αποτελούσαν έναν καλό οδηγό σχετικά με τις μέσες συνθήκες πάνω στην Γη, αδυνατούσαν όμως να δώσουν περισσότερες λεπτομέρειες (Gribbin, 1992).

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη της επεξεργαστικής ικανότητας των υπολογιστών σε συνδυασμό με την επιτάχυνση της επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων (παραλληλοποίηση) επέτρεψαν τη σημαντική αύξηση της διακριτικής ικανότητας των πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται από τα κλιματικά μοντέλα. Έτσι, στα πλέον σύγχρονα GCMs η διακριτική ικανότητα στο οριζόντιο για την ατμόσφαιρα είναι της τάξης των $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, ενώ για τους ωκεανούς $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$.

Πριν ένα κλιματικό μοντέλο χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση μελλοντικών συνθηκών, αξιολογείται η ικανότητά του να προσομοιώνει τόσο το κλίμα του παρελθόντος, όσο και τους κύκλους των κλιματικών φαινομένων. Ο πρώτος έλεγχος στον οποίο υποβάλλεται είναι η δυνατότητα αναπαραγωγής μοτίβων (φαινομένων με επαναλαμβανόμενο χαρακτήρα) του ανέμου, των βροχοπτώσεων και της θερμοκρασίας που παρατηρούμε στον πραγματικό κόσμο. Τα κλιματικά μοντέλα αναπαριστούν θαυμάσια τον κύκλο των εποχών και η κατανομή των θερμοκρασιών που «προβλέπουν» για την περίοδο Αυγούστου- Σεπτεμβρίου συμπίπτει απόλυτα με ένα ευρύ φάσμα χαρακτηριστικών του πραγματικού κόσμου για κάθε εποχή της Γης. Ένας επιπλέον έλεγχος για την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο τα GCMs μπορούν

όντως να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση του γήινου κλίματος είναι η ικανότητα αναπαραγωγής παρελθόντων κλιματικών μοτίβων, όπως ήταν η σχετικά βραχύχρονη επιστροφή του ψυχρού κλίματος στην Ευρώπη πριν από 11.000 χρόνια περίπου, γνωστή και ως «Νεώτερη Δρυάς» (από το όνομα ενός λευκού λουλουδιού των μισοπαγωμένων πεδιάδων), η θερμή περίοδος πριν από 6000 χρόνια («κλιματικό βέλτιστο»), η μεσαιωνική θερμή περίοδος κ.λ.π. Σε αυτόν τον τομέα έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες, άλλες περισσότερο (Gribbin, 1992) και άλλες λιγότερο αποδοτικές (Cox, 2007).

Όλα τα παραπάνω είναι οπωσδήποτε συναρπαστικά για τους ερευνητές, αφού συμβάλλουν στην κατανόηση παρελθόντων κλιματικών μεταβολών. Το σημαντικότερο όμως είναι πως μας δείχνουν ότι τα GCMs λειτουργούν αρκετά ικανοποιητικά και όταν τα χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό των χωροταξικών αλλαγών της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης, σε συνθήκες αυξημένων συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα, μπορούμε να θεωρήσουμε τις προβλέψεις τους, για το πως θα αλλάξουν οι πραγματικές συνθήκες, αρκετά ρεαλιστικές. Άλλωστε με τη βοήθεια τέτοιων μοντέλων είχε διατυπωθεί η υπόθεση ότι ο κόσμος θα έπρεπε να έχει θερμανθεί κατά μέσο όρο 1° C τα τελευταία εκατό χρόνια, ως αποτέλεσμα της ανθρωπογενούς ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου, πράγμα το οποίο, κατά μεγάλη μερίδα ερευνητών (Gribbin, 1992), συμπίπτει αρκετά με την πραγματικότητα, αν βέβαια ληφθούν υπόψη και παράγοντες όπως η θερμική αδράνεια των ωκεανών.

Συμπερασματικά, τα GCMs φαίνεται να μπορούν να αναπαραστήσουν τις σημερινές εποχιακές διακυμάνσεις, τις ιδιομορφίες των κλιματικών αλλαγών της τελευταίας χιλιετίας και τα αδρά χαρακτηριστικά των κλιματικών μεταβολών πριν από χιλιάδες χρόνια. Θα ήταν ενδιαφέρον να δούμε τι έχουν να μας πουν σχετικά με την εξέλιξη του κλίματος τις προσεχείς δεκαετίες.

1.2.1 Τύποι κλιματικών μοντέλων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κλιματικών μοντέλων. Συγκεκριμένα έχουν αναπτυχθεί απλά κλιματικά μοντέλα, που προσομοιώνουν ορισμένες μόνο διαδικασίες του κλιματικού συστήματος, αλλά και πιο προηγμένα παγκόσμια μοντέλα, καθώς και συζευγμένα μοντέλα, που συνδυάζουν περισσότερες κλιματικές διαδικασίες. Μάλιστα, είναι δυνατή η ανάπτυξη μοντέλων υψηλότερης ανάλυσης

(περιοχικά κλιματικά μοντέλα), για την καλύτερη προσομοίωση των παραμέτρων μικρότερης κλίμακας.

Τα **ατμοσφαιρικά μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας (AGCMs)** είναι μια κατηγορία κλιματικών μοντέλων στα οποία πραγματοποιείται μια τρισδιάστατη προσομοίωση της ατμόσφαιρας. Σε αυτή την κατηγορία των μοντέλων πρέπει να δοθούν δεδομένα της θερμοκρασίας της επιφάνειας των ωκεανών καθώς και δεδομένα που σχετίζονται με τις βασικές διεργασίες της επιφάνειας του εδάφους. Συνεπώς ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του για την εκτίμηση του κλίματος καθώς δεν έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει τις αλλαγές των συνθηκών στους ωκεανούς. Είναι όμως χρήσιμα για την μελέτη των ατμοσφαιρικών διαδικασιών.

Τα **ωκεάνια μοντέλα παγκόσμιας κυκλοφορίας (OGCMs)** είναι μια άλλη κατηγορία κλιματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των ωκεανών. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο τους για την μελέτη των ωκεανών. Ωστόσο, ούτε και αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο τους για τις μελλοντικές προβλέψεις του κλίματος καθώς εξαρτώνται από διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες. Σύμφωνα λοιπόν με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι για την προσομοίωση της γενικής συμπεριφοράς του κλίματος σε μεγάλα χρονικά διαστήματα κανένα από τα δύο παραπάνω μοντέλα δεν μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο αν χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα. Έτσι, για την εκτίμηση και τον ρυθμό αλλαγής του μελλοντικού κλίματος χρησιμοποιούνται τα **συζευγμένα ατμοσφαιρικά-ωκεάνια γενικά μοντέλα κυκλοφορίας (AOGCMs)**. Αυτά αποτελούνται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο που συνδέεται με ένα ωκεάνιο.

1.2.2 Υποβιβασμός κλίμακας και περιοχικά κλιματικά μοντέλα (RCMs)

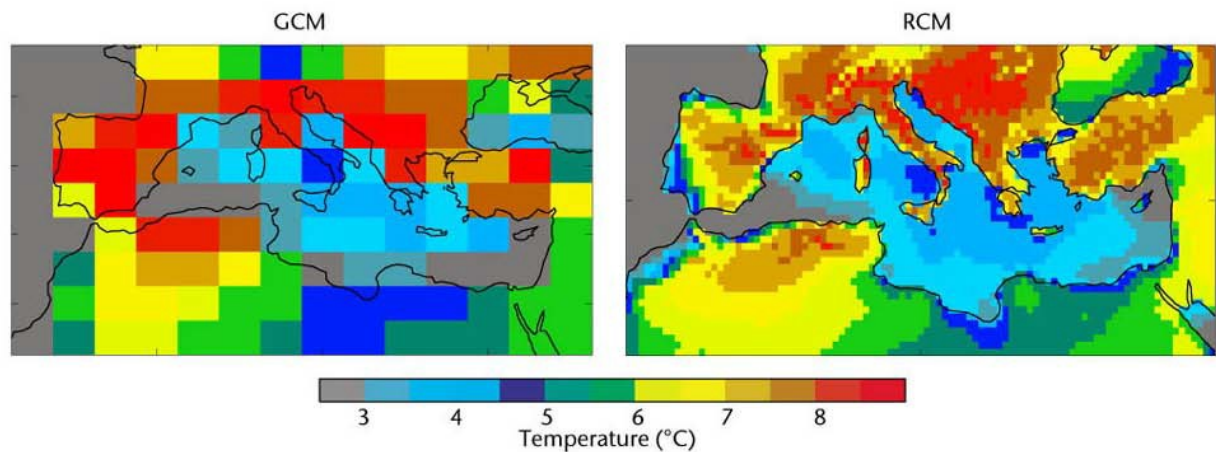
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσα από την μελέτη των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων πραγματοποιούνται προβλέψεις σχετικά με το κλίμα της γης και του πως αυτό μπορεί να αλλάξει στο μέλλον. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την διεθνή κοινότητα έτσι ώστε να αξιολογήσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ανθρώπινα και φυσικά συστήματα αλλά και για να λάβει αποφάσεις σχετικά με την μείωση της. Τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, παρά την μεγάλη τους χρησιμότητα για την προσομοίωση της κυκλοφορίας μεγάλης κλίμακας (large scale circulation), δεν είναι ιδανικά για την μελέτη φαινομένων περιοχικής

κλίμακας. Η τυπική χωρική ανάλυση ενός μοντέλου παγκόσμιας κλίμακας είναι 100 έως 200 χιλιόμετρα, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ακριβής αναπαράσταση των τοπικών φαινομένων καθώς δεν μπορούν να αναλύσουν περιοχές με έντονο ανάγλυφο ή ακτογραμμή. και επομένως δεν μπορούν να αποτυπώσουν κλιματικές επιδράσεις σε κλίμακες μικρότερες του κελιού. Παρόλα αυτά τα δεδομένα από τα GCMs αποτελούν το σημείο αφετηρίας για οποιαδήποτε τεχνική χωρικής διακριτοποίησης, που αποβλέπει σε εκτίμηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής σε τοπικό επίπεδο. Για να επιτευχθεί αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας (*downscaling methods*), οι οποίες αποτελούν ουσιαστικά μία μετάβαση από τη μεγάλη κλίμακα των GCMs σε μικρότερη τοπική κλίμακα. Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εμπειρικές ή **στατιστικές** (*Statistical downscaling*) και τις **δυναμικές** (*Dynamical downscaling*).

Ο **στατιστικός** υποβιβασμός κλίμακας χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους σε παραμέτρους που θα μελετηθούν. Διάφορες ατμοσφαιρικές μεταβλητές μεγάλης κλίμακας (*predictors*) συσχετίζονται με μεταβλητές που αναφέρονται σε χωρικά μικρότερη κλίμακα (*predictands*) και στην συνέχεια εφαρμόζονται στα δεδομένα των μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας. Μπορούν μάλιστα να εφαρμοστούν και στα δεδομένα των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) (IPCC,2013).

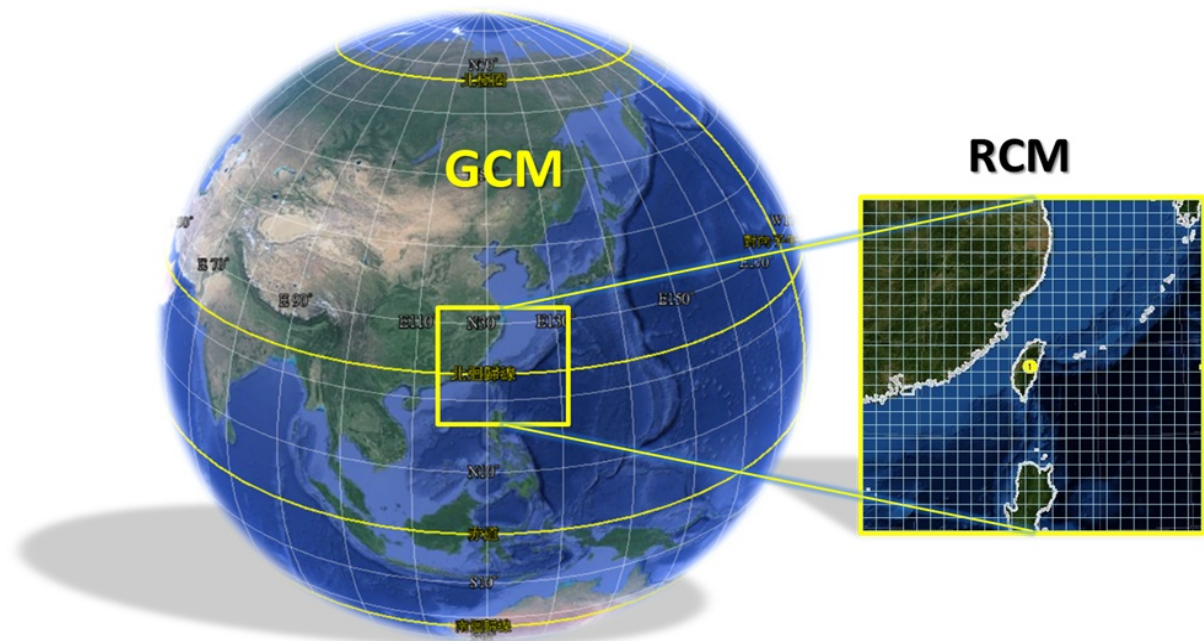
Όσον αφορά τον **δυναμικό** υποβιβασμό κλίμακας, πρόκειται ουσιαστικά για μια εφαρμογή ενός περιοχικού κλιματικού μοντέλου (***Regional Climate Model – RCMs***) σύμφωνα με το οποίο μπορεί να γίνει καλύτερη αναπαράσταση των τοπικών χαρακτηριστικών της περιοχής ενδιαφέροντος. Τα περιοχικά μοντέλα είναι μοντέλα υψηλής ανάλυσης, τα οποία οδηγούμενα με πλευρικές οριακές συνθήκες από τα παγκόσμια μοντέλα, παρέχουν πληροφορίες σε πολύ μικρότερες χωρικές κλίμακες, εστιάζοντας σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στο **σχήμα 1** παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες αλλαγές της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους για την περίοδο του καλοκαιριού μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα από ένα παγκόσμιο και ένα περιοχικό μοντέλο. Και τα δύο μοντέλα είναι αξιόπιστα με την διαφορά ότι τα περιοχικά δίνουν πιο λεπτομερή πληροφορία που είναι απαραίτητη ιδιαίτερα στην εκτίμηση των επιπτώσεων.



Σχήμα 1 : Προβλεπόμενες αλλαγές της θερμοκρασίας της επιφάνειας του εδάφους μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα.

Για να λειτουργήσουν χρειάζεται να τους παρέχονται αρχικές (initial conditions) και πλευρικές οριακές συνθήκες (boundary conditions). Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προσδιορίζονται από τις προσομοιώσεις από τα μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα ή και από τα δεδομένα πλήρους επεξεργασίας (reanalysis data). Έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάρκειας μερικών δεκαετιών σε αρκετά υψηλή ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η υποκλιμάκωση της πληροφορίας από τα αποτελέσματα των μοντέλων παγκόσμιας κλίμακας και επιτυγχάνεται καλύτερη αναπαράσταση της τοπογραφίας λόγω φυσικά της υψηλότερης ανάλυσης αλλά και προσομοίωση διεργασιών μικρότερης κλίμακας οι οποίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν από τα μοντέλα παγκόσμιας κυκλοφορίας. Όσον αφορά στο πλέγμα ενός περιοχικού μοντέλου, αυτό πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο σε έκταση ώστε να αναπτύσσονται όλες οι ατμοσφαιρικές διεργασίες που χαρακτηρίζουν το κλίμα μιας περιοχής.



Σχήμα 2 : Προσομοίωση περιοχικού κλίματος με την μέθοδο δυναμικού υποβιβασμού.

Το βασικό μειονέκτημα των περιοχικών κλιματικών μοντέλων είναι το γεγονός ότι οι αρχικές και οι πλευρικές οριακές συνθήκες που χρειάζονται για να πραγματοποιήσουν μια προσομοίωση, προέρχονται από τα μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας. Αυτό σημαίνει ότι αν τα τελευταία παρουσιάζουν ανακρίβειες και σφάλματα, θα τα μεταφέρουν και στα περιοχικά κλιματικά μοντέλα. Επίσης, μειονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τα μοντέλα παγκόσμιας κλίμακας. Τέλος, οι προσομοιώσεις με τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα μπορούν να είναι αρκετά απαιτητικές σε υπολογιστικούς πόρους, αν η χρονική διάρκεια μιας προσομοίωσης είναι μεγάλη και η χωρική ανάλυση υψηλή.

1.2.3 Αξιολόγηση κλιματικών μοντέλων

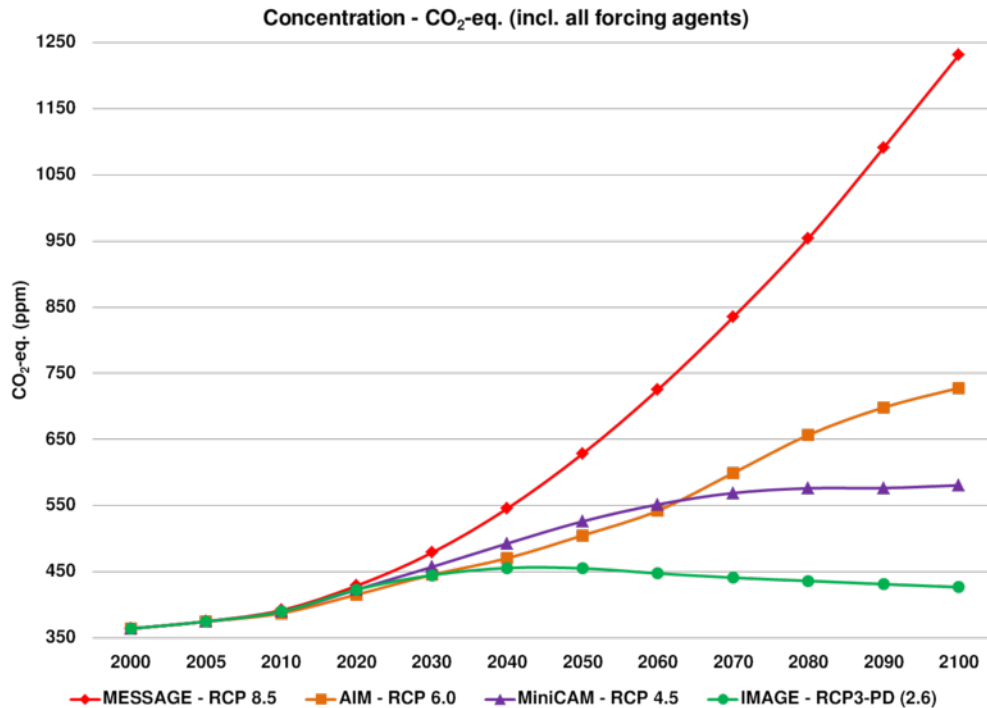
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την αξιολόγηση ενός κλιματικού μοντέλου είναι η σύγκριση των ποσοτήτων που έχουν προσομοιωθεί (παγκόσμια κατανομή θερμοκρασίας, βροχοπτώσεις, ακτινοβολία, κλπ) με τις αντίστοιχες ποσότητες οι οποίες έχουν υπολογιστεί από πραγματικά δεδομένα, οι τιμές δηλαδή των ποσοτήτων που έχουν παρατηρηθεί. Ως γνωστόν, τα κλιματικά μοντέλα κάνουν προβλέψεις πιθανών μελλοντικών αλλαγών σε χρονικές κλίμακες πολλών δεκαετιών και για τις οποίες δεν υπάρχει ακριβή αναλογία με το παρελθόν. Η αξιοπιστία ενός κλιματικού μοντέλου θα μπορούσε να ελεγχθεί με την πραγματοποίηση προσομοιώσεων ιστορικών δεδομένων. Ωστόσο, η αξιολόγηση των κλιματικών

μοντέλων βασιζόμενη στις παρατηρήσεις του παρελθοντικού κλίματος παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς. Συγκεκριμένα περιορίζεται σε εκείνες τις μεταβλητές και τα φαινόμενα για τα οποία υπάρχουν παρατηρήσεις.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης κλιματικών μοντέλων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στα κλιματικά μοντέλα υπεισέρχονται κάποιες αβεβαιότητες. Οι μέθοδοι σμήνους προσομοιώσεων (ensemble) χρησιμοποιούνται για να ερευνήσουν αυτές τις αβεβαιότητες οι οποίες προέρχονται από την εσωτερική πολυπλοκότητα, τις οριακές συνθήκες καθώς και από τις παραμετροποιήσεις που επιλέγονται. Αν και η μέθοδος αυτή είναι καλύτερη στον χαρακτηρισμό των αβεβαιοτήτων, οι μέθοδοι και οι ιδέες εφαρμόζονται στην αξιολόγηση των μοντέλων γενικότερα.

1.3 Σενάρια εκπομπών RCP

Όπως προαναφέρθηκε, για να χρησιμοποιηθεί ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας, θα πρέπει πρώτα να γίνει η επιλογή του κατάλληλου σεναρίου, ώστε να δοθούν τα δεδομένα της θερμοκρασίας της επιφάνειας των ωκεανών καθώς και δεδομένα που σχετίζονται με τις βασικές διεργασίες της επιφάνειας του εδάφους. Τα σενάρια αυτά ονομάζονται RCP (Representative Concentration Pathways) και είναι συνολικά τέσσερα σε αριθμό. Περιγράφουν τέσσερις πιθανούς κλιματολογικούς μέλλοντες, ανάλογα με την συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στα επόμενα χρόνια. Τα σενάρια είναι το RCP2.6, το RCP4.5, το RCP6 και το RCP8.5, και τα ονόματά τους ωφείλονται στη μεταβολή του ενεργειακού εξαναγκασμού το έτος 2100, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο (2.6, 4.5, 6 και 8.5 W/m² αντίστοιχα). Σύμφωνα με το σενάριο RCP2.6 θεωρείται πως θα παρουσιαστεί ύφεση των αερίων του θερμοκηπίου την δεκαετία 2010-2020, και πως στην συνέχεια θα υπάρξει σημαντική μείωση των συγκεκριμένων αερίων. Από την άλλη, οι ύφεση για το RCP4.5 θεωρείται πως θα γίνει το 2040, για το RCP6 το 2060 και τέλος το RCP8.5 θεωρεί πως η ύφεση θα παρουσιαστεί καθ' όλη τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα.



Σχήμα 3: Συγκέντρωση CO₂, σε ppm, ανάλογα με τα τέσσερα διαφορετικά RCP σενάρια.

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε το σενάριο RCP4.5, για την προσομοίωση. Το συγκεκριμένο σενάριο διατηρεί σταθερή την ακτινοβολία στα 4,5 W/m², χωρίς να ξεπερνάει ποτέ αυτή την τιμή για το έτος 2100.

1.4 Η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της στον ελλαδικό χώρο

Ένα μεγάλο ερώτημα είναι ποιες θα είναι οι πιθανές επιπτώσεις στο κλίμα της Ελλάδας και άλλων χωρών της Μεσογείου από την παγκόσμια υπερθέρμανση. Όλα τα συμπεράσματα των GCMs συμφωνούν πως η παγκόσμια κλιματική αλλαγή δεν θα είναι ομοιόμορφη σε όλον τον πλανήτη αλλά θα παρατηρηθεί μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας στις πολικές περιοχές και ελάχιστη στις τροπικές. Για τα μέσα γεωγραφικά πλάτη τα μέχρι τώρα στοιχεία δεν είναι ιδιαίτερα σαφή, σε κάποια σημεία τους μάλιστα εμφανίζονται αντικρουόμενα. Αρκετοί επιστήμονες προβλέπουν μακρές περιόδους ξηρασίας και ερημοποίηση πολλών περιοχών της νότιας Ελλάδας, ιδίως της νησιωτικής. Άλλοι πάλι κάνουν λόγο σε δημοσιεύσεις τους για εντονότερη ζέστη τους καλοκαιρινούς μήνες και περισσότερες βροχοπτώσεις τους χειμερινούς, χωρίς όμως να μεταβληθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του κλίματός της (εύκρατο- μεσογειακό).

Τα πορίσματα των υπολογιστικών μοντέλων έρχεται να συμπληρώσει ο επιστημονικός κλάδος της παλαιοκλιματολογίας, ο οποίος στηρίζεται σε γεωλογικές

και άλλες πληροφορίες για να αναπαραστήσει το κλίμα μιας περιοχής σε διάφορες περιόδους του απώτατου παρελθόντος. Φαίνεται λοιπόν ότι το κλίμα των παραμεσόγειων περιοχών κατά τις μακραίωνες εναλλαγές ψυχρών και θερμών περιόδων κατά τη μέση και ανώτερη Πλειστόκαινο περίοδο παρέμενε αξιοσημείωτα σταθερό και όχι ριζικά διαφορετικό από το σημερινό. Υπήρχαν μεγάλα δάση φυλλοβόλων και κωνοφόρων δέντρων, ανάλογα με το υψόμετρο, και σε αυτά περιπλανιόνταν μικρά και μεγάλα ζώα, όπως ελάφια, λιοντάρια, ελέφαντες και ιπποπόταμοι. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε σε γενικές γραμμές να επαναληφθεί και στις νέες συνθήκες που μπορεί να διαμορφωθούν στον 21^ο αιώνα.

Επιφυλακτικός απέναντι σε όσους ισχυρίζονται ότι το κλίμα έχει αλλάξει στην Ελλάδα είναι ο επιστημονικός συνεργάτης του Εθνικού Αστεροσκοπείου, μετεωρολόγος κ. Κώστας Λαγουβάρδος. Σε πρόσφατη συνέντευξή του (Ιανουάριος 2009) υποστήριξε ότι πολλές φορές μιλάμε για μία πιθανή αλλαγή του κλίματος επειδή βλέπουμε να αυξάνονται καταστροφές από καιρικά φαινόμενα. Όμως μια δυνατή βροχή που πριν από τριάντα χρόνια δεν θα δημιουργούσε σημαντικά προβλήματα στην Αθήνα, σήμερα μπορεί εύκολα να δημιουργήσει πλημμύρα. Αυτό όμως σχετίζεται με άλλους παράγοντες, όπως η έντονη αστικοποίηση, οι ελλειπίς υποδομές και η αποψίλωση των δασών. Ωστόσο, δεν αποκλείει την πιθανότητα αλλαγής του κλίματος στη χώρα μας μετά από 50 χρόνια.

Άλλοι ειδικοί είναι περισσότερο απαισιόδοξοι. Άλλωστε στις παλαιότερες παγετώδεις και μεσοπαγετώδεις κλιματικές φάσεις ο άνθρωπος, όταν υπήρχε, ήταν ένας σχετικά αδύναμος κυνηγός και συλλέκτης, ο οποίος αγωνιζόταν να επιβιώσει, ενώ πλέον κρατά στα χέρια του το μέλλον του πλανήτη, χωρίς όμως να λειτουργεί υπεύθυνα. Ήδη η μέση μέγιστη θερμοκρασία της Αθήνας το καλοκαίρι έχει αυξηθεί κατά 1,9°C, ανεξάρτητα από τις πιθανές αιτίες της και εκφράζονται φόβοι ότι η θερμοκρασία στην Ελλάδα εξαιτίας της αλλαγής του κλίματος μπορεί να ανέβει κατά 3,1°C- 5,1°C έως το 2100. Επιπλέον, η στάθμη της θάλασσας στο ίδιο χρονικό διάστημα μπορεί να ανέβει κατά 50 εκατοστά, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στις παραθαλάσσιες περιοχές και τα οικοσυστήματα. Η Θεσσαλονίκη και γενικότερα η πεδιάδα της Κεντρικής Μακεδονίας θεωρούνται από τις πιο ευάλωτες περιοχές, μαζί με το Πόρτο Λάγος και το Δέλτα του ποταμού Έβρου.

Η παγκόσμια περιβαλλοντική οργάνωση W.W.F σε συνεργασία με το Εθνικό Αστεροσκοπείο δημοσιοποίησε το 2005 έκθεση για τις επιπτώσεις που θα αντιμετωπίσει η Μεσόγειος, αν η θερμοκρασία αυξηθεί κατά 2°C σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με αυτήν, η Ελλάδα θα υφίσταται συχνότερα κύματα καύσωνα και ξηρασίας, περισσότερες πυρκαγιές (τις υφίσταται και τώρα, χωρίς ουσιαστικά καταγεγραμμένη κλιματική αλλαγή), προβλήματα επάρκειας πόσιμου νερού και ζημιές στις γεωργικές δραστηριότητες. Επιπλέον οι νέες συνθήκες που θα επικρατήσουν στην Ευρώπη ενδέχεται να αποθαρρύνουν, άμεσα ή έμμεσα, τις καλοκαιρινές διακοπές στη Μεσόγειο, δηλαδή να πλήξουν τον τουρισμό.

Κεφάλαιο 2-NASA GISS GCM ModelE και WRF

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS GCM ModelE και το μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν το κάθε μοντέλο, ξεχωριστά..

2.1 Μοντέλο γενικής κυκλοφορίας NASA GISS GCM ModelE

2.1.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας GCMs (General Circulation Models) είναι τα εργαλεία με τα οποία κλιματολόγοι εκτελούν πειράματα για την κατανόηση του πραγματικού κόσμου (η οποία παραμένει σημαντικά πιο περίπλοκη από ό, τι οποιοδήποτε μοντέλο). Αυτά τα μοντέλα περιέχουν περισσότερες διαδικασίες απ' αυτές που πιστεύουμε ότι είναι σημαντικές για τον καθορισμό του κλίματος. Η ανάπτυξη ενός GCM μοντέλου είναι μια συνεχής διαδικασία όπου γίνονται μικρές προσθήκες και διορθώσεις, σε συνδυασμό με την περιστασιακή χονδρική αντικατάσταση συγκεκριμένων κομματιών.

Το μοντέλο Goddard Institute for Space Studies (GISS) ModelE (Schmidt et al., 2006, Hansen et al., 2000; Hansen et al., 1983) αποτελεί ένα από τα πλέον σύγχρονα, συνεχώς εξελισσόμενα συζευγμένα μοντέλα ατμόσφαιρας - ωκεανού. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '70 και σήμερα αποτελεί ένα από τα πέντε κύρια μοντέλα που η IPCC χρησιμοποιεί για την αποτύπωση των κλιματικών μεταβολών. Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολλών διαφορετικών διαμορφώσεων του Συστήματος Γης (Earth System Model) - συμπεριλαμβανομένων των αλληλεπιδράσεων ατμοσφαιρικής χημείας, αερολυμάτων, τον κύκλο του άνθρακα και άλλων σημαντικών χημικών ειδών, με τα πρότυπα ατμόσφαιρας, ωκεανού, θάλασσας, πάγου και των συνιστωσών της επιφάνειας της γης και του εδάφους.

2.1.2 Φιλοσοφία μοντέλου

Η φιλοσοφία του μοντέλου GISS ήταν πάντα να βελτιώσει την φυσική του κάθε μοντελοποιημένου στοιχείου, και να επιτραπεί όσο δυνατόν μεγαλύτερη ευελιξία στο μοντέλο διαμορφώσης. Αυτό έχει οδηγήσει σε πολλές καινοτόμες ενσωματώσεις παραμετροποιήσεων που δεν υπάρχουν σε άλλα παγκόσμια μοντέλα. Από την άλλη όμως, κάποιοι συμβιβασμοί (όπως η οριζόντια ανάλυση) ήταν απαραίτητοι. Έχει επιλεγεί να μην ακολουθηθεί μεμονωμένα υψηλότερη ανάλυση, δεδομένου ότι μπορεί να περιορίσει σημαντικά το μέγεθος και τη μεταβλητότητα των πειραμάτων,

αλλά έχει διατηρηθεί μια ποικιλία αναλύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με βάση την επιστημονική ανάγκη. Το μοντέλο GISS ModelE έχει τη δυνατότητα χρήσης τριών διαφορετικών οριζόντιων χωρικών αναλύσεων ανάλογα με το σκοπό της χρήσης του ($2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ για κλιματικές προσομοιώσεις, $4^{\circ} \times 5^{\circ}$ για ιστορικούς λόγους και $8^{\circ} \times 10^{\circ}$ για εκπαιδευτικούς σκοπούς γεωγραφικό πλάτος \times γεωγραφικό μήκος) και 2 κατακόρυφων (20 και 40 επίπεδα ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους και εκτεινόμενο έως τα 0.002 hPa). Από προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση των διαφορετικών διακριτικών ικανοτήτων του μοντέλου έχει προκύψει ότι ορισμένες πτυχές της προσομοίωσης μπορεί να βελτιωθούν με την αύξηση της ανάλυσης, πολλές εξίσου σημαντικές βελτιώσεις είναι πιθανό να προκύψουν μέσω βελτιώσεων σε μία ή περισσότερες παραμετροποιήσεις. Ορισμένα χαρακτηριστικά (όπως το στρατοσφαιρικό εξάμηνη ταλάντωση, η πίεσης της στάθμης της θάλασσας υψηλού γεωγραφικού πλάτους, ή η διζωνικότητα του πεδίου ροής) φαίνεται πως όσο και αν αυξηθεί η διακριτική ικανότητα του μοντέλου, δεν αναμένεται να αποτυπωθούν καλύτερα εκτός αν αυτή συνδυαστεί με βελτίωση των σχετιζόμενων παραμετροποιήσεων. Όσο τα μοντέλα και η επεξεργαστική ικανότητα των υπολογιστών βελτιώνονται, τόσο θα εντίνεται η ανάγκη να συμπεριληφθούν όλο και περισσότερες παραμετροποιήσεις που θα στηρίζονται στις βασικές αρχές της φυσικής, της χημείας και της βιολογίας ώστε να εγκαταληφθούν οι εμπειρικές παραμετροποιήσεις, να πραγματοποιηθούν περισσότερες προσομοιώσεις, και να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα των μοντέλων τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο. Τα στοιχεία αυτά συνθέτουν τη φιλοσοφία της εξέλιξης του μοντέλου GISS.

2.1.3 Φυσική του μοντέλου

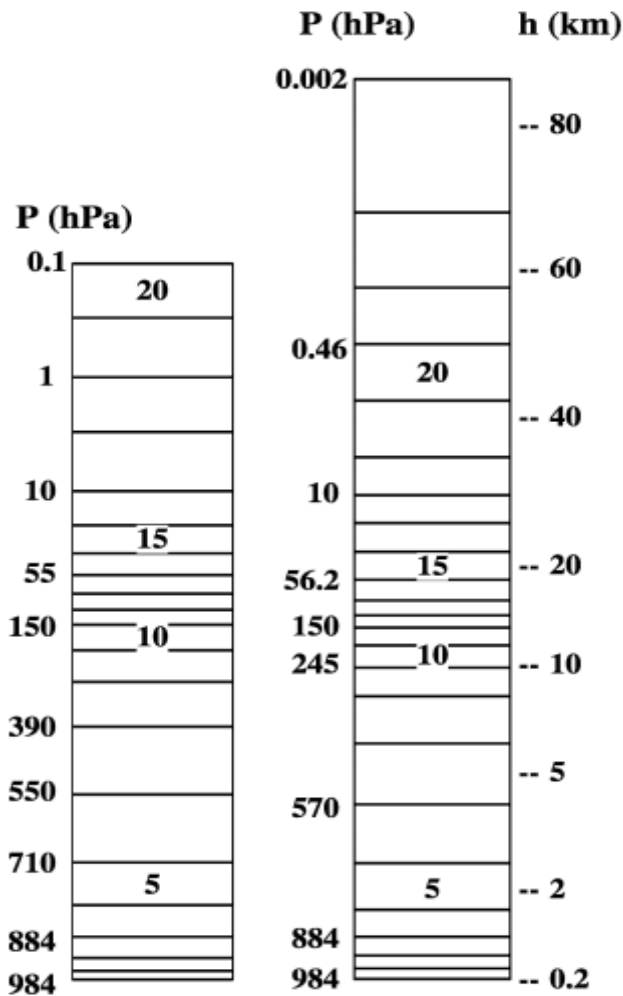
Όπως και στα περισσότερα μοντέλα, έτσι και στο μοντέλο GISS γίνονται κάποιες βασικές παραδοχές από την αρχή, οι οποίες, αν και ήσσονος σημασίας, έχουν επιπτώσεις σε όλο το μοντέλο: δηλαδή, ότι οι υδρατμοί δεν προσθέτονται στην ατμοσφαιρική μάζα (δηλαδή, σε παγκόσμιο επίπεδο, η ολοκληρωμένη επιφανειακή πίεση είναι σταθερή), η λανθάνουσα θερμότητα των ατμοσφαιρικών υδρατμών δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, η δυναμική ενέργεια των υδρατμών / συμπυκνώματος αγνοείται, τα συμπυκνώματα δεν μεταφέρονται, και ο υπολογισμός της βαθμίδας πίεσης δεν περιλαμβάνει την επιδράση της υγρασίας. Υπάρχει σκέψη μείωσης αυτών των περιορισμών σε μελλοντικές εκδόσεις. Οι κύριες προγνωστικές

μεταβλητές στην ατμόσφαιρα είναι η δυνητική θερμοκρασία, ο λόγος ανάμειξης των υδρατμών, και οι οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας. Η εικονική θερμοκρασία χρησιμοποιείται για όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την πυκνότητα/άνωση.

Κατά το μηχανισμό της μεταφοράς (advection) η μάζα της υγρασία και των ιχνοστοιχείων διατηρείται, ενώ η δυνητική ενθαλπία διατηρείται για την θερμότητα. όλες οι διεργασίες, της κινητικής ενέργειας μέσω διαφόρων διεργασιών ανάμειξης μετατρέπεται σε θερμότητα σε τοπικό επίπεδο. Η καθαρή ροή της θερμότητας στην επιφάνεια του πλανήτη είναι ίση με την καθαρή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας.

2.1.4 Διαμόρφωση του μοντέλου

Το μοντέλο χρησιμοποιεί καρτεσιανές συντεταγμένες. Τα σημεία ταχύτητας στην ατμόσφαιρα είναι σε πλέγμα Arakawa B και η κατακόρυφη διακριτοποίηση ακολουθεί σίγμα συντεταγμένες έως τα 150 hPa με στρώματα σταθερής πίεσης από πάνω. Η στάνταρ έκδοση έχει 40 επίπεδα στο κατακόρυφο, φτάνοντας ως τα 0,1 hPa.



Σχήμα 1 : Απεικόνιση της κατακόρυφης διαμόρφωσης του μοντέλου 40 στρωμάτων.

Model configuration	Horizontal resolution	Effective tracer resolution	Vertical layers	Model top (hPa)
M20	$4^\circ \times 5^\circ$	$\approx 1.3^\circ \times 1.6^\circ$	20	0.1
M23	$4^\circ \times 5^\circ$	$\approx 1.3^\circ \times 1.6^\circ$	23	0.002
F20	$2^\circ \times 2.5^\circ$	$\approx 0.7^\circ \times 0.8^\circ$	20	0.1
SI2000	$4^\circ \times 5^\circ$	$\approx 1.3^\circ \times 1.6^\circ$	12	10

Σχήμα 2 : Πίνακας αποτελεσμάτων των 3 μοντέλων.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί χρονικό βήμα 30 λεπτών για όλους τους υπολογισμούς φυσικής, ενώ για την δυναμική της ατμόσφαιρας το χρονικό βήμα είναι 225 δευτερόλεπτα. Ο κωδικός ακτινοβολίας καλείται κάθε πέντε χρονικά βήματα φυσικής (κάθε 2,5 ώρες), ωστόσο, η γωνία ζενίθ ενημερώνεται κάθε χρονικό βήμα.

2.1.5 Σύνθεση της ατμόσφαιρας

Το μοντέλο διαθέτει 5 διαφορετικές διαμορφώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν από λεπτομερή ατμοσφαιρική χημεία και προσομοίωση των αεροζόλ, μέχρι ατμοσφαιρικές αντιδράσεις βασικών χημικών ειδών και διατήρηση των επιπέδων των καλά αναμειγμένων ιχνοστοιχείων [(CO₂, CH₄, N₂O, και οι χλωροφθοράνθρακες (CFC))] και των άλλων συστατικών του αέρα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, όπως το τροποσφαιρικό και στρατοσφαιρικό όζον, τα αερολύματα της στρατόσφαιρας (ηφαιστιακά), και τα τροποσφαιρικά αερολύματα [μεταλλική σκόνη, θαλασσινό αλάτι, θείο, νιτρικό, οργανικός άνθρακας (OC) και αιθάλη (BC)], σταθερά στα επίπεδα του 1979.

2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF

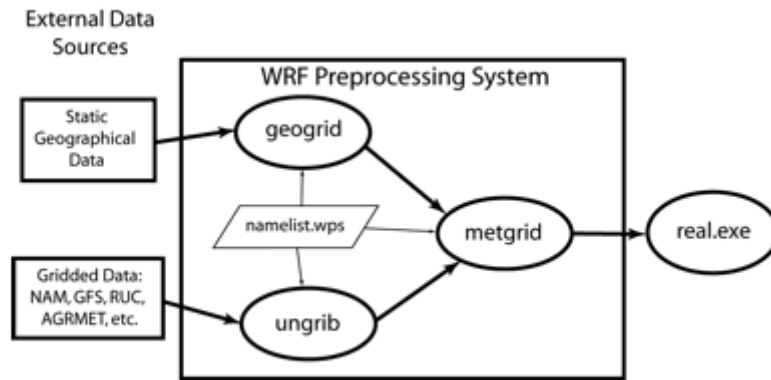
Το περιοχικό μετεωρολογικό μοντέλο μέσης κλίμακας WRF (Weather Research and Forecasting) είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο (με δυνατότητα λειτουργίας και ως υδροστατικό), επόμενης γενιάς, σχεδιασμένο για την πραγματοποίηση αριθμητικής πρόγνωσης καιρού για τις ανάγκες τόσο της ατμοσφαιρικής έρευνας όσο και για τις επιχειρησιακές προβλέψεις. Διαθέτει δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, και ένα αρχιτεκτονικό λογισμικό, διευκολύνοντας παράλληλους υπολογισμούς και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Το μοντέλο υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η προσπάθεια για την ανάπτυξη του WRF ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '90 και ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας κυρίως μεταξύ του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικών Ερευνών NCAR (National Center for Atmospheric Research), της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (εκπρόσωποι από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP) και το Εργαστήριο Πρόβλεψης Συστημάτων FSL (Forecast Systems Laboratory)), τον Οργανισμό Καιρού της Πολεμικής Αεροπορίας AFWA (Air Force Weather Agency), το Ερευνητικό Εργαστήριο Ναυτικού, το Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα, και την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration).

Το WRF μπορεί να πραγματοποιήσει ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, αναλύσεις) ή εξιδανικευμένες συνθήκες. Ακόμη, προσφέρει επιχειρησιακές προβλέψεις σε μια

ευέλικτη και υπολογιστικά αποδοτική πλατφόρμα. Το WRF είναι σήμερα σε επιχειρησιακή χρήση από την NCEP, την AFWA, και άλλα κέντρα.

Είναι ένα υποστηριζόμενο «κοινοτικό μοντέλο», δηλαδή είναι ελεύθερο και διαμοιραζόμενο αλλά με κατανομημένη ανάπτυξη και κεντρική υποστήριξη. Το WRF έχει μια μεγάλη παγκόσμια κοινότητα εγγεγραμμένων χρηστών (πάνω από 30.000 σε πάνω από 150 χώρες), και τα εργαστήρια και τα σεμινάρια πραγματοποιούνται κάθε χρόνο στο NCAR. Το WRF έχει δύο δυναμικούς πυρήνες: Τον Advanced Research WRF (ARW) και τον Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) Οι δυναμικοί πυρήνες περιλαμβάνουν κυρίως την οριζόντια μεταφορά, την βαροβαθμίδα, την δύναμη Coriolis, την άνωση, την διάχυση και τα βήματα ολοκλήρωσης των εξισώσεων. Και οι δύο πυρήνες είναι Eulerian με κατακόρυφες συντεταγμένες που ακολουθούν την ορογραφία. Η ανάπτυξη του ARW γίνεται κυρίως στο NCAR/MMM (Mesoscale & Microscale Meteorology) ενώ η ανάπτυξη του NMM πραγματοποιείται από το NCEP/EMC (Environmental Modeling Center) και υποστήριξη παρέχεται από το NCAR/DTC (Developmental Testbed Center).

Το σύστημα προεπεξεργασίας του WRF (WRF Preprocessing System aka **WPS**) αποτελείται από ένα σύνολο τριών προγραμμάτων των οποίων ο συλλογικός ρόλος είναι να κάνουν παρεμβολή (interpolation) πραγματικών δεδομένων για αριθμητική πρόγνωση καιρού. Κάθε ένα από τα προγράμματα εκτελεί το ένα στάδιο της προετοιμασίας: το geogrid περιέχει πληροφορίες για την προβολή του χάρτη και παρεμβάλλει στατικά γεωγραφικά δεδομένα, το ungrib εξάγει μετεωρολογικά πεδία από τα διαμορφωμένα αρχεία GRIB και το metgrid παρεμβάλλει οριζόντια τα μετεωρολογικά πεδία που εξάγονται από το ungrib στα μοντέλα grids που ορίζονται από το geogrid. Το GRIB είναι ένα τύπος αρχείου που έχει προταθεί από τον WMO για την αποθήκευση κανονικά κατανομημένων (δηλαδή σε κανονικό πλέγμα) πεδίων. Το έργο της κάθετης παρεμβολής των μετεωρολογικών πεδίων του WRF γίνεται εντός του πραγματικού προγράμματος.



Σχήμα 3 : Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS.

Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS παρουσιάζεται στο σχήμα 3. Κάθε ένα από τα προγράμματα WPS διαβάζει τις παραμέτρους από ένα κοινό αρχείο namelist, όπως φαίνεται στο σχήμα. Δεν φαίνεται στην εικόνα αλλά υπάρχουν πρόσθετα αρχεία πίνακα που χρησιμοποιούνται από μεμονωμένα προγράμματα. Οι πίνακες αυτοί παρέχουν επιπρόσθετο έλεγχο επί των εργασιών των προγραμμάτων, αν και γενικά δεν χρειάζεται να μεταβληθούν από το χρήστη.

Ο μηχανισμός ανάπτυξης του WPS, ο οποίος είναι πολύ παρόμοιος με τον μηχανισμό ανάπτυξης που χρησιμοποιείται από το μοντέλο WRF, παρέχει επιλογές για την εφαρμογή του WPS σε μια ποικιλία από πλατφόρμες. Όταν είναι διαθέσιμες βιβλιοθήκες που επιτρέπουν παράλληλη προσομοίωση (π.χ., MPI) και κατάλληλοι μεταγλωττιστές, τα προγράμματα metgrid και geogrid μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις με χρήση κατανεμημένης μνήμης, η οποία επιτρέπει σε μεγάλους τομείς του μοντέλου που επεξεργάζονται, να πραγματοποιούνται σε λιγότερο χρόνο. Το έργο εκτελείται από το πρόγραμμα ungrib το οποίο δεν είναι δεκτικό σε παραλληλοποίηση, με αποτέλεσμα το ungrib να μπορεί να τρέξει σε ένα μόνο επεξεργαστή.

Το WPS αποτελείται από τρία ανεξάρτητα προγράμματα: του **geogrid**, του **ungrib** και του **metgrid**. Μια σύντομη περιγραφή του κάθε ενός από τα τρία κύρια προγράμματα δίνεται παρακάτω.

2.2.1 Πρόγραμμα geogrid

Ο σκοπός του geogrid είναι να καθορίσει τους τομείς της προσομοίωσης, και να παρεμβάλλει διάφορες ομάδες επίγειων δεδομένων στο μοντέλο πλέγματος. Οι τομείς της προσομοίωσης ορίζονται χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που καθορίζονται από το χρήστη στο αρχείο namelist του WPS, namelist.wps. Εκτός από τον υπολογισμό του γεωγραφικού πλάτους, μήκους, και παράγοντες χάρτη κλίμακας σε κάθε σημείο του δικτύου, το geogrid θα παρεμβάλλει τις κατηγορίες εδάφους, τις κατηγορίες χρήσης γης, το ύψος του εδάφους, την ετήσια μέση θερμοκρασία, το μηνιαίο κλάσμα βλάστησης, το μηνιαίο albedo, τη μέγιστη ανακλαστικότητα χιονιού, και τη κλίση κατηγορίας του μοντέλου πλέγματος από προεπιλογή. Τα παγκόσμια σύνολα δεδομένων για κάθε ένα από αυτά τα πεδία παρέχονται μέσω της σελίδας λήψης WRF, και, επειδή τα στοιχεία αυτά είναι χρονικά αναλλοίωτα, το μόνο που χρειάζεται είναι να κατέβουν μία φορά. Αρκετά από τα σύνολα δεδομένων είναι διαθέσιμα μόνο σε μια ανάλυση, αλλά οι άλλοι διατίθενται στα αναλύσεις των 30 ", 2', 5', και 10'. Το <"> δηλώνει τόξο δευτερολέπτων και το <'> δηλώνει λεπτά τόξου. Ο χρήστης δεν χρειάζεται να κατεβάσει όλες τις διαθέσιμες αναλύσεις για ένα σύνολο δεδομένων, αν και η παρεμβολή πεδίων γενικά θα είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική εάν χρησιμοποιείται ανάλυση των δεδομένων πλησίον προς εκείνη του τομέα προσομοίωσης.

Εκτός απ' το να παρεμβάλλει τα προεπιλεγμένα επίγεια πεδία, το πρόγραμμα geogrid είναι αρκετά γενικό ώστε να είναι σε θέση να παρεμβάλλει πιο συνεχή και κατηγορηματικά πεδία στους προσομοιωτικούς τομείς. Νέα ή πρόσθετα σύνολα δεδομένων μπορεί να παρεμβληθούν με τον τομέα προσομοίωσης με τη χρήση του αρχείου πίνακα, GEOGRID.TBL. Το αρχείο GEOGRID.TBL ορίζει κάθε ένα από τα πεδία που θα παράγεται απ' το geogrid. Περιγράφει ακόμη, τις μεθόδους παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθούν για ένα πεδίο, καθώς επίσης και τη θέση στο σύστημα αρχείων όπου τα συγκεκριμένα δεδομένα βρίσκονται.

Τα αποτελέσματα του geogrid είναι γραμμένα WRF I/O API μορφή, και ως εκ τούτου, από την επιλογή της μορφής NetCDF I / O, το geogrid μπορεί να γίνει για να γράψει την παραγωγή της σε NetCDF για εύκολη απεικόνιση με τη χρήση εξωτερικών πακέτων λογισμικού, συμπεριλαμβανομένων ncview, NCL, και RIP4.

2.2.2 Πρόγραμμα ungrib

Το πρόγραμμα ungrib διαβάζει GRIB αρχεία, κάνει "degrib" τα δεδομένα, και γράφει τα δεδομένα σε μια απλή μορφή, που ονομάζεται ενδιάμεση μορφή. Τα GRIB αρχεία περιέχουν χρονικά μεταβαλλόμενα μετεωρολογικά πεδία και είναι συνήθως από άλλα περιφερειακά ή παγκόσμια μοντέλα, όπως τα NAM NCEP ή GFS μοντέλα. Το πρόγραμμα ungrib μπορεί να διαβάσει GRIB Edition 1 και, εφόσον καταρτίζονται με "GRIB2" επιλογή, GRIB Edition 2 αρχεία.

Τα GRIB αρχεία συνήθως περιέχουν περισσότερα πεδία από ό, τι χρειάζονται για να προετοιμαστεί το WRF. Και οι δύο εκδόσεις της μορφής GRIB χρησιμοποιούν διάφορους κώδικες για να προσδιορίσουν τις μεταβλητές και τα επίπεδα στο αρχείο GRIB. Το Ungrib χρησιμοποιεί πίνακες των κωδικών αυτών - που ονομάζεται Vtables (variables tables) για να καθορίσει ποια πεδία να εξαγάγονται από το αρχείο GRIB και να γραφούν στην ενδιάμεση μορφή. Τα Vtables για τα κοινά αρχεία GRIB παρέχονται με το λογισμικό ungrib.

2.2.3 Πρόγραμμα metgrid

Το πρόγραμμα metgrid παρεμβάλλει οριζόντια τα μετεωρολογικά δεδομένα ενδιάμεσης-μορφής που εξάγονται από το πρόγραμμα ungrib πάνω στις περιοχές της προσομοίωσης που ορίζονται από το πρόγραμμα geogrid. Η παρεμβολή εξόδου metgrid μπορεί στη συνέχεια να καταποθεί από το πραγματικό πρόγραμμα WRF. Το εύρος των ημερομηνιών που θα γίνει παρεμβολή από το metgrid ορίζονται στο "κοινό" αρχείο namelist του WPS, και τα εύρη ημερομηνιών πρέπει να προσδιορίζονται χωριστά στο namelist για κάθε τομέα της προσομοίωσης. Το έργο του προγράμματος metgrid, όπως και του προγράμματος ungrib, είναι εξαρτώμενο από τον χρόνο, και γι' αυτό το metgrid εκτελείται κάθε φορά που μια νέα προσομοίωση έχει προετοιμαστεί.

Ο έλεγχος για το πώς κάθε μετεωρολογικό πεδίο παρεμβάλλεται, παρέχεται από το αρχείο METGRID.TBL. Το αρχείο METGRID.TBL παρέχει ένα τμήμα για κάθε πεδίο, και μέσα σε ένα τμήμα, είναι δυνατό να καθοριστούν οι επιλογές όπως οι μέθοδοι παρεμβολής που πρέπει να χρησιμοποιούνται για το πεδίο, το πεδίο που ενεργεί ως μάσκα για τις συγκεκριμένες παρεμβολές, και το πλέγμα (π.χ., U, V σε ARW? H, V σε NMM) στο οποίο παρεμβάλλεται ένα πεδίο.

Τα αποτελέσματα από το metgrid είναι γραμμένα σε / O μορφή API WRF I, και ως εκ τούτου, από την επιλογή της μορφής NetCDF I / O, το metgrid μπορεί να προγραμματιστεί για να γράψει τα αποτελέσματά του σε NetCDF για εύκολη απεικόνιση, με τη χρήση εξωτερικών πακέτων λογισμικού, συμπεριλαμβανομένης της νέας έκδοσης του RIP4 .

Στην συνέχεια αναφέρονται οι ειδικές μεταβλητές ξεχωριστά για τα 3 αυτά προγράμματα.

2.2.4 Εξισώσεις του μετεωρολογικού μοντέλου WRF

Οι εξισώσεις του ARW σχηματίζονται με τη χρήση μιας κατακόρυφης συντεταγμένης της υδροστατικής πίεσης που ακολουθεί την τοπογραφία, ορίζεται ως η και ορίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{ph - pt}{\mu}$$

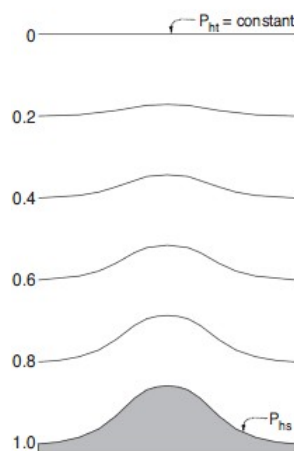
και $\mu = phs - pht$,

ph : η συνιστώσα της υδροστατικής πίεσης,

phs, pht : οι τιμές της πίεσης στην επιφάνεια και στην κορυφή των ορίων

αντίστοιχα.

Οι τιμές αυτής της παραμέτρου κυμαίνονται από 1 στην επιφάνεια μέχρι και 0 στο ανώτερο όριο του μοντέλου, όπως παρουσιάζεται στο **σχήμα 4**.



Σχήμα 4 : Κατακόρυφη συντεταγμένη η του ARW-WRF.

2.2.5 Επιλογές του μοντέλου WRF

Στο αριθμητικό μοντέλο WRF-ARW υπάρχει η δυνατότητα επιλογής και χρήσης πληθώρας παραμετροποιήσεων των φυσικών διεργασιών. Οι επιλογές του μοντέλου για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών μπορούν να ταξινομηθούν σε μια σειρά κατηγοριών. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Ατμοσφαιρική ακτινοβολία (μικρού και μεγάλου μήκους κύματος)
- Μικροφυσική
- Παραμετροποίηση κατακόρυφης ανάπτυξης
- Επιφανειακό στρώμα
- Μοντέλο γης εδάφους
- Πλανητικό οριακό στρώμα

2.2.5.1 Ατμοσφαιρική ακτινοβολία

Το σχήμα ακτινοβολίας ρυθμίζει τη θέρμανση της ατμόσφαιρας μέσω της απόκλισης της ροής της ακτινοβολίας στα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα και του ισοζυγίου της ακτινοβολίας στο έδαφος από τις δύο συνιστώσες: μικρού και μεγάλου μήκους κύματος. Η μεγάλη μήκους κύματος ακτινοβολία αντιστοιχεί στην υπεριώδη ή θερμική ακτινοβολία, η οποία απορροφάται και εκπέμπεται από αέρια και επιφάνειες. Η ανοδική από το έδαφος μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία καθορίζεται την ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας, η οποία εξαρτάται από το είδος χρήσης γης καθώς και από την επιφανειακή θερμοκρασία. Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία περιλαμβάνει την ευρύτερη ορατή ακτινοβολία. Η πηγή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας είναι ο ήλιος αλλά συμπεριλαμβάνονται και διαδικασίες όπως η ανάκλαση, η απορρόφηση και η σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα και στις διάφορες επιφάνειες. Η ανοδική ροή αυτού του είδους της ακτινοβολίας προέρχεται ουσιαστικά από την λευκαύγεια - ανακλαστικότητα του εδάφους.

Στην ατμόσφαιρα η ακτινοβολία επηρεάζεται από το ποσοστό της νεφοκάλυψης, όπως επίσης και από τις συγκεντρώσεις και κατανομές αερίων (υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, όζον, αερίων ιχνοστοιχείων). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των σχημάτων παραμετροποίησης ακτινοβολίας.

2.2.5.2 Μικροφυσική

Για τη μικροφυσική περιλαμβάνονται διεργασίες σχηματισμού υδρατμών, νεφών και υετού. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας) δίνονται οι επιλογές που

υπάρχουν για την μικροφυσική, παρουσιάζεται ο αριθμός των μεταβλητών υγρασίας που υπολογίζονται σε κάθε σχήμα και κατά πόσο συμπεριλαμβάνονται διεργασίες σχηματισμού πάγου και μικτής φάσης.

2.2.5.3 Παραμετροποίηση κατακόρυφης ανάπτυξης

Τα σχήματα παραμετροποίησης κατακόρυφης ανάπτυξης (cumulus) σχετίζονται με την επίδραση των νεφών μικρής κλίμακας που δημιουργούνται από ανοδικές κινήσεις του αέρα. Συγκεκριμένα αναπαριστούν κατακόρυφες κινήσεις εξαιτίας ανοδικών και καθοδικών ρευμάτων αλλά και διεργασίες συμπύκνωσης έξω από τα νέφη. Λειτουργούν σε ανεξάρτητες στήλες σύμφωνα με το σχήμα που έχει επιλεγεί από τον χρήστη του μοντέλου, παρέχοντας κατακόρυφες κατανομές θέρμανσης και υγρασίας.

Τα συγκεκριμένα σχήματα είναι έγκυρα για μεγαλύτερη χωρική ανάλυση πλέγματος (μεγαλύτερα από 10 km) έτσι ώστε να μπορούν να παράγουν ικανοποιητικά την λανθάνουσα θερμότητα σε ρεαλιστική χρονική κλίμακα στις στήλες συναγωγής. Ωστόσο έχει αποδειχτεί ότι μερικά από τα σχήματα είναι χρήσιμα στην συναγωγή στροβίλων σε εφαρμογές με οριζόντιες κλίμακες πλέγματος 5–10 km. Δεν πρέπει όμως αυτά τα σχήματα να χρησιμοποιούνται όταν το μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσει τους στροβίλους συναγωγής από μόνο του.

2.2.5.4 Επιφανειακό στρώμα

Τα σχήματα του επιφανειακού στρώματος (surface layer) εκτιμούν τις ταχύτητες τριβής και τους συντελεστές μεταφοράς έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των ροών θερμότητας και υγρασίας αλλά και άλλων διεργασιών του οριακού στρώματος. Οι επιλογές για αυτή την κατηγορία παραμετροποίησης των φυσικών διεργασιών είναι τρεις και είναι οι ακόλουθες:

- Θεωρία ομοιότητας MM5
- Θεωρία ομοιότητας Eta
- Θεωρία ομοιότητας Pleim-Xiu

2.2.5.5 Μοντέλο εδάφους

Για την εκτίμηση των ροών θερμότητας και υγρασίας, πάνω από σημεία ξηράς και θάλασσας, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα εδάφους (land surface models). Συγκεκριμένα τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν την πληροφορία από το επιφανειακό

στρώμα, την ακτινοβολία και τον υετό και συνδυάζοντάς τα με τις ιδιότητες του εδάφους, καθορίζουν τις κάτω 'οριακές συνθήκες' της κατακόρυφης μεταφοράς του πλανητικού οριακού στρώματος. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλογών του μοντέλου, η περιγραφή του οποίου έγινε πιο πάνω.

2.2.5.6 Πλανητικό οριακό στρώμα (ΠΟΣ)

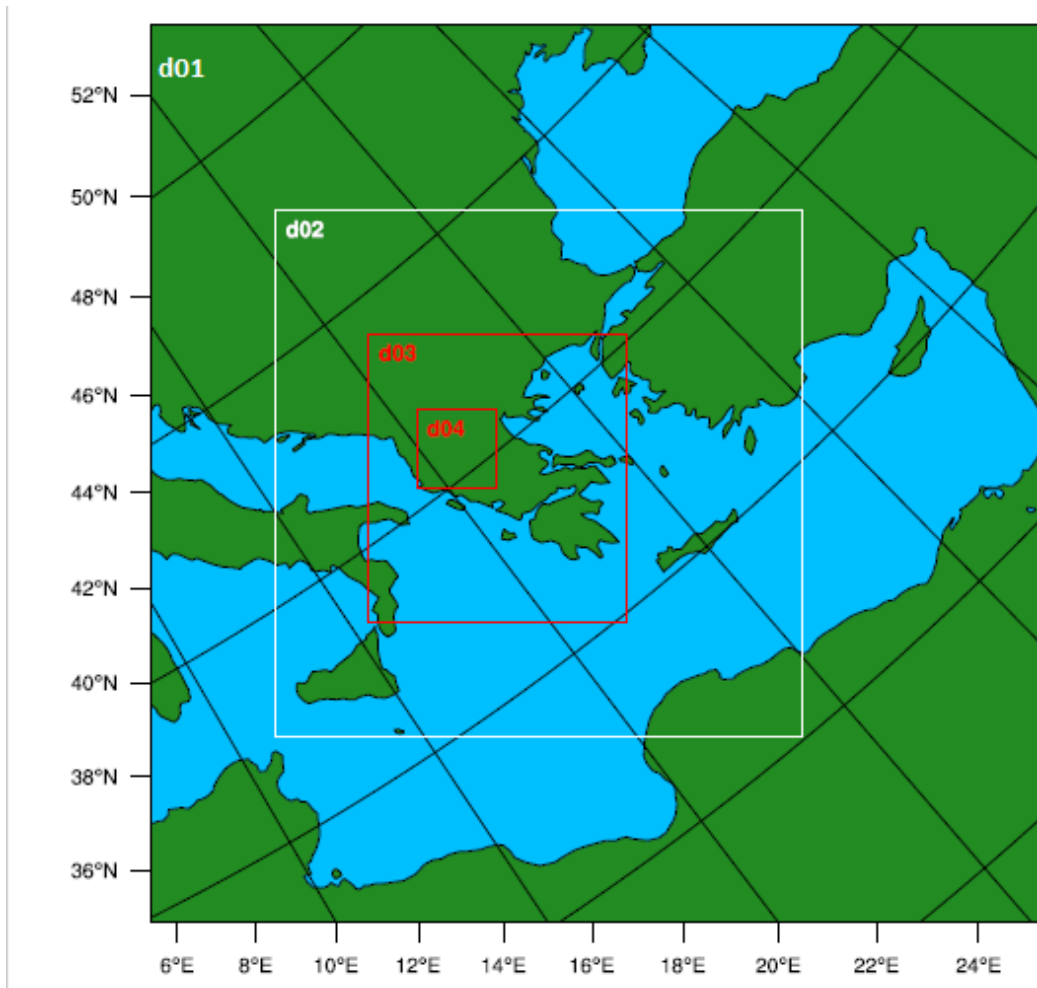
Το πλανητικό οριακό στρώμα (planetary boundary layer) σχετίζεται με τις κατακόρυφες ροές που οφείλονται στην τυρβώδη μεταφορά όχι μόνο στο οριακό στρώμα αλλά σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη. Οι ροές επιφανείας προκύπτουν από το μοντέλο εδάφους και το επιφανειακό στρώμα και στη συνέχεια το μοντέλο οριακού στρώματος παρέχει τις ατμοσφαιρικές τάσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και ορμής σε ολόκληρη την ατμοσφαιρική στήλη καθορίζοντας τα προφίλ των ροών στο οριακό στρώμα.

Κεφάλαιο 3- Μεθοδολογία προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η συνολική μεθοδολογία για την κλιματική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.1 Επιλογή των κατάλληλων περιοχών και η συγκέντρωση δεδομένων

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η επιλογή των κατάλληλων περιοχών (domains) για την εφαρμογή της μεθόδου του δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας. Στη συνέχεια, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού NCL (NCAR Command Language) εντοπίστηκαν οι συγκεκριμένες περιοχές στις πλεγματικές περιοχές του μοντέλου WRF. Η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού έχει σχεδιαστεί ειδικά για επιστημονική ανάλυση και οπτικοποίηση. Ο λόγος υποβιβασμού της κλίμακας που επιλέχθηκε ήταν 1/3 (ένα προς τρία). Κάθε κελί του γονικού πλέγματος (Σχήμα X, d01) έχει διαστάσεις 81km × 81km, ενώ τα κελιά των διαδοχικών υποπεριοχών έχουν διαστάσεις 27 km × 27 km (Σχήμα X, d0), 9 km × 9 km (Σχήμα X, d03) και 3 km × 3 km (Σχήμα X, d04), αντίστοιχα. Η πρώτη περιοχή περιέχει 900 κελιά επομένως η περιοχή που καλύπτεται είναι 2430 km x 2430 km και καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Αντιστοίχως, η δεύτερη περιοχή (αριθμός κελιών=2704) καλύπτει 1404 km x 1404 km, δηλαδή την ευρύτερη περιοχή της Ελλάδος, την νότια Ιταλία καθώς και την περιοχή των Βαλκανίων και της Δυτικής Τουρκίας. Η τρίτη περιοχή (αριθμός κελιών=6460) καλύπτει 684 km x 765 km , κυρίως δηλαδή την περιοχή της Ελλάδος, και τέλος η τέταρτη περιοχή (αριθμός κελιών=4900) καλύπτει 210 km x 210 km , την περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, και πιο συγκεκριμένα την περιοχή της Κοζάνης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οπτικοποιημένα οι τέσσερις περιοχές που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της κλιματικής προσομοίωσης.



Ακολούθως, έγινε συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων των υπό εξέταση μεταβλητών που ήταν απαραίτητα για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Τα δεδομένα αυτά, μετά από κατάλληλη αναζήτηση στο διαδίκτυο, βρίσκονται συγκεντρωμένα στην ιστοσελίδα RDA NCAR, απ' όπου και τα συλλέξαμε, μετά από σχετική αίτηση.

Το RDA (αρχείο δεδομένων έρευνας), το οποίο επιβλέπεται από το τμήμα δεδομένων Στήριξης (DSS) του Εργαστηρίου Συστημάτων Υπολογιστικής και Πληροφοριών (CISL) του NCAR, περιέχει μια μεγάλη και διαφοροποιημένη συλλογή των μετεωρολογικών και ωκεανογραφικών παρατηρήσεων, αποτελέσματα από λειτουργικά και αναλυτικά μοντέλα και σύνολα απομακρυσμένων δεδομένων τηλεπισκόπησης για τη στήριξη της ατμοσφαιρικής και γεωεπιστημονικής έρευνας, μαζί με βοηθητικά σύνολα δεδομένων, όπως της τοπογραφίας/ βαθυμετρίας, της βλάστησης, και των χρήσεων γης. Το προϊόν που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη

διπλωματική είναι το 083.2, του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω.

Αυτά τα επιχειρησιακά δεδομένα παγκόσμιας ανάλυσης FNL, βρίσκονται σε πλέγμα 1 μοίρας επί 1 μοίρα, και παράγονται λειτουργικά κάθε έξι ώρες. Αυτό το προϊόν είναι από το Παγκόσμιο Σύστημα Αφομοίωσης Δεδομένων (GDAS), το οποίο συλλέγει συνεχώς δεδομένα παρατήρησης από το Παγκόσμιο Σύστημα Τηλεπικοινωνιών (GTS), και από άλλες πηγές, για πολλές αναλύσεις. Τα FNL αρχεία δημιουργούνται από το ίδιο πρόγραμμα που χρησιμοποιεί και το NCEP στο παγκόσμιο σύστημα πρόγνωσης (GFS), αλλά τα FNL δημιουργούνται περίπου μία ώρα αφού έχει ολοκληρωθεί το GFS. Τα FNL καθυστερούν έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα δεδομένα παρατηρήσεων. Το GFS χρησιμοποιεί τα FNL δεδομένα από τον προηγούμενο κύκλο έξι ωρών, ως μέρος της προετοιμασίας του.

Οι αναλύσεις είναι διαθέσιμες στην επιφάνεια, στα 26 υποχρεωτικά επίπεδα από 1,000 έως 10 millibars, στο επιφανειακό οριακό στρώμα και σε μερικά στρώματα σίγμα και μερικά άλλα. Παράμετροι περιλαμβάνουν την επιφανειακή πίεση, την πίεση στη στάθμη της θάλασσας, το γεωδυναμικό ύψος, τη θερμοκρασία, τη θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, τις χρήσεις γης, την παγοκάλυψη, τη σχετική υγρασία, τους ανέμους, τη κατακόρυφη κίνηση, το στροβιλισμό και το όζον.

Εν τέλει, έγινε η συγκέντρωση των κλιματολογικών δεδομένων εξόδου της προσομοίωσης του μοντέλου γενικής κυκλοφορίας NASA GISS GCM ModelE, για τα έτη 1880 έως 2055, που είχε σαν βάση για την εφαρμογή της προσομοίωσης το σεναρίο RCP 4.5.

3.2 Προσομοίωση κλιματικών και μετεωρολογικών δεδομένων

Μετά την συλλογή των παραπάνω δεδομένων, ακολούθησε η προσομοίωση των μετεωρολογικών δεδομένων για τα έτη 2006-2015 και των κλιματολογικών δεδομένων για τα έτη 2006-2015 και 2046 έως 2055, μέσω του προγράμματος WRF. Οι επιθυμητές μεταβλητές υπό εξέταση για την συγκεκριμένη προσομοίωση ήταν η θερμοκρασία στα 2 μέτρα, η βροχόπτωση, το ύψος του οριακού στρώματος, η ταχύτητα ανέμου και η φορά ανέμου.

Αρχικά πρέπει να γίνει η προετοιμασία των δεδομένων. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο κατάλληλος VTable ώστε το πρόγραμμα ungrib.exe, να αποκωδικοποιήσει σωστά τα μετεωρολογικά αρχεία που έχουν συλλεχθεί. Τα αρχεία αυτά προέρχονται από το μοντέλο GFS οπότε θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας σύνδεσμος με τον αντίστοιχο πίνακα

Επίσης, πρέπει να δημιουργηθούν οι σύνδεσμοι των μετεωρολογικών αρχείων με το εργαλείο link_grib.csh. Έτσι δημιουργούνται όλοι οι σύνδεσμοι των αρχείων.

Σειρά έχει η τροποποίηση του αρχείου-οδηγού **namelist.wps** για μπορεί να τρέξει το πρόγραμμα ungrib.exe, ώστε να δημιουργηθούν τα αρχεία "FILE".

Στην συνέχεια γίνεται ο καθορισμός της περιοχής μελέτης με το πρόγραμμα geogrid. Αρχικά γίνεται η τροποποίηση εκ νέου του αρχείου namelist.wps. Γίνεται εκτέλεση του προγράμματος geogrid.exe και έτσι έχουν δημιουργηθεί τα αρχεία geo_em.d01.nc/

Για την ολοκλήρωση της προδιεργασίας, χρειάζεται να γίνει η παρεμβολή των δεδομένων στην περιοχή μελέτης, μέσω του προγράμματος metgrid. Γίνεται μια τροποποίηση του αρχείου namelist.wps ώστε το metgrid να λάβει υπόψιν του και τα μετεωρολογικά/ κλιματικά δεδομένα.

Στη συνέχεια, γίνεται εκτέλεση του metgrid, όπου μετά το τέλος της διαδικασίας θα έχουν δημιουργηθεί τα αρχεία **met_em**.

Σειρά τώρα έχει να γίνει εκτέλεση του μοντέλου WRF. Αρχικά, θα πρέπει να γίνει αντιγραφή στον φάκελο **..Build_WRF/WRFV3/test/em_real** όλων των αρχείων που εξήγαγε το metgrid. Γίνεται τροποποίηση του αρχείου-οδηγού namelist.input. Τώρα μπορεί να τρέξει το πρόγραμμα real.exe ώστε να παραχθούν τα αρχεία που απαιτεί το WRF. Τα αρχεία που παράγονται είναι τα wrfinput_d, wrfbd_d και τα wrflowinp_d. Τέλος γίνεται εκτέλεση του WRF.

Τα αρχεία εξόδου περιέχουν όλα τα δεδομένα για όλες τις κλιματικές μεταβλητές, κάτι που καθιστά τον αποθηκευτικό χώρο του κάθε αρχείου πολύ μεγάλο.

Λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων (λόγω των πολλών μεταβλητών που έχουν υπολογισθεί), χρησιμοποιήθηκαν δυο επιπλέον προγράμματα, το πρόγραμμα

MSIP (Meteorology Chemistry Interface Processor) και το m3extract, για την εξαγωγή των επιθυμητών μεταβλητών. Μέσω του WRF υπολογίστηκαν πολλές περισσότερες μεταβλητές από αυτές που ήταν προς ερεύνηση στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Παρακάτω παρουσιάζεται σαν παράδειγμα ένας πίνακας που δείχνει τη φανερή διαφορά σε αποθηκευτικό χώρο πριν και μετά την εξαγωγή των δεδομένων, δηλαδή πόσο αποθηκευτικό χώρο καταλάμβαναν το κάθε κλιματικό/ μετεωρολογικό δεδομένο ανά ημέρα πριν και μετά.

Αριθμός DOMAIN	ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ (MB)
1	39 MB/ ημέρα	1,6 MB/ ημέρα
2	120 MB/ ημέρα	5,3 MB/ ημέρα
3	290 MB/ ημέρα	13,2 MB/ ημέρα
4	220 MB/ ημέρα	9,9 MB/ ημέρα

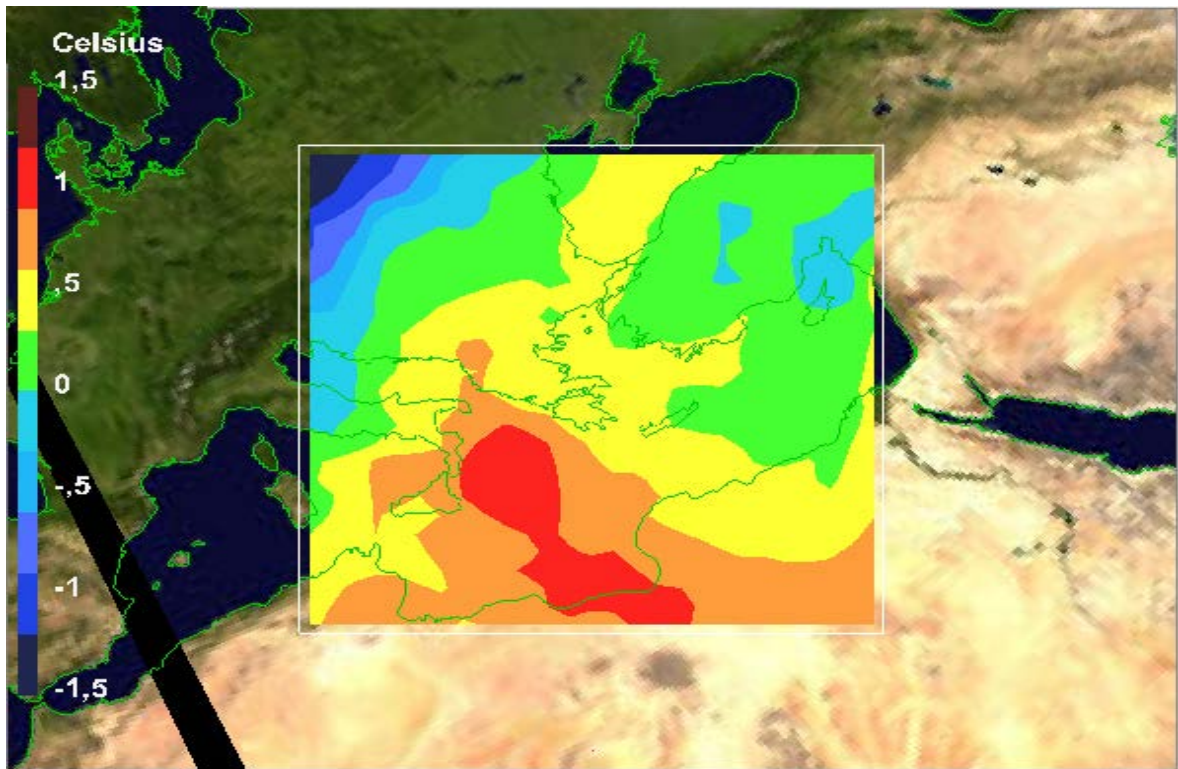
Έχοντας μειώσει και τον όγκο δεδομένων, υπολογίστηκε ο μέσος όρος όλων των επιθυμητών μεταβλητών για 10 χρόνια, μέσω του προγράμματος dw_avg.plt. Έγινε δηλαδή ο υπολογισμός μέσων όρων για το παρόν (2006-2015) και για τα κλιματολογικά και για τα μετεωρολογικά δεδομένα, και υπολογισμός μέσου όρου για το μέλλον (2046-2055) μόνο για τα κλιματολογικά δεδομένα.

Κεφάλαιο 4- Παρουσίαση αποτελεσμάτων

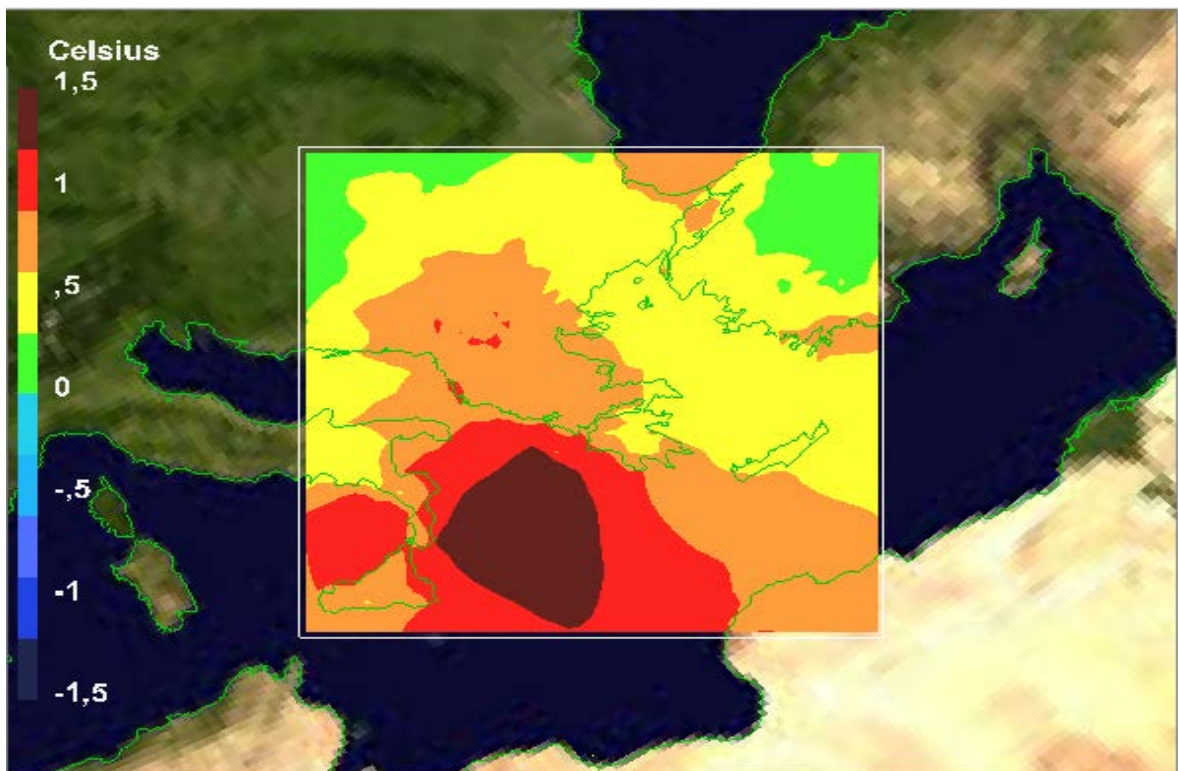
Στο παρών κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την ολοκλήρωση της κλιματικής προσομοίωσης με την διαδικασία που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά θα παρουσιαστούν με γραφήματα και θα σχολιαστούν ως προς τα αποτελέσματα τους οι μεταβλητές, θερμοκρασία, βροχόπτωση, ταχύτητα ανέμου, φορά ανέμου και ύψος οριακού στρώματος. Τα γραφήματα δημιουργήθηκαν μέσω του προγράμματος IDV Unidata. Τα αποτελέσματα των μεταβλητών αντιπροσωπεύουν τους μέσους όρους των δεκαετιών 2006-2015 και 2046-2055, για τον μήνα Αύγουστο, τόσο για τα μετεωρολογικά, όσο και για τα κλιματικά δεδομένα.

4.1 Θερμοκρασία εδάφους

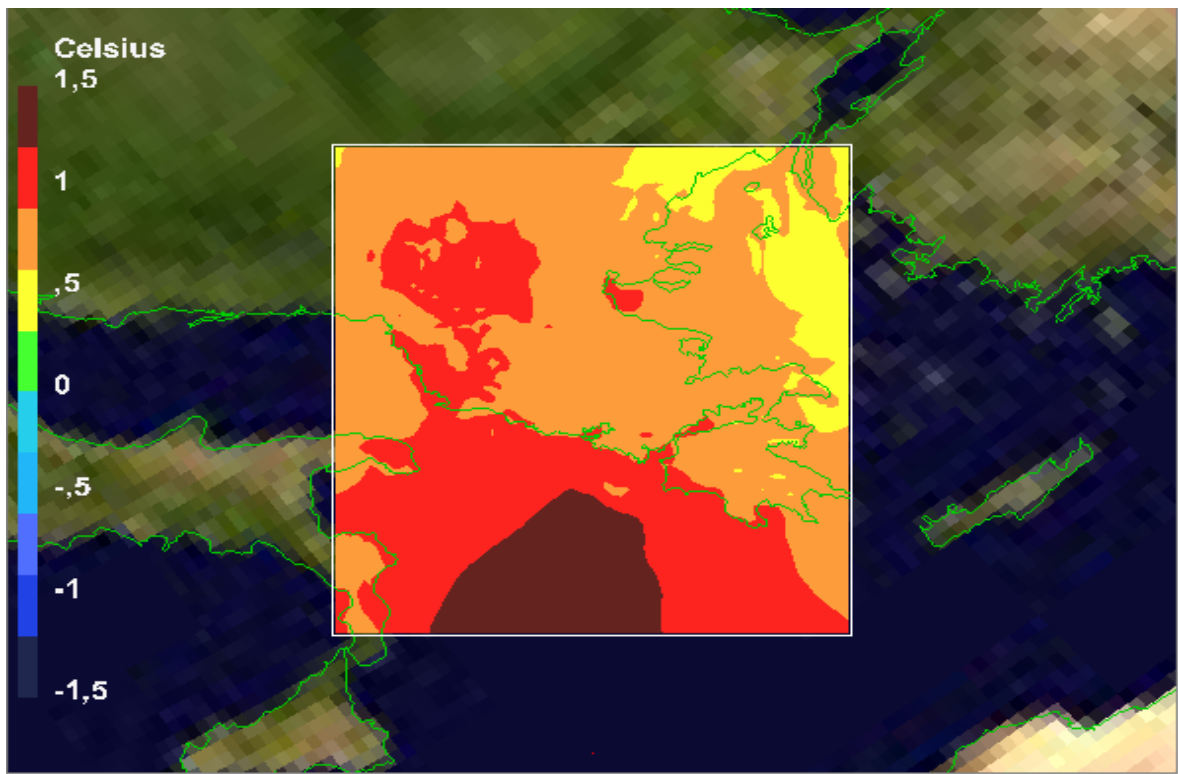
Έπειτα από τη διεξαγωγή της κλιματικής προσομοίωσης μέσω του προγράμματος WRF, προέκυψαν ως αποτελέσματα πρωτίστως οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες του μήνα Αυγούστου για τα κλιματικά δεδομένα, γεγονός που σημαίνει πως τα αποτελέσματα αυτά χρονολογούνται για τα έτη 2006-2015, που αντιστοιχούν στο παρών (present) και για τα έτη 2046-2055, που αντιπροσωπεύουν τις προβλέψεις για το μέλλον (future) κι εν συνεχεία προέκυψαν οι μέσες θερμοκρασίες για τα μετεωρολογικά δεδομένα, δηλαδή για πραγματικά δεδομένα που αναφέρονται αποκλειστικά στο παρών. Όσον αφορά το διαδικαστικό κομμάτι, αρχικά για την πραγματοποίηση του υπολογισμού των μέσων όρων των θερμοκρασιών για εύρος χρόνου 10ετών, δημιουργήθηκε ένα εξειδικευμένο πρόγραμμα, σκοπός του οποίου ήταν η εξοικονόμηση χρόνου. Εν συνεχεία, έχοντας ως δεδομένα τα άνωθεν αποτελέσματα υπολογίστηκε η διάφορα θερμοκρασίας που προβλέπει το μοντέλο μέσω της αφαίρεσης των μέσων όρων των μελλοντικών κλιματικών δεδομένων από τους υπολογισθέντες παροντικούς. Τέλος, η ζητούμενη πρόβλεψη για τη διακύμανση της θερμοκρασίας, βάσει της μετεωρολογίας, για την περίοδο 2046-2055, προέκυψε από την πρόσθεση της παραπάνω διαφοράς με τα μετεωρολογικά δεδομένα που προέκυψαν από τη χρήση του προγράμματος.



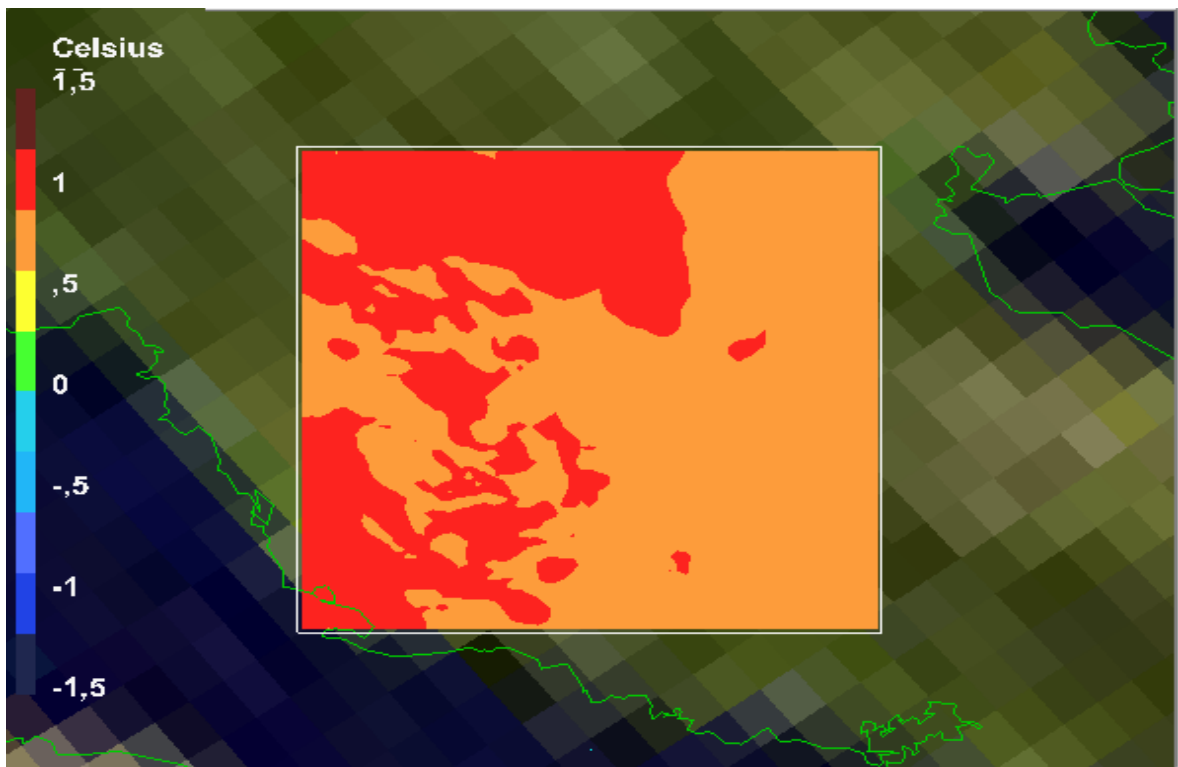
Σχήμα 4.1.1: Η διαφορά μέσω των όρων θερμοκρασιών για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.1.2: Η διαφορά μέσω των όρων θερμοκρασιών για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 2.



Σχήμα 4.1.3: Η διαφορά μέσω των όρων θερμοκρασιών για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 3.



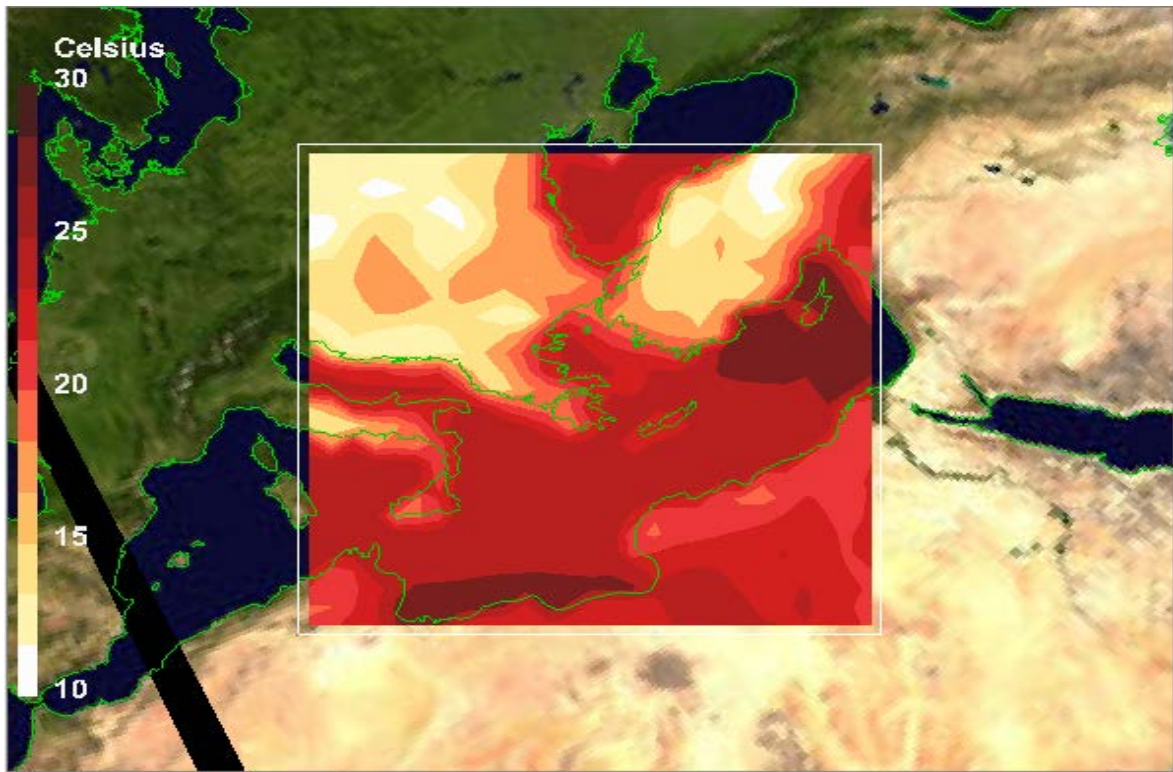
Σχήμα 4.1.4: Η διαφορά μέσω των όρων θερμοκρασιών για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 4.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, εξάγονται οι παρακάτω επισημάνσεις. Αρχικά, στο πρώτο domain, παρατηρείται πως η διαφορά θερμοκρασιών κυμαίνεται από $-1,5^{\circ}\text{C}$ έως $+1,5^{\circ}\text{C}$, δηλαδή υπάρχει ένα εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ θετικών και αρνητικών, στις θερμοκρασίες του παρόντος και του μέλλοντος. Από την άλλη όμως, παρατηρούμε ότι όσο μικραίνουμε την κλίμακα, η διαφορά αυτές τείνουν μόνο μεταξύ θετικών τιμών.

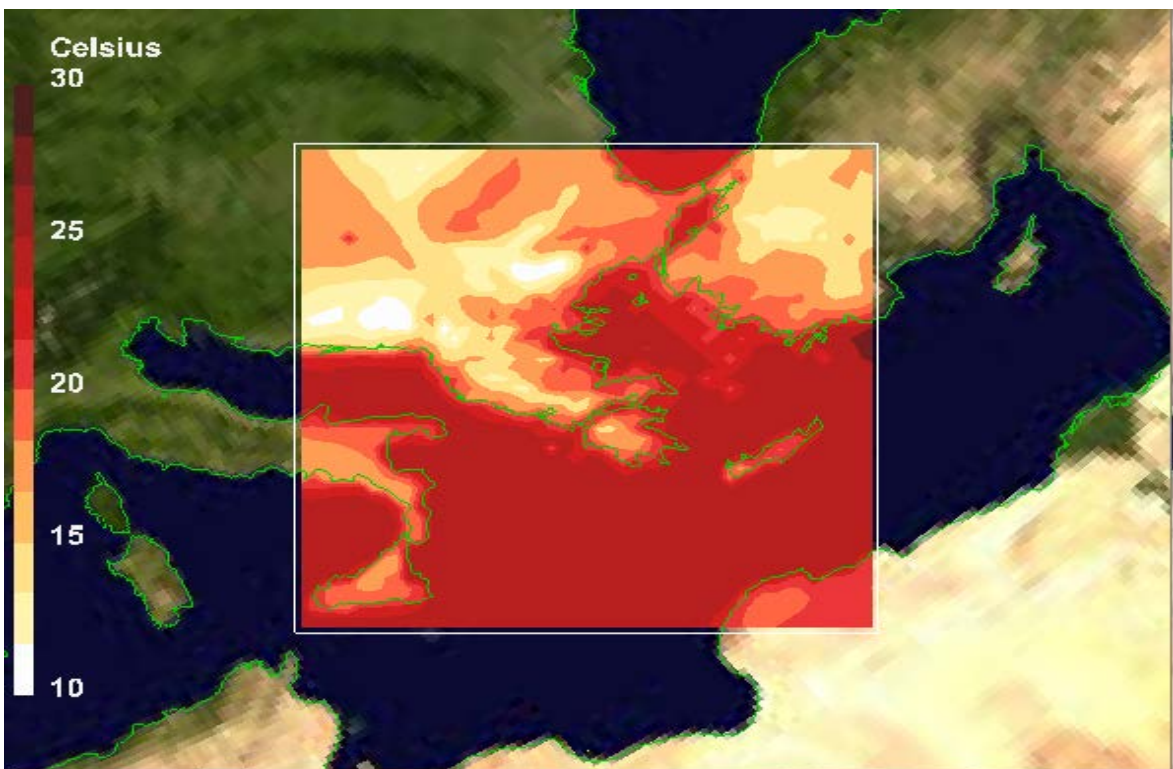
Αυτή η διαφορά $1,5^{\circ}\text{C}$ εμφανίζεται κυρίως σε παράκτιες περιοχές, και μια τέτοια αύξηση εκτιμάται πως μπορεί να οδηγήσει σε μία άνοδο της μέσης θαλάσσιας στάθμης κατά 15 έως 95 εκατοστά. Η άνοδος αυτή, μπορεί να προκαλέσει πλημμύρες σε περιοχές που βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο και κοντά στο επίπεδο της θάλασσας.

Από την άλλη, η αύξηση αυτή μπορεί να έχει και θετικές συνέπειες στο μέλλον. Η γεωργία στο μεγαλύτερο τμήμα της Ευρώπης και ιδιαίτερα στα μέσα γεωγραφικά πλάτη, θα μπορούσε ενδεχομένως να ωφεληθεί από μια συντηρητική άνοδο της θερμοκρασίας. Επιπλέον, η πιθανή εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, με μεγαλύτερη συχνότητα σε σχέση με το παρελθόν, μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερες κακές σοδειές. Σημαντική παράμετρο αποτελεί γενικά η ικανότητα της γεωργίας να προσαρμοστεί σε μελλοντικές κλιματικές μεταβολές.

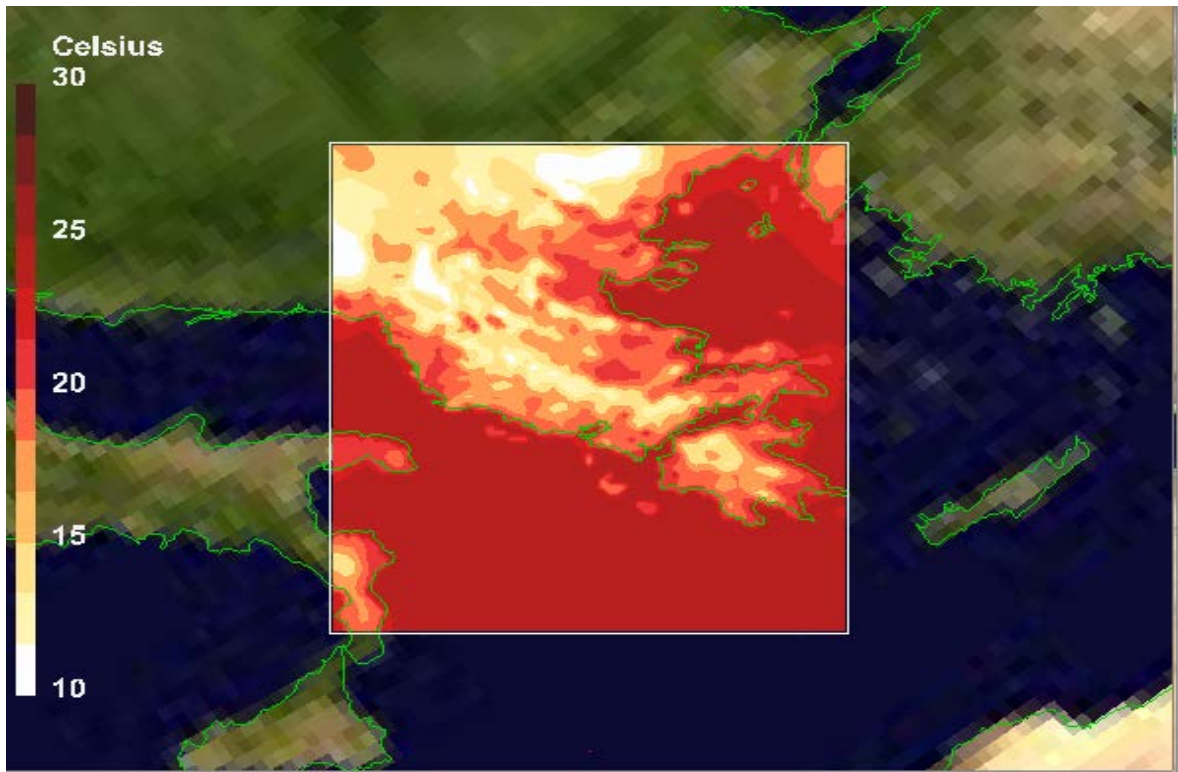
Αναφορικά με την υγεία, η άνοδος της θερμοκρασίας εμφανίζει δύο αντικρουόμενα άμεσα αποτελέσματα σε σχέση με την ανθρώπινη θνησιμότητα: οδηγεί σε αύξηση των θανάτων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού αλλά και σε μείωση των θανάτων κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Μία άλλη παράμετρος της παγκόσμιας θέρμανσης αφορά στην ενδεχόμενη εξάπλωση και άνθιση επιδημιών του παρελθόντος, καθώς οι μεγάλες θερμοκρασίες και η υγρασία αποτελούν κατάλληλο υπόβαθρο για την ανάπτυξη πολλών μικροβίων.



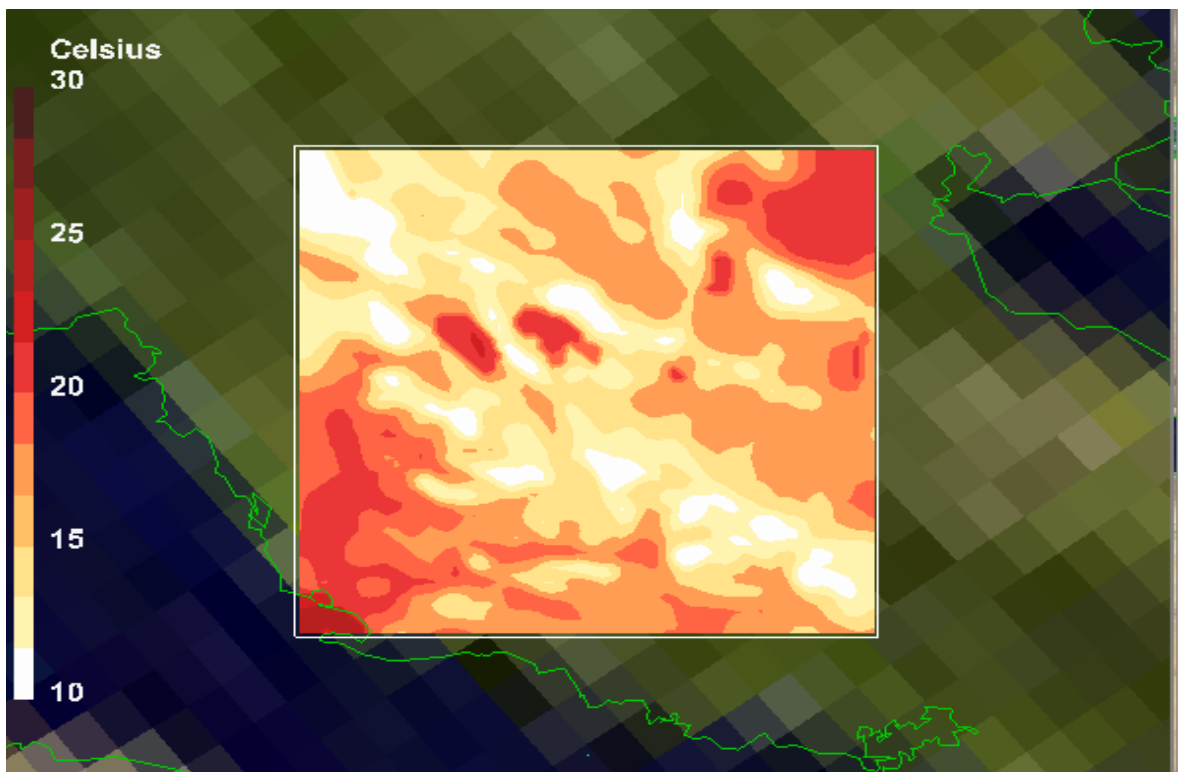
Σχήμα. 4.1.5: Ο μέσος όρος θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα. 4.1.6: Ο μέσος όρος θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 2.

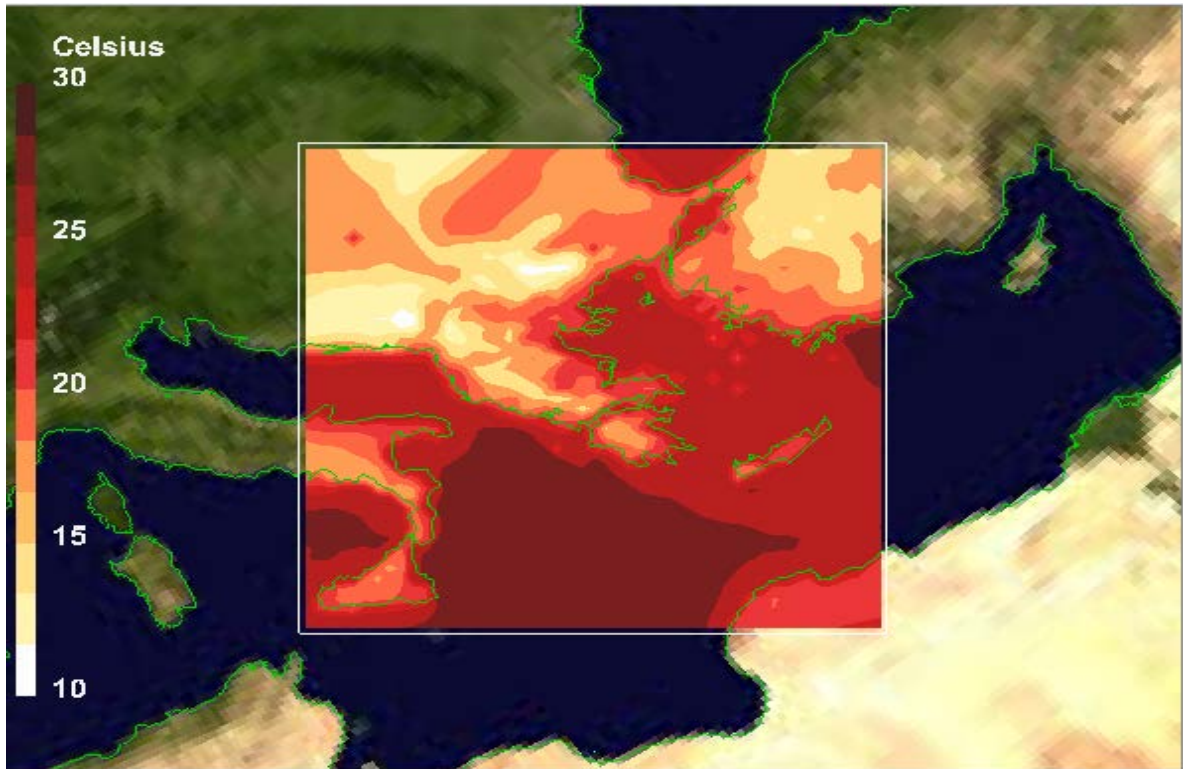


Σχήμα. 4.1.7: Ο μέσος όρος θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 3.

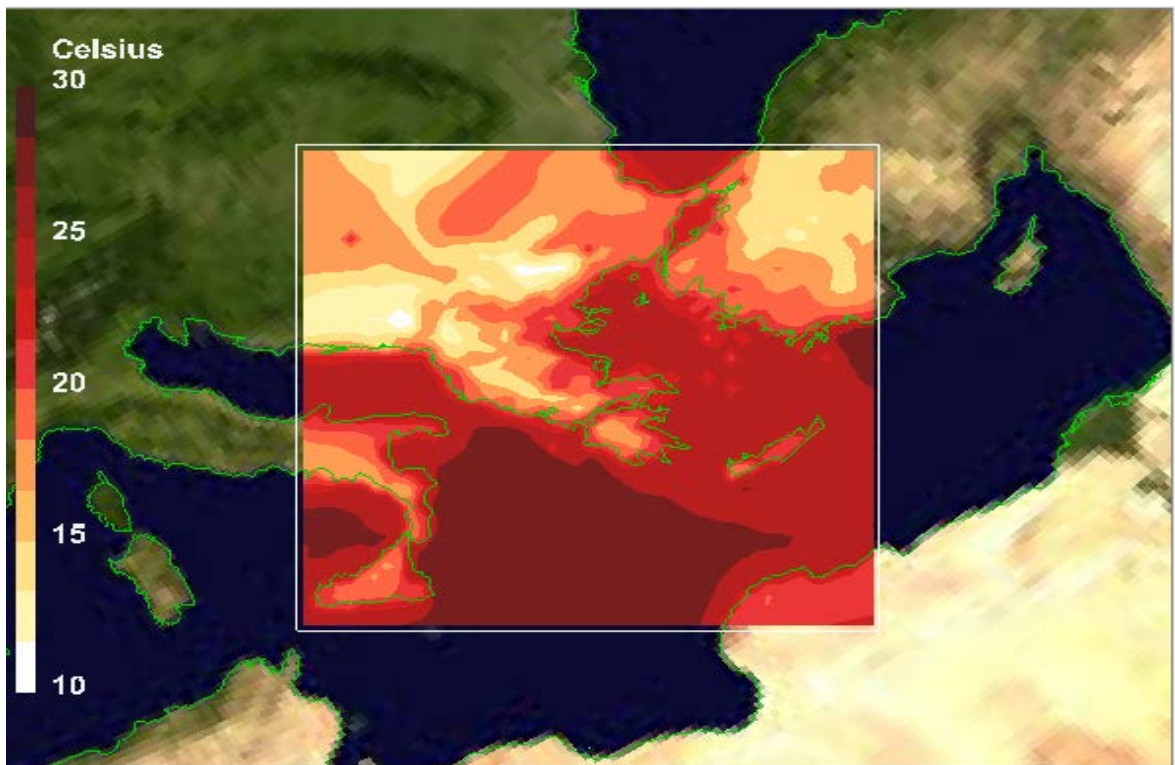


Σχήμα. 4.1.8: Ο μέσος όρος θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 4.

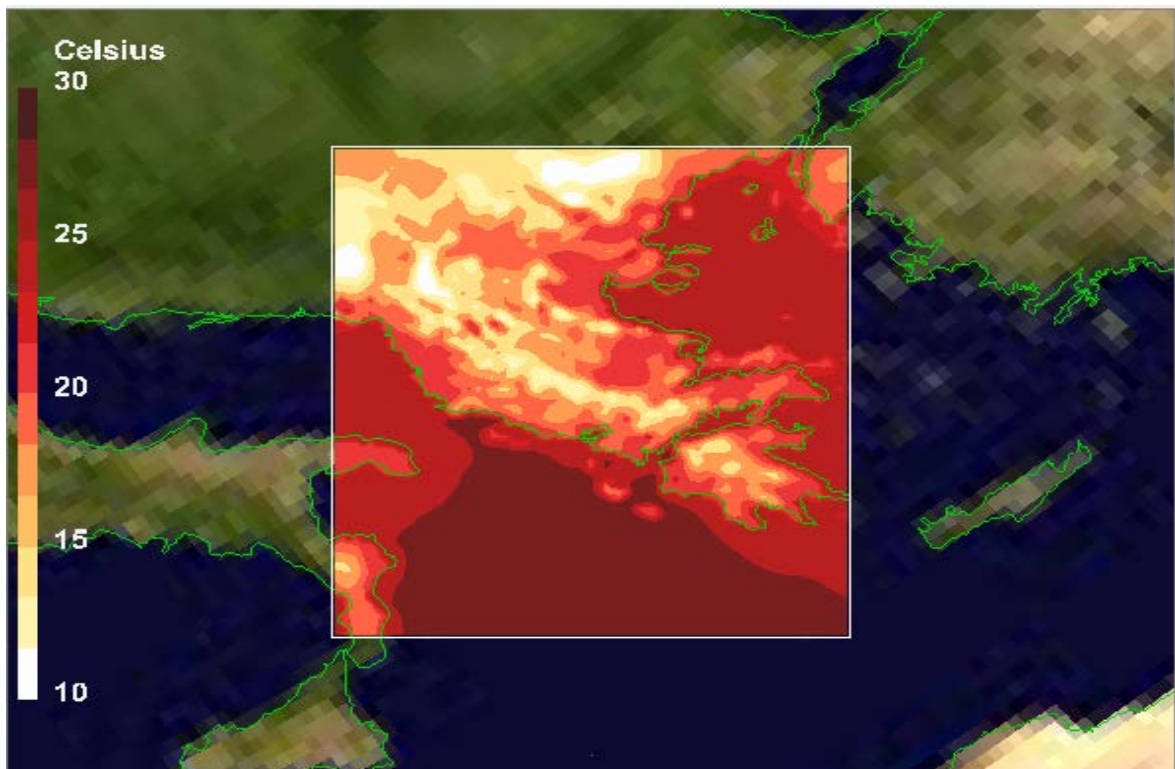
Από τα παραπάνω γραφήματα για τον μέσο όρο θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, φέρεται πως όσο γίνεται ανάλυση στα domains που έχουν προκύψει από τον δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας, τόσο ακριβέστερα είναι τα αποτελέσματα.



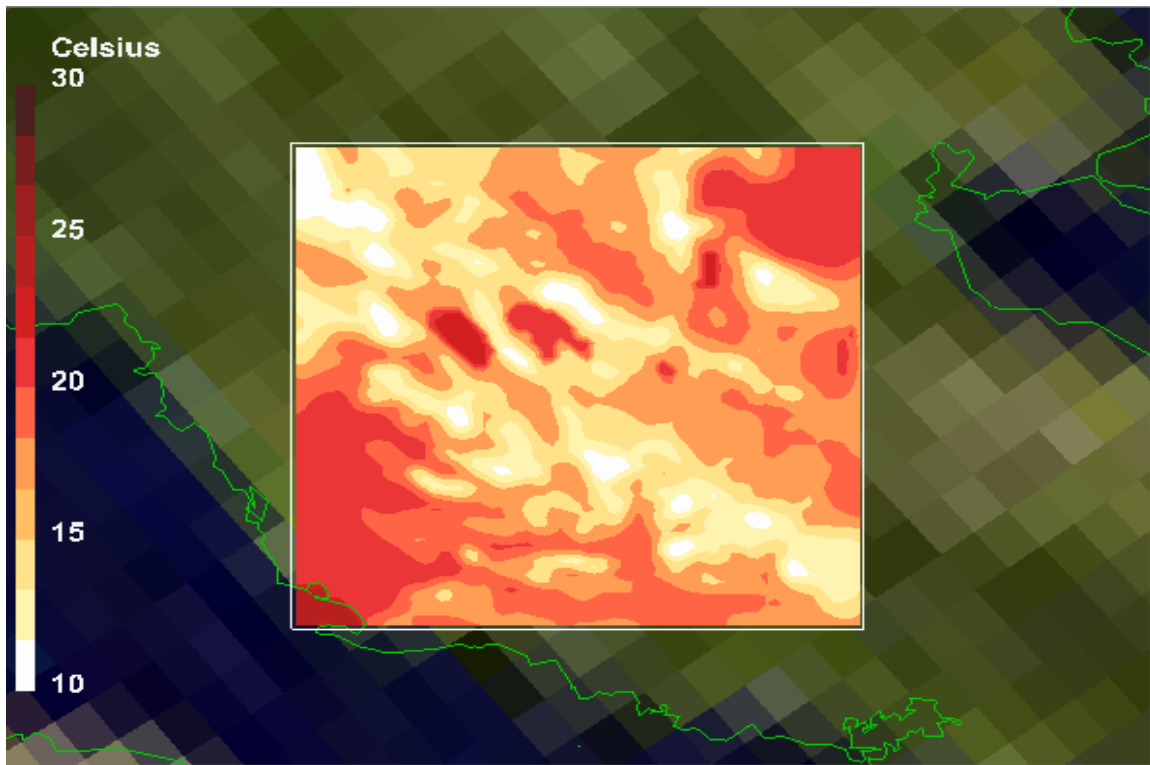
Σχήμα 4.1.9 : Πρόβλεψη θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.1.10 : Πρόβλεψη θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 2.



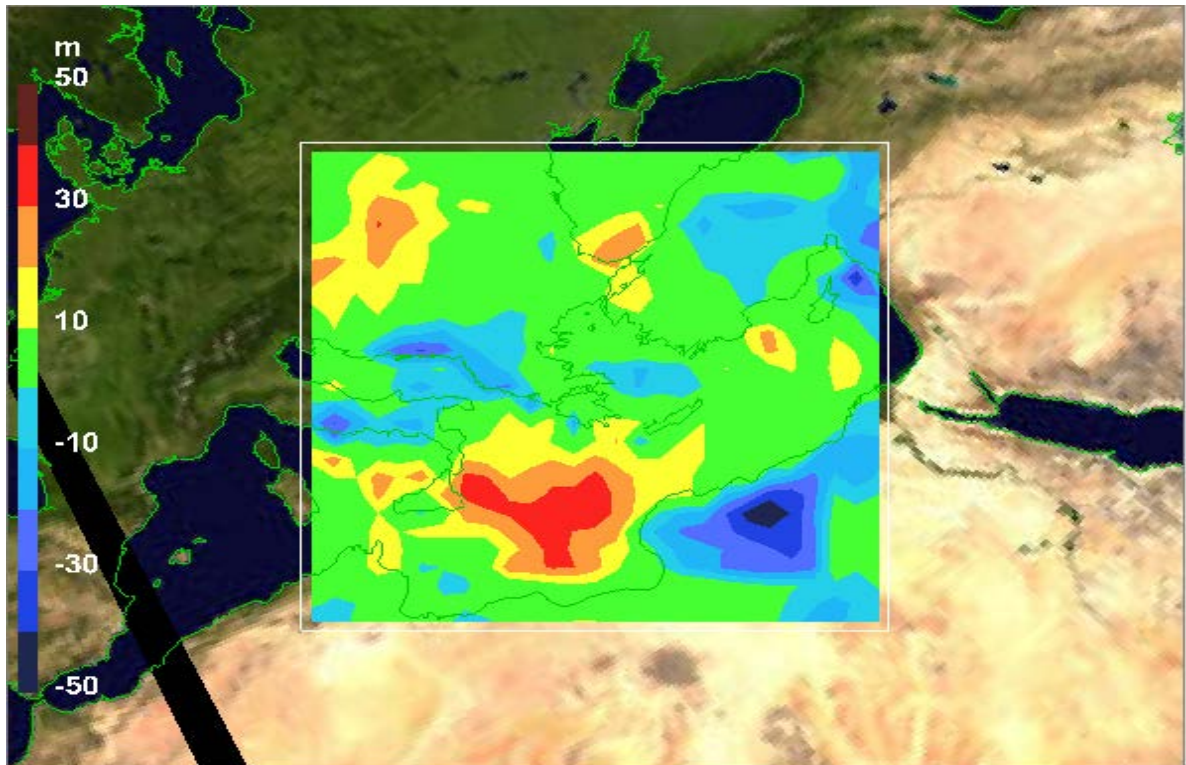
Σχήμα 4.1.11 : Πρόβλεψη θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 3.



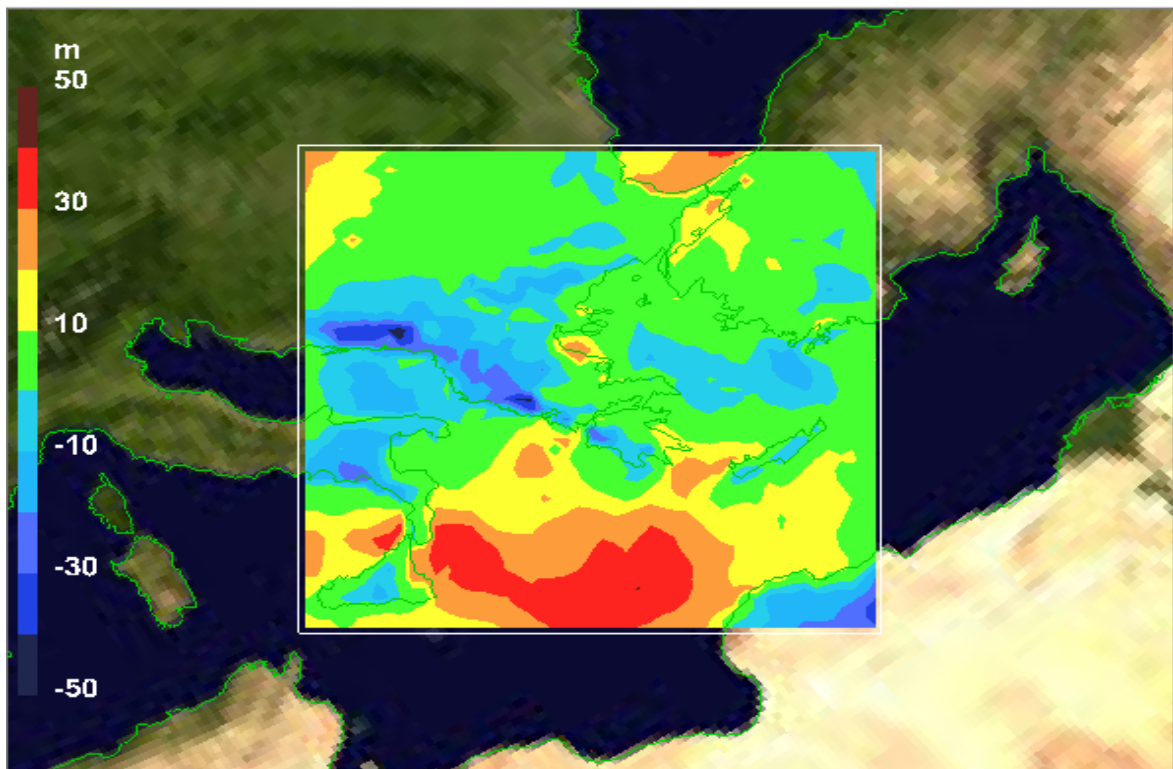
Σχήμα 4.1.12 : Πρόβλεψη θερμοκρασιών για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 4.

4.2 Πλανητικό οριακό στρώμα

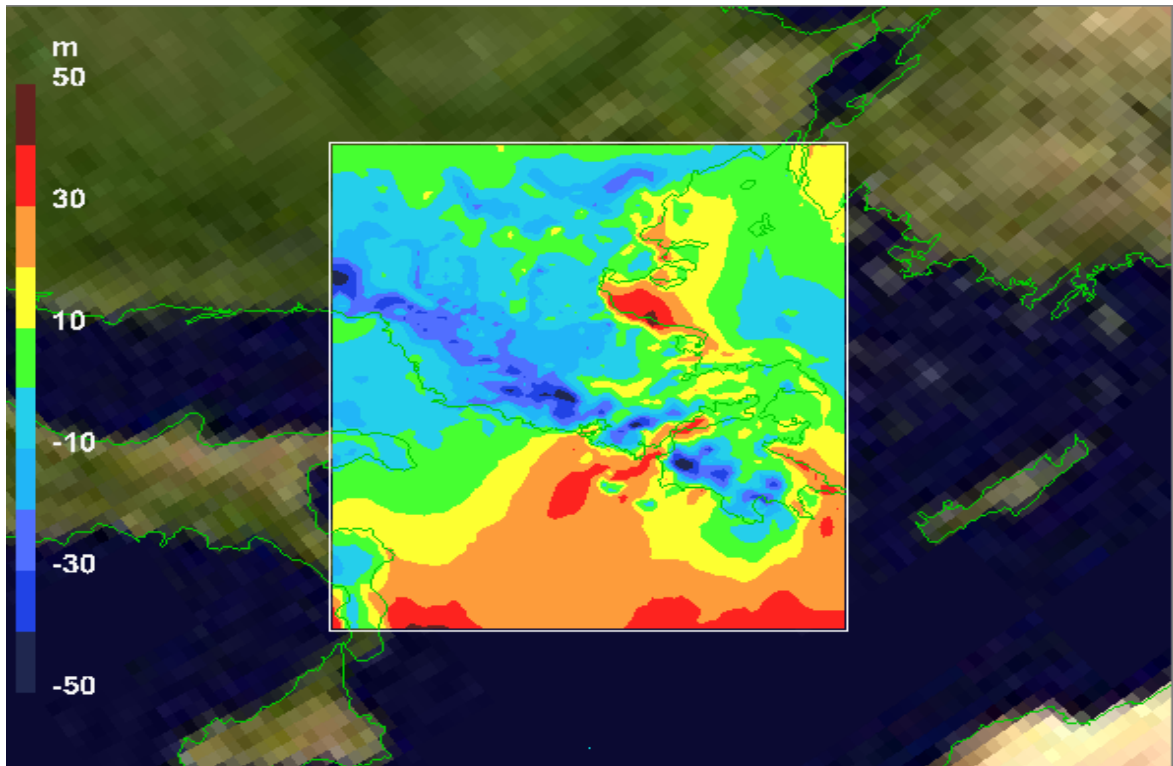
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, σε μορφή γραφημάτων, για το οριακό στρώμα, για τα κλιματολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα, για τα 4 domains. Η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι κοινή με αυτή των προηγούμενων μεταβλητών.



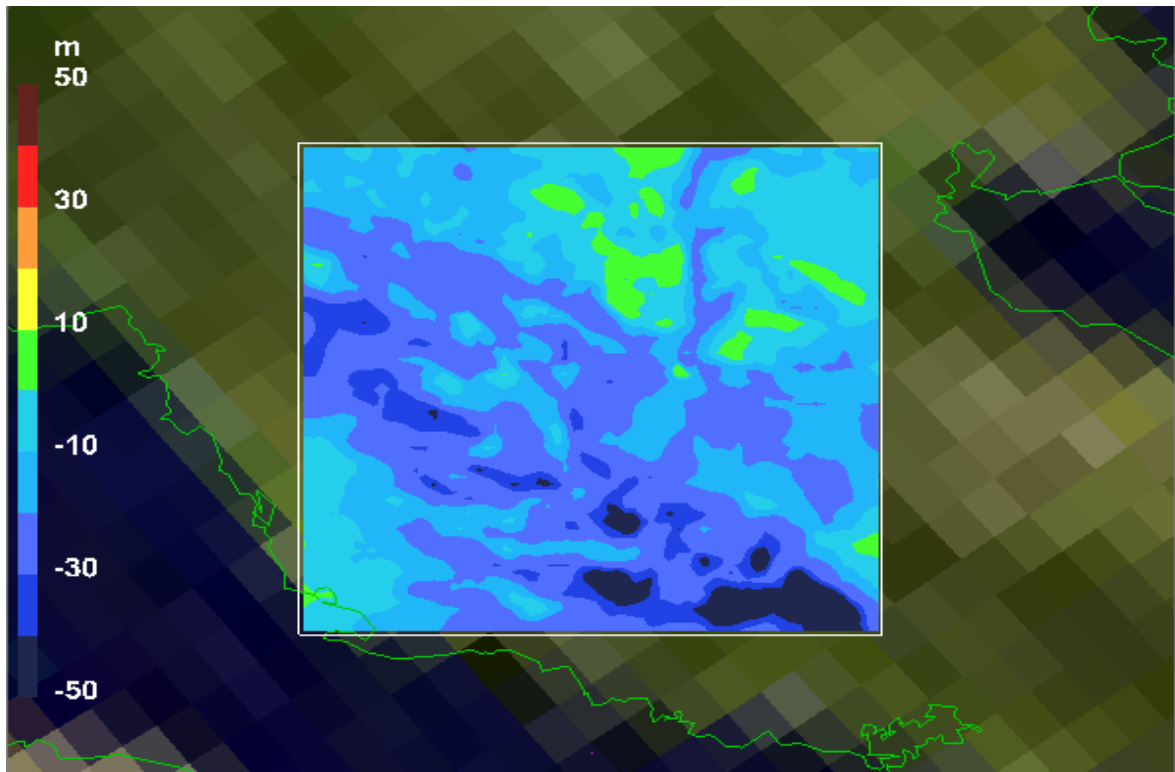
Σχήμα 4.2.1: διαφορά μέσων όρων οριακού στρώματος για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.2.2: διαφορά μέσω των όρων οριακού στρώματος για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 2.



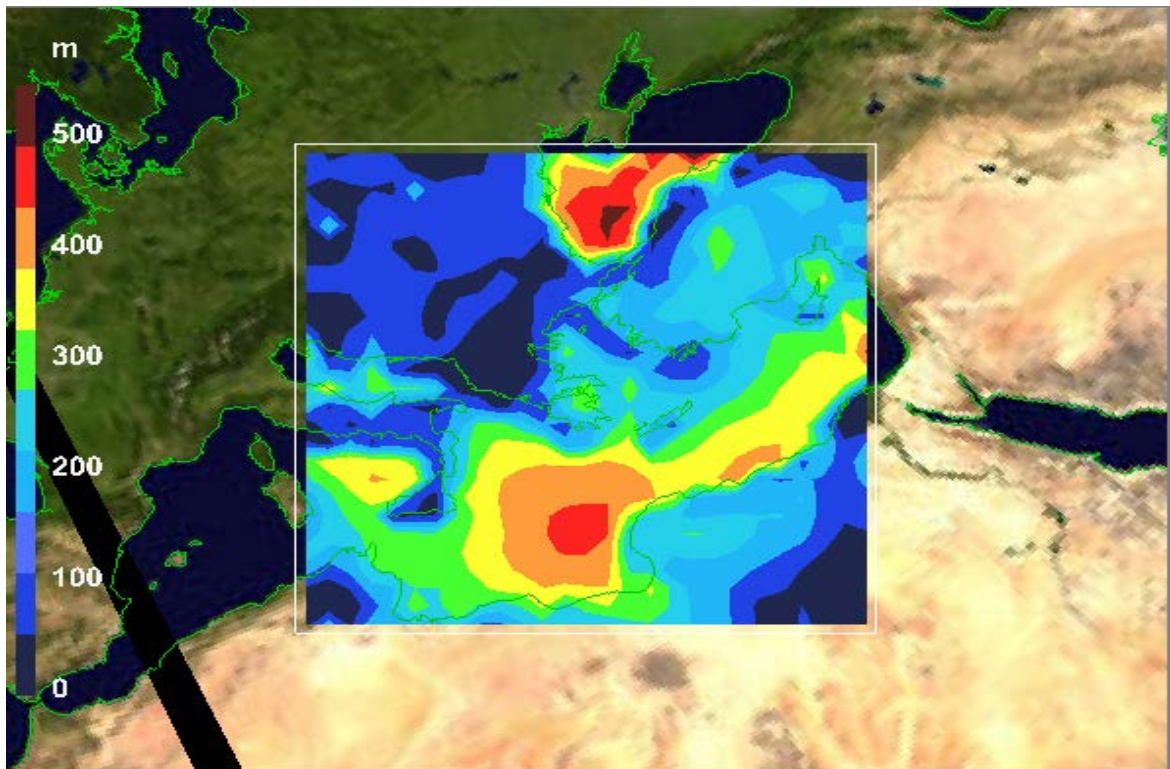
Σχήμα 4.2.3 διαφορά μέσω των όρων οριακού στρώματος για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 3.



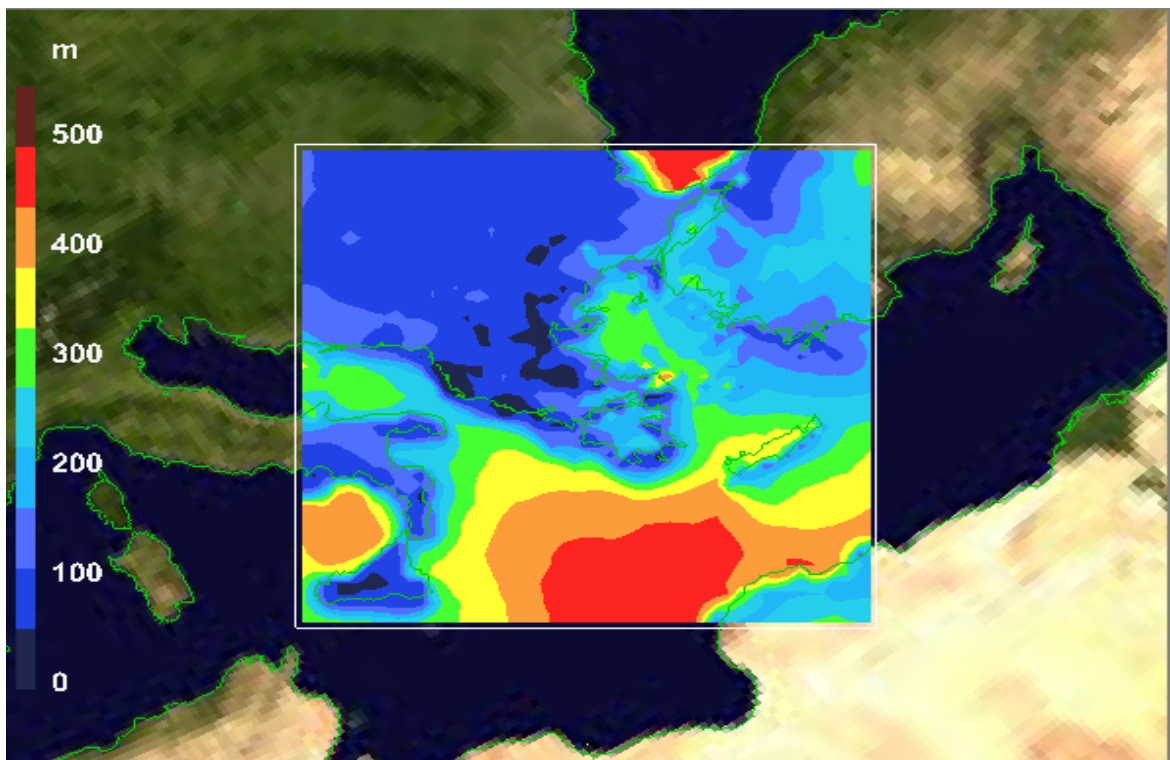
Σχήμα 4.2.4: διαφορά μέσων όρων οριακού στρώματος για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 4.

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται πως ενώ στο 1ο domain η διαφορά του οριακού στρώματος κυμαίνεται από -40m έως +40m, ενώ γίνεται υποβιβασμός της κλίμακας, παρατηρείται συνεχής μείωση του άνω ορίου, κάτι που αντικατοπτρίζει πως ειδικά για την περιοχή της Κοζάνης, δεν προβλέπεται ουσιώδης άνωδος του οριακού στρώματος, αλλά από την άλλη παρατηρείται αισθητή μείωση του οριακού στρώματος από 10 έως 50μ. Στην πλειοψηφία τους, τα γραφήματα παρουσιάζουν κυρίως μείωση του ύψους του οριακού στρώματος, κάτι που επιφέρει σοβαρούς κινδύνους, όσον αφορά την υγεία.

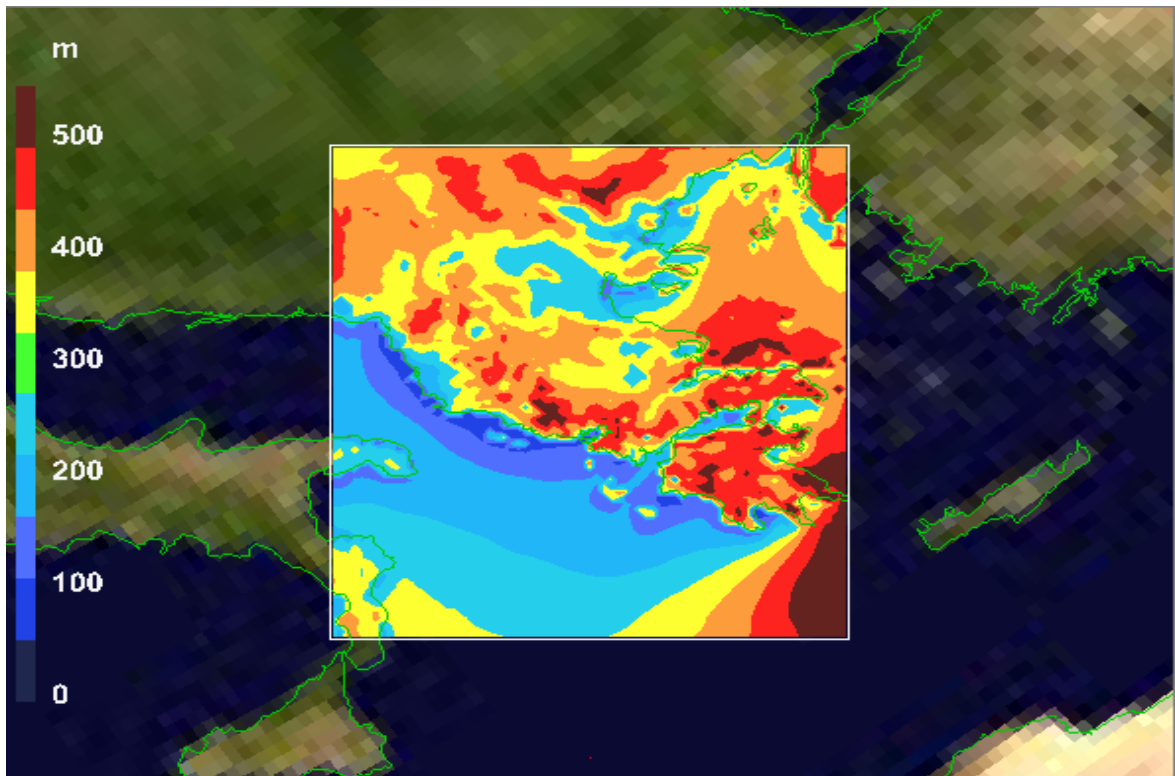
Το οριακό στρώμα είναι το κατώτατο τμήμα της ατμόσφαιρας, κάτι που φανερώνει πως ο αέρας που αναπνέουμε καθώς και οι εκπομπές ρύπων βρίσκονται στο συγκεκριμένο ατμοσφαιρικό στρώμα. Με την μείωση του οριακού στρώματος επομένως, θα παρατηρηθεί αύξηση στην συγκέντρωση αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, που αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υποβιβασμό στην ποιότητα του εισπνεόμενου αέρα.



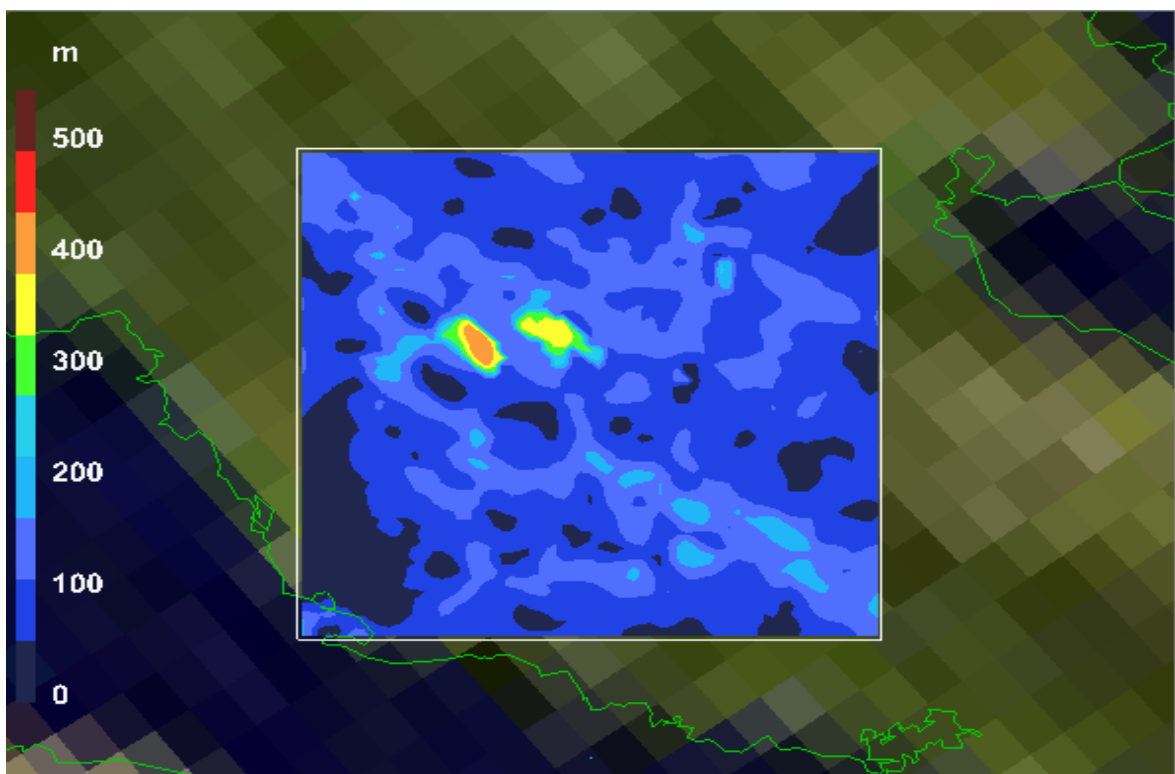
Σχήμα 4.2.5: ο μέσος όρος των τιμών του οριακού στρώματος, για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 1.



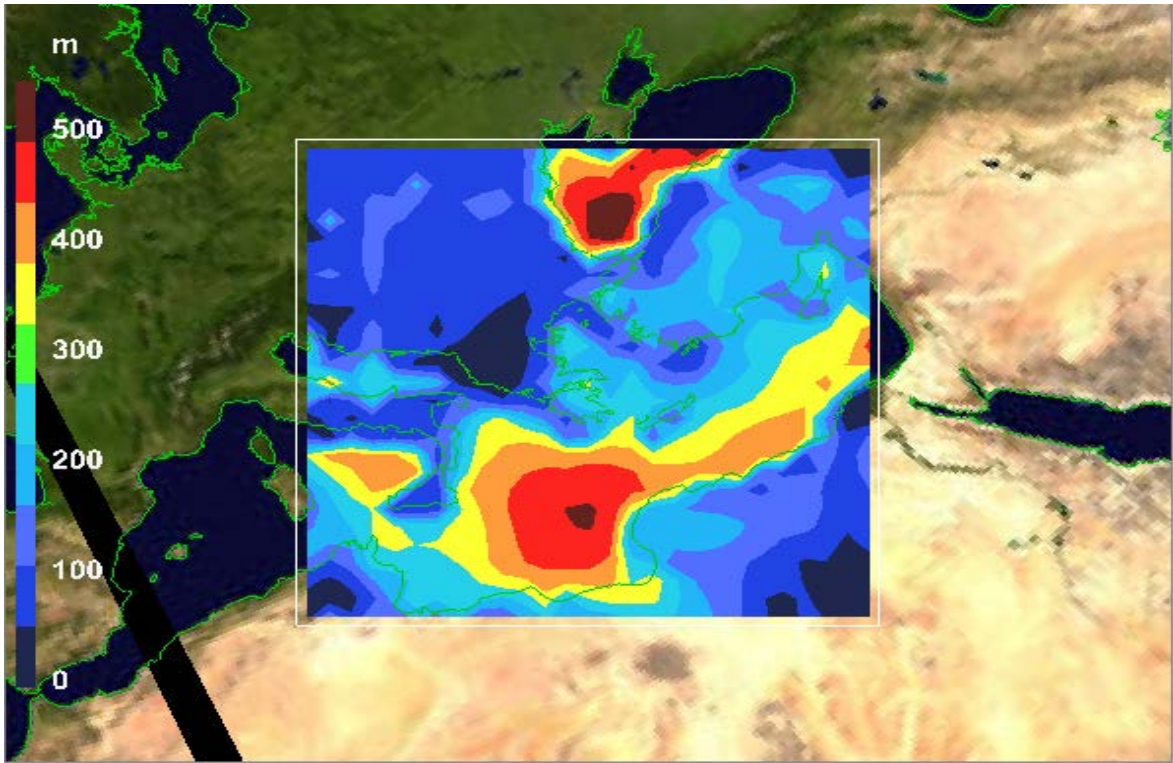
Σχήμα 4.2.6: ο μέσος όρος των τιμών του οριακού στρώματος, για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 2.



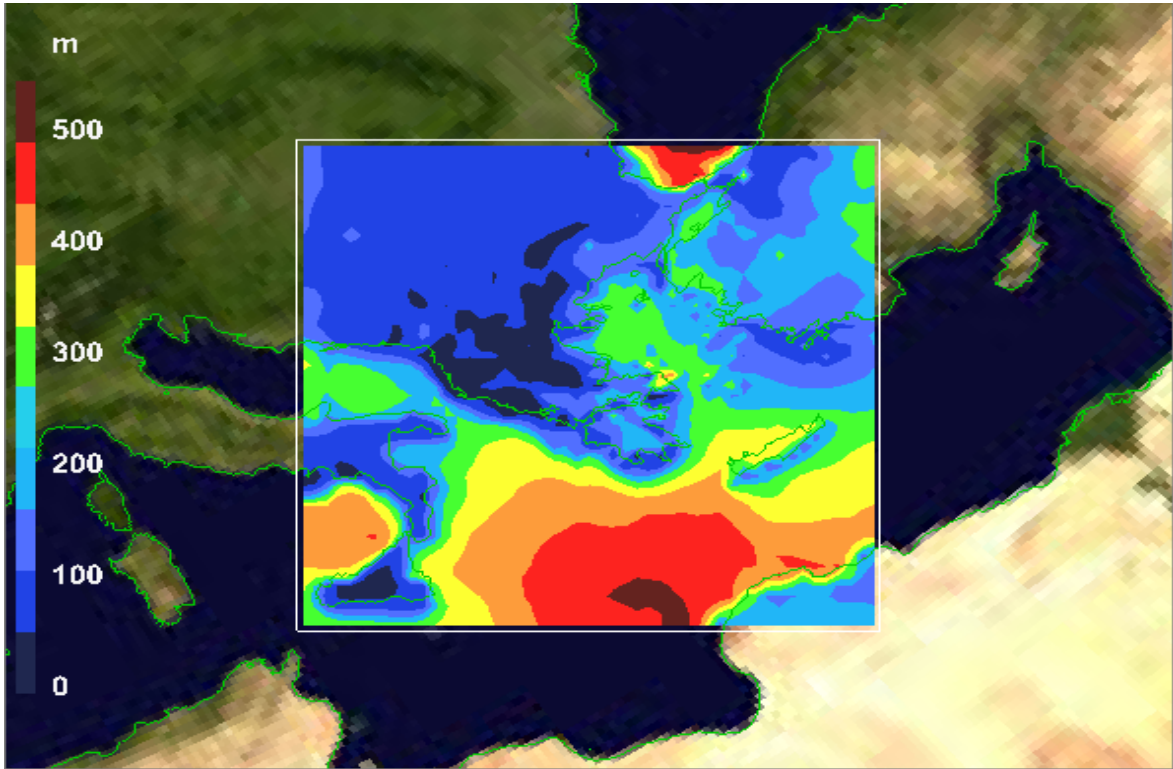
Σχήμα 4.2.7: ο μέσος όρος των τιμών του οριακού στρώματος, για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 3.



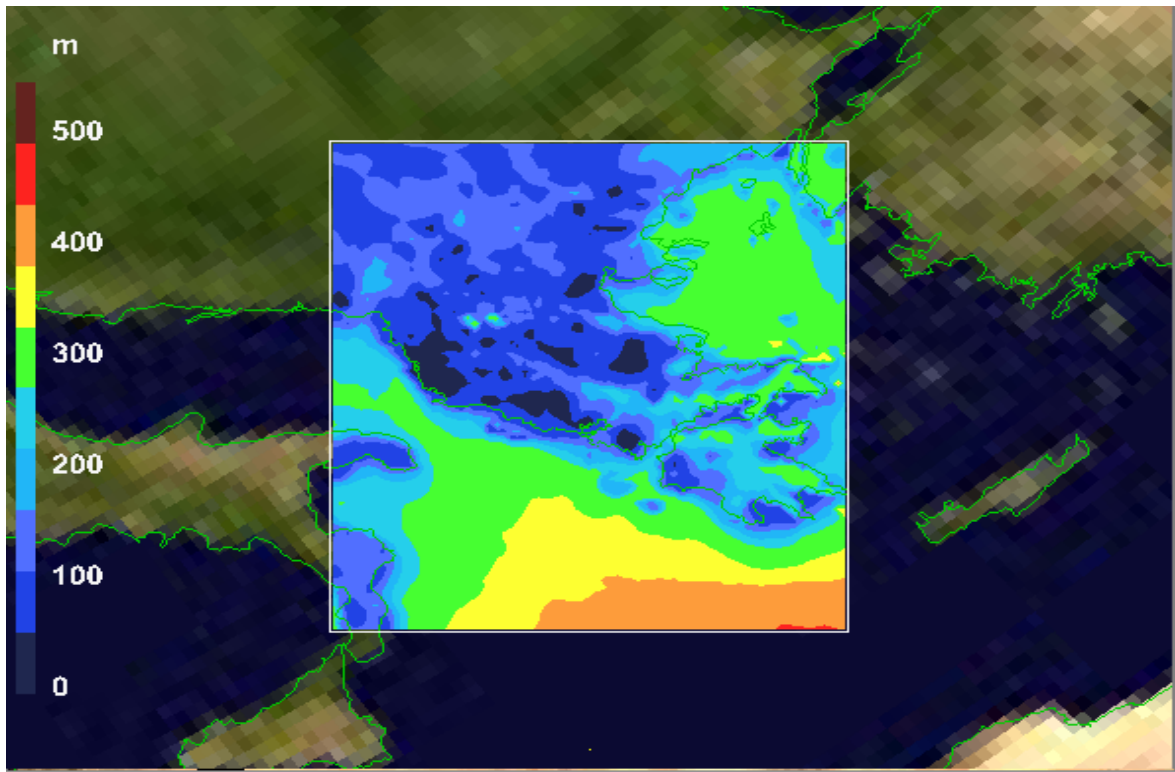
Σχήμα 4.2.8: ο μέσος όρος των τιμών του οριακού στρώματος, για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 4.



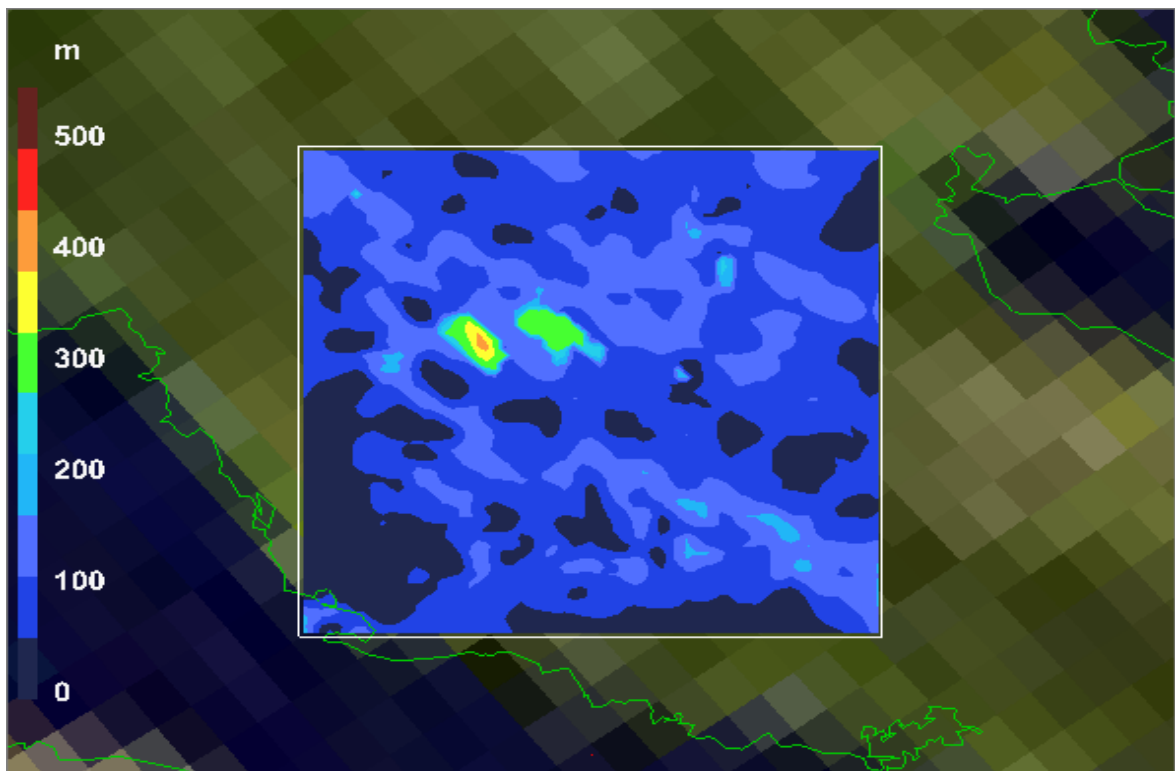
Σχήμα 4.2.9: πρόβλεψη οριακού στρώματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.2.10: πρόβλεψη οριακού στρώματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 2.



Σχήμα 4.2.11: πρόβλεψη οριακού στρώματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 3.

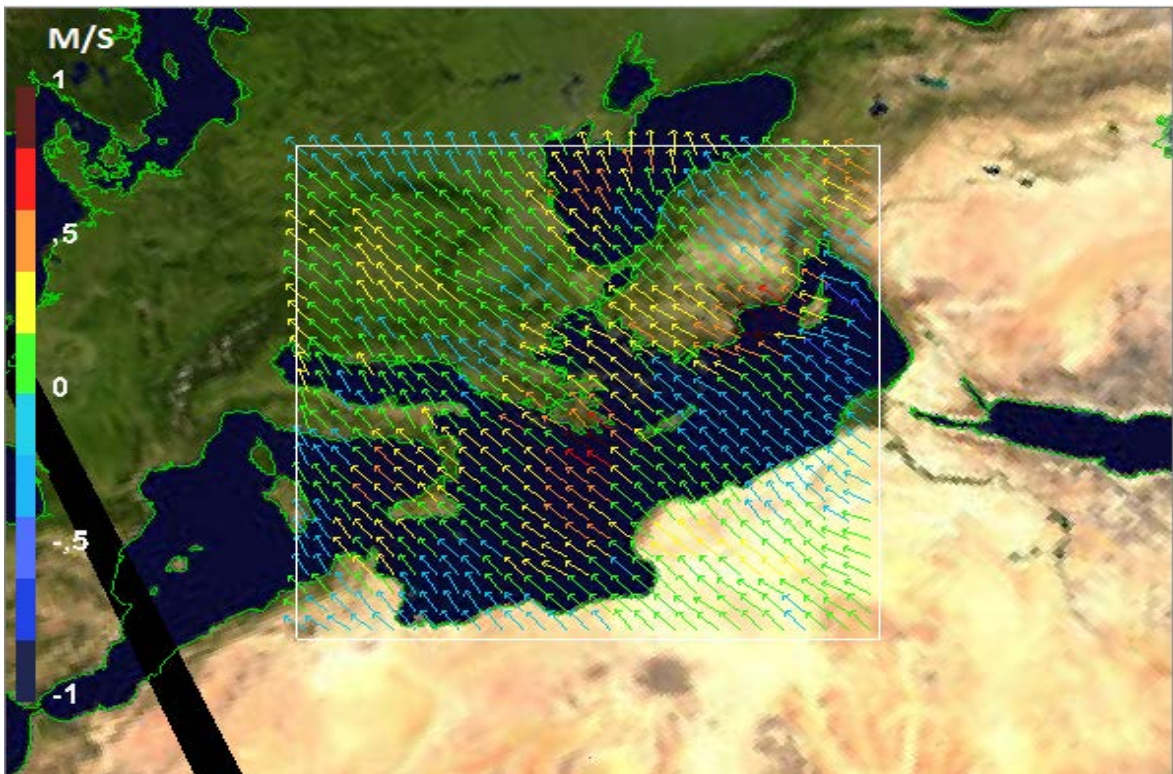


Σχήμα 4.2.12: πρόβλεψη οριακού στρώματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα, για το domain 4.

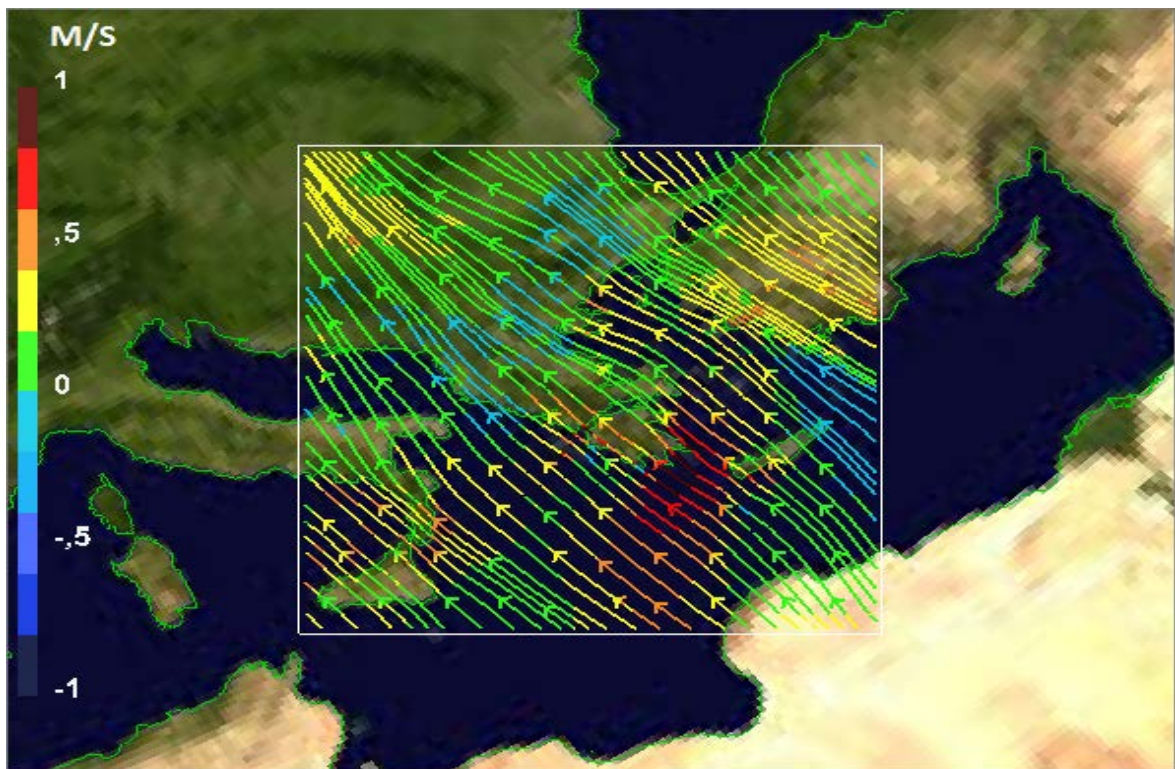
Οι ενδείξεις για την τιμή του οριακού στρώματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα κυμαίνονται από 34m έως 534m. Αντιθέτως, στο τέταρτο domain η διακύμανση είναι σαφώς λιγότερο διακριτή, ιδίως ως προς το ανώτατο όριο, όπου προβλέπεται μείωση της τάξης των 100μ.

4.3 Ταχύτητα και φορά ανέμου

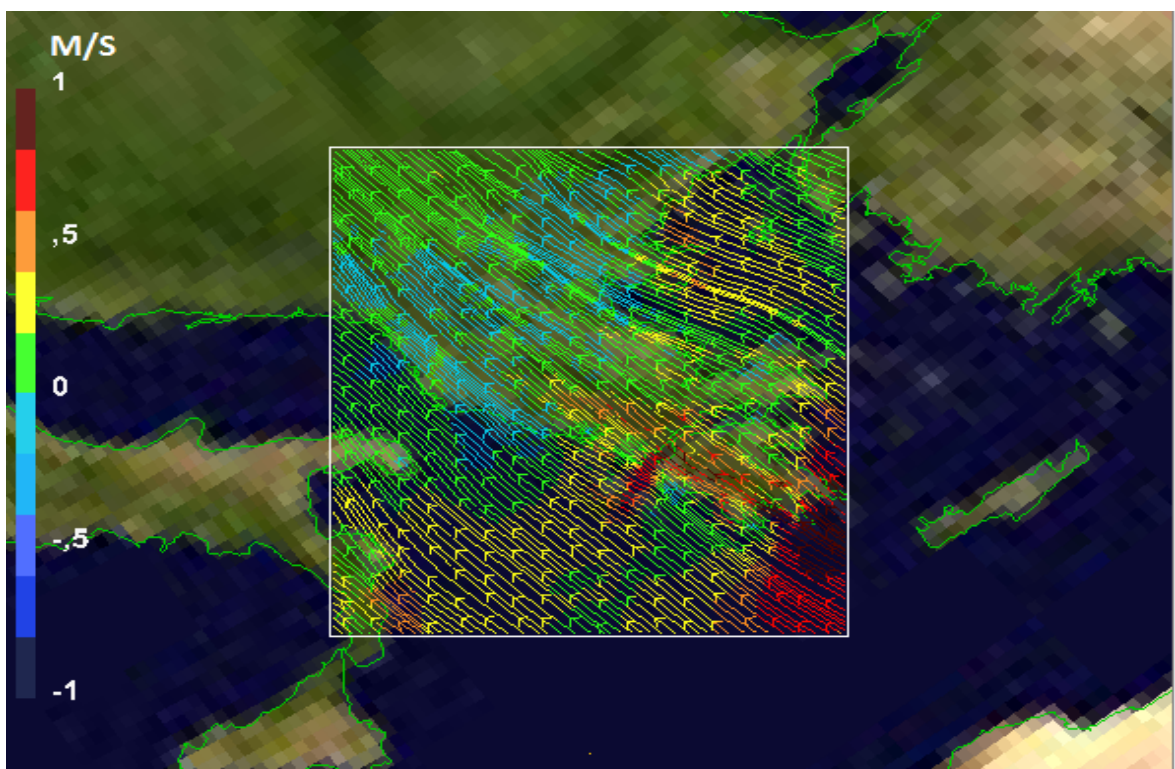
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, σε μορφή γραφημάτων, για τη φορά και την ταχύτητα ανέμου, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για τα 4 domains. Η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι κοινή με αυτή των προηγούμενων μεταβλητών. Στα συγκεκριμένα γραφήματα, παρουσιάζονται με τη μορφή βελών (vectors) η φορά του ανέμου και με χρώμα η τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο κάθε βέλος.



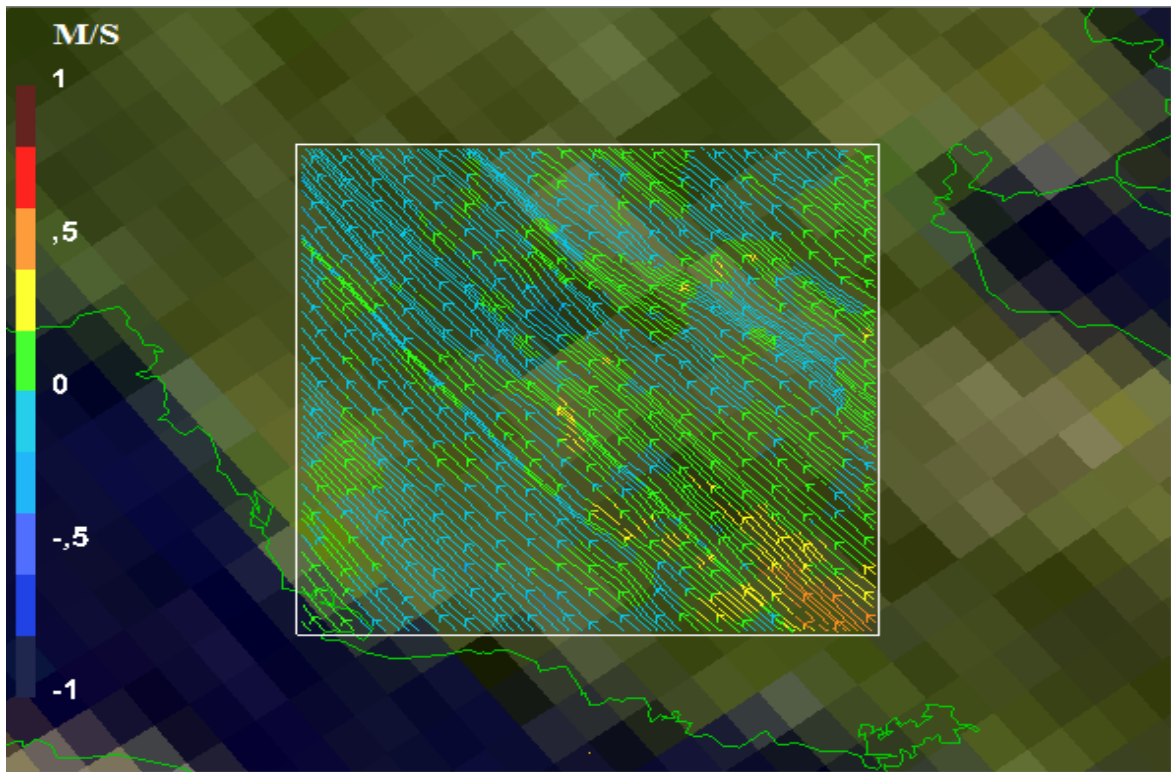
Σχήμα 4.3.1: η διαφορά ταχύτητας και φοράς του ανέμου, για τα κλιματικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.3.2: η διαφορά ταχύτητας και φοράς του ανέμου, για τα κλιματικά δεδομένα, για το domain 2



Σχήμα 4.3.3: η διαφορά ταχύτητας και φοράς του ανέμου, για τα κλιματικά δεδομένα, για το domain 3.

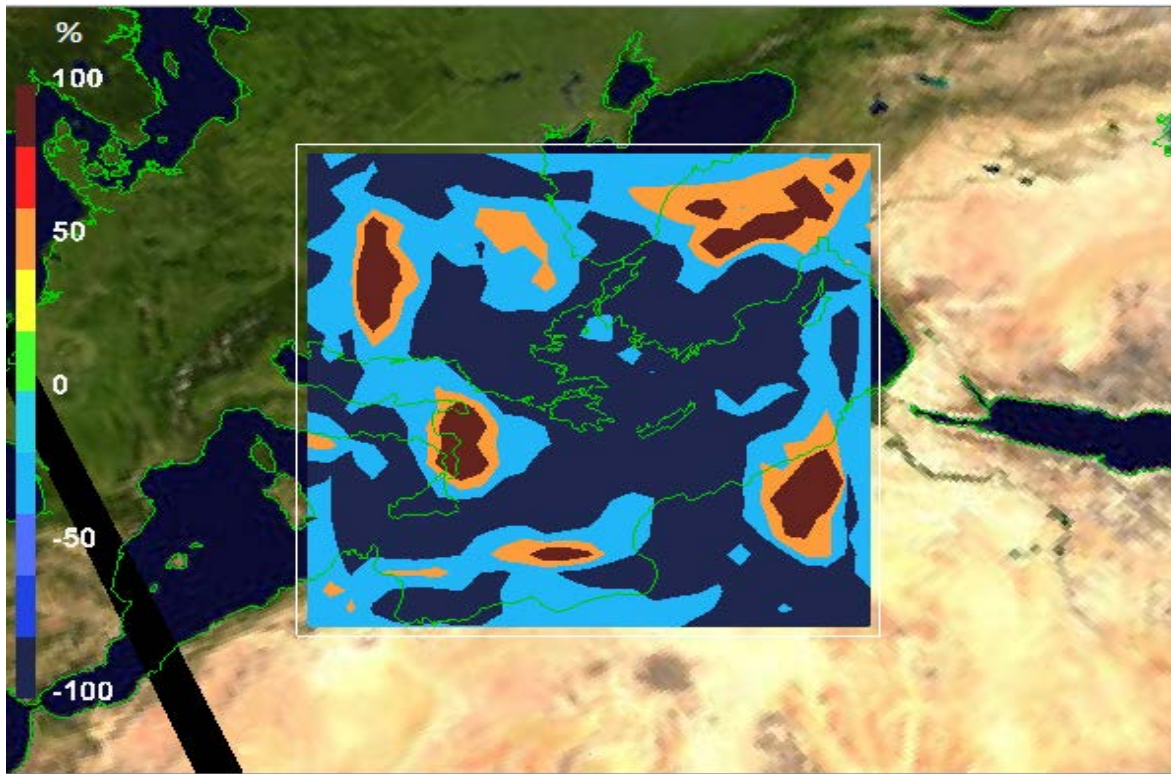


Σχήμα 4.3.4: η διαφορά ταχύτητας και φοράς του ανέμου, για τα κλιματικά δεδομένα, για το domain 4.

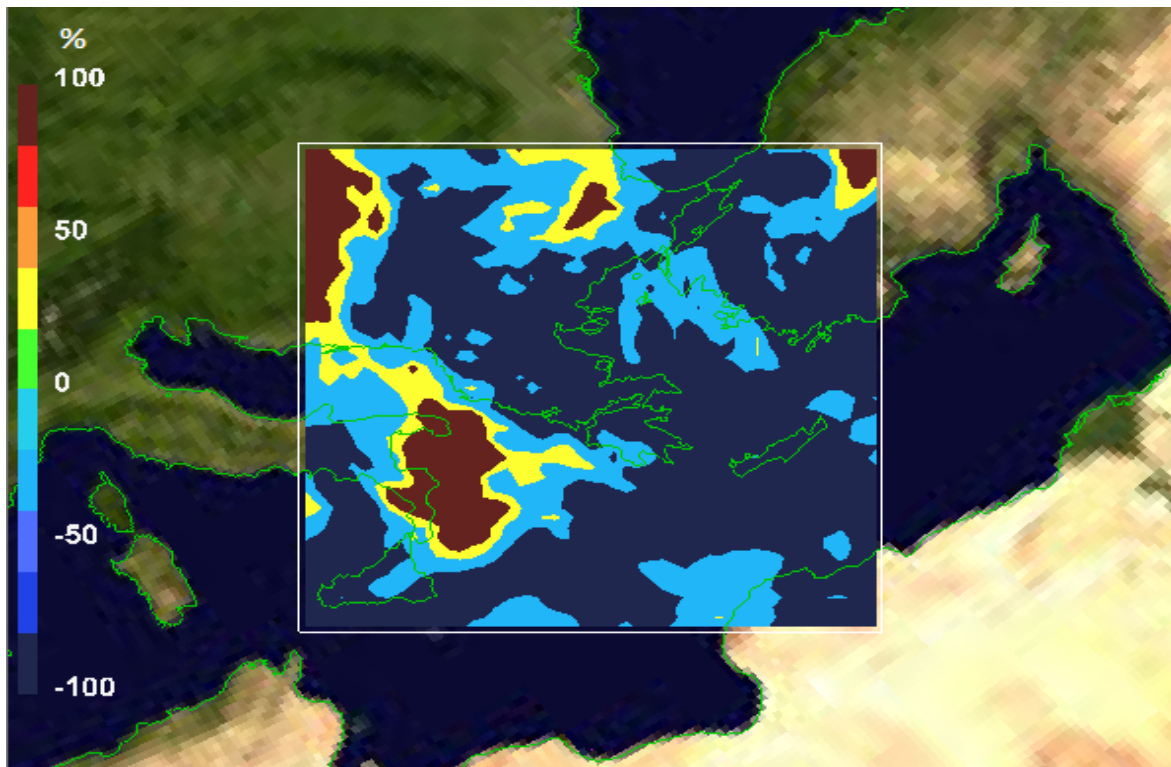
Από τα παραπάνω γραφήματα, δεν παρατηρήται καμία ουσιαστική διαφορά, ούτε ως προς την φορά, ούτε ως προς το μέτρο του ανέμου. Η μόνη αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι πως η μέση φορά του ανέμου είναι από τον νότο προς τον βορρά σε όλες τις περιοχές.

4.4 Βροχόπτωση

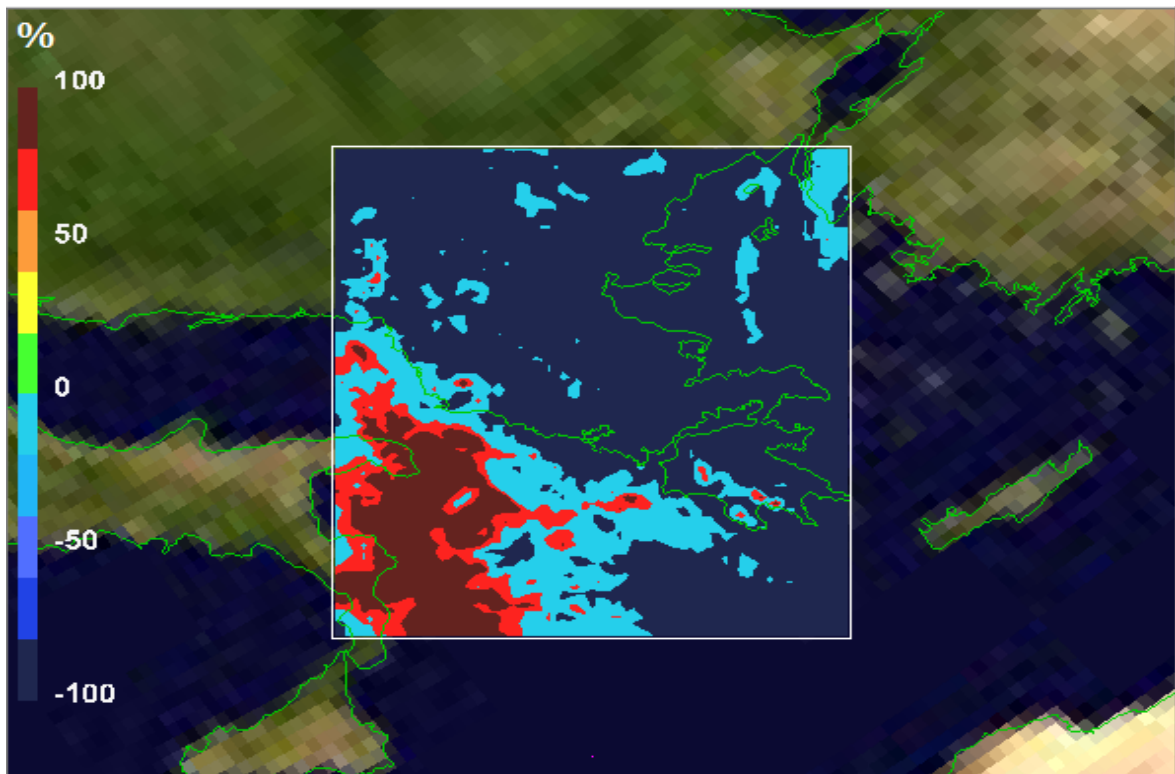
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, σε μορφή γραφημάτων, για τη βροχόπτωση, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για τα 4 domains. Όπως και προηγουμένως, η διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι κοινή με αυτή των προηγούμενων μεταβλητών. Για τα συγκεκριμένα γραφήματα, η βροχόπτωση απεικονίζεται σαν ποσοστιαία μεταβολή των δεδομένων του μέλλοντος, προς αυτών του παρόντος.



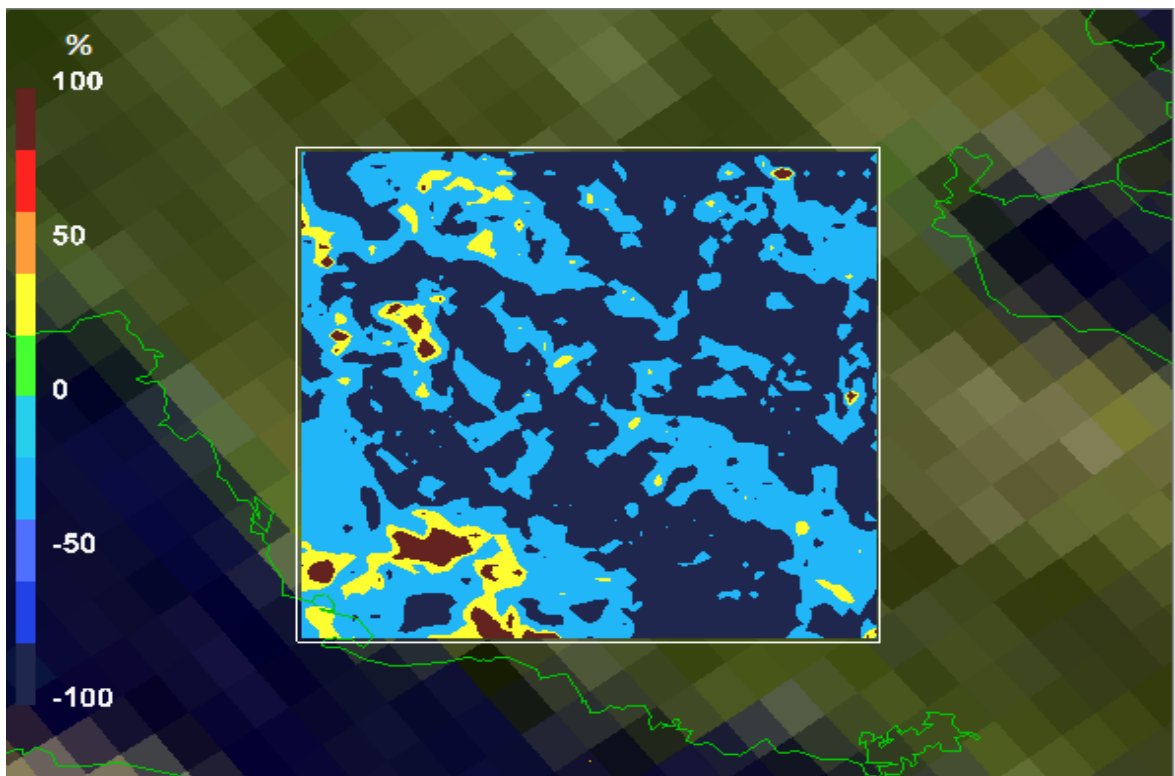
Σχήμα 4.4.1: ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 1.



Σχήμα 4.4.2: ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 2.



Σχήμα 4.4.3: ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 3.



Σχήμα 4.4.4: ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης, για τα κλιματολογικά δεδομένα, για το domain 4.

Αναφορικά για την βροχόπτωση, δεν μπορεί να εκφραστεί ένα καθολικό συμπέρασμα για όλες τις περιοχές. Σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται αύξηση 100% ενώ σε άλλες μείωση επίσης έως 100%. Αυτό σημαίνει πως άλλες περιοχές στο μέλλον πρόκειται να γίνουν ένυδρες, ενώ κάποιες άλλες τελείως άνυδρες. Κοιτώντας τώρα το γράφημα βροχόπτωσης για το domain 1, φαίνεται φανερή μείωση έως και 100% σε όλη την περιοχή της Ελλάδος, και επισημαίνοντας στο domain 4 την περιοχή της Κοζάνης, προκύπτει φανερά η ραγδαία μείωση της βροχόπτωσης στο μεγαλύτερο μέρος του Νομού. Ένα τέτοιο φαινόμενο έχει καταστροφικές συνέπειες σε μια πληθώρα από τομείς.

Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο της έλλειψης βροχόπτωσης ονομάζεται ανομβρία. Η ανομβρία έχει ως αποτέλεσμα την ξηρασία εκτάσεων γης, καθώς και της δημιουργίας ελλειμάτων, τόσο στα επιφανειακά όσο και υπογεία νερών. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να επιφέρει ερημοποίηση της περιοχής, την υποβάθμιση εδαφών και την καταστροφή καλλιεργιών, προκαλώντας έτσι σοβαρό πρόβλημα τόσο στην οικονομία, όσο και στο δημογραφικό της περιοχής, και κατ' επέκταση της χώρας.

Κεφάλαιο 5- Συμπεράσματα- Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, έγινε μια κλιματική προσομοίωση μέσω του κλιματικού μοντέλου μέσης κλίμακας WRF. Η συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε μέσω της μεθόδου του δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μας έδειξαν τι προβλέπει το μοντέλο να είναι οι διαφορές στις τιμές μιας πληθώρας μεταβλητών, που επιρεάζουν άμεσα τον άνθρωπο, και γενικότερα τον πλανήτη. Τέτοιες μεταβλητές ήταν η θερμοκρασία εδάφους, η βροχόπτωση κ.α. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια στατιστική ανάλυση, για να βγει το συμπέρασμα κατά πόσο η μέθοδος του υποβιβασμού κλίμακας είναι απαραίτητη για την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων ως προς την επιθυμητή περιοχή μελέτης. Ο λόγος που έγινε η συγκεκριμένη ανάλυση ήταν διότι η μέθοδος του δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας είναι τρομακτικά χρονοβόρα, και απαιτεί μια πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ, κάτι που κάνει την διαδικασία της κλιματικής προσομοίωσης αρκετά δυσκολότερη. Αφού έγινε η παρουσίαση και η επαλήθευση των αποτελεσμάτων, ήταν πλέον εμφανές, πως ο στόχος της εργασίας είχε επιτευχθεί.

Συμπερασματικά μπορούμε να σχολιάσουμε κάποιες βασικές παρατηρήσεις σχετικά με τα αποτελέσματα που έχουμε εξάγει από την κλιματική προσομοίωση που εκτελέσαμε. Χαρακτηριστικό είναι πως όσο κατευθυνόμαστε σε μικρότερη περιοχή μελέτης, τόσο ακριβέστερα γίνονται τα αποτελέσματα των μεταβλητών που εξετάζουμε. Τα αποτελέσματα όχι μόνο δείχνουν μια σημειωτέα διαφορά στα στοιχεία του μέλλοντος, σε σχέση με αυτά του παρόντος, αλλά ακόμη πως οι επιπτώσεις που προβλέπονται να υπάρχουν δεν μπορούν να αγνοηθούν. Τέτοιες επιπτώσεις μπορούν να αφορούν την οικονομία μιας χώρας, την γεωγραφία μιας περιοχής, καθώς επίσης και την ανθρώπινη υγεία, σε μια πληθώρα από παραμέτρους. Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να έχουν και θετικό και αρνητικό αντίκτυπο στους παραπάνω τομείς, αν και στην πλειοψηφία τους, οι επιπτώσεις που συνδέονται με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, με βάση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι αρνητικά.

Αναφορικά με την στατιστική μελέτη, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η μέθοδος του δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος που χάρη σε αυτή, έχουμε την δυνατότητα να αυξήσουμε σημαντικά την ακρίβεια των

αποτελεσμάτων που επιθυμούμε, πραγματοποιώντας μια κλιματική προσομοίωση, ανεξάρτητα του πόσο μικρή ή μεγάλη είναι η περιοχή μελέτης που μας ενδιαφέρει.

Τα περιθώρια έρευνας και μελέτης που έχουμε με την συγκεκριμένη κλιματική προσομοίωση είναι μεγάλα. Αρχικό στάδιο θα ήταν η εκτέλεση κλιματικών προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας τα 3 εναπομείναντα σενάρια RCP, και να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν.

Κάποια πρόταση για μελλοντική δουλειά θα μπορούσε να περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις ενεργειακές απαιτήσεις παραγωγών ενέργειας, και ποιο συγκεκριμένα, μιας και στην συγκεκριμένη εργασία, η τελευταία περιοχή μελέτης είναι η περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, κέντρο τεσσάρων μεγάλων παραγωγικών κέντρων, θα μπορούσε να ερευνηθεί κατά πόσο η διαφορά θερμοκρασίας θα μπορούσε να επηρεάσει την απόδοση των εργοστασίων της ΔΕΗ.

Επιπρόσθετα, λόγω της ενδεχόμενης μείωσης του ύψους του οριακού στρώματος στην περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας, μία μελέτη θα μπορούσε να είναι η μεταβολή στην πυκνότητα αέριων ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Τέλος, μια ακόμα πρόταση αφορά τη μελέτη η μελέτη φυσικής του κλιματικού μοντέλου WRF, για ξεχωριστές περιοχές, καθώς και η εύρεση της καταλληλότερης παραμετροποίησης, ούτως ώστε να μειωθεί περαιτέρω το περιθώριο σφάλματος στις κλιματικές προσομοιώσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Ahrens C.D., Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere, Sixth Edition
- [2] Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, European Environment Agency
- [3] F. Giorgi, E. Coppola¹, F. Solmon, L. Mariotti, M. B. Sylla, X. Bi, N. Elguindi, G. T. Diro, V. Nair, G. Giuliani¹, U. U. Turuncoglu¹, S. Cozzini, I. Güttler, T. A. O'Brien, A. B. Tawfik, A. Shalaby, A. S. Zakey, A. L. Steiner, F. Stordal, L. C. Sloan, C. Brankovic , RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains
- [4] Global Climate Models and Climate Data: A User Guide for Economists, M.Auffhammer, S.M. Hsiang, W.Schlenker, A.Sobel, February 2011
- [5] Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments: L. O. Mearns, F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, M. Lal
- [6] IPCC, 2000: Emissions Scenarios, A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change by the Working Group III, Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart, Cambridge University Press, UK. pp570
- [7] IPCC, 2007: Climate Change 2007, The Physical Science Basis by the Working Group I , Contribution to Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [8] IPCC, 2007: Climate Change 2007, Impacts, Adaptation and Vulnerability by the Working Group II, Contribution to Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [9] IPCC, 2013: Climate Change 2013, The Physical Science Basis, by the Working Group I.
- [10] Laprise R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable, Mon. Wea. Rev., 120, 197–207.
- [11] M.Meinshausen, S. J. Smith , K. Calvin , J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque,K. Matsumoto , S. A. Montzka, S. C. B. Raper,

- K. Riahi, A. Thomson & G. J. M. Velders , D.P. P. van Vuuren, The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300
- [12] Neelin J.D., Climate Change and Climate Modeling, Cambridge University Press
- [13] Shaocai Yu, Brian Eder, Robin Dennis, Shao-Hang Chu, Stephen Schwartz: Statistics - Definitions and Issues, Deriving 'Unbiased Symmetric' Metrics
- [14] Skamarock W.C, J.B Klemp, J. Dudhia, D.O.Gill, D.M.Barker, M.GDuda, X.Y.Huang, W.Wang, J.G.Powers: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 2008
- [15] User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.5
- [16] WMO bulletin (July 2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework
- [17] M. R. Haylock, N. Hofstra , A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, M. New: A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006
- [18] Dee et al, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597
- [19] John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis : Atmospheric Chemistry and Physics, Second edition
- [20]. Lauwaet, D., P. Viaene, et al. (2014). "The effect of climate change and emission scenarios on ozone concentrations over Belgium: a high-resolution model study for policy support." *Atmos. Chem. Phys.* 14(12): 5893-5904.
- [21]. Saha, S., S. Moorthi, et al. (2010). NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010. Boulder, CO, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
- [22]. Thomson, A. M., K. V. Calvin, et al. (2011). "RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100." *Climatic Change*

[23] United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations, 1992,
Αρ, 1, παρ. 3

[24] US EPA. Glossary of climate change terms

Ιστοσελίδες

- <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>
- <http://pubs.giss.nasa.gov/>
- http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/climate_carbon_energy/