



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις μετεωρολογικές παραμέτρους στον  
ελλαδικό χώρο.*

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: Αλέξιος Τυρολόγος**

**A.E.M.: 1595**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Ραφαέλα-Ελένη Σωτηροπούλου**

**Κοζάνη, Ιούλιος 2021**



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις μετεωρολογικές παραμέτρους στον ελλαδικό χώρο. Η επιλογή του θέματος έγινε με αφορμή την έλλειψη γνώσεων για την εξέλιξη και τη μεταβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων που αναμένονται τα επόμενα έτη αλλά και το γεγονός ότι η Ελλάδα συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών που παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή καθώς ανήκουν στη μεταβατική ζώνη μεταξύ του άνυδρου κλίματος της Βόρειας Αφρικής και του εύκρατου και βροχερού κλίματος της Κεντρικής Ευρώπης, καθιστώντας την ευάλωτη στις κλιματικές μεταβολές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, η πολύπλοκη τοπογραφία και οι τεράστιες ακτές υποδηλώνουν χωρική μεταβλητότητα των κλιματολογικών συνθηκών μικρής κλίμακας.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, πραγματοποιήθηκε κλιματική προσομοίωση για το παρόν και το μέλλον χρησιμοποιώντας το παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο NASA GISS ModelE2. Τα αποτελέσματα του παγκόσμιου μοντέλου είναι σε σχετικά μεγάλη κλίμακα για εφαρμογές σε περιφερειακές και τοπικές κλίμακες. Η ανάγκη για περιφερειακές κλιματικές προβολές σε μικρότερο μέγεθος πλέγματος καλύπτεται από την εφαρμογή της τεχνικής της δυναμικής μείωσης της κλίμακας. Σε αυτή έγινε χρήση του μοντέλου μετεωρολογικής έρευνας και πρόβλεψης WRF που είναι ένα σύστημα αριθμητικής πρόβλεψης καιρού μεσαίας κλίμακας επόμενης γενιάς που έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί τόσο την ατμοσφαιρική έρευνα όσο και τις επιχειρησιακές ανάγκες πρόβλεψης. Προκειμένου να συλλεχθούν στοιχεία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις μετεωρολογικές παραμέτρους, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία και την θερμοκρασία εδάφους, τον υετό, το πλανητικό οριακό στρώμα και τη νεφοκάλυψη, πέντε παρελθοντικών (2008-2012) και πέντε μελλοντικών (2048-2052) ετών υποβλήθηκαν σε δυναμική μείωση κλίμακας. Τα αποτελέσματα για τα παρελθοντικά έτη συγκρίθηκαν με παρατηρούμενα δεδομένα για να διαπιστωθεί η ικανότητα των μοντέλων και των τεχνικών να προσομοιώνουν την πραγματικότητα.

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, μετεωρολογικές παράμετροι, WRF

## **Abstract**

The object of this thesis is to investigate the effects of climate change on meteorological parameters in Greece. The choice of the topic was made on the occasion of the lack of knowledge about the evolution and change of meteorological parameters expected in the coming years and the fact that Greece is among the countries that are very sensitive to climate change as they belong to the transition zone between the arid North Africa and the temperate and rainy climate of Central Europe, making it vulnerable to climate change. In addition, complex topography and vast shores suggest spatial variability of small-scale climatic conditions.

As part of this work, climate simulations for the present and the future were performed using the NASA GISS ModelE2 global climate model (GCM). The results of the global model are on a relatively coarse scale for applications at regional and local scales. The need for regional climate projections in a finer grid size will be assessed, here, using the Weather Research and Forecasting (WRF) model to dynamically downscale GCM simulations. The goal is to generate more locally relevant projections of long-term weather patterns over Greece. WRF is a state-of-the-art atmospheric modeling system that is applicable for both meteorological research and numerical weather prediction. In order to examine the impact of climate change on meteorological parameters, the results of the simulation of the global climate model for atmospheric and ground temperature, precipitation, planetary boundary layer and cloud cover, and five past (2008-2012) and five future (2048-2052) years were dynamically downscaled. The results for the past years were compared against to observation to determine the ability of the models and techniques employed to simulate reality.

Keywords: climate change, meteorological parameters, WRF

## **Ευχαριστίες**

Οι ευχαριστίες μου θα ξεκινήσουν από την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και ήταν δίπλα μου κάθε φορά που το είχα ανάγκη. Επίσης, τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την εκπαίδευση και τις γνώσεις που μου προσέφεραν στο πέρας των ακαδημαϊκών σπουδών μου. Κυρίως, όμως, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας κυρία Ραφαέλα-Ελένη Σωτηροπούλου, η οποία στάθηκε, πραγματικά, αρωγός στην εκπόνησή της με τις συμβουλές και την καθοδήγησή της. Ακόμη, τους συμφοιτητές και φίλους που έκανα στα πέντε χρόνια των σπουδών μου στην Κοζάνη και περάσαμε τόσες όμορφες στιγμές. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που έχω δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν και να με στηρίξουν στις αποφάσεις, αλλά και τα εμπόδια που συνάντησα μέχρι τώρα στην ζωή μου.

**Κοζάνη, Ιούλιος 2021**

**Αλέξιος Τυρολόγος**

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	6
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>8</b>
1.1 Το κλίμα .....	8
1.2 Η μεταβολή του κλίματος.....	9
1.3 Αύξηση της θερμοκρασίας και του όγκου των θαλασσών.....	10
1.4 Συρρίκνωση παγετώνων.....	10
1.5 Ξηρασία.....	11
1.6 Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου.....	12
1.7 Υπερθέρμανση του πλανήτη.....	14
<b>2 Μελέτη του κλίματος.....</b>	<b>16</b>
2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα.....	16
2.2 Κλιματικά μοντέλα.....	17
2.3 Μοντέλο Μετεωρολογικής Έρευνας και Πρόβλεψης (The Weather Research and Forecasting Model-WRF).....	18
<b>3 Το μελλοντικό κλίμα της γης.....</b>	<b>21</b>
3.1 Προβλέψεις για τον καιρό και το κλίμα.....	21
3.2 Το κλίμα της γης στο μέλλον.....	24
3.3 Το μελλοντικό κλίμα στην Μεσόγειο και την Ελλάδα.....	26
3.4 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής.....	29
<b>4 Μετεωρολογικές παράμετροι που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή.....</b>	<b>32</b>
4.1 Θερμοκρασία αέρος.....	32

4.2	Θερμοκρασία Εδάφους (LandSurface Temperature - LST).....	32
4.3	Υετός.....	33
4.4	Πλανητικό οριακό στρώμα.....	35
4.5	Ποσοστό νεφοκάλυψης.....	37
4.6	Υγρασία.....	40
<b>5</b>	<b>Μεθοδολογία έρευνας.....</b>	<b>43</b>
5.1	Παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο.....	43
5.2	Περιοχικό κλιματικό μοντέλο – Τεχνική δυναμικής μείωσης της κλίμακας.....	44
<b>6</b>	<b>Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....</b>	<b>45</b>
6.1	Αποτελέσματα παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου.....	45
6.2	Αποτελέσματα περιοχικού μοντέλου – δυναμικής μείωσης της κλίμακας.....	48
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>66</b>
<b>9</b>	<b>Παράρτημα.....</b>	<b>78</b>

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Το κλίμα

Αν θέλουμε να ορίσουμε το κλίμα, θα μιλήσουμε για την μέση καιρική κατάσταση, ή ακόμα και τον μέσο καιρό κάποιας ορισμένης περιοχής. Ο ορισμός προκύπτει από την μελέτη και την ανάλυση μακροχρόνιων παρατηρήσεων πάνω σε διαφορετικά μετεωρολογικά στοιχεία. Δεν θα πρέπει να γίνεται σύγχυση μεταξύ του κλίματος και του καιρού, καθώς είναι δυο διαφορετικές έννοιες. Ο καιρός μας δείχνει την φυσική κατάσταση της ατμόσφαιρας σε μια όμως, μικρή και συγκεκριμένη χρονική περίοδο (Giorgi, Hewitson, Christensen, Hulme, Storch, Whetton, Jones, Mearns & Fu, 2001). Το κλίμα αποτελεί τη μέση καιρική κατάσταση, τον μέσο καιρό, δηλαδή. Ορίζεται από το σύνολο των στατιστικών πληροφοριών, οι οποίες περιγράφουν τις μεταβολές του καιρού σε μια περιοχή για ένα συγκεκριμένο μεγάλο χρονικό διάστημα (Giorgi, Hewitson, Christensen, Hulme, Storch, Whetton, Jones, Mearns & Fu, 2001).

Η ενέργεια που λαμβάνει η Γη από τον Ήλιο, είναι εκείνη που κατά κύριο λόγο επηρεάζει το κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο. Όμως δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας, καθώς, το κλίμα επηρεάζεται και από διαφορετικές ροές ενέργειας που συντελούνται σε ένα κλιματικό σύστημα (Boes, 1981). Το κλιματικό σύστημα αποτελείται από ένα σύνθετο και ενεργό σύστημα. Περιλαμβάνει την επιφάνεια του εδάφους και τους ζωντανούς οργανισμούς (βιόσφαιρα), τους ωκεανούς και άλλους μικροοργανισμούς του νερού (υδρόσφαιρα), τους πάγους και το χιόνι (κρυόσφαιρα), και την ατμόσφαιρα (Boes, 1981).

Η ατμόσφαιρα πολύ γρήγορα δέχεται μεταβολές και έτσι μπορεί να χαρακτηριστεί ως το πιο ασταθές μέρος του συστήματος. Αποτελείται κατά βάση από άζωτο ( $N_2$ ) σε ποσοστό 78,1% και οξυγόνο ( $O_2$ ) σε ποσοστό 20,9%, δύο στοιχεία τα οποία είναι τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά της κι ως αέρια, που είναι, αλληλεπιδρούν μονάχα με την ηλιακή ακτινοβολία η οποία εισέρχεται (Kerschgens, Pilz & Raschke, 1978). Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι υπάρχει ακόμα ένα ελάχιστο ποσοστό αερίων, τα οποία αλληλεπιδρούν εξαιτίας της υπέρυθρης μακροκυματικής ακτινοβολίας που επανεκπέμπει η Γη. Όμως αυτά δεν παραμένουν σταθερά καθώς μεταβάλλονται με βάση την αλλαγές της Γης. Αυτά τα αέρια είναι γνωστά ως αέρια του θερμοκηπίου. Τόσο η θερμοκρασία όσο και το κλίμα επηρεάζονται σημαντικά και τα αποτελέσματα των αλλαγών αυτών γίνονται φανερά στον πλανήτη μας (Kerschgens, Pilz & Raschke, 1978).



Η γήινη επιφάνεια καλύπτεται στο 70% από τους ωκεανούς, ενώ παράλληλα υπάρχει και ένας σπουδαίος όγκος υπόγειων υδάτων που κάνουν την υδρόσφαιρα σημαντική. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ωκεανοί λόγω της κυκλοφορίας και της θερμοχωρητικότητας που διαθέτουν μπορούν να ρυθμίσουν το γήινο κλίμα, αλλά παράλληλα λειτουργούν και ως πηγή φυσικής μεταβλητότητας του κλίματος (Arnell & Reynar, 1996).

Από την μία πλευρά, η κρύσφαιρα έρχεται να επηρεάσει το κλιματικό σύστημα, μέσω της υψηλής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται από τους πάγους, της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας και της επιρροής των παγόβουνων στην ωκεάνια κυκλοφορία. Από την άλλη πλευρά, η επιφάνεια του εδάφους, δέχεται ενέργεια από τον ήλιο, την οποία μπορεί να ελέγξει και να επιστρέψει πίσω στην ατμόσφαιρα, ως υπέρυθρη ακτινοβολία (Arnell, 1996).

Ταυτόχρονα, σημαντικό ρόλο στη σύνθεση της ατμόσφαιρας έχουν η θαλάσσια και επίγεια βιόσφαιρα. Ο βιόκοσμος επηρεάζει τα αέρια του θερμοκηπίου, τόσο κατά την λήψη, όσο και κατά την απελευθέρωσή τους μέσα από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Διαδικασία μέσω της οποίας απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από τους επίγειους, αλλά και θαλάσσιους φυτικούς οργανισμούς. Κατέχει έναν κυρίαρχο ρόλο στον κύκλο της ζωής του άνθρακα, καθώς και στην μεταβολή που υφίσταται το κλίμα (Dee et al, 2011).

## **1.2 Η μεταβολή του κλίματος**

Το κλίμα της Γης διαφοροποιείται με το πέρασμα των χρόνων. Κατά την διάρκεια των τελευταίων 650.000 χρόνων καταγράφηκαν επτά περίοδοι παγετώνων. Με το τέλος των παγετώνειων περιόδων, πριν από 15.000 χρόνια περίπου, δημιουργήθηκε η σύγχρονη εποχή του κλίματος, καθώς και ο ανθρώπινος πολιτισμός. Αιτία των αλλαγών αυτών, αποτελούν οι πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, που γίνονται πάνω στην τροχιά της Γης. Το γεγονός αυτό μετέβαλλε το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που καταφθάνει στην γη (IPCC, 2000).

Η κλιματική αλλαγή είναι μια από τις σοβαρότερες προκλήσεις, που αντιμετωπίζει σήμερα ο κόσμος. Ο πλανήτης μας βιώνει σημαντική και επιταχυνόμενη κλιματική αλλαγή, η οποία άρχισε πριν από έναν αιώνα. Στις μέρες μας, η μεταβολή του κλίματος του πλανήτη είναι εξαιρετικά σημαντική. Ένα μεγάλο ποσοστό της αλλαγής αυτής φαίνεται ότι οφείλεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες και μάλιστα έχει έναν εντυπωσιακά γρήγορο ρυθμό μεταβλητότητας (IPCC, 2013).

Η πρόβλεψη για την υπερθέρμανση του πλανήτη, βασίζεται σε αδιάψευστα και απρόσβλητα επιστημονικά στοιχεία, με βάση την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC). Όλα αυτά καταγράφονται από δορυφόρους που κινούνται πάνω σε τροχιά γύρω από την Γη και με την βοήθεια διαφόρων τεχνολογικών εξελίξεων έχουν δώσει την εικόνα της γης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται η συλλογή πληροφοριών, τόσο για το κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και για τον πλανήτη γενικότερα, αποδεικνύοντας ότι το κλίμα πάνω στην Γη αλλάζει (IPCC, 1996).

Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, αποτελεί την βασική ένδειξη ότι το κλίμα αλλάζει. Από το 1880 και μετά έχει παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης. Ενώ, η μεγαλύτερη αύξηση έλαβε χώρα από το 1970 και μετά. Μάλιστα αν και τα έτη 2007-2009 υπήρχε μια μείωση της ηλιακής δραστηριότητας, η θερμοκρασία του πλανήτη συνέχισε να έχει αυξητική τάση (IPCC, 2013).

### **1.3 Αύξηση της θερμοκρασίας και του όγκου των θαλασσών**

Η Γη καλύπτεται κατά 70% από τις θάλασσες και τους ωκεανούς, οπότε έχει την δυνατότητα να απορροφά μεγάλα ποσοστά θερμότητας. Αυτό, όμως έχει ως αποτέλεσμα, από το 1960 και μετά να αυξάνεται η θερμοκρασία στα 700 πρώτα μέτρα των ωκεανών, κατά 0,3F (Vellinga & Wood, 2002). Παράλληλα, τον τελευταίο αιώνα, ο όγκος των θαλασσών αυξήθηκε, σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά 17 εκατοστά. Ενώ, την τελευταία δεκαετία το ποσοστό αυτό σχεδόν διπλασιάστηκε. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, καθώς και εξαιτίας της τήξης των παγετώνων, τα νερά των οποίων καταλήγουν στην θάλασσα (Vellinga & Wood, 2002).

Παράλληλα, παρατηρείται μια μείωση του PH (φαινόμενο οξίνισης) των ωκεανών. Από το 1750 και μετά, το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται στους ωκεανούς έχει αυξηθεί, και πλέον μεγεθύνεται κατά 2 δισεκατομμύρια τόνους ανά έτος. Κάτι που έχει ως αποτέλεσμα, να αυξάνεται περίπου κατά 30% η οξύτητα των ωκεανών (Arnell, 2003a).

### **1.4 Συρρίκνωση παγετώνων**

Ένας, από τους πιο συχνά μεταβαλλόμενους δείκτες στην κλιματική αλλαγή, είναι οι παγετώνες. Αυτό συμβαίνει καθώς άμεσα επηρεάζεται ο όγκος τους τόσο όταν το κλίμα

δροσίζει αλλά παράλληλα και όταν προκαλείται ζέστη και υποχωρούν (Arya, 2001). Από στοιχεία μέσα από δορυφόρους και φωτογραφίες, φάνηκε ότι στην Ανταρκτική και στην Γροιλανδία οι παγετώνες υπέστησαν μεγάλη μείωση στον όγκο τους. Μάλιστα, κατά τα έτη 2002 έως 2006, οι παγετώνες της Γροιλανδίας έχασαν 150 έως 250 κυβικά χιλιόμετρα πάγου, αντίθετα στην Ανταρκτικής έχασαν σχεδόν 152 κυβικά χιλιόμετρα πάγου ανάμεσα στο 2002 και το 2005 (Arya, 2001).

Όλα αυτά σε συνάρτηση με τα ακραία καιρικά φαινόμενα που συντελούνται σε παγκόσμιο επίπεδο δείχνουν πως το κλίμα της Γης μεταβάλλεται.

## 1.5 Ξηρασία

Το νερό λογίζεται ως το πολυτιμότερο αγαθό στον πλανήτη. Αυτό, όμως, δεν αναιρεί το γεγονός ότι πρόκειται για έναν πεπερασμένο φυσικό πόρο, ο οποίος επιδέχεται μείωση με την ταυτόχρονη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και της κλιματικής αλλαγής (Σαράντης, 2010).

Η ξηρασία αποτελεί ένα υπερβολικά έντονο μετεωρολογικό-κλιματικό φαινόμενο, που εμφανίζεται σε μη αναμενόμενο χρόνο, περιοχή και διάρκεια. Από τη μετεωρολογική έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί, γίνεται φανερό ότι σαν φαινόμενο τα τελευταία χρόνια συμβαίνει όλο και πιο συχνά ανά τον κόσμο προκαλώντας σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Μάλιστα η ξηρασία δεν μπορεί να αποκωδικοποιηθεί καθώς αποτελεί από τα πιο περίπλοκα και μη κατανοητά φυσικά φαινόμενα καταστροφών (Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών, 2002).

Η ξηρασία δημιουργεί μια σχετική κατάσταση, καθώς συνοδεύεται από πολλές παραμέτρους και διαφοροποιείται από άλλες αντίστοιχες ακραίες κλιματικές καταστάσεις (Αναγνωστοπούλου, 2003). Αρχικά, δεν μπορεί εύκολα να γίνει φανερή η έναρξη ή η λήξη μιας φάσης ξηρασίας, γιατί παρουσιάζει μεταπτώσεις στην εμφάνιση από τη χρονική στιγμή που δεν θα υπάρξουν βροχοπτώσεις. Παράλληλα δεν είναι σπάνια τα καταστροφικά της αποτελέσματα ακόμα και έπειτα από την εμφάνιση κάποιων βροχοπτώσεων (Tannehill, 1947). Επιπρόσθετα, ο ορισμός της ποικίλει από περιοχή σε περιοχή καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η κλιματολογία και η τοπογραφία που τη χαρακτηρίζει, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ένας κοινός αποδεκτός παγκόσμιος ορισμός. Αυτό είναι και ο λόγος που υπάρχει ένα πλήθος ορισμών που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια (Meteorological Office, 1991). Επιπλέον

ο ορισμός της μεταβάλλεται και με βάση το αντικείμενο που πραγματεύεται κάθε επιστήμη. Έτσι για τη Μετεωρολογία, ξηρασία είναι η ελάττωση των βροχοπτώσεων σε σχέση με την «φυσιολογική» τιμή της σε κάποιο συγκεκριμένο και μεγάλο χρονικό διάστημα (Αναγνωστοπούλου, 2003).

Ο δείκτης ευπάθειας της Marplecroft εξετάζει ταυτόχρονα και την αλλαγή του κλίματος αλλά και την έκθεση στην ξηρασία, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη νερού, την καταστροφή καλλιεργειών και του εδάφους που μετατοπίζεται στη θάλασσα. Επίσης, ο συγκεκριμένος δείκτης εξετάζει και πιθανές προσαρμοστικές αλλαγές που πρέπει να μελετηθούν και να προβλεφθούν από κάθε χώρα προκειμένου να καταφέρουν να προσαρμοστούν σε μελλοντικές αλλαγές και κινδύνους που προκαλεί η κλιματική αλλαγή (Σαράντης, 2010).

Στο σύνολο των 30 χωρών οι οποίες αναφέρονται, περισσότερο εκτεθειμένες είναι τα δύο τρίτα της Αφρικής και όλες είναι αναπτυσσόμενες χώρες (Σαράντης, 2010). Συγκεκριμένα, η Αφρική μένει ακάλυπτη ιδιαίτερα στην ξηρασία, τόσο των έντονων πλημμυρών όσο και πυρκαγιών. Σε αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η οικονομία και η ανεπαρκής υγειονομική περίθαλψη. Ενώ και η διακυβέρνηση κάποιων χωρών αφήνουν πολύ μικρά περιθώρια στον περιορισμό των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών (Σαράντης, 2010).

## **1.6 Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου**

Γενικά μιλώντας, ως «φαινόμενο του θερμοκηπίου» χαρακτηρίζεται το φαινόμενο θέρμανσης που παρατηρείται στα θερμοκήπια. Κατά το φαινόμενο αυτό η γυάλινη υπερκατασκευή ή θόλος εκπέμπει από τη μια βραχεία κύματα αλλά από την άλλη, απορροφά και ακτινοβολεί πάλι παρόμοια κύματα, με τα τελευταία να είναι πιο μακρά. Με τον τρόπο αυτό, καταφέρνει και θερμαίνεται το εσωτερικό του. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στη φύση, κατά την οποία η ατμόσφαιρα ενός πλανήτη συμβάλλει στην ίδια του τη θέρμανση (Μελάς, 2007).

Αθροιστικά, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην Γη, αναλογεί σχεδόν σε 1366 watt ανά τετραγωνικό μέτρο στο όριο της ατμόσφαιρας. Ένα ποσοστό της ηλιακής αυτής ακτινοβολίας, εισχωρεί στο σύστημα Γης – Ατμόσφαιρας, αντίθετα το υπόλοιπο ποσοστό απομακρύνεται στο διάστημα (Bezpalova, 2006). Ταυτόχρονα, από την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στη Γη, το 30% υφίσταται ανάκλαση, κατά 3% από τα νέφη, 4% από την επιφάνεια της Γης και 6% από την ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο 70% της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται κατά 3% από

τα νέφη, 16% από την ατμόσφαιρα (συμπεριλαμβανομένου και του στρατοσφαιρικού στρώματος του όζοντος), και το μεγαλύτερο ποσοστό (51%) από τους ωκεανούς και την επιφάνεια (Bezralova, 2006).

Όπως ο ήλιος, έτσι και η γη εκπέμπει θερμική ακτινοβολία εξαιτίας, της θερμοκρασίας της. Μάλιστα η θερμοκρασία που εκπέμπει αποτελούν μεγάλα μήκη κύματος σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία που εκπέμπουν μικρά μήκη κύματος. Η ατμόσφαιρα της Γης, μπορεί και έχει μεγάλη αδιαφάνεια στα μεγάλα μήκη κύματος της γήινης ακτινοβολίας, δηλαδή έχει τη δυνατότητα να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της σε ποσοστό περίπου 71% (Prudhomme, Reynard & Crooks, 2002). Η ίδια η ατμόσφαιρα, εκπέμπει εκ νέου κύματα θερμικής ακτινοβολίας, μεγάλου μήκους. Ένα ποσοστό από την θερμική αυτή ακτινοβολία, απορροφά η επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα την επιπλέον θέρμανσή της. Η ατμόσφαιρα της γης λόγω αυτού, αποτελεί μαζί με τον ήλιο και αυτή, πηγή θερμότητας (Prudhomme, Reynard & Crooks, 2002).

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας, και γι' αυτό η Γη είναι κατοικήσιμη. Το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, ρυθμίζει τη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης καθώς διαφορετικά θα ήταν περίπου  $-18^{\circ}\text{C}$  σε ετήσια παγκόσμια βάση (Ζιώμας, 2007). Πολύ συχνά το φαινόμενο του θερμοκηπίου παραλληλίζεται με το πώς λειτουργεί ένα πραγματικό θερμοκήπιο, όμως αποτελεί μια υπεραπλούστευση, καθώς αυτά χρησιμοποιούν την «απομόνωση» της θερμότητας και εξαλείφουν φαινομένων μεταφοράς της (Favis-Mortlock & Boardman, 1995).

Όλα τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αναφέρονται συνολικά με τον όρο «αέρια του θερμοκηπίου». Απορροφούν τη μεγάλου μήκους γήινη ακτινοβολία και επανεκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, θερμαίνοντας την επιφάνεια (IPCC, 2013). Ορισμένα αέρια, όπως το όζον, έχουν αδιαφάνεια και στην ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να απορροφούν ένα μέρος της, συμβάλλοντας σε έναν βαθμό και στην ψύξη της γήινης επιφάνειας (Kiehl & Trenberth, 1997).

Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) είναι το πιο σημαντικό από τα αέρια που κρατούν ζεστή την ατμόσφαιρα της Γης. Κατά τη διάρκεια του φυσικού κύκλου του στοιχείου αυτού, η ποσότητά του στην ατμόσφαιρα διατηρείται σε ισορροπία. Μέσω της αναπνοής και της αποσύνθεσης των φυτών, αλλά και των ηφαιστειακών εκρήξεων απελευθερώνεται φυσικό  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα, όπου παραμένει 100 περίπου χρόνια. Απομακρύνεται πάλι από την ατμόσφαιρα,

μέσω της φωτοσύνθεσης των φυτών και μέσω της διάλυσής του στο νερό. Η ποσότητα του φυσικά παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα εξισορροπείται, σχεδόν απόλυτα, από την ποσότητα που αφαιρείται με φυσικό τρόπο (Meams, Bogardi, Giorgi, Matyasovszky & Palecki, 1999).

Όμως, ο άνθρωπος με τις δραστηριότητες του έχει συμβάλει σημαντικά σε αυτό το ισοζύγιο και σε μεγάλο βαθμό ευθύνεται για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Παρόλο που το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι φυσικό, η παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα του έχει δημιουργήσει μια δυσλειτουργία, η οποία είναι υπεύθυνη για την αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ιχνοστοιχείων, όπως οι χλωροφθοράνθρακες, τα οποία συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα (Wilks, 1999).

Μάλιστα τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρείται αυξανόμενη συκέντρωση του άνθρακα (η αύξηση υπολογίζεται στο 31% κατά την περίοδο 1750-1998). Τα τρία τέταρτα διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται σε ανθρώπινο παράγοντα έχουν άμεση σχέση με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, ενώ το υπόλοιπο μέρος αφορά αλλαγές που έχουν συμβεί στο έδαφος κυρίως μέσω αποδάσωσης (<http://climate.nasa.gov>).

## **1.7 Υπερθέρμανση του πλανήτη**

Από το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα και μετά παρατηρήθηκε αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, δηλαδή υπερθέρμανση του πλανήτη. Γεγονός που μπορεί να ταυτιστεί με την κλιματική αλλαγή στην σύγχρονη εποχή. Η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης αυξήθηκε περίπου κατά  $0,74 \pm 0,18$  °C κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, με βάση την τέταρτη έκθεση αξιολόγησης του 2007 της Διακυβερνητικής Επιτροπής, για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) (IPCC, 2013). Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτής φαίνεται ότι οφείλεται στη συκέντρωση των θερμοκηπικών αερίων τα οποία πηγάζουν από την δραστηριότητα του ανθρώπου, όπως η καύση των ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών. Ένα μέρος εξουδετερώθηκε εξαιτίας της ανακλαστικής δράσης που παρατηρείται στα αιωρούμενα σωματίδια, λόγω της ανακλαστικότητας των νεφών εμποδίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στο έδαφος (IPCC, 2013).

Η έννοια της παγκόσμιας θέρμανσης (global warming) αποτυπώνει μια συγκεκριμένη εκδοχή της μεταβολής του κλίματος κάνοντας αναφορά στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, τόσο της γης, όσο και των ωκεανών. Ο όρος, ωστόσο, είναι εν γένει ουδέτερος

σε ό,τι αφορά τα αίτια πρόκλησης της θέρμανσης του πλανήτη. Παρόλα αυτά έχει επικρατήσει να υπονοεί την ανθρώπινη παρέμβαση. Ο όρος αποδίδεται πολλές φορές με διαφορετικό τρόπο, πότε ως πλανητική (υπερ)θέρμανση ή παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας και πότε ταυτίζεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο αποτελεί έναν μηχανισμό παγκόσμιας θέρμανσης (Bard & Frank, 2006).

Οικολογικές οργανώσεις επιβεβαιώνουν ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι υπεύθυνες κάθε χρόνο για μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (μόνο το 2004 η αύξηση αυτή ήταν της τάξης των 28 δισεκατομμυρίων τόνων). Συνέπεια αυτού αποτελεί η υπερθέρμανση του πλανήτη. Μάλιστα το φαινόμενο αυτό έχει εμφανιστεί από την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης, όπου και ξεκίνησε η καύση μεγάλων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων με σκοπό την κίνηση των οχημάτων, την θέρμανση των κατοικιών, την εκτέλεση επαγγελματικών δραστηριοτήτων, αλλά και την λειτουργία των εργοστασίων (ΕΟΠ, 2006).

Η αλλαγή λόγω της καύσης των ορυκτών καυσίμων έχει αφήσει τα σημάδια της στο πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων. Τις τελευταίες δύο εκατονταετίες μόνο, έχουμε σπαταλήσει τεράστιο ποσοστό από τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα, στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα, βασικό παράγοντα έχει διαδραματίσει και η αποψίλωση των δασών καθώς ελευθερώνεται το διοξείδιο του άνθρακα που υπό άλλες συνθήκες θα συγκρατούνταν εντός των δέντρων και του εδάφους (McKee, Docsken & Kleist, 1993).

Η συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει ως αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται σημαντική ποσότητα θερμότητας, οπότε και ανεβαίνει η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας της γης, κάτι που συνηγορεί στην κλιματική αλλαγή (Tarpley, 1979). Το πιο επιβλαβές αέριο που ευθύνεται για την υπερθέρμανση του πλανήτη και προκύπτει από την αλόγιστη σπατάλη των ορυκτών καυσίμων είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Δεν είναι όμως το μοναδικό, και άλλα αέρια όπως είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) το οποίο προκύπτει από την χωρίς οξυγόνο αποικοδόμηση της οργανικής ύλης, δηλαδή τις ζυμώσεις του εντερικού συστήματος των ζώων και τα απόβλητα. Το υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ) που προκύπτει από δραστηριότητες της βιομηχανίας, αλλά κυρίως της γεωργίας, καθώς και οι φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες (HFCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθοριούχο θείο ( $\text{SF}_6$ ), τρία τεχνητά αέρια, τα οποία είναι αποτέλεσμα βιομηχανικών διεργασιών. Για αυτό και η συμφωνία του Πρωτοκόλλου του Κιότο είχε ως βασικό μέλημα τον έλεγχο των παραπάνω αυτών αερίων (IPCC, 2013).

## 2 Μελέτη του κλίματος

### 2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα

Το σύστημα του κλίματος επηρεάζεται από την εσωτερική δυναμική που παρουσιάζουν τα στοιχεία από τα οποία αυτό αποτελείται, δηλαδή την επιφάνεια του εδάφους και τους ζωντανούς οργανισμούς (βιόσφαιρα), την ατμόσφαιρα, την κρυόσφαιρα και την υδρόσφαιρα, αλλά και λόγω αλλαγών σε εξωτερικούς παράγοντες που δρουν πάνω σε αυτό (IPCC, 2007). Οι παράγοντες που οφείλονται στην επιρροή του κλίματος είναι δυνατόν να διαχωρισθούν σε δύο μεγάλες ομάδες. Από την μια έχουμε τους ανθρώπινους παράγοντες που οφείλονται σε ανθρώπινες δράσεις και επηρεάζουν κυρίως τη σύνθεση της ατμόσφαιρας και από την άλλη τους φυσικούς παράγοντες που οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα (π.χ. αλλαγές στην ηλιακή δραστηριότητα και τις ηφαιστειακές εκρήξεις) (IPCC, 2007).

Ο παράγοντας της χωρίς έλεγχο ανθρώπινης δραστηριότητας προκαλεί τρομερό αρνητικό παράγοντα, διότι μεγιστοποιεί τη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου μέσω κάποιων βλαβερών ιχνοστοιχείων, όπως είναι το μεθάνιο που παράγεται ως επί το πλείστον κατά την αποσύνθεση της οργανικής ύλης των απορριμμάτων, το διοξείδιο του άνθρακα, το υποξείδιο του αζώτου που προέρχεται κυρίως με τη χρήση λιπασμάτων, όπως και οι χλωροφθοράνθρακες (Καραθανάσης, 2006).

Οι χλωροφθοράνθρακες είναι χημική ένωση με χλώριο, το οποίο είναι ιδιαίτερα καταστροφικό για το όζον, ενώ χρησιμοποιούνται και ως ψυκτικά αέρια σε οικιακές συσκευές (π.χ. τα ψυγεία και τα κλιματιστικά), αλλά και σε σπρέι ως προωθητικά αέρια που μάλιστα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Η παραγωγή προϊόντων με χλωροφθοράνθρακες έχει σταματήσει από το 1987 (Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ). Όμως ακόμα και σήμερα υπάρχουν αρκετές συσκευές οι οποίες έχουν απομείνει και χρησιμοποιούνται ακόμα στην καθημερινότητά μας, οι οποίες σταδιακά αποσύρονται για να αντικατασταθούν από άλλες πιο φιλικές προς το περιβάλλον (Hanson, 1976).

Παράλληλα έπειτα από μελέτη σχετικά και με το διοξείδιο του άνθρακα έχει διαπιστωθεί ότι η συμβολή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Το μεγαλύτερο ποσοστό του περίπου το 75% της συνολικής εκπομπής του σύμφωνα με μετρήσεις, απελευθερώνεται στο περιβάλλον μέσω της καύσης των διάφορων ορυκτών καυσίμων και σε μικρότερο βαθμό εξαιτίας της μαζικής αποψύλωσης δασικών εκτάσεων, οι οποίες και απορροφούν μεγάλες



ποσότητες από τη χημική αυτή ένωση και συμβάλλουν σημαντικά στη μείωσή του (Καραθανάσης, 2006).

Η συγκέντρωσή του έχει αυξηθεί κατά 31% από το 1750. Ενώ, κάθε χρόνο τα επίπεδά του αυξάνονται περίπου κατά 4% στην ατμόσφαιρα. Γεγονός που οι επιστήμονες επισημαίνουν ότι εάν εξακολουθήσει αυτός ο ρυθμός αύξησης, τότε μέχρι το 2030 θα έχει διπλασιαστεί η συγκέντρωσή του. Όλο αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό καθώς θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στον πλανήτη, κατά επέκταση και στην ίδια μας τη ζωή (Μελάς κ.α., 2000).

## 2.2 Κλιματικά μοντέλα

Τα ποικίλα μαθηματικά μοντέλα, αυτή την στιγμή είναι τα κύρια εργαλεία, ώστε να γίνει πρόβλεψη σχετικά με τις κλιματικές αλλαγές τόσο για το παρόν όσο και για το μέλλον. Αυτά στηρίζονται στις βασικές αρχές της επιστήμης της φυσικής και εμπίπτουν, κυρίως, στον τομέα της δυναμικής των ρευστών, αλλά και της θερμοδυναμικής (Μελάς, 2007). Βέβαια, οι επιστήμονες προσπαθούν να μπορέσουν να προσθέσουν στα μοντέλα επιπρόσθετες φυσικές διαδικασίες που θα μπορούσαν να βοηθήσουν, όμως τότε θα πρέπει να γίνουν πολλές απλοποιήσεις εξαιτίας των ελάχιστων γνώσεών μας, καθώς και εξαιτίας των διαφόρων περιορισμών στην ισχύ του υπολογισμού (Neelin, 2011).

Τα κλιματικά μοντέλα της σύγχρονης εποχής, είναι συνδυασμός από απλούστερα μοντέλα διαφόρων τμημάτων που αναφέρονται σε γήινες διαδικασίες. Επομένως, ένα κλιματικό μοντέλο θα αντιστοιχεί όσο πιο κοντά με την πραγματικότητα, αποτελούμενο από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο, που θα δηλώνει τον τρόπο κίνησης του αέρα και την μεταφορά της θερμότητας που θα πηγάζει από αυτόν, τη δημιουργία νεφών κ.α., ένα μοντέλο προσομοίωσης των πάγων, των ωκεανών και άλλα. Σε όλα αυτά όμως η δυσκολία εναπόκειται στο ότι δύσκολα μπορεί να προστεθεί η παράμετρος από τα αέρια του θερμοκηπίου, καθώς δεν γνωρίζουμε την ποσότητα των εκπομπών τους στο επόμενο διάστημα. Παρόλα αυτά χρησιμοποιώντας πιθανές τιμές και λαμβάνοντας υπόψη την όποια ανασφάλεια, θα καταγραφεί σημαντική αύξηση από 1,1 °C έως 6,4 °C, από το IPCC μέχρι την λήξη του 21ου αιώνα (Μελάς, 2007).

Ωστόσο, όλα αυτά τα κλιματικά μοντέλα προσπαθώντας να ανταποκριθούν στην πραγματικότητα, ελέγχουν τα δεδομένα τους μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων που εξάγουν για το κλίμα της σύγχρονης εποχής ή και λαμβάνοντας υπόψιν στοιχεία παλαιότερων

μετρήσεων (Μελάς, 2007). Γενικά γίνεται αποδεκτό ότι υπάρχει μια αρκετά καλή προσέγγιση του σύγχρονου κλιματικού μοντέλου και της πραγματικότητας, αν όχι και πάντα. Η συρρίκνωση της Αρκτικής η οποία συνέβη γρηγορότερα από ότι προέβλεπαν τα μοντέλα, αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα (Hewitson, 1999).

## **2.3 Μοντέλο Μετεωρολογικής Έρευνας και Πρόβλεψης (The Weather Research and Forecasting Model-WRF)**

Το Μοντέλο Μετεωρολογικής Έρευνας και Πρόβλεψης (Weather Research and Forecasting - WRF) αποτελεί ένα σύστημα αριθμητικής πρόβλεψης καιρού μεσαίας κλίμακας επόμενης γενιάς (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>). Το συγκεκριμένο σύστημα έχει προγραμματιστεί, με σκοπό να εξυπηρετεί τις εκτιμήσεις της ατμοσφαιρικής έρευνας, όπως και τις επιχειρησιακές προβλέψεις (Neelin, 2011). Το μοντέλο αυτό αποτελείται από δύο δυναμικούς πυρήνες, μια αρχιτεκτονική λογισμικού και ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, έτσι που εξυπηρετείται ο παράλληλος υπολογισμός και η επεκτασιμότητα του συστήματος (Saha, Moorthi et al, 2010). Το WRF χρησιμοποιείται από πολλές μετεωρολογικές εφαρμογές υπό κλίμακα δεκάδων μέτρων μέχρι και χιλιάδων χιλιομέτρων (Giorgi & Jones, 2008).

Η προσπάθεια ανάπτυξης του WRF άρχισε περί τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ήταν μια συνεργατική σύμπραξη του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικής Έρευνας (NCAR), της Εθνικής Ωκεανικής και Ατμοσφαιρικής Διοίκησης (εκπροσωπούμενη από τα NCEP (Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης) και του Ερευνητικού Εργαστηρίου Γήινων Συστημάτων), της Πολεμικής Αεροπορίας των ΗΠΑ, του Εργαστηρίου Ναυτικής Έρευνας και του Πανεπιστημίου της Οκλαχόμα (<http://www.wrf-model.org/>).

Για τους ερευνητές, το WRF μπορεί να παράγει προσομοιώσεις βάσει πραγματικών ατμοσφαιρικών συνθηκών (δηλαδή, από παρατηρήσεις και αναλύσεις) ή εξιδανικευμένες συνθήκες. Το WRF προσφέρει επιχειρησιακή πρόβλεψη μιας ευέλικτης και υπολογιστικά αποδοτικής πλατφόρμας, ενώ αντανακλά τις πρόσφατες εξελίξεις στη φυσική, την αριθμητική και την αφομοίωση δεδομένων στην οποία συνέβαλαν προγραμματιστές από την εκτεταμένη ερευνητική κοινότητα. Το WRF βρίσκεται επί του παρόντος σε επιχειρησιακή χρήση στο NCEP και σε άλλα εθνικά μετεωρολογικά κέντρα, καθώς και σε διαμορφώσεις προβλέψεων σε πραγματικό χρόνο σε εργαστήρια, πανεπιστήμια και εταιρείες (<http://www.wrf-model.org/>).

Το WRF είναι ένα υπερσύγχρονο σύστημα ατμοσφαιρικής μοντελοποίησης σχεδιασμένο, τόσο για μετεωρολογική έρευνα, όσο και για αριθμητική πρόβλεψη καιρού. Προσφέρει πολλές επιλογές για ατμοσφαιρικές διεργασίες και μπορεί να εκτελεστεί σε μια ποικιλία πλατφορμών υπολογιστών. Το WRF υπερέχει σε ένα μεγάλο φάσμα με εφαρμογές σε κλίμακες, που κυμαίνονται από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα, συμπεριλαμβανομένων των παρακάτω (<http://www.wrf-model.org/>):

- ❖ Μετεωρολογικές μελέτες
- ❖ NWP σε πραγματικό χρόνο
- ❖ Εξιδανικευμένες προσομοιώσεις
- ❖ Εξομοίωση δεδομένων
- ❖ Σύζευξη μοντέλου συστήματος γης
- ❖ Εκπαίδευση μοντέλων και εκπαιδευτική υποστήριξη.

Το Εργαστήριο Μετεωρολογίας Μεσοκλίμακας και Μικροκλίμακας (MMM) του NCAR υποστηρίζει το σύστημα WRF στην κοινότητα χρηστών και διατηρεί τον κωδικό WRF στο GitHub. Η MMM παρέχει βοήθεια χρηστών μέσω ενός διαδικτυακού φόρουμ υποστήριξης. Η MMM εκδίδει επίσης εκδόσεις WRF, διεξάγει σεμινάρια WRF και φιλοξενεί το ετήσιο εργαστήριο χρηστών WRF και MPAS (<http://www.wrf-model.org/>).

Το σύστημα WRF είναι διαθέσιμο μέσω δωρεάν λήψης. Εκτός από την παροχή του κώδικα και της τεκμηρίωσης για το σύστημα WRF, αυτός ο ιστότοπος παρέχει πληροφορίες και συνδέσμους σχετικά με τις συνεισφορές, τις εκδόσεις και τις εκδηλώσεις κώδικα WRF (<http://www.wrf-model.org/>).

Υπάρχουν πολλά συστήματα που σχετίζονται με το WRF και δυνατότητες ειδικότητας με ξεχωριστές σελίδες. Τα βασικά αναφέρονται παρακάτω:

- Σύστημα αφομοίωσης δεδομένων WRF
- WRF-Chem (μοντέλο WRF ατμοσφαιρικής χημείας)
- WRF-Hydro (σύστημα υδρολογικής μοντελοποίησης WRF) (<http://www.wrf-model.org/>)

Το μοντέλο WRF έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει ατμοσφαιρικές προσομοιώσεις, κάνοντας χρήση πραγματικών δεδομένων (παρατηρήσεις, αναλύσεις) ή εξιδανικευμένων

συνθηκών (Thomson, Calvin et al, 2011). Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα σε επιχειρησιακές προβλέψεις με εξαιρετικά και αποδοτικά υπολογιστικά δεδομένα μέσω πλατφόρμας. Σήμερα, το WRF βρίσκεται σε χρήση από επιχειρήσεις όπως η NCEP, η AFWA, καθώς και άλλες πολλές. Αποτελεί ένα υποβοηθούμενο κοινοτικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται ελεύθερα και διαμοιράζεται, έχοντας όμως κάποια κατανομημένη ανάπτυξη και μια κεντρική υποστήριξη (Saha, Moorthi et al, 2010). Στο WRF είναι εγγεγραμμένοι πάρα πολλοί χρήστες. Αποτελείται από μια μεγάλη παγκόσμια κοινότητα όπου οι εγγεγραμμένοι ανέρχονται σε πάνω από 48 χιλιάδες, σε περισσότερες από 160 διαφορετικές χώρες στον κόσμο, ενώ κάθε χρόνο στο NCAR πραγματοποιούνται διάφορα σεμινάρια και εργαστήρια (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>).

Το σύστημα WRF περιλαμβάνει δύο δυναμικούς διαλύτες, που αναφέρονται ως πυρήνας ARW (Advanced Research WRF), και πυρήνας NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) (User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.5). Και οι δύο πυρήνες είναι Eulerian, που έχουν κατακόρυφες συντεταγμένες και ακολουθούν την ορογραφία. Ο πυρήνας ARW έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο ποσοστό και υποστηρίζεται από το εργαστήριο μετεωρολογίας κλίμακας και μικροκλίμακας της NCAR/MMM (Mesoscale & Microscale Meteorology) και η σελίδα για τους χρήστες του είναι WRF-ARW. Ο πυρήνας NMM δημιουργήθηκε από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης NCEP/EMC (Environmental Modeling Center), χρησιμοποιείται επί του παρόντος στο σύστημα HWRF (Hurricane WRF) και η διατήρησή του υποστηρίζεται από το NCAR/DTC (Developmental Testbed Center) (User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.5) (<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>).

Κατά βάση, οι πυρήνες αυτοί συμπεριλαμβάνουν την άνωση, τη διάχυση, την οριζόντια μεταφορά, τη βαροβαθμίδα, τη δύναμη Coriolis και τα βήματα ολοκλήρωσης των εξισώσεων (Skamarock, Klemp, Dudhia, Gill, Barker, Duda, Huang, Wang & Powers, 2008). Το μοντέλο προεπεξεργασίας του WRF (WRF Preprocessing System aka WPS) συνυπάρχει με ένα σύστημα που αποτελείται από τρία προγράμματα, ώστε να δημιουργήσουν παρεμβολή (interpolation) πραγματικών δεδομένων με σκοπό την αριθμητική πρόγνωση καιρού (Shaocai Yu, Brian Eder, Robin Dennis, Shao-Hang Chu & Stephen Schwartz, 2006). Το καθένα από τα συγκεκριμένα προγράμματα στόχο έχει να εκτελέσει ένα κομμάτι της προετοιμασίας (Skamarock, Klemp, Dudhia, Gill, Barker, Duda, Huang, Wang & Powers, 2008).

Συγκεκριμένα, το geogrid περιλαμβάνει δεδομένα για την προβολή του χάρτη, έχοντας και στατικά γεωγραφικά δεδομένα (IPCC, 2013). Το ungrib δίνει στοιχεία των μετεωρολογικών πεδίων από τα διαμορφωμένα αρχεία GRIB (Mearns, Giorgi, Whetton, Pabon, Hulme & Lal, 2003). Ενώ, το metgrid περιέχει τα μετεωρολογικά πεδία σε οριζόντια διάταξη και καταγράφονται συμπεράσματα από το ungrib στα μοντέλα grids, τα οποία προσδιορίζονται από το geogrid (IPCC, 2007). Το GRIB είναι ένας τύπος αρχείου, που έχει προταθεί από τον WMO καθώς μπορεί να αποθηκεύσει κανονικά καταναμημένων πεδίων (δηλαδή σε κανονικό πλέγμα) (Mearns, Giorgi, Whetton, Pabon, Hulme & Lal, 2003). Μάλιστα αυτή η διαδικασία της κάθετης παρεμβολής των μετεωρολογικών πεδίων του WRF, πραγματοποιείται εντός του πραγματικού προγράμματος (Climate change, impacts and vulnerability in Europe, 2012).

Το μοντέλο WRF σχεδιάστηκε, με τέτοιο τρόπο, για να μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί, λαμβάνοντας υπόψιν του όλες τις σύγχρονες εξελίξεις της τεχνολογίας, ενώ δύναται να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον παράλληλης επεξεργασίας (Haylock, Hofstra, Klein Tank, Klok, Jones & New, 2008). Μάλιστα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για έρευνες ο κωδικός του, όσο και για επιχειρησιακές διεργασίες (Giorgi, Coppola, Solmon, Mariotti, Sylla, Bi, Elguindi, Diro, Nair, Giuliani, Turuncoglu, Cozzini, Güttler, O'Brien, Tawfik, Shalaby, Zakey, Steiner, Stordal, Sloan & Brankovic, 2012). Στην επιστήμη έχει χρησιμοποιηθεί ώστε να υπάρξει αριθμητική πρόγνωση του καιρού, προσομοίωση δεδομένων (data assimilation) και ρύθμιση διαφόρων φυσικών διεργασιών, ενώ παράλληλα δίδεται παραγωγή δεδομένων εισόδου για μοντέλα ποιότητας αέρα, αλλά και κάποιες νοητές προσομοιώσεις (π.χ. στροβιλισμός στο οριακό στρώμα, κινήσεις συναγωγής αλλά και βαρυντικά κύματα) (IPCC, 2000).

## **3 Το μελλοντικό κλίμα της γης**

### **3.1 Προβλέψεις για τον καιρό και το κλίμα**

Ο καιρός και το κλίμα πολλές φορές συγχέονται σαν έννοιες και θεωρούνται ταυτόσημες όμως δεν είναι. Ο καιρός είναι η κατάσταση που παρατηρείται στην ατμόσφαιρα σε μια δεδομένη στιγμή και διαφοροποιείται σε σχέση με τον χώρο και τον χρόνο αλλά και αλλάζει από ώρα σε ώρα ή από ημέρα σε ημέρα. Αντίθετα, το κλίμα δηλώνει τις μέσες καιρικές συνθήκες που υπάρχουν σε πάνω από μια δεκαετία, οπότε μελετάται σε βάθος χρόνου (National Geographic, 2013).

Είναι λοιπόν δυνατό να υπολογίζεται το κλίμα ακόμα και χωρίς την ακριβή πρόγνωση του καιρού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό θα μπορούσε να καταγραφεί για παράδειγμα με τη λήξη της εποχής της άνοιξης, όπου με βεβαιότητα μπορεί να προβλεφθεί για τον αέρα η μέση του θερμοκρασία, για την εποχή του καλοκαιριού που έρχεται σε μια καθορισμένη περιοχή ότι η μέση θερμοκρασία θα είναι υψηλότερη από εκείνη της τελευταίας άνοιξης, παρόλο που και πάλι δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η θερινή ημερήσια θερμοκρασία για χρονικό διάστημα πάνω από μια εβδομάδα περίπου (Diaz-Nieto & Wilby, 2004). Από το παραπάνω παράδειγμα γίνεται φανερό ότι οι κλιματικές προσομοιώσεις επηρεάζονται από παράγοντες, όπως ο εποχιακός κύκλος της ακτινοβολίας του ήλιου, ενώ δεν επηρεάζονται από την ακριβή πρόγνωση του καιρού για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (Diaz-Nieto & Wilby, 2004).

Το κλίμα ορίζεται από τις μέσες καιρικές συνθήκες, όπου περιλαμβάνονται οι μέσες τιμές θερμοκρασίας, τόσο του αέρα, όσο και των βροχοπτώσεων για μεγάλα χρονικά διαστήματα, παράλληλα λαμβάνεται υπόψιν και η μεταβλητότητά τους. Σχετικά με την μεταβλητότητα παίρνεται υπόψιν η τυπική απόκλιση της μεταβλητότητας της βροχόπτωσης ανά έτος από εκείνη της μέσης τιμής για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ή αντίστοιχα και το πόσο συχνά εμφανίζονται μέρες με θερμοκρασία κάτω των 5 °C (Charles, Bates & Hughes, 1999a). Οι μέσες τιμές από τις κλιματικές μεταβλητές έπειτα από μεγάλες χρονικές περιόδους ολοκληρωμένες ορίζονται ως κλιματικοί μέσοι. Με αυτό τον τρόπο οι κλιματικοί μέσοι μας δίνουν δεδομένα για χρονικά διαστήματα μήνα, εποχής ή έτους. Βέβαια, θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι προγνώσεις για το κλίμα, δεν μας δίνουν εκτιμήσεις ατμοσφαιρικών μεταβλητών για ημερήσια δεδομένα, αλλά πιθανότητες στις μεταβολές με στατιστικά μακροπρόθεσμα (Charles, Bates & Hughes, 1999a).

Η αναπαράσταση του καιρού μπορεί να δώσει δεδομένα για καθημερινή εκτίμηση των ατμοσφαιρικών παραμέτρων σε ορισμένες στιγμές για κοντινά διαστήματα. Για να δοθεί ακριβής πρόγνωση του καιρού θα πρέπει να γίνει αναλυτική γνώση των συνθηκών, που επικρατούν στην ατμοσφαιρική (Hewitson & Crane, 2003). Σε περίπτωση που εμφανιστούν σφάλματα στην καταγραφή του καιρού, αυτό οφείλεται στη χαοτική φύση της ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση αυτή έχουμε το «φαινόμενο της πεταλούδας» το οποίο έχει αρχικά περιγράψει, στη Θεωρία του Χάους η οποία διατυπώθηκε το 1963, ο Lorenz (Hewitson & Crane, 2003).

Η δυναμική του κλίματος δεν είναι ικανή να μας δώσει στοιχεία για την ακριβή πρόβλεψη της εξέλιξης του καιρού σε επόμενες δεκαετίες, εποχές και έτη. Παρόλα αυτά, η καταγραφή και η μελέτη κάποιων στοιχείων από προηγούμενα χρονικά διαστήματα δύναται να δώσει κάποια στοιχεία για την εκτίμηση μελλοντικών τάσεων όμως χωρίς κάποια βεβαιότητα (Hewitson, 1999). Για παράδειγμα, σημαντικό ρόλο στο κλίμα παίζουν και παράγοντες, όπως η αύξηση στην συγκέντρωση θερμοκηπιακών αερίων, που συνεχώς παρατηρείται μια επιφανειακή αύξηση της θερμοκρασίας στις επόμενες δεκαετίες. Συνεπώς, τα δεδομένα από το παρελθόν δίνουν μια κάποια πρόγνωση για το μελλοντικό κλίμα (Hewitson, 1999).

Το κλίμα επηρεάζεται και από τύπους εσωτερικής μεταβλητότητας οι οποίοι επηρεάζουν την δυνατότητα για κατανόηση του κλίματος στο μέλλον. Επηρεάζεται, λοιπόν, από τις φυσικές αστάθειες του κλιματικού συστήματος. Έτσι, το γεγονός αυτό μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες ανωμαλίες στην θερμοκρασία για μεγάλα χρονικά διαστήματα και αυτά με την σειρά τους επηρεάζουν τα στρώματα των ωκεανών, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η υπερκείμενη ατμόσφαιρα σε μια περιοχή ή σε μια πιο ευρεία κλίμακα (Hegerl et al, 2007). Η Νότια ταλάντωση El Niño (γνωστό και ως Ελ Νίνιο) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της εσωτερικής κλιματικής μεταβλητότητας. Σε αυτή την περίπτωση εξελίσσεται και το «φαινόμενο της πεταλούδας», στο οποίο για την διάδοση της διαταραχής και την απομακρυσμένη επίδρασή της, είναι αναγκαίος περισσότερος χρόνος (Barmpas & Moussiopoulos, 2011).

Το Ελ Νίνιο είναι ωκεάνιο φαινόμενο. Παρατηρείται στα κεντρικά και ανατολικά νερά του Ειρηνικού Ωκεανού κοντά στον Ισημερινό (ακτές του Περού), όπου εκεί τα νερά είναι κατά 3 °C πιο θερμά σε σχέση με άλλες περιοχές, μάλιστα μπορούν να συγκριθούν με την έκταση μιας μεγάλης χώρας (Dawson, 2008). Το φαινόμενο λαμβάνει δράση κάθε δύο με οχτώ χρόνια και για διάρκεια ενός έτους. Συνέπειες του φαινομένου αυτού είναι, κυρίως στις περιοχές γύρω από τον Ειρηνικό, αλλά και σε όλον τον πλανήτη, να παρατηρούνται διάφορα έντονα καιρικά φαινόμενα. Τέτοια φαινόμενα είναι οι ξηρασίες, οι βροχοπτώσεις, οι πυρκαγιές και οι τροπικοί κυκλώνες (Dawson, 2008). Το El Niño, λοιπόν, φαίνεται ότι προκαλεί διαφοροποιήσεις στα καιρικά συστήματα, σε σχέση με την κανονική λειτουργία τους, ωστόσο πιθανόν να καταλογίζεται μια υπερβολή στο φαινόμενο. Ως αιτία του φαινομένου, μάλλον είναι η διαταραχή των αληγών δυτικών ανέμων (Μουσιόπουλος, 2012).

### 3.2 Το κλίμα της γης στο μέλλον

Είναι πραγματικότητα, πως οι επιστήμονες που μελετούν τις κλιματικές μεταβολές συμπεραίνουν ότι υπάρχει μια αξιοσημείωτη τάση στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη (Danny, 2000). Είναι φανερό, ότι σε αυτό σημαντικά έχει συμβάλει ο ίδιος ο άνθρωπος, εξαιτίας της υποβάθμισης που υφίσταται το περιβάλλον από την άμετρη χρήση των φυσικών πόρων του πλανήτη μας, καθώς επίσης και από την ραγδαία τεχνολογική και οικονομική εξέλιξη και ανάπτυξη που προκαλούν μεταβολές στο κλίμα. Η εξέλιξη αυτών προκαλεί άνοδο των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων και των αεροζόλ, κυρίως όσων περιέχουν θειούχα αέρια (Saha & Moorthietal, 2010).

Οι εκπομπές των αερίων αυτών φαίνεται πως δεν θα μειωθούν στο άμεσο διάστημα, αντίθετα παρατηρείται μια αυξητική τάση στην χρήση τους. Μια σημαντική καταγραφή είναι, ότι οι υπολογισμοί των μοντέλων δείχνουν να υπάρχει μια πληθώρα χρήση των θερμοκηπικών αερίων εκτός του διοξειδίου του άνθρακα, και υπολογίζεται ότι ως το 2100 αύξηση αυτών, αν και τα έξι ενδεικτικά σενάρια εκπομπών διαφέρουν σημαντικά (Special Report Emissions and Scenarios - SRES) (IPCC, 2007). Για τα ενδεικτικά αυτά σενάρια, οι προβλεπόμενες ποσότητες εκπομπών των έμμεσων θερμοκηπικών αερίων (NO<sub>x</sub>, CO, VOC), ταυτόχρονα με τις μεταβολές στο μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), δείχνουν ότι θα προκαλέσουν αύξηση στην μέση πληθώρα της τροποσφαιρικής ρίζας υδροξυλίου (OH) παγκοσμίως, από -20% ως +6% κατά το επερχόμενο αιώνα. Λόγω της μεγάλης σημασίας του υδροξυλίου στην τροποσφαιρική χημεία, δημιουργούνται αντίθετες αλλαγές στους ατμοσφαιρικούς χρόνους ζωής των θερμοκηπικών αερίων, μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και φθοριωμένων υδρογονανθράκων (HFCs) (Οικονομόπουλος, 2000).

Παράλληλα, πέρα από την αυξητική χρήση της εκπομπής των θερμοκηπικών αερίων και άλλα συστατικά μόλυνσης, για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα όπως διαφαίνεται σε μερικά από τα σενάρια SRES, θα είναι υπεύθυνα για τις περιβαλλοντικές αλλοιώσεις οι οποίες δεν θα αφορούν μονάχα την κλιματική αλλαγή (Κάσσιου, 2015). Φαίνεται ότι η αυξητική χρήση των θερμοκηπικών αερίων ενδεχομένως να είναι υπεύθυνη για σημαντικές μεταβολές, τόσο σε σχέση με τη βροχόπτωση, όσο και την αλλαγή της θερμοκρασίας (Beersma, Agnew, Viner & Hulme, 2000).

Σε παγκόσμιο επίπεδο η θερμοκρασία της επιφάνειας αναμένεται να παρουσιάσει μια αύξηση από 1,4 ως 5,8°C από το 1990 ως το 2100. Γίνεται φανερό ότι σχεδόν όλες οι περιοχές της γης θα θερμανθούν γρηγορότερα σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο, κυρίως όσες περιοχές



βρίσκονται στα βορειότερα υψηλά γεωγραφικά πλάτη κατά την ψυχρή περίοδο (Oliver-Solàetal, 2013).

Όσον αφορά την βροχόπτωση θα υπάρξουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη μεταβολή των υδρατμών, της εξάτμισης αλλά και της βροχόπτωσης. Φαίνεται από πρόσφατες προσομοιώσεις ότι πιθανό η βροχόπτωση να αυξηθεί, όχι μόνο τον χειμώνα, αλλά και το καλοκαίρι κυρίως πάνω από υψηλού γεωγραφικού πλάτους περιοχές (Eckhardt & Ulbricht, 2003). Κατά την διάρκεια του χειμώνα οι αυξήσεις γίνονται φανερές και στα βορειότερα μεσαία γεωγραφικά πλάτη, όπως την τροπική Αφρική και την Ανταρκτική, ενώ το καλοκαίρι γίνεται φανερό στην νοτιότερη και ανατολικότερη Ασία. Παράλληλα στις περιοχές της Αυστραλίας, της κεντρικής Αμερικής και της νοτιότερης Αφρικής παρατηρείται μια μείωση στην χειμερινή βροχόπτωση. Μάλιστα μέσα από περιορισμένες μελέτες φαίνεται να υπάρχει μια δυνατή συσχέτιση μεταξύ της ενδοετήσιας μεταβλητότητας της βροχόπτωσης και της μέσης βροχόπτωσης (Eckhardt & Ulbricht, 2003).

Στο μέλλον παράλληλα, είναι πιθανόν να υπάρξουν έντονες μεταβολές με ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, διαφαίνεται να έχουμε περισσότερες ημέρες με έντονα θερμικά κύματα προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές της γης, ενώ λιγότερες θα είναι οι παγωμένες και ψυχρές ημέρες (Kothavala, 1999). Ακόμα, έντονες και ακραίες βροχοπτώσεις θα αυξηθούν σε σχέση με τον μέσο όρο και η δύναμή τους φαίνεται να έχει μια αυξητική τάση σχεδόν σε όλα τα μέρη της γης. Από την άλλη προβλέπεται να δημιουργηθούν εκτεταμένες ξηρασίες σε μεσοηπειρωτικές περιοχές κατά την διάρκεια του καλοκαιριού (Kothavala, 1999).

Αυτό θα έχει σαν φανερό χαρακτηριστικό, αλλαγές στον γήινο πάγο (παγετώνες, παγοκύστες), στον θαλάσσιο πάγο και στη χιονοκάλυψη. Οι παγετώνες και οι παγοκύστες θα υποχωρούν σταδιακά κατά τον 21ο αιώνα, ενώ η χιονοκάλυψη και ο θαλάσσιος πάγος του Βορειότερου Ημισφαιρίου θα μειωθούν περισσότερο (IPCC, 2001). Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή άνοδο της θαλάσσιας στάθμης, εκτιμάται μάλιστα ότι από το 1990 ως το 2100, θα εκτείνεται από 0,11 ως 0,77 m (IPCC, 2001). Επομένως, πολλές περιοχές που τώρα δείχνουν να έχουν πτώση της στάθμης της θάλασσας, στο μέλλον, αυτό θα αναδιαμορφωθεί με μια ανοδική θαλάσσια στάθμη (IPCC, 2001).

Το καλύτερο σενάριο για την αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα δείχνει ότι θα υπάρξουν διπλάσιες ποσότητες συγκεντρώσεων του αερίου στην ατμόσφαιρα το έτος 2100 σε

σύγκριση με την εποχή πριν από την Βιομηχανική Επανάσταση (IPCC, 2001). Όμως, το χειρότερο σενάριο, είναι ο διπλασιασμός αυτός να γίνει πιο νωρίς, περίπου το έτος 2045. Μάλιστα μια τρίτη αναφορά αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής (IPCC) διαβλέπει παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 1,4 - 5,8 °C ως το τέλος του αιώνα (IPCC, 2001).

### **3.3 Το μελλοντικό κλίμα στην Μεσόγειο και την Ελλάδα**

Όλες οι αναπαραστάσεις που έχουν πραγματοποιηθεί δείχνουν, ότι στην Ευρώπη το εύρος της ανόδου της θερμοκρασίας κατά μέσο όρο θα είναι πιο υψηλό στην Βόρεια Ευρώπη συγκρίνοντάς το με τις περιοχές της Μεσογείου. Αν και δεν συμπίπτουν σε όλα τα μοντέλα παρά ταύτα φαίνεται ότι η χειμερινή θερμοκρασία θα έχει αυξητική τάση στη Βόρεια Ευρώπη, αντίθετα το καλοκαίρι η θερμοκρασία θα αυξηθεί στην Νότια Ευρώπη (Τζαμπούρας, 2009). Επιπλέον, άλλη μια πληροφορία είναι ότι η άνοδος στην χειμερινή θερμοκρασιακή της Βόρειας Ευρώπης θα είναι υψηλότερη από εκείνη τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ αντίθετα προβλέπεται υψηλότερη αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες στην Νότια Ευρώπη από ό,τι τον χειμώνα (Eckhardt & Ulbricht, 2003).

Σε σχέση με τις βροχοπτώσεις, τα μοντέλα ως επί το πλείστον δείχνουν αύξησή τους κατά την χειμερινή περίοδο, στην Βόρεια Ευρώπη, ενώ παρουσιάζουν παράλληλα και κάποιες ενδείξεις για αύξηση βροχοπτώσεων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν πιθανόν από μια αυξητική τάση που καταγράφεται κυρίως στην Βόρεια Ευρώπη κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα (Τζαμπούρας, 2009). Όλα τα μοντέλα από την άλλη, συγκλίνουν πως η θερμοκρασία, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στην Νότια Ευρώπη θα περιορισθεί, ενώ εξάγονται και κάποιες πληροφορίες που δείχνουν αύξηση των βροχοπτώσεων το καλοκαίρι (Foken, 2008).

Παράλληλα, θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα μοντέλα μας παρουσιάζουν στοιχεία για το πώς μπορεί να μεταβληθεί το κλίμα, κατά μέσο όρο, τόσο σε σχέση με την περιοχή της Μεσογείου, όσο και για την εικόνα που θα διαμορφωθεί στην Ελλάδα (Τζαμπούρας, 2009). Γενικά, δεν είναι πολύ εύκολο να φανούν οι πιθανές κλιματικές αλλαγές στη συγκεκριμένη κλίμακα. Όλα όμως τα μοντέλα προσομοίωσης δείχνουν ότι η θερμοκρασία θα έχει αισθητή αυξητική τάση τις επόμενες δεκαετίες (Loukas, Vasiliades & Dalezios, 2003).

Οι περισσότερες προβλέψεις που καταγράφονται συγκλίνουν στο ότι θα υπάρξει σημαντική μείωση των βροχοπτώσεων το καλοκαίρι σε ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου. Κάποια

από τα μοντέλα δείχνουν μια αύξηση των βροχοπτώσεων, κυρίως, τους χειμερινούς μήνες στα Νότια σημεία της Μεσογείου, ωστόσο η αύξηση αυτή δεν μπορεί να συγκριθεί με εκείνη της Βόρειας Ευρώπης που είναι αισθητά υψηλότερη (Strangeways, 2003) (Τζαμπούρας, 2009).

Δεν είναι εύκολο ακόμα να διαφανούν τα επίπεδα των βροχοπτώσεων στην περιοχή της Μεσογείου, που θα μπορούσαν να μας δώσουν στοιχεία για έναν θερμότερο κόσμο, καθώς υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες και αδυναμίες σχετικά με τις βροχοπτώσεις σε κάθε περιοχή. Τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης μας δίνουν διαφορετικά στοιχεία για το πώς θα κυμανθούν οι βροχοπτώσεις κατά μέσο όρο στην περιοχή της Μεσογείου (Τζαμπούρας, 2009). Ένα κοινό στοιχείο που γίνεται φανερό μέσα από τις μέχρι τώρα ενδείξεις είναι ότι η αύξηση της ετήσιας βροχόπτωσης που κυμαίνεται στο 40° ή 45° N στην περιοχή της Μεσογείου είναι πολύ πιθανή, αντίθετα για τις περιοχές του Νότου οι ενδείξεις δεν είναι αντίστοιχα ελπιδοφόρες (Climatic Changes in Mediterranean) (Τζαμπούρας, 2009).

Ακόμα και κάποιες λίγες μελέτες, που αφορούν την βροχόπτωση στην Ελλάδα, δείχνουν ότι αποκλίνουν για το πώς θα κυμανθούν οι βροχοπτώσεις και πώς μπορεί να μεταβληθούν στην περιοχή. Ωστόσο, εκείνο που γίνεται αποδεκτό είναι ότι και στην Ελλάδα οι βροχοπτώσεις θα κυμανθούν ανάλογα με την υπόλοιπη περιοχή της Μεσογείου, δηλαδή θα είναι περιορισμένες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Τζαμπούρας, 2009).

Μάλιστα, με βάση τα εξαγόμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μελέτης, φαίνεται ότι η ανατολική και νότια Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα η Αττική, η Θεσσαλία, η Θεσσαλονίκη και η ανατολική Πελοπόννησος είναι πολύ πιθανό να αντιμετωπίσουν μια αισθητή μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης κυρίως στις περιοχές προς το βορειότερο μέρος της Μεσογείου. Από την άλλη, η Greenpeace, στην τεχνική της αναφορά, για την κλιματική αλλαγή της Κρήτης καταδεικνύει πως ο μέσος όρος ετήσιας βροχόπτωσης μέχρι το 2030 θα αυξηθεί από τα 14,3 στα 23,8 mm (Τζαμπούρας, 2009).

Παρά τις διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στις μελέτες, σχετικά με την κλιματική μεταβλητότητα και τα έντονα και πολλές φορές ακραία γεγονότα, δείχνουν ότι θα υπάρξει αλλαγή στην περιοχή της Μεσογείου. Μάλιστα οι πρώτες ενδείξεις καταγράφουν μια αύξηση των ακραίων γεγονότων και κυρίως έντονες συνθηκών ξηρασίας στη δυτική Μεσόγειο (Τζαμπούρας, 2009). Γενικά, οι θερμότερες μάζες που θα προκύψουν στην περιοχή της Μεσογείου θα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της των θερμοκρασιών και παράλληλα τη μείωση των ιδιαίτερα χαμηλών θερμοκρασιών. Ακόμα, είναι πιθανόν σε περιοχές που έχουν

περιοριστεί οι βροχοπτώσεις, οι ξηρασίες να ενταθούν, καθώς το ενδεχόμενο ακόμα πιο παρατεταμένων ξηρών ημερών δείχνει να μεγιστοποιείται (World Meteorological Organization, 2008).

Αυτό θα έχει κι ως επακόλουθο, ο μέσος όρος του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας να ανέλθει με ρυθμό 5 cm ανά δεκαετία. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το επίπεδο της θάλασσας θα ανέβει κατά 50 cm περίπου μέχρι το 2100 (η αβεβαιότητα κυμαίνεται ανάμεσα στο 20 ως 86 cm) (Climatic Changes in Mediterranean). Μάλιστα, ως οι πιο ευάλωτες περιοχές της Μεσογείου απεικονίζονται η Βενετία και η Θεσσαλονίκη, καθώς και το Δέλτα του Νείλου (Τζαμπούρας, 2009).

Με βάση τις εκθέσεις της Επιτροπής Μελέτης της Κλιματικής Αλλαγής της Τράπεζας της Ελλάδος και της Ακαδημίας Αθηνών, οφείλουμε να περιμένουμε ότι και το κλίμα της Ελλάδας θα υποστεί μια έντονη μεταβλητότητα. Θα πρέπει να επισημανθεί πως κανένα μοναδικό φυσικό ακραίο καιρικό φαινόμενο δεν συνδέεται με την κλιματική αλλαγή, αν καταγραφεί μια φορά μέσα στον χρόνο (Ρεπαπής, Φιλάνδρας & Μεταξάς, 2002). Η συχνότητα της εμφάνισής του, όμως, μπορεί να συσχετιστεί με την αλλαγή που μπορεί να προκύψει στο παγκόσμιο κλίμα. Αιτία για όλα αυτά θα είναι η μετάβαση σε μια περίοδο που θα υπάρξει θερμότερο κλίμα, και δεν θα παρουσιάσει ομαλή εξέλιξη αλλά θα υπάρξουν μεγάλες διακυμάνσεις των καιρικών φαινομένων. Προβλέπεται γενικά μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα να αυξηθεί η θερμοκρασία από 0,9 έως 2 °C, η οποία θα είναι αντίστοιχη με συνολική συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (WMO, 2009).

Αναφορικά με τις βροχοπτώσεις, παρόλο που οι μελέτες είναι συχνά αντίθετες μεταξύ τους θεωρείται ότι θα υπάρξει μια σημαντική μείωση κυρίως το καλοκαίρι. Οι περιοχές στις οποίες φαίνεται ότι θα είναι πιο έντονο το πρόβλημα είναι η ανατολική και νότια Ελλάδα, ιδιαίτερα η Αττική, η Θεσσαλία, η Θεσσαλονίκη και η ανατολική Πελοπόννησος (Ρεπαπής, Φιλάνδρας & Μεταξάς, 2002).

Μάλιστα ένα σχετικά πρόσφατο παράδειγμα της ακανόνιστης συμπεριφοράς των καιρικών φαινομένων αποτελεί ο Νοέμβριος του 2010 ο οποίος θεωρείται ότι ήταν ο πιο ζεστός μήνας από το 1897 σύμφωνα με το αρχείο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Στο κέντρο της Αθήνας, τα δεδομένα αποδεικνύουν, ότι η μέση μέγιστη θερμοκρασία που παρουσιάστηκε τον Νοέμβριο του 2010 ήταν 21,9 βαθμοί, δηλαδή παρατηρήθηκε απόκλιση +3,3 °C από την αναμενόμενη θερμοκρασία του μήνα. Μελετώντας, τα αρχεία από το 1897, μόνο ο μήνας

Νοέμβριος του 1926 είχε μεγαλύτερη μέση μέγιστη θερμοκρασία με 23 βαθμούς (National Geographic, 2013).

Από την συλλογή λοιπόν των στοιχείων αυτών διαφαίνεται ένας τριπλασιασμό της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων τα τελευταία 30 χρόνια. Επίσης, προκύπτει αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ιδιαίτερα το καλοκαίρι από τις αρχές της δεκαετίας του '90 και μετά. Μάλιστα το καλοκαίρι του 1999 ήταν το θερμότερο του 20ού αιώνα (Leung, Meams, Giorgi & Wilby, 2003). Οι μεταβολές του κλίματος της Αθήνας τις τελευταίες δεκαετίες είναι ιδιαίτερα έντονες ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης διαφόρων παραγόντων, κυρίως ανθρωπογενών, όπως η εντεινόμενη αστικοποίηση (αύξηση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας), η παγκόσμια κλιματική μεταβολή λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, η καταστροφή περιαστικού πρασίνου από δασικές πυρκαγιές και η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος (Loukas & Vasiliades, 2004).

Πάντως, η μέση ετήσια θερμοκρασία βρίσκεται σε συνεχή ανοδική τροχιά από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 έως σήμερα (1,3 °C από το 1976 έως το 2008). Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και η μέση μέγιστη ετήσια θερμοκρασία, η οποία αυξάνεται ανάλογα, από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, ενώ η μέση ελάχιστη ετήσια θερμοκρασία (νυκτερινή θερμοκρασία) αρχίζει να αυξάνεται συστηματικά με καθυστέρηση ορισμένων ετών, αλλά με γρηγορότερο ρυθμό (1,8 °C από το 1984 έως το 2008) (Founda, 2011).

### **3.4 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής**

Οι κλιματικές προβλέψεις που έχουν αποτυπωθεί για τη Μεσόγειο δείχνουν πως η περιοχή θα επηρεαστεί άμεσα και θα υπάρξουν προβλήματα τόσο με την άνοδο της θερμοκρασίας και τη γενικότερη ξηρασία ενώ δεν θα λείψουν ακραία καιρικά φαινόμενα. Όλα αυτά είναι φανερό ότι θα έχουν σαν επακόλουθο πρόβλημα οι αστικές περιοχές να κινδυνεύσουν από την πρόκληση πλημμυρών αλλά και έντονων επεισοδίων καύσωνα (WHO, 2018). Τέτοιες κλιματικές μεταβολές είναι λοιπόν κατανοητό ότι θα δημιουργήσουν προβλήματα με αναπόφευκτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο στην διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, όσο και τη διεύδυση αλμυρού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα, την ατμοσφαιρική ρύπανση και τον κίνδυνο πυρκαγιάς σε αστικές περιοχές γύρω από δασικές εκτάσεις. Είναι φανερό ότι αυτά θα δημιουργήσουν διάφορα κοινωνικό-οικονομικά προβλήματα στην καθημερινότητα όλων. Παράλληλα και στην ανθρώπινη υγεία τα προβλήματα που θα προκύψουν θα γίνουν φανερά.

Ένα άμεσο ακόμη πρόβλημα θα αποτελέσει η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας για ψύξη (WHO, 2018) (Καραμανώλης, 2011).

Η μεταβλητότητα στην αλλαγή του κλίματος είναι πιο έντονη στις αστικές περιοχές και κυρίως σε εκείνες που διαθέτουν περιορισμένους οικονομικούς πόρους, ελλιπή χωροταξικό και κοινωνικό-οικονομικό σχεδιασμό παράλληλα και με την ταχεία ανάπτυξη του πληθυσμού, (WHO, 2018). Από την άλλη μια θετική πτυχή της θα μπορούσε να θεωρηθεί η μείωση της ενέργειας που θα χρειαστούν για θέρμανση, κατά την χειμερινή περίοδο. Μάλιστα, σε πολλές αστικές περιοχές της Ελλάδας, παρατηρείται μείωση της χρήσης της ενέργειας για θέρμανση τους χειμερινούς μήνες, η μείωση αυτή φθάνει τις 15 ημέρες κατά έτος (Tate & Gustard, 2000).

Ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα που πηγάζει από την άνοδο της τιμής της θερμοκρασίας είναι η τήξη των πάγων, καθώς αυτοί συρρικνώνονται (WHO, 2018). Τα γνωστά σε όλους χιόνια του Κιλιμάντζαρο έχουν λιώσει, από το 1912, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%. Και στην Αρκτική, όμως, το πάχος του θαλάσσιου πάγου έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία πενήντα χρόνια, μάλιστα η έκτασή του μειώθηκε μέσα στα τελευταία 30 χρόνια γύρω στο 10%. Αυτό προκαλεί άνοδο της στάθμης της θάλασσας το οποίο εγκυμονεί πολλούς κινδύνους (Υφαντόπουλος et al, 2011).

Ερευνητές έπειτα από υπολογισμούς διαπίστωσαν πως με άνοδο έστω και ενός εκατοστού των υδάτων, οι ακτές που αποτελούνται από άμμο, λόγω της διάβρωσης, θα υποστούν υποχώρηση ενός μέτρου σε οριζόντια κατεύθυνση. Παράλληλα, η υφαλμύρωση (η εισροή, δηλαδή, αλμυρού νερού στους υδροφόρους ορίζοντες του γλυκού νερού) θα απειλήσει τις πηγές πόσιμου νερού δημιουργώντας έτσι προβλήματα στις καλλιέργειες (Santamouris et al, 2013). Έντονο θα είναι το πρόβλημα στο Δέλτα του Νείλου, όπου τα καλλιεργήσιμα εδάφη σε άλλες περιοχές είναι ελάχιστα και τα περισσότερα από τα προϊόντα της Αιγύπτου καλλιεργούνται στις γύρω περιοχές. Οπότε και θα ήταν καταστροφική, μια μεγάλης έκτασης διάβρωση, καθώς και η εισροή αλμυρού νερού (Santamouris et al, 2013).

Όταν ο υδράργυρος ανεβαίνει και οι πάγοι λιώνουν, τότε εισρέουν στη θάλασσα μεγαλύτερες ποσότητες γλυκού νερού από το φυσιολογικό, με αποτέλεσμα να αυξάνονται, τόσο ο όγκος, όσο και η θερμοκρασία των ωκεάνιων υδάτων (IPCC, 2013). Αυτός ο συνδυασμός επιπτώσεων υπήρξε ο κύριος παράγοντας για την αύξηση της μέσης θαλάσσιας στάθμης του πλανήτη από 10 ως 20 εκατοστά τα τελευταία 100 χρόνια, σύμφωνα με την Διακυβερνητική

Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών, για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC). Ακόμη κι αν αποφευχθεί αυτό, η IPCC έχει προβλέψει, ότι η θαλάσσια στάθμη θα έχει άνοδο 10 με 90 εκατοστά μέχρι το πέρας του αιώνα. Με βάση τις εκτιμήσεις, η άνοδος ενός περίπου μέτρου της θαλάσσιας στάθμης, σε πολλές περιοχές του κόσμου, θα δημιουργήσει καταστροφικές συνθήκες (IPCC, 2013).

Με βάση επιστημονικές μελέτες, έχει καταγραφεί πως το επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης παρουσίασε αρκετές τροποποιήσεις στο πέρασμα των 4,6 δισεκατομμυρίων ετών της ιστορίας του πλανήτη μας. Όμως στις μέρες μας, ο ρυθμός με τον οποίο ανεβαίνει η στάθμη της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο ξεπέρασε, τον μέσο ρυθμό ανόδου, των προηγούμενων 2.000 - 3.000 ετών οπότε και η στάθμη ακολουθεί πιο γρήγορη ανοδική πορεία που φτάνει στα 2,4 χιλιοστά ανά έτος. Αν όλο αυτό συνεχιστεί ή ακόμη ενταθεί, είναι δυνατόν να προκληθούν αλλαγές με σημαντικές επιπτώσεις στις ακτογραμμές της γης (Parlange & Katz, 2000).

Πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι και θερμοκηπικοί και εντείνουν το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, και αντίστροφα. Κατά αυτόν τον τρόπο, χαρακτηριστικά της κλιματικής αλλαγής, όπως η αυξημένη θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια και η στασιμότητα του αέρα μπορούν να επιδεινώσουν την ατμοσφαιρική ρύπανση, αυξάνοντας τους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως το όζον και τα αερολύματα σε μεγάλο βαθμό (Charles, Bates & Hughes, 1999a).

Η κλιματική αλλαγή επιδρά σε μετεωρολογικούς παράγοντες, όπως στην θερμοκρασία αέρος και εδάφους, στον υετό, στο πλανητικό οριακό στρώμα, στο ποσοστό νεφοκάλυψης και τη σχετική υγρασία. Επιδρά, επίσης, στην αύξηση της θερμοκρασίας και στην μεταβολή των βροχοπτώσεων, ενώ έχει σημαντικές συνέπειες στις χρήσεις γης, στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία (Wilby & Wigley, 2000).

Η κλιματική αλλαγή φαίνεται πως σε πολλές περιοχές του πλανήτη επηρεάζει τις τοπικές καιρικές συνθήκες, προκαλώντας σε κάποιες από αυτές φονικές πυρκαγιές και αύξηση της συχνότητας περιόδων καύσωνα, ξηρασίας αλλά και ερημοποίησης. Σε άλλες περιοχές προκαλεί αύξηση ακραίων βροχοπτώσεων και ισχυρά πλημμυρικά φαινόμενα, ανεμοστρόβιλους, υδροσίφωνες, όπως στις νότιες ακτές της Μεσογείου, (Papachristopoulou, Matsangouras & Nastos, 2015) και τήξη μόνιμου παγοκαλύμματος στους πόλους.

## **4 Μετεωρολογικές παράμετροι που επηρεάζονται από την κλιματική αλλαγή**

### **4.1 Θερμοκρασία αέρος**

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι η θερμοκρασία που έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας πάνω από μία περιοχή. Η θερμοκρασία είναι μια φυσική ποσότητα που εκφράζει ζεστό και κρύο. Είναι, δηλαδή, η εκδήλωση της θερμικής ενέργειας, που υπάρχει σε όλη την ύλη, η οποία αποτελεί και πηγή της εμφάνισης θερμότητας, μιας ροής ενέργειας, όταν ένα σώμα έρχεται σε επαφή με ένα άλλο που είναι πιο κρύο ή πιο θερμό (Giorgi & Mearns, 1991).

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO, 1992) προσδιορίζει την θερμοκρασία ως το μέτρο που εκφράζεται μέσα από τη «θερμική κατάσταση» των διαφόρων σωμάτων. Θεωρείται, λοιπόν, ως ένα φυσικό μέγεθος το οποίο συσχετίζει την μέση κινητική ενέργεια των μορίων ενός θερμοδυναμικού συστήματος, χαρακτηρίζοντας πόσο θερμό ή πόσο ψυχρό είναι το ίδιο το σύστημα. Η θερμοκρασία απεικονίζει τη θερμοδυναμική κατάσταση ενός σώματος, θεωρείται ως μία από τις καταστατικές μεταβλητές. Γενικά, ο ατμοσφαιρικός αέρας παρουσιάζει εύρος τιμών θερμοκρασίας που κυμαίνεται από -80 έως 60 °C (WMO, 1992).

Στην Ελλάδα, οι πρώτες συστηματικές μετεωρολογικές παρατηρήσεις ξεκινούν το 1858 από το τότε Μετεωρολογικό Ινστιτούτο, το σημερινό Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος και Βιώσιμης Ανάπτυξης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), ενώ από το 1890 αρχίζει να λειτουργεί ένα μικρό δίκτυο 7 μετεωρολογικών σταθμών σε όλη την χώρα. Το 1931 ιδρύεται και στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) η οποία υπάγεται στον χώρο του τότε νεοσύστατου Υπουργείου Αεροπορίας. Τότε αρχίζει να λειτουργεί με ένα πιο οργανωμένο τρόπο. Σκοπός της είναι η μετεωρολογική υποστήριξη των φορέων της Εθνικής Άμυνας, της Εθνικής Οικονομίας και του κοινωνικού συνόλου της χώρας μας (<http://www.emy.gr>).

### **4.2 Θερμοκρασία Εδάφους (LandSurface Temperature - LST)**

Ο ήλιος είναι η βασικότερη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη γη, η οποία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα στην μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός χαμηλού μήκους κύματος, δηλαδή στο φάσμα της υπεριώδους, της ορατής και σε τμήμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η



γη για να μπορέσει να εξισορροπήσει αυτή την εισαγωγή ενέργειας, εκπέμπει και η ίδια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε υψηλά μήκη κύματος, δηλαδή στο υπέρυθρο (Parastatidis et al, 2017).

Κατά συνέπεια, η θερμοκρασία του εδάφους είναι μία συνάρτηση από παράγοντες που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία, την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια στην οποία αναφέρεται. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία επιφάνειας εξαρτάται από (Parastatidis et al, 2017):

- την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και τον χρόνο, δηλαδή την εποχή του έτους και την ώρα της μέρας
- τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, δηλαδή τα σύννεφα, την υγρασία, τις γενικότερες καιρικές συνθήκες
- την τοπογραφία της περιοχής, δηλαδή το υψόμετρο και την κλίση της επιφάνειας
- την ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας, δηλαδή το χρώμα, την υφή, τη σύσταση, την περιεχόμενη υγρασία, το υλικό.

### 4.3 Υετός

Με τον όρο υετό (precipitation) εννοούμε κάθε σχηματισμό σωματιδίων υγρών ή στερεών που καταφθάνουν στο έδαφος μέσω της ατμόσφαιρας. Μάλιστα πολλές φορές δημιουργούνται προβλήματα στην αεροπλοΐα, τέτοια μπορεί να είναι η μείωση της ορατότητας, η απόδοση του κινητήρα, η αύξηση της απόστασης πέδησης και η πρόκληση έντονου διατμητικού άνεμου (wind shear). Παράλληλα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, υπάρχει περίπτωση αν έρθει σε επαφή με το αεροσκάφος, να παγώσει και να επηρεάσει με αυτό τον τρόπο την πτητική του ικανότητα. Γι' αυτό ο πιλότος θα πρέπει να γνωρίζει για τον υετό. Τα μετεωρολογικά radar είναι ακριβή, τόσο στην θέση, όσο και στον τύπο του υετού, αλλά και στην ένταση και στην τάση μεταβολής του, κατά την καταγραφή του (Charles, Bates, Whetton & Hughes, 1999b).

Ο όρος υετός προέρχεται από το ρήμα *ὑώ*, της αρχαίας ελληνικής γλώσσας, ο οποίος σημαίνει βροχή ή όμβρος. Με τον όρο «υετός» ορίζουμε το σύνολο όσων πέφτουν σαν κατακρημνίσματα από την ατμόσφαιρα και μπορούν να μας δώσουν μετρήσιμη ποσότητα νερού υπό τη μορφή βροχής, ψεκάδων, χιονιού, χιονολύτου, χαλάζης και άλλα.

Ο υετός εμφανίζεται με πιο συνήθεις μορφές, τις:

- ❖ *Ψεκάδες (Drizzle)*: Ομοιόμορφος υετός που αποτελείται από λεπτά σταγονίδια νερού τα οποία βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο. Έχουν διάμετρο μικρότερης από 0.5 mm. Ψεκάδες εμφανίζονται συνήθως από νέφη St.
- ❖ *Βροχή (Rain)*: Σωματίδια υγρού νερού με μορφή σταγόνων διαμέτρου μεγαλύτερης από 0.5 mm ή σταγόνων μικρότερων και ευρέως διασπαρμένων. Βροχή μπορεί να εμφανιστεί και από σωρειτόμορφα (Cu, Cb) και από στρωματόμορφα νέφη (As, Ns).
- ❖ *Χιόνι (Snow)*: Παγοκρύσταλλοι που φέρουν κάποιες διακλαδώσεις, μερικές φορές αστεροειδείς. Χιόνι πέφτει κυρίως από νέφη Ns.
- ❖ *Χιονόκοκκοι (Snowgrains)*: Πόλυ μικρά, λευκά και αδιαφανή κοκκία πάγου. Τα κοκκία αυτά είναι σχετικά πεπλατυσμένα ή επιμήκη, διαμέτρου γενικά μικρότερης από 1 mm.
- ❖ *Παγοσφαιρίδια (Ice pellets)*: Διαφανείς ή ημιδιαφανείς κόκκοι πάγου, σχήματος σφαιρικού ή ακανόνιστου, σπάνια κωνικού, διαμέτρου μικρότερης ή το πολύ ίσης με 5 mm. Σχηματίζονται από βροχοσταγόνες και παγώνουν πριν φτάσουν στο έδαφος.
- ❖ *Χαλάζι (Hail)*: Μικρές σφαίρες ή κομμάτια πάγου διαμέτρου από 5 ως 50 mm, μερικές φορές και μεγαλύτερης, τα οποία πέφτουν μεμονωμένα ή συσσωματωμένα σε ακανόνιστους σβώλους από νέφη Cb.
- ❖ *Ουρά (virga)*. Πρόκειται για υετό που εξατμίζεται στην πορεία του από τη βάση του νέφους προς το έδαφος. Έχει τη μορφή κουρτίνας ή γραμμών από ίχνη υετού κάτω από το νέφος. Εμφανίζεται κυρίως σε ψηλά (Cc) ή μέσα νέφη (As, Ac), αλλά μερικές φορές και κάτω από Cu, Cb, Sc ή Ns (Jarraud, 2008) (Charles, Bates, Whetton & Hughes, 1999b).

Ο υετός έχει γενικά, ως πηγή προέλευσής του τα νέφη. Η ποσότητα του υετού που πέφτει μπορεί να μετρηθεί με βροχόμετρα ή βροχογράφους, ειδικά δηλαδή όργανα, και εκφράζεται με το ύψος της στήλης ύδατος. Αποτελεί το ύψος που θα έφθανε η στάθμη του ύδατος, η οποία φθάνει σε οριζόντια επιφάνεια, σε περίπτωση που αυτή δεν παρουσιάζει απορροή, απορρόφηση και εξάτμιση. Το χιλιοστό (mm) είναι διεθνώς καθιερωμένη μονάδα μέτρησης του υετού. Η μονάδα υετού είναι το γραμμικό βάθος, συνήθως σε χιλιοστά (όγκος/επιφάνεια) ή  $\text{kg/m}^2$  (μάζα/περιοχή) για υγρή κατακρήμνιση (Jarraud, 2008). Υετός ύψους 1 mm είναι η

βροχόπτωση που αποφέρει ποσότητα νερού ίση με 1 kg σε μια λεία επιφάνεια εμβαδού 1 m<sup>2</sup> αν δεν υπάρχει απορροή, απορρόφηση ή εξάτμιση.

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, όπως αυτά κατανέμονται στο χώρο της Ελλάδας είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστεί. Ο λόγος είναι ότι πολλές φορές παρατηρείται διαφορά ακόμα και μεταξύ γειτονικών σταθμών με απόσταση λίγων χιλιομέτρων. Αυτό έχει να κάνει με το έντονο ανάγλυφο της Ελλάδας αλλά και την αναλογία ξηράς και θάλασσας (Jarraud, 2008). Αν η Ελλάδα ήταν επίπεδη χωρίς τους σημαντικούς ορεινούς της όγκους, τότε θα επαρκούσε ένα μικρός αριθμός μετεωρολογικών σταθμών, ώστε να απεικονιστούν οι ισοϋετες καμπύλες μεταξύ των διάφορων σταθμών και να υπολογιστεί το ύψος του υετού στα διάφορα σημεία. Όμως, τώρα, για να μπορέσει να υπολογιστεί το μέσο ύψος υετού στις διάφορες περιοχές, απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός μετεωρολογικών δεδομένων υετού (Jarraud, 2008).

Υπενθυμίζουμε ότι το μηναίο ύψος υετού υπολογίζεται από το άθροισμα των ημερήσιων υψών υετού. Μάλιστα αν λείπει μια ημερήσια τιμή, τότε δεν μπορεί να υπολογιστεί το μηναίο ύψος (Jarraud, 2008).

#### **4.4 Πλανητικό οριακό στρώμα**

Η τροπόσφαιρα εκτείνεται από το έδαφος περίπου 11 km, παρόλα αυτά επηρεάζονται άμεσα από την υποκείμενη επιφάνεια μόνο περίπου τα κατώτερα 2 km. Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα ή πλανητικό οριακό στρώμα (PBL ή CLP) ονομάζεται το σημείο της τροπόσφαιρας, εκείνο, που δέχεται από την επιφάνεια της Γης, άμεση επιρροή και αντιδρά στις επιφανειακές δυνάμεις υπό κλίμακες χρόνου διάρκειας ενός εικοσιτετραώρου, κάποιων ωρών ή ακόμα λιγότερο (Stull, 1988).

Οι συγκεκριμένες δυνάμεις εμπεριέχουν επίδραση της τριβής, η οποία ελαττώνεται με το ύψος, εξάτμιση και διαπνοή, αξιοσημείωτη ανταλλαγή ορμής, θερμότητας ή μάζας ανάμεσα στην επιφάνεια και το ρευστό, μεταφορά θερμότητας, εκπομπή ρύπων, όπως επίσης και τροποποίηση ροής εξαιτίας του ανάγλυφου της περιοχής. Το πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αλλάζει καθοριστικά στον χρόνο και στον χώρο και είναι περίπου 1 - 2 km πάνω από την ξηρά και 0,5 km πάνω από τους ωκεανούς (IPCC, 2007).

Γενικά, ένα μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 90% μπορεί και περισσότερο, από την ηλιακή ακτινοβολία περνά μέσω του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και διοχετεύεται στην γη. Η

θερμοκρασία του εδάφους καθίσταται υπεύθυνη για τις θερμοκρασιακές μεταβολές μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, η οποία οφείλεται στους μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας, αλλά και μεταφοράς της μάζας. Εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, η μετάδοση θερμότητας και η μεταφορά της ορμής είναι αποτέλεσμα, κυρίως, της τύρβης που τον χαρακτηρίζει (Saha, Moorthi et al, 2010).

Το οριακό στρώμα επινοήθηκε για πρώτη φορά από τον Prandtl το 1904. Με την επινόηση αυτή, ο Prandtl κατάφερε να συνδέσει την άτριβη ροή με τη ροή πραγματικών ρευστών. Κατά τον Prandtl, συγκεκριμένα, στην περίπτωση κίνησης ρευστών μικρού σχετικά ιξώδους πάνω από στερεά, η επίδραση της εσωτερικής τριβής περιορίζεται μόνο σε ένα πολύ λεπτό στρώμα ρευστού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του στερεού, το οποίο είναι γνωστό ως οριακό στρώμα (σε συντομογραφία ΟΣ). Συνεπώς, το πεδίο ροής μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές, το οριακό στρώμα και την περιοχή εκτός του οριακού στρώματος, στην οποία το ιξώδες παύει να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της ροής (Μελάς, 2007).

Ανάλογα με το είδος της ροής εντός του οριακού στρώματος, αυτό διακρίνεται σε στρωτό και τυρβώδες. Το στρωτό οριακό στρώμα αναπτύσσεται μέχρι μια ορισμένη απόσταση από την αρχή της πλάκας, όπου η ροή είναι στρωτή. Στην περιοχή μεταξύ του στρωτού και του τυρβώδους οριακού στρώματος, η ροή είναι ασταθής κατά διαστήματα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται μεταβατική και η έκτασή της εξαρτάται από τις συνθήκες ροής (Μελάς, 2007).

Το κατώτερο στρώμα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος αποκαλείται και επιφανειακό στρώμα. Είναι δύσκολο να το ορίσουμε με ακρίβεια, μιλώντας ποιοτικά, όμως, θα μπορούσαμε να ορίσουμε την κατώτερη περιοχή του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, που βρίσκεται πολύ κοντά στο έδαφος, όπου οι τυρβώδεις ροές δέχονται μεταβολές σε ποσοστό κάτω του 10% (Μουσιόπουλος, 2012). Το τυρβώδες αυτό στρώμα της επιφάνειας έχει στοιχεία μικρής αλλά έντονης κλίμακας τύρβης, η οποία είναι αποτέλεσμα πρώτον, της επιφανειακής τραχύτητας και δεύτερον της μεταφοράς θερμότητας εξαιτίας των ρευμάτων. Η ταχύτητα κατανέμεται έτσι ώστε η διατμητική τάση σε οριζόντιο προσανατολισμό να είναι ανεξάρτητα από το ύψος, σχεδόν σταθερή (Skamarock et al, 2008).

Οι μετεωρολογικές παράμετροι αλλάζουν έντονα μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα παρουσιάζοντας έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, κοντά στην επιφάνεια αντιστοιχεί στα βασικά στοιχεία του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από την ξηρά, όμως δεν υπάρχουν οι

ίδιες έντονες διακυμάνσεις σε πιο μεγάλα ύψη, καθώς εκεί, η θερμοκρασία εμφανίζει μικρή αλλαγή κατά την διάρκεια της ημέρας στην ελεύθερη ατμόσφαιρα (Reynard, Crooks & Kay, 2004).

Παράλληλα, οι θερμικές ιδιότητες βάλλουν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Σε αντιστοιχία, η μέση τιμή του ανέμου εμφανίζει σημαντικά απότομη οριζόντια μεταφορά ή σύγκλιση. Συνηθισμένοι θεωρούνται οι άνεμοι, οριζόντιου προσανατολισμού, από 2 έως 10 m/s στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Επίσης, άλλο ένα βασικό στοιχείο είναι πως η ταχύτητα του ανέμου ελαττώνεται στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και η διεύθυνση του ανέμου στο βόρειο ημισφαίριο, αλλάζει μέχρι 30 - 45° αντίθετα σε σχέση με την φορά των δεικτών του ρολογιού. Επιπρόσθετα, η μέση ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος επιβραδύνεται λόγω της τριβής. Οι κατακόρυφου προσανατολισμού, μέσοι άνεμοι είναι, συνήθως, πολύ μικροί, της τάξης του mm ή cm/s (Kustas, Norman, Anderson & French, 2003).

Επιπλέον, στο νυχτερινό οριακό στρώμα, παρατηρούμε συχνά κύματα που μεταφέρουν μικρές ποσότητες θερμότητας, υγρασίας και ρυπαντών (Meams, Giorgi, Whetton, Pabon, Hulme & Lai, 2003).

Κλείνοντας αξίζει να αναφέρουμε, ότι η μεγάλη, σχετικά, συχνότητα εμφάνισης αναταράξεων ή τύρβης που παρατηρείται κοντά στο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποιούν το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα από την υπόλοιπη ατμόσφαιρα. Εκτός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, οι αναταράξεις παρουσιάζονται βασικά στα νέφη μεταγωγής και σε κοντινή απόσταση από τον αεροχειμαρρο. Στο σημείο αυτό η ισχυρή διατμητική τάση του ανέμου είναι ικανή να προκαλέσει αναταράξεις καθαρού ουρανού (Hay, Wilby & Leavesley, 2000).

#### **4.5 Ποσοστό νεφοκάλυψης**

Τα νέφη επιδρούν σημαντικά στη διαμόρφωση του κλίματος, αλλά οι μεμονωμένες παρατηρήσεις δεν μπορούν να δώσουν ασφαλείς πληροφορίες σχετικά με την επιρροή τους για ένα θερμότερο κλίμα στο μέλλον. Γενικά η πρόβλεψη γύρω από τις αλλαγές της νεφοκάλυψης μπορεί να πραγματοποιηθεί με κλιματικά μοντέλα βασισμένα σε μια παγκόσμια κλίμακα. Μέσα από αυτά τα μοντέλα προσομοιώνουν τα χαρακτηριστικά σχετικά με τη νεφοκάλυψη, όμως και πάλι πολλά είναι τα σφάλματα και οι αβεβαιότητες (Hallegate, 2009). Τα διάφορα

μοντέλα κλίματος παρουσιάζουν διαφορετικές προβλέψεις σχετικά με τη δυναμική των νεφών σε σχέση με ένα κλίμα πιο θερμό. Πρόσφατα στοιχεία δείχνουν ότι η ανάδραση νεφών - κλίματος αυξάνει την υπερθέρμανση της Γης. Όμως δεν είναι γνωστή η ένταση της επιρροής καθώς ακόμα παραμένει απροσδιόριστη. Από το 1970 και μετά, παρόλα αυτά, έχει διαφανεί το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα νέφη σε ολόκληρο το σύστημα του κλίματος και την ίδια την αλλαγή του κλίματος (Hallegate, 2009).

Το κλιματικό σύστημα επηρεάζεται από τα νέφη που δρουν μέσα από διάφορες διεργασίες. Δημιουργούν κατακρημνίσματα (βροχή και χιόνι), τα οποία είναι απαραίτητα σε διάφορες μορφές ζωής της Γης. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι προσφέρουν ενέργεια στην ατμόσφαιρα, όταν πραγματοποιείται η συμπύκνωση των υδρατμών, παρά την εξάτμιση μέρος αυτών, καθώς τα κατακρημνίσματα που δέχεται η Γη παίζουν ρυθμιστικό παράγοντα στην αέρινη θέρμανση της ατμόσφαιρας (Thomson, Calvin et al, 2011).

Επίσης, οι ροές της ακτινοβολίας του ήλιου που προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη και της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία καθορίζει το ψύχος στον πλανήτη, καθώς μέσω της ατμόσφαιρας επιστρέφει με την μορφή ακτινοβολίας στο διάστημα, επηρεάζονται σημαντικά από τα νέφη. Ακόμη, μεταφέρονται αέριες μάζες από την επιφάνεια της γης σε αρκετά μεγάλα ύψη μέσω έντονων ανοδικών ρευμάτων που δημιουργούν τα νέφη. Έτσι, τα ανοδικά αυτά ρεύματα μεταφέρουν ίχνη αερίων, συστατικά της ατμόσφαιρας σε ποσότητα μικρότερη του 1%, και αερολυμάτων, ορμή, υγρασία και ενέργεια (Barnpas, Ossanlis & Moussiopoulos, 2011).

Τα αριθμητικά μοντέλα και οι παρατηρήσεις βοηθούν να μελετηθεί η αλλαγή των νεφών σε αναλογία με τον εποχιακό κύκλο, τις καιρικές συνθήκες και τις υπερετήσεις μεταβολές, ανάλογες με αυτές που επηρεάζονται από το El Niño. Οι διεργασίες στα νέφη διαφοροποιούνται παράλληλα με τις κλιματικές συνθήκες. Οποιαδήποτε διεργασία, λοιπόν, στο νέφος, που επηρεάζεται από την αλλαγή του κλίματος και το διαφοροποιεί, δείχνει και μια ανάδραση στο σύστημα νέφος - κλίμα (Auffhammer, Hsiang, Schlenker & Sobel, 2011).

Καθώς τα νέφη αλληλεπιδρούν με την υπέρυθρη και την ηλιακή ακτινοβολία, ακόμα και αυτές οι ανεπαίσθητες αλλαγές στο νεφικό σύστημα επηρεάζουν επιδρούν σημαντικά το κλιματικό σύστημα. Πολλοί πιθανοί συνδυασμοί νεφών-κλίματος έχουν μελετηθεί σχετικά με τις μεταβολές στην ανακλαστικότητα, στην ποσότητα και στο μήκος της κορυφής των νεφών. Η ενίσχυση της υπερθέρμανσης της Γης, είναι πιθανόν να οφείλεται στα υψηλά νέφη, καθώς

υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών και της υπέρυθρης ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας (Skoufias, 2012).

Δεν μπορούμε, όμως, να εξάγουμε με βεβαιότητα την ανατροφοδότηση η οποία σχετίζεται με τα χαμηλά νέφη, την ανακλαστικότητα τους καθώς και την ποσότητα τους. Τα έντονα νέφη σε υψηλότερα σημεία ανακλούν σημαντικά το ηλιακό φως, ανεξάρτητα από το πάχος τους, δρουν σημαντικά στην μείωση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που η ατμόσφαιρα και η επιφάνειά της Γης εκπέμπουν. Η επίδραση αυτή διαμορφώνει την θερμοκρασία λιγότερο ευαίσθητη στην επιφάνεια σε σχέση με τις μεταβολές που υφίσταται από τα υψηλά νέφη, σε αντίθεση με εκείνες που υφίσταται σε νέφη χαμηλότερου ύψους (Lambert & Boer, 2001). Οι παραπάνω αλληλεπιδράσεις είναι δυνατόν να διαφοροποιηθούν αν υπάρξει συστηματική μετατόπιση από πυκνά υψηλά νέφη σε λεπτά τύπου Cirrus ή και αντίστροφα, αλλά αυτό δεν έχει αποδειχθεί (Cano, Monget, Albuisson, Guillard, Regas & Wald, 1986).

Ακόμα η μεταβολή στο ύψος των νεφών (σε σταθερή ποσότητα νέφωσης) επηρεάζει σημαντικά τη θερμοκρασία της επιφάνειας. Η μεταφορά των υψηλών νεφών σε υψηλότερα σημεία θα είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία προκαλείται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια προς το διάστημα, όμως και πάλι δεν επιδρά σημαντικά στην αντανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (Vogt & Somma, 2000). Βέβαια υπάρχουν ενδείξεις μιας αλλαγής στη μετατόπιση κάτω από τις συνθήκες ενός καθεστώτος θερμότερου κλίματος. Σε αυτή την περίπτωση θα υπάρξει υπερθέρμανση του πλανήτη, με το να εμποδίζει μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία προέρχεται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια, καθώς δεν θα δύναται η διαφυγή από το κλιματικό σύστημα προς το διάστημα (Charles, Bates & Hughes, 1999a).

Ένα σημαντικό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται από τα χαμηλά νέφη προς το διάστημα, όμως σε συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, φαίνεται να υπάρχει ασθενή επίδραση προς την υπέρυθρη ακτινοβολία, την οποία εκπέμπει εκ νέου η επιφάνεια της Γης προς το διάστημα. Συνεπώς, δημιουργείται αρνητική επίδραση (ψύξη) στο υπάρχον κλίμα, ενώ παρόμοιες ενδείξεις εμφανίζουν τα μεσαία νέφη σε μικρότερο βαθμό. Στο μέλλον, εξαιτίας της υπερθέρμανσης από την αύξηση των θερμοκηπικών αερίων, τα πιο πολλά από τα μοντέλα κλίματος της IPCC διαβλέπουν μείωση του χαμηλού και του μεσαίου νέφους, που θα επηρεάσει τον ρυθμό με τον οποίο απορροφάται η ακτινοβολία του ήλιου με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη (Emeis, 2010).

Η μετακίνηση των νεφών σε μέρη που έχουν χαμηλότερο φως από τον ήλιο, θα ήταν δυνατό να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της γης. Η συγκέντρωση περισσότερων νεφών θα μπορούσε να προκληθεί από σταγόνες υγρής μορφής, που αν και μικρές σε μέγεθος όταν συγκεντρωθούν σε μεγάλη ποσότητα, προκαλούν ανάκλαση σε ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα, αντίθετα με το τι προκαλούν νέφη μεγαλύτερων παγοκρυστάλλων ίδιας μάζας (Κατσαφάδος & Μαυροματίδης, 2010).

Όλες οι κλιματικές προσομοιώσεις παρουσιάζουν την αλληλεπίδραση των συστημάτων νέφους, που άλλοτε επηρεάζουν προσθετικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου και άλλοτε παρουσιάζουν ελάχιστη επίδραση (Skoufias, 2012). Τα στοιχεία της ανάδρασης που χρησιμοποιούνται στα κλιματικά μοντέλα λαμβάνονται υπόψιν λόγω του ότι οι διεργασίες του νέφους και οι επιπτώσεις τους στις ροές ενέργειας μεταξύ των συστημάτων που προσομοιώνονται είναι δυναμικές (Lauwaet, Viaene et al, 2014).

#### 4.6 Υγρασία

Η υγρασία αναφέρεται στην περιεκτικότητα του αέρα σε υδρατμούς. Στην ατμόσφαιρα το 95% της συνολικής ποσότητας νερού βρίσκεται υπό μορφή υδρατμών, ενώ το υπόλοιπο 5% υπό τη μορφή υδροσταγονιδίων και παγοκρυστάλλων. Παρόλο που η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς κατ' όγκο είναι μόνο 4%, η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι καθοριστική, δεδομένου ότι περιορίζουν τη διάδοση της γήινης ακτινοβολίας προς το διάστημα. Η περιεκτικότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα μειώνεται ανάλογα με το ύψος. Αυτό οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας, η οποία συμβάλλει και στη μείωση της ικανότητας του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατήσει τους υδρατμούς (Oliver, 2008). Η υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα είναι δυνατόν να εκφραστεί με τους παρακάτω τρόπους (Oliver, 2008):

- *Τάση των υδρατμών (mmHg ή mb):* πρόκειται για τη μερική πίεση που ασκούν οι υδρατμοί, οι οποίοι δημιουργούνται από την εξάτμιση. Αν ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι κορεσμένος, τότε η τάση αυτή καλείται μέγιστη τάση υδρατμών.
- *Απόλυτη υγρασία (Kg/m<sup>3</sup>):* επίσης γνωστή ως συγκέντρωση ατμών ή πυκνότητα ατμών. Πρόκειται για το πηλίκο της μάζας των υδρατμών που περιέχονται σε έναν όγκο ατμοσφαιρικού αέρα προς τον όγκο του αέρα, δηλαδή η πυκνότητα του υδρατμού. Για



τους μετεωρολόγους η απόλυτη υγρασία δεν είναι πολύ χρήσιμη αφού δεν λαμβάνει υπόψη της θέματα πίεσης.

- *Σχετική υγρασία (%)*: πρόκειται για τον λόγο της μάζας των υδρατμών που περιέχεται σε έναν όγκο ατμοσφαιρικού αέρα, προς τη μάζα των υδρατμών που θα περιείχε ο ίδιος όγκος αν ήταν κορεσμένος. Η σχετική υγρασία αποτελεί μέτρο κορεσμού του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο τέλειος ξηρός αέρας έχει σχετική υγρασία 0%, ενώ ο πλήρως κορεσμένος αέρας 100%.
- *Ειδική υγρασία (gr/Kgr)*: πρόκειται για τον λόγο της μάζας των υδρατμών, προς τη μάζα του υγρού αέρα που τους περιέχει. Για τη μετεωρολογία είναι πολύ πιο χρήσιμη έκφραση σε σχέση με την απόλυτη υγρασία.
- *Αναλογία μείγματος (gr/Kgr)*: πρόκειται για τον λόγο της μάζας των υδρατμών, προς τη μάζα του ξηρού αέρα που τους περιέχει.
- *Θερμοκρασία δρόσου (°C)*: πρόκειται στην ουσία για άλλη έκφραση της υγρασίας, καθώς αποτυπώνει τη θερμοκρασία στην οποία θα πρέπει να ψυχθεί μια αέρια μάζα, σε συνθήκες σταθερής πίεσης, ώστε να κορεστεί. Η θερμοκρασία δρόσου εναλλακτικά ονομάζεται και σημείο δρόσου.
- *Θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου (°C)*: πρόκειται για τη θερμοκρασία στην οποία θα φτάσει μια θερμικά μονωμένη αέρια μάζα όταν θα κορεστεί από υδρατμούς που εξατμίζονται σε συνθήκες σταθερής πίεσης. Υπό την προϋπόθεση ότι ο ουρανός είναι ανέφελος και επικρατούν συνθήκες άπνοιας ή σταθερού ανέμου, η σχετική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα και η θερμοκρασία του αέρα ακολουθούν αντίστροφη πορεία. Τις πρωινές ώρες, η θερμοκρασία αποκτά τις ελάχιστες τιμές της, ενώ η υγρασία παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της. Αντιθέτως, τις μεσημεριανές ώρες η θερμοκρασία αποκτά τις μέγιστες τιμές της, ενώ η υγρασία παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της. Κατά τη διάρκεια του έτους η σχετική υγρασία εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της τον χειμώνα και την ελάχιστη το καλοκαίρι. Συμπεραίνουμε, ότι το ετήσιο εύρος της σχετικής υγρασίας είναι εξαρτώμενο από το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος.

Η κάποια υγρασία του αέρα είναι η απλή έκφραση για την ατμοσφαιρική υγρασία και ορίζεται από το μέγεθος που προκύπτει, αν γίνει διαίρεση ανάμεσα στην ποσότητα των υδρατμών που υπάρχουν στον αέρα, λαμβάνοντας υπόψιν μια δεδομένη τιμή πίεσης και της θερμοκρασίας, σε σχέση με τη μέγιστη ποσότητα εκείνων που θα κατακρατήσει η ίδια αέρια μάζα κάτω από τις

ίδιες συνθήκες. Η σχετική υγρασία ορίζεται σε εκατοστιαία αναλογία και μπορεί να υπολογιστεί με ανάλογους τρόπους. Ένας τρόπος είναι να γίνει διαίρεση ανάμεσα στις απόλυτες τιμές και τις σχετικές τιμές της ίδιας παραμέτρου κι έπειτα πολλαπλασιάζοντας επί 100. Αυτό μπορεί να παρασταθεί στις σχέσεις:  $RH = (e/e_s \text{ ή } q/q_s \text{ ή } r/r_s \text{ ή } \rho/\rho_s) \cdot 100$  (Wilhite, Hayes & Svoboda, 2000).

Αν ο αέρας εμπεριέχει 10gr υδρατμών και σε αυτή τη θερμοκρασία μπορεί να υπάρξει μέγιστη ποσότητα 40gr, τότε η σχετική υγρασία υπολογίζεται στο 25% ( $10 \cdot 100/40$ ).

Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο ακολουθεί μια διαφορετική πορεία σε σχέση με την πορεία της θερμοκρασίας του αέρα. Έτσι, τις πρωινές ώρες σημειώνεται το μέγιστο της σχετικής υγρασίας ενώ το ελάχιστο παρατηρείται τις μεταμεσημβρινές. Η εξήγηση της πορείας αυτής είναι απλή και δίδεται με τη σχέση που συνδέεται η μέγιστη απόλυτη τιμή της υγρασίας σε σχέση με τις διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, καθώς το μέγεθος αυτό δίνει τον παρονομαστή του κλάσματος υπολογισμού της σχετικής υγρασίας (Wilby, Tomlinson & Dawson, 2003).

Η σχετική υγρασία σε ετήσια βάση, έχει απλή διακύμανση, η οποία όμως δεν είναι η ίδια στην ξηρά με εκείνη μέσα στη θάλασσα. Επομένως, στην ξηρά οι μέγιστες τιμές της σχετικής υγρασίας εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα ενώ οι ελάχιστες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Το αντίθετο συμβαίνει στη θάλασσα με μικρότερες όμως εναλλαγές μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού, βέβαια οι υδρατμοί είναι περισσότεροι ποσοτικά το καλοκαίρι στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τον χειμώνα (Loukas & Vasiliades, 2004).

Γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες του ξηρού θερμομέτρου  $T$ , αλλά και την αντίστοιχη του υγρού θερμομέτρου  $T_w$ , είναι εύκολο να υπολογισθεί η σχετική υγρασία του αέρα. Για αυτό τον λόγο, κάνουμε την πράξη της αφαίρεσης μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας  $T - T_w$ . Υγρομετρικό έλλειμμα (wet-bulb depression) λέγεται η τελική τιμή που προκύπτει και συνδυάζεται με την θερμοκρασία του ξηρού θερμομέτρου, όπως για παράδειγμα: αν  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $T_w = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , τότε  $T - T_w = 12 \text{ }^\circ\text{C}$  και προκύπτει ότι η σχετική υγρασία είναι 29% (World Meteorological Organization, 2008).

## 5 Μεθοδολογία έρευνας

Αρχικά, πραγματοποιείται προσομοίωση με παγκόσμιο κλιματικό μοντέλου, προκειμένου να παραχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για το παρόν και το μέλλον. Εξαιτίας της χονδροειδούς ανάλυσης του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου, υιοθετείται η τεχνική της δυναμικής μείωσης της κλίμακας. Η τεχνική αυτή είναι μια μέθοδος για τη λήψη πληροφοριών υψηλής ανάλυσης για το κλίμα ή την κλιματική αλλαγή από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα. Τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα έχουν συνήθως χωρική ανάλυση 100-300 χλμ επί 100-300 χλμ. Πολλά μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων απαιτούν πληροφορίες σε κλίμακα 50 km ή λιγότερο, οπότε απαιτείται κάποια μέθοδος για την εκτίμηση των πληροφοριών σε μικρότερη κλίμακα. Η δυναμική μείωση κλίμακας χρησιμοποιεί ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης περιορισμένης έκτασης (ένα περιφερειακό μοντέλο για το κλίμα, ή RCM) που καθοδηγείται από οριακές συνθήκες που προκύπτουν από ένα παγκόσμιο μοντέλο για να αντλήσουν πληροφορίες μικρότερης κλίμακας.

### 5.1 Παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο

Το NASA GISS GCM ModelE2 (Schmidt et al, 2014) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του τρέχοντος και του μελλοντικού κλίματος. Το ModelE2, η τελευταία γενιά του NASA Goddard Institute for Space Sciences (GISS) σε συνδυασμό με το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (CGCM), είναι ένα υπερσύγχρονο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο παγκόσμιου κλίματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η διαμόρφωση GISS-E2-R του ModelE2 με `physics_version = 1`, όπου διαβάζονται αεροζόλ και όζον μέσω υπολογισμένων παροδικών πεδίων αεροζόλ και όζοντος και το έμμεσο αποτέλεσμα του αερολύματος παραμετροποιείται, για την προσομοίωση του παγκόσμιου κλίματος. Η έκδοση του ModelE2 που χρησιμοποιείται έχει οριζόντια ανάλυση  $2^\circ \times 2,5^\circ$  γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος και 40 κατακόρυφα στρώματα (από την επιφάνεια έως 0,1 hPa). Η επιφάνεια χωρίζεται σε τέσσερις τύπους: ανοιχτό νερό (συμπεριλαμβανομένων των λιμνών και των ωκεανών), νερό που καλύπτεται από πάγο (και πάλι περιλαμβάνει περιοχές πάγου και θαλάσσιου πάγου), εδάφους (συμπεριλαμβανομένων γυμνού εδάφους και βλάστησης) και παγετώνες. Σε κάθε τύπο υπάρχουν περαιτέρω υποδιαίρεσεις (κλάσμα καμένης περιοχής, κλάσμα λειτουργικών τύπων φυτών, κλασματική κάλυψη χιονιού, κλάσμα λίμνης τήξης πάνω από θαλάσσιο πάγο κλπ.). Το μοντέλο αντιπροσωπεύει τόσο τους εποχικούς όσο και τους

ημερήσιους ηλιακούς κύκλους στους υπολογισμούς της θερμοκρασίας. Προσομοιώνει τις εκπομπές, τη μεταφορά, τον χημικό μετασχηματισμό και την εναπόθεση πολλών χημικών ενώσεων. Οι θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας (SST) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο Russell Ocean που είναι συνδεδεμένο με το GCM. Προβλέπονται μεγάλης και μικρής κλίμακας τύποι σύννεφων και η κατακρήμνιση δημιουργείται όποτε συμβαίνουν υπερκορεσμένες συνθήκες. Η βλάστηση χωρίζεται σε 10 διαφορετικούς τύπους με διαφορετικές ιδιότητες φάσματος και βάθους κάλυψης, και μια ρητή εξάρτηση των φασματικών ανακλάσεων βλάστησης από τον δείκτη φυλλώματος και την ηλιακή γωνία. Μπορούν να αντιστοιχιστούν περισσότεροι από ένας τύποι βλάστησης σε κάθε κελί του πλέγματος. Το μοντέλο περιλαμβάνει παραμετροποίηση για να ληφθεί υπόψη η σχετική συμβολή της διαπνοής και της εξάτμισης του εδάφους για περιοχές με βλάστηση.

Στην παρούσα μελέτη, γίνεται χρήση των αντιπροσωπευτικών μονοπατιών συγκέντρωσης 8.5 (RCP8.5) από το σετ CMIP5 για κάλυψη χαμηλότερου έως μέσου εύρους εκπομπών που αναμένεται σύμφωνα με το IPCC AR5 (IPCC, 2013). Οι προσομοιώσεις καλύπτουν την περίοδο από το 1880 έως το 2060. Η αρχή των προσομοιώσεων επιλέγεται πριν από σημαντικές ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και κλιματικές μεταβολές. Η κύρια διαταραχή του κλίματος κατά την ιστορική περίοδο (έως το 2008) είναι η αλλαγή στην ατμοσφαιρική σύνθεση: κυρίως η αυξανόμενη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου και αερολυμάτων. Οι συγκεντρώσεις αερίων θερμοκηπίου έως το 2008 προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας μετρήσεις από πυρήνες πάγου (Schmidt et al, 2011). Για την περίοδο 2009-2060, τα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου παρέχονται από το RCP8.5. Όλες οι τεχνικές παράμετροι του μοντέλου είναι σύμφωνες με αυτές που είχαν προταθεί από την IPCC, επιτρέποντας την επαναληψιμότητα των προσομοιώσεων.

## **5.2 Περιοχικό κλιματικό μοντέλο - Τεχνική δυναμικής μείωσης της κλίμακας**

Τα αποτελέσματα του παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου είναι σχετικά χονδροειδή (δηλαδή  $2^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ ) για εφαρμογές σε περιφερειακές και τοπικές κλίμακες. Η ανάγκη για περιφερειακές κλιματικές προβολές σε λεπτομερέστερο μέγεθος πλέγματος πραγματοποιείται, χρησιμοποιώντας το μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF) (<http://www.wrf-model.org/index.php>) υιοθετώντας την τεχνική δυναμικής μείωσης της κλίμακας. Ο στόχος

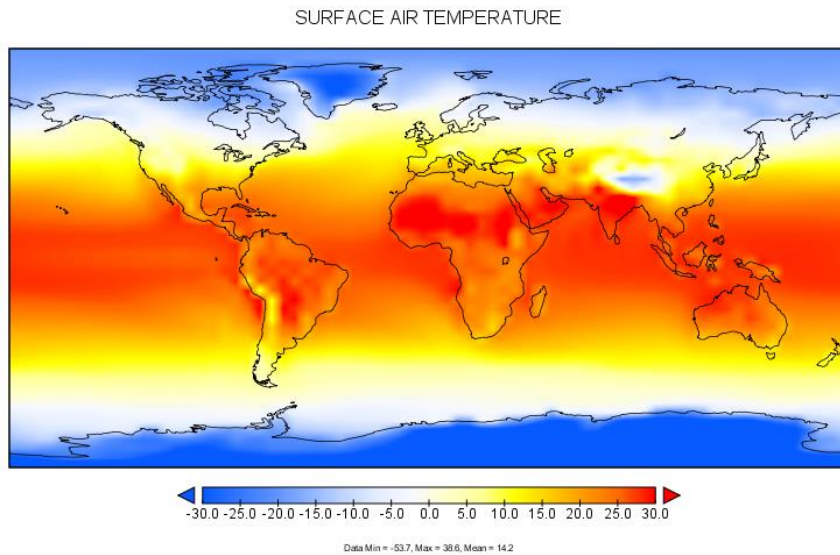
είναι να δημιουργηθούν σε τοπικό επίπεδο πιο σχετικές προβλέψεις μακροπρόθεσμων καιρικών προτύπων στην Ελλάδα. Το WRF είναι ένα υπερσύγχρονο σύστημα ατμοσφαιρικής μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται τόσο για μετεωρολογική έρευνα όσο και για αριθμητική πρόβλεψη καιρού (<http://www.wrf-model.org/index.php>). Για το σύνολο των επιλογών φυσικής χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες παραμετροποιήσεις: Single-Moment 3-class για τη μικροφυσική, το Rapid radiative transfer model (RRTM) για την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, το σχήμα Dudhia για ακτινοβολία μικρού κύματος, το Monin-Obukhov με το ιξώδες υπόστρωμα Carlson-Boland για επιλογές επιφανειακών επιπέδων, θερμική διάχυση 5 επιπέδων για την επιφανειακή γη, η παραμετροποίηση Yonsei University για το πλανητικό οριακό στρώμα και η Kain-Fritsch για τα κατώτερα νέφη. Το WRF εφαρμόζεται εδώ χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση πολλαπλών ένθετων πλέγματος. Οι αρχικές και χρονικά εξελισσόμενες πλευρικές οριακές συνθήκες σε εξάωρα διαστήματα για τις φυσικές παραμέτρους που είναι απαραίτητες για την οδήγηση του WRF (π.χ. θερμοκρασία, σχετική υγρασία, συνιστώσες ανέμου, θερμοκρασία εδάφους και υγρασία σε διαφορετικά βάθη εδάφους, θερμοκρασία επιφάνειας θάλασσας, πίεση επιφάνειας, κλάσμα πάγου και ισοδύναμο νερό χιονιού) λαμβάνονται από τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το NASA GISS GCM ModelE2. Ο εσωτερικός τομέας έχει οριζόντια απόσταση πλέγματος 9 Km. Οι μετεωρολογικές συνθήκες στο λεπτότερο μέγεθος πλέγματος προσομοιώνονται για πέντε τρέχοντα έτη γύρω στο 2010 (δηλαδή, 2008-2012) και πέντε μελλοντικά έτη γύρω στο 2050 (δηλαδή, 2048-2052), εξαιτίας των ιδιαίτερα υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων που δεν επιτρέπουν πιο μακροχρόνιες προσομοιώσεις.

## **6 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων**

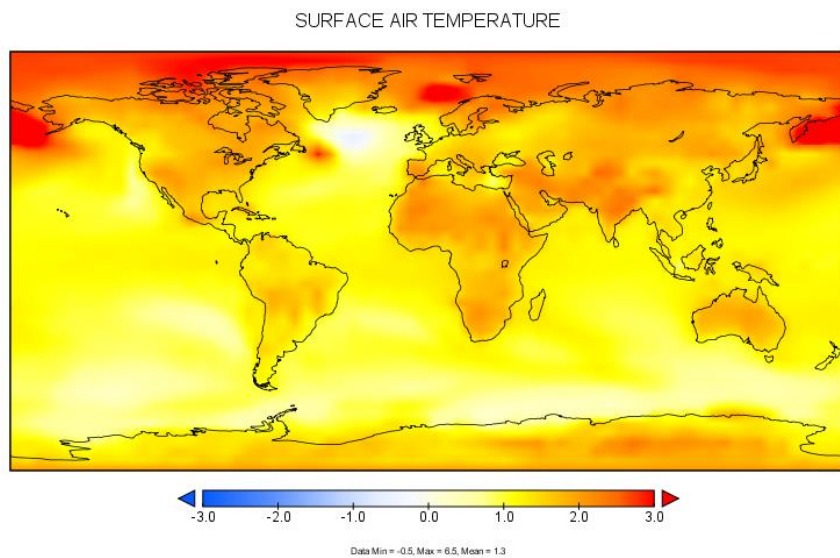
### **6.1 Αποτελέσματα παγκόσμιου κλιματικού μοντέλου**

Η μέση θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 για την ιστορική προσομοίωση (δηλαδή, 1981-2010) και η διαφορά για το 2031-2060 μείον την αντίστοιχη ιστορική προσομοίωση για το σενάριο υψηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου RCP8.5 παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η παγκόσμια μέση θερμοκρασία για ιστορικά έτη εκτιμάται σε 14,2 °C (Σχήμα 1), ενώ εκτιμάται αύξηση 1,3 °C για το RCP8.5, επιβεβαιώνοντας την

αυξανόμενη τάση στη μελλοντική θερμοκρασία. Αυτή η τάση παρατηρείται επίσης στην περιοχή ενδιαφέροντος.

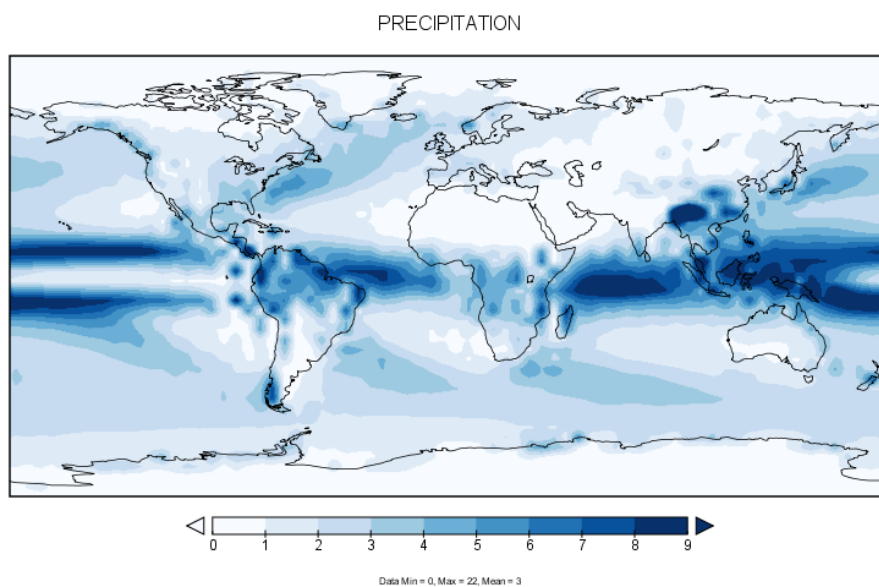


**Σχήμα 1:** Μέση θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα για την ιστορική προσομοίωση (1981 - 2010)

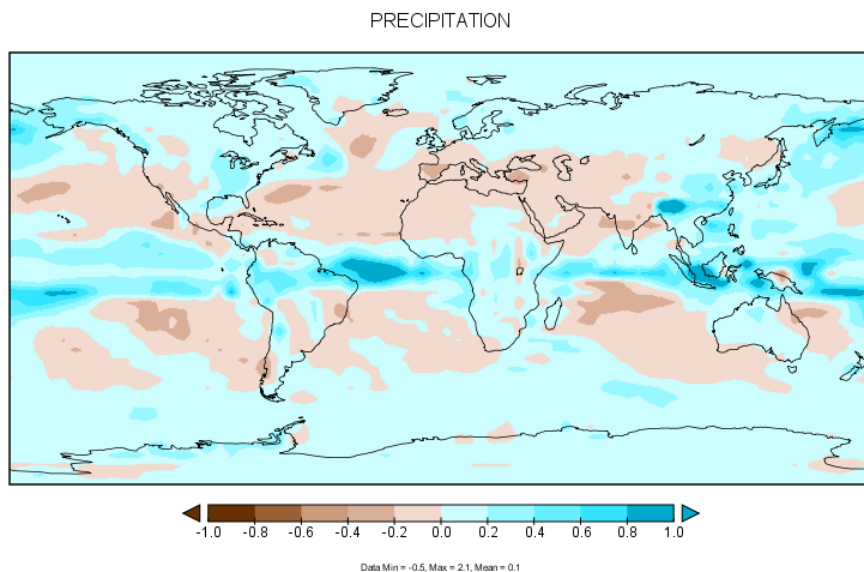


**Σχήμα 2:** Επιφανειακή μέση μεταβολή θερμοκρασίας αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ) μεταξύ 2031 - 2060 για το RCP8.5 και της αντίστοιχης ιστορικής προσομοίωσης, 1981 - 2010

Ο μέσος υετός παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 για την ιστορική προσομοίωση (δηλαδή, 1981-2010) και η διαφορά για το 2031–2060 μείον την αντίστοιχη ιστορική προσομοίωση για το RCP8.5 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Ο παγκόσμιος μέσος όρος υετού για την ιστορική περίοδο εκτιμάται σε 3 mm / ημέρα ενώ υπό το RCP8.5 σημειώνεται αύξηση 0,1 mm / ημέρα υποδηλώνοντας έναν σχεδόν σταθερό ρυθμό υετού κατά μέσο όρο σε ολόκληρο τον κόσμο. Ωστόσο, η κατακρήμνιση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, υποδηλώνοντας περιοχές με αυξανόμενες ή φθίνουσες τάσεις στα ποσοστά υετού. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική η ανάγκη για περιφερειακές κλιματικές προβλέψεις σε υψηλή ανάλυση προκειμένου να αποτυπώνονται ακριβέστερα τα μοτίβα των παραμέτρων.



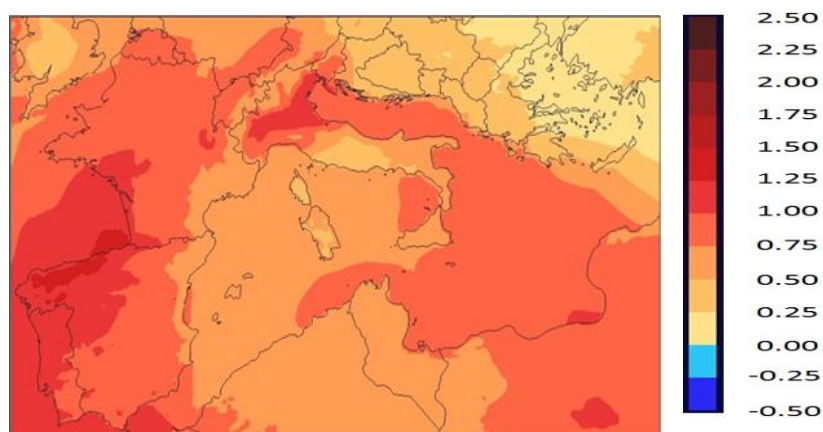
**Σχήμα 3:** Μέση κατακρήμνιση (mm/day) για την περίοδο 1981-2010 των ιστορικών προσομοιώσεων



**Σχήμα 4:** Μέση μεταβολή νετού μεταξύ 2031 – 2060 για το RCP8.5 και της αντίστοιχης ιστορικής προσομοίωσης, 1981–2010

## 6.2 Αποτελέσματα περιοχικού μοντέλου – δυναμικής μείωσης της κλίμακας

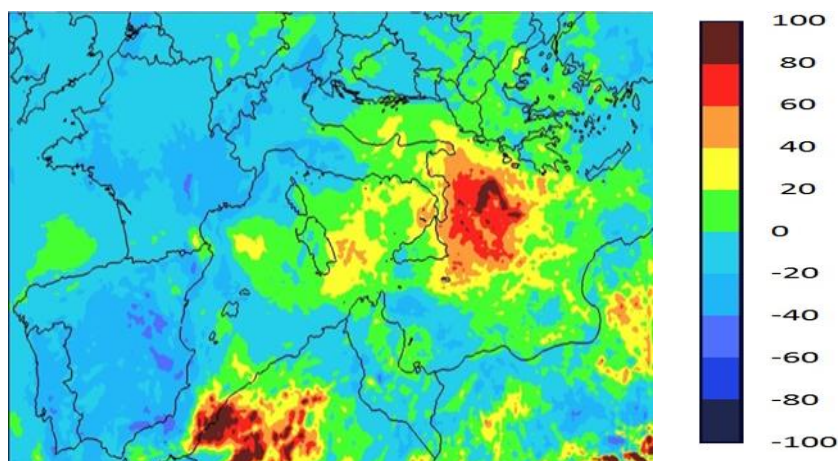
Η ετήσια θερμοκρασία εκτιμάται ότι θα είναι υψηλότερη στο μέλλον (Σχήμα 5). Η μεταβολή θερμοκρασίας υπολογίζεται στο εύρος 0,0 - 0,5 βαθμούς.



**Σχήμα 5:** Επιφανειακή μέση μεταβολή θερμοκρασίας αέρα (°C) μεταξύ 2048 - 2052 για το RCP8.5 και της αντίστοιχης ιστορικής προσομοίωσης, 2008 – 2012



Η αλλαγή της βροχόπτωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία παρουσιάζοντας μια μικτή τάση (Σχήμα 6). Η ετήσια αλλαγή υετού σε όλη την Ελλάδα εκτιμάται στο εύρος  $\pm 20\%$ . Μειώσεις παρατηρούνται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου, με εξαίρεση το κεντρικό τμήμα, βορειοανατολικά, κεντρικά-ανατολικά και τμήματα της νοτιοδυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας.



**Σχήμα 6:** Ποσοστιαία μεταβολή υετού (%) μεταξύ 2048 - 2052 για το RCP8.5 και της αντίστοιχης ιστορικής προσομοίωσης, 2008 - 2012

Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα για έξι παραμέτρους (Πίνακας 1).

**Πίνακας 1:** Πίνακας βασικών μεταβλητών που θα μελετήσουμε

Όνομα	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
<b>SOIT2</b>	θερμοκρασία εδάφους	°K
<b>TEMP2</b>	θερμοκρασία αέρος	°K
<b>RC</b>	ύψος υγρής κατακρήμνισης	Cm
<b>RN</b>	ύψος στερεής κατακρήμνισης	Cm
<b>PBL</b>	ύψος πλανητικού οριακού	M

	στρώματος	
<b>CFRAC</b>	συνολική νεφοκάλυψη	-

Με βάση τις παραπάνω μεταβλητές, εξάγουμε τεχνηέντως, άλλες τρεις (3) μεταβλητές. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο υετός ορίζεται ως το σύνολο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, κατακόρυφου, κυρίως, προσανατολισμού, που εμπεριέχουν μετρήσιμη ποσότητα νερού (βροχή, ψεκάδες, χιόνι κτλ) (Charles, Bates, Whetton & Hughes, 1999b). Επομένως, η πρώτη μεταβλητή, ο υετός (PREC), προκύπτει ως άθροισμα του ύψους υγρής κατακρήμνισης (RC) και του ύψους στερεής κατακρήμνισης (RN). Οι άλλες δύο μεταβλητές, που εξάγουμε, αφορούν την ελάχιστη (TMIN) και τη μέγιστη (TMAX) θερμοκρασία, αντίστοιχα. Συνεπώς, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας (

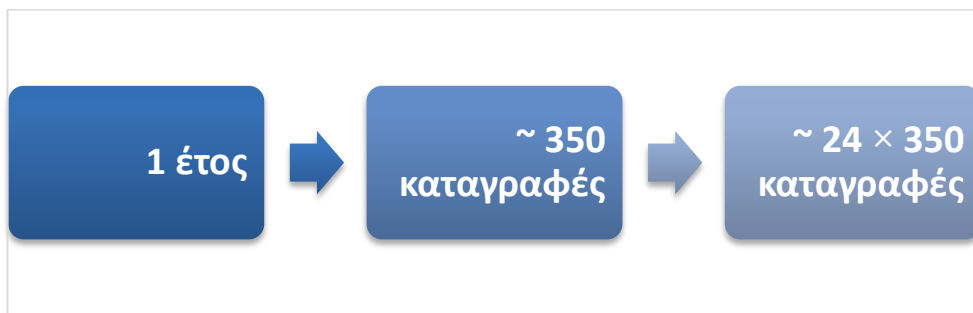
Πίνακας 2).

**Πίνακας 2:** Πίνακας εξαρτημένων μεταβλητών

Όνομα	Περιγραφή	Μονάδα μέτρησης
<b>PREC</b>	ύψος υετού	Cm
<b>TMIN</b>	ελάχιστη θερμοκρασία	°K
<b>TMAX</b>	μέγιστη θερμοκρασία	°K

Οι καταγραφές που υπάρχουν για τις παραπάνω μεταβλητές, που μελετήσαμε, αποτυπώνουν τιμές για κάθε ώρα, κάθε μέρα και κάθε έτος για τα προαναφερθέντα χρονικά διαστήματα, όπως φαίνεται και στην

Εικόνα 1.



**Εικόνα 1:** Η κατανομή του πλήθους των καταγραφών

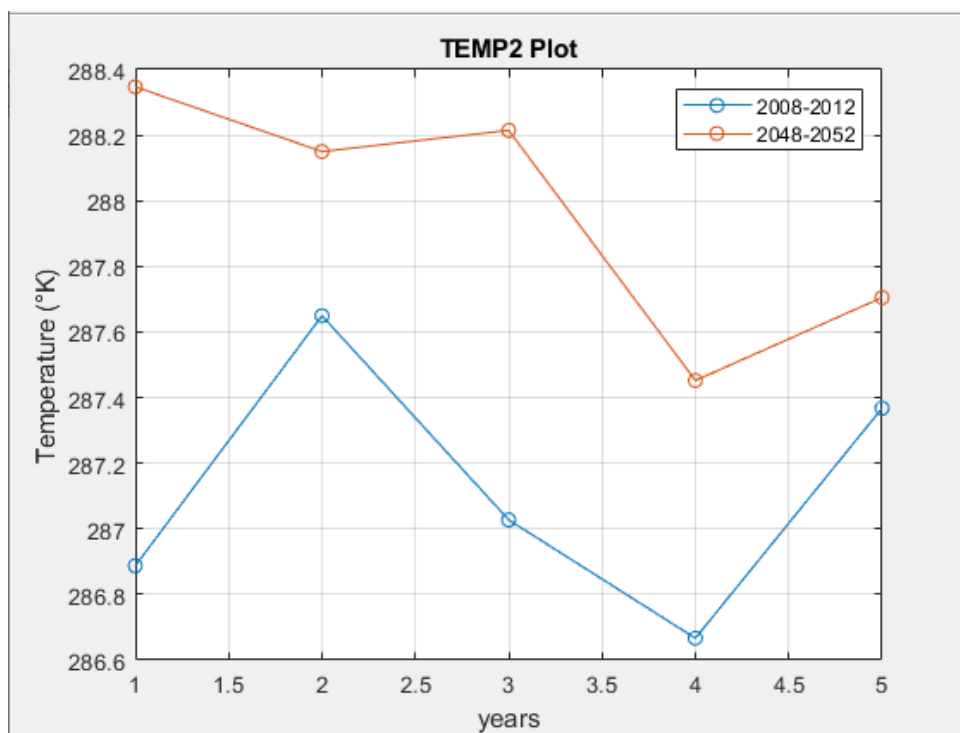
Το επόμενο βήμα ήταν να υπολογίσουμε τη μέση τιμή κάθε μεταβλητής στην διάρκεια μιας ημέρας, καθώς και τις ακραίες τιμές θερμοκρασίας (δηλαδή τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές). Συνεχίσαμε με τον υπολογισμό των μέσων τιμών κάθε μεταβλητής και των ακραίων τιμών κατά έτος, κάθε μεταβλητής. Ακολουθήσαμε τη συγκεκριμένη διαδικασία, τόσο για το χρονικό διάστημα αναφοράς 2008-2012, όσο και για το διάστημα 2048-2052, εξάγοντας του σχετικούς συγκριτικούς πίνακες και γραφήματα.

Στην Εικόνα 2, παρατηρούμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας εδάφους. Μεσοσταθμικά η περίοδος 2048-2052 δίνει υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την περίοδο 2008-2012. Η μοναδική διαφοροποίηση, από αυτό το μοτίβο, παρατηρείται στη σύγκριση των ετών 2009 και 2051, όπου η μέση τιμή θερμοκρασίας του πρώτου έτους ξεπερνά εκείνη του δεύτερου. Επιπλέον, η περίοδος 2048-2052 εμφανίζει μια σχετική πτώση στις τιμές της θερμοκρασίας προϊόντος του χρόνου. Αντίθετα, για την περίοδο 2008-2012 δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την ύπαρξη ανάλογης τάσης.



**Εικόνα 2:** Συγκριτική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας εδάφους για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

Προχωρώντας στην Εικόνα 3, **Εικόνα 2** βλέπουμε την σύγκριση για τις μέσες ετήσιες τιμές θερμοκρασίας αέρα. Χωρίς να προκαλεί έκπληξη, παρατηρούμε μοτίβο ανάλογο με το προηγούμενο γράφημα για τις θερμοκρασίες εδάφους. Δηλαδή, μεσοσταθμικά η περίοδος 2048-52 δίνει υψηλότερες τιμές, ενώ η μοναδική παραφωνία παρατηρείται, όπως και πριν, στο έτος 2009, που εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή από το 2051.



**Εικόνα 3:** Συγκριτική μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας αέρα για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

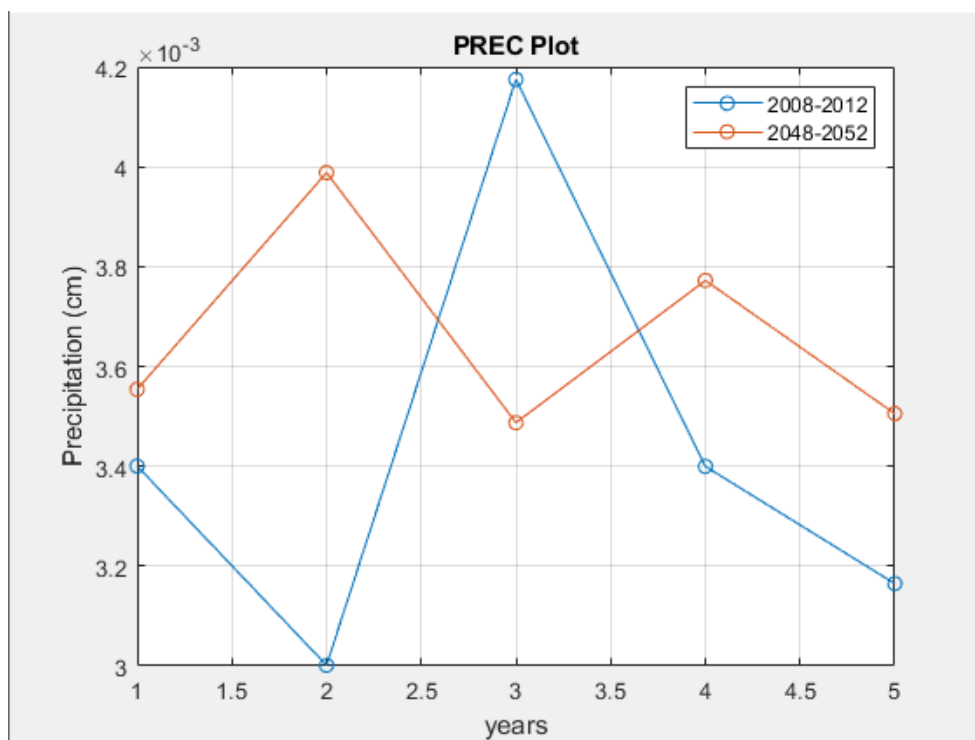
Η υπερθέρμανση του πλανήτη εξαιτίας της ανθρωπογενούς δραστηριότητας έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία, να αυξάνεται ανά δεκαετία. Μια αύξηση της θερμοκρασίας όμως, συνδέεται με σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις για το φυσικό περιβάλλον, αλλά και για την ανθρώπινη υγεία και ευεξία. Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης επικίνδυνων και πιθανώς καταστροφικών αλλαγών στο παγκόσμιο περιβάλλον. Για αυτό και η διεθνής κοινότητα κάνει προσπάθεια, να διατηρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας αρκετά πιο κάτω από τους 2 °C και να συνεχιστούν οι προσπάθειες για τον περιορισμό της στους 1,5 °C ([https://ec.europa.eu/clima/change/causes\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/causes_el)).

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει σαν αποτέλεσμα και την κλιματική αλλαγή της Γης. Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει, αδιαμφισβήτητα, ολόκληρο τον κόσμο. Οι πάγοι των πολικών περιοχών λιώνουν έχοντας ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η στάθμη των θαλασσών, και να εμφανίζονται διάφορα ακραία καιρικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, για την στάθμη των νερών θαλασσών, οι επιστήμονες αναφέρουν ότι υπάρχει άνοδος της τάξης των πέντε εκατοστών ανά δέκα έτη. Η άνοδος μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα να προκληθούν πλημμύρες σε περιοχές που έχουν χαμηλό υψόμετρο και βρίσκονται κοντά στο επίπεδο της θάλασσας (ΔΕΑΚ, 2007). Επίσης, αυτό συμβάλλει στη μετακίνηση των ζωνών βροχοπτώσεως, από τον ισημερινό προς

τον βορά με αποτέλεσμα την ερημοποίηση του κάτω τμήματος της εύκρατης ζώνης. Αποτέλεσμα αυτού, είναι να αλλάξουν οι διάφοροι τύποι βλάστησης τόσο σε εκτάσεις γεωργικής όσο, και σε εκτάσεις δασικής καλλιέργειας. Η τάση αυτή θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η αγροτική παραγωγή. Όσον αφορά, την κεντρική και την ανατολική Ευρώπη εκτιμάται ότι θα υπάρξει μείωση στην δασική παραγωγή. Όσον αφορά, την βόρεια Ευρώπη τώρα, εκτιμάται ότι θα υπάρξει αύξηση στην αγροτική παραγωγή ([https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el)).

Επιπλέον, υπάρχουν περιοχές που πλήττονται πιο συχνά από ακραία και έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως μεγάλης έντασης καύσωνες και έντονες ξηρασίες αλλά και έντονες βροχοπτώσεις ή και μεγάλα κύματα θερμότητας. Τα παραπάνω σχετίζονται και με την ανθρώπινη θνησιμότητα, αφού από την μια οδηγούν σε αύξηση των θανάτων, κυρίως το καλοκαίρι και αντίστοιχα μείωση των θανάτων τον χειμώνα. Επίσης, караδοκούν να επανέλθουν επιδημίες παρελθοντικών χρόνων, και να εξαπλωθούν, αφού οι υψηλές θερμοκρασίες και η υγρασία δημιουργούν ευνοϊκό περιβάλλον για την εμφάνιση και ανάπτυξη πολλών και διάφορων μικροβίων (ΔΕΑΚ, 2007).

Η Εικόνα 4 απεικονίζει τις μεταβολές στο μέσο ετήσιο ύψος υετού, για τις δύο υπό μελέτη πενταετίες. Η περίοδος 2008-2012 εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση σε σχέση με την περίοδο 2048-2052, η οποία έχει πιο ήπιες μεταβολές. Ωστόσο, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι η μελλοντική περίοδος δείχνει να δίνει αυξημένες τιμές σε ύψος υετού. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεγάλη μεταβολή, που παρατηρήθηκε μεταξύ των διαδοχικών ετών 2009 και 2010.



**Εικόνα 4:** Συγκριτική μεταβολή του μέσου ύψους υετού για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

Η αύξηση του ύψους του υετού σε σχέση με το υψόμετρο, είναι ένα χαρακτηριστικό των πλανητών, παρά το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά αυτά διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και από εποχή σε εποχή (Μπαλαφούτης, 1977). Ο κίνδυνος όμως σε μια περιοχή είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη μεταβλητότητα αυτού και μπορεί να προκαλέσει έντονες ξηρασίες ή πλημμύρες σε μια περιοχή. Σε περιοχές, για παράδειγμα, που είναι σταθερές οι βροχοπτώσεις σε όλη την διάρκεια του χρόνου (π.χ. Ισημερινός) τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι πάρα πολύ σπάνια. Αντιθέτως, σε περιοχές (π.χ. Ινδική χερσόνησος) όπου οι περίοδοι ξηρασίας είναι έντονες, τα φαινόμενα των πλημμύρων είναι πολύ πιο συχνά (Μπαλαφούτης, 1977).

Αν επικαλεστούμε τη Μεσογειακή περιοχή, συγκεκριμένα, η έλλειψη βροχοπτώσεων εμφανίζεται κατά την ψυχρή περίοδο, όπου θα έπρεπε να εμφανίζονται βροχές. Από την άλλη δεν είναι σπάνιες οι φορές να παρουσιαστούν εντονότερες βροχοπτώσεις κατά περίοδο του καλοκαιριού που δεν είναι συνηθισμένο. Συνεπώς, αν το συνολικό ετήσιο άθροισμα των βροχοπτώσεων είναι πιο μικρό από αυτό της κανονικής τιμής, τότε αναφερόμαστε σε μετεωρολογική ξηρασία, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αναφερόμαστε σε ένα υγρό έτος. Η έλλειψη νερού δημιουργεί προβλήματα σε πολλές δραστηριότητες της ανθρώπινης ζωής, όπως η ύδρευση κλπ., ο τουρισμός, και όχι στη γεωργία. Στην γεωργική ξηρασία οι ελάχιστες

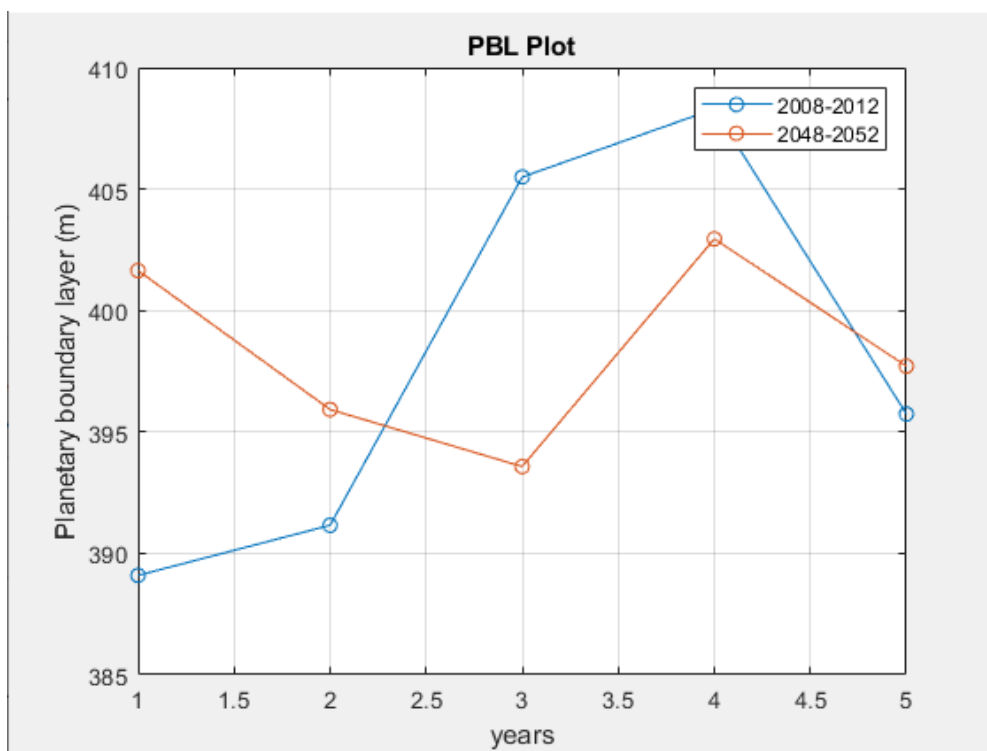
βροχοπτώσεις είναι αυτές που δημιουργούν σημαντικές επιπτώσεις στην παραγωγή (Arnell, 1998).

Το αντίθετο από τις ξηρασίες αποτελούν οι πλημμύρες, οι οποίες συνήθως, είναι καταστροφικές, είτε εμφανιστούν κατά τη βροχερή είτε κατά την ξηρή περίοδο. Οι πλημμύρες είναι αποτέλεσμα των ισχυρών ή των πολύ ισχυρών βροχοπτώσεων. Το πρόβλημα με τις πλημμύρες αλλά και τις ξηρασίες παρουσιάζεται έντονο τα τελευταία χρόνια σε πολλά σημεία της Γης, ενώ παράλληλα προκαλούνται ακραίες καταστάσεις με υψηλές βροχοπτώσεις, θύελλες, καύσωνα και ξηρασία (Bosch et al, 2007). Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει αποθήκευση ενέργειας στην ατμόσφαιρα, οπότε κι έπειτα πρέπει να αναλωθεί κι έτσι προκαλούνται βίαια καιρικά φαινόμενα. Η έντονη αλλαγή της θερμοκρασίας στην ανώτερη ατμόσφαιρα είναι αυτή, που συνήθως συνδέεται, με την καταστροφική δράση από πλημμύρες.

Σημαντική επίδραση στα δάση, αλλά και στην ευρύτερη χλωρίδα, ασκείται από τα έντονα και διαρκή φαινόμενα της βροχόπτωσης. Όταν οι βροχές έχουν μέτρια ένταση και μεγάλη διάρκεια είναι περισσότερο χρήσιμες, καθώς η ποσότητα του νερού που πέφτει προλαβαίνει να εισχωρήσει στο έδαφος του δάσους, κι έτσι αποθηκεύεται και πλέον αξιοποιείται κατά την περίοδο της ξηρασίας από τα φυτά. Όταν πάλι είναι ασθενείς, και παρουσιάζουν μειωμένη ένταση και μικρή διάρκεια, η ποσότητα του νερού δεσμεύεται στις κόμεις των δέντρων του δάσους, αλλά σε αυτή την περίπτωση εξατμίζονται και δεν προλαβαίνουν να φτάσουν στο έδαφος. Οι βροχές μεγάλης έντασης, δηλαδή οι καταιγίδες, συνήθως έχουν μικρή διάρκεια, ασκούν αρνητική επίδραση, καθώς το νερό των καταιγίδων ρέει επιφανειακά και προκαλεί έντονες διαβρώσεις στο έδαφος. Αντίστοιχα, οι βροχές που πέφτουν την εαρινή περίοδο στη διάρκεια της ανθοφορίας είναι επιζήμιες για την καρποφορία, παρεμποδίζοντας την επικονίαση των φυτικών ειδών (Φλόκας & Χρονοπούλου, 2010).

Στην Εικόνα 5, αποτυπώνεται η μεταβολή του ύψους του πλανητικού οριακού στρώματος. Παρατηρούμε ότι οι μελλοντικές τιμές εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση σε σύγκριση με τις τιμές της περιόδου 2008-2012, όπου από αρχικά χαμηλές τιμές για τα δύο πρώτα έτη 2008 και 2009, παρατηρείται μια σημαντική άνοδος για τα επόμενα δύο χρόνια και εν τέλει υπάρχει εκ νέου πτώση στα αρχικά χαμηλά επίπεδα.





**Εικόνα 5:** Συγκριτική μεταβολή πλανητικού οριακού στρώματος για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

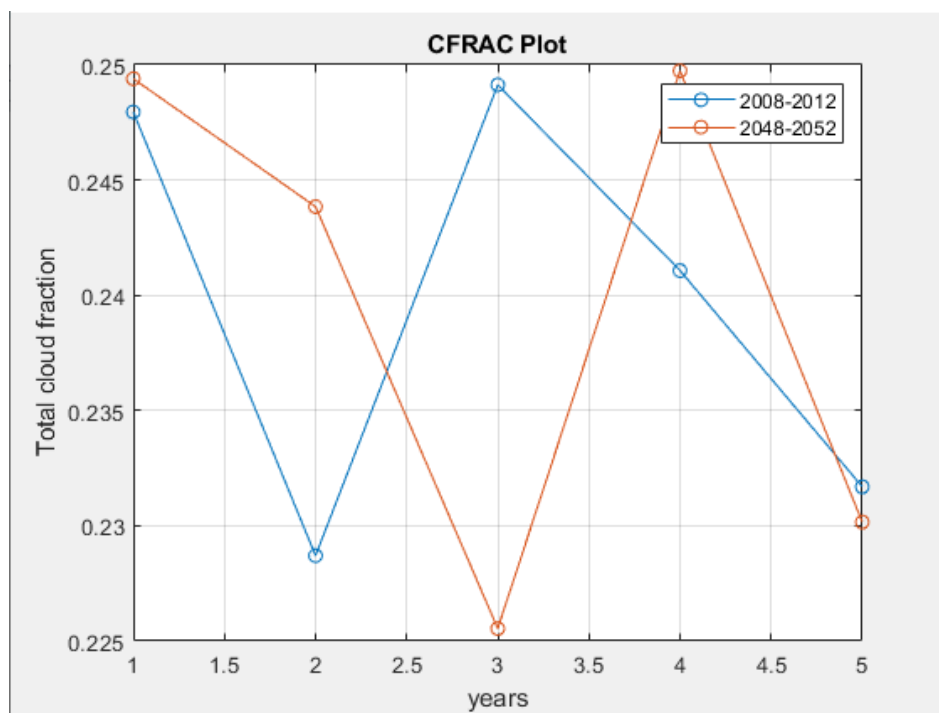
Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι το χαμηλότερο επίπεδο της τροπόσφαιρας, που συνορεύει με την επιφάνεια της γης και το οποίο επηρεάζεται ευθέως από την κατάσταση της επιφάνειας μέσω των τυρβωδών ροών ορμής, θερμότητας και υγρασίας. Η σημασία της έρευνας για το οριακό στρώμα είναι μεγάλη, μιας και πρόκειται για το τμήμα της ατμόσφαιρας μέσα στο οποίο πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (Μελάς, 2009).

Αυτό το ύψος μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως ένα ή δύο χιλιόμετρα, ανάλογα με παράγοντες που ποικίλλουν, όπως η τοπογραφία, η τραχύτητα της επιφάνειας, η φύση του καλύμματος της βλάστησης, η ένταση του ανέμου, ο βαθμός θέρμανσης ή ψύξης του εδάφους, η θερμότητα και η υγρασία κλπ. (Μελάς, 2009).

Το οριακό στρώμα παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές, τόσο μεταξύ ημέρας και νύχτας όσο και ανάμεσα σε διαφορετικές μετεωρολογικές καταστάσεις, από λίγες δεκάδες μέτρα, όταν επικρατεί ακραία ευστάθεια μέχρι περίπου δύο χιλιόμετρα σε συνθήκες ακραίας αστάθειας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η συμβολή της θερμότητας και η επακόλουθη κατακόρυφη ανάμιξη του αέρα αυξάνουν το πάχος του οριακού στρώματος, το οποίο φτάνει στο μέγιστο

ύψος του το απόγευμα. Αντιθέτως, κατά τη διάρκεια της νύχτας η ψύξη του εδάφους αποτρέπει την αναταραχή και το πάχος του μειώνεται. Πάνω από τους ωκεανούς η τιμή του ύψους του ΑΟΣ εμφανίζει ελάχιστες μεταβολές στον χρόνο και στον χώρο εξαιτίας της επιβραδυνόμενης μεταβολής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του νερού (Μελάς, 2009).

Στην Εικόνα 6, παρατηρούμε μεγάλες διακυμάνσεις του ποσοστού νεφοκάλυψης και στις δύο υπό μελέτη χρονικές περιόδους, μη δυνάμενοι να εξάγουμε μια τάση. Η γραμμή των μεταβολών των μέσων τιμών θα λέγαμε ότι ακολουθεί σε αδρές γραμμές το μοτίβο μιας «πριονωτής» συνάρτησης.



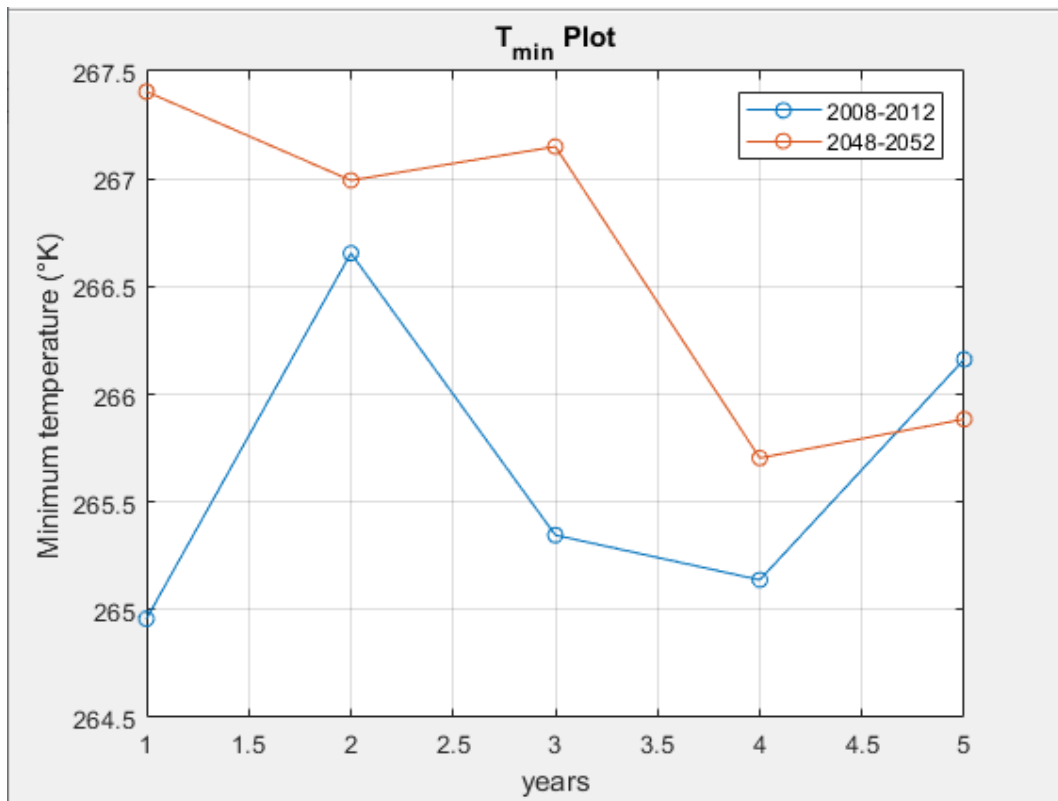
**Εικόνα 6:** Συγκριτική μεταβολή ποσοστού νεφοκάλυψης για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

Το ποσοστό νεφοκάλυψης είναι μία παράμετρος που, αρχικά, επιδρά στην καθαρή διαπερατότητα του ουρανού. Η διαπερατότητα αυτή, έχει άμεση επίδραση στην εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος. Η ύπαρξη περισσότερων νεφών, συνεπάγεται μείωση της ακτινοβολίας του στρώματος επιφανείας, και γενικότερα του οριακού στρώματος και έχει ως αποτέλεσμα να εισάγεται μικρότερο ποσό ενέργειας, και σε συνδυασμό με την αύξηση του

ύψους του οριακού στρώματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, η θερμοκρασία μειώνεται, τόσο στην επιφάνεια όσο και στην κορυφή του στρώματος επιφανείας (Πετράκης, 2021).

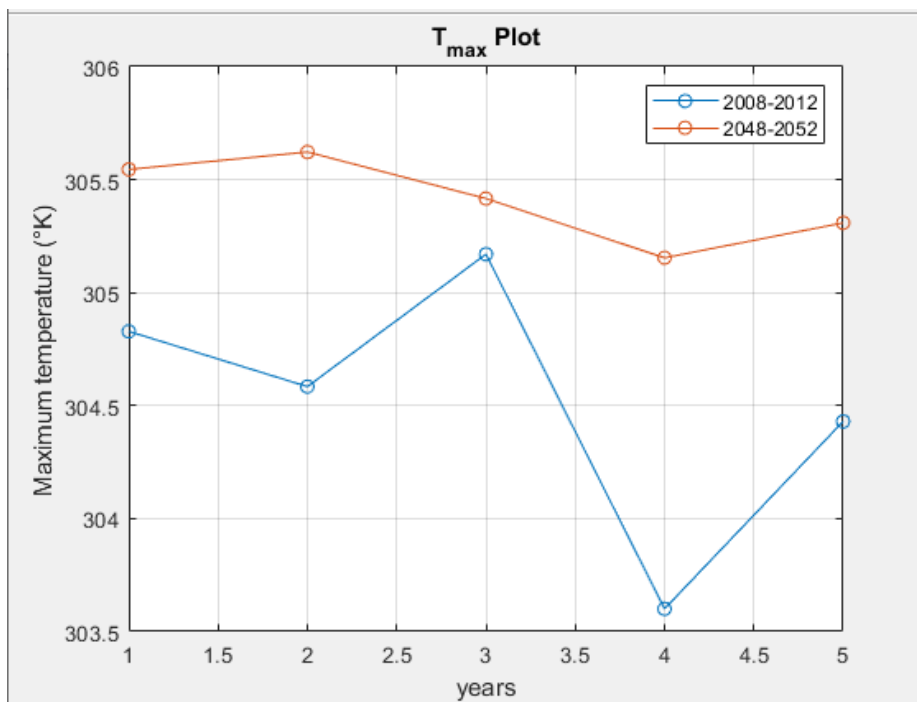
Αντίθετα, η εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, παρουσιάζει εξάρτηση από την θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους. Η συγκεκριμένη ακτινοβολία προσεγγίζει περισσότερο την εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, καθώς εξαρτάται από μία θερμοκρασία που επηρεάζεται άμεσα από την ενέργεια που παρέχεται στο έδαφος. Το γεγονός αυτό οδηγεί την ακτινοβολία αυτή σε μεγαλύτερες τιμές από την αντίστοιχη εισερχόμενη. Αυτή η αύξηση οφείλεται στην ικανότητα των νεφών να απορροφούν την ακτινοβολία με μεγάλα μήκη κύματος, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία κάτω από αυτά και συνεπώς, την θερμοκρασία της επιφανείας. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας, αν και μικρή, έχει αντίκτυπο στην εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (Πετράκης, 2021).

Συνεχίζουμε με την Εικόνα 7, η οποία παρουσιάζει τις ετήσιες μέσες τιμές των ημερήσιων ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας αέρα. Παρατηρούμε, ότι η μελλοντική χρονική περίοδος παρουσιάζει μια πτωτική τάση, ως προς τις ελάχιστες θερμοκρασίες. Ωστόσο, η συγκεκριμένη περίοδος εμφανίζει συνολικά υψηλότερες τιμές. Σημειώνεται, ότι για το έτος 2008, και συγκεκριμένα για την 145<sup>η</sup> ημέρα, υπήρχε καταγεγραμμένη τιμή θερμοκρασίας με ελάχιστη τιμή θερμοκρασίας 0 °K. Όμως, δεν λαμβάνουμε υπόψη μια τέτοια τιμή, που δεν μπορεί να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς συμπεραίνουμε πως πρόκειται για σφάλμα καταγραφής.



**Εικόνα 7:** Συγκριτική μεταβολή των τιμών των ελάχιστων θερμοκρασιών για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

Ολοκληρώνουμε τα γραφήματα με την Εικόνα 8, όπου αποτυπώνονται οι μεταβολές στις ετήσιες μέσες τιμές των ημερήσιων μέγιστων τιμών θερμοκρασίας αέρα. Η μελλοντική χρονική περίοδος έχει διαχρονικά υψηλότερες μέγιστες τιμές, εμφανίζοντας μια σταθεροποιητική τάση. Στον αντίποδα, τα έτη 2010-2011 παρουσιάζουν την σημαντικότερη μεταβολή.



**Εικόνα 8:** Συγκριτική μεταβολή των τιμών των μέγιστων θερμοκρασιών για τα δύο υπό μελέτη χρονικά διαστήματα

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει όλες τις περιοχές του κόσμου. Οι πάγοι στις πολικές περιοχές λιώνουν και σε κάποιες περιοχές επηρεάζονται πιο συχνά από καιρικά φαινόμενα τα οποία χαρακτηρίζονται ως ακραία καθώς και έντονες βροχές. Αντίθετα, σε άλλες περιοχές κυριαρχεί η ένταση του καύσωνα και της ξηρασίας. Εξαιτίας αυτών των μεταβολών, η στάθμη των θαλασσών αυξάνεται κι έτσι έχουμε την εμφάνιση πλημμύρων, ενώ παράλληλα υπάρχει διάβρωση στις ακτές καθώς και στις πεδινές παράκτιες περιοχές. Οι έντονες βροχοπτώσεις και γενικά τα ακραία καιρικά φαινόμενα κάνουν την εμφάνισή τους ολοένα και συχνότερα προκαλώντας πλημμύρες και υποβαθμίζουν την ποιότητα του νερού, αφού περιορίζονται οι υδάτινοι πόροι σε ορισμένες περιοχές ([https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el)).

Συγκεκριμένα στην Ευρώπη:

- Στη νότια και κεντρική Ευρώπη οι χώρες πλήττονται ολοένα και συχνότερα από καύσωνες, ξηρασίες και εν τέλει δασικές πυρκαγιές.
- Στις περιοχές γύρω από την Μεσόγειο η λειψυδρία αυξάνεται συνεχώς, οπότε και ελλοχεύει ο κίνδυνος ξηρασίας, κι επομένως οι ανεξέλεγκτες πυρκαγιές.

- Υψηλές ποσότητες βροχοπτώσεων και πλημμύρες είναι σύνηθες φαινόμενο την περίοδο του χειμώνα και κατακλύζουν την Βόρεια Ευρώπη.
- Σε αστικές περιοχές όπου σήμερα ζουν 4 στους 5 Ευρωπαίους, παρατηρούμε φαινόμενα πλημμύρων και αύξηση της στάθμης της θάλασσας, αλλά και καύσωνες. Παράλληλα, αντιμετωπίζουν προβλήματα αφού δεν είναι κατάλληλα προετοιμασμένες στην κλιματική αλλαγή ([https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el)).

Πολλές αναπτυσσόμενες χώρες που όμως είναι ιδιαίτερα φτωχές συγκαταλέγονται στις χώρες που πλήττονται εντονότερα. Οι άνθρωποι, που κατοικούν σε αυτές σε μεγάλο βαθμό εξαρτώνται κυρίως από το φυσικό περιβάλλον ενώ δεν διαθέτουν τους κατάλληλους πόρους στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Μάλιστα η κλιματική αλλαγή ήδη προκαλεί επιπτώσεις στην υγεία:

- Έχει αυξηθεί η θνησιμότητα, σε κάποιες περιοχές, που προέρχεται από τον καύσωνα, παράλληλα υπάρχει, όμως, μείωση των θανάτων από το κρύο σε κάποιες άλλες περιοχές.
- Παρατηρούνται αλλαγές στις περιοχές, όπου εμφανίζονται ορισμένες ασθένειες οι οποίες μεταφέρονται κυρίως μέσω του νερού, καθώς και των φορέων νόσων ([https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el)).

Οι υλικές ζημιές και οι ζημιές στις υποδομές, καθώς και στην ανθρώπινη υγεία, συνεπάγονται υψηλό κόστος για την κοινωνία και την οικονομία. Τομείς που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο της θερμοκρασίας και των βροχοπτώσεων, όπως η γεωργία, η δασοκομία, η ενέργεια και ο τουρισμός πλήττονται σε σημαντικό βαθμό. Η αλλαγή του κλίματος προχωράει με γοργούς ρυθμούς με αποτέλεσμα αρκετά είδη, τόσο ζώων, όσο και φυτών πασχίζουν να ανταπεξέλθουν στην κατάσταση αυτή. Μεγάλος αριθμός ειδών ζώων της ξηράς ή του γλυκού ή του θαλασσινού νερού έχουν κιάλας αναγκαστεί να μεταναστεύσουν σε άλλα μέρη. Όμως, αν η μέση θερμοκρασία της γης συνεχίσει να έχει ανεξέλεγκτη ανοδική πορεία, αρκετά ζωικά αλλά και φυτικά είδη θα κινδυνεύσουν με εξαφάνιση ([https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_el)).

Ο Πίνακας 3, παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την πενταετία 2008-2012, ενώ ο Πίνακας 4 τις αντίστοιχες τιμές για την πενταετία 2048-2052. Οι δύο τελευταίες στήλες κάθε

πίνακα αναπαριστούν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των τιμών κάθε μεταβλητής στο σύνολο της πενταετίας.

Τα ευρήματα για αυξημένες τιμές διακύμανσης, που είδαμε και στα γραφήματα των PREC (ύψος νετού) και PBL (ύψος πλανητικού οριακού στρώματος) προηγουμένως, αποτυπώνονται και στους πίνακες μέσα από τις αυξημένες τιμές τυπικής απόκλισης.

**Πίνακας 3:** Συγκεντρωτικός πίνακας για την χρονική περίοδο 2008-2012

	2008	2009	2010	2011	2012	AVERAGE	STD
<b>SOIT2</b>	287,517	288,199	287,694	287,378	287,985	287,755	0,301
<b>TEMP2</b>	286,887	287,649	287,027	286,667	287,368	287,120	0,349
<b>PREC</b>	3,40E-03	3,00E-03	4,17E-03	3,40E-03	3,16E-03	3,43E-03	<b>4,03E-04</b>
<b>PBL</b>	389,092	391,157	405,496	408,298	395,740	397,957	<b>7,662</b>
<b>CFRAC</b>	0,248	0,229	0,249	0,241	0,232	0,240	0,008
<b>T_min</b>	264,958	266,654	265,346	265,138	266,162	265,652	0,649
<b>T_max</b>	304,828	304,584	305,170	303,601	304,430	304,523	0,524
<b>min_T_min</b>	247,064	250,509	244,597	242,937	244,447	245,911	2,653
<b>max_T_max</b>	317,020	318,925	317,681	317,394	318,135	317,831	0,657

**Πίνακας 4:** Συγκεντρωτικός πίνακας για την χρονική περίοδο 2048-2052

	2048	2049	2050	2051	2052	AVERAGE	STD
<b>SOIT2</b>	288,935	288,742	288,767	288,098	288,320	288,573	0,312
<b>TEMP2</b>	288,347	288,150	288,215	287,452	287,705	287,974	0,338
<b>PREC</b>	3,554E-03	3,988E-03	3,487E-03	3,772E-03	3,505E-03	3,661E-03	<b>1,925E-04</b>

<b>PBL</b>	401,646	395,922	393,574	402,948	397,709	398,360	<b>3,496</b>
<b>CFRAC</b>	0,249	0,244	0,226	0,250	0,230	0,240	0,010
<b>T_min</b>	267,405	266,993	267,149	265,704	265,884	266,627	0,695
<b>T_max</b>	305,545	305,622	305,416	305,154	305,309	305,409	0,167
<b>min_T_min</b>	249,797	244,384	249,175	246,031	243,548	246,587	2,506
<b>max_T_max</b>	316,911	316,954	318,754	317,566	320,253	318,088	1,271

Τέλος, ολοκληρώνουμε την ανάλυση των αποτελεσμάτων με την εύρεση των ημερομηνιών, όπου παρατηρήθηκαν οι ακραίες τιμές (ελάχιστες και μέγιστες) για κάθε έτος (Πίνακας 5). Παρατηρούμε, ότι οι χαμηλότερες θερμοκρασίες στη μελλοντική πενταετία εμφανίζονται μετατοπισμένες χρονικά, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Από την άλλη, οι μέγιστες τιμές δείχνουν να εμφανίζονται στα τέλη της άνοιξης, κάτι το οποίο μας ξαφνιάζει ως αποτέλεσμα. Μιας και μέχρι τώρα, οι μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονταν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

**Πίνακας 5:** Ημερομηνίες στις οποίες παρατηρούνται οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας κατά έτος

<b>min_T_min</b>	02/01/ 2008	13/02/ 2009	31/12/ 2010	09/12/ 2011	14/02/ 2012	21/02/ 2048	28/02/ 2049	27/01/ 2050	18/03/ 2051	08/01/ 2052
<b>max_T_max</b>	14/06/ 2008	03/07/ 2009	15/08/ 2010	23/07/ 2011	22/06/ 2012	18/08/ 2048	25/05/ 2049	27/05/ 2050	26/05/ 2051	18/05/ 2052

## 7 Συμπεράσματα

Η κλιματική αλλαγή είναι μια από τις σοβαρότερες προκλήσεις, που αντιμετωπίζει σήμερα ο κόσμος. Ο πλανήτης μας βιώνει σημαντική και επιταχυνόμενη κλιματική αλλαγή, η οποία



άρχισε πριν από έναν αιώνα. Η μελέτη της κλιματικής αλλαγής είναι απαραίτητη, καθώς δεν μπορούμε να μην λάβουμε υπόψιν μας, ότι δεν είναι καθόλου απίθανο να οφείλεται και σε ανθρώπινες δραστηριότητες, καθώς αυτές εξελίσσονται με ταχύτατους ρυθμούς.

Η συχνότητα των υψηλών θερμοκρασιών και έντονων «επεισοδίων» καύσωνα κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και, γενικότερα, οι απότομες καιρικές μεταβολές, έχουν αρχίσει να προβληματίζουν τους επιστήμονες για τις μελλοντικές εξελίξεις. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας που παρατηρείται στον πλανήτη μας είναι αδιαμφισβήτητη.

Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει αξιοσημείωτα και τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Μελετώντας, λοιπόν, τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πέντε μελλοντικών ετών, σε σύγκριση, με τις καταγραφές πέντε παρελθοντικών ετών, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εδάφους, μεσοσταθμικά δίνει υψηλότερες τιμές στο μέλλον, σε σχέση με αυτές του παρελθόντος. Για τις θερμοκρασίες αέρος παρατηρούμε μοτίβο ανάλογο με το προηγούμενο. Δηλαδή, μεσοσταθμικά η μελλοντική εξεταζόμενη περίοδος δίνει υψηλότερες τιμές.

Όσον αφορά το ύψος του νετού, η μελλοντική περίοδος δείχνει να δίνει αυξημένες τιμές, αλλά με ήπιες μεταβολές. Με ανάλογο τρόπο εμφανίζεται και η μεταβολή του πλανητικού οριακού στρώματος, όπου οι μελλοντικές τιμές εμφανίζουν μικρότερη διακύμανση. Αντίθετα, μεγάλες διακυμάνσεις εντοπίζονται στις τιμές του ποσοστού νεφοκάλυψης και στις δύο υπό μελέτη χρονικές περιόδους.

Η μεταβολή του κλίματος είναι ένα φαινόμενο, που έχει εξελιχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Η χώρα μας προσπαθεί να αναπτύξει κατάλληλους μηχανισμούς προσαρμογής και οφείλει να δώσει έμφαση σε τομείς που είναι ιδιαίτερα «ευάλωτοι» σε αυτό το φαινόμενο. Θα πρέπει παρόλα αυτά, ο καθένας μας να ευαισθητοποιηθεί, γιατί σε αντίθετη περίπτωση, οι συνέπειες που θα ακολουθήσουν μπορεί να είναι, μη αναστρέψιμες και καταστροφικές για ολόκληρο τον πλανήτη και την ζωή γενικότερα.

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει και τον άνθρωπο πολλαπλώς άμεσα και έμμεσα. Η άμεση έκθεση βασίζεται στις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις, η θερμοκρασία, τα πολύ συχνά ακραία καιρικά φαινόμενα και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Η έμμεση έκθεση οφείλεται στην όλο και πιο χαμηλή ποιότητα του αέρα, του νερού και του φαγητού, καθώς και στις αλλαγές του οικοσυστήματος, της βιομηχανίας, της γεωργίας,

των οικισμών και της οικονομίας. Συνεπώς, η κλιματική αλλαγή μεγεθύνει παγκοσμίως τις υπάρχουσες ασθένειες, ενώ δημιουργεί και νέες, που μπορούν να οδηγήσουν και σε πρόωρο θάνατο.

## 8 Βιβλιογραφία

### Ελληνόγλωσση

Αναγνωστοπούλου, Χ. (2003). *Συμβολή στη μελέτη της ξηρασίας στον Ελληνικό χώρο*. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 222.

ΔΕΑΚ (2007). *"Summary for Policymakers: C. Current knowledge about future impacts". Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M.L. Parry et al. (eds.)]*. Cambridge University Press. (4<sup>η</sup> Έκθεση της ΔΕΑΚ).

Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών (συλλογικό) (2002). *ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΠΟΙΗΣΗ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ*. Αθήνα: Εκδόσεις Ελληνικά Γράμματα.

Ελληνικό Κέντρο Ανάπτυξης Μελετών (1993). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΡΙΣΗ*. Αθήνα: Εκδόσεις Σύγχρονη Εποχή.

ΕΟΠ, 2006. *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment (Πόση ενέργεια μπορεί να παράγει η Ευρώπη χωρίς να προκληθεί βλάβη στο περιβάλλον)*. Έκθεση ΕΟΠ αριθ. 7/2006.

Ζιώμας, Γ. (2007). *Ατμόσφαιρα- Ατμοσφαιρική Ρύπανση*. Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο. Διαθέσιμο στο:

[https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CHEMENG134/Atmosfaira\\_Atmosfairikh%20kai%20rypansh.pdf](https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CHEMENG134/Atmosfaira_Atmosfairikh%20kai%20rypansh.pdf)

Καραθανάσης, Σ. (2006). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Ορισμός, Επιπτώσεις, Πηγές από Βιομηχανικές και Βιοτεχνικές Δραστηριότητες, Τεχνολογία Αντιμετώπισης, Νομοθεσία*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

Καραμανώλης, Δ. (2011). *Διαχείριση οικοσυστημάτων και κλιματική αλλαγή*. Καρδίτσα: Παρουσίαση στο 15ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο.

Κάσσιου, Ε. (2015). *Επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής στην Ένταση και Συχνότητα των Γεγονότων Ξηρασίας στην Κρήτη*. Αθήνα: Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ.

Κατσαφάδος, Π. & Μαυροματίδης, Η. (2010). *Αρχές Μετεωρολογίας- Κλιματολογίας (Πανεπιστημιακές Παραδόσεις)*. Αθήνα: Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.

Μακρογιάννης, Τ. Ι. & Σαχσαμάνογλου, Χ. Σ. (2004). *Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΧΑΡΙΣ.

Μελάς, Δ. (2007). *Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μελάς, Δ. (2009). *Φυσική Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος*. Θεσσαλονίκη.

Μελάς, Δ., Ασωνίτης, Γ. & Αμοιρίδης, Β. (2000). *ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ* [Οδηγός εκπαιδευτικών]. Αθήνα: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.

Μουσιόπουλος, Ν. (2012). *Φαινόμενα Μεταφοράς στην Ατμόσφαιρα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχουδή.

Μπαλαφούτης, Χ. Ι. (1977). *Συμβολή εις την Μελέτην του Κλίματος της Μακεδονίας και Δυτικής Θράκης (Διατριβή επί Δικτατορία)*. Θεσσαλονίκη.

National Geographic (2013). *Εγκυκλοπαίδεια του περιβάλλοντος για νέους. Κλιματική αλλαγή*. Αθήνα: ΣΕΛΕΝΑ ΕΚΔΟΤΙΚΗ Α.Ε. Διαθέσιμο στο:

<https://www.inedivim.gr/images/ng-egkykpolaideia/ng-egkykpolaideia-perivalon-2-klimatiki-allagi.pdf>

Οικονομόπουλος, Α. (2000). *Ρύπανση και Έλεγχος Ρύπανσης Αέρα*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Πετράκης, Θ. (2021). *Ανάλυση ευαισθησίας της εξατμισοδιαπνοής στο συζευγμένο σύστημα Ατμόσφαιρα – Βλάστηση – Έδαφος*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ρεπαπής, Χ. Κ., Φιλάνδρας, Κ. Μ. & Μεταξάς, Δ. Α. (2002). *Μεταβλητότητα του κλίματος στην Ανατολική Μεσόγειο, στην Ελλάδα και ειδικότερα στην Αθήνα*. ΚΕΦΑΚ Ακαδημίας Αθηνών, Δημοσίευμα, 16.

Σαράντης, Μ. (2010). *Εφαρμογή για την Μείωση των Αέριων Εκπομπών Διοξειδίου του άνθρακα από τα Πλοία*. Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σαράντης, Τ. (2010). *Η κλιματική αλλαγή θα πλήξει κυρίως τις φτωχές χώρες*. Διαθέσιμο στο:

<https://www.forest.gr/ylh/el/content/ειδήσεις/η-κλιματικήαλλαγή-θα-πλήξει-κυρίως-τις-φτωχές-χώρες>

Σαχσαμάνογλου, Χ. Σ. & Μακρογιάννης, Τ. Ι. (1998). *Γενική Μετεωρολογία*. Εκδόσεις Ζήτη.

Τζαμπούρας, Ι. (2009). *ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ*. Βόλος: Διπλωματική εργασία

Υφαντόπουλος, Ι. et al (2011). *Κλιματική Αλλαγή και Υγεία*. Αθήνα: Τράπεζα της Ελλάδος, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής.

Φλόκας, Α. & Χρονοπούλου, Α. (2010). *Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.

## **Ξενογλώσση**

Ahrens, C. D.. *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Sixth Edition.

Arnell, N. W. (1996). *Global Warming, River Flows and Water Resources*. Chichester: Wiley.

Arnell, N. W. (1998). *Climate change and water resources in Britain*. *Climatic Change*, vol. 39(1), pp. 83–110. doi: 10.1023/A:1005339412565.

Arnell, N. W. (2003a). *Effects of climate change on river flows and groundwater recharge using the UKCIP02 scenarios*. Report to UK Water Industry Research Limited. University of Southampton.

Arnell, N. W. & Reynar, N. S. (1996). *The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain*. *Journal of Hydrology*, 183, 397-424.

Arya, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*. NY: 2nd edition. Academic Press.

Auffhammer, M., Hsiang, M. S., Schlenker, W. & Sobel, A. (2011). *Global Climate Models and Climate Data: A User Guide for Economists*. February 2011. Διαθέσιμο στο

[file:///C:/Users/user/Downloads/Global climate models and climate data A user guid.pdf](file:///C:/Users/user/Downloads/Global%20climate%20models%20and%20climate%20data%20A%20user%20guid.pdf)

Bard, E. & Frank, M. (2006). *Climate change and solar variability: What's new under the sun?* *Frontiers*. Earth and Planetary Science Letters, 248, 1-14.

Barmpas, F. & Moussiopoulos, N. (2011). *Numerical study for the transient inter- canopy transport of air pollution in the integrated indoor and outdoor environment in a densely populated urban area, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2011) (T.D. Lekkas, ed), Rhodes island, Greece, 8-10 September, 150- 157.*

- Barmpas, Ph., Ossanlis, I. & Moussiopoulos, N. (2011). *Numerical study for the flow around moving cars and its effect on the dispersion of the traffic emitted pollution within a road tunnel*. International Journal of Environment and Pollution 44, 307-315.
- Beersma, I., Agnew, M. D., Viner, D. & Hulme, M. (2000). *Climate Scenarios for Water-Related and Coastal Impacts*. Proceedings of the EU Concerted Action Initiative ECLAT-2 Workshop 3. KNMI, Netherlands, May 10-12th 2000, Climatic Research Unit, Norwich 140pp.
- Bezpalova, K. (2006). *Physical modelling of flow and diffusion in urban canopy*, Doctoral Thesis, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University of Prague.
- Boes, E. (1981). *Fundamentals of solar radiation*. In Krieder & Krieth (Eds.), Solar Energy Handbook (pp. 2.1-2.76), New York: McGraw-Hill.
- Bosch, P., Dave, R., Davidson, O., Metz, B. & Meyer, L. (eds.) (2007). *Climate Change 2007. Mitigation of climate change*. Cambridge: University Press.
- Cano, D., Monget, J. M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N. & Wald, L. (1986). *A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellites data*. In Solar Energy, 37, 1, 31-39.
- Charles, S. P., Bates, B. C. & Hughes, J. P. (1999a). *A spatio-temporal model for downscaling precipitation occurrence and amounts*. Journal of Geophysical Research, 104,31657-31669.
- Charles, S. P., Bates, B. C., Whetton, P. H. & Hughes, J. P. (1999b). *Validation of downscaling models for changed climate conditions: case study of southwestern Australia*. Climate Research, 12, 1-14.
- Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012, European Environment Agency.
- Danny, H. (2000). *Global Warming – The Hard Science*. Pearson Education Limited.
- Dawson, A. (2008). *Rates and Mechanisms of Climate Change: Implications for Ports and Harbours*. University of Aberdeen. World Maritime University (WMU). Volume 7, Issue2, pp 467-476.
- Dee et al (2011). *The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system*. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 137, 553-597.

Diaz-Nieto, J. & Wilby, R. L. (2004). *The impact of climate change on low flows in the River Thames UK: A comparison of statistical downscaling and change factors*. Climatic Change, in press.

Eckhardt, K. & Ulbricht, U. (2003). *Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range*. Journal of Hydrology, 284, 244-252.

Emeis, St. (2010). *Measurement Methods in Atmospheric Sciences, In situ and remote*. Bornträger.

Favis-Mortlock, D. T. & Boardman, J. (1995). *Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a modelling study of the UK South Downs*. Catena, 25, 365-387.

Foken, Th. (2008). *Micrometeorology*. Springer. NY.

Founda, D. (2011). *Evolution of the air temperature in Athens and evidence of climatic change: A review*. Advances in Building Energy Research (in press).

Giorgi, F., Mearns, L. O. (1991). *Approaches to the simulation of Regional climate change*. A review. Reviews of Geophysics 29, 191-216.

Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, Hulme, M. Y., Storch, H., Whetton, P., Jones, R., Mearns, L. & Fu, C. (2001). *Regional climate information – evaluation and projections, in Climate Change 2001: The Scientific Basis, Houghton JT, Ding Y, Chjggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D, Eds*. Cambridge: Cambridge University Press, 583-638.

Giorgi, F. & Jones, C. (2008). *WMO bulletin. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework*. Διαθέσιμο από:

<https://www.researchgate.net/publication/265311339> Addressing climate information needs at the regional level The CORDEX framework

Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M. B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G. T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U. U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T. A., Tawfik, A. B., Shalaby, A., Zakey, A. S., Steiner, A. L., Stordal, F., Sloan, L. C. & Brankovic, C. (2012). *RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains*. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01018>

Hallegate, S. (2009). *Strategies to adapt to an uncertain climate change*. Global Environmental Change, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.

Hanson, K. J. (1976). *An estimate of solar irradiance at the Earth's surface of zonal and global scale*. Journal of Geophysical Research. 81:445-4443.

Hay, L. E., Wilby, R. L. & Leavesley, G. H. (2000). *A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States*. Journal of the American Water Resources Association, 36, 387-397.

Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D. & New M. (2008). *A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*. Διαθέσιμο από: <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>

Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini, J. A., Nicholls, N., Penner, J. E. & Stott, P. A. (2007). *Understanding and Attributing Climate Change*. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Hewitson, B. C. (1999). *Deriving regional precipitation scenarios from General Circulation Models*. Water Research Commission Report 751/1/99, Pretoria, South Africa, 40pp.

Hewitson, B. C. & Crane, R. G. (2003). *Global climate change: Questions of downscaled climate scenarios for impact assessment*. Bulletin of the American Meteorological Society, submitted.

IPCC (1996). *Climate Change 1995: Impacts, Adaptions and Mitigation of Climate Change*. Scientific- Technical Analyses, Cambridge University Press, Cambridge Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

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.

IPCC (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis*. Houghton: J.H.Y (Editor).



IPCC (2001). *Climate Change 2001 - The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P. J., & Xiaosu, D. (Eds.), Cambridge University Press, UK., 881 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) (2007). *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report to the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

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*.

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*.

IPCC (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*, by the Working Group I.

Jarraud, M. (2008). 'Guide to meteorological instruments and methods of observation'. (WMO-No. 8). World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland, 29.

Kerschgens, M., Pilz, U. & Raschke, E. (1978). *A modified two-stream approximation for computation of the solar radiation budget in a cloudy atmosphere*. Tellus. 30:429-435.

Kiehl, J. T. & Trenberth, K. E. (1997). *Earth's annual global mean energy budget*. Bulletin of the American Meteorology Society. 78:197-208.

Kothavala, Z. (1999). *The Duration and Severity of Drought Over Eastern Australia Simulated by a Coupled Ocean-atmosphere GCM with a Transient Increase in CO<sub>2</sub>*. Environmental Modeling & Software 14:243-252.

Kustas, W., Norman, J., Anderson, M. & French, A. (2003). «*Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index – radiometric temperature relationship*», in Remote Sensing of Environment, 2003.

Lambert, S. J. & Boer, G. J. (2001). *CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models*. Climate Dynamics, 17, 83-106.

- Lauwaet, D., Viaene, P. 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.
- Leung, L. R., Meams, L. O., Giorgi, F. & Wilby, R. L. (2003). *Regional climate research: needs and opportunities*. Bulletin of the American Meteorological Society, 84, 89-95.
- Loukas, A. & Vasiliades, L. (2004). *Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly Region*. Greece: Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 719-731.
- Loukas, A., Vasiliades, L. & Dalezios, N. R. (2003). *Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring*. Greece: Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology, 8-10 September 2003, Lemnos, Greece, 484-491.
- McKee, T. B., Docsken, NJ. & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*. 11-22 January, Anaheim, California, USA: 119-184.
- Meams, L. O., Bogardi, I., Giorgi, F., Matyasovszky, I. & Palecki, M. (1999). *Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling*. Journal of Geophysical Research, 104; 6603-6621.
- Meams, L. O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M. & Lai, M. (2003). *Guidelines for use of climate scenarios developed from Regional Climate Model experiments*. Data Distribution Centre of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Διαθέσιμο από: [http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm\\_no1\\_v1\\_10-2003.pdf](http://www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no1_v1_10-2003.pdf)
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J-F., Matsumoto, K., Montzka, A. S., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M. & D.P.P. van Vuuren (2011). *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*. Διαθέσιμο από: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Meteorological Office (1991). *The Meteorological Glossary*. Sixth Edition, London, HMSO.
- Neelin, J. D. (2011). *Climate Change and Climate Modeling*. Cambridge University Press.
- Oliver, J. E. (2008). *Encyclopedia of world climatology*. Springer Science & Business Media.

- Oliver-Solà, J., Armero, M., de Foix, B. M. & Rieradevall, J. (2013). *“Energy and environmental evaluation of municipal facilities: Case study in the province of Barcelona”*. Energy Policy 61, pp. 920-930.
- Papachristopoulou, K., Matsangouras, I. T. & Nastos, P. T. (2015). *Waterspout cloud top detection using MSG SEVIRI infrared brightness temperature over the northern Ionian Sea, Greece*. Department of Environmental Physics and Meteorology, Faculty of Physics, University of Athens, Athens, Greece, Laboratory of Climatology and Atmospheric Environment, Faculty of Geology and Geoenvironment, University of Athens, Hellenic National Meteorological Service, Athens pp.45-46.
- Papanastasiou, D. K. & Melas, D. (2009). *Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment*. International Journal of Climatology.
- Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N. & Abrams, M. (2017). *«Online global land surface temperature estimation from Landsat»*. in Remote Sensing, 2017.
- Parlange, M. B. & Katz, R. W. (2000). *An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables*. Journal of Applied Meteorology, 39,6107622.
- Prudhomme, C., Reynard, N. & Crooks, S. (2002). *Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?* Hydrological Processes, 16, 1137-1150.
- Reynard, N. S., Crooks, S. M. & Kay, AL. (2004). *Impact of climate change on floodflows in river catchments*. Defra Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme, Report W5B 01-050, Swindon, UK.
- Saha, S., Moorthi, S. 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.
- Santamouris, M., Paravantis, J., Founda, D., Kolokotsa, D., Michalakakou, P., Papadopoulos, A., Kontoulis, N., Tzavali, A., Stigka, E., Ioannidis, Z., Mehilli, A., Matthiessen, A. & Servou, E. (2013). *Financial crisis and energy consumption: a household survey in Greece*. Energy and Buildings 65, pp. 477-487.
- Seinfeld, H. J. & Pandis, N. S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics*. Second edition. Wiley-Interscience.

- Shaocai Yu, Brian Eder, Robin Dennis, Shao-Hang Chu & Stephen Schwartz (2006). *Statistics - Definitions and Issues, Deriving 'Unbiased Symmetric' Metrics*. Διαθέσιμο από: <https://www.bnl.gov/envsci/schwartz/pres/metrics.pdf>
- Skamarock, W. C, Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G, Huang, X. Y., Wang, W. & Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note, 2008*.
- Skoufias, E. (2012). *The Poverty and Welfare Impacts of Climate Change: Quantifying the Effects, Identifying the Adaptation Strategies*. Washington, D.C.: World Bank.
- Strangeways, IC. (2003). *Measuring the natural environment (2nd edn)*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer, NY.
- Tannehill, I. R. (1947). *Drought: Its causes and Effects*. Princeton NJ, Princeton University Press.
- Tarpley, J. D. (1979). *Estimating incident Solar Radiation at the surface from geostationary satellite data*. Journal of Applied Meteorology, 18:1172-1181.
- Tate, E. L. & Gustard, A. (2000). *Drought Definition: A Hydrological Perspective*, in J. V. Voght & F. Somma (eds), *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 23-48.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V. et al (2011). "RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100." Climatic Change.
- United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations (1992). Διαθέσιμο από: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- USEPA. Glossary of climate change terms. Διαθέσιμο από: [https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/glossary-climate-change-terms\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/glossary-climate-change-terms_.html)
- User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.5. Διαθέσιμο από: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)
- Vellinga, M. & Wood, R. A. (2002). *Global climate impacts of a collapse of the Atlantic thermohaline circulation*. Climatic Change, 54, 251-267.

Vogt, J. V. & Somma, F. (eds) (2000). *Drought and drought Mitigation in Europe*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

WHO (2018). *Ambient (outdoor) air quality and health*. Διαθέσιμο από: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Wilby, R. L. & Wigley, T.M.L. (2000). *Precipitation predictors for downscaling: observed and General Circulation Model relationships*. International Journal of Climatology, 20, 641-661.

Wilby, R. L., Tomlinson, O. J. & Dawson, C. W. (2003). *Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling*. Climate Research, 23, 183-194.

Wilhite, D. A., Hayes, M. J. & Svoboda, M. D. (2000). 'Drought Monitoring and Assessment: Status and Trends in the United States', in J. V. Voght and F. Somma (eds), *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 149-160.

Wilks, D. S. (1999). *Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator*. Climate Research, 11, 125-136.

WMO (1992). *Measurement of Temperature and Humidity* (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194, WMO-No. 759, Geneva.

World Meteorological Organization (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Updated in 2010)*. WMO-No. 8, Geneva.

## **Ιστοσελίδες**

<http://climate.nasa.gov>

<https://public.wmo.int/en>

<http://pubs.giss.nasa.gov/>

<https://www.giss.nasa.gov/about/>

[http://wwf.panda.org/what\\_we\\_do/footprint/climate\\_carbon\\_energy/](http://wwf.panda.org/what_we_do/footprint/climate_carbon_energy/)

<https://www.medecc.org/>

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

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

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

[http://www.emy.gr/emv/el/meteorology/meteorologia\\_arxaia\\_ellada?pageno=6](http://www.emy.gr/emv/el/meteorology/meteorologia_arxaia_ellada?pageno=6)

[https://ec.europa.eu/clima/change/causes\\_el](https://ec.europa.eu/clima/change/causes_el)

## 9 Παράρτημα

Κώδικας Matlab

```
K>> ncinfo('a20080212_2m')  
  
ans =  
  
  struct with fields:  
  
    Filename: 'E:\MCIP_OUTPUT_RCP85_PRESENT\2008\a20080212_2m'  
      Name: '/'  
Dimensions: [1×6 struct]  
  Variables: [1×25 struct]  
Attributes: [1×33 struct]  
    Groups: []  
    Format: 'classic'
```

```

K>> ncdisp('a20080212_2m')
Source:
      E:\MCIP_OUTPUT_RCP85_PRESENT\2008\a20080212_2m
Format:
      classic
Global Attributes:
      IOAPI_VERSION = '$Id: @(#) ioapi library version 3.0 OpenMP enabled $
      EXEC_ID       = '?????????????????'
      FTYPE         = 1
      CDATE         = 2017016
      CTIME         = 100235
      WDATE         = 2017016
      WTIME         = 100235
      SDATE         = 2008043
      STIME         = 0
      TSTEP         = 10000
      NTHIK         = 1
      NCOLS         = 262
      NROWS         = 163
      NLAYS         = 1
      NVAR          = 24
      GDTYP         = 2
      P_ALP         = 30
      P_BET         = 60

      P_GAM         = -32
      XCENT         = -32
      YCENT         = 45
      XORIG         = 1739686.75
      YORIG         = -631470.375
      XCELL         = 12000
      YCELL         = 12000
      VGTYP         = 7
      VGTOP         = 5000
      VGLVLS        = [1      0.993]
      GDNAM         = 'METCRO_CMAQ-test'
      UPNAM         = 'M3XTRACT'
      VAR-LIST      = 'PRSFC      PBL          HFX          QFX          TEMPG          TEMP2
      FILEDESC      = 'US EPA COMMUNITY MULTISCALE AIR QUALITY MODEL
      HISTORY       = ''

Dimensions:
      TSTEP         = 24      (UNLIMITED)
      DATE-TIME     = 2
      LAY           = 1
      VAR           = 24
      ROW           = 163
      COL           = 262

Variables:
      TFLAG
      Size:         2x24x24

```



```

TFLAG
  Size:          2x24x24
  Dimensions:    DATE-TIME,VAR,TSTEP
  Datatype:      int32
  Attributes:
    units        = '<YYYYDDD,HHMMSS>'
    long_name    = 'TFLAG          '
    var_desc     = 'Timestep-valid flags:  (1) YYYYDDD or (2) HHMMSS

PRSF
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single
  Attributes:
    long_name    = 'PRSF          '
    units        = 'Pascal        '
    var_desc     = 'surface pressure

PBL
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single
  Attributes:
    long_name    = 'PBL          '
    units        = 'M            '
    var_desc     = 'PBL height

HFX
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single
  Attributes:
    long_name    = 'HFX          '
    units        = 'WATTS/M**2    '
    var_desc     = 'sensible heat flux

QFX
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single
  Attributes:
    long_name    = 'QFX          '
    units        = 'WATTS/M**2    '
    var_desc     = 'latent heat flux

TEMPG
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single
  Attributes:
    long_name    = 'TEMPG         '
    units        = 'K            '
    var_desc     = 'skin temperature at ground

TEMP2
  Size:          262x163x1x24
  Dimensions:    COL,ROW,LAY,TSTEP
  Datatype:      single

```

```
Attributes:
    long_name = 'TEMP2          '
    units     = 'K              '
    var_desc  = 'temperature at 2 m

Q2
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'Q2            '
    units     = 'KG/KG        '
    var_desc  = 'mixing ratio at 2 m

WSPD10
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'WSPD10       '
    units     = 'M/S          '
    var_desc  = 'wind speed at 10 m

WDIR10
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'WDIR10       '

```

---

---

```
units      = 'DEGREES      '
var_desc   = 'wind direction at 10 m

GLW
Size:      262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
long_name  = 'GLW          '
units     = 'WATTS/M**2    '
var_desc   = 'longwave radiation at ground

GSW
Size:      262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
long_name  = 'GSW          '
units     = 'WATTS/M**2    '
var_desc   = 'solar radiation absorbed at ground

RGRND
Size:      262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
long_name  = 'RGRND        '
units     = 'WATTS/M**2    '
var_desc   = 'solar rad reaching sfc
```

---

RN

Size: 262x163x1x24  
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP  
Datatype: single  
Attributes:  
long\_name = 'RN'  
units = 'CM'  
var\_desc = 'nonconvec. pcpn per met TSTEP'

RC

Size: 262x163x1x24  
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP  
Datatype: single  
Attributes:  
long\_name = 'RC'  
units = 'CM'  
var\_desc = 'convective pcpn per met TSTEP'

CFRAC

Size: 262x163x1x24  
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP  
Datatype: single  
Attributes:  
long\_name = 'CFRAC'  
units = 'FRACTION'  
var\_desc = 'total cloud fraction'

CLDT

Size: 262x163x1x24

---

```
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
    long_name = 'CLDT          '
    units     = 'M            '
    var_desc  = 'cloud top layer height (m)

CLDB
Size:       262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
    long_name = 'CLDB          '
    units     = 'M            '
    var_desc  = 'cloud bottom layer height (m)

WBAR
Size:       262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
Attributes:
    long_name = 'WBAR          '
    units     = 'G/M**3       '
    var_desc  = 'avg. liquid water content of cloud

SNOCOV
Size:       262x163x1x24
Dimensions: COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:  single
```

---

```

Attributes:
    long_name = 'SNOCOV          '
    units     = 'DECIMAL        '
    var_desc  = 'snow cover

WR
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'WR              '
    units     = 'M                '
    var_desc  = 'canopy moisture content

SOIM1
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'SOIM1          '
    units     = 'M**3/M**3      '
    var_desc  = 'volumetric soil moisture in top cm

SOIM2
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'SOIM2          '
    units     = 'M**3/M**3      '
    var_desc  = 'volumetric soil moisture in top m

SOIT1
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'SOIT1          '
    units     = 'K                '
    var_desc  = 'soil temperature in top cm

SOIT2
Size:        262x163x1x24
Dimensions:  COL,ROW,LAY,TSTEP
Datatype:    single
Attributes:
    long_name = 'SOIT2          '
    units     = 'K                '
    var_desc  = 'soil temperature in top m

```