

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΑΣΚΟΣ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΛΑΣΚΟΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5292

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΨΗΛΗΣ
ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων

Πρόδρομος Ζάνης, Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ

© Κωνσταντίνος Λάσκος, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΗΝ
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΨΗΛΗΣ
ΑΝΑΛΥΣΗΣ – *Διπλωματική Εργασία*

© Konstantinos Laskos, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2022

All rights reserved.

FUTURE CLIMATE CHANGE PROJECTIONS FOR THE GREATER AREA OF
THESSALONIKI BASED ON HIGH RESOLUTION REGIONAL CLIMATE
MODEL SIMULATIONS – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος της Θεσσαλονίκης στη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα. Με τη χρήση της διαδικτυακής εφαρμογής DEAR-Clima έγινε εξαγωγή κλιματικών δεδομένων και δημιουργία χρονοσειρών για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης. Τα δεδομένα προέκυψαν από προσομοιώσεις περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) και παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (GCMs) του EURO-CORDEX που οδηγούνται από τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5. Η χωρική ανάλυση των προσομοιώσεων είναι 11°x11° και ο τομέας ολοκλήρωσής τους είναι ο τομέας EURO-CORDEX που καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης της Μεσογείου και ένα μέρος της Β. Αφρικής. Οι κλιματικές μεταβλητές που μελετήθηκαν είναι η μέση θερμοκρασία και ο υετός σε μηνιαία κλίμακα καθώς και οι κλιματικοί δείκτες των ζεστών ημερών, ημερών παγετού και συνεχόμενων ξηρών ημερών σε ετήσια κλίμακα. Για τη μελέτη της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και του μηνιαίου υετού χρησιμοποιήθηκαν οι χρονικές περίοδοι 2021-2050 και 2071-2100 με ιστορική περίοδο αναφοράς 1971-2000. Η μελέτη των κλιματικών δεικτών έγινε για τη χρονική περίοδο 1950-2100 με ιστορική περίοδο αναφοράς 1960-1990.

Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και για τα τρία κλιματικά σενάρια, με θερμότερη περίοδο την περίοδο 2071-2100. Οι μικρότερες διαφορές με την περίοδο αναφοράς προβλέπονται από το σενάριο RCP 2.6, ενώ οι υψηλότερες από το σενάριο RCP 8.5 με θερμότερο μήνα τον Αύγουστο. Τα δεδομένα υετού δείχνουν αύξηση σύμφωνα με το σενάριο RCP 2.6 με τις μεγαλύτερες τιμές να σημειώνονται το μήνα Ιούνιο, ενώ τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 προβλέπουν μικρές αλλαγές σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, με το σενάριο RCP 8.5 να προβλέπει σημαντική μείωση τους μήνες Μάιο και Νοέμβριο. Η μελέτη του κλιματικού δείκτη των ζεστών ημερών έδειξε αύξησή τους και στα τρία κλιματικά σενάρια, με υψηλότερες τιμές να προβλέπονται στο σενάριο RCP 8.5 στο τέλος του αιώνα. Οι μέρες παγετού παρουσιάζουν μείωση, με μέγιστη διαφορά -40 μέρες από την περίοδο αναφοράς, σύμφωνα με το RCP 8.5. Τέλος, αύξηση παρουσιάζουν και οι συνεχόμενες ξηρές ημέρες με μέγιστη τιμή +16 μέρες συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, σύμφωνα με το σενάριο RCP 8.5.

Η μείωση των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων, η εφαρμογή δέσμευσης άνθρακα καθώς και η ελάττωση της χρήσης γης είναι κάποια από τα μέτρα που συζητούνται προκειμένου να μετριαστεί η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή.

ABSTRACT

The purpose of this study is the projection of the future climate of the city of Thessaloniki during the 21st century. Using the online application DEAR-Clima, climatic data was extracted and used to create timeseries for the grid cell of Thessaloniki. The data used was created by various simulations by the regional and global climate models (RCMs & GCMs) of the EURO-Cordex, driven by the RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The simulations run at a spatial resolution of 11°x11 and their domain of integration is the EURO-CORDEX domain which covers the wider area of Europe including the Mediterranean and a part of N. Africa. Climate variables of mean temperature and precipitation were studied in a monthly basis and the climate indices of hot days, frost days and consecutive dry days were studied in a yearly basis. The time periods used in the analysis of monthly mean temperature and monthly precipitation are the 2021-2050 and 2071-2100 time periods with the historical reference period being 1971-2000. In the case of the climate indices, the time period used was the 1950-2100 time period with the historical reference period being the time period 1960-1990.

Results showed increase in mean monthly temperature for all three scenarios, with the warmest period being the 2071-2100 period. RCP 2.6 showed the smallest increase in mean temperature compared to the reference period, whilst the biggest increase was projected by the RCP 8.5 scenario with August being the warmest month. Results of monthly precipitation show increase in the case of the RCP 2.6 scenario, with the highest values occurring in June. Scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 predict little change compared to the reference period, with the RCP 8.5 scenario predicting a significant decrease in May and November. Studying the climate index of hot days showed increase in all three scenarios, with the highest values being projected by the RCP 8.5 scenario near the end of the century. Frost days show decrease, with the highest difference being -40 days compared to the values of the reference period according to RCP 8.5. Lastly, the index of consecutive dry days showed increase too, with the highest value being +16 days compared to the reference period, according to RCP 8.5 scenario.

Reduction of greenhouse gasses emissions, implementation of carbon capture and storage technologies as well as the reduction of land use are some of the measures being discussed in order to mitigate anthropogenic climate change.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
1.1 Καιρός – Κλίμα	9
1.2 Κλιματική αλλαγή	9
1.3 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής	10
1.4 Κλιματικά μοντέλα	11
1.4.1 Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General circulation models – GCMs)	12
1.4.2 Περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional climate models – RCMs)	13
1.5 Κλιματικά Σενάρια	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	17
2.1 Μεθοδολογία	17
2.2 Dear-Clima	17
2.3 Κλιματικά σενάρια RCP (Representative Concentration Pathways)	19
2.3.1 RCP 2.6	20
2.3.2 RCP 4.5	20
2.3.3 RCP 8.5	20
2.4 Κλιματικές μεταβλητές και κλιματικοί δείκτες	21
2.5 Εξαγωγή και επεξεργασία δεδομένων	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	24
3.1 Μέση Θερμοκρασία επιφάνειας (Mean Temperature 2m)	24
3.1.1 Χρονική περίοδος 2021-2050	24
3.1.2 Χρονική περίοδος 2071-2100	27
3.2 Υετός (Precipitation)	30
3.2.1 Χρονική περίοδος 2021-2050	30
3.2.2 Χρονική περίοδος 2071-2100	33
3.3 Ζεστές Μέρες (Hot days)	36
3.4 Ημέρες παγετού (Frost Days)	37
3.5 Συνεχόμενες ξηρές ημέρες	39
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	41
4.1 Δεδομένα Θερμοκρασίας	41
4.2 Δεδομένα Υετού	41
4.3 Δεδομένα Ζεστών ημερών	42

4.4	Δεδομένα Ημερών παγετού	42
4.5	Δεδομένα συνεχόμενων ξηρών ημερών.....	42
4.6	Το πιο αισιόδοξο σενάριο και τρόποι αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής...	42
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Καιρός – Κλίμα

Ο καιρός και το κλίμα έχουν πολύ σημαντική επίδραση στον άνθρωπο καθώς επηρεάζουν άμεσα αλλά και έμμεσα την καθημερινή του ζωή. Οι έννοιες όμως του καιρού και του κλίματος συχνά συγχέονται. Ο καιρός είναι η μεταβαλλόμενη κατάσταση της ατμόσφαιρας η οποία χαρακτηρίζεται από διάφορες μεταβλητές όπως είναι η θερμοκρασία, οι βροχοπτώσεις, ο άνεμος και άλλα στοιχεία καιρού, και μπορεί να αλλάξει μέσα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (από μερικές ώρες έως και μερικά λεπτά). Το κλίμα αναφέρεται στον μέσο καιρό που επικρατεί σε μια περιοχή σε μεγάλα χρονικά διαστήματα (30 έτη). Πιο αναλυτικά η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) δίνει τον εξής ορισμό για το κλίμα : Το κλίμα ως έννοια, ορίζεται ως ο μέσος καιρός ή πιο αναλυτικά, ως η στατιστική περιγραφή του μέσου όρου και της μεταβλητότητας του καιρού σε μια χρονική περίοδο , που κυμαίνεται από μερικούς μήνες ως χιλιάδες χρόνια. Η κλασσική περίοδος για τον υπολογισμό του μέσου όρου είναι 30 χρόνια, όπως ορίζει ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization – WMO). Το κλίμα της Γης καθορίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των βασικών συνιστωσών του πλανήτη που είναι η λιθόσφαιρα, η βιόσφαιρα, η ατμόσφαιρα, η κρυόσφαιρα και η υγρόσφαιρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κλίμα να διαφέρει από τόπο σε τόπο καθώς εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, όπως είναι : το γεωγραφικό πλάτος, η ηλιακή ακτινοβολία, η κατανομή ξηράς-θάλασσας, τα ωκεάνια ρεύματα καθώς και τα συστήματα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (άνεμοι).

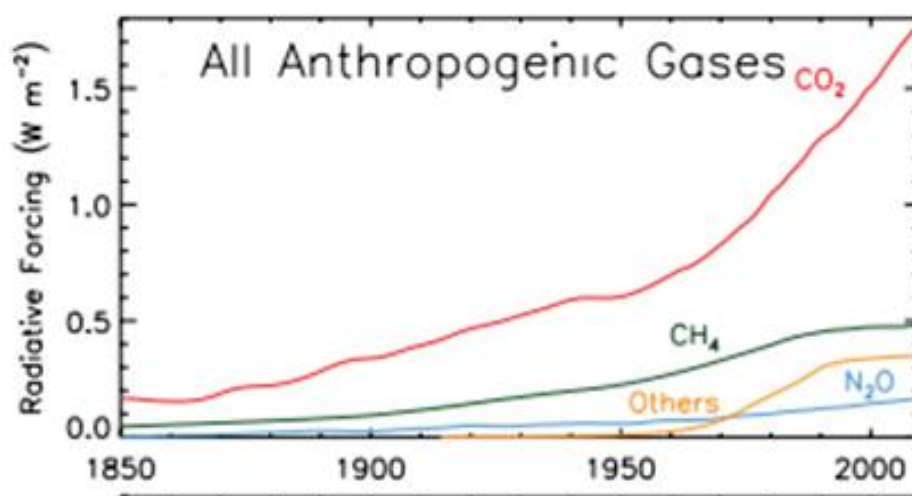
1.2 Κλιματική αλλαγή

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που αφορούν τον πλανήτη μας τα τελευταία χρόνια είναι η κλιματική αλλαγή.

Ως κλιματική μεταβλητότητα χαρακτηρίζεται η διακύμανση των μέσων τιμών κλιματικών παραμέτρων σε όλες τις χωρικές και χρονικές κλίμακες πέρα από τα τυπικά συστήματα καιρού. Μεταβλητότητα μπορεί να υπάρξει είτε λόγω των φυσικών εσωτερικών διεργασιών στο κλιματικό σύστημα (εσωτερική κλιματική μεταβλητότητα) είτε λόγω φυσικών ή ανθρωπογενών εξωτερικών εξαναγκαστικών μηχανισμών (εξωτερική κλιματική μεταβλητότητα). (Katsafados, P., & Mavromatidis, I., 2015).

Ως κλιματική αλλαγή ορίζεται μια στατιστικά σημαντική διακύμανση στη μέση κατάσταση του κλίματος ή στη μεταβλητότητά του, η οποία διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως δεκαετίες ή περισσότερο. Το κλίμα αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα το οποίο μεταβάλλεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Κατά την πάροδο του γεωλογικού χρόνου το κλίμα της Γης έχει αλλάξει πολλές φορές λόγω φυσικών αιτιών όπως είναι η ηλιακή δραστηριότητα, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, αλλαγές στην τροχιά της Γης και οι μετακινήσεις των τεκτονικών πλακών. Όμως, τα τελευταία χρόνια έχει

γίνει αποδεκτό από την επιστημονική κοινότητα ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι το κύριο αίτιο μεταβολής του κλίματος στον πλανήτη μας. Από την βιομηχανική επανάσταση και μετά έχει παρατηρηθεί ραγδαία αύξηση στις ανθρωπογενείς εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , CFCs), καθώς σύμφωνα με την IPCC οι συγκεντρώσεις των αερίων αυτών είναι οι μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί τα τελευταία 800.000 χρόνια. Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού που οδηγεί στην ανεξέλεγκτη βιομηχανική εκμετάλλευση και χρήση ορυκτών καυσίμων έχουν ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου που σημαίνει αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.



Εικόνα 1.1 : Διάγραμμα απεικόνισης της μεταβολής του ισοζυγίου ακτινοβολίας (radiative forcing) λόγω των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες από το 1850 και έπειτα (πηγή : IPCC 2013).

1.3 Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής

Όπως προαναφέρθηκε, το κλίμα είναι ένα δυναμικό σύστημα το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς σε βάθος χρόνου. Μελέτες έδειξαν ότι από τη δεκαετία του 1950 και έπειτα, οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν είναι πρωτοφανείς. Κάθε μία από τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ήταν διαδοχικά θερμότερη από οποιαδήποτε προηγούμενη δεκαετία από το 1850. Η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μια πληθώρα αλλαγών τόσο στο περιβάλλον και τα οικοσυστήματα όσο και στον άνθρωπο και την υγεία του. Σύμφωνα με την έκθεση αξιολόγησης της IPCC πάνω στην κλιματική αλλαγή το 2014, οι ωκεανοί έχουν θερμανθεί λόγω της αυξημένης περιεκτικότητάς τους σε CO_2 με αποτέλεσμα τη μείωση του pH τους και την όξυνση των νερών, η έκταση των παγετώνων κυρίως στο βόρειο ημισφαίριο έχει ελαττωθεί σημαντικά και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας συνεχίζει να αυξάνει ραγδαία καθώς οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων αυξάνουν, κυρίως λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει και την εμφάνιση κάποιων φυσικών καιρικών φαινομένων όπως είναι οι μουσώνες, οι τροπικοί κυκλώνες και το φαινόμενο El Niño,

φαινόμενα που έχουν άμεση επίδραση στη ζωή του ανθρώπου, καθώς επηρεάζει και τον εποχικό κύκλο. Λόγω της εκτιμώμενης αύξησης της θερμοκρασίας αναμένεται συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως είναι οι πλημμύρες, οι πυρκαγιές, η ξηρασία, καθώς και εκτεταμένα φαινόμενα καύσωνα. Οι επιπτώσεις των αλλαγών επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα φυσικά οικοσυστήματα, καθώς απειλούν τη βιοποικιλότητα τους, οδηγώντας πολλά είδη οργανισμών στην εξαφάνιση, όμως επηρεάζουν και σε μεγάλο βαθμό τη ζωή του ανθρώπου. Η κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, καθώς οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προκαλούν πληθώρα νοσημάτων. Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας το 2005 σημειώθηκαν 2,9 εκατομμύρια πρόωροι θάνατοι οφειλόμενοι σε καρδιαγγειακά και αναπνευστικά νοσήματα λόγω αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ υπολογίζεται ότι μεταξύ του 2030 και 2050 σαν άμεση συνέπεια της κλιματικής αλλαγής θα προκληθούν 250.000 επιπλέον θάνατοι ετησίως, οφειλόμενοι σε υποσιτισμό, ελονοσία, διαρροϊκές νόσους και θερμικό στρες. Εκτός από την υγεία του ανθρώπου, επηρεάζεται άμεσα και η οικονομία καθώς η ξηρασία, η έλλειψη συχνών βροχοπτώσεων και οι εκτεταμένοι καύσωνες επιδρούν αρνητικά στους τομείς της γεωργίας και της κτηνοτροφίας, ενώ με την αλλαγή του εποχικού κύκλου και την εμφάνιση ακραίων θερμοκρασιών πλήττεται και ο τομέας του τουρισμού.

1.4 Κλιματικά μοντέλα

Οι ραγδαίες επιπτώσεις που επιφέρει η κλιματική αλλαγή καθιστούν απαραίτητη την πρόβλεψη του μελλοντικού κλίματος και των αλλαγών που θα συμβούν προκειμένου να ληφθούν εγκαίρως μέτρα ώστε οι συνέπειες της μεταβολής του κλίματος να είναι όσο το δυνατόν πιο ήπιες τόσο στο φυσικό, όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Για το λόγο αυτό, οι επιστήμονες, το 1960, επινόησαν υπολογιστικά αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης του κλίματος που ονομάζονται κλιματικά μοντέλα. Αυτά αποτελούν πολύ σημαντικά εργαλεία για τη βελτίωση της κατανόησης και την προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς του κλίματος σε εποχιακές, ετήσιες, δεκαετείς και εκατονταετείς χρονικές κλίμακες. Τα αριθμητικά κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν μαθηματικές εξισώσεις που στηρίζονται πάνω σε νόμους της φυσικής και της χημείας με σκοπό την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ατμόσφαιρας με την κρυόσφαιρα την ξηρά και τον ωκεανό.

Λόγω της πολυπλοκότητας του κλιματικού συστήματος και του περιορισμού της υπολογιστικής ισχύος, ένα μοντέλο δεν μπορεί να υπολογίσει όλες αυτές τις διαδικασίες για κάθε κυβικό μέτρο του κλιματικού συστήματος. Για αυτό τον λόγο, ένα κλιματικό μοντέλο χωρίζει τη Γη σε μια σειρά από κουτιά ή «κελιά πλέγματος» (grid cells). Το μέγεθος των κελιών πλέγματος σε ένα μοντέλο είναι γνωστό και ως χωρική ανάλυση (spatial resolution). Όσο υψηλότερη ανάλυση έχει ένα κλιματικό μοντέλο, τόσο περισσότερα και μικρότερα κελιά πλέγματος θα διαθέτει, με αποτέλεσμα να δίνει πιο ακριβείς πληροφορίες για το κλίμα της περιοχής ολοκλήρωσης με κόστος το χρόνο υπολογισμού λόγω του μεγαλύτερου αριθμού υπολογισμών που απαιτούνται. Από τα παραπάνω είναι σαφές πως η αξιοποίηση των κλιματικών μοντέλων απαιτεί τη χρήση υπερυπολογιστών. Χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας, προστίθενται όλο και παραπάνω δεδομένα με σκοπό την ακριβέστερη προσομοίωση του κλίματος. Ανάλογα

με την περιοχή ολοκλήρωσης, τα κλιματικά μοντέλα χωρίζονται στα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models–GCM) και στα περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional Circulation Models–RCM). Η περιοχή ολοκλήρωσης των GCM είναι όλη η Γη ενώ στα RCM ορίζεται συγκεκριμένη περιοχή μικρότερης έκτασης.



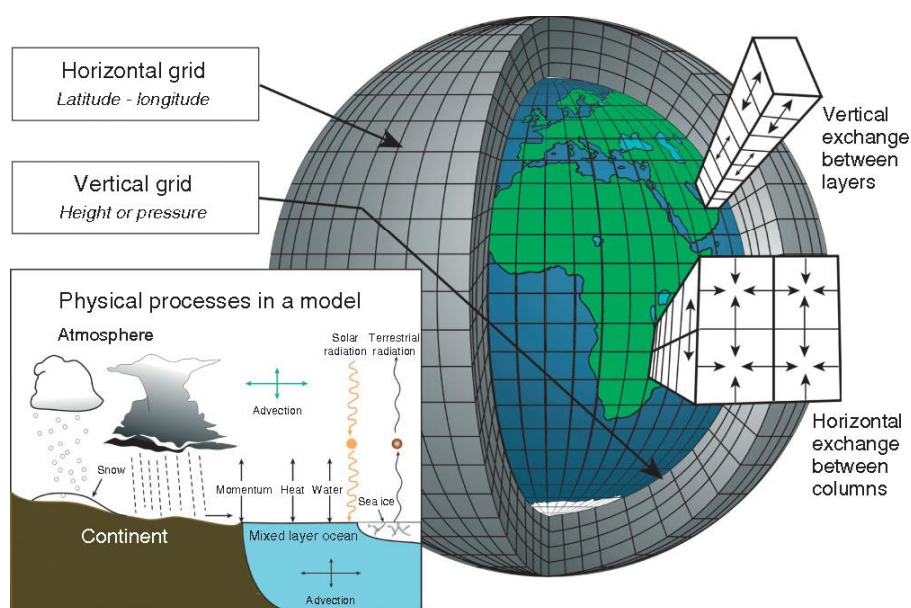
Εικόνα 1.2 : Υπερυπολογιστής που βρίσκεται στο Κέντρο Κλιματικής Προσομοίωσης της NASA (NCCS) (πηγή <https://svs.gsfc.nasa.gov/Gallery/NCCS.html>)

1.4.1 Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General circulation models – GCMs)

Ο όρος «πλανητικά κλιματικά μοντέλα» δόθηκε επειδή ένας από τους πρώτους στόχους αυτών των μοντέλων είναι η προσομοίωση της τρισδιάστατης ατμοσφαιρικής ροής και των θαλάσσιων ρευμάτων (Goosse H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutreand V. Zupz, 2010) ολόκληρου του πλανήτη. Στο παρελθόν γινόταν η χρήση πιο απλοϊκών μοντέλων τα οποία προσομοίωναν το κλίμα της Γης σύμφωνα με μία παράμετρο, όπως είναι τα Ατμοσφαιρικά Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Atmospheric GCMs) και τα Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Oceanic GCMs).

Σήμερα επικρατεί η χρήση των Συζευγμένων Μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας Ατμόσφαιρας–Ωκεανού (AOGCMs) τα οποία αποτελούνται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο που συνδυάζεται με ένα ωκεάνιο. Η βασική τους λειτουργία είναι η κατανόηση της δυναμικής των φυσικών στοιχείων του κλίματος (ατμόσφαιρα, ωκεανός, παγοκάλυψη ξηράς και θάλασσας) και η δημιουργία προβλέψεων που βασίζονται σε μελλοντικές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων και αεροζόλ (IPCC 2013, Chapter 9). Στα AOGCMs η Γη διαιρείται σε κυψελίδες πλέγματος τριών διαστάσεων και οι μαθηματικές εξισώσεις επιλύονται στις επιμέρους κυψελίδες. Σε κάθε κυψελίδα υπολογίζονται πολλές κλιματικές διεργασίες όπως είναι: η κίνηση του αέρα, το ενεργειακό ισοζύγιο ηλιακής και γήινης ακτινοβολίας, η μεταφορά θερμότητας, η υγρασία κ.α. Η χωρική ανάλυση (spatial resolution) των AOGCMs κυμαίνεται από 250 έως 600 χιλιόμετρα οριζόντια ανάλυση και 10 με 20 επίπεδα κατακόρυφη ανάλυση στην ατμόσφαιρα και κάποιες φορές έως 30 επίπεδα στους ωκεανούς (IPCC 2013).

Λόγω της πολυπλοκότητας των διαδικασιών ή της χαμηλής χωρικής ανάλυσης παρά τη συνεχή βελτίωσή της, υπάρχουν διαδικασίες οι οποίες δεν μπορούν να αναλυθούν από το μοντέλο. Τέτοιες διαδικασίες είναι για παράδειγμα οι αναταράξεις στα οριακά ατμοσφαιρικά και ωκεάνια στρώματα, ο υετός, τα νέφη, αλληλεπιδράσεις της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας με τοπογραφία μικρότερης κλίμακας κ.α. (Goosse και συν., 2010). Για το λόγο αυτό εισάγονται παραμετροποιήσεις, δηλαδή απλοποιημένες διαδικασίες που αντικαθιστούν τις πραγματικές διεργασίες που συμβαίνουν σε μικρότερη κλίμακα. Η διαδικασία της παραμετροποίησης επιτρέπει στα κλιματικά μοντέλα να δίνουν απλούστερα αποτελέσματα σε μικρότερες χωρικές αναλύσεις, είναι όμως και η κυριότερη πηγή σφαλμάτων.



Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση της διαίρεσης της Γης σε τρισδιάστατες κυψελίδες και κλιματικές διεργασίες που περιλαμβάνονται σε ένα κλιματικό μοντέλο (πηγή: History of climate modeling, P.N. Edwards 2011)

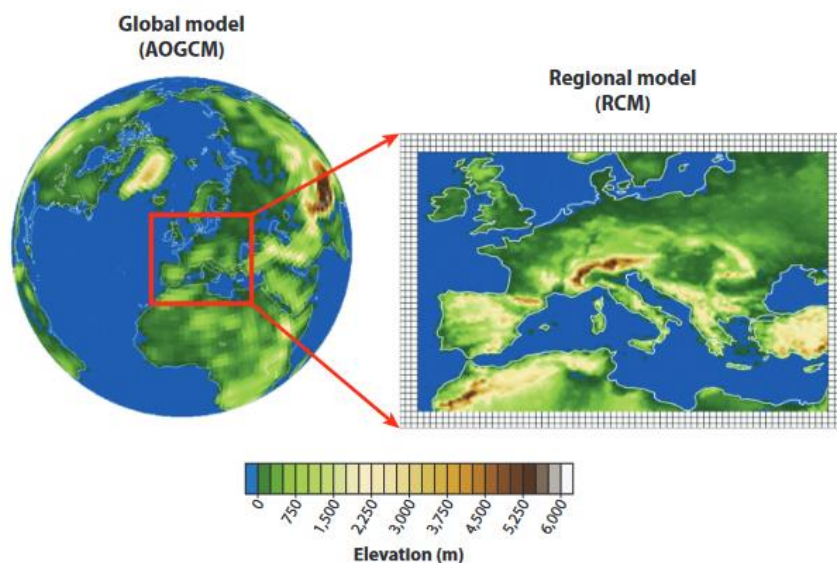
1.4.2 Περιοχικά κλιματικά μοντέλα (Regional climate models – RCMs)

Οι επιστήμονες θέλησαν να δώσουν πιο λεπτομερή αποτελέσματα για μικρότερες περιοχές, σε σχέση με αυτά που παρείχαν τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα, για αυτό χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας (dynamical downscaling) και κατέληξαν στη δημιουργία των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCM). Τα RCMs κάνουν δυναμικό υποβιβασμό κλίμακας των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων ή δεδομένων re-analysis που προκύπτουν από παγκόσμια μοντέλα και τεχνικές αφομοίωσης (assimilation) παρατηρήσεων. Στην ουσία είναι μοντέλα μεγάλης ανάλυσης, τα οποία βρίσκονται ένθετα μέσα στα GCM. Η ανάλυση πλέγματος είναι συνήθως από 50 έως 10 χιλιόμετρα όμως σε μια κάποια μη-υδροστατικά μοντέλα γίνονται προσομοιώσεις και σε υψηλότερες αναλύσεις λίγων χιλιομέτρων. Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία των περιοχικών κλιματικών μοντέλων ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980.

Η Αμερικάνικη Μετεωρολογική Εταιρία (American Meteorological Society - AMS) ορίζει ως περιοχικό κλιματικό μοντέλο (RCM) ένα μοντέλο που δίνει μια αριθμητική κλιματική πρόβλεψη η οποία αρχικοποιείται είτε από ένα σύνολο δεδομένων παρατήρησης είτε από τα εξαγόμενα αποτελέσματα (output) ενός μοντέλου γενικής κυκλοφορίας (GCM). Τα περιοχικά κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν τις διεργασίες της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας του εδάφους, ενώ υπολογίζουν τοπογραφικά δεδομένα υψηλής ευκρίνειας, αντιθέσεις ξηράς-θάλασσας, επιφανειακά χαρακτηριστικά και άλλα στοιχεία του συστήματος της Γης (Francisco J. Tapiador και συν., 2019).

Τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της (5ης) Έκθεσης Αξιολόγησης (AR5) αλλά και της τελευταίας (6ης) Έκθεσης Αξιολόγησης (AR6) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) έχουν μικρή χωρική ανάλυση και δεν μπορούν να προσομοιώσουν την επίδραση τοπικών χαρακτηριστικών (π.χ. τοπογραφία, τοπικές εκπομπές αερίων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων) στο κλίμα μιας περιοχής. Η χρήση των RCMs κρίνεται απαραίτητη σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως η χώρα μας που παρουσιάζει έντονη εναλλαγή ορεινών και πεδινών περιοχών, εκτεταμένη ακτογραμμή και πολλά μικρά νησιά. Για να υποστηριχθούν οι τοπικές/περιφερειακές μελέτες επιπτώσεων στην κλιματική αλλαγή, καθώς και οι στρατηγικές περιφερειακής προσαρμογής και μετριασμού, είναι απαραίτητη η χρήση μελλοντικών κλιματικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης από RCMs.

Λόγω της μικρότερης περιοχής μελέτης, τα RCM είναι ταχύτερα, δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα σε περιοχική κλίμακα από τα GCM, υπόκεινται όμως και αυτά σε διάφορους περιορισμούς. Τα RCM λειτουργούν μέσα σε ένα ή σε μερικά GCM, με αποτέλεσμα να αναπαράγονται σφάλματα που βρίσκονται στο GCM. Χρησιμοποιούν και αυτά τις δικές τους παραμετροποιήσεις που εισάγουν επιπλέον αβεβαιότητες και σφάλματα στα αποτελέσματα του μοντέλου. Πολλές μελέτες μάλιστα έδειξαν ότι πολλά RCM τα οποία αντλούν πληροφορίες από ένα μόνο GCM, έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα για την ίδια περιοχή (Giorgi, 2019). Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητη η σωστή ρύθμιση του μοντέλου και η εκτέλεση δοκιμαστικών προσομοιώσεων που έχουν σκοπό την βελτιστοποίηση του μοντέλου.



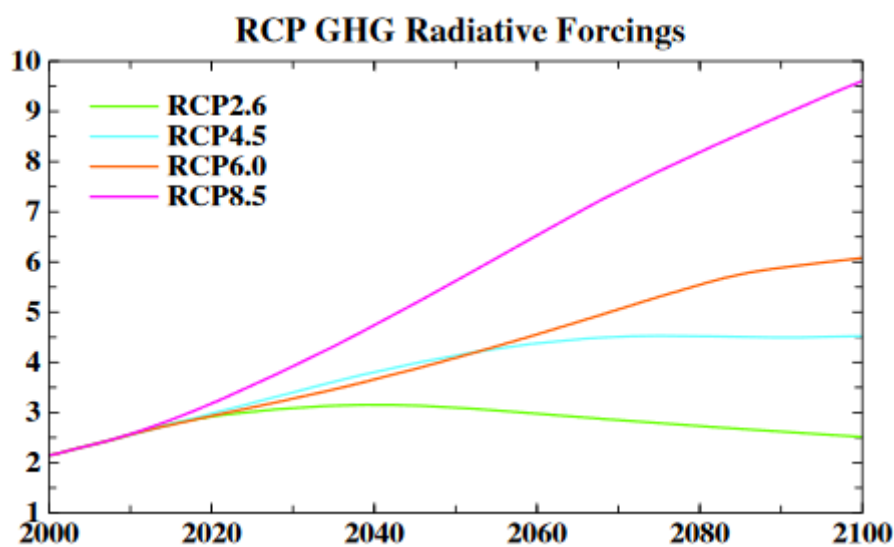
Εικόνα 1.4: Παράδειγμα χρήσης Περιφερειακού Κλιματικού Μοντέλου μέσα σε Παγκόσμιο Κλιματικό Μοντέλο (πηγή: Giorgi and Gutowski, Regional Downscaling and the Cordex Initiative, 2015).

1.5 Κλιματικά Σενάρια

Λόγω δυσκολίας της ακριβούς πρόβλεψης του μελλοντικού κλίματος καθώς και της μεταβολής των παραγόντων που το καθορίζουν, οι επιστήμονες εισήγαγαν την έννοια των κλιματικών σεναρίων. Ως κλιματικό σενάριο ορίζεται μια αληθοφανής αναπαράσταση του μελλοντικού κλίματος, που κατασκευάζεται με κύριο στόχο την εκτίμηση των επιπτώσεων που έχουν οι ανθρωπογενείς επιδράσεις στο μελλοντικό κλίμα. Τα κοινωνικοοικονομικά σενάρια και τα σενάρια εκπομπών χρησιμοποιούνται στην κλιματική έρευνα για να παρέχουν εύλογες περιγραφές για το πώς μπορεί να εξελιχθεί το μέλλον σε σχέση με μια σειρά μεταβλητών, όπως η κοινωνικοοικονομική αλλαγή, η τεχνολογική αλλαγή, η ενέργεια και η χρήση γης και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ατμοσφαιρικών ρύπων (Detlef P. vanVuuren και συν., 2011). Τα κλιματικά σενάρια χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων προκειμένου να προσομοιώσουν τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες που θα επικρατούν. Τα πρώτα κλιματικά σενάρια εισήχθησαν από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) το 1990 και 1992. Αυτά αποτελούσαν μακροπρόθεσμα σενάρια εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της πιθανής κλιματικής αλλαγής, τις επιπτώσεις που θα επιφέρει καθώς και τις επιλογές για το μετριασμό των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων. Στην (3^η) Έκθεση Αξιολόγησης (AR3) και (4^η) Έκθεση Αξιολόγησης (AR4), η IPCC χρησιμοποίησε μια οικογένεια κλιματικών σεναρίων γνωστά και ως SRES (Special Report on Emission Scenarios – Ειδική Έκθεση για τα Σενάρια Εκπομπών). Τα σενάρια SRES αποτελούν μια ομάδα τεσσάρων κλιματικών σεναρίων και χρησιμοποιούν κοινωνικο-οικονομικές «ιστορίες» από τις οποίες εκτιμώνται μελλοντικές εκπομπές και κλιματικές επιπτώσεις.

Το 2014 στην (5^η) Έκθεση Αξιολόγησης (AR5), η IPCC εισήγαγε μια νέα οικογένεια κλιματικών σεναρίων, τα RCPs (Representative Concentration Pathways) η οποία

αντικατέστησε τα SRES σενάρια. Τα RCPs αποτελούνται από τέσσερα κλιματικά σενάρια (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5) τα οποία περιγράφουν τις συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων, ατμοσφαιρικών ρύπων και αεροζόλ που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες μέχρι το 2100, χρησιμοποιώντας το «radiative forcing». Ως radiative forcing ορίζεται η διαφορά στο ισοζύγιο της ενέργειας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και της ποσότητας που εξέρχεται στο διάστημα, σε σύγκριση με την περίοδο πριν τη βιομηχανική επανάσταση και μετριέται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Τα τέσσερα σενάρια RCP αντικατοπτρίζουν το radiative forcing των θερμοκηπικών αερίων του έτους 2100 από 2.6 W/m^2 (RCP 2.6) έως 8.5 W/m^2 (RCP 8.5). Η βασική τους διαφορά με τα σενάρια SRES είναι ότι τα RCP δε λαμβάνουν υπ' όψη τους κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες.



Εικόνα 1.5 : Radiative forcing θερμοκηπικών αερίων μέχρι το έτος 2100 σύμφωνα με τα σενάρια RCP (πηγή : Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2 , L. Nazarenko και συν., 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Μεθοδολογία

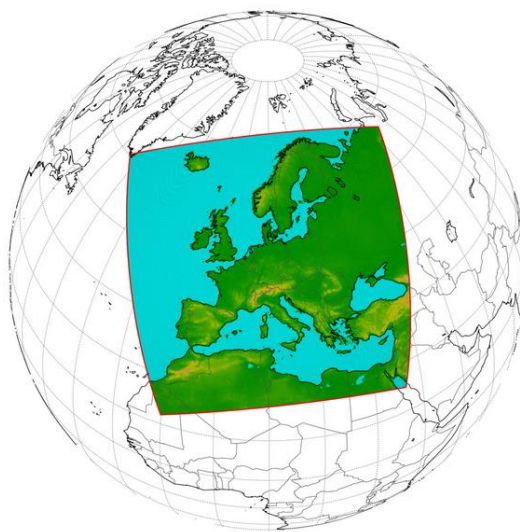
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και αναλύθηκαν οι βασικές κλιματικές μεταβλητές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας σε ύψος δύο (2) μέτρων πάνω από το έδαφος (Mean Monthly Temperature 2m) και του μηνιαίου υετού (Monthly Precipitation) καθώς και οι κλιματικοί δείκτες των ζεστών ημερών (Hot days), των ημερών παγετού (Frost days) καθώς και των συνεχόμενων ξηρών ημερών (Consecutive Dry days) ετησίως, με σκοπό την προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Για τη μελέτη και την ανάλυση των μεταβλητών της μηνιαίας μέσης θερμοκρασίας (Monthly Mean Temperature) και του μηνιαίου υετού (Monthly Precipitation) χρησιμοποιήθηκαν τρεις τριακονταετείς περίοδοι. Η περίοδος αναφοράς 1971-2000 η οποία ονομάζεται ιστορική περίοδος (historic period) και αντιπροσωπεύει το παρόν κλίμα, η περίοδος 2021-2050 η οποία αντιπροσωπεύει το εγγύς μέλλον (near future period) και η περίοδος 2071-2100 η οποία αντιπροσωπεύει το απώτερο μέλλον (far future period). Για την ανάλυση των κλιματικών δεικτών των ζεστών ημερών, ημερών παγετού και συνεχόμενων ξηρών ημερών χρησιμοποιήθηκε ως περίοδος αναφοράς η περίοδος 1960-1990 και τα δεδομένα παρουσιάζονται ετησίως από το έτος 1950 έως το 2100 σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς. Η ιστορική περίοδος αναφέρεται στη χρονική περίοδο 1950-2004, ενώ η μελλοντική περίοδος αναφέρεται στη χρονική περίοδο 2005-2100. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση διάφορων περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) που καθοδηγούνται από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs) στα πλαίσια του EURO-CORDEX (πίνακας 2.1). Η ιστορική περίοδος οδηγείται από τα ιστορικά κλιματικά σενάρια, ενώ οι μελλοντικές περίοδοι οδηγούνται από τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Για την εξαγωγή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή εφαρμογή Dear-Clima (<http://meteo3.geo.auth.gr:3838/>).

2.2 Dear-Clima

Στα πλαίσια του έργου GEO-CRADLE, που στοχεύει στο συντονισμό και την ενοποίηση των σύγχρονων δραστηριοτήτων παρατήρησης της Γης στις περιοχές της Βόρειας Αφρικής, της Μέσης Ανατολής και των Βαλκανίων, αναπτύχθηκε η διαδικτυακή εφαρμογή εξαγωγής δεδομένων περιφερειακού κλίματος DEAR-Clima (Data Extraction Application for Regional Climate). Η εφαρμογή DEAR-Clima αποτελεί ένα φιλικό προς το χρήστη διαδραστικό εργαλείο εξαγωγής κλιματικών δεδομένων και χρονοσειρών των βασικών κλιματικών μεταβλητών και δεικτών (Zanis και συν., 2018). Ο διακομιστής βρίσκεται στο Τμήμα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας της Γεωλογικής σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Τα δεδομένα είναι αποτέλεσμα αριθμητικών προσομοιώσεων περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCM) υψηλής χωρικής ανάλυσης τα οποία λειτουργούν στα πλαίσια διάφορων παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (GCM) από το ερευνητικό πρόγραμμα CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment)

(Πίνακας 1). Το CORDEX είναι ένα πρόγραμμα που χρηματοδοτείται από το Παγκόσμιο Πρόγραμμα Έρευνας για το Κλίμα (World Climate Research Program – WRCP) με στόχο τη δημιουργία ενός διεθνώς συντονισμένου πλαισίου για την παραγωγή βελτιωμένων περιοχικών προβλέψεων για την κλιματική αλλαγή για όλες τις περιοχές του πλανήτη. Οι προσομοιώσεις της εφαρμογής DEAR-Clima έχουν ως περιοχή ολοκλήρωσης το EURO-CORDEX που καλύπτει την ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης της Μεσογείου και ένα μέρος της Β. Αφρικής (Εικόνα 2.1). Η χωρική ανάλυση των προσομοιώσεων CORDEX που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εφαρμογή είναι $11^{\circ} \times 11^{\circ}$. Το κατά προσέγγιση κέντρο των ορίων είναι 27°B - 72°B και 22°Δ - 45°Α , ενώ το κεντρικό σημείο του τομέα βρίσκεται $49,68^{\circ}\text{B}$ και $9,75^{\circ}\text{Α}$ (Εικόνα 2.1). Η ιστορική περίοδος κάθε προσομοίωσης αναφέρεται στην περίοδο 1950-2005, ενώ η μελλοντική περίοδος είναι η 2006-2100 και βρίσκεται υπό την επίδραση των τριών κλιματικών σεναρίων RCP2.6, RCP4.5 και RCP8.5. Η ιστορική περίοδος αναφοράς για όλες τις προσομοιώσεις ορίζεται ως 1960-1990.

Μέσω της εφαρμογής DEAR-Clima ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προβάλλει προσομοιώσεις πολλών κλιματικών μεταβλητών και κλιματικών δεικτών σε ετήσια, μηνιαία ή ημερήσια χρονική κλίμακα. Επιπλέον η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αποκτήσει πρόσβαση στα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων των κλιματικών μοντέλων.



Εικόνα 2.1 : Περιοχή ολοκλήρωσης του EURO-CORDEX (πηγή : διαδικτυακή εφαρμογή DEAR-Clima <http://meteo3.geo.auth.gr:3838/>)

Scenario	Period	RCM	GCM
historical	195001-200512	CLMcom-CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
historical	195001-200512	CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
historical	197001-200512	SMHI-RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
historical	195001-200512	KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH
historical	195101-200512	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-IPSL-CM5A-MR
historical	197001-200512	SMHI-RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR
historical	194912-200512	CLMcom-CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES
historical	197001-200512	SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM2-ES
historical	194912-200512	CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
historical	195002-200512	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR
rcp26	200601-210012	CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
rcp26	200601-210012	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR
rcp45	200601-210012	CLMcom-CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
rcp45	200601-210012	CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
rcp45	200601-210012	KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH
rcp45	200601-210012	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-IPSL-CM5A-MR
rcp45	200601-210012	SMHI-RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR
rcp45	200601-209911	CLMcom-CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES
rcp45	200601-209911	SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM2-ES
rcp45	200601-210012	CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
rcp45	200601-210012	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR
rcp85	200601-210012	CLMcom-CCLM4-8-17	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
rcp85	200601-210012	CNRM-ALADIN53	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
rcp85	200601-210012	KNMI-RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH
rcp85	200601-210012	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-IPSL-CM5A-MR
rcp85	200601-210012	SMHI-RCA4	IPSL-IPSL-CM5A-MR
rcp85	200601-209912	CLMcom-CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES
rcp85	200601-209912	SMHI-RCA4	MOHC-HadGEM2-ES
rcp85	200601-210012	CLMcom-CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
rcp85	200601-210012	MPI-CSC-REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR

Πίνακας 2.1 : Περιοχικά (RCM) και Παγκόσμια (GCM) κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν από το EURO-CORDEX (πηγή : διαδικτυακή εφαρμογή DEAR-Clima, <http://meteo3.geo.auth.gr:3838>)

2.3 Κλιματικά σενάρια RCP (Representative Concentration Pathways)

Όπως προαναφέρθηκε τα κλιματικά σενάρια RCP είναι χωροχρονικά εξαρτώμενες σειρές από τις συγκεντρώσεις θερμοκηπικών αερίων, αεροζόλ και ρύπων που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αποτελούνται από τέσσερα διαφορετικά κλιματικά σενάρια : ένα αυστηρό σενάριο μετριασμού (RCP 2.6), δύο ενδιάμεσα σενάρια (RCP 4.5 και RCP 6.0) και ένα σενάριο με πολύ υψηλές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων (RCP 8.5) (IPCC, 2014). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 για τα οποία θα γίνει μια σύντομη αναφορά παρακάτω.

2.3.1 RCP 2.6

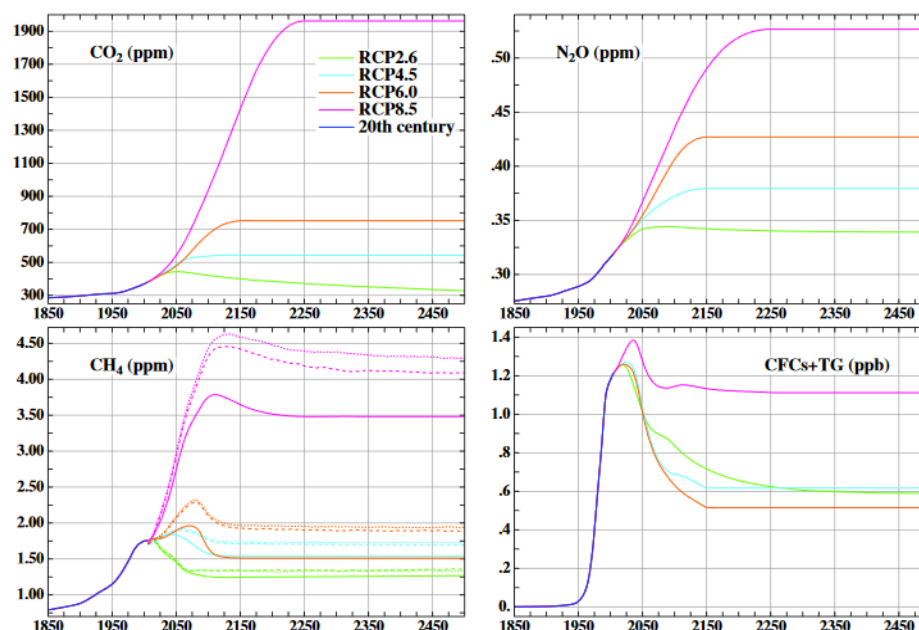
Το σενάριο RCP 2.6 αντιπροσωπεύει το πιο «αισιόδοξο» κλιματικό σενάριο καθώς ο στόχος του είναι ο μετριασμός των εκπομπών των αέριων ρύπων και θερμοκηπικών αερίων με σκοπό να περιοριστεί η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας στους 2°C μέχρι το έτος 2100. Εκτιμάται ότι το radiative forcing θα φτάσει τα 3.1 W/m² μέχρι τα μέσα του αιώνα και θα μειωθεί στα 2.6 W/m² μέχρι το 2100. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος είναι απαραίτητο να μειωθούν οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων κατά 70% από το έτος 2010 έως το 2100, να εφαρμοστούν αλλαγές στην πολιτική παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιώντας εκπεμπόμενα αέρια χωρίς CO₂ και να γίνει χρήση βιοενέργειας, η οποία θα έχει άμεση επίπτωση στη χρήση γης παγκοσμίως. (Vuuren και συν., 2011)

2.3.2 RCP 4.5

Το σενάριο RCP 4.5 περιγράφει ένα μέλλον στο οποίο το radiative forcing δε θα ξεπεράσει 4.5 W/m². Η επίτευξη του στόχου αυτού απαιτεί περιορισμό των εκπομπών, που οδηγεί σε αλλαγές στο ενεργειακό σύστημα, συμπεριλαμβανομένης της στροφής στην ηλεκτρική ενέργεια, στις ενεργειακές τεχνολογίες χαμηλότερων εκπομπών και στην ανάπτυξη τεχνολογίας δέσμευσης άνθρακα και γεωλογικής αποθήκευσης (Allison M. Thomson και συν., 2011). Παρόλο που το RCP 4.5 προβλέπει τη σταθεροποίηση του radiative forcing στα 4.5 W/m², οι εκπομπές των αέριων ρύπων καθώς και οι συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα δε παραμένουν σταθερές. Το συγκεκριμένο σενάριο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους και χρησιμοποιεί όλες τις διαθέσιμες τεχνολογικές επιλογές που μπορούν να συμβάλουν στο μετριασμό των εκπομπών.

2.3.3 RCP 8.5

Το RCP 8.5 συχνά αναφέρεται και ως «worst case scenario» ή «business as usual» καθώς αποτελεί το κλιματικό σενάριο με τις υψηλότερες εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα. Το συγκεκριμένο σενάριο περιγράφει ένα μέλλον στο οποίο υπάρχει σημαντική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού (12 δισεκατομμύρια μέχρι το 2100) και αναγκών για τρόφιμα, έλλειψη πολιτικών για την κλιματική αλλαγή και χαμηλοί ρυθμοί ανάπτυξης της τεχνολογίας. Έτσι οι εκπομπές των αέριων ρύπων υπολογίζεται να τριπλασιαστούν σε σχέση με την προ-βιομηχανική περίοδο και το radiative forcing των αερίων του θερμοκηπίου να φτάσει τα 8.5 W/m², κυρίως λόγω της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα αλλά και της ραγδαίας αύξησης του πληθυσμού. (Riahi και συν., 2011)



Εικόνα 2.2 : Αναπαράσταση συγκεντρώσεων των θερμοκηπικών αερίων μέχρι το έτος 2500 υπό τα σενάρια RCP (πηγή : Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2 , L. Nazarenko και συν. 2015)

2.4 Κλιματικές μεταβλητές και κλιματικοί δείκτες

Στην εν λόγω πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν για την πόλη της Θεσσαλονίκης οι κλιματικές μεταβλητές (climate variables) της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στα δύο μέτρα πάνω από το έδαφος (monthly mean Temperature 2m) και ο μηνιαίος υετός (monthly Precipitation) για τρεις τριακονταετείς περιόδους (1971-2000, 2021-2050, 2071-2100) υπό τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Επιπροσθέτως μελετήθηκαν για την πόλη της Θεσσαλονίκης οι κλιματικοί δείκτες (climate indices) των ζεστών ημερών (hot days), των ημερών παγετού (frost days) και των συνεχόμενων ξηρών ημερών (consecutive dry days) ετησίως, για την περίοδο 1950-2100 με βάση τα τρία προαναφερθέντα κλιματικά σενάρια RCP. Επεξήγηση των κλιματικών δεικτών γίνεται στη συνέχεια.

- **Ζεστές μέρες (Hot Days, HD)** : Σύνολο των ημερών (C) μέσα στο έτος όπου η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 35 °C.
[HD = C (T_{maxdaily} > 35 °C), (days)]
- **Ημέρες παγετού (Frost Days, FD)** : Σύνολο των ημερών (C) μέσα στο έτος όπου η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μικρότερη από 0 °C. [FD = C (T_{mindaily} < 0 °C), (days)]
- **Συνεχόμενες ξηρές ημέρες (Consecutive Dry Days, CDD)** : Σύνολο των συνεχόμενων ημερών (C) μέσα στο έτος όπου ο ημερήσιος υετός (RR) είναι λιγότερος από 1 mm. [CDD = C (RR_{daily} < 1mm), (days)]

2.5 Εξαγωγή και επεξεργασία δεδομένων

Για την εξαγωγή των δεδομένων από την εφαρμογή DEAR-Clima ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα : Αρχικά επιλέξαμε την επιθυμητή μεταβλητή καθώς και την χρονική κλίμακα στην οποία θέλαμε να την προβάλουμε. Στη συνέχεια επιλέξαμε ως τοποθεσία την πόλη της Θεσσαλονίκης, εισάγοντας τις γεωγραφικές συντεταγμένες της. Τέλος, έγινε η επεξεργασία των δεδομένων μέσω της εφαρμογής και έπειτα έγινε η λήψη των αριθμητικών αποτελεσμάτων (plot) που έδωσαν τα κλιματικά μοντέλα.

The screenshot displays the DEAR-Clima web application interface. At the top, there is a navigation bar with links: DEAR-Clima, Home, Domain, Experiments, Scenarios, Variables, Application, About, and Contact. Below the navigation bar, there are buttons for 'Guidelines' and 'Subscribe'. The main content area is divided into three sections: 1. Temporal & Variable Selection, 2. Grid Selection, and 3. Initiate Processing. In the '1. Temporal & Variable Selection' section, there is a 'Temporal Selection' dropdown menu set to 'Yearly' and a 'Variable' dropdown menu set to 'Temperature (2m)'. In the '2. Grid Selection' section, there are buttons for 'Insert Coordinates' and 'Select on Map', and input fields for 'Insert Longitude' (22.9444) and 'Insert Latitude' (40.6401). In the '3. Initiate Processing' section, there is a 'Process' button.

Εικόνα 2.3 : Μενού επιλογής μεταβλητής , χρονικής κλίμακας και τοποθεσίας στην εφαρμογή Dear-Clima (πηγή : <http://meteo3.geo.auth.gr:3838/>)

Για την επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων και τη δημιουργία γραφημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel. Η ανάλυση των μεταβλητών της θερμοκρασίας και του υετού που μελετήθηκαν σε μηνιαία χρονική κλίμακα έγινε ως εξής : Αρχικά έγινε ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων που έδωσαν οι προσομοιώσεις των διάφορων RCMs, βάσει των GCMs στα οποία ολοκληρώνονται. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι για κάθε μήνα ξεχωριστά για τις τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους που χρησιμοποιήθηκαν (1971-2000, 2021-2050, 2071-2100). Με αυτό τον τρόπο εξήχθησαν διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε GCM ξεχωριστά. Τέλος έγινε ομαδοποίηση όλων των αποτελεσμάτων των GCMs και με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκαν οι τελικές τιμές των μεταβλητών της μέσης θερμοκρασίας και του υετού για τις τρεις χρονικές περιόδους. Για τον υπολογισμό της μεταβολής των τιμών σε σχέση με την περίοδο αναφοράς, έγινε αφαίρεση των τιμών της ιστορικής περιόδου (1971-2000) από όλες τις τιμές των περιόδων του εγγύς μέλλοντος (2021-2050) και του απώτερου μέλλοντος (2071-2100) για τις διαθέσιμες κλιματικές προσομοιώσεις RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5.

Για τη μελέτη των κλιματικών δεικτών των ζεστών ημερών, ημερών παγετού και συνεχόμενων ξηρών ημερών ετησίως, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι πιο απλή καθώς η εφαρμογή DEAR-Clima ομαδοποιεί τα αριθμητικά αποτελέσματα όλων των διαθέσιμων προσομοιώσεων. Αφού έγινε λήψη ακολούθησε η προβολή των συνόλων τιμών (ensemble) των κλιματικών προσομοιώσεων καθώς και η προβολή των αντίστοιχων κυλιόμενων μέσων. Η περίοδος αναφοράς για τις προσομοιώσεις τον κλιματικών δεικτών είναι η χρονική περίοδος 1960-1990, η ιστορική περίοδος είναι η

περίοδος μεταξύ των ετών 1950-2004 ενώ η μελλοντική περίοδος που προσομοιώνεται
βάση των τριών RCP σεναρίων είναι η περίοδος 2005-2100.

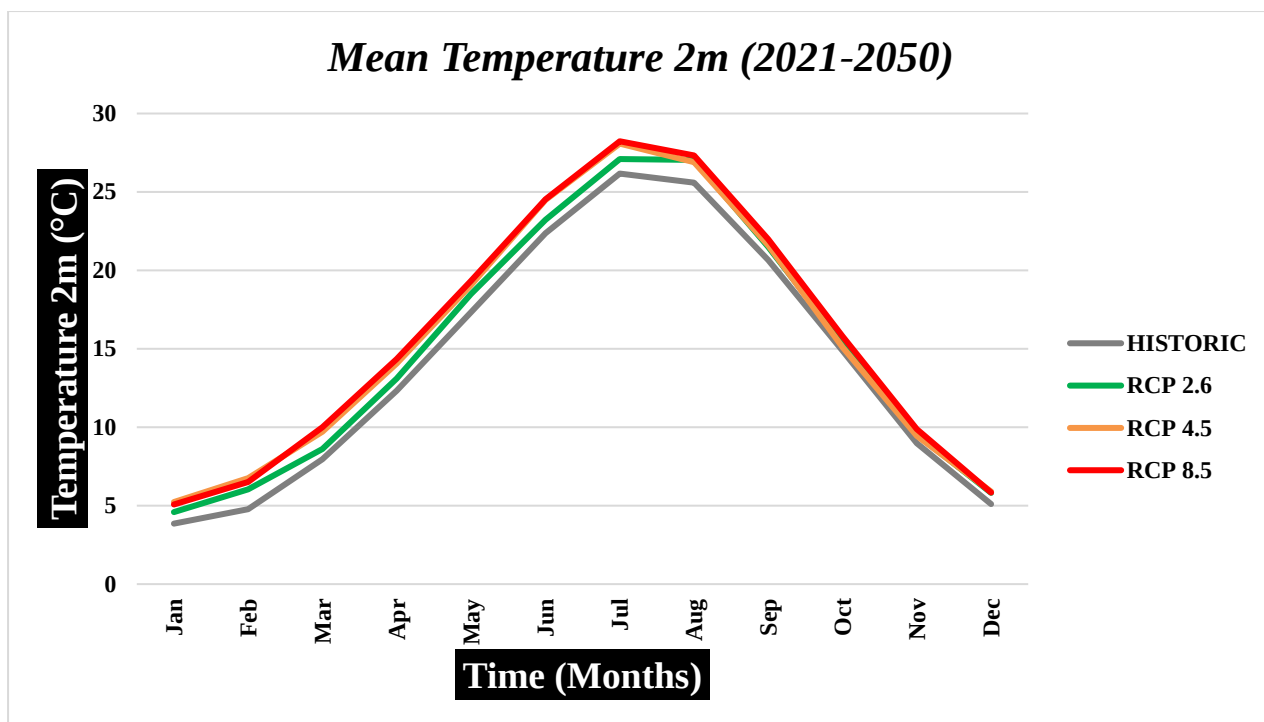
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κλιματικών προσομοιώσεων για τις κλιματικές μεταβλητές της μέσης θερμοκρασίας και του υετού σε μηνιαία κλίμακα και τους κλιματικούς δείκτες των ζεστών ημερών, ημερών παγετού και συνεχόμενων ξηρών ημερών σε ετήσια κλίμακα για το πλεγματικό κελί της πόλης της Θεσσαλονίκης μέσω των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX. Η εξαγωγή των δεδομένων έγινε μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής DEAR-Clima και η επεξεργασία και οπτικοποίησή τους έγινε μέσω της εφαρμογής Excel.

3.1 Μέση Θερμοκρασία επιφάνειας (Mean Temperature 2m)

3.1.1 Χρονική περίοδος 2021-2050

Στο διάγραμμα 3.1 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας σε ύψος 2 μέτρα πάνω από την επιφάνεια για την πόλη της Θεσσαλονίκης την χρονική περίοδο 2021-2050 σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του EURO-CORDEX που οδηγούνται από τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η ιστορική περίοδος που αποτελεί και την περίοδο αναφοράς (1970-2001). Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας σύμφωνα με το σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί χρώμα οι τιμές του σεναρίου RCP 4.5 και με κόκκινο οι τιμές του σεναρίου RCP 8.5. Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.1 και τα τρία κλιματικά σενάρια προβλέπουν αύξηση της μέσης θερμοκρασίας όλων των μηνών σε σχέση με την ιστορική περίοδο. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται τον Ιανουάριο και για τα τρία κλιματικά σενάρια με τη χαμηλότερη θερμοκρασία να έχει τιμή 4.59 °C σύμφωνα με το σενάριο RCP 2.6 ενώ οι ψηλότερες τιμές παρουσιάζονται τον Ιούλιο με την υψηλότερη να έχει τιμή 28.23 °C σύμφωνα με το σενάριο RCP 8.5. Τέλος παρατηρείται ότι και τα τρία σενάρια έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις από το μήνα Αύγουστο ως το Δεκέμβριο.



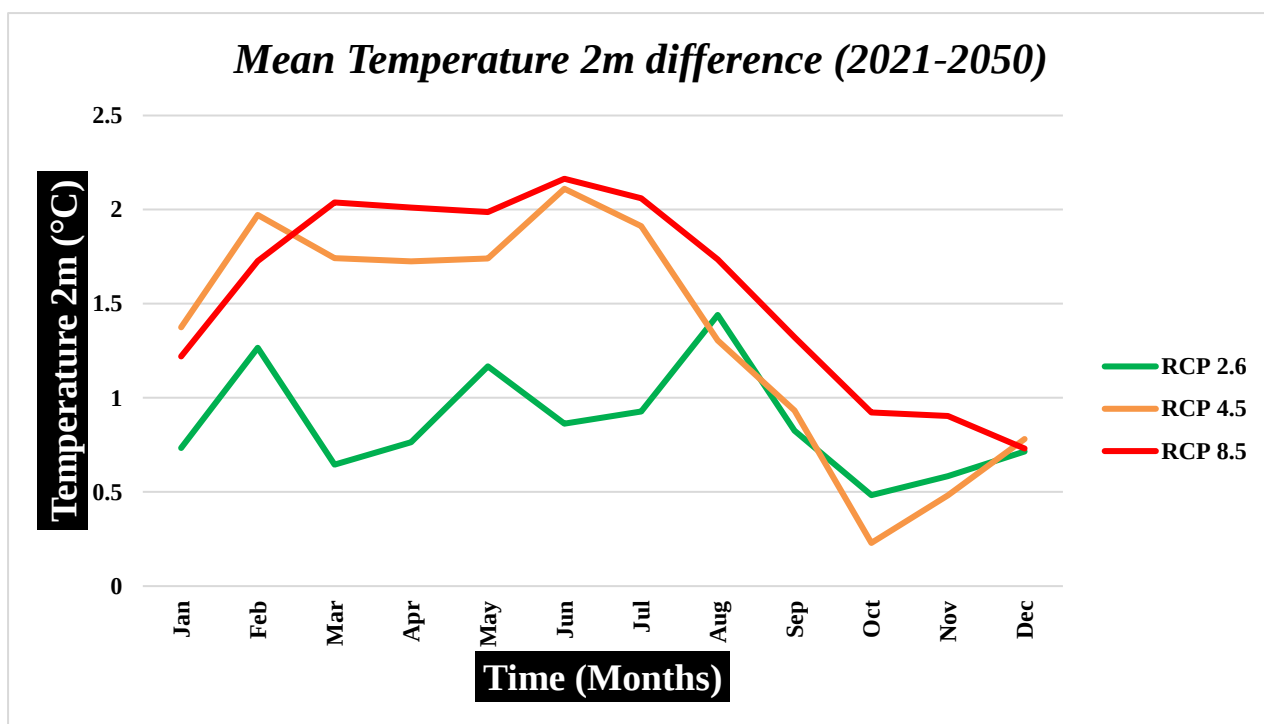
Διάγραμμα 3.1: Μηνιαίες χρονοσειρές μέσης θερμοκρασίας επιφάνειας (°C) για τη χρονική περίοδο 2021-2050 από τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX για τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο χρώμα), RCP 4.5 (πορτοκαλί χρώμα), RCP 8.5 (κόκκινο χρώμα), σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1971-2000 (ιστορική περίοδος, γκρι χρώμα).

DATE	HISTORIC	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	3.857339	4.591049	5.233055	5.077252
Feb	4.782102	6.048666	6.753437	6.508242
Mar	7.969814	8.614536	9.711979	10.00863
Apr	12.33747	13.10198	14.0622	14.34891
May	17.33052	18.49847	19.07103	19.31835
Jun	22.37068	23.23435	24.48156	24.53473
Jul	26.16954	27.09766	28.08231	28.23026
Aug	25.59932	27.0399	26.90422	27.33485
Sep	20.65739	21.48267	21.59075	21.98033
Oct	14.87359	15.35688	15.10309	15.79675
Nov	8.972222	9.556192	9.454562	9.876678
Dec	5.108492	5.823797	5.889657	5.839531

Πίνακας 3.1 : Αριθμητικά αποτελέσματα κλιματικών προσομοιώσεων μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας 2m για την ιστορική περίοδο (1970-2001) και για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 για την χρονική περίοδο 2021-2050.

Στο διάγραμμα 3.2 απεικονίζονται οι διαφορές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας που προβλέπουν τα κλιματικά σενάρια σε σχέση με τις τιμές της ιστορικής περιόδου (1970-2001). Τα τρία κλιματικά σενάρια απεικονίζονται με τα χρώματα που προαναφέρθηκαν. Οι τιμές προέκυψαν αφαιρώντας τις τιμές θερμοκρασίας των

κλιματικών σεναρίων από τις τιμές της ιστορικής περιόδου για κάθε μήνα αντίστοιχα. Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.2 το κλιματικό σενάριο RCP 2.6 παρουσιάζει τη μικρότερη προβλεπόμενη αύξηση μέσης θερμοκρασίας με τη μεγαλύτερη μεταβολή να σημειώνεται το μήνα Αύγουστο με τιμή +1.44 °C. Οι υψηλότερες μεταβολές ανήκουν στο «worst case scenario» RCP 8.5 όπως ήταν αναμενόμενο, με μέγιστη προβλεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας να παρατηρείται τον Ιούνιο με τιμή 2.16 °C. Το σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας για τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο αλλά και τη μικρότερη για το μήνα Οκτώβριο με τιμή 0.22 °C καθώς προβλέπει παρόμοια αύξηση θερμοκρασίας με το σενάριο RCP 2.6 από τον Αύγουστο έως και το Δεκέμβριο. Τέλος παρατηρείται ότι ο Δεκέμβριος είναι ο μήνας με τη μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα τρία κλιματικά σενάρια καθώς σε όλα προβλέπεται σχεδόν ίση αύξηση της μέσης θερμοκρασίας.



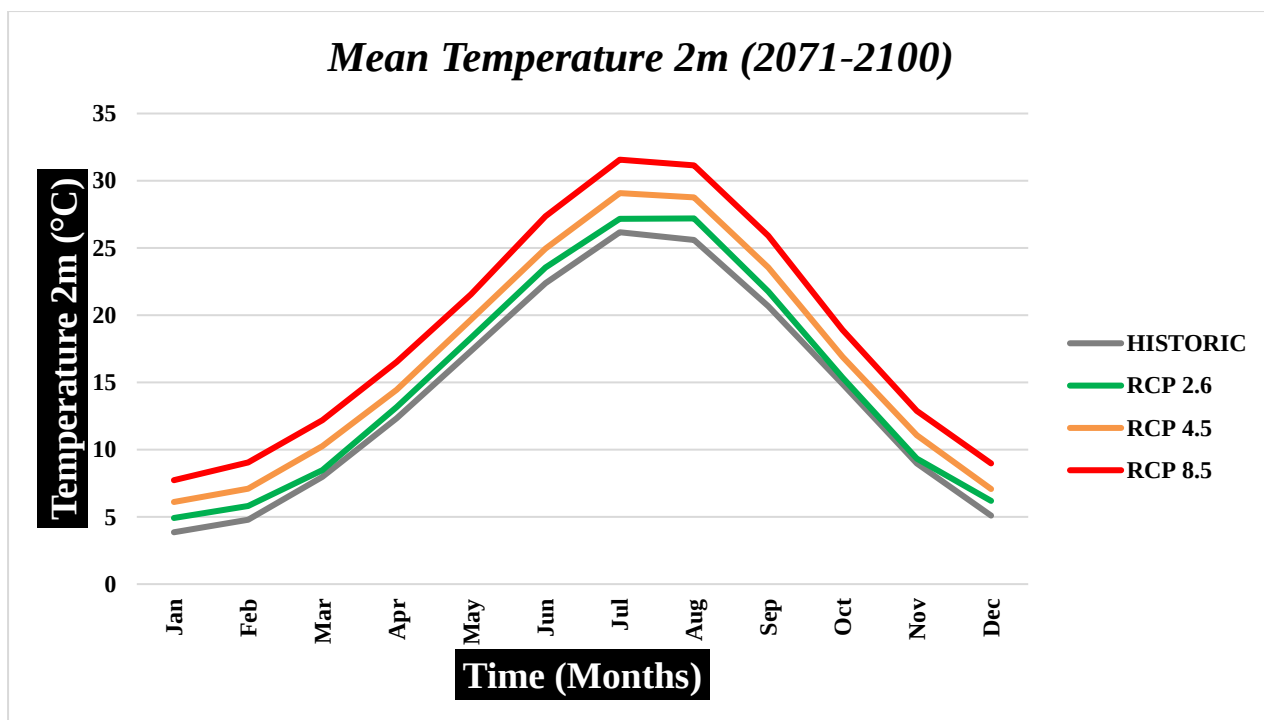
Διάγραμμα 3.2 : Μηνιαίες χρονοσειρές μεταβολής μέσης θερμοκρασίας (°C) επιφάνειας για τη χρονική περίοδο 2021-2050, σε σχέση με την ιστορική περίοδο 1970-2001 από τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX για τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο χρώμα) , RCP 4.5 (πορτοκαλί χρώμα), RCP 8.5 (κόκκινο χρώμα).

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	0.73371	1.375716	1.219913
Feb	1.266564	1.971335	1.72614
Mar	0.644721	1.742165	2.038816
Apr	0.764507	1.72473	2.011437
May	1.167951	1.740512	1.987827
Jun	0.863674	2.110882	2.164057
Jul	0.928118	1.912771	2.060719
Aug	1.440585	1.304901	1.735528
Sep	0.825281	0.933358	1.322943
Oct	0.483295	0.229506	0.923163
Nov	0.58397	0.48234	0.904455
Dec	0.715305	0.781165	0.731039

Πίνακας 3.2 : Διαφορά μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας 2m των κλιματικών σεναρίων RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5, για τη χρονική περίοδο 2021-2050 σε σχέση με την ιστορική περίοδο 1971-2000.

3.1.2 Χρονική περίοδος 2071-2100

Στο διάγραμμα 3.3 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες σε ύψος δύο μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους για την πόλη της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 2071-2100. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι τιμές της ιστορικής περιόδου, με πράσινο οι τιμές του κλιματικού σεναρίου RCP 2.6, πορτοκαλί χρώμα χρησιμοποιείται για το σενάριο RCP 4.5 και κόκκινο για το σενάριο RCP 8.5. Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.3 οι θερμοκρασίες και στα τρία σενάρια είναι υψηλότερες από αυτές της ιστορικής περιόδου. Οι χαμηλότερες τιμές ανήκουν και πάλι στο σενάριο RCP 2.6 με χαμηλότερη τιμή 4.91°C τον μήνα Ιανουάριο, όπως και για τη χρονική περίοδο 2021-2050. Οι υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες της χρονικής περιόδου σημειώνονται το μήνα Ιούλιο με τιμή 31.56 °C σύμφωνα με το σενάριο RCP 8.5, αντίθετα με την χρονική περίοδο 2021-2050 όπου ο πιο ζεστός μήνας ήταν ο Ιούνιος. Σε ότι αφορά τις ακραίες τιμές κάθε περιόδου παρουσιάζεται μικρή διαφορά στις ελάχιστες θερμοκρασίες με τις χαμηλότερες τιμές να παρουσιάζονται στη χρονική περίοδο 2021-2050 ενώ οι υψηλότερες τιμές μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων παρουσιάζουν διαφορά 3.33°C, με πιο ζεστή τη χρονική περίοδο 2071-2100.



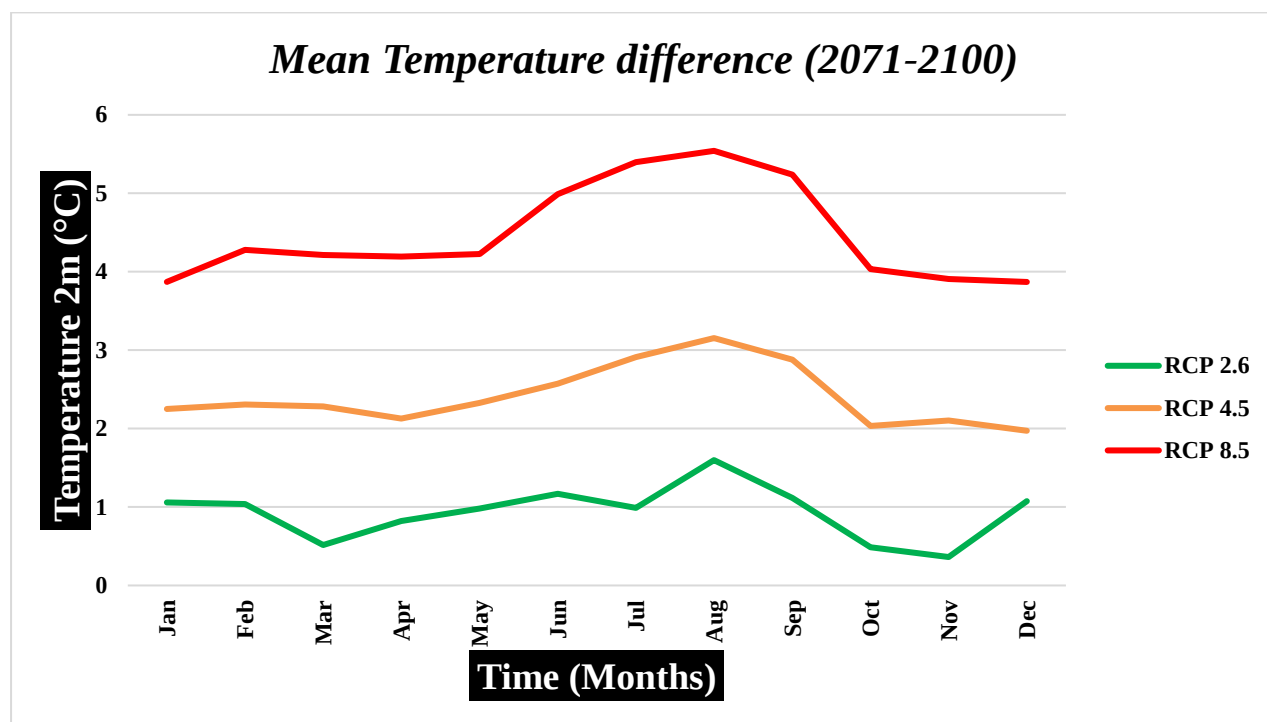
Διάγραμμα 3.3 : Μηνιαίες χρονοσειρές μέσης θερμοκρασίας (°C) επιφάνειας για τη χρονική περίοδο 2071-2100 από τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX για τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο χρώμα) , RCP 4.5 (πορτοκαλί χρώμα), RCP 8.5 (κόκκινο χρώμα) σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (ιστορική περίοδος, γκρι χρώμα).

DATE	HISTORIC	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	3.85733906	4.91768	6.108935	7.72972
Feb	4.78210195	5.819868	7.089242	9.060272
Mar	7.96981405	8.487086	10.25413	12.18393
Apr	12.3374727	13.16016	14.46322	16.52961
May	17.3305228	18.31223	19.6589	21.55515
Jun	22.3706759	23.54116	24.94357	27.36042
Jul	26.1695399	27.1565	29.07953	31.56631
Aug	25.5993191	27.19724	28.75308	31.14047
Sep	20.6573874	21.77443	23.53644	25.89661
Oct	14.8735858	15.36108	16.90742	18.90648
Nov	8.97222229	9.334763	11.07535	12.8814
Dec	5.10849202	6.182048	7.080632	8.977826

Πίνακας 3.3 : Αριθμητικά αποτελέσματα κλιματικών προσομοιώσεων μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας 2m για την ιστορική περίοδο (1970-2001) και για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 για την χρονική περίοδο 2071-2100.

Στο διάγραμμα 3.4 παρουσιάζονται οι διαφορές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας μεταξύ των τριών κλιματικών σεναρίων RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί), RCP 8.5 (κόκκινο) σε σχέση με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες της ιστορικής περιόδου, για την χρονική περίοδο 2071-2100. Από το διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι

διαφορές στη μέση μηνιαία θερμοκρασία που προβλέπεται για την περίοδο 2071-2100 είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι είναι για την περίοδο 2021-2050. Συγκεκριμένα το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει τη μεγαλύτερη αύξηση μέσης θερμοκρασίας με μεγαλύτερη μεταβολή $+5.54^{\circ}\text{C}$ τον μήνα Αύγουστο. Το σενάριο RCP 2.6 προβλέπει τη μικρότερη αύξηση θερμοκρασίας με τη διαφορά μέσης θερμοκρασίας να μη ξεπερνά τους $+2^{\circ}\text{C}$ σε σχέση με την ιστορική περίοδο. Το σενάριο RCP 4.5 δείχνει μια ενδιάμεση κατάσταση σε σχέση με τα προηγούμενα δύο σενάρια με μέγιστη αύξηση θερμοκρασίας $+3.1^{\circ}\text{C}$ τον μήνα Αύγουστο.



Διάγραμμα 3.4 : Μηνιαίες χρονοσειρές μεταβολής μέσης θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) για τη χρονική περίοδο 2071-2100 σε σχέση με την ιστορική περίοδο 1970-2001, από τις προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX για τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο χρώμα) , RCP 4.5 (πορτοκαλί χρώμα), RCP 8.5 (κόκκινο χρώμα).

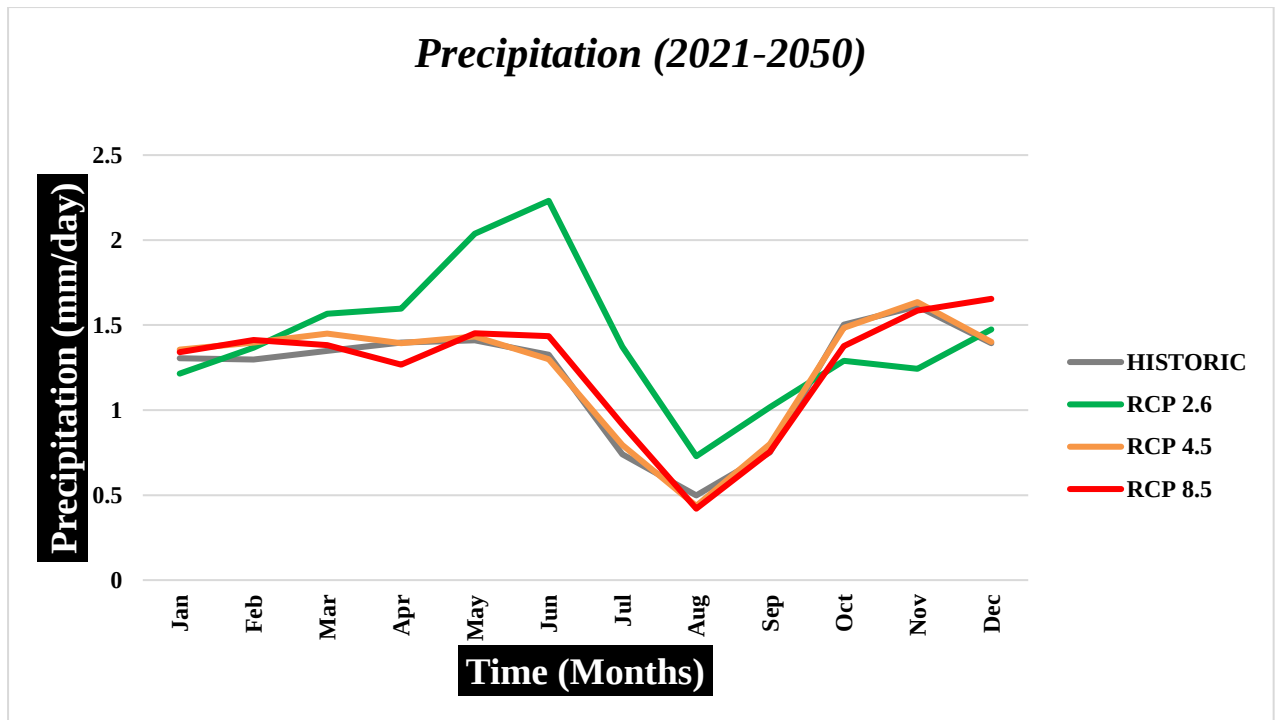
DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	1.060341	2.251596	3.872381
Feb	1.037767	2.30714	4.27817
Mar	0.517272	2.284314	4.214111
Apr	0.822683	2.125751	4.192133
May	0.981707	2.328376	4.224626
Jun	1.170486	2.57289	4.989745
Jul	0.986964	2.909992	5.396768
Aug	1.597922	3.153765	5.54115
Sep	1.117039	2.879048	5.239225
Oct	0.487495	2.033835	4.032894
Nov	0.362541	2.103127	3.909178
Dec	1.073556	1.97214	3.869334

Πίνακας 3.4 : Διαφορά μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας επιφάνειας για τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5, για τη χρονική περίοδο 2071-2100 σε σχέση με την ιστορική περίοδο 1971-2000.

3.2 Υετός (Precipitation)

3.2.1. Χρονική περίοδος 2021-2050

Στα διάγραμμα 3.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα του μηνιαίου υετού των κλιματικών προσομοιώσεων του EURO-CORDEX για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης για τη χρονική περίοδο 2021-2050 σύμφωνα με τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο χρώμα), RCP 4.5 (πορτοκαλί χρώμα), RCP 8.5 (κόκκινο χρώμα) σε σχέση με την ιστορική περίοδο 1971-2000 (γκρι χρώμα). Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.5, το σενάριο RCP 2.6 προβλέπει αύξηση του μέσου υετού από τους μήνες Φεβρουάριο έως και Σεπτέμβριο με μέγιστα ποσά υετού να σημειώνονται τον μήνα Ιούνιο με 2.23 mm/day ενώ ακολουθεί μια απότομη πτώση με τα ελάχιστα ποσά υετού να σημειώνονται το μήνα Αύγουστο με 0.72 mm/day. Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 προβλέπει παρόμοια ποσά υετού με την ιστορική περίοδο, ενώ το σενάριο RCP 8.5 παρουσιάζει μια μικρή αύξηση από το Μάιο ως τον Ιούλιο ενώ σημειώνει και τα χαμηλότερα ποσά υετού με 0.42 mm/day τον Αύγουστο. Αξίζει να αναφερθεί ότι το σενάριο RCP 2.6 προβλέπει τα χαμηλότερα ποσά υετού για τους μήνες του Οκτώβριο και Νοέμβριο, ενώ για το μήνα Δεκέμβριο τα υψηλότερα ποσά υετού παρατηρούνται στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5.



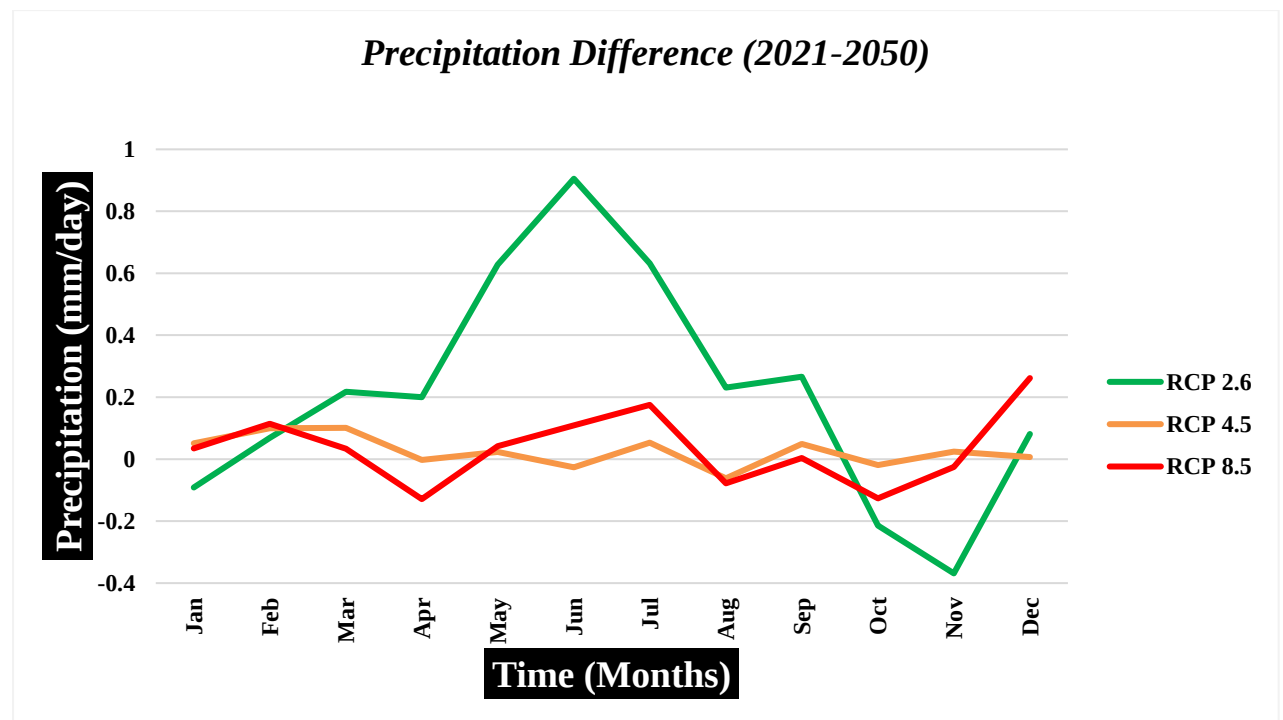
Διάγραμμα 3.5 : Μηνιαίες χρονοσειρές νετού (mm/day) για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης, για τη χρονική περίοδο 2021-2050. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η ιστορική περίοδος 1971-2000, με πράσινο χρώμα το σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί το RCP 4.5 και με κόκκινο το RCP 8.5.

DATE	HISTORIC	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	1.305131	1.214094	1.356233	1.340274
Feb	1.298056	1.367351	1.397673	1.412678
Mar	1.348352	1.565889	1.449458	1.381564
Apr	1.396469	1.596578	1.393848	1.267627
May	1.410014	2.037918	1.43353	1.452071
Jun	1.325901	2.230975	1.300159	1.434674
Jul	0.74013	1.372242	0.793891	0.914908
Aug	0.498168	0.728836	0.436457	0.420203
Sep	0.751303	1.017603	0.800657	0.755454
Oct	1.503552	1.289526	1.484487	1.376977
Nov	1.610955	1.242403	1.635339	1.585613
Dec	1.392833	1.474511	1.400177	1.65453

Πίνακας 3.5 : Αριθμητικά αποτελέσματα κλιματικών προσομοιώσεων μηνιαίου νετού, για την ιστορική περίοδο 1971-2000 και τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 για τη χρονική περίοδο 2021-2050.

Στο διάγραμμα 3.6 παρουσιάζονται οι μεταβολές του μηνιαίου νετού για τη χρονική περίοδο 2021-2050 ανάμεσα στα τρία κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1971-2000. Τα αποτελέσματα προέκυψαν αφαιρώντας τις τιμές κάθε κλιματικού σεναρίου από τις αντίστοιχες τιμές τις ιστορικής

περιόδου 1971-2000 για κάθε μήνα αντίστοιχα. Σύμφωνα με το διάγραμμα η μεγαλύτερη μεταβολή προβλέπεται στο σενάριο RCP 2.6 με μέγιστη τιμή +0.9 mm/day τον μήνα Ιούνιο, ενώ ο μήνας Νοέμβριος είναι ο πιο ξερός μήνας με διαφορά -0.36 mm/day σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1971-2000. Τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 προβλέπουν τις μικρότερες αποκλίσεις από την περίοδο αναφοράς με υγρότερο μήνα το Μάρτιο με διαφορά στις τιμές νετού +0.1 mm/day. Τέλος το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει μια σχετική αστάθεια καθώς οι τιμές του νετού διαφέρουν αρκετά από μήνα σε μήνα, με τις υψηλότερες τιμές να παρατηρούνται το Δεκέμβριο με +0.26 mm/day ενώ οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται τον Απρίλιο με διαφορά -0.12 mm/day σε σχέση με την περίοδο αναφοράς.



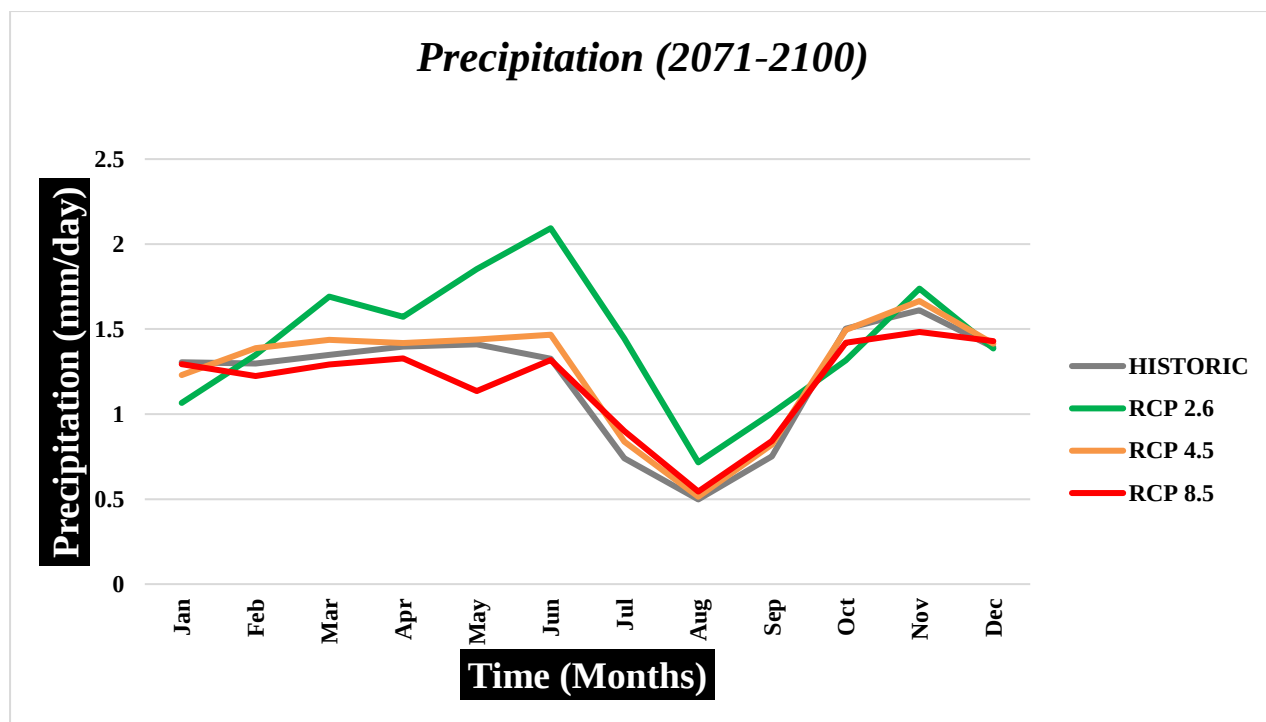
Διάγραμμα 3.6 : Μηνιαίες χρονοσειρές μεταβολής νετού που προβλέπουν τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί) και RCP 8.5 (κόκκινο) για τη χρονική περίοδο 2021-2050, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1970-2001.

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	-0.09104	0.051102	0.035143
Feb	0.069295	0.099617	0.114622
Mar	0.217536	0.101105	0.033212
Apr	0.200109	-0.00262	-0.12884
May	0.627904	0.023516	0.042057
Jun	0.905075	-0.02574	0.108773
Jul	0.632112	0.053761	0.174778
Aug	0.230668	-0.06171	-0.07797
Sep	0.2663	0.049355	0.004152
Oct	-0.21403	-0.01906	-0.12658
Nov	-0.36855	0.024384	-0.02534
Dec	0.081678	0.007344	0.261697

Πίνακας 3.6 : Αριθμητικά αποτελέσματα διαφοράς μηνιαίου υετού που προβλέπουν τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 για τη χρονική περίοδο 2021-2050, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1970-2001.

3.2.2 Χρονική περίοδος 2071-2100

Στο διάγραμμα 3.7 παρατίθενται οι μηνιαίες χρονοσειρές υετού (mm/day) για τη χρονική περίοδο 2071-2100 που προέκυψαν από τα κλιματικά μοντέλα του EURO-CORDEX για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης υπό τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί), RCP 8.5 (κόκκινο) και τα στοιχεία της περιόδου αναφοράς (γκρι). Τα υψηλότερα ποσά υετού προβλέπονται από το σενάριο RCP 2.6 καθώς από το Μάρτιο μέχρι το Σεπτέμβριο οι τιμές είναι υψηλότερες από αυτές της περιόδου αναφοράς 1971-2000, με υψηλότερη τιμή 2.09 mm/day το μήνα Ιούνιο (όπως και για τη χρονική περίοδο 2021-2050). Το σενάριο RCP 4.5 προβλέπει και πάλι παρόμοια ποσά υετού με την περίοδο αναφοράς. Τέλος το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει τα χαμηλότερα ποσά υετού για την περίοδο της άνοιξης (Μάρτιος – Μάιος), ενώ τους υπόλοιπους μήνες παρουσιάζει μικρή απόκλιση από τις τιμές της περιόδου αναφοράς.



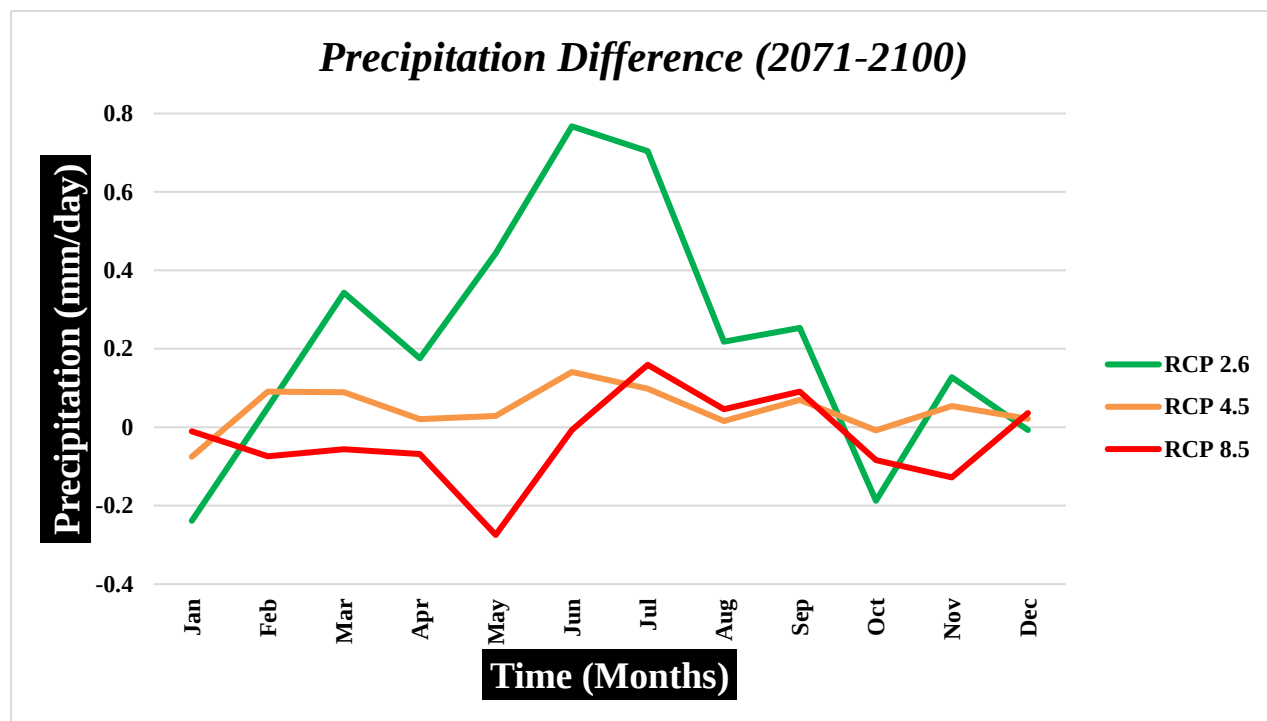
Διάγραμμα 3.7 : Μηνιαίες χρονοσειρές νετού (mm/day) για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης, για τη χρονική περίοδο 2071-2100. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η ιστορική περίοδος 1971-2000, με πράσινο χρώμα το σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί το RCP 4.5 και με κόκκινο το RCP 8.5.

DATE	HISTORIC	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	1.305131	1.066486	1.230029	1.294609
Feb	1.298056	1.348086	1.388801	1.223728
Mar	1.348352	1.691695	1.437546	1.292557
Apr	1.396469	1.572352	1.417543	1.328306
May	1.410014	1.853331	1.438709	1.13544
Jun	1.325901	2.093235	1.466845	1.319125
Jul	0.74013	1.443683	0.838093	0.899393
Aug	0.498168	0.716184	0.51403	0.54448
Sep	0.751303	1.004852	0.821218	0.841817
Oct	1.503552	1.316049	1.495731	1.420084
Nov	1.610955	1.738756	1.66531	1.483107
Dec	1.392833	1.385574	1.414565	1.428846

Πίνακας 3.7 : Αριθμητικά αποτελέσματα κλιματικών προσομοιώσεων μηνιαίου νετού, για την ιστορική περίοδο 1971-2000 και τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 για τη χρονική περίοδο 2071-2100.

Στο διάγραμμα 3.8 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές μεταβολής νετού των σεναρίων RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί), RCP 8.5 (κόκκινο) για τη χρονική περίοδο 2071-2100, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1971-2000. Όπως έδειξε και το διάγραμμα 3.7, ο πιο υγρός μήνας σύμφωνα με το σενάριο RCP 2.6 είναι ο Ιούνιος με διαφορά νετού +0.76 mm/day σε σχέση με την περίοδο 1971-2000, ενώ παρατηρείται μια απότομη αύξηση από τον Ιανουάριο έως τον Μάρτιο, και μια απότομη πτώση στα

ποσά υετού από τον Ιούνιο έως και τον Οκτώβριο. Το σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει τις μικρότερες μεταβολές από τα τρία κλιματικά σενάρια, ενώ το σενάριο RCP 8.5 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση υετού τον Μάιο με διαφορά -0.2 mm/day. Τέλος και τα τρία σενάρια προβλέπουν παρόμοια ποσά υετού το μήνα Δεκέμβριο.



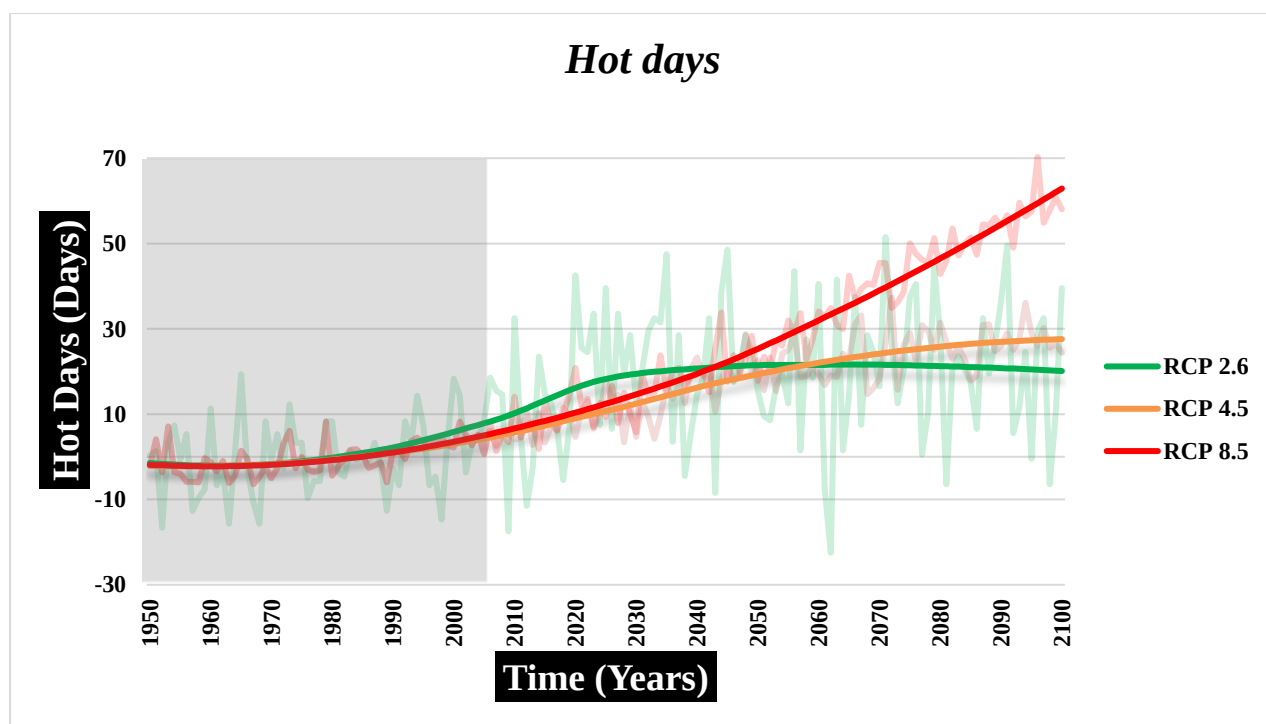
Διάγραμμα 3.8 : Μηνιαίες χρονοσειρές μεταβολής υετού που προβλέπουν τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί) και RCP 8.5 (κόκκινο) για τη χρονική περίοδο 2021-2050, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1970-2001.

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Jan	-0.23864	-0.0751	-0.01052
Feb	0.05003	0.090745	-0.07433
Mar	0.343343	0.089194	-0.0558
Apr	0.175884	0.021074	-0.06816
May	0.443317	0.028695	-0.27457
Jun	0.767334	0.140944	-0.00678
Jul	0.703553	0.097962	0.159262
Aug	0.218016	0.015861	0.046312
Sep	0.253549	0.069916	0.090515
Oct	-0.1875	-0.00782	-0.08347
Nov	0.127801	0.054356	-0.12785
Dec	-0.00726	0.021732	0.036013

Πίνακας 3.8 : Αριθμητικά αποτελέσματα διαφοράς μηνιαίου υετού που προβλέπουν τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5 και RCP 8.5 για τη χρονική περίοδο 2071-2100, σε σχέση με τη περίοδο αναφοράς 1970-2001.

3.3 Ζεστές Μέρες (Hot days)

Στο διάγραμμα 3.9 παρουσιάζονται οι ετήσιες χρονοσειρές μεταβολής του κλιματικού δείκτη των ζεστών ημερών (ημέρες του έτους όπου η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 35 °C) από τις διαθέσιμες προσομοιώσεις των κλιματικών μοντέλων του EURO-CORDEX, για το πλεγματικό κελί της Θεσσαλονίκης, που οδηγούνται από τα σενάρια RCP 2.6 (πράσινο), RCP 4.5 (πορτοκαλί), RCP 8.5 (κόκκινο) για τη χρονική περίοδο 2005-2100. Οι σκιασμένες γραμμές αποτελούν την τυπική απόκλιση των μοντέλων ενώ στο διάγραμμα απεικονίζονται οι κυλιόμενοι μέσοι. Η ιστορική περίοδος απεικονίζεται με γκρι πλαίσιο και είναι η χρονική περίοδος 1950-2004. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά δεκαετίες από το 1950 έως το 2100 συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1960-1990. Σύμφωνα με το διάγραμμα και τα τρία σενάρια προβλέπουν μια σημαντική αύξηση των ζεστών ημερών σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Το σενάριο RCP 2.6 προβλέπει αύξηση του αριθμού των ζεστών ημερών μέχρι το έτος 2030, έπειτα από το οποίο ο αριθμός τους παραμένει σταθερός με μέση αύξηση +20 μέρες από την περίοδο αναφοράς. Σύμφωνα με το σενάριο RCP 4.5 υπάρχει μια συνεχής αύξηση των ζεστών ημερών κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα με τις μεγαλύτερες διαφορές να παρατηρούνται προς το τέλος του αιώνα. Τέλος το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει ραγδαία αύξηση των ζεστών ημερών καθώς ο αριθμός τους αυξάνεται ανεξέλεγκτα με τιμή ρεκόρ +62 μέρες το έτος 2100.



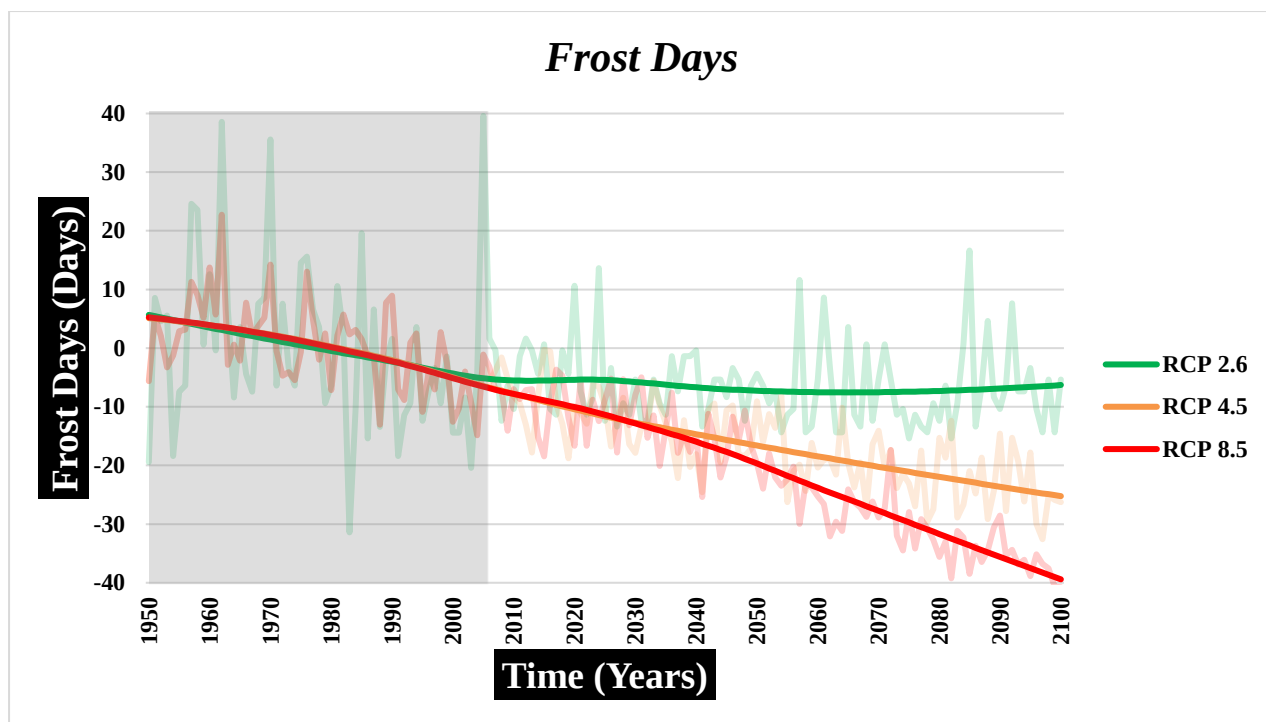
Διάγραμμα 3.9 : Ετήσιες χρονοσειρές μεταβολής ζεστών ημερών για την πόλη της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 1950-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1960-1990. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το κλιματικό σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί το σενάριο RCP 4.5 και με κόκκινο το σενάριο RCP 8.5. Η ιστορική περίοδος 1950-2004 απεικονίζεται με γκρι πλαίσιο.

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1950	-1.452789903	-2.128562053	-1.859924235
1960	-2.084623267	-2.190116051	-2.230912054
1970	-1.703511342	-1.705392829	-1.879720127
1980	-0.210320783	-0.66801149	-0.79111869
1990	2.182004475	0.899364759	0.997317679
2000	5.828898539	3.031429481	3.542971987
2010	10.20402176	5.672537539	6.669699471
2020	16.13087448	9.017588145	10.33981614
2030	19.45553863	12.43696612	14.62088441
2040	20.69110799	16.20684384	19.46235263
2050	21.46803245	19.33249745	25.31041603
2060	21.55794701	22.04094068	31.99448384
2070	21.5889323	24.17436631	38.98332973
2080	21.24763986	25.82999002	46.49021127
2090	20.79392947	26.95883882	54.45354446
2100	20.1217612	27.58518993	62.88430433

Πίνακας 3.9 : Ενδεικτικές τιμές μεταβολής του αριθμού των ζεστών ημερών που προβλέπουν τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 ανά δεκαετία τη χρονική περίοδο 1950-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1960-1990.

3.4 Ημέρες παγετού (Frost Days)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ετήσιες χρονοσειρές ημερών παγετού (σύνολο των ημερών μέσα στο έτος όπου η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία είναι μικρότερη από 0 °C) για την πόλη της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 1950-2100. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1960-1990. Η ιστορική περίοδος καθώς και τα τρία σενάρια απεικονίζονται με τα χρώματα που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα κεφάλαια. Σύμφωνα με το διάγραμμα 3.10 προβλέπεται μείωση του αριθμού των ημερών παγετού και από τα τρία σενάρια με μικρότερη αυτή που προβλέπει το σενάριο RCP 2.6 καθώς σύμφωνα με αυτό, η πτώση του αριθμού των ημερών παγετού σταθεροποιείται από το έτος 2040 και μετά με μέση διαφορά -7 μέρες από την περίοδο αναφοράς. Το σενάριο RCP 8.5 είναι ξανά το χειρότερο σενάριο αφού προβλέπει ραγδαία μείωση των ημερών παγετού με τις μεγαλύτερες τιμές να σημειώνονται στο τέλος του αιώνα με μέγιστη μείωση -39 μέρες το έτος 2100. Το σενάριο RCP 4.5 προβλέπει και αυτό μείωση των ημερών παγετού με σαφώς μικρότερο ρυθμό σε σχέση με το σενάριο RCP 8.5.



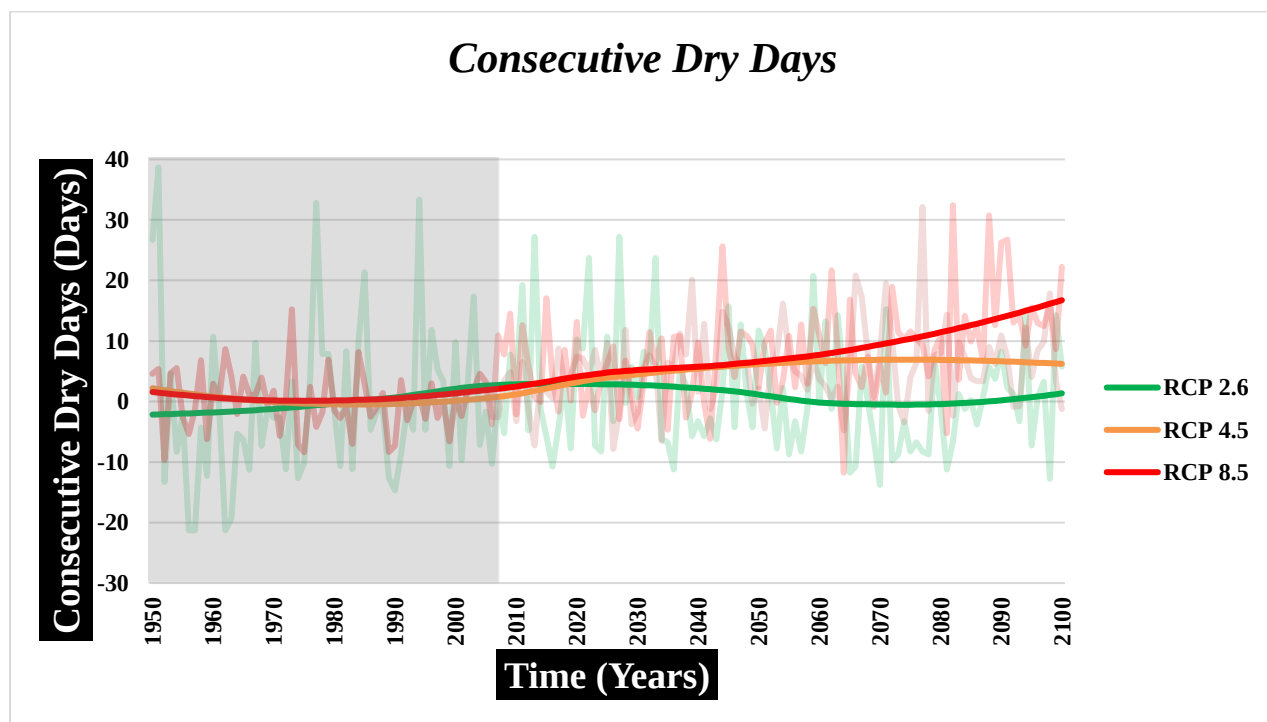
Διάγραμμα 3.10 : Ετήσιες χρονοσειρές μεταβολής ημερών παγετού για την πόλη της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 1950-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1960-1990. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το κλιματικό σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί το σενάριο RCP 4.5 και με κόκκινο το σενάριο RCP 8.5. Η ιστορική περίοδος 1950-2004 απεικονίζεται με γκρι πλαίσιο. Οι σκιασμένες γραμμές αποτελούν την τυπική απόκλιση των μοντέλων.

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1950	5.673101399	5.108649962	5.255885454
1960	3.502248781	3.911456572	3.93905053
1970	1.44956701	2.32112002	2.252708166
1980	-0.483562191	0.289359337	0.156785681
1990	-2.299277807	-2.048893058	-2.216844517
2000	-4.335172663	-4.993359587	-5.127172537
2010	-5.520410082	-7.786714506	-7.821370831
2020	-5.389792482	-10.42032412	-10.04024777
2030	-5.763566354	-12.70943997	-12.83520116
2040	-6.688043308	-14.66005688	-15.95824963
2050	-7.252345031	-16.60378916	-19.67302096
2060	-7.510861932	-18.44130527	-23.82270688
2070	-7.513342614	-20.22563186	-27.72974309
2080	-7.294989483	-21.94116291	-31.69230156
2090	-6.897238779	-23.61522981	-35.57383593
2100	-6.299546624	-25.23337165	-39.41479318

Πίνακας 3.10 : Ενδεικτικές τιμές μεταβολής του αριθμού των ημερών παγετού που προβλέπουν τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 ανά δεκαετία τη χρονική περίοδο 1950-2100, σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1960-1990.

3.5 Συνεχόμενες ξηρές ημέρες

Στο κεφάλαιο 3.5 παρουσιάζονται οι ετήσιες χρονοσειρές μεταβολής συνεχόμενων ξηρών ημερών (σύνολο των συνεχόμενων ημερών μέσα στο έτος όπου ο ημερήσιος υετός είναι λιγότερος από 1 mm) για την πόλη της Θεσσαλονίκης σύμφωνα με τα κλιματικά μοντέλα του EURO-CORDEX που οδηγούνται από τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1960-1990, ενώ η ιστορική περίοδος (γκρι πλαίσιο) είναι η χρονική περίοδος 1950-2004. Στο διάγραμμα 3.11 απεικονίζονται οι κυλιόμενοι μέσοι ενώ οι σκιασμένες γραμμές απεικονίζουν την τυπική απόκλιση των μοντέλων. Το σενάριο RCP 2.6 αποτελεί και πάλι το πιο αισιόδοξο από τα τρία σενάρια καθώς εμφανίζει ελάχιστη αύξηση σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Το σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει μέτρια αύξηση με μια σχετική σταθεροποίηση από το έτος 2050 και μέχρι το τέλος του αιώνα, με μέση αύξηση +6 ημέρες συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς. Τέλος το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει τη μεγαλύτερη αύξηση συνεχόμενων ξηρών ημερών με μέγιστη τιμή +16 συνεχόμενες ξηρές ημέρες το έτος 2100, ενώ παρουσιάζει σχετικά μικρή απόκλιση από το RCP 4.5 έως το έτος 2050.



Διάγραμμα 3.11 : Ετήσιες χρονοσειρές μεταβολής συνεχόμενων ξηρών ημερών για την πόλη της Θεσσαλονίκης τη χρονική περίοδο 1950-2100 σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1960-1990. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται το κλιματικό σενάριο RCP 2.6, με πορτοκαλί το σενάριο RCP 4.5 και με κόκκινο το σενάριο RCP 8.5. Η ιστορική περίοδος 1950-2004 απεικονίζεται με γκρι πλαίσιο. Οι σκιασμένες γραμμές αποτελούν την τυπική απόκλιση των μοντέλων.

DATE	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1950	-2.166010292	2.176904602	1.581371531
1960	-1.802392114	0.815641319	0.65297922
1970	-1.222176183	-0.069959714	0.169252275
1980	-0.33506202	-0.460491117	0.167723897
1990	0.661961387	-0.401824467	0.522433705
2000	2.100678763	0.123969642	1.362792887
2010	2.861212603	1.202402981	2.484910184
2020	2.895165017	3.158910028	4.085316614
2030	2.734386534	4.486843274	5.199514101
2040	2.179916735	5.448535876	5.724829158
2050	1.151396671	6.174004372	6.585374728
2060	-0.160641611	6.658913025	7.718670583
2070	-0.501580686	6.887513699	9.39692024
2080	-0.43313573	6.873267241	11.43920771
2090	0.19149453	6.647122525	13.8874075
2100	1.329874793	6.195781967	16.73875261

Πίνακας 3.11 : Ενδεικτικές τιμές μεταβολής του αριθμού συνεχόμενων ξηρών ημερών που προβλέπουν τα σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 ανά δεκαετία τη χρονική περίοδο 1950-2100, συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς 1960-1990.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του κλίματος για την πόλη της Θεσσαλονίκης κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα σε περιοχική κλίμακα, χρησιμοποιώντας μια πληθώρα περιοχικών κλιματικών μοντέλων (RCMs) και παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (GCMs) (Πίνακας 2.1) του EURO-CORDEX που οδηγούνται από τα κλιματικά σενάρια RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από τη διαδικτυακή εφαρμογή DEAR-Clima (meteo3.geo.auth.gr:3838/). Για το λόγο αυτό, αναλύθηκαν και μελετήθηκαν οι κλιματικές μεταβλητές της μέσης θερμοκρασίας και του υετού σε μηνιαία κλίμακα καθώς και οι κλιματικοί δείκτες των ζεστών ημερών, ημερών παγετού και συνεχόμενων ξηρών ημερών σε ετήσια κλίμακα.

4.1 Δεδομένα Θερμοκρασίας

Τα δεδομένα θερμοκρασίας αναλύθηκαν σε μηνιαία κλίμακα για δύο χρονικές περιόδους: την περίοδο 2021-2050 η οποία αντιπροσωπεύει το εγγύς μέλλον και την περίοδο 2071-2100 που αντιπροσωπεύει το απώτερο μέλλον. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρουσιάζεται σημαντική άνοδος θερμοκρασίας και για τις δύο περιόδους. Μικρότερη άνοδο προβλέπει το σενάριο RCP 2.6 καθώς η μέση θερμοκρασία δεν αυξάνεται πάνω από 2°C σε σχέση με την περίοδο αναφοράς για κανένα μήνα. Συγκρίνοντας τις δύο χρονικές περιόδους δε παρουσιάζεται μεγάλη μεταβολή στην προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς και στις δύο περιόδους η μέγιστη προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία φτάνει τους 27°C. Το σενάριο RCP 4.5 προβλέπει μια ενδιάμεση κατάσταση σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια. Για τη χρονική περίοδο 2021-2050 ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος ενώ η αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας φτάνει τους 2°C το μήνα Ιούνιο, με μέση αύξηση 1.35°C για όλους τους μήνες. Για την περίοδο 2071-2100, το σενάριο RCP 4.5 προβλέπει μια μέση αύξηση 2.4°C σε μηνιαία κλίμακα συγκριτικά με την περίοδο 1970-2001. Το σενάριο RCP 8.5 παρουσιάζει μικρές διαφορές σε σχέση με το RCP 4.5 (με μέγιστη διαφορά +0.7°C) για τη χρονική περίοδο 2021-2050. Για τη χρονική περίοδο 2071-2100, το σενάριο RCP 8.5 προβλέπει τεράστια αύξηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας με τιμή ρεκόρ +5.5 °C τον Αύγουστο. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα και των δύο περιόδων, το σενάριο RCP 2.6 είναι το πιο αισιόδοξο καθώς παρατηρείται μια σχετική σταθεροποίηση της θερμοκρασίας σε μηνιαία κλίμακα, ενώ το σενάριο RCP 8.5 είναι το πιο καταστροφικό, με τις υψηλότερες τιμές να σημειώνονται στην περίοδο 2071-2100.

4.2 Δεδομένα Υετού

Τα δεδομένα υετού αναλύθηκαν με τον ίδιο τρόπο με τα δεδομένα θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.2, το σενάριο RCP 2.6 είναι και πάλι το πιο αισιόδοξο καθώς προβλέπει αύξηση του υετού για τους περισσότερους μήνες με εξαίρεση τους μήνες Ιανουάριο, Οκτώβριο και Δεκέμβριο. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται και στις δύο περιόδους το μήνα Ιούνιο με μέση αύξηση

0.8 mm/day σε σχέση με την περίοδο αναφοράς. Το σενάριο RCP 4.5 έχει τη μικρότερη διαφορά συγκριτικά με την περίοδο αναφοράς, με μέγιστη μεταβολή +0.14 mm/day υετού τη χρονική περίοδο 2071-2100. Τέλος το σενάριο RCP 8.5 παρουσιάζει μικρές μεταβολές από την περίοδο αναφοράς για τη χρονική περίοδο 2021-2050 με τη μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται το μήνα Δεκέμβριο με τιμή +0.26 mm/day. Για τη χρονική περίοδο 2071-2100 προβλέπεται μείωση του υετού με εξαίρεση να αποτελούν οι μήνες Ιούλιος, Αύγουστος, Σεπτέμβριος και Δεκέμβριος στους οποίους προβλέπεται μια μικρή αύξηση.

4.3 Δεδομένα Ζεστών ημερών

Ο κλιματικός δείκτης των ζεστών ημερών αναλύθηκε ετησίως, για τη χρονική περίοδο 1950-2100, με περίοδο αναφοράς τη χρονική περίοδο 1960-1990. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το RCP 2.6 προβλέπει μια σταθερή άνοδο έως το έτος 2030, έπειτα από το οποίο υπάρχει μια σχετική σταθεροποίηση η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το RCP 2.6 προβλέπει μείωση των εκπομπών των αέριων ρύπων από το έτος 2040 και έπειτα. Το πιο δυσόιωνο σενάριο είναι το RCP 8.5, σύμφωνα με το οποίο το πλήθος των ζεστών ημερών αυξάνεται ραγδαία και δεν ανακόπτεται έως το τέλος του αιώνα ενώ το RCP 4.5 προβλέπει μια ενδιάμεση κατάσταση συγκριτικά με τα αλλά δύο σενάρια.

4.4 Δεδομένα Ημερών παγετού

Οι μέρες παγετού μελετήθηκαν στις ίδιες χρονικές κλίμακες με τον κλιματικό δείκτη των ζεστών ημερών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.4, το σενάριο RCP 2.6 προβλέπει τις μικρότερες μεταβολές σε σχέση με την περίοδο αναφοράς με μέση μείωση -7 μέρες από τα μέσα του αιώνα και έπειτα. Το σενάριο RCP 4.5 προβλέπει και αυτό μείωση των ημερών παγετού, μικρότερη όμως από αυτή που προβλέπεται από το σενάριο RCP 8.5, σύμφωνα με το οποίο οι μέρες παγετού μειώνονται με ραγδαίο ρυθμό μέχρι το τέλος του αιώνα όπου σημειώνονται και οι χαμηλότερες τιμές, με τιμή ρεκόρ -39 μέρες.

4.5 Δεδομένα συνεχόμενων ξηρών ημερών

Ο τελευταίος κλιματικός δείκτης που μελετήθηκε ήταν οι συνεχόμενες ξηρές ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το RCP 2.6 προβλέπει μια σχετική σταθερότητα σε σχέση με τα δεδομένα της περιόδου αναφοράς, ενώ τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 προβλέπουν σχετική αύξηση του αριθμού των συνεχόμενων ξηρών ημερών προς το τέλος του αιώνα, με το σενάριο RCP 8.5 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καθώς το έτος 2100 οι συνεχόμενες ξηρές ημέρες θα αυξηθούν κατά 16 μέρες συγκριτικά με την περίοδο 1960-1990.

4.6 Το πιο αισιόδοξο σενάριο και τρόποι αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής
Συγκρίνοντας όλα τα αποτελέσματα, είναι προφανές πως το σενάριο RCP 2.6 είναι το σενάριο με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις καθώς στόχος του είναι η μείωση των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων, ατμοσφαιρικών ρύπων και αεροζόλ κατά 70 % με σκοπό την ελαχιστοποίηση της αύξησης της θερμοκρασίας, η οποία θα φτάσει μέχρι τους +2 °C σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. Σύμφωνα με μελέτες, εκτιμάται

ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα έχει προκαλέσει μέχρι σήμερα άνοδο της μέσης θερμοκρασίας κατά 1°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα. Εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες τάσεις εκτιμάται πως θα επιτευχθεί άνοδος της μέσης θερμοκρασίας κατά 1.5 °C μέχρι το έτος 2052. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να παρθούν σημαντικά μέτρα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας. Πρωταρχικό μέλημα είναι η μείωση των εκπομπών του CO₂ και των υπόλοιπων θερμοκηπικών αερίων, η χρήση βιοενέργειας και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ελάττωση της χρήσης γης και η εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture and Storage Technology – CCS) . Η CCS είναι μια τεχνολογία που μπορεί να συλλαμβάνει έως και το 90% των εκπομπών CO₂ που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και να αποτρέπει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας. Είναι προφανές πως για να επιτευχθούν τα παραπάνω είναι αναγκαία η ύπαρξη διεθνών φορέων και κυβερνήσεων προκειμένου να παρθούν τα σωστά μέτρα και να τηρείται η εφαρμογή τους. Στις 12 Δεκεμβρίου του 2015 υπογράφηκε η Συμφωνία του Παρισιού σύμφωνα με την οποία οι χώρες που την υπέγραψαν καλούνται να εφαρμόσουν μέτρα τα οποία αποσκοπούν στη σταθεροποίηση της ανόδου της θερμοκρασίας στους 2 °C.

Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας και η μείωση του υετού, σε συνδυασμό με την αύξηση των ξηρών περιόδων και των ζεστών ημερών καθώς και τη μείωση ημερών παγετού σε σχέση με το παρελθόν, είναι βασικές ενδείξεις για το τι ακολουθεί σε περίπτωση μη έγκαιρης αντιμετώπισης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Edwards, P. N. (2011). History of climate modeling. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(1), 128–139

Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 5696–5723

Werndl, Charlotte, 2016. On defining climate and climate change. The British Journal for the Philosophy of Science, 67. pp. 337-364.

Goosse H., P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutre, and V. Zunz (2010). Introduction to climate dynamics and climate modeling. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>. ISBN 9781107445833

C. K. Tolika; P. Zanis; C. Anagnostopoulou, 2012. Regional climate change scenarios for Greece: future temperature and precipitation projections from ensembles of RCMs. Global Nest Journal 14 (2012): 407-421

Katsafados Petros, Mavromatidis Ilias, 2015. Εισαγωγή στη φυσική της ατμόσφαιρας και την κλιματική αλλαγή. 9: 237-267.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109, 5 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Filippo Giorgi, William J. Gutowski Jr, 2015. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative, Annual Review of Environment and Resources 2015 40:1, 467-490

L. Nazarenko, G. A. Schmidt, R. L. Miller, N. Tausnev, M. Kelley, R. Ruedy, G. L. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer¹, R. Bleck¹, V. Canuto, Y. Cheng, T. L. Clune, A. D. Del Genio, G. Faluvegi, J. E. Hansen, R. J. Healy, N. Y. Kiang, D. Koch¹, A. A. Lacis, A. N. LeGrande, J. Lerner, K. K. Lo, S. Menon, V. Oinas, J. Perlwitz, M. J. Puma, D. Rind, A. Romanou, M. Sato, D. T. Shindell¹, S. Sun, K. Tsigaridis, N. Unger⁹, A. Voulgarakis, M.-S. Yao¹, Jinlun Zhang, 2015. Future climate change under RCP emission scenarios with GISSModel E2. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 7, no. 1, 244-267

Zanis P, Katragkou E, Ntogras C, Marougianni G and others (2015) Transient high-

resolution regional climate simulation for Greece over the period 1960-2100: evaluation and future projections. *Clim Res* 64:123-140.

<https://doi.org/10.3354/cr01304>

Coppola, E., Raffaele, F., Giorgi, F. *et al.* Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. *Clim Dyn* 57, 1293–1383 (2021).

<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05640-z>

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Tolika, K. (2019). On the analysis of the temporal precipitation distribution over Greece using the Precipitation Concentration Index (PCI): annual, seasonal, monthly analysis and association with the atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*. 137. 10.1007/s00704-018-2736-6.

Georgoulas A. K., D. Akritidis, A. Kalisoras, J. Kapsomenakis, D. Melas, C. S. Zerefos, P. Zanis, Climate change projections for Greece in the 21st century from high-resolution EURO-CORDEX RCM simulations, *Atmospheric Research*, 106049, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106049>, 2022.

Tapiador, Francisco & Navarro Martínez, Andrés & Moreno Galdon, Raul & Sanchez, Jose & García-Ortega, Eduardo. (2019). Regional climate models: 30 years of dynamical downscaling. *Atmospheric Research*. 235. 104785. 10.1016/j.atmosres.2019.104785.

G. P. Wayne, 2013, *Skeptical Science. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways*.

van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G.J. et al. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change* 109, 95 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>

Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J. et al. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109, 77 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>

Riahi, K., Rao, S., Krey, V. et al. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109, 33 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>

Zanis P., Tsikerdekis A., Akritidis D., 2018. DEAR-Clima: A data extraction application tool for regional climate. 14th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics. October 15-17, 2018.

Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M. *et al.* A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Reg Environ Change* **19**, 2621–2635 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01565-w>

Διαδικτυακές πηγές:

<http://meteo.geo.auth.gr:3838>

https://www.safecrete.gr/climate-models/?fbclid=IwAR21QX72rLkeAJ_GvpmLZr6VS35bJK3TfQ4QgtXF4HYqWzylahdptIRyTJs#1617101420361-ccc60a0e-9f84

https://eclass.aegean.gr/modules/document/file.php/GEO155/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B708_Projecting%20Climate%20Change_handouts.pdf

https://www.greenfacts.org/en/1-5-degrees-global-warming/index.htm?fbclid=IwAR0iTHrhpKjE_gjiO7yWHUCIA6Ke7KNzo8I1zzcmaKsxOvnBtasbEhVbnc

https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc/data/climate-indices.html?fbclid=IwAR1TSnbidJeT8y4t6_nJuD6vAZKzcaPRpKjgpH_ccBWk6vyvPvPWgFw6TI60

<https://svs.gsfc.nasa.gov/Gallery/NCCS.html>