



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

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΙΣ
ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΧΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΟΡΡΙΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018



ΒΟΡΡΙΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΙΣ ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΧΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

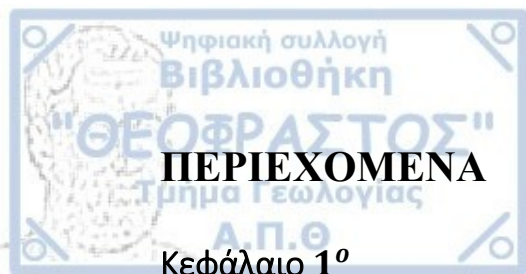
Επιβλέπων καθηγητής:

ΖΑΝΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ



**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΙΣ
ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΩΝ ΕΠΟΧΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΠΕΡΙΟΧΙΚΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

© Αναστασία Βορριά, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.



Κεφάλαιο 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ.1
1.1 Ορισμός κλίμα-κλιματική αλλαγή.....	σελ.1
1.2 Κλιματική αλλαγή στην Ελλάδα.....	σελ.4
1.3 Κλιματικά σενάρια και κλιματικά μοντέλα.....	σελ.5
1.4 Σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC scenarios).....	σελ. 6
1.5 Representative Concentration Pathways (RCPs).....	σελ. 7
1.5.1 RCP 8.5.....	σελ. 7
1.5.2 RCP 4.5.....	σελ.8
1.6 Εποχιακές Μεταβολές.....	σελ.9

Κεφάλαιο 2^ο ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ.....σελ.12

2.1 1 ^η μεθοδολογία.....	σελ.12
2.1.1 Έναρξη εποχών.....	σελ.13
2.1.2 Θηκογράμματα.....	σελ.14
2.1.3 Διαγράμματα.....	σελ.16
2.2 2 ^η μεθοδολογία.....	σελ.17

Κεφάλαιο 3^ο ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....σελ.20

3.1 1 ^η μεθοδολογία.....	σελ.20
3.1.1 Φθινόπωρο.....	σελ.20
3.1.2 Χειμώνας.....	σελ.21
3.1.3 Άνοιξη.....	σελ.22
3.1.4 Καλοκαίρι.....	σελ.23
3.2 2 ^η μεθοδολογία.....	σελ.25

Κεφάλαιο 4^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ.31

4.1 1 ^η μεθοδολογία.....	σελ.31
4.2 2 ^η μεθοδολογία.....	σελ.32

Κεφάλαιο 5^ο ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ.34

[Πληκτρολογήστε εδώ]



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος των προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το αντικείμενο μελέτης αφορά την κλιματική αλλαγή και την επίδραση αυτής στον εποχικό κύκλο, για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δεδομένων από το ερευνητικό πρόγραμμα CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) και των κλιματικών προσομοιώσεων RCM (Regional Climate Model simulations). Οι προσομοιώσεις αυτές παρέχουν δεδομένα θερμοκρασίας και άλλων κλιματικών παραμέτρων σε χρονοσειρές από το 1950 έως το 2100 και βασίζονται σε διαφορετικά σενάρια εκπομπών θερμοκηπικών αερίων (RCP scenarios). Σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση των ημερομηνιών έναρξης των εποχών για τις τριακονταετίες 1971-2000, 2021-2050 και 2071-2100, καθώς και ο διαχωρισμός ψυχρής – θερμής περιόδου για το διάστημα 1971-2100. Στοχεύει στην ανάλυση των αποτελεσμάτων και στην εκτίμηση μελλοντικών τροποποιήσεων των εποχών, τόσο στην έναρξη όσο και στη διάρκειά τους. Οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν εκτελέστηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον R – project καθώς και στο πρόγραμμα Microsoft Excel. Στο 1^ο κεφάλαιο περιλαμβάνονται εισαγωγικές έννοιες του κλίματος και των εποχιακών μεταβολών καθώς και χρήσιμες πληροφορίες για τις κλιματικές προσομοιώσεις και τα σενάρια εκπομπών αερίων. Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται βήμα – βήμα οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν και αναφέρονται κάποιες λεπτομέρειες για τα δεδομένα και την προέλευσή τους. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας, από κάθε μία μεθοδολογία ξεχωριστά, και γίνονται κάποιες εκτιμήσεις πάνω στο θέμα των εποχιακών μεταβολών. Το 4^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει συμπεράσματα σχετικά με την τροποποίηση του εποχικού κύκλου σε συνάρτηση με δύο διαφορετικά σενάρια εκπομπών αερίων, καθώς και εκτιμήσεις για το βαθμό της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ζάνη Πρόδρομο, ο οποίος ανέλαβε την επίβλεψη της πτυχιακής μου εργασίας, και με τη βοήθεια και την εργατικότητα του με καθοδήγησε στη διεκπεραίωση της μελέτης.

[Πληκτρολογήστε εδώ]



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας είναι ο χρονικός προσδιορισμός του ετήσιου εποχικού κύκλου τόσο στο παρελθόν όσο και στο μέλλον, με τη βοήθεια κλιματικών προσομοιώσεων, για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα δεδομένα προέρχονται από τις προσομοιώσεις RCM του ερευνητικού προγράμματος CORDEX, βασιζόμενα σε τρία διαφορετικά κλιματικά σενάρια: το historical, το οποίο αναφέρεται στην ιστορική περίοδο 1971-2000, και τα RCP4.5 – RCP8.5 τα οποία αναφέρονται στις μελλοντικές περιόδους 2021-2050 και 2071-2100. Η πρώτη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίζεται στον ετήσιο εποχικό κύκλο των ελάχιστων και μέγιστων θερμοκρασιών επιφάνειας, αξιοποιώντας το 25^ο και το 75^ο εκατοστημόριο της χρονοσειράς των θερμοκρασιών. Οι θερμοκρασίες του εκάστοτε τεταρτημορίου (1^{ου} και 3^{ου}) αποτελούν σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό της έναρξης κάθε εποχής, χρησιμοποιώντας το κριτήριο των έξι ημερών (de la Franca et al., 2013). Η δεύτερη μεθοδολογία βασίζεται στη συνημιτονοειδή συνάρτηση Fourier $T(t) = \bar{T} + A \cos(2\pi t - \theta)$, η οποία περιγράφει τον ετήσιο εποχικό κύκλο. Όπου $T(t)$ η θερμοκρασία σε συνάρτηση με τις ημέρες του έτους, $\bar{T}$ η μέση αύξηση της θερμοκρασίας, A το θερμοκρασιακό εύρος, και θ η φάση (σε ημέρες) που περιγράφει τη χρονική μετατόπιση των εποχών (καθυστέρηση ή πρόωρη εμφάνιση) (Stine, A. R., Huybers, P., Fung, I. Y., 2009). Τα αποτελέσματα και των δύο μεθοδολογιών εκτιμούν μία μελλοντική επιμήκυνση της θερμής περιόδου, σε βάρος της ψυχρής, νωρίτερη εμφάνιση της άνοιξης και του καλοκαιριού και σχετική μείωση των ημερών του χειμώνα, με το σενάριο RCP8.5 να δίνει μεγαλύτερη ένταση και πιο ακραία φαινόμενα (π.χ. εξαφάνιση του χειμώνα). Συμπερασματικά, αν ληφθεί υπ' όψη ότι το σενάριο RCP4.5 υποθέτει μειωμένες εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, σε σχέση με το RCP8.5, είναι πιθανό οι επιπτώσεις τις κλιματικής αλλαγής, με τη λήψη κατάλληλων μέτρων, να μην έχουν την ίδια μελλοντική επίδραση στην περιοδικότητα των εποχών και στην ισορροπία του κλίματος.

[Πληκτρολογήστε εδώ]



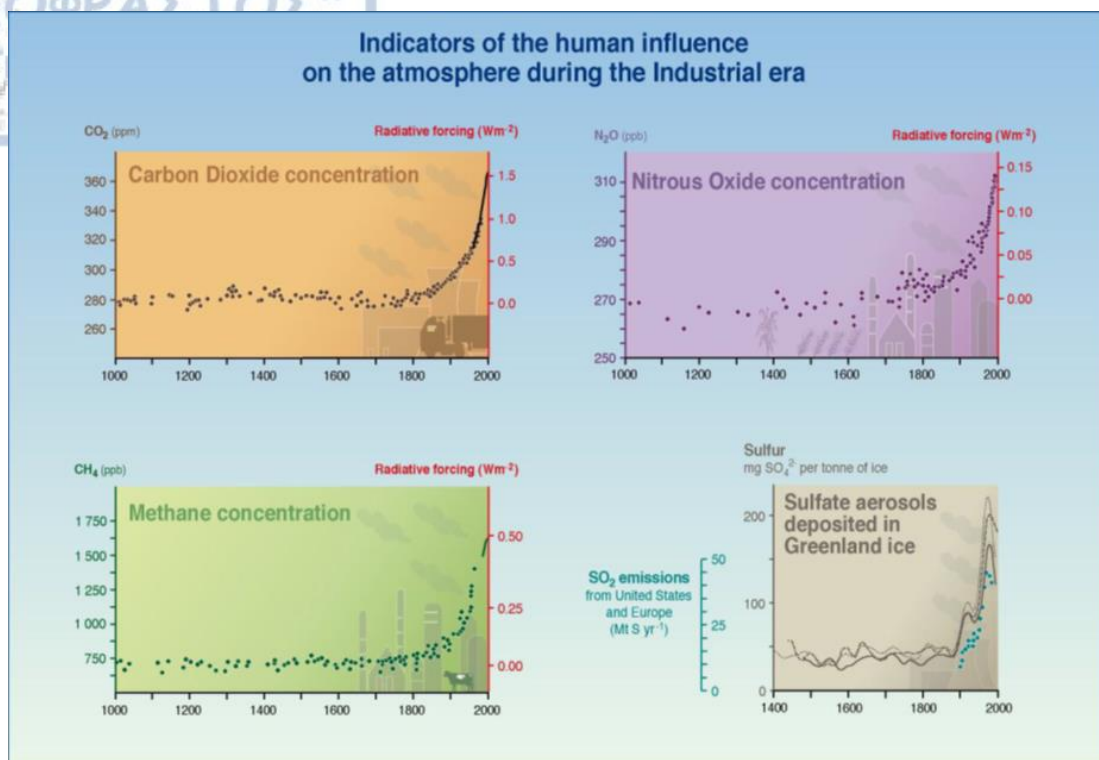
ABSTRACT

The purpose of this study is the definition of the timing of the seasons in the past and future, using climate simulations for the region of Thessaloniki. The data is obtained from RCM simulations of CORDEX research program, and it is based on three different climate scenarios: historical which refers to the historical period of 1971-2000, and the RCP4.5 – RCP8.5 which refer to the future periods of 2021-2050 and 2071-2100. The first method followed is based on the annual cycle of minimum and maximum surface temperature, using the 25th and the 75th percentile of the temperature timeseries. The temperatures at each quartile (1st and 3rd) are the thresholds that define the onset of each season, using the six-day spell criterion (de la Franca et al., 2013). The second method is based on the sinusoidal function (Fourier) $T(t) = \bar{T} + A \cos(2\pi t - \theta)$, which describes the annual cycle of the seasons. As $T(t)$ is defined the temperature in function with the days of the year, $\bar{T}$ as the mean warming, A as the amplitude of the temperatures and θ as the phase (in days) which describes the shift of the timing in seasons (later or earlier onset) (Stine, A. R., Huybers, P., Fung, I. Y., 2009). The results of both methods estimate a future lengthening of the warm period, at the expense of the cold period, earlier onset of spring and summer, and a decrease in the days of winter, with the RCP8.5 scenario estimating more intense and extreme phenomena (e.g. disappearance of winter). In conclusion, taking into account that RCP4.5 scenario is related to reduced gas emissions, in comparison with RCP8.5, it is possible that the effects of climate change won't be so intense for the annual cycle of the seasons and the climate balance, if the appropriate measures are taken.

Κεφάλαιο 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ορισμός κλίμα-κλιματική αλλαγή

Ως **κλίμα** ορίζεται η μέση καιρική κατάσταση μιας περιοχής για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως 30 ετών (WMO), συμπεριλαμβανομένων των ατμοσφαιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, υγρασία, κίνηση αερίων μαζών) οι οποίες επαναλαμβάνονται περιοδικά στο χρόνο. Τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της ανθρωπογενούς δραστηριότητας και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, το κλίμα της Γης τροποποιείται με βασικότερη συνέπεια την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Παρατηρείται, λοιπόν, μία **κλιματική αλλαγή** η οποία ορίζεται ως η αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος λόγω τροποποιήσεων στη μέση μεταβλητότητα των ατμοσφαιρικών συνθηκών για μια περίοδο μερικών δεκαετιών. Αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα η οποία μεταβάλλει τη σύσταση της ατμόσφαιρας και δρώντας σε συνδυασμό με τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος, επιφέρει μακροπρόθεσμες αλλαγές σε αυτό (IPCC). Η ανθρώπινη παρέμβαση περιλαμβάνει τις εκπομπές CO₂, CH₄, N₂O CFCs και την επίδραση στο O₃, αερίων ενώσεων γνωστών ως θερμοκηπικά αέρια, που παράγονται μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων καθώς και άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ενισχύοντας έτσι το ήδη υπάρχον φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η **Εικόνα 1** αποτελείται από τέσσερα διαγράμματα χρονοσειρών συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου. Πρόκειται για τις ενώσεις CO₂, N₂O, CH₄ και SO₄-2 και τη συγκέντρωση αυτών στην ατμόσφαιρα την χλιετία 1000 – 2000. Παρατηρούμε ότι το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, από τη βιομηχανική ανάπτυξη και έπειτα, οι συγκεντρώσεις αυτές αυξάνονται κατακόρυφα με σχεδόν γραμμική άνοδο. Η αύξηση αυτή έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την παράλληλη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης.



Εικόνα 1: Χρονοσειρές των συγκεντρώσεων CO₂, N₂O, CH₄ και SO₄²⁻ κατά την διάρκεια της τελευταίας χιλιετίας. Πηγή: <https://www.greenfacts.org/en/climate-change-ar3/toolboxes/figspm-2s.htm>

Η κλιματική αλλαγή, εκτός από την υπερθέρμανση του πλανήτη, είναι υπαίτια και για τις αλλαγές στη διάρκεια και στην έναρξη των εποχών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δείκτη κλιματικής αλλαγής αποτελεί η άνοιξη. Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα πραγματοποιήθηκαν πολλές έρευνες (Qian et al. 2009, 2011; Song et al. 2010; Ault et al. 2011) στις οποίες παρατηρήθηκε μια τάση για νωρίτερη έναρξη της άνοιξης και επιμήκυνση της διάρκειάς της. Η παρατήρηση και αξιολόγηση των ετήσιων θερμοκρασιακών κύκλων έγινε με βάση τα δεδομένα των παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων (GCMs/ οριζόντιας ανάλυσης 300 χιλιομέτρων). Παρ' όλα αυτά, κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από τις δικές της κλιματικές ιδιαιτερότητες οι οποίες οφείλονται στους διαφορετικούς τύπους καιρού, την ατμοσφαιρική κυκλοφορία, τη βλάστηση, την τοπογραφία και άλλους παράγοντες. Ένα βασικό πρόβλημα που προκύπτει κατά τη μελέτη των κλιματικών εποχών είναι ότι ο προσδιορισμός της έναρξης αυτών δεν είναι ο ίδιος σε παγκόσμιο επίπεδο. Υπάρχουν μέθοδοι που βασίζονται σε φαινολογικά κριτήρια (τα οποία σχετίζονται με το βιολογικό κύκλο συγκεκριμένων φυτικών ειδών) (Cayan et al., 2001; Aasa et al., 2004; Zhu et al., 2012), άλλα που σχετίζονται με κλιματικές μεταβλητές (Wallace and Osborn, 2002; Jaagus et

al., 2003; Linderholm et al., 2008; Stine et al., 2009; Qian et al., 2011) και κάποια που βασίζονται και στα δύο κριτήρια (Menzel et al., 2003; Schwartz et al., 2006; Ault et al., 2011). Τα φαινολογικά κριτήρια είναι τα πιο υποκειμενικά, καθώς εξαρτώνται από την περιοχή μελέτης, συγκεκριμένα φυτικά είδη ή τις ανθρώπινες παρατηρήσεις. Ταυτόχρονα, οι κλιματικές μεταβλητές έχουν μία καλύτερη βάση δεδομένων καθώς προέρχονται από ενόργανες μετρήσεις απ' ό,τι από τα φαινολογικά δεδομένα. Τυπικά, οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται είναι η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, ανάλογα με το ποια από τις δύο έχει σημαντικότερη επιρροή στο τοπικό κλίμα. Οι εποχές στους τροπικούς συνήθως προσδιορίζονται από το καθεστώς βροχοπτώσεων (Lo et al., 2008). Αυτό συμβαίνει γιατί οι εναλλαγές ξηρών και υγρών περιόδων είναι έντονα διακριτές εξαιτίας του φαινομένου El Niño καθώς οι εποχιακές διακυμάνσεις εξαιτίας της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας είναι αμελητέες. Την ίδια στιγμή, στις εύκρατες ζώνες η θερμοκρασία είναι ο κυριότερος παράγοντας προσδιορισμού των εποχιακών αλλαγών. Η πλειοψηφία των ερευνών που χρησιμοποιούν κλιματικούς δείκτες προερχόμενους από ημερήσιες παρατηρήσεις, βασίζονται σε κάποια κλιματικά (θερμοκρασίας ή βροχόπτωσης) προκαθορισμένα όρια. Οι έρευνες αυτές πραγματοποιούνται κυρίως σε περιοχές μέσων έως μεγάλων γεωγραφικών πλατών, με περισσότερο ή λιγότερο ομοιογενείς κλιματικές συνθήκες. Πρόκειται για τις περιπτώσεις των Σκανδιναβικών χωρών (Carter, 1998; Linderholm et al., 2008; Qian et al., 2009), περιοχών της Κίνας (Chen et al., 2005; Song et al., 2010; Qian et al., 2011) ή της Βορείου Αμερικής (Lundquist et al., 2004; Cayan et al., 2001). Κάποιες έρευνες (Qian et al., 2009; Stine et al., 2009) έδειξαν ότι η χρήση των προκαθορισμένων κλιματικών ορίων μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως αυθαίρετα συμπεράσματα και μεγάλη εξάρτηση από το τοπικό επίπεδο. Επιπλέον, περιοχές με έντονη κλιματική ετερογένεια θα μπορούσαν να έχουν ασυνέπειες κατά τη χρήση προκαθορισμένων κλιματικών ορίων που προέρχονται από άλλες κλιματικές περιοχές. Η CCI/CLIVAR/JCOMM Ειδική Ομάδα Ανίχνευσης Δεικτών και Κλιματικής Αλλαγής (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) προτείνει ότι σε μεγάλες γεωγραφικά περιοχές με περίπλοκη τοπογραφία, η χρήση κλιματικών δεικτών που βασίζονται στον αριθμό των ημερών που υπερβαίνουν κάποια όρια που προκύπτουν από τα εκατοστημόρια της χρονοσειράς των θερμοκρασιών, είναι πιο κατάλληλη από τη χρήση αντίστοιχων δεικτών που βασίζονται στα προκαθορισμένα όρια που προορίζονται για χωρική σύγκριση. Αυτό συμβαίνει επειδή τέτοιοι προκαθορισμένοι δείκτες χρησιμοποιούν το ίδιο κομμάτι της κατανομής πιθανοτήτων της θερμοκρασίας για κάθε περιοχή (Zhang et al., 2011). Στη

συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα χαρακτηριστικά των εποχών με τη χρήση περιοχικών κλιματικών προσομοιώσεων για την περιοχή της Θεσσαλονίκης.

1.2 Κλιματική αλλαγή στην Ελλάδα

Η Ελλάδα βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Βαλκανικής χερσονήσου σε μία περιοχή που χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, κατά κύριο λόγο εξαιτίας της οροσειράς της Πίνδου, και αποτελεί μια ενσωματωμένη λωρίδα γης μέσα στη Μεσόγειο θάλασσα. Είναι συνεπώς απαραίτητο το κλίμα της να μελετάται σε τοπικό επίπεδο εξαιτίας των ιδιαίτερων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών κάθε περιοχής. Όσον αφορά τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής στον ελληνικό χώρο, τυπικά χρησιμοποιούνται δεδομένα που βασίζονται στις προσομοιώσεις με GCM, στο οποίο η Ελλάδα αναπαρίσταται από ένα πλέγμα δύο μόνο τετραγώνων (Parry, 2000; Mitchell *et al.*, 2002). Επιπλέον, η Μεσόγειος θεωρείται η περιοχή με τη μεγαλύτερη ανταπόκριση στην κλιματική αλλαγή και συχνά αποκαλείται με τον όρο “hot spot” (Giorgi, 2006). Πολλές μελέτες που βασίζονται στα σενάρια SRES και RCP προβλέπουν ότι μέχρι και τις τελευταίες δεκαετίες του 21^{ου} αιώνα η περιοχή της Μεσογείου θα πλήττεται από υψηλές θερμοκρασίες και έντονη ξηρασία (Gibelin and Deque, 2003; Pal *et al.*, 2004; Giorgi and Bi, 2005; Giorgi and Lionello, 2008. Gao *et al.*, 2006). Τα σενάρια εκπομπών αερίων φαίνεται να έχουν αξιοσημείωτη συνάφεια μεταξύ τους όσον αφορά τις μελλοντικές προβλέψεις για το μεσογειακό κλίμα. Συγκεκριμένα, έδειξαν πως το χειμώνα η μέση μεταβολή των βροχοπτώσεων είναι θετική στη βόρεια Μεσόγειο και αρνητική στη νότια, ενώ τις υπόλοιπες εποχές η βροχόπτωση μειώνεται σημαντικά. Οι Hertig και Jacobeit (2007), χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους υποβιβασμού της κλίμακας για την εκτίμηση της μεταβολής στη βροχόπτωση στη Μεσόγειο την περίοδο 1990-2100, προέβλεψαν ότι τα ανατολικά και νοτιοανατολικά τμήματα αυτής θα έρχονται αντιμέτωπα με αρνητικές μεταβολές στη βροχόπτωση από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάιο. Άλλες πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται στις μεταβολές των ακραίων τιμών θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Ο Diffenbaugh *et al.* (2007), με τη χρήση της υψηλής χωρικής ανάλυσης προσομοίωσης του RegCM3, ανέφερε πως οι εκτεταμένες συγκεντρώσεις θερμοκηπικών αερίων έχουν αυξήσει δραματικά τον κίνδυνο υπερθέρμανσης της Μεσογείου, με τις εμφανίσεις ακραίων θερμοκρασιών

αυξημένων κατά 200-500% σε όλη την έκταση της Μεσογείου. Οι Goubanova και Li (2007) εκτίμησαν τις πιθανές μελλοντικές αλλαγές στις ακραίες τιμές των κλιματικών παραμέτρων και συμπεράναν ότι η λεκάνη της Μεσογείου θα έρθει αντιμέτωπη με θερμότερο και ξηρότερο κλίμα. Ακόμα και αν όλες οι εκπομπές αερίων και αεροζόλ διατηρηθούν σταθερές στα επίπεδα του 2000, θα υπάρχει μία μέση αύξηση της θερμοκρασίας κατά $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ανά δεκαετία εξαιτίας της θερμικής αδράνειας των ωκεανών και των παγοκαλυμάτων λόγω της προσπάθειάς τους για μακροπρόθεσμη προσαρμογή στις συνθήκες (IPCC, 2007). Άλλες έρευνες που βασίζονται σε προσομοιώσεις με RCMs (Zanis et al., 2009; Tolika et al., 2012; Zanis et al., 2015) προβλέπουν μία μέση αύξηση της θερμοκρασίας το χειμώνα κατά $3 - 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, σύμφωνα με το σενάριο A2, $3 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το A1B και $2.5 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το B2. Η αντίστοιχη μέση αύξηση της θερμοκρασίας το καλοκαίρι θα είναι ακόμα μεγαλύτερη, κατά $3.5 - 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το σενάριο A2, $3.5 - 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το A1B και $3 - 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ σύμφωνα με το B2. Αξιοσημείωτη μείωση θα παρουσιάσουν και οι βροχοπτώσεις, σύμφωνα με την παραπάνω έρευνα, ακολουθώντας και πάλι τα σενάρια A2, A1B και B2, από -15% έως -30% το χειμώνα και έως ένα ανησυχητικό -60% το καλοκαίρι.

1.3 Κλιματικά σενάρια και κλιματικά μοντέλα

Ως **κλιματικό σενάριο** ορίζουμε μία απλουστευμένη αναπαράσταση του μελλοντικού κλίματος που έχει κατασκευαστεί προκειμένου να γίνει μία εκτίμηση των επιπτώσεων της ανθρώπινης επίδρασης στο μελλοντικό κλίμα (IPCC). Τα κλιματικά σενάρια χρησιμοποιούν **κλιματικά μοντέλα**, μία αριθμητική αναπαράσταση του κλίματος η οποία βασίζεται στις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες του εκάστοτε κλιματικού συστήματος. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας, έχει βελτιωθεί τόσο η χωρική ανάλυση των μοντέλων όσο και η ακρίβειά τους, καθώς εκτός από τις φυσικές παραμέτρους λαμβάνουν υπ' όψη και τον ανθρώπινο παράγοντα. Έτσι έχουν δημιουργηθεί διαφορετικά σενάρια για το μελλοντικό κλίμα τα οποία συμπεριλαμβάνουν παραμέτρους όπως τις μελλοντικές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, τις αυξανόμενες ανάγκες του πληθυσμού λόγω της οικονομικής, κοινωνικής και τεχνολογικής ανάπτυξης, καθώς και ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς και τη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος. Προκειμένου η εμβέλεια και η ακρίβεια των κλιματικών μοντέλων να αγγίζει και το τοπικό κλίμα, δημιουργήθηκαν μέθοδοι υποβιβασμού της κλίμακας οι οποίες διακρίνονται σε εμπειρικές – στατιστικές (Empirical – Statistical

downscaling methods) και σε μεθόδους μοντέλων περιοχικής – τοπικής κλίμακας ή δυναμικού υποβιβασμού (Model based downscaling methods or Dynamical downscaling). Οι εμπειρικές – στατιστικές μέθοδοι αξιοποιούν τη σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών της γενικής κυκλοφορίας και των εξαρτημένων μεταβλητών που ανάγονται στο τοπικό κλίμα. Οι μέθοδοι δυναμικού υποβιβασμού χρησιμοποιούν την αρχή της “εμφύτευσης” (nesting) μέσα στα μοντέλα μεγάλης κλίμακας γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Model – GCMs), των μικρότερης κλίμακας περιοχικών μοντέλων (Regional Climate Models – RCMs). Τα μοντέλα περιοχικής κλίμακας έχουν χωρική ανάλυση 25x25 km και καλύπτουν μια περιοχή εμβαδού 10^7 km^2 (Τολικά Κ. 2005; Σοφιάδης Ι. 2017).

1.4 Σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή (IPCC scenarios)

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) έχει αναπτύξει τα SRES (Special Report on Emission Scenarios) τα οποία αποτελούν μια ομάδα τεσσάρων κλιματικών σεναρίων. Πλέον, έχουν αντικατασταθεί από νεότερα σενάρια (RCPs), και μετονομάστηκαν pathways. Συνοψίζονται στα εξής:

- A1: Η οικογένεια αυτή σεναρίων υποθέτει μια ραγδαία ανάπτυξη της οικονομίας και του παγκόσμιου πληθυσμού, η οποία κορυφώνεται στα μέσα του 21^{ου} αιώνα ακολουθώντας έπειτα καθοδική πορεία, και συνοδεύεται από παράλληλη ανάπτυξη της τεχνολογίας. Υποθέτει την εξάλειψη των οικονομικών ανισοτήτων μεταξύ των κοινωνιών και λαμβάνει υπ’ όψη τρεις διαφορετικές εκδοχές στην παραγωγή ενέργειας: α) την εκτεταμένη καύση ορυκτών καυσίμων, β) την αποκλειστική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γ) την ισορροπημένη χρήση ορυκτών καυσίμων και ανόργανων (εναλλακτικών) πηγών ενέργειας.
- A2: Υποθέτει μία ετερογένεια στην οικονομική ανάπτυξη των κοινωνιών (σε αντίθεση με την A1 οικογένεια σεναρίων). Η αύξηση του πληθυσμού είναι ραγδαία αλλά η τεχνολογική εξέλιξη ακολουθεί μια σταθερή και αργή άνοδο.
- B1: Περιγράφει την ίδια ραγδαία ανάπτυξη του παγκόσμιου πληθυσμού με το σενάριο A1, μέχρι το 2050, με την αντίστοιχη μετ’ έπειτα πτωτική τάση, αλλά αυτή τη φορά με την ταυτόχρονη εισαγωγή καθαρών μορφών ενέργειας, οι

οποίες συνεισφέρουν στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου. Πρόκειται για το πιο “αισιόδοξο” σενάριο από τα τέσσερα.

- B2: Βασίζεται στην περιγραφή ενός παγκόσμιου πληθυσμού που αναπτύσσεται με πιο αργούς ρυθμούς από το A2 σενάριο, με μέτρια επίπεδα οικονομικής ανάπτυξης και με λιγότερο ραγδαία από το B1 και A1 τεχνολογική ανάπτυξη, η οποία είναι ποικίλη. Υποθέτει, επίσης, τον προσανατολισμό στην προστασία του περιβάλλοντος και την κοινωνική ισότητα σε τοπικό επίπεδο (IPCC).

1.5 Representative Concentration Pathways (RCPs)

Το 2014 το IPCC εισήγαγε μία νέα γενιά κλιματικών σεναρίων, τα **RCPs (Representative Concentration Pathways)**. Πρόκειται για χωροχρονικά εξαρτώμενες σειρές από τις συγκεντρώσεις θερμοκηπικών αερίων, αεροζόλ και ρύπων που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Εκτός από τις ποσοτικές συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων, τα RCPs περιγράφουν και το **radiative forcing** για το 2100. Το radiative forcing εκφράζει την περίσσεια της ενέργειας στη γη εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ορίζεται ως 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. Έχει θετικό πρόσημο λόγω θερμοκηπικών αερίων και αρνητικό λόγω των αεροζόλ. Η μονάδα μέτρησής του είναι το 1 Watt/m^2 . Έτσι, το σενάριο RCP 4.5, για παράδειγμα, υποθέτει την επίδραση 4,5 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (θετικό πλεόνασμα ενέργειας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου) το 2100. Μία βασική διαφορά μεταξύ των SRES και RCP σεναρίων, είναι ότι τα RCP δεν λαμβάνουν υπ’ όψη τους κοινωνικο-οικονομικούς παράγοντες.

1.5.1 RCP 8.5 (αυξημένες εκπομπές θερμοκηπικών αερίων)

Υποθέτει την απουσία της πολιτικής για μείωση των εκπομπών στις μελλοντικές κοινωνίες. Αναπτύχθηκε από το Διεθνές Ινστιτούτο Ανάλυσης Εφαρμοσμένων Συστημάτων στην Αυστρία (International Institute for Applied System Analysis – IIASA) και χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες εκπομπές θερμοκηπικών αερίων που οδηγούν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Συγκριτικά με το σενάριο A1 (SRES) προκύπτουν οι εξής παραδοχές:

- Οι εκπομπές CO₂ θα έχουν τριπλασιαστεί έως το 2100.
- Η αύξηση των εκπομπών μεθανίου θα είναι ραγδαία.

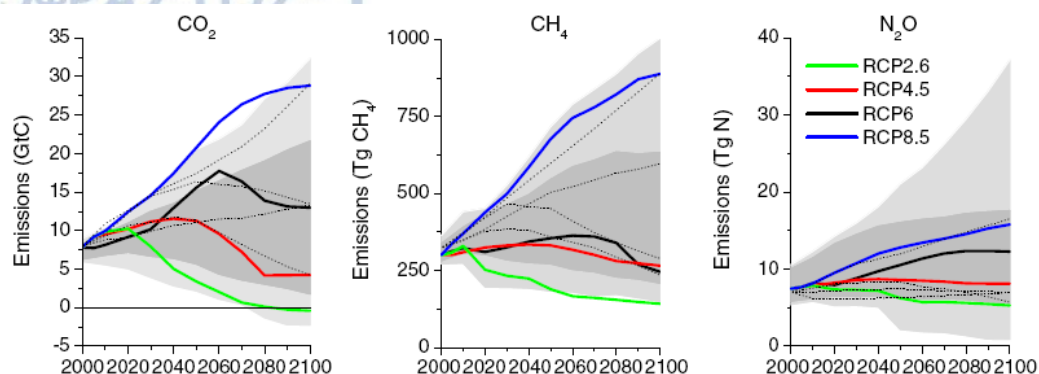
- Λόγω της εκτεταμένης αύξησης του πληθυσμού, θα αυξηθούν η χρήση και η καλλιέργεια της γης.
- Ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αγγίξει τα 12 δισεκατομμύρια το 2100.
- Η τεχνολογία θα έχει χαμηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης.
- Η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα θα είναι μεγάλη.
- Υψηλή ενεργειακή ζήτηση/κατανάλωση.
- Απουσία περιβαλλοντικής πολιτικής.

1.5.2 RCP 4.5 (μέτριες εκπομπές θερμοκηπικών αερίων)

Αναπτύχθηκε από το Pacific Northwest National Laboratory στις ΗΠΑ. Περιγράφει ένα μελλοντικό σενάριο με σημαντική μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και ένα radiative forcing το οποίο σταθεροποιείται μετά το 2100. Συγκριτικά με το σενάριο B1 (SRES) προκύπτει:

- Μείωση ενεργειακής ζήτησης/κατανάλωσης.
- Εφαρμογή προγραμμάτων αναδάσωσης.
- Μειωμένη χρήση και καλλιέργεια της γης λόγω διατροφικών αλλαγών.
- Αυστηρότερες περιβαλλοντικές πολιτικές.
- Σταθερές εκπομπές μεθανίου.
- Μικρή αύξηση των εκπομπών CO₂, λίγο πριν τη μείωση που θα ακολουθήσει, το 2040.

Η **Εικόνα 2** παρουσιάζει τις εκπομπές α) διοξειδίου του άνθρακα β) μεθανίου και γ) υποξειδίου του αζώτου με βάση τα σενάρια RCP το διάστημα 2000-2100. Το σενάριο RCP8.5 υποθέτει τις πιο αυξημένες εκπομπές αέριων ρύπων σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια, ενώ αντίστοιχα το RCP2.6 εκτιμά ότι αυτές θα έχουν μειωθεί σημαντικά μέχρι το 2100.



Εικόνα 2: Εκπομπές α) διοξειδίου του άνθρακα β) μεθανίου γ) υποξειδίου του αζώτου με βάση τα σενάρια: RCP (μπλε, μαύρη, κόκκινη, πράσινη καμπύλη), IAM (90th and 98th percentile – γκρι περιοχή), SRES (διακεκομμένες καμπύλες). Πηγή: <https://www.skepticalscience.com/rcp.php?t=3#srescomparison>

1.6 Εποχιακές Μεταβολές

Οι αλλαγές των εποχών καθορίζονται από την ποσότητα της ακτινοβολίας του ήλιου που προσπίπτει στη γη. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από παράγοντες όπως η γωνία πρόσπτωσης και η διάρκεια της ημέρας. Η τελευταία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους λόγω της ελλειψοειδούς περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο. Έτσι η απόσταση γης-ηλίου είναι μικρότερη τον Ιανουάριο (147 εκατομμύρια χιλιόμετρα) σε σχέση με τον Ιούλιο (152 εκατομμύρια χιλιόμετρα). Αυτό σημαίνει ότι το καλοκαίρι του νότιου ημισφαιρίου είναι πιο θερμό (Ιανουάριος) σε σχέση με το καλοκαίρι του βόρειου ημισφαιρίου (Ιούλιος). Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη, εξαρτάται και από το πάχος της ατμόσφαιρας, καθώς ένα μέρος της απορροφάται, αντανακλάται ή διαχέεται από αυτήν. Όταν το πάχος της ατμόσφαιρας είναι μεγάλο τότε μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από αυτήν.

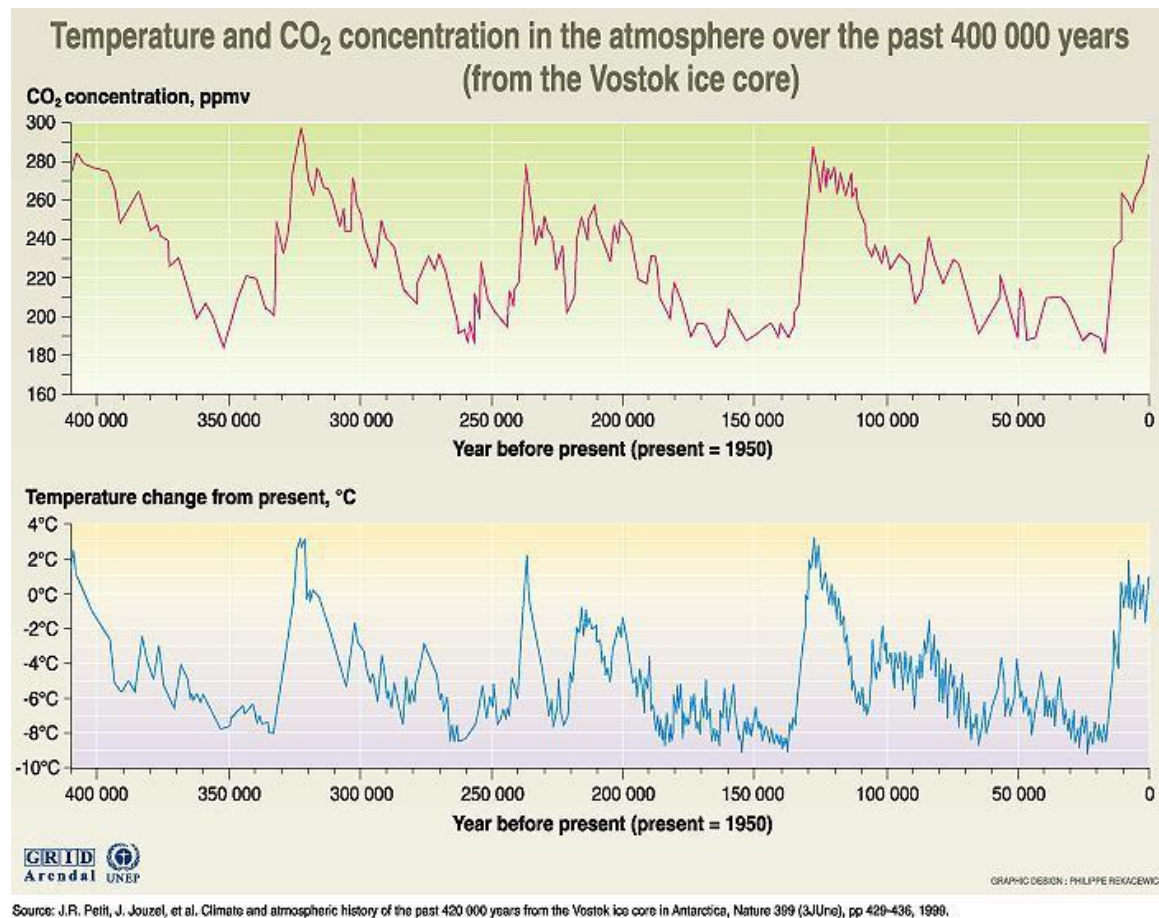
Η εναλλαγή των εποχών σχετίζεται με την ποσότητα της θερμότητας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και κατ' επέκταση τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασιακή αυτή μεταβολή οφείλεται στη διαφορετική γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η γωνία με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες του ήλιου στην επιφάνεια της γης καθορίζουν το εμβαδό που θα δεχτεί την ηλιακή ενέργεια. Η κλίση αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους και από τόπο σε τόπο καθώς εξαρτάται από την ελλειπτική κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο και από το γεωγραφικό πλάτος. Το επίπεδο που σχηματίζει η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο ονομάζεται εκλειπτική

και η γωνία μεταξύ του επιπέδου που σχηματίζει ο ισημερινός με την εκλειπτική ονομάζεται λόξωση εκλειπτικής και είναι ίση με 23,5 μοίρες. Έτσι από την εαρινή μέχρι τη φθινοπωρινή ισημερία ο ήλιος βρίσκεται πιο κοντά και οι ακτίνες του έχουν μεγάλη γωνία κλίσης στο βόρειο ημισφαίριο, το οποίο διανύει τη θερμή περίοδο. Αντίστοιχα, το νότιο ημισφαίριο δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ενέργειας (λόγω γωνίας κλίσης και απόστασης) από τη φθινοπωρινή μέχρι και την εαρινή ισημερία. Επομένως, η εναλλαγή των εποχών οφείλεται στη λόξωση της εκλειπτικής, κατά κύριο λόγο (Λαζαρίδης Μ. 2010)

Η ποσότητα, όμως, της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει τελικά στην επιφάνεια της γης, αλλά και η διαδρομή που θα ακολουθήσει μετ' έπειτα εξαρτάται από τη σύσταση της ατμόσφαιρας. Η αλλαγή στη σύσταση της ατμόσφαιρας επιδρά στο ενεργειακό ισοζύγιο του πλανήτη και επομένως στο κλίμα (Ζάνης Π. Σημειώσεις Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Κλιματικές Μεταβολές, 2014). Η ατμόσφαιρα της γης δρα ως ένα φυσικό θερμοκήπιο το οποίο διατηρεί τη μέση θερμοκρασία της στους 15 βαθμούς Κελσίου, επιτρέποντας έτσι τη διατήρηση της ζωής. Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην ποσότητα της θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία που κατακρατάται από τα λεγόμενα θερμοκηπικά αέρια. Το βασικότερο απ' όλα, λόγω μεγαλύτερου δυναμικού συμβολής, είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο φτάνει στην ατμόσφαιρα μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων αλλά και μέσω βιολογικών και φυσικών διαδικασιών (π.χ. αποσύνθεση οργανισμών, εκρήξεις ηφαιστειών). Τα τελευταία, όμως, χρόνια, μετά τη βιομηχανική επανάσταση, ο άνθρωπος με τις δραστηριότητές του έχει αυξήσει τη συνολική ποσότητα CO₂ στην ατμόσφαιρα, με άμεσο επακόλουθο την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας. Έτσι εκτός από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία, διαταράσσεται και ο εποχικός κύκλος καθώς οι θερμοκρασίες, λόγω και των μηχανισμών ανάδρασης, διατηρούνται υψηλές για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ένα παράδειγμα μηχανισμού ανάδρασης είναι το λιώσιμο των πάγων. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί το λιώσιμο των πάγων. Αυτό σημαίνει ότι το χρώμα των ωκεανών από το διάστημα θα φαίνεται σκουρότερο, άρα θα απορροφάται περισσότερη ηλιακή ενέργεια, με βάση το νόμο του Plank για την ακτινοβολία μέλανος σώματος, αφού θα έχει μειωθεί ταυτόχρονα και η ανακλαστικότητα. Μεγαλύτερη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας συνεπάγεται περεταίρω αύξηση της θερμοκρασίας, άρα και λιώσιμο των πάγων.

Η **Εικόνα 3** παρουσιάζει τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα τα τελευταία 400.000 χρόνια σε σύγκριση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Παρατηρείται μία

σχεδόν παράλληλη εξέλιξη των χρονοσειρών, πράγμα που σημαίνει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Τα δεδομένα προέρχονται από καρότα πάγου στο Vostok.



Εικόνα 3: Συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα και θερμοκρασία τα τελευταία 400.000 χρόνια (από καρότα πάγου στο Vostok). Πηγή: J. R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3June), pp 429-436, 1999.

Κεφάλαιο 2^ο ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές ημερήσιας μέσης ($\bar{T}$), μέγιστης (T_{max}) και ελάχιστης (T_{min}) θερμοκρασίας επιφάνειας από περιοχικές κλιματικές προσομοιώσεις του μοντέλου RCM (Regional Climate Model) του ερευνητικού προγράμματος CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment). Τα δεδομένα έχουν υψηλή χωρική ανάλυση (0.11°) και αφορούν την περιοχή της κεντρικής Ευρώπης για μια περίοδο από το 1950 έως το 2100. Η ιστορική περίοδος (historical) αναφέρεται στο διάστημα 1950-2004, ενώ οι μελλοντικές περίοδοι αναφέρονται στο διάστημα 2005-2100 και βασίζονται στα σενάρια RCP4.5, RCP2.6 και RCP8.5. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας του μοντέλου RCM βασισμένα στα σενάρια historical για την περίοδο 1971-2000 και στα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για τις μελλοντικές περιόδους 2021-2050 και 2071-2100, καθώς και δεδομένα παρατήρησης ημερήσιας θερμοκρασίας από το Μετεωροσκοπείο του Α.Π.Θ. Σκοπός είναι η εύρεση της έναρξης των εποχών συγκρίνοντας την ιστορική περίοδο (historical) με τα σενάρια RCP4.5, RCP8.5 και με τις ημερήσιες παρατηρήσεις, καθώς και η εκτίμηση πιθανών κλιματικών αλλαγών λόγω χρονικής μετατόπισης και μεταβολής της διάρκειας των εποχών. Οι χρονοσειρές είναι χωρισμένες σε τριακονταετίες, ανάλογα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μεθοδολογίες βασιζόμενες στα επιστημονικά άρθρα των de la Franca et al., (2013) και Stine et al., (2009).

2.1. 1^η μεθοδολογία

Βασίστηκε στο άρθρο των de la Franca et al., (2013). Για τον υπολογισμό της έναρξης κάθε εποχής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ημερήσιας μέγιστης και μέσης ημερήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας (T_{max} και T_{min}) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης τις εξής τριακονταετίες: 1971-2000, 2021-2050, 2071-2100. Για την περίοδο 1971-2000 γίνεται η σύγκριση της ιστορικής περιόδου (historical) με τις ημερήσιες παρατηρήσεις από το Μετεωροσκοπείο του Α.Π.Θ. Για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100 γίνεται σύγκριση των μελλοντικών σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5 με την ιστορική περίοδο (historical) την τριακονταετία 1971-2000, ξεχωριστά. Τα εκατοστημόρια της χρονοσειράς της ιστορικής περιόδου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μελλοντικών κλιματικών εποχών, για κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο μας δίνεται η δυνατότητα να μελετήσουμε πώς οι εποχές από μία τωρινή σκοπιά

ενδέχεται να τροποποιηθούν σύμφωνα με τις εκάστοτε μελλοντικές κλιματικές αλλαγές. Η 1^η μεθοδολογία δεν λαμβάνει υπ' όψη όλα τα χαρακτηριστικά της δομής του εποχικού κύκλου, όπως το εύρος και η φάση αυτού του κύκλου, αλλά έχει ως σκοπό να περιγράψει με μία σχετικά απλή διαδικασία τις εναλλαγές των εποχών, από μία στατιστική-κλιματολογική προσέγγιση (de la Franca et al., 2013).

2.1.1 Έναρξη εποχών

Για τον προσδιορισμό των ημερομηνιών έναρξης των εποχών χρησιμοποιούνται δύο όρια, το 25^ο για την ψυχρή (χειμώνας – άνοιξη) και το 75^ο εκατοστημόριο για τη θερμή περίοδο (καλοκαίρι – φθινόπωρο) από τις ημερήσιες ελάχιστες και μέγιστες τιμές, αντίστοιχα, κάθε τριακονταετίας. Έπειτα χρησιμοποιείται το κριτήριο των έξι ημερών όπου η θερμοκρασία για πρώτη φορά θα ξεπεράσει αυτό το όριο (προς τα πάνω ή προς τα κάτω), για να οριστεί η έναρξη των εποχών. Για παράδειγμα, για τον προσδιορισμό της έναρξης του καλοκαιριού της ιστορικής περιόδου για την τριακονταετία 1971-2000 χρησιμοποιούνται οι ημερήσιες μέγιστες θερμοκρασίες T_{max}. Για κάθε ένα από τα τριάντα έτη υπολογίζεται η μέση τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας (T_{max}) για μία συγκεκριμένη ημέρα (π.χ. {T_{max} της 1/1/1971 + T_{max} της 1/1/1972....}/30 και έπειτα {T_{max} της 2/1/1971 + T_{max} της 2/1/1972.....}/30). Από τις 365 τιμές που προκύπτουν υπολογίζεται το 75th percentile (ή το 3^ο quartile) το οποίο αποτελεί το όριο για την έναρξη του καλοκαιριού. Οι πρώτες έξι μέρες που θα ξεπερνούν θερμοκρασιακά αυτό το όριο θα σημάνουν και την έναρξη του καλοκαιριού (με πρώτη ημέρα έναρξης την πρώτη από τις έξι). Αντίστοιχα, για το φθινόπωρο, οι πρώτες έξι μέρες που η θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη από αυτό το όριο αντιστοιχούν στην έναρξη του φθινόπωρου. Για την ψυχρή περίοδο, υπολογίζεται το 25^ο εκατοστημόριο για κάθε μία από τις 365 μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες της τριακονταετίας. Οι πρώτες έξι μέρες που η θερμοκρασία ξεπερνά το 25th percentile T_{min} σηματοδοτούν την έναρξη της άνοιξης, ενώ οι πρώτες έξι μέρες που η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από αυτό το όριο, σηματοδοτούν την έναρξη του χειμώνα. Τα θερμοκρασιακά αυτά όρια που υπολογίστηκαν για κάθε ένα από τα σενάρια για τις αντίστοιχες τριακονταετίες, μπορούν να αποτελέσουν δείκτες κλιματικής αλλαγής, όπως για παράδειγμα συμβαίνει όταν αυτά αυξάνονται. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό με την προοπτική της παρούσας κλιματικής κατάστασης να πραγματοποιηθεί μία εκτίμηση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών. Σε κάθε περίπτωση, βάση σύγκρισης αποτελεί το όριο που θέτει η ιστορική περίοδος από τα εκατοστημόρια της δικής της χρονοσειράς. Έτσι για

παράδειγμα, στην κατασκευή διαγραμμάτων σύγκρισης των εποχικών κύκλων χρησιμοποιείται πάντοτε ως βάση σύγκρισης η καμπύλη του εποχικού της ιστορικής περιόδου. Το όριο (threshold) ορίζεται επίσης από τα εκατοστημόρια της χρονοσειράς της, και με βάση αυτό γίνεται η σύγκριση και με τα μελλοντικά σενάρια.

2.1.2 Θηκογράμματα

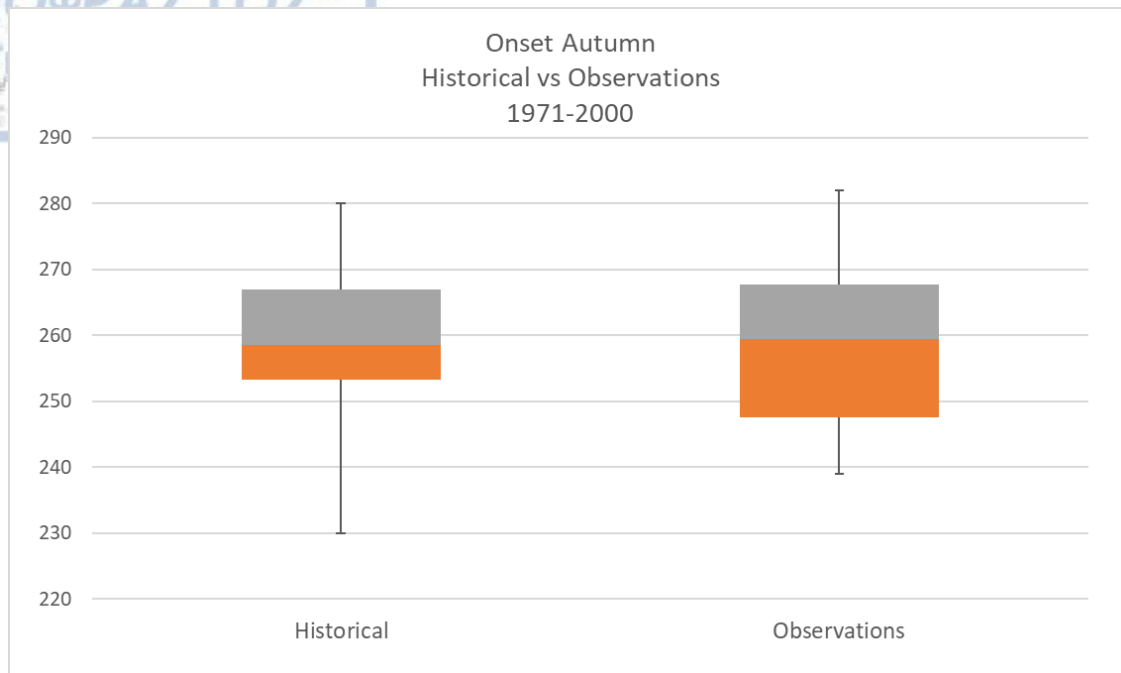
Έχοντας υπολογίσει τα 30 onset όλων των εποχών για όλες τις περιόδους, κατασκευάστηκαν τα θηκογράμματα για τα δεδομένα των μοντέλων historical, RCP4.5, RCP8.5 και των πραγματικών παρατηρήσεων. Η μεθοδολογία για την κατασκευή των θηκογραμμάτων είναι η εξής: α) μετατροπή των ημερομηνιών των onset σε αριθμό της αντίστοιχης ημέρας του έτους (π.χ. 13/6 σε 163), β) υπολογισμός μέγιστης τιμής (max), ελάχιστης τιμής (min), διαμέσου (median), τιμών 1^{ου} και 3^{ου} τεταρτημρίου (1st and 3rd quartile), γ) δημιουργία κουτιών : ανώτερο κουτί (box 3 upper): 3^ο τεταρτημόριο - μέση τιμή, κατώτερο κουτί (box 2 lower): μέση τιμή – 1^ο τεταρτημόριο, κρυφό κουτί (box 1 hidden): 1^ο τεταρτημόριο, γραμμή σφάλματος (θετική) (whisker top): μέγιστη τιμή – 3^ο τεταρτημόριο, γραμμή σφάλματος (αρνητική) (whisker bottom): 1^ο τεταρτημόριο – ελάχιστη τιμή. Στον **Πίνακα 1** παρατίθενται τα αποτελέσματα των παραπάνω πράξεων. Η σύγκριση της ιστορικής περιόδου με τα υπόλοιπα σενάρια και με τις ημερήσιες παρατηρήσεις δείχνει ότι για την εποχή του φθινόπωρου για παράδειγμα, η ελάχιστη τιμή, δηλαδή η νωρίτερη εμφάνισή του παρατηρείται την ιστορική περίοδο. Αντίθετα η πιο αργοπορημένη εμφάνιση (max(Max)) συνέβη στην πραγματικότητα στις 9/10/1988. Η διάμεσος βρίσκεται μεταξύ της 13^{ης} και 15^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου για την ιστορική περίοδο, τις ημερήσιες παρατηρήσεις καθώς και για το σενάριο RCP8.5 την περίοδο 2071-2100, ενώ για τα υπόλοιπα σενάρια βρίσκεται μεταξύ της 8^{ης} και της 11^{ης} ημέρας του Σεπτεμβρίου.

	Historical	Observations	Rcp45 2021-2050	Rcp45 2071-2100	Rcp85 2021-2050	Rcp85 2071-2100
Min	230,00	239,00	232	243	237	244
Max	280,00	282,00	266	276	271	272
1st Quartile	253,25	247,5	247	248	246	250,25

3rd Quartile	267	267,75	260	263	259	263,75
Median	258,50	259,50	254,5	255,5	252	257
Box1 (hidden)	253,25	247,5	247	248	246	250,25
Box2 (lower)	5,25	12,00	7,5	7,5	6	6,75
Box3 (upper)	8,50	8,25	5,5	7,5	7	6,75
Whisker Top	13,00	14,25	6	13	12	8,25
Whisker Bottom	23,25	8,50	15	5	9	6,25

Πίνακας 1: Διαδικασία κατασκευής θηκογράμματος για τις ημερομηνίες έναρξης του φθινοπώρου.

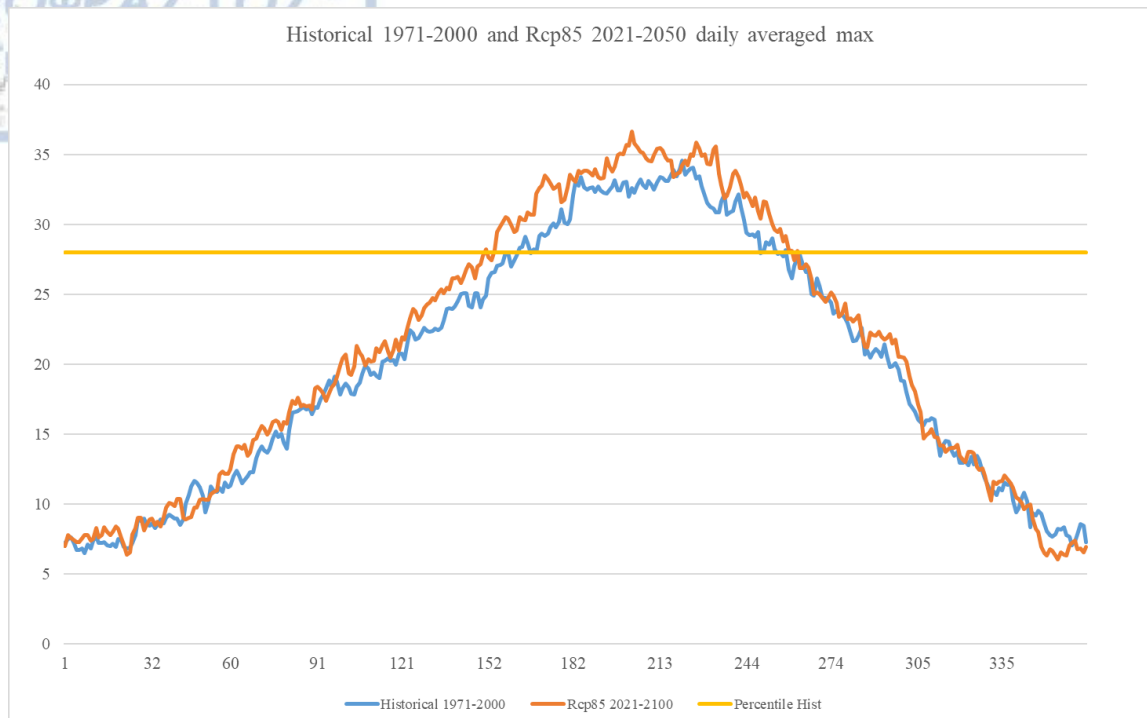
Η **Εικόνα 4** απεικονίζει το αποτέλεσμα της διαδικασίας δημιουργίας θηκογράμματος, και αποτελεί μία οπτική αναπαράσταση των ημερών έναρξης του φθινοπώρου της ιστορικής περιόδου συγκριτικά με τις ημερήσιες παρατηρήσεις. Παρατηρούμε ότι οι δύο χρονοσειρές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις ακραίες τιμές και ως προς τη διάμεσο. Το σενάριο historical εκτίμησε μία νωρίτερη εμφάνιση του φθινοπώρου αρκετά πιο πριν (κατά 9 μέρες) απ' ότι συνέβη στην πραγματικότητα. Αντίθετα, η πιο αργοπορημένη εμφάνιση έγινε στις πραγματικές παρατηρήσεις, αλλά η διαφορά με το σενάριο historical είναι αμελητέα (μόλις 2 ημέρες). Η διάμεσος βρίσκεται πιο ψηλά, δηλαδή χρονικά πιο αργά στις πραγματικές παρατηρήσεις (διαφορά μίας ημέρας).



Εικόνα 4: Θηκόγραμμα έναρξης φθινοπώρου για την ιστορική περίοδο του μοντέλου RCM και των πραγματικών παρατηρήσεων για την περίοδο 1971-2000. Το ανώτερο (γκρι) κουτί αντιπροσωπεύει τις τιμές που είναι μεγαλύτερες από το 50% αυτών και αντίστοιχα το κατώτερο (πορτοκαλί) τις μικρότερες από τη μέση τιμές. Οι γραμμές σφάλματος δείχνουν τις ακραίες (μέγιστες και ελάχιστες τιμές), δηλαδή την αργότερη και τη νωρίτερη εμφάνιση του φθινοπώρου.

2.1.3 Διαγράμματα

Επιπλέον, με βάση τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των ημερήσιων θερμοκρασιών των παρατηρήσεων και των μοντέλων, προέκυψαν ετήσια διαγράμματα με τις μέσες τιμές θερμοκρασίας. Ως βάση σύγκρισης χρησιμοποιείται και πάλι η ιστορική περίοδος, καθώς επίσης και το εκατοστημόριο αυτής. Έτσι προέκυψαν διαγράμματα με δύο καμπύλες των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών από τις δύο εν συγκρίσει βάσεις δεδομένων, μία ευθεία γραμμή που παριστάνει το όριο percentile της ιστορικής περιόδου, σε συνάρτηση με τον άξονα x'x των 365 ημερών. Η **Εικόνα 5** αποτελεί ένα παράδειγμα διαγράμματος των μέσων τιμών μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας των σεναρίων historical και RCP8.5 (2021-2050). Παρατηρούμε ότι το μελλοντικό σενάριο RCP8.5 εκτιμά μία μέση αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας καθώς και πολλές ακραίες τιμές (peaks) ιδιαίτερα τη θερμή περίοδο. Το όριο σύγκρισης (κίτρινη ευθεία) καθορίζεται από την ιστορική περίοδο και είναι οι 28 βαθμοί Κελσίου.

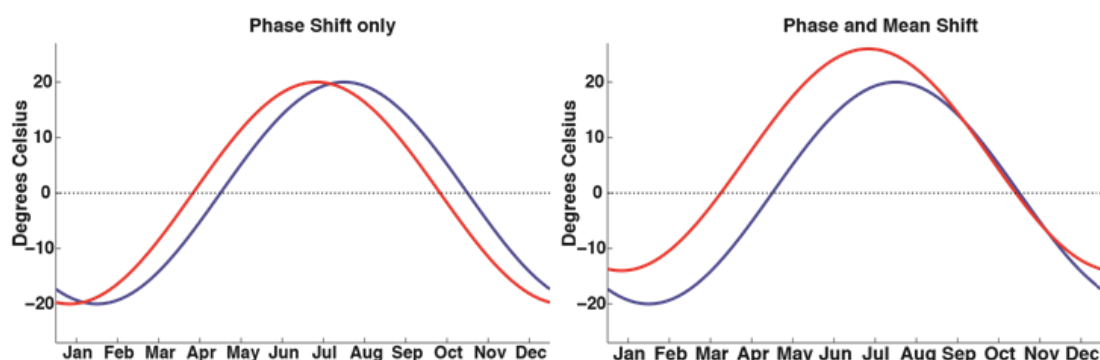


Εικόνα 5: Διάγραμμα μέσων ημερήσιων μέγιστων θερμοκρασιών της ιστορικής περιόδου 1971-2000 (μπλε καμπύλη) και του μοντέλου RCP8.5 για την περίοδο 2021-2050 (πορτοκαλί καμπύλη). Η ευθεία (κίτρινη γραμμή) παριστάνει το 75^ο εκατοστημόριο της ιστορικής περιόδου και αποτελεί το όριο σύγκρισης.

2.2 2^η μεθοδολογία

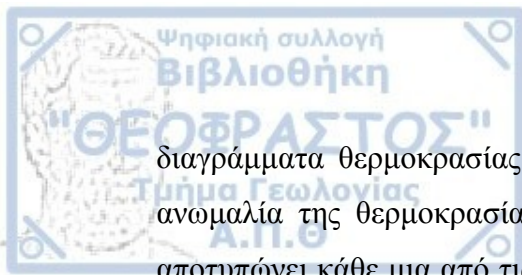
Βασίστηκε στο άρθρο Stine, A. R., Huybers, P., Fung, I. Y., Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature, *Nature*, 457, pages 435–440 (22 January 2009) doi:10.1038/nature07675, 2009. Για τον προσδιορισμό της ψυχρής και της θερμής περιόδου χρησιμοποιείται η φάση της ετήσιας περιόδου της συνημιτονοειδούς συνάρτησης (σειρά Fourier). Υποθέτουμε ότι ο ετήσιος κύκλος θερμοκρασίας επιφάνειας για μία συγκεκριμένη περιοχή περιγράφεται από τον τύπο $T(t) = \bar{T} + A \cos(2\pi t - \theta)$, όπου $\bar{T}$ η μέση θερμοκρασία, A το εύρος της θερμοκρασίας, θ η φάση (σε ημέρες) και t μια δοθείσα χρονική στιγμή (μέρα). Αν $A = 20^\circ\text{C}$, $\theta = 210$ μέρες και $T = 0^\circ\text{C}$ τότε προκύπτει ότι η θερμή περίοδος ($T > 0$) ξεκινάει την 1 Απριλίου, ενώ η ψυχρή ($T < 0$) την 1^η Οκτωβρίου. Θερμή και ψυχρή περίοδος έχουν την ίδια διάρκεια, 182,5 μέρες. Αν, όμως, υποθέσουμε μία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ($\bar{T}$) έτσι ώστε κάθε μέρα να είναι θερμότερη από την προηγούμενη κατά τον ίδιο βαθμό, τότε στο προηγούμενο παράδειγμα η φάση (θ) και το εύρος (A) δεν αλλάζουν, αλλάζει όμως η μέση θερμοκρασία ($\bar{T}$) καθώς αυξάνεται κατά 6 βαθμούς. Έτσι, η άνοιξη έρχεται 6

μέρες νωρίτερα ενώ το φθινόπωρο 18 μέρες αργότερα, με τη θερμή περίοδο να είναι μεγαλύτερη κατά 71 μέρες από την ψυχρή. Οι ημέρες με τις υψηλότερες και χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν αλλάζουν, αλλάζει μόνο η μέρα με θερμοκρασία ίση με τη μέση τιμή των θερμοκρασιών (διάμεσος). Στην αντίθετη περίπτωση όπου δεν υπάρχει μεταβολή στη μέση θερμοκρασία ($\bar{T}$) και στο εύρος (A) αλλά υπάρχει χρονική μετατόπιση στη φάση (θ) κατά 20 μέρες νωρίτερα τότε και η άνοιξη και το φθινόπωρο θα έχουν νωρίτερη εμφάνιση κατά 20 μέρες. Τέλος, αν υπάρχει μεταβολή τόσο στη μέση θερμοκρασία ($\bar{T}$) κατά 6 °C όσο και στη φάση (θ) κατά 20 μέρες τότε η άνοιξη θα εμφανιστεί νωρίτερα κατά 38 μέρες και το φθινόπωρο κατά 3. Η θερμή περίοδος θα επιμηκυνθεί σε βάρος της ψυχρής και σύμφωνα με την συνημιτονοειδή συνάρτηση (Fourier) ο ετήσιος εποχικός κύκλος θα έχει μία μετατόπιση 20 ημερών και μία μέση αύξηση θερμοκρασίας κατά 6 °C (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Αναπαράσταση διαφορετικών περιπτώσεων εποχιακών μεταβολών: α) Εποχικός κύκλος (μπλε καμπύλη) - βάση σύγκρισης β) μέση ετήσια αύξηση της θερμοκρασίας χωρίς μεταβολή φάσης (κόκκινη καμπύλη) γ) μεταβολή φάσης χωρίς αλλαγή στη μέση ετήσια θερμοκρασία (κόκκινη καμπύλη) δ) μεταβολή φάσης και ταυτόχρονη μέση ετήσια αύξηση της θερμοκρασίας (κόκκινη καμπύλη). Πηγή: Stine, A. R., Huybers, P., Fung, I. Y., Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature, *Nature*, 457, pages 435–440 (22 January 2009) doi:10.1038/nature07675, 2009.

Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στην παρούσα διπλωματική, με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού R - project. Έγινε εισαγωγή δεδομένων μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας από τα σενάρια historical, RCP4.5, RCP8.5 του μοντέλου RCM. Η ιστορική περίοδος (historical) καλύπτει το διάστημα 1/1/1971 έως 31/12/2000, ενώ τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 καλύπτουν τις μελλοντικές περιόδους από 1/1/2021 έως 31/12/2050 και 1/1/2071 έως 31/12/2100. Από τα δεδομένα της θερμοκρασίας αφαιρέθηκε η μέση τιμή αυτής, για κάθε ένα από τα σενάρια. Έπειτα έγιναν τα



διαγράμματα θερμοκρασίας – χρόνου. Ο κατακόρυφος άξονας ($y'y$) εκφράζει την ανωμαλία της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου, και ο οριζόντιος άξονας ($x'x$) αποτυπώνει κάθε μια από τις ημέρες του έτους διαιρεμένες με το 366. Τέλος, έγινε η εισαγωγή της συνημιτονοειδούς συνάρτησης $T(t) = \bar{T} + A\cos(2\pi T - \theta)$, όπου $\bar{T}$ η μέση τιμή της διαφοράς των τιμών της θερμοκρασίας και της μέσης τιμής των θερμοκρασιών ($\bar{T} = T - T_{average}$). Από τη συνημιτονοειδή συνάρτηση προέκυψαν οι καμπύλες που περιγράφουν τον ετήσιο κύκλο θερμοκρασίας επιφάνειας. Οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν την θερμή περίοδο και οι αρνητικές την ψυχρή.

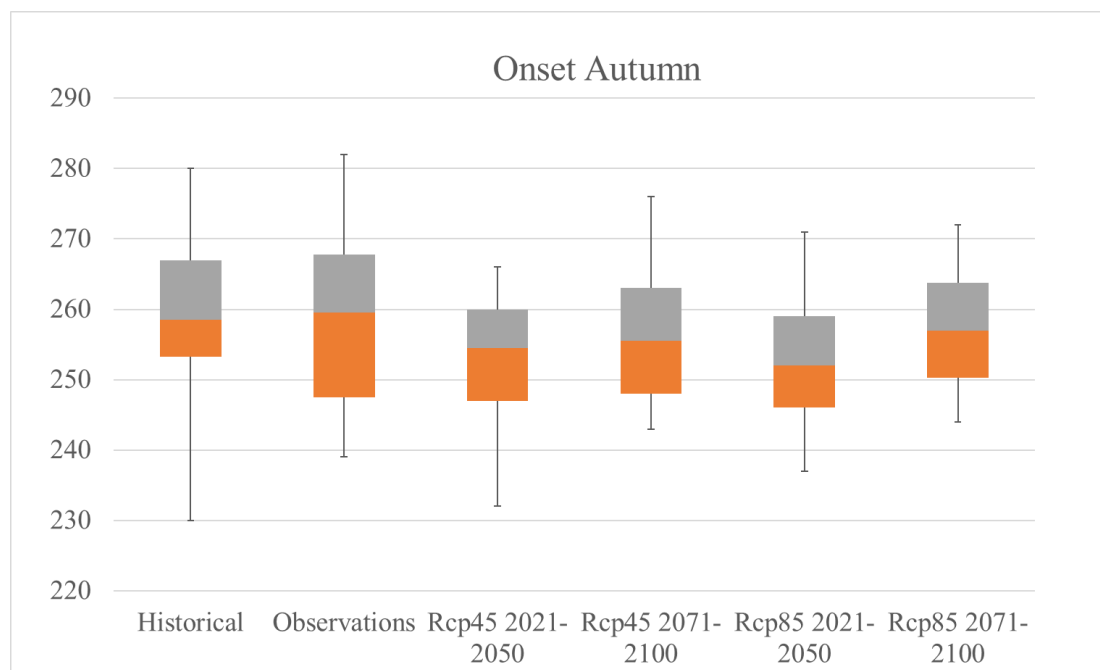
Κεφάλαιο 3^ο ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 1^η μεθοδολογία

Με την εφαρμογή της πρώτης μεθοδολογίας προσδιορίστηκαν οι ημέρες έναρξης των τεσσάρων εποχών για κάθε ένα από τα σενάρια καθώς και για τις ημερήσιες παρατηρήσεις. Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα θηκογράμματα.

3.1.1 Φθινόπωρο

Το πρώτο θηκόγραμμα αφορά την έναρξη του φθινοπώρου. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη τιμή, δηλαδή η νωρίτερη έναρξη του φθινοπώρου, εντοπίζεται στο σενάριο historical, με νωρίτερη ημερομηνία έναρξης την 17^η Αυγούστου 1999. Αντίθετα, η πιο αργοπορημένη εμφάνιση του φθινοπώρου εντοπίζεται στις πραγματικές ημερήσιες παρατηρήσεις την 8^η μέρα του Οκτωβρίου το έτος 1987. Τα μελλοντικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για την περίοδο 2021-2050 υποτιμούν μια αργοπορημένη εμφάνιση του φθινοπώρου δίνοντας ημερομηνίες αργότερης έναρξης 22/09/2041 και 27/09/2034, αντίστοιχα. Η διάμεσος εντοπίζεται για όλες τις προσομοιώσεις και για τις παρατηρήσεις στο 2^ο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου (**Εικόνα 7**).

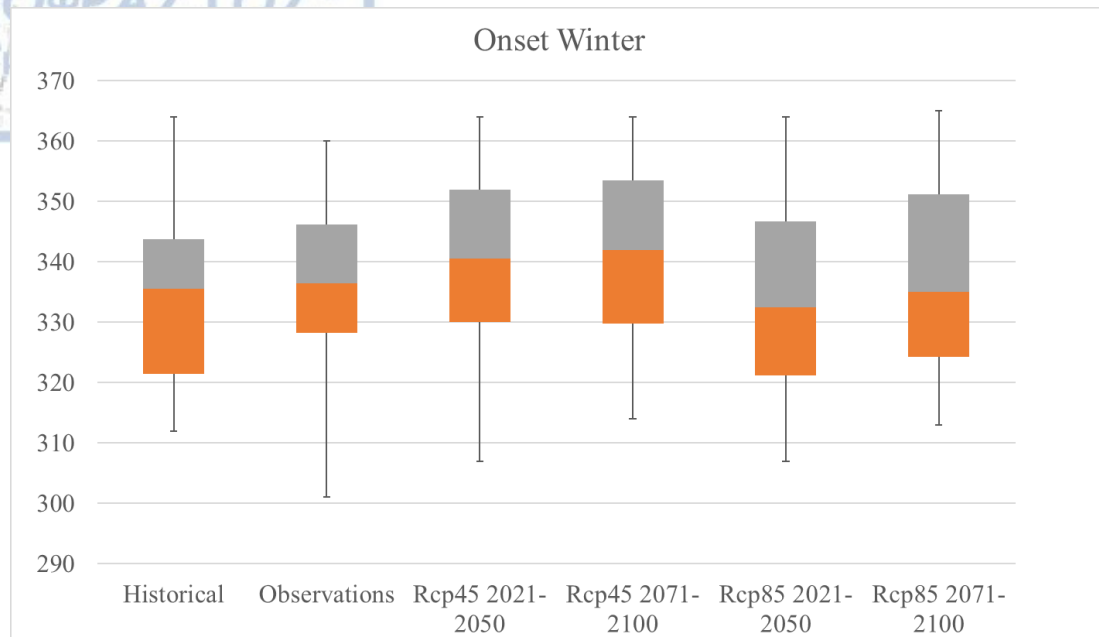




Εικόνα 7: Θηκόγραμμα ημερών έναρξης του φθινοπώρου για το σενάριο historical και για τις πραγματικές παρατηρήσεις την τριακονταετία 1971-2000, και για τα σενάρια RCP4.5, RCP8.5 τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100.

3.1.2 Χειμώνας

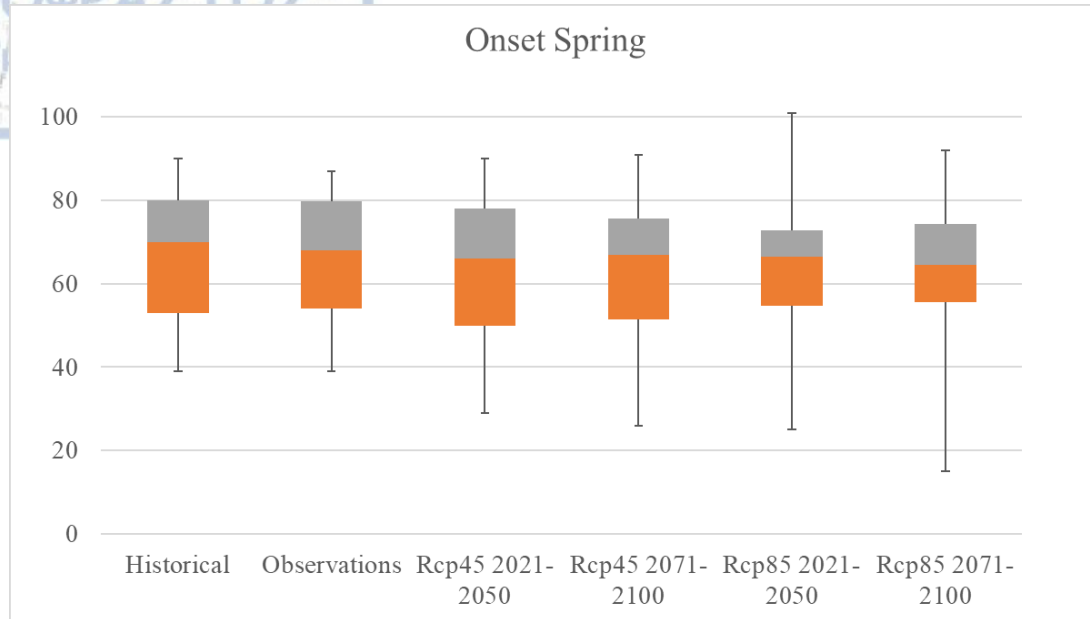
Για τη χειμερινή περίοδο, τόσο οι παρατηρήσεις όσο και τα κλιματικά σενάρια έρχονται σε συμφωνία μεταξύ τους ως προς τις ακραίες τιμές και τη διάμεσο. Συγκεκριμένα, θεωρούν ως περίοδο της πιο πρώιμης εμφάνισης του χειμώνα το πρώτο δεκαήμερο του Νοεμβρίου, ενώ ως την πιο αργοπορημένη εμφάνισή του θεωρούν το τελευταίο δεκαήμερο του Δεκεμβρίου, πολλές φορές και τις αρχές του Ιανουαρίου. Όσον αφορά τη νωρίτερη εμφάνιση του χειμώνα, φαίνεται να έχει γίνει στις πραγματικές παρατηρήσεις στις 27/10/1988. Η χρονιά αυτή έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς το φθινόπωρο είχε πολύ μικρή διάρκεια, μόλις 18 μέρες, αφού προηγήθηκε ένα καλοκαίρι 123 ημερών, ενώ ο χειμώνας 1988-1989 διήρκησε 117 ημέρες. Ακολούθησε η άνοιξη με μία επίσης τετράμηνη διάρκεια 120 ημερών. Τα μελλοντικά μοντέλα RCP4.5 και RCP8.5 συγκριτικά με το σενάριο historical φαίνεται να έχουν μία νωρίτερη κατά 5 ημέρες εμφάνιση του χειμώνα για την τριακονταετία 2021-2050 (2/11), ενώ για την περίοδο 2071-2100 έρχονται σε συμφωνία με αυτό και ο χειμώνας φαίνεται να ξεκινά κατά μέσο όρο στις 7-9 Νοεμβρίου. Η διάμεσος βρίσκεται για όλα τα σενάρια μεταξύ της 335^{ης} και της 340^{ης} ημέρας του έτους (30/11–5/12) (**Εικόνα 8**).



Εικόνα 8: Θηκόγραμμα ημερομηνιών έναρξης του χειμώνα για τις πραγματικές παρατηρήσεις και το σενάριο της ιστορικής περιόδου την τριακονταετία 1971-2000 και για τα μελλοντικά σενάρια RCP4.5, RCP8.5 τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100.

3.1.3 Άνοιξη

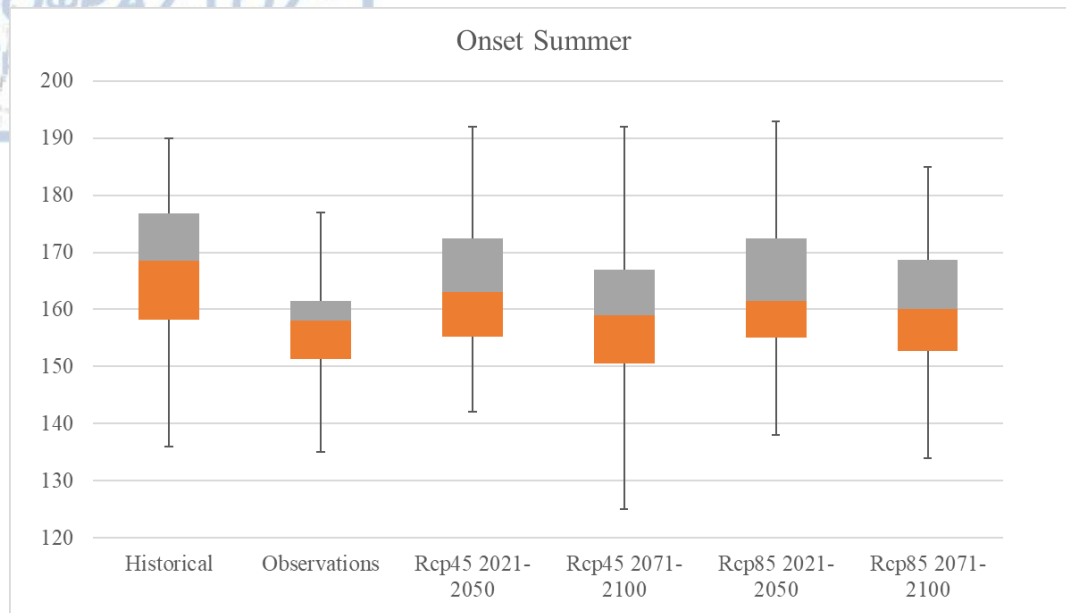
Την άνοιξη παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις ακραίες τιμές καθώς τα μελλοντικά σενάρια εκτιμούν μία αρκετά πρόωμη εμφάνιση της εποχής. Οι πραγματικές παρατηρήσεις έρχονται σε συμφωνία με την ιστορική περίοδο ως προς την νωρίτερη ημερομηνία εμφάνισης της άνοιξης, η οποία είναι η 8^η μέρα του Φεβρουαρίου. Το σενάριο RCP4.5 για τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100 υποθέτει ότι η άνοιξη θα κάνει την εμφάνισή της το νωρίτερο το τελευταίο δεκαήμερο του Ιανουαρίου και το αργότερο το τελευταίο δεκαήμερο του Μαρτίου. Το σενάριο RCP8.5 παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση στις ακραίες τιμές δίνοντας για το 2021-2050 την πιο πρόωμη εμφάνιση της άνοιξης στις 25 Ιανουαρίου, ενώ για το 2071-2100 η εμφάνιση αυτή γίνεται μόλις στις 15 Ιανουαρίου. Αντίστοιχα, η πιο αργοπορημένη εμφάνιση της άνοιξης γίνεται μέσα στο πρώτο δεκαήμερο του Απριλίου, πολύ πιο μετά από τις ημερομηνίες των υπόλοιπων σεναρίων, τα οποία υποθέτουν ότι η πιο αργοπορημένη εμφάνιση της άνοιξης θα έχει γίνει μέχρι το τέλος του Μαρτίου. Παρ' όλα αυτά, οι διάμεσοι όλων των σεναρίων και των πραγματικών παρατηρήσεων κυμαίνονται μεταξύ της 4^{ης} και της 10^{ης} ημέρας του Μαρτίου (**Εικόνα 9**).



Εικόνα 9: Θηκόγραμμα ημερομηνιών έναρξης της άνοιξης για τις πραγματικές ημερήσιες παρατηρήσεις και την ιστορική περίοδο την τριακονταετία 1971-2000 και για τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 τις περιόδους 2021-2050 και 2071-2100.

3.1.4 Καλοκαίρι

Όσον αφορά την έναρξη του καλοκαιριού, η νωρίτερη εμφάνισή του πραγματοποιείται κατά μέσο όρο το δεύτερο δεκαπενθήμερο του Μαΐου σε όλα τα κλιματικά μοντέλα, και στις πραγματικές παρατηρήσεις (η νωρίτερη ιστορική εμφάνιση έγινε στις 14/05/1997). Αντίθετα, όσον αφορά την πιο αργοπορημένη εμφάνισή του, τα μοντέλα έρχονται σε αντίθεση με τις πραγματικές παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις θέλουν την πιο αργοπορημένη εμφάνιση του καλοκαιριού μέσα στο πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου, ενώ σύμφωνα με τις πραγματικές παρατηρήσεις, αυτή η καθυστερημένη εμφάνιση πραγματοποιήθηκε στις 25 Ιουνίου 1991, και ποτέ πιο αργά, μέχρι το 2000. Η διάμεσος βρίσκεται για τις παρατηρήσεις και για τα μελλοντικά σενάρια στο πρώτο δεκαήμερο του Ιουνίου, ενώ για την ιστορική περίοδο (historical) στο πρώτο δεκαπενθήμερο (16/6) (**Εικόνα 10**).



Εικόνα 10: Θηκόγραμμα ημερομηνιών έναρξης του καλοκαιριού για τις πραγματικές παρατηρήσεις (1979-2000) και για τις προσομοιώσεις historical (1979-2000), RCP4.5, RCP8.5 (2021-2050 και 2071-2100).

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας (**Πίνακας 2**) με τη διαφορά των διαμέσων των ημερών έναρξης των εποχών των μελλοντικών σεναρίων και των πραγματικών παρατηρήσεων σε σχέση με το σενάριο historical, π.χ. $\text{median(RCP8.5)} - \text{median(historical)}$. Με αρνητικές τιμές αναπαρίστανται οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η έναρξη μίας εποχής συμβαίνει νωρίτερα απ' ό,τι συμβαίνει στην ιστορική περίοδο. Παρατηρείται ότι συνολικά (για όλες τις εποχές) τις μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σύγκριση με το σενάριο historical, παρουσιάζουν τα μελλοντικά σενάρια, ιδιαίτερα το RCP4.5 για την τελευταία τριακονταετία του 21^{ου} αιώνα. Μελετώντας κάθε μία εποχή ξεχωριστά, βλέπουμε ότι το φθινόπωρο και ο χειμώνας παρουσιάζουν τις μικρότερες αποκλίσεις στη διάμεσο, ενώ το καλοκαίρι τις μεγαλύτερες. Η θερμή περίοδος φαίνεται να κάνει την εμφάνισή της νωρίτερα στα μελλοντικά σενάρια, σε σχέση με την ιστορική περίοδο, ενώ αντίθετα ο χειμώνας μετατοπίζεται χρονικά πιο αργά. Όσον αφορά τις πραγματικές παρατηρήσεις, η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται το καλοκαίρι όπου το σενάριο historical υποτιμά την πρόωρη έναρξή του, ενώ στην πραγματικότητα αυτό εμφανιζόταν κατά μέσο όρο 10 ημέρες νωρίτερα.

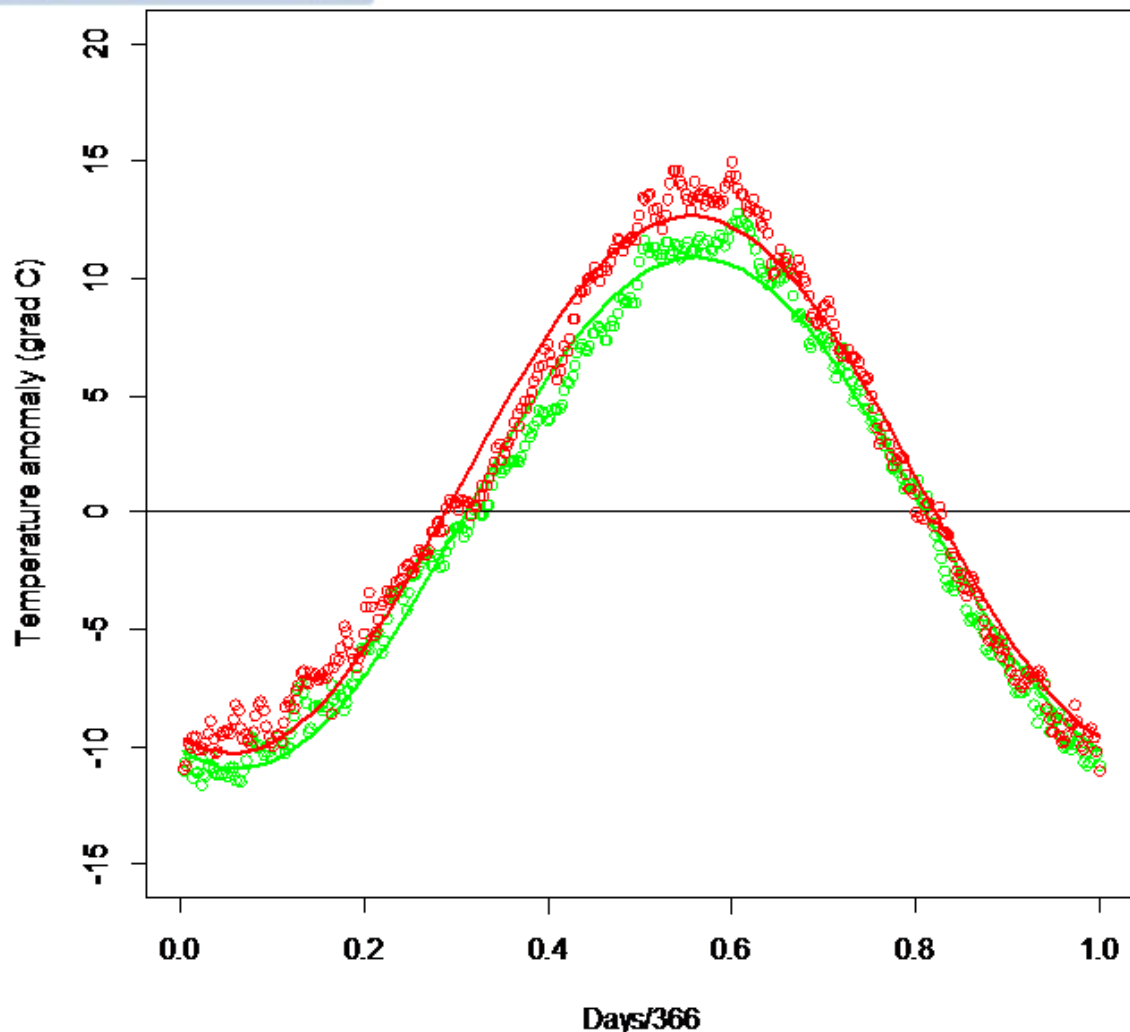
Διαφορά Διαμέσων	Observations 1971-2000	Rcp45 2021-2050	Rcp45 2071-2100	Rcp85 2021-2050	Rcp85 2071-2100
Φθινόπωρο	1	-4	-3	-6.5	-1.5
Άνοιξη	-2	-4	-3	-3.5	-5.5
Καλοκαίρι	-10.5	-5.5	-9.5	-7	-8.5
Χειμώνας	1	5	6.5	-3	-0.5

Πίνακας 2: Διαφορά στις τιμές των διαμέσων του σεναρίου historical από τις τιμές των σεναρίων RCP και των πραγματικών παρατηρήσεων.

3.2 2^η μεθοδολογία

Από τη δεύτερη μεθοδολογία εφαρμόζοντας τη συνημιτονοειδή συνάρτηση (ανάλυση Fourier) για τις τιμές της θερμοκρασίας επιφάνειας προέκυψαν καμπύλες που περιγράφουν τον εποχικό κύκλο θερμοκρασίας.

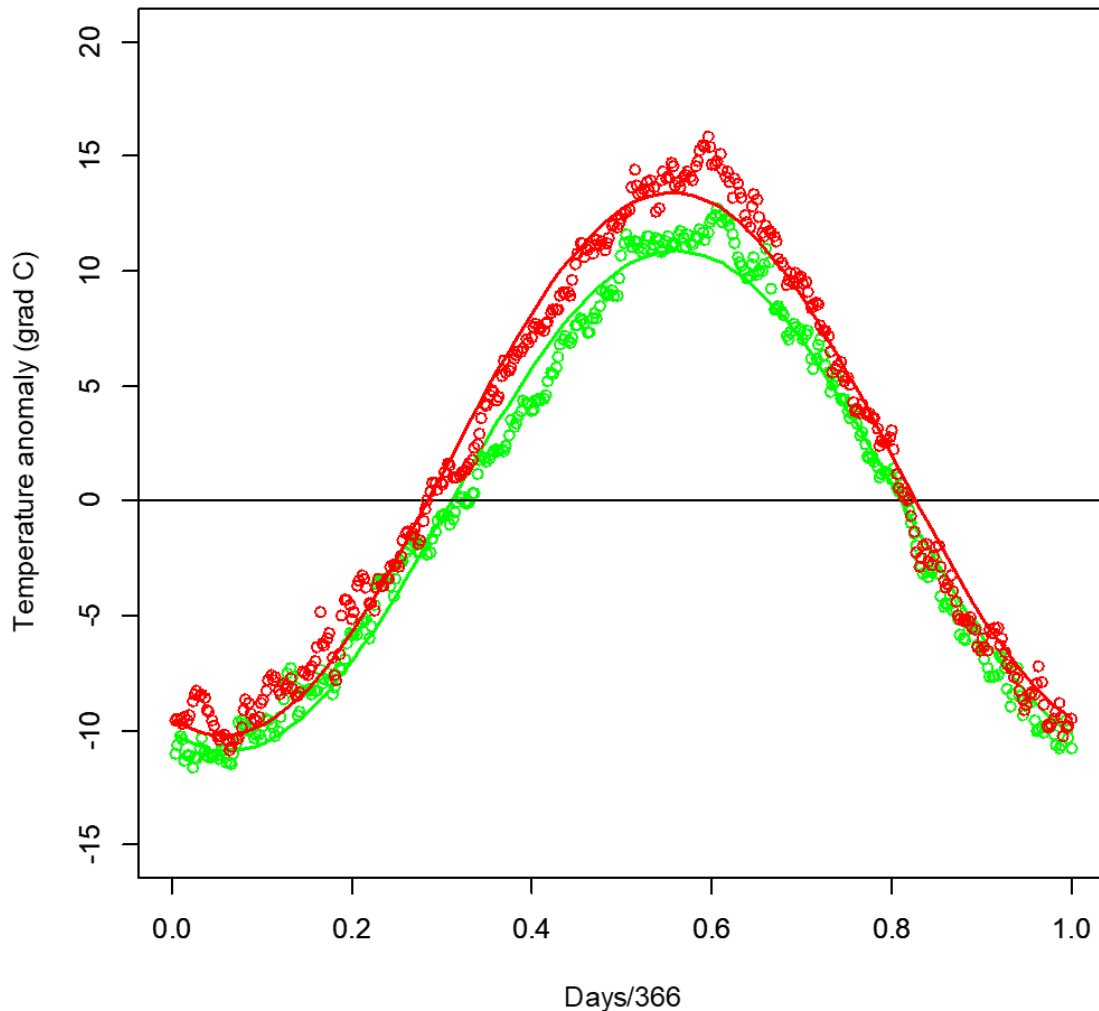
Διακρίνεται, επίσης, και η ψυχρή από τη θερμή περίοδο, για κάθε ένα από τα μελλοντικά σενάρια σε σύγκριση με την ιστορική περίοδο (historical). Το πρώτο διάγραμμα αφορά το σενάριο RCP4.5 την τριακονταετία 2021-2050 και το σενάριο historical από το 1971 έως το 2000. Για την ιστορική περίοδο (πράσινη καμπύλη) προκύπτει ότι η θερμή περίοδος ξεκινά την 32^η ημέρα, ενώ η ψυχρή ξεκινά την 82^η. Για το σενάριο RCP4.5 το διάστημα 2021-2050 (κόκκινη καμπύλη) η θερμή περίοδος ξεκινά την 30^η ημέρα και λήγει την 83^η. Δεν υπάρχει σημαντικό shift λόγω διαφοράς φάσης θ, αλλά λόγω αύξησης της μέσης θερμοκρασίας (mean shift). Επομένως, η διαφορά στις ημερομηνίες έναρξης της θερμής περιόδου (2 μέρες νωρίτερα στο σενάριο RCP4.5) και της ψυχρής περιόδου (1 ημέρα νωρίτερα στο σενάριο historical) οφείλεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στο σενάριο RCP4.5 (Εικόνα 11).



Εικόνα 11: Αναπαράσταση εποχικού κύκλου για την ιστορική περίοδο (1/1/1971-31/12/2000, πράσινη καμπύλη) σε σύγκριση με το σενάριο RCP4.5 (1/1/2021-31/12/2050, κόκκινη καμπύλη): Δεν υπάρχει μεταβολή στη φάση μόνο αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας. Οι κουκκίδες αναπαριστούν τις ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας ενώ οι καμπύλες τη συνημιτονοειδή συνάρτηση αυτών των τιμών.

Στο δεύτερο διάγραμμα γίνεται η σύγκριση της ιστορικής περιόδου με το μελλοντικό σενάριο RCP4.5 για την τριακονταετία 2071-2100. Προκύπτει ότι η θερμή περίοδος του σεναρίου RCP4.5 (κόκκινη καμπύλη) ξεκινά την 29^η ημέρα και λήγει την 84^η. Η διαφορά στις ημερομηνίες έναρξης με αυτές της ιστορικής περιόδου είναι 3 ημέρες νωρίτερα η θερμή περίοδος και 2 ημέρες αργότερα η ψυχρή για το σενάριο RCP4.5. Αντίστοιχα, όπως και την τριακονταετία 2021-2050, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά

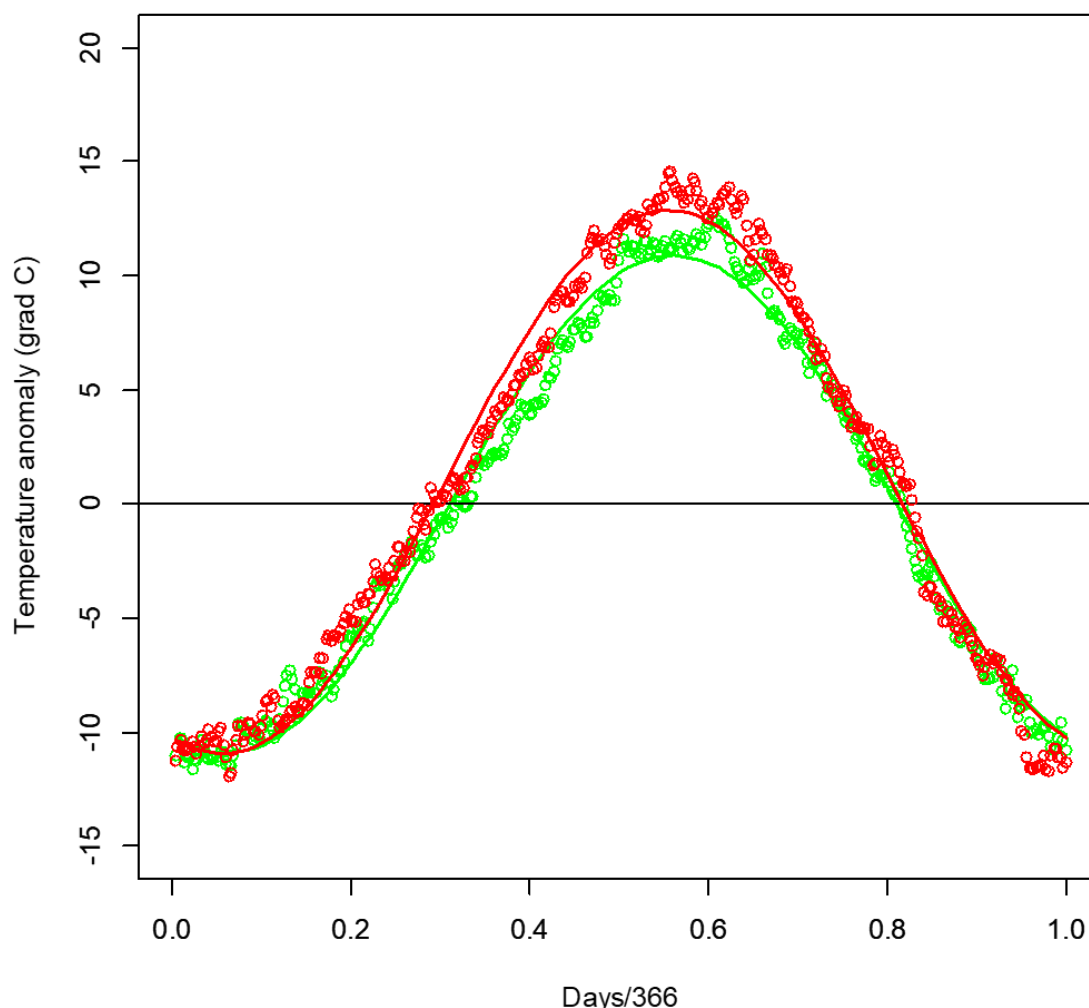
στη φάση θ, αλλά μέση ετήσια αύξηση της θερμοκρασίας (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Αναπαράσταση εποχικού κύκλου για την ιστορική περίοδο (1/1/1971-31/12/2000, πράσινη καμπύλη) σε σύγκριση με το σενάριο RCP4.5 (1/1/2071-31/12/2100, κόκκινη καμπύλη): Δεν υπάρχει μεταβολή στη φάση μόνο αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας. Οι κουκκίδες αναπαριστούν τις ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας ενώ οι καμπύλες τη συνημιτονοειδή συνάρτηση αυτών των τιμών.

Αντίστοιχα για το σενάριο RCP8.5 προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα: Στην **Εικόνα 13** αναπαρίσταται ο ετήσιος εποχικός κύκλος της ιστορικής περιόδου (1971-2000) σε σύγκριση με το σενάριο RCP8.5 (2021-2050). Η θερμή περίοδος ξεκινά για το RCP8.5 (2021-2050) την 30^η ημέρα, ενώ η ψυχρή την 83^η. Η διαφορά του σε σχέση με το σενάριο historical είναι 2 ημέρες νωρίτερα η εμφάνιση της θερμής και 1 ημέρα αργότερα η εμφάνιση της ψυχρής περιόδου, ακριβώς όπως και στο σενάριο RCP4.5 για

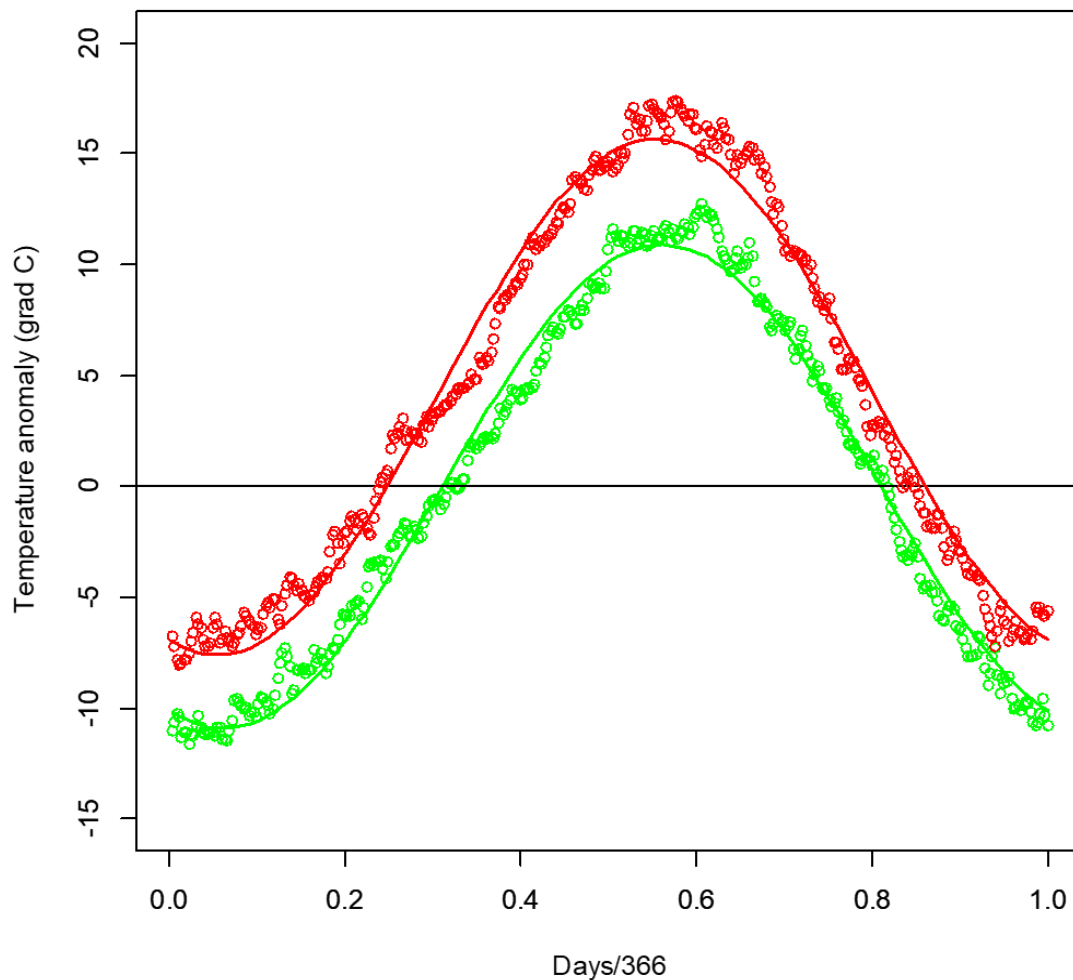
την αντίστοιχη τριακονταετία. Η μόνη διαφορά ανάμεσα στα δύο μελλοντικά σενάρια, αν υποθέσουμε ότι εκτιμούν τις ίδιες διάρκειες θερμής-ψυχρής περιόδου, είναι ίσως μία αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών τη θερμή περίοδο για το σενάριο RCP8.5.



Εικόνα 13: Αναπαράσταση ετήσιου εποχικού κύκλου της ιστορικής περιόδου (1/1/1971-31/12/2000, πράσινη καμπύλη) σε σύγκριση με το σενάριο RCP8.5 (1/1/2021-31/12/2050, κόκκινη καμπύλη). Παρατηρείται μία μέση αύξηση της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα τη θερμή περίοδο.

Τέλος, η **Εικόνα 14** αναπαριστά τον ετήσιο εποχικό κύκλο της ιστορικής περιόδου σε σύγκριση με την τριακονταετία 2071-2100 του σεναρίου RCP8.5. Εδώ πλέον είναι ξεκάθαρη η διαφορά στις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες των δύο σεναρίων. Το σενάριο RCP8.5 για την τριακονταετία 2071-2100 εκτιμά μία σχετικά μεγάλη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, συνολικά μέσα στο έτος, και την ψυχρή και τη θερμή περίοδο. Η

διαφορά στις ημέρες έναρξης της θερμής περιόδου είναι 6 ημέρες νωρίτερα στο RCP8.5 (26^η ημέρα) και 5 ημέρες αργότερα η έναρξη της ψυχρής (87^η ημέρα).



Εικόνα 14: Ο ετήσιος εποχικός κύκλος της ιστορικής περιόδου (πράσινη καμπύλη, 1/1/1971-31/12/2000) σε σύγκριση με το μελλοντικό σενάριο RCP8.5 (κόκκινη καμπύλη, 1/1/2071-31/12/2100). Παρατηρείται μία μέση αύξηση της ετήσιας θερμοκρασίας τη θερμή και την ψυχρή περίοδο και διαφορά φάσης (θ) λόγω της θέρμανσης αυτής.

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται οι διαφορές στις ημέρες έναρξης της θερμής και της ψυχρής περιόδου των μελλοντικών σεναρίων για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100 σε σύγκριση με το σενάριο historical την τριακονταετία 1971-2000. Φαίνεται πως η ψυχρή περίοδος κάνει την εμφάνισή της αργότερα κατά 1 και 2 ημέρες στο σενάριο RCP4.5 τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100 και κατά 1 και 5 ημέρες αργότερα στο RCP8.5 αντίστοιχα για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-

2100. Αντίθετα, η θερμή περίοδος εμφανίζεται 2 και 3 ημέρες νωρίτερα τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100 στο σενάριο RCP4.5 και 1 και 5 ημέρες νωρίτερα στο σενάριο RCP8.5 για τα αντίστοιχες τριακονταετίες. Το σενάριο RCP 8.5, ως το πιο “απαισιόδοξο”, φαίνεται να εκτιμά πως η θερμή περίοδος επιμηκώνεται και εμφανίζεται πιο νωρίς στο μέλλον, σε σχέση με τις προβλέψεις του σεναρίου RCP4.5 το οποίο παρουσιάζει μία πιο ήπια υπεροχή της θερμής περιόδου σε βάρος της ψυχρής.

Πίνακας 3: Διαφορά ημερών έναρξης θερμής – ψυχρής περιόδου του σεναρίου historical από τα σενάρια RCP (RCPs – Historical).

	RCP4.5 2021-2050	RCP4.5 2071-2100	RCP8.5 2021- 2050	RCP8.5 2071-2100
Θερμή περίοδος	-2	-3	-2	-6
Ψυχρή περίοδος	1	2	1	5

Κεφάλαιο 4^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις αλλαγές των εποχών με τη χρήση κλιματικών προσομοιώσεων οδηγούμενων από τα σενάρια εκπομπών αερίων historical, RCP4.5 και RCP8.5 καθώς και από τις πραγματικές ημερήσιες παρατηρήσεις του Μετεωροσκοπείου του ΑΠΘ για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Τα RCP σενάρια υποθέτουν δύο διαφορετικές εκδοχές του μελλοντικού κλίματος, βασιζόμενα σε διαφορετικές εκπομπές αερίων. Το σενάριο RCP4.5 υποθέτει μειωμένες εκπομπές αερίων και ευαισθητοποίηση του κόσμου στην κλιματική αλλαγή, ενώ το σενάριο RCP8.5, θεωρείται το πιο «απαισιόδοξο» και προβλέπει αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και έλλειψη περιβαλλοντικής πολιτικής. Έτσι, τα αποτελέσματα του σεναρίου RCP8.5 περιγράφουν πιο ακραίες κλιματικές συνθήκες, με μεγαλύτερη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, σε σύγκριση με το σενάριο RCP4.5, και έντονες εποχιακές μεταβολές, με αρκετά πιο πρόωρη εμφάνιση της θερμής περιόδου, επιμήκυνση αυτής, και σχεδόν εξαφάνιση του χειμώνα. Η επιμήκυνση της θερμής περιόδου προκύπτει από την αύξηση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας, πάνω από ένα συγκεκριμένο ετήσιο όριο, η οποία οφείλεται στις αυξημένες εκπομπές ρύπων που οξύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Έτσι οι ζεστές ημέρες αυξάνονται σε πλήθος, και η θερμοκρασία είναι κατά μέσο όρο πολύ υψηλότερη. Οι ψυχρές εποχές αργούν να εμφανιστούν και μειώνονται οι μέρες με χαμηλές θερμοκρασίες. Προέκυψαν, έτσι, συμπεράσματα για το πώς τροποποιούνται οι εποχές του έτους λόγω των θερμοκηπικών αερίων, διαφορετικών εκπομπών για κάθε σενάριο. Συγκεκριμένα σε κάθε μεθοδολογία:

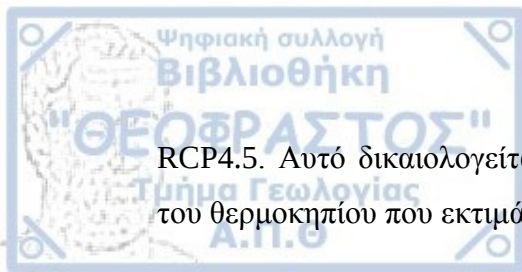
4.1 1^η μεθοδολογία

Η προσέγγιση αυτής της μεθοδολογίας βασίζεται στη χρήση του 25^{ου} και 75^{ου} εκατοστημορίου των χρονοσειρών της μέσης θερμοκρασίας των τριακονταετιών, για τον προσδιορισμό της έναρξης των εποχών. Ταυτόχρονα επιτρέπει τη μελέτη των χαρακτηριστικών των τεσσάρων εποχών σε σύγκριση με τις αστρονομικές εποχές (διάρκειας 90 ημερών). Η χρήση των ελάχιστων θερμοκρασιών (Tmin) για τον προσδιορισμό της ψυχρής περιόδου και των μέγιστων θερμοκρασιών (Tmax) για τον προσδιορισμό της θερμής, δείχνει ένα καλοκαίρι σχετικά πιο ομοιογενές σε σύγκριση με το χειμώνα, ο οποίος εξαρτάται περισσότερο από το τοπικό κλίμα και την ορεογραφία. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μία μέση αύξηση και των μέγιστων και των

ελάχιστων ετήσιων θερμοκρασιών. Η άνοιξη και το καλοκαίρι φαίνεται να εμφανίζονται νωρίτερα ενώ το φθινόπωρο καθυστερεί. Η επιμήκυνση των δύο εποχών, της άνοιξης και του καλοκαιριού, γίνεται σε βάρος των ημερών του χειμώνα, ο οποίος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η διάρκειά του είναι πολύ μικρή, και σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται να έχει σχεδόν εξαφανιστεί (de la Franca et al., 2013). Οι υπόλοιπες εποχές, και κυρίως η άνοιξη και το καλοκαίρι μεγαλώνουν σε διάρκεια και επιφέρουν αντίστοιχες συνέπειες στην ετήσια εποχιακή μεταβλητότητα. Για παράδειγμα, η πιο πρόωμη έναρξη της άνοιξης τόσο για το σενάριο historical όσο και για τις πραγματικές παρατηρήσεις την τριακονταετία 1979-2000 γίνεται στις 8/2. Αντίθετα, τα μελλοντικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 εκτιμούν ότι για το δεύτερο μισό του 21^{ου} αιώνα η άνοιξη ενδέχεται να εμφανίζεται μέχρι και 30 έως 45 μέρες νωρίτερα, δηλαδή στα τέλη με μέσα Ιανουαρίου. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση των ημερών του χειμώνα, και γενικότερα της ψυχρής περιόδου. Το σενάριο RCP8.5, συγκεκριμένα, για την τριακονταετία 2071-2100 υποθέτει την πιο πρόωρη εμφάνιση της άνοιξης απ' όλα τα υπόλοιπα σενάρια, στα μέσα του Ιανουαρίου. Αντίθετα, ο χειμώνας κάνει την εμφάνισή του πολύ πιο αργά σε σχέση με το παρελθόν, και είναι κατ' επέκταση μικρότερος σε διάρκεια καθώς και ηπιότερος θερμοκρασιακά.

4.2 2^η μεθοδολογία

Στη δεύτερη μεθοδολογία μελετήθηκε η μεταβολή στη φάση (θ) και στη μέση θερμοκρασία ($\bar{T}$) κατά τη διάρκεια των εποχικών κύκλων τόσο για την ιστορική περίοδο όσο και για τα μελλοντικά σενάρια. Παρατηρείται ότι τα μελλοντικά σενάρια για το διάστημα 2021-2100 παρουσιάζουν μία αύξηση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας σε σχέση με την ιστορική περίοδο (1971-2000), αλλά παρ' όλα αυτά η μεταβολή στη φάση, δηλαδή η χρονική μετατόπιση των εποχών, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Υπάρχει μία μικρή μετατόπιση της θερμής περιόδου κατά 2 και 6 ημέρες τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100 για το σενάριο RCP8.5 και κατά 2 και 3 ημέρες τις αντίστοιχες τριακονταετίες για το σενάριο RCP4.5 νωρίτερα σε σχέση με την ιστορική περίοδο. Επίσης υπάρχει και μία καθυστέρηση της ψυχρής περιόδου κατά 1 και 4 ημέρες για το σενάριο RCP8.5 τα διαστήματα 2021-2050 και 2071-2100 και κατά 1 και 2 ημέρες για το σενάριο RCP4.5. Η μετατόπιση αυτή, όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας. Επιπλέον, το σενάριο RCP8.5 παρουσιάζει μία μεγαλύτερη μέση αύξηση της θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση μία μετατόπιση της θερμής περιόδου χρονικά νωρίτερα σε σχέση με το



RCP4.5. Αυτό δικαιολογείται λόγω των αυξημένων μελλοντικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που εκτιμά το σενάριο RCP8.5.

Κεφάλαιο 5^ο ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aasa A, Jaagus J, Ahas R, Sepp M (2004) The influence of atmospheric circulation on land phenological phases in central and eastern Europe. *Int J Climatol* 24(12):1551–1564

Ault T, Macalady A, Pederson G, Betancourt J, Schwartz M (2011) Northern Hemisphere modes of variability and the timing of spring in western North America. *J Clim* 24(15):4003–4014

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*, Vol 14, No4, pp 407-421.

Carter T (1998) Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *AgricFood Sci Finl* 7(2):161–179

Cayan D, Kammerdiener S, Dettinger M, Caprio J, Peterson D (2001) Changes in the onset of spring in the western United States. *Bull Am Meteorol Soc* 82(3):399–416

Chen X, Hu B, Yu R (2005) Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Glob Chang Biol* 11(7):1118–1130

David J. Thomson. 2009. Shifts in season. *Nature*|vol 457|22

Diffenbaugh NS, Pal JS, Giorgi F, Gao X. 2007. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters* 34: L11706, DOI: 10.1029/2007GL030000.

Gao X, Pal JS, Giorgi F. 2006. Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophysical Research Letters* 33: L03706, DOI:10.1029/2005GL024954.

Gibelin AL, D'equ'e M. 2003. Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics* 20: 327–339, DOI: 0.1007/s00382-002- 0277-1.

Giorgi F, Bi X. 2005. Regional changes in surface climate interannual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations. *Geophysical Research Letters* 32: L13701, DOI:10.1029/2005GL023002.

Giorgi F, Lionello P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63: 90–104, DOI:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Goubanova K, Li L. 2007. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change* 57: 27–42, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.012.

Hertig E, Jacobeit J. 2007. Assessments of Mediterranean precipitation changes for the 21st century using statistical downscaling techniques. *International Journal of Climatology* 28: 1025–1045. DOI:10.1002/joc.1597.

J. R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core in Antarctica, *Nature* 399 (3June), pp 429-436, 1999.

Jaagus J, Truu J, Ahas R, Aasa A (2003) Spatial and temporal variability of climatic seasons on the East European Plain in relation to large-scale atmospheric circulation. *lim Res* 23(2):111–129

Linderholm H, Walther A, Chen D (2008) Twentieth-century trends in the thermal growing season in the Greater Baltic Area. *Climate Change* 87(3):405–419

Lo F, Wheeler M, Lennox S (2008) Improving predictions of the North Australian wet season: onset and duration. Technical report, Australian Government. Bureau of Meteorology, Melbourne. ISSN: 1836- 019X

Lundquist J, Cayan D, Dettinger M (2004) Spring onset in the Sierra Nevada: when is snowmelt independent of elevation? *J Hydrometeorol* 5(2):327–342

Menzel A, Jakobi G, Ahas R, Scheifinger H, Estrella N (2003) Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries. *Int J Climatol* 23(7):793–812

Mitchell TD, Hulme M, New M. 2002. Climate data for political areas. *Area* 34: 109–112.

N. López de la Franca, E. Sánchez, M. Domínguez. 2013. Changes in the onset and length of seasons from an ensemble of regional climate models over Spain for future climate conditions. *Pal JS, Giorgi F, Bi X.* 2004. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophysical Research Letters* 31: L13202, DOI:10.1029/2004GL019836.

Parry M (ed.). 2000. The changing climate of Europe. Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project. Jackson Environment Partner. University of East Anglia: Norwich.

Qian C, Fu C, Wu Z, Yan Z (2009) On the secular change of spring onset at Stockholm. *Geophys Res Lett* 36:L12706

Qian C, Fu C, Wu Z, Yan Z (2011) The role of changes in the annual cycle in earlier onset of climatic spring in northern China. *Adv Atmos Sci* 28(2):284–296

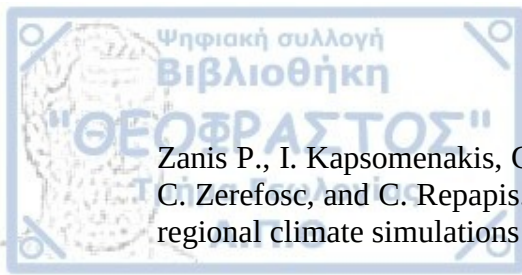
Schwartz M, Ahas R, Aasa A (2006) Onset of spring starting earlier across the Northern hemisphere. *Glob Ecol Biogeogr* 12(2):343–351

Song Y, Linderholm H, Chen D, Walther A (2010) Trends of the thermal growing season in China 1951–2007. *Int J Climatol* 30(1):33–43

Stine A, Huybers P, Fung I (2009) Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature. *Nature* 457(7228):435–440

Tolika K., P. Zanis, C. Anagnostopoulou, Regional climate change scenarios for Greece: Future temperature and precipitation projections from ensembles of RCMs, *Global Nest Journal*, Vol 14, No4, pp 407–421, 2012. Wallace C, Osborn T (2002) Recent and future modulation of the annual cycle. *Clim Res* 22(1):1–11

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



Zanis P., I. Kapsomenakis, C. Philandras, K. Douvis, D. Nikolakis, E. Kanellopoulou, C. Zerefosc, and C. Repapis. 2008. Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece. International journal of 29: 1614–1633.

Zhang X, Alexander L, Hegerl GC, Jones P, Tank AK, Peterson TC, Trewin B, Zwiers FW (2011) Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Clim. Change 2(6):851–870

Zhu W, Tian H, Xu X, Pan Y, Chen G, Lin W (2012) Extension of the growing season due to delayed autumn over mid and high latitudes in North America during 1982–2006. Glob Ecol Biogeogr 21:260–271

Ζάνης Π., Σημειώσεις Ρύπανση και Χημεία της Ατμόσφαιρας, σελ.181, 2014.

Λαζαρίδης Μ. (2010), Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας (σελ.134).

Σοφιάδης Ιωάννης. 2017. Μελέτη της κλιματικής αλλαγής πάνω από την Ευρώπη τον 21ο αιώνα με χρήση περιοχικής κλιματικής προσομοίωσης οδηγούμενης από το σενάριο RCP8.5

<https://www.nature.com/nature/>

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

<http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/orismoι.html>

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_Annex_Glossary.pdf

http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Annex_Glossary.pdf

<https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>

<https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/A-guide-to-RCPs.pdf>

<https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/A-guide-to-RCPs.pdf>

<https://www.skepticalscience.com/rcp.php?t=3#srescomparison>

<https://astro.planitario.gr/stoixeia-astronomias-erotisi-9-epoxes-toy-etoys/>

http://www.jcomm.info/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10956

<https://www.greenfacts.org/en/climate-change-ar3/toolboxes/figspm-2s.htm>