



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Π.  
«Περιβάλλον και Ανάπτυξη»

2<sup>η</sup> Κατεύθυνση Σπουδών  
"ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΤΩΝ ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χρήση οικονομετρικών μεθόδων για τη διερεύνηση των μεταβολών της παγκόσμιας θερμοκρασιακής ανωμαλίας**

ANNA ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ

Επιβλέπων: Νίκος Μαμάσης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**«Περιβάλλον και  
Ανάπτυξη»**

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Π.

«Περιβάλλον και Ανάπτυξη», 2<sup>η</sup> Κατεύθυνση Σπουδών

## Χρήση οικονομετρικών μεθόδων για τη διερεύνηση των μεταβολών της παγκόσμιας θερμοκρασιακής ανωμαλίας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

**ANNAS ΓΕΩΡΓΙΑΔΗ**

**Επιβλέπων:** Νίκος Μαμάσης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2018

.....  
Νίκος Μαμάσης  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ευάγγελος Μπαλτάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Δημήτριος Δαμίγος  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

## Περίληψη

Την τρέχουσα χρονική περίοδο η ανθρωπότητα βιώνει τη μετάβαση του κλιματικού συστήματος από την παρούσα κατάσταση, σε μία νέα θέση ισορροπίας. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη η διερεύνηση των αιτιών της αποσταθεροποίησης καθώς και η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των επιπτώσεων, λόγω των μεγάλων βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται, με τη χρήση στατιστικών μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών, να αποτυπωθεί η συσχέτιση μεταξύ της παγκόσμιας θερμοκρασιακής μεταβολής (εξαρτημένη μεταβλητή) και των μεταβλητών: (α) ηλιακή ακτινοβολία (Total Solar Irradiation – TSI), (β) δείκτης πολυδιάστατης Νότιας Ταλάντωσης (Multivariate ENSO Index – MEI), (γ) οπτικό βάθος σωματιδίων (Aerosols Optical Depth – AOD) και (δ) συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Τα αποτελέσματα από την εκτίμηση του οικονομετρικού υποδείγματος που επιλέχθηκε καταδεικνύουν ότι η μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας δεν μπορεί να ερμηνευθεί μόνο βάσει της μεταβλητής που σχετίζεται με την συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> (ανθρωπογενής μεταβλητή), αλλά απαιτεί να ληφθούν υπόψη και οι μεταβλητές που σχετίζονται με φυσικές παραμέτρους, όπως ο δείκτης MEI, η ηλιακή ακτινοβολία και το οπτικό βάθος των αεροζόλ.

**Λέξεις Κλειδιά:** κλιματική αλλαγή, θερμοκρασιακή ανωμαλία, στατιστική ανάλυση χρονοσειρών, οικονομετρικά μοντέλα

## Abstract

The current time period, mankind experiencing the transition of the climate system of the present state to a new equilibrium position. However, it is particularly complex to investigate the causes of destabilization and to estimate the spatial distribution of impacts due to the high degree of freedom of the system. This thesis is attempted, using statistical methods of time series analysis, to reflect the correlation between the global temperature change (dependent variable), and the variables: (a) Total Solar Irradiation (TSI), (b) Multidimensional Southern Multivariate ENSO Index (MEI); (c) Aerosols Optical Depth (AOD); and (d) Carbon Dioxide concentration (CO<sub>2</sub>). The results of estimating the econometric model chosen demonstrate that the change of the temperature anomalies cannot be interpreted only based on the variable related to the concentration of CO<sub>2</sub> (anthropogenic variable) but also requires that account be taken of the variables associated with physical parameters, such as the MDI index, the solar radiation and the optical depth of the aerosol.

**Keywords:** climate change, temperature anomalies, statistical time series analysis, econometric models

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ηλία Δούλο, μηχανολόγο μηχανικό, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., μετσοβάρχη, πατέρα του παιδιού μου μα πάνω απ'όλα σύντροφο της ζωής μου, για τη πολύτιμη βοήθεια του, καθώς χωρίς αυτήν, η παρούσα εργασία όχι μόνο δεν θα είχε ολοκληρωθεί ποτέ αλλά δεν θα είχε ξεκινήσει καν. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Μαμάση για την καθοδήγησή του καθώς και για την αμέριστη υπομονή του.

Αφιερωμένο στο μικρό μας φεγγαρόπαιδο με την ευχή πως μέχρι να μεγαλώσει ο κόσμος θα έχει γίνει ένα καλύτερο μέρος για να ζει.

# Περιεχόμενα

Εισαγωγή	7
<b>1. Γενικές αρχές μετεωρολογίας – κλιματολογίας</b>	<b>9</b>
1.1. Παράμετροι που επιδρούν στη μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας	10
1.2. Εξέλιξη κλιματικών μεταβολών	16
1.3 Εργαλεία προσομοίωσης της κλιματικής αλλαγής	21
1.4 Το διεθνές και το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή	24
<b>2. Μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης χρονοσειρών</b>	<b>26</b>
2.1. Χαρακτηριστικά Χρονοσειρών	26
2.2. Ανάλυση Χρονοσειρών	27
2.3 Ανάλυση συσχέτισης	27
2.3.1 Συντελεστές συσχέτισης	28
2.4 Γραμμική παλινδρόμηση	30
2.5 Αυτοπαλίνδρομα Ολοκληρωμένα Υποδείγματα Κινητού Μέσου – ARIMA( $p,d,q$ )	31
2.5.1 Μεθοδολογία Box-Jenkins	32
<b>3. Ανάλυση και Αποτελέσματα</b>	<b>34</b>
3.1. Περιγραφή χρονοσειρών και εφαρμογή στατιστικών ελέγχων	34
3.2 Εφαρμογή οικονομετρικού μοντέλου – Απλή γραμμική παλινδρόμηση	44
3.3 Εφαρμογή οικονομετρικού μοντέλου – Υπόδειγμα ARIMA ( $p,d,q$ )	55
<b>4. Συμπεράσματα</b>	<b>60</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>63</b>

## Εισαγωγή

Ο όρος κλιματική αλλαγή υποδηλώνει οποιαδήποτε συστηματική μεταβολή της στατιστικής κατανομής των ατμοσφαιρικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία, άνεμος) για εκτεταμένη χρονική περίοδο (δεκαετιών ή αιώνων ή εκατομμυρίων ετών). Την τρέχουσα χρονική περίοδο η ανθρωπότητα βιώνει τη μετάβαση του κλιματικού συστήματος από την παρούσα κατάσταση, σε μία νέα θέση ισορροπίας. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη η διερεύνηση των αιτιών της αποσταθεροποίησης καθώς και η εκτίμηση της χωρικής κατανομής των επιπτώσεων, λόγω των μεγάλων βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

Με βάση την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change-IPCC) οι μεταβολές του κλίματος προέρχονται από διαταραχές του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος ατμόσφαιρας-υδρόσφαιρας-λιθόσφαιρας και οφείλονται πρωτογενώς στην αύξηση της συγκέντρωσης των θερμοκηπιακών αερίων διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και μεθανίου (CH<sub>4</sub>) στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, αποτελεί κοινή παραδοχή ότι το κλίμα του πλανήτη μεταβάλλεται όχι μόνο εξαιτίας ανθρωπογενών αιτιών (αλλαγή στη σύσταση της ατμόσφαιρας, αλλαγή στις χρήσεις γης) αλλά και λόγω φυσικών αιτιών (ηλιακή δραστηριότητα, αλλαγές της τροχιάς της γης, ηφαιστειογενή δράση) καθώς και εξαιτίας της εσωτερικής κλιματικής μεταβλητότητας, δηλαδή των αλλαγών του κλίματος χωρίς την παρουσία των παραπάνω αιτιών.

Συγκεκριμένα, οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το κλίμα της Γης είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον σημαντικοί παράμετροι που επιδρούν στο κλίμα είναι:

- τα θαλάσσια ρεύματα των ωκεανών και ειδικότερα το ρεύμα του κόλπου του Μεξικού,
- η εκκεντρότητα και την μετάπτωση του άξονα της Γης,
- οι ηλιακές κηλίδες,
- το φαινόμενο El Nino, που σχετίζεται με τη διαφορά πιέσεων στο Ειρηνικό ωκεανό,
- η αύξηση της συγκέντρωσης των αέριων του θερμοκηπίου εξαιτίας ανθρωπογενών δραστηριοτήτων
- οι ηφαιστειακές εκρήξεις και
- τα αιωρούμενα σωματίδια (αεροζολς).

Όπως είναι προφανές, σε ένα μη γραμμικό δυναμικό σύστημα, όπως το κλιματικό, αρκεί μία διαταραχή ενός παράγοντα για να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση το σύνολο του συστήματος μέσω πολύπλοκων αναδράσεων μεταξύ ατμόσφαιρας, υδρόσφαιρας και λιθόσφαιρας.

Η βασική κλιματική μεταβολή που μελετάται ευρέως αφορά στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, της γης και των ωκεανών. Η εν λόγω κλιματική μεταβολή περιγράφεται με τον όρο «παγκόσμια θέρμανση» (“global warming”). Ο όρος είναι εν γένει ουδέτερος ως προς τα αίτια πρόκλησης της θέρμανσης του πλανήτη, ωστόσο έχει επικρατήσει να υπονοεί την ανθρώπινη παρέμβαση. Αποδίδεται, δε, συχνά με διαφορετικό τρόπο, ως πλανητική (υπέρ) θέρμανση ή παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ άλλες φορές λανθασμένα ταυτίζεται με το «φαινόμενο του θερμοκηπίου», το οποίο αποτελεί έναν φυσικό μηχανισμό. Παρόλα αυτά πρέπει να τονισθεί ότι το θερμοκρασιακό σήμα δεν αποτελεί την αιτία αλλά την απόκριση του συστήματος στη μεταβολή του ενεργειακού ισοζυγίου που έχει προέλθει από την αλλαγή στη σύσταση της ατμόσφαιρας (ενισχυμένο φαινόμενο θερμοκηπίου).

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται, με τη χρήση στατιστικών μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών, να αποτυπωθεί η συσχέτιση μεταξύ της παγκόσμιας θερμοκρασιακής μεταβολής (εξαρτημένη μεταβλητή) και των ανεξάρτητων μεταβλητών: (α) ηλιακή ακτινοβολία (Total Solar Irradiation – TSI), (β) δείκτης πολυδιάστατης Νότιας Ταλάντωσης (Multivariate ENSO Index – MEI), (γ) οπτικό βάθος σωματιδίων (Aerosols Optical Depth – AOD) και (δ) συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Στη βάση της ως άνω ανάλυσης θα εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση τόσο των ανθρωπογενών παραμέτρων (CO<sub>2</sub>) όσο και των φυσικών παραμέτρων (TSI, MEI, AOD) στη μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας και κατ’ επέκταση στην παρατηρούμενη κλιματική μεταβολή.



## 1. Γενικές αρχές μετεωρολογίας – κλιματολογίας

Η ατμόσφαιρα της γης είναι ένα στρώμα μίγματος αερίων (άζωτο και οξυγόνο κατά κύριο λόγο), που περιβάλλει τον πλανήτη. Το 99% της ατμόσφαιρας της γης εκτείνεται μέχρι 30km από την επιφάνειά της. Η ατμόσφαιρα αποτελεί κομβικό στοιχείο για τη ζωή στη γη, αφού εξασφαλίζει το απαραίτητο οξυγόνο για τους ζωντανούς οργανισμούς και προστατεύει από την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία, που προέρχεται από τον ήλιο. Στην ατμόσφαιρα αναπτύσσονται τα νέφη που περιέχουν νερό και παγοκρυστάλλους και τα οποία υπό κατάλληλες συνθήκες δημιουργούν βροχή και χιονοπτώσεις. Επίσης εντός της ατμόσφαιρας λόγω θερμοκρασιακών διαφορών δημιουργούνται ρεύματα αέρα. Η μετεωρολογία είναι η επιστήμη η οποία μελετά την ατμόσφαιρα και τα φαινόμενα που συμβαίνουν εντός αυτής.

Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα καθορίζουν τον καιρό. Ο καιρός είναι, στην ουσία, η κατάσταση της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

Τα χαρακτηριστικά που συνιστούν τον καιρό είναι τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία αέρα
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Υγρασία
- Νεφοκάλυψη
- Κατακρημνίσεις (Βροχή, Χιόνι)
- Ορατότητα
- Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου

Εάν γίνει συστηματική παρατήρηση των χαρακτηριστικών του καιρού σε μία περιοχή, για διάστημα αρκετών ετών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για το κλίμα της συγκεκριμένης περιοχής. Δηλαδή, το κλίμα αντιπροσωπεύει τη μέση κατάσταση των καιρικών συνθηκών μίας συγκεκριμένης περιοχής σε μία εκτεταμένη χρονική περίοδο. Η μέση κατάσταση των καιρικών συνθηκών αντιπροσωπεύει πολύ περισσότερο από το μέσο όρο των καιρικών συνθηκών, αφού ενσωματώνει ακραίες τιμές, τάσεις μεταβολής και εξαιρετικά γεγονότα.

Η κλιματολογία αποτελεί τον κλάδο της μετεωρολογίας, που στοχεύει στη διερεύνηση και εξήγηση της κανονικής συμπεριφοράς των ατμοσφαιρικών φαινομένων, στην περιγραφή και εξήγηση της φύσης του κλίματος, τον προσδιορισμό των μεταβολών του κλίματος από τόπο σε τόπο, τη διερεύνηση τάσεων μεταβολής του κλίματος και τη μελέτη των συσχετίσεων του κλίματος με άλλα στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος και της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Έτσι, πέραν των καιρικών χαρακτηριστικών, οι ακόλουθοι παράγοντες συμπεριλαμβάνονται στη διερεύνηση του κλίματος από την κλιματολογία:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Φύση της επιφάνειας (ξηρά ή θάλασσα)
- Φυτοκάλυψη
- Θαλάσσια κυκλοφορία (ρεύματα)
- Ανάγλυφο, υψόμετρο, προσανατολισμός
- Κύκλος του νερού
- Ανθρώπινη δραστηριότητα

### **1.1. Παράμετροι που επιδρούν στη μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας**

- **Ηλιακή ακτινοβολία (Total Solar Irradiation – TSI)**

Το κλίμα της γης έχει υποστεί σημαντικές μεταβολές κατά την διάρκεια της εξέλιξης του πλανήτη μας. Εναλλασσόμενες περίοδοι παγετώνων μετέβαλαν σημαντικά τη μορφή του και επέδρασαν καθοριστικά στην εξέλιξη της ζωής και την πορεία του ανθρώπινου είδους. Η κύρια αιτία των μεταβολών αυτών, είναι η διακύμανση της ηλιακής δραστηριότητας που οφείλεται τόσο σε ενδογενείς όπως για παράδειγμα η μεταβλητότητα του μαγνητικού πεδίου, όσο και σε αστρονομικούς παράγοντες. Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς και το εκπεμπόμενο πλάσμα, ο ηλιακός άνεμος, είναι οι σημαντικότεροι εξωγενείς ρυθμιστές του κλιματικού μας συστήματος. Αν και η συσχέτιση της ηλιακής δραστηριότητας με το κλίμα είναι ευλογοφανής, η έλλειψη μακροχρονίων μετρήσεων, ώστε τα αποτελέσματα να είναι στατιστικώς σημαντικά, επέβαλε πολλούς περιορισμούς. Επί πολλά χρόνια η παραπάνω σχέση, ανήκε στα αμφιλεγόμενα θέματα μεταξύ των αλληλεπιδράσεων Γης-Ηλίου. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει επιτευχθεί τεράστια πρόοδος στην κατανόηση της μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι διαστημικές μετρήσεις υποδεικνύουν ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία (TSI) αλλάζει σε διάφορες χρονικές κλίμακες, από λεπτά έως τον ηλιακό κύκλο.

Η μεγαλύτερη ώθηση στη μελέτη των αλληλεπιδράσεων Γης-Ηλίου που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, οφείλεται στην όλο και σημαντικότερη επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην ατμόσφαιρα. Για να υπολογιστεί η επίδραση των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων λόγω καύσεων στο κλίμα, είναι απαραίτητο να βρεθεί πρώτα ο βαθμός μεταβολής λόγω φυσικών διεργασιών. Μια από τις σημαντικότερες φυσικές δραστηριότητες είναι και η ηλιακή δραστηριότητα.

Τα κλιματικά μοντέλα δείχνουν ότι η συνολική μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τη θερμοκρασιακή μεταβολή της ατμόσφαιρας της Γης κατά την προ-βιομηχανική εποχή. Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα η σχετική επιρροή της στις μεταβολές της θερμοκρασίας έχει μειωθεί σημαντικά και αυτό σημαίνει πως υπάρχουν και άλλοι παράγοντες της ηλιακής δραστηριότητας, καθώς και ανθρωπογενείς αιτίες, που ευθύνονται για την θερμοκρασιακή μεταβολή, ιδιαίτερα στον 20ο αιώνα.

Η ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance) είναι η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που λαμβάνεται από τον Ήλιο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή μήκους κύματος του οργάνου μέτρησης. Η ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance) που ενσωματώνεται με την πάροδο του χρόνου ονομάζεται Solar Irradiation, insolation ή solar exposure. Η ακτινοβολία μπορεί να μετρηθεί στο χώρο ή στην επιφάνεια της Γης μετά από ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση και εξαρτάται επιπλέον από την κλίση της επιφάνειας μέτρησης, το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία (Total Solar Irradiation) ή ολική πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας, ορίζεται ως η ολική ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο που προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια της ατμόσφαιρας στην μέση απόσταση Γης-Ηλίου. Είναι ένα μέτρο της ηλιακής ισχύος σε όλα τα μήκη κύματος ανά μονάδα επιφάνειας που προσπίπτει στην ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης. Η μονάδα μέτρησης της Solar Irradiance είναι watt ανά τετραγωνικό μέτρο ( $W / m^2$ ).

Η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας καθορίζεται από τη σφαιρικότητα και τις τροχιακές παραμέτρους της Γης. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι απαραίτητη για την αριθμητική πρόβλεψη του καιρού και την κατανόηση των εποχών και την κλιματική αλλαγή. Η εφαρμογή στις εποχές των παγετώνων είναι γνωστή ως κύκλοι του Μιλάνκοβιτς. Η TSI αλλάζει αργά σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες.

- **Δείκτης πολυδιάστατης Νότιας Ταλάντωσης (Multivariate ENSO Index – MEI)**

Ο πολυδιάστατος δείκτης ENSO, με τη συντομογραφία MEI, είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της έντασης ενός γεγονότος El Niño Νότια Ταλάντωση (ENSO). Δεδομένου ότι η ENSO προέρχεται από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση ποικίλων κλιματικών συστημάτων, το MEI θεωρείται ως ο πιο ολοκληρωμένος δείκτης για την παρακολούθηση της ENSO, καθώς συνδυάζει ανάλυση πολλαπλών μετεωρολογικών και ωκεανογραφικών στοιχείων. Το MEI προσδιορίζεται ως το πρώτο κύριο συστατικό των έξι διαφορετικών παραμέτρων: πίεση της επιφάνειας της θάλασσας, ζώνη και μεσημβρινές συνιστώσες του επιφανειακού ανέμου, θερμοκρασία επιφάνειας θάλασσας, θερμοκρασία επιφανειακού αέρα και θολερότητα με τη χρήση δεδομένων από το International

Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS ) . Το MEI υπολογίζεται δώδεκα φορές το χρόνο για κάθε «συρρικνούμενη διμηνιαία περίοδο», η οποία χαρακτηρίζεται ως Ιανουάριος-Φεβρουάριος, Φεβρουάριος-Μάρτιος, Μάρτιος-Απρίλιος και ούτω καθεξής. Μεγάλες θετικές τιμές MEI υποδεικνύουν την εμφάνιση των συνθηκών El Niño, ενώ μεγάλες αρνητικές τιμές MEI υποδηλώνουν την εμφάνιση συνθηκών La Niña.

Ως El Niño, που σημαίνει «το Θείο Βρέφος», ονομάστηκε από ψαράδες της περιοχής, ένα θερμό θαλάσσιο ρεύμα με κατεύθυνση τις νοτιοδυτικές ακτές της Νότιας Αμερικής, στον τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό, το οποίο είναι φτωχό σε θρεπτικές ουσίες και ψάρια. Αυτό το θερμό ρεύμα γίνεται αντιληπτό στο Περού περίπου την περίοδο των Χριστουγέννων. Τα περισσότερα χρόνια, η θέρμανση διαρκεί μόνο για μερικές εβδομάδες (ως ένα μήνα) πριν η κατάσταση επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα. Κάποιες χρονιές όμως, το φαινόμενο, έχει μεγαλύτερη ένταση και συνεχίζεται για αρκετούς μήνες οδηγώντας τους τοπικούς ψαράδες σε απόγνωση αλλά και δημιουργώντας, όπως θα αναλύσουμε παρακάτω, διαταραχές στη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Τα επεισόδια αυτά συμβαίνουν με μια περιοδικότητα 2-7 χρόνια και ονομάζονται Μεγάλα Επεισόδια El Niño (αν και πολλές φορές ονομάζονται απλώς El Niño). Κατά τη διάρκεια του El Niño, για λόγους που ακόμα παραμένουν άγνωστοι, η ατμοσφαιρική πίεση στον δυτικό Ειρηνικό αυξάνεται και στα ανατολικά ελαττώνεται, ενώ συνήθως επικρατούν οι αντίστροφες συνθήκες. Η αναστροφή της κατανομής της πίεσης ονομάζεται Νότια Κύμανση και λόγω του γεγονότος ότι συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα με το θερμό ωκεάνιο ρεύμα, οι επιστήμονες το ονομάζουν συχνά ENSO (El Niño / Southern Oscillation). Μια τεράστια περιοχή του νότιου Ειρηνικού γίνεται το κέντρο ενός εκτεταμένου τροπικού συστήματος, που τροποποιεί τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Λόγω αλλαγής της κυκλοφορίας, τα θερμά νερά του δυτικού Ειρηνικού κινούνται ανατολικά προς τις ακτές της νοτίου Αμερικής ανεβάζοντας τις θερμοκρασίες της θάλασσας μέχρι και 7°C. Τα θερμά νερά παρασύρουν μαζί τους μεγάλα σύννεφα βροχής. Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία τόσο περισσότερες και εντονότερες είναι οι βροχές, οι οποίες πλημμυρίζουν τις περιοχές αυτές και προκαλούν πολλές καταστροφές. Αντίθετα, στις δυτικές περιοχές του Ειρηνικού, όπου κανονικά θα υπήρχαν βροχές (περίοδος μουσώνων), επικρατεί ξηρασία, μέχρι και τις ακτές της ανατολικής Αφρικής. Όλες οι περιοχές, από την Αιθιοπία και το Σουδάν μέχρι την Ινδία, το Βόρνεο και την Αυστραλία, υπόκεινται σε εξοντωτική ξηρασία. Το El Niño αποτελεί τη μεγαλύτερη μεμονωμένη καιρική διαταραχή στον πλανήτη και είναι η μεγαλύτερη αιτία μεταβλητότητας του κλίματος. Η εμφάνιση του συνοδεύεται από καταστροφικές πλημμύρες και ξηρασίες, στις διαφορετικές πλευρές του Ειρηνικού. Η έξαρση του φαινομένου, τα τελευταία χρόνια, οδηγεί στην σύνδεσή του με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την επακόλουθη κλιματική αλλαγή. Μετά τη λήξη των επεισοδίων El Niño η κατάσταση συνήθως επανέρχεται στα φυσιολογικά της επίπεδα. Σε μερικές περιπτώσεις, όμως, το θαλάσσιο ρεύμα, το οποίο αντικαθιστά

το El Nino, είναι ιδιαίτερα ψυχρό δημιουργώντας τις αντίθετες συνθήκες και ονομάζεται La Nina (το κοριτσάκι).

- **Οπτικό πάχος αιωρούμενων σωματιδίων (AOD)**

Παρόλο που τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα μικρό ποσοστό της ατμόσφαιρας έχουν σημαντική επίδραση στην ατμόσφαιρα επηρεάζοντας την τόσο άμεσα, σκεδάζοντας και απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία, όσο και έμμεσα μεταβάλλοντας την φυσική των νεφών. Επιπλέον η μεγάλη τους χωρική και χρονική μεταβλητότητα καθιστά την εξέταση των αιωρούμενων σωματιδίων και των οπτικών χαρακτηριστικών τους βασικό κομμάτι στην φυσική της ατμόσφαιρας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι σωματίδια στερεής, υγρής ή διττής φάσης που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίς να έχουν καθορισμένη χημεία. Το μέγεθος τους κυμαίνεται μεταξύ 10 nm – 100 μm. Η προέλευση τους μπορεί να είναι τόσο φυσική (σκόνη από ερήμους/έδαφος, θαλάσσιο άλας, ηφαιστειακή σκόνη) όσο και ανθρωπογενής (καύση βιομάζας, βιομηχανικές εκπομπές, εκπομπές από αυτοκίνητα). Βιομηχανικές εκπομπές, καύση βιομάζας και ορυκτών καυσίμων είναι ανθρωπογενείς πηγές αιωρούμενων σωματιδίων και αποτελούν περίπου το 15% της συνολικής τους μάζας. Σε αστικές περιοχές είναι εύκολο να καταλάβουμε ότι οι ανθρωπογενείς πηγές παίζουν πιο σημαντικό ρόλο. Και στις δύο κατηγορίες περιλαμβάνονται τόσο πρωτογενείς όσο και δευτερογενείς εκπομπές. Η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων περιορίζεται στα κατώτερα στρώματα τις ατμόσφαιρας με το 80% της συνολικής τους μάζας να βρίσκεται στο πρώτο χιλιόμετρο της ατμόσφαιρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες πηγές βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης. Εξαιρέση αποτελούν οι ηφαιστειακές πηγές από τις οποίες παρατηρείται εισροή αιωρούμενων σωματιδίων και σε μεγαλύτερη ύψη.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την διάμετρο τους:

- PM10, σωματίδια διαμέτρου < 10 μm
- PM2.5, σωματίδια διαμέτρου < 2.5 μm
- PM1.0, σωματίδια διαμέτρου < 1.0 μm

Επίσης μπορούμε να τα διακρίνουμε σε λεπτόκοκκα (thin),  $d < 5 \mu\text{m}$  και χονδρά (coarse),  $d > 5 \mu\text{m}$ .

Οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της Γης με αποτέλεσμα να είναι συγκεντρωμένα στα κατώτερα τμήματα της τροπόσφαιρας και να παρουσιάζουν εκθετική μείωση με την αύξηση του ύψους (Seinfeld et al., 2006). Ο χρόνος ζωής των αιωρούμενων σωματιδίων μεταβάλλεται μεταξύ μερικών ημερών μέχρι μερικών εβδομάδων με τα μετεωρολογικά φαινόμενα να παίζουν

σημαντικό ρόλο. Η ποικιλία τους σε χημική σύσταση, σχήμα και μέγεθος είναι μείζονος ενδιαφέροντος μιας και οι οπτικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από αυτή.

Το οπτικό πάχος των αιωρούμενων σωματιδίων θεωρείται από τις πλέον σημαντικές οπτικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων. Η εξασθένιση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω σκέδασης και απορρόφησης (από αιωρούμενα σωματίδια) συνδέεται με το οπτικό τους πάχος (Sathees et al., 2005) Κατά την πρόσπτωση και διάδοση μονοχρωματικής ακτίνας φωτός  $I_0$  στην ατμόσφαιρα, λόγω εξασθένισης στο έδαφος θα φτάσει τελικά ακτινοβολία έντασης  $I_\lambda$ . Η ένταση της ακτινοβολίας δίνεται από την σχέση Beer-Lambert από την οποία μπορεί να υπολογιστεί το οπτικό πάχος των αιωρούμενων σωματιδίων:

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{(-\mu_r \delta)}$$

όπου,  $\mu_r$  η αέριος μάζα και  $\delta_\lambda$  το οπτικό πάχος. Υπό ανέφελες συνθήκες, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν το πιο σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Ο προσδιορισμός λοιπόν των οπτικών τους χαρακτηριστικών μας δίνει σημαντικές πληροφορίες και αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στο προσδιορισμό της επίδρασης τους στην φυσική της ατμόσφαιρας.

- **Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)**

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο με ευεργετικά αποτελέσματα στο κλίμα της γης. Η απειλή προέρχεται από την υπερβολή του φαινομένου, η οποία οφείλεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων. Έχει εξακριβωθεί ότι ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας (γνωστά και ως θερμοκηπικά αέρια), επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης. Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (η οποία ειδάλλως θα χανόταν στο διάστημα) από τα συγκεκριμένα αέρια, ονομάζεται φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πρόκειται για ένα γεωφυσικό φαινόμενο που είναι ουσιώδες και απαραίτητο για την ύπαρξη, διατήρηση και εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη. Χωρίς αυτόν το μηχανισμό η μέση θερμοκρασία της γης θα ήταν περίπου κατά 350C χαμηλότερη, δηλαδή περίπου -20<sup>0</sup>C αντί για +15<sup>0</sup>C που είναι σήμερα και η ύπαρξη ζωής θα ήταν αδύνατη, τουλάχιστον στη μορφή που τη γνωρίζουμε σήμερα. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, στις φυσικές του διαστάσεις, δεν είναι επιβλαβές, αντίθετα είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών του πλανήτη. Το ανησυχητικό είναι η ενίσχυση του φαινομένου σαν αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμοκηπικών αερίων αυξάνουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που παγιδεύεται από την ατμόσφαιρα, επιδρώντας έτσι στο κλίμα της γης. Το φυσικό επακόλουθο της αύξησης των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων από τον άνθρωπο είναι λοιπόν η ενίσχυση του

φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Εκτός από τις ανθρωπογενείς εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, σημαντικό ρόλο για την εξέλιξη του φαινομένου του θερμοκηπίου παίζει και η συνεχής εκτεταμένη καταστροφή των τροπικών δασών τα οποία έχουν σημαντική συμβολή στην ισορροπία των κυριοτέρων θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα. Η συνεισφορά του διοξειδίου του άνθρακα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι καταλυτική. Εκλύεται άμεσα στην ατμόσφαιρα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων και έμμεσα από την εκχέρσωση δασικών εκτάσεων. Τα επίπεδα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα εκτιμάται ότι αυξάνονται κατά 3 – 4% κάθε δεκαετία και κατά 0,4 – 0,5% περίπου κάθε χρόνο. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, αν συνεχίσει ο ίδιος ρυθμός αύξησης των καύσεων πάνω στον πλανήτη, η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> το έτος 2030 θα έχει διπλασιαστεί. Μία τέτοια αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> πιθανολογείται ότι θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3 – 5 °C. Όμως, ακόμη και αν σταματήσει η αυξανόμενη εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η αποκατάστασή του στα επιθυμητά επίπεδα θα καθυστερήσει πολύ. Το διοξείδιο του άνθρακα έχει χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα 5 – 7 χρόνια. Οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα είναι γνωστές με ακρίβεια από το 1958 αλλά, με βάση μετρήσεις στον πάγο και των ισοτόπων του άνθρακα στους δακτυλίους των δέντρων, έχουν υπολογιστεί και για τις τελευταίες χιλιετίες. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας περιόδου των παγετώνων, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα προσδιορίστηκαν στα 200 ppm (μέρη στο εκατομμύριο) αλλά, στο τέλος της περιόδου αυτής, πριν περίπου 15.000 χρόνια, βρέθηκε ότι εκτοξεύτηκαν στα 280 ppm. Ήταν η περίοδος που η γη άρχισε να ζεσταίνεται και σε λιγότερο από 10.000 χρόνια εξελίχθηκε από ένα πλανήτη στον οποίο πολύ μεγάλα ποσοστά της επιφάνειάς του ήταν καλυμμένα με πάγο, στον σημερινό, που ουσιαστικά είναι ελεύθερος από πάγους. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μετράται με πολύ καλή ακρίβεια από το 1957 σε δύο σταθμούς στον κόσμο. Ο πρώτος βρίσκεται στο Mauna Loa στη Χαβάη και ο δεύτερος στο Νότιο Πόλο. Και οι δύο σταθμοί παρέχουν σημαντικότερες πληροφορίες για τη διαχρονική εξέλιξη του διοξειδίου του άνθρακα. Το κατά πόσο μπορεί να προβλεφθεί η μελλοντική εξέλιξη των συγκεντρώσεων του CO<sub>2</sub>, εξαρτάται από την ικανότητα εκτίμησης της ποσότητας των ορυκτών καυσίμων που θα καταναλωθούν κατά τα επόμενα έτη και του ποσοστού του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> που θα παραμείνει στην ατμόσφαιρα. Αν η παγκόσμια κατανάλωση καυσίμων συνεχιστεί με τον ίδιο ρυθμό, εκτιμάται ότι θα παρατηρείται αύξηση του CO<sub>2</sub> κατά περίπου 4% ανά δεκαετία. Συγχρόνως όμως, αναμένεται μία ελάττωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων σαν συνέπεια της αυξανόμενης χρήσης των ήπιων μορφών ενέργειας. Επίσης, δεν θα πρέπει να λησμονήσουμε τη σημαντική συνεισφορά των ωκεανών στα επίπεδα του CO<sub>2</sub>. Οι ωκεανοί λειτουργούν σαν μια τεράστια αποθήκη CO<sub>2</sub>, το οποίο δεσμεύεται από το φυτοπλαγκτόν κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Με το θάνατο των φυτοπλαγκτονικών οργανισμών, ένα μεγάλο ποσοστό του παραμένει κάτω από την

επιφάνεια των ωκεανών. Μια αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (λόγω φαινομένου του θερμοκηπίου) ενδέχεται να οδηγήσει σε άνθηση του φυτοπλαγκτού και κατά συνέπεια σε αύξηση της δέσμευσης του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Παρόλα αυτά, δεν αναμένεται ο ρυθμός αύξησης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα να γίνει μικρότερος από 2% ανά δεκαετία, για τις πρώτες δεκαετίες του 21ου αιώνα.

## 1.2. Εξέλιξη κλιματικών μεταβολών

Σύμφωνα με την έκθεση της Επιτροπής Μελέτης Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής που σύστησε η Τράπεζα της Ελλάδος, οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν το κλίμα της γης έχουν υποστεί σημαντικές διακυμάνσεις. Όπως, ειδικότερα, αναφέρεται στην εν λόγω έκθεση:

Το κλίμα της Γης πριν από 55 εκατομμύρια έτη (αρχή της εποχής του Ηωκαίνου) υπήρξε θερμότερο από σήμερα (The Geological Society, 2010), όπου εκτιμήσεις παλαιοθερμοκρασίας βαθέν υδάτων προερχόμενες από ισότοπα οξυγόνου βενθονικών τρηματοφόρων (Zachos et al., 2001, Miller et al., 2005) υποδεικνύουν περίπου 6 °C υψηλότερες θερμοκρασίες από τις σημερινές. Ακολουθως, τα τελευταία 50 εκατομμύρια έτη υπάρχουν ενδείξεις για μια μακρο-χρόνια τάση μείωσης της θερμοκρασίας (Zachos et al., 2001). Πριν από 34 εκατομμύρια έτη δημιουργήθηκαν οι παγετώνες της Ανταρκτικής (Barrett, 1996), ενώ πριν από 2,6 εκατομμύρια έτη αναπτύχθηκαν και οι παγετώνες του βορείου ημισφαιρίου (Maslin et al., 1998). Από τότε αρχίζει και η τελευταία γεωλογική περίοδος της εποχής του Τεταρτογενούς, η οποία χαρακτηρίζεται από εναλλαγές σχετικά σύντομων (10-30 χιλιάδες χρόνια) μεσοπαγετωδών περιόδων και παρατεταμένων παγετωδών περιόδων, οι οποίες εναλλαγές απέκτησαν αισθητά μεγαλύτερη ένταση και μικρότερη συχνότητα κατά το τελευταίο ένα εκατομμύριο χρόνια.

Συνοπτικά, το κλίμα διαμορφώνεται από εξωτερικούς και εσωτερικούς παράγοντες (Bradley, 1999, Alverson et al., 2003). Στους εξωτερικούς παράγοντες περιλαμβάνονται οι τροχιακές παράμετροι Γης-Ήλιου, δηλαδή η εκκεντρότητα της τροχιάς (eccentricity), η κλίση του άξονα περιστροφής της γης (obliquity) και η μετάπτωση των ισημεριών (precession), καθώς και η ηλιακή δραστηριότητα. Στους εσωτερικούς παράγοντες περιλαμβάνονται η ηφαιστειακή δραστηριότητα, οι διεργασίες ανάδρασης του συστήματος υδρόσφαιρα – ατμόσφαιρα – λιθόσφαιρα – βιόσφαιρα – κρυόσφαιρα (π.χ. albedo, νεφοκάλυψη κ.λπ.), οι διακυμάνσεις του όγκου των παγετώνων, οι μεταβολές της ταχύτητας και του τρόπου κυκλοφορίας των θαλάσσιων ρευμάτων, οι μεταβολές των αερίων του θερμοκηπίου της ατμόσφαιρας (π.χ. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) και η επίδρασή τους στην εισερχόμενη και εξερχόμενη θερμική ακτινοβολία, καθώς και οι διάφορες ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Η σημασία των μεταβολών των τροχιακών παραμέτρων της γης για τις μακροχρόνιες κλιματικές μεταβολές αναπτύχθηκε αρχικά από τους Adhemar (1842),



Croll (1875) και Milankovitch (1941) και έκτοτε πλήθος εργασιών πιστοποίησε την αποτύπωση των τριών τροχιακών παραμέτρων, που απαντούν σε περιοδικότητες των 400 και 100, 41 και 19-21 χιλιάδων ετών (ka), σε ποικίλους παλαιοκλιματικούς δείκτες. Η υπολογιστική απεικόνιση των μεταβολών των τριών τροχιακών παραμέτρων του παρελθόντος (Berger and Loutre, 1991) και του μέλλοντος (Berger et al., 1998) αποτελεί σημαντικό εργαλείο ποικίλων παλαιοκλιματικών μελετών.

Για παράδειγμα, προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης της σημερινής μεσοπαγετώδους περιόδου (έναρξη πριν από 11,5 χιλιάδες χρόνια) με αυτές του παρελθόντος που χαρακτηρίζονταν από παρόμοιες τροχιακές παραμέτρους και στη συνέχεια τη δυνατότητα εκτίμησης της παρούσας φάσης του κλιματικού κύκλου, καθώς και της μελλοντικής του εξέλιξης. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις της 4ης έκθεσης αξιολόγησης (2007) της IPCC, για να δημιουργηθούν συνθήκες τροχιακής διάταξης της Γης κατάλληλες να προκαλέσουν πολύ ψυχρά καλοκαίρια στο βόρειο ημισφαίριο, παρόμοια με αυτά που καταγράφηκαν πριν από 116 χιλιάδες χρόνια (έναρξη τελευταίας παγετώδους περιόδου), θα πρέπει να περάσουν το λιγότερο 30 χιλιάδες χρόνια από σήμερα. Ωστόσο, η επιστημονική κοινότητα παραμένει μέχρι σήμερα επιφυλακτική τόσο ως προς την επιλογή εκείνης της μεσοπαγετώδους περιόδου του παρελθόντος με την οποία θα μπορούσε να συγκριθεί η σημερινή θερμή περίοδος όσο και ως προς τον τρόπο (analogue) με τον οποίο θα πρέπει να γίνει αυτή η σύγκριση. Για παράδειγμα, εάν η σημερινή μεσοπαγετώδης περίοδος (ισοτοπικό στάδιο 1 ή MIS 1) ταυτιστεί με αυτήν του MIS 11 (~ 400 ka), η οποία είναι χαρακτηριστική για τη μεγάλη της διάρκεια (28 ka), και με την οποία έχουν παρόμοιες τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και CO<sub>2</sub>, και ευθυγραμμιστούν οι καμπύλες της μετάπτωσης των ισημεριών (precession) των δύο μεσοπαγετωδών περιόδων, προκύπτει ότι η σημερινή θερμή περίοδος πρέπει να βρίσκεται προς το τέλος της (Loutre and Berger, 2000, 2003, Ruddiman, 2007, Tzedakis, 2010). Εάν όμως ευθυγραμμιστούν οι καμπύλες της κλίσης του άξονα περιστροφής της γης (obliquity) μεταξύ των δύο θερμών περιόδων (Masson-Delmotte et al., 2006, Broecker and Stocker, 2006), προκύπτει ότι η σημερινή θερμή περίοδος θα συνεχιστεί για περίπου 12 ka ακόμη, πριν διαμορφωθούν οι συνθήκες για την έναρξη της επόμενης παγετώδους περιόδου. Εάν, από την άλλη πλευρά, το σημερινό MIS 1 ταυτιστεί με το MIS 19 (~770 ka), με το οποίο επίσης παρουσιάζει ομοιότητες ως προς τις τροχιακές παραμέτρους, τότε η σημερινή θερμή περίοδος θα έχει 9 ka ακόμη να διανύσει. Η μεταβλητότητα του κλίματος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί, ανάλογα με τις εμφανιζόμενες περιοδικές συχνότητες, σε περιόδους που κυμαίνονται από 400 χιλιάδες έως και περίπου 20 χιλιάδες χρόνια και σχετίζονται με τις τροχιακές παραμέτρους ή ακόμα και σε περιόδους με μεταβλητότητα 1.500 ετών και πολλαπλάσιων αυτών (δηλ. 3.000, 5.000 έτη κ.λπ.), που σχετίζονται με τα παγκόσμια σημασία γεγονότα ψύχρανσης των υδάτων, τα αποκαλούμενα “Dansgaard-Oeschger events” και τα μη περιοδικά “Heinrich events”, και τέλος σε περιόδους με μεταβλητότητα σε συντομότερα χρονικά

διαστήματα, της τάξεως των ετών έως ολίγων δεκάδων ετών, που οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις ατμόσφαιρας – βιόσφαιρας – κρούσφαιρας – υδρόσφαιρας, όπως π.χ. το φαινόμενο “El Niño”, η κύμανση του Βόρειου Ατλαντικού, η Αρκτική Κύμανση, η σχεδόν διετής κύμανση κ.ά.

Μετρήσεις της ηλιακής δραστηριότητας μέσω των παρατηρήσεων των ηλιακών κηλίδων υπάρχουν από το 17ο αιώνα μέχρι σήμερα και εμφανίζουν περιοδικές μεταβολές με περιοδικότητες 11, 22 και 75 ετών. Η αναπαράσταση της ηλιακής δραστηριότητας στο ιστορικό και γεωλογικό παρελθόν προκύπτει με έμμεσο τρόπο από τις μεταβολές των συγκεντρώσεων των κοσμικής προέλευσης ισοτόπων (10Be σε πολικό πάγο και 14C σε δακτυλίους δέντρων, όπου μεγαλύτερη παραγωγικότητα των ισοτόπων συνδέεται με μειωμένη ακτινοβολία).

Η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στη μεταβλητότητα του κλίματος υποστηρίζεται από τη συσχέτιση των μεταβολών των κοσμικών ισοτόπων με τις μεταβολές ποικίλων κλιματικών δεικτών, όπως ισότοπα οξυγόνου (Karlén and Kyulenstierna, 1996, Bond et al., 2001, Fleitmann et al., 2003, Wang et al., 2005). Οι Scafetta and West (2006) υπολόγισαν ότι το 75% της παγκόσμιας θέρμανσης της περιόδου 1900-1980 είχε προέλευση την ηλιακή δραστηριότητα, ενώ το ποσοστό μειώνεται στο 30% για την περίοδο 1980-2000. Κάποιοι άλλοι, όπως οι Wanner et al. (2008), είναι πιο επιφυλακτικοί τόσο ως προς τη φυσική ερμηνεία με βάση την οποία η ηλιακή δραστηριότητα επηρεάζει το κλίμα όσο και ως προς την αισθητή επίδραση που μπορεί να έχουν οι μεταβολές της ηλιακής δραστηριότητας τόσο στις κλιματικές αλλαγές του Τεταρτογενούς (αυξομειώσεις παγετώνων) όσο και στη σημερινή παγκόσμια θέρμανση (Bard and Frank, 2006) και θεωρούν ότι ενδεχομένως η ηλιακή δραστηριότητα ασκεί απλώς δευτερεύουσα επίδραση. Είναι δηλαδή πιθανό η ηλιακή επίδραση να συμβάλλει σε μικρές διακυμάνσεις του κλίματος διάρκειας μερικών αιώνων (Steinhilber et al., 2009), όπως, ενδεικτικά, οι περιπτώσεις κλιματικών διακυμάνσεων της τελευταίας χιλιετίας, π.χ. η μεσαιωνική κλιματική ανωμαλία (σχετικά θερμή περίοδος 900-1400 μ.Χ.) και βεβαίως η “Μικρή Παγετώδης Εποχή” (1500-1800 μ.Χ.).

Θα πρέπει να τονισθεί ότι συνολικά, η αβεβαιότητα που υπάρχει στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας σε μικρές χρονικές κλίμακες είναι μεγάλη.

Η παρακολούθηση της εξέλιξης του κλίματος τα τελευταία 11,5 χιλιάδες χρόνια (Ολόκαινος) σε υψηλή χρονική ανάλυση είναι σημαντική για την εκτίμηση τόσο της τάσης των αλλαγών των διαφόρων παραμέτρων του κλίματος όσο και του εύρους και της ταχύτητας διακύμανσης. Η περίοδος του Ολοκαίνου αποτελεί κλιματικό καθεστώς συγκρίσιμο με αυτό του παρόντος, ενώ παράλληλα διαθέτει παλαιοκλιματικά αρχεία ιζημάτων και άλλων βιοδεικτών υψηλής χρονικής ανάλυσης.

Η εποχή του Ολοκαίνου είναι γνωστή ως η τελευταία μεσοπαγετώδης θερμή περίοδος, τα τελευταία στάδια της οποίας διανύουμε σήμερα. Ωστόσο, σημαντικός αριθμός εργασιών αναδεικνύει μια κλιματική μεταβλητότητα, η οποία εκφράζεται με κάποια απότομα, ψυχρά, κλιματικά γεγονότα παγκόσμιας εμβέλειας, των οποίων τα χαρακτηριστικά (διάρκεια, ένταση, ρυθμός) και οι κινητήριες δυνάμεις είναι απολύτως απαραίτητο να καθοριστούν και να συγκριθούν με αυτά της κλιματικής αλλαγής της τελευταίας χιλιετίας έως εκατονταετίας. Σύμφωνα με μια συνθετική ανασκόπηση και επανεξέταση (Mayewski et al., 2004) της παγκόσμιας κλιματικής μεταβλητότητας κατά τη διάρκεια του Ολοκαίνου, προκύπτει η διάκριση τεσσάρων διαστημάτων απότομης κλιματικής αλλαγής, δηλαδή διαστημάτων ψύχρανσης μέσα στη γενικότερα θεωρούμενη θερμή περίοδο. Η παλαιότερη αιφνίδια κλιματική αλλαγή του Ολοκαίνου είναι αυτή πριν από 9-8 χιλιάδες χρόνια (γνωστή ως “8.2 ka event”, π.χ. Alley et al., 1997), η οποία συντρέχει με:

- πιθανές απελευθερώσεις μεγάλης ποσότητας λιωμένου πάγου στο Βόρειο Ατλαντικό (Barber et al., 1999), που ενδεχομένως οδήγησαν στη δημιουργία θαλάσσιου πάγου, αποτελώντας θετική ανάδραση στην κλιματική ψύξη,
- μείωση της καλοκαιρινής ηλιακής προσπίπτουσας ακτινοβολίας (summer insolation),
- απουσία ένδειξης μεταβολής της ηλιακής δραστηριότητας (διότι το  $^{10}\text{Be}$  παραμένει αμετάβλητο στους πυρήνες πάγου, ενώ το  $\Delta^{14}\text{C}$  σημειώνει μείωση, που μπορεί να οφείλεται σε αλλαγή της θερμόαλης κυκλοφορίας εξαιτίας της αυξημένης παραγωγής γλυκού νερού [meltwater]) και αυξημένα ποσοστά  $\text{SO}_4$ , τα οποία υποδηλώνουν πιθανή συμβολή ηφαιστειακών εκρήξεων τόσο στην ψύχρανση όσο και στην ξηρότητα των χαμηλών γεωγραφικών πλατών (μέσω της μείωσης των αφροασιατικών μουσώνων).

Μετά τα 9-8 ka, ακολουθούν τα αιφνίδια κλιματικά γεγονότα των 6 έως 5 ka, των 3,5 έως 2,5 ka και τα μικρότερης εξάπλωσης 4,2 έως 3,8 και 1,2 έως 1 ka BP (Mayewski et al., 2004). Το κλιματικό καθεστώς και οι κινητήριες δυνάμεις που συνδέονται με τα παραπάνω κλιματικά γεγονότα είναι διαφορετικά από αυτά των 9-8 ka BP. Αυτό σημαίνει ότι για τα νεότερα κλιματικά γεγονότα δεν υπάρχουν ενδείξεις απελευθέρωσης μεγάλων ποσοτήτων γλυκού νερού ή έντονες μεταβολές των καλυμμάτων πάγου του βορείου ημισφαιρίου, ούτε συστηματικές αλλαγές στη συγκέντρωση ηφαιστειακών αερίων και ατμοσφαιρικού  $\text{CO}_2$ . Ενώ λοιπόν στην αλλαγή των 9-8 ka BP οι παγετώνες του βορείου ημισφαιρίου διαδραμάτιζαν ακόμη σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των κλιματικών αλλαγών, κάποιες από τις νεότερες κλιματικές αλλαγές φαίνεται να καθορίζονται περισσότερο από τη μεταβλητότητα της ηλιακής δραστηριότητας. Αυτά τα ψυχρά διαστήματα των υψηλών γεωγραφικών πλατών του βορείου ημισφαιρίου εκφράζονται με συνθήκες ξηρότητας στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη (Mayewski et al., 2004, Staubwasser and

Weiss, 2006), όπως για παράδειγμα στη Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα, τα διαστήματα των 6-5 και 3,5-2,5 χιλιάδων χρόνων πριν από σήμερα συνδέονται με:

- μειωμένες τιμές ηλιακής δραστηριότητας, που αντανakλώνται σε μέγιστες τιμές των  $^{10}\text{Be}$  και  $\Delta^{14}\text{C}$ , και
- αύξηση του ατμοσφαιρικού μεθανίου μετά τα πέντε χιλιάδες χρόνια πριν από σήμερα.

Οι επόμενες νεότερες αιφνίδιες κλιματικές αλλαγές των διαστημάτων 4,2-3,5 ka BP και 1,2-1ka BP είναι δύσκολο να αποδοθούν σε συγκεκριμένους μηχανισμούς, καθώς για παράδειγμα η περίοδος 4,2-3,5 ka BP σημειώνει μέγιστο στο  $^{10}\text{Be}$  αλλά ανεπαίσθητη αλλαγή στο  $\Delta^{14}\text{C}$ , αποδυναμώνοντας το επιχείρημα περί της επίδρασης της ηλιακής δραστηριότητας. Από την άλλη πλευρά, η καταγεγραμμένη ξηρότητα στα χαμηλά γεωγραφικά πλάτη πιθανόν να ερμηνεύεται με την οπισθοχώρηση προς το νότο της Ενδοτροπικής Ζώνης Σύγκλισης (ITCZ, Hodell et al., 2001), η οποία συνάδει με την ενδυνάμωση των δυτικών ανέμων (westerlies) στο Βόρειο Ατλαντικό.

Η ξηρότητα της περιόδου 4,2-3,5 ka BP φαίνεται να έχει συνδράμει στην κατάρρευση του ακκαδικού πολιτισμού (deMenocal et al., 2000a). Το διάστημα των 1,2-1 ka BP συμπίπτει με μικρή αύξηση του ατμοσφαιρικού  $\text{CO}_2$  και η ξηρασία αυτού του διαστήματος φαίνεται να συμπίπτει με την κατάρρευση του πολιτισμού των Μάγια (Hodell et al., 2001). Σε περίοδο χαμηλών θερμοκρασιών, η ξηρότητα στις τροπικές περιοχές μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως εξασθένηση των μουσωνικών συστημάτων, μείωση της εξάτμισης από τους κρύους ωκεανούς και μειωμένη θερμική μετάδοση πάνω από τις τροπικές ηπείρους (Mayewski et al., 2004).

Το πιο πρόσφατο ψυχρό γεγονός καταγράφεται 600 χρόνια πριν από σήμερα, όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες των μεγάλων γεωγραφικών πλατών συνδυάζονται με αυξημένη υγρασία στα μικρά γεωγραφικά πλάτη. Κατά τη διάρκεια αυτής της απότομης αλλαγής παρατηρείται μείωση του  $\text{CO}_2$  και αύξηση του  $\text{CH}_4$ , κάτι το οποίο καταδεικνύει συνθήκες αυξημένης υγρασίας. Υψηλές συγκεντρώσεις ηφαιστειακών αερίων κατά την έναρξη του γεγονότος πιθανόν να συνέβαλαν θετικά στην έναρξη της ψύχρανσης. Επίσης, η διακριτή αύξηση των  $^{10}\text{Be}$  και  $\Delta^{14}\text{C}$  (Beer, 2000, Stuiver and Braziunas, 1989, 1993) υποδηλώνει ότι αυτή την περίοδο η μεταβλητότητα της ηλιακής δραστηριότητας άσκησε σημαντική επίδραση (Bond et al., 2001, Denton and Karlén, 1973, Mayewski et al., 1997, O' Brien et al., 1995) και πιθανόν να σχετίζεται με το ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας (Spörer Minimum) του 15ου αιώνα μ.Χ. Μια ακολουθία ελάχιστων ηλιακών κηλίδων, όπως των Wolf (1280-1350 μ.Χ.), Spörer (1460-1550), Maunder (1645-1715) και Dalton (1790-1820), μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει την ψυχρή περίοδο γνωστή ως "Little Ice Age", κατά τη διάρκεια της οποίας η ηφαιστειακή δραστηριότητα

υπολογίζεται ότι συνέβαλε στην περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας (Gao et al., 2008).

Μεταξύ του ελαχίστου των κηλίδων (Περίοδος Oort 1040-1080 και Wolf 1280-1350) μεσολαβεί μια περίοδος περίπου 200 ετών με αυξημένη ηλιακή δραστηριότητα, η οποία συμπίπτει με τη μεσαιωνική κλιματική ανωμαλία.

Συμπερασματικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι απότομες κλιματικές αλλαγές κατά τη διάρκεια του Ολοκαίνου (πιο συχνές από το Μέσο Ολόκαινο μέχρι σήμερα) δεν παρατηρούνται ταυτόχρονα και με την ίδια ένταση σε όλες τις περιοχές της γης, αφού ουσιαστικά συνιστούν το αποτέλεσμα της επίδρασης ποικίλων μηχανισμών, ενώ παράλληλα γίνεται αντιληπτό ότι κάθε ψυχρό γεγονός μπορεί να αποτελεί έκφραση ενός ξεχωριστού και μη επαναλαμβανόμενου συνδυασμού κλιματικών μηχανισμών και κινητήριων δυνάμεων (Mayewski et al., 2004).

### **1.3 Εργαλεία προσομοίωσης της κλιματικής αλλαγής**

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σήμερα για την προσομοίωση της κλιματικής αλλαγής είναι τα Συζευγμένα Ατμοσφαιρικά-Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (Coupled Atmospheric-Ocean General Circulation Models, AOGCMs). Πρόκειται για μοντέλα που βασίζονται στις βασικές φυσικές αρχές του γήινου συστήματος όπως οι βασικές εξισώσεις της μηχανικής των ρευστών και της διάδοσης της ακτινοβολίας. Τα AOGCMs χωρίζονται σε Ατμοσφαιρικά (AGCMs) και Ωκεάνια Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (OGCMs) ενώ μπορεί να είναι και συζευγμένα μεταξύ τους (AOGCMs) καθώς και με άλλα μοντέλα όπως τα μοντέλα προσομοίωσης της παγοκάλυψης στην ξηρά και την θάλασσα, της βιόσφαιρας (Denman et al., 2007) και άλλα.

Τα AOGCMs που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη του κλίματος και της κλιματικής αλλαγής παρουσιάζουν ομοιότητες με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την καιρική πρόγνωση λίγων ημερών. Η διαφορά είναι ότι τα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού δίνουν έμφαση σε διαφορετικά στοιχεία αφού χρησιμοποιούνται με διαφορετικό σκοπό και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Συγκεκριμένα τα κλιματικά AOGCMs δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στις διεργασίες του εδάφους, του ωκεανού και των παγετώνων καθώς και στην ισορροπία των διεργασιών μεγάλης χρονικής κλίμακας όπως ο υδρολογικός κύκλος.

Τονίζεται ότι η γνώση ορισμένων φυσικών διεργασιών είναι ακόμα περιορισμένη. Για το λόγο αυτό στις κλιματικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται παραμετροποιήσεις και απλουστεύσεις ορισμένων φαινομένων. Η χωρική ανάλυση των AOGCMs στις μέρες μας, εξαιτίας των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων, είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων (Mearns et al., 2001). Σε αυτή τη χωρική ανάλυση είναι δυνατόν να αναπαραχθούν ικανοποιητικά η

γενική κυκλοφορία σε ολόκληρο τον πλανήτη καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων κλιματικών παραμέτρων σε συνοπτική κλίμακα. Ωστόσο δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με ακρίβεια φαινόμενα που σχετίζονται με την επίδραση της τοπογραφίας σε τοπική και περιοχική κλίμακα .

Οι τεχνικές με τις οποίες εισάγεται η περιοχική πληροφορία στις κλιματικές προσομοιώσεις ονομάζονται τεχνικές υποβιβασμού κλίμακας (υποκλιμάκωσης) και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: 1) Τα υψηλής ή μεταβλητής ανάλυσης παγκόσμια ατμοσφαιρικά μοντέλα γενικής κυκλοφορίας, 2) τις στατιστικές ή εμπειρικές μεθόδους υποκλιμάκωσης (Statistical/Empirical Downscaling) και 3) τη δυναμική υποκλιμάκωση. Η δυναμική υποκλιμάκωση βασίζεται στη χρήση των περιοχικών κλιματικών μοντέλων (Regional Climate Models, RCMs). Πρόκειται για μοντέλα περιορισμένου πεδίου και υψηλής ανάλυσης τα οποία βασίζονται στη δυναμική υποκλιμάκωση και αναπτύχθηκαν προκειμένου να εισαχθεί η περιοχική πληροφορία στα μεγάλης κλίμακας πεδία που παρέχονται από τα GCMs ή που προκύπτουν από επανα-ανάλυση (NCEP/ ERA-40) (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1990). Για να λειτουργήσουν είναι απαραίτητο να τους παρέχονται αρχικές συνθήκες σε ολόκληρο το πεδίο τους, χρονομεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες στα πλευρικά τους όρια και επιφανειακές οριακές συνθήκες. Οι πλευρικές οριακές συνθήκες προέρχονται από προσομοιώσεις με GCMs ή από ανάλυση παρατηρήσεων. Δέχονται επίσης, όπως και τα AOGCMs, δεδομένα εισόδου συγκέντρωσης αερίων θερμοκηπίου και συγκέντρωσης αερολυμμάτων. Συνήθως αποτελούνται από ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο συζευγμένο με ένα μοντέλο του εδάφους. Οι συνθήκες στην επιφάνεια του ωκεανού παρέχονται μαζί με τις χρονομεταβαλλόμενες πλευρικές οριακές συνθήκες, ωστόσο γίνονται απόπειρες να συζευχθούν και με ένα ωκεάνιο μοντέλο αντίστοιχης (υψηλής) χωρικής ανάλυσης. Επιπρόσθετα είναι δυνατό να συζευχθούν με μοντέλα της υδρολογίας, των πάγων της θάλασσας (sea-ice) της χιμείας της ατμόσφαιρας/αερολυμμάτων και της βιόσφαιρας. Γενικά δεν αλληλεπιδρούν με το GCM που τους παρέχει τις πλευρικές οριακές συνθήκες. Λόγω των μικρών τους απαιτήσεων σε υπολογιστικούς πόρους μπορούν να πραγματοποιούν προσομοιώσεις διάρκειας μερικών δεκαετιών σε αρκετά υψηλή ανάλυση, μέχρι και κάτω από τα 10km. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουν να υποκλιμακώσουν την πληροφορία από τα αποτελέσματα των GCMs που περιέχει την γενική κυκλοφορία η οποία οφείλεται στα μεγάλης κλίμακας παράγοντες (large-scale forcings) και να την εμπλουτίσουν χάρη (α) στην καλύτερη αναπαράσταση της τοπογραφίας (λόγω της υψηλότερης ανάλυσης) και (β) στην δυνατότητα αναπαράστασης διεργασιών μικρότερης κλίμακας οι οποίες δεν μπορούν να προσομοιωθούν στην κλίμακα των GCMs. Τα περιοχικά μοντέλα χρησιμοποιούνταν ήδη από παλιά στην αριθμητική πρόγνωση καιρού, βελτιώθηκαν από τους Dickinson et al. (1989) και Giorgi (1990) και έκτοτε χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από παλαιοκλιματολογικές μέχρι την μελέτη της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής.

Τα RCMs διαθέτουν πολλές υπορουτίνες για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών που είτε συμβαίνουν σε κλίμακα μικρότερη από την κλίμακα που μπορούν να αναλύσουν, όπως οι διεργασίες του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, είτε ξεφεύγουν από την φυσική των εξισώσεων Navier-Stokes που αποτελούν τον βασικό πυρήνα τους, όπως οι υπορουτίνες της ακτινοβολίας, είτε και τα δυο. Όλες αυτές οι υπορουτίνες διαθέτουν μια σειρά από παραμέτρους τις οποίες ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να μεταβάλλει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, το μέγεθος και την ανάλυση του πλέγματος. Πριν από τις κυρίως προσομοιώσεις του ο χρήστης πρέπει να πραγματοποιήσει μερικές δοκιμαστικές προσομοιώσεις προκειμένου να εξετάσει αν η επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου οδηγεί σε αληθοφανή αποτελέσματα. Αυτές οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται με δεδομένα από επανανάλυση (reanalysis) ώστε στη συνέχεια τα αποτελέσματά να μπορούν να επαληθευτούν με δεδομένα παρατηρήσεων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ρύθμιση του μοντέλου (tuning).

Βασικό πλεονέκτημα των RCMs είναι ότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας όπως την ορογραφία, την κατανομή ξηράς και θάλασσας και την χρήση της γης, τα οποία δεν είναι δυνατό να παρασταθούν ακόμα στις προσομοιώσεις των GCMs επειδή οι διαστάσεις τους είναι μικρότερες από τις διαστάσεις του πλέγματος του GCM. Επιπρόσθετα η αυξημένη χωρική ανάλυση των RCMs επιτρέπει να αναλύονται φαινόμενα μικρότερης χωρικής κλίμακας που δεν αναλύονται από τα GCMs. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να προσομοιώσουν τη λειτουργία μηχανισμών ανάδρασης που δρουν σε περιοχική κλίμακα. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι αν τα αποτελέσματα του GCM που παρέχει τις οριακές συνθήκες είναι εσφαλμένα το ίδιο θα ισχύσει και για τα αποτελέσματα του RCM. Αυτό το μειονέκτημα ισχύει για όλες τις τεχνικές υποκλιμάκωσης. Επίσης μειονέκτημα αποτελεί η έλλειψη της δυνατότητας αλληλεπίδρασης με το GCM. Η ανάγκη ρύθμισης τους, είναι ένα ακόμα μειονέκτημα διότι μπορεί να αποδειχτεί διαδικασία χρονοβόρα και επίπονη.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των κλιματικών συνθηκών που θα επικρατήσουν στο μέλλον σε ένα τόπο εμπεριέχει πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι: 1. Η επιλογή του σεναρίου εκπομπής θερμοκηπικών αερίων βάσει του οποίου γίνεται η προσομοίωση του μελλοντικού κλίματος, 2. Η επιλογή του GCM με το οποίο θα διεξαχθούν οι κλιματικές προσομοιώσεις, 3. Η επιλογή του RCM στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μεθοδολογία δυναμικής υποκλιμάκωσης και 4. η επιλογή των αρχικών συνθηκών της κλιματικής προσομοίωσης του GCM δεδομένα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του RCM. Μια συνήθης πρακτική, που χρησιμοποιείται προκειμένου να μειωθούν οι αβεβαιότητες που οφείλονται στις διαφορετικές παραμετροποιήσεις και τους διαφορετικούς δυναμικούς κώδικες που χρησιμοποιούνται από τα διαφορετικά κλιματικά μοντέλα αλλά και στην

αβεβαιότητα των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στο μέλλον, είναι το να αναλύονται αποτελέσματα ενός συνόλου από προσομοιώσεις διαφορετικών κλιματικών μοντέλων και για διάφορα σενάρια εκπομπών (ensemble).

#### **1.4 Το διεθνές και το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή**

Κατά τη διάσκεψη της Κοπεγχάγης το Νοέμβριο του 2009 για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, τα κράτη-μέλη του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών έθεσαν στόχο τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 2 °C σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή. Ο στόχος αυτός είναι δυνατόν να επιτευχθεί εφόσον η συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σταθεροποιηθεί στα 450 ppm.<sup>1</sup> Αυτό σημαίνει ότι, παγκοσμίως, το επίπεδο των εκπομπών πρέπει να μειωθεί δραστικά, ώστε μέχρι το 2050 να περιοριστεί στο 50% περίπου του αντίστοιχου επιπέδου του 1990.

Ο επιμερισμός του παγκόσμιου αυτού στόχου κατά περιοχή δεν είναι δυνατόν να είναι ισομερής. Λαμβανομένης υπόψη της τάσης για σημαντική αύξηση των εκπομπών από τις αναπτυσσόμενες οικονομίες (Κίνα, Ινδία, κ.λπ.), η ανάλυση με παγκόσμια ενεργειακά πρότυπα (Prometheus του ΕΜΠ-Ε3MLab, POLES του IPTS και WEO του IEA) δείχνει ότι η υποχρέωση μείωσης των εκπομπών από τις χώρες του ΟΟΣΑ πρέπει να διαμορφωθεί στο 80% το 2050 συγκριτικά με το 1990. Η ανάλυση δείχνει επίσης ότι για την επίτευξη του στόχου οι αναπτυσσόμενες οικονομίες πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές κατά 25% το 2050 από το επίπεδο εκπομπών του 1990, στόχος που αντιστοιχεί σε μείωση κατά περίπου 80% από τις εκπομπές τους το 2050 στο πλαίσιο των τρεχουσών τάσεων ανάπτυξης.

Επομένως για την Ευρωπαϊκή Ένωση τίθεται ως στόχος η μείωση κατά 80% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2050 σε σύγκριση με το επίπεδο του 1990. Προκύπτει επίσης ενδιάμεσος στόχος μείωσης των εκπομπών κατά 40% το 2030 έναντι του 1990. Η μείωση αυτή πρέπει να επιτευχθεί εντός της Ευρώπης. Με τη χρήση του ενεργειακού προτύπου PRIMES (ΕΜΠ-Ε3MLab), η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προσδιόρισε το 2010 μια οικονομικά βέλτιστη κατανομή της προσπάθειας μείωσης των εκπομπών κατά χώρα-μέλος. Έτσι, προέκυψε για την Ελλάδα στόχος μείωσης των εκπομπών κατά 70-75% το 2050 έναντι του 1990.

Δεδομένου ότι ο ενεργειακός τομέας ευθύνεται περίπου για το 80% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και ότι η δραστική μείωση των εκπομπών (μεθανίου) σε ορισμένους τομείς όπως ο αγροτικός είναι ιδιαίτερα δύσκολη, ο στόχος που τίθεται για τη μείωση των εκπομπών από τον τομέα της ενέργειας είναι τουλάχιστον ίσος με το γενικό στόχο, δηλαδή -80% μέχρι το 2050 και -40% μέχρι το 2030.



Επομένως, η μεγάλη πρόκληση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου απευθύνεται στον ενεργειακό τομέα και επιβάλλει μεγάλες αλλαγές τόσο στην κατανάλωση όσο και στην παραγωγή ενέργειας.

## 2. Μεθοδολογικό πλαίσιο ανάλυσης χρονοσειρών

### 2.1. Χαρακτηριστικά Χρονοσειρών

Γενικά μία χρονοσειρά είναι η αποτύπωση και καταγραφή της τιμής μίας μεταβλητής συνεχόμενα στο χρόνο. Οι χρονοσειρές διακρίνονται σε: διακριτές ή διακεκριμένες (discrete) (π.χ. ημερήσιες, μηνιαίες τιμές παροχής σε μία θέση μέτρησης) και συνεχείς (continuous) (π.χ. συνεχείς τιμές της παροχής για μια σειρά ετών). Επιπλέον, οι χρονοσειρές διακρίνονται σε απλές και πολλαπλές. Οι απλές χρονοσειρές (single timeseries) μίας υδρολογικής μεταβλητής είναι μίας θέσης δηλαδή μίας μεταβλητής (λ.χ. στη μέτρηση της βροχόπτωσης σε πέντε (5) σταθμούς σε μία λεκάνη απορροής, κάθε μία καταγραφή είναι απλή), αντίθετα οι πολλαπλές χρονοσειρές (multiple timeseries) είναι ένα σετ απλών χρονοσειρών (π.χ. χρονοσειρές σε διαφορετικές θέσεις ή διαφορετικών παραμέτρων στην ίδια θέση) **Error! Reference source not found.**

Ένα άλλο χαρακτηριστικών των χρονοσειρών είναι η τάση. Ως τάση χρονοσειράς χαρακτηρίζεται η αυξητική ή μειωτική συμπεριφορά που παρατηρείται στη μέση τιμή της χρονοσειράς για ένα δεδομένο διάστημα παρακολούθησης. Έτσι, η τάση μπορεί να αυξάνεται, να μειώνεται ή να παρουσιάζει διακύμανση. Η εμφάνιση τάσης ή περιοδικότητας στη χρονοσειρά υποδηλώνει ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά του συστήματος που παράγει τη χρονοσειρά αλλάζουν με το χρόνο και η χρονοσειρά δεν είναι στάσιμη. Η αυστηρή στασιμότητα (strict stationarity) ορίζεται μαθηματικά ως η διατήρηση στο χρόνο  $t$  της κοινής κατανομής των  $\{x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+\tau}\}$  για κάποιο αυθαίρετο παράθυρο υστερήσεων  $\tau$ . Η συνθήκη στασιμότητας περιορίζεται συνήθως στη διατήρηση της μέσης τιμής και αυτοδιασποράς και αναφέρεται ως ασθενής στασιμότητα (weak stationarity).

Η μη-στασιμότητα αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στην ανάλυση χρονοσειρών και ιδιαίτερα όταν επιχειρείται η παραγωγή προβλέψεων. Ειδικότερα, η ανάλυση μη στάσιμων χρονοσειρών οδηγεί στο πρόβλημα νόθου παλινδρόμησης (spurious regression). Στις νόθες παλινδρομήσεις ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι πολύ υψηλός (τείνει στη μονάδα) ενώ η τιμή του στατιστικού των Durbin-Watson είναι πολύ χαμηλή  $R^2 > DW$ . Επί της ουσίας το πρόβλημα της νόθου παλινδρόμησης παρατηρείται όταν δύο χρονικές σειρές σε μια παλινδρόμηση έχουν σε μεγάλο βαθμό υψηλή συσχέτιση, ενώ δεν έχουν καμιά πραγματική σχέση μεταξύ τους. Η υψηλή συσχέτιση οφείλεται στην ύπαρξη χρονικών τάσεων και στις δύο χρονικές σειρές. Το πρόβλημα της νόθου παλινδρόμησης αντιμετωπίζεται με την χρήση των πρώτων διαφορών των χρονικών σειρών.

Επιπλέον, οι χρονοσειρές διακρίνονται σε μη συσχετισμένες και συσχετισμένες (uncorrelated – correlated). Συγκεκριμένα, αν σε μία απλή χρονοσειρά  $x(t)$  το  $x$  στο χρόνο  $t$  παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από τις τιμές του  $x$  στο χρόνο  $t-k$ , η χρονοσειρά  $x(t)$  ονομάζεται σειριακά συσχετισμένη, αυτοσυσχετισμένη ή

συσχετισμένη στο χρόνο. Διαφορετικά, η χρονοσειρά  $x(t)$  είναι μη συσχετισμένη ή ανεξάρτητη.

## 2.2. Ανάλυση Χρονοσειρών

Η ανάλυση χρονοσειρών αποσκοπεί στην ανεύρεση των χαρακτηριστικών εκείνων που συμβάλουν στην κατανόηση της ιστορικής συμπεριφοράς μιας μεταβλητής και επιτρέπουν την πρόβλεψη μμελλοντικών τιμών της. Η πρόβλεψη μμελλοντικών συμπεριφορών στηρίζεται στην ανάλυση παρατηρήσεων που αναφέρονται στο παρελθόν (ιστορικά δεδομένα). Αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα, για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος έχει να κάνει με τη δυσκολία αναγνώρισης των χαρακτηριστικών και των σχέσεων που διέπουν τα ιστορικά δεδομένα. Σε πολλές περιπτώσεις είναι σχεδόν αδύνατος ο διαχωρισμός των χαρακτηριστικών αυτών από τις τυχαίες διακυμάνσεις της μεταβλητής (οι οποίες αναφέρονται με το γενικό όρο «θόρυβος»). Η μοντελοποίηση του θορύβου μπορεί να οδηγήσει σε εντελώς λανθασμένες προβλέψεις. Το δεύτερο πρόβλημα οφείλεται στην αβεβαιότητα συνέχισης στο μέλλον των χαρακτηριστικών της μεταβλητής.

Οι ποσοτικές μέθοδοι κατανόησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας μεταβλητής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις αιτιοκρατικές (causal) ή οικονομετρικές (econometric) μεθόδους και στις μεθόδους προεκβολής (extrapolation) ή μεθόδους χρονοσειρών. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι επιχειρούν να εξηγήσουν τη συμπεριφορά μιας μεταβλητής (εξαρτημένη μεταβλητή) συσχετίζοντάς την με άλλες (ανεξάρτητες μεταβλητές). Συγκεκριμένα, η ανεύρεση της ζητούμενης σχέσης στηρίζεται σε τεχνικές παλινδρόμησης. Στις μεθόδους χρονοσειρών η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών μιας μεταβλητής στηρίζεται αποκλειστικά σε ιστορικές τιμές της ίδιας μεταβλητής.

## 2.3 Ανάλυση συσχέτισης

Τα ερωτήματα για τη σχέση δύο μεταβλητών είναι πολύ συνηθισμένα και ενδιαφέροντα στην ερευνητική διαδικασία. Μπορεί για παράδειγμα να απαιτηθεί να δοθεί απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο η αξία των ακινήτων έχει σχέση με την απόσταση από κεντρικές οδικές αρτηρίες ή αν το μέγεθος των αγροκτημάτων έχει σχέση με την παραγωγικότητά τους ή αν η βαθμολογία στις εξετάσεις έχει σχέση με τις ώρες μελέτης. Με την ανάλυση συσχέτισης (correlation analysis) δύναται να υπολογιστεί ο βαθμός συσχέτισης δύο μεταβλητών και να προσδιοριστεί η κατεύθυνση της μεταξύ τους σχέσης.

Για την περίπτωση των ποσοτικών μεταβλητών, ο όρος συσχέτιση αφορά τον βαθμό με τον οποίο δύο μεταβλητές μεταβάλλονται ταυτοχρόνως (συμμεταβάλλονται) και

προς ποια κατεύθυνση, με την προϋπόθεση ότι η σχέση τους είναι γραμμική. Η γραμμική σχέση δύο μεταβλητών εκφράζεται γενικά από τη συνάρτηση  $Y = a + bX$ , όπου  $X$  και  $Y$  είναι μεταβλητές και  $a$ ,  $b$  σταθερές, οι παράμετροι της εξίσωσης. Στη γραμμική σχέση για κάθε μεταβολή της μεταβλητής  $X$  κατά μία μονάδα, η μεταβλητή  $Y$  μεταβάλλεται κατά  $b$ . Σε γεωμετρική απεικόνιση η σχέση αυτή παριστάνεται με μία ευθεία γραμμή. Επειδή στην πραγματικότητα οι τιμές δύο μεταβλητών μπορεί να σχετίζονται με διαφορετικό τρόπο, δηλαδή η σχέση να μην είναι γραμμική, πριν από τον ποσοτικό προσδιορισμό της σχέσης είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η ύπαρξη της γραμμικής σχέσης. Τα διαγράμματα διασποράς αποτελούν το πρώτο βήμα για τη διερεύνηση της ύπαρξης γραμμικής ή μη σχέσης.

### 2.3.1 Συντελεστές συσχέτισης

Ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient) Pearson  $r$  είναι ο σημαντικότερος συντελεστής συσχέτισης και αφορά ποσοτικές μεταβλητές, ενώ βασίζεται στην έννοια της γραμμικής σχέσης. Για τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r$  για δύο μεταβλητές  $X$  και  $Y$  χρησιμοποιείται η συνδιακύμανση (covariance) η οποία συμβολίζεται με  $\text{cov}(X,Y)$ . Η συνδιακύμανση υπολογίζεται από τα γινόμενα των αποκλίσεων των τιμών της μεταβλητής  $X$  από τον αριθμητικό μέσο της και των τιμών της μεταβλητής  $Y$  από τον αριθμητικό μέσο της για όλες τις παρατηρήσεις. Ο μαθηματικός τύπος της συνδιακύμανσης μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του μαθηματικού τύπου της διακύμανσης ή διασποράς (variance). Η διακύμανση αφορά μία και μόνη μεταβλητή, ενώ η συνδιακύμανση περιγράφει πώς οι δύο μεταβλητές μεταβάλλονται ταυτοχρόνως.

Το μέγεθος της συνδιακύμανσης εξαρτάται από τα μεγέθη των τιμών των μεταβλητών και τις μονάδες μέτρησης, όπως είναι η περίπτωση και για την τυπική απόκλιση. Προκειμένου να οριστεί ένα μέτρο συσχέτισης ανεξάρτητο μονάδων μέτρησης, η συνδιακύμανση διαιρείται με το γινόμενο των τυπικών αποκλίσεων  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$ . Με τον τρόπο αυτό προκύπτει ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, ο οποίος δεν έχει μονάδες μέτρησης και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\rho$ , όταν ο υπολογισμός γίνεται για τον στατιστικό πληθυσμό, και με το λατινικό γράμμα  $r$ , όταν πρόκειται για δείγμα. Οπότε:

$$r = \text{cov}(X,Y)/\sigma_x\sigma_y$$

όπου  $\text{cov}(X,Y)$  είναι η συνδιακύμανση και  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών  $X$  και  $Y$ .

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson  $r$  δεν έχει μονάδες μέτρησης και λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1,+1]$ . Επομένως για κάθε ζεύγος μεταβλητών, η τιμή του συντελεστή συσχέτισης θα είναι  $-1 \leq r \leq 1$ . Συντελεστής  $r = -1$  ή  $r = 1$  σημαίνει ότι υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών και τα σημεία που ορίζονται από τα ζεύγη των τιμών τους στο διάγραμμα διασποράς βρίσκονται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής. Η τιμή  $r=0$  αντιστοιχεί σε ένα νέφος σημείων τα οποία

είναι ασυσχέτιστα. Θετικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές είναι θετικά συσχετιζόμενες και οι τιμές τους μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή όταν μεγαλώνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μεγαλώνουν και οι τιμές της άλλης μεταβλητής και το αντίστροφο. Αρνητικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει αρνητική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή όταν αυξάνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μειώνονται οι τιμές της άλλης. Η μηδενική συσχέτιση σημαίνει ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσε να υπάρχει σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών, η οποία όμως δεν είναι γραμμική και για τον λόγο αυτό καταλήγει σε συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r = 0$ . Εκτός των χαρακτηριστικών τιμών του συντελεστή συσχέτισης, δηλαδή των  $r = \pm 1$  και  $r = 0$ , οι υπόλοιπες τιμές στο διάστημα  $[-1,+1]$  ερμηνεύονται με εμπειρικό τρόπο. Τιμές κοντά στη μονάδα, συνήθως μεγαλύτερες του 0,80, θετικές ή αρνητικές ερμηνεύονται ως σχεδόν τέλεια ή πολύ ισχυρή συσχέτιση. Τιμές κοντά στο 0,5 μπορεί να ερμηνευτούν ως μέτρια συσχέτιση, ενώ τιμές κοντά στο μηδέν ως ασθενής συσχέτιση ή απουσία συσχέτισης. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ανάλογα με το αντικείμενο της μελέτης, η ερμηνεία του μεγέθους των συντελεστών συσχέτισης μπορεί να διαφέρει.

Οι έλεγχοι σημαντικότητας του συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r$  προϋποθέτουν την κανονικότητα των κατανομών των δύο μεταβλητών  $X$  και  $Y$ . Ο συντελεστής Pearson  $r$  μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για ποσοτικές μεταβλητές. Στην περίπτωση ιεραρχικών μεταβλητών χρησιμοποιείται ο συντελεστής Spearman  $\rho$ . Ο συντελεστής αυτός εφαρμόζεται επίσης σε ποσοτικές μεταβλητές, όταν δεν ισχύει η προϋπόθεση της κανονικότητας των δύο μεταβλητών  $X$  και  $Y$ , καθώς επίσης και σε περιπτώσεις ύπαρξης ακραίων τιμών.

Ο συντελεστής Spearman ανήκει στους μη παραμετρικούς ελέγχους, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν εκτίμηση κάποιας παραμέτρου, όπως ο αριθμητικός μέσος και η τυπική απόκλιση, και δεν προϋποθέτουν γνώση της μορφής της κατανομής του πληθυσμού από τον οποίο έχουν προέλθει τα δεδομένα (για παράδειγμα από έναν κανονικό πληθυσμό). Επίσης για τους υπολογισμούς δεν χρησιμοποιούνται οι τιμές των μεταβλητών, αλλά οι τάξεις μεγέθους τους. Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman  $\rho$  προκύπτει από δύο μεταβλητές  $X$  και  $Y$  για τις οποίες γίνεται ταξινόμηση των παρατηρήσεων κατά αύξουσα ή φθίνουσα τάξη. Αν η συσχέτιση είναι τέλεια, οι παρατηρήσεις έχουν την ίδια κατάταξη και για τις δύο μεταβλητές. Συνήθως όμως παρατηρούνται διαφορές στην κατάταξη, δηλαδή μια παρατήρηση  $i$  μπορεί να έχει την υψηλότερη τιμή για τη μία μεταβλητή και την τρίτη υψηλότερη για την άλλη. Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman  $\rho$  υπολογίζεται ως εξής:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}$$

όπου

$n$  είναι το πλήθος των παρατηρήσεων του δείγματος και

$d_i$  είναι η διαφορά των σχετικών ή διατεταγμένων θέσεων των τιμών  $x_i$  και  $y_i$  μιας παρατήρησης  $i$ .

Όπως και ο συντελεστής συσχέτισης Pearson  $r$ , έτσι και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman  $\rho$  λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1,+1]$ . Τιμές του συντελεστή συσχέτισης κοντά στο 1 ή το -1 υποδηλώνουν ισχυρή συσχέτιση θετική ή αρνητική, ενώ τιμές κοντά στο μηδέν υποδηλώνουν απουσία συσχέτισης.

## 2.4 Γραμμική παλινδρόμηση

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση (simple linear regression) ορίζεται ως η συναρτησιακή σχέση ανάμεσα σε μια εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  (τη μεταβλητή πρόβλεψης) και σε μια ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$ . Επιπλέον, υποτίθεται ότι η σχέση των δύο μεταβλητών είναι γραμμική, παρότι σε πολλές περιπτώσεις η υπόθεση αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Όμως και πάλι μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, αφού πρώτα γίνει μετασχηματισμός της σχέσης των δύο μεταβλητών σε γραμμική.

Βασικός ρόλος της παλινδρόμησης είναι η ανάλυση και η κατανόηση των σχέσεων μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, ήτοι ο έλεγχος του βαθμού συσχέτισής τους. Η πρόβλεψη με την μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης δίνει μια καλή εικόνα της μέσης και μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του υπό μελέτη μεγέθους.

Το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης μαθηματικά ορίζεται από την σχέση:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon,$$

όπου  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  οι άγνωστοι συντελεστές του μοντέλου και  $\varepsilon$  το τυχαίο σφάλμα ή διαταρακτικός όρος.

Οι τιμές των συντελεστών  $\beta_0$  και  $\beta_1$  υπολογίζονται με βάση την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων. Επιλέγονται δηλαδή οι συντελεστές που ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των πραγματικών τιμών από τις προβλεπόμενες σε κάθε χρονική περίοδο.

Στην περίπτωση που οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο παραπάνω υπόδειγμα είναι χρονολογικές σειρές, συνήθως δημιουργούνται τεχνικά προβλήματα που έχουν να κάνουν με την ύπαρξη σειριακής αλληλεξάρτησης (αυτοσυσχέτισης) στο διαταρακτικό όρο. Όταν υπάρχει αυτοσυσχέτιση (θετική ή αρνητική) στο διαταρακτικό όρο, οι εκτιμήσεις των συντελεστών  $\beta_i$  είναι μεν αμερόληπτες και συνεπείς αλλά όχι αποτελεσματικές. Επιπλέον, η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτόμηση της διακύμανσης του διαταρακτικού όρου και κατ'

επέκταση σε υπερεκτίμηση του Συντελεστή Προσδιορισμού  $R^2$ . Η αυτοσυσχέτιση μπορεί να είναι πρώτου, δευτέρου ή ανώτερου βαθμού, ενώ μερικές από τις βασικές αιτίες στις οποίες οφείλεται η αυτοσυσχέτιση είναι: (α) η παράλειψη μεταβλητών στο υπόδειγμα, (β) η αξιοπιστία των δεδομένων και (γ) η ύπαρξη εγγενών χρονικών υστερήσεων στα φαινόμενα που εξετάζονται (π.χ. η ανεργία στο χρόνο  $t$  εξαρτάται από τον ρυθμό ανάπτυξης στο χρόνο  $t$  αλλά και στο  $t-1$  και ίσως στο  $t-2$  κ.ά.). Ο συνήθης στατιστικός έλεγχος για την ανίχνευση αυτοσυσχέτισης στον διαταρακτικό όρο είναι αυτός των Durbin-Watson. Για την εφαρμογή του εν λόγω ελέγχου θα πρέπει καταρχήν να ικανοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις: (α) το μοντέλο παλινδρόμησης περιλαμβάνει μια σταθερά, (β) η αυτοσυσχέτιση πρέπει να είναι μόνο πρώτης τάξης και (γ) το οικονομετρικό υπόδειγμα δεν περιλαμβάνει την εξαρτημένη μεταβλητή με χρονική υστέρηση σαν ερμηνευτική μεταβλητή. Η μηδενική υπόθεση που ελέγχεται είναι αυτή της Μη ύπαρξης αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης στα κατάλοιπα. Στη συνέχεια, αφού εκτιμηθεί το οικονομετρικό υπόδειγμα με τη μέθοδο της απλής/ πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίζονται τα κατάλοιπα καθώς και το στατιστικό  $d$  του ελέγχου Durbin-Watson. Εάν οι τιμές του στατιστικού  $d$  κυμαίνονται μεταξύ μηδέν (0) και δύο (2) υπάρχει θετική αυτοσυσχέτιση, εάν κυμαίνονται μεταξύ δύο (2) και τέσσερα (4) υπάρχει αρνητική αυτοσυσχέτιση, ενώ τέλος ένα οι τιμές του στατιστικού  $d$  ισούνται με δύο (2) δεν υπάρχει αυτοσυσχέτιση.

## 2.5 Αυτοπαλίνδρομα Ολοκληρωμένα Υποδείγματα Κινητού Μέσου – ARIMA( $p, d, q$ )

Η γενική μορφή ενός υποδείγματος ARMA ( $p, q$ ) είναι το υπόδειγμα:

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \alpha_2 Y_{t-2} + \dots + \alpha_p Y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Το υπόδειγμα ARMA( $p, q$ ) είναι συνδυασμός  $p$  αυτοπαλίνδρομων όρων και  $q$  όρων κινητού μέσου. Είναι προφανές ότι ένα καθαρά αυτοπαλίνδρομο υπόδειγμα ή ένα καθαρό υπόδειγμα κινητού μέσου μπορούν να θεωρηθούν ως ειδικές περιπτώσεις μιας ARMA διαδικασίας. Δηλαδή, θα ισχύουν τα εξής:

$$AR(p) = ARMA(p, 0) \text{ και}$$

$$MA(q) = ARMA(0, q)$$

Η απλούστερη μορφή μιας ARMA( $p, q$ ) διαδικασίας είναι το υπόδειγμα ARMA(1,1). Η μορφή αυτού του υποδείγματος είναι:

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 Y_{t-1} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

Γενικά, ένα υπόδειγμα ARMA( $p, q$ ) που εφαρμόζεται σε μια ολοκληρωμένη σειρά τάξεως, ονομάζεται αυτοπαλίνδρομο ολοκληρωμένο υπόδειγμα κινητού μέσου τάξεως και συμβολίζεται ως ARIMA( $p, d, q$ ). Συγκεκριμένα, οι τρεις μορφές των παραμέτρων αυτού του υποδείγματος είναι: οι  $p$  παράμετροι του αυτοπαλίνδρομου

υποδείγματος, ο αριθμός των διαφορών που απαιτούνται για να γίνει η σειρά στάσιμη, και τέλος οι παράμετροι του υποδείγματος κινητού μέσου.

Για παράδειγμα, ένα υπόδειγμα που περιγράφεται ως  $ARIMA(0,1,2)$  σημαίνει ότι περιέχει μηδέν αυτοπαλίνδρομες παραμέτρους και δύο παραμέτρους κινητού μέσου που έχουν υπολογιστεί για την προκύπτουσα σειρά των πρώτων διαφορών.

Μια  $ARIMA(p,d,q)$  διαδικασία μπορεί να διατυπωθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους και να πάρει τρεις διαφορετικές μορφές:

- Ως συνάρτηση των παρελθουσών τιμών της και των τιμών του διαταρακτικού όρου, τρέχουσας και παρελθουσών. Η μορφή αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση διαφοράς (difference equation form).
- Ως συνάρτηση των παρελθουσών τιμών της και της τρέχουσας τιμής του διαταρακτικού όρου. Η μορφή αυτή είναι γνωστή ως η αντίστροφη μορφή (inverted form).
- Ως συνάρτηση μόνο των τιμών του διαταρακτικού, τρέχουσας και παρελθουσών. Η μορφή αυτή είναι γνωστή ως τυχαία διαταραχή (random shock form).

Η ανάπτυξη και η κατασκευή υποδειγμάτων  $ARIMA$  ως εργαλεία πρόβλεψης των τιμών οικονομικών μεταβλητών είναι γνωστή ως μεθοδολογία Box-Jenkins.

### 2.5.1 Μεθοδολογία Box-Jenkins

Η προσέγγιση των Box-Jenkins στην ανάλυση χρονοσειρών είναι μια μέθοδος εύρεσης ενός στατιστικού υποδείγματος  $ARIMA(p,d,q)$  που να παριστάνει ικανοποιητικά τη στοχαστική διαδικασία από την οποία προήλθαν τα δεδομένα. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τρία στάδια, την ταυτοποίηση (identification), την εκτίμηση (estimation), και το διαγνωστικό έλεγχο (diagnostic checking).

#### *Ταυτοποίηση*

Σε αυτό το στάδιο γίνεται η εξειδίκευση ενός  $ARIMA$  υποδείγματος με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνονται από το δείγμα. Αυτό σημαίνει ότι καθορίζονται οι τιμές των  $d$ ,  $p$  και  $q$ . Δηλαδή, καθορίζεται ο αριθμός των διαφορών που απαιτούνται για να μετατραπεί η σειρά σε στάσιμη, από τη στιγμή βέβαια που δεν είναι, και στη συνέχεια καθορίζεται η τάξη  $p$  της αυτοπαλίνδρομης διαδικασίας και η τάξη της διαδικασίας κινητού μέσου.

#### *Εκτίμηση*

Μετά την εξειδίκευση του υποδείγματος και την εύρεση της τάξης του ακολουθεί η εκτίμηση των  $p$  παραμέτρων  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$  της αυτοπαλίνδρομης διαδικασίας και των  $q$  παραμέτρων  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  της διαδικασίας κινητού μέσου. Αν η σειρά που εξετάζεται είναι μόνο αυτοπαλίνδρομη, οι παράμετροί της μπορούν να εκτιμηθούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αν όμως, η σειρά περιέχει και όρους



κινητού μέσου τότε για την εκτίμηση των παραμέτρων του κινητού μέσου θα χρησιμοποιηθούν μη γραμμικές μέθοδοι εκτίμησης.

#### *Διαγνωστικός Έλεγχος*

Στο στάδιο αυτό γίνεται έλεγχος καλής προσαρμογής του υποδείγματος. Αυτό σημαίνει ότι ελέγχεται το πόσο καλά ταιριάζει το εκτιμώμενο υπόδειγμα με τα δεδομένα, γιατί είναι πιθανό κάποιο άλλο υπόδειγμα ARIMA να προσαρμόζεται καλύτερα. Αν το εκτιμώμενο υπόδειγμα είναι το πιο κατάλληλο, αν δηλαδή εκφράζει ικανοποιητικά τη διαδικασία από την οποία προέρχονται τα δεδομένα, τότε τα κατάλοιπα θα πρέπει να συμπεριφέρονται ως μια διαδικασία λευκού θορύβου. Αυτό σημαίνει ότι τα κατάλοιπα δεν πρέπει να αυτοσυσχετίζονται. Αυτός ο έλεγχος για τα κατάλοιπα γίνεται με τη στατιστική Q των Box-Pierce, με την οποία ελέγχεται από κοινού η σημαντικότητα ενός αριθμού συντελεστών αυτοσυσχέτισης, έστω  $m$ . Η μηδενική υπόθεση τότε, θα είναι:

$$H_0 : \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_m = 0,$$

όπου  $\rho_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  είναι οι συντελεστές συσχέτισης των καταλοίπων.

### 3. Ανάλυση και Αποτελέσματα

#### 3.1. Περιγραφή χρονοσειρών και εφαρμογή στατιστικών ελέγχων

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής και προκειμένου για την μελέτη της μεταβολής της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας θα αναπτυχθεί ένα οικονομετρικό μοντέλο και θα χρησιμοποιηθούν οι χρονοσειρές των παρακάτω μεταβλητών (Πίνακας 1).

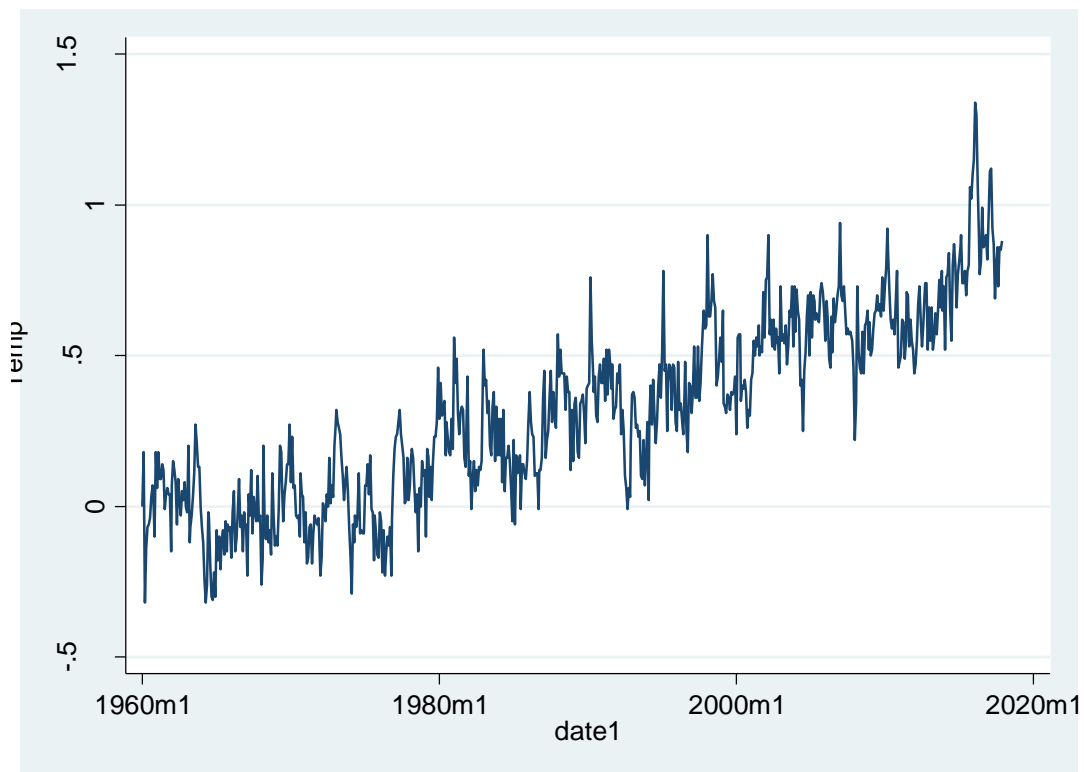
Πίνακας 1. Συγκεντρωτική παρουσίαση μεταβλητών

Μεταβλητή	Ακρωνύμιο	Είδος Μεταβλητής	Περίοδος Παρατηρήσεων	Πηγή
Θερμοκρασιακή Ανωμαλία (°C)	Temp	Εξαρτημένη	Μηνιαία (1900 – 2017)	National Oceanic & Atmospheric Administration ( <a href="https://www.noaa.gov/">https://www.noaa.gov/</a> )
Ηλιακή ακτινοβολία (w/m <sup>2</sup> )	TSI	Ανεξάρτητη	Μηνιαία (1948 – 2017)	National Oceanic & Atmospheric Administration ( <a href="https://www.noaa.gov/">https://www.noaa.gov/</a> )
Δείκτης πολυδιάστατης Νότιας Ταλάντωσης	MEI	Ανεξάρτητη	Μηνιαία (1950 – 2017)	National Oceanic & Atmospheric Administration ( <a href="https://www.noaa.gov/">https://www.noaa.gov/</a> )
Οπτικό βάθος σωματιδίων	AOD	Ανεξάρτητη	Μηνιαία (1900 – 2017)	National Oceanic & Atmospheric Administration ( <a href="https://www.noaa.gov/">https://www.noaa.gov/</a> )
Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (ppm)	CO <sub>2</sub>	Ανεξάρτητη	Μηνιαία (1960 – 2017)	National Oceanic & Atmospheric Administration ( <a href="https://www.noaa.gov/">https://www.noaa.gov/</a> )

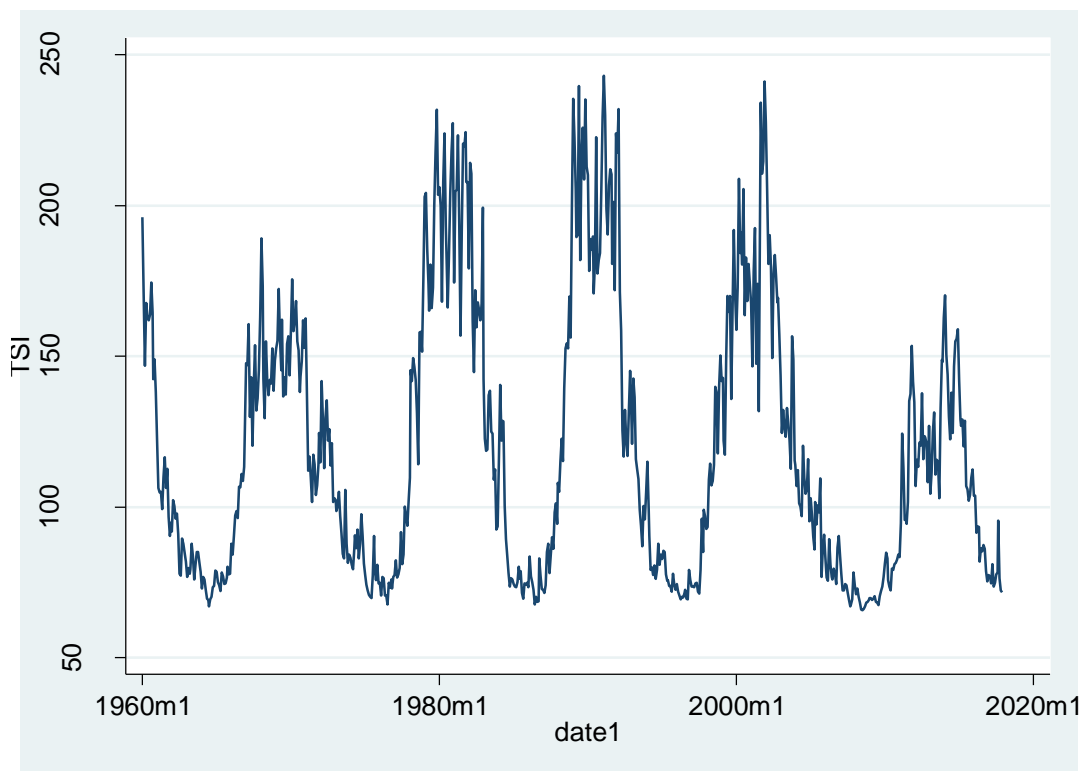
Προτού εφαρμοστεί το οικονομετρικό μοντέλο θα πραγματοποιηθεί έλεγχος στασιμότητας των ανωτέρω μεταβλητών, ενώ επιπλέον με την εφαρμογή του μη παραμετρικού τεστ των Mann-Kendall θα διερευνηθεί η ύπαρξη τάσης στις ως άνω χρονοσειρές. Τέλος, θα υπολογιστεί και ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών.

Για τον έλεγχο ύπαρξης τάσης χρησιμοποιείται η εφαρμογή MAKENSES. Η εν λόγω εφαρμογή αναπτύχθηκε από το Φινλανδικό Μετεωρολογικό Ινστιτούτο (Finnish Meteorological Institute - <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/makesens>) για τον

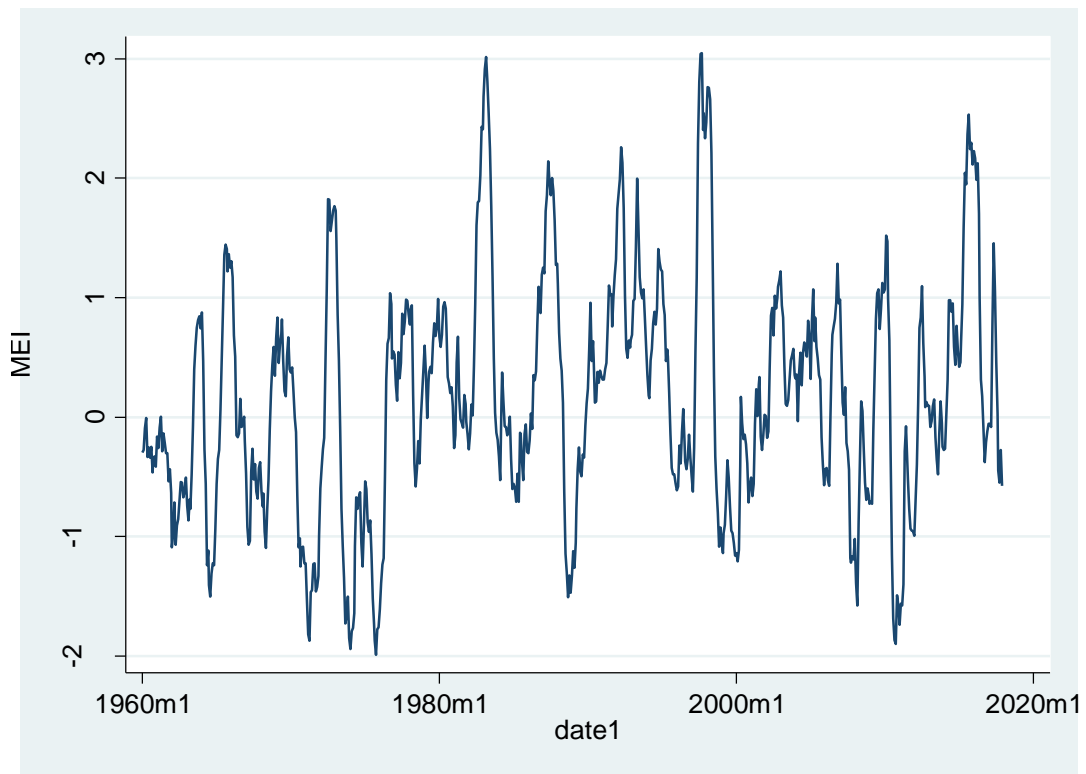
προσδιορισμό ύπαρξης τάσης σε χρονοσειρές κλιματικών δεδομένων. Ακολουθούν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μηνιαία μεταβολή των ως παραμέτρων του Πίνακα 1 από το έτος 1960 έως το έτος 2017.



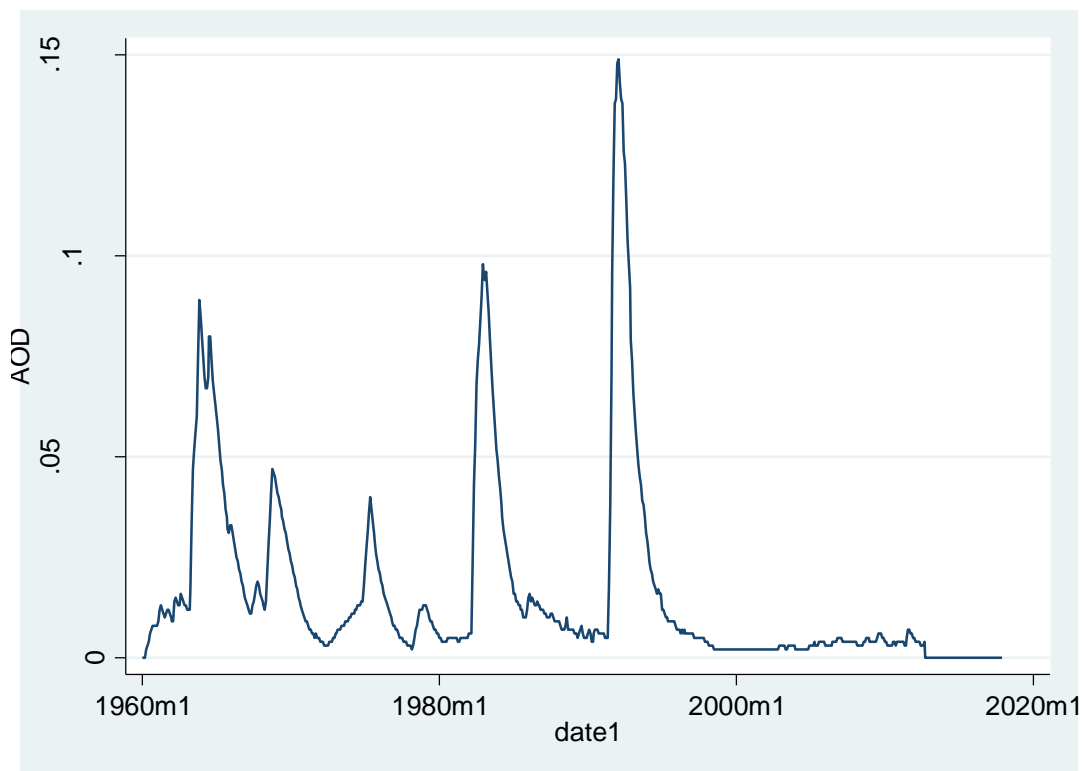
**Διάγραμμα 1.** Εξέλιξη θερμοκρασιακής ανωμαλίας (1960 – 2017)



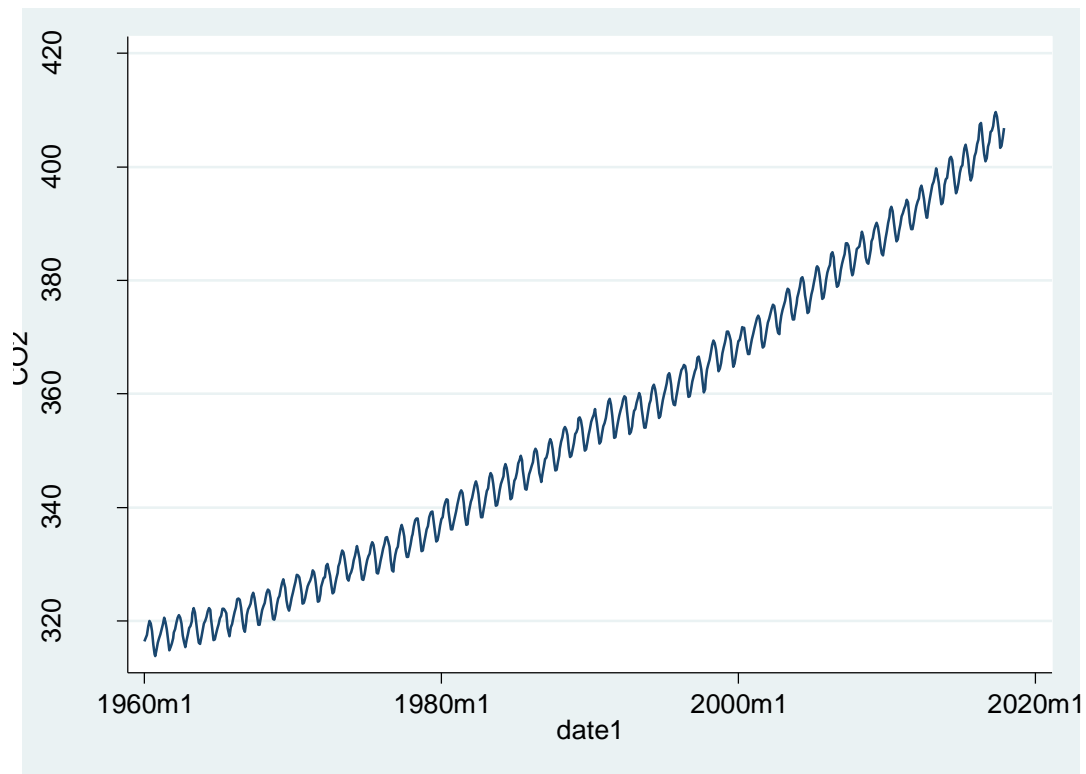
**Διάγραμμα 2.** Εξέλιξη ηλιακής ακτινοβολίας (1960 – 2017)



**Διάγραμμα 3.** Εξέλιξη Δείκτη MEI (1960 – 2017)



**Διάγραμμα 4.** Εξέλιξη Οπτικού Βάθους Αεροζολ (1960 – 2017)



**Διάγραμμα 5.** Εξέλιξη συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> (1960 – 2017)

Από την γραφική απεικόνιση των υπό μελέτη παραμέτρων (Διαγράμματα 1 έως 5) είναι προφανές πως κάποιες από τις μεταβλητές παρουσιάζουν ανοδική τάση και συγκεκριμένα οι μεταβλητές που περιγράφουν τη μηνιαία θερμοκρασιακή ανωμαλία και τη μηνιαία συγκέντρωση CO<sub>2</sub>. Το προηγούμενο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και στατιστικά, βάσει των αποτελεσμάτων του μη παραμετρικού τεστ των Mann-Kendall. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στις Εικόνες 1 και 2, όπου αποτυπώνονται τα αποτελέσματα του ως άνω τεστ, η τιμή του κριτηρίου Z για τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή του κριτηρίου Z<sub>cr</sub> για τυπική κανονική κατανομή και επίπεδο εμπιστοσύνης 5%. Ως εκ τούτου η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και οι εν λόγω χρονοσειρές έχουν τάση και μάλιστα ανοδική.

Mann-Kendall trend						
Time series	First year	Last Year	n	Zcr	Test Z	Signific.
January	1960	2017	58	3,691	7,38	***
February	1960	2017	58	3,406	6,81	***
March	1960	2017	58	3,989	7,98	***
April	1960	2017	58	4,14	8,28	***
May	1960	2017	58	4,091	8,18	***
June	1960	2017	58	4,02	8,04	***
July	1960	2017	58	3,932	7,86	***
August	1960	2017	58	3,945	7,89	***
September	1960	2017	58	3,96	7,92	***
October	1960	2017	58	4,04	8,08	***
November	1960	2017	58	4,003	8,01	***
December	1960	2017	58	3,778	7,56	***
ANNUAL	1960	2017	58	4,32	8,64	***

**Εικόνα 1.** Αποτελέσματα Mann-Kendall τεστ για τη θερμοκρασιακή ανωμαλία βάση της εφαρμογής MAKENSES

Mann-Kendall trend						
Time series	First year	Last Year	n	Zcr	Test Z	Signific.
January	1960	2017	58	4,69	11,07	***
February	1960	2017	58	4,696	11,08	***
March	1960	2017	58	4,696	11,08	***
April	1960	2017	58	4,69	11,07	***
May	1960	2017	58	4,681	11,05	***
June	1960	2017	58	4,69	11,07	***
July	1960	2017	58	4,696	11,08	***
August	1960	2017	58	4,69	11,07	***
September	1960	2017	58	4,684	11,05	***
October	1960	2017	58	4,696	11,08	***
November	1960	2017	58	4,696	11,08	***
December	1960	2017	58	4,696	11,08	***
ANNUAL	1960	2017	58	4,696	11,08	***

**Εικόνα 2.** Αποτελέσματα Mann-Kendall τεστ για τη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> βάση της εφαρμογής MAKENSES

Αντίθετα, οι υπόλοιπες τρεις μεταβλητές, ήτοι η ηλιακή ακτινοβολία, ο δείκτης ΜΕΙ και το οπτικό βάθος αεροζολ, δεν παρουσιάζουν τάση όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του τεστ Mann-Kendal (Εικόνες 3, 4 και 5), δεδομένου ότι η τιμή του κριτηρίου Z για τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης είναι μικρότερη από την τιμή του κριτηρίου Zcr για τυπική κανονική κατανομή και επίπεδο εμπιστοσύνης 5%.

Mann-Kendall trend						
Time series	First year	Last Year	n	Zcr	Test Z	Signific.
January	1960	2017	58	1,51	0,56	
February	1960	2017	58	1,888	0,70	
March	1960	2017	58	2,877	1,07	
April	1960	2017	58	1,817	2,18	*
May	1960	2017	58	3,136	3,76	***
June	1960	2017	58	2,633	3,16	**
July	1960	2017	58	1,711	2,05	*
August	1960	2017	58	1,45	1,26	
September	1960	2017	58	0,748	0,65	
October	1960	2017	58	0,401	0,35	
November	1960	2017	58	0,509	0,44	
December	1960	2017	58	0,417	0,36	
ANNUAL	1960	2017	58	1,713	1,49	

Εικόνα 3. Αποτελέσματα Mann-Kendall τεστ για τον Δείκτη ΜΕΙ βάση της εφαρμογής MAKENSES

Mann-Kendall trend						
Time series	First year	Last Year	n	Zcr	Test Z	Signific.
January	1960	2017	58	1,618	-0,50	
February	1960	2017	58	2,493	-0,76	
March	1960	2017	58	2,231	-0,68	
April	1960	2017	58	1,837	-0,56	
May	1960	2017	58	3,411	-1,05	
June	1960	2017	58	3,062	-0,94	
July	1960	2017	58	1,924	-0,59	
August	1960	2017	58	2,449	-0,75	
September	1960	2017	58	2,274	-0,70	
October	1960	2017	58	1,968	-0,60	
November	1960	2017	58	1,137	-0,35	
December	1960	2017	58	1,706	-0,52	
ANNUAL	1960	2017	58	2,362	-0,72	

Εικόνα 4. Αποτελέσματα Mann-Kendall τεστ για την ηλιακή ακτινοβολία βάση της εφαρμογής MAKENSES

Mann-Kendall trend						
Time series	First year	Last Year	n	Zcr	Test Z	Signific.
January	1960	1985	26	0,475	-0,18	
February	1960	1985	26	0,475	-0,18	
March	1960	1985	26	1,724	-0,64	
April	1960	1985	26	1,069	-0,40	
May	1960	1985	26	1,188	-0,44	
June	1960	1985	26	1,247	-0,46	
July	1960	1985	26	2,02	-0,75	
August	1960	1985	26	2,911	-1,08	
September	1960	1985	26	3,086	-1,15	
October	1960	1985	26	2,913	-1,08	
November	1960	1985	26	2,853	-1,06	
December	1960	1985	26	2,32	-0,86	
ANNUAL	1960	1985	26	1,304	-0,48	

Εικόνα 5. Αποτελέσματα Mann-Kendall τεστ για το οπτικό βάθος των αεροζολ βάση της εφαρμογής MAKENSES

Σε συνέχεια της εφαρμογής του τεστ Mann-Kendall, το οποίο χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η ύπαρξη τάσης στις χρονοσειρές των υπό μελέτη μεταβλητών, θα πραγματοποιηθεί έλεγχος στασιμότητας των ως άνω μεταβλητών.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μια χρονολογική σειρά χαρακτηρίζεται ως στάσιμη αν οι στατιστικές της ιδιότητες δεν μεταβάλλονται διαχρονικά και συγκλίνουν σε μια μακροχρόνια ισορροπία. Συγκεκριμένα, στασιμότητα υπάρχει αν ο μέσος, η διακύμανση και η αυτοσυνδιακύμανση των τιμών της σειράς είναι σταθερές και όχι συναρτήσεις του χρόνου. Ο έλεγχος της στασιμότητας πραγματοποιείται με το επαυξημένο κριτήριο των Dickey-Fuller (ADF). Η μηδενική υπόθεση του ελέγχου είναι η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας (μη στάσιμη χρονοσειρά) και απορρίπτεται αν η τιμή του κριτηρίου  $t$  παίρνει τιμή μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή  $t$  της στατιστικής των Dickey-Fuller, κατ' απόλυτες τιμές, για το δεδομένο μέγεθος δείγματος.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής ο έλεγχος στασιμότητας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού STATA. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ως άνω ελέγχου παρουσιάζονται στις Εικόνες 6 έως 10 που ακολουθούν.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κριτηρίου ADF (Εικόνες 6 – 10), οι χρονοσειρές των παραμέτρων (α) θερμοκρασιακή ανωμαλία, (β) ηλιακή ακτινοβολία και (γ) συγκέντρωση CO<sub>2</sub> είναι μη στάσιμες, ενώ οι χρονοσειρές του Δείκτη MEI και του οπτικού βάθους αεροζολ (AOD) χαρακτηρίζονται από στασιμότητα. Συγκεκριμένα, όπως αποτυπώνεται στις κάτωθι Εικόνες η τιμή του κριτηρίου  $t$  παίρνει τιμή μικρότερη από την τιμή  $t$  της στατιστικής των Dickey-Fuller για τις ως άνω μεταβλητές (α), (β) και (γ) και συνεπώς η μηδενική υπόθεση ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας επιβεβαιώνεται. Αντίθετα, για τις μεταβλητές Δείκτης MEI και AOD η τιμή του κριτηρίου  $t$  παίρνει τιμή μικρότερη από την τιμή  $t$  της στατιστικής των Dickey-Fuller και ως εκ τούτου οι εν λόγω μεταβλητές χαρακτηρίζονται ως στάσιμες.



DF-GLS for Temp					Number of obs = 676
Maxlag = 19 chosen by Schwert criterion					
[lags]	DF-GLS mu Test Statistic	1% Critical Value	5% Critical Value	10% Critical Value	
19	0.064	-2.580	-1.948	-1.629	
18	0.059	-2.580	-1.949	-1.631	
17	-0.112	-2.580	-1.951	-1.632	
16	-0.196	-2.580	-1.952	-1.633	
15	-0.313	-2.580	-1.954	-1.635	
14	-0.452	-2.580	-1.955	-1.636	
13	-0.425	-2.580	-1.957	-1.638	
12	-0.346	-2.580	-1.958	-1.639	
11	-0.440	-2.580	-1.960	-1.640	
10	-0.438	-2.580	-1.961	-1.641	
9	-0.611	-2.580	-1.963	-1.643	
8	-0.803	-2.580	-1.964	-1.644	
7	-0.842	-2.580	-1.965	-1.645	
6	-1.034	-2.580	-1.967	-1.646	
5	-1.136	-2.580	-1.968	-1.648	
4	-1.273	-2.580	-1.969	-1.649	
3	-1.452	-2.580	-1.970	-1.650	
2	-1.925	-2.580	-1.972	-1.651	
1	-2.208	-2.580	-1.973	-1.652	

Opt Lag (Ng-Perron seq t) = 18 with RMSE .1085362  
Min SC = -4.354621 at lag 3 with RMSE .1111817  
Min MAIC = -4.392946 at lag 10 with RMSE .1095269

Εικόνα 6. Αποτελέσματα ενισχυμένου ADF τεστ για τη θερμοκρασιακή ανωμαλία

DF-GLS for TSI					Number of obs = 676
Maxlag = 19 chosen by Schwert criterion					
[lags]	DF-GLS mu Test Statistic	1% Critical Value	5% Critical Value	10% Critical Value	
19	-1.899	-2.580	-1.948	-1.629	
18	-1.879	-2.580	-1.949	-1.631	
17	-1.959	-2.580	-1.951	-1.632	
16	-1.930	-2.580	-1.952	-1.633	
15	-1.820	-2.580	-1.954	-1.635	
14	-1.752	-2.580	-1.955	-1.636	
13	-1.609	-2.580	-1.957	-1.638	
12	-1.605	-2.580	-1.958	-1.639	
11	-1.412	-2.580	-1.960	-1.640	
10	-1.189	-2.580	-1.961	-1.641	
9	-1.031	-2.580	-1.963	-1.643	
8	-1.059	-2.580	-1.964	-1.644	
7	-1.067	-2.580	-1.965	-1.645	
6	-1.124	-2.580	-1.967	-1.646	
5	-1.138	-2.580	-1.968	-1.648	
4	-1.185	-2.580	-1.969	-1.649	
3	-1.311	-2.580	-1.970	-1.650	
2	-1.472	-2.580	-1.972	-1.651	
1	-1.742	-2.580	-1.973	-1.652	

Opt Lag (Ng-Perron seq t) = 14 with RMSE 13.7407  
Min SC = 5.329786 at lag 2 with RMSE 14.16018  
Min MAIC = 5.28963 at lag 12 with RMSE 13.77651

Εικόνα 7. Αποτελέσματα ενισχυμένου ADF τεστ για την ηλιακή ακτινοβολία

DF-GLS for MEI					Number of obs = 676
Maxlag = 19 chosen by Schwert criterion					
[lags]	DF-GLS mu Test Statistic	1% Critical Value	5% Critical Value	10% Critical Value	
19	-4.280	-2.580	-1.948	-1.629	
18	-4.532	-2.580	-1.949	-1.631	
17	-4.655	-2.580	-1.951	-1.632	
16	-4.613	-2.580	-1.952	-1.633	
15	-4.692	-2.580	-1.954	-1.635	
14	-4.648	-2.580	-1.955	-1.636	
13	-4.916	-2.580	-1.957	-1.638	
12	-5.285	-2.580	-1.958	-1.639	
11	-5.088	-2.580	-1.960	-1.640	
10	-5.301	-2.580	-1.961	-1.641	
9	-5.416	-2.580	-1.963	-1.643	
8	-5.611	-2.580	-1.964	-1.644	
7	-6.064	-2.580	-1.965	-1.645	
6	-6.180	-2.580	-1.967	-1.646	
5	-6.060	-2.580	-1.968	-1.648	
4	-5.919	-2.580	-1.969	-1.649	
3	-6.427	-2.580	-1.970	-1.650	
2	-5.624	-2.580	-1.972	-1.651	
1	-5.674	-2.580	-1.973	-1.652	

Opt Lag (Ng-Perron seq t) = 3 with RMSE .2587701  
Min SC = -2.665073 at lag 3 with RMSE .2587701  
Min MAIC = -2.578546 at lag 1 with RMSE .2619981

**Εικόνα 8.** Αποτελέσματα ενισχυμένου ADF τεστ για τον Δείκτη MEI

DF-GLS for AOD					Number of obs = 676
Maxlag = 19 chosen by Schwert criterion					
[lags]	DF-GLS mu Test Statistic	1% Critical Value	5% Critical Value	10% Critical Value	
19	-3.265	-2.580	-1.948	-1.629	
18	-3.230	-2.580	-1.949	-1.631	
17	-3.161	-2.580	-1.951	-1.632	
16	-2.997	-2.580	-1.952	-1.633	
15	-3.156	-2.580	-1.954	-1.635	
14	-3.470	-2.580	-1.955	-1.636	
13	-3.543	-2.580	-1.957	-1.638	
12	-3.575	-2.580	-1.958	-1.639	
11	-3.472	-2.580	-1.960	-1.640	
10	-3.450	-2.580	-1.961	-1.641	
9	-3.704	-2.580	-1.963	-1.643	
8	-3.785	-2.580	-1.964	-1.644	
7	-3.544	-2.580	-1.965	-1.645	
6	-4.010	-2.580	-1.967	-1.646	
5	-4.108	-2.580	-1.968	-1.648	
4	-3.883	-2.580	-1.969	-1.649	
3	-4.314	-2.580	-1.970	-1.650	
2	-4.316	-2.580	-1.972	-1.651	
1	-4.158	-2.580	-1.973	-1.652	

Opt Lag (Ng-Perron seq t) = 15 with RMSE .0021294  
Min SC = -12.23751 at lag 1 with RMSE .0021801  
Min MAIC = -12.22093 at lag 16 with RMSE .0021274

**Εικόνα 9.** Αποτελέσματα ενισχυμένου ADF τεστ για τον Δείκτη AOD

DF-GLS for CO2		Number of obs = 676		
Maxlag = 19 chosen by Schwert criterion				
[lags]	DF-GLS mu Test Statistic	1% Critical Value	5% Critical Value	10% Critical Value
19	3.244	-2.580	-1.948	-1.629
18	3.131	-2.580	-1.949	-1.631
17	3.361	-2.580	-1.951	-1.632
16	3.256	-2.580	-1.952	-1.633
15	3.331	-2.580	-1.954	-1.635
14	3.629	-2.580	-1.955	-1.636
13	4.233	-2.580	-1.957	-1.638
12	6.290	-2.580	-1.958	-1.639
11	11.913	-2.580	-1.960	-1.640
10	18.758	-2.580	-1.961	-1.641
9	18.267	-2.580	-1.963	-1.643
8	14.596	-2.580	-1.964	-1.644
7	8.502	-2.580	-1.965	-1.645
6	4.533	-2.580	-1.967	-1.646
5	2.784	-2.580	-1.968	-1.648
4	2.400	-2.580	-1.969	-1.649
3	2.235	-2.580	-1.970	-1.650
2	1.399	-2.580	-1.972	-1.651
1	0.326	-2.580	-1.973	-1.652

Opt Lag (Ng-Perron seq t) = 15 with RMSE .3429571  
Min SC = -1.991515 at lag 14 with RMSE .3436772  
Min MAIC = -1.926162 at lag 18 with RMSE .3422084

**Εικόνα 10.** Αποτελέσματα ενισχυμένου ADF τεστ για τη συγκέντρωση CO<sub>2</sub>

Προτού ξεκινήσει η εκτίμηση του οικονομετρικού μοντέλου θα διερευνηθεί με τη χρήση, αφενός του συντελεστή  $r$  του Pearson, αφετέρου του συντελεστή  $\rho$  του Spearman, η συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασιακής μεταβολής και κάθε μίας από τις τέσσερις υπόλοιπες μεταβλητές.

```
. pwcorr Temp TSI MEI AOD CO2, sig star(.05)
```

	Temp	TSI	MEI	AOD	CO2
Temp	1.0000				
TSI	0.0037 0.9217	1.0000			
MEI	0.3029* 0.0000	0.0460 0.2251	1.0000		
AOD	-0.3339* 0.0000	0.0280 0.4609	0.2372* 0.0000	1.0000	
CO2	0.8876* 0.0000	-0.0924* 0.0148	0.1662* 0.0000	-0.3302* 0.0000	1.0000

**Εικόνα 11.** Αποτελέσματα συντελεστή συσχέτισης  $r$  του Pearson

	Temp	TSI	MEI	AOD	CO2
Temp	1.0000				
TSI	0.0132 0.7287	1.0000			
MEI	0.2841* 0.0000	0.0845* 0.0258	1.0000		
AOD	-0.6810* 0.0000	-0.1292* 0.0006	0.0051 0.8942	1.0000	
CO2	0.8891* 0.0000	-0.0796* 0.0357	0.1820* 0.0000	-0.6840* 0.0000	1.0000

**Εικόνα 12.** Αποτελέσματα συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  του Spearman

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 11 και 12, για διάστημα εμπιστοσύνης 5%, οι μεταβλητές MEI, AOD και CO2 παρουσιάζουν αντίστοιχα θετική μέση, αρνητική υψηλή και θετική υψηλή γραμμική συσχέτιση με τη μεταβλητή που περιγράφει τη θερμοκρασιακή ανωμαλία. Αντίθετα η μεταβλητή TSI δεν παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση με την ως άνω μεταβλητή.

### 3.2 Εφαρμογή οικονομετρικού μοντέλου – Απλή γραμμική παλινδρόμηση

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής το οικονομετρικό υπόδειγμα καθορίζεται, καταρχάς, σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 1.

$$\text{Temp}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{MEI}_t + \beta_2 \text{AOD}_t + \beta_3 \text{TSI}_t + \beta_4 \text{CO}_{2,t} + \varepsilon_t \quad (\text{Εξ. 1})$$

όπου

$\text{Temp}_t$	η μηνιαία εξέλιξη της θερμοκρασιακής ανωμαλίας
$\beta_0$	σταθερός όρος
$\beta_{1,2,3,4}$	συντελεστές παλινδρόμησης
$\text{MEI}_t$	η μηνιαία εξέλιξη του Δείκτη MEI
$\text{AOD}_t$	η μηνιαία εξέλιξη του Οπτικού Βάθους των Αεροζολ
$\text{TSI}_t$	η μηνιαία εξέλιξη της ηλιακής ακτινοβολίας
$\text{CO}_{2,t}$	η μηνιαία εξέλιξη της συγκέντρωσης CO <sub>2</sub>
$\varepsilon_t$	το τυχαίο σφάλμα ή διαταρακτικός όρος

Με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου STATA εκτιμάται το παραπάνω υπόδειγμα, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της βηματικής παλινδρόμησης (stepwise regression), όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 11. Η μέθοδος της βηματικής παλινδρόμησης είναι μια μέθοδος επιλογής ενός «αξιοπιστού» υποσυνόλου

ανεξαρτήτων μεταβλητών. Στο πλαίσιο της εν λόγω μεθόδου η μηδενική υπόθεση ότι ο συντελεστής παλινδρόμησης  $\beta_i$  είναι ίσος με το μηδέν ελέγχεται για όλες τις δυνατές ανεξάρτητες μεταβλητές ώστε να αποκλείονται εκείνες για τις οποίες οι τιμές της στατιστικής συνάρτησης  $|T_j|$  είναι μικρότερες από ένα προκαθορισμένο κρίσιμο επίπεδο. Αυτή η βηματική επιλογή συνεχίζεται μέχρις ότου προκύψει ένα υποσύνολο μεταβλητών για το οποίο καμιά από τις μεταβλητές που περιέχει το υποσύνολο αυτό δεν έχει τιμή για τη στατιστική συνάρτηση  $|T_j|$  μικρότερη από κάποια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή της μεταβλητής  $t$  και δεν υπάρχουν άλλες μεταβλητές που θα πρέπει να αξιολογηθούν για να περιληφθούν στο μοντέλο.

```

. stepwise, pr(.0002) pe(.0001) forward: regress Temp CO2 TSI AOD MEI
      begin with empty model
p = 0.0000 < 0.0001 adding CO2
p = 0.0000 < 0.0001 adding MEI
p = 0.0000 < 0.0001 adding AOD
p = 0.0000 < 0.0001 adding TSI

```

Source	SS	df	MS	Number of obs = 696		
Model	54.115988	4	13.528997	F( 4, 691) =	829.90	
Residual	11.2647107	691	.016302042	Prob > F =	0.0000	
Total	65.3806987	695	.094072948	R-squared =	0.8277	
				Adj R-squared =	0.8267	
				Root MSE =	.12768	

Temp	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
CO2	.0095918	.0002021	47.46	0.000	.009195	.0099887
MEI	.0585347	.0052859	11.07	0.000	.0481563	.0689131
AOD	-1.322254	.2178605	-6.07	0.000	-1.750002	-.8945063
TSI	.0005101	.0001087	4.69	0.000	.0002967	.0007234
_cons	-3.132571	.075394	-41.55	0.000	-3.2806	-2.984542

```

. estat dwatson
Durbin-Watson d-statistic( 5, 696) = .9802639

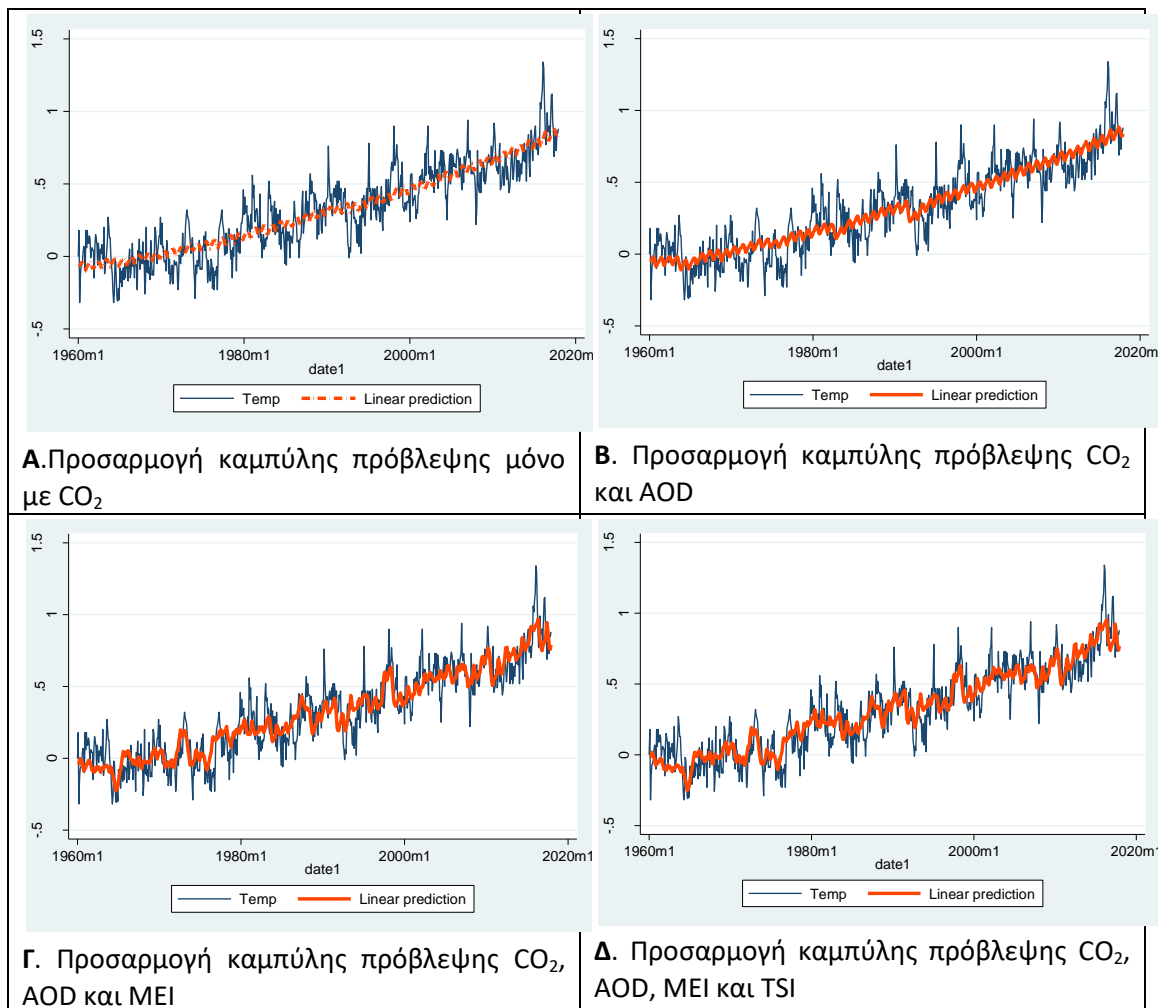
```

**Εικόνα 12.** Αποτελέσματα βηματικής γραμμικής παλινδρόμησης για το επιλεγέν οικονομτρικό υπόδειγμα βάση της Εξίσωσης 1

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 12, οι συντελεστές παλινδρόμησης και των τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μη μηδενικοί και μάλιστα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1%. Επιπλέον, τα πρόσημα των εν λόγω συντελεστών εμφανίζουν συνέπεια σε σχέση με τη φυσική σημασία των εξαρτημένων μεταβλητών. Συγκεκριμένα, μια αύξηση των αεροζολς οδηγεί σε πτώση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας σε αντίθεση με την αύξηση των τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών, η οποία οδηγεί σε άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Τέλος, οι εξαρτημένες

μεταβλητές φαίνεται να εξηγούν τη μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε ποσοστό 82% (Συντελεστής Προσδιορισμού  $R^2$  ιδιαίτερα υψηλός και μάλιστα ίσος με 82%).

Προκειμένου, με ποιοτικό τρόπο, να εκτιμηθεί η συμμετοχή κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας, χαράσσονται με τη βοήθεια του λογισμικού STATA τα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 13).



**Εικόνα 13.** Συγκριτική αποτύπωση της πραγματικής καμπύλης θερμοκρασιακής ανωμαλίας και της καμπύλης βάσει του οικονομετρικού υποδείγματος – Οικονομετρικό υπόδειγμα Εξίσωσης 1

Στα διαγράμματα Α, Β, Γ και Δ της Εικόνας 13 αποτυπώνεται η σχέση της πραγματικής καμπύλης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας και των καμπυλών θερμοκρασιακής ανωμαλίας που προκύπτουν από την εφαρμογή της βηματικής παλινδρόμησης. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα Α απεικονίζεται η πραγματική καμπύλη θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε σχέση με την καμπύλη πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας που προκύπτει όταν μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η συγκέντρωση CO<sub>2</sub>. Τα υπόλοιπα διαγράμματα απεικονίζουν αντίστοιχα την

ως άνω σχέση στη βάση της σταδιακής ενσωμάτωσης και των υπόλοιπων ανεξάρτητων μεταβλητών. Όπως είναι εμφανές, Διάγραμμα Δ της Εικόνας 13, η καμπύλη πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική καμπύλη θερμοκρασιακής ανωμαλίας όταν στο οικονομετρικό υπόδειγμα ενταχθούν και οι τέσσερις (4) ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες περιγράφουν τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς παραμέτρους.

Παρόλα αυτά, τα ως άνω αποτελέσματα χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης και πρέπει να αντιμετωπιστούν με επιφύλαξη διότι, όπως προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο Durbin-Watson, υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα κατάλοιπα. Δεδομένου, ότι η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης στα κατάλοιπα μπορεί να οφείλεται, όπως ήδη αναφέρθηκε, στην ύπαρξη χρονικών υστερήσεων στα φαινόμενα που εξετάζονται, το οικονομετρικό υπόδειγμα θα μετασχηματιστεί προκειμένου να λάβει υπόψη του τέτοιες πιθανές χρονικές υστερήσεις.

#### *Μετασχηματισμός Οικονομετρικού Υποδείγματος*

Εν προκειμένω, οι ανεξάρτητες μεταβλητές της Εξίσωσης 1 θα αντικατασταθούν με τις μετασχηματισμένες μεταβλητές  $L.MEI_t$ ,  $L.AOD_t$ ,  $L.TSI_t$  και  $L.CO_{2,t}$ , οι οποίες παρουσιάζουν χρονική υστέρηση ενός μήνα σε σχέση με την εξαρτημένη μεταβλητή  $Temp_t$  (Εξίσωση 2).

$$Temp_t = \beta_0 + \beta_1 L.MEI_t + \beta_2 L.AOD_t + \beta_3 L.TSI_t + \beta_4 L.CO_{2,t} + \varepsilon_t \quad (Εξ. 2)$$

όπου

$Temp_t$	η μηνιαία εξέλιξη της θερμοκρασιακής ανωμαλίας
$\beta_0$	σταθερός όρος
$\beta_{1,2,3,4}$	συντελεστές παλινδρόμησης
$L.MEI_t$	η μηνιαία εξέλιξη του Δείκτη ΜΕΙ με μηνιαία χρονική υστέρηση
$L.AOD_t$	η μηνιαία εξέλιξη του Οπτικού Βάθους των Αεροζολ με μηνιαία χρονική υστέρηση
$L.TSI_t$	η μηνιαία εξέλιξη της ηλιακής ακτινοβολίας με μηνιαία χρονική υστέρηση
$L.CO_{2,t}$	η μηνιαία εξέλιξη της συγκέντρωσης $CO_2$ με μηνιαία χρονική υστέρηση
$\varepsilon_t$	το τυχαίο σφάλμα ή διαταρακτικός όρος

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση του μετασχηματισμένου οικονομετρικού μοντέλου, όπως αυτό περιγράφεται από την Εξίσωση 2, αποτυπώνονται στην ακόλουθη Εικόνα 14.

```
. regress Temp L.CO2 L.TSI L.AOD L.MEI
```

Source	SS	df	MS	Number of obs = 695		
Model	54.2119693	4	13.5529923	F( 4, 690) =	844.69	
Residual	11.0709596	690	.016044869	Prob > F =	0.0000	
Total	65.2829289	694	.094067621	R-squared =	0.8304	
				Adj R-squared =	0.8294	
				Root MSE =	.12667	

Temp	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
CO2						
L1.	.0094874	.0002011	47.17	0.000	.0090926	.0098823
TSI						
L1.	.000544	.0001079	5.04	0.000	.0003322	.0007557
AOD						
L1.	-1.509429	.2161538	-6.98	0.000	-1.933827	-1.085031
MEI						
L1.	.0637414	.0052486	12.14	0.000	.0534364	.0740465
_cons	-3.096302	.0749573	-41.31	0.000	-3.243473	-2.94913

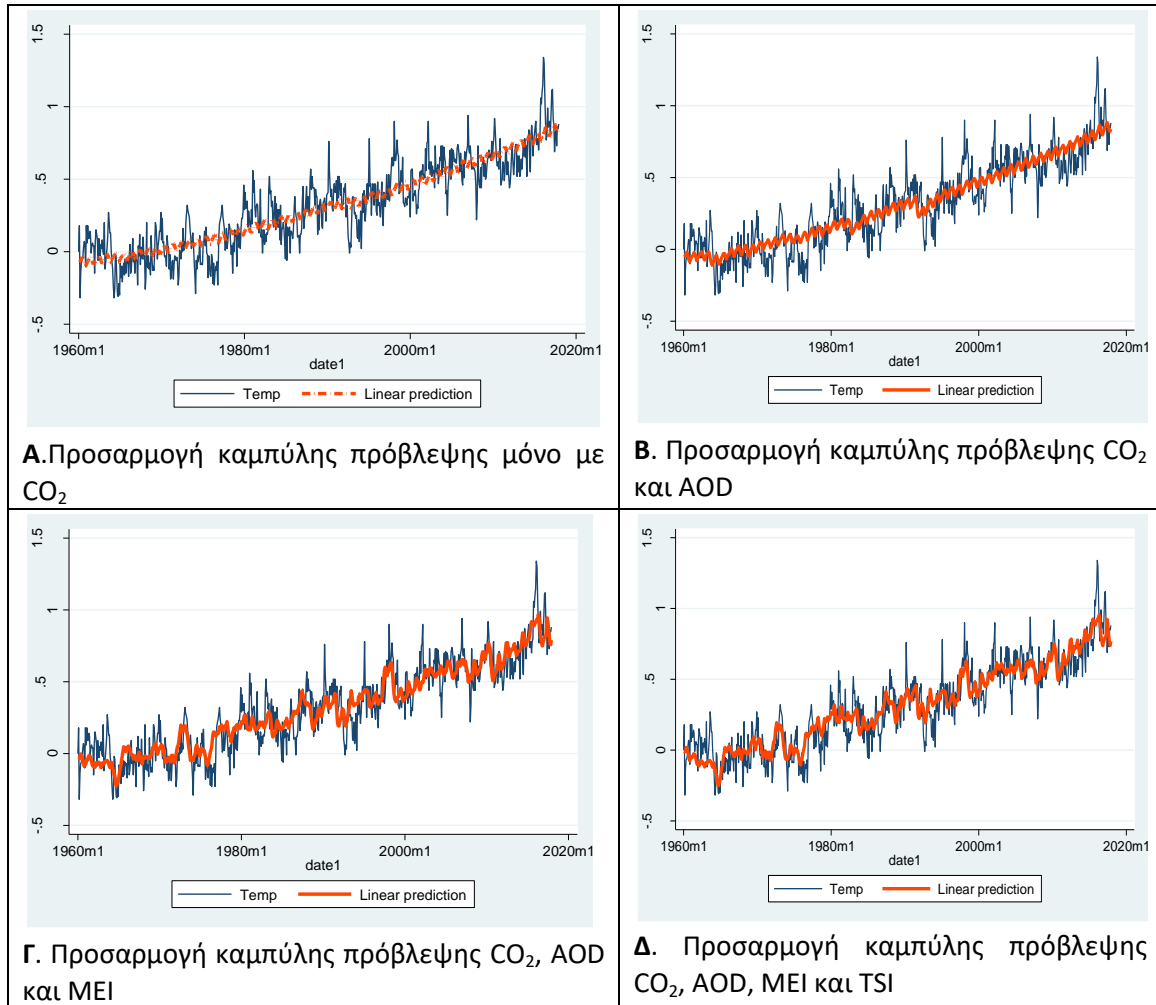
```
. estat dwatson
```

Durbin-Watson d-statistic( 5, 695) = .9945185

**Εικόνα 14.** Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για το επιλεγέν οικονομετρικό υπόδειγμα βάση της Εξίσωσης 2

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της εκτίμησης του μετασχηματισμένου οικονομετρικού υποδείγματος (Εικόνα 14), οι συντελεστές παλινδρόμησης και των τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μη μηδενικοί και μάλιστα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1%, ενώ οι εξαρτημένες μεταβλητές φαίνεται να εξηγούν τη μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε ποσοστό 83% (Συντελεστής Προσδιορισμού  $R^2$  ιδιαίτερα υψηλός και μάλιστα ίσος με 83%). Αναφορικά με την ποιοτική εκτίμηση της προβλεψιμότητας του εν λόγω υποδείγματος, ήτοι τη σχέση μεταξύ της πραγματικής καμπύλης θερμοκρασιακής ανωμαλίας και της καμπύλης πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με πριν (Εικόνα 15).





**Εικόνα 15.** Συγκριτική αποτύπωση της πραγματικής καμπύλης θερμοκρασιακής ανωμαλίας και της καμπύλης βάσει του οικονομετρικού υποδείγματος – Οικονομετρικό υπόδειγμα Εξίσωσης 2

Παρόλα αυτά, όπως και με το προηγούμενο οικονομετρικό υπόδειγμα (Εξ. 1), τα ως άνω αποτελέσματα χρήζουν περαιτέρω αξιολόγησης διότι, όπως προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο Durbin-Watson, υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα κατάλοιπα.

*Μέθοδος Prais - Winsten*

Προκειμένου να απαλειφθεί το πρόβλημα της αυτοσυσχέτισης θα εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός των δεδομένων του υποδείγματος (Εξίσωση 2) με τη βοήθεια της μεθόδου Prais – Winsten. Η μέθοδος περιλαμβάνει τα εξής δύο βήματα:

**Πρώτο βήμα:** Εκτιμάται το υπόδειγμα (Εξίσωση 2) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και υπολογίζεται ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης από τη σχέση:

$$\rho = \sum u_t u_{t-1} / \sum u_t^2 \quad \text{για } t = 2, 3, \dots, T$$

Δεύτερο  
βήμα:

Με την εκτιμημένη τιμή  $\rho$  μετασχηματίζονται οι μεταβλητές και εκτιμάται το υπόδειγμα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

```
. prais Temp L.TSI L.MEI L.AOD L.CO2, rhotype(tscorr)
```

Iteration 0: rho = 0.0000  
 Iteration 1: rho = 0.5006  
 Iteration 2: rho = 0.5077  
 Iteration 3: rho = 0.5081  
 Iteration 4: rho = 0.5081  
 Iteration 5: rho = 0.5081  
 Iteration 6: rho = 0.5081

Prais-Winsten AR(1) regression -- iterated estimates

Source	SS	df	MS	Number of obs =	695
Model	12.9938357	4	3.24845894	F( 4, 690) =	271.32
Residual	8.26114574	690	.011972675	Prob > F =	0.0000
Total	21.2549815	694	.030626774	R-squared =	0.6113
				Adj R-squared =	0.6091
				Root MSE =	.10942

Temp	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
TSI					
L1.	.0004768	.0001708	2.79	0.005	.0001414 .0008123
MEI					
L1.	.0527501	.0083817	6.29	0.000	.0362934 .0692067
AOD					
L1.	-1.33315	.3686824	-3.62	0.000	-2.057024 -.6092763
CO2					
L1.	.0095423	.0003479	27.43	0.000	.0088593 .0102254
_cons	-3.108492	.1290534	-24.09	0.000	-3.361876 -2.855107
rho	.508122				

Durbin-Watson statistic (original) 0.994519  
 Durbin-Watson statistic (transformed) 2.147622

**Εικόνα 16.** Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης με την εφαρμογή της μεθόδου Prais-Winsten για το επιλεγέν οικονομετρικό υπόδειγμα βάση της Εξίσωσης 2

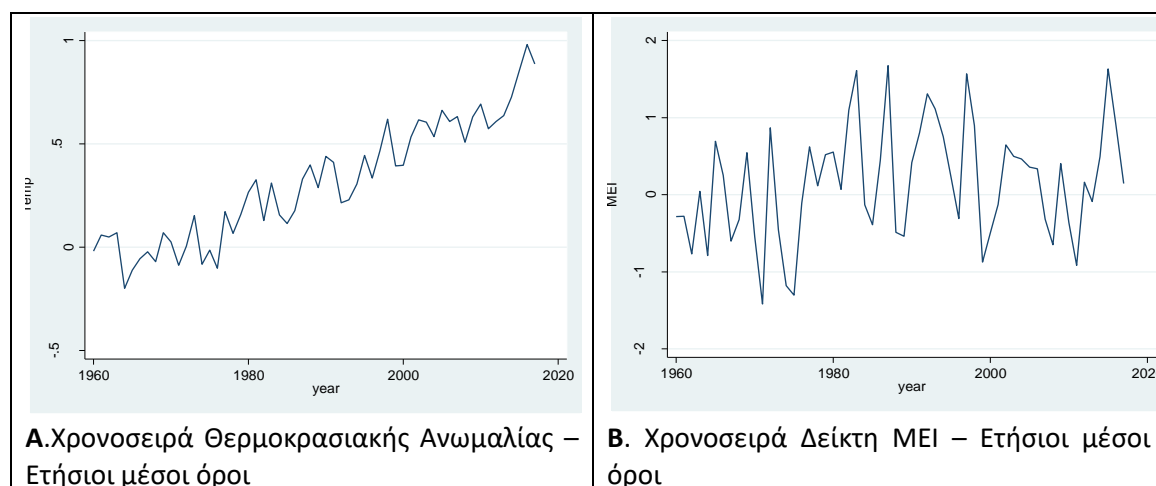
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της εκτίμησης του μετασχηματισμένου οικονομετρικού υποδείγματος της Εξίσωσης 2, οι μεταβλητές του οποίου διορθώθηκαν με τη μέθοδο Prais-Winsten (Εικόνα 16), οι συντελεστές παλινδρόμησης και των τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μη μηδενικοί και

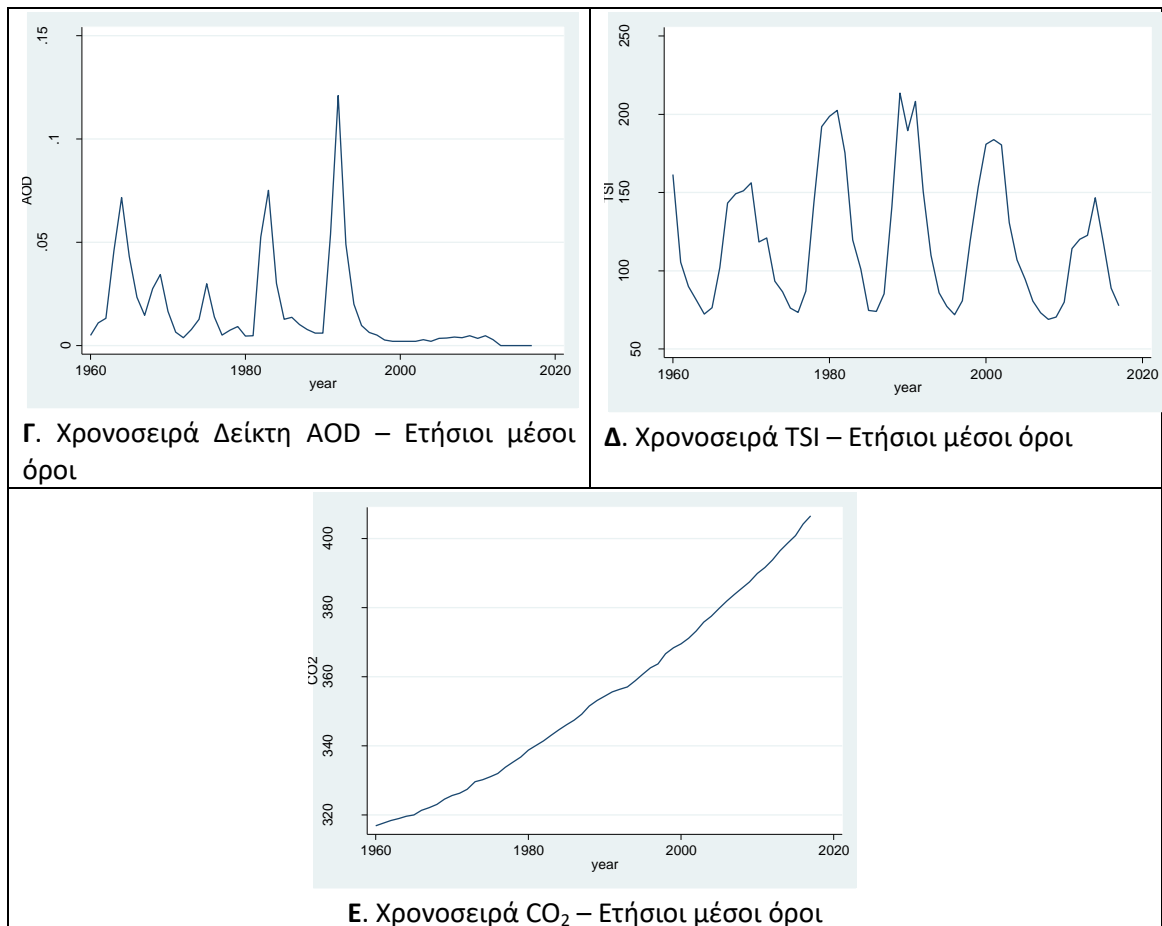
μάλιστα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1%, ενώ οι εξαρτημένες μεταβλητές φαίνεται να εξηγούν τη μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε ποσοστό 61% (Συντελεστής Προσδιορισμού  $R^2$  ικανοποιητικός και ίσος με 61%). Παρόλα αυτά, όπως και με τα προηγούμενα οικονομετρικά υποδειγμένα (Εξ. 1 και Εξ. 2), τα ως άνω αποτελέσματα δεν μπορούν να γίνουν δεκτά διότι, όπως προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο Durbin-Watson, υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα κατάλοιπα.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω συμπεραίνεται ότι η αυτοσυσχέτιση των καταλοίπων είναι μεγαλύτερου βαθμού από ένα (1) καθώς και ότι θα πρέπει να αντιμετωπιστεί το γεγονός της μη στασιμότητας των χρονοσειρών Temp, TSI και CO<sub>2</sub>. Τα ως άνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με την εφαρμογή Αυτοπαλίνδρομων Ολοκληρωμένων Υποδειγμάτων Κινητού Μέσου (ARIMA (p,d,q)).

#### *Οικονομετρικό Υπόδειγμα με χρονοσειρές ετήσιων μέσων όρων*

Προτού εφαρμοστεί ένα Αυτοπαλίνδρομο Ολοκληρωμένο Υπόδειγμα Κινητού Μέσου θα επιχειρηθεί να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω προβλήματα και ειδικά το πρόβλημα της αυτοσυσχέτισης με τον μετασχηματισμό των χρονοσειρών. Συγκεκριμένα, θα εφαρμοστεί η μέθοδος Prais-Winsten στο οικονομετρικό υπόδειγμα όπως περιγράφεται στην Εξίσωση 2, με τη διαφορά ότι οι χρονοσειρές των μεταβλητών θα περιέχουν τους ετήσιους μέσους όρους και όχι τα μηνιαία δεδομένα (Εικόνα 17).





**Εικόνα 17.** Χρονοσειρές Εξαρτημένων και Ανεξάρτητων Μεταβλητών – Ετήσιοι Μ.Ο.

Το οικονομετρικό υπόδειγμα καθορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 3.

$$\text{Temp}_t = \beta_0 + \beta_1 \text{L.MEI}_t + \beta_2 \text{L.AOD}_t + \beta_3 \text{L.TSI}_t + \beta_4 \text{L.CO}_{2,t} + \varepsilon_t \quad (\text{Εξ. 3})$$

όπου

$\text{Temp}_t$	η ετήσια εξέλιξη της θερμοκρασιακής ανωμαλίας
$\beta_0$	σταθερός όρος
$\beta_{1,2,3,4}$	συντελεστές παλινδρόμησης
$\text{L.MEI}_t$	η ετήσια εξέλιξη του Δείκτη ΜΕΙ με χρονική υστέρηση
$\text{L.AOD}_t$	η ετήσια εξέλιξη του Οπτικού Βάθους των Αεροζολ με χρονική υστέρηση
$\text{L.TSI}_t$	η ετήσια εξέλιξη της ηλιακής ακτινοβολίας με χρονική υστέρηση
$\text{L.CO}_{2,t}$	η ετήσια εξέλιξη της συγκέντρωσης CO <sub>2</sub> με χρονική υστέρηση
$\varepsilon_t$	το τυχαίο σφάλμα ή διαταρακτικός όρος

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 18, οι συντελεστές παλινδρόμησης και των τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μη μηδενικοί και μάλιστα σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1%. Επιπλέον, τα πρόσημα των εν λόγω συντελεστών εμφανίζουν συνέπεια σε σχέση με τη φυσική σημασία των εξαρτημένων μεταβλητών. Συγκεκριμένα, μια αύξηση των αεροζολς οδηγεί σε πτώση της μέσης παγκόσμιας

θερμοκρασίας σε αντίθεση με την αύξηση των τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών, η οποία οδηγεί σε άνοδο της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Τέλος, οι εξαρτημένες μεταβλητές φαίνεται να εξηγούν τη μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε ποσοστό 95% (Συντελεστής Προσδιορισμού  $R^2$  ιδιαίτερα υψηλός και μάλιστα ίσος με 95%).

```
. prais Temp L.TSI L.MEI L.AOD L.CO2, rhotype(tscorr)
```

Iteration 0: rho = 0.0000  
Iteration 1: rho = -0.1926  
Iteration 2: rho = -0.2071  
Iteration 3: rho = -0.2079  
Iteration 4: rho = -0.2079  
Iteration 5: rho = -0.2079  
Iteration 6: rho = -0.2079

Prais-Winsten AR(1) regression -- iterated estimates

Source	SS	df	MS	Number of obs = 57		
Model	6.33808076	4	1.58452019	F( 4, 52) =	302.25	
Residual	.272604693	52	.005242398	Prob > F	= 0.0000	
Total	6.61068545	56	.118047954	R-squared	= 0.9588	
				Adj R-squared	= 0.9556	
				Root MSE	= .0724	

Temp	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
TSI						
L1.	.000436	.000196	2.22	0.030	.0000427	.0008292
MEI						
L1.	.0774405	.0135253	5.73	0.000	.0503	.1045811
AOD						
L1.	-2.568758	.4367867	-5.88	0.000	-3.445235	-1.692282
CO2						
L1.	.0092897	.0003658	25.39	0.000	.0085556	.0100237
_cons	-2.984755	.1365683	-21.86	0.000	-3.258799	-2.71071
rho	-.2079327					

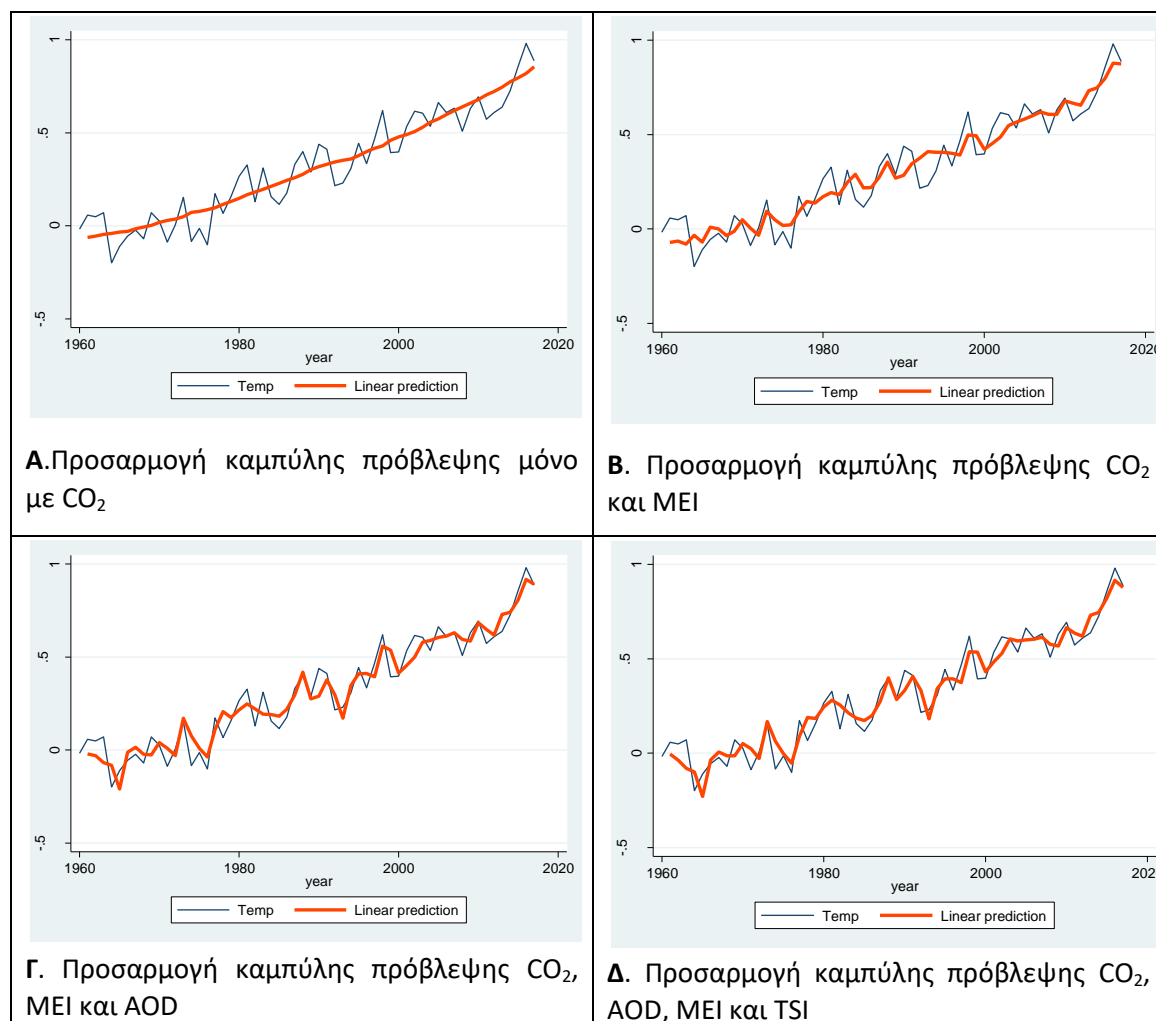
Durbin-Watson statistic (original) 2.369741  
Durbin-Watson statistic (transformed) 2.050992

**Εικόνα 18.** Αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης με την εφαρμογή της μεθόδου Prais-Winsten για το επιλεγέν οικονομετρικό υπόδειγμα βάση της Εξίσωσης 3

Επιπλέον, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του τεστ Durbin-Watson το κριτήριο d της στατιστικής Durbin-Watson είναι ίσο με δύο (2). Ως εκ τούτου τα κατάλοιπα δεν

εμφανίζουν, πλέον, αυτοσυσχέτιση πρώτου βάρθμου και συνεπώς τα αποτελέσματα από την εκτίμηση του συγκεκριμένου οικονομετρικού υποδείγματος (για χρονοσειρές που περιέχουν τους ετήσιους μέσους όρους των μεταβλητών από το έτος 1960 έως το έτος 2017) κρίνονται στατιστικά ικανοποιητικά.

Προκειμένου, με ποιοτικό τρόπο, να εκτιμηθεί η συμμετοχή κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στην μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας, χαράσσονται με τη βοήθεια του λογισμικού STATA τα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 19).

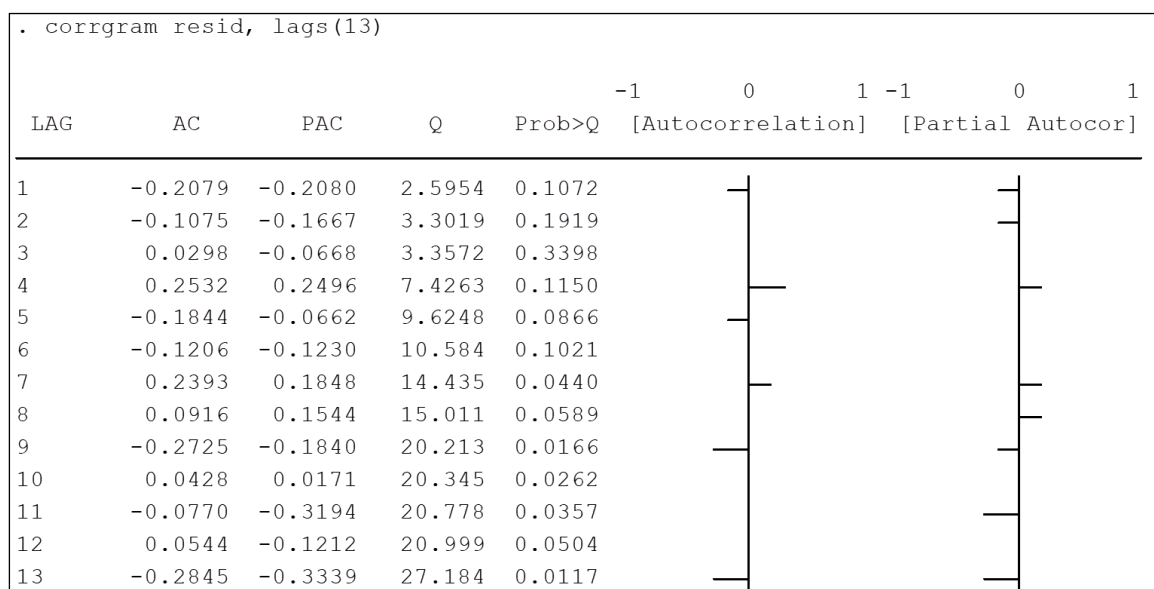


**Εικόνα 19.** Συγκριτική αποτύπωση της πραγματικής καμπύλης θερμοκρασιακής ανωμαλίας και της καμπύλης βάσει του οικονομετρικού υποδείγματος – Οικονομετρικό υπόδειγμα Εξίσωσης 3

Στα διαγράμματα A, B ,Γ και Δ της Εικόνας 19 αποτυπώνεται η σχέση της πραγματικής καμπύλης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας και των καμπυλών θερμοκρασιακής ανωμαλίας που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Prais-Winsten. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα A απεικονίζεται η πραγματική καμπύλη θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε σχέση με την καμπύλη πρόβλεψης της

θερμοκρασιακής ανωμαλίας που προκύπτει όταν μοναδική ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η ετήσια συγκέντρωση CO<sub>2</sub>. Τα υπόλοιπα διαγράμματα απεικονίζουν αντίστοιχα την ως άνω σχέση στη βάση της σταδιακής ενσωμάτωσης και των υπόλοιπων ανεξάρτητων μεταβλητών. Όπως είναι εμφανές, βλ. Διάγραμμα Δ της Εικόνας 19, η καμπύλη πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική καμπύλη θερμοκρασιακής ανωμαλίας όταν στο οικονομετρικό υπόδειγμα ενταχθούν και οι τέσσερις (4) ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες περιγράφουν τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς παραμέτρους.

Αν και όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα του τεστ Durbin-Watson, τα κατάλοιπα πλέον δεν εμφανίζουν συσχέτιση πρώτου βαθμού, εντούτοις τα ως άνω αποτελέσματα χρήζουν περαιτέρω ανάλυσης. Ειδικότερα, χαράσσοντας με τη βοήθεια του λογισμικού STATA το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης των καταλοίπων προκύπτει ότι τα κατάλοιπα εμφανίζουν αυτοσυσχέτιση μεγαλύτερου βαθμού (Εικόνα 20).



**Εικόνα 20.** Διαγραμματική απεικόνιση αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του οικονομετρικού υποδείγματος βάση της εξίσωσης 3

Ως εκ τούτου, για την εκτίμηση του υποδείγματος θα εφαρμοστεί ένα Αυτοπαλίνδρομο Ολοκληρωμένο Υπόδειγμα Κινητού Μέσου (ARIMA (p,d,q)).

### 3.3 Εφαρμογή οικονομετρικού μοντέλου – Υπόδειγμα ARIMA (p,d,q)

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω αλλά και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που προηγήθηκε (βλ. ενότητα 2.5) θα εκτιμηθεί το ακόλουθο οικονομετρικό υπόδειγμα (Εξίσωση 4), του οποίου ο διαταρακτικός όρος θα είναι ένα αυτοπαλίνδρομο σχήμα ARMA (1,1). Συγκεκριμένα:





**Εικόνα 21.** Αποτελέσματα παλινδρόμησης με την εφαρμογή αυτοπαλίνδρομου οικονομετρικού υποδείγματος βάση της Εξίσωσης 4 – ARIMA(1,0,1)

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι τα αποτελέσματα (Εικόνα 21) από την εκτίμηση του ανωτέρω υποδείγματος είναι σωστά, θα πραγματοποιηθεί έλεγχος ότι τα κατάλοιπα αποτελούν λευκό θόρυβο, ήτοι δεν αυτοσυσχετίζονται.

Όπως αποδεικνύεται (Εικόνα 22) τα κατάλοιπα του οικονομετρικού υποδείγματος ARIMA(1,0,1) δεν αυτοσυσχετίζονται και αποτελούν λευκό θόρυβο.

. corrgram res, lags(13)										
LAG	AC	PAC	Q	Prob>Q	-1	0	1	-1	0	1
					[Autocorrelation]			[Partial Autocor]		
1	-0.0095	-0.0095	.06294	0.8019						
2	0.0535	0.0535	2.0603	0.3570						
3	-0.0907	-0.0906	7.8175	0.0499						
4	0.0395	0.0366	8.9099	0.0634						
5	0.0033	0.0133	8.9175	0.1124						
6	0.0218	0.0094	9.2525	0.1599						
7	-0.0367	-0.0312	10.2	0.1775						
8	0.0276	0.0271	10.736	0.2171						
9	-0.0635	-0.0592	13.582	0.1380						
10	0.0338	0.0247	14.39	0.1559						
11	0.0687	0.0840	17.732	0.0880						
12	0.0580	0.0463	20.122	0.0648						
13	0.0753	0.0806	24.152	0.0298						

**Εικόνα 22.** Διαγραμματική απεικόνιση αυτοσυσχέτισης καταλοίπων του οικονομετρικού υποδείγματος βάση της εξίσωσης 4

Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος της τάξης του υποδείγματος. Ο εν λόγω έλεγχος γίνεται βάσει μιας διαδικασίας που ονομάζεται υπερπροσαρμογή (overfitting). Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία ο έλεγχος της καταλληλότητας του εκτιμημένου υποδείγματος πραγματοποιείται συγκρίνοντάς το εν λόγω υπόδειγμα με ένα άλλο υπόδειγμα μεγαλύτερης τάξης.

Στην προκειμένη περίπτωση το εκτιμημένο υπόδειγμα ARIMA(1,0,1) θα συγκριθεί με τα υποδείγματα ARIMA(2,0,1) και ARIMA(1,0,2) της αμέσως επόμενης τάξης. Όπως προκύπτει από την εκτίμηση των ως άνω δύο νέων υποδειγμάτων, το εκτιμημένο υπόδειγμα είναι τελικά το καταλληλότερο, δεδομένου ότι οι επιπλέον συντελεστές στα μεγαλύτερα υποδείγματα δεν είναι στατιστικά διαφορετικοί από το μηδέν.

```

. arima Temp L.TSI L.AOD L.MEI L.CO2, arima(2,0,1) nolog

```

ARIMA regression

Sample: 1960m2 - 2017m12                      Number of obs        =        695  
   Wald chi2(7)        =        1166.70  
Log likelihood = 564.3727                      Prob > chi2         =        0.0000

---

ARMA							
ar							
L1.		-.0887079	.1462596	-0.61	0.544	-.3753714	.1979556
L2.		.4197751	.0718625	5.84	0.000	.2789272	.560623
ma							
L1.		.5434087	.1563041	3.48	0.001	.2370584	.849759
/sigma		.1073929	.002709	39.64	0.000	.1020834	.1127024

**Εικόνα 23.** Υπόδειγμα ARIMA(2,0,1)

```

. arima Temp L.TSI L.AOD L.MEI L.CO2, arima(1,0,2) nolog

```

ARIMA regression

Sample: 1960m2 - 2017m12                      Number of obs        =        695  
   Wald chi2(7)        =        1403.47  
Log likelihood = 561.7184                      Prob > chi2         =        0.0000

---

ARMA							
ar							
L1.		.5921735	.0853057	6.94	0.000	.4249773	.7593696
ma							
L1.		-.1436045	.0915123	-1.57	0.117	-.3229652	.0357563
L2.		.0866656	.056764	1.53	0.127	-.0245898	.197921
/sigma		.1078061	.0027476	39.24	0.000	.1024209	.1131914

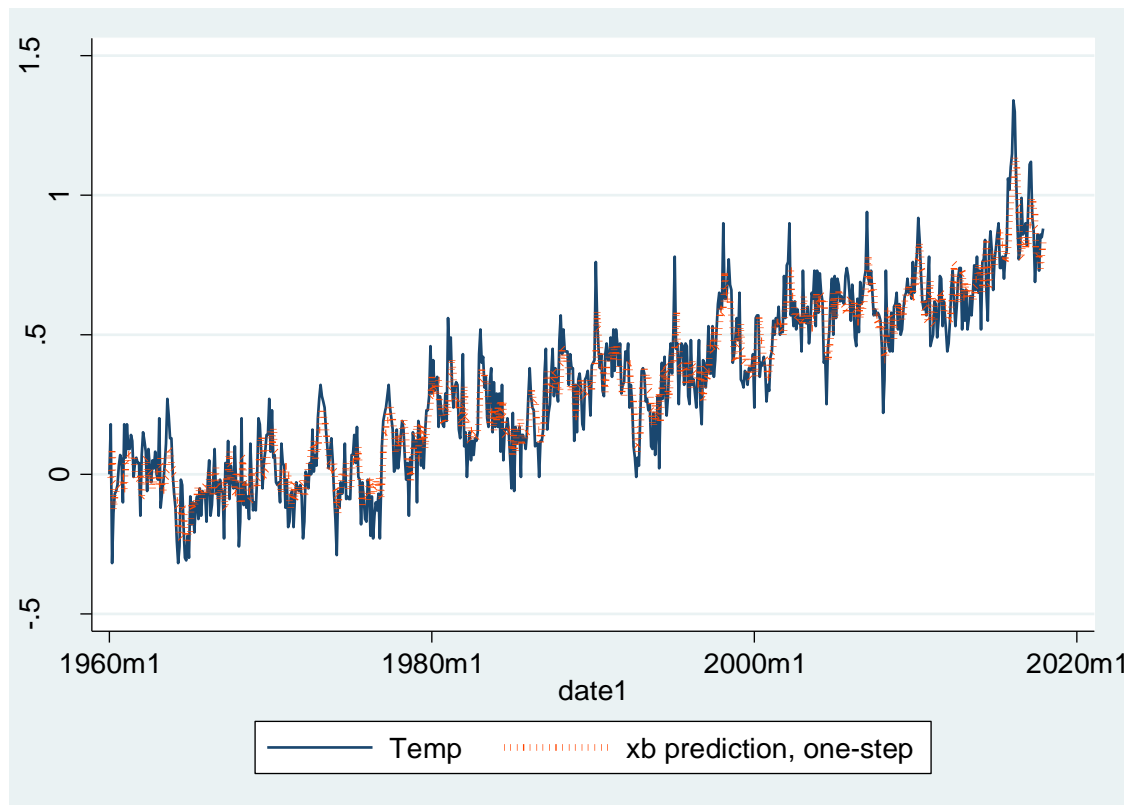
**Εικόνα 24.** Υπόδειγμα ARIMA(1,0,2)

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω το οικονομετρικό υπόδειγμα (Εξίσωση 4) που περιγράφει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασιακής ανωμαλίας και των ανεξάρτητων φυσικών και ανθρωπογενών μεταβλητών, λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα της εκτίμησης με το Αυτοπαλίνδρομο σχήμα ARIMA(1,0,1), καταλήγει στο εξής:

$$\begin{aligned}
\text{Temp}_t = & -3,12 + 0,044 \cdot \text{L.MEI}_t - 1,14 \cdot \text{L.AOD}_t + 0,0005 \cdot \text{L.TSI}_t + \\
& 0,0096 \cdot \text{L.CO}_{2,t} + 0,7 \cdot \mu_{t-1} - 0,26 \cdot \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t
\end{aligned}$$

Η βελτιωμένη προβλεπτικότητα του ως άνω οικονομετρικού υποδείγματος επιβεβαιώνεται:

- από το ακόλουθο Διάγραμμα 6, στο οποίο απεικονίζεται η προσαρμογή της καμπύλης πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις της ίδιας μεταβλητής,
- καθώς και από την τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής αποδοτικότητας  $NSE^1$ , ο οποίος υπολογίζεται ίσος με 87,57%.



**Διάγραμμα 6.** Προσαρμογή καμπύλης πρόβλεψης θερμοκρασιακής ανωμαλίας σε σχέση με πραγματικές τιμές

Τα αποτελέσματα του οικονομετρικού υποδείγματος  $ARIMA(1,0,1)$  επιβεβαιώνουν το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε από την αντίστοιχη εκτίμηση βάσει της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, σύμφωνα με το οποίο η μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας δεν μπορεί να ερμηνευθεί μόνο βάσει της μεταβλητής που σχετίζεται με την συγκέντρωση του  $CO_2$  (ανθρωπογενής μεταβλητή), αλλά απαιτεί να ληφθούν υπόψη και οι μεταβλητές που σχετίζονται με φυσικές παραμέτρους, όπως ο δείκτης MEI, η ηλιακή ακτινοβολία και το οπτικό βάθος των αεροζολ.

<sup>1</sup> Ο συντελεστής αποδοτικότητας  $NSE$  που προτάθηκε από τους Nash and Sutcliffe (1970) ορίζεται ως η αφαίρεση από τη μονάδα του αθροίσματος της διαφοράς των τετραγώνων μεταξύ των υπολογισμένων και των παρατηρούμενων δεδομένων προς τη διασπορά των παρατηρούμενων δεδομένων.

## 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική επιχειρείται μέσω της εφαρμογής στατιστικών μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών να ερμηνευθούν τα αίτια μεταβολής της θερμοκρασιακής ανωμαλίας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο ως άνω στόχος συγκεντρώθηκαν χρονικές σειρές, από το έτος 1960 έως το έτος 2017, πέντε (5) μεταβλητών και συγκεκριμένα:

- Μηνιαία στοιχεία της μεταβολής της θερμοκρασιακής ανωμαλίας (Temp)
- Μηνιαία στοιχεία της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>
- Μηνιαία στοιχεία του Δείκτη MEI (MEI)
- Μηνιαία στοιχεία της ηλιακής ακτινοβολίας (TSI)
- Μηνιαία στοιχεία του Δείκτη Οπτικό Βάθος των Αεροζολ (AOD)

Από την ανάλυση των παραπάνω μεταβλητών με χρήση μεθόδων οικονομετρικής ανάλυσης, βάσει τεχνικών παλινδρόμησης εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι μεταβλητές που περιγράφουν τη μηνιαία θερμοκρασιακή ανωμαλία και τη μηνιαία συγκέντρωση CO<sub>2</sub> παρουσιάζουν ανοδική τάση σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τρεις μεταβλητές που δεν παρουσιάζουν τάση.
- Οι χρονοσειρές των παραμέτρων (α) θερμοκρασιακή ανωμαλία, (β) ηλιακή ακτινοβολία και (γ) συγκέντρωση CO<sub>2</sub> είναι μη στάσιμες, ενώ οι χρονοσειρές του Δείκτη MEI και του οπτικού βάθους αεροζολ (AOD) χαρακτηρίζονται από στασιμότητα.
- Οι μεταβλητές MEI, AOD και CO<sub>2</sub> παρουσιάζουν αντίστοιχα θετική μέση, αρνητική υψηλή και θετική υψηλή γραμμική συσχέτιση, για διάστημα εμπιστοσύνης 5%, με τη μεταβλητή που περιγράφει τη θερμοκρασιακή ανωμαλία. Αντίθετα η μεταβλητή TSI δεν παρουσιάζει γραμμική συσχέτιση με την ως άνω μεταβλητή.
- Η εκτίμηση του οικονομετρικού υποδείγματος βάσει πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης αν και οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλό Συντελεστή Προσδιορισμού R<sup>2</sup> της τάξης του 82%, χρήζει περαιτέρω ανάλυσης και πρέπει να αντιμετωπιστεί με επιφύλαξη διότι, όπως προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο Durbin-Watson, υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα κατάλοιπα.
- Ο μετασχηματισμός του υποδείγματος, αφενός μέσω της χρήσης χρονικών υστερήσεων πρώτης τάξης στις ανεξάρτητες μεταβλητές, αφετέρου με την εφαρμογή της μεθόδου Prais-Winsten, η οποία είναι «ανθεκτική» σε φαινόμενα αυτοσυσχέτισης, δεν οδηγεί σε πιο ασφαλή αποτελέσματα.

- Η εκτίμηση του οικονομετρικού υποδείγματος με χρονοσειρές ετήσιων μέσων όρων, αντιμετωπίζει το πρόβλημα αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης των καταλοίπων, παρόλα αυτά τα κατάλοιπα δεν αποτελούν λευκό θόρυβο.
- Σε κάθε περίπτωση κατά την εκτίμηση του υποδείγματος με την εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης αποδεικνύεται ποιοτικά ότι η καμπύλη πρόβλεψης της θερμοκρασιακής ανωμαλίας προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική καμπύλη θερμοκρασιακής ανωμαλίας όταν στο οικονομετρικό υπόδειγμα ενταχθούν και οι τέσσερις (4) ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες περιγράφουν τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς παραμέτρους.
- Το ενδεδειγμένο οικονομετρικό υπόδειγμα, προκειμένου να περιγράψει η μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας, είναι ένα Αυτοπαλίνδρομο Ολοκληρωμένο Υπόδειγμα Κινητού Μέσου (ARIMA (1,0,1)), το οποίο παρουσιάζει συντελεστή αποδοτικότητας NSE ίσο με 87,57%.
- Το ως άνω οικονομετρικό υπόδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα της εκτίμησης, περιγράφεται ως εξής:

$$\text{Temp}_t = -3,12 + 0,044 * \text{L.MEI}_t - 1,14 * \text{L.AOD}_t + 0,0005 * \text{L.TSI}_t + 0,0096 * \text{L.CO}_{2,t} + 0,7 * \mu_{t-1} - 0,26 * \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t$$

- Τα αποτελέσματα του οικονομετρικού υποδείγματος ARIMA(1,0,1) επιβεβαιώνουν το γενικό συμπέρασμα που προέκυψε από την αντίστοιχη εκτίμηση βάσει της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, σύμφωνα με το οποίο η μεταβολή της θερμοκρασιακής ανωμαλίας δεν μπορεί να ερμηνευθεί μόνο βάσει της μεταβλητής που σχετίζεται με την συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> (ανθρωπογενής μεταβλητή), αλλά απαιτεί να ληφθούν υπόψη και οι μεταβλητές που σχετίζονται με φυσικές παραμέτρους, όπως ο δείκτης MEI, η ηλιακά ακτινοβολία και το οπτικό βάθος των αεροζολ.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω και λαμβάνοντας υπόψη ότι σήμερα το σύνολο των πολιτικών που αφορούν στον μετριασμό ή/ και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής στοχεύουν στον περιορισμό των θερμοκηπιακών αερίων και ειδικότερα του CO<sub>2</sub>, αγνοώντας αέρια με ισχυρότερο «θερμοκηπιακό σήμα» (λ.χ. οι υδρατμοί) καθώς και τις φυσικές παραμέτρους που επιδρούν στο κλίμα, προκύπτει αβίαστα το ερώτημα ποια σκοπιμότητα εξυπηρετείται με το να αποδίδεται οποιαδήποτε αλλαγή των χαρακτηριστικών του κλίματος σε ανθρωπογενή αίτια. Είναι χαρακτηριστικό πως η επιστημονική κοινότητα βρίσκεται ακόμα στη φάση ανακάλυψης νέων θερμοκηπιακών αερίων με σχετικά πρόσφατο παράδειγμα το τριφθοριούχο άζωτο (NF<sub>3</sub>). Το συγκεκριμένο αέριο είναι ισχυρότερο από το CO<sub>2</sub> και το ενδιαφέρον είναι πως αποτελεί βασικό συστατικό των οθονών πλάσμα καθώς και των ηλιακών κυψελών μορφής λεπτών φιλμ. Το παράδοξο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πως διατάξεις που προωθούνται για την παραγωγή πράσινης ενέργειας φαίνεται να ενισχύουν την κλιματική αλλαγή.

Μέχρι στιγμής δεν έχει αναλυθεί όσο θα έπρεπε η εγγενής/ φυσική μεταβλητότητα του κλίματος. Υπάρχει, εν ολίγοις, η πιθανότητα να βιώνουμε την κορυφή μίας θερμής κλιματικής περιόδου, όπως έχει υπάρξει στο παρελθόν, και η ανθρώπινη δραστηριότητα να αυτοτροφοδοτεί τη θέρμανση του πλανήτη. Σε κάθε περίπτωση, οφείλουμε να σεβόμαστε το φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζούμε και να διαφυλάσσουμε τους φυσικούς πόρους του πλανήτη ανεξαρτήτως των κλιματικών μεταβολών.

## Βιβλιογραφία

- Alverson, K.D., R.S. Bradley and T.F. Pedersen (eds) (2003), "Paleoclimate, Global Change and the Future", The IGBP Series, *Springer-Verlag*, New York.
- Berger, A., M.F. Loutre and J.L. Melice (1998), "Instability of the astronomical periods from 1.5 Myr BP to 0.5 Myr AP", *Paleoclimates*, 2, 239-80.
- Berger, A.L. and M.F. Loutre (1991), "Insolation values for the climate of the last 10 million years", *Quaternary Science Reviews*, 10, 297-317.
- Bradley, R.S. (1999), "Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary", *International Geophysics*, Academic Press.
- Karlen, W. and J. Kuylenstierna (1996), "On solar forcing of Holocene climate: evidence from Scandinavia", *The Holocene*, 6, 359-65.
- Maslin, M.A., X.S. Li, M.-F. Loutre and A. Berger (1998), "The contribution of orbital forcing to the progressive intensification of Northern Hemisphere glaciation", *Quaternary Science Reviews*, 17, 411-26.
- Masson-Delmotte, V., G. Dreyfus, P. Braconnot, S. Johnsen, J. Jouzel, M. Kageyama, A. Landais, M.-F. Loutre, J. Nouet, F. Parrenin, D. Raynaud, B. Stenni and E. Tuenter (2006), "Past temperature reconstructions from deep ice cores: relevance for future climate change", *Climate of the Past*, 2, 145-65.
- Masson-Delmotte, V., A. Landais, N. Combourieu-Nebout, U. v. Grafenstein, J. Jouzel, N. Caillon, J. Chappellaz, D. Dahl-Jensen, S.J. Johnsen and B. Stenni (2005), "Rapid climate variability during warm and cold periods in polar regions and Europe" *C. R. Geosciences*, 337, 935-46.
- Mayewski, P.A., E. Rohling, J.C. Stager, W. Karlen, K.A. Maasch, L.D. Meeker, E.A. Meyerson, F. Gasse, S. van Kreveld, K. Holmgren, J. Lee-Thorp, G. Rosqvist, F. Rack, M. Staubwasser, R.R. Schneider and E.J. Steig (2004), "Holocene climate variability", *Quaternary Research*, 62, 243-55.
- Mayewski, P.A., L.D. Meeker, M.S. Twickler, S. Whitlow, Q. Yang, W.B. Lyons and M. Prentice (1997), "Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000-year long glaciochemical series", *Journal of Geophysical Research*, 102, 26345-66.
- Milankovitch, M. (1941), "Canon of Insolation and the Ice Age Problem", *Royal Serbian Sciences*, Special Publication 132, Section of Mathematical and Natural Sciences, 33, 633, Belgrade.

- Miller, K.G., J.D. Wright and J.V. Browning (2005), "Visions of ice sheets in a greenhouse world", *Marine Geology*, 217, 215-31.
- Ruddiman, W. F. (2007), "The early anthropogenic hypothesis: Challenges and responses", *Reviews of Geophysics*, 45, RG4001, doi:10.1029/2006RG000207.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou and D. N. Assimakopoulos (2001), "On the Impact of Urban Climate to the Energy Consumption of Buildings", *Solar Energy*, 70, 3, 201-16.
- Sbaffi, L., F.C. Wezel, N. Kallel, M. Paterne, I. Cacho, P. Ziveri and N. Shackleton (2001), "Response of the pelagic environment to palaeoclimatic changes in the central Mediterranean Sea during Late Quaternary", *Marine Geology*, 178, 39-62.
- Scafetta, N. and B.J. West (2006), "Phenomenological solar contribution to the 1900-2000 global surface warming", *Geophysical Research Letters*, 33 L05708, doi: 10.1029/ 2005GL025539.
- Seinfeld, J. H., Pandis, Spyros N., 2006. "Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change (2nd Edition)"
- Steinhilber, F., J. Beer and C. Frohlich (2009), "Total solar irradiance during the Holocene", *Geophysical Research Letters*, 36, L19704.
- The Geological Society (2010), "Climate change: evidence from the geological record", A statement from the Geological Society of London, November.
- Tzedakis, P.C. (2007), "Seven ambiguities in the Mediterranean palaeoenvironmental narrative", *Quaternary Science Reviews*, 26, 2042-66.
- Zachos, J.C., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas and K. Billups (2001), "Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present", *Science*, 292, 686-93.