Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΣΙΑΜΠΑΖΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΕΜ: 5972

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ERF ΓΙΑ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΡΥΠΩΝ(CH_4, GHGs, HC, N_2O, O_3) ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ UKESM1

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΖΑΝΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Αλέξανδρος Βασίλειος Τσιαμπάζης
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5972

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ERF ΓΙΑ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΡΥΠΩΝ(CH_4, GHGs, HC, N_2O, O_3) ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ UKESM1

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής
Ζάνης Πρόδρομος

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

© Αλέξανδρος Βασίλειος Τσιαμπάζης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ERF ΓΙΑ ΜΙΑ ΟΜΑΔΑ ΡΥΠΩΝ(CH_4, GHGs, HC, N_2O, O_3) ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΡΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ UKESM1– *Διπλωματική Εργασία*

© Alexandros Vasileios Tsiampazis, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2024
All rights reserved.
CALCULATION AND ANALYSIS OF THE ERF VALUES FOR A GROUP OF POLLUTANTS (CH_4, GHGs, HC, N_2O, O_3) IN RELATION TO THE PRE-INDUSTRIAL LEVELS BASED ON THE UKESM1 MODEL– *Bachelor Thesis*

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

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

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Περιεχόμενα

Περίληψη…… 6

Πρόλογος …… 8

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή …… 10

1.1 Ανάλυση των ρύπων …… 10

1.2 Ακτινοβολία και Radiative Forcing …….. 14

1.3 CMIP6 και UKESM1 …… 20

Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογία και δεδομένα ……. 24

2.1 Γενικά …….. 24

2.2 Ανάλυση της εργασίας στο RStudio …….. 26

Κεφάλαιο 3: Αποτελέσματα …… 29

3.1 Μεθάνιο …….. 29

3.2 Αέρια του θερμοκηπίου …… 30

3.3 Αλογονάνθρακες …… 31

3.4 Υποξείδιο του αζώτου …… 33

3.5 Όζον …… 34

3.6 Περιοχές ενδιαφέροντος …….. 35

3.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων ERF με τα αποτελέσματα του IPCC και με αυτά άλλων εργασιών …….. 36

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα…….. 39

Βιβλιογραφία …….. 40

Παράρτημα Ι: Παρουσίαση του κώδικα …….. 45

Παράρτημα ΙΙ: Ανάλυση εντολών οπτικοποίησης …… 50

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρακάτω εργασία εξετάζεται η μεταβλητή ERF (Effective Radiative Forcing) που αφορά την μεταβολή του ισοζυγίου ακτινοβολίας της Γης σε σχέση με την αύξηση ή μείωση ενός ρύπου ή μιας ομάδας ρύπων με αποτέλεσμα να προκληθεί θέρμανση ή ψύξη. Οι εξεταζόμενοι ρύποι είναι το μεθάνιο που είναι ένας αέριος υδρογονάνθρακας, το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου που αποτελούν βασική ομάδα ρύπων για την θερμοκρασία του πλανήτη μιας και σε αυτούς οφείλεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου, τους αλογονάνθρακες στους οποίους συμπεριλαμβάνονται οι πολυσυζητημένοι χλωροφθοράνθρακες, το υποξείδιο του αζώτου που παράγεται κατά κύριο λόγο στο έδαφος και το όζον που αποτελεί ευεργετικό ρύπο στην στρατόσφαιρα και βλαβερό στην τροπόσφαιρα. Τα δεδομένα προέρχονται από το κλιματικό μοντέλο UKESM1 του προγράμματος CMIP6 (Coupled Model Interpolation Project 6) . Η ανάλυση των δεδομένων για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R στο RStudio ενώ μέσω αυτού παράγονται και χάρτες που δείχνουν την κατάσταση του ERF σε σχέση με κάθε ρύπο ή ομάδα ρύπων κάνοντας ξεκάθαρη την ύπαρξη θέρμανσης ή ψύξης. Τέλος, παρουσιάζεται και μία σύγκριση με άλλα μοντέλα και εργασίες. Όπως αποκαλύπτεται από τα αποτελέσματα και από τη σύγκριση υπάρχουν τιμές του ERF που συμφωνούν με άλλα μοντέλα και εργασίες αλλά και κάποιες που αποκλίνουν.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ABSTRACT

In the following project, the variable ERF (Effective Radiative Forcing) is examined. ERF is a variable which concerns the change in the Earth's radiation balance in relation to the increase or decrease of a pollutant or a group of pollutants, resulting in warming or cooling. The pollutants examined are methane which is a gaseous hydrocarbon, greenhouse gases which are a basic group of pollutants for the temperature of the planet since they are responsible for the greenhouse effect, halocarbons which include the much-discussed chlorofluorocarbons, nitrous oxide which is mainly produced in the soil and ozone which is a beneficial pollutant in the stratosphere and a harmful one in the troposphere. The data stem from the UKESM1 climatic model of the CMIP6 (Coupled Model Interpolation Project 6). The analysis of the data, to extract the results is done using the R programming language in RStudio, while through it maps are also produced that show the state of the ERF in relation to each pollutant or group of pollutants making clear the existence of heating or cooling. In the end a comparison with other models and projects is being presented. As it is revealed by the results and the comparison there are some ERF values that agree with other models and projects and some others that diverge.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα εργασία επιτυγχάνεται μια ανάλυση των τιμών της παραμέτρου ERF (Effective Radiative Forcing) για μια ομάδα ρύπων. Οι ρύποι αυτοί είναι: το μεθάνιο (CH_4), τα αέρια του θερμοκηπείου ως σύνολο (Greenhouse Gases, GHGs), οι αλογονάνθρακες (Halocarbon, HC), το υποξείδιο του αζώτου(N_2O) και το όζον (O_3). Ειδικότερα οι περίοδοι που εξετάζονται είναι το παρόν που προσδιορίζεται από τιμές του ERF για το 2021 για τους παραπάνω ρύπους και τα προβιομηχανικά επίπεδα που αντιπροσωπεύονται από την χρονική περίοδο 1864 – 1894. Το μοντέλο που αξιοποιείται είναι το UKESM1.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται μια αναλυτική περιγραφή του Effective Radiative Forcing καθώς και των ρύπων που χρησιμοποιούνται. Διασαφηνίζεται, επίσης, το σύγχρονο πλαίσιο υπολογισμού του Radiative Forcing στα σύγχρονα κλιματικά μοντέλα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τιμών του ERF. Πιο συγκεκριμένα τα αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα προέκυψαν με την χρήση του προγράμματος RStudio που κάνει χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R.

Στο τρίτο κεφάλαιο διατυπώνονται τα αποτελέσματα των εργασιών που αναφέρονται στην παραπάνω παράγραφο. Γίνεται ένας σύντομος σχολιασμός για αυτά τα αποτελέσματα καθώς και για το τι εκπροσωπούν ως προς το κλίμα, καθώς και μία σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με αποτελέσματα άλλων εργασιών.

Κλείνοντας, στον επίλογο (τέταρτο κεφάλαιο) περιγράφονται συμπερασματικά τα αποτελέσματα της εργασίας καθώς και οποιαδήποτε περαιτέρω δουλειά μπορεί να γίνει στο μέλλον με βάση αυτά τα αποτλέσματα.

Αλέξανδρος – Βασίλειος Τσιαμπάζης

Θεσσαλονίκη, 2023

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ακτινοβολία είναι χωρίς αμφιβολία ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν, διαμορφώνουν και εξελίσσουν το κλίμα του πλανήτη μας. Όπως και πολλοί άλλοι παράγοντες έτσι και η ακτινοβολία δεν αποτελεί μια σταθερά αλλά παρουσιάζει μεταβλητότητα με το πέρας του χρόνου. Η μεταβλητότητα αυτή της ακτινοβολίας μπορεί να έχει φυσικές αιτίες, όπως για παράδειγμα την αλλαγή στον αριθμό των ηλιακών κηλίδων στην επιφάνεια του Ήλιου. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αντιληπτό ότι η ακτινοβολία και το ενεργειακό ισοζύγιο επηρεάζεται και από ανθρωπογενείς παράγοντες όπως είναι οι ρύποι που παράγονται στην επιφάνεια της Γης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η παραγωγή των ρύπων πραγματοποιείται λόγω φυσικών αλλά και ανθρωπογενών διεργασιών. Η διάκριση θα διασαφηνιστεί παρακάτω, όταν γίνει ξεχωριστή αναφορά στον κάθε ρύπο.

Οι ρύποι προς μελέτη στην παρούσα εργασία είναι πέντε. Αναλυτικότερα περιλαμβάνονται: το μεθάνιο (CH_4), τα αέρια του θερμοκηπίου ως σύνολο (Green-House Gases, GHGs), οι αλογονάνθρακες (Halocarbons, HC), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και το όζον (O_3). Οι συγκεκριμένοι ρύποι αποτελούν ένα τμήμα όλων των ρύπων που κυκλοφορούν στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, είναι από τους σημαντικότερους ρύπους ως προς την παράμετρο της ακτινοβολίας που θα αναφερθεί παρακάτω και έχουν την ικανότητα να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με την θέρμανση ή ψύξη των διαφόρων περιοχών του πλανήτη.

1.1 Ανάλυση των ρύπων

Το μεθάνιο αποτελεί ένα από τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου. Θεωρείται το δεύτερο σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου μετά το διοξείδιο του άνθρακα (Myhre et al., 2013). Πρόκειται για έναν υδρογονάνθρακα που ανήκει στην ομάδα των αλκανίων και αποτελείται από τέσσερα άτομα υδρογόνου συνδεδεμένα με ομοιοπολικό δεσμό με ένα άτομο άνθρακα. Εκτιμάται ότι καταλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό στην σύσταση της ατμόσφαιρας με συνεισφορά περίπου 1,8ppm. Παρόλα αυτά αποδεικνύεται σημαντικός ρύπος μιας και μπορεί να απορροφήσει έως και 20 με 30 φορές περισσότερη γήινη υπέρυθρη ακτινοβολία σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το CH_4 διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον μετριασμό της βραχυπρόθεσμης κλιματικής αλλαγής (π.χ. Abernethy et al., 2021; Allen et al., 2018; Allen et al., 2021; UNEP, 2011; UNEP, 2021). Αυτό συμβαίνει, όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω, λόγω της μικρής ατμοσφαιρικής του ζωής στα 11,2 ± 1,3 έτη (Prather et al., 2010), αλλά και στην ακτινοβολία του που είναι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από το CO2 (Myhre et al., 2013; Ramaswamy et al., 2001). Η οξείδωση του CH_4 αποτελεί, επίσης, σημαντική καταβόθρα για τη ρίζα υδροξυλίου (OH) και οι αλλαγές στο CH_4 οδηγούν σε αλλαγές στο O3, στο OH και σε άλλα οξειδωτικά (O'Connor et al, 2022, Λαζαρίδης 2020). Επίσης υπάρχει μια θεωρία που αναφέρει ότι οι μεταβολές που παρατηρούνται στους υδρατμούς της στρατόσφαιρας θα μπορούσαν να οφείλονται σε αυξήσεις στην οξείδωση CH_4 της στρατόσφαιρας (Hansen et al., 2005). Παρόλο που οι μελέτες δεν έχουν εξακριβώσει επακριβώς τον ρόλο του μεθανίου στη στρατόσφαιρα είναι σαφές ότι οι έμμεσοι εξαναγκασμοί (forcings) μέσω αλλαγών στο O_3, στους στρατοσφαιρικούς υδρατμούς και στα δυνητικά αεροζόλ, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επιβολή (forcing) CH_4 (Hansen et al., 2005· Myhre et al., 2013· Shindell et al., 2005, 2009· Winterstein et al., 2019). Το μεθάνιο παράγεται με φυσικό τρόπο μέσω αναερόβιων βιολογικών διεργασιών ζύμωσης, δηλαδή κυρίως από αναερόβια βακτήρια σε ανοξικά περιβάλλοντα όπως βάλτοι και υγρότοποι, αλλά και σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Επίσης, μια σημαντική πηγή μεθανίου είναι τα φυτοφάγα ζώα όπως τα βοοειδή και τα πρόβατα τα οποία παράγουν μεθάνιο με εντερικές διεργασίες. Σε αυτόν τον παράγοντα συμβάλλει και ο άνθρωπος που εκτρέφει αυτά τα είδη σε τεράστιους αριθμούς χωρίς μια αποδοτική λύση για την αποφυγή διαφυγής του μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Ο άνθρωπος συνεισφέρει στην παραγωγή του μεθανίου και μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων όπως λιγνίτη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Τα σύγχρονα μοντέλα γενικά αναπαριστούν αύξηση στην ποσότητα του μεθανίου. Συγκεκριμένα, το μεθάνιο στην ατμόσφαιρα φαίνεται να έχει διπλασιαστεί σε ποσότητα σε σχέση με τα επίπεδα στα οποία βρισκόταν τον 18^{ο} αιώνα (Λαζαρίδης 2020).

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι οι ρυθμιστές του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σε αυτά περιλαμβάνεται: το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το όζον (O_3), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και οι υδρατμοί (H2O) (Subramaniam et al., 2012). Αυτά τα αέρια είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου που αποτελεί τον λόγο για τον οποίο η μέση θερμοκρασία της Γης είναι στους 15^{o}C και όχι στους -18^{o}C. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στις ιδιότητες των παραπάνω αερίων να απορροφούν τμήματα της γήινης ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός ψύξης της Γης οδηγώντας σε μεγαλύτερη επιφανειακή θερμοκρασία σε σχέση με μία ατμόσφαιρα που δεν θα είχε αέρια θερμοκηπίου. Ωστόσο, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες οδηγούν σε αύξηση του αριθμού ορισμένων αερίων του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα την απορρόφηση περισσότερης ακτινοβολίας και έτσι την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

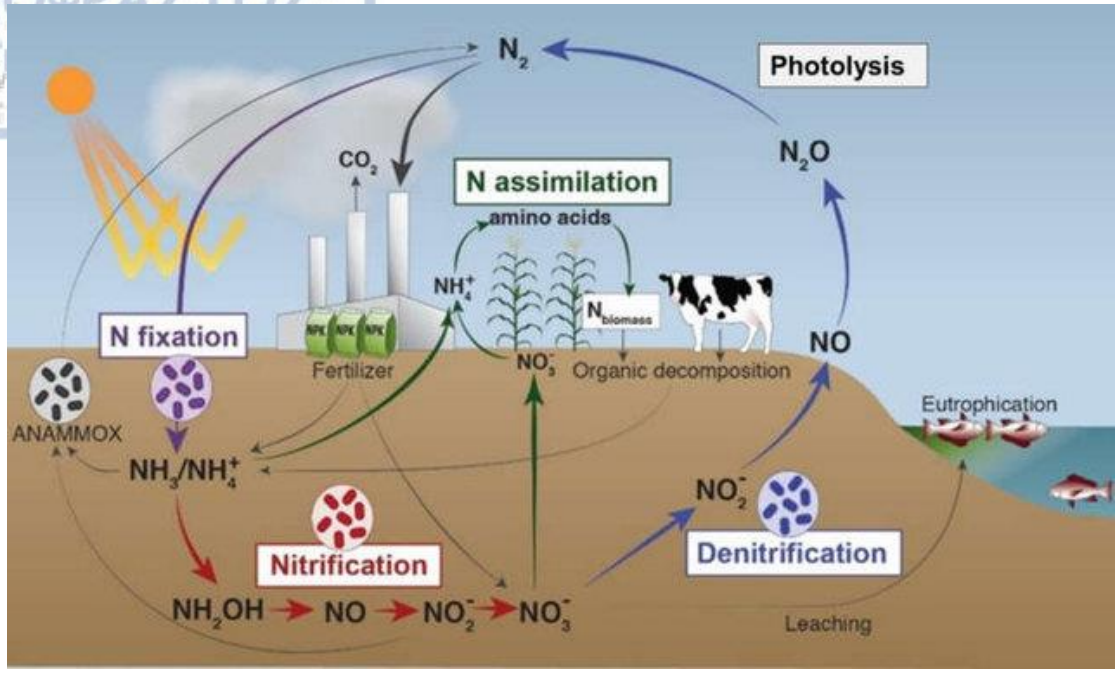
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Οι αλογονάνθρακες είναι μια μεγάλη ομάδα οργανικών χημικών ενώσεων που αποτελούνται από μόρια άνθρακα συνδεδεμένα με ένα ή περισσότερα αλογόνα όπως βρώμιο (Br), χλώριο (Cl), φθόριο (F), ιώδιο (I). Ανάμεσα στις υποκατηγορίες των αλογονανθράκων βρίσκονται οι χλωροφθοράνθρκες, οργανικές ενώσεις του άνθρακα με χλώριο και φθόριο (Pinnock et al., 1995). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι αλογονάνθρακες δεν είναι ενώσεις που παρασκευάζονται με φυσικές διεργασίες αλλά είναι δημιουργήματα του ανθρώπου. Οι χλωροφθοράνθρακες αποτελούν μια ομάδα ρύπων καθαρά ανθρωπογενούς προελεύσεως που προκαλούν αναταραχές στην δομή της ατμόσφαιρας (Butler et al., 1999). Είναι ενώσεις που περιέχονται σε χημικές ουσίες με ευρεία χρήση στην λειτουργία ψυγείων και κλιματιστικών. Η δράση τους προκάλεσε την τρύπα του όζοντος στην Ανταρκτική φέρνοντας το θέμα των χλωροφθορανθράκων στο πολιτικό σκηνικό. Από ιστορικής πλευράς οι χλωροφθοράνθρακες πρωτοδημιουργήθηκαν την δεκαετία του 1920 και μέχρι το 1950 η χρήση τους ήταν περιορισμένη μέχρι που αργότερα αυξήθηκε. Μετά το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ το 1987 η χρήση τους περιορίστηκε μιας και πρόκειται για ανθεκτικούς ρύπους που λόγω του μεγάλου χρόνου ζωής τους (50 έως εκατοντάδες χρόνια) δεν μπορεί να τους απελευθερώσει εύκολα η ατμόσφαιρα (Λαζαρίδης 2020).

Το υποξείδιο του αζώτου είναι ένα από τα βασικότερα οξείδια του αζώτου ως προς την αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία. Το ατμοσφαιρικό υποξείδιο του αζώτου έχει σαν σημαντικότερη πηγή το έδαφος όπου διάφοροι μικροοργανισμοί αποικοδομούν το πρωτεινικό άζωτο σε αέριο άζωτο και υποξείδιο του αζώτου. Υπάρχουν επίσης μικροοργανισμοί που ανάγουν το υποξείδιο του αζώτου σε αναερόβιες συνθήκες. Στην στρατόσφαιρα το υποξείδιο του αζώτου φωτοδιασπάται και επομένως ο κύριος κύκλος του υποξειδίου του αζώτου συνοψίζεται ως εξής: παραγωγή στο έδαφος, στη συνέχεια διάχυση του και μεταφορά του στην στρατόσφαιρα όπου τελικά φωτοδιασπάται (Ghimire et al., 2016, Lehnert et al., 2017).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Εικόνα 1: Αναλυτική παρουσίαση του κύκλου του υποξειδίου του αζώτου (N_2O) (Lehnert et al., 2017)

Το όζον αποτελεί μία ιδιάζουσα περίπτωση ρύπου. Πρόκειται για ένα μόριο που αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου συνδεδεμένα με ομοιοπολικό δεσμό. Βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε μια ποσότητα 20 – 100 ppb. Για να γίνει ξεκάθαρη η φύση του πρέπει να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες. Όταν το όζον βρίσκεται στην τροπόσφαιρα ονομάζεται τροποσφαιρικό όζον και είναι ένα άοσμο αέριο που αποτελεί το κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους στην επιφάνεια της Γης. Ωστόσο, όταν βρίσκεται στην στρατόσφαιρα ονομάζεται στρατοσφαιρικό όζον και έχει ευεργετικό ρόλο προστατεύοντας μας από τις βλαβερές ακτίνες του Ήλιου. Από τα πιο σημαντικά προβλήματα αέριας ρύπανσης είναι αφενός η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος και το γεγονός ότι αποτελεί το κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους κοντά στην επιφάνεια της Γης (Zanis et al., 2022) και αφετέρου η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος. Στην στρατόσφαιρα το όζον απορροφάει την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία και συγκεκριμένα την υπεριώδη UV-B ακτινοβολία και συνεπώς η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος έχει άμεσο αντίκτυπο στο ποσοστό της UV-B ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Στην τροπόσφαιρα το όζον σχηματίζεται ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων μεταξύ οξυγόνου, πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και οξειδίων του αζώτου με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας κυρίως όταν υπάρχει αίθριος και ζεστός καιρός. Πηγές αυτών των βλαβερών ρύπων είναι τα οχήματα, τα εργοστάσια, οι χωματερές, τα χημικά διαλυτικά και πολλές άλλες μικρές πηγές (βενζινάδικα, αγροτικός εξοπλισμός). Στην ανώτερη ατμόσφαιρα το όζον δρα ως θερμοκηπικό αέριο. Στην τροπόσφαιρα είναι η βασική πηγή προέλευσης της ελεύθερης ρίζας του υδροξυλίου (OH) που είναι το βασικό οξειδωτικό μέσο της τροπόσφαιρας αποτελώντας βασική καταβόθρα πολλών στοιχείων που

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

διαφορετικά θα δρούσαν σαν θερμοκηπικά. Κοντά στο έδαφος είναι φυτοξειδωτικό σε συγκεντρώσεις > 40 ppb (Λαζαρίδης 2020). Γενικά το όζον λειτουργεί ως οξειδωτικό μέσο, για παράδειγμα οξειδώνει το διοξείδιο του θείου (SO_2) σε θειικό οξύ (H_2SO_4). Σε συγκεντρώσεις > 140 ppb προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα. Το όζον σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον όπου ζούμε. Προκαλεί ερεθισμό στην αναπνευστική οδό, διαταραχή της αναπνευστικής λειτουργίας, αίσθημα ξηρότητας στο λαιμό, πόνο στο στήθος, βήχα, άσθμα, φλεγμονή στους πνεύμονες και πιθανή επιδεκτικότητα σε μολύνσεις του αναπνευστικού. Το όζον είναι επίσης ο ρύπος με τις δυσμενέστερες επιδράσεις στα φυτά γιατί μειώνει την παραγωγή στις αγροτικές καλλιέργειες και προκαλεί ζημιά στη δασική βλάστηση (Patra et al., 2021). Διαδικασίες που αναμένεται να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στη μελέτη του όζοντος και ιδίως του επιφανειακού όζοντος είναι διαδικασίες που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία συμπεριλαμβανομένων αλληλεπιδράσεων της βιόσφαιρας που επηρεάζουν τις βιογενείς πτητικές οργανικές ενώσεις (BVOCs), φυσικές εκπομπές μεθανίου και εναπόθεση όζοντος (O'Connor et al. 2010, Clifton et al 2014, Fu and Liao 2016, Hollaway et al. 2017, Jiang et al 2018, Ma et al 2019, Lin et al. 2020), εκπομπές NOx από κεραυνούς (Banerjee et al. 2014, Murray 2016) καθώς και πυρκαγιές (Lin et al. 2017) και συνθήκες αντικυκλωνικής στασιμότητας (Jing et al. 2017, Schnell and Prather 2017, Garrido-Perez et al. 2018).

Οι ρύποι στην ατμόσφαιρα δεν μένουν μόνιμα. Οι δράσεις ενός ρύπου καθορίζονται σημαντικά από τον χρόνο ζωής που έχουν δηλαδή τον χρόνο τον οποίο μπορούν να επιβιώσουν στην ατμόσφαιρα πριν διαλυθούν εντελώς. Ο κάθε ρύπος έχει τον δικό του χρόνο ζωής. Ο χρόνος ζωής είναι σημαντικό χαρακτηριστικό διάκρισης των ρύπων. Έτσι, σχετικά με τους παραπάνω προαναφερθέντες ρύπους: το μεθάνιο έχει χρόνο ζωής 12 έτη, οι χλωροφθοράνθρακες έχουν χρόνο ζωής από 55 έως 140 έτη, το υποξείδιο του αζώτου έχει χρόνο ζωής 114 χρόνια και το όζον έχει χρόνο ζωής ώρες έως μέρες.

1.2 Ακτινοβολία και Radiative Forcing

Όσον αφορά την ακτινοβολία, πρόκειται για εκπομπή και διάδοση ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν χρειάζονται μόρια για τη μεταφορά τους. Ωστόσο, η ακτινοβολία έχει δυαδική φύση, σωματιδιακή και κυματική, με αποτέλεσμα να γίνεται δυνατή η περιγραφή της ως ροή σωματιδίων που περιέχουν καθορισμένη ενέργεια και ονομάζονται φωτόνια. Η κύρια πηγή ακτινοβολίας για την Γη είναι ο Ήλιος που εκπέμπει μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία από 0,1 έως 11 μm. Αλλά, και η Γη εκπέμπει τη δική της ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από 4 έως 90 μm

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

και πρόκειται για ακτινοβολία που εκπέμπεται προς το διάστημα. Η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον αέρα στην ατμόσφαιρα αποτελεί την κύρια διεργασία που καθορίζει το κλίμα στη Γη και τις διεργασίες που συνδέονται με την ατμοσφαιρική χημεία. Τα πιο σημαντικά αέρια για απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι το οξυγόνο, το όζον, οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι πάρα πολύ έντονη σε ορισμένα μήκη κύματος ώστε να μη φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους καθόλου ηλιακή ακτινοβολία από τα συγκεκριμένα μήκη κύματος. Οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα είναι ισχυροί απορροφητές στο υπέρυθρο πολλοί φτωχοί όμως απορροφητές στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Άλλα ατμοσφαιρικά αέρια που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία είναι φυσικά τα προαναφερθέντα παραπάνω, υποξείδιο του αζώτου και το μεθάνιο. Σημαντική απορρόφηση βέβαια ασκεί και ο αιωρούμενος στην ατμόσφαιρα κονιορτός χωρίς όμως συγκεκριμένη φασματική προτίμηση.

Στην παρούσα εργασία δίνεται βαρύτητα σε μια παράμετρο που σχετίζεται με την ακτινοβολία και ονομάζεται εξαναγκασμένη μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας ή Radiative Forcing (RF). Εάν διαταραχθεί η συγκέντρωση ενός αερίου στην ατμόσφαιρα εμφανίζεται μια επαγόμενη μεταβολή στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας σε διάφορα ύψη της ατμόσφαιρας (Hansen et al., 1997, Hansen et al., 2005). Αυτή η επαγόμενη μεταβολή είναι το Radiative Forcing και υπολογίζεται σε μονάδες W*m^(-2) (Ramaswamy et al., 2001, Forster et al., 2016). Μέση εξαναγκασμένη μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας σε παγκόσμια κλίμακα προκαλείται από την διαταραχή των διαφόρων ανθρωπογενών κυρίως αλλά και φυσικών παραμέτρων που επιδρούν στο ισοζύγιο ακτινοβολιών του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας και έτσι μπορεί να προκληθεί ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου εάν το ισοζύγιο ακτινοβολιών τείνει προς την κατεύθυνση της θέρμανσης ή απίσχναση του φαινομένου του θερμοκηπίου εάν το ισοζύγιο των ακτινοβολιών τείνει προς την κατεύθυνση της ψύξεως. Προκειμένου να συνδεθεί η δράση των ρύπων με τα φαινόμενα ενίσχυσης ή απίσχνασης του φαινομένου του θερμοκηπίου δηλαδή με την αύξηση ή μείωση της μέσης θερμοκρασίας της Γης υπάρχει η παράμετρος του δυναμικού συμβολής ενός αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ή Global Warming Potential (GWP) (Subramaniam et al., 2012). Δυναμικό συμβολής ενός αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ονομάζεται το δυναμικό που εμφανίζει 1Kg από το αέριο να συνεισφέρει στον παράγοντα Radiative Forcing σε σχέση με το δυναμικό που εμφανίζει 1Kg CO_2 και εξάγεται από: α) την ένταση με την οποία το αέριο απορροφάει υπέρυθρη ακτινοβολία, β) το μήκος κύματος αυτής της ακτινοβολίας που απορροφάτε και γ) την διάρκεια ζωής αυτού του αερίου στην ατμόσφαιρα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

το Global Warming Potential του μεθανίου είναι 21, του υποξειδίου του αζώτου είναι 310 και των χλωροφθορανθράκων είναι από 1300 έως 12000 (Subramaniam et al., 2012). Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της συγκέντρωσης των παραπάνω αερίων στην ατμόσφαιρα οδηγεί σε ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τελικά αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το GWP επηρεάζεται και από της αλληλεπιδράσεις που έχουν οι ρύποι μεταξύ τους. Έτσι για παράδειγμα αναφέρεται ότι οι Prather και Hsu (2010) έδειξαν πως η σύζευξη N_2O και μεθανίου (CH_4), μέσω της εξάντλησης του στρατοσφαιρικού O_3 και της φωτόλυσης, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του GWP του N_2O κατά 5%.

GHG	GWP for 100 years
CO_2	1
CH_4	23
N_2O	296
HFC - 23	12 000
HFC – 134a	1 300
SF_6	22 200

Source: *IPCC Third Assessment Report* (2001).

Εικόνα 2: Πίνακας τιμών του Global Warming Potential για μια ομάδα ρύπων (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, 2 είδη υδροχλωροφθοράνθρακα και εξαφθοριούχο θείο) (Subramaniam et al., 2012).

Ο παράγοντας Radiative Forcing διαιρείται σε τρία διαφορετικά είδη ανάλογα με το ύψος στο οποίο υπολογίζεται, των περιοχών της ατμόσφαιρας που θεωρούμε ως περιοχές καθορισμένης σταθερής θερμοκρασίας και διαφόρων άλλων παραμέτρων που μπορεί να ληφθούν υπόψη ως σημαντική για τη μεταβολή του κλίματος. Έτσι το Radiative Forcing χωρίζεται σε Instantaneous Radiative Forcing (IRF), Stratospheric Adjusted Radiative Forcing (SARF) και Effective Radiative Forcing (ERF). Προκειμένου να γίνει διασαφήνιση των διαφορετικών όρων του Radiative Forcing θα ακολουθήσει μια γρήγορη αναφορά στις διαφορές μεταξύ των τύπων του Radiative Forcing.

Έτσι, ξεκινώντας από τον παράγοντα Instantaneous Radiative Forcing πρόκειται για ένα Radiative Forcing που υπολογίζει την άμεση επαγόμενη μεταβολή του ισοζυγίου ακτινοβολίας του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας στην τροπόπαυση, δηλαδή σε ένα ύψος περίπου 10km από την επιφάνεια της μέσης στάθμης της θάλασσας. Ο συγκεκριμένος τύπος Radiative Forcing θεωρεί σταθερή θερμοκρασία σε όλο το ύψος της ατμόσφαιρας. Ωστόσο ο παράγοντας Instantaneous Radiative Forcing αποδίδει αποτελέσματα που αποκλίνουν από την πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας γιατί δεν λαμβάνει υπόψη την μεταβολή της θερμοκρασίας στην στρατόσφαιρα η οποία είναι σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το μέγεθος ενός Radiative Forcing τόσο ώστε να αλλάξει ακόμα και το πρόσημο του αποτελέσματος όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση καταστροφής του όζοντος.

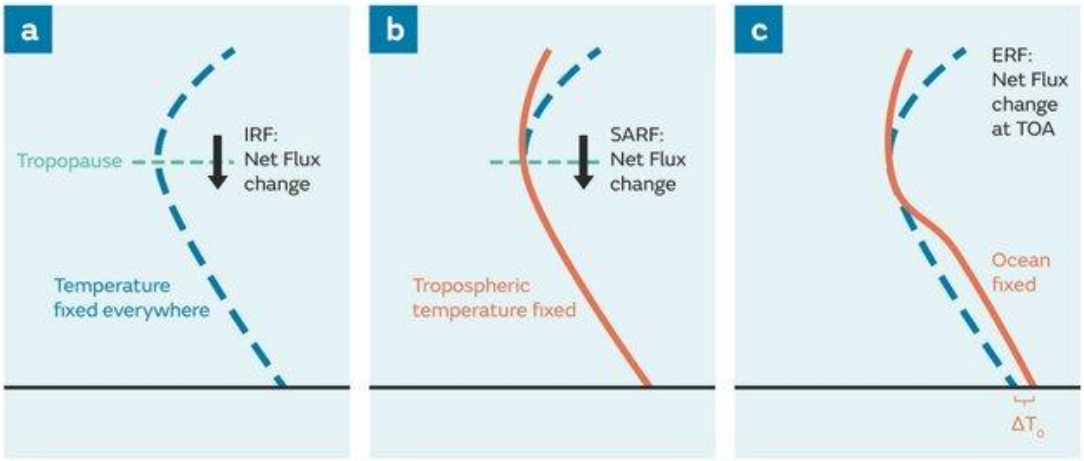
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

Στη συνέχεια υπάρχει το Stratospheric Adjusted Radiative Forcing (SARF). Αυτό το Radiative Forcing υπολογίζει την επαγόμενη μεταβολή του ισοζυγίου ακτινοβολίας του συστήματος Γης – ατμόσφαιρας στην τροπόπαυση όπως δηλαδή και το Instantaneous Radiative Forcing αλλά σε αντίθεση με αυτό το Stratospheric Adjusted Radiative Forcing λαμβάνει ως καθορισμένη σταθερή μόνο τη θερμοκρασία της τροπόσφαιρας. Δίνει χρόνο στη στρατόσφαιρα να προσαρμοστεί σε αλλαγές που συμβαίνουν στη σύσταση των ρύπων κάτι που οδηγεί σε καλύτερη προσέγγιση γιατί μόλις οι στρατόσφαιρα προσαρμοστεί στις αλλαγές η τιμή του Radiative Forcing στην τροπόπαυση είναι ισοδύναμη με την τιμή του Radiative Forcing στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Γενικά, ο τύπος υπολογισμού του SARF στην τροπόπαυση είναι ο παρακάτω:

$$SARF = IRF + Astrattemp$$

Όπου το IRF είναι η στιγμιαία εξαναγκασμένη μεταβολή ακτινοβολίας που αναφέρθηκε παραπάνω και Astrattemp είναι είναι η πρόσθετες αλλαγές στις προς τα κάτω καθαρές ροές ακτινοβολίας (net flux changes) στην τροπόπαυση, οι οποίες οφείλεται αποκλειστικά στη ρύθμιση της θερμοκρασίας της στρατόσφαιρας (Hansen et al., 1997).



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των διαφορετικών τύπων Radiative Forcing a) Instantaneous Radiative Forcing, b) Stratospherically Adjusted Radiative Forcing, c) Effective Radiative Forcing (Myhre et al. 2013, Hansen et al. 2005)

Ο τύπος του Radiative Forcing που απασχολεί τη συγκεκριμένη εργασία είναι το Effective Radiative Forcing, Σε αντίθεση με το Instantaneous Radiative Forcing και με το Stratospherically Adjusted Radiative Forcing που υπολογίζονται στην τροπόπαυση το Effective Radiative Forcing υπολογίζεται στην κορυφή της ατμόσφαιρας (Top Of the Atmosphere, TOA). Ο λόγος ύπαρξης και αξιοποίησης του Effective Radiative Forcing αλλά και ο λόγος που είναι πιο

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

ακριβές από τις δύο παραπάνω μορφές είναι γιατί όπως το Stratospherically Adjusted Radiative Forcing προσαρμόζεται στις αλλαγές που συμβαίνουν στη στρατόσφαιρα, το Effective Radiative Forcing προσαρμόζεται και στις αλλαγές που συμβαίνουν στην τροπόσφαιρα και αυτές είναι κυρίως τα νέφη που επηρεάζουν την ακτινοβολία μιας και μπορούν να ενισχύσουν ή να αποδυναμώσουν την αρχική ακτινοβολία που φτάνει στη Γη. Στο Effective Radiative Forcing περιλαμβάνονται ταχείες προσαρμογές (rapid adjustments) που ανταποκρίνονται στις τροποσφαιρικές μεταβολές που επηρεάζουν το κλιματικό σύστημα (Zanis et al., 2020). Ουσιαστικά μία εξαναγκασμένη μεταβολή (forcing) για ταχείες προσαρμογές (rapid adjustments) ορίζεται ως Effective Radiative Forcing και εννοιολογικά αναπαριστά την αλλαγή στην καθαρή ροή ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (net top-of-the-atmosphere radiative flux) αφού επιτρέψει για τις ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες, τους υδρατμούς και τα νέφη να προσαρμοστούν αλλά με παγκόσμια μέση θερμοκρασία ή με τμήμα των επιφανειακών συνθηκών αμετάβλητο. Μια τυπική μέθοδος για την έρευνα των ταχέων προσαρμογών στις κλιματικές προσομοιώσεις για εξαναγκασμό (forcing) από αεροζόλ ή άλλους βραχύβιους κλιματικούς εξαναγκαστές (short-lived climate forcers, SLCFs) είναι με διόρθωση των θερμοκρασιών της επιφάνειας της θάλασσάς (Sea Surface Temperatures, SSTs) και της κάλυψης από θαλάσσιο πάγο (Sea Ice Cover, SIC) σε κλιματολογικές τιμές, επιτρέποντας όλα τα άλλα μέρη του συστήματος να ανταποκριθούν μέχρι να φτάσουν σε σταθερή κατάσταση (Hansen et al., 2005). Με αυτό τον τρόπο η κλιματική απόκριση σε ένα παράγοντα εξαναγκασμού σε σταθερές προσομοιώσεις SST είναι χωρίς καμία ωκεάνια απόκριση αλλαγής του κλίματος και ως εκ τούτου ασθενώς συνδέεται με τις διεργασίες ανατροφοδότησης μέσω αποκρίσεων στην επιφάνεια της γης (Myhre et al., 2013, 2017). Αυτές οι ταχείες προσαρμογές σχετίζονται με την υγρασία και με τα νέφη. Η συμπερίληψη αυτών των ταχέων προσαρμογών είναι ο παράγοντας που προωθεί το Effective Radiative Forcing ως τον ακριβέστερο τύπο Radiative Forcing. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που καθιστά το Effective Radiative Forcing την αποτελεσματικότερη μορφή Radiative Forcing προς υπολογισμό είναι ότι μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τη χρήση ενός ζεύγους παράλληλων προσομοιώσεων με τυποποιημένο μοντέλο διάγνωσης της ροής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA) (Forster et al., 2016) αν και με την απαίτηση λειτουργίας για σχετικά μεγάλες περιόδους (30 χρόνια) για τη μείωση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τη μετεωρολογική μεταβλητότητα (Shindell et al., 2013a). Για τον υπολογισμό του ERF ο τύπος που απαιτείται είναι ο παρακάτω:

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

$$ERF = IRF + \sum_i Ai$$

Όπου το IRF είναι η στιγμιαία εξαναγκασμένη μεταβολή ακτινοβολίας που αναφέρθηκε παραπάνω και Ai είναι μία ταχεία προσαρμογή στην ατμόσφαιρα ή πάνω από το έδαφος που μεταβάλλει την προς την καθοδική καθαρή ροή ακτινοβολίας (net downward radiative flux) στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA) είτε θετικά είτε αρνητικά (Chung et al., 2015). Ουσιαστικά το ERF υπολογίζεται ως η διαφορά της καθαρής ροής ακτινοβολίας TOA (ΔF) ανάμεσα στο κάθε πείραμα διαταραχής και στο πείραμα ελέγχου ως:

$$ERF = \Delta F$$

Αυτό στη συνέχεια μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες. Έτσι, διασπάται σε ERF καθαρού ουρανού (clear sky) ERFcs και στην μεταβολή του Cloud Radiative Effect ΔCRE της επιρροής, δηλαδή, των νεφών στην ροή της ακτινοβολίας. Η εξίσωση γίνεται:

$$ERF = \Delta Fclear + \Delta(F - Fclear)$$
$$= ERFcs + \Delta CRE$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω κάνοντας χρήση μεταβλητών που όμως λαμβάνουν υπόψη τους και τα αεροζόλ. Παρόλο που τα αεροζόλ και ο τρόπος επιρροής τους στην ακτινοβολία δεν αποτελούν κομμάτι αυτής της εργασίας μια ανάλυση τους στην εξίσωση του ERF θα βοηθήσει στην κατανόηση του. Οι αλλαγές στη συγκέντρωση των αεροζόλ μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στο CRE (Cloud Radiative Effect) καθώς η σκέδαση και η απορρόφηση αεροζόλ συνήθως μειώνουν την αντίθεση στην ανάκλαση βραχέων κυμάτων (Short Wavelength) ανάμεσα σε καθαρό και νεφοσκεπή ουρανό, μια διαδικασία που ονομάζεται "cloudmasking" (Zelinka et al., 2014). Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή στο CRE από τις «καθαρές» (clean) εκπομπές ακτινοβολίας που αποκλείουν τις αλληλεπιδράσεις αεροζόλ-ακτινοβολίας (ari), όπως συνιστάται στον Ghan(2013):

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

$$ERF = \Delta(F - Fclean) + \Delta Fclear, clean + \Delta(Fclean - Fclear, clean)$$
$$= Aerosol\ IRF + ERFcs, clean + \Delta CRE'$$
$$= ERFcs' + \Delta CRE'$$

Ο δείκτης clean στην εξίσωση αναπαριστά μεταβλητές που αποκλείουν τις αλληλεπιδράσεις αεροζόλ-ακτινοβολίας. Το ERF διαχωρίζεται έτσι σε ένα στοιχείο λόγω αλλαγών στις ιδιότητες του νέφους ($\Delta CRE'$) και σε ένα στοιχείο ERF που δεν επηρεάζεται από τις ιδιότητες του νέφους (ERFcs'). Γίνεται ξεκάθαρο ότι το ERFcs' είναι το άθροισμα του IRF των αεροζόλ και οποιωνδήποτε αλλαγών μη αεροζόλ ουσιών στη ροή καθαρού ουρανού (Clear Sky, CS) και διαφέρει ελαφρώς από τα ERFcs, καθώς μπορεί να περιλαμβάνει την επίδραση της σκέδασης και της απορρόφησης αεροζόλ στον καθαρό αέρα παραπάνω ή κάτω από τα νέφη. Ένας αναγνωρισμένος περιορισμός αυτής της μεθόδου υπολογισμού είναι ότι οι διακυμάνσεις στην απορρόφηση και την εκπομπή αερίων μεταξύ καθαρού και νεφελοσκεπούς ουρανού οδηγούν επίσης σε φαινόμενα κάλυψης των νεφών (Soden et al., 2008). Αν και η μέθοδος του Ghan εξαλείφει την πολύ σημαντική επίδραση των αεροζόλ, η κάλυψη νεφών από το όζον (O_3) και τα αέρια του θερμοκηπίου μπορεί να επηρεάσει τον διαχωρισμό του ERF στα συστατικά CS (Clear Sky) και CRE (Cloud Radiative Effect).

Όσων αφορά τους προαναφερθέντες ρύπους και ομάδες ρύπων έχουν εξαχθεί τα παρακάτω συμπεράσματα. Τα αέρια του θερμοκηπίου σε γενικές γραμμές προκαλούν θέρμανση, δηλαδή θετικές τιμές ERF. Οπότε αναμένονται θετικές τιμές για τους εξεταζόμενους ρύπους.

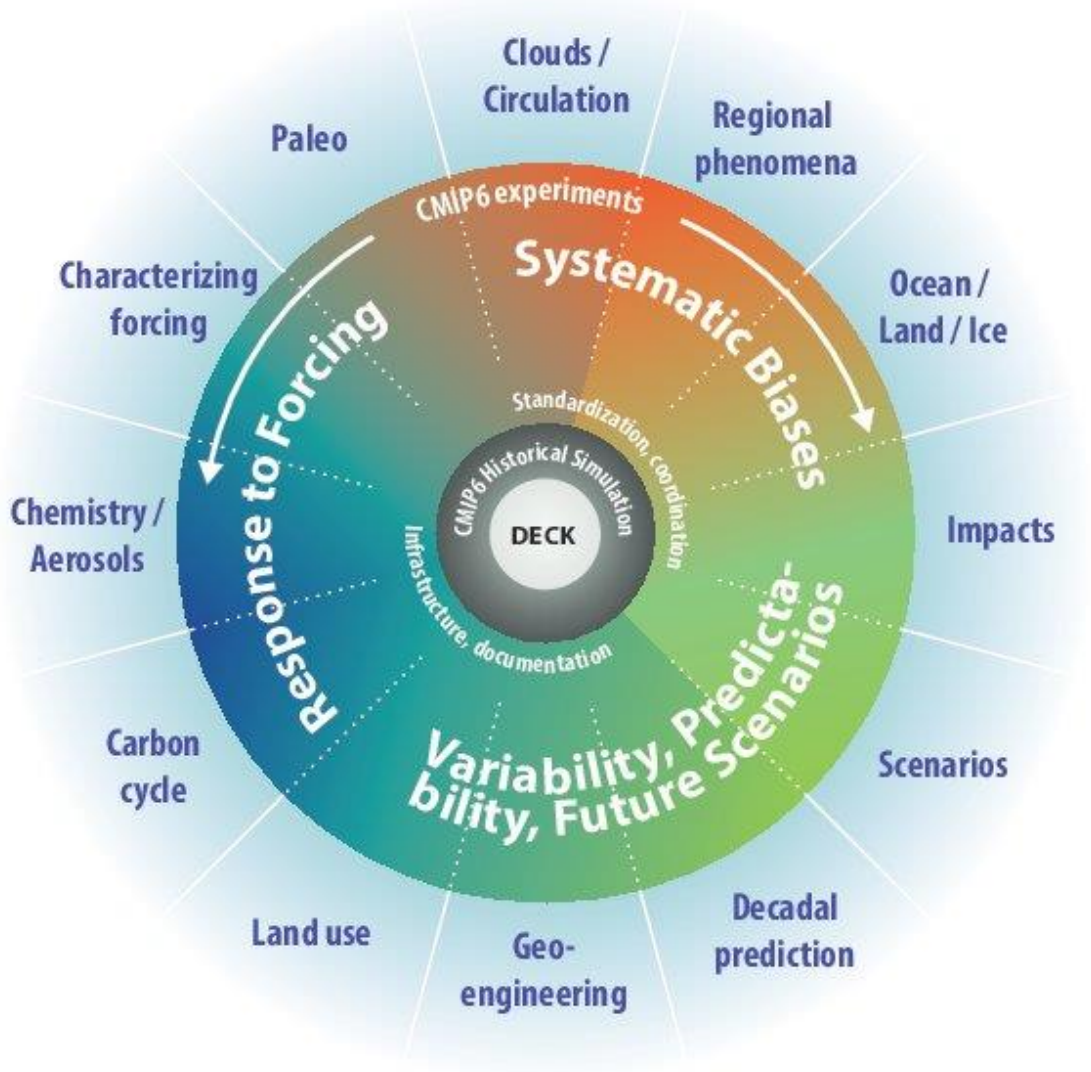
1.3 CMIP6 και UKESM1

Το μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί η παρούσα εργασία, το UKESM1, υπάγεται στο πρόγραμμα CMIP6 (Coupled Model Interpolation Project 6). Πρόκειται για μια συλλογική διεθνή κολεκτίβα κέντρων μοντελοποίησης του κλίματος που βρίσκεται στην έκτη φάση της. Το CMIP έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την κατανόησή μας για τις κλιματικές διαδικασίες, να αξιολογεί την απόδοση των κλιματικών μοντέλων και να παρέχει προβλέψεις για τη μελλοντική κλιματική αλλαγή (Eyring et al., 2016). Το CMIP6 στοχεύει όπως και η προηγούμενη έκδοση του το CMIP5 να ενισχύσει την κατανόηση μας για το κλιματικό σύστημα της Γης (Collins et al., 2017). Παρέχει ένα πλαίσιο για τη συντονισμένη χρήση κλιματικών μοντέλων για την προσομοίωση των

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

κλιματικών συνθηκών του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος (Eyring et al., 2016).



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση των λειτουργιών του προγράμματος CMIP/CMIP6. Ο εσωτερικός δακτύλιος περιλαμβάνει τυποποιημένες λειτουργίες όλων των πειραμάτων CMIP και της ιστορικής προσομοίωσης CMIP6. Ο μεσαίος δακτύλιος εμφανίζει θέματα που σχετίζονται ειδικά με το CMIP6 που αντιμετωπίζονται από τα MIP με έγκριση CMIP6, με τα θέματα MIP να εμφανίζονται στον εξωτερικό δακτύλιο (Eyring et al. 2016)

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί η παρούσα εργασία είναι το UKESM1 (UK Earth System Model 1) και πιο συγκεκριμένα η έκδοση UKESM1-0-LL. Το UKESM1-0-LL είναι ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από το Met Office του Ηνωμένου Βασιλείου σε συνεργασία με το Συμβούλιο Έρευνας Φυσικού Περιβάλλοντος (NERC) και άλλα ερευνητικά ιδρύματα. Είναι μια από τις συνεισφορές από το Ηνωμένο Βασίλειο στο CMIP6. Το UKESM1-0-LL είναι ένα πλήρως συζευγμένο μοντέλο γήινου συστήματος, που σημαίνει ότι προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, της επιφάνειας της γης και του θαλάσσιου πάγου. Περιλαμβάνει επίσης στοιχεία που αντιπροσωπεύουν τον κύκλο του άνθρακα, τους βιογεωχημικούς

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

κύκλους και άλλες διεργασίες του συστήματος της Γης (Thornhill et al., 2021. Έχει ανάλυση N96L85, ισοδύναμη με οριζόντια ανάλυση περίπου 135 km, με 85 υβριδικά επίπεδα ύψους που καλύπτουν υψόμετρο από την επιφάνεια μέχρι το ανώτερο ύψος του μοντέλου στα 85 km (O'Connor et al., 2022). Τα ατμοσφαιρικά στοιχεία του UKESM1-0-LL βασίζονται στο μοντέλο ατμόσφαιρας του Met Office Hadley Centre, το οποίο χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις καιρού και κλίματος. Περιλαμβάνει αναπαραστάσεις της ατμοσφαιρικής δυναμικής, της φυσικής και της χημείας. Η συνιστώσα του ωκεανού βασίζεται στο μοντέλο Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO). Το NEMO είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ωκεάνιο μοντέλο που προσομοιώνει την κυκλοφορία των ωκεανών, τη μεταφορά θερμότητας και τις βιογεωχημικές διεργασίες. Όσο για την παράμετρο της επιφάνειας της Γης το UKESM1-0-LL περιλαμβάνει μια αναπαράσταση της επιφάνειας της γης, η οποία προσομοιώνει διαδικασίες όπως η δυναμική της βλάστησης, οι αλληλεπιδράσεις γης-ατμόσφαιρας και ο κύκλος του άνθρακα. Το μοντέλο περιλαμβάνει στοιχεία για τον θαλάσσιο πάγο που αφορούν την προσομοίωση της κατανομής και των χαρακτηριστικών του θαλάσσιου πάγου σε απόκριση στις κλιματικές συνθήκες. Το UKESM1-0-LL ενσωματώνει αναπαραστάσεις βιογεωχημικών κύκλων, συμπεριλαμβανομένου του κύκλου του άνθρακα. Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές να μελετήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κλίματος και των βιογεωχημικών συστημάτων της Γης. Το UKESM1-0-LL είναι ένα από τα μοντέλα που συνεισφέρει δεδομένα στο CMIP6, παρέχοντας προσομοιώσεις για ιστορικές κλιματικές συνθήκες και μελλοντικά κλιματικά σενάρια. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για διάφορους ερευνητικούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της κατανόησης των παλαιότερων κλιματικών διακυμάνσεων, της αξιολόγησης της τρέχουσας κλιματικής κατάστασης και της προβολής μελλοντικών κλιματικών αλλαγών με βάση διαφορετικά σενάρια εκπομπών. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί πως όπως κάθε κλιματικό μοντέλο έτσι και το UKESM1-0—LL έχει τις αδυναμίες του. Τα κλιματικά μοντέλα, συμπεριλαμβανομένου του UKESM1, λειτουργούν σε πεπερασμένη χωρική και χρονική ανάλυση. Οι διεργασίες που συμβαίνουν σε μικρότερες κλίμακες ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύονται πλήρως, οδηγώντας σε πιθανές αποκλίσεις. Τα νέφη και τα αεροζόλ παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ισορροπία της ακτινοβολίας της Γης. Η ακριβής αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεών τους σε μοντέλα παραμένει πρόκληση και οι αβεβαιότητες στις ανατροφοδοτήσεις των νεφών συμβάλλουν σε αβεβαιότητες στις μελλοντικές κλιματικές προβλέψεις. Τέλος, οι προβλέψεις των μοντέλων για το κλίμα γενικά εξαρτώνται από μελλοντικά σενάρια εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, λοιπόν ρύπων και αεροζόλ. Οι αβεβαιότητες σε μελλοντικές ανθρώπινες δραστηριότητες και αποφάσεις πολιτικής μπορούν να εισάγουν αβεβαιότητες

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

στις προβολές μοντέλων. Στη συγκεκριμένη εργασία υπάρχει ένα μικρό ποσοστό αβεβαιότητας όσον αφορά δεδομένα του παρελθόντος.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιώντας δεδομένα του ανωτέρου μοντέλου και με τη χρήση του RStudio θα εξαχθούν χάρτες που θα παρέχουν το Effective Radiative Forcing (ERF) σε σχέση με ρύπους και ομάδες ρύπων που αναφέρθηκαν στην αρχή.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μεθοδολογία και δεδομένα

2.1 Γενικά

Σε αυτό το σημείο της εργασίας αξίζει να γίνει μια επαναληπτική αναφορά στον ορισμό του Effective Radiative Forcing (ERF) μια και αυτή είναι η βασική παράμετρος της εργασίας και η κατανόηση της κρίνεται απαραίτητη. Το Effective Radiative Forcing ή Αποτελεσματική Εξαναγκασμένη Μεταβολή της Έντασης της Ακτινοβολίας. Το Effective Radiative Forcing (ERF) είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται στην επιστήμη του κλίματος για να ποσοτικοποιήσει τη διαταραχή στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης που προκαλείται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως αλλαγές στις συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου ή στα αεροζόλ. Αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάτε από τη Γη και της εξερχόμενης ακτινοβολίας που εκπέμπεται πίσω στο διάστημα, λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές που προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες. Με απλούστερους όρους, το ERF ποσοτικοποιεί πόσο μεταβάλλεται ο ενεργειακός προϋπολογισμός της Γης λόγω εξωτερικών επιρροών, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στη θερμοκρασία και στο κλίμα της Γης. Οι θετικές τιμές ERF υποδεικνύουν μια επίδραση θέρμανσης, ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν μια επίδραση ψύξης. Το ERF είναι μια ουσιαστική μέτρηση για την κατανόηση των παραγόντων της κλιματικής αλλαγής και την αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών παραγόντων στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης

Το ίδιο το ERF υπολογίζεται από τη διαφορά στις ροές ακτινοβολίας TOA (Top Of the Atmosphere) μεταξύ ενός πειράματος διαταραχής (σε αυτή την εργασία piClim-CH_4, piClim-ghg, piClim-HC, piClim-N_2O ή piClim-O_3) και του πειράματος ελέγχου του (piClim-control) όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Αξίζει να τονισθεί εδώ ότι μια τυπική μέθοδος για τον υπολογισμό του ERF στις κλιματικές προσομοιώσεις για εξαναγκασμό (forcing) από αεροζόλ ή άλλους βραχύβιους κλιματικούς εξαναγκαστές (short-lived climate forcers, SLCFs) είναι με διόρθωση των θερμοκρασιών της επιφάνειας της θάλασσάς (Sea Surface Temperatures, SSTs) και της κάλυψης από θαλάσσιο πάγο (Sea Ice Cover, SIC) σε κλιματολογικές τιμές, επιτρέποντας όλα τα άλλα μέρη του συστήματος να ανταποκριθούν μέχρι να φτάσουν σε σταθερή κατάσταση (Hansen et al., 2005). Με αυτό τον τρόπο η κλιματική απόκριση σε ένα παράγοντα εξαναγκασμού σε σταθερές προσομοιώσεις SST είναι χωρίς καμία ωκεάνια απόκριση αλλαγής του κλίματος και ως εκ τούτου ασθενώς συνδέεται με τις διεργασίες ανατροφοδότησης μέσω αποκρίσεων στην επιφάνεια της γης (Myhre et al., 2013, 2017):

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

$$ERF = \Delta F$$

όπου το ΔF περιλαμβάνει το IRF καθώς και άλλες αλλαγές στις ροές ακτινοβολίας TOA λόγω γρήγορων προσαρμογών.

Οι τιμές του ERF εξάχθηκαν με τη χρήση του RStudio. Ο αναλυτικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται σε μορφή παραρτήματος στο τέλος της εργασίας. Αρχικά, όμως, κάποια πράγματα για το RStudio και για την γλώσσα προγραμματισμού R.

Η R είναι μια ανοιχτού κώδικα γλώσσα προγραμματισμού ειδικά σχεδιασμένη για στατιστικούς υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων. Δημιουργήθηκε από τους Ross Ihaka και Robert Gentleman στο Πανεπιστήμιο του Auckland της Νέας Ζηλανδίας, στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Έχει γίνει από τότε ένα ευρέως διαδεδομένο εργαλείο για στατιστικολόγους, επιστήμονες δεδομένων, ερευνητές και αναλυτές σε διάφορους κλάδους.

Το RStudio είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment, IDE) για τη γλώσσα R που διευκολύνει την ανάπτυξη έργων R. Αναπτύχθηκε από την RStudio, Inc.. Το RStudio παρέχει μια φιλική προς το χρήστη διεπαφή για κωδικοποίηση, ανάλυση δεδομένων και οπτικοποίηση.

Τα δεδομένα της εργασίας είναι αρχεία με κλιματικά δεδομένα. Ανήκουν σε δύο κατηγορίες: τα perturbation αρχεία και το control αρχείο. Τα πειράματα perturbation περιλαμβάνουν σκόπιμη εισαγωγή αλλαγών σε ορισμένες παραμέτρους ή εξωτερικές δυνάμεις στο μοντέλο. Το control πείραμα αντιπροσωπεύει τυπικά ένα βασικό σενάριο με σταθερές συνθήκες που προορίζονται να μοιάζουν με προ-βιομηχανική ή σταθερή κλιματική κατάσταση. Στο μοντέλο που μελετάται το UKESM1-0-LL το control πείραμα αναφέρεται σε προ-βιομηχανικές συνθήκες.

Τα πειράματα της εργασίας ακολουθούν το πρωτόκολλο RFMIP (Radiative Forcing Model IntercomparisonProject) το οποίο αναπτύσσει ένα συμπαγές δείγμα ατμοσφαιρικών συνθηκών (προφίλ πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας, συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου, επιφανειακές ιδιότητες) και οριακών συνθηκών μεταφοράς ακτινοβολίας (ηλιακή γεωμετρία και ηλιακή σταθερά) που, όταν σταθμίζονται κατάλληλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του παγκόσμιου μέσου όρου των ροών ακτινοβολίας με βάση το χρόνο (Pincus et al., 2016). Οι σημερινές ατμοσφαιρικές και επιφανειακές συνθήκες λαμβάνονται δειγματοληπτικά από την εκ νέου ανάλυση, ενώ οι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

συγκεντρώσεις αερίων θερμοκηπίου ακολουθούν το πρωτόκολλο CMIP6, χρησιμοποιώντας τιμές του 2014 που παρέχονται από τους Meinshausen et al. (2016). Τα πειράματα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι πέντε στον αριθμό και είναι το piClim-control που είναι το πείραμα που περιλαμβάνει τις προβιομηχανικές τιμές από το 1850 από τις οποίες όπως θα φανεί και παρακάτω θα επιλεχθεί η περίοδος τριανταετίας που είναι απαραίτητη για τους υπολογισμούς. Σε αυτό το πείραμα περιλαμβάνονται όλες οι ατμοσφαιρικές παράμετροι, οι συγκεντρώσεις ρύπων και λοιποί παράγοντες (π.χ. albedo επιφανείας, θερμοκρασία της θάλασσας) για την προβιομηχανική περίοδο. Ακολουθούν τα πειράματα διαταραχών που αναφέρονται στη σημερινή εποχή και συγκεκριμένα στο έτος 2023. Το πείραμα piClim-CH_4 που αναφέρεται στην συγκέντρωση του μεθανίου στη σημερινή (Present Day) εποχή και στις παραμέτρους της ακτινοβολίας που επηρεάζονται μόνο από τη μεταβολή της συγκέντρωσης του μεθανίου. Το πείραμα piClim-ghg που αναφέρεται στην συγκέντρωση όλων των αερίων του θερμοκηπίου στη σημερινή (Present Day) εποχή και στις παραμέτρους της ακτινοβολίας που επηρεάζονται από τη μεταβολή της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι από τις σημαντικότερες, αν όχι η σημαντικότερη, ομάδα ρύπων που επηρεάζει το κλίμα του πλανήτη μας και η μελέτη τους ως σύνολο κρίνεται απαραίτητη. Χρησιμοποιείται, επίσης, το πείραμα piClim-hc που περιλαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων του ισοζυγίου ακτινοβολίας του πλανήτη λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή μόνο των αλλογονανθράκων από τα προβιομηχανικά επίπεδα μέχρι σήμερα. Το πείραμα piClim-N_2O που αναφέρεται στις τιμές των παραμέτρων του ισοζυγίου ακτινοβολίας που προκαλούνται μόνο από τη μεταβολή της συγκέντρωσης του N_2O. Τέλος, χρησιμοποιείται και το πείραμα piClim-O_3 που αναφέρεται στο όζον, περιλαμβάνει τις συγκεντρώσεις και του τροποσφαιρικού και το στρατοσφαιρικού όζοντος και τις τιμές των παραμέτρων του ισοζυγίου ακτινοβολίας που προκαλούνται μόνο από τη μεταβολή της συγκέντρωσης του όζοντος.

2.2 Ανάλυση της εργασίας στο RStudio

Ακολουθεί βήμα βήμα η ανάλυση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στην αρχή του κώδικα φορτώνονται τέσσερις βιβλιοθήκες R που απαιτούνται για τον κώδικα. Αυτές οι βιβλιοθήκες αφορούν την παροχή λειτουργιών για εργασία με δεδομένα NetCDF (ncdf4) μιας και όλα τα δεδομένα είναι αρχεία NetCDF. Επίσης, βιβλιοθήκη για τον χειρισμό αρχείων png (png) μιας και η τελική μορφή των αρχείων θα είναι png εικόνες, μια βιβλιοθήκη για δημιουργία χαρτών (maps) αφού τα τελικά αποτελέσματα θα

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

είναι χάρτες και μια προσαρμοσμένη βιβλιοθήκη (REdaS) που δεν αποτελεί μέρος της εγκατάστασης βάσης R και εξυπηρετεί στην ανάπτυξη μελλοντικών εργασιών.

Παρακάτω δημιουργούνται λίστες για μοντέλα και πειράματα. Ορίζεται ένα πείραμα ελέγχου (e2) και ο κατάλογος εργασίας (wdir) όπου αποθηκεύονται τα δεδομένα.

Στη συνέχεια δημιουργούνται βρόχοι επανάληψης. Ο εξωτερικός βρόχος επαναλαμβάνεται πάνω από τα μοντέλα (arr_mod) και ο εσωτερικός βρόχος επαναλαμβάνεται πάνω από τα πειράματα (arr_exp). Μέσα στους βρόχους, ορίζονται ορισμένες παράμετροι για τα συγκεκριμένα μοντέλα (phy, grd, tms). Αυτές οι παράμετροι βρίσκονται στο όνομα κάθε αρχείου δεδομένων της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια δημιουργούνται μοτίβα ονομάτων αρχείου με βάση το μοντέλο, το πείραμα και άλλες παραμέτρους.

Μετά γίνετε το άνοιγμα των αρχείων NetCDF (rsdt_pert, rsut_pert, etc.) χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση nc_open από τη βιβλιοθήκη ncdf4. Αυτά τα αρχεία περιέχουν δεδομένα μοντέλου για το κλίμα. Ανοίγονται και τα δεδομένα perturbation και τα control δεδομένα. Εξάγονται συγκεκριμένες μεταβλητές από τα αρχεία NetCDF. Αυτές οι μεταβλητές αφορούν τον χρόνο (tim), το γεωγραφικό μήκος (lon) και το γεωγραφικό πλάτος (lat). Απαραιτήτως προσαρμόζονται οι τιμές γεωγραφικού μήκους ώστε να βρίσκονται στο εύρος από -180° έως 180°. Η προσπέραση αυτού του βήματος θα οδηγήσει στην εμφάνιση αποτελεσμάτων μόνο στον μισό χάρτη. Ακολουθεί κλείσιμο των αρχείων.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του Effective Radiative Forcing. Το ERF ορίζεται ως η διαφορά των perturbation πειραμάτων μείον το control πείραμα. Οπότε όπως φαίνεται και στον κώδικα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$erf = (rsdt_pert_30y - (rsut_pert_30y + rlut_pert_30y)) - (rsdt_ctrl_30y - (rsut_ctrl_30y + rlut_ctrl_30y))$$

Όπου rsdt είναι η παράμετρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, rlut είναι η παράμετρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φεύγει από τη Γη, rsut είναι η παράμετρος της γήινης ακτινοβολίας που φεύγει από τη Γη, το pert αναφέρεται σε παραμέτρους που ανήκουν στα perturbation πειράματα, το ctrl

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

αναφέρεται σε παραμέτρους που ανήκουν στο control πείραμα και το 30y αναφέρεται στην χρονική περίοδο 30 ετών.

Ακολουθεί δημιουργία dataframe και υπολογίζονται η μέση τιμή ERF για την περίοδο 30 ετών, η τυπική απόκλιση, οι συντελεστές βαρύτητας (σημαντικοί για την προσαρμογή των δεδομένων στο πλαίσιο του χάρτη) και τα χρονικά βήματα (n) που αναπαριστούν την περίοδο των πειραμάτων (360 μήνες). Πραγματοποιείται t-test σε επίπεδο σημαντικότητας 95%, για την εξαγωγή στατιστικώς σημαντικών αποτελεσμάτων.

Οι παρακάτω εντολές αναφέρονται στη δημιουργία γραφικής παράστασης των υπολογιζόμενων τιμών ERF. Ελέγχεται η στατιστική τους σημασία και αποθηκεύονται ως αρχείο png, Αναλυτική επεξήγηση της κάθε εντολής δίνεται σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

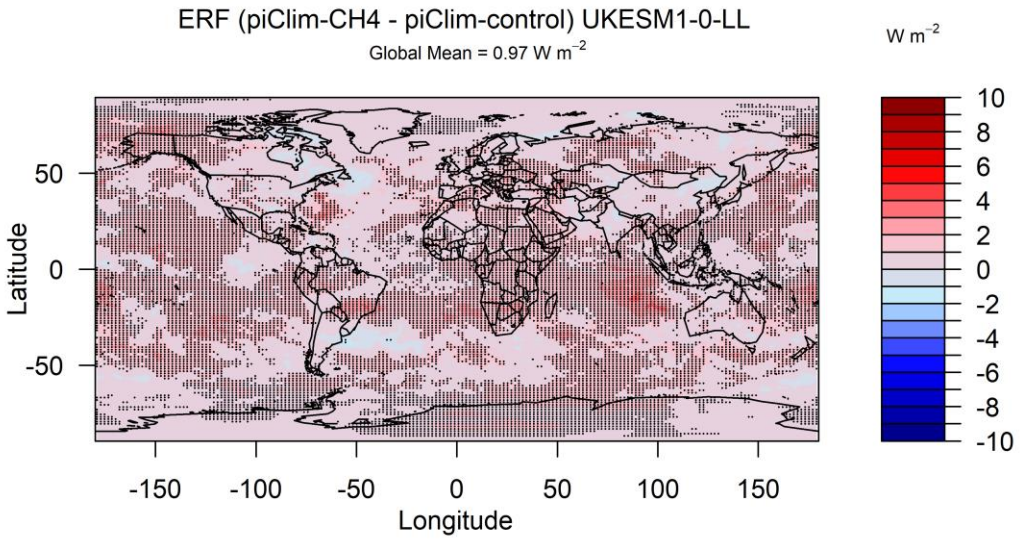
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Μεθάνιο

Ξεκινώντας από το μεθάνιο το ERF εμφανίζεται θετικό με τιμή 0,97 W/(m^2) που σημαίνει ότι τα ποσοστά μεθανίου έχουν αυξηθεί σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα και προκαλούν θέρμανση. Η κατανομή του μεθανίου είναι σχεδόν ομοιόμορφη.



Εικόνα 5: Χάρτης αποτελεσμάτων ERF για το μεθάνιο.

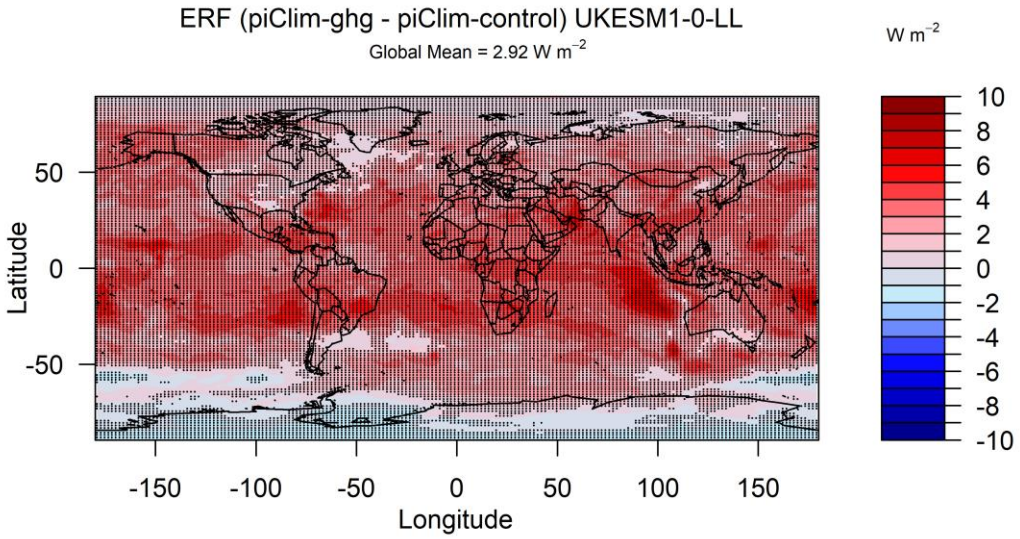
Στην Ευρώπη και στην Αφρική παρατηρείται αποκλειστικά θέρμανση λόγω του μεθανίου. Η Ασία παρουσιάζει πιο μεταβαλλόμενη εικόνα με την ύπαρξη μικρών περιοχών που εμφανίζουν ψύξη. Τέτοιες περιοχές παρατηρούνται σε ορεινές περιοχές του Ιράν, στο Δυτικό Καζακστάν, στην Ινδία Νότια των Ιμαλαίων, στη Βόρεια Κίνα και σε περιοχές της ανατολικής Σιβηρίας. Από την άλλη μεριά περιοχές με έντονη θέρμανση εμφανίζονται η Αραβική χερσόνησος, η Κασπία θάλασσα, η κεντρική Σιβηρία και το άκρο της απέναντι από την Αλάσκα και η νότια Κίνα. Περνώντας στη Αμερική έντονη θέρμανση παρατηρείται στην Αλάσκα και ειδικά βόρεια αυτής. Η θέρμανση συνεχίζεται έως τον κεντρικό Καναδά. Στον Δυτικό Καναδά και στο κόλπο Hudson εμφανίζεται ψύξη. Οι ΗΠΑ, η Κεντρική Αμερική και η Καραϊβική χαρακτηρίζονται από σποραδικές εμφανίσεις και θέρμανσης και ψύξης με τις εμφανίσεις θέρμανσης να υπερισχύουν. Στη Νότια Αμερική κυριαρχεί η θέρμανση με πολύ έντονες εμφανίσεις στη Νότια Βραζιλία και την Παραγουάη. Μια μικρή εμφάνιση ψύξης εμφανίζεται στην Ουρουγουάη και στην Αργεντινή. Στην Αυστραλία και στα νησιά του Ειρηνικού κυριαρχεί η θέρμανση, η οποία

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

είναι πιο έντονη στα νησιά ανατολικά της Αυστραλίας από τον 20° έως τον 10° παράλληλο.

Γενικά, στον Ειρηνικό ωκεανό παρατηρείται σχεδόν ομοιόμορφα θέρμανση με λίγες περιοχές ψύξης διασκορπισμένες στην έκταση του. Πιο πολλές εξάρσεις θέρμανσης εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα του. Ο Ατλαντικός, αντίθετα, έχει δύο ξεκάθαρες εμφανίσεις ψύξης, μία στο βόρειο και μία στο νότιο τμήμα του και οι δύο σε περιοχές εύκρατων γεωγραφικών πλατών. Μια έντονη θέρμανση εμφανίζεται προς τις ανατολικές ακτές των ΗΠΑ. Ο Ινδικός ωκεανός είναι μια περιοχή έντονης θέρμανσης, ειδικά στο ανατολικό του τμήμα. Ο βόρειος πόλος εμφανίζει περιοχές και θέρμανσης και ψύξης, ε θέρμανση βόρεια της Αλάσκας και ψύξης βόρεια του Καναδά και της Σιβηρίας. Η Ανταρκτική παρουσιάζεται σχετικά ουδέτερη με αχνές εμφανίσεις ψύξης.



Εικόνα 6: Χάρτης αποτελεσμάτων ERF για τα αέρια του θερμοκηπίου.

3.2 Αέρια του θερμοκηπίου

Περνώντας στα αέρια του θερμοκηπίου συνολικά εμφανίζεται μια πολύ έντονη θέρμανση με την υψηλή τιμή στο ERF στα 2,92 W/(m^2). Το αποτέλεσμα δηλώνει αύξηση της θερμοκρασίας που έχει προκληθεί από αύξηση του ποσοστού των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα αρκετά υψηλότερα σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Η θέρμανση είναι πολύ έντονη σε ολόκληρο το χάρτη και ο εντοπισμός περιοχών ψύξης είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Οι περιοχές γύρω από τον Ισημερινό και κυρίως στις -10° – -20° και 10° – 20° φαίνεται πως περιλαμβάνουν τα μέγιστα της θέρμανσης που

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

προκαλείται από την αύξηση του ποσοστού των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα.

Σε όλες τις ηπείρους κυριαρχεί η θέρμανση. Στην Ευρώπη το μέγιστο της θέρμανσης εμφανίζεται στην Βαλτική θάλασσα και στις Βαλτικές χώρες, ενώ μικρή εμφάνιση ψύξης διαφαίνεται στη Φινλανδία. Η Αφρική παρουσιάζει σε όλο το εύρος της πολύ υψηλές τιμές θέρμανσης. Το ίδιο πράγμα φαίνεται να συμβαίνει και στην Ασία με εντονότερη τη θέρμανση στην Αραβική χερσόνησο, το Ιράν και τη νοτιοανατολική Ασία και Ινδονησία. Μικρές «λίμνες» ψύξης εντοπίζονται σε βόρεια Κίνα και ανατολική Σιβηρία κάτι που έρχεται σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα από το μεθάνιο. Όπως φάνηκε και στο χάρτη του μεθανίου έτσι και εδώ από την Αλάσκα έως τον κεντρικό Καναδά υπάρχει έντονη θέρμανση. Στις ΗΠΑ υπάρχουν διασκορπισμένες θέσεις και με θέρμανση και με ψύξη με την θέρμανση να υπερισχύει. Νοτιότερα η Καραϊβική και η κεντρική Αμερική εμφανίζουν πολύ έντονη θέρμανση. Όπως και στο χάρτη του μεθανίου έτσι και εδώ στη νότια Αμερική η θέρμανση είναι πολύ έντονη στη νότια Βραζιλία. Θέρμανση εμφανίζεται και στην Ωκεανία με την μεγαλύτερη ένταση της στα νησιά βορειοανατολικά του Ειρηνικού.

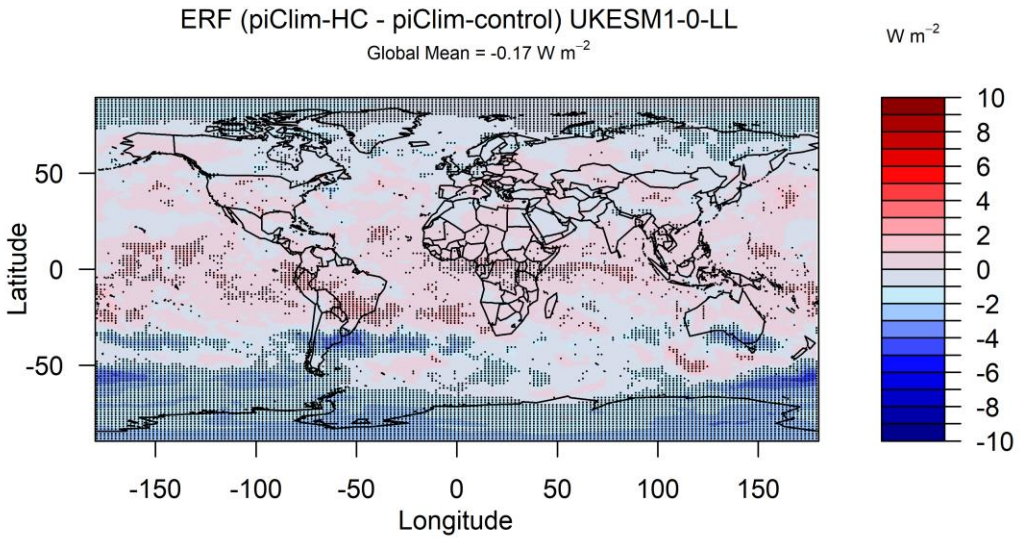
Ο Ειρηνικός ωκεανός παρουσιάζει θέρμανση με εξαίρεση κάποιες εμφανίσεις ψύξης στο νότιο τμήμα του κοντά στην Ανταρκτική. Ο Ατλαντικός παρουσιάζει θέρμανση σε όλη την έκταση του. Ο Ινδικός ωκεανός εμφανίζει θέρμανση και όπως και στο χάρτη του μεθανίου έτσι και εδώ το μέγιστο αυτής της θέρμανσης φαίνεται να βρίσκεται στον ανατολικό Ινδικό. Ο βόρειος πόλος εμφανίζεται σχετικά ουδέτερος με αχνές εμφανίσεις ψύξης. Η Ανταρκτική εμφανίζει έντονη ψύξη στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της.

3.3 Αλογονάνθρακες

Οι αλογονάνθρακες εμφανίζονται ως οι μοναδικοί ρύποι που παρήγαγαν αρνητικό αποτέλεσμα στο ERF με τιμή -0,17 W/(m^2). Στον χάρτη κυριαρχούν εμφανίσεις ψύξης με πολύ υψηλές τιμές στο νότιο ημισφαίριο και φαίνεται οι τιμές του ERF να μειώνονται από τον Ισημερινό προς την Ανταρκτική. Στο βόρειο ημισφαίριο εμφανίζεται ψύξη αλλά όχι τόσο έντονα όσο στο νότιο ημισφαίριο. Παρόλα αυτά υπάρχουν και εμφανίσεις θέρμανσης. Αυτές περιορίζονται στις περιοχές γύρω από τον Ισημερινό.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"



Εικόνα 7: Χάρτης αποτελεσμάτων ERF για τους αλογονάνθρακες.

Στην Ευρώπη η ψύξη εμφανίζεται πιο έντονα στη Σκανδιναβία και στη Βόρεια θάλασσα, ενώ εμφανίζεται και θέρμανση στις βαλτικές χώρες όπως εμφανίζεται και στο χάρτη των θερμοκηπικών αερίων. Η Αφρική εμφανίζει θέρμανση κυρίως στις Ισημερινές της χώρες, ενώ την πιο έντονη ψύξη την εμφανίζει στα όρη του Άτλαντα και στην δυτική Σαχάρα. Στο εύρος της Ασίας φαίνεται ισότιμος διαχωρισμός θέρμανσης και ψύξης με εξαίρεση τη Σιβηρία όπου κυριαρχεί αποκλειστικά η ψύξη. Άλλη σημαντική εμφάνιση ψύξης υπάρχει στα Ιμαλάια. Σε συμφωνία και με τα αποτελέσματα του χάρτη του μεθανίου εμφανίζονται θέσεις έντονης ψύξης στον ανατολικό Καναδά και ειδικά γύρω και εντός του κόλπου Hudson. Στις ΗΠΑ ο διαμοιρασμός θέρμανσης – ψύξης μοιάζει ισότιμος, ενώ στην κεντρική Αμερική κυριαρχεί η ψύξη. Δύο ενδιαφέρουσες θέσεις εμφανίζονται στη νότια Αμερική με τη νότια Βραζιλία να εμφανίζει για άλλη μια φορά έντονη θέρμανση και σε συμφωνία ε το χάρτη του μεθανίου η ψύξη είναι έντονη στην Αργεντινή και την Ουρουγουάη. Στην Ωκεανία οι πιο ψυχρές εμφανίσεις εντοπίζονται στη νότια Αυστραλία, ενώ θέρμανση εμφανίζεται στα νησιά βορειοανατολικά της Αυστραλίας.

Η ψύξη κυριαρχεί και στους ωκεανούς. Στον Ειρηνικό ωκεανό η θέρμανση περιορίζεται στον Ισημερινό, ενώ η ψύξη είναι πολύ έντονη στο νότιο εύκρατο τμήμα του και προς την Ανταρκτική. Στον Ατλαντικό κυριαρχεί πάλι η ψύξη με σποραδικές εμφανίσεις θέρμανσης στον Ισημερινό και περίπου στον 30°Νότιο παράλληλο. Ξεχωρίζει η έντονη «ψυχρή λίμνη» που συνεχίζει από την Αργεντινή. Στον Ινδικό ωκεανό η θέρμανση που εμφανιζόταν στο ανατολικό τμήμα μοιάζει να έχει μεταφερθεί νοτιότερα, ενώ άλλη περιοχή θέρμανσης διαφαίνεται νότια της Ινδίας. Ο βόρειος πόλος και η Ανταρκτική κατακλύζονται

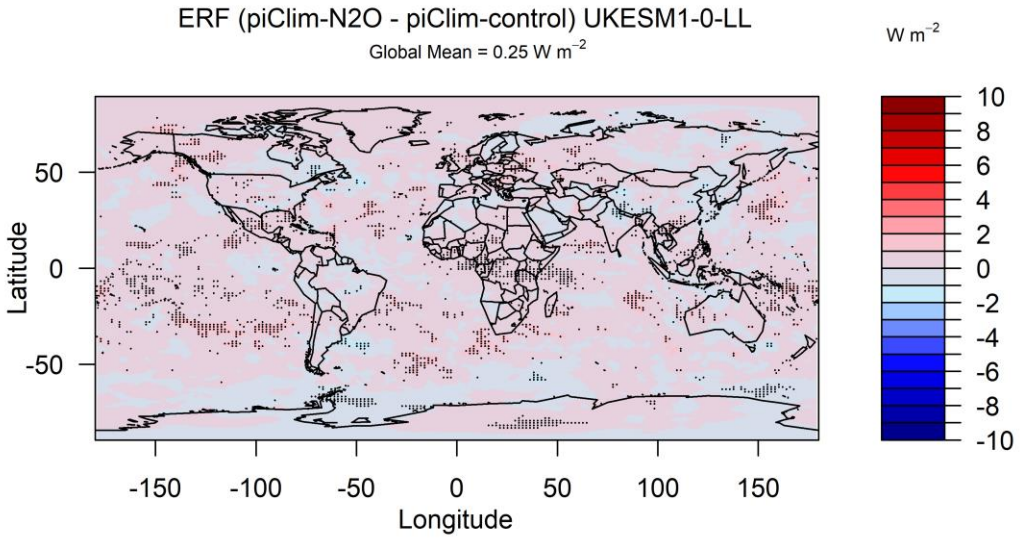
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

από αρνητικές τιμές με την Ανταρκτική να αγγίζει χαμηλότερες από την Αρκτική.

3.4 Υποξείδιο του αζώτου

Ακολουθεί το υποξείδιο του αζώτου, για το οποίο προέκυψε τιμή ERF=0,17W/(m^2). Αυτό σημαίνει ότι τα ποσοστά υποξειδίου του αζώτου έχουν αυξηθεί σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα με αποτέλεσμα να προκαλείται θέρμανση. Με εξαίρεση κάποιες ηπειρωτικές περιοχές που θα αναφερθούν στη συνέχεια, φαίνεται πως η θέρμανση είναι πιο έντονη στους ωκεανούς παρά στην ξηρά.



Εικόνα 8: Χάρτης αποτελεσμάτων ERF για το υποξείδιο του αζώτου.

Ξεκινώντας από τις ηπείρους και συγκεκριμένα από την Ευρώπη η πιο έντονη θέρμανση εμφανίζεται στη Βόρεια θάλασσα, στη δυτική Ευρώπη και στις Βαλτικές χώρες. Στην Αφρική η θέρμανση είναι πολύ αμυδρή ενώ εμφανίζεται και ψύξη στα όρη του Άτλαντα και στη δυτική Σαχάρα όπως είχε εμφανιστεί και στο χάρτη των αλογονανθράκων. Στην Ασία κυριαρχεί η ψύξη με χαρακτηριστικές θέσεις τα Ιμαλάια, τη βόρεια Κίνα, την Ιαπωνία και τη Σιβηρία. Θέσεις ισχυρής θέρμανσης παρουσιάζονται τα Ουράλια, το Καζακστάν και η νότια Κίνα. Στην Αμερικανική ήπειρο από βορρά προς νότο θέσεις θέρμανσης εμφανίζονται γύρω από την Αλάσκα και στον δυτικό Καναδά, στις ΗΠΑ, το Μεξικό και την Καραϊβική. Περιοχές έντονες ψύξης εμφανίζονται στον ανατολικό Καναδά, την κεντρική Βραζιλία και για άλλη μια φορά στην Αργεντινή και την Ουρουγουάη. Στην Αυστραλία και τα νησιά του Ειρηνικού

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

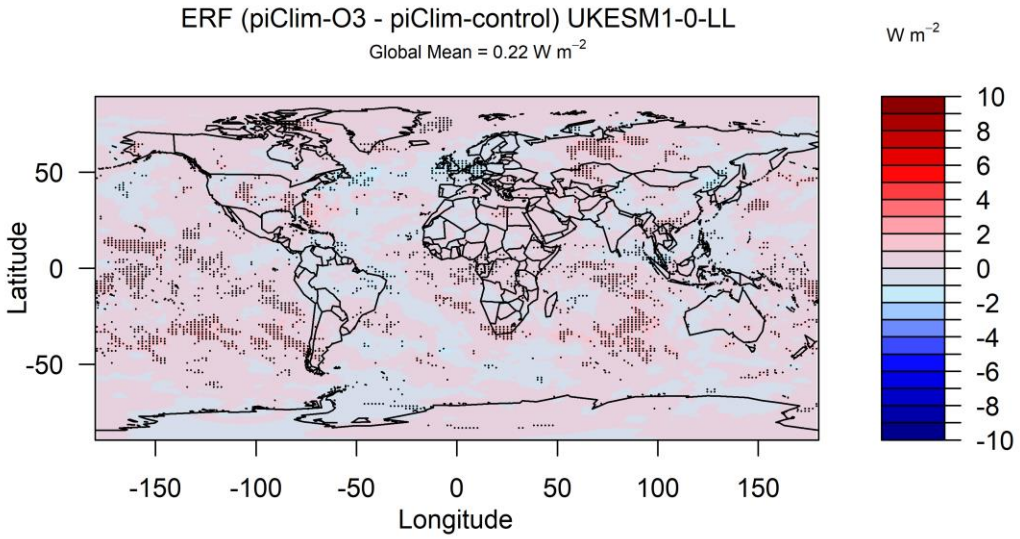
Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

κυριαρχεί η θέρμανση με λίγες μικρές εμφανίσεις ψύξης κυρίως στα νότια της Αυστραλίας και στα βόρεια προς τη Ινδονησία.

Όπως προαναφέρθηκε η θέρμανση κυριαρχεί στους ωκεανούς και ο Ειρηνικός δεν αποτελεί εξαίρεση. «Θερμές λίμνες» εμφανίζονται κυρίως στα νησιωτικά συμπλέγματα του Ισημερινού και στις δύο εύκρατες ζώνες. Παρόμοια είναι η εικόνα και στον Ατλαντικό με εξαίρεση μια ισχυρή εμφάνιση ψύξης κοντά στις ανατολικές ακτές των ΗΠΑ. Στον Ινδικό ωκεανό κυριαρχεί η θέρμανση ειδικά γύρω από τη Μαδαγασκάρη, στην Αραβική θάλασσα και δυτικά της Αυστραλίας. Στον βόρειο πόλο εμφανίζεται θέρμανση (βόρεια της Αλάσκας) και αμυδρή ψύξη (βόρεια του Καναδά και της Σιβηρίας). Στην Ανταρκτική κυριαρχεί η ψύξη.

3.5 Όζον

Συνεχίζοντας με τον τελευταίο ρύπο της εργασίας, το όζον, είναι ένας ακόμα ρύπος που δίνει αποτελέσματα θέρμανσης με τιμή ERF=0,22W/(m^2). Αυτό σημαίνει ότι τα ποσοστά του όζοντος έχουν παρουσιάσει μια μικρή αύξηση σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Με μια πρώτη ματιά οι περιοχές θέρμανσης και ψύξης φαίνονται ισάριθμες στην έκταση του χάρτη κάτι που φυσικά δεν είναι αληθές αφού λόγω του θετικού αποτελέσματος του ERF η θέρμανση υπερισχύει. Η ψύξη περιορίζεται στο κέντρο του χάρτη, δηλαδή στον Ατλαντικό ωκεανό και στην Ευρώπη. Φυσικά υπάρχουν και περαιτέρω θέσεις ψύξης αλλά δεν παρουσιάζουν την ισχύ των παραπάνω δύο περιοχών.



Εικόνα 9: Χάρτης αποτελεσμάτων ERF για το όζον.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
ΑΠΘ

Όπως προαναφέρθηκε στην Ευρώπη κυριαρχεί η ψύξη με μεγαλύτερη εντονότητα στην κεντρική Ευρώπη, Ηνωμένο Βασίλειο, Βόρεια θάλασσα και Σκανδιναβία. Υπάρχει και μια σημαντική θέση θέρμανσης στη Ρουμανία. Στην Αφρική εμφανίζονται θέσεις και θέρμανσης και ψύξης με την θέρμανση να υπερισχύει και να φτάνει τις μεγαλύτερες τιμές της στην Βόρεια Σαχάρα και στη Νότια Αφρική. Στην Ασία η κατάσταση είναι πιο μοιρασμένη. Οι θερμότερες περιοχές φαίνεται να είναι η Σιβηρία, το Καζακστάν, κάποιες μεμονωμένες θέσεις στο Ιράν, ο Καύκασος, η Τουρκία και η νότια Κίνα. Οι ψυχρότερες περιοχές φαίνεται να είναι η βόρεια και δυτική Κίνα, η Ινδία και η νοτιοανατολική Ασία και Ινδονησία. Στην Αμερικανική ήπειρο θέσεις θέρμανσης παρουσιάζονται στην Αλάσκα, τον βορειοανατολικό και δυτικό Καναδά, τις ΗΠΑ και το νότιο τμήμα της Νότιας Αμερικής. Στην Ωκεανία κυριαρχεί η θέρμανση, ιδιαίτερα στα νησιά βορειοανατολικά της Αυστραλίας.

Στο μεγαλύτερο μέρος του Ειρηνικού ωκεανού κυριαρχεί η θέρμανση με μικρές σποραδικές θέσεις ψύξης με εξαίρεση μια έντονη ψύξη στο βόρειο τμήμα του. Στον Ατλαντικό ωκεανό κυριαρχεί η ψύξη με ιδιαίτερα χαμηλές τιμές στο βόρειο τμήμα του. Σημαντικές θέσεις θέρμανσης εμφανίζονται ανατολικά των ΗΠΑ και δυτικά της Αφρικής στο νότιο τμήμα του. Στον Ινδικό ωκεανό κυριαρχεί η θέρμανση με εξαίρεση κάποιες σημαντικές θέσεις όπου εμφανίζεται ψύξη στο βόρειο κομμάτι και ανατολικά της Μαδαγασκάρης. Στην υπόλοιπη έκταση του εμφανίζεται θέρμανση. Τέλος, η κατάσταση στους πόλους μοιάζει μοιρασμένη με θέσεις και ψύξης και θέρμανσης.

3.6 Περιοχές ενδιαφέροντος

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα γίνεται ξεκάθαρο πως κάποιες περιοχές εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά σε τουλάχιστον τέσσερις από τους πέντε χάρτες. Έτσι, οι Βαλτικές χώρες παρουσιάζουν τακτικά αποτελέσματα θέρμανσης. Η Σιβηρία παρουσιάζει μικτά αποτελέσματα με τις θερμότερες εμφανίσεις από τα Ουράλια όρη έως την κεντρική Σιβηρία, ενώ η ανατολική παρουσιάζει ψυχρές τιμές. Το Καζακστάν εμφανίζει θέρμανση συνεχώς. Η Κίνα παρουσιάζει και θέσεις θέρμανσης και θέσεις ψύξης με την θέρμανση να εμφανίζεται κυρίως στο κεντρικό και στο νοτιοανατολικό τμήμα, ενώ το βορειοανατολικό τμήμα εμφανίζει ψύξη. Ο Καναδάς εμφανίζεται διαχωρισμένος με το ανατολικό κομμάτι να παρουσιάζει ψύξη και το δυτικό θέρμανση. Το βόρειο τμήμα της Αργεντινής και η Ουρουγουάη εμφανίζουν ψύξη, ενώ είναι χαρακτηριστική η θέρμανση που εμφανίζεται στους χάρτες του μεθανίου, των θερμοκηπικών αερίων και των αλογονανθράκων στη νότια Βραζιλία. Η Αυστραλία τείνει να παρουσιάζει θέρμανση στα βόρεια και ψύξη

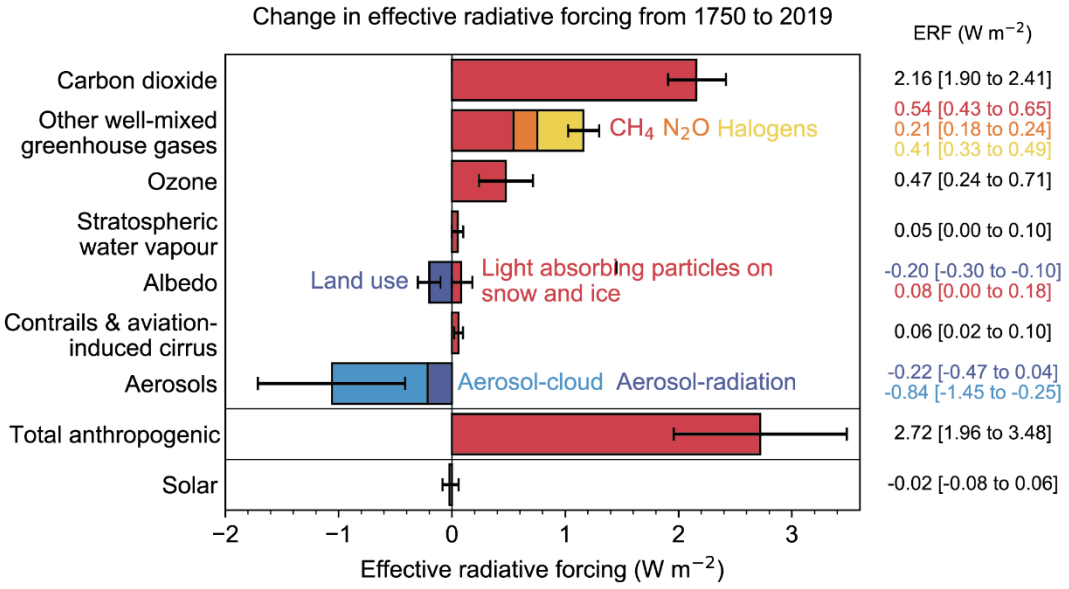
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

στα νότια. Τα νησιωτικά συμπλέγματα του Ειρηνικού βορειοανατολικά της Αυστραλίας παρουσιάζουν θέρμανση τακτικά, όπως και ο Ειρηνικός ωκεανός, γενικά, στη ζώνη του Ισημερινού. Σε όλους τους χάρτες εκτός των αλογονανθράκων οι ανατολικές ακτές των ΗΠΑ στον βόρειο Ατλαντικό παρουσιάζουν θέρμανση. Παρομοίως, σε όλους τους χάρτες εκτός των αλογονανθράκων θέρμανση παρουσιάζει και ο ανατολικός Ινδικός ωκεανός. Τέλος, η Ανταρκτική εμφανίζεται πλήρως σε ψύξη ή με σποραδικές εμφανίσεις ψύξης σε όλους τους χάρτες.

3.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων ERF με τα αποτελέσματα του IPCC και με αυτά άλλων εργασιών

Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε αυτή την εργασία με τα αποτελέσματα για το Effective Radiative Forcing που προέκυψαν από έρευνα του IPCC (Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή, Intergovernmental Panel on Climate Change) το 2021. Στην εικόνα 10 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα που περιλαμβάνει τις τιμές ERF όπως υπολογίστηκαν από το IPCC. Τα αποτελέσματα προέρχονται από την έκτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (Assessment Report 6, AR6). Οι Εκθέσεις Αξιολόγησης της IPCC είναι σημαντικές περιλήψεις της τρέχουσας κατάστασης της επιστημονικής γνώσης για την κλιματική αλλαγή. Αυτές οι εκθέσεις περιλαμβάνουν τη συνεργασία χιλιάδων επιστημόνων από όλο τον κόσμο και χρησιμοποιούνται ευρέως από φορείς χάραξης πολιτικής, κυβερνήσεις και ερευνητές για την ενημέρωση των αποφάσεων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή.



Εικόνα 10: Αλλαγή στο ERF από το 1750 έως το 2019 με τη συνεισφορά παραγόντων εξαναγκασμού (διοξείδιο του άνθρακα, άλλα καλά αναμεμειγμένα αέρια θερμοκηπίου (Well-Mixed Green House Gases, WMGHGs), όζον, υδρατμοί της στρατόσφαιρας, επιφανειακό albedo, contrails και αεροζόλ). Οι συμπαγείς ράβδοι

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

αντιπροσωπεύουν τις καλύτερες εκτιμήσεις και πολύ πιθανά (5–95%) εύρη δίνονται από γραμμές σφάλματος. Τα WMGHG εκτός του CO2 αναλύονται περαιτέρω σε συνεισφορές από μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και αλογονωμένες ενώσεις. Το επιφανειακό albedo διασπάται σε αλλαγές χρήσης γης και σωματίδια που απορροφούν το φως στο χιόνι και τον πάγο. Τα αεροζόλ αναλύονται σε συνεισφορές από αλληλεπιδράσεις αερολύματος-νέφους (ERFaci) και αλληλεπιδράσεις αερολύματος-ακτινοβολίας (ERFari).

Τα αποτελέσματα του IPCC εκ πρώτης όψεως μοιάζουν να διαφέρουν από τα αποτελέσματα που παρήχθησαν στην παρούσα εργασία μέσω του RStudio. Ξεκινώντας από το μεθάνιο η έρευνα του IPCC οδήγησε σε αποτέλεσμα 0,54W/(m^2), εν αντιθέσει με το αποτέλεσμα 0,97W/(m^2) που προέκυψε από το RStudio, αποτέλεσμα αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του IPCC. Μία τέτοια διαφορά στα αποτελέσματα μπορεί να αποδοθεί σε πιθανή χρήση διαφορετικού κλιματικού μοντέλου. Το IPCC χρησιμοποιεί ποικιλία μοντέλων σε αντίθεση με το ένα μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε εδώ. Η μεγαλύτερη τιμή του ERF για το μεθάνιο που παρουσιάζεται στην συγκεκριμένη εργασία είναι, επίσης, πιθανό να οφείλεται σε έμμεσες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη από το μοντέλο UKESM1. Τέτοιοι παράγοντες περιλαμβάνουν τις χημικές αλληλεπιδράσεις του μεθανίου στην ατμόσφαιρα, όπως την οξείδωση του, αλληλεπιδράσεις με τα αεροζόλ και αποκρίσεις του βιογεωχημικού του κύκλου. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμφωνούν και με αποτελέσματα άλλων εργασιών (π.χ. O'Connor et al., 2020). Οι εκτιμήσεις του άμεσου ERF για το CH_4 στη σημερινή εποχή (Present Day) από προσομοιώσεις μοντέλων της ομάδας HadGEM2 (Andrews, 2014) και η ενημερωμένη έκφραση του Radiative Forcing για το CH_4 με βάση υπολογισμούς γραμμή προς γραμμή (line-by-line) (Etminan et al., 2016) είναι της τάξης των 0,50-0,56 W/(m^2). Η μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται στο γεγονός ότι δεν λήφθηκαν υπόψη έμμεσες παράμετροι μεταβολής της συγκέντρωσης του μεθανίου.

Όσον αφορά το υποξείδιο του αζώτου τα αποτελέσματα του IPCC εμφανίζουν την τιμή 0,21 W/(m^2) με ένα εύρος τιμών 0,18 – 0,24 W/(m^2). Τα αποτελέσματα του IPCC διαφέρουν ελάχιστα από την τιμή του ERF που εξάχθηκε στην παρούσα εργασία από το RStudio, η οποία ήταν 0,25 W/(m^2). Η διαφορά είναι πολύ μικρή για να ληφθεί υπόψη και μπορεί να οφείλεται σε στατιστικό σφάλμα του μοντέλου. Συγκριτικά, το καθαρό ERF που υπολογίζεται εδώ (0,21 W/(m^2)) είναι ελαφρώς χαμηλότερο από τις τιμές SARF 0,17 ± 0,03 W/(m^2) από το AR5 για το 2011 (Myhre et al., 2013a) και του 0,18 W/m^2 για το 2014 με βάση την ενημερωμένη έκφραση από τους Etminan et al. (2016). Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην επίδραση των προσαρμογών που σχετίζονται με την αλλαγή του N_2O που δεν θεωρήθηκαν ως μέρος του SARF στο AR5 (Myhre et al., 2013a) ή στους Etminan et al. (2016), συμπεριλαμβανομένης της εξάντλησης του O_3 και των γρήγορων προσαρμογών του νέφους.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Προχωρώντας στο όζον, στην εικόνα 10 φαίνεται η τιμή που εξάχθηκε από το AR6 του IPCC ως 0,47 W/(m^2). Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται για άλλη μια φορά σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας στην οποία του ERF του όζοντος προέκυψε ίσο με 0,22 W/(m^2). Παρόλο που η διαφορά φαίνεται μεγάλη παρατηρώντας την εικόνα 10 γίνεται προφανές το μεγάλο εύρος των τιμών του ERF για το όζον, ένα εύρος 0,24 – 0,71 W/(m^2). Λαμβάνοντας αυτό υπόψη το ERF που εξάχθηκε από αυτή την εργασία είναι οριακά κάτω από το εύρος του IPCC. Αυτό μπορεί και πάλι να οφείλεται σε στατιστικό σφάλμα του μοντέλου ή σε έμμεσους παράγοντες που αφορούν χημικές διαδικασίες στην ατμόσφαιρα που λαμβάνονται υπόψη από το μοντέλο UKESM1.

Όσο για τους αλογονάνθρακες και το σύνολο των θερμοκηπικών αερίων φαίνεται να μην υπάρχει συγκεκριμένο αποτέλεσμα ERF στην AR6 του IPCC. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συγκριθούν με αποτελέσματα από άλλες εργασίες. Ξεκινώντας από τα αέρια του θερμοκηπίου δίνεται από τους O'Connor et al. (2020) μία τιμή ERF = 2,89 ± 0,04 W/(m^2). Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται πως συμφωνεί ικανοποιητικά με το αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας στα 2,92 W/(m^2). Σύμφωνα με τους O'Connor et al. (2020) αυτή η υψηλή τιμή οφείλεται κυρίως σε μια υψηλή τιμή της συνιστώσας των μεγάλων μηκών κύματος σε συνθήκες καθαρού ουρανού (3.08 W/(m^2)). Το ERF για τα αέρια του θερμοκηπίου που προέκυψε (2,92 W/(m^2)) είναι χαμηλότερο από το ERF των 3,09 W/m^2 που εκτιμάται από το φυσικό μοντέλο HadGEM3-GC3.1 (Andrews et al., 2019). Μέρος αυτής της ασυμφωνίας μπορεί να οφείλεται στη συμπερίληψη στο UKESM1 έμμεσων εξαναγκασμών (indirect forcings) από O3 ή/και αεροζόλ από ουσίες που καταστρέφουν το O3 (Morgenstern et al., 2020).

Κλείνοντας με τους αλογονάνθρακες αναφέρεται ότι το αποτέλεσμα του ERF αυτής της εργασίας όπως δόθηκε στην ενότητα 3.3 είναι -0,17 W/(m^2). Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των O'Connor et al. (2020) που κατέληξαν σε μία τιμή -0.33 ± 0.04 W/(m^2) με το αρνητικό πρόσημο, ωστόσο, να παραμένει δίνοντας έμφαση στην κατεύθυνση της ψύξης που προκαλείται από τους αλογονάνθρακες και πιθανώς οφείλεται στον ρόλο ορισμένων αλογονανθράκων στην καταστροφή του όζοντος της στρατόσφαιρας (Morgenstrn et al., 2020). Η διαφορά στα αποτελέσματα πιθανώς οφείλεται στην χρονική διαφορά διεξαγωγής των εργασιών. Τα δεδομένα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούν δεδομένα του έτους 2023 που μπορεί να είναι ελαφρώς τροποποιημένα από αυτά των O'Connor rt al. (2020).

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παράμετρος του Effective Radiative Forcing καθίσταται σημαντική παράμετρος μελέτης του εξαναγκασμού του ισοζυγίου ακτινοβολίας (και του ενεργειακού ισοζυγίου) λόγω διαταραχών στη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα, περιλαμβάνοντας ταχείες προσαρμογές που σχετίζονται με τα νέφη και με την υγρασία. Με τη χρήση του RStudio παρήχθησαν αποτελέσματα του ERF για κάποιους ρύπους και συγκεκριμένα για το μεθάνιο, τα θερμοκηπικά αέρια, τους αλογονάνθρακες, το υποξείδιο του αζώτου και το όζον. Τα δεδομένα προέρχονται από το μοντέλο UKESM1-0-LL του προγράμματος CMIP6.

Γενικά, οι πλειοψηφία των αποτελεσμάτων εμφανίζει θέρμανση στα περισσότερα μέρη του πλανήτη με εξαίρεση λίγες περιοχές που εμφανίζουν σταθερά μια μικρή ψύξη. Τα αποτελέσματα του ERF κυμαίνονται από αρνητική τιμή για τους αλογονάνθρακες στα -0,17 W/m^2 έως την μέγιστη θετική τιμή στα 2,92 W/m^2 για τα αέρια του θερμοκηπίου στο σύνολο τους. Τα ERF του μεθανίου, του υποξειδίου του αζώτου και του όζοντος κινούνται προς την κατεύθυνση της θέρμανσης με τιμές 0,97 W/(m^2), 0,25 W/(m^2) και 0,22 (W/m^2) αντίστοιχα. Περαιτέρω μελέτη θα ήταν προτιμητέα ως συνέχεια αυτής της εργασίας για την μελέτη της επιρροής αυτών των αποτελεσμάτων στις περιοχές που τονίστηκαν στην ενότητα 3.6.

Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν συγκρίθηκαν με άλλα αποτελέσματα ERF. Συγκεκριμένα, περιλήφθηκε σύγκριση με τα αποτελέσματα της έκτης Έκθεσης Αξιολόγησης (AR6) του IPCC, αλλά και με άλλες εργασίες που βασίστηκαν στη χρήση του ίδιου μοντέλου με την παρούσα εργασία, δηλαδή του UKESM1, αλλά και με εργασίες που βασίστηκαν στο μοντέλο HadGEM3-GC3.1. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φάνηκαν ικανοποιητικά για το ERF του μεθανίου, των θερμοκηπικών αερίων και του υποξειδίου του αζώτου και λιγότερο για το όζον και τους αλογονάνθρακες.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Λαζαρίδης Μ.,(2020), *Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας 2η Έκδοση*, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

Abernethy, S., O'Connor, F. M., Jones, C. D., & Jackson, R. B. (2021). Methane removal and the proportional reductions in surface temperature and ozone. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 379(2210), 20210104. https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0104

Allen, M. R., Shine, K. P., Fuglestvedt, J. S., Millar, R. J., Cain, M., Frame, D. J., & Macey, A. H. (2018). A solution to the misrepresenta-tions of CO2-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. npj Climate and Atmospheric Science, 1, 16. https://doi.org/10.1038/s41612-018-0026-8

Allen, R. J., Horowitz, L. W., Naik, V., Oshima, N., O'Connor, F. M., Turnock, S., et al. (2021). Significant climate benefits from near-term climate forcer mitigation in spite of aerosol reductions. Environmental Research Letters, 16, 034010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe06b

Andrews, T.: Using an AGCM to Diagnose Historical Effective Radiative Forcing and Mechanisms of Recent Decadal Climate Change, J. Climate, DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00336.1, 2014.

Andrews, T., M. B. Andrews, A. Bodas-Salcedo, G. S. Jones, T. Kulhbrodt, J. Manners, M. B. Menary, J. Ridley, M. A. Ringer,A. A. Sellar, C. A. Senior, and Y. Tang: Forcings, feedbacks and climate sensitivity in HadGEM3-GC3.1 and UKESM1, J.Adv. Modeling Earth Sys., Submitted, 2019.

Andrews, T., and P. M. Forster: Energy budget constraints on historical radiative forcing, Nature Climate Change, Submitted, 2019.

Banerjee, A., A. T. Archibald, A. Maycock, P. Telford, N. L. Abraham, X. Yang, P. Braesicke, και J. Pyle. 'Lightning NO_X, a Key Chemistry–Climate Interaction: Impacts of Future Climate Change and Consequences for Tropospheric Oxidising Capacity'. Preprint. Gases/Atmospheric Modelling/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions), 31 Μάρτιος 2014. https://doi.org/10.5194/acpd-14-8753-2014.

Butler, James H, Mark Battle, Michael L Bender, Stephen A Montzka, Andrew D Clarke, και Eric S Saltzman. 'A Record of Atmospheric Halocarbons during the Twentieth Century from Polar ®rn Air' 399 (1999).

Chung, E.-S., and B. J. Soden: An assessment of methods for computing radiative forcing in climate models, Environ. Res.Lett., 10, 074004, 2015.

Clifton O E, Fiore A M, Correa G, Horowitz L W and Naik V 2014 Twenty-first century reversal of the surface ozone seasonal cycle over the northeastern United States Geophys. Res. Lett. 41 7343–50.

Collins, William J., Jean-François Lamarque, Michael Schulz, Olivier Boucher, Veronika Eyring, Michaela I. Hegglin, Amanda Maycock, κ.ά. 'AerChemMIP: Quantifying the

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Effects of Chemistry and Aerosols in CMIP6'. *Geoscientific Model Development* 10, τχ. 2 (9 Φεβρουάριος 2017): 585–607. https://doi.org/10.5194/gmd-10-585-2017.

Etminan, M., G. Myhre, E. J. Highwood, and K. P. Shine: Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: Asignificant revision of the methane radiative forcing, Geophys. Res. Lett., 43, 12614–12623, doi:10.1002/2016GL071930,2016.

Eyring, Veronika, Sandrine Bony, Gerald A. Meehl, Catherine A. Senior, Bjorn Stevens, Ronald J. Stouffer, και Karl E. Taylor. 'Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization'. *Geoscientific Model Development* 9, τχ. 5 (26 Μάιος 2016): 1937–58. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016.

Forster, P. M., T. Richardson, A. C. Maycock, C. J. Smith, B. H. Samset, G. Myhre, T. Andrews, R. Pincus, and M. Schulz:Recommendations for diagnosing effective radiative forcing from climate models for CMIP6, J. Geophys. Res.Atmos.,121,12460–12475, doi:10.1002/2016JD025320, 2016.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.

Fu, Yu, και Hong Liao. 'Biogenic Isoprene Emissions over China: Sensitivity to the CO_2 Inhibition Effect'. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 9, τχ. 4 (3 Ιούλιος 2016): 277–84. https://doi.org/10.1080/16742834.2016.1187555.

Garrido-Perez J M, Ordóñez C, García-Herrera R and Barriopedro D 2018 Air stagnation in Europe: spatiotemporal variability and impact on air quality Sci. Total Environ. 645 1238–52.

Ghan, S. J.: Technical Note: Estimating aerosol effects on cloud radiative forcing, Atmos. Chem. Phys., 13, 9971-9974,https://doi.org/10.5194/acp-13-9971-2013, 2013.

Ghimire, Uttam, Narayan Kumar Shrestha, Asim Biswas, Claudia Wagner-Riddle, Wanhong Yang, Shiv Prasher, Ramesh Rudra, και Prasad Daggupati. 'A Review of Ongoing Advancements in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for Nitrous Oxide (N_2O) Modeling'. *Atmosphere* 11, τχ. 5 (29 Απρίλιος 2020): 450. https://doi.org/10.3390/atmos11050450

Hansen, J., Sato, M., and R. Ruedy: Radiative Forcing and Climate Response, J. Geophys. Res., 102, D6, 6831-6864, 1997.

Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G. A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, N. Bell, B.Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, M. Kelley,N. Kiang, D. Koch, J. Lean, J. Lerner, K. Lo, S. Menon, R. Miller, P. Minnis, T.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, N. Tausnev, D. Thresher, B. Wielicki, T. Wong, M. Yao, and S. Zhang:Efficacy of climate forcings, J. Geophys. Res., 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005.

Hollaway M J, Arnold S R, Collins W J, Folberth G and Rap A 2017 Sensitivity ofmidnineteenth century tropospheric ozone to atmospheric chemistry-vegetation interactions J. Geophys. Res. 122 2452–73.

Jiang, Zhe, Brian C. McDonald, Helen Worden, John R. Worden, Kazuyuki Miyazaki, Zhen Qu, Daven K. Henze, κ.ά. 'Unexpected Slowdown of US Pollutant Emission Reduction in the Past Decade'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, τχ. 20 (15 Μάιος 2018): 5099–5104. https://doi.org/10.1073/pnas.1801191115.

Jing P, Lu Z and Steiner A L 2017 The ozone-climate penalty in the Midwestern US Atmos. Environ. 170 130–42.

Lehnert, N.; Coruzzi, G.; Hegg, E.; Seefeldt, L.; Stein, L. NSF workshop report: Feeding the world in the21st century: Grand challenges in the nitrogen cycle. 2017.

Lin, Meiyun, Larry W. Horowitz, Richard Payton, Arlene M. Fiore, και Gail Tonnesen. 'US Surface Ozone Trends and Extremes from 1980–2014: Quantifying the Roles of Rising Asian Emissions, Domestic Controls, Wildfires, and Climate'. Preprint. Gases/Atmospheric Modelling/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions), 7 Δεκέμβριος 2016. https://doi.org/10.5194/acp-2016-1093.

Lin M, Horowitz L W, Xie Y, Paulot F, Malyshev S, Shevliakova E and Pilegaard K 2020 Vegetation feedbacks during drought exacerbate ozone air pollution extremes in Europe Nat. Clim. Change 10 444–51.

Ma, Mingchen, Yang Gao, Yuhang Wang, Shaoqing Zhang, L. Ruby Leung, Cheng Liu, Shuxiao Wang, κ.ά. 'Substantial Ozone Enhancement over the North China Plain from Increased Biogenic Emissions Due to Heat Waves and Land Cover in Summer 2017'. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19, τχ. 19 (2 Οκτώβριος 2019): 12195–207. https://doi.org/10.5194/acp-19-12195-2019.

Morgenstern, Olaf, Fiona M. O'Connor, Ben T. Johnson, Guang Zeng, Jane P. Mulcahy, Jonny Williams, João Teixeira, κ.ά. 'Reappraisal of the Climate Impacts of Ozone-Depleting Substances'. *Geophysical Research Letters* 47, τχ. 20 (28 Οκτώβριος 2020): e2020GL088295. https://doi.org/10.1029/2020GL088295.

Murray, Lee T. 'Lightning NO x and Impacts on Air Quality'. *Current Pollution Reports* 2, τχ. 2 (Ιούνιος 2016): 115–33. https://doi.org/10.1007/s40726-016-0031-7.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T.Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang (2013a): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In:Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of theIntergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A.Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York,NY, USA.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ.

O'Connor, F. M., O. Boucher, N. Gedney, C.D. Jones, G.A. Folberth, R. Coppell, P. Friedlingstein, W.J. Collins, J. Chappellaz, 1265 J. Ridley, and C.E. Johnson (2010): The possible role of wetlands, permafrost and methane hydrates in the future methane cycle: A review, Rev. Geophys., 48, RG4005, doi:10.1029/2010RG000326.

O'Connor, Fiona M., N. Luke Abraham, Mohit Dalvi, Gerd Folberth, Paul Griffiths, Catherine Hardacre, Ben T. Johnson, κ.ά. 'Assessment of Pre-Industrial to Present-Day Anthropogenic Climate Forcing in UKESM1'. Preprint. Gases/Atmospheric Modelling/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions), 3 Φεβρουάριος 2020. https://doi.org/10.5194/acp-2019-1152.

O'Connor, Fiona M., Ben T. Johnson, Omar Jamil, Timothy Andrews, Jane P. Mulcahy, και James Manners. 'Apportionment of the Pre-Industrial to Present-Day Climate Forcing by Methane Using UKESM1: The Role of the Cloud Radiative Effect'. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 14, τχ. 10 (Οκτώβριος 2022): e2022MS002991. https://doi.org/10.1029/2022MS002991.

Patra, Abhik, Hanuman Singh Jatav, Kiran Kumar Mohapatra, Arnab Kundu, Satish Kumar Singh, Vipin Kumar, Laimayum Devarishi Sharma, και Mohsina Anjum. 'Plant–Soil Interactions in a Changing World: A Climate Change Perspective'. Στο *Frontiers in Plant-Soil Interaction*, 1–27. Elsevier, 2021. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90943-3.00004-3.

Pincus, Robert, Piers M. Forster, και Bjorn Stevens. 'The Radiative Forcing Model Intercomparison Project (RFMIP): Experimental Protocol for CMIP6'. *Geoscientific Model Development* 9, τχ. 9 (27 Σεπτέμβριος 2016): 3447–60. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3447-2016.

Pinnock, Simon, Michael D. Hurley, Keith P. Shine, Timothy J. Wallington, και Timothy J. Smyth. 'Radiative Forcing of Climate by Hydrochlorofluorocarbons and Hydrofluorocarbons'. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 100, τχ. D11 (20 Νοέμβριος 1995): 23227–38. https://doi.org/10.1029/95JD02323.

Prather, Michael J., και Juno Hsu. 'Coupling of Nitrous Oxide and Methane by Global Atmospheric Chemistry'. *Science* 330, τχ. 6006 (12 Νοέμβριος 2010): 952–54. https://doi.org/10.1126/science.1196285.

Ramaswamy, V., O. Boucher, J. Haigh, D. Hauglustaine, J. Haywood, G. Myhre, T. Nakajima, G. Y. Shi, and S. Solomon (2001), Radiative forcing of climate change, in Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Y. Ding et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge and New York.

Schnell J L and Prather M J 2017 Co-occurrence of extremes in surface ozone, particulate matter, and temperature over eastern North America Proc. Natl Acad. Sci. 114 2854-9.

Shindell, D. T., G. Faluvegi, N. Bell, and G. A. Schmidt (2005): An emissions-based view of climate forcing by methane and tropospheric ozone, Geophys. Res. Lett., 32, L04803, doi:10.1029/2004GL021900.

Shindell, D. T., Faluvegi, G., Koch, D. M., Schmidt, G. A., Unger, N., and Bauer, S. E. (2009): Improved attribution of climate forcing to emissions, Science, 326, 716–718, doi:10.1126/science.1174760.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"

Shindell, D., G. Faluvegi, L. Nazarenko, K. Bowman, J.-F. Lamarque, A. Voulgarakis, G. A. Schmidt, O. Pechony and R. Ruedy (2013a): Attribution of historical ozone forcing to anthropogenic emissions, Nature Climate Change, 3, pp. 567–570.

Subramaniam, Vijaya, και Choo Yuen May. 'GREENHOUSE GAS EMISSIONS FOR THE PRODUCTION OF CRUDE PALM KERNEL OIL – A GATE-TO-GATE CASE STUDY'. *JOURNAL OF OIL PALM RESEARCH*, 2012.

Thornhill, Gillian D., William J. Collins, Ryan J. Kramer, Dirk Olivié, Ragnhild B. Skeie, Fiona M. O'Connor, Nathan Luke Abraham, κ.ά. 'Effective Radiative Forcing from Emissions of Reactive Gases and Aerosols – a Multi-Model Comparison'. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21, τχ. 2 (21 Ιανουάριος 2021): 853–74. https://doi.org/10.5194/acp-21-853-2021.

Winterstein, F., F. Tanalski, P. Jöckel, M. Dameris, and M. Ponater (2019): Implication of strongly increased atmospheric methane concentrations for chemistry–climate connections, Atmos. Chem. Phys., 19, 7151–7163, doi.org/10.5194/acp-19-1430 7151-2019.

Zanis, Prodromos, Dimitris Akritidis, Aristeidis K. Georgoulias, Robert J. Allen, Susanne E. Bauer, Olivier Boucher, Jason Cole, κ.ά. 'Fast Responses on Pre-Industrial Climate from Present-Day Aerosols in a CMIP6 Multi-Model Study'. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20, τχ. 14 (17 Ιούλιος 2020): 8381–8404. https://doi.org/10.5194/acp-20-8381-2020..

Zanis, Prodromos, Dimitris Akritidis, Steven Turnock, Vaishali Naik, Sophie Szopa, Aristeidis K Georgoulias, Susanne E Bauer, κ.ά. 'Climate Change Penalty and Benefit on Surface Ozone: A Global Perspective Based on CMIP6 Earth System Models'. *Environmental Research Letters* 17, τχ. 2 (1 Φεβρουάριος 2022): 024014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4a34.

Zelinka, M. D., Andrews, T., Forster, P. M., and Taylor, K. E. (2014): Quantifying components of aerosol-cloud-radiation interactions in climate models, J. Geophys. Res. Atmos., 119, 7599– 7615, doi:10.1002/2014JD021710.https://doi.org/10.5194/acp-2019-1152Preprint. Discussion started: 3 February 2020c© Author(s) 2020. CC BY 4.0 License.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

```
library(ncdf4)
library(png)
library(maps)
library(REdaS)

# Array with models
arr_mod <- list("UKESM1-0-LL")

# Array with perturbation experiments
arr_exp <- list("piClim-CH₄")

# Define control experiment
e2 = "piClim-control"

# Set path of data
wdir = "C:/DATA/"

for (mod in arr_mod) {

 if (mod == "UKESM1-0-LL") {
  phy = "r1i1p1f4"  # physics label
  grd = "gn"  # grid label
  tms = "185001-189412"  # time series label
 }
```


Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

```
for (e1 in arr_exp) {
comp = paste(e1, substr(e2,7,nchar(e2)), sep = "")

# Define file name pattern
fe1 = paste("Amon", mod, e1, phy, grd, tms, sep = "_")
fe2 = paste("Amon", mod, e2, phy, grd, tms, sep = "_")
fce = paste("mon", mod, comp, phy, grd, tms, sep = "_")

# Read perturbation files
rsdt_pert = nc_open(paste(wdir, "rsdt_", fe1, ".nc", sep = ""))
rsut_pert = nc_open(paste(wdir, "rsut_", fe1, ".nc", sep = ""))
rlut_pert = nc_open(paste(wdir, "rlut_", fe1, ".nc", sep = ""))

# Read control files
rsdt_ctrl = nc_open(paste(wdir, "rsdt_", fe2, ".nc", sep = ""))
rsut_ctrl = nc_open(paste(wdir, "rsut_", fe2, ".nc", sep = ""))
rlut_ctrl = nc_open(paste(wdir, "rlut_", fe2, ".nc", sep = ""))

tim <- ncvar_get(rsdt_pert, "time")
lon <- ncvar_get(rsdt_pert, "lon")
lon_adjusted <- lon %% 360 - 180  # Adjust longitude values

lat <- ncvar_get(rsdt_pert, "lat")

# Keep the last 30 years (360 timesteps); variable[lon,lat,time]
rsdt_pert_30y = ncvar_get(rsdt_pert)[, , 145:540]
rsut_pert_30y = ncvar_get(rsut_pert)[, , 145:540]
```


Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας

```
rlut_pert_30y = ncvar_get(rlut_pert)[, , 145:540]
rsdt_ctrl_30y = ncvar_get(rsdt_ctrl)[, , 145:540]
rsut_ctrl_30y = ncvar_get(rsut_ctrl)[, , 145:540]
rlut_ctrl_30y = ncvar_get(rlut_ctrl)[, , 145:540]

# Close the NetCDF files
nc_close(rsdt_pert)
nc_close(rsut_pert)
nc_close(rlut_pert)
nc_close(rsdt_ctrl)
nc_close(rsut_ctrl)
nc_close(rlut_ctrl)

# Calculate Effective Radiative Forcing (ERF)
erf = (rsdt_pert_30y - (rsut_pert_30y + rlut_pert_30y)) - (rsdt_ctrl_30y -
(rsut_ctrl_30y + rlut_ctrl_30y))

# Create dataframe -- reshape data
lonlat <- as.matrix(expand.grid(lon_adjusted, lat))

# Calculate the mean ERF value and its standard deviation over the 30-year
period
erf_mean = apply(erf, c(1,2), mean)  # mean value
erf_std  = apply(erf, c(1,2), sd)  # st. deviation

# Calculate weighted global mean ERF value
weights = array(cos(deg2rad(lat)), dim=c(length(lat), length(lon_adjusted)))
erf_wgm = weighted.mean(t(erf_mean), weights)
```


Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

```
#------------------------------------------------------------
# Perform paired sample two-sided t-test at 95% significance level
#------------------------------------------------------------
n = 360  # number of timesteps (i.e., months)
t = abs(erf_mean * sqrt(n) / erf_std)


dpi     = 500
mywidth  = 7*dpi
myheight = 4*dpi
colexpr  = expression("W m"^-2)
zmin     = -10
zmax     = 10
zlims    = c(zmin, zmax)
keyax    = seq(zmin, zmax, by = 1)
title    = paste("ERF (", e1, " - ", e2, ") ", mod, sep = "")
subtitle = bquote("Global Mean =" ~ .(format(round(erf_wgm, 2), nsmall = 2)) ~ "W m"^-2)
palette  = colorRampPalette(c("darkblue", "blue", "lightblue1", "pink", "red", "darkred"))


# Open file to save plot
png(filename = paste(wdir, "ERF_", fce, ".png", sep = ""),
    width = mywidth, height = myheight, res = dpi)


#------------------------------------------------------------------
# Create plot and check for statistical significance in every grid point
#------------------------------------------------------------------
```


Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

```
    filled.contour(lon_adjusted, lat, erf_mean, zlim = zlims, cex.main = 0.8, color
= palette, xlab = "", ylab = "", xlim = c(-180, 180),
                   plot.axes = {
                    for (i in lon_adjusted) {
                     for (j in lat) {
                      if (t[which(lon_adjusted == i), which(lat == j)] > 1.967) {
                       points(x = i, y = j, pch = 20, cex = 0.05)
                      }
                     }
                    }
                    axis(1); axis(2); map('world', add = TRUE)
                   },
                   key.title = title(main = colexpr, cex.main = 0.7),
                   key.axes = axis(4, keyax)
    )
    mtext(side = 3, line = 2, adj = 0.15, cex = 1, title)
    mtext(side = 3, line = 1, adj = 0.35, cex = 0.7, subtitle)
    title(xlab = "Longitude", line = 2, adj = 0.38)
    title(ylab = "Latitude", line = 2)
    dev.off()
  }
}
print("Done!")
```


Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΟΛΩΝ ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η εντολή dpi είναι η ανάλυση του χάρτη, δηλαδή 500 σημεία ανά ίντσα (dots per inch). Η εντολή mywidth ορίζει το πλάτος της αποθηκευμένης γραφικής παράστασης σε pixel με βάση τις καθορισμένες κουκκίδες ανά ίντσα (dpi). Σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίζει το πλάτος πολλαπλασιάζοντας την τιμή dpi επί 7. Η εντολή myheight είναι παρόμοια με την προηγούμενη εντολή, αλλά ορίζει το ύψος της αποθηκευμένης γραφικής παράστασης σε pixel με βάση το dpi. Η εντολή colexpr δημιουργεί μια έκφραση στην R. Σε αυτήν την περίπτωση, αντιπροσωπεύει τις μονάδες της χρωματικής κλίμακας για την γραφική παράσταση, δηλώνοντας συγκεκριμένα ότι οι τιμές που σχεδιάζονται είναι σε μονάδες Watt ανά τετραγωνικό μέτρο ($W\ m^{-2}$). Η εντολή zmin ορίζει την ελάχιστη τιμή για την κλίμακα χρώματος στο διάγραμμα. Αυτή η μεταβλητή καθορίζει το ελάχιστο όριο για τις τιμές του ERF που θα εμφανίζονται στη χρωματική κλίμακα. Η εντολή zmax ορίζει τη μέγιστη τιμή για την κλίμακα χρώματος στο διάγραμμα. Αυτή η μεταβλητή καθορίζει το μέγιστο όριο για τις τιμές του ERF που θα εμφανίζονται στη χρωματική κλίμακα. Η εντολή zlims δημιουργεί ένα διάνυσμα zlims που περιέχει το κατώτερο και το ανώτερο όριο για την κλίμακα χρώματος στην γραφική παράσταση. Εδώ το zmin και το zmax είναι τα καθορισμένα ελάχιστα και μέγιστα όρια για τις τιμές του ERF στην κλίμακα χρώματος, αντίστοιχα. Η εντολή keyax δημιουργεί μια ακολουθία τιμών που θα χρησιμοποιηθούν ως σημάδια στον έγχρωμο άξονα της γραφικής παράστασης. Η εντολή title δημιουργεί έναν τίτλο για την γραφική παράσταση με βάση τις μεταβλητές e1, e2 και mod (μοντέλο). Η εντολή subtitle δημιουργεί υπότιτλο στο γράφημα. Η εντολή palette ορίζει μια χρωματική παλέτα για το χάρτη. Χρησιμοποιεί τη λειτουργία colorRampPalette για να δημιουργήσει μια παλέτα με χρώματα που κυμαίνονται από σκούρο μπλε έως σκούρο κόκκινο. Τα χρώματα στην παλέτα καθορίζονται στο διάνυσμα. Η εντολή png εξυπηρετεί ώστε το αποτέλεσμα να προβληθεί ως εικόνα (.png). Τέλος, η εντολή filled.contour δημιουργεί τους χάρτες λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω πληροφορίες.

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ψηφιακή συλλογή
Βιβλιοθήκη
"ΘΕΟΦΡΑΣΤΟΣ"
Τμήμα Γεωλογίας
Α.Π.Θ

Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης