



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ περιβαλλοντικών και κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα: μία στατιστική προσέγγιση.

Analyzing correlations between environmental and socio-economic factors with carbon dioxide emissions: a statistical approach

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΙΟΛΗ-ΜΑΡΙΑ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2025

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διερεύνηση συσχετίσεων μεταξύ περιβαλλοντικών και κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα:
μία στατιστική προσέγγιση

Analyzing correlations between environmental and socio-economic factors
with carbon dioxide emissions: a statistical approach

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΙΟΛΗ-ΜΑΡΙΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΔΑΡΑΣ ΤΡΥΦΩΝ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΦΙΛΙΠΠΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ
ΠΑΠΑΔΟΜΑΝΩΛΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2025

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν ουσιαστικά στην υλοποίησή της. Πρώτα από όλα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Τρύφωνα Δάρα για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και τη σταθερή υποστήριξη που μου παρείχε σε κάθε στάδιο της έρευνας και της συγγραφής. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Τρύφωνα Δάρα, τον κ. Μιχάλη Φιλιππάκη και την κα. Μαρία Παπαδομανωλάκη, για τον χρόνο τους, την προθυμία συμμετοχής και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους κατά την αξιολόγηση της εργασίας. Η υποστήριξή τους αποτελεί για εμένα ιδιαίτερη τιμή.

Τέλος, είμαι βαθιά ευγνώμων προς την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή ενθάρρυνση, την υπομονή και τη συμπαράστασή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη δική τους παρουσία, η ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει συστηματικά τους παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά κάτοικο και διερευνά τις σχέσεις τους με διάφορα κοινωνικοοικονομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά χωρών. Η προσέγγιση συνδυάζει θεωρητική επισκόπηση της κλιματικής αλλαγής και του ρόλου του CO₂ στο σύστημα Γη με ατμόσφαιρα με πειραματική ανάλυση δεδομένων, προκειμένου να αποτυπωθούν τα βασικά μοτίβα που εξηγούν την ένταση και τη διακύμανση των εκπομπών. Στόχος είναι αφενός να συνοψιστούν οι φυσικοχημικοί και κοινωνικοί μηχανισμοί που οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης CO₂, αφετέρου να απομονωθούν οι μεταβλητές που, σε επίπεδο χωρών συσχετίζονται στατιστικά με υψηλότερο ή χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα.

Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζονται συνοπτικά οι διεργασίες που καθιστούν το CO₂ κυρίαρχο αέριο του θερμοκηπίου συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση, με έμφαση στη μεγάλη διάρκεια παραμονής του στην ατμόσφαιρα, στην ικανότητά του να απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία και στις αλληλεπιδράσεις του με τις φυσικές καταβόθρες άνθρακα (ωκεανούς, δάση, έδαφος). Αναλύονται οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπών (ηλεκτροπαραγωγή και θερμότητα, βιομηχανία, μεταφορές, χρήση γης) και οι βασικές επιπτώσεις της αύξησης του CO₂, όπως η άνοδος της θερμοκρασίας, η οξίνιση των ωκεανών, η εντατικοποίηση ακραίων καιρικών φαινομένων και οι κοινωνικοοικονομικές επιβαρύνσεις. Το πλαίσιο αυτό επιτρέπει να συνδεθούν αργότερα τα πειραματικά δεδομένα με συγκεκριμένους μηχανισμούς του ενεργειακού και παραγωγικού συστήματος.

Στο πειραματικό σκέλος συγκεντρώνονται και τυποποιούνται διεθνή σύνολα δεδομένων για εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο και για μια σειρά επεξηγηματικών μεταβλητών: κατά κεφαλήν ΑΕΠ (ως προσέγγιση της ενεργειακής ζήτησης και της οικονομικής δραστηριότητας), δείκτες κοινωνικής κατάστασης (π.χ. παιδική θνησιμότητα, ικανοποίηση από τη ζωή), ενεργειακές μεταβλητές (κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο, μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από άνθρακα/πετρέλαιο/φυσικό αέριο και από ανανεώσιμες πηγές), καθώς και δείκτες μεταφορών με ιδιαίτερη έμφαση στις αερομεταφορές. Η μεθοδολογία βασίζεται σε διαγράμματα διασποράς, γραμμικές παλινδρομήσεις και συνδυαστικά μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης, ώστε να αξιολογηθεί η ισχύς και η κατεύθυνση των σχέσεων και να ελεγχθεί η σημαντικότητά τους όταν συνυπολογίζονται πολλαπλοί παράγοντες.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν με συνέπεια τρεις κεντρικούς άξονες. Πρώτον, το κατά κεφαλήν εισόδημα συσχετίζεται θετικά με τις εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο, γεγονός που αντανakλά ότι, υπό τις τρέχουσες τεχνολογικές και θεσμικές συνθήκες, η οικονομική ευημερία συνοδεύεται από υψηλή τελική ζήτηση ενέργειας. Η συσχέτιση αυτή είναι αναμενόμενη καθώς όπου το ενεργειακό μίγμα μετασχηματίζεται και η ενεργειακή απόδοση βελτιώνεται, παρατηρούνται ενδείξεις έλλειψης συσχέτισης μεταξύ ανάπτυξης και εκπομπών. Δεύτερον, οι ενεργειακές μεταβλητές έχουν την καθαρότερη σχέση με το ανθρακικό αποτύπωμα. Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο και το μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από άνθρακα και πετρέλαιο συνδέονται ισχυρά με υψηλότερες εκπομπές, ενώ η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών σχετίζεται αρνητικά με τις εκπομπές. Το φυσικό αέριο αναδεικνύεται ως ενδιάμεση περίπτωση, καθώς μπορεί να μειώνει τις εκπομπές όπου αντικαθιστά τον άνθρακα, αλλά δεν αποτελεί μία στρατηγική λύση χωρίς έλεγχο διαρροών μεθανίου και χωρίς παράλληλη κλιμάκωση των ΑΠΕ και της αποθήκευσης. Τρίτον, οι μεταφορές, και ειδικά οι αερομεταφορές, εμφανίζουν μία σταθερή θετική σχέση με το συνολικό αποτύπωμα, υποδεικνύοντας έναν τομέα που απαιτεί στοχευμένες τεχνολογικές και πολιτικές παρεμβάσεις για να εναρμονιστεί με την απανθρακοποίηση άλλων κλάδων.

Η ανάλυση επιβεβαιώνεται από τα συνδυαστικά μοντέλα, ακόμη και όταν συνυπολογίζονται πολλαπλοί προσδιοριστικοί παράγοντες, τρεις ομάδες μεταβλητών διατηρούν καθοριστικό ρόλο στη διακύμανση των εκπομπών: το επίπεδο εισοδήματος, η ένταση ορυκτών καυσίμων στο ενεργειακό μίγμα και το μερίδιο ανανεώσιμων πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή. Παράλληλα, οι κοινωνικοί δείκτες φωτίζουν τη διάσταση της κλιματικής δικαιοσύνης: η παιδική θνησιμότητα εμφανίζει αντίστροφη συσχέτιση με τις εκπομπές, κάτι που δεν αναιρεί τις ανισότητες, αλλά αναδεικνύει ότι οι χώρες με υψηλές εκπομπές τείνουν να διαθέτουν ανθεκτικότερες υποδομές υγείας, ενώ οι χώρες με μικρότερο ιστορικό αποτύπωμα είναι συχνά πιο εκτεθειμένες στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Η συμβολή της εργασίας έγκειται στη σύνθεση θεωρίας και πειραματικής τεκμηρίωσης: τα θεωρητικά συμπεράσματα των κεφαλαίων 1-3 μεταφράζονται σε σαφείς στατιστικές ενδείξεις για το πού γεννιούνται οι εκπομπές και ποιοι είναι οι άμεσοι παράγοντες μείωσής τους. Πρακτικά, η πολιτική μείωσης εκπομπών πρέπει να εστιάζει στην αλλαγή μίγματος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στη μείωση της ποσότητας καυσίμου στις μεταφορές, στην τεχνολογική αναβάθμιση της βιομηχανίας και στην ενίσχυση φυσικών απορροφητών άνθρακα. Σε αυτό το πλαίσιο, η εργασία αναδεικνύει ότι η δυνατότητα μελλοντικής μη συσχέτισης της ανάπτυξης με τις εκπομπές είναι εφικτή όταν ευθυγραμμίζονται επενδύσεις, τεχνολογία και κανονιστικό πλαίσιο.

Συνοψίζοντας, η εργασία καταλήγει ότι οι εκπομπές CO₂ είναι τόσο υψηλές όσο μεγαλύτερο σε ορυκτά καύσιμα είναι το ενεργειακό μίγμα και όσο μεγαλύτερη ενέργεια απαιτείται από τα πρότυπα παραγωγής και μεταφορών. Η κατεύθυνση λύσεων είναι σαφής, δηλαδή η ταχεία διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών και της αποθήκευσης, η βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και ο μετασχηματισμός των μεταφορών και της βιομηχανίας με τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών. Με αυτόν τον τρόπο, η κλιματική ουδετερότητα παύει να είναι αφηρημένος στόχος και γίνεται ρεαλιστικό αποτέλεσμα συντονισμένων επιλογών.

Abstract

This thesis investigates the determinants of per-capita carbon dioxide (CO₂) emissions and quantifies their relationships with socioeconomic and energy-system characteristics across countries. The study integrates a concise theoretical synthesis-covering the radiative role of CO₂, its long atmospheric lifetime, and the limits of natural sinks (oceans, forests, soils)-with an empirical analysis of international datasets. The central objective is to identify which country-level variables most consistently explain the intensity and variation of CO₂ emissions and to derive policy-relevant insights for decarbonization.

The theoretical framework outlines how anthropogenic CO₂ accumulates when the airborne fraction remains positive, translating into warming, ocean acidification, and more frequent extremes, while impacts are unevenly distributed across geographies and income levels. Sectorally, power and heat, industry, and transport dominate global emissions; thus, energy mix composition and mobility patterns are expected to be statistically salient drivers-an expectation the empirical section puts to test.

Methodologically, the thesis assembles harmonized indicators for per-capita CO₂ emissions and explanatory variables: GDP per capita (proxy for energy demand and economic scale), social indicators (e.g., child mortality, life satisfaction), energy metrics (per-capita fossil fuel use; power generation shares from coal, oil, natural gas, and renewables), and transport variables with emphasis on aviation. The analysis employs scatter plots, bivariate ordinary least squares, and multiple regression specifications to assess direction, strength, and robustness of associations.

Results are consistent and policy-coherent. Per-capita emissions are positively correlated with GDP per capita, with fossil fuel consumption, and with the share of fossil-based electricity, confirming that carbon intensity rises where prosperity is still produced through fossil-centric systems. By contrast, the share of renewables in power generation exhibits a negative association with emissions, highlighting its pivotal role in mitigation. Transport variables (especially air transport indicators) show stable positive links with national carbon footprints, underscoring a hard-to-abate sector. Social indicators add context: lower child mortality tends to co-occur with higher emissions per capita, reflecting development asymmetries rather than causality and pointing to climate-justice considerations.

In multivariate models, three clusters remain decisive: income (as a demand proxy), fossil intensity in the energy mix, and renewable penetration. Natural gas displays an intermediate profile-potentially lowering emissions when displacing coal, but insufficient as a stand-alone pathway absent methane-leak controls and rapid renewable and storage deployment.

Overall, the findings indicate that credible decarbonization hinges on rapid power-sector transformation (greater renewable shares and storage), structural efficiency gains in industry and buildings, and targeted measures in transport-particularly aviation-alongside fair transition policies. The thesis thereby connects physical-climate theory with empirical evidence, showing that sustained economic development can be reconciled with declining emissions when energy systems and technologies are deliberately reoriented toward low-carbon trajectories.

Περιεχόμενα

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	7
Περιεχόμενα Πινάκων	10
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων	11
Συντομεύσεις	13
Εισαγωγή	14
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην Κλιματική Αλλαγή	15
1.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες	15
1.2 Ιστορική Ανασκόπηση της Κλιματικής Αλλαγής	17
1.3 Ανθρωπογενείς Παράγοντες και Αίτια της Κλιματικής Αλλαγής	19
1.4 Συνέπειες της Κλιματικής Αλλαγής	21
1.5 Τα Αέρια του Θερμοκηπίου και οι Πηγές Εκπομπής τους	25
1.5.1 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	25
1.5.2 Μεθάνιο (CH ₄)	26
1.5.3 Οξείδια του Αζώτου (N ₂ O)	26
1.5.4 Υδροφθοράνθρακες (HFCs)	27
Κεφάλαιο 2. Το Διοξείδιο του Άνθρακα: Ιδιότητες, Πηγές και Ρόλος στην Κλιματική Αλλαγή	28
2.1 Εισαγωγή στο CO ₂	28
2.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του CO ₂	29
2.3 Πηγές εκπομπών CO ₂	30
2.4 Φυσικοί Μηχανισμοί Απορρόφησης του CO ₂	32
2.4.1 Απορρόφηση των ωκεανών	32
2.4.2 Χερσαία Βλάστηση και Δάση	33
2.4.3 Έδαφος και Μικροβιακή Δραστηριότητα	34
2.5 Εξέλιξη της Συγκέντρωσης CO ₂ στην Ατμόσφαιρα	34
2.6 Επιπτώσεις της αυξανόμενης συγκέντρωσης CO ₂ στο παγκόσμιο κλίμα και τα οικοσυστήματα	36
2.7 Τεχνολογίες Απομάκρυνσης CO ₂ από την Ατμόσφαιρα (Carbon Dioxide Removal - CDR)	38
2.8 Συσχέτιση του διοξειδίου του άνθρακα με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου	39
2.9 Συμπεράσματα και μετάβαση στην ανάλυση του CO ₂	40

Κεφάλαιο 3. Στατιστική Διερεύνηση Εκπομπών, Συγκεντρώσεων και Κλιματικής Επίδρασης του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂)	42
3.1 Εισαγωγή στη Στατιστική Ανάλυση του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂)	42
3.2 Ιστορική εξέλιξη συγκεντρώσεων CO ₂	42
3.3 Ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ ανά τομέα δραστηριότητας.....	44
3.4 Ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ ανά γεωγραφική περιοχή/χώρα.....	46
3.5 Κατά κεφαλήν εκπομπές CO ₂ - ανισότητες και τάσεις.....	48
3.6 Εποχικός κύκλος (seasonal cycle) και διακυμάνσεις	49
3.7 Airborne fraction και ροές άνθρακα μεταξύ δεξαμενών.....	50
3.8 Εξέλιξη CO ₂ σε σύγκριση με άλλα αέρια του θερμοκηπίου ποσοτικά.....	52
3.9 Σενάρια μελλοντικών εκπομπών και συγκεντρώσεων	55
3.10 Σύνδεση στατιστικών CO ₂ με παγκόσμια θερμοκρασιακή αύξηση	57
Κεφάλαιο 4ο: Στατιστική Ανάλυση δεδομένων εκπομπών CO ₂	59
(I) Κατά κεφαλήν εισόδημα (GDP per capita)	60
(II) Παιδική θνησιμότητα (Child mortality rate).....	62
(III) Ικανοποίηση από τη ζωή (Self-reported Life satisfaction)	64
(IV) Αεροπορικά ταξίδια ανά κάτοικο Air travel trips per capita).....	66
(V) Εκπομπές CO ₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο (Per capita CO ₂ emissions from aviation)	68
(VI) Εκπομπές CO ₂ από μεταφορές ανά κάτοικο (Per capita CO ₂ emissions from transport).....	70
(VII) Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο (Fossil fuel consumption per capita)	72
(VIII) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα (Share of electricity generated by fossil fuels).....	73
(IX) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φυσικό αέριο (Share of electricity generated by gas).....	75
(X) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (Share of electricity generated by renewables).....	77
(XI) Παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο (Coal production per capita).....	79
(XII) Παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο (Oil production per capita)	81
(XIII) Μεταβλητές χωρίς στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις εκπομπές CO ₂	83
(XIV) Συνδυασμός μεταβλητών /παραγόντων.....	84
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Τρόποι Αντιμετώπισης.....	88
5.1 Συμπεράσματα	88
5.2 Τρόποι αντιμετώπισης.....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1 Συγκριτικό γράφημα των τιμών GWP (Global Warming Potential) των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου σε ορίζοντα 100 ετών. Το CO ₂ χρησιμοποιείται ως μονάδα αναφοράς (GWP=1), ενώ διακρίνεται η πολύ ισχυρότερη επίδραση του CH ₄ , του N ₂ O και των φθοριο χων αερίων.....	40
Πίνακας 2 Εκπομπές CO ₂ (σε GtCO ₂) για επιλεγμένες χώρες.....	47
Πίνακας 3 Κατά κεφαλήν εκπομπές CO ₂ (tCO ₂ /άτομο) για επιλεγμένες χώρες	48
Πίνακας 4. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.....	60
Πίνακας 5. ANOVA εκπομπών CO ₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.	60
Πίνακας 6. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO ₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.....	61
Πίνακας 7. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - παιδικής θνησιμότητας.	62
Πίνακας 8. ANOVA εκπομπών CO ₂ - παιδικής θνησιμότητας.....	62
Πίνακας 9. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO ₂ - παιδικής θνησιμότητας.	63
Πίνακας 10. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.	64
Πίνακας 11. ANOVA εκπομπών CO ₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.....	64
Πίνακας 12. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO ₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.	65
Πίνακας 13. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.	66
Πίνακας 14. ANOVA εκπομπών CO ₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.	66
Πίνακας 15. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO ₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.	67
Πίνακας 16. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από αερομεταφορές.....	68
Πίνακας 17. ANOVA εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από αερομεταφορές.....	68
Πίνακας 18. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από αερομεταφορές	69
Πίνακας 19. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από μεταφορές. ..	70
Πίνακας 20. ANOVA εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από μεταφορές.	70
Πίνακας 21. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από μεταφορές	70
Πίνακας 22. Model Summary εκπομπών CO ₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.	72
Πίνακας 23. ANOVA εκπομπών CO ₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.....	72
Πίνακας 24. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.....	72
Πίνακας 25. Model Summary εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.	74
Πίνακας 26. ANOVA εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.....	74
Πίνακας 27. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.	74
Πίνακας 28. Model Summary εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.	76
Πίνακας 29. ANOVA εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.	76
Πίνακας 30. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.	76
Πίνακας 31. Model Summary εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. .	78
Πίνακας 32. ANOVA εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.....	78
Πίνακας 33. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.....	78
Πίνακας 34. Model Summary εκπομπών CO ₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.	79
Πίνακας 35. ANOVA εκπομπών CO ₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.....	80
Πίνακας 36. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο	80
Πίνακας 37. Model Summary εκπομπών CO ₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.....	81
Πίνακας 38. ANOVA εκπομπών CO ₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.	81
Πίνακας 39. ANOVA εκπομπών CO ₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.	82
Πίνακας 40. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO ₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.	82
Πίνακας 41. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO ₂	85
Πίνακας 42. Model Summary πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO ₂	85
Πίνακας 43. ANOVA πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO ₂	85
Πίνακας 44. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO ₂	86

Πίνακας 45. Model Summary πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO ₂	86
Πίνακας 46. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO ₂	87
Πίνακας 47. ANOVA πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO ₂	87

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Το ενεργειακό ισοζύγιο του κλιματικού συστήματος, όπως αποτυπώνεται μέσω του effective radiative forcing (ERF) για την περίοδο 1750-2019.	17
Διάγραμμα 2 Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης CO ₂ στη Mauna Loa (1958-2024).	18
Διάγραμμα 3 Κατανομή παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα δραστηριότητας.	20
Διάγραμμα 4 Ετησίως μέση παγκόσμια θερμοκρασία (ανάλυση Berkeley Earth), με απόκλιση σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1850-1900.	21
Διάγραμμα 5 Χάρτης προβλεπόμενης ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας (SSP5-8.5, median) έως το 2100.	22
Διάγραμμα 6 Ετήσιος αριθμός ακραίων καιρικών και κλιματικών γεγονότων (μετεωρολογικά, υδρολογικά, ξηρασία) παγκοσμίως, 1980-2019.	23
Διάγραμμα 7 Σύνθεση παρατηρούμενων επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στις αποδόσεις και την παραγωγικότητα γεωργικών καλλιεργειών, ανά γεωγραφική περιοχή και είδος καλλιέργειας.	23
Διάγραμμα 8 Ευρεία διάσταση εκτιμήσεων για τον αριθμό των εσωτερικών κλιματικών μεταναστών έως το 2050, σε διάφορα σενάρια πολιτικής.	24
Διάγραμμα 9 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο αερίου. Το διοξείδιο του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων και τη βιομηχανία αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή, ενώ ακολουθούν το μεθάνιο, το CO ₂ από αλλαγές χρήσης γης και το νιτρώδες οξείδιο.	27
Διάγραμμα 10 Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ κατά τομέα το 2022. Δεδομένα: Our World in Data (2023).	31
Διάγραμμα 11 Γεωτμημένο διάγραμμα του ωκεάνιου κύκλου άνθρακα. Απεικονίζονται οι δεξαμενές άνθρακα και οι κύριες ροές στην επιφάνεια και τα βαθιά στρώματα, δίνοντας έμφαση στους λεπτομερείς μηχανισμούς φυσικής και βιολογικής απορρόφησης CO ₂	32
Διάγραμμα 12 Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα, με έμφαση στις φυσικές και ανθρωπογενείς ροές CO ₂ μεταξύ ατμόσφαιρας, βιομάζας και εδάφους.	33
Διάγραμμα 13 Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης CO ₂ στην ατμόσφαιρα από το 1958 έως το 2024, με εποχιακές διακυμάνσεις και σαφή ανοδική τάση λόγω ανθρωπογενών εκπομπών.	34
Διάγραμμα 14 Οχηματοποίηση του CO ₂ στους ωκεανούς, απορρόφηση, σχηματισμός ανθρακικού οξέος, αύξηση H ⁺ , μείωση pH.	37
Διάγραμμα 15 Ιστορική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO ₂ , όπως προκύπτει από παγοπηκτικά δεδομένα (900-1800 μ.Χ.) και από μετρήσεις του σταθμού Mauna Loa (1958-2000) σε σύγκριση με την παγκόσμια καύση ορυκτών καυσίμων.	43
Διάγραμμα 16 Μέση μηνιαία συγκέντρωση CO ₂ στο Mauna Loa (1958-2023), με εμφανή την ανοδική τάση και την εποχική διακύμανση.	44
Διάγραμμα 17 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) ανά οικονομικό τομέα.	45
Διάγραμμα 18 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών CO ₂ ανά ήπειρο (2022) που δείχνει την εξέλιξη των εκπομπών σε τόνους απόρριψης, κατά περιοχή και χώρα: Ασία (με την Κίνα, Ινδία), ΗΠΑ, ΕΕ, Ρωσία, Αφρική, Νότια Αμερική και υπόλοιπο κόσμου.	46
Διάγραμμα 19 Οι χώρες με τις μεγαλύτερες ετήσιες εκπομπές CO ₂ (2022). Η Κίνα αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό (35,4%), ακολουθούμενη από τις ΗΠΑ (19%), την Ινδία (8,9%), τη Ρωσία (6,3%) και την Ιαπωνία (3,8%).	47
Διάγραμμα 20 Ο εποχικός κύκλος συγκέντρωσης CO ₂ στο Mauna Loa, όπως καταγράφεται από τον σταθμό της NOAA που απεικονίζει τις μηνιαίες αποκλίσεις της συγκέντρωσης από τον ετήσιο μέσο όρο, αποτυπώνοντας ξεκάθαρα την παγκόσμια εποχική διακύμανση της ατμόσφαιρας.	49

Διάγραμμα 21 Η εξέλιξη του Airborne Fraction (περίοδος 1960-2009 περίπου) με γραφική απεικόνιση των ετήσιων διακυμάνσεων και μιας γενικής αύξησης στο ποσοστό του CO ₂ που παραμένει στον ατμοσφαιρικό κύκλο.	50
Διάγραμμα 22 Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα με εκτιμώμενες ετήσιες ροές (PgC yr ⁻¹) και αποθέματα άνθρακα σε κάθε δεξαμενή.	52
Διάγραμμα 23 Η εξέλιξη των συγκεντρώσεων CO ₂ , CH ₄ και N ₂ O στην ατμόσφαιρα, 1980-2020, βασισμένο σε παγκόσμιες μετρήσεις από δίκτυα παρατήρησης (IPCC, 2021).....	53
Διάγραμμα 24 Ξεκάθαρη απεικόνιση των ετήσιων εκπομπών CO ₂ και της αντίστοιχης συμβολής κάθε σεναρίου SSP στην παγκόσμια θερμοκρασιακή αύξηση έως το τέλος του αιώνα.	55
Διάγραμμα 25 Εξέλιξη της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας (πορτοκαλί γραμμή) και της συγκέντρωσης CO ₂ (κίτρινη γραμμή) από το 1880 έως σήμερα.	58
Διάγραμμα 26 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.	61
Διάγραμμα 27 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - παιδικής θνησιμότητας.....	63
Διάγραμμα 28 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.....	65
Διάγραμμα 29 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.	67
Διάγραμμα 30 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο..	69
Διάγραμμα 31 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - εκπομπών CO ₂ από μεταφορές ανά κάτοικο.	71
Διάγραμμα 32 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο.....	73
Διάγραμμα 33 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.	75
Διάγραμμα 34 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.	77
Διάγραμμα 35 : Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές	79
Διάγραμμα 36 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.....	81
Διάγραμμα 37 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO ₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.	83

Συντομεύσεις

IPCC -- Intergovernmental Panel on Climate Change

UNFCCC -- United Nations Framework Convention on Climate Change

UNEP -- United Nations Environment Programme

GHGs -- Greenhouse Gas

IEA -- International Energy Agency

EEA -- European Environment Agency

HFCs -- hydrofluorocarbons

CDR -- Carbon Dioxide Removal

CCS -- Carbon Capture and Storage

DAC -- Direct Air Capture

BECCS -- Bioenergy with Carbon Capture and Storage

GWP -- Global Warming Potential

NOAA -- National Oceanic and Atmospheric Administration

GCP -- Global Carbon Project

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί το κεντρικό συλλογικό πρόβλημα του 21ου αιώνα και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) τον κυριότερο μοχλό της, λόγω της αφθονίας του, της μεγάλης διάρκειας παραμονής του στην ατμόσφαιρα και της στενής σύνδεσής του με την ενέργεια, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τη χρήση γης. Παρά τον παγκόσμιο χαρακτήρα του φαινομένου, οι εκπομπές CO_2 εμφανίζουν έντονη ετερογένεια μεταξύ χωρών και περιοχών. Η διαφοροποίηση αυτή απορρέει τόσο από κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες (εισόδημα, ενεργειακή δομή, αστικοποίηση, παραγωγικό πρότυπο, εμπορικός προσανατολισμός) όσο και από γεωγραφικά γνωρίσματα (κλιματική ζώνη, παράκτια ή ηπειρωτική θέση, πυκνότητα και κατανομή πληθυσμού).

Η παρούσα εργασία συνδυάζει θεωρητική επισκόπηση και στατιστική διερεύνηση με στόχο να χαρτογραφήσει τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις κατά κεφαλήν εκπομπές CO_2 και να εκτιμήσει τη σχέση τους με κοινωνικοοικονομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά. Στηρίζεται σε διεθνείς βάσεις δεδομένων (NOAA/Scripps, Global Carbon Project, IEA, World Bank/Our World in Data) και, στο πειραματικό μέρος, εφαρμόζει διαγράμματα διασποράς, γραμμικές παλινδρομήσεις και συνδυαστικά μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης, εξετάζοντας μεταβλητές όπως το κατά κεφαλήν ΑΕΠ, η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, τα μερίδια ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και από ΑΠΕ, δείκτες μεταφορών με έμφαση στις αερομεταφορές, καθώς και κοινωνικούς δείκτες (π.χ. παιδική θνησιμότητα, ικανοποίηση από τη ζωή).

Σκοπός είναι να απομονωθούν οι μεταβλητές που εξηγούν πιο σταθερά την ένταση και τη διακύμανση των εκπομπών, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα χρήσιμα για πολιτικές μετριασμού και ενεργειακή μετάβαση. Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής: τα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζουν το θεωρητικό πλαίσιο και τις βασικές έννοιες, ακολουθεί η περιγραφή δεδομένων και μεθοδολογίας, στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι αντιμετώπισης με βάση τα ευρήματα.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην Κλιματική Αλλαγή

1.1 Ορισμός και Βασικές Έννοιες

Η *κλιματική αλλαγή* ορίζεται ως οι μακροχρόνιες μεταβολές των κλιματικών συνθηκών του πλανήτη, οι οποίες περιλαμβάνουν την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης, τις αλλαγές στις βροχοπτώσεις, την συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων και τη σταδιακή άνοδο της στάθμης της θάλασσας (Wuebbles et al., 2017). Οι κλιματικές μεταβολές αυτές μπορούν να προκύψουν και από φυσικούς παράγοντες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και οι ηφαιστειακές εκρήξεις, ωστόσο η σύγχρονη κλιματική αλλαγή προκαλείται κυρίως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. (Lindsey L , NASA,2022)

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έχουν αυξηθεί ιδιαίτερα μετά τη βιομηχανική επανάσταση λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων, της εντατικής γεωργίας και της αστικοποίησης (IPCC, 2021). Τα βασικά αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου περιλαμβάνουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), τα οξείδια του αζώτου (N_2O) και τους υδροφθοράνθρακες (HFCs). Κάποια από αυτά τα αέρια υπάρχουν φυσικά στην ατμόσφαιρα ωστόσο οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει τις συγκεντρώσεις τους επιταχύνοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη (Wuebbles et al., 2017).

Ορισμένες από τις βασικότερες έννοιες που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και είναι απαραίτητες για τη μελέτη των αιτίων και των επιπτώσεων της είναι και οι ακόλουθες.

1. Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2)

Ένα από τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου, που παράγεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων και τις βιομηχανικές διαδικασίες. Η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατακόρυφα τις τελευταίες δεκαετίες επιτείνοντας ακόμα περισσότερο το φαινόμενο του θερμοκηπίου (IPCC, 2021 - Intergovernmental Panel on Climate Change).

2. Αποθήκευση και Αφαίρεση Διοξειδίου του Άνθρακα (CCS).

Τεχνολογία που συλλαμβάνει το CO_2 από τις πηγές εκπομπών όπως βιομηχανικές μονάδες και το αποθηκεύει υπόγεια, ώστε να μην απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα (Global CCS Institute, 2022 - Carbon Capture and Storage).

3. Παγκόσμια Θέρμανση

Η σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης, λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του CO_2 (IPCC, 2021).

4. Αειφόρος Ανάπτυξη

Η ανάπτυξη που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τις ανάγκες των μελλοντικών γενεών. Η ίδια περιλαμβάνει την προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιορίζοντας τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (United Nations, 2015).

5. Ατμοσφαιρική Συγκέντρωση CO_2

Η ποσότητα CO_2 που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, μετρημένη σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Αυτή η συγκέντρωση δηλαδή αποτελεί βασικό δείκτη της έντασης του φαινομένου του θερμοκηπίου (Keeling, 1958).

6. Κλιματική Καταλληλότητα (Climatic Suitability)

Η ικανότητα ενός οικοσυστήματος να μπορεί να διατηρεί τα είδη που το αποτελούν στις τρέχουσες και μελλοντικές κλιματικές συνθήκες (Thomas et al., 2004).

7. Κλιματική Ευαισθησία (Climate Sensitivity)

Ο βαθμός κατά τον οποίο η παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται ως αντίκτυπο της συγκέντρωσης CO₂ που είναι διπλάσια σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Εκφράζεται σε °C (IPCC, 2021).

8. Ισορροπία Διοξειδίου του Άνθρακα (Carbon Dioxide Equilibrium)

Η κατάσταση στην οποία η ποσότητα CO₂ που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα είναι ίση με την ποσότητα που απορροφάται από φυσικές δεξαμενές όπως τα δάση και οι ωκεανοί (Shindell et al., 2013).

9. Ανθρακικό Αποτύπωμα (Carbon Footprint)

Η συνολική ποσότητα εκπομπών CO₂ και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζεται με τις δραστηριότητες ενός ατόμου, μιας επιχείρησης είτε ενός προϊόντος. Αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες για την αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Wiedmann & Minx, 2008).

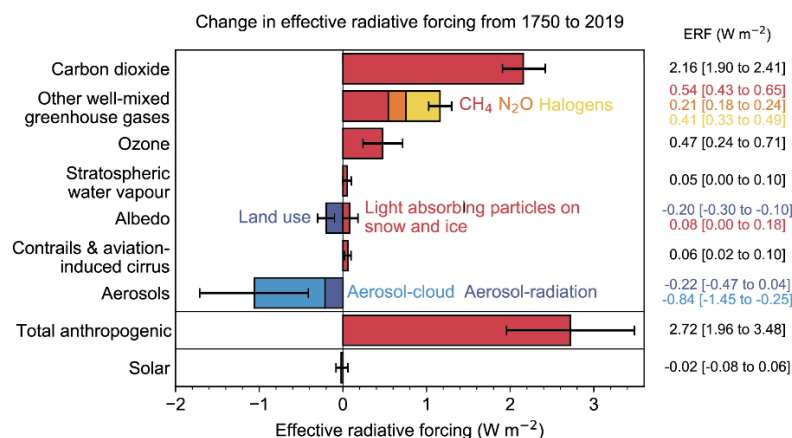
10. Κλιματική Δικαιοσύνη (Climate Justice)

Η αρχή που αναγνωρίζει ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής δεν κατανέμονται ισότιμα και συχνά πλήττουν περισσότερο συγκεκριμένες πιο ευάλωτες κοινωνικές και γεωγραφικές ομάδες. Ασχολείται με ζητήματα ηθικής και ανθρωπίνων δικαιωμάτων (UNEP, 2021).

11. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (Greenhouse Effect)

Η φυσική αυτή διαδικασία στην οποία ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα όπως το CO₂ και το CH₄ παγιδεύουν τη θερμική ακτινοβολία, διατηρώντας τον πλανήτη ζεστό. Όταν το φαινόμενο εντείνεται λόγω ανθρωπογενών εκπομπών, προκαλείται παγκόσμια υπερθέρμανση (Lindsey L, NASA, 2022).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σημειωθεί ότι η επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην ενεργειακή ισορροπία της Γης αποτυπώνεται με σαφήνεια στα επιστημονικά δεδομένα. Το παρακάτω διάγραμμα του IPCC δείχνει ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί τον ισχυρότερο συντελεστή θετικής ενεργειακής επιβάρυνσης, αυξάνοντας την παγκόσμια θερμοκρασία. Αντίθετα, παρατηρείται ότι άλλοι παράγοντες, όπως είναι τα αερολύματα έχουν αρνητική συνεισφορά, δηλαδή ψυκτικό αποτέλεσμα. Ως συνέπεια η συνολική καθαρή τιμή ERF παραμένει θετική και έτσι επιβεβαιώνεται η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω των ανθρωπίνων εκπομπών.



Διάγραμμα 1 Το ενεργειακό ισοζύγιο του κλιματικού συστήματος, όπως αποτυπώνεται μέσω του effective radiative forcing (ERF) για την περίοδο 1750-2019.

Τα αέρια του θερμοκηπίου, κυρίως το CO₂ προκαλούν θετικό εξαναγκασμό, ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη. (Πηγή: IPCC The Physical Science Basis Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report, 2021, Figure 7.6)

1.2 Ιστορική Ανασκόπηση της Κλιματικής Αλλαγής

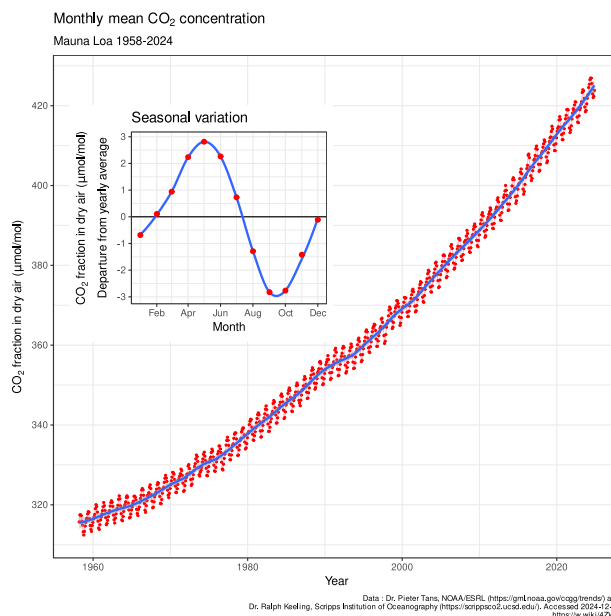
Η επιστημονική κατανόηση της κλιματικής αλλαγής έχει διαμορφωθεί σταδιακά μέσα από πολυεπίπεδη μελέτη των φυσικών φαινομένων, πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών καταγραφών. Αν και οι κλιματικές μεταβολές υπήρχαν πάντοτε στον πλανήτη ως φυσική διαδικασία, από τον 19ο αιώνα και μετά το φαινόμενο έχει μετατραπεί σε παγκόσμιο ζήτημα και έχει οδηγήσει σε διεθνείς διασκέψεις και συμφωνίες με στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως η Σύνοδος του Παρισιού το 2015. (UNFCCC, 2015- United Nations Framework Convention on Climate Change)

Ο πρώτος λοιπόν που διατύπωσε επιστημονικά την ιδέα του φαινομένου του θερμοκηπίου ήταν ο Joseph Fourier, το 1824. Ο ίδιος υπέθεσε ότι η ατμόσφαιρα της Γης λειτουργεί σαν ένα προστατευτικό στρώμα που παγιδεύει την ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας σε σχέση με την απουσία της. Αυτή η περιγραφή αποτέλεσε τη βάση για τις μελλοντικές αναλύσεις και έρευνες που αφορούν το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης (Jackson, 2019).

Στην συνέχεια το 1859, ο John Tyndall πραγματοποίησε ερευνητικά πειράματα που απέδειξαν ότι συγκεκριμένα αέρια όπως το CO₂ και το μεθάνιο, έχουν την ικανότητα να απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία. Το έργο του αποτέλεσε το πρώτο ερευνητικό θεμέλιο για τη μελέτη των αερίων του θερμοκηπίου και τη συσχέτισή τους με τις αλλαγές της θερμοκρασίας (Tyndall, 1859,).

Σημαντική πρόοδος σημειώθηκε με τη μελέτη του Σουηδού χημικού Svante Arrhenius, ο οποίος το 1896 ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο για να υπολογίσει την επίδραση της συγκέντρωσης CO₂ στην παγκόσμια θερμοκρασία. Απέδειξε πως ο διπλασιασμός του CO₂ θα οδηγούσε σε αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 5-6°C, μία εκτίμηση η οποία παραμένει πολύ κοντά στις σύγχρονες προβλέψεις. Η συμβολή του Arrhenius θεωρείται θεμελιώδης για την ανάπτυξη μεθόδων μέτρησης της ανθρώπινης επίδρασης στο παγκόσμιο κλίμα. (Arrhenius, 1896, σελ. 239-260).

Αργότερα κατά τον 20ό αιώνα με την ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η δεκαετία του 1950 συγκεκριμένα αποτέλεσε ορόσημο, καθώς ο Charles David Keeling ξεκίνησε τις πρώτες ακριβείς και μακροχρόνιες μετρήσεις της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα στο Παρατηρητήριο Mauna Loa στη Χαβάη. Η διάσημη **Καμπύλη Keeling** αποτυπώνει τη σταθερή αύξηση του CO₂ στην ατμόσφαιρα και υποδηλώνει την επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στην ατμοσφαιρική σύνθεση και το παγκόσμιο κλίμα (Keeling, 1960, σελ. 200-203).



Διάγραμμα 2 Χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης CO₂ στη Mauna Loa (1958-2024).

Πηγή: NOAA, 2024 <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

Κατά τη δεκαετία του 1970, καθώς η επιστημονική τεκμηρίωση αυξήθηκε, άρχισε να διαμορφώνεται η παγκόσμια συνείδηση για τις επιπτώσεις της ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Η ίδρυση της IPCC το 1988 αποτέλεσε θεσμική ανταπόκριση στην μεγάλη ανάγκη για τεκμηριωμένη επιστημονική αποτίμηση της κλιματικής αλλαγής. Η IPCC λειτουργεί υπό την αιγίδα του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO) και του Περιβαλλοντικού Προγράμματος του ΟΗΕ (UNEP - United Nations Environment Programme) και εκδίδει εκθέσεις που επηρεάζουν άμεσα την παγκόσμια περιβαλλοντική πολιτική (IPCC, 2017).

Ειδικότερα οι επιστημονικές εκθέσεις της IPCC διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία διεθνών συμφωνιών όπως:

- Η Διάσκεψη Κορυφής του Ρίο (1992) η οποία καθιέρωσε πως η βιώσιμη ανάπτυξη αποτελεί στρατηγική προσαρμογής.
- Το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997) που έθεσε νομικά δεσμευτικούς στόχους να μειωθούν οι εκπομπές για τις ανεπτυγμένες χώρες.

- Και η Συμφωνία του Παρισιού (2015) η οποία δεσμεύει σχεδόν όλα τα κράτη του κόσμου να περιορίσουν την άνοδο της θερμοκρασίας χαμηλότερα από τους 2°C στοχεύοντας στο όριο του 1,5°C (UNFCCC, 2015).

Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται και η έννοια του Ανθρωπόκαινου (Anthropocene) μιας νέας γεωλογικής εποχής όπου ο άνθρωπος είναι ο κύριος παράγοντας της αλλαγής στο οικοσύστημα. Η συγκεκριμένη έννοια έχει κάνει σαφές, πόσο σημαντική είναι η δράση καθώς οι εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών καταδεικνύουν πως η υπερβολική εκπομπή CO₂ είναι κεντρική αιτία της κλιματικής αποσταθεροποίησης (Steffen et al., 2018).

Επομένως γίνεται φανερό μέσα από την ιστορική αυτή πορεία, ότι η ανθρώπινη επιρροή στο κλίμα δεν είναι υποθετική αλλά πραγματική και αποδεδειγμένη. Η επιστημονική έρευνα έχει ήδη προσφέρει τα εργαλεία για την κατανόηση του προβλήματος και μεταφέρει την ευθύνη στη λήψη αποτελεσματικών πολιτικών μέτρων.

1.3 Ανθρωπογενείς Παράγοντες και Αίτια της Κλιματικής Αλλαγής

Αν και η κλιματική αλλαγή είναι μέρος των φυσικών μεταβολών του πλανήτη σε γεωλογικές κλίμακες, η ταχύτητα και η ένταση των μεταβολών που παρατηρούνται από τον 20ό αιώνα και έπειτα αποδίδονται κυρίως στην ανθρώπινη δραστηριότητα (IPCC, 2021).

Ο κυριότερος παράγοντας είναι η αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, με μεγαλύτερο ρόλο να παίζει το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το οποίο ευθύνεται για περισσότερο από το 75% των ανθρωπογενών εκπομπών (Hannah Ritchie, et al. 2023). Τα GHGs (Greenhouse Gas) ενισχύουν ακόμα περισσότερο το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνοντας τη ατμοσφαιρική απορρόφηση θερμότητας στην ατμόσφαιρα (Lindsey L., NASA, 2022).

Παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας

Αρχικά, η παραγωγή και χρήση της ενέργειας είναι η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών CO₂ παγκοσμίως. Ειδικότερα σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA-- International Energy Agency) το 2022 το 73% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών προήλθε από την καύση ορυκτών καυσίμων για την ηλεκτρική ενέργεια, τις μεταφορές και βιομηχανική χρήση (IEA, 2023).

Βιομηχανική δραστηριότητα

Έρευνες δείχνουν πως η συνεχής επιλογή καυσίμων υψηλής ενεργειακής έντασης, όπως ο άνθρακας ως την βασική πηγή κάλυψης των ενεργειακών αναγκών χειροτερεύει το πρόβλημα των εκπομπών CO₂. Τα καύσιμα αυτά παράγουν λιγότερη χρήσιμη ενέργεια ανά μονάδα εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που σημαίνει ότι για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας, εκπέμπονται σημαντικά περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου (IPCC, 2021). Παρόλο που τα τελευταία χρόνια έχουν αυξηθεί οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική, η παγκόσμια ζήτηση συνεχίζει να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Ως αποτέλεσμα οι ορυκτές πηγές ενέργειας εξακολουθούν να κυριαρχούν στο ενεργειακό τομέα και έτσι διατηρείται η εξάρτηση της ανθρωπότητας από πρακτικές που ρυπαίνουν (IEA, 2023).

Η βιομηχανία συμβάλλει αρχικά μέσω της κατανάλωσης της ενέργειας και στην συνέχεια μέσω χημικών διεργασιών που εκπέμπουν CO₂. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παραγωγή

τιμέντου, όπου η θερμική αποσύνθεση του ασβεστόλιθου (calcination) απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες CO₂ ανεξαρτήτως πηγής ενέργειας (Le Quéré et al., 2023).

Άλλες βιομηχανικές διεργασίες, όπως η παραγωγή χάλυβα, γυαλιού και αλουμινίου οδηγούν επίσης σε σημαντικές εκπομπές CO₂ αλλά και άλλων αερίων του θερμοκηπίου όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το N₂O (IPCC, 2021).

Αποδάσωση και χρήση γης

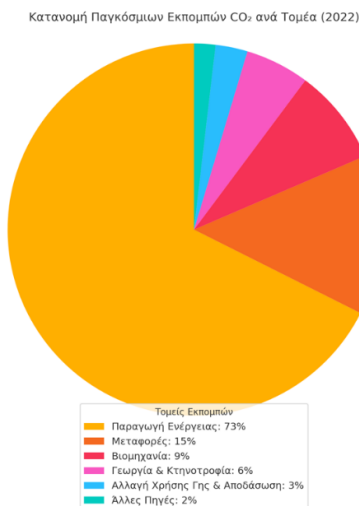
Ένας ακόμη παράγοντας αποτελεί η αλλαγή χρήσης της γης και ειδικά η αποδάσωση, η οποία περιορίζει δραστικά την ικανότητα του πλανήτη να απορροφά το CO₂. Τα δάση λειτουργούν ως φυσικές δεξαμενές άνθρακα (carbon sinks) που απορροφούν περίπου το 30% των παγκόσμιων εκπομπών ετησίως (UNEP, 2021). Η αποψίλωση δασών για γεωργική χρήση, βοσκοτόπια και επέκταση οικισμών έχει την επίδραση να μειώνει την απορρόφηση CO₂ και ταυτόχρονα να απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες άνθρακα στο έδαφος (Le Quéré et al., 2023).

Ιδιαίτερα στις τροπικές περιοχές, όπως είναι η λεκάνη του Αμαζονίου και η Ινδονησία η αποδάσωση έχει οδηγήσει στην απώλεια τεράστιων δασικών εκτάσεων τα τελευταία 30 χρόνια (Global Forest Watch, 2023).

Γεωργία και κτηνοτροφία

Η γεωργία και η κτηνοτροφία αποτελούν σημαντικές πηγές αερίων θερμοκηπίου από τα οποία εξαιρείται το CO₂. Το μεθάνιο (CH₄) απελευθερώνεται κατά την πέψη των μηρυκαστικών και από την αποσύνθεση οργανικής ύλης σε ορυζώνες (Emily Joiner and Michael A. Toman, RFF, 2023). Όσον αφορά στο οξείδιο του αζώτου (N₂O) εκλύεται από τα αζωτούχα λιπάσματα κατά τη μικροβιακή αποικοδόμηση στο έδαφος (Hanqin Tian et al., CSIRO, 2024).

Η ίδια η γεωργία ευθύνεται για περίπου το 20-25% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών, εάν λάβουμε υπόψη τα GHGs και την αποδάσωση η οποία συνδέεται άμεσα με τη γεωργική επέκταση (IPCC, 2021).



Διάγραμμα 3 Κατανομή παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα δραστηριότητας. Η παραγωγή ενέργειας ευθύνεται για το 73% των εκπομπών, ακολουθούμενη από τις μεταφορές, τη βιομηχανία, τη γεωργία και τη χρήση γης (Πηγή: Our World in data, 2023)

Από τα προαναφερθέντα είναι ξεκάθαρο πως η κλιματική αλλαγή είναι το αποτέλεσμα ενός συνόλου ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, με

το CO₂ να είναι ο σημαντικότερος παράγοντας λόγω της μαζικής και διαρκούς εκπομπής του. Η κατανόηση των πηγών και των μηχανισμών εκπομπής του CO₂ είναι καθοριστική για την ανάπτυξη πολιτικών μείωσης εκπομπών και θα αποτελέσει το επίκεντρο των επόμενων ενοτήτων της παρούσας μελέτης.

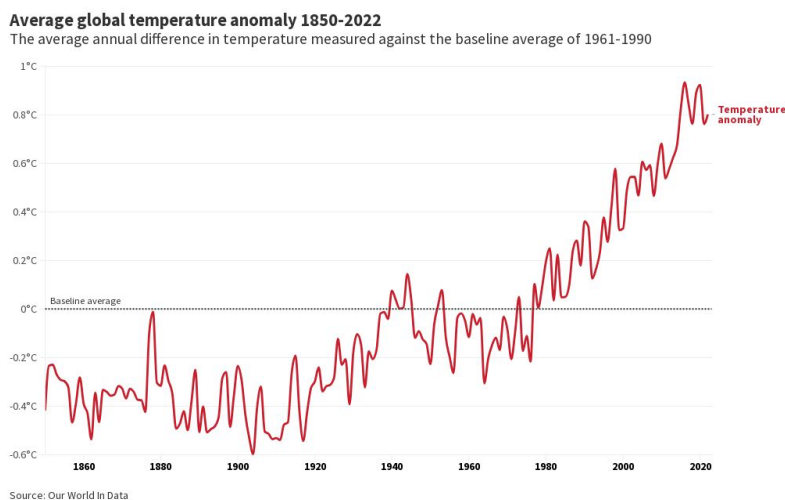
1.4 Συνέπειες της Κλιματικής Αλλαγής

Ένα βασικό σημείο που αξίζει να αναλυθεί είναι οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Η ίδια έχει ήδη αρχίσει να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις σε φυσικά συστήματα, ανθρώπινες κοινότητες και την οικονομία παγκοσμίως. Οι συνέπειες αυτές είναι πολύπλευρες και επηρεάζουν όλους τους τομείς της ζωής με διαβαθμίσεις ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, την κοινωνική ευαλωτότητα και την ικανότητα προσαρμογής.

Αύξηση της θερμοκρασίας και κύματα καύσωνα

Αρχικά, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης έχει αυξηθεί περίπου κατά 1,1°C από το προβιομηχανικό επίπεδο (1850-1900). Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της αύξησης ωστόσο παρατηρείται μετά το 1970 (IPCC, 2021). Αυτή η άνοδος της θερμοκρασίας συνοδεύεται από συχνότερα και εντονότερα κύματα καύσωνα, ειδικότερα στις μεσογειακές χώρες όπου οι θερμοκρασίες ξεπερνούν όλο ένα και συχνότερα τους 40°C το καλοκαίρι (ΕΕΑ, 2023 - European Environment Agency).

Παρακάτω, στην ανάλυση 1850-2023 του Berkeley Earth, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η ραγδαία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας επιβεβαιώνεται. Πιο συγκεκριμένα το 2023 καταγράφεται ως η πρώτη ετήσια μέση θερμοκρασία, η οποία ήταν πάνω από +1,5°C υψηλότερη από το προβιομηχανικό επίπεδο, ξεπερνώντας έτσι σταθερά τις προηγούμενες δεκαετίες.



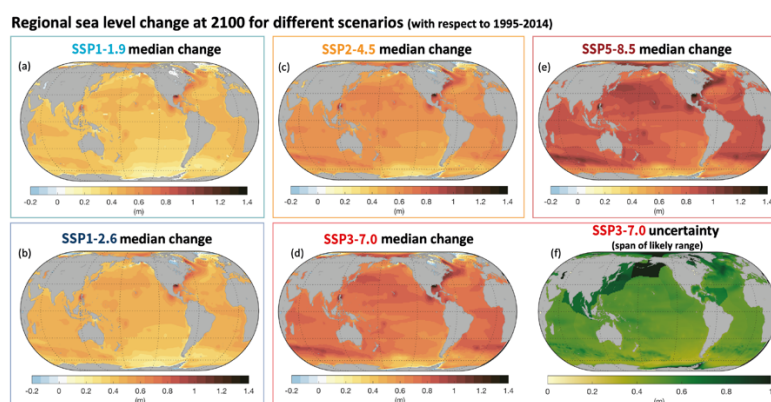
Διάγραμμα 4 Ετησίως μέση παγκόσμια θερμοκρασία (ανάλυση Berkeley Earth), με απόκλιση σε σχέση με την περίοδο αναφοράς 1850-1900

Το 2023 είναι η πρώτη χρονιά που ξεπέρασε τα +1.5 °C, μαρτυρώντας ισχυρή ενίσχυση της υπερθέρμανσης. (Πηγή: Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. Our World in Data (2023))

Λιώσιμο των παγετώνων και άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Αναφορικά με την τήξη των πολικών πάγων και των παγετώνων, η ίδια έχει επιταχυνθεί, συμβάλλοντας στην άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας. Ειδικότερα, από το 1900 έως σήμερα, η στάθμη της θάλασσας έχει ανέβει κατά περίπου 20 εκατοστά. Ωστόσο η προβλεπόμενη άνοδος μέχρι το 2100 κυμαίνεται μεταξύ 0,43 και 0,84 μέτρα ανάλογα με τις εκπομπές (IPCC, 2021). Η άνοδος αυτή θέτει σε μεγάλο κίνδυνο παράκτιες περιοχές, χαμηλότοπες χώρες όπως για παράδειγμα το Μπαγκλαντές, αλλά και νησιωτικά κράτη που απειλούνται άμεσα με την απώλεια εδάφους.

Οι προβλέψεις παρακάτω για την άνοδο της στάθμης της θάλασσας δείχνουν τη μεγάλη περιφερειακή διασπορά. Οι θερμές αποτυπώσεις (κόκκινες) δείχνουν περιοχές με μεγαλύτερη άνοδο έως και +1,2 m στο σενάριο SSP5-8.5. Ο παγκόσμιος μέσος όρος μπορεί να φτάσει τα 0,6-1,0 m έως το 2100, γεγονός που εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για παράκτιες περιοχές, νησιά και δέλτα ποταμών.

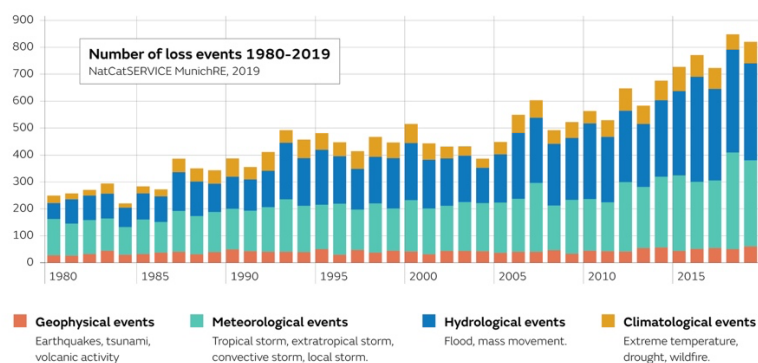


Διάγραμμα 5 Χάρτης προβλεπόμενης ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας (SSP5-8.5, median) έως το 2100. Οι κόκκινες περιοχές υποφέρουν από την ισχυρότερη άνοδο. (Πηγή: IPCC AR6, Κεφ. 9)

Μεταβολές στα καιρικά φαινόμενα και ακραία γεγονότα

Η κλιματική αλλαγή προκαλεί επίσης ενίσχυση των ακραίων καιρικών φαινομένων στις περισσότερες περιοχές. Παρατηρείται δηλαδή αύξηση στη συχνότητα και την ένταση των τροπικών κυκλώνων, των πλημμυρών, της ξηρασίας και των έντονων βροχοπτώσεων (Coumou & Rahmstorf, 2012). Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της Μεσογείου, αναμένονται μεγαλύτερες περίοδοι ξηρασίας και αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιών, με σημαντικές επιπτώσεις στη γεωργία, την υγεία και τα τεχνικά έργα (Katsafados et al., 2020).

Αυτό το γράφημα δείχνει την καθαρή αύξηση της συχνότητας των ακραίων κλιματικών γεγονότων από το 1980 ως το 2019 που αφορούν καταιγίδες, πλημμύρες και παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας. Η άνοδος αυτή υποστηρίζεται επιστημονικά μέσω των attribution studies, τα οποία καταγράφουν τη συμβολή της ανθρωπίνης δραστηριότητας στην υπερθέρμανση η οποία οδηγεί σε αυτά τα φαινόμενα.



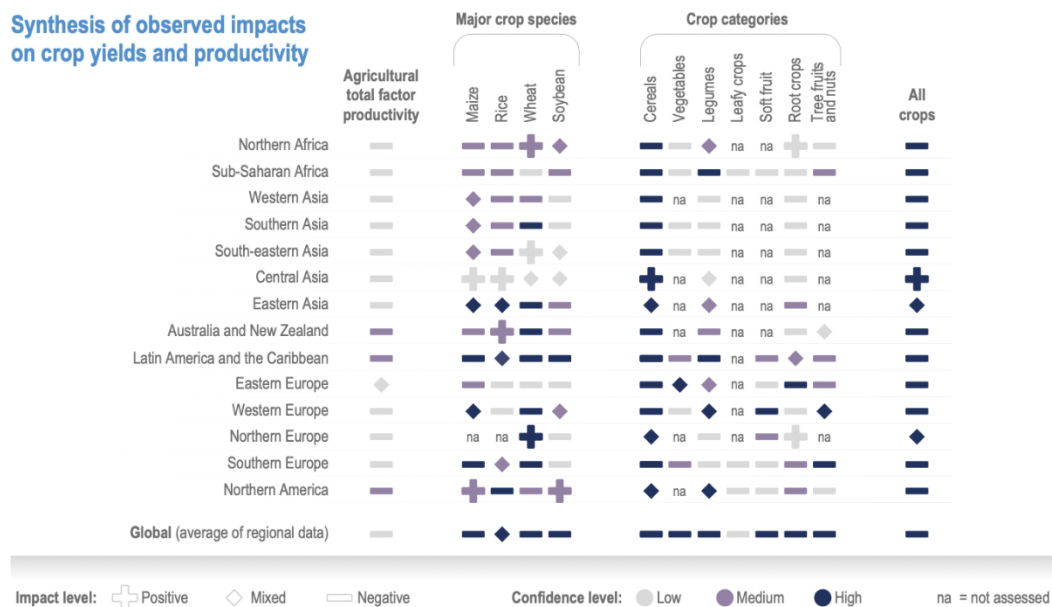
Διάγραμμα 6 Ετήσιος αριθμός ακραίων καιρικών και κλιματικών γεγονότων (μετεωρολογικά, υδρολογικά, ξηρασία) παγκοσμίως, 1980-2019.

Παρατηρείται σημαντική αύξηση της συχνότητας. (Πηγή: Met Office / Munich RE, 2019)

Επιπτώσεις στη γεωργία και την επισιτιστική ασφάλεια

Ακόμη τα παραπάνω δηλαδή η αλλαγή στα πρότυπα βροχοπτώσεων, η αύξηση της θερμοκρασίας και η συχνότητα των ακραίων φαινομένων επηρεάζουν αρνητικά τη γεωργική παραγωγικότητα. Αρκετές καλλιέργειες, όπως το σιτάρι και το καλαμπόκι, έχουν χαμηλότερες αποδόσεις όταν το κλίμα γίνεται πιο ζεστό και ξηρό (Lobell et al., 2011). Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επάρκεια τροφίμων, κυρίως σε φτωχότερες χώρες που βασίζονται στη δική τους παραγωγή.

Synthesis of observed impacts on crop yields and productivity



Διάγραμμα 7 Σύνθεση παρατηρούμενων επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στις αποδόσεις και την παραγωγικότητα γεωργικών καλλιεργειών, ανά γεωγραφική περιοχή και είδος καλλιέργειας.

Οι διαβαθμίσεις αντιπροσωπεύουν το επίπεδο επιρροής (θετικό, αρνητικό, μικτό) και το επίπεδο επιστημονικής ορθότητας. (Πηγή: IPCC AR6 WGII, 2022, Chapter 5, Figure 5.4)

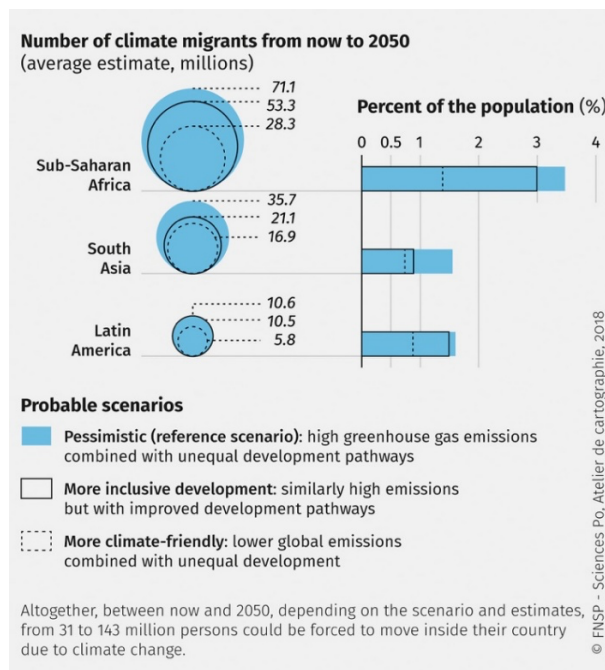
Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία διαφέρουν γεωγραφικά και ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας. Το παραπάνω διάγραμμα συνοψίζει τα αποτελέσματα σε βασικές καλλιέργειες όπως είναι το σιτάρι, το ρύζι, το καλαμπόκι και η σόγια. Δείχνει ότι στις περισσότερες περιφέρειες η συνολική παραγωγικότητα έχει υποστεί αρνητικές ή μικτές μεταβολές. Επιπρόσθετα, οι επιδράσεις είναι ιδιαίτερα έντονες σε τροπικές και μεσογειακές περιοχές, ενώ ορισμένες βόρειες περιοχές παρουσιάζουν θετικά αποτελέσματα λόγω της παρατεταμένης περιόδου ανάπτυξης (IPCC, 2021).

Υγεία και ανθρώπινη ευημερία

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει άμεσα και έμμεσα την ανθρώπινη υγεία. Η αύξηση της θερμοκρασίας σχετίζεται σύμφωνα με τους επιστήμονες με καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα από την άλλη αυξάνουν την πιθανότητα τραυματισμών και θανάτων. Επίσης, θεωρείται ευκολότερη η εξάπλωση τροπικών ασθενειών, όπως η ελονοσία και ο δάγκειος πυρετός σε περιοχές που προηγουμένως δεν ήταν ενδημικές (WHO, 2021).

Κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις

Οι συνεχείς περιβαλλοντικές αλλαγές οδηγούν στην φτώχεια, μετακινήσεις πληθυσμών και κοινωνικές ανισότητες. Η Παγκόσμια Τράπεζα εκτιμά ότι έως το 2050 περισσότεροι από 200 εκατομμύρια άνθρωποι είναι πιθανό να μετακινηθούν εσωτερικά λόγω κλιματικών πιέσεων (World Bank, 2021). Οι επιπτώσεις αυτές επιβαρύνουν ιδιαίτερα οικονομικά τα κράτη και κυρίως τις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ παράλληλα εντείνονται οι ανισότητες σε παγκόσμιο επίπεδο.



Διάγραμμα 8 Ευρεία διάσταση εκτιμήσεων για τον αριθμό των εσωτερικών κλιματικών μεταναστών έως το 2050, σε διάφορα σενάρια πολιτικής.

Η μπάρα δείχνει τρία πιθανά επίπεδα: *pessimist* (μπλε), *inclusive development* (άσπρη γραμμή) και *climate-friendly* (σύνορα κύκλου). (Πηγή: World Atlas of Environmental Migration, βασισμένο σε Groundswell / World Bank, 2018)

Το γράφημα παρουσιάζει το εύρος της εκτίμησης (μέση, pessimist, inclusive, climate-friendly σενάρια) για τον αριθμό των εσωτερικών μεταναστών λόγω κλίματος έως το 2050 σε τρεις μεγάλες περιοχές, στην Υποσαχάρια Αφρική, στην Νότια Ασία και στην Λατινική Αμερική. Σε 'pessimistic' σενάριο, οι εκτιμήσεις φτάνουν μέχρι και 71 εκατομμύρια στην Αφρική, 35,7 εκατομμύρια στη Ν. Ασία και 10,6 εκατομμύρια στη Λ. Αμερική. Ωστόσο, ανάλογα με το επίπεδο δράσης και έντασης της κλιματικής πολιτικής, παρουσιάζεται σημαντική διακύμανση της ποσότητας των μεταναστών ανά περιοχή.

Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει επιπλέον, την τοποθεσία που ζουν τα ζώα και τα φυτά και μεταβάλλει τις συνήθειες τους ανάλογα με την εποχή. Πολλά είδη δεν μπορούν να προσαρμοστούν στον γρήγορο ρυθμό των αλλαγών του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα την απώλεια της βιοποικιλότητας και την εξαφάνιση κάποιων τοπικών πληθυσμών (S. Díaz, J. et al. IPBES, 2019). Οι κοραλλιογενείς ύφαλοι για παράδειγμα, υποφέρουν από λεύκανση, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και της όξυνσης των ωκεανών.

Συμπερασματικά

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι ευρείες και αλληλένδετες. Οι ίδιες επηρεάζουν το περιβάλλον, την οικονομία, την ανθρώπινη υγεία και τις κοινωνικές δομές. Η ανάγκη για άμεση δράση και περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι πλέον επιτακτική.

1.5 Τα Αέρια του Θερμοκηπίου και οι Πηγές Εκπομπής τους

Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία προκύπτει ότι η κλιματική αλλαγή συνδέεται άμεσα με την αυξημένη παρουσία αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) στην ατμόσφαιρα. Τα αέρια αυτά παγιδεύουν την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης, αυξάνοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις τους όπως αναφέραμε και παραπάνω προκύπτουν κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως είναι η παραγωγή ενέργειας, η βιομηχανία, η γεωργία και η χρήση γης (IPCC, 2021).

1.5.1 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)

Το CO₂ είναι το πιο γνωστό και σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου όσον αφορά στη συνολική του επίδραση στο κλίμα. Ειδικότερα αυτό συμβαίνει λόγω της αφθονίας του και της μεγάλης διάρκειας παραμονής του στην ατμόσφαιρα δηλαδή έως και 100 χρόνια. Παράγεται κατά κύριο λόγο από την καύση ορυκτών καυσίμων όπως είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, την αποψίλωση των δασών, την παραγωγή τσιμέντου και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες (Le Quéré et al., 2018).

Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί ότι, η αποδάσωση περιορίζει τη δυνατότητα φυσικής απορρόφησης CO₂ από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης, ενώ από την άλλη η καύση βιομάζας αυξάνει τις εκπομπές. Ενδεικτικά το CO₂ ευθύνεται για το 76% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Hannah Ritchie, et al. Our World in Data, 2024). Ταυτόχρονα, οι συγκεντρώσεις του έχουν αυξηθεί από 280 ppm που ήταν στην προβιομηχανική περίοδο σε πάνω από 420 ppm σήμερα (NASA, 2023).

Η αύξηση του CO₂ συμβάλλει επίσης στην οξίνιση των ωκεανών, καθώς το διαλυμένο CO₂ σχηματίζει το ανθρακικό οξύ, μειώνει το pH του θαλάσσιου νερού και επηρεάζει σημαντικά τα οικοσυστήματα (Gattuso et al., 2015).

1.5.2 Μεθάνιο (CH₄)

Στην συνέχεια, το CH₄ είναι πολύ ισχυρότερο του CO₂ όσον αφορά την ικανότητα παγίδευσης θερμότητας δηλαδή περίπου 84 φορές σε ορίζοντα 20 ετών. Ωστόσο η διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερη, περίπου 12 χρόνια (IPCC, 2021). Το ίδιο παράγεται κυρίως από γεωργικές δραστηριότητες όπως είναι τα μηρυκαστικά ζώα και η χρήση της κοπριάς, διαχείριση απορριμμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής, και τη διαρροή του κατά την εξόρυξη και μεταφορά φυσικού αερίου και πετρελαίου (Saunois et al., 2020).

Η αύξηση των εκπομπών CH₄ τα τελευταία 20 χρόνια αποδίδεται κυρίως στην εντατική κτηνοτροφία, την αυξημένη κατανάλωση ζωικών προϊόντων και την εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων. Το μεθάνιο ευθύνεται για περίπου το 16% των συνολικών εκπομπών GHGs (Hannah Ritchie, et al.2023, 2024).

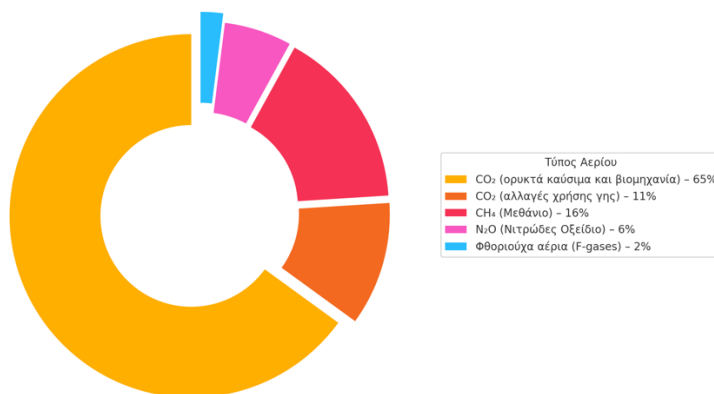
1.5.3 Οξείδια του Αζώτου (N₂O)

Αρχικά το N₂O έχει δυναμικό υπερθέρμανσης 273 φορές υψηλότερο από αυτό του CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών (EPA, 2022). Αυτό προέρχεται κυρίως από τη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων στη γεωργία, τη διαχείριση κοπριάς και τις βιομηχανικές δραστηριότητες. Ακόμη η μικροβιακή αποσύνθεση στο έδαφος απελευθερώνει N₂O, ιδιαιτέρως σε συνθήκες που το έδαφος περιέχει περισσότερο άζωτο απ' όσο χρειάζεται (Reay et al., 2012).

Ειδικότερα οι γεωργικές δραστηριότητες ευθύνονται για περίπου το 60% των παγκόσμιων εκπομπών N₂O (Emily Joiner and Michael A. Toman, RFF, 2023). Πέραν της συμβολής του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το N₂O συμμετέχει σε χημικές αντιδράσεις που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος στη στρατόσφαιρα (Hanqin Tian et al. CSIRO, 2024). Η μείωση λοιπόν των εκπομπών N₂O απαιτεί ειδικές στρατηγικές βιώσιμης χρήσης λιπασμάτων και βελτιωμένες γεωργικές πρακτικές.

Για να κατανοηθεί πληρέστερα η συμβολή κάθε αερίου του θερμοκηπίου στην παγκόσμια υπερθέρμανση είναι κρίσιμο να εξετάσουμε την κατανομή των συνολικών εκπομπών ανά τύπο αερίου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το διοξείδιο του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων κυριαρχεί, ακολουθεί το μεθάνιο, το CO₂ από αλλαγές χρήσης γης, το νιτρώδες οξείδιο και τα φθοριούχα αέρια. Η παρακάτω γραφική απεικόνιση βασίζεται σε δεδομένα του οργανισμού Our World in Data (2024) και δείχνει την σχετική συνεισφορά κάθε αερίου στην μεταβολή του κλίματος.

Κατανομή Παγκόσμιων Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου ανά Τύπο Αερίου



Διάγραμμα 9 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τύπο αερίου. Το διοξείδιο του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων και τη βιομηχανία αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή, ενώ ακολουθούν το μεθάνιο, το CO₂ από αλλαγές χρήσης γης και το νιτρώδες οξείδιο (Πηγή: Our World in Data, 2024)

1.5.4 Υδροφθοράνθρακες (HFCs)

Οι HFCs (hydrofluorocarbons) είναι συνθετικά αέρια που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ψύξης και κλιματισμού, καθώς και σε βιομηχανικές διεργασίες. Έχουν αντικατέστησει τις ουσίες που κατέστρεφαν το όζον (CFCs) ωστόσο διαθέτουν υψηλό GWP. Ενδεικτικά ορισμένα HFCs είναι 1000 έως 12.000 φορές ισχυρότερα από το CO₂ (CCAC, 2023).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι εκπομπές τους αυξήθηκαν τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξημένης ζήτησης σε συστήματα ψύξης. Απελευθερώνονται συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια παραγωγής, χρήσης και απόρριψης των προϊόντων που τα περιέχουν. Είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί πως η Συμφωνία του Κιγκάλι (Kigali Amendment) του 2016 τροποποίησε το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ 1987 και επιδιώκει τη σταδιακή κατάργησή τους σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στην Ελλάδα, ο νόμος 3017/2002 περιλαμβάνει μέτρα για τον περιορισμό των HFCs και την προώθηση εναλλακτικών ουσιών. Επομένως η διαχείριση των αποβλήτων και η ανακύκλωση εξοπλισμού που περιέχει HFCs είναι κρίσιμες λύσεις για τον περιορισμό των εκπομπών αυτών.

Κεφάλαιο 2. Το Διοξείδιο του Άνθρακα: Ιδιότητες, Πηγές και Ρόλος στην Κλιματική Αλλαγή

Παρόλο που η επιστημονική βιβλιογραφία αναγνωρίζει την ύπαρξη πολλών αερίων του θερμοκηπίου με διαφορετικό δυναμικό υπερθέρμανσης (GWP), όπως είναι το μεθάνιο (CH_4), το νιτρώδες οξείδιο (N_2O) και τα φθοριούχα αέρια (F-gases), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) εξακολουθεί να αποτελεί το κυριότερο και μακροβιότερο ανθρωπογενές αέριο που επιβαρύνει τον πλανήτη. Το ίδιο είναι η αφθονο, η διάρκεια παραμονής του στην ατμόσφαιρα ξεπερνά τον αιώνα και συνδέεται με βασικούς τομείς της παγκόσμιας οικονομίας, όπως η ενέργεια, η βιομηχανία και οι μεταφορές. Αυτά τα δεδομένα καθιστούν το CO_2 κομβικό αντικείμενο μελέτης τόσο στην επιστημονική κοινότητα όσο και στις διεθνείς πολιτικές για την αντιμετώπιση της μεγάλης κλιματικής κρίσης (IPCC, 2021, NASA, 2023).

Στο παρόν κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μια εις βάθος προσέγγιση του διοξειδίου του άνθρακα δηλαδή της προέλευσής του, του μηχανισμού δράσης του στο κλίμα, της εξέλιξης των παγκόσμιων συγκεντρώσεών του, καθώς και της διαχρονικής του επίδρασης στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

2.1 Εισαγωγή στο CO_2

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί έναν από τους βασικότερους ρύπους που επηρεάζουν τις κλιματικές συνθήκες σε παγκόσμια κλίμακα. Το ίδιο είναι ένα φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας ωστόσο η απότομη αύξηση των συγκεντρώσεών του κατά την τελευταία εκατονταετία, κυρίως λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, το έχει αναδείξει σε πρωταρχικό στόχο των παγκόσμιων πολιτικών για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής. Η σύνδεσή του με το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει τεκμηριωθεί εκτενώς από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα, καθώς αυτό ευθύνεται για πάνω από το 75% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2021).

Το CO_2 θεωρείται πλέον σημαντικό όχι μόνο λόγω της αφθονίας του, αλλά και εξαιτίας της ικανότητάς του να παραμένει στην ατμόσφαιρα για δεκαετίες έως και αιώνες και έτσι επιδρά συσσωρευτικά στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης (Le Quéré et al., 2018). Σε αντίθεση με άλλα αέρια του θερμοκηπίου, όπως το μεθάνιο ή τα φθοριούχα αέρια, το CO_2 δεν διασπάται εύκολα από χημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα, γεγονός που καθιστά τον έλεγχό του ακόμα πιο μείζοντα για τη σταθεροποίηση του κλίματος.

Η ανάλυση του CO_2 αποτελεί ένα αναπόσπαστο τμήμα της κλιματικής επιστήμης. Ήδη από την προβιομηχανική περίοδο έως σήμερα, η συγκέντρωση του αερίου έχει αυξηθεί από περίπου 280 ppm σε περισσότερα από 420 ppm (NASA, 2023), με το ρυθμό αύξησης να έχει επιταχυνθεί ιδιαίτερα μετά τη δεκαετία του 1950. Αυτή η δραματική μεταβολή σχετίζεται άμεσα με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων, την αποδάσωση και τη μεταβολή της χρήσης γης, παράγοντες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Friedlingstein et al., 2022).

Πέραν όμως της επίδρασής του στην υπερθέρμανση του πλανήτη, το CO_2 διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και σε άλλες περιβαλλοντικές διεργασίες. Συγκεκριμένα η διάλυσή του στους ωκεανούς οδηγεί στην οξίνιση των θαλάσσιων υδάτων, με άμεσες επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς και τα τροφικά πλέγματα (Gattuso et al., 2015). Ταυτόχρονα, οι παγκόσμιες προσπάθειες μείωσης των εκπομπών του επικεντρώνονται στον μετριασμό των

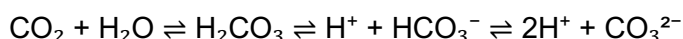
ανθρακούχων πηγών ενέργειας και στην ενίσχυση της απορρόφησης μέσω φυσικών καταβοθρών, όπως είναι τα δάση και οι ωκεανοί (Canadell & Raupach, 2008).

Στην συνέχεια θα εξεταστούν σε επόμενες υποενότητες οι φυσικοχημικές του ιδιότητες, οι πηγές και οι μηχανισμοί εκπομπής και απορρόφησης, καθώς και οι παγκόσμιες τάσεις των συγκεντρώσεων. Επίσης, θα παρουσιαστούν οι δευτερογενείς επιπτώσεις του στην οικολογία και την κοινωνία, τεκμηριωμένες με βάση δεδομένα διεθνών οργανισμών και των πιο πρόσφατων επιστημονικών ερευνών.

2.2 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι μία ανόργανη χημική ένωση, αποτελούμενη από ένα άτομο άνθρακα και δύο άτομα οξυγόνου, ο χημικός τύπος είναι CO₂. Αυτό σε θερμοκρασία δωματίου είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, ενώ σε υψηλότερες συγκεντρώσεις αποκτά ελαφρώς όξινη οσμή. Είναι μία αέρια ένωση που είναι σταθερή σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, και δεν αντιδρά εύκολα με άλλες ουσίες στην ατμόσφαιρα. Έτσι εξηγείται και ικανότητα του να παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα (Archer, 2005).

Το CO₂ είναι ελαφρώς διαλυτό στο νερό, με το οποίο αντιδρά για να σχηματίσει ανθρακικό οξύ (H₂CO₃):



Η παραπάνω αντίδραση είναι δυναμική και έχει μεγάλη σημασία στην κατανόηση της οξίνισης των ωκεανών. Το ανθρακικό οξύ είναι ασθενές ωστόσο η συνεχής απορρόφηση CO₂ από τους ωκεανούς προκαλεί μείωση του pH του νερού, με αποτέλεσμα να απειλεί θαλάσσιους οργανισμούς όπως κοράλλια και οστρακόδερμα (Doney et al., 2009).

Όσον αφορά στις φυσικές ιδιότητές του, η πυκνότητα του CO₂ είναι περίπου 1,98 kg/m³ σε STP (Standard Temperature and Pressure) και το καθιστά το βαρύτερο από τον αέρα. Το σημείο τήξης του είναι -78,5 °C, όπου και μετατρέπεται απευθείας από στερεό (ξηρός πάγος) σε αέριο με την εξάχνωση. Το CO₂ δεν μπορεί να υποστηρίξει την καύση σε υψηλές συγκεντρώσεις και μπορεί να προκαλέσει ασφυξία, καθώς εκτοπίζει το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα.

Από θερμοδυναμικής πλευράς, το CO₂ έχει μεγάλη απορροφητικότητα στην υπέρυθη ακτινοβολία, ειδικά στις περιοχές 4.26 και 15 μm του φάσματος, όπου λειτουργεί ως ισχυρό αέριο θερμοκηπίου. Η ακτινοβολία που επανεκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης απορροφάται από τα μόρια του CO₂, τα οποία μεταβαίνουν σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις και επανεκπέμπουν την ενέργεια, παγιδεύοντας τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα (IPCC, 2021). Η μοριακή δομή του CO₂, λόγω του γραμμικού γεωμετρικού του σχήματος και των τριών ατόμων, ευνοεί αυτή τη συμπεριφορά.

Παρόλο που το CO₂ δεν είναι το πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου ανά μονάδα μάζας, η αφθονία του και η μεγάλη διάρκεια παραμονής του στην ατμόσφαιρα το καθιστούν τον σημαντικότερο παράγοντα της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, οι φυσικοχημικές του ιδιότητες του δυσκολεύουν τη διαδικασία απομάκρυνσης του πλήρως από το σύστημα της ατμόσφαιρας, ακόμη και αν οι εκπομπές του μηδενιστούν (Archer & Brovkin, 2008).

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι, το CO₂ έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί φυσικά μέσω διαδικασιών όπως είναι η φωτοσύνθεση και η διάλυση του στους ωκεανούς. Ωστόσο αυτοί οι μηχανισμοί έχουν περιορισμένη ικανότητα απορρόφησης και επιβραδύνονται όσο αυξάνονται οι συγκεντρώσεις του CO₂. Αυτού του είδους ανισορροπία μεταξύ εκπομπών και απορρόφησης οδηγεί στη συσσώρευση του αερίου στην ατμόσφαιρα και επιταχύνει την υπερθέρμανση του πλανήτη.

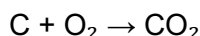
2.3 Πηγές εκπομπών CO₂

Έχοντας εξετάσει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του CO₂ στην προηγούμενη ενότητα, είναι σημαντικό να προχωρήσουμε στην παρουσίαση των βασικών πηγών μέσω των οποίων το αέριο αυτό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα.

Η κυρίαρχη πηγή εκπομπών CO₂ είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, δηλαδή άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου, για την παραγωγή ενέργειας, μεταφορές, και βιομηχανική χρήση. Σύμφωνα με το Global Carbon Project (Friedlingstein et al., 2022), οι εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων και τη βιομηχανία αντιπροσωπεύουν περίπου το 87% των συνολικών παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂.

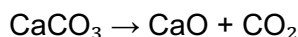
Αρχικά, οι ενεργειακές απαιτήσεις των ανεπτυγμένων αλλά και των αναπτυσσόμενων χωρών έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και τη βιομηχανική δραστηριότητα. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με καύση άνθρακα αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες πηγές CO₂.

Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίδραση καύσης του άνθρακα μέσω της οποίας απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα του αερίου στην ατμόσφαιρα.



Σημαντική είναι επίσης η δημιουργία τους μέσα από τον τομέα των μεταφορών, ο οποίος ευθύνεται για περίπου το 24% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ (IEA, 2023). Αυτές προέρχονται κυρίως από την καύση βενζίνης και πετρελαίου σε οχήματα εσωτερικής καύσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παραγωγής διοξειδίου αποτελεί η χρήση ιδιωτικών αυτοκινήτων για καθημερινές μετακινήσεις σε αστικά κέντρα. Εκεί η κατανάλωση καυσίμου σε μεγάλους όγκους κυκλοφορίας δημιουργεί υψηλά επίπεδα εκπομπών.

Επιπρόσθετα, η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου αποτελεί μια σημαντική πηγή εκπομπών CO₂, καθώς πέρα από την ενέργεια που καταναλώνεται για την καύση, παράγεται CO₂ και κατά τη χημική διεργασία ασβεστοποίησης:



Η συγκεκριμένη διεργασία συμβάλλει περίπου στο 7% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ (Andrew, 2019).

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας είναι η αλλαγή χρήσης της γης, ιδιαίτερα μέσω της αποψίλωσης δασών. Όταν κόβονται τα δένδρα ή καίγονται μεγάλες δασικές εκτάσεις αποδεσμεύεται το CO₂ που υπήρχε στη βιομάζα. Παράλληλα, μειώνεται η δυνατότητα απορρόφησης του CO₂ από τη βιόσφαιρα, και αυτό οδηγεί στην καθαρή αύξηση των

συγκεντρώσεων του στην ατμόσφαιρα. Περίπου το 10% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ επηρεάζει την αποψίλωση και την διατάραξη των οικοσυστημάτων (Le Quéré et al., 2021).

Σε μικρότερο βαθμό οι εκπομπές CO₂ προέρχονται από τη γεωργία και τη διαχείριση αποβλήτων κυρίως μέσω της καύσης οργανικών υλικών και της επεξεργασίας απορριμμάτων.

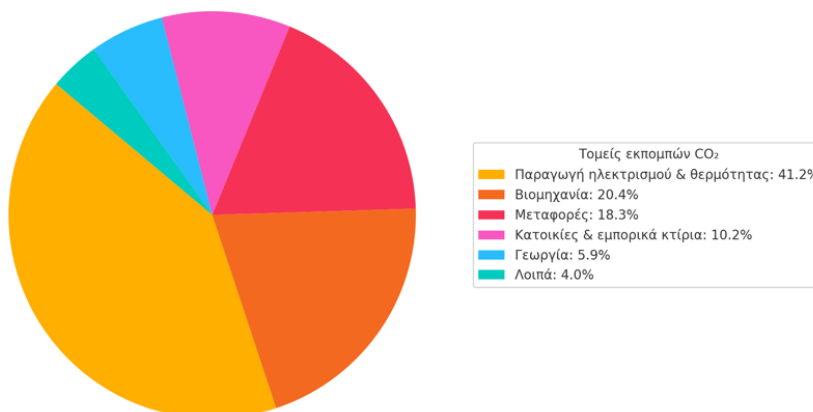
Συνοψίζοντας, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις πηγές εκπομπών CO₂ στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Καύση ορυκτών καυσίμων για ενέργεια και μεταφορές
- Βιομηχανικές διεργασίες (τσιμεντοβιομηχανία, χημικές διεργασίες)
- Αλλαγές στη χρήση γης και αποψίλωση των δασών
- Άλλες ανθρωπογενείς πηγές (καύση βιομάζας, απόβλητα)

Η μελέτη των πηγών αυτών είναι κρίσιμη για την παρακολούθηση και τον περιορισμό των παγκόσμιων εκπομπών. Η επιλογή καλύτερων εναλλακτικών ενεργειακών πηγών και η προώθηση ορισμένων βιώσιμων τεχνολογιών στη βιομηχανία και τη γεωργία αποτελούν απαραίτητες ενέργειες για τον περιορισμό της συσσώρευσης CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συμβολή του κάθε τομέα στη συνολική παγκόσμια ρύπανση λόγω του CO₂. Στο διάγραμμα απεικονίζεται η ποσοστιαία κατανομή των εκπομπών ανά δραστηριότητα. Παρατηρούμε ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας αποτελεί τον κύριο συντελεστή, ακολουθούν ο βιομηχανικός τομέας και αυτός των μεταφορών.

Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ κατά τομέα (2022)



Διάγραμμα 10 Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ κατά τομέα το 2022. Δεδομένα: Our World in Data (2023).

2.4 Φυσικοί Μηχανισμοί Απορρόφησης του CO₂

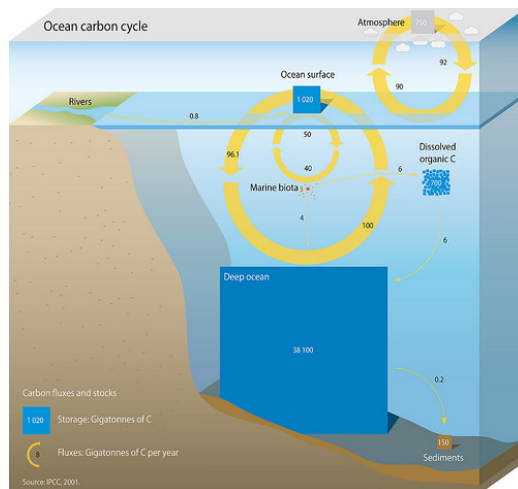
Στην συνέχεια η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από το περιβάλλον είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της παγκόσμιας ισορροπίας του άνθρακα και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Παρόλο που οι ανθρώπινες δραστηριότητες εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες CO₂ στην ατμόσφαιρα, ένα σημαντικό ποσοστό απορροφάται φυσικά μέσω βιογεωχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στους ωκεανούς, τα δάση και το έδαφος (Ciais et al., 2013).

2.4.1 Απορρόφηση των ωκεανών

Οι ωκεανοί λειτουργούν σαν την μεγαλύτερη δεξαμενή άνθρακα της Γης μετά τη λιθόσφαιρα. Το ποσοστό των ετησίων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ που απορροφάται από τους ωκεανούς είναι περίπου το 25% (Friedlingstein et al., 2022). Η απορρόφηση αυτή γίνεται κυρίως με δύο μηχανισμούς:

- **Φυσική αντλία διαλύσεως:** Το CO₂ διαλύεται στα επιφανειακά νερά και μεταφέρεται στα βαθύτερα στρώματα μέσω κατακόρυφης κυκλοφορίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις πολικές περιοχές. Η διαδικασία αυτή επιβραδύνεται από την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς τα θερμότερα νερά μειώνουν τη διαλυτότητα του CO₂ (Sabine et al., 2004).
- **Βιολογική αντλία:** Η φωτοσύνθεση από το φυτοπλαγκτόν στις επιφανειακές ζώνες δεσμεύει CO₂, το οποίο ενσωματώνεται στη βιομάζα. Όταν το φυτοπλαγκτόν και άλλοι οργανισμοί πεθαίνουν, τότε τα σωματίδια του άνθρακα καταβυθίζονται και αποθηκεύονται στον βαθύ ωκεανό.

Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει την ιδανική δομή του ωκεάνιου κύκλου του άνθρακα, περιλαμβάνοντας τις φυσικές διεργασίες απορρόφησης και στη βιολογική συμβολή του πλαγκτόν .



Διάγραμμα 11 Γεωτμημένο διάγραμμα του ωκεάνιου κύκλου άνθρακα. Απεικονίζονται οι δεξαμενές άνθρακα και οι κύριες ροές στην επιφάνεια και τα βαθιά στρώματα, δίνοντας έμφαση στους λεπτομερείς μηχανισμούς φυσικής και βιολογικής απορρόφησης CO₂

Όπως φαίνεται παραπάνω, η φυσική αντλία χαρακτηρίζεται από τη συνεχή διάλυση του CO₂ σε ψυχρά επιφανειακά νερά και τη μεταφορά του στους ωκεανούς με βαθιές ροές. Παράλληλα, η βιολογική αντλία στερεοποιεί τον άνθρακα μέσω φωτοσύνθεσης από το φυτοπλαγκτόν και καταβύθισης της οργανικής ύλης, μεταφέροντας τον άνθρακα σε μεγάλο βάθος Έτσι σταθεροποιείται η συγκέντρωσή του για δεκαετίες ή αιώνες.

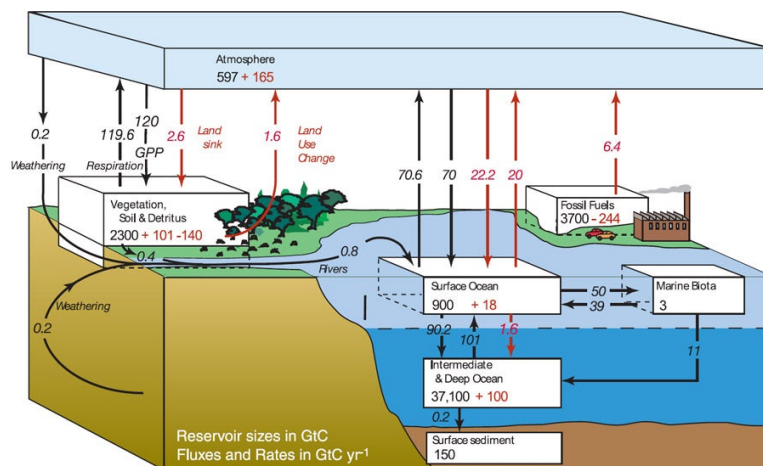
2.4.2 Χερσαία Βλάστηση και Δάση

Μία ακόμη διεργασία φυσικής απορρόφησης του CO₂ είναι από την χερσαία βλάστηση. Η φωτοσύνθεση των φυτών απορροφά ποσότητες CO₂ από την ατμόσφαιρα και το μετατρέπει σε οργανική ύλη. Τα δάση κυρίως τα τροπικά και εκείνα του εύκρατου κλίματος, αποτελούν σημαντικές καταβόθρες άνθρακα, καθώς αποθηκεύουν το CO₂ στη φυτική βιομάζα και στο έδαφος (Pan et al., 2011). Πιο συγκεκριμένα εκτιμάται ότι τα χερσαία οικοσυστήματα απορροφούν περίπου το 30% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂.

Η ικανότητα αυτή της φύσης επηρεάζεται ωστόσο αρνητικά από ορισμένα φαινόμενα όπως την αποψίλωση των δασών, τις πυρκαγιές και τις μεταβολές στη χρήση της γης. Παρατηρείται δηλαδή πως η κλιματική αλλαγή μεταβάλλει την αποτελεσματικότητα των φυτών να φωτοσυνθέτουν και τη βιωσιμότητα πολλών οικοσυστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η σταθερή απορρόφηση CO₂ μακροπρόθεσμα (Pugh et al., 2020).

Παρακάτω φαίνεται ένα αναλυτικό διάγραμμα που αναδεικνύει τους βασικούς μηχανισμούς απορρόφησης του CO₂ από τη χερσαία βιόσφαιρα. Σε αυτό μπορούμε να διακρίνουμε τις φυσικές ροές του άνθρακα μέσω της βιομάζας, δηλαδή την φωτοσύνθεση και του εδάφους, καθώς διασπάται σε οργανική ύλη. Ταυτόχρονα διακρίνουμε και τις καθαρές ανθρωπογενείς εισροές που οδηγούν στην αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης.

Η εικόνα παρουσιάζει την τεχνική διαδικασία, από την απορρόφηση CO₂ σε βιομάζα/έδαφος μέχρι τη σταθερή αποθήκευση με περιορισμένες αποδόσεις, η οποία θα είναι αρνητική ή χαμηλή θετική καθαρή ροή και σε σχέση με τις εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων.



Διάγραμμα 12 Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα, με έμφαση στις φυσικές και ανθρωπογενείς ροές CO₂ μεταξύ ατμόσφαιρας, βιομάζας και εδάφους.

Πηγή: IPCC AR4, UCAR Center for Science Education.

2.4.3 Έδαφος και Μικροβιακή Δραστηριότητα

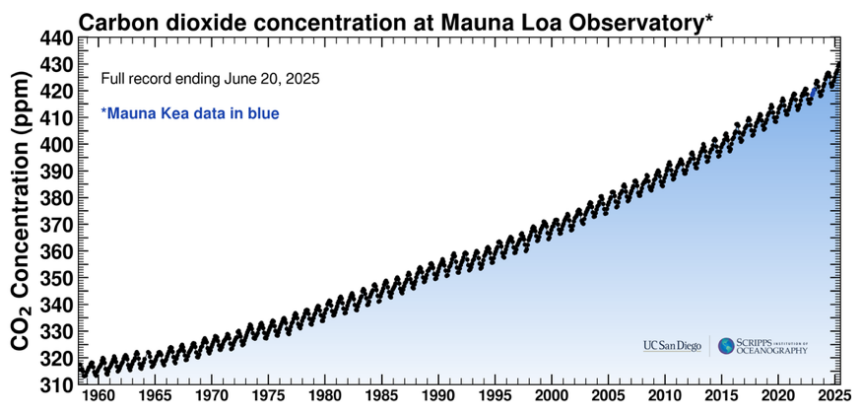
Το έδαφος αποτελεί επίσης δεξαμενή άνθρακα καθώς αποθηκεύεται οργανική ύλη και μέσω των διεργασιών της διάσπασης. Οι μικροοργανισμοί του εδάφους συμμετέχουν ενεργά στη δέσμευση και στην απελευθέρωση CO₂ μέσω της αποδόμησης της οργανικής ύλης και της μικροβιακής αναπνοής. Η οργανική ύλη που απορροφάται στο έδαφος μπορεί να παραμείνει σταθερή για δεκαετίες ή και αιώνες αναλόγως με τις φυσικές συνθήκες (Lal, 2004).

Παρόλα αυτά, η αλόγιστη καλλιέργεια, η ανεξέλεγκτη βόσκηση και η μετατροπή εύφορων εδαφών σε ξηρά μειώνουν τη γονιμότητα και τη δυνατότητα του εδάφους να λειτουργεί ως καταβόθρα άνθρακα. Σημαντικά γεωργικά προγράμματα αποσκοπούν στην αναβάθμιση της απορροφητικής ικανότητας των εδαφών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ενίσχυσης της οργανικής ύλης και της χρήση καλλιεργειών κάλυψης.

Η κατανόηση και διατήρηση αυτών των φυσικών μηχανισμών απορρόφησης είναι θεμελιώδης για τη σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων CO₂ στην ατμόσφαιρα. Αν και οι φυσικές δεξαμενές έχουν υψηλή απορροφητική ικανότητα, δεν είναι απεριόριστες και ήδη παρατηρείται κορεσμός, ιδιαίτερα στους ωκεανούς. Η ενίσχυση και προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων αποτελεί συνεπώς αναγκαία στρατηγική για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

2.5 Εξέλιξη της Συγκέντρωσης CO₂ στην Ατμόσφαιρα

Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα έχει μεταβληθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια της ιστορίας της γεωλογίας της Γης. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις σημειώνονται τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της έντονης ανθρώπινης δραστηριότητας. Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω πριν τη βιομηχανική επανάσταση, η φυσική συγκέντρωση CO₂ κυμαινόταν περίπου στα 280 ppm (μέρη ανά εκατομμύριο) ενώ το 2024 οι μετρήσεις ξεπερνούν τα 420 ppm (NOAA, 2024).



Διάγραμμα 13 Διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα από το 1958 έως το 2024, με εποχιακές διακυμάνσεις και σαφή ανοδική τάση λόγω ανθρωπογενών εκπομπών
(Πηγή: NOAA ESRL, Mauna Loa Observatory)

Για την μακροχρόνια παρακολούθηση των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην

ατμόσφαιρα υπάρχουν πλέον αξιόπιστα επιστημονικά δεδομένα για την κατανόηση της παγκόσμιας κλιματικής μεταβολής. Οι συνεχείς μετρήσεις που ξεκίνησαν το 1958 από τον Charles David Keeling στο Παρατηρητήριο Mauna Loa στη Χαβάη, αποτύπωσαν για πρώτη φορά με ακρίβεια τη μακροπρόθεσμη αυξητική τάση του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Αυτή η αποτύπωση, γνωστή ως **Καμπύλη Keeling**, συνιστά κρίσιμο τεκμήριο για την ποσοτική καταγραφή της ανθρωπογενούς επίδρασης στην παγκόσμια συγκέντρωση CO₂, καθιστώντας τη βασικό σημείο αναφοράς για τη σύγχρονη κλιματική επιστήμη (Keeling et al., 1976; IPCC, 2021).

Η συνεχής αυτή αύξηση του οφείλεται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων, την αποψίλωση των δασών και τις μεταβολές χρήσης γης. Οι ιστορικές μετρήσεις προέρχονται από τους παγοπυρήνες, που επιτρέπουν την ανασύσταση των συγκεντρώσεων CO₂ μέχρι και 800.000 χρόνια πριν. Τα δεδομένα από τους πυρήνες πάγου της Ανταρκτικής δείχνουν ξεκάθαρα ότι, καθ' όλη αυτήν την περίοδο η συγκέντρωση του CO₂ δεν ξεπέρασε ποτέ τα 300 ppm (Lüthi et al., 2008).

Ωστόσο, από τα μέσα του 20ού αιώνα οι άμεσες μετρήσεις συγκέντρωσης CO₂ στο παρατηρητήριο Mauna Loa στη Χαβάη (καμπύλη Keeling) αποτυπώνουν μια σταθερή και ραγδαία αύξηση, με ρυθμούς περίπου 2-3 ppm/έτος (Keeling et al., 1976, NOAA, 2024). Η καμπύλη αυτή δεν δείχνει μόνο μακροχρόνια αύξηση αλλά και εποχιακή κυκλικότητα, που αντανακλά την εποχιακή φωτοσυνθετική δραστηριότητα του βορείου ημισφαιρίου. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού στο βόρειο ημισφαίριο, η φωτοσύνθεση απορροφά περισσότερο CO₂ και προκαλεί μικρή μείωση στη συγκέντρωση. Ταυτόχρονα τον χειμώνα, οι συγκεντρώσεις αυξάνονται ξανά καθώς μειώνεται η βλάστηση. Αυτός ο κυκλικός ρυθμός είναι διακριτός στην καμπύλη και υπογραμμίζει τη σημασία των χερσαίων οικοσυστημάτων στον βραχυπρόθεσμο κύκλο του άνθρακα.

Επιπλέον, η επίδραση της αυξημένης συγκέντρωσης CO₂ είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την άνοδο της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας. Η σχέση αυτή επιβεβαιώνεται από κλιματικά μοντέλα και παρατηρήσεις (IPCC, 2021), ενώ παράλληλα η συνεχής αύξηση των επιπέδων CO₂ αποτελεί έναν από τους βασικούς δείκτες της παγκόσμιας κλιματικής κρίσης.

Αξιοσημείωτη είναι η ανάλυση της ιστορικής πορείας και των σταδιακών υπερβάσεων κρίσιμων ορίων. Η συγκέντρωση των 350 ppm, που θεωρείται από πολλούς επιστήμονες ως το όριο ασφαλείας για την αποφυγή των κινδύνων της κλιματικής αλλαγής, ξεπεράστηκε τη δεκαετία του 1980. Το φράγμα των 400 ppm καταγράφηκε για πρώτη φορά το 2015 και από τότε η συγκέντρωση συνεχίζει να αυξάνεται. Έτσι είναι φανερές οι καθυστερήσεις στη μετάβαση σε καθαρές τεχνολογίες και την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Σύμφωνα με σενάρια του IPCC (AR6, 2021) εφόσον οι εκπομπές CO₂ συνεχιστούν με τους σημερινούς ρυθμούς, οι συγκεντρώσεις θα μπορούσαν να ξεπεράσουν τα 550 ppm έως το 2100 και να προκαλέσουν αυξήσεις της θερμοκρασίας κατά 2,5-4,5 °C ανάλογα με το σενάριο εκπομπών. Αντιθέτως, η έγκαιρη λήψη μέτρων και η μετάβαση σε ουδέτερες εκπομπές άνθρακα μπορούν να σταθεροποιήσουν τη συγκέντρωση γύρω από τα 450 ppm μέσα στις επόμενες δεκαετίες (Meinshausen et al., 2009).

Η παρακολούθηση των συγκεντρώσεων μέσω δορυφορικών μετρήσεων (π.χ. NASA OCO-2) και επίγειων σταθμών προσφέρει υψηλή ακρίβεια και αποτελεί βασικό εργαλείο στην επιστημονική και πολιτική διαχείριση της κλιματικής κρίσης.

2.6 Επιπτώσεις της αυξανόμενης συγκέντρωσης CO₂ στο παγκόσμιο κλίμα και τα οικοσυστήματα

Η αυξανόμενη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον. Οι επιδράσεις αυτές αφορούν διαφορετικούς τομείς το κλίμα, τη γεωργία, τη δημόσια υγεία και τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τομείς στους οποίους το CO₂ έχει προκαλέσει άμεσα ή έμμεσα σημαντικές μεταβολές.

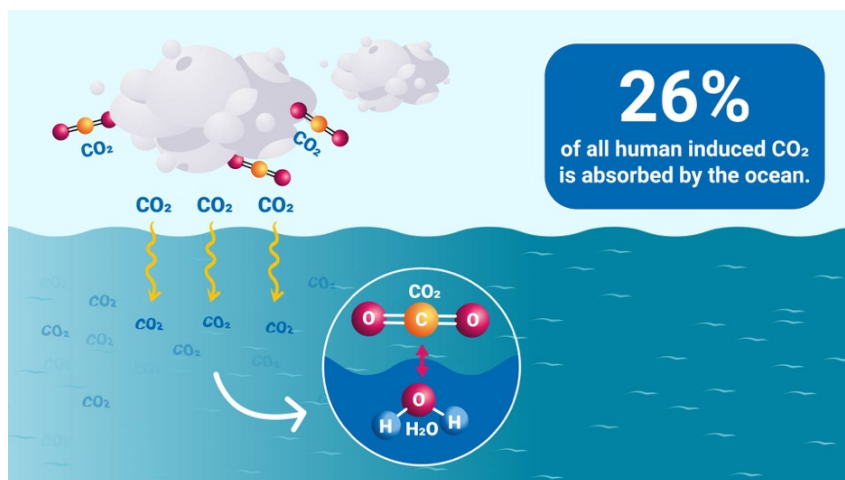
Κλιματική Αλλαγή και Θερμοκρασιακές Μεταβολές

Η κύρια επίπτωση της αύξησης του CO₂ είναι η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες σχετίζονται με ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι καύσωνες, οι ξηρασίες και οι έντονες βροχοπτώσεις (IPCC, 2021). Το CO₂ έχει υψηλό δυναμικό υπέρυθρης απορρόφησης και οδηγεί σε μεγαλύτερη παγίδευση της ακτινοβολούμενης θερμότητας στην τροπόσφαιρα (NASA, 2023).

Ωκεανοί και Οξίνιση των Θαλασσών

Το CO₂ επιπλέον απορροφάται σε μεγάλες ποσότητες από τους ωκεανούς, όπου εκεί αντιδρά με το νερό σχηματίζοντας ανθρακικό οξύ. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην οξίνιση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων, με άμεσο αντίκτυπο στη βιοποικιλότητα και τη δομή των τροφικών αλυσίδων. Οι οξινισμένοι ωκεανοί δυσχεραίνουν την ασβεστοποίηση οργανισμών όπως τα κοράλλια και τα οστρακόδερμα (Doney et al., 2009, Gattuso et al., 2015).

Η παρακάτω εικόνα από το IAEA παρουσιάζει τον κυκλικό μηχανισμό με τον οποίο το ανθρωπογενές CO₂ διαχέεται στην επιφάνεια των ωκεανών (26% των εκπομπών), σχηματίζει ανθρακικό οξύ (H₂CO₃) και αυξάνει τη συγκέντρωση H⁺, οδηγώντας σε χαμηλότερο pH και όξινη στροφή στον ωκεανό



Διάγραμμα 14 Οχηματοποίηση του CO_2 στους ωκεανούς, απορρόφηση, σχηματισμός ανθρακικού οξέος, αύξηση H^+ , μείωση pH.

Πηγή: IAEA (2021)

Γεωργία και Επισιτιστική Ασφάλεια

Η μεταβολή του κλίματος επηρεάζει άμεσα και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Η αύξηση της θερμοκρασίας, οι μεταβολές στις βροχοπτώσεις και η συχνότερη εμφάνιση ξηρασίας μειώνουν τις αποδόσεις βασικών γεωργικών προϊόντων. Έρευνες δείχνουν ότι οι παγκόσμιες αποδόσεις σιταριού και αραβοσίτου παρουσιάζουν μείωση εξαιτίας των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών (Lobell et al., 2011). Επιπλέον, η αύξηση του CO_2 έχει επιπτώσεις και στη θρεπτική αξία των καλλιεργειών καθώς μειώνεται η περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνες και μικροθρεπτικά συστατικά.

Δημόσια Υγεία

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία είναι πολύπλευρες. Αρχικά η αύξηση των θερμοκρασιών συνδέεται με την αύξηση της θνησιμότητας λόγω θερμικής καταπόνησης κυρίως σε αστικές περιοχές. Από την άλλη, η αλλαγή των κλιματικών συνθηκών ευνοεί την εξάπλωση μεταδιδόμενων νοσημάτων όπως είναι η ελονοσία και ο δάγκειος πυρετός σε γεωγραφικές περιοχές όπου δεν ήταν προηγουμένως ενδημικός (WHO, 2021). Παράλληλα, η ποιότητα του αέρα επιδεινώνεται λόγω αυξημένων επιπέδων όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων, γεγονός που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για τους ευπαθείς πληθυσμούς.

Οικοσυστήματα και Βιοποικιλότητα

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει την κατανομή ειδών και οδηγεί σε απώλεια ενδιαιτημάτων. Πολλά είδη αδυνατούν να προσαρμοστούν στις νέες θερμοκρασιακές συνθήκες ή να μετακινηθούν σε νέες περιοχές. Σύμφωνα με τους Thomas et al. (2004), μέχρι και το 37% των ειδών παγκοσμίως ενδέχεται να εξαφανιστούν μέχρι το 2050 λόγω της κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα τα οικοσυστήματα υψηλών υψομέτρων και οι περιοχές με περιορισμένη γεωγραφική εξάπλωση είναι ιδιαίτερα ευάλωτα.

Επιπτώσεις στην Ελλάδα και την Ανατολική Μεσόγειο

Η Ελλάδα, ως μέρος της ανατολικής Μεσογείου, χαρακτηρίζεται από έντονη ευαισθησία στην κλιματική αλλαγή. Πολλές μελέτες μάλιστα δείχνουν αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, μείωση των βροχοπτώσεων, και αύξηση της συχνότητας και έντασης ακραίων φαινομένων όπως οι καύσωνες και οι πυρκαγιές (Katsafados et al., 2020). Επιπλέον, αναμένονται σοβαρές επιπτώσεις στη γεωργική παραγωγή όπως για παράδειγμα το ελαιόλαδο και τα σταφύλια, αλλά και στον τουρισμό, ο οποίος αποτελεί σημαντικό πυλώνα της ελληνικής οικονομίας.

2.7 Τεχνολογίες Απομάκρυνσης CO₂ από την Ατμόσφαιρα (Carbon Dioxide Removal - CDR)

Η ταχεία αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχει οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσης CO₂, γνωστών και ως Carbon Dioxide Removal (CDR). Οι τεχνολογίες αυτές έχουν στόχο να μειώσουν το επιπλέον CO₂, είτε με φυσικές μεθόδους είτε μέσω τεχνητών διαδικασιών. Οι ίδιες αποτελούν κρίσιμο στοιχείο στην επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού για περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 2 °C (IPCC, 2021).

Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (Carbon Capture and Storage - CCS)

Το CCS περιλαμβάνει την καταγραφή του CO₂ από τις μεγάλες πηγές εκπομπών, όπως είναι οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ακόμη αφορά τη μεταφορά του μέσω αγωγών και την έγχυσή του σε γεωλογικούς σχηματισμούς δηλαδή τις υποθαλάσσιες δεξαμενές και εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να δεσμεύσει έως και 90% των εκπομπών CO₂ και έτσι να μειώσει σημαντικά το αποτύπωμα των ενεργοβόρων τομέων (Global CCS Institute, 2022).

Άμεση Δέσμευση από την Ατμόσφαιρα (Direct Air Capture - DAC)

Η DAC χρησιμοποιεί χημικά φίλτρα ή υλικά προσρόφησης για να αφαιρέσει το CO₂ απευθείας από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αν και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, η τεχνολογία αυτή θεωρείται σημαντική για την αντιστάθμιση των ανεξέλεγκτων ή και των δύσκολα μετριαζόμενων εκπομπών, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μηδενικού ισοζυγίου άνθρακα (IEA, 2022).

Βιοενέργεια με Δέσμευση και Αποθήκευση Άνθρακα (BECCS)

Η BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) συνδυάζει τη χρήση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας με CCS. Καθώς τα φυτά δεσμεύουν CO₂ μέσω της φωτοσύνθεσης επιτυγχάνεται η καύση της βιομάζας και η ταυτόχρονη δέσμευση των εκπομπών. Αυτές οι διαδικασίες οδηγούν σε αρνητικό ισοζύγιο άνθρακα. Ωστόσο, η εφαρμογές της BECCS περιορίζονται από τις απαιτήσεις σε γη, νερό και πρώτες ύλες (Smith et al., 2016).

Φυσικές Μέθοδοι και Απορρόφηση CO₂

Πέραν από τις τεχνολογικές λύσεις υπάρχουν και οι φυσικές μέθοδοι όπως η αναδάσωση, η διαχείριση εδαφών για αύξηση της οργανικής ύλης και η ενίσχυση της απορρόφησης από ωκεανούς, μέσω δηλαδή της αλκαλοποίησης και βιογεωχημικών διεργασιών. Αυτές οι διεργασίες θεωρούνται κρίσιμες για την επίτευξη καθαρών αρνητικών εκπομπών (Pan et al.,

2011, Lal, 2004). Οι φυσικές μέθοδοι προσφέρουν επιπλέον οφέλη όπως είναι για παράδειγμα η ενίσχυση της βιοποικιλότητας και η προστασία του εδάφους.

Ωστόσο, όλες οι μέθοδοι CDR αντιμετωπίζουν προκλήσεις λόγω του αυξημένου κόστους, ενεργειακής απαίτησης, κοινωνικής αποδοχής και βαθμού τεχνολογικής ανάπτυξης. Η συνδυαστική αξιοποίηση τους με πολιτικές μείωσης εκπομπών κρίνεται αναγκαία για τον περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (Friedlingstein et al., 2022).

2.8 Συσχέτιση του διοξειδίου του άνθρακα με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αποτελεί το κυρίαρχο αέριο του θερμοκηπίου ως προς την ποσότητα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα, ωστόσο δεν είναι το μοναδικό. Η κατανόηση της σχέσης του με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου (GHGs) είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και των μηχανισμών που το προκαλούν.

Τα βασικότερα αέρια του θερμοκηπίου, πέρα από το CO_2 , περιλαμβάνουν το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και τις ομάδες φθοριούχων αερίων (όπως HFCs, PFCs, SF_6). Παρόλο που οι συγκεντρώσεις αυτών των αερίων στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερες σε σχέση με το CO_2 , η δυνατότητά τους να παγιδεύουν τη θερμική ακτινοβολία είναι πολύ υψηλότερη, γεγονός που αποτυπώνεται στον δείκτη Global Warming Potential (GWP). Για παράδειγμα, το μεθάνιο έχει GWP 84-86 φορές μεγαλύτερο από το CO_2 σε περίοδο 20 ετών, ενώ το υποξείδιο του αζώτου φτάνει τις 264 φορές (IPCC, 2021).

Το CO_2 έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με άλλα GHGs. Αυτό σημαίνει ότι οι εκπομπές του έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις και επιδρούν στο παγκόσμιο ισοζύγιο άνθρακα για δεκαετίες ή και αιώνες μετά την έκλυσή τους. Αντιθέτως, το CH_4 και το N_2O έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής, περίπου 12 και 114 χρόνια αντίστοιχα αλλά πολύ πιο έντονη άμεση επίδραση στο κλίμα.

Η σχέση μεταξύ των αερίων του θερμοκηπίου είναι επίσης σημαντική από πολιτικής και τεχνολογικής πλευράς. Για παράδειγμα, πολλές εξελίξεις στην τεχνολογία και τεχνικές που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών CO_2 επηρεάζουν και άλλα αέρια. Πιο συγκεκριμένα στη γεωργία, οι πρακτικές που μειώνουν τις εκπομπές CO_2 , όπως η διατήρηση της βιομάζας, μπορεί να περιορίσουν και τις εκπομπές N_2O . Επίσης, η μετάβαση από τη χρήση γαιανθράκων σε φυσικό αέριο περιορίζει το CO_2 , αλλά μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές CH_4 , αν δεν ελεγχθούν οι διαρροές (IEA, 2023).

Πίνακας 1 Συγκριτικό γράφημα των τιμών GWP (Global Warming Potential) των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου σε ορίζοντα 100 ετών. Το CO₂ χρησιμοποιείται ως μονάδα αναφοράς (GWP=1), ενώ διακρίνεται η πολύ ισχυρότερη επίδραση του CH₄, του N₂O και των φθοριοχών αερίων.
Πηγή: IPCC, 2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Greenhouse Gas	Global Warming Potential (GWP)
1. Carbon dioxide (CO ₂)	1
2. Methane (CH ₄)	29.8
3. Nitrous Oxide (N ₂ O)	273
4. Hydrofluorocarbons (HFCs)	5 – 14,600
5. Perfluorocarbons (PFCs)	78 – 12,400
6. Sulfur hexafluoride (SF ₆)	25,200
7. Nitrogen trifluoride (NF ₃) ²	17,400

Η κατανόηση του GWP είναι ιδιαίτερα σημαντική στη χάραξη περιβαλλοντικών πολιτικών και στρατηγικών μείωσης εκπομπών. Ορισμένα αέρια όπως το μεθάνιο (CH₄) και τα φθοριούχα αέρια έχουν πολύ υψηλότερη ικανότητα παγίδευσης θερμότητας από το CO₂. Η προσπάθεια μείωσης τους μπορεί βραχυπρόθεσμα να αποφέρει ταχύτερα και σημαντικότερα οφέλη για το κλίμα. Επομένως, το GWP λειτουργεί ως εργαλείο ιεράρχησης της διαδικασίας της απανθρακοποίησης και συμβάλλει στον καθορισμό των κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Τέλος, οι στρατηγικές περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη βασίζονται στη συνδυαστική ανάλυση όλων των GHGs. Οι υπολογισμοί για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού, να διατηρηθεί δηλαδή η υπερθέρμανση κάτω από 1,5°C ή 2°C, λαμβάνουν υπόψη το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Εκεί το CO₂ παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο, καθώς ταυτόχρονα η μείωση και των άλλων αερίων είναι κρίσιμη για ταχύτερα και αποτελέσματα.

2.9 Συμπεράσματα και μετάβαση στην ανάλυση του CO₂

Από την παραπάνω ανάλυση καθίσταται σαφές ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), παρότι δεν αποτελεί το πιο ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου ανά μονάδα μάζας είναι το σημαντικότερο λόγω της ποσότητάς του στην ατμόσφαιρα, της διάρκειας ζωής του και του ρόλου του στις

ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι πηγές εκπομπής του περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα από τη χρήση ορυκτών καυσίμων μέχρι τη γεωργία και την αποψίλωση δασών, ενώ οι δυνατότητες φυσικής και τεχνολογικής απομάκρυνσής του παραμένουν περιορισμένες συγκριτικά με την ταχύτητα εκπομπής του.

Η μελέτη των υπόλοιπων αερίων, όπως το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και οι φθοριούχες ενώσεις, αναδεικνύει την ανάγκη για συνδυασμένες πολιτικές μείωσης εκπομπών σε πολλαπλούς τομείς. Ταυτόχρονα η μεγάλη σημασία του CO_2 στην αλλαγή του κλίματος και στον μηχανισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου επιβάλλει μια συγκεντρωμένη προσέγγιση.

Το επόμενο κεφάλαιο θα επικεντρωθεί αποκλειστικά στο διοξείδιο του άνθρακα, δηλαδή στην εξέλιξη των συγκεντρώσεών του διαχρονικά, στους παράγοντες που επηρεάζουν την αύξησή του και στη στατιστική ανάλυση δεδομένων που σχετίζονται με τη γεωγραφική, κοινωνική και οικονομική του κατανομή. Θα εξεταστούν επίσης παγκόσμιες και εθνικές στρατηγικές, καθώς και επιστημονικά σενάρια για τη μελλοντική του πορεία.

Κεφάλαιο 3. Στατιστική Διερεύνηση Εκπομπών, Συγκεντρώσεων και Κλιματικής Επίδρασης του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

3.1 Εισαγωγή στη Στατιστική Ανάλυση του Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Στο πλαίσιο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν τα στατιστικά δεδομένα που αφορούν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) καθώς είναι απαραίτητα για την κατανόηση της δυναμικής του στο παγκόσμιο κλιματικό σύστημα. Το CO₂ είναι μόνο ένα από τα αέρια του θερμοκηπίου, ωστόσο συνεισφέρει περισσότερο από το 75% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών και παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα που μπορεί να ξεπεράσει τον αιώνα (Archer & Brovkin, 2008, IPCC, 2021, Hannah Ritchie et al., 2023).

Πιο συγκεκριμένα η στατιστική μελέτη του CO₂ περιλαμβάνει την εξέταση της εξέλιξης των συγκεντρώσεων του από την προβιομηχανική περίοδο έως σήμερα, την κατανομή των εκπομπών ανά τομέα δραστηριότητας και γεωγραφική περιοχή, καθώς και την εκτίμηση των κατά κεφαλήν εκπομπών που αναδεικνύουν ανισότητες στην παγκόσμια κατανομή του άνθρακα. Παράλληλα, αναλύονται και οι εποχιακές διακυμάνσεις και ο ρόλος των φυσικών και ανθρωπογενών ροών στον κύκλο του άνθρακα.

Η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη στατιστική αποτύπωση του CO₂ είναι επιτακτική, καθώς τα τελευταία δεδομένα δείχνουν ότι το 2023 η μέση ετήσια συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα ξεπέρασε τα 420 ppm, τιμή κατά περίπου 50% υψηλότερη από την προβιομηχανική περίοδο των 280 ppm (NOAA, 2024). Η αύξηση αυτή ακολουθεί έναν σχεδόν εκθετικό ρυθμό μετά τη δεκαετία του 1950 με μέσο ετήσιο ρυθμό ανόδου 2,4 ppm την τελευταία δεκαετία (Keeling et al., 1976, Friedlingstein et al., 2022).

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν αναλυτικά στατιστικά στοιχεία που αφορούν την ιστορική εξέλιξη των συγκεντρώσεων CO₂ σε παγκόσμιο επίπεδο, τις παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές CO₂ ανά τομέα και ανά χώρα, τις διαφορές στις κατά κεφαλήν εκπομπές και τις ανισότητες που αυτές αντικατοπτρίζουν, τις εποχιακές και διαχρονικές μεταβολές της «airborne fraction» (ποσοστό εκπομπών που παραμένει στην ατμόσφαιρα), την ποσοτική σχέση του CO₂ με άλλα αέρια του θερμοκηπίου, καθώς και τα στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν από τα σενάρια του IPCC για το μέλλον.

Η μελέτη συνοδεύεται από διαγράμματα, χάρτες και πίνακες που θα απεικονίζουν τις μεταβολές με στόχο να παρουσιαστεί μια πλήρης εικόνα για την τρέχουσα κατάσταση, τις τάσεις και τις προοπτικές του CO₂ στον πλανήτη.

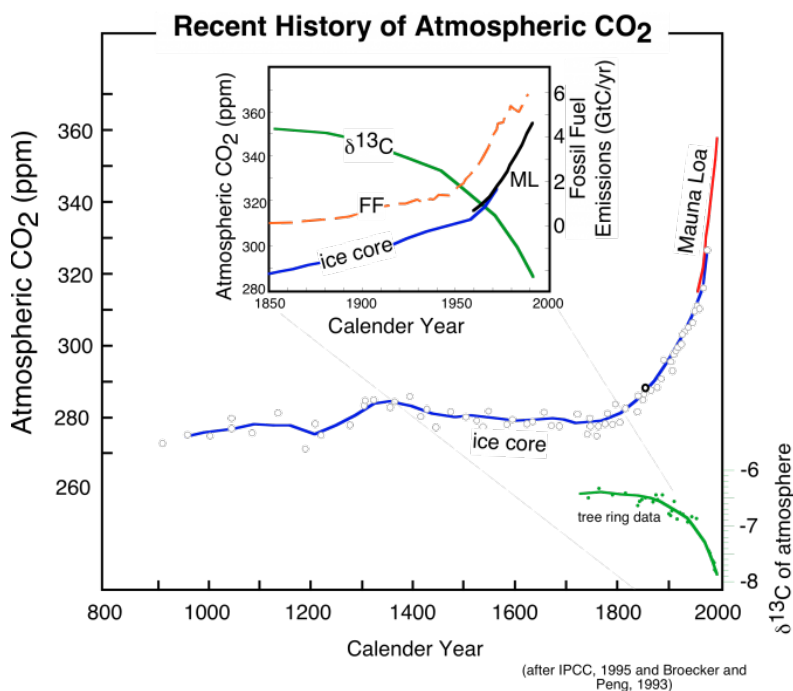
Τα πρωτογενή δεδομένα προήλθαν από NOAA GML (CO₂), Scripps/Keeling, Global Carbon Project & IEA (εκπομπές), και World Bank/Our World in Data (κατά κεφαλήν). Όλες οι σειρές συγχρονίστηκαν σε ετήσια ή μηνιαία ανάλυση, με ομοιόμορφη κλιμάκωση μονάδων (tCO₂/GtCO₂, ppm/ppb). Οι γραφικές απεικονίσεις αποδίδονται με πλήρη βιβλιογραφική αναφορά.

3.2 Ιστορική εξέλιξη συγκεντρώσεων CO₂

Μία σημαντική διάσταση του θέματος αποτελεί πως η εξέλιξη των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά την περίοδο από την προβιομηχανική εποχή έως σήμερα

αποτυπώνει την επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Μελετώντας τους παγοπηρήνες προκύπτει ότι από την Ανταρκτική και τη Γροιλανδία διαθέτουμε παλαιά αρχεία, τα οποία αποτυπώνουν τις συγκεντρώσεις του CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά τις τελευταίες εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι κατά την περίοδο από περίπου 800.000 π.Χ. έως το 1750 μ.Χ. δηλαδή πριν από τη βιομηχανική εποχή, οι συγκεντρώσεις CO₂ κυμαίνονταν μεταξύ 180 και 280 ppm. Οι διακυμάνσεις αυτές συνδέονται άμεσα με τις φυσικές εναλλαγές μεταξύ παγετωδών και μεσοπαγετωδών περιόδων. Κατά τη διάρκεια αυτών των αλλαγών, το κλίμα της Γης παρουσίαζε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας και παγοκάλυψης. Οι κλιματικοί αυτοί κύκλοι προκαλούνταν κυρίως από αστρονομικούς παράγοντες, όπως είναι οι περιοδικές μεταβολές στην τροχιά και στον άξονα περιστροφής της Γης, γνωστοί ως κύκλοι Milankovitch. Ακόμη προκαλούνται και από γεωφυσικές διεργασίες όπως η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η μετατόπιση των τεκτονικών πλακών (Lüthi et al., 2008, Petit et al., 1999).

Η σταθερότητα αυτή ανατράπηκε μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση, όταν η καύση ορυκτών καυσίμων, η εκβιομηχάνιση και η αποψίλωση των δασών προκάλεσαν μία απότομη αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης. Στα τέλη του 19ου αιώνα, οι μετρήσεις είχαν τιμές ανάμεσα σε 295-300 ppm, ενώ το 1958 όταν ξεκίνησαν οι συνεχείς ατμοσφαιρικές μετρήσεις στο Mauna Loa της Χαβάης από τον Charles Keeling, η συγκέντρωση είχε φτάσει περίπου στα 315 ppm (Keeling et al., 1976).

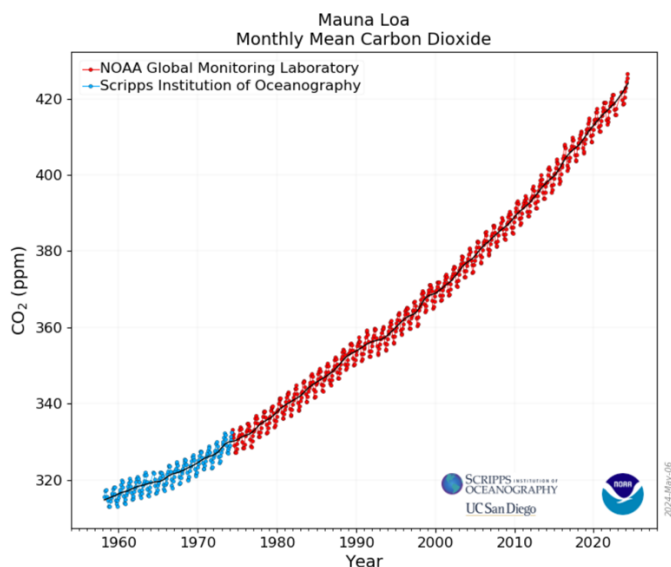


Διάγραμμα 15 Ιστορική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO₂, όπως προκύπτει από παγοπηρηνικά δεδομένα (900-1800 μ.Χ.) και από μετρήσεις του σταθμού Mauna Loa (1958-2000) σε σύγκριση με την παγκόσμια καύση ορυκτών καυσίμων.

Πηγή: Penn State University, *Earth in the Future*, Scripps Institution of Oceanography (SIO Ref. No. 01-06, 2001).

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 15, οι συγκεντρώσεις του CO₂ παρέμειναν σχεδόν σταθερές γύρω από τα 280 ppm μέχρι τα τέλη του 18ου αιώνα, γεγονός που αποτυπώνει την ισορροπία μεταξύ φυσικών πηγών και καταβόθρων. Με την έναρξη της Βιομηχανικής Επανάστασης και

την αυξανόμενη καύση ορυκτών καυσίμων, παρατηρείται μια σαφής ανοδική τάση, η οποία γίνεται εντονότερη μετά τα μέσα του 20ού αιώνα. Η απεικόνιση των εκπομπών ορυκτών καυσίμων επιβεβαιώνει την άμεση συσχέτιση μεταξύ της ανθρώπινης δραστηριότητας και της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης CO₂ και επισημαίνει τον ανθρωπογενή χαρακτήρα της αύξησης. (Scripps Institution of Oceanography, 2001).



Διάγραμμα 16 Μέση μηνιαία συγκέντρωση CO₂ στο Mauna Loa (1958-2023), με εμφανή την ανοδική τάση και την εποχική διακύμανση

Πηγή: NOAA Global Monitoring Laboratory & Scripps Institution of Oceanography (gml.noaa.gov, keelingcurve.ucsd.edu)

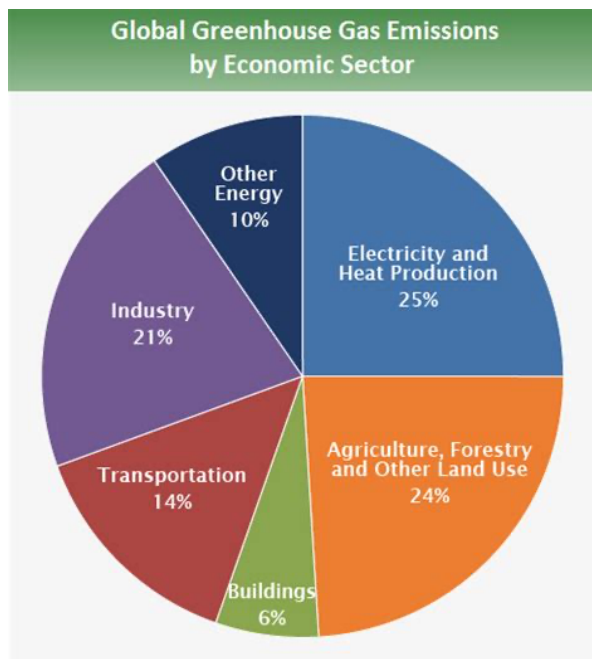
Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα παρά τις φυσικές εποχικές διακυμάνσεις που σχετίζονται με τη φωτοσύνθεση και την κυτταρική αναπνοή, η συνολική τάση παραμένει φανερά αυξητική (Keeling et al., 1976, NOAA, 2024).

Η ιστορική ανάλυση των συγκεντρώσεων βοηθά στην κατανόηση του όρου του ανθρακικού προϋπολογισμού και του χρόνου που απομένει προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της Συμφωνίας του Παρισιού. Η σημερινή συγκέντρωση CO₂ δεν έχει ιστορικό προηγούμενο τουλάχιστον τα τελευταία 800.000 χρόνια, τόσο ως προς την τελική συγκέντρωση όσο και ως προς τον ρυθμό αύξησης (IPCC, 2021). Η απότομη αυτή μεταβολή σε γεωλογική κλίμακα χρόνου αποτελεί σαφή ένδειξη της έντονης ανθρωπογενούς παρέμβασης στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα και θέτει τη βάση για την ανάλυση των ετήσιων εκπομπών ανά τομέα δραστηριότητας και γεωγραφική περιοχή, που εξετάζονται στις επόμενες υποενότητες.

3.3 Ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές CO₂ ανά τομέα δραστηριότητας

Η ποσοτική ανάλυση των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ ανά τομέα δραστηριότητας μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε τη βαρύτητα κάθε κλάδου στην κλιματική αλλαγή και να τεθούν οι κατάλληλες προτεραιότητες στις πολιτικές αντιμετώπισης. Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία του Global Carbon Project και του International Energy Agency το 2022 οι συνολικές

ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ ανήλθαν σε περίπου 36,8 GtCO₂, με τον ενεργειακό τομέα να επικρατεί στην παρακάτω κατανομή. (IEA, 2023, Friedlingstein et al., 2022)



Διάγραμμα 17 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) ανά οικονομικό τομέα. Η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό, ακολουθούμενη από τη βιομηχανία, τις μεταφορές, τη γεωργία και άλλες πηγές. Πηγή: Our World in Data.

Όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 17, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η θέρμανση συνεισφέρουν περίπου το 25% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών CO₂. Η βιομηχανία και κυρίως οι διεργασίες παραγωγής τσιμέντου, χάλυβα και χημικών συνεισφέρουν περίπου το 20%. Ακόμη, οι μεταφορές που αφορούν οδικές, αεροπορικές και θαλάσσιες μετακινήσεις, αντιπροσωπεύουν περίπου το 14%. Η γεωργία και οι αλλαγές χρήσης γης ευθύνονται για περίπου το 12%, ενώ τέλος το υπόλοιπο ποσοστό αποδίδεται σε κτίρια, απόβλητα και άλλες μικρότερης κλίμακας πηγές (Our World in Data)

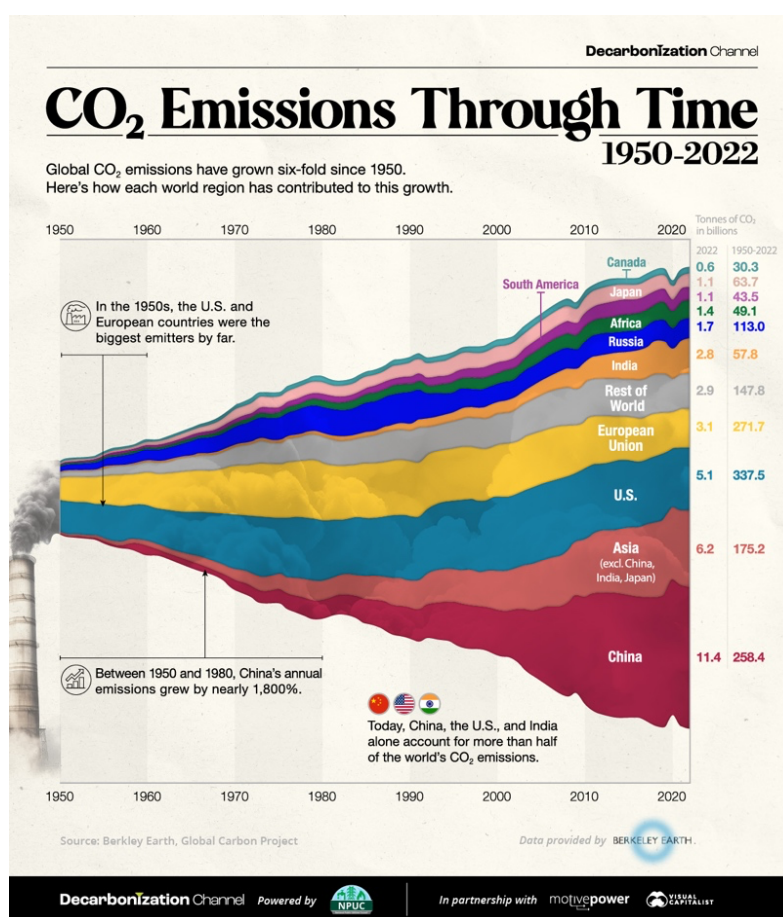
Ειδικότερα, η μακροπρόθεσμη ανάλυση δείχνει ότι από το 1990 έως το 2022 οι εκπομπές από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκαν κατά περίπου 65%, καθώς υπήρχε αυξημένη ζήτηση ρεύματος σε αναπτυσσόμενες οικονομίες και συνεχίστηκε η ανάγκη για άνθρακα και φυσικό αέριο. Από την άλλη πλευρά οι εκπομπές από τον τομέα της βιομηχανίας αυξήθηκαν με χαμηλότερο ρυθμό (35%), ενώ οι εκπομπές από τις μεταφορές παρουσίασαν σταθερή ανοδική τάση μέχρι το 2019 με μία προσωρινή μείωση κατά την πανδημία COVID-19 και επαναφορά στα προ της κρίσης επίπεδα το 2022 (Le Quéré et al., 2023).

Η ξεκάθαρη επικράτηση των εκπομπών από τον ενεργειακό τομέα υποδεικνύει ότι οι πολιτικές απανθρακοποίησης, οι ανανεώσιμες πηγές και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα δίκτυα ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να επιφέρουν τη μεγαλύτερη μείωση στις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές CO₂.

3.4 Ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές CO₂ ανά γεωγραφική περιοχή/χώρα

Η γεωγραφική κατανομή των εκπομπών CO₂ φανερώνει σημαντικές ανισότητες τόσο ως προς τις συνολικές συγκεντρώσεις όσο και ως προς τις τάσεις διαχρονικά. Τα στοιχεία του Global Carbon Project για το 2022 δείχνουν ότι η Ασία έχει το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και ακολουθεί η Βόρεια Αμερική, η Ευρώπη, η Αφρική, η Νότια Αμερική και η Ωκεανία (Friedlingstein et al., 2022).

Η Ασία και πιο συγκεκριμένα η Κίνα και η Ινδία συνεισφέρουν σε πάνω από το 55% των συνολικών εκπομπών CO₂. Η Βόρεια Αμερική με κυριότερη οικονομία τις Ηνωμένες Πολιτείες καλύπτουν περίπου το 15%, ενώ η Ευρώπη το 11%. Αντιθέτα, η Αφρική και η Νότια Αμερική εμφανίζουν ιδιαίτερα χαμηλότερα ποσοστά, δηλαδή κάτω από 5% η κάθε μία, παρόλο που οι πληθυσμοί τους αυξάνονται με πολύ γρήγορους ρυθμούς (IEA, 2023).



Διάγραμμα 18 Κατανομή παγκόσμιων εκπομπών CO₂ ανά ήπειρο (2022) που δείχνει την εξέλιξη των εκπομπών σε τόνους απόρριψης, κατά περιοχή και χώρα: Ασία (με την Κίνα, Ινδία), ΗΠΑ, ΕΕ, Ρωσία, Αφρική, Νότια Αμερική και υπόλοιπο κόσμο.

Πηγή: Berkley Earth, Global Carbon Project, 2023.

Η ανάλυση των τάσεων από το 1990 έως το 2022 δείχνει ότι οι εκπομπές στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική έχουν μειωθεί κατά 20-25%, λόγω της μετάβασης της σε καθαρότερες μορφές ενέργειας και της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Παρά ταύτα, η Ασία παρουσίασε

αύξηση περισσότερο από 150% την ίδια περίοδο, με κύριο παράγοντα την εκβιομηχάνιση και την αύξηση της κατανάλωσης άνθρακα στην Κίνα και την Ινδία (Le Quéré et al., 2023).

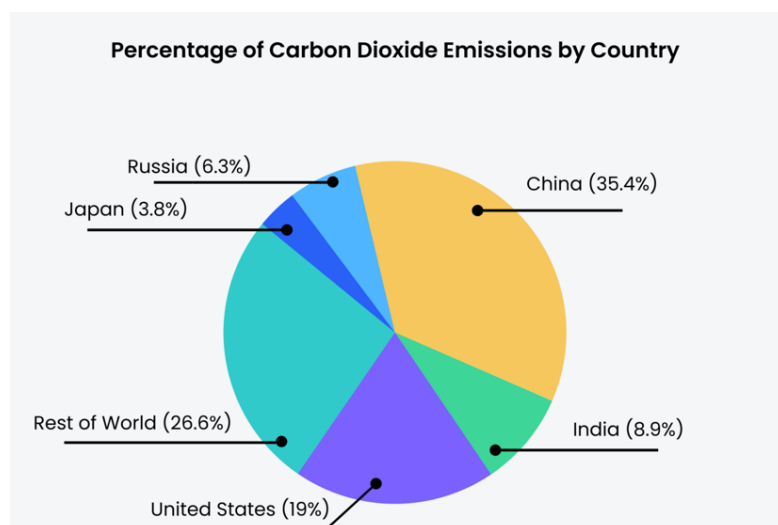
Πίνακας 2 Εκπομπές CO₂ (σε GtCO₂) για επιλεγμένες χώρες

Περιοχή	2000	2010	2022	Μεταβολή 2000-2022
Ασία	12,3	17,8	27,9	+127%
Βόρεια Αμερική	6,7	6,2	5,4	-19%
Ευρώπη	4,8	4,3	3,7	-23%
Αφρική	0,9	1,1	1,4	+56%
Νότια Αμερική	1,1	1,2	1,3	+18%
Ωκεανία	0,4	0,4	0,4	~0%

Πηγή: Global Carbon Project, 2023.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι εκπομπές CO₂ (σε GtCO₂) για τις κύριες γεωγραφικές περιοχές για τα έτη 2000, 2010 και 2022. Οι τιμές δείχνουν την ταχεία άνοδο της Ασίας και τη σταδιακή μείωση σε Ευρώπη και Βόρεια Αμερική.

Οι πέντε μεγαλύτεροι ρυπαντές σε απόλυτα μεγέθη είναι η Κίνα, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ινδία, η Ρωσία και η Ιαπωνία. Οι προηγούμενοι μαζί καλύπτουν περίπου το 60% των παγκόσμιων εκπομπών.



Διάγραμμα 19 Οι χώρες με τις μεγαλύτερες ετήσιες εκπομπές CO₂ (2022). Η Κίνα αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό (35,4%), ακολουθούμενη από τις ΗΠΑ (19%), την Ινδία (8,9%), τη Ρωσία (6,3%) και την Ιαπωνία (3,8%).

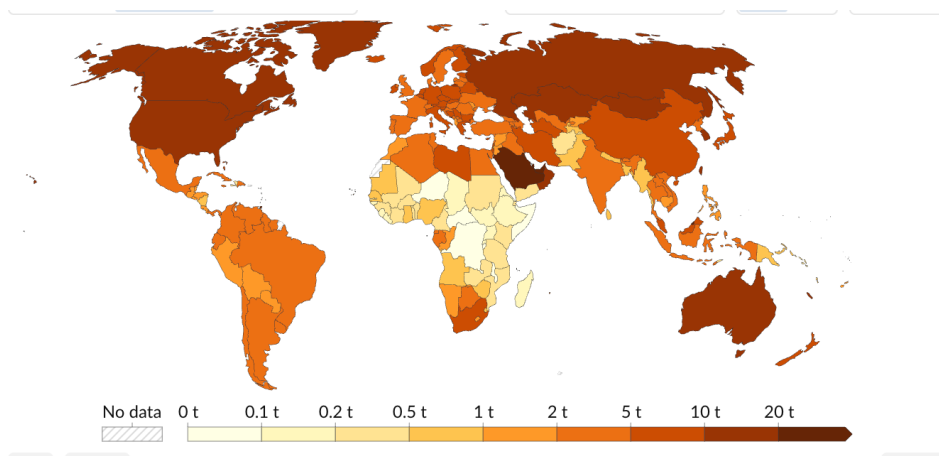
Πηγή: Global Carbon Project, 2023.

Η παραπάνω κατανομή των δεδομένων ανά χώρα δείχνει ότι, παρότι ορισμένα κράτη έχουν υψηλές συνολικές εκπομπές, η εικόνα αλλάζει δραματικά όταν οι εκπομπές εξεταστούν κατά κεφαλήν, κάτι που θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα.

3.5 Κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ - ανισότητες και τάσεις

Ένα βασικό σημείο που αξίζει να αναλυθεί είναι η αξιολόγηση των κατά κεφαλήν εκπομπών CO₂, η οποία παρέχει μια πιο δίκαιη εικόνα της συμβολής κάθε χώρας στην κλιματική αλλαγή. Έτσι εξισορροπούνται οι συνολικές εκπομπές με τον πληθυσμό. Τα στοιχεία του Global Carbon Project και της World Bank για το 2022 δείχνουν τεράστιες διαφοροποιήσεις, δηλαδή τα κράτη του Κόλπου, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Αυστραλία εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές (>15 tCO₂/άτομο), ενώ οι χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής παραμένουν κάτω από 1 tCO₂/άτομο (World Bank, 2023).

Η κατά κεφαλήν προσέγγιση αναδεικνύει τις διαφορές στην ανάληψη των ευθυνών για την κλιματική κρίση. Για παράδειγμα η Ινδία κατατάσσεται τρίτη στις συνολικές εκπομπές CO₂, αλλά οι κατά κεφαλήν εκπομπές της είναι μόλις 1,9 tCO₂/άτομο, δηλαδή κάτω από τον παγκόσμιο μέσο όρο (4,7 tCO₂/άτομο το 2022).



Εικόνα 1 Κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ ανά χώρα (2023), σε τόνους ανά άτομο ετησίως.

Η υψηλή ένταση σε κόκκινο αντικατοπτρίζει μεγάλες κατά-κεφαλήν εκπομπές (π.χ. ανεπτυγμένες χώρες, χώρες του Κόλπου) ενώ οι κίτρινες αποχρώσεις δείχνουν χαμηλές τιμές στις αναπτυσσόμενες χώρες. Πηγή: Our World in Data

Η διαχρονική ανάλυση από το 1990 δείχνει ότι οι κατά κεφαλήν εκπομπές στις αναπτυγμένες χώρες μειώνονται σταδιακά, ενώ σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες αυξάνονται καθώς οι ίδιες αποκτούν οικονομική ανάπτυξη και έτσι αυξάνεται και η ενεργειακή τους κατανάλωση.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ για επιλεγμένες χώρες και επισημαίνονται οι διαφοροποιήσεις μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων οικονομιών.

Πίνακας 3 Κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ (tCO₂/άτομο) για επιλεγμένες χώρες

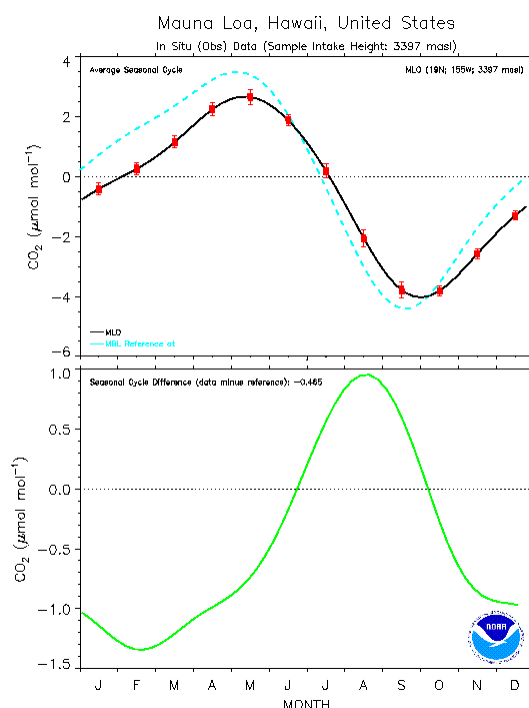
Χώρα	1990	2000	2010	2022
Κατάρ	29,5	38,2	43,1	37,0
ΗΠΑ	19,2	20,5	17,6	15,0
Αυστραλία	17,0	17,5	16,2	15,5
Γερμανία	14,0	10,5	9,3	8,1
Κίνα	2,2	2,9	6,8	8,0
Ινδία	0,8	1,0	1,5	1,9
Νιγηρία	0,5	0,6	0,7	0,8

Πηγή: Our World in Data, 2023.

Η ανάλυση αυτών των δεδομένων μας δείχνει ότι η μείωση των εκπομπών στις ανεπτυγμένες χώρες δεν αρκεί για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισιού, εφόσον δεν συνοδευτεί από βιώσιμη ανάπτυξη χαμηλών εκπομπών στις αναπτυσσόμενες οικονομίες.

3.6 Εποχικός κύκλος (seasonal cycle) και διακυμάνσεις

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία παρατηρείται πως, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα δεν παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους, αλλά εμφανίζει έναν χαρακτηριστικό εποχικό κύκλο. Ο κύκλος αυτός αποτυπώνεται κυρίως στις χρονοσειρές μετρήσεων από τον σταθμό Mauna Loa στη Χαβάη και φανερώνει την ισορροπία μεταξύ της απορρόφησης και της απελευθέρωσης CO_2 από τη χερσαία βλάστηση. Πιο συγκεκριμένα το βόρειο ημισφαίριο έχει πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτό εξαιτίας της μεγάλης ηπειρωτικής μάζας και της εκτεταμένης φυτοκάλυψης. (Keeling et al., 1976, NOAA, 2023)



Διάγραμμα 20 Ο εποχικός κύκλος συγκέντρωσης CO_2 στο Mauna Loa, όπως καταγράφεται από τον σταθμό της NOAA που απεικονίζει τις μηνιαίες αποκλίσεις της συγκέντρωσης από τον ετήσιο μέσο όρο, αποτυπώνοντας ξεκάθαρα την παγκόσμια εποχική διακύμανση της ατμόσφαιρας.

Πηγή: NOAA Global Monitoring Laboratory

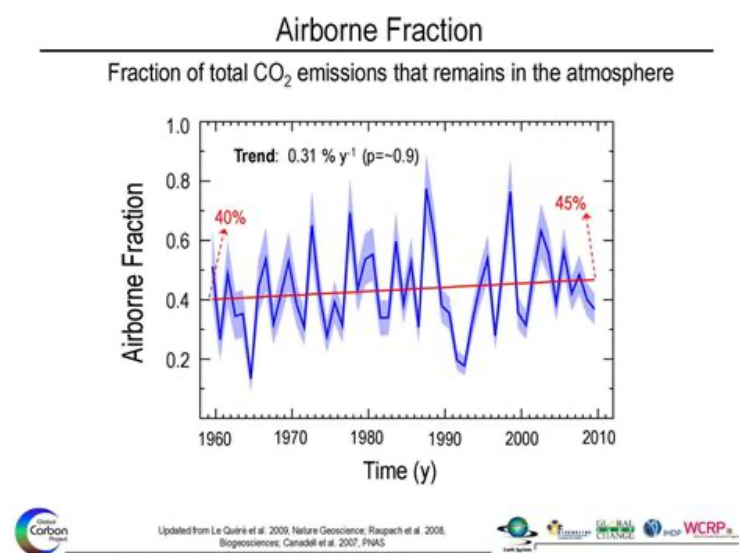
Η στατιστική ανάλυση δείχνει ότι το εύρος της εποχικής διακύμανσης έχει αυξηθεί με την πάροδο των χρόνων, φαινόμενο που σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή και τις αλλαγές στα οικοσυστήματα (Graven et al., 2013). Από τη δεκαετία του 1960 έως σήμερα, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης συγκέντρωσης CO_2 εντός του έτους έχει αυξηθεί περίπου κατά 15%. Το συγκεκριμένο γεγονός αποδίδεται στην αυξημένη φωτοσύνθεση λόγω επιμήκυνσης της βλαστικής περιόδου, αλλά και στις αυξημένες εκπομπές από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης τον χειμώνα.

Παράλληλα, το σχήμα του κύκλου παρουσιάζει μία ασυμμετρία. Η άνοδος των συγκεντρώσεων δηλαδή από το ελάχιστο προς το μέγιστο είναι ταχύτερη σε σχέση με την πτώση. Αυτό πιθανώς συνδέεται με διαφορές στη δυναμική απελευθέρωσης και απορρόφησης CO₂, καθώς και με την επίδραση κλιματικών ανωμαλιών, όπως το φαινόμενο Ελ Νίνιο. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί μετατόπιση στον χρόνο εμφάνισης των ετήσιων ελάχιστων και μέγιστων κατά 3-5 ημέρες. Αυτό μας αποκαλύπτει μεταβολές στην εποχικότητα των οικοσυστημάτων λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής (Forkel et al., 2016).

Η καταγραφή του εποχικού κύκλου λοιπόν, αποτελεί βασικό δείκτη για τη λειτουργία του παγκόσμιου κύκλου του άνθρακα και χρησιμοποιείται σε κλιματικά μοντέλα για τη βελτίωση των προβλέψεων αναφορικά με τις μελλοντικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου .

3.7 Airborne fraction και ροές άνθρακα μεταξύ δεξαμενών

Η έννοια του airborne fraction (AF) αναφέρεται στο ποσοστό των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂ που παραμένει στην ατμόσφαιρα μετά την απορρόφηση από τις φυσικές καταβόθρες όπως είναι για παράδειγμα οι ωκεανοί και η χερσαία βλάστηση.



Διάγραμμα 21 Η εξέλιξη του Airborne Fraction (περίοδος 1960-2009 περίπου) με γραφική απεικόνιση των ετήσιων διακυμάνσεων και μιας γενικής αύξησης στο ποσοστό του CO₂ που παραμένει στον ατμοσφαιρικό κύκλο.
Πηγή: Le Quéré et al. (2009), Nature Geoscience, Global Carbon Project

Στο Διάγραμμα 21 φαίνεται η εξέλιξη του airborne fraction ανά το χρόνο από το 1960 έως τον περίπου 2009. Η μπλε γραμμή αποτυπώνει το ετήσιο ποσοστό του CO₂ που παραμένει στην ατμόσφαιρα (airborne fraction), ενώ η κόκκινη γραμμή δείχνει την μακροπρόθεσμη τάση της αύξησης αυτού του ποσοστού. Η πορεία επιβεβαιώνει ότι με βάση το χρόνο το AF κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 40% και 50%, με εμφανείς αλλαγές την μείωση κατά τα έτη ισχυρού φαινομένου El Niño αλλά και μια μικρή τάση αύξησης περίπου +0,3 % ανά έτος, σύμφωνα με τα δεδομένα του GCP.

Από την άλλη πλευρά, κάποιες νεότερες αναλύσεις με στατιστικές μεθόδους υποδεικνύουν ένα σταθερό AF κοντά στο 44% ($\pm 1,1$ %) για την περίοδο 1959-2022, ενώ κάποιες άλλες μελέτες (2019) δεν βρήκαν στατιστικά σημαντική αύξηση και δηλώνουν ότι ο ρυθμός απορρόφησης από καταβόθρες άνθρακα ενδέχεται να μειώνεται ελαφρά, περίπου στο 0,54% ετησίως.

Υπολογίζεται ως: $AF = \frac{\Delta Catm}{Eanth}$

όπου $\Delta Catm$ είναι η ετήσια αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα (σε GtC ή ppm) και $Eanth$ είναι οι συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και οι αλλαγές χρήσης γης.

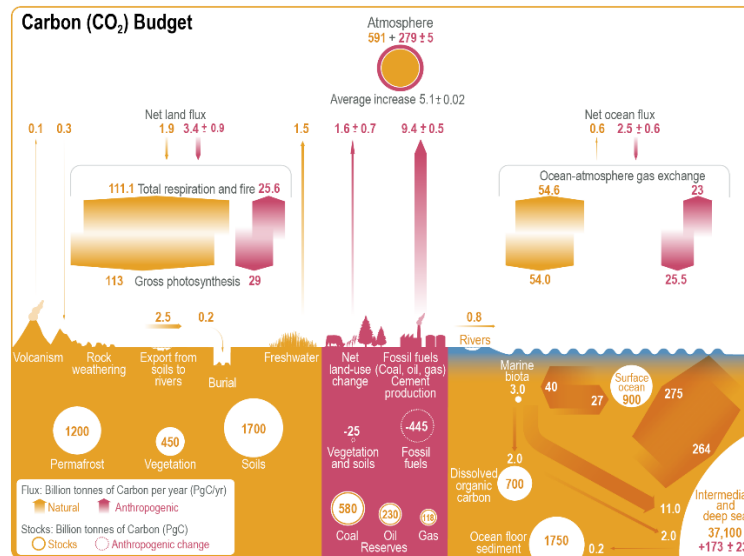
Ιστορικά, το AF διατηρείται γύρω στο 44-46 % από τη δεκαετία του 1960 (Le Quéré et al., 2022) αν και παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ ετών καθώς επηρεάζεται από φαινόμενα όπως το El Niño και τη μεταβλητότητα στις ωκεάνιες και χερσαίες δεξαμενές άνθρακα.

Το AF ορίζεται σε ετήσια βάση και οι βραχυχρόνιες αποκλίσεις οφείλονται στο ENSO και ηφαιστειακές εκρήξεις, ενώ η πολυετής τάση δείχνει τη σταδιακή μεταβολή της ικανότητας των δεξαμενών.

Ροές άνθρακα μεταξύ δεξαμενών

Ο παγκόσμιος κύκλος του άνθρακα περιλαμβάνει τρεις βασικές δεξαμενές άνθρακα. Η πρώτη είναι η ατμόσφαιρα, η οποία περιέχει περίπου 880 gigatonnes άνθρακα (GtC). Η δεύτερη είναι οι ωκεανοί, οι οποίοι αποθηκεύουν περίπου 38.000 GtC συνήθως στη μορφή διαλυμένου ανόργανου άνθρακα. Η τρίτη είναι η χερσαία βιόσφαιρα, η οποία περιλαμβάνει μεταξύ 2.000 και 3.000 GtC αποθηκευμένα στη βιομάζα και στο έδαφος.

Οι ροές άνθρακα μεταξύ αυτών των δεξαμενών καθορίζονται από φυσικές διεργασίες όπως για παράδειγμα η φωτοσύνθεση, η αναπνοή και η διάχυση CO₂ στο νερό, αλλά και ανθρωπογενείς διεργασίες, όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση και αλλαγές χρήσης γης.



Διάγραμμα 22 Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα με εκτιμώμενες ετήσιες ροές (PgC yr⁻¹) και αποθέματα άνθρακα σε κάθε δεξαμενή. Οι κίτρινες και ροζ διαδρομές απεικονίζουν φυσικές και ανθρωπογενείς ροές αντίστοιχα (IPCC, AR6, Figure 5.12).

Το Διάγραμμα 22 αναπαριστά με σαφήνεια τη δυναμική του κύκλου άνθρακα. Παρατηρούμε ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές που είναι 445 PgC ως το 2019, διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο μόνο ένα τμήμα αυτών απορροφάται από τη χερσαία βλάστηση, περίπου 29 PgC/έτος και τους ωκεανούς περίπου 23 PgC/έτος ενώ το υπόλοιπο συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση του διοξειδίου. Αυτό επιβεβαιώνει και τον υπολογισμό του *airborne fraction* που είναι περίπου 10-11 PgC/έτος ως πλεονάζον ανθρωπογενές CO₂ όπως έχει ήδη αναλυθεί παραπάνω σε αυτή την ενότητα.

Σύμφωνα με το Global Carbon Budget 2023, το 2022 οι ανθρωπογενείς εκπομπές ήταν περίπου 40,7 GtCO₂ από τις οποίες απορροφήθηκαν σχεδόν 2,8 GtCO₂ από τους ωκεανούς, σχεδόν 13,9 GtCO₂ από τη χερσαία βλάστηση και τα εδάφη, ενώ περίπου 16,9 GtCO₂ παρέμειναν στην ατμόσφαιρα, αυξάνοντας έτσι τη συγκέντρωση κατά περίπου 2,18 ppm.

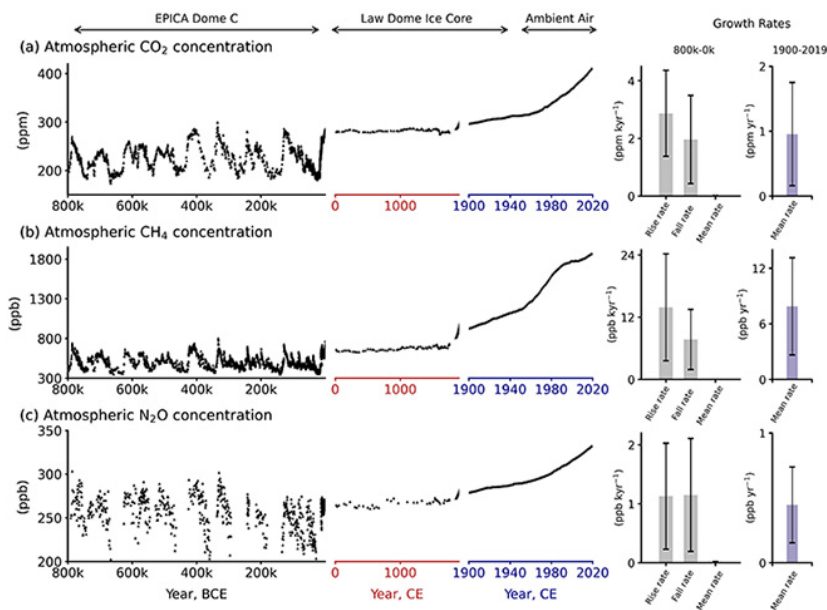
Σημασία παρακολούθησης του AF

Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του AF υποδηλώνει ότι οι φυσικές καταβόθρες απορροφούν σταθερά περίπου το 55-56 % των εκπομπών. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι η ικανότητα αυτή μπορεί να μειωθεί υπό συνθήκες όπως η αυξημένη θερμοκρασία, οξίνιση των ωκεανών και οι αλλαγές στη χρήση γης (Canadell et al., 2021). Η μείωση του ρυθμού απορρόφησης θα σημάνει μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών που παραμένει στην ατμόσφαιρα και θα επιταχύνει δραστικά την κλιματική αλλαγή.

3.8 Εξέλιξη CO₂ σε σύγκριση με άλλα αέρια του θερμοκηπίου ποσοτικά

Στη συνέχεια, αξίζει να αναφερθεί πως η ποσοτική ανάλυση των συγκεντρώσεων των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την μεταβολή στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης και επίσης στην παγκόσμια θέρμανση. Τα κυρίαρχα GHGs

που παρακολουθούνται σε παγκόσμια κλίμακα είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και οι φθοριούχες ενώσεις (HFCs, PFCs, SF_6).



Διάγραμμα 23 Η εξέλιξη των συγκεντρώσεων CO_2 , CH_4 και N_2O στην ατμόσφαιρα, 1980-2020, βασισμένο σε παγκόσμιες μετρήσεις από δίκτυα παρατήρησης (IPCC, 2021).

Το Διάγραμμα 23 απεικονίζει τις μεταβολές των σημαντικότερων ατμοσφαιρικών GHGs - CO_2 , CH_4 και N_2O - σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Είναι μία ένδειξη ότι ενώ οι συγκεντρώσεις στην προβιομηχανική περίοδο παρέμεναν σταθερές για χιλιάδες χρόνια από το 20ό αιώνα και μετά παρουσιάζεται μία απότομη αύξηση. Τα στοιχεία αυτά αποδεικνύουν πάλι τη συνεισφορά του διοξειδίου του άνθρακα στην αλλαγή του κλίματος, αλλά και τον μείζονά ρόλο του μεθανίου και του διοξειδίου του αζώτου, που παρόλο που έχουν μικρότερη συγκέντρωση έχουν υψηλότερη ικανότητά να παγιδεύουν θερμότητα στην ατμόσφαιρα.

Ιστορική Εξέλιξη Συγκεντρώσεων

Η ιστορική εξέλιξη των συγκεντρώσεων των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου αναδεικνύει τη σημαντική ανθρώπινη επίδραση στην σύνθεση τους στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής και μεταβιομηχανικής περιόδου. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) αρχικά, αυξήθηκε από περίπου 280 ppm κατά την προβιομηχανική εποχή σε επίπεδα άνω των 420 ppm σήμερα, σύμφωνα με τις συνεχείς μετρήσεις στο παρατηρητήριο Mauna Loa (NOAA, 2023). Παράλληλα, η συγκέντρωση του μεθανίου (CH_4) ανήλθε από περίπου 722 ppb σε πάνω από 1.900 ppb, με σημαντική αύξηση από τη δεκαετία του 1980 και έπειτα, κυρίως λόγω γεωργικών δραστηριοτήτων όπως είναι οι ρυζοκαλλιέργειες και η εκτροφή μηρυκαστικών, λόγω εξόρυξης και χρήσης ορυκτών καυσίμων, καθώς και εξαιτίας της σταδιακής αποσταθεροποίησης παγωμένων εδαφών (permafrost) σε πολικές περιοχές (IPCC, 2021). Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) αυξήθηκε από περίπου 270 ppb σε 335 ppb, με κύριες πηγές τη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων και βιομηχανικές διεργασίες (WMO, 2022). Τέλος, οι φθοριούχες ενώσεις όπως οι HFCs, PFCs και SF_6 , οι οποίες δεν υπήρχαν σε σημαντικές συγκεντρώσεις

φυσικά πριν τη βιομηχανική εποχή παρουσιάζουν πλέον σταθερή άνοδο εξαιτίας της χρήσης ψυκτικών μέσων, μονωτικών υλικών και άλλων εξειδικευμένων βιομηχανικών εφαρμογών (NOAA, 2023).

Συμβολή στο ενεργειακό ισοζύγιο της Γης

Σύμφωνα με το IPCC AR6, η συνολική θετική ενεργειακή μεταβολή στην ατμόσφαιρα από τα GHGs το 2019 σε σχέση με το 1750 εκτιμάται σε +3,22 W/m², με την ακόλουθη κατανομή:

- CO₂: περίπου 2,16 W/m² (67% της συνολικής επιβάρυνσης)
- CH₄: περίπου 0,54 W/m²
- N₂O: περίπου 0,21 W/m²
- Φθοριούχες ενώσεις: περίπου 0,11 W/m²

Αυτά τα στοιχεία δείχνουν κατά πόσο παρά τη μικρότερη συγκέντρωση και διάρκεια ζωής ορισμένων GHGs, η ικανότητά τους να παγιδεύουν θερμότητα είναι πολύ μεγαλύτερη ανά μόριο από το CO₂. Ωστόσο η τεράστια ποσότητα CO₂ καθιστά αυτό το αέριο τον κυρίαρχο παράγοντα επιβάρυνσης.

Η στατιστικές αναλύσεις των δεδομένων δείχνουν ότι οι ρυθμοί αύξησης διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των αερίων. Το CO₂ αυξάνεται κατά περίπου 2,4 ppm/έτος την τελευταία δεκαετία, ενώ το CH₄ παρουσιάζει ετήσια αύξηση περίπου 10-15 ppb και το N₂O περίπου 0,85 ppb (NOAA, 2023). Αυτές οι αυξήσεις αντικατοπτρίζουν τις διαφορετικές πηγές και μηχανισμούς απομάκρυνσης από την ατμόσφαιρα (IPCC, 2021).

Το μεθάνιο έχει πολύ υψηλότερο Global Warming Potential (GWP) σε χρονικό όριο 20 ετών, δηλαδή περίπου 84-86 φορές το GWP του CO₂. Ωστόσο έχει μικρότερο χρόνο παραμονής περίπου στα 12 έτη και έτσι καθίσταται απαραίτητος στόχος για την βραχυπρόθεσμη μείωση εκπομπών (Myhre et al., 2013). Αντίστοιχα το υποξείδιο του αζώτου έχει GWP περίπου 273 φορές μεγαλύτερο από το CO₂ και διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 100 έτη. Με αυτόν τον τρόπο συσσωρεύεται μακροχρόνια (Ramaswamy et al., 2019).

Η σύγκριση της επίδρασης των διαφόρων αερίων στην υπερθέρμανση της Γης μας δείχνει ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ο βασικός λόγος για την ανθρωπογενή κλιματική αλλαγή, καθώς προκαλεί περίπου τα δύο τρίτα της συνολικής ενεργειακής ανισορροπίας στην ατμόσφαιρα (Forster et al., 2021). Παρόλα αυτά, το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) έχουν επίσης σημαντική επίδραση. Ο περιορισμός των εκπομπών τους μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του ρυθμού υπερθέρμανσης του πλανήτη, ιδιαίτερα σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα (Shindell et al., 2012).

Επιπρόσθετα ορισμένα στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης που χρησιμοποιούν δεδομένα από το Global Carbon Project και το NOAA ESRL δείχνουν ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ επιβεβαιώνει πάνω από το 70% της διακύμανσης στη μέση παγκόσμια θερμοκρασία από το 1850. Από την άλλη πλευρά, η συνδυασμένη επίδραση του CO₂, του CH₄ και του N₂O μπορεί να εξηγήσει πάνω από το 90% της συνολικής ανθρωπογενούς υπερθέρμανσης (Matthews et al., 2009). Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη συμπληρωματική συμβολή και τη σωρευτική επίδραση των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου.

Η ταυτόχρονη στατιστική ανάλυση των κύριων αερίων του θερμοκηπίου φανερώνει ότι, παρά τις διαφορές σε συγκέντρωση, χρόνο παραμονής και συμβολής του στην υπερθέρμανση, η

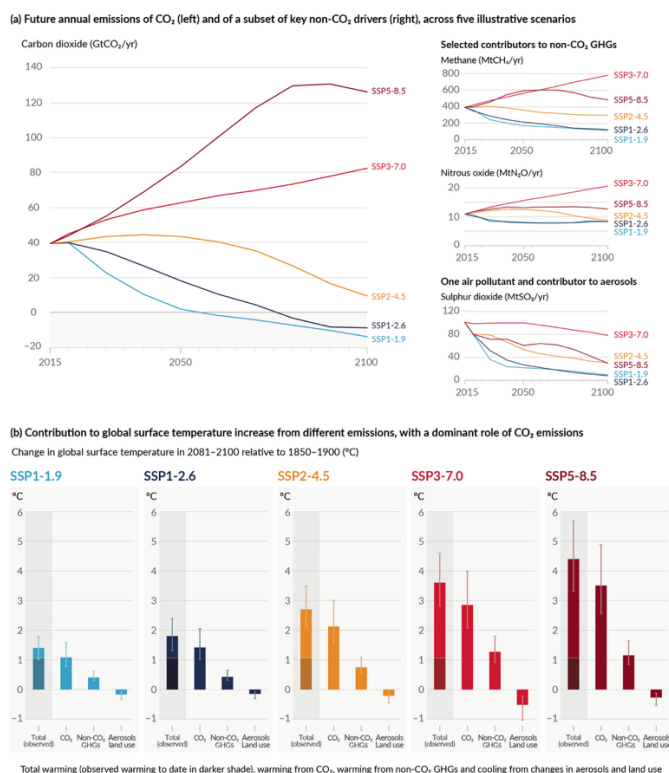
συνολική επίδρασή τους στο κλιματικό σύστημα είναι αθροιστική. Το CO₂ παραμένει ο μεγαλύτερος παράγοντας της υπερθέρμανσης μιας και έχει μακροχρόνια παραμονή και μεγάλη ποσότητα εκπομπών. Το CH₄ και το N₂O από την άλλη, αν και σε μικρότερες συγκεντρώσεις συμβάλλουν σημαντικά στην ενεργειακή ανισορροπία της Γης λόγω του υψηλού τους GWP.

3.9 Σενάρια μελλοντικών εκπομπών και συγκεντρώσεων

Αναφορικά με την πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας των εκπομπών και συγκεντρώσεων CO₂ βασίζεται σε μοντέλα κλιματικών και κοινωνικοοικονομικών σεναρίων. Ο Διακυβερνητικός Πίνακας για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) στην 6η Έκθεση Αξιολόγησης (AR6) χρησιμοποιεί το πλαίσιο Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) και περιγράφει πέντε βασικές αφηγήσεις για την παγκόσμια ανάπτυξη, την ενεργειακή χρήση και την πολιτική δράση (O'Neill et al., 2016).

Τα σενάρια αυτά ενσωματώνουν διαφορετικούς ρυθμούς οικονομικής ανάπτυξης, δημογραφικές τάσεις, τεχνολογικές καινοτομίες και πολιτικές για τον περιορισμό των εκπομπών. Για παράδειγμα το SSP1-1.9 αντιπροσωπεύει ένα σενάριο πολύ χαμηλών ρύπων με άμεση εφαρμογή κλιματικών πολιτικών, οδηγώντας σε μηδενικές καθαρές ποσότητες εκλυόμενου CO₂ γύρω στο 2050. Αντίθετα το SSP5-8.5 περιγράφει μία πραγματικότητα υψηλών εκπομπών με έντονη χρήση ορυκτών καυσίμων και περιορισμένες πολιτικές αντιμετώπισης. Αυτό οδηγεί σε υπερδιπλάσια αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ μέχρι το τέλος του αιώνα (IPCC, 2021).

Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions



Διάγραμμα 24 Ξεκάθαρη απεικόνιση των ετήσιων εκπομπών CO₂ και της αντίστοιχης συμβολής κάθε σεναρίου SSP στην παγκόσμια θερμοκρασιακή αύξηση έως το τέλος του αιώνα.

Η γραφική απεικόνιση του IPCC υπογραμμίζει την τεράστια απόκλιση που μπορεί να προκύψει μεταξύ των σεναρίων χαμηλών και υψηλών εκπομπών. Στο σενάριο SSP1-1.9, η ταχεία απανθρακοποίηση και οι έντονες πολιτικές μείωσης εκπομπών οδηγούν σε απότομη πτώση των εκπομπών CO₂ πριν το 2050, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας γύρω στο 1,5 °C. Αντίθετα, το SSP5-8.5 χαρακτηρίζεται από συνεχή αύξηση εκπομπών έως το τέλος του αιώνα, με συνέπεια μια πιθανή άνοδος των 4 °C. Τα ενδιάμεσα σενάρια, όπως το SSP2-4.5, αποτυπώνουν μία μέτρια δράση και οδηγούν σε αύξηση θερμοκρασίας περίπου 2,5-3 °C και επισημαίνουν την ανάγκη ενίσχυσης των υφιστάμενων πολιτικών για την αποφυγή των σοβαρότερων κλιματικών κινδύνων.

Η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA) παρουσιάζει αντίστοιχα τρία βασικά σενάρια που είναι το Stated Policies Scenario (STEPS) και βασίζεται στις υφιστάμενες πολιτικές και δεσμεύσεις, το Announced Pledges Scenario (APS) που περιλαμβάνει όλες τις δεσμεύσεις για μηδενικές εκπομπές αλλά όχι απαραίτητα πλήρη εφαρμογή τους, και το Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) που προβλέπει ριζικό μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος και επιτυχή επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού (IEA, 2023).

Η μελέτη αυτών των σεναρίων δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ των σεναρίων υψηλών και χαμηλών εκπομπών μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση στην επιβάρυνση του ενεργειακού ισοζυγίου της Γης (radiative forcing) κατά 3-4 W/m² έως το 2100 συνοδευόμενη από διαφορές θερμοκρασίας που ξεπερνούν τους 3 °C (Meinshausen et al., 2020). Η απόκλιση αυτή καταδεικνύει τη μεγάλη σημασία της έγκαιρης και αποφασιστικής δράσης για την απανθρακοποίηση.

Η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA) παρουσιάζει τρία κύρια σενάρια που αποτυπώνουν διαφορετικές πορείες μελλοντικών εκπομπών CO₂ και ενεργειακής μετάβασης (IEA, 2023):

Stated Policies Scenario (STEPS): Αντικατοπτρίζει τον αντίκτυπο των υφιστάμενων πολιτικών και δεσμεύσεων που έχουν ήδη θεσπιστεί από τις κυβερνήσεις. Στο σενάριο αυτό οι εκπομπές CO₂ συνεχίζουν να μειώνονται αργά μετά το 2030, αλλά η παγκόσμια θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 2,5-2,7 °C έως το 2100.

Announced Pledges Scenario (APS): Περιλαμβάνει όλες τις ανακοινωμένες δεσμεύσεις για κλιματική ουδετερότητα ακόμη και αν δεν έχουν ακόμη θεσπιστεί σε νομοθεσία ή εφαρμοστεί πλήρως. Εφόσον επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, η αύξηση της θερμοκρασίας περιορίζεται γύρω στους 1,8-1,9 °C.

Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE): Προϋποθέτει την πλήρη εφαρμογή πολιτικών που εξασφαλίζουν μηδενικές καθαρές εκπομπές CO₂ μέχρι το 2050. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί ριζικό μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος, μαζική διείσδυση ανανεώσιμων πηγών, εκτεταμένη χρήση τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS) καθώς και σημαντική βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Το σενάριο αυτό είναι όμοιο με τον στόχο της Συμφωνίας του Παρισιού για περιορισμό της θέρμανσης στους 1,5 °C.

Η σύγκριση των σεναρίων IPCC και IEA αναδεικνύει για ακόμη μία φορά τη σημασία της άμεσης υιοθέτησης πολιτικών που ευθυγραμμίζονται με τις διαδρομές χαμηλών εκπομπών. Η στατιστική απόκλιση μεταξύ STEPS και NZE είναι ενδεικτική του εύρους δράσης που απαιτείται δηλαδή οι εκπομπές CO₂ το 2050 μπορεί να κυμανθούν από περίπου 33 GtCO₂ (STEPS) έως

σχεδόν μηδενικά επίπεδα (NZE), με συνακόλουθη διαφορά θερμοκρασιακής αύξησης που υπερβαίνει τους 1,5 °C.

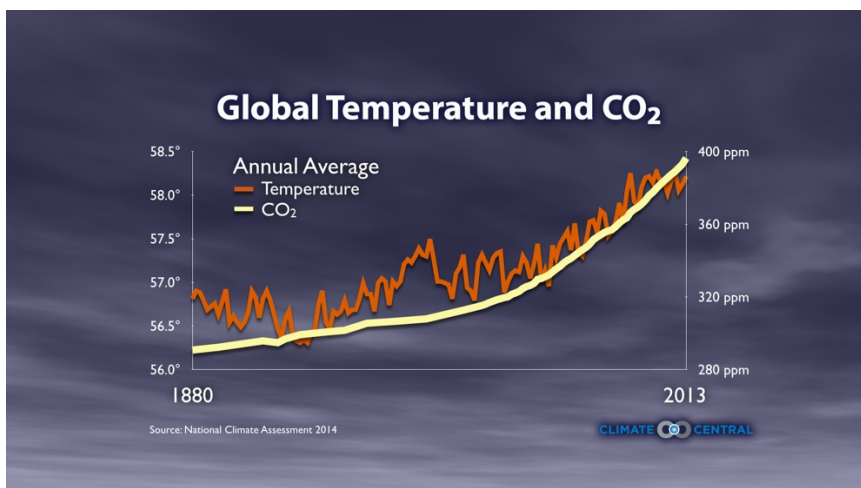
Οι διαφορές μεταξύ STEPS/APS/NZE και SSP οφείλονται σε διαφορετικά υποδείγματα πολιτικής και οικονομικής αποτίμησης άνθρακα, ωστόσο η σύγκλιση ως προς τον απαιτούμενο ρυθμό μείωσης μετά το 2030 είναι συγκεκριμένη.

Η ανάλυση των σεναρίων μελλοντικών εκπομπών και συγκεντρώσεων CO₂ υπογραμμίζει ότι οι επιλογές πολιτικής και τεχνολογίας των επόμενων δεκαετιών θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό την πορεία της κλιματικού κρίσης. Η υιοθέτηση σεναρίων σε χαμηλών εκπομπών, όπως τα σενάρια SSP1-1.9 του IPCC ή το NZE της IEA, απαιτεί συνδυασμένη δράση σε όλα τα επίπεδα, δηλαδή από την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα έως την προώθηση τεχνολογιών αρνητικών εκπομπών και την αναδιάρθρωση των προτύπων κατανάλωσης. Αντίθετα η περιορισμένη δράση οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂ και μη αναστρέψιμες κλιματικές επιπτώσεις, με σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες. Η στατιστική διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων καταδεικνύει ότι η επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού δεν είναι εύκολη και προϋποθέτει την άμεση και αποφασιστική εφαρμογή πολιτικών σε παγκόσμιο επίπεδο.

3.10 Σύνδεση στατιστικών CO₂ με παγκόσμια θερμοκρασιακή αύξηση

Μία σημαντική διάσταση του θέματος αποτελεί η σχέση μεταξύ της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας επιφάνειας και αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις άξονες της κλιματικής επιστήμης. Από φυσικοχημική άποψη, το CO₂ είναι ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου, το οποίο απορροφά και επανεκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα, παγιδεύοντας θερμότητα στο κλιματικό σύστημα. Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ μεταβάλλει το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης και ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου οδηγώντας σε θετικό ενεργειακό ισοζύγιο (radiative forcing) (Myhre et al., 1998, IPCC, 2021).

Πιο συγκεκριμένα στατιστικά, τα δεδομένα της περιόδου 1880-2023 δείχνουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων CO₂ και της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας επιφάνειας, με συντελεστή συσχέτισης $r > 0,9$ (NOAA, 2024, NASA GISS, 2024). Οι παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι για κάθε διπλασιασμό της συγκέντρωσης CO₂, η παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται κατά 2,5-4°C ένα εύρος που αποτελεί τον ορισμό της κλιματικής ευαισθησίας ισορροπίας (Charney et al., 1979, Sherwood et al., 2020). Η πορεία των τελευταίων δεκαετιών δείχνει ότι η άνοδος της θερμοκρασίας κατά περίπου 1,1°C σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο συνδέεται άμεσα με την αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂ από 280 ppm σε πάνω από 420 ppm (IPCC, 2021).



Διάγραμμα 25 Εξέλιξη της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας (πορτοκαλί γραμμή) και της συγκέντρωσης CO₂ (κίτρινη γραμμή) από το 1880 έως σήμερα.

Η παράλληλη ανοδική τάση υπογραμμίζει τη σχέση μεταξύ ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και υπερθέρμανσης (Climate Central)

Το διάγραμμα παρουσιάζει την ιστορική εξέλιξη τόσο των συγκεντρώσεων CO₂ όσο και της ανωμαλίας της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας. Η παράλληλη ανοδική πορεία των δύο μεταβλητών καθιστά εμφανή την κλιματική επίδραση του CO₂, ενώ οι βραχυχρόνιες αποκλίσεις οφείλονται στην εσωτερική μεταβλητότητα του κλιματικού συστήματος όπως για παράδειγμα το φαινόμενο Ελ Νίνιο και οι ηφαιστειακές εκρήξεις.

Η σύνδεση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα σενάρια μελλοντικής κλιματικής αλλαγής όπως είναι τα μοντέλα του IPCC που δείχνουν ότι κάθε πρόσθετη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,1°C απαιτεί μείωση του «ανθρακικού προϋπολογισμού» κατά περίπου 220 GtCO₂ (IPCC, 2021). Επομένως, η συνεχής αύξηση των συγκεντρώσεων CO₂, στην περίπτωση που δεν σταματήσει καθιστά αδύνατη την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού, καθώς η υπέρβαση των 1,5°C προβλέπεται πριν από τα μέσα του αιώνα ακόμη και σε μέτρια σενάρια εκπομπών.

Η στατιστική σχέση αυτή αποτελεί το επιστημονικό θεμέλιο πάνω στο οποίο σχεδιάζονται πολιτικές μείωσης εκπομπών και προσαρμογής. Η κατανόηση της δυναμικής μεταξύ του CO₂ και θερμοκρασίας επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων των σημερινών εκπομπών στο μέλλον και ενισχύει την ανάγκη για άμεση, ταχεία και μεγάλης κλίμακας απανθρακοποίηση.

Η παρούσα έρευνα αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο του διοξειδίου του άνθρακα στην εξέλιξη της κλιματικής αλλαγής, με τις συγκεντρώσεις του να έχουν αυξηθεί κατά περίπου 50% σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων και των αλλαγών χρήσεων γης. Οι εκπομπές παρουσιάζουν σημαντικές γεωγραφικές και κοινωνικοοικονομικές μεταβολές, ενώ η μακροχρόνια ανοδική τάση υπερσχύει των φυσικών εποχικών διακυμάνσεων. Παρά τη χαμηλότερη μεταβολή του ενεργειακού ισοζυγίου στην απόδοση ανά μόριο συγκριτικά με άλλα αέρια του θερμοκηπίου, η αφθονία και η μεγάλη διάρκεια ζωής του CO₂ το καθιστούν τον σημαντικότερο παράγοντα της παγκόσμιας υπερθέρμανσης.

Κεφάλαιο 4ο: Στατιστική Ανάλυση δεδομένων εκπομπών CO₂

Στη συνέχεια επιχειρείται η διερεύνηση πιθανών στατιστικών συσχετίσεων ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά κάτοικο και σε μια σειρά από κοινωνικοοικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, με στόχο την κατανόηση των μηχανισμών που καθορίζουν την ένταση και την κατανομή των εκπομπών. Η επιλογή του δείκτη «**εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο**» επιτρέπει μια αντιπροσωπευτική σύγκριση μεταξύ κρατών και περιοχών. Ταυτόχρονα εξουδετερώνει την επίδραση του μεγέθους του πληθυσμού και αναδεικνύει τη συσχέτιση με το βιοτικό επίπεδο, την ενεργειακή κατανάλωση και τις οικονομικές δομές.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εξετάστηκαν καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων. Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο περιλαμβάνουν το κατά κεφαλήν εισόδημα, δείκτες υγείας (παιδική θνησιμότητα), καθώς και δείκτες κοινωνικής ευημερίας (life satisfaction). Σε ενεργειακό επίπεδο, αξιολογούνται τόσο η κατανάλωση και παραγωγή ορυκτών καυσίμων όσο και η συμμετοχή διαφορετικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής (άνθρακας, φυσικό αέριο, ανανεώσιμες πηγές). Παράλληλα εξετάζονται ειδικοί τομείς εκπομπών, όπως οι μεταφορές και οι αερομεταφορές, οι οποίοι αποτελούν σημαντικούς επιμέρους συντελεστές του ανθρακικού αποτυπώματος.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω **παράγοντες/ μεταβλητές**.

(α) οικονομικοί

- Κατά κεφαλήν εισόδημα.
- Αεροπορικά ταξίδια ανά κάτοικο.

(β) κοινωνικοί

- Παιδική θνησιμότητα.
- Ικανοποίηση από τη ζωή.

(γ) περιβαλλοντικοί

- Εκπομπές CO₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο.
- Εκπομπές CO₂ από μεταφορές ανά κάτοικο.
- Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο.
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα.
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φυσικό αέριο.
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.
- Παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο.
- Παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο.
- PM2.5 μέση ετήσια έκθεση (μg/m³, 2020).
- PM2.5 συγκέντρωση σε κατοικίες (μg/m³, 2019).
- Ετήσια μεταβολή δασικής έκτασης (ha/year, 2015).
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια.
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη/άνθρακα.
- Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού MINITAB (version 22), μέσω του οποίου εκτιμήθηκαν συντελεστές συσχέτισης (R) και προσδιορισμού (R^2), πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σημαντικότητας (P-Values), καθώς και απλές γραμμικές παλινδρομήσεις για την ποσοτικοποίηση της σχέσης κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής με τις εκπομπές CO₂. Τα αποτελέσματα οργανώθηκαν σε πίνακες και διαγράμματα διασποράς, ώστε να αποτυπωθούν με σαφήνεια οι γενικές τάσεις, οι πιθανές αποκλίσεις και η παρουσία ακραίων τιμών (outliers) που συχνά επηρεάζουν καθοριστικά τη στατιστική εικόνα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της πολυπαραγοντικής φύσης του φαινομένου, οι συσχετίσεις δεν είναι πάντα ισχυρές ή γραμμικές. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρούνται χαμηλές τιμές R^2 , γεγονός που μας δείχνει ότι οι εξεταζόμενοι δείκτες από μόνοι τους δεν επαρκούν για να εξηγήσουν τη συνολική μεταβλητότητα των εκπομπών. Ακόμα, μπορεί να υπάρχουν ακραίες τιμές ή να μην έχουν καταγραφεί δεδομένα. Παρ' όλα αυτά η ανάλυση παρέχει σημαντικές ενδείξεις για τον ρόλο επιμέρους κοινωνικοοικονομικών και ενεργειακών παραγόντων και συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας σφαιρικής εικόνας για τους βασικούς προσδιοριστές των εκπομπών CO₂ σε διεθνές επίπεδο.

(I) Κατά κεφαλήν εισόδημα (GDP per capita)

Ο πρώτος παράγοντας/μεταβλητή που εξετάζεται είναι το **κατά κεφαλήν εισόδημα** (GDP per capita).

Model Summary

Πίνακας 4. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος

S	R-sq	R-sq(adj)
3.95475	40.91%	40.54%

Analysis of Variance

Πίνακας 5. ANOVA εκπομπών CO₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	1733	1732.66	110.78
GDP per capita (USD, 2023)	1	1733	1732.66	110.78
Error	160	2502	15.64	
Total	161	4235		

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι υπάρχει μια ισχυρή θετική σχέση ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και στο κατά κεφαλήν εισόδημα. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 40,91\%$, που σημαίνει ότι περίπου το 41% της μεταβλητότητας στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από τη μεταβλητότητα στο κατά κεφαλήν εισόδημα. Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ($R=0,64$) είναι επίσης υψηλή, γεγονός που υποδεικνύει ισχυρή θετική κατεύθυνση στη σχέση.

Ακόμα, από τον πίνακα ανάλυσης διασποράς (ANOVA) φαίνεται ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001 < 0.05$), κάτι που επιβεβαιώνει ότι το κατά κεφαλήν εισόδημα αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα πρόβλεψης των εκπομπών CO₂.

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 0.903 + 0.0001258 * \text{GDP per capita (USD, 2023)}$$

Coefficients

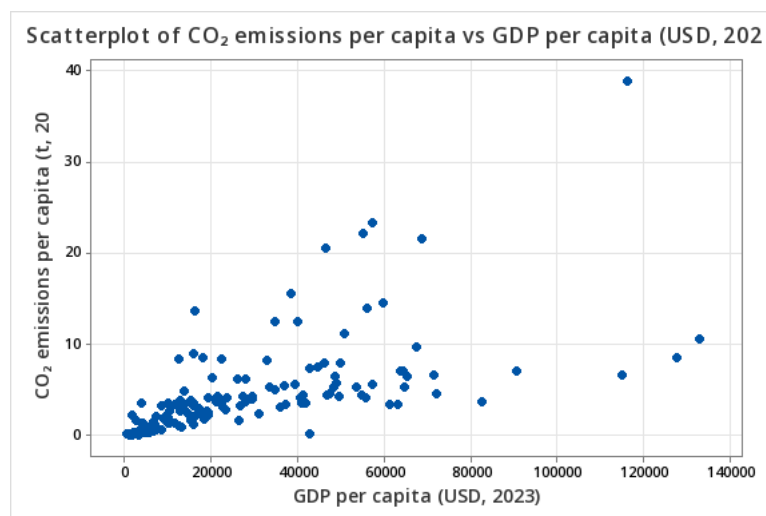
Πίνακας 6. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.903	0.437	2.07	0.041	
GDP per capita (USD, 2023)	0.000126	0.000012	10.53	0.000	1.00

Αν κάποιος επιθυμεί να κατασκευάσει ένα απλό γραμμικό μοντέλο για την πρόβλεψη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα βάσει του κατά κεφαλήν εισοδήματος, τότε από τον πίνακα της παλινδρόμησης προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 0.903 + 0.0001258 * \text{GDP per capita (USD, 2023)}$$

Το θετικό πρόσημο του συντελεστή της ανεξάρτητης μεταβλητής υποδηλώνει ότι η αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος σχετίζεται με την αύξηση των εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο.



Διάγραμμα 26 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - κατά κεφαλήν εισοδήματος.

Η γραφική απεικόνιση ενισχύει το συμπέρασμα αυτό: όσο αυξάνεται το εισόδημα, τόσο αυξάνονται και οι εκπομπές CO₂, γεγονός που αντανάκλα την άμεση σύνδεση του οικονομικού επιπέδου μιας χώρας με το ενεργειακό της αποτύπωμα. Στις χώρες με υψηλό κατά κεφαλήν εισόδημα, το επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας και οι μεταφορικές ανάγκες είναι μεγαλύτερες, οδηγώντας σε αυξημένες εκπομπές. Ωστόσο, παρατηρείται ότι σε πολύ υψηλά επίπεδα εισοδήματος ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών τείνει να σταθεροποιείται, πιθανόν λόγω

στροφής σε καθαρότερες μορφές ενέργειας και εφαρμογής αυστηρότερων περιβαλλοντικών πολιτικών.

(II) Παιδική θνησιμότητα (Child mortality rate)

Ο δεύτερος παράγοντας που εξετάζεται είναι το **ποσοστό παιδικής θνησιμότητας** (child mortality rate).

Model Summary

Πίνακας 7. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - παιδικής θνησιμότητας.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.57620	20.88%	20.39%	19.22%

Από τα αποτελέσματα προκύπτει μια αρνητική, σχετικά ασθενής, σχέση ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και στην παιδική θνησιμότητα. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 20,88\%$, που δείχνει ότι περίπου το 21% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ εξηγείται από τις μεταβολές του ποσοστού παιδικής θνησιμότητας. Η τιμή αυτή, αν και χαμηλότερη σε σύγκριση με την περίπτωση του κατά κεφαλήν εισοδήματος, παραμένει ενδεικτική μιας ουσιαστικής σχέσης.

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) δείχνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001 < 0.05$), στοιχείο που επιβεβαιώνει την ύπαρξη σταθερής και ισχυρής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Analysis of Variance

Πίνακας 8. ANOVA εκπομπών CO₂ - παιδικής θνησιμότητας

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	884.4	884.41	42.23
Child mortality rate (% , 2023)	1	884.4	884.41	42.23
Error	160	3350.7	20.94	
Lack-of-Fit	131	2390.3	18.25	0.55
Pure Error	29	960.3	33.11	
Total	161	4235.1		

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 6.392 - 0.900 * \text{Child mortality rate (\%, 2023)}$$

Coefficients

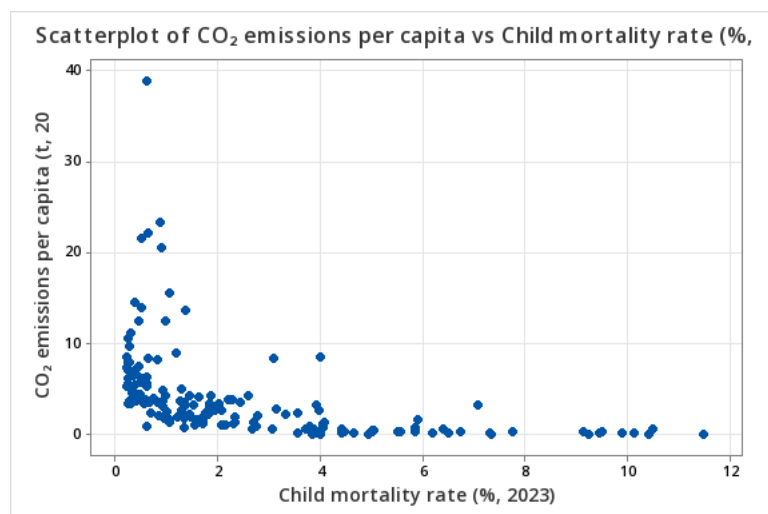
Πίνακας 9. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO₂ - παιδικής θνησιμότητας.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	6.392	0.499	12.80	0.000	
Child mortality rate (% , 2023)	-0.900	0.139	-6.50	0.000	1.00

Η εξίσωση της γραμμικής παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 6.392 - 0.900 * \text{Child mortality rate (\%, 2023)}$$

Το αρνητικό πρόσημο του συντελεστή δείχνει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της παιδικής θνησιμότητας, τόσο μειώνονται οι εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι οι χώρες με υψηλά ποσοστά παιδικής θνησιμότητας είναι κατά κανόνα χαμηλότερου οικονομικού και βιομηχανικού επιπέδου, με μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και συνεπώς περιορισμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.



Διάγραμμα 27 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - παιδικής θνησιμότητας

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ξεκάθαρα η αρνητική σχέση ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και το ποσοστό παιδικής θνησιμότητας. Στις χώρες με υψηλή παιδική θνησιμότητα (πάνω από 4%-5%) οι εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο παραμένουν χαμηλές, σχεδόν συγκεντρωμένες κοντά στο μηδέν. Αντίθετα, οι χώρες με χαμηλή παιδική θνησιμότητα εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά τιμών, με αρκετές περιπτώσεις να καταγράφουν πολύ υψηλές εκπομπές CO₂ (ακόμα και άνω των 20 τόνων ανά κάτοικο).

Η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού σημείων στα χαμηλά ποσοστά θνησιμότητας και στις υψηλότερες εκπομπές αποτυπώνει τη συσχέτιση μεταξύ κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ειδικότερα, καθώς η μείωση της παιδικής θνησιμότητας

αποτελεί ένδειξη βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και του συστήματος υγείας, αυτή η πρόοδος συνδέεται συχνά με μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, άρα και με περισσότερες εκπομπές CO₂.

(III) Ικανοποίηση από τη ζωή (Self-reported Life satisfaction)

Η επόμενη μεταβλητή που εξετάζεται είναι ο **δείκτης ικανοποίησης από τη ζωή** (self-reported life satisfaction).

Πίνακας 4.3.1: Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.

Model Summary

Πίνακας 10. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.85411	27.74%	27.23%	25.89%

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μια θετική σχέση ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και στον δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 27,74\%$, που σημαίνει ότι σχεδόν το 28% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από τη μεταβλητότητα στον δείκτη ικανοποίησης. Η τιμή αυτή είναι μέτρια αλλά αξιοσημείωτη, καθώς υποδηλώνει ότι η ποιότητα ζωής συνδέεται με σημαντικό τρόπο με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001 < 0.05$), επομένως η μεταβλητή «life satisfaction» μπορεί να θεωρηθεί έγκυρος παράγοντας εξήγησης των εκπομπών CO₂.

Πίνακας 4.3.2: ANOVA εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.

Analysis of Variance

Πίνακας 11. ANOVA εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	809.7	809.660	54.51
Self-reported life satisfaction	1	809.7	809.660	54.51
Error	142	2109.3	14.854	
Lack-of-Fit	122	1914.0	15.689	1.61
Pure Error	20	195.2	9.762	
Total	143	2919.0		

Πίνακας 12. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή.

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = -6.78 + 1.978 * \text{Self-reported life satisfaction}$$

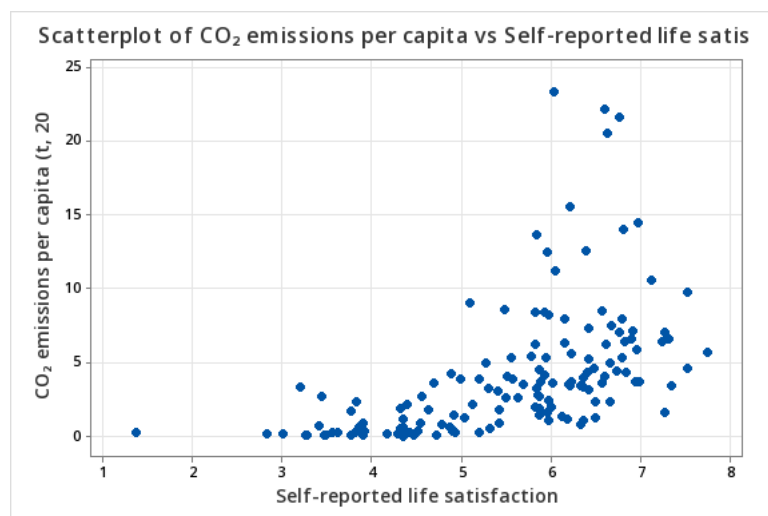
Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-6.78	1.51	-4.48	0.000	
Self-reported life satisfaction	1.978	0.268	7.38	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = -6.78 + 1.978 * \text{Life satisfaction}$$

Ο θετικός συντελεστής δείχνει ότι υψηλότερη ικανοποίηση από τη ζωή σχετίζεται με υψηλότερες εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι εύλογο, καθώς η βελτίωση της ποιότητας ζωής συχνά συνδέεται με αυξημένα επίπεδα κατανάλωσης, ενεργειακή ζήτηση και οικονομική ανάπτυξη, τα οποία οδηγούν σε υψηλότερες εκπομπές.



Διάγραμμα 28 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - δείκτη ικανοποίησης από τη ζωή

Η γραφική απεικόνιση επιβεβαιώνει τη θετική αυτή σχέση: χώρες με υψηλότερα επίπεδα ευημερίας εμφανίζουν συχνά μεγαλύτερες εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει την περιβαλλοντική διάσταση της κοινωνικής ευημερίας, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση της ποιότητας ζωής δεν είναι αποκομμένη από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

(IV) Αεροπορικά ταξίδια ανά κάτοικο Air travel trips per capita)

Η ανάλυση της σχέσης ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και στον αριθμό αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο (air travel trips per capita) δείχνει ότι οι δύο μεταβλητές συνδέονται θετικά και με στατιστικά σημαντικό τρόπο.

Model Summary

Πίνακας 13. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.97000	8.07%	7.48%	5.05%

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 8.07\%$, πράγμα που σημαίνει ότι περίπου το 8% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από τη μεταβλητότητα στον αριθμό αεροπορικών ταξιδιών. Το ποσοστό αυτό δεν είναι υψηλό, αλλά δείχνει μια υπαρκτή σχέση.

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) επιβεβαιώνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value = 0.000 < 0.05). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η αύξηση των αεροπορικών ταξιδιών σχετίζεται ουσιαστικά με υψηλότερες εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο.

Analysis of Variance

Πίνακας 14. ANOVA εκπομπών CO₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	340.3	340.345	13.78
Air travel trips per capita (20	1	340.3	340.345	13.78
Error	157	3878.0	24.701	
Lack-of-Fit	93	3335.7	35.867	4.23
Pure Error	64	542.4	8.475	
Total	158	4218.4		

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 3.351 + 0.816 * \text{Air travel trips per capita (2019)}$$

Coefficients

Πίνακας 15. Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.

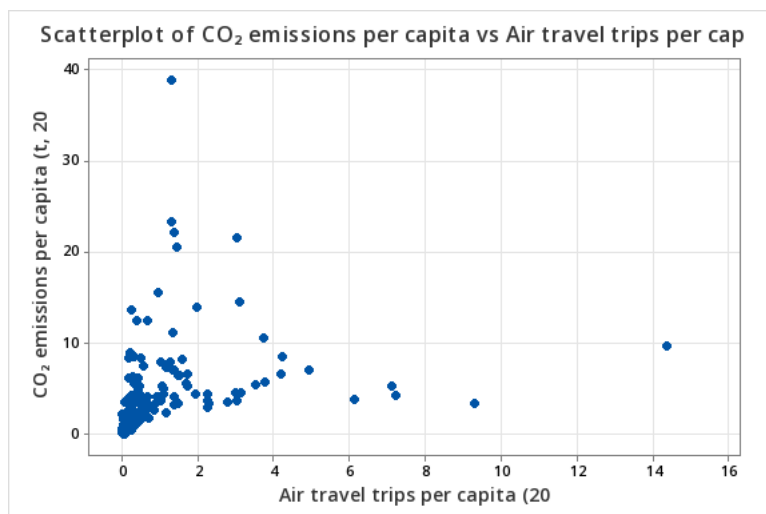
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3.351	0.451	7.43	0.000	
Air travel trips per capita (2019)	0.816	0.220	3.71	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης έχει τη μορφή:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 3.351 + 0.816 * \text{Air travel trips per capita}$$

Το θετικό πρόσημο του συντελεστή (0.816) δείχνει ότι κάθε πρόσθετο αεροπορικό ταξίδι ανά κάτοικο συνδέεται κατά μέσο όρο με αύξηση των εκπομπών CO₂ κατά 0.816 τόνους ανά άτομο. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι αερομεταφορές αποτελούν έναν από τους πιο ενεργοβόρους τομείς μεταφορών και συμβάλλουν σημαντικά στο ανθρακικό αποτύπωμα, ιδιαίτερα σε χώρες με ανεπτυγμένη τουριστική και επιχειρηματική δραστηριότητα.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, παρότι το R² δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό (δηλαδή δεν αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που εκπομπών CO₂), η σχέση παραμένει στατιστικά ισχυρή και αποκαλύπτει την άμεση συμβολή του αεροπορικού τομέα στις εθνικές συνολικές εκπομπές.



Διάγραμμα 29 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - αριθμού αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο.

Στο παραπάνω διάγραμμα διασποράς αποτυπώνεται η θετική σχέση ανάμεσα στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο και στον αριθμό αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των χωρών συγκεντρώνεται σε χαμηλές τιμές (0-2 ταξίδια ανά κάτοικο), με σχετικά χαμηλές εκπομπές CO₂. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις όσο αυξάνεται

ο αριθμός αεροπορικών ταξιδιών, εμφανίζονται περιπτώσεις με υψηλότερες εκπομπές CO₂ (πάνω από 20 τόνους ανά κάτοικο).

Η διασπορά αυτή δείχνει πως, αν και οι αερομεταφορές δεν εξηγούν από μόνες τους το σύνολο των εκπομπών, αποτελούν σημαντικό παράγοντα που συνεισφέρει στην αύξηση τους, ειδικά σε χώρες με υψηλή κινητικότητα, ανεπτυγμένο τουρισμό ή επιχειρηματική δραστηριότητα.

(V) Εκπομπές CO₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο (Per capita CO₂ emissions from aviation)

Η μεταβλητή που εξετάζεται στη συνέχεια είναι οι εκπομπές CO₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο (per capita CO₂ emissions from aviation).

Model Summary

Πίνακας 16. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από αερομεταφορές.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.01521	44.36%	43.82%	33.25%

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μια ισχυρή, θετική συσχέτιση. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι R² = 44.36%, που σημαίνει ότι σχεδόν το 44% της διακύμανσης στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο μπορεί να εξηγηθεί από τις εκπομπές CO₂ που προέρχονται ειδικά από τον τομέα των αερομεταφορών. Το ποσοστό αυτό είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με τις προηγούμενες μεταβλητές που εξετάστηκαν, δείχνοντας τη σημαντική συμβολή του συγκεκριμένου τομέα στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value < 0.001). Επομένως, η μεταβλητή αυτή αποτελεί ουσιαστικό παράγοντα πρόβλεψης των συνολικών εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο.

Analysis of Variance

Πίνακας 17. ANOVA εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από αερομεταφορές.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	1336.70	1336.70	82.91
Per capita CO2 emissions from a	1	1336.70	1336.70	82.91
Error	104	1676.68	16.12	
Lack-of-Fit	84	1600.09	19.05	4.97
Pure Error	20	76.59	3.83	
Total	105	3013.37		

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 2.901 + 0.006338 * \text{Per capita CO}_2 \text{ emissions from aviation}$$

Coefficients

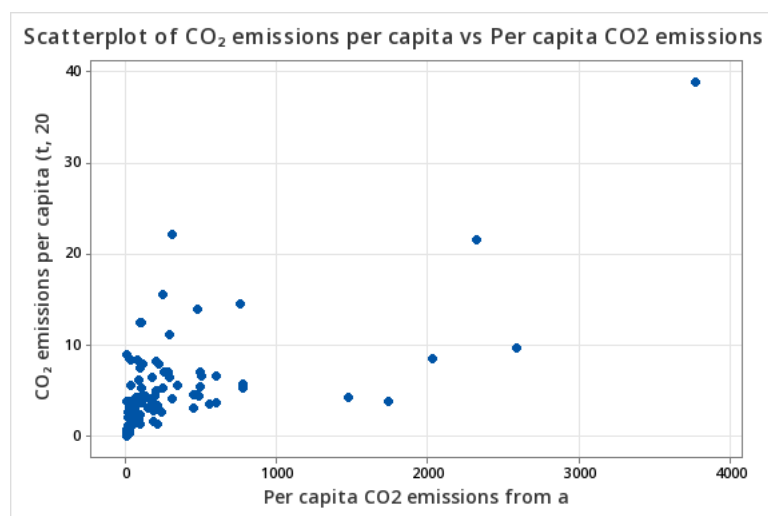
Πίνακας 18.Απλή γραμμική παλινδρόμηση εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από αερομεταφορές

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.901	0.436	6.66	0.000	
Per capita CO2 emissions from aviation	0.006338	0.000696	9.11	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης έχει τη μορφή:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 2.901 + 0.006338 * \text{Per capita CO}_2 \text{ emissions from aviation}$$

Ο θετικός συντελεστής (0.006338) δείχνει ότι κάθε πρόσθετη αύξηση κατά 1 κιλό εκπομπών CO₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο οδηγεί σε αύξηση περίπου 0.0063 τόνων στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς οι αερομεταφορές συνιστούν έναν ενεργοβόρο κλάδο με υψηλές εκπομπές ανά επιβάτη, οι οποίες προστίθενται ουσιαστικά στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα μιας χώρας.



Διάγραμμα 30 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από αερομεταφορές ανά κάτοικο.

Η γραφική απεικόνιση επιβεβαιώνει την έντονη θετική τάση: χώρες με μεγαλύτερες εκπομπές από τον τομέα της αεροπορίας εμφανίζουν σταθερά υψηλότερες συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Το διάγραμμα αυτό υπογραμμίζει ότι οι πολιτικές μείωσης εκπομπών στον τομέα των αερομεταφορών (π.χ. χρήση βιοκαυσίμων, βελτίωση αποδοτικότητας στόλου) μπορούν να έχουν ουσιαστική επίδραση στις συνολικές εθνικές εκπομπές.

(VI) Εκπομπές CO₂ από μεταφορές ανά κάτοικο (Per capita CO₂ emissions from transport)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη συμβολή του τομέα των μεταφορών στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο.

Model Summary

Πίνακας 19. Συντελεστής συσχέτισης, προσδιορισμού εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από μεταφορές.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.38813	57.15%	56.88%	47.47%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 57.15\%$, που σημαίνει ότι περισσότερο από το 57% της διακύμανσης στις συνολικές εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από τις εκπομπές που προέρχονται από τον τομέα των μεταφορών. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή και καταδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο των μεταφορών στο ανθρακικό αποτύπωμα μιας χώρας.

Analysis of Variance

Πίνακας 20. ANOVA εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από μεταφορές.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	2419.5	2419.45	210.76
Per capita CO2 emissions from t	1	2419.5	2419.45	210.76
Error	158	1813.8	11.48	
Lack-of-Fit	113	1501.0	13.28	1.91
Pure Error	45	312.7	6.95	
Total	159	4233.2		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001$), στοιχείο που επιβεβαιώνει τη σταθερότητα της παρατηρούμενης συσχέτισης.

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 0.353 + 3.702 * \text{Per capita CO}_2 \text{ emissions from transport (t, 2021)}$$

Coefficients

Πίνακας 21. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από μεταφορές

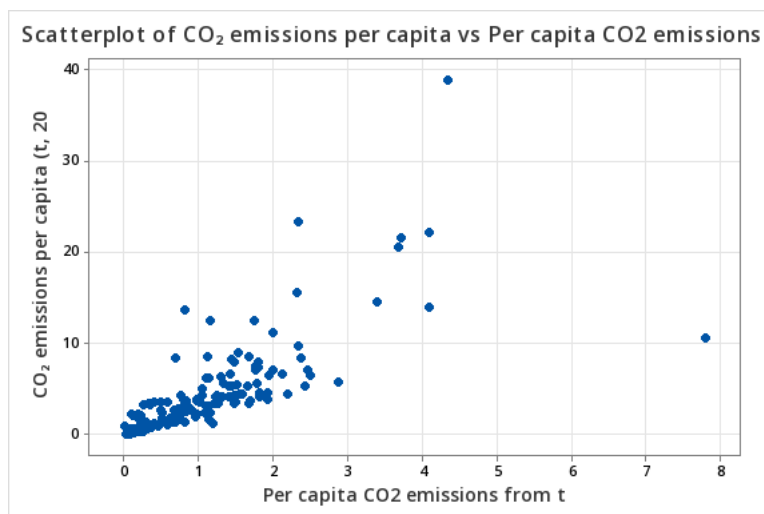
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.353	0.373	0.95	0.346	

Term	Coef	SE Coef	T- Value	P- Value	VIF
Per capita CO2 emissions from transport (t, 2021)	3.702	0.255	14.52	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 0.353 + 3.702 * \text{Per capita CO}_2 \text{ emissions from transport}$$

Το θετικό πρόσημο του συντελεστή (3.702) δείχνει ότι κάθε πρόσθετος τόνος εκπομπών CO₂ από μεταφορές ανά κάτοικο συνδέεται με αύξηση περίπου 3.7 τόνων στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο.



Διάγραμμα 31 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - εκπομπών CO₂ από μεταφορές ανά κάτοικο.

Το διάγραμμα διασποράς επιβεβαιώνει την πολύ ισχυρή θετική σχέση που βρέθηκε. Παρατηρείται ότι οι περισσότερες χώρες συγκεντρώνονται σε σχετικά χαμηλές τιμές (0.5–2 τόνους CO₂ από μεταφορές ανά κάτοικο) με αντίστοιχες συνολικές εκπομπές από 2 έως 10 τόνους. Ωστόσο, καθώς αυξάνονται οι εκπομπές από μεταφορές, οι συνολικές εκπομπές ανεβαίνουν δραματικά: χώρες με 3-4 τόνους CO₂ από μεταφορές φτάνουν σε συνολικά επίπεδα άνω των 20 τόνων, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις (7-8 τόνοι από μεταφορές) οι συνολικές εκπομπές ξεπερνούν τους 30 τόνους ανά κάτοικο.

Η κατανομή αυτή αναδεικνύει τη σημασία του τομέα των μεταφορών ως κεντρικού συντελεστή του ανθρακικού αποτυπώματος. Η μείωση των εκπομπών στον τομέα αυτό (μέσω ηλεκτροκίνησης, ανανεώσιμων καυσίμων και προώθησης μέσων μαζικής μεταφοράς) αποτελεί βασικό πυλώνα κάθε στρατηγικής αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

(VII) Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο (Fossil fuel consumption per capita)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη συμβολή της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο.

Model Summary

Πίνακας 22. Model Summary εκπομπών CO₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.87412	76.31%	75.98%	62.19%

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται πολύ ισχυρή θετική συσχέτιση. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 76.31\%$, που σημαίνει ότι πάνω από το 76% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από τη μεταβλητή «κατανάλωση ορυκτών καυσίμων». Το ποσοστό αυτό είναι από τα υψηλότερα που συναντώνται στις αναλύσεις, γεγονός που επιβεβαιώνει τον καθοριστικό ρόλο των ορυκτών καυσίμων στο ανθρακικό αποτύπωμα.

Analysis of Variance

Πίνακας 23. ANOVA εκπομπών CO₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	1916.2	1916.20	231.97
Fossil fuel consumption per cap	1	1916.2	1916.20	231.97
Error	72	594.8	8.26	
Total	73	2511.0		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value < 0.001), με πολύ υψηλή τιμή F (231.97).

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 2.141 + 0.00014297 * \text{Fossil fuel consumption per capita (kWh, 2024)}$$

Coefficients

Πίνακας 24. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων

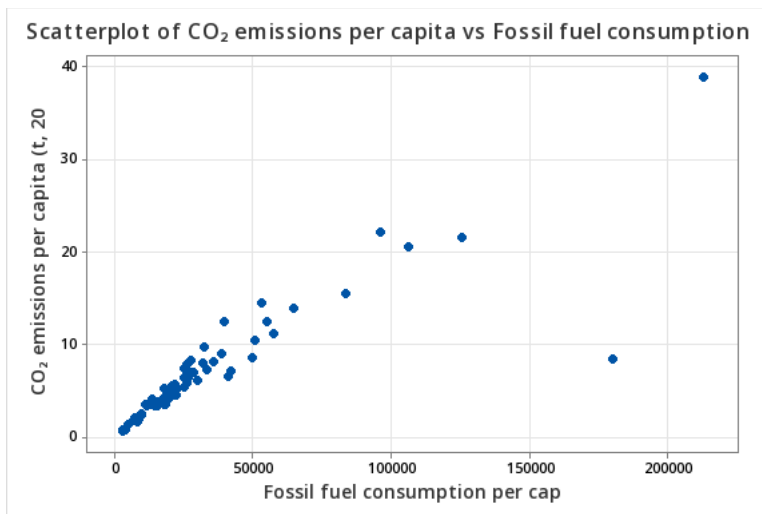
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.141	0.448	4.78	0.000	

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Fossil fuel consumption per capita kWh, 2024)	0.000143	0.000009	15.23	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 2.141 + 0.000143 * \text{Fossil fuel consumption per capita}$$

Το θετικό πρόσημο του συντελεστή δείχνει ότι όσο αυξάνεται η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο, τόσο αυξάνονται και οι συνολικές εκπομπές CO₂.



Διάγραμμα 32 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο.

Το διάγραμμα διασποράς αποτυπώνει καθαρά τη θετική και σχεδόν γραμμική σχέση ανάμεσα στις δύο μεταβλητές. Οι περισσότερες χώρες ακολουθούν μια ανοδική τάση, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, τόσο υψηλότερες είναι οι εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Ορισμένα σημεία που αποκλίνουν (outliers) αφορούν χώρες με πολύ υψηλές καταναλώσεις καυσίμων ή ιδιαίτερες ενεργειακές δομές, όμως η γενική τάση παραμένει σταθερή και ισχυρή.

Η ισχυρή αυτή σχέση αναδεικνύει τη σημασία της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Η στροφή σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας αποτελούν τις βασικές στρατηγικές για τη μείωση των εκπομπών, καθώς η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα είναι ο κυρίαρχος παράγοντας του παγκόσμιου ανθρακικού αποτυπώματος.

(VIII) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα (Share of electricity generated by fossil fuels)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα και στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο.

Πίνακας 4.8.1: Model Summary εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Model Summary

Πίνακας 25. Model Summary εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.03339	5.28%	4.68%	2.35%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 5.28\%$. Αυτό δείχνει ότι μόλις το 5% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Η τιμή είναι σχετικά χαμηλή, κάτι που υποδηλώνει ότι αν και υπάρχει μια θετική τάση, η μεταβλητή αυτή από μόνη της δεν εξηγεί σε μεγάλο βαθμό τη διαφοροποίηση των εκπομπών.

Analysis of Variance

Πίνακας 26. ANOVA εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	223.0	223.01	8.80
Share of electricity generated by fossil fuels (% , 2024)	1	223.0	223.01	8.80
Error	158	4002.9	25.33	
Lack-of-Fit	140	3694.7	26.39	1.54
Pure Error	18	308.2	17.12	
Total	159	4225.9		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} = 0.003 < 0.05$). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ουσιαστική σχέση ανάμεσα στις δύο μεταβλητές, αν και η ισχύς της δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

Regression Equation

Πίνακας 27. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 2.260 + 0.0358 * \text{Share of electricity generated by fossil fuels (\%, 2024)}$$

Coefficients

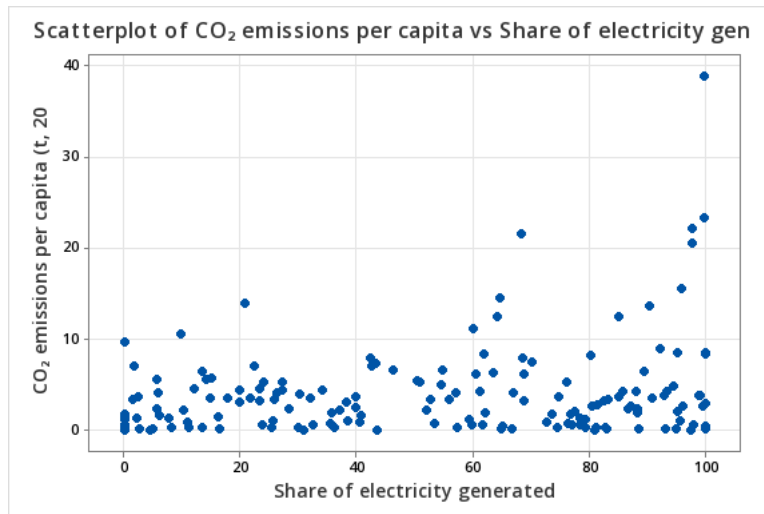
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.260	0.751	3.01	0.003	

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Share of electricity generated by fossil fuels (% , 2024)	0.0358	0.0121	2.97	0.003	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 2.260 + 0.0358 * \text{Share of electricity generated by fossil fuels}$$

Ο θετικός συντελεστής (0.0358) δείχνει ότι η αύξηση του ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα σχετίζεται με αύξηση των εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο.



Διάγραμμα 33 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Το διάγραμμα διασποράς επιβεβαιώνει τη θετική αλλά ασθενή σχέση. Στις χώρες με υψηλό ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά καύσιμα παρατηρούνται συχνά αυξημένες εκπομπές CO₂, χωρίς ωστόσο η τάση να είναι απόλυτα γραμμική. Η μεγάλη διασπορά των σημείων δείχνει ότι και άλλοι παράγοντες, πέρα από τη συμμετοχή των ορυκτών καυσίμων στην ηλεκτροπαραγωγή, επηρεάζουν τις συνολικές εκπομπές.

Η σχέση αυτή αναδεικνύει τη σημασία της διαφοροποίησης του ενεργειακού μίγματος και της αύξησης της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και κατ' επέκταση οι εκπομπές CO₂.

(IX) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φυσικό αέριο (Share of electricity generated by gas)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φυσικό αέριο και τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο.

Model Summary

Πίνακας 28. Model Summary εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.76811	15.49%	14.96%	10.97%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 15.49\%$, πράγμα που σημαίνει ότι περίπου το 15% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από το ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής που βασίζεται στο φυσικό αέριο. Αν και η τιμή αυτή δεν είναι εξαιρετικά υψηλή, δείχνει ότι η χρήση του φυσικού αερίου αποτελεί έναν από τους παράγοντες που επηρεάζουν ουσιαστικά το επίπεδο των εκπομπών.

Analysis of Variance

Πίνακας 29. ANOVA εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	654.4	654.412	28.78
Share of electricity generate by gas	1	654.4	654.412	28.78
Error	157	3569.4	22.735	
Lack-of-Fit	105	3252.1	30.972	5.08
Pure Error	52	317.3	6.102	
Total	158	4223.8		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001$), με υψηλή τιμή F (28.78).

Regression Equation

Πίνακας 30. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 2.592 + 0.0684 \text{ Share of electricity generated by gas}$$

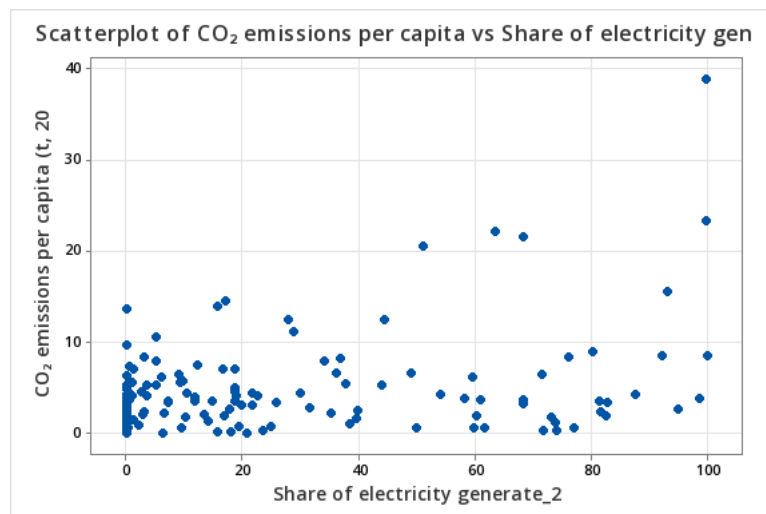
Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.592	0.478	5.42	0.000	
Share of electricity generate_2	0.0684	0.0127	5.37	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής:

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 2.592 + 0.0684 * \text{Share of electricity generated by gas}$$

Ο θετικός συντελεστής (0.0684) δείχνει ότι η αύξηση της συμμετοχής του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή συνδέεται με αύξηση των εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο. Αυτό είναι λογικό επόμενο, καθώς, αν και το φυσικό αέριο εκπέμπει λιγότερο CO₂ σε σχέση με τον άνθρακα, εξακολουθεί να αποτελεί ορυκτό καύσιμο και να συμβάλλει σημαντικά στο ανθρακικό αποτύπωμα.



Διάγραμμα 34 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο.

Το διάγραμμα διασποράς δείχνει μια θετική τάση, δηλαδή οι χώρες με υψηλότερο ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο εμφανίζουν συνήθως και υψηλότερες εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Παρότι υπάρχει διασπορά στις χαμηλότερες τιμές, η γενική ανοδική πορεία των σημείων επιβεβαιώνει την ισχύ της σχέσης.

Η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι, αν και το φυσικό αέριο θεωρείται «μεταβατικό καύσιμο» προς μια πιο καθαρή ενεργειακή οικονομία, η εκτεταμένη χρήση του εξακολουθεί να αυξάνει τις εκπομπές CO₂. Συνεπώς, η αντικατάσταση του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αναγκαία για την ουσιαστική μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

(X) Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (Share of electricity generated by renewables)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές και τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο.

Πίνακας 4.10.1: Model Summary εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Model Summary

Πίνακας 31. Model Summary εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.95134	8.34%	7.76%	5.58%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 8.34\%$, δηλαδή περίπου το 8% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από το ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές. Αν και η τιμή αυτή είναι σχετικά χαμηλή, υποδηλώνει ότι η χρήση ΑΠΕ έχει μετρήσιμη αλλά περιορισμένη επίδραση στη μείωση των εκπομπών, καθώς η συνολική ενεργειακή εικόνα εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους (π.χ. συνολική κατανάλωση ενέργειας, χρήση ορυκτών καυσίμων).

Analysis of Variance

Πίνακας 32. ANOVA εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	352.4	352.44	14.38
Share of electricity generated by renewables	1	352.4	352.44	14.38
Error	158	3873.5	24.52	
Lack-of-Fit	140	3564.6	25.46	1.48
Pure Error	18	308.9	17.16	
Total	159	4225.9		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική ($P\text{-Value} < 0.001$), με $F = 14.38$, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του αποτελέσματος, παρόλο που η εξηγητική δύναμη (R^2) παραμένει χαμηλή.

Regression Equation

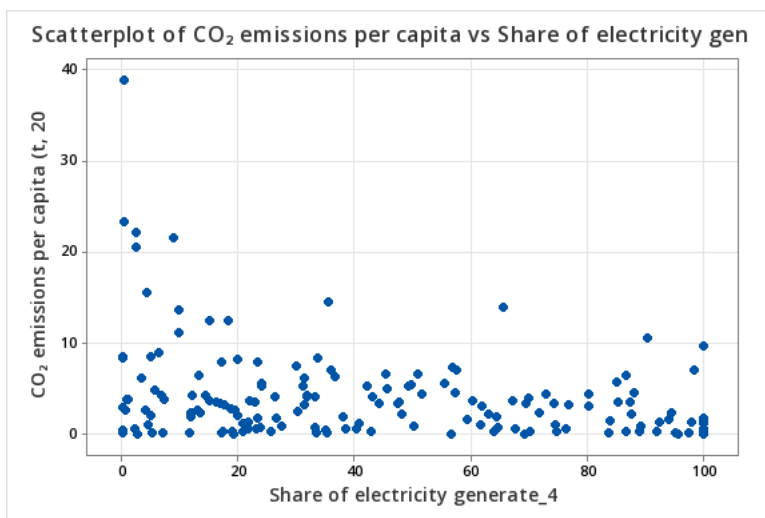
Πίνακας 33. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 6.136 - 0.0465 \text{ Share of electricity generated by renewables}$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	6.136	0.654	9.38	0.000	
Share of electricity generated by renewables	-0.0465	0.0123	-3.79	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δίνεται ως εξής: $\text{CO}_2 \text{ emissions per capita} = 6.136 - 0.0465 * \text{Share of electricity generated by renewables}$. Ο αρνητικός συντελεστής (-0.0465) δείχνει ότι η αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή συνδέεται με μείωση των εκπομπών CO_2 ανά κάτοικο, γεγονός που επιβεβαιώνει τον ρόλο τους ως βασικού παράγοντα της ενεργειακής μετάβασης προς χαμηλότερες εκπομπές.



Διάγραμμα 35 : Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO_2 - ποσοστού ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές

Το διάγραμμα διασποράς δείχνει μια καθαρά καθοδική τάση. Πιο συγκεκριμένα οι χώρες με υψηλότερο ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερες εκπομπές CO_2 ανά κάτοικο. Παρότι παρατηρείται σημαντική διασπορά στις χαμηλές τιμές, η γενική πορεία των σημείων ενισχύει το εύρημα ότι η αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμβάλλει στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

Η σχέση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της ενίσχυσης των ΑΠΕ, όχι μόνο ως μέσο κάλυψης ενεργειακών αναγκών αλλά και ως στρατηγική για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

(XI) Παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο (Coal production per capita)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στην παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Model Summary

Πίνακας 34. Model Summary εκπομπών CO_2 - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.00726	6.49%	5.90%	0.00%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 6.49\%$, πράγμα που σημαίνει ότι μόλις το 6.5% της διακύμανσης στις εκπομπές CO_2 μπορεί να εξηγηθεί από την παραγωγή άνθρακα. Η τιμή είναι

χαμηλή που υποδηλώνει ότι η παραγωγή άνθρακα αποτελεί μεν σχετικό, αλλά όχι πρωτεύοντα παράγοντα στον καθορισμό των εκπομπών CO₂.

Analysis of Variance

Πίνακας 35. ANOVA εκπομπών CO₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	273.3	273.342	10.90
Coal production per capita (kWh,2016)	1	273.3	273.342	10.90
Error	157	3936.4	25.073	
Lack-of-Fit	60	579.9	9.665	0.28
Pure Error	97	3356.5	34.603	
Total	158	4209.8		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value = 0.001), με F = 10.90. Αυτό σημαίνει ότι, αν και το R² είναι χαμηλό, η μεταβλητή συμβάλλει ουσιαστικά στην πρόβλεψη των εκπομπών CO₂.

Regression Equation

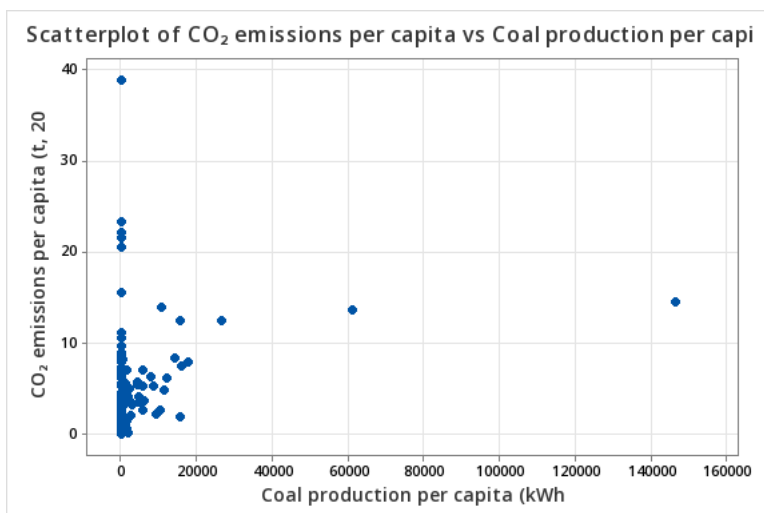
CO₂ emissions per capita (t, 2023) = 3.889 + 0.0001010* Coal production per capita (kWh)

Coefficients

Πίνακας 36. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3.889	0.406	9.57	0.000	
Coal production per capita (kWh,2016)	0.000101	0.000031	3.30	0.001	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δείχνει ότι όσο αυξάνεται η παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο, τόσο αυξάνονται και οι εκπομπές CO₂, με θετικό συντελεστή (0.000101). Παρότι το μέγεθος του συντελεστή είναι μικρό, το αποτέλεσμα είναι στατιστικά σημαντικό.



Διάγραμμα 36 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο.

Το διάγραμμα διασποράς αποτυπώνει ότι, γενικά, η αύξηση της παραγωγής άνθρακα ανά κάτοικο σχετίζεται με υψηλότερες εκπομπές CO₂. Ωστόσο, η ύπαρξη πολλών σημείων κοντά στον άξονα δείχνει ότι η σχέση δεν είναι ιδιαίτερα ισχυρή και επηρεάζεται από ακραίες τιμές (χώρες με πολύ υψηλή παραγωγή άνθρακα).

Συνολικά, η μεταβλητή αυτή επιβεβαιώνει τον αναμενόμενο ρόλο του άνθρακα ως παράγοντα αύξησης των εκπομπών CO₂, αν και η συσχέτιση παραμένει περιορισμένη.

(XII) Παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο (Oil production per capita)

Η μεταβλητή αυτή εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στην παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Model Summary

Πίνακας 37. Model Summary εκπομπών CO₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.89076	38.89%	37.53%	0.00%

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 38.89\%$, τιμή αρκετά υψηλή σε σύγκριση με άλλες μεταβλητές που εξετάστηκαν. Αυτό σημαίνει ότι περίπου το 39% της διακύμανσης στις εκπομπές CO₂ μπορεί να εξηγηθεί από την παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο, υποδηλώνοντας ισχυρή συσχέτιση.

Analysis of Variance

Πίνακας 38. ANOVA εκπομπών CO₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	206,785	68,928	431,43	0,000

Annual change in forest area (h	1	2,564	2,564	16,05	0,001
Fossil fuel consum per cap	1	180,291	180,291	1128,46	0,000
Share of electricity generate_2	1	0,880	0,880	5,51	0,034
Error	14	2,237	0,160		
Total	17	209,022			

Analysis of Variance

Πίνακας 39. ANOVA εκπομπών CO₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Regression	1	993.6	993.63	28.63
Oil production per capita (kWh)	1	993.6	993.63	28.63
Error	45	1561.5	34.70	
Total	46	2555.2		

Η ανάλυση διασποράς δείχνει ότι η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value < 0.001), με F = 28.63, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του αποτελέσματος.

Regression Equation

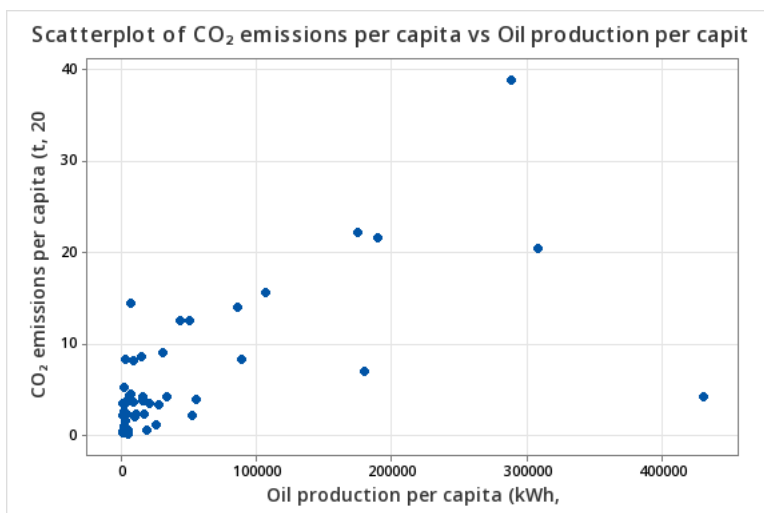
$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 2023)} = 3.986 + 0.00005071 * \text{Oil production per capita (kWh)}$$

Coefficients

Πίνακας 40. Συντελεστές παλινδρόμησης εκπομπών CO₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	3.986	0.980	4.07	0.000	
Oil production per capita (kWh)	0.000051	0.000009	5.35	0.000	1.00

Η εξίσωση της παλινδρόμησης δείχνει ότι η παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο επηρεάζει θετικά τις εκπομπές CO₂. Ο θετικός συντελεστής (0.000051) υποδηλώνει ότι όσο αυξάνεται η παραγωγή πετρελαίου, τόσο υψηλότερες είναι και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.



Διάγραμμα 37 Διάγραμμα διασποράς εκπομπών CO₂ - παραγωγής πετρελαίου ανά κάτοικο.

Το διάγραμμα διασποράς αποτυπώνει σαφή ανοδική τάση με τις χώρες με υψηλή παραγωγή πετρελαίου να παρουσιάζουν αντίστοιχα υψηλότερες εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Παρότι υπάρχουν μεμονωμένες ακραίες τιμές, η γενική εικόνα επιβεβαιώνει την έντονη θετική σχέση.

Η ισχυρή αυτή συσχέτιση αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της παραγωγής πετρελαίου στις εκπομπές CO₂, υπογραμμίζοντας την ανάγκη μείωσης της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και επιτάχυνσης της στροφής προς καθαρότερες μορφές ενέργειας.

(XIII) Μεταβλητές χωρίς στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις εκπομπές CO₂

Κατά την ανάλυση των δεδομένων εντοπίστηκαν ορισμένες μεταβλητές που δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντική συσχέτιση με τις εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο. Οι μεταβλητές αυτές, παρότι σχετίζονται θεωρητικά με περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές διαστάσεις, δεν φαίνεται να επηρεάζουν άμεσα τις εκπομπές ή η συσχέτισή τους δύναμη είναι αμελητέα.

Συγκεκριμένα:

PM2.5 μέση ετήσια έκθεση (μg/m³, 2020)

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 0.30\%$ και $P\text{-Value} = 0.492$. Η πολύ χαμηλή τιμή του R^2 δείχνει ότι η μεταβλητή δεν εξηγεί ουσιαστικά τη διακύμανση στις εκπομπές CO₂.

PM2.5 συγκέντρωση σε κατοικίες (μg/m³, 2019)

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 1.90\%$ και $P\text{-Value} = 0.081$. Η σχέση δεν ήταν στατιστικά σημαντική, αν και η τιμή P βρίσκεται κοντά στο όριο (0.05).

Ετήσια μεταβολή δασικής έκτασης (ha/year, 2015)

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 2.51\%$ και $P\text{-Value} = 0.119$. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή δεν έχει ουσιαστική επίδραση στις εκπομπές CO_2 .

Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 0.46\%$ και $P\text{-Value} = 0.392$. Η χαμηλή συσχέτιση υποδηλώνει ότι, λόγω του περιορισμένου μεριδίου της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα πολλών χωρών, η μεταβλητή δεν μπορεί να συσχετιστεί με τις εκπομπές CO_2 .

Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη/άνθρακα

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 1.01\%$ και $P\text{-Value} = 0.207$. Η σχέση δεν ήταν στατιστικά σημαντική, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στο ότι οι εκπομπές από άνθρακα αποτυπώνονται καλύτερα μέσω άλλων δεικτών (π.χ. παραγωγή άνθρακα ανά κάτοικο).

Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά

Ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν $R^2 = 0.03\%$ και $P\text{-Value} = 0.837$. Το αποτέλεσμα δείχνει πλήρη έλλειψη εξηγητικής δύναμης της μεταβλητής στις εκπομπές CO_2 .

Συνολικά, οι χαμηλές τιμές R^2 ($0.03\% - 2.51\%$) και οι υψηλές τιμές P (>0.05) δείχνουν ότι οι παραπάνω μεταβλητές δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη ως αξιόπιστοι δείκτες πρόβλεψης ή ερμηνείας των εκπομπών CO_2 ανά κάτοικο.

(XIV) Συνδυασμός μεταβλητών /παραγόντων

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να εξετάσουμε, πως συνδέονται/συνεισφέρουν συνδυαστικά οι μεταβλητές που ήδη αναλύσαμε, στις εκπομπές του CO_2 . Κατασκευάζουμε λοιπόν ένα μοντέλο **πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης**, με εξαρτημένη μεταβλητή τις **εκπομπές του CO_2 ανά χώρα** και ανεξάρτητες όλες ή κάποιες από τις μεταβλητές που περιγράψαμε στην αρχή του κεφαλαίου.

Θα χρησιμοποιήσουμε (στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) μία μέθοδο επιλογής των σημαντικότερων από αυτές της μεταβλητές, την λεγόμενη **μέθοδο stepwise (βηματική επιλογή)**.

Παρατήρηση (μέθοδος stepwise)

Η **stepwise method** (βηματική μέθοδος) είναι μια διαδικασία επιλογής μεταβλητών στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Χρησιμοποιείται, συνήθως, όταν έχουμε πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές (predictors) και δεν είναι ξεκάθαρο ποιες πρέπει να μπουν στο τελικό μοντέλο. Η μέθοδος (I) χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο που προσθέτει ή αφαιρεί μεταβλητές από το μοντέλο βήμα-βήμα (step by step) (II) η πρόσθεση/αφαίρεση των μεταβλητών γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων κριτηρίων επιλογής: στατιστικά τεστ (π.χ. $p\text{-values}$) ή κριτήρια πληροφoρίας (AIC, BIC).

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 4.14.1. Κριτήρια επιλογής μεταβλητών (μέθοδος stepwise)

Stepwise Selection of Terms

α to enter = 0,15; α to remove = 0,15

Coefficients

Πίνακας 41. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO₂.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,817	0,188	4,34	0,001	
Annual change in forest area (h	0,000001	0,000000	4,01	0,001	1,07
Fossil fuel consum per cap	0,000213	0,000006	33,59	0,000	1,06
Share of electricity generate_coal	-0,00722	0,00308	-2,35	0,034	1,00

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι, η μέθοδος επέλεξε σας σημαντικότερες μεταβλητές, στον προσδιορισμό των εκπομπών του CO₂, τις:

- Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά άτομο (σημαντικότερη λόγω της μεγαλύτερης t-value =33,59)
- Ετήσια αλλαγή στο ποσοστό της δασοκάλυψης (αποψίλωση)
- Ποσόστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από άνθρακα.

Model Summary

Πίνακας 42. Model Summary πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO₂.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,399710	98,93%	98,70%	96,67%

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται μια πολύ ισχυρή, θετική συσχέτιση. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 = 98,93\%$, που σημαίνει ότι σχεδόν **ΟΛΗ** η διακύμανση στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο μπορεί να εξηγηθεί από τις παραπάνω τρεις μεταβλητές. Επομένως, για τον περιορισμό αυτών των εκπομπών θα πρέπει να δωθεί προτεραιότητα (μέγιστη σημασία) σε αυτούς τους τρεις παράγοντες.

Η ανάλυση διασποράς (ANOVA) δείχνει ότι η σχέση είναι στατιστικά σημαντική (P-Value < 0.001).

Analysis of Variance

Πίνακας 43. ANOVA πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO₂.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	206,785	68,928	431,43	0,000

Annual change in forest area	1	2,564	2,564	16,05	0,001
Fossil fuel consum per cap	1	180,291	180,291	1128,46	0,000
Share of electricity generate_coal	1	0,880	0,880	5,51	0,034
Error	14	2,237	0,160		
Total	17	209,022			

Εάν κάποιος κατασκευάσει ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης των εκπομπών CO₂ ανά κάτοικο, σε σχέση με τις 3 μεταβλητές που ήδη αναφέρθηκαν, τότε από τον παραπάνω πίνακα παρατηρεί ότι, αυτό θα δίνεται από τη σχέση:

Regression Equation

$$\text{CO}_2 \text{ emissions per capita (t, 20)} = 0,817 + 0,000001 \text{ Annual change in forest area (h)} + 0,000213 \text{ Fossil fuel consum per cap} - 0,00722 \text{ Share of electricity generate_coal}$$

Coefficients

Πίνακας 44. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος stepwise) εκπομπών CO₂.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0,817	0,188	4,34	0,001	
Annual change in forest area (h	0,000001	0,000000	4,01	0,001	1,07
Fossil fuel consum per cap	0,000213	0,000006	33,59	0,000	1,06
Share of electricity generate_2	-0,00722	0,00308	-2,35	0,034	1,00

Παρατήρηση

Εάν χρησιμοποιούμε την **μέθοδο enter** (όλες οι μεταβλητές παίρνουν μέρος στο μοντέλο και εξετάζεται η σημαντικότητά του), τότε προκύπτει επίσης ένα στατιστικά σηματικό μοντέλο.

Model Summary

Πίνακας 45. Model Summary πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO₂.

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,13093	88,64%	85,61%	0,00%

Και από τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου παρατηρείται μια πολύ ισχυρή, θετική συσχέτιση. Στο μοντέλο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης παίρνουν μέρος τώρα 8 παράγοντες/ μεταβλητές. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι R² = 88,64%, που σημαίνει ότι 89% της διακύμανση στις συνολικές εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο μπορεί να εξηγηθεί από τις παραπάνω μεταβλητές.

Regression Equation

CO₂ emissions per capita (t, 20) = 1,193 - 0,000023 GDP per capita (USD, 2023)
+ 0,000001 Annual change in forest area
+ 1,387 Air travel trips per capita
- 0,00646 Per capita CO₂ emissions from a
+ 2,181 Per capita CO₂ emissions from t
+ 0,000092 Fossil fuel consum per cap
- 0,02374 Share of electricity generate_4
+ 0,000115 Coal production per capita

Coefficients

Πίνακας 46. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO₂.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	1,193	0,470	2,54	0,017	
GDP per capita (USD, 2023)	- 0,000012		-1,92	0,065	3,42
	0,000023				
Annual change in forest area (h	0,000001	0,000000	1,91	0,066	1,14
Air travel trips per capita (20	1,387	0,383	3,62	0,001	25,96
Per capita CO ₂ emissions from a	-0,00646	0,00209	-3,08	0,004	33,88
Per capita CO ₂ emissions from t	2,181	0,390	5,60	0,000	2,84
Fossil fuel consum per cap	0,000092	0,000021	4,40	0,000	10,64
Share of electricity generate_4	-0,02374	0,00970	-2,45	0,020	2,43
Coal production per capita (kWh	0,000115	0,000042	2,76	0,010	1,30

Παρατήρηση

Αν και το μοντέλο της που προκύπτει από την μέθοδο enter είναι στατιστικά σημαντικό, παρατηρώντας τη **στήλη VIF** του παραπάνω πίνακα, υπάρχουν τιμές μεγαλύτερες του 10, γεγονός που σημαίνει υπάρχει **πρόβλημα πολυσυγγραμικότητας** (απαίτηση αναγκαία για την εφαρμογή της παλινδρόμησης). Υπάρχουν δηλαδή μεταβλητές που συνδέονται μεταξύ τους, οπότε η ερμηνεία του μοντάλου χρειάζεται προσοχή.

Analysis of Variance

Πίνακας 47. ANOVA πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος enter) εκπομπών CO₂

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	8	299,498	37,437	29,27	0,000
GDP per capita (USD, 2023)	1	4,710	4,710	3,68	0,065
Annual change in forest area (h	1	4,667	4,667	3,65	0,066
Air travel trips per capita (20	1	16,757	16,757	13,10	0,001
Per capita CO ₂ emissions from a	1	12,160	12,160	9,51	0,004
Per capita CO ₂ emissions from t	1	40,107	40,107	31,36	0,000
Fossil fuel consum per cap	1	24,802	24,802	19,39	0,000
Share of electricity generate_4	1	7,665	7,665	5,99	0,020
Coal production per capita (kWh	1	9,720	9,720	7,60	0,010
Error	30	38,370	1,279		
Total	38	337,868			

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και Τρόποι Αντιμετώπισης

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ξεκίνησε από το θεωρητικό πλαίσιο του κλιματικού συστήματος και του ρόλου του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ενεργειακή ισορροπία Γης-ατμόσφαιρας, και κατέληξε στην διερεύνηση των παραγόντων που συσχετίζονται με τις κατά κεφαλήν εκπομπές. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι το CO_2 είναι ο βασικός παράγοντας της σύγχρονης υπερθέρμανσης, όχι μόνο επειδή υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες, αλλά κυρίως λόγω της μεγάλης διάρκειας παραμονής του στην ατμόσφαιρα και της άμεσης διασύνδεσής του με την ενέργεια, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τις αλλαγές χρήσης γης. Οι φυσικές δεξαμενές άνθρακα (ωκεανοί, χερσαία βλάστηση, έδαφος) απορροφούν σημαντικό μέρος των ανθρωπογενών εκπομπών, όμως το «airborne fraction» παραμένει σταθερά θετικό: κάθε έτος ένα μετρήσιμο ποσοστό των εκπομπών συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα, ενισχύοντας τον θετικό ενεργειακό ισοζύγιο της γης. Αυτή η συσσώρευση δεν εκδηλώνεται μόνο ως άνοδος της μέσης θερμοκρασίας, αλλά αντανακλάται επίσης στην οξίνιση των ωκεανών, στην αύξηση της συχνότητας και έντασης ακραίων καιρικών φαινομένων και σε επιβαρύνσεις για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη ευημερία.

Στο ιστορικό σκέλος, η σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης CO_2 από τα προβιομηχανικά επίπεδα μέχρι τα σημερινά επίπεδα απεικονίζεται καθαρά στις μακροχρόνιες μετρήσεις (π.χ. καμπύλη Keeling), με έντονη εποχικότητα αλλά σαφή ανοδική τάση. Η θεωρητική συζήτηση στα κεφάλαια 1 με 3 έδειξε επίσης ότι οι ανά τομέα πηγές εκπομπών δεν είναι ισοδύναμες. Για παράδειγμα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η θερμότητα, η βιομηχανία και οι μεταφορές συνεισφέρουν στο μεγαλύτερο μέρος του ανθρακικού αποτυπώματος, ενώ οι χωρικές/γεωγραφικές διαφοροποιήσεις (ήπειρος, γεωγραφικό πλάτος, ενεργειακό μείγμα, βαθμός αστικοποίησης) δημιουργούν έντονες ανισότητες τόσο στα επίπεδα εκπομπών όσο και στην έκθεση σε κλιματικούς κινδύνους. Αυτή η θεωρητική αποτύπωση είναι ιδιαίτερα σημαντική, γιατί εξηγεί εκ των προτέρων γιατί οι συσχετίσεις του Κεφαλαίου 4 είναι ισχυρές εκεί όπου το ενεργειακό σύστημα παραμένει εξαρτάται ως επί το πλείστον από τα ορυκτά καύσιμα αλλά ασθενέστερες όπου προχωρά η ενεργειακή μετάβαση των χωρών.

Στην στατιστική ανάλυση, το κατά κεφαλήν εισόδημα (GDP per capita) παρουσίασε ισχυρή θετική συσχέτιση με τις εκπομπές CO_2 ανά κάτοικο. Το εύρημα είναι αναμενόμενο μιας και ο υψηλότερο εισόδημα σημαίνει συνήθως υψηλότερη τελική ζήτηση για ενέργεια και αγαθά/υπηρεσίες με ενσωματωμένο ενεργειακό φορτίο. Ωστόσο, το συμπέρασμα δεν είναι ότι η ανάπτυξη αποφέρει αναπόφευκτα εκπομπές, αλλά ότι υπό τα σημερινά τεχνολογικά και θεσμικά δεδομένα, μεγάλο μέρος της ανάπτυξης εξακολουθεί να παράγεται με καύση ορυκτών καυσίμων. Η βιβλιογραφία και τα δεδομένα της εργασίας συγκλίνουν στο ότι η μη συσχέτιση ανάπτυξης και εκπομπών επιτυγχάνεται όπου αλλάζει η σύνθεση του ενεργειακού μείγματος, βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση και μετασχηματίζονται οι βιομηχανικές διεργασίες. Στη δική μας ανάλυση αυτό διακρίνεται έμμεσα, καθώς οι χώρες με υψηλό εισόδημα αλλά και υψηλότερα μερίδια ΑΠΕ ή αυστηρά κλιματικά πλαίσια τείνουν να αποκλίνουν θετικά από τη γενική γραμμή της διασποράς.

Ιδιαίτερα καθαρή είναι η εικόνα από τις ενεργειακές μεταβλητές. Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο και το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα εμφάνισαν από τις ισχυρότερες θετικές συσχετίσεις με τις εκπομπές. Η ερμηνεία είναι άμεση, όσο μεγαλύτερη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων γίνεται για ηλεκτρική ενέργεια και όσο μεγαλύτερο μέρος της τελικής κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από πετρέλαιο, άνθρακα και

φυσικό αέριο, τόσο υψηλότερο είναι το ανθρακικό αποτύπωμα. Εξίσου σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σχετίζεται αρνητικά με τις εκπομπές όπου το σύστημα ηλεκτρισμού απανθρακοποιείται, το συνολικό αποτύπωμα μειώνεται. Το φυσικό αέριο κατέγραψε ενδιάμεση εικόνα, το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από αέριο συνδέθηκε θετικά με τις εκπομπές, αλλά η ένταση της σχέσης είναι μικρότερη από εκείνη του άνθρακα, υποδηλώνοντας ότι η αντικατάσταση του άνθρακα από αέριο μπορεί να μειώνει βραχυπρόθεσμα τις εκπομπές, χωρίς όμως να αποτελεί μακροπρόθεσμη λύση αν δεν συνοδεύεται από έλεγχο διαρροών μεθανίου και ταχεία διεύρυνση των ΑΠΕ.

Η παραγωγή ορυκτών καυσίμων ανά κάτοικο ιδίως άνθρακα και πετρελαίου, συνδέθηκε σταθερά με υψηλότερες εκπομπές. Σε αυτό το σημείο αξίζει να υπογραμμιστεί πως η ενεργειακή ανεξαρτησία δεν είναι από μόνη της δείκτης βιωσιμότητας. Όταν η ανεξαρτησία στηρίζεται σε ορυκτά καύσιμα, είναι πιθανό να συνεπάγεται μεγαλύτερη καύση, μεγαλύτερη εξάρτηση και χαμηλότερα κίνητρα για μετάβαση. Στα δεδομένα μας, η παραγωγή πετρελαίου ανά κάτοικο συγκαταλέγεται στις μεταβλητές με υψηλή ισχύ (ενδεικτικά, R^2 κοντά στο 39% για απλή παλινδρόμηση), ενώ η παραγωγή άνθρακα διατηρεί επίσης ισχυρή θετική σχέση με τις εκπομπές. Η εικόνα αυτή συμφωνεί με την ανά τομέα αποδόμηση των παγκόσμιων εκπομπών και εξηγεί γιατί η πολιτική μείωσης εκπομπών συχνά προσκρούει σε δομικά κίνητρα περιοχών που εξαρτώνται από εξορύξεις.

Ο τομέας των μεταφορών αναδείχθηκε κρίσιμος. Οι εκπομπές CO_2 από μεταφορές ανά κάτοικο και οι εκπομπές από αερομεταφορές, καθώς και ο αριθμός αεροπορικών ταξιδιών ανά κάτοικο, συσχετίστηκαν θετικά με το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα. Το αποτέλεσμα είναι διπλά χρήσιμο, καθώς αφενός καταγράφει την επίμονη εξάρτηση των μεταφορών από υγρά καύσιμα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, αφετέρου υπογραμμίζει ότι οι προκλήσεις απανθρακοποίησης διαφέρουν ανά υποτομέα (ηλεκτροκίνηση στις οδικές μεταφορές έναντι περιορισμένων λύσεων στις αερομεταφορές). Η θετική σχέση με τα αεροπορικά ταξίδια καταδεικνύει ότι τα υψηλά επίπεδα μεταφορών αποτελούν ακόμη κυρίαρχο κομμάτι υψηλού αποτυπώματος, κάτι που πρέπει να αντιμετωπιστεί με τεχνολογικά και οργανωτικά μέτρα.

Στους κοινωνικούς δείκτες, η παιδική θνησιμότητα βρέθηκε αντίστροφα συσχετισμένη με τις εκπομπές (ενδεικτικά, R^2 περίπου 21% στην απλή παλινδρόμηση). Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι οι χώρες με υψηλότερο επίπεδο ανάπτυξης και υποδομών υγείας που τείνουν να έχουν και υψηλότερες εκπομπές ανά κάτοικο καταγράφουν χαμηλότερη παιδική θνησιμότητα. Με άλλα λόγια, αναδεικνύεται η άνιση κατανομή οφελών και βλαβών. Οι εύπορες χώρες διατηρούν ιστορικά υψηλά αποτυπώματα αλλά είναι περισσότερο θωρακισμένες από ορισμένες επιπτώσεις, ενώ οι φτωχότερες συνεισφέρουν λιγότερο στις εκπομπές αλλά είναι πιο ευάλωτες. Ο δείκτης ικανοποίησης από τη ζωή εμφάνισε ασθενή θετική σχέση με τις εκπομπές. Η ερμηνεία είναι ότι τα τρέχοντα πρότυπα ευημερίας συχνά απαιτούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, παρότι σε ορισμένες χώρες παρατηρείται σταδιακή μετάβαση σε πρότυπα ποιότητας ζωής με χαμηλότερο αποτύπωμα.

Σημαντικό μέρος των συμπερασμάτων προκύπτει από τα συνδυαστικά μοντέλα παλινδρόμησης (π.χ. *stepwise* και *enter*), όπου οι παράγοντες που αναδείχθηκαν ως ισχυροί και στις μονομεταβλητές σχέσεις διατηρούν τον ρόλο τους και στον πολυμεταβλητό έλεγχο. Συνοπτικά, το κατά κεφαλήν εισόδημα ως προσέγγιση της ενεργειακής ζήτησης, η ένταση των ορυκτών καυσίμων στο μίγμα (κατανάλωση ορυκτών ανά κάτοικο, μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από ορυκτά) και το αντίρροπο μερίδιο των ΑΠΕ, εξηγούν σημαντικό μέρος της διακύμανσης των εκπομπών. Το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο εμφανίζεται με μικρότερη αλλά θετική επίδραση, ενισχύοντας την ιδέα ότι λειτουργεί τοπικά ως μεταβατικό καύσιμο,

χωρίς όμως να αντιστρέφει τη μεγάλη εικόνα. Ορισμένες μεταβλητές όπως επισημάνθηκε στο Κεφάλαιο 4 δεν εμφάνισαν στατιστικά σημαντική συσχέτιση, γεγονός που είναι επίσης χρήσιμο, καθώς βοηθά να εστιάσουμε στους πραγματικούς τρόπους αλλαγής πολιτικής.

Μεθοδολογικά, αξίζει να επισημανθούν τρεις περιορισμοί που δεν αναιρούν αλλά πλαισιώνουν τα ευρήματα. Πρώτον, οι συσχετίσεις αποτυπώνουν γραμμικές σχέσεις σε δεδομένη χρονική τομή ή περίοδο, ενώ ορισμένες επιδράσεις μπορεί να είναι μη γραμμικές ή να εμφανίζουν υστερήσεις. Δεύτερον, τα δεδομένα ανά κάτοικο εξομαλύνουν τον πληθυσμιακό παράγοντα αλλά δεν συλλαμβάνουν πλήρως διαρθρωτικές διαφορές (οικονομική δομή, εξαγωγικός προσανατολισμός, κλιματικές ανάγκες θέρμανσης/ψύξης). Τρίτον, οι δείκτες ευημερίας και κοινωνικών συνθηκών ενέχουν πολιτισμικές διαφορές μέτρησης. Παρ' όλα αυτά, η σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε πληθώρα μεταβλητών και η συνοχή τους με το θεωρητικό πλαίσιο ενισχύουν την εμπιστοσύνη στα βασικά συμπεράσματα.

Σε τελική αποτίμηση, τα δεδομένα της εργασίας υπογραμμίζουν τρεις βασικές ιδέες. Πρώτον, οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται όσο περισσότερο η ανάπτυξη στηρίζεται σε δραστηριότητες με μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια και όπου η τελική κατανάλωση παραμένει συνδεδεμένη με τα ορυκτά καύσιμα. Δεύτερον, ο άμεσος και ισχυρότερος τρόπος μείωσης εκπομπών είναι η αλλαγή του ενεργειακού μίγματος, η αύξηση του μεριδίου ανανεώσιμων πηγών στην ηλεκτρική ενέργεια και η αντικατάσταση ανθρακικών/πετρελαϊκών τεχνολογιών που μειώνουν το αποτύπωμα πιο αποτελεσματικά από μεμονωμένα μέτρα. Τρίτον, οι μεταφορές και ιδιαίτερα οι αερομεταφορές παραμένουν ένας σύνθετος τομέας, που απαιτεί στοχευμένες τεχνολογικές και πολιτικές λύσεις για να ευθυγραμμιστεί με την απανθρακοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας και της βιομηχανίας.

Τέλος, η εργασία επιβεβαιώνει ότι η δυνατότητα έλλειψης συσχέτισης ανάμεσα στην ανάπτυξη και στις εκπομπές δεν είναι αφηρημένος στόχος αλλά αποτέλεσμα συγκεκριμένων επιλογών. Όπου οι οικονομίες επενδύουν σε ΑΠΕ, αποθήκευση ενέργειας, ενεργειακή απόδοση και καθαρότερες βιομηχανικές διεργασίες, η αυξημένη ευημερία δεν συνοδεύεται κατ' ανάγκη από αυξημένες εκπομπές. Η επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας προϋποθέτει λοιπόν αλλαγή μίγματος, τεχνολογική καινοτομία και πολιτικές που κατευθύνουν τη ζήτηση και την παραγωγή προς λύσεις χαμηλού άνθρακα. Αυτή η κατεύθυνση είναι αναλύεται στα θεωρητικά συμπεράσματα των κεφαλαίων 1 με 3 και τεκμηριώνεται εμπειρικά από τις συσχετίσεις και τα πολυμεταβλητά μοντέλα του Κεφαλαίου 4.

5.2 Τρόποι αντιμετώπισης

Σε συνέχεια των παραπάνω συσχετίσεων, οι προτεραιότητες μετριασμού καθίστανται συγκεκριμένες. Εκεί όπου το κατά κεφαλήν εισόδημα συνοδεύεται από αύξηση εκπομπών, ο στόχος δεν είναι να περιοριστεί η ευημερία, αλλά να αλλάξει ο τρόπος παραγωγής της. Η βιομηχανική απανθρακοποίηση με ηλεκτροθερμικές διεργασίες, πράσινο υδρογόνο και δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα στις εκπομπές, σε συνδυασμό με αυστηρά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης σε εξοπλισμό, κτίρια και παραγωγικές αλυσίδες, επιτρέπει η αύξηση εισοδήματος να μην μεταφράζεται γραμμικά με την αύξηση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Η σταθερή τιμολόγηση άνθρακα λειτουργεί ως σήμα αγοράς που στρέφει επενδύσεις και καινοτομία προς τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών, ενώ η ανακύκλωση εσόδων διασφαλίζει κοινωνική δικαιοσύνη.

Εκεί όπου οι εκπομπές συνδέονται στενά με την κατανάλωση και το μερίδιο ορυκτών καυσίμων, απαιτείται ταχεία μετατόπιση του μίγματος. Η συστηματική απόσυρση ανθρακικών και παλαιών

πετρελαϊκών μονάδων, η κλιμάκωση των ΑΠΕ με παράλληλη ανάπτυξη αποθήκευσης και έξυπνων δικτύων, και η στοχευμένη χρήση φυσικού αερίου μόνο ως προσωρινής γέφυρας όταν αντικαθιστά άνθρακα χωρίς διαρροές μεθανίου, μειώνουν άμεσα το ανθρακικό αποτύπωμα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενίσχυση της ευελιξίας στη ζήτηση, με βιομηχανικά φορτία που ανταποκρίνονται στα σήματα του δικτύου και ψηφιοποίηση των υποδομών, περιορίζει την ανάγκη λειτουργίας μονάδων αιχμής υψηλών εκπομπών. Παράλληλα, η κατάργηση επιδοτήσεων ορυκτών καυσίμων και η μεταφορά πόρων σε καθαρές τεχνολογίες επιταχύνουν τη διεύθυνση λύσεων χαμηλού άνθρακα σε κτίρια, θέρμανση και βιομηχανική θερμότητα.

Στις μεταφορές, όπου οι συσχετίσεις με τις εκπομπές είναι έντονες, η διεύρυνση της ηλεκτροκίνησης για ιδιωτικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, η ενίσχυση σιδηροδρομικών και αστικών μέσων μαζικής μεταφοράς και η οργάνωση πόλεων με λιγότερες ανάγκες μετακίνησης μειώνουν αποτελεσματικά την τελική ζήτηση καυσίμου. Για τις αερομεταφορές, η προοδευτική εισαγωγή βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων, η βελτιστοποίηση δρομολογίων και η αντικατάσταση βραχυπρόθεσμων αεροπορικών μετακινήσεων με ηλεκτροκίνητες χερσαίες ή σιδηροδρομικές λύσεις όπου αυτό είναι εφικτό, περιορίζουν έναν τομέα που σύμφωνα με τα δεδομένα παραμένει συστηματικά ρυπογόνος.

Εφόσον το μερίδιο ΑΠΕ καταγράφηκε με αρνητική συσχέτιση ως προς τις εκπομπές, η κλιμάκωσή του πρέπει να συνδυάζεται με μηχανισμούς που μειώνουν το κόστος κεφαλαίου, επιταχύνουν αδειοδοτήσεις και ενισχύουν την κοινωνική αποδοχή. Η συμμετοχή πολιτών και μικρών επιχειρήσεων μέσω ενεργειακών κοινοτήτων, το net-billing με αποθήκευση και η τοπική απόδοση οφέλους ενισχύουν την ευθυγράμμιση κινήτρων και πολλαπλασιάζουν τον ρυθμό μείωσης των εκπομπών. Στο παραγωγικό σκέλος, η σταδιακή συρρίκνωση της εξόρυξης άνθρακα και πετρελαίου συνοδευόμενη από σχέδια μετάβασης, επανακατάρτιση εργαζομένων και διαφοροποίηση περιφερειακών οικονομιών, αποτρέπει τη χρήση τους λόγω κόστους σε κοινότητες που μέχρι σήμερα εξαρτήθηκαν από τα ορυκτά καύσιμα.

Η αποκατάσταση φυσικών καταβοθρών άνθρακα προσφέρει συμπληρωματικό όφελος. Αναδασώσεις, προστασία δασών και αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών αυξάνουν την απορρόφηση CO₂ και ενισχύουν την ανθεκτικότητα οικοσυστημάτων, λειτουργώντας ταυτόχρονα με τη μείωση των πηγών εκπομπής. Την ίδια στιγμή, η κλιμάκωση της έρευνας και ανάπτυξης σε τεχνολογίες για τομείς όπως πράσινος χάλυβας, χαμηλού άνθρακα τσιμέντο με δέσμευση άνθρακα και βιώσιμα καύσιμα αεροπορίας, μεταφέρει τη στατιστική ένδειξη δυσκολίας σε συγκεκριμένη τεχνολογική λύση.

Επειδή οι κοινωνικές μεταβλητές υπογράμμισαν την ανισοκατανομή οφελών και κινδύνων, οι πολιτικές πρέπει να διασφαλίζουν δίκαιη μετάβαση. Η προστασία από την ενεργειακή φτώχεια με ανακαινίσεις κατοικιών, αντλίες θερμότητας και δίκτυα θέρμανσης χαμηλών εκπομπών, καθώς και η ανακύκλωση των εσόδων από την τιμολόγηση άνθρακα σε ευάλωτα νοικοκυριά και μικρές επιχειρήσεις, διατηρούν την κοινωνική αποδοχή της μετάβασης. Η εκπαίδευση και η περιβαλλοντική συνείδηση ενισχύουν νέα πρότυπα ευημερίας που δεν ταυτίζονται με μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, εναρμονίζοντας τη βελτίωση της ποιότητας ζωής με την πτώση των εκπομπών.

Συνολικά, τα δεδομένα της ανάλυσης δείχνουν ότι οι εκπομπές είναι τόσο υψηλές όσο μεγαλύτερο είναι το μίγμα σε ορυκτά καύσιμα και όσο μεγαλύτερη απαίτηση σε ενέργεια έχουν τα πρότυπα παραγωγής και μεταφορών. Η απάντηση δεν είναι γενική και αφηρημένη, είναι συγκεκριμένη και συμβατή με τις συσχετίσεις που καταγράφηκαν. Η αλλαγή του μίγματος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η μείωση των ποσοτήτων των ορυκτών καυσίμων στις

μεταφορές, η τεχνολογική αναβάθμιση βιομηχανίας, η ενίσχυση φυσικών καταβοθρών και οι πολιτικές που κάνουν τη μετάβαση κοινωνικά δίκαιη. Έτσι επιτυγχάνεται η μη ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ της ανάπτυξης και των εκπομπών, μετατρέποντας τα στατιστικά ευρήματα σε εφαρμόσιμες κατευθύνσεις πολιτικής και επενδύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Archer, D. (2005). Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C9).
2. Archer, D., & Brovkin, V. (2008). The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂. *Climatic Change*, 90(3), 283-297.
3. Arrhenius, S. (1896). On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine*, 41, 237-276.
4. Boucher, O., Forster, P., & Shine, K. P. (2022). Updated radiative forcing estimates for well-mixed greenhouse gases. <https://arxiv.org/abs/2211.15780>
5. Canadell, J. G., & Raupach, M. R. (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320(5882), 1456-1457.
6. Charney, J. et al. (1979). Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment. National Academy of Sciences, Washington D.C.
7. Ciais, P., et al. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *IPCC AR5, WG1*.
8. Climate Change Science Emerges With Industrialization. (2024). History.com. Διαθέσιμο στο: <https://www.history.com/news/industrial-revolution-climate-change>
9. Climate Watch. (2024). Greenhouse gas emissions by sector [dataset]. Επεξεργασία: Our World in Data.
10. Coumou, D., & Rahmstorf, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491-496.
11. Díaz, S. et al. (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services – Summary for Policymakers*. IPBES.
12. Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169-192.
13. EPA. (2022). *Overview of Greenhouse Gases*. United States Environmental Protection Agency.

14. Forster, P. et al. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. *IPCC AR6, WG1*.
15. Friedlingstein, P., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811-4900.
16. Gattuso, J. P., et al. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349(6243), aac4722.
17. Global Carbon Project. (2023). *Global Carbon Budget 2023*.
<https://www.globalcarbonproject.org>
18. Global CCS Institute. (2022). *Global Status of CCS 2022*.
<https://www.globalccsinstitute.com>
19. Global Forest Watch. (2023). *Deforestation Trends*. <https://www.globalforestwatch.org>
20. Graven, H. D., et al. (2013). Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960. *Science*, 341(6150), 1085-1089.
<https://doi.org/10.1126/science.1239207>
21. GHG Protocol. (2024). *Global Warming Potential Values (August 2024 update)*. World Resources Institute.
22. Hannah Ritchie et al. (2023). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org>
23. IAEA. (2021). *How Carbon Emissions Acidify Our Ocean*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org>
24. IEA. (2022, 2023). *CO₂ Emissions Reports και World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency. <https://www.iea.org>
25. IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
26. Katsafados, P., Papadopoulos, A., et al. (2020). Regional climate change in the Mediterranean. *Atmospheric Research*, 239, 104911.
27. Keeling, C. D., et al. (1976). Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*, 28(6), 538-551.
28. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627.
29. Le Quéré, C., et al. (2018, 2021, 2023). Global Carbon Budget. *Earth System Science Data*.
30. Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production. *Science*, 333(6042), 616-620.

31. Lüthi, D. et al. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379-382.
32. Matthews, H. D., et al. (2009). The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 459(7248), 829–832.
33. Meinshausen, M., et al. (2009). Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature*, 458, 1158-1162.
34. Myhre, G., et al. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *IPCC AR5, WG1*.
35. NASA. (2022, 2023). *The Greenhouse Effect*. <https://climate.nasa.gov>
36. NOAA Global Monitoring Laboratory (GML). (2024). *Global Greenhouse Gas Reference Network – Trends in CO₂, CH₄, and N₂O*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
37. NOAA ESRL. (2023). *Mauna Loa CO₂ monthly mean data*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
38. Pan, Y., et al. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045), 988-993.
39. Petit, J. R., et al. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436.
40. Pugh, T. A. M., et al. (2020). Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Nature*, 585(7824), 545-550.
41. Ramaswamy, V., et al. (2019). Radiative forcing of climate: the historical development. *Reviews of Geophysics*, 57(1), 287–299.
42. Reay, D. S., Davidson, E. A., et al. (2012). Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change*, 2(6), 410-416.
43. Sabine, C. L., et al. (2004). The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367-371.
44. Saunois, M., et al. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12, 1561-1623.
45. Sherwood, S. C., et al. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4), e2019RG000678.
46. Shindell, D., et al. (2012). Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science*, 335, 183–189.
47. Smith, P., et al. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6(1), 42-50.

48. Thomas, C. D., et al. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.
49. Tian, H., et al. (2024). Global Nitrous Oxide Emissions. CSIRO. <https://www.csiro.au>
50. UNEP. (2021). *State of the Climate 2021*. United Nations Environment Programme.
51. United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.
52. WHO. (2021). *Climate change and health*. World Health Organization.
53. Wuebbles, D. J., et al. (2017). Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I. <https://doi.org/10.7930/J0DJ5CTG>
54. World Bank. (2023). *CO₂ emissions (metric tons per capita)*. The World Bank Group. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>
55. Wikipedia Contributors. (2024). Global warming potential. In *Wikipedia*. Retrieved August 10, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_potential