ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διακύμανση αερίων ρύπων στην πόλη των Χανίων και συγκριτική αξιολόγηση με άλλες Ευρωπαϊκές πόλεις»

ΧΟΝΔΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΤΖΑΓΚΑΡΑΚΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Επιβλέπων καθηγητής

ΚΟΠΑΝΑΚΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΧΑΝΙΑ 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας, Δρ. Κοπανάκη Ηλία, για την απέραντη βοήθεια και καθοδήγησή του, για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, αναθέτοντάς μας την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας και την αξιολόγηση των μετρήσεων που είχε διενεργήσει, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του, αλλά και για την μεγάλη στήριξη που μας έδειξε κατά τη διάρκεια αυτής.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ελευθερία Κατσίβελα, καθώς και την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Σπυριδούλα Μελίνα Κώττη, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας και τις πολύτιμες υποδείξεις στις διορθώσεις της εργασίας μας.

Ιδιαίτερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή Μιχαήλ Λαζαρίδη, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ευγενική παραχώρηση των δεδομένων των μετρήσεων των αερίων ρύπων από την πόλη των Χανίων κατά το έτος 2022. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Περιφερειακή Ενότητα Χανίων, στην οποία ανήκει ο σταθμός μετρήσεων στο Στάδιο Χανίων.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Εισηγητής: Δρ. Ηλίας Κοπανάκης (*Επιβλέπων καθηγητής*)
2. Μέλος: Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα
3. Μέλος: Αναπλ. Καθ. Σπυριδούλα Μελίνα Κώττη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τη διακύμανση των συγκεντρώσεων των αερίων ρύπων στην πόλη των Χανίων κατά το έτος 2022 και ασχολείται με τη συγκριτική αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα σε δύο ελληνικές αστικές περιοχές, στην Αθήνα και στη Θεσσαλονίκη, και σε άλλες Ευρωπαϊκές πόλεις. Η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στην αξιολόγηση των επιπέδων ρύπανσης των αερίων ρύπων NO_2, NO, CO, SO_2 και O_3, για το έτος 2022, και γίνεται μια σύγκριση με αντίστοιχα δεδομένα από άλλες Ευρωπαϊκές πόλεις. Τα αξιοσημείωτα ευρήματα περιλαμβάνουν διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις ρύπων κατά τη διάρκεια των εποχών του έτους καθώς και μεταξύ πόλεων, με ορισμένους ρύπους ενίοτε να υπερβαίνουν τα νομοθετικά όρια. Συγκεκριμένα, τα Χανιά παρουσίασαν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις NO το Φεβρουάριο και το Μάρτιο, ενώ η Αθήνα κατέγραψε αυξημένα επίπεδα CO το Δεκέμβριο. Εν τω μεταξύ, η Θεσσαλονίκη παρουσίασε σημαντικές συγκεντρώσεις NO_2 σε διάφορους μήνες. Η μελέτη εξετάζει επίσης ευρύτερες τάσεις στην ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη και τις συνεχιζόμενες προκλήσεις της διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπογραμμίζει την ανάγκη για στοχευμένα μέτρα για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ρύπων και τονίζει τη σημασία της συνολικής συλλογής και ανάλυσης δεδομένων για την αποτελεσματική διαχείριση της ποιότητας του αέρα.

Λέξεις-κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, Χανιά, ποιότητα αέρα, Αθήνα, Θεσσαλονίκη, αέριοι ρύποι

ABSTRACT

This paper presents the variation in air pollutant concentrations in the city of Chania in the year 2022 and deals with the comparative assessment of air quality in the urban areas of two Greek cities, Athens and Thessaloniki, as well as other European cities. The study mainly focuses on the assessment of the pollution levels of NO_2, NO, CO, SO_2 and O_3, for the year 2022, and a comparison is made with corresponding data from other European cities. Notable findings include variations in pollutant concentrations during the seasons of the year as well as between cities, with some pollutants sometimes exceeding legal limits. Specifically, Chania presented the highest NO concentrations in February and March, while Athens recorded elevated CO levels in December. Meanwhile, Thessaloniki experienced significant NO_2 concentrations in various months. The study also examines wider trends in air quality in Europe and the ongoing challenges of air pollution management. It highlights the need for targeted measures to tackle specific pollutants and emphasizes the importance of comprehensive data collection and analysis for effective air quality management.

Keywords: air pollution, Chania, air quality, Athens, Thessaloniki, air pollutants

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ... 3
ABSTRACT ... 4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ... 7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ... 9
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ... 10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ... 12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ... 20
2.1 Φωτοχημικό νέφος και αιθαλομίχλη ... 20
2.2 Σχηματισμός Όζοντος ... 25
2.4 Σχηματισμός νιτρικού υπεροξυακετυλίου ... 27
2.5 Φαινόμενο του θερμοκηπίου ... 29
2.6 Μετεωρολογικές επιδράσεις ... 30
2.6.1 Επιπτώσεις των Φυσικών Εκπομπών στην Κλιματική Αλλαγή ... 33
2.6.2 Επιπτώσεις των Ανθρωπογενών Εκπομπών στην Κλιματική Αλλαγή ... 34
2.6.3 Επιπτώσεις των Χημικών Διεργασιών στην Κλιματική Αλλαγή ... 34
2.6.4 Αντίκτυπος της Κλιματικής Αλλαγής στην Ατμοσφαιρική Ρύπανση και στο Επιφανειακό Όζον ... 35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ: ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ ... 39
3.1 Οξείδια του αζώτου (NO_x) ... 39
3.2 Αμμωνία NH_3 ... 40
3.3 Υποξείδιο του αζώτου (N_2O) ... 42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΛΛΟΙ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ... 43
4.1 Ολικά αιωρούμενα σωματίδια ... 43
4.2 Ατμοσφαιρικό όζον (O_3) ... 44
4.3 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ... 45
4.4 Διοξείδιο του θείου (SO_2) ... 46
4.5 Μόλυβδος ... 46
4.6 Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες ... 47
4.7 Πτητικές οργανικές ενώσεις ... 47
4.8 Διοξίνες ... 48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ... 49
5.1 Ο ρόλος της μετεωρολογίας ... 49
5.2 Αέριες μάζες ... 50
5.3 Υδρατμοί - υγρασία ... 52
5.4 Συννεφιά – Ομίχλη ... 52
5.5 Άνεμοι ... 52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΡΥΠΩΝ ... 53
6.1 Πρωτοβουλίες της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα ... 53
6.2 Η συγκρότηση της ευρωπαϊκής νομοθεσίας ... 53
6.3 Προσπάθειες της ΕΕ για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ... 55
7.1 Στόχος της εργασίας ... 56
7.2 Σταθμοί παρακολούθησης ατμοσφαιρικών ρύπων ... 56
7.3 Παρακολούθηση Ρύπων στο σταθμό μέτρησης της πόλης των Χανίων ... 57
7.3.1 Μέτρηση του όζοντος ... 57

7.3.2 Μέτρηση του NO_2 59
7.3.3 Μέτρηση του CO 60
7.3.4 Μέτρηση του SO_2 60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 61
8.1 Παρουσίαση δεδομένων στην πόλη των Χανίων 61
8.1.1. Παρουσίαση μετεωρολογικών δεδομένων 61
8.1.2. Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων 62
8.2 Αποτελέσματα μεταβολής ατμοσφαιρικών ρύπων για Αθήνα και Θεσσαλονίκη 67
8.2.1 Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων στην Αθήνα 68
8.2.2 Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων στη Θεσσαλονίκη 72
8.3 Αποτελέσματα μεταβολής ατμοσφαιρικών ρύπων σε Ευρωπαϊκό επίπεδο 75
8.3.1 Όζον O_3 75
8.3.2 Διοξείδιο του αζώτου NO_2 78
8.3.3 Διοξείδιο του θείου και μονοξείδιο του άνθρακα (SO_2 και CO) 80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 88

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ κλίματος, εκπομπών και ποιότητας του αέρα (προτάθηκε από Jacob και Winner, 2009). Το πράσινο διακεκομμένο πλαίσιο δείχνει τις διαφορετικές εκπομπές, ενώ τα κόκκινα και τα μπλε βέλη δείχνουν αμφίδρομες και μονόδρομες αλληλεπιδράσεις, αντίστοιχα [104]. 32
Σχήμα 2 Προβολές μοντέλου του O_3 όπως υπολογίζονται από τις μελέτες που περιλαμβάνονται σε αυτήν την ανασκόπηση, με βάση τους Fu και Tian. (2019) [29]. Οι αλλαγές κωδικοποιούνται με χρώμα και σύμβολα από τις μελέτες. (A) Watson et al. (2016), (B) Fortems-Cheiney et al. (2019), (C) Glotfelty et al. (2016), (D) Colette et al. (2015) και (E) Schnell et al. (2016). Κάθε μελέτη αντιπροσωπεύεται από τις κατώτερες και τις ανώτερες εκτιμήσεις των προβλέψεων εάν είναι διαθέσιμες. 37
Σχήμα 3 Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής NH_3 στις σημαντικότερες γεωργικές περιοχές του κόσμου που ανιχνεύονται από το διάστημα. Ο λόγος ανάμειξης όγκου υπολογίστηκε για κελί πλέγματος γεωγραφικού πλάτους-μήκους 1° × 1° [54]**.** 41
Σχήμα 4 Εικόνα και σχηματική αναπαράσταση του συστήματος λειτουργίας του οργάνου Horiba APOA-370 για τη μέτρηση του όζοντος [81] 58
Σχήμα 5 Εικόνα και σχηματική αναπαράσταση του λειτουργικού συστήματος του οργάνου Horiba APOA-370 για τη μέτρηση του NO_2 [94] 60
Σχήμα 6 Μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111] 61
Σχήμα 7 Μηνιαία μεταβολή του υετού και της νεφοκάλυψης για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111]. 61
Σχήμα 8 Μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111] 62
Σχήμα 9 Μέσες μηνιαίες τιμές NO στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022. 62
Σχήμα 10 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022. 63
Σχήμα 11 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022. 64
Σχήμα 12 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_x στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022. 65
Σχήμα 13 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.66
Σχήμα 14 Μέσες μηνιαίες τιμές SO_2 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022. 67
Σχήμα 15 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88]. 68
Σχήμα 16 Μέσες μηνιαίες τιμές SO_2 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88]. 69
Σχήμα 17 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88]. 70
Σχήμα 18 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88]. 71
Σχήμα 19 Μέσες μηνιαίες τιμές NO στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88]. 72
Σχήμα 20 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89]. 73
Σχήμα 21 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89]. 74
Σχήμα 22 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89] 74
Σχήμα 23 Συγκεντρώσεις O_3 στην Ευρώπη το έτος 2018 [90]. 76
Σχήμα 24 Συγκεντρώσεις O_3 σε σχέση με την τιμή στόχο το έτος 2018 και τον αριθμό των

σταθμών που εξετάζονται για κάθε χώρα [90]. 76
Σχήμα 25 Συγκεντρώσεις NO_2 στην Ευρώπη το 2018 [90]..... 79
Σχήμα 26 Συγκεντρώσεις NO_2 σε σχέση με την ετήσια οριακή τιμή το 2018 και τον αριθμό των σταθμών που εξετάζονται για κάθε χώρα [90]. 80
Σχήμα 27 Ετήσιες συγκεντρώσεις SO_2 στην Ευρώπη το 2018 [90]. 81
Σχήμα 28 Συγκεντρώσεις CO στην Ευρώπη το 2018 [90]. 82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συντομογραφίες……..10
Πίνακας 2 Οι οριακές τιμές συγκέντρωσης για ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως ισχύουν στην ΕΕ [87] 54

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Πίνακας 1 Συντομογραφίες

	Ελληνική Ονομασία	***Αγγλική Ονομασία***
Ελληνικά ακρωνύμια		
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση	European Union
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας	World Health Organisation
ΧΑΠ	Χρόνια Αποφρακτική Πνευμονοπάθεια	Chronic Obstructive Pulmonary Disease
Αγγλικά ακρωνύμια		
AQLV	Οριακές τιμές ποιότητας αέρα	Air quality limit values
BVOCs	Βιογενείς πτητικές οργανικές ενώσεις	Biogenic volatile organic compounds
CCM	Περιφερειακά μοντέλα χημείας-κλίματος	Regional chemistry-climate models
CTM	Μοντέλα χημικών μεταφορών	Chemical transport models
GLO	Όζον σε επίπεδο εδάφους	Ground level ozone
EPA	Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος	Environmental Protection Agency
IPCC	Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή	The Intergovernmental Panel on Climate Change
NAAQS	Εθνικά πρότυπα ποιότητας περιβάλλοντος αέρα	National Ambient Air Quality Standards
NM-VOC	Μη Μεθανικές Πτητικές Οργανικές Ενώσεις	Non-Methane Volatile Organic Compounds
NOx	Οξείδια του αζώτου	Nitrogen oxides
NO_2	Διοξείδιο του αζώτου	Nitrogen dioxide
NO	Μονοξείδιο του αζώτου	Nitric oxide
PAH	Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
PAN	Νιτρικό υπεροξυακετύλιο	Peroxyacetyl nitrate
PM_{10}	Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μικρομέτρων	Particles less than 10 micrometers in diameter
$PM_{2.5}$	Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μικρομέτρων	Particles with a diameter of less than 2.5 micrometers
SSA	Αερολύματα θαλάσσιου αλατιού	Sea salt aerosols
SO_2	Διοξειδίου του θείου	Sulfur dioxide
SOA	δευτερογενή οργανικά αερολύματα	secondary organic aerosols
SOMO35	Σύνολο των μέσων ημερήσιων 8-ωρων τιμών O3 άνω των 35 ppb	Sum of Ozone means over 35 ppb (daily maximum 8-hour)
SLCF	βραχύβιες κλιματικές δυνάμεις	Short-lived climate forces
TSP	Συνολικά αιωρούμενα σωματίδια	Total suspended particulate matter

VOC	Πτητικές Οργανικές Ενώσεις	Volatile Organic Compounds

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί σημαντική πρόκληση για το περιβάλλον και την υγεία τόσο για τις ανεπτυγμένες όσο και για τις αναπτυσσόμενες χώρες παγκοσμίως [1]. Υπάρχει μια αυξανόμενη απελευθέρωση δυνητικά επιβλαβών αερίων και σωματιδίων στην παγκόσμια ατμόσφαιρα, προκαλώντας επιζήμιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και εξάντληση πόρων ζωτικής σημασίας για τη μακροπρόθεσμη βιώσιμη ανάπτυξη του πλανήτη [2]. Ο συνδυασμός της αστικής επέκτασης και της βιομηχανικής προόδου έχει οδηγήσει σε σοβαρά ζητήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης τις τελευταίες δεκαετίες. Η ατμόσφαιρα έχει εξελιχθεί σε έναν απέραντο χημικό αντιδραστήρα, όπου ρύποι όπως οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOCs) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x) συμμετέχουν σε αντιδράσεις παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, παράγοντας διάφορες επιβλαβείς ουσίες.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση τυπικά ορίζεται ως η παρουσία ενός ή περισσότερων ρύπων (χημικών ουσιών, σωματιδίων ή βιολογικών υλικών) στην ατμόσφαιρα, που φθάνουν σε συγκεντρώσεις και διάρκειες που μπορεί να είναι επιβλαβείς για τη φυσική χλωρίδα, την πανίδα και τον άνθρωπο. Αυτό περιλαμβάνει δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα των επιφανειακών ή υπόγειων υδάτων, την παραγωγικότητα του εδάφους και τη ζημιά σε χερσαία ή υδάτινα οικοσυστήματα και υλικά [96].

Στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, οι μεγάλες πόλεις άρχισαν να αντιμετωπίζουν ένα νέο φαινόμενο ρύπανσης που προηγουμένως δεν είχε προσδιοριστεί. Αυτό το φαινόμενο, που ονομάζεται φωτοχημική αιθαλομίχλη, χαρακτηρίζεται από αυξημένη συγκέντρωση όζοντος στην κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα), που προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των οξειδίων του αζώτου, των πτητικών οργανικών ενώσεων και της ηλιακής ακτινοβολίας. Μία από τις πιο γνωστές και εκτενώς μελετημένες περιπτώσεις παρατηρείται στο Los Angeles των ΗΠΑ, που αρχικά εντοπίστηκε από τους Haagen-Smit et al. [3] που αναγνώρισαν συμπτώματα βλάβης στα φυτά.

Ήδη από τη δεκαετία του 1980, έγινε φανερό ότι η μεταβαλλόμενη σύνθεση της ατμόσφαιρας της Γης εξελισσόταν σε ένα πρόβλημα που ξεπερνούσε τα τοπικά και περιφερειακά όρια, που εκτείνεται σε ολόκληρες ηπείρους μέσω του φαινομένου που είναι γνωστό ως όξινη βροχή. Αυτό το ζήτημα προήλθε από την ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θείο για την παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας σε παραδοσιακούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Σταδιακά, το πρόβλημα κλιμακώθηκε σε παγκόσμια κλίμακα, ξεπερνώντας τη συμβατική έννοια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και άρχισε να αποτελεί απειλή για τις θεμελιώδεις λειτουργίες του πλανητικού συστήματος, ιδιαίτερα σε έναν κρίσιμο τομέα: την ατμόσφαιρα [97].

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), περίπου το 90% του παγκόσμιου πληθυσμού εκτέθηκε σε υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικών ρύπων το 2016. Η ατμοσφαιρική ρύπανση από μόνη της οδηγεί σε θανάτους 7 εκατομμυρίων ανθρώπων ετησίως, με 4,2 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους να αποδίδονται σε ρύπους του ατμοσφαιρικού αέρα. Ένα σημαντικό μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, περίπου το 91%, αφορά χώρες του τρίτου κόσμου, ιδιαίτερα στη Νοτιοανατολική Ασία και σε περιοχές του Δυτικού Ειρηνικού. Μελέτες έχουν δείξει ότι ακόμη και μια μικρή αύξηση κατά 10 μg/m^3 στα επίπεδα των PM_{10} (σωματίδια με μέση αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10μm) του περιβάλλοντος σε ορισμένες πόλεις της Ασίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση 0,6% στα ποσοστά θνησιμότητας, ξεπερνώντας τον αντίκτυπο που παρατηρείται σε πόλεις του Δυτικού Κόσμου. Σε οικονομικούς όρους, οι πρόωροι θάνατοι που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική ρύπανση αποτιμώνται σε περίπου 5 τρισεκατομμύρια δολάρια σε απώλειες παγκοσμίως σε ετήσια βάση [98].

Επί του παρόντος, η πλειονότητα των μεγάλων πόλεων παγκοσμίως αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα, που εκτείνονται πέρα από τις ανεπτυγμένες περιοχές όπως η Βόρεια Αμερική, η Ευρώπη και η Ιαπωνία, και σε πόλεις σε αναπτυσσόμενες περιοχές, όπως η Πόλη του Μεξικού, το Σαντιάγο της Χιλής, το Κάιρο, η Μπανγκόκ και άλλες. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι κατηγοριοποιούνται συνήθως σε αιωρούμενα σωματίδια (όπως σκόνες, αναθυμιάσεις, ομίχλες και καπνοί), αέριους ρύπους (συμπεριλαμβανομένων αερίων και ατμών) και οσμές. Τα αιωρούμενα σωματίδια στον αέρα περιλαμβάνουν συνολικά αιωρούμενα σωματίδια (total suspended particles, TSP), PM_{10}, $PM_{2.5}$ (σωματίδια με μέση αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5μm), λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια, καυσαέρια ντίζελ, ιπτάμενη τέφρα άνθρακα, ορυκτές σκόνες (π.χ. άνθρακας, ασβεστόλιθος, τσιμέντο), σκόνες και αναθυμιάσεις μετάλλων (π.χ. ψευδάργυρος, χαλκός, σίδηρος, μόλυβδος), ομίχλες οξέος (π.χ. θειικό οξύ), σωματίδια φθορίου, χρωστικές ενώσεις χρωμάτων, ομίχλες φυτοφαρμάκων, αιθάλη, καπνός λαδιού και άλλα [2].

Οι αέριοι ρύποι περιλαμβάνουν ενώσεις θείου όπως διοξείδιο του θείου και τριοξείδιο του θείου (SO_3), μονοξείδιο του άνθρακα, ενώσεις αζώτου όπως μονοξείδιο

του αζώτου (NO), διοξείδιο του αζώτου (NO_2), αμμωνία, οργανικές ενώσεις συμπεριλαμβανομένων υδρογονανθράκων (HC), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), ενώσεις αλογόνων (HF και HCl) και άλλες. Όσον αφορά τις οσμές, ενώ ορισμένες αποδίδονται σε συγκεκριμένους χημικούς παράγοντες, όπως είναι το υδρόθειο (H_2S), το δισουλφίδιο του άνθρακα (CS_2) και οι μερκαπτάνες (R-SH, R1-S-R2), άλλοι είναι δύσκολο να προσδιοριστούν χημικά [99].

Οι δευτερογενείς ρύποι μπορεί να προκύψουν από θερμικές, χημικές ή φωτοχημικές αντιδράσεις. Για παράδειγμα, οι φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ NO_x και αντιδρώντων υδρογονανθράκων μπορούν να παράγουν O_3, οδηγώντας στο σχηματισμό φωτοχημικής αιθαλομίχλης σε αστικές περιοχές. Η εκπομπή πρωτογενών ρύπων (SO_2, σωματιδίων, NO_x κ.ά.) στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στην παραγωγή δευτερογενών ρύπων, αυξάνοντας σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ωστόσο, ο αντίκτυπος σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξαρτάται όχι μόνο από τις ατμοσφαιρικές εκπομπές της, αλλά και από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των μηχανισμών μεταφοράς, διασποράς, αντίδρασης και εναπόθεσης που αποτελούν όλες τις ατμοσφαιρικές διεργασίες. Κατά συνέπεια, η μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις ανάλογα με τους υπό ανάλυση μηχανισμούς [βιβλιογραφία].

Στις μέρες μας, μια από τις βασικές περιβαλλοντικές προκλήσεις προκύπτει από την αυξανόμενη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων. Για παράδειγμα, τα σημερινά επίπεδα τροποσφαιρικού όζοντος ξεπερνούν αυτά που μετρήθηκαν στην προβιομηχανική εποχή λόγω των αυξημένων εκπομπών διοξειδίου του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων από τη βιομηχανία και τα οχήματα από τη δεκαετία του 1950. Οι προσομοιώσεις περιφερειακών μοντέλων υποδεικνύουν επίσης ότι το μη ρυπασμένο οριακό στρώμα πάνω από την Ευρώπη θα είχε χαμηλότερα επίπεδα φωτοοξειδωτικών ειδών, εάν αποκλείονταν οι ανθρωπογενείς εκπομπές [4].

Σύμφωνα με τους de Leeuw et al. [5], τα πιο σοβαρά προβλήματα στην Ευρώπη σχετίζονται με σωματίδια με διάμετρο κάτω των 10 μικρομέτρων (PM_{10}), διοξείδιο του αζώτου και όζον. Οι στόχοι για την ποιότητα του αέρα που προτείνει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) επιτυγχάνονται λιγότερο στη Νότια Ευρώπη από ό,τι σε πιο βόρειες πόλεις, εν μέρει λόγω των καλύτερων συνθηκών διασποράς στις τελευταίες. Οι Baldasano et al. [2] συγκέντρωσαν πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα στις μεγάλες πόλεις παγκοσμίως, τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες, και αξιολόγησαν τις τάσεις στα τέλη του 20ου και στις αρχές του 21ου αιώνα. Υπάρχει μια ξεκάθαρη πτωτική τάση στις τιμές των σωματιδίων, του διοξειδίου του

θείου και του διοξειδίου του αζώτου, αν και αυτά τα επίπεδα παραμένουν αισθητά υψηλότερα από διάφορα θεσμοθετημένα όρια και κατευθυντήριες τιμές.

Όταν τα δεδομένα αναλύονται με ομαδοποίηση χωρών με βάση τις ζώνες εισοδήματος, γίνεται προφανές ότι οι χώρες στη Δύση υψηλού εισοδήματος δεν αντιμετωπίζουν ζητήματα που σχετίζονται με το SO_2. Τα οξείδια του αζώτου φτάνουν σε υψηλές τιμές παγκοσμίως λόγω της εντατικής χρήσης του αυτοκινήτου. Αντίθετα, οι πόλεις σε ζώνες χαμηλού εισοδήματος εμφανίζουν χαμηλούς μέσους όρους για τα αιωρούμενα σωματίδια. Το όζον εμφανίζει σημαντικές μέσες τιμές σε όλες τις περιοχές εκτός από την Ευρώπη, η οποία επίσης εμφανίζει υψηλή τιμή, καταδεικνύοντας ότι το όζον στο επίπεδο του εδάφους είναι παγκόσμιο πρόβλημα [2].

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, ρυπαίνοντας το νερό που καταναλώνουμε, τον αέρα που αναπνέουμε και το έδαφος που συντηρεί την ανάπτυξη των φυτών. Παρά τις τεχνολογικές, κοινωνικές και σχετιζόμενες με τις υπηρεσίες, επιτυχίες της βιομηχανικής επανάστασης, αυτή παράλληλα οδήγησε στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων ρύπων που απελευθερώθηκαν στον αέρα, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Αναμφίβολα, η παγκόσμια περιβαλλοντική ρύπανση έχει εξελιχθεί σε διεθνές ζήτημα δημόσιας υγείας με πολύπλευρες διαστάσεις, που περιλαμβάνει κοινωνικούς, οικονομικούς, νομοθετικούς προβληματισμούς και συνήθειες του τρόπου ζωής. Η αστικοποίηση και η εκβιομηχανοποίηση έχουν φτάσει σε πρωτοφανή και ανησυχητικά επίπεδα σε παγκόσμια κλίμακα στη σύγχρονη εποχή. Η ανθρωπογενής ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί πρωταρχικό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία παγκοσμίως, συμβάλλοντας σε περίπου 9 εκατομμύρια θανάτους ετησίως. Αναμφισβήτητα, αυτά τα ζητήματα συνδέονται στενά με την κλιματική αλλαγή, με δυνητικά σοβαρές συνέπειες για την ανθρωπότητα. Η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζουν έντονα διάφορα οικοσυστήματα, προκαλώντας ανησυχία για την ασφάλεια των τροφίμων, το λιώσιμο των πάγων, την εξαφάνιση ειδών ζώων και τη βλάβη στα φυτά [6].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί ποικίλες επιπτώσεις στην υγεία, επηρεάζοντας τα ευαίσθητα άτομα ακόμη και σε ημέρες με χαμηλή ατμοσφαιρική ρύπανση. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους συσχετίζεται στενά με καταστάσεις όπως η Χρόνια Αποφρακτική Πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ), ο βήχας, η δύσπνοια, ο συριγμός, το άσθμα, οι αναπνευστικές ασθένειες και τα αυξημένα ποσοστά νοσηλείας, υποδεικνύοντας νοσηρότητα. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις που

σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνουν το χρόνιο άσθμα, την πνευμονική ανεπάρκεια, τις καρδιαγγειακές παθήσεις και την καρδιαγγειακή θνησιμότητα. Σύμφωνα με μια σουηδική μελέτη, η μακροχρόνια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση φαίνεται να προκαλεί διαβήτη [7]. Επιπλέον, η ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζει διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία στην πρώιμη ανθρώπινη ζωή, συμβάλλοντας σε αναπνευστικές, καρδιαγγειακές, ψυχικές και περιγεννητικές διαταραχές, οδηγώντας σε βρεφική θνησιμότητα ή χρόνιες ασθένειες στην ενήλικη ζωή [8].

Οι εθνικές εκθέσεις υπογραμμίζουν σταθερά τον αυξημένο κίνδυνο νοσηρότητας και θνησιμότητας. Αυτές οι μελέτες, που διεξάγονται παγκοσμίως, καθορίζουν μια συσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων διακυμάνσεων στη συγκέντρωση των σωματιδίων (PM) και της ημερήσιας θνησιμότητας. Οι κλιματικές αλλαγές και η υπερθέρμανση του πλανήτη θα μπορούσαν να επιδεινώσουν αυτήν την κατάσταση, συμβάλλοντας στην αύξηση της νοσηλείας (δείκτης νοσηρότητας) μεταξύ των ηλικιωμένων και των ευπαθών ατόμων για συγκεκριμένους λόγους. Τα λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια φαίνεται να σχετίζονται με πιο σοβαρές ασθένειες, καθώς μπορούν να διεισδύσουν στα βαθύτερα μέρη των αεραγωγών και να εισέλθουν πιο εύκολα στην κυκλοφορία του αίματος [100].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει κυρίως τους κατοίκους μεγάλων αστικών περιοχών, όπου οι οδικές εκπομπές είναι ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση ενέχει επίσης κινδύνους που σχετίζονται με βιομηχανικά ατυχήματα, όπου η απελευθέρωση τοξικών ουσιών μπορεί να είναι θανατηφόρα για τους γύρω πληθυσμούς. Η διασπορά των ρύπων επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, ιδίως από την ατμοσφαιρική σταθερότητα και τον άνεμο [101].

Στις αναπτυσσόμενες χώρες [9], το πρόβλημα εντείνεται λόγω του υπερπληθυσμού, της ανεξέλεγκτης αστικοποίησης και της ταχείας εκβιομηχανοποίησης. Αυτό οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, ιδίως σε χώρες που χαρακτηρίζονται από κοινωνικές ανισότητες και έλλειψη πληροφόρησης σχετικά με τη βιώσιμη περιβαλλοντική διαχείριση. Η χρήση καυσίμων όπως το ξύλο ή τα στερεά καύσιμα για οικιακές ανάγκες, λόγω των χαμηλών εισοδημάτων, εκθέτει τους ανθρώπους σε κακής ποιότητας, ρυπασμένο και μολυσμένο αέρα εσωτερικών χώρων. Συγκεκριμένα, περίπου τρία δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως βασίζονται σε αυτές τις πηγές ενέργειας για τις καθημερινές ανάγκες θέρμανσης και μαγειρέματος. Στις

αναπτυσσόμενες χώρες, οι γυναίκες στα νοικοκυριά φαίνεται να αντιμετωπίζουν τον υψηλότερο κίνδυνο ανάπτυξης ασθένειας λόγω της παρατεταμένης έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση των εσωτερικών χώρων [9]. Λόγω της ταχείας βιομηχανικής ανάπτυξης και του υπερπληθυσμού της, η Κίνα είναι μία από τις ασιατικές χώρες που αντιμετωπίζουν σοβαρά ζητήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η παρατηρούμενη θνησιμότητα από καρκίνο του πνεύμονα στην Κίνα συνδέεται με τα λεπτά σωματίδια. Ενώ η μακροχρόνια έκθεση σχετίζεται με επιβλαβείς επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα, είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι καρδιαγγειακές παθήσεις παρατηρούνται κυρίως σε ανεπτυγμένες και υψηλού εισοδήματος χώρες παρά σε αναπτυσσόμενες χώρες χαμηλού εισοδήματος που εκτίθενται σε μεγάλο βαθμό στην αέρα ρύπανση [10]. Η Ινδία καταγράφει ακραία επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με επικίνδυνη ποιότητα αέρα ιδιαίτερα σε πόλεις όπως το Νέο Δελχί. Τόσο οι αστικές όσο και οι αγροτικές περιοχές στην Ινδία αντιμετωπίζουν ρύπανση λόγω της ταχείας εκβιομηχανοποίησης, της αστικοποίησης και της αυξημένης χρήσης μοτοσυκλετών για μεταφορές. Η καύση βιομάζας για τις ανάγκες θέρμανσης και μαγειρέματος είναι μια σημαντική πηγή οικιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ινδία και το Νεπάλ. Χωρική ετερογένεια υπάρχει στην Ινδία, με τις πολιτείες της Βόρειας Ινδίας να παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα $PM_{2.5}$ ($557 – 601 \mu g/m^3$) σε σύγκριση με τις Νότιες Πολιτείες ($183 – 214 \mu g/m^3$) [11]. Το ψυχρό κλίμα στο Βορρά μπορεί να συμβάλει σε αυτή τη διαφορά, απαιτώντας περισσότερο χρόνο θέρμανσης σε εσωτερικούς χώρους και αυξημένη θέρμανση σε σύγκριση με το τροπικό κλίμα στη Νότια Ινδία. Η οικιακή ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ινδία σχετίζεται με σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, ιδιαίτερα σε γυναίκες και μικρά παιδιά, που περνούν πολλές ώρες του εικοσιτετραώρου σε εσωτερικούς χώρους. Η χρόνια αποφρακτική αναπνευστική νόσος (ΧΑΠ) και ο καρκίνος του πνεύμονα είναι πιο διαδεδομένοι στις γυναίκες, ενώ η οξεία νόσος του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος παρατηρείται σε μικρά παιδιά ηλικίας κάτω των 5 ετών [12].

Ιστορικά, η συσσώρευση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του θείου και του καπνού, που έφτασε τα $1.500 mg/m^3$, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των θανάτων (4.000 θάνατοι) τον Δεκέμβριο του 1952 στο Λονδίνο και το 1963 στη Νέα Υόρκη (400 θάνατοι). Σημειώθηκε συσχέτιση μεταξύ της ρύπανσης και της θνησιμότητας με βάση την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε έξι μητροπολιτικές πόλεις των ΗΠΑ. Σε κάθε περίπτωση, η θνησιμότητα φαινόταν στενά συνδεδεμένη με λεπτά, εισπνεόμενα και θειικά σωματίδια περισσότερο από τη

συνολική σωματιδιακή ρύπανση, την οξύτητα του αερολύματος, το διοξείδιο του θείου ή τα επίπεδα διοξειδίου του αζώτου [13]. Επιπλέον, η Πόλη του Μεξικού και το Ρίο ντε Τζανέιρο αναφέρουν εξαιρετικά υψηλά επίπεδα ρύπανσης, ακολουθούμενα από το Μιλάνο, την Άγκυρα, τη Μελβούρνη, το Τόκιο και τη Μόσχα. Δεδομένου του σημαντικού αντίκτυπου στη δημόσια υγεία, πρέπει να ληφθούν υπόψη ποικίλες παρεμβάσεις. Έχει αναφερθεί επιτυχής έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο, με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογικών μέσων λαμβάνοντας υπόψη την πηγή εκπομπών, τη φύση, τις επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Ο Bruce [12] τονίζει τη σημασία του ελέγχου τόσο των σημειακών όσο και των μη σημειακών πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μια ολοκληρωμένη απογραφή εκπομπών πρέπει να καταγράφει όλες τις πηγές σε μια δεδομένη περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις πηγές και τη φύση τους αλλά και την τοπογραφία και τη μετεωρολογία. Οι πολιτικές και οι μέθοδοι ελέγχου συχνά αξιολογούνται από τοπική, περιφερειακή έως παγκόσμια κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να διασκορπιστεί και να μεταφερθεί σε διαφορετικές περιοχές. Η διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στοχεύει στη μείωση των ρύπων σε αποδεκτά επίπεδα ή στην εξάλειψη αυτών που επηρεάζουν αρνητικά την υγεία ή το περιβαλλοντικό οικοσύστημα. Ιδιωτικοί και κρατικοί φορείς εφαρμόζουν δράσεις για τη διασφάλιση της ποιότητας του αέρα. Ο ΠΟΥ και η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA) έχουν θεσπίσει πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα για διάφορους ρύπους ως εργαλεία για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα. Αυτά τα πρότυπα πρέπει να συγκριθούν με τα πρότυπα απογραφής εκπομπών μέσω ανάλυσης αιτιών και μοντελοποίησης διασποράς για τον εντοπισμό προβληματικών περιοχών [14].

Για παράδειγμα, η εφαρμογή καταλυτικών μετατροπέων στα αυτοκίνητα αντιπροσωπεύει ένα μέτρο ελέγχου που βασίζεται στην πηγή. Αυτές οι συσκευές καταλύουν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, μετατρέποντας τους ρύπους και τα τοξικά αέρια από κινητήρες εσωτερικής καύσης σε λιγότερο επιβλαβείς ουσίες. Στην Ελλάδα, η χρήση ιδιωτικών αυτοκινήτων ρυθμιζόταν με παρακολούθηση του λήγοντα αριθμού των πινακίδων κυκλοφορίας για την ανακούφιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά τις ώρες αιχμής (μέτρο μονά – ζυγά) [15].

Όσον αφορά τις βιομηχανικές εκπομπές, τα φίλτρα και άλλες τεχνολογίες απορρύπανσης μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την ατμοσφαιρική ρύπανση ώστε να πληρούν τα νομοθετικά πρότυπα. Οι τρέχουσες στρατηγικές για τη βελτίωση της

ποιότητας του αέρα απαιτούν την αξιολόγηση της οικονομικής αξίας των οφελών που προκύπτουν από τα προτεινόμενα προγράμματα. Οι δημόσιες αρχές εκδίδουν οδηγίες και κατευθυντήριες γραμμές με συνοδευτικά προγράμματα, με στόχο τη συμμόρφωση. Στην Ευρώπη, οι οριακές τιμές ποιότητας αέρα (air quality limit values, AQLV) εκδίδονται για την ενεργοποίηση αξιώσεων προγραμματισμού. Στις ΗΠΑ, τα εθνικά πρότυπα ποιότητας περιβάλλοντος αέρα (U.S. National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) καθορίζουν εθνικές οριακές τιμές για την ποιότητα του αέρα. Ενώ τα πρότυπα και οι οδηγίες λειτουργούν με διαφορετικούς μηχανισμούς, έχει επιτευχθεί σημαντική επιτυχία στη μείωση των συνολικών εκπομπών και των συναφών επιπτώσεων στην υγεία και στο περιβάλλον. Η Ευρωπαϊκή Οδηγία προσδιορίζει τις γεωγραφικές περιοχές έκθεσης σε κίνδυνο ως ζώνες παρακολούθησης/αξιολόγησης για την καταγραφή των πηγών εκπομπών και των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ενώ οι ΗΠΑ θεσπίζουν παγκόσμια γεωγραφικά κριτήρια ποιότητας του αέρα με βάση τη σοβαρότητα των προβλημάτων ποιότητας του αέρα, καταγράφοντας όλες τις πηγές ρύπων και τις πρόδρομες ουσίες [16].

Η εξέλιξη της περιβαλλοντικής διακυβέρνησης, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές εξελίξεις, έχει πυροδοτήσει μια συζήτηση. Η περιβαλλοντική πολιτική έχει προκαλέσει αντιρρήσεις και σημεία διαμάχης μεταξύ διαφόρων πολιτικών κομμάτων, επιστημόνων, φορέων, μέσων ενημέρωσης και κυβερνητικών καθώς και μη κυβερνητικών οργανώσεων. Αυτό οδήγησε στην εμφάνιση ριζοσπαστικών ενεργειών και κινημάτων περιβαλλοντικού ακτιβισμού [13]. Η αυξανόμενη επικράτηση των νέων τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών έχει ωθήσει τον έλεγχο της επιρροής τους στις μεθόδους επικοινωνίας και στα κοινωνικά κινήματα, συμπεριλαμβανομένου του ακτιβισμού. Από τη δεκαετία του 1990, ο όρος «ψηφιακός ακτιβισμός» έχει αποκτήσει εξέχουσα θέση σε διάφορους κλάδους. Στις μέρες μας, πολλές ψηφιακές τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν για να αποφέρουν αποτελέσματα στον ψηφιακό ακτιβισμό σχετικά με περιβαλλοντικά ζητήματα. Συγκεκριμένα, συσκευές με διαδικτυακές δυνατότητες, όπως υπολογιστές ή κινητά τηλέφωνα, χρησιμοποιούνται ως εργαλεία για την υποστήριξη της αλλαγής στον πολιτικό και κοινωνικό τομέα [17].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

2.1 Φωτοχημικό νέφος και αιθαλομίχλη

Οι σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον, που προέρχονται από την απελευθέρωση και τη διασπορά διαφόρων ρύπων στην ατμόσφαιρα, έχουν αναφερθεί ευρέως παγκοσμίως. Υπολογίζεται ότι περίπου δύο εκατομμύρια θάνατοι συμβαίνουν ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [18].

Ο όρος «νέφος» είναι ένας συνδυασμός «καπνού» (smog) και «ομίχλης» (fog). Η ομίχλη αποτελείται από ορατά αερολύματα που περιέχουν μικροσκοπικές σταγόνες νερού ή κρυστάλλους πάγου που αιωρούνται στον αέρα, που μοιάζουν με σύννεφο χαμηλού υψομέτρου. Ο σχηματισμός και τα χαρακτηριστικά της φωτοχημικής αιθαλομίχλης επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του ανέμου, της θερμοκρασίας και του ηλιακού φωτός. Η φωτοχημική αιθαλομίχλη συνήθως σχηματίζεται μέσω χημικών αντιδράσεων όταν αυξημένα επίπεδα βασικών ρύπων στον αέρα, όπως οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και τα οξείδια του αζώτου (NOx), αλληλεπιδρούν με οξειδωτικά όπως το υδροξύλιο, το όζον και τα νιτρικά [19]. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, οι εκπομπές κυκλοφορίας οχημάτων, η καύση υπολειμμάτων καλλιεργειών και οι ηφαιστειακές εκρήξεις είναι οι κύριες πηγές σωματιδίων και ρύπων που ευνοούν το σχηματισμό αιθαλομίχλης. Αυτές οι δραστηριότητες συμβάλλουν άμεσα ή έμμεσα στην παραγωγή $PM_{2,5}$, το οποίο χρησιμεύει ως ο κύριος πρόδρομος της αιθαλομίχλης [20]. Περιστατικά αιθαλομίχλης έχουν αναφερθεί συχνά σε μεγάλες πόλεις παγκοσμίως, όπως το Πεκίνο, το Δελχί, η Πόλη του Μεξικού, το Λος Άντζελες και την Τεχεράνη. Οι ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αιθαλομίχλης χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1950, μετά από γνωστά γεγονότα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος της αιθαλομίχλης, θεσπίστηκαν νόμοι για τον καθαρό αέρα από τις κυβερνήσεις του Ηνωμένου Βασιλείου και των ΗΠΑ για τον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συμπεριλαμβανομένης της αιθαλομίχλης [21]. Οι ανησυχίες για την υγεία και το περιβάλλον που δημιουργούνται από την αιθαλομίχλη έχουν προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή, όπως αποδεικνύεται από τον πολλαπλασιασμό των ερευνητικών εργασιών για σχετικά θέματα.

Η κλασική αιθαλομίχλη, γνωστή και ως αιθαλομίχλη του Λονδίνου, αντιπροσωπεύει μια θανατηφόρα μορφή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Τον Δεκέμβριο του 1952, το Λονδίνο παρουσίασε μια τέτοια αιθαλομίχλη για περίπου 5 ημέρες, με αποτέλεσμα το θάνατο πολλών χιλιάδων ανθρώπων. Αυτή η κλασική αιθαλομίχλη, που συχνά ονομάζεται θειούχος αιθαλομίχλη, χαρακτηρίζεται από ασυνήθιστα υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίων του θείου (φτάνοντας τα 1.340 μέρη ανά δισεκατομμύριο το 1952), που προέρχονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων, κυρίως άνθρακα [22, 26]. Η έναρξη της αιθαλομίχλης του Λονδίνου καταλύθηκε από τη συσσώρευση υπερβολικών ποσοτήτων σωματιδίων (PM) στην ατμόσφαιρα. Στην κλασική αιθαλομίχλη, τα σωματίδια PM αυξάνονται σε μέγεθος λόγω των υψηλών επιπέδων υγρασίας, χρησιμεύοντας ως πυρήνες για το σχηματισμό σταγονιδίων ομίχλης. Κατά συνέπεια, το διοξείδιο του θείου διαλύεται σε αυτά τα σταγονίδια ομίχλης και υφίσταται οξείδωση σχηματίζοντας θειικό οξύ, συμβάλλοντας έτσι στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Οι κύριες αντιδράσεις είναι οι εξής [26]:

$SO_2 + OH \rightarrow HOSO_2$
$HOSO_2 + O_2 \rightarrow HO_2 + SO_3$
$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$

Το 2016, ο Wang και οι συνεργάτες του διεξήγαγαν μια πειραματική μελέτη με στόχο να αποσαφηνίσουν τη χημεία που κρύβεται πίσω από την αιθαλομίχλη του Λονδίνου [20]. Τα ευρήματά τους πρότειναν ότι ο σχηματισμός της κλασικής αιθαλομίχλης έμοιαζε με τη διαδικασία οξείδωσης του διοξειδίου του θείου (SO_2) από το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) μέσα στα σύννεφα. Οι βασικές συνθήκες για την παραγωγή της κλασικής αιθαλομίχλης περιλαμβάνουν: (1) πρωτογενείς πρόδρομες ουσίες όπως σωματίδια αιθάλης και οξείδια του θείου, (2) δευτερογενείς πρόδρομες ουσίες όπως αερολύματα, (3) αναστροφή θερμοκρασίας, (4) υψηλή σχετική υγρασία και (5) χαμηλή θερμοκρασία. Μετά το αρχικό καταστροφικό γεγονός της αιθαλομίχλης του Λονδίνου, περιβαλλοντικές υπηρεσίες και κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο εφάρμοσαν τους νόμους για τον καθαρό αέρα, όπως η νομοθεσία ορόσημο που θεσπίστηκε από τη βρετανική κυβέρνηση το 1956 (ο νόμος του Ηνωμένου Βασιλείου για τον καθαρό αέρα) [22, 26]. Ωστόσο, αυτή η μορφή αιθαλομίχλης συνεχίζει να εμφανίζεται στις αναπτυσσόμενες χώρες λόγω της εξάρτησής τους από ορυκτά καύσιμα και της απουσίας αυστηρών κανονισμών για τον καθαρό αέρα.

Από την άλλη πλευρά, η αιθαλομίχλη του Los Angeles, γνωστή ως φωτοχημική αιθαλομίχλη, είναι μια οξειδωτική αιθαλομίχλη που σχηματίζεται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων (πρωτογενείς ρύποι που απελευθερώνονται από την καύση ορυκτών καυσίμων σε αυτοκίνητα, σταθμούς παραγωγής ενέργειας κ.λπ.), υψηλά επίπεδα οξειδωτικών, όπως το όζον, και ομίχλη από αερολύματα που σχηματίζονται σε χημικές αντιδράσεις φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Η φωτοχημική αιθαλομίχλη τύπου Los Angeles εξαρτάται από την ημερήσια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, σχηματίζοντας δευτερεύοντα οξειδωτικά και αερολύματα. Σε αντίθεση με την αιθαλομίχλη του Λονδίνου, η φωτοχημική αιθαλομίχλη του Los Angeles εμφανίζεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες και μέσα στην ημέρα, αφού η ηλιακή ακτινοβολία έχει παραγάγει εν τω μεταξύ δευτερογενείς χημικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους [22].

Αυτός ο τύπος αιθαλομίχλης προκύπτει από την παρουσία συγκεκριμένων χημικών ειδών στον αέρα αστικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με το ηλιακό φως και άλλες μετεωρολογικές συνθήκες. Ουσιαστικά, η φωτοχημική αιθαλομίχλη περιλαμβάνει υψηλές συγκεντρώσεις διαφόρων ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του αζώτου, του όζοντος, των νιτρικών υπεροξειδίων οργανικών ενώσεων, του μονοξειδίου του άνθρακα και των αλδεϋδών. Ο σχηματισμός όζοντος στον αέρα περιλαμβάνει τη φωτοχημική αντίδραση του διοξειδίου του αζώτου που εκπέμπεται από οχήματα και βιομηχανικές εγκαταστάσεις με ηλιακή ακτινοβολία, οδηγώντας στη δημιουργία οξειδίου του αζώτου και ελεύθερων ριζών οξυγόνου. Αυτές οι ρίζες αντιδρούν περαιτέρω με μόρια οξυγόνου για να παράγουν όζον. Ωστόσο, παρουσία πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), αυτός ο κύκλος μπορεί να προκαλέσει θανατηφόρο φωτοχημικό νέφος. Η χημική διαδικασία του σχηματισμού φωτοχημικής αιθαλομίχλης μπορεί να συνοψιστεί ως εξής [22]:

Αποσύνθεση του διοξειδίου του αζώτου υπό υπεριώδη ακτινοβολία:

$NO_2 + hv \rightarrow NO + O\cdot$

Σχηματισμός όζοντος:

$O\cdot + O_2 \rightarrow O_3$

Ανακύκλωση σε διοξείδιο του αζώτου:

$O_3 + NO \rightarrow O_2 + NO_2$

Παραγωγή δραστικών μορίων VOC μέσω αντίδρασης με ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου:

$RH + OH^{\cdot} \rightarrow R^{\cdot} + H_2O$

Σχηματισμός οξειδωμένων πτητικών οργανικών ενώσεων:

$R^{\cdot} + O_2 \rightarrow RO_2$

Αυτές οι αντιδράσεις δείχνουν ότι υψηλότερες συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων μπορούν να συμβάλουν στο σχηματισμό ενός επιβλαβούς τύπου φωτοχημικής αιθαλομίχλης που υποβαθμίζει την ποιότητα του αέρα δημιουργώντας φωτοχημικές οξειδωτικές ενώσεις και όζον στο επίπεδο του εδάφους. Επιπλέον, είναι προφανές ότι η φωτοχημική αιθαλομίχλη βασίζεται τόσο σε πρωτογενείς όσο και σε δευτερογενείς ρύπους [22, 24, 25].

Λόγω της ταχείας εκβιομηχανοποίησης και των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων παγκοσμίως, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων και άλλων οργανικών ρύπων αυξάνονται. Κατά συνέπεια, η φωτοχημική αιθαλομίχλη έχει καταστεί κυρίαρχη περιβαλλοντική ανησυχία σε πολλές πόλεις τόσο σε αναπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες χώρες, ωθώντας τις κυβερνήσεις να επινοήσουν στρατηγικές μετριασμού.

Πολλές μεγάλες πόλεις παγκοσμίως, όπως η Πόλη του Μεξικού, το Ρίο ντε Τζανέιρο, το Σάο Πάολο, το Χιούστον και το Σαντιάγο, υποφέρουν από κάποια μορφή φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Τα αερολύματα μπορούν να συμβάλουν τόσο στην ψύξη όσο και στη θέρμανση της ατμόσφαιρας, ανάλογα με τους τύπους, τη χημική τους σύνθεση και τις θέσεις σχηματισμού τους στην ατμόσφαιρα. Οι συνολικές επιπτώσεις του σχηματισμού αιθαλομίχλης σε αστική, περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα εγείρουν ανησυχίες σχετικά με την ευημερία του οικοσυστήματος και την ανθρώπινη υγεία [21].

Η Ευρώπη δεν ήταν η μόνη που αντιμετώπισε τέτοια προβλήματα. Στις 26 Οκτωβρίου 1948, ένα θανατηφόρο φαινόμενο αιθαλομίχλης συνέβη στις Ηνωμένες Πολιτείες στην Donora της Πενσυλβάνια. Ένα νέφος αιθαλομίχλης, που περιλάμβανε ένα τοξικό μείγμα διοξειδίου του θείου, μονοξειδίου του άνθρακα και σκόνης με υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων από τις καπνοδόχους του τοπικού μεταλλουργείου ψευδαργύρου, οδήγησε σε είκοσι θανάτους, ενώ περί τους 7.000 ανθρώπους νοσηλεύτηκαν τις επόμενες πέντε ημέρες. Αυτός ο τύπος αιθαλομίχλης παραμένει

διαδεδομένος σε πολλά αστικά κέντρα παγκοσμίως, ειδικά στην Κίνα, την Ινδία, τη Μέση Ανατολή και την Ανατολική Ευρώπη [23].

Μεταξύ 2015 και 2016, η Πολωνία αναδείχθηκε ως μία από τις πιο ρυπασμένες χώρες όσον αφορά τον δείκτη ποιότητας του αέρα στην Ευρώπη. Ανησυχητικά, 33 πόλεις στην Πολωνία κατατάσσονται μεταξύ των κορυφαίων 50 πιο ρυπασμένων πόλεων στην Ευρώπη. Αυτή η ανησυχητική κατάσταση έχει θέσει σημαντικές απειλές για την υγεία των Ευρωπαίων πολιτών, με αποτέλεσμα τη μέση μείωση του προσδόκιμου ζωής κατά εννέα μήνες. Οι Czerwinska et al. (2019) [24] εντόπισαν μια ξεχωριστή μορφή αιθαλομίχλης, που ονομάζεται «Πολωνική αιθαλομίχλη», η οποία διέφερε χημικά από τους προηγουμένως χαρακτηρισμένους τύπους αιθαλομίχλης. Συγκεκριμένα, αυτή η παραλλαγή αιθαλομίχλης σχηματίστηκε ακόμη και κάτω από υψηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις και χαμηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με την αιθαλομίχλη του Λονδίνου, η οποία τυπικά εμφανίζεται κάτω από χαμηλές ατμοσφαιρικές πιέσεις. Ο κύριος ένοχος πίσω από το πολωνικό νέφος είναι οι λέβητες οικιακής χρήσης, οι οποίοι εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες εισπνεύσιμων PM_{10} και $PM_{2,5}$ σωματιδίων, μαζί με καρκινογόνες ενώσεις όπως το βενζο[a]πυρένιο [25]. Ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό της πολωνικής αιθαλομίχλης είναι η υψηλή συγκέντρωση PM_{10} σε συνθήκες υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Κάθε χρόνο, έως και 48 χιλιάδες Πολωνοί υφίστανται πρόωρους θανάτους λόγω της έκθεσης στην πολωνική αιθαλομίχλη. Είναι σημαντικό ότι ο αντίκτυπος αυτού του τύπου αιθαλομίχλης εκτείνεται πέρα από την Πολωνία, επηρεάζοντας άλλες Ευρωπαϊκές χώρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες και προφίλ ρύπων [22]. Κατά συνέπεια, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για περαιτέρω έρευνα από επιστήμονες σε όλο τον κόσμο για την καλύτερη κατανόηση αυτής της αναδυόμενης μορφής αιθαλομίχλης.

Η φωτοχημική αιθαλομίχλη αντιπροσωπεύει μια χαρακτηριστική μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκύπτει από αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ηλιακού φωτός και των ρύπων όπως οι υδρογονάνθρακες και το διοξείδιο του αζώτου. Παρά το γεγονός ότι είναι συχνά ανεπαίσθητο, αυτό το είδος αιθαλομίχλης μπορεί να εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, προκαλώντας ερεθισμούς της αναπνευστικής οδού και των ματιών. Περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις φωτοχημικής αιθαλομίχλης έχουν αναφέρει αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας και αναπνευστικών παθήσεων. Κατά συνέπεια, η φωτοχημική αιθαλομίχλη αναγνωρίζεται ως πρόκληση που σχετίζεται με τη σύγχρονη εκβιομηχανοποίηση. Ενώ είναι

διαδεδομένο σε όλα τα σύγχρονα αστικά κέντρα, είναι ιδιαίτερα συχνό σε πόλεις με ηλιόλουστα, ζεστά, ξηρά κλίματα και με σημαντικό αριθμό μηχανοκίνητων οχημάτων. Δεδομένης της ικανότητάς του να ταξιδεύει με τον άνεμο, ακόμη και αραιοκατοικημένες περιοχές μπορεί να επηρεαστούν [23].

Η αρχική φάση των φωτοχημικών αντιδράσεων περιλαμβάνει την απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα άτομο, μόριο, ελεύθερη ρίζα ή ιόν. Το αποτέλεσμα αυτής της απορρόφησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενέργεια ή το μήκος κύματος του φωτονίου. Τα ορατά και τα υπεριώδη τμήματα φωτός είναι απαραίτητα για την έναρξη αυτών των φωτοχημικών αντιδράσεων, με την απορρόφηση να οδηγεί ενδεχομένως σε διάσπαση, εσωτερική αναδιάταξη, φθορισμό ή δημιουργία διεγερμένων ειδών. Η φωτοχημική αιθαλομίχλη μπορεί να εκδηλωθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον με σημαντικές και συνεχείς εκπομπές πρωτογενών ατμοσφαιρικών ρύπων. Ωστόσο, οι ιδιαιτερότητες του κλίματος και της γεωγραφίας επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια και τη σοβαρότητα της φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Δύο παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της φωτοχημικής αιθαλομίχλης είναι [23]:

(α) Τοπογραφία: Οι κινήσεις του ανέμου διασκορπίζουν τις αέριες μάζες τόσο οριζόντια όσο και κάθετα, μειώνοντας τις συγκεντρώσεις των ρύπων καθώς απομακρύνονται από την πηγή. Η έκταση της διασποράς συνδέεται άμεσα με τη σταθερότητα του αέρα ή το βαθμό κάθετης κίνησης του αέρα.

(β) Αναστροφή θερμοκρασίας: Οι θερμικές αναστροφές επιδεινώνουν κάθε μορφή αιθαλομίχλης, αντιπροσωπεύοντας μια ανώμαλη διάταξη των μαζών αέρα όπου ένα θερμότερο στρώμα παγιδεύεται ανάμεσα σε δύο πιο κρύα στρώματα αέρα. Αυτή η παγίδευση ρύπων κοντά στην επιφάνεια της Γης εντείνεται, όταν λόφοι ή βουνά εμποδίζουν τους οριζόντιους ανέμους, προκαλώντας τη συσσώρευση ρύπων πάνω από μια πόλη. Ο ζεστός αέρας λειτουργεί ως καπάκι, αναστέλλοντας τη διασπορά των ρύπων.

2.2 Σχηματισμός Όζοντος

Ο καθηγητής Arie Haagen-Smit, χημικός στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καλιφόρνια και η ομάδα του, απέδειξαν ότι η έκθεση των εκπομπών αυτοκινήτων που περιέχουν οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία αποτελούνται από μονοξείδιο του αζώτου (NO), διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και άκαυστους υδρογονάνθρακες, σε ηλιακό φως έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή όζοντος και ερεθιστικών ουσιών για τα μάτια

όπως η φορμαλδεΰδη. Η καθηγήτρια Frances Blacet καθηγήτρια χημείας στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Λος Άντζελες, ήταν η πρώτη που αναγνώρισε ότι η φωτόλυση του NO έπαιξε ρόλο στη δημιουργία ατόμων οξυγόνου στην τροπόσφαιρα [26, 28]. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε στην κατανόηση ότι οι ακόλουθες χημικές αντιδράσεις είναι υπεύθυνες τόσο για την παραγωγή όσο και για την απώλεια του όζοντος στην τροπόσφαιρα [26, 28]:

$$NO_2 + \text{sunlight (280-423 nm)} \rightarrow NO + O \quad (1)$$

$$O + O_2 + M\ (N_2, O_2, Ar, \text{etc.}) \rightarrow O_3 + M \quad (2)$$

$$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2\, O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (3)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντιδράσεις 1-3 δημιουργούν μια κατάσταση όπου ο σχηματισμός όζοντος εξαρτάται από την αναλογία συγκέντρωσης NO προς NO_2 και την ένταση του ηλιακού φωτός. Η παρατήρηση των υψηλών επιπέδων όζοντος στη φωτοχημική αιθαλομίχλη οδήγησε στο συμπέρασμα ότι φωτοχημικές αλυσιδωτές αντιδράσεις ελευθέρων ριζών λαμβάνουν χώρα. Αυτά τα πρόσθετα είδη ελευθέρων ριζών συνδέθηκαν με τις οργανικές ενώσεις που είναι απαραίτητες για το σχηματισμό της φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Διάφοροι ερευνητές συμπέραναν ότι η ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου (OH), η ελεύθερη ρίζα υδροϋπεροξυλίου (HO_2) και οι ελεύθερες οργανικές υπεροξυ ρίζες (RO_2) έπαιξαν βασικό ρόλο στις φωτοχημικές αλυσιδωτές αντιδράσεις επιτρέποντας τη μετατροπή του NO σε NO_2. Ως εκ τούτου, οι αυξημένες συγκεντρώσεις NO και οι μειωμένες συγκεντρώσεις NO_2 έχουν ως αποτέλεσμα ενισχυμένο σχηματισμό όζοντος λόγω των αντιδράσεων 1 και 2. Το βασικό στάδιο έναρξης που οδηγεί στον σχηματισμό OH είναι η φωτόλυση του όζοντος (O_3), παράγοντας ένα ηλεκτρονικά διεγερμένο άτομο οξυγόνου, $O(^1D)$, το οποίο αντιδρά με υδρατμούς (H_2O) στον αέρα για να σχηματίσει την ελεύθερη ρίζα OH [27]:

$$O_3 + \text{sunlight (290-320 nm)} \rightarrow O(^1D) + O_2 \quad (4)$$

$$O(^1D) + H_2O \rightarrow 2\ OH \quad (5)$$

Μόλις σχηματιστεί, η ελεύθερη ρίζα OH μπορεί να αντιδράσει με μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή υδρογονάνθρακες για να δημιουργήσει ενεργές σε αντιδράσεις υπεροξειδικές ρίζες και να αναμορφώσει το OH, δημιουργώντας μια αλυσιδωτή

αντίδραση για την παραγωγή όζοντος. Για παράδειγμα, οι αλυσιδωτές αντιδράσεις που παράγουν όζον που περιλαμβάνουν CO είναι οι εξής [23]:

$$OH + CO \rightarrow H + CO_2 \quad (6)$$

$$H + O_2 \rightarrow HO_2 \quad (7)$$

$$HO_2 + NO \rightarrow NO_2 + OH \quad (8)$$

$$NO_2 + \text{sunlight} \rightarrow NO + O \quad (9)$$

Η αντίδραση 9 παρέχει τα χημικά είδη για τον σχηματισμό όζοντος μέσω της αντίδρασης 2. Σημειώστε ότι η ελεύθερη ρίζα OH οξειδώνει το CO μέσω της αντίδρασης 6 και αναγεννάται κατά την οξείδωση του NO για να σχηματίσει NO_2 στην αντίδραση 8. Για την περίπτωση ενός απλού υδρογονάνθρακα, του αιθανίου (CH_3CH_3), το σχήμα αντίδρασης είναι [27]:

$$OH + CH_3CH_3 \rightarrow H_2O + CH_3CH_2^{\bullet} \quad (10)$$

$$CH_3CH_2^{\bullet} + O_2 \rightarrow CH_3CH_2O_2^{\bullet} \quad (11)$$

$$CH_3CH_2O_2^{\bullet} + NO \rightarrow NO_2 + CH_3CH_2O^{\bullet} \quad (12)$$

$$CH_3CH_2O^{\bullet} + O_2 \rightarrow CH_3CHO + HO_2 \quad (13)$$

Η ελεύθερη ρίζα υδροϋπεροξειδίου (OH_2) που σχηματίζεται μέσω της αντίδρασης της ρίζας αιθοξέος ($CH_3CH_2O^{\bullet}$) και του μοριακού οξυγόνου (αντίδραση 13), μπορεί περαιτέρω να αντιδράσει με το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) μέσω της αντίδρασης 8, αναμορφώνοντας το OH και ξεκινώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση. Αυτός ο καταλυτικός κύκλος συνεχίζεται μέχρι να εξαντληθούν οι πτητικοί υδρογονάνθρακες ή να συμβούν αντιδράσεις τερματισμού των αλυσιδωτών αντιδράσεων ελευθέρων ριζών. Μια τέτοια αντίδραση τερματισμού είναι η αντίδραση του OH με το διοξείδιο του αζώτου για να σχηματιστεί νιτρικό οξύ, που οδηγεί στη δημιουργία όξινων ειδών που συμβάλλουν στον σχηματισμό αερολύματος.

2.4 Σχηματισμός νιτρικού υπεροξυακετυλίου

Ακεταλδεΰδη (CH_3CHO), που εκπέμπεται απ' ευθείας από την εξάτμιση του αυτοκινήτου ή μέσω δευτερογενών αντιδράσεων παρόμοιες με τις αντιδράσεις 10-13,

μπορεί να αντιδράσει με OH. Η αφαίρεση του αλδεϋδικού υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας ελεύθερης ρίζας ακετυλίου, η οποία, με τη σειρά της, μπορεί να προσθέσει μοριακό οξυγόνο για να σχηματιστεί μια ρίζα υπεροξυακετυλίου (CH_3COO_2). Η ρίζα υπεροξυακετυλίου μπορεί να αντιδράσει με NO για να σχηματίσει NO_2, όπως φαίνεται παρακάτω [23].

$$CH_3CO^{\bullet} + O_2 \rightarrow CH_3COO_2 \quad (15)$$

The peroxyacetyl radical can react with NO to form NO_2:

$$CH_3COO_2 + NO \rightarrow CH_3CO_2 + NO_2 \quad (16)$$

$$CH_3CO_2 \rightarrow CH_3^{\bullet} + CO_2 \quad (17)$$

$$CH3^{\bullet} + O_2 \rightarrow CH_3O_2 \quad (18)$$

$$CH_3O_2 + NO \rightarrow CH_3O + NO_2 \quad (19)$$

$$CH_3O + O_2 \rightarrow CH_2O + HO_2 \quad (20)$$

Αυτή η σειρά αλυσιδωτών αντιδράσεων στην χημεία της φωτοχημικής αιθαλομίχλης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή φορμαλδεΰδης (CH_2O) και ελεύθερης της ρίζας υδροϋπεροξυλίου. Η ρίζα υδροϋπεροξυλίου μπορεί, με τη σειρά της, να αντιδράσει με NO για να ξαναδημιουργήσει το OH μέσω της αντίδρασης 8. Η ρίζα υπεροξυακετυλίου σχηματίζει επίσης ένα σταθερό προϊόν προσθήκης με NO, παράγοντας νιτρικό υπεροξυακετύλιο (Peroxyacetyl nitrate, PAN):

$$CH_3COO_2 + NO_2 \leftrightarrow CH_3CO\text{-}OO\text{-}NO_2 \quad (21)$$

Το νιτρικό υπεροξυακετύλιο, σε ισορροπία με τη ρίζα υπεροξυακετυλίου και το NO_2, εντοπίστηκε αρχικά από γεωπόνους ερευνητές που παρατήρησαν ένα νέο είδος φυτικής βλάβης στην αγροτική λεκάνη του Λος Άντζελες. Η βλάβη (κιτρίνισμα) των φύλλων σε πολλά είδη φυτών, διέφερε από τη γνωστή βλάβη που προκαλούνταν από το όζον, το διοξείδιο του θείου ή άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Μελέτες αποκάλυψαν ως υπεύθυνο για αυτό τις ενώσεις PAN, επιβεβαιώνοντας τη φυτοτοξικότητά τους. Αρκετά μέλη της οικογένειας γνωστά ως νιτρικά υπεροξυακύλια (Peroxyacyl nitrates, PANs), που χαρακτηρίζονται από τη γενική δομή του RCO-OO-NO_2, έχουν ανιχνευθεί στην τροπόσφαιρα. Το PAN είναι το πιο διαδεδομένο μέλος αυτής της ομάδας ένωσης. Τα PANs προκαλούν ερεθισμό στα μάτια(δακρύρροια),

έχουν χαμηλή υδατοδιαλυτότητα, αργούς ρυθμούς φωτόλυσης και τάση να αποσυντίθενται θερμικά στις πρόδρομες ενώσεις τους, τις υπεροξυακυλικές ρίζες και το διοξείδιο του αζώτου. Κατά συνέπεια, τα PANs διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά διοξειδίου του αζώτου από τις αστικές περιοχές σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα [23].

2.5 Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου εκδηλώνεται στην τροπόσφαιρα, το στρώμα όπου εμφανίζονται τα φαινόμενα της ζωής και του καιρού. Ελλείψει του φαινομένου του θερμοκηπίου, η επιφάνεια της Γης θα είχε εκτιμώμενη μέση θερμοκρασία περίπου -19°C, αντί για τους σημερινούς 14°C [43]. Τα αέρια θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) είναι οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για αυτό το φαινόμενο, που περιλαμβάνουν αέρια συστατικά στην ατμόσφαιρα που απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία στη θερμική υπέρυθρη περιοχή. Τόσο φυσικά όσο και ανθρωπογενή ίχνη αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένων των υδρατμών, του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου, του υποξειδίου, του αζώτου και του όζοντος, υπάρχουν σε ποικίλα ποσοστά στην τροπόσφαιρα, με διακυμάνσεις καθημερινές, εποχιακές και ετήσιες [44].

Τα αέρια του θερμοκηπίου μειώνουν την ικανότητα της Γης να εκπέμπει εκ νέου την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα. Κατά συνέπεια, στη Γη παραμένει περισσότερη θερμική ενέργεια και έτσι υφίσταται υπερθέρμανση. Η κλιματική αλλαγή εγκυμονεί κινδύνους για όλες τις χώρες, με τα έθνη που έχουν περιορισμένες προσαρμοστικές ικανότητες να αντιμετωπίζουν μεγαλύτερες απειλές από ακραία φαινόμενα που προκαλούνται από το κλίμα. Πολλές περιοχές στην Ινδία, που χαρακτηρίζονται από την ευθραυστότητά τους, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις κλιματικές επιπτώσεις. Έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες ερευνητικές μελέτες στην Ινδία για να προβληθούν τα πιθανά μελλοντικά σενάρια για το κλίμα στην χώρα αυτή και να αξιολογηθεί η ευπάθεια στην κλιματική αλλαγή και οι σχετικοί κίνδυνοι σε διάφορες περιοχές της [45].

Σε μια μελέτη που επικεντρώθηκε στην Καρνατάκα, οι Kumar et al. [46] υπολόγισαν ότι περίπου το 70% της καλλιεργούμενης έκτασης στην πολιτεία αντιμετωπίζει ακραία έως υψηλή ευπάθεια στις επιπτώσεις που σχετίζονται με το κλίμα. Μια άλλη δημοσίευση για την περιοχή των Ιμαλαΐων Arunachal Pradesh από τους Maiti et al. [47] τόνισε ότι επτά από τις δώδεκα περιφέρειες εμφάνισαν υψηλή κοινωνική

ευαλωτότητα στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες. Οι Xu et al. [48] τόνισαν την πιθανή μείωση του κινδύνου ακραίων γεγονότων που προκαλούνται από το κλίμα στην Ινδία μέσω της διαμόρφωσης τοπικών προσαρμοστικών μέτρων. Οι ερευνητές έχουν συνδέσει την πιθανότητα και τη σοβαρότητα των καυσώνων στην Ινδία με την υπερθέρμανση του πλανήτη. Οι Uprety και Saxena [49] προέβλεψαν ότι οι μέσες θερμοκρασίες στην Ινδία θα αυξηθούν κατά 2,5–4,4°C μέχρι το τέλος του αιώνα σε σύγκριση με το τρέχον σενάριο, ενώ οι ετήσιες βροχοπτώσεις προβλέπεται να αυξηθούν κατά μέσο όρο κατά 15–24%. Οι Gupta και Jain [50] εκτίμησαν ότι οι μελλοντικές ξηρασίες στην ινδική υποήπειρο θα γίνουν πιο έντονες και συχνές. Ομοίως, οι Chevuturi et al. (2018) ανέφεραν μια τάση αύξησης της θερμοκρασίας, αλλά μείωσης της βροχόπτωσης στην περιοχή Leh της Ινδίας, δυνητικά συνδεδεμένη με μείωση του αριθμού των ημερών με υψηλότερα ποσά βροχοπτώσεων στην περιοχή.

2.6 Μετεωρολογικές επιδράσεις

Η κλιματική αλλαγή μπορεί να έχει διπλό αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα και στην ατμοσφαιρική ρύπανση, τόσο μέσω φυσικών αλλαγών που τροποποιούν τη μεταφορά ρύπων, την ανάμειξη αερίων μαζών και τις φυσικές εκπομπές, όσο και μέσω χημικών αλλαγών που επηρεάζουν τις αντιδράσεις. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν σε μια επιδείνωση της ποιότητας του αέρα που αποδίδεται σε ένα θερμαινόμενο κλίμα, ανεξάρτητα από τις αλλαγές στις ανθρωπογενείς ρυπογόνες δραστηριότητες [29]. Οι κλιματικές αλλαγές παίζουν επίσης ρόλο στη διαμόρφωση της εμφάνισης και της σοβαρότητας των φυσικών καταστροφών, όπως π.χ. πυρκαγιών σε παρθένα γη [30]. Αντίθετα, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι πρόδρομες εκπομπές τους μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική του κλίματος αλλάζοντας τις ιδιότητες των νεφών, τη βροχόπτωση και την ακτινοβολία [31]. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτεί εξέταση κατά τη διαμόρφωση στρατηγικών μετριασμού και προσαρμογής. Ωστόσο, σημαντικά κενά στην κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών οδηγούν σε σημαντικές αβεβαιότητες στον εντοπισμό και στον ποσοτικό προσδιορισμό αυτών των αλληλεπιδράσεων.

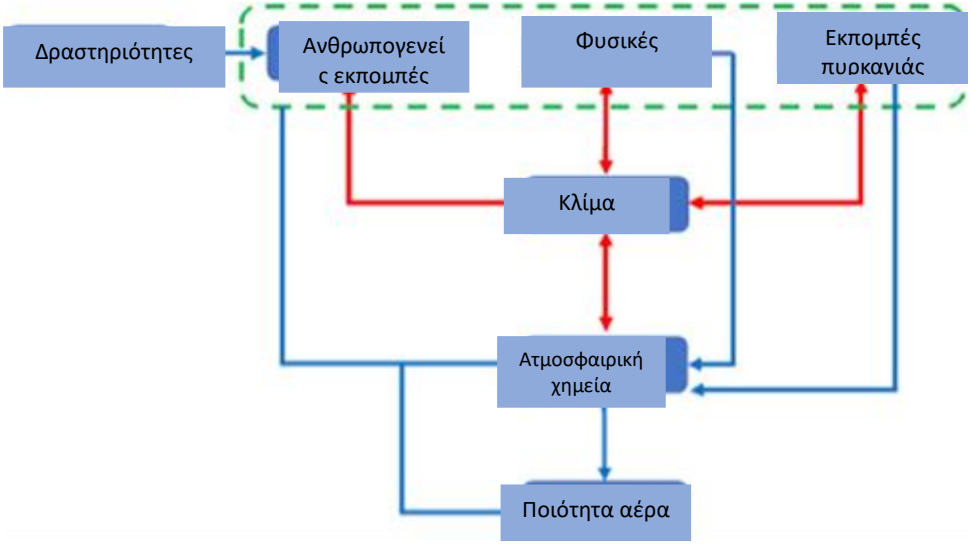
Για παράδειγμα, ενώ οι τρέχουσες πυρκαγιές είναι κατά κύριο λόγο ανθρωπογενείς, προερχόμενες από πρακτικές γεωργικής και δασικής διαχείρισης, οι προβλέψεις υποδεικνύουν αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιών σε άγρια εδάφη λόγω υψηλών θερμοκρασιών και ξηρασιών [32]. Πληροφορίες από το πιο πρόσφατο πρόγραμμα

Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 στην έκτη έκθεση αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) (AR6) και από την πιο πρόσφατη αξιολόγηση των βραχύβιων κλιματικών δυνάμεων (Short-lived Climate Forcers, SLCF) από το Πρόγραμμα Παρακολούθησης και Αξιολόγησης της Αρκτικής (AMAP 2021) δείχνουν ότι τα επίπεδα ανθρωπογενών πηγών ρύπων αναμένεται να μειωθούν σε όλη την Ευρώπη. Αυτό συνεπάγεται ότι φυσικές πηγές όπως η αφρικανική σκόνη και οι πυρκαγιές θα μπορούσαν να αναδειχθούν ως καθοριστικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στη δυναμική του κλίματος στην Ευρώπη, τονίζοντας τη σημασία των μηχανισμών ανάδρασης και των σεναρίων προσαρμογής/μετριασμού του κλίματος. Η μετεωρολογία διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στον καθορισμό της μοίρας όλων των χημικά δραστικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, περιλαμβάνοντας ενώσεις σχετικές με το κλίμα, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το όζον και τα δευτερογενή ανόργανα (π.χ. θειικά και νιτρικά) και οργανικά αερολύματα. Οι αλλαγές στο κλίμα, και κατά συνέπεια στις μετεωρολογικές παραμέτρους, μπορούν να επηρεάσουν την ατμοσφαιρική σύνθεση μέσω διαφόρων μηχανισμών [102]:

- Οι διακυμάνσεις στις θερμοκρασίες, στη βροχόπτωση και στα μοτίβα του ανέμου μπορούν να επηρεάσουν τις φυσικές πηγές αερολύματος, συμπεριλαμβανομένης της ορυκτής σκόνης, του θαλάσσιου αλατιού και των βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων (Biogenic volatile organic compounds, BVOCs).
- Επηρεάζονται επίσης οι ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής, με την αύξηση της θερμοκρασίας να οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές NH_3 από γεωργικές δραστηριότητες και εκπομπές VOCs κατά τη εξόρυξη, επεξεργασία και χρήση πετρελαιοειδών.
- Οι αλλαγές στη θερμοκρασία, στην υγρασία, στην ηλιακή ακτινοβολία και σε άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες επηρεάζουν το ρυθμό των φωτοχημικών, οξειδωτικών και άλλων χημικών αντιδράσεων, είτε επιταχύνοντας, είτε επιβραδύνοντας τη χημική μετατροπή των εκπεμπόμενων ουσιών.
- Οι αλλαγές στα μοτίβα του ανέμου, στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και στη βροχόπτωση επηρεάζουν τις διαδικασίες μεταφοράς, ανάμειξης και εναπόθεσης των ατμοσφαιρικών συστατικών.

• Οι έντονες εναλλαγές των καιρικών φαινομένων διέπουν τη διασπορά και τη μεταφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων και επιφέρουν διακυμάνσεις στη συχνότητα και στην ένταση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ουσιαστικά, η κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην ατμοσφαιρική ρύπανση απαιτεί μια ολοκληρωμένη εξέταση του τρόπου, με τον οποίο το κλίμα επηρεάζει ένα ευρύ φάσμα βιολογικών, χημικών και φυσικών διεργασιών. Το Σχήμα 1 δείχνει εποπτικά πώς το κλίμα διαμορφώνει την ποιότητα του αέρα και τις αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εκπομπών (Jacob και Winner, 2009) [103].



Σχήμα 1 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ κλίματος, εκπομπών και ποιότητας του αέρα (προτάθηκε από Jacob και Winner, 2009). Το πράσινο διακεκομμένο πλαίσιο δείχνει τις διαφορετικές εκπομπές, ενώ τα κόκκινα και τα μπλε βέλη δείχνουν αμφίδρομες και μονόδρομες αλληλεπιδράσεις, αντίστοιχα [104].

Ορισμένες συνοπτικές και μετεωρολογικές συνθήκες συμβάλλουν σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος. Συγκεκριμένα, η παρουσία ατμοσφαιρικής θερμοκρασιακής αναστροφής ενισχύει την πιθανότητα καύσωνα και υψηλών επιπέδων όζοντος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού [33]. Έρευνα των Pfahl and H. Wernli, (2012) [34] αποκάλυψε ότι έως και το 80% των ακραίων θερμοκρασιών του καλοκαιριού συνδέονται με ατμοσφαιρική παρεμπόδιση στη διάχυση των ρύπων. Ενώ τα κλιματικά μοντέλα αντιμετώπισαν δυσκολίες στην αναπαράσταση αυτού του ατμοσφαιρικού αποκλεισμού, εκτεταμένα σύνολα μοντέλων έχουν αναπαράγει με επιτυχία παρατηρηθείσες συσχετίσεις μεταξύ των κυμάτων καύσωνα και αυτών των γεγονότων [35]. Ωστόσο, η εντατικοποίηση, η αυξημένη συχνότητα και η παρατεταμένη διάρκεια

των κυμάτων καύσωνα λόγω της υπερθέρμανσης του πλανήτη [36], αναμένεται να αυξήσουν την πιθανότητα περιόδων με υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος.

2.6.1 Επιπτώσεις των Φυσικών Εκπομπών στην Κλιματική Αλλαγή

Οι κλιματικές μεταβολές που συνδέονται με την ταχύτητα του ανέμου και τις θερμοκρασίες της επιφάνειας της θάλασσας παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση των εκπομπών αερολύματος θαλάσσιου αλατιού (sea salt aerosol, SSA) [37]. Η παραγωγή του πρωτογενούς SSA επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα του ανέμου. Επιπλέον, οι εργαστηριακές και in situ μετρήσεις δείχνουν ότι, για σωματίδια νανο-μεγέθους, οι εκπομπές του αριθμού των αερολυμάτων μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού, ενώ οι εκπομπές μεγαλύτερων σωματιδίων αυξάνονται. Η ταχύτητα του ανέμου και η βροχόπτωση επηρεάζουν επίσης τις εκπομπές ορυκτής σκόνης και τη μεταφορά τους σε άλλες περιοχές. Οι αλλαγές στον άνεμο μπορούν να επηρεάσουν τις εκπομπές σωματιδίων ορυκτής σκόνης, σε σχέση με παράγοντες όπως είναι το ανάγλυφο της περιοχής, η τραχύτητα της επιφάνειας και η υγρασία του εδάφους. Η ορυκτή/αφρικανική σκόνη, μια σημαντική φυσική πηγή ατμοσφαιρικών αερολυμάτων, μπορεί να επηρεάσει την ακτινοβολία και το κλίμα της ατμόσφαιρας. Οι προβλέψεις για το παγκόσμιο φορτίο ορυκτής σκόνης τα επόμενα χρόνια παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, αντανακλώντας διαφορετικές αντιδράσεις στην κλιματική αλλαγή. Ως εκ τούτου οι προβλέψεις των μοντέλων αυτών απολαμβάνουν χαμηλή εμπιστοσύνη. Η συχνότητα των γεγονότων σκόνης μπορεί επίσης να μετατοπιστεί με την κλιματική αλλαγή, οδηγώντας σε λιγότερα αλλά πιο έντονα γεγονότα, όπως προβλέπεται από μελέτες που αναλύουν ιστορικά δεδομένα παγετώνων, αλλά και καταγραφές πεδίου τις τελευταίες δεκαετίες [37].

Οι υψηλές θερμοκρασίες αναμένεται να ενισχύσουν τις εκπομπές βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων (Biogenic volatile organic compounds, BVOCs), συμπεριλαμβανομένων του ισοπρενίου και των τερπενίων, που εκπέμπονται από τη βλάστηση. Αυτές οι ενώσεις χρησιμεύουν ως κρίσιμες πρόδρομες ουσίες για το O_3 και τα δευτερογενή οργανικά αερολύματα (secondary organic aerosol, SOA). Ο αντίκτυπος των ατμοσφαιρικών επιπέδων CO_2 στις εκπομπές BVOCs είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τα μελλοντικά πρότυπα εκπομπών. Ενώ παρατηρείται μια τάση αναστολής του CO_2 για τις εκπομπές ισοπρενίου, ο αντίκτυπος στα μονοτερπένια παραμένει ασαφής. Οι μελέτες τονίζουν τη σημασία των ακραίων καιρικών συνθηκών, όπως είναι

η ξηρασία, στην επίδραση των εκπομπών βιογενών προδρόμων ουσιών όπως το ισοπρένιο. Η προβλεπόμενη αύξηση της έντασης των περιόδων ξηρασίας υπογραμμίζει περαιτέρω τη σημασία τους. Για παράδειγμα, οι Jiang et al., (2018) [38] υπολόγισαν μια μείωση κατά 17% στις παγκόσμιες εκπομπές ισοπρενίου, που μεταφράζεται σε μείωση κατά 3ppb στις αντίστοιχες συγκεντρώσεις O_3 κοντά στην επιφάνεια τα γης στον Ευρωπαϊκό χώρο.

2.6.2 Επιπτώσεις των Ανθρωπογενών Εκπομπών στην Κλιματική Αλλαγή

Το κλίμα είναι ένας σημαντικός περιβαλλοντικός παράγοντας μιας περιοχής, οποιασδήποτε χώρας και του πλανήτη. Οι αλλαγές στους περιβαλλοντικούς παράγοντες μιας περιοχής για μεγάλο χρονικό διάστημα συνιστούν κλιματική αλλαγή. Οι αλλαγές αφορούν τη μεταβολή της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των ανέμων και αξιολογούνται για περιόδους ανά 30 χρόνια. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν τον αγροτικό τομέα, τα ζώα, τον υδρολογικό κύκλο, το μοτίβο των ανέμων, την κατανομή των βροχοπτώσεων, την ανάπτυξη των φυτών και ακόμη και ολόκληρη την τροφική αλυσίδα καθώς τα φυτά είναι παραγωγοί στο φλοιό της γης [39]. Οι εκπομπές αμμωνίας (NH_3) από γεωργικές και πτηνοτροφικές πηγές προβλέπεται να αυξηθούν σημαντικά στην Ευρώπη σε μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, με μια προτεινόμενη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C ενδεχομένως να οδηγήσει σε αύξηση 42% [28%–67%] στις εκπομπές NH_3 παγκοσμίως. Αυτή η αλλαγή που προκαλείται από το κλίμα στις εκπομπές NH_3 μπορεί να επηρεάσει τα επίπεδα $PM_{2.5}$ στην Ευρώπη μέσω της μετατροπής τους σε αμμώνιο (NH_4^+). Η μεταβολή της θερμοκρασίας του πλανήτη επηρεάζει επίσης τα συστήματα εξαερισμού, μεταβάλλοντας την παραγωγή ενέργειας και τις σχετικές εκπομπές. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες αυξάνουν τη ζήτηση ενέργειας ψύξης το καλοκαίρι, ενώ μειώνουν τη ζήτηση θέρμανσης το χειμώνα. Οι αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο επηρεάζουν την υδροηλεκτρική ενέργεια και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την έκταση της καύσης ξύλου σε κατοικίες, μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων στην Ευρώπη.

2.6.3 Επιπτώσεις των Χημικών Διεργασιών στην Κλιματική Αλλαγή

Όσον αφορά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις χημικές διεργασίες, μετεωρολογικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία παίζουν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία, κυρίως μέσω της επιρροής τους στη

δημιουργία των ελεύθερων ριζών υδροξυλίου (OH). Το OH είναι ζωτικής σημασίας για την οξειδωτική ικανότητα της τροπόσφαιρας και τη χημική απομάκρυνση των ρύπων. Οι πρωτογενείς πηγές OH περιλαμβάνουν τη φωτόλυση του O_3 και την αντίδραση με υδρατμούς, με τις αντιδράσεις αυτές να επιτείνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας περιοχών του πλανήτη. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε αυξημένο όζον το καλοκαίρι σε ρυπασμένες περιοχές λόγω της αυξημένης φωτοχημικής δραστηριότητας. Το όζον υποβάθρου, ωστόσο, μειώνεται λόγω της αναμενόμενης αύξησης των υδρατμών. Οι αυξανόμενες θερμοκρασίες ενισχύουν επίσης το σχηματισμό θειικού αερολύματος (SO_4^{2-}) από ταχύτερη οξείδωση διοξειδίου του θείου (SO_2), ενώ τα σωματίδια νιτρικών ιόντων (NO_3^-) μειώνονται καθώς το νιτρικό αμμώνιο εξατμίζεται, μετατοπίζοντας αυτά από τη σωματιδιακή στην αέρια φάση. Αντίθετα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να μειώσουν τα θειικά αερολύματα SO_4^{2-} λόγω της μειωμένης διαθεσιμότητας OH, καθώς οι αυξημένες βιογενείς εκπομπές ανταγωνίζονται το SO_2 για αντίδραση με το OH. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία μπορούν επίσης να επηρεάσουν τα δευτερεύοντα οργανικά αερολύματα (SOA), οδηγώντας τόσο σε μειώσεις όσο και σε αυξήσεις με βάση διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της κατανομής τους στην σωματιδιακή και στην αέρια φάση και την αύξηση των βιογενών προδρόμων SOA [105].

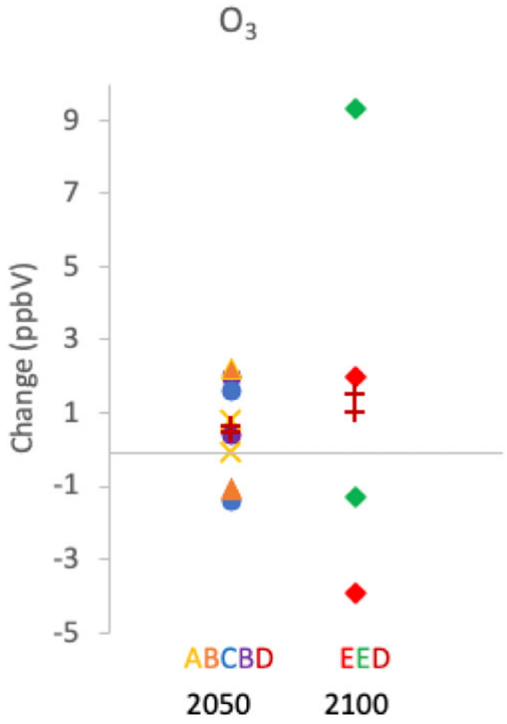
2.6.4 Αντίκτυπος της Κλιματικής Αλλαγής στην Ατμοσφαιρική Ρύπανση και στο Επιφανειακό Όζον

Η κατανόηση του αντίκτυπου της κλιματικής αλλαγής στην ατμοσφαιρική ρύπανση περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις, συμπεριλαμβανομένων μελετών ευαισθησίας, στατιστικής ανάλυσης και άμεσων υπολογισμών με χρήση ολοκληρωμένων μοντέλων. Οι μελέτες ευαισθησίας χρησιμοποιούν μεμονωμένες μετεωρολογικές παραμέτρους, η στατιστική ανάλυση συσχετίζει τις αλλαγές στην ποιότητα του αέρα με τις μεταβλητές του κλιματικού μοντέλου και οι άμεσοι υπολογισμοί χρησιμοποιούν συνδυασμένα παγκόσμια ή περιφερειακά μοντέλα χημείας-κλίματος (regional climate-chemistry models, CCM) ή μοντέλα χημικών μεταφορών (chemical transport models, CTM) που τροφοδοτούνται από μετεωρολογικές προβλέψεις. Οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης συμβάλλουν επίσης στην κατανόηση των βραχυπρόθεσμων αλλαγών, καθώς και στην προέκταση αυτών για μελλοντικές συνθήκες [106].

Ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής στο επιφανειακό όζον έχει συγκεντρώσει την προσοχή, αρχικά μέσω απλοποιημένων μελετών ευαισθησίας και αργότερα μέσω πιο περίπλοκων προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν μοντέλα χημείας-κλίματος. Οι μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε παγκόσμια και περιφερειακή κλίμακα, ιδιαίτερα σε ρυπασμένες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών και της Ευρώπης. Οι πρόσφατες ανασκοπήσεις συνόψισαν τα ευρήματα, με έμφαση στις πρόσφατες εξελίξεις, τις αβεβαιότητες και τα κενά γνώσης της Ευρώπης.

Το Σχήμα 2, που προέρχεται από τους Fu and H. Tian, (2019) [29], συνοψίζει πρόσφατα ευρήματα σχετικά με τις κλιματικές επιπτώσεις στα Ευρωπαϊκά επίπεδα O_3. Οι προσομοιώσεις πολλαπλών μοντέλων, υποθέτοντας ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι +2°C, υποδηλώνουν μια μέτρια αύξηση των μέσων θερινών επιπέδων O_3 στην Ευρώπη, αν και όχι στατιστικά σημαντική. Οι αναλύσεις του συνόλου των μέσων ημερήσιων 8-ωρων τιμών όζοντος άνω των 35 ppb(Sum of Ozone Means Over 35 ppb, SOMO35) αποκαλύπτουν την πλειονότητα των μοντέλων που προβάλλουν αυξημένο O_3 το καλοκαίρι, ιδιαίτερα στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη και την Ισπανία. Οι Colette et al., (2015) [40] με μία μετα-ανάλυση δείχνουν μια θερινή επιβάρυνση στα επίπεδα O_3 στην ηπειρωτική Ευρώπη για μελλοντικές περιόδους, με πιο έντονες αλλαγές στη Νότια και Κεντρική Ευρώπη και ελαφρές μειώσεις σε πιο βόρεια γεωγραφικά πλάτη.

Σε μια πρόσφατη έρευνα, οι Fortems-Cheiney et al., (2017) [41] χρησιμοποίησαν το μοντέλο CHIMERE CTM (chemistry-transport model) σε συνδυασμό με τα κλιματικά σενάρια RCP8.5 και RCP4.5, μαζί με σενάρια ανθρωπογενών εκπομπών, για να αξιολογήσουν τον αντίκτυπο μιας αλλαγής θερμοκρασίας +3°C και +2°C. Οι προσομοιώσεις για το 2050 (ECLIPSE-v4a εκπομπές CLE) αποκάλυψαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στα μέσα ετήσια Ευρωπαϊκά επίπεδα O_3 μεταξύ +2°C (31,99 ± 1,01ppb) και +3°C (34,41 ± 1,07ppb) σενάρια. Το σενάριο +3°C παρουσίασε 8% υψηλότερο μέσο όρο, υποδεικνύοντας την επίδραση μόνο της αυξημένης θερμοκρασίας. Αυτή η μελέτη εντόπισε επίσης αύξηση της συχνότητας των ημερών με αυξημένα επίπεδα O_3 στο σενάριο +3°C, οδηγώντας σε περισσότερες περιπτώσεις υπέρβασης του ορίου του ΠΟΥ για το όζον, ιδιαίτερα στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ευρώπης. Οι συγγραφείς συνέδεσαν αυτό το εύρημα με ένα χαμηλότερο ύψος οριακού στρώματος και έναν αυξημένο αριθμό εξαιρετικά ζεστών καλοκαιρινών ημερών στο θερμότερο σενάριο.



Σχήμα 2 Προβολές μοντέλου του O_3 όπως υπολογίζονται από τις μελέτες που περιλαμβάνονται σε αυτήν την ανασκόπηση, με βάση τους Fu και Tian. (2019) [29]. Οι αλλαγές κωδικοποιούνται με χρώμα και σύμβολα από τις μελέτες. (A) Watson et al. (2016), (B) Fortems-Cheiney et al. (2019), (C) Glotfelty et al. (2016), (D) Colette et al. (2015) και (E) Schnell et al. (2016). Κάθε μελέτη αντιπροσωπεύεται από τις κατώτερες και τις ανώτερες εκτιμήσεις των προβλέψεων εάν είναι διαθέσιμες.

Οι Zanis et al., (2022) [42] χρησιμοποίησαν προσομοιώσεις με πέντε μοντέλα CMIP6, λαμβάνοντας υπόψη το μελλοντικό κλίμα (ssp370SST) και το σημερινό κλίμα (ssp370pdSST) κάτω από την ίδια τροχιά μελλοντικών εκπομπών (SSP3-7.0). Οι εκτιμήσεις τους πρότειναν μια μικρή αύξηση του όζοντος στην Ευρώπη σε ετήσια βάση και το χειμώνα. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η μείωση του όζοντος κατά 0,2ppb $°C^{-1}$ έγινε ελαφρώς θετική αλλά όχι ισχυρή μεταξύ των μοντέλων. Οι παράγοντες που συνέβαλαν σε αυτές τις τάσεις στην Ευρώπη περιελάμβαναν χαμηλότερες εκπομπές NO_x, ενισχυμένες εκπομπές BVOC, εκπομπές NO_x κεραυνών και τον ανταγωνισμό με μεγάλης κλίμακας χημική καταστροφή του όζοντος περιβάλλοντος που συνδέεται με την αύξηση των υδρατμών από την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Η κατανόηση της εκπομπής βιογενών VOCs (BVOCs) και των σχετικών αντιδράσεων δεν έχουν πλήρως κατανοηθεί [29]. Τα BVOCs εκπέμπονται από την βιόσφαιρα ως μέρος της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, επηρεαζόμενα από παράγοντες όπως τα είδη φυτών, τη θερμοκρασία και το ηλιακό φως. Η κλιματική αλλαγή μπορεί να επηρεάσει άμεσα τις εκπομπές BVOC και στη συνέχεια να επηρεάσει τα επίπεδα O_3. Ενώ τα μοντέλα χημείας-μεταφοράς συχνά προβλέπουν μια

σημαντική αύξηση των εκπομπών BVOC σε μελλοντικές προβλέψεις, η ευαισθησία στη θερμοκρασία ποικίλλει μεταξύ των μοντέλων. Πρόσφατες μελέτες που χρησιμοποιούν δυναμικά μοντέλα βλάστησης υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα της αξιολόγησης μελλοντικών εξελίξεων στις εκπομπές BVOC, λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετους παράγοντες όπως οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO_2. Οι προβλέψεις για τις μελλοντικές τάσεις των βιογενών πτητικών οργανικών ενώσεων παραμένουν εξαιρετικά αβέβαιες λόγω διαφόρων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών στη βλάστηση που προκαλούνται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς επιρροές [29].

Η σημαντική μεταβλητότητα στα μελλοντικά επίπεδα τροποσφαιρικού O_3 σε διάφορες μελέτες προκύπτει από αβεβαιότητες στις βιογενείς εκπομπές και πιο συγκεκριμένα στις διακυμάνσεις εκπομπών, στα χαρακτηριστικά τους, στις αναλύσεις του μοντέλου και στη χρήση διαφορετικών σεναρίων εκπομπών/κλίματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ: ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑ

3.1 Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Το άζωτο, κυρίως σε μοριακή μορφή (N_2), αποτελεί το πιο άφθονο αέριο στην ατμόσφαιρα. Εκτός από το N_2, μικρότερες ποσότητες αζώτου υπάρχουν ως υποξείδιο του αζώτου (N_2O), διοξείδιο του αζώτου (NO_2), μονοξείδιο του αζώτου (NO), αμμωνία (NH_3) και διάφορα άλλα οξείδια του αζώτου. Σημάδια οξείας βλάβης στα φυτά λόγω διοξειδίου του αζώτου γίνονται εμφανή όταν εκτίθενται σε κατώφλι συγκέντρωση 2 ppm NO_2 για διάρκεια 4 ωρών, αν και αυτό το φαινόμενο είναι σπάνιο στις φυσικές συγκεντρώσεις του περιβάλλοντος. Οι φυσικές πηγές οξειδίων του αζώτου περιλαμβάνουν τους ατμοσφαιρικούς κεραυνούς, την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και τις δασικές πυρκαγιές. Ωστόσο, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, ιδιαίτερα η καύση ορυκτών καυσίμων σε εργοστάσια, αυτοκίνητα και άλλες διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών, χρησιμεύουν ως κυρίαρχες πηγές, συχνά ξεπερνώντας τις φυσικές εκπομπές [96]. Η εφαρμογή καταλυτικών μετατροπέων στα συστήματα εξάτμισης οχημάτων, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (Forcetto και Daemme, 2017) [107]. Αρκετά οξείδια του αζώτου δρουν ως κρίσιμες πρόδρομες ενώσεις, οδηγώντας στο σχηματισμό δευτερογενών ρύπων όπως η αιθαλομίχλη, η όξινη βροχή, το όζον στο επίπεδο του εδάφους και τα σωματίδια (Brown et al. 2006; Yung et al. 2007; Ghazali et al. 2010) [96, 108].

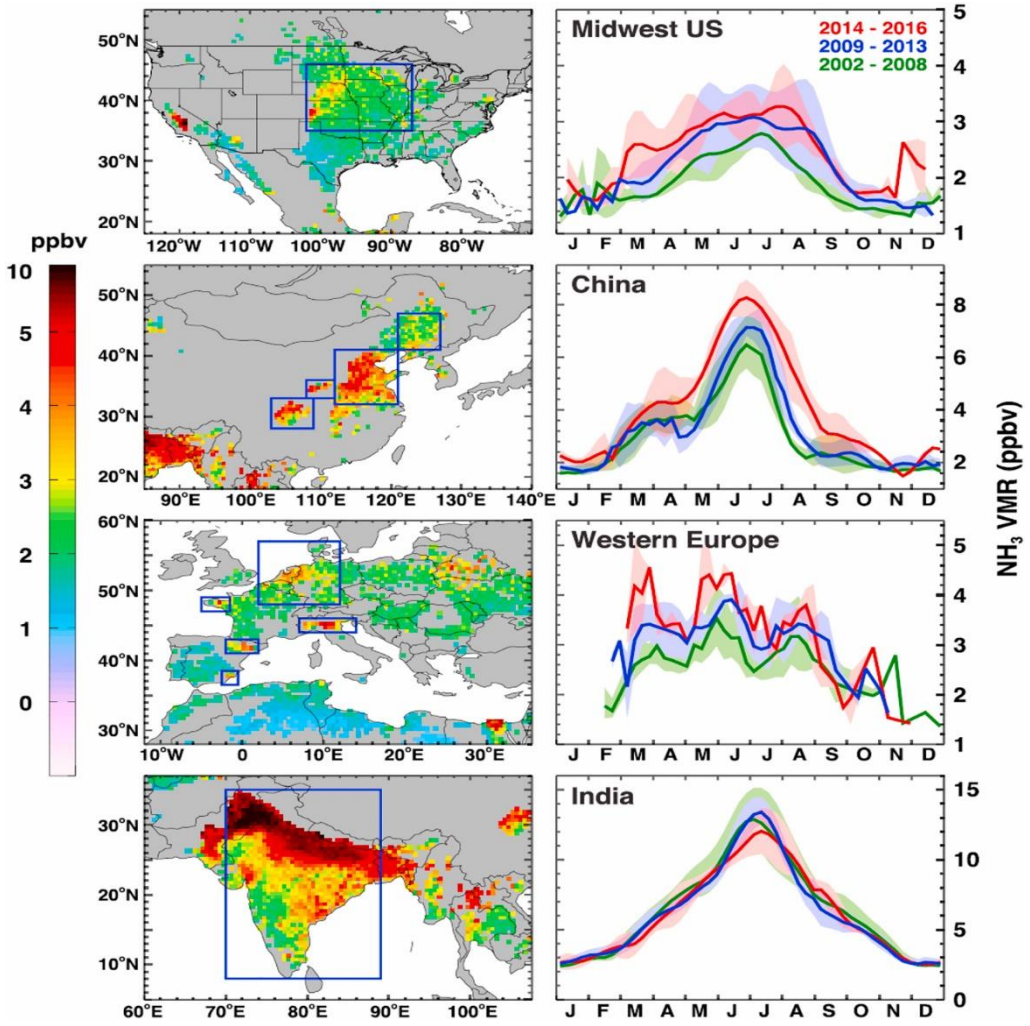
Η έκθεση σε επίπεδα NO_2 πέρα από τα ανεκτά όρια στα φυτά προκαλεί περίπλοκες αλλαγές στη δραστηριότητα των αντιοξειδωτικών ενζύμων. Η εφαρμογή ανθεκτικών φυτικών ειδών, ικανών να μεταβολίζουν το ατμοσφαιρικό NO_2, αναγνωρίζεται ως μια οικολογικά ορθή προσέγγιση για τον μετριασμό των συγκεντρώσεων του αέρα. Ένα πρόσφατο πείραμα από τους Sheng και Zhu [51] έδειξε ότι η έκθεση σε NO_2 σε φυτά κήπου (6 μL/L NO_2 σε γυάλινους θαλάμους, ακολουθούμενη από ανάκτηση 30 ημερών σε φυσικό περιβάλλον), επηρέασε την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη των φύλλων και προκάλεσε αντιδράσεις βιοχημικής άμυνας. Οι Mansfield et al. [52] πρότειναν ότι το SO_2 παρεμβαίνει στην επαγωγή της αναγωγάσης, το οποίο είναι ένα ένζυμο που καταλύει την αναγωγή των νιτρωδών σε αμμώνιο ενός ενζύμου που είναι υπεύθυνο για τη μείωση του NO_2 σε NH_3, που είναι δυνητικά ο πρωταρχικός μηχανισμός που ρυθμίζει την τοξικότητα του NO_2 στα φυτικά κύτταρα.

Το οξείδιο του αζώτου είναι ένας ρύπος που σχετίζεται με την κυκλοφορία, καθώς εκπέμπεται από κινητήρες αυτοκινήτων. Είναι ερεθιστικό του αναπνευστικού συστήματος, καθώς διεισδύει βαθιά στον πνεύμονα, προκαλώντας αναπνευστικές παθήσεις, βήχα, συριγμό, δύσπνοια, βρογχόσπασμο, ακόμη και πνευμονικό οίδημα όταν εισπνέεται σε υψηλά επίπεδα. Φαίνεται ότι συγκεντρώσεις πάνω από 0,2ppm προκαλούν αυτές τις ανεπιθύμητες ενέργειες στον άνθρωπο, ενώ συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 2,0 ppm επηρεάζουν τα Τ-λεμφοκύτταρα, ιδιαίτερα τα κύτταρα CD8+ και τα κύτταρα NK που παράγουν την ανοσολογική μας απόκριση. Αναφέρεται ότι η μακροχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα διοξειδίου του αζώτου μπορεί να ευθύνονται για χρόνια πνευμονική νόσο. Η μακροχρόνια έκθεση στο NO_2 μπορεί να βλάψει την αίσθηση της όσφρησης. Ωστόσο, μπορεί να εμπλέκονται και άλλα συστήματα εκτός από τα αναπνευστικά, καθώς έχουν καταγραφεί συμπτώματα όπως ερεθισμός των ματιών, του λαιμού και της μύτης. Τα υψηλά επίπεδα διοξειδίου του αζώτου είναι επιβλαβή για τις καλλιέργειες και τη βλάστηση, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι μειώνουν την απόδοση των καλλιεργειών και την αποδοτικότητα της ανάπτυξης των φυτών. Επιπλέον, το NO_2 μπορεί να μειώσει την ορατότητα και να αποχρωματίσει τα υφάσματα [53].

3.2 Αμμωνία NH_3

Η αμμωνία (NH_3) είναι πρωτογενής ατμοσφαιρικός ρύπος και εκπέμπεται κυρίως στην ατμόσφαιρα από γεωργικές δραστηριότητες. Η γεωργία και η κτηνοτροφία συμβάλλουν στο 80% περίπου των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών NH_3, χαρακτηρίζοντάς τες ως τις κυρίαρχες πηγές της ατμοσφαιρικής NH_3. Τα ευρήματα από μια μελέτη που χρησιμοποιεί δεδομένα από το Atmospheric Infrared Sounder στον δορυφόρο Aqua της NASA αποκαλύπτουν σημαντικές αυξήσεις στις συγκεντρώσεις NH_3 στην ατμόσφαιρα σε διάστημα 14 ετών σε μεγάλες γεωργικές περιοχές (Σχήμα 3). Αξιοσημείωτες αυξητικές τάσεις παρατηρούνται στις ΗΠΑ (2,61%), στη Δυτική Ευρώπη (1,83%) και στην Κίνα (2,27%). Στις ΗΠΑ, οι αυξήσεις NH_3 αποδίδονται σε μέτρα ελέγχου των SO_2 και NO_x, με αποτέλεσμα τη μειωμένη δέσμευση της NH_3 σε αραιά αερολύματα, μαζί με τις περιφερειακές αυξανόμενες θερμοκρασίες. Στη Δυτική Ευρώπη, οι συγκεντρώσεις NH_3 έχουν αυξηθεί, παρά τη μειωμένη χρήση λιπασμάτων, λόγω του βελτιωμένου ελέγχου μέσω κατάλληλων μέτρων ελέγχου των SO_2 και του NO_x. Στην Κίνα, ένας συνδυασμός αυξημένων γεωργικών δραστηριοτήτων, αρχικού

ελέγχου του SO_2 και αύξησης της θερμοκρασίας συμβάλλει στις παρατηρούμενες αυξήσεις NH_3 [54, 55].



Σχήμα 3 Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής NH_3 στις σημαντικότερες γεωργικές περιοχές του κόσμου που ανιχνεύονται από το διάστημα. Ο λόγος ανάμειξης όγκου υπολογίστηκε για κελί πλέγματος γεωγραφικού πλάτους-μήκους 1° × 1° [54]**.**

Η ατμοσφαιρική NH_3 είναι εξαιρετικά υδατοδιαλυτή, οδηγώντας σε ερεθισμό και βλάβη υγρούς ιστούς, όπως είναι ο βλεννογόνος, τα μάτια και τα ιγμόρεια, καθώς και το δέρμα. Η παρατεταμένη εισπνοή μπορεί να οδηγήσει σε χρόνια πνευμονική νόσο. Σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν τα 17 ppm, η NH_3 γίνεται ανιχνεύσιμη από την ευδιάκριτη μυρωδιά της που μοιάζει με την οσμή κατά την ξήρανση ούρων. Αυξημένες συγκεντρώσεις (π.χ. 50 ppm για 2 ώρες) μπορεί να προκαλέσουν ερεθισμό των ματιών, της μύτης και του λαιμού. Τα κλινικά συμπτώματα σε υψηλότερα επίπεδα περιλαμβάνουν γρήγορο ερεθισμό των ματιών και της αναπνευστικής οδού και δερματικά εγκαύματα (100 ppm), άμεσο ερεθισμό των ματιών και του λαιμού (700

ppm), πνευμονικό οίδημα και βήχα (>1.500 ppm), ενώ εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να είναι θανατηφόρες (2.500 –5.500 ppm για 30 λεπτά) ή βέβαια θανατηφόρες (5.000–10.000 ppm) [55].

3.3 Υποξείδιο του αζώτου (N_2O)

Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), ένα υποπροϊόν της μικροβιακής νιτροποίησης και απονιτροποίησης, είναι ένα άχρωμο, μη τοξικό αέριο με γλυκιά οσμή και χρόνο παραμονής 114 χρόνια. Το N_2O έχει δύο διακριτές επιπτώσεις: μια επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη στην τροπόσφαιρα και μια επίδραση εξάντλησης του O_3 στη στρατόσφαιρα. Συμβάλλει στο 6% του φαινομένου του θερμοκηπίου, με τη συγκέντρωσή του να αυξάνεται από περίπου 270 ppb στην προβιομηχανική εποχή σε 320 ppb το 2011. Αυτό αντιστοιχεί σε ετήσια αύξηση 0,25% στην ατμοσφαιρική συγκέντρωση N_2O. Ενώ το N_2O είναι λιγότερο άφθονο από το CO_2, είναι περίπου 300 φορές πιο επιβλαβές για το κλίμα. Οι παγκόσμιες εκπομπές N_2O έχουν αυξηθεί από περίπου 15 Tg N έτος^{-1} το 1997 σε περίπου 18 Tg N έτος^{-1} την περίοδο 2010–2015 [56, 57], με 11 Tg N να προέρχονται από φυσικές πηγές και 7 Tg N από ανθρωπογενείς πηγές. Περίπου το 70% του ανθρωπογενούς N_2O (~5 Tg N) προκύπτει από γεωργικές δραστηριότητες και καύση βιομάζας [58].

Μόλις μεταφερθεί στη στρατόσφαιρα, το N_2O εμπλέκεται σε φωτοχημικές διεργασίες που συμβάλλουν στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος. Σε αυτές τις διεργασίες, το N_2O αντιδρά με διεγερμένα άτομα οξυγόνου που προέρχονται από τη φωτόλυση του O_3 [59].

Οι επιπτώσεις του N_2O στην υγεία είναι έμμεσες και περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και την καταστροφή του στρώματος O_3 της στρατόσφαιρας. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία περιλαμβάνουν τον κίνδυνο αφυδάτωσης και θερμοπληξίας από τις υψηλότερες θερμοκρασίες και τους καύσωνες, καθώς τον αυξημένο κίνδυνο τραυματισμών και θανάτων από τις έντονες τοπικές καιρικές μεταβολές, την επισιτιστική ανασφάλεια λόγω υποβάθμισης της γης που οδηγεί σε υποσιτισμό, καθώς και ψυχικές ασθένειες και ενθάρρυνση της μετακίνησης πληθυσμών εξαιτίας των βίαιων συγκρούσεων που ξεσπούν σε πολλές περιοχές του κόσμου. Οι καύσωνες έχουν συσχετιστεί με βραχυπρόθεσμες αυξήσεις στη θνησιμότητα, όπως ο καλοκαιρινός καύσωνας του 2003 στην Κεντρική Ευρώπη, ο οποίος προκάλεσε περίπου 14.800 θανάτους στη Γαλλία [60].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΛΛΟΙ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

4.1 Ολικά αιωρούμενα σωματίδια

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) προσδιορίζει έξι σημαντικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους: τη σωματιδιακή ρύπανση, το όζον στο επίπεδο του εδάφους, το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του θείου, τα οξείδια του αζώτου και το μόλυβδο. Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει αρνητικές επιπτώσεις σε όλα τα περιβαλλοντικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των υπόγειων υδάτων, του εδάφους και του αέρα, και αποτελεί σημαντική απειλή για τους ζωντανούς οργανισμούς. Η κύρια εστίασή μας περιστρέφεται γύρω από αυτούς τους ρύπους λόγω της συσχέτισής τους με πιο εκτεταμένα και σοβαρά ζητήματα στην ανθρώπινη υγεία και με τις περιβαλλοντικές συνέπειες. Η όξινη βροχή, η υπερθέρμανση του πλανήτη, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οι κλιματικές αλλαγές συμβάλλουν σημαντικά στον οικολογικό αντίκτυπο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [61].

Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) τυπικά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω πυρηνοποίησης και χημικών αντιδράσεων μεταξύ διαφόρων ρύπων. Η διείσδυση των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθός τους [62]. Η εισπνεύσιμη σωματιδιακή ύλη PM_{10} περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο 10 μικρομέτρων (μm) ή μικρότερη, ενώ τα $PM_{2,5}$περιλαμβάνουν λεπτά σωματίδια με διάμετρο 2,5 μικρόμετρα (μm) και μικρότερη.

Τα σωματίδια περιλαμβάνουν μικροσκοπικά υγρά ή στερεά σταγονίδια που, όταν εισπνέονται, μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10μm (PM_{10}) μπορούν να διεισδύσουν στους πνεύμονες και ενδεχομένως να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. Τα λεπτά σωματίδια, που δηλώνονται ως $PM_{2,5}$, ενέχουν υψηλότερο κίνδυνο για την υγεία [63]. Τα σωματίδια προκαλούν τοξικές επιδράσεις με βάση τις χημικές και φυσικές τους ιδιότητες, τα συστατικά τους που μπορεί να είναι είτε οργανικά (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, διοξίνες, βενζόλιο, 1-3 βουταδιένιο), είτε ανόργανα (άνθρακας, χλωριούχα, νιτρικά, θειικά, μέταλλα) χημικά είδη [64].

4.2 Ατμοσφαιρικό όζον (O_3)

Το όζον είναι ένα αέριο, παράγεται από οξυγόνο μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης υψηλής τάσης και λειτουργεί ως ισχυρό οξειδωτικό, όντας 52% ισχυρότερο από το χλώριο. Ενώ υπάρχει φυσικά στη στρατόσφαιρα (βλέπε ενότητα 2.2), το όζον μπορεί επίσης να σχηματιστεί στην τροπόσφαιρα μέσω αλυσιδωτών αντιδράσεων φωτοχημικής αιθαλομίχλης (βλέπε ενότητες 2.1 και 2.2) [65]. Είναι αξιοσημείωτο ότι το όζον μπορεί να ταξιδέψει σε σημαντικές αποστάσεις από την πηγή προέλευσής του, μεταφερόμενο από αέριες μάζες [66]. Οι αυξημένες ποσότητες στις αστικές περιοχές μπορεί να θέτουν σε κινδύνους τις καλλιέργειες, τα δάση και τη βλάστηση, επηρεάζοντας την αφομοίωση του άνθρακα [67]. Το όζον επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη και τη στρεμματική απόδοση, επηρεάζοντας τη μικροχλωρίδα των φυτών λόγω των αντιμικροβιακών ιδιοτήτων του. Πέρα από τη φυτική ζωή, το όζον μπορεί να αλλάξει τη σύνθεση των ειδών στα φυσικά οικοσυστήματα, επηρεάζοντας τη μικροχλωρίδα και προκαλώντας αλλαγές στα ζωικά είδη. Η έκθεση στο όζον οδηγεί επίσης σε αυξημένη βλάβη του DNA στα επιδερμικά κερατινοκύτταρα, με αποτέλεσμα την εξασθενημένη κυτταρική λειτουργία. Το όζον σε επίπεδο εδάφους (ground level ozone, GLO) παράγεται μέσω μιας χημικής αντίδρασης που περιλαμβάνει οξείδια του αζώτου και πτητικές οργανικές ενώσεις που εκπέμπονται τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο 2, στις ενότητες 2.1 και 2.2. Το όζον εισέρχεται κυρίως στο σώμα μέσω της εισπνοής, επηρεάζοντας τα ανώτερα στρώματα του δέρματος και τους δακρυϊκούς πόρους [68]. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση των ποντικών σε υψηλά επίπεδα όζοντος έδειξε σχηματισμό μηλονδιαλδεΰδης στο ανώτερο δέρμα (επιδερμίδα) και εξάντληση των βιταμινών C και E. Αν και τα επίπεδα του όζοντος δεν πιστεύεται ότι θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργία του δερματικού φραγμού, μπορεί να προδιαθέτουν τα άτομα σε δερματικές παθήσεις.

Λόγω της χαμηλής διαλυτότητάς του στο νερό, το εισπνεόμενο όζον μπορεί να διεισδύσει βαθιά στους πνεύμονες. Τα άτομα που διαβιούν σε αστικές περιοχές παγκοσμίως αντιμετωπίζουν τοξικές επιδράσεις που προκαλούνται από το όζον, οδηγώντας σε βιοχημικές, μορφολογικές, λειτουργικές και ανοσολογικές διαταραχές [69].

Το Ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο APHEA2 επικεντρώνεται στην αξιολόγηση των επιπτώσεων των αυξημένων συγκεντρώσεων του όζοντος στο περιβάλλον και στη

θνησιμότητα [70]. Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις όζοντος συγκρίθηκαν με τον ημερήσιο αριθμό θανάτων σε διάφορες Ευρωπαϊκές πόλεις σε μια περίοδο τριών ετών. Η αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου συσχετίστηκε με αύξηση των ημερήσιων θανάτων (0,33%), των θανάτων από αναπνευστικά νοσήματα (1,13%) και των καρδιαγγειακών θανάτων (0,45%), χωρίς να παρατηρηθεί επίδραση κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

4.3 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο, άγευστο και άοσμο αέριο που σχηματίζεται κατά την ατελή καύση καυσίμων που περιέχουν άνθρακα ή παράγεται σε ζωντανούς οργανισμούς μέσω της φυσικής αποδόμησης αιμοπρωτεϊνών όπως η αιμοσφαιρίνη, η μυοσφαιρίνη και τα κυτοχρώματα. Η εξωτερική έκθεση σε επιπλέον CO μπορεί να οδηγήσει σε επιπτώσεις στην υγεία και τα υψηλά επίπεδα έκθεσης μπορεί να οδηγήσουν σε θάνατο.

Τα πρότυπα ποιότητας του περιβάλλοντος αέρα για το CO, όπως 9 ppm για 8 ώρες και 35 ppm για 1 ώρα, στοχεύουν στην προστασία από δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία σε ευαίσθητους πληθυσμούς. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι περισσότεροι άνθρωποι περνούν σημαντικό μέρος του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους, μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της έκθεσης σε CO πρέπει να λάβει υπόψη τη συνολική έκθεση, συμπεριλαμβανομένης της έκθεσης σε εσωτερικούς χώρους [71].

Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης λόγω της εισπνοής μονοξειδίου του άνθρακα περιλαμβάνουν πονοκέφαλο, ζάλη, αδυναμία, ναυτία, έμετο και, τέλος, απώλεια συνείδησης. Η συγγένεια του μονοξειδίου του άνθρακα με την αιμοσφαιρίνη είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του οξυγόνου. Σε αυτό το πνεύμα, σοβαρή δηλητηρίαση μπορεί να συμβεί σε άτομα που εκτίθενται σε υψηλά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Λόγω της απώλειας οξυγόνου ως αποτέλεσμα της ανταγωνιστικής δέσμευσης του μονοξειδίου του άνθρακα, παρατηρείται υποξία, ισχαιμία και καρδιαγγειακές παθήσεις. Το μονοξείδιο του άνθρακα επηρεάζει τα αέρια του θερμοκηπίου που συνδέονται στενά με την υπερθέρμανση του πλανήτη και το κλίμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους και του νερού και ενδέχεται να προκύψουν ακραίες καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, σε πειράματα εργαστηρίου και πεδίου, έχει φανεί ότι προκαλεί αυξημένη ανάπτυξη φυτών [72].

4.4 Διοξείδιο του θείου (SO_2)

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα επιβλαβές αέριο που εκπέμπεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων και τις βιομηχανικές δραστηριότητες. Το ετήσιο όριο για το SO_2 έχει οριστεί στα 0,03ppm για τις ΗΠΑ [73] και 0,02ppm για την Ευρώπη [74].

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) είναι ένας διαδεδομένος ατμοσφαιρικός ρύπος που επηρεάζει τα φυτά, τα ζώα, τον άνθρωπο και τα υλικά. Στους 0 °C, το SO_2 εμφανίζει διαλυτότητα 228 g/L στο νερό. Χρησιμεύει ως κρίσιμη πρόδρομη ένωση για την παραγωγή δευτερογενών ατμοσφαιρικών ρύπων και συμβάλλει στο σχηματισμό όξινης βροχής και στο νέφος της καπνομίχλης (βλέπε ενότητα 2.1). Από το 2019, η Ινδία είναι ο μεγαλύτερος συνεισφέρων στον εν λόγω ρύπο παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 15% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών SO_2 [46]. Σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, το SO_2 υφίσταται οξείδωση σε SO_3, το οποίο, κατά την ενυδάτωση, έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό θειικού οξέος (H_2SO_4).

Ο αντίκτυπός του επεκτείνεται στη ζωή του ανθρώπου, των ζώων και των φυτών, θέτοντας υψηλότερους κινδύνους για τα ευάλωτα άτομα, όπως τα άτομα με πνευμονικές παθήσεις, τους ηλικιωμένους και τα παιδιά. Τα θέματα υγείας που σχετίζονται με τις εκπομπές διοξειδίου του θείου στις βιομηχανικές περιοχές περιλαμβάνουν ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, βρογχίτιδα, παραγωγή βλέννας και βρογχόσπασμο. Όντας ερεθιστικός παράγοντας, το διοξείδιο του θείου διεισδύει βαθιά στους πνεύμονες, μετατρέπεται σε όξινο θειώδες και αλληλεπιδρά με τους αισθητηριακούς υποδοχείς, οδηγώντας σε βρογχοσυστολή. Επιπλέον, οι παρατηρήσεις περιλαμβάνουν ερυθρότητα του δέρματος, βλάβη στα μάτια (δακρύρροια και θολότητα του κερατοειδούς), επιδράσεις στη βλεννογόνο μεμβράνη και έξαρση προϋπαρχόντων καρδιαγγειακών παθήσεων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η οξύνιση του εδάφους και η όξινη βροχή, φαίνεται να συνδέονται με τις εκπομπές διοξειδίου του θείου [75].

4.5 Μόλυβδος

Ο μόλυβδος, ένα βαρύ μέταλλο που χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, εκπέμπεται από πηγές όπως βενζινοκινητήρες, μπαταρίες, θερμαντικά σώματα, αποτεφρωτήρες απορριμμάτων και λύματα [76]. Οι κύριες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης από μόλυβδο περιλαμβάνουν μέταλλα, μεταλλεύματα και αεροσκάφη με κινητήρες εμβόλου. Ο μόλυβδος αποτελεί απειλή για τη δημόσια υγεία,

επηρεάζοντας αρνητικά τους ανθρώπους, τα ζώα και το περιβάλλον, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η έκθεση σε μόλυβδο συμβαίνει μέσω εισπνοής, κατάποσης και απορρόφησης από το δέρμα. Συγκεκριμένα, αναφέρθηκε διαπλακουντιακή μεταφορά μολύβδου, με τις τοξικές επιδράσεις πιο επιβλαβείς για τα νεότερα έμβρυα, επηρεάζοντας το νευρικό σύστημα και προκαλώντας εγκεφαλικό οίδημα. Στους ενήλικες, ο εισπνεόμενος μόλυβδος συσσωρεύεται στο αίμα, στους μαλακούς ιστούς, στο συκώτι, στους πνεύμονες, στα οστά και σε διάφορα συστήματα, οδηγώντας σε απώλεια συγκέντρωσης και μνήμης, πόνο στους μύες και στις αρθρώσεις [77].

4.6 Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες

Οι Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (Polycyclic aromatic hydrocarbon - PAH) είναι ευρέως κατανεμημένοι στο περιβάλλον, κυρίως μέσω της ατμοσφαιρικής διασποράς. Παράγονται μέσω ατελούς καύσης (δασικές πυρκαγιές, αποτέφρωση, κινητήρες). Ενώσεις PAH, όπως το βενζοπυρένιο, το ακεναφθυλένιο, το ανθρακένιο και το φθορανθένιο, είναι γνωστές τοξικές, μεταλλαξιογόνες και καρκινογόνες ουσίες, που αποτελούν σημαντικό παράγοντα κινδύνου για καρκίνο του πνεύμονα [78].

4.7 Πτητικές οργανικές ενώσεις

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds, VOCs), όπως το τολουόλιο, το βενζόλιο, το αιθυλοβενζόλιο και το ξυλόλιο, σχετίζονται με τον καρκίνο στον άνθρωπο. Η χρήση νέων προϊόντων και υλικών έχει αυξήσει τις συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων, οδηγώντας σε ατμοσφαιρική ρύπανση εσωτερικών χώρων και δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Τόσο η βραχυπρόθεσμη όσο και η μακροπρόθεσμη έκθεση έχουν ως αποτέλεσμα προβλήματα υγείας, με τις πτητικές οργανικές ενώσεις να προκαλούν βραχυπρόθεσμα ερεθισμό των ματιών, της μύτης, του λαιμού και των βλεννογόνων, καθώς και τοξικές αντιδράσεις σε παρατεταμένη έκθεση. Η αξιολόγηση των τοξικών επιδράσεων των σύνθετων μιγμάτων πτητικών οργανικών ενώσεων αποτελεί πρόκληση, λόγω πιθανών συνεργιστικών και ανταγωνιστικών αλληλεπιδράσεων [79].

4.8 Διοξίνες

Οι διοξίνες προέρχονται από βιομηχανικές διεργασίες και φυσικές πηγές, όπως δασικές πυρκαγιές και ηφαιστειακές εκρήξεις. Συσσωρεύονται σε τρόφιμα όπως το κρέας, τα γαλακτοκομικά προϊόντα, τα ψάρια και τα οστρακοειδή, ειδικά στο λιπώδη ιστό των ζώων. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις διοξίνης μπορεί να οδηγήσει σε σκούρες κηλίδες και βλάβες στο δέρμα. Η μακροχρόνια έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε αναπτυξιακά προβλήματα, εξασθένηση του ανοσοποιητικού, ενδοκρινικού και νευρικού συστήματος, αναπαραγωγική υπογονιμότητα και καρκίνο [80].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

5.1 Ο ρόλος της μετεωρολογίας

Διάφοροι μετεωρολογικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, η ώρα της ημέρας, οι εποχιακές διακυμάνσεις, η υγρασία, η νεφοκάλυψη, οι επικρατούντες άνεμοι και η θερμοκρασία επηρεάζουν σημαντικά την ατμοσφαιρική σταθερότητα και τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων. Τις ηλιόλουστες μέρες, τόσο το καλοκαίρι όσο και το χειμώνα, υπό στάσιμες συνθήκες, οι τοπικοί εκπεμπόμενοι ρύποι, συμπεριλαμβανομένων των καυσαερίων από την καύση του πετρελαίου (οξείδια του αζώτου και υδρογονάνθρακες), τείνουν να συσσωρεύονται στον αέρα, οδηγώντας σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το ηλιακό φως, σε συνδυασμό με αέριες ουσίες, πυροδοτεί χημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό όζοντος, όπως προαναφέρθηκε στις ενότητες 2.1 και 2.2. Επιπλέον, οι αναστροφές της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα μπορούν να εμποδίσουν την άνοδο των αερίων ρύπων σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Περιοχές με υψηλά επίπεδα ετήσιας ατμοσφαιρικής βροχόπτωσης, υπό μορφή βροχής ή χιονιού, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθαρισμό του αέρα από τους ρύπους [81, 82].

Ο μετεωρολογικός ορισμός της ορατότητας είναι η «απόσταση στην οποία η αντίθεση ενός δεδομένου αντικειμένου σε σχέση με το φόντο του είναι ακριβώς ίση με το κατώφλι αντίθεσης ενός παρατηρητή» [109]. Γενικά, η καλή ορατότητα είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για οποιαδήποτε γεωγραφική τοποθεσία και η σημασία της δεν πρέπει να αγνοηθεί. Η κακή ορατότητα (λιγότερο από 2,0 km, Founda et al., 2016) [110] μπορεί να επηρεάσει τη μεταφορά αγαθών και ανθρώπων, είτε σιδηροδρομικώς, είτε οδικώς, διά θαλάσσης ή αεροπορικώς, οδηγώντας δυνητικά σε ατυχήματα και εγείροντας ανησυχίες για τη δημόσια ασφάλεια. Ο τουρισμός συχνά βασίζεται στην καλή ορατότητα για την επιλογή των περιοχών ενδιαφέροντος. Για παράδειγμα, μια μελέτη που διεξήχθη στο Grand Canyon Park στις ΗΠΑ αποκάλυψε μια μείωση στη συχνότητα των επισκεπτών καθώς μειώθηκε η ορατότητα [83].

Τυπικά, σε έναν ουρανό χωρίς σύννεφα, η ορατότητα μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 5 έως 100 χιλιόμετρα, ανάλογα με την ατμοσφαιρική σύνθεση και τις συνθήκες. Η ορατότητα επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση του φωτός με τα ατμοσφαιρικά αέρια και τα σωματίδια αερολύματος, τα οποία μπορούν να

απορροφήσουν ή να διασκορπίσουν το φως. Ως αποτέλεσμα, η ορατότητα είναι πιο ευνοϊκή σε μη ρυπασμένες ατμόσφαιρες, με την προϋπόθεση ότι άλλοι παράγοντες, όπως η μετεωρολογία, είναι ίδιοι. Πολυάριθμες μελέτες στο παρελθόν, έχουν διερευνήσει τη σύνδεση μεταξύ της ατμοσφαιρικής σύνθεσης και της ορατότητας [83, 84]. Αυτές οι έρευνες δείχνουν ότι η ορατότητα επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος, τη χημική σύσταση και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Η μειωμένη ορατότητα αποδίδεται κυρίως σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, με τα φαινόμενα σκέδασης να αποτελούν τον κυρίαρχο μηχανισμό για τη μείωση της ορατότητας στην ατμόσφαιρα. Σε πολύ ρυπασμένες ατμόσφαιρες, η ορατότητα μπορεί να μειωθεί γρήγορα λόγω της παρουσίας σωματιδίων αερολύματος. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια των φαινομένων αιθαλομίχλης του Λονδίνου το 1952, η ορατότητα μειώθηκε σε λίγα μέτρα λόγω της υψηλής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Πιο πρόσφατα, μια μελέτη από τους Sati και Mohan [85] βρήκε γρήγορες μειώσεις στην ορατότητα λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων σωματιδίων (PM) και NO_2 κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος αιθαλομίχλης το Νοέμβριο του 2012 στο Δελχί. Ομοίως, οι Zhang et al. [86] περιέγραψαν την επίδραση των PM στη μείωση της ορατότητας στο Πεκίνο της Κίνας. Τα φεστιβάλ που περιλαμβάνουν πυροτεχνήματα, τα οποία απελευθερώνουν σωματίδια αερολύματος κατά την έκρηξη, είναι ένα καλό παράδειγμα χωρικά και χρονικά εντοπισμένων γεγονότων ρύπανσης που μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη ορατότητα.

5.2 Αέριες μάζες

Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία της Γης και η μεταφορά θερμότητας από τις ισημερινές στις πολικές περιοχές (και αντίστροφα) συμβαίνουν μέσω των μαζών του αέρα. Η περιεκτικότητα σε υδρατμούς και η θερμοκρασία κάθε μάζας αέρα είναι καθοριστικοί παράγοντες. Η συμπύκνωση και η ατμοσφαιρική κατακρήμνιση επηρεάζονται από τους υδρατμούς, ενώ η θερμοκρασία καθορίζει τη σταθερότητα ή την αστάθεια της ατμόσφαιρας. Η ικανότητα της ατμόσφαιρας να αναμειγνύει αέριους ρύπους, είτε προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες είτε από φυσικές πηγές, συνδέεται με τη σταθερότητά της.

Οι αέριες μάζες κατηγοριοποιούνται σε ψυχρές ή θερμές. Οι θερμές αέριες μάζες είναι θερμότερες από τις περιοχές στις οποίες μετακινούνται, προκαλώντας ψύξη από κάτω, ενώ οι ψυχρές μάζες αέρα είναι ψυχρότερες από τις περιοχές που διασχίζουν, με

αποτέλεσμα να θερμαίνονται από κάτω. Η ψύξη των αέριων μαζών είναι πιο έντονη στα στρώματα που βρίσκονται κοντά στο έδαφος, αυξάνεται αργά, οδηγώντας σε αναστροφές θερμοκρασίας στην επιφάνεια, προκαλώντας δυνητικά ομίχλη σε περιόδους ασθενών ανέμων.

Οι αέριες μάζες ταξινομούνται με βάση την πηγή τους:

1) Πολικές Ηπειρωτικές (Pc)
2) Πολικές Θαλάσσιες (Pm)
3) Αρκτικές (A)
4) Τροπικές Θαλάσσιες (Tm)
5) Τροπικές Ηπειρωτικές (Tc)
6) Ισημερινές (E)

Οι πρωτογενείς αέριες μάζες που επηρεάζουν τη Μεσόγειο περιλαμβάνουν τη Θαλάσσια Αρκτική, την Ηπειρωτική Αρκτική, την Πολική Θαλάσσια, τη Θαλάσσια Τροπική και την Ηπειρωτική.

Πιο συγκεκριμένα:

Τροπική Ηπειρωτική (Tc): Αυτός ο τύπος αέριας μάζας προέρχεται κυρίως από τα νοτιοανατολικά και νότια. Ο αέρας ταξιδεύει πάνω από μια θερμή χερσαία μάζα. Ο αέρας είναι συνήθως ζεστός και ξηρός με μικρή απόλυτη και σχετική υγρασία.

Τροπική Θαλάσσια (Tm): Αυτές οι αέριες μάζες προέρχονται γενικά από τα νοτιοδυτικά και ταξιδεύουν προς μία θαλάσσια περιοχή με υψηλή θερμοκρασία. Ο αέρας είναι συνήθως ζεστός και υγρός, γιατί ο αέρας μαζεύει την υγρασία από τη θάλασσα.

Πολική Ηπειρωτική (Pc): Αυτό το είδος αέριας μάζας προέρχεται από πολικές περιοχές, που ταξιδεύει πάνω από μια ηπειρωτική περιοχή με χαμηλή θερμοκρασία. Τέτοιες μάζες αέρα τείνουν να είναι ψυχρές και σχετικά ξηρές με χαμηλή σχετική υγρασία.

Πολική ή Αρκτική Θαλάσσια (Pm ή Am): Αυτές οι αέριες μάζες προέρχονται από την Καναδική Αρκτική περιοχή ή από τη Γροιλανδία και φτάνουν στα βρετανικά νησιά από τα βόρεια ή τα βορειοδυτικά. Ο αέρας έχει ταξιδέψει πάνω από μια θαλάσσια περιοχή με χαμηλή θερμοκρασία. Ο αέρας είναι συνήθως δροσερός και αρκετά υγρός με μεγάλη σχετική υγρασία.

Επιπλέον, υπάρχει η Μεσογειακή μάζα αέρα (med) που προέρχεται από πολικές περιοχές αλλά αποκτά τοπικά χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια παρατεταμένης παραμονής στη Μεσόγειο. Η περιοχή της ανατολικής Μεσογείου δέχεται την επιρροή θαλάσσιων και ηπειρωτικών πηγών αερολυμάτων [81, 82].

5.3 Υδρατμοί - υγρασία

Εκτός από τα αέρια, η ατμόσφαιρα περιέχει υδρατμούς που προέρχονται από την εξάτμιση των ωκεανών, των θαλασσών, των ποταμών και της διαπνοής των φυτών. Οι ωκεανοί, ειδικότερα, συνεισφέρουν σημαντικές ποσότητες υδρατμών που υφίστανται συνεχείς αλλαγές. Η υγρασία στον αέρα είναι ζωτικής σημασίας για το σχηματισμό νεφών και χρησιμεύει ως φορέας θερμικής ενέργειας στη Γη, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στα μετεωρολογικά φαινόμενα [81, 82].

5.4 Συννεφιά – Ομίχλη

Τα σωματίδια διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στο σχηματισμό νεφών και βροχοπτώσεων, επηρεάζοντας την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τον υδρολογικό κύκλο. Συγκεκριμένα, τα σύννεφα δημιουργούνται όταν η θερμοκρασία μιας μάζας αέρα πέσει κάτω από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου, οδηγώντας στη συμπύκνωση των υδρατμών που περιέχονται στην αέρια μάζα. Καθώς συμβαίνει συμπύκνωση, η σχετική υγρασία αυξάνεται και η ορατότητα μειώνεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι υδρατμοί υφίστανται μια μετάβαση φάσης από μια αέρια κατάσταση, είτε σε υγρή είτε σε στερεή, σχηματίζοντας λεπτά σταγονίδια ή κρυστάλλους πάγου και εν συνεχεία ατμοσφαιρικά σύννεφα [82].

5.5 Άνεμοι

Οι άνεμοι παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασπορά των αέριων ρύπων. Είναι προφανές ότι οι ρύποι που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, όπως από μια καμινάδα, διασκορπίζονται προς την κατεύθυνση του ανέμου που επικρατεί.

Σε περιόδους ασθενών ανέμων, η πιθανότητα ανάπτυξης δυσμενών συνθηκών ατμοσφαιρικής ρύπανσης αυξάνεται, ειδικά όταν υπάρχει ατμοσφαιρική σταθερότητα. Αυτό υποδηλώνει ότι οι χαμηλής έντασης άνεμοι δεν επαρκούν για να καθαρίσουν τους αέριους ρύπους από την περιοχή [81].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΡΥΠΩΝ

6.1 Πρωτοβουλίες της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα

Οι ανησυχίες σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν εξέχουσα πολιτική εστίαση στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) από τη δεκαετία του 1970. Από τη δεκαετία του 1990 και μετά, τα κύρια μέσα που στοχεύουν στη διασφάλιση προστασίας από υψηλές συγκεντρώσεις ρύπανσης είναι μια σειρά οδηγιών που παρατίθενται με χρονολογική σειρά:

- Οδηγία Πλαίσιο για την Ποιότητα του Αέρα 96/62/ΕΚ – Αυτή η οδηγία καθιέρωσε πρότυπα για διάφορους ρύπους, συμπεριλαμβανομένου του όζοντος, των σωματιδίων (PM_{10}) και του διοξειδίου του αζώτου (NO_2), για την περίοδο έως το 2004.
- Οδηγία για την ποιότητα του αέρα και του περιβάλλοντος 2004/107/ΕΚ – Αυτό το πλαίσιο χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης του περιβάλλοντος στην ΕΕ. Οι οδηγίες που περιλαμβάνονται αποσκοπούν στον έλεγχο των εκπομπών από κινητές πηγές, στη βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων και στην ενσωμάτωση των απαιτήσεων προστασίας του περιβάλλοντος στους τομείς των μεταφορών και της ενέργειας [87].
- Οδηγία για την ποιότητα του αέρα 2008/50/ΕΚ – Αυτή η οδηγία συγχώνευσε την οδηγία πλαίσιο και άλλες οδηγίες σε μια ενιαία οδηγία, ως μέρος της θεματικής στρατηγικής του 2005 για την ατμοσφαιρική ρύπανση. Σχεδιάστηκε για να θέτει στόχους για τα λεπτά σωματίδια ($PM_{2.5}$).

6.2 Η συγκρότηση της ευρωπαϊκής νομοθεσίας

Τα κράτη μέλη της ΕΕ καλούνται να ενσωματώσουν καθορισμένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην εθνική τους νομοθεσία. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ποιότητα του αέρα τηρεί τις ακόλουθες αρχές:

Τα κράτη μέλη διαιρούν τα εδάφη τους σε διάφορες ζώνες και οικισμούς. Αυτές οι καθορισμένες ζώνες ποιότητας του αέρα υποβάλλονται σε αξιολόγηση για τα επίπεδα ρύπανσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις, μοντελοποίηση και άλλες εμπειρικές τεχνικές. Στη συνέχεια, τα δεδομένα από αυτές τις ζώνες κοινοποιούνται σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία.

Όταν τα επίπεδα ατμοσφαιρικών ρύπων υπερβαίνουν τις οριακές τιμές ή τις τιμές-στόχους, τα κράτη μέλη πρέπει να καταρτίσουν σχέδιο ή πρόγραμμα για την ποιότητα του αέρα για να διορθώσουν τις υπεύθυνες πηγές. Πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του αέρα θα πρέπει επίσης να κοινοποιούνται στο κοινό.

Ο παρακάτω πίνακας 2 περιγράφει τα πρότυπα για αρκετούς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Αυτά τα πρότυπα ισχύουν για διαφορετικές χρονικές περιόδους λόγω των ποικίλων επιπτώσεων στην υγεία που σχετίζονται με τη διάρκεια της έκθεσης.

Οι κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ δίνουν προτεραιότητα στην προστασία της υγείας και είναι γενικά πιο αυστηρές από τα πρότυπα κατευθυντήριων γραμμών της ΕΕ [87].

Πίνακας 2 Οι οριακές τιμές συγκέντρωσης για ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως ισχύουν στην ΕΕ [87]

Ρύπος	**Συγκέντρωση**	**Μέσος χρόνος**
Αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$)	25 μg/m^3	1 χρόνος
Αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10})	50 μg/m^3	24 ώρες
	40 μg/m^3	1 χρόνος
Διοξείδιο του θείου (SO_2)	350 μg/m^3	1 ώρα
	125μg/m^3	24 ώρες
Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)	200 μg/m^3	1 ώρα
	40 μg/m^3	1 χρόνος
Μόλυβδος (Pb)	0,5 μg/m^3	1 χρόνος
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	10 mg/m^3	Μέγιστος ημερήσιος μέσος όρος 8 ωρών
Όζον (O_3)	120 μg/m^3	Μέγιστος ημερήσιος μέσος όρος 8 ωρών

Η εφαρμογή της νομοθεσίας για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή περιλαμβάνει τις εξής τρεις βασικές μεθόδους [87].

1. **Κατανόηση του Προβλήματος** Χρησιμοποιώντας δεδομένα από προηγούμενες οδηγίες-πλαίσια για την ποιότητα του αέρα για την κατανόηση των επιπτώσεων μεμονωμένων ρύπων, τον εντοπισμό πηγών και την παρακολούθηση των τάσεων συγκέντρωσης. Αυτή η γνώση αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων υποστήριξης.

2. **Μέθοδοι και κριτήρια**

- Παρακολούθηση συγκεκριμένων ορίων συγκέντρωσης σε ζώνες ποιότητας αέρα ή οικισμούς.
- Επιλογή κατάλληλων τοποθεσιών για σταθμούς παρακολούθησης για την υποστήριξη της ανάπτυξης ατμοσφαιρικής πολιτικής και της διαχείρισης της ρύπανσης.
- Καταλογογράφηση μεθόδων μέτρησης αναφοράς για τυποποιημένη παρακολούθηση.
- Χρήση μοντέλων για την επικύρωση των δεδομένων παρακολούθησης, προσφέροντας ολοκληρωμένες πληροφορίες σχετικά με τη δημόσια έκθεση, τον προσδιορισμό της πηγής και τα πιθανά μελλοντικά μέτρα.

3. **Διασφάλιση της ποιότητας των πληροφοριών αξιολόγησης** Τεκμηρίωση των ρόλων και των ευθυνών των εθνικών εργαστηρίων και δικτύων αναφοράς, σύνοψη των διαδικασιών διασφάλισης ποιότητας και διευκόλυνση συγκρίσεων σε επίπεδο ΕΕ.

6.3 Προσπάθειες της ΕΕ για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η σοβαρή ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει την ανθρώπινη υγεία, την οξύνιση και τη ρύπανση με όζον στο επίπεδο του εδάφους. Η ΕΕ έχει εφαρμόσει πολιτικές που στοχεύουν μεμονωμένες και εθνικές πηγές ατμοσφαιρικών εκπομπών για βασικούς ρύπους. Μια νέα Οδηγία στοχεύει στην επίτευξη εθνικών μειώσεων σε πέντε ρύπους ζωτικής σημασίας για την υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) παρέχει πρόσβαση του κοινού στην κατάσταση της ποιότητας του αέρα, σχέδια, διαδραστικούς χάρτες και προγράμματα προβολής δεδομένων, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη πολιτικής, την παρακολούθηση, την αξιολόγηση και την επικοινωνία μεταξύ των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και του κοινού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

7.1 Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει την διακύμανση των αέριων ρύπων στα Χανιά (Κρήτη-Ελλάδα) και να συγκρίνει τα επίπεδα αυτά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τα αντίστοιχα σε Ευρωπαϊκές πόλεις, δύο εκ των οποίων είναι ελληνικές, Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Συγκεκριμένα, η μελέτη θα επικεντρωθεί στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εξετάζοντας ειδικότερα ρύπους όπως NO_2, NO, NO_x, CO, SO_2 και O_3 και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα για τις Ευρωπαϊκές πόλεις. Επιπλέον, η διπλωματική εργασία θα παρουσιάσει τις μετεωρολογικές συνθήκες της πόλης Χανίων.

7.2 Σταθμοί παρακολούθησης ατμοσφαιρικών ρύπων

Τα δεδομένων των μετρήσεων των αερίων ρύπων και τα μετεωρολογικά δεδομένα από την πόλη των Χανίων κατά το έτος 2022 παραχωρήθηκαν από το Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά της Κρήτης.

Οι σταθμοί παρακολούθησης, οι μετρήσεις των οποίων παρουσιάζονται, αποτελούνται από προκατασκευασμένες μεταλλικές κατασκευές εξοπλισμένες με όργανα σχεδιασμένα για τη συλλογή δειγμάτων ατμοσφαιρικού αέρα σε τακτά χρονικά διαστήματα από καθορισμένες τοποθεσίες. Μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως περιοχές υψηλής κυκλοφορίας, αστικές ή βιομηχανικές ζώνες, ακόμη και πάρκα. Η κύρια λειτουργία τους είναι να μετρούν τις συγκεντρώσεις των ρύπων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένων των NO_2 και O_3. Οι σύγχρονοι σταθμοί παρακολούθησης συχνά μεταδίδουν δεδομένα μετρήσεων σε μια κεντρική μονάδα μέσα σε λίγα λεπτά, καθιστώντας τα άμεσα διαθέσιμα στο κοινό. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν επίσης αυτά τα δεδομένα για συνεχή παρακολούθηση και ανάλυση για την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων. Για την πόλη της Αθήνας επιλέχθηκε η επεξεργασία των δεδομένων που αντλήθηκαν από το σταθμό παρακολούθησης Πατησίων (Γεωγρ. Μήκος: 23,733053, Γεωγρ. Πλάτος: 37,999587, και υψόμετρο (m) 105) και χαρακτηρίζεται ως Αστικός-Κυκλοφορίας [88]. Για την πόλη της Θεσσαλονίκης επιλέχθηκε η επεξεργασία των δεδομένων που αντλήθηκαν

από το σταθμό παρακολούθησης Εγνατίας (Γεωγρ. Μήκος: 40°38'15.62"N, Γεωγρ. Πλάτος: 22°56'28.68"E, και υψόμετρο (m) 11,3) και χαρακτηρίζεται επίσης ως Αστικός-Κυκλοφορίας [89]. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο ερευνήθηκαν δεδομένα από 2.195 σταθμούς σε 37 χώρες σε διάφορους τύπους σταθμών, συμπεριλαμβανομένων αστικών, προαστιακών, αγροτικών, κυκλοφορίας και βιομηχανικών σταθμών [90].

Αυτές οι μετρήσεις είναι συγκεκριμένες για τον χρόνο και την τοποθεσία, επηρεάζονται από παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η τοπογραφία, η απόσταση από τις πηγές εκπομπών και η κατανομή αυτών των πηγών.

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα έχει σημαντική σημασία λόγω των δυσμενών επιπτώσεων του ρυπασμένου αέρα στην ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα για τις ευάλωτες ομάδες, και στο περιβάλλον.

7.3 Παρακολούθηση Ρύπων στο σταθμό μέτρησης της πόλης των Χανίων

Οι μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των επιπέδων των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι οι παρακάτω.

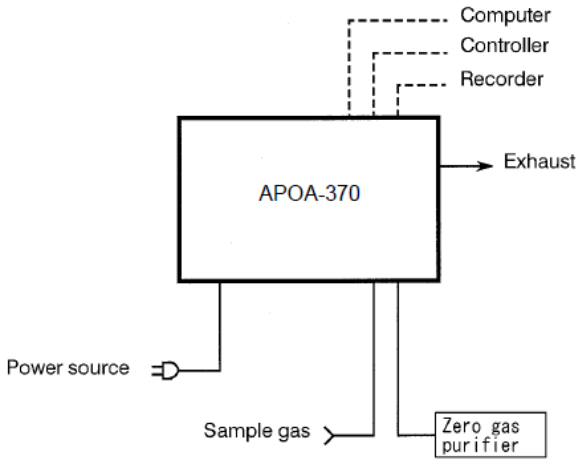
7.3.1 Μέτρηση του όζοντος

Στην τεχνική της φωτομετρίας UV για τη μέτρηση του όζοντος, το όργανο υφίσταται μια αρχική βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας ένα τυπικό δείγμα αέρα, όπου η συγκέντρωση του όζοντος τίθεται στο μηδέν. Στη συνέχεια, το όργανο αποκτά ένα δείγμα, μετρώντας την υπεριώδη (UV) ακτινοβολία που περιέχει επιφανειακό όζον, προσδιορίζοντας την αντίστοιχη ένταση εξόδου (I) [81].

Το APOA-370 λειτουργεί ως καταγραφέας περιβαλλοντικού όζοντος (O_3), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της μη διαχεόμενης υπεριώδους φασματοσκοπίας (Non-Dispersive Ultra Violet Spectroscopy-NDUV) (Σχήμα 4). Αυτό το σύστημα παρακολούθησης διευκολύνει τη συνεχή μέτρηση των συγκεντρώσεων O_3 στην ατμόσφαιρα. Οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν την αναλογική έξοδο των συγκεντρώσεων, επιλέγοντας μεταξύ του συνδυασμού στιγμιαίας τιμής και κυλιόμενου μέσου όρου ή στιγμιαίας τιμής και μέσου όρου (προαιρετικό). Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι ο συνδυασμός στιγμιαίας τιμής και κυλιόμενου μέσου όρου. Επιπλέον, η ενσωμάτωση μιας θύρας RS-232C (προαιρετική) επιτρέπει την απρόσκοπτη και συνεχή ροή των δεδομένων.

Το APOA-370 λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα, που απαιτεί μόνο σύνδεση με μηδενικό καθαριστή αερίου για λειτουργία. Για βελτιωμένες δυνατότητες, το σύστημα μπορεί να αναβαθμιστεί με σύνδεση σε υπολογιστή, οθόνη ή συσκευή εγγραφής. Η διαμόρφωση συστήματος του APOA-370 απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα στο Σχήμα 4.





Activate Wi

Σχήμα 4 Εικόνα και σχηματική αναπαράσταση του συστήματος λειτουργίας του οργάνου Horiba APOA-370 για τη μέτρηση του όζοντος [81]

Λειτουργεί με σταθερό εύρος μέτρησης πλήρους κλίμακας 0 - 0,5 ppm, με αυτόματη απενεργοποίηση εύρους, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία στην περιοχή από 20 έως 30°C.

Εύρος μέτρησης: 0-1,0 ppm

Επαναληψιμότητα: ±1,0% της πλήρους κλίμακας

Γραμμικότητα: ±1,0% της πλήρους κλίμακας

Ρυθμός ροής: 0,7 LPM

Εύρος θερμοκρασίας: 20°C-30°C

7.3.2 Μέτρηση του NO_2

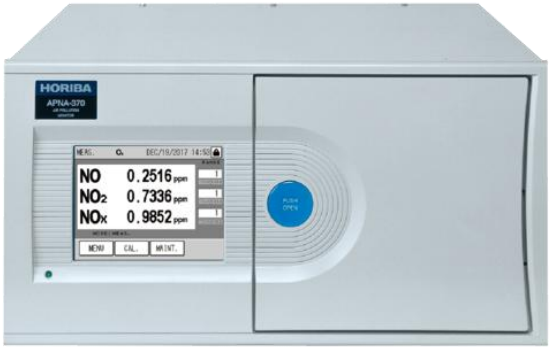
Η μέθοδος χημειοφωταύγειας είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για τη μέτρηση του NO_2, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την εκπομπή ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης. Ουσιαστικά, το διοξείδιο του αζώτου υφίσταται μετατροπή σε μονοξείδιο μέσω ενός θερμαινόμενου μετατροπέα. Η μέθοδος υπολογίζει τη διαφορά που θα προέκυπτε μεταξύ του αθροίσματος NO_2 και NO παρουσία του μετατροπέα και του υποθετικού σεναρίου όπου ο μετατροπέας απουσιάζει [81].

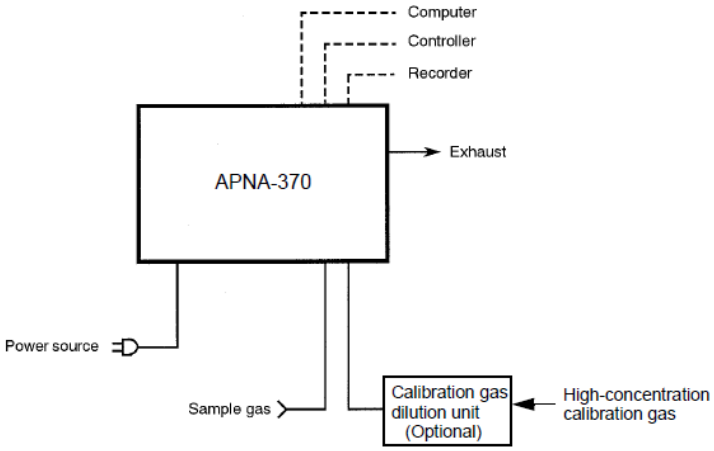
Το όργανο APNA-370 (Σχήμα 5) λειτουργεί ως καταγραφέας συγκεντρώσεων οξειδίου του αζώτου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο χημειοφωταύγειας (CLD) ως βασική αρχή λειτουργίας του. Αυτή η συσκευή παρακολούθησης παρέχει συνεχείς μετρήσεις των συγκεντρώσεων οξειδίου του αζώτου στην ατμόσφαιρα, συγκεκριμένα του μονοξειδίου του αζώτου (NO), του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και των συνολικών οξειδίων του αζώτου ($NO_x = NO + NO_2$).

Η συγκέντρωση του NO_2 προκύπτει από τις μετρήσεις των NO και NO_x. Η συσκευή προσφέρει επιλογές αναλογικής εξόδου για συγκεντρώσεις, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέξουν μεταξύ ενός συνδυασμού στιγμιαίας τιμής και κυλιόμενου μέσου όρου ή ενός συνδυασμού στιγμιαίας τιμής και μέσου όρου (προαιρετικό). Η προεπιλεγμένη ρύθμιση είναι ο συνδυασμός στιγμιαίας τιμής και κυλιόμενου μέσου όρου [94].

Για βελτιωμένη λειτουργικότητα, η προσθήκη μιας προαιρετικής θύρας RS-232C επιτρέπει δυνατότητες επικοινωνίας δεδομένων. Το όργανο APNA-370 λειτουργεί ως αυτόνομο σύστημα, απαιτώντας μόνο σύνδεση με σύστημα αραίωσης του αερίου βαθμονόμησης για τη λειτουργία. Το σύστημα μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω συνδέοντας έναν υπολογιστή, μια οθόνη, μια συσκευή εγγραφής ή μια γεννήτρια αερίου βαθμονόμησης.

Η διαμόρφωση συστήματος του APNA-370 απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα στο Σχήμα 5 [94].





Σχήμα 5 Εικόνα και σχηματική αναπαράσταση του λειτουργικού συστήματος του οργάνου Horiba APOA-370 για τη μέτρηση του NO_2 [94]

7.3.3 Μέτρηση του CO

Το APMA-370 είναι ένα φορητό όργανο συνεχούς μέτρησης της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας του την μέθοδο της μη-διαχεόμενης υπέρυθρης ανάλυσης (NDIR - non-dispersive infrared).

7.3.4 Μέτρηση του SO_2

Το APSA-370 είναι ένα φορητό όργανο συνεχούς μέτρησης της συγκέντρωσης του διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα. Χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας του την μέθοδο του υπεριώδους φθορισμού (UVF - ultraviolet fluorescence).

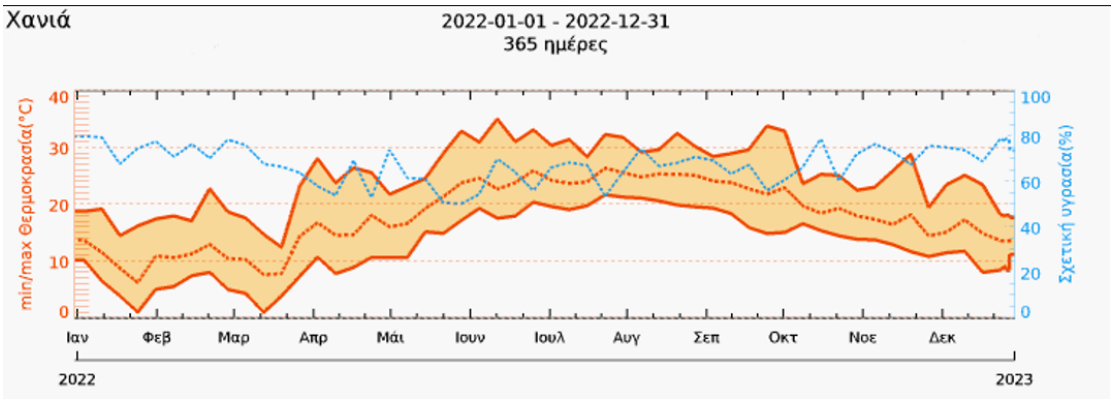
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

8.1 Παρουσίαση δεδομένων στην πόλη των Χανίων

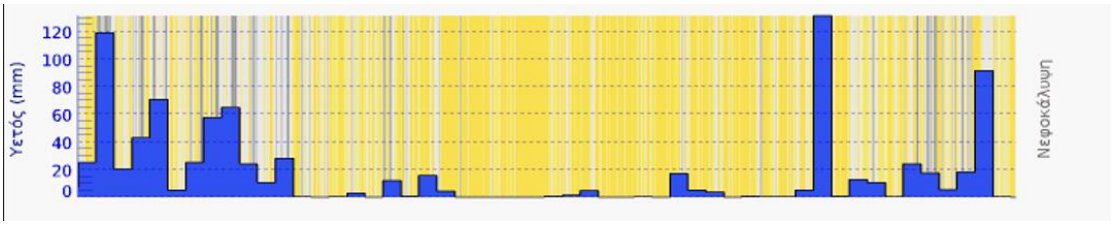
Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η συλλογή δεδομένων (μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ρύπων) για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα αστικά κέντρα. Στο επόμενο στάδιο, υπολογίστηκαν μηνιαίοι και ετήσιοι μέσοι όροι και δημιουργήθηκαν γραφήματα για να βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα θεσμοθετημένα όρια κάθε ρύπου.

8.1.1. Παρουσίαση μετεωρολογικών δεδομένων

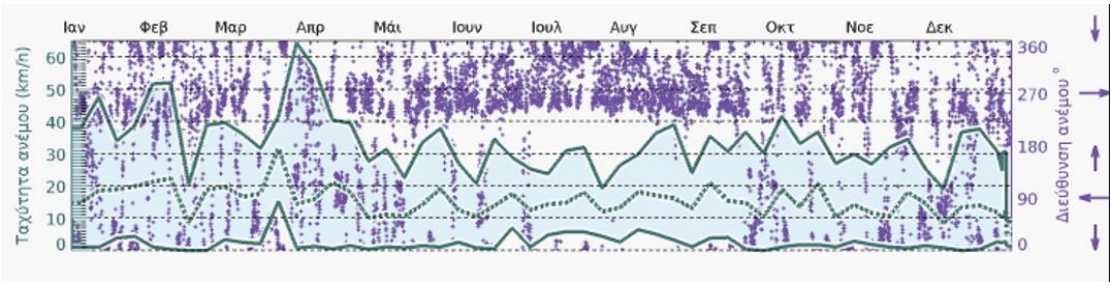
Τα κλιματολογικά δεδομένα για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 6 - 8 αναφορικά για τη μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας, του υετού και της ταχύτητας του ανέμου, αντίστοιχα.



Σχήμα 6 Μηνιαία μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111].



Σχήμα 7 Μηνιαία μεταβολή του υετού και της νεφοκάλυψης για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111].



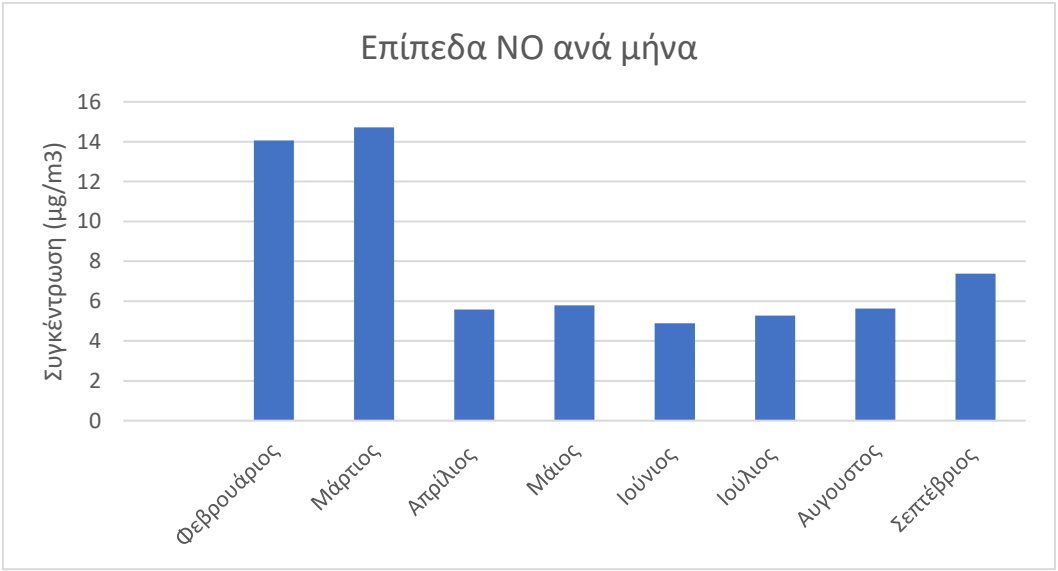
Σχήμα 8 Μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου για το έτος 2022 για την πόλη των Χανίων [111]

8.1.2. Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO καταγράφηκαν το Φεβρουάριο και το Μάρτιο (14 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO παρατηρήθηκαν τον Ιούνιο (4,88 μg/m^3) και τον Ιούλιο (5,27 μg/m^3).

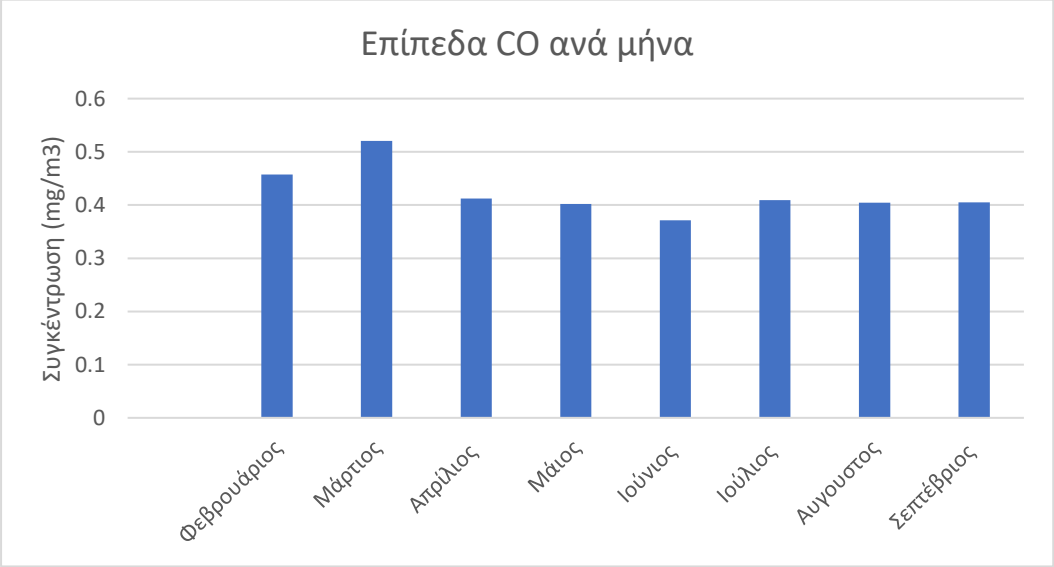
Δεν έχουν οριστεί επιτρεπόμενα όρια για το NO στην ατμόσφαιρα [95].



Σχήμα 9 Μέσες μηνιαίες τιμές NO στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του CO στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση CO καταγράφηκε το Μάρτιο (0,52 mg/m^3).
- Η χαμηλότερη μηνιαία συγκέντρωση CO παρατηρήθηκε τον Ιούνιο (0,37 mg/m^3).
- Τα όρια μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τα περιφερειακά πρότυπα και κανονισμούς ποιότητας του αέρα, καθώς και τη διάρκεια της έκθεσης. Στην ΕΕ η μέγιστη οκτάωρη ημερήσια τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mg/m^3 σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/ΕΚ. Όμοια και σύμφωνα με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ), το μέσο όριο 1 ώρας για συγκέντρωση CO δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 35 χιλιοστόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (mg/m³), ενώ το μέσο όριο των 8 ωρών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mg/ m³ [95]. Επομένως δε παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το CO.

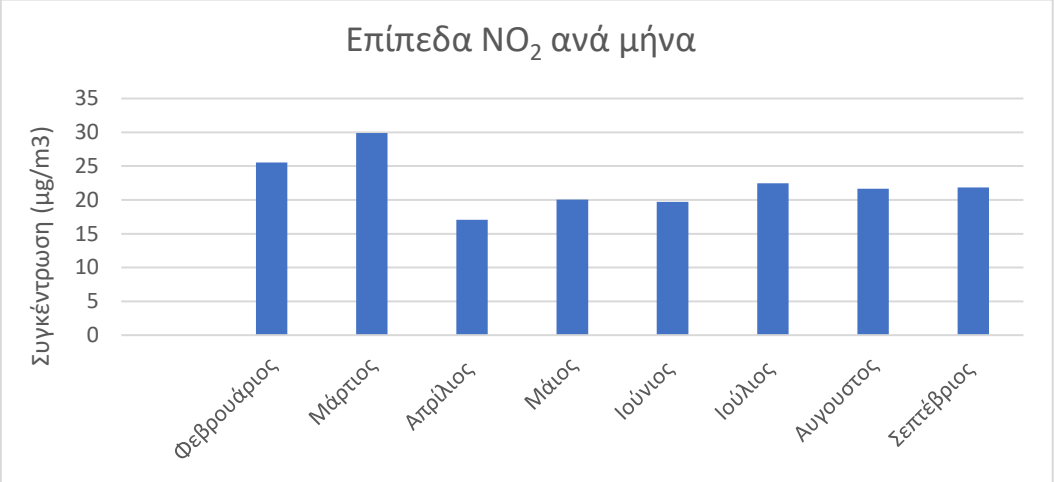


Σχήμα 10 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO_2 στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση NO_2 καταγράφηκε το Μάρτιο (29,9 μg/m^3).
- Η χαμηλότερη μηνιαία συγκέντρωση NO_2 παρατηρήθηκε τον Απρίλιο (17,1 μg/m^3).
- Στην ΕΕ η μέση ετήσια τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 40 μg/m^3 και το ωριαίο ανώτατο επιτρεπτό όριο τα 200 μg/m^3 σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/ΕΚ. Αντίθετα σύμφωνα με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ), το μέσο ετήσιο όριο συγκέντρωσης NO_2 δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μg/m³) [95]. Επιπλέον, υπάρχουν συχνά πιο

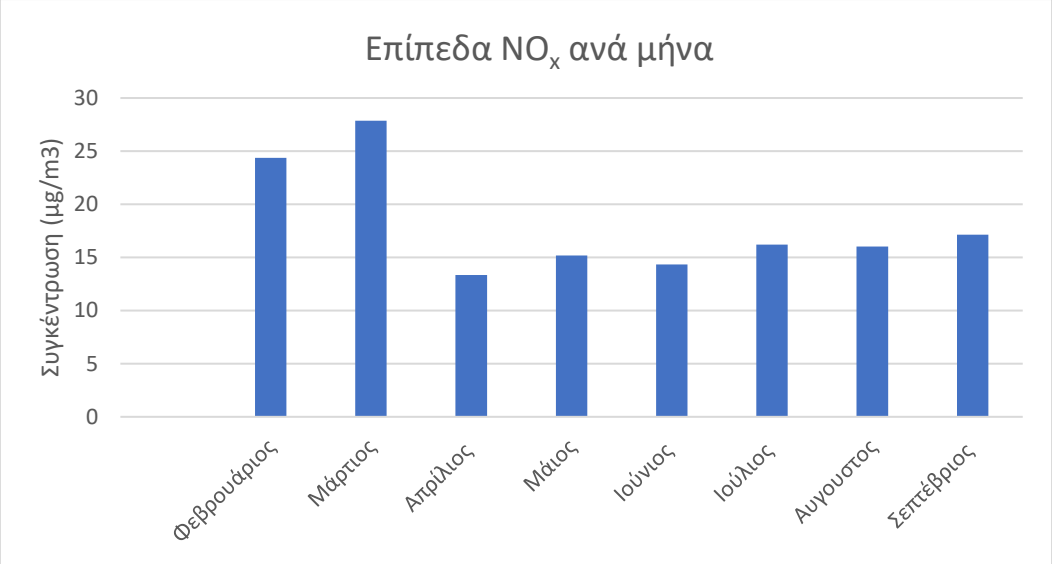
βραχυπρόθεσμα όρια για το NO_2, όπως ωριαίοι ή ημερήσιοι μέσοι όροι, για την προστασία της δημόσιας υγείας. Επομένως δε παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το NO_2 όσον αφορά την Ευρωπαϊκή νομοθεσία, αλλά καταγράφονται υπερβάσεις με βάση το όριο του ΠΟΥ.



Σχήμα 11 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις των NO_x στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

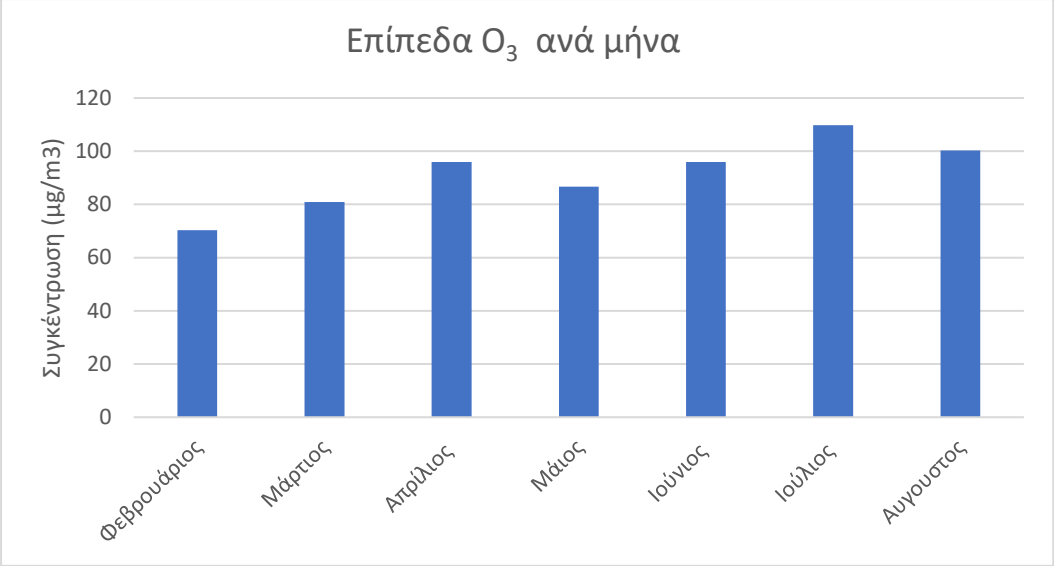
- Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των NO_x καταγράφηκαν το Μάρτιο (27,8 $\mu g/m^3$).
- Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις των NO_x παρατηρήθηκαν τον Απρίλιο (13,3 $\mu g/m^3$).
- Τα επιτρεπτά όρια για τα NO_x εκφράζονται συχνά ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων NO_2 και NO. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος, η επιτρεπόμενη μέση ετήσια συγκέντρωση για το NO_2 είναι 40 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο ($\mu g/m^3$). Ωστόσο, τα ειδικά όρια για τα NO_x στο σύνολό τους μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη δικαιοδοσία και τα ειδικά ισχύοντα πρότυπα ποιότητας του αέρα. Δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των Ευρωπαϊκών ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το NO_x.



Σχήμα 12 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_x στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του O_3 στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

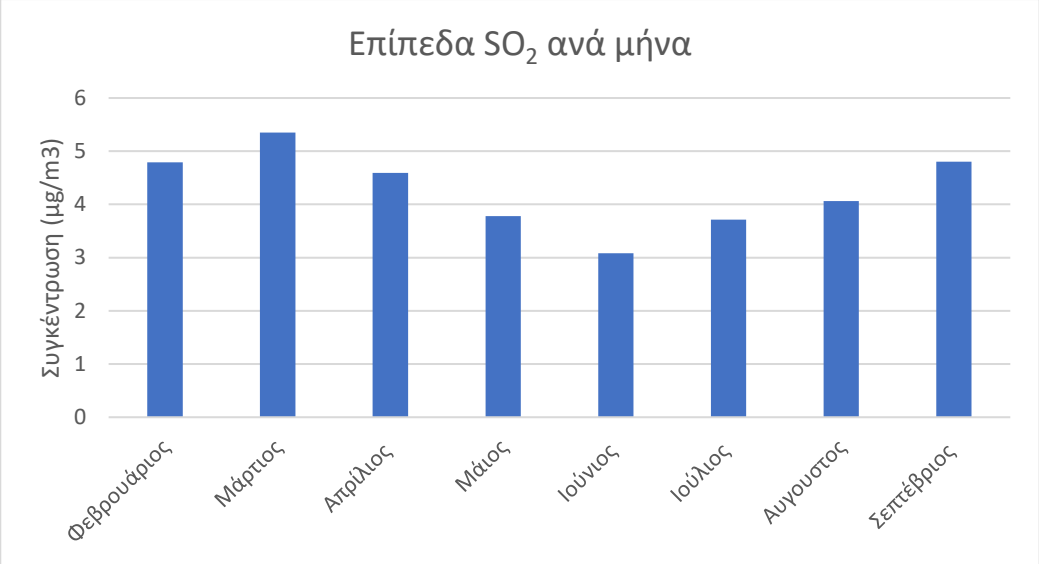
- Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση O_3 καταγράφηκε τον Ιούλιο (109,8 μg/m^3).
- Η χαμηλότερη μηνιαία συγκέντρωση O_3 παρατηρήθηκε το Φεβρουάριο (70,3 μg/m^3).
- Τα επιτρεπτά όρια για το όζον (O_3) στην ατμόσφαιρα ρυθμίζονται στην ΕΕ από την Οδηγία 2008/50/ΕΚ. Η μέση ημερήσια τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 120 μg/m^3. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η συνιστώμενη κατευθυντήρια γραμμή για το όζον είναι 100 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μg/m³) ως μέσος όρος 8 ωρών, που δεν πρέπει να ξεπερνιέται περισσότερο από μία φορά το χρόνο, για την προστασία της ανθρώπινης υγείας [95]. Επομένως για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το O_3 σύμφωνα με τον ΠΟΥ, ενώ με βάση την Ευρωπαϊκή Οδηγία δεν παρατηρείται υπέρβαση του ορίου.



Σχήμα 13 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του SO_2 στην πόλη των Χανίων και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η ελάχιστη μηνιαία συγκέντρωση SO_2 καταγράφηκε τον Ιούνιο (3,1 μg/m^3).
- Η υψηλότερη μηνιαία συγκέντρωση SO_2 παρατηρήθηκε το Μάρτιο (5,4 μg/m^3).
- Τα επιτρεπτά όρια για το διοξείδιο του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα στην ΕΕ ορίζονται από την Οδηγία 2008/50/ΕΚ. Η μέση ημερήσια τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 125 μg/m^3. Παράλληλα σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), η συνιστώμενη οδηγία για το διοξείδιο του θείου είναι 40 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο (μg/m³) ως μέσος όρος 24 ωρών, που δεν πρέπει να ξεπερνιέται περισσότερο από μία φορά το χρόνο, για την προστασία του ανθρώπινης υγείας. Επομένως δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το SO_2.



Σχήμα 14 Μέσες μηνιαίες τιμές SO_2 στο σταθμό για την πόλη των Χανίων για το έτος 2022.

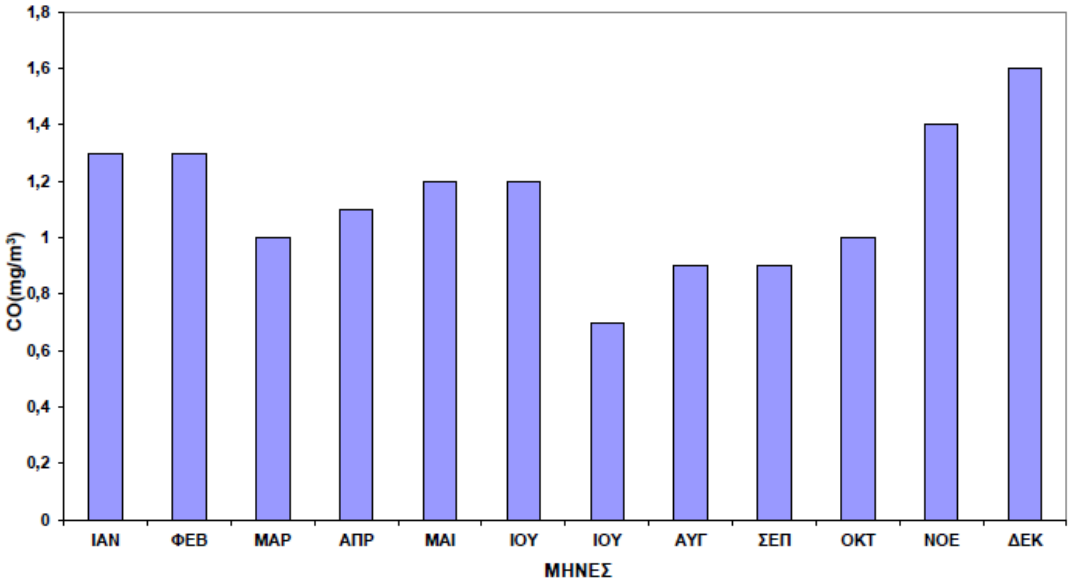
8.2 **Αποτελέσματα μεταβολής ατμοσφαιρικών ρύπων για Αθήνα και Θεσσαλονίκη**

Οι μηνιαίες διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις ρύπων για την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, οι οποίες δείχνουν τις μέσες μηνιαίες τιμές συγκέντρωσης για όλους τους μετρούμενους ρύπους για το έτος 2021 παρουσιάζονται στη συνέχεια. Τα επόμενα στοιχεία απεικονίζουν τις μηνιαίες διακυμάνσεις των ρύπων σε συγκεκριμένους σταθμούς και συγκεκριμένα για την Αθήνα στο σταθμό της Πατησίων και για τη Θεσσαλονίκη στο σταθμό της Εγνατίας. Οι πρωτογενείς ρύποι όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του θείου (SO_2) παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα κατά τους χειμερινούς μήνες. Η αυξημένη παρουσία SO_2 κατά τη διάρκεια του χειμώνα αποδίδεται στις εργασίες κεντρικής θέρμανσης, αν και οι χαμηλές τιμές συγκέντρωσης περιορίζουν τα οριστικά συμπεράσματα. Τα αυξημένα επίπεδα CO και NO το χειμώνα οφείλονται στην εντατική κίνηση και στη μη βέλτιστη απόδοση των κινητήρων των οχημάτων, που επιδεινώνονται από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Αντίθετα, τα επίπεδα του φωτοχημικού όζοντος (O_3) κορυφώνονται το καλοκαίρι λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας, ζωτικής σημασίας για τον σχηματισμό του από πρόδρομες ενώσεις όπως τα οξείδια του αζώτου. Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) δεν παρουσιάζει σαφή μηνιαία διακύμανση, αλλά κορυφώνεται τους μήνες Μάιο-Ιούνιο λόγω των θερμοκρασιακών αναστροφών και της παρατεταμένης ηλιακής ακτινοβολίας, που ενισχύουν τον σχηματισμό του [88, 89].

8.2.1 Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων στην Αθήνα

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του CO, στην πόλη της Αθήνας και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση CO καταγράφηκε το Δεκέμβριο (1,60 mg/m^3).
- Η ελάχιστη μηνιαία συγκέντρωση CO παρατηρήθηκε τον Ιούλιο (0,72 mg/m^3).
- Επομένως δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το CO (ΕΕ και ΠΟΥ 8-ωρο όριο <10 mg/ m³).

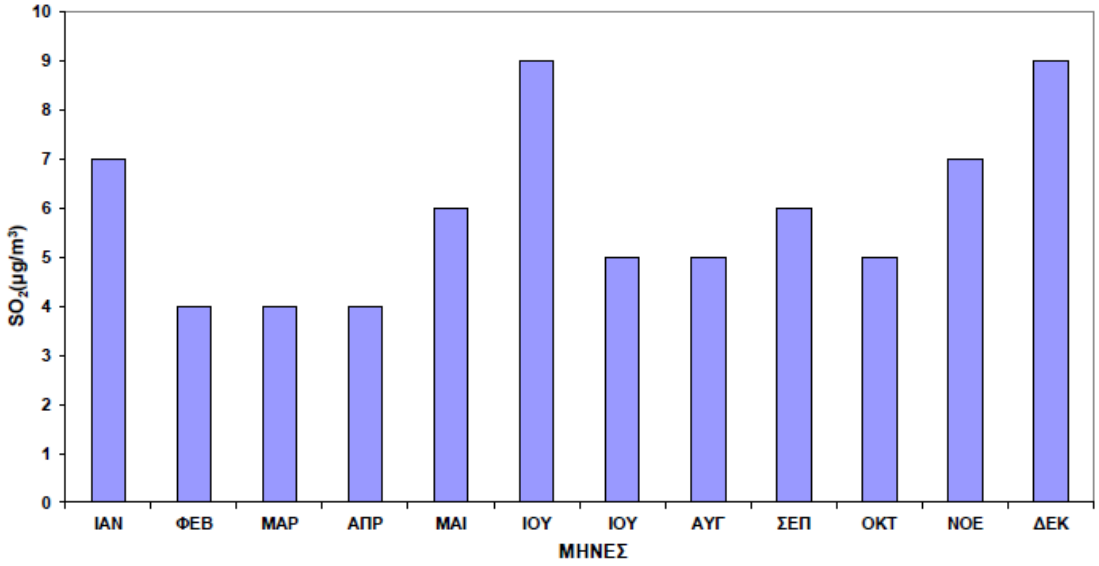


Σχήμα 15 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88].

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του SO_2 στην πόλη της Αθήνας και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις SO_2 καταγράφηκαν τον Ιούνιο και το Δεκέμβριο (9,0 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις SO_2 παρατηρήθηκαν από Φεβρουάριο έως Απρίλιο (4,0 μg/m^3).

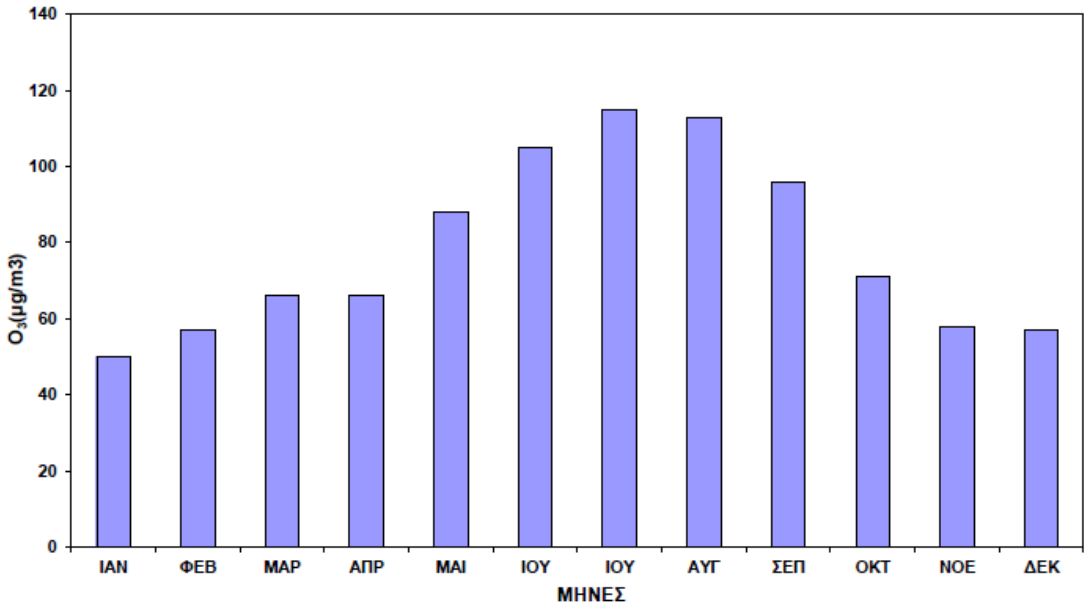
- Επομένως δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το SO_2 (ΠΟΥ ημερήσιο όριο <40 μg/ m^3).



Σχήμα 16 Μέσες μηνιαίες τιμές SO_2 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88].

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του O_3 στην πόλη της Αθήνας και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

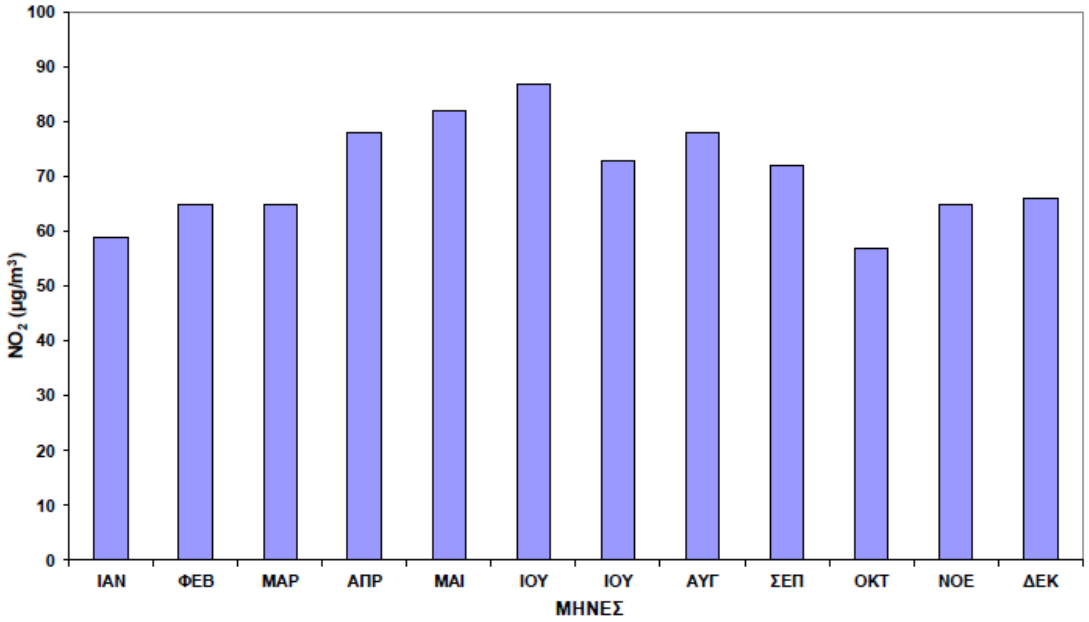
- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις O_3 καταγράφηκαν το διάστημα μεταξύ Ιουνίου και Αύγουστου (>100 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρήθηκαν από Νοέμβριο έως Ιανουάριο (≈50 μg/m^3).
- Επομένως παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το O_3 (ΠΟΥ 8-ωρο όριο <100 μg/ m^3).



Σχήμα 17 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88].

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO_2 στην πόλη της Αθήνας και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

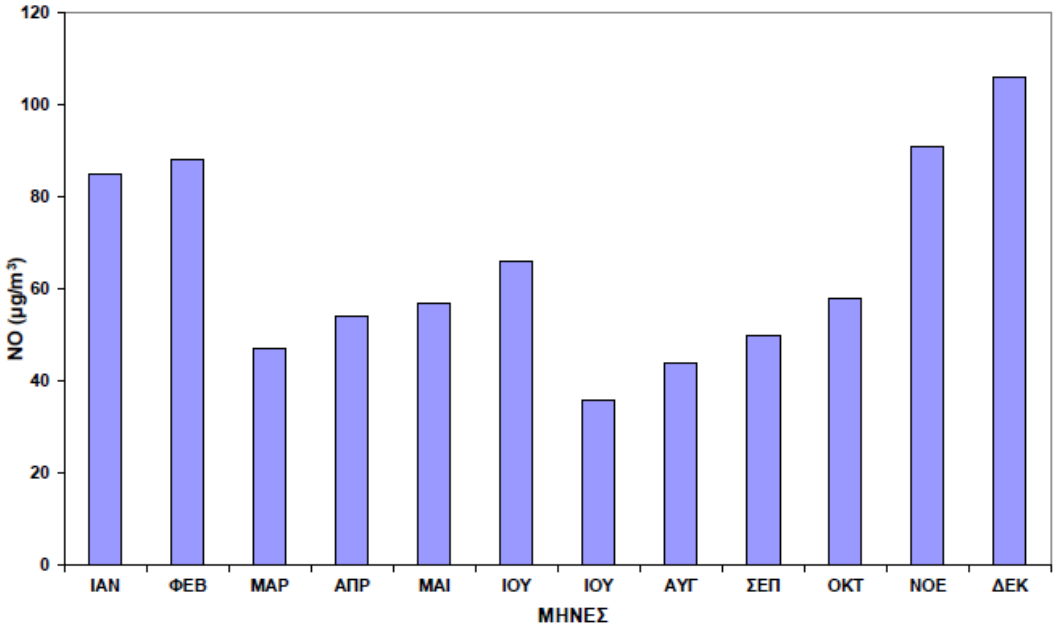
- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO_2 καταγράφηκαν το διάστημα μεταξύ Μάιο και Ιούνιο (>80 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO_2 παρατηρήθηκαν τον Ιανουάριο και τον Οκτώβριο (≈55 μg/m^3).
- Παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το NO_2 (ΕΕ ετήσιο όριο < 40 μg/ m^3, ΠΟΥ ετήσιο όριο < 10 μg/ m^3).



Σχήμα 18 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88].

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO στην πόλη της Αθήνας και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO καταγράφηκαν το διάστημα μεταξύ Νοεμβρίου και Φεβρουαρίου (>80 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO παρατηρήθηκαν τον Ιούνιο και τον Αύγουστο (≈40 μg/m^3).
- Δεν παρατηρούνται υπερβάσεις για όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης λόγω μη ύπαρξης ανώτερου επιτρεπτού ορίου αναφορικά με το NO.

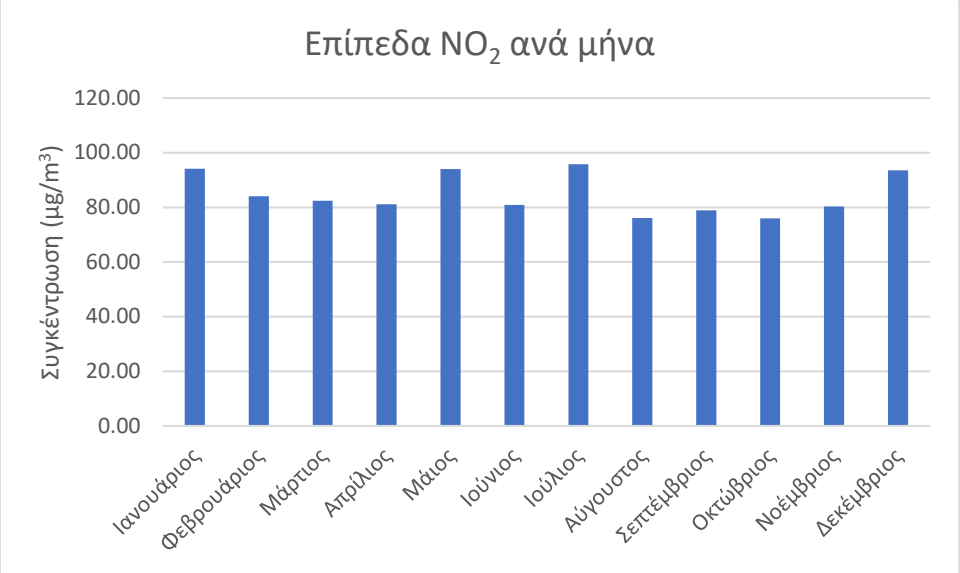


Σχήμα 19 Μέσες μηνιαίες τιμές NO στο σταθμό Πατησίων στην πόλη της Αθήνας για το έτος 2021 [88].

8.2.2 Παρουσίαση διακύμανσης αερίων ρύπων στη Θεσσαλονίκη

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του NO_2 στην πόλη της Θεσσαλονίκης και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

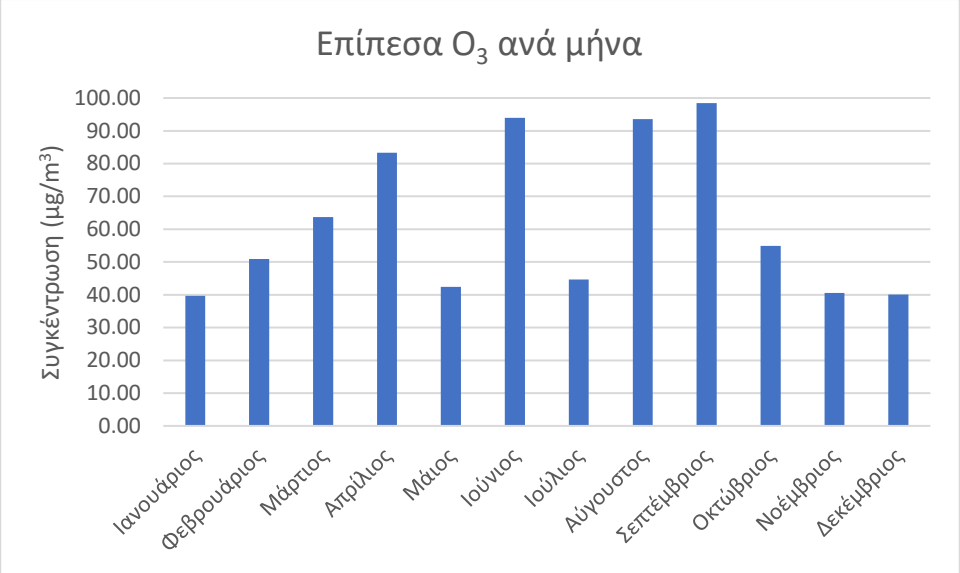
- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO_2 καταγράφηκαν τον Ιανουάριο, το Μάιο, τον Ιούλιο και το Δεκέμβριο (>80 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις NO_2 παρατηρήθηκαν μεταξύ Αυγούστου και Οκτωβρίου (≈55 μg/m^3).
- Παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το NO_2 (ΕΕ ετήσιο όριο <40 mg/ m^3, ΠΟΥ ετήσιο όριο <10 mg/ m^3).



Σχήμα 20 Μέσες μηνιαίες τιμές NO_2 στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89].

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του O_3 στην πόλη της Θεσσαλονίκης και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

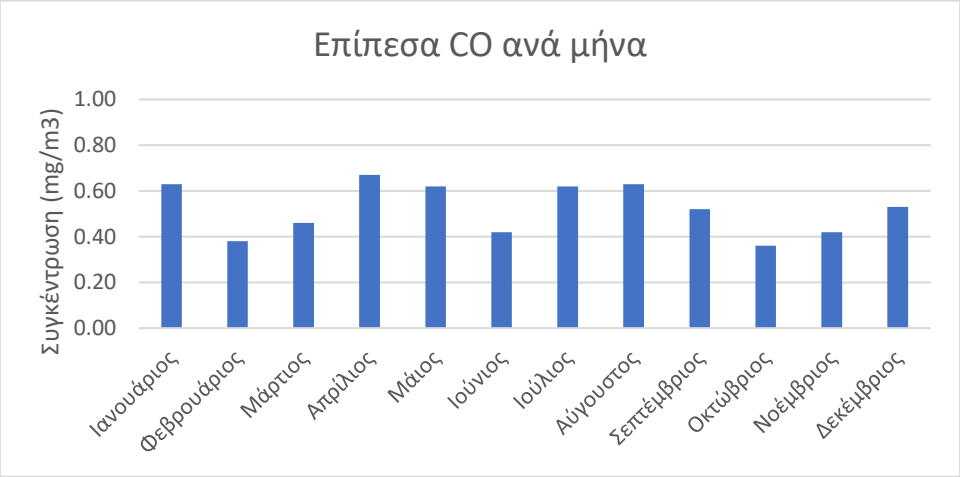
- Οι μέγιστες μηνιαίες συγκεντρώσεις O_3 καταγράφηκαν τους μήνες Ιούνιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο (>90 μg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρήθηκαν από το Νοέμβριο έως τον Ιανουάριο (≈40 μg/m^3).
- Επομένως δεν παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το O_3 (ΠΟΥ ημερήσιο 8-ωρο όριο <100 mg/ m^3).



Σχήμα 21 Μέσες μηνιαίες τιμές O_3 στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89].

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του CO στην πόλη της Θεσσαλονίκης και έγιναν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση CO καταγράφηκε τον Απρίλιο (0,67 mg/m^3).
- Οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις CO παρατηρήθηκαν το Φεβρουάριο και τον Οκτώβριο (0,35 mg/m^3).
- Επομένως δε παρατηρούνται υπερβάσεις των ορίων για το χρονικό διάστημα της μελέτης αναφορικά με το CO (ΕΕ και ΠΟΥ όριο <10 mg/ m³).



Σχήμα 22 Μέσες μηνιαίες τιμές CO στο σταθμό Εγνατίας στην πόλη της Θεσσαλονίκης για το έτος 2016 – ίδια επεξεργασία [89]

8.3 Αποτελέσματα μεταβολής ατμοσφαιρικών ρύπων σε Ευρωπαϊκό επίπεδο

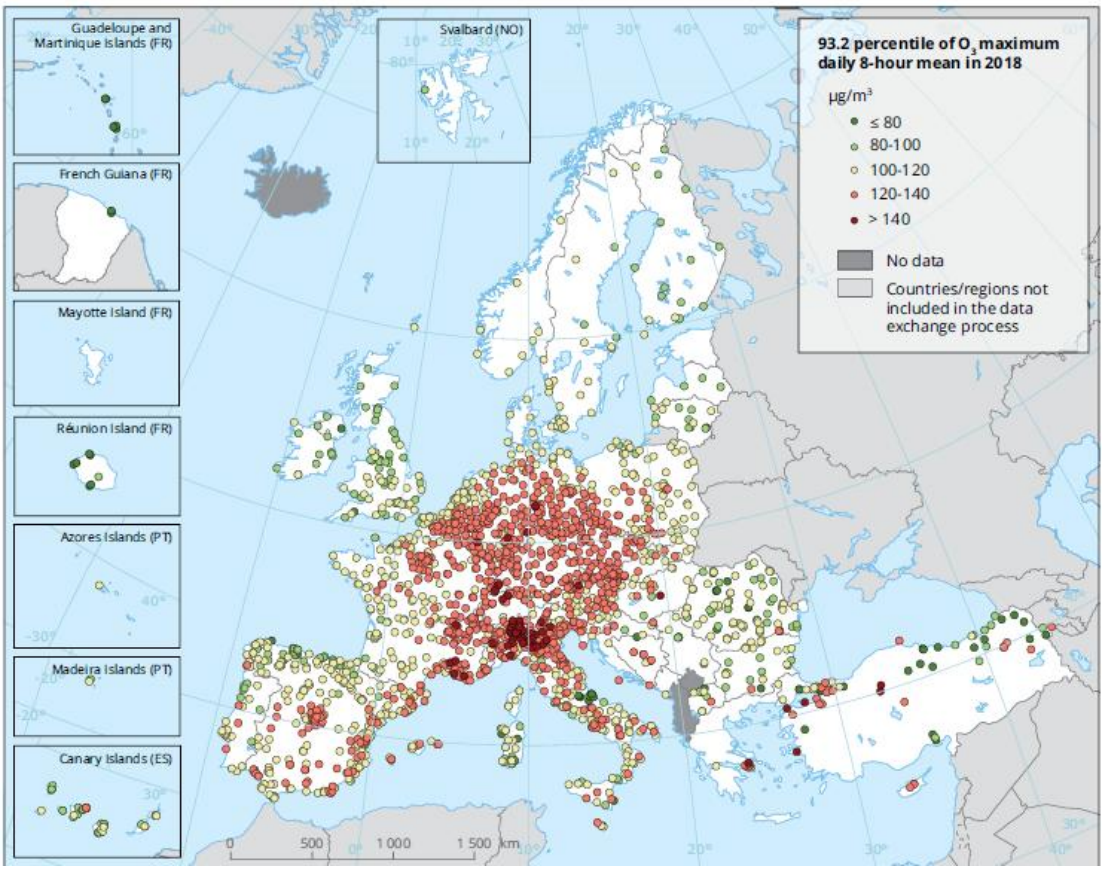
8.3.1 Όζον O_3

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, όσον αφορά την κατάσταση της συγκέντρωσης του O_3 το 2018, αναφέρθηκαν δεδομένα O_3 από 2.195 σταθμούς σε 37 χώρες, εξαιρουμένης της Ισλανδίας. Είκοσι κράτη μέλη και πέντε άλλες χώρες κατέγραψαν συγκεντρώσεις που υπερέβαιναν την τιμή στόχο του O_3 περισσότερες από 25 φορές το έτος 2018. Συγκεκριμένα, το 41% όλων των σταθμών αναφοράς O_3, με ελάχιστη κάλυψη δεδομένων 75%, εμφάνισαν συγκεντρώσεις πάνω από την τιμή στόχο για την ανθρώπινη υγεία. Αντίθετα, μόνο το 13% των σταθμών πέτυχε τον μακροπρόθεσμο στόχο [90].

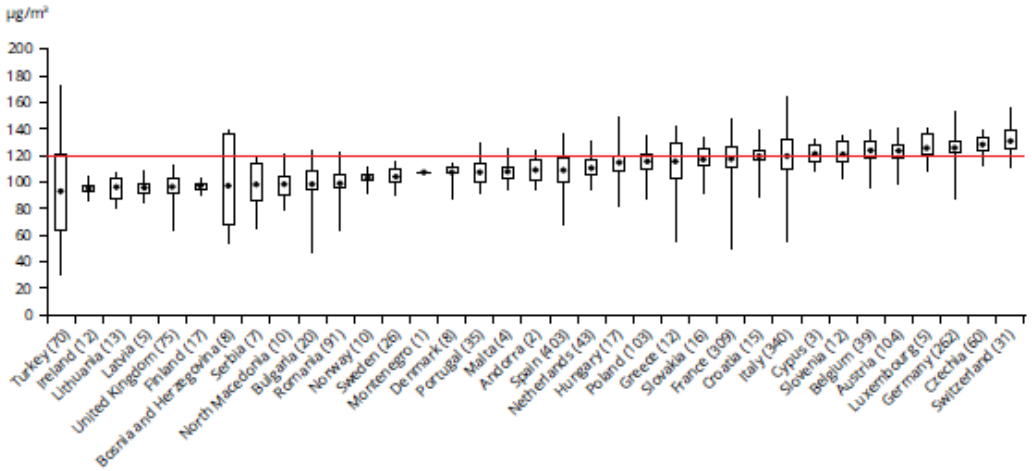
Η αυξημένη ατμοσφαιρική θερμοκρασία το έτος 2018 διευκόλυνε αυξημένες φωτοχημικές αντιδράσεις και σχηματισμό O_3. Ήταν η τρίτη θερμότερη χρονιά που έχει καταγραφεί στην Ευρώπη μέχρι το 2018, με θερμοκρασίες στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη στα τέλη της άνοιξης και το καλοκαίρι κατά μέσο όρο 4 - 8 °C πάνω από τον μέσο όρο της δεκαετίας (2008 - 2017). Αυτές οι μετεωρολογικές συνθήκες ευνόησαν το σχηματισμό O_3, με αποτέλεσμα αυξημένες συγκεντρώσεις, ιδιαίτερα στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη. Συγκεκριμένα, τα επίπεδα O_3 στην Κεντρική Ευρώπη ξεπέρασαν αυτά των προηγούμενων ετών και πλησίασαν τα υψηλά που είχαν καταγραφεί το 2015. Η Υπηρεσία Παρακολούθησης Ατμόσφαιρας Copernicus (CAMS) εκτίμησε, ότι το πιο σοβαρό επεισόδιο O_3 το 2018 σημειώθηκε από τις 30 Ιουλίου έως τις 7 Αυγούστου, με σημαντικές υπερβάσεις και των δύο του ορίου πληροφόρησης και του μακροπρόθεσμου στόχου που παρατηρήθηκαν σε μεγάλες περιοχές στην Κεντρική, Νότια και Δυτική Ευρώπη (Σχήματα 23 και 24). Η κυκλοφορία και οι βιομηχανικές εκπομπές προσδιορίστηκαν ως οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν σε αυτό το επεισόδιο O_3 [90].

Το σχήμα 23 απεικονίζει το σύνολο των μέσων ημερήσιων 8-ωρων τιμών όζοντος άνω των 35 ppb (SOMO35) που εκτείνονται από το έτος 2000 έως το 2018 σε διάφορους τύπους σταθμών, συμπεριλαμβανομένων αστικών, προαστιακών, αγροτικών, κυκλοφορίας και βιομηχανικών σταθμών. Μετά από αξιοσημείωτες κορυφές που παρατηρήθηκαν το 2003 και το 2006, το SOMO35 παρέμεινε σχετικά σταθερό από το 2009 έως το 2013, ενώ πιο έντονες διακυμάνσεις παρατηρήθηκαν τα

επόμενα πέντε χρόνια, κορυφώθηκαν το 2015 και παρουσίασαν μια επακόλουθη αύξηση από το 2016 έως το 2018 [90].



Σχήμα 23 Συγκεντρώσεις O_3 στην Ευρώπη το έτος 2018 [90].



Σχήμα 24 Συγκεντρώσεις O_3 σε σχέση με την τιμή στόχο το έτος 2018 και τον αριθμό των σταθμών που εξετάζονται για κάθε χώρα [90].

Οι εκπομπές NO_X και NM-VOC στον EOX-33 κατέδειξαν συνολική μείωση 45% και 41%, αντίστοιχα, μεταξύ 2000 και 2018, συμβάλλοντας στο μειωμένο σχηματισμό O_3. Μελέτες των Jonson et al., (2018) και Turnock et al., (2018), έχουν τονίσει τον

σημαντικό ρόλο της διηπειρωτικής μεταφοράς του O_3 και των πρόδρομων ουσιών του, μαζί με τις κλιμακούμενες συγκεντρώσεις CH_4 παγκοσμίως, στον επηρεασμό των επιπέδων O_3. Συγκεκριμένα, οι μη Ευρωπαϊκές πηγές ασκούν σημαντικό αντίκτυπο στα επιφανειακά επίπεδα O_3 στην Ευρώπη, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τα μέσα ετήσια επίπεδα O_3, ενώ μετρήσεις όπως το SOMO35 αντικατοπτρίζουν κυρίως αυξημένα επίπεδα O_3 το καλοκαίρι, επηρεαζόμενα κυρίως από τις ευρωπαϊκές εκπομπές πρόδρομων ουσιών [90].

Η ανάλυση τάσεων που πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 2009 - 2018 δείχνει μια συνολική μέση αύξηση σε όλους τους τύπους σταθμών εκτός από τους βιομηχανικούς σταθμούς. Οι περισσότεροι σταθμοί (90%) παρουσίασαν μη σημαντική τάση, με το 7% να παρουσιάζει σημαντική ανοδική τάση στο SOMO35, κυρίως συγκεντρωμένο στην Κεντρική και Νότια Ευρώπη. Αντίθετα, το 3% των σταθμών παρουσίασε σημαντική πτωτική τάση, κυρίως στην Ισπανία και την Ιταλία, με την πλειοψηφία να ταξινομείται ως αγροτικοί και βιομηχανικοί σταθμοί. Συγκεκριμένα η τάση στη μεταβολή των συγκεντρώσεων του O_3 για διάφορες χώρες για το χρονικό διάστημα 2009 - 2018 είναι η εξής: Σερβία (-675 μg/m^3·για έναν σταθμό), Βόρεια Μακεδονία (-339 μg/m^3 για δύο σταθμούς), Σλοβακία (-220 μg/m^3·για 11 σταθμούς) και Βουλγαρία (-188 g/m^3·για 17 σταθμούς) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη μείωση στο SOMO35, με τη Μάλτα (120 μg/m^3·για δύο σταθμούς) και την Αυστρία (101 μg /m^3 για 90 σταθμούς) να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση, ακολουθούμενη από την Τσεχία (94 μg/m^3·για 51 σταθμούς) και το Λουξεμβούργο (94 μg/m^3·για πέντε σταθμούς) [90].

Επιπλέον, η ανάλυση του μοντέλου GAM αποκάλυψε αξιοσημείωτες περιφερειακές τάσεις στις συγκεντρώσεις SOMO35. Σε σταθμούς αγροτικού φόντου στις Σ υπόβαθρου κανδιναβικές χώρες, ο SOMO35 μειώθηκε από το 2009 έως το 2014 πριν σταθεροποιηθεί από το 2015 έως το 2018. Αντίθετα, οι σταθμοί αγροτικού φόντου στην Κεντρική - Ανατολική Ευρώπη παρουσίασαν πτωτική τάση, ενώ οι σταθμοί αστικού φόντου δεν παρουσίασαν σαφή τάση. Παρόμοιες φθίνουσες τάσεις παρατηρήθηκαν σε αγροτικούς και περιαστικούς σταθμούς στη Βόρεια Ιταλία και σε σταθμούς σε όλη την Ιβηρική Χερσόνησο, τα Βαλκάνια και την Ελλάδα. Αντίθετα, δεν εντοπίστηκαν σαφείς τάσεις στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιρλανδία [90].

8.3.2 Διοξείδιο του αζώτου NO_2

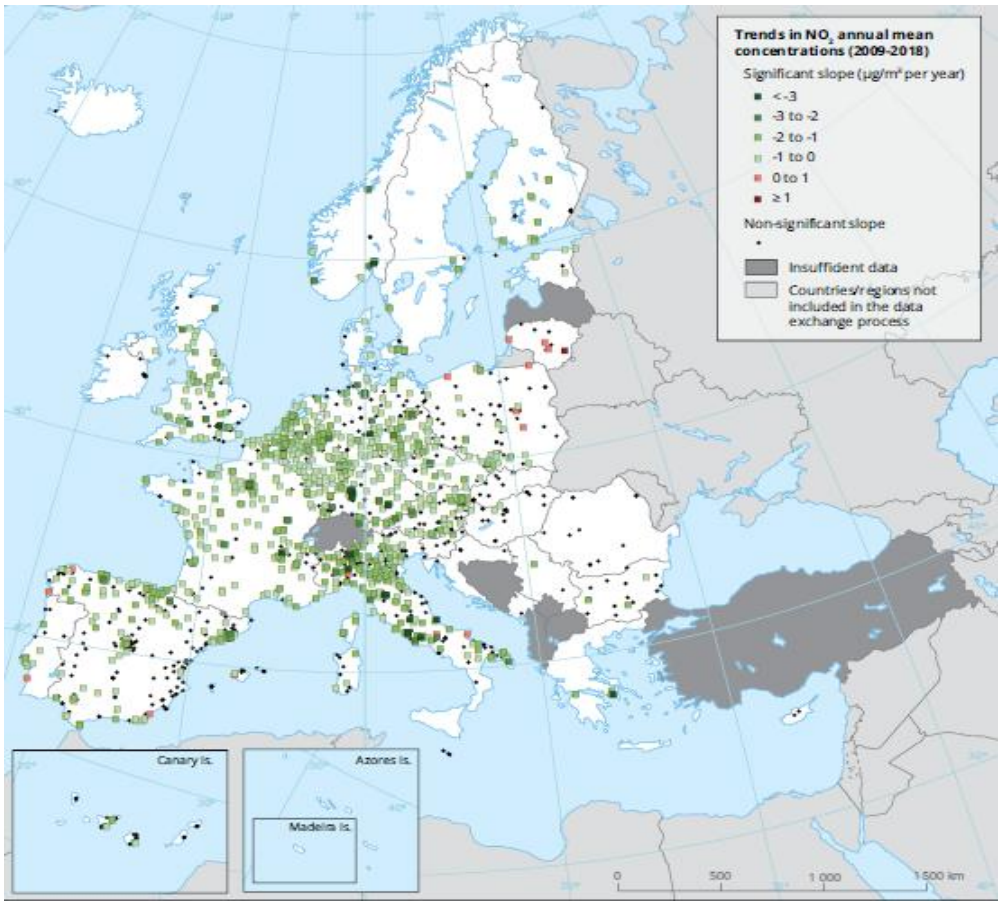
Το 2018, και οι 37 χώρες που υπέβαλαν στοιχεία παρείχαν δεδομένα NO_2, καλύπτοντας τουλάχιστον 75% κάλυψη δεδομένων από 3.411 σταθμούς για την ετήσια οριακή τιμή και 3.160 σταθμούς για την ωριαία οριακή τιμή, με το 32% να είναι σταθμοί κυκλοφορίας. Δεκαέξι κράτη μέλη της ΕΕ και τρεις άλλες χώρες κατέγραψαν συγκεντρώσεις πάνω από την ετήσια οριακή τιμή, με το 8% όλων των σταθμών που μετρούν το NO_2 να υπερβαίνει αυτό το όριο. Υψηλές συγκεντρώσεις, συμπεριλαμβανομένου του 95% των τιμών που υπερβαίνουν το ετήσιο όριο, παρατηρήθηκαν κυρίως σε σταθμούς κυκλοφορίας, με μόνο δύο σταθμούς αγροτικής κυκλοφορίας να παρουσιάζουν συγκεντρώσεις υψηλότερες από το όριο. Η κυκλοφορία των οχημάτων, μια σημαντική πηγή NO_2 και μονοξειδίου του αζώτου (NO), απαιτεί στοχευμένα μέτρα για τον μετριασμό των συγκεντρώσεων NO_2, εστιάζοντας συνήθως σε αστικές περιοχές. Το Βέλγιο και το Ηνωμένο Βασίλειο (ΗΒ) ανέφεραν μοντελοποιημένες υπερβάσεις της ετήσιας οριακής τιμής, με το Βέλγιο να αναφέρει 50 μg/m^3 και 57 μg/m^3 σε συγκεκριμένες ζώνες ποιότητας αέρα και το ΗΒ να εντοπίζει υπερβάσεις σε 27 ζώνες ποιότητας του αέρα, που κυμαίνονται από 42 μg/ m^3 έως 58 μg/m^3. Συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν την ωριαία οριακή τιμή παρατηρήθηκαν σε λιγότερο από το 1% των σταθμών αναφοράς το 2018, κυρίως σε αστικές περιοχές, με δύο εξαιρέσεις που βρέθηκαν σε σταθμούς αγροτικού περιβάλλοντος στην Ολλανδία και την Τουρκία [90].

Η ανάλυση τάσεων για την ίδια περίοδο δείχνει μια συνολική πτωτική τάση. Το Σχήμα 25 δείχνει τη χωρική κατανομή των τάσεων που υπολογίζονται για κάθε σταθμό. Περισσότεροι από τους μισούς σταθμούς έχουν σημαντική τάση (58%). Οι περισσότεροι σταθμοί με σημαντική τάση παρουσιάζουν πτωτική τάση. Από τους σταθμούς με μη σημαντικές τάσεις, το 21% εμφανίζει μέση αύξηση του ετήσιου μέσου όρου του NO_2. Οι κλίσεις τάσης, ανά τύπο σταθμού, για σημαντικές και μη σημαντικές τάσεις, εμφανίζονται στο Σχήμα 26 [90].

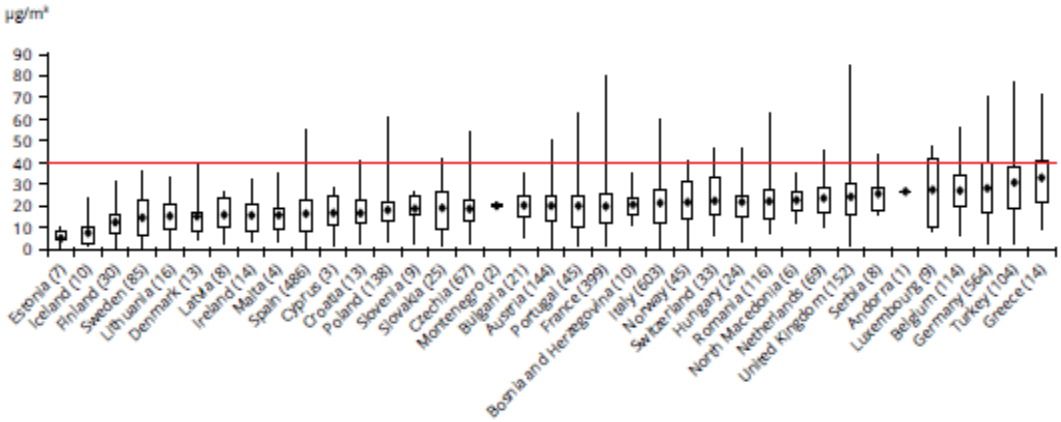
Η ανάλυση τάσεων για την περίοδο 2009-2018 δείχνει ότι η υψηλότερη μέση μείωση των συγκεντρώσεων NO_2 παρατηρήθηκε στους σταθμούς κυκλοφορίας, ακολουθούμενοι από τους περιαστικούς σταθμούς, ενώ η χαμηλότερη μείωση σημειώθηκε στους σταθμούς αγροτικού περιβάλλοντος. Ενώ στη Λιθουανία και την Ισλανδία σημειώθηκε μέση αύξηση στις συγκεντρώσεις NO_2 (0,22 μg/m^3 ετησίως, 10 σταθμοί και 0,26 μg/m^3 ετησίως, ένας σταθμός, αντίστοιχα), και καμία αλλαγή στην

Κροατία (τέσσερις σταθμοί), οι υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες δεν είχαν μεταβολή. Η υψηλότερη μέση μείωση σημειώθηκε στην Ελλάδα (-1,66 μg/m^3 ετησίως, τέσσερις σταθμοί), ακολουθούμενη από τη Νορβηγία (-1,60 μg/m^3 ετησίως, 18 σταθμοί), τη Σερβία (-1,34 μg/m^3 ετησίως, δύο σταθμούς), τη Σουηδία (-0,88 μg/m^3 ετησίως, 18 σταθμούς) και την Ιταλία (- 0,74 μg/m^3 ετησίως, 337 σταθμοί) [90].

Μια μελέτη αξιολόγησης τάσεων στην Ευρώπη για την περίοδο μεταξύ 2000 και 2017 δείχνει ότι η μέση ετήσια συγκέντρωση NO_2 έχει μειωθεί κατά 25 % στους περιαστικούς σταθμούς, κατά 28 % στους σταθμούς κυκλοφορίας και κατά 34 % σε βιομηχανικούς και αγροτικούς σταθμούς [93].



Σχήμα 25 Συγκεντρώσεις NO_2 στην Ευρώπη το 2018 [90].

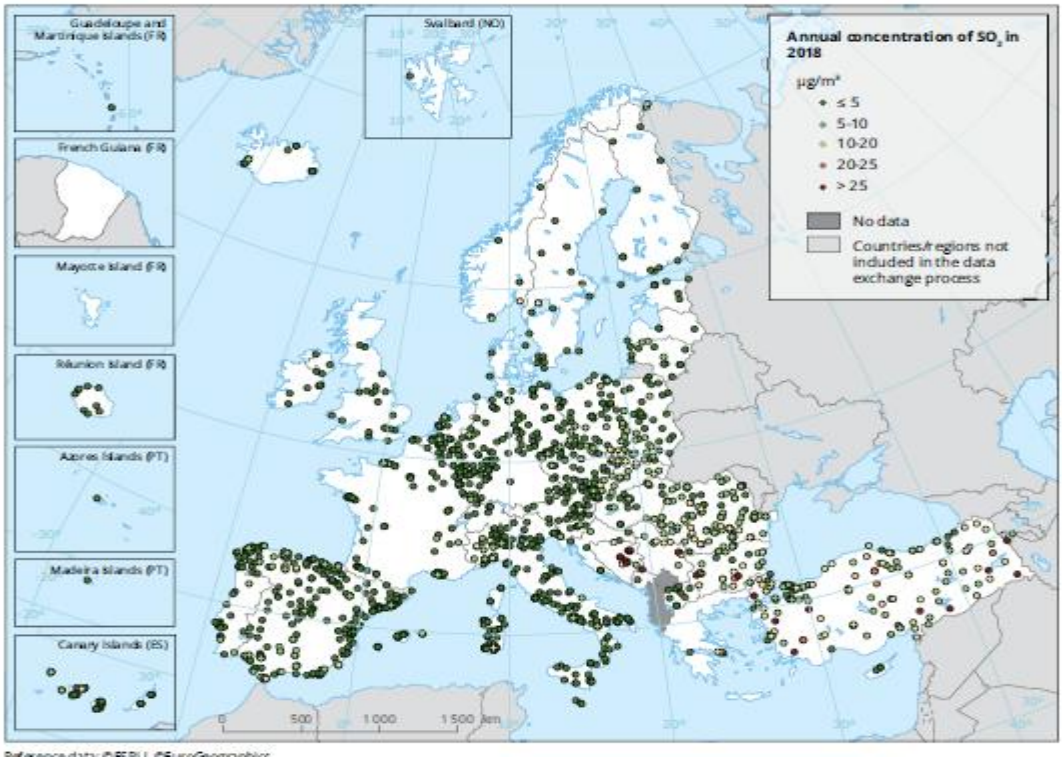


Σχήμα 26 Συγκεντρώσεις NO_2 σε σχέση με την ετήσια οριακή τιμή το 2018 και τον αριθμό των σταθμών που εξετάζονται για κάθε χώρα [90].

8.3.3 Διοξείδιο του θείου και μονοξείδιο του άνθρακα (SO_2 και CO)

Και οι 37 χώρες που αναφέρουν για το έτος 2018 παρείχαν μετρήσεις SO_2 με κάλυψη δεδομένων άνω του 75%, που συλλέγονται από 1.667 σταθμούς για την ωριαία οριακή τιμή και 1.666 σταθμούς για την ημερήσια οριακή τιμή. Γενικά, οι συγκεντρώσεις SO_2 παραμένουν κάτω από τις οριακές τιμές για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, αν και εξακολουθούν να υπάρχουν περιπτώσεις υπέρβασης του ημερήσιου μέσου όρου της ΠΟΥ [90].

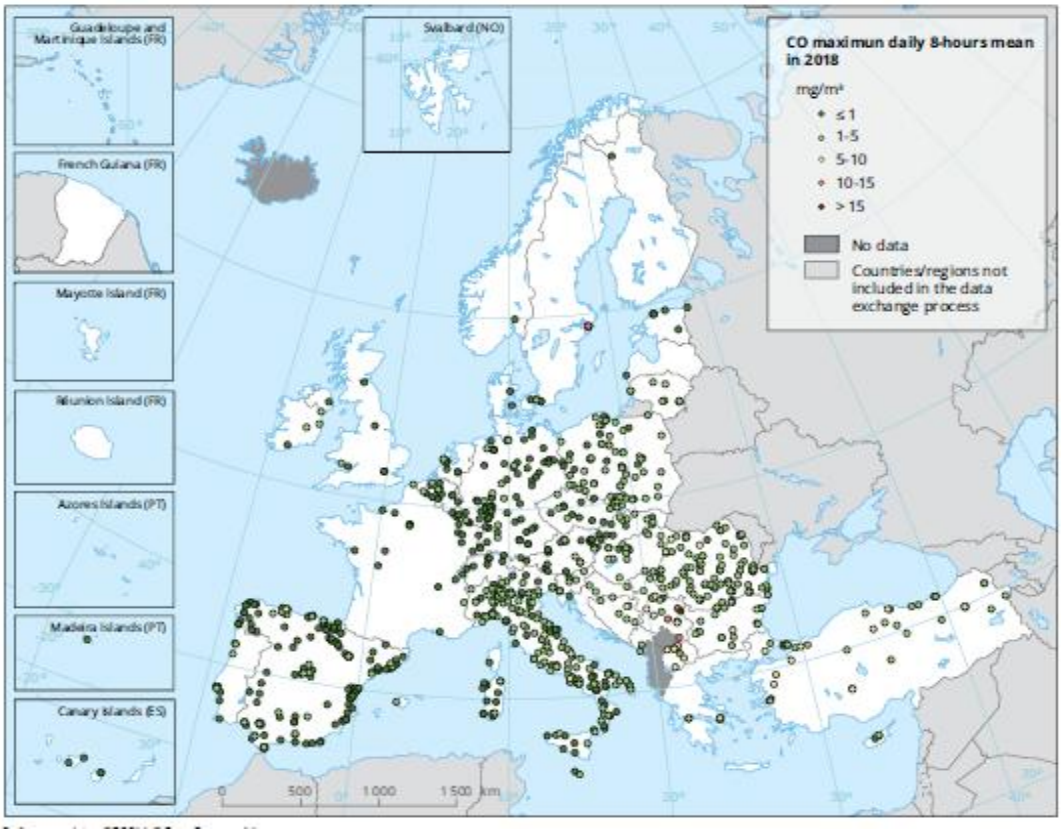
Το 2018, 13 σταθμοί κατέγραψαν συγκεντρώσεις που ξεπέρασαν την ωριαία οριακή τιμή, ενώ 16 σταθμοί υπερέβησαν την ημερήσια οριακή τιμή SO_2. Αντίθετα, το 33% όλων των σταθμών που ανέφεραν επίπεδα SO_2 μέτρησαν συγκεντρώσεις υψηλότερες από το όριο του ΠΟΥ των 20 µg/m^3 για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις το 2018. Αυτές οι μετρήσεις κατανεμήθηκαν σε 27 χώρες που αναφέρθηκαν. Το Σχήμα 27 απεικονίζει τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις SO_2 το 2018, προσφέροντας μια συγκριτική επισκόπηση της κατάστασης σε ολόκληρη την Ευρώπη. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις διάφορες συγκεντρώσεις SO_2 του 2018 μπορούν να διερευνηθούν μέσω του «Προβολή στατιστικών στοιχείων ποιότητας αέρα» του ΕΟΧ (ΕΟΧ, 2020h) [90].



Σχήμα 27 Ετήσιες συγκεντρώσεις SO_2 στην Ευρώπη το 2018 [90].

Το 2019, και οι 33 χώρες αναφοράς, εκτός από τη Σουηδία, παρείχαν μετρήσεις του SO_2 με κάλυψη δεδομένων άνω του 75% από 1.124 σταθμούς για την ωριαία οριακή τιμή και 1.116 σταθμούς για την ημερήσια οριακή τιμή. Ένας σταθμός στη Βουλγαρία κατέγραψε συγκεντρώσεις υψηλότερες από τις ωριαίες και ημερήσιες οριακές τιμές για το SO_2 το 2019. Αντίθετα, 318 (28%) από όλους τους σταθμούς που ανέφεραν επίπεδα SO_2, κατανεμημένοι σε 22 χώρες αναφοράς, κατέγραψαν συγκεντρώσεις SO_2 που ξεπερνούσαν το όριο του ΠΟΥ για ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις το 2019 [90].

Όσον αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα υψηλότερα επίπεδα ανιχνεύονται συνήθως σε αστικές περιοχές κατά τις ώρες αιχμής ή κατά τη διάρκεια του ανέμου από μεγάλες βιομηχανικές πηγές εκπομπών. Και οι 37 χώρες που αναφέρθηκαν για το έτος 2018, εκτός από την Ισλανδία, υπέβαλαν δεδομένα CO από 970 σταθμούς με έγκυρα στοιχεία άνω του 75%. Μόνο τέσσερις σταθμοί ανέφεραν συγκεντρώσεις που υπερέβαιναν την ημερήσια 8-ωρη οριακή τιμή CO που συνιστά ο ΠΟΥ το 2018: τρεις αστικοί σταθμοί στη Σερβία και ένας σταθμός αστικής κυκλοφορίας στη Σουηδία (Σχήμα 28) [90].



Σχήμα 28 Συγκεντρώσεις CO στην Ευρώπη το 2018 [90].

Όταν οι συγκεντρώσεις μειώνονται κάτω από το «κατώτερο όριο αξιολόγησης» (LAT), η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα βασίζεται σε μοντέλα ή αντικειμενικές εκτιμήσεις. Το 2018, το 96% των σταθμών κατέγραψε μέγιστες ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις CO 8 ωρών κάτω από το LAT των 5 mg/m^3, όπως απεικονίζεται από τις δύο πρώτες κατηγορίες έγχρωμων κουκκίδων στο Σχήμα 28 [90].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να εξετάσει και να αντιπαραβάλει την ποιότητα του αέρα της πόλης των Χανίων (Κρήτη, Ελλάδα) με διάφορες αστικές περιοχές στην Ελλάδα (Αθήνα και Θεσσαλονίκη) και στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στην αξιολόγηση των επιπέδων αέριας ρύπανσης, εξετάζοντας συγκεκριμένα ρύπους όπως NO_2, NO, CO, SO_2 και O_3 στα Χανιά Κρήτης (Ελλάδα) για το έτος 2022.

Σχετικά με την πόλη των Χανίων, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO ανιχνεύθηκαν το Φεβρουάριο και το Μάρτιο, φτάνοντας τα 14 μg/m^3, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα παρατηρήθηκαν τον Ιούνιο (4,88 μg/m^3) και τον Ιούλιο (5,27 μg/m^3). Έτσι, εντός της περιόδου της μελέτης, δεν καταγράφηκαν παραβιάσεις του NO αφενός λόγω των χαμηλών συγκεντρώσεων και αφετέρου λόγω της έλλειψης θεσμοθετημένων ανώτατων επιτρεπτών ορίων.

Η υψηλότερη μηνιαία συγκέντρωση CO σημειώθηκε τον Μάρτιο (0,52 mg/m^3), ενώ οι χαμηλότερη τον Ιούνιο (0,37 mg/m^3). Τα πρότυπα για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τους περιφερειακούς κανονισμούς για την ποιότητα του αέρα και τη διάρκεια της έκθεσης. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, η μέση συγκέντρωση CO για χρονικό διάστημα 1 ώρας δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 35 χιλιοστόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (mg/m³), ενώ ο μέσος όρος των 8 ωρών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mg/m³. Κατά συνέπεια, δεν σημειώθηκαν περιπτώσεις υπέρβασης ορίου κατά την περίοδο της μελέτης σχετικά με το CO.

Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση NO_2 καταγράφηκε τον Μάρτιο (29,9 μg/m^3), με τα χαμηλότερα επίπεδα να παρατηρούνται τον Απρίλιο (17,1 μg/m^3). Επιπλέον, τα βραχυπρόθεσμα όρια, όπως ωριαίοι ή ημερήσιοι μέσοι όροι, συχνά επιβάλλονται για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Δεν παρατηρήθηκαν παραβιάσεις αυτών των ορίων και του Ευρωπαϊκού ετήσιου ορίου για το NO_2 κατά την περίοδο της μελέτης. Αντίθετα παρατηρήθηκαν υπερβάσεις όσον αφορά το ετήσιο όριο που προτείνει ο ΠΟΥ [95].

Η υψηλότερη μηνιαία συγκέντρωση NOx παρατηρήθηκε τον Μάρτιο (27,8 μg/m^3), με τα χαμηλότερα επίπεδα να σημειώνονται τον Απρίλιο (13,3 μg/m^3). Τα NO_x περιλαμβάνουν διάφορα οξείδια του αζώτου, συμπεριλαμβανομένων των NO_2 και NO, και τα επιτρεπτά όρια εκφράζονται τυπικά ως το άθροισμα των συγκεντρώσεων NO_2

και NO. Δεν σημειώθηκαν παραβιάσεις αυτών των ορίων κατά την περίοδο της μελέτης όσον αφορά τα NO_x.

Όσον αφορά το O_3, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν τον Ιούλιο (109,8 μg/m^3), ενώ οι χαμηλότερες τον Φεβρουάριο (70,3 μg/m^3). Τα πρότυπα για το όζον καθορίζονται τόσο από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία όσο και από περιβαλλοντικούς φορείς και μπορεί να διαφέρουν με βάση τους περιφερειακούς κανονισμούς για την ποιότητα του αέρα. Συνεπώς, κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, σημειώθηκε υπέρβαση των ορίων εντός της περιόδου μελέτης για το O_3 όσον αφορά το προτεινόμενο όριο του ΠΟΥ.

Τέλος, η ελάχιστη μηνιαία συγκέντρωση του SO_2 παρατηρήθηκε τον Ιούνιο (3,1 μg/m^3), με τα υψηλότερα επίπεδα να καταγράφονται το Μάρτιο (5,4 μg/m^3). Τα πρότυπα για το διοξείδιο του θείου καθορίζονται τόσο από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία όσο και από περιβαλλοντικούς φορείς και ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τους περιφερειακούς κανονισμούς για την ποιότητα του αέρα. Δεν παρατηρήθηκαν παραβιάσεις αυτών των ορίων κατά την περίοδο μελέτης για το SO_2.

Σχετικά με την Αθήνα, η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση CO καταγράφηκε το Δεκέμβριο (1,60 mg/m^3), ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα σημειώθηκαν τον Ιούλιο (0,72 mg/m^3). Ως αποτέλεσμα, δεν υπήρξαν περιπτώσεις υπερβάσεων του ορίου CO καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης (ΕΕ και ΠΟΥ ημερήσιο 8-ωρο όριο < 10 mg/m³).

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις SO_2 σημειώθηκαν τον Ιούνιο και το Δεκέμβριο (9,0 μg/m^3), σε αντίθεση με τα χαμηλότερα επίπεδα που παρατηρήθηκαν από το Φεβρουάριο έως τον Απρίλιο (4,0 μg/m^3). Κατά συνέπεια, δεν υπήρξαν παραβιάσεις των ορίων SO_2 κατά την περίοδο της μελέτης (ΠΟΥ ημερήσιο όριο < 20 mg/m³ και Ευρωπαϊκό ημερήσιο όριο < 120 mg/m³).

Τα επίπεδα O_3 κορυφώθηκαν μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου, ξεπερνώντας τα 100 μg/m^3, ενώ τα κατώτατα επίπεδα παρατηρήθηκαν μεταξύ Νοεμβρίου και Ιανουαρίου, με περίπου 50 μg/m^3. Έτσι, οι υπερβάσεις του ορίου O_3 ήταν εμφανείς κατά τους θερινούς μήνες καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης όσον αφορά το συνιστώμενο όριο του ΠΟΥ (όριο < 100 μg/m³), ενώ βρίσκονται στο ανώτατο επιτρεπτό όριο με βάση την Ευρωπαϊκή νομοθεσία (όριο < 120 μg/m³).

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις NO_2 καταγράφηκαν μεταξύ Μαΐου και Ιουνίου, που ξεπέρασαν τα 80 μg/m^3, ενώ τα ελάχιστα επίπεδα εντοπίστηκαν τον Ιανουάριο και τον Οκτώβριο, περίπου 55 μg/m^3. Αυτό δείχνει ότι οι υπερβάσεις του ορίου NO_2 παρέμειναν καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης (ΕΕ ετήσιο όριο < 40 μg/m³).

Οι συγκεντρώσεις NO κορυφώθηκαν από τον Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο, ξεπερνώντας τα 80 μg/m^3, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα καταγράφηκαν τον Ιούνιο και τον Αύγουστο, περίπου 40 μg/m^3. Παρατηρήθηκαν παρόμοιες αυξομειώσεις με το NO_2 χωρίς υπερβάσεις λόγω έλλειψης νομοθετημένου ορίου.

Σχετικά με τη Θεσσαλονίκη, τα μέγιστα επίπεδα NO_2 τεκμηριώθηκαν τον Ιανουάριο, το Μάιο, τον Ιούλιο και το Δεκέμβριο, που ξεπέρασαν τα 80 μg/m^3, ενώ οι χαμηλότερες μηνιαίες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ Αυγούστου και Οκτωβρίου, κυμαινόμενες γύρω στα 55 μg/m^3. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου της μελέτης, οι συγκεντρώσεις NO_2 υπερέβαιναν σταθερά το προβλεπόμενο Ευρωπαϊκό ετήσιο όριο των 40 μg/m^3.

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρήθηκαν τους καλοκαιρινούς μήνες μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου, εκτός από τον Ιούλιο, ξεπερνώντας τα 90 μg/m^3, με τα χαμηλότερα επίπεδα να καταγράφονται μεταξύ Νοεμβρίου και Ιανουαρίου, περίπου 40 μg/m^3. Δεν σημειώθηκαν υπερβάσεις του μέγιστου ημερήσιου ορίου O_3 που συνιστά ο ΠΟΥ (< 100 μg/m^3) κατά τη διάρκεια του χρονικού πλαισίου της μελέτης.

Η υψηλότερη μηνιαία συγκέντρωση CO καταγράφηκε τον Απρίλιο, φθάνοντας τα 0,67 mg/m^3, ενώ τα χαμηλότερα επίπεδα παρατηρήθηκαν το Φεβρουάριο και τον Οκτώβριο, στα 0,35 mg/m^3. Συνεπώς, δεν υπήρξαν περιπτώσεις υπερβάσεων του ορίου CO (ΕΕ και ΠΟΥ ημερήσιο όριο <10 mg/m^3 - 8-ωρών) καθ' όλη την περίοδο της μελέτης.

Γενικότερα στις Ευρωπαϊκές χώρες επισημαίνονται σημαντικές υπερβάσεις των τιμών - στόχων για το O_3, ιδιαίτερα στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη. Οι μετεωρολογικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των αυξημένων θερμοκρασιών, διευκόλυναν τον αυξημένο σχηματισμό O_3, οδηγώντας σε αξιοσημείωτες αιχμές συγκέντρωσης, ειδικά στην Κεντρική Ευρώπη. Η Υπηρεσία Παρακολούθησης Ατμόσφαιρας Copernicus εντόπισε ένα σοβαρό επεισόδιο O_3 από τα τέλη Ιουλίου έως τις αρχές Αυγούστου, που αποδόθηκε κυρίως σε κυκλοφοριακές και βιομηχανικές εκπομπές. Η ανάλυση των τάσεων της συγκέντρωσης του O_3 από το 2000 έως το 2018 αποκαλύπτει διακυμάνσεις, με αξιοσημείωτες αυξήσεις σε ορισμένες περιοχές και μειώσεις σε άλλες. Επιπλέον, οι μειώσεις εκπομπών NO_X και NMVOC συνέβαλαν στον μειωμένο σχηματισμό O_3. Η ανάλυση τάσεων για την περίοδο 2009-2018 δείχνει ποικίλες τάσεις μεταξύ των τύπων σταθμών και των χωρών, με ορισμένους να παρουσιάζουν σημαντικές ανοδικές ή καθοδικές τάσεις. Συνολικά, η έκθεση υπογραμμίζει την ευρεία κάλυψη των δεδομένων NO_2 το έτος 2018, με πολλούς

σταθμούς να υπερβαίνουν τις ετήσιες οριακές τιμές, δίνοντας έμφαση στη συνεχιζόμενη πρόκληση της διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρώπη. Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις NO_2, που παρατηρούνται κυρίως σε σταθμούς κυκλοφορίας, απαιτούν στοχευμένα μέτρα για την αντιμετώπιση των εκπομπών NO_2, με την κυκλοφορία οχημάτων να είναι ο κύριος παράγοντας. Το Βέλγιο και το Ηνωμένο Βασίλειο ανέφεραν υπερβάσεις της ετήσιας οριακής τιμής, με τις συγκεντρώσεις να ποικίλουν μεταξύ των ζωνών ποιότητας του αέρα. Οι υπερβάσεις της ωριαίας οριακής τιμής ήταν ελάχιστες, κυρίως σε αστικές περιοχές, με σπάνιες περιπτώσεις σε αγροτικούς σταθμούς. Η ανάλυση τάσεων από το 2009 έως το 2018 αποκαλύπτει μια συνολική πτωτική τάση στις συγκεντρώσεις NO_2, με σημαντικές μειώσεις να παρατηρούνται σε αστικούς – κυκλοφορίας σταθμούς και στους προαστιακούς σταθμούς. Ωστόσο, οι τιμές του ρύπου στη Λιθουανία και στην Ισλανδία παρουσίασαν άνοδο, ενώ στην Κροατία παρέμειναν αμετάβλητες [90].

Σε ευρύτερη κλίμακα, μια ευρωπαϊκή μελέτη αξιολόγησης τάσεων που εκτείνεται από το 2000 έως το 2017 καταδεικνύει μείωση στις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις NO_2 σε διάφορους τύπους σταθμών, υποδεικνύοντας πρόοδο στο μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το 2018, και οι 37 χώρες που υπέβαλαν έκθεση, παρείχαν ολοκληρωμένες μετρήσεις SO_2, που συλλέχθηκαν από περισσότερους από 1.600 σταθμούς, ξεπερνώντας το όριο κάλυψης δεδομένων κατά 75%. Αν και οι συγκεντρώσεις SO_2 παραμένουν γενικά κάτω από τα όρια προστασίας της υγείας, σημειώθηκαν περιπτώσεις υπέρβασης του ημερήσιου ορίου του ΠΟΥ. Δεκατρείς σταθμοί ξεπέρασαν το ωριαίο όριο και 16 ξεπέρασαν το ημερήσιο όριο για SO_2 το 2018, με το 33% των σταθμών σε 27 χώρες να μετρούν συγκεντρώσεις υψηλότερες από τις οδηγίες του ΠΟΥ. Επιπλέον, το 2019, ένας βουλγαρικός σταθμός υπερέβη τόσο τα ωριαία όσο και τα ημερήσια όρια SO_2, ενώ 318 σταθμοί από 22 χώρες υπερέβησαν τις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για ημερήσιους μέσους όρους. Όσον αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οι αστικές περιοχές παρουσιάζουν συνήθως τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, κυρίως λόγω της κυκλοφορίας και των βιομηχανικών εκπομπών. Το 2018, δεδομένα μετρήσεων του CO από 970 σταθμούς αναφέρθηκαν από όλες τις χώρες εκτός από την Ισλανδία, με μόνο λίγους σταθμούς να καταγράφουν συγκεντρώσεις που ξεπερνούν τα όρια υγείας του ΠΟΥ [90].

Πρόσθετες ερευνητικές προσπάθειες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην ακριβή οριοθέτηση των πηγών εκπομπής σε κάθε πόλη για να διευκολυνθεί ο περιορισμός των ρύπων τους εντός των δημοτικών ορίων. Ταυτόχρονα, είναι επιτακτική η αναγνώριση

των πηγών ρύπανσης που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα και σε γειτονικές χώρες, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η ρύθμιση των εκπομπών και η επιβολή κυρώσεων σε χώρες που δεν τηρούν την ισχύουσα περιβαλλοντική νομοθεσία, συμβάλλοντας έτσι στη διασυνοριακή ρύπανση. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των ερευνητικών ευρημάτων με μετεωρολογικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων βροχόπτωσης, της υγρασίας και των ανέμων, θα ενίσχυε την κατανόησή μας για τους παράγοντες που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση τόσο στα αστικά κέντρα της ΕΕ όσο και εκτός ΕΕ, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη προοπτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] H. Akimoto, (2003). «Global Air Quality and Pollution», *Science (80).*, vol. 302, no. 5651, pp. 1716–1719. [online]. Διαθέσιμο από: doi: 10.1126/science.1092666 [προσβάσιμο στις 25 Ιουνίου 2024].

[2] J. Baldasano, E. Valera, and P. Jimenez, (2003). «Air quality data from large cities», *Sci. Total Environ.*, vol. 307, no. 1–3, pp. 141–165. doi: 10.1016/S0048-9697(02)00537-5.

[3] A. J. Haagen-Smit, E. F. Darley, M. Zaitlin, H. Hull, and W. Noble, (1952). «Investigation on Injury to Plants from Air Pollution in the Los Angeles Area», *Plant Physiol.*, vol. 27, no. 1, pp. 18–34. doi: 10.1104/pp.27.1.18.

[4] F. Ravetta, G. Ancellet, J. Kowol-Santen, R. Wilson, and D. Nedeljkovic, (1999). «Ozone, Temperature, and Wind Field Measurements in a Tropopause Fold: Comparison with a Mesoscale Model Simulation», *Mon. Weather Rev.*, vol. 127, no. 11, pp. 2641–2653.doi: 10.1175/1520-0493(1999)127<2641:OTAWFM>2.0.CO;2.

[5] F. A. A. M. de Leeuw, N. Moussiopoulos, P. Sahm, and A. Bartonova, (2001). «Urban air quality in larger conurbations in the European Union», *Environ. Model. Softw.*, vol. 16, no. 4, pp. 399–414.doi: 10.1016/S1364-8152(01)00007-X.

[6] F. Moore, (2009). «Climate Change and Air Pollution: Exploring the Synergies and Potential for Mitigation in Industrializing Countries», *Sustainability*, vol. 1, no. 1, pp. 43–54.doi: 10.3390/su1010043.

[7] I. C. Eze *et al.*, (2014). «Long-term air pollution exposure and diabetes in a population-based Swiss cohort», *Environ. Int.*, vol. 70, pp. 95–105.doi: 10.1016/j.envint.2014.05.014.

[8] R. Kelishadi and P. Poursafa, (2010). «Air pollution and non-respiratory health hazards for children», *Arch. Med. Sci.*, vol. 4, pp. 483–495.doi: 10.5114/aoms.2010.14458.

[9] D. Hashim and P. Boffetta, (2014). «Occupational and Environmental Exposures and Cancers in Developing Countries», *Ann. Glob. Heal.*, vol. 80, no. 5, p. 393.doi: 10.1016/j.aogh.2014.10.002.

[10] M. S. Burroughs Peña and A. Rollins, (2017). «Environmental Exposures and Cardiovascular Disease», *Cardiol. Clin.*, vol. 35, no. 1, pp. 71–86.doi:

10.1016/j.ccl.2016.09.001.

[11] D. P. Singh, R. Gadi, T. K. Mandal, T. Saud, M. Saxena, and S. K. Sharma, (2013). «Emissions estimates of PAH from biomass fuels used in rural sector of Indo-Gangetic Plains of India», *Atmos. Environ.*, vol. 68, pp. 120–126.doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.11.042.

[12] N. Bruce, (2008). «Indoor air pollution from unprocessed solid fuel use and pneumonia risk in children aged under five years: a systematic review and meta-analysis», *Bull. World Health Organ.*, vol. 86, no. 5, pp. 390–398.doi: 10.2471/BLT.07.044529.

[13] D. W. Dockery *et al.*, (1993). «An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities», *N. Engl. J. Med.*, vol. 329, no. 24, pp. 1753–1759.doi: 10.1056/NEJM199312093292401.

[14] P. A. Kassomenos, A. Kelessis, M. Petrakakis, N. Zoumakis, T. Christidis, and A. K. Paschalidou, (2012). «Air quality assessment in a heavily polluted urban Mediterranean environment through air quality indices», *Ecol. Indic.*, vol. 18, pp. 259–268.doi: 10.1016/j.ecolind.2011.11.021.

[15] R. K. Pathak, T. Wang, K. F. Ho, and S. C. Lee, (2011). «Characteristics of summertime PM2.5 organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC)», *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 318–325.doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.10.021.

[16] R. Gibson and S. Ward, (2009). «Parties in the digital age – A Review Article», *Representation*, vol. 45, no. 1, pp. 87–100.doi: 10.1080/00344890802710888.

[17] L. Möller, D. Schuetzle, and H. Autrup, (1994). «Future research needs associated with the assessment of potential human health risks from exposure to toxic ambient air pollutants», *Environ. Health Perspect.*, vol. 102, no. Suppl 4, pp. 193–210.doi: 10.1289/ehp.94102s4193.

[18] F. M. Shah, (2019). «Å lære fra fiksjon», *Agora*, vol. 37, no. 1, pp. 190–196.doi: 10.18261/ISSN1500-1571-2019-01-16.

[19] J. Liu *et al.*, (2016). «Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 113, no. 28, pp. 7756–7761.doi: 10.1073/pnas.1604537113.

[20] Y. Wang, M. Sun, X. Yang, and X. Yuan, (2016). «Public awareness and willingness to pay for tackling smog pollution in China: a case study», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 1627–1634.doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.135.

[21] E. Malchrowicz-Mośko, Z. Botiková, and J. Poczta, (2019). “Because We Don’t Want to Run in Smog”: Problems with the Sustainable Management of Sport Event Tourism in Protected Areas (A Case Study of National Parks in Poland and Slovakia)», *Sustainability*, vol. 11, no. 2, p. 325.doi: 10.3390/su11020325.

[22] W. Raza *et al.*, (2021). «A review on the deteriorating situation of smog and its preventive measures in Pakistan», *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123676.doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123676.

[23] J. S. Gaffney, N. A. Marley, and J. E. Frederick, (2009). «Formation and effects of smog. Environmental and Ecological Chemistry; Sabljic, A., Ed.; Eolss Publishers Co., Ltd.: Oxford, UK», vol. 2,

[24] J. Czerwińska, G. Wielgosiński, and O. Szymańska, (2019). «Is the Polish Smog a New Type of Smog?», *Ecol. Chem. Eng. S*, vol. 26, no. 3, pp. 465–474.doi: 10.1515/eces-2019-0035.

[25] D. Kryzia and M. Pepłowska, (2019). «The impact of measures aimed at reducing low-stack emission in Poland and on energy efficiency and the household emission of pollutants.», *Polityka Energ. Policy J.*, pp. 121–132.

[26] A. J. Haagen-Smit, (1952). «Chemistry and physiology of Los Angeles smog», *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, no. 6, pp. 1342–1346.

[27] J. S. Gaffney and N. A. Marley, (2003). «Atmospheric Chemistry and Air Pollution», *Sci. World J.*, vol. 3, pp. 199–234.doi: 10.1100/tsw.2003.18.

[28] F. E. Blacet, (1952). «Photochemistry in the Lower Atmosphere», *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, no. 6, pp. 1339–1342.doi: 10.1021/ie50510a044.

[29] T.-M. Fu and H. Tian, (2019). «Climate Change Penalty to Ozone Air Quality: Review of Current Understandings and Knowledge Gaps», *Curr. Pollut. Reports*, vol. 5, no. 3, pp. 159–171.doi: 10.1007/s40726-019-00115-6.

[30] O. M. Lozano *et al.*, (2017). «Assessing Climate Change Impacts on Wildfire Exposure in Mediterranean Areas», *Risk Anal.*, vol. 37, no. 10, pp. 1898–1916.doi: 10.1111/risa.12739.

[31] J. Mülmenstädt and G. Feingold, (2018). «The Radiative Forcing of Aerosol–Cloud Interactions in Liquid Clouds: Wrestling and Embracing Uncertainty», *Curr. Clim. Chang. Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 23–40.doi: 10.1007/s40641-018-0089-y.

[32] J. Dupuy *et al.*, (2020). «Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: a review», *Ann. For. Sci.*, vol. 77, no. 2, p. 35.doi:

10.1007/s13595-020-00933-5.

[33] Ø. Hodnebrog *et al.*, (2012). «Impact of forest fires, biogenic emissions and high temperatures on the elevated Eastern Mediterranean ozone levels during the hot summer of 2007», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, no. 18, pp. 8727–8750.doi: 10.5194/acp-12-8727-2012.

[34] S. Pfahl and H. Wernli, (2012). «Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 39, no. 12.doi: 10.1029/2012GL052261.

[35] N. Schaller, J. Sillmann, J. Anstey, E. M. Fischer, C. M. Grams, and S. Russo, (2018). «Influence of blocking on Northern European and Western Russian heatwaves in large climate model ensembles», *Environ. Res. Lett.*, vol. 13, no. 5, p. 054015.doi: 10.1088/1748-9326/aaba55.

[36] S. Russo *et al.*, (2014). «Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world», *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 119, no. 22.doi: 10.1002/2014JD022098.

[37] M. Sofiev, T. Ermakova, and R. Vankevich, (2012). «Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 12, no. 4, pp. 1995–2006.doi: 10.5194/acp-12-1995-2012.

[38] X. Jiang *et al.*, (2018). «Isoprene emission response to drought and the impact on global atmospheric chemistry», *Atmos. Environ.*, vol. 183, pp. 69–83.doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.01.026.

[39] H. Ahmad *et al.*, (2022). «Impact of Pre-Anthesis Drought Stress on Physiology, Yield-Related Traits, and Drought-Responsive Genes in Green Super Rice», *Front. Genet.*, vol. 13.doi: 10.3389/fgene.2022.832542.

[40] A. Colette *et al.*, (2015). «Is the ozone climate penalty robust in Europe?», *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 8, p. 084015.doi: 10.1088/1748-9326/10/8/084015.

[41] A. Fortems-Cheiney *et al.*, (2017). «A 3 °C global RCP8.5 emission trajectory cancels benefits of European emission reductions on air quality», *Nat. Commun.*, vol. 8, no. 1, p. 89.doi: 10.1038/s41467-017-00075-9.

[42] P. Zanis *et al.*, (2022). «Climate change penalty and benefit on surface ozone: a global perspective based on CMIP6 earth system models», *Environ. Res. Lett.*, vol. 17, no. 2, p. 024014.doi: 10.1088/1748-9326/ac4a34.

[43] R. Leimu, P. Vergeer, F. Angeloni, and N. J. Ouborg, (2010). «Habitat fragmentation, climate change, and inbreeding in plants», *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1195, no. 1, pp. 84–98.doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05450.x.

[44] T.-H. Kim, M. Böhmer, H. Hu, N. Nishimura, and J. I. Schroeder, (2010). «Guard Cell Signal Transduction Network: Advances in Understanding Abscisic Acid, CO 2 , and Ca 2+ Signaling», *Annu. Rev. Plant Biol.*, vol. 61, no. 1, pp. 561–591.doi: 10.1146/annurev-arplant-042809-112226.

[45] X. Zhao *et al.*, (2019). «Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production», *Sci. Total Environ.*, vol. 649, pp. 1299–1306.doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.392.

[46] D. Kumar, A. K. Singh, V. Kumar, R. Poyoja, A. Ghosh, and B. Singh, (2021). «COVID-19 driven changes in the air quality; a study of major cities in the Indian state of Uttar Pradesh», *Environ. Pollut.*, vol. 274, p. 116512.doi: 10.1016/j.envpol.2021.116512.

[47] A. Maity, M. Pal, G. D. Banik, S. Maithani, and M. Pradhan, (2017). «Cavity ring-down spectroscopy using an EC-QCL operating at 7.5 μ m for direct monitoring of methane isotopes in air», *Laser Phys. Lett.*, vol. 14, no. 11, p. 115701.doi: 10.1088/1612-202X/aa8584.

[48] R. Xu *et al.*, (2020). «Wildfires, Global Climate Change, and Human Health», *N. Engl. J. Med.*, vol. 383, no. 22, pp. 2173–2181.doi: 10.1056/NEJMsr2028985.

[49] D. C. Uprety and P. Saxena, (2021). «Technologies for Green House Gas Assessment in Crop Studies», Springer Singapore, Singapore.doi: 10.1007/978-981-16-0204-7.

[50] A. Vishwakarma, A. Kumari, L. A. J. Mur, and K. J. Gupta, (2018). «A discrete role for alternative oxidase under hypoxia to increase nitric oxide and drive energy production», *Free Radic. Biol. Med.*, vol. 122, pp. 40–51.doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.045.

[51] Y. Zhu *et al.*, (2020). «Spatial and temporal representativeness of point measurements for nitrogen dioxide pollution levels in cities», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 21, pp. 13241–13251.doi: 10.5194/acp-20-13241-2020.

[52] T. A. Mansfield, M. E. Whitmore, and R. M. Law, (1982). «Effects of Nitrogen Oxides on Plants: Two Case Studies», pp. 511–520.doi: 10.1016/B978-0-444-42127-2.50051-8.

[53] Y. Hou *et al.*, (2018). «Changes in nitrogen and phosphorus flows and losses in

agricultural systems of three megacities of China, 1990–2014», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 139, pp. 64–75.doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.030.

[54] P. D. Berens and N. S. Bryan, (2011). «Nitrite and Nitrate in Human Breast Milk: Implications for Development», in *Nitrite and Nitrate in Human Health and Disease*, Humana Press, Totowa, NJ, pp. 139–153.doi: 10.1007/978-1-60761-616-0_9.

[55] J. X. Warner, R. R. Dickerson, Z. Wei, L. L. Strow, Y. Wang, and Q. Liang, (2017). «Increased atmospheric ammonia over the world's major agricultural areas detected from space», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 44, no. 6, pp. 2875–2884.doi: 10.1002/2016GL072305.

[56] H. Tian *et al.*, (2023). «Global Nitrous Oxide Budget 1980–2020.», *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, pp. 1–98.doi: https://doi.org/10.5194/essd-2023-401.

[57] R. L. Thompson *et al.*, (2019). «Acceleration of global N2O emissions seen from two decades of atmospheric inversion», *Nat. Clim. Chang.*, vol. 9, no. 12, pp. 993–998.doi: 10.1038/s41558-019-0613-7.

[58] D. Coskun, D. T. Britto, W. Shi, and H. J. Kronzucker, (2017). «Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition», *Nat. Plants*, vol. 3, no. 6, p. 17074.doi: 10.1038/nplants.2017.74.

[59] R. W. Portmann, J. S. Daniel, and A. R. Ravishankara, (2012). «Stratospheric ozone depletion due to nitrous oxide: influences of other gases», *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 367, no. 1593, pp. 1256–1264.doi: 10.1098/rstb.2011.0377.

[60] R. S. Kovats and L. E. Kristie, (2006). «Heatwaves and public health in Europe», *Eur. J. Public Health*, vol. 16, no. 6, pp. 592–599.doi: 10.1093/eurpub/ckl049.

[61] W. E. Wilson and H. H. Suh, (1997). «Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies», *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 47, no. 12, pp. 1238–1249.doi: 10.1080/10473289.1997.10464074.

[62] EPA USA, (2018). « Particulate Matter (PM) Basics ». Available at «https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics» [accessed Sep. 22, 2018].

[63] L. Zhang *et al.*, (2019). «Short-term and long-term effects of PM2.5 on acute nasopharyngitis in 10 communities of Guangdong, China», *Sci. Total Environ.*, vol. 688, pp. 136–142.doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.470.

[64] K. Cheung *et al.*, (2011). «Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient coarse particulate matter (PM10–2.5) in the Los Angeles area», *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 16, pp. 2651–2662.doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.066.

[65] V. Villanyi, B. Turk, F. Batic, and Z. Csintal, (2010). «Ozone Pollution and its Bioindication», in *Air Pollution*, Sciyo.doi: 10.5772/10047.

[66] G. Lorenzini and C. Saitanis, (2003). «Ozone: A Novel Plant "Pathogen"», in *Abiotic Stresses in Plants*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 205–229.doi: 10.1007/978-94-017-0255-3_8.

[67] S. Fares *et al.*, (2013). «Tropospheric ozone reduces carbon assimilation in trees: estimates from analysis of continuous flux measurements», *Glob. Chang. Biol.*, vol. 19, no. 8, pp. 2427–2443.doi: 10.1111/gcb.12222.

[68] J. J. Thiele, M. G. Traber, K. Tsang, C. E. Cross, and L. Packer, (1997). «In Vivo Exposure to Ozone Depletes Vitamins C and E and Induces Lipid Peroxidation in Epidermal Layers of Murine Skin», *Free Radic. Biol. Med.*, vol. 23, no. 3, pp. 385–391.doi: 10.1016/S0891-5849(96)00617-X.

[69] M. Lippmann, (1989). «Health effects of ozone A Critical Review», *JAPCA*, vol. 39, no. 5, pp. 672–695.doi: 10.1080/08940630.1989.10466554.

[70] A. Gryparis *et al.*, (2004). «Acute Effects of Ozone on Mortality from the "Air Pollution and Health», *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 170, no. 10, pp. 1080–1087.doi: 10.1164/rccm.200403-333OC.

[71] S. Singh and R. Kumar, (2022). «Air Pollution and Its Associated Impacts on Atmosphere and Biota Health», pp. 29–58.doi: 10.1007/978-981-16-7727-4_3.

[72] W. Soon, S. L. Baliunas, A. B. Robinson, and Z. W. Robinson, (1999). «Environmental Effects of Increased Atmospheric Carbon Dioxide», *Energy Environ.*, vol. 10, no. 5, pp. 439–468.doi: 10.1260/0958305991499694.

[73] EPA USA, (2018). «Table of Historical SO2 NAAQS, Sulfur US EPA.». Available at «https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/so2/s_so2_history.html» [accessed Oct. 05, 2019].

[74] European Environment Agency, (2023). «Sulphur dioxide - Annual limit value for the protection of ecosystems». Available at «https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/sulphur-dioxide-annual-limit-value-for-the-protection-of-ecosystems»

[75] T.-M. Chen, W. G. Kuschner, J. Gokhale, and S. Shofer, (2007). «Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects», *Am. J. Med. Sci.*, vol. 333, no. 4, pp. 249–256.doi: 10.1097/MAJ.0b013e31803b900f.

[76] A.-M. J. Pruss-Ustun A, Fewrell L, Landrigan PJ, Ayuso-Mateos JL.Pruss-Ustun A, Fewrell L, Landrigan PJ, ((2020).).«Lead exposure. Comparative Quantification of Health Risks.». [Online]. Available: https://www.who.int/publications/cra/chapters/volume2/1495-1542.pdf?ua=1

[77] R. A. Goyer, (1990). «Transplacental transport of lead.», *Environ. Health Perspect.*, vol. 89, pp. 101–105.doi: 10.1289/ehp.9089101.

[78] H. I. Abdel-Shafy and M. S. M. Mansour, (2016). «A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation», *Egypt. J. Pet.*, vol. 25, no. 1, pp. 107–123.doi: 10.1016/j.ejpe.2015.03.011.

[79] L. Molhave *et al.*, (1997). «Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations*», *Indoor Air*, vol. 7, no. 4, pp. 225–240.doi: 10.1111/j.1600-0668.1997.00002.x.

[80] WHO, (2019). «WHO (World Health Organization). Dioxins and Their Effects on Human Health.». Available at «https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health» [προσβάσιμο στις 25 Ιουνίου 2024].

[81] Π. Ζάνης, (2014). «Σημειώσεις για την ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, [online], Διαθέσιμο στο:users.auth.gr»,

[82] Μ. Λαζαρίδης, (2010). «Ατμοσφαιρική Ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας, Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα»,

[83] U. Schlink *et al.*, (2003). «A rigorous inter-comparison of ground-level ozone predictions», *Atmos. Environ.*, vol. 37, no. 23, pp. 3237–3253.doi: 10.1016/S1352-2310(03)00330-3.

[84] J. Zhong *et al.*, (2017). «Relative contributions of boundary-layer meteorological factors to the explosive growth of PM2.5 during the red-alert heavy pollution episodes in Beijing in December 2016», *J. Meteorol. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 809–819.doi: 10.1007/s13351-017-7088-0.

[85] A. P. Sati and M. Mohan, (2014). «Analysis of air pollution during a severe smog

episode of November 2012 and the Diwali Festival over Delhi, India», *Int. J. Remote Sens.*, vol. 35, no. 19, pp. 6940–6954.doi: 10.1080/01431161.2014.960618.

[86] Q. H. Zhang, J. P. Zhang, and H. W. Xue, (2010). «The challenge of improving visibility in Beijing», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 10, no. 16, pp. 7821–7827.doi: 10.5194/acp-10-7821-2010.

[87] EU Commission, (2022). «European Regulation and Limits on Air Pollution». Available at «https://www.breeze-technologies.de/blog/european-eu-regulation-and-limits-on-air-pollution/»

[88] ΥΠΕΝ, (2020). «Ετησια εκθεση ποιοτητας της ατμοσφαιρας 2021», in *υπουργειο περιβαλλοντος και ενεργειας γεν. δ/νση περιβαλλοντικης πολιτικης δ/νση κλιματικης αλλαγης & ποιοτητας ατμοσφαιρας τμημα ποιοτητας της ατμοσφαιρας* [online]. Διαθέσιμο από: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/06/%CE%95%CE%9A%CE%98%CE%95%CE%A3%CE%97-2020.pdf [προσβάσιμο στις 25 Δεκεμβρίου 2023] [online].

[89] Δήμος Θεσσαλονίκης, Τμήμα Περιβάλλοντικών Δράσεων, (2017) «Μετρήσεις ετών 2014 - 2016 της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Δημοτικού Δικτύου Σταθμών Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης» [online]. Διαθέσιμο από https://opendata.thessaloniki.gr/el/dataset/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CE%B4%CE%B7%CE%BC%CE%BF%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D-%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%84%CF%8D%CE%BF%CF%85-%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8E%CE%BD-%CE%B5%CE%BB%CE%AD%CE%B3%CF%87%CE%BF%CF%85-%CE%B1%CF%84%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82-%CF%81%CF%8D%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7%CF%82-%CF%84%CE%BF%CF%85-%CE%B4%CE%AE%CE%BC%CE%BF%CF%85-%CE%B8%CE%B5%CF%83%CF%83%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CE%BD%CE%AF%CE%BA%CE%B7%CF%82-3 [προσβάσιμο στις 25 Δεκεμβρίου 2023].

[90] EEA Report, González Ortiz, A., Guerreiro, C. and Soares, J., (2020). «Air

quality in Europe — 2020 report», Publications Office, [online]. Διαθέσιμο από: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/447035cd-344e-11eb-b27b-01aa75ed71a1/language-en [προσβάσιμο στις 25 Δεκεμβρίου 2023].

[91] S. T. Turnock *et al.*, (2018). «The impact of future emission policies on tropospheric ozone using a parameterised approach», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, no. 12, pp. 8953–8978.doi: 10.5194/acp-18-8953-2018.

[92] J. E. Jonson *et al.*, (2018). «The effects of intercontinental emission sources on European air pollution levels», *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, no. 18, pp. 13655–13672.doi: 10.5194/acp-18-13655-2018.

[93] ETC/ATNI, (2020). «Emissions outsourcing in the EU. A review of potential effects on industrial pollution, Eionet Report ETC/ATNI 7/2019, European Topic Centre on Air Pollution, Transport, Noise and Industrial Pollution.».

[94] L. HORIBA, (2009). «Ambient O3 monitor APOA-370, Operation Manual» [online]. Διαθέσιμο από: https://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/Manuals_US/Ambient/APOA-370_Operation_manual_e.pdf. [προσβάσιμο στις 20 Σεπτεμβρίου 2024].

[95] Belgian Interregional Environment Agency (IRCEL - CELINE) (2021). «What are the guidelines drafted by the World Health Organisation?» [online]. Διαθέσιμο από: https://www.irceline.be/en/documentation/faq/what-are-the-guidelines-drafted-by-the-world-health-organisation [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[96] Γεντεκάκης Ι.Β. (2010) Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα

[97] Shivanna KR. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. Proc.Indian Natl. Sci. Acad. 2022;88(2):160–71. doi: 10.1007/s43538-022-00073-6. Epub 2022 May 2. PMCID: PMC9058818. [online]. Διαθέσιμο από: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9058818 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[98] Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο. (2018) Ατμοσφαιρική ρύπανση: Η προστασία της υγείας μας παραμένει ανεπαρκής [online]. Διαθέσιμο από: https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/el/ [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[99] Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, (2024) Ατμοσφαιρικοί ρύποι και κλίμακες διασποράς [online].

Διαθέσιμο από: http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/simeiwseis/chapter2.pdf [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[100] Tiotiu AI, Novakova P, Nedeva D, Chong-Neto HJ, Novakova S, Steiropoulos P, Kowal K. (2020) Impact of Air Pollution on Asthma Outcomes. Int J Environ Res Public Health., 17 (17): 6212. doi: 10.3390/ijerph17176212. PMID: 32867076; PMCID: PMC7503605. [online]. Διαθέσιμο από: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7503605/ [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[101] Air Dictionary: Particulate (2024) [online]. Διαθέσιμο από: https://narvalo.design/blogs/news/parliamo-di-particolato-air-dictionary?utm_source=google_search&utm_medium=cpc&utm_campaign=prodotti_particolato&utm_id=prodotti_particolato&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAu8W6BhC-ARIsACEQoDAUfhoCAFdqW766hImhaqbFXjdyENSdMV-_DJU3j77nxYRgzdfDk8MaAsUhEALw_wcB [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[102] Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., & Lettenmaier, D. P. (2019). Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California. Earth's Future, 7, 892–910. https://doi.org/10.1029/2019EF001210 [online]. Διαθέσιμο από: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019ef001210 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[103] Im Ulas, Geels Camilla, Hanninen Risto , Kukkonen Jaakko , Rao Shilpa , Ruuhela Reija , Sofiev Mikhail , Schaller Nathalie , Hodnebrog Øivind , Sillmann Jana , Schwingshackl Clemens, Christensen Jesper H. , Bojariu Roxana, Aunan Kristin, (2022) Reviewing the links and feedbacks between climate change and air pollution in Europe. Frontiers in Environmental Science, 10, https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.954045 [online]. Διαθέσιμο από: https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.954045/full [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[104] Im, Ulas & Geels, C. & Hanninen, Risto & Kukkonen, Jaakko & Rao, Shilpa & Ruuhela, Reija & Sofiev, Mikhail & Schaller, Nathalie & Hodnebrog, Øivind & Sillmann, Jana & Schwingshackl, Clemens & Christensen, Jesper & Bojariu, Roxana & Aunan, Kristin. (2022). Reviewing the links and feedbacks between

climate change and air pollution in Europe. Frontiers in Environmental Science. 10. 10.3389/fenvs.2022.954045. [online]. Διαθέσιμο από: https://www.researchgate.net/figure/Interactions-between-climate-emissions-and-air-quality-adopted-from-Jacob-and-Winner_fig1_363483541 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[105] Richard G. Derwent, Michael E. Jenkin, Steven R. Utembe, Dudley E. Shallcross, Tim P. Murrells, Neil R. Passant, (2010) Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds. Science of The Total Environment, 408 (16), pages 3374-3381, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.013 [online]. Διαθέσιμο από: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969710003918 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[106] Mohsin Imam, Sufiyan Adam, Soumyabrata Dev, Nashreen Nesa, (2024) Air quality monitoring using statistical learning models for sustainable environment, Intelligent Systems with Applications, Volume 22, 200333, ISSN 2667-3053, https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200333. [online]. Διαθέσιμο από: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305324000097 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[107] Forcetto, A. L. S., Daemme, L. C. (2017) Environmental Impact of Motorcycle Replacement Exhaust Systems in Sao Paulo City, Volume 210, pages 641-652, WIT Press, https://doi.org/10.2495/SDP160541 [online]. Διαθέσιμο από: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citations [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024] [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[108] Alang, A.K., Aggarwa, S.G. (2024). Atmospheric Brown Carbon: Sources, Optical Properties, and Chromophore Composition. Aerosol Air Qual. Res. 24, 240035. https://doi.org/10.4209/aaqr.240035 [online]. Διαθέσιμο από: https://aaqr.org/articles/aaqr-24-02-oa-0035 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[109] European Geosciences Union. (2024) Atmospheric Chemistry and Physics [online]. Διαθέσιμο από: https://acp.copernicus.org/ [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[110] D. Founda, K.V. Varotsos, F. Pierros, C. Giannakopoulos, (2019) Observed and projected shifts in hot extremes' season in the Eastern Mediterranean, Global and Planetary Change, Volume 175, Pages 190-200, ISSN 0921-8181,

https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.02.012 [online]. Διαθέσιμο από: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818118303990 [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]

[111] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. (2024) Κλιματικά Δεδομένα για επιλεγμένους σταθμούς στην Ελλάδα [online]. Διαθέσιμο από: https://www.emy.gr/emy/el/climatology/climatology_city?perifereia=Crete&poli=Chania_Souda [προσβάσιμο στις 20 Οκτωβρίου 2024]