



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)»

«Κωνσταντίνα Πανταζή»

A.M. 153204

Διπλωματική Εργασία

«Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ατμοσφαιρικών ρύπων
και οι εκπομπές τους σε ελληνικές πόλεις»

Επιβλέπων καθηγητής: Κελέσης Απόστολος

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («Κωνσταντίνα Πανταζή») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του/της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)»

Διπλωματική Εργασία

«Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ατμοσφαιρικών ρύπων
και οι εκπομπές τους σε ελληνικές πόλεις »

«Κωνσταντίνα Πανταζή»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Απόστολος Κελέσης

Δρ. Φυσικός/Περιβαλλοντολόγος,

ΣΕΠ-ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Καζαντζίδης Ανδρέας

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών,

ΣΕΠ-ΕΑΠ

Πάτρα, «Σεπτέμβριος 2026»

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο που μου έδωσε τη δυνατότητα να εκπονήσω αυτή τη μεταπτυχιακή διατριβή.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Απόστολο Κελέση που με την καθοδήγησή του και την υπομονή του κατάφερα να ολοκληρώσω αυτή την εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον β' επιβλέποντα καθηγητή κ. Καζαντζίδη Ανδρέα για την επιστημονική του συνεισφορά και τις εποικοδομητικές του παρεμβάσεις.

Περίληψη

Η φωτοχημική ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στις σύγχρονες πόλεις, επηρεάζοντας την υγεία των πολιτών και την ποιότητα ζωής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση των επιπέδων και των τάσεων της φωτοχημικής ρύπανσης, σε σχέση με τις κοινωνικές και οικονομικές εξελίξεις και τις αλλαγές στη δραστηριότητα των κατοίκων, καθώς και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μέτρων, που επέδρασαν στη μείωση ή αύξηση των επιπέδων αυτών των ρύπων στις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Η μελέτη βασίστηκε στα διαθέσιμα δεδομένα από 15 αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, που επελέγησαν με κριτήρια πληρότητας δεδομένων και χωρικής αντιπροσωπευτικότητας, ώστε να καλύπτονται διαφορετικοί τύποι αστικού περιβάλλοντος.

Έτσι, αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει διαχρονικά την ετήσια, την εποχική και τη μηνιαία διακύμανση, σημαντικών δεικτών της φωτοχημικής ρύπανσης και συγκεκριμένα των NO , NO_2 , O_3 , CO και C_6H_6 , στις ευρύτερες αστικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Παράλληλα, από τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των εκπομπών στην Ελλάδα, προέκυψε ότι, οι συνολικές εκπομπές των NO_x και NMVOC μειώθηκαν κατά 54,9% και 61,1%, αντίστοιχα, το 2024 σε σύγκριση με το 2005, ενώ οι συνολικές εκπομπές CO μειώθηκαν περίπου 30,9% το 2012, σε σύγκριση με το 2021. Από την επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων των φωτοχημικών ρύπων, για την περίοδο 2001-2024, προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις των NO , NO_2 , C_6H_6 και CO ήταν αυξημένες στους σταθμούς που βρίσκονται στα κέντρα των δύο πόλεων, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στον αυξημένο αριθμό οχημάτων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές, καθώς και στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες. Οι συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων παρουσίασαν στις περισσότερες περιοχές των δύο αυτών πόλεων μια τάση μείωσης, η οποία κυρίως οφείλεται στη μείωση των εκπομπών NO_x και CO . Πρέπει να επισημανθεί ότι στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας οι συγκεντρώσεις του NO_2 , ειδικά στην Αθήνα την περίοδο 2001-2010, υπήρξαν συστηματικές υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των $40\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Αντίθετα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του O_3 καταγράφηκαν στις περιαστικές περιοχές των δύο μεγαλουπόλεων, ενώ παρατηρήθηκαν διαχρονικά αυξητικές τάσεις στους περισσότερους σταθμούς μέτρησης. Οι τάσεις αυτές σχετίζονται και με τη μείωση των επιπέδων των NO_x , NMVOCs και CO, που προαναφέρθηκε, τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στον ημερήσιο κύκλο των φωτοχημικών αντιδράσεων.

Η μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των NO, CO και C_6H_6 , έδειξε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι, ενώ του NO_2 , διαπιστώθηκε μικρή διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO_2 να παρουσιάζονται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, με αρκετές όμως αποκλίσεις, ανάλογα με τον τύπο του σταθμού και τις τοπικές πηγές εκπομπών. Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του όζοντος, την περίοδο 2001-2024, διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις του O_3 είναι μεγαλύτερες τη θερινή περίοδο, ενώ οι ελάχιστες τη χειμερινή περίοδο του έτους, κυρίως λόγω της αυξημένης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη θερμή περίοδο του έτους, η οποία ενισχύει σημαντικά το σχηματισμό του O_3 από φωτοχημικές διεργασίες.

Τέλος, από τη σύγκριση των επιπέδων των παραπάνω φωτοχημικών ρύπων στις δύο μεγαλουπόλεις διαπιστώθηκε ότι, ενώ τα επίπεδα των NO_x στις κεντρικές και βιομηχανικές περιοχές στην Αθήνα ήταν περίπου διπλάσια, από τα αντίστοιχα στη Θεσσαλονίκη, στις αστικές περιοχές των δύο πόλεων ήταν περίπου ίδια. Αντίθετα, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 στη Θεσσαλονίκη ήταν διπλάσια από τα αντίστοιχα επίπεδα στην Αθήνα, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων, ενώ ήταν περίπου ίδια, στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές και περιαστικές περιοχές υποβάθρου, παρόλη τη διαφορά του πληθυσμού και των οχημάτων που κινούνται στις δύο πόλεις.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι σε πολλές αστικές περιοχές, παρά τη σημαντική επίδραση τοπικών ή βιομηχανικών πηγών, οι μετεωρολογικές συνθήκες, οι χημικές διεργασίες και οι διαδικασίες διασποράς, αλλά και οι τοπικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μετρήσεων, καθορίζουν αποφασιστικά το βαθμό συσσώρευσης των φωτοχημικών ρύπων.

Λέξεις–Κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, φωτοχημική ρύπανση, εκπομπές φωτοχημικών ρύπων, συγκεντρώσεις NO, NO_2 , O_3 , CO και C_6H_6 , ελληνικές μεγαλουπόλεις.

“Comparison of levels of photochemical atmospheric pollutants and their emissions in Greek cities”

Abstract

Photochemical air pollution is one of the most important environmental problems in modern cities, affecting human health and quality of life.

The aim of the present study was to investigate the levels and trends of photochemical air pollution in relation to social and economic developments and changes in the activities of the population, as well as to evaluate the effectiveness of measures that contributed to the reduction or increase of pollutant levels in the two largest cities in Greece, Athens and Thessaloniki. The study was based on available data from 15 representative air pollution monitoring stations of the National Air Pollution Monitoring Network (EDPAR) of the Ministry of Environment and Energy. The stations were selected based on data completeness and spatial representativeness criteria in order to cover different types of urban environments.

The present thesis therefore examines the long-term annual, seasonal and monthly variation of important indicators of photochemical air pollution, specifically NO, NO₂, O₃, CO and C₆H₆, in the wider urban areas of Athens and Thessaloniki during the period 2001–2024. In parallel, the investigation of the long-term evolution of emissions in Greece showed that total NO_x and NMVOC emissions decreased by 54.9% and 61.1%, respectively, in 2024 compared with 2005, while total CO emissions decreased by approximately 30.9% in 2012 compared with 2021. The analysis of the photochemical pollutant measurements for the period 2001–2024 showed that NO, NO₂, C₆H₆ and CO concentrations were higher at monitoring stations located in the city centres, mainly due to the increased number of vehicles travelling through these areas, as well as the higher population density and built-up character of the central urban areas. In most areas of the two cities, concentrations of these pollutants showed a decreasing trend, mainly attributable to the reduction in NO_x and CO emissions. It should be noted that at urban traffic monitoring stations, particularly in Athens during the period 2001–2010, systematic exceedances of the legislated annual NO₂ limit value of 40 µg/m³ were observed.

In contrast, the highest O_3 concentrations were recorded in the suburban areas of the two metropolitan areas, while increasing long-term trends were observed at most monitoring stations. These trends are also associated with the aforementioned reductions in NO_x , NMVOCs and CO levels, which play a decisive role in the daily cycle of photochemical reactions.

The monthly and seasonal analysis of NO, CO and C_6H_6 concentrations showed clear seasonality in most areas, with maximum values occurring during winter and minimum values during summer. NO_2 concentrations exhibited relatively limited variation between the winter and summer half-years, with comparatively higher concentrations occurring during the winter and autumn months, although considerable variations were observed depending on the type of monitoring station and local emission sources. The monthly and seasonal analysis of ozone concentrations during the period 2001–2024 showed that O_3 concentrations were higher during the summer period and lowest during winter, mainly due to the increased intensity of solar radiation during the warm period of the year, which significantly enhances O_3 formation through photochemical processes.

Finally, the comparison of the levels of the aforementioned photochemical pollutants in the two metropolitan areas showed that, while NO_x levels in the central and industrial areas of Athens were approximately twice as high as the corresponding levels in Thessaloniki, they were approximately similar in the urban areas of the two cities. In contrast, O_3 concentrations in Thessaloniki were approximately twice as high as the corresponding levels in Athens in the central areas of the two cities, while they were approximately similar in the suburban industrial and suburban background areas, despite the difference in population and the number of vehicles operating in the two cities.

The results of the present study indicate that, in many urban areas, despite the significant influence of local or industrial sources, meteorological conditions, chemical processes and dispersion mechanisms, as well as the local characteristics of each monitoring area, decisively determine the degree of accumulation of photochemical pollutants.

Keywords: Air pollution, photochemical pollution, photochemical emissions, concentrations of NO, NO_2 , O_3 , CO και C_6H_6 , Greek cities.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	4
Περίληψη.....	5
Abstract	7
Κατάλογος Εικόνων / Διαγραμμάτων	12
Κατάλογος Πινάκων	17
1. Ρύπανση της ατμόσφαιρας	19
1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί	19
1.2 Βασικές έννοιες εκπομπών – πρωτογενείς κα δευτερογενείς ρύποι	22
1.2.1 Ανθρωπογενείς εκπομπές	22
1.2.2 Φυσικές εκπομπές	23
1.3 Κατηγορίες πηγών ρύπανσης	24
1.3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	24
1.4 Θεσμικό πλαίσιο Ε.Ε. και Ελλάδας για την ποιότητα του αέρα	26
2. Φωτοχημικοί ρύποι και πηγές προέλευσής τους.....	31
2.1 Μηχανισμοί σχηματισμού φωτοχημικών ρύπων	31
2.1.1 Οξείδια του Αζώτου NO _x	33
2.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα CO	35
2.1.3 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs)	36
2.1.4 Όζον (O ₃)	37
2.1.5 Βενζόλιο C ₆ H ₆	39
3. Εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και μοντέλα εκτίμησης.....	41
3.1 Εκτίμηση εκπομπών με χρήση βιβλιογραφικών δεδομένων και μοντέλων ...	41
3.2.1 Απογραφή εκπομπών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας	47
3.2.2 Εκπομπές από οδικές μεταφορές	51
3.2.3 Εκπομπές από οικιακή θέρμανση	51
3.3. Μεθοδολογίες υπολογισμού (NEMO, WRF)	52
3.3.1 Το μοντέλο Natural Emissions Model (NEMO)	53
3.3.2 Το μετεωρολογικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF)	54
3.3.3 Εφαρμογές των μοντέλων στον ελληνικό χώρο	54
4. Δίκτυα μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης	56
4.1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες ελληνικές πόλεις....	56

4.2 Μεθοδολογίες μέτρησης και έλεγχος ποιότητας δεδομένων	60
4.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων των Φωτοχημικών Ρύπων	62
4.3.1 Μέθοδος μέτρησης των οξειδίων του αζώτου	62
4.3.2 Μέθοδος μέτρησης του όζοντος	63
4.3.3 Μέθοδος μέτρησης του μονοξειδίου του άνθρακα	64
5. Εκτίμηση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων σε ελληνικές πόλεις.....	65
5.1 Μηνιαίες διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	66
5.1.1 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , C ₆ H ₆ , CO, σε σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	66
5.1.2 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , CO, σε σταθμούς αστικού υποβάθρου, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	72
5.1.3 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , σε σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	75
5.1.4 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , C ₆ H ₆ , CO, σε περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	79
5.2 Μηνιαίες και Εποχικές διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	86
5.2.1 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , C ₆ H ₆ , CO, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	86
5.2.2 Εποχικές διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , C ₆ H ₆ , CO, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	93
5.3 Ετήσιες διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	102

5.3.1 Ετήσιες διακυμάνσεις των NO, NO ₂ , O ₃ , σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	103
5.3.2 Ετήσιες διακυμάνσεις των C ₆ H ₆ , CO, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	105
5.3.3 Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις των NO, NO ₂ , NO _x , O ₃ και O ₃ σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.	107
6. Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δυο μεγάλων ελληνικών πόλεων.....	113
6.1 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	114
6.1.1 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς αστικής κυκλοφορίας στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	114
6.1.2 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς αστικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	115
6.1.3 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε περιβαλλοντικούς βιομηχανικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	117
6.1.4 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς περιβαλλοντικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	118
7. Συμπεράσματα	124

Κατάλογος Εικόνων / Διαγραμμάτων

Εικόνα.1.1: Χρονική μεταβολή της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση και σε άλλους βασικούς παράγοντες κινδύνου (Heger et al., 2022).....	17
Εικόνα.1.2: Κατανομή των θανάτων που αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση ανά κατηγορία ασθένειας (Heger et al., 2022).....	17
Εικόνα.2.1: Σχηματισμός και καταστροφή του όζοντος (παρατηρείται πολυπλοκότητα μηχανισμών και δημιουργία μεγάλου αριθμού δευτερογενών αερίων ρύπων) (Γεντενάκης, 2010; Κωστέα, 2016; Παρασχά, 2014).....	23
Εικόνα.2.2: Εξέλιξη της εθνικής μέσης συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στις Ηνωμένες Πολιτείες (1980–2020), σε ppm, σε σχέση με το εθνικό πρότυπο ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα. Πηγή: Auras & Selke (2022).....	26
Εικόνα.2.3: Κατανομή εκπομπών NMVOCs ανά πηγή δραστηριότητας (Πηγή: EEA, 2016).....	28
Εικόνα.2.4: Σχηματική παράσταση της προέλευσης του τροποσφαιρικού O ₃ (Πηγή: Ζάνης, 2014).....	29
Εικόνα.2.5: Χωρική κατανομή του δείκτη κινδύνου καρκινογένεσης (LTCR) λόγω έκθεσης σε βενζόλιο το χειμώνα και το καλοκαίρι στην Ελλάδα (Πηγή: Kanellopoulos et al., 2025).....	29
Εικόνα.3.1: Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών NOx στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024 (Πηγή: ΥΠΕΝ, 2026).....	35
Εικόνα.3.2: Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών NMVOCs στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024. (Πηγή: ΥΠΕΝ, 2026) https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provlepseis-ekpobon-rypon	36
Εικόνα.3.3: Ποσοστιαία κατανομή (%) των εκπομπών των αερίων ρύπων NOx, SOx, NH ₃ , NMVOC, CO, PM ₁₀ , στους κύριους τομείς οικονομικής δραστηριότητας (NACE Αναθ. 2), την περίοδο 2020-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021) http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SOP08/-	37
Εικόνα.3.4: Ετήσια διακύμανση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, την περίοδο 2006-2012 (Fameli & Assimakopoulos, 2106).....	39
Εικόνα.3.5: Ετήσια διακύμανση των εκπομπών CO, PM ₁₀ , NMVOC, NOx από τον τομέα της οικιακής θέρμανσης στην Ελλάδα, την περίοδο 2006-2018 (Fameli et al., 2021).....	43

Εικόνα.3.6: Διάγραμμα ροής του μοντέλου NEMO και της σύζευξής του με το μετεωρολογικό μοντέλο WRF (Πηγή: Liora, 2015).....	45
Εικόνα .4.1: Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην Ελλάδα (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).	48
Εικόνα.4.2 : Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην περιοχή της Αττικής (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).....	48
Εικόνα.4.3 : Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).....	49
Εικόνα.4.4 : Διαδικασία συλλογής, ποιοτικού ελέγχου και έγκρισης δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πλαίσιο λειτουργίας του ΕΔΠΑΡ (Πηγή: ΥΠΕΝ, 2025).....	52
 Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Αθηνάς, Πειραιάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	58
Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO ₂ στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	59
Διάγραμμα 5.3: Μέση μηνιαία διακύμανση του O ₃ στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	60
Διάγραμμα 5.4: Μέση μηνιαία διακύμανση του C ₆ H ₆ στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.	61
Διάγραμμα 5.5: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024....	62
Διάγραμμα 5.6: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	63
Διάγραμμα 5.7: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO ₂ στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	64
Διάγραμμα 5.8: Μέση ημερήσια δκύμανση του O ₃ στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	65

Διάγραμμα 5.9: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί την περίοδο 2001- 2024.....	66
Διάγραμμα 5.10: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιόσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	67
Διάγραμμα 5.11: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO ₂ στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιόσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	68
Διάγραμμα 5.12: Μέση μηνιαία διακύμανση του O ₃ στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιόσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	69
Διάγραμμα 5.13: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	70
Διάγραμμα 5.14: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO ₂ στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	71
Διάγραμμα 5.15: Μέση μηνιαία διακύμανση του O ₃ στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	72
Διάγραμμα 5.16: Μέση μηνιαία διακύμανση του C ₆ H ₆ στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	73
Διάγραμμα 5.17: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.....	73
Διάγραμμα 5.18: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	78
Διάγραμμα 5.19: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO ₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	79
Διάγραμμα 5.20: Μέση μηνιαία διακύμανση του O ₃ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	81
Διάγραμμα 5.21: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	83

Διάγραμμα 5.22: Μέση μηνιαία διακύμανση του C_6H_6 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	84
Διάγραμμα 5.23: Μέση εποχική διακύμανση του NO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	85
Διάγραμμα 5.24: : Μέση εποχική διακύμανση του NO_2 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	87
Διάγραμμα 5.25: : Μέση εποχική διακύμανση του O_3 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	88
Διάγραμμα 5.26: : Μέση εποχική διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	90
Διάγραμμα 5.27: : Μέση εποχική διακύμανση του C_6H_6 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	91
Διάγραμμα 5.28: : Μέση ετήσια διακύμανση του NO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	95
Διάγραμμα 5.29: : Μέση ετήσια διακύμανση του NO_2 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	95
Διάγραμμα 5.30: : Μέση ετήσια διακύμανση του O_3 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	96
Διάγραμμα 5.31: : Μέση ετήσια διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	97
Διάγραμμα 5.32: : Μέση ετήσια διακύμανση του C_6H_6 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	97

Διάγραμμα 5.33: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO , NO_2 , NO_x , O_3 και O_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	98
Διάγραμμα 5.34: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO , NO_2 , NO_x , O_3 και O_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	99
Διάγραμμα 5.35: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO , NO_2 , NO_x , O_3 και O_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	100
Διάγραμμα 5.36: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO , NO_2 , NO_x , O_3 και O_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	100
Διάγραμμα 6.1: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	105
Διάγραμμα 6.2: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	107
Διάγραμμα 6.3: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	108
Διάγραμμα 6.4: : Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.....	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας .11: Ρύποι και τα αποδεκτά εύρη συγκέντρωσής τους (Πηγή: (Bhagi & Chatwal, 2009).....	12
Πίνακας 1.2: Εκπομπές CO, NO _x , SO ₂ , NMVOC, NH ₃ από οδικές μεταφορές το 2018 σύμφωνα με το εθνικό κέντρο διαχείρισης εκπομπών (Πηγή: Polednik et al., 2024).....	16
Πίνακας 1.3: Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2008/50/EK (ΥΠΕΝ, 2002-2022).....	18
Πίνακας 1.4: Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) 2024/2881 της 23-10-2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη.....	20
Πίνακας 3.1: Εκπομπές αέριων ρύπων (NO _x , SO _x , NH ₃ , NMVOC, CO, PM ₁₀ ,) (σε 1000t) την περίοδο 2012-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021).....	37
Πίνακας 3.2: Ποσοστιαίες εκπομπές αέριων ρύπων (NO _x , SO _x , NH ₃ , NMVOC, CO, PM ₁₀ ,) ανά οικονομική δραστηριότητα την περίοδο 2012-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021)	38
Πίνακας 3.3: Ετήσια μεταβολή των εκπομπών CO στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, από το 2006 έως 2012 (Πηγή: Fameli και Assimakopoulos 2016)	40
Πίνακας 3.4: Ετήσια μεταβολή των εκπομπών NO _x στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, από 2006 έως 2012 (Πηγή: Fameli και Assimakopoulos 2016).....	41
Πίνακας 3.5: Εκπομπές (σε τόνους) ανά τύπο οχήματος για το έτος 2010 στην Αττική και ποσοστό συμμετοχής κάθε κατηγορίας οχήματος στη συνολική τιμή εκπομπών για κάθε ρύπο και για το CO ₂ (Πηγή: Fameli και Assimakopoulos, 2015).....	42
Πίνακας 4.1: Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, στην περιοχή της Αττικής με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).....	49
Πίνακας 4.2: Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην περιοχή της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).....	50
Πίνακας 4.3: Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στις Περιφέρειες Δυτ. Ελλάδας, Θεσσαλίας, Δυτ. Μακεδονίας, Κρήτης Ηπείρου, Αν. Μακεδονίας & Θράκης και Στερεάς Ελλάδας με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον	

<i>τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, http://www.ypen.gov.gr).....</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 4.4: Μετρούμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι και εφαρμοζόμενες πρότυπες μέθοδοι μέτρησης στο Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (Πηγή:ΥΠΕΝ, 2025),.....</i>	<i>53</i>
<i>Πίνακας 5.1: Έλεγχος υπέρβασης του ετήσιου ορίου NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς.....</i>	<i>112</i>
<i>Πίνακας 5.2: Έλεγχος υπέρβασης του ετήσιου ορίου C₂H₆ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς.....</i>	<i>113</i>
<i>Πίνακας 6.1 Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024....</i>	<i>106</i>
<i>Πίνακας 6.2 Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024....</i>	<i>108</i>
<i>Πίνακας 6.3 Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024....</i>	<i>109</i>
<i>Πίνακας 6.4 Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024....</i>	<i>110</i>

1. ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Η ρύπανση είναι η διαδικασία κατά την οποία μολύνονται η γη, το νερό, ο αέρας ή άλλα τμήματα του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να γίνονται ακατάλληλα για χρήση. Η διαδικασία αυτή είναι πολύπλοκη και προκαλείται από την εισαγωγή ανεπιθύμητων ουσιών, παθογόνων μικροοργανισμών ή μορφών ενέργειας που διαταράσσουν τη φυσική ισορροπία του περιβάλλοντος και την ανάπτυξη ορισμένων περιοχών. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες ρύπανσης: χημική, φυσική και μικροβιολογική. Το 2007 ο Chapman έδωσε μια πιο σαφή διάκριση: Η μόλυνση είναι η παρουσία μιας ουσίας εκεί που δεν θα έπρεπε να υπάρχει σε μεγαλύτερη ποσότητα από τη φυσιολογική. Η ρύπανση είναι μόλυνση που προκαλεί ή μπορεί να προκαλέσει αρνητικές βιολογικές επιπτώσεις στους οργανισμούς που ζουν εκεί (Calvo – Flores et al., 2018). Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει όλα τα στάδια από την παραγωγή και εκπομπή των ρύπων μέχρι τις επιπτώσεις, είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες, είτε από φυσικές πηγές. Όταν οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προέρχονται άμεσα από κάποια πηγή τότε ονομάζονται πρωτογενείς ρύποι. Μέσα στην ατμόσφαιρα οι ρύποι διαχέονται, μετατρέπονται και υφίστανται χημικές αλλαγές, σχηματίζοντας δευτερογενείς ρύπους. Οι ρύποι τελικά εναποτίθενται στο έδαφος ή στο νερό μέσω βροχής ή καθίζησης και προκαλούν επιπτώσεις στην υγεία, στα οικοσυστήματα και στα υλικά. Με βάση αυτά τα στάδια, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα πρόβλεψης της ρύπανσης, τα οποία υπολογίζουν τη συγκέντρωση και τη διασπορά των ρύπων στο χρόνο και στο χώρο. Υπάρχουν μοντέλα σημειακών πηγών (plume models), μοντέλα περιοχών/λεκάνης αέρα (συνχά αναφέρονται και ως μοντέλα ποιότητας αέρα) (airshed models) και μοντέλα μεγάλης κλίμακας (long-range transport models). Για να είναι αξιόπιστα τα μοντέλα συγκρίνονται με πραγματικές μετρήσεις αέρα και χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση πολιτικών και στρατηγικών ελέγχου της ρύπανσης με στόχο τη μείωση των εκπομπών στην πηγή (Bhagi & Chatwal, 2009). Ο πίνακας 1.1 παρουσιάζει ορισμένους από τους κοινούς ρύπους-κριτήρια ή μη ρύπους-κριτήρια και τα εύρη συγκέντρωσής τους που είναι αποδεκτά.

**Πίνακας 1.1 Ρύποι και τα αποδεκτά εύρη συγκέντρωσής τους
(Πηγή: (Bhagi & Chatwal, 2009))**

S.No.	Name of Pollutant	Range of concentration
<i>Criteria Pollutants</i>		
1.	CO	$\leq 0.2 - 50$ ppm
2.	SO ₂	≤ 1 ppb - 2ppm
3.	O ₃	0.01 - 0.5 ppm
4.	NO ₂	≤ 1 ppb - 0.5 ppm
5.	Non-methane hydrocarbons (NMHC)	65 ppb - 1.5 ppm
6.	Total suspended Particles (TSP)	5 - 1500 μgm^{-3}
7.	Lead	$1 \times 10^{-4} - 10 \mu\text{g m}^{-3}$
<i>Non-Criteria Pollutants</i>		
1.	NO	$0.02 - 2 \times 10^3$ ppb
2.	Peroxyacetylnitrate (PAN)	0.05 - 70 ppb
3.	HNO ₃	< 0.1 - 50 ppb
4.	HNO ₂	< 0.03 - 8 ppb
5.	NO ₃ [*] (nitrate radical)	< 5 - 8 ppb
6.	N ₂ O ₅ (dinitrogen pentaoxide)	≤ 15 ppb
7.	NH ₃	< 0.02 - 100 ppb
8.	HCHO	< 0.5 - 75 ppb
9.	HCOOH	< 20 ppb
10.	CH ₃ OH	≤ 40 ppb

Χαρακτηριστικά παραδείγματα των παραπάνω ρύπων κριτηρίων είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και τα οξείδια του αζώτου. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν ατελούς καύσης και αποτελεί ιδιαίτερα επικίνδυνο ρύπο στο ανθρώπινο σώμα. Επιπλέον το CO σε συνδυασμό με τα NO_x και τις πτητικές οργανικές ενώσεις, συμμετέχει σε φωτοχημικές αντιδράσεις παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας συμβάλλοντας στον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων όπως το τροποσφαιρικό όζον. Τα οξείδια του αζώτου παράγονται κυρίως κατά την καύση καυσίμων σε υψηλές θερμοκρασίες παίζουν καθοριστικό ρόλο, τόσο στη φωτοχημική ρύπανση, όσο και στον σχηματισμό όξινων ενώσεων στην ατμόσφαιρα, επηρεάζοντας αρνητικά την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (Polednik et al., 2024).

1.2 Βασικές έννοιες εκπομπών – πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύποι

Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελούν την απελευθέρωση ρύπων στην ατμόσφαιρα είτε απευθείας από πηγές είτε έμμεσα μέσω χημικών αντιδράσεων στο περιβάλλον. Οι ρύποι χαρακτηρίζονται με βάση την προέλευσή τους σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Πρωτογενείς ρύποι είναι ουσίες οι οποίες εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές. Παράδειγμα πρωτογενών ρύπων περιλαμβάνουν το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO₂), τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) που προέρχονται από καύση καυσίμων, βιομηχανικές διεργασίες, μεταφορές και άλλες δραστηριότητες. Αντίθετα οι δευτερογενείς ρύποι δεν εκπέμπονται άμεσα αλλά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ των πρωτογενών ρύπων και άλλων ατμοσφαιρικών συστατικών όπως η υγρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα δευτερογενούς ρύπου είναι το τροποσφαιρικό όζον (O₃) που σχηματίζεται από τις αντιδράσεις NO_x και VOCs υπό την επίδραση του φωτός. Η διάκριση αυτή είναι θεμελιώδης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα και την αποτελεσματική διαχείριση της ποιότητας του αέρα δεδομένου ότι οι δευτερογενείς ρύποι εξαρτώνται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τις αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών ρύπων (IER, 2023)

1.2.1 Ανθρωπογενείς εκπομπές

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές περιλαμβάνουν όλες τις εκπομπές ρύπων που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες και διαδικασίες. Οι κυριότερες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών είναι η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, οι μεταφορές, η βιομηχανία, οι οικιακές και εμπορικές εγκαταστάσεις, καθώς και η γεωργία και η διαχείριση αποβλήτων. Η καύση πετρελαίου, άνθρακα και φυσικού αερίου παράγει σημαντικά ποσά διοξειδίου του θείου (SO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και σωματιδίων (PM), επηρεάζοντας την ποιότητα του αέρα και συμβάλλοντας στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή. Πέρα από την καύση καυσίμων η βιομηχανική παραγωγή εκλύει ρύπους όπως βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις μέσω διεργασιών επεξεργασίας και

παραγωγής ενώ η γεωργία εκπέμπει αμμωνία (NH_3) από την κτηνοτροφία και τη χρήση λιπασμάτων συμβάλλοντας στον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων.

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις αστικές περιοχές ιδίως σε πόλεις με έντονη κυκλοφοριακή φόρτιση και πυκνή δόμηση όπου οι συνθήκες αερισμού είναι περιορισμένες. Οι εκπομπές των οχημάτων περιλαμβάνουν κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO_x), πτητικές οργανικές ενώσεις και αιωρούμενα σωματίδια ενώ παράλληλα σημαντική συνεισφορά έχουν και εκπομπές οι οποίες δεν προέρχονται από καυσαέρια όπως φθορά ελαστικών και φρένων και επαναιώρηση οδικής σκόνης. Επίσης, οι διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, σε αστικές περιοχές, έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κυκλοφορίας των οχημάτων που αυξάνουν τις εκπομπές και κατά συνέπεια τις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου και του μονοξειδίου του άνθρακα. Έτσι, ο έλεγχος των ανθρωπογενών εκπομπών είναι κρίσιμος για την ανάπτυξη πολιτικών και τεχνολογιών μείωσης αυτών των ρύπων, όπως πχ η ηλεκτροκίνηση, η χρήση καθαρότερων καυσίμων, η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και η εφαρμογή ελέγχων εκπομπών στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Seinfeld & Pandis, 2016; European Environment Agency, 2023).

1.2.2 Φυσικές εκπομπές

Οι φυσικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων προέρχονται από πηγές που δεν σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες και περιλαμβάνουν τη γλωρίδα, τα εδάφη και τις καλλιέργειες, την καύση βιομάζας και τις δασικές πυρκαγιές, τους υδροβιότοπους και τους ωκεανούς, τα άγρια ζώα, τα ηφαίστεια, τις αστραπές, το θαλάσσιο αλάτι, τη σκόνη από το έδαφος, καθώς και τις βιολογικές διεργασίες όπως η γύρη, τα βακτήρια και οι ιοί. Οι φυσικές αυτές πηγές εκπέμπουν σημαντικούς ρύπους όπως VOCs , NO_x , CH_4 , NH_3 , SO_2 και αιωρούμενα σωματίδια. Ειδικότερα οι υδροβιότοποι ευθύνονται για περίπου το 65% των παγκόσμιων φυσικών εκπομπών μεθανίου, ενώ οι ηφαιστειακές εκρήξεις μπορούν να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες SO_2 , NO_x και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα επηρεάζοντας σε μεγάλη κλίμακα την ποιότητα του αέρα (Λιώρα, 2009).

1.3 Κατηγορίες πηγών ρύπανσης

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία οι πηγές εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων ταξινομούνται κυρίως σε σημειακές (point sources), επιφανειακές ή περιοχικές (area sources) και κινητές (mobile sources). Οι σημειακές πηγές είναι μεγάλες εγκαταστάσεις που εκπέμπουν ρύπους από ένα συγκεκριμένο και σαφώς προσδιορισμένο σημείο όπως εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, διυλιστήρια και βιομηχανικές μονάδες ευρύτερη περιοχή όπως η οικιακή θέρμανση και οι εμπορικές δραστηριότητες. Οι κινητές πηγές αφορούν τα μέσα μεταφοράς όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία, πλοία και αεροσκάφη και αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης στα αστικά κέντρα λόγω της συνεχούς καύσης καυσίμων κατά την κίνησή τους (APN – Regional Resource Centre for Asia and the Pacific, 2025). Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα στην Πολωνία οι οδικές μεταφορές ήταν υπεύθυνες για τις εκπομπές βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως χαρακτηριστικά φαίνονται και στον Πίνακα 1.2

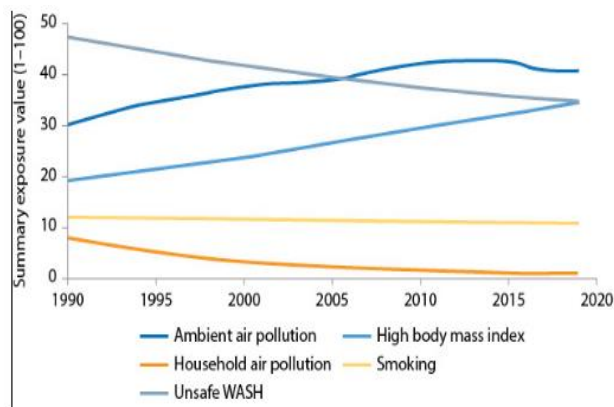
Πίνακας 1.2 Εκπομπές CO, NO_x, SO₂, NMVOC, NH₃ από οδικές μεταφορές το 2018 σύμφωνα με το εθνικό κέντρο διαχείρισης εκπομπών (Πηγή: Polednik et al. , 2024).

<i>Pollutant</i>	<i>CO</i>	<i>NO_x</i>	<i>SO₂</i>	<i>NMVOC</i>	<i>NH₃</i>
	kt				
Transport	528.30	295.32	0.73	74.90	4.38
Road transportation	526.05 (22.5%)	286.74 (37.6%)	0.57 (0.1%)	73.96 (10.1%)	4.38 (1.4%)
Total	2,339.07	761.71	501.93	732.69	316.93

1.3.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

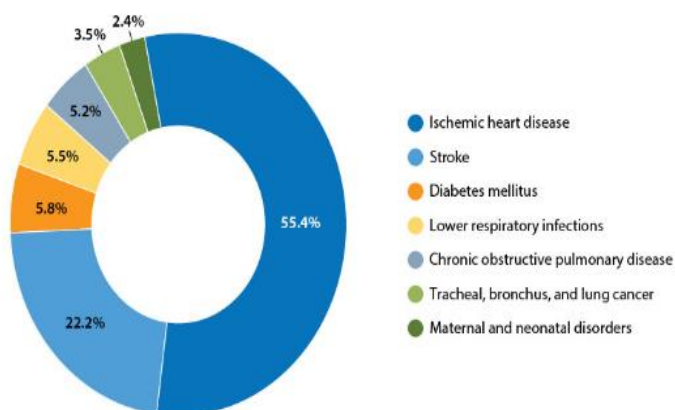
Σύμφωνα με την Εικόνα 1.1 φαίνεται στο γράφημα πως εξελίσσεται από το 1990 έως το 2020 η έκθεση του παγκόσμιου πληθυσμού σε διάφορους παράγοντες κινδύνου για την υγεία, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση του εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, το κάπνισμα, ο υψηλός δείκτης μάζας σώματος και οι κακές συνθήκες υγιεινής. Παρατηρείται ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση του εξωτερικού αέρα παρουσιάζει σταθερή αύξηση σε όλη την περίοδο μελέτης γεγονός που υποδηλώνει ότι όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού εκτίθεται σε επιβλαβή επίπεδα ρύπανσης. Αντίθετα παράγοντες όπως το κάπνισμα και η ρύπανση εσωτερικού χώρου εμφανίζουν τάση μείωσης ενώ ο υψηλός δείκτης μάζας σώματος παρουσιάζει ανοδική πορεία. Το

γράφημα αναδεικνύει ότι η ρύπανση του εξωτερικού αέρα αποτελεί πλέον έναν από τους σημαντικότερους κινδύνους για την δημόσια υγεία (Heger et al., 2022).



Εικόνα 1.1 Χρονική μεταβολή της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση και σε άλλους βασικούς παράγοντες κινδύνου (Heger et al., 2022)

Σύμφωνα με την Εικόνα 1.2 φαίνονται ποιες ασθένειες ευθύνονται για τους θανάτους που προκαλούνται από την έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση του εξωτερικού αέρα. Το μεγαλύτερο ποσοστό των θανάτων σχετίζεται με καρδιαγγειακά νοσήματα. Συγκεκριμένα πάνω από τους μισούς θανάτους οφείλονται σε ισχαιμική καρδιοπάθεια ενώ περίπου το ένα πέμπτο σχετίζεται με εγκεφαλικά επεισόδια. Σημαντικό ποσοστό θανάτων συνδέεται επίσης με διαβήτη, λοιμώξεις του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια και καρκίνο των πνευμόνων. Ένα μικρότερο αλλά αξιοσημείωτο ποσοστό αφορά μητρικές και νεογνικές επιπλοκές. Αναδεικνύεται ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν επηρεάζει μόνο το αναπνευστικό σύστημα αλλά αποτελεί σοβαρό παράγοντα κινδύνου και για καρδιαγγειακά και μεταβολικά νοσήματα επιβαρύνοντας συνολικά τη δημόσια υγεία (Heger et al., 2022).



Εικόνα 1.2 Κατανομή των θανάτων που αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση ανά κατηγορία ασθένειας (Heger et al., 2022)

1.4 Θεσμικό πλαίσιο Ε.Ε. και Ελλάδας για την ποιότητα του αέρα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο για την προστασία και τη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με βασικό στόχο τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τη θέσπιση οριακών τιμών και στόχων ποιότητας για βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, καθώς και κοινές μεθοδολογίες παρακολούθησης, αξιολόγησης και ενημέρωσης του κοινού.

Πίνακας 1.3 Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2008/50/ΕΚ (ΥΠΕΝ, 2002-2022).

Όρια ποιότητας ατμόσφαιρας (ΥΠΕΝ, 2019)	
Τιμές ορίων για το διοξείδιο του θείου	Οριακή τιμή
Μέση ωριαία τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 24 φορές το χρόνο	350μg/m ³
Μέση ημερήσια τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 3 φορές το χρόνο	125μg/m ³
Όριο συναγερμού	Ωριαία τιμή μεγαλύτερη από 500μg/m ³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Τιμές ορίων για αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ10	Οριακή τιμή
Μέση ημερήσια τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές το χρόνο	50μg/m ³
Μέση ετήσια τιμή	40μg/m ³
Τιμές ορίων για αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ2,5	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	25μg/m ³
Τιμές ορίων για το διοξείδιο του αζώτου	Οριακή τιμή
Μέση ωριαία τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές το χρόνο	200μg/m ³
Μέση ετήσια τιμή	40μg/m ³
Όριο συναγερμού	Ωριαία τιμή μεγαλύτερη από 400μg/m ³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Τιμές ορίων για μόλυβδο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	0,5μg/m ³
Τιμές ορίων για το όζον	Οριακή τιμή
Όριο ενημέρωσης (Μέση ωριαία τιμή)	180μg/m ³
Όριο συναγερμού (Μέση ωριαία τιμή)	240μg/m ³
Τιμή – στόχος για την προστασία της ανθρώπινης υγείας (Μέγιστη ημερήσια μέση 8ωρη τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 25 φορές ανά έτος κατά μέση τιμή για διάστημα 3 ετών)	120μg/m ³
Τιμές ορίων για το μονοξείδιο του άνθρακα	Οριακή τιμή
Μέγιστη ημερήσια οκτάωρη τιμή	10mg/m ³
Τιμές ορίων για το βενζόλιο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	5μg/m ³
Τιμές στόχοι για μέταλλα και το βενζο(α)πυρένιο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	αρσενικό (6 ng/m ³) κάδμιο (5 ng/m ³) νικέλιο (20 ng/m ³) βενζο(α)πυρένιο (1 ng/m ³)

Μέσω των σχετικών οδηγιών, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να οργανώνουν δίκτυα μετρήσεων, να αξιολογούν συστηματικά την ποιότητα του αέρα και να λαμβάνουν μέτρα σε περιπτώσεις υπέρβασης των θεσπισμένων ορίων, στο πλαίσιο της ευρύτερης ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη μείωση της ρύπανσης και τη βιώσιμη ανάπτυξη (European Commission, 2024). Στην Ελλάδα η περιβαλλοντική πολιτική και ειδικότερα η διαχείριση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα εφαρμόζεται στο πλαίσιο ενός πολυεπίπεδου συστήματος διακυβέρνησης, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις και τις υποχρεώσεις που απορρέουν από την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Η κεντρική ευθύνη για τον σχεδιασμό, τον συντονισμό και την εφαρμογή των πολιτικών προστασίας του περιβάλλοντος ανήκει στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, το οποίο είναι αρμόδιο για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, την εφαρμογή μέτρων ελέγχου και τη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες. Παράλληλα οι περιφερειακές και τοπικές αρχές συμμετέχουν στην υλοποίηση της περιβαλλοντικής πολιτικής μέσω της συλλογής και διάχυσης δεδομένων της εφαρμογής τοπικών και περιφερειακών μέτρων και της ενημέρωσης του κοινού, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διαχείριση και βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε τοπικό επίπεδο (Committee of the Regions, 2024).

Το εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα διαμορφώνεται μέσα από την ενσωμάτωση βασικών ευρωπαϊκών οδηγιών που καθορίζουν οριακές τιμές, στόχους ποιότητας και διαδικασίες παρακολούθησης για κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Κεντρικό ρόλο κατέχει η Οδηγία 2008/50/EK (Πίνακας 1.3) για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη η οποία ενοποίησε και αντικατέστησε προγενέστερες οδηγίες, καθώς και η Οδηγία 2004/107/EK για τον έλεγχο συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων.

Οι οδηγίες αυτές έχουν ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία μέσω κοινών υπουργικών αποφάσεων και αποτελούν τη βάση για τη λειτουργία των δικτύων μέτρησης, την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και τη λήψη μέτρων σε περιπτώσεις υπέρβασης των θεσπισμένων ορίων (Κωστέα, 2016). Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί, αρκετά κράτη μέλη εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις στην επίτευξη των καθορισμένων ορίων, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή δράση και ενίσχυση των μέτρων προστασίας της ατμόσφαιρας.

Πίνακας 1.4. Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) 2024/2881 της 23-10-2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Πρότυπα ποιότητας του αέρα

Τμήμα 1 — Οριακές τιμές για την προστασία της υγείας του ανθρώπου

Πίνακας 1 — Οριακές τιμές για την προστασία της υγείας του ανθρώπου που θα πρέπει να επιτευχθούν έως την 1η Ιανουαρίου 2030

Περίοδος υπολογισμού μέσου όρου	Οριακή τιμή
AΣ_{2,5}	
1 ημέρα	25 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος
Ημερολογιακό έτος	10 µg/m ³
AΣ₁₀	
1 ημέρα	45 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος
Ημερολογιακό έτος	20 µg/m ³
Διοξείδιο του αζώτου (NO₂)	
1 ώρα	200 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 3 φορές ανά ημερολογιακό έτος
1 ημέρα	50 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος
Ημερολογιακό έτος	20 µg/m ³
Διοξείδιο του θείου (SO₂)	
1 ώρα	350 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 3 φορές ανά ημερολογιακό έτος
1 ημέρα	50 µg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος
Ημερολογιακό έτος	20 µg/m ³
Βενζόλιο	
Ημερολογιακό έτος	3,4 µg/m ³
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	
Μέγιστος ημερήσιος μέσος όρος 8 ωρών ⁽¹⁾	10 mg/m ³
1 ημέρα	4 mg/m ³ Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές ανά ημερολογιακό έτος
Μόλυβδος (Pb)	
Ημερολογιακό έτος	0,5 µg/m ³

Για το λόγο αυτό η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, στην ανακοίνωσή της (11-12-2024) με τίτλο «Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία», καθόρισε έναν φιλόδοξο χάρτη πορείας για το μετασχηματισμό της Ένωσης σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία, με μια σύγχρονη,

αποδοτική ως προς τη χρήση των πόρων και ανταγωνιστική οικονομία, με στόχο την προστασία, τη διατήρηση και την ενίσχυση του φυσικού κεφαλαίου της Ένωσης, καθώς και την προστασία της υγείας και της ευημερίας των πολιτών από κινδύνους και επιπτώσεις που σχετίζονται με το περιβάλλον. Ειδικότερα όσον αφορά τον καθαρό αέρα, η Επιτροπή δεσμεύτηκε για την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την καλύτερη ευθυγράμμιση των προτύπων ποιότητας του αέρα της ΕΕ με τις συστάσεις (κατευθυντήριες γραμμές) του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO-ΠΟΥ) και τη συμβολή στην επίτευξη των στόχων του σχεδίου δράσης για μηδενική ρύπανση. Ανακοίνωσε επίσης, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, ότι θα ενισχύσει τις διατάξεις για την παρακολούθηση, την κατάρτιση μοντέλων και την εκπόνηση σχεδίων για την ποιότητα του αέρα. Έτσι, οι οδηγίες 2004/107/EK και 2008/50/EK, καταργούνται από τη 12-12-2026, με την επιφύλαξη των υποχρεώσεων των κρατών μελών όσον αφορά τις προθεσμίες για τη μεταφορά στο εθνικό δίκαιο των οδηγιών, και τίθεται σε ισχύ η Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (Πίνακας 1.4), με την οποία εισάγονται αυστηρότερα όρια ποιότητας του αέρα.

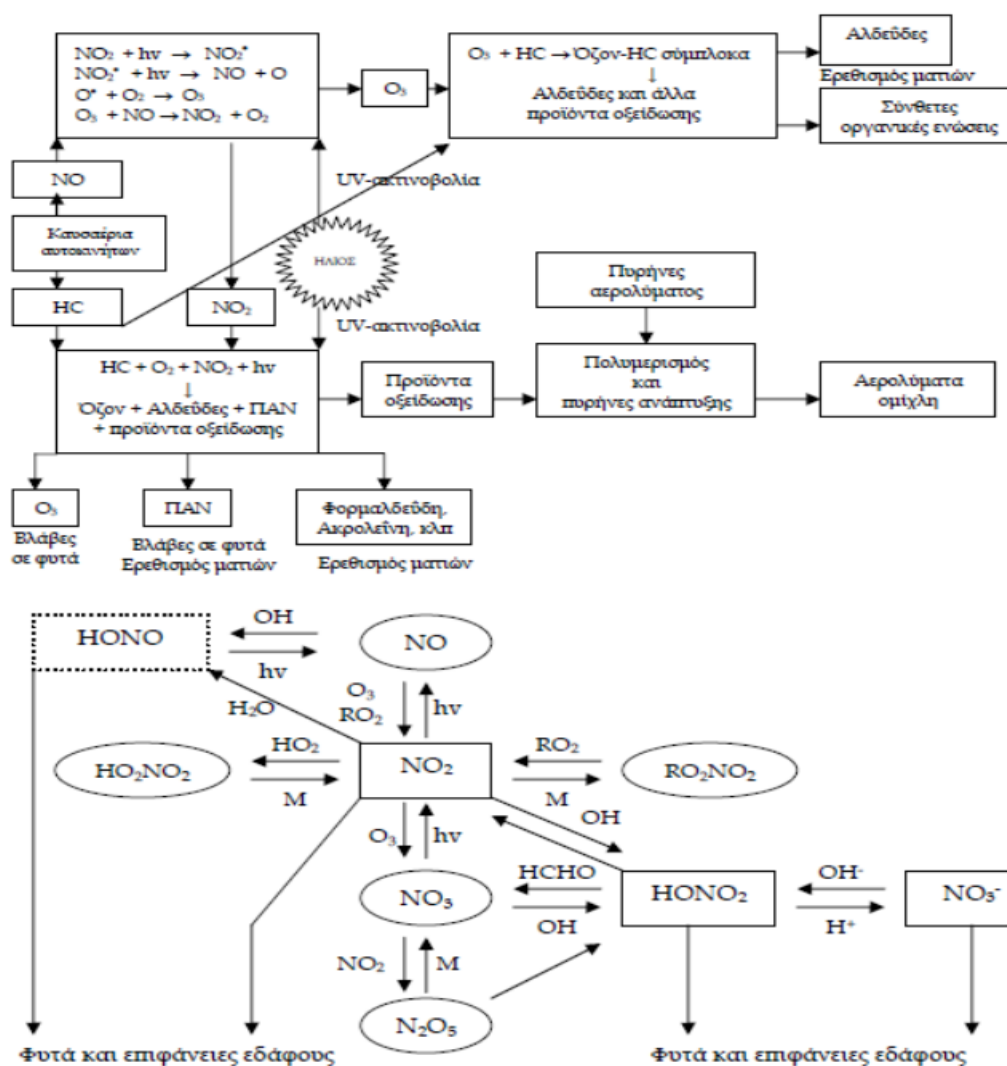
2. ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥΣ

Η φωτοχημική ρύπανση είναι μια μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που εμφανίζεται συχνά στα μεγάλα αστικά κέντρα. Για τα υψηλά επίπεδα αυτής της ρύπανσης χρησιμοποιείται συχνά ο όρος «φωτοχημικό νέφος». Το φωτοχημικό νέφος οφείλεται στη συσσώρευση αέριων ρύπων, οι οποίοι προέρχονται κυρίως από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων, τη βιομηχανία και τη διακίνηση των καυσίμων.

2.1 Μηχανισμοί σχηματισμού φωτοχημικών ρύπων

Το φωτοχημικό νέφος οφείλεται κυρίως στα οξείδια του αζώτου, τους υδρογονάνθρακες το μονοξείδιο του άνθρακα και το όζον. Κύριος δείκτης της φωτοχημικής ρύπανσης είναι το επιφανειακό (τροποσφαιρικό) όζον, που είναι ένας δευτερογενής ατμοσφαιρικός ρύπος, ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται για να καθορίσει το βαθμό επικινδυνότητας των φωτοχημικών επεισοδίων.

Έτσι, όταν στην ατμόσφαιρα συνυπάρχουν όζον (O_3), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO_x) και υδρογονάνθρακες (πρόδρομοι ρύποι), παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ξεκινούν φωτοχημικές αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις αυτές δεν είναι μεμονωμένες αλλά εξελίσσονται ως αλυσιδωτή αντίδραση. Στο πρώτο στάδιο σχηματίζονται ελεύθερες ρίζες. Αυτές αντιδρούν στη συνέχεια με το οξυγόνο και με τα οξείδια του αζώτου δημιουργώντας νέες ρίζες και ενδιάμεσα προϊόντα. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας παράγονται: διοξείδιο του αζώτου (NO_2), αλδεύδες που είναι οργανικές ενώσεις επιβλαβείς για την υγεία. Οι ενώσεις αυτές θεωρούνται από τα πιο επικίνδυνα της αλυσιδωτής αντίδρασης. Παράλληλα, μέσω μιας εναλλακτικής διαδρομής από τις αλδεύδες σχηματίζεται μια ιδιαίτερα τοξική ένωση το νιτρικό υπεροξυακετύλιο (PAN) το οποίο προκαλεί έντονο ερεθισμό στα μάτια. Όλες αυτές οι αντιδράσεις οδηγούν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους, το οποίο εμφανίζεται ως καφέ θολό πέπλο στην ατμόσφαιρα. Το φωτοχημικό νέφος ερεθίζει τα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα ενώ προκαλεί σοβαρές βλάβες και στη βλάστηση. Το φαινόμενο παρατηρείται συχνά σε παράκτιες πόλεις με έντονη κυκλοφορία οχημάτων και ήπιο χειμερινό κλίμα, όπως είναι το Λος Άντζελες στις Ηνωμένες Πολιτείες (Anil Kumar De, 2004).



Εικόνα 2.1 Σχηματισμός και καταστροφή του όζοντος (παρατηρείται πολυπλοκότητα μηχανισμών και δημιουργία μεγάλου αριθμού δευτερογενών αέριων ρύπων) (Γεντενάκης, 2010; Κωστέα, 2016; Παρασκά, 2014).

Οι κύριες αντιδράσεις της χημείας της τροπόσφαιρας χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: α) Φωτολυτικές αντιδράσεις, β) Αντιδράσεις που δημιουργούν ατμοσφαιρικούς οξειδωτικούς παράγοντες, γ) Αντιδράσεις που παράγουν ελεύθερες ρίζες και καρβονυλικές ενώσεις και 4) Αντιδράσεις που σταματούν τις αλυσιδωτές διαδικασίες. Από αυτές τις αντιδράσεις σχηματίζονται χαρακτηριστικά προϊόντα, όπως νέες ενώσεις με τη συμμετοχή του διοξειδίου του αζώτου, οι οποίες με τη σειρά τους φωτολύονται και παράγουν όζον, καθώς και νέα προϊόντα οξειδωσης, κυρίως καρβονυλικές ενώσεις (Ζιώμας και Ρεμουντάκη, 2003).

Η μέγιστη συγκέντρωση του όζοντος που μπορεί να επιτευχθεί σε μια ρυπασμένη ατμόσφαιρα εξαρτάται όχι μόνο από τις απόλυτες συγκεντρώσεις πτητικών οργανικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου, αλλά και από την αναλογία τους. Οι καλοκαιρινές συνθήκες ευνοούν το σχηματισμό του όζοντος, κυρίως λόγω της αυξημένης υπεριώδους ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου σε συνθήκες στασιμότητας. Στις αγροτικές περιοχές, η παραγωγή όζοντος περιορίζεται συνήθως από τη διαθεσιμότητα οξειδίων του αζώτου. Οι φυσικές πηγές αντιπροσωπεύουν περίπου το 15% των επιπέδων οξειδίου του αζώτου το καλοκαίρι, αλλά ενδέχεται να αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερο ποσοστό σε ορισμένες αγροτικές περιοχές. Επίσης, στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι μετεωρολογικές συνθήκες φαίνεται να είναι καθοριστικός παράγοντας που προσδιορίζει τις φωτοχημικές διεργασίες και τη μεταβλητότητα από έτος σε έτος των συγκεντρώσεων του όζοντος σε κάθε περιοχή (Στρατάκη, 2022).

2.1.1 Οξείδια του Αζώτου NO_x

Τα οξείδια του αζώτου είναι πρόδρομες ουσίες του όζοντος. Τα βασικά οξείδια αυτής της ομάδας είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2). Μαζί αναφέρονται ως NO_x ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). Παρότι έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες, καθώς και διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συνήθως εξετάζονται ως σύνολο. Το μονοξείδιο του αζώτου είναι άχρωμο και άγευστο, αντίθετα το διοξείδιο του αζώτου έχει καστανοκόκκινο χρώμα και ιδιάζουσα οσμή. Κατά την καύση, παράγεται ένα μείγμα NO και NO_2 με το NO να αποτελεί πάνω από το 90% των NO_x .

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) σχηματίζεται κυρίως από αντιδράσεις μεταξύ του αζώτου (N_2) και του οξυγόνου (O_2) της ατμόσφαιρας στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες μιας ζώνης καύσης. Αυτό το φαινόμενο είναι ενδόθερμο (απορροφά θερμότητα), με αποτέλεσμα η παραγωγή θερμικού NO να είναι μεγαλύτερη στις πιο θερμές περιοχές του θαλάμου καύσης. Το NO από καύσιμο αντίθετα προέρχεται από το άζωτο που περιέχεται μέσα στο ίδιο το καύσιμο. Το πετρέλαιο και ο άνθρακας περιέχουν 0,5 % - 1,5 % άζωτο ενώ το φυσικό αέριο έχει πολύ λιγότερο. Τέλος, το μονοξείδιο του αζώτου παράγεται και από φυσικές πηγές του εδάφους, με βακτήρια να συμβάλλουν στη δημιουργία του μέσω βιολογικών διεργασιών (Atafar and Sarkhosh, 2025).

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) αποτελεί ένα ιδιαίτερα δραστικό αέριο μόριο με σημαντικό ρόλο ως μόριο σηματοδότησης τόσο στους ζωικούς οργανισμούς όσο και στα φυτά. Στα φυτικά συστήματα ρυθμίζει βασικές φυσιολογικές διεργασίες, όπως η

βλάστηση, η ανάπτυξη των ριζών και οι αποκρίσεις σε βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις. Η παραγωγή του πραγματοποιείται μέσω αναγωγικών και οξειδωτικών βιοχημικών οδών σε διάφορα κυτταρικά οργανίδια όπως οι χλωροπλάστες και τα μιτοχόνδρια. Παράλληλα, η αύξηση των επιπέδων NO μπορεί να επηρεάσει το οξειδοαναγωγικό ισοζύγιο των κυττάρων και να ενεργοποιήσει μηχανισμούς απόκρισης σε περιβαλλοντικό στρες, γεγονός που αναδεικνύει τη διττή φύση του ως φυσιολογικού ρυθμιστή αλλά και δυνητικά επιβλαβούς παράγοντα (Dalal, 2023).

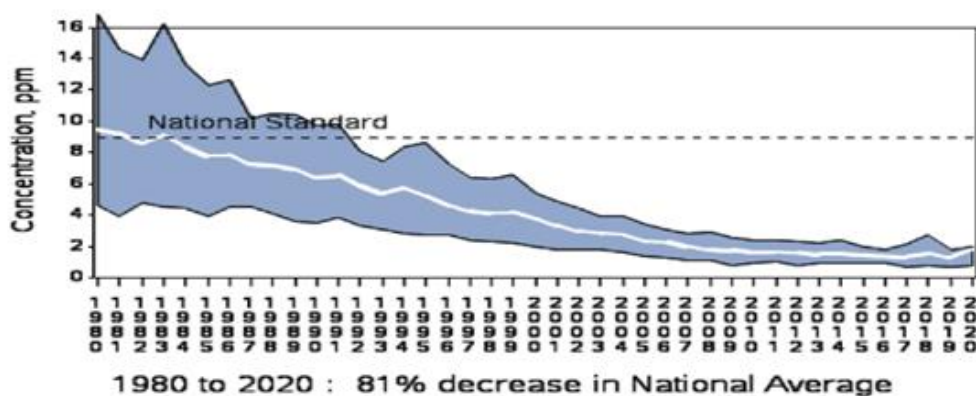
Η καύση ορυκτών καυσίμων είναι η κύρια πηγή NO και μιας μικρής ποσότητας διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Ωστόσο, το NO μπορεί να μετατραπεί σε NO_2 μέσω οξείδωσης. Το NO_2 είναι ένα αέριο που εκπέμπεται κυρίως από βιομηχανικές πηγές και πηγές κυκλοφορίας οχημάτων.

Τα οξείδια του αζώτου (NO και NO_2) εμπλέκονται και ενεργοποιούν το φωτοχημικό κύκλο αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα και το σχηματισμό της φωτοχημικής ρύπανσης (Εικόνα 2.1), παίζοντας καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο του τροποσφαιρικού όζοντος. Η συγκέντρωση του O_3 εξαρτάται ευθέως από το λόγο NO/ NO_2 (Γεντεκάκης, 2010). Επομένως η αύξηση του O_3 στην ατμόσφαιρα είναι σε άμεση συνάρτηση με το μετασχηματισμό του NO σε NO_2 . Γενικά, οι μεγαλύτερες τιμές του NO_2 παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της Άνοιξης και του Καλοκαιριού, ενώ αντιθέτως, οι μεγαλύτερες τιμές του NO παρατηρούνται στα τέλη του φθινοπώρου και κατά τη διάρκεια του Χειμώνα, εξαιτίας της εντονότερης λειτουργίας των πηγών (αύξηση της χρήσης των συστημάτων κεντρικής θέρμανσης και της κυκλοφορίας των οχημάτων) και των επικρατούντων μετεωρολογικών συνθηκών που δεν ευνοούν την καταστροφή του (μειωμένη ηλιοφάνεια) (Παρασχά, 2014).

Σε αστικές περιοχές οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις NO_x κυμαίνονται συνήθως από 10 έως 100ppb, με ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων ανάλογα με τη διακύμανση της κυκλοφορίας των οχημάτων. Οι μέγιστες μέσες ημερήσιες και ωριαίες συγκεντρώσεις των NO_x πολλές φορές φθάνουν έως 200ppb και 400ppb, αντίστοιχα (Βερύκιος, 2003). Η γεωγραφική κατανομή των εκπομπών NO_x εξαρτάται κυρίως από τη βιομηχανία και το επίπεδο διαβίωσης των κατοίκων. Οι ετήσιες εκπομπές NO_x διαφόρων χωρών παρουσίασαν γενικά πτωτική τάση μεταξύ 1980 και 2000, παρά την αύξηση της βιομηχανικής δραστηριότητας και του βιοτικού επιπέδου (Βερύκιος, 2003).

2.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα CO

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα αέριο που δεν έχει χρώμα, γεύση ή μυρωδιά, αλλά είναι πολύ τοξικό και προκαλεί θάνατο σε υψηλές συγκεντρώσεις. Όταν εισπνέεται δεσμεύει την αιμοσφαιρίνη στο αίμα, με περίπου 200 φορές μεγαλύτερη ικανότητα από το οξυγόνο, δημιουργώντας ανθρακυλαιμοσφαιρίνη και έτσι εμποδίζει τους πνεύμονες να μεταφέρουν οξυγόνο στα όργανα. Στην ατμόσφαιρα παραμένει για μικρό διάστημα καθώς οξειδώνεται σε CO₂ αντιδρώντας με ρίζες υδροξυλίου (OH). Είναι λίγο πιο ελαφρύ από τον αέρα. Στη φύση υπάρχει σε πολύ μικρές ποσότητες, περίπου 10-200 ppb. Οι συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα εξαρτώνται από πηγές ατελούς καύσης, όπως τα οχήματα. Στις πόλεις, η ποσότητά του στον αέρα αλλάζει ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες και την κίνηση των αυτοκινήτων. Συνήθως, οι τιμές του είναι κάτω από 10ppm.



Εικόνα 2.2 Εξέλιξη της εθνικής μέσης συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στις Ηνωμένες Πολιτείες (1980–2020), σε ppm, σε σχέση με το εθνικό πρότυπο ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα.

Πηγή: Auras & Selke (2022).

Το CO σχηματίζεται όταν καίγεται ο άνθρακας και αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο πριν παραχθεί το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Όταν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, το μεγαλύτερο μέρος του CO μετατρέπεται αμέσως σε CO₂. Ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει πλήρως στους κινητήρες των αυτοκινήτων, ενώ μικρότερες ποσότητες CO προέρχονται και από άλλες καύσεις όπως σε εργοστάσια παραγωγής ρεύματος ή εγκαταστάσεις καύσης απορριμμάτων (Βερύκιος, 2003). Το CO είναι ένας από τους κύριους ρύπους κριτήρια στην ατμόσφαιρα των πόλεων. Περισσότερο από το 50% όλων των ανθρωπογενών εκπομπών CO προέρχεται από τις μεταφορές, ενώ οι συγκεντρώσεις του είναι υψηλότερες κοντά σε αυτοκινητόδρομους και δρόμους. Οι συγκεντρώσεις CO τα τελευταία έτη έχουν μειωθεί καθώς τα νεότερα αυτοκίνητα έχουν καλύτερη αποδοτικότητα καυσίμου και

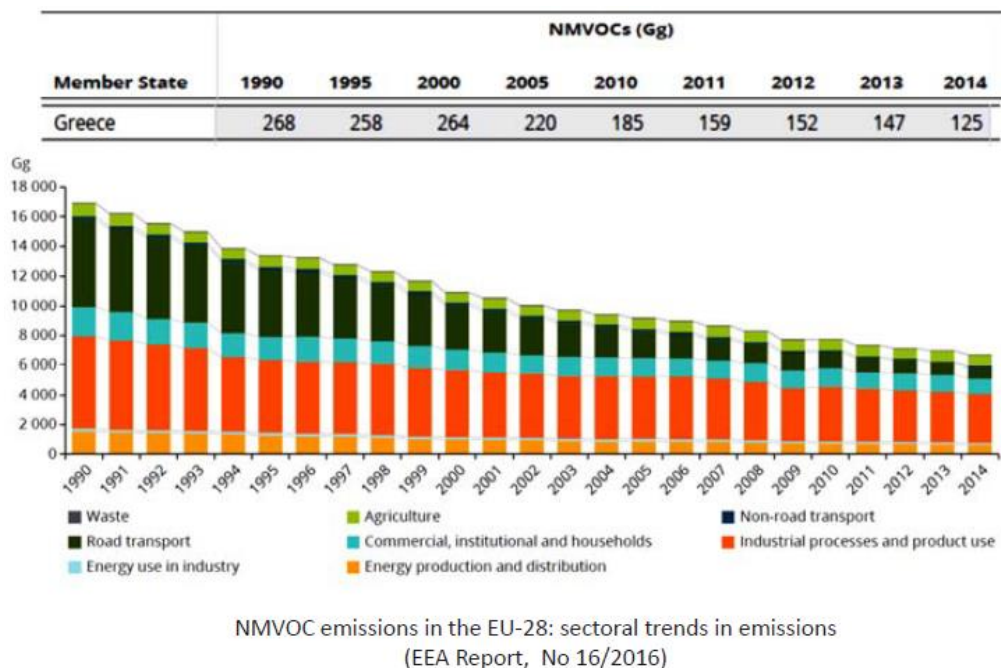
καταλυτικούς μετατροπείς. Η Εικόνα 2.2 δείχνει μείωση κατά 81% στις συγκεντρώσεις CO μεταξύ 1980 και 2020 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Auras & Selke, 2022).

2.1.3 Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs)

Οι Πτητικές Οργανικές Ενώσεις (VOCs) είναι οργανικές ενώσεις που εξατμίζονται εύκολα. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση (Directive 2004/42/CE) πτητική οργανική ένωση (*Volatile organic compounds* ή VOCs) είναι οποιαδήποτε οργανική ένωση που έχει αρχικό σημείο βρασμού μικρότερο ή ίσο με 250°C (482°F), μετρούμενο σε σταθερή ατμοσφαιρική πίεση 101.3kPa και μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε οπτικές ή ακουστικές αισθήσεις. Έτσι, VOCs είναι οι οργανικές ενώσεις που είναι παρούσες στην ατμόσφαιρα σε αέρια κατάσταση, αλλά κάτω από κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (25°C, 101.3kPa) θα ήταν υγρά ή στερεά.

Οι VOCs εκπέμπονται από ανθρωπογενείς πηγές όπως οχήματα, βιομηχανικές δραστηριότητες, χρήση διαλυτών, πετροχημική βιομηχανία, διύλιση πετρελαίου, παραγωγή και χρήση χρωμάτων/επιστρώσεων και οικιακή χρήση προϊόντων (Βερύκιος, 2003). Ειδικά οι οδικές μεταφορές, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις ανθρωπογενείς εκπομπές μη-μεθανικών υδρογονανθράκων (NMVOCs). Οι φυσικές πηγές εκπομπής VOCs είναι τα δάση και τα φυτά, μικροβιακές διεργασίες στο έδαφος, φωτιές και βιογενείς εκπομπές. Σε ορισμένες χώρες οι φυσικές πηγές μπορεί να είναι πολύ σημαντικές αλλά στις βιομηχανικές περιοχές κυριαρχούν οι ανθρωπογενείς. Ως προς την σύστασή τους οι VOCs περιέχουν αρωματικούς υδρογονάνθρακες (βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και τα ισομερή του ξυλολίου), αλκάνια και αλκένια, αλδεύδες, κετόνες, κλπ. Οι ενώσεις διαφέρουν σημαντικά ως προς τη χημική δραστικότητα, τη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα και την τοξικότητα. Ως προς τις εκπομπές και τη γεωγραφική κατανομή τους διαφέρουν ανά χώρα. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες παρατηρείται μείωση εκπομπών από το 1990 έως το 2000 (Βερύκιος, 2003). Η μείωση αυτή οφείλεται σε τεχνολογικές βελτιώσεις, καταλυτικούς μετατροπείς, νομοθεσία για καύσιμα και περιβαλλοντικές πολιτικές. Οι VOCs στην ατμόσφαιρα συμμετέχουν στο σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος (φωτοχημικό νέφος), στην παραγωγή δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων και έμμεσα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις είναι πολλές όπως συμβολή στο φωτοχημικό νέφος, τοξικές ή

καρκινογόνες ιδιότητες, ερεθισμοί αναπνευστικού συστήματος και περιβαλλοντική υποβάθμιση. Η Εικόνα 2.3 παρουσιάζει τη διαχρονική μεταβολή και το ποσοστό συμμετοχής των βασικών πηγών στις συνολικές εκπομπές NMVOCs για την ΕΕ και την Ελλάδα. Διακρίνεται ότι οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές είναι η χρήση διαλυτών, οι μεταφορές, η παραγωγή ενέργειας-πετροχημική βιομηχανία και οι λοιπές βιομηχανικές δραστηριότητες (EEA, 2016).

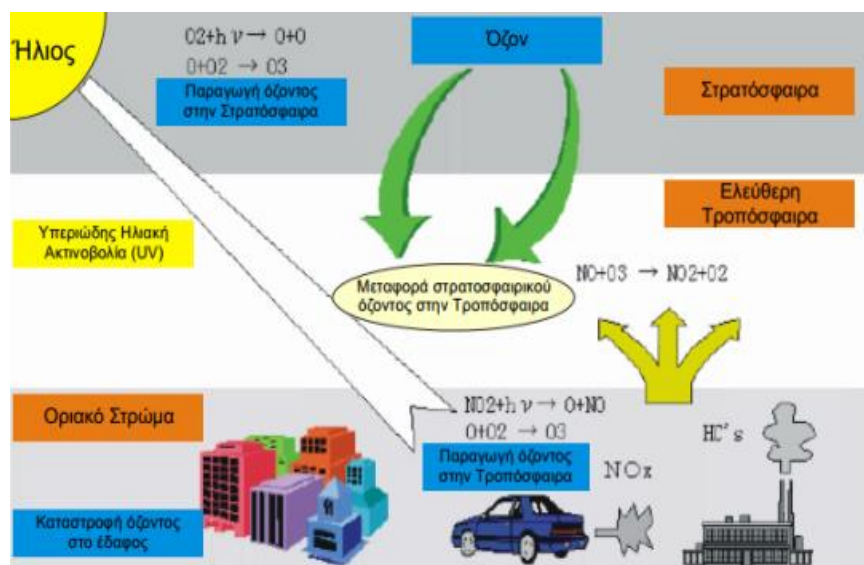


Εικόνα 2.3 Κατανομή εκπομπών NMVOCs ανά πηγή δραστηριότητας (Πηγή: EEA, 2016).

2.1.4 Όζον (O₃)

Το όζον είναι ένα ασταθές αέριο, που τείνει να μετατραπεί στη σταθερότερη αλλοτροπική μορφή του, το οξυγόνο (O₂). Ονομάστηκε έτσι λόγω της δυσοσμίας του (όζει, δηλαδή μυρίζει άσχημα), είναι άχρωμο αέριο, βαρύτερο του αέρα, περισσότερο διαλυτό στο νερό από το οξυγόνο και με ισχυρή οξειδωτική δράση (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003). Στην Ευρώπη τα φυσικά επίπεδα στην τροπόσφαιρα είναι συνήθως κάτω από 15 ppb, αλλά κάποιες φορές φτάνουν έως 100 ppb. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όζοντος στην τροπόσφαιρα σχηματίζονται με φωτοχημικές αντιδράσεις (Εικόνα 2.4), όταν οξειδώνονται το CO, πτητικές οργανικές ενώσεις, οξείδια του αζώτου (NO_x), παρουσία ηλιακού φωτός. Δεν υπάρχει άμεση, πρωτογενής εκπομπή όζοντος από ανθρωπογενείς πηγές. Ένα μικρό ποσοστό (περίπου 10-15%) προέρχεται από μεταφορά του από τη στρατόσφαιρα, όπου το όζον σχηματίζεται από O₂ υπό την επίδραση υπεριώδους φωτός και από ηλεκτρικές εκκενώσεις (κεραυνούς) στην τροπόσφαιρα

(Βερύκιος, 2003). Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του τροποσφαιρικού O_3 εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών του έτους και κατά τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες της ημέρας όταν δηλαδή υπάρχει υψηλή θερμοκρασία και ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία (Τσέζος & Ρεμουντάκη, 2010).



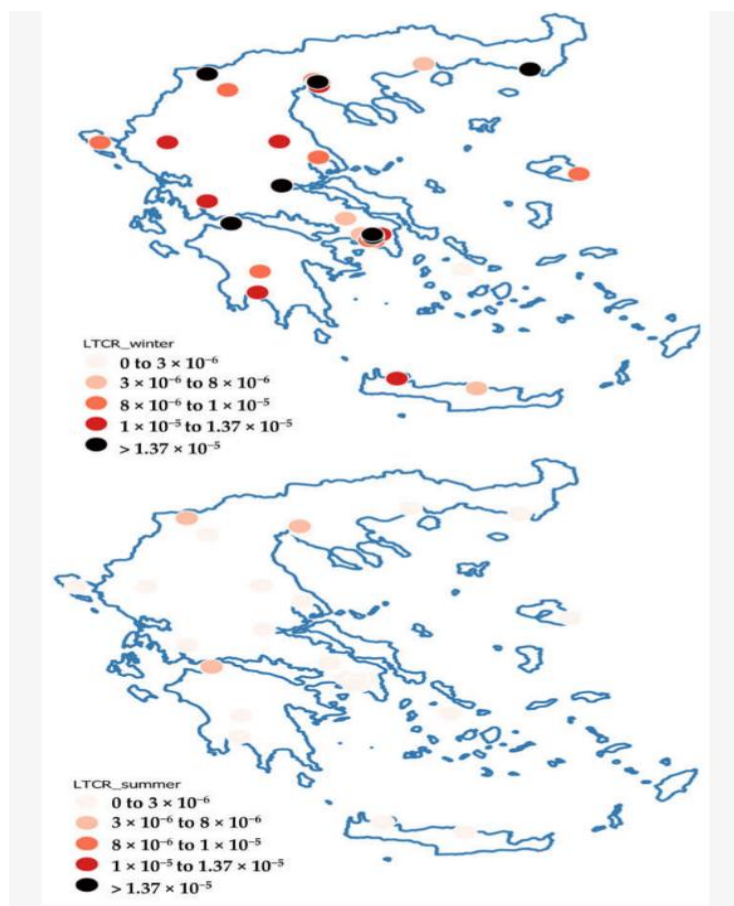
Εικόνα 2.4 Σχηματική παράσταση της προέλευσης του τροποσφαιρικού O_3 (Πηγή: Ζάνης, 2014).

Είναι ένα σημαντικό συστατικό της φωτοχημικής αιθαλομίχλης και οδηγεί σε αναπνευστικά προβλήματα, άσθμα, μειωμένη πνευμονική λειτουργία και αναπνευστικές παθήσεις. Έτσι, το όζον μειώνει την λειτουργία των πνευμόνων, προκαλεί επιδείνωση του άσθματος, αυξάνει τα περιστατικά σε νοσοκομεία και μπορεί να συμβάλει σε πρόωρους θανάτους. Τα πρώτα συμπτώματα στην υγεία είναι τσούξιμο στα μάτια, ερεθισμός στη μύτη και το λαιμό, ξηρότητα του λάρυγγα, πονοκέφαλος, ζαλάδα και έντονο αίσθημα κόπωσης (Katsouyanni, 2003). Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι ακόμα και χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων O_3 επιδρούν, τόσο σε ανθρώπους με αναπνευστικά προβλήματα και παιδιά, όσο και σε υγιείς ενήλικες (Βερύκιος, 2003). Επίσης, βλάπτει τα φυτά, τα δέντρα, τις καλλιέργειες, τα οικοσυστήματα και φθείρει τα υλικά (Μελάς, 2007). Ακόμα και σε συγκεντρώσεις μικρότερες από τα όρια που θέτουν η ΕΕ και οι ΗΠΑ και οι διεθνείς οργανισμοί, το όζον μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην υγεία. Για να προστατευθούν οι άνθρωποι και οι καλλιέργειες, πολλοί φορείς έχουν θεσπίσει Πρότυπα Ποιότητας Αέρα για το τροποσφαιρικό όζον. Στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ, τα όρια έχουν γίνει πιο αυστηρά και περιλαμβάνουν πλέον ειδική προστασία και για τις αγροτικές καλλιέργειες. Το πρόβλημα της ρύπανσης του όζοντος είναι ιδιαίτερα έντονο στην Ελλάδα, αλλά και

γενικότερα σε όλη τη Μεσόγειο, διότι είναι μια περιοχή πλούσια σε ηλιακή ακτινοβολία, υπερβαίνοντας κατά τη διάρκεια του έτους τα θεσμοθετημένα όρια που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ζάνης, 2014).

2.1.5 Βενζόλιο C_6H_6

Το βενζόλιο (benzene) C_6H_6 είναι μια σημαντική πτητική οργανική ένωση (VOC) που ανήκει στην ομάδα των αρωματικών υδρογονανθράκων, η οποία αποτελεί έναν από τους κύριους δείκτες της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αστικά περιβάλλοντα. Μαζί με το τολουόλιο, το αιθυλοβενζόλιο και τα ξυλένια, απαρτίζουν την ομάδα των BTEX, που λόγω της διαδεδομένης παρουσίας τους στο περιβάλλον και των επιδράσεών τους στην υγεία και την ατμοσφαιρική χημεία, παρακολουθούνται συχνά από τα δίκτυα μετρήσεων ποιότητας αέρα.



Εικόνα 2.5 Χωρική κατανομή του δείκτη κινδύνου καρκινογένεσης (LTCR) λόγω έκθεσης σε βενζόλιο κατά τον χειμώνα και το καλοκαίρι στην Ελλάδα (Πηγή: Kanellopoulos et al., 2025)

Κύριες πηγές βενζολίου είναι τα καυσαέρια αυτοκινήτων (βενζινοκίνητα οχήματα), οι βιομηχανίες (δυλιστήρια, χημική βιομηχανία), η διακίνηση καυσίμων, η οικιακή θέρμανση και ο καπνός του τσιγάρου. Το βενζόλιο αποτελεί φυσικό συστατικό του αργού πετρελαίου (1-5%), η δε καρκινογόνος και μεταλλαξιογόνος δράση του είναι γνωστή εδώ και πολλές δεκαετίες (Vlachokostas et al., 2012). Προστίθεται σε μικρές αναλογίες στα καύσιμα μηχανών εσωτερικής καύσης για να βελτιώσει την ποιότητά τους (αύξηση του αριθμού οκτανίων). Η βραχυχρόνια έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις φέρνει ζάλη, πονοκέφαλο, ναυτία, ερεθισμό στα μάτια και τη μύτη και απώλεια αισθήσεων. Η μακροχρόνια έκθεση καταστρέφει τον μυελό των οστών, μειώνει τα αιμοσφαίρια και προκαλεί λευχαιμία, καθώς θεωρείται ισχυρή καρκινογόνη ουσία.

Η ετήσια μελέτη των BTEX σε 33 σταθμούς σε όλη την Ελλάδα έδειξε ότι οι συγκεντρώσεις αυτών των ρυπαντών παρουσιάζουν σημαντική εποχιακή και χωρική μεταβλητότητα με τα υψηλότερα επίπεδα να καταγράφονται κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, όπως η Αττική και η Θεσσαλονίκη, σαν αποτέλεσμα, τόσο της αυξημένης κυκλοφορίας και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όσο και των μετεωρολογικών συνθηκών (Kanellopoulos et al., 2025; ΥΠΕΝ, 2025). Τα δεδομένα αυτά υπογραμμίζουν την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση και εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης της ποιότητας αέρα προκειμένου να μειωθεί η έκθεση του πληθυσμού σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις βενζολίου (Kanellopoulos et al., 2025). Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η χωρική μεταβολή του δείκτη Lifetime Cancer Risk (LTCR) για το βενζόλιο σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας κατά τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο. Οι τιμές LTCR υπολογίστηκαν από μετρήσεις συγκεντρώσεων βενζολίου και εκφράζουν την πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής, λόγω χρόνιας εισπνοής αυτού του ρύπου. Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές LTCR εμφανίζονται κυρίως σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, όπως η Αττική, η Θεσσαλονίκη και η Πάτρα με εντονότερη επιβάρυνση κατά τους χειμερινούς μήνες γεγονός που αποδίδεται στη μειωμένη ατμοσφαιρική διασπορά και στις αυξημένες ανθρωπογενείς εκπομπές. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τιμές LTCR της τάξης του 10^{-6} έως 10^{-5} θεωρούνται αποδεκτές από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας ενώ η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA) προτείνει ως επιθυμητό όριο τιμές μικρότερες του 10^{-6} (Kanellopoulos et al., 2025).

3. ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ

Η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ανθρώπινη υγεία και την κατάσταση των οικοσυστημάτων και των υλικών. Η ατμόσφαιρα λειτουργεί ως μέσο μεταφοράς εκπομπών, τόσο σε τοπικό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Επομένως, πολλά από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα η ανθρωπότητα οφείλονται στις εκπομπές αέριων ρύπων στο περιβάλλον, ενώ καθοριστικές είναι οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά, τη θέση και την ποσότητα των εκπομπών, έτσι ώστε εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Οι εκπομπές χωρίζονται κυρίως σε δυο κατηγορίες, στις φυσικές εκπομπές και στις ανθρωπογενείς εκπομπές, που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ανθρωπογενείς εκπομπές διότι, τις περισσότερες φορές, σ' αυτές οφείλεται η αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στη συνέχεια στην Διπλωματική εργασίας θα αναφερθούμε διεξοδικά στις ανθρωπογενείς εκπομπές και τις μεθόδους υπολογισμού τους.

3.1 Εκτίμηση εκπομπών με χρήση βιβλιογραφικών δεδομένων και μοντέλων

Ανθρωπογενείς εκπομπές ονομάζονται οι εκπομπές οι οποίες προέρχονται από τις ανθρωπινές δραστηριότητες, βασικότερες των οποίων είναι οι μεταφορές, η βιομηχανία, η παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, οι κεντρικές θερμάνσεις, η χρήση διαλυτών, η διαχείριση και η αποθήκευση απορριμμάτων και η αποθήκευση και διανομή καυσίμων και βιομάζας. Ο υπολογισμός και των ανθρωπογενών εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων γίνεται συνήθως σε ωριαία ή ετήσια βάση. Έτσι λοιπόν, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός και η εκτίμηση των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Τα στοιχεία σχετικά με τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων στο περιβάλλον, είναι δομημένα σύμφωνα με κάποιους κανόνες και αποτελούν ένα σύστημα απογραφής εκπομπών (emission inventory) (ΥΠΕΝ, 2025). Οι εκπομπές ενός ρύπου υπολογίζονται είτε πειραματικά είτε θεωρητικά. Ο πειραματικός υπολογισμός πραγματοποιείται με μετρήσεις στην πηγή της ρύπανσης, ενώ ο θεωρητικός υπολογισμός στηρίζεται στους διαφόρους συντελεστές εκπομπής. Πολλές φορές ο πειραματικός υπολογισμός δεν είναι

εφικτός λόγω του υψηλού κόστους συντήρησης και λειτουργίας των οργάνων. Έτσι, ο θεωρητικός υπολογισμός αποτελεί εναλλακτική προσέγγιση, ο οποίος βασίζεται στους συντελεστές εκπομπής (ποσότητα του ρύπου που απελευθερώνεται ανά μονάδα δραστηριότητας) και στη δραστηριότητα της πηγής (αντιπροσωπευτική μονάδα που περιγράφει την δραστηριότητα της υπό εξέταση πηγής, όπως για παράδειγμα η ποσότητα του προϊόντος που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σε μια βιομηχανία) (EEA, 2001; 2013; Eleftheriadis et al., 2014; Markakis et al., 2010; Κωστέα, 2016).

Όταν τα δεδομένα δραστηριότητας λείπουν, οι υπολογισμοί μπορούν να στηριχτούν σε γενικότερα στατιστικά στοιχεία τα οποία είναι πιο εύκολα διαθέσιμα. Έτσι, ο υπολογισμός των εκπομπών ρύπων από ανθρωπογενείς διαδικασίες είναι μια πολύπλοκη διαδικασία διότι δεν είναι εύκολο να γίνουν μετρήσεις εκπομπών για όλες τις δραστηριότητες και επομένως οι εκπομπές πολλές φορές υπολογίζονται ποσοτικά με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων (EEA, 2013; Eleftheriadis et al., 2014; Markakis et al., 2010). Επειδή οι υπολογισμοί συχνά στηρίζονται σε ελλιπή στοιχεία, πολύπλοκη μεθοδολογία και κάποιες υποθέσεις, είναι αναπόφευκτο πολλές φορές να υπάρχει αβεβαιότητα στις υπολογιζόμενες εκπομπές.

Επομένως, η εκτίμηση των ανθρωπογενών εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων πραγματοποιείται πολλές φορές μέσω της χρήσης επίσημων βιβλιογραφικών δεδομένων και εθνικών απογραφών, οι οποίες βασίζονται σε τυποποιημένες μεθοδολογίες υπολογισμού. Στη χώρα μας, διαχρονικά, έχουν γίνει διάφορες μελέτες έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθούν οι εκπομπές από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, σε μια προσπάθεια να προσδιορισθούν τα χωρικά, χρονικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των πηγών των εκπομπών σε ευρύτερες περιοχές. Στον ελλαδικό χώρο, η βασική πηγή δεδομένων για τις εκπομπές αποτελεί η Εθνική Απογραφή Εκπομπών Ατμοσφαιρικών Ρύπων, η οποία καταρτίζεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ, 2025) και υποβάλλεται σε ετήσια βάση στο πλαίσιο των υποχρεώσεων της χώρας προς την Ευρωπαϊκή Ένωση και τους διεθνείς οργανισμούς.

Οι εθνικές απογραφές εκπομπών ακολουθούν τις κατευθυντήριες οδηγίες του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (EMEP/EEA) και περιλαμβάνουν εκτιμήσεις εκπομπών για βασικούς ρύπους, όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO_2), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs - NMVOCs), η αμμωνία (NH_3) και τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $\text{PM}_{2,5}$, ανά τομέα δραστηριότητας. Οι τομείς αυτοί περιλαμβάνουν

μεταξύ άλλων την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, τις μεταφορές, τη βιομηχανία, τη γεωργία και τη διαχείριση αποβλήτων (ΥΠΕΝ, 2025) .

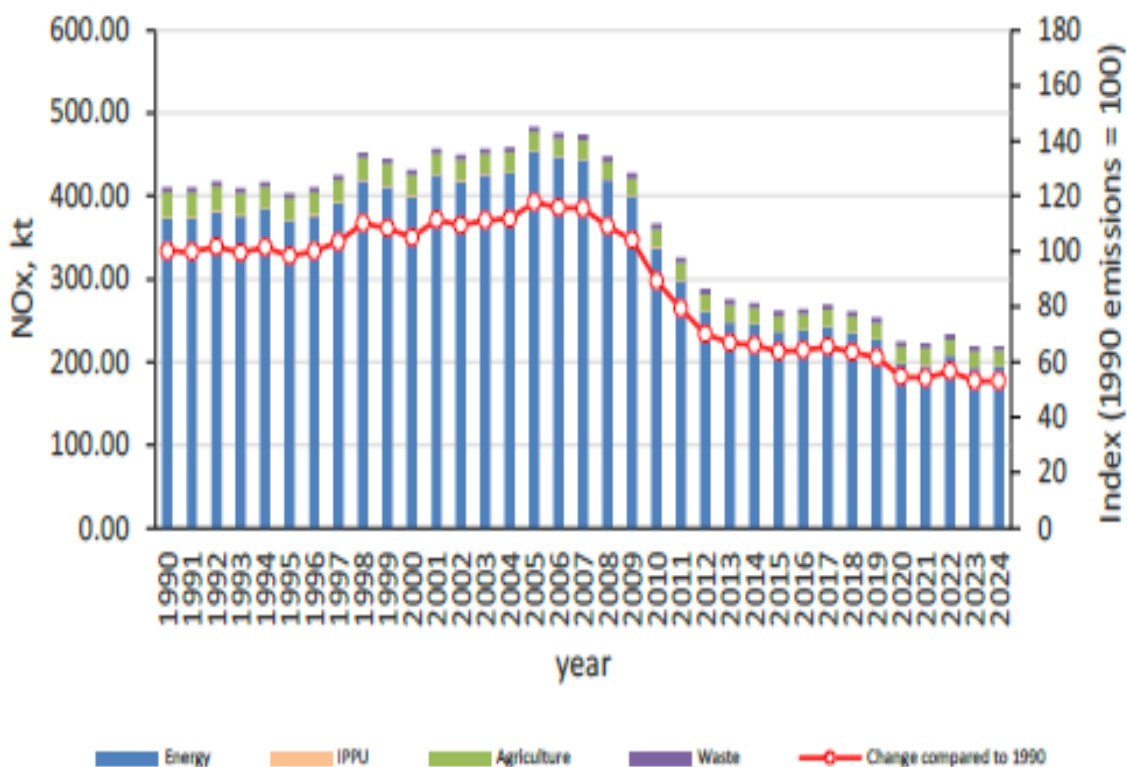
Παράλληλα με τις εθνικές απογραφές, σημαντική πηγή πληροφόρησης αποτελούν οι Λογαριασμοί Αερίων Εκπομπών της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ), οι οποίοι εντάσσουν τις εκπομπές στο πλαίσιο των εθνικών λογαριασμών και συνδέουν τα επίπεδα εκπομπών με την οικονομική δραστηριότητα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανάλυση της συμβολής των επιμέρους κλάδων της οικονομίας, καθώς και των νοικοκυριών στις συνολικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Η συνδυαστική χρήση των εθνικών απογραφών και των στατιστικών λογαριασμών εκπομπών παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της εξέλιξης των ανθρωπογενών εκπομπών στον ελλαδικό χώρο και αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων εκτίμησης και πρόβλεψης της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Το όζον και τα οξείδια του αζώτου των αστικών περιοχών συγκαταλέγονται μεταξύ των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων των μεγαλουπόλεων του Ευρωπαϊκού Νότου και επομένως οι επιπτώσεις της φωτοχημικής ρύπανσης στο περιβάλλον και κυρίως στην υγεία του ανθρώπου είναι σημαντικές. Για το λόγο αυτό οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν δώσει ιδιαίτερη έμφαση στην εκτίμηση των εκπομπών των φωτοχημικών ατμοσφαιρικών ρύπων και στη συνεχή και συστηματική παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των επιπέδων τους, σε διάφορες αστικές, περιαστικές και βιομηχανικές περιοχές της Ε.Ε. Στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιασθούν εκτιμήσεις των εκπομπών των φωτοχημικών ατμοσφαιρικών ρύπων στην Ελλάδα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

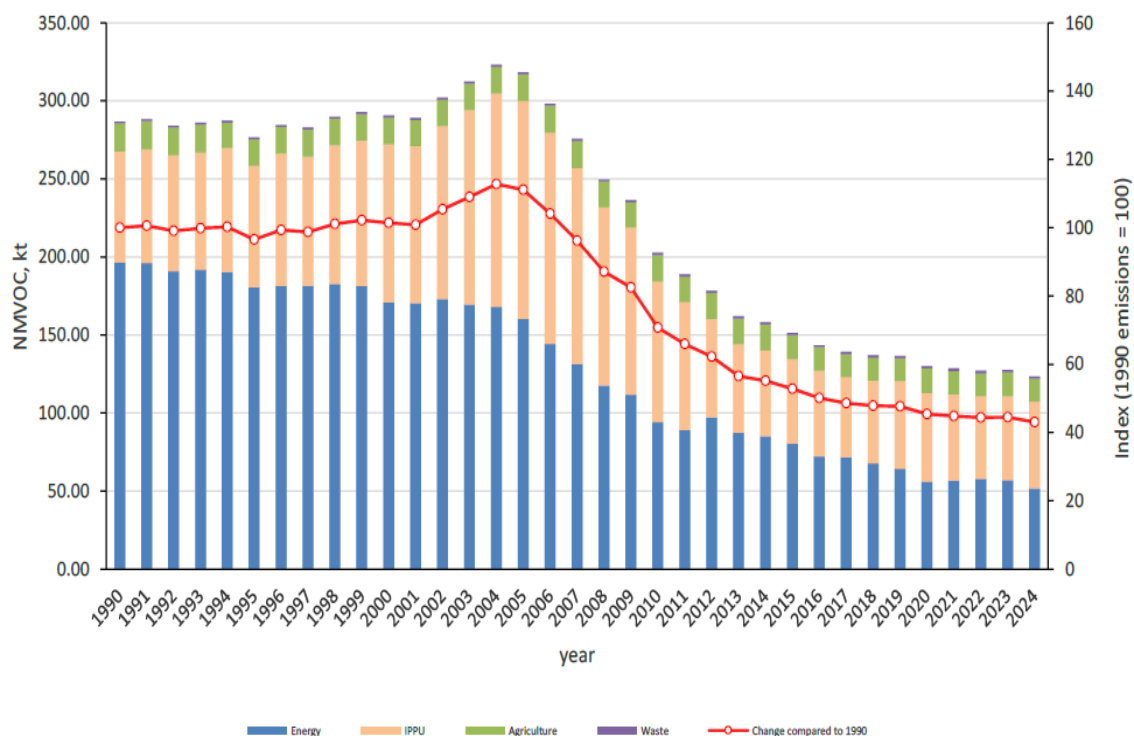
Τις τελευταίες δεκαετίες στην Ευρώπη και στην Ελλάδα έχει παρατηρηθεί μείωση στις ανθρωπογενείς εκπομπές των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων (ΕΛΣΤΑΤ, 2021; ΥΠΕΝ, 2026). Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται από το 1990 η πορεία των εθνικών εκπομπών για τους φωτοχημικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους στην Ελλάδα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, στους διάφορους τομείς όπως της ενέργειας (όπου συμπεριλαμβάνονται και οι μεταφορές), των βιομηχανικών διεργασιών (IPPU είναι η συντομογραφία του "Industrial Processes and Product Use" (Βιομηχανικές Διαδικασίες και Χρήση Προϊόντων), της γεωργίας και των αποβλήτων, σύμφωνα με την τελευταία ενημερωτική έκθεση απογραφής, που υποβλήθηκε από ΥΠΕΝ στην ΕΕ το 2026 (ΥΠΕΝ, 2026). Στις απογραφές περιγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού των εκπομπών, παρουσιάζονται τα δεδομένα δραστηριότητας και οι συντελεστές εκπομπής που χρησιμοποιήθηκαν και

υπολογίζεται η αβεβαιότητα κατά την εκτίμηση των εκπομπών. Κατά την απογραφή εφαρμόζονται οι τελευταίες κατευθυντήριες γραμμές της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και του ΕΜΕΡ/ΕΕΑ (ΥΠΕΝ, 2026).



Εικόνα 3.1 Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών NO_x στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024 (Πηγή: ΥΠΕΝ, 2026) <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provlepseis-ekpobon-rypon>

Στην Εικόνα 3.1. παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024 (ΥΠΕΝ, 2026). Οι συνολικές εκπομπές NO_x μειώθηκαν από 410,54 kt το 1990 σε 218,35 kt το 2024. Οι εκπομπές το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 46,8% και 54,9% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα. Παρατηρείται σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών η οποία αποδίδεται κυρίως στην αλλαγή του ενεργειακού μείγματος με αυξημένη χρήση φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων παραγωγής καθώς και στην ανανέωση του στόλου των οχημάτων. Επιπλέον η οικονομική ύφεση μετά το 2009 και οι περιορισμοί στις μετακινήσεις κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19 συνέβαλαν περαιτέρω στη μείωση των εκπομπών.

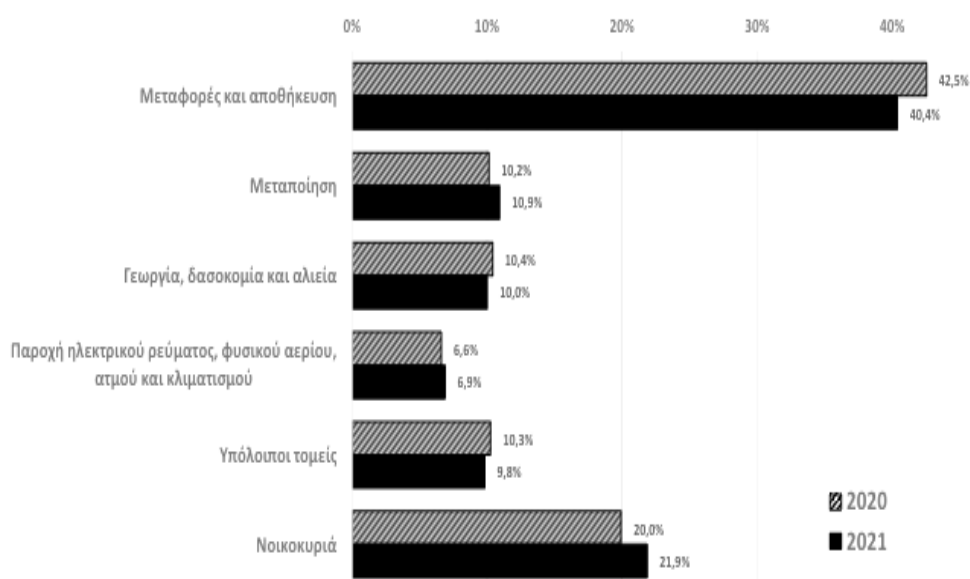


Εικόνα 3.2 Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών NMVOCs στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024.
(Πηγή: ΥΠΕΝ, 2026) <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provlepseis-ekprobon-rypon>

Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών μη μεθανικών πτητικών οργανικών ενώσεων (NMVOCs) στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2024 (ΥΠΕΝ, 2026). Οι συνολικές εκπομπές NMVOC μειώθηκαν από 286,62 kt το 1990 σε 123,89 kt το 2024. Οι εκπομπές το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 56,8% και 61,1% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα. Παρατηρείται σημαντική μείωση των εκπομπών η οποία αποδίδεται κυρίως στην εφαρμογή ευρωπαϊκών κανονιστικών ρυθμίσεων για τον περιορισμό των εκπομπών από τη χρήση οργανικών διαλυτών και από την αποθήκευση και διανομή καυσίμων καθώς και στη μείωση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών λόγω της ανανέωσης του στόλου των οχημάτων. Επιπλέον οι περιορισμοί στις μετακινήσεις κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19 οδήγησαν σε περαιτέρω μείωση αυτών των εκπομπών (ΥΠΕΝ, 2026).

Η εικόνα 3.3 παρουσιάζει την τομεακή κατανομή των εκπομπών των αέριων ρύπων NO_x, SO_x, NH₃, NMVOC, CO, PM₁₀ στην Ελλάδα, την περίοδο 2020-2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).. Τα σχετικά στοιχεία παρουσιάζονται στους τομείς της στατιστικής ταξινόμησης οικονομικών δραστηριοτήτων (NACE Αναθ.2) και στα νοικοκυριά. Ο κωδικός NACE είναι ένα τυπικό ευρωπαϊκό αριθμητικό σύστημα που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση

των επιχειρηματικών και οικονομικών δραστηριοτήτων. Στην Ελλάδα, αυτοί οι κωδικοί είναι γνωστοί ως ΚΑΔ (Κωδικοί Αριθμοί Δραστηριότητας) και τους διαχειρίζεται η Ανεξάρτητη Αρχή Δημοσίων Εσόδων (ΑΑΔΕ). Παρατηρείται ότι ο τομέας των μεταφορών αποτελεί την κυριότερη πηγή εκπομπών φωτοχημικών ρύπων (περίπου 40%-42%), ενώ σημαντική είναι και η συμβολή των νοικοκυριών και της μεταποίησης. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τον καθοριστικό ρόλο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην παραγωγή πρόδρομων ενώσεων του όζοντος (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).



Εικόνα 3.3 Ποσοστιαία κατανομή (%) των εκπομπών των αερίων ρύπων NO_x, SO_x, NH₃, NMVOC, CO, PM₁₀, στους κύριους τομείς οικονομικής δραστηριότητας (NACE Αναθ. 2), την περίοδο 2020-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021) <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SOP08/->

Πίνακας 3.1 Εκπομπές αερίων ρύπων (NO_x, SO_x, NH₃, NMVOC, CO, PM₁₀) (σε 1000t) την περίοδο 2012-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021) <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SOP08/->

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Οξείδια του αζώτου (NO _x)	507,4	437,2	437,5	468,9	500,2	545,0	580,0	554,2	528,4	509,3
Οξείδια του θείου (SO _x)	314,1	247,7	230,7	256,2	256,7	293,1	323,5	328,5	198,5	165,6
Αμμωνία (NH ₃)	68,1	68,0	65,3	64,0	63,9	63,5	63,2	63,1	63,7	62,8
Πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου (NMVOC)	203,1	183,9	180,6	174,9	167,7	163,4	159,7	160,3	152,2	156,6
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	653,3	556,1	565,9	547,1	493,7	510,4	492,0	488,8	452,8	451,6
Σωματίδια (PM ₁₀)	90,3	81,9	86,0	81,8	83,4	83,8	80,8	78,7	80,8	78,3
ΣΥΝΟΛΟ	1.836,4	1.574,8	1.566,0	1.593,0	1.565,6	1.659,2	1.699,2	1.673,6	1.476,5	1.424,2

Πίνακας 3.2 Ποσοστιαίες εκπομπές αέριων ρύπων (NO_x, SO_x, NH₃, NMVOC, CO, PM₁₀) ανά οικονομική δραστηριότητα την περίοδο 2012-2021 (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2021)
<http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SOP08/->

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Γεωργία, δασοκομία και αλιεία	12,8	10,8	9,6	9,1	9,2	9,0	8,2	8,5	10,4	10,0
Ορυχεία και λατομεία	1,0	1,1	1,1	1,0	0,8	0,9	0,9	0,6	0,4	0,5
Μεταποίηση	9,0	10,1	10,8	9,9	10,3	9,3	9,5	9,4	10,2	10,9
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, φυσικού αερίου, ατμού και κλιματισμού	12,8	13,3	11,9	11,0	9,3	9,9	8,9	8,3	6,6	6,9
Παροχή νερού, επεξεργασία λυμάτων, διαχείριση αποβλήτων, και δραστηριότητες αποκατάστασης	4,9	5,9	5,9	5,7	5,8	5,6	5,4	5,5	6,3	6,5
Κατασκευές	0,7	1,2	1,4	1,4	1,7	1,2	1,0	0,9	1,1	1,1
Μεταφορές και αποθήκευση	30,5	27,9	28,4	32,8	37,5	40,2	44,7	45,5	42,5	40,4
Λοιπές υπηρεσίες	2,1	2,6	2,3	2,4	2,3	1,9	1,8	1,9	2,4	1,8
Νοικοκυριά	26,1	27,2	28,6	26,7	23,1	22,1	19,7	19,4	20,0	21,9
ΣΥΝΟΛΟ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

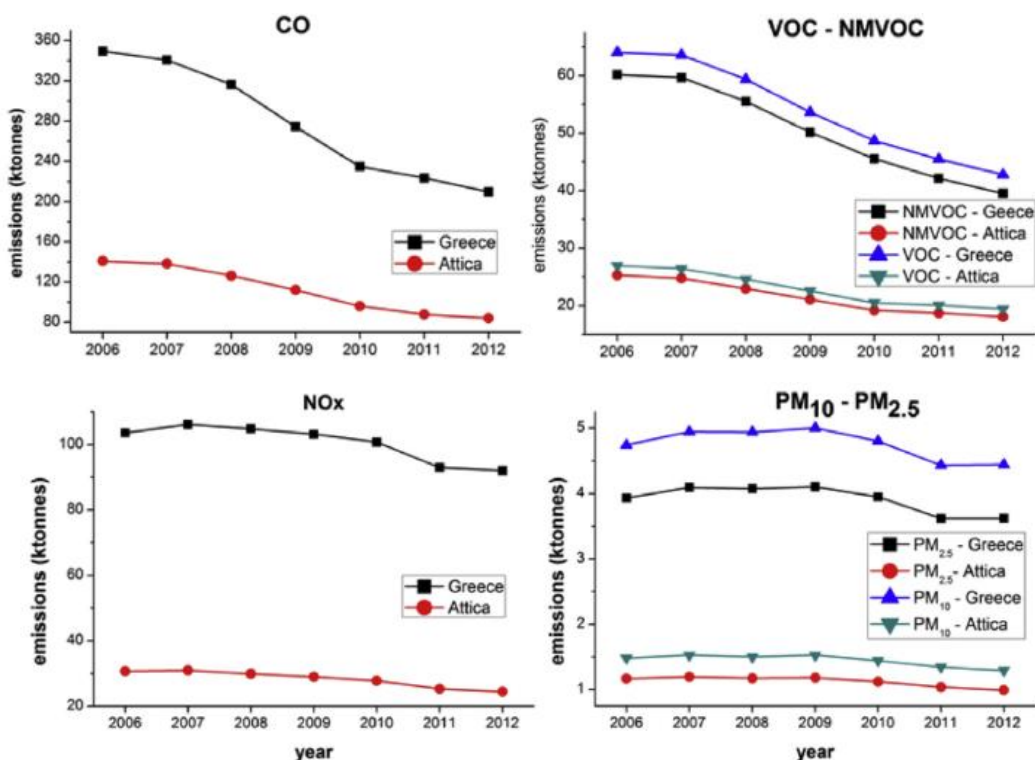
*Προσωρινά στοιχεία

Οι Πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζουν τις εκπομπές των αέριων ρύπων NO_x, SO_x, NH₃, NMVOC, CO, PM₁₀ στην Ελλάδα, συνολικά και ανά οικονομική δραστηριότητα, για την περίοδο 2012 έως 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021). Παρατηρείται συνολικά πτωτική τάση για τους φωτοχημικούς ρύπους (πρόδρομες ενώσεις όζοντος), όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOCs) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), γεγονός που αντανακλά τη μείωση της δραστηριότητας σε ορισμένους τομείς, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την εφαρμογή περιβαλλοντικών πολιτικών. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με τις τάσεις που προκύπτουν από την εθνική απογραφή εκπομπών (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

3.2.1 Απογραφή εκπομπών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας

Η απογραφή εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση της προέλευσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την υποστήριξη μοντέλων ποιότητας αέρα. Μια από τις πλέον ολοκληρωμένες απογραφές εκπομπών για την Ελλάδα είναι η βάση δεδομένων Flexible Emission Inventory for Greece and the Greater Athens Area (FEI – GREGAA), η οποία αναπτύχθηκε από τους Fameli και Assimakopoulos (2016) και καλύπτει την περίοδο 2006 έως 2012. Η απογραφή FEI – GREGAA βασίστηκε σε συνδυασμό μεθόδων bottom – up και top-down, χρησιμοποιώντας δεδομένα από

εθνικές και ευρωπαϊκές βάσεις, στατιστικές υπηρεσίες και ενεργειακά ισοζύγια. Η χωρική ανάλυση της απογραφής ήταν υψηλής ανάλυσης με πλέγμα 6 χ 6 km για το σύνολο της Ελλάδας και 2 χ 2 km για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας ενώ περιλάμβανε και χρονική ανάλυση σε ωριαία βάση. Οι κύριοι ρύποι που εξετάστηκαν ήταν το μονοξειδίο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO₂), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOCs), PM και η αμμωνία (NH₃). Η Ελλάδα και ειδικότερα η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Greater Athens Area, GAA), παρουσίασαν σημαντικές μεταβολές κατά την περίοδο 2006–2012, οι οποίες επηρέασαν άμεσα τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων (Πίνακες 3.1 και 3.2). Η πληθυσμιακή αύξηση και η επέκταση του αστικού ιστού οδήγησαν σε σημαντική χωρική ανάπτυξη της αστικής περιοχής προς τα βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά τμήματα της Αττικής. Η επέκταση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των διανυόμενων αποστάσεων των οχημάτων και τη μεταβολή των προτύπων κυκλοφορίας, γεγονός που επηρεάζει τόσο το συνολικό ύψος των εκπομπών όσο και τη χωρική κατανομή τους (Fameli & Assimakopoulos, 2016).



Εικόνα 3.4 Ετήσια διακύμανση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, την περίοδο 2006-2012 (Fameli & Assimakopoulos, 2016)

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν σημαντική μείωση των εκπομπών CO, NO_x και NMVOCs κατά την εξεταζόμενη περίοδο γεγονός που συνδέεται με την βελτίωση της τεχνολογίας των οχημάτων, τη μείωση της βιομηχανικής δραστηριότητας και τις επιπτώσεις της οικονομικής κρίσης (Πίνακες 3.1 και 3.2). Αντίθετα, παρατηρήθηκε αύξηση των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων ιδιαίτερα μετά το 2011 η οποία αποδόθηκε κυρίως στην αυξημένη χρήση βιομάζας για οικιακή θέρμανση (Fameli & Assimakopoulos, 2016).

Όσον αφορά τις κύριες πηγές εκπομπών στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας οι οδικές μεταφορές αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή για τις εκπομπές CO και NO_x ενώ η ναυτιλία συμβάλλει επίσης σημαντικά στις εκπομπές NO_x λόγω της έντονης δραστηριότητας στο λιμάνι του Πειραιά (Πίνακες 3.1 και 3.2). Επιπλέον, η οικιακή θέρμανση ιδιαίτερα μέσω καύσης βιομάζας, αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών CO και αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ η βιομηχανική δραστηριότητα συμβάλλει κυρίως στις εκπομπές σωματιδίων.

Πίνακας 3.3 Ετήσια μεταβολή των εκπομπών CO στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, από το 2006 έως 2012 (Πηγή: Fameli και Assimakopoulos 2016)

CO emissions (in ktonnes) for Greece. (Source: WebDab – EMEP emissions database, updated in 2015).

Year	Road transport	Other transport	Small combustion	Industries	Agriculture	Total
2006	460.08	50.94	104.56	123.95	58.74	798.26
2007	425.90	48.97	99.06	118.22	58.74	750.89
2008	391.72	47.01	93.57	112.49	58.74	703.52
2009	357.54	45.04	88.07	106.76	58.74	656.15
2010	323.36	43.08	82.58	101.03	58.74	608.78
2011	307.23	40.72	80.25	100.87	58.74	587.82
2012	291.11	38.36	77.93	100.72	58.74	566.86

Annual variation of CO emissions (in ktonnes) for the GAA.

Emissions (ktonnes)	Road transport	Aviation	Navigation	Small combustion	Industries	Non road transport	Agriculture	Total
2006	135.33	24.22	2.79	11.43		1.13	174.90	135.33
2007	132.82	23.66	2.84	13.52	11.44	1.02	185.29	132.82
2008	121.40	21.01	2.80	11.80	16.01	0.98	173.99	121.40
2009	107.65	18.34	3.09	10.99	2.45	0.97	143.49	107.65
2010	91.21	6.34	3.00	10.98	6.51	0.83	118.87	91.21
2011	87.75	2.76	1.92	13.71	2.57	0.56	109.28	87.75
2012	84.04	2.82	1.69	22.32	2.02	0.27	113.16	84.04

Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζονται οι ετήσιες διακυμάνσεις των εκπομπών οι οποίες προέρχονται από τον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη

περιοχή της Αττικής, κατά την περίοδο 2006-2012. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν σημαντική μείωση των εκπομπών, από τον τομέα των οδικών μεταφορών των CO και NMVOCs, ενώ μικρότερη μείωση παρατηρήθηκε στις εκπομπές των NOx, κατά την εξεταζόμενη περίοδο, γεγονός που συνδέεται με την βελτίωση της τεχνολογίας των οχημάτων, τη μείωση της βιομηχανικής δραστηριότητας και τις επιπτώσεις της οικονομικής κρίσης (Fameli & Assimakopoulos, 2016).

Πίνακας 3.4 Ετήσια μεταβολή των εκπομπών NOx στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, από 2006 έως 2012 (Πηγή: Fameli και Assimakopoulos 2016)

NOx emissions (in ktonnes) for Greece. (Source: WebDab – EMEP emissions database, updated in 2015).						
Year	Road transport	Other transport	Small combustion	Industries	Agriculture	Total
2006	122.69	80.07	11.13	169.23	1.39	384.51
2007	116.95	78.38	10.67	179.85	1.39	387.25
2008	111.21	76.70	10.22	168.50	1.39	368.00
2009	105.46	75.01	9.76	152.37	1.39	343.99
2010	99.72	73.32	9.30	139.27	1.39	323.00
2011	92.96	72.00	9.18	102.56	1.39	278.10
2012	86.21	70.68	9.06	98.83	1.39	266.18

Annual variation of NOx emissions (in ktonnes) for the GAA.								
Emissions (ktonnes)	Road transport	Aviation	Navigation	Small combustion	Industries	Non road transport	Agriculture	Total
2006	30.66	1.64	24.38	3.41		3.49	0.15	63.75
2007	30.92	1.80	24.79	3.15	16.88	3.16	0.26	80.96
2008	29.86	1.89	24.35	3.04	8.95	3.03	0.18	71.31
2009	28.94	1.96	26.86	2.63	7.12	3.00	0.13	70.65
2010	25.54	1.81	26.13	2.38	10.61	2.58	0.14	69.18
2011	25.27	1.63	18.48	2.97	5.52	1.72	0.10	55.69
2012	24.43	1.44	16.21	3.01	3.88	0.84	0.13	49.94

Η ανάπτυξη της βάσης FEI – GREGAA αποτελεί σημαντικό βήμα για την κατανόηση της χωρικής και χρονικής κατανομής των εκπομπών στην Ελλάδα καθώς παρέχει ένα αξιόπιστο και ευέλικτο εργαλείο για την υποστήριξη μοντέλων διασποράς ρύπων, την αξιολόγηση περιβαλλοντικών πολιτικών και τη λήψη μέτρων για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα (Fameli & Assimakopoulos, 2016).

3.2.2 Εκπομπές από οδικές μεταφορές

Οι οδικές μεταφορές αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων στις αστικές περιοχές. Η ανάπτυξη απογραφής εκπομπών για τις οδικές μεταφορές στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκε από τους Fameli και Assimakopoulos (2015), χρησιμοποιώντας bottom-up μεθοδολογία και λεπτομερή δεδομένα σχετικά με τον στόλο οχημάτων, τα χαρακτηριστικά των κινητήρων, τον τύπο καυσίμου και τις συνθήκες κυκλοφορίας. Η μελέτη έδειξε ότι τα επιβατικά οχήματα βενζίνης αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών CO και NMVOCs, ενώ τα πετρελαιοκίνητα οχήματα, ιδιαίτερα τα βαρέα οχήματα, συμβάλλουν σημαντικά στις εκπομπές NOx και αιωρούμενων σωματιδίων. (Πίνακας 3.3) Επιπλέον, οι κρύες εκκινήσεις των οχημάτων αποτελούν σημαντικό παράγοντα αύξησης των εκπομπών, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της λεπτομερούς καταγραφής των χαρακτηριστικών του στόλου και των συνθηκών κυκλοφορίας για την ακριβή εκτίμηση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών.

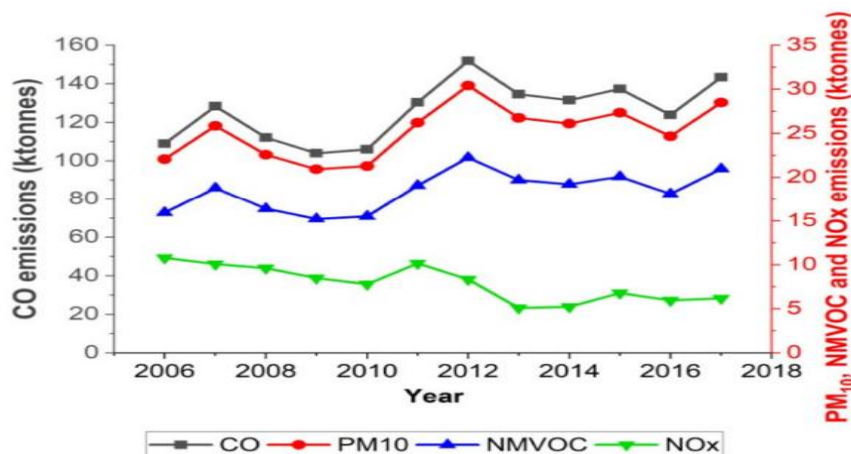
Πίνακας 3.5 Εκπομπές (σε τόνους) ανά τύπο οχήματος για το έτος 2010 στην Αττική και ποσοστό συμμετοχής κάθε κατηγορίας οχήματος στη συνολική τιμή εκπομπών για κάθε ρύπο και για το CO₂
(Πηγή: Fameli και Assimakopoulos, 2015)

Pollutant/vehicle type	PC	LCV	HDV	Buses	Motorcycles	Total
CO	54,332.16 56.53%	12,866.77 13.39%	3633.86 3.78%	953.25 0.99%	24,322.06 25.31%	96,108.09 100.00%
NOx	5915.48 21.30%	2574.51 9.27%	14,240.23 51.27%	4257.08 15.33%	785.15 2.83%	27,772.46 100.00%
VOC	11,909.47 58.14%	1841.21 8.99%	1147.85 5.60%	245.97 1.20%	5339.27 26.07%	20,483.77 100.00%
NMVOC	11,253.54 58.76%	1785.78 9.32%	1045.90 5.46%	179.30 0.94%	4887.01 25.52%	19,151.54 100.00%
PM _{2.5}	306.36 27.31%	140.89 12.56%	493.25 43.97%	92.97 8.29%	88.38 7.88%	1121.86 100.00%
PM ₁₀	512.15 35.50%	168.60 11.69%	550.11 38.13%	106.59 7.39%	105.41 7.31%	1442.86 100.00%
CO ₂	5,616,634.38 66.15%	687,888.78 8.10%	1,401,236.55 16.50%	455,946.42 5.37%	329,631.56 3.88%	8,491,337.68 100.00%

3.2.3 Εκπομπές από οικιακή θέρμανση

Η οικιακή θέρμανση αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο. Η χρήση της καύσης βιομάζας ως κύριου καυσίμου θέρμανσης είναι αρκετά διαδεδομένη στις ψυχρότερες και αγροτικές περιοχές, ενώ αποτελεί δημοφιλή επιλογή ως δευτερεύον καύσιμο θέρμανσης στις αστικές περιοχές. Η περίοδος θέρμανσης των κατοικιών στην Ελλάδα διαρκεί από τον Οκτώβριο έως τον

Απρίλιο, ενώ είναι ακόμη μικρότερη στη νότια Ελλάδα. Οι Fameli et al. (2021) χρησιμοποίησαν μία προσέγγιση crowd-sourcing για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά της οικιακής θέρμανσης στην Ελλάδα, μέσω διαδικτυακών ερωτηματολογίων. Όσον αφορά τις εκπομπές, το CO και τα PM₁₀, από τον τομέα της οικιακής θέρμανσης στην Ελλάδα, παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές, την περίοδο 2006-2018, καθώς συνδέονται με την καύση βιομάζας. Οι εκπομπές NO_x προέρχονται κυρίως από το πετρέλαιο που καίγεται στους λέβητες και δευτερεύοντος από την καύση βιομάζας (Fameli et al., 2021). Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση στη χρήση βιομάζας, όπως καυσόξυλα και πέλλετ, ως εναλλακτική λύση στο πετρέλαιο θέρμανσης, την περίοδο 2006-2018, κυρίως λόγω οικονομικών παραγόντων. Η αύξηση αυτή οδήγησε σε αυξημένες εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (PM₁₀ και PM_{2.5}) και CO, από τον τομέα της οικιακής θέρμανσης, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Αντίθετα, οι εκπομπές NMVOC NO_x, την περίοδο 2006-2018, από τον τομέα της οικιακής θέρμανσης στην Ελλάδα παρουσίασαν μια σχετική σταθερότητα. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν σημαντικές χωρικές διαφοροποιήσεις στη χρήση καυσίμων, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της χρήσης επικαιροποιημένων και υψηλής ανάλυσης δεδομένων στις απογραφές εκπομπών.



Εικόνα 3.5 Ετήσια διακύμανση των εκπομπών CO, PM₁₀, NMVOC, NO_x από τον τομέα της οικιακής θέρμανσης στην Ελλάδα, την περίοδο 2006-2018 (Fameli et al., 2021).

3.3. Μεθοδολογίες υπολογισμού (NEMO, WRF)

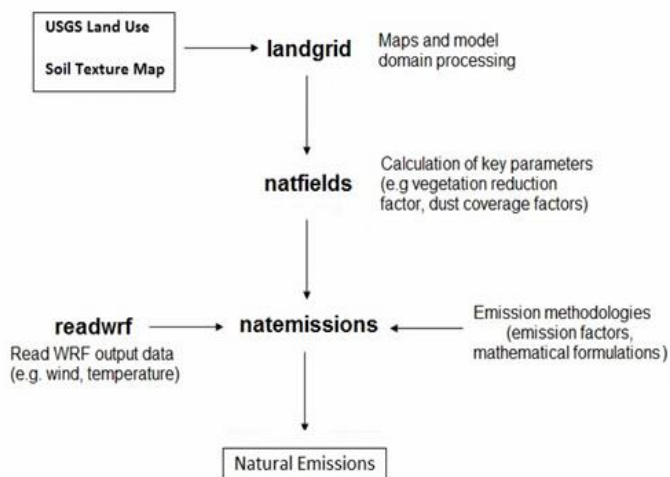
Η εκτίμηση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων και η ανάλυση της επίδρασής τους στην ποιότητα του αέρα βασίζονται σε συνδυασμό απογραφικών δεδομένων και αριθμητικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την αναπαράσταση των φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών που επηρεάζουν την ατμόσφαιρα, λαμβάνοντας υπόψη τη

χωρική και χρονική μεταβλητότητα των εκπομπών, καθώς και τον ρόλο της μετεωρολογίας. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές μεθοδολογίες υπολογισμού που στηρίζονται στο μοντέλο φυσικών εκπομπών Natural Emissions Model (NEMO) και στο μετεωρολογικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF) τα οποία έχουν εφαρμοστεί ευρέως στον ευρωπαϊκό και ελληνικό χώρο. Τα μοντέλα εκτίμησης εκπομπών χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό υπολογισμό των ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Σε αντίθεση με τις εθνικές απογραφές εκπομπών οι οποίες παρέχουν ετήσια συγκεντρωτικά στοιχεία τα αριθμητικά μοντέλα επιτρέπουν την ανάλυση της χρονικής και χωρικής κατανομής των εκπομπών καθώς και τη σύνδεσή τους με μετεωρολογικές και χημικές διεργασίες. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη των φωτοχημικών ρύπων, όπως το όζον (O_3) τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOCs) των οποίων ο σχηματισμός και η μεταφορά εξαρτώνται έντονα από τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

3.3.1 Το μοντέλο Natural Emissions Model (NEMO)

Το Natural Emissions Model (NEMO) αποτελεί ένα εξειδικευμένο μοντέλο υπολογισμού φυσικών εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων. Χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση εκπομπών που προέρχονται από τη σκόνη του εδάφους, το θαλάσσιο αλάτι, τα βιολογικά αιωρούμενα σωματίδια και τις βιογενείς εκπομπές από τη βλάστηση. Οι φυσικές αυτές εκπομπές παρουσιάζουν έντονη χωρική και εποχιακή μεταβλητότητα και επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες της ατμόσφαιρας και την ποιότητα του αέρα, ιδιαίτερα στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Η λειτουργία του NEMO βασίζεται σε μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η θερμοκρασία, η υγρασία και η κατάσταση της επιφάνειας τα οποία καθορίζουν την ένταση και τη μεταβλητότητα των φυσικών εκπομπών. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο εφαρμόζεται σε σύζευξη με αριθμητικά μετεωρολογικά μοντέλα επιτρέποντας την εκτίμηση των φυσικών εκπομπών σε διαφορετικές χωρικές κλίμακες. Η εφαρμογή του NEMO στον ευρωπαϊκό και ελληνικό χώρο έχει αναδείξει τον σημαντικό ρόλο των φυσικών πηγών στη διαμόρφωση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο (Λιώρα, 2015). Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται σχηματικά η μεθοδολογία υπολογισμού των φυσικών εκπομπών στο μοντέλο NEMO. Το μοντέλο αξιοποιεί χωρικά δεδομένα χρήσεων γης και εδαφικών χαρακτηριστικών σε συνδυασμό με μετεωρολογικά δεδομένα

που προέρχονται από το μοντέλο WRF, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων αυτών και της εφαρμογής συντελεστών εκπομπών και μαθηματικών σχέσεων το NEMO υπολογίζει τις φυσικές εκπομπές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδο σε φωτοχημικά μοντέλα ποιότητας αέρα (Liora, 2015).



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα ροής του μοντέλου NEMO και της σύζευξής του με το μετεωρολογικό μοντέλο WRF (Πηγή: Liora, 2015)

3.3.2 Το μετεωρολογικό μοντέλο Weather Research and Forecasting (WRF)

Το Weather Research and Forecasting (WRF) αποτελεί ένα τρισδιάστατο μη υδροστατικό μετεωρολογικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών σε περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Το μοντέλο παρέχει βασικές μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα τον σχηματισμό και τη συσσώρευση δευτερογενών ρύπων, όπως το όζον. Η συνδυασμένη χρήση του WRF με μοντέλα εκπομπών και φωτοχημικά μοντέλα επιτρέπει την ολοκληρωμένη προσομοίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τις πηγές εκπομπών και τις μετρήσεις ποσότητας του αέρα, όσο και τις ατμοσφαιρικές διεργασίες, προκειμένου να υπάρξει σωστή αξιολόγηση της φωτοχημικής μοντελοποίησης (Progiou et al., 2022).

3.3.3 Εφαρμογές των μοντέλων στον ελληνικό χώρο

Η εφαρμογή των παραπάνω (ή παρόμοιων) μεθοδολογιών στον ελληνικό χώρο έχει παρουσιαστεί σε πληθώρα μελετών. Ενδεικτικά στις δύο προαναφερόμενες μελέτες (Liora, 2015; Progiou et al., 2022) χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα μοντέλα για την προσομοίωση των μετεωρολογικών συνθηκών και την ποσοτικοποίηση εκπομπών με στόχο τη διερεύνηση

της επίδρασης της μετεωρολογίας και των μεταβολών των εκπομπών στα επίπεδα φωτοχημικών ρύπων όπως το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και το όζον (O_3). Τα αποτελέσματα ανέδειξαν την ισχυρή εξάρτηση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, καθώς και την ευαισθησία τους σε μεταβολές της ανθρωπογενούς δραστηριότητας.

Παράλληλα οι εφαρμογές του NEMO σε συνδυασμό με το WRF στον ευρωπαϊκό και ελληνικό χώρο έχουν δείξει ότι οι φυσικές εκπομπές αποτελούν σημαντική συνιστώσα της συνολικής ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης επηρεάζοντας τόσο τα επίπεδα των πρωτογενών όσο και των δευτερογενών ρύπων. Τα δεδομένα των ανθρωπογενών εκπομπών που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στα μοντέλα αυτά προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από την εθνική απογραφή εκπομπών του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας η οποία, όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται σε εναρμονισμένες ευρωπαϊκές μεθοδολογίες (ΥΠΕΝ, 2025).

4. ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

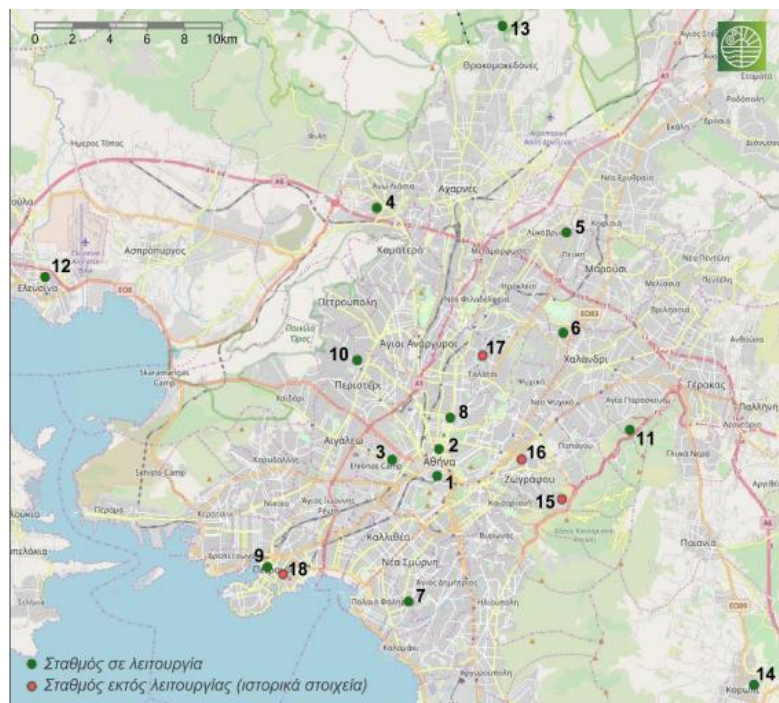
Η αξιόπιστη εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, πραγματοποιείται συνήθως με την εγκατάσταση δικτύων σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που είναι επανδρωμένοι με κατάλληλα όργανα συνεχούς καταγραφής των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων (αυτόματους αναλυτές) σε συνεχή βάση καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Προκειμένου να παρακολουθείται η διαχρονική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, απαιτείται η εγκατάσταση δικτύου διαφόρων κατηγοριών σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κατανεμημένων ανάλογα με τις ανάγκες και τα προβλήματα της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Η χωρική τοποθέτηση των σταθμών ελέγχου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα της τοπογραφίας και την ύπαρξη κοντινών πηγών έκλυσης ατμοσφαιρικών ρύπων (ΥΠΕΝ, 2000-2025).

4.1 Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες ελληνικές πόλεις

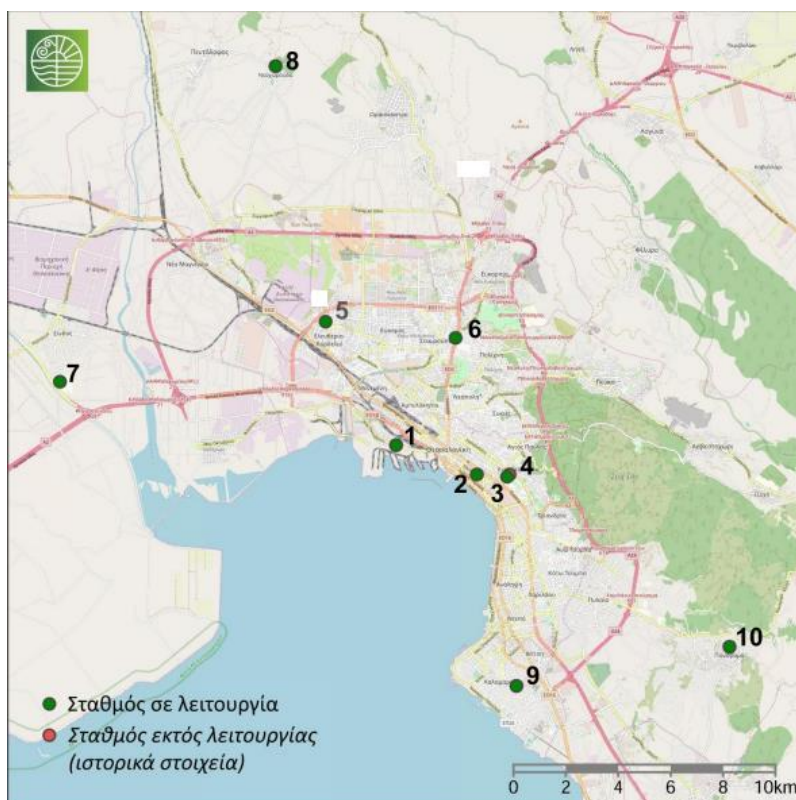
Η ατμοσφαιρική ρύπανση στις ελληνικές αστικές περιοχές παρακολουθείται από σταθμούς ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) αποτελεί το επίσημο Δίκτυο της χώρας (Εικόνα 4.1) για τη συστηματική μέτρηση και έλεγχο της ποιότητας του αέρα και λειτουργεί υπό την ευθύνη της Διεύθυνσης Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας, του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας Ατμόσφαιρας 2025, το ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ λειτούργησε δεκατέσσερις σταθμούς μέτρησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή της Αττικής (Εικόνα 4.2), καθώς και έναν σταθμό στην Αλιάρτο Βοιωτίας. Οι Περιφέρειες λειτούργησαν τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου εντός των διοικητικών τους ορίων. Στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 4.3) λειτούργησαν εννέα σταθμοί μέτρησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας που λειτουργούν υπό την ευθύνη της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Οι σταθμοί αυτοί (Πίνακες 4.1-4.3) καλύπτουν διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος και χαρακτηρίζονται μεταξύ άλλων ως αστικοί – κυκλοφορίας, αστικοί – υποβάθρου, καθώς και περιαστικοί ή βιομηχανικοί προκειμένου να αποτυπώνονται τόσο οι άμεσες επιδράσεις της κυκλοφορίας όσο και τα γενικότερα επίπεδα αστικού και περιαστικού υποβάθρου (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).



Εικόνα 4.1 Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην Ελλάδα (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).



Εικόνα 4.2 Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην περιοχή της Αττικής (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).



Εικόνα 4.3 Χωρική κατανομή των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).

Πίνακας 4.1. Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην περιοχή της Αττικής με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).

Σταθμός						Μετρούμενοι ρύποι								
Όνομα	Θέση				Υψόμετρο (m –asl)	Χαρακτηρισμός	SO ₂	NO _x	CO	O ₃	ΑΣ ₁₀	ΑΣ _{2.5}	CsH ₆	As, Cd, Ni, Pb, BaP
	WGS84		ΕΓΣΑ87											
	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	X (m)	Y(m)										
ΑΘΗΝΑΣ (ΑΘΗ) [1]	23,726845	37,978204	475861	4203144	75	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v				
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΟΥΣ (ΑΡΙ) [2]	23,727617	37,988066	475932	4204238	75	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v			v	v		
ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ (ΓΕΩ) [3]	23,705153	37,984100	473958	4203804	40	Περιαστικός-Βιομηχανικός		v	v	v				
ΛΙΟΣΙΑ (ΛΙΟ) [4]	23,697781	38,076741	473344	4214085	165	Περιαστικός-Υποβάθρου		v		v	v			
ΛΥΚΟΒΡΥΣΗ* (ΛΥΚ) [5]	23,788986	38,067793	481341	4213070	234	Περιαστικός-Υποβάθρου		v		v	v	v		
ΜΑΡΟΥΣΙ (ΜΑΡ) [6]	23,787372	38,030837	481190	4208970	170	Αστικός-Υποβάθρου		v	v	v	v			
ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ (ΣΜΥ) [7]	23,713020	37,931998	474631	4198021	50	Αστικός-Υποβάθρου		v	v	v	v		v	
ΠΑΤΗΣΙΟΝ (ΠΑΤ) [8]	23,733053	37,999587	476413	4205515	105	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v			v	
ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1** (ΠΕΙ) [9]	23,645230	37,944656	468679	4199446	4	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v	v	
ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ (ΠΕΡ) [10]	23,688361	38,020811	472497	4207882	80	Αστικός-Υποβάθρου		v		v	v			
ΑΓ. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ (ΑΓΠ) [11]	23,819421	37,995110	483995	4205000	290	Περιαστικός-Υποβάθρου		v		v	v	v		v
ΕΛΕΥΣΙΝΑ (ΕΛΕ) [12]	23,538432	38,051322	459354	4211322	20	Περιαστικός-Βιομηχανικός	v	v		v	v	v	v	v
ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ (ΘΡΑ) [13]	23,758195	38,143521	478662	4221479	550	Περιαστικός-Υποβάθρου		v		v	v	v		
ΚΟΡΩΠΙ (ΚΟΡ) [14]	23,879026	37,901308	489215	4194584	140	Περιαστικός-Υποβάθρου	v	v		v	v			
ΑΛΙΑΡΤΟΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ (ΑΛΙ)	23,110302	38,375295	422136	4247543	110	Υποβάθρου	v	v		v	v	v		

Πίνακας 4.2 Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στην περιοχή της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).

Όνομα	Σταθμός					Χαρακτηρισμός	Μετρούμενοι ρύποι								As, Cd Ni, Pb BaP
	Θέση				Υψόμετρο (m –asl)		SO ₂	NOx	CO	O ₃	ΑΣ ₁₀	ΑΣ _{2,5}	C ₆ H ₆		
	WGS84		ΕΓΣΑ87												
	Γεωγρ. Μήκος	Γεωγρ. Πλάτος	X (m)	Y(m)											
Περιφέρεια ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ															
ΑΓ. ΣΟΦΙΑ (ΑΓΣ) [2]	22,945099	40,633724	410641	4498347	12	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v	v		
Α.Π.Θ.-2 (ΑΠ2) [3]	22,955444	40,633143	411515	4498272	29	Αστικός-Κυκλοφορίας		v		v					
ΠΑΝΟΡΑΜΑ (ΠΑΝ) [10]	23,031689	40,588918	417909	4493289	363	Περιστικός-Υποβάθρου		v		v	v	v			
ΚΑΛΑΜΑΡΙΑ	22,958644	40,578739	411715	4492230	60	Αστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v				
(ΚΑΛ) [9]															
ΚΟΡΔΕΛΙΟ (ΚΟΔ) [6]	22,893219	40,673453	406309	4502811	30	Αστικός-Βιομηχανικός	v	v	v	v	v		v	v	
ΣΙΝΔΟΣ (ΣΙΝ) [7]	22,802169	40,657842	398590	4501179	14	Περιστικός- Βιομηχανικός	v	v	v	v	v		v		
ΝΕΟΧΩΡΟΥΔΑ (ΝΕΟ) [8]	22,876060	40,739805	404953	4510195	229	Περιστικός-Υποβάθρου		v		v	v				
ΣΤΑΥΡΟΥΠΟΛΗ (ΣΤΑ) [5]	22,937785	40,669232	410070	4502296	42	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v				
Π.Κ.Μ. (ΠΚΜ) * [1]	22,917366	40,641359	408306	4499223	4	Παρακολούθησης Αστικός-Κυκλοφορίας					v				

Πίνακας 4.3 Οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, στις Περιφέρειες Δυτ. Ελλάδας, Θεσσαλίας, Δυτ. Μακεδονίας, Κρήτης Ηπείρου, Αν. Μακεδονίας & Θράκης και Στερεάς Ελλάδας με τα γεωγραφικά τους χαρακτηριστικά, τον τύπο τους και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μετρώνται σε κάθε θέση (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).

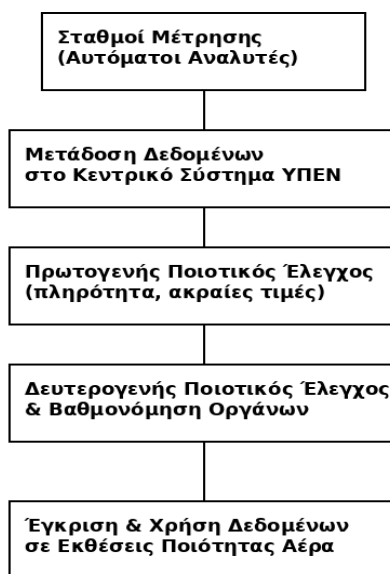
Περιφέρεια ΔΥΤ. ΕΛΛΑΔΑΣ														
ΠΑΤΡΑ-1 (ΠΑ1)	21,738179	38,253109	301940	4236030	10	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v			
ΠΑΤΡΑ-2 (ΠΑ2)	21,734512	38,246469	301601	4235301	8	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v		v	v	v	
ΠΑΤΡΑ-Ε (ΠΑΕ)	21,73651	38,24623	301775	4235270	35	Αστικός-Κυκλοφορίας								v
ΑΓΡΙΝΙΟ (ΑΓΡ)	21,409550	38,619773	274317	4277479	98	Αστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v				
Περιφέρεια ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ														
ΒΟΛΟΣ-1 (ΒΟ1)	22,942922	39,366711	408789	4357718	31	Αστικός-Κυκλοφορίας			v		v	v		
ΒΟΛΟΣ-3 (ΒΟ3)	22,950840	39,365846	409470	4357614	16	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v		
ΒΟΛΟΣ-4 (ΒΟ4)	22,969258	39,359830	411049	4356928	44	Περιστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v	v	v	
ΛΑΡΙΣΑ-1 (ΛΑ1)	22,414549	39,63553	363796	4388220	85	Αστικός-Υποβάθρου		v		v	v			
ΛΑΡΙΣΑ-2 (ΛΑ2)	22,430447	39,614259	365119	4385835	83	Περιστικός-Υποβάθρου			v	v	v	v		
ΛΑΡΙΣΑ-3 (ΛΑ3)	22,397436	39,627286	362311	4387331	86	Αστικός-Υποβάθρου			v	v	v	v	v	
ΤΡΙΚΑΛΑ (ΤΡΙ)	21,770151	39,560819	308287	4381102	112	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v		
ΚΑΡΔΙΤΣΑ (ΚΑΛ)	21,919224	39,365810	320595	4359150	112	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v		
Περιφέρεια ΔΥΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ														
ΚΟΖΑΝΗ (ΚΟΖ)	21,790895	40,294078	311542	4463650	675	Αστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v	v		
ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑ (ΠΤΟ)	21,686045	40,508024	303777	4486521	597	Αστικός-Βιομηχανικός					v			
ΑΚΡΙΝΗ (ΑΚΡ)	21,900093	40,431487	322145	4477833	799	Περιστικός-Βιομηχανικός					v	v		
ΚΑΡΥΟΧΩΡΙ (ΚΑΥ)	21,773266	40,500029	311122	4485483	713	Περιστικός-Βιομηχανικός					v			
ΓΡΕΒΕΝΑ (ΓΡΕ)	21,438678	40,084696	281473	4440015	520	Περιστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v	v		
ΚΑΣΤΟΡΙΑ (ΚΑΣ)	21,253257	40,513302	267139	4488070	633	Περιστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v	v		
Περιφέρεια ΚΡΗΤΗΣ														
ΗΡΑΚΛΕΙΟ-2 (ΗΡ2)	25,138231	35,332820	603297	3910258	60	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v	v	v
ΧΑΝΙΑ-2 (ΧΑ2)	24,025672	35,514226	502179	3929783	15	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v	v	v	v	v		
ΑΚΡΩΤΗΡΙ (ΑΚΩ)	24,070740	35,532892	506264	3931855	100	Περιστικός-Υποβάθρου		v		v	v			
ΒΟΥΤΣΕΣ (ΒΟΥ)	25,080084	35,308542	598041	3907506	240	Περιστικός-Υποβάθρου		v		v				
ΦΙΝΟΚΑΛΙΑΣ (ΦΙΝ)	25,670041	35,338560	651622	3911580	241	Υποβάθρου				v	v	v		
Περιφέρεια ΗΠΕΙΡΟΥ														
ΙΩΑΝΝΙΝΑ-2 (ΙΩ2)	20,846597	39,671173	229363	4395729	481	Αστικός-Υποβάθρου	v	v	v	v	v	v		
Περιφέρεια ΑΝ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ & ΘΡΑΚΗΣ														
ΚΑΒΑΛΑ-2 (ΚΑ2)	24,412419	40,936662	534569	4531522	2	Αστικός-Κυκλοφορίας	v	v		v			v	v
Περιφέρεια ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ														
ΛΑΜΙΑ (ΛΑΜ)	22,431707	38,902170	363858	4306802	105	Αστικός-Υποβάθρου					v			
ΧΑΛΚΙΔΑ (ΧΑΛ)	23,612019	38,469880	466005	4257735	12	Αστικός-Υποβάθρου					v			
ΛΕΙΒΑΔΙΑ (ΛΕΙ)	22,877516	38,440615	401890	4255013	140	Αστικός-Υποβάθρου					v			
ΑΙΦΩΙΣΣΑ (ΑΙΦ)	22,380409	38,528371	358676	4265397	180	Αστικός-Υποβάθρου					v			
ΚΑΡΠΕΝΗΣΙ (ΚΑΡ)	21,791822	38,916588	308405	4309551	960	Αστικός-Υποβάθρου					v			

Στους Πίνακες 4.1 έως 4.3 καταγράφονται αναλυτικά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, ο χαρακτηρισμός τους, καθώς και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που μετρώνται σε κάθε θέση, όπως διοξείδιο του θείου (SO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), όζον (O_3), αιωρούμενα σωματίδια ($\text{A}\Sigma_{10}$ και $\text{A}\Sigma_{2,5}$), βενζόλιο (C_6H_6), βαρέα μέταλλα και το βενζοπυρένιο (BaP). Έτσι, το δίκτυο των σταθμών του ΕΔΠΑΡ προσφέρει ένα σύνολο δεδομένων καθώς αφορά σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή αστική κυκλοφορία, σε βιομηχανικές περιοχές, αλλά και σε περιοχές απομακρυσμένες από τα αστικά κέντρα, αστικού ή περιαστικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα να παρέχουν μία συνολική εικόνα για την ποιότητα της ατμόσφαιρας των περιοχών αυτών. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χωρική κατανομή των σταθμών του ΕΔΠΑΡ στον ελλαδικό δείχνει την προσπάθεια γεωγραφικής κάλυψης, τόσο των μεγάλων μητροπολιτικών κέντρων, όσο και επιλεγμένων περιφερειακών περιοχών (ΥΠΕΝ, 2025).

4.2 Μεθοδολογίες μέτρησης και έλεγχος ποιότητας δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η συλλογή των δεδομένων ποιότητας ατμόσφαιρας στο πλαίσιο του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) πραγματοποιείται μέσω αυτόματων αναλυτών, οι οποίοι λειτουργούν σε συνεχή βάση και καταγράφουν ωριαίες συγκεντρώσεις των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων όπως SO_2 , NO_x , CO , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ και βενζόλιο C_6H_6 . Οι αναλυτές πληρούν τις απαιτήσεις των ευρωπαϊκών προτύπων. Ο χρόνος απόκρισης των αυτομάτων αναλυτών είναι της τάξης του ενός λεπτού, δηλαδή ο κάθε αναλυτής δίνει μια τιμή περίπου κάθε λεπτό. Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων γίνεται αυτόματα σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές ή data loggers, που βρίσκονται σε κάθε σταθμό ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με τους αυτόματους αναλυτές. Οι τιμές αυτές μεταβιβάζονται στον κεντρικό υπολογιστή της Υπηρεσίας προκειμένου να αξιοποιηθούν περαιτέρω, για την έκδοση συμπερασμάτων, αλλά και για την λήψη μέτρων όταν υπάρχουν υπερβάσεις των θεσμοθετημένων οριακών τιμών. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης της κάθε περιοχής (ΥΠΕΝ, 2025).

Τα πρωτογενή δεδομένα μεταδίδονται αυτόματα στο κεντρικό σύστημα του ΥΠΕΝ, όπου υπόκεινται σε διαδικασίες πρωτογενούς και δευτερογενούς ποιοτικού ελέγχου οι οποίες περιλαμβάνουν έλεγχο πληρότητας, ανίχνευση ακραίων ή μη ρεαλιστικών τιμών και αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης των οργάνων. Επιπλέον, εφαρμόζονται τακτικοί βαθμονομήσεις και έλεγχοι ακρίβειας των αναλυτών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από εξειδικευμένο προσωπικό σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές απαιτήσεις των Οδηγιών για την ποιότητα του αέρα, ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Μόνο τα δεδομένα που πληρούν τα κριτήρια ποιότητας και πληρότητας εγκρίνονται τελικά και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ετήσιων στατιστικών δεικτών και των εκθέσεων ποιότητας ατμόσφαιρας του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2025). Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η διαδικασία συλλογής ποιοτικού ελέγχου και έγκρισης δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πλαίσιο λειτουργίας του ΕΔΠΑΡ.



Εικόνα 4.4 Διαδικασία συλλογής, ποιοτικού ελέγχου και έγκρισης δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πλαίσιο λειτουργίας του ΕΔΠΑΡ (Πηγή:ΥΠΕΝ, 2025)

Οι μετρούμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι αντίστοιχες πρότυπες μέθοδοι μέτρησης των συγκεντρώσεών τους, που εφαρμόζονται στο πλαίσιο λειτουργίας του ΕΔΠΑΡ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Όπως φαίνεται για κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο χρησιμοποιείται η επίσημα, εξειδικευμένη αποδεκτή διαδικασία χημικής ή φυσικής ανάλυσης, δηλαδή η αναλυτική τεχνική, προσαρμοσμένη στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 4.4 Μετρούμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι και εφαρμοζόμενες πρότυπες μέθοδοι μέτρησης στο Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (Πηγή: ΥΠΕΝ, 2025)

Ρύπος	Μέθοδος μέτρησης
Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)	Απορρόφηση στο υπέρυθρο (NDIR)
Οξειδία του αζώτου (NO, NO ₂)	Χημειοφωταύγεια
Όζον (O ₃)	Απορρόφηση στο υπεριώδες
Διοξειδίο του θείου (SO ₂)	Φθορισμομετρία
Αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ ₁₀ –ΑΣ _{2,5})	Απορρόφηση β ακτινοβολίας
Βενζόλιο (C ₆ H ₆)	Αέρια χρωματογραφία (GC)
Βαρέα μέταλλα	Ατομική απορρόφηση
Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες – Βενζο(α)πυρένιο	Αέρια χρωματογραφία-φασματογραφία μάζας

Ειδικότερα, για τις συγκεντρώσεις των φωτοχημικών ρύπων, μονοξειδίο και διοξειδίο του αζώτου χρησιμοποιείται η μέθοδος της χημειοφωταύγειας, ενώ για το όζον η απορρόφηση στο υπεριώδες. Τα αιωρούμενα σωματίδια μετρώνται με τη μέθοδο απορρόφησης της β-ακτινοβολίας, ώστε να είναι αξιόπιστη η εκτίμηση των συγκεντρώσεων ΑΣ₁₀ & ΑΣ_{2,5}. Για πιο δύσκολους ρύπους, όπως το βενζόλιο, τα βαρέα μέταλλα και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες χρησιμοποιούνται εργαστηριακές τεχνικές υψηλής ακρίβειας όπως η αέρια χρωματογραφία, η ατομική απορρόφηση και η φασματογραφία μάζας, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα και η συγκρισιμότητα των μετρήσεων (ΥΠΕΝ, 2025).

4.3 Μεθοδολογία Μετρήσεων των Φωτοχημικών Ρύπων

4.3.1 Μέθοδος μέτρησης των οξειδίων του αζώτου

Η κύρια (πρότυπη) μέθοδος μέτρησης των οξειδίων του αζώτου, είναι η χημειοφωταύγεια. Σύμφωνα μ' αυτή τη μέθοδο, ο εισερχόμενος ατμοσφαιρικός αέρας στον αναλυτή, μπορεί να ακολουθήσει δύο διαφορετικές διαδρομές. Στην πρώτη διαδρομή, μετράται αποκλειστικά η συγκέντρωση του NO. Έτσι, το NO που βρίσκεται στον αέρα αντιδρά με το όζον και παράγει διοξειδίο του αζώτου σε μια ηλεκτρονικά διεγερμένη κατάσταση. Η μέτρηση της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του αζώτου στο δείγμα αέρα, που αντέδρασε με το όζον. Στη δεύτερη διαδρομή, πραγματοποιείται η μέτρηση του συνόλου των οξειδίων του αζώτου. Ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται για να μετατρέψει το NO₂

πλήρως σε NO, ώστε όλη η ποσότητα των NOx να αντιδράσει με το όζον. Ο φωτοπολλαπλασιαστής καταγράφει την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από αυτή την αντίδραση, επιτρέποντας τον υπολογισμό της συνολικής συγκέντρωσης των NOx. Η διαφορά των δύο μετρήσεων δίνει τη συγκέντρωση του NO₂. Έτσι, ο αναλυτής υπολογίζει αυτόματα τις συγκεντρώσεις NO και NO₂ σε πραγματικό χρόνο (Βερύκιος, 2003; Γεντεκάκης, 2010; Καμπεζίδης και Ματράλης, 2004).

Οι τιμές ορίων για το διοξείδιο του αζώτου που αντιστοιχεί στη μέση ωριαία τιμή (δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 18 φορές ανά έτος) είναι 200μg/m³, ενώ η μέση οριακή ετήσια τιμή αντιστοιχεί στα 40 μg/m³. Το όριο συναγερμού, σε ωριαία βάση, είναι τα 400 μg/m³ (δεν πρέπει να υπερβαίνει τις τρεις συνεχόμενες ώρες) (ΥΠΕΝ, 2025).

4.3.2 Μέθοδος μέτρησης του όζοντος

Η κύρια (πρότυπη) μέθοδος μέτρησης όζοντος από τους αυτόματους αναλυτές των δικτύων των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης στηρίζεται στη διαφορική απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η μέθοδος βασίζεται στην εκλεκτική απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από το όζον του δείγματος. Η συγκέντρωση του όζοντος είναι ανάλογη της μείωσης, που υφίσταται δέσμη της υπεριώδους ακτινοβολίας (εκπέμπεται από λάμπα, λ=245/253nm) κατά τη διέλευσή της από το θάλαμο απορρόφησης του αναλυτή, από τον οποίο περνά ο δειγματοληπτούμενος αέρας. Για αναφορά, ο αναλυτής χρησιμοποιεί ένα δείγμα αέρα από το οποίο έχει απομακρυνθεί το όζον. Μέσω της μέτρησης της εξασθένισης της υπεριώδους ακτινοβολίας, καθορίζεται η συγκέντρωση του O₃. Η βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται με τη χρήση μιας γεννήτριας όζοντος, η οποία παράγει συγκεκριμένες συγκεντρώσεις O₃ και απαιτεί τακτικούς εξωτερικούς ελέγχους. Η διαδικασία βαθμονόμησης καλύπτει όλο το εύρος έντασης της υπεριώδους λάμπας, ενώ η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων επαληθεύεται συνήθως μέσω επαναλαμβανόμενων μετρήσεων για κάθε διαφορετική συγκέντρωση που παράγει η γεννήτρια όζοντος (Γεντεκάκης, 2010).

Για το όζον η μέγιστη μέση ημερήσια τιμή 8-ώρου είναι τα 120μg/m³ (δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 25 φορές το χρόνο (κατά μέση τιμή) για διάστημα 3 ετών). Το όριο για την πληροφόρηση (ενημέρωση) του κοινού είναι η μέση ωριαία τιμή των 180μg/m³ και το όριο συναγερμού η μέση ωριαία τιμή των 240μg/m³ (ΥΠΕΝ, 2025).

4.3.3 Μέθοδος μέτρησης του μονοξειδίου του άνθρακα

Βασίζεται στην ιδιότητα, που έχει το CO να απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία (IR). Στον αναλυτή μια πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR) περνά διαδοχικά από δύο τμήματα ενός περιστρεφόμενου δίσκου, που περιέχουν αντίστοιχα άζωτο και μονοξείδιο του άνθρακα. Ο δίσκος αυτός βρίσκεται πριν το θάλαμο απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το δειγματοληπτούμενο αέρα. Έτσι, όταν η IR ακτινοβολία περνά από το τμήμα του δίσκου που περιέχει το CO, γίνεται ολική απορρόφηση της ενέργειας, που θα μπορούσε να απορροφηθεί από το CO του δείγματος, ενώ η οποιαδήποτε άλλη απορρόφηση οφείλεται σε αέρια παρεμβολών, που περιέχονται στο δείγμα. Όταν η IR ακτινοβολία περνά από το τμήμα του δίσκου, που περιέχει το άζωτο, που δεν απορροφά στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος, τότε η απορρόφηση της ακτινοβολίας οφείλεται, τόσο στο CO, όσο και στα άλλα αέρια παρεμβολών του δείγματος. Η διαφορά, επομένως, των δύο σημάτων, που λαμβάνει ο ανιχνευτής από τα διαδοχικά περάσματα της ακτινοβολίας, από το τμήμα του δίσκου με το άζωτο και το τμήμα με το μονοξείδιο του άνθρακα, οφείλεται μόνο στο μονοξείδιο του άνθρακα, που υπάρχει στο αέριο δείγμα και είναι ανάλογη με τη συγκέντρωσή του σε αυτό (Γεντεκάκης, 2010; Καμπεζίδης και Ματράλης, 2004). Για το CO η μέγιστη ημερήσια τιμή 8-ώρου είναι τα 10mg/m³ (ΥΠΕΝ, 2025).

5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση των μεταβολών των συγκεντρώσεων των σημαντικών δεικτών φωτοχημικής ρύπανσης, δηλαδή των οξειδίων του αζώτου και του όζοντος οι οποίοι θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί της φωτοχημικής ρύπανσης μιας περιοχής, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 2001-2024. Επίσης, για την ίδια περίοδο μελέτης εξετάζονται οι μεταβολές των συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα και του βενζολίου, για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και οι οποίοι παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων φωτοχημικής ρύπανσης μιας περιοχής. Η ανάλυση βασίζεται σε χρονοσειρές συγκεντρώσεων, με δεδομένα από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ, οι οποίοι επιλέχθηκαν βάσει επάρκειας και διαθεσιμότητας δεδομένων και αντιπροσωπευτικότητας διαφορετικών τύπων σταθμών σε σχέση με τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά (αστικός -κυκλοφορίας, αστικός - υποβάθρου, περιαστικός - βιομηχανικός, περιαστικός - υποβάθρου) και τη γεωγραφική τους θέση (εγγύτητά τους σε πηγές εκπομπής), εξασφαλίζοντας, όσο το δυνατόν, αντιπροσωπευτική απεικόνιση της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις δύο αυτές περιοχές (ΥΠΕΝ, 2025).

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις των εγκατεστημένων σταθμών του ΕΔΠΑΡ, όπως αναρτώνται στην επίσημη ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ (<https://ypen.gov.gr>). Έτσι, έγινε προσπάθεια πραγματοποίησης μελέτης της διαχρονικής εξέλιξης της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συγκεκριμένα διερευνώνται οι μεταβολές των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου και του διοξειδίου του αζώτου, του όζοντος, καθώς και του μονοξειδίου του άνθρακα και του βενζολίου, για την περίοδο 2001-2024, για τις ετήσιες μεταβολές, εποχικές μεταβολές και μηνιαίες διακυμάνσεις.

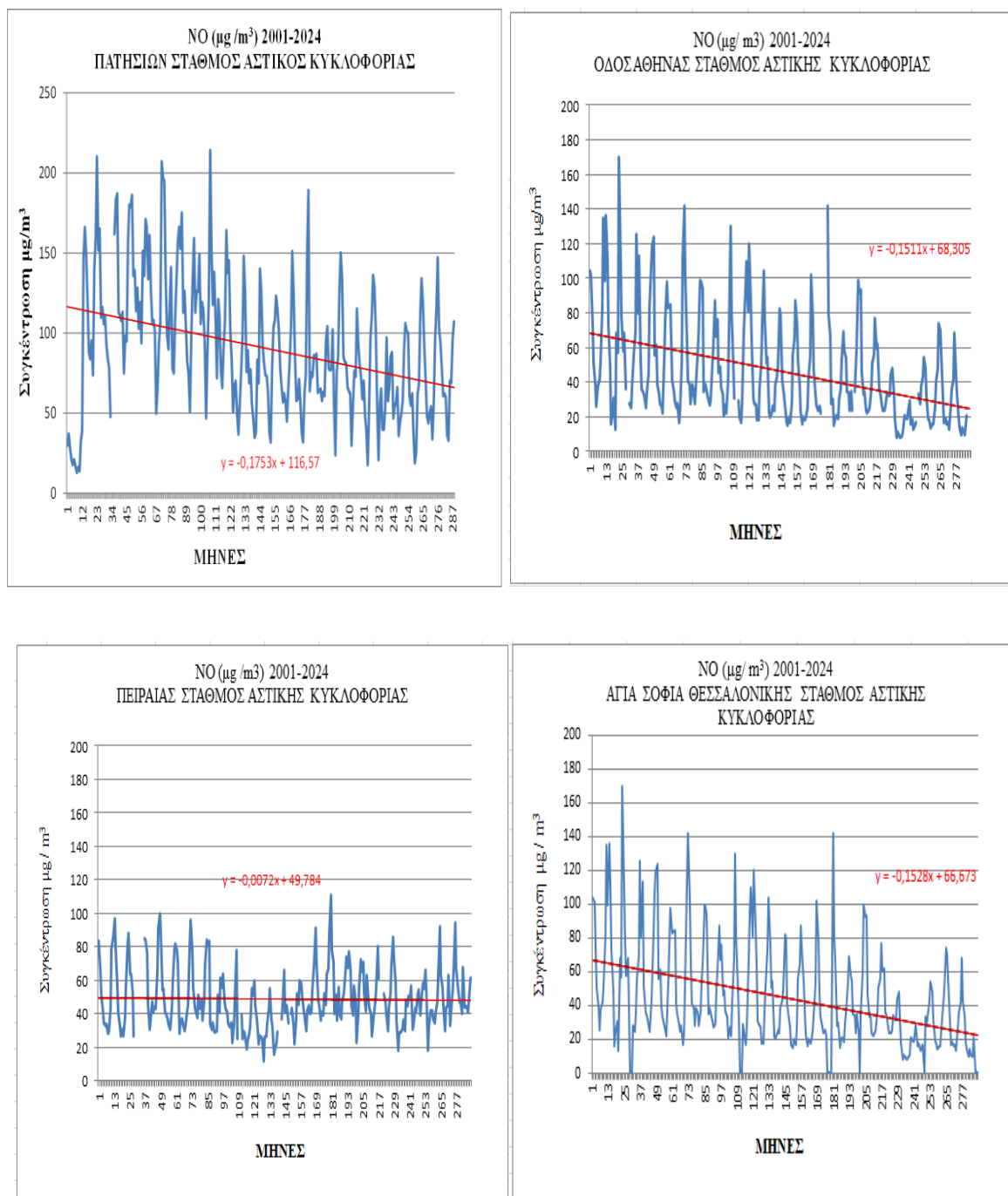
Σε κάθε υποενότητα παρουσιάζεται η εξέλιξη των μετρήσεων των συγκεντρώσεων ανά ατμοσφαιρικό ρύπο και σταθμό, συνοδευόμενη από ανάλυση της διακύμανσης των μέσων τιμών, ώστε να αποτυπώνεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων στην περίοδο μελέτης.

5.1 Μηνιαίες διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

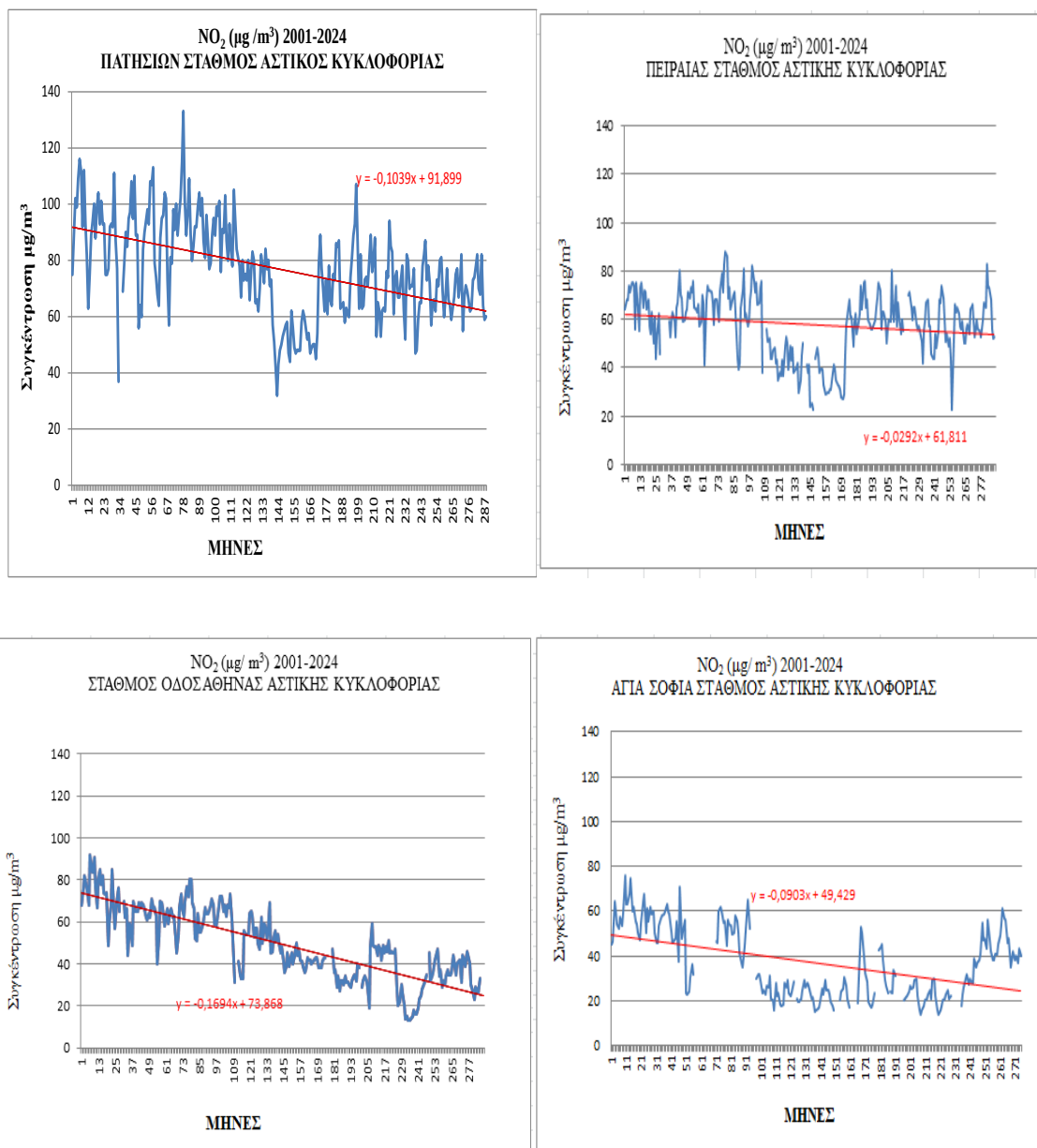
Στην υποενότητα αυτή εξετάζονται οι μέσες μηνιαίες μεταβολές των συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων, NO, NO₂, O₃, CO και βενζολίου (C₆H₆), από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>), στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Τα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συγκριτική απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων των μέσων μηνιαίων τιμών των NO, NO₂, O₃, CO και C₆H₆, ανά σταθμό, για την περίοδο μελέτης, ώστε να διευκολύνεται η συνολική αποτίμηση των επιπέδων ρύπανσης και η συσχέτισή τους με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα της κάθε θέσης. Τα διαγράμματα περιλαμβάνουν και γραμμές τάσης, προκειμένου να διαπιστωθούν πιθανές μακροχρόνιες μεταβολές στις συγκεντρώσεις του κάθε φωτοχημικού ρύπου, καθώς και πιθανές μεταβολές που σχετίζονται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή κλιματικές συνθήκες. Η αποτύπωση των διαχρονικών μεταβολών συμβάλλει στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας περιβαλλοντικών πολιτικών και της επίδρασης μεταβολών κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στη φωτοχημική ρύπανση των αστικών, περιαστικών και βιομηχανικών περιοχών.

5.1.1 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, σε σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

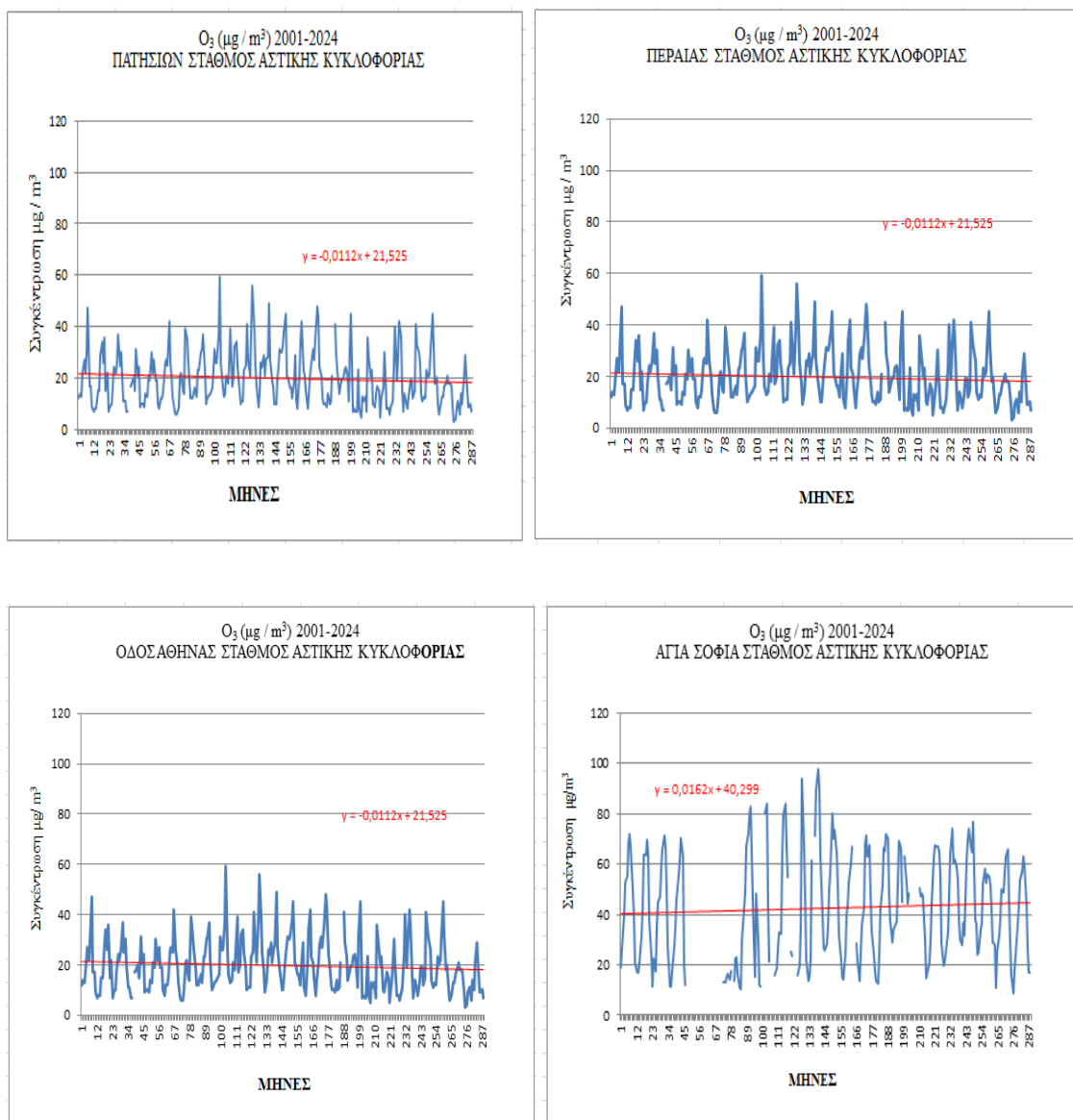
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, σε σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024.



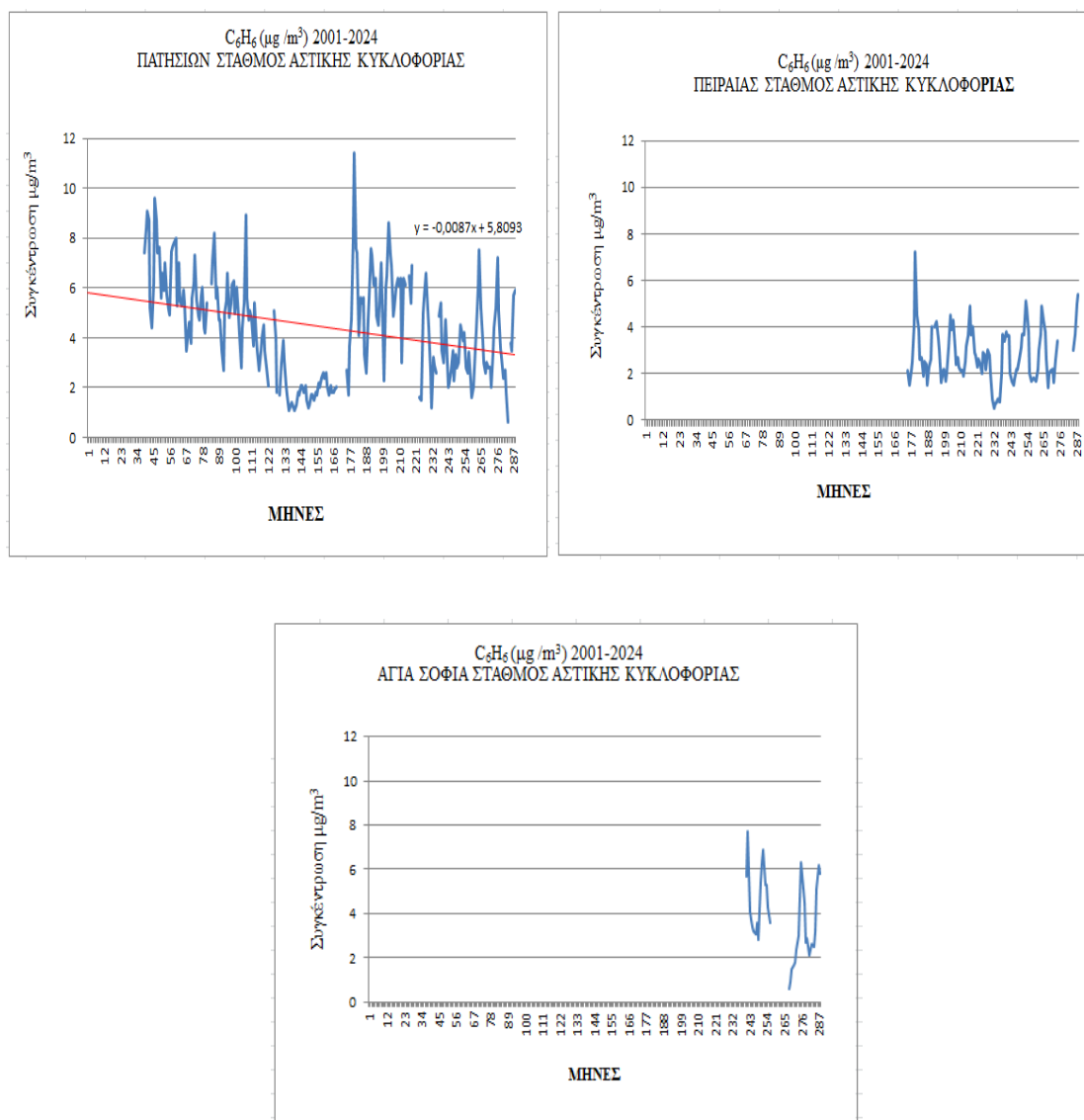
Διάγραμμα 5.1: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Αθηνάς, Πειραιάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



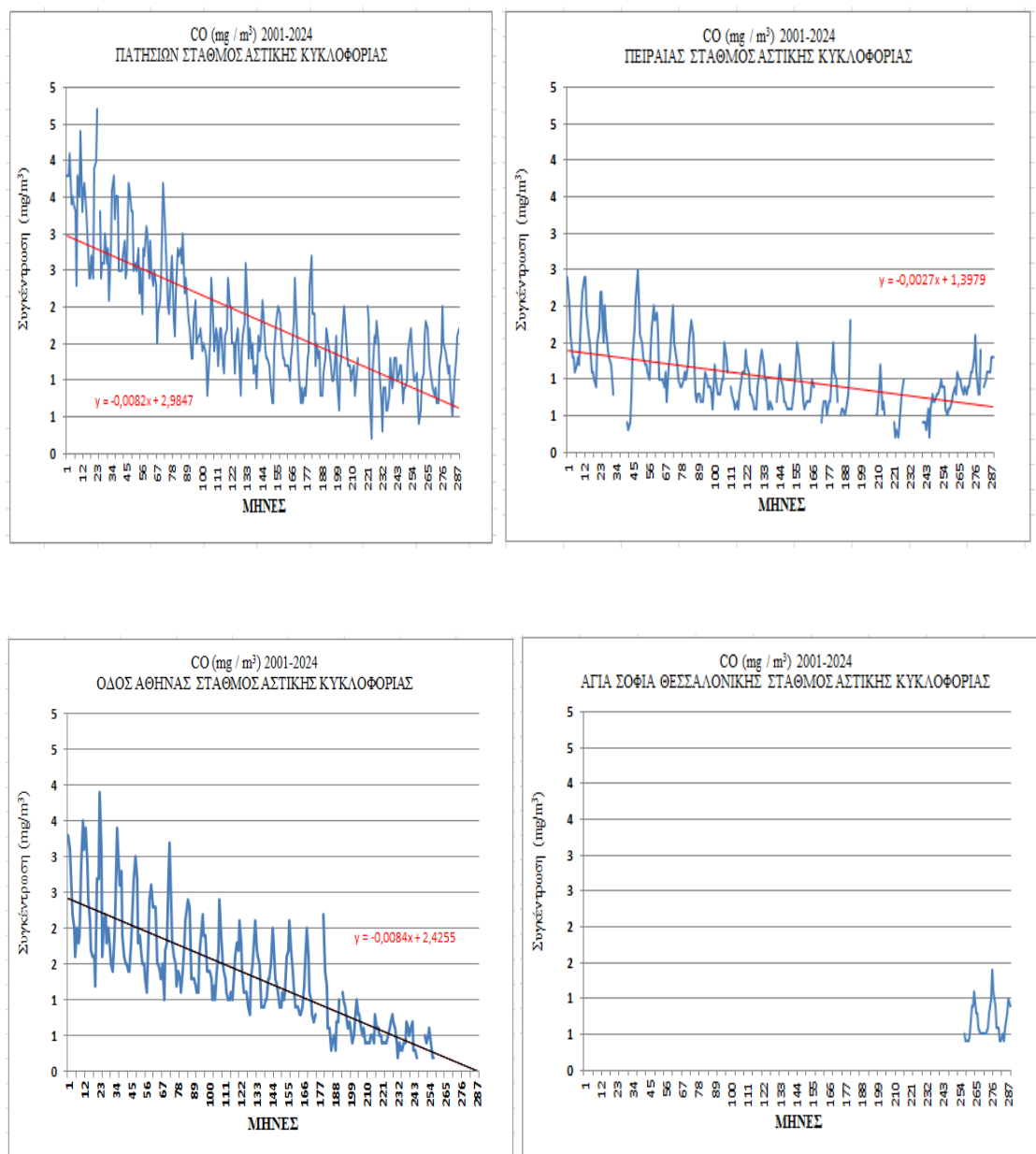
Διάγραμμα 5.2: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO_2 στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.3: Μέση μηνιαία διακύμανση του O_3 στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



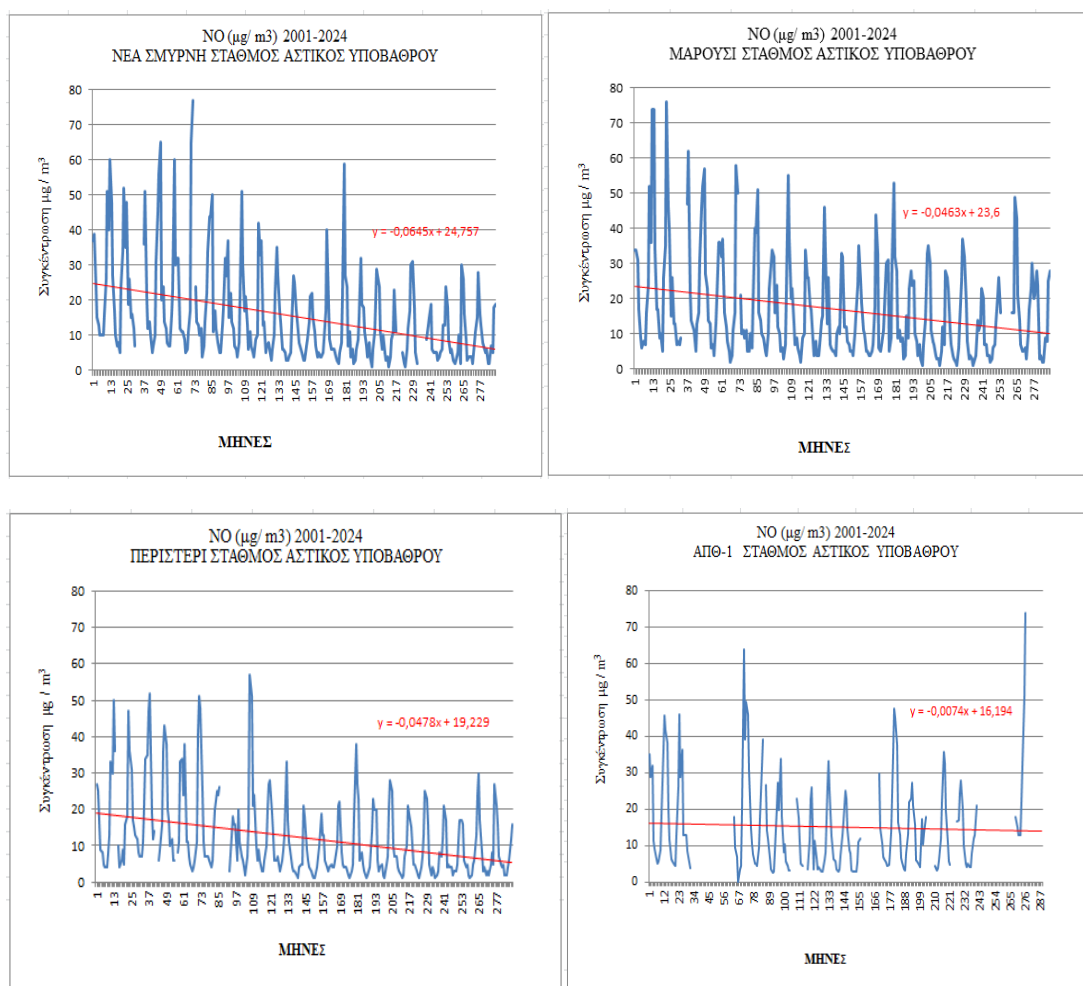
Διάγραμμα 5.4: Μέση μηνιαία διακύμανση του C_6H_6 στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



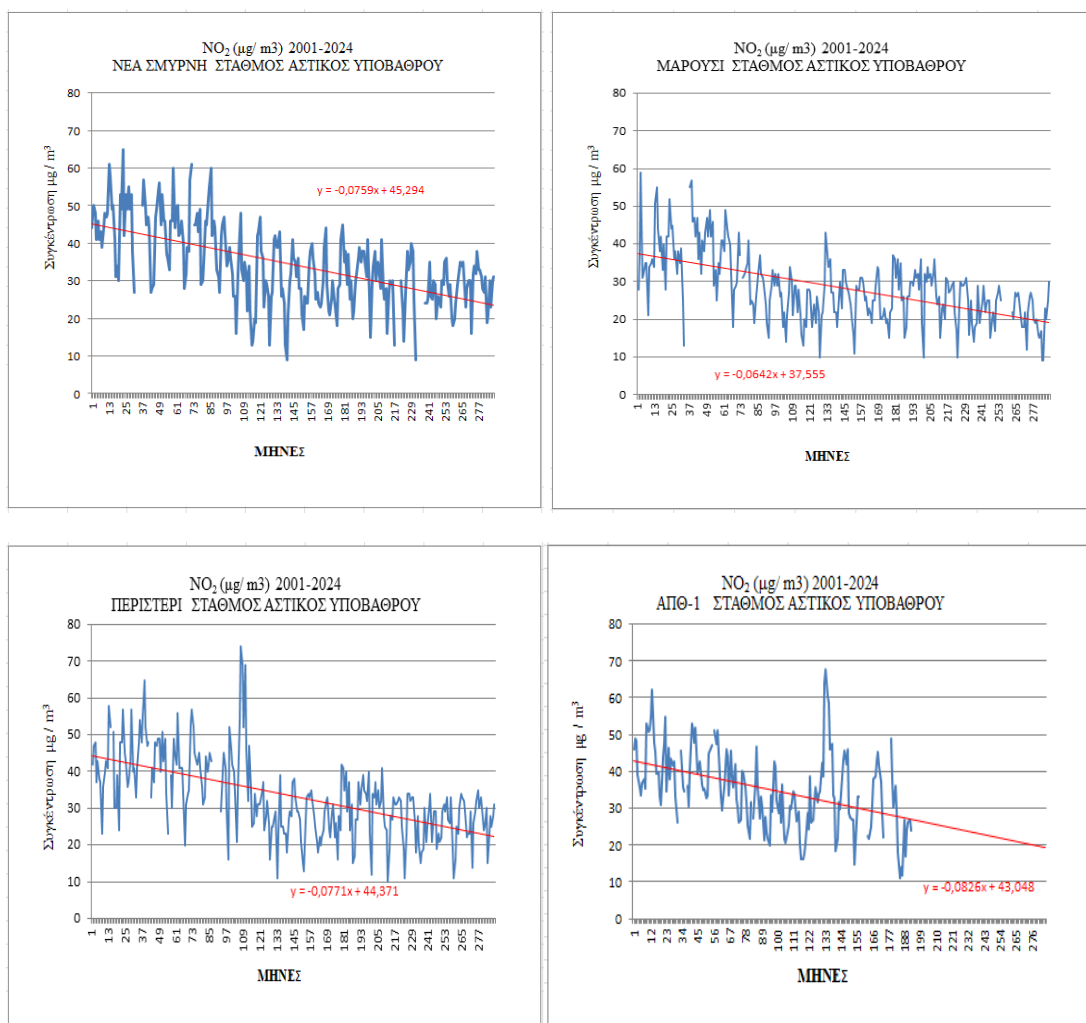
Διάγραμμα 5.5: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Σταθμούς Αστικής Κυκλοφορίας Πατησίων, Πειραιάς, Αθηνάς και Αγίας Σοφίας Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

5.1.2 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, CO, σε σταθμούς αστικού υποβάθρου, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

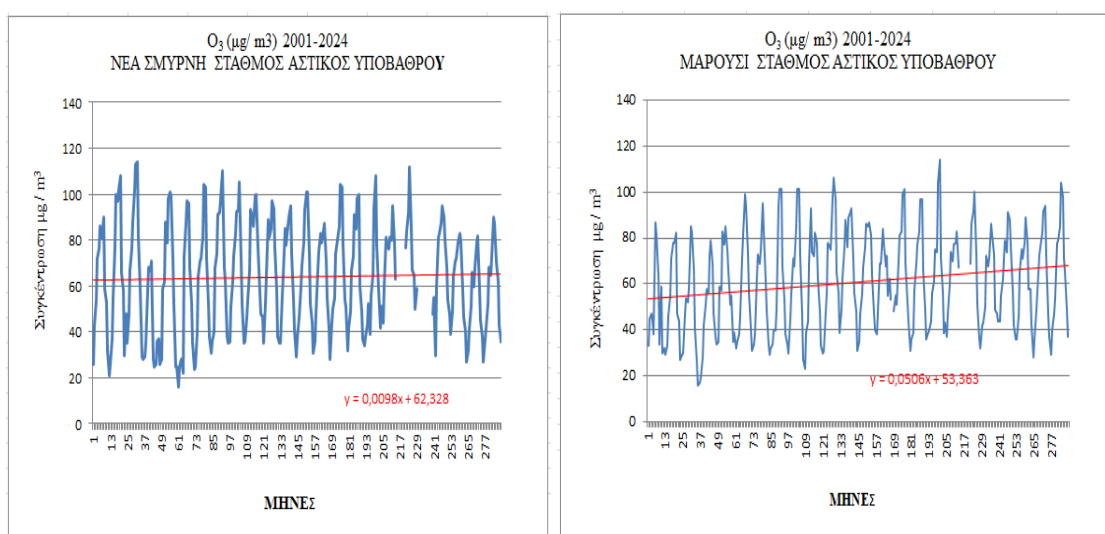
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, CO, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, σε σταθμούς αστικού υποβάθρου, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024.

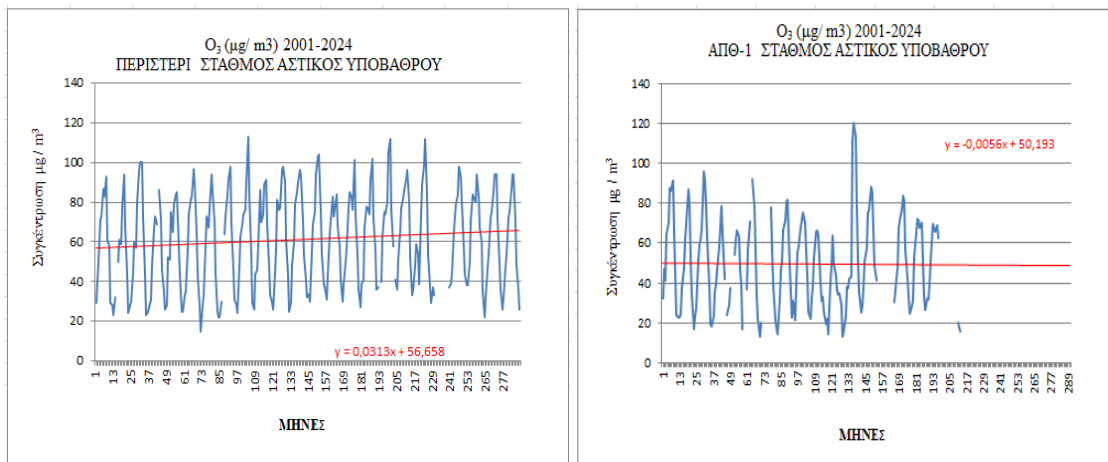


Διάγραμμα 5.6: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστέρι και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024

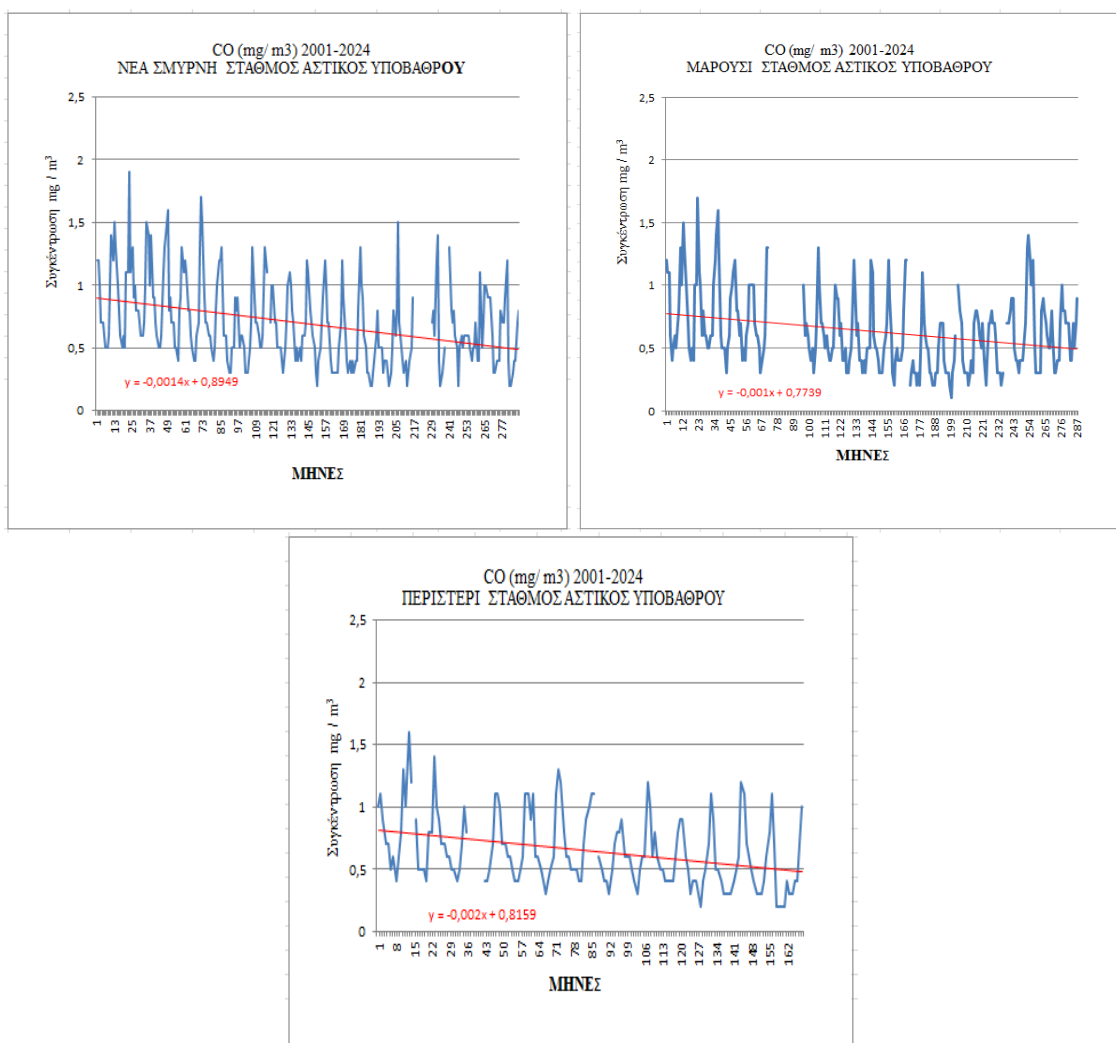


Διάγραμμα 5.7: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO₂ στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024





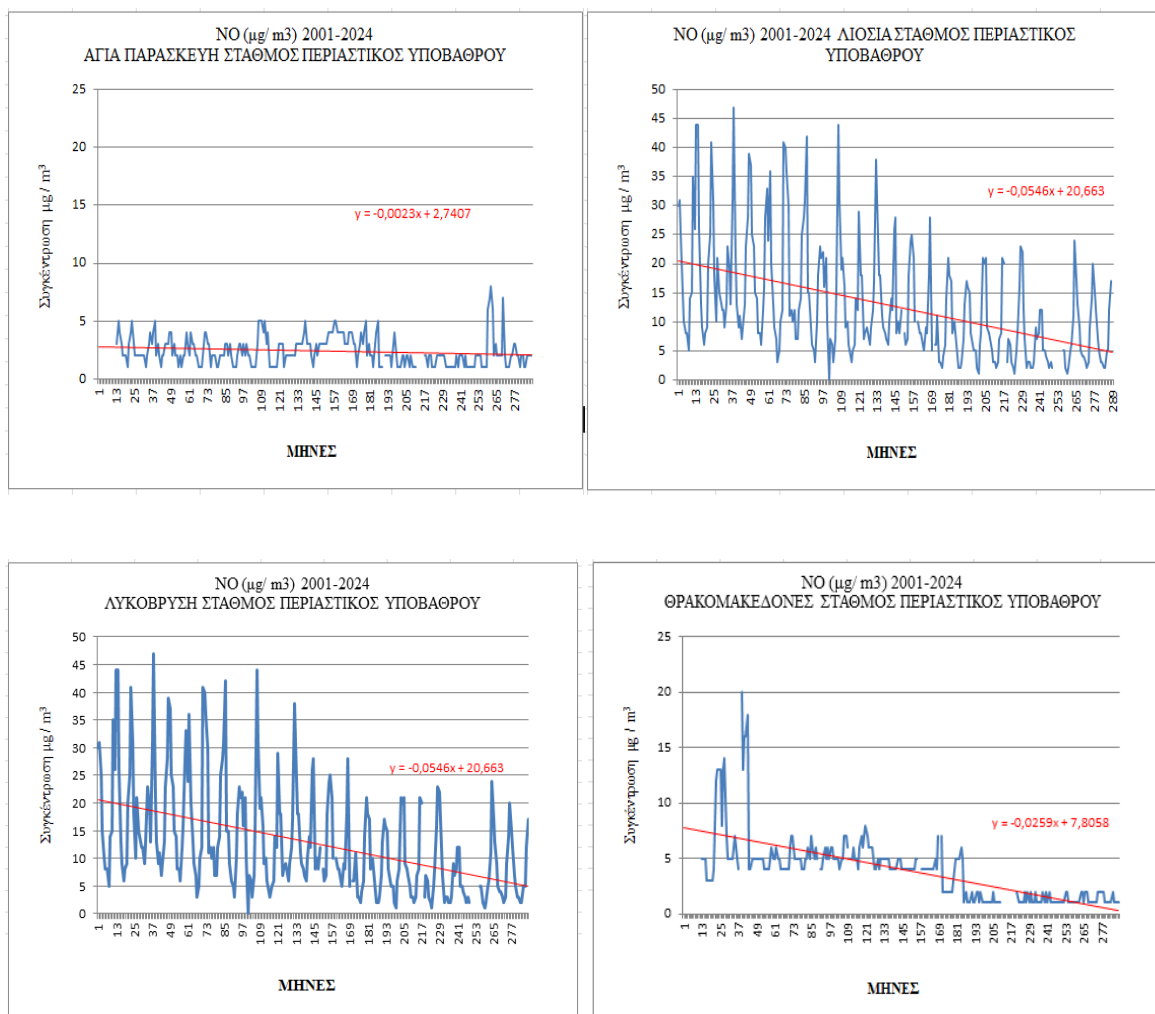
Διάγραμμα 5.8: Μέση μηνιαία διακύμανση του O₃ στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί και ΑΠΘ-1 Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024

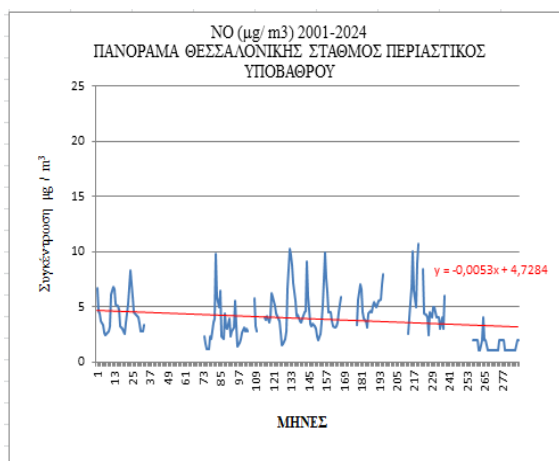


Διάγραμμα 5.9: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Σταθμούς Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Περιστερί την περίοδο 2001- 2024

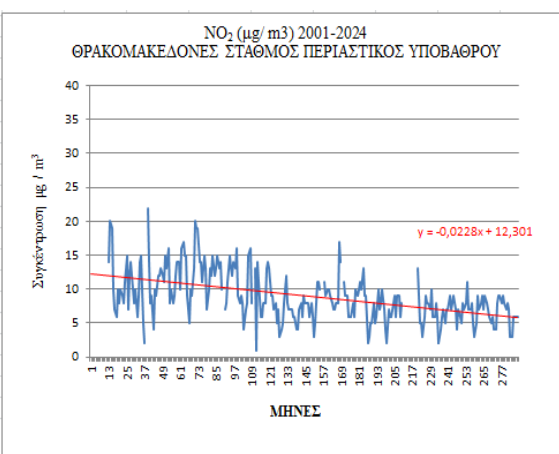
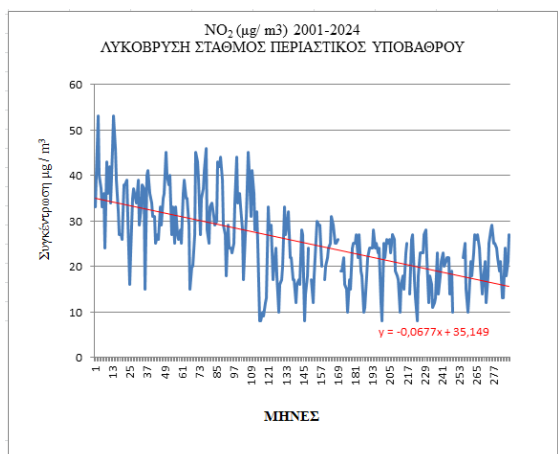
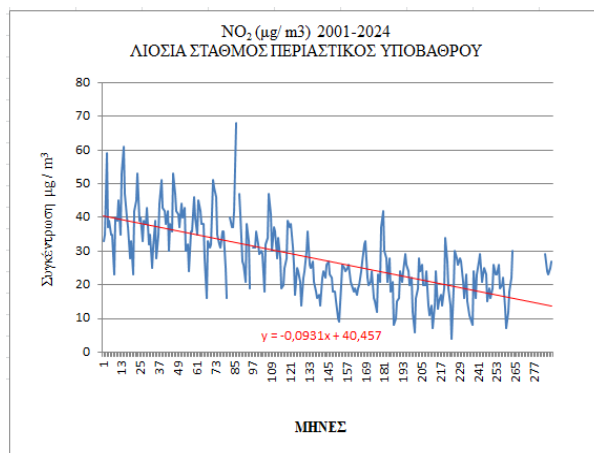
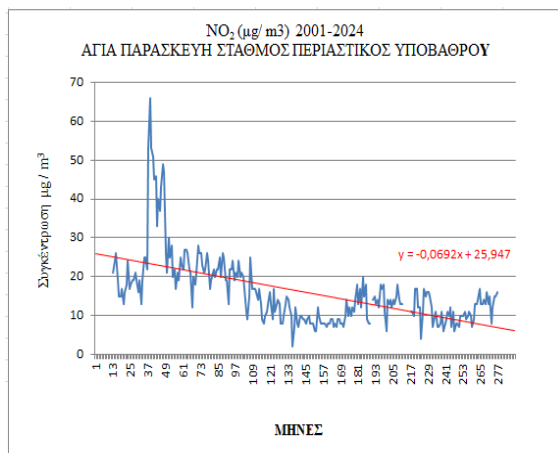
5.1.3 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, σε σταθμούς περιβατικού υποβάθρου, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

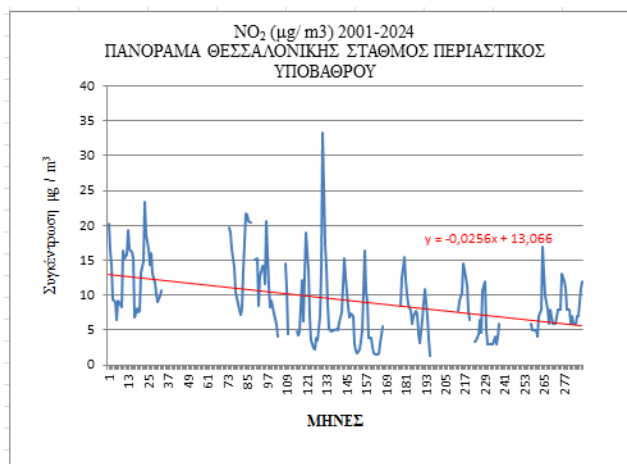
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, σε σταθμούς περιβατικού υποβάθρου, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024.



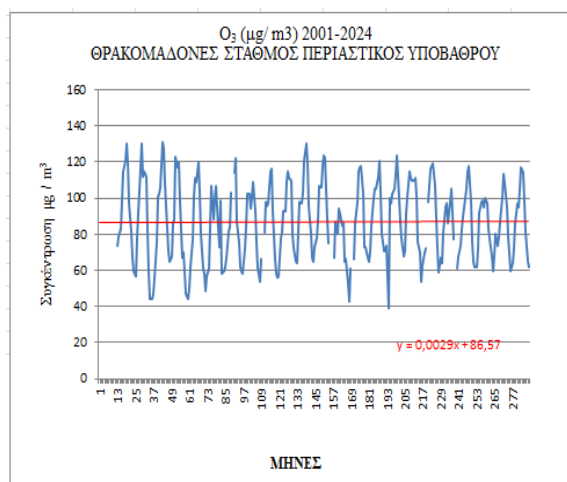
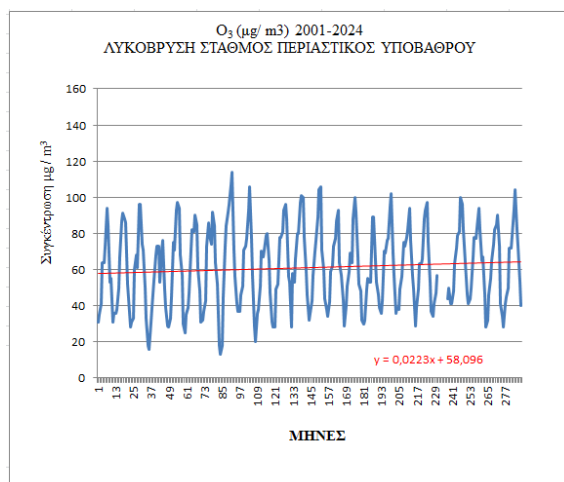
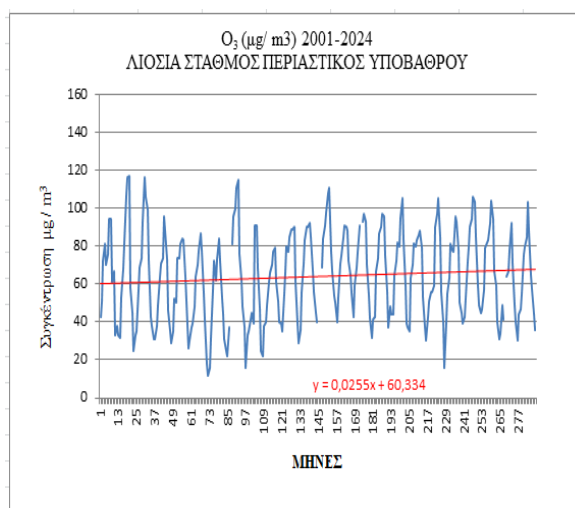
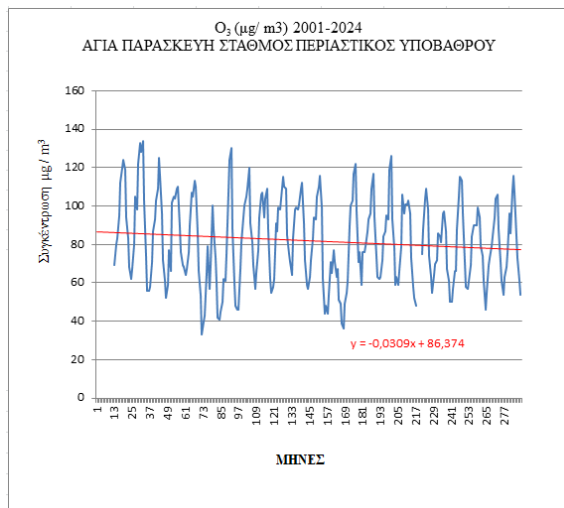


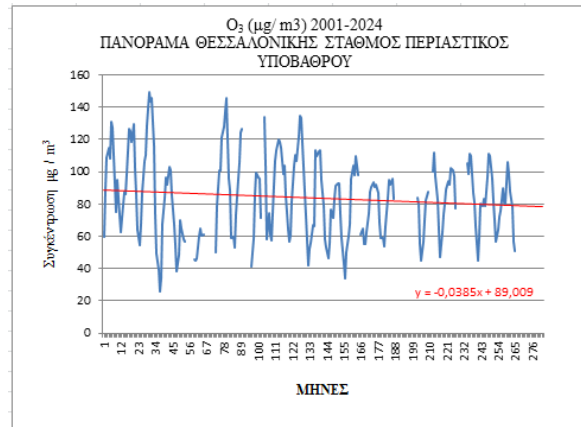
Διάγραμμα 5.10: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιάσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024





Διάγραμμα 5.11: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO₂ στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιόσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024

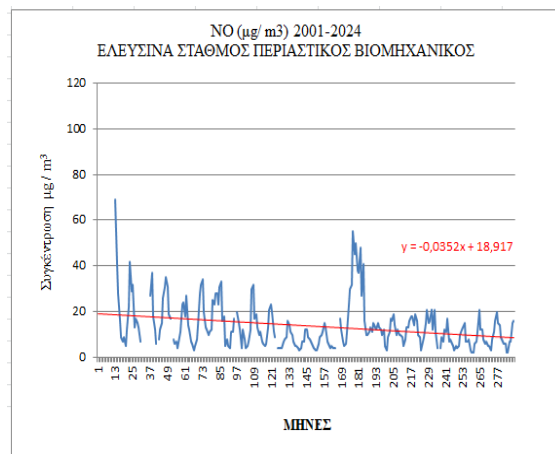
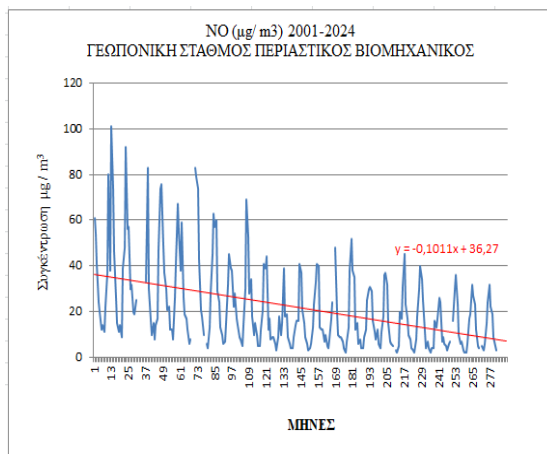


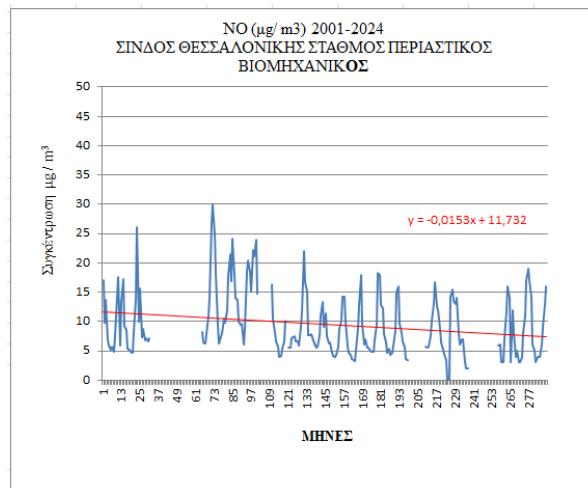


Διάγραμμα 5.12: Μέση μηνιαία διακύμανση του O₃ στους Σταθμούς Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή, Λιάσια, Λυκόβρυση, Θρακομακεδόνες και Πανόραμα Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024

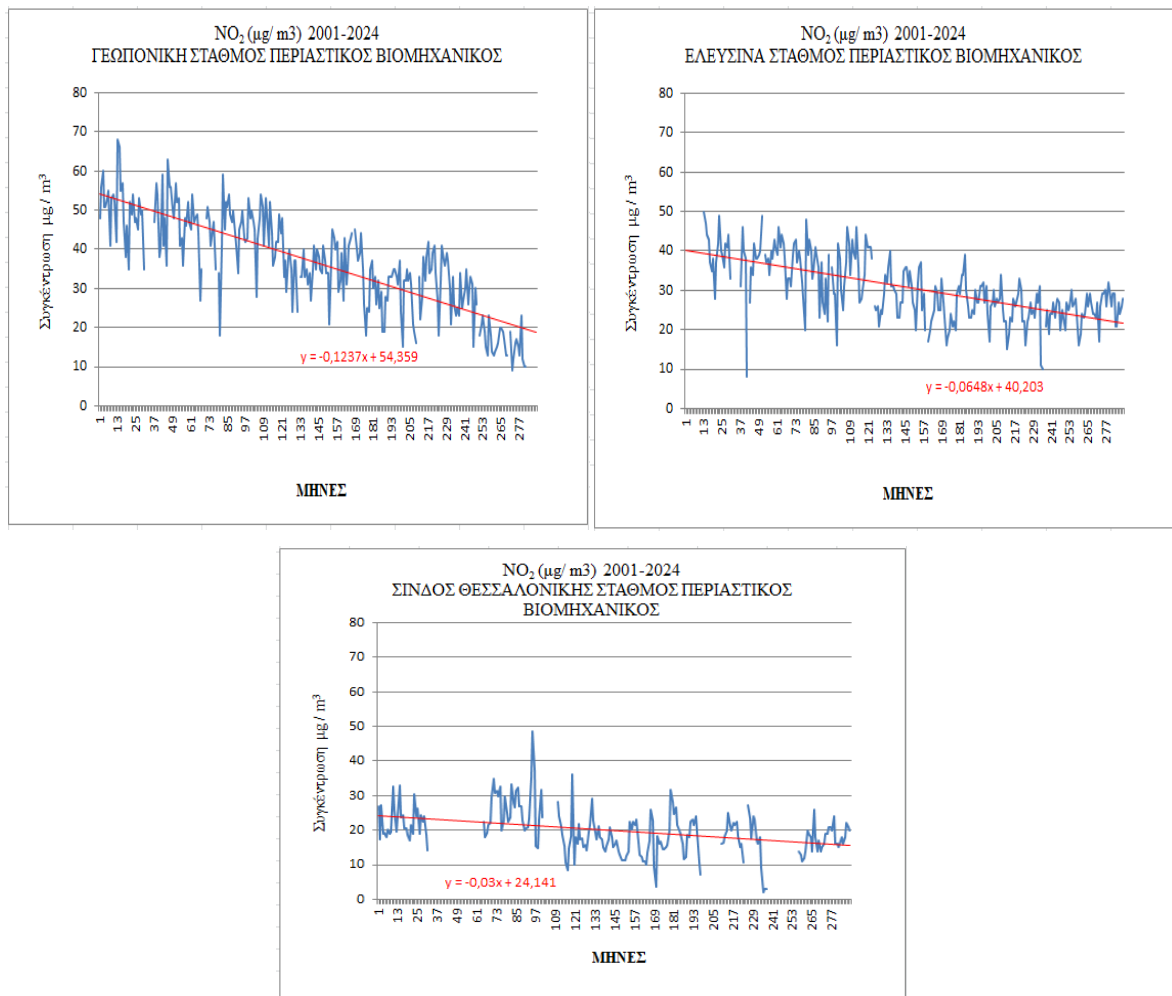
5.1.4 Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, σε περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, σε περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2024.

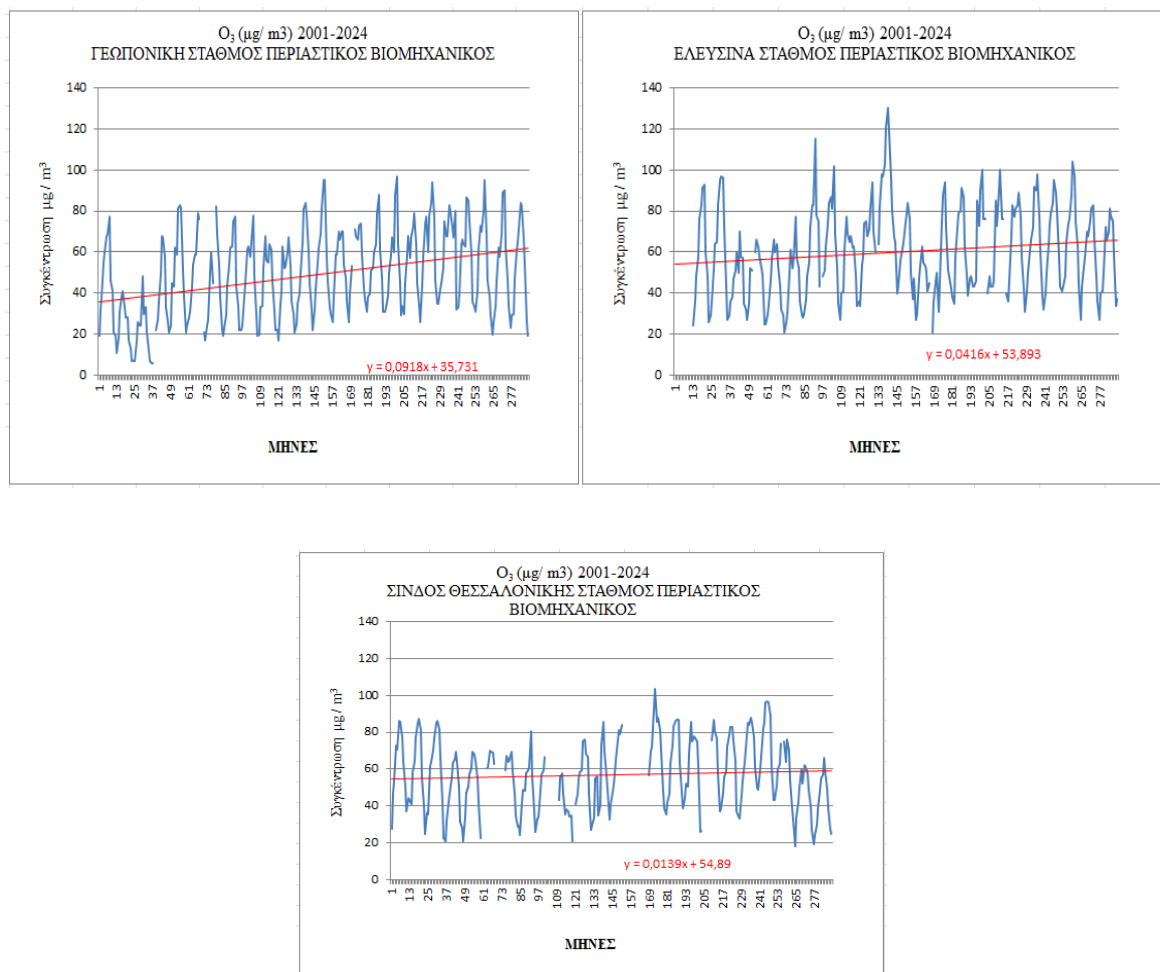




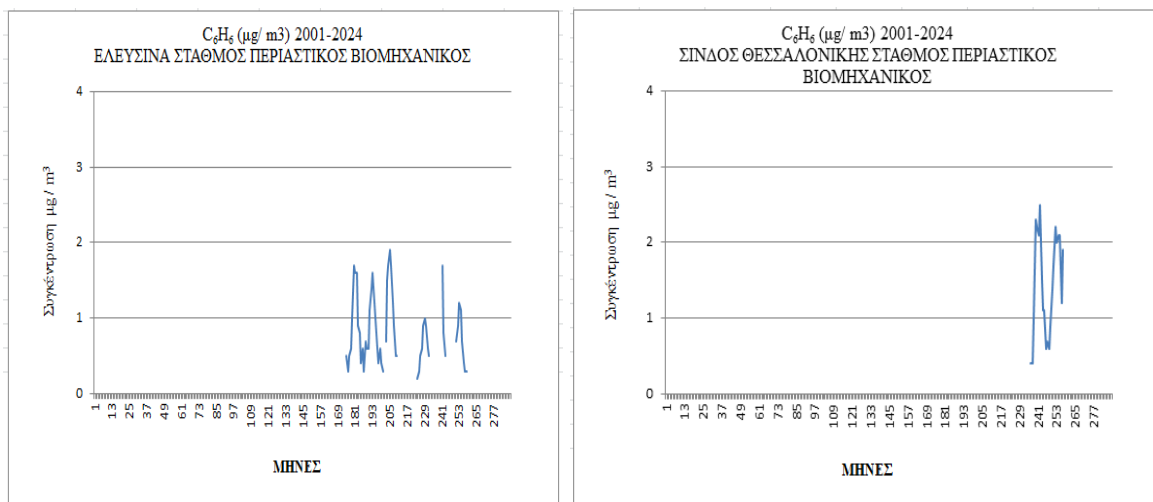
Διάγραμμα 5.13: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.



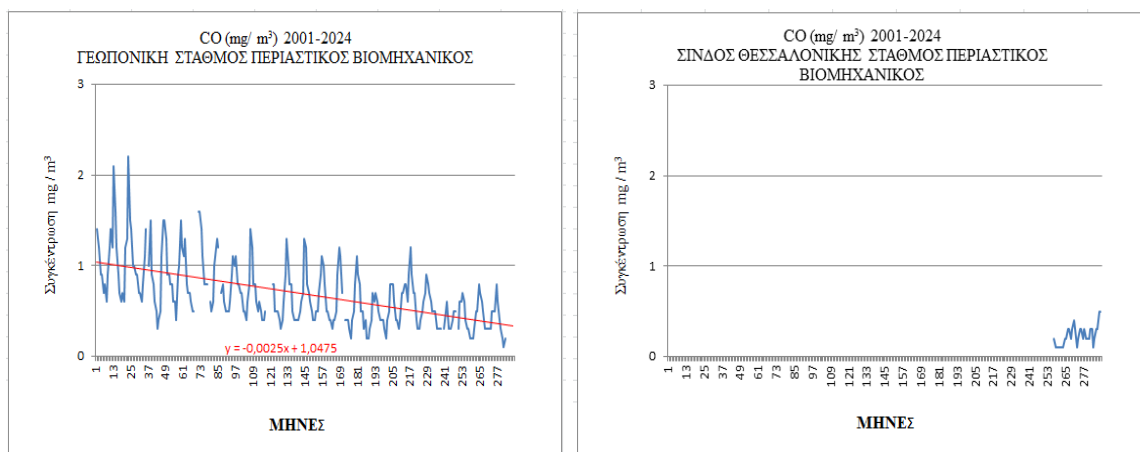
Διάγραμμα 5.14: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO₂ στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.15: Μέση μηνιαία διακύμανση του O_3 στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική, Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.16: Μέση μηνιαία διακύμανση του C_6H_6 στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Ελευσίνα και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.16: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους Περιαστικούς Βιομηχανικούς Σταθμούς Γεωπονική και Σίνδο Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001- 2024.

Σε ορισμένους σταθμούς, παρατηρήθηκε έλλειψη καταγραφής δεδομένων, είτε κατά τη διάρκεια μεγάλης περιόδου, είτε για μικρότερες χρονικές περιόδους, λόγω διαφόρων προβλημάτων συντήρησης των αναλυτών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μερικώς η διακύμανση των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή. Επίσης, οι ρύποι, C_6H_6 , CO δεν μετρώνται σε ορισμένους σταθμούς ή άρχισαν μετρώντας τα τελευταία έτη της περιόδου μελέτης. Στις περιπτώσεις μεγάλης έλλειψης δεδομένων δεν παρουσιάζεται η γραμμή τάσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, των υποενοτήτων 5.1.1-5.1.3, από τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων μετρήσεων των συγκεντρώσεων των σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ, προέκυψε ότι:

Την εξεταζόμενη περίοδο (2001-2024), στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις του NO (πρωτογενής ρύπος) και του NO₂ (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) καθώς και των C₆H₆ και CO (πρωτογενείς ρύποι) ήταν αυξημένες στο κέντρο της πόλης, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στον αυξημένο αριθμό οχημάτων και διανυόμενων χιλιομέτρων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές, καθώς και στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες. Έτσι, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των NO, NO₂, CO και C₆H₆ παρουσιάστηκαν στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, των οποίων η θέση είναι παραπλεύρως κεντρικών οδικών αξόνων. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν στους περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών και σε ορισμένους αστικού υποβάθρου, λόγω των τοπικών πηγών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης από παρακείμενες περιοχές. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου παρουσιάστηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις του σταθμούς των NO, NO₂, CO και C₆H₆, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών, αλλά και της αστάθειας του NO, που παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, το οδηγεί στη γρήγορη μετατροπή του σε NO₂, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε όζον (Ελληνα 2020; Μπαλάσκας, 2025; Kassomenos et al., 2012; Asimakopoulos et al., 1992; Ziomas et al., 1998).

Αντίθετα, από τα παραπάνω διαγράμματα των μέσων μηνιαίων μετρήσεων προέκυψε ότι, για την περίοδο 2001-2024, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις του O₃ (δευτερογενής ρύπος), όπως αναμένεται, ήταν αυξημένες στους σταθμούς που βρίσκονται περιφερειακά της πόλης, γεγονός που οφείλεται στο ότι το όζον καταστρέφεται από τις υψηλές συγκεντρώσεις NO₂ που υπάρχουν στα κέντρα των πόλεων. Επίσης, οι χημικές αντιδράσεις που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό του χρειάζονται χρόνο, με αποτέλεσμα με τη βοήθεια του ανέμου να μεταφέρεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον τόπο παραγωγής των πρόδρομων ενώσεων, γι' αυτό και αποκαλείται "ρύπος των προαστίων" (Κωστέα, 2016; Μπαλάσκας, 2025; Kassomenos et al., 2013; 2012; Asimakopoulos et al., 1992; Ziomas et al., 1998).

Στους περισσότερους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στους σταθμούς αστικού και περιαστικού υποβάθρου και στους βιομηχανικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της

Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο μελέτης 2001-2024, οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του διοξειδίου και του μονοξειδίου του αζώτου, του μονοξειδίου του άνθρακα και του βενζολίου παρουσίασαν πτωτική τάση, ενώ αντίθετα του όζοντος παρουσίασαν αυξητική τάση. Σε ορισμένους περιφερειακούς σταθμούς υποβάθρου (Αγίας Παρασκευής, ΑΠΘ-1, Πανόραμα), αλλά και σε ορισμένους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Πατησίων και Αθηνάς) οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις του O_3 παρουσίασαν σταθεροποιητικές ή και πτωτικές τάσεις, όπως επίσης και του NO σε ορισμένους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Πειραιάς και Αγ. Σοφίας) που παρουσίασαν την περίοδο μελέτης 2001-2024, σταθεροποιητικές τάσεις.

Οι συγκεντρώσεις των NO , NO_2 βενζολίου και CO παρουσίασαν, στις περισσότερες περιοχές, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, μια τάση μείωσης, η οποία κυρίως οφείλεται στη μείωση των εκπομπών NO_x και NMVOCs (Εικόνες 3.1 και 3.2) ειδικά μετά το 2010 (ΥΠΕΝ, 2026), καθώς και του CO (Εικόνα 3.4, Πίνακας 3.1) (Fameli & Assimakopoulos, 2016). Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι, οι εκπομπές των NO_x το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 46,8% και 54,9% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα, ενώ οι εκπομπές των NMVOCs το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 56,8% και 61,1% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα (ΥΠΕΝ, 2026). Οι πτωτικές αυτές τάσεις πιθανότατα οφείλονται στην αύξηση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (στην Αθήνα συνεχής επέκταση των γραμμών του μετρό, τραμ, κλπ.), στη βελτίωση της τεχνολογίας καυσίμων και οχημάτων, στη μειωμένη κίνηση των οχημάτων και την αποβιομηχάνιση εξαιτίας της ελληνικής οικονομικής κρίσης μετά το 2010, στην ολοκλήρωση των μεγάλων κυκλοφοριακών έργων, αλλά και στα μέτρα ελέγχου εκπομπής ρύπων από διάφορες πηγές και στη διείσδυση της χρήσης του φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στα νοικοκυριά. Επίσης, έχει υπολογιστεί ότι, μεταξύ 1990 και 2009 στην Ελλάδα, οι εκπομπές των CO και VOCs παρουσίαζαν πτωτική τάση (Progiou and Ziomas, 2011a-b), ενώ άλλες εκτιμήσεις (Eleftheriadis et al., 2012) δείχνουν μια σαφή μείωση των εκπομπών των NO_x και VOCs, κατά τη δεκαετία 2000-2010, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, τόσο από τις οδικές μεταφορές, όσο και από τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τον οικιακό και εμπορικό τομέα (Κωστέα, 2016; Παρασχά, 2014).

Ακόμη, η τάση σταθεροποίησης των συγκεντρώσεων του NO , σε ορισμένους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας πιθανότατα οφείλεται, εκτός από τις προαναφερθείσες αιτίες και στην αύξηση του κόστους καυσίμων εξαιτίας της ελληνικής οικονομικής κρίσης, με αποτέλεσμα τη μείωση των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων, στην αναβάθμιση των

μηχανών εσωτερικής καύσης (αυτοκινήτων και μέσων μαζικής μεταφοράς), καθώς και στη χρήση καυσίμων φιλικότερων προς το περιβάλλον (Πετρακάκης κ.ά., 2008; Κοφίνας, 2024). Σημαντικός επίσης παράγοντας μείωσης των NO_x ήταν το γεγονός της μείωσης της χρήσης καυσίμων για τη θέρμανση των κτιριακών μονάδων, τόσο σε οικιακό, όσο και σε εμπορικό επίπεδο, καθώς και της μείωσης της παραγωγής εξαιτίας της οικονομικής κρίσης, η οποία προκάλεσε μεταφορά κάποιων βιομηχανιών σε όμορες χώρες ή την παύση λειτουργίας κάποιων βιομηχανικών μονάδων (Ελληνα 2020; Μπαλάσκας, 2025; Στογιάννης, 2019). Τέλος, την περίοδο 2020-2021, η σημαντική μείωση των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων οφείλεται και στην πανδημία του COVID-19 και του αναγκαστικού περιοδικού αποκλεισμού των πολιτών στις κατοικίες τους, που είχε σαν επακόλουθο, στα αστικά κέντρα, τη γενικότερη μείωση των εκπομπών εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (Akritidis et al., 2021; Kofinas et al., 2024; Progiou et al., 2022).

Σε σημαντικό αριθμό σταθμών παρατηρήθηκαν αυξητικές τάσεις των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων του O₃, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Οι τάσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των επιπέδων και της διάρκειας των επεισοδίων υψηλών θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας, την τελευταία δεκαπενταετία, τα οποία παρατηρούνται σε μεγάλες αστικές περιοχές στην Ευρώπη και στη χώρα μας (Bais et al., 2013; Nastos and Kapsomenakis, 2015). Οι τάσεις αυτές σχετίζονται και με τη μείωση των επιπέδων των NO_x, NMVOCs και CO, που προαναφέρθηκε, τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στον ημερήσιο κύκλο των φωτοχημικών αντιδράσεων. Βέβαια, παρά τη σαφή μείωση των επιπέδων των NO_x, κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, έχει επισημανθεί ότι οι τάσεις του O₃ δεν απεικονίζουν πραγματικά τις μειώσεις των ανθρωπογενώς εκπεμπόμενων NO_x και VOCs, διότι λόγω των ακραία υψηλών θερμοκρασιών, ενώ οι εκπομπές τους μπορεί να μειώνονται, οι συγκεντρώσεις του O₃ μπορεί να παραμένουν αμετάβλητα υψηλές (Wilson et al., 2011). Επιπλέον, μαθηματική προσομοίωση έδειξε ότι ακόμη και αν περιοριστούν σημαντικά οι ανθρωπογενείς εκπομπές πρόδρομων ενώσεων του O₃ στην Ελλάδα (βιομηχανία, μεταφορές, θέρμανση, κλπ.), οι τιμές του O₃ στην περιοχή δεν πρόκειται να μειωθούν σημαντικά (Zerefos et al., 2002). Οι σταθεροποιητικές ή και πτωτικές τάσεις σε ορισμένους περιφερειακούς σταθμούς υποβάθρου, αλλά και σε ορισμένους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων του όζοντος πιθανότατα να οφείλεται σε τοπικές ιδιαιτερότητες αυτών των περιοχών, αλλά και στο ότι η δημιουργία

του O_3 εξαρτάται από πολλούς και ορισμένες φορές αλληλοαναιρούμενους παράγοντες (εκπομπές πολλών πρόδρομων ενώσεων, κλιματικές και μετεωρολογικές συνθήκες, τοπογραφικά χαρακτηριστικά περιοχών, κλπ.), οι οποίοι και διαμορφώνουν τελικά τα επίπεδα του όζοντος στις ελληνικές αστικές περιοχές.

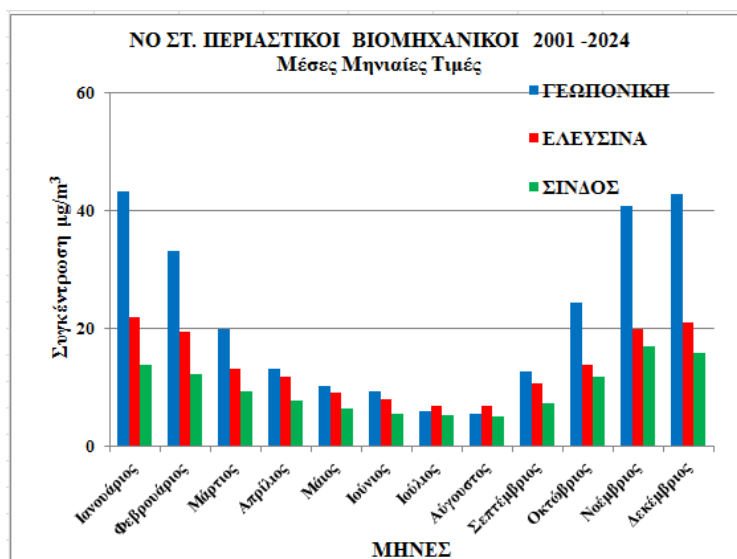
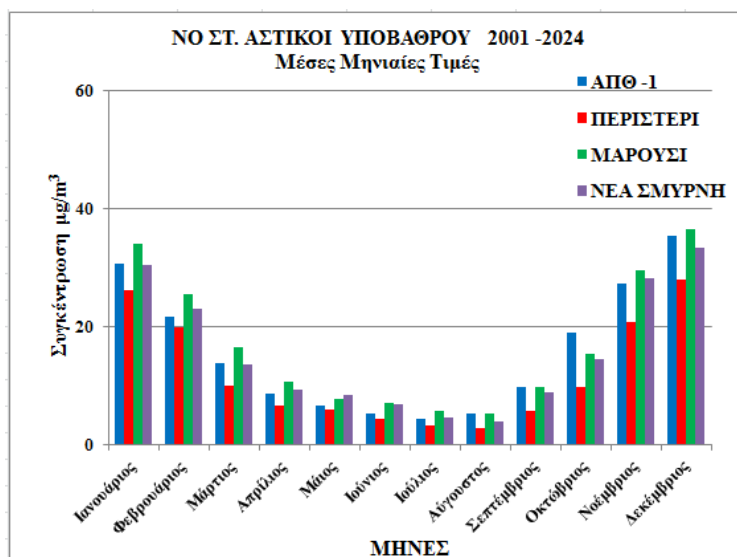
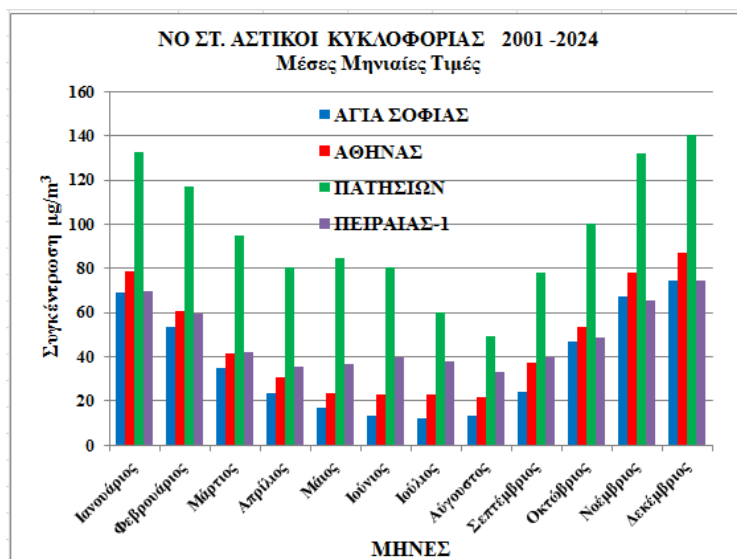
Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της φωτοχημικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης.

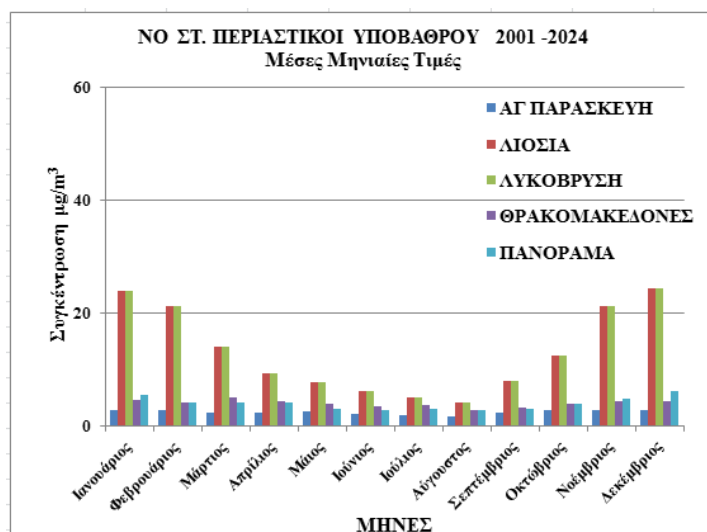
5.2 Εποχικές διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

Στην υποενότητα αυτή εξετάζονται οι μέσες μηνιαίες και εποχικές μεταβολές των συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων, NO , NO_2 , O_3 , CO και βενζολίου (C_6H_6), από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>), στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Τα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συγκριτική απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων των μέσων μηνιαίων και εποχικών τιμών των NO , NO_2 , O_3 , CO και C_6H_6 , ανά σταθμό, για την περίοδο μελέτης, ώστε να διευκολύνεται η συνολική αποτίμηση των επιπέδων ρύπανσης και η συσχέτισή τους με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα της κάθε θέσης.

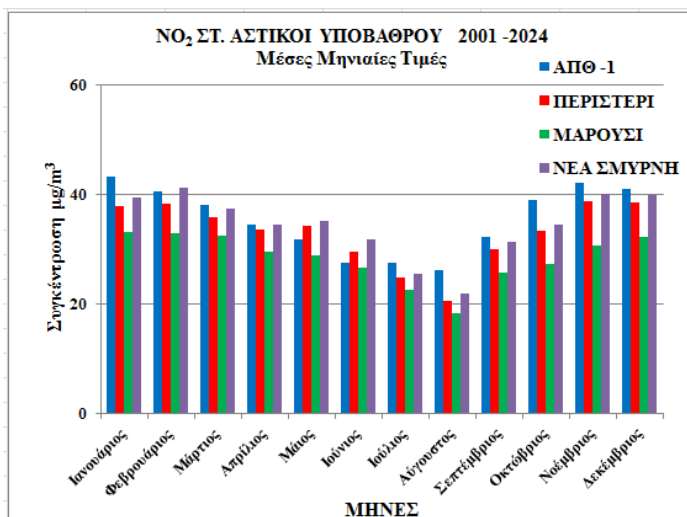
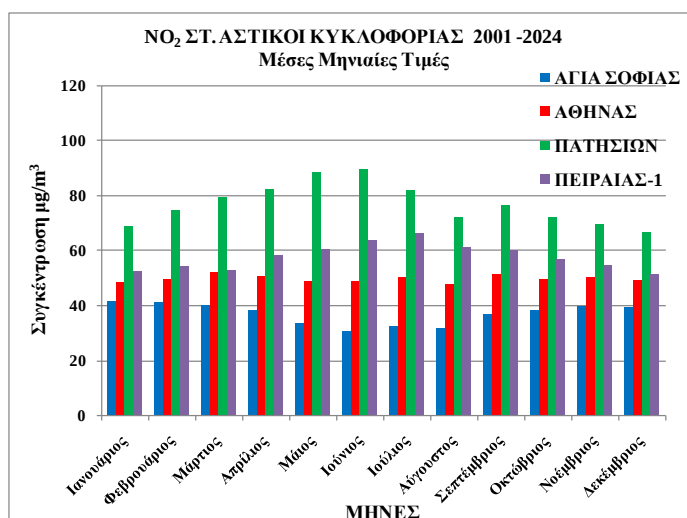
5.2.1 Μέσες Μηνιαίες διακυμάνσεις των NO , NO_2 , O_3 , C_6H_6 , CO , σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

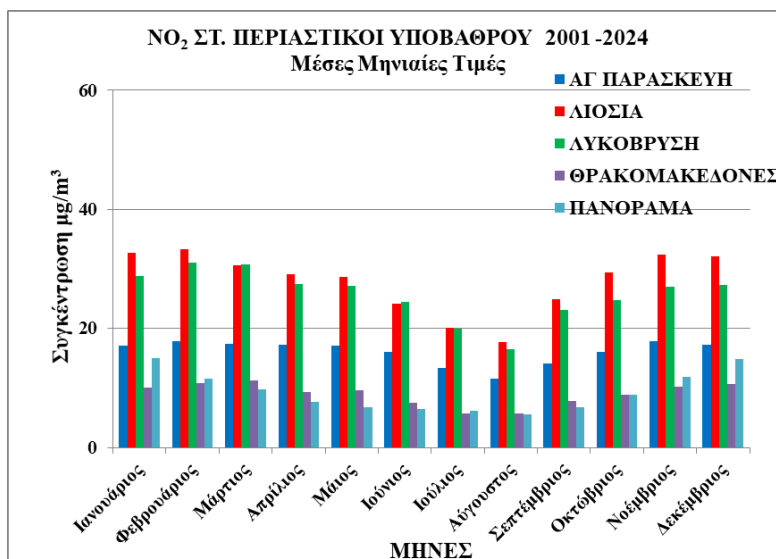
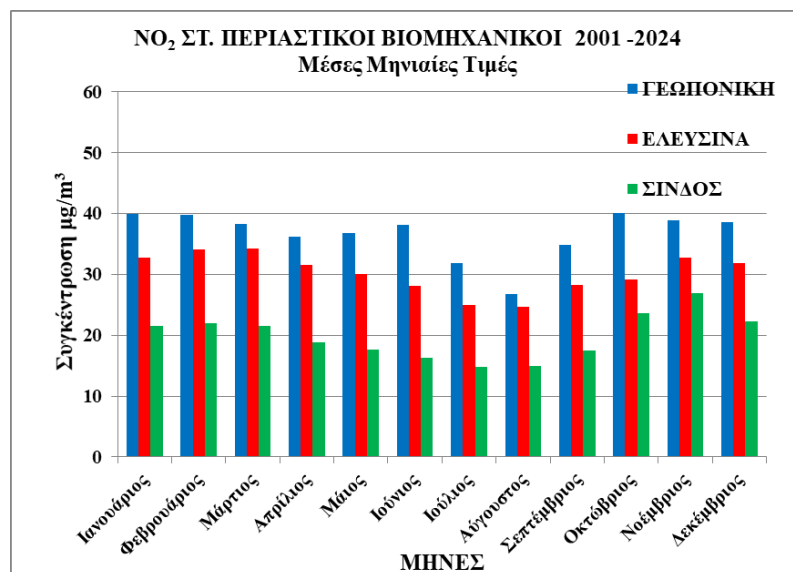
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO , NO_2 , O_3 , C_6H_6 , CO , για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και αστικούς σταθμούς υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.



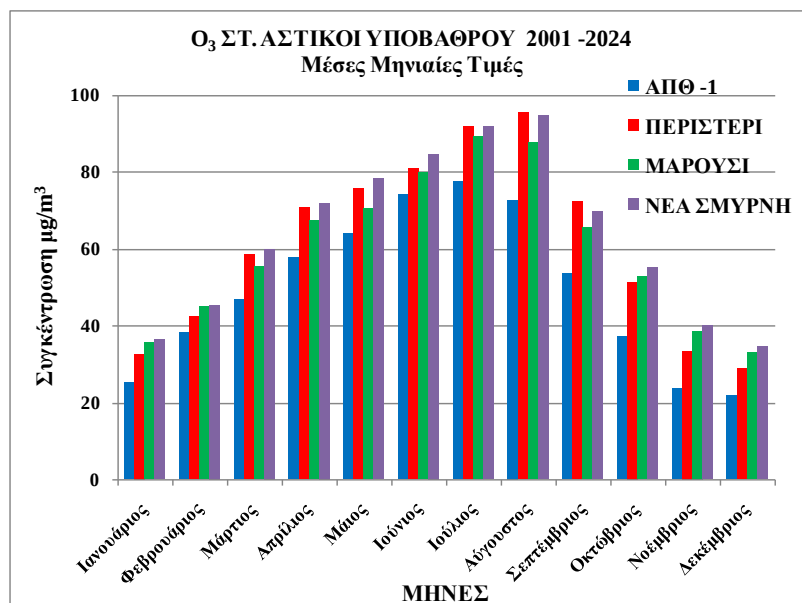
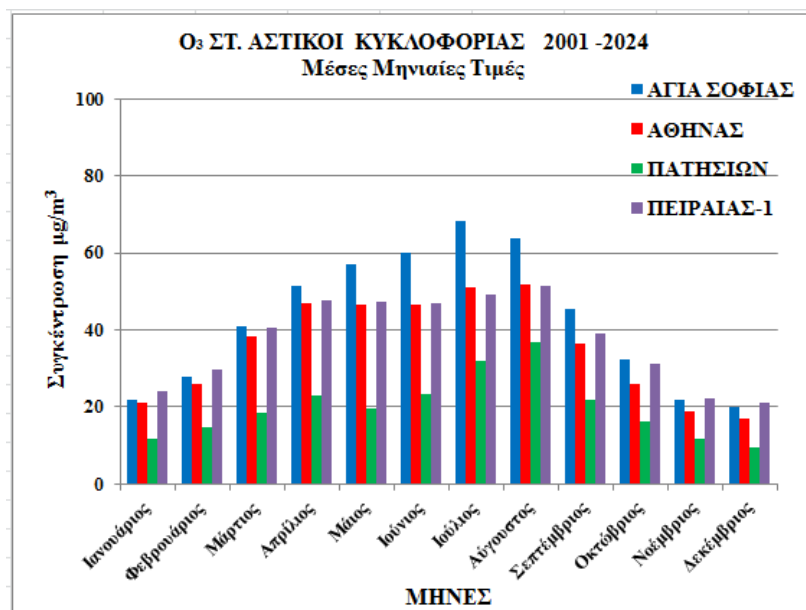


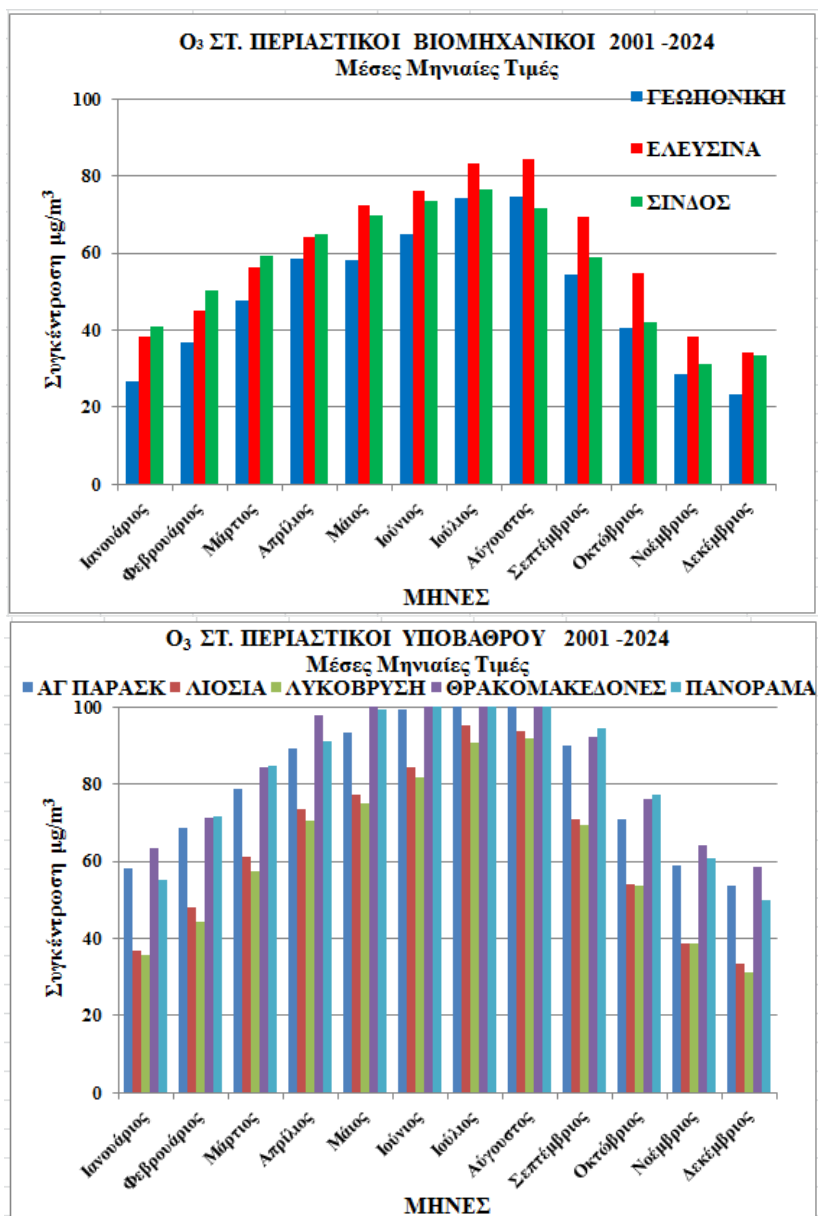
Διάγραμμα 5.17: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



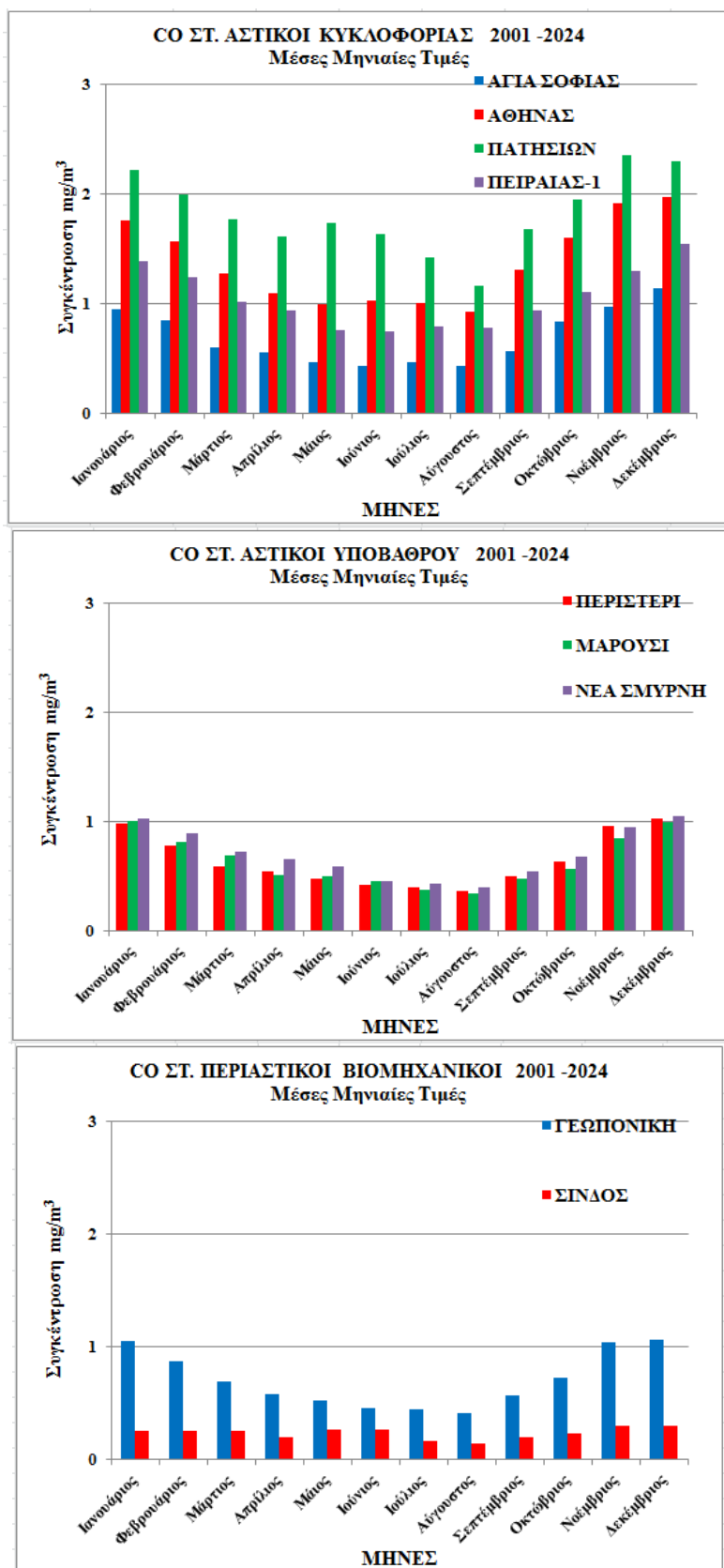


Διάγραμμα 5.18: Μέση μηνιαία διακύμανση του NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

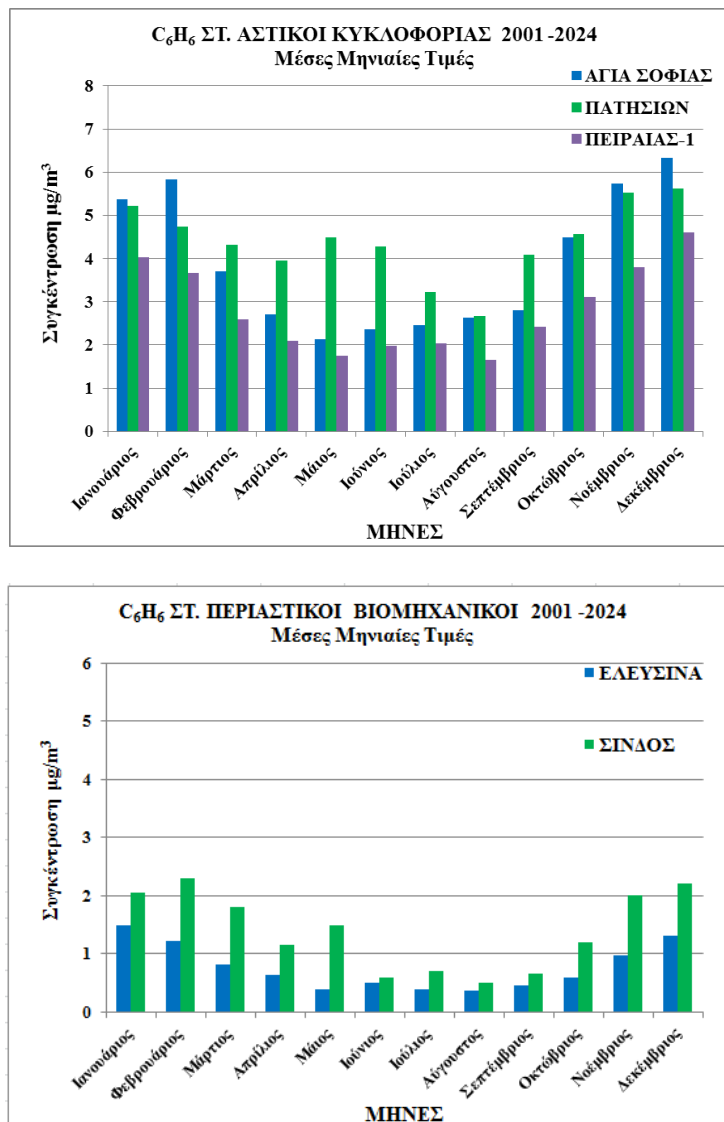




Διάγραμμα 5.20: Μέση μηνιαία διακύμανση του O₃ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



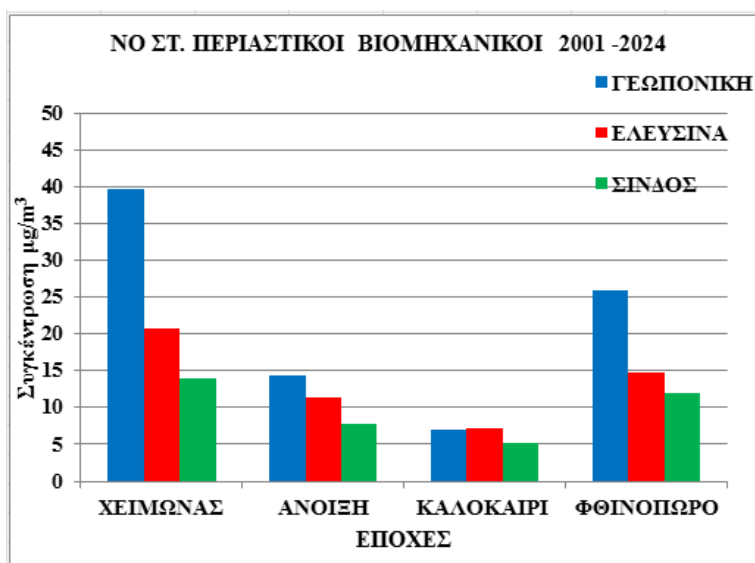
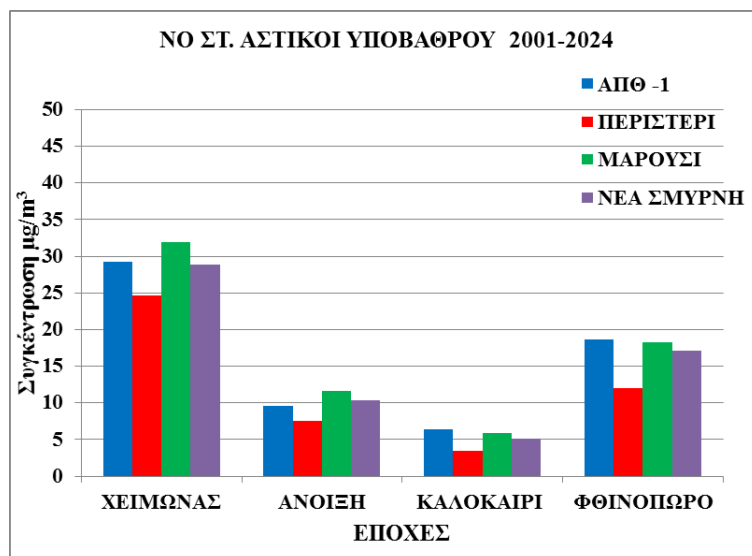
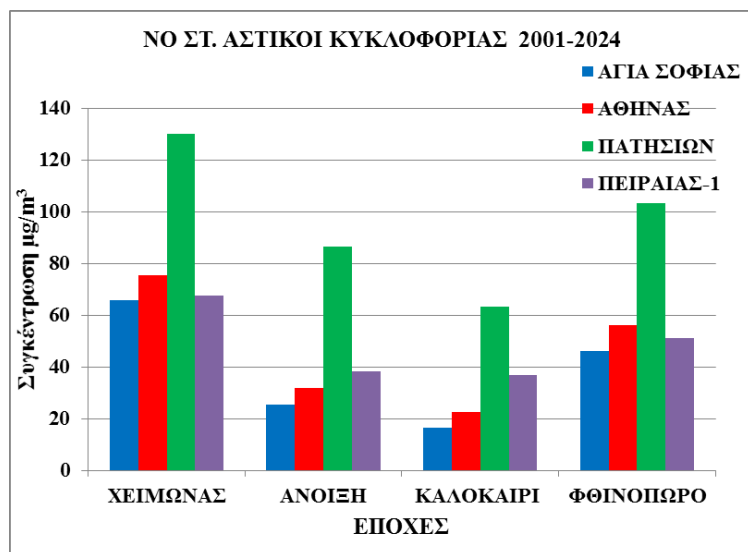
Διάγραμμα 5.21: Μέση μηνιαία διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

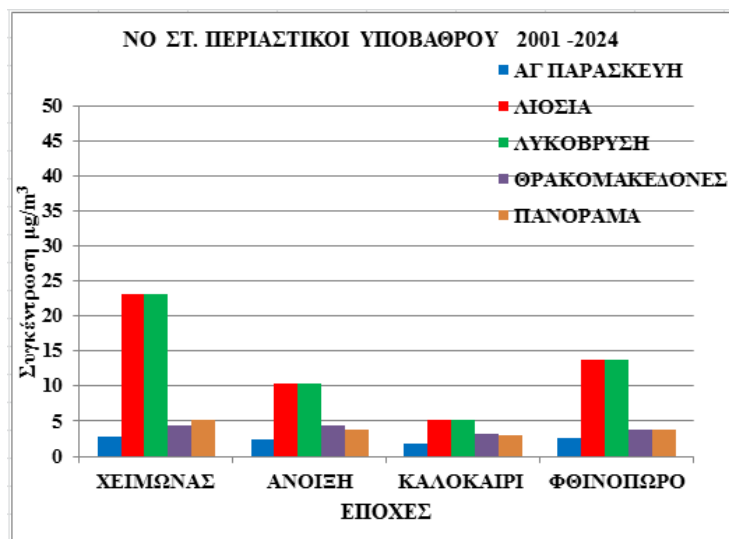


Διάγραμμα 5.22: Μέση μηνιαία διακύμανση του C₆H₆ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

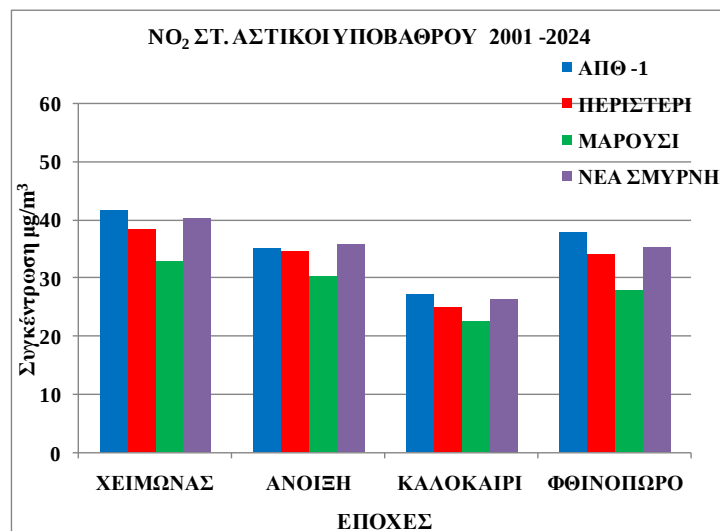
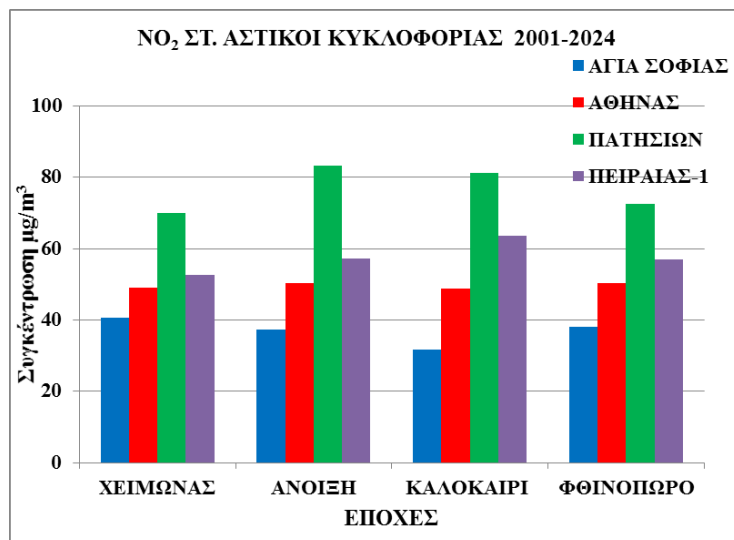
5.2.2 Μέσες εποχικές διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

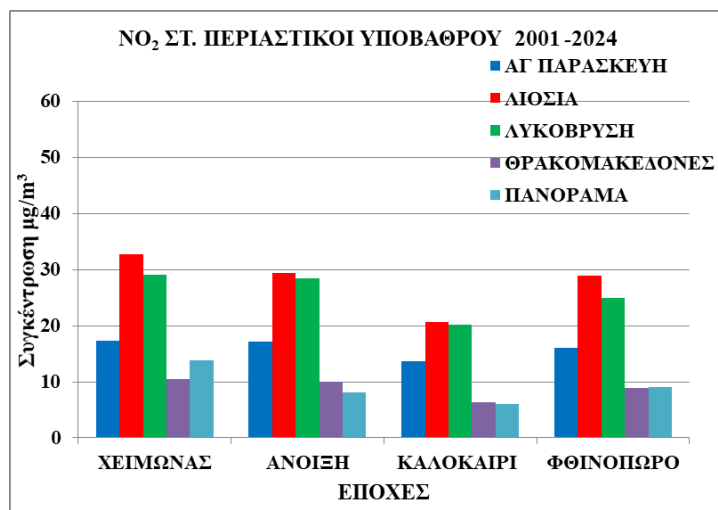
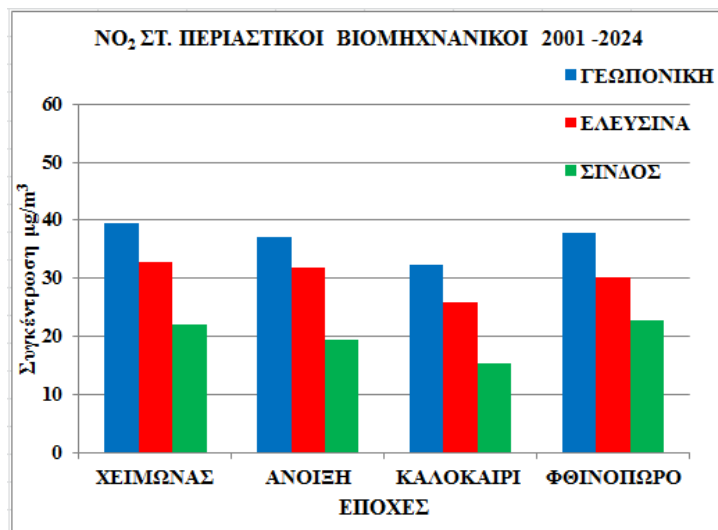
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων εποχικών συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, C₆H₆, CO, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και αστικούς σταθμούς υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.



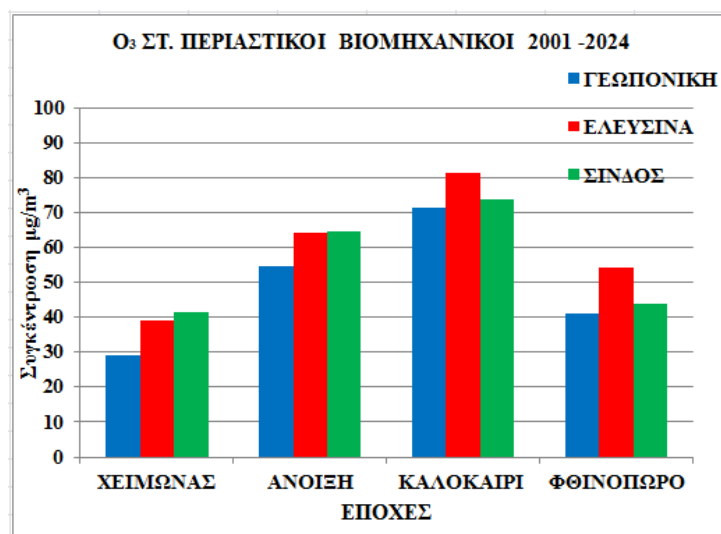
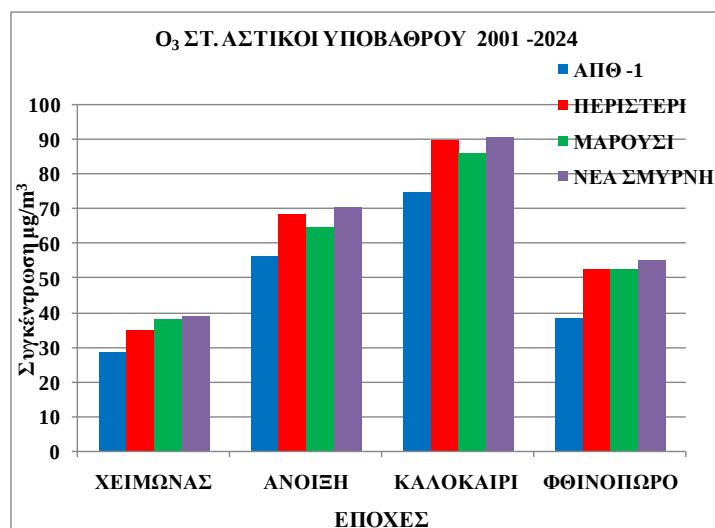
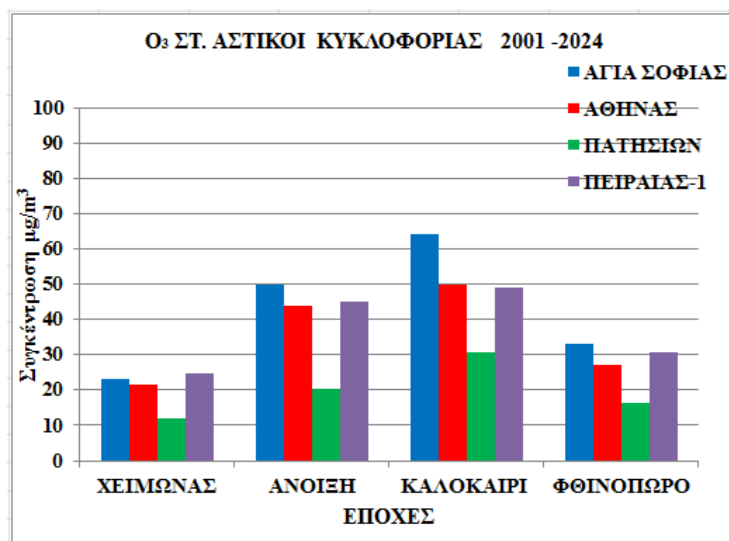


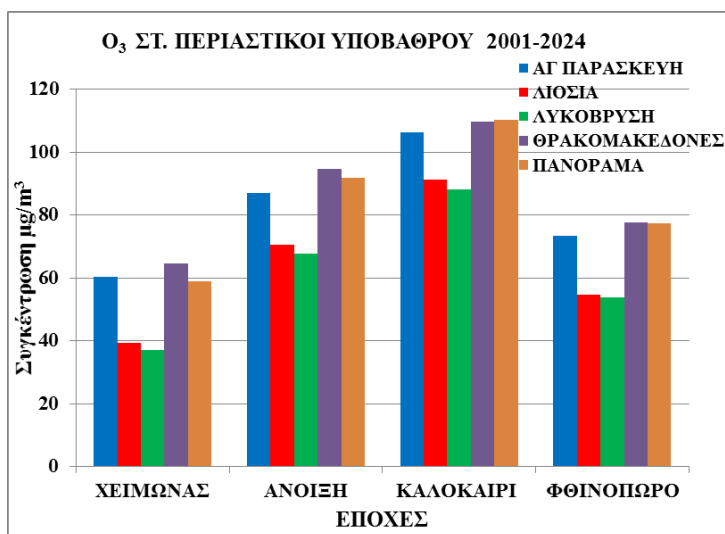
Διάγραμμα 5.23: Μέση εποχική διακύμανση του ΝΟ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



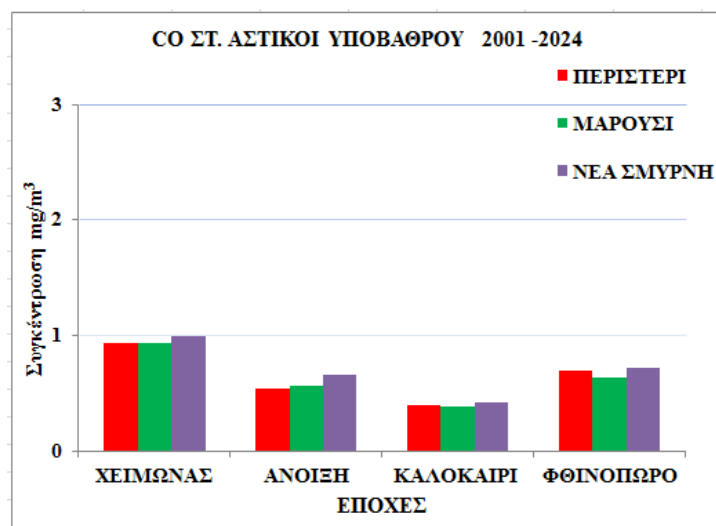
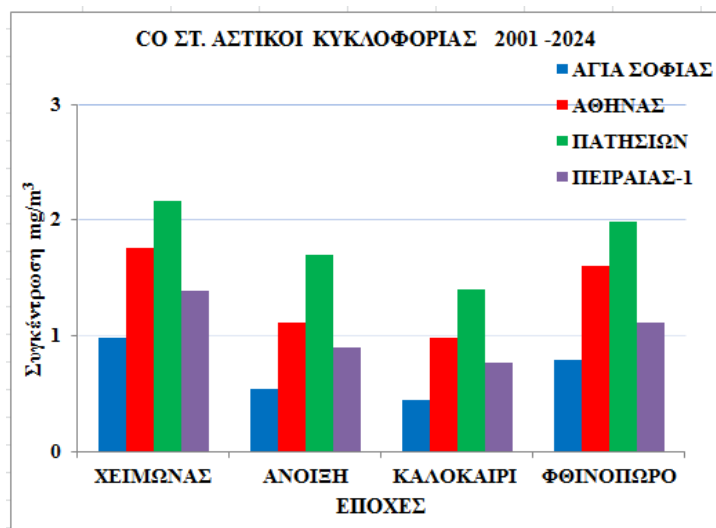


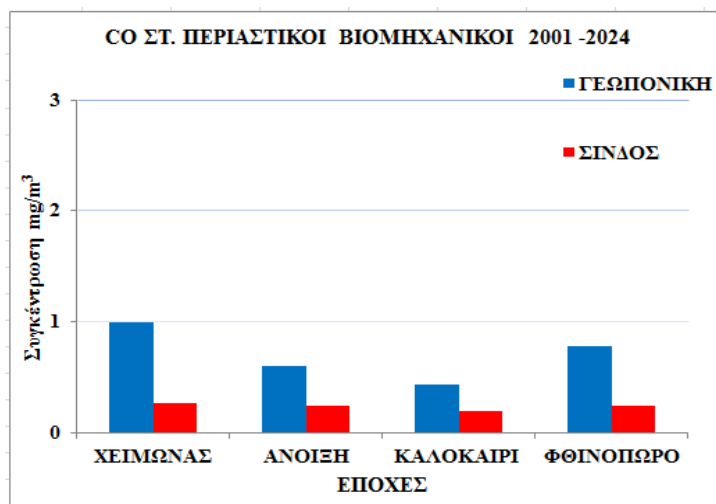
Διάγραμμα 5.24: Μέση εποχική διακύμανση του NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



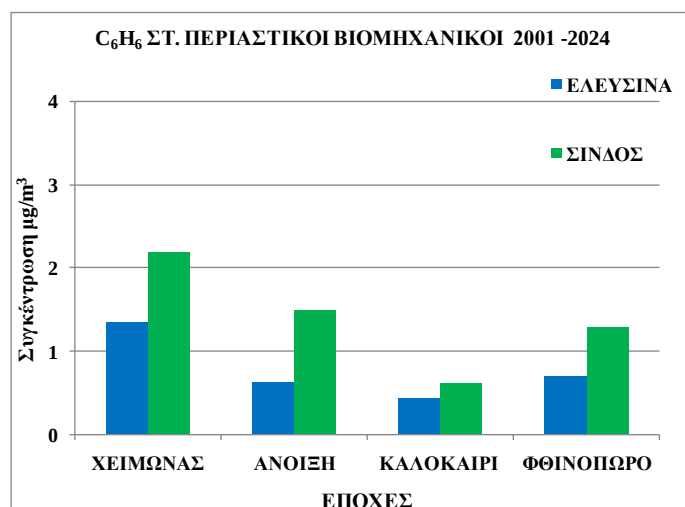
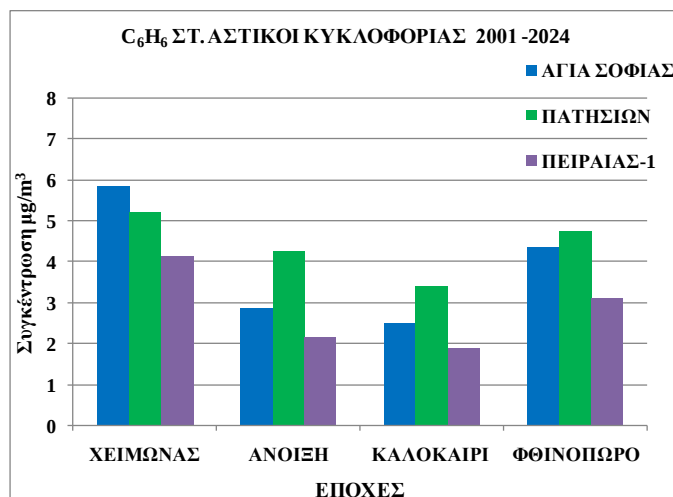


Διάγραμμα 5.25: Μέση εποχική διακύμανση του O₃ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.





Διάγραμμα 5.26: Μέση εποχική διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.27: Μέση εποχική διακύμανση του C₆H₆ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Η μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των NO, CO και C₆H₆, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρική ρύπανσης, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024, έδειξε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων, στις εκπομπές των οικιακών θερμάνσεων, στη μειωμένη φωτοχημική δραστηριότητα τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις γενικότερες μετεωρολογικές συνθήκες (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, κλπ) κάθε εποχής του έτους. Έτσι, η εικόνα αυτή αντικατοπτρίζει τις εποχικές μεταβολές στις πηγές εκπομπών των NO, CO και C₆H₆, αλλά και στις μετεωρολογικές συνθήκες, που επηρεάζουν τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες μεταξύ των φωτοχημικών ρύπων. Παρά τις διαφορές ανά σταθμό και περιοχή, η πλειονότητα εμφανίζει σταθερά καθοδική τάση από τις χειμερινές προς τις καλοκαιρινές συγκεντρώσεις. Σε ορισμένες βιομηχανικά επιβαρυμένες περιοχές, καθώς και σε μερικές περιαστικές περιοχές οι εποχικές μεταβολές ήταν περιορισμένες, λόγω κυρίως των χαμηλών επιπέδων αυτών των πρωτογενών ρύπων.

Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του NO₂ στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024, διαπιστώθηκε ότι ο χειμώνας και το φθινόπωρο ήταν οι περισσότερο επιβαρυμένες εποχές, με αρκετές όμως αποκλίσεις, ανάλογα με τον τύπο του σταθμού και τις τοπικές πηγές εκπομπών. Στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας Πατησίων και Πειραιά-1, παρατηρήθηκε σχετικά μικρή διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO₂ να παρουσιάζονται την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού. Στους περιαστικούς-βιομηχανικούς παρατηρήθηκαν σαφείς επιρροές από μη κυκλοφοριακές πηγές. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου παρατηρήθηκαν χαμηλές συγκεντρώσεις NO₂, πιθανότατα εξαιτίας της περιορισμένης επίδρασης ανθρωπογενών εκπομπών. Στους σταθμούς αυτούς επίσης παρατηρήθηκε μικρή διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO₂ να παρουσιάζονται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Γενικότερα, το NO₂ παρουσιάζει μικρότερη μηνιαία διακύμανση, σε σύγκριση με το NO, καθώς είναι περισσότερο σταθερός ρύπος και επηρεάζεται λιγότερο από άμεσες εκπομπές

και περισσότερο από δευτερογενείς ατμοσφαιρικές χημικές διεργασίες (Seinfeld & Pandis, 2016).

Τα μεγαλύτερα επίπεδα του δευτερογενώς παραγόμενου O_3 , σε αντίθεση με τους άλλους αέριους ρύπους, παρατηρούνται στους περιφερειακούς σταθμούς (περιαστικούς σταθμούς και σταθμούς υποβάθρου) και όχι στα αστικά κέντρα και τις κύριες οδικές αρτηρίες, λόγω της μεταφερόμενης ρύπανσης από παρακείμενες περιοχές, σε περιοχές με μικρή δραστηριότητα εκπομπών, γι' αυτό και αποκαλείται ρύπος των προαστίων (Κωστέα, 2016; Παρασχά, 2014; Στρατάκη, 2022). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το όζον καταστρέφεται από το NO , που υπάρχει σε υψηλές συγκεντρώσεις στα κέντρα των πόλεων και οι χημικές αντιδράσεις που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό του χρειάζονται χρόνο, έτσι, με τη βοήθεια του ανέμου μεταφέρεται σε σημαντικές αποστάσεις, από τον τόπο παραγωγής των πρόδρομων ενώσεων του O_3 (Kassomenos et al., 2012; Zerefos, et al., 2002; Ziomas et al., 1998).

Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του όζοντος στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024, διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις του O_3 είναι μεγαλύτερες τη θερινή περίοδο, ενώ οι ελάχιστες τη χειμερινή περίοδο του έτους, κυρίως λόγω της αυξημένης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας κατά τη θερμή περίοδο του έτους, η οποία ενισχύει σημαντικά το σχηματισμό του O_3 από φωτοχημικές διεργασίες (Kassomenos et al., 2012; Kofinas et al., 2024; Πετρακάκης κ.ά., 2008). Στους σταθμούς της Θεσσαλονίκης (ιδίως το Πανόραμα και η Αγία Σοφία) καταγράφονται υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με αντίστοιχους τύπους σταθμών στην Αθήνα, πιθανότατα λόγω χαμηλότερων επιπέδων NO και NO_2 (μικρότερες κυκλοφοριακές και βιομηχανικές εκπομπές, σε σχέση με την Αθήνα) και ευνοϊκότερων τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών για το σχηματισμό O_3 . Διαχρονικά η αυξητική τάση στις θερινές τιμές των συγκεντρώσεων του O_3 είναι εμφανής κυρίως σε περιαστικούς σταθμούς. Γενικά, το O_3 είναι ένας σημαντικός δείκτης φωτοχημικής ρύπανσης μιας περιοχής, ιδιαίτερα σε σταθμούς μακριά από έντονες πηγές πρόδρομων ρύπων (NO_x , VOCs), όπου η αναγωγική καταστροφή του είναι περιορισμένη (Μπαλάσκας, 2025; Πετρακάκης κ.ά., 2008).

Γενικά, σε πολλές αστικές περιοχές, παρά τη σημαντική επίδραση τοπικών πηγών (κυκλοφορία οχημάτων, κεντρικές θερμάνσεις) ή βιομηχανικών πηγών, οι μετεωρολογικές συνθήκες (έντονη ηλιακή ακτινοβολία, διαδικασίες διασποράς, υψηλές θερμοκρασίες) και

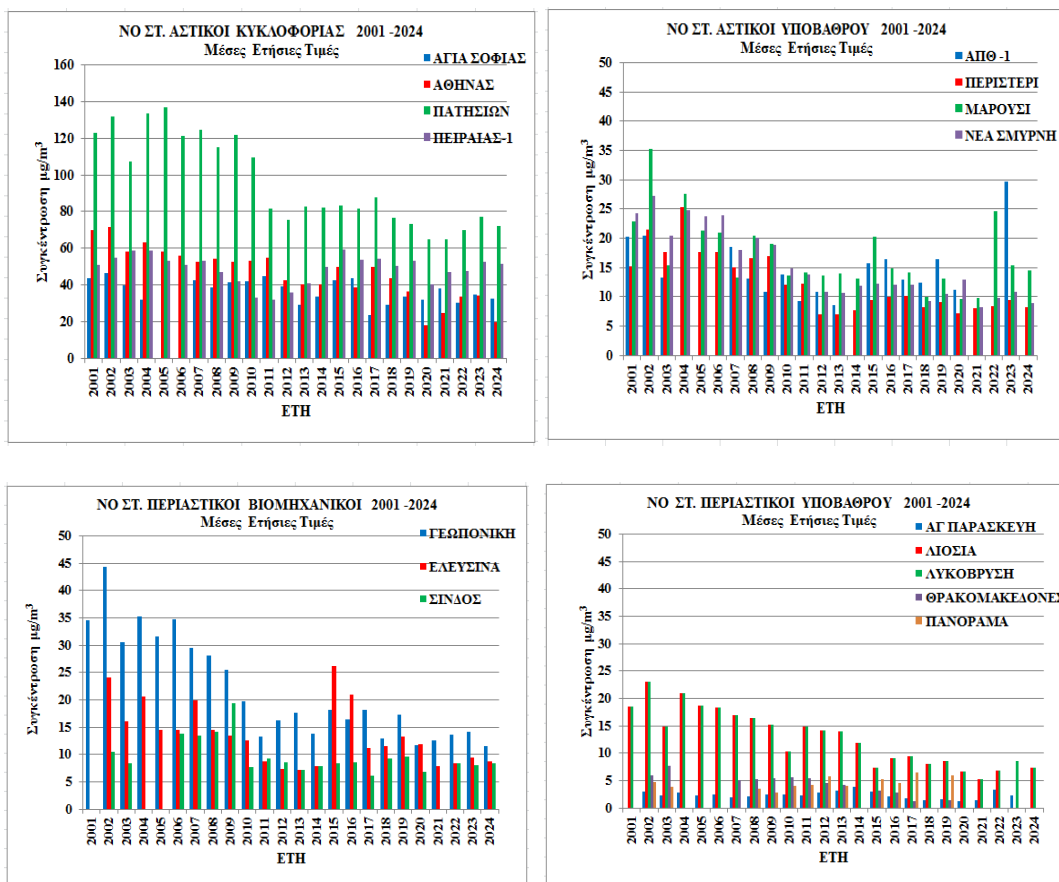
οι διαδικασίες διασποράς, αλλά και οι τοπικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μετρήσεων, καθορίζουν αποφασιστικά το βαθμό συσσώρευσης και τη εποχική διακύμανση των φωτοχημικών ρύπων.

5.3 Ετήσιες διακυμάνσεις των φωτοχημικών ρύπων στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

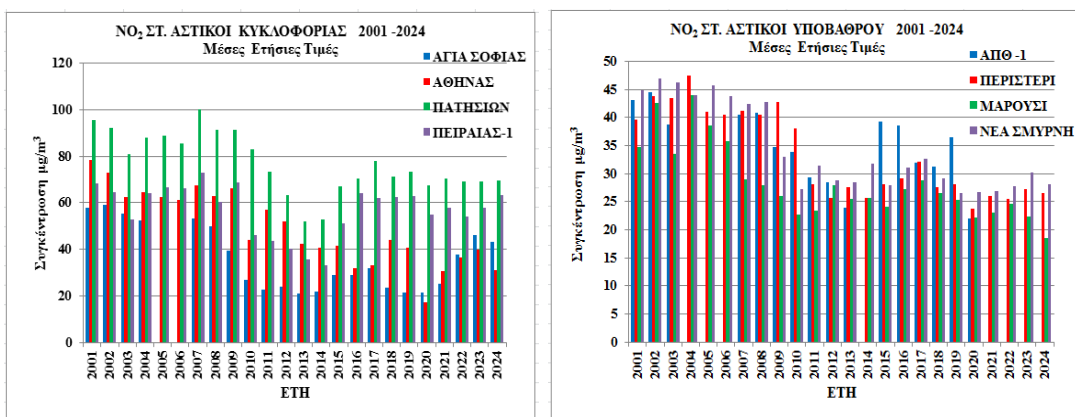
Στην υποενότητα αυτή εξετάζονται οι μέσες ετήσιες μεταβολές των συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων, NO, NO₂, O₃, CO και βενζολίου (C₆H₆), από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>), στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Τα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συγκριτική απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων των μέσων ετήσιων τιμών των NO, NO₂, O₃, CO και C₆H₆, ανά σταθμό, για την περίοδο μελέτης, ώστε να διευκολύνεται η συνολική αποτίμηση των επιπέδων ρύπανσης και η συσχέτισή τους με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα της κάθε θέσης. Η αποτύπωση των διαχρονικών μεταβολών και των γραμμικών τάσεων των ρύπων αυτών συμβάλλει στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας περιβαλλοντικών πολιτικών και της επίδρασης μεταβολών κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στη φωτοχημική ρύπανση των αστικών, περιαστικών και βιομηχανικών περιοχών.

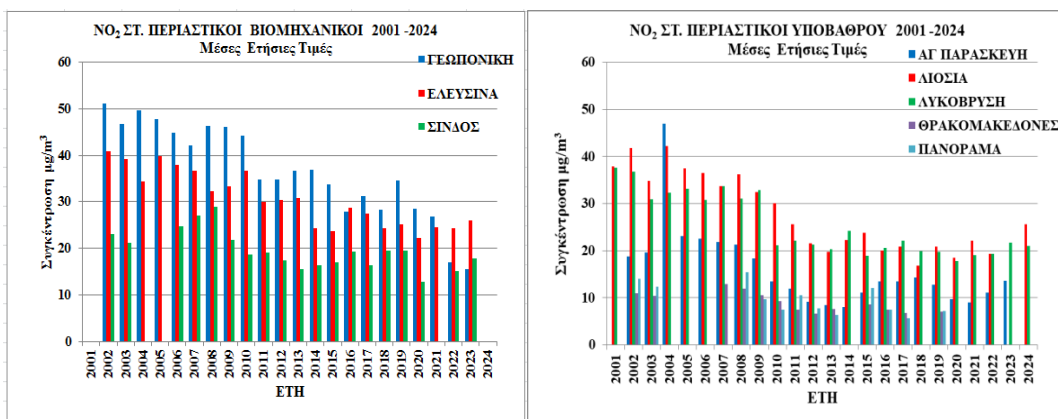
5.3.1 Μέσες ετήσιες διακυμάνσεις των NO, NO₂, O₃, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διαχρονικές διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και αστικούς σταθμούς υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.

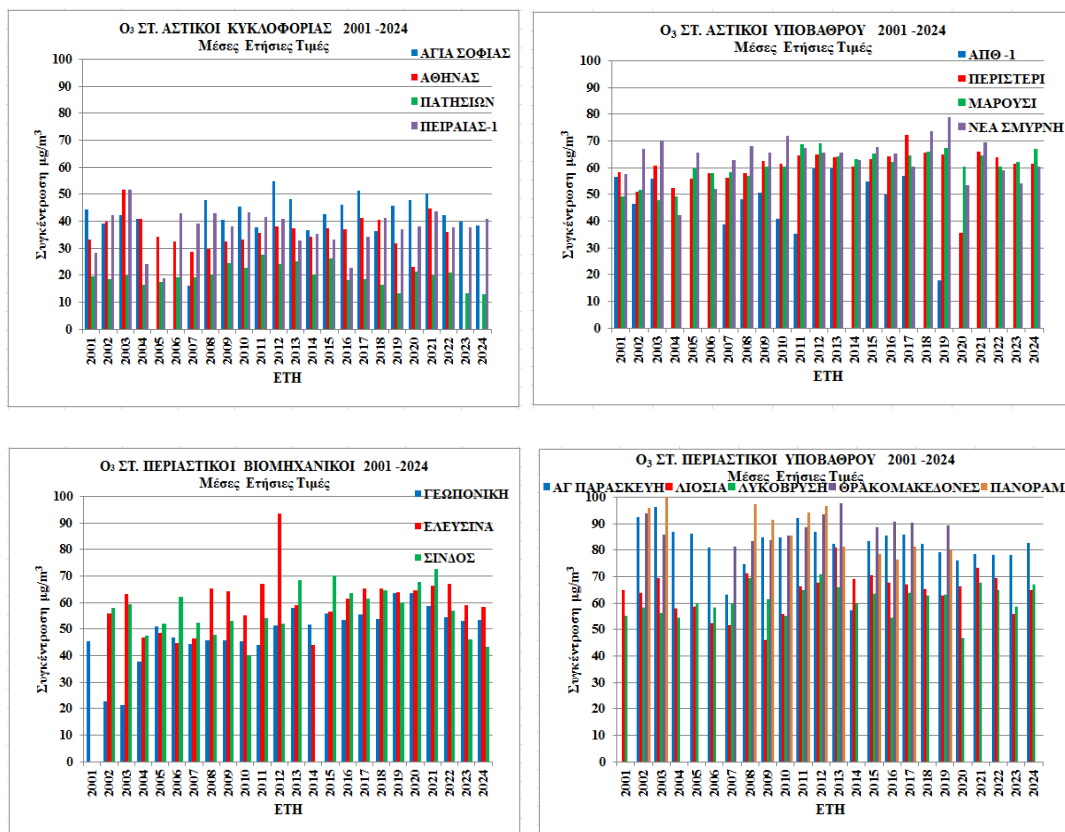


Διάγραμμα 5.28: Μέση ετήσια διακύμανση του NO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.





Διάγραμμα 5.29: Μέση ετήσια διακύμανση του NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



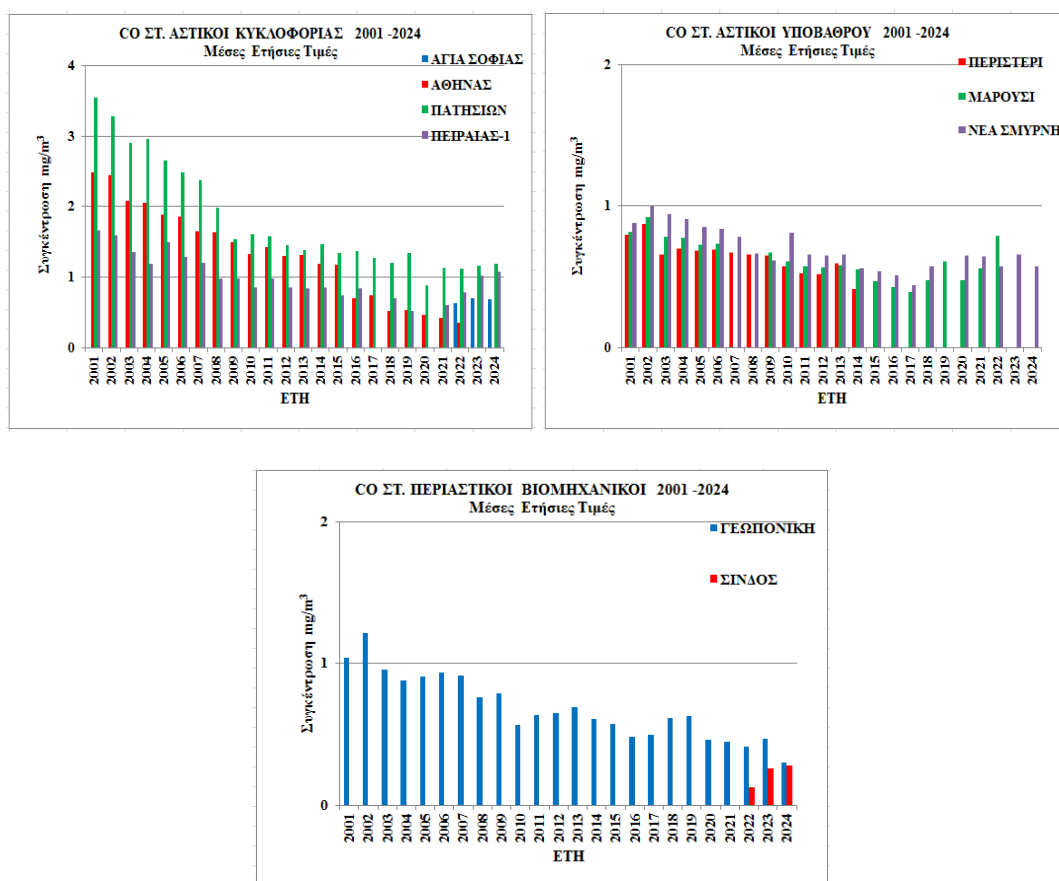
Διάγραμμα 5.30: Μέση ετήσια διακύμανση του O₃ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

5.3.2 Ετήσιες διακυμάνσεις των C₆H₆, CO, σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

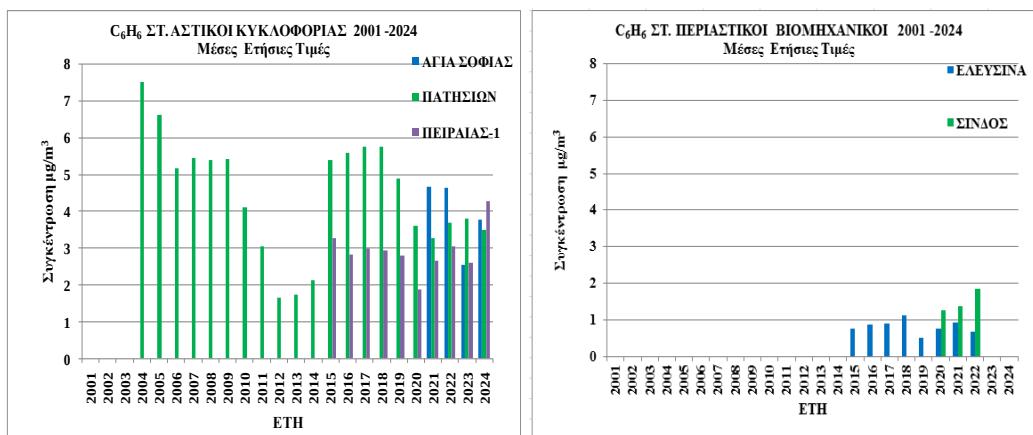
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διαχρονικές διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των C₆H₆, CO, για τους επιλεγμένους

αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και αστικούς σταθμούς υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.

Ειδικά για τους ρύπου αυτούς, σε ορισμένους σταθμούς, παρατηρήθηκε έλλειψη καταγραφής δεδομένων, είτε κατά τη διάρκεια μεγάλης περιόδου, είτε για μικρότερες χρονικές περιόδους, λόγω διαφόρων προβλημάτων συντήρησης των αναλυτών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μερικώς η διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή. Επίσης, οι ρύποι, C_6H_6 , CO δεν μετρώνται σε ορισμένους σταθμούς ή άρχισαν μετρώνται τα τελευταία έτη της περιόδου μελέτης.



Διάγραμμα 5.31: Μέση ετήσια διακύμανση του CO στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001 - 2024.

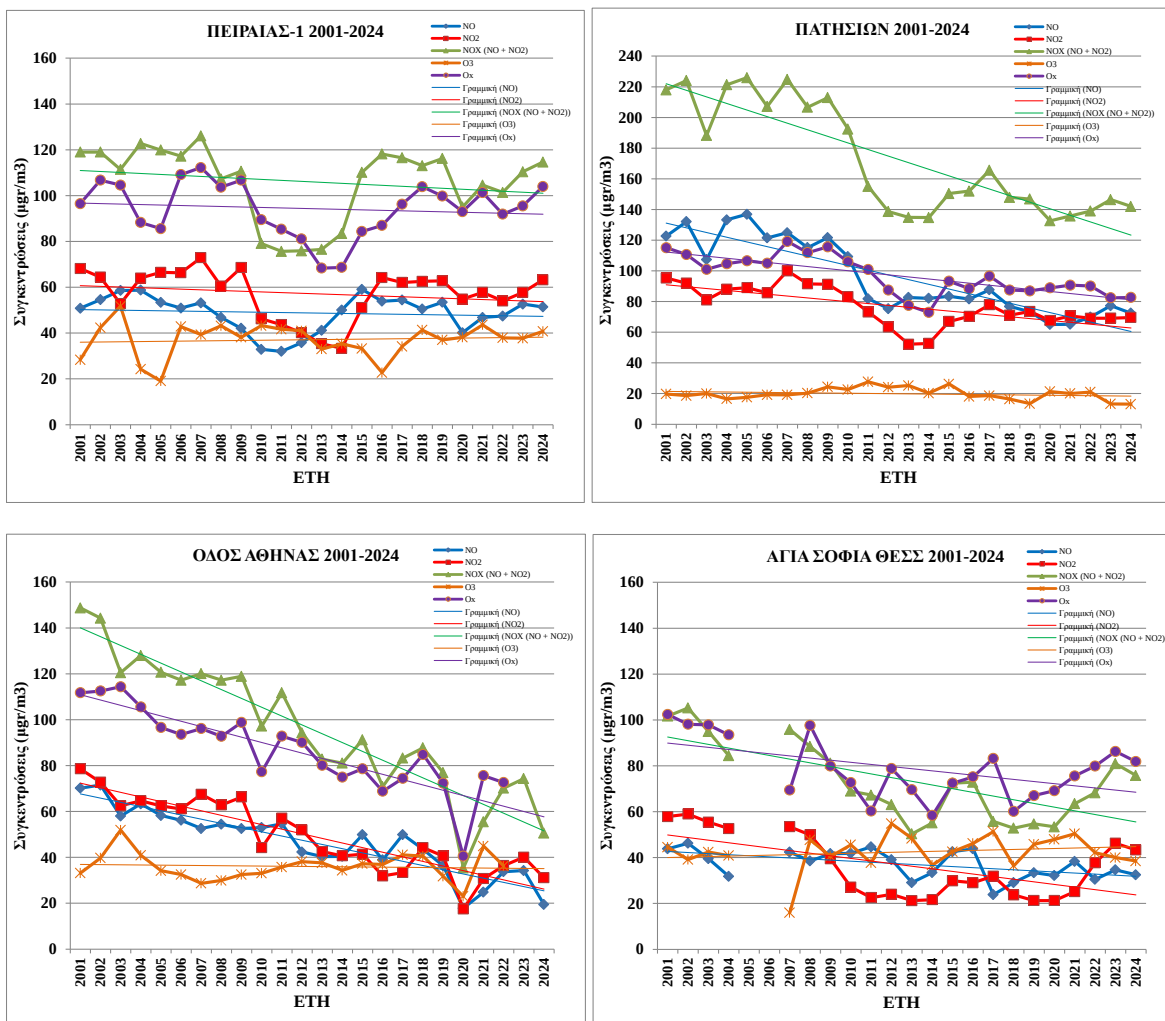


Διάγραμμα 5.32: Μέση ετήσια διακύμανση του C_6H_6 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.

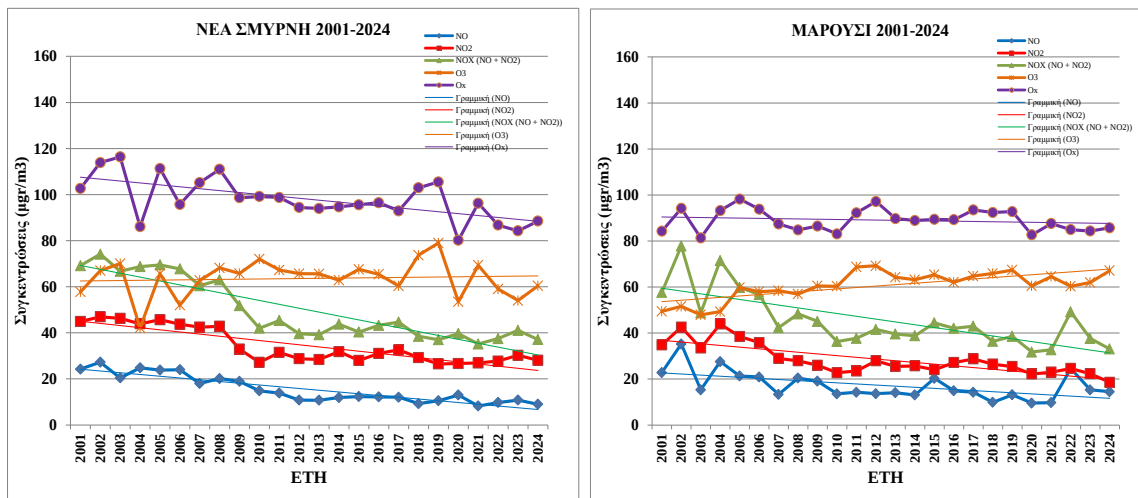
5.3.3 Διαχρονικές διακυμάνσεις και τάσεις των NO , NO_2 , NO_x , O_3 και O_x σε σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001 έως 2024.

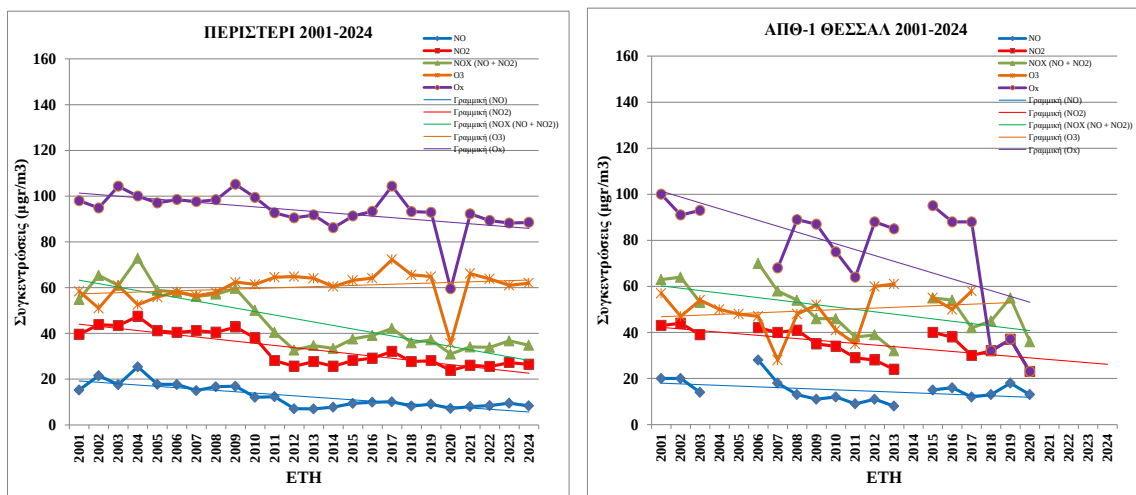
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διαχρονικές διακυμάνσεις και τις γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των NO , NO_2 , $NO_x=(NO+NO_2)$, O_3 και $O_x=(O_3+NO_2)$, για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και αστικούς σταθμούς υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024.

Η εξέταση και των διαχρονικών διακυμάνσεων των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων του $O_x=(O_3+NO_2)$, έγινε εξαιτίας του γεγονότος ότι στις φωτοχημικές αντιδράσεις, O_3 και NO_2 αλληλομετατρέπονται, αλλά και εξαιτίας του ότι ένα μεγάλο μέρος του O_3 δεσμεύεται με τη μορφή NO_2 , με αποτέλεσμα στο πλαίσιο της πληρέστερης εξέτασης του φωτοχημικού νέφους, να εξετάζεται επίσης ευρέως το επίπεδο του φωτοχημικού οξειδωτικού O_x (Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

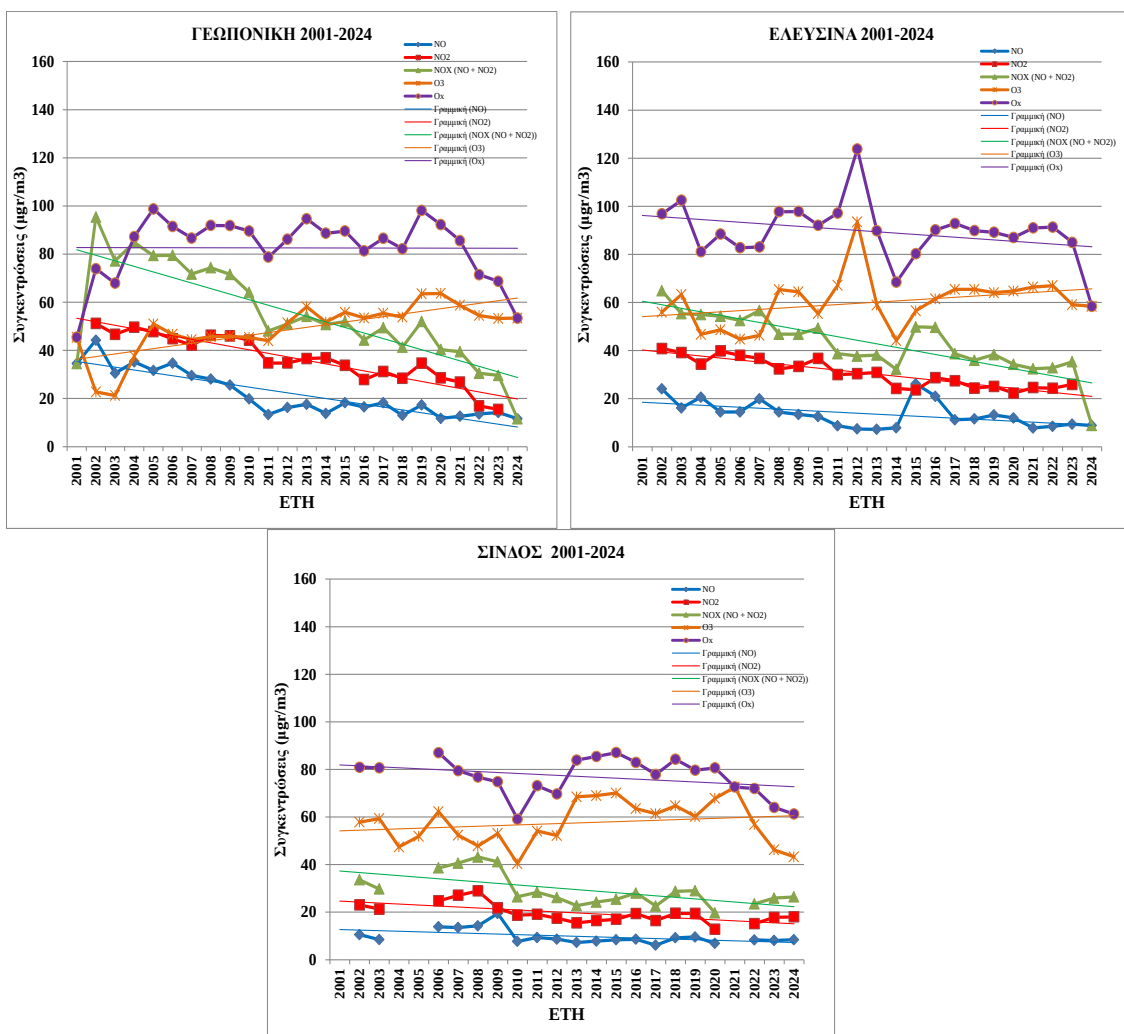


Διάγραμμα 5.33: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO, NO₂, NO_x, O₃ και O₄ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

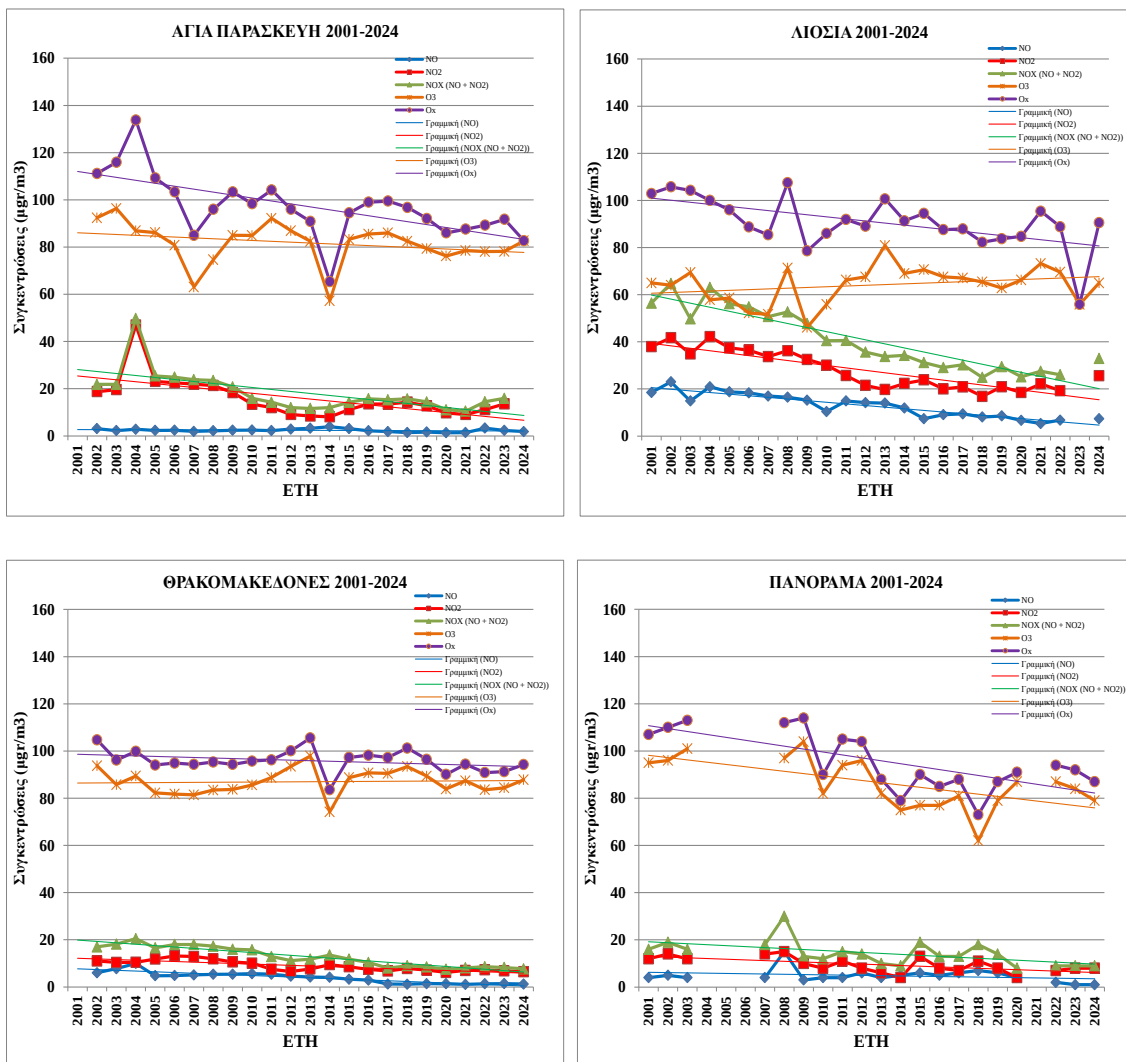




Διάγραμμα 5.34: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO, NO₂, NO_x, O₃ και O_{3x} στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.35: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO, NO₂, NO_x, O₃ και O_{3x} στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς περιστατικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 5.36: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των NO, NO₂, NO_x, O₃ και O_{3x} στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Πίνακας 5.1. Υπερβάσεις του ετήσιου ορίου NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς

Κατηγορία σταθμού	Σταθμός	Πόλη	Σύνολο υπερβάσεων 2001 – 2024 > ετήσιο όριο 40μg/m ³	Σύνολο υπερβάσεων 2001 – 2024 > ετήσιο όριο (Οδ.2024/2881της 23-10-2024) 20μg/m ³
Αστικός – κυκλοφορίας	Πατησίων	Αθήνα	24	24
Αστικός – κυκλοφορίας	Αθηνάς	Αθήνα	18	23
Αστικός – κυκλοφορίας	Πειραιάς-1	Αθήνα	22	24

Αστικός – κυκλοφορίας	Αγία Σοφία	Θεσσαλονίκη	8	22
Αστικός – υποβάθρου	Νέα Σμύρνη	Αθήνα	8	24
Αστικός – υποβάθρου	Περιστέρι	Αθήνα	8	24
Αστικός – υποβάθρου	Μαρούσι	Αθήνα	2	23
Αστικός – υποβάθρου	ΑΠΘ-1	Θεσσαλονίκη	4	16
Περιαστικός – υποβάθρου	Αγία Παρασκευή	Αθήνα	0	5
Περιαστικός – υποβάθρου	Λιόσια	Αθήνα	2	19
Περιαστικός – υποβάθρου	Θρακομακεδόνες	Αθήνα	0	0
Περιαστικός – υποβάθρου	Πανόραμα	Θεσσαλονίκη	0	0
Περιαστικός – βιομηχανικός	Γεωπονική	Αθήνα	9	21
Περιαστικός – βιομηχανικός	Ελευσίνα	Αθήνα	1	23
Περιαστικός – βιομηχανικός	Σίνδος	Θεσσαλονίκη	0	6

Πίνακας 5.2. Υπερβάσεις του ετήσιου ορίου C_6H_6 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς

Κατηγορία σταθμού	Σταθμός	Πόλη	Σύνολο υπερβάσεων 2001 – 2024 > ετήσιο όριο $5\mu g/m^3$	Σύνολο υπερβάσεων 2001 – 2024 > ετήσιο όριο (Οδ.2024/2881 της 23-10-2024) $3,4\mu g/m^3$
Αστικός – κυκλοφορίας	Πατησίων	Αθήνα	10	16
Αστικός – κυκλοφορίας	Αθηνάς	Αθήνα	-	-
Αστικός – κυκλοφορίας	Πειραιάς-1 (2015 -2024)	Αθήνα	0	1
Αστικός – κυκλοφορίας	Αγία Σοφία (2021-2024)	Θεσσαλονίκη	0	3
Περιαστικός – βιομηχανικός	Ελευσίνα (2015-2022)	Αθήνα	0	0
Περιαστικός – βιομηχανικός	Σίνδος (2020-2022)	Θεσσαλονίκη	0	0

Σύμφωνα με τα παραπάνω διάγράμματα, των υποενοτήτων 5.3.1-5.3.3, από τις διαχρονικές διακυμάνσεις και τις γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων μετρήσεων των συγκεντρώσεων των σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ, προέκυψε ότι:

Την εξεταζόμενη περίοδο, 2001-2024, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις του NO (πρωτογενής ρύπος) καθώς και των C₆H₆ και CO (πρωτογενείς ρύποι), βασικών δεικτών πρωτογενούς φωτοχημικής ρύπανσης, καθώς εκπέμπονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, με κύρια πηγή τα οδικά οχήματα, αλλά και του NO₂ (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) και του φωτοχημικού δείκτη O_x, παρουσίασαν, στις περισσότερες περιοχές, μια τάση μείωσης. Οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων είναι ιδιαίτερες έντονες κατά την περίοδο 2001-2010, πιθανότατα εξαιτίας της ολοκλήρωσης μεγάλων κυκλοφοριακών έργων, της αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας στον τομέα της βιομηχανίας και της συνεχούς αυστηροποίησης των μέτρων ελέγχου εκπομπής ρύπων, της διεύρυνσης της χρήσης του φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών και ειδικά στην Αθήνα της διεύρυνσης της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (συνεχής επέκταση των γραμμών του μετρό, τραμ, κλπ). Η καθοδική τάση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων, σχεδόν σε όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024, συνεχίστηκε και στην περίοδο 2011-2024, γεγονός που οφείλεται στη μείωση των εκπομπών NO_x (Εικόνες 3.1 και 3.2) (ΥΠΕΝ, 2026), κυρίως εξαιτίας των νέων κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών, που διαμορφώθηκαν από την ελληνική οικονομική κρίση (μείωση των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων και αποβιομηχάνιση), αλλά και στη συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας οχημάτων και καυσίμων φιλικότερων προς το περιβάλλον. Εξαιτίας τοπικών ιδιομορφιών, σε μερικούς σταθμούς, υπήρξε τάση σταθεροποίησης των NO_x και O_x (Περιστέρι, Σίνδος, Θρακομακεδόνες), αλλά και του NO₂ (Πειραιάς-1, Σίνδος, Θρακομακεδόνες, Πανόραμα), είτε λόγω ιδιαίτερης κίνησης οχημάτων από εμπορικές ή ναυπηγικές δραστηριότητες, είτε λόγω χαμηλών επιπέδων των NO_x στους περιαστικού σταθμούς υποβάθρου. Η περίοδος της πανδημίας του COVID-19 (Μάρτιος 2020 έως Ιανουάριο 2021), είχε σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων, λόγω του περιορισμού των μετακινήσεων και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας (Akritidis et al., 2021; Kofinas et

al., 2024). Ωστόσο, η εικόνα δεν είναι ενιαία με αποτέλεσμα σε ορισμένους σταθμούς οι μειώσεις (ειδικά του NO_2) εξαιτίας της πανδημίας του COVID-19 ήταν περιορισμένες και παρατηρήθηκαν κυρίως κατά την περίοδο των μηνών ισχύος των περιοριστικών μέτρων. Μετά την πανδημία, σε αρκετές περιοχές παρατηρείται σταδιακή ανάκαμψη των επιπέδων των NO_x , O_3 (χωρίς όμως επιστροφή στα επίπεδα προ του 2010), ενώ σε άλλες περιοχές, οι συγκεντρώσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, δείχνοντας τη διατήρηση των σημαντικών επιδράσεων από τις τεχνολογικές και πολιτικές παρεμβάσεις που εφαρμόστηκαν με στόχο τη βελτίωση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Έτσι, σε πολλές αστικές περιοχές, παρά τη σημαντική επίδραση τοπικών (κυκλοφορία οχημάτων, κεντρικές θερμάνσεις) ή βιομηχανικών πηγών, οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι διαδικασίες διασποράς, αλλά και οι τοπικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μετρήσεων, καθορίζουν αποφασιστικά το βαθμό συσσώρευσης των φωτοχημικών ρύπων.

Πρέπει να επισημανθεί ότι στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας οι συγκεντρώσεις του NO_2 υπερέβησαν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, ειδικά την περίοδο 2001-2010, αλλά και κατά την υπόλοιπη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, παρατηρήθηκε σημαντικός αριθμός υπερβάσεων του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου (Πίνακας 5.1), με εξαίρεση το σταθμό Αγ. Σοφίας, που υπήρξε σχετικά μικρός αριθμός υπερβάσεων. Στους σταθμούς αστικού υποβάθρου και τους περιφερειακούς βιομηχανικούς οι συγκεντρώσεις του NO_2 υπερέβησαν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, μόνο την περίοδο 2001-2010, ενώ δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις στους σταθμούς περιφερειακού υποβάθρου. Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 , στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος των οδικών αξόνων (σε σύγκριση με τα γειτονικά σημεία μέτρησης υποβάθρου) οφείλονται, τόσο στο NO_2 που προκύπτει από την αντίδραση μεταξύ NO και O_3 , όσο και σε εκείνο που εκπέμπεται απευθείας από τα οχήματα (Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

Όσον αφορά το CO δεν υπήρξαν υπερβάσεις του ορίου των $10\text{mg}/\text{m}^3$ σε κανένα σταθμό των δύο πόλεων, ενώ όσον αφορά το C_6H_6 (Πίνακας 5.2), μόνο στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας της Πατησίων υπήρξαν, μέχρι το 2018, συστηματικές υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου.

Όμως, όπως βλέπουμε αναλυτικά τις υπερβάσεις του NO_2 και του C_6H_6 , σε κάθε έναν από τους επιλεγμένους σταθμούς, με την ισχύουσα Οδηγία 2008/50 (Πίνακες 5.1 και 5.2), με τα νέα χαμηλότερα όρια, της Οδηγίας 2024/2881, που θα τεθεί σε ισχύ στο τέλος του

2026, στα οποία προκύπτει μείωση των ετήσιων ορίων κατά 50% περίπου, διαπιστώνεται ότι θα προκύψει σημαντική αύξηση των υπερβάσεων στους περισσότερους από τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς.

Αντίθετα, στις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του O_3 , διαχρονικά, σε πολλούς σταθμούς παρατηρήθηκαν αυξητικές τάσεις ή και σε ορισμένους σταθμούς τάσεις σταθεροποίησης των επιπέδων του. Οι αυξητικές αυτές τάσεις του O_3 μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των επιπέδων και της διάρκειας των επεισοδίων υψηλών θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας, την τελευταία δεκαετία (Bais et al., 2013; Nastos and Kapsomenakis, 2015), που παρατηρούνται σε μεγάλες αστικές περιοχές στην Ευρώπη και στην Ελλάδα. Επίσης, οι τάσεις αυτές σχετίζονται και με τη μείωση ειδικά μετά το 2010, των επιπέδων των NO_x , που προαναφέρθηκε (Εικόνες 3.1 και 3.2) (ΥΠΕΝ, 2026), τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στον ημερήσιο κύκλο των φωτοχημικών αντιδράσεων. Βέβαια, παρά τη σαφή μείωση των επιπέδων των NO_x και γενικά των πρόδρομων ενώσεων του O_3 , κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχει επισημανθεί ότι οι τάσεις του O_3 δεν απεικονίζουν πραγματικά τις μειώσεις των ανθρωπογενών εκπεμπόμενων NO_x και VOCs (Wilson et al., 2011; Zerefos et al., 2002) διότι λόγω πολλών και ορισμένες φορές, αλληλοαναιρούμενων παραγόντων (τοπογραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών διεξαγωγής των μετρήσεων, μετεωρολογικές συνθήκες, εποχή του έτους, κλπ.) οι συγκεντρώσεις του O_3 μπορεί να παραμένουν αμετάβλητες. Κατά την περίοδο 2010-2019 (περίοδος κατά τη διάρκεια της ελληνικής οικονομικής κρίσης) στους περισσότερους περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου και στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας υπήρξε σταθεροποίηση ή και μικρή μείωση των συγκεντρώσεων O_3 , σε σχέση με την προηγούμενη δεκαετία. Κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19, και στις δύο πόλεις εξαιτίας της ισχύος περιοριστικών μέτρων, οι συγκεντρώσεις των NO_x μειώθηκαν σημαντικά, λόγω περιορισμού των ανθρωπογενών εκπομπών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα στους περισσότερους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας να υπάρξει σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων O_3 , σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες, ενώ στους πολλούς αστικούς και περιαστικούς σταθμούς σταθεροποίηση ή και αύξηση των συγκεντρώσεων O_3 , ιδίως τους μήνες ισχύος των περιοριστικών μέτρων. Από το 2021 και μετά παρατηρήθηκε στους περισσότερους σταθμούς μια τάση επανοφοράς των επιπέδων του O_3 , σε σχέση με την προηγούμενη δεκαετία, που πιθανότατα σχετίζεται με τη μερική μόνο επαναφορά των κυκλοφοριακών εκπομπών σε προηγούμενα επίπεδα. Το σύνολο των παραπάνω παρατηρήσεων επιβεβαιώνει ότι η χωροχρονική μεταβολή των επιπέδων του O_3 δεν σχετίζεται άμεσα

μόνο με την ένταση των πηγών των πρωτογενών ρύπων (κυκλοφορία οχημάτων, κλπ), αλλά κυρίως με τις φωτοχημικές διεργασίες και τις μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών, που επικρατούν στην κάθε περιοχή.

Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της φωτοχημικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης.

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΓΑΛΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ

Οι συγκεντρώσεις των φωτοχημικών ρύπων σε διάφορες πόλεις εξαρτώνται κυρίως από τις συνθήκες και τις χωροχρονικές διακυμάνσεις των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων, αλλά και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες (διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου, ευστάθεια της ατμόσφαιρας και ηλιοφάνεια). Στην υποενότητα αυτή έγινε μια προσπάθεια σύγκρισης των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων στις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, την περίοδο μελέτης 2001-2024, ώστε να γίνει μια καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, που αναπνέουν οι πολίτες των δύο πόλεων.

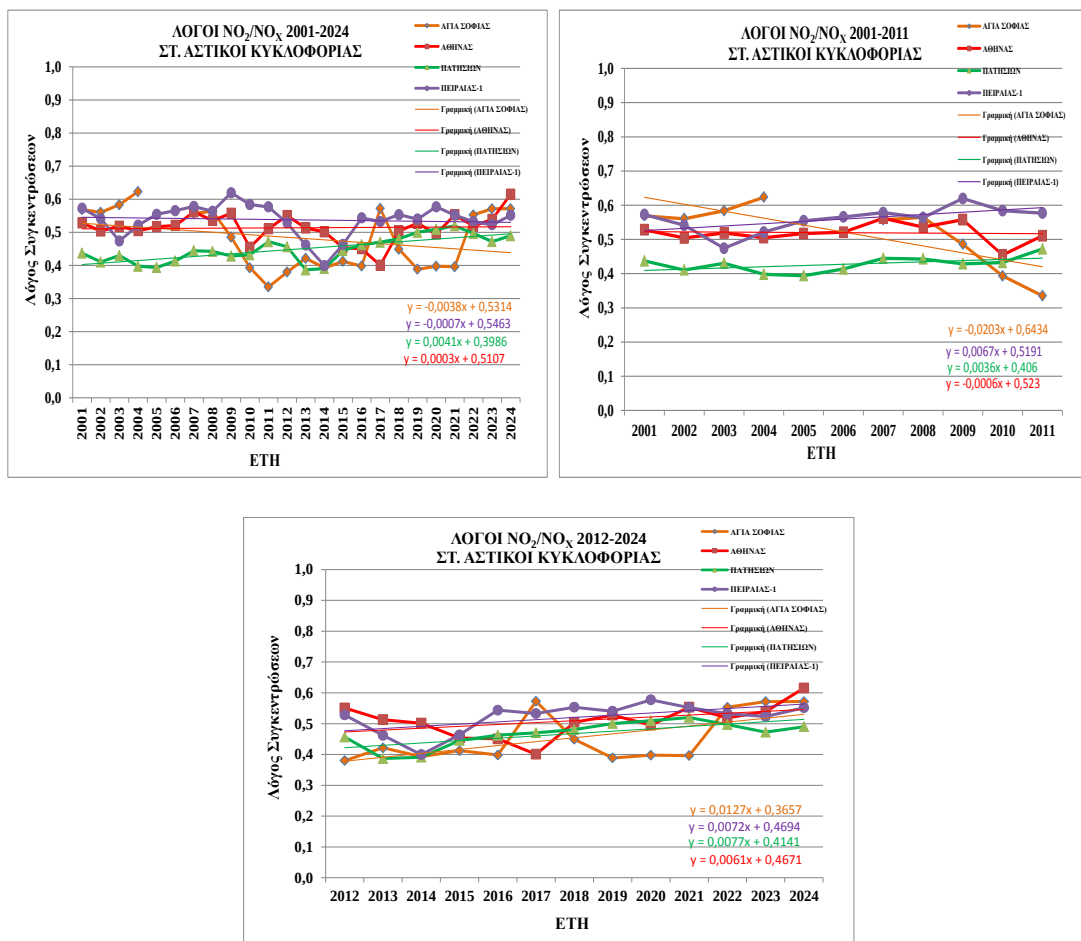
6.1 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Στην υποενότητα αυτή εξετάζονται οι μέσες ετήσιες μεταβολές των λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x και οι γραμμικές τάσεις τους την περίοδο μελέτης 2001-2024, αλλά και τις δύο περιόδους 2001-2011 και 2012-2024. Η εξέταση των δύο τελευταίων περιόδων έγινε εξαιτίας μιας σημαντικής μεταβολής στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων των δύο μεγάλων ελληνικών πόλεων Αθήνας και Θεσσαλονίκης, διότι το Νοέμβριο του 2011 η πολιτεία επέτρεψε τη μετακίνηση των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στις δύο μεγαλουπόλεις.

Επίσης, παρουσιάζονται οι λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων NO , NO_2 , NO_x , O_x και O_3 , μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024, ανά κατηγορία σταθμού,.

6.1.1 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς αστικής κυκλοφορίας στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Στα διαγράμματα 6.1-6.4 παρουσιάζεται η σύγκριση των διακυμάνσεων και οι γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x την περίοδο μελέτης 2001-2024, αλλά και οι λόγοι (Πίνακες 6.1-6.4) των μέσων συγκεντρώσεων των NO , NO_2 , NO_x , O_x και O_3 , μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024.



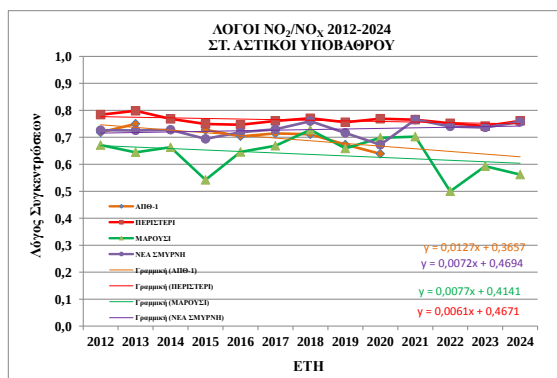
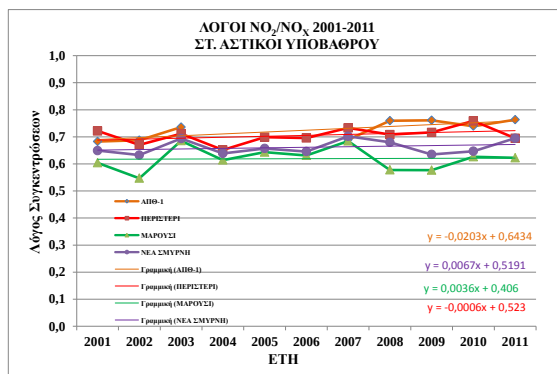
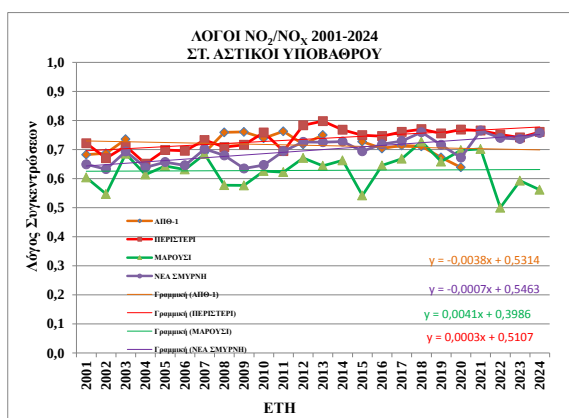
Διάγραμμα 6.1: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO₂/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Πίνακας 6.1. Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O₃ και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024.

ΛΟΓΟΙ ΠΟΛΕΩΝ	
NO ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1	0,76
NO ₂ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO ₂ ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1	0,63
NO _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO _x ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1	0,69
O ₃ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ O ₃ ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1	1,15
O _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ O _x ΠΕΙΡΑΙΑΣ-1	0,83
NO ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO ΠΑΤΗΣΙΩΝ	0,39
NO ₂ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO ₂ ΠΑΤΗΣΙΩΝ	0,47
NO _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ NO _x ΠΑΤΗΣΙΩΝ	0,42
O ₃ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ O ₃ ΠΑΤΗΣΙΩΝ	2,14
O _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ O _x ΠΑΤΗΣΙΩΝ	0,81

ΝΟ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ ΝΟ ΑΘΗΝΑΣ	0,79
ΝΟ ₂ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ ΝΟ ₂ ΑΘΗΝΑΣ	0,73
ΝΟ _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ ΝΟ _x ΑΘΗΝΑΣ	0,76
Ο ₃ ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ Ο ₃ ΑΘΗΝΑΣ	1,18
Ο _x ΑΓ. ΣΟΦΙΑΣ/ Ο _x ΑΘΗΝΑΣ	0,91

6.1.2 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς αστικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

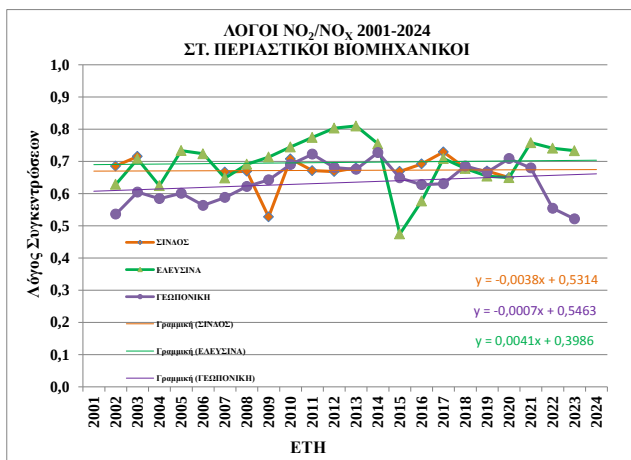


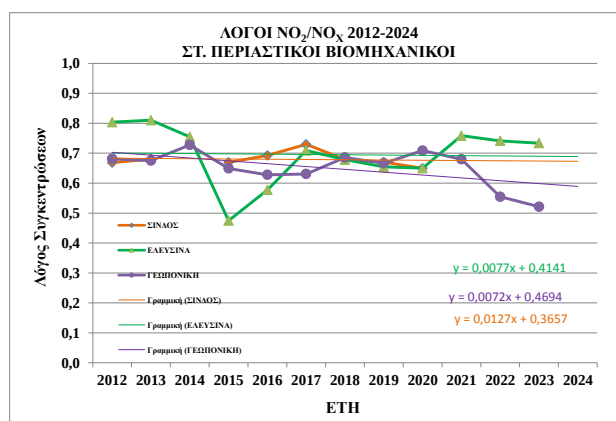
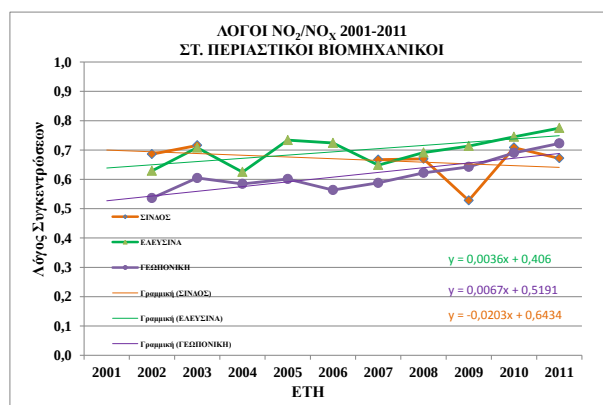
Διάγραμμα 6.2: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων ΝΟ₂/ΝΟ_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Πίνακας 6.2. Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024.

ΛΟΓΟΙ ΠΟΛΕΩΝ	
NO ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ	0,96
NO₂ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO₂ ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ	1,03
NO_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO_x ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ	0,98
O₃ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O₃ ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ	0,75
O_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O_x ΝΕΑ ΣΜΥΡΝΗ	0,91
NO ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO ΜΑΡΟΥΣΙ	0,86
NO₂ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO₂ ΜΑΡΟΥΣΙ	1,24
NO_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO_x ΜΑΡΟΥΣΙ	1,07
O₃ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O₃ ΜΑΡΟΥΣΙ	0,78
O_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O_x ΜΑΡΟΥΣΙ	0,96
NO ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	1,19
NO₂ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO₂ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	1,06
NO_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ NO_x ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	1,07
O₃ ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O₃ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	0,79
O_x ΑΠΘ-1 ΘΕΣΣ/ O_x ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	0,91

6.1.3 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



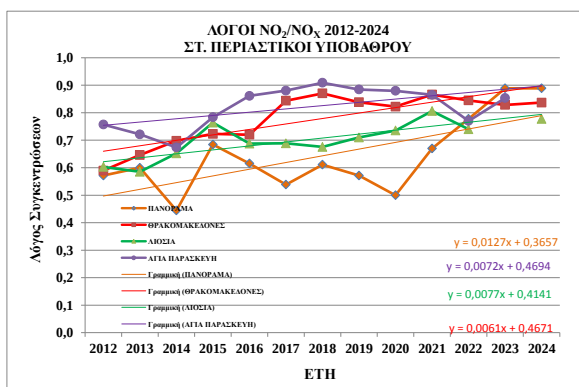
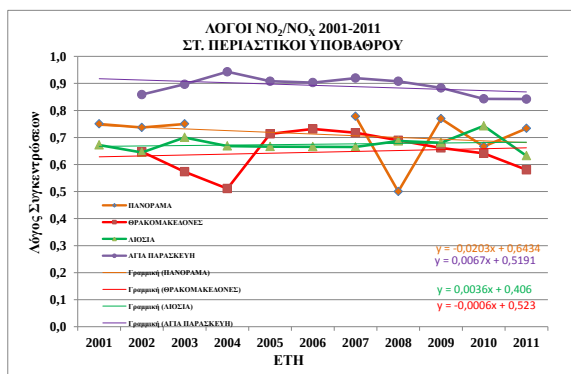
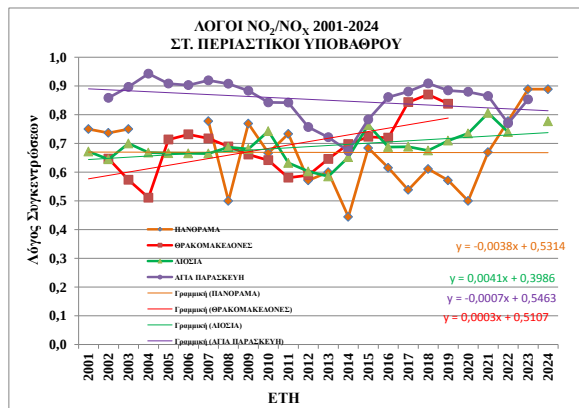


Διάγραμμα 6.3: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς περιστατικούς βιομηχανικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Πίνακας 6.3. Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO , NO_2 , NO_x , O_x και O_3 , μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024.

ΛΟΓΟΙ ΠΟΛΕΩΝ	
$\text{NO ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ}$	0,45
$\text{NO}_2 \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO}_2 \text{ ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ}$	0,53
$\text{NO}_x \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO}_x \text{ ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ}$	0,53
$\text{O}_3 \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{O}_3 \text{ ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ}$	1,17
$\text{O}_x \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{O}_x \text{ ΓΕΩΠΟΝΙΚΗ}$	0,93
$\text{NO ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO ΕΛΕΥΣΙΝΑ}$	0,72
$\text{NO}_2 \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO}_2 \text{ ΕΛΕΥΣΙΝΑ}$	0,64
$\text{NO}_x \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{NO}_x \text{ ΕΛΕΥΣΙΝΑ}$	0,68
$\text{O}_3 \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{O}_3 \text{ ΕΛΕΥΣΙΝΑ}$	0,96
$\text{O}_x \text{ ΣΙΝΔΟΣ ΘΕΣΣ}/ \text{O}_x \text{ ΕΛΕΥΣΙΝΑ}$	0,86

6.1.4 Σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων μεταξύ των δύο περιοχών μελέτης σε σταθμούς περιβατικού υποβάθρου στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.



Διάγραμμα 6.4: Διαχρονικές διακυμάνσεις και γραμμικές τάσεις των λόγων NO_2/NO_x στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιβατικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001- 2024.

Πίνακας 6.4. Λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x, O_x και O₃, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024.

ΛΟΓΟΙ ΠΟΛΕΩΝ	
NO ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	2,01
NO₂ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO₂ ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	0,59
NO_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO_x ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	0,77
O₃ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O₃ ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	1,05
O_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O_x ΑΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	0,98
NO ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO ΛΙΟΣΙΑ	0,37
NO₂ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO₂ ΛΙΟΣΙΑ	0,34
NO_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO_x ΛΙΟΣΙΑ	0,35
O₃ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O₃ ΛΙΟΣΙΑ	1,34
O_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O_x ΛΙΟΣΙΑ	1,05
NO ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ	1,23
NO₂ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO₂ ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ	1,05
NO_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ NO_x ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ	1,11
O₃ ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O₃ ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ	0,99
O_x ΠΑΝΟΡΑΜΑ ΘΕΣΣ/ O_x ΘΡΑΚΟΜΑΚΕΔΟΝΕΣ	0,99

Στα διαγράμματα 6.1-6.4 παρουσιάζεται η σύγκριση των διακυμάνσεων και οι γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων λόγων των συγκεντρώσεων NO₂/NO_x την περίοδο μελέτης 2001-2024, αλλά και τις δύο επιμέρους περιόδους 2001-2011 και 2012-2024 (η επιλογή των δύο επιμέρους περιόδων έγινε εξαιτίας της αλλαγής στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων, διότι η πολιτεία επέτρεψε το Νοέμβριο του 2011 τη μετακίνηση των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις), στους υπό εξέταση αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Έτσι, στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας προκύπτει ότι, ενώ την περίοδο 2001-2011 υπήρξε, στους περισσότερους σταθμούς, σταθεροποιητική τάση των μέσων ετήσιων λόγων των συγκεντρώσεων NO₂/NO_x, την περίοδο 2012-2024, εξαιτίας κυρίως της αλλαγής της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων, διαπιστώθηκε ανοδική τάση των λόγων των συγκεντρώσεων NO₂/NO_x, σ' όλους τους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στα κέντρα των δύο ελληνικών μεγαλουπόλεων. Η ίδια εικόνα παρατηρήθηκε στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, όπου επίσης διαπιστώθηκε σημαντική ανοδική τάση των λόγων

των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x , την περίοδο 2012-2024. Ο υψηλότερος λόγος NO_2/NO_x , που παρατηρείται στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, σε σύγκριση με τους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, που επηρεάζονται από την κυκλοφορία των οχημάτων, δηλώνει τα χαμηλότερα επίπεδα NO στους σταθμούς υποβάθρου και την αυξημένη οξείδωση του NO σε NO_2 (Mavroidis & Chaloulakou, 2011). Επομένως, γενικά διαπιστώνεται, όπως έδειξαν και προηγούμενες μελέτες για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας (Mavroidis & Chaloulakou, 2011), ότι ο λόγος των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x παρουσίασε αυξητική τάση, ειδικά την περίοδο 2012-2024, στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις. Η αύξηση αυτή του λόγου NO_2/NO_x , πιθανότατα να οφείλεται στην αύξηση του κλάσματος του πρωτογενούς NO_2 που εκπέμπεται από κινητές πηγές και ειδικά από τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα, καθώς αυτά εκπέμπουν υψηλότερο πρωτογενές κλάσμα NO_2 από τα οχήματα που κινούνται με βενζίνη, η οποία αύξηση μπορεί να οδηγήσει και σε αύξηση των επιπέδων του όζοντος σε αστικές περιοχές (Carslaw and Carslaw, 2007). Όμως, στους περισσότερους περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και τους σταθμούς αστικού υποβάθρου, που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, διαπιστώθηκε σταθεροποιητική ή και καθοδική τάση των λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x , την περίοδο 2012-2024, σε σχέση και με την προηγούμενη περίοδο (2001-2011), που γενικά παρατηρήθηκαν ανοδικές τάσεις. Η παρατηρούμενη αυτή αύξηση του λόγου NO_2/NO_x , την περίοδο 2001-2011, όταν δεν κυκλοφορούσαν πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα, πιθανότατα οφείλεται κυρίως στη δευτερογενή φωτοχημική παραγωγή του NO_2 (Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

Επίσης, στους Πίνακες 6.1-6.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων NO , NO_2 , $\text{NO}_x=(\text{NO}+\text{NO}_2)$, O_3 και του φωτοχημικού δείκτη $\text{O}_x=(\text{O}_3+\text{NO}_2)$, μεταξύ των αντιπροσωπευτικών σταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024, ανά κατηγορία σταθμού, που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Αναλυτικότερα, από τον Πίνακα 6.1, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,39-0,79, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,65, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO στην Αθήνα ήταν πάνω από διπλάσια από αυτά στη Θεσσαλονίκη, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων. Αντίστοιχα, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_{2\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_{2\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,47-0,73, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,61, που σημαίνει ότι τα

επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 στην Αθήνα ήταν πάνω από διπλάσια από τα αντίστοιχα στη Θεσσαλονίκη, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων. Ομοίως, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας οι λόγοι της μέσης συγκέντρωσης $\text{NOx}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NOx}_{\text{Αθήνας}}$ και $\text{Ox}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{Ox}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκαν μεταξύ 0,42-0,76, και 0,81-0,91 αντίστοιχα, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,62 και 0,85 αντίστοιχα, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NOx στην Αθήνα ήταν πάνω από διπλάσια από αυτά στη Θεσσαλονίκη, ενώ του Ox ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων. Αντίθετα, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικής κυκλοφορίας ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{O}_3_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{O}_3_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 1,15-2,14, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,49, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 στη Θεσσαλονίκη ήταν διπλάσια από τα αντίστοιχα επίπεδα στην Αθήνα, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων. Οι διαφορές αυτές πιθανότατα οφείλονται κυρίως στις μικρότερες εκπομπές NOx στη Θεσσαλονίκη, αλλά και σε χωροταξικές διαφορές των περιοχών που είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί (πχ ο σταθμός της Αγ. Σοφίας είναι εγκατεστημένος σε πλατεία, ενώ της Πατησίων σε κύριο οδικό άξονα), αλλά και στις διαφορετικές κυκλοφοριακές συνθήκες (αριθμό διερχόμενων οχημάτων, κλπ) που επικρατούν στις παρακείμενες περιοχές των σταθμών.

Από τον Πίνακα 6.2, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου, ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,86-1,19, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,01, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO ήταν στα ίδια επίπεδα, στις αστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Αντίστοιχα, στους σταθμούς αστικού υποβάθρου ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_2_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_2_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 1,03-1,24, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,11, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 ήταν στα ίδια επίπεδα, στις αστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Ομοίως, στους σταθμούς αστικού υποβάθρου οι λόγοι της μέσης συγκέντρωσης $\text{NOx}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NOx}_{\text{Αθήνας}}$ και $\text{Ox}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{Ox}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκαν μεταξύ 0,98-1,07, και 0,91-0,96 αντίστοιχα, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,04 και 0,93 αντίστοιχα, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NOx και του Ox ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, στις αστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Αντίθετα, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς αστικού υποβάθρου ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{O}_3_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{O}_3_{\text{Αθήνας}}$, όλης

της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,75-0,79, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,77, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 στην Αθήνα ήταν πάνω από διπλάσια από τα αντίστοιχα επίπεδα στη Θεσσαλονίκη, στις αστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Όμως, είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι, στο σταθμό του ΑΠΘ (που είναι ο μοναδικός σταθμός αστικού υποβάθρου του ΥΠΕΝ στη Θεσσαλονίκη) υπήρξε σημαντική έλλειψη καταγραφής μετρήσεων, στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο, και για το λόγο αυτό τα συγκεκριμένα αποτελέσματα πρέπει να ληφθούν με σχετική επιφύλαξη.

Από τον Πίνακα 6.3, στους αντιπροσωπευτικούς περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $NO_{\text{Θεσσαλονίκης}}/NO_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,45-0,72, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,58, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO στην Αθήνα ήταν περίπου διπλάσια από αυτά στη Θεσσαλονίκη, στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές των δύο πόλεων. Αντίστοιχα, στους περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $NO_{2\text{Θεσσαλονίκης}}/NO_{2\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,53-0,64, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,59, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 στην Αθήνα ήταν περίπου διπλάσια από αυτά στη Θεσσαλονίκη, στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές των δύο πόλεων. Ομοίως, στους περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς οι λόγοι της μέσης συγκέντρωσης $NOx_{\text{Θεσσαλονίκης}}/NOx_{\text{Αθήνας}}$ και $Ox_{\text{Θεσσαλονίκης}}/Ox_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκαν μεταξύ 0,53-0,68, και 0,86-0,93 αντίστοιχα, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,61 και 0,89 αντίστοιχα, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NOx ήταν στην Αθήνα ήταν σχεδόν διπλάσια από αυτά στη Θεσσαλονίκη, ενώ του Ox ήταν περίπου ίδια στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές των δύο πόλεων. Αντίθετα, στους αντιπροσωπευτικούς περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $O_{3\text{Θεσσαλονίκης}}/O_{3\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,96-1,17, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,06, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 ήταν περίπου ίδια, στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές των δύο πόλεων. Όμως, είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι, στο σταθμό του Σίνδου (που είναι ο μοναδικός περιαστικός βιομηχανικός σταθμός του ΥΠΕΝ στη Θεσσαλονίκη) υπήρξε σημαντική αποβιομηχάνιση την τελευταία δεκαετία, και για το λόγο αυτό τα συγκεκριμένα αποτελέσματα πρέπει να ληφθούν με σχετική επιφύλαξη.

Από τον Πίνακα 6.4, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,37-2,01, με σημαντικές επομένως διαφοροποιήσεις στις περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,20, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO ήταν στη Θεσσαλονίκη λίγο μεγαλύτερα από τα επίπεδα στην Αθήνα, στις συγκεκριμένες περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Αντίστοιχα, στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{NO}_{2\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NO}_{2\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,34-1,05, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,66, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 ήταν στην Αθήνα πάνω από διπλάσια από τα επίπεδα στη Θεσσαλονίκη, στις περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Ομοίως, στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου οι λόγοι της μέσης συγκέντρωσης $\text{NOx}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{NOx}_{\text{Αθήνας}}$ και $\text{Ox}_{\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{Ox}_{\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκαν μεταξύ 0,35-1,11, και 0,98-1,05 αντίστοιχα, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 0,74 και 1,01 αντίστοιχα, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NOx ήταν στην Αθήνα πάνω από διπλάσια από τα επίπεδα στη Θεσσαλονίκη και του Ox ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, στις περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Αντίθετα, στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς περιαστικού υποβάθρου ο λόγος της μέσης συγκέντρωσης $\text{O}_{3\text{Θεσσαλονίκης}}/\text{O}_{3\text{Αθήνας}}$, όλης της περιόδου 2001-2024, κυμάνθηκε μεταξύ 0,99-1,34, στις διάφορες περιοχές που μελετήθηκαν, με μέση τιμή 1,13, που σημαίνει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 ήταν περίπου ίδια, στις συγκεκριμένες περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Όμως, είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι, υπάρχουν σημαντικές χωροταξικές διαφορές στις συγκεκριμένες περιαστικές περιοχές που είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί, αλλά και στις διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (τοπική ροή ανέμου, κλπ) που επικρατούν στις παρακείμενες περιοχές των σταθμών και για το λόγο αυτό τα συγκεκριμένα αποτελέσματα πρέπει να ληφθούν με σχετική επιφύλαξη.

Επομένως, από τα παραπάνω προκύπτει ότι θα πρέπει να εκπονηθούν λεπτομερείς απογραφές των πρωτογενών και των δευτερογενών εκπομπών NO_2 ώστε να αναπτυχθούν κατάλληλες πολιτικές για τη μείωση των συγκεντρώσεων NO_2 κάτω από τις θεσμοθετημένες οριακές τιμές της ΕΕ, καθώς η μείωση των συνολικών εκπομπών NOx από μόνη της ενδέχεται να μην είναι εξίσου αποτελεσματική.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η φωτοχημική ρύπανση αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία εμφανίζεται συχνά στα μεγάλα αστικά κέντρα, καθώς η δημιουργία τους συνδέεται άμεσα με τις ανθρωπογενείς εκπομπές, τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις πολύπλοκες φωτοχημικές διεργασίες της ατμόσφαιρας. Τα υψηλά επίπεδα αυτής της ρύπανσης αποκαλούνται συνήθως «φωτοχημικό νέφος», το οποίο οφείλεται στη συσσώρευση αέριων ρύπων, που προέρχονται από τις μηχανές καύσης, κυρίως των μέσων μεταφοράς, αλλά και των βιομηχανιών και παρουσιάζεται όταν έχουμε μεγάλη ηλιοφάνεια σε ένταση και διάρκεια, υψηλές θερμοκρασίες, μικρή σχετική υγρασία και υψηλή συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογονανθράκων και των δευτερογενών προϊόντων τους.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια εκτίμησης της ποιότητας του αέρα, σε σχέση με τη φωτοχημική ρύπανση, στις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Η ανάλυση βασίστηκε στα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα από επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, οι οποίοι επελέγησαν με κριτήρια πληρότητας δεδομένων και χωρικής αντιπροσωπευτικότητας (σε σχέση με τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά), ώστε να καλύπτονται διαφορετικοί τύποι αστικού περιβάλλοντος (σταθμοί κυκλοφορίας, αστικού υποβάθρου, περιαστικοί βιομηχανικοί και περιαστικού υποβάθρου). Το παραπάνω δίκτυο των σταθμών του ΕΔΠΑΡ προσφέρει ένα σύνολο δεδομένων καθώς αφορά σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή αστική κυκλοφορία, σε βιομηχανικές περιοχές, αλλά και σε περιοχές απομακρυσμένες από τα αστικά κέντρα, αστικού ή περιαστικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα να παρέχουν μία συνολική εικόνα για την ποιότητα της ατμόσφαιρας των περιοχών αυτών.

Στόχος της μελέτης ήταν η διερεύνηση των τάσεων της φωτοχημικής ρύπανσης σε σχέση με τις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις και τις αλλαγές στη δραστηριότητα των κατοίκων, καθώς και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας μέτρων που επέδρασαν στη μείωση ή αύξηση των επιπέδων αυτών των ρύπων.

Έτσι, αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει διαχρονικά την ετήσια, την εποχική και τη μηνιαία διακύμανση, σημαντικών δεικτών της φωτοχημικής ρύπανσης και συγκεκριμένα

των NO, NO₂, O₃, CO και C₆H₆, στις ευρύτερες αστικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 2001-2024, με στόχο την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων για τη χωροχρονική εξέλιξη των επιπέδων της φωτοχημικής ρύπανσης. Επίσης, έγινε εξέταση και των ετήσιων διαχρονικών διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του O_x=(O₃+NO₂), εξαιτίας του γεγονότος ότι στις φωτοχημικές αντιδράσεις, O₃ και NO₂ αλληλομετατρέπονται, αλλά και εξαιτίας του ότι ένα μεγάλο μέρος του O₃ δεσμεύεται με τη μορφή NO₂, με αποτέλεσμα στο πλαίσιο της πληρέστερης εξέτασης του φωτοχημικού νέφους, να εξετάζεται επίσης ευρέως το επίπεδο του φωτοχημικού οξειδωτικού O_x.

Σε ορισμένους σταθμούς ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρατηρήθηκε έλλειψη καταγραφής δεδομένων, είτε κατά τη διάρκεια μεγάλης περιόδου, είτε για μικρότερες χρονικές περιόδους, λόγω διαφόρων προβλημάτων συντήρησης των αναλυτών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μερικώς η διακύμανση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάσθηκαν σ' αυτή την εργασία. Επίσης, οι ρύποι, C₆H₆, CO δεν μετρώνται σε ορισμένους σταθμούς ή άρχισαν μετρώνται τα τελευταία έτη της περιόδου μελέτης.

Οι 15 αντιπροσωπευτικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν ήταν:

1. Αστικός – κυκλοφορίας (Πατησίων, Αθηνάς, Πειραιας-1, Αγίας Σοφίας)
2. Αστικός – υποβάθρου (Νέας Σμύρνης, Περιστερι, Μαρούσι, ΑΠΘ-1)
3. Περιαστικός – υποβάθρου (Αγίας Παρασκευής, Λιοσια, Θρακομακεδόνες, Πανοράματος)
4. Περιαστικός Βιομηχανικός (Γεωπονικής, Ελευσίνας, Σίνδου).

Παράλληλα, από τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των μη μεθανικών πτητικών οργανικών ενώσεων (NMVOCs) στην Ελλάδα, για την περίοδο 1990-2024 (ΥΠΕΝ, 2026), προέκυψε ότι, οι συνολικές εκπομπές NO_x μειώθηκαν, από 410,54 kt το 1990, σε 218,35 kt το 2024 και οι συνολικές εκπομπές NMVOC μειώθηκαν από 286,62 kt το 1990, σε 123,89 kt το 2024. Οι εκπομπές NO_x το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 46,8% και 54,9%, σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα, ενώ οι εκπομπές NMVOC το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 56,8% και 61,1%, σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα. Επίσης, την Ελλάδα, προέκυψε ότι, οι συνολικές εκπομπές CO μειώθηκαν, από 653,3 kt το 2012, σε 451,6 kt το 2021, περίπου 30,9% (ΕΛΣΤΑΤ, 2024). Η σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών αποδίδεται κυρίως στην αλλαγή του ενεργειακού μείγματος με αυξημένη

χρήση φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων παραγωγής, στην εφαρμογή ευρωπαϊκών κανονιστικών ρυθμίσεων για τον περιορισμό των εκπομπών από τη χρήση οργανικών διαλυτών και από την αποθήκευση και διανομή καυσίμων, καθώς και στην ανανέωση του στόλου των οχημάτων. Επιπλέον, η οικονομική ύφεση μετά το 2009 και οι περιορισμοί στις μετακινήσεις κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19 συνέβαλαν περαιτέρω στη μείωση των εκπομπών.

Από τη διαχρονική εξέταση των συγκεντρώσεων των NO, NO₂, O₃, CO και C₆H₆, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στις ευρύτερες περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2024, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

➤ Την εξεταζόμενη περίοδο (2001-2024), οι συγκεντρώσεις του NO (πρωτογενής ρύπος) και του NO₂ (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) καθώς και των C₆H₆ και CO (πρωτογενείς ρύποι), ήταν αυξημένες στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στα κέντρα των δύο πόλεων, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στον αυξημένο αριθμό οχημάτων και διανυόμενων χιλιομέτρων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές, καθώς και στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίσθηκαν στους περιφερειακούς βιομηχανικούς σταθμούς, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών και σε ορισμένους αστικού υποβάθρου, λόγω των τοπικών πηγών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης από παρακείμενες περιοχές. Στους σταθμούς περιφερειακού υποβάθρου παρουσιάσθηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις του σταθμούς των NO, NO₂, CO και C₆H₆, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών, αλλά και της αστάθειας του NO, που παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, το οδηγεί στη γρήγορη μετατροπή του σε NO₂, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε όζον

➤ Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του O₃ (δευτερογενής ρύπος), όπως αναμένεται, ήταν αυξημένες στους σταθμούς που βρίσκονται περιφερειακά της πόλης και όχι στα αστικά κέντρα και τις κύριες οδικές αρτηρίες, γεγονός που οφείλεται στο ότι το O₃ καταστρέφεται από τις υψηλές συγκεντρώσεις πρόδρομων ρύπων (NO_x, VOCs), που υπάρχουν στα κέντρα των πόλεων. Επίσης, είναι γνωστό ότι οι χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό του O₃ χρειάζονται ορισμένο χρόνο για την ολοκλήρωσή τους και στο διάστημα αυτό οι πρόδρομες ενώσεις και το σχηματιζόμενο όζον μεταφέρονται με τη βοήθεια των τοπικών συστημάτων ανέμου στην περιφέρεια της πόλης, γι' αυτό και το όζον αποκαλείται ρύπος των προαστίων.

➤ Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NO , NO_2 , C_6H_6 , CO , αλλά και των NO_x και O_x , την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2024, παρουσίασαν διαχρονικά, στις περισσότερες περιοχές, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, μια τάση μείωσης, η οποία κυρίως οφείλεται στη μείωση των εκπομπών NO_x , NMVOCs και CO . Οι μειώσεις αυτές, που είναι ιδιαιτέρως έντονες την περίοδο 2001-2010, πιθανότατα οφείλονται στην αύξηση της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (στην Αθήνα συνεχής επέκταση των γραμμών του μετρό, τραμ, κλπ.), στη βελτίωση της τεχνολογίας καυσίμων και οχημάτων, στις νέες κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες, που διαμορφώθηκαν από την ελληνική οικονομική κρίση (μείωση των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων και αποβιομηχάνιση) μετά το 2010, στην ολοκλήρωση μεγάλων κυκλοφοριακών έργων, της αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας σε σχέση με τα μέτρα ελέγχου εκπομπών ρύπων από τη βιομηχανία και της διείσδυσης της χρήσης του φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών. Τέλος, η σημαντική μείωση των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων, στα αστικά κέντρα, την περίοδο 2020-2021, οφείλεται και στην πανδημία του COVID-19 (Μάρτιος 2020 έως Ιανουάριο 2021) και του αναγκαστικού περιοδικού αποκλεισμού των πολιτών στις κατοικίες τους, που είχε σαν επακόλουθο, τη γενικότερη μείωση των εκπομπών εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων.

➤ Ωστόσο, η εικόνα δεν είναι ενιαία, διότι εξαιτίας τοπικών ιδιαιτεροτήτων σε ορισμένους σταθμούς, υπήρξε τάση σταθεροποίησης των επιπέδων των NO_x και O_x (Περιστέρι, Σίνδος, Θρακομακεδόνες), του NO (Πειραιάς και Αγ. Σοφίας), αλλά και του NO_2 (Πειραιάς-1, Σίνδος, Θρακομακεδόνες, Πανόραμα) την περίοδο μελέτης 2001-2024. Οι τάσεις αυτές προέκυψαν, είτε λόγω ιδιαίτερης κίνησης οχημάτων από εμπορικές ή ναυπηγικές δραστηριότητες στα κέντρα των πόλεων, είτε λόγω χαμηλών επιπέδων των NO_x στους περιφερειακούς σταθμούς υποβάθρου.

➤ Πρέπει να επισημανθεί ότι στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας οι συγκεντρώσεις του NO_2 , ειδικά στην Αθήνα την περίοδο 2001-2010, υπήρξαν συστηματικές υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των $40\mu\text{g}/\text{m}^3$. Αλλά και κατά την υπόλοιπη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, παρατηρήθηκε σημαντικός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου ορίου, με εξαίρεση το σταθμό Αγ. Σοφίας, που υπήρξε μικρός αριθμός υπερβάσεων. Στους σταθμούς αστικού υποβάθρου και τους περιφερειακούς βιομηχανικούς οι συγκεντρώσεις του NO_2 υπερέβησαν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $40\mu\text{g}/\text{m}^3$, μόνο την περίοδο 2001-2010, ενώ δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις στους

σταθμούς περιαστικού υποβάθρου. Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 , στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος των οδικών αξόνων (σε σύγκριση με τα γειτονικά σημεία μέτρησης υποβάθρου) οφείλονται, τόσο στο NO_2 που προκύπτει από την αντίδραση μεταξύ NO και O_3 , όσο και σε εκείνο που εκπέμπεται απευθείας από τα οχήματα.

➤ Όσον αφορά το CO δεν υπήρξαν υπερβάσεις του ορίου των 10mg/m^3 σε κανένα σταθμό των δύο πόλεων, ενώ όσον αφορά το C_6H_6 , μόνο στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας της Πατησίων υπήρξαν, μέχρι το 2018, συστηματικές υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των $5\mu\text{g/m}^3$.

➤ Όμως, από τη σύγκριση των υπερβάσεων του NO_2 και του C_6H_6 , σε κάθε έναν από τους επιλεγμένους σταθμούς, μεταξύ των ετήσιων ορίων της ισχύουσας Οδηγίας 2008/50, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια, της Οδηγίας 2024/2881, που θα τεθεί σε ισχύ στο τέλος του 2026, στα οποία προκύπτει μείωση των ετήσιων ορίων κατά 50% περίπου, διαπιστώνεται ότι θα προκύψει σημαντική αύξηση των υπερβάσεων στους περισσότερους από τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς.

➤ Σε σημαντικό αριθμό σταθμών παρατηρήθηκαν διαχρονικά αυξητικές τάσεις των επιπέδων των συγκεντρώσεων του O_3 , στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2001-2024. Οι τάσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των επιπέδων και της διάρκειας των επεισοδίων υψηλών θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας, την τελευταία δεκαπενταετία, τα οποία παρατηρούνται σε μεγάλες αστικές περιοχές στην Ευρώπη και στην Ελλάδα. Οι τάσεις αυτές σχετίζονται και με τη μείωση των επιπέδων των NO_x , NMVOCs και CO , που προαναφέρθηκε, τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στον ημερήσιο κύκλο των φωτοχημικών αντιδράσεων.

➤ Κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19, και στις δύο πόλεις εξαιτίας της ισχύος περιοριστικών μέτρων, οι συγκεντρώσεις των NO_x μειώθηκαν σημαντικά, λόγω περιορισμού των ανθρωπογενών εκπομπών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα στους περισσότερους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας να υπάρξει σταθεροποίηση των επιπέδων του O_3 , σε σχέση με τις προηγούμενες δεκαετίες, ενώ σε πολλούς αστικούς και περιαστικούς σταθμούς σταθεροποίηση ή και αύξηση των συγκεντρώσεων O_3 , ιδίως τους μήνες ισχύος των περιοριστικών μέτρων.

➤ Βέβαια, παρά τη σαφή μείωση των επιπέδων των NO_x , κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, έχει επισημανθεί ότι οι τάσεις του O_3 δεν απεικονίζουν πραγματικά τις

μειώσεις των ανθρωπογενώς εκπεμπόμενων NO_x και VOCs, διότι λόγω των ακραία υψηλών θερμοκρασιών, ενώ οι εκπομπές τους μπορεί να μειώνονται, οι συγκεντρώσεις του O_3 μπορεί να παραμένουν αμετάβλητα υψηλές. Οι σταθεροποιητικές ή και πτωτικές τάσεις σε ορισμένους περιαστικούς σταθμούς υποβάθρου, αλλά και σε ορισμένους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας των επιπέδων των συγκεντρώσεων του όζοντος πιθανότατα να οφείλεται σε τοπικές ιδιαιτερότητες αυτών των περιοχών, αλλά και στο ότι η δημιουργία του O_3 εξαρτάται από πολλούς και ορισμένες φορές αλληλοαναιρούμενους παράγοντες (εκπομπές πολλών πρόδρομων ενώσεων, κλιματικές και μετεωρολογικές συνθήκες, τοπογραφικά χαρακτηριστικά περιοχών, κλπ.), οι οποίοι και διαμορφώνουν τελικά τα επίπεδα του όζοντος στις ελληνικές αστικές περιοχές.

➤ Η μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των NO , CO και C_6H_6 , την περίοδο 2001-2024, έδειξε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων, στις εκπομπές των οικιακών θερμάνσεων, στη μειωμένη φωτοχημική δραστηριότητα τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις γενικότερες μετεωρολογικές συνθήκες (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, κλπ) κάθε εποχής του έτους. Έτσι, η εικόνα αυτή αντικατοπτρίζει τις εποχικές μεταβολές στις πηγές εκπομπών των NO , CO και C_6H_6 , αλλά και στις μετεωρολογικές συνθήκες, που επηρεάζουν τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες μεταξύ των φωτοχημικών ρύπων. Σε ορισμένες βιομηχανικά επιβαρυνμένες περιοχές, καθώς και σε μεερικές περιαστικές περιοχές οι εποχικές μεταβολές ήταν περιορισμένες, λόγω κυρίως των χαμηλών επιπέδων αυτών των πωτογενών ρύπων.

➤ Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του NO_2 , την περίοδο 2001-2024, διαπιστώθηκε ότι ο χειμώνας και το φθινόπωρο ήταν οι περισσότερο επιβαρυνμένες εποχές, με αρκετές όμως αποκλίσεις, ανάλογα με τον τύπο του σταθμού και τις τοπικές πηγές εκπομπών. Στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας Πατησίων και Πειραιά-1, παρατηρήθηκε σχετικά μικρή διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO_2 να παρουσιάζονται την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού. Στους περιαστικούς-βιομηχανικούς παρατηρήθηκαν σαφείς επιρροές από μη κυκλοφοριακές πηγές. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, λόγω κυρίως της περιορισμένης επίδρασης ανθρωπογενών εκπομπών, επίσης παρατηρήθηκε μικρή διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO_2 να

παρουσιάζονται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Γενικότερα, το NO_2 παρουσιάζει μικρότερη μηνιαία διακύμανση, σε σύγκριση με το NO , καθώς είναι περισσότερο σταθερός ρύπος και επηρεάζεται λιγότερο από άμεσες εκπομπές και περισσότερο από δευτερογενείς ατμοσφαιρικές χημικές διεργασίες.

➤ Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του όζοντος, την περίοδο 2001-2024, διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις του O_3 είναι μεγαλύτερες τη θερινή περίοδο, ενώ οι ελάχιστες τη χειμερινή περίοδο του έτους, κυρίως λόγω της αυξημένης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας κατά τη θερμή περίοδο του έτους, η οποία ενισχύει σημαντικά το σχηματισμό του O_3 από φωτοχημικές διεργασίες

➤ Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των επιπέδων των φωτοχημικών ρύπων στις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη, την περίοδο μελέτης 2001-2024, ώστε να γίνει καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, που αναπνέουν οι πολίτες των δύο πόλεων. Για το λόγο αυτό εξετάστηκαν οι μέσες ετήσιες μεταβολές και οι τάσεις των λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x , την περίοδο μελέτης 2001-2024, αλλά και τις δύο επιμέρους περιόδους 2001-2011 και 2012-2024 (η επιλογή των δύο επιμέρους περιόδων έγινε εξαιτίας της αλλαγής στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων, διότι η πολιτεία επέτρεψε το Νοέμβριο του 2011 τη μετακίνηση των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις).

➤ Πρέπει να επισημανθεί ότι σύμφωνα με την απογραφή του 2021, ο μόνιμος πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Θεσσαλονίκης ανέρχεται σε 1.091.424 κατοίκους, ενώ ο Δήμος Θεσσαλονίκης σε 319.044 κατοίκους. Αντίστοιχα, ο μόνιμος πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Αττικής ανέρχεται σε 3.814.064 κατοίκους, ενώ του Δήμου Αθηναίων σε 637.798 κατοίκους και ολόκληρο το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας φιλοξενεί πάνω από 3 εκατομμύρια ανθρώπους. Ο συνολικός αριθμός επιβατικών οχημάτων που κινείται στην Αττική ανέρχεται περίπου στα 3,4 εκατομμύρια οχήματα (αριθμός αντιστοιχεί περίπου στο 56% του συνολικού στόλου οχημάτων ολόκληρης της χώρας), ενώ στην Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης εκτιμάται ότι κυκλοφορούν συνολικά περισσότερα από 750.000 οχήματα.

➤ Έτσι, προκύπτει ότι, ενώ την περίοδο 2001-2011 υπήρξε, στους περισσότερους σταθμούς, σταθεροποιητική τάση των μέσων ετήσιων λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x , την περίοδο 2012-2024, εξαιτίας κυρίως της αλλαγής της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων, διαπιστώθηκε ανοδική τάση των λόγων των συγκεντρώσεων

NO_2/NO_x , σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, στα κέντρα των δύο ελληνικών μεγαλουπόλεων, αλλά και στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου. Ο υψηλότερος λόγος NO_2/NO_x , που παρατηρήθηκε στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, σε σύγκριση με τους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, που επηρεάζονται από την κυκλοφορία των οχημάτων, δηλώνει τα χαμηλότερα επίπεδα NO στους σταθμούς υποβάθρου και την αυξημένη οξείδωση του NO σε NO_2 .

➤ Επομένως, γενικά διαπιστώνεται, όπως έδειξαν και προηγούμενες μελέτες για το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας, ότι ο λόγος των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x παρουσίασε αυξητική τάση, ειδικά την περίοδο 2012-2024, στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις. Η αύξηση αυτή του λόγου NO_2/NO_x , πιθανότατα να οφείλεται στην αύξηση του κλάσματος του πρωτογενούς NO_2 που εκπέμπεται από κινητές πηγές και ειδικά από τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα, καθώς αυτά εκπέμπουν υψηλότερο πρωτογενές κλάσμα NO_2 από τα οχήματα που κινούνται με βενζίνη, η οποία αύξηση μπορεί να οδηγήσει και σε αύξηση των επιπέδων του όζοντος σε αστικές περιοχές.

➤ Όμως, στους περισσότερους περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς και τους σταθμούς αστικού υποβάθρου, που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, διαπιστώθηκε σταθεροποιητική ή και καθοδική τάση των λόγων των συγκεντρώσεων NO_2/NO_x , την περίοδο 2012-2024, σε σχέση και με την περίοδο 2001-2011, που γενικά παρατηρήθηκαν ανοδικές τάσεις. Η παρατηρούμενη αυτή αύξηση του λόγου NO_2/NO_x , την περίοδο 2001-2011, όταν δεν κυκλοφορούσαν πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα,, πιθανότατα οφείλεται κυρίως στη δευτερογενή φωτοχημική παραγωγή του NO_2 .

➤ Επίσης, εξετάστηκαν οι λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων των φωτοχημικών ρύπων NO , NO_2 , NO_x , O_x και O_3 , μεταξύ των αντιπροσωπευτικών ασταθμών των δύο πόλεων, συνολικά για την περίοδο 2001-2024, ανά κατηγορία σταθμού. Από τους λόγους αυτούς προκύπτει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO , NO_2 και NO_x στην Αθήνα ήταν περίπου διπλάσια από τα αντίστοιχα στη Θεσσαλονίκη, του O_x ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, στις κεντρικές περιοχές και στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές των δύο πόλεων. Αντίθετα, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O_3 στη Θεσσαλονίκη ήταν διπλάσια από τα αντίστοιχα επίπεδα στην Αθήνα, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων. Οι διαφορές αυτές πιθανότατα οφείλονται κυρίως στις μεγαλύτερες εκπομπές NO_x στην Αθήνα (περίπου τετραπλάσιος αριθμός οχημάτων και κατοίκων σε σχέση με τη Θεσσαλονίκη), αλλά και σε χωροταξικές διαφορές των περιοχών που είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί (πχ ο σταθμός της Αγ. Σοφίας είναι

εγκατεστημένος σε πλατεία, ενώ της Πατησίων σε κύριο οδικό άξονα), αλλά και στις διαφορετικές μετεωρολογικές και κυκλοφοριακές συνθήκες (αριθμό διερχόμενων οχημάτων, κλπ) που επικρατούν στις παρακείμενες περιοχές των σταθμών.

➤ Επίσης, από τους λόγους αυτούς προκύπτει ότι τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NO, NO₂, NO_x και O_x ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, στις αστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων. Όμως, στις περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων, ενώ τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των NO και O_x ήταν περίπου στα ίδια επίπεδα, των NO₂ και NO_x ήταν στην Αθήνα περίπου διπλάσια από τα επίπεδα στη Θεσσαλονίκη. Τέλος, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O₃ ήταν περίπου ίδια, στις συγκεκριμένες περιαστικές βιομηχανικές περιοχές και περιαστικές περιοχές υποβάθρου των δύο πόλεων.

➤ Επομένως, διαπιστώνεται ότι γενικά, ενώ τα επίπεδα των NO_x στις κεντρικές και βιομηχανικές περιοχές στην Αθήνα ήταν περίπου διπλάσια, από τα αντίστοιχα στη Θεσσαλονίκη, στις αστικές περιοχές των δύο πόλεων ήταν περίπου ίδια. Αντίθετα, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του O₃ στη Θεσσαλονίκη ήταν διπλάσια από τα αντίστοιχα επίπεδα στην Αθήνα, στις κεντρικές περιοχές των δύο πόλεων, ενώ ήταν περίπου ίδια, στις περιαστικές βιομηχανικές περιοχές και περιαστικές περιοχές υποβάθρου, παρόλη την διαφορά του πληθυσμού και των οχημάτων που κινούνται στις δύο πόλεις.

➤ Από όλα τα παραπάνω λοιπόν, προκύπτει η διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της φωτοχημικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης.

➤ Επίσης, από την παραπάνω ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων προκύπτει ότι, οι συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων φωτοχημικών ρύπων παρουσιάζουν σημαντικές χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των σταθμών μέτρησης των δύο πόλεων, καθώς και έντονη εποχική μεταβλητότητα, η οποία ανέδειξε με σαφήνεια τη σημασία της οδικής κυκλοφορίας ως κύριας πηγής εκπομπών σ' αυτές τις αστικές και περιαστικές περιοχές.

➤ Ακόμη, προκύπτει ότι θα πρέπει να εκπονηθούν λεπτομερείς απογραφές των πρωτογενών και των δευτερογενών εκπομπών NO₂ ώστε να αναπτυχθούν κατάλληλες πολιτικές για τη μείωση των συγκεντρώσεων NO₂ κάτω από τις θεσμοθετημένες οριακές τιμές της ΕΕ, καθώς η μείωση των συνολικών εκπομπών NO_x από μόνη της ενδέχεται να μην είναι εξίσου αποτελεσματική.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι σε πολλές αστικές περιοχές, παρά τη σημαντική επίδραση τοπικών (κυκλοφορία οχημάτων, κεντρικές θερμάνσεις) ή βιομηχανικών πηγών, οι μετεωρολογικές συνθήκες, οι χημικές διεργασίες και οι διαδικασίες διασποράς, αλλά και οι τοπικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μετρήσεων, καθορίζουν αποφασιστικά το βαθμό συσσώρευσης των φωτοχημικών ρύπων.

Επίσης, οι μελέτες αυτές προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για τη σχέση της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τις μεταβολές των κοινωνικών συμπεριφορών και μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη βιώσιμων πολιτικών περιβαλλοντικής διαχείρισης και μείωσης των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων, της συνεχούς λειτουργίας αξιόπιστων δικτύων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, με στόχο τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Akritidis, D., Zanis, P., Georgoulis, A., K., Papakosta, E., Tzoumaka, P., Kelessis, A., 2021, *Implications of COVID-19 Restriction Measures in Urban Air Quality of Thessaloniki, Greece: A Machine Learning Approach*, Atmosphere, 12, 1500. <https://doi.org/10.3390/atmos12111500>.

Asimakopoulos, D.N., Deligiorgi, D., Drakopoulos, C., Helmis, C.G., Kokkori K., Lalas, D., Sikiotis, D. and Varotsos, C., 1992: An experimental study of nighttime pollution transport over complex terrain in Athens. Atmos. Env., 26B, 59-71.

Auras, R., & Selke, S. E. M. (2022). *Life Cycle of Sustainable Packaging: From Design to End-Of-Life*. John Wiley & Sons, Incorporated. ProQuest Ebook Central. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=7081838>. Created from eapgr on 2025-12-27 15:19:19.

Atafar Z. , Sarkhosh M., Atmospheric pollutants:exposure assessment and material damage, Air Pollution, Air Quality, and Climate Change, (2025), pages 83-102 : <https://doi-org.proxy.eap.gr/10.1016/B978-0-443-23816-1.00006-9>Get rights and content

Bais, A.F., Drosoglou, Th., Meleti, C., Tourpali, K., & Kouremeti, N. (2013). Changes in surface shortwave solar irradiance from 1993 to 2011 at Thessaloniki (Greece). *Int. J. Climatol.* 33, 2871–2876, DOI: 10.1002/joc.3636.

Bhagi, A. K., & Chatwal, G.R (2009).Environmental chemistry. Global Media. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=3011337>

Blanchard C. Duncan, 1989. The ejection of drops from the sea and their enrichment with bacteria and other materials. Estuaries Vol. 12, No. 3, p. 127-137.

Calvo – Flores, F. G, Monteagudo – Arrebola, M.J., Dobado, J. A. , & Isac – Garcia J. (2018). Emergin pollutants: Origin, structure, and properties.John Wiley & Sons. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=5123354>.

Carslaw, D.C., Carslaw, N., 2007. Detecting and characterising small changes in urban nitrogen dioxide concentrations. Atmospheric Environment 41, 4723-4733.

Cooper C. and Alley H., Air Pollution Control. A Design Approach, 3rd Waveland Press Inc., (2002)

Committee of the Regions (2024). *Environment – Greece*. Available at: <https://portal.cor.europa.eu/divisionpowers/Pages/Greece-Environment.aspx> (Accessed: 19/12/2025).

Dalal, V. K. (Ed.). (2023). *A closer look at photosynthesis*. Nova Science Publishers
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=30593692>.
Created from eapgr on 2025-12-27 14:46:37.

De, Anil Kumar. *Environmental Education*, New Age International Ltd, 2004. ProQuest
Ebook Central <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=424108>
Created from eapgr on 2025-12-19 09:16:31

De, Anil Kumar. *Environmental Studies*, New Age International Ltd, 2005. ProQuest
Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=418805>.
Created from eapgr on 2025-12-20 14:39:05.

European Commission (2024). *Air quality*. Available at:
https://environment.ec.europa.eu/topics/air_en (Accessed: 19/12/2025)

EEA (European Environmental Agency) Atmospheric Emission Inventory, Guidebook,
third edition., 2001. Copenhagen: European Environmental Agency.

EEA (2013). *Understanding pollutant emissions from Europe's cities - Highlights from
the EU Air Implementation Pilot project*. Luxembourg: Publications Office of the
European Union.

Eleftheriadis K. et al., Emission inventories for the three urban areas (AMA, TMA,
GVA), for anthropogenic and natural sources, for the past decade (2000-2010) ACEPT-
AIR LIFE+ 09 ENV/GR/000289, 2012.

Fameli, K.-M., & Assimakopoulos, V. D. (2016). The new open flexible emission
inventory for Greece and the Greater Athens Area (FEI-GREGAA): Account of
pollutant sources and their importance from 2006 to 2012. *Atmospheric Environment*,
137, 17–37. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.004>(Accessed: 16/02/2026).

Fameli, K.-M., & Assimakopoulos, V. D. (2015). *Development of a road transport
emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important
parameters*. *Science of the Total Environment*, 505, 770–786.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.082>

Fameli, K. M., & Assimakopoulos, V. D. (2015). Development of a road transport
emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important
parameters. *Science of the Total Environment*, 505, 770–786.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.015>(Accessed: 16/02/2026)

Fameli, K. M., Papagiannaki, K., & Kotroni, V. (2021). Optimizing the knowledge on
residential heating characteristics in Greece via crowd-sourcing approach. *Atmosphere*,
12(9), 1178. <https://doi.org/10.3390/atmos12091178>(Accessed: 16/02/2026)

Fameli, K. M., Kladakis, A., & Assimakopoulos, V. D. (2022). Inventory of commercial
cooking activities and emissions in a typical urban area in Greece. *Atmosphere*, 13(5),
792. <https://doi.org/10.3390/atmos13050792>(Accessed: 16/02/2026)

Fameli, K.M. (προσωπική επικοινωνία, 15 Μαρτίου 2025)

Flocas, H., Kelessis A., Helmis C., Petrakakis M., Zoumakis M. and Pappas K., 2009, «Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area», *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 265-277

Heger, Martin, et al. *Blue Skies, Blue Seas : Air Pollution, Marine Plastics, and Coastal Erosion in the Middle East and North Africa*, World Bank Publications, 2022. *ProQuest Ebook Central*, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=29275771>
Created from eapgr on 2025-12-27 14:28:34.

Imura, Hidefumi. *Environmental Issues in China Today : A View from Japan*, Springer Japan, 2013. *ProQuest Ebook Central*, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=1317701>.
Created from eapgr on 2025-12-20 14:16:31.

Institute for Energy Research. (2023). *What are primary and secondary air pollutants?* <https://iere.org/what-are-primary-and-secondary-air-pollutants/>
(Accessed: 3/01/2026)

Kanellopoulos, P. G., Chrysochou, E., & Bakeas, E. (2025). *Investigating BTEX Emissions in Greece: Spatiotemporal Distribution, Health Risk Assessment and Ozone Formation Potential*. *Atmosphere*, 16(10), 1162. https://www.mdpi.com/2073-4433/16/10/1162?utm_source=chatgpt.com
Created from eapgr on 2025-12-28 17:39:05

Kassomenos P., Kelessis A., Paschalidou A.K., Petrakakis M., 2011, «Identification of sources and processes affecting particulate pollution in Thessaloniki, Greece», *Atmospheric Environment*, 45, 7293-7300

Kassomenos, P.A., Kelessis A., Petrakakis M., Zoumakis N., Christidis Th., Paschalidou A.K., 2012, «Air Quality assessment in a heavily-polluted urban Mediterranean environment through Air Quality indices», *Ecological Indicators*, 18, 259-268.

Kassomenos, P.A., Karakitsios, S.P., & Pilidis, G.A. (2004). A simple semi-empirical approach to modeling benzene concentrations in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 38, 6073-6078.

Kassomenos P., Dimitriou K., Paschalidou A., (2013), « Human health damage caused by particulate matter PM10 and ozone in urban environments: the case of Athens, Greece », *Environ Monit Assess*, 185, p.g. 6933–6942.

Katsouyanni K., 2003, «Ambient air pollution and health», *British Medical Bulletin* 2003, 68, Department of Hygiene and Epidemiology, University of Athens Medical School, Athens, Greece.

Kelessis A.G., Petrakakis M.J., Zoumakis N.M., 2006, «Determination of benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes in urban air of Thessaloniki, Greece», *Environmental Toxicology*, 440-443.

Kelessis, A.G., M.J. Petrakakis, P.N. Tzoumaka, M.A. Tsougas, G.A. Tzourelis and N.M. Zoumakis, 2006. PM_{2.5} Concentration Levels in Urban Thessaloniki. *Journal Fresenius Environmental Bulletin*, Vol 15 - No 8b, 853-858.

Kofinas P., Kelessis A., Kassomenos P., 2024, *The impact of restriction measures implementation due to COVID-19 on particulate atmospheric pollution in Greek urban areas*, *Journal of the Association of Greek Chemists (JAGC)*, Issue 1, ISSN 29450861, <https://doi.org/10.62579/JAGC0003>.

Liora, N. (2015). Study of the contribution of anthropogenic and natural emissions to atmospheric pollution levels. PhD Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, Department of Physics, Thessaloniki, Greece.

Markakis, K., Poupkou, A., and Melas, D., Tzoumaka, P., Petrakakis, M., 2010. A computational approach based on GIS technology for the development of an anthropogenic emission inventory for air quality applications in Greece. *Water, Air & Soil Pollution*. DOI 10.1007/s11270-009-0126-5.

Mavroidis, I., & Chaloulakou, A. (2011). *Long-term trends of primary and secondary NO₂ production in the Athens area: Variation of the NO₂/NO_x ratio*. *Atmospheric Environment*, 45(39), 6872–6879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.006>

Moussiopoulos N., 2003, «Air Quality in Cities» Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany.

Nastos, P., T., Kapsomenakis, J., 2015, *Regional climate model simulations of extreme air temperature in Greece. Abnormal or common records in the future climate?*, *Atmospheric Research*, 152, 43-60.

National Research Council. (2010). Global sources of local pollution: An assessment of long – range transport of key air pollutants to and from the United States. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12743>

Petrakakis M.I., Kelessis A.G., Samara C., Tzoumaka P., Zoumakis N.M., Iosifidis E., 2007, «Effects of transport processes on particulate concentration in urban Thessaloniki, Greece», *Proceedings of First Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2007)*, (eds A. Kungolos, K. Aravossis, A. Karagiannidis and P. Samaras), June 24 – 28, Skiathos, Greece, 2471-2477.

Połodnik, Bernard, et al. *Traffic-Related Air Pollution and Exposure in Urbanized Areas*, CRC Press LLC, 2024. *ProQuest Ebook Central*, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eapgr/detail.action?docID=6791486>. Created from eapgr on 2025-12-20 15:01:19.

Progiou, A., et al. (2022). Impact of COVID-19 restrictions on air quality in the Greater Athens Area. *Atmospheric Environment*

Progiou A., Ziomas I., 2011a. Twenty-Year Road Traffic Emissions Trend in Greece. *Water Air Soil Pollut*, DOI 10.1007/s11270-011-0859-9

Progiou A.G., Ziomas I.C.. 2011b. Road traffic emissions impact on air quality of the Greater Athens Area based on a 20 year emissions inventory, *Science of the Total Environment* 410, 1–7.

Overview of Emission Source Categories: point, area and mobile sources. APN/Regional Resource Centre for Asia and the Pacific (2025). https://pressbooks.uwf.edu/envrioscience/chapter/10-1-atmospheric-pollution/?utm_source=chatgpt.com
(Accessed: 29/12/2025)

Querol, X., et al. (2014). *Natural sources of atmospheric aerosols influencing air quality across Europe*. *Science of the Total Environment*, 472, 825–833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.140>
(Accessed: 29/12/2025)

Samara C., Voutsas D., Kouras A., Petrakakis M., Kelessis A., and Tzoumaka P., 2014, «PM_{2.5} and carbonaceous species in Thessaloniki, Greece during the economic recession period», *Proceedings of 9th International Conference on Air Quality Science and Application*, Garmisch-Partenkirchen, pp. 266, 24-28 March 2014.

Samara C., [Kouras A.](#), [Kaidoglou K.](#), [Emmanouil-Nikoloussi E.N.](#), [Simou C.](#), [Bousnaki M.](#), Kelessis A., Ultrastructural alterations in the mouse lung caused by real-life ambient PM₁₀ at urban traffic sites, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.139, 2015.

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.
(Accessed: 3/01/2026)

Symeonidis, P., Ziomas, I., Proyou, A., 2003. Emissions of air pollutants from the road transport sector in Greece: Year to Year Variation and Present Situation. *Environmental Technology* 24, 719-725.

Vlachokostas C., Achillas C., Moussiopoulos N., Kalogeropoulos K., Sigalas G., Kalognomou E-A., Baniyas G., (2012), « Health effects and social costs of particulate and photochemical urban air pollution: a case study for Thessaloniki, Greece», *Air Quality*, Volume 5, Issue 3, p.g. 325-334.

Vlachokostas, Ch., Chourdakis, E., Michalidou, A.V., Moussiopoulos, N., Kelessis, A., & Petrakakis, M., (2012). Establishing relationships between chemical health stressors in urban traffic environments: Prediction of toluene concentration levels in European cities. *Atmospheric Environment*, 55, 299-310.

Vouitsis, I., S. Amanatidis, L. Ntziachristos, A. Kelessis, M. Petrakakis, I. Stamos, E. Mitsakis and Zissis Samaras, Daily and seasonal variation of traffic related aerosol pollution in Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment*, 122, 577-587, 2015.

Wilson, R., C., Flemming, Z., L., Monks, R., S., Clain, G., Henne, S., Kononov, I., B., Szopa, S., Menut, L., 2011, *Have primary emission reduction measures reduced ozone across Europe? An analysis of European rural background ozone trends 1996 – 2005*, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 18433-18485.

Zerefos, C.S., Kourtidis, K.A., Melas, D., Balis, D., Zanis, P., Katsaros, L., Mantis, H.T., Repapis, C., Isaksen, I., Sundet, J., Herman, J., Bhartia, P.K., and Calpini, B. (2002). Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation (PAUR) Modulation Factors: An overview of the project. *Journal of Geophysical Research*, 107 (doi: 10.1029/2000JD000134. issn: 0148-0227).

Ziomas, I.C., Melas, D., Zerefos, C.S., Paliatsos, A., Bais, A.F., 1995, Forecasting peak pollutant levels using meteorological variables and indexes. *Atmospheric Environment* 29, 3605-3617.

Ziomas, I.C, Tzoumaka, P., Balis, D., Melas, D., Zerefos, C., Klemm, O. (1998). Ozone Episodes in Athens, Greece. A modelling Approach using Data from the MEDCAPHOT-TRACE, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Issue 12, p.p. 2313-2321.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλμπάνης Τ., 2009. Ρύπανση και Τεχνολογίες Προστασίας Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη

Βερύκιος, Ξ., «Ατμοσφαιρικοί Ρύποι και Τεχνολογία Ελέγχου Εκπομπής τους Ι» Τόμος Α', (2003), Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Γεντεκάκης., Ιωάννης Β. Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Επιπτώσεις έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες, Εκδόσεις "Κλειδάριθμος", Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2010.

Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2024). Λογαριασμοί Αερίων Εκπομπών 2021. Αθήνα: ΕΛΣΤΑΤ.

Έλληνα, Φ. (2020), «Μελέτη των χρονικών και χωρικών μεταβολών των ατμοσφαιρικών ρύπων στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης με τη χρήση Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών», Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Ζάνης Π., (2014), «Σημειώσεις για την ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας», Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωλογίας.

Ζιώμας Ι., Ρεμουντάκη Ε., 2003, «Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση: Η ατμόσφαιρα ως αποδέκτης Αποβλήτων», Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα

Καμπεζίδης Χ., Ματράλης Χ., 2004, «Διαχείριση αέριων ρύπων. Ατμοσφαιρικοί ρύποι και Τεχνολογία Ελέγχου Εκπομπής τους II». Τόμος Β', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Κοφίνας Π., 2023, Τα επίπεδα των ατμοσφαιρικών ρύπων στις ελληνικές αστικές περιοχές κατά τις περιόδους επιβολής των περιοριστικών μέτρων για την πρόληψη της εξάπλωσης του COVID-19, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα

Αποθετήριο ΕΑΠ. <https://apothesis.eap.gr/>

Κουιμτζής, Θ., και Κ. Σαμαρά, 1994. Έλεγχος αέριας ρύπανσης. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη

Κώστεα, Β. (2016). «Σύγκριση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και των εκπομπών εξαιτίας της φωτοχημικής ρύπανσης στις δύο μεγαλύτερες ελληνικές πόλεις» [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Ψηφιακό Αποθετήριο ΕΑΠ. <https://apothesis.eap.gr/>

Λιώρα, Ν. (2009). Φυσικές εκπομπές σωματιδιακής ρύπανσης στην Ευρώπη (Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Φυσική Περιβάλλοντος».

Μελάς, Δ. (2007). Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Βοηθητικές Σημειώσεις Μαθήματος, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Μπαλάσκας, Β., (2025). «Χωροχρονικές μεταβολές των επιπέδων της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ελληνικές αστικές περιοχές κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών» [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Ψηφιακό Αποθετήριο ΕΑΠ. <https://apothesis.eap.gr/>

Στρατάκη, Ο. (2022). «Η φωτοχημική ρύπανση στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον μεγάλων πόλεων: Η περίπτωση της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης» [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Ψηφιακό Αποθετήριο ΕΑΠ. <https://apothesis.eap.gr/>

Παρασχά, Α. (2014). «Η χωροχρονική εξέλιξη της φωτοχημικής ρύπανσης στην Ελλάδα. Συγκρίσεις με άλλες Ευρωπαϊκές πόλεις» [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Ψηφιακό Αποθετήριο ΕΑΠ. <https://apothesis.eap.gr/>

Πετρακάκης Μ.Ι., Α.Γ. Κελέσης, Π.Ν. Τζουμάκα, Ζ. Κανελλοπούλου, Γ. Τζουρέλης και Α. Τσακνιά,, 2000-2015, «Ετήσιες Τεχνικές Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Μετεωρολογικών Παραμέτρων 2000-2015», Τμήμα Περιβάλλοντος, Δήμος Θεσσαλονίκης

Πετρακάκης Μ.Ι., Παπαγιαννόπουλος Ν.Μ., Κελέσης Α.Γ., Τζουμάκα Π.Ν., Τζουρέλης Α., Κανελλοπούλου Ζ., Τσακνιά Α., Κούτσαρη Ε. και Ζουμάκης Ν.Μ., 2008, «Αξιολόγηση της διαχρονικής εξέλιξης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης», 3^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας 14-17 Μαρτίου 2008.

Στογιάννης, Κ. (2019). *Χωρική και χρονική κατανομή των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες Ελληνικές αστικές περιοχές*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Τσέζος, Μ., & Ρεμουντάκη, Εμ. (2010). *Περιβάλλον Ι: Εισαγωγή στην Επιστήμη και Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος* [Σημειώσεις μαθήματος]. ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνολογίας Προστασίας Περιβάλλοντος στη Μεταλλουργία και Τεχνολογία Υλικών

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). «Ετήσιες Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2000-2025», Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας - ΕΔΠΑΡ, Αθήνα. (2000-2025).

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Greece's Informative Inventory Report, 2026. Αθήνα.

Χαϊνά Ε., Κελέσης Α., Πετρακάκης Μ.Ι., Κασσωμένος Π. και Παρασχά Α.,
Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ σε μεγάλα ελληνικά αστικά κέντρα πριν και μετά την οικονομική κρίση, Πρακτικά 12^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Χημείας Ελλάδας-Κύπρου με τίτλο «Χημεία, Πυλώνας Ανάπτυξης στη μετά Κρίση Εποχή» (CD), 8-10 Μαΐου, Θεσσαλονίκη, 2015

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

European Environment Agency. (2023). *Air pollutant emissions data viewer*.
<https://www.eea.europa.eu>
(Accessed: 11/01/2026).

(ΥΠΕΝ, 2025)
<https://ypen.gov.gr/wpcontent/uploads/2024/08/%CE%95%CE%9A%CE%98%CE%95%CE%A3%CE%97-2023.pdf>
(Accessed: 20/01/2026).

<https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provlepseis-ekpobon-rypon>
(Accessed: 15/02/2026).

<https://www.statistics.gr>,
<https://www.statistics.gr/documents/20181/18285545>
<http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SOP08/->
(Accessed: 22/02/2026).

(EEA, 2024) <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/index>
(Accessed: 3/02/2026).

<https://www.iersd.noa.gr/ανθρωπογενείς-εκπομπές-πρόγνωση-ρύ/>
(Accessed: 29/03/2026).

<https://urbanatmosphere.gr/>
FEI-GREGAA (Flexible Emission Inventory for Greece and the Greater Athens Area)
(Accessed: 30/03/2026).

<https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/about>
(Accessed: 13/02/2026).

<https://industry.eea.europa.eu/analyse/releases>
(Accessed: 12/02/2026).

<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:EN:PDF>
(Accessed: 3/03/2026).

<https://www.moa.gov.cy/moa/environment/environmentnew.nsf/all/3EB9DE4478400E1EC225823300376499?opendocument>
(Accessed: 9/03/2026).

<http://envdimosthes.gr>
(Accessed: 7/02/2026).

<http://pkm.gr>
(Accessed: 5/02/2026).

<https://www.iqair.com/greece/attica/athens>
(Accessed: 23/01/2026).

<https://aqicn.org/map/greece/>
(Accessed: 25/01/2026).

<https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html>
(Accessed: 2/02/2026).

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα: Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.