



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

Διπλωματική Εργασία

«Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης την τελευταία δεκαετία»

«Atmospheric pollution levels in the central urban area of Thessaloniki over the last decade»

«ΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ»

A.M. 138173

**Επιβλέπων καθηγητής: Κελέσης Απόστολος, Δρ. Φυσικός/Περιβαλλοντολόγος,
ΣΕΠ-ΕΑΠ**

**Β' Αξιολογητής Καζαντζίδης Ανδρέας Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του
Πανεπιστημίου Πατρών**

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026



Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας 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 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 συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ «Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης την τελευταία δεκαετία»



ΕΛΛΗΝΙΚΟ
ΑΝΟΙΚΤΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

**Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο κεντρικό πολεοδομικό
συγκρότημα της Θεσσαλονίκης την τελευταία δεκαετία**

ΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής

Απόστολος Κελέσης

Καζαντζίδης Ανδρέας

Δρ. Φυσικός, Σ.Ε.Π. Ε.Α.Π.

Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου (Ε.Α.Π.), στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Αποβλήτων». Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον (Α επιβλέποντα) καθηγητή μου κύριο Κελέση Απόστολο για την καθοδήγηση, την υποστήριξή του και την άριστη συνεργασία μας, χάρη στην οποία κατάφερα να ολοκληρώσω επιτυχώς τη διπλωματική μου εργασία. Επίσης, ευχαριστώ εξίσου θερμά τον (Β επιβλέποντα) κύριο Καζαντζίδη Ανδρέα για τη συμβολή του στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Η ΠΑΡΟΥΣΑ Δ.Ε ΕΙΝΑΙ ΑΦΙΕΡΩΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΜΟΥ



Περίληψη

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα, που 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.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση των επιπέδων και των τάσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στη δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, τη Θεσσαλονίκη. Η μελέτη βασίστηκε στα διαθέσιμα δεδομένα από 4 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. Ταυτόχρονα, η ανάλυση βασίστηκε και στα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, που βρίσκεται στον Κεντρικό Λιμένα της Θεσσαλονίκης, πλησίον του κέντρου της πόλης, ώστε να γίνει εκτίμηση της επίδρασης των δραστηριοτήτων του Λιμένα στο αστικό πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης.

Έτσι, αυτή η διπλωματική εργασία εξετάζει διαχρονικά την ετήσια, εποχική και μηνιαία διακύμανση, σημαντικών δεικτών της σωματιδιακής, PM_{10} και $PM_{2,5}$, και της φωτοχημικής ρύπανσης, NO και NO_2 , στο κέντρο της πόλης και στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 2014-2024, με στόχο την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων για τη χωροχρονική εξέλιξη των επιπέδων αυτών των ρύπων. Από την επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων, για την περίοδο 2014-2024, προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις των PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO και NO_2 , ήταν αυξημένες στο κέντρο της πόλης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες, αλλά και στον αυξημένο αριθμό οχημάτων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές. Στο σταθμό Λιμάνι-ΟΛΘ τα επίπεδα αυτών των ρύπων οφείλονται κυρίως στις μεταφορικές και τουριστικές ναυτιλιακές δραστηριότητες στο Λιμένα της Θεσσαλονίκης, καθώς και στην κίνηση οχημάτων και φορτηγών που προκύπτει εξαιτίας αυτών των δραστηριοτήτων. Στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου παρουσιάστηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών.



Διαχρονικά όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ και NO στους περισσότερους σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση των επιπέδων, κατά την περίοδο 2014-2024. Αντίθετα, όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 , κατά την περίοδο 2014-2024, παρατηρήθηκαν αυξητικές τάσεις στο κέντρο της πόλης και την αστική βιομηχανική περιοχή ή και τάσεις σταθεροποίησης στις περιφερειακές περιοχές, πιθανότατα εξαιτίας της αλλαγής στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων. Οι παραπάνω πτωτικές τάσεις, αυτών των ρύπων, πιθανότατα οφείλονται κυρίως στη μείωση των συνολικών εκπομπών των PM και NO_x στην Ελλάδα, αλλά και εξαιτίας των νέων κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών, που διαμορφώθηκαν από την ελληνική οικονομική κρίση.

Από τη μέση εποχική και μηνιαία διακύμανση των επιπέδων των συγκεντρώσεων της περιόδου 2014-2024, των PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO και NO_2 , στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, προέκυψε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Τα επίπεδα του NO_2 , είχαν τη μικρότερη διακύμανση μεταξύ χειμερινού και θερινού εξαμήνου, καθώς είναι περισσότερο σταθερός ρύπος και επηρεάζεται λιγότερο από άμεσες εκπομπές και περισσότερο από δευτερογενείς ατμοσφαιρικές χημικές διεργασίες.

Πρέπει να επισημανθεί ότι την περίοδο μελέτης υπήρξαν υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίων των PM_{10} και $PM_{2,5}$, που ήταν περισσότερες στο κέντρο της πόλης, ενώ στους άλλους σταθμούς δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις. Όσον αφορά τα επίπεδα του NO_2 , παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου ορίου στο κέντρο της πόλης, ενώ στις άλλες περιοχές δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του ετήσιου ορίου. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των ετήσιων ορίων, για όλα τα έτη της περιόδου μελέτης.

Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ρύπανσης κυρίως στο κέντρο του πολεοδομικού συγκροτήματος, που είναι η περισσότερο επιβαρυνόμενη περιοχή, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Λέξεις κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, σωματιδιακή ρύπανση, αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2,5}$, PM_{10}), NO , NO_2 , ποιότητα αέρα, Θεσσαλονίκη, αστικό περιβάλλον.



Abstract

Air pollution is one of the major problems frequently encountered in large urban centers, as its occurrence is directly linked to anthropogenic emissions, meteorological conditions, and complex atmospheric photochemical processes. The aim of this study was to investigate air pollution levels and trends in Thessaloniki, Greece's second-largest city. The study utilized data from four air quality monitoring stations belonging to the Ministry of Environment and Energy's National Air Pollution Monitoring Network (EDPAR), these stations were selected based on criteria regarding data completeness and spatial representativeness to ensure coverage of various urban environment types. Additionally, the analysis incorporated data from the Thessaloniki Port Authority (ThPA S.A.) station—located at the city's central port near the city center—to assess the impact of port activities on the urban area.

Thus, this thesis examines the annual, seasonal, and monthly variations over time of key indicators of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and photochemical pollution (NO and NO_2) in the city center and the broader Thessaloniki area during the 2014–2024 period, aiming to draw evidence-based conclusions regarding the spatiotemporal evolution of these pollutant levels. Analysis of the aforementioned measurements for the 2014–2024 period revealed elevated concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO , and NO_2 in the city center, this is primarily attributed to the denser urban fabric of central areas and the high volume of vehicles passing through them. At the Port monitoring station, the levels of these pollutants are primarily attributable to maritime transport and tourism activities at the Port of Thessaloniki, as well as to the traffic of vehicles and trucks resulting from these activities. The lowest concentrations of these pollutants were observed at the suburban background station, primarily due to the absence of local sources.

Regarding the concentration levels of PM_{10} , $PM_{2.5}$, and NO at most stations, a downward trend was observed over the 2014–2024 period. In contrast, regarding NO_2 concentration levels during the 2014–2024 period, increasing trends were observed in the city center and the urban industrial area, while trends in suburban areas remained stable—likely due to changes in the vehicle fleet composition. The aforementioned downward trends in these pollutants are likely attributable primarily to the reduction in



total PM and NO_x emissions in Greece, as well as to the new social and economic conditions brought about by the Greek economic crisis.

Analysis of the average seasonal and monthly concentration levels of PM₁₀, PM_{2.5}, NO, and NO₂ in the wider area of Thessaloniki during the 2014–2024 period revealed a clear seasonal pattern in most areas, with peak values occurring in winter and minimum values in summer. NO₂ levels showed the least variation between the winter and summer periods, as it is a more stable pollutant that is less influenced by direct emissions and more by secondary atmospheric chemical processes.

It should be noted that during the study period, there were exceedances of the established annual limits for PM₁₀ and PM_{2.5} which were more frequent in the city center—whereas no exceedances were observed at the other stations. Regarding NO₂ levels, a small number of exceedances of the annual limit were observed in the city center, whereas no exceedances of the annual limit were observed in the other areas. However, under the new, lower annual limits established by Directive 2024/2881, almost all the stations examined show continuous exceedances of the annual limits throughout the study period.

All the above indicate the persistence—or even intensification—of the problem of particulate and photochemical pollution mainly in the center of the urban area, as well as in the wider Thessaloniki region.

Keywords: Air pollution, particulate pollution, particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀), NO, NO₂, air quality, Thessaloniki, urban environment.



Περιεχόμενα

Περίληψη-Abstract.....	5
I. Κατάλογος σχημάτων.....	11
II. Κατάλογος πινάκων.....	12
III. Κατάλογος διαγραμμάτων.....	13
Εισαγωγή.....	17
Κεφάλαιο 1: Ατμοσφαιρική Ρύπανση.....	19
1.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση.....	19
1.1.1 Γενικές Έννοιες.....	19
1.1.2 Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ιστορική βάση.....	21
1.2 Είδη, παράγοντες σχηματισμού και προέλευση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης....	24
1.3 Εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.....	26
Κεφάλαιο 2: Ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι κυριότερες πηγές τους.....	30
2.1 Βασικές Έννοιες.....	30
2.2 Πηγές Αέριων Ρύπων.....	31
2.2.1 Αιωρούμενα Σωματίδια	32
2.2.2 Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂) – Μονοξείδιο του Αζώτου (NO).....	35
2.3 Επιπτώσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	37
2.3.1 Επιπτώσεις στην Υγεία του Ανθρώπου.....	38
2.3.2 Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο αστικό περιβάλλον.....	40
2.3.3 Επιπτώσεις στο Κλίμα.....	43
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι μετρήσεων αέριων και σωματιδιακών ρύπων	45
3.1 Σταθμοί αναφοράς στην περιοχή μελέτης.....	45
3.2 Μεθοδολογίες μέτρησης και έλεγχος ποιότητας δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	49
3.2.1 Μέθοδος μέτρησης των οξειδίων του αζώτου.....	50
3.2.2 Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας.....	51
3.2.3 Διαδικασία Βαθμονόμησης.....	52
3.3 Χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης.....	53
Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων και των	



φωτοχημικών ρύπων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	56
4.1. Ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ , PM _{2,5} , και των NO, NO ₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	57
4.1.1. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ και PM _{2,5} στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014- 2024.....	58
4.1.2. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των NO και NO ₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014- 2024.....	65
4.2. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , PM _{2,5} και NO, NO ₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.....	77
4.2.1 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ και PM _{2,5} στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.....	77
4.2.2 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των NO, NO ₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.....	83
Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	92
Βιβλιογραφία.....	99



I. Κατάλογος σχημάτων

Εικόνα 1. Οι επιπτώσεις των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία, στο περιβάλλον και στο κλίμα (Πηγή: European Environmental Agency).....	37
Εικόνα 2. Δίκτυο σταθμών ελέγχου των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, (α) στον ελλαδικό χώρο και (β) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; http://www.ypen.gov.gr).....	46
Χάρτης 1. Αντιπροσωπευτικοί σταθμοί ελέγχου των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Google Earth, 2026).....	48



Π. Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Ταξινόμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Πηγή: Κυριαζίδης, 2022).....	25
Πίνακας 2. Όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50. Πηγή: Ετήσιες Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης ΕΔΠΑΡ-ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; http://www.ypen.gr ; Κοφίνας, 2023).....	27
Πίνακας 3. Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία 2024/2881 της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 23-10-2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΥΠΕΝ, 2001-2024; http://www.ypen.gr).....	29
Πίνακας 4: Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία.....	38
Πίνακας 5. Αντιπροσωπευτικοί σταθμοί ελέγχου ατμοσφαιρικών ρύπων στο δίκτυο ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; http://www.ypen.gov.gr) και του Οργανισμού Λιμένος Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ, 2025; https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/).....	49
Πίνακας 6. Μέθοδοι μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων στο δίκτυο ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2002-2022).....	50
Πίνακας 7. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	73
Πίνακας 8. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO ₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	74

III. Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	58
Διάγραμμα 4.2: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM _{2,5} , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	59
Διάγραμμα 4.3: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	60
Διάγραμμα 4.4: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	61
Διάγραμμα 4.5: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	62
Διάγραμμα 4.6: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM _{2,5} , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	63
Διάγραμμα 4.7: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM ₁₀ , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	63
Διάγραμμα 4.8: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM _{2,5} , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	64
Διάγραμμα 4.9: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	65
Διάγραμμα 4.10: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	66
Διάγραμμα 4.11: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την	



περίοδο 2014-2024.....	66
Διάγραμμα 4.12: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	67
Διάγραμμα 4.13: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	68
Διάγραμμα 4.14: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	68
Διάγραμμα 4.15: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	69
Διάγραμμα 4.16: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	76
Διάγραμμα 4.17: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	70
Διάγραμμα 4.18: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO ₂ , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.....	71
Διάγραμμα 4.19: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	77
Διάγραμμα 4.20: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	78
Διάγραμμα 4.21: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	79
Διάγραμμα 4.22: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	79

Διάγραμμα 4.23: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	80
Διάγραμμα 4.24: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	81
Διάγραμμα 4.25: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.....	81
Διάγραμμα 4.26: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.....	82
Διάγραμμα 4.27: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	83
Διάγραμμα 4.28: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	84
Διάγραμμα 4.29: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	84
Διάγραμμα 4.30: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	85
Διάγραμμα 4.31: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	86
Διάγραμμα 4.32: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	86
Διάγραμμα 4.33: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού	



υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	87
Διάγραμμα 4.34: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO ₂ , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.....	88
Διάγραμμα 4.35: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.....	88
Διάγραμμα 4.36: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO ₂ , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.....	89



Εισαγωγή

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα από τα κυριότερα περιβαλλοντικά προβλήματα της σύγχρονης εποχής, στο οποίο τις τελευταίες δεκαετίες έχει εστιαστεί το ενδιαφέρον της πολιτείας και της επιστημονικής κοινότητας, εξαιτίας των αρνητικών επιπτώσεων της στην υγεία και γενικά την ποιότητα ζωής των ανθρώπων των αναπτυγμένων χωρών, όπως και στα οικοσυστήματα, στα μνημεία και στην κλιματική αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας των επιπτώσεων που έχουν στην ανθρώπινη υγεία, σε συνδυασμό με αποτελέσματα από επιδημιολογικές κλινικές και τοξικολογικές μελέτες, έχει προκύψει η ανάγκη συνεχών μετρήσεων των επιπέδων ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων (Desonie, 2007).

Ως ρύπανση του αέρα χαρακτηρίζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ενός ή περισσότερων ρύπων, όπως είναι για παράδειγμα η αιθάλη, η σκόνη, ο καπνός, σε ικανές ποσότητες, με χαρακτηριστικά και διάρκεια που να είναι βλαβερά για τον άνθρωπο, τα ζώα, τα φυτά, ή που επηρεάζει την απόλαυση της ζωής ή της ιδιοκτησίας (Ross, 1995).

Οι αναπτυγμένες χώρες κάνουν μεγάλη προσπάθεια μέσω αυστηρών νόμων και κανονισμών για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, μέσω της μείωσης των εκπομπών, με τη χρήση καθαρότερης ενέργειας, με τεχνολογικές βελτιώσεις-παρεμβάσεις, με αποτέλεσμα, σήμερα, σε μεγάλες αστικές περιοχές να παρατηρούμε μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Βλαχοκόστας, 2009).

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των φυσικών εκπομπών, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται και αυτές υπόψη στο πλαίσιο σχεδίων διαχείρισης της ποιότητας του αέρα και της προστασίας της δημόσιας υγείας. Στην περιοχή της Μεσογείου παρουσιάζονται κυρίως υψηλές συγκεντρώσεις αερολυμάτων και όζοντος, δύο ιδιαίτερα επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων για την ανθρώπινη υγεία και για το οικοσύστημα, καθώς προκαλούν επιπτώσεις και στη γεωργία, με απώλειες καλλιεργειών, καθώς επίσης έχουν σημαντική συμβολή στην αλλαγή του κλίματος (Kanakidou et al., 2011).

Η παρούσα εργασία έχει στόχο τη μελέτη των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, την τελευταία δεκαετία. Για το λόγο αυτό έχει γίνει προσπάθεια μελέτης των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$ και PM_{10} και των οξειδίων του αζώτου, σε συγκεκριμένους



αντιπροσωπευτικούς σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2014-2024.

Η εργασία έχει την παρακάτω δομή:

- Κεφάλαιο 1: Δίνεται μια γενική εικόνα των εννοιών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και το εθνικό και Ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο γύρω από την ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Κεφάλαιο 2: Παρουσιάζει τις κυριότερες πηγές των ατμοσφαιρικών ρύπων και πιο συγκεκριμένα για τους σωματιδιακούς και φωτοχημικούς ρύπους ($PM_{2,5}$, PM_{10} , NO , NO_2), με τους οποίους ασχολείται η παρούσα μελέτη περίπτωσης.
- Κεφάλαιο 3: Παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των πέντε σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης που θα χρησιμοποιηθούν για να αντληθούν τα δεδομένα των μετρήσεων της παρούσας μελέτης καθώς και τη μεθοδολογία των μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Κεφάλαιο 4: Σ' αυτό το κεφάλαιο, από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, έγινε προσπάθεια εκτίμησης των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συγκεκριμένα των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$, PM_{10} και των οξειδίων του αζώτου NO , NO_2 . Έτσι, παρουσιάζονται ετήσιες, εποχικές και μηνιαίες διακυμάνσεις, κατά την περίοδο μελέτης, 2014-2024.
- Κεφάλαιο 5: Παρουσιάζει τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία του ανθρώπου, στο αστικό περιβάλλον και στο κλίμα.



Κεφάλαιο 1: Ατμοσφαιρική Ρύπανση

1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζει η παγκόσμια κοινωνία στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα είναι αυτό της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι δυστυχώς συνυφασμένη με το σύγχρονο τρόπο ζωής και είναι αποτέλεσμα του τρόπου που παράγονται τα αγαθά μας, του τρόπου με τον οποίο χτίζονται οι πόλεις στις οποίες ζούμε, του τρόπου με τον οποίο μεταφερόμαστε και μεταφέρουμε τα αγαθά μας και του τρόπου με τον οποίο παράγεται η ενέργεια που χρειαζόμαστε για την καθημερινότητά μας. Επομένως, γίνεται κατανοητό ότι ο άνθρωπος είναι πολύ δύσκολο να μην ρυπαίνει, έστω και σε μικρό βαθμό, το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Από την άλλη όμως, δεν μπορεί να συνεχιστεί η ρύπανση του περιβάλλοντος μ' αυτούς τους ρυθμούς. Είναι εμφανές ότι πρέπει να ακολουθηθεί μια μέση οδός έτσι ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα ζωής και ταυτόχρονα να διατηρηθεί αλλά και να βελτιωθεί η ποιότητα του περιβάλλοντος. Αυτό τεχνολογικά είναι εφικτό, ενέχει όμως κόστος, το οποίο πρέπει να θέλουμε να καταβάλουμε ώστε να αφήσουμε ένα καλύτερο περιβάλλον για τις μελλοντικές γενιές.

1.1.1 Γενικές Έννοιες

Η ατμόσφαιρα είναι το προστατευτικό στρώμα χάρη στο οποίο υπάρχει ζωή στον πλανήτη και αποτελεί πηγή διοξειδίου του άνθρακα το οποίο είναι απαραίτητο για την φωτοσύνθεση, όπως και αζώτου για τους διάφορους οργανισμούς με σκοπό την σύνθεση των δομικών τους μορίων αλλά και πηγή οξυγόνου για την αναπνοή (Ρεμουντάκη, 2010). Ατμόσφαιρα είναι ο μείγμα των αερίων τα οποία περιβάλλουν τη γη. Η ατμόσφαιρα της γης αποτελείται από 78,1% (κατ όγκο) άζωτο, 20,9% οξυγόνο, 0,93% αργό, 0,0018% νέο και πολύ μικρές ποσότητες άλλων αερίων όπως υδρογόνο, ήλιο και μεταβλητές ποσότητες αερίων, όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, όζον και υδρατμούς (Μελάς, 2007).

Η ατμόσφαιρα διαιρείται σε στρώματα σύμφωνα με τις θερμικές ιδιότητες (θερμοκρασία) και τα χημικά χαρακτηριστικά. Το στρώμα το οποίο βρίσκεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της γης είναι η τροπόσφαιρα, η οποία κυμαίνεται σε ύψος 8km στους πόλους και 17 χιλιόμετρα περίπου στον ισημερινό. Το αμέσως



επόμενο στρώμα είναι η στρατόσφαιρα η οποία φτάνει σε ύψος 50km περίπου. Το 99,9% της μάζας της ατμόσφαιρας αποτελείται από την τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα. Ακολουθεί η μεσόσφαιρα, η οποία φτάνει στα 80-90km, ενώ πάνω από το στρώμα της μεσόσφαιρας βρίσκεται η θερμόσφαιρα (Seinfeld and Pandis, 2006).

Ως ρύπος μπορεί να οριστεί η κάθε πρόσθετη ουσία η οποία είναι ανιχνεύσιμη στο έδαφος, το νερό, τον αέρα, αλλά και τα τρόφιμα και η οποία μπορεί να αποτελέσει απειλή για τους διάφορους έμβιους οργανισμούς, αλλά και την ανθρώπινη υγεία, η περιεκτικότητα της οποίας ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια (Βερύκιος, 2003).

Μια από τις σοβαρότερες περιβαλλοντικές απειλές για την υγεία είναι αυτή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής παγκοσμίως. Πρόκειται για την αλλοίωση της σύστασης της ατμόσφαιρας από ξένες ουσίες (αέρια, σωματίδια) που βλάπτουν τους ζωντανούς οργανισμούς και το περιβάλλον.

Το θέμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι πολυδιάστατο. Το γεγονός που θα κρίνει αν η ρύπανση προκαλέσει περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή βλάβες στην υγεία είναι η συγκέντρωση του ρύπου καθώς και ο χρόνος έκθεσης των ανθρώπων ή του περιβάλλοντος σε αυτόν (Γεντεκάκης, 2010). Γενικά η ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται ως η παρουσία κάποιας ουσίας στην ατμόσφαιρα, η οποία εκπέμπεται από είτε από ανθρωπογενείς είτε από φυσικές πηγές και προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στα υλικά αγαθά ή και στο περιβάλλον (Μελάς, 2007). Τέτοιες ουσίες είναι το όζον το οποίο δημιουργεί προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και επίσης βλάπτει τα δέντρα και τα φυτά, τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία παράγονται από τις καύσεις των καυσίμων, από βιομηχανικές διεργασίες, γεωργικές δραστηριότητες, καθώς και πολλές άλλες δραστηριότητες, τα οξείδια του αζώτου, του άνθρακα και του θείου, τα οποία σχηματίζονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως η βενζίνη, ο γαιάνθρακας, το φυσικό αέριο, τοξικά χημικά όπως το βενζόλιο, το τριχλωροαιθάνιο και το τολουόλιο τα οποία προξενούν καρκίνο, γενετικές διαταραχές και άλλα προβλήματα, ο μόλυβδος ο οποίος είναι ένα από τα βαρέα μέταλλα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από την παραγωγή χρωμάτων που περιέχουν μόλυβδο, από ορισμένες μπαταρίες, ενώ μπορεί να προκληθεί βλάβη στον εγκέφαλο και το κεντρικό νευρικό σύστημα, ιδίως στα παιδιά κατά την έκθεση σ αυτόν (Βερύκιος, 2003; Κουιμιτζής και Σαμαρά, 1994).



Οι τρεις κύριες ανθρώπινες δραστηριότητες που προκαλούν την λεγόμενη ανθρωπογενή ατμοσφαιρική ρύπανση, είναι η βιομηχανία, οι μεταφορές και η θέρμανση των κτιρίων (Αλμπάνης, 2009). Είναι πιθανό η ατμοσφαιρική ρύπανση να φτάσει σε τέτοια επίπεδα που δημιουργούν ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης. Όμως, εκτός από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (ανθρωπογενείς πηγές) επίσης και οι φυσικές διεργασίες απελευθερώνουν ρύπους σωματίδια και αέρια στην ατμόσφαιρα προκαλώντας ατμοσφαιρική ρύπανση. Παρόλο που το πρόβλημα εντοπίζεται κυρίως στην ανθρώπινη παρέμβαση, οι φυσικές πηγές, όπως ηφαιστειακές δραστηριότητες, δασικές πυρκαγιές, αμμοθύελλες, θαλάσσια αερολύματα και βιολογικές διαδικασίες μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα (Seinfeld and Pandis, 2006).

Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει τάση να μειώνονται οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων και αυτό οφείλεται στη χρήση καλύτερων καυσίμων, με φιλικές προς το περιβάλλον ιδιότητες (φυσικό αέριο κ.λπ.), την είσοδο στην κυκλοφορία νέων καταλυτικών αυτοκινήτων και την απόσυρση των παλαιών οχημάτων με υψηλό αποτύπωμα στη ρύπανση, καθώς και στην «πράσινη χημεία», που παράγει χημικά προϊόντα, με λιγότερο βλαβερά παραπροϊόντα. Επίσης σημαντικό ρόλο, στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παίζει η ολοένα αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των πολιτών, καθώς και η σημαντική πρόοδος στο νομοθετικό πλαίσιο, που αφορά τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Τσέζος & Ρεμουντάκη, 2010).

1.1.2 Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ιστορική βάση

Συχνά επικρατεί η άποψη ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα πρόβλημα που εμφανίστηκε στο δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα. Όμως, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα αρκετά παλαιό φαινόμενο. Θα μπορούσαμε να πούμε πως η αφετηρία της ανθρωπογενούς ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι στην εποχή όπου ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί τη φωτιά για θέρμανση και να προετοιμάσει το φαγητό του. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγονται κατά την καύση ξύλων είναι το CO, CO₂, η κάπνα (αιθάλη), κλπ. Μπορούμε επίσης να φανταστούμε πως σε αγροτικές και νομαδικές κοινωνίες, η ρύπανση του αέρα ήταν μεγάλη στο εσωτερικό των σπιτιών, πράγμα που ισχύει επίσης και στα μεγάλα αστικά κέντρα της αρχαιότητας, όπως η



Ρώμη (Βερύκιος, 2003).

Όμως αυτού του είδους οι δραστηριότητες δεν είχαν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον μέχρι σχετικά πρόσφατα. Η επιβάρυνση στην ατμόσφαιρα των αστικών κέντρων της βόρειας Ευρώπης ήταν μεγάλη το 14^ο αιώνα, όταν άρχισε να χρησιμοποιείται ο γαιάνθρακας (κάρβουνο) για θέρμανση. Ωστόσο, η κατάσταση έγινε ακόμα χειρότερη στα μεγάλα αστικά κέντρα κατά την περίοδο της βασιλείας της βασίλισσας Ελισάβετ Α' (1550-1603) και για αυτόν τον λόγο η Βουλή εξέδωσε έναν νόμο σύμφωνα με τον οποίο απαγορευόταν η χρήση του άνθρακα στην πόλη του Λονδίνου κατά τη διάρκεια των συνεδριάσεων της βουλής, όμως και το συγκεκριμένο μέτρο δεν βοήθησε ιδιαίτερα στην λύση του προβλήματος. Στη συνέχεια στην Αγγλία υπήρχαν συνεχείς διαμαρτυρίες και η χρήση του κάρβουνου περιορίστηκε μέσω φορολογικών επιβαρύνσεων. Με την αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις και με την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης σημειώθηκε ραγδαία αύξηση της χρήσης του γαιάνθρακα και κατά συνέπεια η ατμοσφαιρική ρύπανση. Εκτός της Αγγλίας και η Γαλλία αναγκάστηκε να ασχοληθεί με το ζήτημα της καταστροφής του περιβάλλοντος εφαρμόζοντας συνεχώς νέες διατάξεις και αποφάσεις δικαστηρίων, που εκδίδονταν έπειτα από καταγγελίες πολιτών. Το 1810 η Γαλλία εξέδωσε νόμο για τον έλεγχο της ποιότητας του περιβάλλοντος, σύμφωνα με τον οποίο απαιτούνταν ειδική άδεια από τις αρχές για τις εμπορικές δραστηριότητες και καθορίζονταν οι διαδικασίες χορήγησης των αδειών αυτών. Μέχρι το 1845 υπάγονταν σε αυτό το νόμο 307 κατηγορίες δραστηριοτήτων. Επίσης η Γαλλία ήταν η πρώτη χώρα η που καθιέρωσε την έκδοση αδειών το 1823 για τη λειτουργία ατμοκινητήρων και έλεγχο σε τακτά χρονικά διαστήματα των μηχανών αυτών από μηχανικούς του κράτους. Οι καταστροφές των δασών της Βόρειας και Κεντρικής Ευρώπης στα μέσα του 19^{ου} αιώνα οδήγησαν στην εφαρμογή κανόνων για τις εκπομπές SO₂ και στην ανάπτυξη τεχνολογιών κατακράτησής του. Όσο αυξανόταν η βιομηχανοποίηση τόσο χειροτέρευε και το πρόβλημα του καπνού, με αποτέλεσμα έως το 1850 το Λονδίνο να έχει γίνει περιβόητο για το στρώμα καπνού και ομίχλης, το οποίο κάλυπτε ολόκληρη την πόλη, και ονομάστηκε αιθαλομίχλη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η κάπνα (αιθάλη) από την καύση του κάρβουνου στάθηκε η πρώτη αφορμή για την αναγνώριση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι μεγάλες πόλεις όπως το Cincinnati, το Chicago και το St Louis εξέδωσαν σχετικούς κανονισμούς, αναγνωρίζοντας ότι η



ευθύνη για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος είναι των τοπικών αρχών αλλά και της κεντρικής κυβέρνησης. Καθ' όλη τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα και κατά το πρώτο μισό του 20^{ου}, το θέμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θεωρούνταν τοπικό θέμα και όλες οι προσπάθειες ελέγχου της ρύπανσης στόχευαν κυρίως στον περιορισμό των εκπομπών μεγάλων βιομηχανικών μονάδων, λόγω των διαμαρτυριών των γειτονικών περιοχών. Μεταξύ του 1945-1970 αυξήθηκε κατακόρυφα η ανάγκη αναγνώρισης του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα και οι κυβερνήσεις των ΗΠΑ και των Ευρωπαϊκών κρατών άρχισαν να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με μεγαλύτερη σοβαρότητα. Το 1948 στην Donora της Πενσυλβάνια σημειώθηκε ένα επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης με καταστροφικές συνέπειες, κατά το οποίο πέθαναν 18 άνθρωποι. Σε αυτή τη βιομηχανική πόλη, κοντά στο Pittsburgh, η οποία είχε πληθυσμό 12.000 κατοίκους, λειτουργούσαν μονάδες ψευδαργύρου, χαλυβουργίας και θεικού οξέος οι οποίες εξέπεμπαν ανεξέλεγκτα στην ατμόσφαιρα ρύπους κάθε είδους. Σε κανονικές συνθήκες υπήρχε απομάκρυνση των ρύπων αυτών με τους ανέμους. Όμως λόγω πρωτοφανούς άπνοιας σε μια περίοδο 5 ημερών, η συγκέντρωση των ρύπων αυξήθηκε και έφτασε σε τέτοια επίπεδα, ώστε να αρρωστήσουν χιλιάδες άνθρωποι. Πολλοί από αυτούς μεταφέρθηκαν σε νοσοκομεία, και 18 απεβίωσαν. Παρόμοια επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης τα οποία προκάλεσαν ασθένειες ανθρώπων και θανάτους καταγράφονται και σε άλλες πόλεις (Βερύκιος, 2003).

Μετά το Β' Παγκόσμιο πόλεμο, έκανε την εμφάνισή του στα μεγάλα αστικά κέντρα και κυρίως στο Los Angeles, ένα νέο είδος ατμοσφαιρικής ρύπανσης: το φωτοχημικό νέφος, το οποίο προκαλεί ερεθισμό στα μάτια και το δέρμα και βλάβη στα φυτά. Στην αρχή επικράτησε η εντύπωση ότι το φωτοχημικό αυτό νέφος οφείλεται στα διυλιστήρια και σε άλλες παρόμοιες δραστηριότητες, αλλά κατόπιν αποδείχθηκε ότι οφείλεται, σχεδόν αποκλειστικά στις εκπομπές των αυτοκινήτων. Το φωτοχημικό νέφος έκανε σιγά σιγά την εμφάνισή του σε πολλά άλλα μητροπολιτικά κέντρα και τις τελευταίες δεκαετίες και στις ελληνικές μεγαλουπόλεις (Βερύκιος, 2003).

Στα τέλη της δεκαετίας του 80' εδραιώθηκε μια νέα ιδέα στον τομέα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης: η ιδέα της πλανητικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέχρι τότε τα περισσότερα προβλήματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θεωρούνταν τοπικά προβλήματα. Οι ρύποι είχαν σχετικά μικρό χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα ή η εκπομπή



τους ήταν τόσο μικρή που δεν προξενούσαν προβλήματα μακριά από την πηγή εκπομπής. Στη δεκαετία του 80' όμως, εμφανίστηκαν τρία προβλήματα τα οποία αφορούν ρύπους με μεγάλο χρόνο ζωής και οι οποίοι μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής τους, όπου και προξενούν βλάβες. Τα προβλήματα αυτά είναι η όξινη βροχή, η καταστροφή του στρώματος του όζοντος από τους χλωροφθοροάνθρακες και η συσσώρευση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, το οποίο οδηγεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτά τα διεθνή ή πλανητικά προβλήματα δεν μπορούν να επιλυθούν με τοπικούς ή εθνικούς νόμους και κανόνες, αλλά με παγκόσμια συλλογική προσπάθεια και έτσι μεγάλοι φορείς, όπως ο ΟΗΕ και η ΕΕ, αποφάσισαν να λάβουν μέτρα για το μετριασμό των εκλυόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων (Βερύκιος, 2003).

1.2 Είδη, παράγοντες σχηματισμού και προέλευση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα πολυδιάστατο και πολυσύνθετο πρόβλημα που δεν μπορεί να περιοριστεί σε προκαθορισμένα όρια και να αντιμετωπιστεί με συγκεκριμένες τακτικές. Αντιθέτως αποτελεί ένα ζήτημα με μεγάλη ευρύτητα και πολλές ευμετάβλητες και ακαθόριστες προεκτάσεις. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η ανθρωπότητα αντιλαμβάνεται σταδιακά με το πέρασμα των χρόνων ολοένα και εντονότερα τις αρνητικές επιπτώσεις που οφείλονται στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Παράλληλα με τα εξελιγμένα τεχνολογικά μέσα που πλέον διατίθενται για την μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δίνεται η δυνατότητα ακριβέστερων μετρήσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων. Τέλος, δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι η μακροχρόνια μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εμπλουτίζει διαρκώς τις γνώσεις μας σχετικά με την επίδρασή της στο περιβάλλον και τους οργανισμούς. Υπάρχουν πολλά κριτήρια με βάση τα οποία μπορεί να γίνει η ταξινόμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπως οι φυσικοχημικές ιδιότητες και η δράση των ρύπων, η πηγή προέλευσής τους, η δραστηριότητά τους, ο χρόνος παραμονής τους κ.α.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκύπτει από ένα ευρύ φάσμα ρύπων, οι οποίοι είτε εκπέμπονται άμεσα (πρωτογενείς ρύποι), είτε σχηματίζονται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα (δευτερογενείς ρύποι). Μεταξύ των κυριότερων ρύπων συγκαταλέγονται



τα οξείδια του θείου και του αζώτου, το μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, η αμμωνία, το μεθάνιο, οι πτητικές οργανικές ενώσεις και τα αιωρούμενα σωματίδια (Ζιώμας. & Ρεμουντάκη, 2003). Οι πηγές τους διακρίνονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές. Οι ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν κυρίως τη βιομηχανία, τις μεταφορές, τη θέρμανση κτιρίων, την καύση απορριμμάτων, την αγροτική παραγωγή και τη χρήση ορυκτών καυσίμων (Ρεμουντάκη, 2010). Από την άλλη πλευρά, οι φυσικές πηγές είναι ηφαιστειακές εκρήξεις, δασικές πυρκαγιές, σκόνη από διάβρωση, θαλάσσια σταγονίδια και κεραυνοί (Μελάς, 2007). Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται μια ταξινόμησή τους με διαφορετικά κριτήρια (Κυριαζίδης, 2022).

Πίνακας 1. Ταξινόμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Πηγή: Κυριαζίδης, 2022).

Κριτήριο ταξινόμησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης	Είδη ατμοσφαιρικής ρύπανσης
Περιβάλλον	1. Εσωτερικών χώρων 2. Εξωτερική
Προέλευση	1. Φυσική α. Γεωχημική β. Βιολογική 2. Ανθρωπογενής α. Κοινωνική β. Επαγγελματική γ. Προσωπική ρύπανση
Φυσικές ιδιότητες	1. Αέρια 2. Σωματίδια α. Λεπτά β. Μεγάλα 3. Οσμές
Χρόνος παραμονής	1. Μόνιμα αέρια 2. Μεταβλητά αέρια α. Μικροί χρόνοι ζωής β. Ημιμόνιμα
Χημική δράση	1. Χημικά ενεργά αέρια 2. Χημικά αδρανή αέρια 3. Ελεύθερες ρίζες
Προέλευση	1. Πρωτογενείς α. Πρόδρομοι 2. Δευτερογενείς
Κλίμακα	1. Τοπική-αστική 2. Περιφερειακή 3. Παγκόσμια
Δραστηριότητα	1. Ρύποι υψηλής τοξικότητας 2. Συνηθισμένοι ρύποι

Η συγκέντρωση και η εξάπλωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, η τοπογραφία της περιοχής και η φυσικοχημική σύσταση του κάθε ρύπου (Ζάνης, 2014). Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η ευστάθεια της ατμόσφαιρας καθορίζουν την κίνηση και τη διάχυση



των ρύπων (Ζιώμας. & Ρεμουντάκη, 2003).

Τέλος, σημαντικός είναι ο ρόλος των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, καθώς αυτές οδηγούν στη δημιουργία δευτερογενών ρύπων, οι οποίοι μπορεί να είναι ακόμη πιο επιβλαβείς από τους αρχικούς (Κουιμτζής και Σαμαρά, 1994). Η διάρκεια παραμονής των ρύπων στον αέρα εξαρτάται από το μέγεθος, τη χημική δραστηριότητα και τη διαλυτότητά τους (Ρεμουντάκη, 2010). Η κατανόηση της προέλευσης, των μηχανισμών μεταφοράς και της αλληλεπίδρασης των ρύπων είναι καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

1.3 Εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα

Για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όσον αφορά την Ε.Ε., επειδή ήταν ανέφικτη η πλήρη απαγόρευση εκπομπής κάθε δυνητικά επικίνδυνου ρύπου και με δεδομένο τη διατήρηση και ανάπτυξη του παρόντος βιοτικού επιπέδου, έγινε θέσπιση ανώτατων ορίων εκπομπής. Δηλαδή, καθορίστηκαν όρια εκπομπής ανά πηγή, όπως παράδειγμα οι εκπομπές του κάθε αυτοκινήτου, καθώς και όρια ανώτατης συνολικής εκπομπής για τον κάθε ρύπο, σε μια δεδομένη περιοχή και για δεδομένο χρονικό διάστημα, από το σύνολο των πηγών εκπομπής αυτού του ρύπου.

Η Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21/05/2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για την Ευρώπη ορίζει τα όρια συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων (Πίνακας 2) που είναι καθοριστικά για την ανθρώπινη υγεία. Σκοπός της είναι η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε επίπεδα που ελαχιστοποιούν τις επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η Οδηγία θέτει δεσμευτικά όρια και στόχους για τη συγκέντρωση 12 βασικών ρύπων, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10} και $PM_{2.5}$), το διοξείδιο του αζώτου (NO), το όζον (O), το διοξείδιο του θείου (SO), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το βενζόλιο, το μόλυβδο, το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο και το βενζο(α)πυρένιο.

Τα κράτη μέλη υποχρεούνται να παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα μέσω δικτύων μέτρησης, να αξιολογούν τα δεδομένα και να τα δημοσιοποιούν. Σε περιπτώσεις



υπέρβασης των ορίων, απαιτείται η εκπόνηση και εφαρμογή σχεδίων δράσης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Η ΚΥΑ 174505/607/2017 ενσωματώνει αυτόν τον πίνακα και απαιτεί τη λειτουργία των ελληνικών δικτύων μέτρησης με βάση τις μεθοδολογίες που ορίζει η ΕΕ για την παρακολούθηση αυτών των ορίων.

Πίνακας 2. Όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50.

Πηγή: Ετήσιες Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης ΕΔΠΑΡ-ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gr>; Κοφίνας, 2023).



<i>Ρύπος</i>	<i>Οριακή Τιμή</i>	<i>Όρια Έκτακτων Μέτρων – Συναγερμού</i>
<i>Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)</i>	10 mg/m³ – Μέγιστη ημερήσια οκτάωρη τιμή	
<i>Διοξείδιο του θείου (SO₂)</i>	350μg/m³ - Μέση ωριαία τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 24 φορές το έτος 125μg/m³ - Μέση ημερήσια τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 3 φορές το έτος	Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης ωριαίας τιμής των 500μg/m³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
<i>Διοξείδιο του αζώτου (NO₂)</i>	200μg/m³ - Μέση ωριαία τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 18 φορές το έτος 40μg/m³ - Μέση ετήσια τιμή	Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης ωριαίας τιμής των 400μg/m³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
<i>Αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ₁₀</i>	50μg/m³ - Μέση ημερήσια τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές το χρόνο 40μg/m³ - Μέση ετήσια τιμή	(Η κοινοτική νομοθεσία δεν διαθέτει όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια. Έτσι εκδόθηκε η ΚΥΑ 70601 (ΦΕΚ 3272Β/23.12.13), η οποία θεσμοθετεί επίπεδα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ ₁₀ , καθορίζοντας τα αντίστοιχα μέτρα.) Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης 24-ωρης τιμής των: 51-75 μg/m³ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού. 76-100 μg/m³ συστάσεις για το γενικό πληθυσμό 101-150 & >150 μg/m³ μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία



Αιωρούμενα σωματίδια $AS_{2,5}$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Οζόν (O_3)	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέγιστη ημερήσια 8ωρη μέση τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 25 φορές το χρόνο (κατά μέση τιμή) για διάστημα 3 ετών	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέση ωριαία τιμή (όριο ενημέρωσης) 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέση ωριαία τιμή (όριο συναγερμού)
Βενζόλιο (C_6H_6)	5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Βενζο(α)πυρένιο	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - Μέση ετήσια τιμή	

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.

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.

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, με την οποία εισάγονται αυστηρότερα όρια ποιότητας του αέρα (Πίνακας 3).

Αυτή η οδηγία φέρνει ριζικές αλλαγές, ευθυγραμμίζοντας τα όρια πιο κοντά στις αυστηρές συστάσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ). Η Ελλάδα, όπως και τα υπόλοιπα κράτη μέλη, έχει προθεσμία έως τις 11 Δεκεμβρίου 2026 για να ενσωματώσει τη νέα οδηγία στο εθνικό δίκαιο. Για πρώτη φορά, εισάγεται ρητά το δικαίωμα των πολιτών να διεκδικούν αποζημίωση από το κράτος, εάν αποδειχθεί ότι η υγεία τους ζημιώθηκε λόγω παράλειψης των αρχών να συμμορφωθούν με τα όρια ποιότητας του αέρα. Απαιτείται η δημιουργία περισσότερων σημείων μέτρησης και η παροχή δεδομένων στο κοινό σε πραγματικό χρόνο (near-real-time). Τα κράτη που υπερβαίνουν τα όρια σήμερα πρέπει να έχουν έτοιμους οδικούς χάρτες με



συγκεκριμένα μέτρα πολύ πριν το 2030. Έτσι, τα νέα όρια που θα ισχύσουν από το 2030 είναι σημαντικά χαμηλότερα.

Πίνακας 3. Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία 2024/2881 της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 23-10-2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gr>)

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
ΑΣ_{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
ΑΣ₁₀	
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 (*)	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

Κεφάλαιο 2: Ατμοσφαιρικοί ρύποι, οι κυριότερες πηγές και οι επιπτώσεις τους

2.1 Βασικές Έννοιες

Η ανθρωπογενής ατμοσφαιρική ρύπανση οφείλεται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων, είτε για τη θέρμανση, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε για την κίνηση των οχημάτων. Οι διάφοροι ρύποι που εκπέμπονται δεν επιβαρύνουν με τον ίδιο τρόπο την ατμόσφαιρα. Η διαφοροποίησή τους έγκειται στη χημική σύνθεσή τους, στις χημικές ιδιότητές τους, στον τρόπο που εκπέμπονται, στη χρονική διάρκεια παραμονής τους στην ατμόσφαιρα και στις επιπτώσεις που προκαλούν στο περιβάλλον και τους ζωντανούς οργανισμούς. Παρά τις όποιες διαφοροποιήσεις τους, μπορεί να ομαδοποιηθούν (Kampa & Castanas, 2008) ως εξής:

- Αέριοι ρύποι, όπως είναι το SO_2 , τα NO_x , το CO , το O_3 , οι πτητικές οργανικές ενώσεις, κ.α. Οι αέριοι ρύποι συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στις μεταβολές της σύνθεσης της ατμόσφαιρας και οφείλονται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων. Τα οξείδια του αζώτου εκπέμπονται ως NO το οποίο αντιδρά γρήγορα με το όζον σχηματίζοντας NO_2 . Επιπλέον, το όζον στα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα σχηματίζεται από μία σειρά αντιδράσεων που περιλαμβάνουν NO_2 και πτητικές οργανικές και άλλες πρόδρομες ενώσεις, μια διαδικασία που ευνοείται από την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας. Το CO , είναι προϊόν της ατελούς καύσης και προέρχεται κυρίως από τις οδικές μεταφορές. Το SO_2 προκύπτει από την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο και την τήξη μεταλλευμάτων που περιέχουν θείο. Τέλος, μια σημαντική κατηγορία ενώσεων που εκπέμπεται από τους οργανικούς διαλυτές (διαλύτες χρώματα), τη χημική και πετροχημική βιομηχανία (παραγωγή – μεταφορά – αποθήκευση – καύσεις ορυκτών καυσίμων, όπως πετρέλαιο, βενζίνη, γαιάνθρακας, φυσικό αέριο) και τις οδικές μεταφορές είναι οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Σ' αυτή την κατηγορία ενώσεων, περιλαμβάνονται και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (BTX ενώσεις δηλαδή Βενζόλιο, Τολουόλιο, Ξυλόλια, Αιθυλοβενζόλιο), που συμμετέχουν σε φωτοχημικές διαδικασίες και θεωρούνται ιδιαίτερα τοξικοί.
- Βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος, χαλκός, νικέλιο, χρώμιο κ.α. Είναι φυσικά συστατικά του φλοιού της γης, που δεν μπορούν να

υποβαθμίζονται ή να καταστραφούν. Επιπλέον, εισέρχονται στο περιβάλλον μέσω μιας μεγάλης ποικιλίας πηγών, συμπεριλαμβανομένης της καύσης, των εκροών λυμάτων και των βιομηχανιών. Σε μικρό βαθμό εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα, ως ιχνοστοιχεία, απαραίτητα για τη διατήρηση των φυσιολογικών μεταβολικών αντιδράσεων. Ωστόσο, σε υψηλότερες (αν και σχετικά χαμηλές) συγκεντρώσεις μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα τοξικά. Τα περισσότερα βαρέα μέταλλα είναι επικίνδυνα επειδή τείνουν να βιοσυσσωρεύονται στο ανθρώπινο σώμα.

- Ανθεκτικοί (έμμονοι) Οργανικοί ρύποι (Persistent Organic Pollutant, POP) είναι τοξικές χημικές ουσίες με βάση τον άνθρακα, που παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα, αντιστέκονται στη διάσπαση και συσσωρεύονται στους ζωντανούς οργανισμούς. Αυτοί οι οργανικοί ρύποι αποτελούν μια τοξική ομάδα χημικών ουσιών και αποτελούν στην ουσία παραπροϊόντα των διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών. Επειδή παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλες χρονικές περιόδους μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω του αέρα και του νερού, μολύνοντας περιοχές μακριά από την πηγή εκπομπής τους και έτσι προκαλούν σοβαρές βλάβες στην υγεία ανθρώπων και ζώων, προκαλούν σημαντική υποβάθμιση του περιβάλλοντος και τα αποτελέσματά τους μεγεθύνονται καθώς καθώς ανεβαίνουν στην τροφική αλυσίδα (από τα φυτά στα ζώα και στον άνθρωπο, βιο-μεγέθυνση). Περιλαμβάνουν φυτοφάρμακα, διοξίνες και φουράνια, υπερφθοροαλκυλιωμένες ουσίες (PFAS) και PCB (Polychlorinated Biphenyls - πολυχλωριωμένα διφαινύλια). Οι διοξίνες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της ατελούς καύσης από βιομηχανική δραστηριότητα, τη λεύκανση χαρτιού, και κυρίως από την καύση απορριμμάτων που περιέχουν χλώριο ή πλαστικά PVC. Οι διοξίνες εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα όπου βιοσυσσωρεύονται λόγω της ικανότητάς τους να συνδέονται με τα λιπίδια και έτσι να αποθηκεύονται στα λίπη των ζώων και των ανθρώπων. Έχουν χαρακτηριστεί ως καρκινογόνες ουσίες και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο αναπαραγωγικό και ανοσοποιητικό σύστημα.

2.2 Πηγές Αέριων Ρύπων

Οι εκπομπές διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων προέρχονται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Οι φυσικές πηγές, σε παγκόσμια κλίμακα, εκπέμπουν μεγαλύτερες ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων από αυτές οι οποίες προέρχονται από



ανθρωπογενείς πηγές. Αυτές οι φυσικές πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων είναι κυρίως οι δασικές πυρκαγιές, οι ηφαιστειακές εκρήξεις, η εξάτμιση των υγρών σωματιδίων από τη θάλασσα, η διάβρωση του εδάφους, αλλά και η βιογενής ύλη (Ρεμουντάκη, 2010). Όμως, σε τοπικό επίπεδο τα προβλήματα εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης προκαλούνται κυρίως από τις συγκεντρώσεις των ρύπων, στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι οποίες έχουν ανθρωπογενή προέλευση. (Seinfeld and Pandis, 2006). Οι κυριότερες πηγές αφορούν διεργασίες που πραγματοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την οικιακή θέρμανση, τα μέσα μεταφοράς, τις βιομηχανικές δραστηριότητες και τις γεωργικές, εξορυκτικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες (Cooper & Alley, 2004; Βερύκιος, 2003).

Οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπων μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις σταθερές και τις κινητές πηγές. Οι σημαντικότερες σταθερές πηγές περιλαμβάνουν: τις μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας, εγκαταστάσεις στις οποίες γίνονται χημικές διεργασίες, μεταλλουργία, βιομηχανίες πετρελαίου και άλλες βιομηχανίες, όπως η χρήση διαλυτών, η διαχείριση αποβλήτων, η θέρμανση κτιρίων, ενώ οι κινητές πηγές ρύπων αφορούν τις εκπομπές από τα οχήματα (Μελάς, 2007).

Στις κύριες αυτές κατηγορίες εκπομπών μπορούν να προστεθούν και άλλες μικρότερες πηγές, οι οποίες έχουν και αυτές με τη σειρά τους ιδιαίτερη συνεισφορά στο συνολικό πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως είναι η σωματιδιακή ύλη που εκπέμπεται από την τριβή των ελαστικών των αυτοκινήτων (Γεντεκάκης, 2010).

Όσον αφορά τα κριτήρια καθορισμού των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων είναι οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία, τη φύση αλλά και το περιβάλλον και σύμφωνα με αυτά ατμοσφαιρικοί ρύποι-κριτήρια μπορούν θεωρηθούν τα οξείδια του αζώτου, τα αιωρούμενα σωματίδια, το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, αλλά και οι πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs (Βερύκιος, 2003; Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003; Ζάνης, 2014).

Τα αιωρούμενα σωματίδια και τα NO_x, με τα οποία θα ασχοληθούμε στη μελέτη περίπτωσης αυτής της εργασίας, θα συζητηθούν αναλυτικά στην επόμενη υποενότητα.

2.2.1 Αιωρούμενα Σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αποτελούν στη σημερινή εποχή ένα από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους κριτήρια για την ποιότητα του αέρα τοπικών και

περιφερειακών περιοχών, με σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στην υποβάθμιση του φυσικού και του αστικού περιβάλλοντος, αλλά και με ουσιώδη συμβολή στην κλιματική αλλαγή (Seinfeld and Pandis, 2006; Ζάνης, 2014). Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια διακρίνονται, σε σχέση με την προέλευσή τους, σε δύο μεγάλες κατηγορίες στα πρωτογενή και στα δευτερογενή. Τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται απευθείας από την πηγή, όπως είναι για παράδειγμα η κίνηση των οχημάτων ή η επαναιώρηση της σκόνης, ενώ τα δευτερογενή σωματίδια σχηματίζονται εντός της ατμόσφαιρας μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων μεταξύ ρύπων, όπως πχ τα νιτρικά και θειικά άλατα, που σχηματίζονται σε αστικά κέντρα από αντιδράσεις κυρίως των SO_x και NO_x (Cooper & Alley, 2004; Βερύκιος 2003).

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών σωματιδίων είναι το μέγεθός τους το οποίο σχετίζεται με την πηγή από την οποία προέρχονται και τις επιπτώσεις που προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατηγοριοποιούνται με βάση την κατανομή επιφάνειας και το μέγεθός τους και το φυσικοχημικό μηχανισμό σχηματισμού τους (Cooper & Alley, 2004; Seinfeld and Pandis, 2006). Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η παράμετρος που τα κατηγοριοποιεί στις παρακάτω κύριες κατηγορίες, σε σχέση με το μέγεθός τους:

- Ολικά Αιωρούμενα Στερεά, που είναι το σύνολο όλων των στερεών σωματιδίων και των σταγονιδίων, τα οποία ποικίλουν σε μέγεθος από περίπου $0,002 \mu\text{m}$ έως και μερικές δεκάδες μm ($\sim 100 \mu\text{m}$).
- PM_{10} : διαμέτρου μικρότερης των $10 \mu\text{m}$ (χονδρόκοκκα σωματίδια)
- $\text{PM}_{10-2,5}$: διαμέτρου μικρότερης των $10 \mu\text{m}$ και μεγαλύτερης των $2,5 \mu\text{m}$ (χονδρόκοκκα σωματίδια)
- $\text{PM}_{2,5}$: διαμέτρου μικρότερης των $2,5 \mu\text{m}$ (λεπτόκοκκα σωματίδια)
- PM_1 : διαμέτρου μικρότερης των $1 \mu\text{m}$ (υπέρλεπτα σωματίδια-ultrafine particles)
- Νανোসωματίδια (nanoparticles), που έχουν μέγεθος μικρότερο από τα υπέρλεπτα σωματίδια, με διαστάσεις που κυμαίνονται συνήθως από $0,001$ έως $0,05 \mu\text{m}$.

Τα μεγάλα αστικά κέντρα φαίνεται πλέον πως παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων του ρύπου των PM , λόγω του υψηλού βαθμού αστικοποίησης και μεγάλης κίνησης των οχημάτων. Σύμφωνα με την τελευταία επιστημονική έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environmental Agency - EEA), ένα μεγάλο ποσοστό των ευρωπαϊκών πόλεων



εξακολουθεί να εμφανίζει υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ορίων των προτύπων ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, όσον αφορά τα δύο κλάσματα των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, με την πλειονηφία των παρατηρούμενων υπερβάσεων να εντοπίζεται κυρίως στην Ανατολική, στη Νότια Ευρώπη και στην περιοχή των Βαλκανίων (EEA, 2026). Η έλλειψη προόδου από πλευράς των εθνικών ή περιφερειακών κυβερνήσεων σχετικά με την επίτευξη των οριακών τιμών των PM δεν συνδέεται πάντοτε με την απουσία μέτρων άμβλυνσης του υπάρχοντος περιβαλλοντικού προβλήματος, αλλά και με την εγγενή δυσκολία στον έλεγχο ενός ρύπου με τόσο διαφορετικές πηγές και μηχανισμούς σχηματισμού (Diapouli et al., 2017; Paraskevopoulou et al., 2015). Τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται συνήθως σε αστικές περιοχές αποτελούνται κυρίως από σωματίδια προερχόμενα από διεργασίες ατελούς καύσης των εκπομπών λόγω της κίνησης, αλλά και της τριβής των ελαστικών των πάσης φύσεως οχημάτων (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003; Μελάς, 2007). Επίσης, υπάρχουν διάφορα συσσωματώματα τα οποία δημιουργούνται από συμπύκνωση και πήξη και να επισημανθεί ακόμα, ότι υπάρχει ένας συνεχής κύκλος δημιουργίας μικρών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, των οποίων το μέγεθος αυξάνεται και τελικά όταν αποκτήσουν αρκετά μεγάλο μέγεθος παρατηρείται απομάκρυνση τους από την ατμόσφαιρα, μέσω υγρής ή ξηρής εναπόθεσης (Γεντεκάκης, 2010). Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι εκπομπές κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών και των εκρήξεων ηφαιστειών, οι εκπομπές από την επιφάνεια και τη διάβρωση του εδάφους, τη μεταφορά σκόνης από ερήμους, τις ανεμοθύελλες, τη βιογενή ύλη, την εξάτμιση από τους ωκεανούς (θαλάσσια σταγονίδια), κλπ (Βερόκιος 2003).

Οι συγκεντρώσεις των PM φαίνεται πως επηρεάζονται από την εποχικότητα. Στην πραγματικότητα, τα επίπεδα των PM στο περιβάλλον αστικών περιοχών τείνουν να είναι υψηλότερα το χειμώνα, σε σχέση με το καλοκαίρι, εξαιτίας κυρίως των εκπομπών από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και η θέρμανση κτιρίων) που συνδυάζονται με δυσμενείς καιρικές συνθήκες (όπως η επικράτηση αντικυκλωνικών συνθηκών που περιορίζουν τη μεταφορά ρυπασμένων αέριων μαζών σε μεγάλες αποστάσεις (Flocas, et al., 2009; Kassomenos et al., 2011). Η μετεωρολογία φαίνεται, λοιπόν, να αποτελεί ένα σημαντικό και πολύ καθοριστικό παράγοντα στη διαμόρφωση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του ρύπου των PM

στον ατμοσφαιρικό αέρα, αφού οι διεργασίες διασποράς, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης και οι διαδικασίες του χημικού σχηματισμού των ατμοσφαιρικών σωματιδίων εξαρτώνται από μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η βροχόπτωση και η ηλιακή ακτινοβολία (Πετρακάκης κ.ά., 2008; Χαϊνά, 2014). Γενικά, τα ατμοσφαιρικά σωματίδια εκπροσωπούν ένα πολυσύνθετο μείγμα ανόργανων και εκατοντάδων διαφορετικών οργανικών ενώσεων, οι ιδιότητες των οποίων, όπως είναι το μέγεθος και η χημική σύσταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των πηγών τους, αλλά και του τρόπου σχηματισμού τους (Τσέζος & Ρεμουντάκη, 2010).

2.2.2 Διοξείδιο του Αζώτου (NO_2) – Μονοξείδιο του Αζώτου (NO)

Η φωτοχημική ρύπανση είναι μια μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που εμφανίζεται συχνά στα μεγάλα αστικά κέντρα και οφείλεται στη συσσώρευση αέριων ρύπων, οι οποίοι προέρχονται κυρίως από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων, τη βιομηχανία και τη διακίνηση των καυσίμων. Το φωτοχημικό νέφος οφείλεται κυρίως στα οξείδια του αζώτου, τους υδρογονάνθρακες το μονοξείδιο του άνθρακα και το όζον. Έτσι, όταν στην ατμόσφαιρα συνυπάρχουν οξείδια του αζώτου, όζον, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες (πρόδρομοι ρύποι), παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ξεκινούν φωτοχημικές αντιδράσεις (Cooper & Alley, 2004; Seinfeld and Pandis, 2006). Δύο από τα κυριότερα οξείδια του αζώτου που θεωρούνται υπεύθυνα για την φωτοχημική ατμοσφαιρική ρύπανση είναι το μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου. Η οδική κυκλοφορία και οι διεργασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ορυκτών καυσίμων αποτελούν τις κύριες πηγές εκπομπών οξειδίων του αζώτου ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) σε αστικές περιοχές (Γεντεκάκης, 2010).

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι αέριο άχρωμο, άγευστο και άοσμο που προκύπτει από την καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας (πετρέλαιο, βενζίνη, φυσικό αέριο, γαιάνθρακας κ.α.). Κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις που έχουν εγκαταστάσεις καύσης, οι εγκαταστάσεις θέρμανσης και οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. 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. Λόγω της φωτοχημικής οξειδωσής του από



το όζον (O_3) μετατρέπεται αμέσως σε διοξείδιο του αζώτου (NO_2) (Βερύκιος, 2003; Μελάς, 2007; Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

Εκτός από τις ανθρωπογενείς πηγές εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου παρατηρούνται εκπομπές και από φυσικές πηγές με σημαντικότερες την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και τη θάλασσα. Άλλες φυσικές πηγές αποτελούν οι μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται στους φυτικούς μικροοργανισμούς, με τα βακτήρια να συμβάλλουν στη δημιουργία του μέσω βιολογικών διεργασιών, οι δασικές πυρκαγιές και σε μικρότερο βαθμό οι αστραπές (Μελάς, 2007).

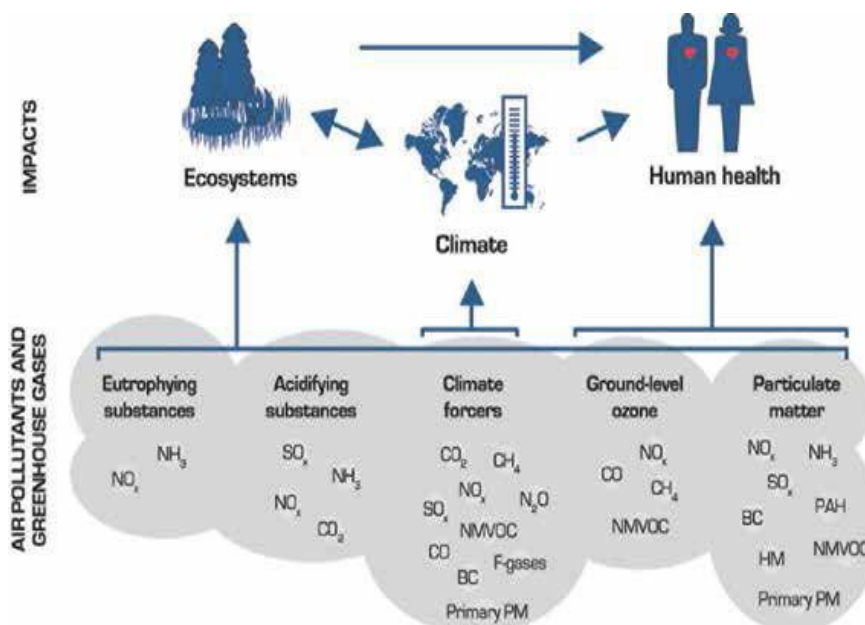
Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) είναι αέριο τοξικό, διαβρωτικό, με καφεκίτρινο χρώμα και με ιδιαίτερα έντονη οσμή. Βασική ανθρωπογενής πηγή διοξειδίου του αζώτου αποτελεί η καύση ορυκτών καυσίμων στις μηχανές εσωτερικής καύσης στα οχήματα, στη βιομηχανία και στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Βερύκιος, 2003; Μελάς, 2007). Ακόμη, η οικιακή θέρμανση θεωρείται πηγή εκπομπών του NO_2 . Επίσης, ένα μέρος του παραγόμενου διοξειδίου του αζώτου προκύπτει από τη φωτοχημική οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου, που προκύπτει από τις μηχανές εσωτερικής καύσης το οποίο στην συνέχεια οξειδώνεται και παράγεται διοξείδιο του αζώτου. Έτσι, το NO_2 αποτελεί μία πρόδρομη ένωση του φωτοχημικού νέφους. Υπολογίζεται ότι το πρωτογενώς παραγόμενο από μηχανές εσωτερικής καύσης διοξείδιο του αζώτου αποτελεί περίπου το 10%-15% των συνολικά παραγόμενων οξειδίων του αζώτου (Γεντεκάκης, 2010; YPIEN, 2025; Seinfeld and Pandis, 2006). Από τα προαναφερόμενα προκύπτει ότι η παρουσία διοξειδίου του αζώτου συσχετίζεται άμεσα με τις εκπομπές στα αστικά κέντρα και γίνεται εντονότερη τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς ενισχύεται από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τους μετασχηματισμούς από τις φωτοχημικές αντιδράσεις (Βερύκιος, 2003; Ζάνης, 2014; Παρασχά, 2014; Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

Σε μεγάλες συγκεντρώσεις το διοξείδιο του αζώτου συνδέεται με καρδιαγγειακά νοσήματα και αναπνευστικά προβλήματα ιδιαίτερα σε άτομα με επιβαρυνμένο ιστορικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το διοξείδιο του αζώτου μετασχηματίζεται νιτρικό οξύ που είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό όταν υγροποιηθεί κατά την είσοδο του μέσω της αναπνευστικής οδού (Βερύκιος, 2003; Παρασχά, 2014). Τα οξείδια του αζώτου και ειδικότερα το διοξείδιο του αζώτου θεωρείται ένας από τους κύριους υπεύθυνους για τη δημιουργία της όξινης βροχής που καταστρέφει τα δάση και τη μόλυνση των

λιμνών και ποταμών και προκαλεί τη διάβρωση των μαρμάρων συμβάλλοντας έτσι στην καταστροφή τους (Cooper & Alley, 2004; Seinfeld and Pandis, 2006).

2.3 Επιπτώσεις της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό και πολυδιάστατο πρόβλημα, που σχετίζεται με σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον και στο κλίμα (Kampa & Castanas, 2008). Ειδικότερα, η ατμοσφαιρική ρύπανση προσβάλλει την υγεία των ανθρώπων καθώς θεωρείται υπεύθυνη για μεγάλο πλήθος ασθενειών και για πρόωρους θανάτους, καταστρέφει το περιβάλλον και συντελεί στην αλλοίωση του κλίματος (EEA, 2026). Οι συνέπειες για την παγκόσμια οικονομία είναι τεράστιες, όπως ανεπανόρθωτες είναι και οι επιπτώσεις στην κοινωνική ζωή (Βερύκιος, 2003).



Εικόνα 1. Οι επιπτώσεις των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία, στο περιβάλλον και στο κλίμα (Πηγή: European Environmental Agency, 2026).

Η έκταση της συντελούμενης καταστροφής από τους κινδύνους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθορίζεται από ποικίλες παραμέτρους. Η συγκέντρωση και η τοξικότητα των ατμοσφαιρικών ρύπων, η δόση και ο χρόνος έκθεσης σ' αυτούς και το γεγονός ότι η έκθεση αφορά περισσότερο μείγμα ατμοσφαιρικών ρύπων, παρά μεμονωμένες ουσίες, καθορίζουν και το μέγεθος των επιπτώσεων στην υγεία, το περιβάλλον και το κλίμα (Cooper & Alley, 2004; Seinfeld and Pandis, 2006; Βερύκιος, 2003). Στην

Εικόνα 1 παρατηρούνται οι επιπτώσεις των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία, στο περιβάλλον και στο κλίμα (ΕΕΑ, 2026).

2.3.1 Επιπτώσεις στην Υγεία του Ανθρώπου

Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία εκδηλώνονται με πολλούς τρόπους, από ναυτία και δύσπνοια ή ερεθισμό του δέρματος μέχρι καρκίνο (Katsouyanni, 2003). Επιπλέον, συμπεριλαμβάνουν γενετικές ανωμαλίες, σωματικές αναπηρίες, σοβαρές αναπτυξιακές διαταραχές στα παιδιά και τέλος μειωμένη αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος, που οδηγεί στην εκδήλωση μιας σειράς ασθενειών (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην υγεία. (Πηγή: Κυριαζίδης, 2022).

Ατμοσφαιρικός ρύπος	Επιπτώσεις που προκαλεί στην υγεία
SO ₂	- Ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος (βήχας) - Επιδείνωση υφιστάμενων πνευμονικών παθήσεων - Προκαλεί καρδιαγγειακές παθήσεις
NO ₂	- Συνδέεται με αναπνευστικά προβλήματα - Ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος - Προκαλεί καρδιαγγειακές παθήσεις
Αιωρούμενα σωματίδια	- Προσβάλλουν το αναπνευστικό σύστημα - Τα PM₁₀ προσβάλλουν το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, προκαλούν ερεθισμό στη μύτη και τον λαιμό, βρογχίτιδα) - Τα PM_{2.5} προσβάλλουν τους πνεύμονες. - Προκαλεί καρδιαγγειακές παθήσεις - Προσβάλλουν το ανοσοποιητικό σύστημα - Σχετίζονται με εκδήλωση καρκίνου - Επιδρούν στο νευρικό σύστημα αν μεταφέρουν τοξικές ουσίες.
CO	- Συχετίζεται με την μειωμένη μεταφορά οξυγόνου στα όργανα - Επηρεάζει το καρδιαγγειακό σύστημα - Επηρεάζει το νευρικό σύστημα - Προκαλεί ζάλη, πνευματική και σωματική κόπωση, πονοκέφαλο
VOCs	- Σχετίζονται με εκδήλωση καρκίνου - Προκαλούν ερεθισμό - Προκαλούν πονοκεφάλους, κόπωση, ερεθισμό στα μάτια και το δέρμα - Επηρεάζουν το νευρικό σύστημα - Έχουν αρνητικές αναπτυξιακές επιδράσεις
O ₃	- Προκαλούν ερεθισμό στα μάτια - Προκαλούν άσθμα, βήχα, δύσπνοια, ερεθισμό το λαιμού. - Προκαλεί αναπνευστικές παθήσεις, βρογχίτιδα.
Μόλυβδος	- Προκαλεί βλάβες στο νευρικό σύστημα - Προκαλεί βλάβες στο νευρικό σύστημα - Επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη των παιδιών

Περισσότερο εκτεθειμένοι στην ατμοσφαιρική ρύπανση θεωρούνται οι υπερήλικες και τα άτομα που πάσχουν από υπερκείμενα νοσήματα. Ακόμη, ευαίσθητες ομάδες, εκτεθειμένες στη μεγάλη αστική ατμοσφαιρική ρύπανση, αποτελούν τα παιδιά και οι γυναίκες κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης (Αλμπάνης, 2009). Οι επιπτώσεις θα μπορούσαν να διακριθούν σε άμεσες και έμμεσες, οξείες και χρόνιες, μη καρκινικές



και καρκινικές. Η παρατήρηση των επιδημιολογικών δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα που επηρεάζονται περισσότερο είναι το αναπνευστικό και το καρδιαγγειακό, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η πιθανότητα να επηρεαστεί η λειτουργία και άλλων οργάνων (Βερύκιος, 2003; Kampa & Castanas, 2008).

Όσον αφορά το αναπνευστικό σύστημα, πολυάριθμες μελέτες που έχουν γίνει περιγράφουν ότι, υψηλές συγκεντρώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μπορούν να επηρεάσουν τους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος. Παρόμοια αποτελέσματα διαπιστώνονται μετά από μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ερεθισμός της μύτης και του λαιμού που συχνά συνοδεύονται από δύσπνοια, ιδιαίτερα σε άτομα με ιστορικό άσθματος, εμφανίζονται συνήθως μετά από έκθεση σε αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου και ορισμένων βαρέων μετάλλων (Βερύκιος, 2003). Έτσι, το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια που διεισδύουν στο κυψελιδικό επιθήλιο προκαλούν φλεγμονή των πνευμόνων που, ιδιαίτερα σε ασθενείς με ιστορικό σε πνευμονικές παθήσεις, επιδεινώνει την κατάστασή τους. Αναφορικά με τα αιωρούμενα σωματίδια, τα πιο επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπινου οργανισμού είναι τα λεπτά και τα υπέρλεπτα σωματίδια, καθώς η αεροδυναμική τους διάμετρο είναι κατάλληλη να διεισδύσει, μέσω της αναπνοής, βαθιά στο αναπνευστικό επιθήλιο και στις πνευμονικές κυψελίδες (Μελάς, 2007). Ειδικά το όζον προκαλεί αύξηση των εισαγωγών στα νοσοκομεία, λόγω αναπνευστικών προβλημάτων, αλλαγές στην πνευμονική λειτουργία, φλεγμονή των αεραγωγών, εμφάνιση άσθματος και αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης καρκίνου του πνεύμονα (Cooper & Alley, 2004). Επιπλέον, τα οξείδια του αζώτου αυξάνουν την ευαισθησία σε λοιμώξεις του αναπνευστικού. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις, οι διοξίνες και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες θεωρούνται ατμοσφαιρικοί ρύποι επικίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία, γιατί προκαλούν αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης διαφόρων μορφών καρκίνου (Vlachokostas et al., 2012). Τέλος, η χρόνια έκθεση σε ορισμένα βαρέα μέταλλα μειώνει τη λειτουργία των πνευμόνων, τα οποία επίσης θεωρούνται υπεύθυνα για άσθμα, εμφύσημα και για καρκίνο του πνεύμονα (Kampa & Castanas, 2008).

Εξίσου σημαντική είναι η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο καρδιαγγειακό σύστημα. Έτσι, το μονοξείδιο του άνθρακα προκαλεί δηλητηρίαση αν προσληφθεί σε μεγάλες συγκεντρώσεις μέσω του αναπνευστικού, καθώς μειώνει την ικανότητα του



αίματος να δεσμεύει και να μεταφέρει οξυγόνο. Η μείωση λήψης οξυγόνου από τον οργανισμό έχει σημαντικές επιπτώσεις στην καρδιακή λειτουργία (Βερύκιος, 2003). Ο ατμοσφαιρικός αέρας που έχει επιβαρυνθεί από αιωρούμενα σωματίδια ενδέχεται να ενεργοποιήσει βιολογικούς μηχανισμούς, όπως θρόμβωση και αρρυθμίες, ενώ το διοξείδιο του αζώτου μπορεί να προκαλέσει ταχυπαλμία, υπέρταση και καρδιακή αρρυθμία, που μπορεί να υποκινήσουν ένα καρδιαγγειακό επεισόδιο (Cooper & Alley, 2004). Γενικά, οι παράγοντες που καθορίζουν πόσο θα είναι επιρρεπής ο πληθυσμός στην έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η ηλικία, το φύλο, η διατροφή, το ιατρικό ιστορικό, οι μετεωρολογικές συνθήκες το διάστημα της έκθεσης, καθώς και η ευρύτερη κοινωνική και οικονομική κατάσταση του πληθυσμού (Kampa & Castanas, 2008).

2.3.2 Επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο αστικό περιβάλλον

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για την ατμοσφαιρική ρύπανση «Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η παρουσία στην εξωτερική ατμόσφαιρα ενός ή περισσότερων ουσιών ή ρύπων σε ποσότητες οι οποίες είναι ή μπορεί να είναι επιβλαβείς ή επιζήμιες για την ανθρώπινη υγεία, η ευεξία, για την ύπαρξη των ζώων και των φυτών, ή των περιουσιών, ή αδικαιολόγητα παρεμβαίνουν στις απολαύσεις της ζωής και της περιουσίας, συμπεριλαμβανομένης και της υπαίθριας αναψυχής» (Cooper & Alley, 2004). Οι βασικές πηγές από τις οποίες προκαλείται η ανθρωπογενής ατμοσφαιρική ρύπανση είναι, τα μέσα μεταφοράς, η θέρμανση κτιρίων, οι διεργασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι τσιμεντοβιομηχανίες και τα διυλιστήρια, οι μη ελεγχόμενες καύσεις και οι βιομηχανικές και οι γεωργικές δραστηριότητες (Βερύκιος, 2003; Γεντεκάκης, 2010). Όμως, εκτός από τις βασικές αυτές εκπομπές υπάρχουν μερικές δευτερεύουσες πηγές ανθρωπογενών εκπομπών, οι οποίες είναι πολύ σημαντικές. Ένα χαρακτηριστικό τέτοιο παράδειγμα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από τα ελαστικά των αυτοκινήτων κατά την πέδηση, ή από τις διαδικασίες κατασκευής δρόμων, οικοδομών και συγκροτημάτων και γενικά οι κατασκευαστικές δραστηριότητες (Μελάς, 2007). Επίσης, στις πηγές αυτές περιλαμβάνεται το κάπνισμα που αποτελεί πηγή ρύπανσης κυρίως για τους εσωτερικούς χώρους, η χρήση προϊόντων υπό μορφή αεροζόλ, οι εξατμιζόμενοι πτητικοί υδρογονάνθρακες, κλπ (Seinfeld & Pandis, 2006).



Το φαινόμενο είναι πιο σύνθετο σε επίπεδο αστικής κλίμακας καθώς μπορούμε να διακρίνουμε δύο διαφορετικές κατηγορίες ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η μία σχετίζεται με την έκλυση πρωτογενών ρύπων, δηλαδή ρύπων που εκλύονται απευθείας από τις πηγές και άρα η χημική τους σύσταση είναι από πριν γνωστή. Η δεύτερη έχει να κάνει με τους δευτερογενείς ρύπους, οι οποίοι προέρχονται από την μετατροπή των πρωτογενών ρύπων, μέσω χημικών αντιδράσεων και μετασχηματισμών, που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα. Οι δευτερογενείς ρύποι έχουν πιο πολύπλοκη χημική σύσταση, ενώ η συγκέντρωσή τους εξαρτάται και από την γενικότερη σύσταση της ατμόσφαιρας της κάθε περιοχής (Cooper & Alley, 2004). Οι ρύποι που θεωρούνται σχετικά αδρανείς από άποψη μετατροπών, όπως είναι για παράδειγμα το μονοξειδίο του άνθρακα, παράγονται μέσω της συνεισφοράς πολλών μεμονωμένων πηγών και παρουσιάζονται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στις αστικές περιοχές και ιδιαίτερα σε τοπική κλίμακα. Η συγκέντρωση των ρύπων αυτής της κατηγορίας μπορεί να φθάσει σε επικινδυνά επίπεδα ιδίως όταν επικρατούν συνθήκες άπνοιας ή/και φαινόμενα θερμοκρασιακής αναστροφής, οπότε έχουμε μείωση του ύψους ανάμιξης των ρύπων (Χαϊνά, 2014). Ένα ακόμη πρόβλημα που παρατηρείται σε επίπεδο αστικής κλίμακας είναι ο σχηματισμός δευτερογενών ρύπων, όπως το όζον, που είναι βασικός δείκτης της φωτοχημικής ρύπανσης, το οποίο δημιουργείται από τις φωτοχημικές αντιδράσεις, μεταξύ των οξειδίων του αζώτου, υδρογονανθράκων και άλλων πρόδρομων ρύπων, που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα των πόλεων (Ζάνης, 2014).

Εκτός από την υγεία του ανθρώπου, η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι επιβλαβής και για τα οικοσυστήματα. Τα φυτά και οι καλλιέργειες επηρεάζονται άμεσα και αυτό γίνεται αμέσως ορατό από την ασθενική όψη των φύλλων και την αραίωση του φυλλώματός τους. Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπλοκάρει το μεταβολισμό των φυτών και επιφέρει μεταβολές στη φωτοσυνθετική τους ικανότητα και κατά συνέπεια στην ανάπτυξή τους. Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι που ευθύνονται για αυτή την κατάσταση στα φυτικά είδη είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x) και το όζον (O_3) (Ρεμουντάκη, 2010). Η σταδιακή εξασθένηση της βλάστησης δημιουργεί έναν φαύλο κύκλο, όπου η μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας περιορίζει τελικά τις δυνατότητες του αστικού πρασίνου στην προστασία του οικοσυστήματος (Seinfeld & Pandis, 2006).



Πέρα από τον άνθρωπο, την χλωρίδα και την πανίδα η ατμοσφαιρική ρύπανση επιδρά και στα υλικά, όπως είναι για παράδειγμα τα υλικά κατασκευής των κτιρίων, οι μεταλλικές κατασκευές, οι εγκαταστάσεις κτλ. Έτσι, όσον αφορά το δομημένο περιβάλλον, οι κυριότεροι ρύποι που επιφέρουν διάβρωση και οξείδωση των επιφανειών είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, το CO_2 και το όζον (O_3) (Βερύκιος, 2003; Γεντεκάκης, 2010). Για παράδειγμα, το διοξείδιο του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα οξειδώνει τις επιφάνειες από μέταλλο ή από υλικά, όπως ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος. Επιπρόσθετα, το SO_2 , στην οξειδωμένη μορφή των θεικών ιόντων εμπεριέχεται στις σταγόνες της βροχής και μετατρέπει τις μαρμάρινες επιφάνειες και όσες περιέχουν ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σε θεικό ασβέστιο (γύψο- CaSO_4) και αποτελεί σημαντική αιτία καταστροφής των αρχαίων μνημείων και των γλυπτών (Cooper & Alley, 2004). Ακόμη, τα SO_x σχετίζονται με αλλοιώσεις των χρωμάτων στις βαφές, καθώς και καταστροφές στα υφάσματα, στο βαμβάκι, στο λινό και στο τεχνητό μετάξι. Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, είναι αρκετά σύνηθες τα κτίρια να καλύπτονται από αιθάλη, να υπάρχουν λερωμένα παράθυρα στα κτίρια και να υπάρχουν διαβρωμένες μεταλλικές επιφάνειες, κτλ. Τα αιωρούμενα σωματίδια όταν επικάθονται στα υλικά αντικείμενα μπορούν να προκαλέσουν χημική διάβρωση, μέσω ουσιαστικά αντιδράσεων ηλεκτροχημικής φύσεως. Όταν δημιουργούνται συνθήκες σημαντικών συγκεντρώσεων όξινων ή αλκαλικών σωματιδίων, υπό συνθήκες υψηλής υγρασίας, τότε ο βαθμός της διάβρωσης επιταχύνεται (Seinfeld & Pandis, 2006). Έτσι, εκτός από τις πολύπλευρες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, η σωματιδιακή ρύπανση αποτελεί βασικό παράγοντα αλλοίωσης των ιστορικών μνημείων. Τα σωματίδια που προέρχονται από τις διάφορες καύσεις περιέχουν οξείδια μετάλλων, όπως ο σίδηρος, τα οποία δρουν καταλυτικά στην οξείδωση του ατμοσφαιρικού SO_2 . Αυτή η διαδικασία επιταχύνει την αντίδραση του θείου με το ανθρακικό ασβέστιο του μαρμάρου, παρουσία υγρασίας και οξυγόνου, με τελικό προϊόν τη δημιουργία γύψου (Γεντεκάκης, 2010). Έτσι, τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την καύση πετρελαίου και άνθρακα, δεν επικάθονται απλώς στην επιφάνεια των μνημείων, αλλά εγκλωβίζονται σ' αυτό το στρώμα γύψου, σχηματίζοντας μια μαύρη κρούστα και έτσι προκαλούν σημαντική φθορά των υλικών των ιστορικών μνημείων (Ρεμουντάκη, 2010). Επίσης, ορισμένα δομικά υλικά όπως είναι η πέτρα, το μάρμαρο, τα τσιμέντα παρουσιάζουν αλλοίωση με το χρόνο σε



περιβάλλον όπου υπάρχουν οξείδια του αζώτου σε υψηλές συγκεντρώσεις (Βερύκιος, 2003).

Από την άλλη το CO₂ με την παρουσία υγρασίας σχηματίζει ανθρακικό οξύ, το οποίο έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τον ασβεστόλιθο σε όξινο ανθρακικό άλας, το οποίο είναι υδατοδιαλυτό και απομακρύνεται με την βροχή. Όμως, εξαιτίας του μηχανισμού αυτού προκαλείται φθορά στα μαρμάρινα έργα τέχνης. Το φωτοχημικό νέφος, και ιδίως το κύριο οξειδωτικό του που είναι το όζον, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη στα ελαστικά των οχημάτων (Μελάς, 2007).

2.3.3 Επιπτώσεις στο Κλίμα

Η ρύπανση του περιβάλλοντος συμβάλει καταλυτικά στη διαμόρφωση του κλίματος. Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, λόγω της αύξησης των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων, που το προκαλούν, με βασικότερο το διοξείδιο του άνθρακα, εγκλωβίζουν την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και την υπερθέρμανση του πλανήτη (Ρεμουντάκη, 2010). Τις τελευταίες δεκαετίες διαπιστώνονται προοδευτικά με έντονο τρόπο οι καταστροφικές συνέπειες αυτού του φαινομένου. Η ανύψωση της επιφάνειας της στάθμης των θαλασσών, το λιώσιμο των πάγων, η ενίσχυση του ρυθμού ερημοποίησης των εδαφών, η συχνότητα και η ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως η αύξηση της συχνότητας των έντονων βροχοπτώσεων αποτελούν επακόλουθα αυτού του φαινομένου (Ζάνης, 2014). Επιπρόσθετα, η κλιματική αλλαγή και το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, φαίνεται να συνδέονται στενά, εξαιτίας του γεγονότος ότι διάφοροι ατμοσφαιρικοί ρύποι αλληλεπιδρούν με αέρια του θερμοκηπίου, προκαλώντας σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε τοπική, περιφερειακή, αλλά και σε παγκόσμια κλίμακα (Seinfeld & Pandis, 2006).

Επίσης, σε διάφορες περιοχές, τα αερολύματα μειώνουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τη θάλασσα, μεταβάλλοντας το προφίλ της θέρμανσης στην χαμηλότερη τροπόσφαιρα, ενώ η ψύξη που δημιουργείται εκτιμάται ότι είναι πέντε φορές πιο μεγάλη από τη θέρμανση που προκαλούν τα αέρια του θερμοκηπίου. Ακόμη, σύμφωνα με δορυφορικές παρατηρήσεις, τα αερολύματα προκαλούν σημαντικές διαταραχές στη μικροδομή των σύννεφων και συμβάλλουν στη μείωση των βροχοπτώσεων. Συνεπώς, διαπιστώνουμε ότι τα αερολύματα ενδέχεται να επηρεάζουν



διάφορα χαρακτηριστικά του κλίματος, στα οποία συμπεριλαμβάνεται και ο περιφερειακός κύκλος του νερού (EEA, 2026).

Ωστόσο, η παγκόσμια κοινότητα, τις τελευταίες δεκαετίες, προσπαθεί με συντονισμένες ενέργειες να αναγνωρίσει εγκαίρως τις μακροπρόθεσμες συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συμβάλλοντας καθοριστικά στη βελτίωση της δημόσιας υγείας και στην προστασία των οικοσυστημάτων, αλλά και του ευρύτερου περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι μετρήσεων αέριων και σωματιδιακών ρύπων

Όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, υποχρεούνται στην ανάπτυξη δικτύου σταθμών μέτρησης της συγκέντρωσης συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία, που αναφέρονται στις ισχύουσες ευρωπαϊκές Οδηγίες για την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Στην Ελλάδα υπό την ευθύνη του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) έχουν αναβαθμιστεί σταθμοί, που ήδη λειτουργούσαν στη χώρα μας, καθώς επίσης εγκαταστάθηκαν και νέοι σε μεγάλες κυρίως πόλεις της Ελλάδας, δημιουργώντας, το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gov.gr>). Σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EC τα κράτη μέλη αποφασίζουν για το συνολικό αριθμό και τις θέσεις των σταθμών παρακολούθησης των συγκεντρώσεων των ρύπων στην ατμόσφαιρα, τηρώντας τα κριτήρια που προβλέπονται στην οδηγία (http://europa.eu/legislation_summaries/environment/).

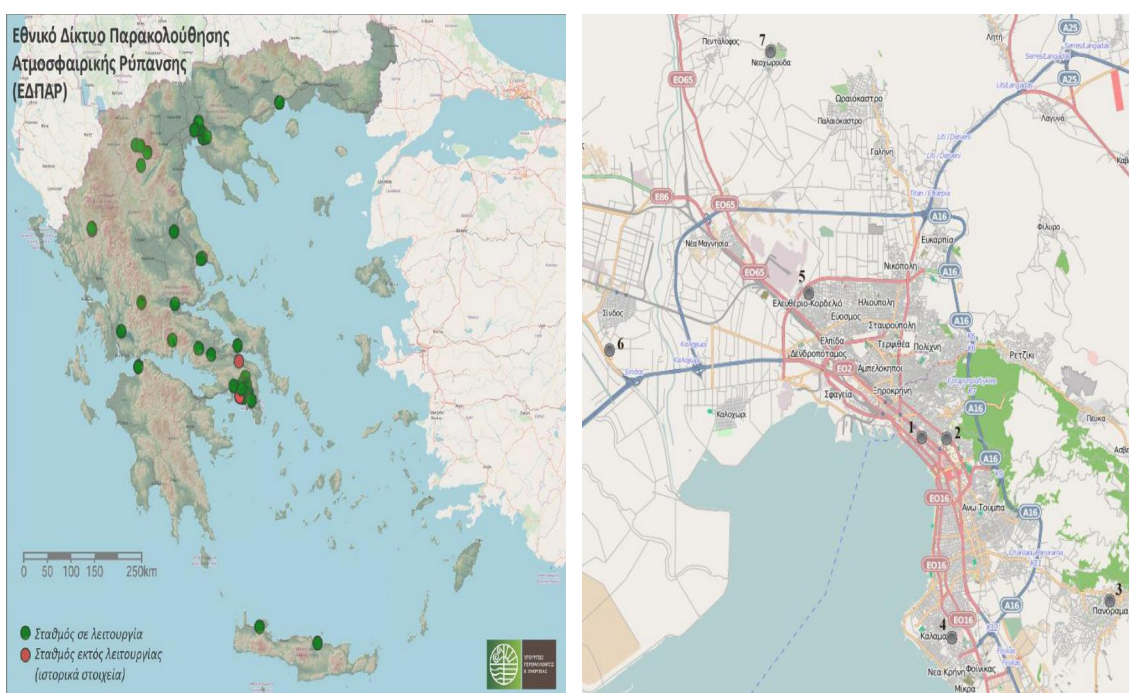
3.1 Σταθμοί αναφοράς στην περιοχή μελέτης

Η αξιόπιστη εκτίμηση των επιπέδων της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση δικτύου σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που πρέπει να διαθέτουν κατάλληλα όργανα συνεχούς καταγραφής των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι σταθμοί αυτοί συνήθως τοποθετούνται στο κέντρο και στην περιφέρεια των αστικών περιοχών, καθώς και στις γύρω περιαστικές περιοχές, η δε χωρική τοποθέτησή τους, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα της τοπογραφίας της κάθε περιοχής και την ύπαρξη κοντινών πηγών εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων (ΥΠΕΝ, 2001-2024; Kassomenos et al., 2012).

Οι σταθμοί ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανάλογα με την τοποθεσία τους (αστική, βιομηχανική, περιαστική, κλπ.), αλλά και τις πηγές εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή της θέση τους (κυκλοφορία οχημάτων, βιομηχανίες, αστική ζώνη, κλπ), ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες σταθμών: αστικής-κυκλοφορίας, αστικός-βιομηχανικός, περιαστικός-βιομηχανικός, αστικός-υποβάθρου, περιαστικός-υποβάθρου (<http://www.ypen.gov.gr>).

Η Θεσσαλονίκη αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας και μια από τις μεγαλύτερες στα Βαλκάνια. Οι εκπομπές των διάφορων ατμοσφαιρικών ρύπων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης την καθιστούν μία περιοχή με σημαντικά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που εστιάζονται κυρίως στα αιωρούμενα σωματίδια και τους φωτοχημικούς ρύπους. Στην περιοχή, που είναι και περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, ο σχηματισμός και η μεταφορά των ρύπων επηρεάζονται σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Στην Εικόνα 1, παρατίθεται το πανελλαδικό δίκτυο και το δίκτυο σταθμών στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, των σταθμών μέτρησης των συγκεντρώσεων των επιπέδων των ατμοσφαιρικών ρύπων, του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), του ΥΠΕΝ, (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gov.gr>).



Εικόνα 2. Δίκτυο σταθμών ελέγχου των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, (α) στον ελλαδικό χώρο και (β) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gov.gr>).

Πιο συγκεκριμένα στην παρούσα διπλωματική εργασία, από το Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), πραγματοποιήθηκε χρήση των



μετρήσεων από τέσσερις αντιπροσωπευτικούς σταθμούς του δικτύου. Οι αντιπροσωπευτικοί σταθμοί του ΕΔΠΑΡ, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο σταθμός Αγ. Σοφία, Κορδελιό, Πανόραμα και Σίνδος (Πίνακας 5). 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 περιφερειακού 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).

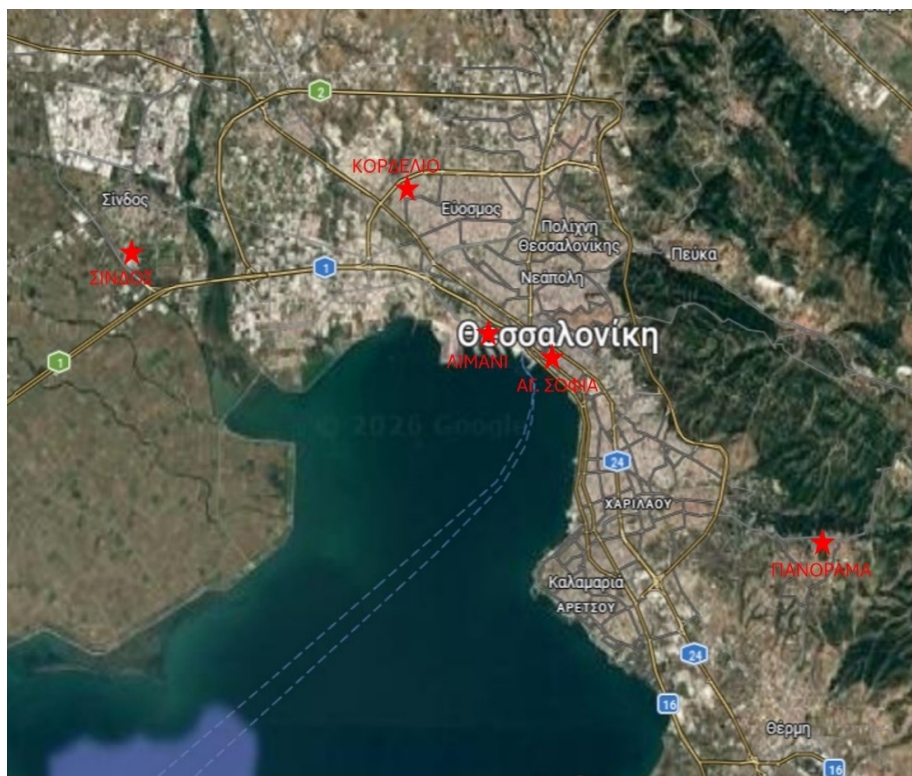
Παράλληλα έγινε χρήση των μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το σταθμό ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Οργανισμού Λιμένος Θεσσαλονίκης ΑΕ (ΟΛΘ ΑΕ) που βρίσκεται εντός της περιοχής του κεντρικού εμπορικού λιμανιού της Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ, 2025; <https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/>).

Το Λιμάνι της Θεσσαλονίκης είναι η κύρια θαλάσσια πύλη της Κεντρικής και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης, σε στρατηγική τοποθεσία στη Βόρεια Ελλάδα, κοντά στα μεγάλα διευρωπαϊκά δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρόμων, με άμεση πρόσβαση στις χώρες της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Τα εμπορευματοκιβώτια διακινούνται μέσω ειδικά διαμορφωμένου χώρου που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της του 6^{ου} Προβλήτα. Το Λιμάνι της Θεσσαλονίκης είναι το πρώτο διαμετακομιστικό λιμάνι της Ελλάδας σε συμβατικό φορτίο κι ένα από τα κυριότερα λιμάνια στην Ανατολική Μεσόγειο, με δεκατέσσερις αποβάθρες κατάλληλες για όλα τα είδη χύδην και χύδην εντός συσκευασίας φορτίων, που συνδέονται όλες με το εθνικό και διεθνές σιδηροδρομικό δίκτυο. Το 2023 από το λιμάνι της Θεσσαλονίκης διακινήθηκαν 16.777.263 τόνοι φορτίου (γενικού, υγρού και ξηρού) και 520.048 TEU (εμπορευματοκιβώτιο 20 ποδών), καθιστώντας το δεύτερο μεγαλύτερο λιμάνι εμπορευματοκιβωτίων και ένα από τα πιο πολυσύχναστα λιμάνια φορτίου στην Ελλάδα (https://el.wikipedia.org/wiki/Λιμάνι_της_Θεσσαλονίκης; *The European Sea Ports Organisation-ESPO*, 2022).

Ο Οργανισμός Λιμένος Θεσσαλονίκης ΑΕ διακινεί εμπορευματοκιβώτια, συμβατικό φορτίο, λειτουργεί την ελεύθερη ζώνη του Λιμένα σύμφωνα με την ισχύουσα



φορολογική και τελωνειακή νομοθεσία, προσφέρει αξιόπιστες και αποδοτικές λύσεις εφοδιαστικής και συνδυασμένων μεταφορών, παρέχει απευθείας σιδηροδρομική σύνδεση μεταξύ του Λιμένα της Θεσσαλονίκης και της Βουλγαρίας (Σόφια), της Σερβίας (Νις) και της Δημοκρατίας της Βόρειας Μακεδονίας (Σκόπια) και εξυπηρετεί την επιβατική κίνηση μέσω κρουαζιέρας και ακτοπλοΐας. Η παροχή ποιοτικών και φιλικών προς το περιβάλλον υπηρεσιών αποτελεί έναν από τους κύριους στρατηγικούς στόχους της ΟΛΘ Α.Ε. Στο πλαίσιο αυτό η ΟΛΘ Α.Ε. έχει σχεδιάσει και εφαρμόζει Σύστημα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης και Πρόγραμμα Παρακολούθησης Περιβάλλοντος, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Εγκεκριμένων Περιβαλλοντικών όρων (<https://www.thpa.gr/el/>). Συγκεκριμένα, ο μετεωρολογικός σταθμός και ο σταθμός μέτρησης ποιότητας της ατμόσφαιρας που καταγράφει τις συγκεντρώσεις των ρύπων στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον, λειτουργούν 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες τον χρόνο στην περιοχή του Κεντρικού Λιμένα. Όλες οι δειγματοληψίες και οι μετρήσεις γίνονται από διαπιστευμένα εργαστήρια (<https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/>).



Χάρτης 1. Αντιπροσωπευτικοί σταθμοί ελέγχου των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Google Earth, 2026)



Στο Χάρτη 1 αποτυπώνονται οι θέσεις των αντιπροσωπευτικών σταθμών ελέγχου των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, από τους οποίους αντλήθηκαν τα δεδομένα, για τη μελέτη περίπτωσης αυτής της εργασίας.

Στην παρούσα εργασία η ανάλυση και μελέτη έγινε με συγκεκριμένους ρύπους-κριτήρια. Οι ρύποι αυτοί είναι τα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2,5}$ και PM_{10} , καθώς και το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου NO , NO_2 .

Πίνακας 5. Αντιπροσωπευτικοί σταθμοί ελέγχου ατμοσφαιρικών ρύπων στο δίκτυο ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gov.gr>) και του Οργανισμού Λιμένος Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ, 2025; <https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/>).

Σταθμός / Θέση στο χάρτη της Εικόνας 1(β)	Κατηγορία Σταθμού
Αγ. Σοφίας (1)	Αστικός-Κυκλοφορίας
Κορδελιό (5)	Αστικός-Βιομηχανικός
Σίνδος (6)	Περιαστικός-Βιομηχανικός
Πανόραμα (3)	Περιαστικός-Υποβάθρου
Λιμάνι - ΟΛΘ	Αστικός

3.2 Μεθοδολογίες μέτρησης και έλεγχος ποιότητας δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η συλλογή των δεδομένων ποιότητας ατμόσφαιρας στο πλαίσιο του ΕΔΠΑΡ πραγματοποιείται μέσω αυτόματων αναλυτών, οι οποίοι λειτουργούν σε συνεχή 24ωρη βάση και καταγράφουν ωριαίες συγκεντρώσεις των κυριότερων ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι αναλυτές πληρούν τις απαιτήσεις των ευρωπαϊκών προτύπων. Η συλλογή και καταγραφή των μετρήσεων γίνεται αυτόματα σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές ή data loggers, που βρίσκονται σε κάθε σταθμό ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που είναι συνδεδεμένοι με τους αυτόματους αναλυτές. Οι τιμές αυτές μεταβιβάζονται σε κεντρικό υπολογιστή προκειμένου να αξιοποιηθούν για την έκδοση συμπερασμάτων, αλλά και για τη 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).

Πίνακας 6. Μέθοδοι μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων στο δίκτυο ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ (ΥΠΕΝ, 2002-2022).

Ρύπος	Μέθοδος μέτρησης
Οξείδια του αζώτου (NO, NO ₂)	Χημειοφωταύγεια
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM ₁₀ , PM _{2,5})	Απορρόφηση β ακτινοβολίας

Οι μετρούμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι, με τους οποίους έγινε μελέτη στην παρούσα εργασία, δηλαδή τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5} και PM₁₀, καθώς και το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου NO, NO₂ και οι αντίστοιχες πρότυπες μέθοδοι μέτρησης των συγκεντρώσεών τους, που εφαρμόζονται στο πλαίσιο λειτουργίας του ΕΔΠΑΡ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Όπως φαίνεται για κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο χρησιμοποιείται η πρότυπη, εξειδικευμένη αποδεκτή διαδικασία χημικής ή φυσικής ανάλυσης, δηλαδή η αναλυτική τεχνική, προσαρμοσμένη στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του.

3.2.1 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 διοξείδιο 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 NO_x 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 NO_x. 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 NO_2 που αντιστοιχεί στη μέση ωριαία τιμή είναι $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ (δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 18 φορές ανά έτος), ενώ η μέση οριακή ετήσια τιμή ορίζεται στα $40\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το όριο συναγερμού, σε ωριαία βάση, είναι τα $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ (δεν πρέπει να υπερβαίνει τις τρεις συνεχόμενες ώρες) (YIEN, 2025). Σύμφωνα με την Οδηγία 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου το όριο των 24 ωρών παραμένει $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ (αλλά δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 3 φορές ανά έτος), ορίζεται νέο όριο για την ημερήσια οριακή τιμή που είναι τα $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος), και τέλος η μέση οριακή ετήσια τιμή του NO_2 ορίζεται στα $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μείωση 50% σε σχέση με το προηγούμενο όριο).

3.2.2 Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας

Η πρότυπη μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους αυτόματους αναλυτές του ΕΔΠΑΡ για τη συνεχή, 24ωρη παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας (Beta Attenuation Monitoring) (YIEN, 2025). Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στη μέτρηση της μείωσης της έντασης μιας δέσμης ηλεκτρονίων (ακτίνες β) κατά τη διόδό της μέσα από διηθητικό φίλτρο, διαμορφωμένου σαν κινούμενη ταινία, εξαιτίας της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Καθώς η εξασθένηση της β-ακτινοβολίας είναι ανάλογη της μάζας των κατακρατούμενων από τη φιλτροταινία σωματιδίων, που υπάρχουν στο δειγματοληπτούμενο αέρα, η μέθοδος επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό τους (Καμπεζίδης & Ματράλης, 2004). Ουσιαστικά, ο προσδιορισμός της μάζας των σωματιδίων, πραγματοποιείται αφού ποσότητα δειγματοληπτούμενου αέρα διαβιβάζεται διαμέσου κατάλληλα θερμοστατούμενου αγωγού στην κινούμενη φιλτροταινία, που συγκρατεί τα αιωρούμενα σωματίδια. Η φιλτροταινία βρίσκεται μεταξύ μιας ραδιενεργούς πηγής χαμηλής έντασης (συνήθως $\text{C} 14$) και ενός ανιχνευτή (συνήθως Geiger-Muller). Η ραδιενεργός πηγή εκπέμπει β-ακτινοβολία προς τη φορτισμένη με σωματίδια φιλτροταινία που είναι τοποθετημένη απέναντι από τη ραδιενεργό πηγή. Στη συνέχεια, από τη διαφορά της έντασης της β-ακτινοβολίας, που μετράται στον ανιχνευτή, η οποία προκύπτει μεταξύ, της φιλτροταινίας, που έχει συγκρατήσει τα σωματίδια, σε σχέση με την αρχική κατάσταση της καθαρής φιλτροταινίας (η απορροφητική ικανότητα της ταινίας στην β-ακτινοβολία μετρείται πριν πραγματοποιηθεί η διήθηση του δειγματοληπτούμενου αέρα) γίνεται ο

προσδιορισμός της μάζας των σωματιδίων του δειγματοληπτούμενου αέρα. Το όργανο, αναλόγως με την κεφαλή, που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό και η οποία τοποθετείται στην είσοδο της διάταξης, επιτρέπει, τη μέτρηση της συγκέντρωσης των PM_{10} και των $PM_{2.5}$. Η διάταξη διαθέτει αντλία και έναν αγωγό ο οποίος μετρά και ελέγχει την ποσότητα ροής του δειγματοληπτούμενου ατμοσφαιρικού αέρα (Καμπεζίδης & Ματράλης, 2004; Κανελλοπούλου, 2015; Κανελλοπούλου κ.ά., 2016). Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην ικανότητα παροχής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time), γιατί είναι μια αυτόματη μέθοδος συνεχούς μέτρησης και προσδιορισμού, της συγκέντρωσης των PM_{10} και $PM_{2.5}$, ανά ώρα, στην ατμόσφαιρα (Χαϊνά κ.ά, 2015).

Το όριο 24 ωρών για τα PM_{10} ($50\mu g/m^3$) στην Οδηγία 2008/50/EK επιτρεπόταν να υπερβαίνεται έως 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος. Σύμφωνα με την Οδηγία 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου νέο όριο 24 ωρών για τα σωματίδια PM_{10} ορίζεται τα $45\mu g/m^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος), που αντιστοιχεί σε μείωση 10% στη συγκέντρωση και 49% στις υπερβάσεις). Για τα $PM_{2.5}$ νέο όριο 24 ωρών ορίζονται τα $25\mu g/m^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος). Όσον αφορά το μέσο ετήσιο όρο για τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ ορίζονται τα $20\mu g/m^3$ και $10\mu g/m^3$, αντίστοιχα, που υποχρεώνουν σε μειώσεις των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων της τάξης του 50-60%.

3.2.3. Διαδικασία Βαθμονόμησης

Η διασφάλιση της ποιότητας και η εγκυρότητα των μετρήσεων του δικτύου βασίζονται στην εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων τακτικής βαθμονόμησης (calibration) των οργάνων. Για τη βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης των αερίων ρύπων, χρησιμοποιείται ειδική διάταξη δυναμικής αραίωσης, η οποία αναμιγνύει φιλτραρισμένο «καθαρό» αέρα με πρότυπα αέρια γνωστής συγκέντρωσης από φιάλες αναφοράς. Με τη μεταβολή της αναλογίας των δύο ροών, δημιουργούνται πρότυπα μείγματα ακριβείας για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της γραμμικότητας των αναλυτών (ΥΠΕΝ, 2025). Τα ροόμετρα των βαθμονομητικών συστημάτων με τα οποία εφαρμόζεται η δυναμική αραίωση διακρίβωνονται ετησίως στο Εθνικό Εργαστήριο Αναφοράς για την Ποιότητα της Ατμόσφαιρας. Μεταξύ άλλων, πραγματοποιείται

έλεγχος γραμμικότητας, ολίσθησης μηδενός και επαναληψιμότητας στους αναλυτές σύμφωνα με τα τεχνικά πρότυπα EN. Για την επιτόπια βαθμονόμηση των αναλυτών χρησιμοποιούνται φιάλες γνωστής συγκέντρωσης αερίου σε άζωτο οι οποίες έχουν διακριβωθεί ως προς τη συγκέντρωση με τη μονάδα στατικής αραίωσης του Εργαστηρίου του ΥΠΕΝ. Ειδικά για τη βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, με τη μέθοδο της απορρόφησης της β-ακτινοβολίας, χρησιμοποιούνται διατάξεις από πρότυπα δείγματα (μεμβράνες) γνωστής μάζας (ΥΠΕΝ, 2025).

3.3 Χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης

Η Θεσσαλονίκη αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας και μια από τις μεγαλύτερες στα Βαλκάνια, όπου ο σχηματισμός και η μεταφορά των ρύπων επηρεάζονται σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά (Πετρακάκης κ.ά., 2015). 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. Ο συνολικός αριθμός επιβατικών οχημάτων που κυκλοφορούν στην Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης εκτιμάται ότι ανέρχεται περίπου στα 750.000 οχήματα (<https://www.statistics.gr>). Η Θεσσαλονίκη βρίσκεται σ' ένα λεκανοπέδιο με επιφάνεια κατά προσέγγιση 200 km², με ένα αρκετά υψηλό όρος, το Χορτιάτη, στην ανατολική-βορειοανατολική πλευρά, ενώ στη δυτική πλευρά το έδαφος είναι σχεδόν επίπεδο και στα νότια βρίσκεται ο Θερμαϊκός κόλπος (Flocas et al., 2009). Το κλίμα της Θεσσαλονίκης είναι Μεσογειακό, με ζεστά και ξηρά καλοκαίρια και βροχερούς και ήπιους χειμώνες, τη μέση ημερήσια θερμοκρασία το χειμώνα και το καλοκαίρι να κυμαίνεται περίπου στους 7,0 °C και 25,3 °C, αντίστοιχα, ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται περίπου στα 445 mm (Kassomenos et al., 2012; Kelessis et al., 2006b; Vouitsis et al., 2015).

Η πόλη της Θεσσαλονίκης αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα όσον αφορά την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Οι κυριότεροι λόγοι αναφορικά με την περιβαλλοντικά επιβαρυνόμενη ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης είναι, αφενός ότι η ταχύτητα του ανέμου στην πόλη της Θεσσαλονίκης είναι γενικά χαμηλή, ενώ εμφανίζει μεγάλο αριθμό από άπνοιες και αφετέρου το ιδιαίτερα περίπλοκο χωροταξικό υπόβαθρο, που έχει ως



αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου στο επίπεδο του εδάφους (Πετρακάκης κ.ά, 2008). Επιπλέον, οι πιο έντονοι άνεμοι στη Θεσσαλονίκη, που προέρχονται από τα βορειοδυτικά (Βαρδάρης) εμφανίζονται μόνο περίπου 30 ημέρες το έτος, ενώ οι πιο συνήθεις προέρχονται από τα νοτιοδυτικά (κελί θαλάσσιας-απόγειου αύρας) (Flocas et al., 2009). Η ύπαρξη υψηλών κτηρίων κατά μήκος της ακτογραμμής και λοφοσειράς στην ανατολική-βορειοανατολική πλευρά της πόλης, αποτελούν εμπόδια που δεν επιτρέπουν τη θαλάσσια αύρα να απομακρύνει την ατμοσφαιρική ρύπανση, που εκπέμπεται από τις διάφορες τοπικές πηγές στην πόλη της Θεσσαλονίκης, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα της πόλης (Kassomenos et al., 2012; Kelessis et al., 2006a; Moussiopoulos, 2003; Πετρακάκης κ.ά, 2008).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στη Θεσσαλονίκη αποτελεί αποτέλεσμα, τόσο των μετεωρολογικών συνθηκών και της χωροταξίας-τοπογραφίας της περιοχής, όσο και των εκπομπών αέριων και σωματιδιακών ρύπων από το μεγάλο αριθμό οχημάτων που κυκλοφορούν (περίπου 750.000 οχήματα), τη βιομηχανική δραστηριότητα, των εμπορικών και θαλάσσιων μεταφορών από το λιμάνι της πόλης και της θέρμανσης των κτιρίων κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους (Vouitsis et al., 2015). Στη δυτική Θεσσαλονίκη, που είναι επίπεδη, βρίσκεται επικεντρωμένη η βιομηχανική δραστηριότητα, ειδικά στην περιοχή της Σίνδου, αλλά και η διύλιση πετρελαίου, τα πετροχημικά, η παραγωγή τσιμέντου, η παραγωγή σιδήρου και χάλυβα, κλπ. Επίσης, λόγω της απουσίας ενός σύγχρονου συστήματος μέσω μαζικής μεταφοράς (το μετρό της πόλης άρχισε τη λειτουργία της βασικής του γραμμής στις αρχές του 2025), οι κάτοικοι αναγκαστικά χρησιμοποιούσαν τα ιδιωτικά τους οχήματα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται κυκλοφοριακή συμφόρηση και αυτό έχει ως συνέπεια τα υψηλά επίπεδα εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, ειδικά στο κέντρο της πόλης (Paschalidou et al., 2016). Η οικιακή θέρμανση παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, όσον αφορά τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου και ιδιαίτερα στο πυκνοδομημένο δυτικό τμήμα του πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης (Πετρακάκης κ.ά, 2008; Kelessis et al., 2006b; Paschalidou et al., 2016).

Όσον αφορά τα επίπεδα της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη για την πόλη της Θεσσαλονίκης, για δύο περιόδους (κατά το 2007 και την περίοδο 2011-2012), προέκυψε ότι οι κυριότερες πηγές συνεισφοράς ήταν η κίνηση των οχημάτων (καύση και τριβή ελαστικών και η επαναιώρηση της



σκόνης από τους δρόμους), τα δευτερογενή θειικά και οργανικά αλλά και η καύση βιομάζας, ενώ όσον αφορά τις φυσικές πηγές, το θαλάσσιο άλας και η σκόνη ορυκτής προέλευσης (*Diapouli et al., 2017*). Επίσης, σε εργασία η οποία διενεργήθηκε σ' ένα ιδιαίτερα επιβαρυνμένο από την κυκλοφοριακή κίνηση σημείο, στο κέντρο της Θεσσαλονίκης και συγκεκριμένα, στο οποίο παρουσιάζονται μεγάλες συγκεντρώσεις PM_{10} και $PM_{2,5}$, στη μάζα των PM_{10} κυριαρχούσε 30% η οργανική ύλη 30%, τα ανόργανα συστατικά (οξείδια των Ca, Ti, Fe, Mg, Al, Si και K) σε ποσοστό 28%, τα δευτερογενή θειικά και νιτρικά σε ποσοστό 20% και ο στοιχειακός άνθρακας 10%, ενώ παρατηρήθηκε μικρότερη συνεισφορά από τα ιχνοστοιχεία και το θαλάσσιο άλας (*Samara et al., 2015*). Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η μεγάλη μείωση των εκπομπών του βιομηχανικού τομέα, κατά τη χρονική περίοδο 2011-2012, κάτι που πιθανότατα οφείλεται στην επίδραση της ελληνικής οικονομικής κρίσης, η οποία οδήγησε σε σημαντική μείωση της παραγωγικότητας ή ακόμα και στο κλείσιμο αρκετών βιομηχανικών μονάδων στη χώρα. Αντίθετα, η καύση της βιομάζας παρουσίασε σημαντική αύξηση κατά τη χρονική περίοδο 2011 έως 2012, με αποτέλεσμα να διπλασιαστεί, σε σχέση με το 2007 (*Diapouli et al., 2017*).



Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων και των φωτοχημικών ρύπων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση των μεταβολών των συγκεντρώσεων των σημαντικών δεικτών της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, δηλαδή των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2.5}$ και των μονοξειδίου και του διοξειδίου του αζώτου, που θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ρύπανσης μιας περιοχής, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 2014-2024. Έτσι, για την περίοδο μελέτης εξετάζονται οι μεταβολές των συγκεντρώσεων, των παραπάνω ρύπων για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και οι οποίοι παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων της σωματιδιακής και της 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 βιομηχανικός, περιαστικός βιομηχανικός, περιαστικός υποβάθρου) και τη γεωγραφική τους θέση (εγγύτητά τους σε πηγές εκπομπής), εξασφαλίζοντας, όσο το δυνατόν, αντιπροσωπευτική απεικόνιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή (ΥΠΕΝ, 2025). Η επιλογή έγινε με βάση και τα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, που βρίσκεται στον Κεντρικό Λιμένα της Θεσσαλονίκης, πλησίον του κέντρου της αστικής περιοχής της πόλης, ώστε να γίνει εκτίμηση της επίδρασης των ναυτιλιακών υπηρεσιών και δραστηριοτήτων του Λιμένος στο αστικό πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης.

Έτσι, τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις των εγκατεστημένων σταθμών του ΕΔΠΑΡ, όπως αναρτώνται στην επίσημη ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ (<https://ypen.gov.gr>) και τα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, που βρίσκεται στον Κεντρικό Λιμένα της Θεσσαλονίκης (<https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/>; ΟΛΘ, 2025). Με τα παραπάνω δεδομένα, έγινε προσπάθεια πραγματοποίησης μελέτης της διαχρονικής εξέλιξης της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ατμοσφαιρικής



ρύπανσης και συγκεκριμένα διερευνώνται οι ετήσιες, εποχικές και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου και του διοξειδίου του αζώτου, καθώς και των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, για την περίοδο 2014-2024, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

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.

4.1. Ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2,5}$, και των NO , NO_2 στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διαχρονικές διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και μηνιαίων συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ καθώς και των NO και NO_2 , για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης (αστικής κυκλοφορίας, περιαστικό υποβάθρου, περιαστικό και αστικό βιομηχανικό και αστικούς σταθμούς υποβάθρου) από το δίκτυο ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΝ, 2001-2024; <http://www.ypen.gov.gr>) και τον Οργανισμό Λιμένος Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ, 2025; <https://www.thpa.gr/el/sustainability/environment/>), στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

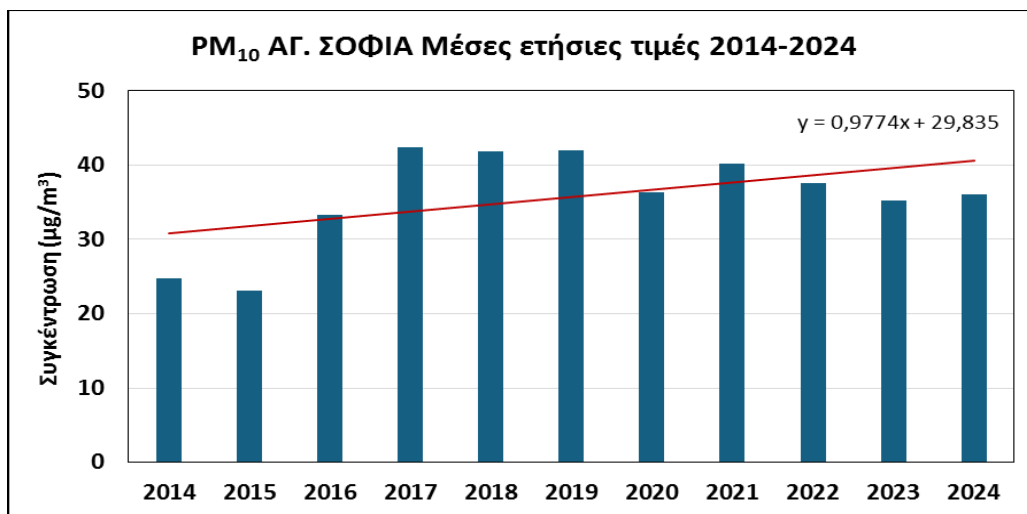
Τα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συγκριτική απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων, ανά σταθμό, για την περίοδο μελέτης, ώστε να μπορεί να γίνει συνολική αποτίμηση των επιπέδων ρύπανσης και η συσχέτισή τους με το χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα της κάθε θέσης μέτρησης. Επίσης, περιλαμβάνουν και γραμμές τάσης, προκειμένου να διαπιστωθούν πιθανές μακροχρόνιες μεταβολές στις συγκεντρώσεις του κάθε ρύπου, καθώς αυτές σχετίζονται κυρίως με ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή κλιματικές συνθήκες. Η αποτύπωση των διαχρονικών μεταβολών συμβάλλει στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας περιβαλλοντικών πολιτικών και της επίδρασης των μεταβολών κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στην ατμοσφαιρική ρύπανση των αστικών, περιαστικών και βιομηχανικών περιοχών.

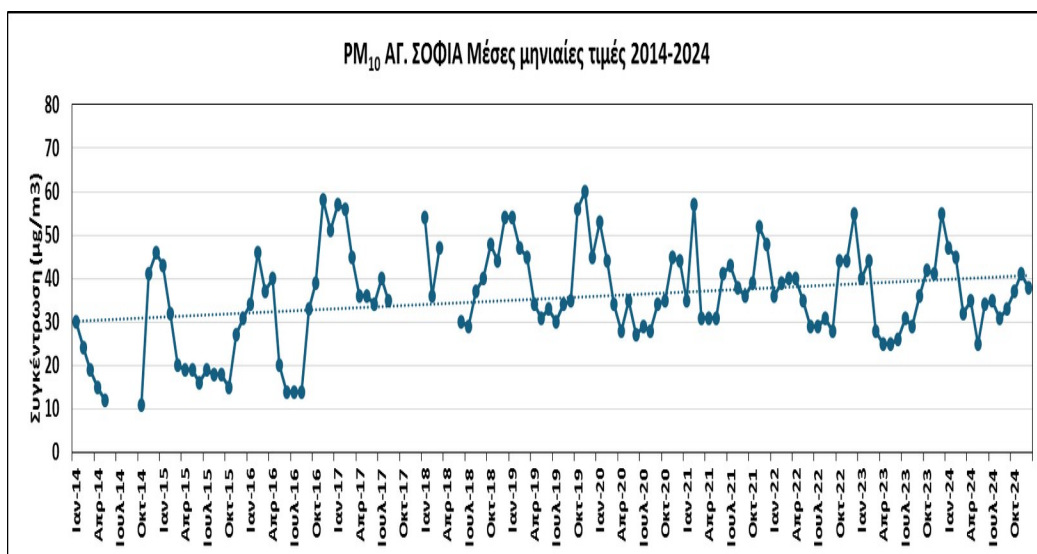


Σε ορισμένους σταθμούς, παρατηρήθηκε έλλειψη καταγραφής δεδομένων, για μεγάλες ή μικρές χρονικές περιόδους, λόγω διαφόρων προβλημάτων συντήρησης των αναλυτών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μερικώς η διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάστηκαν σ' αυτή την εργασία. Στις περιπτώσεις μεγάλης έλλειψης δεδομένων δεν παρουσιάζεται η γραμμή τάσης.

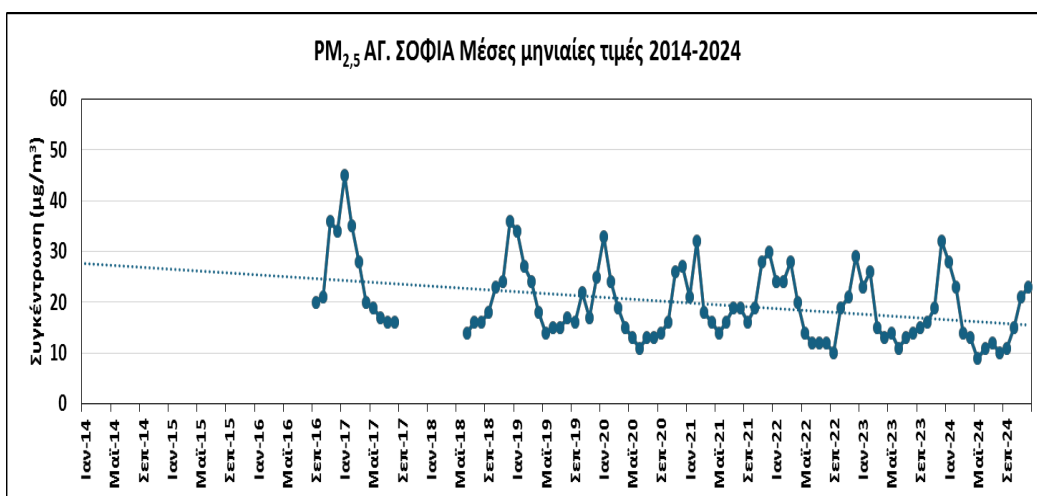
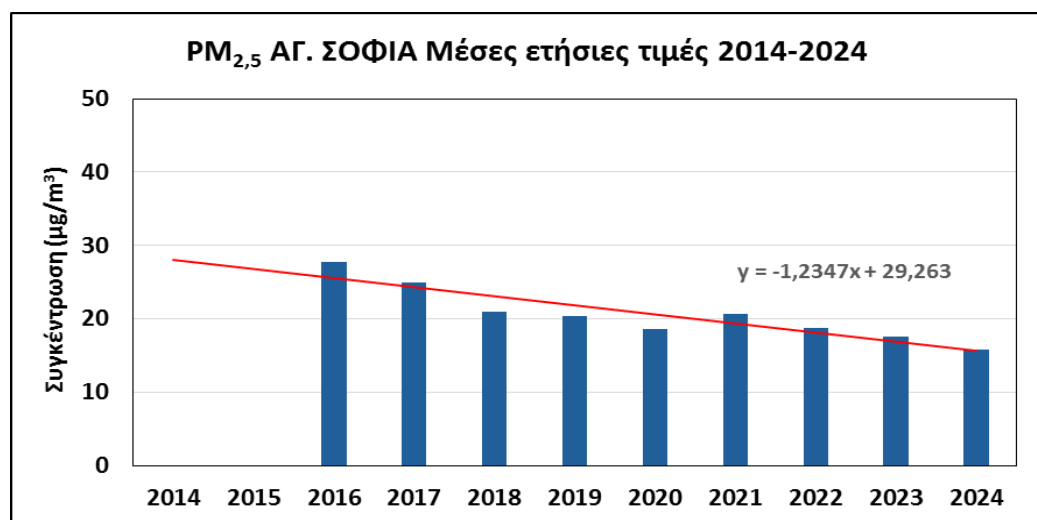
4.1.1. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014- 2024.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και μηνιαίων συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014-2024.

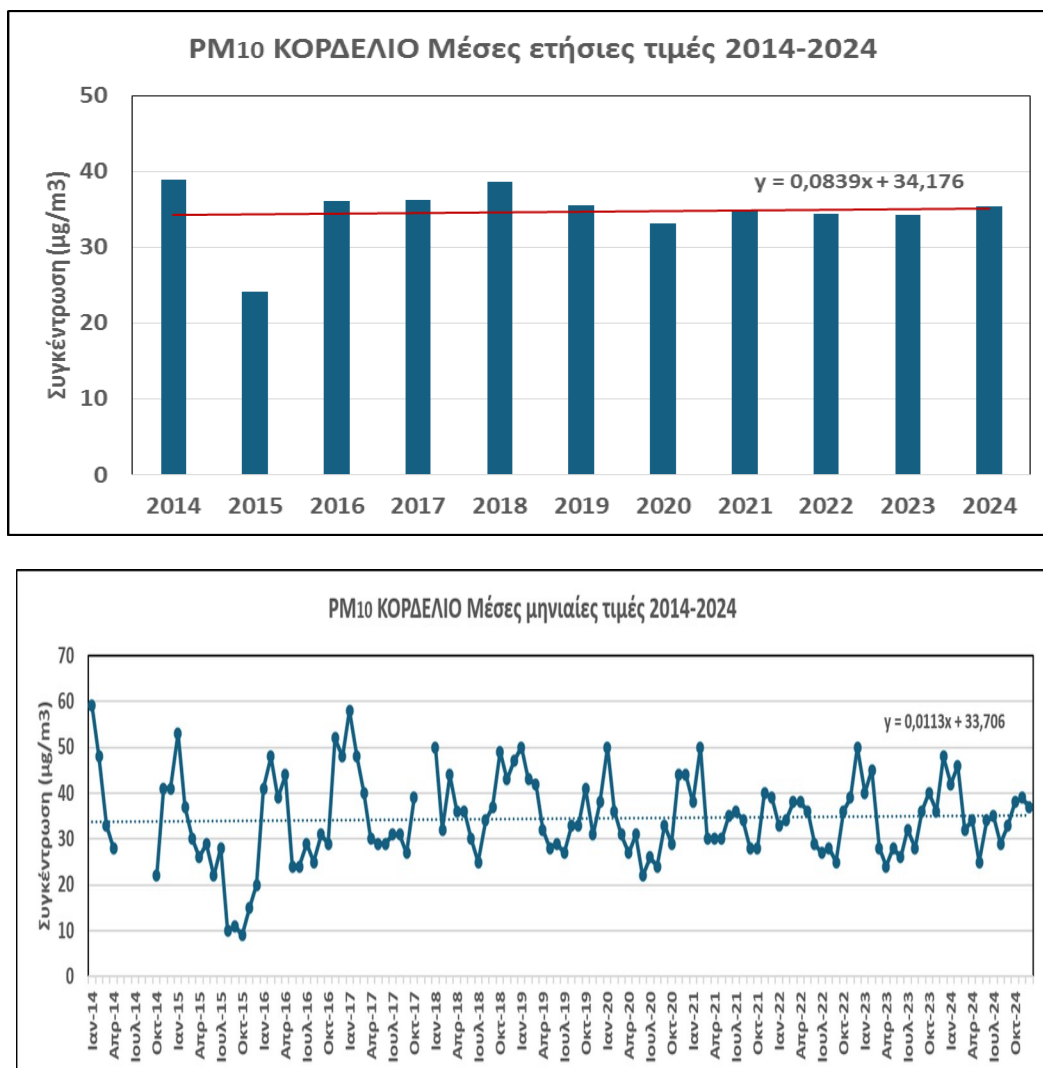




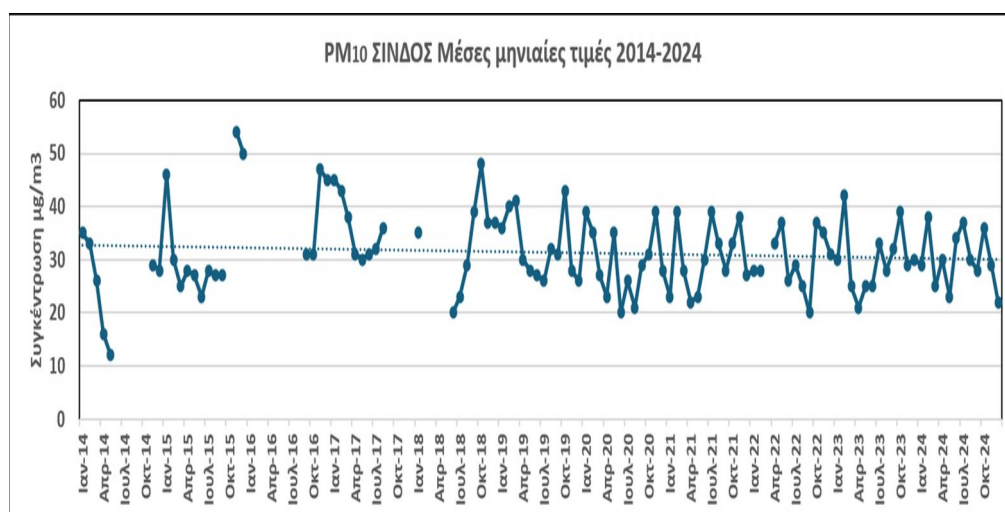
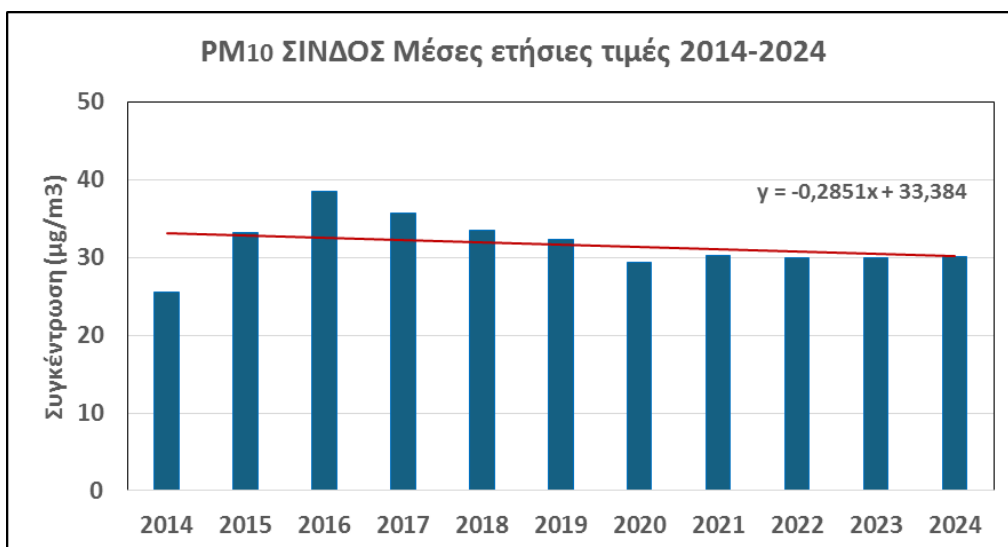
Διάγραμμα 4.1: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



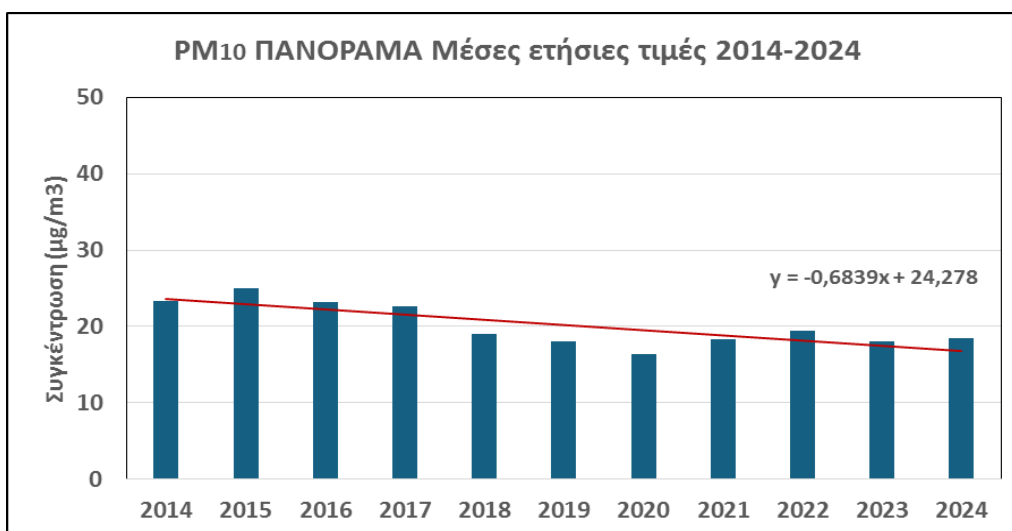
Διάγραμμα 4.2: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM_{2,5}, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

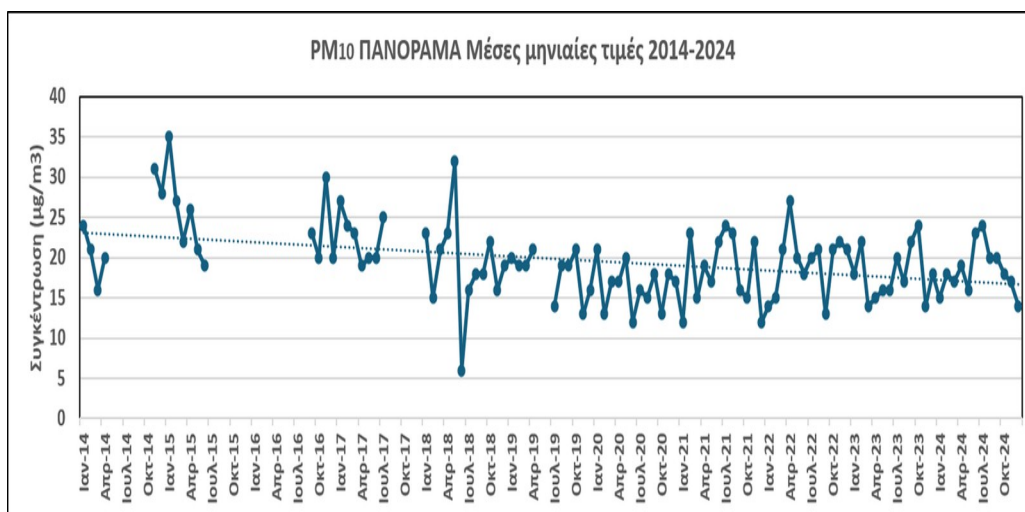


Διάγραμμα 4.3: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

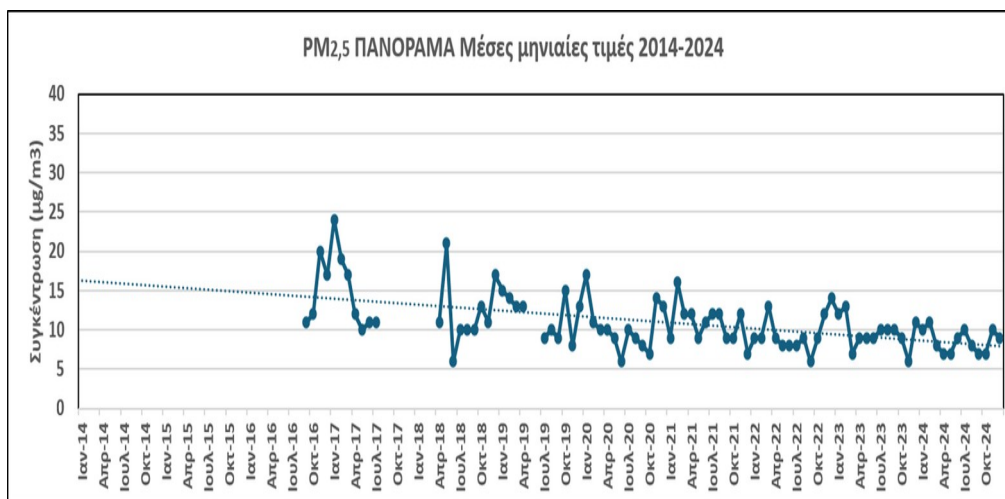
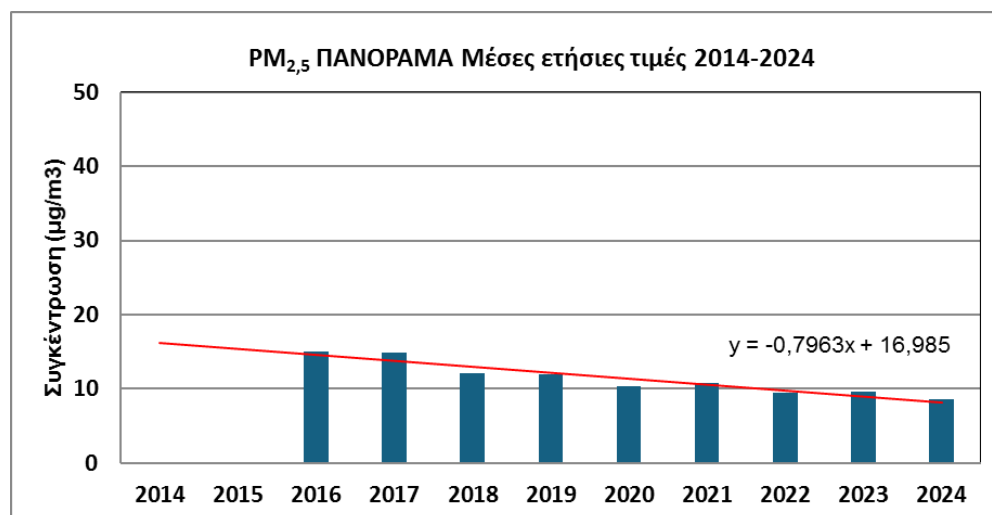


Διάγραμμα 4.4: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

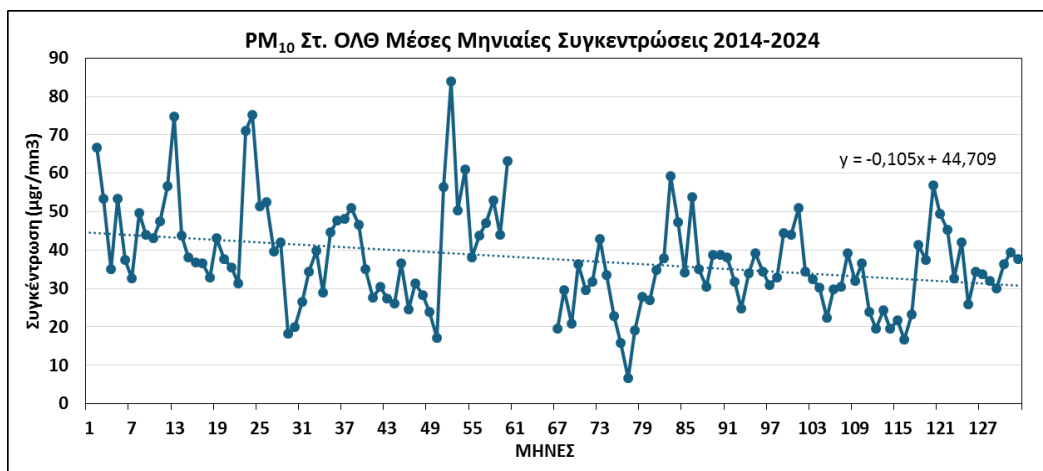
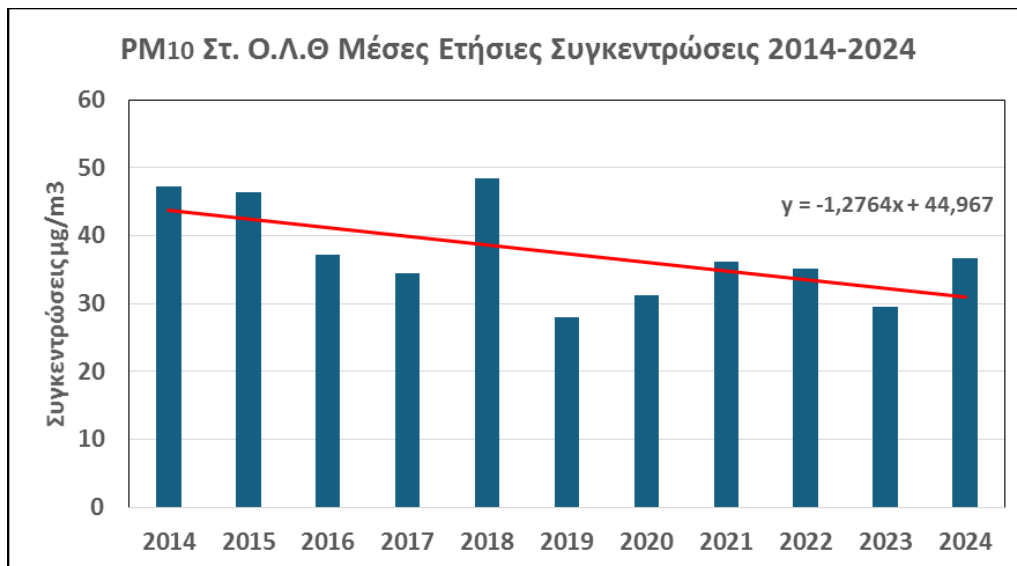




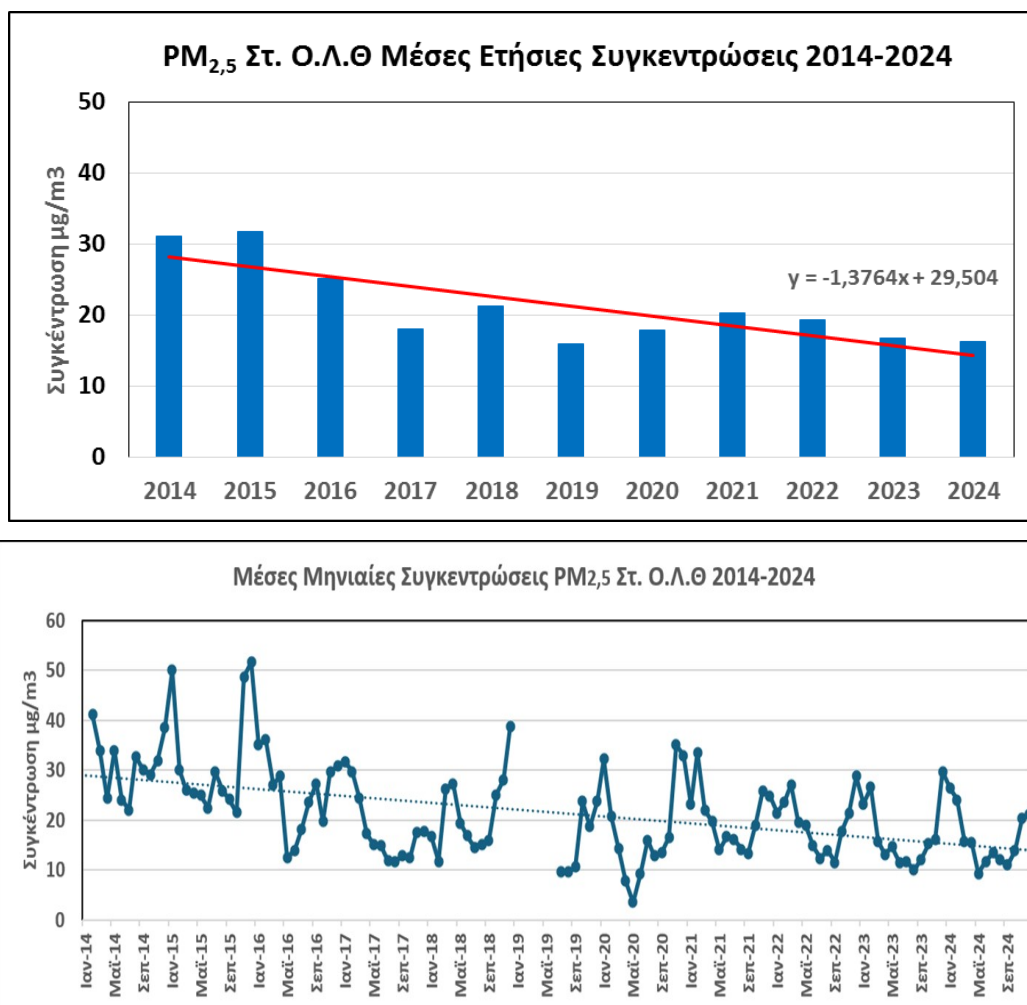
Διάγραμμα 4.5: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιβατικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



Διάγραμμα 4.6: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των $PM_{2,5}$, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



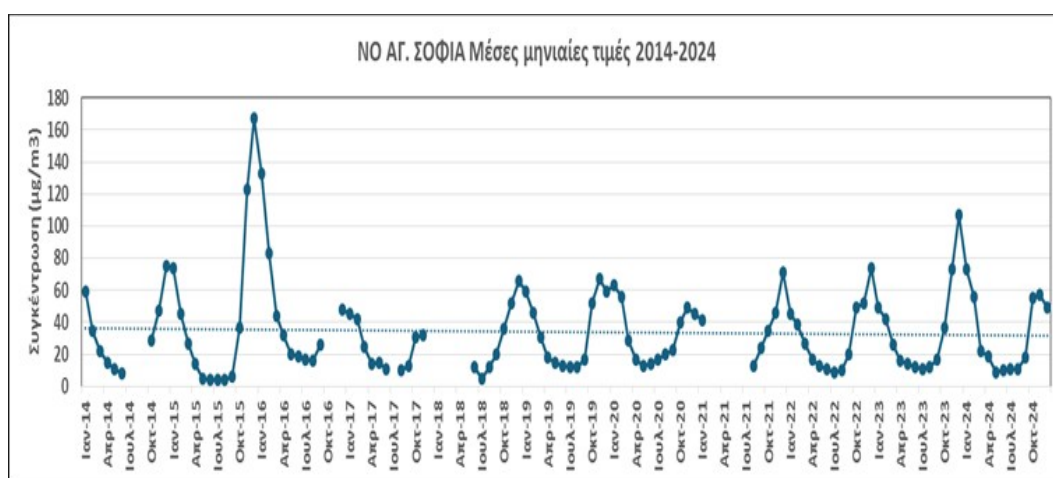
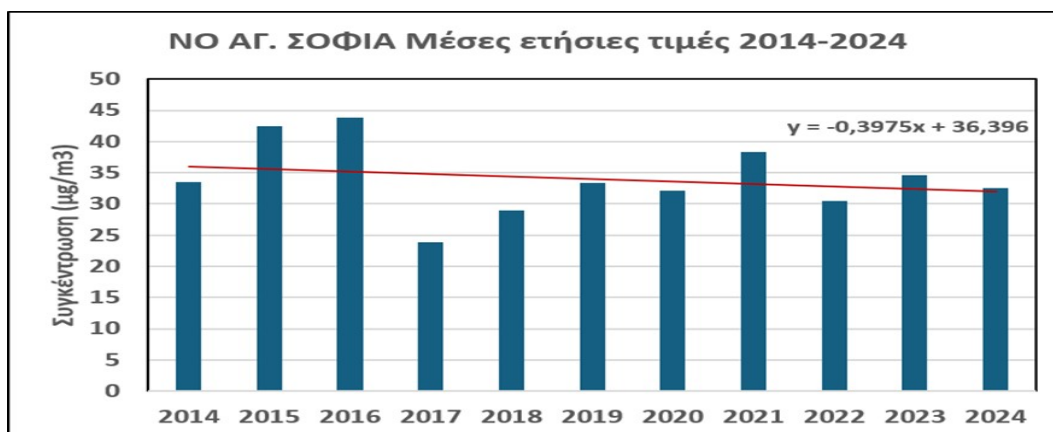
Διάγραμμα 4.7: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM_{10} , στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



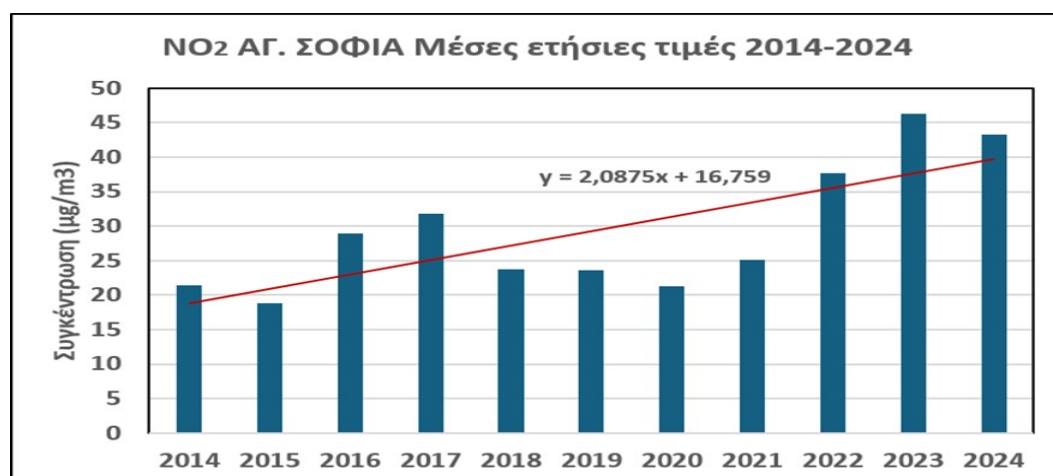
Διάγραμμα 4.8: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση των PM_{2,5}, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

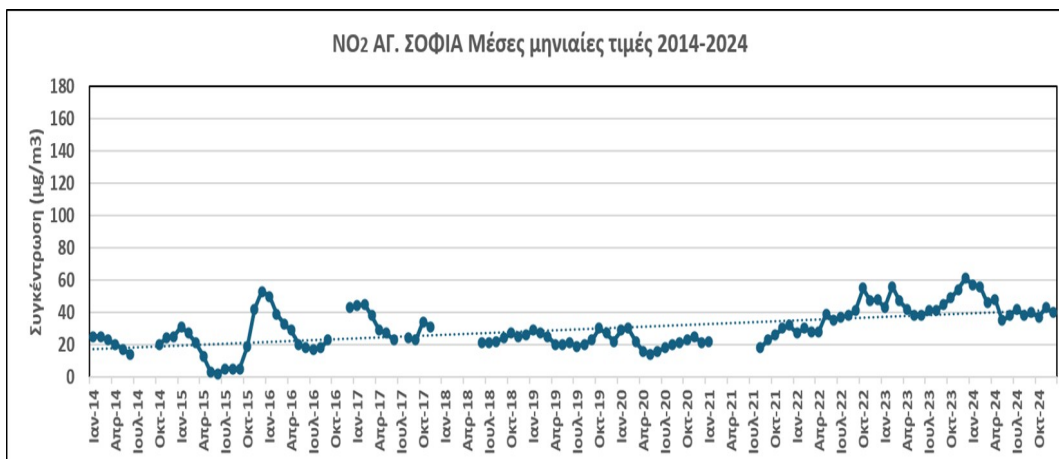
4.1.2. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των NO και NO₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014-2024.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και μηνιαίων συγκεντρώσεων των NO και NO₂, συνοδευόμενη από γραμμικές τάσεις, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2014-2024.

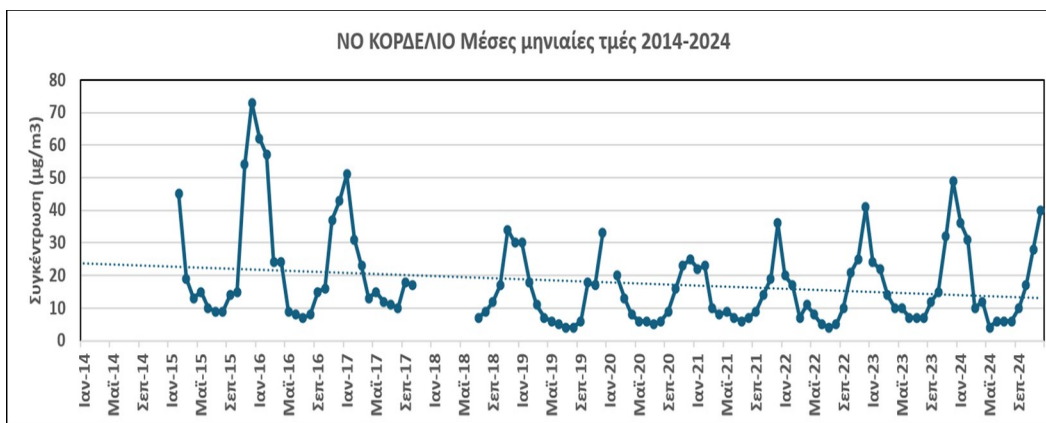


Διάγραμμα 4.9: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

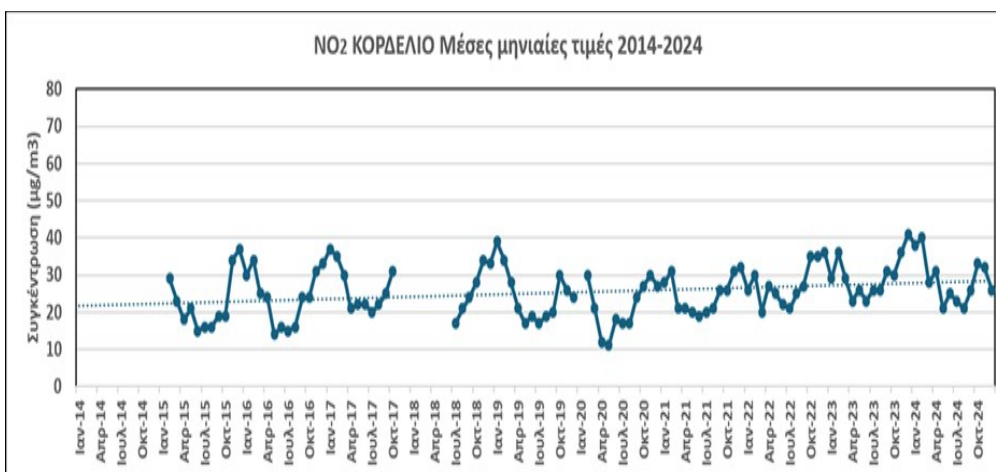
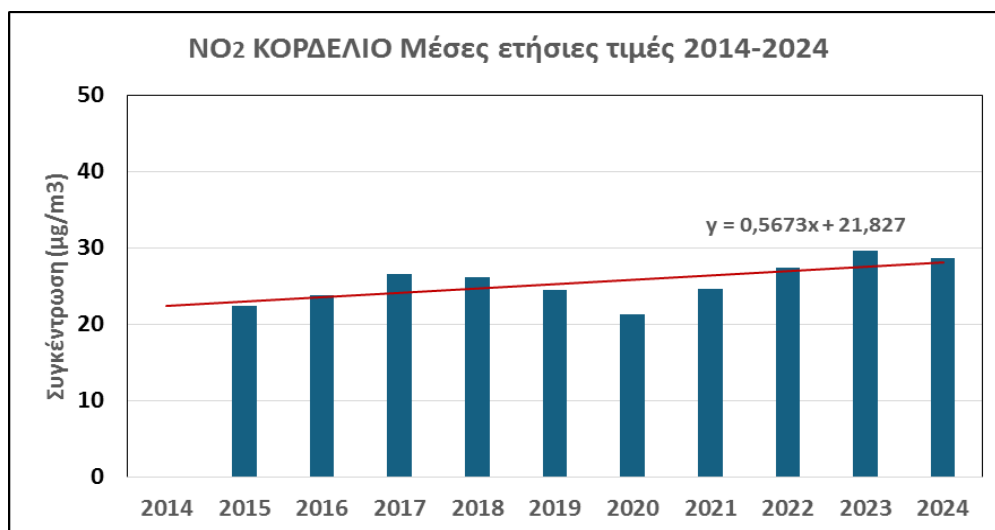




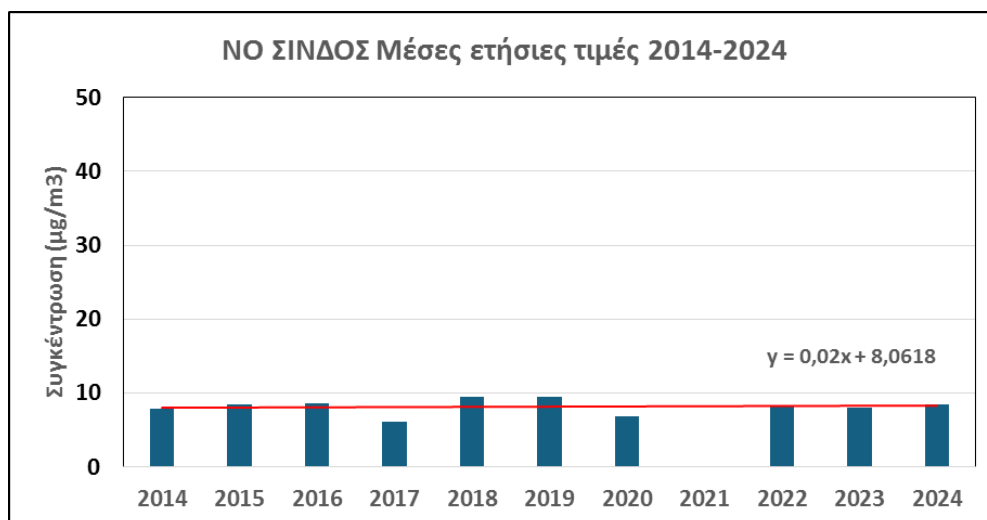
Διάγραμμα 4.10: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

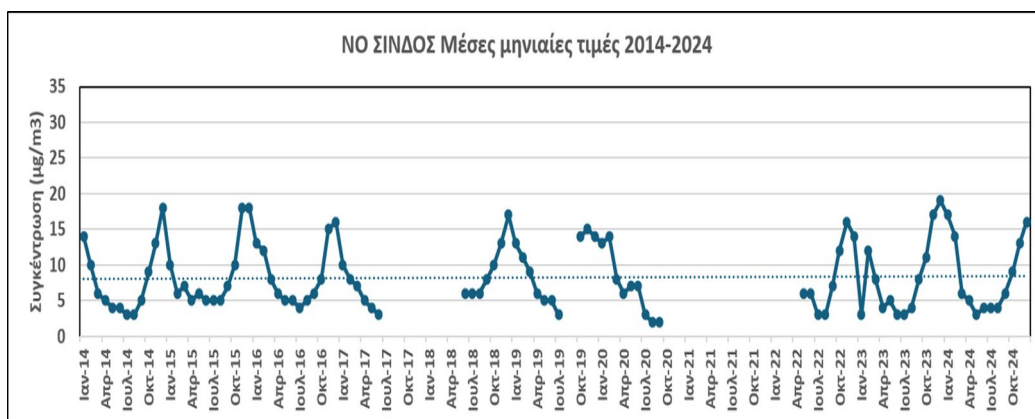


Διάγραμμα 4.11: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

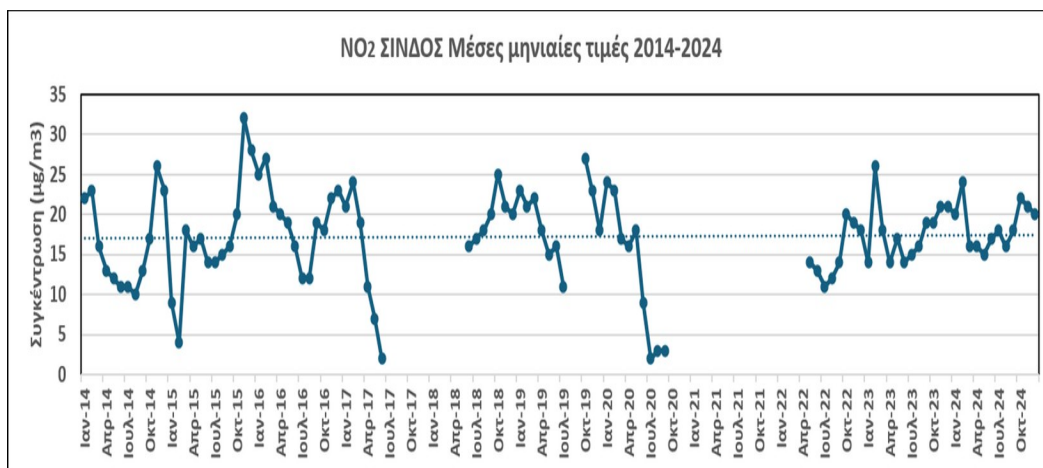
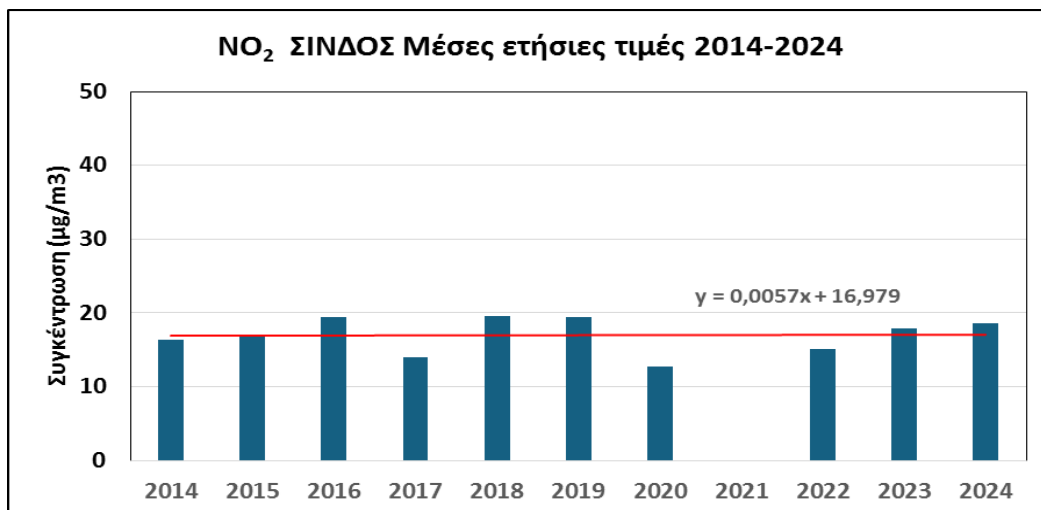


Διάγραμμα 4.12: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

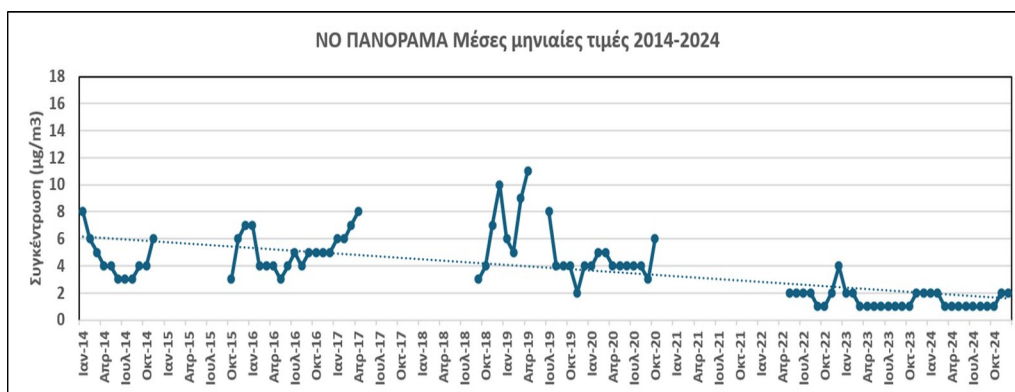
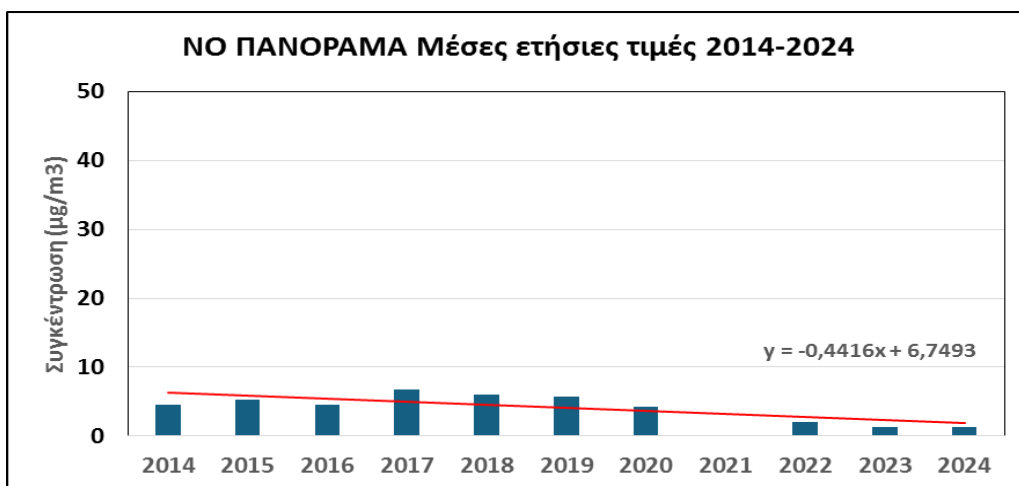




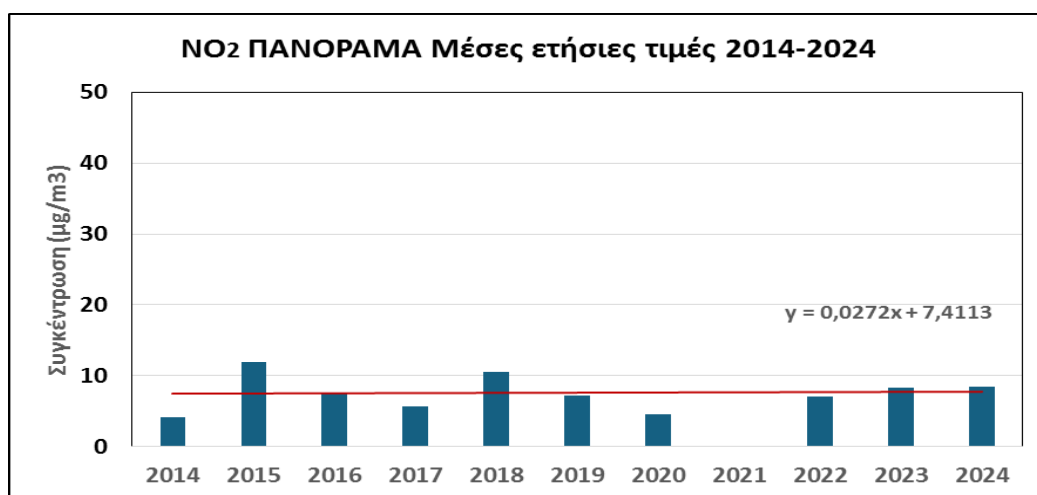
Διάγραμμα 4.13: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό περιβατικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

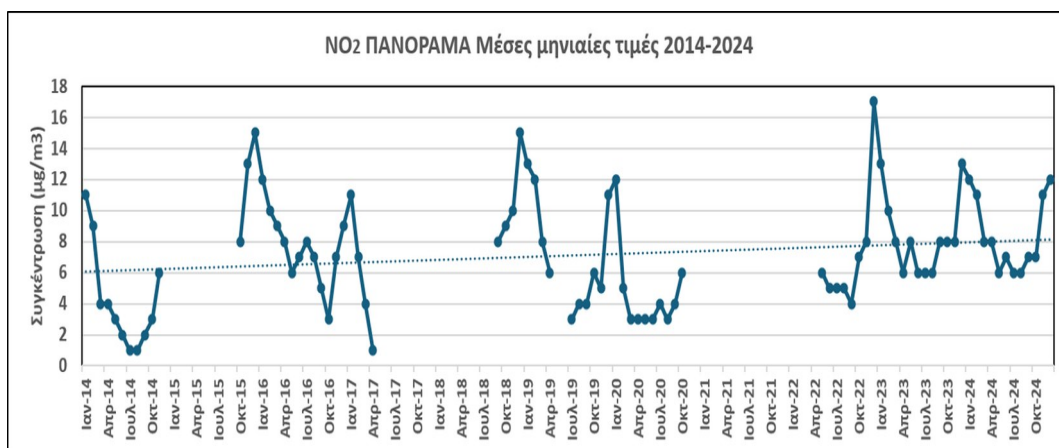


Διάγραμμα 4.14: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό περιβατικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

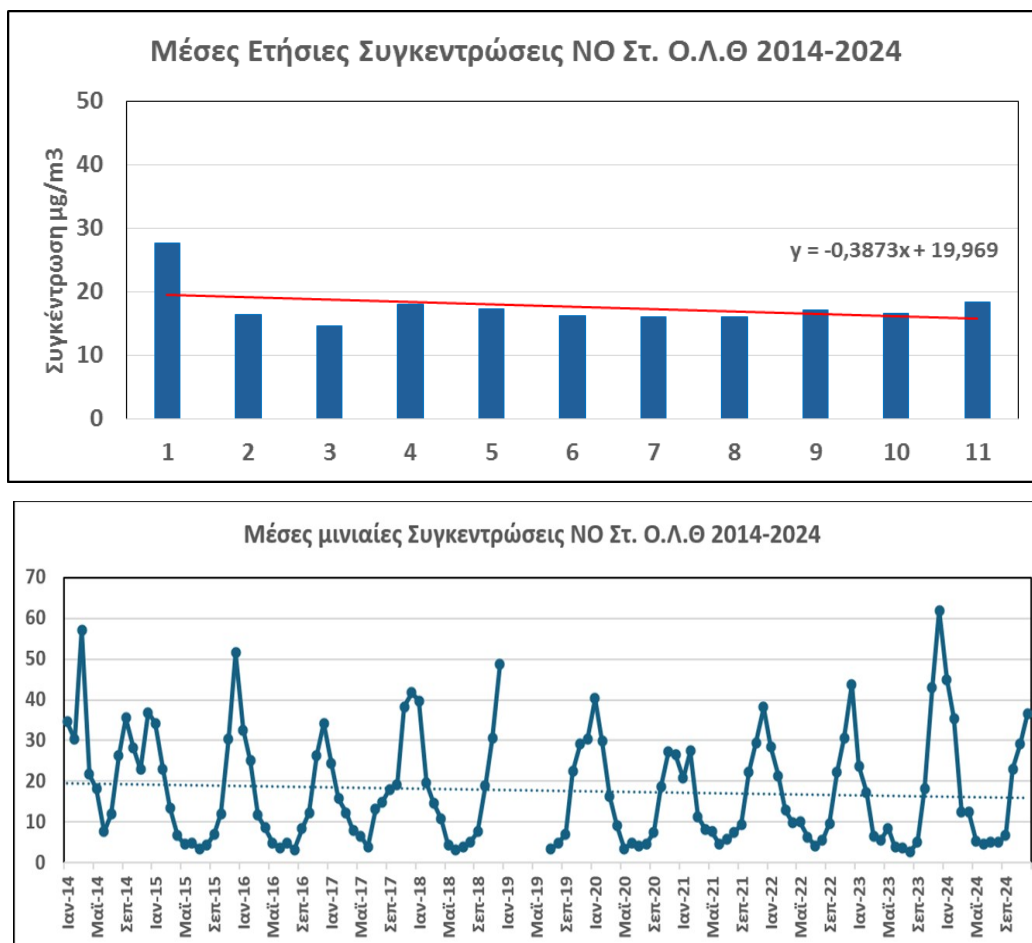


Διάγραμμα 4.15: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

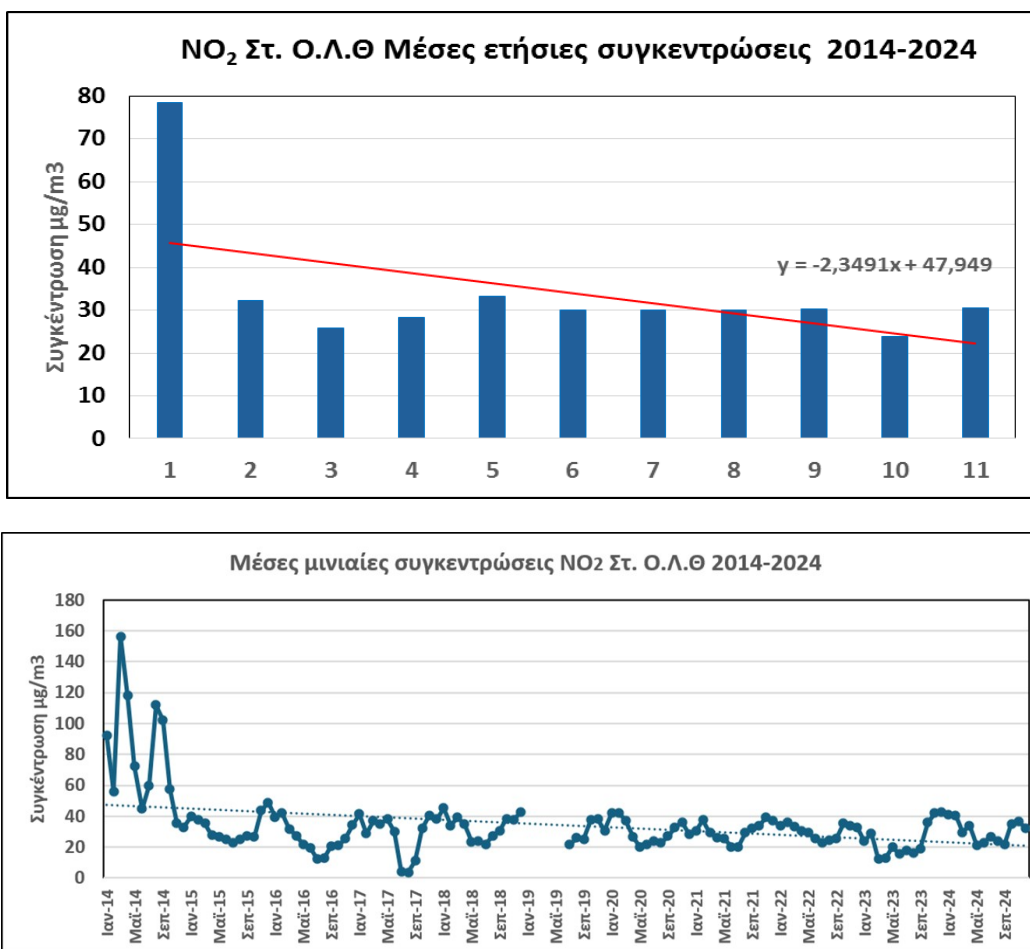




Διάγραμμα 4.16: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



Διάγραμμα 4.17: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.



Διάγραμμα 4.18: Μέση ετήσια και μηνιαία διακύμανση του NO₂, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, των υποενοτήτων 4.1.1-4.1.2, από τις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και μηνιαίων μετρήσεων των συγκεντρώσεων των σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ και του ΟΛΘ που βρίσκεται στον Κεντρικό Λιμένα της Θεσσαλονίκης, προέκυψε ότι:

Την εξεταζόμενη περίοδο, 2014-2024, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5} (πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύποι), του NO (πρωτογενής ρύπος) και του NO₂ (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) ήταν αυξημένες στο κέντρο της πόλης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες, αλλά και στον αυξημένο αριθμό οχημάτων και διανυόμενων χιλιομέτρων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές (οχήματα, θέρμανση). Έτσι, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των PM₁₀, PM_{2,5},



NO και NO₂, παρουσιάστηκαν, αφενός στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας, του οποίου η θέση είναι σε περιοχή πυκνής κτιριακής δόμησης, παραπλεύρως κεντρικών οδικών αξόνων και αφετέρου στο σταθμό Λιμάνι του ΟΛΘ, που βρίσκεται πλησίον του κέντρου της πόλης. Στο σταθμό Λιμάνι του ΟΛΘ τα επίπεδα αυτών των συγκεντρώσεων πιθανότατα οφείλονται κυρίως στις μεταφορικές, εμπορικές και τουριστικές ναυτηλιακές δραστηριότητες στο Λιμένα της Θεσσαλονίκης, καθώς και στην κίνηση οχημάτων και φορτηγών που προκύπτει εξαιτίας αυτών των δραστηριοτήτων. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν στους αστικούς και περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών, των τοπικών πηγών, των δευτερογενών μετασχηματισμών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης (τοπικά συστήματα ανέμου) από παρακείμενες περιοχές. Στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου παρουσιάστηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις των PM₁₀, PM_{2,5}, NO και NO₂, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών και ειδικά για τους φωτοχημικούς ρύπους 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; Asimakopoulos et al., 1992; Ziomas et al., 1995; Kassomenos et al., 2012).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πιθανότατα το σημαντικότερο πρόβλημα των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5}, και των NO_x στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης προέρχεται, τόσο από οδικές μεταφορές, όσο και από άλλες πηγές όπως η θέρμανση κατοικιών (καύση βιομάζας τη χειμερινή περίοδο) ή των ναυτιλιακών υπηρεσιών του Λιμένος, αλλά και δευτερογενών μετασχηματισμών. Επίσης, η μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών (κυρίως η διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου) και της επαναιώρησης της σκόνης, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων, ειδικά στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου (Kosmopoulos, et al., 2022; Logothetis, et al., 2024; Manousakas, et al., 2021).

Πρέπει να επισημανθεί ότι στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5}, την περίοδο 2014-2024, υπήρξαν υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίου των 40μg/m³ και 25μg/m³, αντίστοιχα (Πίνακας 7). Ειδικότερα, όσον αφορά τα PM₁₀ και τα PM_{2,5} οι υπερβάσεις ήταν περισσότερες στο κέντρο της πόλης (στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Αγ. Σοφίας



και στο Λιμάνι-ΟΛΘ). Στους άλλους σταθμούς δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του ετήσιου ορίου των PM_{10} και $PM_{2.5}$. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των PM_{10} και $PM_{2.5}$, για τα περισσότερα έτη της περιόδου μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΡΥΠΟΙ	Μέση Τιμή 2014-2024	Ετήσιες Υπερβάσεις PM_{10} Οδ. 2008/50	Ετήσιες Υπερβάσεις PM_{10} Οδ.2024/2881	Ετήσιες Υπερβάσεις $PM_{2.5}$ Οδ. 2008/50	Ετήσιες Υπερβάσεις $PM_{2.5}$ Οδ.2024/2881
ΑΓ. ΣΟΦΙΑ Αστικός Κυκλοφορίας	PM_{10}	35,7	4	11 (όλα τα έτη)		
	$PM_{2.5}$	20,6			2	9 (όλα τα έτη)
ΚΟΡΔΕΛΙΟ Αστικός Βιομηχανικός	PM_{10}	34,7	0	11 (όλα τα έτη)		
	$PM_{2.5}$	----				
ΣΙΝΔΟΣ Περιαστικός Βιομηχανικός	PM_{10}	31,7	0	11 (όλα τα έτη)		
	$PM_{2.5}$	----				
ΠΑΝΟΡΑΜΑ Περιαστικός Υποβάθρου	PM_{10}	20,2	0	4		
	$PM_{2.5}$	11,4			0	6
Στ. Λιμάνι- Ο.Λ.Θ Αστικός	PM_{10}	37,3	3	11 (όλα τα έτη)		
	$PM_{2.5}$	21,2			3	11 (όλα τα έτη)

Όσον αφορά τα επίπεδα του NO_2 , στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των $40\mu g/m^3$, παρατηρήθηκαν μόνο στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Αγ. Σοφίας και στο σταθμό Λιμάνι-ΟΛΘ (Πίνακας 8) και μάλιστα μικρού αριθμού (2 και 1 έτος αντίστοιχα). Στις άλλες περιοχές δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του ετήσιου ορίου του NO_2 . Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 , στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος ή πλησίον 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). Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία



2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν, με εξαίρεση τους περιστατικούς σταθμούς, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις του NO₂, για τα περισσότερα έτη της περιόδου μελέτης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024.

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΡΥΠΟΙ	Μέση Τιμή 2014-2024	Ετήσιες Υπερβάσεις NO ₂ Οδ. 2008/50	Ετήσιες Υπερβάσεις NO ₂ Οδ.2024/2881
ΑΓ. ΣΟΦΙΑ Αστικός Κυκλοφορίας	NO	34,0		
	NO ₂	29,3	2	10
ΚΟΡΔΕΛΙΟ Αστικός Βιομηχανικός	NO	17,8		
	NO ₂	25,5	0	11 (όλα τα έτη)
ΣΙΝΔΟΣ Περιαστικός Βιομηχανικός	NO	8,2		
	NO ₂	17,0	0	0
ΠΑΝΟΡΑΜΑ Περιαστικός Υποβάθρου	NO	4,2		
	NO ₂	7,6	0	0
Στ. Λιμάνι- Ο.Λ.Θ Αστικός	NO	17,7		
	NO ₂	33,9	1	11 (όλα τα έτη)

Επίσης, σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, από τις διαχρονικές διακυμάνσεις και τις γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων και μηνιαίων μετρήσεων των συγκεντρώσεων των σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ και του σταθμού Λιμάνι του ΟΛΘ, προέκυψε ότι για την εξεταζόμενη περίοδο, 2014-2024, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5} (πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύποι), βασικών δεικτών σωματιδιακής ρύπανσης και του NO (πρωτογενής ρύπος) και του NO₂ (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) βασικών δεικτών φωτοχημικής ρύπανσης, παρουσίασαν, μια ανομοιόμορφη συμπεριφορά.

Όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των PM₁₀ και PM_{2,5}, στους περισσότερους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στις μέσες ετήσιες και μηνιαίες συγκεντρώσεις, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης,



κατά την περίοδο 2014-2024. Οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, ήταν ιδιαίτερος έντονος στους σταθμούς στο Λιμένα της πόλης και στην περιοχή περιαστικού υποβάθρου, αλλά και στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας όσον αφορά τα $PM_{2,5}$ (στον οποίο όμως υπήρξε έλλειψη μετρήσεων στην αρχή της περιόδου, οπότε το αποτέλεσμα είναι επισφαλές). Εξαιρέση αποτέλεσαν οι σταθμοί Αγ. Σοφίας και Κορδελιού, όσον αφορά τα PM_{10} . Στον πρώτο παρατηρήθηκε αυξητική τάση, ενώ στο δεύτερο μια σταθεροποιητική τάση, που όμως οφείλονται κυρίως στις χαμηλές συγκεντρώσεις των δύο πρώτων ετών (2014-2015) της περιόδου μελέτης, εξαιτίας πιθανότατα των επιπτώσεων της ελληνικής οικονομικής κρίσης.

Όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO , σχεδόν σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στις μέσες ετήσιες και μηνιαίες συγκεντρώσεις, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2014-2024. Οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις του NO , ήταν ιδιαίτερος έντονος στους σταθμούς στο κέντρο της πόλης και στην αστική βιομηχανική περιοχή του Κορδελιού. Αντίθετα, όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 , για τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2014-2024, παρατηρήθηκαν αυξητικές τάσεις (κέντρο πόλης και αστική βιομηχανική περιοχή) ή και τάσεις σταθεροποιήσεις (περιαστικές περιοχές). Στο σταθμό στο Λιμένα της πόλης με εξαίρεση το 2014, που παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις NO_x (NO και NO_2) παρατηρήθηκαν σταθεροποιητικές τάσεις στα επίπεδα του NO_2 .

Οι παραπάνω πτωτικές τάσεις, αυτών των ρύπων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024, πιθανότατα οφείλονται κυρίως στη μείωση των συνολικών εκπομπών των PM και NO_x στην Ελλάδα (European Commision, 2026; Fameli & Assimakopoulos, 2016; ΥΠΕΝ, 2025). Οι μειώσεις αυτές μπορεί να προέκυψαν εξαιτίας κυρίως 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 (Κανελλοπούλου, 2016; Χαϊνά 2015; Samara et al., 2014). Επίσης, η διεύρυνση της χρήσης του φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών, η αυστηρότερη περιβαλλοντική νομοθεσία στον τομέα της βιομηχανίας και η συνεχής αυστηροποίηση



των μέτρων ελέγχου εκπομπής ρύπων, συνέβαλαν σ' αυτές τις καθοδικές τάσεις. Η περίοδος της πανδημίας του COVID-19 (Μάρτιος 2020 έως Ιανουάριο 2021), είχε σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων, λόγω του περιορισμού των μετακινήσεων και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, κυρίως κατά την περίοδο των μηνών ισχύος των περιοριστικών μέτρων (Akritidis *et al.*, 2021; Kofinas *et al.*, 2024; Progiou, *et al.*, 2022).

Εξαιτίας τοπικών ιδιαιτεροτήτων, σε μερικούς σταθμούς, υπήρξαν αυξητικές τάσεις ή τάσεις σταθεροποίησης του NO_2 , είτε λόγω ιδιαίτερης κίνησης οχημάτων, είτε από εμπορικές ή ναυτηλιακές δραστηριότητες, είτε λόγω χαμηλών επιπέδων των NO_x . Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι από το Νοέμβριο του 2011 προέκυψε σημαντική αλλαγή στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων, διότι η πολιτεία επέτρεψε τη μετακίνηση των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις (Αθήνα και Θεσσαλονίκη). Έτσι, αυτή η αλλαγή της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων, μπορεί να είναι επίσης μια σημαντική αιτία της ανοδικής τάσης των συγκεντρώσεων NO_2 , σ' αρκετές περιοχές στο κέντρο της πόλης και στην αστική βιομηχανική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Ακόμη, τα χαμηλότερα επίπεδα NO , ειδικά στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου δείχνουν την αυξημένη οξείδωση του NO σε NO_2 (Mavroidis & Chaloulakou, 2011).

Μετά την πανδημία, σε αρκετές περιοχές παρατηρείται σταδιακή ανάκαμψη των επιπέδων των PM και NO_x , 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.

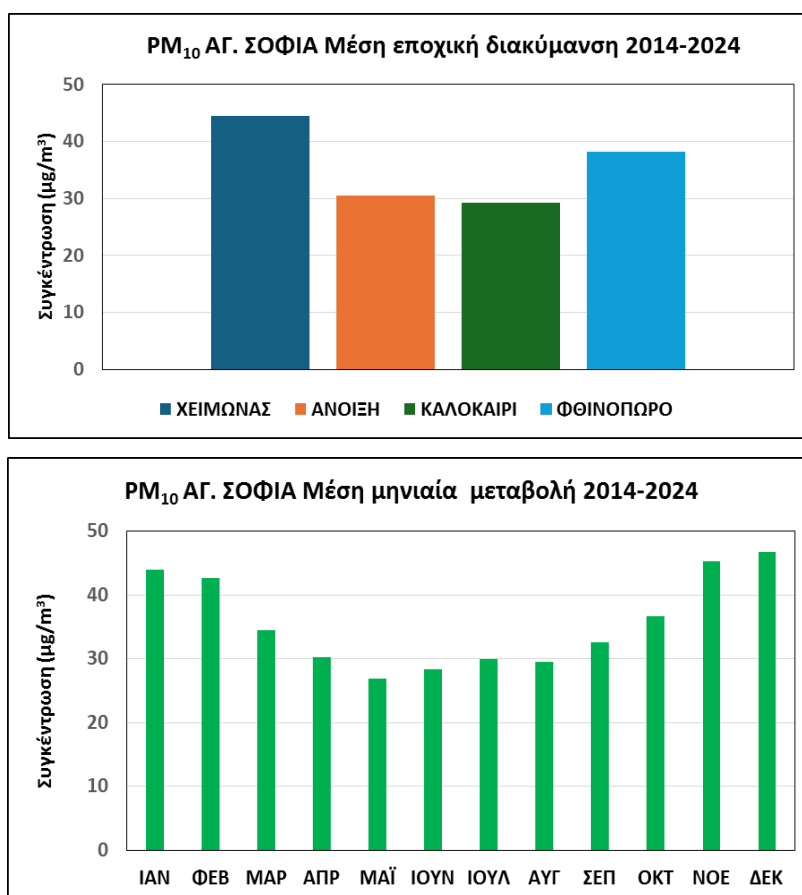
Έτσι, σε πολλές αστικές περιοχές, παρά τη σημαντική επίδραση τοπικών (κυκλοφορία οχημάτων, κεντρικές θερμάνσεις) ή βιομηχανικών πηγών, οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι διαδικασίες διασποράς, αλλά και οι τοπικές ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής μετρήσεων, καθορίζουν αποφασιστικά το βαθμό συσσώρευσης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

Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ρύπανσης στο κέντρο της πόλης και την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

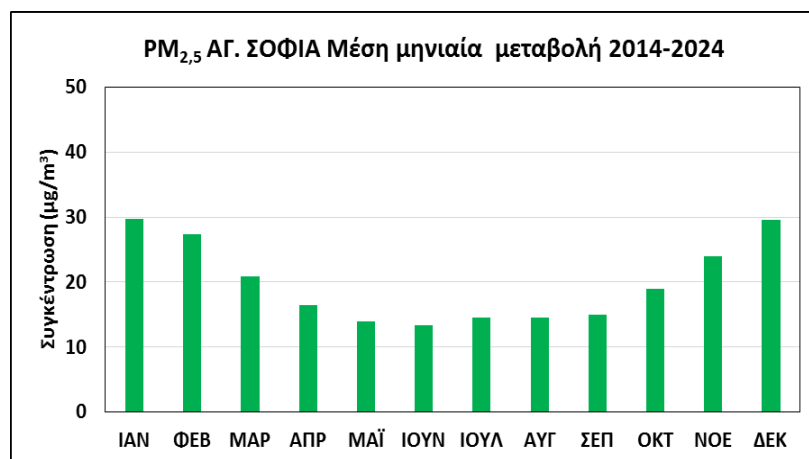
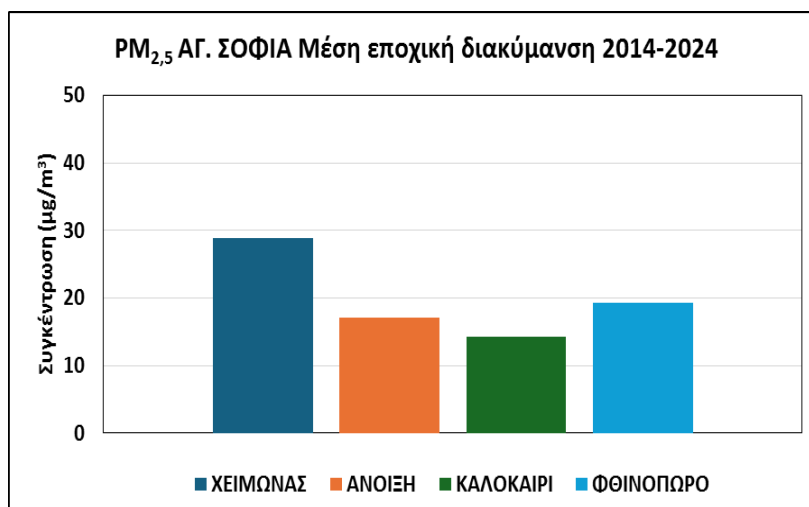
4.2. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM_{10} , $PM_{2,5}$ και NO , NO_2 στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.

4.2.1 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.

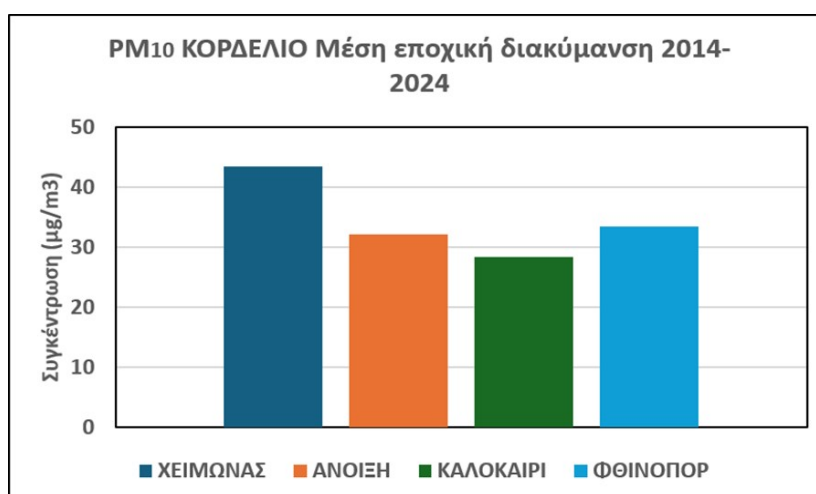
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων εποχικών και των μέσων μηνιαίων μεταβολών της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM_{10} , και $PM_{2,5}$ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης.

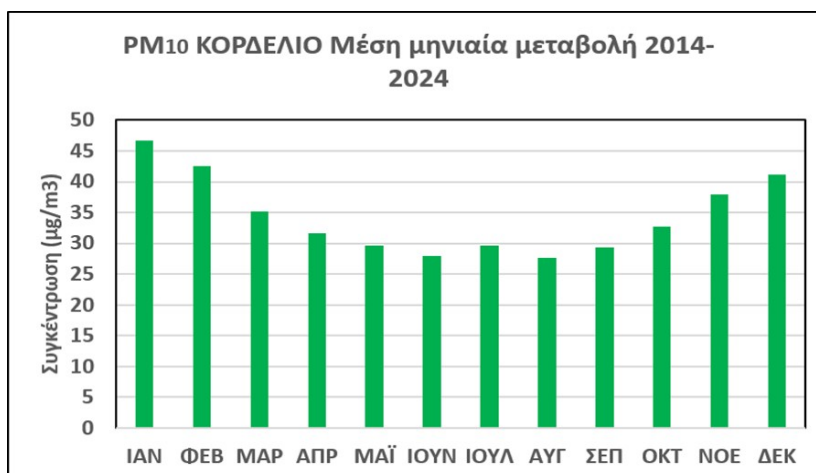


Διάγραμμα 4.19: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM_{10} , σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

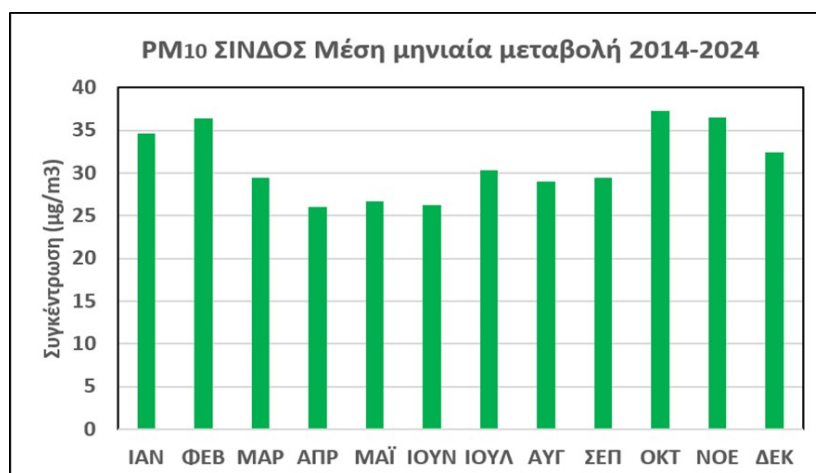
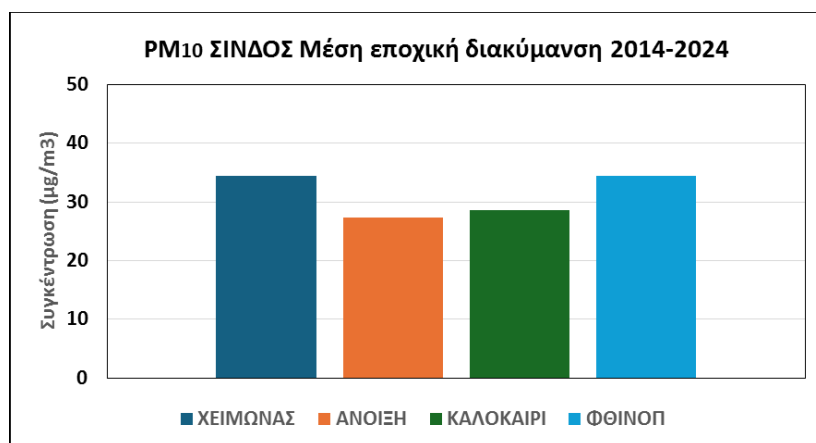


Διάγραμμα 4.20: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

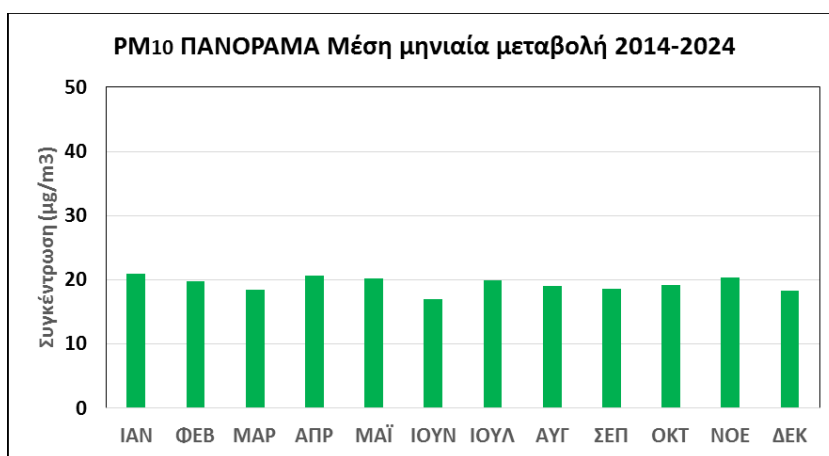
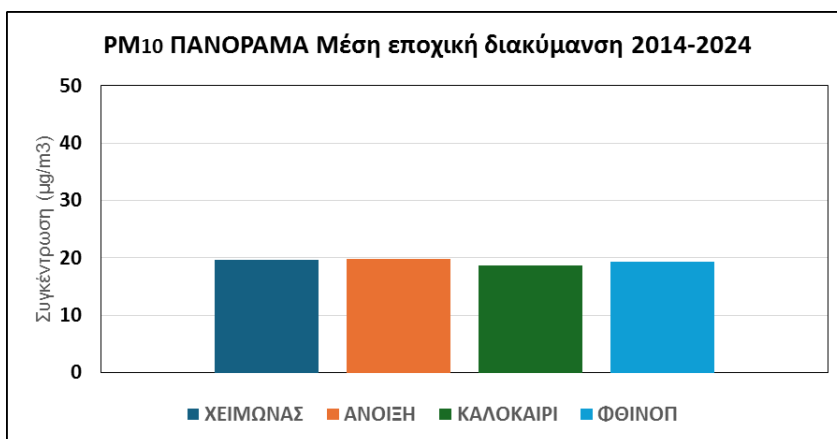




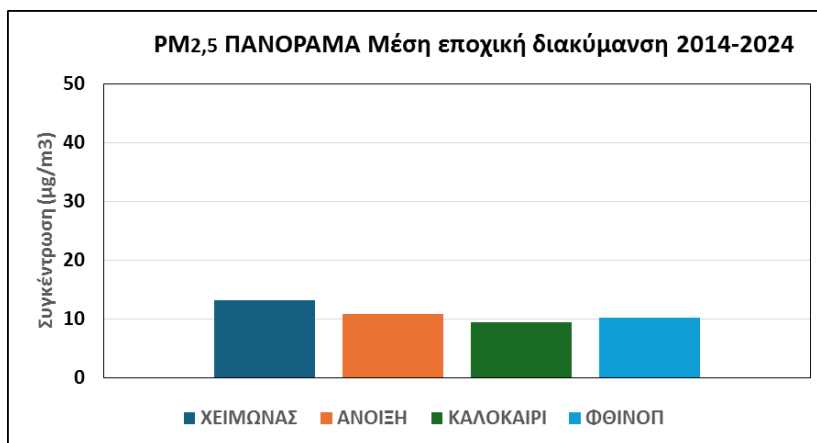
Διάγραμμα 4.21: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

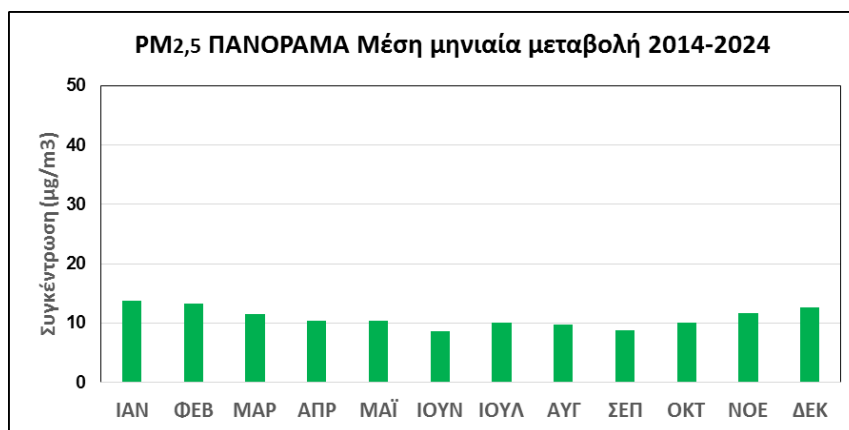


Διάγραμμα 4.22: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό περιαστικό βιομηχανικό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

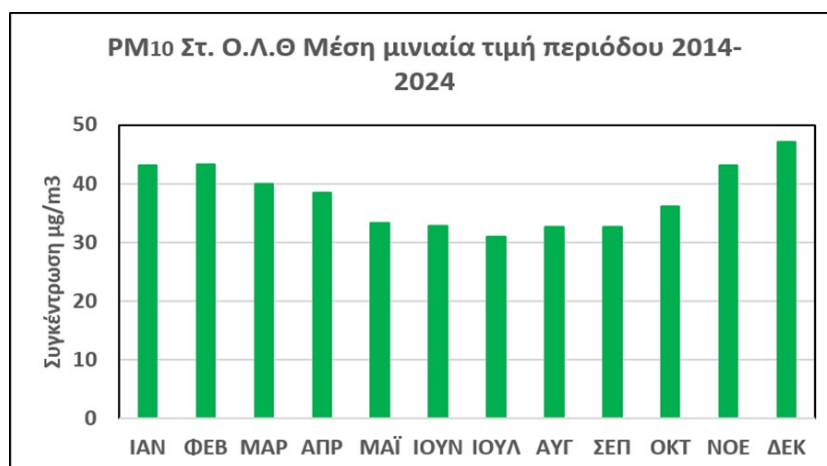
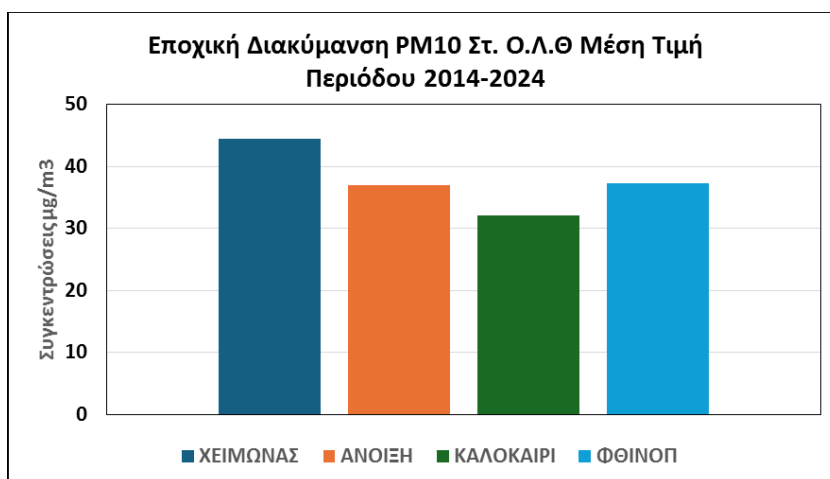


Διάγραμμα 4.23: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM₁₀, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιβατικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

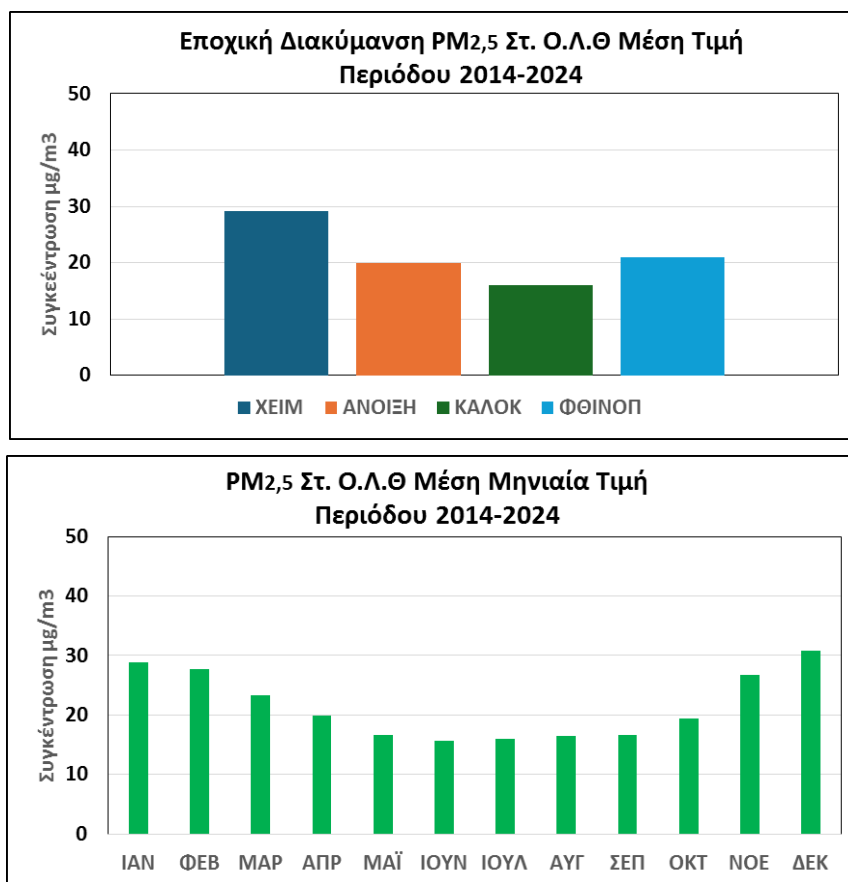




Διάγραμμα 4.24: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.



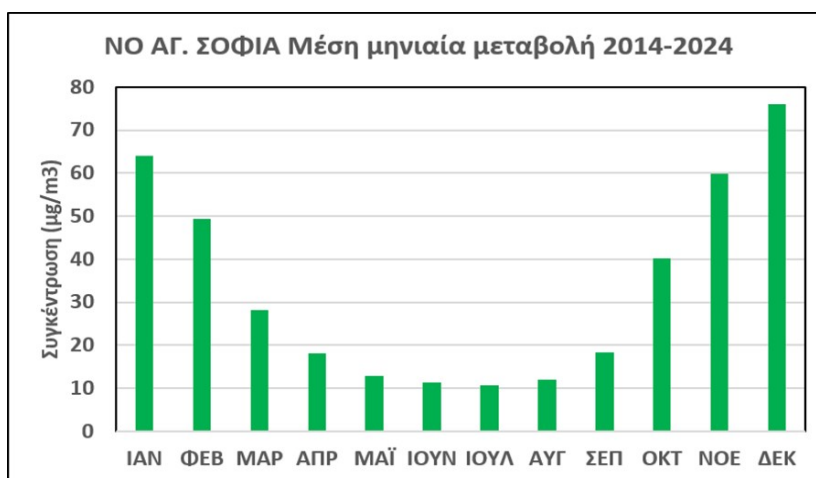
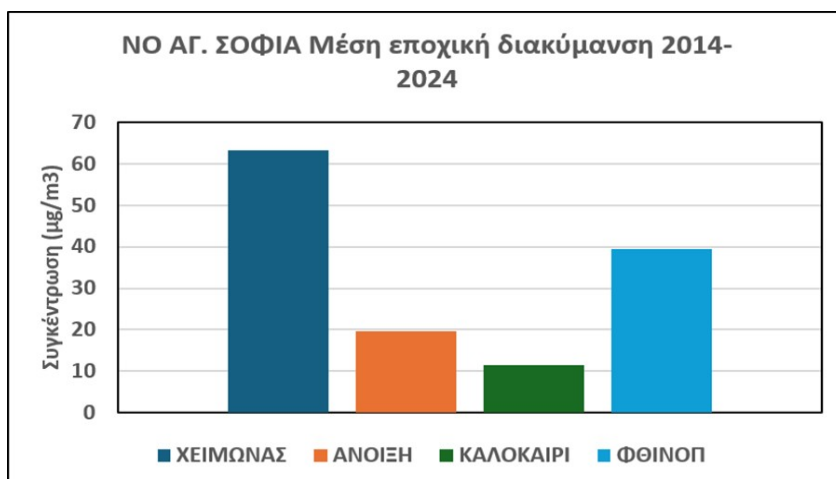
Διάγραμμα 4.25: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.



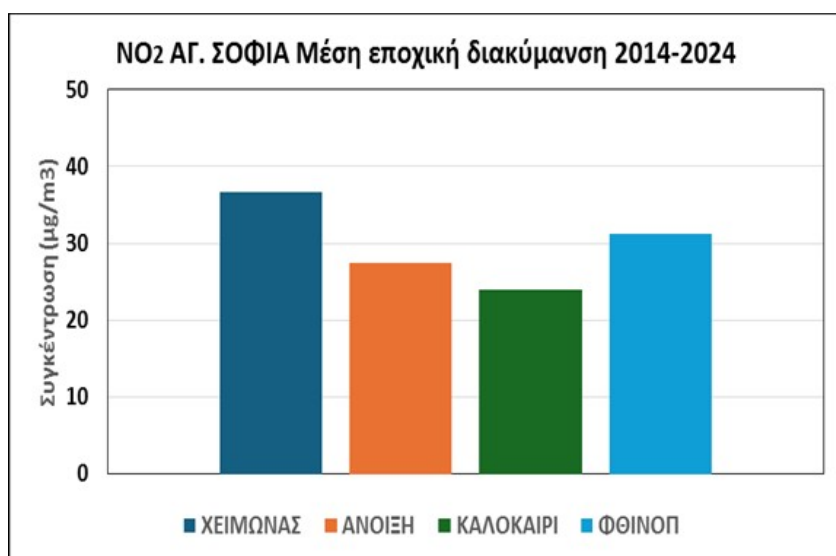
Διάγραμμα 4.26: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.

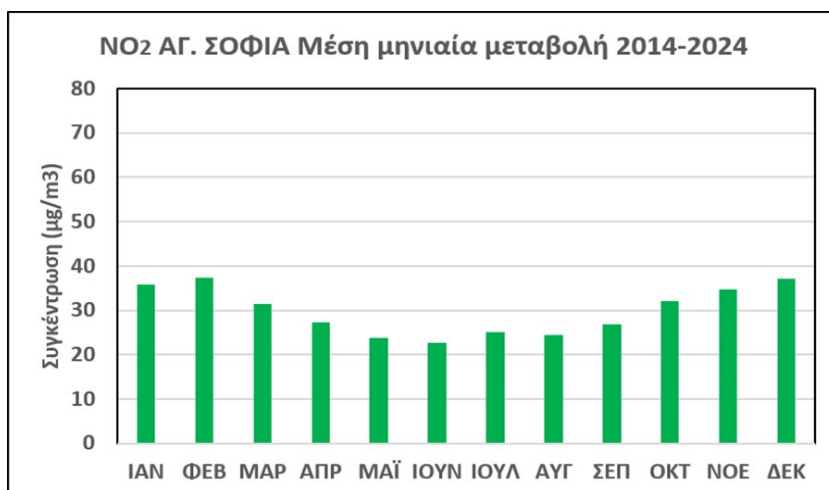
4.2.2 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των NO, NO₂ στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014 - 2024.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων εποχικών και των μέσων μηνιαίων μεταβολών της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων των NO, και NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης.

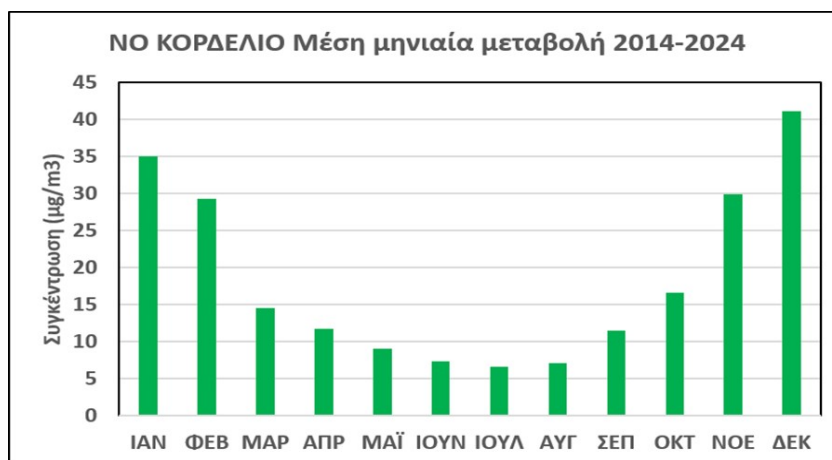
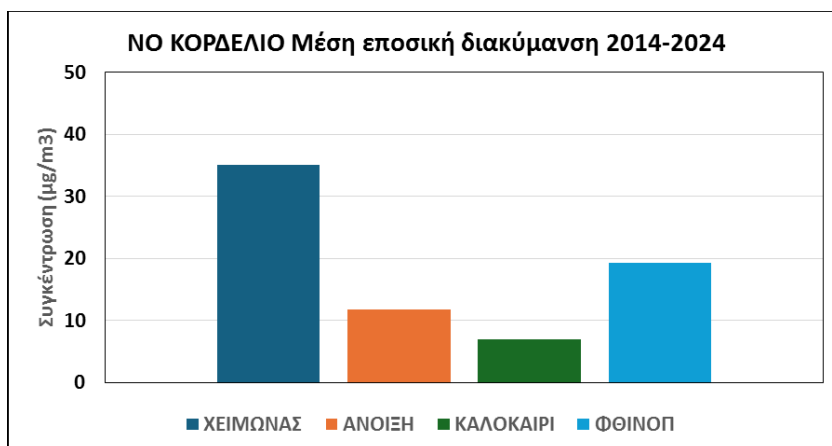


Διάγραμμα 4.27: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του ΝΟ, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

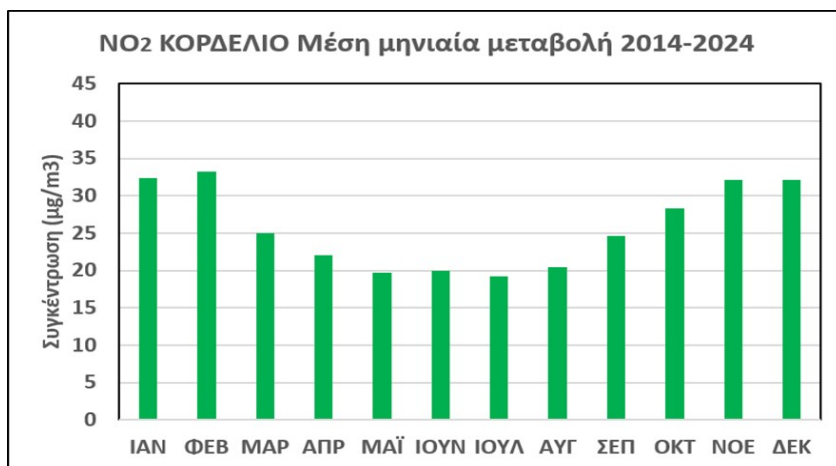
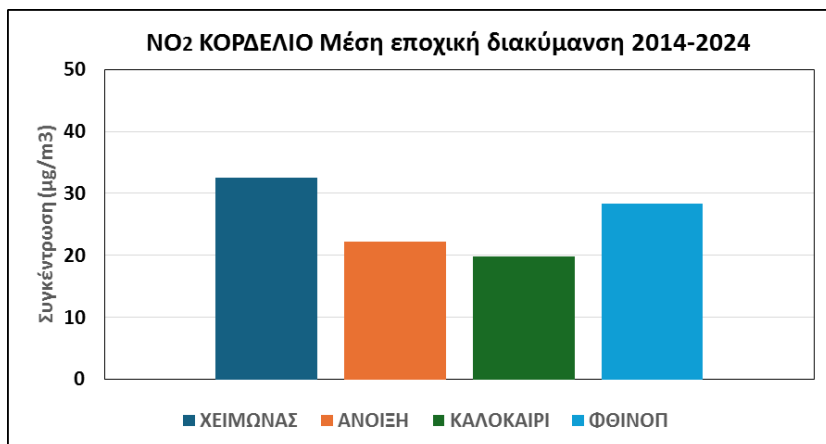




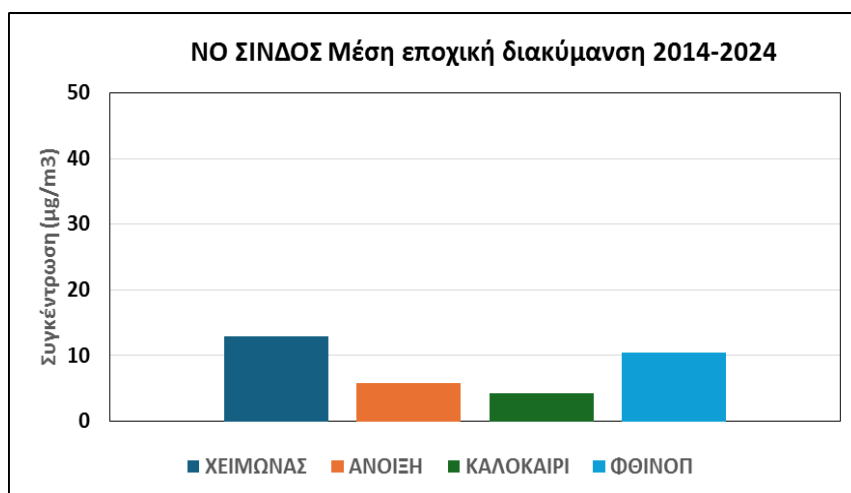
Διάγραμμα 4.28: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικής κυκλοφορίας, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

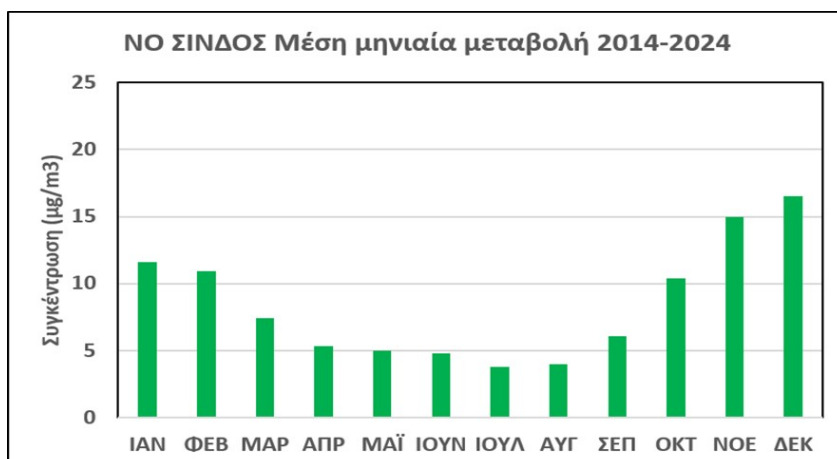


Διάγραμμα 4.29: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

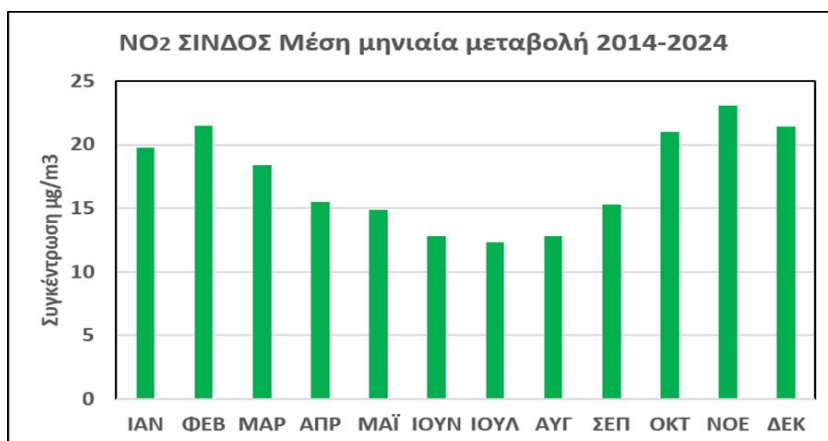
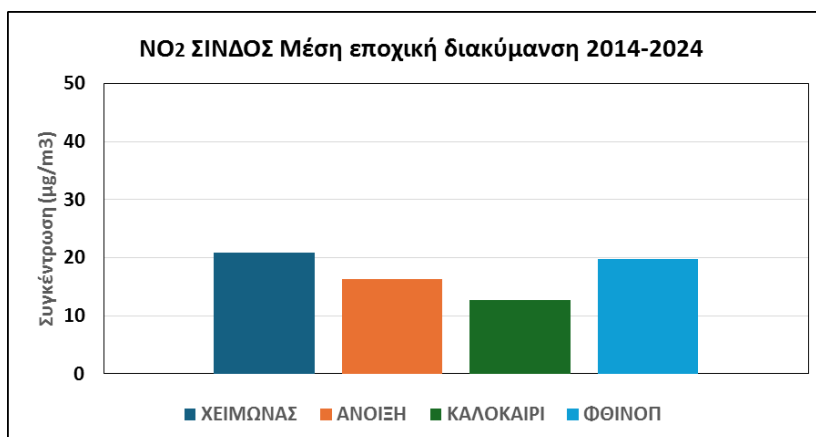


Διάγραμμα 4.30: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό αστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

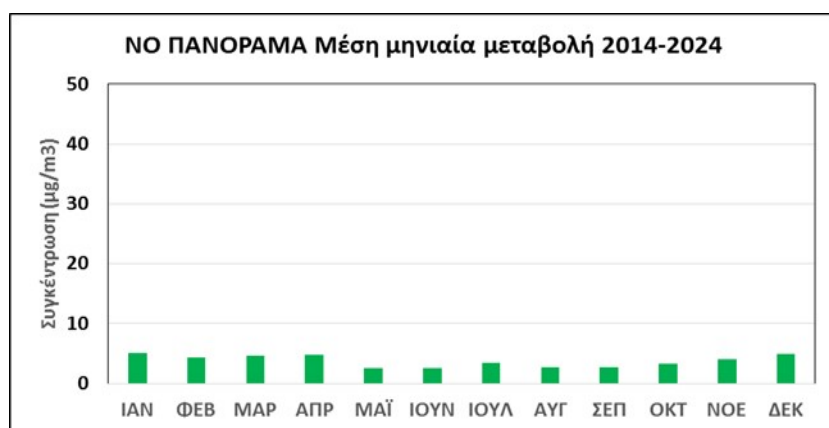
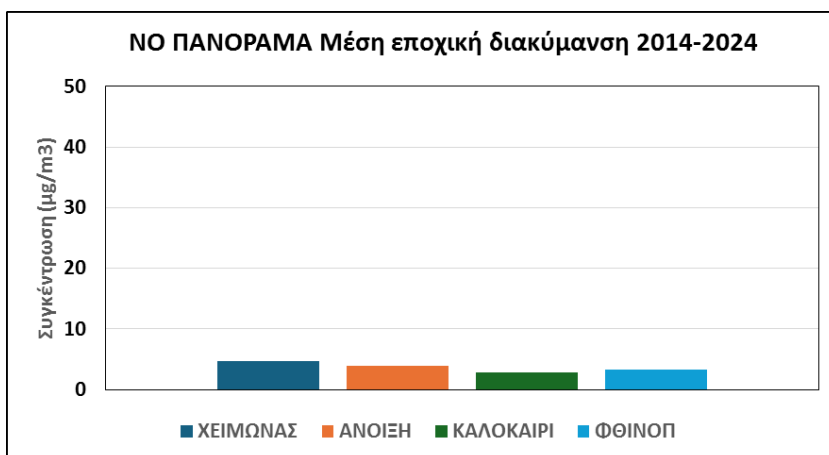




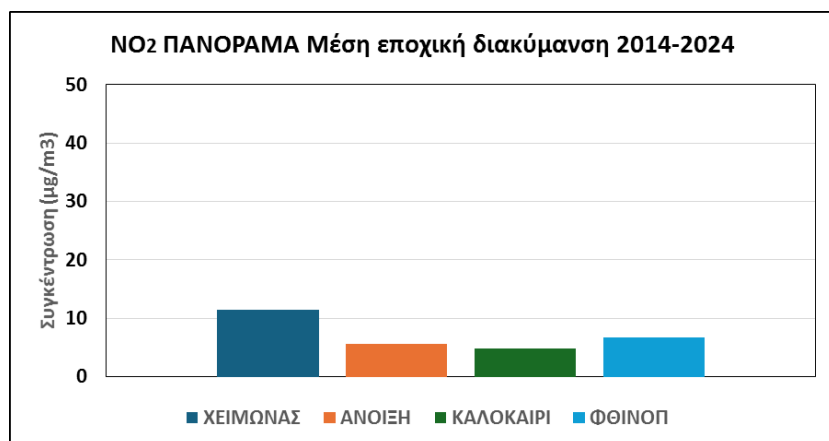
Διάγραμμα 4.31: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό περιβαστικό βιομηχανικό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

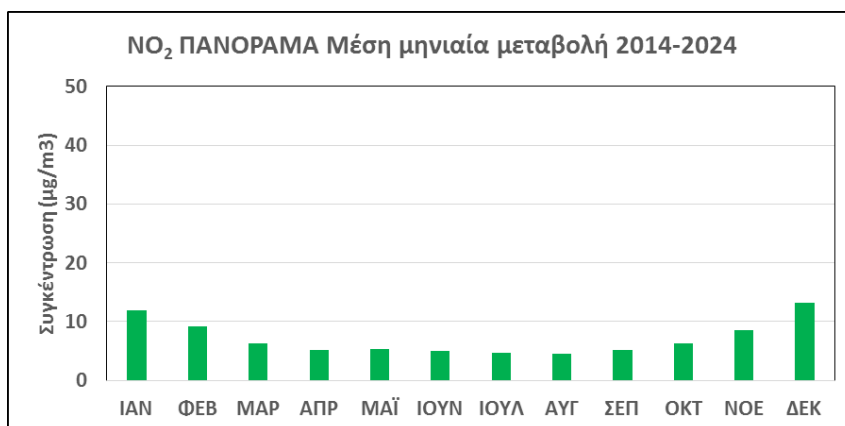


Διάγραμμα 4.32: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό περιβαστικό βιομηχανικό σταθμό, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

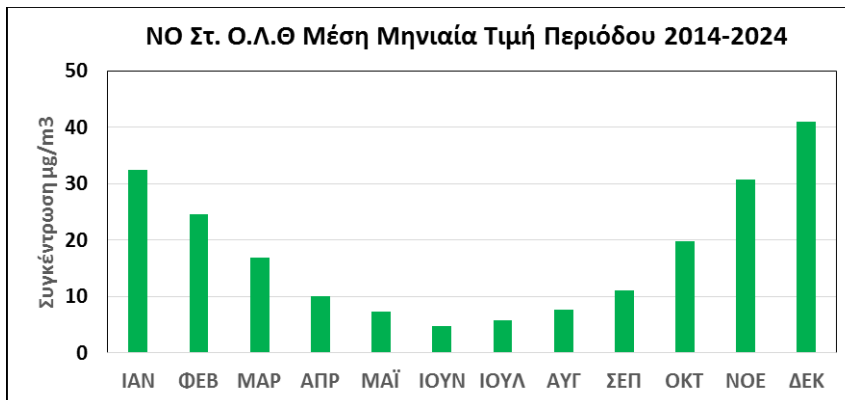
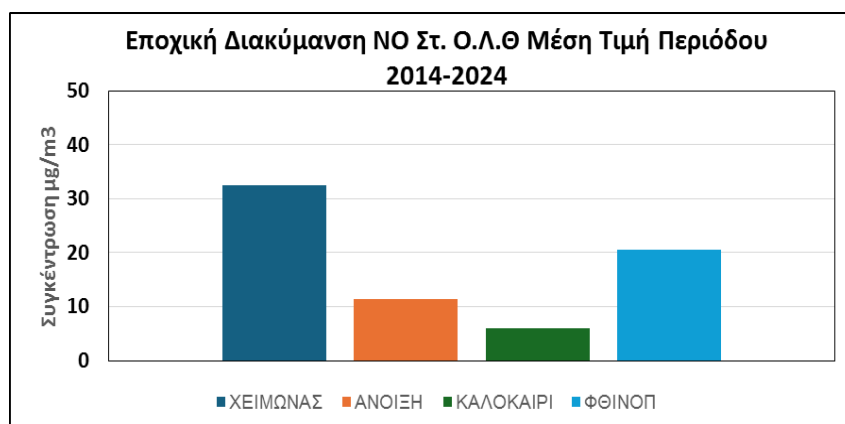


Διάγραμμα 4.33: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

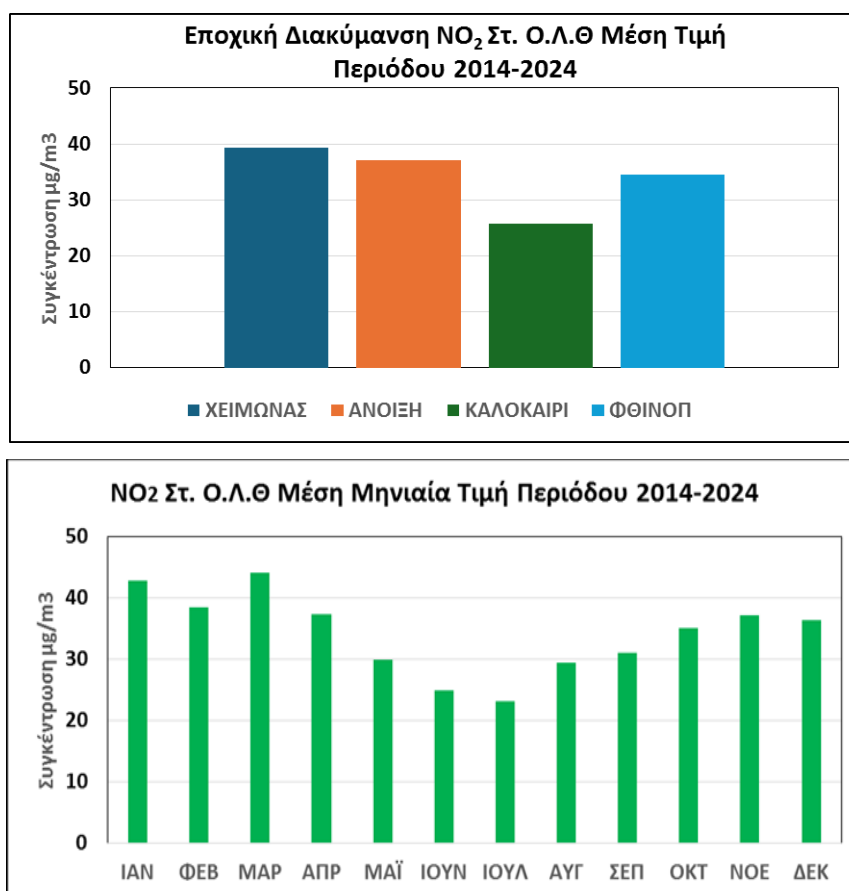




Διάγραμμα 4.34: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO₂, σε αντιπροσωπευτικό σταθμό περιαστικού υποβάθρου, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Διάγραμμα 4.35: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.



Διάγραμμα 4.36: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση της περιόδου 2014-2024, των συγκεντρώσεων του NO₂, στον αστικό σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ στο Λιμάνι της Θεσσαλονίκης.

Από τα διαγράμματα της μέσης εποχικής και της μηνιαίας διακύμανσης των επιπέδων των συγκεντρώσεων της περιόδου 2014-2024, των PM₁₀, PM_{2,5}, NO και NO₂ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρική ρύπανσης, στην ευρύτερη περιοχή της της Θεσσαλονίκης, προέκυψε 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 αυξημένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, τοπικά συστήματα ανέμου, κλπ) κάθε εποχής του έτους (Flocas, et al., 2009; Kassomenos et al., 2011; Kelessis et al., 2006a; Ziomas et al., 1998). Επίσης, η μείωση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, PM_{2,5}, NO και NO₂ τους θερινούς μήνες πιθανώς να οφείλεται και στην ύφεση των δραστηριοτήτων της πόλης και επομένως τη μείωση της κυκλοφορίας των οχημάτων εξαιτίας των καλοκαιρινών διακοπών. Ακόμη, όσον αφορά τα NO και NO₂, στη μειωμένη φωτοχημική δραστηριότητα τη χειμερινή



περίοδο του έτους και όσον αφορά τα PM_{10} και $PM_{2,5}$, στις εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (ειδικά με την αύξηση της καύσης βιομάζας μετά το 2011) (Μπαλάσκας, 2025; Παρασχά κ.ά., 2014; Παρταλίδου, 2018; Χαϊνά κ.ά., 2015).

Στους περιαστικούς σταθμούς και ειδικότερα στο σταθμό του Πανοράματος, παρατηρήθηκε την άνοιξη, αλλά και το καλοκαίρι, αυξημένες τιμές αιωρούμενων σωματιδίων, πιθανότατα εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από παρακείμενες αστικές περιοχές και των δευτερογενών σχηματισμών σωματιδίων, λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών αυτήν την περίοδο του έτους (επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου σε σχέση με τη θέση των σταθμών, ηλιοφάνεια, κλπ) (Πετρακάκης κ.ά., 2008; Στογιάννης, 2019; Χαϊνά, 2014). Η ανοιξιάτικη έξαρση κατά ένα ποσοστό πιθανότατα οφείλεται και στα επεισόδια μεταφοράς Αφρικανικής Σκόνης από τη Σαχάρα, τα οποία εμφανίζουν τη μέγιστη συχνότητα και ένταση στην Ελλάδα κατά τους ανοιξιάτικους μήνες (Mantas et al., 2014). Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου λόγω των παρατηρούμενων χαμηλότερων επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων τα επεισόδια αυτά έχουν ισχυρότερο αποτύπωμα σε σχέση με τους άλλους σταθμούς. Γενικά, η μηνιαία μεταβολή των PM_{10} και $PM_{2,5}$ μπορεί να αλλάζει από έτος σε έτος λόγω και των φυσικών πηγών τους (μεταφορά σκόνης από ξηρές περιοχές εντός και εκτός χώρας, θαλάσσια και βιογενή αερολύματα, κλπ) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (ΥΠΕΝ, 2025).

Στους σταθμούς, αστικής κυκλοφορίας και Λιμάνι-ΟΛΘ, στο κέντρο της πόλης, η εποχική διακύμανση ήταν μεγαλύτερη και ειδικότερα στο NO και τα $PM_{2,5}$, πιθανότατα εξαιτίας της αυξημένης κυκλοφορίας οχημάτων και ναυπηγικών δραστηριοτήτων στο λιμένα της Θεσσαλονίκης τη χειμερινή περίοδο του έτους. Στους περιαστικούς σταθμούς και ειδικότερα στο σταθμό του Πανοράματος, παρατηρήθηκε η μικρότερη εποχική διακύμανση των PM και NO, γεγονός που δείχνει ότι οι περιοχές αυτές δεν επιβαρύνονται ιδιαίτερα από τοπικές πηγές καύσης βιομάζας ή κίνηση οχημάτων τη χειμερινή περίοδο του έτους, αλλά και γενικότερα εξαιτίας της περιορισμένης επίδρασης ανθρωπογενών εκπομπών στις περιοχές αυτές.

Από την εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του NO_2 στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024, διαπιστώθηκε ότι υπήρξε σχετικά η μικρότερη διακύμανση μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου, σε σχέση και με τους άλλους τρεις ρύπους που



μελετήθηκαν σ' αυτήν την εργασία. Ο χειμώνας και το φθινόπωρο ήταν οι περισσότερο επιβαρυνμένες εποχές, με κάποιες όμως μικρές αποκλίσεις, όπως στο σταθμό Λιμάν-ΟΛΘ, στον οποίο οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO_2 παρατηρήθηκαν το χειμώνα και την άνοιξη. Οι διαφοροποιήσεις μπορεί να προκύπτουν ανάλογα με τον τύπο του σταθμού, τις τοπικές πηγές εκπομπών, αλλά και τους δευτερογενείς μετασχηματισμούς σε κάθε περιοχή της πόλης (Λέλης, 2020; Στρατάκη, 2022; ΥΠΕΝ, 2025). 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 (Ζάνης, 2014; Μελάς, 2007; Seinfeld & Pandis, 2016).

Παρά τις παραπάνω διαφορές ανά σταθμό και περιοχή, η πλειονότητα των σταθμών εμφάνισε σταθερά καθοδική τάση από τις χειμερινές προς τις καλοκαιρινές συγκεντρώσεις. Επίσης, από τα παραπάνω προκύπτει ότι, οι εποχικές μεταβολές των εκπομπών των PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, NO και NO_2 , αλλά και οι εποχικές μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών και ειδικά των τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας του ανέμου (θαλάσσια-απόγειος αύρα), επηρεάζουν σημαντικά τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες (δευτερογενείς μετασχηματισμούς) και επομένως την εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων αυτών των ατμοσφαιρικών ρύπων.



Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα, που εμφανίζεται συχνά στα μεγάλα αστικά κέντρα, καθώς η δημιουργία της συνδέεται άμεσα με τις ανθρωπογενείς εκπομπές, τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις πολύπλοκες φωτοχημικές διεργασίες της ατμόσφαιρας. Τα υψηλά επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλονται στη συσσώρευση αέριων και σωματιδιακών ρύπων, που προέρχονται από τις μηχανές καύσης, κυρίως των μέσων μεταφοράς, των βιομηχανιών και της θέρμανσης των κτιρίων.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια εκτίμησης της ποιότητας του αέρα, στη δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, 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 σταθμοί επελέγησαν με κριτήρια πληρότητας δεδομένων και χωρικής αντιπροσωπευτικότητας (σε σχέση με τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά), ώστε να καλύπτονται διαφορετικοί τύποι αστικού περιβάλλοντος (σταθμοί αστικής κυκλοφορίας, αστικοί και περιαστικοί βιομηχανικοί σταθμοί και σταθμοί 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 περιαστικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα να παρέχουν μία συνολική εικόνα για την ποιότητα της ατμόσφαιρας των περιοχών αυτών. Ταυτόχρονα, η ανάλυση βασίστηκε με βάση και τα διαθέσιμα δεδομένα από το σταθμό του ΟΛΘ ΑΕ, που βρίσκεται στον Κεντρικό Λιμένα της Θεσσαλονίκης, πλησίον του κέντρου της αστικής περιοχής της πόλης, ώστε να γίνει εκτίμηση της επίδρασης των δραστηριοτήτων του Λιμένα στο αστικό πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης.

Η παρούσα εργασία έχει στόχο τη μελέτη των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο κέντρο της πόλης, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την τελευταία δεκαετία. Για το λόγο αυτό έχει γίνει προσπάθεια μελέτης των επιπέδων και διερεύνηση των τάσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$ και των οξειδίων του αζώτου NO και NO_2 , σε συγκεκριμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς



μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης, αλλά και την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2014-2024. Η εξέταση έγινε σε σχέση με τις κοινωνικές και οικονομικές αλλαγές στις δραστηριότητες 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 σωματιδιακής, PM_{10} και $PM_{2,5}$, και της φωτοχημικής ρύπανσης, NO και NO_2 , στο κέντρο της πόλης και την ευρύτερη αστική περιοχή της πόλης, για την περίοδο 2014-2024, με στόχο την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων για τη χωροχρονική εξέλιξη των επιπέδων αυτών των ρύπων.

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 εξετάστηκαν σ' αυτή την εργασία. Επίσης, τα $PM_{2,5}$, δεν μετρώνται σε ορισμένους σταθμούς (Κορδελιό και Σίνδος) ή άρχισαν να μετρώνται τα τελευταία έτη της περιόδου μελέτης.

Οι 5 αντιπροσωπευτικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν ήταν:

Αστικής κυκλοφορίας (Αγίας Σοφίας), Αστικός Βιομηχανικός (Κορδελιό), Περιαστικός Βιομηχανικός (Σίνδος), Περιαστικός Υποβάθρου (Πανόραμα), Αστικός Λιμάνι-ΟΛΘ.

Από τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στο κέντρο της πόλης και την ευρύτερη αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2014-2024, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

❖ Την εξεταζόμενη περίοδο οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$ (πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύποι), του NO (πρωτογενής ρύπος) και του NO_2 (πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος) ήταν αυξημένες στο κέντρο της πόλης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο ότι οι κεντρικές αστικές περιοχές είναι πιο πυκνοδομημένες, αλλά και στον αυξημένο αριθμό οχημάτων και διανυόμενων χιλιομέτρων που διέρχονται απ' αυτές τις περιοχές (οχήματα, θέρμανση). Στο σταθμό Λιμάνι του ΟΛΘ τα επίπεδα αυτών των ρύπων πιθανότατα οφείλονται κυρίως στις μεταφορικές, εμπορικές και τουριστικές ναυτιλιακές δραστηριότητες στο Λιμένα της Θεσσαλονίκης, καθώς και στην κίνηση οχημάτων και φορτηγών που προκύπτει



εξαιτίας αυτών των δραστηριοτήτων.

- ❖ Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίσθηκαν στους αστικούς και περιαστικούς βιομηχανικούς σταθμούς, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών, των τοπικών πηγών, των δευτερογενών μετασχηματισμών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης (τοπικά συστήματα ανέμου) από παρακείμενες περιοχές. Στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου παρουσιάσθηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις των PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO και NO_2 , εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών και ειδικά για τους φωτοχημικούς ρύπους και της αστάθειας του NO , που παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, το οδηγεί στη γρήγορη μετατροπή του σε NO_2 , το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε όζον. Ακόμη, τα χαμηλότερα επίπεδα NO , ειδικά στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου δείχνουν την αυξημένη οξείδωση του NO σε NO_2 .
- ❖ Πρέπει να επισημανθεί ότι στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, υπήρξαν υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίων των PM_{10} και $PM_{2.5}$, που ήταν περισσότερες στο κέντρο της πόλης (στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Αγ. Σοφίας και στο Λιμάνι-ΟΛΘ). Στους άλλους σταθμούς δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του ετήσιου ορίου των PM_{10} και $PM_{2.5}$. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάσθηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των PM_{10} και $PM_{2.5}$, για τα περισσότερα έτη της περιόδου μελέτης.
- ❖ Όσον αφορά τα επίπεδα του NO_2 , στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των $40\mu g/m^3$, στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Αγ. Σοφίας και στο σταθμό Λιμάνι-ΟΛΘ (2 και 1 έτος αντίστοιχα). Στις άλλες περιοχές δεν παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του ετήσιου ορίου του NO_2 . Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις NO_2 , στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος ή πλησίον 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. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάσθηκαν, με εξαίρεση τους περιαστικούς σταθμούς, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις του NO_2 , για τα περισσότερα έτη της περιόδου μελέτης.
- ❖ Διαχρονικά όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2.5}$,

στους περισσότερους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στις μέσες ετήσιες και μηνιαίες συγκεντρώσεις, κατά την περίοδο 2014-2024. Εξαιρέση αποτέλεσαν οι σταθμοί Αγ. Σοφίας και Κορδελιού, όσον αφορά τα PM_{10} . Στον πρώτο παρατηρήθηκε αυξητική τάση, ενώ στο δεύτερο μια σταθεροποιητική τάση, που όμως οφείλονται κυρίως στις χαμηλές συγκεντρώσεις των δύο πρώτων ετών (2014-2015) της περιόδου μελέτης, εξαιτίας πιθανότατα των επιπτώσεων της ελληνικής οικονομικής κρίσης.

❖ Διαχρονικά όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO , σχεδόν σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση, κατά την περίοδο 2014-2024. Οι μειώσεις στις συγκεντρώσεις του NO , ήταν σημαντικές στους σταθμούς στο κέντρο της πόλης και στην αστική βιομηχανική περιοχή του Κορδελιού. Αντίθετα, όσον αφορά τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του NO_2 , κατά την περίοδο 2014-2024, παρατηρήθηκαν αυξητικές τάσεις (κέντρο πόλης και αστική βιομηχανική περιοχή) ή και τάσεις σταθεροποίησης (περιαστικές περιοχές). Στο σταθμό στο Λιμένα της πόλης με εξαίρεση το 2014, που παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις των NO_x , παρατηρήθηκαν σταθεροποιητικές τάσεις στα επίπεδα του NO_2 .

❖ Οι παραπάνω πτωτικές τάσεις, αυτών των ρύπων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο 2014-2024, πιθανότατα οφείλονται κυρίως στη μείωση των συνολικών εκπομπών των PM και NO_x στην Ελλάδα. Οι μειώσεις αυτές μπορεί να προέκυψαν εξαιτίας κυρίως 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. Επίσης, η διεύρυνση της χρήσης του φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών και η αυστηρότερη περιβαλλοντική νομοθεσία στον τομέα της βιομηχανίας, συνέβαλαν σ' αυτές τις καθοδικές τάσεις. Η περίοδος της πανδημίας του COVID-19 (Μάρτιος 2020 έως Ιανουάριο 2021), είχε σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων, λόγω του περιορισμού των μετακινήσεων και της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, κυρίως κατά την περίοδο των μηνών ισχύος των περιοριστικών μέτρων.

❖ Εξαιτίας τοπικών ιδιαιτεροτήτων, σε μερικούς σταθμούς, υπήρξαν αυξητικές



τάσεις ή τάσεις σταθεροποίησης του NO_2 , είτε λόγω αύξησης του αριθμού των οχημάτων που κινούνται στο κέντρο της πόλης, είτε από εμπορικές ή ναυτιλιακές δραστηριότητες. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι από το Νοέμβριο του 2011 προέκυψε σημαντική αλλαγή στη σύνθεση του στόλου των οχημάτων, διότι η πολιτεία επέτρεψε τη μετακίνηση των πετρελαιοκίνητων επιβατικών οχημάτων στις δύο ελληνικές μεγαλουπόλεις (Αθήνα και Θεσσαλονίκη). Έτσι, αυτή η αλλαγή της σύνθεσης του στόλου των οχημάτων, μπορεί να είναι επίσης μια σημαντική αιτία της ανοδικής τάσης των συγκεντρώσεων NO_2 , σ' αρκετές περιοχές στο κέντρο της πόλης και στην αστική βιομηχανική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

- ❖ Από τη μέση εποχική και μηνιαία διακύμανση των επιπέδων των συγκεντρώσεων της περιόδου 2014-2024, των PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO και NO_2 στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρική ρύπανσης, στην ευρύτερη περιοχή της της Θεσσαλονίκης, προέκυψε 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 αυξημένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, τοπικά συστήματα ανέμου, κλπ) κάθε εποχής του έτους. Επίσης, η μείωση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO και NO_2 τους θερινούς μήνες πιθανώς να οφείλεται και στην ύφεση των δραστηριοτήτων της πόλης και επομένως τη μείωση της κυκλοφορίας των οχημάτων εξαιτίας των καλοκαιρινών διακοπών. Ακόμη, όσον αφορά τα NO και NO_2 , στη μειωμένη φωτοχημική δραστηριότητα τη χειμερινή περίοδο του έτους και όσον αφορά τα PM_{10} και $\text{PM}_{2.5}$, στις εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (ειδικά με την αύξηση της καύσης βιομάζας μετά το 2011) αυτή την περίοδο του έτους.
- ❖ Στους περιφερειακούς σταθμούς και ειδικότερα στο σταθμό του Πανοράματος, παρατηρήθηκε την άνοιξη, αλλά και το καλοκαίρι, αυξημένες τιμές αιωρούμενων σωματιδίων, πιθανότατα εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από παρακείμενες αστικές περιοχές και των δευτερογενών σχηματισμών σωματιδίων, λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών αυτήν την περίοδο του έτους. Η ανοιξιότικη έξαρση κατά ένα ποσοστό πιθανότατα οφείλεται και στα επεισόδια μεταφοράς Αφρικανικής Σκόνης από τη Σαχάρα, τα οποία εμφανίζουν τη μέγιστη συχνότητα και ένταση στην



Ελλάδα κατά τους ανοιξιάτικους μήνες.

- ❖ Στους σταθμούς, αστικής κυκλοφορίας και Λιμάνι-ΟΛΘ, στο κέντρο της πόλης, η εποχική διακύμανση ήταν μεγαλύτερη και ειδικότερα στο NO και τα PM_{2,5}, πιθανότατα εξαιτίας της αυξημένης κυκλοφορίας οχημάτων και ναυτιλιακών δραστηριοτήτων στο λιμένα της Θεσσαλονίκης, τη χειμερινή περίοδο του έτους. Στους περιφερειακούς σταθμούς και ειδικότερα στο σταθμό του Πανοράματος, παρατηρήθηκε η μικρότερη εποχική διακύμανση των PM και NO, γεγονός που δείχνει ότι οι περιοχές αυτές δεν επιβαρύνονται ιδιαίτερα από τοπικές πηγές καύσης βιομάζας ή κίνηση οχημάτων τη χειμερινή περίοδο του έτους, αλλά και γενικότερα εξαιτίας της περιορισμένης επίδρασης ανθρωπογενών εκπομπών στις περιοχές αυτές.
- ❖ Από την εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του NO₂ στους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, την περίοδο 2014-2024, διαπιστώθηκε ότι υπήρξε σχετικά η μικρότερη διακύμανση μεταξύ χειμερινής και θερινής περιόδου, σε σχέση και με τους άλλους τρεις ρύπους που μελετήθηκαν σ' αυτήν την εργασία. 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.
- ❖ Παρά τις παραπάνω διαφορές ανά σταθμό και περιοχή, η πλειονότητα των σταθμών εμφάνισε σταθερά καθοδική τάση από τις χειμερινές προς τις καλοκαιρινές συγκεντρώσεις. Επίσης, από τα παραπάνω προκύπτει ότι, οι εποχικές μεταβολές των εκπομπών των PM₁₀, PM_{2,5}, NO και NO₂, αλλά και οι εποχικές μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών και ειδικά των τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας του ανέμου (θαλάσσια-απόγειος αύρα), επηρεάζουν σημαντικά τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες (δευτερογενείς μετασχηματισμούς) και επομένως την εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων αυτών των ατμοσφαιρικών ρύπων.
- ❖ Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πιθανότατα το επίπεδο των PM₁₀ και PM_{2,5}, και των NO_x στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης προέρχονται, τόσο από οδικές μεταφορές, όσο και από άλλες πηγές όπως η θέρμανση κατοικιών (καύση βιομάζας τη χειμερινή περίοδο) ή των ναυτιλιακών υπηρεσιών του Λιμένος, αλλά και δευτερογενών μετασχηματισμών. Επίσης, η μεταφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών (κυρίως διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου) και της επαναιώρησης της σκόνης, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση



των επιπέδων αυτών των ρύπων, ειδικά στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου.

- ❖ Όλα τα παραπάνω φανερώνουν τη διατήρηση ή και ενίσχυση του προβλήματος της σωματιδιακής και της φωτοχημικής ρύπανσης κυρίως στο κέντρο του πολεοδομικού συγκροτήματος, που είναι η περισσότερη επιβαρυμένη περιοχή, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

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

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

Γεντεκάκης, Ι.Β. (2010). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Επιπτώσεις έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες*, Εκδόσεις "Κλειδάριθμος" Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

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

Ελληνα, Φ., (2020). *Ο ρόλος των Περιβαλλοντικών Συνθηκών στην εξάπλωση του COVID-19. (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία)*. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Ευρωπαϊκή Ένωση (2008). *Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21ης Μαΐου 2008, για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.* <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj?locale=el>

Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο (2025). *Ειδική έκθεση 02/2025: Αστική ρύπανση στην ΕΕ – Καθαρότερος ο αέρας στις πόλεις, αλλά η ρύπανση εξακολουθεί να έχει σημαντικό κόστος για την υγεία.* Εκδόσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης. <https://www.eca.europa.eu/el/publications?ref=SR-2025-02>

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2024). *Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2024, για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/el/ALL/?uri=CELEX:32024L2881>

Ζάνης, Π., (2014). *Σημειώσεις για την ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

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 ΙΙ». Τόμος Β', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.



Κανελλοπούλου, Ζ. (2015). «Διαχρονική μεταβολή των αέριων ρύπων στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Αξιολόγηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας κατά την οικονομική κρίση στην Ελλάδα». Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

Κανελλοπούλου, Ζ., Κελέσης, Α., Μαλέα, Π., Πετρακάκης, Μ.Ι., Κασσωμένος, Π., & Τζουμάκα, Π. (2016). Αξιολόγηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης πριν και κατά την οικονομική κρίση στην Ελλάδα, 22ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημείας «Χημεία: Έρευνα και Εκπαίδευση με Στόχο τη Βιώσιμη Ανάπτυξη» (CD), 2-4 Δεκεμβρίου 2016, Θεσσαλονίκη.

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

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.

Κυριαζίδης, Π., (2022). ‘Τα επίπεδα των πρωτογενών και των δευτερογενών ατμοσφαιρικών ρύπων σε μεσαίου μεγέθους πόλεις. Η περίπτωση της πόλης των Σερρών’ (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Λέλης, Α. (2020). Εκτιμήσεις των μεταβολών της ποιότητας της ατμόσφαιρας ελληνικών αστικών περιοχών κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Μελάς, Δ. (2007). «Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος», Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής Ατμόσφαιρας.

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.

Ο.Λ.Θ, Τμήμα Βιώσιμης Ανάπτυξης και Περιβαλλοντικής Στρατηγικής, προσωπική επικοινωνία, 2025

Παρασχά, Α., (2014). Η χωροχρονική εξέλιξη της φωτοχημικής ρύπανσης στην Ελλάδα. Συγκρίσεις με άλλες ευρωπαϊκές πόλεις. (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Παρασχά Α., Κελέσης Α., Κασσωμένος Π., Πετρακάκης Μ.Ι. και Χαϊνά Ε., (2015) Η εξέλιξη της φωτοχημικής ρύπανσης στα μεγάλα ελληνικά αστικά κέντρα, Πρακτικά 12^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου Χημείας Ελλάδας-Κύπρου με τίτλο «Χημεία, Πυλώνες Ανάπτυξης στη μετά Κρίση Εποχή» (CD), 8-10 Μαΐου, Θεσσαλονίκη.



Παρταλίδου, Κ. (2018). Αξιολόγηση των μεταβολών της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων τις τελευταίες δεκαετίες σε ελληνικές αστικές περιοχές. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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.

Ρεμουντάκη Ε., 2010, «Οδηγός για το Περιβάλλον: Αέρας και Ατμοσφαιρική Ρύπανση», WWF Hellas.

Στρατάκη, Ο., (2022). Η φωτοχημική ρύπανση στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον μεγάλων πόλεων. Η περίπτωση της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. (Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία). Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

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

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.

Υ.Π.ΕΝ. (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας), 2001-2025, «Ετήσιες Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2001-2025», Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας - ΕΔΠΑΡ, (2001-2025) Αθήνα.

Χαϊνά, Ε. (2014). Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικά αστικά κέντρα. Η επίδραση της οικονομικής κρίσης στα επίπεδα της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Χαϊνά Ε., Κελέσης Α., Πετρακάκης Μ.Ι., Κασσωμένος Π. και Παρασχά Α., Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} 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.



Ξενόγλωση Βιβλιογραφία

Akritidis, D., Zanis, P., Georgoulas, 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.

Chatzopoulou, A., & Mavroidis, I. (2025). *Spatiotemporal analysis of air pollutants in Thessaloniki, Greece*. *Atmosphere*, 16(9), 1057. <https://www.mdpi.com/2073-4433/16/9/1057>

Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2004). *Air pollution control: A design approach* Waveland Press Inc.

Diapouli E., M. Manousakas, S. Vratolis, V. Vasilatou, Th. Maggos, D. Saraga, Th. Grigoratos, G. Argyropoulos, D. Voutsas, C. Samara, K. Eleftheriadis (2017) *Evolution of air pollution source contributions over one decade, derived by PM10 and PM2.5 source apportionment in two Metropolitan Urban Areas in Greece*. *Atmospheric Environment*, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.06.016

Dimitriou, K., & Mihalopoulos, N. (2024). *Air quality assessment in six major Greek cities with an emphasis on the Athens metropolitan region*. *Atmosphere*, 15(9), 1074. <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/9/1074>

EU Clean Air Policy Updates (2024). European Commission-DG ENV Clean Air and Urban Policy Unit. env-air@ec.europa.eu

European Committee for Standardization. (2023). *Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter (Standard No. EN 12341:2023)*. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/9e212b76-3171-40b4-9d69-07409bc6bf75/en-12341-2023>

European Commision (2026). *Evaluation of the National Emission Reduction Commitments Directive (NEC Directive)*
https://environment.ec.europa.eu/topics/air/reducing-emissions-air-pollutants/national-emission-reduction-commitments-directive-evaluation_en

European Environment Agency. (2026). *Europe's environment and climate: knowledge for resilience, prosperity and sustainability* <https://www.eea.europa.eu/en/europe-environment-2025/main-report>

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).

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.

Kampa, M., Castanas, E., 2008, Human health effects of air pollution, Environmental Pollution, Volume 151, Issue 2, January 2008, Pages 362-367, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>

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.

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., 2006a, «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, 2006b. 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>.

Kosmopoulos, G., Salamalikis, V., Matrali, A., Pandis, S. N., & Kazantzidis, A. (2022). Insights about the sources of PM_{2.5} in an urban area from measurements of a low-cost sensor network. Atmosphere, 13(3), 440. <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/3/440>

Logothetis, S.-A., Kosmopoulos, G., Panagopoulos, O., Salamalikis, V., Kazantzidis, A. (2024). Forecasting the Exceedances of PM_{2.5} in an Urban Area. Atmosphere, 15, 594. <https://doi.org/10.3390/atmos15050594>.



Mantas E., Remoundaki E., Halari I., Kassomenos P., Theodosi C., Hatzikioseyan A., Mihalopoulos N., 2014, “Mass closure and source apportionment of PM_{2.5} by Positive Matrix Factorization analysis in urban Mediterranean environment”, *Atmospheric Environment*, Vol. 94, 154-163.

Manousakas, M., Diapouli, E., Belis, C., Vasilatou, V., Gini, M., Lucarelli, F., Querol, X., Eleftheriadis, K. (2021). Quantitative assessment of the variability in chemical profiles from source apportionment analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} at different sites within a large metropolitan area. *Environ. Res.*, 192, 110257.

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.

Paschalidou A.K., Kassomenos P.A., A. Kelessis, 2016, Tracking the association between metro-railway construction works and PM levels in an urban Mediterranean environment, *Science of the Total Environment*, Vol. 568, Pages 1326–1332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.031>.

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.

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

Progiou, A. G., Sebos, I., Zarogianni, A. M., Tsilibari, E. M., Adamopoulos, A. D., & Varelidis, P. (2022). Impact of Covid-19 pandemic on air pollution: the case of Athens, Greece. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 21(5).

Progiou, A., Liora, N., Sebos, I., Chatzimichail, C., & Melas, D. (2023). Measures and policies for reducing PM exceedances through the use of air quality modeling: The case of Thessaloniki, Greece. *Sustainability*, 15(2), 930. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/2/930>

Saffari A., Daher N., Samara C., Voutsas D., Kouras A., Manoli E., Karagkiozidou O., Vlachokostas C., Moussiopoulos N., Shafer M., Schauer J. and Sioutas C. Increased Biomass Burning Due to the Economic Crisis in Greece and Its Adverse Impact on Wintertime Air Quality in Thessaloniki, *Environmental Science Technology*, 47, 13313–13320, 2013.

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., Pandis S. *Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2006.

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., Achilles C., Moussiopoulos N., Kalogeropoulos K., Sigalas G., Kalognomou E-A., Baniyas G., (2012a), «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., (2012b). 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.

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content>

Wilson, R., C., Flemming, Z., L., Monks, R., S., Clain, G., Henne, S., Konovalov, 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.*

Ιστοσελίδες στο διαδίκτυο

http://europa.eu/legislation_summaries/environment/. Ανακτήθηκε στις 18 Οκτωβρίου 2025

<http://www.ypen.gr> . Ανακτήθηκε στις 20 Οκτωβρίου 2025

<https://apothesis.eap.gr/archive/search> Ανακτήθηκε στις 12 Νοεμβρίου 2025

<https://apothesis.eap.gr/archive/item/151626>. Ανακτήθηκε στις 17 Νοεμβρίου 2025

<https://apothesis.eap.gr/archive/item/193220>. Ανακτήθηκε στις 18 Νοεμβρίου 2025

<https://www.thpa.gr/el/> Ανακτήθηκε στις 14 Δεκεμβρίου 2025

<https://www.thpa.gr/el/sustainability/> Ανακτήθηκε (ΟΛΘ) στις 14 Δεκεμβρίου 2025

www.espo.be. *ESPO - The European Sea Ports Organisation*, 2022. Ανακτήθηκε στις 10 Μαρτίου 2026.

https://el.wikipedia.org/wiki/Λιμάνι_της_Θεσσαλονίκης Ανακτήθηκε στις 5 Μαρτίου 2026.

<https://www.statistics.gr>, Ανακτήθηκε στις 25-3-2026.

<http://envdimosthes.gr> . Ανακτήθηκε στις 25 Οκτωβρίου 2025

<http://pkm.gr> . Ανακτήθηκε στις 23 Οκτωβρίου 2025

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.