



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΚΑΛΗΣΩΡΑΣ Θ. ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ
ΑΕΜ: 5116

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018





ΚΑΛΗΣΩΡΑΣ Θ. ΑΛΚΙΒΙΑΔΗΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5116

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας,
5 Νοεμβρίου 2018

Επιβλέπων

Ζάνης Πρόδρομος



© Καλησώρας Θ. Αλκιβιάδης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – *Διπλωματική Εργασία*

© Kalisoras T. Alkiviadis, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2018

All rights reserved.

STUDY OF AIR POLLUTION IN THE CITY OF THESSALONIKI – *Bachelor Thesis*

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

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



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	1
1.1 Η ΓΗΙΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	1
1.1.1 Χημική σύσταση της κατώτερης ατμόσφαιρας	1
1.1.2 Κατακόρυφη διαίρεση της ατμόσφαιρας	2
1.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	4
1.2.1 Ιστορική αναδρομή του προβλήματος	4
1.2.2 Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι	6
1.2.3 Επίδραση μετεωρολογικών παραγόντων στις συγκεντρώσεις των ρύπων	27
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	30
2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	30
2.1.1 Η μορφολογία της Θεσσαλονίκης	30
2.1.2 Κλιματικά στοιχεία της Θεσσαλονίκης	30
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	33
2.2.1 Ανάλυση O ₃	33
2.2.2 Ανάλυση NO _x	34
2.2.3 Ανάλυση CO	36
2.2.4 Ανάλυση SO ₂	36
2.2.5 Ανάλυση PM ₁₀	38
2.3 ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	40
2.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	42
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	45
3.1 ΕΤΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2017	45
3.2 ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013	51
3.3 ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013	58
3.4 ΩΡΙΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013	63
3.4.1 Ωριαίες μεταβολές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους	63
3.4.2 Ωριαίες μεταβολές κατά τη θερμή και την ψυχρή περίοδο του έτους	69
3.4.3 Ωριαίες μεταβολές με βάση τις εποχές του έτους	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ατμοσφαιρική ρύπανση της πόλης της Θεσσαλονίκης. Οι ρύποι οι οποίοι συμμετέχουν στη μελέτη αυτή είναι το όζον (O_3), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα O_x , τα οποία αποτελούν το άθροισμα των συγκεντρώσεων του όζοντος και του διοξειδίου του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των $10 \mu m$ (PM_{10}).

Τα δεδομένα αντλούνται από το δίκτυο των σταθμών της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και περιλαμβάνουν τους σταθμούς της Αγίας Σοφίας, του Α.Π.Θ., του Ελευθερίου-Κορδελιού, της Καλαμαριάς, του Πανοράματος, της Νεοχωρούδας και της Σίνδου. Οι μετρήσεις των ρύπων είναι ωριαίες και μαζί με αυτές γίνονται και μετρήσεις κάποιων μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου).

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η πορεία των ρύπων κατά τη διάρκεια του έτους, των εποχών, της εβδομάδας και της ημέρας, ενώ γίνεται και ερμηνεία των διαχρονικών τάσεων των ρύπων. Επίσης, μελετάται η συμπεριφορά των ρύπων κατά τη διάρκεια της θερμής (Μάιος-Σεπτέμβριος) και της ψυχρής (Νοέμβριος-Μάρτιος) περιόδου του έτους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής αναπτύσσονται μερικά θεωρητικά στοιχεία για την ατμόσφαιρα και τη δομή της, την ατμοσφαιρική ρύπανση (ορισμός, ιστορική αναδρομή) και τους υπό μελέτη ρύπους (χαρακτηριστικά, πηγές εκπομπής, επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον).

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται μερικές πληροφορίες για την ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, το δίκτυο μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, τον τρόπο και τα όργανα μέτρησης των ατμοσφαιρικών ρύπων και τη νομοθεσία ποιότητας αέρα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η στατιστική μελέτη της ετήσιας, εποχικής, μηνιαίας, εβδομαδιαίας και ημερήσιας διακύμανσης των προαναφερθέντων ρύπων μαζί με τα ανάλογα διαγράμματα.



Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πόλης της Θεσσαλονίκης.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, κ. Πρόδρομο Ζάνη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδάκτορα του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., κ. Αθανάσιο Τσικερδέκη για τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε σχετικά με την επεξεργασία των δεδομένων.

Καλησώρας Αλκιβιάδης
Θεσσαλονίκη, 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ατμοσφαιρική ρύπανση της πόλης της Θεσσαλονίκης. Πιο συγκεκριμένα, μελετώνται οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των ρύπων O_3 , NO_x , O_x , CO , SO_2 και PM_{10} σε ετήσια, εποχική, μηνιαία, εβδομαδιαία και ημερήσια βάση για τα έτη 2001-2013. Ακόμη, εξετάζεται η διαχρονική τάση του εκάστοτε ρύπου για την περίοδο 2001-2017.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, οι συγκεντρώσεις του O_3 σε όλους τους σταθμούς μέτρησης είναι μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού λόγω των φωτοχημικών αντιδράσεων παραγωγής όζοντος, οι οποίες ευνοούνται από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα εξ' αιτίας της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας της Γης. Οι σταθμοί που έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 βρίσκονται μακριά από το κέντρο της πόλης.

Αντίθετα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των NO_x , CO , SO_2 και PM_{10} παρατηρούνται σε όλους τους σταθμούς μέτρησης κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο λόγω της λειτουργίας των συστημάτων κεντρικής θέρμανσης και της έντονης κυκλοφοριακής κίνησης. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κατά τους θερινούς μήνες διότι δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση. Οι σταθμοί με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις στους παραπάνω ρύπους βρίσκονται στο κέντρο της πόλης.

Οι συγκεντρώσεις των O_x αποτελούν το άθροισμα των συγκεντρώσεων του O_3 και του NO_2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μεταβολή των συγκεντρώσεων των O_x να επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις του O_3 και των NO_x .



ABSTRACT

STUDY OF AIR POLLUTION IN THE CITY OF THESSALONIKI

In the present study, the air pollution in the city of Thessaloniki is examined. More specifically, the variations in the O_3 , NO_x , O_x , CO , SO_2 and PM_{10} concentrations are examined in a yearly, seasonal, monthly, weekly and diurnal basis for the years 2001-2013. Moreover, the intertemporal trend of each pollutant is examined for the 2001-2017 time period.

The results showed that in every monitoring station the O_3 concentrations are higher during the summer due to photochemical reactions, which benefit from immense solar radiation. The lowest concentrations are observed during the winter because of the decreased solar radiation that reaches the lower layers of the Earth's atmosphere. The stations with the highest O_3 concentrations are found far away from the city centre.

On the contrary, the highest NO_x , CO , SO_2 and PM_{10} concentrations are observed during November, December and January in all monitoring stations due to the operation of central heating systems and the immense traffic. The lowest concentrations are observed during the summer because the central heating systems do not operate. The stations that have the highest concentrations of the above pollutants are located in the city centre.

The O_x concentrations are a sum of the O_3 and NO_2 concentrations. As a result, the variations in the O_x concentrations are greatly affected by the variations in the O_3 and NO_x concentrations.



1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1.1 Η ΓΗΙΝΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Ατμόσφαιρα καλείται το αεριώδες τμήμα του πλανήτη μας, το οποίο τον περιβάλλει (συγκράτηση λόγω βαρύτητας) και τον ακολουθεί στις διάφορες κινήσεις του. Οι ταχύτητες περιστροφής του αεριώδους και του στερεού τμήματος της Γης γενικά συμπίπτουν, χωρίς να είναι κατά κανόνα ίσες. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών ποσοτήτων ενέργειας που απορροφά το εκάστοτε τμήμα κάθε φορά. Όταν το ένα τμήμα του πλανήτη τύχει να απορροφήσει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, τότε αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του, ενώ το άλλο τμήμα λειτουργεί ως απορροφητής ενέργειας, με τελικό αποτέλεσμα την εξίσωση των ταχυτήτων περιστροφής.

1.1.1 Χημική σύσταση της κατώτερης ατμόσφαιρας

Μετά από πολλές μετρήσεις και χημικές αναλύσεις, διαπιστώθηκε ότι η Γη, στα κατώτερα στρώματά της, αποτελείται από: 1) ένα μίγμα αερίων συστατικών που συνιστούν τον “ξηρό” αέρα, 2) νερό σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή και 3) αερολύματα, δηλ. υγρά ή στερεά ατμοσφαιρικά σωματίδια μικρής διαμέτρου.

Πίνακας 1.1: Η μέση σύσταση του “ξηρού” αέρα, από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το ύψος των 80 Km. Τροποποιημένο από: (Μακρογιάννης & Σαχσαμάνογλου, 2004)

Συστατικό	Σύμβολο	Περιεκτικότητα κατ' όγκο (%)
Άζωτο	N ₂	78.084±0.004
Οξυγόνο	O ₂	20.946±0.001
Αργό	Ar	0.934±0.001
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	0.03±0.003
Νέο	Ne	(1.821±0.004).10 ⁻³
Ήλιο	He	(5.239±0.005).10 ⁻⁴
Κρυπτό	Kr	(1.14±0.01).10 ⁻⁴
Υδρογόνο	H ₂	~5.10 ⁻⁵
Ξένο	Xe	(8.7±0.1).10 ⁻⁶
Όζον	O ₃	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁵

Όπως διαπιστώνεται από τα παραπάνω, τα πρώτα τέσσερα αέρια του πίνακα 1.1 συνιστούν περίπου το 99.98% του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα. Γενικότερα, μέχρι και το ύψος των 100 Km περίπου παρατηρείται καλή ανάμιξη των συστατικών της ατμόσφαιρας, ενώ πέρα από αυτό το ύψος δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο.

1.1.2 Κατακόρυφη διαίρεση της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις βασικές περιοχές με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος: α) την Τροπόσφαιρα, β) τη Στρατόσφαιρα, γ) τη Μεσόσφαιρα και δ) τη Θερμόσφαιρα. Ανάμεσά τους συναντώνται μεταβατικές ζώνες αρκετού πάχους, οι οποίες αποτελούν τα όρια μεταξύ δύο διαδοχικών περιοχών. Αυτές κατά σειρά είναι: i) η Τροπόπαυση, ii) η Στρατόπαυση και iii) η Μεσόπαυση.

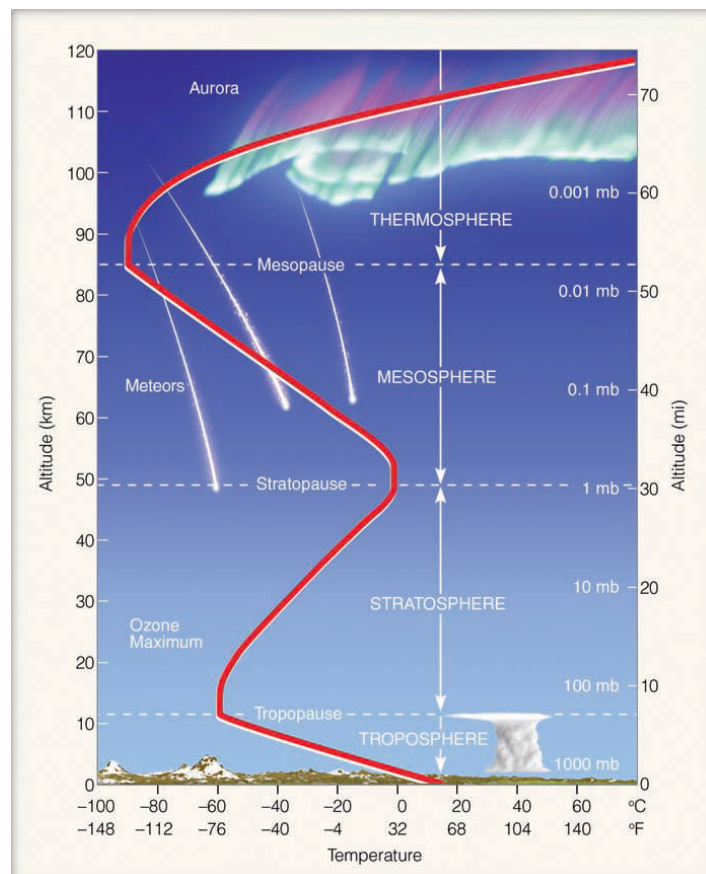
Η Τροπόσφαιρα αποτελεί την κατώτερη περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το ύψος των 12 ± 4 Km. Το μεταβλητό αυτό ύψος εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους. Στον Ισημερινό φτάνει μέχρι το ύψος των 16-17 Km και στους πόλους το ύψος των 7-8 Km. Περιλαμβάνει περίπου το 75-80% της μάζας της ατμόσφαιρας και σχεδόν το σύνολο των υδρατμών. Σε αυτό το στρώμα λαμβάνουν χώρα σχεδόν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα και τα φαινόμενα ρύπανσης της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία ελαττώνεται καθ' ύψος με ρυθμό 6°C/Km μέχρι την τιμή των -55°C ως -80°C στο ύψος της τροπόπαυσης.

Η Στρατόσφαιρα βρίσκεται άνωθεν της Τροπόσφαιρας και διαχωρίζεται από αυτήν με την Τροπόπαυση. Εκτείνεται μέχρι το ύψος των 50 Km περίπου και μέσα σε αυτή, η θερμοκρασία αυξάνεται με το ύψος (για ύψη μεγαλύτερα των 20 Km περίπου) μέχρι την τιμή των 0°C στο ύψος όπου εκτείνεται η Στρατόπαυση. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας, όπως διαπιστώθηκε με έμμεσες και άμεσες μεθόδους, οφείλεται στο στρώμα του όζοντος που εκτείνεται από τα 15 Km μέχρι τα 40 Km και είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας με μήκη κύματος 200-300 nm. Σημειώνεται ότι η Στρατόσφαιρα και η Τροπόσφαιρα περιέχουν το 99% του συνόλου της μάζας της ατμόσφαιρας, όπως φαίνεται από την τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην Στρατόπαυση ($\sim 1\text{mb}$).

Η Μεσόσφαιρα εκτείνεται από την Στρατόπαυση μέχρι περίπου τα 80 Km. Μέσα σε αυτό το στρώμα παρατηρείται δραματική πτώση της θερμοκρασίας καθ' ύψος με

τιμές που φτάνουν μέχρι τους -80°C με -90°C στο ανώτερο όριο αυτού (Μεσόπαιση). Η μεγάλη ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος οφείλεται, μεταξύ άλλων, και στην απουσία του όζοντος μέσα το στρώμα αυτό.

Πάνω από την Μεσόπαιση εκτείνεται η Θερμόσφαιρα μέχρι το ύψος των 400 Km περίπου. Μέσα σε αυτήν η θερμοκρασία αυξάνει μονότονα με το ύψος, με τιμές που «αγγίζουν» τους 1000°K ή και περισσότερο, ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα, το γεωγραφικό πλάτος και την ώρα της ημέρας. Οι αιτίες που προκαλούν τέτοια αύξηση στη θερμοκρασία είναι η εκλυόμενη ενέργεια από τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα αυτό, η μεγάλη αραίωση του ατμοσφαιρικού αέρα, η έλλειψη τριατομικών μορίων και η ηλιακή ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 175 nm (Φλόκας, 1997). Το ανώτερο όριο της Θερμόσφαιρας είναι η Θερμόπαιση και άνωθεν αυτής εκτείνεται η ισόθερμη Εξώσφαιρα μέχρι τα 400-500 Km.



Σχήμα 1.1: Η κατακόρυφη διάρθρωση της ατμόσφαιρας με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος (Ahrens, 2008).

1.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Ατμοσφαιρική ρύπανση ονομάζεται η παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα (κάθε είδους ουσιών, ακτινοβολίας, θορύβου ή άλλης μορφής ενέργειας) σε συγκέντρωση, ποσότητα ή διάρκεια τέτοια που δύναται να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, τους ζωντανούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα (Ζάνης, 2014).



Εικόνα 1.1: Παχύ στρώμα αιθαλομίχλης που καλύπτει την πόλη του Λος Άντζελες των Η.Π.Α. (Ahrens, 2008).

1.2.1 Ιστορική αναδρομή του προβλήματος

Η ρύπανση του περιβάλλοντος δεν αποτελεί ένα πρόσφατο πρόβλημα, ούτε επηρεάζει αποκλειστικά μια συγκεκριμένη περιοχή του πλανήτη. Οι απαρχές του προβλήματος εντοπίζονται την εποχή που οι προϊστορικές νομαδικές φυλές αναγκάζονταν να μετεγκατασταθούν σε διαφορετικές περιοχές ανά σχετικά τακτά χρονικά διαστήματα λόγω των δυσάρεστων οσμών που παρήγαγαν τα ζώα, τα φυτά και τα απορρίμματα που προέκυπταν από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Όταν οι άνθρωποι ανακάλυψαν τη φωτιά, άρχισαν να ρυπαίνουν και τους εσωτερικούς χώρους διαβίωσης με παράγωγα ατελούς καύσης, μέχρι να συλλάβουν την ιδέα της καμινάδας. Με τη χρήση της καμινάδας, τα προϊόντα ατελούς καύσης απομακρύνονταν μεν από τους χώρους διαβίωσης, δημιουργούσαν δε προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή, ειδικά στις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Για τον περιορισμό του καπνού στον κόλπο του Τάραντα, το 530 π.Χ. απαγορεύτηκε η λειτουργία καμινιών. Κατά τον 4^ο αιώνα π.Χ. ο Ιπποκράτης έγραψε για το συσχετισμό ανάμεσα στις καιρικές συνθήκες και τα επιδημικά φαινόμενα, ενώ την ίδια περίπου εποχή, ο Θεόφραστος έγραψε για την ερεθιστική και δυσάρεστη οσμή από την καύση άνθρακα μέσα στις πόλεις. Ανάλογες αναφορές έγιναν και στην αρχαία Ρώμη από τον Οράτιο, ο οποίος αναφέρθηκε στο «μαύρισμα» των κτιρίων από φωτιές κατά την καύση ξύλων, και τον Σενέκα, ο οποίος έγραψε για τις αποπνικτικές συνθήκες που δημιουργούν οι καπνοδόχοι στην ατμόσφαιρα της πόλης.

Κατά το Μεσαίωνα και πιο συγκεκριμένα το 1157 μ.Χ. , η σύζυγος του βασιλιά της Αγγλίας Ερρίκου Β' έλαβε μέτρα για τη ρύπανση που προκαλούσε η καύση του κάρβουνου στο κάστρο του Νότινχαμ. Το 1661 μ.Χ. ο Τζον Έβελυν υπέβαλλε στον βασιλιά Κάρολο Β' φυλλάδιο με προτάσεις αντιμετώπισης της αέριας ρύπανσης, με τον τελευταίο να εκδίδει οδηγία για τον έλεγχο του προβλήματος. Την περίοδο πριν τη βιομηχανική επανάσταση, οι κύριες βιομηχανίες που συνδέθηκαν με την ατμοσφαιρική ρύπανση ήταν η μεταλλουργία, η κεραμοποιία και η συντήρηση ζωικών προϊόντων.

Με την έλευση της βιομηχανικής επανάστασης τον 18^ο αιώνα, άρχισε η συστηματική χρήση του κάρβουνου και του πετρελαίου για την παραγωγή ενέργειας με επακόλουθα προβλήματα ρύπανσης από τον παραγόμενο καπνό και τη στάχτη. Κατά το 19^ο αιώνα, το σημαντικότερο πρόβλημα αέριας ρύπανσης ήταν ο καπνός, η στάχτη και η ιπτάμενη τέφρα από την καύση κάρβουνου και πετρελαίου για παραγωγή ενέργειας και θέρμανση. Στη Μεγάλη Βρετανία θεσπίστηκαν μέτρα για την αντιμετώπιση και το μερικό περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μετά το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα.

Κατά τον 20^ο αιώνα, το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης διογκώθηκε ραγδαία. Η αντικατάσταση της ατμομηχανής από τον ηλεκτροκινητήρα, η αύξηση του αριθμού των εργοστασίων, η αστική επέκταση, η αντικατάσταση του άνθρακα από πετρέλαιο σε πολλές διεργασίες και η δραματική αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων επιδείνωσε την κατάσταση και επιβάρυνε έτι περαιτέρω την ατμόσφαιρα των αστικών κέντρων.

Μέχρι τη δεκαετία του 1980, σχεδόν όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες, η Ιαπωνία, η Αυστραλία, η Νέα Ζηλανδία, το Μεξικό και οι Η.Π.Α. είχαν υποστεί σοβαρά προβλήματα αέριας ρύπανσης. Ακόμη, υπήρξαν αξιοσημείωτα επεισόδια έντονης ατμοσφαιρικής ρύπανσης που, κάποιες φορές, οδήγησαν ακόμη και στην απώλεια

ανθρώπων ζώων, όπως στις περιπτώσεις του Meuse Valley του Βελγίου το 1930, του Donora της πολιτείας της Πενσυλβανίας των Η.Π.Α. το 1948, της Roza Rica του Μεξικού το 1950 και του Λονδίνου το 1952. Έτσι, από τη δεκαετία του 1950 κι έπειτα ξεκίνησε η μελέτη του φαινομένου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από εθνικά ερευνητικά κέντρα, η λήψη νομοθετικών μέτρων σε εθνικό επίπεδο για τον έλεγχο και την αντιμετώπιση του προβλήματος και η έρευνα για την πρόληψη και αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε διεθνές επίπεδο, τον Ιούλιο του 1987 υπογράφηκε η πρώτη διακρατική συμφωνία για τη μείωση της παραγωγής των περισσότερων χλωροφθορανθράκων που καταστρέφουν το στρατοσφαιρικό όζον (Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ) και το Δεκέμβριο του 1997 υπογράφηκε (και τέθηκε σε ισχύ το Φεβρουάριο του 2005) η συμφωνία για μείωση των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων (Πρωτόκολλο του Κιότο).

1.2.2 Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι κυριότεροι ρύποι της ατμόσφαιρας είναι (Γεντεκάκης, 2010):

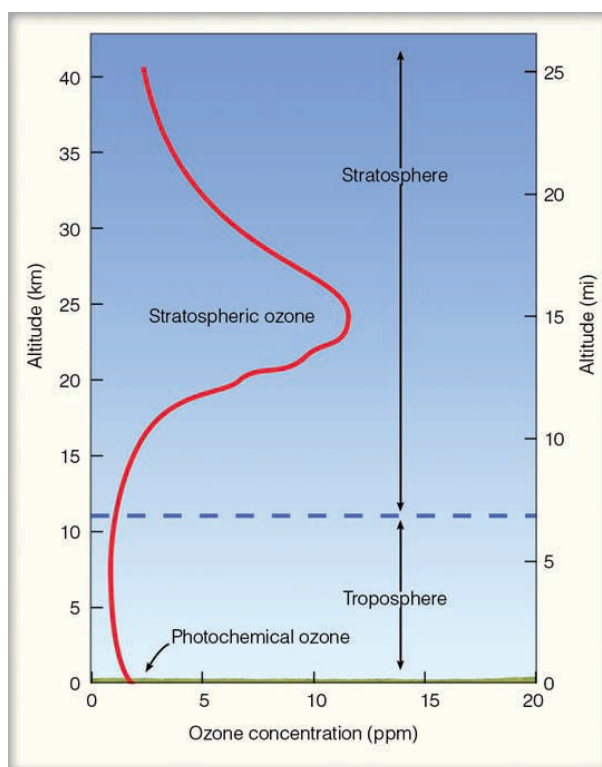
- Ενώσεις που περιέχουν άνθρακα: διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογονάνθρακες (H/Cs) και παράγωγες οργανικές ενώσεις (π.χ. πτητικές οργανικές ενώσεις VOCs)
- Ενώσεις που περιέχουν άζωτο: υποξείδιο του αζώτου (N_2O), οξείδιο του αζώτου (NO), διοξείδιο του αζώτου (NO_2), αμμωνία (NH_3), δραστικό άζωτο (NO_y)
- Ενώσεις που περιέχουν θείο: διοξείδιο του θείου (SO_2), υδρόθειο (H_2S), καρβονυλοσουλφίδιο (OCS), διμεθυλοσουλφίδιο (CH_3SCH_3 , DMS)
- Αλογονούχες ενώσεις: αλογόνα (F_2 , Cl_2 , Br_2) και παράγωγα, υδραλογόνα (HF , HCl , HBr), αλογονάνθρακες (CFCs, HCFCs, HFCs, υπεραλογονομένοι-αλογονάνθρακες, αλογονο-βρωμάνθρακες)
- Φωτοχημικά οξειδωτικά: όζον (O_3), οξείδια, νιτρικά υπεροξυακύλια (PAN)
- Σωματιδιακοί ρύποι, αερολύματα (PM)
- Επικίνδυνοι και τοξικοί ρύποι: συστατικά αλκυλιωμένου Μολύβδου, πολυκυκλικές οργανικές ενώσεις, εξαχλωροβενζόλιο, πολυχλωριωμένα διφενύλια, βαρέα μέταλλα (Cd, Pb, Be, Ni, Hg, As) κ.ά.

Στην ατμόσφαιρα συναντώνται, λίγο ως πολύ, όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Ανάλογα με τη συγκέντρωσή του και τις επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον του και τον άνθρωπο, μπορεί ένας ρύπος να χαρακτηριστεί ως σημαντικός. Γενικά, οι ρύποι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: 1) σε πρωτογενείς, εάν εκπέμπονται απευθείας από μια ρυπογόνο πηγή και 2) σε δευτερογενείς, εάν προκύπτουν από χημικές αντιδράσεις πρωτογενών ρύπων.

Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά θεωρητικά στοιχεία μόνο για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που μελετώνται στην παρούσα εργασία (O_3 , NO , NO_2 , PM_{10} , CO , SO_2).

1.2.2.1 Όζον (O_3)

Το όζον αποτελεί μια αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου. Είναι άχρωμο αέριο με έντονη οξειδωτική δράση. Το O_3 δεν εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλά παράγεται μετά από μια σειρά πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων.



Σχήμα 1.2: Η μέση συγκέντρωση του όζοντος στα πρώτα 40 Km της ατμόσφαιρας (Ahrens, 2008).

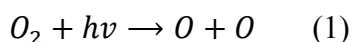
Στη στρατόσφαιρα βρίσκεται περίπου το 90% του παραγόμενου όζοντος και έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση στο ατμοσφαιρικό στρώμα μεταξύ 15-35 Km (οζονόσφαιρα). Στη στρατόσφαιρα, το όζον παίζει το ρόλο «φίλτρου», καθότι απορροφά έντονα την εισερχόμενη υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος 200-300 nm, η οποία είναι καταστρεπτική για τη ζωή στον πλανήτη. Το υπόλοιπο 10% του παραγόμενου όζοντος απαντάται στην τροπόσφαιρα, όπου αποτελεί δευτερογενή ατμοσφαιρικό ρύπο, διότι προξενεί βλάβες στη χλωρίδα και στην πανίδα λόγω του έντονου οξειδωτικού του χαρακτήρα.

❖ Παραγωγή όζοντος

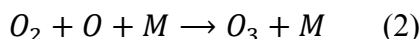
Η δημιουργία του όζοντος στην ατμόσφαιρα, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται μέσω μιας σειράς πολύπλοκων χημικών ενώσεων. Αυτές οι φωτοχημικού χαρακτήρα αντιδράσεις ευνοούνται από την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας και υψηλής θερμοκρασίας. Οι κυριότεροι μηχανισμοί παραγωγής όζοντος είναι:

➤ Αντιδράσεις μεταξύ O και O₂

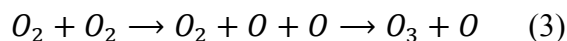
Το όζον σχηματίζεται στην ανώτερη ατμόσφαιρα (σε ύψη > 20 Km) μέσα από δύο διαδοχικές αντιδράσεις. Αρχικά, λαμβάνει χώρα η φωτόλυση του μοριακού οξυγόνου (O₂) από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία μήκους κύματος μικρότερο των 242 nm σύμφωνα με την αντίδραση:



Έπειτα, το ατομικό (O) και το μοριακό οξυγόνο (O₂) συγκρούονται, παρουσία ενός καταλύτη (M) που παραλαμβάνει την εκλυόμενη ενέργεια της παρακάτω εξώθερμης αντίδρασης:



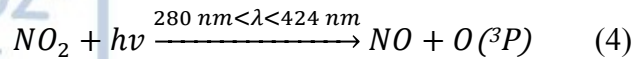
Η ύπαρξη του ουδέτερου σώματος (M) είναι απαραίτητη, καθώς, απουσία αυτής, το όζον επαναδιασπάται. Όζον μπορεί να σχηματιστεί και με την αντίδραση:



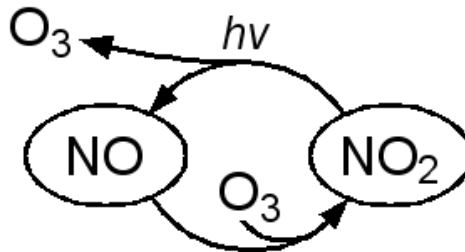
Η αντίδραση (2) αποτελεί την πλέον σημαντική αντίδραση παραγωγής όζοντος.

➤ Φωτοδιάσπαση του NO₂

Σε μικρότερα υψόμετρα φτάνει μόνο ηλιακή ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 280 nm. Έτσι, μόνη σημαντική αντίδραση παραγωγής O είναι:



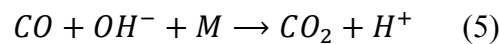
Εν συνεχεία, το $O(^3P)$ αντιδρά με το O_2 σύμφωνα με την αντίδραση (2) (Ζάνης, 2014).



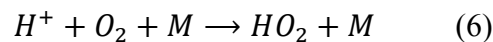
Σχήμα 1.3: Σχηματική παράσταση που δείχνει το μηδενικό κύκλο στο όζον από τις αντιδράσεις (2), (4) και (20) (Ζάνης, 2014).

➤ Παραγωγή O_3 μέσω του CO

Από την αντίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) με την ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου ($OH^\cdot$) απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και κατιόν υδρογόνου (H^+), σύμφωνα με την αντίδραση:



Ακολούθως, το H^+ αντιδρά με το μοριακό οξυγόνο (O_2), προς σχηματισμό υδρο-υπερόξυ ρίζας ($HO_2^\cdot$), σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



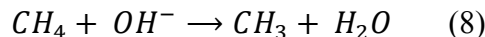
Το μονοξείδιο του αζώτου (NO), εφόσον υπάρχει σε ικανή συγκέντρωση, αντιδρά με το $HO_2^\cdot$, σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



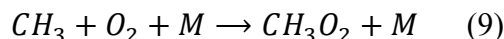
Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) που σχηματίζεται οδηγεί στην παραγωγή όζοντος με τις αντιδράσεις (4) και (2). Σημειώνεται ότι για να μπορέσει να παραχθεί όζον μέσω του CO, απαιτείται μεγάλη ποσότητα NO. Σε αντίθετη περίπτωση, δε λαμβάνει χώρα η αντίδραση (7) και δε μπορεί να παραχθεί NO_2 , το οποίο μέσω της αντίδρασης (4) παράγει το απαραίτητο για την αντίδραση (2) ατομικό οξυγόνο.

➤ Παραγωγή O₃ μέσω του CH₄

Το μεθάνιο (CH₄), μέσω μιας σειράς αντιδράσεων, παράγει NO₂, από το οποίο προκύπτει όζον, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Αρχικά, το CH₄ αντιδρά με την ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου (OH⁻), σύμφωνα με την αντίδραση:



Το μεθύλιο (CH₃) που παράγεται αντιδρά με το μοριακό οξυγόνο προς σχηματισμό μεθυλο-υπερόξυ ρίζας (CH₃O₂), όπως φαίνεται από την αντίδραση:



Έπειτα το NO, εφόσον βρίσκεται σε ικανή ποσότητα, αντιδρά με τη μεθυλο-υπερόξυ ρίζα προς σχηματισμό NO₂, σύμφωνα με την αντίδραση:



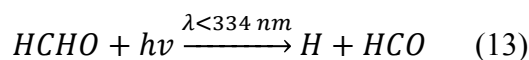
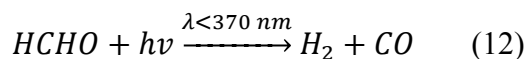
Το παραγόμενο CH₃O μπορεί να αντιδράσει με το μοριακό οξυγόνο (O₂) προς παραγωγή φορμαλδεϋδης (HCHO) και υδρο-υπερόξυ ρίζας (HO₂):



Η φορμαλδεϋδη υφίσταται παραπέρα αντιδράσεις, όπως φαίνεται παρακάτω, ενώ η υδρο-υπερόξυ ρίζα αντιδρά με το NO με την αντίδραση (7).

➤ Παραγωγή O₃ μέσω του HCHO

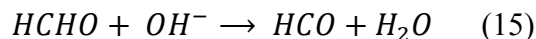
Αντίστοιχα με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, η φορμαλδεϋδη (HCHO) μέσω διαδοχικών αντιδράσεων μπορεί να παράξει NO₂, το οποίο μέσω των αντιδράσεων (4) και (2) δημιουργεί το όζον. Η φορμαλδεϋδη φωτολύεται με δύο τρόπους, όπως φαίνεται και στις ακόλουθες αντιδράσεις:



Από την αντίδραση (13) παράγεται η φορμυλο-ρίζα (HCO), η οποία μπορεί να αντιδράσει με το O₂, προς παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρο-υπερόξυ ρίζας (HO₂), σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η φορμυλο-ρίζα (HCO) μπορεί να παραχθεί και μέσω της αντίδρασης της φορμαλδεϋδης με την ελεύθερη ρίζα υδροξυλίου (OH⁻), σύμφωνα με την αντίδραση:

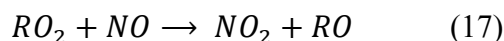
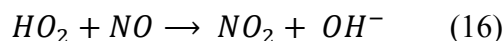


Στη συνέχεια, η πραγματοποίηση των αντιδράσεων (5), (6), (7), (4) και (2) θα οδηγήσει στην παραγωγή όζοντος, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η ευκολία με την

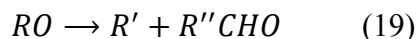
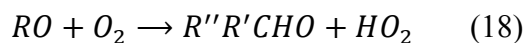
οποία η φορμαλδεΐδη παράγει CO και HCO δείχνει τη μεγάλη συνεισφορά που έχει στην έμμεση παραγωγή όζοντος.

➤ Παραγωγή O₃ μέσω των NO_x και των VOCs

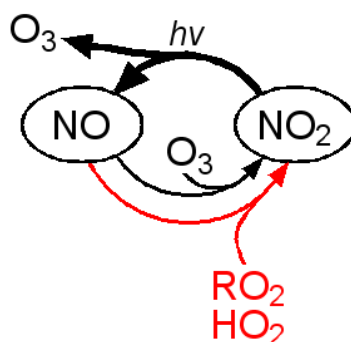
Στην τροπόσφαιρα, τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) συμβάλλουν στην παραγωγή τροποσφαιρικού όζοντος παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ποσότητα του όζοντος που θα σχηματιστεί εξαρτάται από τη συγκέντρωση των NO_x, τον τύπο και τη συγκέντρωση των VOCs και το χρόνο έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Αρχικά, τα VOCs οξειδώνονται μέσω του OH⁻ δίνοντας αλκυλο-υπερόξυ (RO₂) και υδρο-υπερόξυ (HO₂) ελεύθερες ρίζες. Ακολούθως, οι ρίζες αυτές αντιδρούν, όπως φαίνεται στις παρακάτω αντιδράσεις, με το μονοξείδιο του αζώτου (NO) προς παραγωγή διοξειδίου του αζώτου (NO₂), το οποίο συμβάλλει στην παραγωγή όζοντος μέσω των αντιδράσεων (4) και (2).



Οι ελεύθερες ρίζες RO μπορούν να αντιδράσουν εύκολα με μοριακό οξυγόνο προς σχηματισμό αλδευδών και κετονών, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Οι παραγόμενες κετόνες και αλδεύδες, με φωτόλυση ή οξείδωση, δύνανται να παράξουν νέα αλκάλια με μικρότερες ελεύθερες ρίζες RO₂, οι οποίες θα οξειδώσουν εκ νέου μόρια οξειδίων του αζώτου με τελικό αποτέλεσμα το σχηματισμό όζοντος.

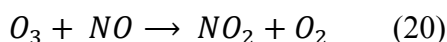


Σχήμα 1.4: Σχηματική παράσταση που δείχνει πως οι ρίζες HO₂ και RO₂ διαταράσσουν τη φωτοσταθερή κατάσταση του κύκλου O₃-NO₂-NO και συμβάλλουν στην παραγωγή όζοντος (Ζάνης, 2014).

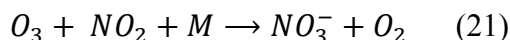
Σημειώνεται ότι, υπάρχουν και άλλες αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό όζοντος, οι οποίες περιλαμβάνουν οξειδώσεις αλκανίων, αλκενίων, αλκοολών και ακεταλδεϋδων, οι οποίες, αντίστοιχα με τις παραπάνω αντιδράσεις, παράγουν RO_2 και HO_2 . Οι ρίζες αυτές αντιδρούν με τα NO_x προς τον τελικό σχηματισμό όζοντος.

❖ Καταστροφή όζοντος

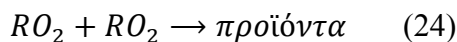
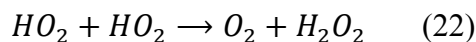
Στον αντίποδα, υπάρχουν αντιδράσεις οι οποίες συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος της ατμόσφαιρας. Το παραγόμενο από την αντίδραση (4) μονοξείδιο του αζώτου (NO) αντιδρά ταχύτατα με το όζον, σύμφωνα με την αντίδραση:



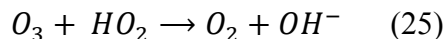
Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το όζον αντιδρά με το NO_2 , προς παραγωγή ελεύθερης νιτρικής ρίζας (HNO_3) (Ζάνης, 2014).



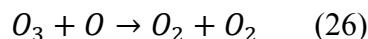
Ακόμη, υπάρχουν αντιδράσεις, οι οποίες μειώνουν έμμεσα τη συγκέντρωση του όζοντος, όπως οι ακόλουθες:



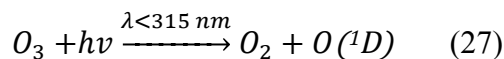
Το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) και τα οργανικά υδρο-υπεροξείδια ($ROOH$) απομακρύνονται με τον νετό, διότι είναι υδροδιαλυτά. Με τις παραπάνω αντιδράσεις μειώνεται η ποσότητα των ελεύθερων ριζών RO_2 και HO_2 , οι οποίες, σε τελικό στάδιο, θα παρήγαγαν όζον, όπως προκύπτει από τις αντιδράσεις (16), (17), (18), (19) και (4). Υπάρχει, βέβαια, και η περίπτωση να αντιδράσει η υδρο-υπερόξυ ρίζα με το όζον, όταν υπάρχει έλλειψη NO_x :

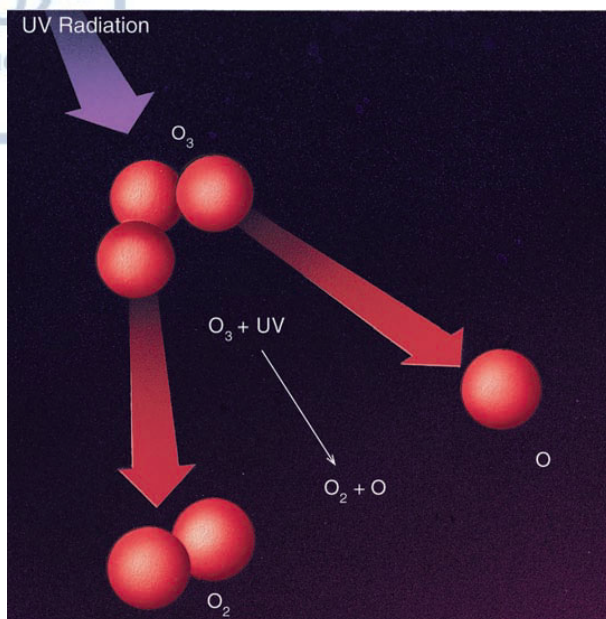


Όπως προαναφέρθηκε, όταν από την αντίδραση (2) απουσιάζει η ουσία M , τότε το όζον επαναδιασπάται. Ακόμη, στα μεγάλα ύψη και με σχετικά μεγάλη ταχύτητα πραγματοποιείται η σύγκρουση όζοντος με το ατομικό οξυγόνο:



Το όζον μπορεί, επίσης, να υποστεί φωτόλυση (σε οποιαδήποτε ύψος) σύμφωνα με την αντίδραση:

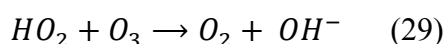




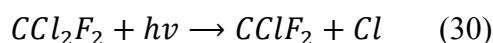
Σχήμα 1.5: Με απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας το όζον διασπάται σε μοριακό και ατομικό οξυγόνο (Ahrens, 2008).

Το διεγερμένο αυτό ατομικό οξυγόνο $O(^1D)$ μπορεί είτε να ενωθεί αμέσως με ένα μόριο οξυγόνου προς παραγωγή όζοντος είτε να αντιδράσει με τους υδρατμούς προς παραγωγή υδροξυλίου είτε να αποδιεγερθεί και να επιστέψει στη βασική του ηλεκτρονική στάθμη ενέργειας $O(^3P)$ παρουσία ενός σώματος M (Ζάνης, 2014).

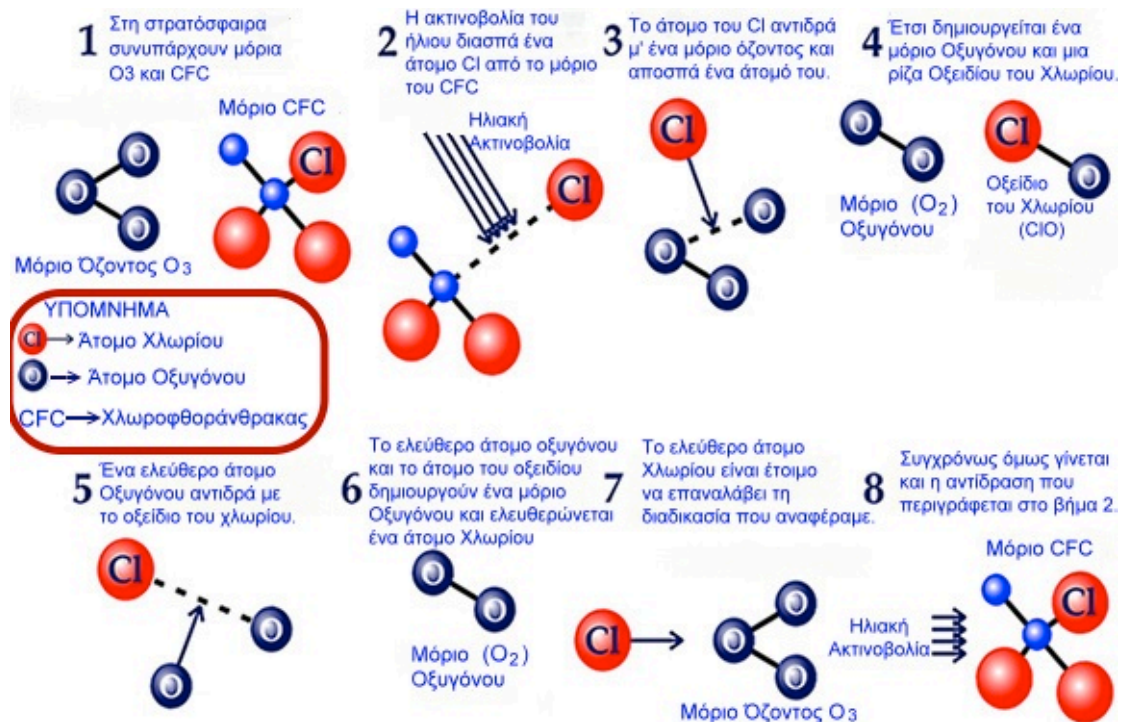
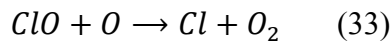
Όταν οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου είναι χαμηλές, τότε το όζον μπορεί να καταστραφεί μέσω των ακόλουθων αντιδράσεων:



Σημαντικό ρόλο στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος παίζουν οι διάφοροι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και άλλες αλογονούχες ενώσεις, οι οποίες είναι πολύ σταθερές, έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και αντιδρούν δύσκολα με χημικές ουσίες της τροπόσφαιρας. Έτσι, μέσω δυναμικών διαδικασιών ανέρχονται στα στρώματα της στρατόσφαιρας, όπου και διασπώνται από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία (Ζάνης, 2014):



Εν συνεχεία, τα προκύπτοντα ελεύθερα άτομα χλωρίου (Cl) μέσω διαδοχικών αντιδράσεων καταστρέφουν τα μόρια του στρατοσφαιρικού όζοντος:



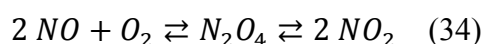
Σχήμα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση του μηχανισμού καταστροφής του όζοντος από χλωροφθοράνθρακες (Πηγή: <http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/climate/html/ozon.htm>)

❖ Επιπτώσεις του όζοντος στον άνθρωπο και το περιβάλλον

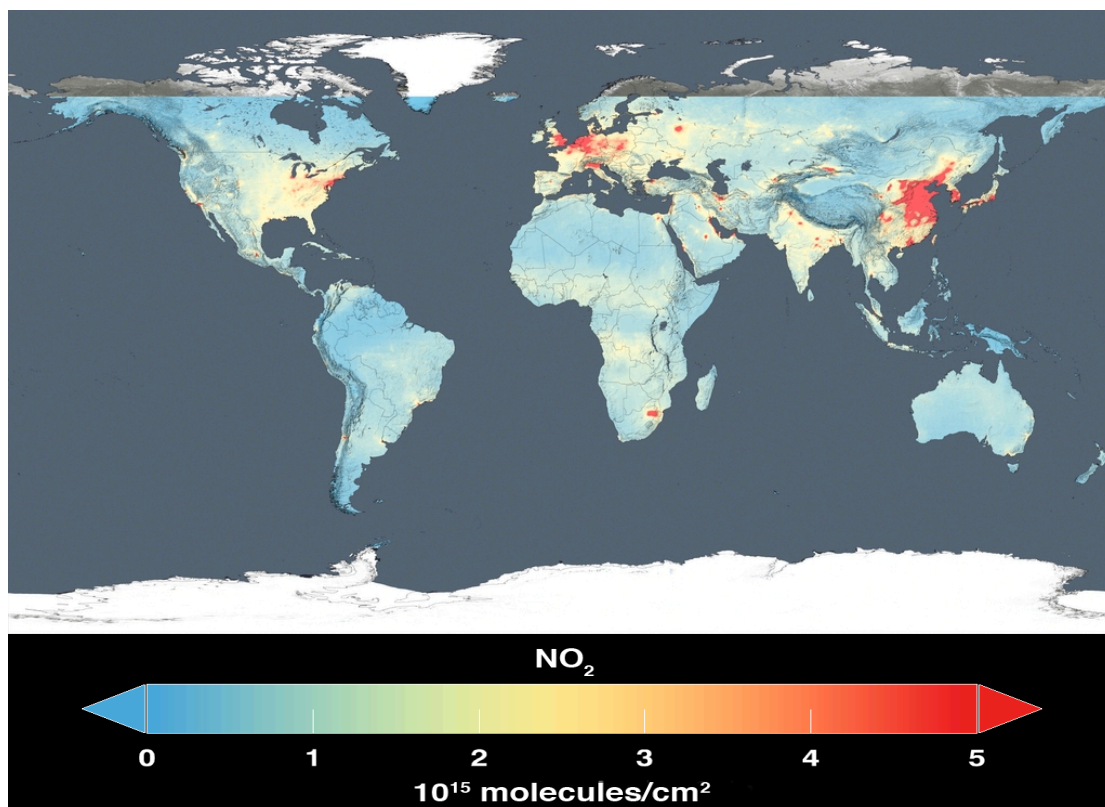
Οι υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος (το οποίο στην τροπόσφαιρα αποτελεί ρύπο) προξενούν προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα, όπως ερεθισμό των αεραγωγών των πνευμόνων, φλεγμονή στους πνεύμονες, βήχα, αίσθημα ξηρότητας στο λαιμό και πόνο στο στήθος, ενώ η συνεχής έκθεση σε υψηλές τιμές όζοντος μπορεί να προκαλέσει μόνιμες βλάβες στους πνεύμονες. Τα μεγαλύτερα προβλήματα εντοπίζονται στις ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού, όπως τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και οι πάσχοντες από αναπνευστικά προβλήματα. Οι επιπτώσεις του όζοντος δεν περιορίζονται μόνο στον άνθρωπο, αλλά επηρεάζουν αρνητικά και την χλωρίδα και τα διάφορα υλικά. Όταν το όζον βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις, επηρεάζει την ικανότητα των φυτών να παράγουν και να αποθηκεύουν τροφή, καθιστώντας τα εύαλωτα στις αρρώστιες, τις κακές καιρικές συνθήκες και τα έντομα (Ζάνης, 2014).

1.2.2.2 Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Ως NO_x χαρακτηρίζονται όλες οι ενώσεις του αζώτου με το οξυγόνο, οι οποίες παράγονται από φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες. Οι κυριότερες από τις ενώσεις αυτές είναι το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο (NO_2) του αζώτου, οι οποίες συνήθως εξετάζονται μαζί εφόσον, παρουσία οξυγόνου, βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους με βάση τις ακόλουθες αμφίδρομες αντιδράσεις (Γεντεκάκης, 2010):



Το NO αποτελεί πρωτογενή ρύπο, ενώ το NO_2 δευτερογενή. Τα δύο αυτά οξείδια σχετίζονται με τις φωτοχημικές αντιδράσεις της ατμόσφαιρας και συμβάλλουν στο φαινόμενο της φωτοχημικής ρύπανσης.



Εικόνα 1.2: Μέσες συγκεντρώσεις NO_2 στην τροπόσφαιρα για το 2014 (Πηγή: <https://svs.gsfc.nasa.gov/12094>).

Τα οξείδια του αζώτου παράγονται είτε από φυσικές είτε από ανθρωπογενείς διεργασίες. Βασικές φυσικές πηγές NO_x είναι το έδαφος, οι πυρκαγιές (καύση βιομάζας), οι ηλεκτρικές εκκενώσεις στην ατμόσφαιρα και, όσον αφορά την τροπόσφαιρα, η μεταφορά των εν λόγω οξειδίων από τη στρατόσφαιρα. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές των οξειδίων του αζώτου είναι οι διάφορες καύσεις

για την παραγωγή ενέργειας και θέρμανσης. Η χρήση καυσίμων σε αυτοκίνητα, καυστήρες βιομηχανικών μονάδων, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης προκαλεί την εκπομπή, μεταξύ άλλων, και NO , το οποίο με διάφορες χημικές αντιδράσεις μετατρέπεται σε NO_2 . Οι περισσότερες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που σχετίζονται με την παραγωγή οξειδίων του αζώτου λαμβάνουν χώρα μέσα στον αστικό ιστό. Το γεγονός αυτό επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον των μεγάλων αστικών κέντρων, όπου οι συγκεντρώσεις σε οξείδια του αζώτου είναι υψηλές.

Τα NO και NO_2 θεωρούνται τοξικές ενώσεις. Το NO_2 ερεθίζει τα μάτια και τους πνεύμονες, ενώ μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό μετά από την αντίδρασή του με τους υδρατμούς των βρόγχων και των κυψελίδων των πνευμόνων. Το βασικό σύμπτωμα που προκαλεί είναι το πνευμονικό οίδημα, το οποίο μπορεί να επιφέρει το θάνατο για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των 150 ppm (Φυτιάνος & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009). Γενικότερα υψηλές συγκεντρώσεις του NO_2 ευθύνονται για τη δημιουργία αναπνευστικών προβλημάτων, ιδιαίτερα σε παιδιά και ανθρώπους που έχουν άσθμα. Επίσης, έχουν αναφερθεί και στα φυτά αρνητικές επιδράσεις (π.χ. πτώση φύλων, μείωση της παραγωγής ορισμένων καρποφόρων δέντρων κ.τ.λ.) όταν οι συγκεντρώσεις NO_2 είναι αυξημένες (Γεντεκάκης, 2010).

1.2.2.3 O_x ($\text{O}_3 + \text{NO}_2$)

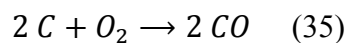
O_x καλείται το άθροισμα των μορίων όζοντος και διοξειδίου του αζώτου. Δεν υπάρχει ως πραγματικό μόριο στη φύση, αλλά νοείται ως το θεωρητικό άθροισμα των O_3 και NO_2 . Η μεγάλη αλληλεξάρτηση που έχει ο ένας ρύπος από τον άλλο, καθιστά το O_x κατάλληλο για να δώσει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ρύπανσης μιας περιοχής. Αυτό, βέβαια, δε σημαίνει ότι οι θεωρητικές συγκεντρώσεις O_x μπορούν να δώσουν ολοκληρωμένα και αξιόπιστα συμπεράσματα για τις μεμονωμένες συγκεντρώσεις του όζοντος ή του διοξειδίου του αζώτου σε μια περιοχή, διότι το O_3 καταστρέφεται σε βάρος του NO_2 και αντίστροφα. Έτσι, προσφέρει μια καλύτερη εποπτεία των συγκεντρώσεων του O_3 και του NO_2 συνολικά στην περιοχή μελέτης.

1.2.2.4 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, ελαφρύτερο από τον αέρα, σχεδόν αδιάλυτο στο νερό, αναφλέξιμο και ιδιαιτέρως τοξικό. Έχει χρόνο

ζωής 60-120 περίπου μέρες και παίζει σημαντικό ρόλο στη χημεία του όζοντος της τροπόσφαιρας.

Οι φυσικές πηγές του CO είναι η επιφάνεια των ωκεανών, τα ηφαίστεια, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις των καταιγίδων, οι πυρκαγιές των δασών, τα φυσικά αέρια, οι διάφορες βακτηριακές δράσεις, αλλά η πλέον σημαντική, από άποψη ποσότητας, πηγή είναι η οξείδωση του μεθανίου της ατμόσφαιρας. Όσον αφορά τις κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές CO, αυτές είναι οι εξατμίσεις των οχημάτων και μηχανών, οι μονάδες θέρμανσης, οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, οι βιομηχανικές κατεργασίες και η καύση στερεών αποβλήτων. Γενικότερα, στις αστικές περιοχές, η μεγαλύτερη ποσότητα CO αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης του άνθρακα:

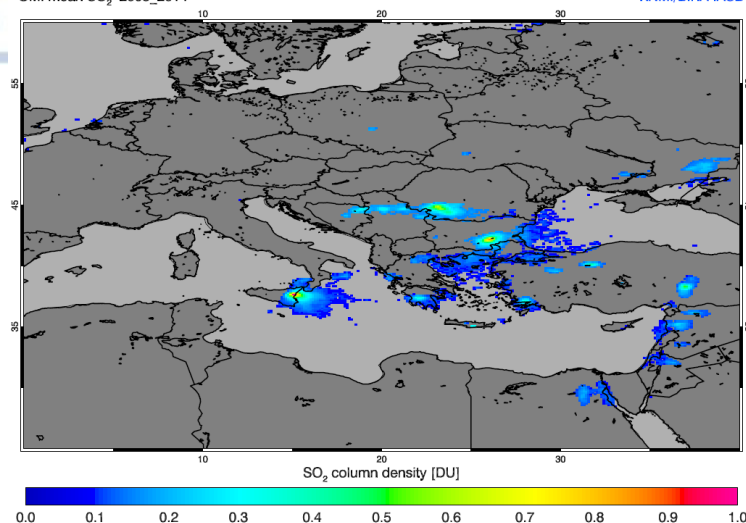


Το CO επιδρά στην αιμοσφαιρίνη του αίματος, εξ' αιτίας της μεγάλης χημικής συγγένειας που έχει με αυτή, μειώνοντας την ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου στους ιστούς του οργανισμού, με αρνητικά αποτελέσματα στο καρδιαγγειακό και νευρικό σύστημα. Έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις CO επιφέρει πονοκεφάλους, ζάλη, ατονία, κόπωση, ερεθισμό των ματιών, δυσκολία στην αναπνοή, μυϊκή αδυναμία, δυσφορία στο στήθος, αναισθησία και μείωση της πνευματικής διαύγειας. Ο οργανισμός επανέρχεται στην κανονική του λειτουργία με απομάκρυνσή του από το περιβάλλον υψηλών συγκεντρώσεων CO σε διάστημα 4-5 ωρών (Γεντεκάκης, 2010).

1.2.2.5 Διοξείδιο του θείου (SO₂)

Το SO₂ είναι ένα άχρωμο και άοσμο (σε χαμηλές συγκεντρώσεις – σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει δυσάρεστη και ερεθιστική οσμή) αέριο, το οποίο αποτελεί τη σημαντικότερη από τις θειούχες ενώσεις της ατμόσφαιρας. Το SO₂, μέσω διαφόρων αντιδράσεων, παράγει SO₃, το οποίο με την υγρασία της ατμόσφαιρας σχηματίζει σταγονίδια θειικού οξέος (H₂SO₄) που διαλύονται στο νερό της βροχής, δημιουργώντας το φαινόμενο της όξινης βροχής.

Οι φυσικές πηγές του SO₂ είναι, κυρίως, οι ωκεανοί (με εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων θεικών αλάτων, θειούχων ενώσεων και υδροθείου), τα ηφαίστεια, οι θερμές πηγές και οι πυρκαγιές. Οι βασικότερες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής SO₂ είναι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα διυληστήρια πετρελαίου, οι χημικές και μεταλλουργικές βιομηχανίες, οι εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης και τα οχήματα που χρησιμοποιούν καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο.



Εικόνα 1.3: Μέσες συγκεντρώσεις SO₂ στην περιοχή της Ευρώπης της περιόδου 2005-2014 (Πηγή:http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2017/11/Sulphur_dioxide_over_Europe_from_OMI)

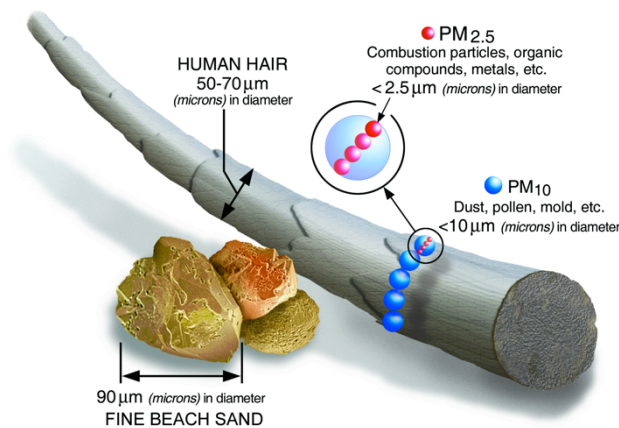
Έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις SO₂ προκαλεί προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα και δύναται να δημιουργήσει πνευμονικό οίδημα. Η μακροχρόνια έκθεση, ακόμη και σε σχετικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις SO₂ δημιουργεί αναπνευστικά νοσήματα και επιδεινώνει τις προϋπάρχουσες καρδιαγγειακές παθήσεις. Μεγαλύτερο κίνδυνο αντιμετωπίζουν οι ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού (παιδιά, ηλικιωμένοι, άτομα με χρόνιες πνευμονολογικές και καρδιαγγειακές παθήσεις). Ακόμη, πολλά είδη φυτών πλήττονται από τη δράση του SO₂ με ποικίλους τρόπους (κιτρίνισμα ή/και πτώση φύλλων, καταστροφή καρπού κ.τ.λ.). Οι υψηλές συγκεντρώσεις SO₂ στην ατμόσφαιρα προκαλούν την μείωση του pH των υδάτων των ποταμών και των λιμνών, μειώνουν την ορατότητα και, μαζί με το παραγόμενο θειικό οξύ, καταστρέφουν μέταλλα, ατσάλινες κατασκευές, καλώδια, μπογιά, τσιμέντο, μνημεία, αγάλματα και λοιπές ανθρώπινες κατασκευές.

1.2.2.6 Αιωρούμενα σωματίδια (PM)

Αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter - PM) καλείται κάθε ουσία που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε στερεή ή υγρή φάση και έχει μέγεθος μερικών μικρομέτρων (0.001-200 μm). Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη αναφέρεται και ως αιωρούμενα σωματίδια, ατμοσφαιρικά αιωρήματα, αερολύματα και αεροζόλ.

❖ Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων

Η τυπική διάμετρος των αεροζόλ είναι περίπου 0.1-10 μm . Επειδή τα αερολύματα διαφέρουν ως προς το σχήμα (δεν είναι πάντοτε σφαιρικά) και την πυκνότητα, ως διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων νοείται η αεροδυναμική τους διάμετρος και όχι η γεωμετρική. Αεροδυναμική διάμετρος καλείται η διάμετρος που έχει ένα σφαιρικό σώμα με πυκνότητα 1 gr/cm^3 και παρουσιάζει την ίδια αντίσταση στον αέρα κατά την κίνησή του με το σωματίδιο που εξετάζεται (Λαζαρίδης, 2005). Η διάμετρος θεωρείται μια πολύ σημαντική ιδιότητα των αερολυμάτων, διότι αυτή καθορίζει τις επιπτώσεις που έχουν στην ανθρώπινη υγεία και το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.7: Σύγκριση του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων με μια ανθρώπινη τρίχα και έναν κόκκο άμμου (Πηγή: www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/pm2.5_scale_graphic-color_2.jpg)

Σύμφωνα με τους (Ασσαέλ, Μελάς, Καρατζάς, Αχιλλάς, & Κακοσίμος, 2008), διακρίνονται τρεις κύριες κατηγορίες αεροζόλ, με βάση το μέγεθός τους:

- TSP (Total Suspended Particles): Ολικά ατμοσφαιρικά αιωρήματα αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 100 μm .
- PM₁₀: Αιωρούμενα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 10 μm (εισπνεύσιμα).
- PM_{2.5}: Αιωρούμενα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 2.5 μm (αναπνεύσιμα).

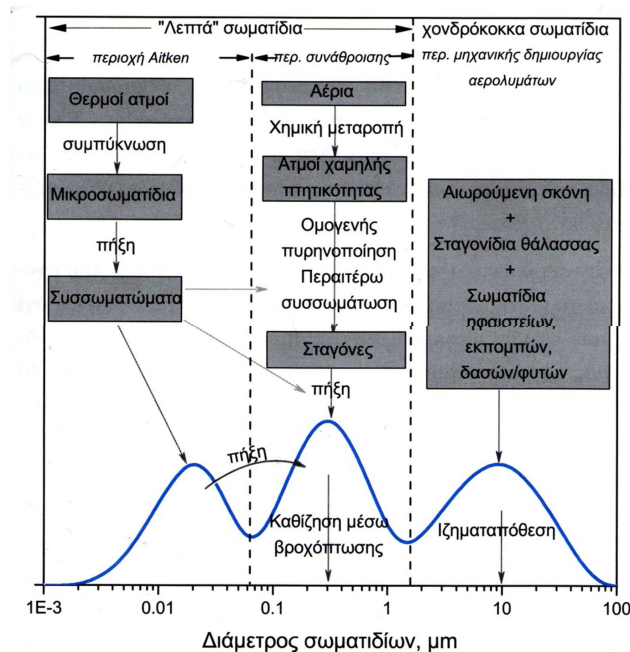
Τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ συνιστούν τους πλέον επικίνδυνους αέριους ρύπους λόγω των σοβαρών προβλημάτων που προκαλούν. Για το λόγο αυτό, η Ε.Ε. καθιέρωσε ανώτατες οριακές τιμές για τα PM_{10} το 2000 και τα $PM_{2.5}$ το 2008.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των αερολυμάτων με βάση το μέγεθος. Μια έτερη ταξινόμηση με βάση το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η εξής (Ζάνης, 2014):

- Σωματίδια Aitken (0.001-0.1 μm)
- Λεπτά σωματίδια (0.1-1 μm)
- Χονδρόκοκκα ή γιγαντιαία σωματίδια (>1 μm)
- Σωματίδια καπνού (1-1000 μm)
- Σκόνη μικρής διαμέτρου (<100 μm)
- Σκόνη μεγάλης διαμέτρου (>100 μm)
- Νεφροσταγονίδια (1-100 μm)
- Σταγόνες βροχής (>100 μm)

Στο ακόλουθο σχήμα δίνεται μια τυπική εικόνα της κατανομής των μεγεθών των αερολυμάτων. Παρατηρείται ότι οι διάμετροι των αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζουν τρία μέγιστα, ανάλογα με το μηχανισμό δημιουργίας τους. Τα σωματίδια με μέγιστο κοντά στα 0.2 μm προκύπτουν από το μηχανισμό πήξεως και συμπυκνώσεως και ονομάζονται «λεπτά» σωματίδια (fine particles). Ο χαρακτηρισμός αυτός χρησιμοποιείται για να ξεχωρίσει τα εν λόγω σωματίδια από αυτά που εμφανίζουν μέγιστο στα 10 μm και καλούνται «χονδρόκοκκα» (coarse particles). Τα λεπτά σωματίδια είναι κατά βάση νιτρικά, θειικά, οργανικά και αμμωνιακά άλατα και ενώσεις του μολύβδου. Τα σωματίδια με διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 0.1-1 μm σχηματίζονται από τη συμπύκνωση ατμών, από προϊόντα καύσης και από ατμοσφαιρική σκόνη. Το μικρό τους μοριακό βάρος τους επιτρέπει να παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μήνες. Είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία ομιχλώδους ρύπανσης και τη μείωση της ορατότητας, ενώ δύνανται να συμμετέχουν σε ατμοσφαιρικές αντιδράσεις, συσσωματώσεις και συγκρούσεις. Τα χονδρόκοκκα σωματίδια με μέγιστο στα 10 μm εισάγονται στην ατμόσφαιρα ως στερεά σώματα από την επιφάνεια της Γης και της θάλασσας. Η σωματιδιακή ύλη αυτού του μεγέθους είναι κυρίως άμμος, αλουμίνα, θαλάσσιο άλας και σωματίδια προερχόμενα από φυτικούς οργανισμούς. Στα μεγέθη που είναι μικρότερα του 0.1 μm συμπεριλαμβάνονται ιόντα και πυρήνες Aitken. Λόγω του μικρού μεγέθους τους,

βρίσκονται διαρκώς σε κίνηση που πυροδοτείται από τις συγκρούσεις τους με τα μόρια του αέρα. Τα σωματίδια αυτά θεωρείται ότι δε συμμετέχουν στη δημιουργία νεφών. Πιθανές πηγές τους είναι τα ηφαίστεια, οι καταιγίδες σκόνης, οι δασικές πυρκαγιές, οι εξατμίσεις των τροχοφόρων, οι φωτο-οξειδωτικές αντιδράσεις και οι βιομηχανικές εκπομπές (Γεντεκάκης, 2010).



Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής επιφανείας αιωρούμενων σωματιδίων. Δείχνονται οι πηγές, οι βασικές διεργασίες και οι μηχανισμοί σχηματισμού και απομάκρυνσης (Γεντεκάκης, 2010).

❖ Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Η χημική σύσταση των αερολυμάτων ποικίλει σε μεγάλο βαθμό και αλλοιώνεται από τις αλληλεπιδράσεις που έχουν αυτά μεταξύ τους και με τα συστατικά της ατμόσφαιρας. Γενικά, τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από μια οργανική φάση (οργανικός άνθρακας) και μια ανόργανη (στερεό ανόργανο υλικό, υδατοδιαλυτά ανόργανα άλατα, στοιχειακός άνθρακας κ.ά.). Η σχετική συνεισφορά ανόργανου και οργανικού υλικού στη μάζα των αεροζόλ εξαρτάται από την προέλευσή τους, το μέγεθός τους και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στις οποίες σχηματίστηκαν (Φυτιάνος & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να είναι συνδυασμοί πολλών όμοιων και διαφορετικών μορίων. Περιλαμβάνουν ιόντα, συμπλέγματα μορίων, σκόνη, σωματίδια καπνού, κρυστάλλους πάγου, σταγόνες

βροχής, γύρη κ.τ.λ. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να μεταβάλλουν τη χημική τους σύσταση μέσω διαφόρων μηχανισμών και δυναμικών διαδικασιών στις οποίες συμμετέχουν. Μπορούν να λειτουργήσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης υδρατμών ή άλλων πτητικών συστατικών που δύνανται να βερθούν στο περιβάλλον τους, να αντιδράσουν με αέρια και υδρατμούς της ατμόσφαιρας ή να δημιουργήσουν συσσωματώματα μετά από σύγκρουση με όμοια ή διαφορετικά από αυτά μόρια. Από αυτά γίνεται κατανοητό ότι τα αεροζόλ μπορούν να είναι και πρωτογενείς και δευτερογενείς.

Τα βασικότερα συστατικά που περιέχουν τα αερολύματα είναι (Μελάς, 2004):

- Ορυκτογενή μέταλλα από επαναιώρηση σκόνης
- Οργανικές ενώσεις που συνιστούν προϊόντα ημιτελών καύσεων
- Καθαρός άνθρακας προερχόμενος από διαδικασίες καύσης
- Θαλάσσια άλατα
- Άλατα του αμμωνίου ως προϊόντα εξουδετέρωσης
- Άλατα του ασβεστίου από σκόνη και οικοδομικά υλικά
- Θειικά άλατα ως προϊόντα αντιδράσεων του SO_2
- Νιτρικά άλατα ως προϊόντα αντιδράσεων των NO_x

❖ Μορφές ατμοσφαιρικών αιωρημάτων

Οι μορφές με τις οποίες συναντώνται τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα είναι (Μπάης, 2005):

- ο Σκόνη (dust): Στερεά σωματίδια σχετικά μεγάλης διαμέτρου ($>1 \mu\text{m}$), τα οποία δημιουργούνται από διάβρωση ή κατακερματισμό στερεών υλικών.
- ο Ομίχλη (fog): Ορατά υδροσταγονίδια ευρισκόμενα σε διασπορά στην ατμόσφαιρα, συνήθως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.
- ο Καπνός (smoke): Μικρά σωματίδια ($>0.01 \mu\text{m}$) προερχόμενα από διαδικασίες ατελούς καύσης, κυρίως άνθρακα ή άλλων καυσίμων, σε συγκεντρώσεις που τα καθιστούν ορατά.
- ο Νέφος (smog): Συνδυασμός καπνού και ομίχλης.
- ο Αχλός (haze): Μικρά σωματίδια ($<1 \mu\text{m}$) ως μείγμα υδροσταγονιδίων, σκόνης και ρύπων, που μειώνουν την ορατότητα.

- Κάπνα (fume): Σωματίδια ($<1\ \mu\text{m}$) που σχηματίζονται από συμπυκνώσεις ατμών, κατά βάση από πτητικές ουσίες, ή είναι αποτέλεσμα οξειδωτικών αντιδράσεων.
- Αιθάλη (soot): Συσσώρευση σωματιδίων άνθρακα προερχόμενα από αντιδράσεις ατελούς καύσης ανθρακικών ενώσεων.
- Ιπτάμενη τέφρα (fly ash): Λεπτόκοκκα σωματίδια τέφρας στερεών καυσίμων, τα οποία παρασύρονται μαζί με τα καυσαέρια.

❖ Πηγές εκπομπής αεροζόλ

Η παρουσία των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα είναι αποτέλεσμα τόσο φυσικών, όσο και ανθρώπινων διεργασιών. Σε πλανητική κλίμακα υπερτερούν οι φυσικές εκπομπές των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων, ενώ σε τοπική κλίμακα οι ανθρωπογενείς. Οι βασικές διαδικασίες παραγωγής πρωτογενών αερολυμάτων είναι οι διάφορες καύσεις, η τριβή, η αποσάθρωση, η διάβρωση και ο κατακερματισμός των υλικών. Τα δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζονται, κατά κύριο λόγο, με τη συμπύκνωση και την πυρήνωση αέριων ουσιών της ατμόσφαιρας (Φυτιάνος & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009).

Οι κυριότερες φυσικές πηγές εκπομπής αερολυμάτων είναι τα πετρώματα, το έδαφος, τα ηφαίστεια, οι δασικές πυρκαγιές, η επιφάνεια της θάλασσας, η βλάστηση και η μετατροπή αερίων σε σωματίδια είτε με συμπύκνωση αέριων ουσιών είτε μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων. Γενικά, ο άνεμος παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή αερολυμάτων, καθώς η μηχανική του δράση οδηγεί στην έκλυση σκόνης από το έδαφος και τα πετρώματα της γήινης επιφάνειας, αλάτων (NaCl) από τη θαλάσσια επιφάνεια και σπόρων και γύρης από τα φυτά. Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, στην ατμόσφαιρα υπήρχαν αιωρούμενα σωματίδια πριν αρχίσει ο άνθρωπος να ρυπαίνει το περιβάλλον. Αυτά τα σωματίδια συνιστούν τη φυσική συγκέντρωση υποβάθρου. Εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι ο υπολογισμός της πραγματικής συγκέντρωσης υποβάθρου είναι αδύνατος. Έτσι, γίνεται η παραδοχή ότι κάποιες απομακρυσμένες περιοχές, όπως οι πόλοι, οι κορυφές των βουνών και η μέση στάθμη της θάλασσας, προσεγγίζουν την πραγματική συγκέντρωση υποβάθρου.

Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές ατμοσφαιρικών αιωρημάτων είναι οι βιομηχανικές μονάδες (χαλυβουργία, μεταλλουργία κ.τ.λ.), οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης, τα αυτοκίνητα, οι κατασκευές κτιρίων, η γεωργία και τα λατομεία.

❖ Χρόνος παραμονής αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

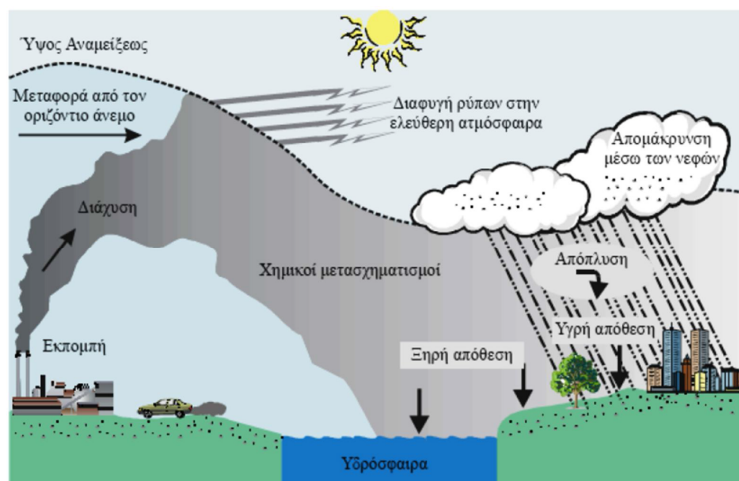
Η χρονική διάρκεια για την οποία τα αερολύματα παραμένουν στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από το μέγεθός τους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες που έχουν και το ατμοσφαιρικό στρώμα στο οποίο βρίσκονται. Στην κατώτερη τροπόσφαιρα παραμένουν για πέντε ημέρες κατά μέσο όρο, στην ανώτερη τροπόσφαιρα μέχρι ένα περίπου μήνα και στη στρατόσφαιρα για σχεδόν δύο με τρία χρόνια (λόγω συνθηκών ευστάθειας). Γενικά, όσο μεγαλύτερη διάμετρο έχουν τα αεροζόλ, τόσο λιγότερο παραμένουν στην ατμόσφαιρα. Για τα μικρότερης διαμέτρου αιωρούμενα σωματίδια ισχύει το αντίστροφο.

❖ Μηχανισμοί απομάκρυνσης αερολυμάτων

Τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα μπορούν να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα με τις ακόλουθες διεργασίες:

- Συσσωμάτωση: Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0.1 μm συγκρούονται με τα μόρια του ατμοσφαιρικού αέρα (διάχυση Brown), με αποτέλεσμα τη δημιουργία συσσωματωμάτων μεγαλύτερης διαμέτρου. Όταν το μέγεθος των νεοσχηματισθέντων σωματιδίων είναι ικανό, τότε αυτά καθιζάνουν στην επιφάνεια του εδάφους.
- Χημικός μετασχηματισμός: Τα αερολύματα υπόκεινται σε πλήθος χημικών μετασχηματισμών κατά την παραμονή τους στην ατμόσφαιρα. Όταν αντιδρούν με τα διάφορα συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα, προκύπτουν ουσίες οι οποίες είτε είναι νέοι ρύποι (δευτερογενείς ρύποι) είτε δεν είναι ρύποι. Μόνο η δεύτερη περίπτωση αποτελεί μηχανισμό απομάκρυνσης ατμοσφαιρικών αιωρημάτων.
- Διασπορά: Η δράση του ανέμου μεταφέρει τα αερολύματα μακριά από την πηγή που τα εκπέμπει τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Ο βαθμός αραίωσης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (οριζόντια συνιστώσα) και την ένταση των αναταρακτικών κινήσεων (κατακόρυφη συνιστώσα).
- Απόθεση: Η σωματιδιακή ύλη φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσω των διεργασιών της ξηρής και της υγρής απόθεσης. Κατά την ξηρή απόθεση, τα αεροζόλ επικάθονται απ' ευθείας στην επιφάνεια του εδάφους, των διάφορων

υδροσυλλογών (ωκεανοί, λίμνες κ.ά.) και των φυτών λόγω βαρυτικής καθίζησης υπό φηρές συνθήκες. Κατά την υγρή απόθεση, τα αερολύματα φτάνουν στη γήινη επιφάνεια είτε με απόπλυση από τη βροχή ή το χιόνι είτε ως πυρήνες συμπύκνωσης σταγόνων βροχής ή νιφάδων χιονιού.



Σχήμα 1.9: Μηχανισμοί απομάκρυνσης αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα (Μελάς Δ. , 2012).

❖ Επιπτώσεις των αεροζόλ στο περιβάλλον και τον άνθρωπο

Τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα επιδρούν στο φυσικό περιβάλλον, μεταβάλλοντας το κλίμα με άμεσους και έμμεσους τρόπους, και στον άνθρωπο, επιβαρύνοντας την υγεία του. Τα φαινόμενα που προκαλούν στην ατμόσφαιρα και τον ανθρώπινο οργανισμό είναι απόρροια των φυσικών τους ιδιοτήτων (μέγεθος, προσρόφηση, οπτική συμπεριφορά) και της χημικής τους σύστασης.

Τα αερολύματα, εξ' αιτίας της ικανότητάς τους να απορροφούν, να σκεδάζουν και να ανακλούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας, μεταβάλλουν το χρόνο ζωής και τις οπτικές ιδιότητες των νεφών και μειώνουν την ορατότητα μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις λιγότερο σκούρων σωματιδίων (λόγω ατελούς καύσης άνθρακα) στην τροπόσφαιρα ή η παρουσία τέφρας στη στρατόσφαιρα (λόγω ηφαιστειακής έκρηξης) προκαλούν ψύξη της ατμόσφαιρας, ενώ μεγάλη ποσότητα αιθάλης προκαλεί θέρμανση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κάποια ατμοσφαιρικά αιωρήματα δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης. Όταν τέτοια σωματίδια βρεθούν σε ικανές συγκεντρώσεις

στην ατμόσφαιρα, δημιουργούν μεγάλο αριθμό σταγονιδίων μικρού μεγέθους, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται ο ρυθμός κατακρήμνισής τους. Έτσι, το σχηματιζόμενο νέφος αποκτά μεγαλύτερη λαμπρότητα, πράγμα που οδηγεί σε ψύξη της ατμόσφαιρας (μεγάλη ανακλαστικότητα), και αυξάνεται ο χρόνος ζωής του. Ακόμη, τα αεροζόλ δύνανται να απορροφήσουν ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε τέτοιο βαθμό, που εμποδίζεται η συμπύκνωση των υδρατμών. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση των βροχοπτώσεων.

Οι επιπτώσεις που έχουν τα αερολύματα στην υγεία του ανθρώπου είναι σημαντικές και εξαρτώνται από το μέγεθος και τη χημική τους σύσταση. Τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της διαδικασίας της αναπνοής, προσβάλλοντας το αναπνευστικό σύστημα. Ανάλογα με την αεροδυναμική τους διάμετρο, διακρίνονται σε (Φυτιάνος & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009):

- Εισπνεύσιμα: Έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση των 10 μm . Τα μεγαλύτερα εξ αυτών κατακάθονται στη ρινική κοιλότητα και όσο μειώνεται το μέγεθός τους εισχωρούν σε βαθύτερα τμήματα των αεραγωγών.
- Θωρακικά: Έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση των 7 μm και διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού.
- Αναπνεύσιμα: Έχουν διάμετρο μικρότερη ή ίση των 2.5 μm και φτάνουν μέχρι τις κυψελίδες των πνευμόνων.

Λόγω της μεγάλης ενεργής επιφάνειας ανά μονάδα μάζας που έχουν τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορούν να προσροφήσουν επικίνδυνες τοξικές ουσίες, (π.χ. μόλυβδο, νικέλιο, ίνες αμιάντου) επιβαρύνοντας έτι περαιτέρω την υγεία του ανθρώπου.

Τα αερολύματα επηρεάζουν την αναπνοή, προκαλώντας ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος, των πνευμόνων και της καρδιάς. Οι ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού (παιδιά, ηλικιωμένοι, οι πάσχοντες από άσθμα ή καρδιολογικές παθήσεις) διατρέχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο υπό συνθήκες υψηλών συγκεντρώσεων αεροζόλ. Η μακροχρόνια εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων είναι υπεύθυνη για την πρόκληση διαφόρων μορφών πνευμοκονιάσεων, άσθματος, αλλεργικών αντιδράσεων και, σε κάποιες περιπτώσεις, καρκινογενέσεων.

1.2.3 Επίδραση μετεωρολογικών παραγόντων στις συγκεντρώσεις των ρύπων

Η συγκέντρωση των ρύπων σε μια περιοχή δεν είναι σταθερή με το χρόνο. Επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη μετεωρολογία είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο. Οι διάφορες μετεωρολογικές παράμετροι επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στον εκάστοτε ρύπο και δύνανται αυξήσουν ή να μειώσουν τοπικά τη συγκέντρωσή του. Οι βασικές μετεωρολογικές παράμετροι που διαμορφώνουν την ρύπανση της ατμόσφαιρας σε ένα τόπο είναι οι ακόλουθες:

- ο Άνεμος
- ο Θερμοκρασία
- ο Σχετική υγρασία
- ο Υετός
- ο Θερμοκρασιακή αναστροφή
- ο Νέφωση

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη ανάλυση του τρόπου με τον οποίο μπορεί να επηρεάσει την ατμοσφαιρική ρύπανση μιας περιοχής ο κάθε ένας από τους προαναφερθέντες παράγοντες.

❖ Άνεμος

Ο άνεμος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ρύπανση ενός τόπου, καθώς την επηρεάζει με την ταχύτητα και τη διεύθυνσή του. Η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό με τον οποίο οι ρύποι απομακρύνονται από την πηγή εκπομπής τους. Σε γενικές γραμμές μπορεί να ειπωθεί ότι όσο αυξάνει η ταχύτητα που του ανέμου, τόσο μειώνεται η συγκέντρωση των ρυπογόνων ουσιών. Η σχέση αυτή δεν ισχύει για όλους τους ρύπους, καθώς υπάρχουν και περιπτώσεις (π.χ. όζον) κατά τις οποίες αυξάνεται η συγκέντρωση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Η διεύθυνση του ανέμου προσδιορίζει την περιοχή προς την οποία κατευθύνονται οι ρύποι. Οριοθετεί την πορεία που ακολουθεί ο άνεμος και κατ' επέκταση τη συγκέντρωση των ρύπων πάνω από έναν τόπο, ενώ παράλληλα καθορίζει την περιοχή προς την οποία κατευθύνονται οι ρύποι. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των ρύπων σε μια ατμοσφαιρικά επιβαρυμένη περιοχή ενδέχεται να μειωθούν σημαντικά με τη δράση του ανέμου. Με ανάλογο τρόπο δύναται να αυξηθούν οι συγκεντρώσεις των ρυπογόνων ουσιών σε μια μη ρυπασμένη περιοχή

λόγω μεταφοράς των ρύπων από άλλους τόπους. Στην περίπτωση σημειακών πηγών (π.χ. καμινάδες και φουγάρα βιομηχανικών μονάδων), η διεύθυνση του ανέμου αποκτά ιδιαίτερη σημασία, διότι με μικρή μεταβολή αυτής μπορούν να αλλάξουν σημαντικά τα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής.

❖ **Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας συμβάλλει στη διαμόρφωση των επιπέδων ρύπανσης. Καθορίζει εάν δύναται να λάβουν χώρα ορισμένες χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα και επηρεάζει την ταχύτητα με την οποία αυτές πραγματοποιούνται. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή υπαρχόντων ή τη δημιουργία νέων ρύπων. Η θερμοκρασία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα κατώτερα στρώματα της Γης και συνδέεται άμεσα με τη ροή αυτής μέσα στην ατμόσφαιρα.

❖ **Σχετική υγρασία**

Σχετική υγρασία (RH) του ατμοσφαιρικού αέρα καλείται ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχονται σε δοσμένο όγκο υγρού αέρα προς τη μάζα των υδρατμών που θα περιείχε ο εν λόγω όγκος αέρα, εάν ήταν κορεσμένος σε υδρατμούς, κάτω από τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (Χρονοπούλου-Σερέλη & Φλόκας, 2010). Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας επηρεάζει σε μικρό βαθμό τα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής, συγκριτικά με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Αύξηση της σχετικής υγρασίας συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, οι οποίοι μπορούν να λάβουν μέρος σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων και να παίζουν έμμεσο ρόλο στην αύξηση ή τη μείωση της συγκέντρωσης κάποιων ρύπων.

❖ **Υετός**

Ο υετός σε όλες τις μορφές του επηρεάζει σημαντικά στα επίπεδα ρύπανσης, καθώς με τη διαδικασία της απόθεσης, όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, μεταφέρει τους εν αιωρήσει ρύπους στο έδαφος, απομακρύνοντάς τους από την ατμόσφαιρα. Οι υδροδιαλυτοί ρύποι εγκλωβίζονται μέσα στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, παρασύρονται από αυτά και μεταφέρονται στη γήινη επιφάνεια. Με τέτοια φαινόμενα απόπλυσης μειώνονται οι συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα.

❖ **Θερμοκρασιακή αναστροφή**

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, στην τροπόσφαιρα λαμβάνει χώρα σχεδόν το σύνολο των μετεωρολογικών φαινομένων, όπου η θερμοκρασία παρουσιάζει μια μείωση καθ' ύψος της τάξης των $\sim 6^{\circ}\text{C/Km}$. Θερμοκρασιακή αναστροφή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία αυξάνει με την αύξηση του ύψους. Θερμοκρασιακές αναστροφές δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν τα παρεδάφια στρώματα αέρα ψύχονται λόγω έντονης εκπομπής γήινης ακτινοβολίας από την εδαφική επιφάνεια, με αποτέλεσμα αυτά να αποκτούν μικρότερη θερμοκρασία από τα υπερκείμενα στρώματα αέρα. Έτσι, σε ένα ύψος μερικών εκατοντάδων μέτρων από το έδαφος εκτείνεται ένα θερμότερο στρώμα αέρα, το οποίο εμποδίζει την άνοδο των ρύπων προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων στο στρώμα υπάρχει ανάμεσα στο έδαφος και το στρώμα της θερμοκρασιακής αναστροφής.

❖ **Νέφωση**

Όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός νεφών σε μια περιοχή, τότε εμποδίζεται η έλευση ηλιακής ακτινοβολίας στα χαμηλά στρώματα της τροπόσφαιρας. Έτσι, κάποιες χημικές αντιδράσεις, που απαιτούν την ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας, δε μπορούν να λάβουν χώρα (π.χ. φωτοχημικές αντιδράσεις), με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συγκέντρωση ορισμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα (λ.χ. η συγκέντρωση του όζοντος μειώνεται όταν υπάρχει νέφωση). Ακόμη, η παρουσία νεφών προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας του αέρα (στα κυκλωνικά συστήματα), η οποία είναι υπεύθυνη για την πραγματοποίηση ή μη χημικών αντιδράσεων και της ταχύτητας με την οποία αυτές θα συμβούν. Έτσι, με μείωση της θερμοκρασίας λόγω υψηλής νέφωσης σε μια ύφεση, μειώνονται οι χημικές αντιδράσεις που παράγουν δευτερογενείς ρύπους.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης με έμφαση στα μορφολογικά, κλιματολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της.

2.1.1 Η μορφολογία της Θεσσαλονίκης

Το αστικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης βρίσκεται στην Κεντρική Μακεδονία στη Βόρεια Ελλάδα με γεωγραφικό πλάτος $40^{\circ} 38' \text{N}$ και γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 55' \text{E}$. Η Θεσσαλονίκη είναι από τις πλέον πυκνοκατοικημένες πόλεις της χώρας και χαρακτηρίζεται από πυκνή δόμηση, πληθώρα ψηλών κτιρίων, δίκτυο στενών δρόμων και έλλειψη ακάλυπτων χώρων με πράσινο.

Η πόλη της Θεσσαλονίκης αναπτύσσεται κατά μήκος της βορειοανατολικής ακτής του Θερμαϊκού κόλπου. Στα ΑΒΑ της βρίσκεται ο ορεινός όγκος του Χορτιάτη, η κορυφή του οποίου φτάνει σε μέγιστο ύψος τα 1200 m και στα ΒΑ της υψώνεται ο ορεινός όγκος του Προφήτη Ηλία, με ύψος 740 m. Στα ΔΒΔ της πόλης αναπτύσσεται με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ η πεδιάδα της Θεσσαλονίκης, η οποία διατρέχεται από τους ποταμούς Αξιό, Λουδία, Αλιάκμονα και Γαλλικό.

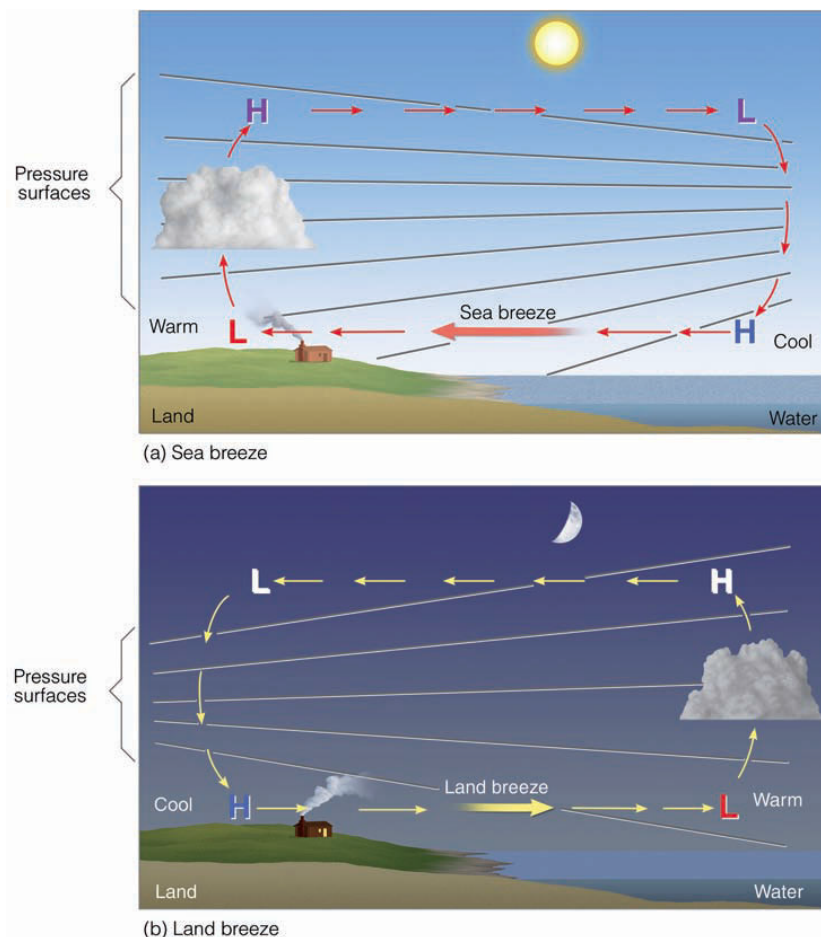
2.1.2 Κλιματικά στοιχεία της Θεσσαλονίκης

Η Θεσσαλονίκη έχει μεσογειακό κλίμα (κλίμα τύπου Csa κατά Köppen). Χαρακτηρίζεται από θερμά - ξηρά καλοκαίρια και ψυχρούς - υγρούς χειμώνες, λόγω της παρουσίας ορεινών όγκων στα ΒΑ της πόλης σε συνδυασμό με την κλειστή, ρηχή και θερμή θαλάσσια έκταση του Θερμαϊκού κόλπου. Η εγγύτητα της πόλης με τη λίμνη Κορώνεια στα ανατολικά συμβάλλει στα υψηλά ποσοστά υγρασίας κατά τη χειμερινή, κυρίως, περίοδο. Οι μέγιστες θερμοκρασίες σημειώνονται κατά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, ενώ τα μεγαλύτερα ποσά βροχής καταγράφονται το Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο.

Η ιδιαίτερη θέση που κατέχει η Θεσσαλονίκη την καθιστά ευάλωτη σε απότομες μεταβολές του καιρού, προερχόμενες από βορειότερες περιοχές, ενώ οι ημερήσιοι και τοπικοί άνεμοι την επηρεάζουν σημαντικά. Τέτοιου είδους άνεμοι είναι:

- Η θαλάσσια και η απόγειος αύρα: Η θαλάσσια αύρα δημιουργείται κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της ταχύτερης θέρμανσης της επιφάνειας της ξηράς σε

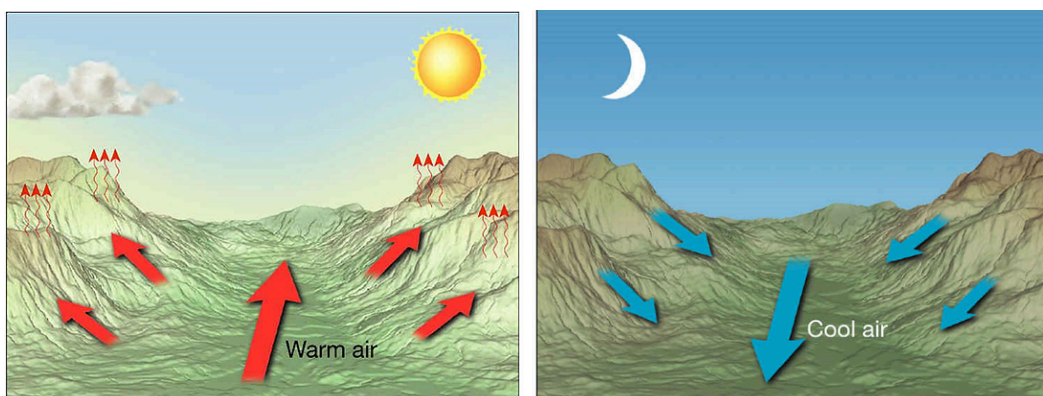
σχέση με αυτή της θάλασσας. Με αυτό τον τρόπο, η ατμοσφαιρική πίεση πάνω από την ξηρά γίνεται μικρότερη από την αντίστοιχη πάνω από τη θάλασσα, με αποτέλεσμα να πνέει άνεμος από τη θάλασσα προς την ξηρά. Κατά τη διάρκεια της νύχτας συμβαίνει η ακριβώς αντίθετη διαδικασία. Η επιφάνεια της ξηράς ψύχεται ταχύτερα από αυτή της θάλασσας, με αποτέλεσμα η πίεση πάνω από τη θάλασσα να είναι μεγαλύτερη. Έτσι, ο άνεμος που πνέει από την ξηρά προς τη θάλασσα εξ' αιτίας αυτού του φαινομένου καλείται απόγειος αύρα. Σημειώνεται απόγεια αύρα έχει πολύ μικρότερο ύψος και ένταση απ' ό,τι η θαλάσσια αύρα, διότι οι θερμομετρικές διαφορές ξηράς-θάλασσας είναι μεγαλύτερες την ημέρα σε σχέση με τη νύχτα (Φλόκας, 1997).



Σχήμα 2.1: Η θαλάσσια (α) και η απόγειος αύρα (β) (Ahrens, 2008).

- Η αύρα βουνών και κοιλάδων: Η αύρα κοιλάδων πνέει κατά τη διάρκεια της ημέρας από τα χαμηλότερα προς τα υψηλότερα σημεία επικλινών εδαφών ως αποτέλεσμα της θέρμανσης του αέρα στο βάθος των κοιλάδων και της ανοδικής

κίνησης αυτού κατά μήκος των πλαγιών προς τις κορυφές με ταυτόχρονη κάθοδο ψυχρότερου αέρα στο μέσο της κοιλάδας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας πνέει η αύρα των βουνών, η οποία σχηματίζεται με την αντίστροφη διαδικασία. Τη νύχτα ο αέρας στις κορυφές ψύχεται γρηγορότερα από αυτόν στο μέσο των κοιλάδων. Έτσι, ο αέρας αυτός ως πυκνότερος, κατέρχεται κατά μήκος των πλαγιών στο κέντρο της κοιλάδας, αντικαθιστώντας το θερμότερο αέρα που ανέρχεται από εκείνο το σημείο.



Σχήμα 2.2: Άνεμος κοιλάδας (αριστερά) και βουνού (δεξιά) (Πηγή: www.ecoweather.gr/anemos)

- Ο Βαρδάρης: Ο άνεμος αυτός ξεκινά από το υψίπεδο των Σκοπίων και, ακολουθώντας την κοιλάδα του Αξιού, εισέρχεται στην περιοχή της Ελλάδας από το άνοιγμα μεταξύ των ορέων Πάικο και Μπέλες. Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης φτάνει ως σφοδρός και ξηρός καταβατικός Βόρειος-Βορειοδυτικός άνεμος. Η μέση ταχύτητά του είναι ~10 m/sec, ενώ μπορεί να φτάσει και τα 20-25 m/sec, που σημαίνει άνεμο βαθμού θύελλας για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Εμφανίζεται για περίπου 40 ημέρες το χρόνο, διαρκεί για 1-2 μέρες (σπανίως και για 3-4 μέρες) και δύναται να επαναληφθεί μετά από τη διακοπή του. Η δράση του προκαλεί νεφοδιάλυση, πτώση της θερμοκρασίας και της υγρασίας και αύξηση της εξάτμισης και του ποσοστού της ηλιοφάνειας (Φλόκας, 1997).
- Ο Χορτιάτης: Ισχυρός ανατολικός καταβατικός άνεμος, ο οποίος μπορεί να φτάσει στο βαθμό της θύελλας όταν επικρατούν βαθιές υφέσεις στην περιοχή της Κεντρικής Μεσογείου (Φλόκας, 1997).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

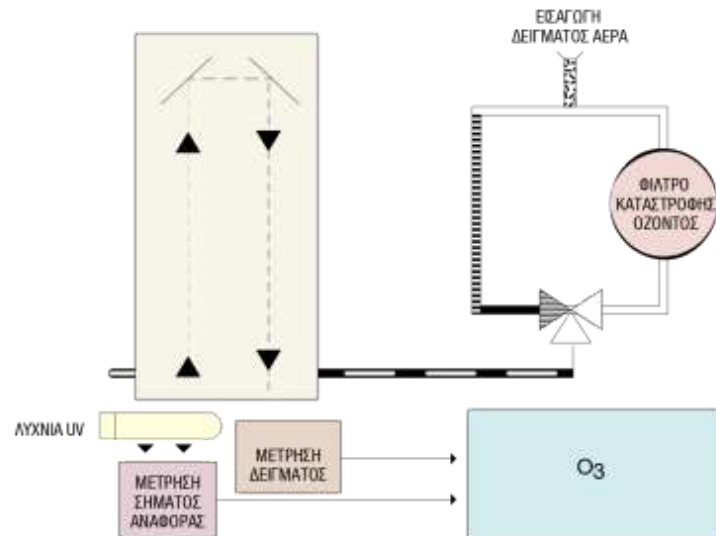
Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα τεχνικών, με σκοπό την παρακολούθηση και τον προσδιορισμό των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής. Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει επιτρέψει τη δημιουργία αποτελεσματικών οργάνων για τη μέτρηση ρύπων και χημικών ενώσεων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται: α) με δειγματοληψία και μετέπειτα ανάλυση στο εργαστήριο, β) με διαρκή επιτόπια μέτρηση και καταγραφή και γ) με παρατήρηση μακρόθεν (τηλεπαρατήρηση). Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές μέτρησης των υπό μελέτη ρύπων της παρούσας εργασίας.

2.2.1 Ανάλυση O_3

Μια βασική μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης του όζοντος σε ένα αέριο δείγμα βασίζεται στο γεγονός ότι το όζον εμφανίζει το μέγιστο της απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας στα 253.7 nm. Το υπό ανάλυση δείγμα αέρα διέρχεται μέσα από ένα σωλήνα, στο ένα άκρο του οποίου υπάρχει μια λάμπα υδραργύρου (διότι η κύρια γραμμή εκπομπής του είναι στα 253.7 nm) και στο άλλο άκρο του βρίσκεται ανιχνευτής που μετράει την ένταση του φωτός της λάμπας στα 253.7 nm. Επειδή στον αέρα υπάρχουν κι άλλα συστατικά που απορροφούν ακτινοβολία στα ίδια μήκη κύματος με το όζον, το όργανο κάνει πρώτα μια μέτρηση αναφοράς, με διέλευση του εισερχόμενου αέρα από φίλτρο που περιέχει MnO_2 , το οποίο καταστρέφει το όζον. Έτσι, μετράται η εξασθένηση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο δείγμα αέρα του θαλάμου μέτρησης και υπολογίζεται η συγκέντρωση του όζοντος μέσα σε αυτό. Η διαδικασία διαρκεί περίπου 10 δευτερόλεπτα (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

Μια ακόμη βασική μέθοδος μέτρησης του όζοντος στηρίζεται στη χημειοφωταύγεια. Το όζον αντιδρά με το αιθυλένιο, παράγοντας προϊόντα σε διεγερμένη ηλεκτρονιακή κατάσταση, τα οποία φθορίζουν με εκπομπή φωτός. Η οργανολογία της μεθόδου αυτής έχει ως κύρια εξαρτήματα: α) μια μόνιμη πηγή αιθυλενίου, β) μια γραμμή εισόδου ατμοσφαιρικού αέρα, γ) ένα θάλαμο αντίδρασης, δ) ένα φωτοπολλαπλασιαστή και ε) ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα επεξεργασίας των ενδείξεων. Οι συγκεντρώσεις του όζοντος και του αιθυλενίου καθορίζουν το ρυθμό λήψης φωτός από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Εάν η συγκέντρωση του όζοντος είναι

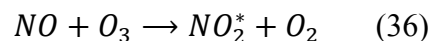
πολύ μικρότερη από αυτή του αιθυλενίου, τότε το εκλυόμενο φως είναι ανάλογο μόνο της συγκέντρωσης του όζοντος (Ζάνης, 2014).



Σχήμα 2.3: Η διάταξη του αναλυτή όζοντος (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

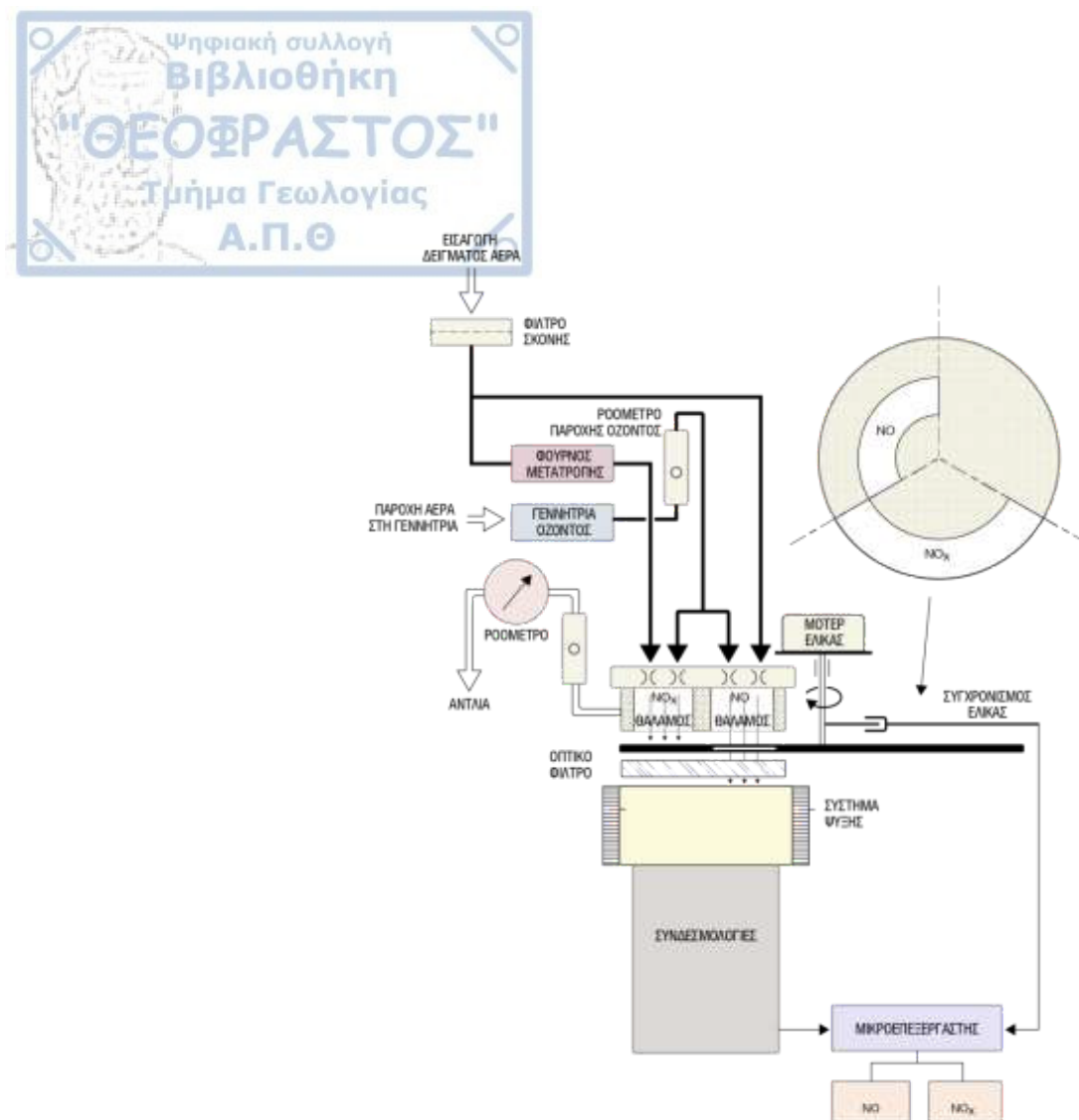
2.2.2 Ανάλυση NO_x

Οι αυτόματοι αναλυτές βασίζονται στη μέτρηση των συγκεντρώσεων των οξειδίων του αζώτου με τη μέθοδο της χημειοφωταύγειας. Το μονοξείδιο του αζώτου αντιδρά με το όζον, με αποτέλεσμα το πρώτο να οξειδώνεται σε διοξείδιο του αζώτου, το οποίο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και εκπέμπει ακτινοβολία κατά την αποδιέγερσή του. Η εν λόγω αντίδραση είναι η ακόλουθη:



Η συγκέντρωση του NO προσδιορίζεται άμεσα από την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τα διεγερμένα μόρια NO₂. Η συγκέντρωση του NO₂ υπολογίζεται έμμεσα από τη διαφορά ανάμεσα στις συγκεντρώσεις του NO και των συνολικών οξειδίων του αζώτου που περιέχονται στο δείγμα αέρα. Αυτές οι συγκεντρώσεις προκύπτουν από τη μέτρηση του εκλυόμενου φωτός της αντίδρασης (36). Σημειώνεται ότι το όζον παρέχεται σε σταθερά υψηλή συγκέντρωση, οπότε η συγκέντρωση του NO του ατμοσφαιρικού αέρα καθορίζει την παραγωγή του φωτός (Γεντεκάκης, 2010).

Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει τον τρόπο λειτουργίας του αναλυτή. Το όργανο διαθέτει δύο διακριτά κανάλια από τα οποία διέρχεται το προς ανάλυση δείγμα αέρα.



Σχήμα 2.4: Η διάταξη του αναλυτή οξειδίων του αζώτου (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

Το πρώτο κανάλι μετράει τη συγκέντρωση του NO με τον εξής τρόπο: το δείγμα του ατμοσφαιρικού αέρα που περιέχει NO εισέρχεται σε έναν θάλαμο αντίδρασης, όπου υπάρχει συνεχής τροφοδοσία σε O_3 από την γεννήτρια όζοντος, με αποτέλεσμα να λάβει χώρα η αντίδραση (36). Το αρχικό δείγμα αέρα περιέχει και NO_2 , το οποίο, όμως, παραμένει αμετάβλητο και δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα. Το εκπεμπόμενο φως από την αντίδραση χημειοφωταύγειας διέρχεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή και η έντασή του μετατρέπεται σε συγκέντρωση NO από ένα κύκλωμα επεξεργασίας του σήματος.

Το δεύτερο κανάλι μετράει τα συνολικά NO_x με την ακόλουθη διαδικασία: Το δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα που περιέχει οξείδια του αζώτου εισέρχεται σε ένα μετατροπέα, ο οποίος ανάγει ποσοτικά το NO_2 σε NO. Έτσι, το σύνολο των NO_x εξέρχεται από τον εν λόγω μετατροπέα ως NO, εισέρχεται στον θάλαμο αντίδρασης, όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση (36), και το προκύπτον σήμα μετατρέπεται σε

συγκέντρωση NO_x , με τρόπο αντίστοιχο με αυτόν του πρώτου καναλιού. Κατά συνέπεια, η τελική συγκέντρωση του αρχικού δείγματος αέρα σε NO_2 υπολογίζεται από τη διαφορά των σημάτων των δύο καναλιών (διαφορά ανάμεσα στις συγκεντρώσεις NO και NO_x) (Γεντεκάκης, 2010).

2.2.3 Ανάλυση CO

Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του CO στηρίζεται στη μη σκεδαζόμενη υπέρυθρη φωτομετρία (non dispersive infared photometry, NDIR) και σχετίζεται με την επιλεκτική απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το μονοξείδιο του άνθρακα.

Το όργανο ανάλυσης CO λειτουργεί ως εξής: σε ένα κελί αναφοράς περιέχεται το αέριο αναφοράς, το οποίο δεν απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία, και σε ένα κελί δείγματος οδηγείται το προς ανάλυση δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα, το οποίο περιέχει άγνωστη ποσότητα CO . Μια ελαστική μεμβράνη χωρίζει τον ανιχνευτή σε δύο τμήματα που πληρούνται με CO . Ένας περιστρεφόμενος έλικας εκθέτει περιοδικά τα δύο αυτά τμήματα σε υπέρυθρη ακτινοβολία. Το τμήμα με το αέριο αναφοράς εκτίθεται σε σταθερή ποσότητα υπέρυθρης ενέργειας, η οποία μεταδίδεται στο ένα τμήμα του ανιχνευτή. Το τμήμα με το δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα μεταδίδει στον ανιχνευτή ελαττωμένη ποσότητα υπέρυθρης ενέργειας, λόγω της απορρόφησής της από το περιεχόμενο στο δείγμα αέρα CO . Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του δείγματος ατμοσφαιρικού αέρα σε CO , τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα υπέρυθρης ενέργειας που φτάνει στον ανιχνευτή. Οι διαφορετικές ποσότητες ακτινοβολίας που δέχονται τα δύο τμήματα του ανιχνευτή ωθούν την ελαστική μεμβράνη σε κίνηση με ταυτόχρονη παραγωγή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, η συχνότητα του οποίου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής και την περίοδο του έλικα (Γεντεκάκης, 2010). Το εκπεμπόμενο σήμα επεξεργάζεται και καταγράφεται, δίνοντας τη συγκέντρωση του CO μέσα στο δείγμα του ατμοσφαιρικού αέρα.

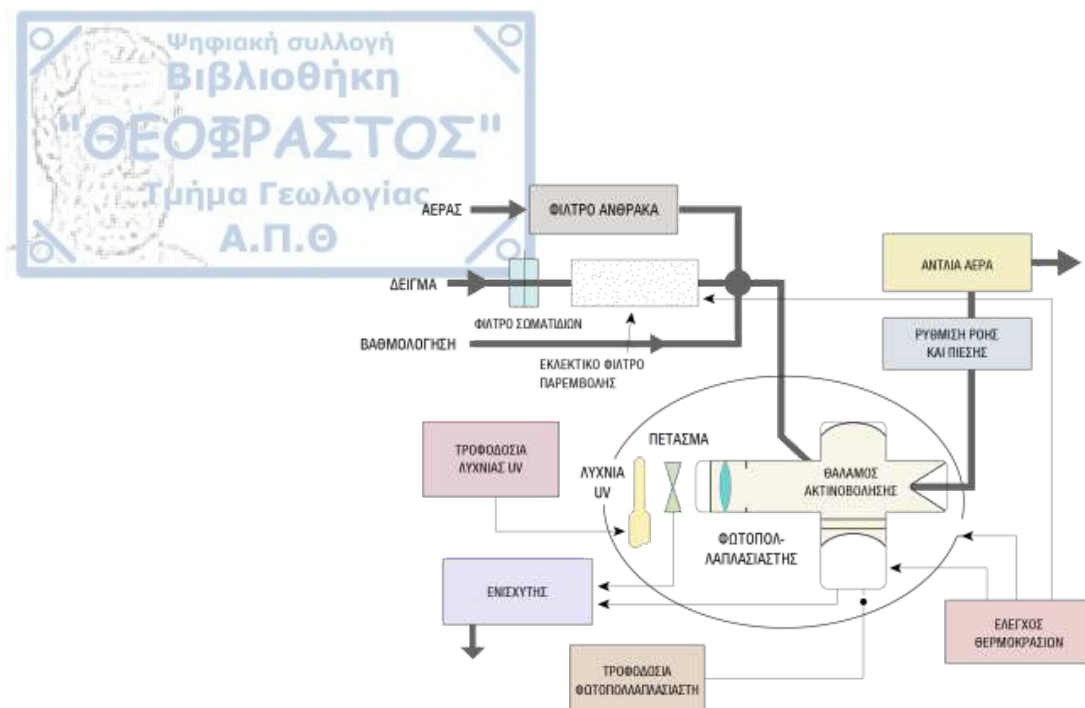
2.2.4 Ανάλυση SO_2

Η μέτρηση του διοξειδίου του θείου μπορεί να γίνει είτε με δειγματοληψία και κατόπιν ανάλυση του δείγματος στο εργαστήριο είτε με τη χρήση αυτόματων αναλυτών συνεχούς καταγραφής.

Στις μεθόδους δειγματοληψίας, τα δείγματα συλλέγονται με διέλευση γνωστού όγκου αερίου υπό μορφή φυσαλίδων μέσα σε υγρό φορέα. Ο εν λόγω υγρός φορέας περιέχει χημικές ουσίες, οι οποίες κατακρατούν το SO_2 στο διάλυμα, είτε με συμπλοκοποίησή του είτε με οξείδωσή του σε σταθερότερη μορφή. Έπειτα, τα δείγματα μεταφέρονται στο εργαστήριο για ανάλυση με τη χρήση κατάλληλης μεθόδου. Μια τυπική μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της φωτομετρίας, κατά την οποία το ποσό του SO_2 που συλλέχθηκε είναι ανάλογο του ποσού του απορροφούμενου από το διάλυμα φωτός (Γεντεκάκης, 2010).

Στις μεθόδους συνεχούς ανάλυσης SO_2 η συλλογή και η μέτρηση των δειγμάτων μετατρέπεται σε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τον προσδιορισμό του SO_2 , οι οποίες βασίζονται στη φωτομετρία, τη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, την κουλομετρία, την ένταση του διαρρέοντος ρεύματος, το φωτομετρικό ανιχνευτή φλόγας, τη φασματοσκοπία φθορισμού και την υπέρυθη φασματοσκοπία (αναλυτές NDIR- SO_2) (Γεντεκάκης, 2010).

Στη μέθοδο με αναλυτή υπεριώδους φθορισμού, η δειγματοληψία και η μέτρηση γίνονται συνεχώς με άντληση αέρα και προώθησή του στο εσωτερικό του οργάνου. Η συγκέντρωση του SO_2 προσδιορίζεται από την καταγραφόμενη ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού, η οποία παράγεται κατά την αποδιέγερσή του. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα ατμοσφαιρικού αέρα εισέρχεται στον αναλυτή, όπου αρχικά περνάει από ένα ειδικό φίλτρο άνθρακα για να απομακρυνθούν οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Το απαλλαγμένο από αρωματικά συστατικά δείγμα αέρα οδηγείται σε ένα θάλαμο αντίδρασης, όπου ακτινοβολείται από λάμπα υπεριώδους ακτινοβολίας στο μήκος κύματος των 214 nm. Σε αυτό το μήκος κύματος τα μόρια του SO_2 απορροφούν χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα το SO_2 να μεταπίπτει σε διεγερμένη κατάσταση. Κατά την αποδιέγερσή του εκπέμπεται ακτινοβολία φθορισμού, η οποία ανιχνεύεται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή. Το εκπεμπόμενο από αυτόν σήμα φτάνει σε ένα μικροϋπολογιστή, οποίος το μετατρέπει σε ψηφιακές τιμές και υπολογίζει τις μέσες τιμές των μετρήσεων (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

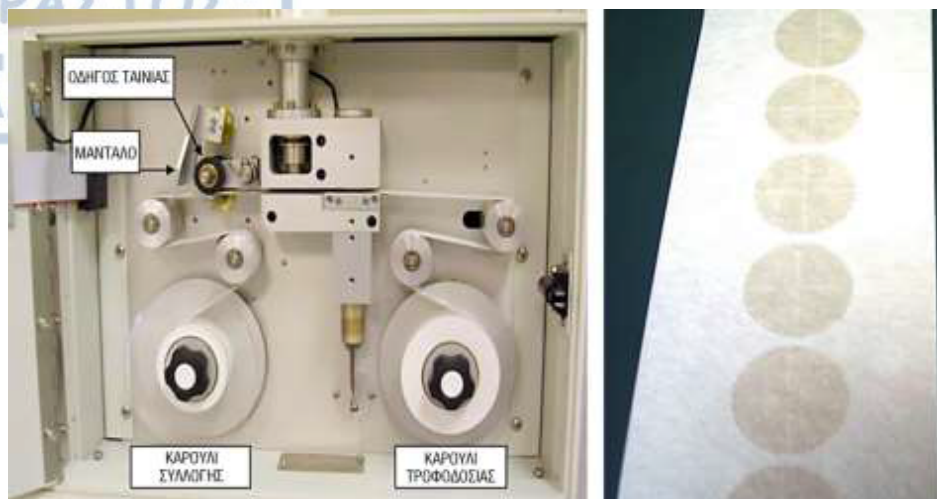


Σχήμα 2.4: Η διάταξη του αναλυτή διοξειδίου του θείου (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

2.2.5 Ανάλυση PM₁₀

Οι ατμοσφαιρικοί σωματιδιακοί ρύποι χαρακτηρίζονται με βάση τη συγκέντρωση μάζας τους, τη χημική τους σύσταση και την κατανομή μεγέθους τους. Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν με το φυσικό περιβάλλον και τους ζώντες οργανισμούς (π.χ. τα προβλήματα υγείας που ενδέχεται να προκαλέσουν στον άνθρωπο).

Κάποιες βασικές τεχνικές προσδιορισμού της συγκέντρωσης μάζας είναι ο προσδιορισμός με βάση το βάρος των φίλτρων και η μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας. Στην πρώτη περίπτωση, τα σωματίδια διαχωρίζονται από γνωστό όγκο αέρα και μετράται η ολική μάζα τους. Ο διαχωρισμός γίνεται με τη χρήση διαφόρων φίλτρων και η μέτρηση της μάζας των αερολυμάτων στηρίζεται στη διαφορά βάρους των φίλτρων, πριν και μετά το διαχωρισμό (Γεντεκάκης, 2010). Στη μέθοδο με τη χρήση β-ακτινοβολίας, ατμοσφαιρικός αέρας αντλείται από ένα αυτόματο μηχανικό σύστημα και συλλέγεται από ένα φίλτρο δειγματοληψίας. Έπειτα, το δείγμα αέρα οδηγείται σε σημείο όπου βρίσκεται ραδιενεργό υλικό (άνθρακας-14), το οποίο εκπέμπει β-ακτινοβολία, και μετρητής Geiger-Muller. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνουν χώρα δύο μετρήσεις, μία πριν και μία μετά τη συλλογή δείγματος αέρα από το φίλτρο και η συγκέντρωση των PM₁₀ προσδιορίζεται με βάση την εξασθένιση της έντασης της ακτινοβολίας (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).



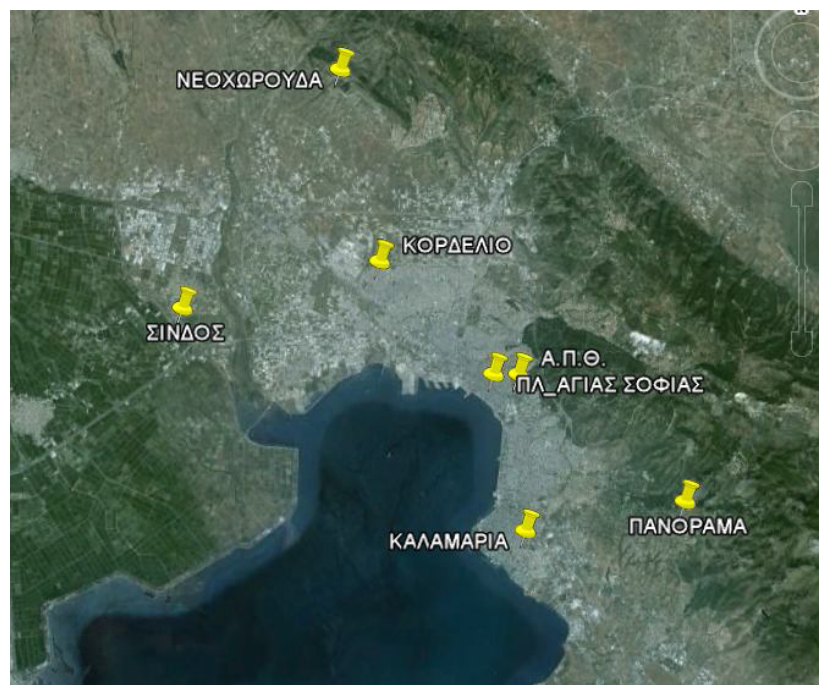
Εικόνα 2.1: Συσκευή διγματοληψίας ολικής συγκέντρωσης σωματιδίων με τη μέθοδο της β-ακτινοβολίας. Αριστερά απεικονίζεται η συσκευή και δεξιά το φίλτρο δειγματοληψίας (Μελάς, Μπάης, & Μπαλής, 2015).

Η κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων γίνεται με τις μεθόδους των πολλαπλών κοσκίνων, της ηλεκτρικής κινητικότητας και του σκεδασμού του φωτός. Η μέθοδος των πολλαπλών κοσκίνων συνήθως χρησιμοποιείται για σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη του 0.1 μm . Χρησιμοποιούνται πολλαπλά διαδοχικά κόσκινα, το κάθε επίπεδο των οποίων αφαιρεί σωματίδια με προοδευτικά μικρότερη αεροδυναμική διάμετρο, και κατόπιν τα κόσκινα αυτά ζυγίζονται για να καταγραφεί η κατανομή μεγέθους ή αναλύονται χημικά για να προσδιοριστεί η χημική σύσταση του κάθε μεγέθους. Η μέθοδος της ηλεκτρικής κινητικότητας χρησιμοποιείται για σωματίδια με διάμετρο από 0.01 μm ως 1 μm και απαιτεί τη μονοπολική φόρτιση αυτών. Ο διαχωρισμός των σωματιδίων γίνεται μετά από τη διέλευσή τους μέσα από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Όσο μεγαλύτερη ισχύ έχει το ηλεκτρικό πεδίο, τόσο μεγαλύτερα σωματίδια εκτρέπονται και διαχωρίζονται από το ρεύμα ατμοσφαιρικού αέρα. Στη μέθοδο του σκεδασμού του φωτός, μεμονωμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν με μια ακτίνα φωτός και σκεδάζουν το φως υπό γωνία. Η ένταση του φωτός που σκεδάζεται εξαρτάται από την αεροδυναμική διάμετρο και το δείκτη διάθλασης του σωματιδίου (Γεντεκάκης, 2010).

Όσον αφορά τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, αυτή προσδιορίζεται με τις μεθόδους της φασματοσκοπίας φθορισμού με ακτίνες-X και της ανάλυσης με βομβαρδισμό νετρονίων. Στη φασματοσκοπία φθορισμού με ακτίνες-X (X-ray fluorescence, XRF), το δείγμα βομβαρδίζεται με ακτίνες-X, με αποτέλεσμα να

διεγείρονται τα ηλεκτρόνια του εσωτερικού φλοιού. Κατά την αποδιέγερσή τους εκπέμπεται ενέργεια με χαρακτηριστικά για κάθε στοιχείο του δείγματος μήκη κύματος. Αυτά τα φωτόνια ανιχνεύονται και αναλύονται για τον προσδιορισμό του τύπου και της ποσότητας των περιεχόμενων μέσα στο δείγμα στοιχείων. Σημειώνεται ότι η τεχνική XRF εφαρμόζεται και είναι αποτελεσματική για σωματιδιακή ύλη που περιέχει στοιχεία με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 11 (Νάτριο). Στη μέθοδο της ενεργοποίησης του δείγματος με βομβαρδισμό νετρονίων (Neutron Activation Analysis, NAA), το δείγμα αέρα βομβαρδίζεται με νετρόνια, τα οποία αλληλεπιδρούν με αυτό και δημιουργούν διαφορετικά ισότοπα των περιεχόμενων στο δείγμα στοιχείων. Πολλά από τα προκύπτοντα ισότοπα είναι ραδιενεργά και εντοπίζονται με σύγκριση της εκπεμπόμενης από αυτά ραδιενέργειας με πρότυπα. Άλλες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης, η φασματοσκοπία εκπομπής, η ανοδική βολταμετρία, η πολαρομετρία και η ιοντική χρωματογραφία (Γεντεκάκης, 2010).

2.3 ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ



Εικόνα 2.2: Χάρτης της περιοχής της Θεσσαλονίκης με τις θέσεις των σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Οι μετρήσεις των τιμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης γίνονται από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και το Τμήμα Περιβάλλοντος του Δήμου Θεσσαλονίκης. Οι δύο φορείς έχουν εγκατεστημένα δίκτυα παρακολούθησης των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε όλη την έκταση της πόλης. Στην παρούσα εργασία αναλύονται τα δεδομένα μόνο της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας.

Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) λειτουργεί από το 2000 με ευθύνη της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Το δίκτυο που λειτουργεί στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας απαρτίζεται από 7 σταθμούς (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά των σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ο χαρακτηρισμός του σταθμού διέπεται από 3 παραμέτρους: α) τύπος σταθμού, β) ταξινόμηση σταθμού ως προς το O₃, γ) τύπος περιοχής σταθμού. Τροποποιημένο από: (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Σταθμός	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Υψόμετρο (m)	Χαρακτηρισμός	CO	NO _x	SO ₂	O ₃	PM ₁₀
Αγίας Σοφίας	22° 56' 43'' .04	40° 38' 01'' .58	27	Κυκλοφορίας - Αστικός	X	X		X	X
Α.Π.Θ.	22° 57' 24'' .13	40° 38' 00'' .86	55	Κυκλοφορίας Αστικός Αστικός		X		X	
Ελευθέριο - Κορδελιό	22° 53' 36'' .38	40° 40' 24'' .77	30	Βιομηχανικός Αστικός Αστικός	X	X	X	X	X
Καλαμαριά	22° 57' 33'' .49	40° 34' 44'' .10	60	Κυκλοφορίας - Περιαστικός	X				X
Νεοχωρούδα	22° 52' 34'' .43	40° 44' 23'' .43	229	Υποβάθρου Περιαστικός Περιαστικός		X		X	X
Πανόραμα	23° 01' 54'' .05	40° 35' 20'' .15	363	Υποβάθρου Περιαστικός Περιαστικός		X		X	X
Σίνδος	22° 48' 08'' .52	40° 39' 28'' .23	14	Βιομηχανικός Αστικός Αστικός	X	X	X	X	X

Παράλληλα με την καταγραφή των ανωτέρω ρύπων, οι σταθμοί της Περιφέρειας καταγράφουν και μετεωρολογικά δεδομένα (διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, σχετική υγρασία). Μοναδική εξαίρεση αποτελεί ο σταθμός της Αγίας Σοφίας, ο οποίος δεν καταγράφει καμία μετεωρολογική παράμετρο διότι βρίσκεται μέσα σε οδική χαράδρα, με αποτέλεσμα να μην είναι αντιπροσωπευτικός των μετεωρολογικών συνθηκών της ευρύτερης περιοχής. Η μέτρηση των ρύπων γίνεται σε συνεχή βάση και για κάθε λεπτό καταγράφεται μια τιμή. Εν συνεχεία, μέσω επεξεργαστή υπολογίζονται οι μέσες ωριαίες τιμές, οι οποίες μεταβιβάζονται στον κεντρικό υπολογιστή της Υπηρεσίας μέσω μόντεμ (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Πίνακας 2.2: Μέθοδοι μέτρησης των ρύπων (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Ρύπος	Μέθοδος μέτρησης
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	Μέθοδος φθορισμού
Οξείδια του αζώτου (NO _x)	Μέθοδος χημειοφωταύγειας
Όζον (O ₃)	Μέθοδος απορρόφησης υπεριώδους
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Μέθοδος μη διαχεόμενης ακτινοβολίας
Αιωρούμενα σωματίδια (PM ₁₀)	Απορρόφηση β' ακτινοβολίας

2.4 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Σε μια προσπάθεια ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα έχουν νομοθετηθεί οριακές τιμές, όρια ενημέρωσης και συναγερμού για τους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Η ισχύουσα νομοθεσία που έχει εκδοθεί μέχρι σήμερα σχετικά με την ποιότητα της ατμόσφαιρας για τους ρύπους SO₂, NO₂, O₃, CO και PM₁₀ είναι:

- Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21^{ης} Μαΐου 2008, για την προστασία του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη
- ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103 (ΦΕΚ 488Β/30.3.11) «Μέτρα για την βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/EK»

Όσον αφορά την αντιμετώπιση των επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, έχει νομοθετηθεί με την Απόφαση 9452/08 του γενικού γραμματέα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (ΦΕΚ

1652B/08), όπως αυτή τροποποιήθηκε από την ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/E103 (Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013). Η προαναφερθείσα ευρωπαϊκή οδηγία δίνει τους ακόλουθους ορισμούς:

- Οριακή τιμή: Επίπεδο καθοριζόμενο βάσει επιστημονικών γνώσεων, με σκοπό να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και/ή στο σύνολο του περιβάλλοντος, το οποίο πρέπει να επιτευχθεί εντός δεδομένης προθεσμίας χωρίς εν συνεχεία υπερβάσεις.
- Περιθώριο ανοχής: Το ποσοστό της οριακής τιμής κατά το οποίο επιτρέπεται να γίνει υπέρβασή της σύμφωνα με τους όρους της ευρωπαϊκής οδηγίας.
- Όριο ενημέρωσης: Το επίπεδο πέραν του οποίου η βραχύχρονη έκθεση εγκυμονεί, για ιδιαίτερα ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού, κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία με αποτέλεσμα να καθίσταται απαραίτητη η άμεση και κατάλληλη πληροφόρηση.
- Όριο συναγερμού: το επίπεδο πέραν του οποίου υπάρχει κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία του πληθυσμού εν γένει ύστερα από σύντομη έκθεση και κατά τη διαπίστωση του οποίου τα κράτη μέλη πρέπει να λαμβάνουν άμεσα μέτρα.
- Τιμή στόχος: Επίπεδο καθοριζόμενο με σκοπό να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και/ή στο σύνολο του περιβάλλοντος, που επιτυγχάνεται κατά το δυνατόν εντός δεδομένης χρονικής περιόδου.

Επειδή δεν υπήρχε νομοθεσία για τα όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για τα PM_{10} , εκδόθηκε η ΚΥΑ 70601 (ΦΕΚ 3272B/23-12-2013), η οποία θεσμοθετεί επίπεδα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , προδιορίζει μέτρα προστασίας του πληθυσμού και μέτρα μείωσης των εκπομπών, ανάλογα με τις συγκεντρώσεις τους.

Πίνακας 2.3: Νομοθετημένες οριακές τιμές ποιότητας του αέρα. Τα όρια ενημέρωσης και συναγερμού κάτω από τη διακεκομμένη γραμμή εφαρμόζονται μόνο στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης (ΦΕΚ 1652B/08) και πρέπει να επαληθεύονται από τουλάχιστον 2 γειτονικούς σταθμούς (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Όριο για την προστασία της υγείας				Όριο ενημέρωσης		Όριο συναγερμού	
Ρύπος	Χρονική περίοδος	Τιμή	Μέγιστος αριθμός επιτρεπόμενων υπερβάσεων	Χρονική περίοδος	Τιμή	Χρονική περίοδος	Τιμή
SO ₂	1 ώρα	350 µg/m ³	24	-----	-----	3 ώρες	500 µg/m ³
	1 ημέρα	125 µg/m ³	3	3 ώρες	350 µg/m ³	3 ώρες	450 µg/m ³
NO ₂	1 ώρα	200 µg/m ³	18	-----	-----	3 ώρες	400 µg/m ³
	1 έτος	40 µg/m ³	0	3 ώρες	250 µg/m ³	3 ώρες	360 µg/m ³
CO	Μέγιστος ημερήσιος Μ.Ο. 8 ωρών	10 µg/m ³	0	-----	-----	-----	-----
				8 ώρες	10 µg/m ³	8 ώρες	16 µg/m ³
O ₃	Μέγιστος ημερήσιος Μ.Ο. 8 ωρών	120 µg/m ³ (τιμή στόχος)	25	1 ώρα	180 µg/m ³	3 ώρες	240 µg/m ³
				1 ώρα	180 µg/m ³	3 ώρες	240 µg/m ³
PM ₁₀	1 ημέρα	50 µg/m ³	35	-----	-----	-----	-----
	1 έτος	40 µg/m ³	0	7 ημέρες	90 µg/m ³	5 ημέρες	110 µg/m ³

Πίνακας 2.4: Επίπεδα συγκεντρώσεων PM₁₀. Τροποποιημένο από: (Εκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013).

Ρύπος	Χρονική βάση	Όριο συγκεντρώσεων	Ενέργειες
PM ₁₀	24 ώρες	51-75 µg/m ³	Συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού
		76-100 µg/m ³	Συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό
		101-150 µg/m ³	Συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό, μέτρα μείωσης των εκπομπών PM ₁₀ από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία
		>150 µg/m ³	

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η διαχρονική μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των ρύπων O_3 , NO_x , O_x , CO , SO_2 , PM_{10} . Ακόμη, αναλύονται οι μεταβολές στις μηνιαίες, ημερήσιες και ωριαίες συγκεντρώσεις των παραπάνω ρύπων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, κατά την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριος-Μάρτιος), κατά τη θερμή περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος) και ανά εποχή.

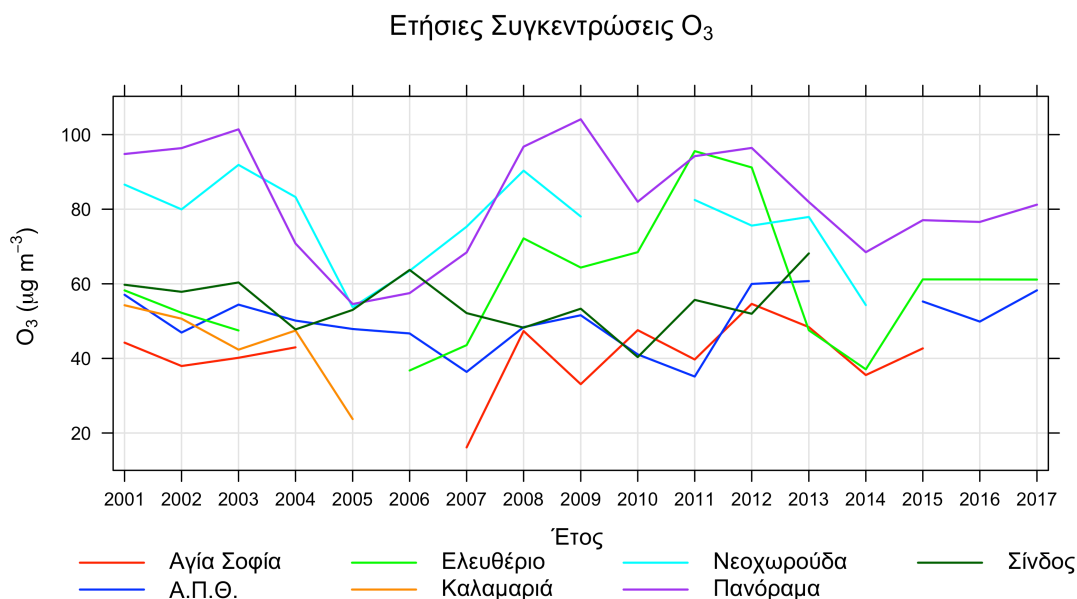
3.1 ΕΤΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2017

Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετάται η διακύμανση που έχουν οι ετήσιες συγκεντρώσεις των υπο μελέτη ρύπων κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 2001-2017, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις τους στο διάστημα αυτό. Για της ανάγκες της παρούσας εργασίας λήφθηκαν δεδομένα από τους επτά σταθμούς της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Όλοι οι σταθμοί είχαν δεδομένα για κάθε ώρα της ημέρας, με εξαίρεση τα δεδομένα των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} του έτους 2015, για τα οποία οι μετρήσεις γίνονταν μία φορά κάθε ημέρα στις 00:00. Υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε έτος, κάθε σταθμό και κάθε ρύπο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις O_3

Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζονται οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του όζοντος στους υπό μελέτη σταθμούς. Στις παρακάτω χρονοσειρές υπάρχουν κενά είτε λόγω απουσίας μετρήσεων κατά τα διαστήματα αυτά είτε παρουσίας μικρού αριθμού μετρήσεων που δε καθιστά ικανή την εξαγωγή ενός αντιπροσωπευτικού ετήσιου μέσου όρου. Παρατηρείται ότι οι σταθμοί του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας έχουν γενικά πολύ υψηλότερες μέσες συγκεντρώσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς. Οι εν λόγω σταθμοί παρουσιάζουν μια σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις τους την περίοδο 2004-2005. Από το 2006 μέχρι το 2009 ο σταθμός του Πανοράματος εμφανίζει ραγδαία αύξηση στις συγκεντρώσεις του, το 2010 παρατηρείται μια μείωση κατά $20-25 \mu g/m^3$ περίπου, ενώ το 2013 εμφανίζει μια εκ νέου σημαντική μείωση μέχρι και το 2014. Κατά την περίοδο 2015-2017 οι συγκεντρώσεις παραμένουν περίπου σταθερές. Ο σταθμός της Νεοχωρούδας

εμφανίζει μια παρόμοια πορεία στις ετήσιες συγκεντρώσεις του μέχρι το 2008 και από το 2011 μέχρι το 2014 εμφανίζει μια πτωτική τάση. Ο σταθμός του Ελευθερίου έχει μια μικρή πτωτική τάση από το 2001 μέχρι το 2003 και από το 2006 κι έπειτα εμφανίζει μια εξαιρετικά σημαντική αύξηση στις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του που κορυφώνεται το 2011. Από κει κι έπειτα εμφανίζεται μια μείωση στις τιμές μέχρι το 2014 και ακολούθως παρατηρείται μια νέα αύξηση και σταθεροποίηση μέχρι το τέλος της χρονοσειράς. Ο σταθμός του Α.Π.Θ. εμφανίζει μια σχετικά σταθερή πορεία στις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του, οι οποίες κυμαίνονται από $35\text{-}60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ και εμφανίζει αξιόλογες μειώσεις τις χρονιές 2007, 2010 και 2011. Ο σταθμός της Σίνδου έχει ανάλογη σχετικά σταθερή πορεία, με μόνη αξιόλογη αύξηση τα έτη 2006 και 2013 και μείωση το 2010. Στο σταθμό της Καλαμαριάς, τα υπάρχοντα δεδομένα δεν επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Ο σταθμός της Αγίας Σοφίας έχει σχετικά σταθερές συγκεντρώσεις το διάστημα 2001-2004, το 2007 παρουσιάζει σημαντική μείωση και από το 2008 κι έπειτα εμφανίζει αξιόλογες μεταβολές κάθε έτος, με τις τιμές του να κυμαίνονται από $50\text{-}55\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ μέχρι $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ περίπου.

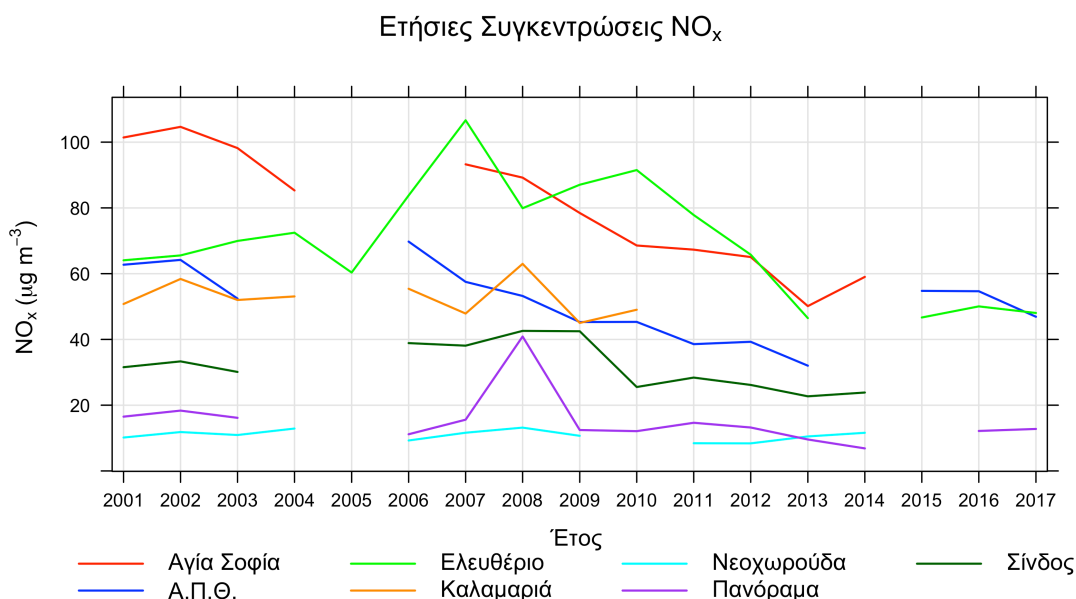


Σχήμα 3.1: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων O_3 για την περίοδο 2001-2017.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις NO_x

Στο παρακάτω σχήμα εικονίζονται οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου ($\text{NO}+\text{NO}_2$). Τα κενά στις χρονοσειρές αντικατοπτρίζουν τα χρονικά

διαστήματα για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις είτε για το NO είτε για το NO₂ είτε και για τα δυο μαζί.



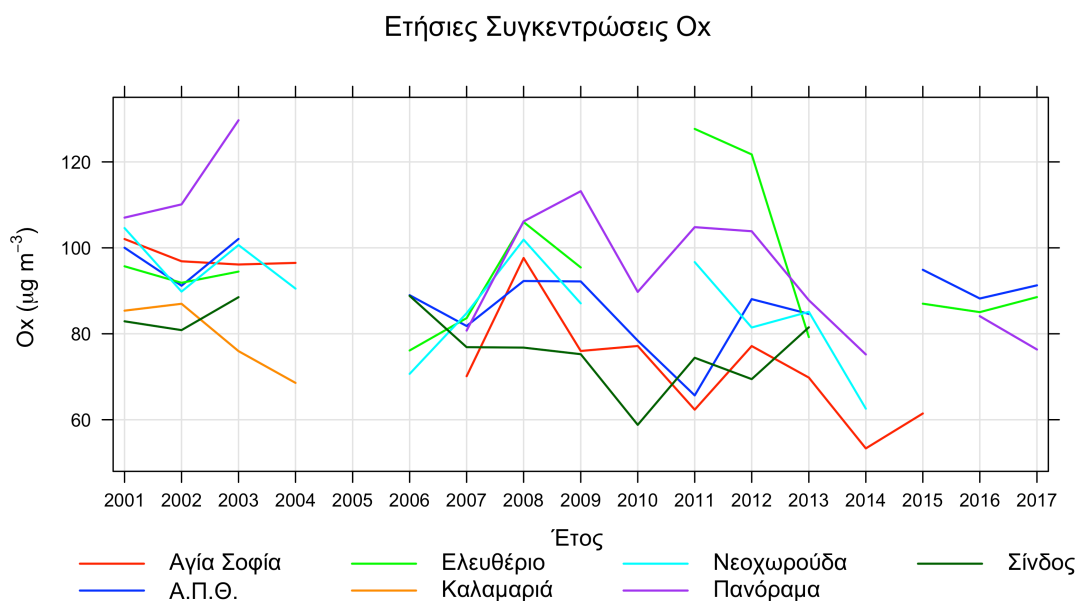
Σχήμα 3.2: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων NO_x για την περίοδο 2001-2017.

Τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζει ο σταθμός της Αγίας Σοφίας και του Ελευθερίου-Κορδελιού. Οι τιμές όλων των σταθμών είναι περίπου σταθερές στο διάστημα 2001-2004. Από το 2006 κι έπειτα, οι σταθμοί της Αγίας Σοφίας και του Α.Π.Θ. εμφανίζουν πτωτική τάση, ενώ οι σταθμοί της Νεοχωρούδας και του Πανοράματος (με εξαίρεση το 2008) έχουν σχετικά σταθερές χαμηλές τιμές. Ο σταθμός της Σίνδου έχει μια πτώση στις τιμές το 2010 και μέχρι το 2014 διατηρεί τις τιμές του σε αυτά τα επίπεδα, ενώ ο σταθμός του Ελευθερίου εμφανίζει μια σημαντική αύξηση, η οποία κορυφώνεται το 2007 και από το 2010 και μετά παρουσιάζει διαρκή μείωση.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις O_x

Οι συγκεντρώσεις των σταθμών σε O_x εμφανίζουν μεγάλη μεταβλητότητα, κυρίως από το 2006 και μετά. Αυτό είναι λογικό διότι, όπως προαναφέρθηκε, το O_x δεν είναι πραγματικός ρύπος, αλλά το άθροισμα των O₃ και NO₂, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται από τις μεταβολές αυτών στη διάρκεια των ετών. Συγκεκριμένα, η πορεία των O_x στο σταθμό του Πανοράματος αντικατοπτρίζει τις μεταβολές του όζοντος (αύξηση το 2003, μείωση το 2010 και το 2014) μιας και οι μεταβολές του

NO_x (που εμπεριέχει και τα NO₂) δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές τις χρονιές αυτές. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζει και σταθμός της Νεοχωρούδας. Ο σταθμός της Αγίας Σοφίας παρουσιάζει μείωση στα O_x λόγω της έντονης μείωσης των οξειδίων του αζώτου από το 2009 και μετά, ενώ οι συγκεντρώσεις στο σταθμό της Σίνδου το 2010 εμφανίζουν σημαντική πτώση εξ' αιτίας της ταυτόχρονης μείωσης των συγκεντρώσεων O₃ και NO_x την ίδια χρονιά. Ο σταθμός του Α.Π.Θ. εμφανίζει σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις O_x τα έτη 2010 και 2011, ενώ την περίοδο 2015-2017 οι συγκεντρώσεις σταθεροποιούνται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τα προηγούμενα έτη. Η ραγδαία μείωση των O_x στο σταθμό του Κορδελιού υποδεικνύει την αντίστοιχη μείωση στα επίπεδα και του όζοντος και των οξειδίων του αζώτου το διάστημα 2011-2013.

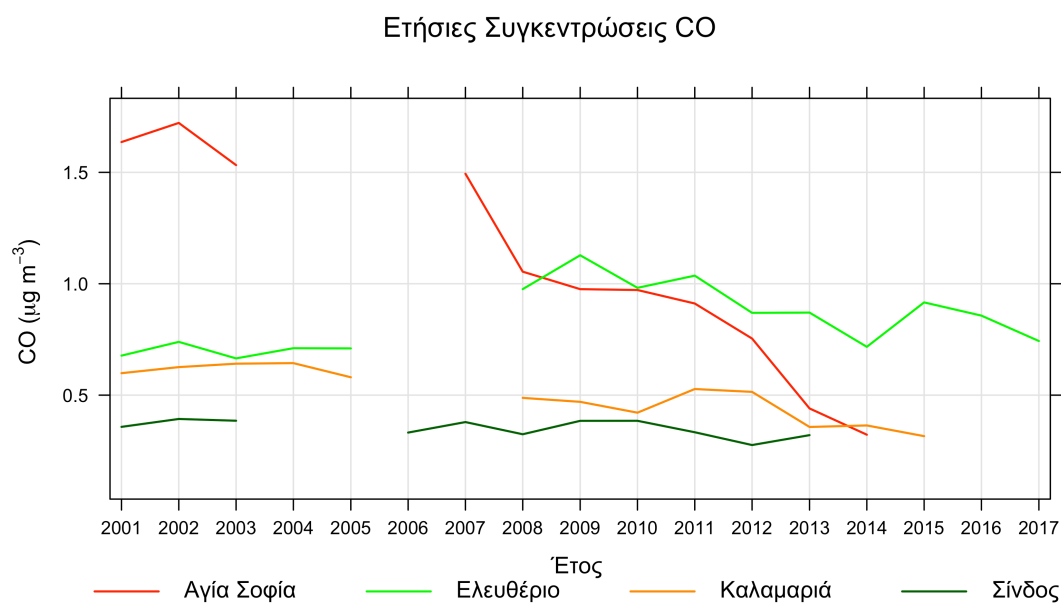


Σχήμα 3.3: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων O_x για την περίοδο 2001-2017.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις CO

Τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σε CO εμφανίζει ο σταθμός της Αγίας Σοφίας το διάστημα 2001-2003 με σχεδόν διπλάσιες τιμές απ' ό,τι οι άλλοι σταθμοί. Από το 2008 και έπειτα παρατηρείται μια σταθερά πτωτική πορεία, η οποία ενδεχομένως να οφείλεται στην αντικατάσταση των ρυπογόνων υδρογονανθράκων στα καύσιμα με αντίστοιχους περισσότερο φιλικούς στο περιβάλλον (πετρέλαιο κίνησης και θέρμανσης) και στην εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πόλης από αναγωγική (τύπου Λονδίνου – οξείδια του άνθρακα και του θείου) σε οξειδωτική (τύπου Λος

Αντζίλες – οξείδια του αζώτου και όζον). Οι σταθμοί της Σίνδου και της Καλαμαριάς παρουσιάζουν μια σχετικά σταθερή πορεία στις συγκεντρώσεις τους, ενώ στο σταθμό του Ελευθερίου οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων της περιόδου 2008-2017 είναι υψηλότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες της περιόδου 2001-2005. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει μια πτωτική τάση στις συγκεντρώσεις CO μετά το 2008.

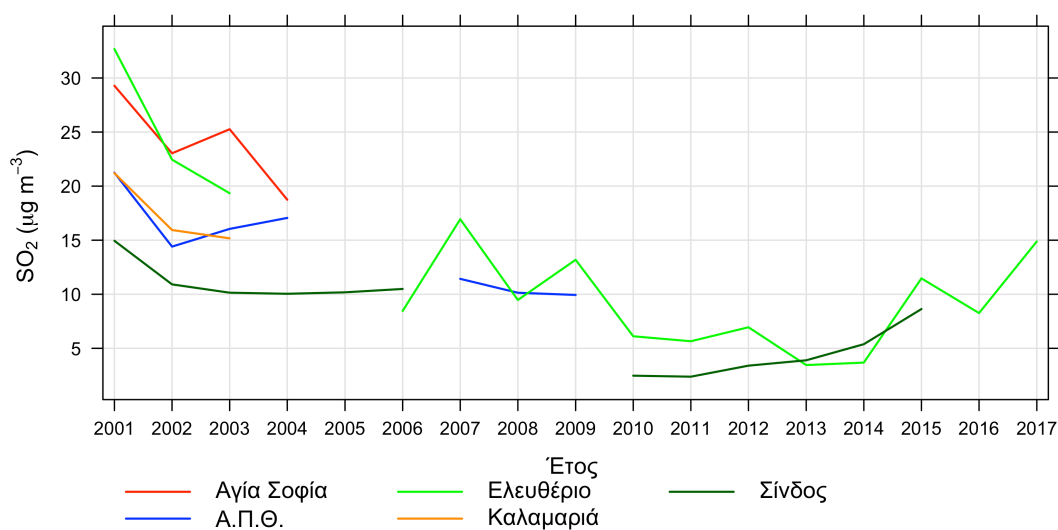


Σχήμα 3.4: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων CO για την περίοδο 2001-2017.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις SO₂

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων SO₂ ενισχύουν την άποψη ότι υπάρχει μεταστροφή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Θεσσαλονίκης από αναγωγική σε οξειδωτική καθώς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5, υπάρχει εμφανής μείωση στις συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου σε όλους του σταθμούς μετά το 2001 (για όσες χρονιές υπάρχουν δεδομένα που επιτρέπουν την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων). Ο σταθμός της Σίνδου εμφανίζει μια αυξητική τάση στις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου μετά το 2011, ενώ παρόμοια τάση υπάρχει και στο σταθμό του Ελευθερίου από το 2015 κι έπειτα.

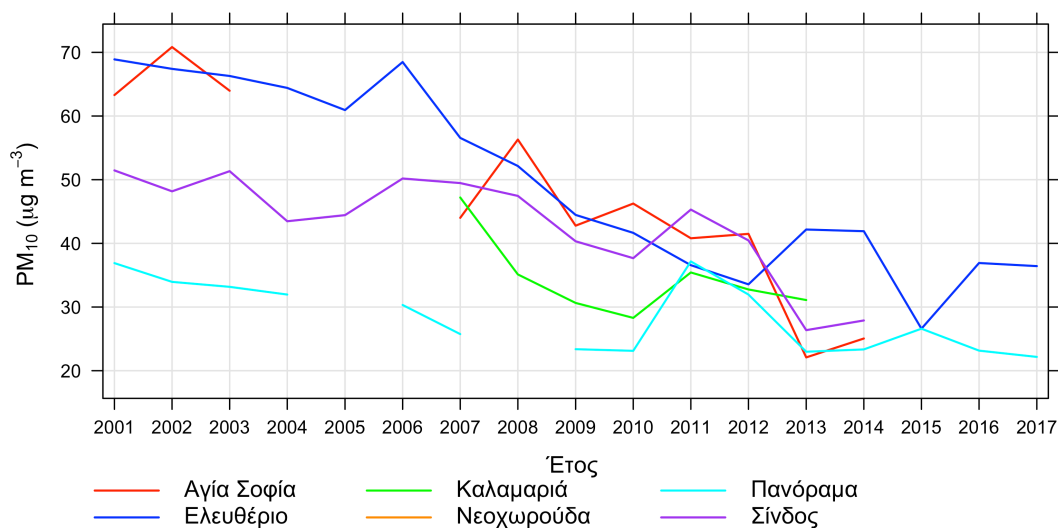
Ετήσιες Συγκεντρώσεις SO₂



Σχήμα 3.5: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων SO₂ για την περίοδο 2001-2017.

❖ Ετήσιες συγκεντρώσεις PM₁₀

Ετήσιες Συγκεντρώσεις PM₁₀



Σχήμα 3.6: Μεταβολή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων PM₁₀ για την περίοδο 2001-2017.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζονται στο σταθμό του Ελευθερίου, κατά κύριο λόγο, και στο σταθμό της Αγίας Σοφίας. Οι υψηλές συγκεντρώσεις στο σταθμό του Κορδελιού ίσως να οφείλονται στην εγγύτητά του με βιομηχανική περιοχή και την εσωτερική περιφερειακή οδό, ενώ οι αυξημένες

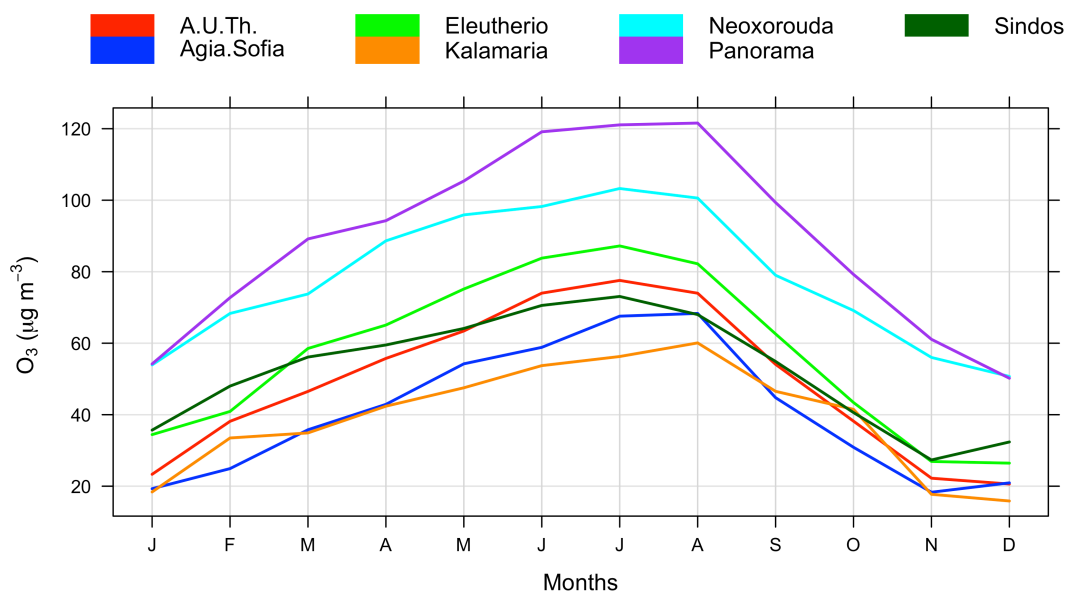
συγκεντρώσεις στο σταθμό της Αγίας Σοφίας οφείλονται στη θέση του (αστική χαράδρα), η οποία ευνοεί τη συσσώρευση αιωρούμενων σωματιδίων. Με εξαίρεση τις διάφορες αυξομειώσεις από χρονιά σε χρονιά, όλοι οι σταθμοί δείχνουν μια πτωτική τάση στις συγκεντρώσεις τους σε αερολύματα. Αναστροφή της τάσης αυτής παρατηρείται το 2006, το 2013 και το 2016 στο σταθμό του Κορδελιού, το 2008 στο σταθμό της Αγίας Σοφίας και το 2011 στους σταθμούς Πανοράματος, Σίνδου και Καλαμαριάς.

3.2 ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013

Σε αυτό το υποκεφάλαιο μελετάται η μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των υπό εξέταση ρύπων για την περίοδο 2001-2013. Επειδή μόνο οι σταθμοί του Α.Π.Θ., του Ελευθερίου και του Πανοράματος διέθεταν δεδομένα μέχρι και το 2017 (με εξαίρεση το έτος 2014, κατά το οποίο ο σταθμός του Α.Π.Θ. δεν διέθετε καθόλου δεδομένα), τα δεδομένα των PM_{10} κατά το έτος 2015 για όλους τους σταθμούς μέτρησης ήταν, όπως προαναφέρθηκε, ημερήσια και τα μετεωρολογικά δεδομένα ήταν διαθέσιμα μέχρι και το 2014, επιλέχθηκε η κοινή περίοδος 2001-2013 (κατά την οποία όλοι οι σταθμοί είχαν ωριαία δεδομένα συγκεντρώσεων ρύπων και ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα) για την καλύτερη μελέτη και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις O_3

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οι σταθμοί του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας εμφανίζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σε όζον καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ενώ οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στους σταθμούς της Καλαμαριάς, του Α.Π.Θ. και της Αγίας Σοφίας. Οι τιμές των συγκεντρώσεων όλων των σταθμών κατά τους θερινούς μήνες είναι αρκετά υψηλότερες από τις αντίστοιχες των χειμερινών μηνών.



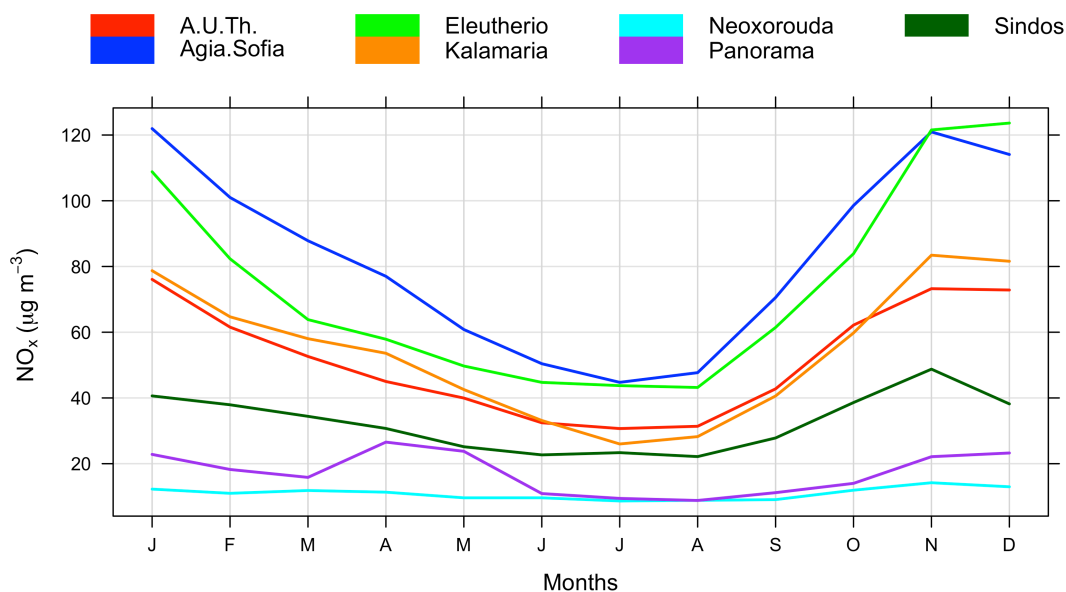
Σχήμα 3.7: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων O_3 για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι θερινό μέγιστο που σημειώνεται τον Ιούλιο-Αύγουστο συμβαίνει λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας που υπάρχει κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 1, οι φωτοχημικές αντιδράσεις είναι κυρίως υπεύθυνες για το σχηματισμό του όζοντος, με αποτέλεσμα, όταν υπάρχει εντονότερη ηλιακή ακτινοβολία, να ευνοούνται οι αντιδράσεις αυτές και να παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα όζοντος. Αντίθετα, το χειμερινό ελάχιστο εντοπίζεται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, αφ' ενός λόγω της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με το θέρος και αφ' ετέρου εξ' αιτίας της αύξησης των NO που εκλύονται από τις εγκαταστάσεις οικιακής θέρμανσης, κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας, και συμβάλλουν στην καταστροφή του όζοντος (Lin, Xu, Ge, & Zhang, 2009).

Όπως προαναφέρθηκε, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας, οι οποίοι βρίσκονται έξω από τα όρια της πόλης. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι το όζον αποτελεί ρύπο κυρίως των προαστίων και όχι των πόλεων. Η Σίνδος, η οποία βρίσκεται επίσης έξω από το πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης, δείχνει να συγκλίνει περισσότερο με τους αστικούς σταθμούς λόγω του γεγονότος ότι βρίσκεται σε βιομηχανική-αγροτική περιοχή.

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις NO_x

Οι μεταβολές στις μηνιαίες συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου διαγράφει ακριβώς αντίθετη πορεία από αυτή του όζοντος. Πιο συγκεκριμένα, η ελάχιστη συγκέντρωση των NO_x παρατηρείται κατά τους θερινούς μήνες και η μέγιστη κατά τους χειμερινούς μήνες. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ανάγκη για θέρμανση τη χειμερινή περίοδο, η οποία έχει ως επακόλουθο την εκπομπή οξειδίων του αζώτου και στη μειωμένη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα οι αντιδράσεις μεταξύ NO, NO₂ και O₃ να λαμβάνουν χώρα με πιο αργό ρυθμό και να συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα μεγαλύτερες ποσότητες NO_x. Παράλληλα, η μείωση του πάχους του οριακού στρώματος λόγω της μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας κατά την περίοδο αυτή, οδηγεί σε συμπύκνωση της ατμόσφαιρας κοντά στην επιφάνεια και επιπλέον αύξηση των συγκεντρώσεων NO_x.



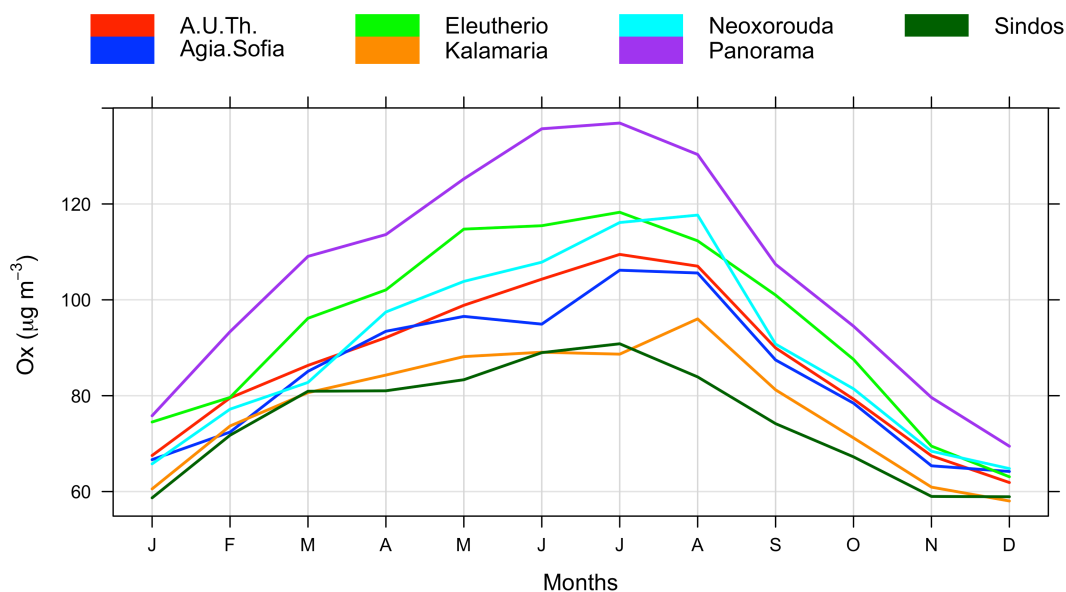
Σχήμα 3.8: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων NO_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι οι μικρότερες συγκεντρώσεις NO_x σημειώνονται στους σταθμούς που βρίσκονται μακριά από το κέντρο της πόλης (Πανόραμα, Νεοχωρούδα, Σίνδος), ενώ οι υψηλότερες σε αυτούς που βρίσκονται πλησίον του κέντρου. Οι σταθμοί μακριά από το κέντρο (περιαστικοί) εμφανίζουν σχετικά μικρή διακύμανση κατά τη διάρκεια του έτους, ενώ οι αστικοί εμφανίζουν

μεγάλες διαφορές στις συγκεντρώσεις τους σε NO_x κατά τη διάρκεια του έτους. Για παράδειγμα, ο σταθμός της Αγίας Σοφίας, ο οποίος σημειώνει και τις υψηλότερες τιμές, κυμαίνεται μεταξύ 120 μg/m³ το χειμώνα (χειμερινό μέγιστο τον Ιανουάριο) και 45 μg/m³ το καλοκαίρι (θερινό ελάχιστο τον Ιούλιο).

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις O_x

Το παρακάτω διάγραμμα προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό αυτό του όζοντος. Όπως προαναφέρθηκε, τα O_x αποτελούν το άθροισμα των μορίων O₃ και NO₂. Παρατηρείται ότι τις υψηλότερες συγκεντρώσεις σε O_x σημειώνουν οι σταθμοί του Πανοράματος και του Ελευθερίου. Ο περιαστικός σταθμός του Πανοράματος κατείχε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις O₃, ενώ οι συγκεντρώσεις του σε NO_x ήταν περίπου σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνει την μεγαλύτερη ποσότητα O_x.

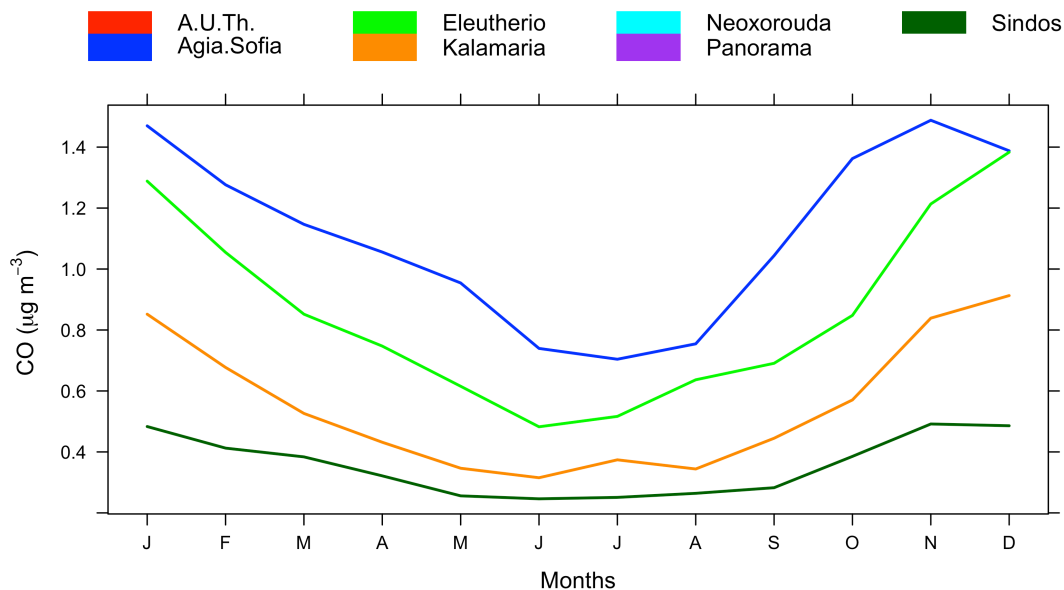


Σχήμα 3.9: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων O_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Αντίστοιχα, ο αστικός σταθμός του Κορδελιού είχε την τρίτη υψηλότερη συγκέντρωση O₃ και τη δεύτερη υψηλότερη συγκέντρωση NO_x, με αποτέλεσμα να διαθέτει και υψηλές συγκεντρώσεις O_x. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε O_x σημειώνονται στους σταθμούς που είχαν μικρότερες συγκεντρώσεις όζοντος και οξειδίων του αζώτου.

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις CO

Όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχήμα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO καταγράφονται σταθμό της Αγίας Σοφίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ η μικρότερη συγκέντρωση εντοπίζεται στον σταθμό της Σίνδου. Από αυτό προκύπτει ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται ο σταθμός από το κέντρο της πόλης, τόσο μικρότερες συγκεντρώσεις σε μονοξείδιο του άνθρακα έχει.

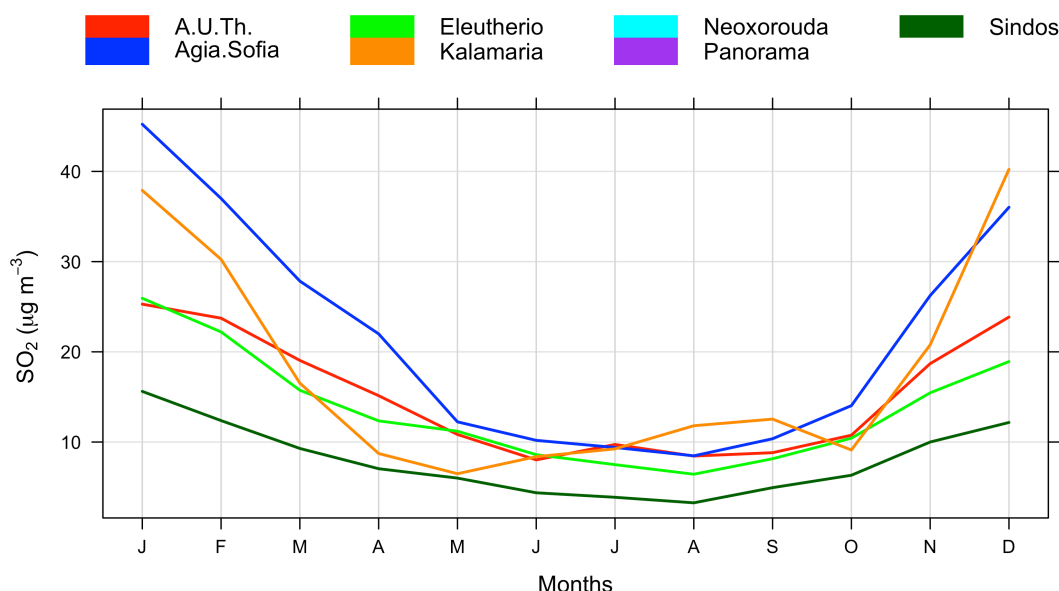


Σχήμα 3.10: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων CO για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Αυτό συμβαίνει επειδή το CO παράγεται κατά την ατελή καύση των υδρογονανθράκων που χρησιμοποιούνται ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων και των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί, κατά ένα μέρος, και το μέγιστο που παρουσιάζεται στις συγκεντρώσεις του εν λόγω ρύπου κατά τη διάρκεια του χειμώνα, που οι ανάγκες για θέρμανση είναι μεγάλες. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CO τους χειμερινούς μήνες οφείλονται, επίσης, στη μείωση του ρυθμού συμμετοχής του στις αντιδράσεις της ατμόσφαιρας, ελλείπει έντονης ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπρόσθετα, η μείωση του πάχους του οριακού στρώματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης του CO στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια της Γης, όπως συμβαίνει αντίστοιχα και με τα NO_x.

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις SO₂

Οι συγκεντρώσεις του SO₂ παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή με τις συγκεντρώσεις των NO_x και CO. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται κατά τη χειμερινή περίοδο και στους σταθμούς που βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο της πόλης. Αυτό συμβαίνει για τους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν και παραπάνω. Οι ανάγκες για θέρμανση το χειμώνα είναι μεγαλύτερες και η μείωση του οριακού στρώματος την εποχή αυτή προκαλεί αύξηση των συγκεντρώσεων του SO₂ στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια. Επίσης, κατά την καλοκαιρινή περίοδο που οι οξειδωτικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα με πιο έντονο ρυθμό λόγω της παρουσίας έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, το SO₂ οξειδώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε θειικό οξύ και απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μέσω του υετού.

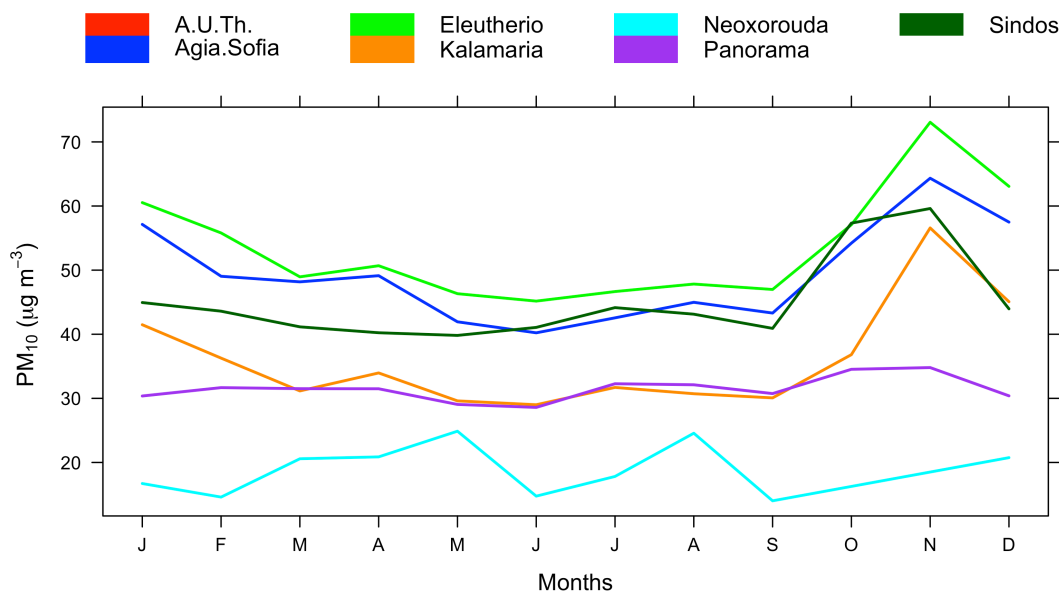


Σχήμα 3.11: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων SO₂ για την κοινή περίοδο 2001-2013.

❖ Μηνιαίες συγκεντρώσεις PM₁₀

Από το παρακάτω σχήμα προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων αυξάνονται κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, παρουσιάζοντας μέγιστο το μήνα Νοέμβριο. Λόγω της έντονης κυκλοφορίας των οχημάτων και της λειτουργίας των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης οι συγκεντρώσεις των αερολυμάτων παρουσιάζουν αυξητική τάση την περίοδο αυτή. Επίσης, η αύξηση των συγκεντρώσεων των PM₁₀ ευνοείται από την αποδυνάμωση της θαλάσσιας αύρας το

φθινόπωρο και από το γεγονός ότι οι χειμερινοί βόρειοι άνεμοι δεν έχουν ενισχυθεί ακόμη. Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων μειώνονται από τις αρχές του ημερολογιακού έτους μέχρι και τα μέσα του καλοκαιριού, οπότε λαμβάνουν και τις χαμηλότερες τιμές τους.



Σχήμα 3.12: Μεταβολή των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων PM_{10} για την κοινή περίοδο 2001-2013.

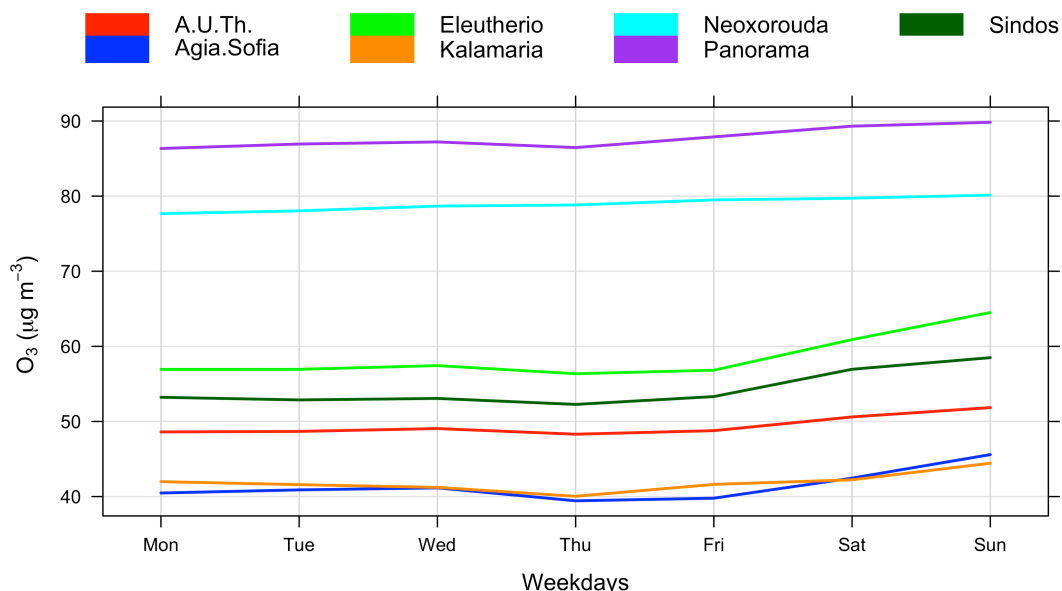
Οι σταθμοί της Αγίας Σοφίας και του Κορδελιού εμφανίζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} λόγω της εγγύτητάς τους με το κέντρο της πόλης. Οι υψηλές συγκεντρώσεις στο σταθμό της Σίνδου οφείλονται στο ότι αυτή αποτελεί βιομηχανική περιοχή με συνεχείς εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπου σταθερή και σχετικά χαμηλή συγκέντρωση των PM_{10} στο σταθμό του Πανοράματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι στην περιοχή του Πανοράματος δεν υπάρχουν σημαντικές ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής PM_{10} και οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων οφείλονται σε φυσικές διεργασίες και μεταφορά ρύπων από άλλες περιοχές. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αεροζόλ σημειώνονται στο σταθμό της Νεοχωρούδας.

3.3 ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013

Στη συνέχεια αναλύονται οι διακυμάνσεις των υπό μελέτη ρύπων κατά τη διάρκεια της εβδομάδας με βάση τις μέσες ημερήσιες τιμές που υπολογίστηκαν για την κοινή περίοδο 2001-2013.

❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις O_3

Κατά τη διάρκεια της εβδομάδας, οι συγκεντρώσεις του όζοντος παραμένουν περίπου σταθερές, ενώ το Σαββατοκύριακο σημειώνεται αύξηση. Πρόκειται για το επονομαζόμενο «φαινόμενο του Σαββατοκύριακου» (weekend effect), κατά το οποίο οι συγκεντρώσεις του όζοντος αυξάνονται λόγω της μείωσης των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου και των πτητικών οργανικών ενώσεων. Με άλλα λόγια, κατά τις εργάσιμες ημέρες εκλύονται όλες εκείνες οι ενώσεις που έχουν ως πηγές τις μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων και των εγκαταστάσεων θέρμανσης, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν χώρα πολύπλοκες αντιδράσεις που διατηρούν το όζον σε χαμηλότερα επίπεδα. Το Σαββατοκύριακο, όμως, που οι ενώσεις αυτές παράγονται σε μικρότερο βαθμό απ' ό,τι τις καθημερινές, οι αντιδράσεις καταστροφής του όζοντος λαμβάνουν χώρα σε μικρότερη έκταση, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις του.

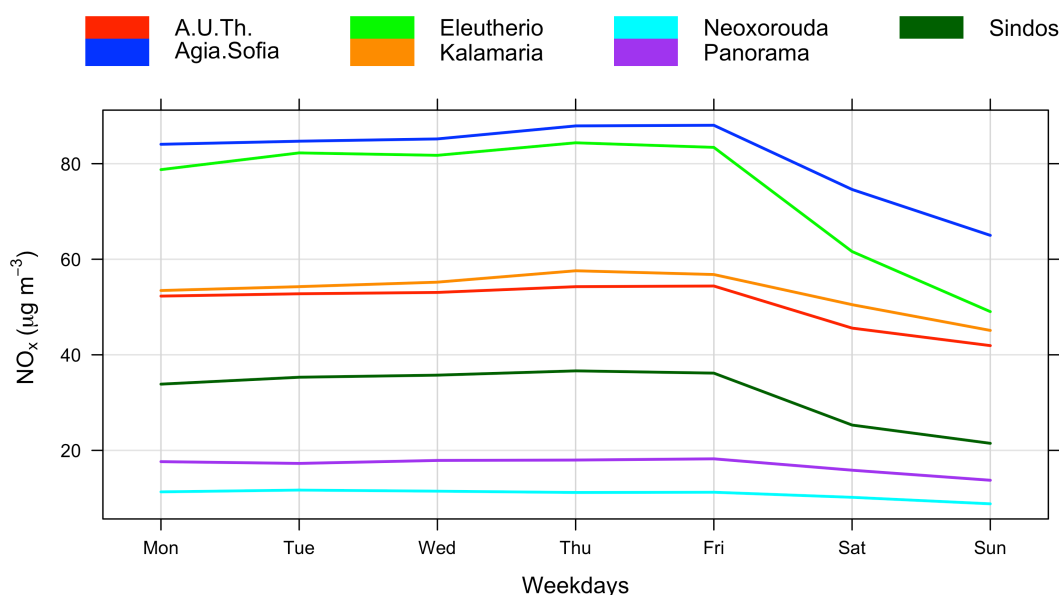


Σχήμα 3.13: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων O_3 για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Όπως αναμενόταν, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στους σταθμούς που βρίσκονται πιο μακριά από το κέντρο της πόλης, ήτοι οι σταθμοί του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στους σταθμούς που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της πόλης.

❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις NO_x

Στον αντίποδα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου σημειώνονται τις καθημερινές, όταν δηλαδή κινούνται περισσότερο τα οχήματα και λειτουργούν οι υπηρεσίες, τα εργοστάσια και οι βιομηχανικές μονάδες. Το Σαββατοκύριακο σημειώνεται σχετικά μεγάλη μείωση λόγω του ότι τα οχήματα δεν κινούνται με την ίδια συχνότητα και δε λειτουργούν οι βιομηχανικές μονάδες (weekend effect). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στους αστικούς σταθμούς της Αγίας Σοφίας και του Κορδελιού και οι μικρότερες στους περιφερειακούς σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας.

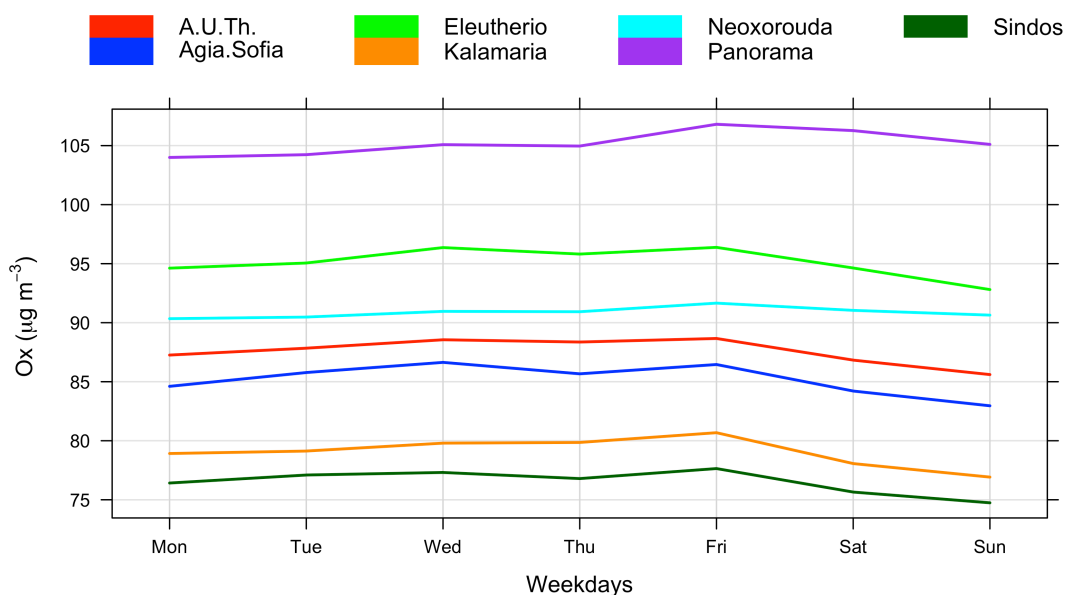


Σχήμα 3.14: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων NO_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις O_x

Οι συγκεντρώσεις των O_x παρουσιάζουν μια μέση κατάσταση σε σχέση με τις συγκεντρώσεις των NO_x και O_3 . Τις καθημερινές, οι συγκεντρώσεις δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβολή, ενώ το Σαββατοκύριακο εμφανίζουν ελαφρά

μείωση στους σταθμούς που παρατηρούνταν εντονότερη μείωση στις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου. Αντίθετα, στους σταθμούς που το weekend effect δεν ήταν ιδιαίτερα έντονο, παρατηρείται μια τάση εξομάλυνσης, με αποτέλεσμα αυτοί να διατηρούν καθ' όλη τη διάρκεια της εβδομάδας σχετικά σταθερές συγκεντρώσεις O_x . Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σε O_x παρατηρούνται στους σταθμούς του Πανοράματος (λόγω υψηλής συγκέντρωσης όζοντος) και του Ελευθερίου (υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου).

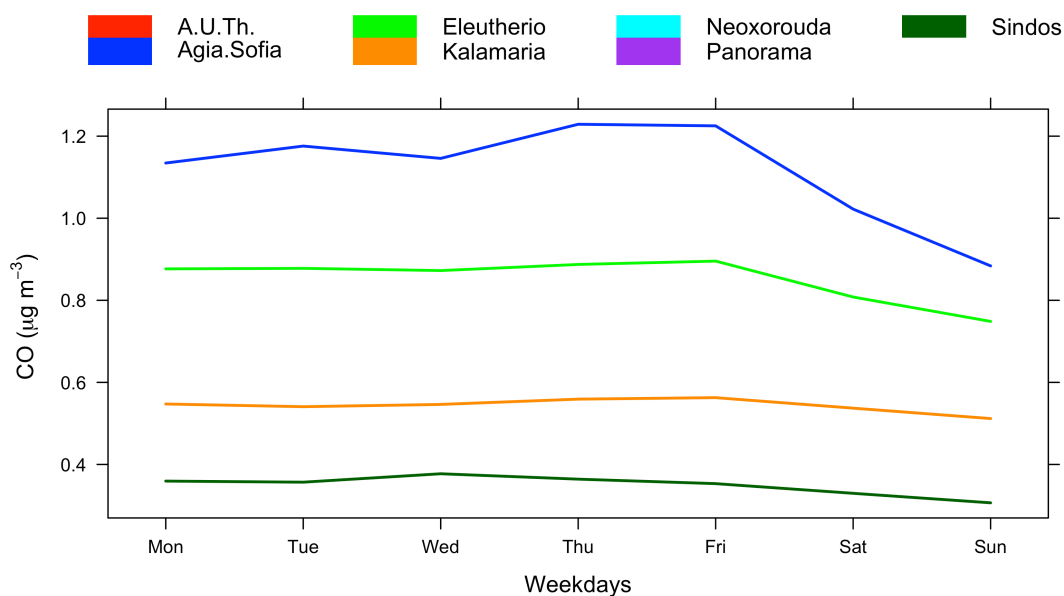


Σχήμα 3.15: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων O_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις CO

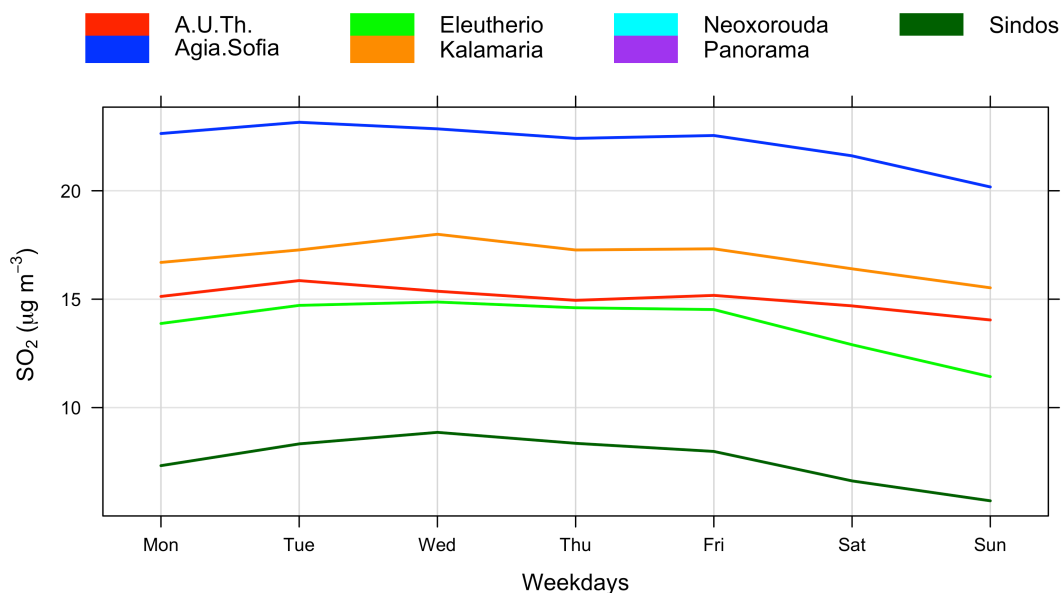
Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα εμφανίζουν παρόμοια πορεία με αυτή των οξειδίων του αζώτου για τους ίδιους λόγους. Η εντονότερη κίνηση των οχημάτων και η λειτουργία βιομηχανικών μονάδων και μηχανών εσωτερικής καύσης τις καθημερινές οδηγεί στην έκλυση μεγαλύτερων ποσοτήτων CO, ενώ το Σαββατοκύριακο παρατηρείται μείωση.

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στους αστικούς σταθμούς της Αγίας Σοφίας και του Ελευθερίου λόγω της έντονης κυκλοφοριακής κίνησης και της ύπαρξης βιομηχανικών μονάδων στο Κορδελιό. Όσο αυξάνεται η απόσταση του σταθμού από το κέντρο της Θεσσαλονίκης, τόσο μικρότερες συγκεντρώσεις CO εμφανίζει.



Σχήμα 3.16: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων CO για την κοινή περίοδο 2001-2013.

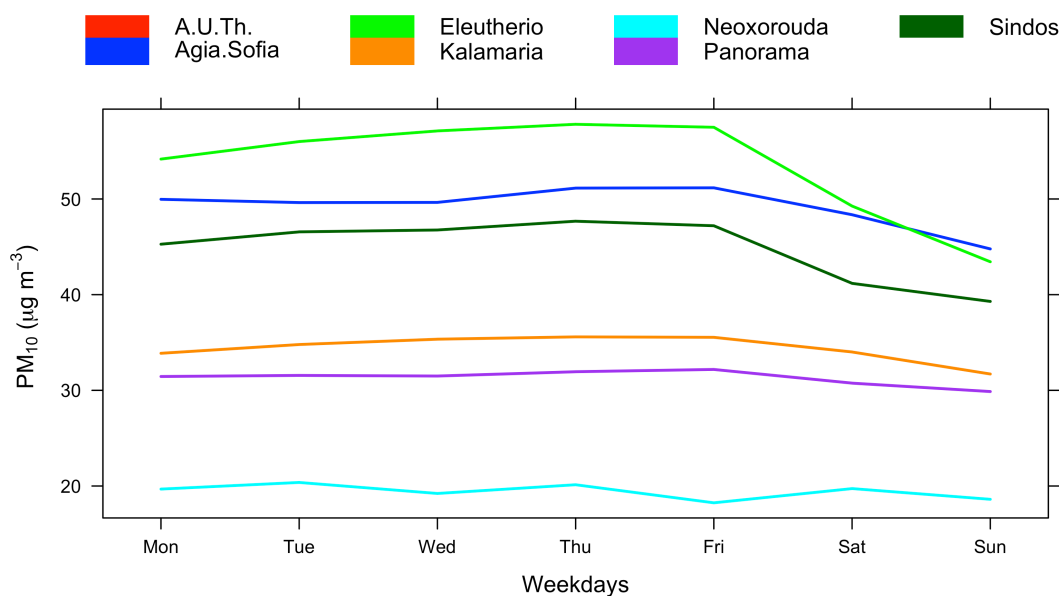
❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις SO₂



Σχήμα 3.17: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων SO₂ για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Οι συγκεντρώσεις του SO_2 μειώνονται το Σαββατοκύριακο για τους ίδιους λόγους με το CO και τα NO_x . Λόγω της εντονότερης κυκλοφοριακής κίνησης και της λειτουργίας βιομηχανικών μονάδων τις καθημερινές, οι εκλύσεις διοξειδίου του θείου είναι εντονότερες, ενώ το Σαββατοκύριακο που η κίνηση των οχημάτων είναι μικρότερη, οι συγκεντρώσεις του SO_2 ελαττώνονται. Τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις έχει ο σταθμός της Αγίας Σοφίας διότι βρίσκεται στο κέντρο της πόλης, όπου η κίνηση των οχημάτων είναι μεγάλη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας τις καθημερινές.

❖ Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM_{10}



Σχήμα 3.18: Μεταβολή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM_{10} για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μεγαλύτερες τις καθημερινές λόγω της έντονης κυκλοφοριακής κίνησης, της λειτουργίας των βιομηχανικών μονάδων, της ανοικοδόμησης κτιρίων και της λειτουργίας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σαββατοκύριακο που η κίνηση των οχημάτων είναι μειωμένη και δε λειτουργούν οι βιομηχανικές μονάδες, οι συγκεντρώσεις των αεροζόλ ελαττώνονται.

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αερολυμάτων εμφανίζονται στο σταθμό του Ελευθερίου, της Αγίας Σοφίας και της Σίνδου. Το Κορδελιό και η Σίνδος αποτελούν βιομηχανικές περιοχές και με τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων αυξάνεται η

συγκέντρωση των PM_{10} στην περιοχή. Ο σταθμός της Αγίας Σοφίας βρίσκεται στο κέντρο της πόλης, όπου υπάρχει έντονη κυκλοφορία οχημάτων, ιδιαίτερα τις καθημερινές.

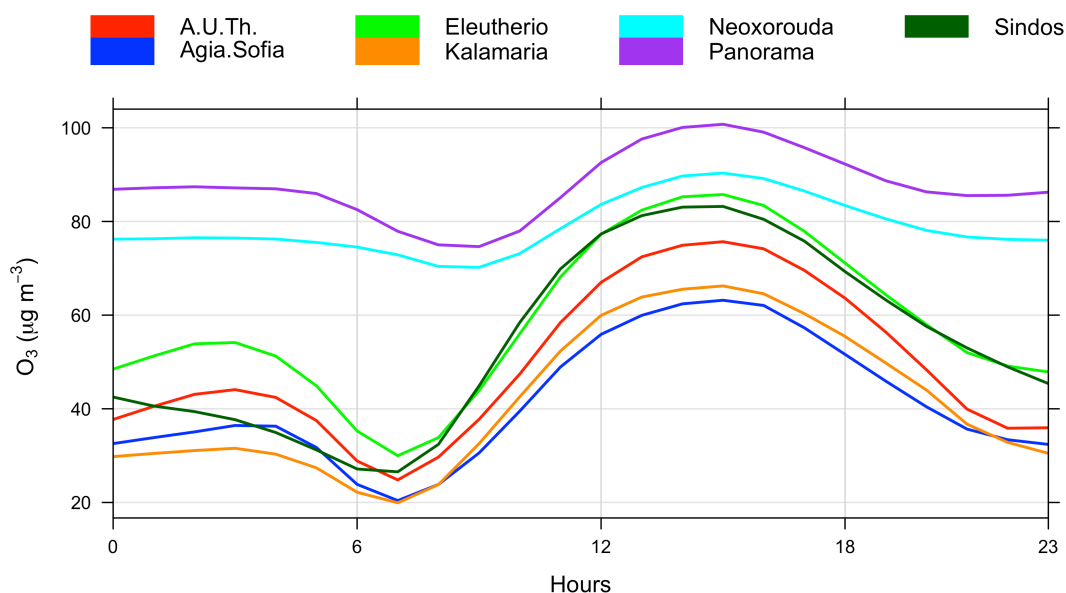
3.4 ΩΡΙΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΟΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2013

Σε αυτό το σημείο γίνεται ανάλυση της διακύμανσης των υπό μελέτη ρύπων κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτών μέσα στο εικοσιτετράωρο.

3.4.1 Ωριαίες μεταβολές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η διακύμανση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων των ρύπων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

❖ Ωριαίες μεταβολές O_3



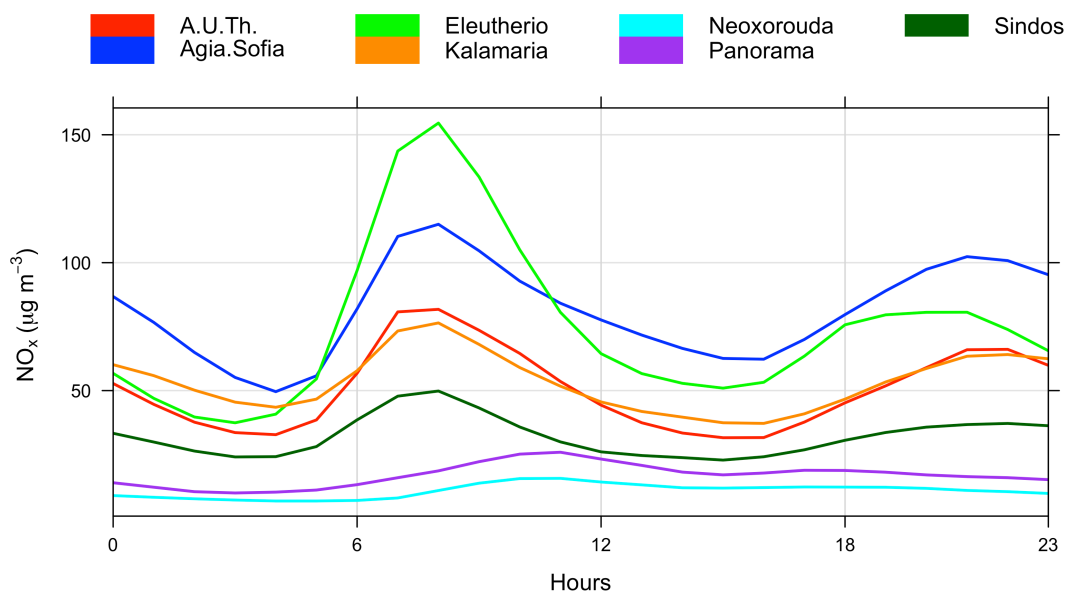
Σχήμα 3.19: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_3 για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας φαίνεται να επικρατεί μια ομοιογένεια όσον αφορά τη μεταβολή των συγκεντρώσεων του όζοντος. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας, οι οποίοι

εμφανίζουν και τη μικρότερη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό συμβαίνει διότι αυτοί οι δύο σταθμοί είναι περιαστικοί και συγκεντρώνουν μεγαλύτερα ποσά όζοντος σε σχέση με τους αστικούς, όπως επισημάνθηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Οι ελάχιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στις 07:00-09:00 το πρωί και οι μέγιστες στις 14:00-16:00 σε όλους τους σταθμούς.

❖ Ωριαίες μεταβολές NO_x

Στον αντίποδα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου σημειώνονται στους αστικούς σταθμούς του Ελευθερίου και της Αγίας Σοφίας, ενώ οι μικρότερες στους σταθμούς της Νεοχωρούδας και του Πανοράματος. Οι ελάχιστες τιμές των συγκεντρώσεων εμφανίζονται στις 15:00-17:00, ενώ οι μέγιστες παρατηρούνται τις ώρες 08:00-09:00 (πρωτεύον μέγιστο) και 21:00-23:00 (δευτερεύον μέγιστο).

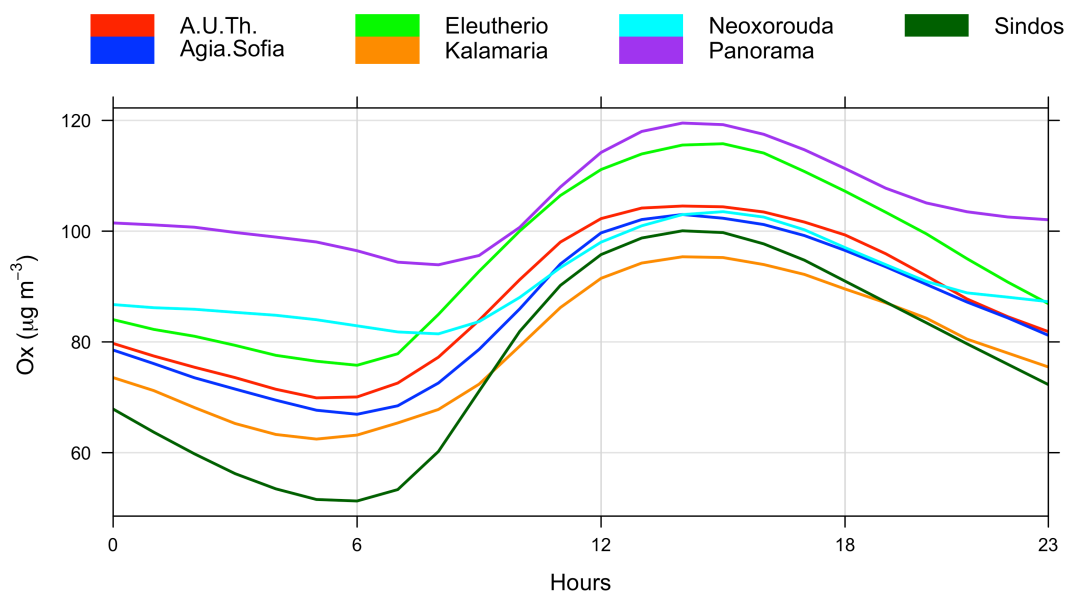


Σχήμα 3.20: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων NO_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Η αντίθετη πορεία που παρουσιάζουν οι δύο αυτοί ρύποι φανερώνουν τη μεταξύ τους αλληλεξάρτηση, όπως περιγράφεται από τις αντιδράσεις (2), (4) και (20). Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες αρχίζουν να κυκλοφορούν τα οχήματα εντός του κέντρου της πόλης με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το πρωτεύον μέγιστο στις συγκεντρώσεις των NO_x κατά τις ώρες 08:00-09:00, κυρίως στους σταθμούς κοντά στο κέντρο. Κατά

τις ώρες 21:00-23:00 εμφανίζεται το δευτερεύον μέγιστο στις συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου διότι εκείνες τις ώρες κορυφώνεται η λειτουργία των καυστήρων οικιακής θέρμανσης, ενώ παράλληλα το ύψος του οριακού στρώματος έχει μειωθεί αρκετά. Ακόμη, η μετατροπή του όζοντος σε οξείδια του αζώτου κατά τη διάρκεια τη νύχτας συμβάλλει στην αύξηση των συγκεντρώσεων των τελευταίων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αυξημένων συγκεντρώσεων NO_x τις ώρες 21:00-23:00 και παράλληλη μείωση των συγκεντρώσεων του O_3 κατά τις ίδιες ώρες. Τα μόρια NO_x που εκλύονται τις πρώτες πρωινές ώρες μεταφέρονται σε περιοχές μακριά από το κέντρο της πόλης με διάφορες μεθόδους διασποράς και μετατρέπονται σε O_3 , με αποτέλεσμα οι περιστατικοί σταθμοί να εμφανίζουν μέγιστο στις συγκεντρώσεις όζοντος στις 14:00-16:00.

❖ Ωριαίες μεταβολές O_x



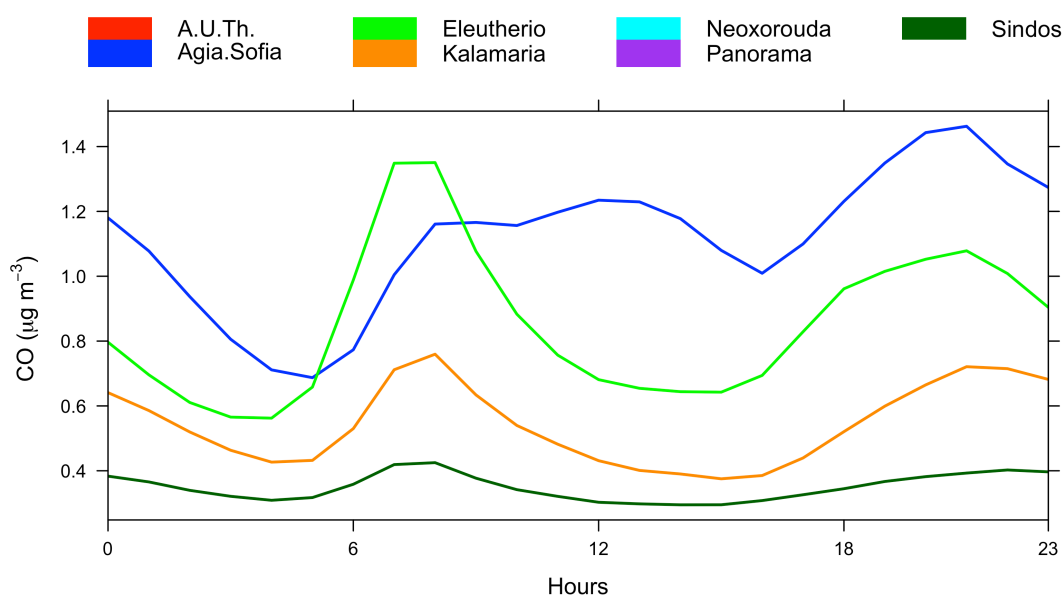
Σχήμα 3.21: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_x για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνεται η αλληλένδετη σχέση του όζοντος και των οξειδίων του αζώτου. Οι μέγιστες τιμές καταγράφονται από τους σταθμούς του Πανοράματος, ο οποίος είχε την υψηλότερη συγέντρωση όζοντος, και του Ελευθερίου, στον οποίο εμφανίζονταν οι μέγιστες τιμές οξειδίων του αζώτου. Επειδή τα O_x αποτελούν το άθροισμα των NO_2 και O_3 , στο γράφημα των O_x εμφανίζονται

χαρακτηριστικά και του όζοντος και του διοξειδίου του αζώτου. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρατηρούνται σε όλους τους σταθμούς τις ώρες 13:00-16:00 και οι ελάχιστες τις ώρες 08:00-09:00 στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας και τις ώρες 05:00-06:00 στους υπόλοιπους σταθμούς.

❖ Ωριαίες μεταβολές CO

Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται η μεταβολή στις συγκεντρώσεις του CO στη διάρκεια της ημέρας. Όπως αναμενόταν, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στους αστικούς σταθμούς της Αγίας Σοφίας και του Κορδελιού. Οι σταθμοί του Ελευθερίου, της Καλαμαριάς και της Σίνδου παρουσιάζουν τις μέγιστες συγκεντρώσεις τους σε μονοξείδιο του άνθρακα τις ώρες 07:00-09:00 και 20:00-22:00, ενώ οι ελάχιστες εμφανίζονται τις ώρες 03:00-06:00 και 14:00-17:00. Ο σταθμός της Αγίας Σοφίας παρουσιάζει τις ελάχιστες συγκεντρώσεις τις ίδιες ώρες με τους άλλους σταθμούς, αλλά οι μέγιστες συγκεντρώσεις σε CO εμφανίζονται τις ώρες 08:00-09:00, 13:00-14:00 και 21:00-22:00.



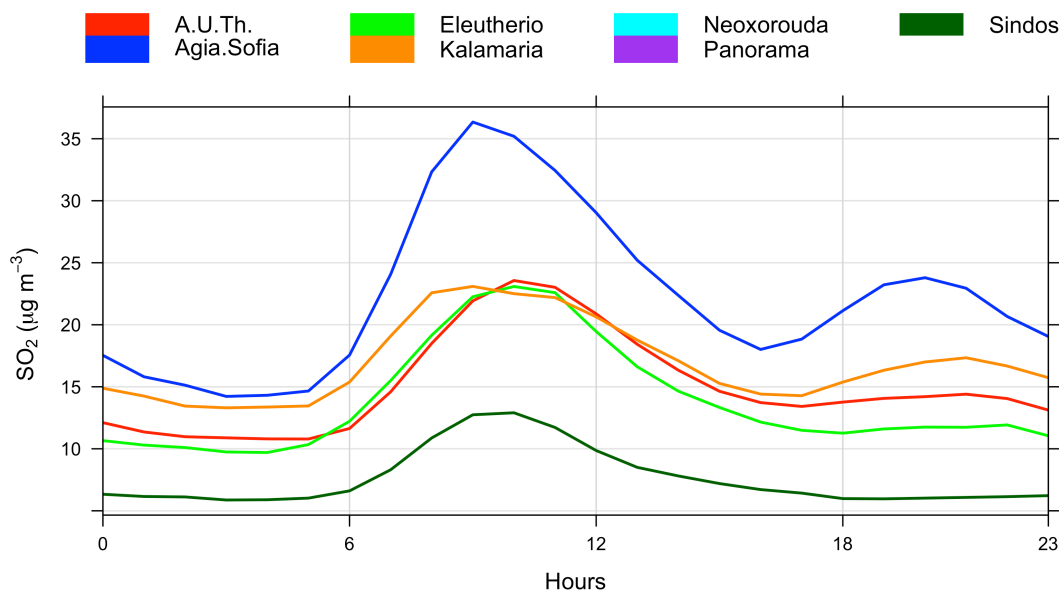
Σχήμα 3.22: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων CO για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Αν αναλογιστεί κανείς ότι το CO αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης υδρογονανθράκων σε μηχανές εσωτερικής καύσης (οχήματα, εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης κ.ά.), οι ώρες που εμφανίζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις

έχουν λογική εξήγηση. Τις πρωινές ώρες η κίνηση των οχημάτων κορυφώνεται (πρωινό μέγιστο) και τις βραδινές ώρες λειτουργούν οι καυστήρες κεντρικής θέρμανσης (βραδινό μέγιστο), ενώ το μεσημβρινό μέγιστο της Αγίας Σοφίας πιθανώς να οφείλεται στην κίνηση των οχημάτων κατά την επιστροφή των εργαζομένων μετά τη λήξη της εργασίας τους. Αντίθετα, το πρωινό ελάχιστο που σημειώνεται σε όλους τους σταθμούς οφείλεται στην απουσία κίνησης οχημάτων και τη λήξη της λειτουργίας των εγκαταστάσεων οικιακής θέρμανσης, με αποτέλεσμα να μην εκπέμπεται CO.

❖ Ωριαίες μεταβολές SO₂

Στο παρακάτω γράφημα αποτυπώνεται η πορεία του SO₂ στη διάρκεια της μέρας. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στο σταθμό της Αγίας Σοφίας και οι μικρότερες σε αυτόν της Σίνδου. Η διακύμανση των ρύπων σε όλους τους σταθμούς ακολουθεί ανάλογη πορεία, με την εμφάνιση των μέγιστων συγκεντρώσεων τις ώρες 09:00-11:00 και 19:00-22:00 και των ελάχιστων τις ώρες 03:00-05:00 και 16:00-17:00.



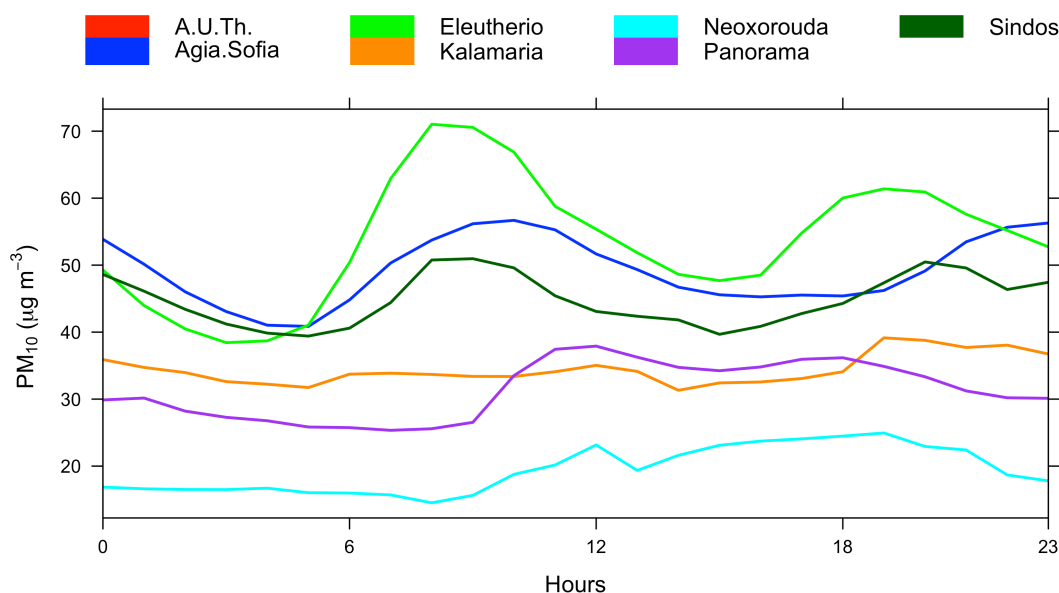
Σχήμα 3.23: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων SO₂ για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Το πρωινό μέγιστο οφείλεται στην κίνηση των οχημάτων και στη λειτουργία βιομηχανικών μονάδων, ενώ το βραδινό μέγιστο κυρίως στις καύσεις που γίνονται για

τις ανάγκες οικιακής θέρμανσης, ιδιαίτερα κατά τη χειμερινή περίοδο. Το πρωινό ελάχιστο οφείλεται στην παύση των καυστήρων οικιακής θέρμανσης και στην απουσία κυκλοφορίας οχημάτων, ενώ το απογευματινό ελάχιστο πιθανόν να οφείλεται στις συνθήκες ατμοσφαιρικής αστάθειας που εμποδίζουν τη συσσώρευση του ρύπου.

❖ Ωριαίες μεταβολές PM_{10}

Παρακάτω φαίνεται η ωριαία διακύμανση των συγκεντρώσεων αερολυμάτων. Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στους σταθμούς του Ελευθερίου, της Αγίας Σοφίας και της Σίνδου, ενώ οι χαμηλότερες στο σταθμό της Νεοχωρούδας.



Σχήμα 3.24: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} για την κοινή περίοδο 2001-2013.

Οι τρεις σταθμοί με τις υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τοπικών μέγιστων και ελάχιστων τιμών και μια σχετική ομοιομορφία ως προς τους χρόνους εμφάνισης των ακρότατων τιμών συγκεντρώσεων PM_{10} . Έτσι, οι σταθμοί του Ελευθερίου, της Αγίας Σοφίας και της Σίνδου εμφανίζουν ένα πρωινό μέγιστο τις ώρες 08:00-11:00, που οφείλεται στην κίνηση των οχημάτων, στη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων και στο χαμηλό ύψος του οριακού στρώματος, και ένα βραδινό μέγιστο τις ώρες

20:00-23:00 (ο σταθμός του Κορδελιού το εμφανίζει λίγο νωρίτερα), το οποίο οφείλεται στην κυκλοφορία των αυτοκινήτων, στη λειτουργία των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης και στις θερμοκρασιακές αναστροφές που δημιουργούνται τις ώρες αυτές και εγκλωβίζουν τα αιωρούμενα σωματίδια στα χαμηλά στρώματα. Τα ελάχιστα των εν λόγω σταθμών σημειώνονται τις ώρες 03:00-05:00 λόγω της απουσίας εκπομπών από τα εν κινήσει οχήματα και τις βιομηχανικές μονάδες και τις ώρες 15:00-16:00 εξ' αιτίας των συνθηκών αστάθειας στην ατμόσφαιρα που εμποδίζουν τη συσσώρευση των σωματιδιακών ρύπων.

Οι σταθμοί της Καλαμαριάς, του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας εμφανίζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} , οι οποίες μεταβάλλονται σχετικά ομαλά στη διάρκεια της ημέρας. Οι συγκεντρώσεις στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας εμφανίζουν το πρώτο μέγιστο στις 11:00-12:00 και το δεύτερο στις 17:00-19:00, τα οποία οφείλονται στη μεταφορά σωματιδιακών ρύπων από αστικές περιοχές.

3.4.2 Ωριαίες μεταβολές κατά τη θερμή και την ψυχρή περίοδο του έτους

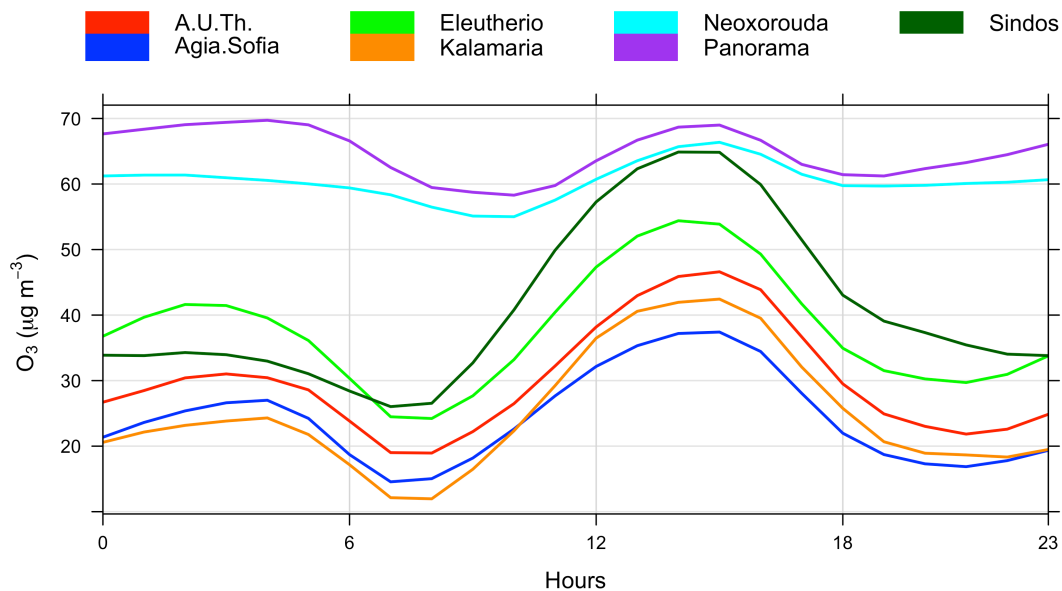
Σε αυτή την ενότητα μελετάται η μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων των ρύπων κατά τη θερμή και κατά την ψυχρή περίοδο του έτους. Η θερμή περίοδος περιλαμβάνει τους μήνες Μάιο-Σεπτέμβριο και η ψυχρή τους μήνες Νοέμβριο-Μάρτιο. Ο Οκτώβριος και ο Απρίλιος θεωρούνται μεταβατικοί μήνες και δε συμμετέχουν στους υπολογισμούς.

❖ Ωριαίες μεταβολές O_3

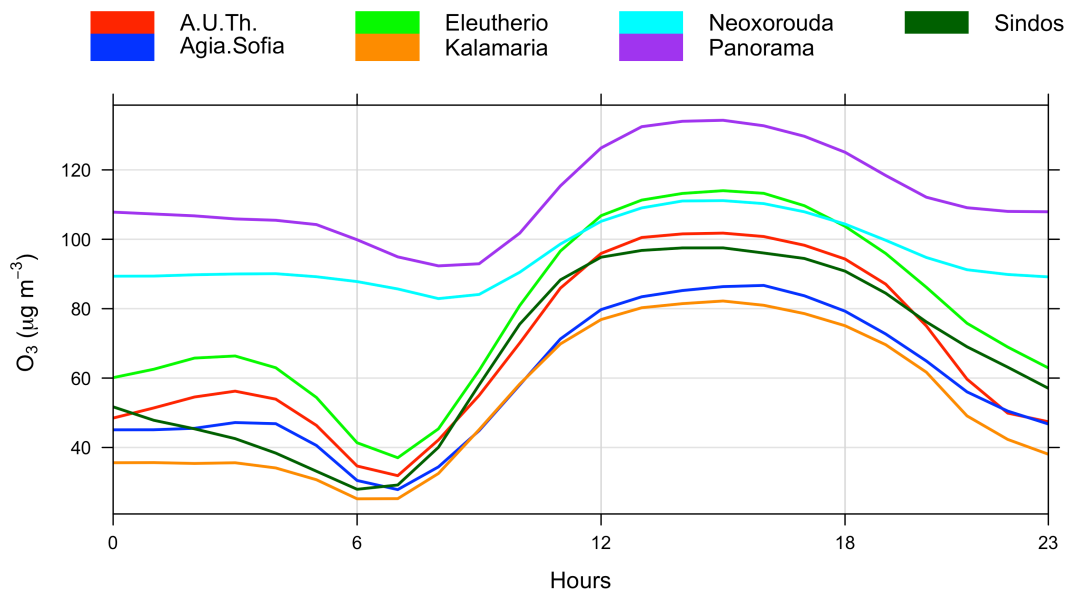
Κατά την ψυχρή περίοδο οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις όζοντος σημειώνονται στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης εμφανίζεται στις 14:00-16:00, ενώ η ελάχιστη στις 10:00-11:00. Οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή περίπου 3 ώρες νωρίτερα. Σημειώνεται ότι οι συγκεντρώσεις του όζοντος στο σταθμό της Σίνδου κατά τις ώρες που σημειώνονται οι μέγιστες τιμές σχεδόν ταυτίζεται με τις αντίστοιχες τιμές του σταθμού της Νεοχωρούδας.

Κατά τη θερμή περίοδο οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται και πάλι στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας. Τα ελάχιστα εμφανίζονται

μία ώρα νωρίτερα σε σχέση με την ψυχρή περίοδο, ενώ τα μέγιστα σημειώνονται τις ώρες 14:00-17:00.



Σχήμα 3.25: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_3 κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.

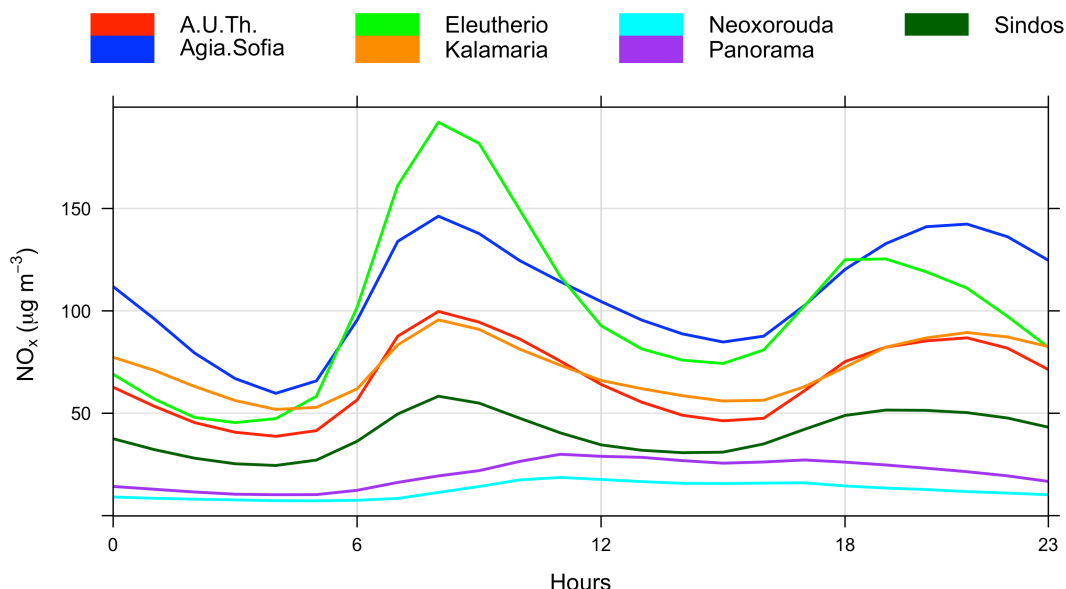


Σχήμα 3.26: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_3 κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

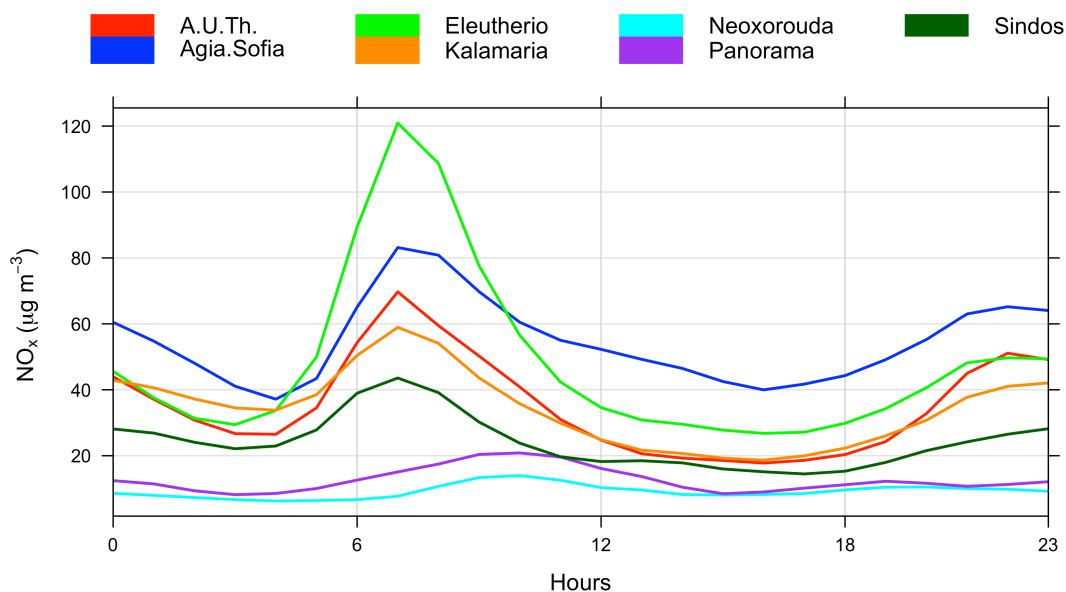
Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων προκύπτει ότι τη θερμή περίοδο οι συγκεντρώσεις του όζοντος είναι μεγαλύτερες σε όλους τους σταθμούς σε σχέση με τις αντίστοιχες της ψυχρής περιόδου, ενώ οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές O_3 της θερμής περιόδου είναι σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες της ψυχρής περιόδου. Η παραπάνω διαπίστωση οφείλεται στο γεγονός ότι ο σχηματισμός όζοντος ευνοείται από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τη θερμή περίοδο του έτους, η ηλιακή ακτινοβολία είναι εντονότερη απ' ό,τι την ψυχρή περίοδο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής όζοντος και να εμφανίζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα.

❖ Ωριαίες μεταβολές NO_x

Τόσο κατά τη θερμή όσο και κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου σημειώνονται στους σταθμούς του Ελευθερίου και της Αγίας Σοφίας, ενώ οι χαμηλότερες στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας.



Σχήμα 3.27: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων NO_x κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.



Σχήμα 3.28: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων NO_x κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

Κατά την ψυχρή περίοδο οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται τις ώρες 08:00-09:00 και 20:00-22:00, ενώ οι ελάχιστες τις ώρες 04:00-05:00 και 15:00-17:00. Κατά τη θερμή περίοδο, τα ακρότατα μετατοπίζονται κατά μία ώρα σε σχέση με την ψυχρή περίοδο. Αυτό εξηγείται λόγω της αλλαγής της ώρας και της ανάλογης αλλαγής στις προγραμματισμένες μετακινήσεις και τα ωράρια.

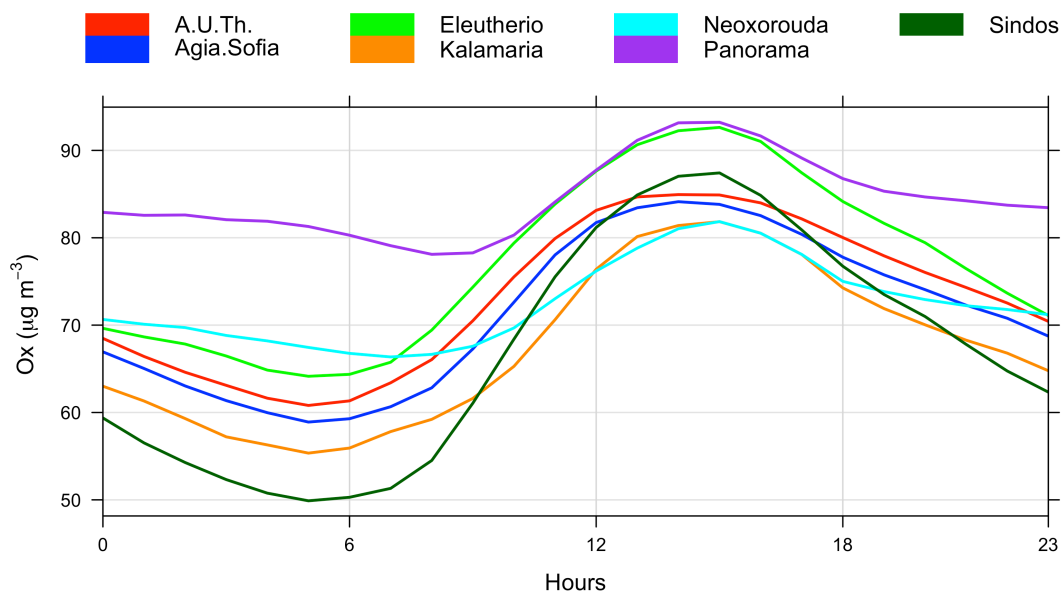
Σε αντίθεση με το όζον, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου σημειώνονται κατά την ψυχρή περίοδο του έτους εξ' αιτίας των αυξημένων αναγκών θέρμανσης και μετακίνησης εντός της πόλης. Τα NO_x παράγονται από την ατελή καύση υδρογονανθράκων (κυρίως βενζίνης και πετρελαίου) και οι συγκεντρώσεις τους αυξάνονται κατά την ψυχρή περίοδο.

❖ Ωριαίες μεταβολές O_x

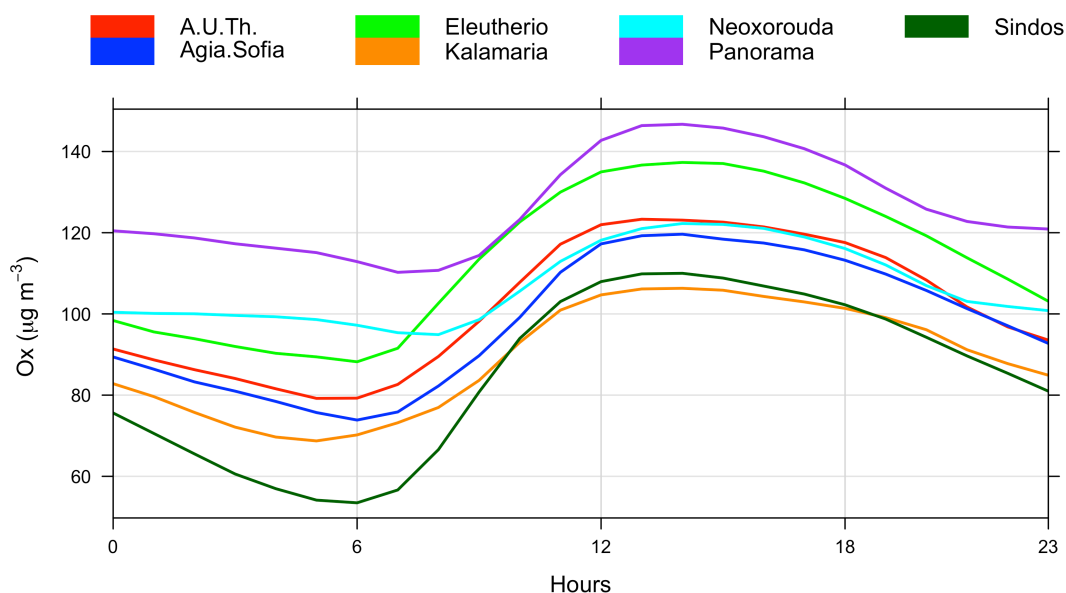
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα, οι καμπύλες των συγκεντρώσεων τόσο της ψυχρής όσο και της θερμής περιόδου προσεγγίζουν τις αντίστοιχες του όζοντος. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στους σταθμούς του Πανοράματος, ο οποίος έχει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις όζοντος, και του Ελευθερίου, ο οποίος έχει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου.

Την ψυχρή περίοδο οι μέγιστες συγκεντρώσεις σημειώνονται τις ώρες 14:00-16:00 (όπως συμβαίνει και για το O_3 την ψυχρή περίοδο) και οι ελάχιστες 09:00-

10:00 για το Πανόραμα και τη Νεοχωρούδα και 05:00-07:00 για τους υπόλοιπους σταθμούς. Τη θερμή περίοδο οι μέγιστες συγκεντρώσεις O_x σημειώνονται τις ώρες 13:00-15:00 και οι ελάχιστες περίπου μία ώρα νωρίτερα σε σχέση με τις αντίστοιχες της ψυχρής περιόδου.



Σχήμα 3.29: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_x κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.

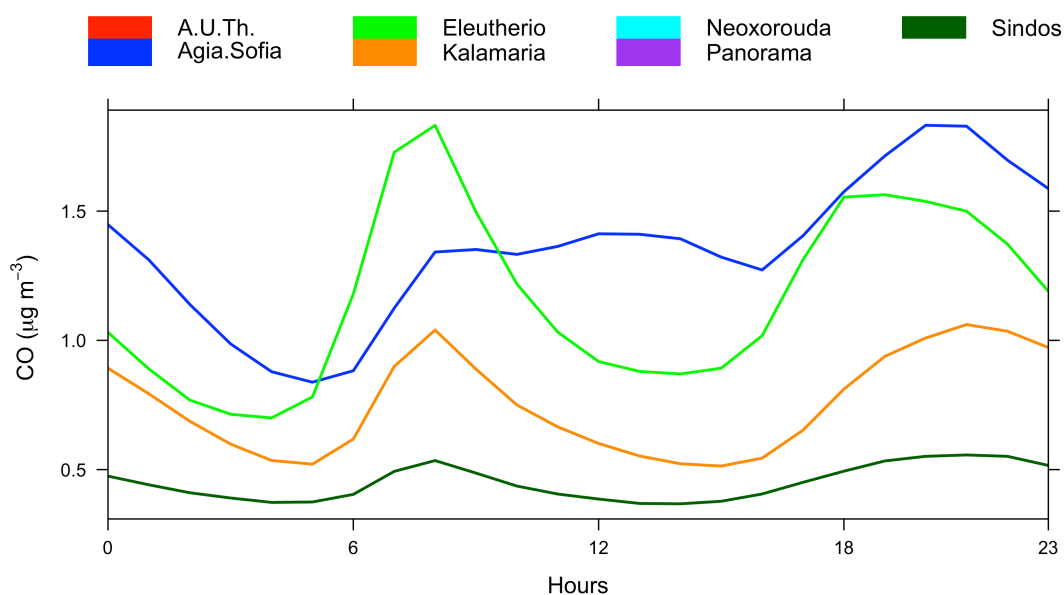


Σχήμα 3.30: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_x κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

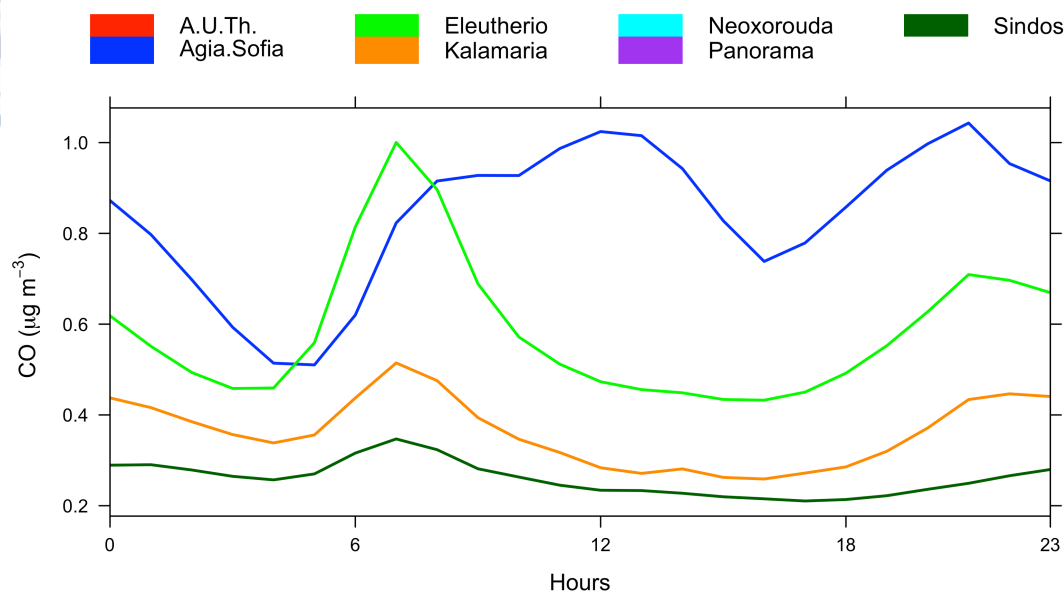
Είναι φανερό ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O_x σημειώνονται κατά τη θερμή περίοδο του έτους, γεγονός που καταδεικνύει την έντονη επιρροή που ασκεί το όζον στις συγκεντρώσεις των O_x . Κατά τη θερμή περίοδο, οι φωτοχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερη έκταση λόγω της εντονότερης ηλικάκης ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή όζοντος.

❖ Ωριαίες μεταβολές CO

Με βάση τα ακόλουθα διαγράμματα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO τόσο κατά την ψυχρή όσο και κατά τη θερμή περίοδο του έτους σημειώνονται στους αστικούς σταθμούς της Αγίας Σοφίας και του Ελευθερίου, ενώ οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις CO εμφανίζονται στο σταθμό της Σίνδου.



Σχήμα 3.31: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων CO κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.



Σχήμα 3.32: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων CO κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

Την ψυχρή περίοδο, οι μέγιστες συγκεντρώσεις στους σταθμούς του Ελευθερίου, της Καλαμαριάς και της Σίνδου σημειώνονται στις 07:00-09:00 και στις 19:00-22:00, ενώ οι ελάχιστες στις 04:00-06:00 και 13:00-15:00. Στο σταθμό της Αγίας Σοφίας, τα τρία μέγιστα σημειώνονται τις ώρες 08:00-09:00, 12:00-13:00 και 20:00-22:00 και τα ελάχιστα τις ώρες 04:00-06:00 και 16:00-17:00. Τη θερμή περίοδο τα ακρότατα όλων των σταθμών μετατοπίζονται περίπου μία ώρα σε σχέση με την ψυχρή περίοδο. Κατά την ψυχρή περίοδο οι συγκεντρώσεις του CO είναι γενικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες της θερμής περιόδου λόγω των αυξημένων αναγκών για θέρμανση, όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο της παρούσας εργασίας.

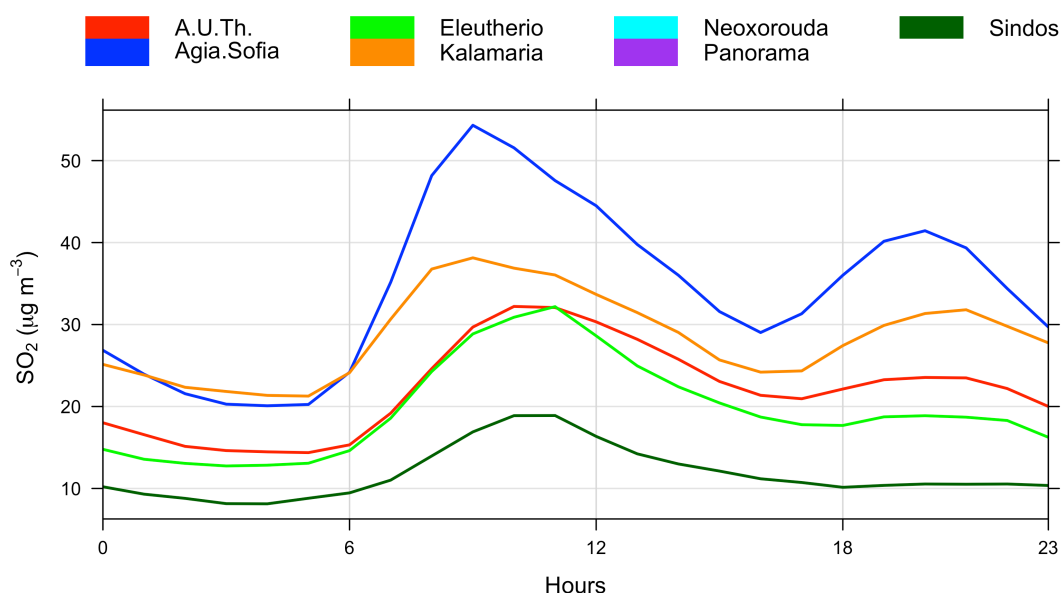
❖ Ωριαίες μεταβολές SO₂

Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις SO₂ σημειώνονται στους σταθμούς της Αγίας Σοφίας και της Καλαμαριάς. Διακρίνονται για όλους τους σταθμούς δύο τοπικά μέγιστα και δύο τοπικά ελάχιστα. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις σημειώνονται τις ώρες 09:00-11:00 και 20:00-22:00, ενώ οι ελάχιστες τις ώρες 03:00-05:00 και 16:00-18:00.

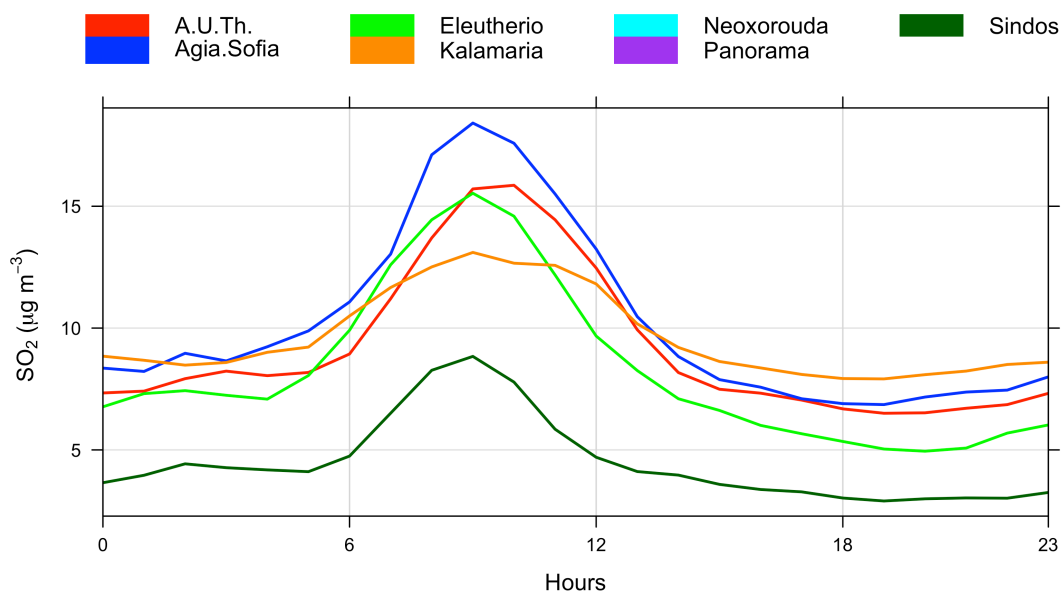
Κατά τη θερμή περίοδο λαμβάνει χώρα μια σημαντική αλλαγή στη συμπεριφορά του διοξειδίου του θείου, καθώς σε όλους τους σταθμούς εμφανίζεται μόνο ένα

τοπικό μέγιστο τις ώρες 09:00-10:00 και ένα τοπικό ελάχιστο τις ώρες 18:00-21:00. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στους σταθμούς της Αγίας Σοφίας και της Καλαμαριάς, με εξαίρεση τις ώρες του τοπικού μέγιστου, κατά τις οποίες οι συγκεντρώσεις των σταθμών του Α.Π.Θ. και του Ελευθερίου γίνονται μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της Καλαμαριάς. Ο λόγος για τον οποίο πιθανόν να συμβαίνει αυτό είναι η αυξημένη κίνηση των οχημάτων τις ώρες αυτές στις εν λόγω περιοχές.

Γενικά, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις SO_2 εμφανίζονται κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, όπως συμβαίνει και με τα NO_x και το CO . Η λειτουργία των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης λόγω της αυξημένης ανάγκης για θέρμανση, κυρίως τους χειμερινούς μήνες, και η εντονότερη κίνηση των οχημάτων οδηγεί στην έκλυση μεγαλύτερων ποσοτήτων διοξειδίου του θείου. Η παρουσία ενός δεύτερου τοπικού μέγιστου κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες της ψυχρής περιόδου πιθανώς να οφείλεται στη λειτουργία των εγκαταστάσεων οικιακής θέρμανσης, ενώ κατά τη θερμή περίοδο, αυτό το τοπικό μέγιστο απουσιάζει διότι δεν υπάρχει ανάγκη για θέρμανση. Σημειώνεται ότι ο σταθμός της Αγίας Σοφίας μετράει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις SO_2 καθ' όλο το έτος λόγω της εντονότατης κυκλοφορίας των οχημάτων στο κέντρο της Θεσσαλονίκης.



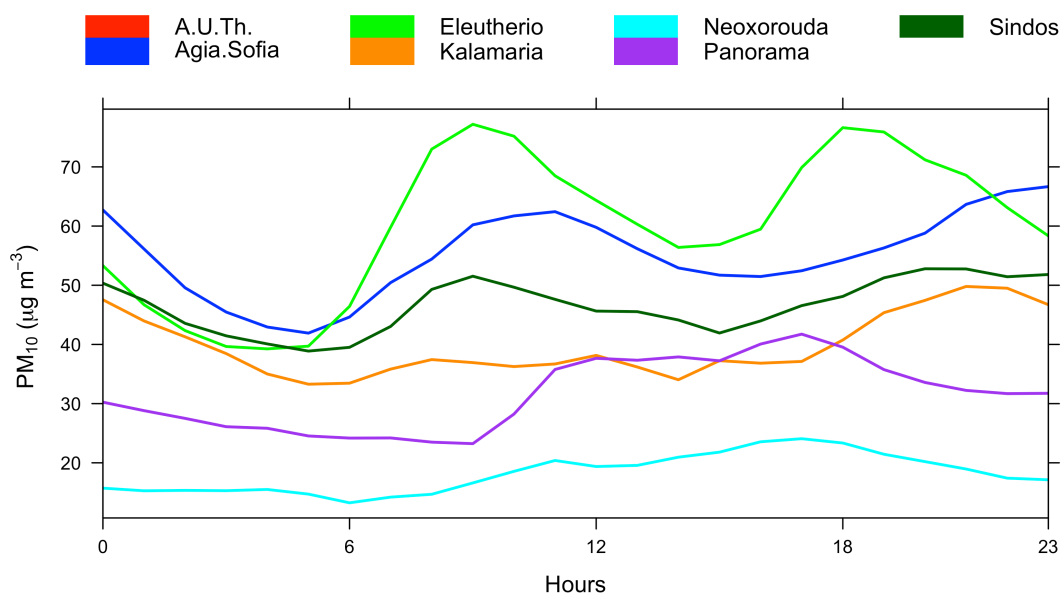
Σχήμα 3.33: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων SO_2 κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.



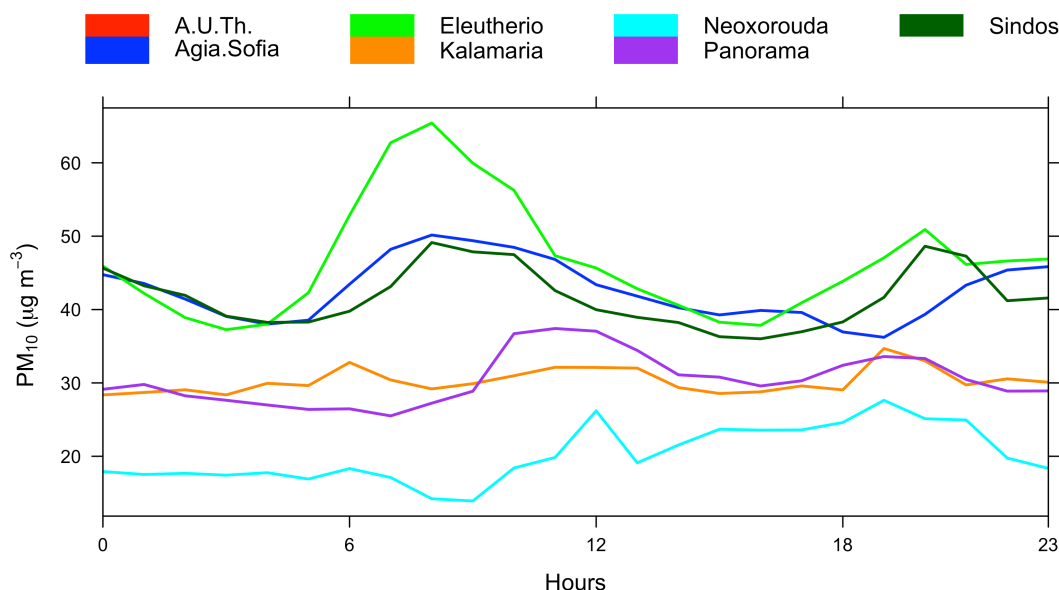
Σχήμα 3.34: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων SO_2 κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

❖ Ωριαίες μεταβολές PM_{10}

Από τα Σχήματα 3.35 και 3.36 φαίνεται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εντοπίζονται στους σταθμούς του Κορδελιού, της Αγίας Σοφίας και της Σίνδου τόσο κατά την ψυχρή όσο και κατά τη θερμή περίοδο του έτους.



Σχήμα 3.35: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου των ετών 2001-2013.



Σχήμα 3.36: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου των ετών 2001-2013.

Κατά την ψυχρή περίοδο στους σταθμούς του Ελευθερίου, της Αγίας Σοφίας, της Σίνδου και της Καλαμαριάς, το πρωινό μέγιστο εμφανίζεται στις 08:00-11:00 και το βραδινό μέγιστο στις 18:00-19:00 για το Ελευθέριο και στις 20:00-23:00 για τους άλλους τρεις σταθμούς. Για τους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας τα δύο μέγιστα εντοπίζονται τις ώρες 11:00-12:00 και 17:00, ενώ η διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη. Το πρωινό ελάχιστο στους σταθμούς της Αγίας Σοφίας, της Καλαμαριάς, της Σίνδου και της Νεοχωρούδας εμφανίζεται στις 05:00-06:00, στο σταθμό του Ελευθερίου στις 03:00-05:00 και στο σταθμό του Πανοράματος στις 08:00. Το απογευματινό ελάχιστο εμφανίζεται περίπου στις 14:00-17:00 για όλους τους σταθμούς πλην αυτού της Νεοχωρούδας, όπου το ελάχιστο εντοπίζεται στις 12:00-13:00.

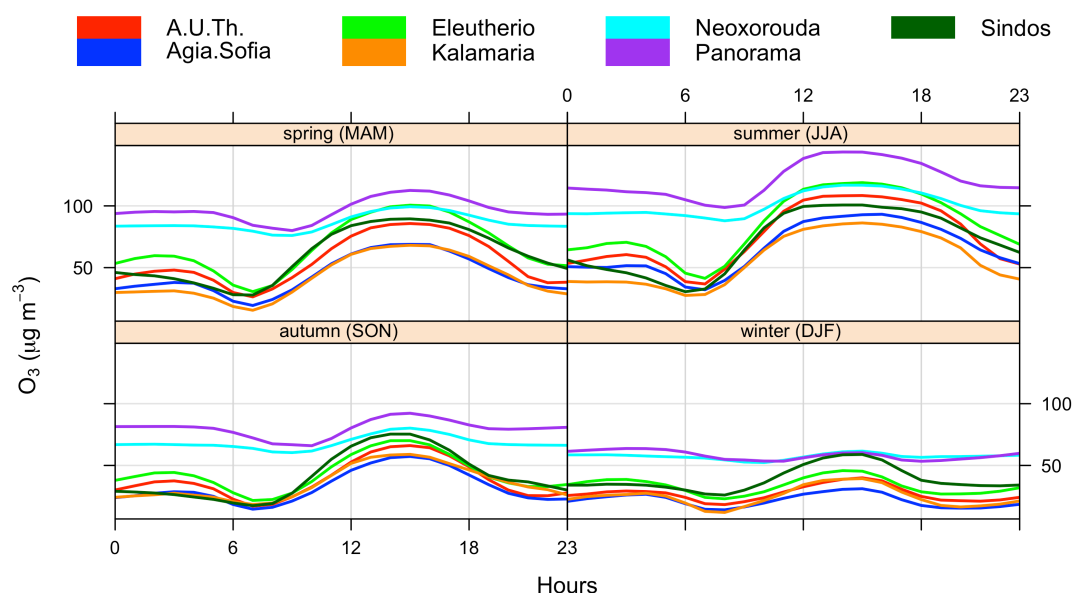
Κατά τη θερμή περίοδο του έτους τα ακρότατα όλων των σταθμών μετατοπίζονται περίπου 1-2 ώρες σε σχέση με την ψυχρή περίοδο. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το βραδινό μέγιστο κατά τη θερμή περίοδο έχει μικρότερη ένταση σε σχέση με το αντίστοιχο της ψυχρής περιόδου εξ' αιτίας της μη λειτουργίας εγκαταστάσεων οικιακής θέρμανσης. Επιπρόσθετα, οι τιμές των συγκεντρώσεων κατά τη θερμή περίοδο κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα λόγω του ότι οι ανάγκες για θέρμανση είναι μειωμένες και δε λειτουργούν μονάδες κεντρικής θέρμανσης.

3.4.3 Ωριαίες μεταβολές με βάση τις εποχές του έτους

Σε αυτή την ενότητα μελετώνται οι μεταβολές των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών του έτους.

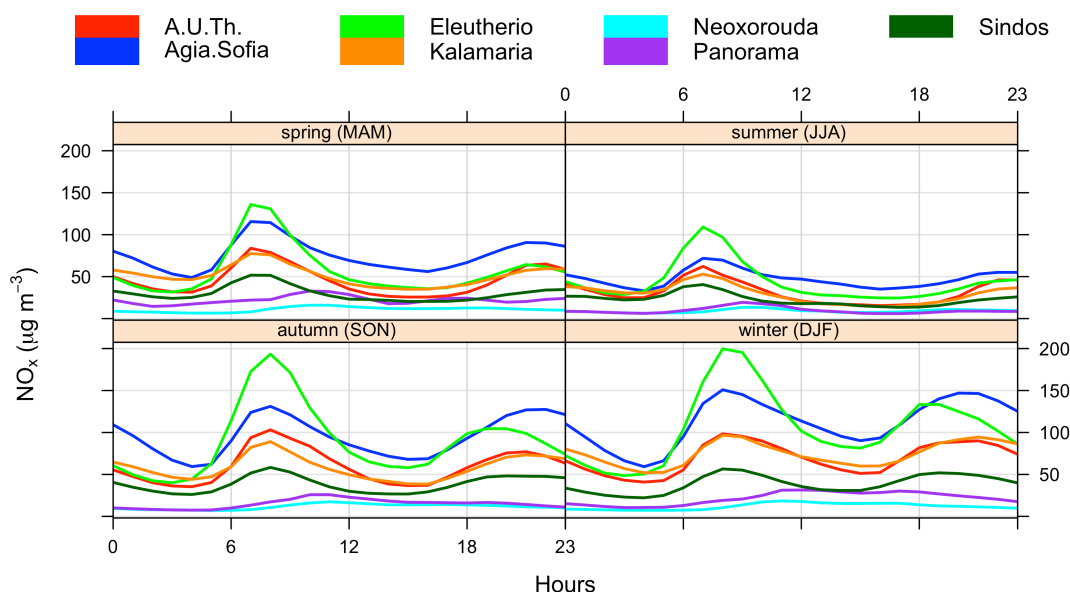
❖ Ωριαίες μεταβολές O_3

Όπως αναμενόταν, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων όζοντος σε όλους τους σταθμούς είναι πολύ υψηλότερα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε σχέση με τα αντίστοιχα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ το φθινόπωρο και την άνοιξη επικρατεί μια μέση κατάσταση. Οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του θέρους είναι μεγάλες, πράγμα που δε συμβαίνει κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Το χειμώνα, οι διακυμάνσεις, ειδικά στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας, είναι πολύ μικρότερες και περίπου σταθερές στα 55-65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ λόγω του χαμηλότερου ρυθμού με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα, όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σημειώνονται στους περιφερειακούς σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας.



Σχήμα 3.37: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_3 κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

❖ Ωριαίες μεταβολές NO_x

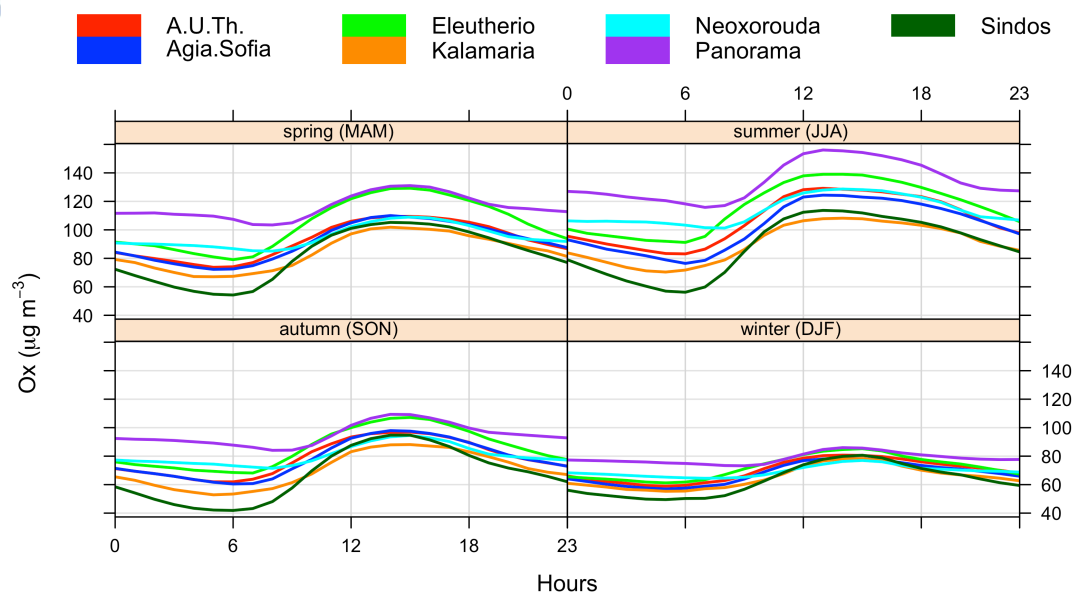


Σχήμα 3.38: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων NO_x κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

Στον αντίποδα, οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου μεγιστοποιούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ελαχιστοποιούνται κατά τη διάρκεια του θέρους.

Το φθινόπωρο, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων αυξάνονται σημαντικά και προσεγγίζουν τα αντίστοιχα του χειμώνα, ενώ την άνοιξη οι συγκεντρώσεις αποκτούν μικρότερες τιμές και προσεγγίζουν τις καλοκαιρινές τιμές. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα οι ανάγκες για θέρμανση αυξάνονται, με αποτέλεσμα να εκλύονται μεγαλύτερες ποσότητες NO_x στην ατμόσφαιρα. Το φθινόπωρο και τον χειμώνα οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των οξειδίων του αζώτου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες της άνοιξης και του καλοκαιριού, κυρίως. Οι αστικοί σταθμοί του Ελευθερίου και της Αγίας Σοφίας έχουν τα πρωτεία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους όσον αφορά τις συγκεντρώσεις NO_x.

❖ Ωριαίες μεταβολές O_x



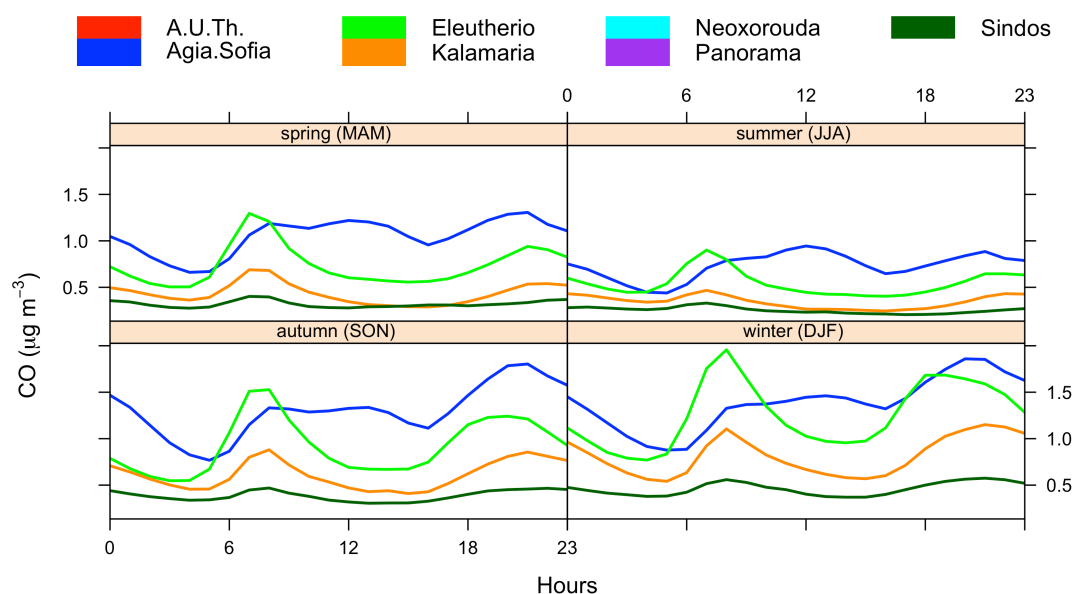
Σχήμα 3.39: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων O_x κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

Όπως διαπιστώθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των O_x επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις συγκεντρώσεις του O_3 , με αποτέλεσμα οι καμπύλες των πρώτων να προσεγγίζουν τις αντίστοιχες του δεύτερου. Έτσι, το καλοκαίρι οι συγκεντρώσεις των O_x είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές του χειμώνα, ενώ οι συγκεντρώσεις την άνοιξη και το φθινόπωρο παίρνουν ενδιάμεσες τιμές. Όπως και στην περίπτωση του όζοντος, οι διακυμάνσεις είναι μεγαλύτερες τους θερινούς μήνες, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα ελαχιστοποιούνται. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σε O_x σημειώνονται στους σταθμούς του Πανοράματος και του Ελευθερίου καθ' όλο το έτος.

❖ Ωριαίες μεταβολές CO

Οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα και του φθινοπώρου, την περίοδο της άνοιξης μειώνονται και το καλοκαίρι λαμβάνουν τις ελάχιστες τιμές τους. Τους φθινοπωρινούς και τους χειμερινούς μήνες, οι ανάγκες για θέρμανση είναι μεγαλύτερες, οπότε οι μονάδες θέρμανσης λειτουργούν σε μεγαλύτερο βαθμό, με αποτέλεσμα την αυξημένη έκλυση ποσοτήτων CO και την ανάλογη αύξηση των συγκεντρώσεών του στην ατμόσφαιρα.

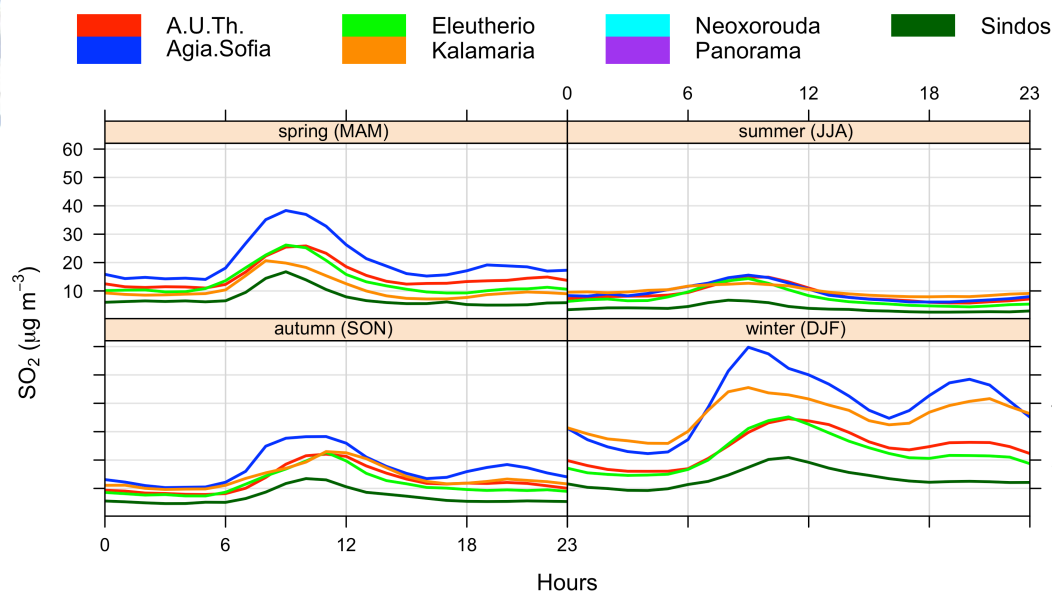
Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται στους αστικούς σταθμούς της Αγίας Σοφίας και του Ελευθερίου για τους λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενο σημείο της εργασίας.



Σχήμα 3.40: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων CO κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

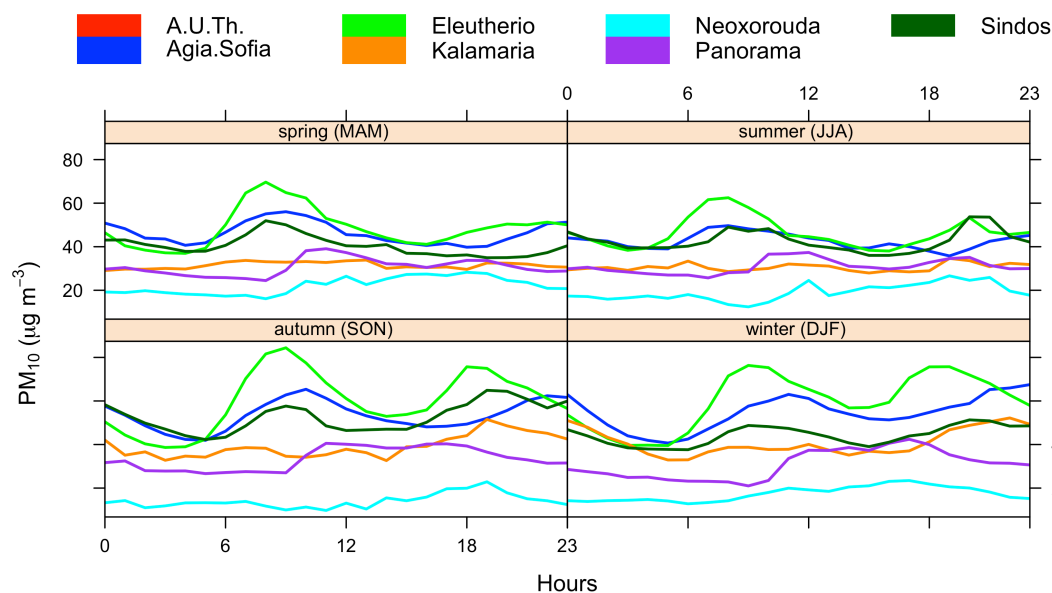
❖ Ωριαίες μεταβολές SO₂

Κατά παρόμοιο τρόπο με τα NO_x και το CO, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους το χειμώνα και τις ελάχιστες το θέρος. Σε αντίθεση με τα NO_x και το CO, οι συγκεντρώσεις SO₂ την άνοιξη είναι μεγαλύτερες από αυτές του φθινοπώρου. Οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου είναι μεγαλύτερες το χειμώνα και την άνοιξη και μικρότερες το φθινόπωρο και το καλοκαίρι. Οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων καταγράφονται από το σταθμό της Αγίας Σοφίας και οι μικρότερες από το σταθμό της Σίνδου καθ' όλο το έτος.



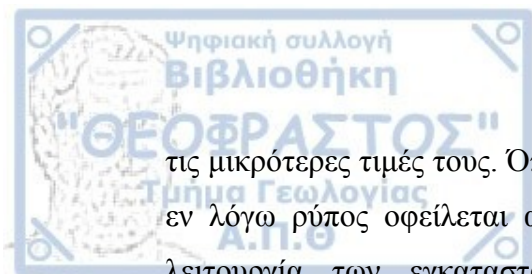
Σχήμα 3.41: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων SO_2 κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

❖ Ωριαίες μεταβολές PM_{10}



Σχήμα 3.42: Μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εποχών της κοινής περιόδου 2001-2013.

Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων παρατηρούνται το φθινόπωρο και μειώνονται σταδιακά μέχρι το καλοκαίρι, κατά το οποίο λαμβάνουν



τις μικρότερες τιμές τους. Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, η συμπεριφορά που έχει ο εν λόγω ρύπος οφείλεται αφ' ενός στην έντονη κίνηση των τροχοφόρων και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων κεντρικής θέρμανσης και αφ' ετέρου στην αποδυνάμωση της θαλάσσιας αύρας και σχετικά μικρή ισχύ των βόρειων ανέμων την περίοδο του φθινοπώρου. Οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων αερολυμάτων εντοπίζονται στους σταθμούς του Ελευθερίου, της Αγίας Σοφίας και της Σίνδου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στις προηγούμενες σελίδες αναλύθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη των δεδομένων των σταθμών της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Τα ωριαία δεδομένα όζοντος (O_3), οξειδίων του αζώτου (NO_x), O_x , μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του θείου (SO_2) και αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των $10\ \mu m$ (PM_{10}) επεξεργάστηκαν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη φύση και τη συμπεριφορά των ρύπων κατά τη διάρκεια του έτους, της εβδομάδας και της ημέρας για την περίοδο 2001-2013, κατά την οποία όλοι οι σταθμοί διέθεταν ωριαία δεδομένα ρύπων. Επίσης, έγινε προσπάθεια της ερμηνείας των τάσεων των εν λόγω ρύπων κατά τη χρονική περίοδο 2001-2017. Στις επόμενες παραγράφους συνοψίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Σε όλους τους σταθμούς της περιφέρειας, οι συγκεντρώσεις των NO_x , CO , SO_2 και PM_{10} εμφανίζουν λίγο έως πολύ πτωτική τάση κατά την περίοδο 2001-2017, με εξαίρεση μερικές μεμονωμένες αναστροφές τάσης που παρατηρούνται σε κάποιους σταθμούς. Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελεί, επίσης, η περίοδος 2012-2015 στο σταθμό της Σίνδου και η περίοδος 2015-2017 στο σταθμό του Ελευθερίου. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, οι συγκεντρώσεις του SO_2 εμφανίζει ανοδική τάση. Όσον αφορά το όζον και τα O_x , όλοι οι σταθμοί παρουσιάζουν μεταβλητές συγκεντρώσεις ανά τα χρόνια, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται ξεκάθαρα κάποια τάση.

Οι συγκεντρώσεις του όζοντος σε όλους τους σταθμούς είναι υψηλότερες κατά τους θερινούς μήνες (κυρίως τον Ιούλιο και τον Αύγουστο), ενώ οι μικρότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται τους χειμερινούς μήνες (κατά βάση τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο). Σε εβδομαδιαία βάση, οι συγκεντρώσεις του O_3 σε όλους τους σταθμούς διατηρούνται περίπου σταθερές τις καθημερινές και αυξάνονται το Σαββατοκύριακο. Σε ημερήσια βάση, όλοι οι σταθμοί εμφανίζουν τις μέγιστες συγκεντρώσεις τους σε όζον τις ώρες 14:00-16:00, ενώ οι ελάχιστες παρατηρούνται τις ώρες 08:00-09:00 στους σταθμούς της Νεοχωρούδας και του Πανοράματος και τις ώρες 07:00-08:00 στους υπόλοιπους σταθμούς. Κατά τη θερμή περίοδο, οι συγκεντρώσεις O_3 είναι σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες της ψυχρής περιόδου, ενώ σε εποχική βάση, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρούνται το

καλοκαίρι, οι μικρότερες τον χειμώνα και ενδιάμεσες την άνοιξη και το φθινόπωρο. Καθ' όλο το έτος, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις O_3 εντοπίζονται στους περιαστικούς σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας και οι χαμηλότερες στους σταθμούς της Καλαμαριάς και της Αγίας Σοφίας.

Από τα παραπάνω φαίνεται η εξάρτηση του O_3 από τη φωτοχημεία. Με την παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερη έκταση οι φωτοχημικές αντιδράσεις παραγωγής του O_3 , με αποτέλεσμα αυτό να βρίσκεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα κατά τις περιόδους που φτάνει στη Γη περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή τους θερινούς μήνες. Κατά τις περιόδους αυτές, οι μηχανισμοί παραγωγής O_3 υπερτερούν των μηχανισμών καταστροφής του, ενώ κατά τις περιόδους που η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη (π.χ. κατά τους χειμερινούς μήνες) συμβαίνει το αντίστροφο, με αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεών του. Η αύξηση της συγκέντρωσης του όζοντος το Σαββατοκύριακο οφείλεται στο weekend effect, κατά το οποίο οι συγκεντρώσεις των ενώσεων που συμβάλλουν στην καταστροφή του O_3 (π.χ. οξείδια αζώτου, πτητικές οργανικές ενώσεις κ.ά.) μειώνονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή μικρότερης ποσότητας O_3 και συνεπώς αύξηση της συγκέντρωσής του.

Μεγάλη σύγκλιση παρατηρείται στη συμπεριφορά των ρύπων NO_x , CO , SO_2 και PM_{10} . Οι μικρότερες συγκεντρώσεις των ρύπων σε όλους τους σταθμούς παρατηρούνται τους θερινούς μήνες, ενώ οι μεγαλύτερες τους μήνες Νοέμβριο-Ιανουάριο. Κατά τη διάρκεια της εβδομάδας οι συγκεντρώσεις των παραπάνω ρύπων παραμένουν περίπου σταθερές, ενώ το Σαββατοκύριακο σε όλους τους σταθμούς παρατηρείται πτώση στις μέσες συγκεντρώσεις λόγω του weekend effect. Εξαιρέση αποτελεί ο σταθμός της Νεοχωρούδας, όπου οι συγκεντρώσεις των PM_{10} παραμένουν σταθερά χαμηλές καθ' όλη τη διάρκεια της εβδομάδας. Σε ημερήσια βάση, σχεδόν όλοι οι σταθμοί παρουσιάζουν δύο μέγιστα και δύο ελάχιστα για όλους τους παραπάνω ρύπους. Το πρώτο μέγιστο εμφανίζεται τις ώρες κυκλοφοριακής αιχμής (07:00-10:00) και το δεύτερο μέγιστο τις απογευματινές και βραδινές ώρες (19:00-23:00). Εξαιρούνται ο σταθμός της Αγίας Σοφίας, ο οποίος εμφανίζει και ένα τρίτο μέγιστο στις συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα στις 12:00-13:00 και οι σταθμοί της Νεοχωρούδας, του Πανοράματος και της Σίνδου, οι οποίοι δεν εμφανίζουν ξεκάθαρα σε κάποιες περιπτώσεις το βραδινό μέγιστο. Τα ελάχιστα εμφανίζονται τις πρώτες πρωινές ώρες (03:00-05:00) και τις απογευματινές ώρες (15:00-17:00) στην πλειοψηφία των σταθμών.

Κατά την ψυχρή περίοδο, όλοι οι σταθμοί εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε NO_x , CO , SO_2 και PM_{10} σε σχέση με την θερμή περίοδο. Την θερμή περίοδο, οι διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των προαναφερθέντων ρύπων είναι σχετικά μικρότερες, ενώ στην περίπτωση του SO_2 , το βραδινό μέγιστο απουσιάζει. Σε εποχική βάση, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις και οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις εντός του εικοσιτετραώρου εντοπίζονται το χειμώνα για τα NO_x , το CO και το SO_2 και το φθινόπωρο για τα PM_{10} , ενώ σε όλες τις περιπτώσεις οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις σημειώνονται το καλοκαίρι για όλους τους προαναφερθέντες ρύπους. Οι σταθμοί που καταγράφουν καθ' όλο το έτος τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στους παραπάνω ρύπους είναι οι σταθμοί του Ελευθερίου και της Αγίας Σοφίας.

Οι ρύποι NO_x , CO , SO_2 και PM_{10} έχουν κατά βάση τις ίδιες ανθρωπογενείς πηγές. Η κίνηση των οχημάτων, οι διάφορες βιομηχανικές μονάδες, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης και γενικότερα οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν τις πλέον σημαντικές πηγές εκπομπής των ρύπων αυτών. Έτσι, κατά το τέλος του φθινοπώρου και όλο το χειμώνα οι ανάγκες για θέρμανση αυξάνονται σημαντικά, προκαλώντας αύξηση στις συγκεντρώσεις των παραπάνω ρύπων. Επιπρόσθετα, η έντονη κίνηση των οχημάτων, η πυκνή δόμηση των κτιρίων, το χαμηλό ύψος του οριακού στρώματος και τα επικρατούντα συστήματα ανέμων την περίοδο αυτή, προκαλούν τη συσσώρευση των ρύπων στο κέντρο της πόλης, με αποτέλεσμα οι αστικοί σταθμοί να καταγράφουν υψηλές τιμές συγκεντρώσεων.

Τέλος, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των O_x , αυτές λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο και τις μικρότερες το Δεκέμβριο σε όλους τους σταθμούς. Σε εβδομαδιαία βάση, οι συγκεντρώσεις των O_x σταθεροποιούνται τις καθημερινές, ενώ το Σαββατοκύριακο παρατηρείται πτώση λόγω της επίδρασης του weekend effect. Σε ημερήσια βάση, παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς ένα μέγιστο στις συγκεντρώσεις των O_x τις ώρες 13:00-16:00 και ένα ελάχιστο τις ώρες 08:00-09:00 στους σταθμούς του Πανοράματος και της Νεοχωρούδας και τις ώρες 05:00-06:00 στους υπόλοιπους σταθμούς. Κατά τη θερμή περίοδο, οι συγκεντρώσεις των O_x είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες την ψυχρή περίοδο, ενώ, σε εποχιακό επίπεδο, το καλοκαίρι παρατηρούνται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις O_x και η μεγαλύτερη διακύμανση των συγκεντρώσεων,

ενώ το χειμώνα σημειώνονται οι ελάχιστες συγκεντρώσεις O_x και η διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι μικρή.

Η πορεία των συγκεντρώσεων των O_x , τα οποία αποτελούν το αλγεβρικό άθροισμα των συγκεντρώσεων O_3 και NO_2 , καταδεικνύουν την άρρηκτη σχέση μεταξύ όζοντος και οξειδίων του αζώτου. Οι αντιδράσεις μεταξύ των NO_x και του O_3 λαμβάνουν χώρα σε διάστημα λίγων μόνο λεπτών, με αποτέλεσμα την αλλαγή στη χημική ισορροπία ανάμεσα στους προαναφερθέντες ρύπους. Έτσι, φαίνεται ότι όταν τα NO_x μειώνονται (π.χ. κατά τη διάρκεια του Σαββατοκύριακου), υπάρχει αντίστοιχη μείωση και στις συγκεντρώσεις των O_x λόγω της μείωσης των πρωτογενών εκπομπών NO (φωτοχημικά το Σαββατοκύριακο η ατμόσφαιρα είναι σε καλύτερη κατάσταση μιας και δεν επιβαρύνεται τόσο από τις εκπομπές των NO_x). Το NO επιδρά με το O_3 , όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, μεταβάλλοντας τη λεπτή ισορροπία μεταξύ όζοντος και οξειδίων του αζώτου, αλλά και την ισορροπία $NO-NO_2$ κοντά στην πηγή εκπομπής του ρύπου. Όταν υπάρχει έντονη ηλιακή ακτινοβολία (π.χ. θερμή περίοδος του έτους) υπερτερεί ο μηχανισμός παραγωγής O_3 , ενώ όταν αυτή απουσιάζει (π.χ. ψυχρή περίοδος του έτους) υπερτερεί ο μηχανισμός καταστροφής του με παράλληλη παραγωγή NO_2 . Έτσι, γίνεται φανερό ότι τα διαγράμματα των O_x συγκεντρώνουν τα χαρακτηριστικά των διαγραμμάτων των NO_x και του O_3 .

Ελληνική

Ασσαέλ Μ., Μελάς Δ., Καρατζάς Κ., Αχιλλάς Χ., Κακοσίμος Κ. (2008). *Καταγραφή & Μελέτη αιωρούμενων σωματιδίων στο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης*. Θεσσαλονίκη. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.

Γεντεκάκης Ι. (2010). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: επιπτώσεις, έλεγχος & εναλλακτικές τεχνολογίες* (2η έκδοση). Χανιά. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Ζάνης Π. (2014). *Σημειώσεις για την Ρύπανση και Χημεία της Ατμόσφαιρας*. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας.

Καραθανάσης Σ. (2006). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις Τζιόλα.

Κατσαφάδος Π., Μαυροματίδης Η. (2015). *Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή*. (ηλεκτρ. βιβλίο). Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

Κόλλια Π. (2012). *Μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας.

ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103 (ΦΕΚ 488Β/30.3.11) «Μέτρα για την βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ»

Λαζαρίδης Μ. (2005). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις Τζιόλα.

Μακρογιάννης Τ., Σαχσαμάνογλου Χ. (2004). *Μαθήματα Γενικής Μετεωρολογίας*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις "ΧΑΡΙΣ Ε.Π.Ε."

Μαχαίρας Π., Μπαλαφούτης Χ. (1997). *Γενική Κλιματολογία με στοιχεία Μετεωρολογίας*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις University Studio Press.

Μελάς Δ. (2012). *Ατμοσφαιρική Διάχυση και Διασπορά*. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.

Μελάς Δ. (2004). *Φυσική Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.

Μελάς Δ., Μπάης Α., Μπαλής Δ. (2015). *Ατμοσφαιρική Τεχνολογία*. (ηλεκτρ. βιβλίο). Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.

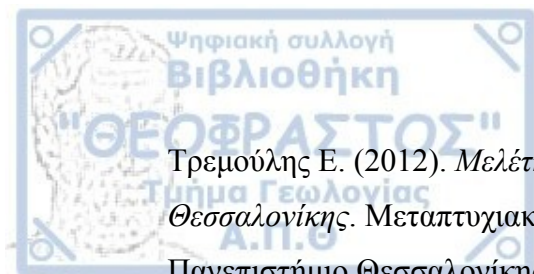
Μπάης Α. (2005). *Φυσική της Ατμόσφαιρας, μέρος II, ατμοσφαιρική σύσταση, παγκόσμιοι κύκλοι, χρόνοι ζωής και αιωρούμενα σωματίδια*. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.

Ντουμανάκης Ε., Νικολάου Κ. *Διακύμανση ατμοσφαιρικών ρύπων σε συνάρτηση με την κυκλοφοριακή κίνηση και τις μετεωρολογικές συνθήκες στην πόλη της Θεσσαλονίκης*. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης.

Οδηγία (1999/30/EK) του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης - 22 Απριλίου 1999.

Οδηγία (2008/50/EK) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21^{ης} Μαΐου 2008, για την προστασία του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη.

Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού, Τμήμα Περιβάλλοντος. (Σεπτέμβριος 2014). *Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2013*.



Τρεμούλης Ε. (2012). *Μελέτη της φωτοχημικής ρύπανσης στην πόλη της Θεσσαλονίκης*. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τομέας Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος.

Φλόκας Α. Α. (1997). *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας* (2η έκδοση). Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις Ζήτη.

Φυτιάνος Κ., Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ. (2009). *Χημεία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις University Studio Press.

Χρονοπούλου-Σερέλη Α., Φλόκας Α. (2010). *Μαθήματα Γεωργικής Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Θεσσαλονίκη. Εκδόσεις Ζήτη.

Ξενόγλωσση

Ahrens, D. C. (2008). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment* (9th ed.). Belmont, California, U.S.A. Cengage Learning.

Carslaw, D.C. and K. Ropkins, (2012). *openair — an R package for air quality data analysis*. Environmental Modelling & Software. Volume 27-28, pp. 52–61.

Carslaw, D.C. (2015). *The openair manual — open-source tools for analysing air pollution data*. Manual for version 1.1-4, King's College London.

Colbeck, I., Lazaridis, M. (2014). *Aerosol Science: Technology and Applications*. John Wiley and Sons Ltd.

Colls, J. (2002). *Air Pollution* (2nd ed.). London. Spon Press.

Kalabokas, P. D. and Repapis, C. C. (2004). *A climatological study of rural surface ozone in central Greece*, Atmos. Chem. Phys., 4, 1139-1147.

Kalabokas, P., Adamopoulos, A., & Viras, L. (2010). *Atmospheric PM₁₀ particle concentration measurements at central and peripheral urban sites in Athens and Thessaloniki, Greece*. Global NEST Journal, Vol 12, No 1, pp 71-83

Katragkou, E., Kazadzis, S., Amiridis, V., Papaioannou, V., Karathanasis, S., & Melas, D. (2008). *PM₁₀ regional transport pathways in Thessaloniki, Greece*. Atmospheric Environment 43 (2009) 1079–1085.

Lin, W., Xu, X., Ge, B., & Zhang, X. (2009). Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural site southwest of Beijing. *J. of Geophys. Res.* , 114.

Mavrakis A., Theoharatos G., Pitsitakis N., Christides A., Makrigiannis G. (2004). *Meteorological conditions during the occurrence of severe air pollution episodes in the thriassio plain*. 7th Pan-Hellenic Conference on Geography, Volume: 1. E1K155

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: 6872-6879

Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). Hoboken, New Jersey, U.S.A. John Wiley & Sons, Inc.

Vallero, D. (2014). *Fundamentals of Air Pollution* (5th ed.). Academic Press.

Διευθύνσεις στο Διαδίκτυο

http://195.134.76.37/chemicals/chem_ozone.htm (Η χημική ένωση του μήνα – Όζον – Ιούλιος 2009)

<http://5dim-pyrgou.ilei.sch.gr/climate/html/ozon.htm> (Μελέτη του όζοντος - 5^ο Δημοτικό Σχολείο Πύργου)



<https://www.ecoweather.gr> (Μετεωρολογικό και περιβαλλοντικό magazino)

<http://www.pkm.gov.gr> (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας)

<http://www.airthess.gr> (Σύστημα έγκαιρης πληροφόρησης των πολιτών για την ποιότητα της ατμόσφαιρας στη Θεσσαλονίκη)

<http://www.ypeka.gr> (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας)

<http://www.esa.int/ESA> (European Space Agency)

<https://svs.gsfc.nasa.gov> (NASA Scientific Visualization Studio)

<https://www.epa.gov> (U.S. Environmental Protection Agency)