



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

Μελέτη συγκεντρώσεων αερίων ρύπων για το έτος  
2023 στον σταθμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης των  
Χανίων και επίδραση αυτών στην ανθρώπινη υγεία

Διπλωματική Εργασία  
της  
Ξένου Καλλιόπης Χαράς

Χανιά, Φεβρουάριος, 2025

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Μελέτη συγκεντρώσεων αερίων ρύπων για το έτος  
2023 στον σταθμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης των  
Χανίων και επίδραση αυτών στην ανθρώπινη υγεία**

Διπλωματική Εργασία  
της  
Ξένου Καλλιόπης Χαράς

**Τριμελής Επιτροπή:**  
Λαζαρίδης Μιχαήλ (Επιβλέπων)  
Βουλγαράκης Απόστολος  
Χατουτσίδου Σοφία Ειρήνη

## Περίληψη

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων στον σταθμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης των Χανίων κατά το έτος 2023 και αξιολογεί την επίδραση τους στην ανθρώπινη υγεία. Οι ρύποι που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν τα αιωρούμενα σωματίδια  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , το όζον ( $O_3$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ), το μονοξείδιο του αζώτου ( $NO$ ), το διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ), τα οξείδια αζώτου ( $NO_X$ ) και το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ). Οι συγκεντρώσεις των ρύπων καταγράφηκαν σε πραγματικό χρόνο με ειδικά όργανα υψηλής ακριβείας, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των δεδομένων. Για την αναγνώριση των επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα, χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο HYSPLIT και δορυφορικές εικόνες από τη NASA, καθώς η αφρικανική σκόνη συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Η ανάλυση των συγκεντρώσεων των ρύπων έδειξε ότι τα  $PM_{10}$  είχαν μέση ετήσια συγκέντρωση  $32,8 \mu g/m^3$  και ξεπέρασαν το ημερήσιο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης ( $50 \mu g/m^3$ ) σε 26 ημέρες και το ημερήσιο όριο του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας ( $45 \mu g/m^3$ ) σε 51 ημέρες. Σημαντική συσχέτιση μεταξύ των  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  παρατηρήθηκε την άνοιξη και το καλοκαίρι, γεγονός που υποδηλώνει κοινές πηγές εκπομπής κατά τους θερμούς μήνες. Ακόμη, καταγράφηκαν συνολικά 43 ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα, με την πλειονότητα αυτών (72,1%) να συμβαίνουν τον χειμώνα και το φθινόπωρο. Όσον αφορά το  $O_3$ , σημειώθηκαν 62 υπερβάσεις του ορίου, κυρίως το καλοκαίρι, όταν οι φωτοχημικές αντιδράσεις ενισχύουν τις συγκεντρώσεις του, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, το  $O_3$  παρουσίασε αρνητική συσχέτιση με τους υπόλοιπους ρύπους και εμφάνισε υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τη νύχτα. Αντίθετα, όλοι οι άλλοι ρύποι είχαν υψηλές συγκεντρώσεις το φθινόπωρο και τον χειμώνα και χαμηλότερες την άνοιξη και το καλοκαίρι.

Επιπλέον, η ανάλυση των σχέσεων μεταξύ των ρύπων αποκάλυψε υψηλή συσχέτιση μεταξύ  $CO$  και  $NO_X$  ( $R^2 = 0,89$ ), γεγονός που υποδηλώνει κοινή προέλευση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων. Κατά τους χειμερινούς μήνες, οι συγκεντρώσεις  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $NO$  και  $NO_X$  ήταν αυξημένες λόγω της οικιακής θέρμανσης, ενώ σημειώθηκε γενική αύξηση όλων των ρύπων (πλην  $O_3$ ) τις πρωινές ώρες εξαιτίας της κυκλοφοριακής αιχμής. Αντίθετα, το  $SO_2$  παρουσίασε σταθερή κατανομή συγκεντρώσεων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Όσον αφορά τη συσχέτιση των ρύπων με τη θερμοκρασία, συσχετίστηκε θετικά μόνο το  $O_3$ , λόγω της εξάρτησής του από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ για τους υπόλοιπους ρύπους παρατηρήθηκε αρνητική συσχέτιση.

Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης επικινδυνότητας (Hazard Index) για τους ρύπους  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  και  $NO_2$ , προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος χρόνιας έκθεσης των ανθρώπων σε αυτούς τους ρύπους. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικούς ωριαίους ρυθμούς εισπνοής ( $1,5 m^3/h$  και  $3 m^3/h$ ) και έδειξε διπλάσιο δείκτη επικινδυνότητας για τη μεγαλύτερη τιμή ρυθμού εισπνοής. Οι υψηλότεροι δείκτες για κάθε ρύπο παρατηρήθηκαν τις ημέρες με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις.



## Abstract

---

The present thesis examines the concentrations of air pollutants at the air pollution station of Chania in 2023 and assesses their impact on human health. The pollutants studied include particulate matter  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , ozone ( $O_3$ ), carbon monoxide (CO), nitrogen monoxide (NO), nitrogen dioxide ( $NO_2$ ), nitrogen oxides ( $NO_X$ ) and sulfur dioxide ( $SO_2$ ). The concentrations of pollutant concentrations were recorded in real-time with special high-precision instruments, ensuring the reliability of the data. The HYSPLIT model and satellite images from NASA were used to identify dust transport episodes from the Sahara desert, as African dust is a major contributor to the increase in suspended particulate matter.

Analysis of pollutant concentrations showed that  $PM_{10}$  had an annual average concentration of  $32,8 \mu g/m^3$  and exceeded the EU daily limit ( $50 \mu g/m^3$ ) on 26 days and the World Health Organisation daily limit ( $45 \mu g/m^3$ ) on 51 days. A significant correlation between  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  was observed in spring and summer, suggesting common emission sources during the warm months. Furthermore, a total of 43 days with Saharan dust transport episodes were recorded, with the majority (72.1%) occurring in winter and autumn. For  $O_3$ , 62 exceedances of the limit value were recorded, mainly in summer, when photochemical reactions enhance concentrations due to solar radiation.  $O_3$  was also negatively correlated with other pollutants and showed higher concentrations during the day than at night. In contrast, all other pollutants had higher concentrations in autumn and winter and lower concentrations in spring and summer.

Furthermore, the analysis of the relationships between pollutants revealed a high correlation between CO and  $NO_X$  ( $R^2 = 0,89$ ), suggesting a common origin from anthropogenic activities such as vehicle traffic. During the winter months, concentrations of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , CO,  $NO_2$ , NO and  $NO_X$  were elevated due to domestic heating, while there was a general increase in all pollutants (except  $O_3$ ) in the morning hours due to peak traffic. In contrast,  $SO_2$  showed a stable concentration distribution throughout the day. As regards the correlation of pollutants with temperature, only  $O_3$  was positively correlated, due to its dependence on solar radiation, while a negative correlation was observed for the other pollutants.

Finally, the Hazard Index for the pollutants  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  and  $NO_2$  was calculated in order to assess the risk of chronic human exposure to these pollutants. The calculation was performed for two different hourly inhalation rates ( $1,5 m^3/h$  and  $3 m^3/h$ ) and showed double the Hazard Index for the higher inhalation rate value. The highest indices for each pollutant were observed on the days with the highest concentrations.

## Ευχαριστίες

---

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους, με οποιονδήποτε τρόπο, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Λαζαρίδη Μιχάλη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για τις εύστοχες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η καθοδήγηση του υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις κ. Χατουτσίδου Σοφία Ειρήνη και κ. Χαλβατζάκη Ελευθερία, για τη πολύτιμη βοήθεια τους, τις συμβουλές τους και την προθυμία να απαντήσουν σε κάθε μου απορία.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στους φίλους μου και στα πιο κοντινά μου άτομα, που με στήριξαν ηθικά και ψυχολογικά καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδρομής. Ένα ξεχωριστό ευχαριστώ στον Γιώργο, για την πολύτιμη παρουσία και στήριξή του σε κάθε βήμα. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που γνώρισα κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων, καθώς με τον έναν ή τον άλλον τρόπο συνέβαλαν σε αυτό το όμορφο και πολύτιμο ταξίδι.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στους γονείς μου και στην αδερφή μου, Εβελίνα, οι οποίοι δεν έπαψαν να πιστεύουν σε εμένα. Παρά τις όποιες δυσκολίες, ήταν πάντα δίπλα μου, με στήριζαν με κάθε εφικτό τρόπο και μου έδιναν τη δύναμη να συνεχίσω.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Εισαγωγή</b>  | <b>11</b> |
| <b>1 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι</b>   | <b>13</b> |
| 1.1 Αιωρούμενα Σωματίδια . . . . .                                     | 13        |
| 1.1.1 Ορισμός αιωρούμενων σωματιδίων . . . . .                         | 13        |
| 1.1.2 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων . . . . .                         | 13        |
| 1.1.3 Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων . . . . .                     | 14        |
| 1.1.4 Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων . . . . .                  | 14        |
| 1.2 Όζον ( $O_3$ ) . . . . .   | 15        |
| 1.3 Μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ) . . . . .                          | 17        |
| 1.4 Μονοξείδιο το αζώτου ( $NO$ ) . . . . .                            | 18        |
| 1.5 Διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ) . . . . .                          | 18        |
| 1.6 Οξείδια του αζώτου ( $NO_X$ ) . . . . .                            | 19        |
| 1.7 Διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) . . . . .                           | 19        |
| <b>2 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία</b>    | <b>21</b> |
| 2.1 Έκθεση και δόση . . . . .  | 21        |
| 2.2 Έκθεση με εισπνοή . . . . .  | 22        |
| 2.3 Επιπτώσεις στην υγεία . . . . .                                    | 23        |
| <b>3 Μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή δειγματοληψίας</b> | <b>25</b> |
| 3.1 Περιοχή μελέτης . . . . .  | 25        |
| 3.2 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, Model 5014i Beta . . . . .           | 26        |
| 3.3 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APOA-370 . . . . .                   | 28        |
| 3.4 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APMA-370 . . . . .                   | 28        |
| 3.5 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APNA-370 . . . . .                   | 29        |
| 3.6 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APSA-370 . . . . .                   | 30        |
| 3.7 Μοντέλο HYSPLIT . . . . .  | 31        |
| 3.8 Δορυφορικές εικόνες NASA . . . . .                                 | 31        |
| 3.9 Μετεωρολογικά δεδομένα . . . . .                                   | 32        |
| 3.10 Hazard Index . . . . .  | 32        |
| <b>4 Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων</b>                             | <b>34</b> |
| 4.1 Χρονοσειρά $PM_{10}$ . . . . .                                     | 34        |
| 4.1.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .                                  | 36        |
| 4.1.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .                                  | 38        |
| 4.1.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                           | 40        |
| 4.2 Χρονοσειρά $PM_{2.5}$ . . . . .                                    | 42        |
| 4.2.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .                                  | 42        |
| 4.2.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .                                  | 44        |
| 4.2.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                           | 45        |
| 4.2.4 Συσχέτιση $PM_{10}$ με $PM_{2.5}$ . . . . .                      | 46        |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 4.2.5  | Μηνιαία ωριαία συσχέτιση PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> . . . . . | 48         |
| 4.3    | Χρονοσειρά O <sub>3</sub> . . . . .                                     | 51         |
| 4.3.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 54         |
| 4.3.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 55         |
| 4.3.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 56         |
| 4.4    | Χρονοσειρά CO . . . . .   | 57         |
| 4.4.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 58         |
| 4.4.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 59         |
| 4.4.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 60         |
| 4.5    | Χρονοσειρά NO . . . . .   | 61         |
| 4.5.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 61         |
| 4.5.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 63         |
| 4.5.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 64         |
| 4.6    | Χρονοσειρά NO <sub>2</sub> . . . . .                                    | 65         |
| 4.6.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 65         |
| 4.6.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 67         |
| 4.6.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 68         |
| 4.7    | Χρονοσειρά NO <sub>x</sub> . . . . .                                    | 68         |
| 4.7.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 69         |
| 4.7.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 70         |
| 4.7.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 72         |
| 4.8    | Χρονοσειρά SO <sub>2</sub> . . . . .                                    | 73         |
| 4.8.1  | Μηνιαίες Διακυμάνσεις . . . . .   | 73         |
| 4.8.2  | Μηνιαία 24ωρη ανάλυση . . . . .   | 75         |
| 4.8.3  | Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση . . . . .                                  | 76         |
| 4.9    | Συγκρίσεις των ρύπων . . . . .  | 77         |
| 4.9.1  | Μηνιαία συσχέτιση . . . . .   | 77         |
| 4.9.2  | Ωριαία συσχέτιση . . . . .  | 78         |
| 4.9.3  | Συσχέτιση συγκέντρωσης ρύπων με θερμοκρασία . . . . .                   | 82         |
| 4.10   | Ημέρες με επεισόδια σκόνης . . . . .                                    | 83         |
| 4.11   | Υπολογισμός επικινδυνότητας -Hazard Index . . . . .                     | 86         |
| 4.11.1 | Hazard Index για τα PM <sub>10</sub> . . . . .                          | 86         |
| 4.11.2 | Hazard Index για τα PM <sub>2.5</sub> . . . . .                         | 88         |
| 4.11.3 | Hazard Index για το O <sub>3</sub> . . . . .                            | 89         |
| 4.11.4 | Hazard Index για το NO <sub>2</sub> . . . . .                           | 91         |
| 5      | <b>Συμπεράσματα</b>   | <b>93</b>  |
|        | <b>Βιβλιογραφία</b>   | <b>96</b>  |
|        | <b>Παράρτημα Α</b>  | <b>102</b> |
|        | <b>Παράρτημα Β</b>  | <b>110</b> |

## Κατάλογος Πινάκων

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.1  | Συνιστώμενα επίπεδα συγκεντρώσεων PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> (αναπροσαρμοσμένο από WHO, 2021). . . . .      | 33 |
| 4.1  | Ημερήσιες υπερβάσεις PM <sub>10</sub> σύμφωνα με τα όρια της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ. . . . .   | 36 |
| 4.2  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης PM <sub>10</sub> το 2023. . . . .  | 37 |
| 4.3  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης PM <sub>2.5</sub> το 2023. . . . .   | 43 |
| 4.4  | Υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε) για τις συγκεντρώσεις O <sub>3</sub> στον σταθμό των Χανίων το έτος 2023. . . . . | 53 |
| 4.5  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης O <sub>3</sub> το 2023. . . . .  | 54 |
| 4.6  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης CO το 2023. . . . .  | 58 |
| 4.7  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης NO το 2023. . . . .  | 61 |
| 4.8  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης NO <sub>2</sub> το 2023. . . . .   | 66 |
| 4.9  | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης NO <sub>x</sub> το 2023. . . . .   | 69 |
| 4.10 | Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης SO <sub>2</sub> το 2023. . . . .   | 74 |
| 4.11 | Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για το 2023 στα Χανιά. . . . .   | 82 |
| 4.12 | Πίνακας με επεισόδια σκόνης και συγκέντρωση PM <sub>10</sub> ανά μήνα. . . . .   | 84 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.1  | Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $PM_{10}$ για το έτος 2023. . . . .   | 35 |
| 4.2  | Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $PM_{10}$ ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .                                  | 38 |
| 4.3  | Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $PM_{10}$ ανά εποχή. . . . .   | 39 |
| 4.4  | Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{10}$ Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .                                      | 41 |
| 4.5  | Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ για το έτος 2023. . . . .  | 42 |
| 4.6  | Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .                                 | 43 |
| 4.7  | Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ ανά εποχή. . . . .  | 44 |
| 4.8  | Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .                                     | 45 |
| 4.9  | Μέση ημερήσια συγκέντρωση $PM_{2.5}$ στα $PM_{10}$ στην περιοχή των Χανίων το 2023. .   | 46 |
| 4.10 | Ποσοστό μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ στα $PM_{10}$ στην περιοχή των Χανίων το 2023. . . . .  | 46 |
| 4.11 | Γραμμική παλινδρόμηση των μηνιαίων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ και των μηνιαίων συγκεντρώσεων $PM_{10}$ στην περιοχή των Χανίων το 2023. . . . . | 47 |
| 4.12 | Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ στα $PM_{10}$ στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2023. . . . .                                     | 48 |
| 4.13 | Ποσοστιαία σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ στα $PM_{10}$ στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2023. . . . .                          | 49 |
| 4.14 | Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ και των ωριαίων συγκεντρώσεων $PM_{10}$ για το έτος 2023. . . . .           | 50 |
| 4.15 | Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $O_3$ για το 2023. . . . .  | 52 |
| 4.16 | Μέγιστη ημερήσια 8ωρη συγκέντρωση $O_3$ για το 2023. . . . .  | 53 |
| 4.17 | Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $O_3$ ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .                                      | 54 |
| 4.18 | Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $O_3$ ανά εποχή. . . . .   | 55 |
| 4.19 | Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $O_3$ Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 56 |
| 4.20 | Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $CO$ για το 2023. . . . .   | 57 |
| 4.21 | Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $CO$ ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .                                       | 58 |
| 4.22 | Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $CO$ ανά εποχή. . . . .  | 59 |
| 4.23 | Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων $CO$ Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .   | 60 |
| 4.24 | Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $NO$ για το 2023. . . . .   | 61 |
| 4.25 | Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $NO$ ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .                                       | 62 |
| 4.26 | Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $NO$ ανά εποχή. . . . .  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| 4.27 Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων NO Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .   | 64 |
| 4.28 Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις NO <sub>2</sub> για το 2023. . . . .  | 65 |
| 4.29 Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων NO <sub>2</sub> ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 66 |
| 4.30 Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις NO <sub>2</sub> ανά εποχή. . . . .   | 67 |
| 4.31 Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων NO <sub>2</sub> Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 68 |
| 4.32 Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις NO <sub>x</sub> για το 2023. . . . .  | 69 |
| 4.33 Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων NO <sub>x</sub> ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 70 |
| 4.34 Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις NO <sub>x</sub> ανά εποχή. . . . .   | 70 |
| 4.35 Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων NO <sub>x</sub> Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 72 |
| 4.36 Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις SO <sub>2</sub> για το 2023. . . . .  | 73 |
| 4.37 Θηκόγραμμα ( <i>boxplot</i> ) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων SO <sub>2</sub> ανά μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 74 |
| 4.38 Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις SO <sub>2</sub> ανά εποχή. . . . .   | 75 |
| 4.39 Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων SO <sub>2</sub> Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023. . . . .  | 76 |
| 4.40 Συσχέτιση ρύπων μεταξύ τους. Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης <i>i</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης NO <sub>2</sub> και της συγκέντρωσης NO (πάνω αριστερά), <i>ii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης CO και της συγκέντρωσης NO <sub>x</sub> (πάνω δεξιά), <i>iii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης NO <sub>x</sub> και της συγκέντρωσης O <sub>3</sub> (κάτω αριστερά), <i>iv</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης SO <sub>2</sub> και της συγκέντρωσης PM <sub>2.5</sub> (κάτω δεξιά). . . . .   | 77 |
| 4.41 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων NO <sub>2</sub> και των ωριαίων συγκεντρώσεων NO για το έτος 2023. . . . .   | 79 |
| 4.42 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και των ωριαίων συγκεντρώσεων NO <sub>x</sub> για το έτος 2023. . . . .   | 80 |
| 4.43 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων NO <sub>x</sub> και των ωριαίων συγκεντρώσεων O <sub>3</sub> για το έτος 2023. . . . .   | 81 |
| 4.44 Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων SO <sub>2</sub> και των ωριαίων συγκεντρώσεων PM <sub>2.5</sub> για το έτος 2023. . . . .  | 82 |
| 4.45 Συσχέτιση μηνιαίας συγκέντρωσης με μηνιαία θερμοκρασία. Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης <i>i</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης PM <sub>10</sub> και της θερμοκρασίας, <i>ii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης PM <sub>2.5</sub> και της θερμοκρασίας, <i>iii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης O <sub>3</sub> και της θερμοκρασίας, <i>iv</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης CO και της θερμοκρασίας, <i>v</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης NO και της θερμοκρασίας, <i>vi</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης NO <sub>2</sub> και της θερμοκρασίας, <i>vii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης NO <sub>x</sub> και της θερμοκρασίας, <i>viii</i> ) μεταξύ της συγκέντρωσης SO <sub>2</sub> και της θερμοκρασίας. . . . . | 83 |
| 4.46 Ημέρες με επεισόδια σκόνης για κάθε μήνα (αριστερά) και κάθε εποχή (δεξιά). . . .   | 85 |
| 4.47 Hazard Index των PM <sub>10</sub> για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023. . . . .  | 87 |
| 4.48 Ημερήσιο Hazard Index των PM <sub>10</sub> για το έτος 2023. . . . .  | 88 |
| 4.49 Hazard Index των PM <sub>2.5</sub> για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023. . . . .   | 89 |
| 4.50 Ημερήσιο Hazard Index των PM <sub>2.5</sub> για το έτος 2023. . . . .   | 89 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.51 | Hazard Index των $O_3$ για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023. . . . .                          | 90  |
| 4.52 | Ημερήσιο Hazard Index των $O_3$ για το έτος 2023. . . . .  | 90  |
| 4.53 | Hazard Index των $NO_2$ για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023. . . . .                         | 91  |
| 4.54 | Ημερήσιο Hazard Index των $NO_2$ για το έτος 2023. . . . .   | 92  |
| 5.1  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $PM_{10}$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                | 102 |
| 5.2  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                               | 103 |
| 5.3  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $O_3$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                    | 104 |
| 5.4  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $CO$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                     | 105 |
| 5.5  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $NO$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                     | 106 |
| 5.6  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $NO_2$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                   | 107 |
| 5.7  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $NO_X$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                   | 108 |
| 5.8  | Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις $SO_2$ ανά μήνα για το 2023. . . . .                                   | 109 |
| 5.9  | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $CO$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . .   | 110 |
| 5.10 | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $NO_2$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . . | 110 |
| 5.11 | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $NO$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . .   | 110 |
| 5.12 | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $NO_X$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . . | 111 |
| 5.13 | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $O_3$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . .  | 111 |
| 5.14 | Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης $SO_2$ με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων<br>ρύπων. . . . . | 111 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Σύγκριση μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων με ανθρώπινη τρίχα (California Air Resources Board). . . . .  | 13 |
| 1.2  | Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων ανά μέγεθος (Λαζαρίδης, 2023). . . . .   | 14 |
| 1.3  | Χημικές αντιδράσεις και διεργασίες που αφορούν τη χημική σύνθεση των σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2023). . . . .   | 15 |
| 1.4  | Είσοδος της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης και απορρόφησή της από τη στοιβάδα του όζοντος στη στρατόσφαιρα (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010). . . . .    | 17 |
| 2.1  | Γραφική παράσταση της μέσης, μέγιστης, στιγμιαίας και ολικής έκθεσης (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2008). . . . .   | 22 |
| 2.2  | Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010). . . . .  | 23 |
| 2.3  | Η πυραμίδα των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία (αναπροσαρμοσμένο από Ζέρβας και Σέμπος, 2024). . . . .  | 24 |
| 3.1  | Χάρτης Μεσογείου (πάνω), χάρτης της δυτικής Κρήτης (κάτω αριστερά) και δορυφορική φωτογραφία της τοποθεσίας του σταθμού (κάτω δεξιά). . . . .  | 25 |
| 3.2  | Δυτική πλευρά του σταθμού (αριστερά), νότια πλευρά του σταθμού (δεξιά). . . . .  | 26 |
| 3.3  | Μορφολογία οργάνου Model 5014i Beta (Thermo Fisher Scientific, 2009). . . . .  | 26 |
| 3.4  | Κεφαλή εισόδου PM <sub>10</sub> (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2009). . . . .   | 27 |
| 3.6  | Οθόνη μετρήσεων του οργάνου Model 5014i Beta (αριστερά) (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2009), Model 5014i Beta στον σταθμό των Χανίων (δεξιά). . . . .                | 27 |
| 3.7  | Διαμόρφωση του συστήματος APOA-370 (αναπροσαρμοσμένο από Ambient O <sub>3</sub> monitor APOA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APOA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά). . . . . | 28 |
| 3.8  | Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APMA-370 (αναπροσαρμοσμένο από Ambient CO monitor APMA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APMA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά). . . . .           | 29 |
| 3.9  | Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APNA-370 (Ambient NO <sub>x</sub> monitor APNA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APNA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά). . . . .                   | 30 |
| 3.10 | Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APSA-370 (Ambient SO <sub>2</sub> monitor APSA-370, Operation Manual, 2009). . . . .   | 31 |
| 4.1  | Εικόνες οπισθοπορείας ανέμου μέσω του <i>HYSPLIT</i> και δορυφορικές εικόνες για 27/10 (πάνω) και 29/11 (κάτω). . . . .  | 86 |

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές απειλές για τη δημόσια υγεία, καθώς οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) συνδέονται άμεσα με σοβαρά αναπνευστικά και καρδιαγγειακά νοσήματα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, περίπου 3,3 εκατομμύρια πρόωροι θάνατοι αποδίδονται ετησίως στην ατμοσφαιρική ρύπανση, με την Ευρώπη να καταγράφει 790.000 θανάτους λόγω της έκθεσης σε λεπτόκοκκα σωματίδια ( $PM_{2.5}$ ) (Lelieveld, κ.ά., 2015). Παράλληλα, στην Κίνα, η ατμοσφαιρική ρύπανση συνδέεται με περίπου 1 εκατομμύριο πρόωρους θανάτους ετησίως (Zu και Gao, 2024).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν επηρεάζει μόνο τη φυσική υγεία, αλλά μπορεί επίσης να συμβάλει στην εξάπλωση αερομεταφερόμενων ασθενειών, όπως ο COVID-19. Η εναπόθεση αιωρούμενων σωματιδίων στους πνεύμονες μπορεί να ενισχύσει τη φορητότητα και επιρρέπεια σε ιογενείς λοιμώξεις, γεγονός που αυξάνει τη μετάδοσή τους. Η έκθεση σε ρύπους, τόσο στον εξωτερικό όσο και στον εσωτερικό αέρα, έχει σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, όπως αυξημένες εισαγωγές σε νοσοκομεία για αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις, αύξηση των κρίσεων άσθματος και της οξείας βρογχίτιδας και τη μεταβολή της πνευμονικής λειτουργίας. Μακροχρόνια, αυτή η έκθεση συνδέεται με αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας, ενώ τα σωματίδια εισχωρούν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα, επηρεάζοντας καρδιαγγειακά και αναπνευστικά όργανα. Παράλληλα, οι πρόσφατες έρευνες δείχνουν πως η ρύπανση συνδέεται με την αύξηση περιστατικών νευρολογικών παθήσεων και σακχαρώδη διαβήτη (Atkinson, κ.ά., 2018). Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η κυκλοφοριακή ρύπανση, καθώς τα σωματίδια που προέρχονται από την καύση καυσίμων είναι εξαιρετικά τοξικά. Η εκτίμηση του κινδύνου από την ατμοσφαιρική ρύπανση είναι πιο ακριβής όταν ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η διάρκεια έκθεσης, η συγκέντρωση των σωματιδίων και οι ατομικές παράμετροι (ηλικία, φύλο, δραστηριότητες). Η κατανόηση των περιοχών στους πνεύμονες που πλήττονται από αυτά τα σωματίδια είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή εκτίμηση των κινδύνων και τη λήψη κατάλληλων μέτρων (De Marko, κ.ά., 2019; Kasdagli, κ.ά., 2022). Οι ρύποι αυτοί δεν επιβαρύνουν μόνο την υγεία των ανθρώπων, αλλά επίσης υποβαθμίζουν την ποιότητα του αέρα, μειώνοντας την ορατότητα και συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή (Khan, κ.ά., 2024; Fuzzi, κ.ά., 2015).

Η περιοχή της Μεσογείου συνεχίζει να αντιμετωπίζει ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ρύπανσης, εξαιτίας της μεταφοράς ρύπων από τρεις ηπείρους και των τοπικών εκπομπών. Επιπλέον, οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής, όπως οι περιορισμένες βροχοπτώσεις και η έντονη ηλιακή ακτινοβολία, ενισχύουν τον σχηματισμό φωτοχημικού νέφους, επιδεινώνοντας την κατάσταση (Fakhri, κ.ά., 2023; Mantas, κ.ά., 2014).

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει έντονο πρόβλημα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το οποίο οφείλεται τόσο σε φυσικές όσο και σε ανθρωπογενείς πηγές. Η σύνθετη τοπογραφία, η πολεοδομική ανάπτυξη των ελληνικών πόλεων και οι κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες και η μειωμένη βροχόπτωση, ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων. Μελέτες των τελευταίων δεκαετιών έχουν καταγράψει υψηλές συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , ιδιαίτερα στις μητροπολιτικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Από τη δεκαετία του 1990, η Ελλάδα έχει εφαρμόσει διάφορα μέτρα για τον έλεγχο της ρύπανσης, όπως η βελτίωση των προδιαγραφών των καυσίμων, η προώθηση της ενεργειακής απόδοσης και η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρά τη μείωση των εκπομπών, η οικονομική κρίση του 2009 ανέτρεψε αυτή την τάση, οδηγώντας σε αύξηση της χρήσης φθηνών καυσίμων, όπως το ξύλο και ο άνθρακας, γεγονός που επιδείνωσε περαιτέρω την ποιότητα του αέρα (Diapouli, κ.ά., 2017).

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή των Χανίων κατά το έτος 2023 και την πιθανή συσχέτιση μεταξύ τους, με έμφαση στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ( $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ ). Επιπλέον, εξετάζονται τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα που καταγράφηκαν εκείνη τη χρονιά, καθώς και η επίδρασή τους στα επίπεδα των ρύπων στην περιοχή. Τέλος, εκτιμάται η επικινδυνότητα της έκθεσης στους ατμοσφαιρικούς ρύπους, προκειμένου να αξιολογηθούν οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία του τοπικού πληθυσμού.

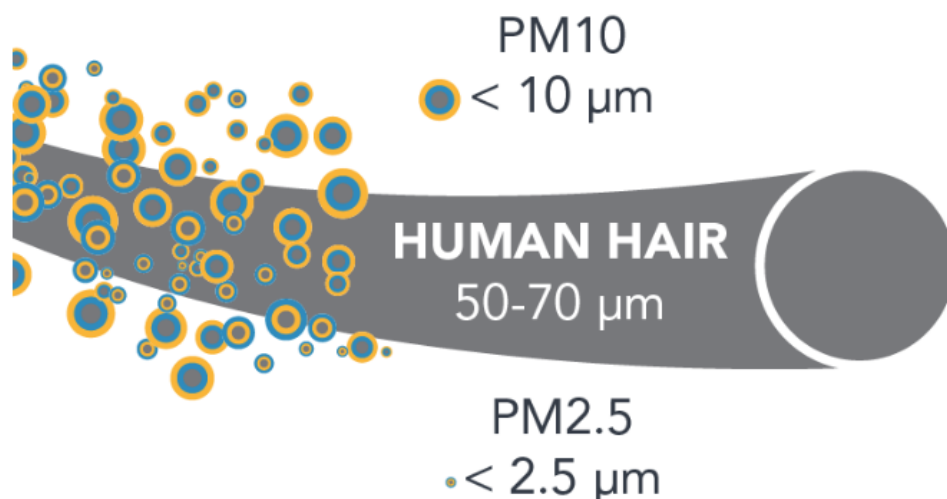
### 1.1 Αιωρούμενα Σωματίδια

#### 1.1.1 Ορισμός αιωρούμενων σωματιδίων

Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter-PM) ορίζονται όλα τα σωματίδια (στερεά ή υγρά) με διαστάσεις 0,0002-500  $nm$ , τα οποία βρίσκονται σε διασπορά στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα αιωρούμενα σωματίδια θεωρούνται η αιωρούμενη τέφρα, η σκόνη, ο καπνός. Μερικές φορές τα αιωρούμενα σωματίδια αναφέρονται και σαν αεροζόλ. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν προέλευση από φυσικές πηγές (ηφαίστεια, ανεμοθύελλες, σταγονίδια ωκεανών) ή ανθρωπογενών (καύση άνθρακα, εκπομπές οχημάτων). Τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή, σύμφωνα με τον τρόπο παραγωγής τους. Τα πρωτογενή προέρχονται απευθείας από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές, όπως η καύσεις ή η επαναιώρηση, καθώς τα δευτερογενή σχηματίζονται μέσω χημικών αντιδράσεων. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης ενεργούς επιφάνειας των σωματιδίων, μπορούν να μεταφέρουν διάφορες τοξικές ουσίες, οι οποίες προσροφούνται πάνω τους, γεγονός που τα καθιστά επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία (Λαζαρίδης, 2010; Αλμπάνης, 2009).

#### 1.1.2 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων

Τα σωματίδια παρουσιάζουν ποικιλία τόσο στη συγκέντρωση, όσο και στα φυσικά, χημικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με το μέγεθος τους, τα αιωρούμενα σωματίδια χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα λεπτόκοκκα και στα χονδρόκοκκα σωματίδια. Λεπτόκοκκα είναι τα σωματίδια με διάμετρο έως 2,5  $nm$  ( $PM_{2.5}$ ) και χονδρόκοκκα αυτά με διάμετρο έως 10  $nm$  ( $PM_{10}$ ). Αυτός ο διαχωρισμός πραγματοποιείται για τη διευκόλυνση προσέγγισης της πηγής προέλευσης (Hinds, 1999). Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η σύγκριση μεγέθους των ( $PM_{10}$ ) και ( $PM_{2.5}$ ) μεταξύ τους, αλλά και με το μέγεθος μιας ανθρώπινης τρίχας.



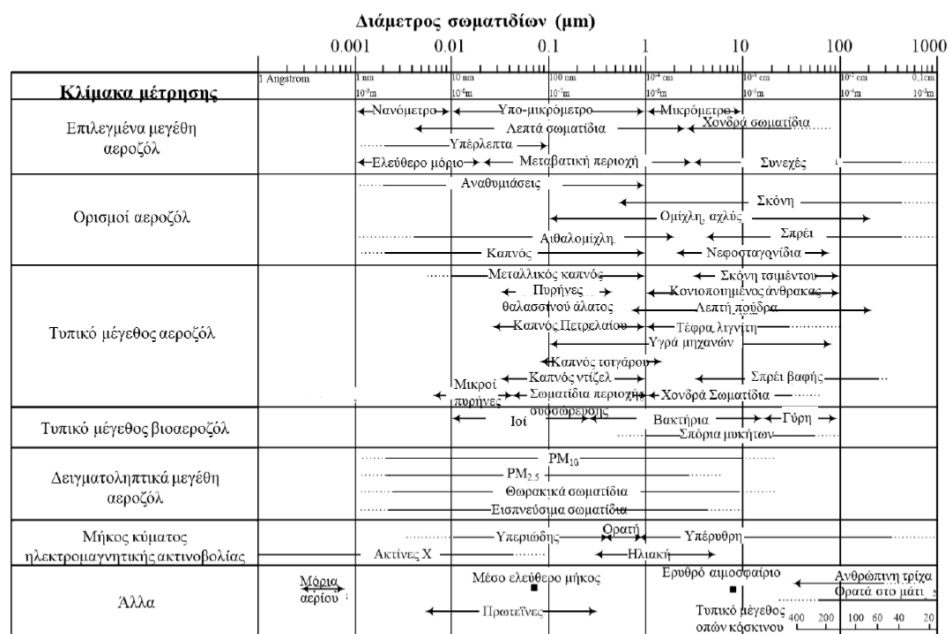
Σχήμα 1.1: Σύγκριση μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων με ανθρώπινη τρίχα (California Air Resources Board).

Το μέγεθος, αποτελώντας ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων,

καθορίζεται σύμφωνα με τη διάμετρο, η οποία συνήθως μετريέται σε  $\mu m$  ή  $mm$ . Για τα σφαιρικά σωματίδια χρησιμοποιείται η φυσική διάμετρος του σωματιδίου, ενώ για τα σωματίδια με άλλο σχήμα χαρακτηρίζονται από την ισοδύναμη διάμετρο ( $d_{ae}$ ), η οποία η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου με τον ίδιο όγκο. Η ισοδύναμη διάμετρος ή αλλιώς αεροδυναμική διάμετρος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμού παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, καθώς και της απόθεσης του στο αναπνευστικό σύστημα. Η αεροδυναμική διάμετρος μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$d_{ae} = d \sqrt{\frac{\rho \cdot C(d)}{\rho_0 \cdot C(d_{ae})}} \quad (1.1)$$

όπου  $d$  είναι η γεωμετρική διάμετρος της σφαίρας,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του σωματιδίου, ενώ  $\rho_0$  η πυκνότητα μιας σφαίρας ίση με  $1 \text{ g/cm}^3$ . Τα  $C(d)$  και  $C(d_{ae})$  αποτελούν συντελεστές διόρθωσης (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.2: Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων ανά μέγεθος (Λαζαρίδης, 2023).

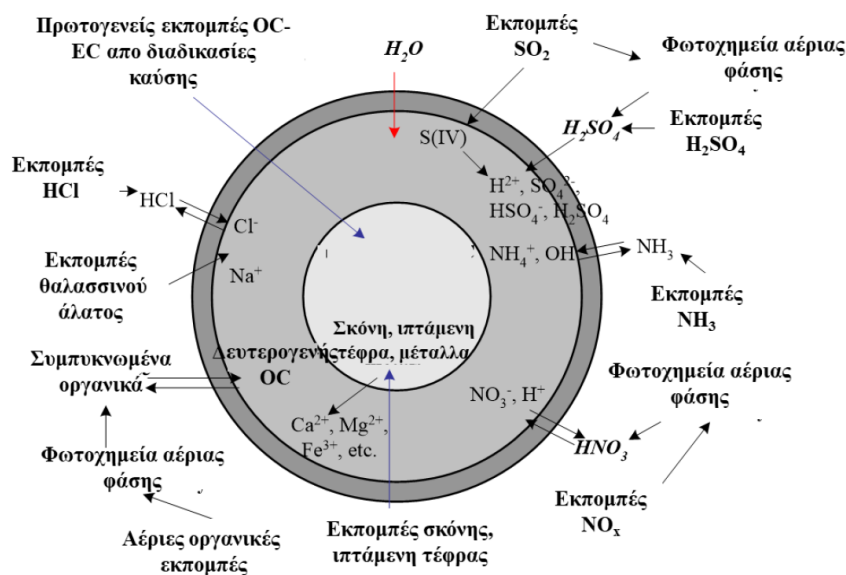
### 1.1.3 Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Συνήθως η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων μετρίεται σε  $\text{g/m}^3$ ,  $\text{mg/m}^3$  και  $\text{μg/m}^3$  και αποφεύγεται η μέτρηση τους σε μέρη στο εκατομμύριο ( $\text{ppm}$ ), όπως για αρκετούς άλλους ρύπους ( $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  κ.ά.) (Hinds, 1999). Διακρίνεται μεγάλος εύρος συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, για παράδειγμα στην καθαρή ατμόσφαιρα η συγκέντρωση είναι περίπου  $10 \text{ μg/m}^3$ , κοντά στα αστικά κέντρα περίπου  $60 \text{ μg/m}^3$  και μέσα στα αστικά κέντρα μπορεί να κυμαίνεται από  $100\text{-}200 \text{ μg/m}^3$  (Αλμπάνης, 2009).

### 1.1.4 Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν μια μίξη χημικών ενώσεων και η σύστασή τους δεν είναι ποτέ ίδια, λόγω των διαφορετικών πηγών που προέρχονται. Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να παρέχει αρκετές πληροφορίες σχετικά με την πηγή τους (Ανδρούτσου, 2004). Τα σωματίδια περιέχουν ανόργανα ιόντα, ενώσεις μετάλλων, οργανικές και ανόργανες ενώσεις από το

έδαφος. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι τα οργανικά σωματίδια περιέχουν εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες διαφορετικές ενώσεις, γεγονός που καθιστά τη μελέτη τους εξαιρετικά σύνθετη. Στην τροπόσφαιρα τα αεροζόλ περιέχουν αμμώνιο, νάτριο, χλώριο, παράγωγα του θείου, του αζώτου, μέταλλα, οργανικές ενώσεις, γήινα υλικά και νερό. Όσον αφορά τις ανθρωπογενείς εκπομπές μικροσωματιδίων, κυριαρχούν τα θειούχα σωματίδια (Λαζαρίδης, 2008). Κάποιες από τις οργανικές ενώσεις που είναι πιθανό να περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια είναι οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (ΠΟΕ), οι οποίες χαρακτηρίζονται τοξικές και καρκινογόνες. Ακόμη, τα χημικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να περιέχονται στα αιωρούμενα σωματίδια και προέρχονται κυρίως από τα οχήματα είναι το βρώμιο (*Br*), ο μόλυβδος (*Pb*), το βάριο (*Ba*), το μαγνήσιο (*Mn*), το χλώριο (*Cl*), ο ψευδάργυρος (*Zn*), το βανάδιο (*V*), το νικέλιο (*Ni*), το σελήνιο (*Se*) και το αρσενικό (*As*), καθώς επίσης και από την τριβή των μηχανικών εξαρτημάτων ο σίδηρος (*Fe*) και το αργίλιο (*Al*). Σπάνια στοιχεία όπως το ρόδιο (*Rh*), το παλλάδιο (*Pd*), το ιρίδιο (*Ir*) και το ρουθένιο (*Ru*) εκπέμπονται καταλυτικά από τα οχήματα, ενώ από βιομηχανικές διεργασίες τα συνηθέστερα χημικά στοιχεία που περιέχονται στα σωματίδια είναι το βανάδιο (*V*), το νικέλιο (*Ni*), το σελήνιο (*Se*), το αρσενικό (*As*), το χρώμιο (*Cr*), το κοβάλτιο (*Co*), ο χαλκός (*Cu*), το αργίλιο (*Al*), το θείο (*S*), ο φώσφορος (*P*), το γάλλιο (*Ga*), ο ψευδάργυρος (*Zn*) και το μαγγάνιο (*Mg*). Τέλος, αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προκύψουν και από τη επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, με κυρίαρχα στοιχεία το νάτριο (*Na*), το χλώριο (*Cl*), το θείο (*S*) και το κάλιο (*K*) (Λαζαρίδης, 2010). Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται οι διεργασίες που επηρεάζουν την χημική σύσταση των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 1.3: Χημικές αντιδράσεις και διεργασίες που αφορούν τη χημική σύνθεση των σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2023).

## 1.2 Όζον ( $\text{O}_3$ )

Το όζον ( $\text{O}_3$ ) είναι ένα άχρωμο αέριο με πολυσύνθετο ρόλο στην ατμόσφαιρα, καθώς μπορεί να είναι τόσο ευεργετικό όσο και επιβλαβές, ανάλογα με τη θέση και τη συγκέντρωσή του (Γεωργακάκη, 2009). Στη στρατόσφαιρα, το όζον αποτελεί βασικό παράγοντα προστασίας για τη ζωή στη Γη. Απορροφά την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία ( $UV - B$  και  $UV - C$ ) του ήλιου, προφυλάσσοντας τους ζωντανούς οργανισμούς από τις βλαβερές της συνέπειες. Επιπλέον, έχει κρίσιμο ρόλο στον

ενεργειακό προϋπολογισμό του πλανήτη, απορροφώντας τόσο ηλιακή  $UV$  όσο και επίγεια υπέρυθη ( $IR$ ) ακτινοβολία. Το όζον ευθύνεται επίσης για την αύξηση της θερμοκρασίας στη στρατόσφαιρα, καθιστώντας το απαραίτητο για τη θερμοδυναμική ισορροπία της ανώτερης ατμόσφαιρας (Staehelin, κ.ά., 2001).

Στην τροπόσφαιρα, το όζον είναι ένας δευτερογενής ρύπος, καθώς σχηματίζεται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ), πτητικές οργανικές ενώσεις ( $VOCs$ ) και μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ), με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024). Οι πηγές των πρόδρομων αυτών αερίων περιλαμβάνουν οχήματα, βιομηχανίες, χωματερές, χημικά διαλυτικά και γεωργικό εξοπλισμό. Η αυξημένη παρουσία του σε κοντινή απόσταση από την επιφάνεια της Γης συνδέεται με σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Αναλυτικότερα, η έκθεση στο  $O_3$  μειώνει τη λειτουργία των πνευμόνων και μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, όπως ερεθισμό, φλεγμονή των πνευμόνων, άσθμα, ξηρότητα στον λαιμό και ευπάθεια σε λοιμώξεις. Όσο για το περιβάλλον, μειώνει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και προκαλεί ζημιές στη δασική βλάστηση (Λαζαρίδης, 2023; Γεωργακάκη, 2009; Tagaris, κ.ά., 2009).

Το όζον δρα ως ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου στην τροπόσφαιρα, συνεισφέροντας στην αλλαγή του κλίματος. Ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου, κατά τη θερινή περίοδο, τα επίπεδα όζοντος αυξάνονται λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και της μεταφοράς ρύπων από την Κεντρική Ευρώπη. Οι τεχνικές παρακολούθησης του όζοντος, που αναπτύχθηκαν για την ανάλυση των μακροχρόνιων τάσεων του, έχουν προσφέρει κρίσιμα δεδομένα για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας. Από τη δεκαετία του 1950 έως τη δεκαετία του 1980, οι ανθρωπογενείς εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον, κυρίως αέρια που περιέχουν χλώριο και βρώμιο, αυξήθηκαν σημαντικά. Σήμερα, το όζον παρακολουθείται εντατικά, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές, εξαιτίας των σοβαρών περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεών του (Κοπανάκης, κ.ά. 2015; Staehelin, κ.ά., 2001).

Το όζον αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του φυσικού περιβάλλοντος, με διττό ρόλο ως προστάτης στη στρατόσφαιρα και ως ρύπος στην τροπόσφαιρα. Η κατανόηση της συμπεριφοράς και των επιπτώσεών του είναι κρίσιμη για την προστασία της δημόσιας υγείας και την αντιμετώπιση των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής.

Έχοντας υπόψιν ότι η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας περιλαμβάνει και την υπεριώδη ακτινοβολία, η οποία διαχωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, κατηγοριοποιημένες βάσει του μήκους κύματος της: την  $UV-A$ , για μήκη κύματος  $\lambda=320-400\text{ nm}$ , την  $UV-B$ , για  $\lambda=290-320\text{ nm}$  και την  $UV-C$ , για  $\lambda<290\text{ nm}$ .

Η δημιουργία του όζοντος γίνεται περίπου σε ύψος 30 χιλιομέτρων (Λαζαρίδης, 2010). Εκεί, η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία με μήκος κύματος μικρότερο από 242  $nm$   $UV-C$  διασπά τα μόρια οξυγόνου σε δύο άτομα οξυγόνου, σύμφωνα με την αντίδραση:



Το ατομικό οξυγόνο στη συνέχεια αντιδρά με το μοριακό οξυγόνο παρουσία ενός τρίτου σώματος (π.χ.  $O_2$ ,  $N_2$ ) και το όζον παράγεται με αυτόν τον τρόπο:

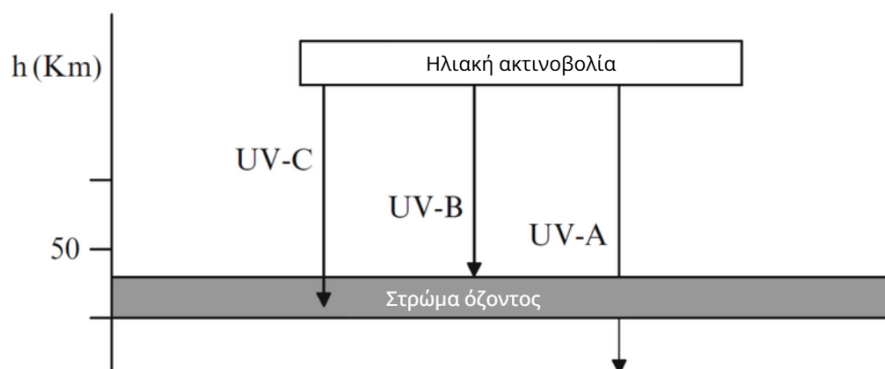


Το όζον που σχηματίζεται μπορεί να απορροφήσει ακτινοβολία  $UV-B$  και  $UV-C$ , οδηγώντας στη

διάσπασή του σε μοριακό και ατομικό οξυγόνο:



Παράλληλα, το όζον μπορεί να αντιδράσει με ατομικό οξυγόνο, παράγοντας δύο μόρια μοριακού οξυγόνου:



Σχήμα 1.4: Είσοδος της ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα της Γης και απορρόφησή της από τη στοιβάδα του όζοντος στη στρατόσφαιρα (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

### 1.3 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Τα κύρια αέρια συστατικά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του αζώτου και το διοξείδιο του θείου. Το μονοξείδιο του άνθρακα CO είναι ένα από τα κυριότερα αέρια συστατικά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μαζί με το  $O_3$ , το  $NO_2$  και το  $SO_2$  (Mustafic, κ.ά., 2012). Είναι ένα άοσμο και άχρωμο αέριο, το οποίο αποτελεί σημαντικό συστατικό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης τόσο στους εσωτερικούς όσο και στους εξωτερικούς χώρους (Καραβά, 2007). Παράγεται κυρίως από την καύση άνθρακα σε υψηλές θερμοκρασίες, σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση, καθώς και από τη διάσπαση του  $CO_2$  σε CO και O υπό τις ίδιες συνθήκες (Αλμπάνης, 2009).



Οι ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής του CO περιλαμβάνουν τις εξατμίσεις των βενζινοκίνητων οχημάτων, τις μηχανές, τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, τα συστήματα θέρμανσης και διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες. Φυσικές πηγές είναι τα ηφαίστεια, τα φυσικά αέρια, οι δασικές πυρκαγιές, οι βακτηριακές δράσεις και η ατελής οξείδωση υδρογονανθράκων, όπως το μεθάνιο ( $CH_4$ ) στην ατμόσφαιρα (Καραβά, 2007; Αλμπάνης, 2009). Υψηλές συγκεντρώσεις CO εντοπίζονται συχνά σε κλειστούς χώρους, όπως γκαράζ, ελλιπώς αεριζόμενες υπόγειες διαβάσεις, ή σε περιοχές με κυκλοφοριακή αιχμή. Ακόμα και ο καπνός του τσιγάρου περιέχει σημαντικές ποσότητες CO (Λαζαρίδης, 2010).

Το συνηθέστερο εύρος συγκέντρωσης του CO είναι από  $0,06 \text{ mg/m}^3$  μέχρι  $0,14 \text{ mg/m}^3$ . Στις πόλεις της Ευρώπης, με αρκετή κυκλοφορία η οκτάωρη μέση συγκέντρωση είναι μικρότερη από 20



$mg/m^3$  και μερικές φορές η τιμή αυτή αγγίζει και τα  $60\ mg/m^3$ . Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι η συγκέντρωση CO εντός των οχημάτων είναι υψηλότερη από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα (Λαζαρίδης, 2010). Ο μέσος χρόνος παραμονής του στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 36 ημέρες. Απομακρύνεται μέσω φυσικοχημικών διεργασιών, όπως η οξειδωσή του σε CO<sub>2</sub> και στη συνέχεια δεσμεύεται από μικροοργανισμούς του εδάφους (Καραβά, 2007).

Το CO επηρεάζει αρνητικά την ικανότητα του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο στους ιστούς, πλήττοντας το καρδιαγγειακό και το νευρικό σύστημα. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να επιδεινώσει καρδιακά προβλήματα και να μειώσει τις επιδόσεις νεαρών, υγιών ατόμων. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις προκαλεί ζάλη, πονοκεφάλους, εξασθένιση της όρασης, κόπωση, ναυτία ακόμα και θάνατο (Λαζαρίδης, 2008; Levy, 2015).

#### 1.4 Μονοξείδιο το αζώτου (NO)

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι ένα σχετικά αδρανές αέριο που παράγεται από την καύση υπό υψηλή θερμοκρασία, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων. Προκύπτει από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου και από την απονιτροποίηση των βακτηρίων του εδάφους. Επιπλέον, το NO οξειδώνεται περαιτέρω σε NO<sub>2</sub> γρήγορα στον αέρα, καθώς διευκολύνεται από οξειδωτικά όπως το όζον (Alberts, 1994; Λαζαρίδης, 2010). Η οξείδωση του NO από το O<sub>3</sub> είναι ο κύριος μηχανισμός μετατροπής του NO σε NO<sub>2</sub> και πραγματοποιείται με την παρακάτω αντίδραση (Clapp και Jenkin, 2001):



#### 1.5 Διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>)

Το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) είναι το σημαντικότερο οξείδιο του αζώτου, με σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην ποιότητα του αέρα όσο και στην υγεία. Σε υψηλές συγκεντρώσεις, εμφανίζεται ως πορτοκαλοκαφέ αέριο, ενώ σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις είναι κίτρινο ή αόρατο και έχει οσμή παρόμοια με τη χλωρίνη, αλλά πιο γλυκιά και λιγότερο πικάντικη. Η εισπνοή του μπορεί να προκαλέσει μια πικρή, επιθετική αίσθηση, ενώ η χαμηλή διαλυτότητά του στο νερό του επιτρέπει να προκαλεί μακροχρόνιες βλάβες χωρίς άμεσα συμπτώματα (Alberts, 1994).

Υπάρχουν λίγες πηγές πρωτογενούς NO<sub>2</sub> με το μεγαλύτερο μέρος του στον αστικό αέρα να σχηματίζεται από την οξείδωση του NO στην ατμόσφαιρα. Στις περισσότερες αστικές περιοχές η κυκλοφορία των αυτοκινήτων είναι η κυρίαρχη πηγή εκπομπών NO. Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, αυξημένες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub>, μπορεί να προκύψουν, λόγω της ατμοσφαιρικής φωτοχημείας που παράγει υπεροξειδικές ρίζες, οι οποίες επιταχύνουν τη μετατροπή του NO σε NO<sub>2</sub> (Harrison, 1996). Στους εσωτερικούς χώρους, οι κυριότερες πηγές NO<sub>2</sub> είναι οι σύμπες αερίου, οι ξυλόσομπες, τα τζάκια, καθώς και η εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση που διεισδύει στους εσωτερικούς χώρους. Η ρύπανση εξαρτάται από το καύσιμο, το είδος της συσκευής, τη χρήση για θέρμανση και την εγγύτητα των ατόμων κατά τη λειτουργία της συσκευής (Alberts, 1994; Λαζαρίδης, 2008).

Το NO<sub>2</sub> αποτελεί νομοθετικά κατοχυρωμένο ρύπο στην ΕΕ, με οριακές τιμές που έχουν θεσπιστεί τόσο σε ετήσια όσο και σε ωριαία βάση. Η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις ή η βραχυχρόνια έκθεση σε υψηλότερα επίπεδα μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία (Chaney, κ.ά., 2011). Οι ετήσιες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> στη φύση κυμαίνονται από 0,4 έως 9,4  $\mu g/m^3$ , ενώ σε αστικές περιοχές κυμαίνονται από 20 έως 90  $\mu g/m^3$ , με μέγιστες ωριαίες τιμές 75-1.015  $\mu g/m^3$ .

Ακόμη, σε εσωτερικούς χώρους, τα επίπεδα μπορεί να φτάσουν έως  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  λόγω ανεπαρκούς εξαερισμού σε συνδυασμό με τη χρήση συσκευών καύσης φυσικού αερίου. Σε ακραίες περιπτώσεις, η μέγιστη ωριαία τιμή μπορεί να αγγίζει τα  $2.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Λαζαρίδης, 2010).

## 1.6 Οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ )

Τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) αποτελούν από τα σημαντικότερα μόρια στην ατμοσφαιρική χημεία, συμμετέχοντας σε φωτοχημικούς κύκλους που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Τα  $\text{NO}_x$  περιλαμβάνουν κυρίως το μονοξείδιο ( $\text{NO}$ ) και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, προέρχονται από καύσεις που λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα αποδίδεται τόσο σε φυσικές όσο και σε ανθρωπογενείς πηγές, με τις τελευταίες να παίζουν κυρίαρχο ρόλο στις αστικές περιοχές (Λαζαρίδης, 2010; Αλμπάνης, 2009).

Ανθρωπογενείς πηγές, όπως οι μεταφορές, συμβάλλουν κατά 45% στις εκπομπές  $\text{NO}_x$ , ενώ εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ευθύνονται για το 30-35% και η βιομηχανία για το 20%. Από φυσικές πηγές, το 16% των εκπομπών προέρχεται από το έδαφος μέσω διεργασιών νιτροποίησης. Σε ορισμένες περιοχές, οι συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  από φυσικές πηγές πλησιάζουν ποσοτικά αυτές των ανθρωπογενών (Λαζαρίδης, 2010). Η αυξημένη χρήση κινητήρων ντίζελ στις μεταφορές ενισχύει σημαντικά τις εκπομπές  $\text{NO}_x$ , καθώς και σωματιδίων (PM), με σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και την ανθρώπινη υγεία. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, για την πλειονότητα των εκπομπών  $\text{NO}_x$  ευθύνονται τα βαρύτερα οχήματα, όπως τα λεωφορεία και τα τούλμαν (Markakis, κ.ά. 2009; Wenlong, κ.ά. 2024).

## 1.7 Διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ )

Το  $\text{SO}_2$  είναι ένας επικίνδυνος ατμοσφαιρικός ρύπος που μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στην αναπνευστική οδό, τα μάτια και το δέρμα. Το αέριο αυτό ταξινομείται στην κατηγορία μη καρκινογόνου κινδύνου, παρά το γεγονός ότι μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα υγείας, καθώς και υφιστάμενων πνευμονικών παθήσεων όπως το άσθμα και η βρογχίτιδα (Susetyo, κ.ά., 2024). Το  $\text{SO}_2$  έχει τόσο φυσικές, όσο και ανθρωπογενείς πηγές. Προέρχεται κυρίως από φυσικές πηγές, αλλά παρατηρείται αύξηση της συγκεντρώσεως του λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Το  $\text{SO}_2$  είναι το τρίτο πιο άφθονο αέριο που προέρχεται από ηφαίστεια, μετά τους υδρατμούς και το  $\text{CO}_2$ . Ορισμένα ηφαίστεια απελευθερώνουν συνεχώς μεγάλες ποσότητες αερίων που περιέχουν  $\text{SO}_2$ , καθώς βρίσκονται σε ήρεμη κατάσταση. Η επαναιώρηση μπορεί να διαρκέσει πολλά χρόνια, διοχετεύοντας τεράστιες ποσότητες αερίου στην ατμόσφαιρα (Bernath και Bhusal, 2025). Η οξείδωση του  $\text{SO}_2$  προκαλεί τον σχηματισμό θειικού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), το οποίο εναποτίθεται κυρίως ως όξινη βροχή και είναι υπεύθυνο για την μόλυνση του εδάφους και την διάβρωση των μαρμάρινων μνημείων. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές  $\text{SO}_2$  εκτιμάται ότι είναι μεγαλύτερες από τις φυσικές πηγές. Η διαφορά μεταξύ των ανθρωπογενών και φυσικών εκπομπών θείου ποικίλει, καθώς οι πηγές από ηφαιστειακές εκρήξεις είναι περιστασιακές (Georgoulas, κ.ά., 2009). Σύμφωνα με μελέτες έχει εκτιμηθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό  $\text{SO}_2$  (>90%) που εκπέμπεται από τις θειούχες ενώσεις προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές. Κύριες πηγές του  $\text{SO}_2$  είναι η καύση άνθρακα, πετρελαίου και ορυκτών του θείου. Επίσης, έχει υπολογιστεί ότι περισσότερο από το 90% του  $\text{SO}_2$  οφείλεται σε εκπομπές από πηγές που βρίσκονται στο Βόρειο ημισφαίριο.

Η απλή αντίδραση σχηματισμού του  $\text{SO}_2$  είναι:



Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των  $H_2S$  και  $SO_2$  αποτελούν δείκτη βαθμού ρύπανσης σε μια περιοχή. Οι μέσες τιμές συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα για το  $H_2S$  είναι  $0,2 \text{ ppm}$ , δηλαδή  $278,6 \mu g/m^3$  και για το  $SO_2$  είναι  $0,3 \text{ ppb}$ , δηλαδή  $0,786 \mu g/m^3$ . Επίσης, ο μέσος χρόνος παραμονής του  $SO_2$  είναι 4 ημέρες (Αλμπάνης, 2009).

## Κεφάλαιο 2: Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία

### 2.1 Έκθεση και δόση

Η εισαγωγή των ατμοσφαιρικών ρύπων στο ανθρώπινο σώμα γίνεται κυρίως μέσω της αναπνοής, με την επαφή του δέρματος ή με κατάποση και βρώση τροφίμων και ποτών, τα οποία περιέχουν χημικές ουσίες. Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία εξαρτώνται από την περιοχή της εναπόθεσης στο αναπνευστικό σύστημα, στη συγκέντρωση, στο μέγεθος και στην χημική σύσταση των ρύπων. Η απόκριση των οργανισμών εξαρτάται από την δόση του ρύπου και όχι την έκθεση. Συγκεκριμένα, ως δόση ορίζεται η ποσότητα εναπόθεσης του ρύπου σε διάφορα μέρη του αναπνευστικού συστήματος, αλλά και σε άλλες περιοχές του σώματος για ορισμένη χρονική περίοδο. Η δόση μιας τοξικής ένωσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως ο χρόνος εναπόθεσης και ο καθαρισμός της από την συγκεκριμένη περιοχή του σώματος. Η είσοδος της χημικής ένωσης στο σώμα γίνεται με δύο τρόπους: την πρόσληψη και την ανάληψη.

Πρόσληψη (intake) είναι η εισαγωγή μιας χημικής ουσίας στο ανθρώπινο σώμα, που πραγματοποιείται μέσω ενός σχετικού φορέα, όπως ο αέρας, η τροφή ή το νερό. Η πρόσληψη γίνεται από τα εξωτερικά σημεία επαφής του σώματος, όπως η μύτη και το στόμα.

Η ανάληψη (uptake), αντιθέτως, ορίζεται η εισαγωγή μιας χημικής ουσίας στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της απορρόφησης από το δέρμα, είτε από άλλους εκτεθειμένους ιστούς, όπως τα μάτια. Επίσης, η ανάληψη πραγματοποιείται στο εσωτερικό των πνευμόνων, του γαστρεντερικού συστήματος και σε άλλα όρια επαφής μετά την πρόσληψη.

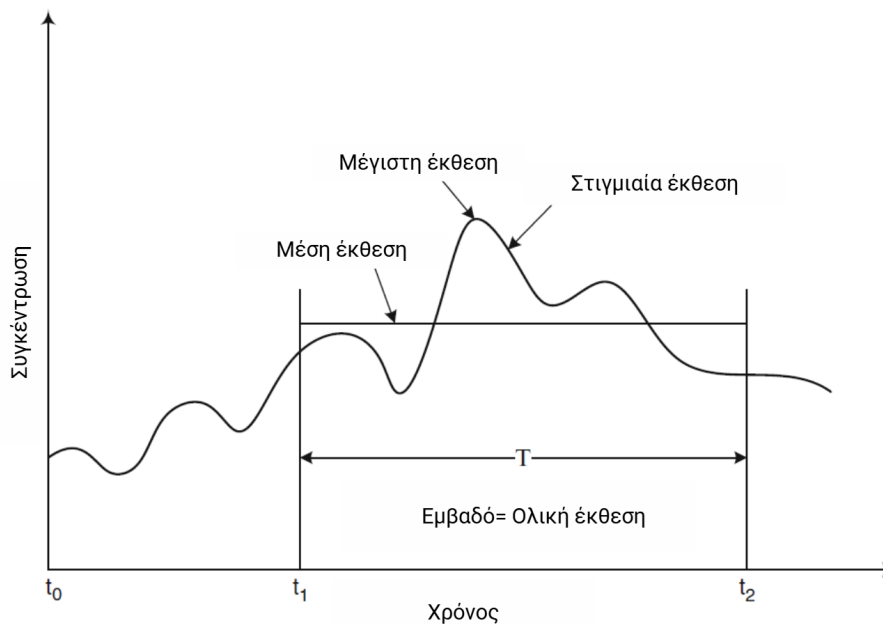
Ως έκθεση ορίζεται η συγκέντρωση του ρύπου που έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο για ορισμένη χρονική περίοδο. Η επαφή πραγματοποιείται με την περιοχή του σώματος που βρίσκεται κοντά στις αναπνευστικές οδούς. Με λίγα λόγια, η έκθεση είναι η συγκέντρωση της τοξικής χημικής ένωσης στο περιβάλλον για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, ενώ η δόση η ποσότητα που απορροφάται ή λαμβάνεται από τον οργανισμό στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η ολική έκθεση (μεταξύ χρόνων  $t_0$  και  $t_1$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{e}_i(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} c_i(t) dt \quad (2.1)$$

όπου  $c_i(t)$  η συγκέντρωση που έρχεται σε επαφή με το άτομο  $i$  στον χρόνο  $t$ . Όμως, συνηθίζεται να εκφράζεται η έκθεση για πρακτικότερους λόγους ως εξής:

$$\Delta \bar{e}_i = \Delta t \times c_i(\Delta t) \quad (2.2)$$

όπου το  $\Delta$  εκφράζει το πεπερασμένο διάστημα που υπολογίζεται η έκθεση και ο χρόνος. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της συγκέντρωσης του ρύπου σε σχέση με τον χρόνο, όσον αφορά τη μέση, μέγιστη και στιγμιαία έκθεση (Λαζαρίδης, 2008).



Σχήμα 2.1: Γραφική παράσταση της μέσης, μέγιστης, στιγμιαίας και ολικής έκθεσης (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2008).

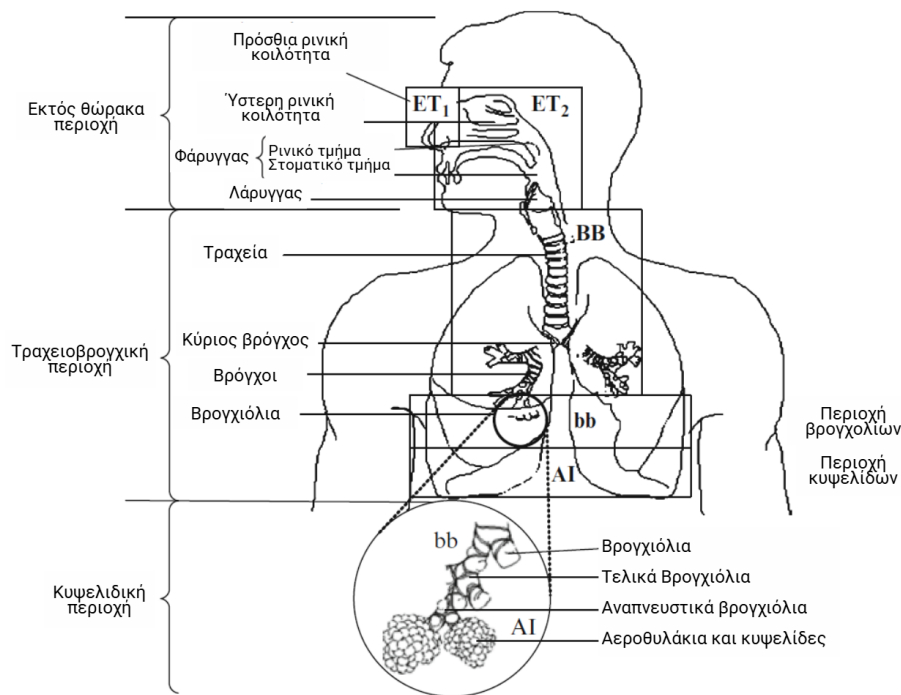
## 2.2 Έκθεση με εισπνοή

Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, την εκτός θώρακα, την τραχειοβρογχική και την κυψελιδική περιοχή, όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 2.2.

Αναλυτικότερα, η εκτός θώρακα περιοχή, ή αλλιώς ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (Extrathoracic, ET ή Head Airways, HA) αποτελείται από την πρόσθια ρινική κοιλότητα ( $ET_1$ ), την ύστερη ρινική κοιλότητα, τον φάρυγγα, τον λάρυγγα και το στόμα ( $ET_2$ ). Η βασικότερη του λειτουργία είναι ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα, η ρύθμιση της υγρασίας και της θερμοκρασίας του και η μεταφορά του στην τραχεία και τους πνεύμονες. Ο αέρας εισέρχεται οριζόντια από τον προθάλαμο στην ρινική κοιλότητα και έπειτα εξέρχεται κάθετα από την ύστερη ρινική κοιλότητα και ρέει κάθετα στο φάρυγγα, το λάρυγγα και την τραχεία. Στον λάρυγγα, επίσης, βρίσκονται και οι φωνητικές χορδές, επιτρέποντας τη δίοδο του αέρα στην τραχεία μέσα από μια μικρή σχισμή. Επομένως, λόγω της αυξημένης ταχύτητας του αέρα, ένα μεγάλο ποσοστό σωματιδίων εναποτίθεται σε εκείνη την περιοχή. Η τραχειοβρογχική περιοχή ξεκινάει από την τραχεία και καταλήγει στα βρογχιόλια και χωρίζεται στη βρογχική περιοχή ( $BB$ ) και την περιοχή των βρογχιολίων ( $bb$ ). Στόχος αυτής της περιοχής είναι η μεταφορά και ο κλιματισμός του αέρα καθώς και ο καθαρισμός του με εναπόθεση σωματιδίων λόγω πρόσκρουσης, καθίζησης και διάχυσης. Επιπλέον, στην τραχειοβρογχική περιοχή ξεκινά το δέντρο των αεραγωγών που αποτελούν το αναπνευστικό μας σύστημα. Κάθε αεραγωγός διχοτομείται σε δύο διακλαδώσεις, τα λεγόμενα παρακλάδια. Στην περιοχή των βρογχιολίων ο αέρας καθαρίζεται από σωματίδια μεγέθους 2-5 mm μέσω της πρόσκρουσης τους στα τοιχώματα (διακλαδώσεις), με καθίζηση και διασπορά.

Τέλος, η κυψελιδική περιοχή (Alveolar, AI) αποτελείται από αναπνευστικά βρογχιόλια, τα αεροθυλάκια, τους κυψελιδικούς αεραγωγούς, τις πνευμονικές κυψελίδες και τον συνδετικό ιστό. Ο κυριότερος στόχος της περιοχής αυτής είναι η αναπνοή, καθώς επίσης και λειτουργίες που σχετίζονται με τους ενδοκρινείς αδένες και την άμυνα του οργανισμού. Μόνο τα σωματίδια με το μικρότερο μέγεθος φτάνουν σε αυτή την περιοχή και αποτίθενται λόγω καθίζησης και διασποράς, ενώ τα α-

έρια διαλύονται στη βλέννα της περιοχής. Τα τελικά βρογχιόλια διακλαδίζονται στα αναπνευστικά βρογχιόλια, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη των κυψελίδων, των οποίων το ποσοστό αυξάνεται στις περιφέρειες των πνευμόνων. Οι πνεύμονες ενός ενήλικου ανθρώπου περιλαμβάνουν περίπου 300 εκατομμύρια κυψελίδες. Το πλήθος αυτό μεταβάλλεται μεταξύ των ανθρώπων, όπως επίσης μεταβάλλεται και η ολική επιφάνεια των κυψελίδων, οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των 70 και 80  $m^2$  (Λαζαρίδης, 2015).



Σχήμα 2.2: Ανατομία του αναπνευστικού συστήματος (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

## 2.3 Επιπτώσεις στην υγεία

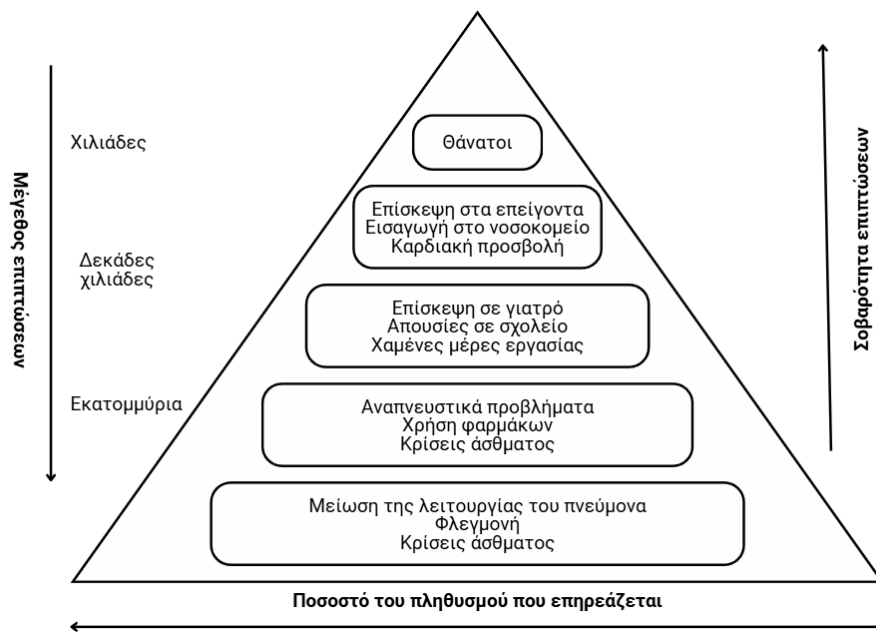
Η έκθεση σε αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων του αέρα συνδέεται με την εμφάνιση ασθενειών, οι οποίες ποικίλουν σε σοβαρότητα. Οι συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις βραχυπρόθεσμες, που έχουν προσωρινό χαρακτήρα και τις μακροπρόθεσμες, οι οποίες επηρεάζουν την υγεία σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου. Τα διαθέσιμα στοιχεία για τις επιπτώσεις προκύπτουν μέσα από τρεις βασικούς τύπους έρευνας: μελέτες που εστιάζουν σε ανθρώπους (κλινικές και επιδημιολογικές) και τοξικολογικές μελέτες που εξετάζουν ζώα ή απλουστευμένα κυτταρικά συστήματα. Ορισμένες κατηγορίες ατόμων, όπως οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά και όσοι αντιμετωπίζουν προβλήματα υγείας, όπως άσθμα ή διαβήτη, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες και χρήζουν προστασίας από την έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Τα προβλήματα από τη βραχυπρόθεσμη έκθεση περιλαμβάνουν ενοχλήσεις όπως ερεθισμός στα μάτια και το δέρμα, δυσκολίες στην αναπνοή, ή ακόμη και σοβαρές παθήσεις όπως βρογχίτιδα ή πνευμονία. Επίσης, μπορεί να εμφανιστούν συμπτώματα όπως πονοκέφαλοι και ζαλάδα. Ωστόσο, η χρόνια έκθεση έχει πιο σοβαρές επιπτώσεις, οι οποίες εκτείνονται σε συστήματα όπως το αναπνευστικό, το κυκλοφορικό και το νευρολογικό, ενώ μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη καρκίνου ή θανάτου (Ζέρβας και Σέμπος, 2024; Μουσιόπουλος, κ.ά., 2015).

Οι ρύποι καθώς εισέρχονται στον οργανισμό μέσω του αναπνευστικού συσσωρεύονται στα κύτταρα, προκαλώντας βλάβες που εξαρτώνται από την ποιότητα και την ποσότητα έκθεσης. Οι συνθήκες,

όπως η γεωγραφική τοποθεσία, η εποχή, η χημική σύνθεση των σωματιδίων και η διάρκεια έκθεσης, παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο στις επιπτώσεις. Έτσι, η μακροχρόνια έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα υγείας, ανάλογα με αυτούς τους παράγοντες (Hinds, 1999; Ζέρβας και Σέμπος, 2024; Λαζαρίδης, 2008).

Στην πυραμίδα του Σχήματος 2.3 περιγράφεται η συσχέτιση της σοβαρότητας των επιπτώσεων στην υγεία με τον αριθμό των περιπτώσεων, λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα λεπτά σωματίδια και το όζον. Στο κάτω μέρος της πυραμίδας αναγράφονται οι επιπτώσεις της υγείας, όπως οι φλεγμονές και οι κρίσεις άσθματος, οι οποίες είναι λιγότερο σοβαρές και επηρεάζουν ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού. Οι επιπτώσεις που φαίνονται στο ανώτερο μέρος της πυραμίδας, όπως ο θάνατος, οι εισαγωγές στα νοσοκομεία, είναι οι πιο σοβαρές και επηρεάζουν μικρότερο ποσοστό ανθρώπων (Ζέρβας και Σέμπος, 2024).



Σχήμα 2.3: Η πυραμίδα των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία (αναπροσαρμοσμένο από Ζέρβας και Σέμπος, 2024).

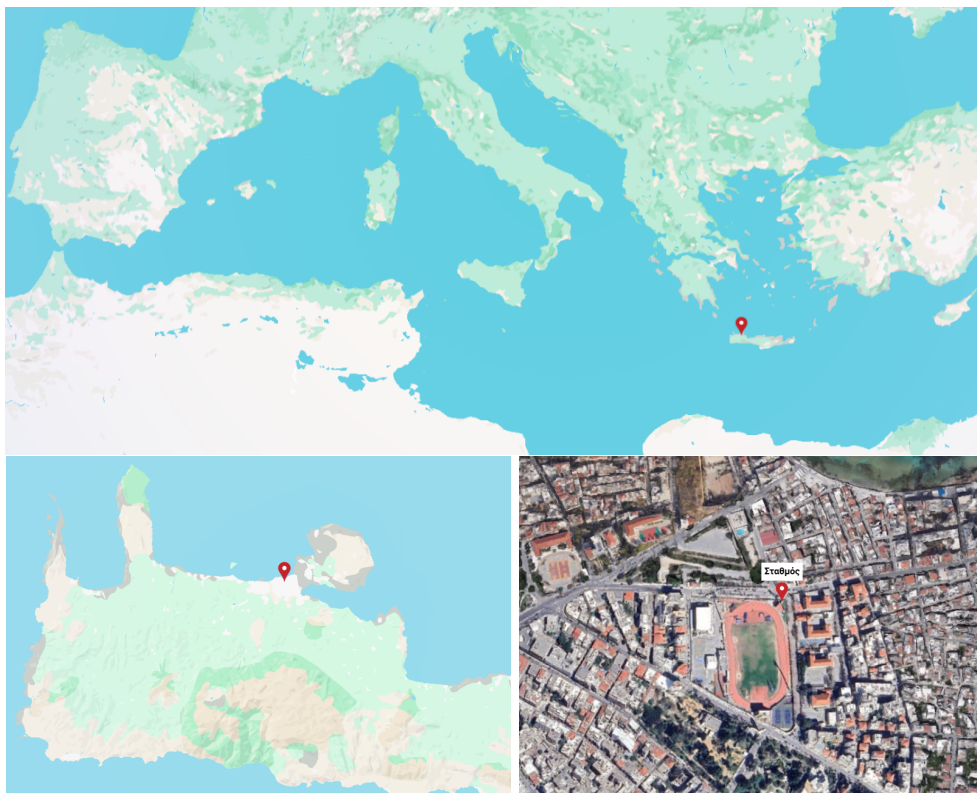
### Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή δειγματοληψίας

#### 3.1 Περιοχή μελέτης

Η μελέτη αυτή διεξήχθη στον μετεωρολογικό σταθμό των Χανίων, ο οποίος βρίσκεται στο κέντρο των Χανίων, εντός του Εθνικού Σταδίου Χανίων. Τα Χανιά βρίσκονται στο βορειοδυτικό τμήμα της Κρήτης, η οποία αποτελεί το νοτιότερο νησί της Ελλάδας. Η πόλη, σύμφωνα με την απογραφή του 2021, έχει πληθυσμό 55.000 κατοίκους και η κύρια αστική περιοχή των Χανίων εκτείνεται σε μια έκταση  $13 \text{ km}^2$ . Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας του μετεωρολογικού σταθμού, σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87) είναι 35.51N και 24.02E και βρίσκεται σε υψόμετρο 15 m από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει απόσταση από την θάλασσα 220 m. Επίσης, τοποθετείται δίπλα από δρόμο, ο οποίος οδηγεί στο κέντρο της πόλης, το οποίο απέχει 750 m από το Στάδιο.

Το Εθνικό Στάδιο Χανίων λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τους πολίτες, καθώς περιβάλλεται από ένα πυκνό δίκτυο κατοικιών, σχολικών μονάδων και καταστημάτων, γεγονός που καθιστά την περιοχή ένα ζωντανό και πολυλειτουργικό τμήμα της πόλης. Λόγω της τοποθεσίας του παρατηρείται συχνά κυκλοφοριακή συμφόρηση, ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής, όπως το πρωί και το μεσημέρι.

Ο σταθμός ανήκει στο Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και μεταφέρει δεδομένα στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (<https://airquality.crete.gov.gr/>). Ο σταθμός άρχισε να λειτουργεί το 2022 και λαμβάνει μετρήσεις συγκεντρώσεων για τα  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  και  $\text{SO}_2$ .



Σχήμα 3.1: Χάρτης Μεσογείου (πάνω), χάρτης της δυτικής Κρήτης (κάτω αριστερά) και δορυφορική φωτογραφία της τοποθεσίας του σταθμού (κάτω δεξιά).



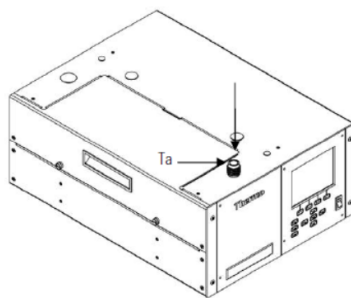
Στο παρακάτω Σχήμα διακρίνεται ο σταθμός Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης των Χανίων από την δυτική και τη νότια πλευρά.



Σχήμα 3.2: Δυτική πλευρά του σταθμού (αριστερά), νότια πλευρά του σταθμού (δεξιά).

### 3.2 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, Model 5014i Beta

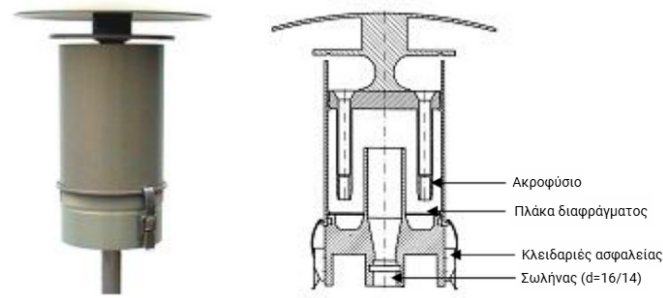
Το όργανο Model 5014i Beta (Thermo) είναι ένα εξειδικευμένο σύστημα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  στον αέρα. Η βασική αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέθοδο του βαρυμετρικού προσδιορισμού με χρήση του ακτινοβολίας β. Η συσκευή χρησιμοποιεί μια ειδική μεμβράνη ή φίλτρο όπου συλλέγονται τα αιωρούμενα σωματίδια, ενώ στη συνέχεια εκπέμπεται ακτινοβολία β από μία πηγή, συνήθως ένα ισχυρό ραδιενεργό στοιχείο, όπως το καίσιο-137 ( $Cs - 137$ ). Η ογκομετρική παροχή στην εισόδου είναι  $16,67 L/min$  ( $1 m^3/h$ ) και το όργανο λειτουργεί σε θερμοκρασίες από  $4$  έως  $50 ^\circ C$ . Επιπλέον, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία μετριοούνται μέσω μιας φυσικής αναρροφητικής ασπίδας ακτινοβολίας και ενός τυπικού αισθητήρα ως μέρος του συστήματος ελέγχου της ογκομετρικής ροής και της δυναμικής θέρμανσης. Η μορφολογία του οργάνου φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Μορφολογία οργάνου Model 5014i Beta (Thermo Fisher Scientific, 2009).

Το μοντέλο Model 5014i Beta μετράει συνεχώς τη συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων και εξευγενισμένων σωματιδίων με τη χρήση της εξασθένησης της ακτινοβολίας β. Επιπλέον, η επιρροή του φυσικού αερίου ραδονίου ( $Rn - 222$ ) διορθώνεται ως βήμα εξευγενισμού της μάζας, επιτρέποντας καλύτερη ευαισθησία σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σωματιδίων του περιβάλλοντος. Αρχικά, το δείγμα αέρα εισέρχεται από την κεφαλή εισόδου, τύπου κυκλώνα, με παροχή  $16,67 L/min$  σε επι-

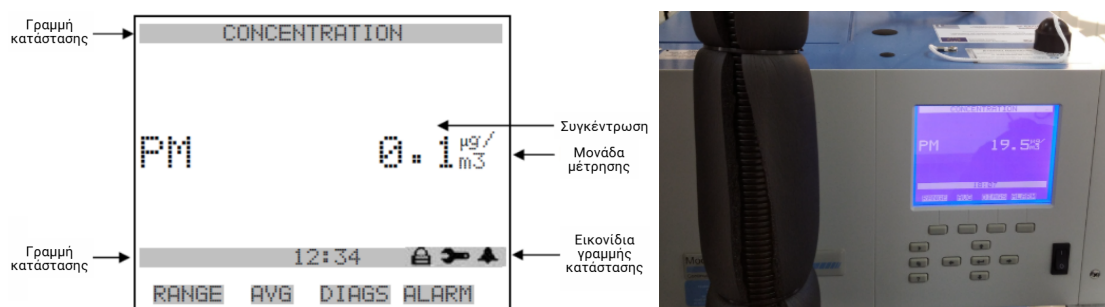
λεγμένο μέγεθος εισόδου  $10\ \mu m$ , η οποία επιτρέπει μόνο στα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μέχρι και  $10\ \mu m$  να εισέλθουν. Η είσοδος του οργάνου φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Κεφαλή εισόδου  $PM_{10}$  (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2009).

Η διαδικασία μέτρησης για τα  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  περιλαμβάνει τη χρήση φίλτρων διαμέτρου συγκεκριμένων μεγεθών για την απομόνωση και συλλογή των σωματιδίων αυτών. Το όργανο διασφαλίζει ότι μόνο τα κατάλληλα μεγέθη σωματιδίων εισέρχονται στο φίλτρο μέσω του συστήματος εισαγωγής αέρα. Στη συνέχεια, μια ραδιενεργή πηγή ακτινοβολίας  $\beta$  εκπέμπει σωματίδια  $\beta$  σε μια ινώδη ταινία φίλτρου για τη συνεχή ανίχνευση της μάζας των εναποτιθέμενων σωματιδίων του περιβάλλοντος και ένας ανιχνευτής στην άλλη πλευρά καταγράφει την ποσότητα της ακτινοβολίας που το διαπερνά. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης, το σωματίδιο που συλλέγεται στο φίλτρο μειώνει την ένταση της ακτινοβολίας  $\beta$  που φτάνει στον ανιχνευτή, η οποία μείωση της ακτινοβολίας  $\beta$  είναι ανάλογη με την ποσότητα των σωματιδίων που συλλέγονται στο φίλτρο. Η συγκεκριμένη διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 3.5, όπου διακρίνονται τα τέσσερα βασικά στοιχεία του θαλάμου, τα οποία είναι: 1) ο αναλογικός ανιχνευτής, 2) η συλλογή σωματιδίων σε ταινία φίλτρου από ίνες γυαλιού, 3) μια κάθετα κινούμενη βαλβίδα κενού και 4) η πηγή της ακτινοβολίας  $\beta < 100\ mCi (< 3,7\ Mbq)$  (Thermo Fischer Scientific, 2009).

Η συσκευή υπολογίζει τις συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων που αναλύονται, και εξάγει τα αποτελέσματα σε  $\mu g/m^3$ , όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.6.



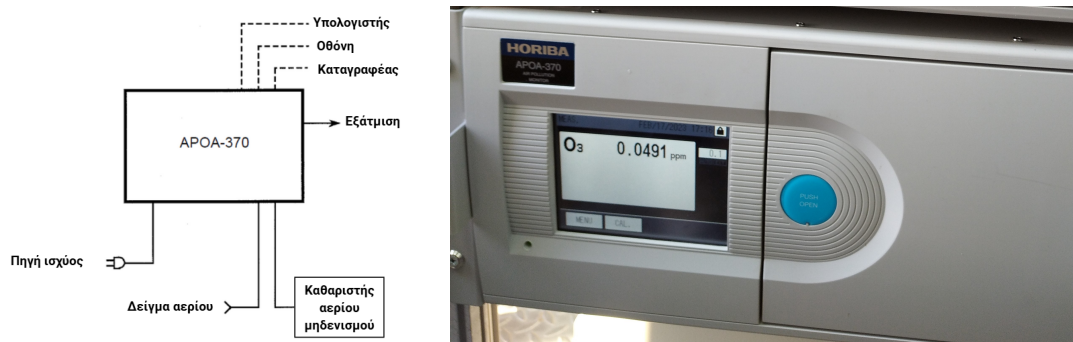
Σχήμα 3.6: Οθόνη μετρήσεων του οργάνου Model 5014i Beta (αριστερά) (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2009), Model 5014i Beta στον σταθμό των Χανίων (δεξιά).

Η μέτρηση είναι συνεχής και παρέχει γρήγορη και ακριβή ανάλυση της ποιότητας του αέρα, με τη δυνατότητα καταγραφής των δεδομένων και της διαχείρισης τους μέσω λογισμικού για ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το Model 5014i Beta είναι αξιόπιστο, ακριβές και χρησιμοποιείται ευρέως σε σταθμούς παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, παρέχοντας πολύτιμες

πληροφορίες για την προστασία της δημόσιας υγείας και την κατανόηση της ρύπανσης του αέρα.

### 3.3 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APOA-370

Οι συγκεντρώσεις του  $O_3$  μετρήθηκαν με το όργανο APOA-370 (Horiba), στο οποίο λαμβάνονται δεδομένα κάθε 5 λεπτά. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιούνται ωριαίες συγκεντρώσεις σε αυτή την εργασία. Συνολικά για την εργασία έγινε ανάλυση για περίπου 8.700 ωριαίες τιμές συγκέντρωσης για κάθε ρύπο. Το APOA-370 είναι ένα αυτόνομο σύστημα που μπορεί να λειτουργηθεί απλώς συνδέοντας έναν καθαριστή αερίου μηδενισμού. Η παροχή του αέρα είναι περίπου  $0,7 \text{ L/min}$  και λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ  $5-40^\circ\text{C}$ . Το σύστημα μπορεί, επίσης, να αναβαθμιστεί με τη σύνδεση υπολογιστή, οθόνης και καταγραφέα. Η διαμόρφωση του συστήματος APOA-370 φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 3.7: Διαμόρφωση του συστήματος APOA-370 (αναπροσαρμοσμένο από Ambient  $O_3$  monitor APOA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APOA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά).

Η μέθοδος απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας βασίζεται στο χαρακτηριστικό του όζοντος να απορροφά υπεριώδεις ακτίνες συγκεκριμένου μήκους κύματος, το οποίο αντιστοιχεί στα  $253,7 \text{ nm}$ . Αρχικά, το όργανο αντλεί ένα δείγμα αέρα μέσω αντλίας και το εισάγει στον θάλαμο μέτρησης. Μέσα στον θάλαμο, το δείγμα εκτίθεται σε υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται από μια πηγή  $UV$ . Το όζον απορροφά μέρος της ακτινοβολίας και η ένταση της απορρόφησης καταγράφεται από έναν ανιχνευτή. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη σύγκριση της έντασης της ακτινοβολίας πριν και μετά τη διέλευση του φωτός μέσα από το δείγμα αέρα. Η διαφορά στις μετρήσεις χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του  $O_3$ , βάσει του νόμου του Beer-Lambert, ο οποίος συνδέει την απορρόφηση της ακτινοβολίας με τη συγκέντρωση του αερίου. Για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων, το όργανο πραγματοποιεί αυτόματη βαθμονόμηση χρησιμοποιώντας αέρα αναφοράς χωρίς  $O_3$  και δείγματα γνωστής συγκέντρωσης  $O_3$ . Το APOA-370 διαθέτει σύστημα για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων, ενώ τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο μέσω οθόνης ή αποθηκεύονται για περαιτέρω μελέτη. Χάρη στην υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία του, το όργανο είναι ιδανικό για περιβαλλοντικές μετρήσεις και την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα (APOA-370, Operation Manual, 2009).

### 3.4 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APMA-370

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων  $CO$  πραγματοποιήθηκαν με το όργανο APMA-370 (Horiba). Το APMA-370 είναι ένας μετρητής  $CO$  περιβάλλοντος που χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας τη μέθοδο μη διασποράς υπέρυθρης ανάλυσης. Η λειτουργία του βασίζεται στις ιδιότητες των μορίων

CO να απορροφούν υπέρυθη ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Το συγκεκριμένο όργανο επιτρέπει τη συνεχή μέτρηση των συγκεντρώσεων CO στην ατμόσφαιρα.

Ο τρόπος λειτουργίας του είναι ο εξής: Το APMA-370 συλλέγει ένα δείγμα αέρα μέσω της αντλίας που διαθέτει με παροχή περίπου  $1,5 \text{ L/m}^3$ . Το δείγμα αυτό εισέρχεται στον αναλυτή μέσω ενός συστήματος φιλτραρίσματος για να απομακρυνθούν σωματίδια και ακαθαρσίες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Στη συνέχεια, εκπέμπεται φως, μέσω της υπέρυθρης πηγής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του οργάνου και διέρχεται μέσα από τον θάλαμο μέτρησης, το οποίο απορροφάται από τα μόρια CO. Μετά τη διέλευση του φωτός από τον θάλαμο, μετριέται από τον ανιχνευτή η ένταση της ακτινοβολίας που έφτασε σε αυτόν και συγκρίνεται με την αρχική ένταση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ώστε να υπολογιστεί η συγκέντρωση του CO. Οι μετρήσεις εμφανίζονται στην οθόνη του οργάνου (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4) και μπορούν να αποθηκευτούν ή να μεταδοθούν σε εξωτερικές συσκευές για περαιτέρω ανάλυση. Το όργανο υποστηρίζει επίσης διασύνδεση μέσω συστημάτων επικοινωνίας (π.χ. RS-232) για συνεχή καταγραφή. Επίσης, το συγκεκριμένο όργανο διαθέτει σύστημα αυτόματης βαθμονόμησης με τη χρήση αναφοράς μηδενικού αερίου γνωστής συγκέντρωσης CO. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, ακόμα και σε περιβάλλοντα με μεταβλητές συνθήκες (APMA-370, Operation Manual, 2009).



Σχήμα 3.8: Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APMA-370 (αναπροσαρμοσμένο από Ambient CO monitor APMA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APMA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά).

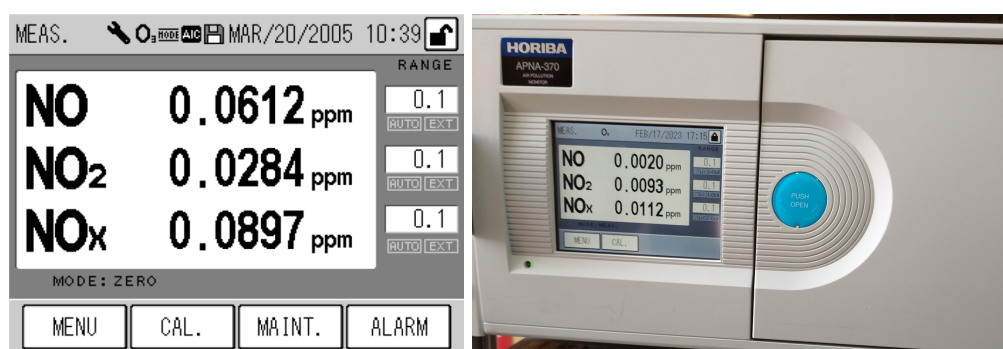
### 3.5 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APNA-370

Το APNA-370 (Horiba) είναι ένα όργανο μέτρησης συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) του περιβάλλοντος, το οποίο χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας τη μέθοδο χημειοφωταύγειας (Chemiluminescence, CLD). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντίδραση του  $\text{NO}$  με το  $\text{O}_3$ , η οποία παράγει διεγερμένα μόρια  $\text{NO}_2$ . Καθώς αυτά τα μόρια επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση, εκπέμπουν φως (φωταύγεια), το οποίο ανιχνεύεται από έναν φωτοανιχνευτή. Όταν το  $\text{O}_3$  προστίθεται στο αέριο δείγμα που περιέχει  $\text{NO}_x$ , ένα μέρος του  $\text{NO}$  στο αέριο δείγμα οξειδώνεται σε  $\text{NO}_2$ . Επίσης, ένα μέρος του παραγόμενου  $\text{NO}_2$  βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση ( $\text{NO}_2^*$ ) και εκπέμπει φως στην κατάσταση αποδιέγερσης. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω αντιδράσεις, οποίες πραγματοποιούν το φαινόμενο της χημειοφωταύγειας.





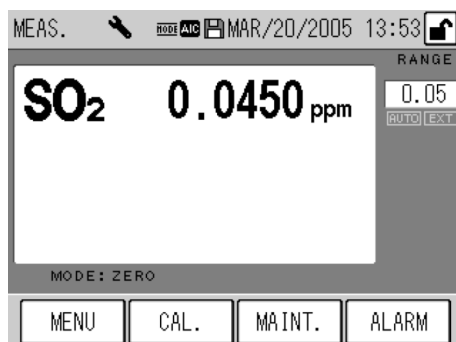
Στο APNA-370, το αέριο που λαμβάνεται σε δείγμα χωρίζεται σε δύο ροές: η μία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) με αναγωγή του  $\text{NO}_2$  σε  $\text{NO}$  με μετατροπέα  $\text{NO}_x$ , καθώς η άλλη χρησιμοποιείται για την απευθείας μέτρηση της συγκέντρωσης  $\text{NO}$ . Αυτά τα αέρια δείγματος μετακινούνται στις γραμμές  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$  και αερίου αναφοράς κάθε 0,5 s με ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και εισάγονται με τη σειρά τους στο θάλαμο αντίδρασης με ρυθμό περίπου 0,8 L/min. Από την άλλη πλευρά, ο ανοικτός αέρας αναρροφάται χωριστά μέσω του φίλτρου αέρα, ξηραίνεται από έναν ξηραντήρα πυριτικού πηκτώματος τύπου αυτοαναπαραγωγής και χρησιμοποιείται για το σχηματισμό όζοντος σε έναν οζονιστή. Στη συνέχεια, το παραγόμενο όζον εισάγεται στο θάλαμο αντίδρασης. Στο θάλαμο αντίδρασης, το δείγμα και το όζον αντιδρούν και η εκπομπή φωτός που εμπλέκεται στην αντίδραση ανιχνεύεται από τη φωτοδιόδο. Αυτό το όργανο υπολογίζει τις συγκεντρώσεις  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  από τις εξόδους που λαμβάνονται από τη φωτοδιόδο, οι οποίες είναι ανάλογες με τις συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  και  $\text{NO}$ , και εξάγει τα αποτελέσματα ως συνεχή σήματα (APNA-370, Operation Manual, 2009).



Σχήμα 3.9: Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APNA-370 (Ambient  $\text{NO}_x$  monitor APNA-370, Operation Manual, 2009) (αριστερά), APNA-370 στον σταθμό των Χανίων (δεξιά).

### 3.6 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, APSA-370

Οι μετρήσεις συγκεντρώσεων  $\text{SO}_2$  πραγματοποιήθηκαν με το όργανο APSA-370, το οποίο χρησιμοποιεί ως αρχή λειτουργίας τη μέθοδο υπεριώδους φθορισμού (Ultraviolet Fluorescent - UVF). Η συσκευή αυτή διαθέτει ένα εσωτερικό σύστημα δειγματοληψίας ξηρού τύπου με ρυθμό παροχής δείγματος 0,7 L/min, το οποίο επιτρέπει υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια στις μετρήσεις. Το APSA-370 βασίζεται στην αρχή ότι τα μόρια του  $\text{SO}_2$  απορροφούν υπεριώδη ακτινοβολία και εκπέμπουν φως (φθορισμός) σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένα δείγμα ακτινοβολείται με υπεριώδη ακτινοβολία (215 nm), το  $\text{SO}_2$  εκπέμπει φως διαφορετικού μήκους κύματος από αυτό που ακτινοβολείται. Το πρώτο, ακτινοβολούμενο φως αναφέρεται ως φως διέγερσης και το μεταγενέστερο, εκπεμπόμενο φως αναφέρεται ως φθορισμός. Η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του  $\text{SO}_2$  στο δείγμα αέρα. Η συσκευή ανιχνεύει αυτόν τον φθορισμό και υπολογίζει τη συγκέντρωση του  $\text{SO}_2$  (APSA-370, Operation Manual, 2009).



Σχήμα 3.10: Οθόνη μετρήσεων του οργάνου APSA-370 (Ambient SO<sub>2</sub> monitor APSA-370, Operation Manual, 2009).

### 3.7 Μοντέλο HYSPLIT

Το HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) είναι ένα μοντέλο υπολογισμού απλών τροχιών αέριων μαζών, καθώς και σύνθετων προσομοιώσεων μεταφοράς, διασποράς, χημικού μετασχηματισμού και εναπόθεσης. Αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Αέριων Πόρων (Air Resources Laboratory) της Εθνική Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA) και έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια. Κάποιες από τις χρήσεις του μοντέλου περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών, του καπνού από πυρκαγιές, της ηφαιστειακής τέφρας, της σκόνης και των ρύπων, είτε από σταθερή είτε από κινητή πηγή. Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή του είναι η ανάλυση αντίστροφης τροχιάς για τον προσδιορισμό της προέλευσης των αέριων μαζών (Stein κ.α., 2015).

Στη συγκεκριμένη μελέτη δημιουργήθηκαν 5ήμερες (120 h) οπισθοδρομικές τροχιές των αέριων σωματιδίων που φτάνουν πάνω από τον σταθμό των Χανίων (35.51N, 24.02E), με στόχο τον προσδιορισμό των ημερών με επεισόδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Επομένως, όσες αέριες μάζες είχαν διεύθυνση από την Αφρική, μετέφεραν σκόνη από την Σαχάρα. Οι ατμοσφαιρικές τροχιές υπολογίστηκαν για την ώρα άφιξης 12:00 UTC (Coordinated Universal Time), δηλαδή στη μέση της ημέρας (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024).

### 3.8 Δορυφορικές εικόνες NASA

Η ιστοσελίδα της NASA, Zoom Earth (<https://zoom.earth/>), παρέχει δορυφορικές εικόνες του πλανήτη, που ενημερώνονται κάθε 10 λεπτά, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους γεωστατικούς δορυφόρους NOAA GOES και JMA Himawari-8. Οι εικόνες αυτές αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες για την παρακολούθηση επεισοδίων σκόνης, καθώς παρουσιάζουν με ακρίβεια τα μετεωρολογικά φαινόμενα της εκάστοτε περιοχής. Παράλληλα, προσφέρει πληθώρα μετεωρολογικών δεδομένων, όπως οι καιρικές συνθήκες, η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία, η υγρασία, η ατμοσφαιρική ρύπανση, καθώς και πληροφορίες για τροπικές καταιγίδες, τυφώνες και πυρκαγιές, καλύπτοντας γεγονότα από το 1999 μέχρι σήμερα. Επιπλέον, υπάρχουν διαθέσιμες δορυφορικές εικόνες σε πραγματικό χρόνο με υψηλή ανάλυση (High Definition-HD), οι οποίες ανανεώνονται δύο φορές την ημέρα μέσω των δορυφόρων Suomi-NPP, MODIS Aqua και Terra της NASA-NOAA, αξιοποιώντας υπηρεσίες του Gordon Institute of Business Science (GIBS) που αποτελεί μέρος του Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS).

### 3.9 Μετεωρολογικά δεδομένα

Δεδομένα για την θερμοκρασία λήφθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), όπου διατηρείται σημαντικό ιστορικό κλιματικών δεδομένων ανά πόλη. Για τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες επιλέχθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός των Χανίων που ανήκει στο δίκτυο της ΕΜΥ και οι τιμές αναγράφονται στον Πίνακα 4.11.

### 3.10 Hazard Index

Ο Hazard Index (HI) είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κινδύνου για την υγεία, που σχετίζεται με την έκθεση σε ρύπους, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ . Αυτά τα μικροσκοπικά σωματίδια μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα. Ο HI βασίζεται στην υπόθεση ότι οι χημικές ουσίες που προκαλούν κοινές τοξικολογικές επιδράσεις στον άνθρωπο ακολουθούν μοντέλα προσθήκης δόσης. Ο HI συνήθως κυμαίνεται από μεταξύ 0 και 1, με τις υψηλότερες τιμές να υποδηλώνουν μεγαλύτερη πιθανή επικινδυνότητα για την ανθρώπινη υγεία. Παρ' όλα αυτά, ο HI έχει ορισμένους περιορισμούς, όπως η έλλειψη δεδομένων, η αδυναμία αντιμετώπισης φαινομένων συνέργειας και ενίσχυσης και η αδυναμία πρόβλεψης της πιθανότητας συγκεκριμένων δυσμενών επιπτώσεων (Forester και Wells, 2009; Price, 2023). Ο HI υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (EPA 2012; ATSDR 2004; Ma, κ.ά., 2022):

$$HI = \frac{CDI}{RI} \quad (3.3)$$

όπου CDI είναι η χρόνια ημερήσια πρόσληψη (chronic daily intake) ( $\mu g/kg \cdot day$ ) και RI είναι η πρόσληψη αναφοράς (reference intake) ( $\mu g/kg \cdot day$ ). Για τον υπολογισμό των CDI και RI χρησιμοποιούνται οι παρακάτω εξισώσεις.

$$CDI = \frac{C \times IR \times ET}{BW} \times \frac{EF \times ED}{AT} \quad (3.4)$$

όπου  $C$  είναι η συγκέντρωση του ρύπου ( $\mu g/m^3$ ),  $IR$  είναι ο ωριαίος ρυθμός εισπνοής ( $m^3/h$ ),  $ET$  ο χρόνος έκθεσης ( $h/d$ ),  $EF$  η συχνότητα έκθεσης ( $d/y$ ),  $ED$  η διάρκεια της έκθεσης ( $y$ ),  $AT$  η μέση ώρα ( $d$ ) και  $BW$  το βάρος του ανθρώπινου σώματος ( $kg$ ).

$$RI = RfC \times \frac{IR_d}{BW} \quad (3.5)$$

όπου  $RfC$  είναι η συγκέντρωση μάζας αναφοράς ( $\mu g/m^3$ ) και  $IR_d$  ο ημερήσιος ρυθμός εισπνοής αναφοράς ( $m^3/h$ ). Στη συγκεκριμένη Εργασία υπολογίστηκε ο HI για τα  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  και  $NO_2$ . Για τον κάθε ρύπο χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες ημερήσιες συγκεντρώσεις για συνεχή ημερήσια έκθεση 70 χρόνων ( $ET=24 h/d$ ,  $EF=365 d/y$ ,  $ED=70 y$ ) για έναν μέσο άνθρωπο με βάρος  $70 kg$ . Για ωριαίο ρυθμό εισπνοής χρησιμοποιήθηκαν τα  $1,5$  και  $3 m^3/h$ . Επιπλέον, όσον αφορά την πρόσληψη αναφοράς, οι συγκεντρώσεις αναφοράς επιλέχθηκαν από τον παρακάτω Πίνακα, σύμφωνα με τις οδηγίες του Π.Ο.Υ. (Air Quality Guidelines - AQG) (WHO, 2021).

Πίνακας 3.1: Συνιστώμενα επίπεδα συγκεντρώσεων PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> (αναπροσαρμοσμένο από WHO, 2021).

| Ρύπος             | Μέσος χρόνος    | Συνιστώμενη τιμή συγκέντρωσης ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|-------------------|-----------------|--|
| PM <sub>10</sub>  | Ετήσιο          | 15   |
| PM <sub>2.5</sub> | Ετήσιο          | 5  |
| O <sub>3</sub>    | Περίοδος αιχμής | 60   |
| NO <sub>2</sub>   | Ετήσιο          | 10   |

Όπως παρατηρείται και στον Πίνακα 3.1, για όλους τους ρύπους, εκτός από το O<sub>3</sub>, χρησιμοποιείται η ετήσια συνιστώμενη τιμή συγκέντρωσης, καθώς για το O<sub>3</sub> η τιμή της περιόδου αιχμής, η οποία σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ. πρόκειται για τον μέσο όρο της ημερήσιας μέγιστης δωρης μέσης συγκέντρωσης O<sub>3</sub> κατά τους έξι διαδοχικούς μήνες με την υψηλότερη εξαμηνιαία μέση συγκέντρωση O<sub>3</sub> (WHO, 2021). Τέλος, ο ημερήσιος ρυθμός εισπνοής αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε είναι 0,641 m<sup>3</sup>/h ( $IR_d$ ).



### 4.1 Χρονοσειρά PM<sub>10</sub>

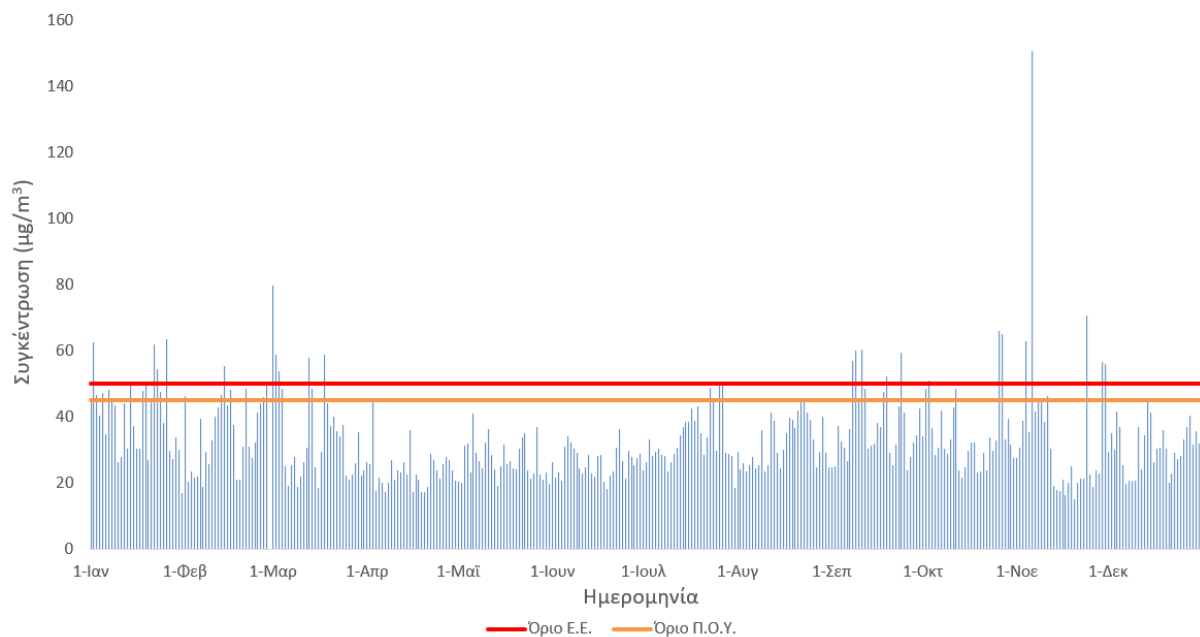
Η μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> για το έτος 2023 ανήλθε στα 32,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , βάσει των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων που καταγράφηκαν από τον σταθμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης των Χανίων. Οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.1 εκφρασμένες σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Το ημερήσιο όριο συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> είναι 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) θέτει ένα πιο αυστηρό όριο στα 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Όσον αφορά την μέση ετήσια τιμή του 2023 (32,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), αυτή δεν υπερβαίνει το ετήσιο όριο των 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ωστόσο, συγκριτικά με το 2022, η τιμή αυτή είναι υψηλότερη, καθώς η αντίστοιχη μέση ετήσια συγκέντρωση PM<sub>10</sub> για το 2022 στο Ακρωτήριο ήταν 21,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , σύμφωνα τις συγκεντρώσεις που μελετήθηκαν από τον σταθμό του Ακρωτηρίου (Μπαλή, 2023). Η τιμή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης είναι συνηθισμένη για τον σταθμό αστικής περιοχής στην Ευρώπη, καθώς ο σταθμός του Ακρωτηρίου απέχει 5 km από το κέντρο των Χανίων, είναι τοποθετημένος εντός του Πολυτεχνείου της Κρήτης και δεν επηρεάζεται άμεσα από έντονη κυκλοφοριακή κίνηση λόγω χαμηλής πληθυσμιακής πυκνότητας της περιοχής. Επιπλέον, προηγούμενη μελέτη έδειξε ότι η μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> στον ίδιο σταθμό για την περίοδο 15/4/2003-31/12/2009 ήταν 36,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kopanakis, κ.ά., 2012).

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Απρίλιο του 2017 έως τον Μάρτιο του 2018 η μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> στον σταθμό του Ακρωτηρίου καταγράφηκε στα 22,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στην περιοχή των Δικαστηρίων, στα Χανιά, ήταν 34,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η τελευταία τιμή είναι συγκρίσιμη με τη μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> του 2023, καθώς η περιοχή των Δικαστηρίων βρίσκεται περίπου 600 m από τον σταθμό του Σταδίου και μόλις 1 km από το κέντρο των Χανίων (Chatoutsidou, κ.ά., 2019).

Επιπλέον, μετρήσεις για περίπου τέσσερις μήνες (από τον χειμώνα έως την άνοιξη) κατέγραψαν μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> στην περιοχή των Δικαστηρίων στα 27,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το 2015, στην περιοχή της Χρυσοπηγής, η οποία απέχει 2,3 km από το κέντρο των Χανίων, η μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> ήταν 35,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αν και αραιοκατοικημένη, η Χρυσοπηγή βρίσκεται κοντά σε αυτοκινητόδρομο, γεγονός που επηρεάζει τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Το 2016, στην περιοχή της Χαλέπας, καταγράφηκε μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> 28,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η Χαλέπα απέχει περίπου 2,1 km από το κέντρο της πόλης, είναι κυρίως κατοικημένη, με μέτρια πληθυσμιακή πυκνότητα και σχετικά χαμηλή κυκλοφοριακή κίνηση (Chatoutsidou, κ.ά., 2019).

Τέλος, σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην ανατολική Μεσόγειο, καταγράφηκαν συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> σε δυο τοποθεσίες της Κρήτης. Η πρώτη ήταν μια αστική περιοχή στο Ηράκλειο, τη μεγαλύτερη πόλη του νησιού, ενώ η δεύτερη ήταν η απομακρυσμένη, παράκτια περιοχή της Φινοκαλιάς, στο νομό Λασιθίου, περίπου 70 km βορειοανατολικά του Ηρακλείου. Στον σταθμό του Ηρακλείου, η μέση συγκέντρωση PM<sub>10</sub> κατά την περίοδο 2000-2005 ήταν 51  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στη Φινοκαλιά, για το διάστημα 2004-2005, η μέση συγκέντρωση ανήλθε στα 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Mihalopoulos, κ.ά., 1997; Gerasopoulos, κ.ά., 2006).



Διάγραμμα 4.1: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> για το έτος 2023.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.1, η υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση PM<sub>10</sub> που παρατηρήθηκε το 2023 στην περιοχή των Χανίων ήταν στις 6 Νοέμβρη, με τιμή  $150,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , καθώς εκείνη την ημέρα καταγράφηκε επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα (Τερζίδου, 2024). Μάλιστα, εκείνη την ημέρα, καταγράφηκε η υψηλότερη ωριαία συγκέντρωση PM<sub>10</sub> του έτους για την συγκεκριμένη περιοχή, με τιμή  $225,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παράλληλα, η χαμηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση PM<sub>10</sub> παρατηρήθηκε στις 20 Νοέμβρη 2023 με τιμή  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η πλειοψηφία των ημερήσιων συγκεντρώσεων δεν ξεπερνά τα νομοθετικά όρια των Ε.Ε. και Π.Ο.Υ. Μεγαλύτερη αύξηση συγκεντρώσεων παρατηρείται τον Ιανουάριο, όπου για 6 ημέρες αυτού του μήνα, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις ξεπερνούν το όριο της Ε.Ε. ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και για 12 ημέρες οι ημερήσιες συγκεντρώσεις ξεπερνούν το όριο του Π.Ο.Υ. ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Η ποιότητα του αέρα στα Χανιά επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταφορά σωματιδίων PM<sub>10</sub>, λόγω της γεωγραφικής εγγύτητας με τη Βόρεια Αφρική. Η έρημος Σαχάρα αποτελεί μια σημαντική πηγή χονδρόκοκκων σωματιδίων, τα οποία μεταφέρονται μέσω της ατμόσφαιρας στη λεκάνη της Μεσογείου (Dai, κ.ά., 2022). Η μακρινή μεταφορά της αφρικανικής σκόνης έχει μελετηθεί εκτενώς, καθώς επηρεάζει περιοχές στη νότια, κεντρική και βόρεια Ευρώπη, καθώς και τη δυτική Ασία (Ganor, κ.ά., 2010; Polymenakou, κ.ά., 2008). Τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης προκαλούν απότομες αυξήσεις στις συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, υπερβαίνοντας συχνά τα ημερήσια όρια της Ε.Ε και του Π.Ο.Υ. (Pey, κ.ά., 2013; Koranakis, κ.ά., 2018). Εκτός από τη μεταφορά σκόνης, η ατμοσφαιρική ρύπανση σε αστικό περιβάλλον επηρεάζεται σημαντικά από τοπικές πηγές. Πολλές μελέτες δείχνουν ότι η κυκλοφορία οχημάτων αποτελεί κύριο παράγοντα αύξησης των συγκεντρώσεων PM<sub>10</sub> στις πόλεις, ενώ ιδιαίτερη σημασία έχει και η επαναίωρηση σκόνης από το οδόστρωμα (Glojek, κ.ά., 2024; Swietlicki, κ.ά., 2004). Επίσης, οι οικιακές εγκαταστάσεις θέρμανσης συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων, με την καύση βιομάζας να αποτελεί βασικό παράγοντα ρύπανσης κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων μηνών του έτους (Fourtziou, κ.ά., 2017). Αυτό εξηγεί γιατί ο Ιανουάριος είναι ο μήνας με τις περισσότερες υπερβάσεις, καθώς οι πηγές καύσης, όπως η οικιακή θέρμανση, προκάλεσαν υψηλές εκπομπές μικροσωματιδίων PM<sub>10</sub> εκείνον το μήνα.

Στον Πίνακα 4.1 παραθέτονται οι αριθμοί των ημερών και οι ημερομηνίες που ξεπεράστηκαν τα

νομοθετικά όρια συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  σύμφωνα με την Ε.Ε. και τον Π.Ο.Υ.

Πίνακας 4.1: Ημερήσιες υπερβάσεις  $PM_{10}$  σύμφωνα με τα όρια της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ.

| Μήνας         | Αριθμός ημερών όπου $PM_{10} > 50 \mu g/m^3$ (Ε.Ε.) | Ημερομηνίες υπέρβασης (Ε.Ε.) | Αριθμός ημερών όπου $PM_{10} > 45 \mu g/m^3$ (Π.Ο.Υ.) | Ημερομηνίες υπέρβασης (Π.Ο.Υ.)            |
|---------------|---|------------------------------|---|---|
| Ιανουάριος    | 6   | 2, 14, 19, 22, 23, 26        | 12  | 2, 3, 5, 7, 8, 14, 18, 19, 22, 23, 24, 26 |
| Φεβρουάριος   | 2   | 14, 28                       | 7   | 1, 13, 14, 16, 21, 27, 28                 |
| Μάρτιος       | 5   | 1, 2, 3, 13, 18              | 7   | 1, 2, 3, 4, 13, 14, 18                    |
| Απρίλιος      | 0   | -                            | 1   | 3   |
| Μάιος         | 0   | -                            | 0   | -   |
| Ιούνιος       | 0   | -                            | 0   | -   |
| Ιούλιος       | 0   | -                            | 3   | 23, 26, 27                                |
| Αύγουστος     | 0   | -                            | 1   | 22  |
| Σεπτέμβριος   | 5   | 8, 9, 11, 19, 24             | 7   | 8, 9, 11, 12, 18, 19, 24                  |
| Οκτώβριος     | 3   | 3, 26, 27                    | 5   | 2, 3, 12, 26, 27                          |
| Νοέμβριος     | 5   | 4, 6, 24, 29, 30             | 8   | 4, 6, 8, 9, 11, 24, 29, 30                |
| Δεκέμβριος    | 0   | -                            | 0   | -   |
| <b>Σύνολο</b> | <b>26</b>   |                              | <b>51</b>   |   |

Το 2023, οι ημέρες κατά τις οποίες οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  ξεπέρασαν το νομοθετικό όριο της Ε.Ε. ( $50 \mu g/m^3$ ) ήταν 26. Πιο αναλυτικά, τον Ιανουάριο του 2023 το ημερήσιο όριο ξεπεράστηκε 6 φορές, τον Φεβρουάριο του ίδιου χρόνου ξεπεράστηκε 2 φορές, τον Μάρτιο 5, τον Σεπτέμβριο 5 τον Οκτώβριο 3 και τον Νοέμβριο 5. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Ε.Ε., η συγκέντρωση  $PM_{10}$  δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $50 \mu g/m^3$  για περισσότερες από 35 ημέρες ετησίως. Επομένως, δεν έγινε υπέρβαση του ετησίου ορίου το έτος 2023. Συγκριτικά με την χρονική περίοδο Απρίλιος 2017 - Μάρτιος 2018, οι ημέρες που η ημερήσια συγκέντρωση  $PM_{10}$  στην περιοχή των Δικαστηρίων ξεπέρασε το νομοθετικό όριο της Ε.Ε. ήταν 31, μόλις 5 περισσότερες από αυτές του 2023, και παρέμειναν εντός του ορίου των 35 υπερβάσεων. Την ίδια χρονική περίοδο στον σταθμό του Ακρωτηρίου καταγράφηκαν 19 υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου της Ε.Ε. Ο μικρότερος αριθμός των υπερβάσεων στο Ακρωτήριο αποδίδεται στην τοποθεσία του σταθμού εντός της Πολυτεχνειούπολης, γεγονός που επηρεάζει τις καταγραφές των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  (Chatoutsidou, κ.ά., 2019). Σύμφωνα με τον Π.Ο.Υ., η μέση ημερήσια συγκέντρωση  $PM_{10}$  δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $45 \mu g/m^3$  πάνω από 50 φορές τον χρόνο. Όπως παρατηρείται στις μετρήσεις το ημερήσιο όριο των  $45 \mu g/m^3$  υπερέβη 51 φορές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αναλυτικότερα, το όριο του Π.Ο.Υ. ξεπεράστηκε 12 φορές τον Ιανουάριο, 7 φορές τον Φεβρουάριο, 1 φορά τον Μάρτιο, 3 φορές τον Ιούλιο, 1 φορά τον Αύγουστο, 7 φορές τον Σεπτέμβριο, 5 φορές τον Οκτώβριο και 8 φορές τον Νοέμβριο. Έτσι, πραγματοποιήθηκε υπέρβαση του ετησίου ορίου κατά μία ημέρα. Αυτές οι υπερβάσεις οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες στη συγκεκριμένη περιοχή, καθώς επίσης και σε επεισόδια σκόνης.

#### 4.1.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

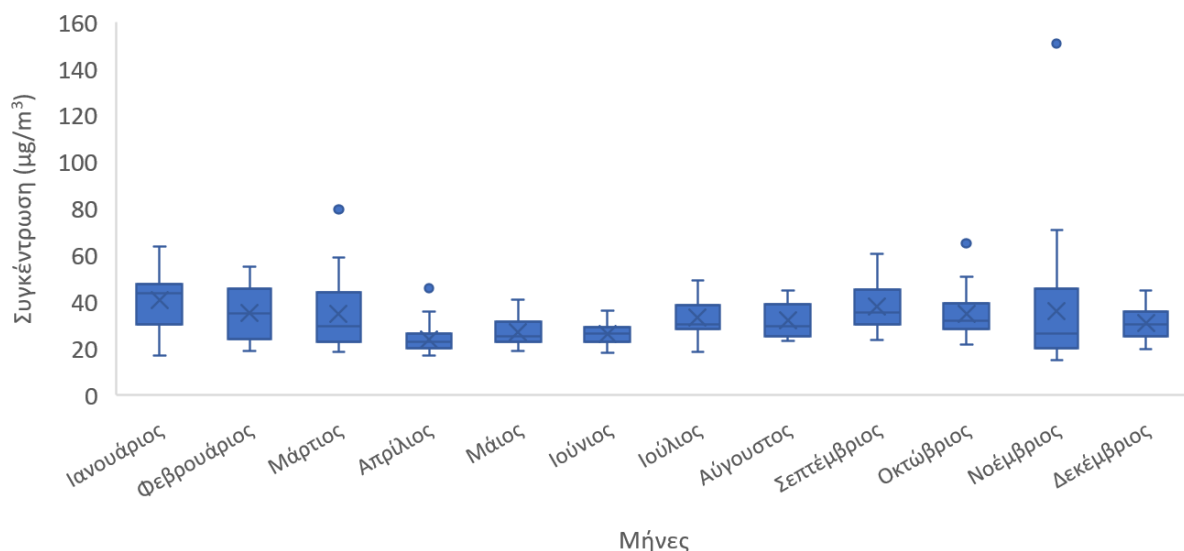
Για τις μηνιαίες μεταβολές καταγράφηκαν στον Πίνακα 4.2 οι μέσες, ελάχιστες και μέγιστες ημερήσιες τιμές  $PM_{10}$  για κάθε μήνα. Επίσης, καταγράφηκαν τα 25α, 50α και 75α εκατοστημόρια των τιμών

αυτών.

Πίνακας 4.2: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> το 2023.

| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 40,8      | 16,8          | 30,4              | 43,6              | 47,7              | 63,7         |
| Φεβρουάριος | 35,3      | 18,8          | 25,2              | 35,2              | 44,6              | 55,3         |
| Μάρτιος     | 34,7      | 18,4          | 23,2              | 29,6              | 42,1              | 79,8         |
| Απρίλιος    | 23,8      | 17,1          | 20,2              | 22,9              | 26,2              | 45,8         |
| Μάιος       | 27,0      | 19,3          | 22,2              | 25,1              | 31,6              | 41,0         |
| Ιούνιος     | 26,3      | 18,3          | 22,8              | 26,4              | 29,3              | 36,4         |
| Ιούλιος     | 33,3      | 18,4          | 28,3              | 30,3              | 38,5              | 49,4         |
| Αύγουστος   | 32,2      | 23,4          | 25,4              | 29,5              | 39,1              | 45,0         |
| Σεπτέμβριος | 38,1      | 23,8          | 30,6              | 35,3              | 44,2              | 60,4         |
| Οκτώβριος   | 34,8      | 21,8          | 28,7              | 32,1              | 38,1              | 66,1         |
| Νοέμβριος   | 36,0      | 15,0          | 23,6              | 26,3              | 44,5              | 150,9        |
| Δεκέμβριος  | 30,7      | 19,8          | 25,9              | 30,5              | 35,9              | 44,7         |

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η μέγιστη μέση ημερήσια τιμή παρατηρείται τον Νοέμβρη με τιμή συγκέντρωση PM<sub>10</sub> 150,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ταυτόχρονα, όμως, τον Νοέμβρη καταγράφηκε και η ελάχιστη ημερήσια τιμή του έτους με συγκέντρωση 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η μέση ημερήσια τιμή του Νοέμβρη είναι 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , η οποία δεν αποκλίνει αρκετά από την μέση συγκέντρωση του έτους 2023 (32,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Η μικρότερη μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση παρατηρείται τον Ιούνιο με τιμή 36,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , η οποία είναι μικρότερη από το νομοθετικό όριο Π.Ο.Υ. (45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τον Ιούνιο δεν έγινε κάποια υπέρβαση των νομοθετικών ορίων, επομένως είναι λογικό για την μέγιστη τιμή των μέσων συγκεντρώσεων του μήνα να μην υπερβαίνει τα 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Όσον αφορά τις ελάχιστες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις, η μεγαλύτερη τιμή καταγράφηκε τον Σεπτέμβριο με τιμή 23,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επίσης, τον Απρίλιο παρατηρείται η μικρότερη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> με τιμή 23,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τον Ιανουάριο η μεγαλύτερη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης στα 40,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τις χαμηλές τιμές του Απριλίου δικαιολογεί και η τιμή του 75ου εκατοστημορίου, η οποία είναι η ελάχιστη των υπολοίπων 75ων εκατοστημορίων με τιμή 26,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αυτό σημαίνει ότι το 75% των μέσων ημερησίων τιμών συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> του Απριλίου είναι μικρότερο ή ίσο του 26,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Από τον πίνακα φαίνεται ότι σχεδόν σε όλους τους μήνες η μέση τιμή είναι μεγαλύτερη από τη διάμεση, λόγω κάποιων υψηλών συγκεντρώσεων PM<sub>10</sub> που αυξάνουν τον μέσο όρο των συγκεντρώσεων.

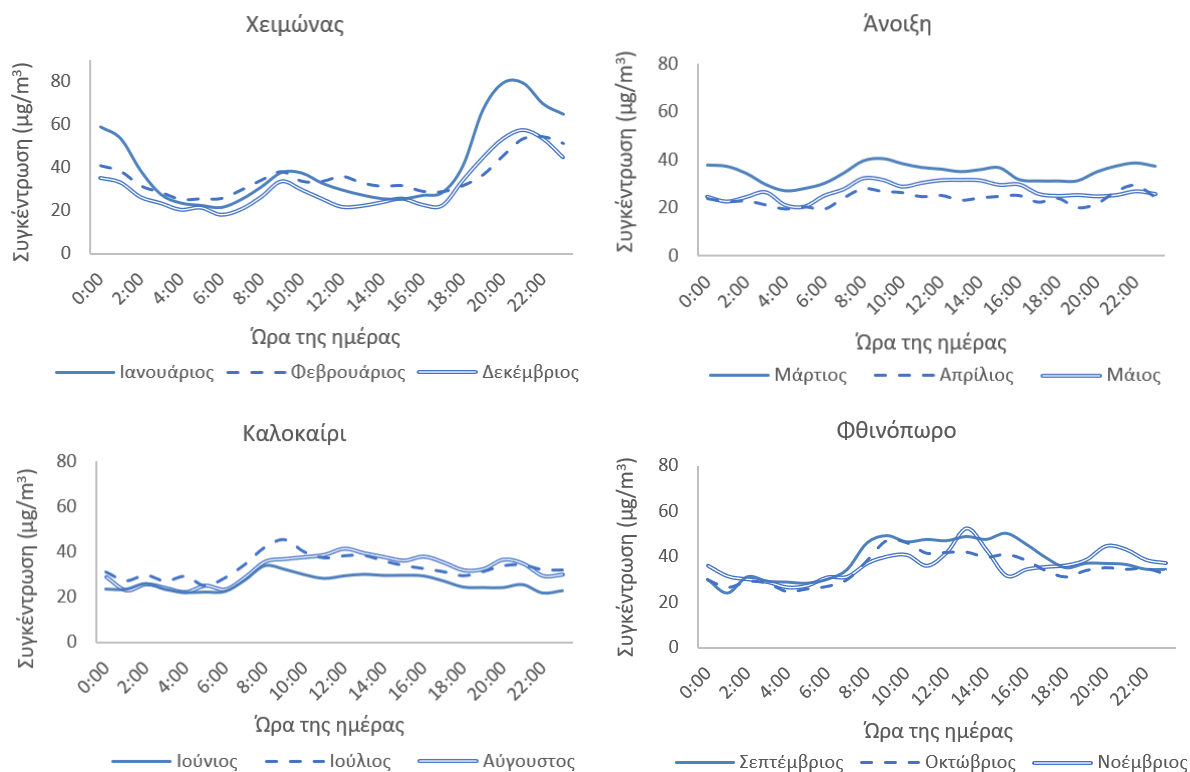


Διάγραμμα 4.2: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  ανά μήνα για το έτος 2023.

Το συγκεκριμένο διάγραμμα *boxplot* παρουσιάζει την κατανομή των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  για κάθε μήνα του 2023. Το κουτί κάθε μήνα δείχνει την ενδοτεταρτημοριακή απόκλιση που περιλαμβάνει το 50% των δεδομένων, ενώ η γραμμή μέσα στο κουτί αντιπροσωπεύει τη διάμεσο. Επίσης, οι γραμμές δείχνουν το εύρος των τιμών, χωρίς τις ακραίες τιμές, ενώ οι κουκίδες υποδηλώνουν ημέρες με εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις. Από την κατανομή που προκύπτει παραπάνω, παρατηρείται ότι τον Μάρτιο, Απρίλιο, Οκτώβριο και Νοέμβριο υπάρχουν κάποιες ακραίες τιμές, οι οποίες σχετίζονται με θέρμανση, αυξημένη κυκλοφορία οχημάτων και φυσικές συνθήκες (π.χ. μεταφορά σκόνης). Επιπλέον, από τον Μάιο μέχρι τον Αύγουστο οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλές και με μικρή διακύμανση. Αυτοί οι μήνες φαίνεται να έχουν χαμηλή και σταθερή ρύπανση. Το γράφημα συνολικά δείχνει εποχιακή διαφοροποίηση, με υψηλότερες συγκεντρώσεις την άνοιξη και ακραίες τιμές τον χειμώνα.

#### 4.1.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση

Στο Διάγραμμα 4.3 παρατηρείται η μηνιαία 24ωρη μεταβολή των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  ανά κάθε εποχή του έτους.



Διάγραμμα 4.3: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  ανά εποχή.

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται οι ωριαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  κάθε μήνα χωρισμένες ανά εποχή.

Τον χειμώνα παρουσιάζεται αύξηση των συγκεντρώσεων τις απογευματινές-βραδινές ώρες (18:00-00:00) με μια ιδιαίτερη αύξηση τον Ιανουάριο με μέγιστη μέση ωριαία τιμή κατά τις 20:00 τα  $81 \mu g/m^3$ . Ο λόγος που παρατηρούνται οι υψηλές συγκεντρώσεις τις βραδινές ώρες είναι οι καύσεις που γίνονται για την οικιακή θέρμανση. Τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο η υψηλότερη συγκέντρωση μέσα στην ημέρα διακρίνεται επίσης τις βραδινές ώρες και συγκεκριμένα για τον Φεβρουάριο στις 22:00 με τιμή  $53,7 \mu g/m^3$  και τον Δεκέμβριο με τιμή  $57,7 \mu g/m^3$ . Μια περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης  $PM_{10}$  σημειώνεται το πρωί στις 9:00 και για τους τρεις μήνες του χειμώνα με τιμές συγκέντρωσης τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο  $38 \mu g/m^3$  και τον Δεκέμβριο  $33,7 \mu g/m^3$ . Η πρωινή αυτή αύξηση οφείλεται στην κίνηση των αυτοκινήτων, καθώς ο σταθμός μέτρησης ρύπων βρίσκεται σε έναν κεντρικό δρόμο των Χανίων.

Την άνοιξη δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας με μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις από 20 μέχρι  $40 \mu g/m^3$ . Ο Μάρτιος είναι ο μήνας με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, σε σχέση με τους άλλους δύο μήνες της άνοιξης, με εύρος τιμών από  $27 \mu g/m^3$  μέχρι  $40 \mu g/m^3$ . Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα οφείλονται στις καύσεις για θέρμανση, καθώς ο Μάρτιος είναι ο ψυχρότερος μήνας της άνοιξης, σύμφωνα με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες που καταγράφονται στον Πίνακα 4.11. Όσον αφορά τις μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις του Απριλίου και του Μαΐου, έχουν χαμηλότερες τιμές από τον Μάρτιο από  $20 \mu g/m^3$  μέχρι  $31 \mu g/m^3$ .

Το καλοκαίρι οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις κυμαίνονται στα  $20 \mu g/m^3$ , με μία αύξηση κατά τις 8:00 στα  $50 \mu g/m^3$  τον μήνα του Ιουλίου.

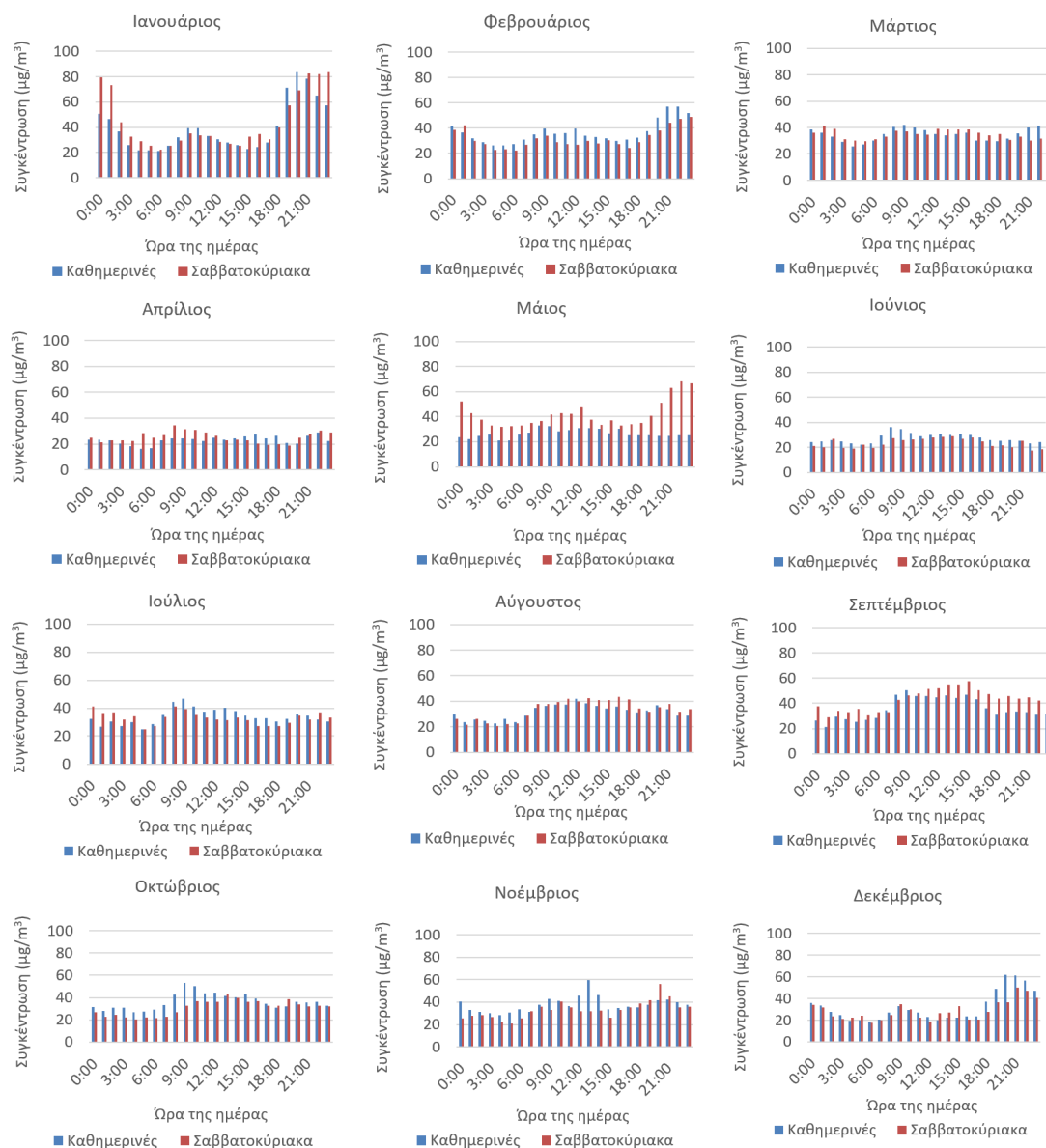
Το φθινόπωρο φαίνεται πως υπάρχουν διακυμάνσεις και στους τρεις μήνες της εποχής. Τον Σεπτέμ-

βριο και τον Οκτώβριο παρουσιάζεται μια αύξηση από τις 8:00 μέχρι τις 16:00. Καθ' όλη τη διάρκεια του Νοέμβρη υπάρχουν διακυμάνσεις με μέγιστη ωριαία συγκέντρωση κατά τις 13:00.

Η συγκεκριμένη μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  παρατηρείται και σε άλλες αστικές περιοχές της Ευρώπης, όπως σε πόλεις στη Σουηδία (Ferm και Sjoberg, 2015) και την Κύπρο (Pikridas, κ.ά., 2018), όπου κατά τη διάρκεια των ψυχρών μηνών (Νοέμβριος έως Μάρτιος), καταγράφονται δύο κορυφώσεις στις συγκεντρώσεις  $PM_{10}$ , κατά τις ώρες 7:00-9:00 και 18:00-21:00, οι οποίες οφείλονται στην πρωινή και βραδινή κυκλοφορία αντίστοιχα. Στους θερμότερους μήνες (Απρίλιος έως Οκτώβριος) παρατηρείται μια αιχμή μεταξύ 6:00 και 8:00, κυρίως λόγω της πρωινής κυκλοφορίας, ενώ η επίδραση της βραδινής κυκλοφορίας δεν είναι αρκετά αισθητή (Achilleos, κ.ά., 2014).

#### 4.1.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση

Στο Διάγραμμα 4.4 εμφανίζονται οι συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  των καθημερινών (Δευτέρα-Παρασκευή) και των σαββατοκύριακων για κάθε μήνα ξεχωριστά.

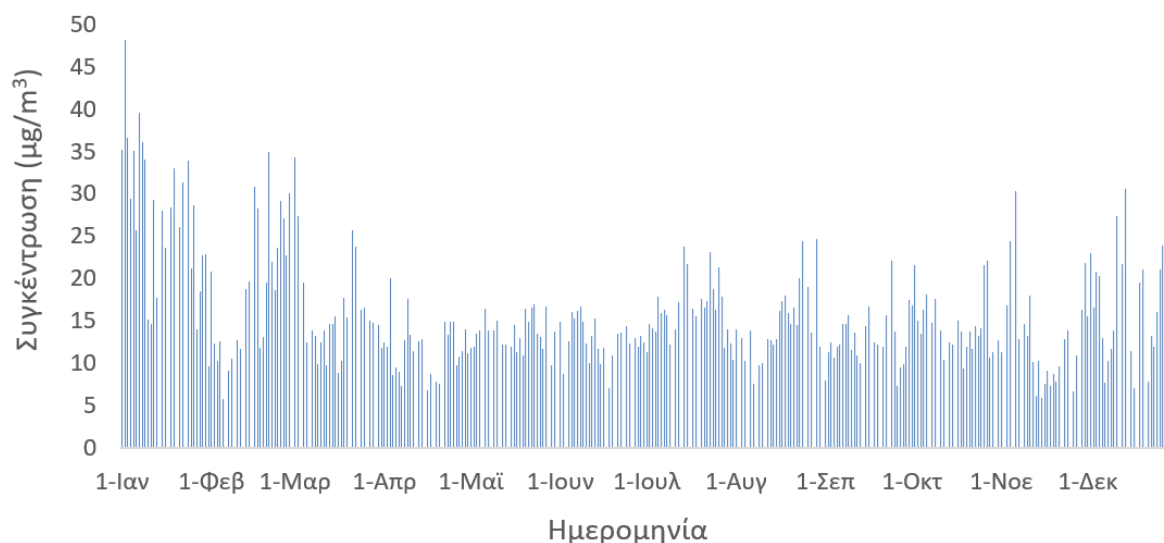


Διάγραμμα 4.4: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων PM<sub>10</sub> Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Τα Σαββατοκύριακα του Ιανουαρίου παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> τις βραδινές ώρες (21:00-1:00) σε σχέση με τις καθημερινές. Τον Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο δεν υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά στις τιμές των συγκεντρώσεων για τις καθημερινές και τα σαββατοκύριακα. Τον Μάιο, τα σαββατοκύριακα σημειώνουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με μεγαλύτερη διαφορά από τις 20:00 μέχρι τις 00:00. Τον Σεπτέμβρη οι συγκεντρώσεις καθημερινών-σαββατοκύριακων είναι παρόμοιες τις πρωινές ώρες, ενώ τις μεσημεριανές, απογευματινές και βραδινές ώρες των Σαββατοκύριακων (12:00-00:00), οι τιμές των συγκεντρώσεων PM<sub>10</sub> είναι ελάχιστα υψηλότερες από αυτές των καθημερινών. Τον Οκτώβρη, Νοέμβρη και Δεκέμβρη παρατηρούνται παρόμοιες συγκεντρώσεις μεταξύ σαββατοκύριακων-καθημερινών, με εξαίρεση κάποιες ώρες την ημέρα για κάθε μήνα, όπου τις καθημερινές η συγκέντρωση PM<sub>10</sub> είναι μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> εμφανίζονται ελαφρώς υψηλότερες το πρωί κατά τον Οκτώβρη, το μεσημέρι κατά τον Νοέμβρη, και το βράδυ κατά τον Δεκέμβρη.



## 4.2 Χρονοσειρά PM<sub>2.5</sub>



Διάγραμμα 4.5: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> για το έτος 2023.

Στο Διάγραμμα 4.5 καταγράφονται οι μέσες ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για το έτος 2023, καθώς σύμφωνα με την οδηγία της Ε.Ε., το ετήσιο όριο συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> έχει καθοριστεί στα  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επιπλέον, να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο όριο κάτω από το οποίο τα PM<sub>2.5</sub> δεν αποτελούν παράγοντα επικινδυνότητας για τη δημόσια υγεία. Επομένως, δεν έχει οριστεί κάποιο όριο για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις, αλλά μόνο μια ετήσια οριακή τιμή. Ο μέσος όρος συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> για το 2023 στην περιοχή των Χανίων είναι  $15,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , τιμή η οποία βρίσκεται εντός του επιτρεπτού ορίου της Ε.Ε. ( $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Σύμφωνα με παλαιότερη έρευνα που εξέταζε τις συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> στον σταθμό του Ακρωτηρίου για την χρονική περίοδο Μάιος 2003 - Μάρτιος 2006, η μέση συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub> ήταν  $25,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Lazaridis, κ.ά., 2008). Συγκριτικά με μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα από τον Φεβρουάριο μέχρι τον Δεκέμβριο 2010 κατέγραψε μέση συγκέντρωση  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Remoundaki, κ.ά., 2013). Επιπλέον, η μέση ετήσια συγκέντρωση ήταν χαμηλότερη σε σχέση με αντίστοιχες τιμές από αστικές περιοχές της Μεσογείου. Πιο συγκεκριμένα, η μέση συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub> από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο 2014 στο κέντρο της Βηρυτού ήταν  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fakhri, κ.ά., 2023), ενώ οι μέσες συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> του 2001 σε δύο πόλεις της Ισπανίας, την Ταραγόνα και τη Βαρκελώνη, ήταν  $37,4$  και  $36,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα (Querol, κ.ά., 2004; Viana, κ.ά., 2002). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.5 οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των PM<sub>2.5</sub> παρατηρούνται τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο, καθώς κατά τους δύο αυτούς μήνες καταγράφηκαν 12 ημέρες με μεταφορά σκόνης από τις 48 ημέρες με σκόνη για ολόκληρο τον χρόνο (25%). Ένα σημαντικό ποσοστό των PM<sub>2.5</sub> προέρχεται επίσης από εκπομπές οχημάτων και καύσεις για θέρμανση με ξύλο ή πετρέλαιο. Επιπλέον, στις 6 Νοεμβρίου παρατηρήθηκε υψηλή ημερήσια συγκέντρωση ( $30,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), όπως είχε παρατηρηθεί και στις συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub>, λόγω της αφρικανικής σκόνης.

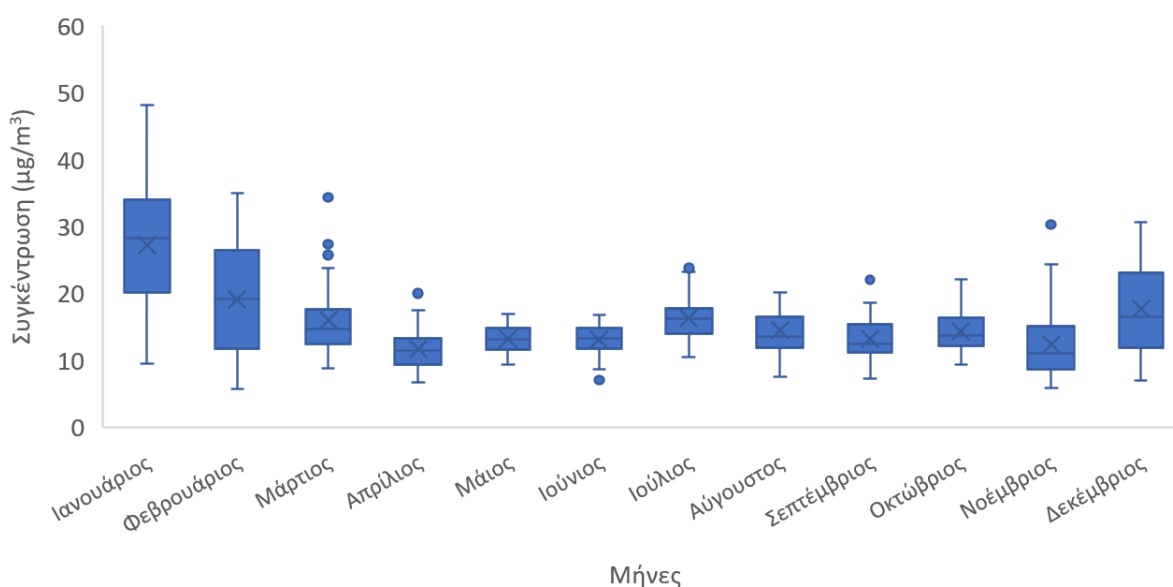
### 4.2.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Με τις αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν και για την μηνιαία ανάλυση των PM<sub>10</sub>, έτσι καταγράφηκαν και για τα PM<sub>2.5</sub>.

Πίνακας 4.3: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> το 2023.

| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 27,2      | 9,6           | 20,7              | 28,3              | 34,0              | 48,2         |
| Φεβρουάριος | 19,1      | 5,7           | 11,8              | 19,1              | 25,1              | 35,0         |
| Μάρτιος     | 16,1      | 8,8           | 12,5              | 14,6              | 17,6              | 34,3         |
| Απρίλιος    | 11,7      | 6,8           | 9,5               | 11,5              | 13,2              | 20,0         |
| Μάιος       | 13,2      | 9,4           | 11,7              | 13,1              | 14,7              | 16,9         |
| Ιούνιος     | 13,0      | 7,0           | 11,9              | 13,2              | 14,7              | 16,7         |
| Ιούλιος     | 16,2      | 10,4          | 13,9              | 16,2              | 17,8              | 23,8         |
| Αύγουστος   | 14,5      | 7,6           | 11,9              | 13,6              | 16,3              | 25,1         |
| Σεπτέμβριος | 13,2      | 7,3           | 11,4              | 12,5              | 15,1              | 22,0         |
| Οκτώβριος   | 14,4      | 9,4           | 12,1              | 13,7              | 15,7              | 22,1         |
| Νοέμβριος   | 12,4      | 5,9           | 8,7               | 11,1              | 14,4              | 30,3         |
| Δεκέμβριος  | 17,7      | 7,0           | 12,1              | 16,5              | 23,0              | 30,6         |

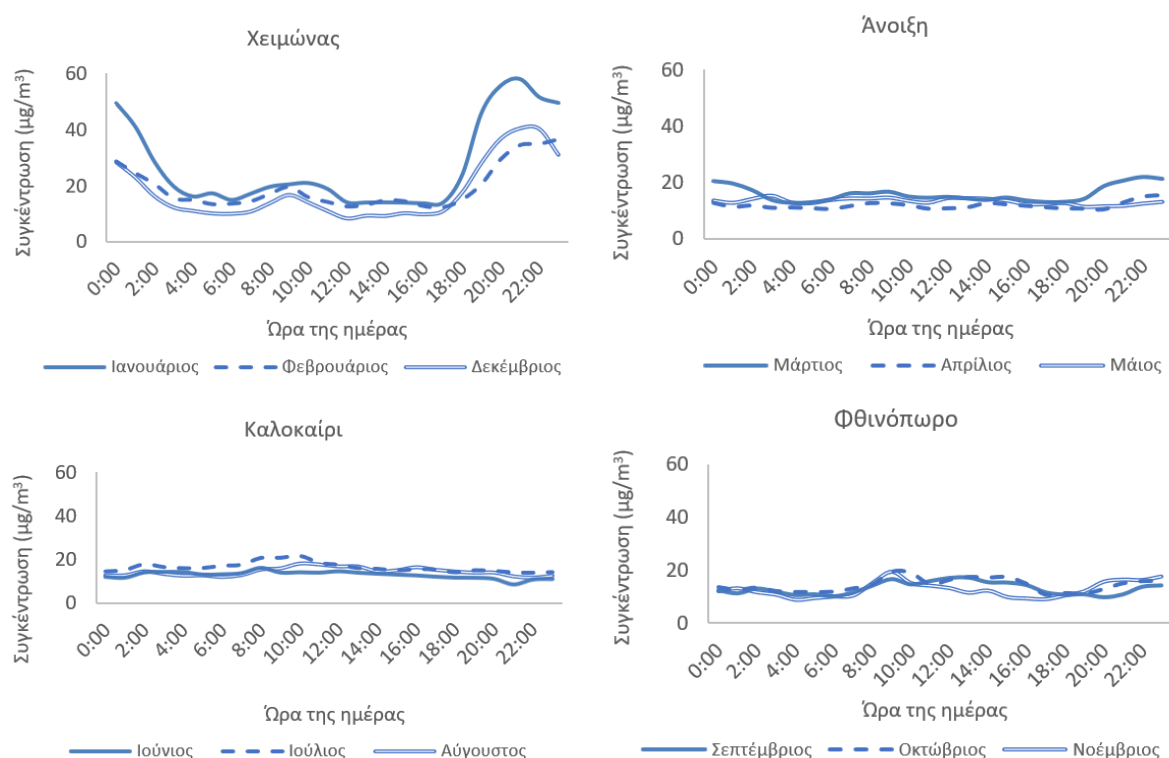
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3, η μέγιστη ημερήσια τιμή συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> παρατηρείται τον Ιανουάριο στα 48,2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Επίσης, τον Ιανουάριο, Φεβρουάριο, Μάρτιο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο του 2023 η αντίστοιχη μέγιστη ημερήσια τιμή είναι πάνω από 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , σε σχέση με τις χαμηλότερες τιμές των υπολοίπων μηνών. Η οικιακή θέρμανση αιτιολογεί αυτές τις αυξημένες τιμές των τεσσάρων αυτών μηνών. Την μικρότερη ελάχιστη ημερήσια συγκέντρωση κατέγραψε ο Φεβρουάριος με τιμή 5,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , καθώς η μέγιστη μέση ημερήσια τιμή ανήκει στον Ιούλιο, η οποία είναι 10,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Εκτός από τον Ιανουάριο, όλες οι μέσες τιμές των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων είναι κάτω από 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και συγκεκριμένα κυμαίνονται από 11,7 μέχρι 19,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και αυτή του Ιανουαρίου είναι 27,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 4.6: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> ανά μήνα για το έτος 2023.

Στο παραπάνω *boxplot*, οι υψηλότερες διακυμάνσεις των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> παρατηρούνται τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο, με τον Ιανουάριο να εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές. Το καλοκαίρι εμφανίζει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις, με το εύρος να παραμένει μικρό και σταθερό. Από τον Σεπτέμβρη ως τον Δεκέμβρη παρατηρείται σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων, καθώς οι ακραίες τιμές είναι πιο συχνές στις αρχές και στο τέλος του έτους.

#### 4.2.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.7: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> ανά εποχή.

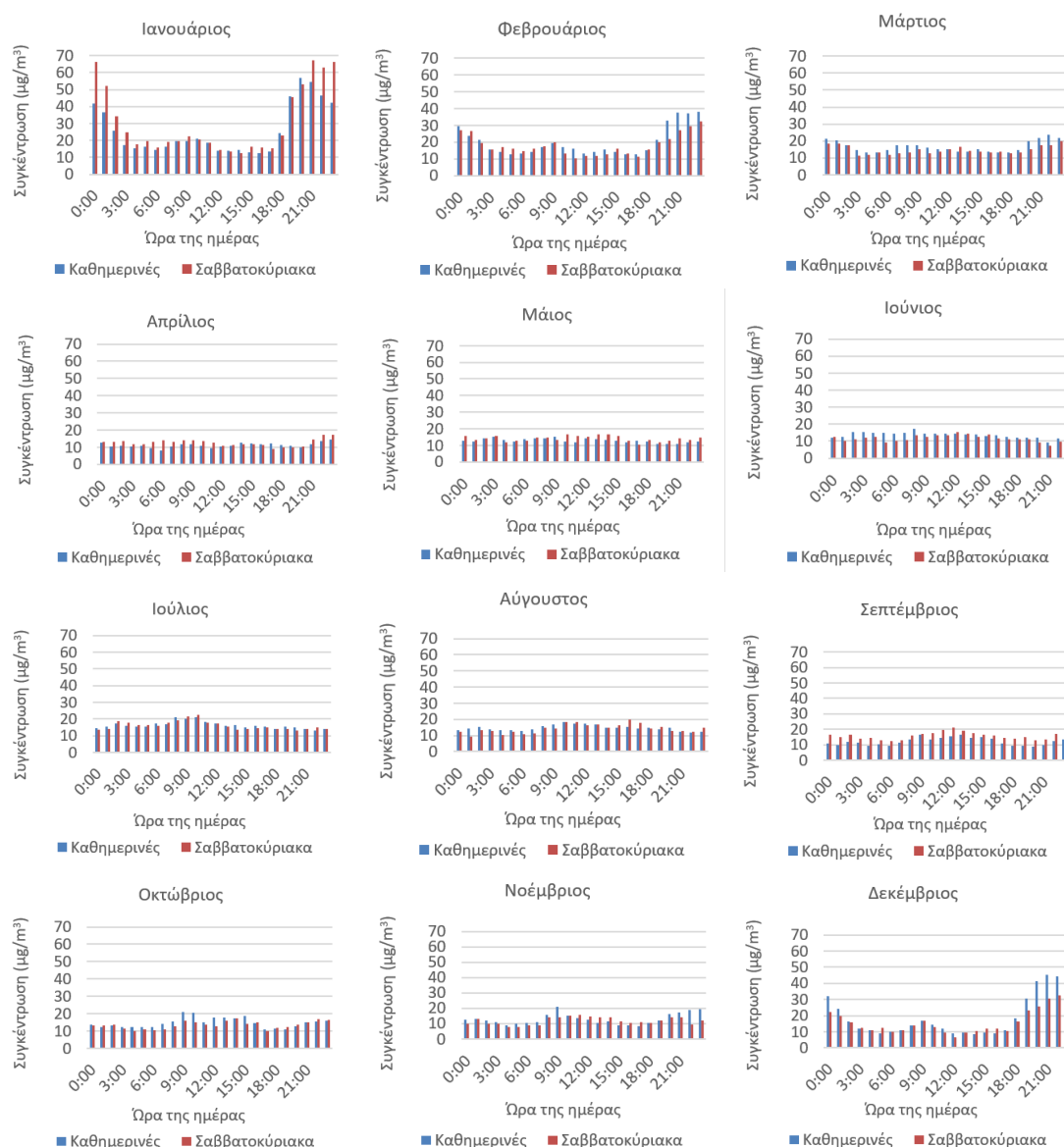
Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται οι ωριαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> κάθε μήνα χωρισμένες ανά εποχή. Τον χειμώνα οι συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> αυξάνονται τις βραδινές ώρες (20:00-1:00), με την υψηλότερη τιμή να καταγράφεται τον Ιανουάριο 57,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (21:00). Κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας οι τιμές PM<sub>2.5</sub> κυμαίνονται μεταξύ 10-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Την άνοιξη του 2023 δεν παρατηρήθηκε κάποια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> στην περιοχή των Χανίων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν ήταν από 12 μέχρι 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Το καλοκαίρι του ίδιου έτους επίσης δεν υπήρχε κάποια διακύμανση μέσα στη μέρα, με τιμές συγκεντρώσεως PM<sub>2.5</sub> από 11-22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Κατά τους φθινοπωρινούς μήνες του 2023 η συγκεντρώση PM<sub>2.5</sub> τις βραδινές ώρες (3:00-7:00) ήταν σταθερή (περίπου 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και στη συνέχεια ακολουθούσε μια μικρή αύξηση μέχρι τα 19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 4.2.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση

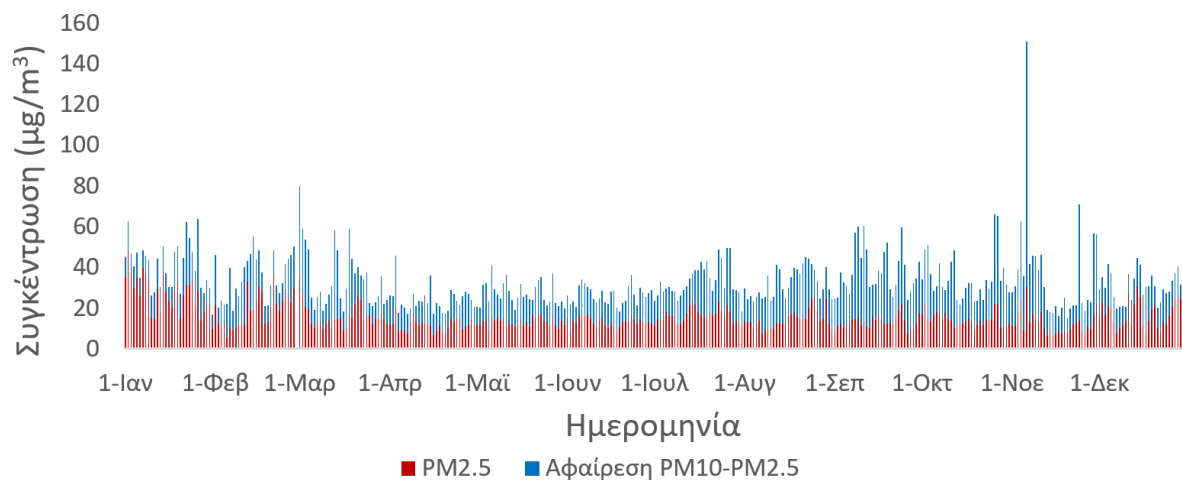


Διάγραμμα 4.8: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

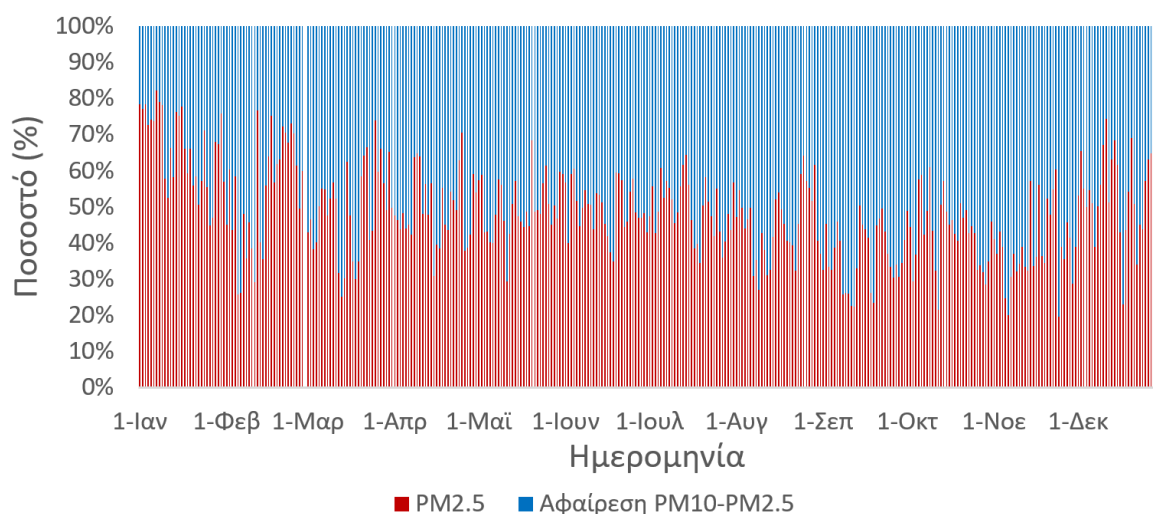
Τα Σαββατοκύριακα του Ιανουαρίου παρατηρούνται υψηλότερες συγκεντρώσεις  $PM_{2.5}$  μεταξύ των ωρών 21:00-1:00, σε σχέση με τις καθημερινές. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια της ημέρας δεν καταγράφεται κάποια διαφορά στις ημέρες της εβδομάδας. Τον Δεκέμβρη οι καθημερινές σημειώνουν μεγαλύτερη συγκέντρωση  $PM_{2.5}$  μεταξύ 19:00-00:00. Τους υπόλοιπους μήνες του έτους 2023 οι τιμές των συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  για τις καθημερινές και τα σαββατοκύριακα δεν έχουν ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ τους. Παρά τη μεγαλύτερη κυκλοφορία τις καθημερινές, οι παράγοντες των  $PM_{2.5}$  φαίνεται να μην διαφέρουν σημαντικά μεταξύ καθημερινών και σαββατοκύριακων, όπως έχει παρατηρηθεί και σε παρόμοια έρευνα (Ferm και Sjoberg, 2015).

#### 4.2.4 Συσχέτιση $PM_{10}$ με $PM_{2.5}$

Τα  $PM_{2.5}$  είναι συχνά υποσύνολο των  $PM_{10}$ , καθώς περιλαμβάνονται στη γενική κατηγορία των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$ . Δηλαδή, όλα τα  $PM_{2.5}$  είναι  $PM_{10}$ . Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ποσότητα των  $PM_{2.5}$  που εμπεριέχεται στα  $PM_{10}$ .



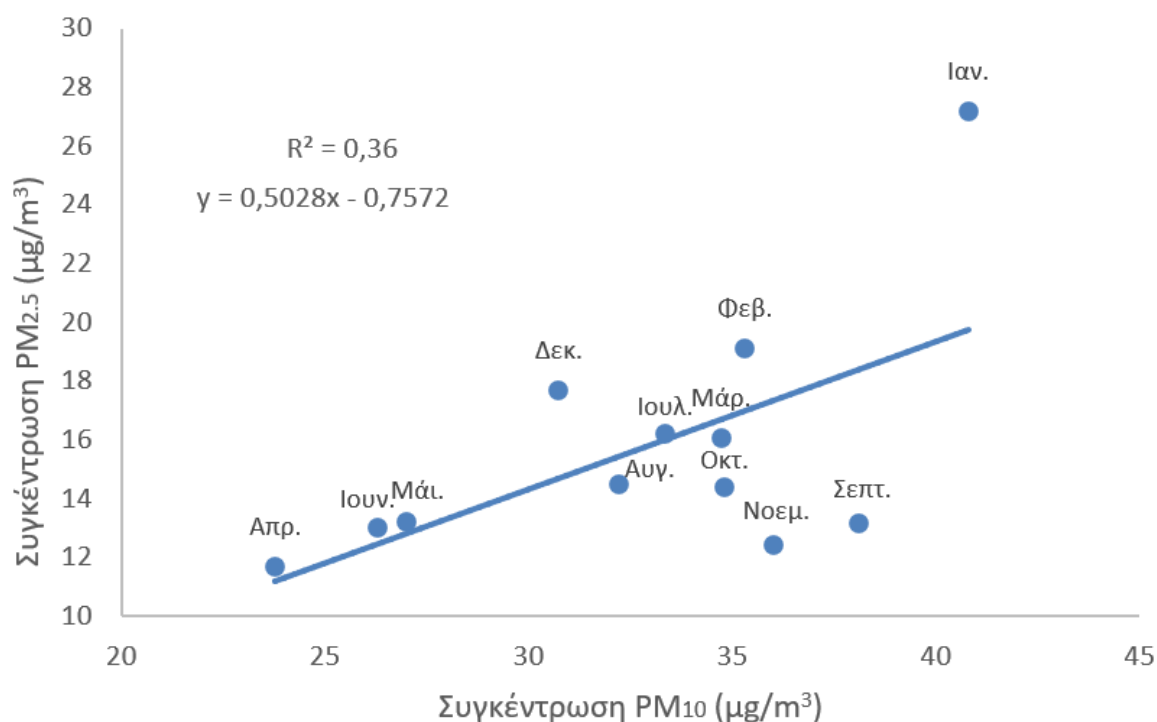
Διάγραμμα 4.9: Μέση ημερήσια συγκέντρωση  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  στην περιοχή των Χανίων το 2023.



Διάγραμμα 4.10: Ποσοστό μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  στην περιοχή των Χανίων το 2023.

Στο Διάγραμμα 4.10 παρατηρείται ότι τον Ιανουάριο το μεγαλύτερο ποσοστό  $PM_{10}$  είναι τα  $PM_{2.5}$  με μεγαλύτερο ποσοστό  $PM_{2.5}$  το 81%. Τον Ιανουάριο το ποσοστό  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  κυμαίνεται από 45% μέχρι 81%. Τον Φεβρουάριο υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις στην ποσότητα  $PM_{2.5}$  που περιέχονται στα  $PM_{10}$ , με ποσοστά  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  από 25% μέχρι 75%. Κατά τον υπόλοιπο χρόνο τα ποσοστά των  $PM_{2.5}$  που περιέχονται στα  $PM_{10}$  είναι ως επί το πλείστον κοντά στο 50%, με κάποιες εξαιρέσεις και διακύμανση από 20% μέχρι 80% τα  $PM_{2.5}$ . Το εύρος του ποσοστού των  $PM_{2.5}$  που περιέχονται στα  $PM_{10}$  τη συγκεκριμένη χρονιά δεν διαφέρει ιδιαίτερα από παρόμοια ανάλυση για την περίοδο Μάιος 2020 - Σεπτέμβριος 2021, στον σταθμό του Ακρωτηρίου, όπου

καταγράφηκαν ποσοστά από 23% μέχρι 85% (Chatoutsidou και Lazaridis, 2022). Παρόμοια εύρη ποσοστών έχουν αναφερθεί και σε άλλες μελέτες. Στη Θεσσαλονίκη, το ποσοστό των  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  κυμάνθηκε από 20% έως 74%, με μέση τιμή 48% κατά τη ψυχρή περίοδο και 45% κατά τη θερμή (Χρυσικού, κ.ά., 2008). Επιπλέον, σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Μπέρμιγχαμ του Ηνωμένου Βασιλείου, βρέθηκε ότι το ποσοστό των  $PM_{2.5}$  στη συνολική μάζα των  $PM_{10}$  ήταν περίπου 80% κατά τη χειμερινή περίοδο και 50% κατά τη θερινή περίοδο (Harrison, κ.ά., 1997).



Διάγραμμα 4.11: Γραμμική παλινδρόμηση των μηνιαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  και των μηνιαίων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  στην περιοχή των Χανίων το 2023.

Το Διάγραμμα 4.11 δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης  $PM_{10}$  ( $\mu g/m^3$ ) στον οριζόντιο άξονα και της συγκέντρωσης  $PM_{2.5}$  ( $\mu g/m^3$ ) στον κατακόρυφο άξονα, για τους μήνες του 2023. Όπως φαίνεται από την γραμμική παλινδρόμηση, υπάρχει μια θετική γραμμική σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  με τον συντελεστή  $R^2$  να έχει τιμή 0,36. Αυτό υποδηλώνει ότι περίπου το 36% της διακύμανσης της συγκέντρωσης  $PM_{2.5}$  εξηγείται από τη συγκέντρωση  $PM_{10}$ . Το  $R^2$  δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, πράγμα που σημαίνει ότι η συσχέτιση δεν είναι πολύ ισχυρή. Τους θερμούς μήνες παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, γεγονός που υποδηλώνει ότι έχουν κοινές πηγές. Σύμφωνα με αντίστοιχη έρευνα, ο κύριος παράγοντας τους (>30%), είναι η σκόνη από ορυκτά, η οποία προέρχεται από τη μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα (Chatoutsidou και Lazaridis, 2022). Αντιθέτως, παρατηρείται ότι ο Ιανουάριος, όπως και στο Διάγραμμα 4.10, παρουσιάζει πολύ υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης  $PM_{2.5}$  σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες. Επίσης, ο Ιανουάριος σημειώνει την μεγαλύτερη απόκλιση τιμών, καθώς βρίσκεται πολύ πάνω από τη γραμμή παλινδρόμησης. Αυτό δείχνει ότι η συγκέντρωση  $PM_{2.5}$  για τον Ιανουάριο είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή βάσει της συγκέντρωσης  $PM_{10}$ , συμπεραίνοντας ότι οι συγκεντρώσεις  $PM_{2.5}$  δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από τις συγκεντρώσεις  $PM_{10}$ , καθώς άλλοι παράγοντες ενδέχεται να επηρεάζουν τα επίπεδα  $PM_{2.5}$ . Η

μεγαλύτερη απόκλιση τους ψυχρούς μήνες (Ιανουάριος, Σεπτέμβριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος) αποδίδονται σε δύο κύριους παράγοντες: την αυξημένη εκπομπή λεπτόκοκκων σωματιδίων λόγω καύσεων για θέρμανση και τη μεγαλύτερη απομάκρυνση των μεγάλων σωματιδίων ( $PM_{10}$ ) λόγω αυξημένων βροχοπτώσεων (Χρυσικού, κ.ά., 2008).

#### 4.2.5 Μηνιαία ωριαία συσχέτιση $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$

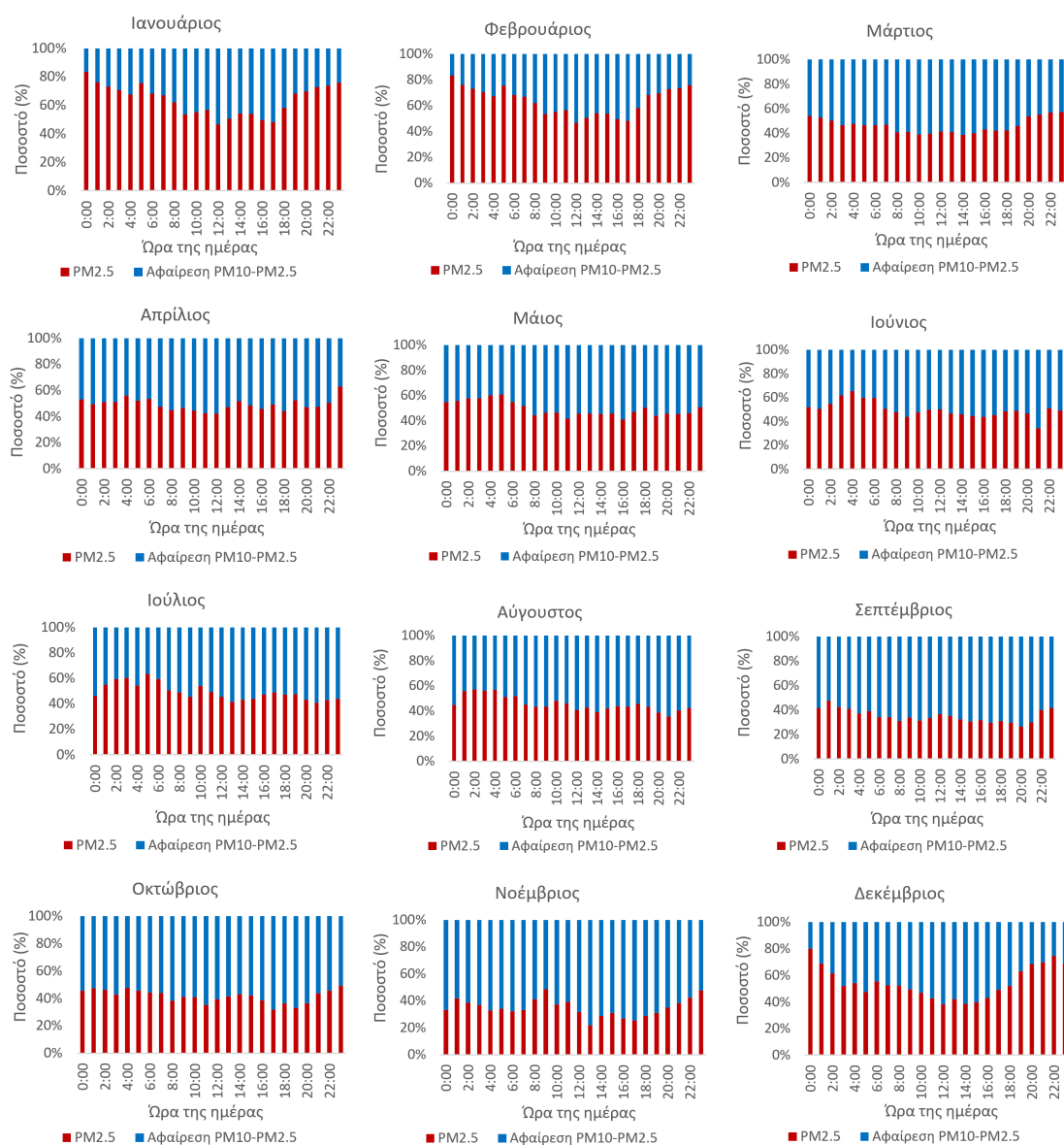


Διάγραμμα 4.12: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2023.

Τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο παρατηρείται η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , κυρίως τις βραδινές ώρες (18:00-2:00), με ένα μεγάλο μέρος των  $PM_{10}$  να αποτελείται από  $PM_{2.5}$ . Τους μήνες του φθινοπώρου παρατηρείται μια μειωμένη περιεκτικότητα των  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$ . Τους υπόλοιπους μήνες φαίνεται ότι τα αιωρούμενα σωματίδια  $PM_{10}$  αποτελούνται κατά το ήμισυ από



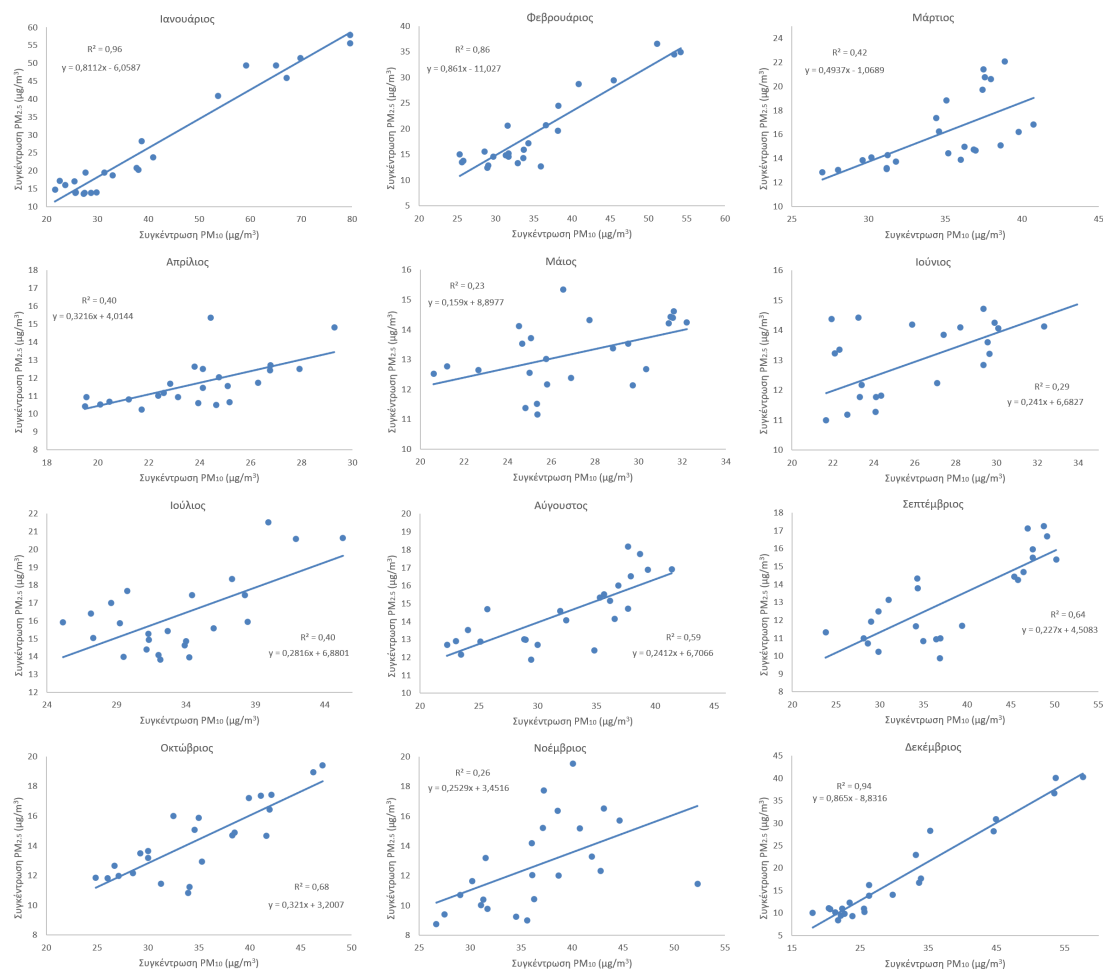
μικροσωματίδια  $PM_{2.5}$ .



Διάγραμμα 4.13: Ποσοστιαία σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2023.

Στο Διάγραμμα 4.13 παρατηρείται ότι στους περισσότερους μήνες το μεγαλύτερο μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  είναι  $PM_{2.5}$ , με υψηλότερα ποσοστά τους μήνες του χειμώνα. Μάλιστα το ποσοστό των  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  εκείνους τους μήνες φτάνει το 80%. Όσον αφορά την άνοιξη, και στους τρεις μήνες, η περιεκτικότητα των  $PM_{2.5}$  στα  $PM_{10}$  δεν αποκλίνουν αρκετά από το 50%. Το καλοκαίρι μεταξύ των ωρών 2:00-6:00 υπάρχει μια αύξηση του ποσοστού των  $PM_{2.5}$  που ξεπερνούν το 50% και συγκεκριμένα τον Ιούνιο το ποσοστό φτάνει το 70%. Τέλος, το φθινόπωρο η ποσοστιαία συσχέτιση των  $PM_{2.5}$  έχει εύρος από 30% μέχρι 50%.





Διάγραμμα 4.14: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  και των ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  για το έτος 2023.

Το Διάγραμμα 4.14 παρουσιάζει τις γραμμικές παλινδρομήσεις για κάθε μήνα του 2023, δείχνοντας τη σχέση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$ . Παρατηρείται ότι ο συντελεστής προσδιορισμού διαφέρει σημαντικά ανά μήνα, καθώς οι τιμές του κυμαίνονται από 0,23 μέχρι 0,96, υποδεικνύοντας ότι η σχέση  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$  επηρεάζεται από εποχιακές ή περιβαλλοντικές συνθήκες. Τους χειμερινούς μήνες, η συσχέτιση είναι ισχυρότερη, αφού ο συντελεστής προσδιορισμού έχει τιμές μεγαλύτερες από 0,8. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πιο ομαλά κατανεμημένες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, κατά τους ψυχρούς μήνες η ατμόσφαιρα είναι συχνά πιο στατική, με περιορισμένη ανάμειξη των αέριων μαζών. Αυτό σημαίνει ότι η ρύπανση μπορεί να παραμείνει σε σταθερά επίπεδα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ενώ η διάχυση των ρύπων να είναι περιορισμένη.

Την άνοιξη η συσχέτιση είναι χαμηλότερη, με το  $R^2$  να έχει εύρος από 0,23 μέχρι 0,42. Αυτές οι τιμές συσχέτισης δείχνουν ότι οι πηγές  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$  αρχίζουν να διαφέρουν, λόγω των ασταθών συνθηκών, της μεγαλύτερης ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και της επαναιώρησης σκόνης και άλλων πρωτογενών σωματιδίων.

Τους μήνες του καλοκαιριού, όπως και της άνοιξης, η συσχέτιση είναι επίσης χαμηλή με τον συντελεστή συσχέτισης να έχει τιμές για τον Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο 0,29, 0,40 και 0,59 αντίστοιχα. Συνεπώς, εκείνους τους μήνες τα  $PM_{2.5}$  προέρχονται από διαφορετικές πηγές απ' ότι τα  $PM_{10}$ , όπως

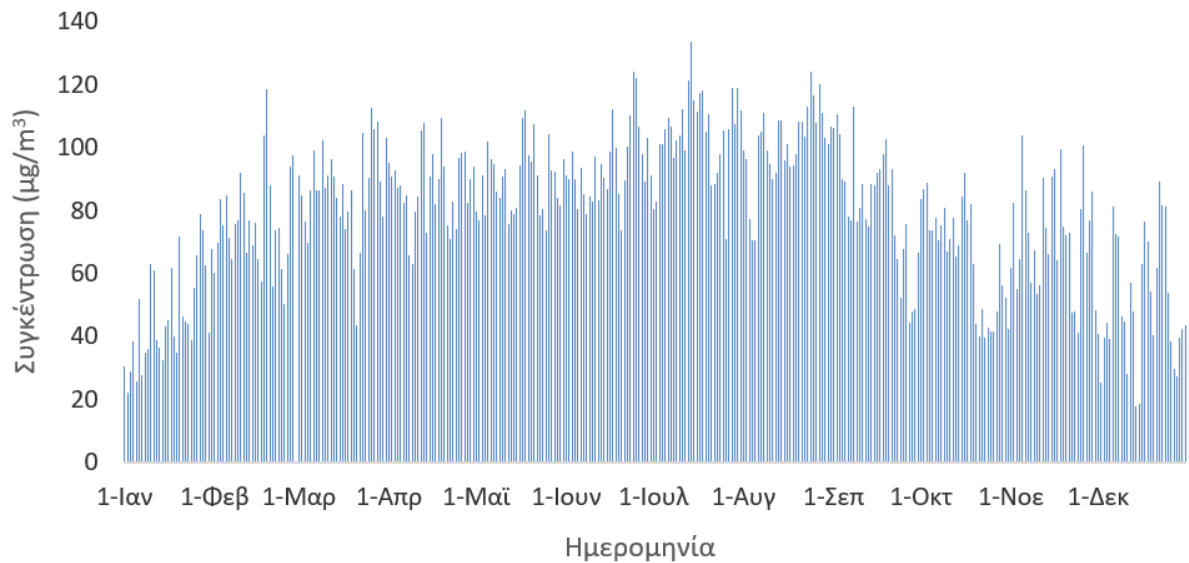
το θαλασσίνο αλάτι και η σκόνη.

Τέλος, το φθινόπωρο η συσχέτιση είναι μέτρια με το εύρος του  $R^2$  μεταξύ 0,26-0,68. Είναι διακριτή η διαφορά μεταξύ των συσχετίσεων του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου με αυτή του Νοεμβρίου, καθώς οι δύο πρώτοι μήνες έχουν συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο από 0,6, σε αντίθεση με τον Νοέμβριο που έχει μόλις 0,26. Ο κυριότερος λόγος που αιτιολογεί αυτή τη διαφορά είναι τα επεισόδια σκόνης, καθώς τον Νοέμβριο σημειώθηκαν οι περισσότερες ημέρες με Αφρικανική σκόνη σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες το 2023, όπου σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12 οι ημέρες με επεισόδια σκόνης ήταν 10. Η Αφρικανική σκόνη αποτελείται κυρίως από σωματίδια  $PM_{10}$ , τα οποία επηρεάζουν αρκετά τις συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα. Τα  $PM_{2.5}$  αυξάνονται επίσης, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συσχέτιση μεταξύ τους. Επιπλέον, άλλος ένας λόγος που οι συσχετίσεις του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου είναι μεγαλύτερες από εκείνες του Νοεμβρίου, οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι πιο έντονη τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας της ημέρας και της γωνίας με την οποία η ηλιακή ενέργεια πέφτει στην ατμόσφαιρα. Η ακτινοβολία αυτή ενισχύει την φωτοχημική δραστηριότητα, με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών αερίων και σωματιδίων, όπως τα  $PM_{2.5}$ . Από την άλλη, τον Νοέμβριο, με την πτώση της ηλιακής ακτινοβολίας, μειώνεται η φωτοχημική δραστηριότητα και συνεπώς η παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων, οδηγώντας σε πιο αδύναμους δεσμούς μεταξύ των συγκεντρώσεων  $PM_{2.5}$  και  $PM_{10}$  (Herman, κ.ά., 2020).

### 4.3 Χρονοσειρά $O_3$

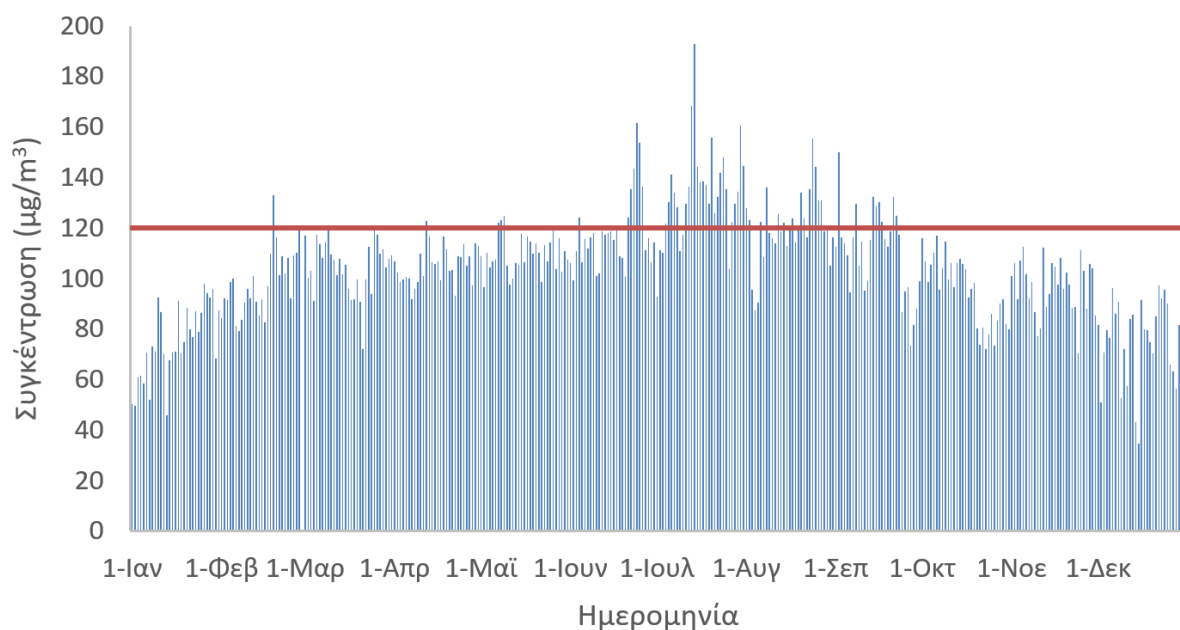
Η μέση ετήσια τιμή συγκέντρωσης του όζοντος ( $O_3$ ) που καταγράφηκε στην πόλη των Χανίων το 2023 είναι  $79,6 \mu g/m^3$ . Συγκριτικά, η μέση συγκέντρωση  $O_3$  για την περίοδο 2003-2009 στον σταθμό του Ακρωτηρίου ήταν  $87,3 \mu g/m^3$  (Korpanakis, κ.ά., 2015). Σε άλλη μελέτη για την περίοδο 2001-2012, η μέση τιμή συγκέντρωσης  $O_3$  στην Αθήνα ήταν  $64,5 \mu g/m^3$  (Tzima, κ.ά., 2018). Η διαφορά στις συγκεντρώσεις  $O_3$  μεταξύ των αστικών και εξωτερικών περιοχών εξηγείται κυρίως από τη χημική αλληλεπίδραση του  $O_3$  με το  $NO$ , το οποίο εκπέμπεται από αστικές πηγές ρύπανσης, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντίδραση 1.7. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη μείωση των επιπέδων  $O_3$  στις πυκνοκατοικημένες περιοχές. Αντίθετα, σε εξωτερικές περιοχές, όπου οι εκπομπές  $NO$  είναι χαμηλότερες, το  $O_3$  δεν καταναλώνεται τοπικά με τον ίδιο ρυθμό και μπορεί να συσσωρευτεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις (Wang, κ.ά., 2013).

Στο Διάγραμμα 4.15 παρουσιάζονται οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις  $O_3$  στην περιοχή των Χανίων για το έτος 2023. Οι τιμές κυμαίνονται από  $17,5 \mu g/m^3$  μέχρι  $133,7 \mu g/m^3$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι την ημέρα με την υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση  $O_3$  ( $133,7 \mu g/m^3$ ), η οποία ήταν στις 14 Ιουλίου, καταγράφηκε και η υψηλότερη ωριαία συγκέντρωση  $O_3$  με τιμή  $206,2 \mu g/m^3$ . Η τιμή αυτή, σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EK της Ε.Ε., ξεπερνά το όριο ενημέρωσης  $180 \mu g/m^3$ , αλλά όχι το όριο συναγερμού, το οποίο είναι  $240 \mu g/m^3$ .



Διάγραμμα 4.15: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις  $O_3$  για το 2023.

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.15 το φθινόπωρο και τον χειμώνα παρατηρούνται μικρότερες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις  $O_3$  απ' ό τι την άνοιξη και το καλοκαίρι. Η αύξηση συγκέντρωσης τους θερμότερους μήνες οφείλεται κυρίως στην υψηλότερη θερμοκρασία και ακτινοβολία, η οποία με τη σειρά της ενισχύει τις φωτοχημικές αντιδράσεις, δεδομένου ότι το  $O_3$  είναι δευτερογενής ρύπος. Η Ε.Ε. δεν έχει θέσει κάποιο όριο για την μέση ημερήσια συγκεντρώση  $O_3$ , αλλά μια τιμή στόχο, όπου ο μέγιστος ημερήσιος μέσος όρος 8 ωρών δεν πρέπει να ξεπερνά τα  $120 \mu g/m^3$  για περισσότερο από 25 ημέρες ανά ημερολογιακό έτος. Επομένως, στο Διάγραμμα 4.16 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις  $O_3$  ανά μέγιστη ημερήσια 8ωρη συγκεντρώση για το 2023 και η κόκκινη οριζόντια γραμμή συμβολίζει το νομοθετικό όριο της Ε.Ε. Συνολικά εκείνο το έτος υπήρξαν 62 υπερβάσεις, με μόλις τις 25 από αυτές να έχουν πραγματοποιηθεί τον Ιούλιο. Στον πίνακα 4.4 αναγράφονται αναλυτικά οι ημέρες που παρατηρήθηκαν υπερβάσεις.



Διάγραμμα 4.16: Μέγιστη ημερήσια δωρη συγκέντρωση  $O_3$  για το 2023.

Πίνακας 4.4: Υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε) για τις συγκεντρώσεις  $O_3$  στον σταθμό των Χανίων το έτος 2023.

| Μήνας         | Ημέρες όπου $O_3 > 120 \mu g/m^3$ (ΕΕ) | Ημερομηνίες υπέρβασης (ΕΕ)  |
|---------------|--|---|
| Ιανουάριος    | 0                                      | -   |
| Φεβρουάριος   | 2                                      | 19, 28  |
| Μάρτιος       | 1                                      | 9   |
| Απρίλιος      | 1                                      | 12  |
| Μάιος         | 3                                      | 7, 8, 9   |
| Ιούνιος       | 8                                      | 4, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26   |
| Ιούλιος       | 25                                     | 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 |
| Αύγουστος     | 14                                     | 1, 2, 6, 8, 12, 14, 17, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27  |
| Σεπτέμβριος   | 8                                      | 2, 8, 14, 15, 16, 17, 21, 22  |
| Οκτώβριος     | 0                                      | -   |
| Νοέμβριος     | 0                                      | -   |
| Δεκέμβριος    | 0                                      | -   |
| <b>Σύνολο</b> | <b>62</b>                              | -   |

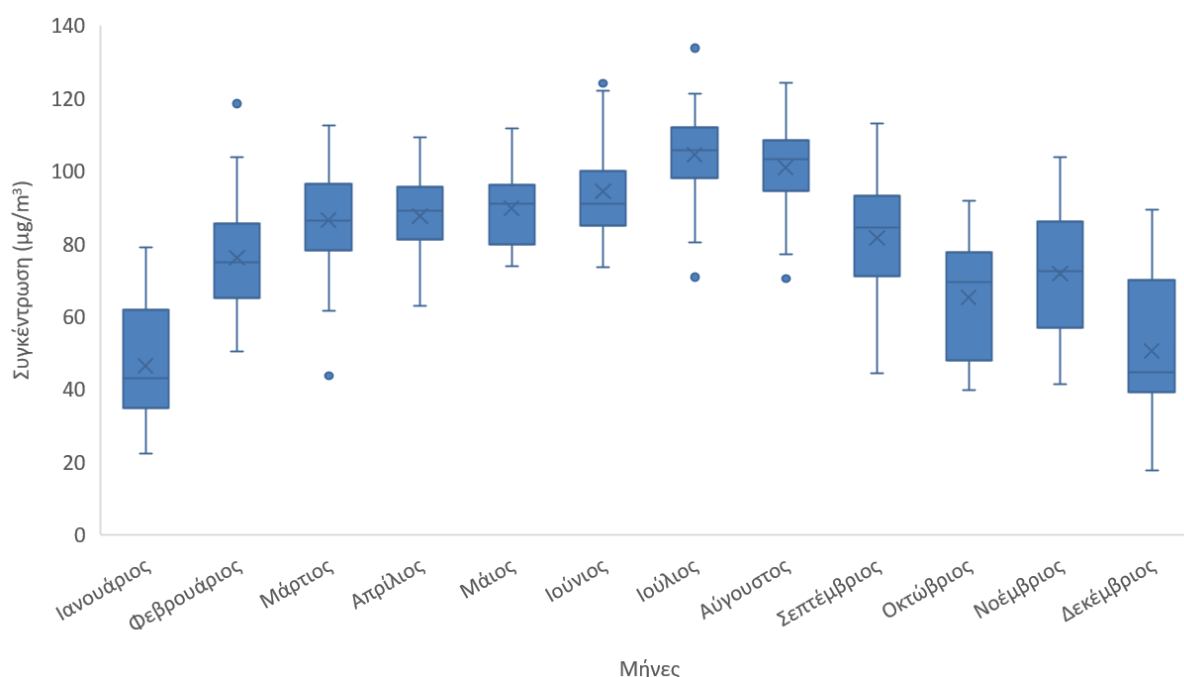
Τον Ιανουάριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο δεν παρατηρήθηκε κάποια υπέρβαση, γεγονός που αιτιολογούν οι χαμηλές τιμές συγκεντρώσεων  $O_3$  τους συγκεκριμένους μήνες. Επιπλέον, παρόλο που έγινε υπέρβαση των  $120 \mu g/m^3$  σε ημερήσια δωρη συγκέντρωση τον Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο, πρόκειται για ελάχιστες φορές. Συγκεκριμένα τον Φεβρουάριο έγινε 2 φορές υπέρβαση, τον Μάρτιο και τον Απρίλιο 1 και τον Μάιο 3. Στη συνέχεια, οι μήνες με τις περισσότερες υπερβάσεις είναι ο Ιούνιος και ο Σεπτέμβριος με 8, ο Ιούλιος με 25 και ο Αύγουστος με 14.

### 4.3.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Πίνακας 4.5: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης  $O_3$  το 2023.

| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 46,5      | 22,2          | 35,5              | 42,9              | 61,4              | 78,9         |
| Φεβρουάριος | 76,1      | 50,3          | 65,7              | 75,0              | 85,1              | 118,4        |
| Μάρτιος     | 86,5      | 43,7          | 78,8              | 89,3              | 96,8              | 112,6        |
| Απρίλιος    | 87,5      | 62,8          | 81,9              | 89,0              | 94,9              | 109,1        |
| Μάιος       | 89,6      | 73,8          | 80,1              | 89,0              | 95,9              | 111,6        |
| Ιούνιος     | 93,4      | 39,3          | 81,0              | 90,0              | 98,1              | 116,1        |
| Ιούλιος     | 104,4     | 70,7          | 95,3              | 103,5             | 111,8             | 133,7        |
| Αύγουστος   | 101,0     | 70,3          | 90,8              | 103,2             | 108,4             | 124,1        |
| Σεπτέμβριος | 81,6      | 44,5          | 72,8              | 84,3              | 92,7              | 113,1        |
| Οκτώβριος   | 39,6      | 23,9          | 28,4              | 48,2              | 69,4              | 77,9         |
| Νοέμβριος   | 71,8      | 41,3          | 58,3              | 72,6              | 88,1              | 103,7        |
| Δεκέμβριος  | 50,5      | 17,5          | 39,3              | 44,5              | 66,5              | 89,3         |

Στον Πίνακα 4.5 καταγράφονται οι μηνιαίες μεταβολές των μέσων ημερησίων συγκεντρώσεων και τα εκατοστημόρια τους. Οι δύο μικρότερες ελάχιστες τιμές αντιστοιχούν στους μήνες του Ιανουαρίου και Δεκεμβρίου με τιμές  $22,2 \mu g/m^3$  και  $17,5 \mu g/m^3$ , καθώς οι μέγιστες ελάχιστες τιμές σε θερμότερους μήνες όπως ο Μάιος, Ιούλιος και Αύγουστος με ελάχιστες μηνιαίες τιμές  $73,8 \mu g/m^3$ ,  $70,7 \mu g/m^3$  και  $70,3 \mu g/m^3$  αντίστοιχα. Οι υψηλότερες μέσες τιμές και μέγιστες τιμές ανήκουν πάλι στον Ιούλιο και Αύγουστο με μέσες τιμές  $104,4 \mu g/m^3$  και  $101 \mu g/m^3$  και μέγιστες τιμές  $133,7 \mu g/m^3$  και  $124,1 \mu g/m^3$  αντίστοιχα.

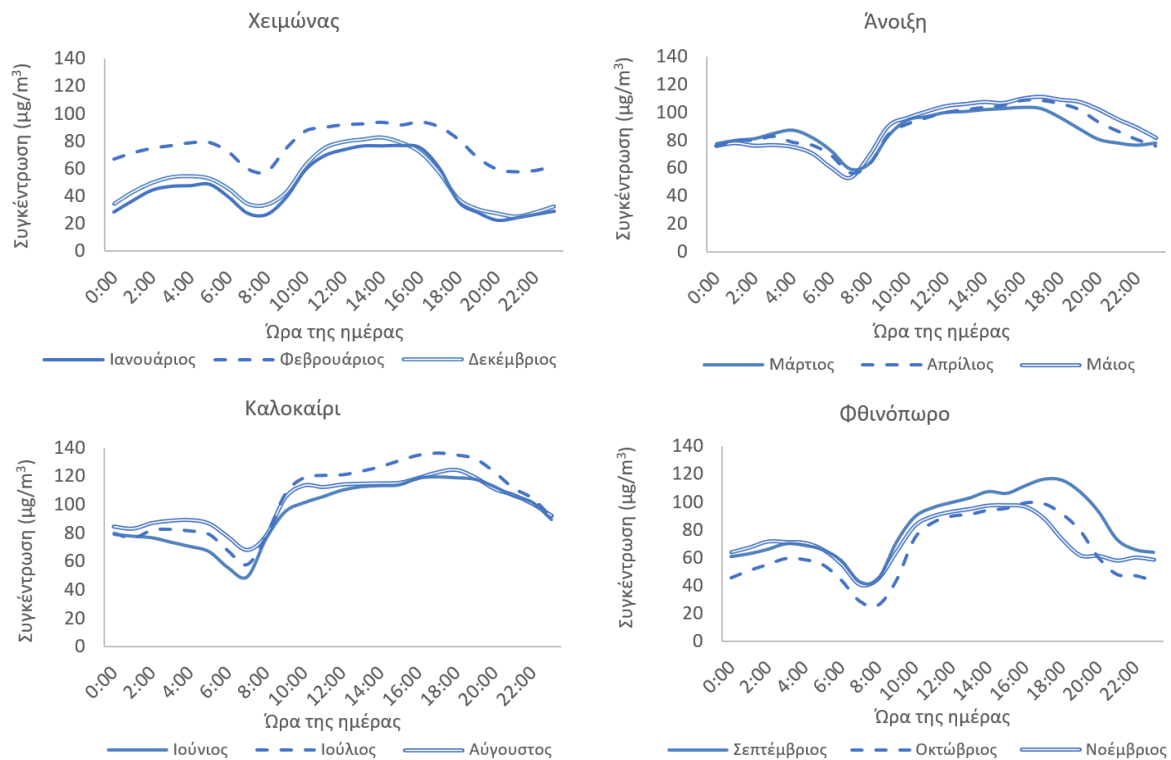


Διάγραμμα 4.17: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερησίων συγκεντρώσεων  $O_3$  ανά μήνα για το έτος 2023.

Στο Διάγραμμα 4.17 πραγματοποιείται η απεικόνιση του Πίνακα 1.5. Αναλυτικότερα φαίνεται η κατανομή κάθε μήνα και διακρίνεται η διαφορά χειμώνα-καλοκαιριού. Ο Ιανουάριος έχει τη μικρότερη τιμή 75ου εκατοστημορίου ( $61,4 \mu g/m^3$ ), δηλαδή ότι το 75% των μέσων ημερησίων τιμών

συγκέντρωσης δεν ξεπερνά τα  $61,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Αντίθετα ο Ιούλιος, ως μήνας με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{O}_3$ , έχει ελάχιστη τιμή  $70,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο είναι υψηλότερο από το 75ο εκατοστημόριου του Ιουλίου.

#### 4.3.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.18: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις  $\text{O}_3$  ανά εποχή.

Η συγκέντρωση του  $\text{O}_3$  παρουσιάζει χαρακτηριστική ημερήσια διακύμανση, επηρεαζόμενη κυρίως από τη φωτοχημική του παραγωγή. Τα επίπεδα του είναι χαμηλότερα τη νύχτα και υψηλότερα το μεσημέρι έως αργά το απόγευμα, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία ευνοεί τον σχηματισμό του μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων (Korpanakis, κ.ά., 2015).

Τον χειμώνα παρατηρείται η ίδια διακύμανση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{O}_3$  στους τρεις αυτούς μήνες, με τον Φεβρουάριο να σημειώνει τις υψηλότερες τιμές. Συγκεκριμένα, τις βραδινές ώρες οι συγκεντρώσεις τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο κυμαίνονται γύρω στα  $30\text{-}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , τις πρωινές ώρες (6:00-9:00) σημειώνεται μια πτώση στα  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και στη συνέχεια υπάρχει μια αύξηση στα  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι τις 16:00, όπου ξεκινά πάλι η πτώση. Τον Φεβρουάριο οι τιμές συγκέντρωσης  $\text{O}_3$  τις βραδινές ώρες κυμαίνονται στα  $60\text{-}80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , στις 6:00 η συγκέντρωση μειώνεται στα  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και στις 9:00 καταγράφεται πάλι αύξηση συγκέντρωσης, η οποία φτάνει τα  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι τις 16:00. Την άνοιξη οι ωριαίες τιμές των τριών μηνών αποκλίνουν μεταξύ τους απειροελάχιστα με χαμηλότερες τιμές γύρω στα  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 7:00. Στις 9:00 η συγκέντρωση έχει αυξηθεί στα  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και συνεχίζει με ανοδική πορεία μέχρι τις 17:00 με τιμές να κυμαίνονται μεταξύ  $100\text{-}110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έπειτα ακολουθεί μια πτώση στα  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες παρατηρείται διαφοροποίηση των ωριαίων συγκεντρώσεων με τον Ιούλιο να έχει τις υψηλότερες τιμές μεταξύ των ωρών 9:00-21:00, με τιμές συγκέντρωσης  $\text{O}_3$  από  $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι  $136 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Μεταξύ των ωρών 00:00-5:00 η συγκέντρωση είναι σταθερή και τους

τρεις μήνες στα  $70\text{--}90\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  και ακολουθεί μια πτώση με τον Ιούνιο να καταγράφει χαμηλότερη τιμή στις 7:00 ( $49\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Το φθινόπωρο, όπως και οι υπόλοιπες εποχές, παρουσιάζουν μειωμένες συγκεντρώσεις κατά τις 6:00-9:00 με συγκεντρώσεις από  $24\text{--}50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Οι χαμηλότερες ωριαίες συγκεντρώσεις  $\text{O}_3$  παρατηρούνται τον Οκτώβριο. Μετά τις 9:00 η συγκέντρωση αυξάνεται και κυμαίνεται στα  $70\text{--}115\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τις υψηλότερες ωριαίες συγκεντρώσεις να ανήκουν στον Σεπτέμβριο κατά τις 18:00.

#### 4.3.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση



Διάγραμμα 4.19: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{O}_3$  Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

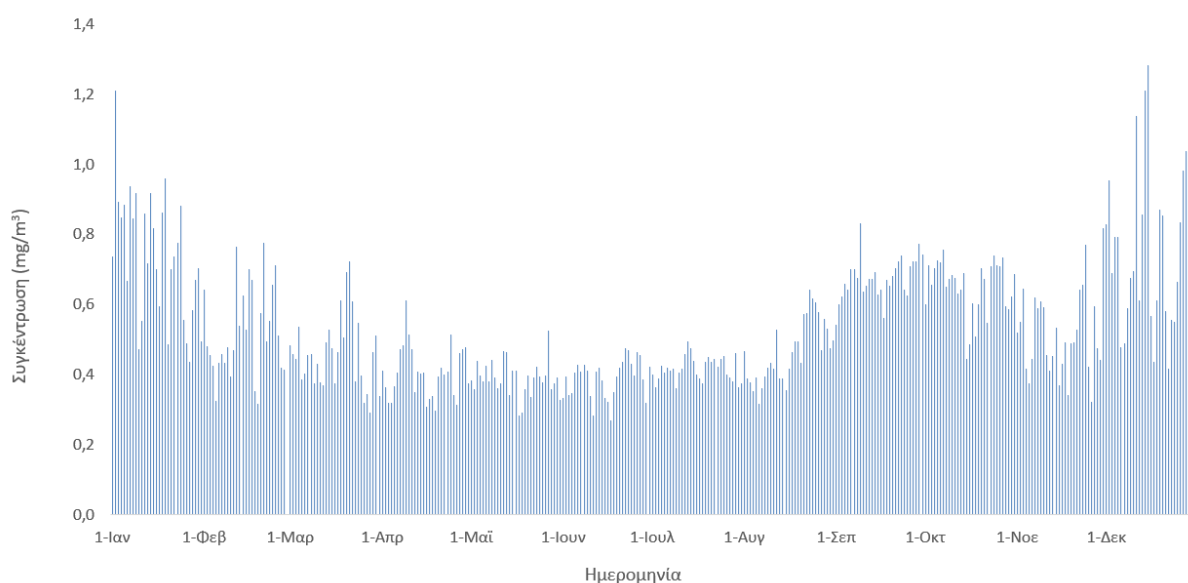
Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.19 τους περισσότερους μήνες δεν υπάρχει διαφοροποίηση στις συγκεντρώσεις μεταξύ καθημερινών και σαββατοκύριακων. Αναλυτικότερα, τον Ιανουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο, Μάιο, Ιούλιο, Αύγουστο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο και Δεκέμβριο οι ωριαίες συγκεντρώσεις

των καθημερινών δεν αποκλίνουν από αυτές των Σαββατοκύριακων. Τον Φεβρουάριο οι απογευματινές ώρες των σαββατοκύριακων είχαν ελαφρά υψηλότερες τιμές  $O_3$ . Τον Ιούνιο και τον Νοέμβριο πάλι παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση το σαββατοκύριακο κάποιες ώρες της ημέρας. Τα Σαββατοκύριακα του Ιουνίου εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις από τις 00:00 μέχρι τις 7:00 και τον Νοέμβριο οι αυξημένες συγκεντρώσεις τα Σαββατοκύριακα πραγματοποιούνται από τις 5:00 μέχρι τις 9:00 και από τις 17:00 μέχρι τις 23:00.

#### 4.4 Χρονοσειρά CO

Στο Διάγραμμα 4.20 καταγράφονται οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις CO για το 2023 στην περιοχή των Χανίων σε  $mg/m^3$ . Η υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση παρατηρήθηκε στις 15 Δεκέμβρη με τιμή  $1,3 mg/m^3$  και η χαμηλότερη τιμή  $0,3 mg/m^3$ , η οποία καταγράφηκε επανειλημμένα κατά τη διάρκεια του έτους. Επίσης, στις 15 Δεκεμβρίου σημειώθηκε η υψηλότερη ωριαία τιμή, φτάνοντας τα  $3 mg/m^3$ . Η μέση τιμή συγκέντρωσης CO για το 2023 ήταν  $0,5 mg/m^3$ , τιμή παρόμοια με εκείνη που καταγράφηκε σε σταθμό της Αθήνας το 2022 ( $0,4 mg/m^3$ ) και της Πάτρας ( $0,5 mg/m^3$ ) (ΥΠΕΝ, 2022).

Σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EK το νομοθετικό όριο που έχει θέσει η Ε.Ε. για το CO είναι ο μέγιστος μέσος όρος δώρου να μην ξεπερνά τα  $10 mg/m^3$ . Το 2023 στα Χανιά δεν υπήρξαν υψηλές συγκεντρώσεις που να πλησιάζουν το νομοθετικό όριο, καθώς οι ωριαίες τιμές συγκέντρωσης CO δεν ξεπέρασαν τα  $3 mg/m^3$ . Επομένως δεν πραγματοποιήθηκε κάποια υπέρβαση της τιμής ορίου.



Διάγραμμα 4.20: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις CO για το 2023.

Ακόμη παρατηρείται για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ότι τον χειμώνα και το φθινόπωρο είναι υψηλότερες από το καλοκαίρι και την άνοιξη, τις οποίες δικαιολογούν οι εκπομπές από πηγές θέρμανσης, που είναι πιο έντονες τους ψυχρούς μήνες, γεγονός που έχει παρατηρηθεί και σε άλλες έρευνες (Gialesakis, κ.ά., 2023; Myriokefalitakis, κ.ά., 2016).

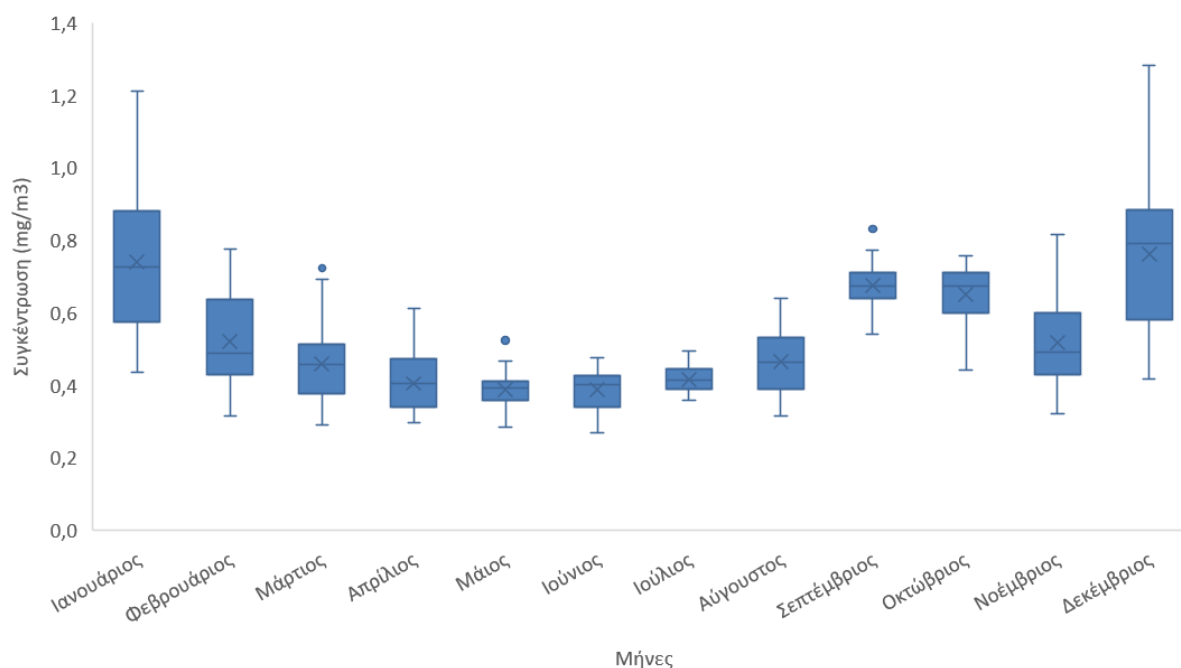


#### 4.4.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Πίνακας 4.6: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης CO το 2023.

| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 0,7       | 0,4           | 0,6               | 0,7               | 0,9               | 1,2          |
| Φεβρουάριος | 0,5       | 0,3           | 0,4               | 0,5               | 0,6               | 0,8          |
| Μάρτιος     | 0,5       | 0,3           | 0,4               | 0,5               | 0,5               | 0,7          |
| Απρίλιος    | 0,4       | 0,3           | 0,3               | 0,4               | 0,5               | 0,6          |
| Μάιος       | 0,4       | 0,3           | 0,4               | 0,4               | 0,4               | 0,5          |
| Ιούνιος     | 0,4       | 0,3           | 0,3               | 0,4               | 0,4               | 0,5          |
| Ιούλιος     | 0,4       | 0,4           | 0,4               | 0,4               | 0,4               | 0,5          |
| Αύγουστος   | 0,5       | 0,3           | 0,4               | 0,5               | 0,5               | 0,6          |
| Σεπτέμβριος | 0,7       | 0,5           | 0,6               | 0,7               | 0,7               | 0,8          |
| Οκτώβριος   | 0,7       | 0,4           | 0,6               | 0,7               | 0,7               | 0,8          |
| Νοέμβριος   | 0,5       | 0,3           | 0,4               | 0,5               | 0,6               | 0,8          |
| Δεκέμβριος  | 0,8       | 0,4           | 0,6               | 0,8               | 0,9               | 1,3          |

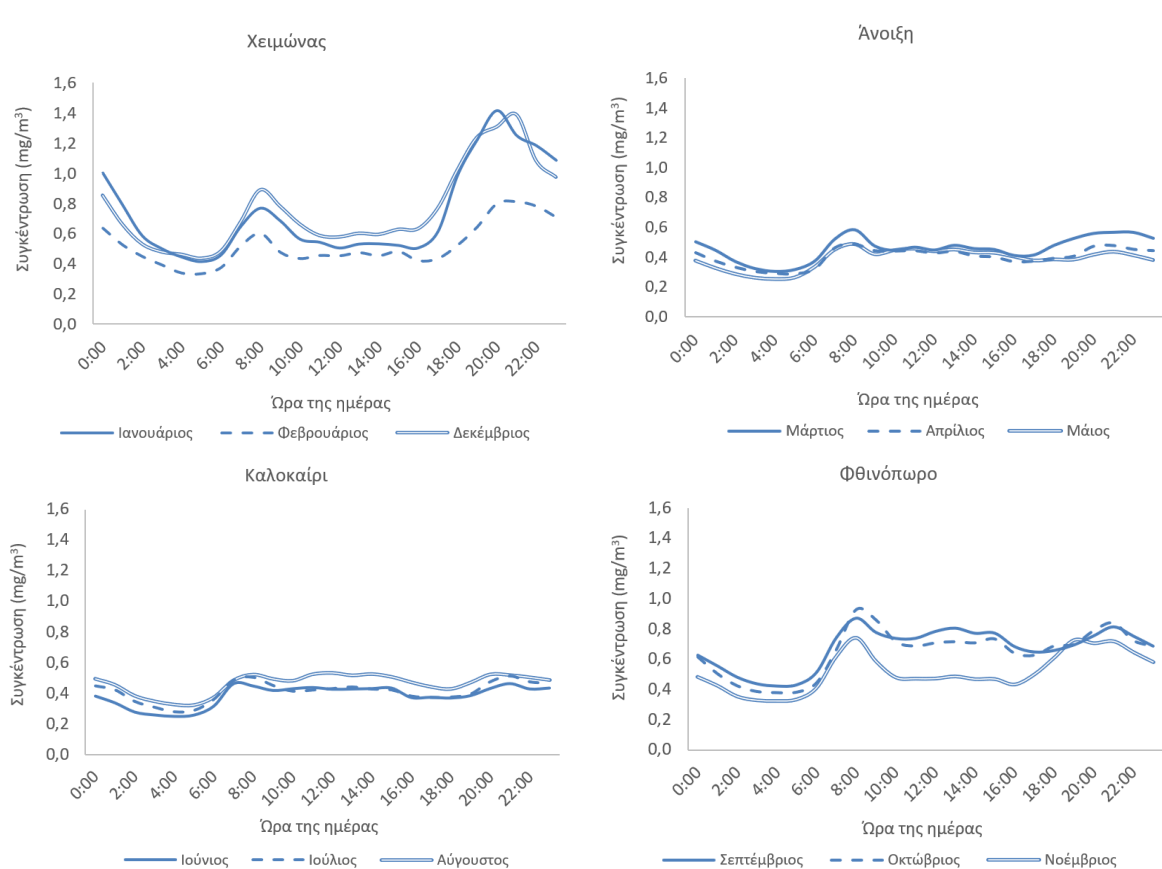
Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.6, οι μέγιστες ημερήσιες τιμές καταγράφηκαν τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο με  $1,2 \text{ mg/m}^3$  και  $1,3 \text{ mg/m}^3$  αντίστοιχα. Η ελάχιστη ημερήσια τιμή,  $0,3 \text{ mg/m}^3$ , σημειώθηκε τους μήνες Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο, Μάιο, Ιούνιο και Σεπτέμβριο. Το εύρος των μέσων μηνιαίων τιμών είναι από  $0,4$  έως  $0,8 \text{ mg/m}^3$ , τιμές που δεν διαφέρουν ιδιαίτερα από εκείνες του ίδιου σταθμού για την περίοδο Απρίλιος 2022 έως Μάρτιος 2023, όπου οι μέσες τιμές να κυμάνθηκαν από  $0,4 \text{ mg/m}^3$  τον Ιούνιο έως  $0,7 \text{ mg/m}^3$  τον Δεκέμβριο (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024).



Διάγραμμα 4.21: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων CO ανά μήνα για το έτος 2023.

Όπως παρατηρείται στο *boxplot* μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκέντρωσης CO για το 2023 έχει ο Δεκέμβριος με ελάχιστη μέση ημερήσια τιμή  $0,8 \text{ mg/m}^3$  και μέγιστη  $1,3 \text{ mg/m}^3$ . Το μικρότερο εύρος σημειώνουν οι καλοκαιρινοί μήνες, όπου επικρατούν χαμηλές συγκεντρώσεις.

#### 4.4.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



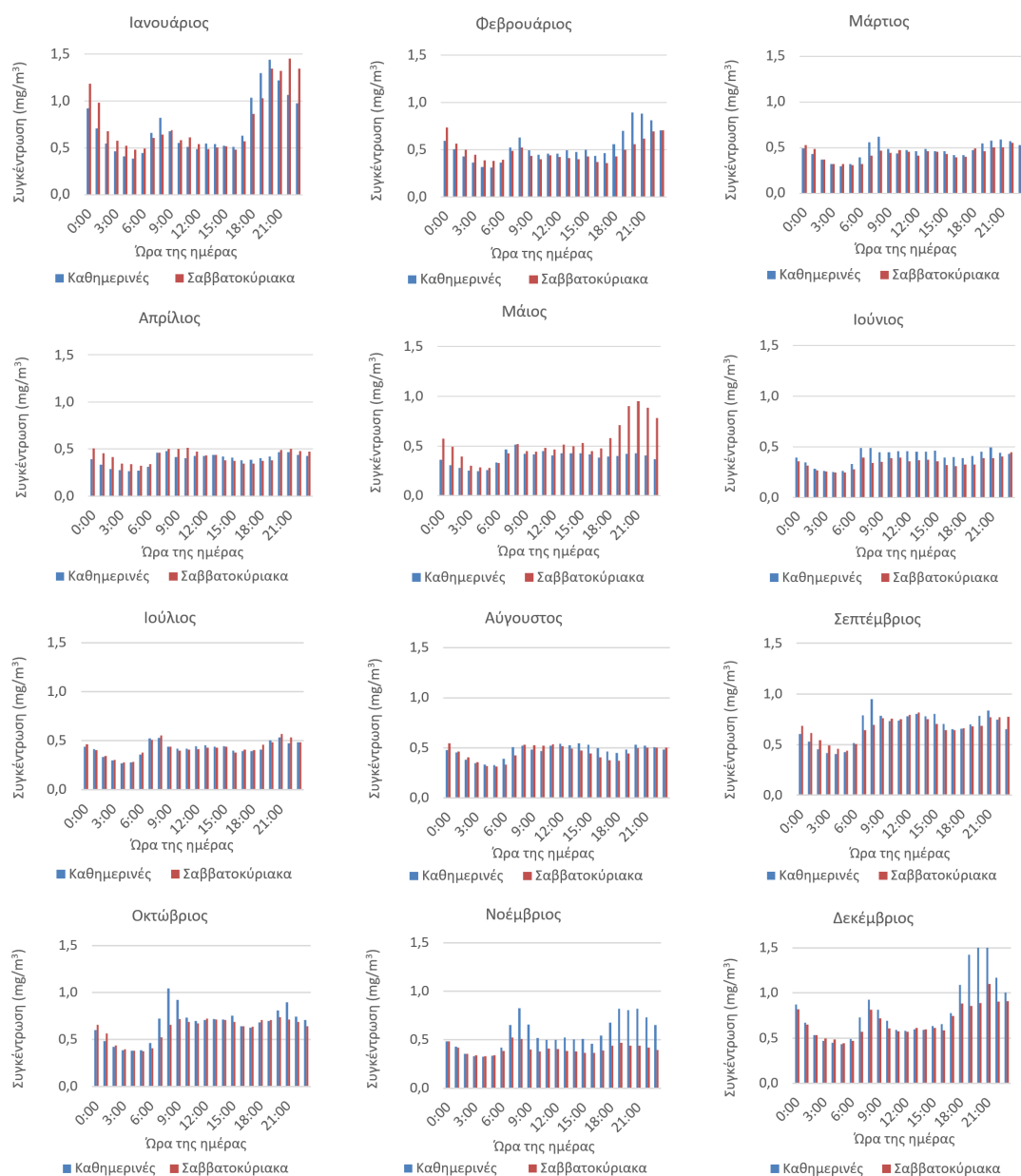
Διάγραμμα 4.22: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις CO ανά εποχή.

Τον χειμώνα υψηλότερες συγκεντρώσεις CO καταγράφονται τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο τις βραδινές ώρες, με υψηλότερη τιμή τα  $1,4 \text{ mg/m}^3$  στις 20:00. Ο Φεβρουάριος τις βραδινές ώρες σημειώνει υψηλότερη τιμή  $0,8 \text{ mg/m}^3$ . Επίσης κατά τη διάρκεια της ημέρας υπάρχει μια αύξηση συγκεντρώσεως κατά τις 8:00 με ωριαίες τιμές τον Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Δεκέμβριο  $0,8$ ,  $0,6$  και  $0,9 \text{ mg/m}^3$  αντίστοιχα. Οι αυξομειώσεις αυτές οφείλονται κυρίως σε ανθρωπογενείς εκπομπές, όπως εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων και εκπομπές από πηγές θέρμανσης.

Την άνοιξη και το καλοκαίρι δεν παρατηρείται μεγάλη διακύμανση κατά το 24ωρο, τιμές συγκεντρώσεως CO να κυμαίνονται από  $0,3 \text{ mg/m}^3$  μέχρι  $0,6 \text{ mg/m}^3$ . Μέγιστη συγκεντρώση σημειώνεται στις 8:00 με μέση ωριαία τιμή τον Μάρτιο  $0,6 \text{ mg/m}^3$  και τον Απρίλιο και Μάιο  $0,5 \text{ mg/m}^3$ , οι οποίες οφείλονται στις αυξημένες εκπομπές λόγω της έντονης κυκλοφορίας των οχημάτων.

Το φθινόπωρο υψηλότερες ωριαίες συγκεντρώσεις σημειώνονται τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο. Όπως και στις υπόλοιπες εποχές, έτσι και στο φθινόπωρο υπάρχει μια αύξηση συγκεντρώσεων τις πρωινές ώρες. Τον Σεπτέμβρη και τον Οκτώβρη οι τιμές έχουν εύρος από  $0,4$  μέχρι  $0,9 \text{ mg/m}^3$  και τον Νοέμβρη από  $0,3$  μέχρι  $0,7 \text{ mg/m}^3$ .

#### 4.4.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση

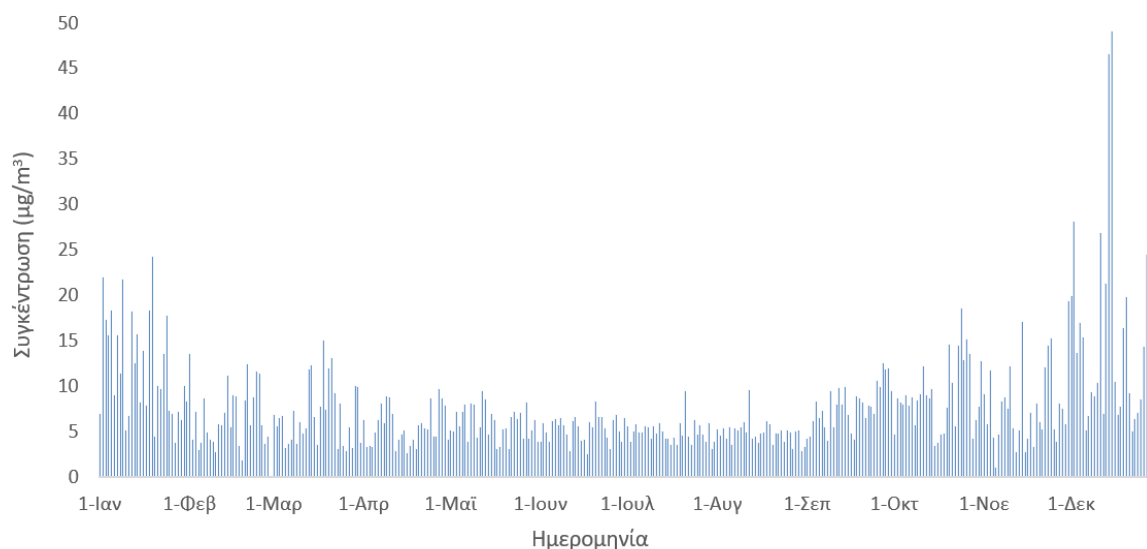


Διάγραμμα 4.23: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων CO Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Στην παραπάνω σύγκριση δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των ημερών της εβδομάδας. Τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο από τις 17:00 μέχρι τις 22:00 παρουσιάζεται υψηλότερη συγκέντρωση τις καθημερινές. Τον Μάιο από τις 13:00 μέχρι τις 3:00 οι συγκεντρώσεις CO είναι μεγαλύτερες τα σαββατοκύριακα από τις καθημερινές. Επίσης, τον Σεπτέμβρη και τον Οκτώβρη από τις 7:00 μέχρι τις 9:00 οι τιμές των συγκεντρώσεων τις καθημερινές ξεπερνάνε αυτές των σαββατοκύριακων. Τέλος, ο Νοέμβριος σημειώνει παρόμοιες συγκεντρώσεις όλες τις μέρες της εβδομάδας από τις 00:00 μέχρι τις 5:00 και ύστερα οι συγκεντρώσεις αυξάνονται τις καθημερινές κατά τη διάρκεια της ημέρας.

## 4.5 Χρονοσειρά NO

Οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις NO που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.24 έχουν εύρος από 1 μέχρι  $49,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με την χαμηλότερη ημερήσια συγκέντρωση να παρατηρείται στις 5 Νοεμβρίου και η υψηλότερη στις 15 Δεκεμβρίου. Παράλληλα, εκείνη την ημέρα καταγράφηκε και η υψηλότερη ωριαία συγκέντρωση του έτους με τιμή  $161,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η μέση τιμή συγκέντρωσης NO του έτους ήταν  $7,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 4.24: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις NO για το 2023.

Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους η μέση ημερήσια συγκέντρωση δεν ξεπερνά τα  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , εκτός από μόνο δύο ημέρες την 14η και 15η Δεκεμβρίου. Τους καλοκαιρινούς μήνες η συγκέντρωση είναι ελάχιστη σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες.

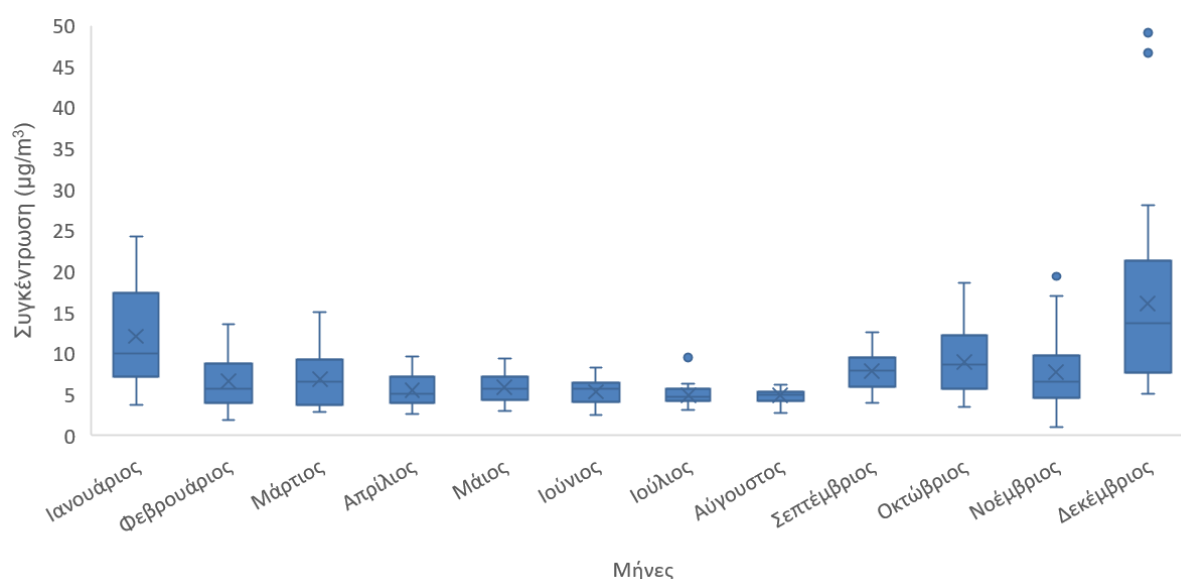
### 4.5.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Πίνακας 4.7: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης NO το 2023.

| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 12,1      | 3,7           | 7,2               | 10,0              | 16,5              | 24,3         |
| Φεβρουάριος | 6,7       | 1,8           | 4,1               | 5,7               | 8,8               | 13,6         |
| Μάρτιος     | 6,9       | 2,8           | 3,7               | 6,5               | 8,7               | 15,0         |
| Απρίλιος    | 5,5       | 2,6           | 4,1               | 5,1               | 6,8               | 9,7          |
| Μάιος       | 5,9       | 3,1           | 4,5               | 5,6               | 7,2               | 9,4          |
| Ιούνιος     | 5,3       | 2,5           | 4,2               | 5,7               | 6,3               | 8,3          |
| Ιούλιος     | 4,9       | 3,1           | 4,2               | 4,7               | 5,6               | 9,5          |
| Αύγουστος   | 4,9       | 2,8           | 4,2               | 4,9               | 5,3               | 9,6          |
| Σεπτέμβριος | 7,8       | 4,0           | 6,2               | 7,9               | 9,5               | 12,5         |
| Οκτώβριος   | 9,0       | 3,5           | 6,0               | 8,6               | 11,3              | 18,6         |
| Νοέμβριος   | 7,8       | 1,0           | 4,8               | 6,6               | 9,1               | 19,4         |
| Δεκέμβριος  | 16,1      | 5,0           | 8,1               | 13,7              | 20,6              | 49,1         |

Στον πίνακα της στατιστικής ανάλυσης του NO αναγράφεται ότι η μικρότερη ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί στον Νοέμβριο με τιμή  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και η μεγαλύτερη ελάχιστη τιμή στον Δεκέμβριο με τιμή  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Όσον αφορά τις μέσες τιμές των ημερήσιων τιμών κάθε μήνα μόνο ο Ιανουάριος και ο

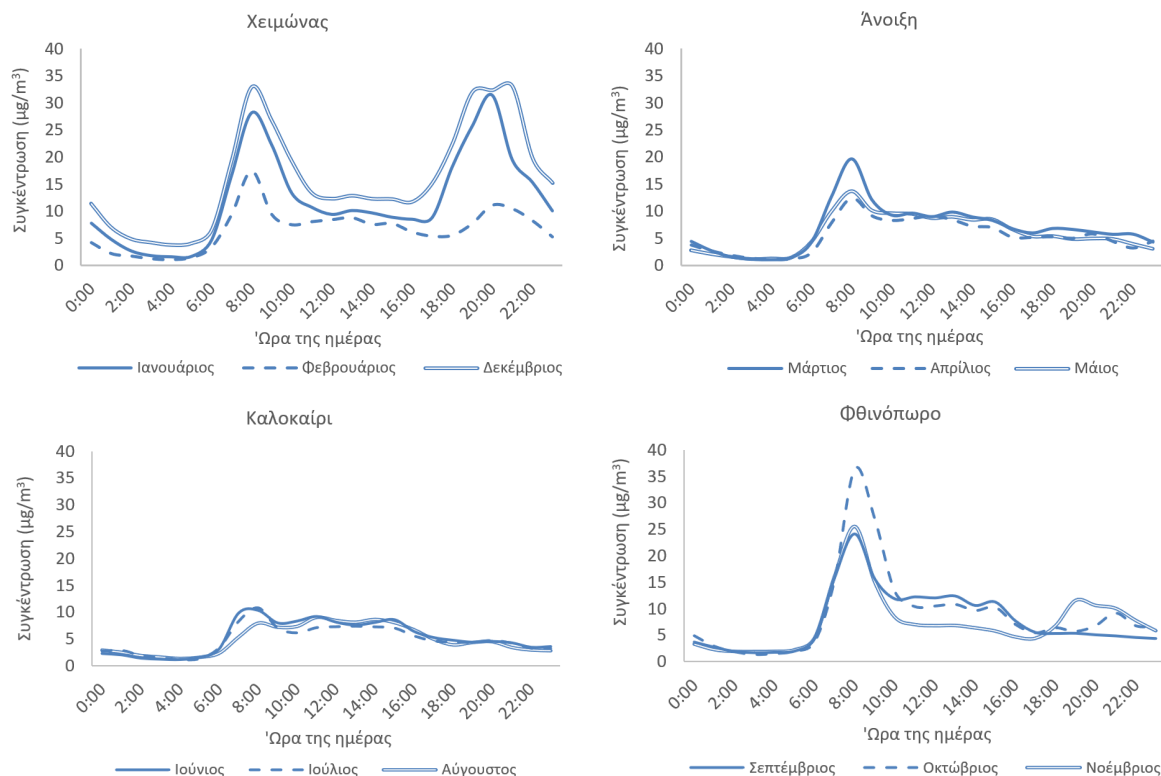
Δεκέμβριος έχουν τιμή μεγαλύτερη από  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τιμές 12,1 και  $16,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Ο Απρίλιος, Μάιος, Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος είναι οι μήνες με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις και συγκεκριμένα με μέγιστες ημερήσιες τιμές 9,7, 9,4, 8,3 9,5 και  $9,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Συγκριτικά με τις τιμές του διαστήματος Απρίλιος 2022-Μάρτιος 2023 οι μέσες μηνιαίες τιμές κυμαίνονταν από  $4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Ιούνιο έως  $15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Δεκέμβριο. Εκείνη την περίοδο οι τιμές συγκεντρώσεως NO στον σταθμό του Ακρωτηρίου είχαν εύρος από  $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Απρίλιο έως  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Οκτώβριο (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024). Επιπλέον, σε έρευνα στην περιοχή της Μαρμαράς στην Τουρκία την περίοδο Μάρτιος 2013-Απρίλιος 2016 οι μέσες τιμές NO σε αστικές περιοχές κυμαίνονταν τον χειμώνα από 15,5 έως  $67,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το φθινόπωρο από 7,6 έως  $52,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , την άνοιξη από 5,8 έως  $49,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και το καλοκαίρι από 1,4 έως  $22,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Σε αγροτικές περιοχές της Μαρμαράς οι μέσες συγκεντρώσεις NO έχουν εύρος  $1,9\text{-}5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το φθινόπωρο  $1,3\text{-}5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , την άνοιξη  $1,1\text{-}2,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και το καλοκαίρι  $0,9\text{-}2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kasparoglu, κ.ά., 2018).



Διάγραμμα 4.25: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων NO ανά μήνα για το έτος 2023.

Το μεγαλύτερο εύρος τιμών του Ιανουαρίου και Δεκεμβρίου επιβεβαιώνει το *boxplot*. Παρά τις ακραίες τιμές που παρατηρούνται τον Δεκέμβριο, το 75ο εκατοστημόριο του δεν έχει υψηλή τιμή, με μόλις  $20,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο σημαίνει ότι το 75% των τιμών συγκεντρώσεως NO του Δεκεμβρίου δεν ξεπερνά τα  $20,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επιπλέον, χαμηλές τιμές και εύρη τιμών έχουν οι μήνες πέρα από τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο.

#### 4.5.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.26: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις NO ανά εποχή.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των συγκεντρώσεων NO κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι η απότομη αύξηση τους γύρω στις 9:00, λόγω της αυξημένης κυκλοφορίας που επικρατεί στο κέντρο των Χανίων. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και τα προηγούμενα χρόνια τόσο στα Χανιά όσο και σε άλλες πόλεις της Μεσογείου (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024; Kasparoglu, κ.ά., 2018).

Το εύρος των ωριαίων τιμών κατά τους χειμωνιάτικους μήνες είναι από 1 μέχρι  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ο Δεκέμβριος παρουσιάζει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι τιμές ξεπερνούν τα  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  κατά τις 8:00-9:00 και 19:00-21:00. Τις υπόλοιπες βραδινές ώρες και μεσημεριανές οι τιμές σταθεροποιούνται μεταξύ των 3 και  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ο Ιανουάριος έχει παρόμοιες διακυμάνσεις με τον Δεκέμβριο φτάνοντας μέχρι τα  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ο Φεβρουάριος έχει τις χαμηλότερες ωριαίες τιμές του χειμώνα με υψηλότερη τιμή τα  $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 8:00.

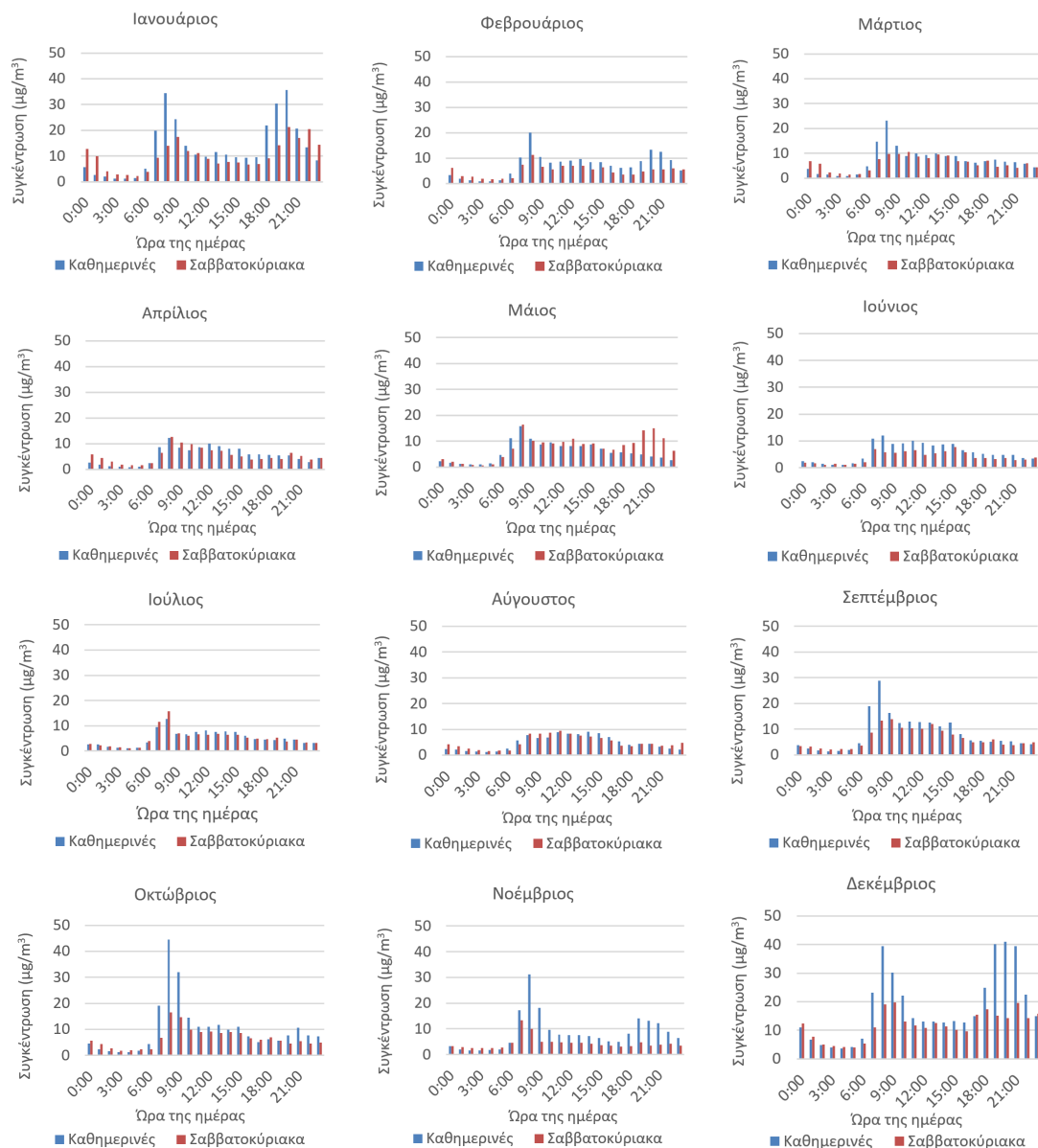
Την άνοιξη οι μέσες ωριαίες τιμές δεν ξεπέρασαν τα  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Μάρτιο. Συγκεκριμένα, τις βραδινές ώρες οι τιμές των συγκεντρώσεων και τους τρεις μήνες είναι μεταξύ  $1-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , το πρωί στις 7:00 η συγκεντρώση αυξάνεται ελαφρώς. Τον Απρίλιο και Μάιο η συγκεντρώση κορυφώνεται στα  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  εκείνη την ώρα και τον Μάρτιο στα  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά τις 10:00 η συγκεντρώσεις NO μειώνονται και μέχρι τις 00:00 φτάνουν τα  $3-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Τους καλοκαιρινούς μήνες επικρατούν πάλι χαμηλές συγκεντρώσεις. Μέσα στην ημέρα καταγράφεται μια μικρή αύξηση το πρωί στις 7:00 με τιμή τον Αύγουστο τα  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και τον Ιούνιο και Ιούλιο τα  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τις υπόλοιπες ώρες η συγκεντρώση NO έχει τιμές από 1 μέχρι  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Το φθινόπωρο παρατηρείται διαφοροποίηση στους τρεις αυτούς μήνες, όσον αφορά την ωριαία συγκεντρώση NO. Τις βραδινές ώρες των τριών μηνών η τιμή της συγκεντρώσης NO είναι  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και στις 7:00 αυξάνεται. Στις 8:00 η κορύφωση της τιμής τον Σεπτέμβριο και Νοέμβριο γίνεται στα

25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τον Οκτώβριο την ίδια ώρα στα 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έστερα, η συγκέντρωση μειώνεται και δημιουργούνται αυξομειώσεις και τους τρεις μήνες μεταξύ των 4 και 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### 4.5.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση



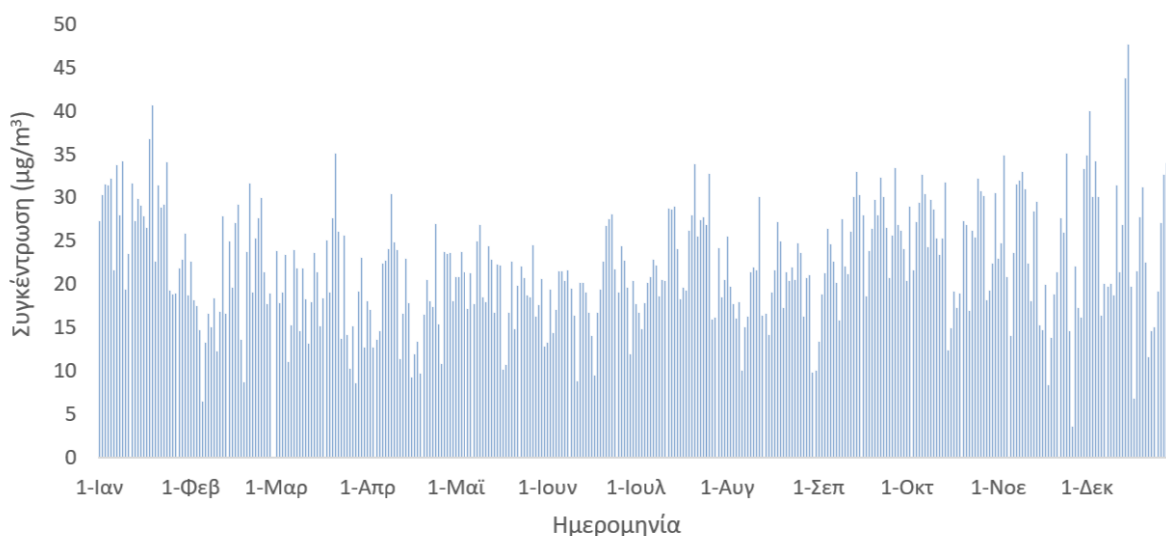
Διάγραμμα 4.27: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων NO Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο η διαφοροποίηση μεταξύ καθημερινών-σαββατοκύριακων διακρίνεται από τις 6:00 μέχρι τις 21:00, όπου τις καθημερινές η συγκέντρωση είναι πιο υψηλή. Τον Μάρτιο οι συγκεντρώσεις NO είναι ίδιες τις καθημερινές και τα σαββατοκύριακα, εκτός από τις 7:00-8:00, καθώς τις καθημερινές η συγκέντρωση έχει ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή. Από τον Απρίλιο μέχρι τον Αύγουστο οι ωριαίες τιμές συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια της εβδομάδας δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα μεταξύ τους, όπως παρατηρείται και στο Διάγραμμα 4.27. Οι καθημερινές των φθινοπωρινών μηνών σημειώνουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες απ' ό,τι τα σαββατοκύρια-

κα. Τέλος, τον Δεκέμβριο οι καθημερινές διαφοροποιούνται από τα σαββατοκύριακα, με αυξημένες συγκεντρώσεις στις 7:00-10:00 και 18:00-22:00.

#### 4.6 Χρονοσειρά NO<sub>2</sub>

Η μέση ετήσια συγκέντρωση NO<sub>2</sub> το 2023 στα Χανιά ήταν 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας. Για παράδειγμα το, 2022, η μέση ετήσια συγκέντρωση στο κέντρο της Αθήνας ήταν 47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , στη Θεσσαλονίκη περίπου 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και στην Πάτρα 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ΥΠΕΝ, 2022). Οι ημερήσιες τιμές κυμαίνονταν από 3,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι 47,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το νομοθετικό όριο που έχει θεσπίσει η Ε.Ε. για τις συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> αφορά το ετήσιο μέσο όρο και τις ωριαίες συγκεντρώσεις. Το ετήσιο μέσο όρο είναι τα 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και το ωριαίο όριο τα 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερες από 18 φορές το χρόνο. Το 2023 δεν υπήρχε κάποια υπέρβαση στην περιοχή των Χανίων, όπου πάρθηκαν οι μετρήσεις, καθώς ο μέσος όρος συγκέντρωσης του έτους ήταν χαμηλότερος από 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και καθώς η μέγιστη ωριαία τιμή που καταγράφηκε ήταν μόλις 89,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 21 Ιουλίου. Επίσης, η υψηλότερη ημερήσια συγκέντρωση NO<sub>2</sub> (47,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) σημειώθηκε στις 15 Δεκεμβρίου, την ημέρα όπου παρουσιάστηκαν οι μέγιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις των CO και NO όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Διάγραμμα 4.28: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> για το 2023.

Στο Διάγραμμα 4.28 φαίνονται οι διακυμάνσεις των ημερήσιων τιμών συγκεντρώσεων NO<sub>2</sub> στα Χανιά. Όπως παρατηρήθηκε και στις συγκεντρώσεις NO το φθινόπωρο και τον χειμώνα οι συγκεντρώσεις ήταν ελάχιστα υψηλότερες από το καλοκαίρι και την άνοιξη.

##### 4.6.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8 ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος είναι οι μήνες που σημείωσαν τις υψηλότερες μέγιστες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης NO<sub>2</sub> με τιμές 40,6 και 47,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Για τους υπόλοιπους μήνες οι μέγιστες ημερήσιες τιμές κυμαίνονται από 26,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι 35,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ταυτόχρονα, όμως, ο Δεκέμβριος έχει και μια από τις χαμηλότερες ελάχιστες ημερήσιες τιμές (6,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Την χαμηλότερη ελάχιστη τιμή έχει ο Νοέμβριος με συγκέντρωση NO<sub>2</sub> 3,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Όσον

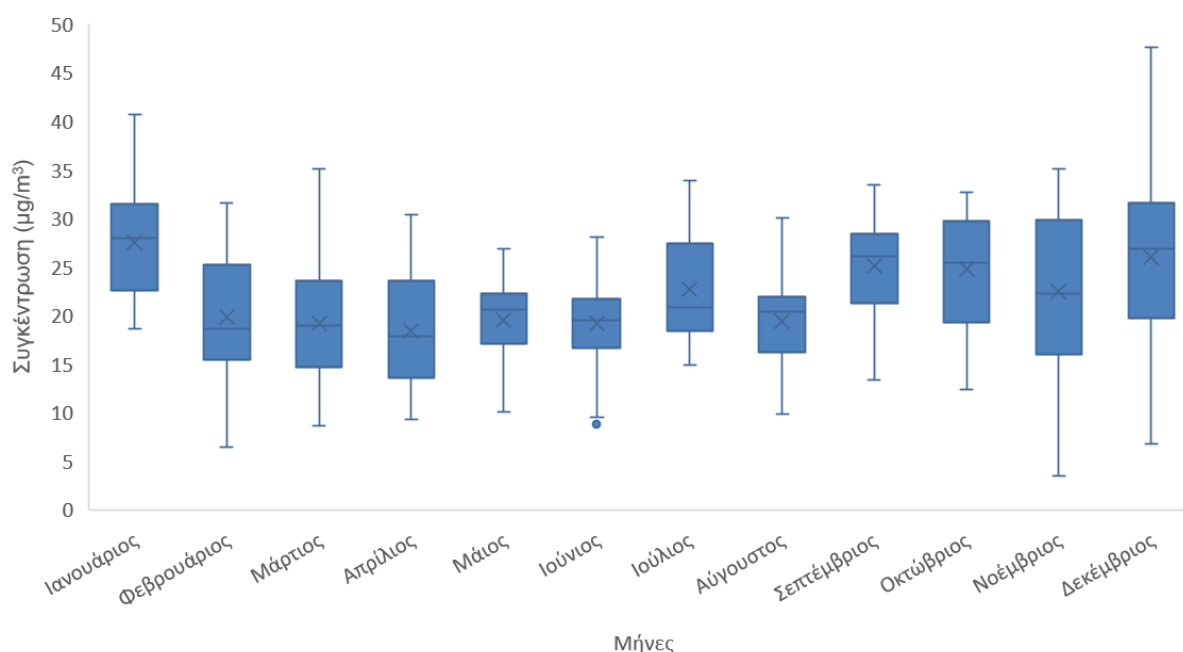


αφορά τις διάμεσες τιμές, δηλαδή το 50ο εκατοστημόριο, ο Ιανουάριος σημείωσε το υψηλότερο με τιμή  $27,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επομένως το 50% των ημερήσιων τιμών του Ιανουαρίου είναι μικρότερο από αυτή την τιμή. Τα μικρότερα 50α εκατοστημόρια αναλογούν στους μήνες του Φεβρουαρίου, Μαρτίου, Απριλίου και Ιουνίου με τιμές από  $17,9$  μέχρι  $19,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Πίνακας 4.8: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκέντρωσης  $\text{NO}_2$  το 2023.

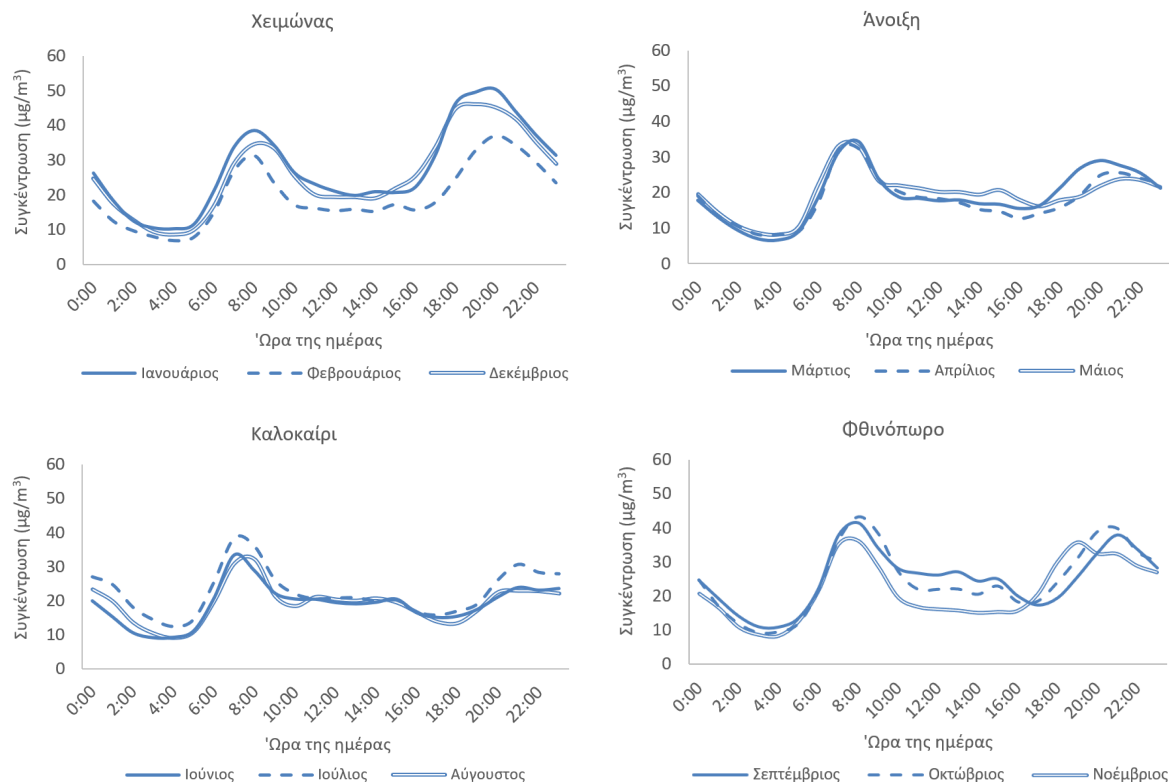
| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 27,6      | 18,7          | 22,7              | 27,9              | 31,4              | 40,6         |
| Φεβρουάριος | 19,8      | 6,4           | 16,2              | 18,6              | 25,0              | 31,6         |
| Μάρτιος     | 19,2      | 8,6           | 14,9              | 19,0              | 23,5              | 35,0         |
| Απρίλιος    | 18,4      | 9,3           | 13,8              | 17,9              | 23,3              | 30,4         |
| Μάιος       | 19,5      | 10,1          | 17,3              | 20,6              | 22,2              | 26,8         |
| Ιούνιος     | 19,1      | 8,8           | 16,7              | 19,5              | 21,6              | 28,0         |
| Ιούλιος     | 22,7      | 14,8          | 18,5              | 20,8              | 27,1              | 33,9         |
| Αύγουστος   | 19,4      | 9,8           | 16,3              | 20,4              | 21,7              | 30,1         |
| Σεπτέμβριος | 25,1      | 13,3          | 21,5              | 26,1              | 28,0              | 33,4         |
| Οκτώβριος   | 24,8      | 12,3          | 19,8              | 25,4              | 29,5              | 32,6         |
| Νοέμβριος   | 25,5      | 3,5           | 16,5              | 22,2              | 29,2              | 35,1         |
| Δεκέμβριος  | 26,0      | 6,8           | 19,7              | 26,8              | 31,4              | 47,6         |

Κατά την περίοδο Απρίλιος 2022-Μάρτιος 2023 οι υψηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{NO}_2$  στον σταθμό των Χανίων καταγράφηκαν τον Δεκέμβριο με μέση τιμή  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η ελάχιστη τιμή καταγράφηκε τον Απρίλιο, φτάνοντας τα  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Την ίδια περίοδο στον σταθμό του Ακρωτηρίου, η μέση συγκέντρωση τον Δεκέμβριο ήταν  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η χαμηλότερη τιμή σημειώθηκε τον Ιούλιο με  $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024). Στο *boxplot* του Διαγράμματος 4.29 παρουσιάζονται τα εύρη των ημερήσιων τιμών συγκέντρωσης  $\text{NO}_2$  κάθε μήνα και φαίνεται ότι ο Δεκέμβριος είναι ο μήνας με το μεγαλύτερο εύρος, καθώς όπως προαναφέρθηκε η ελάχιστη ημερήσια τιμή του Δεκεμβρη ήταν  $6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και η μεγαλύτερη  $47,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Για τον Νοέμβριο παρατηρείται επίσης η ελάχιστη ημερήσια τιμή, η οποία είναι  $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 4.29: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_2$  ανά μήνα για το έτος 2023.

#### 4.6.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.30: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> ανά εποχή.

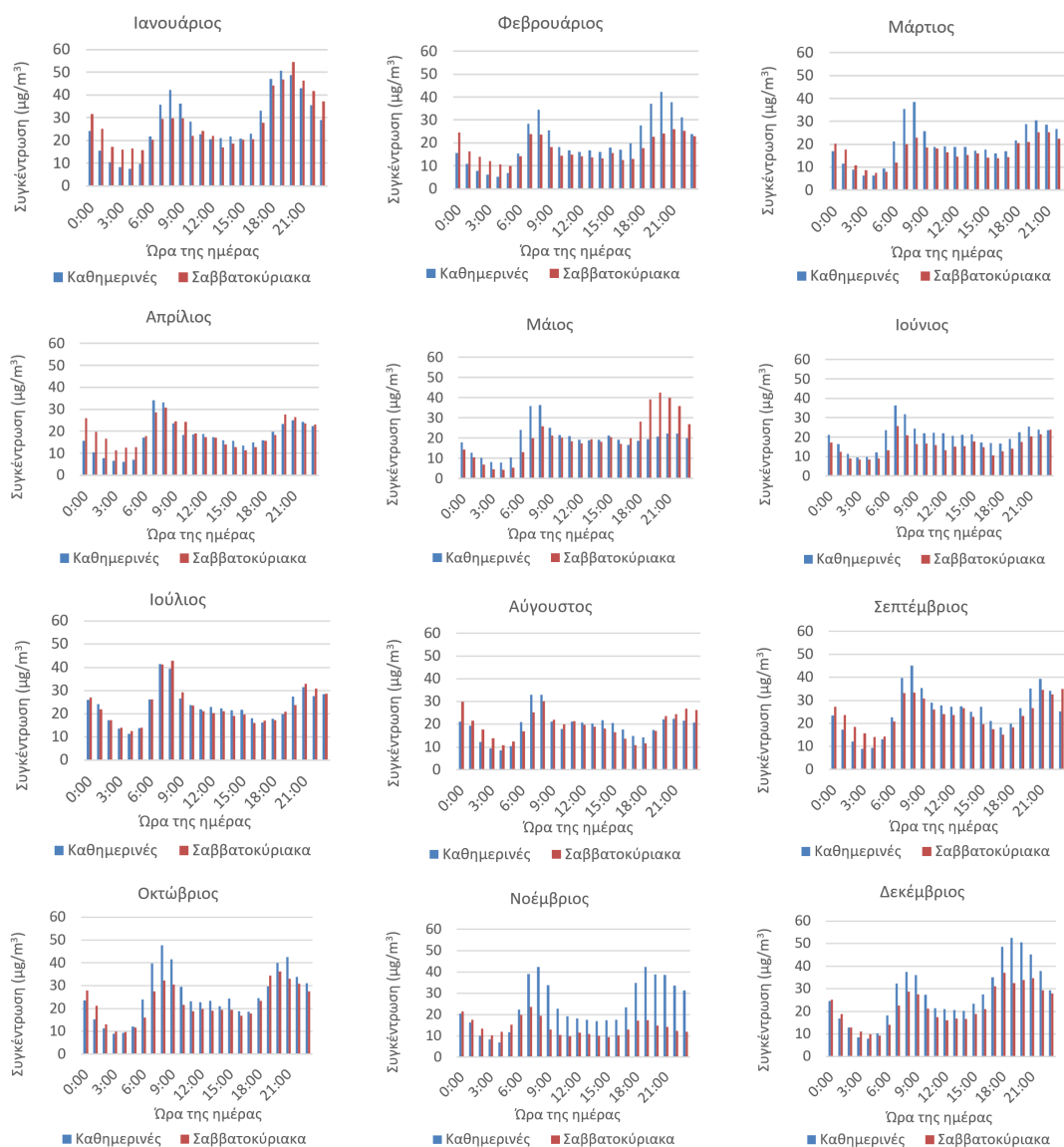
Τον χειμώνα παρατηρείται το μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκεντρώσης κατά τη διάρκεια της ημέρας με τις τιμές μεταξύ 6,8 και 50,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τους χειμερινούς μήνες η μέση συγκέντρωση στις 5:00 είναι περίπου 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στη συνέχεια η συγκέντρωση NO<sub>2</sub> αυξάνεται και στις 8:00 έχει τιμές 38,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Ιανουάριο, 34,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Δεκέμβριο και 31,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Φεβρουάριο. Στη συνέχεια παρατηρείται μια μείωση των συγκεντρώσεων στα 15-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  από τις 12:00 μέχρι τις 16:00 και έπειτα αυξάνονται πάλι με μέγιστες ωριαίες τιμές στις 20:00 για τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο με τιμές 50,4 και 37,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και στις 19:00 για τον Δεκέμβριο με τιμή 46,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Την άνοιξη φαίνεται παρόμοια διακύμανση με μικρότερο εύρος τιμών. Στις 5:00 η μέση συγκέντρωση και τους τρεις μήνες είναι 10,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και μέχρι τις 8:00 αυξάνεται στα 34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και κατόπιν μειώνεται στα 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι τις 20:00, όταν αυξάνονται πάλι στα 25-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Και τους τρεις μήνες του καλοκαιριού φαίνεται η ίδια αυξομείωση των συγκεντρώσεων καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με τιμές συγκεντρώσης NO<sub>2</sub> μεταξύ 9-36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Διαφορετικές ωριαίες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στους φθινοπωρινούς μήνες, με τον Οκτώβριο να έχει υψηλότερη ωριαία τιμή στις 8:00 τα 43,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , τον Σεπτέμβριο την ίδια ώρα με τιμή 41,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τον Νοέμβριο με 36,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έπειτα, από τις 11:00 μέχρι τις 16:00 η μέση ωριαία τιμή του Σεπτέμβρη ήταν 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , του Οκτώβρη 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και του Νοέμβρη 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά τις 17:00 οι ωριαίες τιμές αυξάνονται και φτάνουν τις τιμές των 38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα.

### 4.6.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση



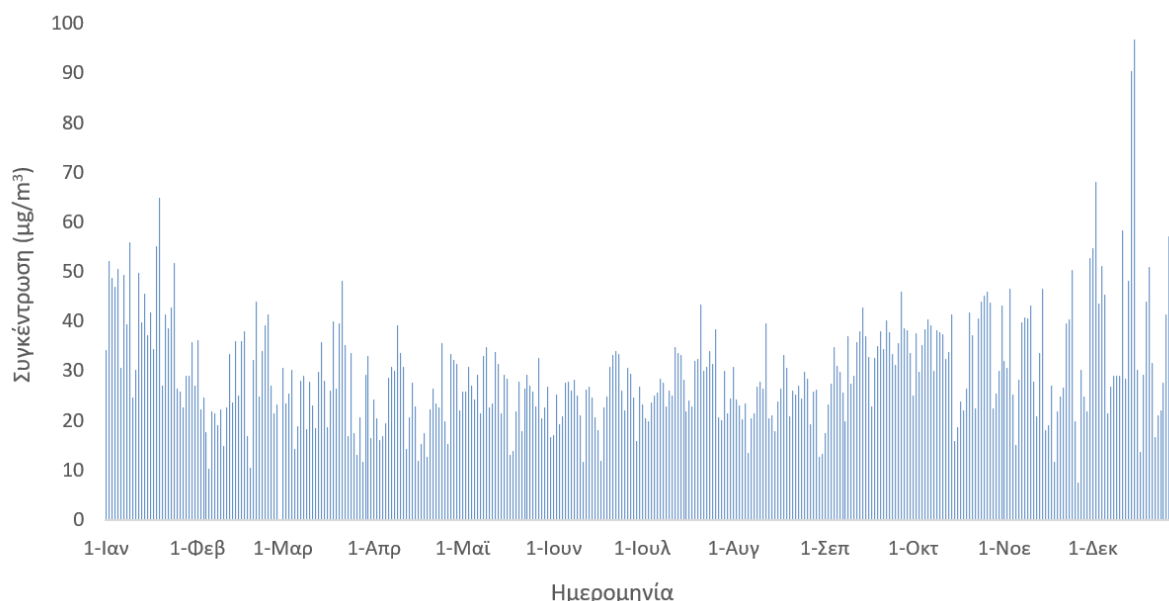
Διάγραμμα 4.31: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_2$  Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Όλους του μήνες εκτός από τον Ιούλιο υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση  $\text{NO}_2$  τις καθημερινές από τα σαββατοκύριακα μεταξύ των ωρών 7:00 και 9:00. Επιπλέον, τον Φεβρουάριο, Μάρτιο, Ιούνιο, Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο η συγκέντρωση τις καθημερινές είναι υψηλότερη μέχρι τις 22:00. Τα σαββατοκύριακα του Μαΐου, επίσης, παρατηρείται ότι από τις 18:00 μέχρι τις 23:00 οι ωριαίες συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες των καθημερινών.

### 4.7 Χρονοσειρά $\text{NO}_x$

Στο Διάγραμμα 4.32 απεικονίζονται οι ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  για το έτος 2023. Οι ημερήσιες τιμές έχουν εύρος από  $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι  $96,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και μέση ετήσια τιμή συγκέντρωσης  $29,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η ημέρα με την υψηλότερη ημερήσια τιμή είναι η 15η του Δεκέμβρη, όπου καταγράφηκε

και η μεγαλύτερη ωριαία τιμή  $\text{NO}_x$  του 2023, με  $231,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η ελάχιστη ημερήσια τιμή ( $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) σημειώθηκε στις 26 Νοεμβρίου.



Διάγραμμα 4.32: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  για το 2023.

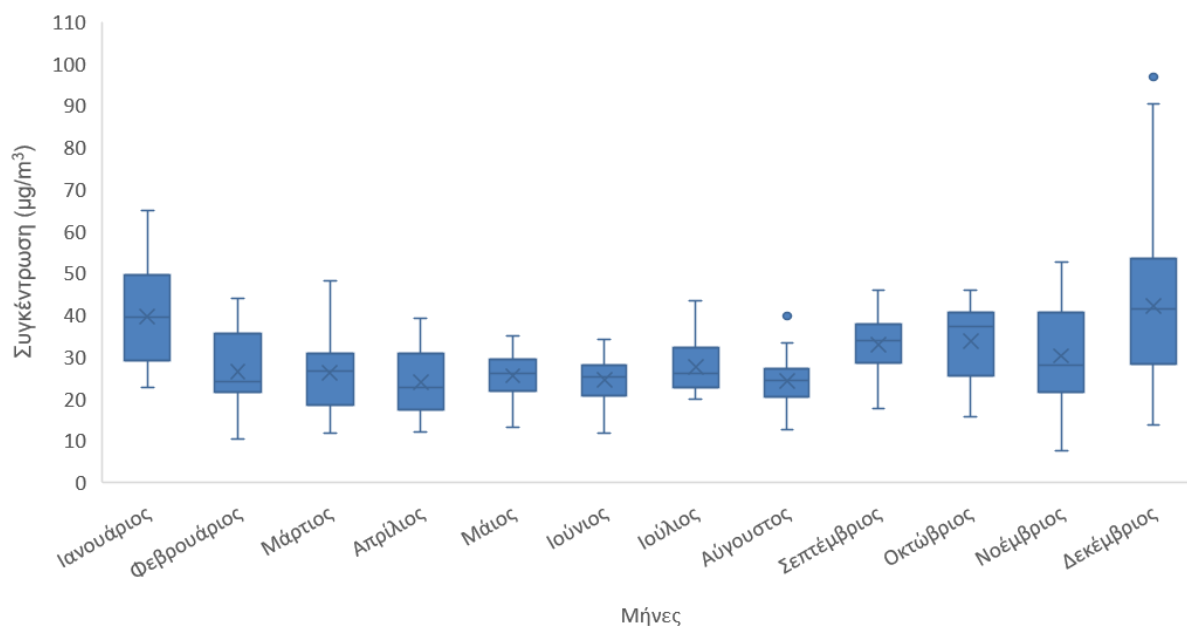
#### 4.7.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Όπως αναγράφεται και στον παρακάτω πίνακα το μεγαλύτερο εύρος των ημερήσιων συγκεντρώσεων έχει ο Δεκέμβριος με ελάχιστη τιμή τα  $13,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και μέγιστη τα  $96,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η μικρότερη μέγιστη ημερήσια τιμή εντοπίζεται τον Ιούνιο με τιμή  $34,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Επίσης το 75ο εκατοστημόριο του Ιουνίου είναι  $27,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που αιτιολογεί τις χαμηλές συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  του Ιουνίου. Τις μεγαλύτερες μέσες ημερήσιες τιμές έχουν ο Ιανουάριος και Δεκέμβριος με τιμές  $39,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $42,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Όσον αφορά τις ελάχιστες ημερήσιες τιμές, την μεγαλύτερη έχει ο Ιανουάριος με  $22,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και την μικρότερη ο Νοέμβριος με  $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Πίνακας 4.9: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκεντρώσης  $\text{NO}_x$  το 2023.

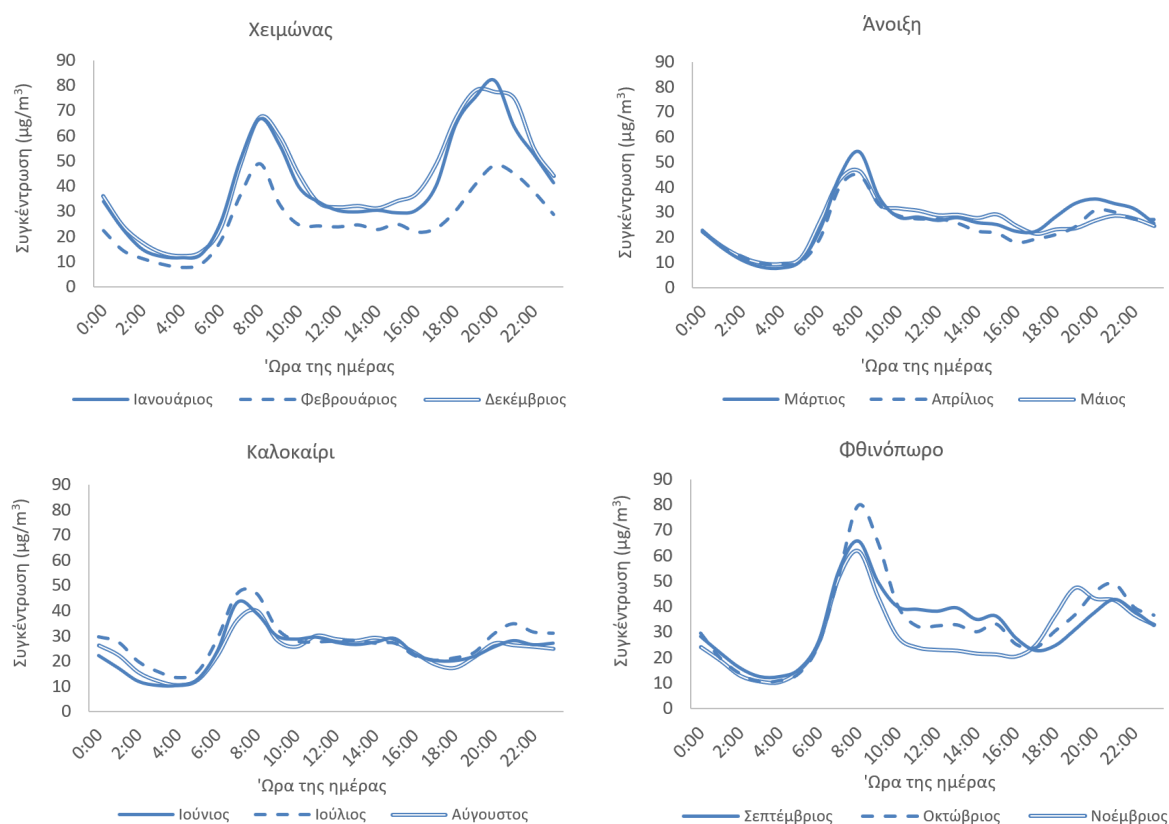
| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 39,6      | 22,7          | 29,6              | 39,3              | 49,1              | 64,9         |
| Φεβρουάριος | 26,5      | 10,3          | 21,5              | 24,2              | 34,6              | 44,0         |
| Μάρτιος     | 26,0      | 11,8          | 18,5              | 26,5              | 30,4              | 48,2         |
| Απρίλιος    | 23,9      | 11,9          | 18,0              | 22,7              | 30,6              | 39,3         |
| Μάιος       | 25,4      | 13,1          | 22,3              | 25,9              | 29,2              | 34,9         |
| Ιούνιος     | 24,4      | 11,6          | 20,9              | 25,2              | 27,8              | 34,1         |
| Ιούλιος     | 27,6      | 19,9          | 23,0              | 26,1              | 31,8              | 43,4         |
| Αύγουστος   | 24,2      | 12,6          | 20,7              | 24,4              | 27,0              | 39,6         |
| Σεπτέμβριος | 32,9      | 17,5          | 29,3              | 34,0              | 37,6              | 45,9         |
| Οκτώβριος   | 33,7      | 15,8          | 26,0              | 37,2              | 40,6              | 45,9         |
| Νοέμβριος   | 30,2      | 7,4           | 21,9              | 28,0              | 40,3              | 52,7         |
| Δεκέμβριος  | 42,1      | 13,7          | 28,6              | 41,4              | 52,3              | 96,7         |

Το *boxplot* για το  $\text{NO}_x$  στο Διάγραμμα 4.33 δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτά των  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$  στα αντίστοιχα Διαγράμματα 4.25 και 4.29, δηλαδή ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος εμφανίζουν μεγάλο εύρος τιμών σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες και κυρίως τους καλοκαιρινούς. Επίσης, στο Διάγραμμα 4.33 διακρίνεται η ελάχιστη ημερήσια τιμή συγκεντρώσης  $\text{NO}_x$  τον Νοέμβριο.



Διάγραμμα 4.33: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_x$  ανά μήνα για το έτος 2023.

#### 4.7.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.34: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις  $\text{NO}_x$  ανά εποχή.

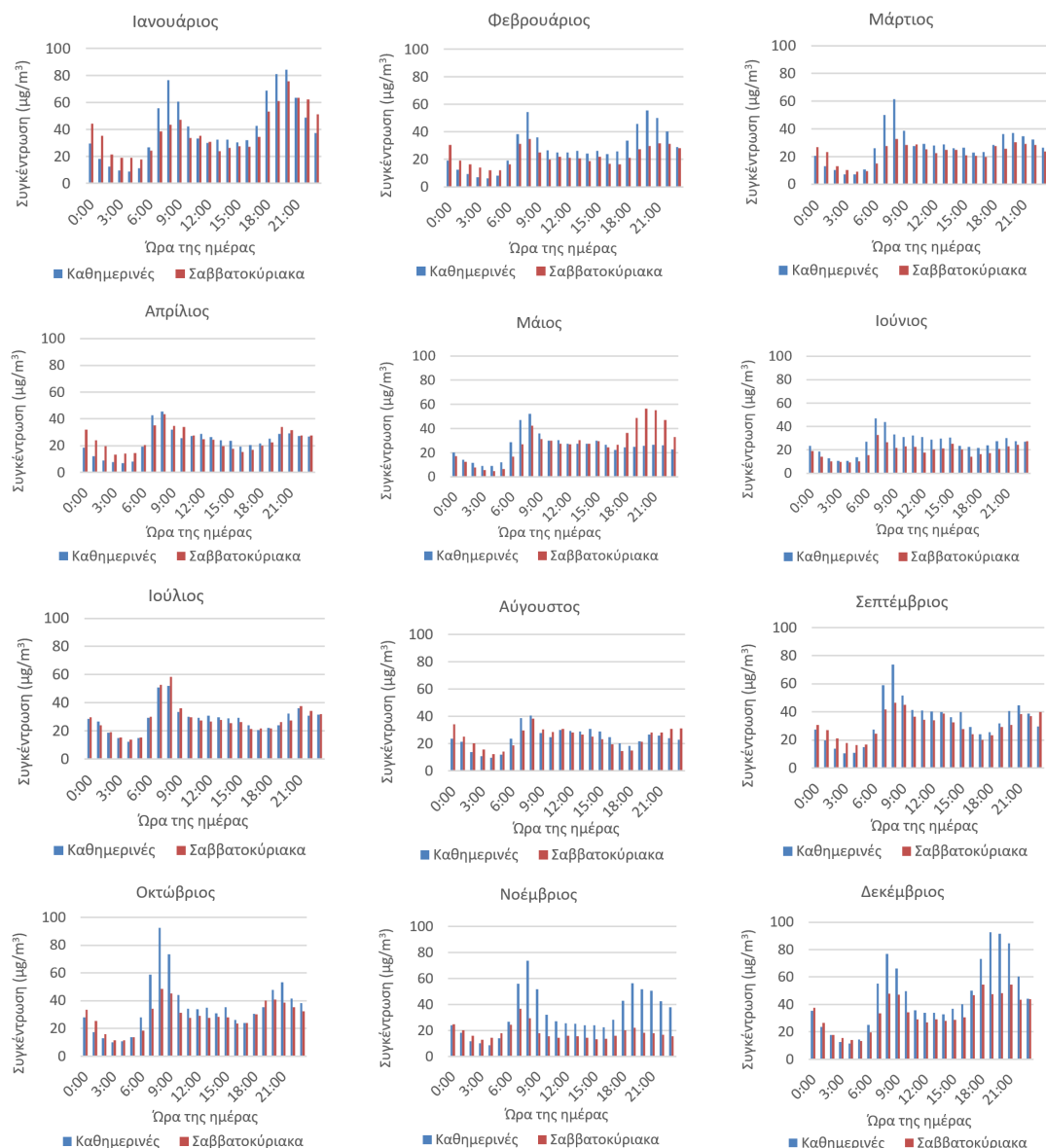
Η μεταβολή της συγκέντρωσης των  $\text{NO}_x$  κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αυξημένες τιμές γύρω στις 9:00 και βραδινές αυξήσεις τον χειμώνα, είναι παρόμοια με εκείνη των  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$ , όπως παρατηρήθηκε παραπάνω, καθώς και σε άλλες μελέτες (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024; Kasparoglu, κ.ά., 2018).

Τους χειμερινούς μήνες η συγκέντρωση μέσα στο 24ωρο φαίνεται να είναι υψηλότερη από τις υπόλοιπες εποχές με τις τιμές της συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  να κορυφώνεται δύο φορές μέσα στην ημέρα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια κορύφωση στις 8:00, με τιμές τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο  $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και τον Φεβρουάριο  $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Έπειτα, η συγκέντρωση μειώνεται στα  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Η δεύτερη κορύφωση πραγματοποιείται στις 20:00 με τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο να έχουν τιμές  $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα και τον Φεβρουάριο με  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Την άνοιξη και το καλοκαίρι οι τιμές συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  ακολουθούν την ίδια πορεία με την υψηλότερη συγκέντρωση της ημέρας να παρατηρείται στις 8:00 και με τιμές  $50\text{-}54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και  $40\text{-}47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Τις υπόλοιπες ώρες η συγκέντρωση κυμαίνεται την άνοιξη από  $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και το καλοκαίρι από  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Τέλος, το φθινόπωρο σημειώνεται πάλι υψηλότερη τιμή στις 8:00 με τιμές  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Οκτώβριο,  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Σεπτέμβριο και  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  τον Νοέμβριο. Τις μεσημεριανές ώρες του Σεπτέμβρη η συγκέντρωση  $\text{NO}_x$  είναι στα  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , του Οκτώβρη  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και του Νοέμβρη  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες παρατηρούνται μερικές αυξομειώσεις οι οποίες δεν υπερβαίνουν τα  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 4.7.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση

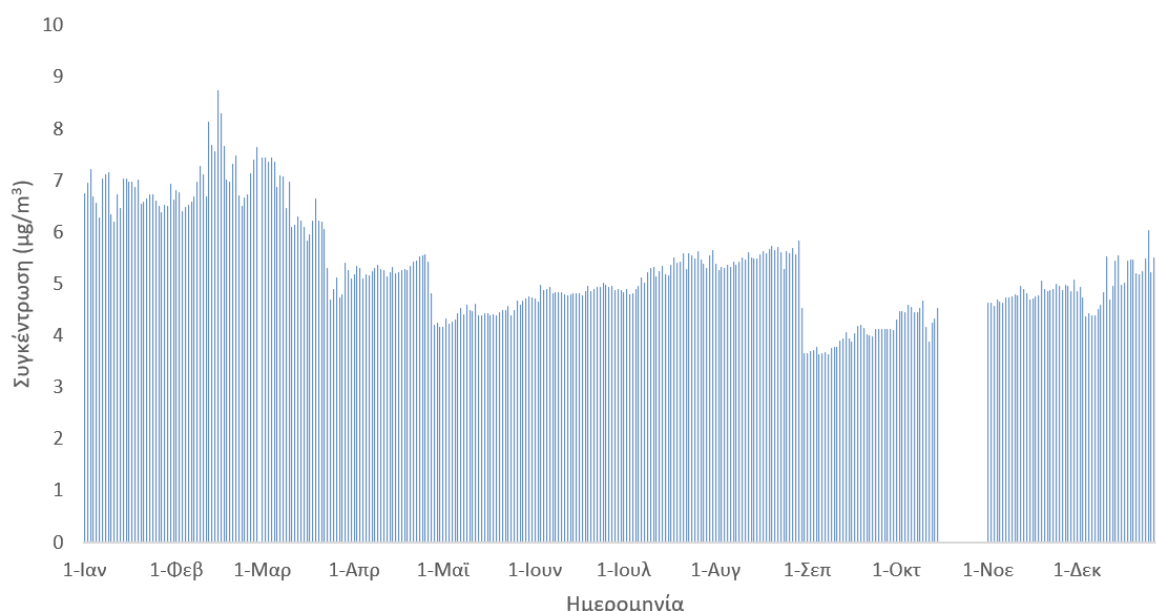


Διάγραμμα 4.35: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_x$  Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Οι μήνες που παρουσίασαν διαφορετικές ωριαίες συγκεντρώσεις μεταξύ των καθημερινών και σαββατοκύριακων είναι όλοι εκτός από τον Απρίλιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Οι πιο αξιοσημείωτες αποκλίσεις των συγκεντρώσεων για τις ημέρες τις εβδομάδας παρατηρούνται τις πρωινές ώρες του Ιανουαρίου, του Μαρτίου, του Οκτωβρίου και του Νοεμβρίου, καθώς και τα απογεύματα του Δεκεμβρίου, όπου οι καθημερινές σημειώνουν υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα σαββατοκύριακα. Για τους υπόλοιπους μήνες που οι καθημερινές είχαν ελάχιστα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από τα σαββατοκύριακα, πρόκειται για τις ώρες μεταξύ 7:00-22:00.

## 4.8 Χρονοσειρά SO<sub>2</sub>

Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> στα Χανιά το 2023 κυμαίνονταν από 3,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι 8,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και η μέση ετήσια συγκέντρωση ήταν 5,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Τα 8,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  σημειώθηκαν στις 15 Φεβρουαρίου και στις 12 Φεβρουαρίου καταγράφηκε η υψηλότερη ωριαία τιμή του έτους, τα 10,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αν συγκρίνουμε τη μέση ετήσια τιμή του 2023 με άλλες πόλεις της Μεσογείου, η μέση συγκέντρωση SO<sub>2</sub> στην Αθήνα το 2009 ήταν 14,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στη Βαρκελώνη ήταν 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδεικνύει ότι η συγκέντρωση στα Χανιά το 2023 βρίσκεται κοντά στις τιμές της Βαρκελώνης, αλλά είναι σημαντικά χαμηλότερη από την Αθήνα (Henschel, κ.ά., 2013). Τα νομοθετικά όρια που έχει θεσπίσει η Ε.Ε. είναι το ημερήσιο όριο των 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάτε περισσότερες από τρεις φορές τον χρόνο και το ωριαίο όριο των 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνεται πάνω από 24 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος. Όπως φαίνεται και από τις χαμηλές συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> στο Διάγραμμα 4.36 δεν πραγματοποιήθηκε καμία υπέρβαση του ορίου, καθώς καμία ημερήσια συγκέντρωση δεν ξεπερνά τα 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Διάγραμμα 4.36: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> για το 2023.

Υψηλότερες ημερήσιες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται τον Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο, καθώς τους υπόλοιπους μήνες η συγκέντρωση φαίνεται σχετικά σταθερή. Οι υψηλές αυτές συγκεντρώσεις μπορεί να οφείλονται στην καύση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Μεγάλη πτώση παρατηρείται, όμως, από τις 28 μέχρι τις 31 Αυγούστου, όπως διακρίνεται και στο Διάγραμμα 4.36, η μέση συγκέντρωση στις 28 Αυγούστου είναι 5,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , στις 30 Αυγούστου είναι 4,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και στις 31 Αυγούστου είναι 3,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 4.8.1 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω την μεγαλύτερη μέγιστη ημερήσια τιμή κατέχει ο Φεβρουάριος (8,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), καθώς η ημέρα με την υψηλότερη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> ήταν η 15η Φεβρουαρίου. Από τον Πίνακα 4.10 παρατηρείται επίσης ότι ο Σεπτέμβριος είναι ο μήνας με τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub>, καθώς η μέγιστη ημερήσια τιμή είναι 4,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παράλληλα,

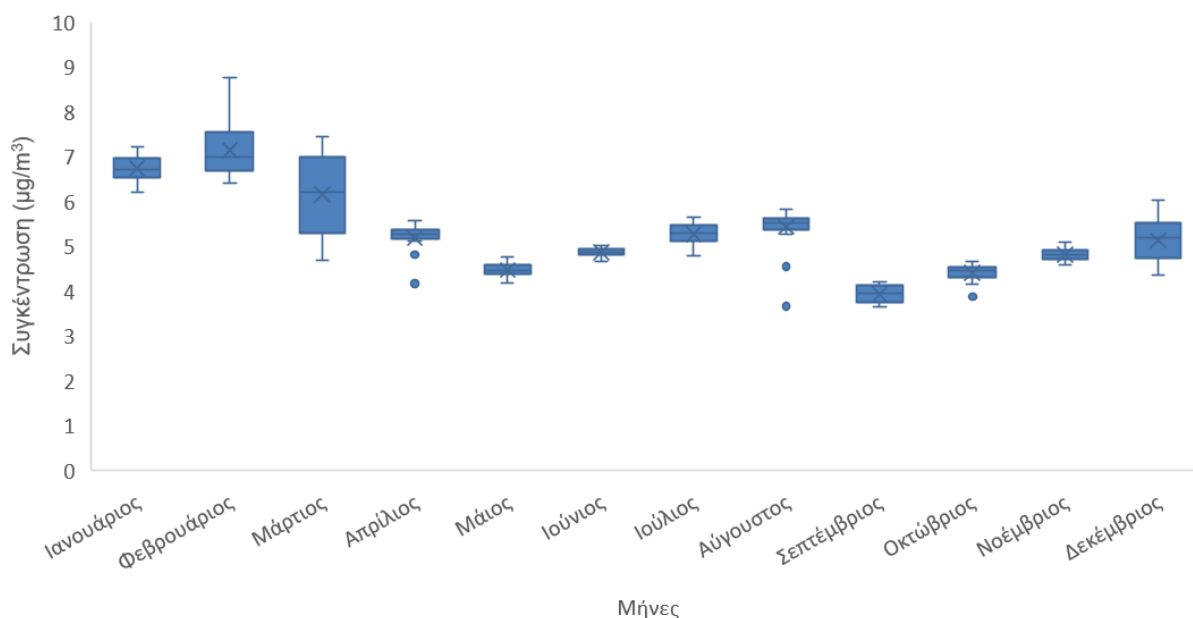


είναι και ένας από τους μήνες με το μικρότερο εύρος τιμών, αφού η ελάχιστη ημερήσια συγκεντρώση του Σεπτεμβρίου είναι  $3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το μικρότερο όμως εύρος φαίνεται να έχει η Ιούνιος με ελάχιστη τιμή  $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και μέγιστη  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Σε αντίθεση με τις χαμηλές τιμές του Σεπτεμβρίου, την περίοδο Απρίλιος 2022-Μάρτιος 2023 οι μικρότερες συγκεντρώσεις  $\text{SO}_2$  καταγράφηκαν τον Ιούνιο, με μέση τιμή  $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η υψηλότερη συγκεντρώση σημειώθηκε τον Φεβρουάριο με τιμή περίπου  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024). Οι παρακάτω τιμές του Πίνακα 4.10 απεικονίζονται καλύτερα στο Διάγραμμα 1.35, το οποίο αποτελεί το *boxplot* των ημερήσιων συγκεντρώσεων  $\text{SO}_2$ .

Πίνακας 4.10: Μηνιαία στατιστική ανάλυση συγκεντρώσης  $\text{SO}_2$  το 2023.

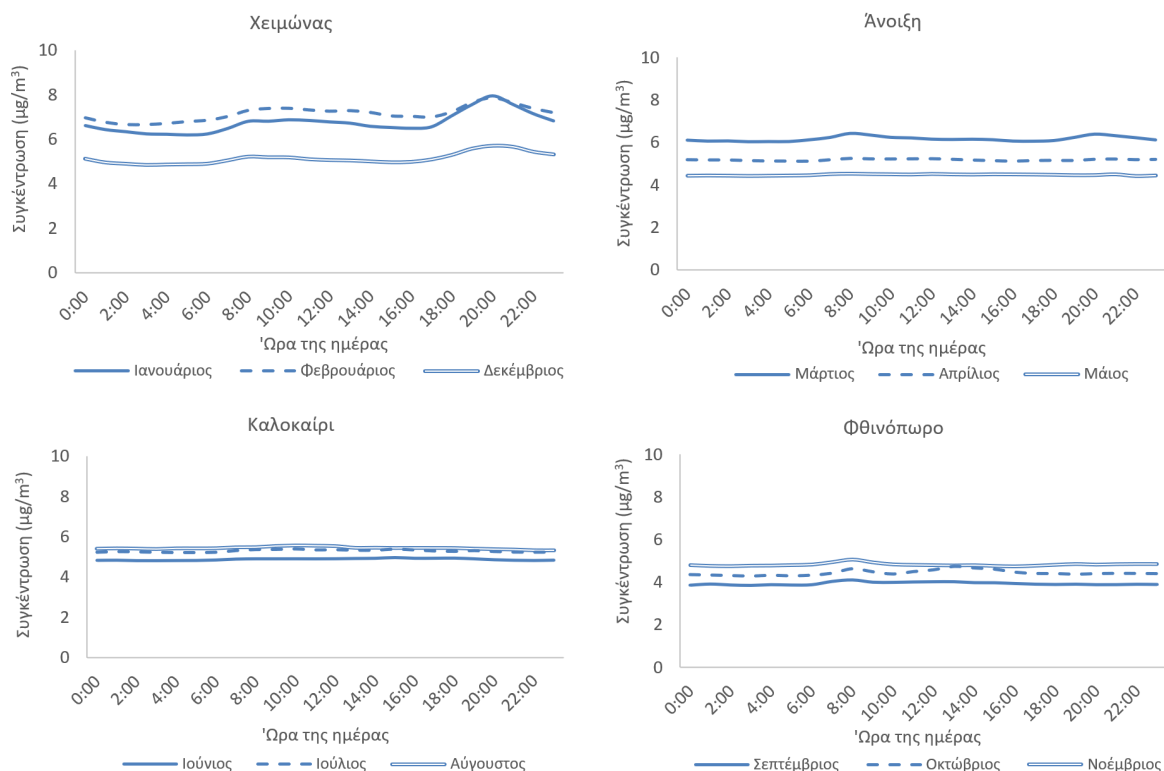
| Μήνας       | Μέση τιμή | Ελάχιστη τιμή | 25ο εκατοστημόριο | 50ο εκατοστημόριο | 75ο εκατοστημόριο | Μέγιστη τιμή |
|-------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Ιανουάριος  | 6,7       | 6,2           | 6,5               | 6,7               | 7,0               | 7,2          |
| Φεβρουάριος | 7,1       | 6,4           | 6,7               | 7,0               | 7,5               | 8,8          |
| Μάρτιος     | 6,2       | 4,7           | 5,4               | 6,2               | 6,9               | 7,4          |
| Απρίλιος    | 5,2       | 4,2           | 5,2               | 5,3               | 5,4               | 5,6          |
| Μάιος       | 4,5       | 4,2           | 4,4               | 4,5               | 4,6               | 4,8          |
| Ιούνιος     | 4,9       | 4,7           | 4,8               | 4,9               | 4,9               | 5,0          |
| Ιούλιος     | 5,3       | 4,8           | 5,1               | 5,3               | 5,5               | 5,7          |
| Αύγουστος   | 5,4       | 3,7           | 5,4               | 5,5               | 5,6               | 5,8          |
| Σεπτέμβριος | 3,9       | 3,6           | 3,8               | 4,0               | 4,1               | 4,2          |
| Οκτώβριος   | 4,4       | 3,9           | 4,3               | 4,5               | 4,5               | 4,7          |
| Νοέμβριος   | 4,8       | 4,6           | 4,7               | 4,8               | 4,9               | 5,1          |
| Δεκέμβριος  | 5,1       | 4,4           | 4,8               | 5,2               | 5,5               | 6,0          |

Στο Διάγραμμα 4.37 διακρίνεται το εύρος τιμών του Ιουνίου, το οποίο αποτελεί το μικρότερο όλων των μηνών. Αντιθέτως, το μεγαλύτερο εύρος τιμών παρατηρείται τον Μάρτιο, το οποίο κυμαίνεται από  $4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  μέχρι  $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στο *boxplot* φαίνονται πάλι οι μεγάλες συγκεντρώσεις  $\text{SO}_2$  τους μήνες του Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου, όπως εμφανίζονται και καθημερινά οι συγκεντρώσεις στο Διάγραμμα 4.34.



Διάγραμμα 4.37: Θηκόγραμμα (*boxplot*) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $\text{SO}_2$  ανά μήνα για το έτος 2023.

#### 4.8.2 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση



Διάγραμμα 4.38: Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> ανά εποχή.

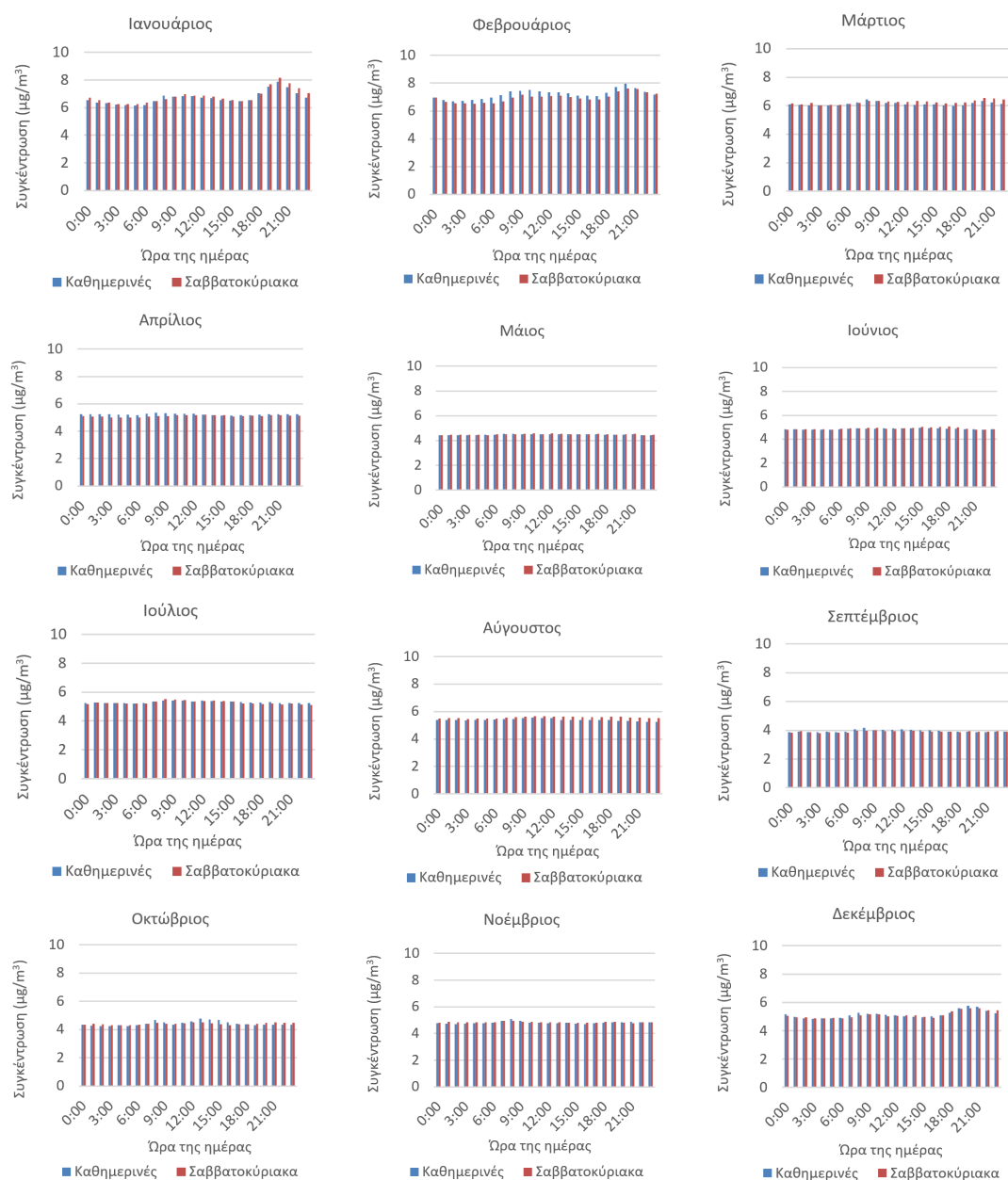
Στην 24ωρη ανάλυση κάθε μήνα παρατηρείται ότι η συγκέντρωση SO<sub>2</sub> είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας όλους τους μήνες, εκτός από μια μικρή αύξηση που εμφανίζεται τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Αναλυτικότερα, τους δυο αυτούς μήνες η συγκέντρωση έχει τιμές από 6,2 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 7 μg/m<sup>3</sup> από τις 00:00-17:00 και στις 20:00 σημειώνεται η μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση με τιμή 7,9 μg/m<sup>3</sup>. Όσον αφορά τον Δεκέμβριο, η μέση ωριαία συγκέντρωση είναι σταθερή όλη την ημέρα από 4,8 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 5,7 μg/m<sup>3</sup>.

Τις υπόλοιπες τρεις εποχές, οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.38, είναι σταθερές. Την άνοιξη μεγαλύτερες ωριαίες συγκεντρώσεις έχει ο Μάρτιος με τιμές από 6 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 6,4 μg/m<sup>3</sup>, ο Απρίλιος στη συνέχεια και τιμές από 5,1 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 5,3 μg/m<sup>3</sup> και τέλος ο Μάιος με σταθερές τιμές από 4,4 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 4,5 μg/m<sup>3</sup>.

Το καλοκαίρι οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις των τριών μηνών δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα μεταξύ τους, με τις τιμές του Ιουνίου να κυμαίνονται μεταξύ των 4,0-5 μg/m<sup>3</sup>, του Ιουλίου μεταξύ 5,2-5,4 μg/m<sup>3</sup> και του Αυγούστου μεταξύ 5,3-5,6 μg/m<sup>3</sup>.

Τέλος, για το φθινόπωρο, οι μεγαλύτερες ωριαίες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> καταγράφονται τον Νοέμβριο, με τιμές ανάμεσα από 4,7 μg/m<sup>3</sup> και 5,1 μg/m<sup>3</sup>, στη συνέχεια ο Οκτώβριος με μέσες ωριαίες τιμές από 4,3 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 4,7 και ο Σεπτέμβριος με τιμές από 3,9 μg/m<sup>3</sup> μέχρι 4,1 μg/m<sup>3</sup>. Η σταθερή συγκέντρωση κατά την πάροδο της ημέρας παρατηρείται και σε άλλες πόλεις της Ευρώπης, όπως στην Αθήνα, τη Βαρκελώνη, το Παρίσι κ.ά. (Henschel, κ.ά., 2013).

### 4.8.3 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση



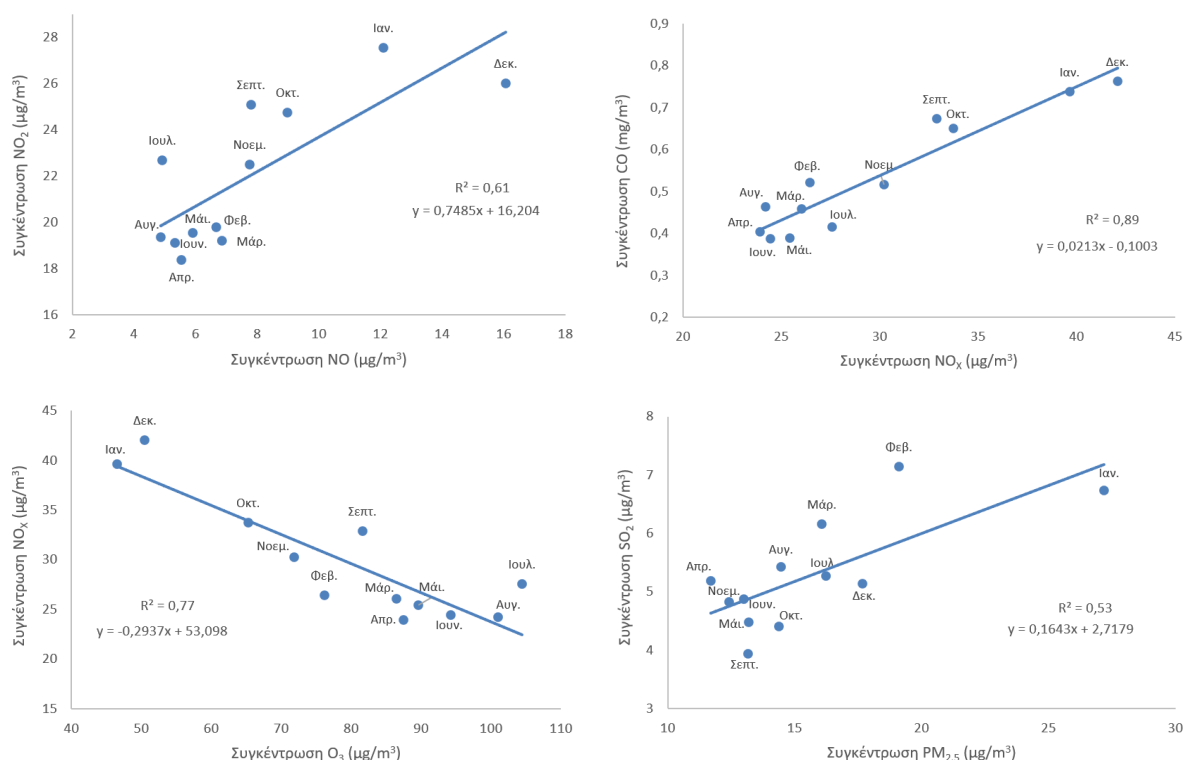
Διάγραμμα 4.39: Σύγκριση ωριαίων συγκεντρώσεων SO<sub>2</sub> Καθημερινών-Σαββατοκύριακων κάθε μήνα για το έτος 2023.

Στην εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση του SO<sub>2</sub> δεν διακρίνεται κάποια διαφορά μεταξύ των καθημερινών και των σαββατοκύριακων, σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.37. Οι ωριαίες συγκεντρώσεις είναι σταθερές όλες τις ημέρες τις εβδομάδας και όπως φάνηκε και στο Διάγραμμα 4.39 δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη αυξομείωση των συγκεντρώσεων μέση στην ημέρα. Οι παρόμοιες αυτές συγκεντρώσεις των ημερών μεταξύ τους μπορεί να οφείλεται στις σταθερές πηγές εκπομπών και καθώς οι συγκεντρώσεις του SO<sub>2</sub> το 2023 στα Χανιά θεωρούνται χαμηλές, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η παραγωγή SO<sub>2</sub> ήταν σχετικά μικρή και σταθερή.

## 4.9 Συγκρίσεις των ρύπων

### 4.9.1 Μηνιαία συσχέτιση

Στο Διάγραμμα 4.40 παρουσιάζονται τέσσερις συσχετίσεις μερικών ρύπων μεταξύ τους και σε κάθε διάγραμμα απεικονίζεται η γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των συγκεντρώσεων, ώστε να εξεταστεί αν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ των ρύπων που αναλύονται στη συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία.



Διάγραμμα 4.40: Συσχέτιση ρύπων μεταξύ τους. Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης *i)* μεταξύ της συγκέντρωσης  $\text{NO}_2$  και της συγκέντρωσης  $\text{NO}$  (πάνω αριστερά), *ii)* μεταξύ της συγκέντρωσης  $\text{CO}$  και της συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  (πάνω δεξιά), *iii)* μεταξύ της συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  και της συγκέντρωσης  $\text{O}_3$  (κάτω αριστερά), *iv)* μεταξύ της συγκέντρωσης  $\text{SO}_2$  και της συγκέντρωσης  $\text{PM}_{2.5}$  (κάτω δεξιά).

Στον οριζόντιο άξονα του πρώτου διαγράμματος (πάνω αριστερά) αναγράφεται η συγκέντρωση του  $\text{NO}$  σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στον κάθετο η συγκέντρωση του  $\text{NO}_2$  σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρατηρείται θετική γραμμική συσχέτιση, με συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) ίσο με 0,61. Αυτό δείχνει ότι η αύξηση του  $\text{NO}_2$  σχετίζεται με την αύξηση του  $\text{NO}$ , πιθανώς λόγω της φωτοχημικής μετατροπής του  $\text{NO}$  σε  $\text{NO}_2$ .

Στο διάγραμμα πάνω δεξιά, η συγκέντρωση των λεπτόκοκκων αιωρουμένων σωματιδίων  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα, ενώ η συγκέντρωση του  $\text{CO}$  σε  $\text{mg}/\text{m}^3$  στον κάθετο. Η συσχέτιση είναι επίσης θετική, με  $R^2 = 0,89$ , υποδεικνύοντας ισχυρή σχέση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα  $\text{NO}_x$  και το  $\text{CO}$  προέρχονται συχνά από παρόμοιες πηγές, όπως καύση ορυκτών καυσίμων.

Στο τρίτο διάγραμμα (κάτω αριστερά), στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η συγκέντρωση του  $\text{O}_3$  σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ στον κάθετο η συγκέντρωση των  $\text{NO}_x$ . Παρατηρείται αρνητική συσχέτιση ( $R^2 = 0,77$ ),

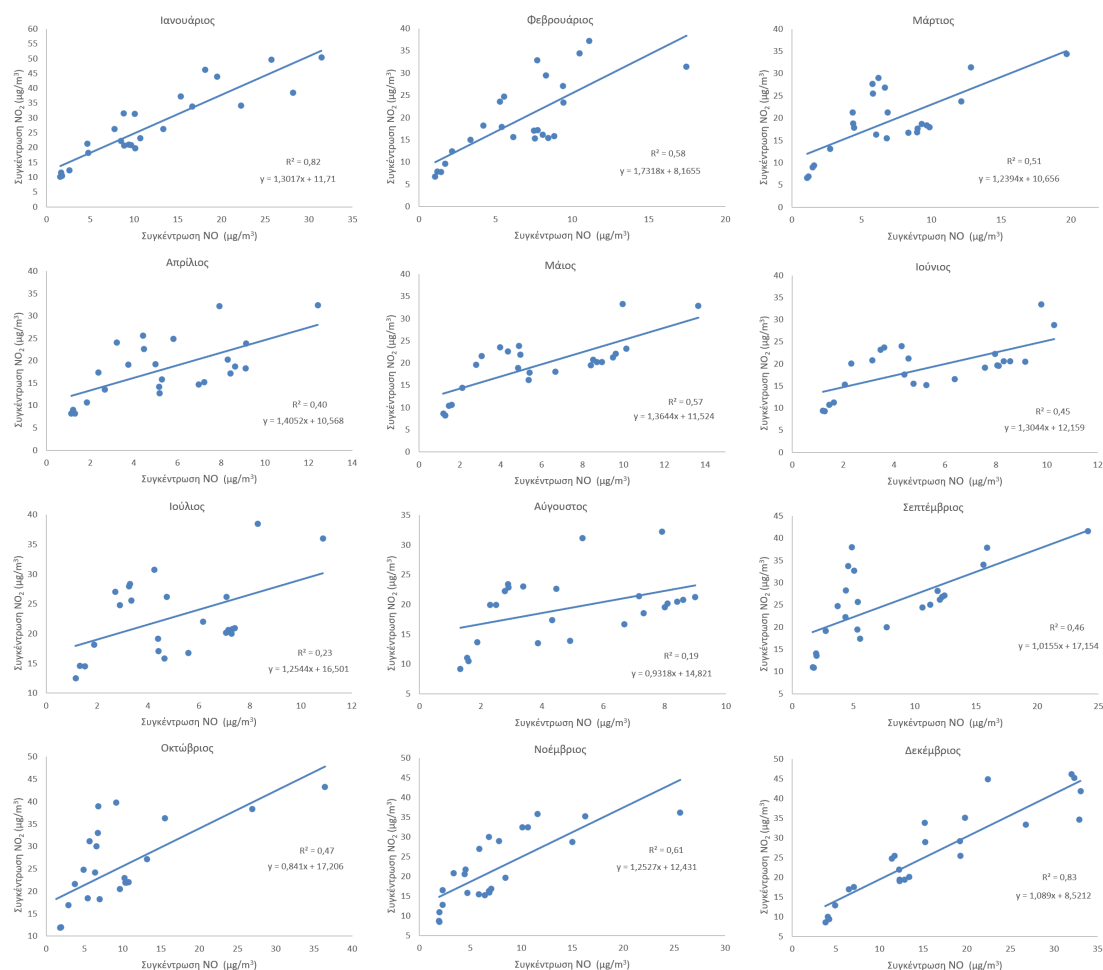
γεγονός που δείχνει ότι καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των  $\text{NO}_x$ , μειώνεται η συγκέντρωση του  $\text{O}_3$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το  $\text{NO}$  αντιδρά γρήγορα με το  $\text{O}_3$ , σχηματίζοντας  $\text{NO}_2$  και κατά συνέπεια, μειώνοντας τη συγκέντρωση του  $\text{O}_3$ . Έτσι, σε περιοχές με υψηλές εκπομπές  $\text{NO}_x$ , όπως τα αστικά κέντρα, παρατηρούνται χαμηλότερες συγκεντρώσεις  $\text{O}_3$  (Kopanakis, κ.ά., 2015). Η αρνητική αυτή συσχέτιση των δύο ρύπων έχει επιβεβαιωθεί και σε άλλες μελέτες (Gerasopoulos, κ.ά., 2006; Chatoutsidou και Lazaridis, 2024).

Τέλος, στο τέταρτο διάγραμμα (κάτω δεξιά) η συγκέντρωση των  $\text{PM}_{2.5}$  σχετίζεται θετικά με τη συγκέντρωση του  $\text{SO}_2$ , με  $R^2 = 0,53$ . Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι εκτός από τη βασική πηγή των δύο αυτών ρύπων, που είναι οι καύσεις, όπως η καύση άνθρακα για θέρμανση ή βιομηχανικές δραστηριότητες, η συσχέτιση τους οφείλεται και στον δευτερογενή σχηματισμό των  $\text{PM}_{2.5}$ . Αυτός ο σχηματισμός προκύπτει μέσω χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα από αέριους ρύπους, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται και το  $\text{SO}_2$  (Αλμπάνης, 2009).

Συμπερασματικά, η ανάλυση αποκαλύπτει ότι η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών ρύπων, συχνά λόγω κοινών πηγών ή φυσικοχημικών διεργασιών.

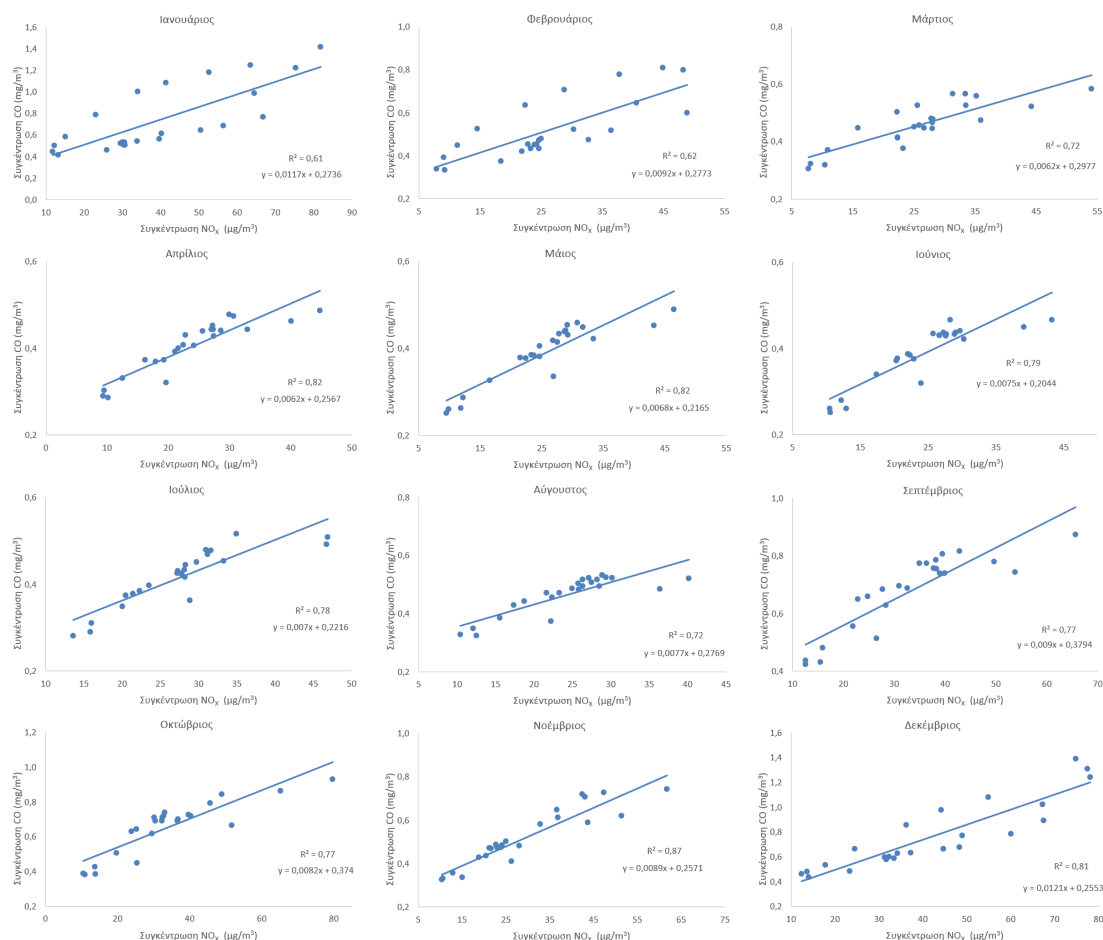
#### 4.9.2 Ωριαία συσχέτιση

Στο Διάγραμμα 4.41 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$  ανά μήνα με γραμμική παλινδρόμηση. Οι μεγαλύτερες συσχετίσεις παρατηρούνται τον Ιανουάριο και Δεκέμβριο με τιμές του συντελεστή συσχέτισης 0,82 και 0,83 αντίστοιχα. Αντίθετα, μικρότερη συσχέτιση συγκεντρώσεων  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$  παρουσιάζει ο Αύγουστος με συντελεστή 0,19. Η υψηλότερες συσχετίσεις τον χειμώνα οφείλονται στο γεγονός ότι το  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$  έχουν την τάση να παραμένουν σε συνδυασμένες υψηλές συγκεντρώσεις λόγω της αυξημένης καύσης καυσίμων για θέρμανση. Το καλοκαίρι που η θερμοκρασία και η ηλιοφάνεια είναι υψηλότερες, δημιουργούνται συνθήκες για έντονες φωτοχημικές αντιδράσεις. Το  $\text{NO}$  οξειδώνεται πιο γρήγορα σε  $\text{NO}_2$ , με αποτέλεσμα τις συγκεντρώσεις των δυο αυτών ρύπων να μην αυξάνονται ή μειώνονται ταυτόχρονα.



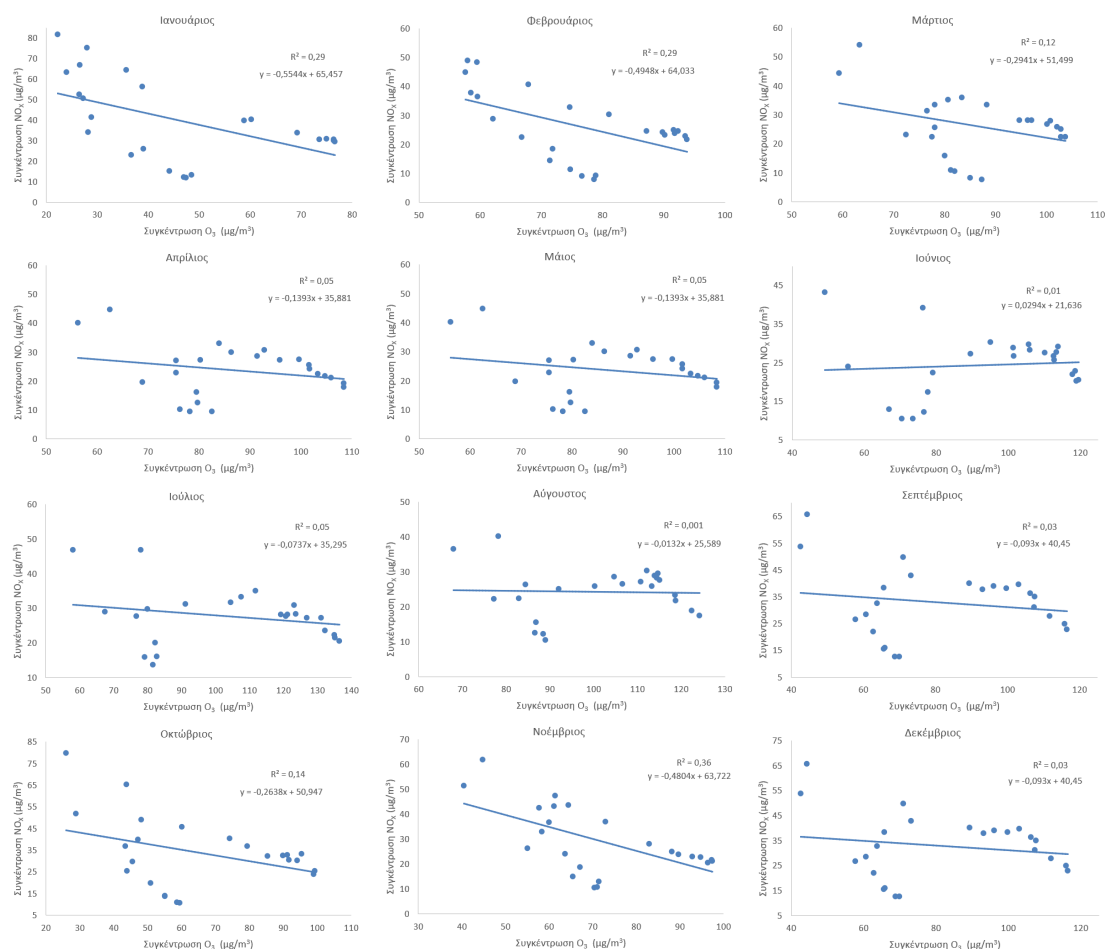
Διάγραμμα 4.41: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_2$  και των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}$  για το έτος 2023.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.42 η συσχέτιση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$  είναι υψηλή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με τον συντελεστή συσχέτισης να έχει τιμές από 0,61 τον Ιανουάριο μέχρι 0,87 τον Νοέμβριο. Επομένως συμπεραίνουμε ότι οι δύο ρύποι έχουν κοινές πηγές. Το  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$  εκπέμπονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας, με τις εκπομπές αυτές να προέρχονται από μέσα μεταφοράς και καυστήρες για θέρμανση. Η σταθερή κυκλοφορία των οχημάτων στον κεντρικό δρόμο των Χανίων, δίπλα στον οποίο βρίσκεται ο σταθμός ατμοσφαιρικής ρύπανσης που καταγράφει τις συγκεντρώσεις των ρύπων, συμβάλει στην ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των  $\text{CO}$  και  $\text{NO}_x$ .



Διάγραμμα 4.42: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων CO και των ωριαίων συγκεντρώσεων  $NO_X$  για το έτος 2023.

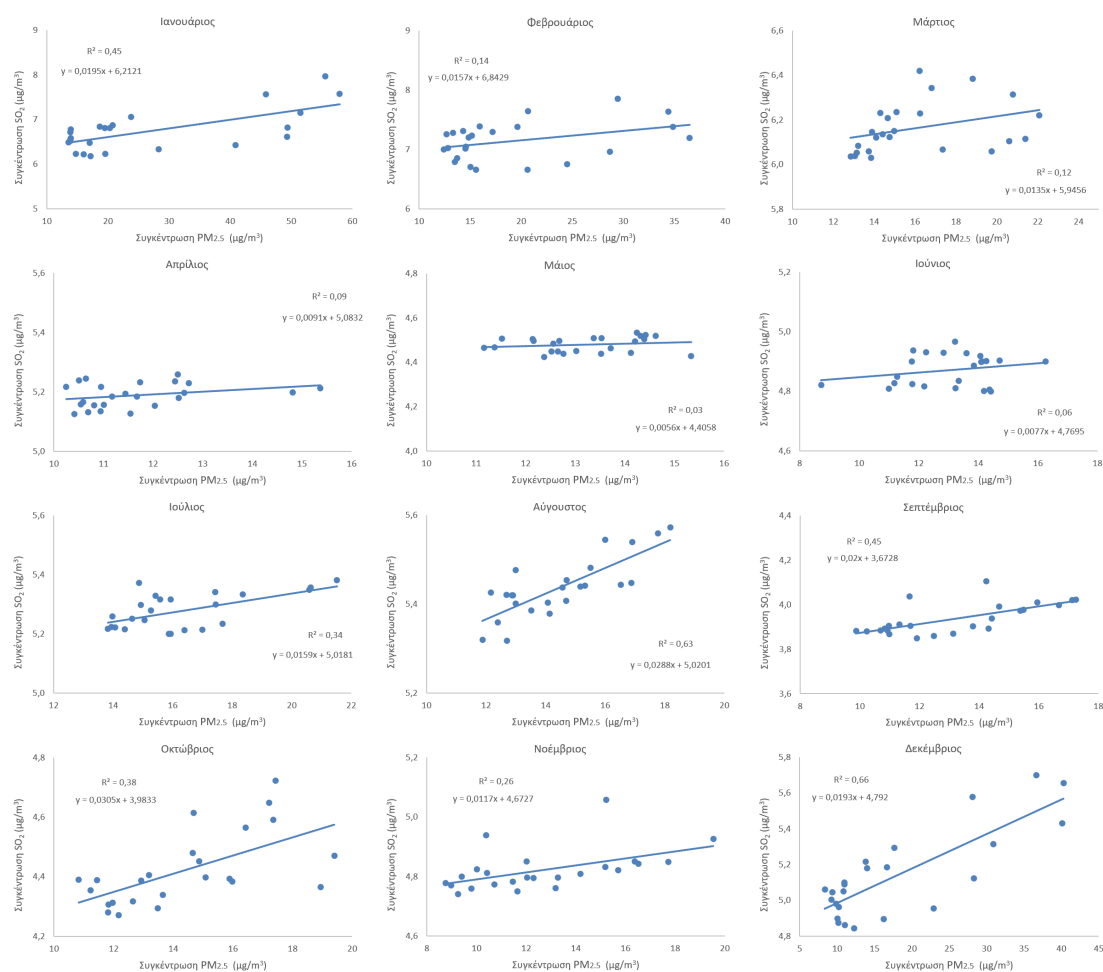
Στο Διάγραμμα 4.43 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η συσχέτιση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $NO_X$  και  $O_3$ . Σχεδόν όλους τους μήνες παρατηρείται αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δύο ρύπων, καθώς όπως προαναφέρθηκε οι συγκεντρώσεις  $O_3$  μειώνονται όταν οι συγκεντρώσεις  $NO_X$  είναι υψηλές. Οι συντελεστές συσχέτισης έχουν εύρος από 0,0009 μέχρι 0,36, γεγονός που υποδεικνύει ότι η σχέση μεταξύ των δύο αυτών ρύπων είναι αρκετά ασθενής μέχρι και σχεδόν ανύπαρκτη. Αυτή η σχεδόν μηδενική συσχέτιση σημαίνει ότι δεν υπάρχει ουσιαστική γραμμική σχέση μεταξύ των δύο ρύπων.



Διάγραμμα 4.43: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{NO}_x$  και των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{O}_3$  για το έτος 2023.

Τέλος στο Διάγραμμα 4.44 φαίνεται η συσχέτιση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{SO}_2$  και  $\text{PM}_{2.5}$  με τον μικρότερο συντελεστή συσχέτισης να ανήκει στον Μάιο με τιμή 0,03 και τον μεγαλύτερο στον Δεκέμβριο με τιμή 0,66. Τους χειμερινούς μήνες η συσχέτιση είναι υψηλότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους, που είναι αρκετά μικρότερη μέχρι ή σχεδόν μηδενική. Επομένως, η μεγαλύτερη συσχέτιση  $\text{SO}_2$  και  $\text{PM}_{2.5}$  τον χειμώνα οφείλεται κυρίως στις αυξημένες εκπομπές της χρήσης καυσίμων για θέρμανση.





Διάγραμμα 4.44: Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των ωριαίων συγκεντρώσεων SO<sub>2</sub> και των ωριαίων συγκεντρώσεων PM<sub>2.5</sub> για το έτος 2023.

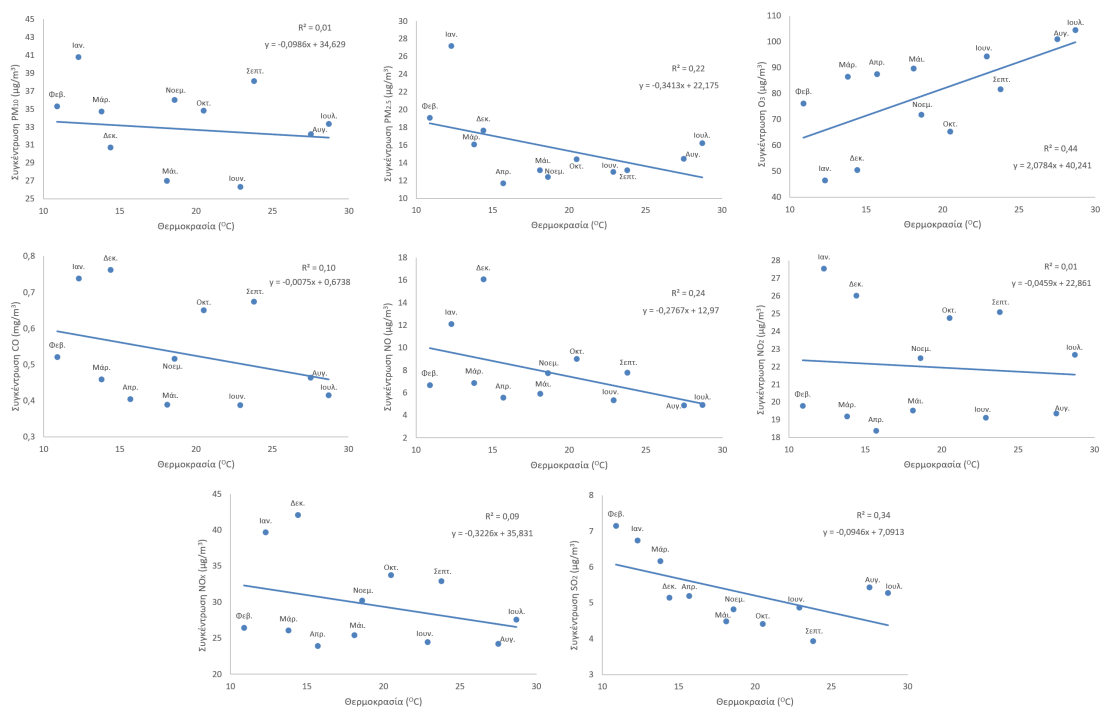
### 4.9.3 Συσχέτιση συγκέντρωσης ρύπων με θερμοκρασία

Πίνακας 4.11: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για το 2023 στα Χανιά.

| Μήνας       | Μέση θερμοκρασία (°C) |
|-------------|-----------------------|
| Ιανουάριος  | 12,3                  |
| Φεβρουάριος | 10,9                  |
| Μάρτιος     | 13,8                  |
| Απρίλιος    | 15,7                  |
| Μάιος       | 18,1                  |
| Ιούνιος     | 22,9                  |
| Ιούλιος     | 28,7                  |
| Αύγουστος   | 27,5                  |
| Σεπτέμβριος | 23,8                  |
| Οκτώβριος   | 20,5                  |
| Νοέμβριος   | 18,6                  |
| Δεκέμβριος  | 14,4                  |

Στον πίνακα 4.11 καταγράφονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες των Χανίων για το έτος 2023. Οι ψυχρότεροι μήνες ήταν ο Ιανουάριος και Φεβρουάριος με μέσες τιμές θερμοκρασίας 12,3°C και

10,9°C αντίστοιχα και οι θερμότεροι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με μέσες τιμές 28,7°C και 27,5°C. Στην συνέχεια, στο Διάγραμμα 4.45 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των μηνιαίων συγκεντρώσεων των οκτώ ρύπων με τις αντίστοιχες μηνιαίες θερμοκρασίες. Παρατηρείται ότι ο μόνος ρύπος με θετική συσχέτιση συγκέντρωσης-θερμοκρασίας είναι το O<sub>3</sub> με  $R^2 = 0,44$ . Για τους υπόλοιπους ρύπους διακρίνεται αρνητική συσχέτιση με το εύρος του  $R^2$  από 0,01 (NO<sub>2</sub>) μέχρι 0,34 (SO<sub>2</sub>). Η αρνητική συσχέτιση των περισσότερων ρύπων σημαίνει ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, οι συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων τείνουν να μειώνονται και αντίστροφα. Οι συσχετίσεις αυτές επαληθεύονται και από το γεγονός, όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως, ότι κατά τους χειμερινούς μήνες που η θερμοκρασία είναι χαμηλή, οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες (Zender-Swiercz, κ.ά., 2024; Romaszko-Wojtowicz, κ.ά., 2025). Όσον αφορά το O<sub>3</sub>, η μεγάλη συσχέτιση των συγκεντρώσεων του με τη μηνιαία θερμοκρασία οφείλεται κυρίως στις φωτοχημικές διαδικασίες που το παράγουν, οι οποίες εντείνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Chatoutsidou και Lazaridis, 2024).



Διάγραμμα 4.45: Συσχέτιση μηνιαίας συγκέντρωσης με μηνιαία θερμοκρασία. Διάγραμμα γραμμικής παλινδρόμησης *i*) μεταξύ της συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> και της θερμοκρασίας, *ii*) μεταξύ της συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> και της θερμοκρασίας, *iii*) μεταξύ της συγκέντρωσης O<sub>3</sub> και της θερμοκρασίας, *iv*) μεταξύ της συγκέντρωσης CO και της θερμοκρασίας, *v*) μεταξύ της συγκέντρωσης NO και της θερμοκρασίας, *vi*) μεταξύ της συγκέντρωσης NO<sub>2</sub> και της θερμοκρασίας, *vii*) μεταξύ της συγκέντρωσης NO<sub>x</sub> και της θερμοκρασίας, *viii*) μεταξύ της συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> και της θερμοκρασίας.

#### 4.10 Ημέρες με επεισόδια σκόνης

Στον Πίνακα 4.12 καταγράφονται οι ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα, όπως επίσης και οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> εκείνων των ημερών. Το 2023 εντοπίστηκαν συνολικά 43 ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης στην πόλη των Χανίων. Οι ημέρες με αφρικανική σκόνη το 2023 είναι λιγότερες από το 2008 και 2022, όπου σύμφωνα με μελέτες σημει-

ώθηκαν 51 (Kopanakis, κ.α., 2018) και 50 (Μπαλή, 2023) ημέρες αντίστοιχα με επεισόδια σκόνης. Αντίθετα, τη περίοδο Απρίλιος 2017-Μάρτιος 2018 παρατηρήθηκαν 36 επεισόδια μεταφοράς σκόνης στα Χανιά (Chatoutsidou, κ.ά., 2019).

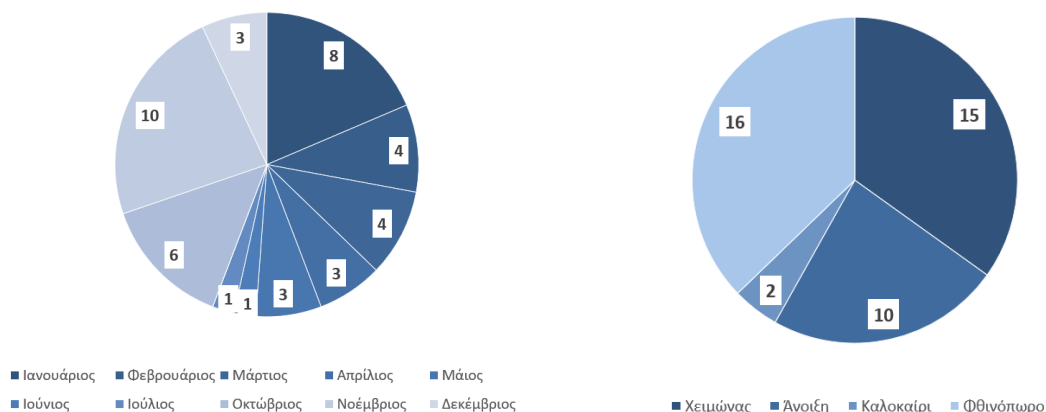
Από τις 43 ημέρες μεταφοράς σκόνης, στις 22 (51,2%) παρατηρήθηκε υπέρβαση του νομοθετικού ορίου Π.Ο.Υ. για τα  $PM_{10}$  ( $45 \mu g/m^3$ ). Δηλαδή σχεδόν στις μισές ημέρες με αφρικανική σκόνη, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  ξεπέρασαν τα  $45 \mu g/m^3$ . Όσον αφορά το νομοθετικό όριο της Ε.Ε. ( $50 \mu g/m^3$ ) υπήρξε παράβαση 14 ημέρες με επεισόδιο μεταφοράς σκόνης (32,6%). Παρά το γεγονός ότι το ποσοστό αυτό είναι σχετικά μικρό, δεν αναιρεί το γεγονός ότι η συνεισφορά της αφρικανικής σκόνης στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων είναι ουσιώδης. Αν και τις ημέρες με σκόνη οι συγκεντρώσεις μπορεί να μην ξεπέρασαν τα καθορισμένα νομοθετικά όρια, παρόλα αυτά συνέβαλαν στην αύξηση των συγκεντρώσεων σε σχέση με τις ημέρες χωρίς μεταφορά σκόνης. Συνεπώς, η μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα αύξησης των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  στην ατμόσφαιρα (Li, 2020).

Πίνακας 4.12: Πίνακας με επεισόδια σκόνης και συγκέντρωση  $PM_{10}$  ανά μήνα.

| Μήνας       | Ημερομηνία με επεισόδια σκόνης | Μέση Ημερήσια Συγκέντρωση $PM_{10}$ ( $\mu g/m^3$ ) |
|-------------|--------------------------------|---|
| Ιανουάριος  | 18                             | 47,8  |
|             | 19                             | 50,1  |
|             | 21                             | 44,7  |
|             | 22                             | 62,1  |
|             | 23                             | 54,4  |
|             | 24                             | 47,7  |
|             | 25                             | 38,2  |
| Φεβρουάριος | 26                             | 63,7  |
|             | 25                             | 41,4  |
|             | 26                             | 44,1  |
|             | 27                             | 46,0  |
| Μάρτιος     | 28                             | 50,2  |
|             | 01                             | 79,8  |
|             | 02                             | 58,9  |
|             | 03                             | 53,7  |
| Απρίλιος    | 04                             | 48,5  |
|             | 02                             | 25,8  |
|             | 03                             | 45,8  |
| Μάιος       | 22                             | 28,7  |
|             | 16                             | 31,7  |
|             | 21                             | 30,5  |
| Ιούνιος     | 22                             | 33,9  |
|             | 01                             | 26,2  |
| Ιούλιος     | 02                             | 23,7  |
| Οκτώβριος   | 25                             | 33,0  |
|             | 26                             | 66,1  |
|             | 27                             | 65,2  |
|             | 28                             | 33,3  |
|             | 29                             | 39,6  |
|             | 30                             | 31,6  |
| Νοέμβριος   | 03                             | 38,9  |
|             | 04                             | 62,8  |
|             | 05                             | 35,4  |
|             | 06                             | 150,9   |
|             | 07                             | 41,6  |
|             | 08                             | 45,6  |
|             | 09                             | 45,5  |
|             | 11                             | 46,2  |
|             | 29                             | 56,5  |
|             | 30                             | 56,1  |
| Δεκέμβριος  | 03                             | 30,1  |
|             | 04                             | 41,6  |
|             | 05                             | 37,1  |

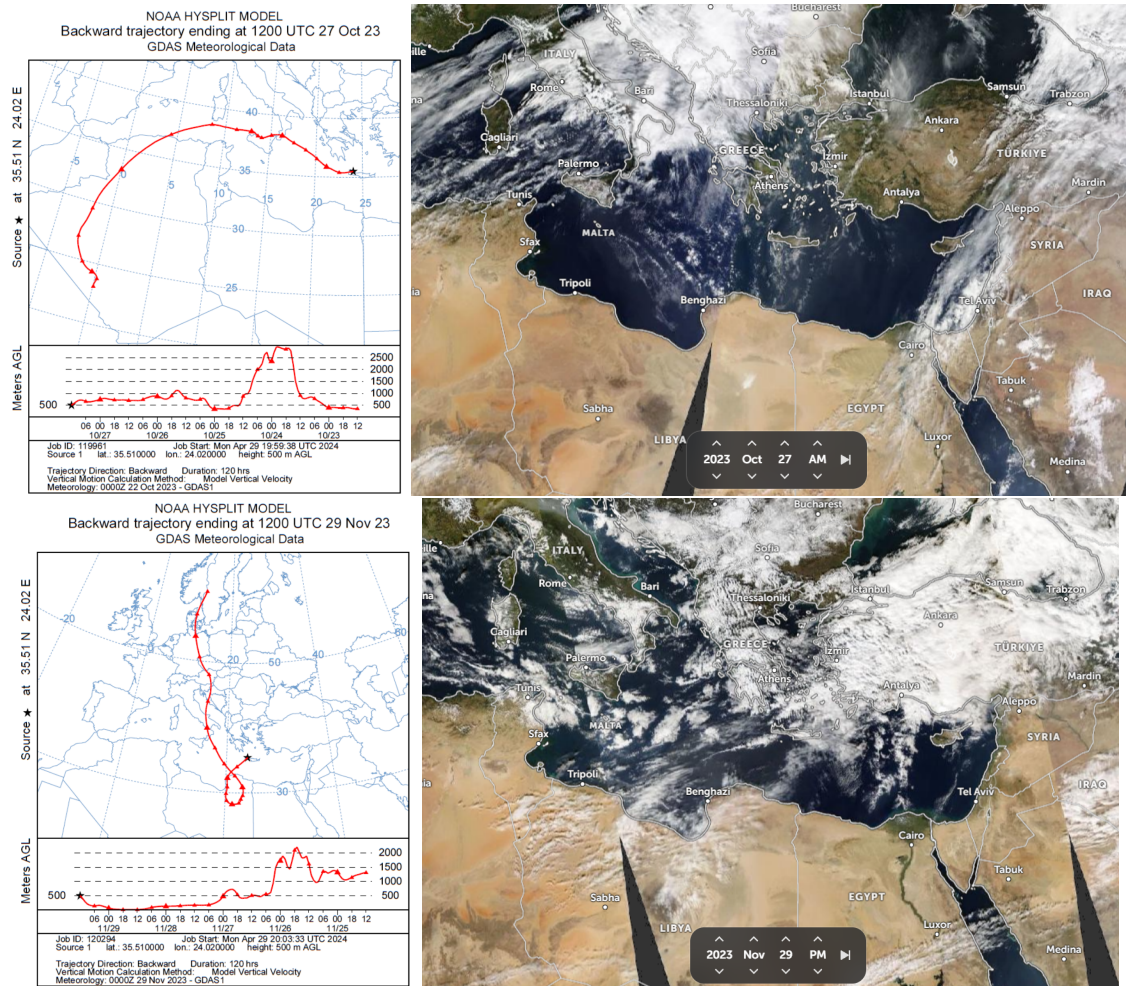
Οι μόνοι μήνες που δεν παρατηρήθηκε κάποιο επεισόδιο μεταφοράς σκόνης είναι ο Αύγουστος και ο Σεπτέμβριος. Τα περισσότερα επεισόδια συνέβησαν τον Νοέμβριο (10). Στο Διάγραμμα 1.46

παρουσιάζονται οι ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης ανά μήνα και ανά εποχή. Ο χειμώνας και το φθινόπωρο είχαν τα περισσότερα επεισόδια σκόνης με τον πρώτο να έχει συνολικά 15 ημέρες και τον δεύτερο 16 ημέρες. Την άνοιξη παρατηρήθηκαν 10 ημέρες με επεισόδια σκόνης και το καλοκαίρι μόνο 2, ένα τον Ιούνιο και ένα τον Ιούλιο.



Διάγραμμα 4.46: Ημέρες με επεισόδια σκόνης για κάθε μήνα (αριστερά) και κάθε εποχή (δεξιά).

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται ανάστροφες τροχιές αέριων μαζών, που απεικονίζονται μέσω του μοντέλου HYSPLIT, για ύψος 500 km, για δύο ημέρες με επεισόδιο σκόνης, συγκεκριμένα για τις 27 Οκτωβρίου (πάνω) και για τις 29 Νοεμβρίου (κάτω). Και τις δύο αυτές ημέρες, εκτός από αφρικανική σκόνη, σημειώθηκε και υπέρβαση του νομοθετικού ορίου Π.Ο.Υ., καθώς οι ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης PM<sub>10</sub> στις 27 Οκτωβρίου ήταν 65,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και στις 29 Νοεμβρίου ήταν 56,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στην πρώτη περίπτωση, ο άνεμος είχε διεύθυνση από την Αλγερία, διέσχισε τη Σικελία και τη νότια Ιταλία και κατέληξε στην Κρήτη. Στην δεύτερη περίπτωση οι αέριες μάζες πέρασαν πάνω από την Σκανδιναβία, διασχίζοντας την κεντρική Ευρώπη έφτασαν στη Λιβύη και άλλαξαν πορεία κατευθύνοντας βόρεια προς την Κρήτη, όπου και κατέληξαν. Και στις δύο περιπτώσεις οι αέριες μάζες είχαν διαφορετικές πορείες, όμως πέρασαν και οι δύο από τη βόρεια Αφρική και τέλος κατέληξαν στην Κρήτη.

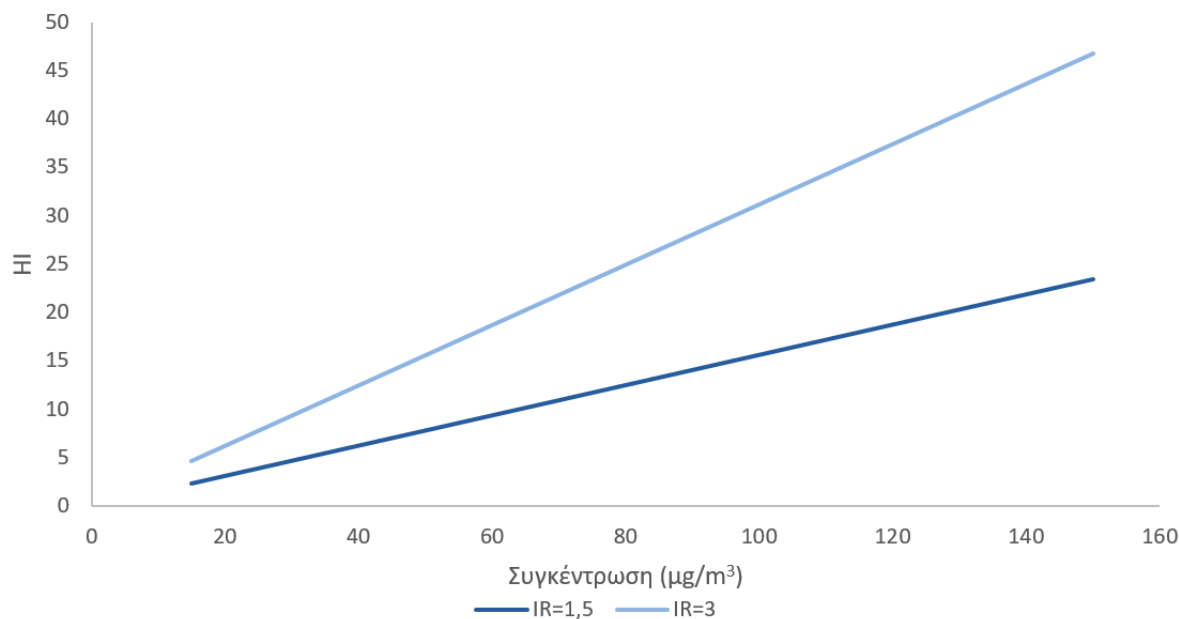


Σχήμα 4.1: Εικόνες οπισθοπορείας ανέμου μέσω του *HYSPLIT* και δορυφορικές εικόνες για 27/10 (πάνω) και 29/11 (κάτω).

## 4.11 Υπολογισμός επικινδυνότητας -Hazard Index

### 4.11.1 Hazard Index για τα $PM_{10}$

Σύμφωνα με την Εξίσωση 3.3 υπολογίστηκαν οι δείκτες HI για τα  $PM_{10}$ . Αρχικά, στο Διάγραμμα 4.47 διακρίνονται οι HI για το εύρος των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  του 2023 στα Χανιά, το οποίο είναι από 15 μέχρι  $150 \mu g/m^3$ . Η διαφοροποίηση στις δύο ευθείες οφείλεται στην τιμή του ωριαίου ρυθμού εισπνοής IR, ο οποίος στην μία περίπτωση έχει τιμή  $1,5 m^3/h$  και στην άλλη  $3 m^3/h$ . Ο ρυθμός  $IR=1,5 m^3/h$  αντιστοιχεί σε μέτρια δραστηριότητα για έναν ενήλικα (π.χ. περπάτημα, ελαφριά εργασία) και ο ρυθμός  $IR=3 m^3/h$  αντιστοιχεί σε έντονη δραστηριότητα (π.χ τρέξιμο, αθλητική δραστηριότητα) (EPA).

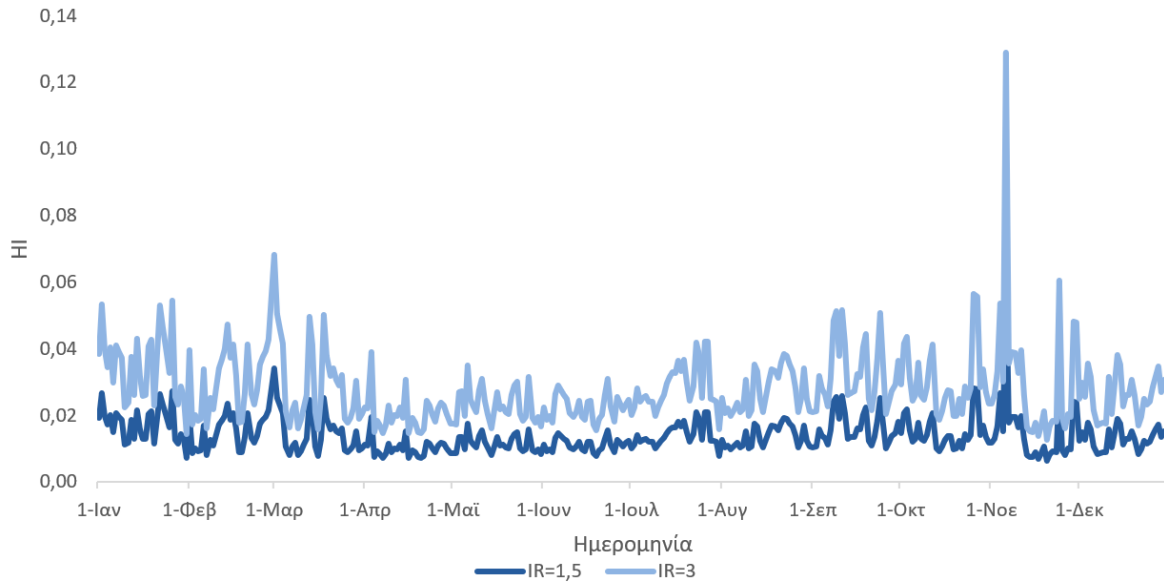


Διάγραμμα 4.47: Hazard Index των PM<sub>10</sub> για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023.

Όπως παρατηρείται, η ευθεία με IR=3 m<sup>3</sup>/h παρουσιάζει υψηλότερες τιμές του δείκτη HI καθώς και μεγαλύτερη κλίση σε σύγκριση με την ευθεία που αντιστοιχεί σε IR=1,5 m<sup>3</sup>/h. Αυτό οφείλεται στον διπλάσιο ρυθμό εισπνοής, ο οποίος οδηγεί σε αυξημένη εναπόθεση των σωματιδίων PM<sub>10</sub> στο αναπνευστικό σύστημα, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Οι τιμές του δείκτη HI για IR=1,5 m<sup>3</sup>/h κυμαίνονται από 2,34 έως 23,40 και για IR=3 m<sup>3</sup>/h από 4,68 μέχρι 46,8. Δηλαδή οι τιμές αυτές είναι διπλάσιες σε σχέση με εκείνες του IR=1,5 m<sup>3</sup>/h, γεγονός που οφείλεται στον διπλασιασμό του ρυθμού εισπνοής. Οι υψηλές αυτές τιμές του δείκτη HI οφείλονται στο γεγονός ότι ο δείκτης υπολογίστηκε σύμφωνα με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις, αλλά για μακροχρόνια έκθεση (70 χρόνων) για κάθε μια από αυτές. Το γεγονός αυτό δεν είναι ρεαλιστικό, καθώς η υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης (150 μg/m<sup>3</sup>) καταγράφηκε μόνο μία ημέρα μέσα στο 2023, και σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.47 ο δείκτης επικινδυνότητας για ημερήσια έκθεση για 70 χρόνια με ρυθμό εισπνοής 3 m<sup>3</sup>/h σε αυτή τη συγκέντρωση είναι 46,8, ο οποίος ρυθμός αντιστοιχεί σε έντονη σωματική άσκηση. Επομένως, αιτιολογούνται οι υψηλές τιμές των δεικτών.

Στο Διάγραμμα 4.48 παρουσιάζονται οι ημερήσιοι δείκτες HI των PM<sub>10</sub>. Οι δείκτες αυτοί έχουν υπολογιστεί για έκθεση διάρκειας μίας ημέρας, αποτυπώνοντας έτσι τη μεταβλητότητα του HI σε ημερήσια βάση.



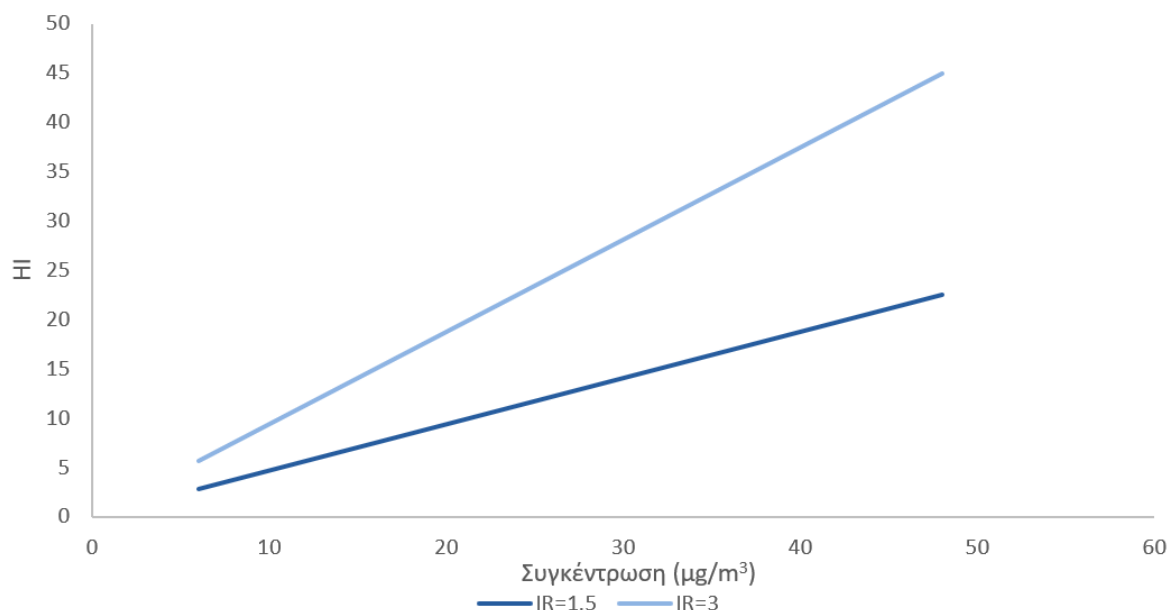


Διάγραμμα 4.48: Ημερήσιο Hazard Index των  $PM_{10}$  για το έτος 2023.

Ο υψηλότερος HI υπολογίστηκε στις 6 Νοεμβρίου με τιμή 0,06 και 0,13 για  $IR=1,5 \text{ m}^3/h$  και  $IR=3 \text{ m}^3/h$  αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη την ημέρα καταγράφηκε η υψηλότερη ημερήσια συγκέντρωση  $PM_{10}$  ( $150,9 \mu g/m^3$ ). Οι ημερήσιοι δείκτες για  $IR=3 \text{ m}^3/h$  είναι διπλάσιοι από εκείνους για  $IR=1,5 \text{ m}^3/h$ . Υψηλές τιμές του δείκτη HI παρατηρούνται επίσης τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο, όπως φαίνεται και στις ημερήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  στο Διάγραμμα 4.1. Αυτό συμβαίνει επειδή ο δείκτης HI είναι ανάλογος της συγκέντρωσης των σωματιδίων, σύμφωνα με τις Εξισώσεις 3.3 και 3.4. Οι συγκεκριμένες τιμές είναι πιο αντιπροσωπευτικές στον κίνδυνο της έκθεσης στον συγκεκριμένο ρύπο, καθώς οι τιμές του δείκτη εξαρτώνται αποκλειστικά στην ημερήσια συγκέντρωση, η οποία είναι ο μόνος παράγοντας που μεταβάλλεται στους υπολογισμούς.

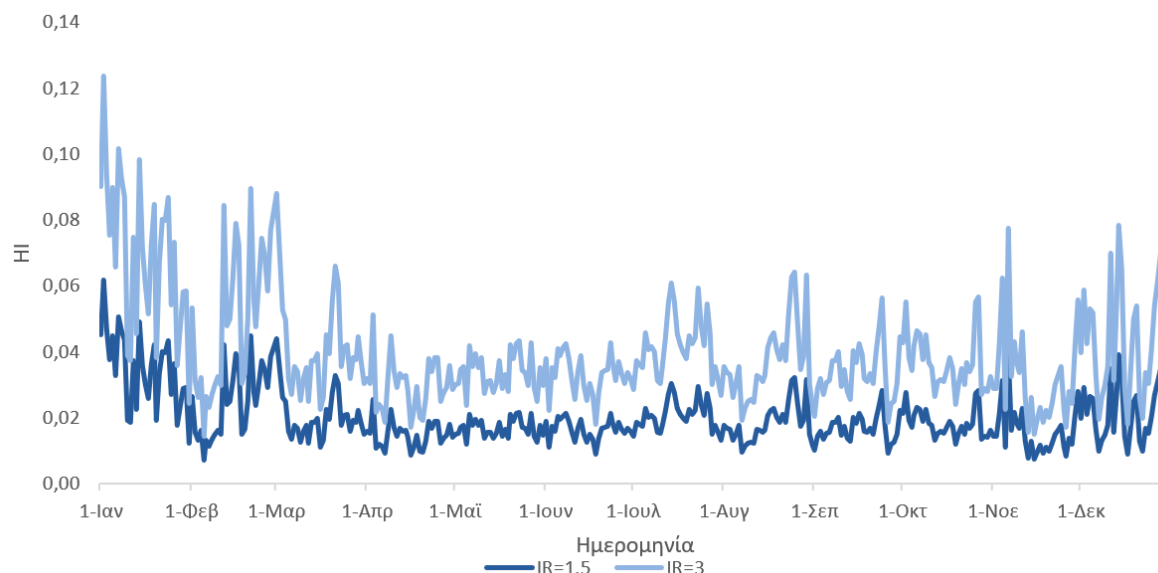
#### 4.11.2 Hazard Index για τα $PM_{2.5}$

Στο ακόλουθο Διάγραμμα φαίνεται ότι ο δείκτης επικινδυνότητας HI έχει εύρος από 2,81 μέχρι 22,46 και 5,62 μέχρι 44,93 για τις σχετικές τιμές συγκέντρωσης των  $PM_{2.5}$  που κυμαίνονται από 6 έως  $48 \mu g/m^3$ . Τα αποτελέσματα αυτά, όπως και στο Διάγραμμα 4.47 δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικά, αποτυπώνουν όμως το αντίκτυπο που έχουν στην ανθρώπινη υγεία.



Διάγραμμα 4.49: Hazard Index των  $PM_{2.5}$  για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023.

Οι ημερήσιοι δείκτες HI μεταβάλλονται αναλογικά με την ημερήσια συγκέντρωση των  $PM_{2.5}$ , όπως και στο Διάγραμμα 4.5 με τις υψηλότερες τιμές HI να αντιστοιχούν στον Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως, ο διπλασιασμός του ρυθμού εισπνοής έχει ως αποτέλεσμα τον διπλασιασμό των τιμών του δείκτη HI.



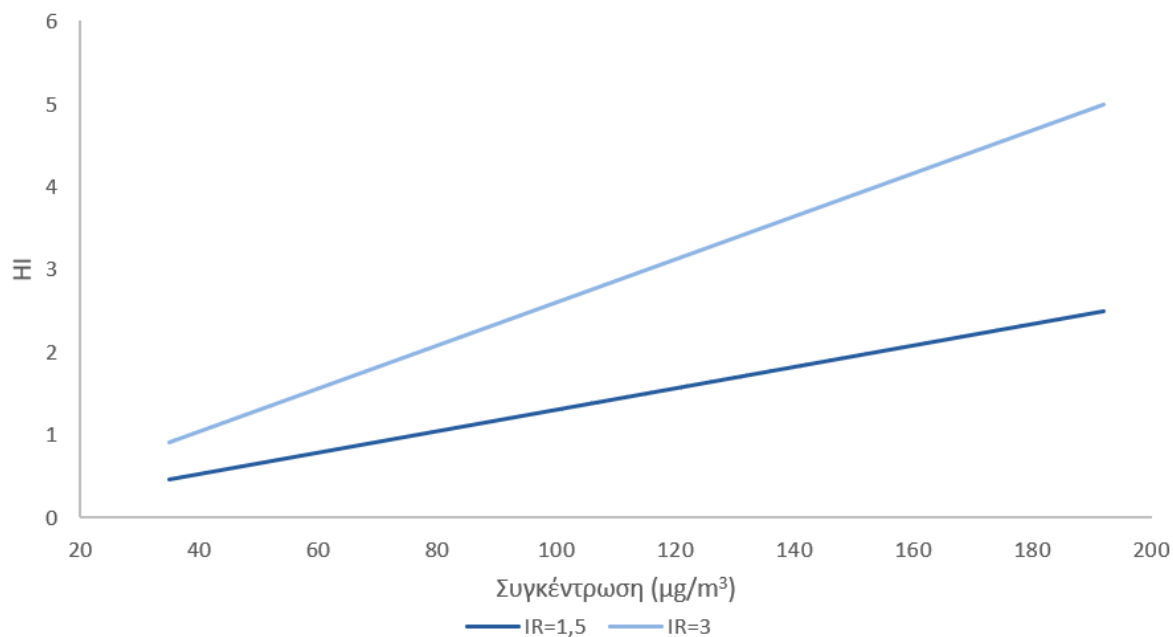
Διάγραμμα 4.50: Ημερήσιο Hazard Index των  $PM_{2.5}$  για το έτος 2023.

#### 4.11.3 Hazard Index για το $O_3$

Στο Διάγραμμα 4.51 φαίνονται οι τιμές του δείκτη HI, οι οποίες έχουν υπολογιστεί για το εύρος συγκέντρωσης από 35 έως 192  $\mu g/m^3$ , οι οποίες είναι οι μέγιστες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις δωρου. Για την ελάχιστη μέση συγκέντρωση δωρου (35  $\mu g/m^3$ ) ο HI που αντιστοιχεί για  $IR=1,5$

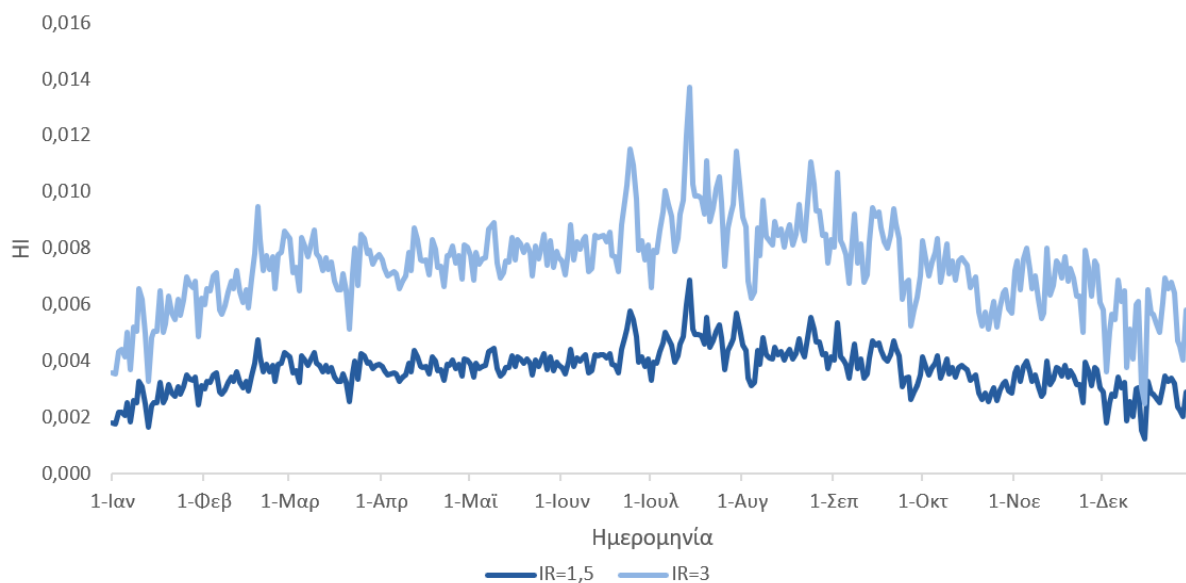


$m^3/h$  είναι 0,46 και για  $IR=3 \text{ } m^3/h$  η σχεδόν διπλάσια τιμή, δηλαδή 0,91. Για συγκέντρωση ίση με  $192 \mu g/m^3$ , ο αντίστοιχος δείκτης HI είναι για  $IR=1,5 \text{ } m^3/h$  2,5 και για  $IR=3 \text{ } m^3/h$  4,99.



Διάγραμμα 4.51: Hazard Index των  $O_3$  για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023.

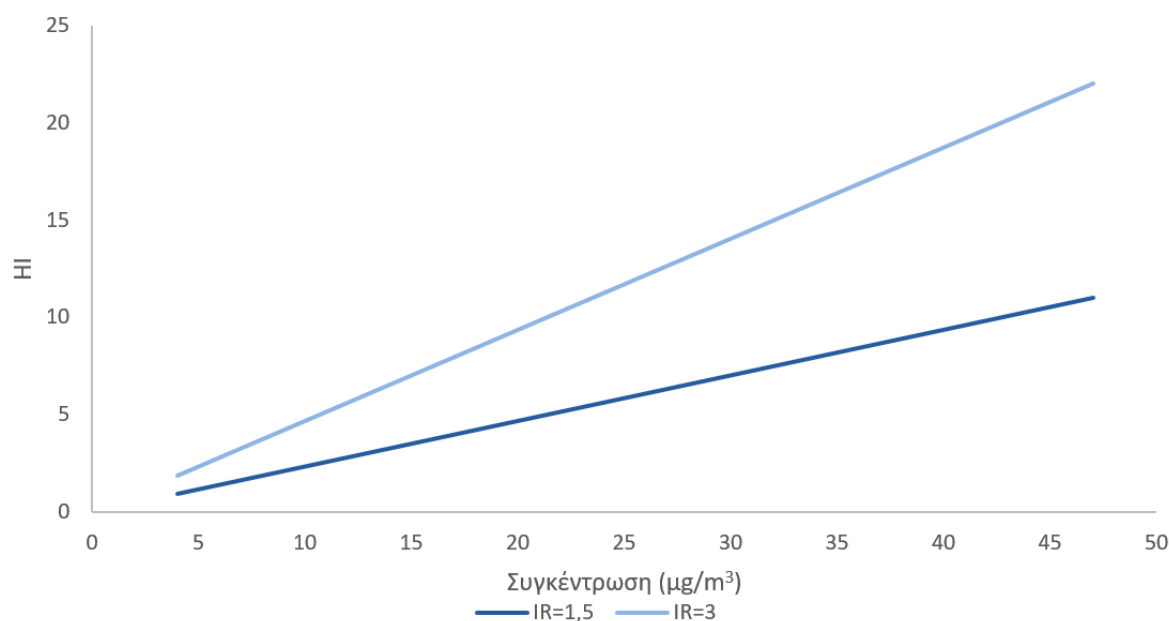
Η μεταβλητότητα του δείκτη HI για το  $O_3$  πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μεταβλητότητα των τιμών της μέγιστης μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης δωρων, που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.16 και φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα. Οι πιο επικίνδυνοι περίοδοι για έκθεση στο  $O_3$  είναι οι καλοκαιρινοί μήνες, όπου έχουν καταγραφεί υψηλές συγκεντρώσεις  $O_3$ . Συγκριτικά με τις τιμές του δείκτη HI για τα  $PM_{10}$  και  $PM_{2,5}$ , η έκθεση στο  $O_3$  είναι λιγότερο επικίνδυνη από τους άλλους δύο ρύπους, καθώς ο HI του  $O_3$  σε ημερήσια βάση δεν υπερβαίνει το 0,014, ενώ οι HI των  $PM_{10}$  και  $PM_{2,5}$  ξεπερνάνε το 0,12.



Διάγραμμα 4.52: Ημερήσιο Hazard Index των  $O_3$  για το έτος 2023.

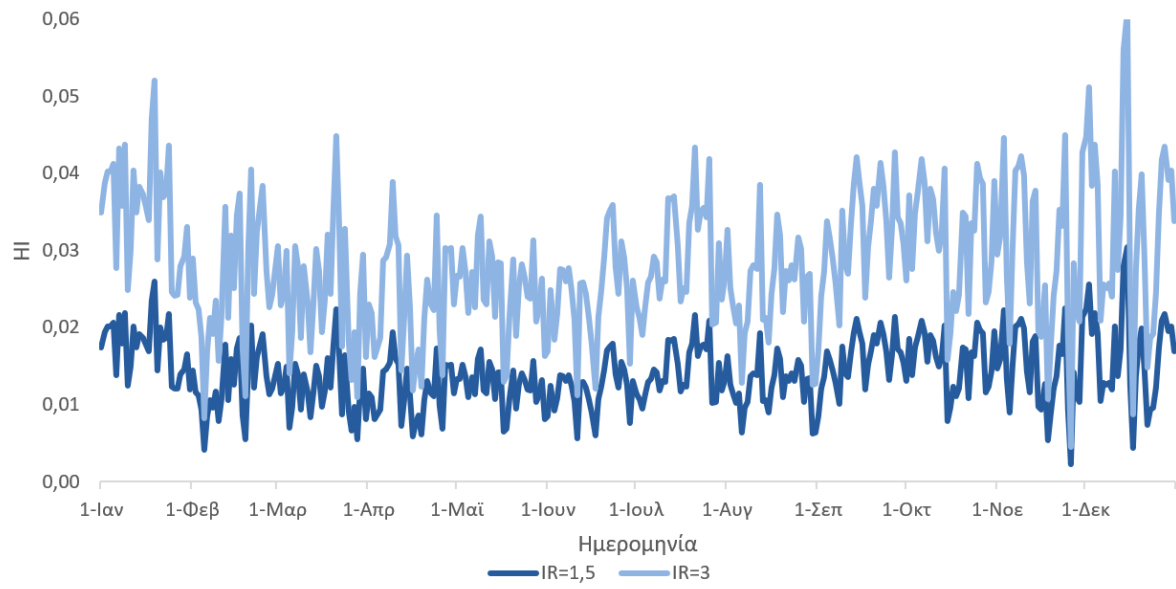
#### 4.11.4 Hazard Index για το NO<sub>2</sub>

Οι δείκτες HI για το NO<sub>2</sub> είναι επίσης υψηλοί, σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.53, σε υποθετική χρόνια έκθεση για μέσες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης NO<sub>2</sub> από 4 έως 47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ο HI που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ημερήσια τιμή συγκέντρωσης NO<sub>2</sub> είναι για IR=1,5  $\text{m}^3/\text{h}$  0,94 και για IR=3  $\text{m}^3/\text{h}$  1,87, καθώς για την μεγαλύτερη ημερήσια τιμή συγκέντρωσης είναι 11 και 22 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.53: Hazard Index των NO<sub>2</sub> για το εύρος συγκεντρώσεων του έτους 2023.

Όσον αφορά τους ημερήσιους δείκτες HI, παρατηρούνται αρκετές διακυμάνσεις στο Διάγραμμα 4.54, όπως και στο αντίστοιχο των συγκεντρώσεων NO<sub>2</sub> Διάγραμμα 4.28. Σχετικά με τις τιμές HI του O<sub>3</sub>, το NO<sub>2</sub> μπορεί να χαρακτηριστεί μέχρι και 5 φορές πιο επικίνδυνο, καθώς οι τιμές επικινδυνότητας του NO<sub>2</sub> κυμαίνονται από 0,002 έως 0,031 για ρυθμό εισπνοής 1,5  $\text{m}^3/\text{h}$  και από 0,005 έως 0,061 για ρυθμό εισπνοής 3  $\text{m}^3/\text{h}$ . Το NO<sub>2</sub> έχει χαμηλότερους δείκτες επικινδυνότητας από τα PM<sub>2.5</sub> και προσεγγίζει αρκετά τους δείκτες των PM<sub>10</sub>, με ανάλογο κίνδυνο τις ημέρες με αυξημένες συγκεντρώσεις των ρύπων.



Διάγραμμα 4.54: Ημερήσιο Hazard Index των NO<sub>2</sub> για το έτος 2023.

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη συγκέντρωσης των ρύπων  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$  και  $SO_2$  στον σταθμό των Χανίων για το έτος 2023. Μέσω της ανάλυσης των ωριαίων τιμών συγκέντρωσης εξετάστηκε η ετήσια, μηνιαία και ωριαία διακύμανση τους, καθώς και οι διαφορές μεταξύ καθημερινών και σαββατοκύριακων.

Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η μέση ετήσια συγκέντρωση  $PM_{10}$  ήταν  $32,8 \mu g/m^3$ , με τις ημερήσιες τιμές να κυμαίνονται από  $15 \mu g/m^3$  έως  $150,9 \mu g/m^3$ . Όσον αφορά τα νομοθετικά όρια της Ε.Ε. ( $50 \mu g/m^3$ ) και του Π.Ο.Υ. ( $45 \mu g/m^3$ ) σημειώθηκαν 26 και 51 ημέρες υπέρβασης αντίστοιχα. Οι περισσότερες υπερβάσεις έγιναν το φθινόπωρο και τον χειμώνα, γεγονός που αποδίδεται κυρίως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η θέρμανση και η κυκλοφορία των οχημάτων, αλλά και σε επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν τις πρωινές ώρες (9:00-10:00), λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης στο κέντρο των Χανίων, ενώ τον χειμώνα εντοπίστηκαν υψηλές συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  τις βραδινές ώρες, κυρίως λόγω εκπομπών από την οικιακή θέρμανση. Επιπλέον, σχετικά με τη σύγκριση καθημερινών-σαββατοκύριακων, η μεγαλύτερη διαφορά των συγκεντρώσεων παρατηρήθηκε τον Μάιο, όταν τα σαββατοκύριακα παρουσίασαν υψηλότερες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$  από τις καθημερινές καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Τα  $PM_{2.5}$  είχαν μέση συγκέντρωση για το 2023 ίση με  $15,7 \mu g/m^3$ , τιμή χαμηλότερη από το ετήσιο όριο της Ε.Ε. ( $25 \mu g/m^3$ ). Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{2.5}$  κυμάνθηκαν από  $5,7 \mu g/m^3$  έως  $48,2 \mu g/m^3$ , με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο. Σύμφωνα με την μηνιαία 24ωρη ανάλυση, δεν σημειώθηκαν σημαντικές αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, ενώ τον χειμώνα παρατηρήθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις τόσο τις πρωινές όσο και τις βραδινές ώρες, λόγω των καύσεων. Όσον αφορά τη σύγκριση καθημερινών-σαββατοκύριακων, δεν εντοπίστηκε αξιοσημείωτη διαφορά στις συγκεντρώσεις.

Σχετικά με τη σύγκριση  $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ , παρατηρήθηκε υψηλή συσχέτιση κατά τους θερμούς μήνες, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  έχουν παρόμοιες πηγές την περίοδο αυτή. Αντίθετα, τους ψυχρούς μήνες, το ποσοστό των  $PM_{2.5}$  επί των  $PM_{10}$  ήταν υψηλότερο (45%-80%), γεγονός που δείχνει ότι τα  $PM_{2.5}$  προέρχονται κυρίως από καύσεις για θέρμανση. Επίσης, η συνολική συσχέτιση των συγκεντρώσεων  $PM_{10}$  με  $PM_{2.5}$  υπολογίστηκε 0,36, τιμή σχετικά χαμηλή, υποδεικνύοντας ότι το φθινόπωρο και τον χειμώνα τα  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  έχουν διαφορετικές πηγές εκπομπής. Όσον αφορά τη συσχέτιση σε ωριαία βάση, οι τιμές κυμάνθηκαν από 0,23 έως 0,96, με υψηλότερες συσχετίσεις τον χειμώνα και χαμηλότερες το καλοκαίρι, γεγονός που οφείλεται στην στασιμότητα της ατμόσφαιρας κατά τους ψυχρούς μήνες.

Το  $O_3$  σημείωσε υψηλές συγκεντρώσεις το καλοκαίρι, καθώς είναι ένας δευτερογενής ρύπος που σχηματίζεται μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων. Επομένως, οι ημέρες με ηλιοφάνεια συμβάλλουν αρκετά στον σχηματισμό του. Το νομοθετικό όριο της Ε.Ε. για το  $O_3$  είναι ο μέγιστος μέσος όρος 8ωρων να μην ξεπεράσει τα  $120 \mu g/m^3$  για περισσότερες από 25 ημέρες. Το 2023 πραγματοποιήθηκαν 62 υπερβάσεις της τιμής ορίου ( $120 \mu g/m^3$ ), οι οποίες σημειώθηκαν από τον Φεβρουάριο έως τον Σεπτέμβριο, με το 40,3% αυτών να καταγράφεται τον Ιούλιο. Εντός του 24ωρου, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν από το πρωί έως το απόγευμα, ενώ οι χαμηλότερες τη νύχτα, λόγω της απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η μέση ετήσια τιμή του  $CO$  στα Χανιά ήταν  $0,5 \text{ } mg/m^3$  και οι ημερήσιες τιμές κυμάνθηκαν από

0,3 έως 1,3  $mg/m^3$ . Οι τιμές αυτές θεωρούνται χαμηλές, καθώς το όριο της Ε.Ε. είναι τα 10  $mg/m^3$  ανά μέγιστο όρο δωρου. Επομένως, δεν έγινε κάποια υπέρβαση του ορίου. Οι χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης CO παρατηρήθηκαν το καλοκαίρι, ενώ οι υψηλότερες τον χειμώνα, οι οποίες οφείλονται στις καύσεις του άνθρακα για λόγους θέρμανσης. Σύμφωνα με την 24ωρη ανάλυση όλους τους μήνες παρατηρήθηκε αύξηση συγκέντρωσης CO τις πρωινές ώρες, λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων και τον χειμώνα υψηλές τιμές τις βραδινές ώρες.

Οι ημερήσιες τιμές του NO είχαν εύρος από 1 μέχρι 49  $μg/m^3$  και μέση ετήσια τιμή 7,8  $μg/m^3$ . Υψηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν τον Δεκέμβριο, καθώς το NO προκύπτει από καύσεις για οικιακή θέρμανση και καύσεις ορυκτών καυσίμων οχημάτων. Τους θερμούς μήνες καταγράφηκαν χαμηλές τιμές συγκέντρωσης NO, γεγονός που οφείλεται στην αντίδραση NO με το O<sub>3</sub>, για να παραχθεί NO<sub>2</sub>. Η μεταβολή των συγκεντρώσεων NO κατά τη διάρκεια της ημέρας, είναι αρκετά παρόμοια με τους προηγούμενους ρύπους (πλην O<sub>3</sub>), δηλαδή αυξημένη συγκέντρωση το πρωί (9:00) όλους του μήνες και τους χειμερινούς μήνες αυξημένη συγκέντρωση το βράδυ. Όσο για τις διαφορές των συγκεντρώσεων τις καθημερινές από τα σαββατοκύριακα, τους μήνες Ιανουάριος, Φεβρουάριος, Μάρτιος, Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος σημειώθηκαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NO τις καθημερινές, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής (πρωί και αργά το απόγευμα-βράδυ), πράγμα που οφείλεται στην ελάχιστη μεγαλύτερη κυκλοφορία των οχημάτων και αυτή η διαφορά παρατηρείται μόνο τους ψυχρούς μήνες καθώς η μειωμένη συγκέντρωση O<sub>3</sub> συμβάλει στις αυξημένες τιμές NO. Το NO<sub>2</sub> παρουσίασε υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης από το NO, καθώς σχηματίζεται από την κατανάλωση του. Η μέση ετήσια συγκέντρωση NO<sub>2</sub> ήταν 22  $μg/m^3$ , τιμή χαμηλότερη από το μέσο ετήσιο όριο της Ε.Ε. το οποίο είναι 40  $μg/m^3$ . Επιπλέον, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια υπέρβαση σχετικά με το ωριαίο όριο συγκέντρωσης, το οποίο είναι 200  $μg/m^3$ , καθώς η υψηλότερη ωριαία τιμή NO<sub>2</sub> το 2023 ήταν 89,8  $μg/m^3$ . Η ελάχιστη ημερήσια τιμή ήταν 3,5  $μg/m^3$  και η μεγαλύτερη 47,6  $μg/m^3$ . Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτό των συγκεντρώσεων NO, με τις αυξημένες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> να οφείλονται στις καύσεις και τον σχηματισμό του από την αντίδραση του NO με το O<sub>3</sub>. Επίσης, αρκετούς μήνες παρουσιάστηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις τις καθημερινές απ' ότι τα σαββατοκύριακα εξαιτίας της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τα NO<sub>x</sub> κατέγραψαν ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης από 7,4  $μg/m^3$  έως 96,7  $μg/m^3$  και μέση ετήσια τιμή 29,8  $μg/m^3$ . Όπως τα NO και NO<sub>2</sub>, έτσι και τα NO<sub>x</sub> παρουσίασαν υψηλότερες συγκεντρώσεις τον χειμώνα και χαμηλότερες τους υπόλοιπους μήνες. Ακόμη, παρατηρήθηκε η ίδια μεταβολή των συγκεντρώσεων μέσα στο 24ωρο και παρόμοιες αυξημένες συγκεντρώσεις τις καθημερινές των ψυχρών μηνών, όπως και τα NO και NO<sub>2</sub>.

Οι ημερήσιες συγκεντρώσεις του SO<sub>2</sub> ήταν αρκετά χαμηλότερες από το ημερήσιο όριο που έχει θεσπίσει η Ε.Ε. (125  $μg/m^3$ ) με υψηλότερη ημερήσια τιμή τα 8,8  $μg/m^3$ . Επομένως, δεν πραγματοποιήθηκε κάποια υπέρβαση, όσον αφορά το SO<sub>2</sub>. Η μέση ετήσια τιμή συγκέντρωσης SO<sub>2</sub> ήταν 5,3  $μg/m^3$ . Σύμφωνα με τη μηνιαία ανάλυση, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν τον Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο, λόγω των καύσεων για θέρμανση. Επιπλέον, η συγκέντρωση του SO<sub>2</sub> δεν μεταβλήθηκε κατά τη διάρκεια του 24ωρου, αντιθέτως παραμένει σταθερή, εκτός από τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο που παρατηρήθηκε ελάχιστη αύξηση στις 20:00.

Όσον αφορά τη συσχέτιση των ρύπων μεταξύ τους, υψηλή συσχέτιση παρουσίασαν οι NO<sub>2</sub>-NO, CO-NO<sub>x</sub> και SO<sub>2</sub>-PM<sub>2.5</sub> με συντελεστές συσχέτισης 0,61, 0,89 και 0,53 αντίστοιχα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι συγκριμένοι ρύποι έχουν παρόμοιες πηγές (καύσεις οικιακής θέρμανσης και καυσίμων οχημάτων). Αντιθέτως, το O<sub>3</sub> παρουσίασε αρνητική συσχέτιση με τους υπόλοιπους ρύπους, συγκεκριμένα με τα NO<sub>x</sub> υπολογίστηκε αρνητική συσχέτιση 0,77, γεγονός που οφείλεται στον σχηματισμό NO<sub>2</sub> από το O<sub>3</sub>, δηλαδή όταν μειώνεται η συγκέντρωση του O<sub>3</sub> αυξάνεται εκείνη του NO<sub>2</sub>,

και επομένως των  $\text{NO}_x$ .

Επιπλέον, εξετάστηκε η συσχέτιση των ρύπων με τη μέση μηνιαία θερμοκρασία και αποδείχτηκε ότι μόνο το  $\text{O}_3$  επηρεάζεται θετικά από τη θερμοκρασία, με συντελεστή συσχέτισης 0,44, καθώς εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που συμβάλει στη δημιουργία του ρύπου. Οι υπόλοιποι ρύποι έδειξαν αρνητική συσχέτιση, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν τους ψυχρούς μήνες.

Το 2023 καταγράφηκαν 43 ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα. Τα περισσότερα από αυτά (72,1%) έγιναν το φθινόπωρο και τον χειμώνα. Επίσης, τις 22 ημέρες από τις 43 (51,2%) σημειώθηκε υπέρβαση του νομοθετικού ορίου Π.Ο.Υ. για τις συγκεντρώσεις των  $\text{PM}_{10}$ . Συνεπώς, η αφρικανική σκόνη συμβάλει στα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, υπολογίστηκε ο δείκτης επικινδυνότητας HI για τα  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{O}_3$  και  $\text{NO}_2$ . Ο συγκεκριμένος δείκτης προσδιορίζει την πιθανή επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία λόγω χρόνιας έκθεσης. Τον υψηλότερο δείκτη παρουσίασαν τα  $\text{PM}_{2.5}$ , αποτελώντας τον πιο επικίνδυνο ρύπο, ακολουθούμενα από τα  $\text{PM}_{10}$ , το  $\text{NO}_2$  και τέλος το  $\text{O}_3$ . Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον δείκτη HI είναι ο ωριαίος ρυθμός εισπνοής, καθώς καθορίζει την ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα. Οι υπολογισμοί του δείκτη HI πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές συνθήκες δραστηριότητας, με ρυθμούς  $\text{IR}=1,5 \text{ m}^3/\text{h}$  και  $\text{IR}=3 \text{ m}^3/\text{h}$ , όπου η υψηλότερη τιμή οδήγησε σε διπλασιασμό του δείκτη επικινδυνότητας. Παρόλο που οι τιμές του δείκτη HI δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλές για κάθε ρύπο μεμονωμένα, η συνδυαστική έκθεση σε όλους τους ρύπους που αναλύθηκαν στη διπλωματική αυτή εργασία είναι πολύ πιθανό να προκαλέσει προβλήματα στην υγεία, ιδιαίτερα σε ευάλωτες πληθυσμιακές μονάδες ή σε άτομα με προϋπάρχοντα αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα.

Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για τον σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την εφαρμογή μέτρων περιορισμού των ρύπων, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα και να μειωθούν οι επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών.

### Ελληνική

- Αλμπάνης, Τ. (2009). Ρύπανση και Τεχνολογίες Προστασίας Περιβάλλοντος (1η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Ανρούτσου, Μ. (2004). Αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια, εξελικτική πορεία συγκέντρωσης στην ΕΕ & επιπτώσεις στην υγεία.
- Γεωργακάκη, Δ.Ε. (2007). Μελέτη της επίδρασης της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων στη ρύπανση της ατμόσφαιρας στην πόλη των Χανίων.
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). <https://emy.gr>.
- Ζέρβας, Ε. και Σέμπος, Ι. (2024). Αέρια ρύπανση και αέρια αντιρρυπαντική τεχνολογία.
- Καραβά, Δ. (2004). Αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια, εξελικτική πορεία συγκέντρωσης στην ΕΕ & επιπτώσεις στην υγεία.
- Λαζαρίδης, Μ. (2008). Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους (1η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Λαζαρίδης, Μ. (2010). Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας (2η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Λαζαρίδης, Μ. (2015). Βασικές αρχές της επιστήμης των αεροζόλ (1η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Λαζαρίδης, Μ. (2023). Ατμόσφαιρα και κλίμα (1η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ. και Σλίνη, Θ. (2015). Τεχνική προστασίας περιβάλλοντος - Αρχές αειφορίας.
- Μπαλή, Α. (2023). Μελέτη της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων (ΑΣ<sub>10</sub>) στο σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων: μελέτη εποχικότητας και πηγών προέλευσης.
- Τερζίδου, Ν. (2024). Ανάλυση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (ΑΣ<sub>10</sub>) στην περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων: Μελέτη της Αφρικανικής σκόνης και επίδραση τοπικών και απομακρυσμένων πηγών.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2022). Ετήσια Έκθεση Ποιότητας της Ατμόσφαιρας 2022. Γενική Διεύθυνση Περιβαλλοντικής Πολιτικής, Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής & Ποιότητας Ατμόσφαιρας, Τμήμα Ποιότητας της Ατμόσφαιρας.
- Χρυσικού, Λ., Αργυρόπουλος, Γ., Φλαρούντζου, Α., και Τερζή, Ε. (2008). Αιωρούμενα σωματίδια πμ<sub>25</sub> και πμ<sub>10</sub> στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης. Πρακτικά 3ου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, ΕΕΧ-ΠΤΚΔΜ, Θεσσαλονίκη.

### Ξένη

- Achilleos, S., Evans, J.S., Yiallourous, P.K., Kleanthous, S., Schwartz, J. and Koutrakis, P. PM<sub>10</sub> concentration levels at an urban and background site in Cyprus: The impact of urban sources and dust storms. Journal of the Air & Waste Management association 64.  
<https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923061>.
- Alberts, W.M. (1994). Indoor air pollution: NO, NO<sub>2</sub>, CO, and CO<sub>2</sub>.  
<https://doi.org/10.1053/ai.1994.v94.a56007>.
- Atkinson, R.W., Butland, B.K., Anderson, H.R. and Maynard, R.L. (2018). Long-term Concentrations of Nitrogen Dioxide and Mortality: A Meta-analysis of Cohort Studies. Epidemiology

29, 460-472. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000847>.

ATSDR (2004). Calculating Hazard Quotients and Cancer Risk Estimates. <https://www.atsdr.cdc.gov>

Bernath, P.F. and Bhusal, M. (2025). Sulfur dioxide sources in the stratosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 330. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2024.109217>.

California Air Resources Board (2023). Inhalable Particulate Matter and Health (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>).

Chaney, A.M., Cryer, D.J., Nicholl, E.J. and Seakins, P.W. (2011). NO and NO<sub>2</sub> interconversion downwind of two different line sources in suburban environments. *Atmospheric Environment*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.070>.

Chatoutsidou, S.E., Kopanakis, I., Lagouvardos, K., Mihalopoulos, N., Torseth, K. and Lazaridis, M. (2019). PM<sub>10</sub> levels at urban, suburban, and background locations in the eastern Mediterranean: local versus regional sources with emphasis on African dust. *Air Quality, Atmosphere & Health* 12, 1359-1371. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00750-4>.

Chatoutsidou, S.E. and Lazaridis, M. (2022). Mass concentrations and elemental analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in a coastal Mediterranean site: A holistic approach to identify contributing sources and varying factors. *Science of the Total Environment* 838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155980>.

Chatoutsidou, S.E. and Lazaridis, M. (2024). Investigating the role of photochemistry and impact of regional and local contributions on gaseous pollutant concentrations (NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, and SO<sub>2</sub>) at urban and suburban sites. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102322>.

Clapp, L.J. and Jenkin, M.E. (2001). Analysis of the relationship between ambient levels of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO as a function of NO<sub>x</sub> in the UK. *Atmospheric Environment* 35, 6391-6405. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8).

Dai, Y., Hitchcock, P., Mahowald, N.M., Domeisen, D.I.V., Hamilton, D.S., Li, L., Marticorena, B., Kanakidou, M., Mihalopoulos, N. and Aboagye-Okyere, A. (2022). Stratospheric impacts on dust transport and air pollution in West Africa and the Eastern Mediterranean. *Nature Communications* 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35403-1>.

De Marco, A., Proietti, C., Anav, A., Ciancarella, L., D'Elia, I., Fares, S., Fornasier, M. F., Fusaro, L., Gualtieri, M., Manes, F., Marchetto, A., Mircea, M., Paoletti, E., Piersanti, A., Rogora, M., Salvati, L., Salvatori, E., Screpanti, A., VIALETTA, G., Vitale, M. and Leonardi, C. (2019). Impacts of air pollution on human and ecosystem health, and implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy. *Environmental International* 125, 320-333. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.064>.

Diapouli, E., Manousakas, M., Vratolis, S., Vasilatou, V., Maggos, Th., Saraga, D., Grigoratos, Th., Argyropoulos, G., Voutsas, D., Samara, C. and Eleftheriadis, K. (2017). Evolution of air pollution source contributions over one decade, derived by PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> source apportionment in two metropolitan urban areas in Greece. *Atmospheric Environment* 164, 416-430. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.016>.

Fakhri, N., Fadel, M., Ozturk, F., Keles, M., Iakovides, M., Pikridas, M., Abdallah, C., Karam, C., Sciare, J., Hayes, P.L. and Affif, C. Comprehensive chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> in the large East Mediterranean-Middle East city of Beirut, Lebanon. *Journal of Environmental Sciences* 133, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.07.010>.

Ferm, M. and Sjoberg, K. (2015). Concentrations and emission factors for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> from road traffic in Sweden. *Atmospheric Environment* 119, 211-219.



<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.037>.

Forester, C.D. and Wells, J.R. (2009). Yields of Carbonyl Products from Gas-Phase Reactions of Fragrance Compounds with OH Radical and Ozone. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es803465v>

Fourtziou, L., Liakakou, E., Stavroulas, I., Theodosi, I., Zarmas, P., Psiloglou, B., Sciare, J., Maggos, T., Bairachtari, K., Bougiatioti, A., Gerasopoulos, E., Sarda-Esteve, R. Bonnaire, N. and Mihalopoulos, N. (2017). Multi-tracer approach to characterize domestic wood burning in Athens (Greece) during wintertime. *Atmospheric Environment* 148, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.011>.

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M. and Giaradoni, S. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 8217-8299. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>.  
Ganor, E., Osetinsky, I., Stupp, A. and Alpert, P. (2010). Increasing trend of African dust, over 49 years, in the eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115. <https://doi.org/10.1029/2009JD012500>.

Georgoulas, A.K., Balis, D., Koukouli, M.E., Meleti, C., Bais, A. and Zerefos, C. (2009). A study of the total atmospheric sulfur dioxide load using ground-based measurements and the satellite derived Sulfur Dioxide Index. *Atmospheric Environment* 43, 1693-1701. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.012>.

Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Babasakalis P., Vrekoussis M., Putaud J.-P. and Mihalopoulos N. (2006). Origin and variability of particulate matter (PM<sub>10</sub>) mass concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 40, 4679-4690. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.020>.

Gerasopoulos E., Kouvarakis G., Vrekoussis M., Donoussis C., Mihalopoulos N. and Kanakidou, M. (2006). Photochemical ozone production in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 40, 3057-3069. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.061>.

Giaselakis, N., Kalivitis, N., Kouvarakis, G., Ramonet, M., Lopez, M., Yver Kwok, C., Narbaud, C., Daskalakis, N., Mermigkas, M., Mihalopoulos, N. and Kanakidou, M. (2023). A twenty year record of greenhouse gases in the Eastern Mediterranean atmosphere. *Science of The Total Environment* 864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161003>.

Glojek, K., Dinh Ngoc Thuy, V., Weber, S., Uzu, S., Manousakas, M., Elazzouzi, R., Dzepina, K., Darfeuil, S., Ginot, P., Jaffrezo, J.L., Zabkar, R., Tursic, J., Podkoritnik, A. and Mocnik, G. (2024). Annual variation of source contributions to PM<sub>10</sub> and oxidative potential in a mountainous area with traffic, biomass burning, cement-plant and biogenic influences. *Environmental International* 189. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108787>.

Harrison, R.M. (1996). Sources of nitrogen dioxide in winter smog episodes. *Science of The Total Environment* 189-190, 391-399. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05236-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05236-9).

Harrison, R.M., Deacon, A.R., Jones, M.R. and Appleby, R.S. (1997). Sources and processes affecting concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particulate matter in Birmingham (U.K.). *Atmospheric Environment* 31, 4103-4117. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00296-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00296-3).

Henschel, S., Querol, X., Atkinson, R., Pandolfi, M., Zeka, A., Le Tertre, A., Analitis, A., Katsouyanni, K., Chanel, O., Pascal, M., Bouland, C., Haluza, D., Medina, S. and Goodman, P.G. (2013). Ambient air SO<sub>2</sub> patterns in 6 European cities. *Atmospheric Environment* 79, 236-247. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.008>.

- Herman, D.A., Wingen, L.M., Johnson, R.M., Keebaugh, A.J., Renusch, S.R., Hansen, I., Ting, I. and Kleinman, M.T. (2020). Seasonal effects of ambient PM<sub>2.5</sub> on the cardiovascular system of hyperlipidemic mice. *Journal of the Air & Waste Management Association* 70. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1717674>.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology*. Wiley-Inter science.
- Horiba, (2009). Ambient CO monitor APMA-370, Operation Manual.
- Horiba, (2009). Ambient NO<sub>x</sub> monitor APNA-370, Operation Manual.
- Horiba, (2009). Ambient O<sub>3</sub> monitor APOA-370, Operation Manual.
- Horiba, (2009). Ambient SO<sub>2</sub> monitor APSA-370, Operation Manual.
- Kasdagli, M.I., Katsouyanni, K., de Hoogh, K., Lagiou, P. and Samoli, E. (2022). Investigating the association between long-term exposure to air pollution and greenness with mortality from neurological, cardio-metabolic and chronic obstructive pulmonary diseases in Greece. *Environmental Pollution* 292. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118372>.
- Kasparoglu, S., Incecik, S. and Topcu, S. (2018). Spatial and temporal variation of O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> concentrations at rural and urban sites in Marmara Region of Turkey. *Atmospheric Pollution Research* 9, 1009-1020. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.03.005>.
- Khan, S., Veerendra, S., Nachimuthu Manoj, K. and Bhola Ram, G. (2024). Particulate matter deposition in the human respiratory system: A health risk assessment at a technical university. *Journal of Air Pollution and Health* 9, 1-14. <https://doi.org/10.18502/japh.v9i1.15075>.
- Kopanakis, I., Eleftheriadis, K., Mihalopoulos, N., Lydakis-Symantiris, N., Katsivela, E., Pentari, D., Zampas, P., Lazaridis, M., (2012). Physico-chemical characteristics of particulate matter in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Research* 106, 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.11.011>.
- Kopanakis, I., Glytsos, T., Kouvarakis, G., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N. and Lazaridis, M. (2015). Variability of ozone in the Eastern Mediterranean during a 7-year study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 461-470. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0362-3>
- Kopanakis, I., Mammi-Galani, E., Pentari, D., Glytsos, T. and Lazaridis, M. (2018). Ambient Particulate Matter Concentration Levels and their Origin During Dust Event Episodes in the Eastern Mediterranean. *Aerosol Science and Engineering* 2, 61-73. <https://doi.org/10.1007/s41810-018-0023-7>.
- Lazaridis, M., Dzumbova, L., Kopanakis, I., Ondracek, J., Glytsos, T., Aleksandropoulou, V., Voulgarakis, A., Katsivela, E., Mihalopoulos, N. and Eleftheriadis, K. (2008). PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Levels in the Eastern Mediterranean (Akrotiri Research Station, Crete, Greece). *Water, Air, and Soil Pollution* 189, 85-101. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9558-y>.
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>.
- Levy, R.J. (2015). Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern. *Neurotoxicology and Teratology*, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.03.001>.
- Li, X. (2020). PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> characterizations with a focus on Sand and Dust Storms episodes in the urban atmosphere in Amman, Jordan.
- Ma, J., Chen, Z., Wang, J., Wang, Y. and Li, L. (2022). Diffusion simulation, health risks, ozone and secondary organic aerosol formation potential of gaseous pollutants from rural comprehensive waste treatment plant. *Chemosphere* 286. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131857>.
- Mantas, E., Remoundaki, E., Halari, I., Kassomenos, P., Theodosi, C., Hatzikioseyan, A. and

- Mihalopoulos, N. (2014). Mass closure and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> by Positive Matrix Factorization analysis in urban Mediterranean environment. *Atmospheric Environment* 94, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.002>.
- Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Tzoumaka, P. and Petrakakis, M. (2009). A Computational Approach Based on GIS Technology for the Development of an Anthropogenic Emission Inventory of Gaseous Pollutants in Greece. *Water, Air, and Soil Pollution* 207, 157-180.
- Mihalopoulos, N., Stephanou, E., Kanakidou, M., Pilitsidis, S. and Bousquet, P. (1997). Tropospheric aerosol ionic composition in the Eastern Mediterranean region. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 49, 314-326. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v49i3.15970>
- Mustafic, H., Jabre, P., Caussin, C., Murad, M.H., Escolano, S., Tafflet, M., Perier, M.C., Marjion, E., Vernerey, D., Empana, J.P., Jouven, X. (2012). Main air pollutants and myocardial infarction: a systematic review and meta-analysis. doi: 10.1001/jama.2012.126.
- Myriokefalitakis, S., Daskalakis, N., Fanourgakis, G.S., Voulgarakis, A., Krol, M.C., Aan de Brugh, J.M.J. and Kanakidou, M. (2016). Ozone and carbon monoxide budgets over the Eastern Mediterranean. *Science of The Total Environment* 563-564, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.061>.
- Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Forastiere, F. and Stafoggia, M. (2013). African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001–2011: PM<sub>10</sub> concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 1395–1410. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1395-2013>.
- Pikridas, M., Vrekoussis, M., Sciare, J., Kleanthous, S., Vasiliadou, E., Kizas, C., Savvides, C. and Mihalopoulos, N. (2018). Spatial and temporal (short and long-term) variability of sub-micron, fine and sub-10 $\mu$ m particulate matter (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) in Cyprus. *Atmospheric Environment* 191, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.048>.
- Polymenakou, P.N., Mandalakis, M., Stephanou, E.G. and Tselepidis, A. (2008). Particle size distribution of airborne microorganisms and pathogens during an intense African dust event in the eastern Mediterranean. *Environmental Health Perspectives* 116, 292-296. <https://doi.org/10.1289/ehp.10684>.
- Price, P.S. (2023). The Hazard index at thirty-seven: New science new insights. *Current Opinion in Toxicology* 34. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2023.100388>.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Viana, M.M., Artinano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Garcia do Santos, S., Fernandez Patier, R., de La Rosa, J., Sanchez de la Campa, A., Menendez, M. and Gil, J. J. (2004). Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *Science of the Total Environment* 334-335, 359-376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.036>.
- Romaszko-Wojtowicz, A., Draganska, E., Dogoszynska, A. and Glinska-Lewczuk, K. (2025). Impact of seasonal biometeorological conditions and particulate matter on asthma and COPD hospital admissions. *Scientific Reports* 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84739-9>.
- Staehelin, J., Harris, N.R.P., Appenzeller, C. and Eberha, J. (2001). Ozone trends: A review. *Reviews of Geophysics*, Volume 39. <https://doi.org/10.1029/1999RG000059>.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. and Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- Susetyo, S.H., Abidin, A.U., Nagaya, T. and Matsui, Y. (2024). Environmental health risk assessment and acute effects of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) inhalation exposure on traditional sulfur

miners at Ijen Crater Volcano, Indonesia. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101772>.

Swietlicki, E., Nilsson, T., Kristensson, A., Johansson, C., Omstedt, G. and Gidhagen, L. (2004). Traffic-related source contributions to PM<sub>10</sub> near a highway. *Journal of Aerosol Science* 35, S795-S796. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(19\)30146-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(19)30146-6)

Tagaris, E., Kuo-Jen, L., Antony J., D, Leland, D., Praveen, A. and Armistead G., R. (2009). Potential impact of climate change on air pollution-related human health effects. *Environmental Science and Technology* 43, 4979-4988. <https://doi.org/10.1021/es803650w>.

Thermo Fischer Scientific (2009). Model 5014i Beta Instruction Manua, Continious Ambient Particulate Monitor.

U.S. EPA (2012). Integrated Risk Information System. <http://www.epa.gov/irisU.S>.

Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E and Rodriguez, S. (2002). Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmospheric Environment* 36, 5861-5875. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00463-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00463-6).

Wang, Y., Hu, B., Tang, G., Ji, D., Zhang, H., Bai, J., Wang, X. and Wang, Y. (2013). Characteristics of ozone and its precursors in Northern China: A comparative study of three sites. *Atmospheric Research* 132-133, 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.04.005>.

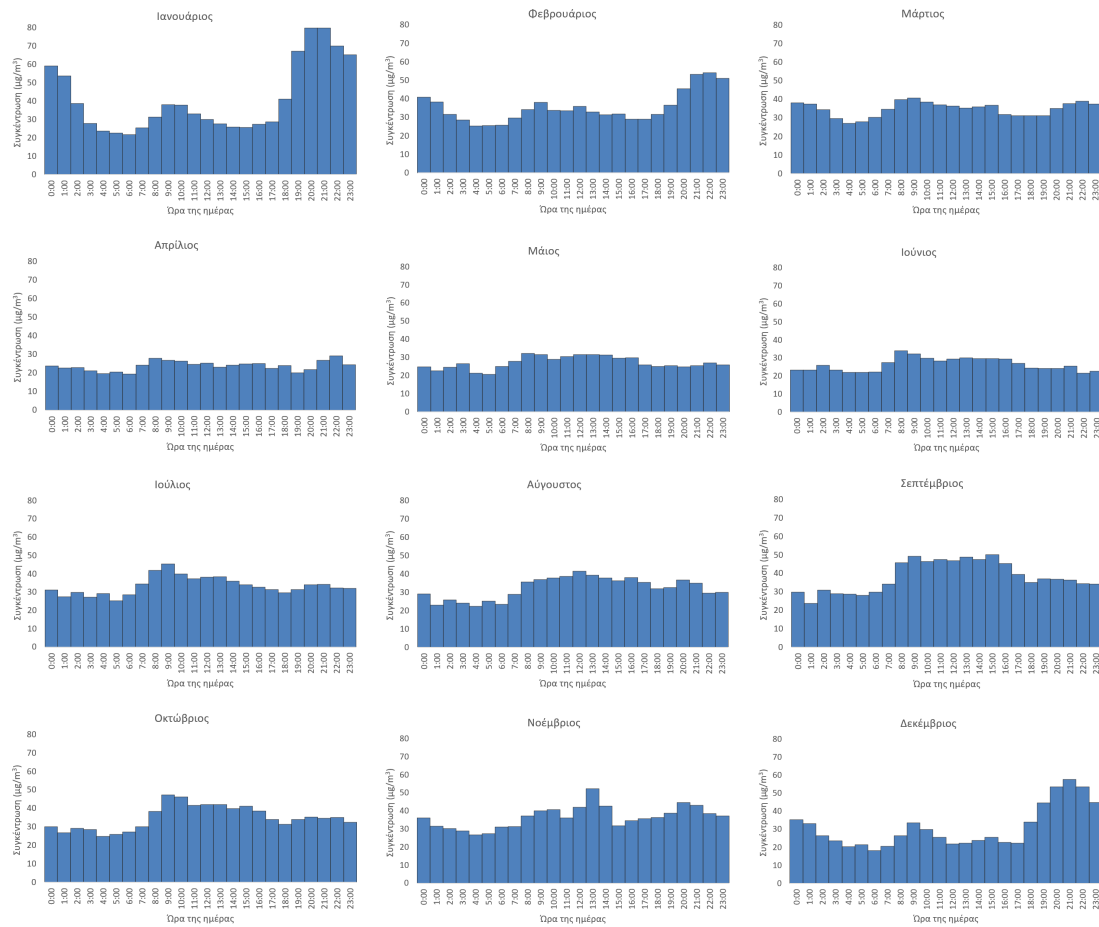
Wenlong, L., Gao, Y., You, Y., Jiang, C., Hua, T. and Xia, B. (2024). Optimizing of selective catalytic reduction urea injection and NO<sub>x</sub> conversion analysis of diesel engine based on higher-order physical model and sequential quadratic programming algorithm. *Energy* 313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134100>.

WHO, (2021). Global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.

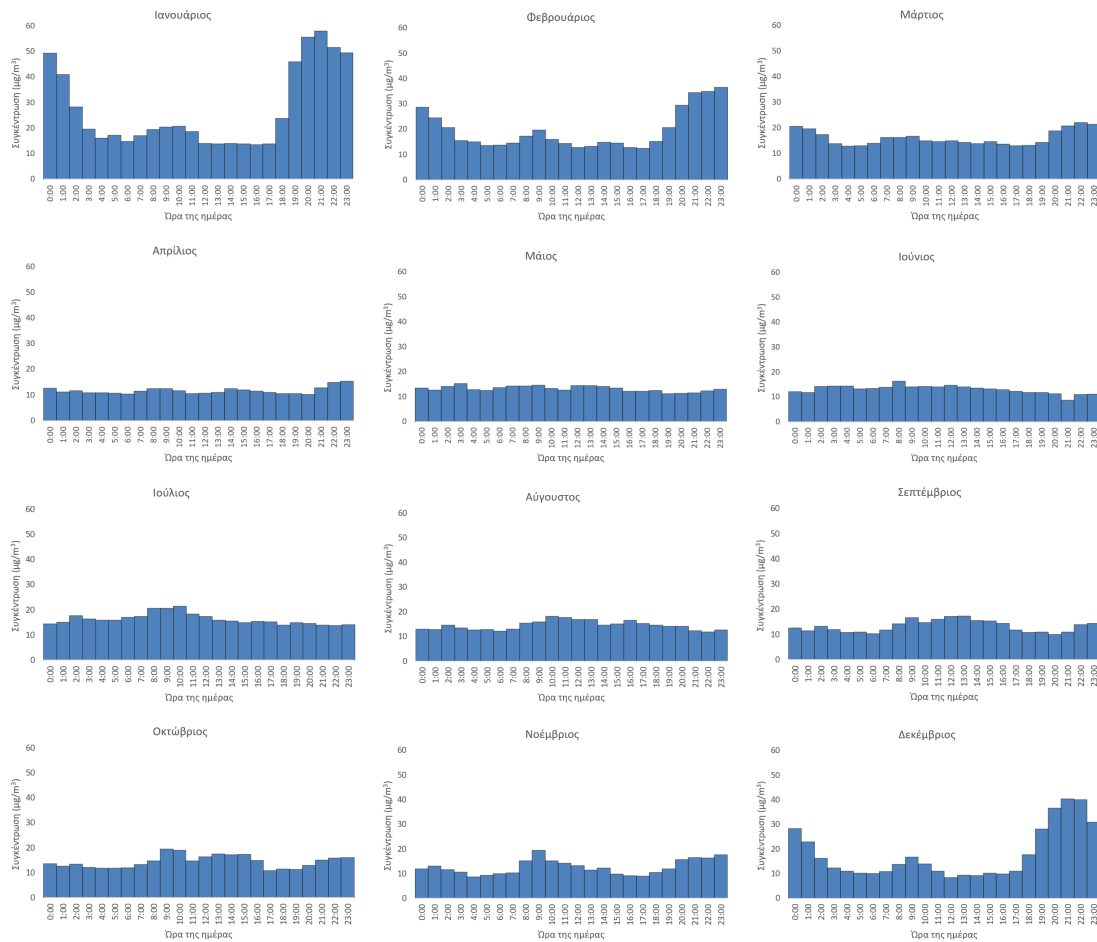
Zender-Swiercz, E., Galiszewska, B., Telejko, M. and Starzomska, M. (2024). The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter - PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>. *Atmospheric Research* 312. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107733>.

Zu, X. and Gao, C. (2024). Analyzing the impact of planning schemes on the neighborhood-scale PM<sub>2.5</sub> distribution through Pix2PixGAN and crowd-source data. *Building and Environment* 265. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111996>.

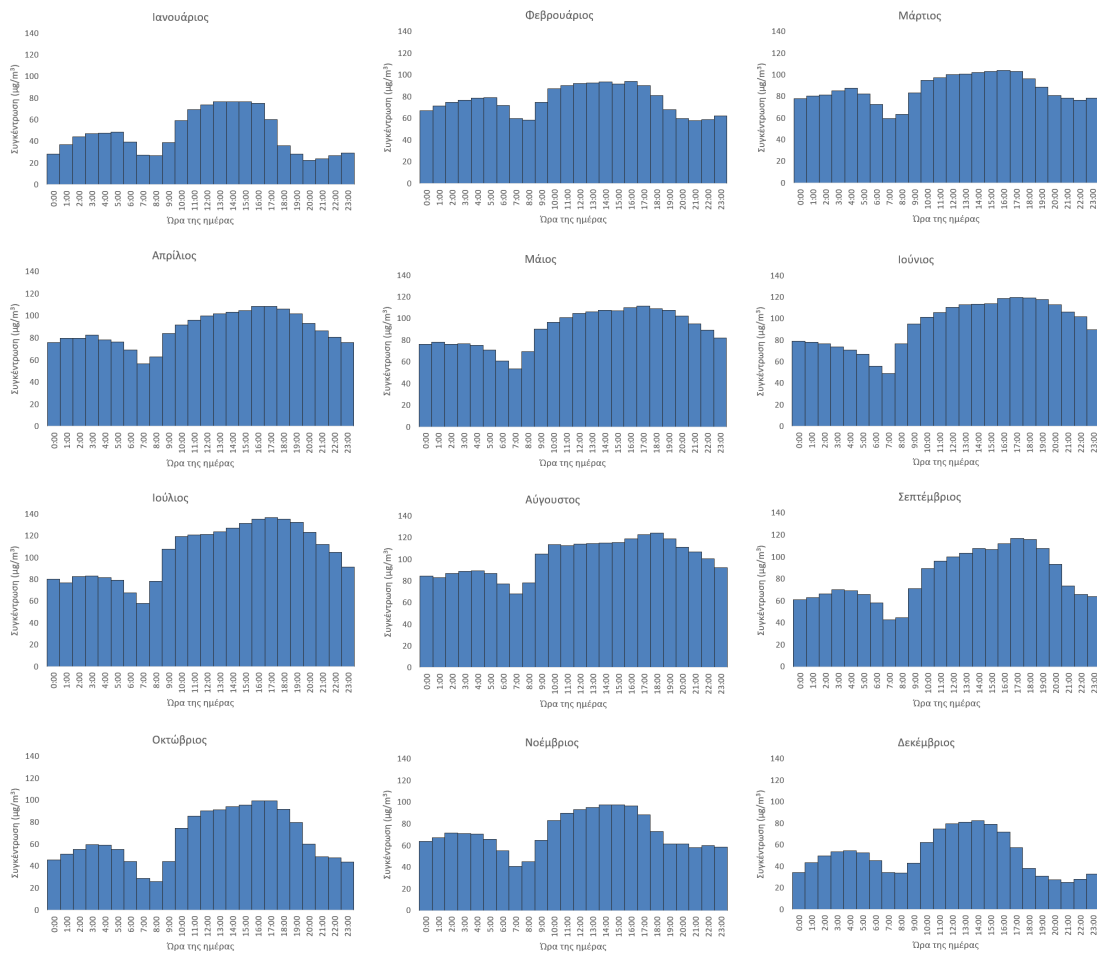
## Παράρτημα Α



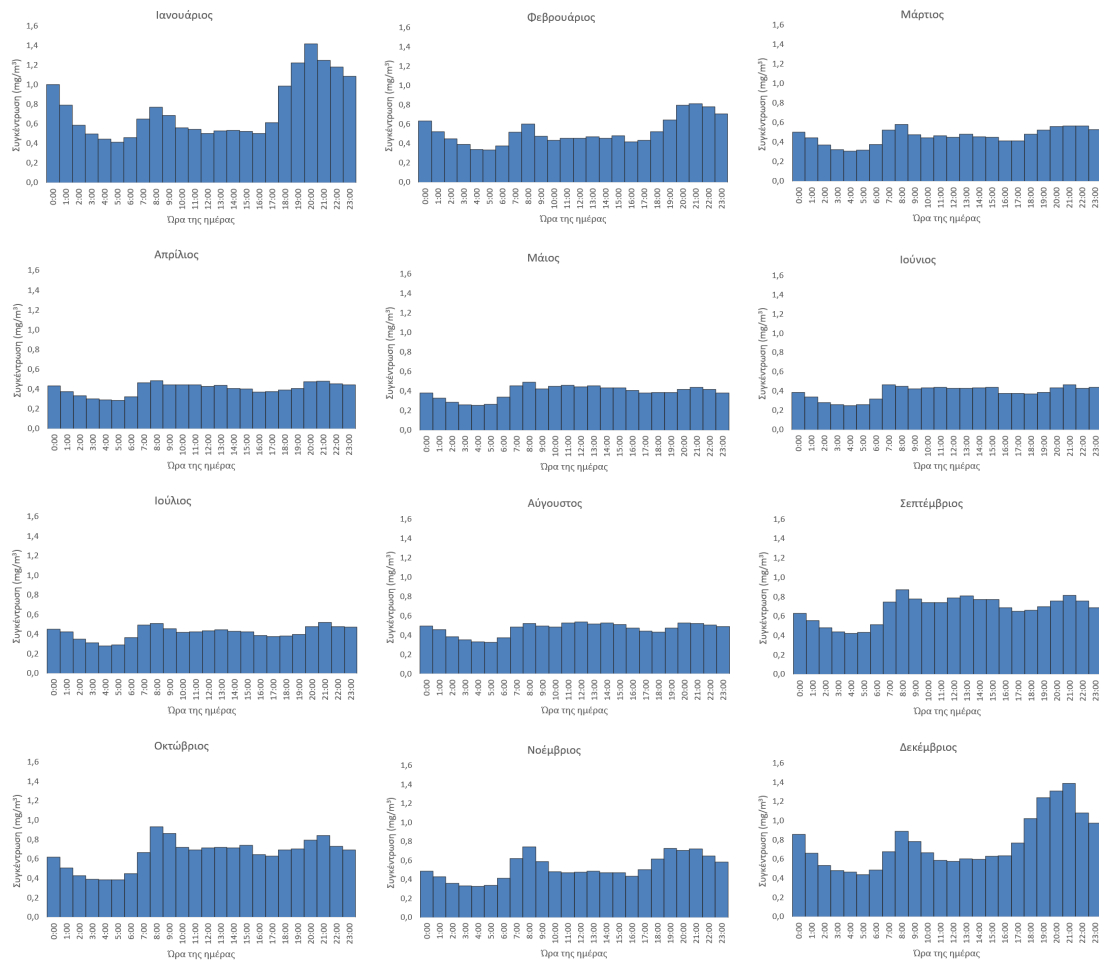
Διάγραμμα 5.1: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub> ανά μήνα για το 2023.



Διάγραμμα 5.2: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub> ανά μήνα για το 2023.

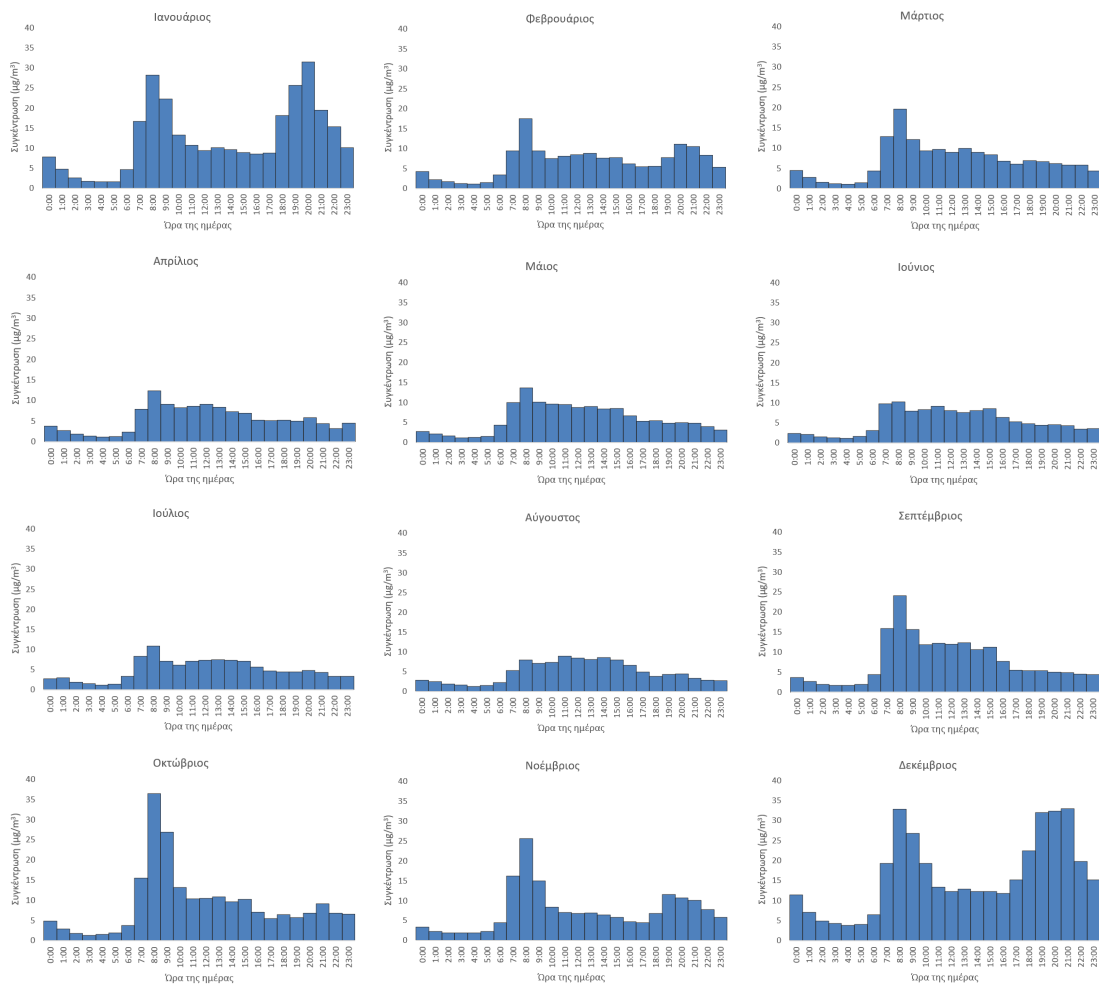


Διάγραμμα 5.3: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις  $O_3$  ανά μήνα για το 2023.

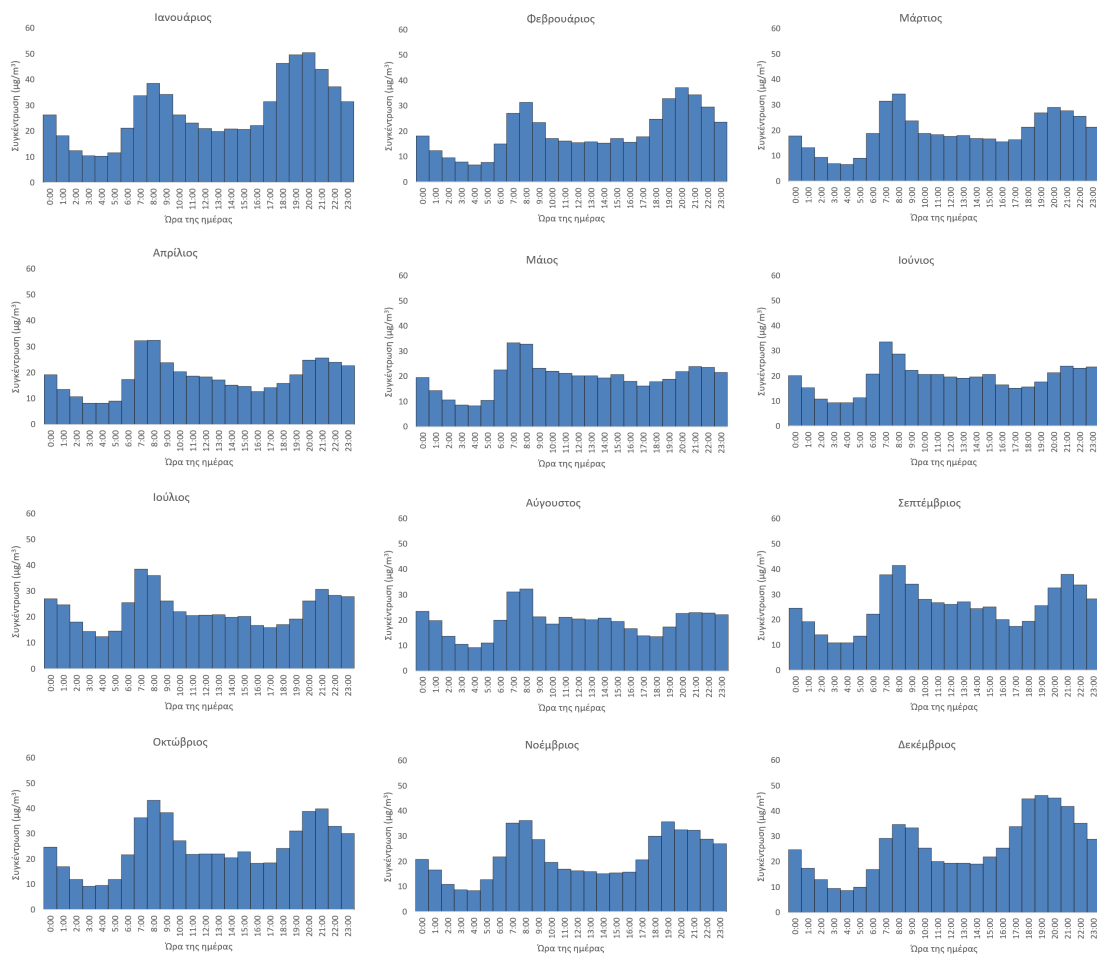


Διάγραμμα 5.4: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις CO ανά μήνα για το 2023.

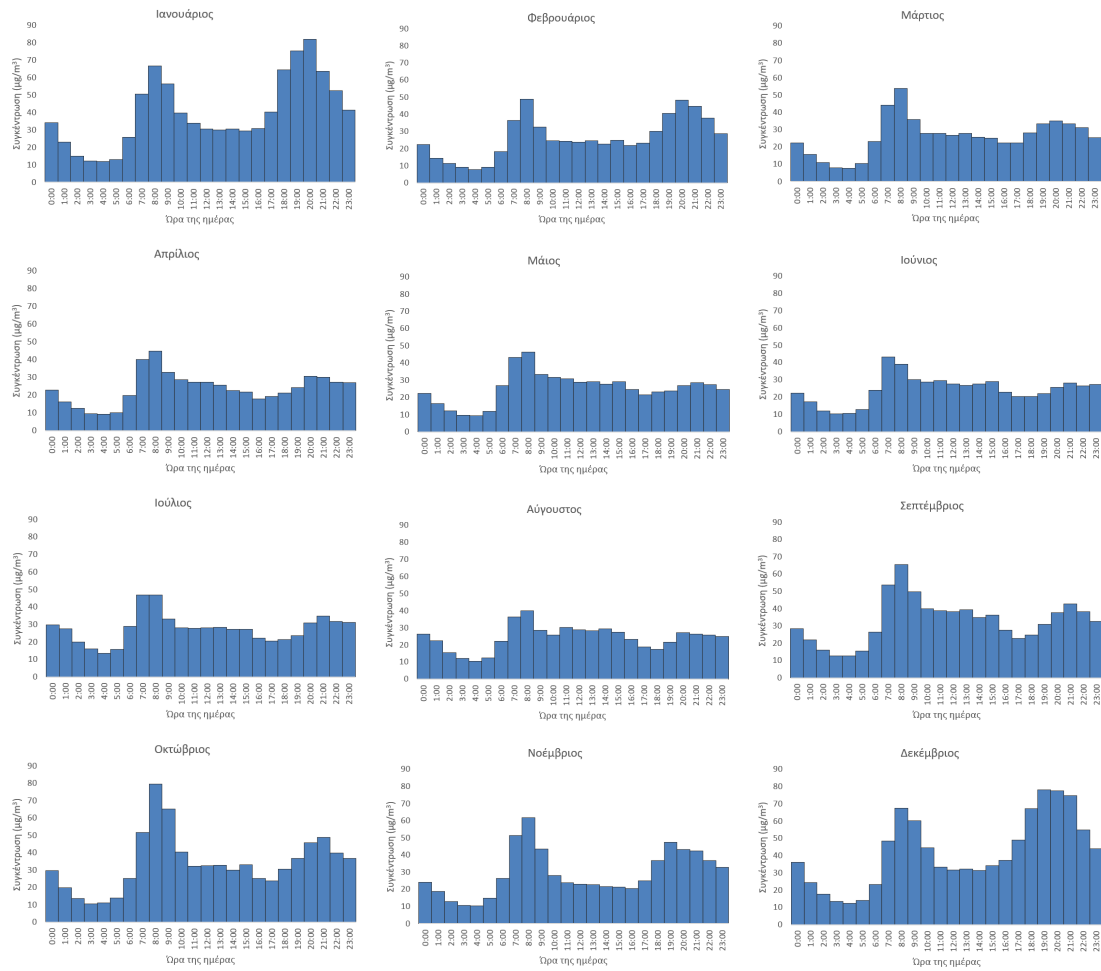




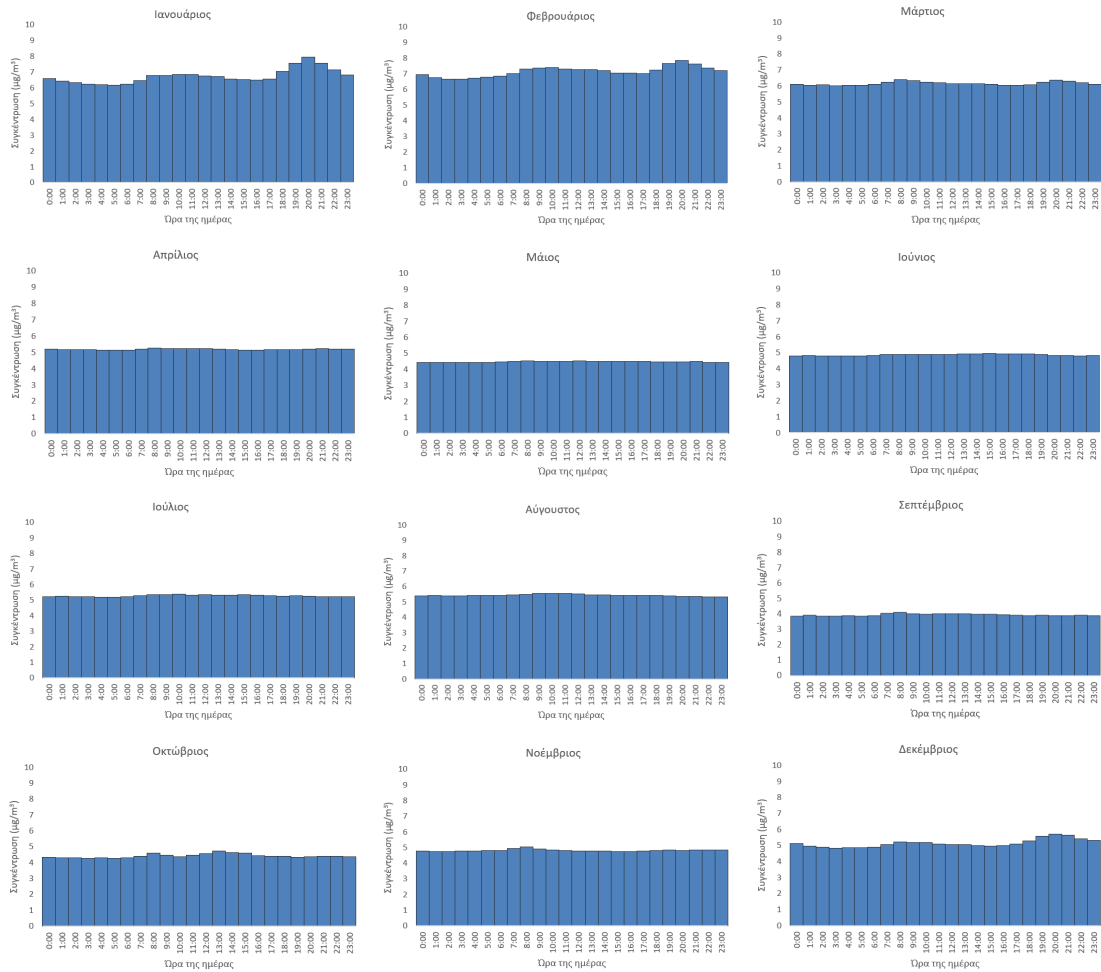
Διάγραμμα 5.5: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO ανά μήνα για το 2023.



Διάγραμμα 5.6: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO<sub>2</sub> ανά μήνα για το 2023.

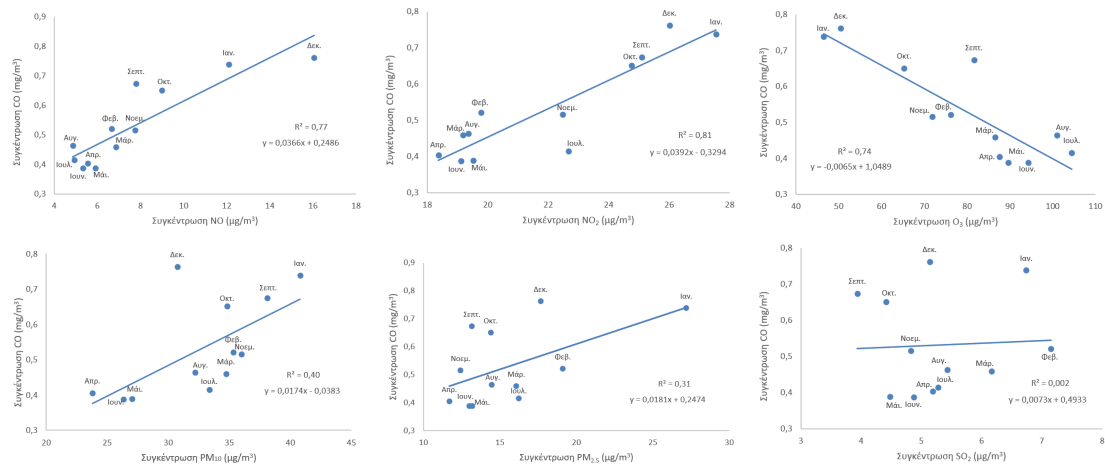


Διάγραμμα 5.7: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις NO<sub>x</sub> ανά μήνα για το 2023.

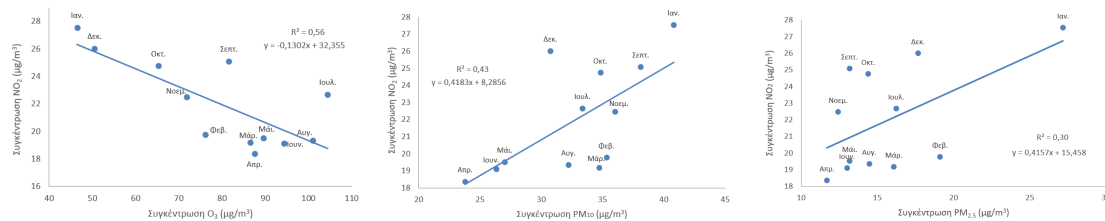


Διάγραμμα 5.8: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub> ανά μήνα για το 2023.

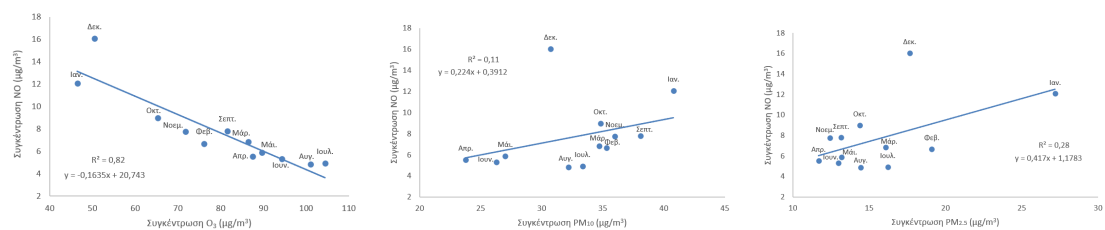
## Παράρτημα Β



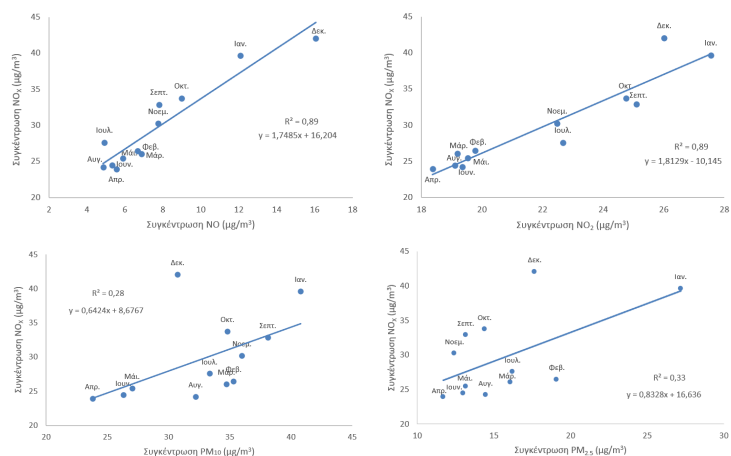
Διάγραμμα 5.9: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης CO με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.



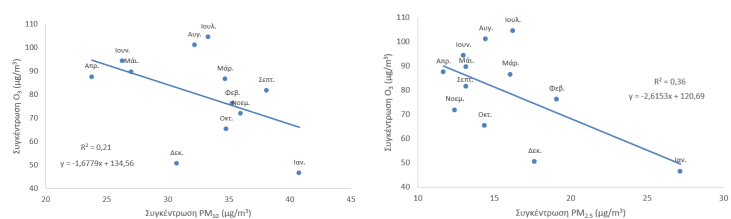
Διάγραμμα 5.10: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης NO<sub>2</sub> με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.



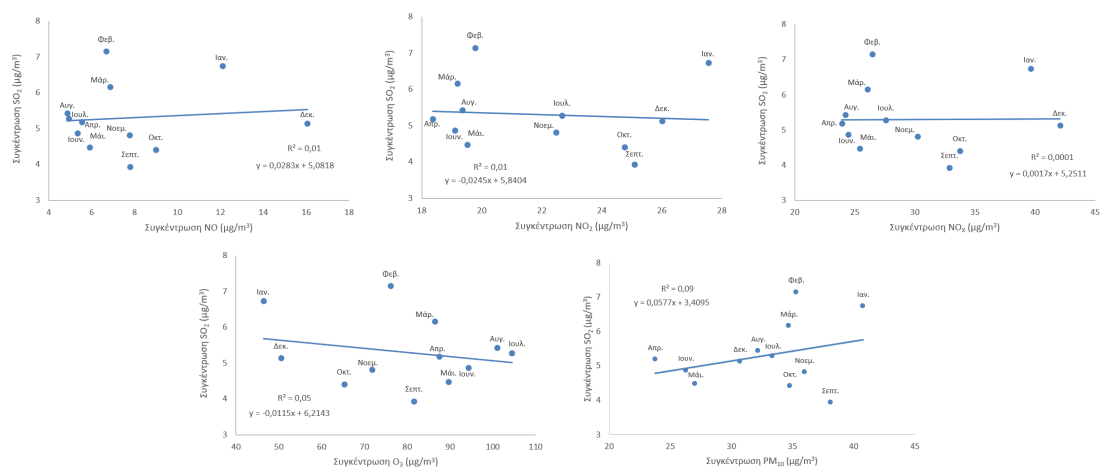
Διάγραμμα 5.11: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης NO με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.



Διάγραμμα 5.12: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης  $\text{NO}_x$  με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.



Διάγραμμα 5.13: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης  $\text{O}_3$  με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.



Διάγραμμα 5.14: Συσχέτιση ημερήσιας συγκέντρωσης  $\text{SO}_2$  με τις ημερήσιες συγκεντρώσεις των άλλων ρύπων.