



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας»

«Μ.Π.Σ.: Διαχείριση Αποβλήτων (ΔΙΑ)»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ατμοσφαιρική ρύπανση και οι επιπτώσεις της στη Δημόσια Υγεία και το περιβάλλον: Εκτίμηση των συγκεντρώσεων PM_{10} σε Ελληνικές πόλεις με βάση δεδομένα περιβαλλοντικών σταθμών.

Atmospheric pollution and its impacts on public health and the environment: Assessment of PM_{10} concentrations in Greek cities using data from environmental monitoring stations

«Δήμητρα-Αικατερίνη Κυρσάββα »

Επιβλέπων Καθηγητής : «Ανδρέας Καζαντζίδης »

Πάτρα, «ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ » «2026»

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

«Ατμοσφαιρική ρύπανση και οι επιπτώσεις της στη Δημόσια Υγεία και το περιβάλλον: Εκτίμηση των συγκεντρώσεων PM_{10} σε Ελληνικές πόλεις με βάση δεδομένα περιβαλλοντικών σταθμών.»

« Atmospheric pollution and its impacts on public health and the environment: Assessment of PM_{10} concentrations in Greek cities using data from environmental monitoring stations

»

«Δήμητρα-Αικατερίνη Κυρσάββα »

Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής
«Ανδρέας Καζαντζίδης»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
«Απόστολος Κελέσης»

Πάτρα, « ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ» «2026»

Αφιέρωση

Στη μητέρα μου, Γεωργία, και στη μνήμη του αγαπημένου μου πατέρα, Τιμόθεου, με ευγνωμοσύνη για τη διαρκή στήριξη και όσα μου προσέφεραν.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ανδρέα Καζαντζίδη, για την καθοδήγηση, τη στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 2:Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	16
2.1Ταξινόμηση ατμοσφαιρικών ρύπων.....	17
2.1.1Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).....	17
2.1.2 Οξείδια του αζώτου (NO _x)	18
2.1.3 Οξείδια του θείου (SO _x)	19
2.1.4 Τροποσφαιρικό όζον (O ₃).....	21
2.1.5 Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile organic compounds, VOC)	22
2.1.6 Τα βαρέα μέταλλα	23
2.1.7 Αμύαντος.....	25
2.1.8 Υδρογονάνθρακες (HCs).....	25
2.2 Πηγές ρύπανσης της ατμοσφαίρας	26
2.3. Ιστορικά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης	28
2.3.1 Μεγάλο νέφος του Λονδίνου (1952)	29
2.3.2 Καταστροφή της κοιλάδας του Meuse 1930	30
2.3.3 Η καταστροφή της Donora.....	30
2.3.4 Το φωτοχημικό νέφος του Los Angeles:	31
2.3.5 Βιομηχανική επανάσταση	32
2.3.6 Βροχές οξέων.....	32
2.4 Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο	34
2.5 Ατμοσφαιρική ρύπανση: Πολιτική -Νομοθεσία.....	38
Κεφάλαιο 3: Αιωρούμενα σωματίδια	42
3.1 Ταξινόμηση αιωρούμενων σωματιδίων.....	43
3.1.1 Αιωρούμενα σωματίδια PM ₁₀	44
3.1.2 Αιωρούμενα σωματίδια PM _{2,5}	50
3.1.3 Αιωρούμενα σωματίδια PM ₁	56
3.1.3.1 βιβλιογραφική ανασκόπηση	57
3.2 Πηγές προέλευσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁).....	61
3.3 Χημική σύσταση.....	63
3.4 Επίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία.....	64
3.5 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον	66

3.6 Μέθοδοι μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM	67
3.6.1 Σταθμική μέθοδος (gravimetric method)	68
3.6.2 Οπτικές μέθοδοι (light scattering methods)	68
3.6.3 Ηλεκτρονικές μέθοδοι TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance).....	69
3.6.4 Ηλεκτρονική μέθοδος BAM (Beta Attenuation Monitor).....	70
3.7. Θεσμικό και Νομοθετικό Πλαίσιο για τα Αιωρούμενα Σωματίδια.....	70
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία - Ανάλυση δεδομένων	74
4.1 Μεθοδολογία της ερευνάς.....	74
4.2 Περιγραφική στατιστική ανάλυση των PM ₁	76
4.3 Χρονική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁	78
4.3.1 Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων συγκεντρώσεων PM ₁ στις έξι πόλεις.....	79
4.3.2 Μηνιαία και εποχική μεταβολή των συγκεντρώσεων PM ₁ στις έξι πόλεις	86
4.3.4 Μηνιαία διακύμανση και εποχικότητα των PM ₁ ανά πόλη.....	101
4.4 Επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων PM ₁ ανά Πόλη.....	109
4.5 Ημερήσιος κύκλος και μοτίβα δραστηριότητας	111
4.6 Ανάλυση των σωματιδίων PM _{2.5} και του Λόγου PM ₁ /PM _{2.5}	114
4.7.1 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στην Αργιά, Πάτρα	116
4.7.2 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στην Δεξαμενή, Χαλκίδας	119
4.7.3 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στο Μαρούσι, Αθήνας.....	122
4.7.4 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στην Κόρινθο	124
4.7.5 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} Τριλόφου	127
4.7.6 Ανάλυση Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} 4 ^{ου} γυμνασίου, Αργίνιου	129
Κεφάλαιο 5: Σύνθεση και συζήτηση αποτελεσμάτων	132
5.1 Συνολική αποτίμηση	132
5.2 Χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων PM ₁ και PM _{2.5}	132
5.3 Μηνιαία και εποχική μεταβολή	133
5.4 Επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων	134
5.5 Ημερήσιος κύκλος	135
5.6 Συμμετοχή των PM ₁ στο κλάσμα των PM _{2.5}	135
5.7 Περιορισμοί της μελέτης	136
5.8 Συμπεράσματα και προτάσεις.....	136

Περιεχόμενα σχημάτων και πινάκων

Σχήμα 2.1: Έτη υγιούς ζωής που χάνονται εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (ανά 100 κατοίκους).....	35
Σχήμα 2.2 : Οι επιπτώσεις στην υγεία από ατμοσφαιρικούς ρύπους.....	36
Πίνακας 2.1: Εκτιμώμενοι πρόωροι θάνατοι στην ΕΕ λόγω έκθεσης σε PM _{2.5} , NO ₂ και O ₃	37
Πίνακας 3.1: Μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων.....	42
σχήμα 3.1 Τυπικά μεγέθη διαφόρων σωματιδίων που εντοπίζονται την ατμόσφαιρα.	43
Σχήμα 3.2: Έκθεση πληθυσμού σε ατμοσφαιρική ρύπανση: Πρότυπα ΕΕ έναντι Οδηγιών ΠΟΥ	44
Πίνακας 3.2: Οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀	46
Σχήμα 3.3: Ποιότητα αέρα στην Ευρώπη: Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM ₁₀ (2023).....	47
Σχήμα 3.4: Χωρική κατανομή των ημερήσιων συγκεντρώσεων PM ₁₀ στην Ευρώπη για το έτος 2024 (προσωρινά δεδομένα)	47
Σχήμα 3.5: Ποσοστό σταθμών με υπερβάσεις ορίων στην Ευρώπη (2023-2024)	48
Σχήμα 3.6: Κατανομή συγκεντρώσεων ρύπων στην Ευρώπη: Υπερβάσεις του ορίου των 50 μg/m ³	49
Σχήμα 3.7: Σχετική σύγκριση μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ και PM _{2.5}	50
Πίνακας 3.3: Οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2.5} , σύμφωνα με τον ΠΟΥ και την Ευρωπαϊκή Ένωση.....	52
Σχήμα 3.8: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2.5} στην Ευρώπη για το έτος 2023	53
Σχήμα 3.9: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2.5} στην Ευρώπη για το έτος 2024(προσωρινά δεδομένα).	54
Σχήμα 3.10: Ποσοστό των σταθμών παρακολούθησης με συγκεντρώσεις PM _{2.5} που υπερβαίνουν την ετήσια οριακή τιμή της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα κατευθυντήρια επίπεδα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.	55
Σχήμα 3.11: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2.5} ανά χώρα για το έτος 2023 σε σύγκριση με τα όρια της Ε.Ε. και τις οδηγίες του ΠΟΥ.	56
3.2 Πηγές προέλευσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁	61
Σχήμα 3.12: Πηγές προέλευσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁).....	61
Σχήμα 3.13: Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία.....	66
Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά στατιστικά στοιχεία (Μέση τιμή, Διάμεσος, Ελάχιστο, Μέγιστο, Τυπική Απόκλιση) των σωματιδίων (PM ₁) στις έξι περιοχές.	78

Σχήμα 4.2: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Χαλκίδα	82
Σχήμα 4.3: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Αθήνα	83
Σχήμα 4.4: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Κόρινθου	84
Σχήμα 4.5: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Αγρίνιο	84
Σχήμα 4.6: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Τριλόφου	86
Πίνακας 4.2:Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μ g/m ³) στην πόλη της Πάτρας.....	88
Σχήμα 4.7: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην Πάτρα.	88
.....	89
Σχήμα 4.8: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM ₁ στην Πάτρα.	89
Πίνακας 4.3: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μg/m ³) στην πόλη της Χαλκίδας.	90
Σχήμα 4.9: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη της Χαλκίδας.	90
Σχήμα 4.10 Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη της Χαλκίδας.....	91
Πίνακας 4.4: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μg/m ³) στην πόλη της Αθήνας.....	92
Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη της Αθήνας.	93
Σχήμα 4.12: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM ₁ στο Μαρούσι.....	94
Πίνακας 4.5: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μg/m ³) στην πόλη της Κορίνθου.	95
Σχήμα 4.13: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη της Κορίνθου.....	95
Πίνακας 4.6: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μg/m ³) στη πόλη του Αγρινίου	97
Σχήμα 4.15: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη του Αγρινίου.	98
Σχήμα 4.16: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη του Αγρινίου.....	99
Πίνακας 4.7: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁ (μg/m ³) στη πόλη του Τριτολοφου.....	100

Σχεδιάγραμμα 4.17: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη του Τριλόφου, ...	100
Σχήμα 4.18: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM ₁ στην πόλη του Τριλόφου	101
Σχήμα 4.19: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁ στην Πάτρα	102
Σχήμα 4.20: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁ στην Χαλκίδα.	103
Σχήμα 4.22: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁ στη Κόρινθος.	105
Σχήμα 4.23: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁ στο Αγρίνιο.	106
Σχήμα 4.24: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁ στο Τριλόφου.	107
Σχήμα 4.25: Συγκριτικό Boxplot τιμών PM ₁ ανά πόλ	108
Πίνακας 4.8: Στατιστικά στοιχεία και χαρακτηριστικά ακραίων επεισοδίων PM ₁ ανά πόλη μελέτης (Όριο > 25 μg/m ³).	109
Σχήμα 4.26: Συγκριτική απεικόνιση του αριθμού ημερών με ακραία επεισόδια PM ₁ ανά πόλη μελέτης.	110
Σχήμα 4.27: Μέσο ημερήσιο προφίλ ωριαίας διακύμανσης των συγκεντρώσεων PM ₁ (μg/m ³) για τις έξι πόλεις μελέτης.	111
Σχήμα 4.28: Ημερήσιος Κύκλος PM ₁ – Εργάσιμες	113
Σχήμα 4.29: Ημερήσιος Κύκλος PM ₁ – Σαββατοκύριακα.	114
Πίνακας 4.9: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2.5} (μg/m ³) ανά σταθμό μέτρησης.	115
Πίνακας 4.10: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στον σταθμό της Αγυιάς Πατρών.	117
Πίνακας 4.11: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στον σταθμό της Δεξαμενής, Χαλκίδας	119
Σχήμα 4.32: Boxplot Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} Δεξαμενή, Χαλκίδας	120
Σχήμα 4.33: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στη Δεξαμενή, Χαλκίδας	121
Πίνακας 4.12: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου PM ₁ /PM _{2.5} στον σταθμό του Αμαρουσίου, Αθήνας	122
Σχήμα 4.34: Boxplot Λόγου PM ₁ /PM _{2.5} Μαρούσι, Αθήνα	123

Σχήμα 4.35: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στο Μαρούσι, Αθήνας	124
Πίνακας 4.13: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό της κορινθίου.	125
Σχήμα 4.37: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην Κόρινθο	126
Πίνακας 4.14: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό Τριλόφου	127
Σχήμα 4.38:Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ ΚΑΠΗ τριλοφου	128
Σχήμα 4.39: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στο ΚΑΠΗ Τριλόφου.....	129
Σχήμα 4.40 :Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ - 4 γυμνασίου, Αγρίνιου	130

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην ατμόσφαιρα, καθώς και η στατιστική και χρονική ανάλυση των συγκεντρώσεων τους. Τα δεδομένα προέχονται από έξι διαφορετικούς περιβαλλοντικούς σταθμούς μέτρησης στην Ελλάδα: Την Αγυιά Πατρών, Δεξαμενή Χαλκίδας, Μαρούσι Αθηνών, Κόρινθος, ΚΑΠΗ Τριλόφου Θεσσαλονίκης, 4ο Γυμνάσιο Αγρίνιου

Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα προστατευτικό περίβλημα τη Γης και είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και τη διατήρηση των οργανισμών πάνω στον πλανήτη. Ως ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται σύμφωνα με τον Ν. 1650/1986 (ΦΕΚ 160/Α/1986), η παρουσία των ρυπογόνων ουσιών σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις και για χρονική διάρκεια τέτοια, ώστε να προκαλούνται αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο φυσικό περιβάλλον. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα διαχρονικά και σημαντικότερα προβλήματα παγκόσμιας κλίμακας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες που υπάγονται στους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται κυρίως με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο σε PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_{10} . Τα PM_{10} είναι σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερο ή ίση του 1 μm , καθώς αποτελούν την κατηγορία που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας βασιστήκαν στην ανάλυση των πρωτογενών περιβαλλοντικών δεδομένων που προήλθαν από βαθμονομημένους σταθμούς μέτρησης. Κατά την διάρκεια της μελέτης εξεταστήκαν οι ωριαίες και ημερήσιες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} , με στόχο τη διερεύνηση της στατιστικής συμπεριφοράς και της χρονικής τους διακύμανσης.

Λέξεις - κλειδιά

Σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση, Επιπτώσεις, Περιβάλλον, Δημόσια υγεία, Αιωρούμενα σωματίδια, Αναπνευστικά προβλήματα, Καρδιαγγειακά προβλήματα, ωριαίες και ημερήσιες συγκεντρώσεις.

Abstract

The subject of this thesis was the study of PM₁ particulate matter in the atmosphere, as well as the statistical and temporal analysis of their concentrations. The data were obtained from six different environmental monitoring stations in Greece: Agyia Patras, Dexameni Chalkida, Marousi Athens, Corinth, KAPI Trilofou Thessaloniki, and the 4th Gymnasium of Agrinio.

The atmosphere constitutes the gaseous protective envelope of the Earth and is essential for the development and maintenance of life on the planet. According to Law 1650/1986 (Government Gazette 160/A/1986), air pollution is defined as the presence of pollutants in solid, liquid, or gaseous form in the atmosphere, at concentrations and for a duration such that adverse effects on public health and the natural environment may occur. Air pollution constitutes one of the most significant and long-standing problems on a global scale.

Particulate matter (PM) is one of the most important categories of air pollutants. Particulate matter is primarily classified according to its aerodynamic diameter into PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁. PM₁ refers to particles with an aerodynamic diameter less than or equal to 1 μm and constitutes the category of particulate matter investigated in the present study.

The results of this study were based on the analysis of primary environmental data obtained from certified monitoring stations. During the study, hourly and daily PM₁ concentrations were examined, with the aim of investigating their statistical behavior and temporal variation. The analysis of the statistical characteristics of PM₁ concentrations revealed differences among the study areas, both in terms of the average concentration levels and their variability

Keywords

Particulate air pollution, effects, Environment, Public health, Particulate matter, Respiratory problems, Cardiovascular problems, Hourly and daily concentrations.

Κεφάλαιο 1:Εισαγωγή

Η ατμόσφαιρα αποτελεί το αεριώδες προστατευτικό περίβλημα της ζωής στη Γη και θεωρείται απαραίτητη για την ανάπτυξη και τη διατήρηση των οργανισμών πάνω στον πλανήτη. Ανάλογα με τη σύστασή της, τη δομή της και τα φυσικοχημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μέσα της, επηρεάζει άμεσα και έμμεσα τους βιογεωχημικούς κύκλους και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων. Παράλληλα, η ατμόσφαιρα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των οπτικών και ακουστικών συνθηκών του περιβάλλοντος, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη ζωή στον πλανήτη.

Η Γήινη ατμόσφαιρα λειτουργεί ως φυσικό προστατευτικό φίλτρο για τον πλανήτη. Η ατμόσφαιρα έχει την ικανότητα να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθώς με αυτό τον τρόπο μειώνει την άμεση έκθεση της επιφάνειας της Γης σε επιβλαβείς ακτινοβολίες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η δυνατότητα να προστατεύονται οι ζωντανοί οργανισμοί και διατηρούνται οι κατάλληλες συνθήκες για την ύπαρξη και τη διατήρηση της ζωής στον πλανήτη (Wallace & Hobbs, 2006). Επιπλέον, η ατμόσφαιρα έχει τη δυνατότητα να προστατεύει τη Γη από μικρομετεωρίτες οι οποίοι καίγονται κατά τη διάρκεια της εισόδου τους, το γεγονός αυτό οφείλεται στη τριβή με τα αέρια στρώματα της (Trenberth et al., 2009). Τέλος, η ατμόσφαιρα έχει τη δυνατότητα να δρα ως ρυθμιστικός παράγοντας της θερμοκρασίας μέσω του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η γήινη ατμόσφαιρα έχει καθοριστική σημασία, διότι θεωρείται πηγή διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), το οποίο αποτελεί ένα απαραίτητο συστατικό για την πραγματοποίηση της φωτοσύνθεσης των φυτών. Παράλληλα, είναι κύρια πηγή οξυγόνου (O_2), που αποτελεί ένα στοιχείο ζωτικής σημασίας για την αναπνοή των οργανισμών, ενώ το άζωτο (N_2) που περιέχει, αξιοποιείται από τα φυτά και τους μικροοργανισμούς για τη σύνθεση οργανικής ύλης. Η σύσταση της ατμοσφαίρας περιλαμβάνει ένα μείγμα διαφορετικών αερίων, με κυρίαρχο το άζωτο (N_2) σε ποσοστό περίπου 78%. Ακολουθεί το οξυγόνο (O_2) με ποσοστό περίπου 21%, ενώ ακολουθεί ένα μικρό κλάσμα που περιλαμβάνει αργό (Ar), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρατμούς (H_2O), ίχνη διάφορων άλλων αερίων καθώς και σωματίδιο

όπου περιλαμβάνει τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) (Seinfeld & Pandis, 2016; WHO, 2021).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται ως η παρουσία των ρυπογόνων ουσιών σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις και για χρονική διάρκεια τέτοιες, ώστε να προκαλούνται αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, στο φυσικό περιβάλλον, στα οικοσυστήματα και στα υλικά αγαθά. Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να φτάσουν σε τέτοιο βαθμό, ώστε να δημιουργούν δυσμενείς και ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης για τον άνθρωπο.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι προέρχονται τόσο από φυσικές πηγές όσο και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, με τις τελευταίες να αποτελούν τη βασική αιτία επιβάρυνσης της ποιότητας του αέρα στις σύγχρονες αστικές και βιομηχανικές περιοχές (Seinfeld & Pandis, 2016; WHO, 2021). Μεταξύ των σημαντικότερων ατμοσφαιρικών ρύπων συγκαταλέγονται τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), τα οποία αποτελούν βασικό δείκτη ποιότητας του αέρα, κυρίως λόγω της εκτεταμένης παρουσίας τους στις αστικές περιοχές και των αποδεδειγμένων επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία. Η ατμοσφαιρική ρύπανση συγκαταλέγεται σήμερα στα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα παγκοσμίως, καθώς σχετίζεται άμεσα με αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα του πληθυσμού, αλλά και με την υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος (EEA, 2023).

Τα αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες που υπάγονται στους ατμοσφαιρικούς ρύπους, και αποτελούν κρίσιμο δείκτη ποιότητας του αέρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται κυρίως με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο σε PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 . Στα PM_{10} υπάγονται τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση των 10 μm , στα $PM_{2.5}$ ανήκουν τα σωματίδια μικρότερη ή ίση των 2,5 μm , ενώ στα PM_1 κατατάσσονται σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση του 1 μm .

Οι κύριες πηγές παραγωγής των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η καύση ορυκτών καυσίμων, καθώς και οι διάφορες δραστηριότητες που σχετίζονται με τις βιομηχανίες και τη γεωργία. Τα αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) επηρεάζουν τόσο την ποιότητα του αέρα όσο και τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Έντονο ενδιαφέρον παρουσιάζουν

τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ (particulate matter) επειδή έχουν την ικανότητα να εισχωρούν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα και να προκαλούν επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (WHO, 2021). Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα διαχρονικά και σημαντικότερα προβλήματα παγκόσμιας κλίμακας, με αποτέλεσμα να επηρεάζει άμεσα τη δημόσια υγεία, το φυσικό περιβάλλον αλλά και τη συνολική ποιότητα ζωής.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization, WHO) η μακροχρόνια έκθεση του πληθυσμού σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικών ρύπων συνδέεται με πρόωρους θανάτους κάθε χρόνο, διαπιστώνοντας ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένας από τους κυριότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (WHO, 2021).

Σε παγκόσμια κλίμακα, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποδίδεται κυρίως σε ανθρωπογενείς πηγές, καθώς συμπεριλαμβάνονται κυρίως τα εξής: η καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, οι οδικές μεταφορές και οι βιομηχανικές δραστηριότητες με αυξημένη βιομηχανική παραγωγή και η έντονη αστικοποίηση. Η αυξημένη και έντονη αστικοποίηση συμβάλλει στα αυξημένα αρνητικά αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Seinfeld&Pandis, 2016; European Environment Agency 2023).

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της εφαρμογής των περιβαλλοντικών πολιτικών μέτρων, έχει παρατηρηθεί πρόοδος της ποιότητας του αέρα, παρ' όλα αυτά η ατμοσφαιρική ρύπανση εξακολουθεί να αποτελεί έναν σημαντικό ζήτημα για τη δημόσια υγεία. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, εξακολουθεί ένα ποσοστό του πληθυσμού να είναι εκτεθειμένο σε υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικών ρύπων που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια προστασίας (European Environment Agency, 2022).

Στην Ελλάδα, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στα μεγάλα αστικά κέντρα. Οι βασικές αιτίες είναι η αυξημένη κυκλοφορία οχημάτων, η ιδιαίτερη γεωμορφολογία των πόλεων, οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες καθώς και η εκτεταμένη χρήση στερεών καυσίμων για την οικιακή θέρμανση με αποτέλεσμα τη συχνή καταγραφή υψηλών συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων, και ιδίως αιωρούμενων σωματιδίων (PM).

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της περιβαλλοντικής ρύπανσης με έμφαση στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁, τα οποία θεωρούνται επικίνδυνα τόσο για τη δημόσια υγεία όσο και για το φυσικό περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, είναι λιγότερο μελετημένα σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην εκτίμηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ σε ελληνικές πόλεις (Αγυιά Πάτρας, Δεξαμενή Χαλκίδας, Μαρούσι Αθήνας, Κόρινθος, ΚΑΠΗ Τριλόφου Θεσσαλονίκης, 4ο Γυμνάσιο Αγρινίου) αξιολογώντας τα δεδομένα από μετρήσεις που προέρχονται από περιβαλλοντικούς σταθμούς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιδιώκεται η επίτευξη των ακόλουθων στόχων:

- α) Η παρουσίαση και η κατανόηση του φαινομένου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των κυρίων κατηγοριών ατμοσφαιρικών ρύπων.
- β) Ανασκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας για τις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.
- γ) Ανάλυση, επεξεργασία και αξιολόγηση των δεδομένων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ από περιβαλλοντικούς σταθμούς σε περιοχές της Ελλάδας.
- δ) Ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με υφιστάμενα νομοθετικά όρια και τα ευρήματα των άλλων ερευνών.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από επιμέρους ενότητες. Αρχικά ακολουθεί το πρώτο κεφάλαιο όπου περιλαμβάνει την εισαγωγή και αναπτύσσεται το θεωρητικό πλαίσιο. Στη συνέχεια, ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο το οποίο επικεντρώνεται στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Ακολουθεί το τρίτο κεφάλαιο, που παρουσιάζει την ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας όπου επικεντρώνεται στα αιωρούμενα σωματίδια και στις επιπτώσεις των σωματιδίων PM₁ στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο όπου δίνεται εμφάνιση στα δεδομένα και τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων PM₁, ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2:Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα παγκόσμια κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης προσελκύει το ενδιαφέρον και την ευαισθητοποίηση όχι μόνο των αρμόδιων φορέων και της επιστημονικής κοινότητας, αλλά και της κοινής γνώμης. Η ρύπανση του αέρα έχει ως αποτέλεσμα σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, στο οικοσύστημα και στην ποιότητα ζωής των ανθρώπων (Seinfeld & Pandis, 2016; Βερύκιος, 2003).

Με τον όρο ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται η μεταβολή της φυσικής σύστασης της ατμοσφαίρας, η οποία προκύπτει από την εισαγωγή χημικών, φυσικών και βιολογικών παραγόντων. Όταν οι συγκεντρώσεις των παραγόντων αυτών υπερβαίνουν τα φυσιολογικά επίπεδα που έχουν οριστεί σύμφωνα με τη νομοθεσία, έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις και βλαβερές συνέπειες τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον (WHO, 2021). Σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες, έχειδειχθεί ότι η μακροχρόνια έκθεση του πληθυσμού σε χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων, και κυρίως αιωρούμενων σωματιδίων (PM), μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση σοβαρών επιπτώσεων στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα (WHO, 2021).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν την ιδιότητα να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω των αέριων μαζών, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν διάφορες περιοχές που βρίσκονται μακριά από τις αρχικές πηγές εκπομπής. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού καθίσταται αναγκαία η θέσπιση ενιαίων ευρωπαϊκών πολιτικών και νομοθετικών μηχανισμών για την προστασία της ποιότητας του αέρα (European Environment Agency, 2023).

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission, 2024), έχει τεθεί ως στρατηγικός στόχος η σταδιακή μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η διασφάλιση της δημόσιας υγείας, με τα επίπεδα ποιότητας του αέρα να μη θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Η νέα οδηγία επιβάλλει αυστηρές απαιτήσεις για την ποιότητα του αέρα, με παρακολουθήσεις, ελέγχους και μείωση των ορίων των ρύπων.

Συνοψίζοντας, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα πιο συχνά και πολύ παραγοντικά φαινόμενα, καθώς η αντιμετώπισή του απαιτεί επιστημονική τεκμηρίωση, θεσμικό συντονισμό και συνεχή πολιτική δέσμευση σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

2.1 Ταξινόμηση ατμοσφαιρικών ρύπων

Παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα αποτελεί η ατμοσφαιρική ρύπανση, διότι επηρεάζει τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και τη λειτουργία του οικοσυστήματος. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τους ρύπους που παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανίες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κίνηση αυτοκινήτων, αεροπλάνων και τρένων καθώς και για τη θέρμανση κατοικιών και κτιρίων.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι διακρίνονται σε αέρια και σωματιδιακή ύλη. Οι κυριότεροι είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι υδρογονάνθρακες, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Η ταξινόμηση των ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση και την αξιολόγηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Η ταξινόμηση πραγματοποιείται με βάση διαφορών κριτηρίων. Ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια είναι ο τρόπος δημιουργίας τους. Περιλαμβάνει τους πρωτογενείς ρύπους που παράγονται απευθείας από την πηγή εκπομπής και τους δευτερογενείς ρύπους, οι οποίοι σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται μεταξύ των πρωτογενών ρύπων και των φυσικών συστατικών του αέρα. Επιπλέον κριτήρια είναι και οι φυσικοχημικές μορφές τους, η προέλευσή τους, καθώς και οι επιπτώσεις που δημιουργούν στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Η διαδικασία της ταξινόμησης συμβάλλει στην κατανόηση των μηχανισμών διάχυσης και στην ανάπτυξη αποτελεσματικών πολιτικών περιορισμού της ρύπανσης (European Environment Agency, 2022).

2.1.1 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα άοσμο, άχρωμο και άγευστο αέριο, το οποίο παράγεται ως ενδιάμεσο προϊόν της ατελούς καύσης του άνθρακα προς διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Κατά συνέπεια, κύρια πηγή εκπομπής του είναι η ατελής καύση

καυσίμων που περιέχουν άνθρακα, όπως είναι η βενζίνη, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το ξύλο. Οι κυριότερες πηγές διακρίνονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης, τα συστήματα θέρμανσης, οι βιομηχανικές δραστηριότητες και η καύση βιομάζας. Στις φυσικές πηγές συγκαταλέγονται οι δασικές πυρκαγιές και διάφορες βιολογικές διεργασίες.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) αποτελεί ένα ιδιαίτερο και επικίνδυνο αέριο για την ανθρώπινη υγεία. Η έκθεση του ανθρώπου σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει δηλητηρίαση και σε σοβαρές περιπτώσεις να οδηγήσει σε θάνατο. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) έχει την ιδιότητα να μειώνει την ικανότητα του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο, αυτό οφείλεται στο ότι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) συνδέεται ταχύτερα με την αιμοσφαιρίνη σε σχέση με το οξυγόνο, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα επίπεδα του οξυγόνου που χρειάζονται οι ιστοί για τη λειτουργία τους (World Health Organization, 2021).

Τα συμπτώματα από την έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα (CO) περιλαμβάνουν πονοκέφαλο, ζάλη, ναυτία, κόπωση, σύγχυση, πόνο στο στήθος, δυσκολία στην αναπνοή, ταχυκαρδία, απώλεια αισθήσεων ενώ σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να επέλθει και θάνατος. Παράλληλα, η παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα συμβάλλει σε διάφορες φωτοχημικές αντιδράσεις στην τροπόσφαιρα, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δευτερογενείς ρύποι, όπως είναι το τροποσφαιρικό όζον και το φωτοχημικό νέφος με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα.

Για τη μείωση και τον περιορισμό των εκπομπών εφαρμόζονται μέτρα με τη βελτίωση της τεχνολογίας της καύσης, τη χρήση καταλυτικών μετατροπών στα οχήματα και την προώθηση καθαρότερων μορφών ενέργειας.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/50/EK καθορίζει ότι η δωρη μέση συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 10 mg/m³, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

2.1.2 Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) αποτελούν μία ομάδα αέριων ενώσεων που περιλαμβάνει κυρίως το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), καθώς και μικρότερες ποσότητες άλλων ενώσεων αζώτου (N) και οξυγόνου (O). Τα οξείδια

του αζώτου (NO_x) παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης καυσίμων σε υψηλές θερμοκρασίες. Κύριες πηγές εκπομπής τους είναι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για τα μέσα μεταφοράς όπως πλοία, φορτηγά και αυτοκίνητα. Παράλληλα, φυσικές πηγές εκπομπής αποτελούν οι δασικές πυρκαγιές, οι αστραπές και τα ηφαίστεια (Seinfeld & Pandis, 2016).

Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου (NO_x) στην ατμόσφαιρα δημιουργεί σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό εκδηλώνονται κυρίως με ερεθισμό στο αναπνευστικό σύστημα, επιδείνωση του άσθματος και αυξημένη ευαισθησία σε λοιμώξεις του αναπνευστικού συστήματος. Παράλληλα, οι επιπτώσεις που εκδηλώνονται στο περιβάλλον είναι εξίσου σημαντικές, διότι τα οξείδια του αζώτου (NO_x) συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις με πτητικές οργανικές ενώσεις υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, συμμετέχοντας στο σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος και του φωτοχημικού νέφους. Το τροποσφαιρικό όζον προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στη βλάστηση, στην αγροτική παραγωγή και διαταράσσει τη λειτουργία των οικοσυστημάτων (World Health Organization, 2021). Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) συμμετέχουν στον σχηματισμό της όξινης βροχής, η οποία οδηγεί σε οξίνιση τόσο στο έδαφος όσο και στο υδάτινο οικοσύστημα, προκαλεί φθορές σε δάση, καλλιέργειες, κτίρια και μνημεία.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/50/EK καθορίζει ότι η μέση ωριαία συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) στην ατμόσφαιρα δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η ετήσια μέση τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

2.1.3 Οξείδια του θείου (SO_x)

Τα οξείδια του θείου (SO_x) υπάγονται στους σημαντικότερους ρύπους της ατμόσφαιρας και αποτελούν μια ομάδα αέριων χημικών ενώσεων, οι οποίες αποτελούνται από το θείο (S) και το οξυγόνο (O). Οι κυριότερες μορφές της ομάδας είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2), το τριοξείδιο του θείου (SO_3), το θειικό οξύ (H_2SO_4), το υδρόθειο (H_2S), διμεθυλικό σουλφίδιο (DMS, CH_3SH_3) και το καρβουνικό σουλφίδιο (OCS).

Οι πηγές παραγωγής οξειδίων του θείου (SO_x) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις ανθρωπογενείς και τις φυσικές πηγές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακα, φυσικό αέριο και πετρέλαιο), η χαλυβουργία, η μεταλλουργική κατεργασία θειούχων μεταλλευμάτων, τα διυλιστήρια με την επεξεργασία και τη διύλιση πετρελαίου, η παραγωγή χαρτιού, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η παραγωγή τσιμέντου. Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται οι ηφαιστειακές δραστηριότητες, οι ωκεανοί μέσω της εκπομπής διμεθυλοσουλφιδίου (DMS) από το φυτοπλαγκτόν και η αποσύνθεση οργανικών ενώσεων που παράγουν το υδρόθειο (H_2S).

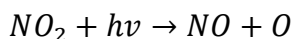
Τα οξείδια του θείου (SO_x), και κυρίως το διοξείδιο του θείου (SO_2), είναι ιδιαίτερα ισχυρό αέριο που δημιουργεί επιπτώσεις τόσο στον ανθρώπινο οργανισμό όσο και στο περιβάλλον. Στην ανθρώπινη υγεία προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις, με εμφάνιση αναπνευστικών προβλημάτων όπως βρογχοσυστολή και αυξημένη αντίσταση στη ροή του αέρα κατά την εισπνοή, παρατηρείται επιδείνωση του άσθματος, καθώς και χρόνια καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα.

Στο περιβάλλον, η παρουσία του διοξειδίου του θείου (SO_2), συμβάλλει στο σχηματισμό της όξινης βροχής. Μέσω οξειδωτικών αντιδράσεων, το διοξείδιο του θείου (SO_2) μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H_2SO_4), το οποίο διαλύεται στα υδροσταγονίδια των νεφών και κατακρημνίζεται ως όξινη απόθεση, με αποτέλεσμα να προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις, όπως μείωση της γεωργικής παραγωγικότητας και απώλεια βιοποικιλότητας σε λίμνες και ποτάμια. Επιπλέον, οι ενώσεις του θείου προκαλούν φθορές σε δομικά υλικά, ιδιαίτερα σε αυτά που είναι κατασκευασμένα από ασβεστόλιθο και μάρμαρο όπως είναι τα μνημεία. Τα θειικά αερολύματα συμμετέχουν στο σχηματισμό αιθαλομίχλης, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν το κλιματικό σύστημα της Γης.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/50/EK καθορίζει ότι η μέση ωριαία συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (με μέγιστο αριθμό υπερβάσεων τις 24 φορές ανά έτος), ενώ η ημερήσια μέση τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (με μέγιστο αριθμό υπερβάσεων τις 3 φορές ανά έτος), με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

2.1.4 Τροποσφαιρικό όζον (O₃)

Το τροποσφαιρικό όζον (O₃) συγκαταλέγεται στους δευτερογενείς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Ο σχηματισμός του πραγματοποιείται στην τροπόσφαιρα μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων μεταξύ των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αρχικά λαμβάνει χώρα η φωτοδιάσπαση του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) με την απορρόφηση της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας (hν).



Στη συνέχεια, ακολουθεί η διάσπαση του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) και ατομικό οξυγόνο (O). Το ατομικό οξυγόνο που προκύπτει από τη διάσπαση αντιδρά γρήγορα με μοριακό οξυγόνο (O₂) παρουσία τρίτου σώματος (M) και στη συνέχεια ακολουθεί ο σχηματισμός του όζοντος (O₃).



Το όζον (O₃) αποτελεί ένα ισχυρό οξειδωτικό αέριο με έντονη χαρακτηριστική οσμή. Σε αστικές περιοχές, όπου οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) είναι αυξημένες, παρατηρούνται συχνά υψηλότερα επίπεδα όζοντος (O₃). Κατά τους θερινούς μήνες παρουσιάζονται υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος, γεγονός που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες και στην έντονη ηλιακή ακτινοβολία, οι οποίες ευνοούν τις αντιδράσεις φωτοδιάσπασης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂).

Οι υψηλές συγκεντρώσεις του τροποσφαιρικού όζοντος (O₃) στην ατμόσφαιρα προκαλούν επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στη δημόσια υγεία. Λόγω της ισχυρής του οξειδωτικής ικανότητας, το τροποσφαιρικό όζον επηρεάζει αρνητικά τη βλάστηση, καθώς προκαλεί βλάβες στους ιστούς των φύλλων, μειώνει τη φωτοσυνθετική ικανότητα και ταυτόχρονα συμβάλλει στη μείωση της ανάπτυξης των δασικών οικοσυστημάτων, καθώς και στην απώλεια βιοποικιλότητας. Παράλληλα, το τροποσφαιρικό όζον (O₃) θεωρείται βραχύβιος κλιματικός ρύπος και συμμετέχει ενεργά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου επηρεάζοντας το κλιματικό σύστημα.

Όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία, όταν το τροποσφαιρικό όζον (O₃) εισέρχεται στον οργανισμό μέσω της εισπνοής, επιδρά αρνητικά, προκαλώντας ερεθισμό του

αναπνευστικού συστήματος, βήχα, άσθμα και μείωση της λειτουργίας του πνεύμονα. Η μακροχρόνια έκθεση στο τροποσφαιρικό όζον (O_3) αυξάνει το κίνδυνο εμφάνισης χρόνιων αναπνευστικών νοσημάτων και τη θνησιμότητα.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/50/EK καθορίζει ότι η μέγιστη ημερήσια 8ωρη μέση συγκέντρωση του τροποσφαιρικού όζοντος (O_3) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας, ενώ η τιμή αυτή δεν επιτρέπεται να υπερβαίνεται περισσότερες από 25 ημέρες ανά ημερολογιακό έτος, υπολογιζόμενη ως μέσος όρος τριετίας. Επιπλέον, για την προστασία της βλάστησης καθορίζεται ως στόχος η τιμή AOT40 ίση με $18.000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$, υπολογιζόμενη για την περίοδο Μαΐου–Ιουλίου (European Union, 2008).

2.1.5 Πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile organic compounds, VOC)

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOC) συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες κατηγορίες των ατμοσφαιρικών ρύπων. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται οργανικές ενώσεις που περιέχουν άνθρακα (C) οι οποίες εξατμίζονται εύκολα υπό συνθήκες περιβάλλοντος, οι οξυγονούχες, οι αλογονούχες και οι θειούχες οργανικές ενώσεις. Ωστόσο εξαιρούνται ο στοιχειακός άνθρακας, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) τα οποία εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις ανιχνεύονται κυρίως στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές.

Οι VOCs απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα τόσο από ανθρωπογενείς πηγές όσο και από φυσικές πηγές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται τα μέσα μεταφοράς και η καύση καυσίμων, όπως τα καυσάερια των αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούν βενζίνη και diesel, η ναυτιλία, καθώς και διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες όπως η εξόρυξη και η διύλιση του πετρελαίου, η παραγωγή χρωμάτων και διαλυτών, οι διαδικασίες εκτύπωσης και βαφής υλικών, η παραγωγή πλαστικών και διαλυτών που χρησιμοποιούνται για την επίστρωση διαφόρων επιφανειών όπως είναι τα χρώματα, τα βερνίκια και οι κόλλες. Διάφορες άλλες πηγές στις οποίες εντοπίζονται πτητικές οργανικές ενώσεις και απελευθερώνονται σε εσωτερικούς ή σε εξωτερικούς χώρους, είναι τα καθαριστικά προϊόντα, τα έπιπλα σύνθετων ξύλων, τα καλλυντικά και προϊόντα προσωπικής φροντίδας, το στεγνό

καθάρισμα ρούχων, τα αρωματικά χώρου και ο καπνός τσιγάρου. Από την άλλη πλευρά, στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τη βλάστηση και τα δάση, το έδαφος και τους μικροοργανισμούς, διάφορες αναερόβιες διεργασίες καθώς από τις φυσικές καταστροφές.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις συμβάλλουν σημαντικά στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα καθώς προκαλούν επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Η βραχυχρόνια έκθεση του ανθρώπου μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό των οφθαλμών και του αναπνευστικού συστήματος, πονοκέφαλο, ζάλη και ναυτία, ενώ η μακροχρόνια έκθεση ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στο ήπαρ, στα νεφρά και στο κεντρικό νευρικό σύστημα (EPA, 2023). Διεθνείς οργανισμοί υγείας, όπως είναι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, έχουν χαρακτηρίσει ορισμένες πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως το βενζόλιο και η φορμαλδεΐδη, ως καρκινογόνες για την υγεία του ανθρώπου.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, ορισμένες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις, οδηγώντας στον σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος και δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων, γεγονός που μειώνει την ποιότητα του αέρα και επηρεάζει το κλίμα και τα οικοσυστήματα.

Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, και συγκεκριμένα η Οδηγία 2008/50/EK για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, καθορίζει ότι η ετήσια μέση συγκέντρωση του βενζολίου (C_6H_6) στην ατμόσφαιρα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $5 \mu g/m^3$, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Το βενζόλιο αποτελεί καρκινογόνο ουσία και χρησιμοποιείται ως δείκτης ρύπανσης για τις πτητικές οργανικές ενώσεις σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές.

2.1.6 Τα βαρέα μέταλλα

Ένα σοβαρό και σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα αποτελεί η απελευθέρωση βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα, καθώς πρόκειται για τοξικά στοιχεία που μπορούν να παραμείνουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να προκαλέσουν επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία αλλά και στο περιβάλλον.

Με τον όρο «βαρέα μέταλλα» περιγράφονται συνήθως μέταλλα με σχετικά υψηλή πυκνότητα και ατομικό βάρος, τα οποία εμφανίζουν τοξικότητα ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Τα μέταλλα με αριθμό μεταξύ του 21 (σκάνδιο) και του 84 (πολώνιο) αναφέρονται πιο συχνά διότι εμφανίζονται στα φυσικά ύδατα (Γκέκας κ.ά., 2002). Τα βαρέα μέταλλα δεν μπορούν να αδρανοποιηθούν σε αβλαβείς στοιχεία, γεγονός που ενισχύει την επικινδυνότητά τους. Σε αυτά περιλαμβάνονται ο μόλυβδος (Pb), το κάδμιο (Cd), ο υδράργυρος (Hg) και το νικέλιο (Ni).

Τα βαρέα μέταλλα εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα τόσο από ανθρωπογενείς πηγές όσο και από τις φυσικές πηγές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η μεταλλουργία, η καύση ορυκτών καυσίμων, η κίνηση οχημάτων όπου κάνουν η χρήση παλαιότερων μολυβδούχων καυσίμων, οι φθορές των φρένων καθώς και η αποτέφρωση απορριμμάτων. Ωστόσο από την άλλη πλευρά, στις φυσικές πηγές απελευθερώνονται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων, τις πυρκαγιές και τις ηφαιστειακές δραστηριότητες. Τα βαρέα μέταλλα έχουν τη δυνατότητα να προσροφώνται σε αιωρούμενα σωματίδια με αποτέλεσμα να μπορούν να διανύουν μεγάλες αποστάσεις.

Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε βαρέα μέταλλα μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χρόνιας έκθεσης. Τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν βαρέα μέταλλα έχουν τη δυνατότητα μέσω της εισπνοής να εισέλθουν στον οργανισμό. Ο μόλυβδος (Pb) έχει την δυνατότητα να επηρεάσει αρνητικά το κεντρικό νευρικό σύστημα ιδιαίτερα των παιδιών, απορυθμίζει τη σύνθεση της αιμοσφαιρίνης και επηρεάζει τη νεφρική λειτουργία. Το κάδμιο (Cd) επιδρά αρνητικά στον ανθρώπινο οργανισμό προκαλώντας βλάβη στη νεφρική λειτουργία, μείωση της δύναμη των οστών και μεταβολικές διαταραχές. Αντίστοιχα, ο υδράργυρος (Hg) είναι γνωστός για τις νευροτοξικές του επιδράσεις, επηρεάζοντας τη μνήμη, τον συντονισμό και τη λειτουργία του εγκεφάλου.

Τα βαρέα μέταλλα προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς λόγω της μη βιοαποδομήσιμης φύσης τους, συσσωρεύονται στο έδαφος και στα υδάτινα οικοσυστήματα, επηρεάζοντας αρνητικά τη χλωρίδα και την πανίδα. Επιπλέον, μέσω της τροφικής αλυσίδας βιοσυσσωρεύονται στους οργανισμούς, οδηγώντας σε τοξικές επιδράσεις και διαταραχή της οικολογικής ισορροπίας.

Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθορίζει οριακές τιμές για ορισμένα βαρέα μέταλλα στον ατμοσφαιρικό αέρα με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Σύμφωνα με την Οδηγία 2004/107/EK, η ετήσια μέση συγκέντρωση του μολύβδου (Pb) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, του καδμίου (Cd) τα $5 \text{ ng}/\text{m}^3$, ενώ για το νικέλιο (Ni) καθορίζεται τιμή στόχος $20 \text{ ng}/\text{m}^3$ στον ατμοσφαιρικό αέρα.

2.1.7 Αμύαντος

Ο αμύαντος (asbestos) είναι ινώδης ορυκτό, που ανήκει σε μια ομάδα ενυδατωμένων πυριτικών ορυκτών με ινώδη μορφολογία (Κουγκούλος, 2007). Ο αμύαντος χαρακτηρίζεται από την υψηλή μηχανική αντοχή, παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και σταθερότητα στη διάβρωση. Οι ίνες του είναι εξαιρετικά σταθερές και δεν συσσωματώνονται εύκολα για να σχηματίσουν μεγαλύτερες ίνες. Ο αμύαντος λόγω των ιδιοτήτων του, χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε επενδύσεις φρενών, μονώσεις και στην κατασκευή οικοδομικών υλικών. Η απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα προκύπτει κυρίως από τις φθορά και την κατεδάφιση παλιών υλικών με βάση τον αμύαντο.

Οι ίνες αμύαντου δεν συγκρατούνται αποτελεσματικά από τους βλεννογόνους της μύτης, με αποτέλεσμα να μπορούν να εισχωρήσουν στις κυψελίδες των πνευμόνων και να προκαλέσουν μορφολογικές αλλοιώσεις. Η παραμονή τους στον οργανισμό συνδέεται με την εμφάνιση αμύαντωσης, πνευμονοκονίαση, καρκίνο του πνεύμονα και μεσοθηλίωμα.

Η χρήση του αμύαντου τείνει να έχει απαγορευτεί ή περιοριστεί σε πολλές χώρες. Σύμφωνα με την Οδηγία 2009/148/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η έκθεση των εργαζομένων σε ίνες αμύαντου δεν πρέπει να υπερβαίνει τις $0,1 \text{ ίνες}/\text{cm}^3$ αέρα ως μέσο όρο οκτάωρης βάρδιας, με στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

2.1.8 Υδρογονάνθρακες (HCs)

Οι υδρογονάνθρακες (HCs) είναι οργανικές ενώσεις που αποτελούνται αποκλειστικά από άνθρακα (C) και υδρογόνο (H), και αποτελούν βασικό συστατικό στοιχείο των ορυκτών καυσίμων. Ταξινομούνται ανάλογα με τη χημική τους δομή, τον τύπο δεσμών τους, σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες, αλκίνια, αλκένια και τα αλκάνια.

Οι υδρογονάνθρακες απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κυρίως από ανθρωπογενείς πηγές, όπως η καύση πετρελαίου, βενζίνης, φυσικού αερίου, με τη λειτουργία βιομηχανικών εγκαταστάσεων, τη ναυτιλία και τα μέσα μεταφοράς. Αντίστοιχα, οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τις εκπομπές από τη βλάστηση, τις δασικές πυρκαγιές και τις ηφαιστειακές δραστηριότητες. Οι υδρογονάνθρακες συμμετέχουν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους αλλά και του τροποσφαιρικού όζοντος μέσω αντιδράσεων με οξείδια του αζώτου υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε υψηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό των οφθαλμών και του αναπνευστικού συστήματος πονοκέφαλο, ζάλη και ναυτία, ενώ η μακροχρόνια έκθεση συνδέεται με σοβαρές επιπτώσεις στο ήπαρ, στα νεφρά και στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Ορισμένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, όπως το βενζόλιο, θεωρούνται καρκινογόνοι (WHO, 2021; EPA, 2023).

Από περιβαλλοντική άποψη, οι υδρογονάνθρακες έχουν την ιδιότητα να συμβάλλουν στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα αλλά και των οικοσυστημάτων. Επιπλέον, συμμετέχουν και σε φωτοχημικές αντιδράσεις με το σχηματισμό δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων και όζοντος με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τη βλάστηση, τη γεωργική παραγωγή και τη βιοποικιλότητα.

2.2 Πηγές ρύπανσης της ατμοσφαίρας

Οι κυριότερες δραστηριότητες που οδηγούν στην επιβάρυνση της ποιότητας του αέρα διακρίνονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, οι ανθρωπογενείς πηγές επιβαρύνουν ολοένα και περισσότερο την ποιότητα της ατμοσφαίρας, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη βιομηχανική παραγωγή, την αστικοποίηση, την ανάπτυξη των μεταφορών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτέλεσμα να επηρεάζουν αρνητικά τη δημόσια υγεία, το οικοσύστημα και το κλίμα. Πέραν των δυο βασικών πηγών εκπομπής, υπάρχουν μικρότερες πηγές, οι οποίες παρότι χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών πηγής, συμβάλλουν σημαντικά στο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης .

Οι ανθρωπογενείς πηγές που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε βασικές κατηγορίες: Βιομηχανικές δραστηριότητες, μεταφορές, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, γεωργία και κτηνοτροφία, καθώς και διαχείριση αποβλήτων. Οι βιομηχανικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα διάφορων διεργασιών, από την παραγωγή προϊόντων πρώτων υλών έως τις διεργασίες μετατροπής τους μέχρι το τελικό προϊόν. Παράλληλα κατά τη διαδικασία παράγονται συχνά διάφορα παραπροϊόντα, που συνήθως μπορεί να ρυπαίνουν το περιβάλλον εάν δεν εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα για τον περιορισμό των ρύπων. Οι βιομηχανικές δραστηριότητες εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων όπως είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) και τα βαρέα μέταλλα. Οι βιομηχανίες που εντάσσονται στην κατηγορία αυτή είναι οι βιομηχανίες με χημικά προϊόντα, οι βιομηχανίες με ρητίνες και πλαστικά, βιομηχανίες με βερνίκια και χρώματα και βιομηχανίες παραγωγής οξέων. Ο τομέας των μεταφορών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, καθώς συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Οι ρύποι αυτοί παράγονται κυρίως από την καύση καυσίμων στους κινητήρες των διαφόρων μεταφορικών μέσων.

Κατά την παραγωγή ενέργειας κατά την οικιακή θέρμανση απελευθερώνονται σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων κυρίως μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση των κατοικιών χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο και ξύλο, με αποτέλεσμα την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), διοξειδίου του θείου (SO_2), οξειδίων του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο συμβατικά ορυκτά καύσιμα (άνθρακα, λιγνίτη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) με αποτέλεσμα κατά τη λειτουργία τους να εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες ρύπων στην ατμόσφαιρα μέσω των καμινάδων τους.

Ο τομέας της γεωργίας και της κτηνοτροφίας συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση, μέσω διάφορων δραστηριοτήτων, όπως η χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, καθώς και μέσω εκπομπών αερίων από τις

κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα είναι η αμμωνία (NH_3), το μεθάνιο (CH_4), το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC).

Τέλος, η διαχείριση των στερεών αποβλήτων, κυρίως μέσω της υγειονομικής ταφής και της καύσης απορριμμάτων, οδηγεί στην εκπομπή αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κατά τη αποσύνθεση των οργανικών υλικών σε χώρους ταφής παράγονται αέρια, όπως το μεθάνιο (CH_4) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) τα οποία συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παράλληλα η καύση απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει στην εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων, διοξινών, φουρανίων, μονοξειδίου του άνθρακα και άλλων τοξικών ενώσεων.

Παρόλο που οι ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν την βασική αιτία των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων, σε μικρότερο βαθμό συμβάλλουν ορισμένες φυσικές πηγές. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τις ηφαιστειακές εκρήξεις, όπου απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα διοξείδιο του θείου (SO_2), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και αιωρούμενα σωματίδια. Επιπλέον με τις δασικές πυρκαγιές απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα διοξείδιο του θείου (SO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), αιωρούμενα σωματίδια, υδρογονάνθρακες. Στις φυσικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης περιλαμβάνονται και η μεταφορά σκόνης από άνυδρες και ερημικές περιοχές, τη θαλάσσια αερολυματοποίηση, καθώς και τις βιογενείς εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων από φυτικούς οργανισμούς και μικροβιακές διεργασίες του εδάφους.

2.3. Ιστορικά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Πολλά ιστορικά γεγονότα έχουν καταγραφεί, τα οποία καταδεικνύουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές και καταστροφικές επιπτώσεις τόσο στη δημόσια υγεία όσο και στο περιβάλλον. Ο συνδυασμός των βιομηχανικών δραστηριοτήτων με τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, και ιδιαίτερα με το φαινόμενο της θερμοκρασιακής αναστροφής, έχει οδηγήσει στην εμφάνιση κρίσιμων επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέσω των κρίσιμων ιστορικών γεγονότων, αφύπνισαν την παγκόσμια κοινότητα να υιοθετήσουν αυστηρότερη περιβαλλοντική νομοθεσία.

2.3.1 Μεγάλο νέφος του Λονδίνου (1952)

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά θανατηφόρα γεγονότα που οφείλονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η Μεγάλη αιθαλομίχλη του Λονδίνου. Τον Δεκέμβριο του 1952 και συγκεκριμένα από τις 5 έως 9 Δεκεμβρίου στο Λονδίνο, ένα πυκνό και τοξικό νέφος κάλυψε την πόλη. Την συγκεκριμένη περίοδο, το Λονδίνο για την ενεργειακή του κάλυψη βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό κυρίως στη χρήση άνθρακα χαμηλής ποιότητας είτε για οικιακή χρήση είτε για διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες.

Κατά τη διάρκεια εκείνου του Δεκεμβρίου, επικρατήσαν δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, με έντονες χαμηλές θερμοκρασίες, και ισχυρές αντικυκλωνικές συνθήκες. Παράλληλα, η εμφάνιση θερμοκρασιακής αναστροφής στα χαμηλά ατμοσφαιρικά στρώματα περιόρισε σημαντικά την κατακόρυφη ανάμειξη της ατμόσφαιρας, οδηγώντας στον εγκλωβισμό των ρύπων κοντά στο έδαφος. Επιπλέον, με την απουσία των ανέμων σε συνδυασμό με τα υψηλά επίπεδα υγρασίας συνέβαλε στη δημιουργία ενός τοξικού νέφους (Brimblecombe, 1987).

Το τοξικό νέφος χαρακτηριζόταν από υψηλά επίπεδα διοξειδίου του θείου (SO_2), αιωρούμενα σωματίδια (PM) και προϊόντα ατελούς καύσης με τις συγκεντρώσεις να υπερβαίνουν αρκετά τα φυσιολογικά επίπεδα. Το καταστροφικό γεγονός έφερε επιπτώσεις τόσο στη δημόσια υγεία όσο και στο περιβάλλον. Σημαντική αύξηση της θνησιμότητας σε αναπνευστικά και καρδιοαναπνευστικά νοσήματα, καθώς και στην απότομη αύξηση των εισαγωγών στα νοσοκομεία. Επίσημως καταγράφηκαν περίπου 4,000 άνθρωποι που έχασαν την ζωή του, ωστόσο εκτίμησαν ότι ο συνολικός αριθμός των πρόωρων θανάτων ανέρχεται περίπου σε 12,000 ανθρώπους. (Brimblecombe, 1987).

Από περιβαλλοντικής πλευράς, το επεισόδιο δημιούργησε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις θειούχων ενώσεων οδήγησαν στην επιτάχυνση της φθοράς δομικών υλικών αλλά και των ιστορικών μνημείων. Παράλληλα επηρεάστηκε η αστική βλάστηση. Ένα ακόμα σοβαρό πρόβλημα που είχε δημιουργηθεί ήταν η περιορισμένη ορατότητα, η οποία επηρέασε και επιβάρυνε τις μεταφορές και τη γενική καθημερινή λειτουργία της πόλης. (Brimblecombe, 1987).

Το Μεγάλο Νέφος αποτέλεσε ορόσημο γεγονός για την περιβαλλοντική νομοθεσία του Ηνωμένου Βασιλείου με το 1956 ψηφίστηκε στο βρετανικό κοινοβούλιο, ο νόμος «Διπλωματική Εργασία»

(Clean Air Act). Θεσπιστήκαν αυστηρά μέτρα περιορισμού των εκπομπών, και παράλληλα προώθησε τη σταδιακή απομάκρυνση των ρυπογόνων καυσίμων από τις αστικές περιοχές.

2.3.2 Καταστροφή της κοιλάδας του Meuse 1930

Ένα από τα πρώτα καταγεγραμμένα σοβαρά και θανατηφόρα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με σημαντικές επιπτώσεις τόσο στη δημόσια υγεία όσο και στο περιβάλλον. Στο Βέλγιο και συγκεκριμένα στην περιοχή της κοιλάδας του Meuse, χαρακτηρίζεται από αυξημένη βιομηχανική δραστηριότητα, όπου περιλαμβάνει διάφορες μεταλλουργικές εγκαταστάσεις και εργοστάσια καύσης άνθρακα. Οι βιομηχανίες απελευθέρωναν στην ατμόσφαιρα διάφορους ρύπους, με αποτέλεσμα να προκαλέσουν έντονη ρύπανση στην τοπική ατμόσφαιρα. Κατά το χρονικό διάστημα 1 - 5 Δεκεμβρίου 1930, στην περιοχή εκδηλώθηκαν αντικυκλωνικές συνθήκες, χαμηλές θερμοκρασίες και αυξημένη υγρασία, σε συνδυασμό την γεωμορφολογία της κοιλάδας και τη θερμοκρασιακή αναστροφή επηρέασαν την διασπορά των ρύπων με αποτέλεσμα να εγκλωβιστούν στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα πυκνό τοξικό νέφος. Οι κύριοι ρύποι που εντοπίστηκαν ήταν διοξείδιο του θείου (SO₂), φθοριούχες ενώσεις και αιωρούμενα σωματίδια (PM). Οι αυξημένες συγκεντρώσεις οδήγησαν σε σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, προκαλώντας έντονα αναπνευστικά προβλήματα και καταγράφηκαν περίπου 60 θάνατοι.

2.3.3 Η καταστροφή της Donora

Τον Οκτώβριο του 1948, στην πολιτεία της Πενσυλβάνιας των Ηνωμένων Πολιτειών, εκδηλώθηκε ένα σοβαρό ιστορικό επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης με σημαντικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Στην πόλη Donora υπήρχαν διάφορες βιομηχανίες επεξεργασίας και παραγωγής χαλκού και ψευδαργύρου, οι οποίες σε καθημερινή βάση εξέπεμπαν σημαντικές ποσότητες ρύπων στην ατμόσφαιρα (Snyder, 1994; Pope & Dockery, 2006) Κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 26 - 31 Οκτωβρίου, οι αντικυκλωνικές συνθήκες που επικρατούσαν, οι ασθενείς άνεμοι και τα επίπεδα υγρασίας που ήταν αυξημένα σε συνδυασμό με τη θερμοκρασιακή αναστροφή και την

γεωμορφολογία της κοιλάδας του ποταμού Monongahela, οδήγησαν στον περιορισμό της διασποράς των ρύπων, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ένα πυκνό τοξικό νέφος.

Καταγραφτήκαν υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου (SO₂), λεπτά αιωρούμενα σωματίδια (PM) και διάφορα μεταλλικά αερολύματα, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται επιπτώσεις στη δημόσια υγεία με τους κατοίκους της περιοχής να εμφανίζουν αναπνευστικά προβλήματα και επιδείνωση προϋπαρχόντων καρδιοαναπνευστικών παθήσεων, επιπλέον καταγράφηκαν τουλάχιστον 20 θάνατοι.

Το επεισόδιο που πραγματοποιήθηκε στην Donora αποτέλεσε ορόσημο για την περιβαλλοντική πολιτική των Ηνωμένων Πολιτειών. Λόγω των σοβαρών επιπτώσεων προέκυψε η ανάγκη για οργανωμένο έλεγχο την ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπου ακολούθησε σταδιακή θέσπιση ομοσπονδιακής νομοθεσίας για την προστασία της ποιότητας του αέρα (EPA, 2019; WHO, 2021).

2.3.4 Το φωτοχημικό νέφος του Los Angeles:

Ένα από τα χαρακτηριστικά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σημειώθηκε στα μέσα του 20ού αιώνα ήταν το φωτοχημικό νέφος του Los Angeles. Το φωτοχημικό νέφος οφείλεται σε μια σειρά από φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) υπό την έντονη παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας. Οι αντιδράσεις αυτές οδηγούν στον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων, κυρίως του όζοντος (O₃), το οποίο εντοπίζεται στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας. Ο συνδυασμός της έντονης ηλιοφάνειας, της θερμοκρασιακής αναστροφής και της χαμηλής ταχύτητας ανέμων, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία της λεκάνης του Los Angeles, οδήγησαν στη δημιουργία κατάλληλων συνθηκών για την συσσώρευση των ρύπων και τον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους (Seinfeld & Pandis, 2016; EPA, 2022).

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία περιλάμβαναν ερεθισμό των οφθαλμών, η μείωση της πνευμονικής λειτουργίας, καθώς εκδήλωση αναπνευστικών και καρδιαγγειακών νοσημάτων. Πέρα από τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, καταγράφηκαν επιπτώσεις και στο φυσικό περιβάλλον, όπως υποβάθμιση της αγροτικής παραγωγής και

βλάβες στην αστική βλάστηση (WHO, 2021). Λόγω του φαινομένου, οι τοπικές αρχές και οι πολιτειακοί φορείς ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οδηγήθηκαν στη θέσπιση πρωτοποριακών μέτρων που αφορούσαν τον έλεγχο των εκπομπών, και συμβάλλοντας σε μια σύγχρονη περιβαλλοντική νομοθεσία για την ποιότητα του αέρα στις Ηνωμένες Πολιτείες και διεθνώς (EPA, 2022· Seinfeld & Pandis, 2016).

2.3.5 Βιομηχανική επανάσταση

Κατά τη χρονική περίοδο από το 19ο αιώνα έως τις αρχές του 20ού αιώνα, άρχισαν να εμφανίζονται σοβαρά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σε μια εποχή όπου αποτέλεσε μια περίοδο έντονης βιομηχανικής ανάπτυξης και αυξημένης ενεργειακής καταναλώσης.

Η εκτεταμένη χρήση ορυκτών καυσίμων, με κυρίαρχο καύσιμο τον άνθρακα για τη λειτουργία των εργοστασίων, τις μεταφορές και την οικιακή θέρμανση, οδήγησε στη σημαντική αύξηση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων. Ταυτόχρονα, η ταχεία αστικοποίηση και η συγκέντρωση του πληθυσμού στα βιομηχανικά κέντρα επιβάρυναν περαιτέρω την ποιότητα του αέρα. Οι παράγοντες αυτοί συνέβαλαν στην υποβάθμιση της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων δημόσιας υγείας, με ιδιαίτερη αύξηση των αναπνευστικών παθήσεων. Αν και κατά την περίοδο αυτή δεν υπήρχε οργανωμένο πλαίσιο περιβαλλοντικής προστασίας, οι αρνητικές επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δημιούργησαν την ανάγκη για θεσμική παρέμβαση και έλεγχο των εκπομπών. Η βιομηχανική επανάσταση αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη περιβαλλοντικής πολιτικής και νομοθεσίας με στόχο την προστασία της δημόσιας υγείας και το περιβάλλον.

2.3.6 Βροχές οξέων

Η δημιουργία της όξινης βροχής οφείλεται κυρίως στις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2) και των οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα οποία απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κυρίως από βιομηχανικές δραστηριότητες και την καύση ορυκτών καυσίμων. Στη συνέχεια, το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x) υφίστανται

διάφορες χημικές αντιδράσεις με το νερό (H_2O) και το οξυγόνο (O_2) της ατμόσφαιρας, σχηματίζοντας θειικό και νιτρικό οξύ. Τα οξέα αυτά, με τη βοήθεια των νεφών, μεταφέρονται και κατακρημνίζονται στην επιφάνεια της γης, είτε με την μορφή της βροχής και του χιονιού είτε μέσω της ξηρής εναπόθεσης, προκαλώντας την οξίνιση των εδαφών και υδάτων.

Οι επιπτώσεις από την όξινη βροχή είναι πολλαπλές. Προκαλεί βλάβες στη βλάστηση, οδηγώντας φθορές στα φύλλα, μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας και εξασθένηση των φυτών. Επιπλέον, φθείρει τα δομικά υλικά κτηρίων, ιστορικών μνημείων και αγαλμάτων, τα οποία αποτελούνται από ασβεστολιθικά και μαρμάρινα υλικά, τα οποία διαβρώνονται λόγω των χημικών αντιδράσεων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την όξινη βροχή επιφέρουν και έμμεσες κοινωνικοοικονομικές συνέπειες, διότι επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγικότητα, υποβαθμίζουν και την ποιότητα των υδατικών πόρων και συμβάλλουν στην υποβάθμιση του αστικού περιβάλλοντος. Η κατάσταση αυτή αναδεικνύει τη στενή αλληλεξάρτηση μεταξύ ατμοσφαιρικής ρύπανσης και περιβαλλοντικής υποβάθμισης.

2.3.7 Η καταστροφή του Τσερνομπίλ

Ένα από τα σοβαρότερα πυρηνικά ατυχήματα που καταγράφηκε στην παγκόσμια ιστορία σημειώθηκε στις 26 Απριλίου 1986, στον πυρηνικό σταθμό «Βλαντιμιρ Ιλιτς Λενιν» στην Ουκρανία (τότε Σοβιετική Ένωση). Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα και καταστροφικά ιστορικά γεγονότα παγκοσμίως. Η έκρηξη σημειώθηκε τις πρώτες πρωινές ώρες, όταν ο αντιδραστήρας τύπου RBMK, λόγω του ελαττωματικού σχεδιασμού του και σε συνδυασμό με ανθρώπινο σφάλμα, οδήγησε στην απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών ουσιών στην ατμόσφαιρα, με εκτεταμένη διασπορά σε όλη την Ευρώπη. (IAEA, 2006; UNSCEAR, 2008).

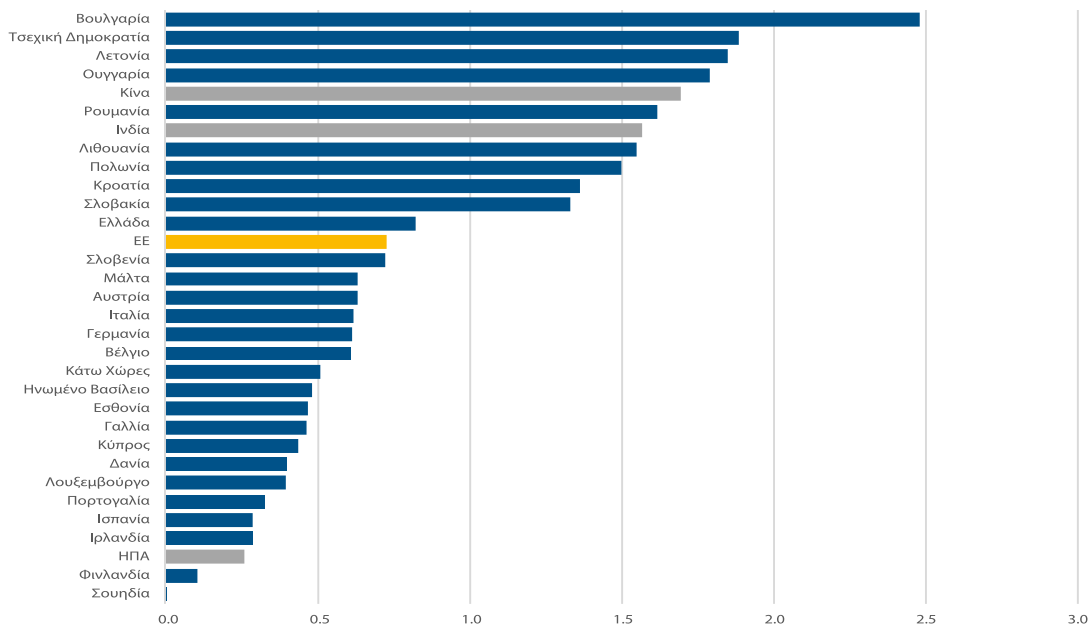
Η διασπορά ραδιονουκλιδίων, όπως είναι το ιώδιο -131, το καίσιο-137 και το στρόντιο-90, προκάλεσε σοβαρές επιπτώσεις τόσο στο φυσικό περιβάλλον, με ρύπανση του εδάφους των υδάτων και των οικοσυστημάτων σε πολλές περιοχές της Ευρώπης. Ενώ παράλληλα, όσο αφορά τη δημόσια υγεία καταγράφηκαν άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις, όπως οι θάνατοι εργαζομένων και διασωστών, καθώς αυξημένα περιστατικά καρκίνου του θυρεοειδούς. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν ζώνες αποκλεισμού γύρω από τον πυρηνικό

σταθμό. Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ, ανέδειξε την ανάγκη διαμόρφωσης και ενίσχυσης μέτρων πυρηνικής ασφάλειας, καθώς και ανάπτυξης διεθνούς συνεργασίας περιβαλλοντικής προστασίας. (IAEA, 2006·UNSCEAR, 2020).

2.4 Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο

Η έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί πλέον ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα της δημόσιας υγείας σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO, 2021), κάθε χρόνο εκτιμάται ότι περίπου 7 εκατομμύρια πρόωροι θάνατοι σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση, εκ των οποίων περίπου 4,2 εκατομμύρια προέρχονται από εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση, ενώ 3,2 εκατομμύρια από την οικιακή ατμοσφαιρική ρύπανση. Στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού εκτιμάται περίπου 4 εκατομμύρια θανάτους (UNEP, 2019). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η ατμοσφαιρική ρύπανση ευθύνεται για περίπου 400.000 πρόωπους θανάτους ετησίως, δηλαδή περίπου 1.000 θανάτους ημερησίως (European Court of Auditors, 2018).

Στο Γράφημα 1. παρατηρείται ότι ορισμένες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα όσον αφορά τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον τομέα της δημόσιας υγείας, με αποτέλεσμα την απώλεια υγιών ετών ζωής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα αποτελέσματα πλησιάζουν τα επίπεδα χωρών με έντονα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως η Κίνα και η Ινδία. Το οικονομικό κόστος των επιπτώσεων για την Ευρωπαϊκή Ένωση εκτιμάται μεταξύ 330 και 940 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών για την υγειονομική περίθαλψη και των απωλειών παραγωγικότητας (European Court of Auditors, 2018).



Σχήμα 2.1: Έτη υγιούς ζωής που χάνονται εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (ανά 100 κατοίκους) Πηγή: European Court of Auditors. (2018). Air pollution: Protecting human health remains insufficient (Special Report No. 23/2018). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

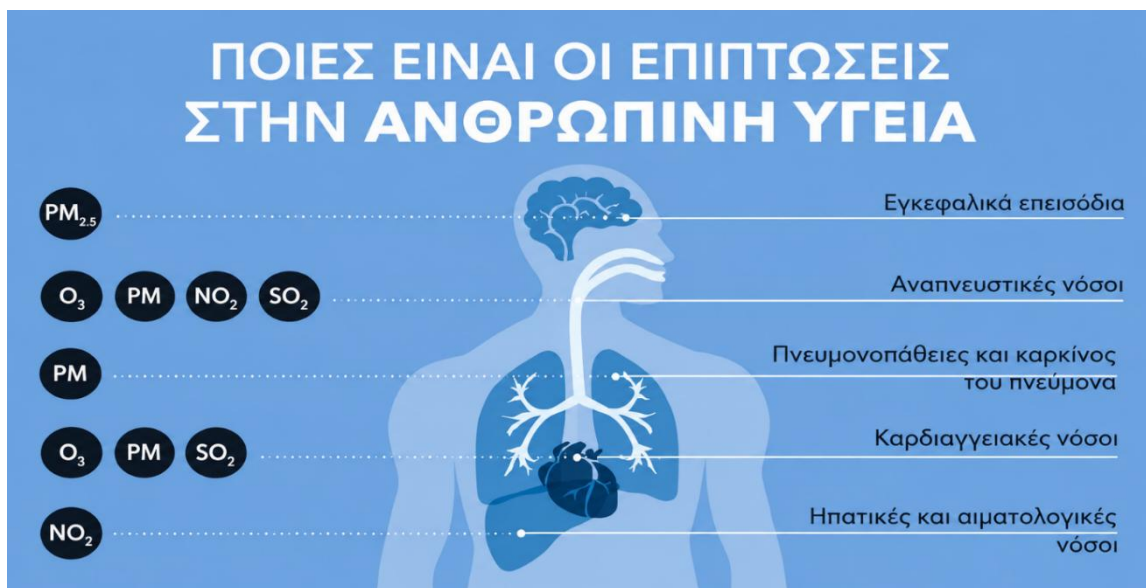
Η ατμοσφαιρική ρύπανση, σε σύγκριση με άλλους παγκόσμιους παράγοντες κινδύνου για την υγεία, όπως το κάπνισμα και η ανθυγιεινή διατροφή, θεωρείται μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές απειλές για τον άνθρωπο. Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2,5}$), το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και το τροποσφαιρικό όζον (O_3), ευθύνονται για ένα σημαντικό ποσοστό πρόωρων θανάτων. Παρά το γεγονός ότι έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα του αέρα από το 1990, το παγκόσμιο φορτίο της πρόωρης θνησιμότητας έχει μειωθεί ελάχιστα. Η ποιότητα του αέρα στις χώρες υψηλού εισοδήματος έχει βελτιωθεί αισθητά, ωστόσο στις χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος παρατηρείται το αντίθετο, λόγω της μαζικής αστικοποίησης και της οικονομικής ανάπτυξης, με αποτέλεσμα οι άνθρωποι να είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Οι κάτοικοι των αστικών περιοχών τείνουν να εκτίθενται περισσότερο στην ατμοσφαιρική ρύπανση σε σύγκριση με εκείνους που διαμένουν σε αγροτικές περιοχές, καθώς στις αστικές περιοχές καταγράφονται αυξημένες εκπομπές αέριων ρύπων. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη πυκνότητα του πληθυσμού και στην έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα,

όπως η κυκλοφορία των οχημάτων, η βιομηχανική παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, οι οποίες συμβάλλουν στην παραγωγή και συσσώρευση ρύπων . Παράλληλη, η δυσκολία της διασποράς των ρύπων, λόγω της πυκνής δόμησης και της παρουσίας ψηλών κτηρίων οδηγεί στον περιορισμό της διασποράς.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει σημαντικά την ανθρώπινη υγεία, αυξάνοντας τη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα μέσω καρδιαγγειακών και αναπνευστικών παθήσεων, καρκίνου του πνεύμονα και επιπτώσεων σε άλλα όργανα. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, οι καρδιακές παθήσεις και τα εγκεφαλικά επεισόδια ευθύνονται για περίπου το 80% των πρόωρων θανάτων που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση (WHO, 2016).

. Στο Γράφημα 2.2 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία .



Σχήμα 2.2 : Οι επιπτώσεις στην υγεία από ατμοσφαιρικούς ρύπους

Πηγή: European Court of Auditors. (2018). *Air pollution: Protecting human health remains insufficient* (Special Report No. 23/2018). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Το 2014, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, η έκθεση σε λεπτά αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm (PM_{2,5}) προκάλεσε περίπου 400.000 πρόωρους θανάτους στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Αντιστοίχισα, η έκθεση

στο διοξείδιο του αζώτου (NO₂) συνδέθηκε με περίπου 75.000 πρόωρους θανάτους, ενώ το τροποσφαιρικό όζον (O₃) με περίπου 13.600 πρόωρους θανάτους.

Το 2019, η ατμοσφαιρική ρύπανση, εξακολούθησε να αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό και υγειονομικό πρόβλημα. Σύμφωνα με την έκθεση Air Quality in Europe 2021 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, στα 27 κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης καταγράφηκαν 307.000 πρόωροι θάνατοι που αποδίδονται στην έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια (PM_{2.5}), 40.400 πρόωροι θάνατοι που σχετίζονται με τη έκθεση στο διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και 16.800 πρόωροι θάνατοι οφείλονται στην έκθεση στο όζον (O₃). Ο πίνακας 2.1, που ακολουθεί παρουσιάζει τους πρόωρους θανάτους στην Ευρώπη, με κύρια αιτία την έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους τα τελευταία χρόνια. Η επιβάρυνση της υγείας που προκαλείται από την ατμοσφαιρική ρύπανση συνεπάγεται σημαντικό οικονομικό κόστος, γεγονός που ωθεί τις κυβερνήσεις παγκοσμίως να βελτιώσουν την ποιότητα του αέρα ώστε να μειώσουν τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.

Πίνακας 2.1: Εκτιμώμενοι πρόωροι θάνατοι στην ΕΕ λόγω έκθεσης σε PM_{2.5}, NO₂ και O₃.

Έτος	Αιωρούμενα σωματίδια PM _{2.5}	Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	τροποσφαιρικό όζον (O ₃)
2019	307,000	40,400	16,800
2020	238.000	49.000	24.000
2021	269.000	66.000	81.000
2022	239.000	48.000	70.000
2023	182.000	34.000	63.000

πηγές European Environment Agency — *Air Quality in Europe* (2021); *Health impacts of air pollution in Europe* (2022); *Harm to human health from air pollution in Europe* (2024); *Air quality improving, but air pollution still leads to over 180,000 deaths in the EU* (2025)

2.5 Ατμοσφαιρική ρύπανση: Πολιτική -Νομοθεσία

Η προστασία της ποιότητας του αέρα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της περιβαλλοντικής πολιτικής σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε διεθνές επίπεδο, η αντιμετώπισή της αποτελεί διεθνή προτεραιότητα, εξαιτίας των σοβαρών επιπτώσεων που προκαλεί στη δημόσια υγεία, στο περιβάλλον καθώς και στην οικονομική ανάπτυξη.

Η αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης άρχισε να δρομολογείται με τις πρώτες συντονισμένες προσπάθειες το 1979, με τη Σύμβαση της Γενεύης, η οποία στόχευε στη μείωση της διασυνοριακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες αποστάσεις. Κύριος στόχος της ήταν η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος από ρύπους που προέρχονται από μια χώρα και επηρεάζουν άλλες, καθώς οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις, υπερβαίνοντας τα εθνικά σύνορα.

Η σύμβαση αποτέλεσε την πρώτη διεθνή, νομικά δεσμευτική συμφωνία για την προστασία της ποιότητας του αέρα, με κύριο στόχο την εφαρμογή των μέτρων για την καταπολέμηση της όξινης βροχής και την ανάγκη συνεργασίας των κρατών για τον έλεγχο και τη μείωση των εκπομπών. Η σύμβαση τέθηκε σε ισχύ στις 16 Μαρτίου 1983 αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη των μελλοντικών πρωτοκόλλων σε διεθνές ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Στη συνέχεια, η Σύμβαση της Γενεύης εξελίχθηκε μέσω της θέσπισης οκτώ ειδικών πρωτοκόλλων, τα οποία είχαν ως κύριο στόχο τη μείωση συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών ρύπων.

Το 1984, με το πρωτόκολλο EMEP, όπου αφορά τη χρηματοδότηση για το πρόγραμμα της παρακολούθησης και μέτρησης των ρύπων στην Ευρώπη. Ακολούθως, το 1985 υποθετικέ το πρώτο πρωτόκολλο για το θείο (S), το οποίο προέβλεπε την μείωση των εκπομπών κατά 30%, ενώ το 1994 ακολουθεί δεύτερο πρωτόκολλο με αυστηρότερα όρια εκπομπών. Το 1988 υιοθετήθηκε το πρωτόκολλο των οξειδίων του Αζώτου (NO_x) όπου θεσπίστηκαν όρια, ενώ το 1991 υιοθετήθηκε το πρωτόκολλο για τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) το οποίο στόχευε στην μείωση των ουσιών που συμβάλλουν στο φωτοχημικό νέφος.

Το 1998 ακολουθεί η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου που αφορούσαν τα βαρέα μέταλλα, περιορίζοντας τις εκπομπές του μολύβδου (Pb), του καδμίου (Cd) και του υδραργύρου (Hg), ενώ παράλληλα θεσπίστηκε και το πρωτόκολλο για τους Έμμονους Οργανικούς

Ρύπους (POPs), με την απαγόρευση και τον περιορισμό των εκπομπών επικίνδυνων χημικών ουσιών. Τέλος, το 1999 υιοθετήθηκε το πρωτόκολλο του Γκέτεμποργκ, το οποίο έθεσε ανώτατα όρια εκπομπών, για την περίοδο 2010 - 2020, για τέσσερις βασικούς ρύπους: το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξείδια του Αζώτου (NO_x), τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και την αμμωνία NH_3 . Ακολουθήσε αναθεώρηση του πρωτοκόλλου το 2012, με την προσθήκη νέων στόχων που αφορά την μείωση των εκπομπών για την περίοδο μετά το 2020, καθώς και με την ένταξη των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων ($\text{PM}_{2.5}$) στο πεδίο εφαρμογής του.

Με την πάροδο του χρόνου, ακολουθήσαν νέες διεθνείς συμφωνίες που επικεντρώθηκαν στην κλιματική αλλαγή. Το 1992, κατά τη Διάσκεψη του Ρίο Ντε τζανέιρο, υιοθετήθηκε η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, η οποία τέθηκε σε ισχύ 21 Μάρτιου 1994, με κύριο στόχο την σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου. Η σύμβαση αυτή αποτέλεσε τη βάση για το πρωτόκολλο του Κιότο το 1997, το οποίο καθόρισε υποχρεωτικά όρια αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου. Το 2015, η Συμφωνία των Παρισίων η οποία είχε κύριο στόχο να περιορίσει την άνοδο της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα αρκετά κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, καθώς και τη συνέχιση των προσπάθειών περιορισμού της αύξησης της θερμοκρασίας $1,5^\circ\text{C}$. Η Συμφωνία απαιτεί από όλα τα συμβαλλόμενα κράτη να υποβάλουν τις δεσμεύσεις τους και να προχωρήσουν την υλοποίησή τους.

Ενώ οι διεθνείς συμφωνίες καθορίζουν το γενικό πλαίσιο, η Ευρωπαϊκή Ένωση προχώρησε στη θέσπιση νομοθετικών οδηγιών που αφορούσε τα πρότυπα ποιότητας του αέρα και διαμόρφωσε ένα ολοκληρωμένο νομοθετικό πλαίσιο με μία σειρά οδηγιών

Το 1996, με την Οδηγία 96/62/EK, αποτελεί τη πρώτη ολοκληρωμένη ευρωπαϊκή νομοθετική στρατηγική για την ποιότητα του αέρα. Η οδηγία επέβαλε σε όλα τα Κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να μετρούν, να καταγράφουν και να αξιολογούν την ποιότητα του αέρα με ενιαίο τρόπο. Παράλληλα, υποχρέωσε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης να παρακολουθούν όλους τους ρύπους μέσω των δικτύων μετρήσεων και να εφαρμόζουν σχέδια δράσης όταν τα επίπεδα ρύπανσης υπερβούν τα καθορισμένα όρια. Στόχος είναι η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

Το 1999, με την Οδηγία 1999/30/ΕΚ, θεσπίστηκαν για πρώτη φορά συγκεκριμένες οριακές τιμές για τους τέσσερις βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους: το διοξείδιο του θείου (SO₂), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀) και τον μόλυβδο (Pb). Τα Κράτη - μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης υποχρεώθηκαν να αναφέρουν τις υπερβάσεις των όριων και να λαμβάνονται μέτρα προστασίας και να ενημερώνουν το κοινό.

Στην συνέχεια, η οδηγία 2008/50/ΕΚ, ενοποίησε όλες τις νομοθετικές οδηγίες που είχαν θεσπιστεί σε ένα ενιαίο κείμενο, απλοποιώντας την εφαρμογή τους, ώστε να είναι περισσότερο κατανοητή και σαφής, ενώ βελτίωσε και αυστηροποίησε ορισμένες οριακές τιμές. Τέλος, η οδηγία 2010/75/ΕΕ, επικεντρώθηκε με προσοχή στον περιορισμό των εκπομπών που προέρχονται από βιομηχανικές δραστηριότητες. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προώθησε την υιοθέτηση καθαρών τεχνολογιών και υποχρέωσε τα κράτη - μέλη να παρακολουθούν και να λαμβάνουν μέτρα ώστε να μειώνουν τις εκπομπές.

Την ευρωπαϊκή πορεία την ακολουθεί και η ελληνική νομοθεσία, η οποία διαμόρφωσε ένα εθνικό θεσμικό πλαίσιο μέσω Προεδρικών Διαταγμάτων και Κοινών Υπουργικών Αποφάσεων, με κύριο σκοπό την προστασία της δημόσιας υγείας, καθώς και του οικοσυστήματος, στοχεύοντας στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι βασικές νομοθετικές ρυθμίσεις που θεσπίστηκαν είναι οι εξής:

Το 1986, ο Νόμος 1650/1986 αποτέλεσε το πρώτο ολοκληρωμένο νομοθετικό πλαίσιο που θεσπίστηκε με σκοπό ένα βασικό πλαίσιο για την προστασία του περιβάλλοντος στην Ελλάδα, περιλαμβάνοντας διατάξεις για την πρόληψη και τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το 1993, ακολουθεί η έκδοση μιας Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ), η οποία προέβλεπε έκτακτα μέτρα για τη αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις αστικές περιοχές.

Το 2004, με την Υπουργική Απόφαση Υ.Α 9238/332/2004, καθορίστηκαν οριακές και κατευθυντήριες τιμές για το βενζόλιο και το μονοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Το 2007, ακολούθησε η ΚΥΑ Η.Π. 22306/1075/Ε103/2007 η όποια καθόρισε τιμές και στόχους που αφορούσε τους επικίνδυνους ατμοσφαιρικούς ρύπου όπου περιλαμβάνει τα Βαρέα μέταλλα: κάδμιο (Cd), αρσενικό (As), υδράργυρος (Hg) και τους Πολυκυκλικούς

αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι συνδέονται με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Το 2011 εκδόθηκε η Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ Η.Π. 14122/549/Ε.103/2011 με την οποία ενσωματώθηκε η Οδηγία 2008/50/ΕΚ στο ελληνικό δίκαιο. Αφορά την ποιότητα του αέρα στο Ελληνικό δίκαιο. Καθόριζε οριακές τιμές στους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, υποχρέωσε το κράτος – μέλος να παρακολουθήσει την ποιότητα του αέρα και να εφαρμόζει σχέδια δράσης σε περίπτωση που υπερβούν τα όρια.

Το 2020, ο Νόμος 4675/2020 αποτέλεσε ένα κομβικό σημείο για την ελληνική νομοθεσία, καθώς συνέδεσε την προστασία της δημόσιας υγείας με τη διαχείριση των περιβαλλοντικών κινδύνων και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Συνοψίζοντας, το ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο αναδεικνύει τη σημασία της συλλογικής δράσης σε διεθνές, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο αναδεικνύοντας τη σημασία της συλλογικής δράσης για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Ωστόσο, η ύπαρξη των νομοθετικών μέτρων χωρίς την ορθή εφαρμογή τους, μειώνει την αποτελεσματικότητά τους.



Σχήμα 2.3: Ατμοσφαιρική ρύπανση: Πολιτική -Νομοθεσία

Κεφάλαιο 3: Αιωρούμενα σωματίδια

Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (οδηγία 2008/50/EK), ως αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter - PM), ορίζονται τα σωματίδια τα οποία βρίσκονται σε αιώρηση μέσα στην ατμόσφαιρα. Αποτελούν μία από τις σημαντικότερες και πλέον επικίνδυνες κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων, διότι έχουν απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, λόγω των επιπτώσεών τους στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον.

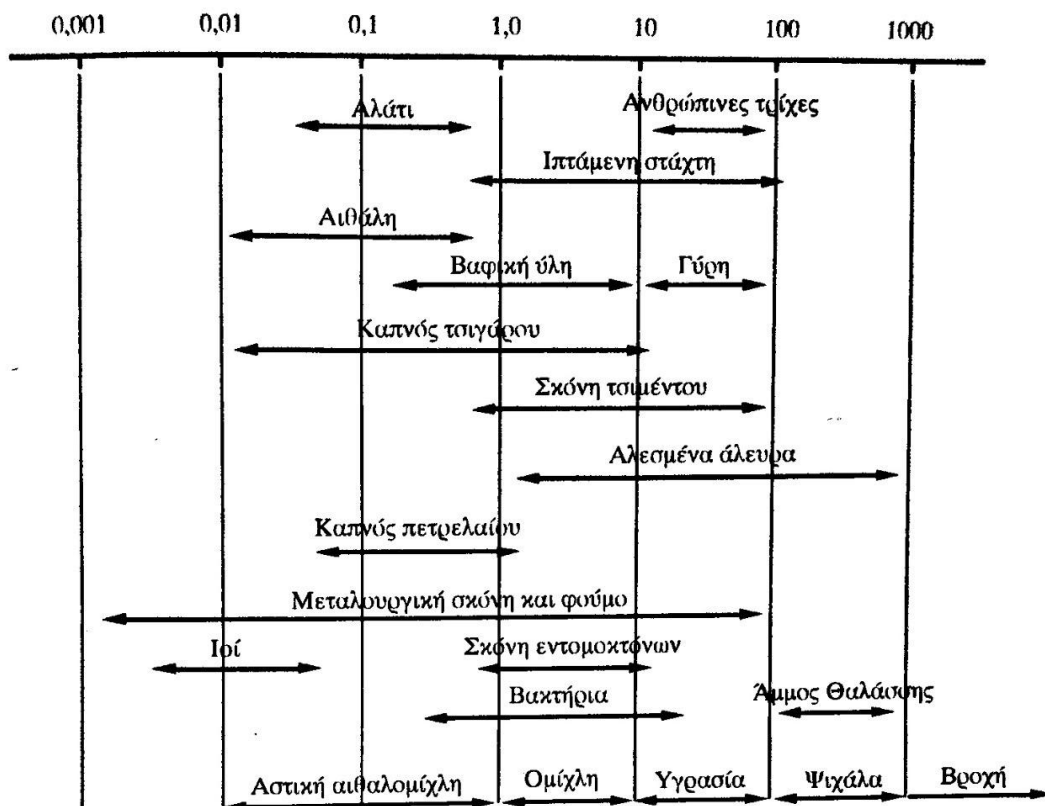
Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα στέρεων και υγρών σωματιδίων. Το μέγεθός τους κυμαίνεται από μερικά νανόμετρα (nm) έως περίπου 500 μικρόμετρα (μm), ενώ το σχήμα τους παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία. Η ειδική τους επιφάνεια ευνοεί την προσρόφηση διαφόρων χημικών ενώσεων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα δυνητικά επικίνδυνο μίγμα. Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους, καθώς μπορεί να κυμαίνεται από λίγες ώρες έως αρκετές μέρες. Έχουν την ικανότητα να μεταφέρονται από μικρές έως πολύ μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια των ατμοσφαιρικών ρευμάτων. Η χημική τους σύσταση μεταβάλλεται ανάλογα την πηγή προέλευσης τους, τις ατμοσφαιρικές διεργασίες και τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων.

Πίνακας 3.1: Μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων

Σωματιδιακοί ρύποι	Αέριοι ρύποι
Αιθάλη (Fume): (0,03 -0,3 μm)	Αέρια (Gases)
Σκόνη (Dust): (1-10 μm)	Ατμοί (Vapors)
Καπνός (Smoke): (0,5-1 μm)	
Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash): (1-1000 μm)	
Ομίχλη (Mist) (0,1-10 μm)	
Spray: (10-1000 μm)	

3.1 Ταξινόμηση αιωρούμενων σωματιδίων

Λόγω του δεδομένου ότι τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν ακανόνιστα γεωμετρικά σχήματα, κατηγοριοποιούνται με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα αιωρούμενα σωματίδια δεν είναι πάντοτε σφαιρικά, παρουσιάζουν διαφορετική πυκνότητα και το βάρος τους ποικίλλει. Στο Γράφημα 3.1 παρουσιάζεται η διάμετρος των διαφόρων σωματιδίων. Ωστόσο, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν και με βάση και άλλων κριτηρίων, όπως η χημική τους σύσταση και η πηγή προέλευσής τους. Τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες.



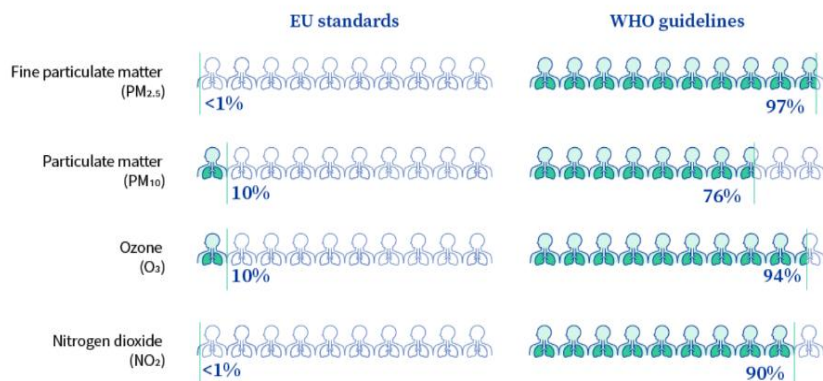
σχήμα 3.1 Τυπικά μεγέθη διαφόρων σωματιδίων που εντοπίζονται την ατμόσφαιρα.

Πηγή: Ξενοφών βερύκιος (2003), διαχείριση αέριων ρύπων. Τόμος Α, ατμοσφαιρικοί ρύποι και τεχνολογία ελέγχου εκπομπής

3.1.1 Αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ περιλαμβάνουν σωματίδια των οποίων η αεροδυναμική διάμετρος είναι μικρότερη ή ίση με 10 μm. Ανήκουν στις βασικές κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων και αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους δείκτες ποιότητας του αέρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία έχουν την ικανότητα να εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα, ωστόσο λόγω του μεγέθους τους, παραμένουν στο ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος (WHO,2021). Μέσω της εισπνοής, τα PM₁₀ εισέρχονται στον οργανισμό και εναποτίθενται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, δηλαδή στη μύτη, στον φάρυγγα και στην τραχεία. Με την είσοδό τους στον οργανισμό μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμό στον βλεννογόνο, βήχα, αλλεργικές αντιδράσεις καθώς επιδείνωση κάποιου προ υπάρχοντος πρόβλημα στο αναπνευστικό σύστημα, με την εκδήλωση κρίσεων άσθματος (Pope and Dockery, 2006).

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται μια σημαντική και ιδιαίτερα έντονη απόκλιση μεταξύ των θεσμικών ορίων και των επιστημονικών εκτιμήσεων. Σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα μόνο το 10% του πληθυσμού θεωρείται ότι εκτίθεται σε επιβαρυνμένη ποιότητα αέρα. Αντίθετα, σύμφωνα με τις αυστηρές κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO guidelines), το ποσοστό αυτό εκτινάσσεται στο 76%. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι η συμμόρφωση με τα ισχύοντα όρια δεν διασφαλίζει επαρκώς την προστασία της δημόσιας υγείας.



Σχήμα 3.2: Έκθεση πληθυσμού σε ατμοσφαιρική ρύπανση: Πρότυπα ΕΕ έναντι Οδηγιών ΠΟΥ

Πηγή European environment Agency, 2025,Particulate matter (PM10)

«Διπλωματική Εργασία»

Οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ διακρίνονται σε ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές. Στις ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνονται οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές όπως η καύση καυσίμων, η φθορά των ελαστικών και των φρένων, η οικιακή θέρμανση, καθώς και διάφορες βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες, οι οποίες αποτελούν τις σημαντικότερες πηγές εκπομπής PM₁₀. Αντίστοιχα, στις φυσικές πηγές συγκαταλέγονται οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι δασικές πυρκαγιές, η μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα, η μεταφορά θαλασσινού αλατιού, καθώς και τα σπόρια μυκήτων και της γύρης. Επιπλέον, στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και τα δευτερογενή σωματίδια τα οποία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων μεταξύ αέριων ρύπων, όπως η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου. Η σύσταση των PM₁₀ είναι εξαιρετικά ετερογενής, καθώς εξαρτάται από την πηγή προέλευσής τους. Αποτελούνται από ένα μείγμα ανόργανων συστατικών, οργανικών ενώσεων και βιολογικών υλικών, ενώ η επικινδυνότητά τους αυξάνεται όταν υπάρχουν διάφορα βαρέα μέταλλα και τοξικές οργανικές ενώσεις (EEA,2023).

Από την πλευρά των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η παρουσία των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στη μείωση της ορατότητας και συμμετέχει στη δημιουργία αιθαλομίχλης. Επιπλέον, προκαλούν φθορές και καταστροφή υλικών σε κτίρια και μνημεία μέσω της εναπόθεσής τους, καθώς προκαλούν διαβρώσεις, αποχρωματισμούς και κηλίδες, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Παράλληλα, επηρεάζουν αρνητικά και το οικοσύστημα, καθώς με την εναπόθεσή τους στο έδαφος και στα υδάτινα σώματα, μπορούν να μεταβάλουν την χημική τους ισορροπία, με το γεγονός να μπορούν να ακολουθήσουν αρνητικές συνέπειες στην ανάπτυξη των φυτών και της βιοποικιλότητας.

Για τη μείωση των επιπτώσεων στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας έχουν θεσπιστεί οριακές τιμές. Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι οριακές τιμές. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση η ημερήσια οριακή τιμή ανέρχεται σε 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ωστόσο δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές ανά έτος, ενώ η ετήσια οριακή τιμή είναι 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Από την άλλη πλευρά, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας θέτει αυστηρότερα μετρά, καθώς η ημερήσια οριακή τιμή ανέρχεται σε 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η ετήσια οριακή τιμή είναι 15

μg/m³, ωστόσο παρατηρείται ότι τα Ευρωπαϊκά πρότυπα είναι λιγότερο αυστηρά από τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. (WHO, 2021; European Union, 2008).

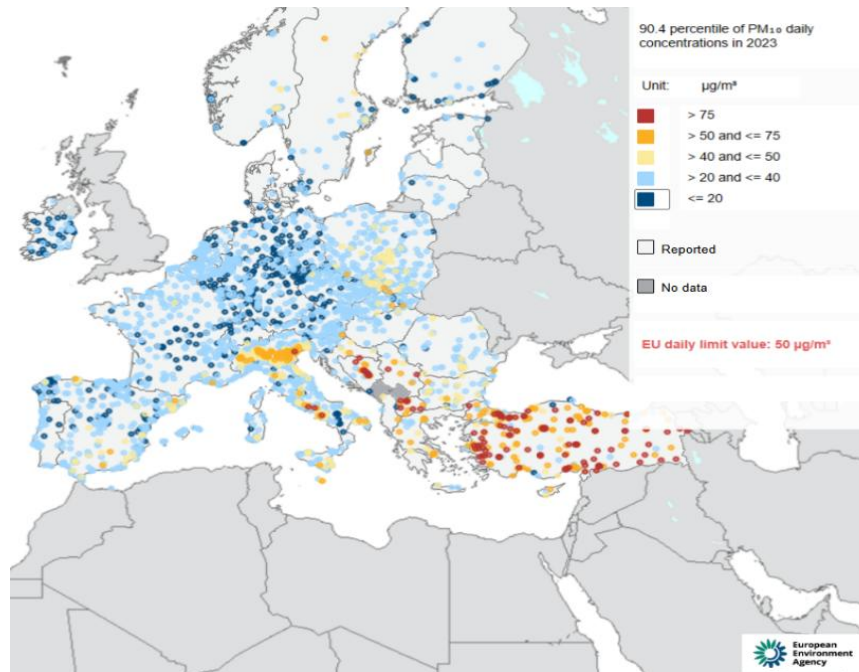
Πίνακας 3.2: Οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀

Οργανισμός	Ετήσιο όριο	Ημερήσιο όριο
ΕΕ	40 μg/m ³	50 μg/m ³
ΠΟΥ	15 μg/m ³	45 μg/m ³

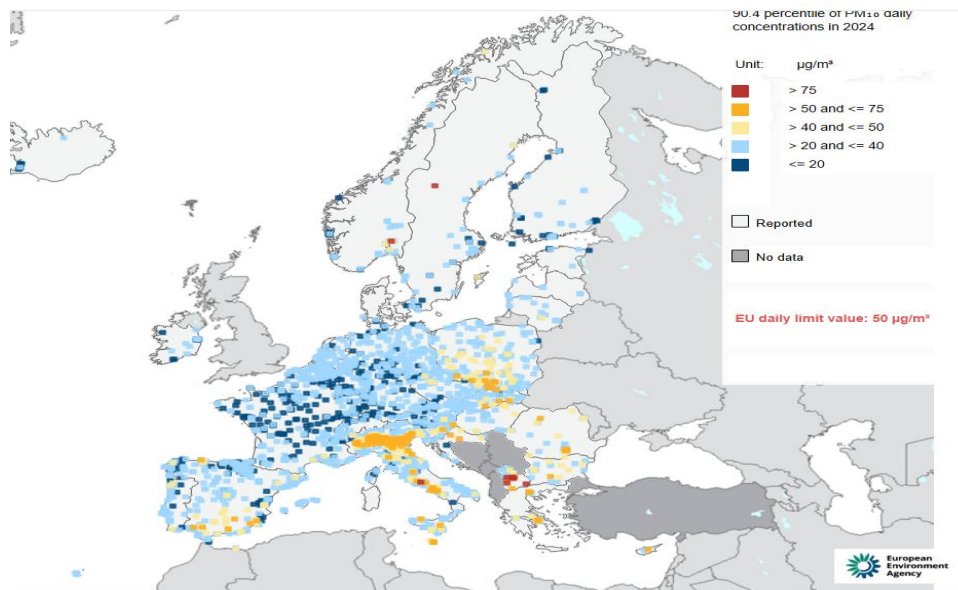
Πηγή (WHO, 2021; European Union, 2008)

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.3, οι υπερβάσεις των ορίων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ εντοπίζονται κυρίως στα κράτη της Ανατολικής Ευρώπης, καθώς και στην Ιταλία (σημειωμένες με κόκκινο και πορτοκαλί χρώμα). Η κατάσταση στην Ελλάδα παρουσιάζει μια μεικτή εικόνα διότι αρκετοί σταθμοί βρίσκονται στην πορτοκαλί ζώνη (40-50 μg/m³), με αποτέλεσμα να βρίσκονται οριακά κάτω από το ισχύον ευρωπαϊκό όριο. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τη χρήση στερεών καυσίμων για θέρμανση, ενώ παράλληλα οι γεωγραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες ευνοούν τη συσσώρευση των ρύπων. Τα δεδομένα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία, διότι αποτελούν μια επικυρωμένη αποτύπωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, απαλλαγμένη από προσωρινές εκτιμήσεις

Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται μια πρόσφατη αποτύπωση της ποιότητας του αέρα της Ευρώπης με τα προσωρινά αποτελέσματα του 2024. Παρατηρείται ότι κατά το 2024 οι περιοχές που εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα (συγκεντρώσεις άνω των 50 μg/m³) παραμένουν σε μεγάλο βαθμό αμετάβλητες, με το αποτέλεσμα αυτό, να επιβεβαιώνουν ότι πρόκειται για ένα διαχρονικό και δομικό πρόβλημα, και η επιμονή του φαινομένου στις περιοχές υποδηλώνει τη συνεχή έκθεση του πληθυσμού σε επιβαρυμένη ποιότητα αέρα. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να έχει σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον.



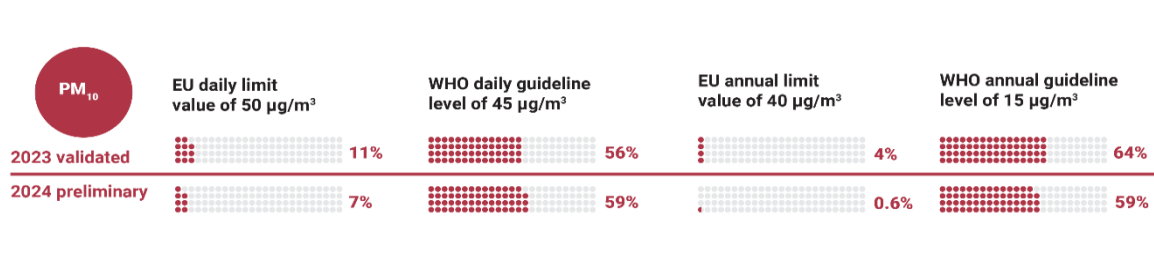
Σχήμα 3.3: Ποιότητα αέρα στην Ευρώπη: Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM10 (2023)
 Πηγή European environment Agency, 2025,Particulate matter (PM10)



Σχήμα 3.4: Χωρική κατανομή των ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10 στην Ευρώπη για το έτος 2024 (προσωρινά δεδομένα)
 Πηγή European environment Agency, 2025,Particulate matter (PM10)

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (EEA), η σύγκριση μεταξύ των οριακών τιμών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των κατευθυντήριων τιμών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Επιπλέον, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5, παρατηρείται ότι ένα μεγάλο ποσοστό των σταθμών καταγράφει υπερβάσεις των ορίων των συγκεντρώσεων PM₁₀. Συγκεκριμένα, για το έτος 2023, το 11% των σταθμών υπερέβη τα ημερήσια όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ το 56% των σταθμών, διαπιστώθηκε ότι υπερέβη τα ημερήσια όρια του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Παράλληλα, όσον αφορά τα ετήσια όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης μόνο το 4% των σταθμών υπερέβη τα ετήσια όρια, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, έφθασε το 64%.

Παράλληλα, απεικονίζονται και τα προκαταρκτικά στοιχεία του 2024, τα οποία δείχνουν μια βελτίωση, με το 7% των σταθμών να υπερβαίνει τα ημερήσια όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εννοώ τα ημερήσια όρια του παγκοσμίου οργανισμού υγείας ανήλθε στο 59%. Όσον αφορά τα ετήσια όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι σταθμοί που υπερέβησαν τα όρια ανήλθαν μόνο 0,6% αλλά το αντίστοιχο ποσοστό του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας ανήλθε 59%. Παρατηρείται μια μικρή βελτίωση το 2024 ωστόσο, ακόμα τα στοιχεία παραμένουν προκαταρκτικά.



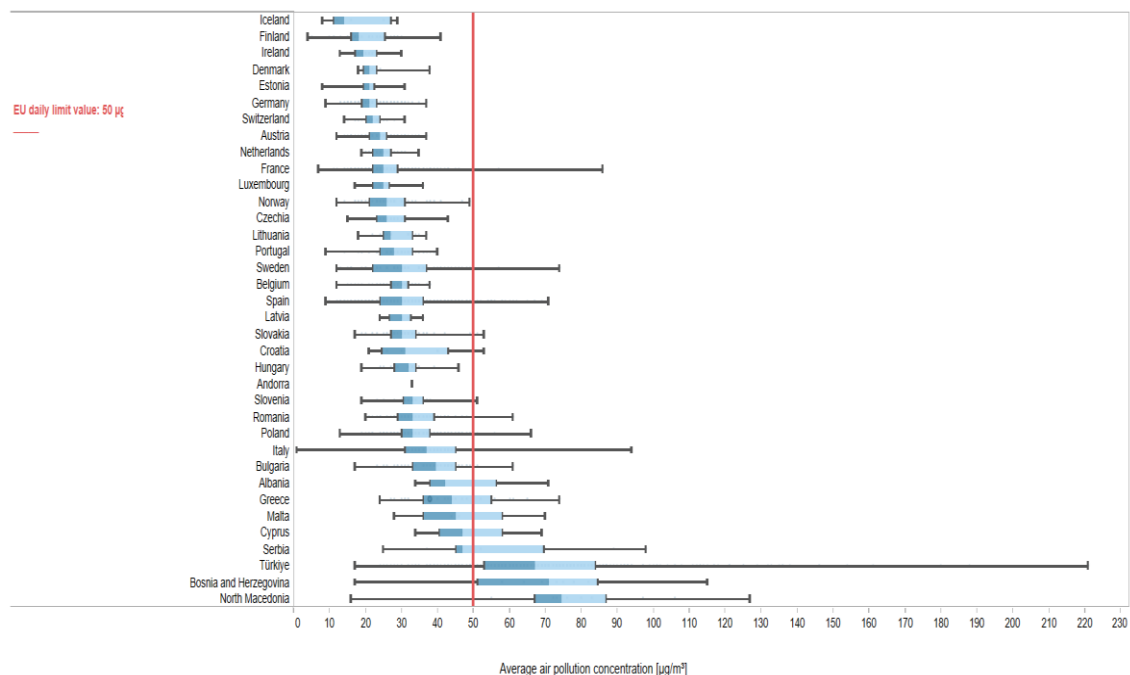
Σχήμα 3.5: Ποσοστό σταθμών με υπερβάσεις ορίων στην Ευρώπη (2023-2024)

Πηγή European environment Agency, 2025, Particulate matter (PM₁₀)

Στο Σχήμα 3.6, παρατηρείται το θηκόγραμμα (box plot) το οποίο παρουσιάζει τη χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων των PM₁₀ ανά χώρα. Το θηκογράμμο (box plot) αναδεικνύει μια σαφή γεωγραφική διαβάθμιση και τη δυσκολία συμμόρφωσης με το ημερήσιο όριο της ΕΕ. Όπως προκύπτει, ορισμένες χώρες όπως είναι Ισλανδία, Φινλανδία, και η Εσθονία παρουσιάζουν συγκεντρώσεις χαμηλότερες από το θεσμοθετημένο όριο.

Αντίθετα με οι χώρες των βαλκανίων και της Νότιας Ευρώπης, όπως είναι η Βόρεια Μακεδονία, Τουρκία, Σερβία, παρουσιάζουν σημαντικές υπερβάσεις. Η Ελλάδα και η Ιταλία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι εμφανίζουν μεγάλο εύρος τιμών. Παρατηρώντας το σχήμα, διαπιστώνεται ότι οι ενδιάμεσες τιμές βρίσκονται κοντά στα 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, η εκτεταμένη δεξιά ουρά του διαγράμματος δείχνει ότι σημαντικός αριθμός σταθμών ή χρονικών περιόδων υπερβαίνει κατά πολύ το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση στις χώρες αυτές διαμορφώνεται κυρίως από τοπικές συνθήκες, γεωγραφικές ιδιαιτερότητες και εποχικούς παράγοντες, όπως η εντατικοποίηση της θέρμανσης κατά την χειμερινή.

Συνοψίζοντας, οι συγκεντρώσεις των PM_{10} παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των χωρών και επηρεάζονται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και οι μετεωρολογικές συνθήκες. Η πολυπαραγοντική αυτή φύση καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση στοχευμένων και προσαρμοσμένων μέτρων για την αποτελεσματική διαχείριση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

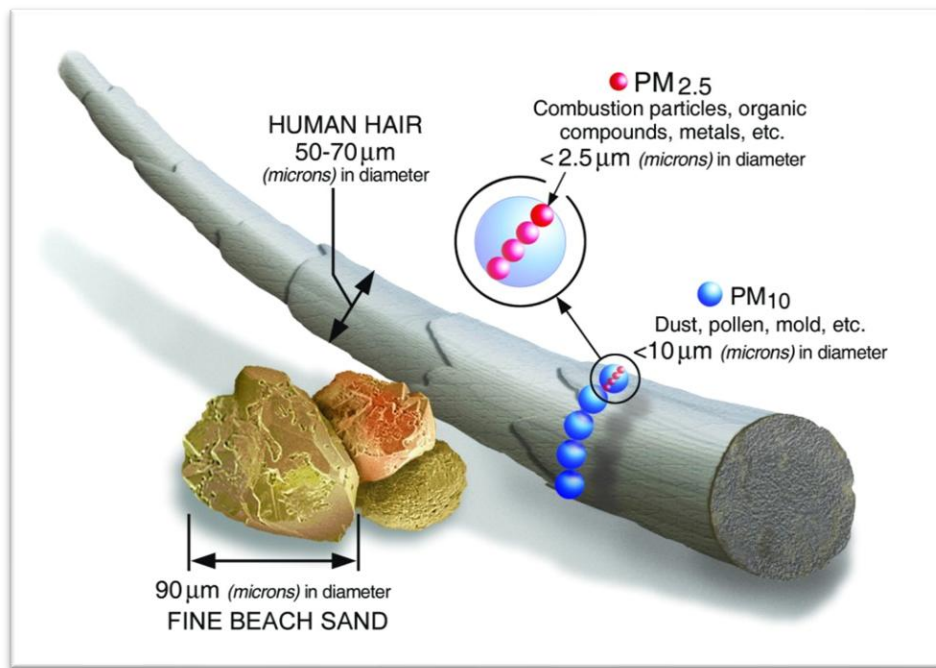


Σχήμα 3.6: Κατανομή συγκεντρώσεων ρύπων στην Ευρώπη: Υπερβάσεις του ορίου των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Πηγή European environment Agency, 2025, Particulate matter (PM_{10})

3.1.2 Αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5}

Μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελούν τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5}. Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter) με διάμετρο 2,5 μm, ανήκουν στην κατηγορία με τα λεπτά σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη ή ίση με 2,5 μm (European environment Agency [EEA],2025). Εξαιτίας της εξαιρετικά μικρής διαμέτρου τους, τα σωματίδια έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τόσο τις αγροτικές όσο τις αστικές περιοχές. (World Health Organization [WHO], 2021).



Σχήμα 3.7: Σχετική σύγκριση μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5}
(Πηγή: Environmental Protection Agency).

Οι κύριες πηγές παραγωγής των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2,5}, είναι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες περιλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων από τα οχήματα, τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τις μονάδες παραγωγής ενέργειας. Αντίστοιχα, στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται οι δασικές πυρκαγιές καθώς και η μεταφορά σκόνης από φυσικές πηγές όπως η Σαχάρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό των σωματιδίων που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, σχηματίζονται στην

ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα δευτερογενών χημικών αντιδράσεων μεταξύ των πρόδρομων αερίων ενώσεων, όπως είναι τα οξείδια του αζώτου(NO_x) και τα διοξείδια του θείου(SO_2), η αμμωνία (NH_3) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) (Seinfeld & Pandis, 2016).

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2,5}$ είναι η ικανότητά τους να εισέρχονται εύκολα στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Αυτό οφείλεται στη μικρή αεροδυναμική διάμετρο τους. Τα σωματίδια μπορούν να παρακάμπτουν τους φυσικούς μηχανισμούς άμυνας του οργανισμού και έχουν τη δυνατότητα να φθάσουν στο κατώτερο αναπνευστικό τμήμα και στις κυψελίδες των πνευμόνων, εννοώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να περάσουν στο συστηματική κυκλοφορία του αίματος (Brook et al., 2010). Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια $\text{PM}_{2,5}$ αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα κινδύνου για την υγεία. Πλήθος επιδημιολογικών μελετών έχει δείξει ότι η έκθεση $\text{PM}_{2,5}$ συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης αναπνευστικών παθήσεων, όπως το άσθμα και η χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, καθώς και καρδιαγγειακών νοσημάτων, όπως το έμφραγμα του μυοκαρδίου και το αγγειακό εγκεφαλικό επεισόδιο. Επιπλέον, η μακροχρόνια έκθεση σχετίζεται με αυξημένη θνησιμότητα και αυξημένο κίνδυνο καρκίνου, κυρίως τους πνεύμονα (Pope & Dockery, 2006; WHO, 2021).

Τα αιωρούμενα σωματίδια $\text{PM}_{2,5}$ σε περιβαλλοντικό επίπεδο, συμβάλλουν σημαντικά στην υποβάθμιση της ατμοσφαιρικής ποιότητας και της ορατότητας, καθώς συμμετέχουν στον σχηματισμό της αιθαλομίχλης, ενώ παράλληλα επηρεάζουν σημαντικά το κλιματικό σύστημα μέσω της αλληλεπίδρασης τους με την ηλιακή ακτινοβολία και με τα νέφη. Επιπλέον, η εναπόθεσή τους στο έδαφος και τα υδάτινα σώματα οδηγεί στη μεταφορά τοξικών ουσιών, με αρνητικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα (IPCC, 2021).

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, οι κατευθυντήριες οδηγίες που έχουν δοθεί για τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2,5}$ αναδεικνύουν ότι ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις ενδέχεται να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές που προτείνει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας στην αναθεώρηση των κατευθυντήριων οδηγιών του το 2021, σύμφωνα με την οποία η ετήσια μέση συγκέντρωση $\text{PM}_{2,5}$ δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η ημερήσια μέση τιμή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2021).

Σε αντίθεση με τις κατευθυντήριες οδηγίες που έχουν δοθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η Ευρωπαϊκή Ένωση εφαρμόζει διαφορετικά ρυθμιστικά όρια για τα PM_{2.5}. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία και συγκεκριμένα η οδηγία 2008/50/EK ορίζει ως ανώτατη ετήσια μέση συγκέντρωση των PM_{2.5} τα 25 µg/m³, χωρίς να προβλέπεται δεσμευτικό ημερήσιο όριο για τα PM_{2.5} (European Union, 2008). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια στην Ευρωπαϊκή Ένωση εγκρίθηκε η νέα οδηγία (ΕΕ) 2024/2881, η οποία προβλέπει τη μείωση της ετήσιας οριακής τιμής στα 10 µg/m³ έως το 2030, με κύριο στόχο την καλύτερη προστασία της δημόσιας υγείας και τη σταδιακή σύγκλιση με τις αυστηρότερες κατευθυντήριες τιμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (European Parliament & Council, 2024).

Πίνακας 3.3: Οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5}, σύμφωνα με τον ΠΟΥ και την Ευρωπαϊκή Ένωση

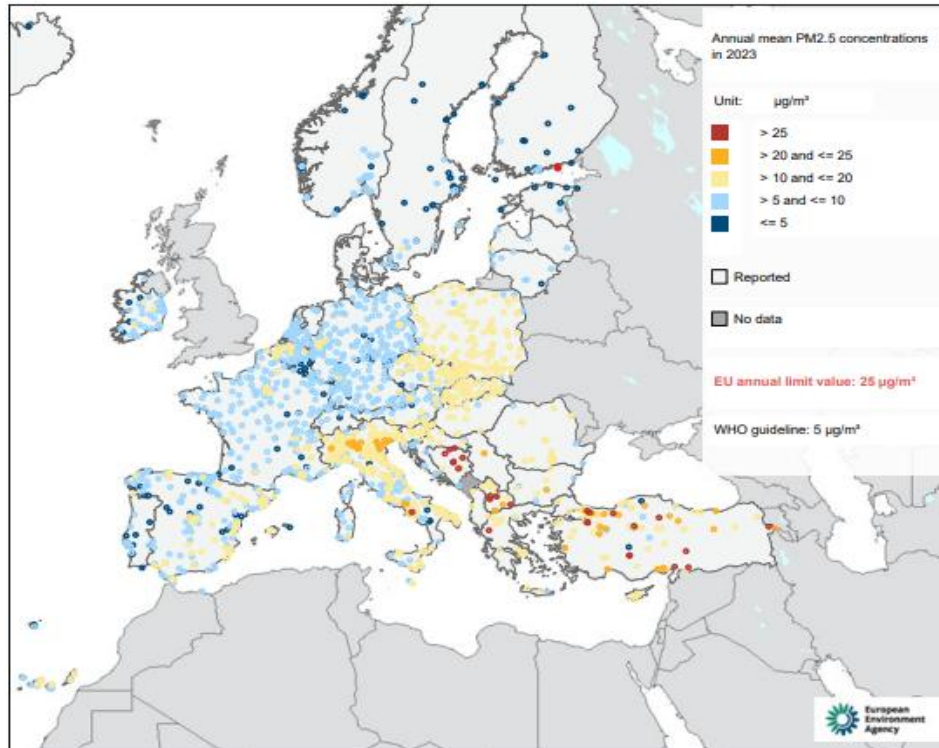
Οργανισμός	Ετήσιο όριο	Ημερήσιο όριο
ΕΕ	25 µg/m ³	Δεν έχει επίσημο ημερήσιο όριο για PM _{2.5}
ΕΕ(νέα οδηγία εφαρμογή από το 2030)	10 µg/m ³	Δεν έχει επίσημο ημερήσιο όριο για PM _{2.5}
ΠΟΥ	5 µg/m ³	15 µg/m ³

Πηγή (WHO, 2021; European Union, 2008)

Στο Σχήμα 3.8, ο χάρτης απεικονίζει τη χωρική κατανομή των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} για το έτος 2023. Η χαρτογράφηση έχει αντλήσει δεδομένα από την πρόσφατη έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (EEA, 2025). Σύμφωνα με τον χάρτη, προκύπτουν οι γεωγραφικές ανισότητες, όσον αφορά την ποιότητα του αέρα μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών. Σύμφωνα με τον χάρτη, ένα μεγάλο μέρος των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (σημεία με μπλε και γαλάζιες αποχρώσεις) παρουσιάζουν μέσες χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τα ετήσια όρια που ορίζει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Ωστόσο, καταγράφονται και οι υπερβάσεις των ορίων, οι οποίες αποτυπώνονται με κόκκινες αποχρώσεις και οι συγκεντρώσεις υπερβαίνουν τα 25µg/m³ , εντοπίζονται κυρίως στη Ανατολική Ευρώπη και στην κοιλάδα του Πάδου στην Ιταλία. Ελάχιστοι σταθμοί που απεικονίζονται με μπλε αποχρώσεις έχουν καταφέρει να επιτύχουν τα όρια 5 µg/m³ του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Αντίθετα,

«Διπλωματική Εργασία»

παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο μέρος της ηπείρου οι συγκεντρώσεις εντοπίζονται στην κλίμακα των 10 -20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, με τους σταθμούς να απεικονίζονται με κίτρινη και κόκκινη απόχρωση. Τα στοιχεία δείχνουν ότι παρά την γενική συμμόρφωση και την προσπάθεια να τηρήσουν τα νομοθετικά όρια η ποιότητα του αέρα εξακολουθεί να μην θεωρείται ασφαλής σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα όπου ορίζει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας. (European Environment Agency 2025).



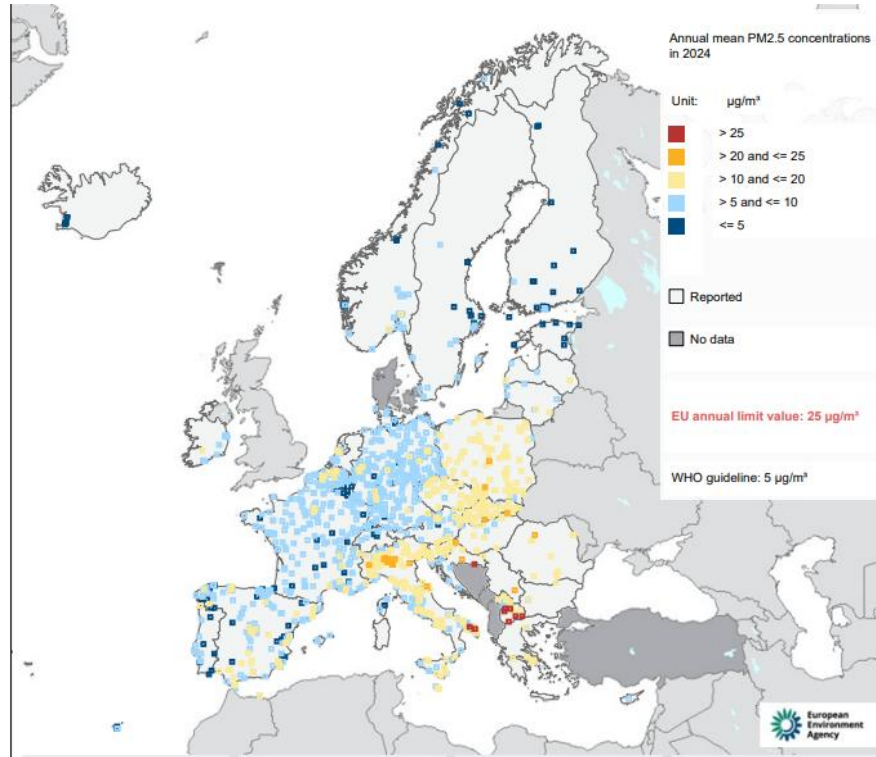
Σχήμα 3.8: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ στην Ευρώπη για το έτος 2023.

Πηγή: European environment Agency, 2025, Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$)

Στο Σχήμα 3.9, απεικονίζεται ο χάρτης της Ευρώπης με μια πρόσφατη προκαταρκτική απεικόνιση της ποιότητας του αέρα, η οποία βασίζεται σε προσωρινά αποτελέσματα του 2024 και αφορά τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις των $\text{PM}_{2.5}$. Σύμφωνα με τον χάρτη, και το 2024 η πλειονότητα των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης παραμένει εντός των ορίων 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά απέχουν σημαντικά από τους στόχους του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, καθώς το προτεινόμενο όριο ανέρχεται στα 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σύμφωνα με τα στοιχεία του χάρτη, αποτυπώνονται περιοχές, όπως η Βόρεια Ιταλία και τμήματα της Ανατολικής Ευρώπης με κόκκινες αποχρώσεις (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) γεγονός που επιβεβαιώνουν την ύπαρξη ενός διαχρονικού προβλήματος σε αυτές

«Διπλωματική Εργασία»

τις περιοχές, με αποτέλεσμα τη συνεχή έκθεση του πληθυσμού σε επιβαρυνμένη ποιότητα αέρα. Από την σύγκριση ανάμεσα στο Σχήμα 3.8 και στο Σχήμα 3.9 δεν καταγράφονται θεαματικές μεταβολές, γεγονός ότι αυτή η εικόνα υποδηλώνει στασιμότητα



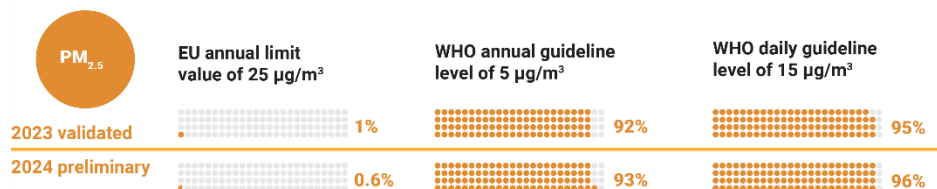
Σχήμα 3.9: Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} στην Ευρώπη για το έτος 2024(προσωρινά δεδομένα).

Πηγή: European environment Agency, 2025,Particulate matter (PM_{2,5})

Στο Σχήμα 3.10, απεικονίζεται το ποσοστό των σταθμών μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2,5} στην Ευρώπη. Παρατηρείται ότι καταγράφηκαν συγκεντρώσεις PM_{2,5} που υπερβαίνουν τόσο τα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσο και των κατευθυντήριων οδηγιών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η συμμόρφωση με τα θεσμοθετημένα όρια δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη επαρκή προστασία της δημόσιας υγείας. Συγκεκριμένα, το 2023 οι σταθμοί κατέγραψαν μόλις το 1% των υπερβάσεων των ετήσιων ορίων της Ε.Ε. Ωστόσο, σύμφωνα με τα προσωρινά αποτέλεσμα του 2024, το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 0,6%, γεγονός που υποδηλώνει υψηλό βαθμό τυπικής συμμόρφωσης με το ισχύον ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο. Όταν τα δεδομένα αξιολογούνται με βάση τα κριτήρια του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας παρατηρείται ότι η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά. Συγκεκριμένα,

το 92–93% των σταθμών υπερβαίνει την ετήσια κατευθυντήρια τιμή των 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ το 95–96% καταγράφει υπερβάσεις της ημερήσιας τιμής των 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σύμφωνα με τα δεδομένα, τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν ανταποκρίνονται στα επίπεδα που θεωρούνται ασφαλή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Επιπλέον, σύμφωνα με τα δεδομένα του 2023, το 85% των σταθμών κατέγραψαν υπερβάσεις των ορίων της Ε.Ε. εντοπίζονται σε αστικές περιοχές, ενώ το 12% σε προαστιακές περιοχές. Αντίστοιχα, όσον αφορά τις κατευθυντήριες τιμές του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας το 62% των υπερβάσεων καταγράφεται σε αστικούς σταθμούς. Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν τη σχέση της σωματιδιακής ρύπανσης και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στα μεγάλα αστικά κέντρα. (European environment Agency, 2025)

Σχήμα 3.10: Ποσοστό των σταθμών παρακολούθησης με συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$ που υπερβαίνουν την ετήσια οριακή τιμή της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τα κατευθυντήρια επίπεδα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.

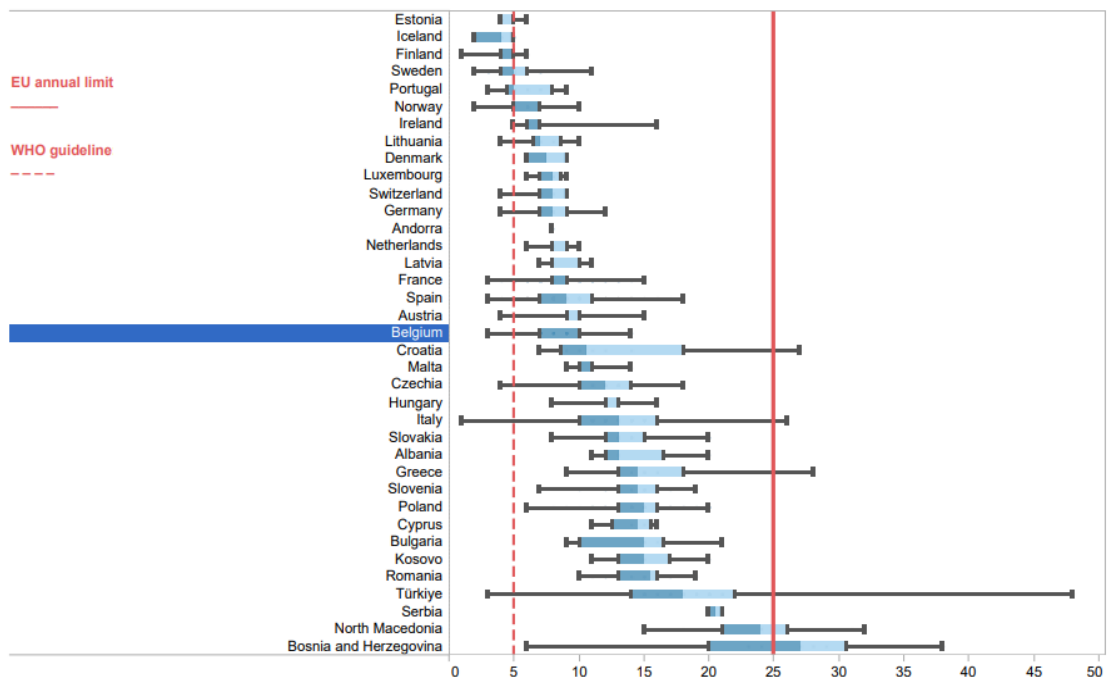


(Πηγή: European environment Agency, 2025, Particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$))

Στο Σχήμα 3.11, απεικονίζεται ένα θηκόγραμμα (box-plot), το οποίο παρουσιάζει τη κατανομή των συγκεντρώσεων $\text{PM}_{2.5}$ για το έτος 2023 ανά χώρα, παρέχοντας μια συγκριτική εικόνα της ατμοσφαιρικής ποιότητας σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

Σύμφωνα με το θηκόγραμμα (box-plot), παρατηρείται εμφανές ότι οι πλειονότητα των κρατών-μελών επιτυγχάνει συμμόρφωση σύμφωνα με τα ετήσια όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, ελάχιστες χώρες όπως είναι η Ισλανδία και Φινλανδία, έχουν καταφέρει να προσεγγίσουν τις αυστηρές κατευθυντήριες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Αντίθετα, χώρες όπως είναι η Ελλάδα, η Πολωνία και η Ιταλία παρατηρείται ότι έχουν υψηλές συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$. Το γεγονός αυτό, αναδεικνύει αυξημένες προκλήσεις

συμμόρφωσης με τα αναμενόμενα αυστηρότερα ευρωπαϊκά πρότυπα που θα τεθούν σε ισχύ μέχρι το 2030.



Σχήμα 3.11: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} ανά χώρα για το έτος 2023 σε σύγκριση με τα όρια της Ε.Ε. και τις οδηγίες του ΠΟΥ.

3.1.3 Αιωρούμενα σωματίδια PM₁

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ (Particulate Matter $\leq 1 \mu\text{m}$), ορίζονται ως τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη ή ίση του 1µm, τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των πολύ λεπτών ή υπέρλεπτων σωματιδίων, αποτελούν το μικρότερο κλάσμα από τις άλλες κατηγορίες. (WHO, 2021; U.S. EPA, 2022).

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁, λόγω της εξαιρετικά μικρής αεροδυναμικής τους διαμέτρου, μπορούν να παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στην ατμόσφαιρα και αποτελούν την πλέον πιο επικίνδυνη κατηγορία από τις υπόλοιπες. Τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ λόγω του μικρού μεγέθους, παρουσιάζουν μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με την μάζα τους, με αποτέλεσμα να έχουν την ικανότητα να συγκρατήσουν στην επιφάνεια τους διάφορες χημικές και οργανικές ενώσεις καθώς και μέταλλα. (Pöschl, 2005). Η επικινδυνότητα τους οφείλεται στην ικανότητα τους να εισέρχονται βαθιά στο

αναπνευστικό σύστημα, να διαπερνούν το φράγμα των κυψελιδοτριχοειδική μεμβρανών και στην συνέχεια να περνούν στην κυκλοφορία του αίματος με αποτέλεσμα να φτάσουν δυνητικά σε κάθε όργανο του ανθρώπινου οργανισμού (Seinfeld & Pandis, 2016). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι, παρά τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις τους που έχει στη δημόσια υγεία, δεν έχουν ακόμα καθοριστεί όρια ασφάλειας από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στην ατμόσφαιρα, η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} αποδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα πηγών εκπομπής, όπου ταξινομούνται τόσο σε φυσικές διεργασίες όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Οι φυσικές πηγές που απελευθερώνουν αιωρούμενα σωματίδια είναι οι ηφαιστειακές εκρήξεις, οι δασικές πυρκαγιές καθώς τα αερολύματα από τον κυματισμό των ωκεανών. Αντίστοιχα, οι κυριότερες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που παράγουν αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} στην ατμόσφαιρα, είναι οι εκπομπές από τις εξατμίσεις των οχημάτων, οι βιομηχανικές μονάδες και τα εργοστάσια, η καύση διάφορων ορυκτών καυσίμων, η καύση απορριμμάτων. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , δεν εκπέμπονται κατευθείαν από την πηγή, αλλά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα όταν αέριοι ρύποι αντιδρούν χημικά μεταξύ τους, για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται ως δευτερογενή σωματίδια. (European Environment Agency, 2023; Seinfeld & Pandis, 2016).

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} αποτελούν ένα σημαντικό αντικείμενο επιστημονικής μελέτης, καθώς επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα και σχετίζονται άμεσα και έμμεσα με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ παράλληλα μπορούν και επιδρούν αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία (Pöschl, 2005).

3.1.3.1 βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα τελευταία χρόνια, τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} έχουν προσελκύσει όλο και περισσότερο το επιστημονικό ενδιαφέρον, καθώς αποτελούν σημαντικό παράγοντα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συνδέονται με σοβαρές επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο στο περιβάλλον. Επιστημονικές μελέτες που έχουν διερευνήσει τα αιωρούμενα σωματίδια ως προς την χημική τους σύσταση, τις πηγές προέλευσης τους, την

συμπεριφορά τους, καθώς και τις επιδράσεις τους στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα (Seinfeld & Pandis, 2016).

Μια από τις σημαντικότερες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας είναι εκείνη των Pateraki et al. (2020), η οποία διερεύνησε τον χημικό χαρακτήρα και την προέλευση των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$ και PM_{10} . Κατά τη διάρκεια της έρευνας πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες σε διάφορες περιοχές της Αθήνας, με κύριο σκοπό την αποτύπωση του μεσογειακού προφίλ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα κύρια αποτελέσματα από την μελέτη έδειξαν ότι τα $PM_{2.5}$ και PM_{10} αποτελούνται από οργανική ύλη (Particulate Organic Matter - POM) και από δευτερογενή ανόργανα αερολύματα (Secondary Inorganic Aerosols - SIA). Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , η μελέτη αναφέρει ότι κύρια πηγή τους είναι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ιδιαίτερα οι διεργασίες καύσης.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} παρουσιάζουν περισσότερο τοξικολογικό ενδιαφέρον, καθώς τα PM_{10} εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων και τοξικολογικών ουσιών σε σχέση με τα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$. Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} λόγω της μικρότερης διάμετρο, καθίστανται επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία διότι μπορούν να εισέλθουν βαθύτερα στο αναπνευστικό σύστημα. Παράλληλα, η μελέτη έδωσε ιδιαίτερη έμφαση και στους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι εντοπίστηκαν προσροφημένοι στην επιφάνεια των PM_{10} . Οι ενώσεις αυτές προέρχονται από την διαδικασία της καύσης όπως εκπομπές από οχήματα, η οικιακή θέρμανση και η καύση βιομάζας. Η συνεχής έκθεση του πληθυσμού σε αυτά τα σωματίδια ενδέχεται να αυξήσει τον κίνδυνο εμφάνισης καρκινογόνων και μεταλλαξιογόνων επιδράσεων λόγω της παρουσίας των PAHs (Pateraki et al., 2020).

Τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο λεκανοπέδιο της Αθήνας, καταδεικνύουν ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες αποτελούν την κυριότερη πηγή αιωρούμενων σωματιδίων και συμβάλλουν σημαντικά στις πιθανές επιπτώσεις του περιβάλλοντος καθώς και στην ανθρώπινη υγεία (Pateraki et al., 2020)

Τον Νοέμβριο του 2020 δημοσιεύθηκε η μελέτη των Stavroulos et al. (2020), στην οποία εξετάζονται τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

Βασικοί στόχοι της μελέτης ήταν η διερεύνηση της χημικής σύστασης, των πηγών προέλευσης και της χωρικής κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} αποτελούνταν από ένα σύνθετο μίγμα που περιλάμβανε τα εξής συστατικά: Οργανικό αεροζόλ (Organic Aerosol - OA), θειικά ιόντα (SO_4^{2-}), Νιτρικά ιόντα (NO_3^-), αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+) και μαύρο άνθρακα. Όσον αφορά τη ανάλυση πηγών προέλευση τους, παρατηρήθηκε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , προέρχονται κυρίως από την κυκλοφορία οχημάτων, την καύση βιομάζας και τις αστικές δραστηριότητες καύσης και το σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων.

Σχετικά με την χωρική και χρονική μεταβλητότητα, παρατηρήθηκε ότι όσο πλησιέστερα στο κέντρο της Αθήνας οι σταθμοί μετρήσης, τόσο πιο υψηλά ήταν τα ποσοστά συγκεντρώσεις των PM_{10} , καθώς απομακρυνόντουσαν από το κέντρο της Αθήνας τόσο τα ποσοστά των συγκεντρώσεων των PM_{10} μειωνόντουσαν. Ωστόσο σημαντικό ρόλο έχει και η εποχικότητα, καθώς την χειμερινή περίοδο τα ποσοστά αυξάνονται λόγω της χρήσης συστημάτων θέρμανσης. Ενώ το καλοκαίρι στον Πειραιά λόγω τις ναυτιλιακής κίνησης αυξάνει τα ποσοστά διότι αποτελεί μια τοπική πηγή. Η μελέτη έδειξε ότι οι μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συγκέντρωση και τη διασπορά των ρύπων. (Stavroulas et al., 2020)

Συμπερασματικά, η μελέτη τόνισε ότι ανθρωπογενείς δραστηριότητες συμβάλλουν σημαντικά στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην Αθήνα, ενώ οι μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διασπορά και τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Stavroulas et al., 2020).

Το 2008 δημοσιεύθηκε στο επιστημονικό περιοδικό Fresenius Environmental Bulletin η μελέτη των Tolis et al. (2008), στην οποία εξέταζαν τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) στην περιοχή της Κοζάνης. Η Κοζάνη αποτελεί μια περιοχή όπου επηρεάζεται έντονα από τα ενεργειακές και άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Βασικός σκοπός της έρευνας ήταν η ανάλυση της χημικής σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων και η διερεύνηση της παρουσίας των πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) οι οποίοι προσροφώνται στην επιφάνειά τους. Η έρευνα ανέδειξε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} προέρχονται κυρίως

από προϊόντα καύσης που περιέχουν οργανικές ενώσεις. Επιπλέον λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους, μπορούν να παραμένουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα και να μεταφέρονται εύκολα σε μεγάλες αποστάσεις.

Μέσω της έρευνας διαπιστώθηκε ότι οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) παράγονται κυρίως κατά την διάρκεια των διεργασιών ατελών καύσης, καθώς ένα σημαντικό ποσοστό ήταν προσκολλημένο στην επιφάνεια των σωματιδίων PM_{10} . Το γεγονός αυτό αποτελεί ιδιαίτερα ανησυχητικό καθώς τα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα, μεταφέροντας μαζί τους τοξικές και δυνητικά καρκινογόνες ενώσεις. Οι πηγές προέλευσης τους, σχετίζονται κυρίως με την καύση λιγνίτη, την παραγωγή ενέργειας, την κυκλοφορία οχημάτων καθώς την οικιακή θέρμανση. Η Κοζάνη έχει πολλές ενεργειακές δραστηριότητες και για αυτό ο αέρας της περιοχής πιθανόν να είναι αρκετά επιβαρυνμένος. (Tolis et al., 2008)

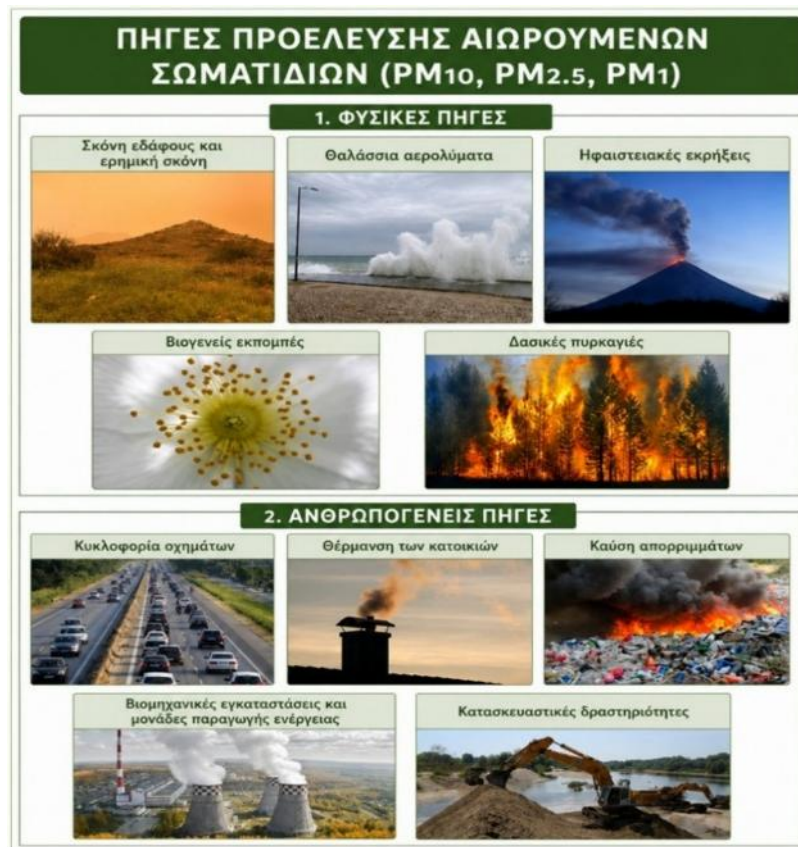
Μέσω της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή ανέδειξε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} περιέχουν σημαντικές ποσότητες πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) και ότι λόγω του μεγέθους τους και της χημικής τους σύστασης αυξάνονται οι πιθανότητες πρόκλησης δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία (Tolis et al., 2008).

Οι Koulouri et al. (2008) πραγματοποίησαν μελέτη στην Ελλάδα, στην οποία εξετάστηκαν τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_{10} . Κύριος στόχος της έρευνας ήταν η αξιολόγηση των συγκεντρώσεών τους σε διαφορετικά περιβάλλοντα, καθώς και η διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν τα επίπεδά τους στην ατμόσφαιρα.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε αστικές και περιφερειακές περιοχές, προκειμένου να εξεταστούν η χρονική μεταβλητότητα και οι χωρικές διαφοροποιήσεις των σωματιδίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, τα PM_{10} παρουσιάζουν αυξημένες συγκεντρώσεις κυρίως στα αστικά κέντρα, γεγονός που αποδίδεται σε διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι τα PM_{10} παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή με τα $PM_{2.5}$, καθώς ανήκουν στο ίδιο φάσμα λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων και προέρχονται από κοινές πηγές ρύπανσης. Τα ευρήματα καταδεικνύουν ότι τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ αποτελούν σημαντικούς κρίσιμους δείκτες αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με κύριες πηγές προέλευση τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες καύσης.

Οι μελέτες που εξετάστηκαν (Koulouri et al., 2008; Tolis et al., 2008; Pateraki et al., 2014, 2020; Stavroulas et al., 2020) καταδεικνύουν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $PM_{2.5}$ αποτελούν σημαντικούς δείκτες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ελλάδα. Παρότι οι περιοχές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι έρευνες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, έχουν έναν κοινό παρονομαστή, ο οποίος είναι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες κυρίως με τις διεργασίες της καύσης και τη κυκλοφορία των οχημάτων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι τα πολύ λεπτά σωματίδια περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικών και τοξικών ενώσεων, όπου επηρεάζονται από τις τοπικές πηγές όσο και από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Επομένως, η διερεύνηση των PM_{10} και $PM_{2.5}$ είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία.

3.2 Πηγές προέλευσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1)



Σχήμα 3.12: Πηγές προέλευσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1). Πηγές EPA, WHO, Google Images και προσωπική επεξεργασία

Κάθε κατηγορία αιωρούμενων σωματιδίων παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά τόσο ως προς στο μέγεθος όσο και ως προς στις διεργασίες σχηματισμού της. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} παράγονται συνήθως από φυσικές και μηχανικές διεργασίες, ενώ τα μικρότερα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ και PM_1 συνδέονται κυρίως με τις διεργασίες καύσης και με τον σχηματισμό δευτερογενών ατμοσφαιρικών αερολυμάτων (Watson & Chow, 2002; Seinfeld & Pandis, 2016).

Οι βασικότερες πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων διακρίνονται στις φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται η σκόνη του εδάφους, και η ερημική σκόνη η οποία μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις, τα θαλάσσια αερολύματα, που αποτελούνται από τα σταγονίδια αλμυρού νερού, τα οποία εκτινάσσονται από τους ανέμους και στην συνέχεια αφήνουν μικροσωματίδια στην ατμόσφαιρα, οι βιογενείς εκπομπές, όπως η γύρη από τα φυτά, τα φυτικά υπολείμματα και οι μικροοργανισμοί, οι ηφαιστειακές εκρήξεις και οι δασικές πυρκαγιές. Οι τελευταίες παράγουν μεγάλες ποσότητες καπνού και άκαυστους υδρογονάνθρακες, καθώς παράγονται παράλληλα και οξείδια του άνθρακα και του αζώτου. Οι ρύποι αυτοί με δυνατούς ανέμους μπορούν να μεταφερθούν σε άλλες περιοχές.

Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην συμβολή των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στην ατμοσφαιρική ρύπανση, καθώς αποτελούν πηγές αιωρούμενων σωματιδίων και ιδιαίτερα για λεπτά σωματίδια $PM_{2.5}$ και PM_1 (Seinfeld & Pandis, 2016). Οι κυριότερες κατηγορίες που υπάγονται στις ανθρωπογενείς πηγές είναι, τα μέσα μεταφοράς και η κυκλοφορία οχημάτων, όπου μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, την φθορά των φρένων και των ελαστικών, καθώς των οδοστρωμάτων αποτελούν σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων. Παράλληλα, μια ακόμη σημαντική πηγή αποτελεί η καύση καυσίμων για την θέρμανση των κατοικιών, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούν βιομάζα και ξύλο, καθώς μπορούν να παραχθούν αυξημένες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων.

Επιπλέον, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι μονάδες παραγωγής ενέργειας απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και άλλων ρύπων όπως βαρέα μέταλλα. Στην κατηγορία των ανθρωπογενών πηγών υπάγονται επίσης και οι κατασκευαστικές δραστηριότητες, οι εξορύξεις και η καύση απορριμμάτων, οι οποίες συνδέονται συνήθως με την παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων

PM₁₀. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αποτελούν σημαντικές πηγές παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, ειδικά στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Η διερεύνηση και η μελέτη των ανθρωπογενών πηγών και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο ώστε να αντιμετωπίσουν την ατμοσφαιρική ρύπανση και για την προστασία του περιβάλλον και της δημόσια υγεία. (Seinfeld & Pandis, 2016; Watson & Chow, 2002).

3.3 Χημική σύσταση

Τα αιωρούμενα σωματίδια, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αιωρούνται στην ατμόσφαιρα και αποτελούνται από ένα μείγμα στέρεων και υγρών σωματιδίων. Η χημική σύσταση τους, διαφοροποιείται σημαντικά, καθώς εξαρτάται τόσο από τις πηγές από τις οποίες προέρχονται, όσο και από ατμοσφαιρικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μετά την απελευθέρωση τους. (WHO, 2021; US EPA).

Τα συστατικά που εντοπίζονται στα αιωρούμενα σωματίδια περιλαμβάνονται διάφορα ανόργανα ιόντα όπως τα θειικά (SO_4^{2-}), τα οποία στην ατμόσφαιρα απελευθερώνονται μετά δευτερογενούς μετατροπής του διοξειδίου του θείου, τα νιτρικά (NO_3^-) τα οποία απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από εκπομπές οχημάτων και μηχανές εσωτερική καύσης, καθώς και τα αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+), τα οποία παράγονται κυρίως από τις αγροτικές δραστηριότητες. Το θαλασινό αλάτι (NaCl) και τα χλωριούχα ιόντα (Cl) μπορούν να εντοπιστούν στα αιωρούμενα σωματίδια (Seinfeld & Pandis, 2016).

Στην κατηγορία των οργανικών συστατικών περιλαμβάνονται ο οργανικός άνθρακας (OC), διάφορες οργανικές ενώσεις, όπως είναι άκαυστοι υδρογονάνθρακες και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), καθώς και ο στοιχειακός άνθρακας. Επιπλέον, μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα μπορούν να δημιουργηθούν και τα δευτερογενή οργανικά αερολύματα (Seinfeld & Pandis 2016).

Ένα ακόμη συστατικό που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από την ατελή καύση ορυκτών καυσίμων και της βιομάζας είναι ο μαύρος άνθρακας. Ο μαύρος άνθρακας έχει την ιδιότητα να απορροφά τη ηλιακή ακτινοβολία και να συμβάλλει στην υπερθέρμανση της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, στα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εντοπιστούν και

βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος (Pb), ο ψευδάργυρος (Zn), το νικέλιο (Ni), ο χαλκός (Cu), το βανδανίο (V), το χρώμιο (Cr) και το κάδμιο (Cd) (WHO, 2021;).

Πέρα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, σημαντική συμβολή στην χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων έχουν και οι φυσικές πηγές. Μέσω της ερημικής σκόνης και της διάβρωσης του εδάφους απελευθερώνονται διάφορα ορυκτά στοιχεία, όπως είναι τα πυριτικά (SiO_2) και τα οξείδια αλουμινίου, του σιδήρου και του ασβεστίου. Αντίστοιχα, τα θαλάσσια αερολύματα έχουν ως κύριο συστατικό το χλωριούχο νάτριο (NaCl), το οποίο σχηματίζεται μέσω της εξάτμισης του θαλασσινού νερού και είναι ιδιαίτερα συχνό σε παράκτιες περιοχές (Seinfeld & Pandis, 2016)

Η μελέτη της χημικής σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι απαραίτητη για την κατανόηση και την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεών τους, τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον.

3.4 Επίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία

Η ποιότητα του αέρα αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία του ανθρώπου αλλά και το περιβάλλον. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν διάφοροι ατμοσφαιρικοί ρύποι, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι υδρογονάνθρακες, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Η υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, αποτελεί πλέον ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό και υγειονομικό πρόβλημα, καθώς ο πληθυσμός είναι καθημερινά εκτεθειμένος στις υψηλές συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων. Σύμφωνα με τις επιστημονικές έρευνες, η έκθεση αυτή έχει συνδεθεί με σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, οι οποίες μπορεί να είναι σοβαρές και μη αναστρέψιμες, καθώς μπορούν να εκδηλώσουν τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες. (World Health Organization 2021;European Environment Agency, 2024).

Τα αιωρούμενα σωματίδια, ανάλογα τη αεροδυναμική διάμετρό τους, μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό και ανάλογα το μέγεθος τους, μπορούν είτε να παραμένουν στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, είτε αν είναι μικρότερα $\text{PM}_{2.5}$ να εισέλθουν στο κατώτερο μέρος του αναπνευστικού και να φτάσουν στις πνευμονικές

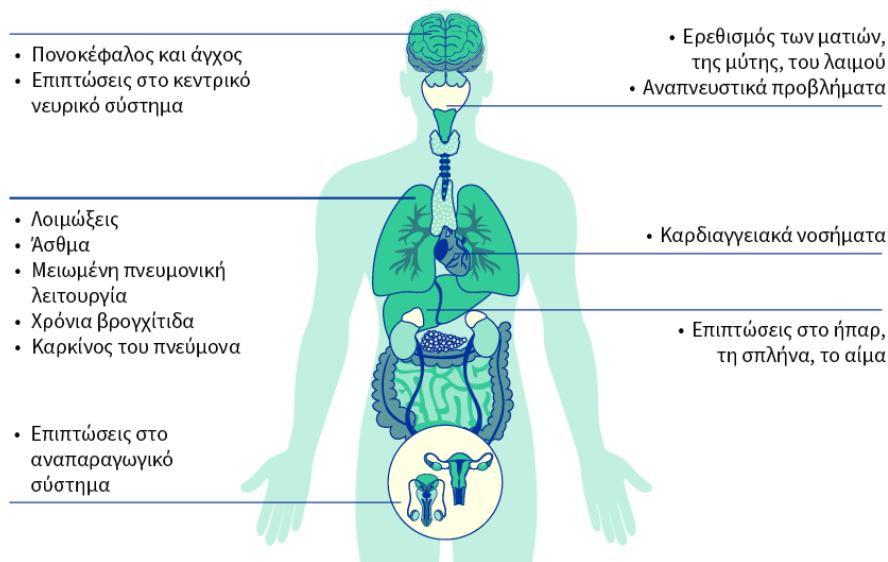
κυψελίδες. Ωστόσο, τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ θεωρούνται ιδιαίτερα επικίνδυνα, καθώς έχουν την δυνατότητα να περάσουν στην κυκλοφορία του αίματος, και στην συνέχεια να επηρεάσουν πολλαπλά συστήματα του οργανισμού (WHO, 2021; European Environment Agency, 2024). Σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι σοβαρές για την ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα κυρίως όσον αφορά το αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα (World Health Organization, 2024),

Η χρόνια έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ έχει συσχετιστεί με αυξημένο κίνδυνο εμφανίσεις καρδιαγγειακών παθήσεων, όπως ισχαιμική καρδιοπάθεια, η υπέρταση και εγκεφαλικά επεισόδια, καθώς τα σωματίδια αυτά προκαλούν οξειδωτικό στρες και φλεγμονώδεις αντιδράσεις στον οργανισμό (Li et al. 2019, Yang et al., 2019)

Μελέτες που έχουν δημοσιευθεί έδειξαν ότι η βραχυχρόνια έκθεση των συγκεντρώσεων PM₁ συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο καρδιαγγειακής θνησιμότητας, καθώς και αυξημένη αναπνευστική νοσηρότητα και θνησιμότητα (Lu et al., 2022). Επιπλέον, οι Hu et al. (2022) έδειξαν ότι η έκθεση στα PM₁ συνδέεται με αυξημένο κίνδυνο ορισμένων αναπνευστικών παθήσεων, όπως το άσθμα και η πνευμονία.

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM έχουν την δυνατότητα να μπορούν να επηρεάσουν το νευρικό σύστημα, αυτό οφείλεται λόγω του μεγέθους τους, τα οποία είναι πολύ μικρά και τους επιτρέπει να μπορούν να διαπεράσουν τους βιολογικούς φραγμούς και να προκαλέσουν νευροφλεγμονή. Επιπλέον, οι επιστημονικές μελέτες αναφέρουν ότι η έκθεση του ανθρώπου στα αιωρούμενα σωματίδια PM σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο εμφανίσεις της άνοιας και διάφορων νευροεκφυλιστικών νοσημάτων, όπως η νόσος Alzheimer (You et al., 2022).

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM αποτελούν μια σοβαρή απειλή για την δημόσια υγεία, καθώς συνδέονται με αναπνευστικά, καρδιαγγειακά και νευρολογικά νοσήματα. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό και κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την βελτίωση της ποιότητας τη ζωής και να μειωθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση.



Σχήμα 3.13: Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία. Πηγή: Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (consilium.europa.eu), Γράφημα για την ατμοσφαιρική ρύπανση στην ΕΕ.

3.5 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον

Η παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αποτελεί έναν από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας, καθώς συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση, στη μείωση της ορατότητας αλλά και στην κλιματική αλλαγή.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν την δυνατότητα να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια των ανέμων, και στην συνέχεια να εναποτίθενται στο έδαφος, στα ύδατα και στην βλάστηση, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τόσο τα οικοσυστήματα όσο και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. (World Health Organization, 2021).

Μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι η μείωση της ορατότητας, καθώς αυτό το φαινόμενο οφείλεται στις υψηλές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων που αιωρούνται και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Στην συνέχεια μπορεί να εμφανιστεί το φαινόμενο της αιθαλομίχλης (smog). Η αιθαλομίχλη εμφανίζεται

έντονα στις βιομηχανικές περιοχές και στις μεγάλες πόλεις. Τα αιωρούμενα σωματίδια και ιδιαίτερα ο μαύρος άνθρακας (Black Carbon - BC), συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς απορρόφα ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας της ατμοσφαιράς.

Παράλληλα, οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων επεκτείνονται στην χλωρίδα και στις γεωργικές καλλιέργειες. Τα σωματίδια να εναποτίθενται στην επιφάνεια των φύλλων και μπορούν να εμποδίζουν την διαδικασία της φωτοσύνθεσης με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ανάπτυξης τους (Grantz et al., 2003).

Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν τοξικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν τα συστατικά τους, στο έδαφος και στο υδάτινο οικοσύστημα επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα των οικοσυστημάτων και τη βιοποικιλότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εναπόθεση των όξινων ενώσεων μπορεί να οδηγήσει σε οξίνιση των λιμνών και των ποταμών, με αποτέλεσμα να επηρεάσει αρνητικά την επιβίωση πολλών οργανισμών (United States Environmental Protection Agency, 2024).

Επιπρόσθετα, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν φθορές σε κτήρια και πολιτιστικά μνημεία. Η επίδραση αυτή οφείλεται κυρίως στα σωματίδια που περιέχουν θεικές και νιτρικές ενώσεις, οι οποίες εναποτίθενται στις επιφάνειες και επιτυγχάνουν στις διαδικασίες τις διάβρωσης και της χημικής αποσάθρωσης. Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, είναι απαραίτητος ο περιορισμός των εκπομπών τους, η ευρύτερη χρήση καθαρών μορφών ενέργειας και η εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος.

3.6 Μέθοδοι μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM

Για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συγκεκριμένα για την μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνικές μέτρησης, οι οποίες χωρίζονται κυρίως σε σταθμικές και οπτικές/ηλεκτρονικές μεθόδους.

3.6.1 Σταθμική μέθοδος (gravimetric method)

Για τη μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων, η σταθμική μέθοδος αποτελεί ένα διεθνές πρότυπο αναφοράς, καθώς χρησιμοποιείται από επίσημους σταθμούς παρακολούθησης και αξιολόγησης ελέγχου της ποιότητας του αέρα. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων, όπου ο αέρας διέρχεται με σταθερή ροή μέσα από ειδικό φίλτρο, στο οποίο συγκρατούνται τα σωματίδια. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τα φίλτρα ζυγίζονται πριν και μετά τη δειγματοληψία υπό ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η μάζα των σωματιδίων. Η διαφορά μάζας, προκύπτει σε συνάρτηση με τον όγκο του αέρα που έχει περάσει από το φίλτρο, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τη συγκέντρωση των PM. Αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο, καθώς χρησιμοποιείται ως πρότυπη μέθοδος αναφοράς από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ.

Ωστόσο παρουσιάζει ορισμένα μειονέκτημα, καθώς δεν παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και απαιτείται μεγάλο χρόνο διάστημα δειγματοληψίας, το οποίο συνήθως ανέρχεται στις 24 ώρες. Επιπλέον, τα φίλτρα έχουν τη δυνατότητα εκτός από τα σωματίδια που συγκρατούν, να συλλέγουν και υγρασία από τον αέρα. Με αποτέλεσμα όταν το φίλτρο ζυγίζεται μετά τη δειγματοληψία, η αύξηση της μάζας μπορεί να οφείλεται εν μέρει στο νερό που έχει απορροφήσει. Για την αποφυγή σφάλματος και λανθασμένων μετρήσεων τα ειδικά φίλτρα τοποθετούνται πριν και μετά τη μέτρηση σε ειδικούς θαλάμους με σταθερή θερμοκρασία και υγρασία ώστε να έχουν ίδιες συνθήκες ζύγισης (Hinds, 1999 ; US EPA, 2019; CEN, EN 12341).

3.6.2 Οπτικές μέθοδοι (light scattering methods)

Η μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων με οπτικές μεθόδους βασίζεται στην αλληλεπίδραση του φωτός με τα σωματίδια που περιέχει ο αέρας. Κατά τη λειτουργία της διαδικασίας, μια φωτεινή δέσμη από laser ή led διέρχεται μέσα από το δείγμα του αέρα, το οποίο περιέχει σωματίδια και αυτά προκαλούν σκέδαση της ακτινοβολίας σε διαφορετικές

κατευθύνσεις. Η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σχετίζεται με το μέγεθος, τον αριθμός καθώς και η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, οι αισθητήρες καταγράφουν αυτή τη μεταβολή, και με τη βοήθεια αλγορίθμων υπολογίζουν τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως των $PM_{2.5}$ και PM_{10} .

Η χρήση των αισθητήρων αυτών γίνεται σε Optical Particle Counters (OPC), τα οποία περιλαμβάνουν τους φορητούς μετρητές, και χρησιμοποιούν επίσης συστήματα παρακολούθησης ρύπανσης στις πόλεις. Το πλεονέκτημα είναι ότι τα δεδομένα παράγονται σε πραγματικό χρόνο και υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης, καθώς σε περίπτωση υψηλών συγκεντρώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης υπάρχει η δυνατότητα να ειδοποιηθούν έγκυρα οι αρχές και, στην συνέχεια να ενημερωθεί το κοινό ώστε να προστατευθεί και να ληφθούν άμεσα μετρά προστασίας .

Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα είναι ότι οι αισθητήρες δεν καταμετρούν άμεσα τη μάζα των σωματιδίων, αλλά εκτιμούν την συγκέντρωση από το πόσο φως σκεδάζουν τα σωματίδια στον αέρα, επομένως απαιτείται βαθμονόμηση (Hinds, 1999; Chow, 1995; Snyder et al., 2013).

3.6.3 Ηλεκτρονικές μέθοδοι TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)

Αποτελεί μια από της πιο εξελιγμένες τεχνικές μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων. Η βασική διαδικασία της μεθόδου αυτής είναι ότι αέρας διέρχεται μέσα από την συσκευή και τα αιωρούμενα σωματίδια συγκεντρώνονται στο φίλτρο το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα λεπτό κωνικό σωλήνα. Η μάζα αυξάνεται λόγω της εναπόθεσης των σωματιδίων, με αποτέλεσμα η συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος να μειώνεται και αυτή, η μεταβολή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης PM σε πραγματικό χρόνο.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η συνεχής καταγραφή δεδομένων με υψηλή χρονική ανάλυση, όπου αποτελεί ιδιαίτερο χρήσιμο εργαλείο για τους σταθμούς παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επιπλέον, παρουσιάζει άμεσα τα

αποτελέσματα και μπορεί να ανιχνεύσει γρήγορες μεταβολές της ρύπανσης. Ωστόσο, το μειονέκτημα είναι ότι η εφαρμογή θερμικής προεπεξεργασίας στη μέθοδο TEOM ενδέχεται να προκαλέσει εξάτμιση πτητικών ενώσεων, οδηγώντας σε συστηματική υποεκτίμηση της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων. Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία των μετρήσεων ενισχύεται μέσω κατάλληλων διορθώσεων ή και συνδυαστικής χρήσης με άλλες αναλυτικές τεχνικές. (Allen et al., 2001; US EPA, 2016; Seinfeld & Pandis, 2016)

3.6.4 Ηλεκτρονική μέθοδος BAM (Beta Attenuation Monitor)

Η ηλεκτρονική μέθοδος BAM, αποτελεί μια διαδεδομένη τεχνική για τη μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων. Η βασική λειτουργία της, στηρίζεται στην εξασθένηση της ακτινοβολίας βήτα (β) όταν αυτή διαπερνά μέσα από ένα φίλτρο στο οποίο έχουν συγκεντρωθεί αιωρούμενα σωματίδια.

Στην αρχή ένα δείγμα αέρα περνά μέσα από το ειδικό φίλτρο, το οποίο συγκρατεί τα αιωρούμενα σωματίδια. Στη συνέχεια, μια πηγή ακτινοβολία βήτα εκπέμπει μια ακτινοβολία μέσω του φίλτρου και ο ανιχνευτής μετρά την μείωση της έντασης της ακτινοβολίας η οποία προκαλείται από τη μάζα των σωματιδίων. Η μείωση της ακτινοβολίας είναι η ανάλογη μάζα των σωματιδίων που έχουν συγκρατηθεί στο φίλτρο. Η συσκευή έχει τη δυνατότητα να μέτρα και να μπορεί να υπολογίζει την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και στην συνέχεια να παρέχει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Η ηλεκτρονική μέθοδος BAM χρησιμοποιείται σε επισήμους σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα, η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να επηρεαστεί από την υγρασία, καθώς τα υγροσκοπικά σωματίδια μπορούν να αυξήσουν τεχνητά τη μετρούμενη μάζα. Επιπλέον, η παρουσία ραδιενεργού πηγής βήτα απαιτεί αυστηρά μέτρα ασφαλείας και ειδική συντήρηση του εξοπλισμού.

3.7. Θεσμικό και Νομοθετικό Πλαίσιο για τα Αιωρούμενα Σωματίδια

Για την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος η νομοθεσία έχει θεσπίσει οριακές τιμών για τις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι σχετικές

νομοθετικές ρυθμίσεις, προέρχονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) εκδίδει κατευθυντήριες οδηγίες για την προστασία της δημοσίας υγείας. Κάθε κράτος-μέλος είναι υποχρεωμένο να εφαρμόζει τη νομοθεσία και παράλληλα να αναπτύσσει συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου της ποιότητας του αέρα.

Οι πρώτες προσπάθειες περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εφαρμόστηκαν μετά από σοβαρά επεισόδια που πραγματοποιήθηκαν κατά τον 20ό αιώνα, όταν η αιθαλομίχλη καταγράφηκε σε μεγάλες βιομηχανικές πόλεις της Ευρώπης και των Ηνωμένων Πολιτειών. Επιπλέον, ακόμα ένα σημαντικό επεισόδιο που πραγματοποιήθηκε το 1952, ήταν με την Μεγάλη Αιθαλομίχλη του Λονδίνου (Great Smog of London) η οποία προκάλεσε χιλιάδες θανάτους, καθώς ανέδειξε την ανάγκη για λήψη μέτρων βελτίωσης της ποιότητας του αέρα (World Health Organization [WHO], 2021).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλοι διεθνείς οργανισμοί άρχισαν να θεσπίζουν νομοθεσία για την παρακολούθηση και τον περιορισμό των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ένα από τα σημαντικότερα βήματα σε Ευρωπαϊκό επίπεδο αποτέλεσε η Οδηγία 96/62/EK, η οποία αποτέλεσε το πρώτο ολοκληρωμένο πλαίσιο για την αξιολόγηση και την διαχείριση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα.

Στην συνέχεια της οδηγίας 96/62/EK, ακολουθεί η έκδοση της οδηγίας 1999/30/EK, η οποία καθόρισε για πρώτη φορά αυστηρά όρια τιμών για τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀. Συγκεκριμένα, θεσπίστηκε το ετήσιο όριο 40 µg/m³ και το ημερήσιο όριο 50 µg/m³, με δικαίωμα υπέρβασης έως 35 φορές το χρόνο. Οι τιμές αυτές αποτέλεσαν την βάση για αρκετές δεκαετίες.

Μια σημαντική Οδηγία είναι 2008/50/EK, σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και το καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη, η οποία ενσωματώθηκε και στην ελληνική νομοθεσία μέσω της Κοινής Υπουργικής Απόφασης Η.Π. 14122/549/2011. Η οδηγία αυτή, κωδικοποίησε και ενοποίησε όλες τις υπάρχουσες διατάξεις σε ένα ενιαίο νομοθετικό πλαίσιο. Παράλληλα, διατήρησε τα όρια των PM₁₀, σε ημερήσιο όριο 50 µg/m³, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνιέται περισσότερες από 35 φορές ανά έτος, καθώς και τα ετήσια όρια 40 µg/m³, επιπλέον, για πρώτη φορά καθορίστηκαν ετήσια όρια τιμών των PM_{2,5} με συγκέντρωση 25 µg/m³. Παράλληλα, θεσμοθετήθηκαν υποχρεώσεις για την συνεχή

παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και την ενημέρωση του κοινού σε περιπτώσεις υπερβάσης οριακών τιμών (European Parliament & Council of the European Union, 2008).

Το 2015 εκδόθηκε η οδηγία (ΕΕ) 2015/1480, η οποία αφορά τη διασφάλιση Ποιότητας των μετρήσεων και καθορίζει, σχετικά με τις απαιτήσεις που αφορά την χωροθέτηση των σταθμών παρακολούθησης, τις οδηγίες για την δειγματοληψία, καθώς και την μέθοδο και την διαδικασία τη βαθμονόμηση των οργάνων.

Η πιο πρόσφατη οδηγία είναι σε εξέλιξη είναι η νέα Αναθεωρημένη Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του αέρα με την Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881. Στόχος είναι επίτευξη μηδενικής ρύπανσης (Zero Pollution) έως το 2050. Ψηφίστηκε και εκδόθηκε το 2024, και τα κράτη-μέλη έχουν προθεσμία έως τον Δεκέμβριο του 2026, για να την ενσωματώσουν στο εθνικό τους δίκαιο. Με την νέα οδηγία, μειώνει δραστικά τα όρια έως το 2030, προσεγγίζοντας τα αυστηρά κριτήρια του Παγκοσμίου οργανισμού υγείας. Επιπλέον, εισάγει για πρώτη φορά την ενισχύει παρακολούθησης των υπερλεπτών σωματιδίων (UFP / PM_{0.1}), τα οποία ανιχνεύονται κυρίως με προηγμένες ηλεκτρονικές και οπτικές μεθόδους μέτρησης (Οδηγία 2024/2881/ΕΕ, 2024).

Στην Ελλάδα, η ευρωπαϊκή οδηγία έχει ενσωματωθεί στην εθνική νομοθεσία μέσω της Κοινής Υπουργικής Απόφασης Η.Π. 14122/549/Ε.103/2011, η οποία καθορίζει τα μέτρα για την αξιολόγηση και τη διαχείριση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σε συνεργασία με τα εθνικά και περιφερειακά δίκτυα σταθμών παρακολούθησης, είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και την ενημέρωση του κοινού σε περιπτώσεις υπέρβασης των οριακών τιμών.

Παράλληλα, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), έχει προτείνει αυστηρότερες κατευθυντήριες οδηγίες για την προστασία της δημόσιας υγείας. Σύμφωνα με τις οδηγίες του 2021, η ετήσια μέση συγκέντρωση των PM_{2.5} δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5 µg/m³, ενώ για τα PM₁₀ το αντίστοιχο όριο είναι 15 µg/m³. Οι τιμές αυτές είναι χαμηλότερες από τα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς βασίζονται σε νεότερα επιστημονικά δεδομένα σχετικά με τις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία (World Health Organization [WHO], 2021).

Η εφαρμογή της νομοθεσίας πραγματοποιείται μέσω δικτύων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, τα οποία χρησιμοποιούν σταθμικές και ηλεκτρονικές μεθόδους μέτρησης για την καταγραφή των συγκεντρώσεων PM. Σε περιπτώσεις υπέρβασης των οριακών τιμών, οι αρμόδιες αρχές μπορούν να εφαρμόσουν μέτρα περιορισμού της κυκλοφορίας, ελέγχου βιομηχανικών εκπομπών και ενημέρωσης των πολιτών, ιδιαίτερα των ευπαθών ομάδων του πληθυσμού.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία - Ανάλυση δεδομένων

4.1 Μεθοδολογία της ερευνάς

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η ερευνητική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με εμφάνιση στην εκτίμηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} σε ελληνικές πόλεις. Η μελέτη βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από περιβαλλοντικούς σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και παραχωρήθηκαν από τον επιβλέποντα καθηγητή.

Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται η ερευνητική προσέγγιση, τα χαρακτηριστικά του συνόλου δεδομένων, η διαδικασία επεξεργασίας των μετρήσεων, καθώς και οι στατιστικές και γραφικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των συγκεντρώσεων PM_{10} . Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται και οι περιορισμοί της έρευνας καθώς και οι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε ποσοτική ερευνητική μεθοδολογία, καθώς πραγματοποιείται ανάλυση αριθμητικών δεδομένων συγκεντρώσεων PM_{10} . Η χρήση ποσοτικών δεδομένων επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη διερεύνηση των χρονικών μεταβολών των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα προέρχονται από ωριαίες περιβαλλοντικές μετρήσεις διάρκειας εντός ενός έτους, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν μέσω των σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα σε ελληνικές πόλεις. Συγκεκριμένα, το αρχείο παραχωρήθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή σε μορφή αρχείου Excel και περιλαμβάνει μετρήσεις και δεδομένα από έξι διαφορετικούς περιβαλλοντικούς σταθμούς στην Ελλάδα: Αθήνα (Μαρούσι), Πάτρα (Αγυία), Χαλκίδα (Δεξαμενή), Κόρινθος, ΚΑΠΗ Τριλόφου και 4ο Γυμνάσιο Αγρίνιου. Το σύνολο δεδομένων αποτελείται από 8.760 ωριαίες καταγραφές, αριθμός που αντιστοιχεί στις ώρες ενός ημερολογιακού έτους ($24 \text{ ώρες} \times 365 \text{ ημέρες}$). Οι μετρήσεις αφορούν συγκεντρώσεις PM_{10} και

συνοδεύονται από χρονική σήμανση ημερομηνίας και ώρας, καθώς και πληροφορίες σχετικά από ποιο περιβαλλοντικό σταθμό προέρχονται. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, την ανάλυση της χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων PM_{10} , τη διερεύνηση εποχικών διαφοροποιήσεων, την ανίχνευση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης και τη μελέτη του ημερήσιου κύκλου των συγκεντρώσεων.

Η επεξεργασία των δεδομένων υλοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια, με κύριο στόχο τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ορθότητας των αποτελεσμάτων. Αρχικά πραγματοποιήθηκε έλεγχος ποιότητας των δεδομένων, ακολούθησε οι μετατροπή των ημερομηνιών σε κατάλληλη μορφή ώστε να είναι δυνατή η χρονική ανάλυση των δεδομένων. Ακολουθεί, η στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων PM_{10} , υπολογίστηκαν οι ακόλουθοι δείκτες: μέση τιμή, διάμεσος, ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή και τυπική απόκλιση. Οι δείκτες που αναλύθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την για την αξιολόγηση της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων PM_{10} και για τη διερεύνηση πιθανών επεισοδίων αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η χρονική και εποχική ανάλυση των δεδομένων μέσω υπολογισμού μηνιαίων μέσων όρων, του υπολογισμού εποχικών μέσων όρων, της ανάλυσης του ημερήσιου κύκλου, και της διερεύνησης ακραίων επεισοδίων ρύπανσης.

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν διάφορα γραφήματα και διαγράμματα, όπως χρονοσειρές συγκεντρώσεων PM_{10} , γραφήματα μηνιαίων και εποχικών μέσων όρων, boxplots ανά μήνα, ιστογράμματα κατανομής τιμών, και γραφήματα ημερήσιας μεταβολής των συγκεντρώσεων. Τα γραφήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τη διάρκεια του έτους και για την ανάδειξη πιθανών προτύπων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Η μελέτη χρησιμοποιεί δεδομένα χρονικής διάρκειας ενός μόνο έτους, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα εξαγωγής μακροχρόνιων συμπερασμάτων σχετικά με τις τάσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παράλληλα, οι συγκεντρώσεις PM_{10} επηρεάζονται σημαντικά από εξωτερικούς παράγοντες, όπως: οι καιρικές συνθήκες, η θερμοκρασία, η

υγρασία, η ένταση του ανέμου, η κυκλοφορία οχημάτων και οι δραστηριότητες θέρμανσης, οι οποίοι πιθανών να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης

4.2 Περιγραφική στατιστική ανάλυση των PM₁

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υλοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων PM₁ σε έξι διαφορετικές περιοχές, καθώς σε κάθε περιοχή υπολογίστηκαν βασικά περιγραφικά στατιστικά μέτρα, τα οποία περιλαμβάνουν τη μέση τιμή, τη διάμεσο, την ελάχιστη και μέγιστη τιμή, καθώς και τη τυπική απόκλιση. Στο Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάθε πόλης, καθώς προβάλλεται μια πρώτη εικόνα της χωρικής μεταβολής των συγκεντρώσεων των πολύ λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων και επιτρέποντας τη σύγκριση των επιπέδων ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης μεταξύ των διαφορετικών αστικών και περαστικών περιοχών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1, η υψηλότερη μέση συγκέντρωση PM₁ καταγράφηκε στον σταθμό μέτρησης της περιοχής ΚΑΠΗ Τριλόφου (8,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επιβάρυνση από τα πολύ λεπτά αιωρούμενα σωματίδια. Υψηλές μέσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στη Δεξαμενή Χαλκίδας (7,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και στην Κόρινθο (7,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ χαμηλότερες τιμές καταγράφηκαν στην Αγυιά Πατρών (6,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και στο 4ο Γυμνάσιο Αργινίου (6,54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Αντίθετα, στην περιοχή του Αμαρουσίου καταγράφηκε η χαμηλότερη με την μέση τιμή (4,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), το γεγονός αυτό υποδηλώνει μικρότερη επιβάρυνση των PM₁ στην ποιότητα αέρα συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές.

Η σύγκριση των διάμεσων τιμών οδηγεί σε παρόμοια συμπεράσματα. Η υψηλότερη διάμεσος PM₁ παρατηρήθηκε στον ΚΑΠΗ Τριλόφου (6,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ η χαμηλότερη στο Μαρούσι (3,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Αξιοσημείωτο είναι ότι σε όλες τις περιοχές η διάμεσος είναι μικρότερη από τη μέση τιμή, το γεγονός αυτό υποδηλώνει θετική ασυμμετρία στις κατανομές των δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁ παραμένουν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων. Η μέση τιμή επηρεάζεται σημαντικά από τα μεμονωμένα επεισόδια πολύ υψηλών συγκεντρώσεων.

Οι ελάχιστες τιμές για όλες τις περιοχές ήταν ίσες με $(0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3)$. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη διάρκεια της μελέτης σημειώθηκαν χρονικές φάσεις, με ιδιαίτερα περιορισμένη ατμοσφαιρική ρύπανση, και οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM_{10} προσέγγισαν μηδενικά επίπεδα .

Αντίθετα, σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρήθηκαν στις μέγιστες τιμές. Η Αγυιά Πατρών κατέγραψε τη μεγαλύτερη μέγιστη συγκέντρωση ($198,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), η οποία είναι σχεδόν διπλάσια από τη δεύτερη υψηλότερη τιμή που καταγράφηκε στο 4ο γυμνάσιο Αγρινίου ($140,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ακολουθούν η Δεξαμενή Χαλκίδας με μέγιστη τιμή ($100,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), το ΚΑΠΗ Τριλόφου με ($64,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) και η Κόρινθος με ($59,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ στο Μαρούσι η μέγιστη τιμή περιορίστηκε στα ($38,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι υψηλότερες μέγιστες συγκεντρώσεις, που παρατηρούνται στην Πάτρα και στο Αγρίνιο αποτελούν ένδειξη εμφάνισης έντονων επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα οποία ενδέχεται να συνδέονται με αυξημένη κυκλοφορία οχημάτων, καύση βιομάζας για θέρμανση ή δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων.

Η τυπική απόκλιση χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων PM_{10} . Η μεγαλύτερη τιμή καταγράφηκε στη Χαλκίδα ($8,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$), το γεγονός αυτό οφείλεται σε σημαντικές διακύμανσης των συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης. Ακολουθούν η Αγυιά Πατρών ($7,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$), το ΚΑΠΗ Τριλόφου ($7,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) και το 4ο γυμνάσιο Αγρινίου ($7,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Αντίθετα, το Μαρούσι παρουσίασε την μικρότερη τυπική απόκλιση ($2,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$), το γεγονός αυτό υποδηλώνει μεγαλύτερη σταθερότητα των συγκεντρώσεων και περιορισμένες ακραίες διακυμάνσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της Αγυιάς Πατρών. Παρότι η μέση συγκέντρωση δεν είναι η υψηλότερη μεταξύ των περιοχών μελέτης, η εξαιρετικά υψηλή μέγιστη τιμή των ($198,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) υποδηλώνει την παρουσία μεμονωμένων αλλά ιδιαίτερα έντονων επεισοδίων ρύπανσης. Ωστόσο, παρόμοια εικόνα εμφανίζεται και στο Αγρίνιο, όπου η μέγιστη συγκέντρωση έφθασε τα ($140,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι διαφοροποιήσεις αυτές καταδεικνύουν ότι η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στις μέσες τιμές, αλλά θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τις ακραίες τιμές, καθώς και την μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ότι το ΚΑΠΗ Τριλόφου, η Δεξαμενή Χαλκίδας και η Κόρινθος παρουσιάζουν τα υψηλότερα μέσα επίπεδα PM_{10} , ενώ το Μαρούσι εμφανίζει τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση και μεγαλύτερη σταθερότητα των τιμών. Αντίθετα, η Αγυιά Πατρών και το 4ο γυμνάσιο Αγρίνιου, χαρακτηρίζονται από έντονα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων, τα οποία πιθανώς οφείλονται σε τοπικές πηγές εκπομπών και συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες. Η περαιτέρω χρονική ανάλυση που ακολουθεί αναμένεται να αναδείξει τα εποχικά και ημερήσια πρότυπα μεταβολής των συγκεντρώσεων PM_{10} στις εξεταζόμενες περιοχές.

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά στατιστικά στοιχεία (Μέση τιμή, Διάμεσος, Ελάχιστο, Μέγιστο, Τυπική Απόκλιση) των σωματιδίων (PM_{10}) στις έξι περιοχές.

	ΑΓΥΙΑ, ΠΑΤΡΩΝ	ΔΕΞΑΜΕΝΗ, ΧΑΛΚΙΔΑ	ΜΑΡΟΥΣΙ, ΑΘΗΝΑ	ΚΟΡΙΝΘΟΣ	ΚΑΠΗ ΤΡΙΛΟΦΟΥ	4Ο ΓΥΜΝΑΣΙΟ ΑΓΡΙΝΙΟΥ
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	6.23	7.48	4.31	7.14	8.54	6.54
ΔΙΑΜΕΣΟ	4.50	4.90	3.70	5.00	6.20	4.60
MIN	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
MAX	198.20	100.80	38.10	59.40	64.10	140.20
STD (ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ)	7.65	8.54	2.97	6.98	7.55	7.53

4.3 Χρονική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10}

Στην παρούσα υποενότητα πραγματοποιείται χρονική ανάλυση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στις έξι περιοχές μελέτης. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι η διερεύνηση της χρονικής μεταβλητότητας των επιπέδων του ρύπου, καθώς και ο εντοπισμός πιθανών εποχικών τάσεων και επαναλαμβανόμενων προτύπων μεταβολής. Η χρονική ανάλυση αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των PM_{10} , όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες και οι τοπικές πηγές εκπομπών.

Για κάθε πόλη κατασκευάστηκαν χρονοσειρές ημερήσιων ή ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} , με σκοπό την αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης του ρύπου κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Επιπλέον, υπολογίστηκαν και απεικονίστηκαν οι μέσες

μηνιαίες και εποχικές συγκεντρώσεις, προκειμένου να διερευνηθούν πιθανές μεταβολές που σχετίζονται με τις εποχές του έτους και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Παράλληλα, κατασκευάστηκαν διαγράμματα τύπου boxplot για κάθε μήνα και για κάθε περιοχή, με βασικό στόχο την αξιολόγηση της διασπορά των δεδομένων και τον εντοπισμό πιθανών ακραίων τιμών. Μέσω της ανάλυσης των παραπάνω γραφικών παραστάσεων, εξετάζεται η ύπαρξη χειμερινών εξάρσεων των συγκεντρώσεων PM_{10} , η σταθερότητα των επιπέδων του ρύπου μεταξύ των διαφορετικών πόλεων, καθώς και η παρουσία σαφών εποχικών προτύπων μεταβολής.

Με την διερεύνηση της χρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων PM_{10} συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που επηρεάζουν την παρουσία των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες για τον εντοπισμό περιόδων αυξημένης ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης και την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα στις εξεταζόμενες περιοχές.

4.3.1 Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} στις έξι πόλεις

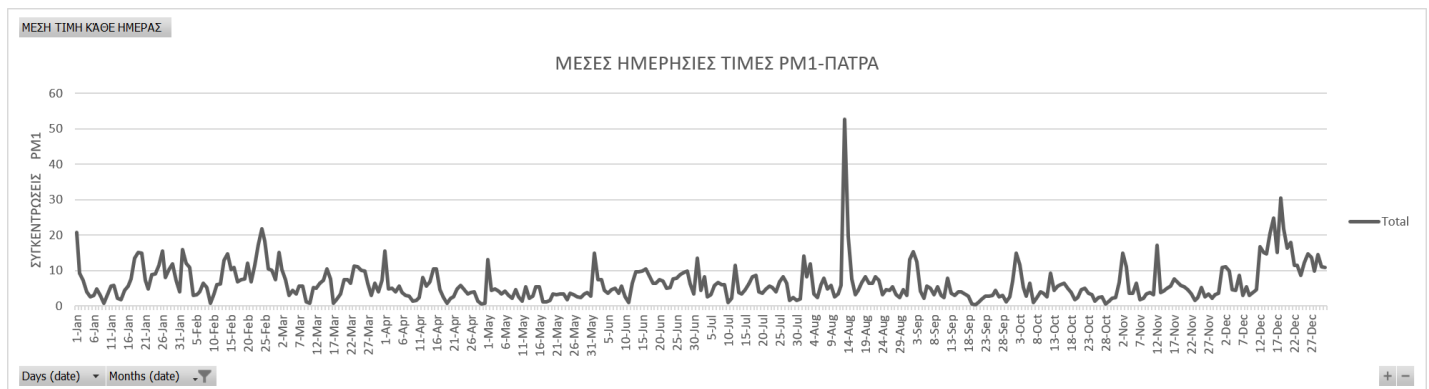
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των ημερήσιων και ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} για καθεμία από τις έξι εξεταζόμενες πόλεις ξεχωριστά. Μέσω των διαγραμμάτων καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της εξέλιξης των συγκεντρώσεων PM_{10} κατά την εξεταζόμενη περίοδο, καθώς και ο εντοπισμός χρονικών διαστημάτων με αυξημένα ή μειωμένα επίπεδα του ρύπου.

Η ανάλυση των χρονοσειρών συμβάλλει στην ανάδειξη των τάσεων, των εποχικών διακυμάνσεων και των βραχυπρόθεσμων μεταβολών των συγκεντρώσεων PM_{10} . Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης της συμπεριφοράς των σωματιδίων PM_{10} μεταξύ των εξεταζόμενων πόλεων, διευκολύνοντας την κατανόηση των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται ως προς τη χρονική εξέλιξη και τα επίπεδα συγκέντρωσης του ρύπου, καθώς και τον εντοπισμό επεισοδίων αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των συγκεντρώσεων PM_{10} για καθεμία από τις έξι εξεταζόμενες πόλεις.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ στην περιοχή της Αγυιάς Πατρών, για το σύνολο του έτους, με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παρατηρείται ότι κατά τους ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες οι συγκεντρώσεις PM₁ διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, κυμαινόμενες μεταξύ 1,00 και 10,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συμπεριφορά αυτή αντανακλά τις τυπικές συνθήκες του αστικού υποβάθρου της πόλης και υποδηλώνει περιορισμένη επίδραση έντονων πηγών εκπομπών. Ωστόσο, τον Αύγουστο καταγράφηκε μία εξαιρετικά έντονη έξαρση των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα, στις 13 Αυγούστου καταγράφηκε μέγιστη ωριαία τιμή 198,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 07:00 π.μ., ενώ στις 14 Αυγούστου η συγκέντρωση έφθασε τα 97,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 03:00 π.μ. Το επεισόδιο αυτό ενδέχεται να συνδέεται άμεσα με τις μεγάλες και καταστροφικές δασικές πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν στην Πάτρα και τη Δυτική Αχαΐα στα μέσα Αυγούστου του 2025, οι οποίες επιβάρυναν σημαντικά την ατμόσφαιρα με λεπτά σωματίδια από καύσεις.

Κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρείται μία δεύτερη αξιοσημείωτη αύξηση των συγκεντρώσεων, με χαρακτηριστικότερη την έξαρση που καταγράφηκε στα μέσα Δεκεμβρίου. Ειδικότερα, στις 18 Δεκεμβρίου η μέγιστη ωριαία συγκέντρωση ανήλθε στα 58,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Παράλληλα, κατά την περίοδο Ιανουαρίου–Φεβρουαρίου καταγράφονται συχνότερες αλλά ηπιότερες εξάρσεις, με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 10,00 και 20,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική των αστικών περιοχών κατά τη χειμερινή περίοδο και αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη χρήση συστημάτων θέρμανσης και στην καύση βιομάζας (τζάκια και σόμπες).



Σχήμα 4.1: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Πάτρα

Επιπλέον, οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά την χειμερινή περίοδο, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και η περιορισμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη, ευνοούν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, οδηγώντας σε αυξημένες συγκεντρώσεις PM_{10} .

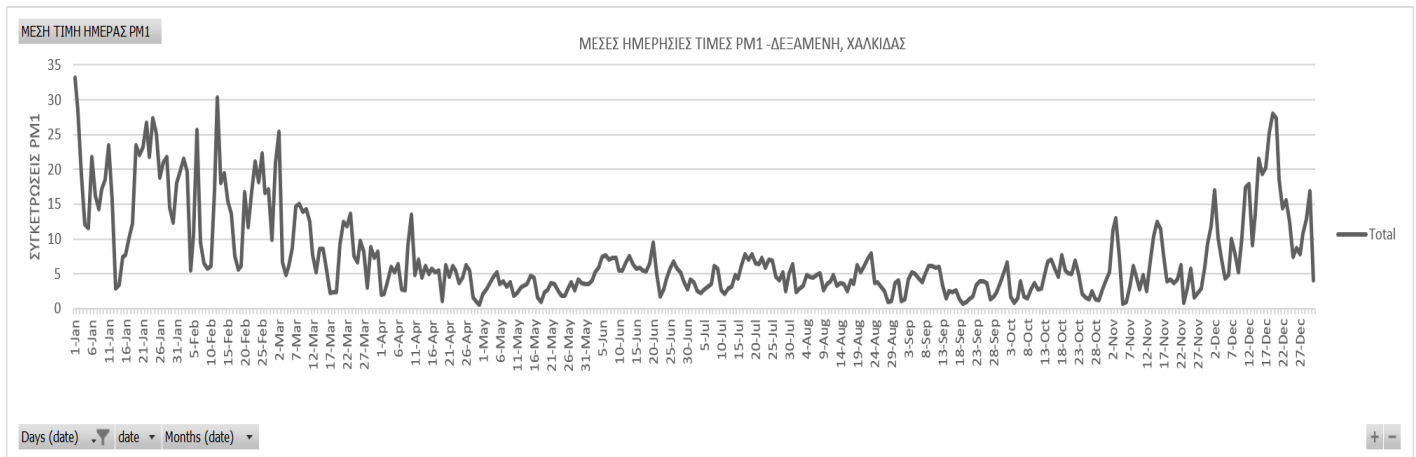
Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην πόλη της Χαλκίδας για το σύνολο του έτους, με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu g/m^3$.

Παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} εμφανίζουν έντονη εποχική διακύμανση, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο. Συγκεκριμένα, τον Ιανουάριο η μέγιστη μέση ημερήσια συγκέντρωση ανήλθε στα $33,20 \mu g/m^3$, ενώ η ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε ήταν $4,06 \mu g/m^3$. Επιπλέον, 1η Ιανουαρίου στις 00:00 καταγράφηκε ωριαία τιμή $68,3 \mu g/m^3$, ενώ στις 24 Ιανουαρίου στις 22:00 η συγκέντρωση έφθασε τα $81,9 \mu g/m^3$, αποτελώντας τη μέγιστη ωριαία τιμή που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του έτους. Συνολικά, οι ωριαίες συγκεντρώσεις κυμάνθηκαν από περίπου $2,00 \mu g/m^3$ έως $81,90 \mu g/m^3$.

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις κατά την χειμερινή περίοδο οφείλεται κυρίως στις εκπομπές από την λειτουργία συστημάτων θέρμανσης και στην καύση βιομάζας. Παράλληλα, οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη χειμερινή περίοδο, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και η περιορισμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη, συμβάλλουν σημαντικά στη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, οδηγώντας σε αυξημένα επίπεδα PM_{10} .

Αντίθετα, κατά τους ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες οι συγκεντρώσεις PM_{10} διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με τις μέσες ημερήσιες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ $1,00 \mu g/m^3$ και $9,48 \mu g/m^3$. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει περιορισμένη επιρροή

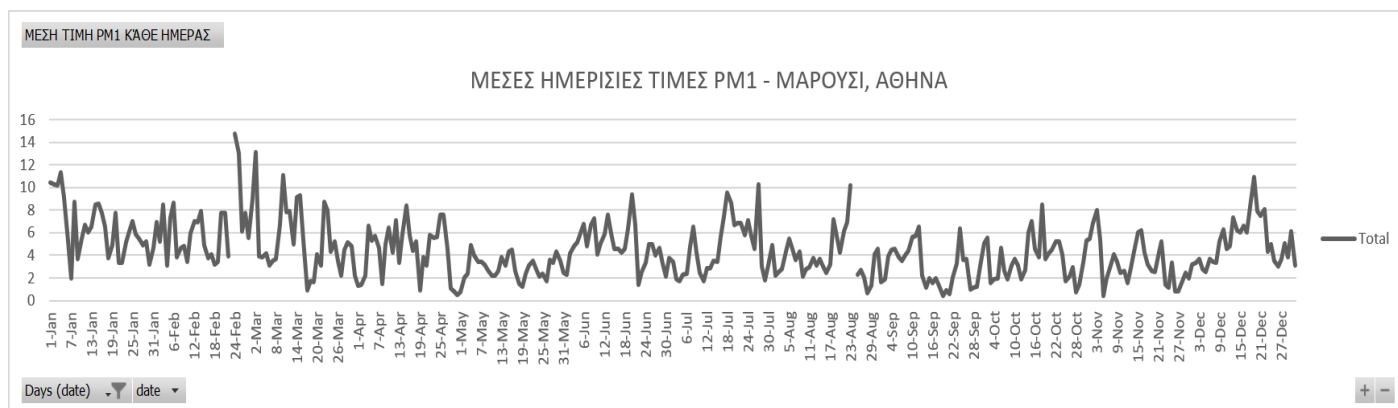
σταθερών ανθρωπογενών πηγών εκπομπών και καταδεικνύει ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις PM₁ αποτελούν κυρίως χειμερινό φαινόμενο.



Σχήμα 4.2: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Χαλκίδα

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ στο Μαρούσι της Αθήνας για το σύνολο του έτους. Με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παρατείνεται μια διαφοροποιημένη εικόνα σε σχέση με τη Δεξαμενή Χαλκίδας, καθώς στο Μαρούσι, κατά τη χειμερινή και την καλοκαιρινή περίοδο καταγράφονται αυξημένες συγκεντρώσεις, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη συνεχούς ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο έντονο κυκλοφοριακό πρόβλημα της πρωτεύουσας, καθώς και σε διάφορες αυξημένες αστικές δραστηριότητες και στις πολλαπλές πηγές εκπομπών που χαρακτηρίζουν το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας. Σε ορισμένα χρονικά διαστήματα του έτους παρατηρούνται διακοπές στη γραμμή του διαγράμματος. Αυτό οφείλεται σε έλλειψη πρωτογενών δεδομένων (missing data) για τις συγκεκριμένες ημέρες, γεγονός που μπορεί συνήθως να σχετίζεται με προσωρινή παύση λειτουργίας ή τεχνική συντήρηση των σταθμών μέτρησης

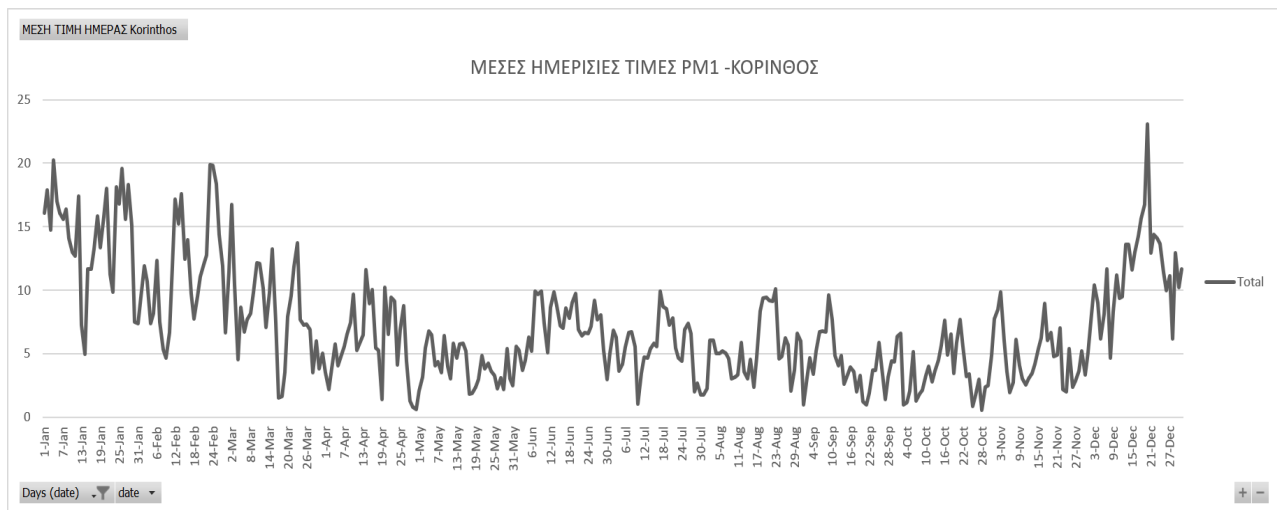


Σχήμα 4.3: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Αθήνα

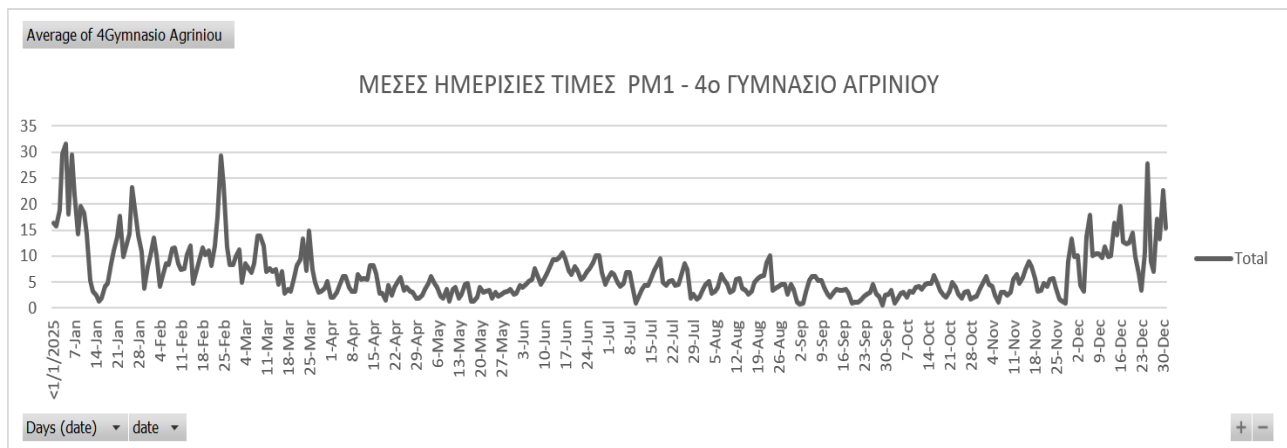
Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_1 στην πόλη της Κορίνθου για το σύνολο του έτους, με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu g/m^3$.

Παρατηρείται σαφής εποχική μεταβολή των συγκεντρώσεων PM_1 , με υψηλότερες τιμές κατά τη χειμερινή περίοδο και χαμηλότερες κατά τους θερμότερους μήνες του έτους. Κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 10,00 και 20,00 $\mu g/m^3$, ενώ καταγράφονται και αρκετές βραχυχρόνιες αυξήσεις. Στα μέσα Δεκεμβρίου καταγράφεται η υψηλότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση του έτους, η οποία υπερβαίνει τα 20 $\mu g/m^3$. Στη συνέχεια, από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο, οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν αισθητή μείωση και παραμένουν σχετικά σταθερές, κυμαινόμενες συνήθως μεταξύ 2,00 και 8,00 $\mu g/m^3$, γεγονός που υποδηλώνει ευνοϊκότερες συνθήκες διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ωστόσο να σημειωθεί ότι έχει καταγραφεί ωριαία τιμή στις 24 Φεβρουαρίου και ανήλθε στα 59,40 $\mu g/m^3$, ενώ μία ακόμη αξιοσημείωτη αύξηση σημειώθηκε στις 18 Ιανουαρίου με 54,80 $\mu g/m^3$, καθώς και 1 Αύγουστου που οι συγκεντρώσεις κυμάνθηκαν μεταξύ 50,1 και 50,8 $\mu g/m^3$.

Η αύξηση των συγκεντρώσεων κατά τους χειμερινούς μήνες αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των αστικών περιοχών και μπορεί αποδίδεται κυρίως στην αυξημένη χρήση συστημάτων θέρμανσης, στην καύση βιομάζας και στις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά την περίοδο αυτή. Παράγοντες όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές και η περιορισμένη ατμοσφαιρική ανάμειξη δυσχεραίνουν τη διασπορά των ρύπων, ευνοώντας τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.4: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Κόρινθου



Σχήμα 4.5: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Αγρίνιο

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ στην πόλη του Αγρινίου για το σύνολο του έτους, με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

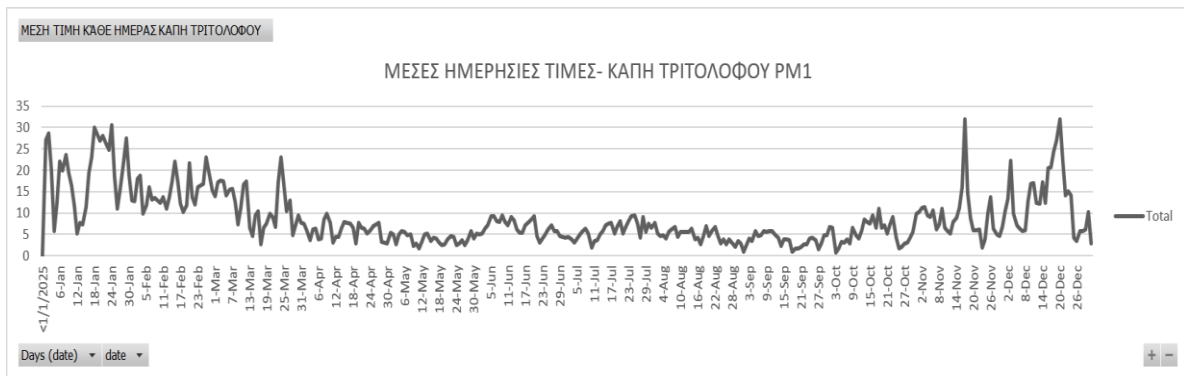
Παρατηρείται έντονη εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο και τις χαμηλότερες κατά τους ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες. Τον Ιανουάριο σημειώθηκαν επεισόδια αυξημένων συγκεντρώσεων, με τη μέγιστη μέση ημερήσια τιμή να καταγράφεται στις 4 Ιανουαρίου, η οποία ανήλθε $31,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η ελάχιστη τιμή του μήνα ήταν περίπου $1,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 15 Ιανουαρίου. Αυξημένες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν επίσης στο τέλος του έτους. Συγκεκριμένα, στις 25 Δεκεμβρίου η μέση ημερήσια συγκεντρώση έφθασε τα $27,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στις 30η Δεκεμβρίου καταγράφηκε η τιμή $22,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα επεισόδια αυτά πιθανόν να οφείλονται στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας από τη χρήση συστημάτων θέρμανσης, την καύση βιομάζας και τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη χειμερινή περίοδο, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Αντίθετα, όσον αφορά την άνοιξη και το καλοκαίρι, οι συγκεντρώσεις διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με τις περισσότερες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ $1,00$ και $10,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι χαμηλές τιμές των συγκεντρώσεων υποδηλώνει περιορισμένη επίδραση μόνιμων πηγών εκπομπών, καθώς αναδεικνύει τον έντονα εποχικό χαρακτήρα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή, με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να εμφανίζονται κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ στην περιοχή του ΚΑΠΗ Τριλόφου για το σύνολο του έτους, με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παρατηρείται έντονη εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁, με τις υψηλότερες τιμές να καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο και τις χαμηλότερες κατά τους ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες. Τον Ιανουάριο καταγράφονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του έτους, με αρκετές ημέρες να εμφανίζουν τιμές που προσεγγίζουν ή και υπερβαίνουν τα $29,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παράλληλα, παρατηρείται εκ νέου αύξηση των συγκεντρώσεων, με επεισόδια αιχμής κατά τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο, όπου οι ημερήσιες τιμές σε ορισμένες περιπτώσεις προσεγγίζουν ή υπερβαίνουν τα 30,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό πιθανόν οφείλεται στην επανεμφάνιση των συνθηκών που ευνοούν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον, παραιτείται ότι κατά τους θερινούς και καλοκαιρινούς μήνες, οι συγκεντρώσεις μειώνονται αισθητά, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένες συνθήκες ποιότητας αέρα και περιορισμένη επίδραση ισχυρών πηγών εκπομπών. αναδεικνύοντας τον έντονα εποχικό χαρακτήρα της μεταβολής των συγκεντρώσεων PM_{10} στην περιοχή του Τριλόφου.



Σχήμα 4.6: Χρονοσειρά ημερήσιων ή ωριαίων τιμών Τριλόφου

4.3.2 Μηνιαία και εποχική μεταβολή των συγκεντρώσεων PM_{10} στις έξι ε πόλεις

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η μέση μηνιαία διακύμανση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , στις έξι περιοχές. Με στόχο την διερεύνηση των εποχικών μεταβολών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} δεν παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή.

Συγκεκριμένα, καταγράφονται την χειμερινή περίοδο οι υψηλότερες τιμές όπου αποδίδονται κυρίως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπου οφείλεται στην η χρήση συστημάτων οικιακής θέρμανσης και σε συνδυασμό με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Επιπλέον παρατηρείται μια δεύτερη αύξηση κατά τη θερινή περίοδο, η οποία

ενδέχεται να συνδέεται με έκτακτα φαινόμενα, όπως οι δασικές πυρκαγιές, καθώς και με τις αυξημένες θερμοκρασίες.

Για την πόλη της Πάτρας, η στατιστική ανάλυση και γραφική απεικόνιση αναδεικνύουν μια έντονη εποχική διακύμανση όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} . Βάσει του Πίνακα 4.2, παρατηρείται ότι η υψηλότερη μέση μηνιαία συγκέντρωση καταγράφεται με $10,91 \mu g/m^3$ τον Δεκέμβριο, ενώ ακολουθούν ο Φεβρουάριος με $9,44 \mu g/m^3$ και ο Ιανουάριος με $7,63 \mu g/m^3$. Για την εν λόγω περίοδο οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οφείλονται κυρίως στην χρήση συστημάτων θέρμανσης, καθώς και στις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που εμποδίζουν τη διασπορά των ρύπων και βοηθούν τη συσσώρευσή τους στην ατμόσφαιρα.

Αντίθετα, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις εντοπίζονται τον Μάιο με την ελάχιστη τιμή του έτους $3,57 \mu g/m^3$, καθώς ακολουθεί ο Σεπτέμβριος με $4,23 \mu g/m^3$, ο Οκτώβριος με $4,32 \mu g/m^3$ και ο Απρίλιος με $4,46 \mu g/m^3$. Κατά την περίοδο αυτή η μείωση της συγκεντρώσεως των αιωρούμενων σωματιδίων πιθανόν να οφείλεται στη διακοπή της χρήσης συστημάτων θέρμανσης και στη μείωση των σχετικών εκπομπών ρύπων.

Κατά τους θερινούς μήνες καταγράφεται μια δευτερεύουσα έξαρση των τιμών με τον Ιούνιο $6,87 \mu g/m^3$ και τον Αύγουστο $7,74 \mu g/m^3$, ενώ τον Ιούλιο παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή $5,19 \mu g/m^3$. Η πιθανή άνοδος των συγκεντρώσεων των τιμών, ενδέχεται στην έντονη ηλιακή ακτινοβολία (φωτοχημική δραστηριότητα), στην αυξημένη κίνηση οχημάτων και τη λιμενική δραστηριότητα της Πάτρας καθώς έχει ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια της χώρας, επιπλέον ευνοεί την επαναίωση σκόνης, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να συμβάλλει και η μεταφορά καπνού από πυρκαγιάς σε γειτονικές περιοχές.

Στο Σχήμα 4.7, παρουσιάζεται η γραμμική εξέλιξη του μηνιαίου μέσου όρου, η οποία επιβεβαιώνει τη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων PM_{10} στην Πάτρα. Η διακύμανση αυτή καθορίζεται από τη χημική κορύφωση η οποία μπορεί να αποδίδεται κυρίως στην χρήση θέρμανσης, καθώς και από μια δευτερεύουσα καλοκαιρινή έξαρση τύπου "W", η οποία μπορεί να οφείλεται λόγω φωτοχημικών διεργασιών και τοπικών πηγών.

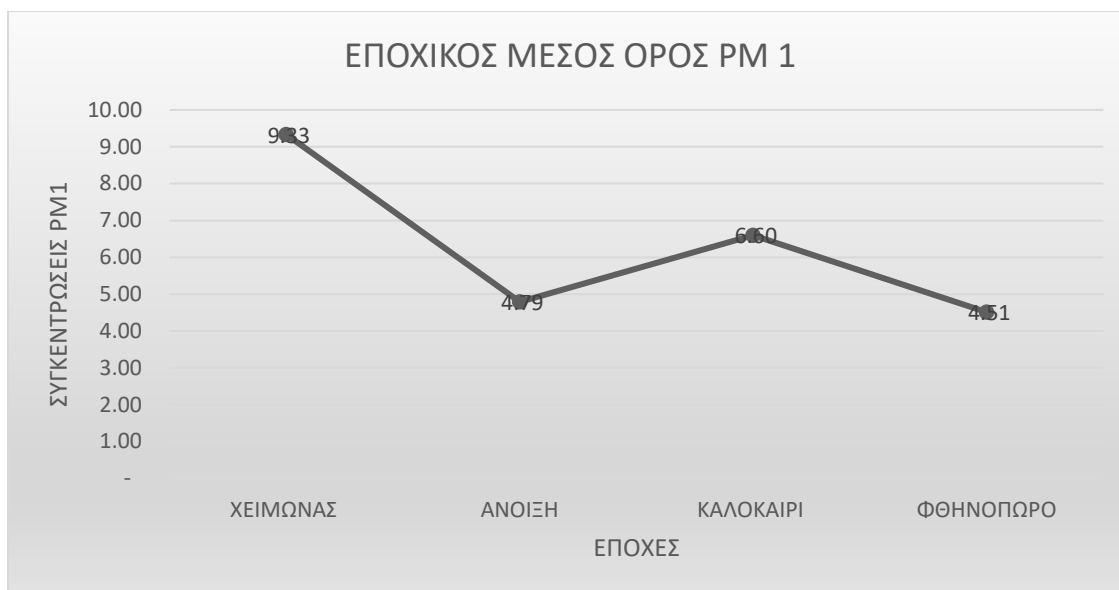
Πίνακας 4.2:Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ (μ g/m³) στην πόλη της Πάτρας

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM ₁
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	7.63
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	9.44
ΜΑΡΤΙΟΣ	6.33
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	4.46
ΜΑΙΟΣ	3.57
ΙΟΥΝΙΟΣ	6.87
ΙΟΥΛΙΟΣ	5.20
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	7.74
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	4.23
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	4.32
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	4.99
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	10.91



Σχήμα 4.7: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM₁ στην Πάτρα.

Όσον αφορά την εποχιακή διακύμανση, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3 και το σχήμα 4.8, παρατηρείται δύο διακριτές κορυφές. Η μέγιστη συγκέντρωση PM₁ καταγράφεται τη κατά την χειμερινή περίοδο 10,91 μg/m³, πιθανόν εξαιτίας των αυξημένων αναγκών αστικής θέρμανσης, καθώς ακολουθεί μια δευτερεύουσα αιχμή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού 7,74 μg/m³ πιθανόν λόγω της έντονης φωτοχημικής δραστηριότητας, τη λιμενική κίνηση και την επαναιώρηση σκόνης λόγω ξηρασίας. Αντίθετα, την άνοιξη καταγράφηκε 4,46 μg/m³ και τον φθινόπωρο ανήλθε με 4,51 μg/m³, όπου υποδηλώνουν μια σημαντική κάμψη των επιπέδων ρύπανσης.



Σχήμα 4.8: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM₁ στην Πάτρα.

Για την πόλη της Χαλκίδας, μέσω της στατιστικής ανάλυσης και της γραφικής απεικόνιση, αναδεικνύεται έντονη μηνιαία διακύμανση όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁.

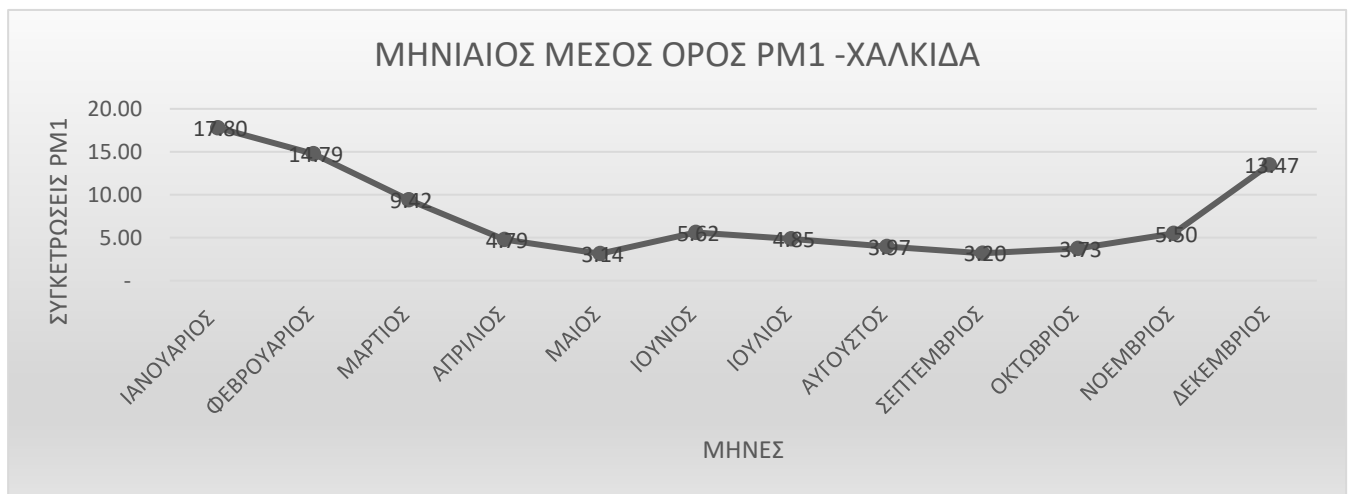
Οι τιμές διαφοροποιούνται σημαντικά, καθώς σύμφωνα με τον Πίνακα 4.3 παρατηρείται έντονη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας κατά τους χειμερινούς μήνες. Συγκεκριμένα, καταγράφεται 17,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ τον Ιανουάριο όπου αποτελεί την υψηλότερη τιμή του έτους, ενώ ακολουθούν ο Φεβρουάριος με 14,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ο Δεκέμβριος με 13,47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατά την εν λόγω περίοδο, οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να οφείλονται κυρίως στην χρήση συστημάτων θέρμανσης αλλά και στις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν εκείνη την περίοδο .

Αντίθετα, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις καταγράφονται τον Μάιο με την ελάχιστη μέση μηνιαία τιμή του έτους να ανέρχεται 3,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατά τους υπολοίπους μήνες της άνοιξης, του καλοκαιριού, καθώς και του φθινοπώρου διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα μεταξύ 3,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και 5,61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, τον Ιούνιο με 5,61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αποτελεί μια δευτερεύουσα μικρή αύξηση η οποία μπορεί να οφείλεται λόγω φωτοχημικών διεργασιών και τοπικών πηγών. Στο σχήμα 4.9, παρουσιάζεται η γραμμική εξέλιξη του

μηνιαίου μέσου όρου των συγκεντρώσεων PM₁ της Χαλκίδας, όπου παρουσιάζεται μια έντονη καμπύλη με την χειμερινή κορύφωση 17,79 μg/m³ του Ιανουάριου και το χαμηλότερο σημείο της τον Μάιο με 3,13 μg/m

Πίνακας 4.3: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ (μg/m³) στην πόλη της Χαλκίδας.

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM ₁
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	17.79
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	14.78
ΜΑΡΤΙΟΣ	9.41
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	4.79
ΜΑΙΟΣ	3.13
ΙΟΥΝΙΟΣ	5.61
ΙΟΥΛΙΟΣ	4.85
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	3.97
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	3.20
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3.73
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	5.49
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	13.47



Σχήμα 4.9: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM₁ στην πόλη της Χαλκίδας.

Σύμφωνα με Σχήμα 4.10, η γραμμική εξέλιξη του εποχιακού μέσου όρου των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων της Χαλκίδας, χαρακτηρίζεται από υψηλές

τιμές μέσης συγκέντρωσης κατά την χειμερινή περίοδο με $15,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στην συνέχεια, ακολουθεί σταδιακή πτώση κατά την άνοιξη με $5,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ οι συγκεντρώσεις συνεχίζουν να μειώνονται κατά το καλοκαίρι με $4,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και φθάνουν κατά το φθινόπωρο με $4,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η εποχιακή αυτή μεταβολή υποδηλώνει σημαντική επίδραση των χειμερινών εκπομπών, κυρίως από τη χρήση συστημάτων θέρμανσης, καθώς και των μετεωρολογικών συνθηκών που ευνοούν τη συσσώρευση και των περιορισμό των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 4.10 Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} στην πόλη της Χαλκίδας.

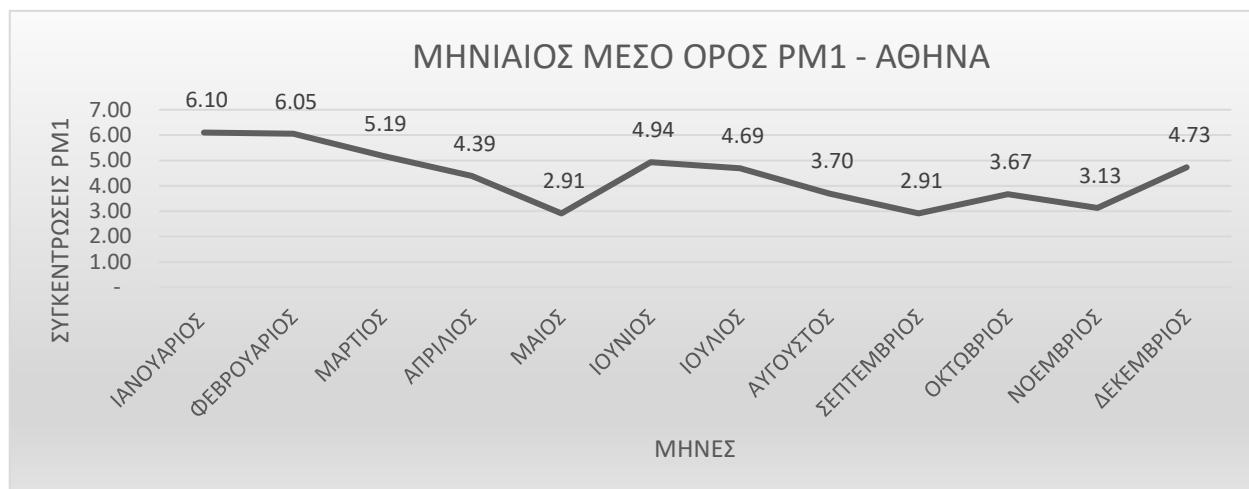
Ακολουθεί η ανάλυση της μηνιαίας διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} , στην περιοχή του Αμαρουσίου στην Αθήνα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.4, τα δεδομένα παρουσιάζουν μια σαφή εποχική τάση, με αυξημένες τιμές κατά τους χειμερινούς αλλά και τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η μέγιστη μηνιαία συγκέντρωση PM_{10} κατά την χειμερινή περίοδο καταγράφεται τον Ιανουάριο με τιμή $6,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ακολουθεί ο Φεβρουάριο με $6,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι υψηλές συγκεντρώσεις οφείλονται πιθανόν στην οικιακή θέρμανση σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη συσσώρευση των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ακολουθεί μια δευτερεύουσα αύξηση τον Ιούνιο με $4,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Ιούλιο με $4,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ η οποία μπορεί να αποδίδεται λόγω φωτοχημικών διεργασιών, έντονης ηλιακής ακτινοβολίας και κυκλοφοριακών ρύπων στο αστικό κέντρο. Όσον αφορά τις ελάχιστες τιμές του έτος, καταγράφηκαν τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο με $2,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ καθώς ακολουθεί ο Νοέμβριο με $3,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στο Σχήμα 4.11, απεικονίζεται γραμμική εξέλιξη του μηνιαίου μέσου όρου των συγκεντρώσεων PM_{10} , όπου διακρίνονται δυο κύριες κορυφές. Η πρώτη παρατηρείται κατά την χειμερινή περίοδο με το υψηλότερο σημείο που είναι στον Ιανουάριο με $6,10 \mu g/m^3$ και τον Φεβρουάριο με $6,05 \mu g/m^3$. Στην συνέχεια παρατηρείται σταδιακή πτώση κατά την άνοιξη, φθάνοντας με το χαμηλότερο που καταγράφεται το Μάιος με $2,91 \mu g/m^3$. Ακολουθεί μια δευτερεύουσα αιχμή στην έναρξη του καλοκαιριού, με τον Ιούνιο να φτάνει $4,93 \mu g/m^3$, πιθανώς λόγω της έντονης φωτοχημικής δραστηριότητας, Ακολουθεί νέα πτώση, με τον Σεπτέμβριο να καταγραφεί επίσης $2,91 \mu g/m^3$, και εκ νέου ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι τον Δεκέμβριο $4,73 \mu g/m^3$.

Πίνακας 4.4: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} ($\mu g/m^3$) στην πόλη της Αθήνας.

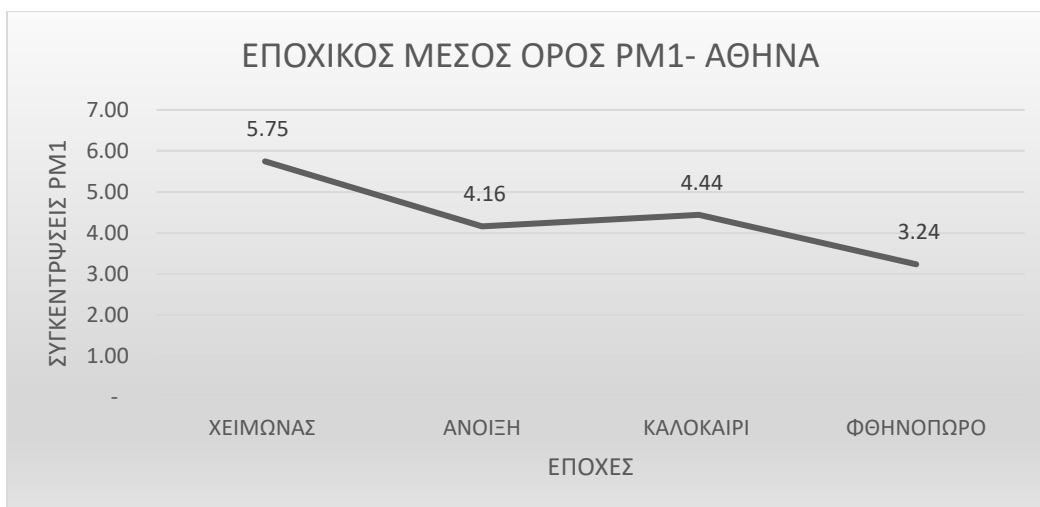
ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM_{10}
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	6.10
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	6.04
ΜΑΡΤΙΟΣ	5.18
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	4.39
ΜΑΙΟΣ	2.91
ΙΟΥΝΙΟΣ	4.93
ΙΟΥΛΙΟΣ	4.69
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	3.70
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	2.91
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3.67
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	3.13
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	4.73



Σχήμα 4.11: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM₁ στην πόλη της Αθήνας.

Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται η εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁ στο Μαρούσι. Από την παρατήρηση του διαγράμματος διαπιστώνεται ότι η χειμερινή περίοδος παρουσιάζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, με μέση τιμή 5,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που συνδέεται κυρίως με τις αυξημένες ανάγκες θέρμανσης και τις μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη συσσώρευση των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Στη συνέχεια, οι συγκεντρώσεις μειώνονται αισθητά κατά την άνοιξη, φθάνοντας τα 4,16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται μικρή εκ νέου αύξηση, με μέση τιμή 4,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία μπορεί να συνδέεται στη φωτοχημική δραστηριότητα και στην έντονη κυκλοφορία οχημάτων. Αντίθετα, το φθινόπωρο καταγράφονται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις PM₁, με μέση τιμή 3,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 4.12: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM₁ στο Μαρούσι.

Αναλύοντας τα δεδομένα της περιοχής της Κορίνθου, η μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁, παρουσιάζει σαφή τάση, με έντονη επιβάρυνση κατά τους χειμερινούς μήνες και μια δευτερεύουσα αιχμή στις αρχές του καλοκαιριού. Η μέγιστη συγκέντρωση PM₁ καταγράφεται τον Ιανουάριο, με τιμή 14,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ακολουθεί ο Φεβρουάριος με τιμή 11,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ο Δεκέμβριος με τιμή 11,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι κατά τους χειμερινούς μήνες η χρήση συστημάτων οικιακής θέρμανσης και σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες ευνοούν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά τις χαμηλότερες τιμές του έτους, καταγράφονται τον Οκτώβριο με 3,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ακολουθεί ο Μάιος με 3,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ο Σεπτέμβριο με 4,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Παράλληλα, η δευτερεύουσα έξαρση εμφανίζεται κατά την θερινή περίοδο με τον Ιούνιο να καταγραφεί 7,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Στην συνέχεια, οι συγκεντρώσεις υποχωρούν με τον Ιούλιο να καταγραφεί 5,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Αύγουστο με 5,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Να σημειωθεί ότι τη θερινή έξαρση πιθανόν να σχίζεται με φωτοχημικές διεργασίες και την επίδραση των τοπικών πηγών εκπομπών.

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η γραμμική εξέλιξη του μηνιαίου μέσου όρου, η οποία επιβεβαιώνει οπτικά τη διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁ στην Κόρινθο. Απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη με έντονη έξαρση τον Ιανουάριο με τιμή 14,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στην συνέχεια ακολουθεί σταδιακή υποχώρηση κατά την ανοιξιάτικη περίοδο έως το

Μάιο, όπου καταγράφεται η τιμή 3,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ακολουθώς, παρατηρείται η δευτερεύουσα θερινή αιχμή, με τον Ιούνιο να καταγράφει 7,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που μπορεί οφείλεται στην αυξημένη φωτοχημική δραστηριότητα. Κατά τους επομένους μήνες ακολουθούν χαμηλές συγκεντρώσεις, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζεται εκ νέου ανοδική τάση προς το τέλος του έτους, φθάνοντας τον Δεκέμβριο τα 11,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Πίνακας 4.5: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) στην πόλη της Κορίνθου.

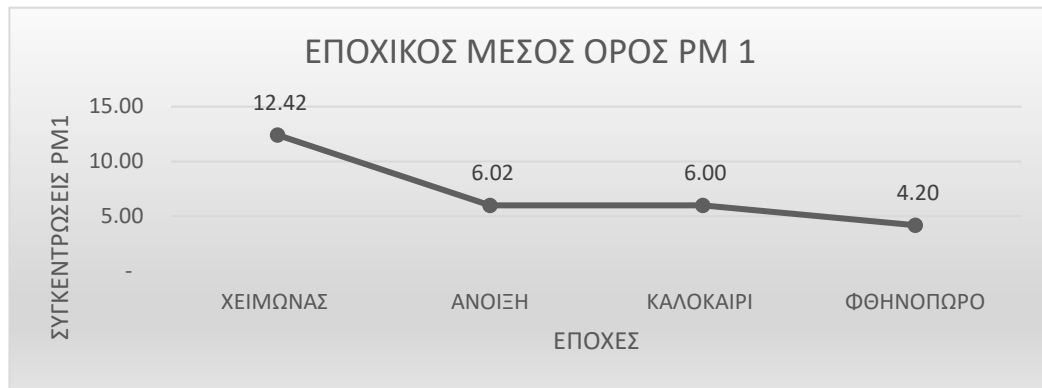
ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM_{10}
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	14.27
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	11.64
ΜΑΡΤΙΟΣ	8.18
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	5.87
ΜΑΙΟΣ	3.99
ΙΟΥΝΙΟΣ	7.20
ΙΟΥΛΙΟΣ	5.38
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	5.42
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	4.07
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3.72
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	4.79
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	11.33



Σχήμα 4.13: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM_{10} στην πόλη της Κορίνθου.

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.14, στο οποίο απεικονίζεται η εποχιακή διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} , επιβεβαιώνεται ότι η χειμερινή περίοδος παρουσιάζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, με τη μέγιστη τιμή να ανέρχεται 12,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός «Διπλωματική Εργασία»

αυτό αποδίδεται πιθανόν στην αυξημένη χρήση συστημάτων οικιακής θέρμανσης σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στη συνέχεια οι συγκεντρώσεις παρουσιάζουν απότομη πτώση και σταθεροποιούνται σε παρόμοια επίπεδα κατά την άνοιξη με $6,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, και το καλοκαίρι με $6,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Αντίθετα, παρατηρείται ότι την φθινοπωρινή περίοδο καταγράφεται η χαμηλότερη τιμή με $4,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη περίοδος του φθινοπώρου αποτελεί την περίοδο με τα χαμηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης στην περιοχή.



Σχήμα 4.14: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} στην πόλη της Κορίνθου.

Ακολουθεί η ανάλυση της μηνιαίας διακύμανσης των συγκεντρώσεων PM_{10} στην περιοχή του Αγρινίου. Σύμφωνα με το Πίνακα 4.6, τα δεδομένα παρουσιάζουν σαφή εποχική μεταβολή, με αύξηση συγκεντρώσεων κατά την χειμερινή περίοδο και μια δευτερεύουσα αιχμή στις αρχές του καλοκαιριού. Η μέγιστη συγκέντρωση καταγράφηκε τον Ιανουάριο, με $13,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ακολουθούν ο Δεκέμβριος με $12,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και ο Φεβρουάριος με $10,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό, που πραγματοποιείται κατά τη χειμερινή περίοδο, αποδίδεται κυρίως στη χρήση συστημάτων οικιακής θέρμανσης, σε συνδυασμό με τις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, που ευνοούν τη συσσώρευση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Αντίθετα, όσον αφορά την ελάχιστη τιμή του έτους καταγράφηκε τον Σεπτέμβριο με $2,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα παρουσιάζονται τον Μάιο, με $3,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Οκτώβριο με $3,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Παράλληλα, καταγράφεται και δευτερεύουσα έξαρση τον Ιούνιο με $6,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία υποχωρεί σταδιακά τον Ιούλιο, με $5,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Αύγουστο με

4,62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η θερινή αύξησή μπορεί να αποδίδεται σε φωτοχημικές διεργασίες και σε συνδυασμό με την επίδραση τοπικών πηγών εκπομπών.

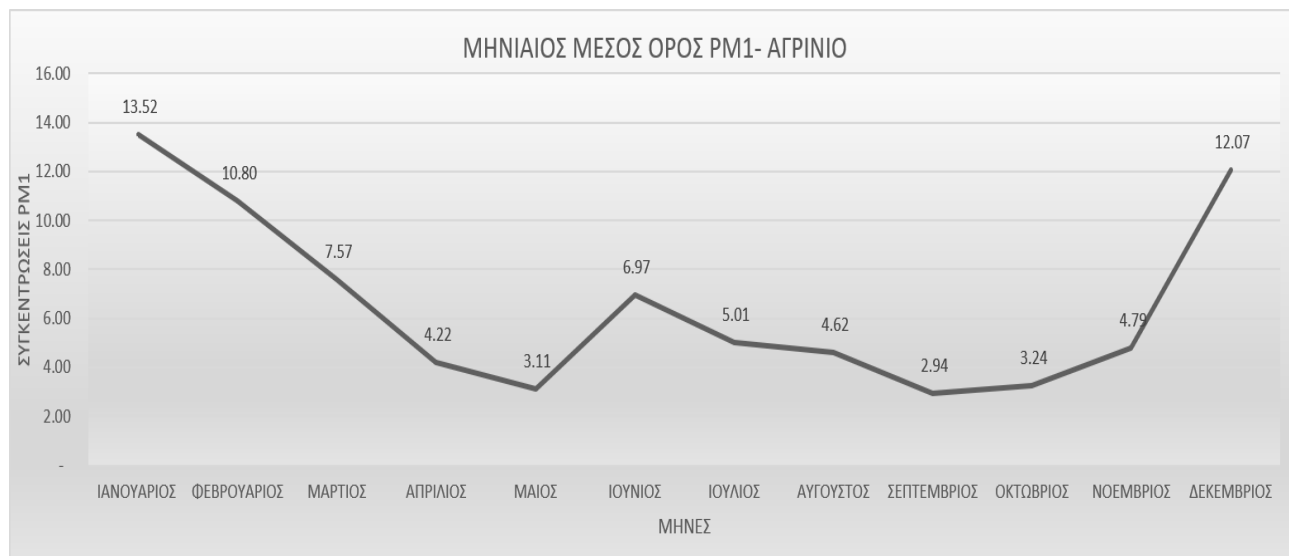
Πίνακας 4.6: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) στη πόλη του Αγρινίου

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM_{10}
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	13.51
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	10.80
ΜΑΡΤΙΟΣ	7.56
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	4.21
ΜΑΙΟΣ	3.11
ΙΟΥΝΙΟΣ	6.96
ΙΟΥΛΙΟΣ	5.00
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	4.62
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	2.93
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	3.24
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	4.79
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	12.07

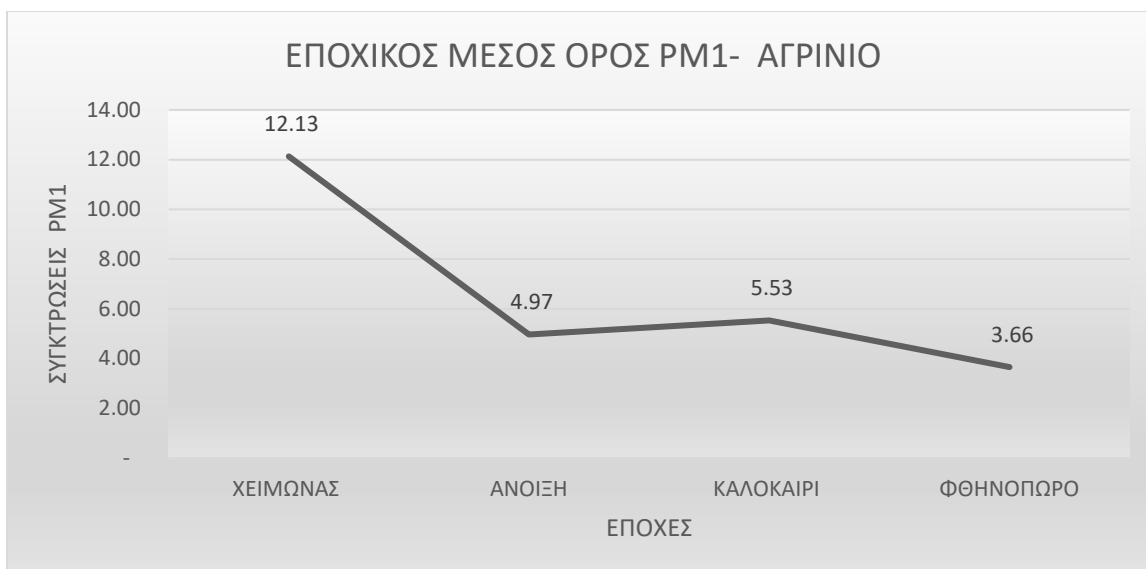
Στο σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζονται η γραμμική εξέλιξη του μηνιαίου και του εποχικού μέσου όρου των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στο Αγρινίου. Από την ανάλυση, διαπιστώνεται ότι την χειμερινή περίοδο καταγράφονται οι υψηλότερες τιμές, και συγκεκριμένα τον Ιανουάριο με 13,51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Δεκέμβριο 12,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Αντίθετα, η χαμηλότερη μηνιαία τιμή καταγράφεται το Σεπτέμβριο με 2,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Όσον αφορά την εποχική διακύμανση, ο χειμώνας αποτελεί την πλέον επιβαρυσμένη εποχή του έτους, με μέση συγκέντρωση 12,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις πιθανόν να αποδίδονται, στην χρήση συστημάτων θέρμανσης σε συνδυασμό με τα μετεωρολογικά φαινόμενα με αποτέλεσμα να ευνοούν την συσσώρευση η των ρύπων.

Αντίθετα, κατά την άνοιξη και τον φθινόπωρο παρατηρείται σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων, με τον φθινόπωρο να αποτελεί την περίοδο με τα χαμηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης και μέση εποχική συγκέντρωση $3,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Κατά την θερινή περίοδο οι συγκεντρώσεις παραμένουν γενικά σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, το καλοκαίρι παρουσιάζει μια μεμονωμένη έξαρση με την τιμή του Ιουνίου να κυμαίνεται $6,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία μπορεί να οφείλεται στην εντονότερη φωτοχημική δραστηριότητα, την αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία και την επίδραση τοπικών πηγών εκπομπών.



Σχήμα 4.15: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM₁ στην πόλη του Αγρινίου.



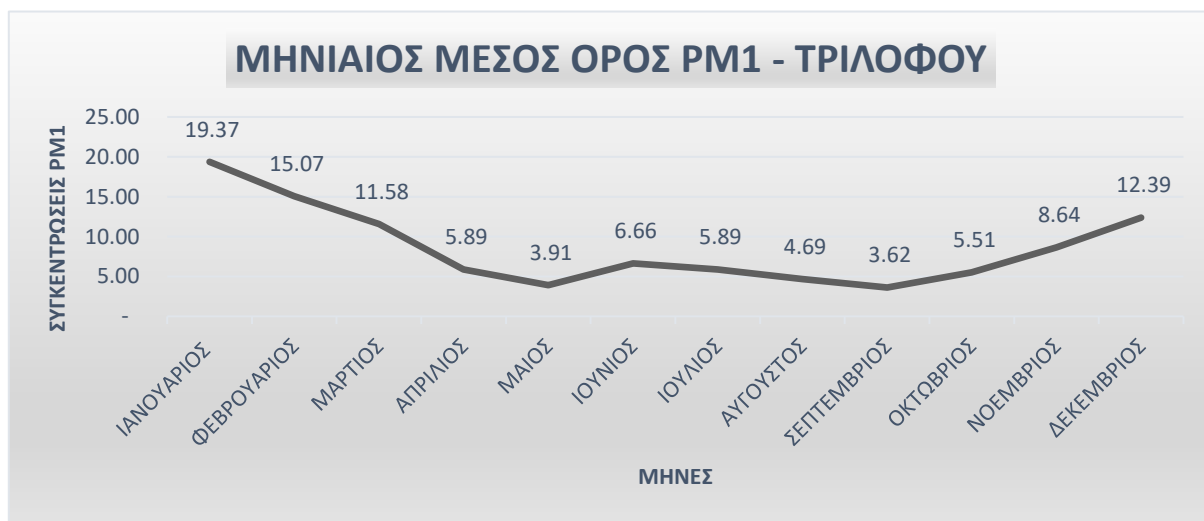
Σχήμα 4.16: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM₁ στην πόλη του Αγρινίου.

Για την ολοκλήρωση της χωρικής και χρονικής αποτίμησης της ποιότητας του αέρα στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται η περιοχή του Τριλόφου. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7, ο Ιανουάριος καταγράφει τη μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση PM₁, με τιμή 19,37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, αποτελώντας τον πλέον επιβαρυνμένο μήνα του έτους. Ακολουθούν ο Φεβρουάριος με 15,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ο Δεκέμβριος με 12,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η αυξημένη επιβάρυνση κατά τους χειμερινούς μήνες αποδίδεται πιθανόν στη χρήση συστημάτων οικιακής θέρμανσης, καθώς και στις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη συσσώρευση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αντίθετα, οι χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν τον Σεπτέμβριο με 3,62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και τον Μάιο με 3,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μήνες αυτοί χαρακτηρίζονται από τις από τα χαμηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης κατά τη διάρκεια του έτους.

Κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται μια μικρή δευτερεύουσας αύξηση των συγκεντρώσεων, με τον Ιούνιο να καταγράφει μέση τιμή 6,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η αύξηση αυτή αποδίδεται πιθανότατα στην εντονότερη φωτοχημική δραστηριότητα, στην αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία και στην επίδραση τοπικών πηγών εκπομπών, χωρίς ωστόσο οι συγκεντρώσεις να προσεγγίζουν τα υψηλά επίπεδα που καταγράφονται κατά τη χειμερινή περίοδο.

Πίνακας 4.7: Μηνιαίες μέσες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁ (μg/m³) στη πόλη του Τριτολοφου

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΟ ΟΡΟΣ PM ₁
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	19.37
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	15.07
ΜΑΡΤΙΟΣ	11.57
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	5.88
ΜΑΙΟΣ	3.91
ΙΟΥΝΙΟΣ	6.65
ΙΟΥΛΙΟΣ	5.89
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	4.68
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	3.61
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	5.50
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	8.63
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	12.38



Σχεδιάγραμμα 4.17: Χρονική εξέλιξη και διακύμανση του μηνιαίου μέσου όρου των σωματιδίων PM₁ στην πόλη του Τριλόφου,

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.18, η χειμερινή περίοδος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη επιβάρυνση, με μέση εποχική συγκέντρωση 15,61 μg/m³, τιμή που είναι υπερδιπλάσια σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εποχές του έτους. Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να οφείλεται κυρίως στη χρήση καυσίμων για θέρμανση, σε συνδυασμό με δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η άπνοια και η θερμοκρασιακή αναστροφή, οι οποίες ευνοούν και παγιδεύουν τους ρύπους κοντά στο έδαφος.

Κατά την άνοιξη παρατηρείται σημαντική μείωση των συγκεντρώσεων, με μέση τιμή 7,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ το καλοκαίρι και το φθινόπωρο εμφανίζουν τις χαμηλότερες εποχικές συγκεντρώσεις, με μέσες τιμές 5,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και 5,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι χαμηλές αυτές τιμές πιθανόν να συνδέονται με την απουσία εκπομπών από συστήματα θέρμανσης τη θερινή περίοδο, καθώς και με τις πρώτες φθινοπωρινές βροχοπτώσεις, οι οποίες συμβάλλουν στον φυσικό καθαρισμό της ατμόσφαιρας μέσω της απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 4.18: Εποχιακή διακύμανση των μέσων συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} στην πόλη του Τριλόφου

4.3.4 Μηνιαία διακύμανση και εποχικότητα των PM_{10} ανά πόλη

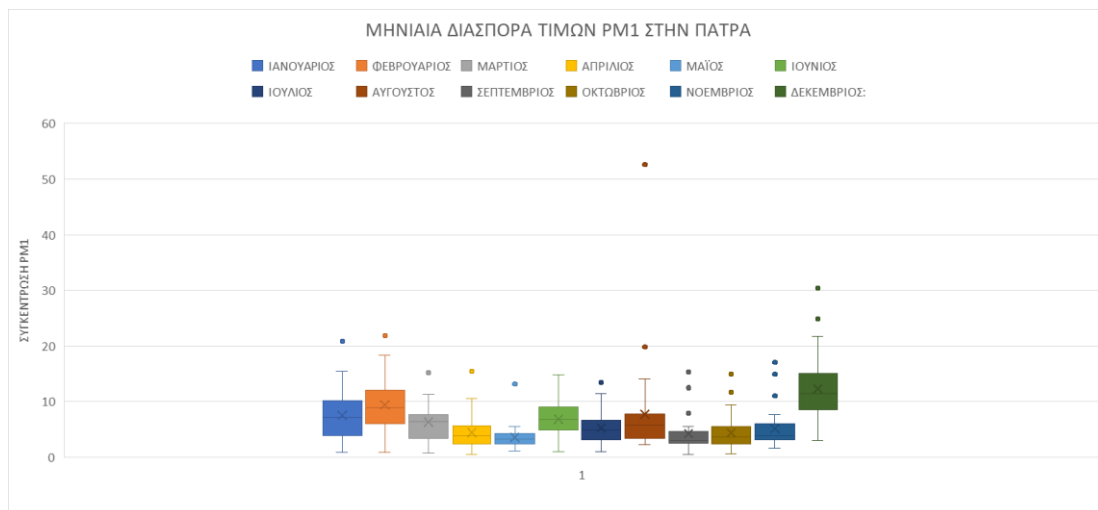
Στην παρούσα υποενότητα εξετάζονται η μηνιαία διακύμανση και η εποχικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} σε κάθε πόλη ξεχωριστά. Η χρήση διαγραμμάτων Boxplot (θηκογραμμάτων) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης, καθώς επιτρέπει την αποτύπωση της κεντρικής τάσης (διάμεσος), της διασποράς (ενδοτεταρτημοριακό εύρος) καθώς και τον εντοπισμό ακραίων τιμών (outliers) για κάθε εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Μέσω της συγκεκριμένης ανάλυσης υπάρχει η δυνατότητα της αναγνώρισης συγκεκριμένων μοτίβων ρύπανσης, τα οποία σχετίζονται τόσο με τις εποχικές μεταβολές όσο και με τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Με βάση το σχήμα 4.19, το οποίο παρουσιάζει τη μηνιαία διασπορά των τιμών PM_{10} για την πόλη της Πάτρας, προκύπτουν τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος–Φεβρουάριος) παρουσιάζονται υψηλότερες διάμεσες τιμές των συγκεντρώσεων PM_{10} , ενώ οι χαμηλότερες καταγράφονται τον Μάιο και τον Ιούλιο. Το εύρημα αυτό φανερώνει ότι τα επίπεδα ρύπανσης επηρεάζονται άμεσα από την εποχή του χρόνου.

Διασπορά: Η μεγαλύτερη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων καταγράφεται τον χειμώνα, κυρίως τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο, γεγονός όπου παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις τιμών. Αντίθετα, ο Μάιος παρουσιάζει μικρότερη διασπορά συνεπώς πιο σταθερές τιμές.

Ακραίες τιμές: Εμφανίζονται σε μεμονωμένα επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων κατά την διάρκεια διαφόρων μηνών. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του Αύγουστου, όπου καταγράφεται μια ιδιαίτερα αυξημένη τιμή σε σχέση με τη γενική κατανομή των τιμών του μήνα, το γεγονός αυτό ενδέχεται να συνδέεται με παροδικό επεισόδιο αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 4.19: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στην Πάτρα

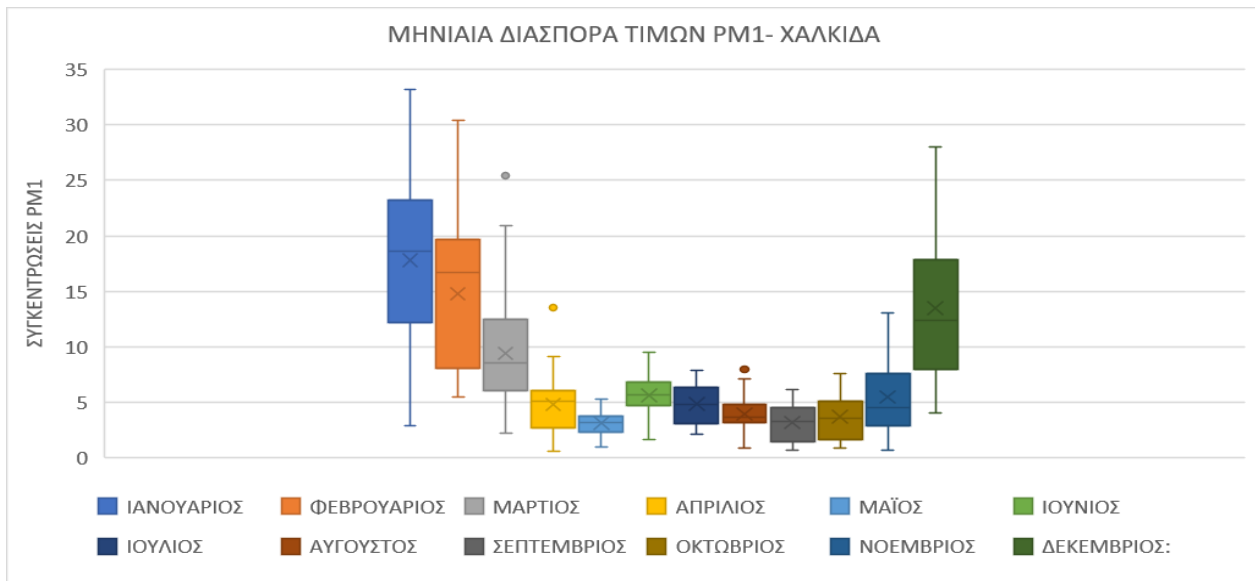
Με βάση το σχήμα 4.20, το οποίο παρουσιάζει τη μηνιαία διασπορά των τιμών PM_{10} για την πόλη της Χαλκίδας, προκύπτουν τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Στο διάγραμμα απεικονίζεται έντονη εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} . Συγκεκριμένα, κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριος – Φεβρουάριος) καταγράφονται υψηλότερες διάμεσες τιμές PM_{10} , ενώ οι χαμηλότερες

εμφανίζονται κατά τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο. Το εύρημα υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις PM_{10} επηρεάζονται σημαντικά από τις εποχικές μεταβολές.

Διασπορά: Η μεγαλύτερη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων παρατηρείται κατά τον χειμώνα, κυρίως τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο και ακολουθεί ο Δεκέμβριος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει αυξημένη διασπορά και έντονες ημερήσιες διακύμανσης. Αντίθετα, κατά την περίοδο από τον Μάιο έως και τον Οκτώβριο, καταγράφεται μικρότερη διασπορά, γεγονός που υποδηλώνει πιο σταθερές και γενικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις του θερινούς μήνες.

Ακραίες τιμές: Οι ακραίες τιμές είναι σχετικά περιορισμένες. Ωστόσο, εντοπίζονται κυρίως τον Μάρτιο (κοντά στα $25 \mu g/m^3$) και τον Απρίλιο, το γεγονός αυτό υποδηλώνει την εμφάνιση μεμονωμένες ημέρων, με ασυνήθιστα αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων. Επιπλέον, τον Αύγουστο παρατηρείται μια αυξημένη τιμή σε σχέση με τη γενική τάση του μήνα, η οποία ενδέχεται να σχετίζεται με παροδικό επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



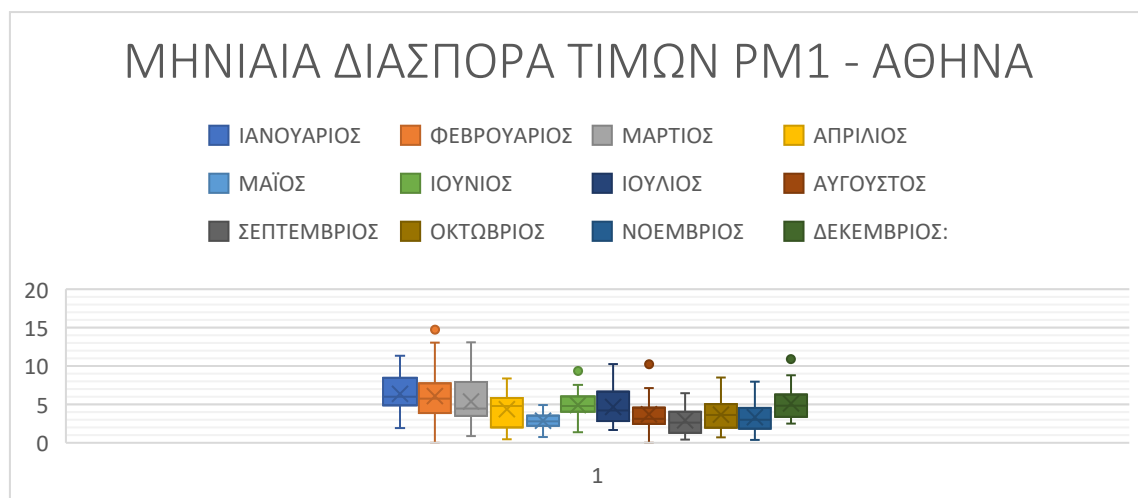
Σχήμα 4.20: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στην Χαλκίδα.

Με βάση το σχήμα 4.21, το οποίο παρουσιάζει της μηνιαία διασπορά των τιμών PM_{10} για τον σταθμό της Αθήνας (Μαρούσι), προκύπτουν τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Οι υψηλότερες διάμεσες τιμές PM₁ απεικονίζονται κατά τους χειμερινούς μήνες, κυρίως τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο και στην συνέχεια παρουσιάζεται μια σταδιακή μείωση. Κατά την θερινή περίοδο παρατηρείται μια δευτερεύουσα μικρή έξαρση τον Ιούλιο. Αντίθετα, οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφονται τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο.

Διασπορά: Η μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών καταγράφεται την χειμερινή περίοδο, συγκεκριμένα, κυρίως τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο. Αντίθετα, ο Μάιος, ο Αύγουστος ο Σεπτέμβριος παρουσιάζουν σταθερές και χαμηλότερη διασπορά τιμών.

Ακραίες τιμές: Παρουσιάζονται μεμονωμένες ακραίες τιμές σε αρκετούς μήνες του έτους. Ωστόσο, η υψηλότερη ακραία τιμή εντοπίζονται κυρίως τον Φεβρουάριο περίπου στο 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και, ενώ ακολουθούν και άλλες ακραίες τιμές τον Ιούνιο, τον Αύγουστο και τον Δεκέμβριο. Το γεγονός υποδηλώνει την εμφάνιση μεμονωμένων επεισοδίων αυξημένης συγκέντρωσης PM₁.



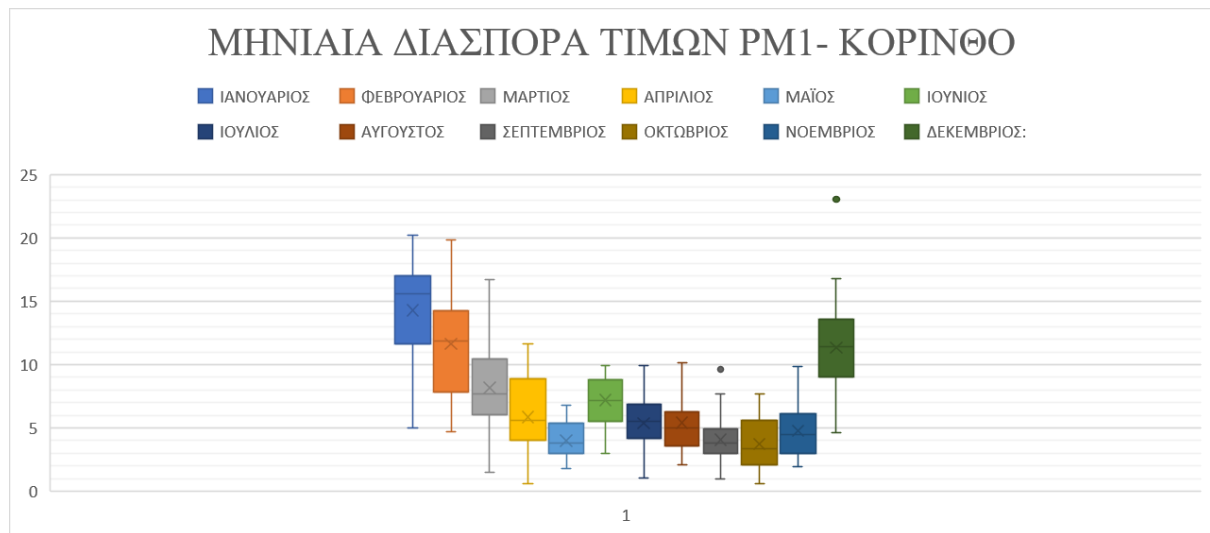
Σχήμα 4.21: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁ στην Αθήνα.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.22, στο οποίο απεικονίζεται η μηνιαία διασποράς των τιμών PM₁ για τον σταθμό της Κορίνθου, προκύπτουν τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Οι υψηλότερες διάμεσες τιμές PM₁ απεικονίζονται κατά τους χειμερινούς μήνες, κυρίως τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφονται τον Μάιο και τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο .

Διασπορά: Η μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών καταγράφεται κατά τη χειμερινή περίοδο, κυρίως τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Αντίθετα, ο Μάιος παρουσιάζει πιο σταθερές και χαμηλότερες συγκεντρώσεις τιμών καθ όλη την διάρκεια του μήνα.

Ακραίες τιμές: Παρουσιάζονται μεμονωμένες ακραίες τιμές σε αρκετούς μήνες του χρόνου. Ωστόσο, η υψηλότερη ακραία τιμή εντοπίζεται κυρίως τον Δεκέμβριο, ενώ χαμηλότερες ακραίες τιμές παρατηρούνται τον Σεπτέμβριο.



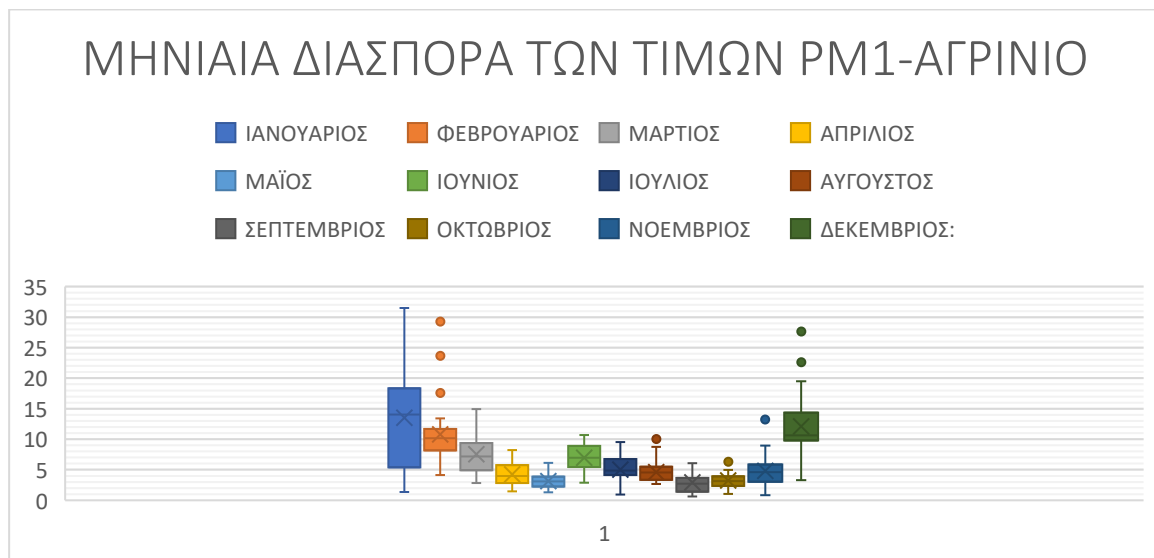
Σχήμα 4.22: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁ στη Κόρινθος.

Το σχήμα 4.23, το οποίο παρουσιάζει της μηνιαία διασπορά των τιμών PM₁ για τον σταθμό του Αγρινίου, προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά συμπεράσματα:

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Παρατηρείται έντονη έξαρση κατά τους χειμερινούς μήνες, με τις υψηλότερες διάμεσες τιμές PM₁ να καταγράφονται τον Ιανουάριο με περίπου στα 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ακολουθεί ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Αντίθετα οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφονται τον Μάιο, τον Σεπτέμβριο και τον Οκτώβριο, με τις διάμεσες τιμές να παραμένουν κάτω από τα 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Διασπορά: Η μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών καταγράφεται κυρίως τον Ιανουάριο, γεγονός που υποδηλώνει απότομες αυξομειώσεις στην ποιότητα του αέρα από μέρα σε μέρα. Αντίθετα, ο Μάιος παρουσιάζει σταθερές και χαμηλότερες τιμές καθ' όλη την διάρκεια του μήνα.

Ακραίες τιμές: Οι ακραίες τιμές παρουσιάζονται κατά την χειμερινή περίοδο. Συγκριμένα, εντοπίζονται κυρίως τον Φεβρουάριο όπου δύο μεμονωμένες ημέρες πλησίασαν και ξεπέρασαν τα $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ακολουθεί ο Δεκέμβριος με ορισμένες ακραίες τιμές καθώς και ο Ιούλιος, υποδεικνύοντας ένα μεμονωμένο επεισόδιο ρύπανσης μέσα στο καλοκαίρι.



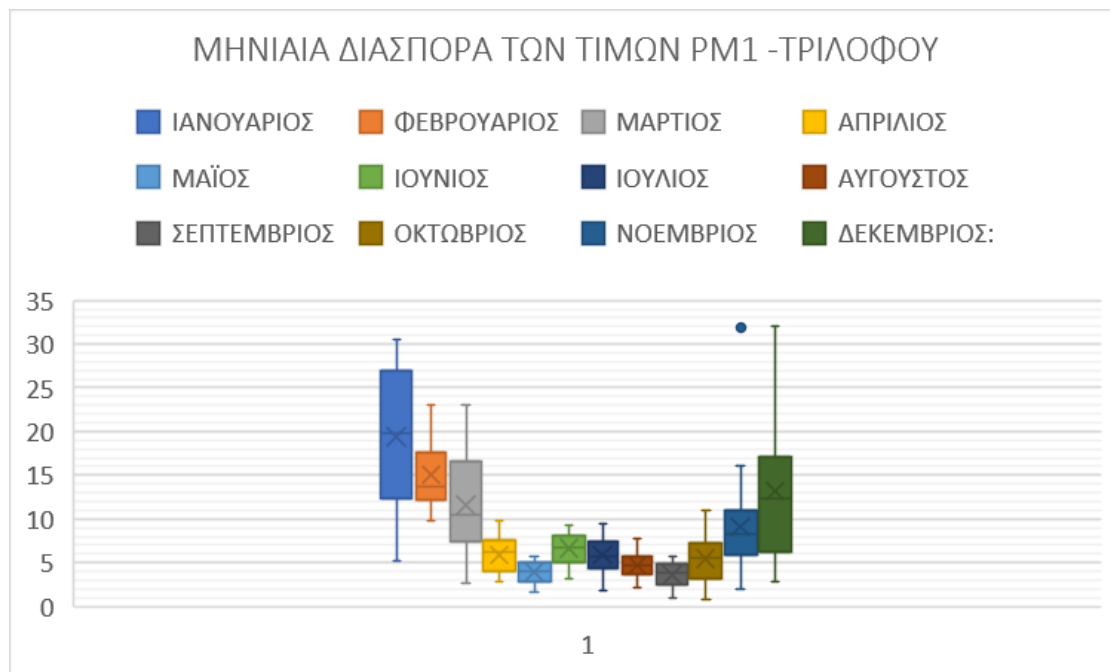
Σχήμα 4.23: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στο Αγρίνιο.

Με βάση το σχήμα 4.24, της μηνιαίας διασποράς των τιμών PM_{10} για τον σταθμό του Τριλόφου, προκύπτουν τα ακόλουθα στατιστικά συμπεράσματα

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Παρατηρείται έντονη έξαρση την χειμερινή περίοδο, με τις υψηλότερες διάμεσες τιμές PM_{10} να καταγράφονται κυρίως τον Ιανουάριο, ενώ ακολουθεί ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Αντίθετα οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές καταγράφονται από τον Μάιο έως και τον Οκτώβριο, με τις διάμεσες τιμές να παραμένουν κάτω από τα $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, υποδηλώνοντας χαμηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Διασπορά: Η μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών καταγράφεται τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο. Το γεγονός αυτό, υποδηλώνει απότομες αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις των τιμών PM₁ από μέρα σε μέρα. Αντίθετα, ο Μάιος και ο Σεπτέμβριος παρουσιάζουν πιο σταθερές και χαμηλότερες τιμές ρύπων.

Ακραίες τιμές: Ακραίες τιμές παρουσιάζονται την χειμερινή περίοδο, συγκεκριμένα εντοπίζονται κυρίως τον Νοέμβριο, όπου η συγκέντρωση ρύπων εκτοξεύεται πάνω από τα 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε ένα μεμονωμένο, αλλά πολύ έντονο επεισόδιο ρύπανσης κατά τον συγκεκριμένο μήνα.



Σχήμα 4.24: Στατιστική κατανομή και διακύμανση των συγκεντρώσεων PM₁ στο Τριλόφου.

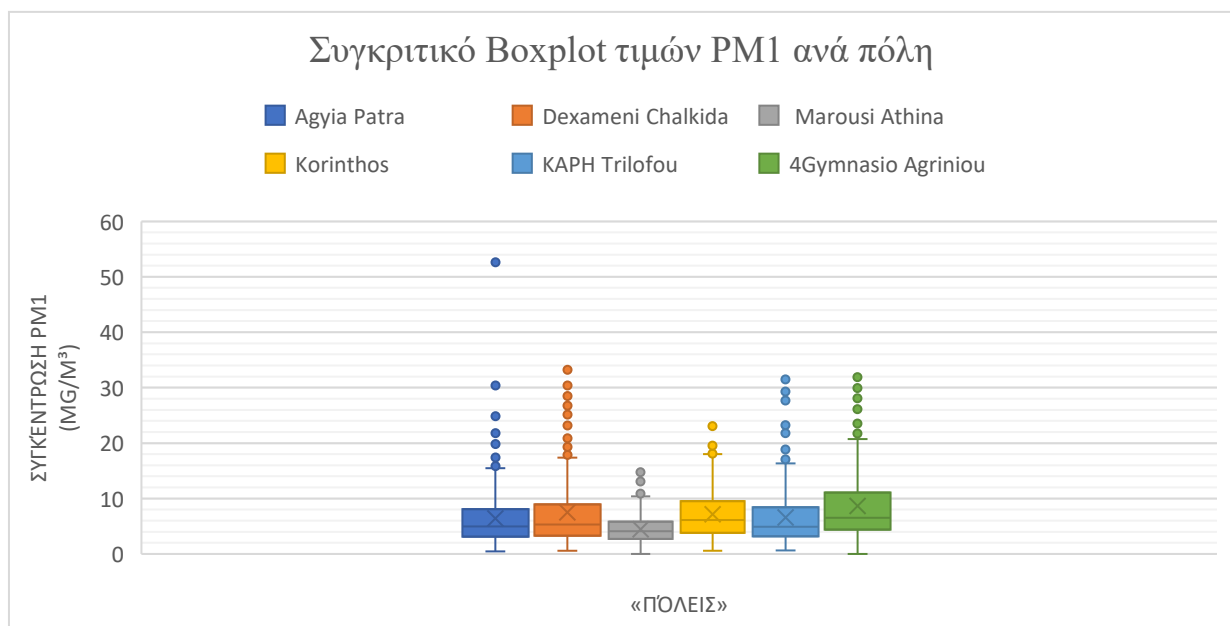
Στο σχήμα 4.25, παρουσιάζονται το συγκριτικό boxplot (Θηκογράμμα) των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM₁, για του έξι περιβαλλοντικούς σταθμούς μέτρησης. Η παράλληλη απεικόνιση των δεδομένων διευκολύνει, την συγκριτική αξιολόγηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης μεταξύ των διαφορετικών περιοχών.

Κεντρική Τάση (Διάμεσος): Ο περιβαλλοντικός σταθμός του 4ου γυμνασίου Αγρινίου παρουσιάζει την υψηλότερη διάμεση τιμή PM₁, η οποία πλησιάζει τα 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ακολουθούν η Κόρινθος και η Δεξαμενή Χαλκίδας. Αντίθετα, οι χαμηλότερες διάμεσες τιμές εμφανίζονται στον περιβαλλοντικό σταθμό του Αμαρουσίου στην Αθήνα.

Διασπορά: Ο περιβαλλοντικός σταθμός του 4ου γυμνασίου Αγρινίου, καθώς και ο σταθμός Δεξαμενή Χαλκίδας, παρουσιάζουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων. Αντιθέτως, ο περιβαλλοντικός σταθμός του Αμαρουσίου στην Αθήνα, παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα, το γεγονός αυτό υποδηλώνει μικρότερες συγκεντρώσεις PM₁.

Ακραίες τιμές: Παρατηρώντας το σχήμα 4.25, διαπιστώνεται ότι όλοι οι περιβαλλοντικοί σταθμοί παρουσιάζουν ακραίες τιμές. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την εμφάνιση μεμονωμένων επεισοδίων αυξημένων συγκεντρώσεων PM₁. Η υψηλότερη ακραία τιμή καταγράφεται στον περιβαλλοντικό σταθμό Αγυιας Πάτρας, όπου η συγκέντρωση υπερβαίνει τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ακολουθούν η Δεξαμενή Χαλκίδας, ΚΑΠΗ Τριλόφου και το 4ο γυμνάσιο Αγρινίου, όπου παρουσιάζουν αρκετές τιμές να προσεγγίζουν ή να ξεπερνούν τα 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, υποδηλώνοντας μεμονωμένα επεισόδια αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 4.25: Συγκριτικό Boxplot τιμών PM1 ανά πόλη

4.4 Επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων PM₁ ανά Πόλη

Μετά την ολοκλήρωση της βασικής στατιστικής επεξεργασία και της ανάλυση της χρονικής και χωρικής κατανομής των συγκεντρώσεων PM₁, στην παρούσα υποενότητα δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην διερεύνηση των επεισοδίων αυξημένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η αξιολόγηση βασίζεται στην καταγραφή των ημερών κατά τις οποίες οι συγκεντρώσεις PM₁ υπερέβησαν το όριο των 25 µg/m, όπου χρησιμοποιείται ως ερευνητικό κατώφλι αναφοράς, με σκοπό τον εντοπισμό ημερών με αυξημένες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM₁.

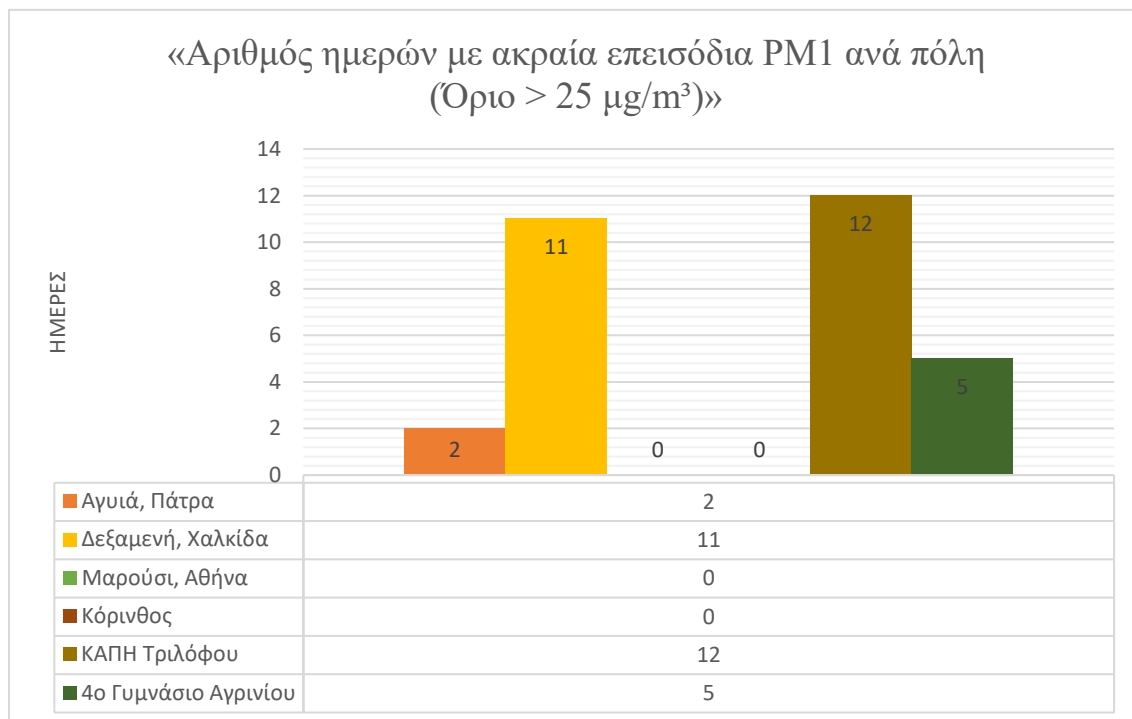
Πόλη	Αριθμός ημερών (> 25 µg/m ³)	Ποσοστό ημερών (%)	Μέγιστη ημερήσια τιμή (µg/m ³)	Μέγιστη ωριαία τιμή (µg/m ³)	Διάρκεια επεισοδίων (Ημέρες ή Ωρες)
Αγυιά, Πάτρα	2	1%	52.6	198.2	1 ημέρα
Δεξαμενή, Χαλκίδα	11	3%	33.2	100.8	1-2 ημέρες . έχουν αρκετές μέρες ρύπανσης
Μαρούσι, Αθήνα	0	0%	14.72	38.1	0 ημέρες ρύπανσης, διότι δεν υπήρξε κανένα επεισόδιο
Κόρινθος	0	0%	23.05	59.4	0 ημέρες ρύπανσης, διότι δεν υπήρξε κανένα επεισόδιο
ΚΑΠΗ Τριλόφου	12	3%	32	64.1	1-2 ημέρες . έχουν αρκετές μέρες ρύπανσης
4ο Γυμνάσιο Αγρινίου	5	1%	31.49	140.2	1 ημερα

Πίνακας 4.8: Στατιστικά στοιχεία και χαρακτηριστικά ακραίων επεισοδίων PM₁ ανά πόλη μελέτης (Όριο > 25 µg/m³).

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8, παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις τόσο προς την συχνότητα όσο στην ένταση των επεισοδίων συγκεντρώσεις των PM₁. Στο σχήμα 4.26, «Διπλωματική Εργασία»

απεικονίζεται ο αριθμός των ημερών κατά τις οποίες οι ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις PM_{10} υπερέβησαν το ερευνητικό κατώφλι των $25 \mu g/m^3$. Η μεγαλύτερη επιβάρυνση μεταξύ των έξι πόλεων, καταγράφεται στο ΚΑΠΗ Τριλόφου και στη Δεξαμενή Χαλκίδας, όπου σημειώθηκε ο μεγαλύτερο αριθμό ημερών με συγκεντρώσεις PM_{10} άνω των $25 \mu g/m^3$ (12 και 11 ημέρες αντίστοιχα). Αντίθετα στο Μαρούσι και στην Κόρινθο δεν καταγράφηκαν υπερβάσεις. Τα επεισόδια στις πόλεις με τι υπερβάσεις υποδηλούν αυξημένη έκθεση του πληθυσμού σε επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων PM_{10} .

Όσον αφορά την μέγιστη ωριαία συγκέντρωση, την πρώτη θέση την κατέχει η Αγυιά, Πατρών με $198.2 \mu g/m^3$ και ακολουθεί το 4ο Γυμνάσιο Αργινίου $140.2 \mu g/m^3$. Οι συγκεντρώσεις αυτές υποδηλώνουν έντονα αλλά βραχεία διάρκειας επεισοδίων ρύπανσης. Παράλληλα, η Αγυιά Πάτρας παρουσίασε τη μεγαλύτερη ημερήσια συγκέντρωση $52.6 \mu g/m^3$ η οποία αποτελεί τιμή σχεδόν διπλάσια τιμή από το ερευνητικό κατώφλι των $25 \mu g/m^3$.

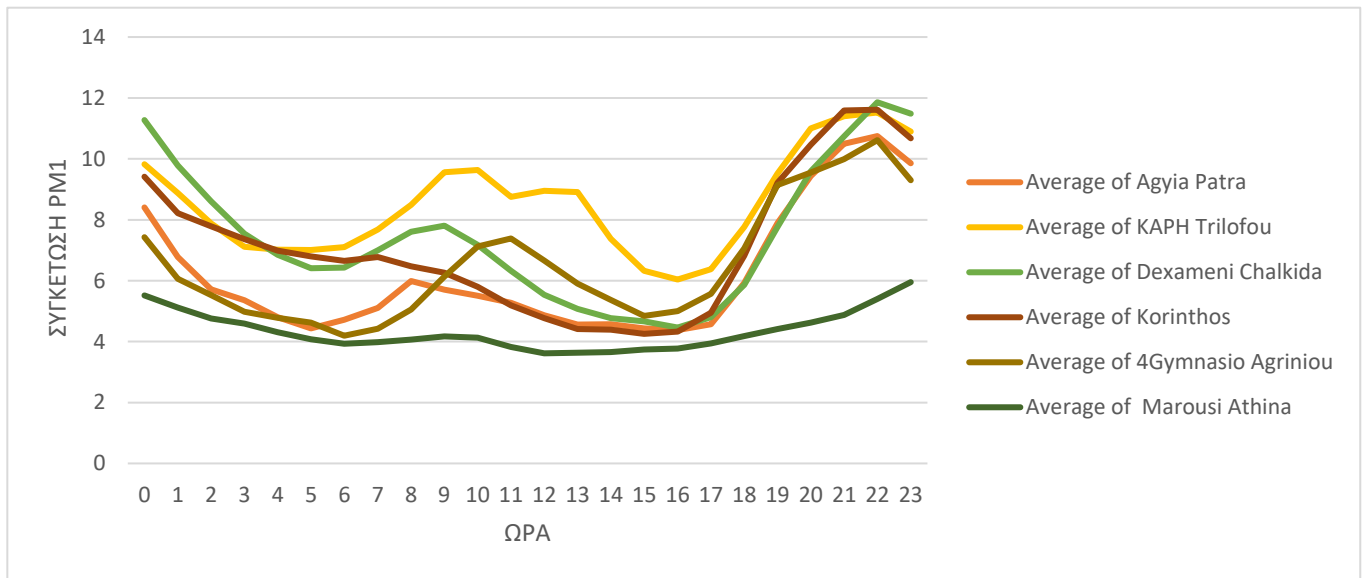


Σχήμα 4.26: Συγκριτική απεικόνιση του αριθμού ημερών με ακραία επεισόδια PM_{10} ανά πόλη μελέτης.

4.5 Ημερήσιος κύκλος και μοτίβα δραστηριότητας

Στη παρούσα υποενότητα μελετάται ο ημερήσιος κύκλος των συγκεντρώσεων PM_{10} , ο οποίος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη κατανόηση των πηγών εκπομπής και των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα.

Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας και παρουσιάζουν διαφορετικές διακυμάνσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων, η οικιακή θέρμανση και διάφορες διαδικασίες καύσης. Παράλληλα, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετεωρολογικοί συνθήκες, όπως η ανάμιξη της ατμόσφαιρας και η μεταβολή του ύψους του οριακού στρώματος, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα επίπεδα των σωματιδίων. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται το μέσο ημερήσιο προφίλ των συγκεντρώσεων PM_{10} για καθεμία από τις έξι πόλεις του συνόλου δεδομένων.



Σχήμα 4.27: Μέσο ημερήσιο προφίλ ωριαίας διακύμανσης των συγκεντρώσεων PM_{10} ($\mu g/m^3$) για τις έξι πόλεις μελέτης.

Από τη μελέτη του μέσου ημερήσιου προφίλ των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} (σχήμα 4.27) προκύπτει ότι στις έξι πόλεις εμφανίζεται ένα σαφές επαναλαμβανόμενο

ημερήσιο μοτίβο, το οποίο εμφανίζει δύο διακριτές αιχμές (peaks), οι οποίες συνδέονται με τις καθημερινές ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Η πρώτη αιχμή παρουσιάζεται τις πρώτες πρωινές ώρες, 8:00π.μ με 11:00π.μ, και είναι εμφανές και στις έξι πόλεις. Ωστόσο, στο ΚΑΠΗ Τριλόφου είναι εντονότερη και ακολουθούν η Δεξαμενή Χαλκίδας, Πάτρα και το Αγρίνιο. Η αύξηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} πιθανόν να οφείλεται κυρίως στις ταυτόχρονες δραστηριότητες δηλαδή, την πρωινή κυκλοφοριακή αιχμή, την έναρξη λειτουργίας επαγγελματικών δραστηριοτήτων και κατά λόγο τη χειμερινή περίοδο με την λειτουργία συστημάτων θέρμανσης.

Η δεύτερη αιχμή είναι εντονότερη από την πρωινή, παρατηρείται κατά τις βραδινές ώρες, μεταξύ 19:00μ.μ έως 23:00μ.μ. με τις μέγιστες τιμές να καταγράφονται περίπου μεταξύ 20:00 και 22:00. Η συγκεκριμένη αύξηση εμφανίζεται έντονη Τριλόφου και Κόρινθος, στην συνέχεια ακολουθεί η Δεξαμενή Χαλκίδα, η Πάτρα και το Αγρίνιο. Η βραδινή αύξηση πιθανόν να οφείλεται κυρίως στη χρήση οικιακής θέρμανσης, ενώ ενισχύεται από τη μείωση της θερμοκρασίας και το χαμηλότερο ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, γεγονός που περιορίζει τη διασπορά των ρύπων.

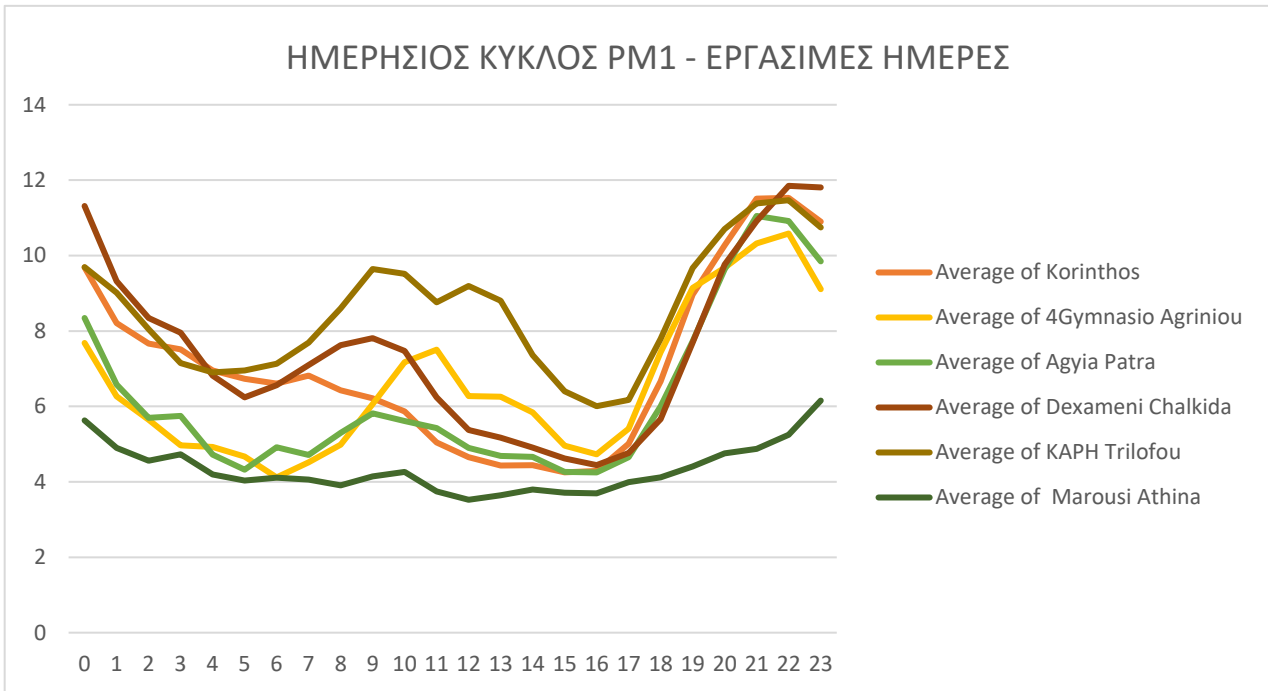
Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , καταγράφονται κατά τις πρώτες μεταμεσονύκτιες ώρες μεταξύ (02:00–05:00), το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στις ελάχιστες ανθρώπινες δραστηριότητες, καθώς και κατά τις μεσημεριανές ώρες μεταξύ (14:00–16:00), όταν η ατμοσφαιρική ανάμειξη είναι εντονότερη και ευνοεί τη διάχυση των ρύπων.

Συνολικά, οι σταθμοί στο ΚΑΠΗ Τριλόφου και η Δεξαμενή Χαλκίδας παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, αντίθετα το Μαρούσι εμφανίζει πιο σταθερό και χαμηλότερο προφίλ συγκεντρώσεων.

Στα σχήματα 4.28 και 4.29, παρουσιάζονται οι ημερήσιοι κύκλοι των συγκεντρώσεων PM_{10} για τις εργάσιμες ημέρες και για το σαββατοκύριακο αντίστοιχα.

Κατά τις εργάσιμες ημέρες, εντοπίζεται μια έντονη αύξηση των συγκεντρώσεων PM_{10} κατά τις πρώτες πρωινές ώρες περίπου 9:00 με 10:00, σχεδόν σε όλες τις πόλεις. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφοριακή δραστηριότητα όπου

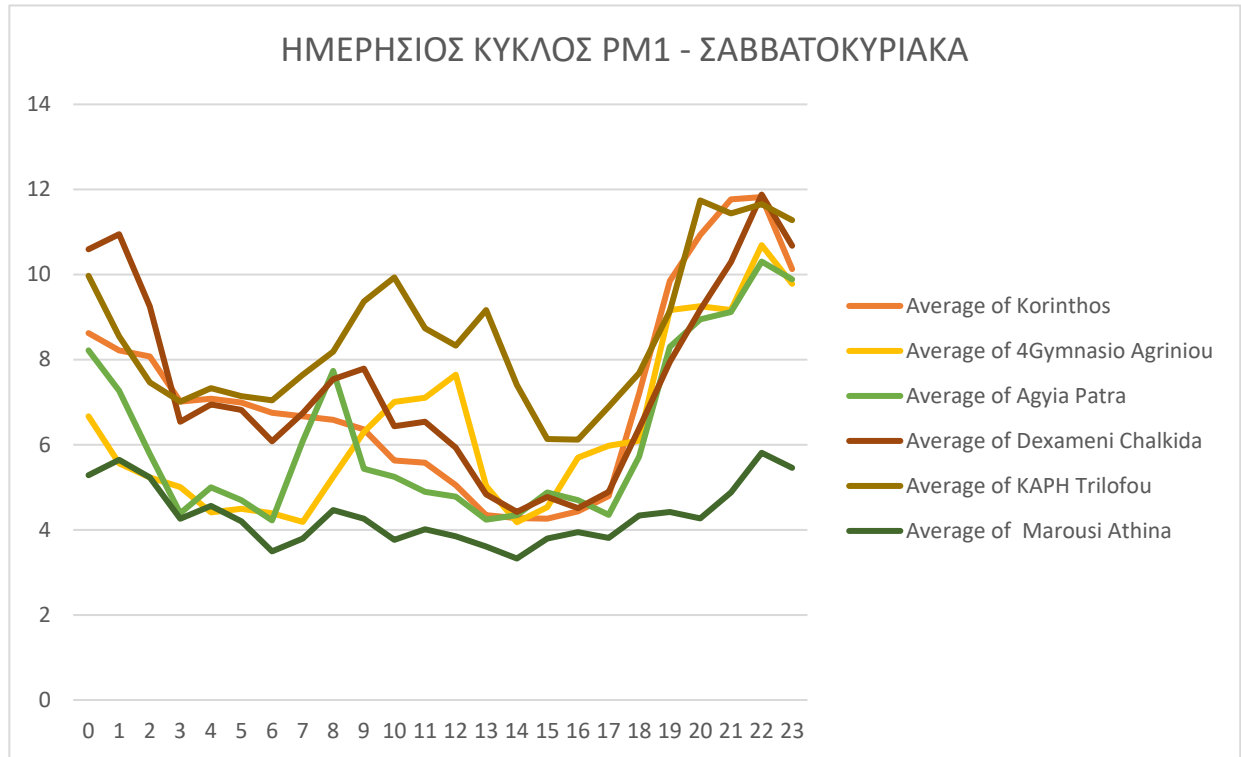
συνδέεται με τις μετακινήσεις προς τους χώρους εργασίας και τα εκπαιδευτικά ιδρύματα. Η αυξημένη κυκλοφοριακή δραστηριότητα συμβάλλει τόσο στις εκπομπές σωματιδίων όσο και στην επαναιώρηση υλικών από το οδόστρωμα. Αντίθετα το σαββατοκύριακο, οι συγκεντρώσεις PM₁ από τη πρωινή αιχμή μετατοπίζεται περίπου 10:00 με 11:00 σε πιο ήπια μορφή. Το γεγονός της διαφοροποίηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στην μειωμένη ένταση και την καθυστερημένη έναρξη των καθημερινών δραστηριοτήτων των κατοίκων σε σχέση με τις εργάσιμες ημέρες.



Σχήμα 4.28: Ημερήσιος Κύκλος PM₁ – Εργάσιμες

Και στα 2 σχήματα, παρατηρείται έντονη αύξηση των συγκεντρώσεων PM₁ τις βραδινές ώρες, με τις μέγιστες τιμές να καταγράφονται μεταξύ 19:00 και 22:00. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στον συνδυασμό δύο βασικών παραγόντων: στην αυξημένη κυκλοφορία λόγω της επιστροφή των πολιτών στις κατοικίες τους και στην λειτουργία συστημάτων οικιακής θέρμανσης. Παράλληλα, η συσσώρευση σωματιδίων ενδυναμώνεται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Ειδικότερα η πτώση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται μετά τη δύση του ηλίου οδηγεί στη μείωση του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και στην εμφάνιση θερμοκρασιακών

αναστροφών, με αποτέλεσμα να περιορίζουν την κατακόρυφη διασπορά των ρύπων και να βοηθούν στον εγκλωβισμό τους κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχημα 4.29: Ημερήσιος Κύκλος PM1 – Σαββατοκύριακα

4.6 Ανάλυση των σωματιδίων PM_{2.5} και του Λόγου PM₁/PM_{2.5}

Στην παρούσα υποενοτητα αναλύονται οι συγκεντρώσεις των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5}, καθώς και η χρονική μεταβολή του λόγου PM₁/PM_{2.5} στις υπο εξέταση περιοχές. Ο συγκεκριμένος λόγος PM₁/PM_{2.5} χρησιμοποιείται ως δείκτης της σχετικής συνεισφοράς των σωματιδίων PM₁ στο συνολικό κλάσμα των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5}, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η διερεύνηση της μεταβολής του λόγου PM₁/PM_{2.5} σε μηνιαία και εποχιακή κλίμακα, συμβάλλει στην κατανόηση της επικράτησης διαφορετικών κλασμάτων μεγέθους των σωματιδίων και επιτρέπει την εκτίμηση των διαφοροποιήσεων που

σχετίζονται με τις πηγές εκπομπής (ανθρωπογενείς ή φυσικές), καθώς και με τις διεργασίες δευτερογενούς σχηματισμού.

Στον Πίνακα 4.9, παρουσιάζονται τα βασικά περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$, στους έξι περιβαλλοντικούς σταθμούς μετρήσεις που περιλαμβάνει η εργασία: Αγινιάς (Πάτρα), Δεξαμενής (Χαλκίδα), Αμαρουσίου (Αθήνα), Κορίνθου, ΚΑΠΗ Τριλόφου και 4ου Γυμνασίου Αγρινίου.

Πίνακας 4.9: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) ανά σταθμό μέτρησης.

	Αγινιά, Πάτρα	Δεξαμενή, Χαλκίδα	Μαρούσι, Αθήνα	Κόρινθος	ΚΑΠΗ Τριλόφου	4ο Γυμνάσιο Αγρινίου
Μέση τιμή	7.71	9.42	5.86	9.36	11.37	7.69
Διάμεσο	5.6	6.1	5	6.4	8.1	5.4
Min	0.4	0.4	0.6	0.5	0.6	0.4
Max	250	125	49.6	74.5	83.3	157.3
STD (Τυπική Απόκλιση)	8.98	10.44	3.70	8.94	10.01	8.33

Από την ανάλυση των στατιστικών δεικτών παρατηρείται ότι η υψηλότερη μέση συγκέντρωση των $PM_{2.5}$, καταγράφεται στο ΚΑΠΗ Τριλόφου με $11.37 \mu g/m^3$, ακολουθούμενο από την Δεξαμενή Χαλκίδας με $9.42 \mu g/m^3$ και την Κόρινθο, με $9.36 \mu g/m^3$. Αντίθετα, το Μαρούσι με $5.86 \mu g/m^3$ παρουσιάζει τον χαμηλότερο δείκτη μέσης τιμής, ενώ ακολουθεί η Αγινιά Πάτρας με $7.71 \mu g/m^3$ και το 4ο γυμνάσιο Αγρινίου με $7.69 \mu g/m^3$ όπου κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα. Σε όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς παρατηρείται ότι η μέση τιμή είναι υψηλότερη σε σχέση με τη διάμεσο. Για παράδειγμα, στον σταθμό της Αγινιάς η μέση συγκέντρωση ανέρχεται $7.71 \mu g/m^3$, ενώ η διάμεσος $5.60 \mu g/m^3$. Αυτή η διάφορα δείχνει ότι οι περισσότερες τιμές έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις, ωστόσο υπάρχουν κάποιες υψηλές τιμές που ανεβάζουν τον μέσο όρο.

Η τυπική απόκλιση αποτυπώνει την μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων γύρω από τη μέση τιμή. Οι υψηλότερες τιμές της τυπική απόκλιση παρατηρούνται στους σταθμούς Δεξαμενή Χαλκίδας με $10.44 \mu g/m^3$, στο ΚΑΠΗ Τριλόφου με $10.01 \mu g/m^3$ και στο 4ο γυμνάσιο Αγρινίου με $8.33 \mu g/m^3$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την πιθανόν εμφάνιση επεισοδίων αυξημένης ρύπανσης. Οι διακυμάνσεις αυτές, πιθανόν οφείλονται σε εποχικές πηγές εκπομπών, όπως η οικιακή θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς και σε

μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων. Αντίθετα, στον σταθμό του Αμαρουσίου η τυπική απόκλιση κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα με $3.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις παραμένουν σχετικά κοντά στη μέση τιμή, παρουσιάζοντας μικρότερες διακυμάνσεις, επομένως, πιο σταθερό επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Όσον αφορά τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές, παρατηρείται ότι οι ελάχιστες τιμές σε κάθε σταθμό βρίσκονται περίπου κοντά στο μηδέν. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την εμφάνιση χρονικών περιόδων με πολύ χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$, οι οποίες μπορεί να συνδέονται με ευνοϊκές συνθήκες ατμοσφαιρικής διασποράς και μειωμένες εκπομπές. Αντίθετα, οι υψηλές μέγιστες τιμές που έχουν καταγραφεί, πιθανόν να οφείλονται σε έντονα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η υψηλότερη μέγιστη συγκέντρωση καταγράφηκε στην Αγυιά Πατρών με $250,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ιδιαίτερα υψηλές τιμές παρατηρήθηκαν στο 4ο Γυμνάσιο Αγρινίου με $157,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, στο ΚΑΠΗ Τριλόφου $146,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και στη Δεξαμενή Χαλκίδας $125,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης επεισοδίων υψηλής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις περιοχές.

4.7.1 Ανάλυση Λόγου $\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5}$ στην Αγυιά, Πάτρα

Στην παρούσα υποενότητα αυτή, εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική μεταβολή του λόγου $\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5}$ για τον σταθμό της Αγυιάς Πατρών. Ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται ως δείκτης της συμμετοχής των πολύ λεπτών σωματιδίων PM_1 στο συνολικό κλάσμα των $\text{PM}_{2.5}$.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.10, η διάμεση τιμή του λόγου $\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5}$ ανέρχεται 0.79. Αντίθετα η μέση τιμή του λόγου $\text{PM}_1/\text{PM}_{2.5}$ είναι ελαφρώς χαμηλότερα και διαμορφώνεται 0.77. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ένα μεγάλο μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$ αποτελείται από πολύ λεπτά αιωρούμενα σωματίδια PM_1 . Η διαφορά της μέσης τιμής και της διάμεσος οφείλεται πιθανόν αποκλειστικά στην ασυμμετρία δεδομένων, καθώς οι χαμηλές ακραίες τιμές επηρεάζουν τη μέση τιμή.

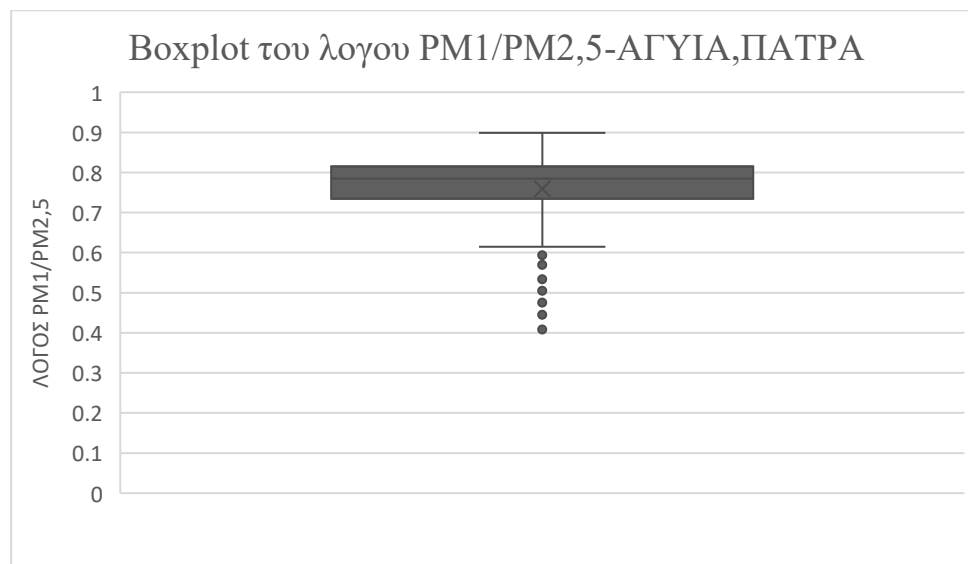
Πίνακας 4.10: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό της Αγυιάς Πατρών.

Μέση Τιμή	0.77
Διάμεσος	0.79

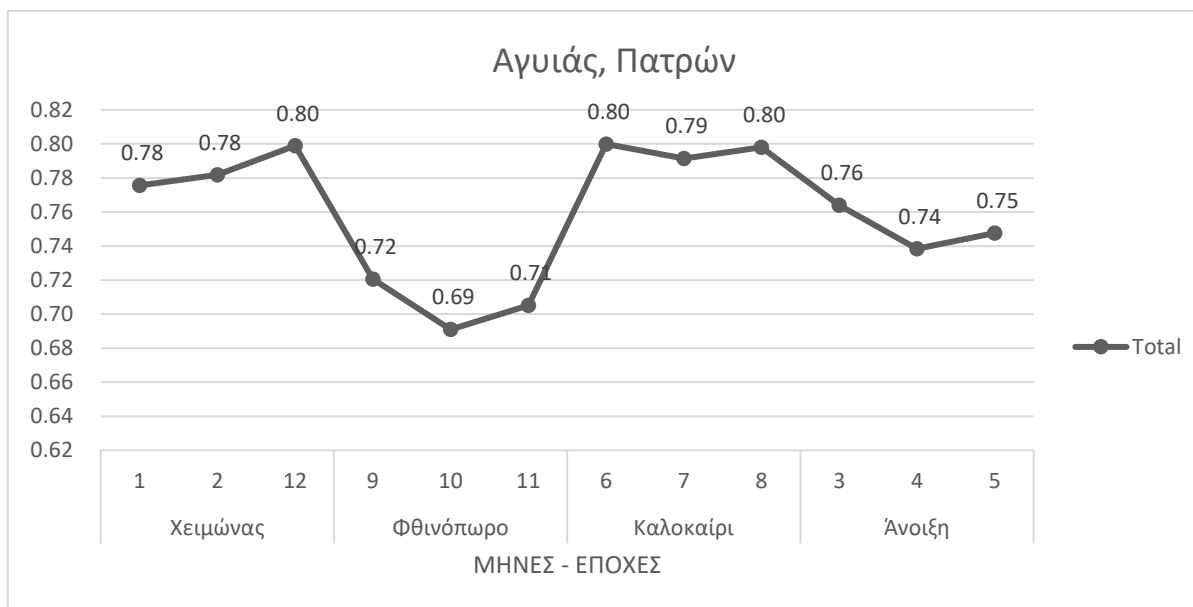
Στο Σχήμα 4.36, απεικονίζεται το θηκόγραμμα (boxplot) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$, το όπου παρουσιάζει τη στατιστική κατανομή των μετρήσεων του σταθμού της Αγυιάς Πατρών, καθώς έχει καταγραφεί η κεντρική τάση, η διασπορά και οι ακραίες τιμές.

Η διάμεσο του λόγου βρίσκεται κοντά στο 0,79, ενώ η μέση τιμή, εντοπίζεται με το σύμβολο X, είναι ελαφρώς χαμηλότερη και εντοπίζεται κοντά 0,77. Οι περισσότερες τιμές κυμαίνονται μεταξύ από 0,73 έως και 0,82, ενώ παρατηρούνται ότι υπάρχουν αρκετές χαμηλές ακραίες τιμές. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται μεμονωμένες κουκκίδες κάτω από τα κατώτερα όρια του θηκογράμματος, όπου κυμαίνονται μεταξύ 0,40 έως 0,60.

Η σχετικά σταθερή κατανομή των τιμών επιβεβαιώνει ότι τα PM_1 αποτελούν σημαντικό κυρίαρχο μέρος του κλάσματος $PM_{2.5}$ στην περιοχή της Αγυιάς. Επιπλέον, να αναφερθεί ότι η παρουσία των χαμηλών ακραίων τιμών, σε κάποιες χρονικές περιόδους υποδηλώνει πιθανόν επεισόδια με αυξημένη παρουσία χονδρύτερων σωματιδίων $PM_{2.5}$ και πιθανή επίδραση της υγρασίας στην περιοχή της Αγυιάς.



Σχήμα 4.30:Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ -Αγυιάς, Πατρών
«Διπλωματική Εργασία»



Σχήμα 4.31: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην Αγυιά Πατρών

Στο Σχήμα 4.37, παρουσιάζεται η μηνιαία και εποχική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην περιοχή της Αγυιάς Πατρών, ομαδοποιημένη ανά εποχή. Ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η συμμετοχή των πολύ λεπτών σωματιδίων PM_1 στη συνολική μάζα των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$.

Κατά τους πρώτους μήνες του έτους, παρατηρείται ότι τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα περίπου 0.78, ενώ η πρώτη κορύφωση του χειμώνα εντοπίζεται το Δεκέμβριο με τον λόγο $PM_1/PM_{2.5}$ να κορυφώνεται στο 0.80. Το γεγονός αυτό, υποδηλώνει την έντονη κυριαρχία των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων PM_1 στο κλάσμα των $PM_{2.5}$. Επιπλέον, η τάση αυτή μπορεί να οφείλεται στην έναρξη της περιόδου χρήση συστημάτων θέρμανσης.

Από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο παρουσιάζεται ήπια μεταβολή του λόγου, με το λόγο να κυμαίνεται από 0.74 τον Απρίλιο, 0.75 τον Μάιο και 0.80 τον Ιουνίου. Ενώ κατά τους θερινούς μήνες παρουσιάζεται σχετικά μια δεύτερη σημαντική κορύφωση, με το λόγο $PM_1/MP_{2.5}$ να κυμαίνεται από 0.79 έως 0.80. Η αυξημένη συμμετοχή των PM_1 πιθανών να οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες και στην έντονη ηλιοφάνεια του καλοκαιριού καθώς ευνοούν τις φωτοχημικές διεργασίες για φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα και βοηθούν στον σχηματισμό πολύ λεπτών σωματιδίων από αέριους ρύπους

Η ελάχιστη τιμή καταγράφεται τον φθινόπωρο και συγκεκριμένα τον Οκτώβριο με την τιμή να ανέρχεται 0,69, και στην συνέχεια ακολουθεί μια σταδιακή αύξηση των τιμών προς στο τέλος του έτους.

4.7.2 Ανάλυση Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην Δεξαμενή, Χαλκίδας

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για την πόλη της Δεξαμενής στη Χαλκίδα. Ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται ως δείκτης της συμμετοχής των πολύ λεπτών σωματιδίων PM_1 στο συνολικό κλάσμα των $PM_{2.5}$. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.11, η διάμεση τιμή του λογού $PM_1/PM_{2.5}$ ισούνται με 0,78 ενώ η μέση τιμή με 0,75. Σύμφωνα με την μέση τιμή, το 75% της συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ αποτελείται από σωματίδια PM_1 . Το γεγονός αυτό δείχνει ότι στην περιοχή αυτή, τα πολύ λεπτά αιωρούμενα σωματίδια (PM_1) αποτελούν κυρίαρχο μέρος του κλάσματος των λεπτών σωματιδίων $PM_{2.5}$.

Επιπλέον, η μέση τιμή είναι ελαφρώς μικρότερη από τη διάμεσο, το γεγονός αυτό υποδηλώνει την παρουσία των χαμηλότερων τιμών, Ωστόσο, ο σχετικά υψηλός λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ δείχνει ότι στον σταθμό Δεξαμενής Χαλκίδας, επικρατούν τα πολύ λεπτά σωματίδια PM_1 μέσα στο κλάσμα των $PM_{2.5}$, γεγονός που υποδηλώνει σημαντική παρουσία πολύ μικρών αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της περιοχής.

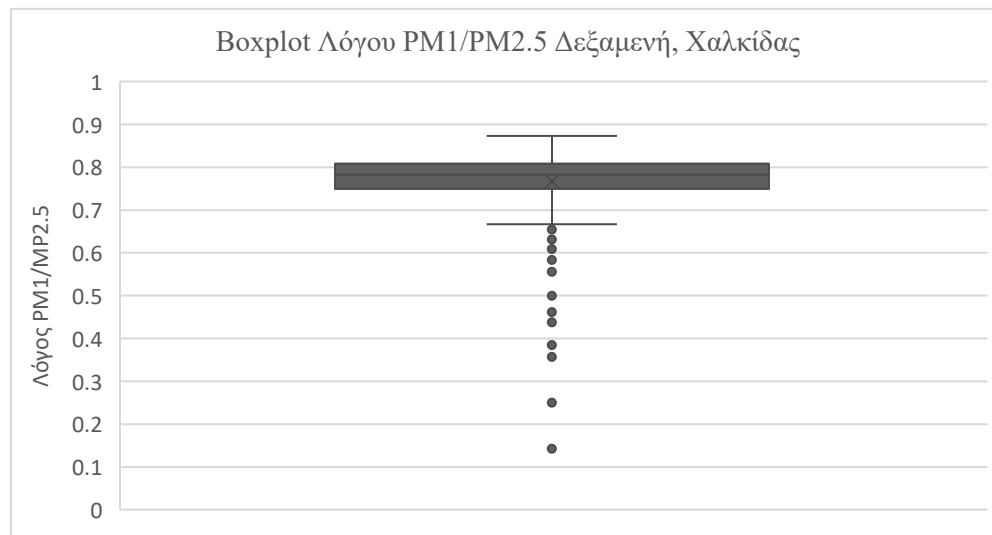
Πίνακας 4.11: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό της Δεξαμενής, Χαλκίδας .

Μέση Τιμή	0.75
Διάμεσος	0.78

Το θηκόγραμμα (boxplot) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.38, παρουσιάζει τη στατιστική κατανομή των μετρήσεων του σταθμού Δεξαμενής της Χαλκίδας, αποτυπώνοντας τη κεντρική τάση, τη διασπορά και τις ακραίες τιμές. Εξετάζοντας το θηκόγραμμα, παρατηρείται ότι οι περισσότερες τιμές έχουν συγκεντρωθεί σε ένα σχετικά μικρό εύρος μεταξύ 0,75 και 0,81. Το γεγονός αυτό παρουσιάζει ότι ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ παραμένει σχετικά σταθερός στις περισσότερες μετρήσεις. Η διάμεση τιμή

ανέρχεται 0,78, ενώ η μέση τιμή 0.75 ελαφρώς χαμηλότερη. Επιπλέον, παρατηρούνται αρκετές χαμηλές τιμές, με ορισμένες να προσεγγίζουν το 0,15. Το γεγονός υποδηλώνει ότι σε ορισμένες χρονικές περιόδους το ποσοστό των PM_1 στο σύνολο των $PM_{2.5}$ ήταν σημαντικά μικρότερο από το συνηθισμένο.

Το θηκόγραμμα (boxplot) παρουσιάζει ότι ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ είναι υψηλός και σχετικά σταθερός, υποδηλώνοντας ότι τα PM_1 αποτελούν το κυρίαρχο κλάσμα των $PM_{2.5}$ στη συγκεκριμένη περιοχή.



Σχήμα 4.32:Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ Δεξαμενή, Χαλκίδας

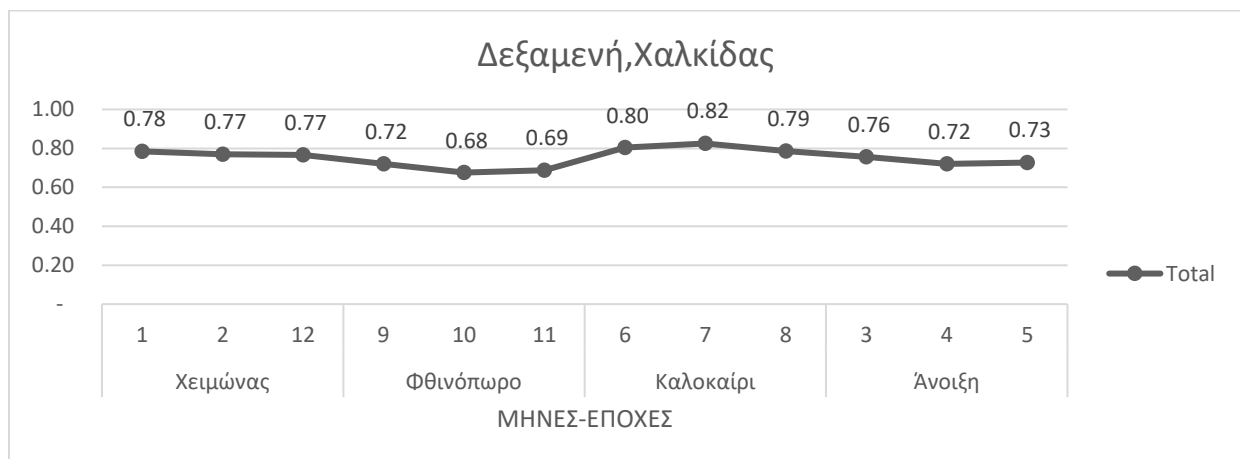
Στο Σχήμα 4.39 απεικονίζεται το διάγραμμα της μηνιαίας και εποχικής εξέλιξης του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό της Δεξαμενής Χαλκίδας. Ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ παρουσιάζει σχετικά μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους, γεγονός που δείχνει ότι η συμβολή των PM_1 στο κλάσμα των $PM_{2.5}$ παραμένει γενικά σταθερή. Οι υψηλότερες τιμές έχουν καταγραφεί τους θερινούς μήνες με τον Ιούνιο 0,80 και τον Ιούλιο να φτάνει περίπου 0,82. Αντίθετα οι χαμηλότερες τιμές εμφανίζονται τον Οκτώβριο ανέρχεται περίπου 0,68, ενώ σχετικά χαμηλές τιμές καταγράφονται τον Απρίλιο και τον Σεπτέμβριο με 0,72, και τον Νοέμβριο 0,68. Συνολικά, Ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ κυμαίνεται μεταξύ 0,68-0,82, κατά την διάρκεια του έτους, γεγονός που δείχνει ότι τα PM_1 αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του κλάσματος των $PM_{2.5}$ σε όλους τους μήνες.

Κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους, παρατηρείται ότι ο λόγος παραμένει σχετικά σε υψηλά επίπεδα περίπου 0,77-0,78. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι τα PM_{10} αποτελούν σημαντικό ποσοστό των $PM_{2.5}$. Τα υψηλά επίπεδα πιθανόν να σχετίζονται με εκπομπές από τα συστήματα θέρμανσης και της σταθερές συνθήκες της ατμόσφαιρας, που ευνοούν τη συσσώρευση λεπτών σωματιδίων.

Κατά την άνοιξη, παρουσιάζεται μια μικρή μείωση του λόγου $PM_{10}/PM_{2.5}$, κυρίως τον Απρίλιο 0,72. ενώ τον Μάρτιο κυμαίνεται 0,76 και ο Μάιος 0,73, αντίστοιχα. Η μεταβολή αυτή πιθανόν να οφείλεται σε αλλαγές των μετεωρολογικών συνθηκών και των πηγών εκπομπών.

Κατά το καλοκαίρι έχουν καταγραφθεί οι υψηλότερες τιμές του λόγου $PM_{10}/PM_{2.5}$, με τον Ιούνιο 0,80, τον Ιούλιο 0,82, τον Αύγουστο 0,79. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στην αυξημένη φωτοχημική δραστηριότητα και στον σχηματισμό δευτερογενών λεπτών σωματιδίων, που ευνοούνται από τις υψηλές θερμοκρασίες και την έντονη ηλιακή ακτινοβολία.

Κατά το φθινόπωρο, παρατηρώντας ότι ο λόγος $PM_{10}/PM_{2.5}$ παρουσιάζει μείωση, με τη χαμηλότερη καταγραφή τιμών τον Οκτώβριο 0,68 και τον Νοέμβριο 0,69. Η μείωση αυτή πιθανόν να σχετίζεται με τις μεταβολές στις μετεωρολογικές συνθήκες και στις πηγές εκπομπών .



Σχήμα 4.33: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_{10}/PM_{2.5}$ στη Δεξαμενή, Χαλκίδας

4.7.3 Ανάλυση Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στο Μαρούσι, Αθήνας

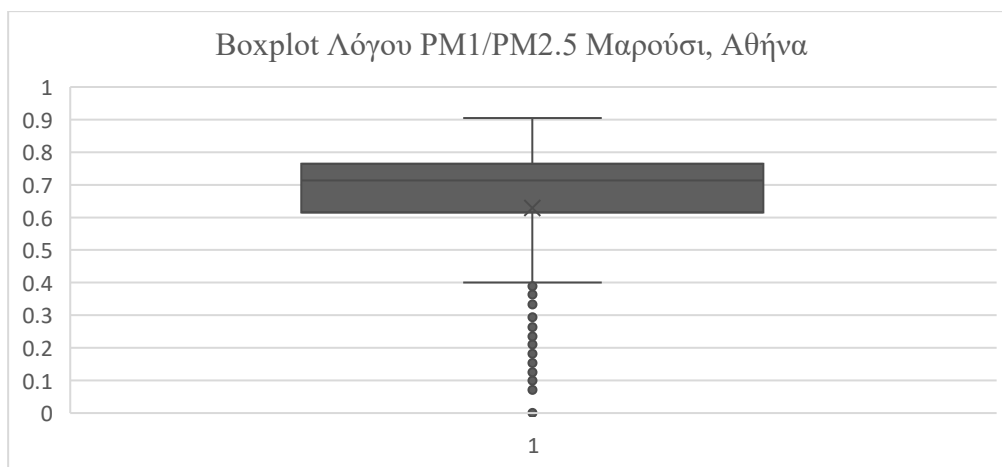
Στην υποενότητα αυτή μελετάται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό του Αμαρουσίου της Αθήνας. Στον σταθμό του Αμαρουσίου, η μέση τιμή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ είναι 0,69, ενώ η διάμεσος τιμή σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12 είναι 0,72. Παρατηρείται ότι δυο τιμές είναι σχετικά κοντά μεταξύ τους.

Η διάμεσος είναι σχετικά μεγαλύτερη από την μέση τιμή, με το γεγονός αυτό να υποδηλώνει ότι υπάρχουν ορισμένες χαμηλές τιμές του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$, οι οποίες μειώνουν τη μέση τιμή, χωρίς ωστόσο να επηρεάζουν σημαντικά τη διάμεσο. Στις περισσότερες μετρήσεις, τα PM_1 αντιστοιχούν περίπου στο 72% της συγκεντρώσεως των $PM_{2.5}$.

Πίνακας 4.12: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό του Αμαρουσίου, Αθήνας .

Μέση Τιμή	0.69
Διάμεσος	0.72

Στο σχήμα 4.40, απεικονίζεται το θηκόγραμμα (boxplot) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$, το οποίο παρουσιάζει τη στατιστική κατανομή των μετρήσεων του σταθμού του Αμαρουσίου, καθώς αποτυπώνοντας τη κεντρική τάση, τη διασπορά και τις ακραίες τιμές. Σύμφωνα με το διάγραμμα, η διάμεσος τιμή εντοπίζεται στο 0,72, ενώ η μέση τιμή εμφανίζεται ελαφρώς χαμηλότερη, περίπου στο 0,69. Λόγω της παρουσίας αρκετών χαμηλών τιμών επηρεάζουν τη συνολική κατανομή. Οι περισσότερες τιμές κυμαίνονται περίπου από 0,40 έως 0,90, ενώ παράλληλα εμφανίζονται αρκετές τιμές κάτω από το 0,40 και ορισμένες τιμές πλησιάζουν το μηδέν. Η παρουσία αυτών των χαμηλών τιμών δείχνει, ότι σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, το ποσοστό του PM_1 σε σχέση με το $PM_{2.5}$ μειώνεται σημαντικά, πιθανόν να οφείλονται στην αύξηση του κλάσματος σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους μέσα στην κατηγορία $PM_{2.5}$.



Σχήμα 4.34:Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ Μαρούσι, Αθήνα

Στο σχήμα 4.4, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία και εποχή τιμή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για το σταθμό του Αμαρουσίου της Αθήνας. Οι τιμές κυμαίνονται περίπου μεταξύ 0,68 και 0,72 παρουσιάζονται σχετικά περιορισμένες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους.

Κατά την χειμερινή περίοδο, παρατηρώντας τον Ιανουάριο 0,69 , τον Φεβρουάριο 0,71 και τον Δεκέμβριο 0.70, ότι ο λόγος παραμένει σχετικά σε σταθερές τιμές, το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές.

Κατά τον φθινόπωρο, οι τιμές του Σεπτεμβρίου και του Οκτώβριου με 0.71, και τον Νοέμβριο 0,70, παρουσιάζουν υψηλή εποχή τιμή του λόγου

Τους θερινούς μήνες παρουσιάζει μεγαλύτερη μηνιαία διακύμανση. Με τον Ιούνιο να καταγράφεται με υψηλότερη τιμή 0,72, ενώ ο Ιούλιος μειώνεται σημαντικά στο 0,68 και στην συνέχεια ο Αύγουστος παρουσιάζει μια μικρή αύξηση 0,70. Η αύξηση αυτή, πιθανόν να οφείλεται σε διάφορες συνθήκες που ευνοούν τον σχηματισμό και τη διατήρησή των δευτερογενών σωματιδίων με πολύ μικρή διάμετρο.

Κατά την άνοιξη, παρατηρείται μια σταδιακή μείωση του λόγου, οι τιμές διαμορφώνονται σε 0,69 τον Μάρτιο, 0,71 τον Απρίλιο και 0,69 τον Μάιο, παρουσιάζουν μια σταθερή συμπεριφορά του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ χωρίς να παρουσιάζει έντονη διακύμανση.

Συνολικά, σε εποχική βάση, ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις στις διακυμάνσεις, κυμαίνεται μεταξύ 0,70-0,71. Το φθινόπωρο έχει την υψηλότερη εποχή τιμή σε σχέση με τις άλλες εποχές. Ο σταθμός του Αμαρουσίου παρουσιάζει σχετικά σταθερή συμπεριφορά χωρίς έντονη εποχική μεταβολή.

Σε μηνιαία διακύμανση η μεγαλύτερη τιμή του λόγου παρουσιάζεται το καλοκαίρι με τον Ιούνιο να φτάνει 0,72 όπου παρουσιάζει αυξημένη συμμετοχή του PM_1 , το γεγονός αυτό πιθανόν να συνδέεται με τις υψηλές θερμοκρασίες, την έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τον αυξημένο σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων, καθώς με τις συνθήκες αυτές ευνοούν την παραγωγή πολύ λεπτών σωματιδίων, με αποτέλεσμα το PM_1 να αποτελεί μεγαλύτερο ποσοστό του $PM_{2.5}$.



Σχήμα 4.35: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στο Μαρούσι, Αθήνας

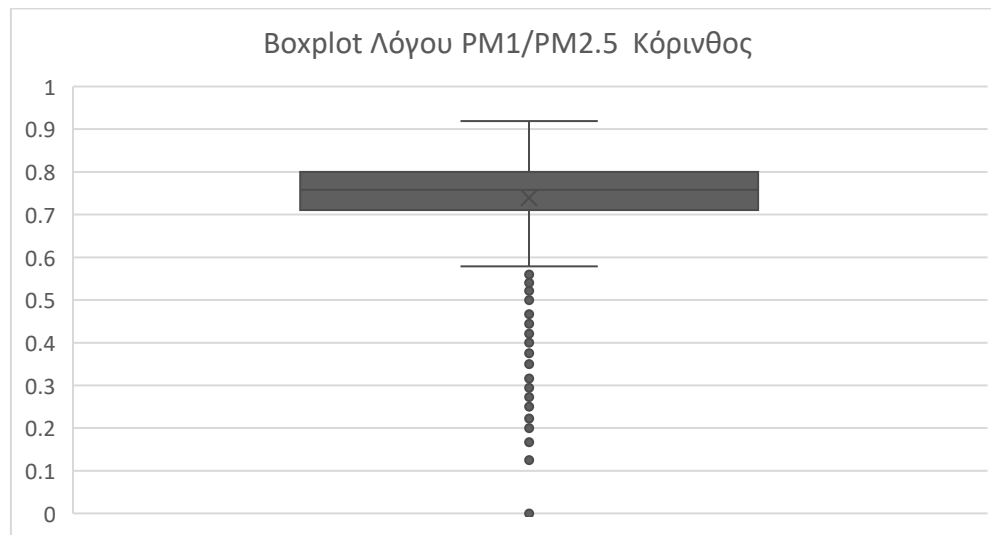
4.7.4 Ανάλυση Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην Κόρινθο

Στην υποενότητα αυτή, εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό της πόλη της Κορινθίου. Στο Πίνακα 4.13, απεικονίζεται τα βασικά στατιστικά στοιχεία, με τη διάμεση τιμή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ να ισούνται 0,75, παρουσιάζονται ελαφρώς υψηλότερη σε σχέση με την μέση τιμή του λόγου $0,74\mu g/m^3$.

Στο σχήμα 4.42 παρουσιάζεται το θηκόγραμμα (boxplot) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$, το οποίο δείχνει ότι οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, με το γεγονός αυτό, το 50% των μετρήσεων να εντοπίζονται μεταξύ 0,71 έως 0,80. Οι τιμές κυμαίνονται περίπου από 0,58 έως 0,92. Ωστόσο, υπάρχει σημαντικός αριθμός με αρκετές χαμηλές τιμές. Οι χαμηλές τιμές είναι η αιτία ότι η μέση τιμή 0,74 είναι ελαφρώς χαμηλότερη από τη διάμεσο 0,76, υποδηλώνοντας αρνητική ασυμμετρία της κατανομής.

Πίνακας 4.13: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό της Κορινθίου.

Μέση Τιμή	0.74
Διάμεσος	0.75



Σχήμα 4.36:Boxplot Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ Κόρινθος

Στο Σχήμα 4.43, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία και εποχή μεταβολή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για την πόλη της Κορίνθου. Ο λόγος διατηρείται σχετικά σε υψηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με τις μηνιαίες τιμές να κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,74 και 0,76.

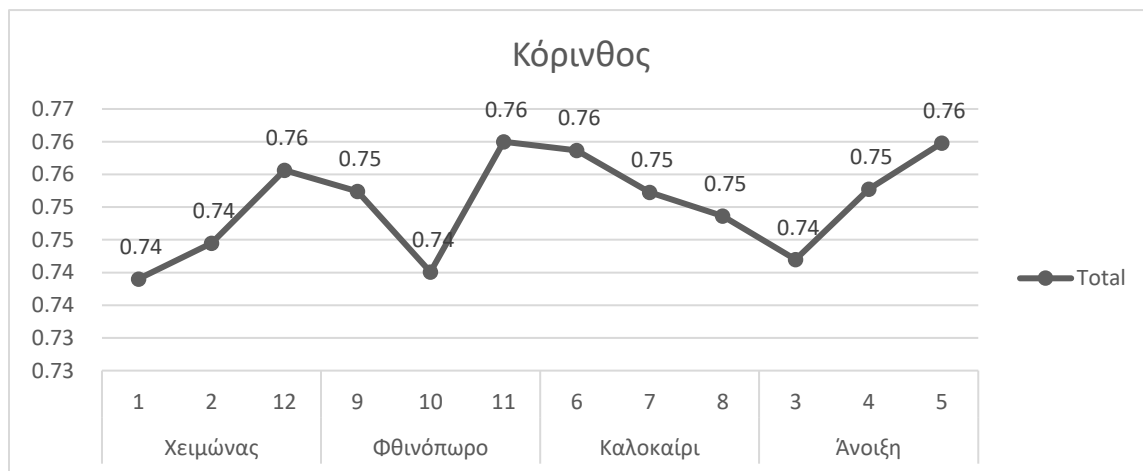
Κατά την χειμερινή περίοδο, ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ παρουσιάζει τιμή 0,74 για τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο, ενώ τον Δεκέμβριο αυξάνεται σε 0,76.

Κατά το φθινόπωρο, οι τιμές διαμορφώνονται σε 0,75 τον Σεπτέμβριο, 0,74 τον Οκτώβριο και 0,76 τον Νοέμβριο. Επομένως, δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή μεταξύ των μηνών της φθινοπωρινής περιόδου.

Κατά τους θερινούς μήνες ότι τιμές συνεχίζουν και παραμένουν σε υψηλά επίπεδα με το λόγο να ανέρχεται σε 0,76 τον Ιούνιο και τον Ιούλιο, και τον Αύγουστο 0,75. Οι υψηλότερες τιμές του λόγου $PM_{10}/PM_{2.5}$ ήταν την καλοκαιρινή περίοδο, δείχνει αυξημένη συμμετοχή των PM_{10} , πιθανών να οφείλεται στην έντονη ηλιακή ακτινοβολία και στις αυξημένες φωτοχημικές αντιδράσεις.

Κατά την άνοιξη, ο λόγος παρουσιάζει τιμές 0,74 τον Μάρτιο, 0,75 τον Απρίλιο και 0,76 τον Μάιο, παρουσιάζοντας και εδώ πολύ μικρές διακυμάνσεις.

Όσον αφορά την Η εποχική βάση, οι διαφοροποιήσεις είναι περιορισμένες, καθώς οι μέσες τιμές των εποχών βρίσκονται περίπου στο 0,75. Η θερινή περίοδο παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερη τιμή με τον Ιούνιο, ο λόγος να καταγράφεται 0,76, ενώ το χειμώνα και το φθινόπωρο να έχουν καταγράψει 0,74 .



Σχήμα 4.37: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_{10}/PM_{2.5}$ στην Κόρινθο

4.7.5 Ανάλυση Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ Τριλόφου

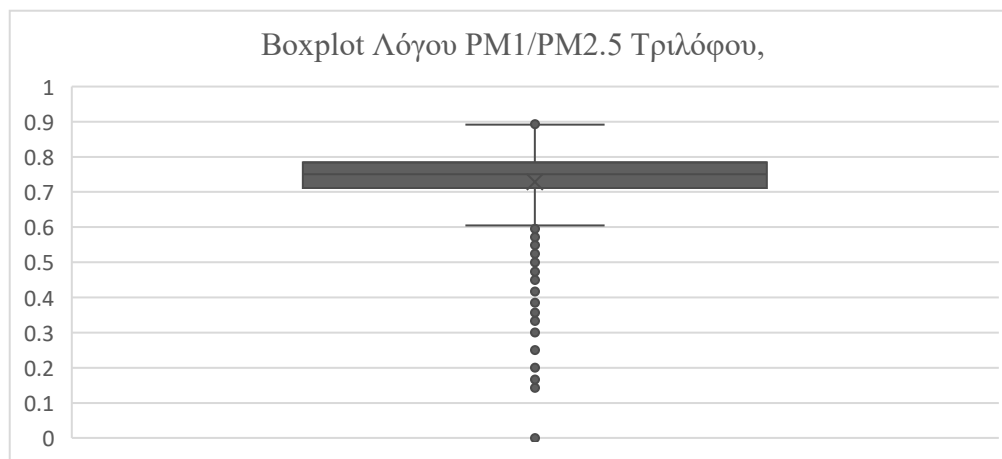
Στην υποενότητα αυτή, εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό της πόλης Τριλόφου. Στο Πίνακα 4.14, απεικονίζεται τα βασικά στατιστικά στοιχεία, με τη διάμεση τιμή του λογού $PM_1/PM_{2.5}$ να ισούνται 0,75, ενώ η μέση τιμή 0,74. Παρατηρείται και σε αυτή την πόλη, ότι η διάμεσος είναι ελαφρώς υψηλότερη από τη μέση τιμή. Το γεγονός αυτό, υποδηλώνει την παρουσία ορισμένων χαμηλότερων τιμών, οι οποίες επηρεάζουν τη μέση τιμή της κατανομής.

Πίνακας 4.14: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό Τριλόφου .

Μέση Τιμή	0.74
Διάμεσος	0.75

Το. σχήμα 4.43, παρουσιάζει το θηκόγραμμα (boxplot) της κατανομής των τιμών του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην περιοχή του Τριλόφου. Η διάμεσος τιμή εντοπίζεται περίπου στο 0,75, ενώ η μέση τιμή είναι ελαφρώς χαμηλότερη και ανέρχεται 0,74. Η διαφορά ανάμεσα στην μέση τιμή και στην διάμεσο οφείλεται στην παρουσία αρκετών χαμηλών τιμών όπου επηρεάζουν την μέση τιμή.

Το 50% των τιμών κυμαίνονται περίπου μεταξύ 0,71 έως 0,79, ενώ οι περισσότερες τιμές του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ βρίσκονται σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντικός αριθμός χαμηλών τιμών, όπου ορισμένοι φθάνουν κοντά στο μηδέν. Η παρουσία αυτών των αριθμών υποδηλώνει ότι, η συμμετοχή των PM_1 σε ορισμένες χρονικές περιόδους μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη σχετική συμμετοχή του κλάσματος $PM_1/PM_{2.5}$ να είναι τα $PM_{2.5}$.



Σχήμα 4.38:Boxplot Λόγου PM₁/PM_{2.5} ΚΑΠΗ τριλόφου

Στο σχήμα 4.45, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία και εποχή μεταβολή του μέσου λόγου $M_1/PM_{2.5}$. Ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ παρουσιάζει σχετικά περιορισμένες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια του έτους, με τις μηνιαίες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 0,72 έως 0,76.

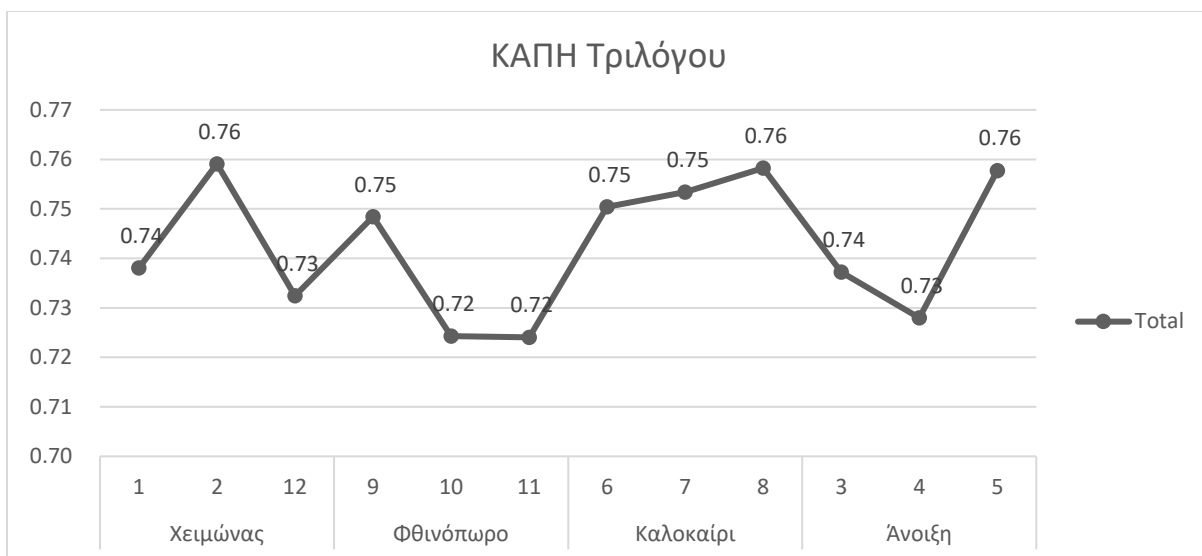
Κατά την χειμερινή περίοδο, ο λόγος παρουσιάζει μια μικρή αύξηση, με τον Ιανουάριο να καταγράφεται 0,74 και να αυξάνεται ελαφρώς τον Φεβρουάριο 0,76.

Κατά τον φθινόπωρο, ο Σεπτέμβριο με 0,75 ενώ τον Οκτώβριο και τον Νοέμβριο ο λόγος παραμένει σταθερός περίπου 0,72.

Ακολουθεί η θερινή περίοδος, κατά την οποία οι τιμές τον Ιούνιο και το Ιούλιο παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση, με τον λόγο να φτάνει το 0,75, ενώ ακολουθεί μια σταδιακή σχετικά αύξηση με τον Αύγουστο 0,76. Το γεγονός αυτό, δηλώνει πιθανόν την έναρξη μιας περιόδου εντονότερης παρουσίας λεπτόκοκκων σωματιδίων. Η τάση αυτή, οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες, την έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τον αυξημένο σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων, καθώς με τις συνθήκες αυτές ευνοούν την παραγωγή πολύ λεπτών σωματιδίων.

Κατά την άνοιξη, παρατηρούνται ότι καταγράφεται η μικρές διακύμανσης του λόγου, με τον Απρίλιο 0,73 και τον Μάιο 0,76.

Συνολικά, ο λόγος $PM_1/PM_{2.5}$ στο ΚΑΠΗ Τριλόφου παρουσιάζει μια σχετικά σταθερή συμπεριφορά κατά την διάρκεια του έτους, χωρίς έντονες εποχικές διακυμάνσεις. Η υψηλότερη εποχική τιμή καταγράφεται κατά το καλοκαίρι, ενώ η χαμηλότερη τιμή το φθινόπωρο.



Σχήμα 4.39: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στο ΚΑΠΗ Τριλόγου

4.7.6 Ανάλυση Λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ 4^{ου} γυμνασίου, Αγρινίου

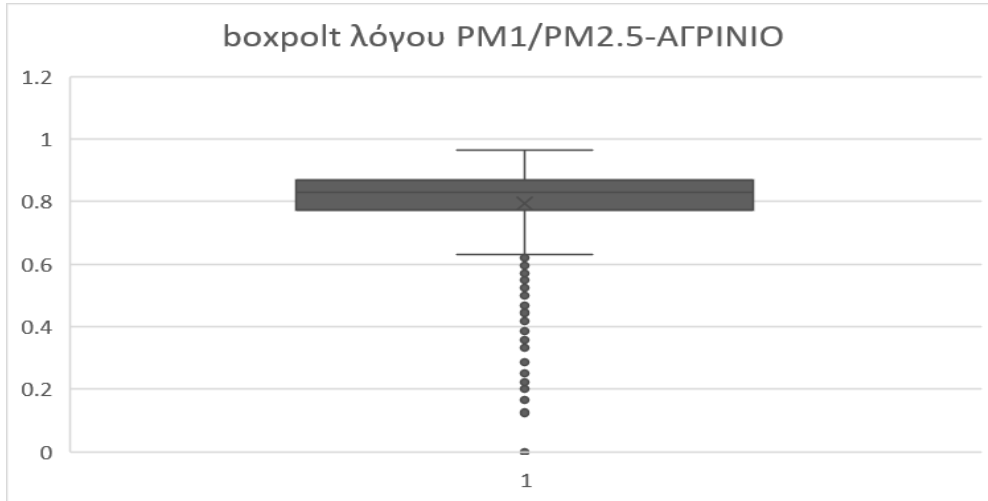
Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η στατιστική συμπεριφορά και η χρονική διακύμανση του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό της πόλης του Αγρινίου. Στο Πίνακα 4.15, απεικονίζονται οι βασικές στατιστικές παράμετροι, με τη διάμεσο τιμή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ να αναγράφεται 0,83, ενώ η μέση τιμή μέση τιμή διαμορφώνεται 0,80. Παρατηρείται και σε αυτή την πόλη, ότι η διάμεσος είναι ελαφρώς υψηλότερη από τη μέση τιμή, γεγονός που σχετίζεται με την παρουσία ορισμένων χαμηλότερων τιμών, οι οποίες επηρεάζουν τη μέση τιμή της κατανομής.

Πίνακας 4.15: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή και διάμεσος) του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στον σταθμό του Αγρινίου.

Μέση Τιμή	0.80
Διάμεσος	0.83

Στο σχήμα 4.46, παρουσιάζεται το θηκόγραμμα (boxplot) της κατανομής των τιμών του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ στην περιοχή του Αγρινίου. Η διάμεσος τιμή βρίσκεται περίπου στο 0,83, ενώ η μέση τιμή είναι ελαφρώς χαμηλότερη 0.80. Η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο

τιμών δείχνει ότι η κεντρική τάση της κατανομής είναι σχετικά σταθερή. Παράλληλα, παρατηρούνται αρκετές χαμηλές ακραίες τιμές, οι οποίες επηρεάζουν τη μέση τιμή και οδηγούν σε ελαφρώς χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τη διάμεσο.



Σχήμα 4.40 :Boxplot Λόγου PM1/PM2.5 - 4 γυμνασίου, Αγρινίου

Στο Σχήμα 4.47, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία και εποχή μεταβολή του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ για τον σταθμό της πόλη του Αγρινίου. Ο λόγος παρουσιάζει σαφή εποχική διακύμανση με υψηλότερες τιμές κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο και χαμηλότερα επίπεδα κατά τις μεταβατικές εποχές. Οι μηνιαίες τιμές του λόγου $PM_1/PM_{2.5}$ κυμαίνεται μεταξύ 0,78 έως 0,82.

Κατά την άνοιξη με το Μάρτιο και τον Απρίλιο καταγράφεται η χαμηλότερη τιμή της περιόδου να 0,79, ενώ το Μάιο ανέρχεται στο 0,82.

Αντίθετα κατά το καλοκαίρι παρουσιάζουν μια μεγάλη αύξηση των τιμή του λόγου και κυμαίνεται μεταξύ 0,81 και 0,82. Η αύξηση αυτή, πιθανόν συνδέεται με την έντονη ηλιακή ακτινοβολία και τις υψηλές θερμοκρασίες, που ευνοούν τον σχηματισμό δευτερογενών λεπτών αερολυμάτων.

Κατά το φθινόπωρο παρουσιάζεται μια από τις σημαντικότερη μείωση του λόγου, με την ελάχιστη τιμή να καταγράφεται τον Νοέμβριο περίπου 0,73. Η μείωση αυτή πιθανόν να οφείλεται στις μετεωρολογικές συνθήκες, στην αυξημένη υγρασία και στα επεισόδια μεταφοράς σκόνης. Οι χαμηλές τιμές που εμφανίζονται δεν φαίνεται να αποτελούν μόνιμο

χαρακτηριστικό της περιοχής, αλλά πιθανότατα σχετίζονται με μεμονωμένα επεισόδια. Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα PM1 αποτελούν το κυρίαρχο κλάσμα των PM_{2.5} στο Αγρίνιο, καθώς ο λόγος διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Οι εποχικές μεταβολές του λόγου αντανακλούν πιθανές αλλαγές στις πηγές εκπομπής και στις μετεωρολογικές συνθήκες.



Σχήμα 4.41: Μηνιαία και εποχική διακύμανση του μέσου λόγου PM1/PM2.5 στο Αγρίνιο

Κεφάλαιο 5: Σύνθεση και συζήτηση αποτελεσμάτων

5.1 Συνολική αποτίμηση

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι ωριαίες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2.5}$ κατά τη διάρκεια του έτους 2025 σε έξι σταθμούς παρακολούθησης: στην Αγυιά Πατρών, στη Δεξαμενή Χαλκίδας, στο Μαρούσι Αθηνών, στην Κόρινθο, στο ΚΑΠΗ Τριλόφου και στο 4ο Γυμνάσιο Αγρινίου. Η ανάλυση περιέλαβε την περιγραφική στατιστική των συγκεντρώσεων, τη μηνιαία και εποχική μεταβολή τους, την εμφάνιση επεισοδίων υψηλών τιμών, τον ημερήσιο κύκλο και τη σχετική συμμετοχή των PM_{10} στο κλάσμα των $PM_{2.5}$.

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιοχών, τόσο ως προς το μέσο επίπεδο των συγκεντρώσεων όσο και ως προς τη μεταβλητότητα και τη συχνότητα των επεισοδίων. Παράλληλα, διαπιστώθηκε κοινή χρονική συμπεριφορά στους περισσότερους σταθμούς, με αυξημένες συγκεντρώσεις κατά τη χειμερινή περίοδο, χαμηλότερες τιμές στις μεταβατικές εποχές και σαφή βραδινή ενίσχυση του ημερήσιου κύκλου. Ωστόσο, οι διαφορές μεταξύ των σταθμών δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική επιβάρυνση καθορίζεται και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε θέσης.

5.2 Χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων PM_{10} και $PM_{2.5}$

Η υψηλότερη μέση συγκέντρωση PM_{10} καταγράφηκε στο ΚΑΠΗ Τριλόφου και ήταν $8,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ακολούθησαν η Δεξαμενή Χαλκίδας με $7,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και η Κόρινθος με $7,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ενδιάμεσα επίπεδα καταγράφηκαν στο 4ο Γυμνάσιο Αγρινίου και στην Αγυιά Πατρών, με $6,54$ και $6,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα, ενώ το Μαρούσι παρουσίασε τη χαμηλότερη μέση συγκέντρωση, ίση με $4,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Σε όλους τους σταθμούς η διάμεσος ήταν μικρότερη από τη μέση τιμή. Η σχέση αυτή φανερώνει δεξιά ασυμμετρία των κατανομών: οι περισσότερες συγκεντρώσεις βρίσκονταν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, αλλά ένας μικρότερος αριθμός υψηλών τιμών αύξανε τον συνολικό μέσο όρο. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της επιβάρυνσης δεν πρέπει να στηρίζεται αποκλειστικά στη μέση συγκέντρωση, αλλά να λαμβάνει υπόψη τη διάμεσο, τη διασπορά και τη συχνότητα των ακραίων τιμών.

Η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση των PM_{10} καταγράφηκε στη Χαλκίδα και ήταν $8,54 \mu g/m^3$, ενώ η μικρότερη στο Μαρούσι, με $2,97 \mu g/m^3$. Επομένως, το Μαρούσι χαρακτηρίστηκε όχι μόνο από το χαμηλότερο μέσο επίπεδο αλλά και από τη μικρότερη μεταβλητότητα. Αντίθετα, η Χαλκίδα παρουσίασε σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους.

Ανάλογη χωρική κατάταξη παρατηρήθηκε και για τα $PM_{2.5}$. Η υψηλότερη μέση συγκέντρωση καταγράφηκε στο ΚΑΠΗ Τριλόφου, με $11,37 \mu g/m^3$, και ακολούθησαν η Χαλκίδα και η Κόρινθος, με $9,42$ και $9,36 \mu g/m^3$ αντίστοιχα. Η Πάτρα και το Αγρίνιο παρουσίασαν παρόμοιες μέσες συγκεντρώσεις, περίπου $7,7 \mu g/m^3$, ενώ η χαμηλότερη μέση τιμή καταγράφηκε στο Μαρούσι, με $5,86 \mu g/m^3$. Η συμφωνία της κατάταξης των σταθμών για τα PM_{10} και τα $PM_{2.5}$ δείχνει ότι οι παράγοντες που διαμορφώνουν τη συνολική επιβάρυνση από λεπτά σωματίδια επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό και τα PM_{10} .

5.3 Μηνιαία και εποχική μεταβολή

Η μηνιαία ανάλυση ανέδειξε χειμερινή ενίσχυση των PM_{10} σε όλους τους σταθμούς. Οι υψηλότερες μηνιαίες μέσες τιμές καταγράφηκαν συνήθως τον Ιανουάριο, τον Φεβρουάριο ή τον Δεκέμβριο. Ιδιαίτερα υψηλές ήταν οι τιμές του Ιανουαρίου στο ΚΑΠΗ Τριλόφου και στη Χαλκίδα, όπου ανήλθαν σε $19,37$ και $17,79 \mu g/m^3$ αντίστοιχα. Στην Κόρινθο και στο Αγρίνιο οι αντίστοιχες τιμές ήταν $14,27$ και $13,51 \mu g/m^3$. Στην Πάτρα η υψηλότερη μηνιαία μέση συγκέντρωση καταγράφηκε τον Δεκέμβριο και ήταν $10,91 \mu g/m^3$, ενώ στο Μαρούσι η υψηλότερη τιμή, $6,10 \mu g/m^3$, εμφανίστηκε τον Ιανουάριο.

Η χειμερινή αύξηση είναι συμβατή με την ενίσχυση των εκπομπών από την οικιακή θέρμανση και τις καύσεις, σε συνδυασμό με μετεωρολογικές συνθήκες που περιορίζουν την ατμοσφαιρική διασπορά. Η χαμηλή ταχύτητα του ανέμου, οι θερμοκρασιακές αναστροφές και το περιορισμένο ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μπορούν να ευνοήσουν τη συσσώρευση των σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια. Επειδή, όμως, στην εργασία δεν πραγματοποιήθηκε παράλληλη ανάλυση μετεωρολογικών παραμέτρων ή δεδομένων εκπομπών, οι παραπάνω μηχανισμοί αποτελούν πιθανές ερμηνείες και όχι αποδεδειγμένη απόδοση των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων σε συγκεκριμένες πηγές.

Κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο καταγράφηκαν γενικά χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Στους περισσότερους σταθμούς οι ελάχιστες μηνιαίες τιμές εμφανίστηκαν τον Μάιο ή τον Σεπτέμβριο. Παρατηρήθηκε επίσης μικρότερη θερινή ενίσχυση, συνήθως τον Ιούνιο, ενώ στην Πάτρα καταγράφηκε εντονότερη αύξηση τον Αύγουστο. Οι θερινές αυξήσεις μπορεί να σχετίζονται με τοπικές πηγές, δασικές πυρκαγιές, επαναιώρηση σκόνης ή σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων. Η επιβεβαίωση των μηχανισμών αυτών απαιτεί συνεξέταση μετεωρολογικών, δορυφορικών και χημικών δεδομένων.

5.4 Επεισόδια υψηλών συγκεντρώσεων

Για τον εντοπισμό ημερών με αυξημένες συγκεντρώσεις χρησιμοποιήθηκε το επίπεδο των $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ως ερευνητικό κατώφλι αναφοράς και όχι ως θεσμοθετημένο όριο για τα PM_{10} . Με βάση αυτό το κριτήριο, η μεγαλύτερη συχνότητα επεισοδίων καταγράφηκε στο ΚΑΠΗ Τριλόφου, με 12 ημέρες, και στη Δεξαμενή Χαλκίδας, με 11 ημέρες. Στο Αγρίνιο καταγράφηκαν πέντε ημέρες και στην Πάτρα δύο, ενώ στο Μαρούσι και στην Κόρινθο δεν καταγράφηκε ημερήσια μέση συγκέντρωση μεγαλύτερη από το επιλεγμένο κατώφλι.

Η συχνότητα των επεισοδίων δεν ταυτίστηκε πάντοτε με την έντασή τους. Η υψηλότερη ωριαία συγκέντρωση καταγράφηκε στην Αγυιά Πατρών και ήταν $198,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η αντίστοιχη τιμή στο Αγρίνιο έφθασε τα $140,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στη Χαλκίδα η μέγιστη ωριαία συγκέντρωση ήταν $100,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επομένως, η Χαλκίδα και ο Τρίλοφος χαρακτηρίστηκαν κυρίως από συχνότερα επεισόδια, ενώ η Πάτρα και το Αγρίνιο από σπανιότερες αλλά εντονότερες ωριαίες αιχμές.

Στην Πάτρα η μέγιστη ημερήσια τιμή των $52,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και η μέγιστη ωριαία τιμή των $198,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ καταγράφηκαν στις 13 Αυγούστου. Η χρονική σύμπτωση με επεισόδιο πυρκαγιάς καθιστά πιθανή την επίδραση της μεταφοράς καπνού. Ωστόσο, η ασφαλής απόδοση της συγκεκριμένης αιχμής στις πυρκαγιές απαιτεί πρόσθετη τεκμηρίωση μέσω δεδομένων για τις εστίες πυρκαγιάς, τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου και, εφόσον είναι διαθέσιμες, δορυφορικές παρατηρήσεις.

5.5 Ημερήσιος κύκλος

Η ανάλυση του μέσου ημερήσιου κύκλου ανέδειξε ως κυριότερο χαρακτηριστικό τη βραδινή αύξηση των συγκεντρώσεων. Στους περισσότερους σταθμούς οι υψηλότερες μέσες ωριαίες τιμές εμφανίστηκαν μεταξύ 19:00 και 23:00, με την κορύφωση να εντοπίζεται συνήθως μεταξύ 20:00 και 22:00. Η συμπεριφορά αυτή ήταν ιδιαίτερα έντονη στην Πάτρα, στην Κόρινθο, στον Τρίλοφο και στο Αγρίνιο.

Η βραδινή κορύφωση είναι συμβατή με τον συνδυασμό αυξημένων εκπομπών από κυκλοφορία και οικιακή θέρμανση και με τη μείωση του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μετά τη δύση του ηλίου. Κατά τις απογευματινές ώρες, περίπου μεταξύ 14:00 και 16:00, καταγράφηκαν συνήθως οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις, πιθανώς λόγω της εντονότερης κατακόρυφης ανάμειξης της ατμόσφαιρας. Μια ασθενέστερη πρωινή αύξηση εμφανίστηκε σε αρκετούς σταθμούς, αλλά δεν ήταν εξίσου σαφής σε όλες τις περιοχές. Συνεπώς, το ισχυρότερο και περισσότερο κοινό χαρακτηριστικό του ημερήσιου κύκλου ήταν η βραδινή και όχι η πρωινή αιχμή.

5.6 Συμμετοχή των PM_{10} στο κλάσμα των $PM_{2.5}$

Ο λόγος $PM_{10}/PM_{2.5}$ χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της σχετικής συμμετοχής των σωματιδίων PM_{10} στη συγκέντρωση των $PM_{2.5}$. Οι μέσες τιμές του λόγου κυμάνθηκαν από 0,69 έως 0,80. Η υψηλότερη μέση τιμή καταγράφηκε στο Αγρίνιο, με 0,80, και ακολούθησε η Πάτρα με 0,77. Στη Χαλκίδα η μέση τιμή ήταν 0,75, ενώ στην Κόρινθο και στον Τρίλοφο ήταν περίπου 0,74. Η χαμηλότερη τιμή καταγράφηκε στο Μαρούσι και ήταν 0,69.

Οι διάμεσες τιμές ήταν ελαφρώς υψηλότερες και κυμάνθηκαν από 0,72 στο Μαρούσι έως 0,83 στο Αγρίνιο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα PM_{10} αντιπροσώπευαν κατά μέσο όρο περίπου το 69–80% της συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$.

Η υψηλή συμμετοχή των PM_{10} είναι συμβατή με σημαντική επίδραση σωματιδίων που προέρχονται από διεργασίες καύσης και από δευτερογενή σχηματισμό στην ατμόσφαιρα. Ο λόγος, όμως, δεν αποτελεί από μόνος του μέθοδο ταυτοποίησης των πηγών. Για την ασφαλή διάκριση μεταξύ κυκλοφορίας, θέρμανσης, βιομάζας,

δευτερογενών αερολυμάτων και φυσικών πηγών απαιτούνται δεδομένα χημικής σύστασης και εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων προσδιορισμού πηγών.

5.7 Περιορισμοί της μελέτης

Τα αποτελέσματα αφορούν ένα μόνο έτος και, συνεπώς, δεν μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά μακροχρόνιων τάσεων ή της κλιματολογικής συμπεριφοράς των PM_{10} στις εξεταζόμενες περιοχές. Επιπλέον, κάθε σταθμός αντιπροσωπεύει τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασής του και όχι κατ' ανάγκη το σύνολο της αντίστοιχης πόλης.

Η διαφορετική πληρότητα των χρονοσειρών, ιδιαίτερα οι περισσότερες ελλείψεις στον σταθμό του Αμαρουσίου, μπορεί να επηρεάζει ορισμένες συγκρίσεις. Επίσης, η απουσία παράλληλων μετεωρολογικών δεδομένων και πληροφοριών για τις εκπομπές δεν επιτρέπει την ποσοτική απόδοση των παρατηρούμενων μεταβολών σε συγκεκριμένες πηγές ή μηχανισμούς.

5.8 Συμπεράσματα και προτάσεις

Η μελέτη ανέδειξε σαφή χωρική και χρονική μεταβλητότητα των συγκεντρώσεων PM_{10} στις έξι εξεταζόμενες περιοχές. Ο Τρίλοφος, η Χαλκίδα και η Κόρινθος παρουσίασαν τα υψηλότερα μέσα επίπεδα, ενώ το Μαρούσι εμφάνισε τις χαμηλότερες και περισσότερο σταθερές συγκεντρώσεις. Η χειμερινή περίοδος ήταν η πλέον επιβαρυνμένη σε όλους τους σταθμούς, ενώ η βραδινή αύξηση αποτέλεσε το κυριότερο χαρακτηριστικό του ημερήσιου κύκλου.

Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι η συχνότητα και η ένταση των επεισοδίων αποτελούν διαφορετικές διαστάσεις της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης. Η Χαλκίδα και ο Τρίλοφος παρουσίασαν συχνότερες ημέρες αυξημένων συγκεντρώσεων, ενώ η Πάτρα και το Αγρίνιο κατέγραψαν τις εντονότερες ωριαίες αιχμές. Ο λόγος $PM_{10}/PM_{2.5}$ επιβεβαίωσε ότι τα PM_{10} αποτελούσαν το μεγαλύτερο μέρος του κλάσματος των $PM_{2.5}$ σε όλες τις θέσεις.

Για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου προτείνεται η επέκταση της ανάλυσης σε περισσότερα έτη, η ταυτόχρονη εξέταση μετεωρολογικών παραμέτρων, η συστηματική βαθμονόμηση των αισθητήρων και η αξιοποίηση δεδομένων χημικής

σύστασης. Η προσθήκη πληροφοριών για την κυκλοφορία, την οικιακή θέρμανση, τις πυρκαγιές και τη μεταφορά σκόνης θα επέτρεπε την πληρέστερη ερμηνεία των επεισοδίων και τον περισσότερο αξιόπιστο προσδιορισμό των πηγών των σωματιδίων.

Βιβλιογραφία

Βιβλία και επιστημονικά συγγράμματα

- Brimblecombe, P. (1987). *The big smoke: A history of air pollution in London since medieval times*. Methuen.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (2nd ed.). Elsevier Academic Press.
- Βερύκιος, Χ., 2003. *Ατμοσφαιρική ρύπανση και περιβάλλον*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Γκέκας, Α. κ.ά., 2002. *Περιβαλλοντική χημεία και βαρέα μέταλλα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Κουγκούλος, Α. (2007). *Αμίαντος και επιπτώσεις στην υγεία*. Εκδόσεις Τζόλα.

Επιστημονικά άρθρα

- Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., & Lurmann, F. W. (2001). Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in California. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51(7), 1052–1061.
- Brook, R.D. et al., 2010. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), pp.2331–2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbeecl>
- CEN. (2023). *EN 12341:2023. Ambient air – Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM₁₀ or PM_{2.5} mass concentration of suspended particulate matter*. European Committee for Standardization.
- Chow, J.C., 1995. Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(5), pp.320–382. <https://doi.org/10.1080/10473289.1995.10467369>
- Chow, J. C., & Watson, J. G. (2002). Review of PM_{2.5} and PM₁₀ apportionment for fossil fuel combustion and other sources by the Chemical Mass Balance Receptor Model. *Energy & Fuels*, 16(2), 222–260. <https://doi.org/10.1021/ef0101715>
- Grantz, D.A., Garner, J.H.B. and Johnson, D.W., 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2–3), pp.213–239. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Hu, Y., Wu, M., Li, Y., & Liu, X. (2022). Influence of PM₁ exposure on total and cause-specific respiratory diseases: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 15117–15126. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16536-0>
- Kelly, F.J. and Fussell, J.C., 2012. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, pp.504–526. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.039>
- Koulouri, E., Grivas, G., Gerasopoulos, E., Chaloulakou, A., Mihalopoulos, N., & Spyrellis, N. (2008). Study of size-segregated particle (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) concentrations over Greece. *Global NEST Journal*, 10(2), 132–139. <https://doi.org/10.30955/gnj.000554>
- Li, N., Chen, G., Liu, F., Mao, S., Liu, Y., Hou, Y., Lu, Y., Liu, S., Wang, C., Xiang, H., Guo, Y., & Li, S. (2019). Associations of long-term exposure to ambient PM₁ with hypertension and blood pressure in rural Chinese population: The Henan rural cohort study. *Environment International*, 128, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.037>
- Lu, M., Yan, S., et al. (2022). Association between short-term PM₁ exposure and cardiorespiratory diseases: Evidence from a systematic review and meta-analysis. *Atmospheric Pollution Research*, 13(1), 101254. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101254>

ou, R., Ho, Y. S., & Choi, H. W. (2022). Particulate matter air pollution and neurological disorders: A review. *Journal of Biomedical Science*, 29, 15. <https://doi.org/10.1186/s12929-022-00799-x>

Pateraki, S., Asimakopoulos, D. N., Bougiatioti, A., Maggos, T., Vasilakos, C., & Mihalopoulos, N. (2014). Assessment of PM_{2.5} and PM₁ chemical profile in a multiple-impacted Mediterranean urban area: Origin, sources and meteorological dependence. *Science of the Total Environment*, 479–480, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.008>

Pateraki, S., Asimakopoulos, D. N., Maggos, T., Asimakopoulos, V. D., Bougiatioti, A., Bairachtari, K., Vasilakos, C., & Mihalopoulos, N. (2020). Chemical characterization, sources and potential health risk of PM_{2.5} and PM₁ pollution across the Greater Athens Area. *Chemosphere*, 241, 125026. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125026>

Pope, C.A. and Dockery, D.W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), pp.709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>

Shukla, K., & Aggarwal, S. G. (2022). A technical overview on beta-attenuation method for the monitoring of particulate matter in ambient air. *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 220195. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220195>

Stavroulas, I., Grivas, G., & Mihalopoulos, N. (2020). Trends and Spatial Characteristics of PM₁ Aerosol Chemical Composition over the Greater Athens Area, Using High Temporal Resolution Measurements. In *Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2020)*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/ecas2020-08139>

Snyder, E.G. et al., 2013. The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), pp.11369–11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>

Snyder, L.P., 1994. The death-dealing smog over Donora, Pennsylvania: Industrial air pollution, public health, and federal policy, 1948–1950. *Environmental History Review*, 18(1), pp.117–139. <https://doi.org/10.2307/3984701>

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311–323. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>

Tolis, E. I., Amarantidis, S., Missia, D. A., Saraga, D. E., Koziakis, N. E., & Bartzis, J. G. (2008). Preliminary results on PM₁ and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Kozani, Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17(10A), 1634–1639.

Watson, J. G., & Chow, J. C. (2002). Comparison and evaluation of in situ and filter carbon measurements at the Fresno Supersite. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21), ICC 3-1–ICC 3-15. <https://doi.org/10.1029/2001JD000573>

Yang, B.-Y., Guo, Y., Morawska, L., Bloom, M. S., Markevych, I., Heinrich, J., Dharmage, S. C., Knibbs, L. D., Lin, S., Yim, S. H.-L., Chen, G., Li, S., Zeng, X.-W., Liu, K.-K., Hu, L.-W., & Dong, G.-H. (2019). Ambient PM₁ air pollution and cardiovascular disease prevalence: Insights from the 33 Communities Chinese Health Study. *Environment International*, 123, 310–317. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.012>

Οργανισμοί και τεχνικές εκθέσεις

European Environment Agency, 2022. *Air quality in Europe 2022: Health impacts of air pollution in Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Διαθέσιμο σε: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022>

European Environment Agency, 2023. *Air quality in Europe 2023 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Διαθέσιμο σε: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2023>.

European Environment Agency, 2024. *Air quality in Europe 2024 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Διαθέσιμο σε: <https://www.eea.europa.eu/publications>.

European Commission, 2024. *Proposal for a Directive on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast)*. Brussels: European Commission.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2020. *Evaluation of radiation exposures and effects following the Chernobyl accident*. New York: United Nations

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2020). *Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2019/2020 report*. United Nations.

United States Environmental Protection Agency. (2019). *The Donora smog: 70 years later*. U.S. Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency. (2022). *Ground-level ozone pollution*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution>

United States Environmental Protection Agency. (2022). *Integrated science assessment (ISA) for particulate matter*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/isa/integrated-science-assessment-isa-particulate-matter>

United States Environmental Protection Agency. (2023). *Volatile organic compounds' impact on indoor air quality*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq>

United States Environmental Protection Agency. (2024). *Particulate matter (PM) pollution*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/pm-pollution>

World Health Organization. (2005). *Chernobyl: The true scale of the accident*. World Health Organization.

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

World Health Organization. (2023). *Air quality in Europe: Health impacts*. WHO Regional Office for Europe.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). *Ποιότητα της ατμόσφαιρας: Εκθέσεις και δεδομένα*. <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/>

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2004). Οδηγία 2004/107/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 15ης Δεκεμβρίου 2004 σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 23, 26.1.2005, σ. 3–16. EUR-Lex.

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2008). Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 152, 11.6.2008, σ. 1–44. EUR-Lex.

Πράξη Υπουργικού Συμβουλίου 34/30.05.2002. (2002). Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και οξείδια του αζώτου, σωματίδια και μόλυβδο. ΦΕΚ 125/A/05.06.2002.

Προεδρικό Διάταγμα 1180/1981. (1981). Περί ρυθμίσεως θεμάτων αναγομένων εις τα της ιδρύσεως και λειτουργίας βιομηχανιών, βιοτεχνιών πάσης φύσεως μηχανολογικών εγκαταστάσεων και αποθηκών και της εξ τούτων διασφαλίσεως περιβάλλοντος εν γένει. ΦΕΚ 293/A/06.10.1981.

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2011). Κοινή Υπουργική Απόφαση Η.Π. 14122/549/Ε.103/24.03.2011, «Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη». ΦΕΚ 488/B/30.03.2011.

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2024). Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (αναδιατύπωση). Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L, 2024/2881, 20.11.2024. EUR-Lex.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2017). Υπουργική Απόφαση 174505/607/2017, «Τροποποίηση της ... σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και τη θέση των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα». ΦΕΚ 1311/Β/13.04.2017.

.