



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)»

Διπλωματική Εργασία

«Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων.»

«Particulate atmospheric pollution in Greek cities. Sources, impacts on human health and the environment and control technologies to reduce the levels of the suspended particulates»

«ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΠΑΖΑΛΟΣ »

A.M. 122936

Επιβλέπων καθηγητής: «ΚΕΛΕΣΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ»

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, 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.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)»

Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων

ΠΑΖΑΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κελέσης Απόστολος

Καζαντζίδης Ανδρέας

Δρ. Φυσικός/Περιβαλλοντολόγος,

Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών,

ΣΕΠ-ΕΑΠ

ΣΕΠ-ΕΑΠ

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου (Ε.Α.Π.), στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διαχείριση Αποβλήτων». Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, στον (Α επιβλέποντα) καθηγητή μου κύριο Απόστολο Κελέση για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την υπομονή του, στοιχεία που εξασφάλισαν μια υποδειγματική συνεργασία, χάρη στην οποία κατάφερα να ολοκληρώσω επιτυχώς τη διπλωματική μου εργασία. Επίσης, ευχαριστώ εξίσου θερμά τον (Β επιβλέποντα) κύριο Ανδρέα Καζαντζίδη για τη συμβολή του στη παρούσα διπλωματική εργασία.

Περιεχόμενα.....	5
Περίληψη.....	14
Abstract	16
Εισαγωγή.....	18
I. Κατάλογος πινάκων	
II. Κατάλογος διαγραμμάτων	
Εισαγωγή	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	
1.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση	21
1.2. Βασικές έννοιες - Κυριότεροι Ατμοσφαιρικοί Ρύποι.....	21
1.3. Επιδράσεις στον Οργανισμό και Χρόνος Έκθεσης από την ατμοσφαιρική ρύπανση.....	22
1.4. Μηχανισμοί Επιδείνωσης της Ποιότητας του Αέρα και η Κλιματική Αλλαγή....	24
1.5. Πολιτικές για τη Μείωση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	26
1.6. Εθνικό και Ευρωπαϊκό Θεσμικό Πλαίσιο για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού αέρα.....	27
1.6.1. Η νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.....	27
1.6.2. Η νομοθεσία σχετικά με την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	31
1.6.3. Η νομοθεσία σχετικά με τα Πρότυπα Εκπομπών.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	
2.1. Γενικά χαρακτηριστικών των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.....	36
2.2. Κατηγορίες Ταξινόμησης	36
2.2.1. Ταξινόμηση σε σχέση με τη πηγή προέλευσης.....	37
2.2.2 Ταξινόμηση σε σχέση με το μέγεθος.....	37
2.2.3. Ταξινόμηση σε σχέση με τη προέλευση.....	41
2.2.3.1. Πρωτογενή Σωματίδια (Primary Particulate Matter).....	41
2.2.3.2. Δευτερογενή Σωματίδια (Secondary Particulate Matter)	42

2.2.4. Ταξινόμηση των σωματιδίων σύμφωνα με τη σύσταση τους.....	43
2.2.5. Ταξινόμηση των σωματιδίων σύμφωνα με τις επιπτώσεις τους στην υγεία.....	43
2.3. Εξαιρετικά λεπτά αιωρούμενα σωματίδια UFPs	44
2.3.1. Ο ρόλος που διαδραματίζει το σχήμα στα πολύ μικρά αιωρούμενα σωματίδια	46
2.4. Απομάκρυνση και Χρόνος Παραμονής	47
2.5. Ο ρόλος του Μαύρου και του Καφέ Άνθρακα στο Κλίμα	47
2.6. Τα Αιωρούμενα Σωματίδια ως παράγοντας κινδύνου για την υγεία.....	49
2.6.1. Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2,5} στην υγεία.....	51
2.6.2. Η επίδραση της ρύπανσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία των πνευμόνων.....	52
2.6.3. Αιωρούμενα Σωματίδια και Καρδιοπάθεια.....	54
2.6.4 Αιωρούμενα Σωματίδια και Κεντρικό Νευρικό Σύστημα - Εγκέφαλος	55
2.6.5. Αιωρούμενα Σωματίδια και Μεταβολική Υγεία - Διαβήτης	56
2.6.6. Αναπαραγωγικό Σύστημα και Ανάπτυξη	57
2.6.7. Αιωρούμενα Σωματίδια και η Πύλη του Εντέρου	57
2.6.8. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στη νεφρική λειτουργία	58
2.6.9. Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM _{2,5} και δυσλειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος	59
2.6.10. Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM _{2,5} κατά την κυοφορία και αύξηση του κινδύνου εμφάνισης παχυσαρκίας	60
2.6.11. Ψυχική υγεία και αιωρούμενα σωματίδια	61
2.7. Πηγές Αιωρούμενων Σωματιδίων στις Αστικές Περιοχές	61
2.7.1. Κίνηση Οχημάτων.....	62
2.7.2. Καύση βιομάζας στο Αστικό Περιβάλλον.....	63
2.7.3. Βιομηχανικός Τομέας.....	64
2.7.4. Μεταφορά σκόνης και σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση.....	65
2.7.5. Αλλαγές στην οξύτητα των αιωρούμενων σωματιδίων και σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση.....	68
2.8. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην πολιτιστική κληρονομιά.....	70
2.8.1. Μαύρες Κρούστες και Πολιτισμική Κληρονομιά.....	70
2.8.2. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων PM ₁₀ και PM _{2,5} στη πολιτιστική κληρονομιά.....	72

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

2.9. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στα οικοσυστήματα	73
2.9.1. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων PM _{2,5} στο αστικό πράσινο	73
2.9.2 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στα υδάτινα οικοσυστήματα	74
2.9.3 Τα αιωρούμενα σωματίδια ως περιβαλλοντικοί παράγοντες στα θαλάσσια και γλυκά υδάτινα οικοσυστήματα	75
2.9.4. Τα υδάτινα οικοσυστήματα ως αποδέκτες των οργανικών ρύπων μέσω των αιωρούμενων σωματιδίων	76
2.10. Η Πρόκληση της Συμμόρφωσης με τη Νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία 2024/2881.....	77
2.10.1. Εθνικό και Ευρωπαϊκό Θεσμικό Πλαίσιο για τα Αιωρούμενα Σωματίδια.....	77
2.10.2. Κατευθυντήριες Οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για την έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3.1. Σταθμοί αναφοράς στην περιοχή μελέτης.....	82
3.2. Μέθοδοι Μέτρησης.....	88
3.2.1. Μέθοδος απορρόφησης β- ακτινοβολίας.....	88
3.2.2 Σταθμική Μέθοδος	89
3.2.3. Πρωτόκολλο Δειγματοληψίας και Διαδικασία Βαθμονόμησης.....	90
3.3. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων.....	91
3.3.1. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων- Κυκλώνες.....	92
3.3.2. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων- Ηλεκτροστατικά Φίλτρα.....	94
3.3.3. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων- Σακκόφιλτρα.....	95
3.3.4. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων- Πλυντρίδες.....	98
3.4. Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από τα πετρελαιοκίνητα οχήματα.....	100

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ PM₁₀ και PM_{2.5}, ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ.....102

4.1. Χαρακτηριστικά και πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.....103

4.2. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....107

4.2.1. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 - 2025....107

4.2.2. Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001- 2025....112

4.3. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....121

4.3.1. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....121

4.3.2. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....127

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ136

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....143

I. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2008/50/EK (ΥΠΕΝ, 2025).....28

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Οριακές τιμές για την προστασία της υγείας του ανθρώπου που πρέπει να επιτευχθούν έως την 1η Ιανουαρίου 2030 (Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2024, για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για την Ευρώπη.....30

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Οριακές τιμές λήψης εκτάκτων μέτρων για την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀32

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Σύγκριση Οριακών Τιμών για τα Αιωρούμενα Σωματίδια $PM_{2,5}$ και PM_{10} (Οδηγίες (ΕΕ) 2008/50, 2024/2881).....78

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του δικτύου του ΕΔΠΑΡ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο αριθμός τους στο Χάρτη 2 και ο χαρακτηρισμός του (ΥΠΕΝ, 2025).....86

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 : Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα τεχνολογιών αντιρρύπανσης.....97

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....120

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Διακύμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.....134

II. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1 (α) Συγκριτική κλίμακα μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων (PM)
(β) Οπτική σύγκριση μεγέθους σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$39

ΕΙΚΟΝΑ 2 Βαθμός διεύθυνσης αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο σώμα...49

ΕΙΚΟΝΑ 3 Συσχέτιση μεγέθους σωματιδίων και ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος50

ΕΙΚΟΝΑ 4 Διάγραμμα ροής ενός κυκλώνα.....93

ΕΙΚΟΝΑ 5 Διάταξη ηλεκτροστατικού φίλτρου.....95

ΕΙΚΟΝΑ 6 Διάταξη σακόφιλτρων.....97

ΕΙΚΟΝΑ 7 Διατάξεις πλυντρίδων.....100

ΕΙΚΟΝΑ 8 (α) Διαχρονική εξέλιξη των συνολικών εκπομπών των $PM_{2,5}$ στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2023 (β) Ετήσια διακύμανση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, τη περίοδο 2006-2012.....105

III. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς -1, την περίοδο 2001-2025.....	107
Διάγραμμα 2: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς-1 την περίοδο 2001-2025	107
Διάγραμμα 3: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς -1 την περίοδο 2001-2025.....	108
Διάγραμμα 4: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Αριστοτέλους την περίοδο 2001-2025	108
Διάγραμμα 5: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Νέα Σμύρνη την περίοδο 2001-2025	108
Διάγραμμα 6: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Νέα Σμύρνη την περίοδο 2001-2025	109
Διάγραμμα 7: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Μαρούσι την περίοδο 2001-2025	109
Διάγραμμα 8: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Μαρούσι την περίοδο 2001-2025	109
Διάγραμμα 9: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνας την περίοδο 2001-2025	110
Διάγραμμα 10: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνας την περίοδο 2001-2025	110
Διάγραμμα 11: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στον Σταθμό Περιαστικό Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025	110
Διάγραμμα 12: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στον Σταθμό Περιαστικό Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025	111
Διάγραμμα 13: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM ₁₀ στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή για την περίοδο 2001-2025.....	111

Διάγραμμα 14: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή για την περίοδο 2001-2025.....	111
Διάγραμμα 15: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες για την περίοδο 2001-2025.....	112
Διάγραμμα 16: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων PM_{10} στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες για την περίοδο 2001-2025.....	112
Διάγραμμα 17: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς-1 για την περίοδο 2001-2025.....	113
Διάγραμμα 18: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς-1 για την περίοδο 2001-2025.....	113
Διάγραμμα 19: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Αριστοτέλους για την περίοδο 2001-2025.....	113
Διάγραμμα 20: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Αριστοτέλους για την περίοδο 2001-2025.....	114
Διάγραμμα 21: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Περιβατικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνα την περίοδο 2001-2025.....	114
Διάγραμμα 22: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Περιβατικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνα την περίοδο 2001-2025.....	114
Διάγραμμα 23: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025.....	115
Διάγραμμα 24: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025.....	115
Διάγραμμα 25: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή την περίοδο 2001-2025.....	115
Διάγραμμα 26: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή την περίοδο 2001-2025.....	116
Διάγραμμα 27: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων $PM_{2,5}$ στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες την περίοδο 2001-2025.....	116

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Διάγραμμα 28: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων PM _{2,5} στον Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες την περίοδο 2001-2025.....	116
Διάγραμμα 29: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς -1 την περίοδο 2001-2025.....	122
Διάγραμμα 30: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Αριστοτέλους την περίοδο 2001-2025....	123
Διάγραμμα 31: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου Νέα Σμύρνη την περίοδο 2001-2025.....	123
Διάγραμμα 32: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου Μαρούσι την περίοδο 2001-2025.....	124
Διάγραμμα 33: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Περιβατικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνα την περίοδο 2001-2025.....	125
Διάγραμμα 34: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025...	125
Διάγραμμα 35: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή την περίοδο 2001-2025.....	126
Διάγραμμα 36: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM ₁₀ στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες την περίοδο 2001-2025.....	127
Διάγραμμα 37: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Πειραιάς -1 την περίοδο 2001-2025.....	128
Διάγραμμα 38: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας Αριστοτέλους την περίοδο 2001-2025....	128
Διάγραμμα 39: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} στο Περιβατικό Βιομηχανικό Σταθμό Ελευσίνα την περίοδο 2001-2025.....	129
Διάγραμμα 40: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM _{2,5} στο Σταθμό Περιβατικού Υποβάθρου Λυκόβρυση την περίοδο 2001-2025...	130

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Διάγραμμα 41: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου Αγία Παρασκευή την περίοδο 2001-2025.....130

Διάγραμμα 42: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των $PM_{2,5}$ στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου Θρακομακεδόνες την περίοδο 2001-2025.....131

ΧΑΡΤΗΣ 1 Γεωγραφική κατανομή των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) στην ελληνική επικράτεια83

ΧΑΡΤΗΣ 2 Σταθμοί ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην Περιφέρεια Αττικής87

Περίληψη

Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στις σύγχρονες πόλεις, επηρεάζοντας την υγεία των πολιτών και την ποιότητα ζωής, αλλά και το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των επιπέδων και των τάσεων της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, την Αθήνα. Η μελέτη βασίστηκε στα διαθέσιμα δεδομένα από 8 αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, που επελέγησαν με κριτήρια πληρότητας δεδομένων και χωρικής αντιπροσωπευτικότητας, ώστε να καλύπτονται διαφορετικοί τύποι αστικού περιβάλλοντος.

Στα αρχικά κεφάλαια της εργασίας αναλύονται οι ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές προέλευσης των ρύπων, καθώς και το ισχύον εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εκτενείς επιπτώσεις της έκθεσης στη σωματιδιακή ρύπανση στη δημόσια υγεία, καθώς και στο φυσικό περιβάλλον, στα οικοσυστήματα και στην πολιτιστική κληρονομιά. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι διαθέσιμες βιομηχανικές τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων. Από τη διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των εκπομπών στην Ελλάδα, προέκυψε ότι, οι συνολικές εκπομπές των $PM_{2,5}$, για την περίοδο 1990-2023 παρουσίασαν μείωση κατά 47,3% και 52,5% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα και των PM_{10} μειώθηκαν κατά 13,3% περίπου το 2021, σε σχέση με το 2012 και κατά 28% και 23,9% στον ελλαδικό χώρο και στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, μεταξύ των ετών 2006-2012.

Στη συνέχεια εξετάζεται διαχρονικά η ετήσια, η εποχική, και η μηνιαία διακύμανση, των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$ στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025, ώστε να γίνει αξιολόγηση της υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα στην περιοχή αυτή, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Από την επεξεργασία των παραπάνω μετρήσεων, προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, παρουσιάστηκαν στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, των οποίων η θέση είναι παραπλεύρως κεντρικών οδικών αξόνων και σε περιοχές με πυκνή δόμηση, όπως το κέντρο της πόλης της Αθήνας και το λιμάνι

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

του Πειραιά. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίσθηκαν στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση, στο σταθμό αστικού υποβάθρου Μαρούσι και στον περιαστικό βιομηχανικό σταθμό Ελευσίνα λόγω των τοπικών πηγών, των δευτερογενών μετασχηματισμών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης από παρακείμενες περιοχές. Διαχρονικά την περίοδο 2001-2025, σ' όλους τους σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στα επίπεδα συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Πρέπει να επισημανθεί ότι την περίοδο μελέτης υπήρξαν συστηματικές υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίων. Ειδικότερα, όσον αφορά τα PM_{10} , οι υπερβάσεις ήταν περισσότερες στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, καθώς και στους σταθμούς υποβάθρου Λυκόβρυση και Μαρούσι και αφορούσαν κυρίως την περίοδο 2001-2010. Όσον αφορά τα $PM_{2,5}$, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου θεσμοθετημένου ορίου μόνο στους σταθμούς Πειραιάς-1 και Λυκόβρυση. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάσθηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, για όλα τα έτη της περιόδου μελέτης.

Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025, προέκυψε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Όμως, στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάστηκαν την άνοιξη και το καλοκαίρι, πιθανότατα εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από παρακείμενες αστικές περιοχές, των δευτερογενών σχηματισμών και των φυσικών πηγών των σωματιδίων και κατά ένα ποσοστό πιθανότατα οφείλονται και στα επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

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

Λέξεις-Κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, ατμοσφαιρική σωματιδιακή ρύπανση, PM_{10} , $PM_{2,5}$, αστικό περιβάλλον, ελληνικές μεγαλουπόλεις.

Abstract

Particulate air pollution represents one of the most significant environmental problems in modern cities, affecting public health and quality of life, as well as the environment and ecosystems.

The purpose of this thesis was to investigate the levels and trends of particulate air pollution in Greece's largest city, Athens. The study was based on available data from 8 representative air pollution monitoring stations of the National Air Pollution Monitoring Network (EDPAR) of the Ministry of Environment and Energy, selected based on data completeness and spatial representativeness criteria to cover different types of urban environments.

In the initial chapters of the thesis, anthropogenic and natural sources of pollutants are analyzed, alongside the applicable national and European regulatory framework. Particular emphasis is placed on the extensive impacts of exposure to particulate pollution on public health, as well as on the natural environment, ecosystems, and cultural heritage. Subsequently, available industrial control technologies for reducing particulate matter levels are examined. The investigation into the long-term evolution of emissions in Greece revealed that total PM_{2.5} emissions for the period 1990–2023 decreased by 47.3% and 52.5% compared to 1990 and 2005, respectively, while PM₁₀ emissions decreased by approximately 13.3% in 2021 compared to 2012, and by 28% across Greece and 23.9% in the broader Athens area between 2006 and 2012.

Next, the annual, seasonal, and monthly variations of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in the broader Athens area during the period 2001–2025 are examined over time to evaluate air quality degradation in the region over recent decades. The processing of these measurements indicated that the highest concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} occurred at urban traffic stations located adjacent to major roadways and in densely built-up areas, such as the Athens city center and the port of Piraeus. Significant concentrations were also observed at the suburban background station of Lykovrysi, the urban background station of Maroussi, and the suburban industrial station of Elefsina, due to local sources, secondary transformations, and transported pollution from adjacent areas. Over the 2001–2025 period, a downward trend in PM₁₀ and PM_{2.5} concentration levels was observed across all stations in the broader area of Athens. It should be noted that during the study period, systematic exceedances of

statutory annual limit values occurred. Specifically, regarding PM₁₀, exceedances were more frequent at urban traffic stations, as well as at the background stations of Lykovrysi and Maroussi, mainly during the period 2001–2010. For PM_{2.5}, a small number of exceedances of the annual statutory limit was observed only at the Piraeus-1 and Lykovrysi stations. However, under the new, lower annual limits established by Directive 2024/2881, nearly all examined stations exhibit continuous exceedances for both PM₁₀ and PM_{2.5} across all years of the study period.

The monthly and seasonal analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration levels in the broader Athens area during the period 2001–2025 demonstrated clear seasonality in most areas, with maximum values in winter and minimum values in summer. However, at suburban background stations, the highest concentrations occurred in spring and summer, likely due to dust transport from adjacent urban areas, secondary particle formation, natural sources, and, to a certain extent, African dust transport events across the broader region of Athens.

The results of this study indicate that, despite the significant influence of local or industrial sources, meteorological conditions, dispersion processes, chemical transformations, and site-specific characteristics decisively determine the accumulation level of particulate air pollutants.

Keywords: Air pollution, particulate air pollution, PM₁₀, PM_{2.5}, urban environment, Greek major cities.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών ΔΙΑΧΕΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ του Ε.Α.Π., έγινε προσπάθεια αξιολόγησης της διαχρονικής μεταβολής των επιπέδων των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$) κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε ελληνικές αστικές περιοχές.

Η συγκεκριμένη ΜΔΕ περιλαμβάνει, το πρώτο κεφάλαιο, στο οποίο αναφέρονται, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων και αναφορών, γενικές έννοιες και τα είδη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι παράγοντες σχηματισμού και η προέλευση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (κυριότερες πηγές των ρύπων-κριτηρίων), οι επιπτώσεις της στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον και στα οικοσυστήματα, καθώς και το εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα (επιτρεπτά όρια των σημαντικότερων αέριων ρύπων, στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση).

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζονται οι ανθρωπογενείς και φυσικές εκπομπές των ατμοσφαιρικών σωματιδιακών ρύπων, καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών σωματιδιακών ρύπων, που καθορίζουν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε κάθε περιοχή.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε αναλυτική περιγραφή των δικτύων μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης - Σταθμοί Ελέγχου Αέριας Ρύπανσης στις ελληνικές αστικές περιοχές (Αθήνα, Θεσσαλονίκη), καθώς και τις πρότυπες μεθόδους μέτρησης των ατμοσφαιρικών σωματιδιακών ρύπων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επεξεργασία και τα στατιστικά αποτελέσματα της εργασίας, που βασίζονται σε μετρήσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$), στις ελληνικές αστικές περιοχές, όπως καταγράφονται από Σταθμούς Αναφοράς του Δικτύου Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν οι ρύποι αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $PM_{2.5}$, κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων αναφοράς, κατά την περίοδο 2001-2009 (πριν την ελληνική οικονομική κρίση, που ξεκίνησε το 2009), κατά την περίοδο 2010-2019 (κατά τη διάρκεια της ελληνικής οικονομικής κρίσης) και κατά την περίοδο 2020-2025 (κατά την οποία το διάστημα 2020-2021 υπήρξε η πανδημία του COVID-19).

Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκαν οι διαχρονικές μεταβολές που προκλήθηκαν στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε σχέση με τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων, σε ελληνικές αστικές περιοχές, εξαιτίας αφενός διαφόρων μέτρων της ελληνικής πολιτείας για τον περιορισμό των εκπομπών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αλλά και αφετέρου των αλλαγών των κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών που ήταν συνέπεια της οικονομικής κρίσης στη χώρα μας, αλλά και της πανδημίας του COVID-19.

Καινοτομία της ΜΔΕ

Η καινοτομία αυτής της ΜΔΕ έγκειται στο γεγονός ότι, θα παρουσιαστεί μια όσο το δυνατόν ολοκληρωμένη μελέτη για τα ακόλουθα:

- η διαχρονική μεταβολή των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$), κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε ελληνικές αστικές περιοχές
- η διερεύνηση των αιτιών των μεταβολών των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$), που έχει πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών σε ελληνικές αστικές περιοχές
- οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$), στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον

Έτσι, η εργασία οργανώνεται ως εξής:

- **Κεφάλαιο 1:** Παρουσιάζει τις γενικές έννοιες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, προσδιορίζοντας τους κύριους ρύπους, τα είδη, τους παράγοντες σχηματισμού και τις πηγές προέλευσής τους, διακρίνοντας τους ανάλογα με τη προέλευση σε ρύπους φυσικών και ανθρωπογενών πηγών.
- **Κεφάλαιο 2:** Εστιάζει ειδικότερα στα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10} , $PM_{2.5}$ και UFPs), αναλύοντας τα χαρακτηριστικά, τους μηχανισμούς σχηματισμού και τις πηγές εκπομπής τους. Στη συνέχεια, εξετάζει διεξοδικά τις ποικίλες επιπτώσεις της έκθεσης σε αυτά στην ανθρώπινη υγεία, στα φυσικά οικοσυστήματα και στην πολιτιστική κληρονομιά, ενώ παρουσιάζει και τις διαθέσιμες βιομηχανικές τεχνολογίες ελέγχου (κυκλώνες, ηλεκτροστατικά φίλτρα, σακκόφιλτρα) για τη μείωση των επιπέδων τους. Παράλληλα, αναφέρεται στο ισχύον εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο που διέπει την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.
- **Κεφάλαιο 3:** Περιγράφει τη δομή και τη λειτουργία του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του ΥΠΕΝ, και αναλύει

τη σταθμική (βαρυμετρική) μέθοδο μέτρησης, καθώς και τη μέθοδο της β-απορρόφησης, που εφαρμόζεται στους σταθμούς αυτούς.

- **Κεφάλαιο 4:** Παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, PM_{10} και $PM_{2.5}$, σε επιλεγμένες περιοχές της Ελλάδας (ευρύτερη περιοχή στην Αθήνα), μεταξύ σταθμών διαφορετικού χαρακτήρα (αστικοί-κυκλοφορίας, αστικοί-περιαστικοί, βιομηχανικοί και περιαστικοί υποβάθρου), ώστε να διαπιστωθούν οι διαφοροποιήσεις στις χωρικές και χρονικές κατανομές αυτών των αιωρούμενων σωματιδίων.
- **Κεφάλαιο 5:** Παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διαχρονική μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων, κατά την περίοδο 2001-2025, στις εξεταζόμενες περιοχές και διατυπώνει προτάσεις για τη μελλοντική αντιμετώπιση του προβλήματος της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Κεφάλαιο 1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

1.1. Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα και πιο επίκαιρα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η μόλυνση του εσωτερικού ή εξωτερικού περιβάλλοντος από οποιονδήποτε χημικό, φυσικό ή βιολογικό παράγοντα που τροποποιεί τα φυσικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας (Cooper & Alley, 2004). Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί πολλές αρνητικές επιπτώσεις στη μη ομαλή ανάπτυξη και λειτουργία των ανθρώπινων οργανισμών, αλλά ταυτόχρονα έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τα οικοσυστήματα. Τα μηχανοκίνητα οχήματα, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η κεντρική θέρμανση των κατοικιών, κλπ, αποτελούν μερικές από τις πιο συνηθισμένες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Seinfeld & Pandis, 2006).

1.2. Βασικές Έννοιες - Κυριότεροι Ατμοσφαιρικοί Ρύποι

Τις τελευταίες δεκαετίες, εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού, της αυξανόμενης αστικοποίησης και της βιομηχανικής δραστηριότητας, η σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα έχει αλλάξει ριζικά, με αποτέλεσμα να επέλθουν μεγάλες αλλαγές, σε παγκόσμιο επίπεδο στο περιβάλλον (Βερύκιος, 2003; Μελάς, 2007).

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι αποτέλεσμα, φυσικών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Ορισμένες από τις κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων είναι τα μέσα μαζικής μεταφοράς, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η οικιακή θέρμανση-ψύξη, τα δημόσια έργα και η εξόρυξη και μεταποίηση φυσικών πόρων. Οι ανθρωπογενείς πηγές αέριας ρύπανσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, σε εκπομπές σταθερής πηγής, όπως οι βιομηχανικές δραστηριότητες και σε εκπομπές κινητής πηγής, όπως οι ρύποι που προέρχονται από τις μεταφορές (οχήματα) (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003). Οι φυσικές πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων συμμετέχουν με πιο μεγάλο ποσοστό σε ρύπους στην ατμόσφαιρα, από ότι οι ρύποι που προέρχονται από τον άνθρωπο, αλλά έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα διασποράς, με αποτέλεσμα να μη συναντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις (Cooper & Alley, 2004). Επειδή όμως οι ανθρωπογενείς εκπομπές

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ρύπων συγκεντρώνονται στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις των ρύπων στις περιοχές αυτές είναι πολλές φορές μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια (Γεντεκάκης, 2010). Από τις πιο σημαντικές φυσικές πηγές αέριων ρύπων είναι οι εκπομπές κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών, όταν εκπέμπονται μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και αιωρούμενα σωματίδια. Επίσης, οι εκρήξεις ηφαιστειών συγκαταλέγονται στις κύριες φυσικές πηγές αέριων ρύπων, που εκπέμπουν μεθάνιο (CH₄), διοξείδιο του θείου (SO₂), υδρόθειο (H₂S) και αιωρούμενα σωματίδια. Επίσης, φυσικές πηγές αέριων ρύπων είναι οι ωκεανοί (επιφάνεια θαλασσών), η μεταφορά σκόνης από ερήμους, η εξάτμιση, τα φυτά, οι κόκκοι γύρης και σπόροι και η βιολογική αποσύνθεση των φυτών και των ζώων (Μελάς, 2007).

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που προκαλούν μεγάλη ανησυχία για τη δημόσια υγεία περιλαμβάνουν τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το όζον (O₃), το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και το διοξείδιο του θείου (SO₂). Επίσης, τα λεπτά σωματίδια (PM_{2,5} & PM₁) αποτελούν μια ιδιαίτερα σημαντική πηγή κινδύνων για την υγεία, καθώς αυτά τα πολύ μικρά σωματίδια μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στους πνεύμονες, να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος και να ταξιδέψουν σε όργανα προκαλώντας συστηματικές βλάβες στους ιστούς και τα κύτταρα. Οι παραπάνω ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους πρωτογενείς ρύπους, οι οποίοι εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από συγκεκριμένες πηγές και τους δευτερογενείς ρύπους, οι οποίοι παράγονται στην ατμόσφαιρα από την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ή περισσότερων πρωτογενών ρύπων, κάτω από την επίδραση ειδικών συνθηκών (Βερύκιος, 2003). Στους πρωτογενείς ατμοσφαιρικούς ρύπους περιλαμβάνονται για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια. Από την άλλη πλευρά στην κατηγορία των δευτερογενών ατμοσφαιρικών ρύπων ανήκουν ρύποι όπως το όζον, αλλά και διάφορες οργανικές ενώσεις όπως είναι οι αλδεΐδες (Ρεμουντάκη, 2010).

1.3 Επιδράσεις στον Ανθρώπινο Οργανισμό σε Σχέση με το Χρόνο Έκθεσης από την Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί αναπνευστικές και άλλες ασθένειες αποτελώντας σημαντική πηγή νοσηρότητας και θνησιμότητας. Οι συγκεκριμένες ασθένειες που

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

συνδέονται στενότερα με την έκθεση περιλαμβάνουν το εγκεφαλικό επεισόδιο, την ισχαιμική καρδιοπάθεια, τη χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ), τον καρκίνο του πνεύμονα και την πνευμονία. Υπάρχουν επίσης ενδείξεις σύνδεσης με δυσμενή αποτελέσματα εγκυμοσύνης (χαμηλό βάρος γέννησης), άλλους τύπους καρκίνου, σταδιακή έκπτωση νοητικών λειτουργιών και νευρολογικές παθήσεις. Τα στοιχεία του ΠΟΥ δείχνουν ότι σχεδόν όλος ο παγκόσμιος πληθυσμός (99%) αναπνέει αέρα που υπερβαίνει τα όρια των κατευθυντήριων γραμμών του ΠΟΥ, με τις χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος να υποφέρουν από την υψηλότερη έκθεση. Οι συνδυασμένες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (εξωτερικής και οικιακής) συνδέονται με 6,7 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους ετησίως (WHO, 2021).

Η κύρια έκθεση των πολιτών στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μέσω της αναπνευστικής οδού. Η εισπνοή των ατμοσφαιρικών ρύπων οδηγεί σε φλεγμονή, οξειδωτικό στρες, ανοσοκαταστολή και μεταλλαξιογένεση σε κύτταρα σε όλο το σώμα μας, επηρεάζοντας τους πνεύμονες, την καρδιά, τον εγκέφαλο μεταξύ άλλων οργάνων. Σχεδόν κάθε όργανο στο σώμα μπορεί να επηρεαστεί από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Προβλήματα υγείας μπορούν να προκύψουν και λόγω βραχυπρόθεσμης αλλά και μακροπρόθεσμης έκθεσης. Για ορισμένους ρύπους, δεν υπάρχουν όρια κάτω από τα οποία δεν εμφανίζονται δυσμενείς επιπτώσεις. Η μακροχρόνια έκθεση αυξάνει τον κίνδυνο για μη μεταδοτικές ασθένειες, ενώ η βραχυπρόθεσμη μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη πνευμονική λειτουργία και επιδείνωση του άσθματος (WHO, 2021).

Τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και οι έγκυες γυναίκες είναι πιο ευάλωτες σε ασθένειες. Η έκθεση της μητέρας στην ατμοσφαιρική ρύπανση σχετίζεται με δυσμενείς επιπτώσεις κατά τη γέννηση, όπως χαμηλό βάρος γέννησης και πρόωρο τοκετό. Είναι σημαντική η διαπίστωση ότι η αύξηση των συγκεντρώσεων ρύπων μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της θνησιμότητας από κάθε αιτία. Ειδικότερα, μελέτες (Parliari et al., 2023) που εξέτασαν την επίδραση PM_{10} και O_3 στη θνησιμότητα της πόλης της Θεσσαλονίκης, διαπίστωσαν ότι μία αύξηση $10 \mu g/m^3$ στη συγκέντρωση PM_{10} σχετίζεται με αύξηση 2,3% στη φυσική θνησιμότητα από κάθε αιτία και αύξηση 2% στην καρδιοαναπνευστική θνησιμότητα, με το 3,6% των συνολικών θανάτων να αποδίδεται στα PM_{10} , γεγονός που αντιστοιχεί σε 242 πρόωρα θύματα

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

από κάθε αιτία ετησίως. Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι η προγεννητική και η πρώιμη παιδική έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, που οφείλονται στην κυκλοφορία οχημάτων, σχετίζεται με μια σειρά από αρνητικές επιπτώσεις στην πρώιμη ζωή, συμπεριλαμβανομένων καρδιαγγειακών, μεταβολικών, αναπνευστικών, αλλεργικών, καθώς και νευροαναπτυξιακών προβλημάτων (Gheissari et al., 2022).

Πρόσφατες μελέτες σε σχέση με τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και στα φυσικά οικοσυστήματα στην Ιταλία αξιολόγησαν την αποτελεσματικότητα της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για τα Εθνικά Ανώτατα Όρια Εκπομπών (National Emission Ceilings Directive - NECD), που στοχεύει στη μείωση των ρύπων εκείνων που προκαλούν οξίνιση, ευτροφισμό και μείωση του όζοντος σε χαμηλό υψόμετρο (De Marco et al., 2019). Και αυτή η έρευνα επιβεβαίωσε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$, το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και το Όζον (O_3) παραμένουν οι πιο επικίνδυνοι ρύποι. Στην Ιταλία όπως και στην υπόλοιπη Ευρώπη, η μακροχρόνια έκθεση σε αυτούς τους ρύπους συνδέεται με χιλιάδες πρόωρους θανάτους ετησίως, κατά κύριο λόγο των καρδιαγγειακών και αναπνευστικών νοσημάτων. Η μείωση που παρατηρήθηκε στην εναπόθεση θεικών αλάτων κατά τη περίοδο 1999-2017 επέτρεψε σε πολλά οικοσυστήματα, όπως ορεινές λίμνες και δάση, που είναι ευαίσθητα στην οξίνιση, να ξεκινήσουν διαδικασίες ανάκαμψης. Η εναπόθεση αζώτου παραμένει πρόβλημα καθώς υπερβαίνει τα κρίσιμα φορτία σε πολλές περιοχές οδηγώντας σε απώλεια βιοποικιλότητας και μεταβολές στη σύνθεση των ειδών στα δάση. Επίσης, το τροποσφαιρικό όζον προκαλεί οξειδωτικό στρες στα φυτά, μειώνοντας τη φωτοσύνθεση και κατ'επέκταση την ανάπτυξη των δασών, που με τη σειρά της επηρεάζει την ικανότητα των οικοσυστημάτων να αποθηκεύουν άνθρακα. (De Marco et al., 2019).

1.4. Μηχανισμοί Επιδείνωσης της Ποιότητας του Αέρα και η Κλιματική Αλλαγή

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες διαπιστώθηκε ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων (μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου, υδρογονανθράκων, όζοντος και αιωρούμενων σωματιδίων), σε μία αστική ή βιομηχανική περιοχή, προκαλούν τα λεγόμενα “επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης” (Χαϊνά, 2014). Καταλυτικό ρόλο στην επιδείνωση αυτών των επεισοδίων

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ατμοσφαιρικής ρύπανσης παίζουν οι δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες. Για παράδειγμα, το φωτοχημικό νέφος παρουσιάζεται σε υψηλές θερμοκρασίες, παρατεταμένη ηλιοφάνεια, μικρή σχετική υγρασία και εκπομπή υψηλών συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου και υδρογονανθράκων και ως απόρροια αυτών, παραγωγή O_3 και δευτερογενών προϊόντων (Μπάης, κ.ά., 2011).

Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η κλιματική αλλαγή αυξάνει τα επίπεδα συγκεκριμένων ρύπων, κυρίως του τροποσφαιρικού όζοντος (O_3) και των λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων ($PM_{2.5}$) (Chinago & Ajiboye, 2024). Ακόμη, η αύξηση των πυρκαγιών εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων ($PM_{2.5}$) υποβαθμίζοντας την ποιότητα του αέρα, ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν τις χημικές αντιδράσεις που δημιουργούν το όζον (Μελάς, 2007). Επίσης, η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω της κλιματικής αλλαγής και οι μεταβολές στην κυκλοφορία του αέρα εμποδίζουν τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας. Η αύξηση της ρύπανσης με τη σειρά της οδηγεί σε έξαρση των αναπνευστικών και καρδιαγγειακών παθήσεων καθώς και σε αύξηση της πρόωρης θνησιμότητας, κυρίως στις πιο ευάλωτες ομάδες του πληθυσμού, που είναι τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι. Στο κέντρο των πόλεων εξαιτίας της πυκνής δόμησης, η θερμοκρασία αυξάνεται περισσότερο στο κέντρο, σε σχέση με τις γύρω περιοχές. Αυτό το φαινόμενο που λέγεται φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (urban heat island) παγιδεύει τους ρύπους αυξάνοντας περαιτέρω τη θερμοκρασία (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003). Είναι αξιοσημείωτο ακόμη και αν μειώσουμε τις εκπομπές ρύπων από τα εργοστάσια και τα αυτοκίνητα, η άνοδος της θερμοκρασίας από μόνη της, ακυρώνει ένα μέρος αυτής μας της προσπάθειας. Ορισμένοι ρύποι όπως ο μαύρος άνθρακας (αιθάλη) διαδραματίζουν πολυεπίπεδο ρόλο μια που όχι μόνο επιβαρύνουν την υγεία αλλά και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, θερμαίνοντας περαιτέρω την ατμόσφαιρα (Ρεμουντάκη, 2010). Έτσι σχηματίζεται ένας φαύλος κύκλος με την ρύπανση να επιταχύνει την κλιματική αλλαγή, η οποία με τη σειρά της να προάγει την αύξηση της ρύπανσης. Λόγω της άνοδου της θερμοκρασίας, επιμηκύνονται οι περίοδοι ανθοφορίας, γεγονός που αυξάνει τη συγκέντρωση γύρης στην ατμόσφαιρα, η οποία συνδυαζόμενη με τους ρύπους, επιδεινώνει δραματικά τις αλλεργίες και το άσθμα στον πληθυσμό. Η ξηρασία που φέρνει η κλιματική αλλαγή οδηγεί με τη σειρά της σε περισσότερες αμμοθύελλες. Η μεταφορά σκόνης σε μεγάλες αποστάσεις, μεταφέρει παθογόνους μικροοργανισμούς και μέταλλα,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

υποβαθμίζοντας την ποιότητα του αέρα ακόμη και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή της (Chinago & Ajiboye, 2024).

Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι η κλιματική αλλαγή μεταβάλλει τα συστήματα των ανέμων. Όταν ο αέρας δεν κινείται (λόγω αντικυκλώνων), οι ρύποι δεν διασκορπίζονται αλλά παραμένουν πάνω από τις πόλεις για μέρες (Φωτιάδη, 2015). Αυτό δημιουργεί συνθήκες έντονης αιθαλομίχλης (smog) μετατρέποντας τις αστικές περιοχές σε περιοχές υψηλής τοξικότητας (Μελάς, 2007). Καθώς η θερμοκρασία ανεβαίνει, τα ίδια τα δέντρα και η βλάστηση απελευθερώνουν περισσότερες φυσικές χημικές ουσίες (όπως το ισοπρένιο). Αν και αυτές οι ουσίες είναι φυσικές, όταν αναμιγνύονται με τη ρύπανση από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως τα οξείδια του αζώτου) δημιουργούν ακόμη περισσότερα μικροσωματίδια (PM_{2,5}) και όζον (O₃). Οι αλλαγές στην κυκλοφορία του αέρα στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσουν καθοδικές κινήσεις του όζοντος από τη στρατόσφαιρα προς την τροπόσφαιρα. Αυτή η μετακίνηση του όζοντος έρχεται να προσθέσει ένα ακόμη στρώμα ρύπανσης το οποίο προέρχεται από τα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας και δεν προέρχεται από τη ρύπανση του εδάφους (Chinago & Ajiboye, 2024).

Διάφορες μελέτες επισημαίνουν ότι το ζήτημα είναι πολυεπίπεδο, δηλαδή εκτός από την υγεία, επηρεάζεται και η οικονομία (WHO, 2021). Το κόστος για τα συστήματα υγείας και η απώλεια της παραγωγικότητας εξαιτίας των ασθενειών που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση είναι τεράστιο. Για αυτό οι πολιτικές για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, όπως η μετάβαση σε καθαρή ενέργεια, προσφέρουν άμεσα κέρδη στη δημόσια υγεία (Αλμπάνης, 2009; Γεντεκάκης, 2010).

1.5. Πολιτικές για τη Μείωση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Η αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που αποτελεί τον δεύτερο υψηλότερο παράγοντα κινδύνου για μη μεταδοτικές ασθένειες, απαιτεί συντονισμένη δράση από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής σε τομείς όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, η διαχείριση αποβλήτων, ο πολεοδομικός σχεδιασμός και η γεωργία. Είναι απαραίτητο να επεκταθεί η χρήση καθαρών καυσίμων και τεχνολογιών για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα νοικοκυριά και την προστασία της υγείας. Αυτά περιλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια, την ηλεκτρική ενέργεια, το βιοαέριο, το

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

υγραέριο (LPG), το φυσικό αέριο, καθώς και καυστήρες βιομάζας που πληρούν τους στόχους εκπομπών του ΠΟΥ (ΥΠΕΝ, 2025). Παραδείγματα επιτυχημένων πολιτικών περιλαμβάνουν καθαρές τεχνολογίες στη βιομηχανία και βελτιωμένη διαχείριση αστικών και γεωργικών αποβλήτων. Όσον αφορά την ενέργεια, μια προτεινόμενη αντιμετώπιση είναι η διασφάλιση πρόσβασης σε οικονομικά προσιτές λύσεις καθαρής οικιακής ενέργειας, ενώ για τις μεταφορές, στροφή σε καθαρούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, προτεραιότητα στα μέσα μαζικής μεταφοράς, ενίσχυση της πεζοπορίας και της χρήσης ποδήλατου και χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών (Τσέζος & Ρεμουντάκη, 2010). Όσον αφορά τον αστικό σχεδιασμό, μια προτεινόμενη αντιμετώπιση είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, ενώ για την παραγωγή ενέργειας, η αυξημένη χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική) (ΥΠΕΝ, 2025).

1.6. Εθνικό και Ευρωπαϊκό Θεσμικό Πλαίσιο για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού Αέρα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο για την προστασία και τη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, με βασικό στόχο τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τη θέσπιση οριακών τιμών και στόχων ποιότητας για βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, καθώς και κοινές μεθοδολογίες παρακολούθησης, αξιολόγησης και ενημέρωσης του κοινού (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2008). Μέσω των σχετικών οδηγιών, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να οργανώνουν δίκτυα μετρήσεων, να αξιολογούν συστηματικά την ποιότητα του αέρα και να λαμβάνουν μέτρα σε περιπτώσεις υπέρβασης των θεσπισμένων ορίων, στο πλαίσιο της ευρύτερης ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη μείωση της ρύπανσης και τη βιώσιμη ανάπτυξη (Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, 2025).

1.6.1 Η νομοθεσία σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Στην Ελλάδα η περιβαλλοντική πολιτική και ειδικότερα η διαχείριση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα εφαρμόζεται στο πλαίσιο ενός πολυεπίπεδου συστήματος διακυβέρνησης, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις και τις υποχρεώσεις που απορρέουν από την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Η κεντρική ευθύνη για τον σχεδιασμό, τον

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

συντονισμό και την εφαρμογή των πολιτικών προστασίας του περιβάλλοντος ανήκει στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, το οποίο είναι αρμόδιο για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, την εφαρμογή μέτρων ελέγχου και τη συμμόρφωση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες (ΥΠΕΝ, 2025).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Θεσμοθετημένα όρια τιμών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως προβλέπονται από την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2008/50/ΕΚ (ΥΠΕΝ, 2001-2025).

Όρια ποιότητας ατμόσφαιρας (ΥΠΕΝ, 2019)	
Τιμές ορίων για το διοξείδιο του θείου	Οριακή τιμή
Μέση ωριαία τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 24 φορές το χρόνο	350μg/m ³
Μέση ημερήσια τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 3 φορές το χρόνο	125μg/m ³
Οριο συναγερμού	Ωριαία τιμή μεγαλύτερη από 500μg/m ³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Τιμές ορίων για αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ₁₀	Οριακή τιμή
Μέση ημερήσια τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές το χρόνο	50μg/m ³
Μέση ετήσια τιμή	40μg/m ³
Τιμές ορίων για αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ_{2,5}	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	25μg/m ³
Τιμές ορίων για το διοξείδιο του αζώτου	Οριακή τιμή
Μέση ωριαία τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές το χρόνο	200μg/m ³
Μέση ετήσια τιμή	40μg/m ³
Οριο συναγερμού	Ωριαία τιμή μεγαλύτερη από 400μg/m ³ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Τιμές ορίων για μόλυβδο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	0,5μg/m ³
Τιμές ορίων για το όζον	Οριακή τιμή
Οριο ενημέρωσης (Μέση ωριαία τιμή)	180μg/m ³
Οριο συναγερμού (Μέση ωριαία τιμή)	240μg/m ³
Τιμή – στόχος για την προστασία της ανθρώπινης υγείας (Μέγιστη ημερήσια μέση 8ωρη τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 25 φορές ανά έτος κατά μέση τιμή για διάστημα 3 ετών)	120μg/m ³
Τιμές ορίων για το μονοξείδιο του άνθρακα	Οριακή τιμή
Μέγιστη ημερήσια οκτάωρη τιμή	10mg/m ³
Τιμές ορίων για το βενζόλιο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	5μg/m ³
Τιμές στόχοι για μέταλλα και το βενζο(α)πυρένιο	Οριακή τιμή
Μέση ετήσια τιμή	αρσενικό (6 ng/m ³) κάδμιο (5 ng/m ³) νικέλιο (20 ng/m ³) βενζο(α)πυρένιο (1 ng/m ³)

Παράλληλα οι περιφερειακές και τοπικές αρχές συμμετέχουν στην υλοποίηση της περιβαλλοντικής πολιτικής μέσω της συλλογής και διάχυσης δεδομένων της εφαρμογής τοπικών και περιφερειακών μέτρων και της ενημέρωσης του κοινού,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

συμβάλλοντας ουσιαστικά στη διαχείριση και βελτίωση της ποιότητας του αέρα σε τοπικό επίπεδο (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, 2016).

Το εθνικό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα διαμορφώνεται μέσα από την ενσωμάτωση βασικών ευρωπαϊκών οδηγιών που καθορίζουν οριακές τιμές, στόχους ποιότητας και διαδικασίες παρακολούθησης για κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Κεντρικό ρόλο κατέχει η Οδηγία 2008/50/EK (Πίνακας 1) για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη η οποία ενοποίησε και αντικατέστησε προγενέστερες οδηγίες. Οι οδηγίες αυτές έχουν ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία μέσω κοινών υπουργικών αποφάσεων (Κοινή Υπουργική Απόφαση, 2011) και αποτελούν τη βάση για τη λειτουργία των δικτύων μέτρησης, την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και τη λήψη μέτρων σε περιπτώσεις υπέρβασης των θεσπισμένων ορίων.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, στην ανακοίνωσή της (11-12-2024) με τίτλο «Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία», καθόρισε έναν φιλόδοξο χάρτη πορείας για το μετασχηματισμό της Ένωσης σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία. Ειδικότερα όσον αφορά τον καθαρό αέρα, η Επιτροπή δεσμεύτηκε για την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την καλύτερη ευθυγράμμιση των προτύπων ποιότητας του αέρα της ΕΕ με τις συστάσεις (κατευθυντήριες γραμμές) του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO-ΠΟΥ) και τη συμβολή στην επίτευξη των στόχων του σχεδίου δράσης για μηδενική ρύπανση.

Έτσι, οι οδηγίες 2004/107/EK και 2008/50/EK, καταργούνται από τη 12-12-2026, με την επιφύλαξη των υποχρεώσεων των κρατών μελών όσον αφορά τις προθεσμίες για τη μεταφορά στο εθνικό δίκαιο των οδηγιών, και τίθεται σε ισχύ η Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη, με την οποία εισάγονται αυστηρότερα όρια ποιότητας του αέρα.

Στον Πίνακα 2 αναφέρονται οι νέες, αυστηροποιημένες οριακές τιμές που θεσπίζει η Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, τις οποίες τα κράτη-μέλη οφείλουν να επιτύχουν έως την 1η Ιανουαρίου 2030.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Οριακές τιμές για την προστασία της υγείας του ανθρώπου που θα πρέπει να επιτευχθούν έως την 1η Ιανουαρίου 2030 (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)

Ρύπος	Περίοδος Μέσου Όρου	Νέο Ευρωπαϊκό Όριο (Οδηγία 2024/2881)	Κατευθυντήρια Τιμή Π.Ο.Υ. (WHO 2021 / 2000)
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM _{2.5})	Ετήσια	10 µg/m ³	5 µg/m ³
	Ημερήσια (24ωρη)	25 µg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	15 µg/m ³
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM ₁₀)	Ετήσια	20 µg/m ³	15 µg/m ³
	Ημερήσια (24ωρη)	45 µg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	45 µg/m ³
Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	Ετήσια	20 µg/m ³	10 µg/m ³
	Ημερήσια (24ωρη)	50 µg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	25 µg/m ³
	Ωριαία	200 µg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	-
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	Ημερήσια (24ωρη)	50 µg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	40 µg/m ³
	Ετήσια	20 µg/m ³	
	Ωριαία	350 µg/m ³ (έως 3 υπερβάσεις/έτος)	-
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	Μέγιστη ημερήσια 8ωρη	10 mg/m ³	

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

	Ημερήσια (24ωρη)	4 mg/m ³ (έως 18 υπερβάσεις/έτος)	4 mg/m ³
Βενζόλιο C ₆ H ₆	Ετήσια	3,4 μg/m ³	-
Μόλυβδος (Pb)	Ετήσια	0,5 μg/m ³	0,5 μg/m ³

Αν και οι προτεινόμενες οριακές τιμές είναι αυστηρότερες από τις τρέχουσες, παραμένουν δύο φορές υψηλότερες από τις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ (WHO, 2021). Μία ομάδα κορυφαίων επιστημόνων εκ μέρους της Ευρωπαϊκής Πνευμονολογικής Εταιρείας (ERS) και της Διεθνούς Εταιρείας Περιβαλλοντικής Επιδημιολογίας (ISEE) αναλύοντας την πρόταση για τη νέα Οδηγία ανέφεραν ότι *“Οι προτεινόμενες νέες ετήσιες οριακές τιμές είναι 10μg/m³ για τα PM_{2.5} και 20μg/m³ για το NO₂, οι οποίες πρέπει να τηρούνται σε ολόκληρη την ΕΕ έως το 2030. Ενώ αυτές οι προτεινόμενες οριακές τιμές είναι αυστηρότερες από τις τρέχουσες, εξακολουθούν να είναι διπλάσιες από τα Air Quality Guidelines του ΠΟΥ για το 2021.”* (Boogaard et al., 2023). Η μελέτη θεωρεί ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση κινδυνεύει να χάσει την ευκαιρία να ηγηθεί στην περιβαλλοντική νομοθεσία, τη στιγμή που άλλες χώρες υψηλού εισοδήματος, όπως οι ΗΠΑ, εξετάζουν ήδη τη μείωση των δικών τους ορίων για τα PM_{2.5} ακόμη και στα 8 μg/m³ και ότι η επίσημη εκτίμηση αντικτύπου (impact assessment) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής υποτιμά το πραγματικό υγειονομικό κόστος.

1.6.2 Η νομοθεσία σχετικά με την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Για τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) δεν προβλέπεται όριο συναγερμού από την ευρωπαϊκή και την ελληνική ισχύουσα νομοθεσία. Έτσι, με δεδομένο ότι η κοινοτική νομοθεσία δεν διαθέτει όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για τα ΑΣ₁₀ και για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια, εκδόθηκε η Κ.Υ.Α 70601 ΦΕΚ 3272/23-12-2013, που αφορά «Βραχυπρόθεσμα σχέδια δράσης για την αντιμετώπιση ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια» και η οποία θεσμοθετεί επίπεδα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ₁₀, καθορίζει μέτρα ενημέρωσης και προστασίας του πληθυσμού καθώς και μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

καύσης, τη βιομηχανία - βιοτεχνία και την κυκλοφορία οχημάτων ανάλογα με τα επίπεδα των συγκεντρώσεων.

Τα όρια λήψης εκτάκτων μέτρων που ισχύουν για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συγκεκριμένα από τα αιωρούμενα σωματίδια, παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3 (ΥΠΕΝ, 2015).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Οριακές τιμές λήψης εκτάκτων μέτρων για την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια ΑΣ₁₀ (ΥΠΕΝ, 2015).

ΡΥΠΟΣ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΒΑΣΗ	ΟΡΙΟ
Αιωρούμενα Σωματίδια ΑΣ ₁₀	24 ώρες	51-75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού
		76-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό
		101-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό, μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία
		>150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού και το γενικό πληθυσμό, μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία

Η συγκεκριμένη απόφαση καθορίζει τα επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, πάνω από τα οποία πρέπει να λαμβάνονται μέτρα, ενώ θεσπίζει και την δεξαμενή μέτρων που μπορεί κάθε φορά να λαμβάνονται. Τα μέτρα αφορούν σε:

- προφύλαξη της υγείας του πληθυσμού και ιδίως των ατόμων αυξημένου κινδύνου, όπως άτομα με αναπνευστικά προβλήματα, καρδιοπαθείς, παιδιά, άτομα άνω των 65 ετών κλπ (πάνω από 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- περιορισμό των εκπομπών από εστίες καύσης, ιδίως με την ορθή χρήση των συστημάτων θέρμανσης και την αποφυγή των τζακιών (πάνω από 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- περιορισμό των βιομηχανικών εκπομπών, με μείωση της δραστηριότητας μόνο των ρυπογόνων εγκαταστάσεων (πάνω από 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- περιορισμό των κυκλοφοριακών εκπομπών, μέσω συστάσεων προς τους οδηγούς αλλά και απαγόρευση της κυκλοφορίας συγκεκριμένων τύπων οχημάτων σε συγκεκριμένες περιοχές (πάνω από 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Τα μέτρα κηρύσσονται με ανακοίνωση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής για την Περιφέρεια Αττικής και από τον αρμόδιο Περιφερειάρχη για τις υπόλοιπες Περιφέρειες της χώρας, ενώ λαμβάνονται, κατά περίπτωση, μεμονωμένα ή σωρευτικά, ανάλογα με τη χωρική έκταση, την ένταση και το είδος του επεισοδίου και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες της κάθε Περιφέρειας, ενώ είναι δυνατό να λαμβάνονται και επιπρόσθετα μέτρα.

1.6.3 Η νομοθεσία σχετικά με τα Πρότυπα Εκπομπών.

Με σκοπό την επίτευξη του μεγαλύτερου δυνατού βαθμού προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας με τον περισσότερο αποδοτικό και οικονομικό τρόπο δημιουργήθηκε η Οδηγία 2010/75/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 24ης Νοεμβρίου 2010, περί των βιομηχανικών εκπομπών (ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης). Η οδηγία 2010/75/ΕΕ συγκεντρώνει την προγενέστερη οδηγία 2008/1/ΕΚ και έξι ακόμη προηγούμενες οδηγίες, σε μια ενιαία οδηγία που σχετίζεται με τις εκπομπές από βιομηχανικές δραστηριότητες με ισχυρό δυναμικό ρύπανσης, όπως καθορίζονται στο παράρτημα Ι της οδηγίας (ενεργειακός τομέας, παραγωγή και επεξεργασία μετάλλων, βιομηχανία ορυκτών προϊόντων, χημική βιομηχανία, διαχείριση αποβλήτων, κλπ). Κάθε βιομηχανική εγκατάσταση, στην οποία πραγματοποιούνται οι δραστηριότητες που παρατίθεται στο παράρτημα Ι της οδηγίας 2010/75/ΕΕ πρέπει να ανταποκρίνεται σε ορισμένες θεμελιώδεις περιβαλλοντικές απαιτήσεις που είναι:

- η εφαρμογή των Βέλτιστων Δυνατών Τεχνικών (ΒΔΤ).
- η λήψη προληπτικών μέτρων κατά της ρύπανσης.
- ο περιορισμός, η ανακύκλωση ή η απομάκρυνση των αποβλήτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκληθεί η λιγότερη δυνατή ρύπανση.
- η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.
- η πρόληψη των ατυχημάτων και ο περιορισμός των επιπτώσεών τους.
- η αποφυγή πρόκλησης ρύπανσης σημαντικού μεγέθους.
- η αποκατάσταση του χώρου μετά το τέλος των δραστηριοτήτων.

Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις οφείλουν να χρησιμοποιούν τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (ΒΔΤ), δηλαδή τις αποτελεσματικότερες τεχνικές, με στόχο την επίτευξη ενός υψηλού γενικού επιπέδου προστασίας του περιβάλλοντος στο σύνολό του. Οι εν λόγω τεχνικές αναπτύσσονται σε κλίμακα που επιτρέπει την εφαρμογή τους εντός του οικείου βιομηχανικού κλάδου, κάτω από οικονομικά και τεχνικά βιώσιμες συνθήκες.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή οφείλει να εκδώσει συμπεράσματα σχετικά με τις ΒΔΤ, στα οποία θα περιλαμβάνονται τα επίπεδα εκπομπών που συνδέονται με αυτές. Τα συμπεράσματα αυτά χρησιμεύουν σαν βάση για τον καθορισμό των όρων αδειοδότησης. Όσον αφορά το σύστημα αδειοδότησης των βιομηχανικών εγκαταστάσεων, πρέπει να προβλέπονται τα απαραίτητα μέτρα για τη διασφάλιση της τήρησης των βασικών υποχρεώσεων από τον φορέα εκμετάλλευσης, καθώς και τα ποιοτικά περιβαλλοντικά πρότυπα.

Τα μέτρα που πρέπει να περιλαμβάνουν οι άδειες είναι τουλάχιστον τα εξής:

- οι οριακές τιμές εκπομπών για τους ρύπους.
- τα μέτρα για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των αποβλήτων.
- οι όροι για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τις οριακές τιμές εκπομπών.
- οι διατάξεις για την ελαχιστοποίηση της διασυννοριακής ρύπανσης ή της ρύπανσης σε μεγάλη απόσταση.
- οι απαιτήσεις για την εξασφάλιση της προστασίας του εδάφους, των υδάτων και της ατμόσφαιρας.
- οι απαιτήσεις για τη διατήρηση και τον έλεγχο του εδάφους και των υπόγειων υδάτων.
- οι απαιτήσεις σχετικά με τη μεθοδολογία υπολογισμού των εκπομπών, τη συχνότητα λήψης των στοιχείων και τη διαδικασία αξιολόγησης.
- η υποχρέωση ενημέρωσης της αρμόδιας αρχής τουλάχιστον άπαξ ετησίως σχετικά με τα αποτελέσματα της παρακολούθησης
- τα μέτρα σχετικά με τις μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας (διαρροές, δυσλειτουργίες, προσωρινή παύση ή οριστική διακοπή λειτουργίας κ.λπ.).

Επιπλέον ορισμένες ειδικές διατάξεις ισχύουν για συγκεκριμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπως οι μονάδες καύσης, οι μονάδες αποτέφρωσης και συναποτέφρωσης αποβλήτων, οι εγκαταστάσεις όπου χρησιμοποιούνται οργανικοί διαλύτες και οι εγκαταστάσεις παραγωγής διοξειδίου του τιτανίου.

Σύμφωνα με την οδηγία 2010/75/ΕΕ τα κράτη μέλη της ΕΕ οφείλουν να συγκροτήσουν σύστημα περιβαλλοντικών επιθεωρήσεων των σχετικών βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Όλες οι εγκαταστάσεις πρέπει να υπόκεινται σε κάποιο σχέδιο περιβαλλοντικών επιθεωρήσεων, που πρέπει να αναθεωρείται και να επικαιροποιείται τακτικά.

Η Οδηγία 2010/75/ΕΕ περί “βιομηχανικών εκπομπών” έχει εναρμονιστεί με την ελληνική νομοθεσία μέσω του Ν.4014/20.9.2011 (ΦΕΚ 209/21.9.2011), ο οποίος τέθηκε σε ισχύ ένα μήνα αργότερα, μέσα στο οποίο ορίστηκαν ως αρμόδιοι φορείς το

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΥΠΕΝ και τις αρμόδιες για θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής και ποιότητας περιβάλλοντος υπηρεσίες των Περιφερειών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των ατμοσφαιρικών σωματιδίων

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει μία τεράστια ποικιλία σωματιδίων, τόσο από την άποψη της προέλευσης, όσο και από την άποψη των χαρακτηριστικών τους. Έτσι, τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από μια μεγάλη ποικιλία πηγών και έχουν ένα σημαντικό εύρος μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών.

Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα αποτελούνται από σωματίδια των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από μερικές δεκάδες Angström (Å), έως αρκετές εκατοντάδες μικρόμετρα (μm). Με τον όρο αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη ή αιωρούμενα σωματίδια περιγράφουμε τα διεσπαρμένα στον αέρα στερεά ή υγρά σωματίδια, με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων, αλλά μικρότερο από 500μm. Στην ατμόσφαιρα έχουν ανιχνευθεί συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, ως προς την μάζα, από μερικά $\mu\text{g}/\text{m}^3$ έως και αρκετές εκατοντάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$, σε ατμοσφαιρικά επιβαρυνμένες περιοχές (Seinfeld and Pandis, 2006).

2.2. Κατηγορίες Ταξινόμησης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων οι κυριότεροι από τους οποίους βασίζονται (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003):

- Στην προέλευση: Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν οι πηγές τους είναι φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές.
- Στο μέγεθός τους: Η κατανομή των ατμοσφαιρικών σωματιδίων αποτελεί σημαντική παράμετρο, που καθορίζει τις ιδιότητες, την απόθεση και τις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Το μέγεθος των σωματιδίων καθορίζει τη συμπεριφορά τους και παρουσιάζεται με τη βοήθεια της αεροδυναμικής τους διαμέτρου. Οι ταχύτητες εναπόθεσης των σωματιδίων, καθώς και οι χρόνοι παραμονής τους στην ατμόσφαιρα εξαρτώνται από την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων.
- Στον τρόπο σχηματισμού τους: Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατατάσσονται σε πρωτογενή ή δευτερογενή.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

- Στη σύσταση τους: Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατατάσσονται σε ανόργανα (πχ οξείδια μετάλλων, θεικές ρίζες, νιτρικές ρίζες, κλπ) ή οργανικά (πχ διάφοροι υδρογονάνθρακες) ή και σωματίδια μικτής σύστασης.
- Στις επιπτώσεις τους στην υγεία: Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατατάσσονται σε εσπνεύσιμα και μη. Η κατηγοριοποίηση αυτή υπάγεται στην ευρύτερη κατάταξη των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους.

2.2.1 Ταξινόμηση σε σχέση με την πηγή προέλευσης

Οι σημαντικότερες φυσικές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι εκπομπές κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών και των εκρήξεων ηφαιστείων, οι εκπομπές από την επιφάνεια και τη διάβρωση του εδάφους, την εξάτμιση από τους ωκεανούς (θαλάσσια σταγονίδια), τη μεταφορά σκόνης από ερήμους, τις ανεμοθύελλες, τη βιογενή ύλη, κλπ. (Βερύκιος 2003; Ρεμουντάκη, 2010).

Οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές αιωρούμενων σωματιδίων είναι η καύση ξύλου και ορυκτών καυσίμων, οι διάφορες βιομηχανικές διεργασίες και οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, η κίνηση οχημάτων, οι γεωργικές, κατασκευαστικές και εξορυκτικές δραστηριότητες, κλπ. (Seinfeld and Pandis, 2006; Kassomenos et al., 2012). Επίσης, υπάρχουν διάφορα συσσωματώματα τα οποία δημιουργούνται από συμπύκνωση και πήξη και να επισημανθεί ακόμα, ότι υπάρχει ένας συνεχής κύκλος δημιουργίας μικρών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, των οποίων το μέγεθος αυξάνεται και τελικά όταν αποκτήσουν αρκετά μεγάλο μέγεθος παρατηρείται απομάκρυνση τους από την ατμόσφαιρα, μέσω υγρής ή ξηρής εναπόθεσης (Γεντεκάκης, 2010).

2.2.2 Ταξινόμηση σε σχέση με το μέγεθος

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των ατμοσφαιρικών σωματιδίων είναι το μέγεθός τους το οποίο σχετίζεται με την πηγή από την οποία προέρχονται και τις επιπτώσεις που προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κατηγοριοποιούνται με βάση την κατανομή επιφάνειας και το μέγεθός τους και το φυσικοχημικό μηχανισμό σχηματισμού τους (Seinfeld and Pandis, 2006; Γεντεκάκης, 2010) στις ακόλουθες κύριες ομάδες:

- **Τύπου Πυρήνα (Nucleation Mode):** Περιλαμβάνει τα εξαιρετικά μικρά αιωρούμενα σωματίδια περιοχής πυρηνοποίησης (έως 15 nm) και τα μεταβατικά σωματίδια πυρήνα, κατηγορία Aitken (από 15 nm έως 100 nm). Τα σωματίδια αυτά, τα οποία συχνά αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως υπερλεπτά, αντιπροσωπεύουν τη συντριπτική πλειονότητα των αερολυμάτων ως προς τον απόλυτο αριθμό τους, αλλά συνεισφέρουν μόνο ένα ελάχιστο ποσοστό στη συνολική μάζα. Ο σχηματισμός τους είναι αποτέλεσμα της συμπύκνωσης θερμών ατμών και της δημιουργίας νέων σωματιδίων, απευθείας με άμεση απελευθέρωση από διεργασίες καύσης, στην αέρια φάση. Λόγω του εξαιρετικά μικρού τους μεγέθους, μπορούν να διεισδύσουν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα.
- **Τύπου Συσσώρευσης (Accumulation Mode):** Περιλαμβάνει λεπτόκοκκα σωματίδια με διάμετρο συνήθως από 0,08 έως 2,5 μm . Σχηματίζονται συνήθως όταν μικρότερα σωματίδια μεγαλώνουν μέσω πήξης μικρότερων σωματιδίων του τύπου πυρήνα, καθώς και η συμπύκνωση ατμών πάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια. Διακρίνονται σε συμπυκνώματα (Condensation mode), που προέρχονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων και σταγονίδια (Droplet mode), που σχηματίζονται όταν υγροσκοπικά σωματίδια απορροφούν υγρασία και αντιδρούν χημικά στο νερό της ατμόσφαιρας. Παραμένουν στον αέρα για πολλές μέρες, επειδή οι φυσικοί μηχανισμοί καθαρισμού της ατμόσφαιρας τα απομακρύνουν πολύ δύσκολα, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Αντιπροσωπεύουν συνήθως το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής επιφάνειας των αερολυμάτων και ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της μάζας τους. Ο σχηματισμός τους οφείλεται σε καυσαέρια οχημάτων και βιομηχανικές εκπομπές, καύση βιομάζας και χημικές αντιδράσεις αερίων στην ατμόσφαιρα (δευτερογενείς ρύποι). Εισχωρούν βαθιά στους πνεύμονες και επηρεάζουν σοβαρά το αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα και λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, επηρεάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία και τον καιρό.
- **Τύπου Χονδρών Σωματιδίων (Coarse Mode):** Περιλαμβάνει σωματίδια με διάμετρο από 2,5 μm και άνω, τα οποία σχηματίζονται κυρίως από μηχανικές διεργασίες (όπως η τριβή από τα ελαστικά των οχημάτων, χωματοουργικές εργασίες, κατασκευές) και φυσικές πηγές (όπως η σκόνη εδάφους, τα θαλάσσια αερολύματα, αφρικανική σκόνη, γύρη). Λόγω του μεγέθους τους, παγιδεύονται

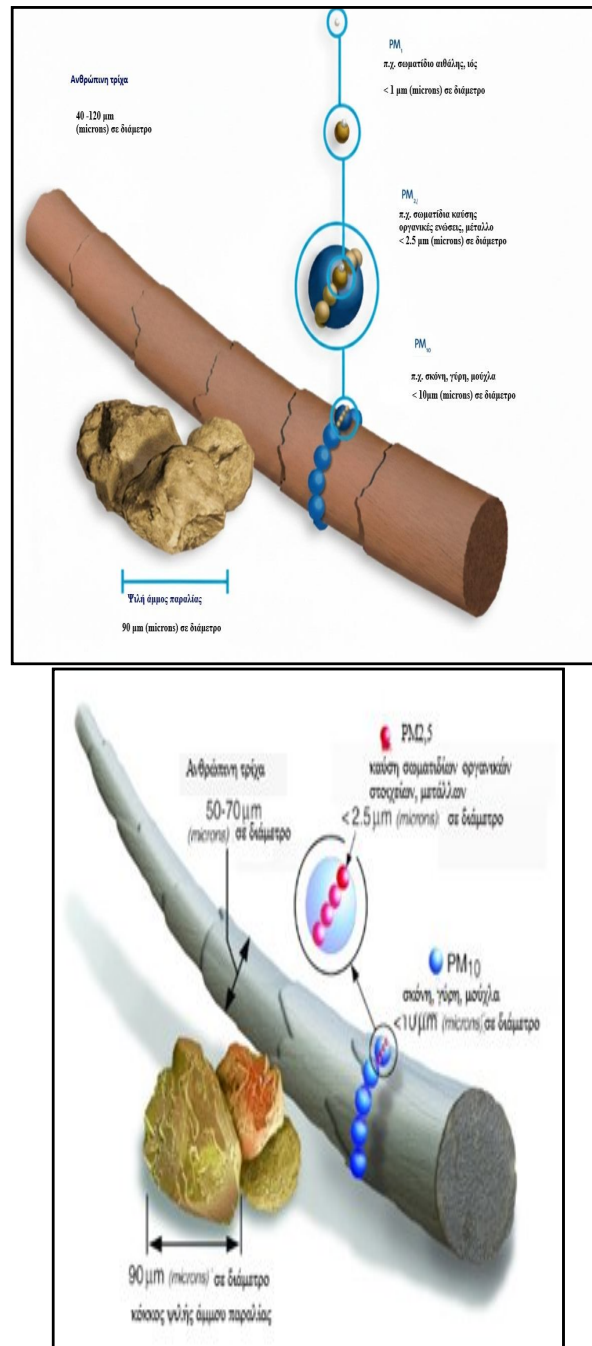
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

κυρίως στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (μύτη, φάρυγγας, τραχεία) και φιλτράρονται πιο εύκολα από τον οργανισμό σε σχέση με τα λεπτά σωματίδια.

Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η παράμετρος που τα κατηγοριοποιεί στις παρακάτω κύριες κατηγορίες, σε σχέση με το μέγεθός τους:

- Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Particle - **TSP**)» δόθηκε στο σύνολο όλων των στερεών σωματιδίων και των σταγονιδίων, τα οποία ποικίλουν σε μέγεθος από περίπου 0,002 μm έως και μερικές δεκάδες μm (~100 μm).
- PM_{10} : διαμέτρου μικρότερης των 10 μm (χονδρόκοκκα σωματίδια)
- $\text{PM}_{10-2,5}$: διαμέτρου μικρότερης των 10 μm και μεγαλύτερης των 2,5 μm (χονδρόκοκκα σωματίδια)
- $\text{PM}_{2,5}$: διαμέτρου μικρότερης των 2,5 μm (λεπτόκοκκα σωματίδια)
- PM_1 : διαμέτρου μικρότερης των 1 μm (υπέρλεπτα σωματίδια-ultrafine particles)
- Νανοσωματίδια (nanoparticles), τα οποία έχουν μικρότερο μέγεθος από τα υπέρλεπτα σωματίδια, και οι διαστάσεις των οποίων κυμαίνονται συνήθως από 0,001 έως 0,05 μm .

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Εικόνα 1. (α) Συγκριτική κλίμακα μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων (PM) (Mauricio-Álvarez et al., 2024). (β) Οπτική σύγκριση μεγέθους σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5} (National Cancer Institute [NCI], 2023)

Στην Εικόνα 1 αποτυπώνεται σχηματικά η συγκριτική κλίμακα μεγέθους, όπου μια ανθρώπινη τρίχα έχει μέση διάμετρο περίπου 50-70 μm. Τα σωματίδια PM₁₀ είναι τουλάχιστον 5 έως 7 φορές μικρότερα από αυτήν, ενώ τα PM_{2.5} είναι τόσο

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

μικροσκοπικά ώστε δεκάδες από αυτά μπορούν να χωρέσουν εντός της διαμέτρου μιας και μόνο τρίχας.

Η διάκριση μεταξύ λεπτών και χονδρών σωματιδίων είναι σημαντική στη μελέτη των αερολυμάτων, καθώς αυτά διαφέρουν σημαντικά ως προς την προέλευση, τις διαδικασίες μετασχηματισμού, τους μηχανισμούς απομάκρυνσης, τη χημική σύνθεση, τις οπτικές ιδιότητες, καθώς και τη δυναμική εναπόθεσής τους στην ανθρώπινη αναπνευστική οδό. Τα λεπτά σωματίδια, με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από $2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), σχηματίζονται κυρίως κατά τις διεργασίες καύσης και μέσω του σχηματισμού νέων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (nucleation). Αντίθετα, τα χονδρόκοκκα σωματίδια, με διάμετρο άνω των $2,5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{10-2.5}$), παράγονται κατά κύριο λόγο από μηχανικές διεργασίες και παρουσιάζουν σαφώς μεγαλύτερες ταχύτητες βαρυτικής καθίζησης (Μελάς, 2007).

2.2.3 Ταξινόμηση σε σχέση με την προέλευση

Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια διακρίνονται, σε σχέση με την προέλευσή τους, σε δύο μεγάλες κατηγορίες στα πρωτογενή και στα δευτερογενή. Τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται απευθείας από την πηγή, όπως είναι για παράδειγμα η κίνηση των οχημάτων ή η επαναιώρηση της σκόνης, ενώ τα δευτερογενή σωματίδια σχηματίζονται εντός της ατμόσφαιρας μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων μεταξύ ρύπων, όπως πχ τα νιτρικά και θειικά άλατα, που σχηματίζονται σε αστικά κέντρα από αντιδράσεις κυρίως των SO_x και NO_x (Cooper & Alley, 2004).

2.2.3.1 Πρωτογενή Σωματίδια (Primary Particulate Matter)

Τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από τις πηγές τους σε στερεή ή υγρή μορφή. Τα πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια, εκπέμπονται απευθείας, τόσο από φυσικές, όσο και από ανθρωπογενείς πηγές και προέρχονται κυρίως από καύσεις (μεταφορές, βιομηχανικές δραστηριότητες, θέρμανση κατοικιών), από διαδικασίες κατά τις οποίες αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης και από μηχανικές διαταραχές, από ανθρωπογενή ή φυσικά αίτια, που σχετίζονται με τον άνεμο και τα οποία προκαλούν την αιώρηση-επαναιώρηση των σωματιδίων (Μελάς, 2007). Η ορυκτή σκόνη (mineral dust) προέρχεται από την αιολική διάβρωση του εδάφους και τις άνυδρες ή ερημικές

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

περιοχές, αποτελώντας το μεγαλύτερο μέρος των χονδρόκοκκων σωματιδίων παγκοσμίως. Το θαλάσσιο αλάτι (sea salt) παράγεται από τον κυματισμό και τη θραύση των κυμάτων στους ωκεανούς, παρουσιάζοντας κυρίαρχη παρουσία στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Η πρωτογενής βιολογική ύλη περιλαμβάνει ζωντανούς ή νεκρούς οργανισμούς και εκκρίσεις τους, όπως γύρη, σπόρους μυκήτων, βακτήρια και υπολείμματα φυτικών ιστών. Τέλος, τα προϊόντα καύσης συνίστανται σε σωματίδια αιθάλης (black carbon-BC) και οργανικού άνθρακα, τα οποία παράγονται κατά την ατελή καύση ορυκτών καυσίμων και βιομάζας από ανθρωπογενείς ή φυσικές δραστηριότητες.

2.2.3.2 Δευτερογενή Σωματίδια (Secondary Particulate Matter)

Τα δευτερογενή σωματίδια δεν εκπέμπονται απευθείας αλλά σχηματίζονται εντός της ατμόσφαιρας μέσω χημικών αντιδράσεων και της διαδικασίας μετατροπής αερίου σε σωματίδιο (gas-to-particle conversion). Οι κυριότεροι μηχανισμοί περιλαμβάνουν τη δημιουργία Δευτερογενών Ανόργανων Αερολυμάτων (Secondary Inorganic Aerosols) από την οξείδωση αερίων ρύπων. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του θείου (SO_2) οξειδώνεται και μετατρέπεται σε θειικά άλατα, ενώ τα οξείδια του αζώτου (NO_x) μετατρέπονται σε νιτρικά άλατα. Η ατμοσφαιρική αμμωνία (NH_3) παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς εξουδετερώνει τα σχηματιζόμενα οξέα, οδηγώντας στη δημιουργία στερεών σωματιδίων όπως το θειικό αμμώνιο (Seinfeld and Pandis, 2006; Γεντεκάκης, 2010).

Παράλληλα, τα Δευτερογενή Οργανικά Αερολύματα (Secondary Organic Aerosols - SOA) προκύπτουν από την πολυπλοκότερη οξείδωση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Τα αέρια αυτά, κατά την οξείδωσή τους, παράγουν χημικές ενώσεις με εξαιρετικά χαμηλή τάση ατμών, οι οποίες στη συνέχεια συμπυκνώνονται πάνω σε προϋπάρχοντα σωματίδια ή σχηματίζουν νέους πυρήνες. Αν και τα πρωτογενή σωματίδια κυριαρχούν συνήθως στη συνολική μάζα λόγω της συνεισφοράς της σκόνης και του αλατιού, τα δευτερογενή σωματίδια επικρατούν αριθμητικά και αποτελούν το κύριο σώμα του λεπτόκοκκου κλάσματος ($\text{PM}_{2.5}$), έχοντας έτσι τη μεγαλύτερη αρνητική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία και την ορατότητα (Seinfeld & Pandis, 2006).

2.2.4 Ταξινόμηση των σωματιδίων σύμφωνα με τη σύστασή τους

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα πολυσύνθετο μείγμα οργανικής και ανόργανης ύλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα είτε ως υγρό είτε ως στερεό. Τα μεγάλα στερεά σωματίδια περιλαμβάνουν ύλη από την επιφάνεια της γης, όπως σκόνη, ενώ τα μικρά σωματίδια περιλαμβάνουν συνήθως δευτερογενώς σχηματιζόμενα αερολύματα, σωματίδια από τις διεργασίες καύσης και, υγροποιημένους οργανικούς και μεταλλικούς ατμούς. Η σύσταση των σωματιδίων σχετίζεται άμεσα με την προέλευσή τους, και ειδικότερα με το μηχανισμό γένεσής τους (Μελάς, 2007). Έτσι, τα σωματίδια ανάλογα με την σύστασή τους μπορούν να χαρακτηριστούν ως οργανικά και ανόργανα και η κατηγοριοποίηση προέρχεται από τα κύρια συστατικά που φέρουν τα σωματίδια (Τσέζος & Ρεμουντάκη, 2010).

Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια εκπροσωπούν ένα πολυσύνθετο μείγμα ανόργανων και εκατοντάδων διαφορετικών οργανικών ενώσεων. Οι ιδιότητες των σωματιδίων όπως είναι το μέγεθος και η χημική σύσταση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη των πηγών τους, αλλά και του τρόπου σχηματισμού τους. Για παράδειγμα, η επικράτηση των ανόργανων συστατικών υπονοεί ότι τα σωματίδια προήλθαν από φυσικές πηγές, ενώ η υψηλή περιεκτικότητα αιθάλης στα λεπτά σωματίδια υποδεικνύει ότι τα σωματίδια προήλθαν από πηγές καύσης (Eleftheriadis et al., 2012).

2.2.5 Ταξινόμηση των σωματιδίων σύμφωνα με τις επιπτώσεις τους στην υγεία

Οι βλαβερές επιπτώσεις που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στον ανθρώπινο οργανισμό είναι άμεση συνάρτηση της διεισδυτικότητάς τους η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη η διεισδυτικότητά τους, και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερες οι βλάβες που προκαλούν στον οργανισμό (Ρεμουντάκη, 2010). Οι υποομάδες των αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν προκύψει με κριτήριο την διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό (Cooper & Alley, 2004; Seinfeld & Pandis, 2006; Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003) είναι οι ακόλουθες:

1. Εισπνεύσιμα σωματίδια (Inhalable particles)

Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ρινοφάρυγγας). Η αεροδυναμική τους διάμετρος είναι μικρότερη από

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

10 μm , καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες των 10 μm κατακρατούνται από τη στοματική και τη ρινική κοιλότητα.

2. Θωρακικά σωματίδια (Thoracic particles)

Είναι τα σωματίδια που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού. Το μέγεθός τους είναι μικρότερο των 7 μm .

3. Αναπνεύσιμα σωματίδια (Respirable particles)

Πρόκειται για την σημαντικότερη και την πιο επιβλαβή κατηγορία αιωρούμενων σωματιδίων, αφού διεισδύουν έως τα βάθη των πνευμόνων με αποτέλεσμα να προκαλούν σοβαρότατες βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό. Το μέγεθός τους είναι μικρότερο των 2,5 μm . Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη του 1 μm (PM_{1.0}), τα οποία θεωρούνται άκρως επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους και κατά συνέπεια, της μεγάλης διεισδυτικότητάς τους.

2.3 Εξαιρετικά λεπτά αιωρούμενα σωματίδια UFPs

Τα εξαιρετικά λεπτά σωματίδια (Ultra Fine Particles - UFPs) ορίζονται ως τα αερολύματα με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη από 0,1 μm (100 nm). Παρά την ελάχιστη συνεισφορά τους στη συνολική μάζα, κυριαρχούν όσον αφορά τον συνολικό αριθμητικό πληθυσμό των σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους τους, έχουν την ικανότητα να διεισδύουν βαθιά έως τις πνευμονικές κυψελίδες, παρακάμπτοντας τους φυσικούς μηχανισμούς κάθαρσης και άμυνας των ανώτερων αεραγωγών. Παράλληλα, διαθέτουν πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια ανά μονάδα μάζας, γεγονός που αυξάνει την ικανότητά τους να προσροφούν τοξικές οργανικές ενώσεις και βαρέα μέταλλα καθιστώντας τα ιδιαίτερα επιβλαβή. Ενώ τα PM_{2.5} και PM₁₀ υπολογίζονται σε συγκέντρωση, μάζα ανά όγκο αέρα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), τα UFPs αναφέρονται κυρίως ως αριθμός σωματιδίων ανά κυβικό εκατοστό (particles/cm³) (Hopke et al., 2022).

Κατά την εισπνοή τους, δεν συγκρατούνται στο βλεννογόνο της ρινικής κοιλότητας ή του φάρυγγα, αλλά περνούν το κυψελιδικό-τριχοειδικό φράγμα και εισέρχονται

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

απευθείας στη συστηματική κυκλοφορία του αίματος. Μέσω του κυκλοφορικού συστήματος, μετατοπίζονται και κατανέμονται σε απομακρυσμένα ζωτικά όργανα, όπως η καρδιά και ο εγκέφαλος, εισχωρώντας ακόμη και στο εσωτερικό των κυτταρικών οργανιδίων και μεταφέροντας τοξίνες σε ολόκληρο τον ανθρώπινο οργανισμό (Miller et al., 2017; Fan et al., 2018). Λόγω αυτής της μετατόπισης, η έκθεση σε UFPs συνδέεται με την εκδήλωση παθολογιών που, αν και αναπτύσσονται εκτός του αναπνευστικού συστήματος, έχουν ως αρχικό περιβαλλοντικό έναυσμα την εισπνοή αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης. Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά κλίμακας, ο όγκος που καταλαμβάνει ένα μόνο σωματίδιο PM₁₀ ισοδυναμεί με τον όγκο ενός εκατομμυρίου σωματιδίων UFP διαμέτρου 0,1 μm. Η υψηλή επιφανειακή αντιδραστικότητα επιτρέπει στα UFPs να μεταφέρουν, για μια δεδομένη μάζα, πολύ μεγαλύτερο τοξικό φορτίο, ενώ μπορούν να προέλθουν και από τη συμύκνωση ημιπτητικών οργανικών ενώσεων (SVOCs) στην αέρια φάση (Kwon et al., 2020).

Πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στην υγεία, η εκπομπή UFPs από την καύση ορυκτών καυσίμων επηρεάζει καταλυτικά και τους μηχανισμούς των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων. Σύμφωνα με την ανάλυση των Junkermann κ.ά. (2011), τα εξαιρετικά λεπτά σωματίδια λειτουργούν ως πρόδρομοι πυρήνες συμύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nuclei - CCN), τροποποιώντας τη μικροφυσική δομή των νεφών, καθώς και τη χωρική κατανομή και ένταση των βροχοπτώσεων σε περιφερειακή κλίμακα κατάντη των πηγών εκπομπής. Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των μικροσκοπικών σταγονιδίων νερού στα σύννεφα μειώνει το διαθέσιμο νερό που απαιτείται για τη δημιουργία μεγαλύτερων, βαρέων σταγόνων ικανών να πέσουν ως βροχή. Το παγιδευμένο αυτό νερό μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις, προκαλώντας παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές, και αντίστοιχα, αιφνίδιες καταρρακτώδεις βροχές και έντονα πλημμυρικά φαινόμενα χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά (Junkermann et al., 2011).

Η μελέτη των Fan κ.ά. (2018) αναδεικνύει επιπλέον ότι η υψηλή συγκέντρωση υπερλεπτών σωματιδίων αναγκάζει τις μικροσκοπικές σταγόνες, λόγω έλλειψης βάρους, να παρασυρθούν από τα ανοδικά ρεύματα σε πολύ μεγαλύτερα υψόμετρα της ατμόσφαιρας. Εκεί, κατά τη διαδικασία πήξης τους, απελευθερώνεται σημαντική ποσότητα λανθάνουσας θερμότητας, η οποία θερμαίνει εσωτερικά το υποσύστημα του νέφους. Το γεγονός αυτό ενισχύει περαιτέρω τα ανοδικά ρεύματα θερμού αέρα

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

από το έδαφος, αυξάνοντας απότομα το κατακόρυφο μέγεθος του νέφους και οδηγεί στη δημιουργία σφοδρότερων καταιγίδων με έντονη δραστηριότητα κεραυνών και ακραία ύψη βροχής (Fan et al., 2018).

2.3.1 Ο ρόλος που διαδραματίζει το σχήμα στα πολύ μικρά αιωρούμενα σωματίδια

Ο Lockerby (2025) επεσήμανε ότι, εκτός από το γεωμετρικό μέγεθος, το σχήμα των σωματιδίων διαδραματίζει εξίσου κρίσιμο ρόλο στις επιπτώσεις τους στην υγεία. Αυτό οφείλεται στο ότι το σχήμα καθορίζει τις αεροδυναμικές ιδιότητες μεταφοράς των αερολυμάτων εντός του αέριου ρεύματος και τον τρόπο με τον οποίο αυτά ανακατευθύνονται και καθηλώνονται στο εσωτερικό του πνεύμονα, επηρεάζοντας τη δυνατότητά τους να διαπεράσουν την άμυνα του οργανισμού. Ενώ για μια τέλεια σφαίρα η ασκούμενη αεροδυναμική αντίσταση είναι πανομοιότυπη προς όλες τις κατευθύνσεις, για σωματίδια ακανόνιστου σχήματος ή δισκοειδούς μορφής δεν ισχύει αυτό. Ο Lockerby (2025) απέδειξε ότι η αεροδυναμική αντίσταση μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με τον στιγμιαίο προσανατολισμό του σωματιδίου ως προς τη ροή του αέρα. Αυτό αναγκάζει τα ακανόνιστα σωματίδια να εκτελούν περίπλοκες περιστροφικές κινήσεις και συστροφές κατά την καθίζησή τους. Έτσι, τα ακανόνιστα σωματίδια, λόγω της τραχύτητας της επιφάνειάς τους λοιπόν, πολλαπλασιάζουν τα σημεία σύγκρουσης με τα ατμοσφαιρικά μόρια, αυξάνοντας τη συνολική οπισθέλκουσα δύναμη. Λόγω της αυξημένης αντίστασης που προκαλεί το σχήμα, τα ακανόνιστα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η τροχιά τους στους πνευμονικούς αεραγωγούς παρουσιάζει χαοτική μορφή και αποκλίνει από την ευθεία γραμμή, γεγονός που αυξάνει γεωμετρικά την πιθανότητα να προσκρούσουν στα τοιχώματα των κυψελίδων και να εναποτεθούν μόνιμα στον ιστό.

Η κατανόηση της αεροδυναμικής αντίστασης είναι θεμελιώδης για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς των ρύπων, το σχεδιασμό βιομηχανικών φίλτρων και την πρόβλεψη της πνευμονικής τοξικότητας. Η υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων ακανόνιστου σχήματος προκαλεί έντονη τοπική εναπόθεση και οδηγεί στην εκδήλωση χρόνιων φλεγμονών, ινώσεων ή νεοπλασιών, εξαιτίας της δυσκολίας απομάκρυνσής τους από τα μακροφάγα. Αντίθετα, τα σφαιρικά σωματίδια ταξιδεύουν βαθύτερα και, αν είναι αρκετά μικρά, παρουσιάζουν αυξημένες πιθανότητες να διαπεράσουν τους

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

αεραγωγούς και να εισέλθουν άμεσα στο κυκλοφορικό σύστημα. Συνεπώς, τα UFPs ακανόνιστου σχήματος θεωρούνται πιο απειλητικά για την πρόκληση μόνιμων βλαβών στον πνευμονικό ιστό, ενώ τα σφαιρικά UFPs είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά του τοξικού φορτίου σε άλλα όργανα. Από την άλλη πλευρά, σωματίδια σε σχήμα δίσκου, όπως ο γραφίτης ή τα θραύσματα από τα συστήματα πέδησης (φρένα) των οχημάτων, παραμένουν στον αέρα για μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω της υψηλής μέσης αντίστασής τους, ενώ αν ευθυγραμμιστούν κατάλληλα με τη ροή του αέρα, μπορούν να διεισδύσουν με την κοφτή τους πλευρά εξαιρετικά βαθιά στις κυψελίδες (Lockerby, 2025).

2.4 Απομάκρυνση και Χρόνος Παραμονής

Τα σωματίδια απομακρύνονται από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον με δύο μηχανισμούς, της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης. Η ξηρή εναπόθεση, αφορά την άμεση καθίζηση ή προσκόλληση των σωματιδίων στην επιφάνεια της Γης λόγω βαρύτητας ή αδράνειας και η υγρή εναπόθεση, περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των σωματιδίων σε σταγονίδια νεφών ή βροχής και την επακόλουθη έκπλυσή τους κατά τη διάρκεια των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων (Μελάς, 2007; Χαϊνά, 2014).

Οι χρόνοι παραμονής των σωματιδίων στην τροπόσφαιρα παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, που κυμαίνονται από λίγες ημέρες έως μερικές εβδομάδες. Αυτός ο σχετικά σύντομος χρόνος ζωής, σε συνδυασμό με την ανομοιογενή γεωγραφική διασπορά των πηγών εκπομπής, έχει ως αποτέλεσμα τα αερολύματα της τροπόσφαιρας να εμφανίζουν έντονες χωροχρονικές μεταβολές στη συγκέντρωση και τη χημική τους σύσταση. Τα σωματίδια του τύπου συσώρευσης τείνουν να παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερους χρόνους παραμονής συγκριτικά με τα σωματίδια του τύπου πυρήνα ή των χονδρών σωματιδίων, καθώς διαφεύγουν πιο εύκολα από τους κύριους μηχανισμούς απομάκρυνσης (Seinfeld & Pandis, 2006; Cooper & Alley, 2011).

2.5 Ο ρόλος του Μαύρου και του Καφέ Άνθρακα στο Κλίμα

Ο μαύρος άνθρακας ή αιθάλη, είναι ένα στερεό αερόλυμα που αποτελείται από σχεδόν καθαρό στοιχειακό άνθρακα με γραφιτική δομή. Θεωρείται ο ισχυρότερος

απορροφητής ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα επειδή απορροφά το φως σε όλα τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος. Προέρχεται κυρίως από την ατελή καύση σε υψηλές θερμοκρασίας από κινητήρες ντίζελ (φορτηγών, πλοίων), από καύση ορυκτών καυσίμων σε εργοστάσια και μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά και από οικιακή χρήση (καύση άνθρακα και ξύλου για θέρμανση ή μαγείρεμα) καθώς και από τις καύσεις των δασικών πυρκαγιών και την καύση των γεωργικών υπολειμμάτων (Βερύκιος, 2003; Χαϊνά, 2014).

Ο καφέ άνθρακας, είναι μια κατηγορία οργανικών ενώσεων που απορροφούν το φως στα μικρά μήκη κύματος (υπεριώδες 100 nm - 400 nm και μπλε φως 450 nm - 495 nm), γεγονός που του προσδίδει μία φαιά ή καφέ εμφάνιση. Αντίθετα, με τον μαύρο άνθρακα μπορεί να είναι ημιπτητικός και χημικά πιο σύνθετος (Bond & Bergstrom, 2006; Laskin et al., 2015). Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού του, ο καφέ άνθρακας διακρίνεται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Πρωτογενής είναι όταν προέρχεται από τη καύση βιομάζας και δευτερογενής όταν προκύπτει μέσω χημικών αντιδράσεων πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Μπορεί επίσης να προέλθει από υπολείμματα φυτών, μύκητες και ουσίες χούμου (Andreae & Gelencsér, 2006; Yan, et al., 2018). Παρόλο που ο μαύρος άνθρακας θεωρείται ως ο ισχυρότερος παράγοντας θέρμανσης της ατμόσφαιρας από σωματίδια, εντούτοις και ο καφέ άνθρακας είναι επίσης ένας σημαντικός απορροφητής. Μελέτες έδειξαν ότι η άμεση ακτινοβολούσα επίδρασή του παγκοσμίως εκτιμάται σε περισσότερο από το 25% της επίδρασης του μαύρου άνθρακα (Zhang et al., 2020). Στη τροπική μέση και ανώτερη τροπόσφαιρα, η θέρμανση που προκαλείται από τον καφέ άνθρακα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που προκαλείται από το μαύρο άνθρακα. Ο καφέ άνθρακας στις τροπικές περιοχές προέρχεται κυρίως από δασικές πυρκαγιές (καύση βιομάζας), οι οποίες απελευθερώνουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες BrC (Καφέ Άνθρακα) σε σχέση με BC (Μαύρο Άνθρακα). Ενώ, ο μαύρος άνθρακας συγκεντρώνεται περισσότερο στα μέσα γεωγραφικά πλάτη του βόρειου ημισφαιρίου (λόγω των βιομηχανικών εκπομπών), ο καφέ άνθρακας επηρεάζει έντονα την ελεύθερη ατμόσφαιρα των τροπικών (Φωτιάδη, 2015). Σύμφωνα με τη μελέτη των Zhang et al. (2020), η ικανότητα του καφέ άνθρακα να απορροφά ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται με την πάροδο του χρόνου έκθεσης στο ηλιακό φως. Ωστόσο, εμφανίζει πιο αποτελεσματική μεταφορά στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας μέσω των καταιγίδων, συγκριτικά με το μαύρο

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

άνθρακα, λόγω του ότι απομακρύνεται λιγότερο εύκολα από τη βροχή, όσο παρατείνεται η παραμονή του στην ατμόσφαιρα (Zhang et al., 2020).

2.6 Τα Αιωρούμενα Σωματίδια ως παράγοντας κινδύνου για την υγεία

Τα αιωρούμενα σωματίδια και ιδιαίτερα αυτά που έχουν μικρό μέγεθος, υποβαθμίζουν την ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε καθημερινά, με αποτέλεσμα να προκαλούν είτε άμεσες, είτε έμμεσες και χρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Άλλωστε η αναπνοή αποτελεί έναν από τους κυριότερους τρόπους έκθεσης του ανθρώπου σε επικίνδυνες για την υγεία του ουσίες. Η κατανόηση των επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία, αποτελεί σήμερα ένα από τα μεγαλύτερα πεδία έρευνας αναφορικά με τη σωματιδιακή ρύπανση. Επιδημιολογικές έρευνες αποδεικνύουν τη σύνδεση ανάμεσα στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν στην αναπνευστική τους λειτουργία διάφοροι οργανισμοί, μεταξύ των οποίων φυσικά και ο άνθρωπος και στη συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ιδιαίτερα των αστικών και βιομηχανικών περιοχών (WHO, 2021).

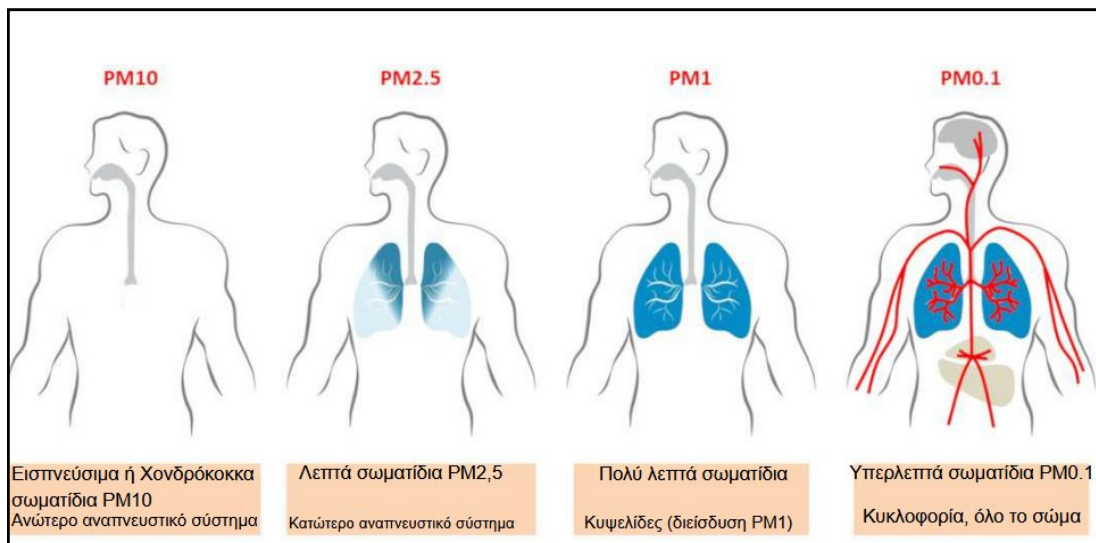
Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, οι οποίες διακρίνονται σε βραχυχρόνιες ή άμεσες όπως ο ερεθισμός των ματιών, τα αναπνευστικά προβλήματα, ο βήχας τα επεισόδια άσθματος κλπ, και σε μακροχρόνιες ή έμμεσες όπως οι χρόνιες πνευμονικές παθήσεις, οι καρδιοαγγειακές ασθένειες, ο καρκίνος των πνευμόνων, κλπ. Είναι ωστόσο γενικά παραδεκτό, ότι η μακροχρόνια έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οδηγεί σε αυξημένη νοσηρότητα, θνησιμότητα και μετρήσιμη μείωση του προσδόκιμου επιβίωσης. Ακόμα, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι τα σωματίδια δρουν επιβαρυντικά για την υγεία ακόμη και σε συγκεντρώσεις κατά πολύ μικρότερες από τα προβλεπόμενα ανώτατα επιτρεπτά όρια (Katsouyanni, 2003).

Τα αιωρούμενα σωματίδια μάλιστα, όπως προαναφέρθηκε, ανάλογα με την ικανότητα τους να διεισδύσουν σε διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος διακρίνονται σε εσπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα. Εισπνεύσιμα είναι τα σωματίδια που μπορούν να εισέλθουν και να αποτεθούν στο ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος. Θωρακικά είναι τα σωματίδια που διασχίζουν το

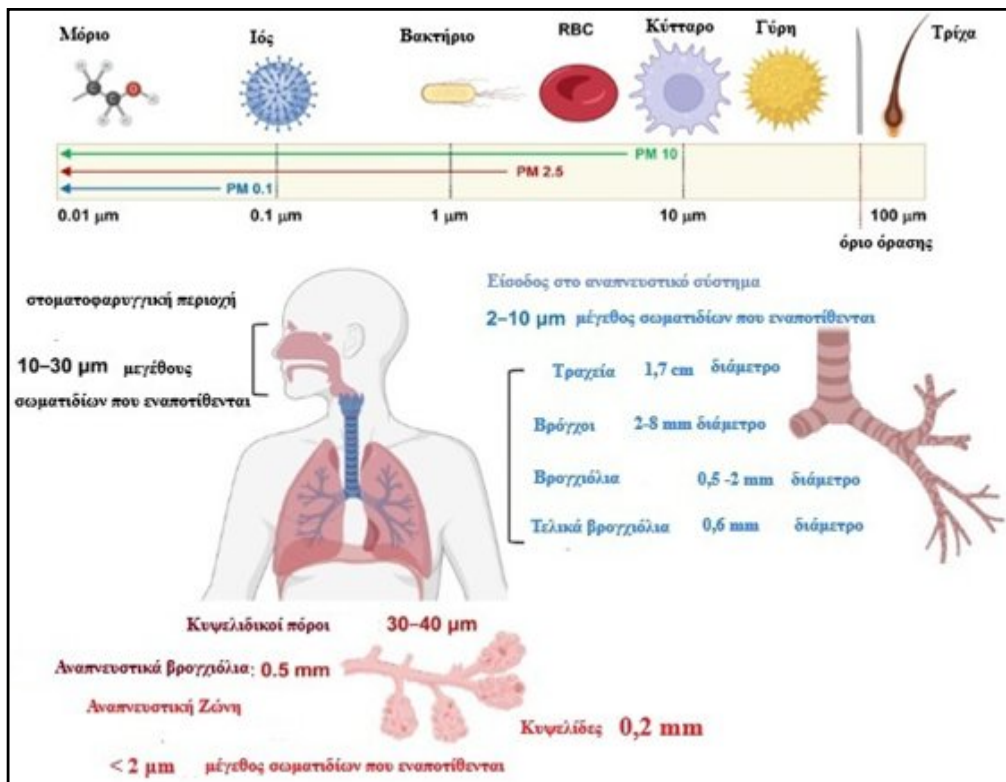
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

λάρυγγα και τους πνεύμονες και αναπνεύσιμα είναι το μέρος των θωρακικών που φθάνει μέχρι τις κυψελίδες (Τσέζος και Ρεμουντάκη, 2010).

Έτσι, (Εικόνα 2) τα PM_{10} συνήθως κατακρατούνται στην ανώτερη αναπνευστική οδό (μύτη, φάρυγγας), τα $PM_{2.5}$ εισχωρούν βαθιά στους πνεύμονες και στις κυψελίδες (κατώτερο αναπνευστικό σύστημα), ενώ τα πολύ λεπτά και τα υπέρλεπτα φθάνουν στις κυψελίδες και στο κυκλοφορικό, αντίστοιχα (Pelgrims, 2024).



Εικόνα 2. Βαθμός διείσδυσης αιωρούμενων σωματιδίων (PM) στο ανθρώπινο σώμα (Pelgrims, 2024).



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Εικόνα 3. Συσχέτιση μεγέθους σωματιδίων και ανατομίας του αναπνευστικού συστήματος (Lim & Kim, 2024).

Βασική αρχή στην εκτίμηση των επιπτώσεων των σωματιδίων στην υγεία είναι και η δόση που φθάνει στο σημείο του ανθρώπινου σώματος που μας ενδιαφέρει και όχι η έκθεση σε εξωτερικούς παράγοντες (συγκέντρωση). Η δόση των αναπνεύσιμων σωματιδίων που εναποτίθεται και παραμένει στην αναπνευστική οδό (Εικόνα 3) εξαρτάται από τη συγκέντρωση και το χρόνο έκθεσης, την ανατομία της αναπνευστικής οδού, τις παραμέτρους αναπνοής καθώς και από τις ιδιότητες των σωματιδίων (μέγεθος, υγροσκοπικότητα, διαλυτότητα, κλπ) (Τσέζος και Ρεμουντάκη, 2010).

2.6.1. Η επίδραση αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2,5} στην υγεία

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5} συνδέονται με ισχαιμική καρδιοπάθεια, εγκεφαλικά επεισόδια, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, καρκίνο του πνεύμονα και λοιμώξεις του κατώτερου αναπνευστικού. Σύμφωνα με διεθνή μελέτη, τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5} αποτελούν έναν από τους κορυφαίους παράγοντες κινδύνου για τη δημόσια υγεία, με τις τάσεις έκθεσης του πληθυσμού να παρουσιάζουν συνεχή άνοδο κατά τη δεκαετία 2010-2019 (The Lancet, 2019). Η ρύπανση από PM_{2,5} συνδέθηκε άμεσα με 4,14 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους, σε παγκόσμιο επίπεδο, κυρίως λόγω της αποδεδειγμένης συσχέτισής τους με καρδιαγγειακά νοσήματα, τη χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια (ΧΑΠ), τον καρκίνο του πνεύμονα, το διαβήτη τύπου 2 και τις οξείες λοιμώξεις του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος (The Lancet, 2019).

Οι Huang et al. (2024) πραγματοποίησαν ανάλυση της παγκόσμιας ερευνητικής δραστηριότητας σχετικά με τις επιπτώσεις των PM_{2,5} στην υγεία τη δεκαετία 2013-2023. Αναλύοντας συνολικά 2.174 άρθρα από τη βάση δεδομένων Web of Science Core Collection. Παρατήρησαν ότι υπάρχει μια συνεχής και σταθερή αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων παγκοσμίως σχετικά με τις επιπτώσεις των PM_{2,5} στην υγεία με κυρίαρχες χώρες στον αριθμό άρθρων, τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και την Κίνα. Επιγραμματικά μπορούμε να αναφέρουμε τη μελέτη των Cohen et al. (2017) η οποία κατέταξε τα PM_{2,5} ως τον 5^ο σημαντικότερο παράγοντα κινδύνου θνησιμότητας παγκοσμίως, ενώ οι Burnett et al. (2018) έδειξαν ότι οι θάνατοι από PM_{2,5} είναι πολύ περισσότεροι από ό,τι πιστεύαμε παλαιότερα. Η μελέτη των Pope &

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Dockery (2006) ανέδειξε τα $PM_{2.5}$ ως την κύρια πηγή για τη σύνδεση της ρύπανσης με τα καρδιαγγειακά νοσήματα.

Στην Ελλάδα και ειδικότερα στην Αττική, η θνησιμότητα που σχετίζεται με τα $PM_{2.5}$ αναμένεται να αυξηθεί κατά 6.000 θανάτους ετησίως, φθάνοντας συνολικά τους 8.800 θανάτους ετησίως έως το 2090 (Akritidis et al., 2025). Η θνησιμότητα που αποδίδεται στα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ στην Ελλάδα αναμένεται να επηρεαστεί σημαντικά στο μέλλον όχι μόνο από τις μεταβολές των εκπομπών, αλλά και από δημογραφικούς παράγοντες, όπως η γήρανση του πληθυσμού, η οποία αυξάνει την ευπάθεια των πολιτών στους ατμοσφαιρικούς ρύπους (Akritidis et al., 2025).

2.6.2 Η επίδραση της ρύπανσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία των πνευμόνων

Οι Hamanaka & Mutlu (2025) μελέτησαν τους μηχανισμούς μέσω των οποίων η ατμοσφαιρική ρύπανση και τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν βλάβες στους πνεύμονες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν είναι μόνο ένας ερεθιστικός παράγοντας, αλλά λειτουργεί και ως μηχανισμός τροποποίησης της βιολογίας του πνεύμονα. Επηρεάζει το DNA, τα μιτοχόνδρια και τις λειτουργίες του ανοσοποιητικού συστήματος στη καταπολέμηση των ιών και τη καταστολή των καρκινικών κυττάρων. Φαίνεται ότι η βλάβη ξεκινά με τη συσσώρευση των σωματιδίων της ρύπανσης στα μιτοχόνδρια των πνευμονικών κυττάρων. Αυτή η συσσώρευση οδηγεί σε αλλαγή της μορφολογίας τους και στη μαζική παραγωγή Ελευθέρων Ριζών Οξυγόνου (ROS) (Li et al., 2003; Upadhyay et al., 2003). Το οξειδωτικό στρες προηγείται της πρόκληση φλεγμονής όπως έχει παρατηρηθεί με τροποποιημένα κύτταρα που δεν παράγουν ελεύθερες ρίζες και εμφανίζουν μειωμένη φλεγμονή (Brown et al., 2010; Soberanes et al., 2012; Gualtieri et al., 2011). Η ρύπανση όμως δεν προκαλεί μόνο τη φλεγμονή αλλά δημιουργεί και ένα περιβάλλον που ευνοεί σοβαρές παθήσεις. Μια σημαντική ανακάλυψη είναι ότι η ρύπανση επιταχύνει την ανάπτυξη όγκων σε κύτταρα που έχουν προϋπάρχουσες μεταλλάξεις δίχως να προκαλέσει υποχρεωτικά νέες μεταλλάξεις (Riva et al., 2011; Karoly et al., 2007; Hill et al., 2023). Η ρύπανση καταστρέφει τις συνδέσεις μεταξύ των κυττάρων του πνεύμονα καθιστώντας τον πιο διαπερατό σε αλλεργιογόνα και τοξίνες. Παράλληλα επηρεάζει την κίνηση των κροσσών που απομακρύνουν τη

βλέννα, ευνοώντας τις λοιμώξεις (Heijink et al., 2010; Xian et al., 2020). Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια μειώνει το μήκος των τελομερών και εμποδίζει την αναγέννηση των πνευμόνων, προάγοντας την ίνωση (Pieters et al., 2016; Martens et al., 2017). Το ανοσοποιητικό σύστημα στην αρχή, αντιδρά σε υπερβολικό βαθμό αλλά στη πορεία εξασθενεί στο ρόλο του στην αντιμετώπιση των ιών (Helfenstein et al., 2016). Η ρύπανση καθιστά τον οργανισμό πιο ευάλωτο στη γρίπη (van Voorhis et al., 2013). Επίσης, μεταβάλλει τον τρόπο ανάγνωσης του DNA και μειώνει τη ρυθμιστική ικανότητα του ανοσοποιητικού, επιδεινώνοντας το άσθμα (Nadeau et al., 2010; Brunst et al., 2013). Τα αιωρούμενα σωματίδια PM λειτουργούν και ως οχήματα μεταφοράς των ιών όπως τη γρίπη. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους ιούς ως φορείς προκειμένου να μεταφερθούν βαθύτερα στους πνεύμονες παρακάμπτοντας τους φυσιολογικούς υποδοχείς και ως εκ τούτου η λοίμωξη που προκαλούν γίνεται ακόμη σοβαρότερη (Setti et al., 2020).

Μελέτη των τελευταίων ετών εστιάζει στο μηχανισμό με τον οποίο οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, και ιδιαίτερα τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5}, συμβάλλουν στην εμφάνιση αδενοκαρκινώματος του πνεύμονα (Hill et al., 2023). Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι τα PM_{2.5} δρουν κατά κύριο λόγο ως προαγωγοί όγκων, παρά ως παράγοντες που δημιουργούν νέες γενετικές μεταλλάξεις. Η εισπνοή των PM_{2.5} προκαλεί βαθιά τοπική φλεγμονή, που διεγείρει τα κύτταρα εκείνα που έχουν ήδη προϋπάρχουσες μεταλλάξεις στο να πολλαπλασιαστούν με ταχύτατους ρυθμούς, επιταχύνοντας με το τρόπο αυτό την ανάπτυξη του καρκίνου (Hill et al., 2023). Επίσης, πρόσφατη μελέτη εστίασε στις επιπτώσεις της έκθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{2.5}) στον ρινικό βλεννογόνο, από την οποία φαίνεται ότι η έκθεση στα PM_{2.5} προκαλεί βλάβη στη δομική ακεραιότητα και τη λειτουργία του φραγμού των επιθηλιακών κυττάρων της ρινικής κοιλότητας (Xian et al., 2020). Έτσι, τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} αυξάνουν την διαπερατότητα των ιστών, καθιστώντας το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα ευάλωτο σε παθογόνους μικροοργανισμούς και αλλεργιογόνους παράγοντες (Xian et al., 2020).

Η έρευνα των Soukup και Becker (2001) έδειξε ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ προκαλεί έντονη φλεγμονώδη απόκριση στα κυψελιδικά μακροφάγα (που είναι τα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος στους πνεύμονες). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερπαραγωγή κυτοκινών, οι οποίες φυσιολογικά παράγονται για

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

την αντιμετώπιση παθογόνων μικροοργανισμών. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί ακόμη να δρουν ως φορείς ενδοτοξινών, "ξεγελώντας" τα μακροφάγα του ανοσοποιητικού συστήματος, τα οποία αναγνωρίζοντας τις ενδοτοξίνες, θεωρούν λανθασμένα, ότι αντιμετωπίζουν παθογόνους μικροοργανισμούς. Αντίθετα λοιπόν με ό,τι συμβαίνει με τα πραγματικά βακτήρια, τα αιωρούμενα σωματίδια δεν μπορούν να αποδομηθούν. Έτσι, τα μακροφάγα συνεχίζουν ακατάπαυστα την παραγωγή κυτοκινών, προσελκύοντας διαρκώς ουδετερόφιλα και λεμφοκύτταρα, παρόλο που δεν υπάρχει βακτήριο για να καταπολεμηθεί. Αυτή η χρόνια και εντελώς μάταιη ανοσολογική ενεργοποίηση, οδηγεί στην ενίσχυση της φλεγμονής, με αποτέλεσμα είτε τη σταδιακή καταστροφή των κυψελίδων (Χρόνια Αποφρακτική Πνευμονοπάθεια-ΧΑΠ), είτε την πνευμονική ίνωση, λόγω της ανεξέλεγκτης εναπόθεσης κολλαγόνου κατά τη συνεχή προσπάθεια του οργανισμού για επούλωση (Soukup & Becker, 2001).

2.6.3 Αιωρούμενα Σωματίδια και Καρδιοπάθεια

Πρόσφατες μελέτες (Zachariah et al., 2024; Thompson, 2018) έδειξαν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση, από ένα σύνθετο μείγμα αερίων που περιλαμβάνει διοξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του θείου και αιωρούμενα σωματίδια, συνδέεται με καρδιαγγειακά νοσήματα και φλεγμονώδεις παθήσεις όπως οι εξάρσεις κυστικής ίνωσης και το άσθμα. Η νόσος Kawasaki (KD), η πιο κοινή μορφή επίκτητης καρδιοπάθειας στον ανεπτυγμένο κόσμο, είναι μια μεσαίου μεγέθους αγγειίτιδα που επηρεάζει βρέφη, μικρά παιδιά και μεγαλύτερους σε ηλικία νέους και οδηγεί σε συστηματική φλεγμονή, πυρετό, ευερεθιστότητα, εξάνθημα, λεμφαδενοπάθεια και δυνητικά απειλητικές για τη ζωή καρδιακές εκδηλώσεις, συμπεριλαμβανομένης της διατατικής στεφανιαίας αρτηριοπάθειας ή της μυοκαρδιακής δυσλειτουργίας. (McCrindle et al., 2017). Οι πιθανοί παθοφυσιολογικοί μηχανισμοί συνδέουν την εισπνοή σωματιδίων με την πρόκληση συστηματικού οξειδωτικού στρες, γεγονός που προδιαθέτει γενετικά ευάλωτα παιδιά στην ανάπτυξη αυτής της νόσου (Manlhiot et al., 2018). Σε παιδιά ηλικίας κάτω των 5 ετών, η βραχυπρόθεσμη έκθεση σε PM και SO₂ συσχετίστηκε θετικά με τον κίνδυνο εμφάνισης KD (Fujii et al., 2020). Επίσης, στην Ιαπωνία, ερευνητές επιβεβαίωσαν την παράλληλη αύξηση των περιστατικών KD και των εισαγωγών στα νοσοκομεία για παιδικό άσθμα μετά από επεισόδια υψηλής ρύπανσης (Yorifuji et al., 2018). Η επίδραση αυτή μάλιστα εμφανίζεται

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

σημαντικά ισχυρότερη όταν η έκθεση στα σωματίδια είναι προγεννητική (κατά τη διάρκεια της ενδομήτριας ζωής) σε σχέση με τη μεταγεννητική τους έκθεση (Yorifuji et al., 2018; Buteau et al., 2020; Kuo et al., 2022).

2.6.4 Αιωρούμενα Σωματίδια και Κεντρικό Νευρικό Σύστημα - Εγκέφαλος

Τα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ αποτελούν σοβαρή απειλή για το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), λόγω της ικανότητάς τους να παρακάμπτουν τους φυσικούς φραγμούς του οργανισμού. Οι τρεις κύριοι οδοί εισόδου στον εγκέφαλο, είναι το οσφρητικό νεύρο, η κυκλοφορία του αίματος και ο άξονας εντέρου–εγκεφάλου. Τα σωματίδια που εισπνέονται, εισέρχονται απευθείας στον εγκέφαλο μέσω της μύτης παρακάμπτοντας τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό. Παράλληλα μέσω των πνευμόνων περνούν στο αίμα, το οποίο τα μεταφέρει σε όλο το σώμα και τελικά στον εγκέφαλο, όπου μπορούν να προκαλέσουν βλάβη στον αιματοεγκεφαλικό φραγμό (Li et al., 2022). Ένα ίσως μη αναμενόμενο εύρημα είναι ότι η έκθεση σε $PM_{2.5}$ δεν περιορίζεται στο αναπνευστικό αλλά μπορεί να διαταράξει το μικροβίωμα του εντέρου, προκαλώντας φλεγμονή που επηρεάζει άμεσα το νευρικό σύστημα μέσω του άξονα εντέρου –εγκεφάλου (Li et al., 2022). Τα $PM_{2.5}$ εισέρχονται στο πεπτικό σύστημα είτε μέσω της κατάποσης είτε μέσω της κυκλοφορίας του αίματος και τροποποιούν τη σύνθεση των βακτηρίων μειώνοντας την παραγωγή των ωφέλιμων μεταβολιτών, όπως τα λιπαρά οξέα (Yu et al., 2025). Η φλεγμονή όμως αυτή στο έντερο, αδυνατίζει τον εντερικό φραγμό, επιτρέποντας σε τοξίνες και φλεγμονώδεις κυτταροκίνες να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. Αυτοί οι φλεγμονώδεις παράγοντες μπορούν να διαπεράσουν τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό, προκαλώντας νευροφλεγμονή και αυξάνοντας τον κίνδυνο για νευροεκφυλιστικές παθήσεις, όπως η νόσος Alzheimer (Wang et al., 2020). Η έκθεση στα σωματίδια έχει επίσης συνδεθεί με αυξημένα επίπεδα ορμονών του στρες (κορτιζόλη), επηρεάζοντας άμεσα τη λειτουργία του κεντρικού νευρικού συστήματος (Li et al., 2022).

Οι Huang et al. (2025) από την ανάλυση των επιπτώσεων των $PM_{2.5}$ στην υγεία, ανέδειξαν μια ισχυρή συσχέτιση των $PM_{2.5}$ με τη νόσο Alzheimer (AD). Συγκεκριμένα, ο κίνδυνος αυξάνεται τουλάχιστον κατά 38% για πληθυσμούς που εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$ (Huang et al., 2025). Επίσης, φαίνεται μια σημαντική μη γραμμική σχέση με ελάχιστη αύξηση 14% στο κίνδυνο άνοιας για επίπεδα έκθεσης $PM_{2.5}$ μεταξύ $4,5 \mu g/m^3$ και $26,9 \mu g/m^3$, σε

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

σύγκριση με ένα επίπεδο αναφοράς $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Για την αγγειακή άνοια τα δεδομένα δείχνουν μια τάση αύξησης του κινδύνου αν και δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Το εξαιρετικά ανησυχητικό λοιπόν είναι ότι, ο κίνδυνος της άνοιας, αυξάνεται ραγδαία ακόμη και σε σχετικά χαμηλά επίπεδα έκθεσης, κάτω από τα $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ καθιστώντας απαραίτητη τη συμμόρφωση με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO), που θέτουν ετήσια το όριο στα $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.6.5. Αιωρούμενα Σωματίδια και Μεταβολική Υγεία - Διαβήτης

Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν επιβαρυντικά και στο μεταβολικό σύστημα. Πρόσφατη έρευνα κατέγραψε θετική συσχέτιση μεταξύ της μακροχρόνιας έκθεσης σε $\text{PM}_{2.5}$ και του κινδύνου εμφάνισης διαβήτη τύπου 2, ακόμη και σε πληθυσμούς, όπως στη Δανία, με χαμηλά επίπεδα έκθεσης (Mayntz et al., 2025). Τα $\text{PM}_{2.5}$ προκαλούν συστηματική φλεγμονή αυξάνοντας τις προφλεγμονώδεις κυτοκίνες, διαταράσσοντας τον μεταβολισμό και προάγοντας την αντίσταση στην ινσουλίνη. Παράγουν επίσης αντιδραστικά είδη οξυγόνου (ROS), οδηγώντας σε οξειδωτικό στρες που επηρεάζει τον ρόλο της ινσουλίνης στη πρόσληψη της γλυκόζης από τα κύτταρα με συνέπεια την αύξηση των επιπέδων γλυκόζης στο αίμα. Τόσο η βραχυπρόθεσμη, όσο και η μακροπρόθεσμη έκθεση σε $\text{PM}_{2.5}$ συνδέονται με αυτές τις φλεγμονώδεις και οξειδωτικές οδούς, συμβάλλοντας στην παθοφυσιολογία του σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2 (Mayntz et al., 2025). Επιπλέον, η έκθεση σε $\text{PM}_{2.5}$ προκαλεί ενδοθηλιακή δυσλειτουργία, επηρεάζοντας τη ρύθμιση του αγγειακού τόνου, προάγοντας την αθηροσκλήρωση και επιδεινώνοντας την αντίσταση στην ινσουλίνη. Στατιστικά η μελέτη υπογραμμίζει ότι για κάθε αύξηση της συγκέντρωσης των $\text{PM}_{2.5}$ κατά $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ο κίνδυνος εμφάνισης διαβήτη αυξάνεται κατά περίπου 15% (Mayntz et al., 2025). Η μέση έκθεση στα $\text{PM}_{2.5}$ στη μελέτη αυτή ήταν περίπου $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η μέση τιμή της περιόδου της μελέτης 2010-2019 ήταν περίπου $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, η οποία είναι κοντά στο ετήσιο όριο κατευθυντήριων γραμμών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας των $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτές τις συγκριτικά χαμηλές συγκεντρώσεις, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του κινδύνου για το σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2. Αυτό μας δείχνει ότι μπορεί να μην υπάρχει ασφαλές όριο για την έκθεση σε $\text{PM}_{2.5}$, όσον αφορά τον κίνδυνο του σακχαρώδη διαβήτη και οι πληθυσμοί σε χώρες με υψηλότερα επίπεδα ρύπανσης μπορεί να διατρέχουν ακόμη μεγαλύτερο κίνδυνο (Mayntz et al., 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

2.6.6. Αναπαραγωγικό Σύστημα και Ανάπτυξη

Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν αρνητικά και στην αναπαραγωγική υγεία επηρεάζοντας, τόσο την εμβρυϊκή ανάπτυξη, όσο και τη γονιμότητα. Ανάλυση (Ji et al., 2025) που εξέτασε τη σχέση μεταξύ της έκθεσης σε σωματίδια PM_{2.5} και PM₁₀ και του βάρους γέννησης, έδειξε ότι για κάθε αύξηση των PM_{2.5} κατά 10μg/m³ η πιθανότητα χαμηλού βάρους γέννησης (κάτω από 2.500 γραμμάρια) αυξάνεται κατά 141%, ενώ η αντίστοιχη αύξηση των PM₁₀ συνδέεται με αύξηση κινδύνου κατά 46%. Η επίδραση των PM_{2.5} παραμένει σημαντική και στα τρία τρίμηνα της κύησης, με τις μητέρες ηλικίας 30 ετών και άνω να είναι πιο ευάλωτες, παρουσιάζοντας αυξημένο κίνδυνο κατά 269%, σε σύγκριση με τις νεότερες μητέρες (Ji et al., 2025).

Όσον αφορά τη γονιμότητα, έρευνα διαπίστωσε ότι η έκθεση σε PM_{2.5} έχει ισχυρή συσχέτιση με αυξημένο κίνδυνο διάγνωσης υπογονιμότητας στους άνδρες (Sørensen et al., 2024) και συγκεκριμένα, για κάθε αύξηση των PM_{2.5} κατά 2.9 μg/m³, ο κίνδυνος αυξάνεται κατά 24%, τόσο στην ηλικιακή ομάδα 30-36.9 ετών, όσο και στην ομάδα 37-45 ετών. Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει συσχετιστεί με χαμηλότερη κινητικότητα και μικρότερο αριθμό σπερματοζωαρίων αλλά και με αλλαγές στη μορφολογία τους. Σε αντίθεση με τους άνδρες, δεν διαπιστώθηκε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια σχετίζονται με αυξημένο κίνδυνο διάγνωσης υπογονιμότητας στις γυναίκες. Αν και κάποιες προγενέστερες μελέτες δείχνουν μειωμένα ποσοστά επιτυχίας σε θεραπείες γονιμότητας λόγω της ρύπανσης, τα αποτελέσματα παραμένουν ασυνεπή και η συγκεκριμένη έρευνα δεν επιβεβαίωσε την ύπαρξη άμεσης σχέσης με τη γενική υπογονιμότητα στις γυναίκες (Sørensen et al., 2024).

2.6.7. Αιωρούμενα Σωματίδια και η Πύλη του Εντέρου

Η αντίληψη ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση πλήττει αποκλειστικά το αναπνευστικό σύστημα ανατρέπεται και από τα ευρήματα έρευνας, που ανέδειξε ότι τα σωματίδια μαύρου άνθρακα (Black Carbon) δεν περιορίζονται στους πνεύμονες, αλλά μεταφέρονται και συσσωρεύονται στον υποβλεννογόνο χιτώνα του εντέρου (Van Pee et al., 2024). Αυτό το εύρημα είναι πολύ σημαντικό γιατί το έντερο είναι μια περιοχή με πυκνή αγγείωση, που σημαίνει ότι μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική οδό εισόδου των ρύπων απευθείας στη κυκλοφορία του αίματος, εκτός από τις κυψελίδες των πνευμόνων. Ειδικότερα, οι ερευνητές ποσοτικοποίησαν τα σωματίδια μαύρου άνθρακα σε τρία διαφορετικά στρώματα ιστών (βλεννογόνο, υποβλεννογόνο και

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

μυϊκό χιτώνα) σε βιοψίες ειλεού και παχέος εντέρου πέντε ασθενών. Παρόλο, που η μέση έκθεση σε σωματιδιακή ύλη στη Φλάνδρα του Βελγίου, όπου έγινε η μελέτη, είναι κάτω από το ετήσιο μέσο όρο που επιβάλλεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση ($10,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ το 2022, σε σύγκριση με τα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $\text{PM}_{2,5}$), τα σωματίδια μαύρου άνθρακα μπορούν ακόμα να μετατοπιστούν στον εντερικό ιστό. Με άλλα λόγια, η μελέτη μας δείχνει στη πραγματική ζωή, ότι ακόμα και σε χαμηλή έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, προκαλείται συσσώρευση σε διαφορετικά στρώματα εντερικών ιστών. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει άμεσα την υγεία του γαστρεντερικού σωλήνα, καθώς ήδη έχει συνδεθεί με εντερικές διαταραχές, όπως η ελκώδης κολίτιδα και ο καρκίνος του παχέος εντέρου, και χαμηλότερο εντερικό βακτηριακό πλούτο (Van Pee et al., 2024).

Επίσης, τα εισπνεόμενα σωματίδια μαύρου άνθρακα, μετά την εναπόθεσή τους στο αναπνευστικό δέντρο, μπορούν να μεταφερθούν μέσω της βλεννοκροσσωτής κάθαρσης προς τον φάρυγγα και στη συνέχεια να καταποθούν, καταλήγοντας στο πεπτικό σύστημα (Uzeloto et al., 2021). Παράλληλα, τα σωματίδια αυτά εισέρχονται στον εντερικό αυλό και μέσω της άμεσης κατανάλωσης νερού και τροφίμων που έχουν επιμολυνθεί από την ατμοσφαιρική απόθεση (Schraufnagel, 2020). Στο εσωτερικό του εντέρου, προσλαμβάνονται από τους ιστούς μέσω μηχανισμών παρακυτταρικής και διακυτταρικής μεταφοράς (O'Hagan, 1998) ή απορροφώνται και μετατοπίζονται από τα ανοσοκύτταρα, όπως τα δενδριτικά κύτταρα και τα μακροφάγα (Shepherd et al., 2013). Εκτός από την εντερική οδό, τα μικρότερα σωματίδια μαύρου άνθρακα ($<1 \mu\text{m}$) διεισδύουν έως τις κυψελίδες, διαπερνούν τον αιματοπνευμονικό φραγμό (Schraufnagel, 2020) και μεταφέρονται μέσω της συστηματικής κυκλοφορίας σε απομακρυσμένες θέσεις του σώματος, όπως τεκμηριώνεται από τον εντοπισμό τους στους νεφρούς (Rasking et al., 2023), στον εγκέφαλο (Vanbrabant et al., 2024), καθώς και στους αναπτυσσόμενους εμβρυϊκούς ιστούς κατά την κύηση (Bongaerts et al., 2022).

2.6.8. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στη νεφρική λειτουργία

Η νεφρική λειτουργία φαίνεται να αποτελεί έναν από τους πιο ευάλωτους στόχους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Πρόσφατη έρευνα αναδεικνύει μια ανησυχητική επιτάχυνση επιδείνωσης της νεφρικής λειτουργίας, σε άτομα με συστηματική έκθεση σε $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} και NO_2 (Wu et al., 2026). Το κρίσιμο εύρημα είναι ότι η βλάβη δεν

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

είναι προσωρινή και η μακροχρόνια έκθεση (έως 5 έτη) σε $PM_{2.5}$, PM_{10} και NO_2 προκαλεί μια σταδιακή αλλά σταθερή νεφρική βλάβη, καθιστώντας τους ρύπους αυτούς ισχυρούς προγνωστικούς παράγοντες για τη Χρόνια Νεφρική Νόσο (CKD). (Wu et al., 2026). Η επίδραση αυτής της μακροχρόνιας έκθεσης καθιστά τα αιωρούμενα σωματίδια έναν από τους πιο σταθερούς προγνωστικούς παράγοντες για τη χρόνια νεφρική νόσο. Ακόμη, τα αιωρούμενα σωματίδια καταστρέφουν τα μικρά αγγεία των νεφρών που είναι υπεύθυνα για το φιλτράρισμα του αίματος, προκαλώντας ενδοθηλιακή δυσλειτουργία (Atawia et al., 2017).

Σύμφωνα με την ανάλυση των Wathanavasin et al. (2024), που εξέτασαν 22 μελέτες με συνολικά 8 εκατομμύρια συμμετέχοντες, διαπιστώθηκε ότι κάθε αύξηση των $PM_{2.5}$ κατά $10 \mu g/m^3$, αυξάνει σημαντικά το κίνδυνο εμφάνισης και επικράτησης της Χρόνιας Νεφρικής Νόσου κατά 31%. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η μακροχρόνια έκθεση αυξάνει και τον κίνδυνο για νεφρική ανεπάρκεια τελικού σταδίου. Επειδή τα νεφρά δέχονται το 20-25% της καρδιακής παροχής αίματος, τα σωματίδια $PM_{2.5}$ εισέρχονται στη κυκλοφορία προκαλώντας αύξηση προ-φλεγμονωδών κυτταροκινών και οξειδωτικού στρες και τελικά προκαλούν βλάβη στο DNA και ίνωση του νεφρικού ιστού. Επίσης, οι Hou et al. (2024) διαπίστωσαν ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ συνδέεται άμεσα με την πρόκληση νεφρικής βλάβης και την επιδείνωση χρόνιων παθήσεων. Ειδικότερα διαπιστώθηκε αύξηση κινδύνου κατά 6% για νεφρίτιδα, αύξηση κατά 7% για υδρονέφρωση, αύξηση κατά 9% για νεφρολιθίαση και αύξηση κινδύνου κατά 11% για οξεία νεφρική ανεπάρκεια και αύξηση κατά 10% για χρόνια νεφρική νόσο (CKD). Η βλάβη προκαλείται κυρίως μέσω του οξειδωτικού στρες, το οποίο πυροδοτεί διαδικασίες όπως το προγραμματισμένο κυτταρικό θάνατο στα νεφρικά σωληναριακά επιθηλιακά κύτταρα (Hou et al., 2024).

2.6.9. Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ και δυσλειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος

Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ προκαλεί βλάβη στο ανοσοποιητικό σύστημα με δύο τρόπους. Από τη μία πλευρά αποδυναμώνει την άμυνα του οργανισμού και από την άλλη, πυροδοτεί μηχανισμούς αυτοανοσίας. Σύμφωνα με μελέτη, τα αιωρούμενα σωματίδια "παραλύουν" τα μακροφάγα κύτταρα, μειώνοντας την ικανότητά τους να εξουδετερώνουν παθογόνα (Son et al., 2025). Αυτή η

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

εξασθένιση καθιστά τον οργανισμό ευάλωτο σε σοβαρές λοιμώξεις, όπως η φυματίωση και η Covid-19. Ωστόσο, η πιο ανατρεπτική διαπίστωση έρχεται από τις πρόσφατες έρευνες (Zhao et al., 2026), οι οποίες συνδέουν τη μακροχρόνια έκθεση (1-3 έτη) με την απώλεια της ανοσολογικής ανοχής.

Πρόσφατη μελέτη παρουσιάζει ότι τα $PM_{2.5}$ έχουν τη μοναδική ικανότητα να "αναπρογραμματίζουν" τη γονιδιακή έκφραση των ανοσοποιητικών κυττάρων, επηρεάζοντας οδούς που σχετίζονται με τον κυτταρικό κύκλο, τις ιστόνες και τη λειτουργία των μιτοχονδρίων (Rundblad et al., 2025). Είναι αξιοσημείωτο ότι η συσχέτιση αυτή εμφανίζεται ισχυρότερη στις γυναίκες, υποδηλώνοντας μια έμφυλη ευαλωτότητα στην περιβαλλοντική πυροδότηση αυτοάνοσων αποκρίσεων. Αυτή η γονιδιακή μεταβολή συντηρεί μια κατάσταση "χαμηλής έντασης" συστηματικής φλεγμονής, η οποία λειτουργεί ως το υπόστρωμα για την ανάπτυξη, τόσο αυτοάνοσων, όσο και καρδιομεταβολικών νοσημάτων (Rundblad et al., 2025).

2.6.10. Έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ κατά την κυοφορία και αύξηση του κινδύνου εμφάνισης παχυσαρκίας

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ξεκινά ακόμη και από την ενδομήτρια ζωή, επηρεάζοντας τον μεταβολικό προγραμματισμό του εμβρύου. Ιδιαίτερα αποκαλυπτική είναι πρόσφατη μελέτη, η οποία ανέλυσε δεδομένα παρακολουθώντας πάνω από 37.000 ζεύγη μητέρας-παιδιού (Warkentin et al., 2025) για τη προγεννητική περίοδο και 33.860 ζεύγη για τη μεταγεννητική. Το πλέον αξιοσημείωτο εύρημα ήταν ότι η προγεννητική έκθεση σε $PM_{2.5}$ συνδέεται με μια αύξηση κατά 23% στον κίνδυνο εμφάνισης υπερβάλλοντος βάρους ή παχυσαρκίας καθ' όλη τη διάρκεια της παιδικής ηλικίας. Η επιβάρυνση αυτή γίνεται ακόμη πιο εμφανής στις ηλικίες 9-12 ετών, όπου καταγράφηκε σημαντικά υψηλότερος Δείκτης Μάζας Σώματος. Αντιθέτως, η μελέτη κατέδειξε ότι η μεταγεννητική έκθεση δεν παρουσιάζει την ίδια καθολική και ομοιόμορφη επιβάρυνση, γεγονός που υπογραμμίζει ότι η περίοδος της κυοφορίας αποτελεί ένα κρίσιμο "παράθυρο ευαλωτότητας". Το συμπέρασμα των ερευνητών είναι σαφές: τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια δρουν ως μεταβολικοί απορρυθμιστές, ήδη από την εμβρυϊκή ηλικία,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

θέτοντας τις βάσεις για την εμφάνιση παχυσαρκίας σε μεταγενέστερα στάδια της ζωής (Warkentin et al., 2025).

2.6.11. Ψυχική υγεία και αιωρούμενα σωματίδια

Η μελέτη των Braithwaite et al. (2019) αναδεικνύει μια ανησυχητική πτυχή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αποδεικνύοντας ότι ο αντίκτυπός της, εκτός από τη σωματική υγεία, επηρεάζει άμεσα και την ψυχική υγεία. Σύμφωνα με τα ευρήματα τους η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης (άνω των 6 μηνών) στα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2,5}$ και του κινδύνου εμφάνισης κατάθλιψης είναι στατιστικά σημαντική. Η ανάλυση έδειξε αύξηση των πιθανοτήτων κατάθλιψης κατά 10% για κάθε αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$ κατά $10\mu g/m^3$ (Braithwaite et al., 2019). Ακόμη πιο ανησυχητικά όμως είναι τα ευρήματα σχετικά με τον κίνδυνο αυτοκτονίας. Τα περιορισμένα διαθέσιμα στοιχεία υποδηλώνουν πιθανή συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2,5}$) και των συμπτωμάτων άγχους, τόσο με τη βραχυπρόθεσμη όσο και με την μακροπρόθεσμη έκθεση. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζει τον εγκέφαλο μέσω νευροφλεγμονής και οξειδωτικού στρες, απορρυθμίζοντας τον άξονα υποθάλαμος–υπόφυση–επινεφρίδια και αυξάνοντας τη παραγωγή της κορτιζόλης. Η μελέτη καταλήγει στο ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια, δεν επηρεάζει μόνο τη σωματική υγεία αλλά αποτελεί και σημαντικό παράγοντα κινδύνου για την ψυχική υγεία παγκοσμίως. Η μείωση της έκθεσης του πληθυσμού στα $PM_{2,5}$ στο συνιστώμενο επίπεδο ορίων από το Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας θα μπορούσε δυνητικά να μειώσει την εξάπλωση της κατάθλιψης κατά περίπου 2,5% σε πόλεις του Ηνωμένου Βασιλείου και έως και 15,2% σε παγκόσμιο επίπεδο. (Braithwaite et al., 2019).

2.7. Πηγές Αιωρούμενων Σωματιδίων στις Αστικές περιοχές

Στις αστικές περιοχές, είναι γνωστή η παρουσία αυξημένων επιπέδων PM, λόγω του μεγάλου βαθμού αστικοποίησης και της πυκνής κίνησης των οχημάτων (Diaprouli et al., 2017). Το αυξημένο κλάσμα των συγκεντρώσεων σε PM_{10} και $PM_{2,5}$, στα αστικά κέντρα είναι χαρακτηριστικό αποτέλεσμα ιδίως από την κίνηση των οχημάτων

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

(εκπομπή καυσαερίων, εκπομπές από την επαναιώρηση της σκόνης των δρόμων, τριβή ελαστικών), των βιομηχανιών (προϊόντα τσιμέντου, σκόνη από μεταλλεύματα, καύση αποβλήτων) και από άλλες πηγές, όπως είναι η καύση της βιομάζας, αλλά και της χημικής μετατροπής των πρόδρομων αερίων (δευτερογενή ατμοσφαιρικά σωματίδια) (Πετρακάκης κ.ά., 2008).

2.7.1 Κίνηση Οχημάτων

Τα οχήματα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις αστικές περιοχές, που προκαλούν δυσμενείς συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και τις διάφορες υποδομές (Dimitriou & Mihalopoulos, 2024; Eleftheriadis et al., 1998). Το κάθε μεμονωμένο αυτοκίνητο, επιφέρει μικρή συνεισφορά, ωστόσο λόγω του αυξημένου αριθμού αυτοκινήτων, τα οχήματα αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες απειλές της ποιότητας της ατμόσφαιρας των μεγάλων αστικών κέντρων (Μελάς, 2007). Τα αυτοκίνητα λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες με την καύση των καυσίμων Diesel και βενζίνης, αποδίδουν την αναγκαία ισχύ έτσι ώστε να κινηθεί το όχημα. Η ρύπανση που προκαλείται προέρχεται από τα απαέρια που εξέρχονται από την εξάτμιση του αυτοκινήτου, από τα προϊόντα της καύσης, αλλά και από μηχανικές διεργασίες όπως η φθορά (τριβή) των ελαστικών και των φρένων των οχημάτων (Cooper & Alley, 2011). Από την κίνηση των οχημάτων προέρχονται εκπομπές πρωτογενών σωματιδίων, λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων, οργανικών αερίων και οργανικής σωματιδιακής ύλης και οξειδίων του αζώτου τα οποία στη συνέχεια σχηματίζουν δευτερογενή σωματίδια. (Eleftheriadis et al., 2014). Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι κινητήρες Diesel εκπέμπουν περισσότερα σωματίδια από ότι οι βενζινοκινητήρες, γεγονός που είναι σύμφωνο με την γενική αρχή ότι, όσο βαρύτερο είναι το κλάσμα πετρελαίου που καίγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή σωματιδίων (Βερύκιος, 2003). Οι εκπομπές από μηχανές ντίζελ περιέχουν κυρίως αιθάλη, δηλαδή σωματίδια στοιχειακού άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις και μερικά θεικά σωματίδια από το θείο που περιέχει το καύσιμο (Seinfeld & Pandis, 2006). Η χρήση καταλυτών, αντίστοιχων με αυτούς που χρησιμοποιούνται στους βενζινοκινητήρες, αποτελεί μια λύση για τη μείωση των εκπομπών σωματιδίων, αλλά παρουσιάζει ακόμη ουσιαστικά προβλήματα. Τέλος, η κίνηση των οχημάτων στους δρόμους προκαλεί την επαναιώρηση της σκόνης του δρόμου, δηλαδή την αιώρηση στερεών σωματιδίων,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

αλλά και στην επανεισαγωγή στην ατμόσφαιρα σωματιδίων που προηγούμενα είχαν αποτεθεί στην επιφάνεια του εδάφους και των δρόμων (Diaprouli et al., 2017; Paschalidou et al., 2016).

2.7.2 Καύση βιομάζας στο Αστικό Περιβάλλον

Η οικιακή θέρμανση έχει σημαντική συνεισφορά, σε αιωρούμενα σωματίδια, κατά την περίοδο του χειμώνα στις αστικές περιοχές (Vouitsis et al., 2015). Ένα μεγάλο ποσοστό κατοίκων, λόγω δυσμενών οικονομικών συνθηκών, έχουν επιλέξει σαν μεθόδους θέρμανσής τους εστίες καύσης οι οποίες δεν είναι πιστοποιημένες, όπως είναι τα τζάκια και οι λέβητες και οι σόμπες στις οποίες χρησιμοποιούνται ξύλα ή pellets και αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλά επίπεδα εκπομπών σωματιδιακών ρύπων κατά την περίοδο του χειμώνα (Saffari et al., 2013; Κανελλοπούλου κ.ά., 2016).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα καύσης βιομάζας σε αστικό περιβάλλον μας δίνει πρόσφατη μελέτη για την πόλη των Ιωαννίνων, που εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο η οικιακή θέρμανση επιβαρύνει το αστικό περιβάλλον κατά τους χειμερινούς μήνες (Kaskaoutis et al., 2022). Οι ερευνητές μελέτησαν τα χημικά χαρακτηριστικά των $PM_{2,5}$ στην πόλη των Ιωαννίνων και τις επιπτώσεις που προκαλεί η εντατική καύση ξύλου για οικιακή θέρμανση, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η καύση βιομάζας και ειδικότερα η καύση σκληρής ξυλείας, αποτέλεσε την κύρια πηγή των ανθρακούχων σωματιδίων το χειμώνα. Καταγράφηκαν υψηλές μέσες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$ που έφτασαν τα $57,5 \mu g m^{-3}$. Η καύση του ξύλου συνέβαλε κατά 92% στον οργανικό άνθρακα (OC), 87% στον υδατοδιαλυτό οργανικό άνθρακα (WSOC) και 64% στον στοιχειακό άνθρακα (EC) αυτών των σωματιδίων. Οι ερευνητές μέτρησαν την ικανότητα του οργανικού άνθρακα να απορροφά το φως καταγράφοντας ισχυρή απορρόφηση στα μικρά μήκη κύματος (υπεριώδες και μπλε φως). Ενώ ο στοιχειακός άνθρακας (αιθάλη) είναι μαύρος και απορροφά όλο το φάσμα, ο καπνός από τα ξύλα έδωσε στον αέρα των Ιωαννίνων τη χαρακτηριστική καφέ απόχρωση της ξυλείας που καίγεται για θέρμανση το χειμώνα.

Ένα αξιόλογο και ανησυχητικό εύρημα ήταν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την καύση ξύλου ήταν σε μεγάλο βαθμό υδατοδιαλυτά. Η αυξημένη διαλυτότητα των σωματιδίων καύσης βιομάζας είναι εξαιρετικά επικίνδυνη για την υγεία. Και αυτό γιατί, όταν εισπνέονται τα διαλυτά σωματίδια, οι τοξικές ενώσεις τους αποτίθενται εύκολα στους πνευμονικούς ιστούς και μπορούν να εισέλθουν

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

άμεσα στην κυκλοφορία του αίματος. Ο υδατοδιαλυτός οργανικός άνθρακας (WSOC) αποτέλεσε το 56% του συνολικού οργανικού άνθρακα τον χειμώνα. Η υψηλή διαλυτότητα αυτών των λεπτών σωματιδίων, σε συνδυασμό με τα ακραία επίπεδα συγκέντρωσής τους, μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις για την τοξικότητά τους και, κατ' επέκταση, για τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη υγεία των κατοίκων. Οι συγκεντρώσεις των PM_{2,5} και του μαύρου άνθρακα (BC) ήταν 4-5 φορές υψηλότερες και του οργανικού άνθρακα 10 φορές υψηλότερες το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι (Kaskaoutis et al., 2022). Όλα τα παραπάνω μεγέθη υποδηλώνουν ένα περιβάλλον ιδιαίτερα επιβαρυνμένο εξαιτίας της καύσης βιομάζας σε αστικό περιβάλλον. Επίσης, κατά τη χειμερινή περίοδο στην Αθήνα, η καύση ξύλου για οικιακή θέρμανση είχε σημαντική συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 30% των συγκεντρώσεων μαύρου άνθρακα (Black Carbon) και κατά μέσο όρο 11% του συνολικού CO₂ στις προαστιακές περιοχές και 16% του συνολικού CO₂ στις αστικές περιοχές (Kalogridis et al., 2018).

2.7.3 Βιομηχανικός Τομέας

Οι βιομηχανικές μονάδες αποτελούν σταθερές, σημειακές πηγές εκπομπής αερίων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων. Η χημική σύσταση, οι φυσικές ιδιότητες και η ποσότητα των αερολυμάτων που προέρχονται από τις στάσιμες πηγές, εξαρτώνται από τη διεργασία της καύσης και από το είδος του καυσίμου (Seinfeld and Pandis, 2006). Οι σημαντικότερες βιομηχανικές δραστηριότητες που επιφέρουν μεγάλη συνεισφορά σωματιδιακών ρύπων είναι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή τσιμέντων και λιπασμάτων, η χημική βιομηχανία και οι βιομηχανίες επεξεργασία μετάλλων (Μελάς, 2007). Ανάμεσα στις προαναφερθείσες βιομηχανικές δραστηριότητες που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με σωματιδιακούς ρύπους είναι οι βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας (πχ ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας), που για δεκαετίες χρησιμοποιούν λιγνίτη, από την καύση του οποίου υπάρχει μεγάλη συνεισφορά σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως τα σωματίδια και το SO₂ (Βερύκιος, 2003).

Ακόμα, η σωματιδιακή ρύπανση αποτελεί σημαντικό θέμα για περιοχές με ορυχεία και ιδίως όταν αυτό συνδυάζεται με την μεταφορά ακατέργαστου λιγνίτη και της

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

καύσης που πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Λίτου, 2016). Το μέγεθος των σωματιδίων που εκπέμπεται από τις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες, κυμαίνεται από 0,5-100μm, αναλόγως των χαρακτηριστικών της κάθε πηγής (Χαϊνά 2014; Κανελλοπούλου, 2015).

Η έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος εξετάζει τις τάσεις των εκπομπών των ρύπων από τις ενεργοβόρες βιομηχανίες της Ευρώπης, όπως ο χάλυβας, το τσιμέντο, το αλουμίνιο και τα χημικά. Αν και τις τελευταίες δεκαετίες, οι ενεργοβόρες βιομηχανίες κατάφεραν να μειώσουν σημαντικά την εκπομπή ρύπων τους, εντούτοις, τη τελευταία δεκαετία, η πρόοδος αυτή φαίνεται να έχει στάσιμη πορεία με συνέπεια ένα τεράστιο οικονομικό και κοινωνικό κόστος, το οποίο υπολογίζεται στα 73 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως, εξαιτίας κυρίως των επιπτώσεων στην υγεία (European Environment Agency, 2026). Η εν λόγω έκθεση συνδέει τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων άμεσα με την απανθρακοποίηση και την ανάγκη συνολικής αλλαγής της παραγωγής. Για παράδειγμα, η μετάβαση στην ηλεκτροδότηση των εργοστασίων και η χρήση εναλλακτικών υλικών, όπως τα υποκατάστατα κλίνκερ στο τσιμέντο, θεωρούνται οι πιο αποτελεσματικοί τρόποι μείωσης των εκπομπών. Ο τελικός στόχος που θέτει η Ευρώπη με τη πλήρη εφαρμογή των νέων κανονισμών είναι η μείωση των εκπομπών PM_{2,5} κατά 55% έως το 2050 (European Environment Agency, 2026).

2.7.4 Μεταφορά σκόνης και σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση

Η σωματιδιακή ρύπανση αποτελεί διασυνοριακή υπόθεση, αφού εκτός από τις τοπικές πηγές σωματιδιακών εκπομπών είναι δυνατόν να λάβει χώρα και μεταφορά σωματιδίων μέσω αερίων ρευμάτων από όμορες χώρες. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μεταφορά τόνων σωματιδίων από την έρημο της Σαχάρα στη βορειοδυτική περιοχή της Μεσογείου, αλλά και γενικότερα στη Νότια Ευρώπη (Dimitriou & Mihalopoulos 2024; Mantas et al., 2014; Remoundaki, et al., 2013). Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τις ανεμοθύελλες, που εμφανίζονται στις έρημους, σαν αποτέλεσμα ισχυρών ανέμων και άστατου καιρού, που καταλήγουν σε βίαιη μεταφορά σκόνης στα μεσαία και ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας (Mihalopoulos et al., 2007). Τα επεισόδια μεταφοράς σκόνης της ερήμου συμβάλλουν στην επιβάρυνση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών σωματιδίων

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

και προκαλούν μια αυξανόμενη ανησυχία για τη δημόσια υγεία, εξαιτίας της πρόκλησης αναπνευστικών ασθενειών.

Πρόσφατη μελέτη δείχνει ότι κατά τη διάρκεια επεισοδίων σκόνης, που προέρχονται από τις ερήμους Σαχάρα και Γκόμπι, περίπου το 50% του υδατοδιαλυτού δευτερογενούς οργανικού αερολύματος, βρίσκεται σε χονδρόκοκκα σωματίδια σκόνης (Li et al., 2025). Σύμφωνα μ' αυτή τη μελέτη, η σκόνη που περιέχει νερό μπορεί να λειτουργήσει σαν σφουγγάρι απορροφώντας αέριους ρύπους, μετατρέποντας τους σε σωματίδια (δευτερογενή οργανικά αερολύματα) που επηρεάζουν την υγεία και το κλίμα. Ο σχηματισμός του δευτερογενούς οργανικού αερολύματος πάνω στα σωματίδια σκόνης είναι ενισχυμένος στις περιοχές της Βόρειας Αφρικής και Ασίας – Μέσης Ανατολής. Η κατανόηση του σχηματισμού αυτών των σωματιδίων βοηθά στη βελτίωση προβλέψεων και ελέγχου της ρύπανσης και, τελικά, προστασία της ανθρώπινης υγείας (Li et al., 2025).

Μια νέα μελέτη που βασίστηκε σε παρακολούθηση 21 ετών (2003-2023) της μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα, στο Monte Cimone της Ιταλίας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μεταφορά σκόνης παραμένει ένα σταθερό και σημαντικό φαινόμενο για τη Μεσόγειο (Vogel et al., 2025). Κατά τη διάρκεια των επεισοδίων σκόνης η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι περίπου 10 φορές υψηλότερη από τις συνθήκες υποβάθρου. Η μέση συγκέντρωση και το ποσοστό των ημερών με σκόνη παρέμειναν σταθερά κατά τη διάρκεια των δύο δεκαετιών μελέτης. Παρά τις κλιματικές αλλαγές, η συχνότητα των ημερών με επεισόδια μεταφοράς σκόνης παρέμεινε σταθερή αντιπροσωπεύοντας περίπου 58 ημέρες ετησίως (ποσοστό 15,8% του συνόλου των ημερών ετησίως). Δεν παρατηρήθηκε αυξητική ή μειωτική τάση στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των σωματιδίων υποδεικνύοντας ότι η Σαχάρα παραμένει μια σταθερή πηγή σκόνης. Η Κεντρική Σαχάρα αναγνωρίστηκε ως η κυρίαρχη πηγή σκόνης (72,7%), ακολουθούμενη από τη Δυτική Σαχάρα (19,2%). Εντοπίστηκαν δύο κύριες περίοδοι αιχμής: μια παρατεταμένη το καλοκαίρι (Μάιος–Αύγουστος) και μία μικρότερη το φθινόπωρο (Οκτώβριος–Νοέμβριος). Τα επεισόδια το καλοκαίρι τείνουν να είναι μεγαλύτερης διάρκειας (τριών ημερών), ενώ το χειμώνα είναι συνήθως πιο σύντομα (1-2 ημέρες). Σημαντικό όμως ποσοστό των επεισοδίων (42,2%) διαρκεί μία ημέρα. Επομένως, οι αυξήσεις στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των σωματιδίων είναι σημαντικές καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

υπερβάσεις των ορίων ασφαλείας για τα σωματίδια επηρεάζοντας την ανθρώπινη υγεία και τις εισαγωγές στα νοσοκομεία (Vogel et al., 2025).

Η Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε επεισόδια μεταφοράς σκόνης λόγω της γειτνίασής της με την Αφρική, αλλά και λόγω της εκτεταμένης ακτογραμμής της Ελλάδας και του νησιωτικού της χαρακτήρα, τα σωματίδια θαλασσινού άλατος αποτελούν σταθερό συστατικό της ατμόσφαιρας (Dimitriou & Mihalopoulos 2024). Έτσι, ένα μείγμα σκόνης και σωματιδίων θαλασσινού άλατος προσθέτουν φυσική μάζα στα συνολικά επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων. Όσον αφορά την ορυκτή σκόνη, που προέρχεται κυρίως από τη μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα αυτή συνεισφέρει κυρίως στα επίπεδα των PM_{10} , αλλά κατά τη διάρκεια των επεισοδίων, ένα σημαντικό μέρος της διασπάται και σε λεπτότερα σωματίδια $PM_{2.5}$ (Dimitriou, & Mihalopoulos, 2024; Kassomenos, et al., 2014; Remoundaki, et al., 2013). Στον ελληνικό χώρο τα επεισόδια μεταφοράς της σκόνης από τη Σαχάρα είναι πολύ συχνά κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου (Mantas et al., 2014; Mihalopoulos et al., 2007). Στο μέλλον η κλιματική αλλαγή μπορεί να αυξήσει τα επεισόδια, κάνοντας ακόμα πιο δύσκολη τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές στο σύνολο τους (Akritidis et al., 2025).

Τα σωματίδια ορυκτής σκόνης επηρεάζουν το ενεργειακό ισοζύγιο της Γης μέσω της σκέδασης/απορρόφησης ακτινοβολίας και της δημιουργίας νεφών. Η σκόνη αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, προκαλώντας ψύξη στην επιφάνεια της Γης. Συγχρόνως, απορροφά μέρος της ακτινοβολίας (τόσο της ηλιακής όσο και της γήινης υψηλού μήκους κύματος) θερμαίνοντας τοπικά την ατμόσφαιρα. Επίσης, η σκόνη λειτουργεί ως πυρήνας συμπύκνωσης νεφών επηρεάζοντας τα νέφη και τις βροχοπτώσεις. Οι υδρατμοί μπορούν να υγροποιηθούν πάνω στη σκόνη και τα ορυκτά σωματίδια λόγω της κρυσταλλικής τους δομής, επιτρέπουν τη δημιουργία παγοκρυστάλλων σε μεγάλα υψόμετρα, επηρεάζοντας τη διαδικασία της βροχόπτωσης. Έτσι η ορυκτή σκόνη, ανάλογα με τη σύσταση και το μέγεθος των σωματιδίων, μπορεί να προκαλεί ψύξη στην επιφάνεια εμποδίζοντας το ηλιακό φως να φθάσει στο έδαφος αλλά μπορεί να προκαλεί και θέρμανση στην ατμόσφαιρα στο υψόμετρο που αιωρείται καθώς εγκλωβίζει θερμότητα. Παράλληλα, μπορεί να αναστείλει τη βροχόπτωση σε μία περιοχή και να την ενισχύσει σε κάποια άλλη (Vogel et al., 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

2.7.5 Αλλαγές στην οξύτητα των αιωρούμενων σωματιδίων και σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στην Ελλάδα συνδέεται άμεσα με την περιβαλλοντική κατάσταση των θαλασσών και τη σταθερότητα του κλίματος, με την οξύτητα (pH) των σωματιδίων να διαδραματίζει κεντρικό ρυθμιστικό ρόλο (Neroladaki et al., 2025). Η οξύτητα των αερολυμάτων επηρεάζει καθοριστικά τη χημική σύνθεση και τις ιδιότητές τους, με άμεσες προεκτάσεις στην ανθρώπινη υγεία και τη σταθερότητα των οικοσυστημάτων. Πολλά μεταλλικά στοιχεία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα εγκλωβισμένα σε στερεή, αδιάλυτη μορφή εντός σωματιδίων σκόνης ή τέφρας. Όταν το pH του υδατικού στρώματος που περιβάλλει το σωματίδιο μειώνεται (δηλαδή αυξάνεται η οξύτητα), προκαλείται χημική διάβρωση που απελευθερώνει αυτά τα μέταλλα υπό τη μορφή διαλυτών ιόντων. Τα διαλυμένα μέταλλα παρουσιάζουν σαφώς υψηλότερη βιολογική δραστηριότητα, κατά την εισπνοή τους, διεισδύουν ευκολότερα στην κυκλοφορία του αίματος ή προκαλούν άμεσο οξειδωτικό στρες στους πνεύμονες, πυροδοτώντας φλεγμονώδεις αντιδράσεις και οξεία αναπνευστικά προβλήματα (Neroladaki et al., 2025).

Η λεκάνη της Ανατολικής Μεσογείου δέχεται συχνά μάζες σκόνης από τη Σαχάρα, η οποία μεταφέρει απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, όπως ο σίδηρος και ο φωσφόρος. Στην αρχική τους μορφή, τα συστατικά αυτά είναι αδιάλυτα και, ως εκ τούτου, μη αξιοποιήσιμα από τους θαλάσσιους μικροοργανισμούς, όπως το φυτοπλαγκτόν. Οι όξινες συνθήκες της ατμόσφαιρας μετατρέπουν αυτά τα αδιάλυτα κλάσματα σκόνης σε βιοδιαθέσιμα, επιτρέποντας την απορρόφησή τους από το φυτοπλαγκτόν μετά την εναπόθεσή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Χαρακτηριστικά, η διαλυτότητα του σιδήρου στη Μεσόγειο, η οποία περιορίζεται σε μόλις 0,5% υπό την επίδραση της αλκαλικής σκόνης της Σαχάρας, εκτινάσσεται στο 28% σε συνθήκες όξινης επίδρασης (Neroladaki et al., 2025). Παράλληλα, το pH επηρεάζει άμεσα τη χημεία του θείου, ελέγχοντας την ταχύτητα με την οποία το διοξείδιο του θείου απορροφάται και οξειδώνεται εντός των ατμοσφαιρικών σταγονιδίων για το σχηματισμό δευτερογενών θειικών αλάτων. Τα θειικά αυτά σωματίδια λειτουργούν ως ανακλαστικός καθρέφτης έναντι της ηλιακής ακτινοβολίας, συμβάλλοντας στην ψύξη του συστήματος και εξισορροπώντας, εν μέρει, τη θέρμανση που προκαλείται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Neroladaki et al., 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Από πρόσφατη έρευνα της οξύτητας των λεπτών αερολυμάτων και την εποχιακή τους διακύμανση, σε έξι χαρακτηριστικές τοποθεσίες της Ελλάδας (Φινοκαλιά, Πάτρα, Θησείο Αττικής, Ιωάννινα, Θεσσαλονίκη και Ξάνθη), κατά την περίοδο 2019–2020, προέκυψε ότι κατά τη χειμερινή περίοδο τα λεπτά αερολύματα ήταν από όξινα έως μέτρια όξινα, στην ελληνική επικράτεια, με το συνολικό μέσο pH να διαμορφώνεται στο $3,57 \pm 0,44$ για τις αστικές περιοχές και στο $3,05 \pm 0,50$ για τις απομακρυσμένες τοποθεσίες υποβάθρου. Η υψηλότερη τιμή pH ($4,08 \pm 0,42$) καταγράφηκε στα Ιωάννινα (Ιανουάριο του 2020), γεγονός που αποδίδεται στα αυξημένα επίπεδα ιόντων καλίου (K⁺) από την εκτεταμένη καύση βιομάζας για οικιακή θέρμανση. Αντίθετα, τα αερολύματα στην Ξάνθη εμφάνισαν τη μέγιστη οξύτητα λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων θεικών αλάτων, βιομηχανικής προέλευσης ή διασυννοριακής μεταφοράς (Neroladaki κ.ά., 2025). Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, τα PM_{2,5} στο Θησείο, τα Ιωάννινα και τον Φινοκαλιά παρουσίασαν έντονα όξινο χαρακτήρα. Κατά την περίοδο αυτή, τα θειικά άλατα αποτέλεσαν τον κύριο παράγοντα που οδήγησε στις συνθήκες υψηλής οξύτητας (Neroladaki et al., 2025).

Η αλληλεπίδραση της αλκαλικής σκόνης της Σαχάρας με τους ανθρωπογενείς όξινους ρύπους, κατά τη μεταφορά της πάνω από την Ελλάδα, οδηγεί στο φαινόμενο της «ατμοσφαιρικής γήρανσης». Το NO που εκπέμπεται από τη βιομηχανία και την οδική κυκλοφορία οξειδώνεται σε NO₂, το οποίο στη συνέχεια αντιδρά με τις ατμοσφαιρικές ρίζες υδροξυλίου για την παραγωγή νιτρικού οξέος. Όταν το νιτρικό οξύ συναντήσει τα σωματίδια της ορυκτής σκόνης, προσκολλάται στην επιφάνειά τους και μετατρέπεται σε σωματιδιακά νιτρικά άλατα. Αυτή η επικάλυψη καθιστά τη σκόνη πιο υγροσκοπική (απορροφά υδρατμούς ευκολότερα) και μεταβάλλει τον πραγματικό δείκτη διάθλασης του μείγματος. Επειδή τα νιτρικά άλατα παρουσιάζουν υψηλή ικανότητα σκέδασης, η συσσώρευσή τους πάνω στη σκόνη ενισχύει τη συνολική σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας, τροποποιώντας τις κλιματικές ιδιότητες των αερολυμάτων και τη διαδικασία σχηματισμού των νεφών (Karydis et al., 2016). Παράλληλα, η διαδικασία αυτή αυξάνει την οξύτητα των σωματιδίων, απελευθερώνοντας τα εγκλωβισμένα τοξικά μέταλλα, στην υδατική τους φάση και καθιστώντας τα, κατά την εισπνοή τους, ακόμη πιο επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία (Karydis et al., 2016; Neroladaki et al., 2025; Milousis et al., 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

2.8. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην πολιτιστική κληρονομιά

Τα σωματίδια μπορεί να είναι εκ φύσεως είτε χημικά αδρανή, είτε χημικά ενεργά. Συνεπώς, ανάλογα με την χημική τους σύσταση και τις φυσικές τους ιδιότητες τα σωματίδια είναι δυνατόν να προκαλέσουν επιφανειακές αλλοιώσεις σε σχεδόν κάθε επιφάνεια του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος (Cooper & Alley, 2004). Έτσι μπορούν να καταστρέψουν τα μεταλλικά υλικά πάνω στα οποία επικάθονται. Επομένως, είναι δυνατόν, να προκαλέσουν άμεση χημική καταστροφή, είτε με κατευθείαν διαβρωτική δράση των ιδίων, είτε με τη δράση διαβρωτικών χημικών ουσιών, οι οποίες προσροφώνται σε αδρανή σωματίδια (Μελάς, 2007). Η επίδραση των σωματιδίων δεν είναι μόνο άμεση αλλά και έμμεση. Κατά πρώτον λειτουργούν άμεσα ως φορείς ενώσεων οι οποίοι δρουν διαβρωτικά επιτυγχάνοντας να εισχωρήσουν και κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Επιπλέον, τα εναποτιθέμενα σωματίδια είναι δυνατόν να λειτουργήσουν και ως σημεία συμπύκνωσης και άλλων ρύπων, που με τη σειρά τους διαβρώνουν την επιφάνεια (Seinfeld & Pandis, 2006).

Έτσι, εκτός από τις πολύπλευρες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, η σωματιδιακή ρύπανση αποτελεί επίσης και βασικό παράγοντα αλλοίωσης των ιστορικών μνημείων. Τα σωματίδια που προέρχονται από την καύση καυσίμων (ιπτάμενη τέφρα) περιέχουν οξείδια μετάλλων, όπως ο σίδηρος, τα οποία δρουν καταλυτικά στην οξείδωση του ατμοσφαιρικού SO₂. Αυτή η διαδικασία επιταχύνει την αντίδραση του θείου με το ανθρακικό ασβέστιο του μαρμάρου, παρουσία υγρασίας και οξυγόνου, με τελικό προϊόν τη δημιουργία γύψου (Βερύκιος, 2003). Ο σχηματισμός κρυστάλλων γύψου αυξάνει τον όγκο στην επιφάνεια της πέτρας, προκαλώντας ρωγμές, ξεφλούδισμα, απώλεια των λεπτομερειών στο γλυπτό διάκοσμο και μαζί με πυριτικά άλατα και ανθρακούχα σωματίδια από την καύση καυσίμων, εγκλωβίζονται μέσα στο στρώμα της γύψου, σχηματίζοντας τη χαρακτηριστική μαύρη κρούστα (Seinfeld & Pandis, 2006). Έτσι, τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την καύση πετρελαίου και άνθρακα, δεν επικάθονται απλώς στην επιφάνεια των μνημείων, αλλά εγκλωβίζονται σ' αυτό το στρώμα γύψου, σχηματίζοντας μια μαύρη κρούστα και έτσι προκαλούν σημαντική φθορά των υλικών των ιστορικών μνημείων.

2.8.1 Μαύρες Κρούστες και Πολιτισμική Κληρονομιά

Οι κύριοι ρύποι που απειλούν την ακεραιότητα των πετρωμάτων και ιδιαίτερα των ανθρακικών πετρωμάτων, όπως το μάρμαρο και ο ασβεστόλιθος, είναι τα οξείδια του

θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου, (NO_x) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Αυτοί οι ρύποι αντιδρώντας με υγρασία του αέρα, σχηματίζουν οξέα που διαβρώνουν την επιφάνεια της πέτρας. Μία από τις σοβαρότερες μορφές αλλοίωσης είναι ο σχηματισμός μαύρων κρουστών (black crusts). Αυτές προκύπτουν από την αντίδραση του διοξειδίου του θείου με το ανθρακικό ασβέστιο του πετρώματος, οδηγώντας στο σχηματισμό γύψου ο οποίος εγκλωβίζει αιωρούμενα σωματίδια, βαρέα μέταλλα και σκόνη. Τα επικαθήμενα αιωρούμενα σωματίδια λειτουργώντας ως φορείς, που μεταφέρουν υγρασία και όξινα αέρια.

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) οξειδώνεται σε τριοξείδιο του θείου (SO_3) με καταλύτη το μαύρο άνθρακα. Το SO_3 αντιδρά με την υγρασία της ατμόσφαιρας (H_2O) και σχηματίζει θειικό οξύ (H_2SO_4). Το H_2SO_4 αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) του πετρώματος και παράγει το γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) που έχει σχεδόν διπλάσιο μέγεθος από το αρχικό μάρμαρο (Βερύκιος 2003). Με αυτή την αντίδραση το σκληρό μάρμαρο μετατρέπεται βαθμιαία σε γύψο που είναι εύθρυπτος και διαλυτός στο νερό. Ο γύψος που σχηματίζεται εγκλωβίζει τα μαύρα σωματίδια δημιουργώντας τη χαρακτηριστική μαύρη κρούστα. Η χημική ανάλυση των μετάλλων στις μαύρες αυτές κρούστες, επιτρέπει το προσδιορισμό της πηγής ρύπανσης (Ruffolo et al., 2023). Τα αιωρούμενα σωματίδια και ειδικότερα ο μαύρος άνθρακας (black carbon) που προέρχεται από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων και τις βιομηχανικές δραστηριότητες, επικάθονται στις πορώδεις επιφάνειες των πολιτισμικών μνημείων (Mitsos et al., 2022). Συνήθως τα σωματίδια του μαύρου άνθρακα έχουν ακανόνιστο και αιχμηρό σχήμα το οποίο τα βοηθάει να γαντζώνονται στους πόρους της πέτρας. Το αποτέλεσμα δεν είναι μόνο ότι το μνημείο φαίνεται βρώμικο αλλά και ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο να καθαριστεί δίχως να αφαιρεθεί ταυτόχρονα και μέρος της επιφάνειάς του, προκαλώντας έτσι την αλλοίωσή του (Li et al., 2025).

Σύμφωνα με μελέτες στα μνημεία της Ακρόπολης (Παρθενώνας, Ερέχθειο), η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί τον κύριο παράγοντα σχηματισμού της μαύρης κρούστας (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005; Moraitou et al., 2000). Οι μελέτες έδειξαν ότι τα σωματίδια αυτά δεν προκαλούν μόνο αισθητική αλλοίωση, αλλά περιέχουν μεταλλικά στοιχεία (όπως Fe και Pb) που δρουν καταλυτικά, επιταχύνοντας τη χημική διάβρωση και την αποσάθρωση του Πεντελικού μαρμάρου. Τα σωματίδια που ανιχνεύθηκαν στην εξωτερική στιβάδα της κρούστας

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

περιλαμβάνουν ιχνηθέτες καύσης βενζίνης (Pb), καύσης πετρελαίου (Fe, S) και βιομηχανικών και αστικών εκπομπών (Ti, Mn) (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2005; Moraitou et al., 2000). Όταν βρέχει, η μαύρη αυτή κρούστα μπορεί να διαλυθεί και να ξεπλυθεί, παρασέρνοντας μαζί της και τμήματα από το ανάγλυφο, αλλοιώνοντας λεπτομέρειες που το χαρακτηρίζουν. Λόγω του ότι πολλά μνημεία της Ελλάδας βρίσκονται σχετικά κοντά στη θάλασσα (π.χ. Αθήνα, Πειραιάς, Δήλος) τα αιωρούμενα σωματίδια αναμειγνύονται με ιόντα χλωρίου και νατρίου που προέρχονται από τη θάλασσα. Αυτά τα άλατα εισχωρούν στους πόρους του μαρμάρου και δημιουργούν κρυστάλλους. Οι αλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας προκαλούν διαστολή αυτών των κρυστάλλων και ως εκ τούτου μια μηχανική τάση, με την οποία το μάρμαρο σπάει από το εσωτερικό του (αλατική φθορά) προκαλώντας έτσι σημαντικές αλλοιώσεις στο ανάγλυφο των μνημείων (Li et al., 2025).

2.8.2. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$ στη πολιτιστική κληρονομιά

Η δράση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} διαφοροποιείται σημαντικά από εκείνη των λεπτότερων σωματιδίων $PM_{2,5}$ καθώς η επίδραση τους είναι κυρίως φυσική και επιφανειακή. Λόγω της μεγαλύτερης μάζας τους, τα PM_{10} εναποτίθενται κυρίως σε οριζόντιες ή ελαφρώς κεκλιμένες επιφάνειες των μνημείων. Αυτή η εναπόθεση δημιουργεί ένα στρώμα που λειτουργεί σαν σφουγγάρι, συγκρατώντας την υγρασία και τα διαβρωτικά αέρια (όπως το διοξείδιο του θείου SO_2) σε επαφή με τη πέτρα (Li et al., 2025). Σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους, τα PM_{10} που συχνά περιέχουν κόκκους πυριτίου ή σκληρά μέταλλα, δρουν σαν λειαντικά, φθείροντας μηχανικά τις ακμές των γλυπτών και των αναγλύφων (Yan & Wang, 2024).

Τα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2,5}$ είναι περισσότερο επικίνδυνα για τα μνημεία επειδή δρουν σε μικροσκοπικό επίπεδο επιδρώντας στην ίδια τη δομή του πετρώματος. Επειδή έχουν μικροσκοπικό μέγεθος, εισχωρούν βαθιά στο εσωτερικού του πετρώματος (ενδοπορώδης εναπόθεση). Εκεί προκαλούν χημικές αντιδράσεις (όπως η κρυστάλλωση αλάτων) δημιουργώντας εσωτερικές τάσεις που οδηγούν σε ξεφλούδισμα ή ρωγμές (Esteban-Cantillo et al., 2024). Τα $PM_{2,5}$ αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από άνθρακα (αιθάλη) γύρω από τα οποία αναπτύσσεται ο γύψος, δημιουργώντας τις σκληρές μαύρες κρούστες που βλέπουμε στα μνημεία των πόλεων

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

(Ruffolo et al., 2023; Yan & Wang, 2024). Τα PM_{2.5} μεταφέροντας μέταλλα, όπως ο σίδηρος (Fe) και το βανάδιο (V), λειτουργούν ως καταλύτες, κάνοντας τη χημική διάβρωση να πραγματοποιείται με γρηγορότερους ρυθμούς (Li et al., 2025). Επομένως, η χημική επίδραση των σωματιδίων στα μνημεία τεκμηριώνεται από πολλές σύγχρονες αναλύσεις που δείχνουν τις σημαντικές επιδράσεις της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πολιτιστική κληρονομιά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν τα αποτελέσματα μελέτης, που έδειξε ότι οι απεικονίσεις της ατμόσφαιρας σε έργα τέχνης παρέχουν κρίσιμα δεδομένα για τη συγκέντρωση σωματιδίων, κατά τη διάρκεια προ-βιομηχανικών περιόδων, βοηθώντας έτσι στην πληρέστερη κατανόηση της μακροχρόνιας έκθεσης των μνημείων σε διάφορους διαβρωτικούς παράγοντες (Zerefos et al., 2014).

2.9. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στα οικοσυστήματα

2.9.1. Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} στο αστικό πράσινο

Σε περιβάλλον με υψηλή ρύπανση, όπως τα επιβαρυνμένα αστικά κέντρα της Ελλάδας, η χρόνια εναπόθεση αιθάλης και ορυκτής σκόνης δεν υποβαθμίζει μόνο την υγεία των φυτών, αλλά μειώνει και τη μακροπρόθεσμη ικανότητά τους να λειτουργούν ως αποτελεσματικά φίλτρα καθαρισμού του ατμοσφαιρικού αέρα (Βερύκιος, 2003). Η σταδιακή εξασθένηση της βλάστησης δημιουργεί έναν φαύλο κύκλο, όπου η μείωση της φωτοσυνθετικής ικανότητας περιορίζει τελικά τις δυνατότητες του αστικού πρασίνου στην προστασία του οικοσυστήματος (Seinfeld & Pandis, 2006). Από την αξιολόγηση επτά είδη φυτών (τρία δέντρα, τρεις θάμνους και ένα αναρριχώμενο), στο αστικό πράσινο της Βαρσοβίας, διαπιστώθηκε ότι η συσσώρευση αιωρούμενων σωματιδίων στο φύλλωμα επηρεάζει άμεσα και αρνητικά το μηχανισμό της φωτοσύνθεσης (Popek et al., 2018). Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η ποσότητα των συσσωρευμένων αιωρούμενων σωματιδίων συσχετίζεται αρνητικά με το ρυθμό φωτοσύνθεσης και το δείκτη Fv/Fm (δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται από τη χλωροφύλλη και χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση ή πόσο καλά το φυτό μετατρέπει το φως που απορροφά σε χημική ενέργεια) και θετικά με την αντοχή των στομάτων των φυτών. Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν αυτή

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

την τιμή μέσω της μηχανικής παρεμπόδισης και της σκίασης. Η συσσώρευση των PM_{2,5} οδηγεί στη φραγή των στομάτων των φυτών περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο μεσόφυλλο (το εσωτερικό τμήμα του φύλλου ανάμεσα στην πάνω και κάτω επιδερμίδα, που πραγματοποιείται η λειτουργία της φωτοσύνθεσης) και προκαλεί δευτερογενή φωτοαναστολή, που καταγράφεται ως πτώση του δείκτη Fv/Fm. Παράλληλα, το στρώμα σκόνης μειώνει την ενεργό ακτινοβολία που απορροφάται, επηρεάζοντας την ενέργεια διέγερσης, που φθάνει στα κέντρα αντίδρασης των χλωροπλαστών (Popek et al., 2018). Σε περιοχές με υψηλή ρύπανση, όπως τα αστικά κέντρα της Ελλάδας, η συνεχής εναπόθεση σωματιδίων (ιδιαίτερα αιθάλης και ορυκτής σκόνης) οδηγεί σε χρόνια μείωση του δείκτη Fv/Fm, εξασθενώντας την ανθεκτικότητα της βλάστησης και την ικανότητα των φυτών να δρουν ως φυσικά φίλτρα καθαρισμού του αέρα (Popek et al., 2018).

2.9.2 Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στα υδάτινα οικοσυστήματα

Τα αιωρούμενα σωματίδια επιδρούν στα υδάτινα οικοσυστήματα διττά, αφενός ως πηγή απαραίτητων θρεπτικών συστατικών και αφετέρου ως φορείς τοξικών ουσιών. Τα αιωρούμενα σωματίδια μετά την εκπομπή τους καταλήγουν στα επιφανειακά ύδατα ωκεανών και λιμνών, μέσω της ξηρής και υγρής εναπόθεσης (Seinfeld & Pandis, 2006). Η σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από τη πηγή τους, με τα σωματίδια που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως είναι η καύση ορυκτών καυσίμων και η βιομηχανία, να είναι πλουσιότερα σε άζωτο συγκριτικά με εκείνα που προέρχονται από τη φυσική σκόνη (Thiagarajan et al., 2024). Τα σωματίδια, μεταφέρουν ένα σύνθετο μείγμα ανοργάνων και οργανικών ενώσεων και έτσι μόλις αυτές οι ενώσεις διαλυθούν στο νερό, γίνονται βιοδιαθέσιμες στο φυτοπλακτόν. Επομένως, τα σωματίδια, που εναποθέτουν άζωτο και φωσφόρο διεγείρουν την πρωτογενή παραγωγή και αυξάνουν τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης α (Thiagarajan et al., 2024). Η ατμοσφαιρική σκόνη παρέχει τον απαραίτητο σίδηρο (Fe) για την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτού, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στη δέσμευση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα. Εκτός όμως από την ευεργετική δράση παροχής των θρεπτικών συστατικών, τα αιωρούμενα σωματίδια παρέχουν επίσης ιχνοστοιχεία που σε υψηλές συγκεντρώσεις καθίστανται

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

τοξικά (Thiagarajan et al., 2024). Έτσι μέταλλα όπως ο χαλκός (Cu), το αλουμίνιο (Al) και ο ψευδάργυρος (Zn) μπορούν να αναστείλουν την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού. Ιδιαίτερα ο χαλκός είναι γνωστός για τη πρόκληση οξειδωτικού στρες και τη μείωση της φωτοσύνθεσης (Thiagarajan et al., 2024).

Επομένως, η τελική επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο φυτοπλαγκτόν είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας μεταξύ της παροχής θρεπτικών και της τοξικότητας των μετάλλων. Αυτή η ισορροπία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος (πχ οξύτητα νερού, προϋπάρχουσες συγκεντρώσεις θρεπτικών) και τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων (Thiagarajan et al., 2024).

2.9.3 Τα αιωρούμενα σωματίδια ως περιβαλλοντικοί παράγοντες στα θαλάσσια και γλυκά υδάτινα οικοσυστήματα

Πρόσφατη μελέτη εξετάζοντας τις πολυδιάστατες επιπτώσεις της σωματιδιακής ρύπανσης στα υδάτινα ασπόνδυλα, ανέδειξαν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να λειτουργήσουν ως κρίσιμοι στρεσογόνοι παράγοντες για τα θαλάσσια και γλυκά υδάτινα οικοσυστήματα (Gokul et al., 2023). Τα αιωρούμενα σωματίδια μόλις εισέλθουν στο νερό δρουν ως φορείς επικίνδυνων ουσιών, όπως είναι τα βαρέα μέταλλα (Pb, Cd, Cu) και οι οργανικοί ρύποι, οι οποίοι έχουν προσκολληθεί στην επιφάνεια τους (Gokul et al., 2023). Τα υδάτινα ασπόνδυλα όπως είναι τα μαλάκια, τα καρκινοειδή και οι προνύμφες εντόμων, εκτίθενται στα σωματίδια αυτά μέσω της άμεσης επαφής ή μέσω της διήθησης. Έτσι, τα σωματίδια εναποτίθενται στα βράγχια και στο πεπτικό σύστημα προκαλώντας ερεθισμό και εμποδίζουν τη φυσιολογική πρόσληψη τροφής. Παράλληλα, η απελευθέρωση των βαρέων μετάλλων από τα σωματίδια πυροδοτεί την παραγωγή ελευθέρων ριζών, οδηγώντας σε κυτταρικές βλάβες και οξειδωτική καταπόνηση (Gokul et al., 2023). Όταν η έκθεση των οργανισμών αυτών στα αιωρούμενα σωματίδια καταστεί χρόνια, τότε παρατηρούνται μια σειρά από παθολογικές καταστάσεις. Παρατηρείται καθυστέρηση στην ανάπτυξη και αλλοιώσεις κατά τη διάρκεια των σταδίων της μεταμόρφωσης των ασπονδύλων, από την προνύμφη στον ενήλικο οργανισμό. Αυτό γίνεται γιατί αναγκάζονται να δαπανούν ενέργεια στην προσπάθειά τους να απομακρύνουν τα βαρέα μέταλλα, γεγονός που περιορίζει τη διαθέσιμη ενέργεια για την ανάπτυξη και την επιβίωση τους (Gokul et al., 2023). Επειδή τα ασπόνδυλα αποτελούν τη βάση του τροφικού πλέγματος, η μόλυνση τους έχει ευρύτερες συνέπειες στο οικοσύστημα, καθώς δεν

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

περιορίζονται μόνο σε αυτούς τους οργανισμούς. Οι τοξικές ουσίες που μεταφέρονται από τα αιωρούμενα σωματίδια βιοσυσσωρεύονται στους ιστούς των ασπονδύλων και στη συνέχεια περνούν σε ανώτερους καταναλωτές, όπως είναι τα ψάρια και τελικά ο άνθρωπος. Αυτό καθιστά τη ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια όχι μόνο ένα τοπικό πρόβλημα αλλά μια παγκόσμια απειλή για την τροφική αλυσίδα και τη δημόσια υγεία.

2.9.4. Τα υδάτινα οικοσυστήματα ως αποδέκτες των οργανικών ρύπων μέσω των αιωρούμενων σωματιδίων

Τα υδάτινα οικοσυστήματα (λίμνες, ποτάμια, ωκεανοί) λειτουργούν, όπως προκύπτει από πρόσφατες μελέτες, ως τελικοί αποδέκτες (sink) των οργανικών ρύπων, που μεταφέρονται με τη βοήθεια των αιωρούμενων σωματιδίων, μέσω των διαδικασιών της ξηρής και της υγρής εναπόθεσης (Seinfeld & Pandis, 2006; Wollenweber et al., 2025). Τα σωματίδια αυτά δρουν ως οχήματα μεταφοράς για μια πληθώρα οργανικών χημικών ενώσεων, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) και λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς τους, τα αερολύματα προσροφούν τους εν λόγω ρύπους και τους μεταφέρουν σε μεγάλες αποστάσεις από την αρχική πηγή εκπομπής τους (Μελάς, 2007). Κατά τη διάρκεια της ατμοσφαιρικής μεταφοράς τους, οι ρύποι που είναι προσκολλημένοι στα αιωρούμενα σωματίδια υφίστανται φωτοχημικές αντιδράσεις, σχηματίζοντας παράγωγα όπως οι νιτρο-PAHs (*nitro-PAHs*) και οι οξυ-PAHs (*oxy-PAHs*) και δευτερογενή οργανικά αερολύματα, τα οποία επιβαρύνουν την ποιότητα του αέρα. Οι ενώσεις αυτές εμφανίζονται συχνά σαφώς πιο τοξικές, μεταλλαξιογόνες και υδατοδιαλυτές σε σχέση με τις μητρικές (αρχικές) ενώσεις, αυξάνοντας κατακόρυφα τον κίνδυνο για τους υδρόβιους οργανισμούς (Wollenweber et al., 2025). Με την είσοδο των αιωρούμενων σωματιδίων στο υδάτινο περιβάλλον, οι μεταφερόμενοι οργανικοί ρύποι αποδεσμεύονται από το σωματιδιακό υπόστρωμα και καθίστανται βιοδιαθέσιμοι. Πολλές από αυτές τις ενώσεις λειτουργούν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες στους οργανισμούς που τις προσλαμβάνουν, ενώ παράλληλα προκαλούν δυσπλασίες και αναπτυξιακά προβλήματα στα έμβρυα των ψαριών και άλλων υδρόβιων ειδών. Η έκθεση των θαλάσσιων και λιμναίων οργανισμών σε αυτές τις τοξικές ενώσεις προκαλεί επίσης δομικές βλάβες στο DNA, αυξάνοντας τον κίνδυνο μεταλλάξεων (Wollenweber et al., 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Οι τρέχουσες θεσμικές κατευθυντήριες γραμμές (όπως αυτές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας) βασίζονται αποκλειστικά στην αποτίμηση του κινδύνου από την άμεση εισπνοή των σωματιδίων. Ωστόσο, η σωματιδιακή ρύπανση παρουσιάζει ένα εκτεταμένο «οικολογικό αποτύπωμα» το οποίο συνήθως παραβλέπεται. Τα υδάτινα οικοσυστήματα εκτίθενται σε ένα «τοξικό μείγμα» ατμοσφαιρικά μεταφερόμενων ρύπων, το οποίο δύναται να οδηγήσει σε απώλεια της βιοποικιλότητας και ποιοτική υποβάθμιση των υδάτινων πόρων. Για το λόγο αυτό, υπάρχει ανάγκη για την άμεση ενσωμάτωση της υδάτινης οικοτοξικολογίας στις γενικότερες αξιολογήσεις κινδύνου της ποιότητας του αέρα, οι οποίες μέχρι σήμερα επικεντρώνονται σχεδόν αποκλειστικά στην προστασία της ανθρώπινης υγείας.

2.10. Η Πρόκληση της Συμμόρφωσης με τη Νέα Ευρωπαϊκή Οδηγία 2024/2881.

2.10.1 Εθνικό και Ευρωπαϊκό Θεσμικό Πλαίσιο για τα Αιωρούμενα Σωματίδια

Το θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και, κατ' επέκταση, στην Ελλάδα, διέρχεται μια περίοδο σημαντικής αναθεώρησης με στόχο τη δραστική μείωση των επιπτώσεων της ρύπανσης στη δημόσια υγεία. Επί του παρόντος, η Οδηγία 2008/50/ΕΚ, η οποία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο με την ΚΥΑ 14122/549/Ε.103/2011 (όπως τροποποιήθηκε από την ΚΥΑ 174505/607/2017), αποτελεί το βασικό νομοθετικό εργαλείο αναφοράς. Αυτή τη στιγμή, στην Ελλάδα, η ΚΥΑ 14122/549/Ε.103/2011 παραμένει σε τυπική ισχύ μέχρι την πλήρη ενσωμάτωση της νέας οδηγίας 2024/2881. Ωστόσο η Ελλάδα επικαιροποίησε πρόσφατα το εθνικό της σχέδιο για να προετοιμαστεί για τους στόχους του 2030. Ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος (Ν. 4936/2022) περιλαμβάνει διατάξεις που συνδέουν τη μείωση των ρύπων με την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (πχ σταδιακή κατάργηση καυστήρων πετρελαίου). Η νομοθεσία εισήγαγε επίσης την υποχρέωση κατάρτισης «Εκτελεστικών Σχεδίων για τον Αέρα» σε περιπτώσεις συστηματικών υπερβάσεων (φαινόμενο συχνό σε αστικά κέντρα όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη)

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

επιβάλλοντας τη λήψη μέτρων, όπως ο περιορισμός της κυκλοφορίας οχημάτων και ο έλεγχος της οικιακής καύσης βιομάζας.

Στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και του «Σχεδίου Δράσης για Μηδενική Ρύπανση», η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δρομολόγησε την αυστηροποίηση του πλαισίου αυτού, επιδιώκοντας την ευθυγράμμιση των προτύπων της ΕΕ με τις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO). Αποτέλεσμα αυτής της δέσμευσης είναι η έκδοση της νέας Οδηγίας (ΕΕ) 2024/2881, η οποία αντικαθιστά τις προγενέστερες Οδηγίες (2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ) από τις 12 Δεκεμβρίου 2026.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Σύγκριση Οριακών Τιμών για τα Αιωρούμενα Σωματίδια PM_{2.5} και PM₁₀ (Οδηγίες (ΕΕ) 2008/50, 2024/2881; EU Clean Air Policy Updates, 2024; Dilara, 2024)

Ρύπος	Τύπος Ορίου	Σημερινό Όριο (Οδ. 2008/50)	Νέο Όριο (Οδ. 2024/2881)
PM_{2.5}	Ετήσιο	25 µg/m³	10 µg/m³ (Μείωση 60%)
PM₁₀	Ετήσιο	40 µg/m³	20 µg/m³ (Μείωση 50%)
PM_{2.5}	Ημερήσιο	--	25 µg/m³ (18 υπερβ.)
PM₁₀	Ημερήσιο	50 µg/m³ (35 υπερβ.)	45 µg/m³ (18 υπερβ.) (Μείωση 10% στη συγκέντρωση και 49% στις υπερβ.)

Η Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21/05/2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για την Ευρώπη ορίζει τα όρια συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5} αναγνωρίζοντας ότι,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ειδικά τα επίπεδα των $PM_{2.5}$ είναι καθοριστικά για την υγεία. Η ΚΥΑ 174505/607/2017 ενσωματώνει αυτούς τους πίνακες και απαιτεί τη λειτουργία των ελληνικών δικτύων μέτρησης με βάση τις μεθοδολογίες που ορίζει η ΕΕ για την παρακολούθηση αυτών των ορίων. Ειδικότερα για τα σωματίδια PM_{10} ορίζει ως ανώτερο όριο μέσου όρου 24 ωρών, τα $50\mu g/m^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος). Όσον αφορά το μέσο ετήσιο όρο PM_{10} τα $40\mu g/m^3$. Για τα $PM_{2.5}$ ορίζει ως ανώτερο όριο ετησίου μέσου όρου τα $25\mu g/m^3$. Ειδικότερα όσον αφορά τον καθαρό αέρα, η Επιτροπή δεσμεύτηκε για την περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την καλύτερη ευθυγράμμιση των προτύπων ποιότητας του αέρα της ΕΕ με τις συστάσεις (κατευθυντήριες γραμμές) του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO-ΠΟΥ) και τη συμβολή στην επίτευξη των στόχων του σχεδίου δράσης για μηδενική ρύπανση. Έτσι, οι οδηγίες 2004/107/EK και 2008/50/EK, καταργούνται από τη 12-12-2026, με την επιφύλαξη των υποχρεώσεων των κρατών μελών όσον αφορά τις προθεσμίες για τη μεταφορά στο εθνικό δίκαιο των οδηγιών και τίθεται σε ισχύ η Οδηγία (ΕΕ) 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2024 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και για καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη, με την οποία εισάγονται αυστηρότερα όρια ποιότητας του αέρα. Αυτή η οδηγία φέρνει ριζικές αλλαγές, ευθυγραμμίζοντας τα όρια πιο κοντά στις αυστηρές συστάσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ). Η Ελλάδα, όπως και τα υπόλοιπα κράτη μέλη, έχει προθεσμία έως τις 11 Δεκεμβρίου 2026 για να ενσωματώσει τη νέα οδηγία στο εθνικό δίκαιο. Για πρώτη φορά, εισάγεται ρητά το δικαίωμα των πολιτών να διεκδικούν αποζημίωση από το κράτος, εάν αποδειχθεί ότι η υγεία τους ζημιώθηκε λόγω παράλειψης των αρχών να συμμορφωθούν με τα όρια ποιότητας του αέρα. Απαιτείται η δημιουργία περισσότερων σημείων μέτρησης και η παροχή δεδομένων στο κοινό σε πραγματικό χρόνο (near-real-time). Τα κράτη που υπερβαίνουν τα όρια σήμερα πρέπει να έχουν έτοιμους οδικούς χάρτες με συγκεκριμένα μέτρα πολύ πριν το 2030. Έτσι, τα νέα όρια που θα ισχύσουν από το 2030 είναι σημαντικά χαμηλότερα.

Το όριο 24 ωρών για τα PM_{10} ($50\mu g/m^3$) στην Οδηγία 2008/50/EK επιτρεπόταν να υπερβαίνεται έως 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος. Σύμφωνα με την Οδηγία 2024/2881 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου νέο όριο 24 ωρών για τα σωματίδια PM_{10} ορίζεται τα $45\mu g/m^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές σε

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ένα ημερολογιακό έτος), που αντιστοιχεί σε μείωση 10% στη συγκέντρωση και 49% στις υπερβάσεις). Για τα $PM_{2.5}$ νέο όριο 24 ωρών ορίζονται τα $25\mu g/m^3$ (που δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 18 φορές σε ένα ημερολογιακό έτος). Όσον αφορά το μέσο ετήσιο όρο για τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ ορίζονται τα $20\mu g/m^3$ και $10\mu g/m^3$, αντίστοιχα (Πίνακας 4), που υποχρεώνουν σε μειώσεις των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων της τάξης του 50-60%.

Τα νέα, αυστηρότερα όρια πρέπει να επιτευχθούν σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ έως το 2030. Τα κράτη μέλη έχουν προθεσμία έως τις 11 Δεκεμβρίου 2026 για να ενσωματώσουν την Οδηγία στο εθνικό τους δίκαιο. Η μείωση του ετήσιου ορίου για τα από 25 σε 10 (μείωση κατά 60%) είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς τα λεπτά αυτά σωματίδια, όπως αναφέρεται στην Ειδική Έκθεση για την Αστική ρύπανση στην ΕΕ (σελ. 10), συνδέονται με περίπου 253.000 πρόωρους θανάτους ετησίως στην ΕΕ (Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, 2025).

2.10.2. Κατευθυντήριες Οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για την έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (Π.Ο.Υ.) μείωσε σημαντικά τα συνιστώμενα επίπεδα για τα σωματίδια αυτά σε σύγκριση με τις οδηγίες του 2005 (World Health Organization, 2021). Έτσι, οι νέες κατευθυντήριες οδηγίες του Π.Ο.Υ., που αφορούν τη μακροχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2.5}$ και PM_{10}) έγιναν:

- $PM_{2.5}$: Το ετήσιο όριο μειώθηκε από $10\mu g/m^3$ σε $5\mu g/m^3$ (Μείωση 50%), ενώ το 24ωρο όριο από $25\mu g/m^3$ ορίστηκε στα $15\mu g/m^3$ (Μείωση 40%).
- PM_{10} : Το ετήσιο όριο μειώθηκε από $20\mu g/m^3$ σε $15\mu g/m^3$ (Μείωση 25%), ενώ το 24ωρο όριο ορίστηκε στα $45\mu g/m^3$ (Μείωση 10%).

Έτσι με τεκμηριωμένα στοιχεία γνωρίζουμε ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση και ειδικά από τα αιωρούμενα σωματίδια, βλάπτει την υγεία σε ακόμη χαμηλότερες συγκεντρώσεις από ό,τι πιστευόταν παλαιότερα. Τα $PM_{2.5}$ θεωρούνται τα πιο επικίνδυνα καθώς μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες και στο κυκλοφορικό σύστημα, προκαλώντας καρδιαγγειακές και αναπνευστικές παθήσεις μέχρι και καρκίνο. Η ρύπανση συνδέθηκε πλέον επίσημα και με ασθένειες που δεν

έχουν σχέση με το αναπνευστικό σύστημα, όπως ο διαβήτης τύπου 2, η γνωστική εξασθένιση (άνοια) καθώς και με προβλήματα στην εμβρυϊκή ανάπτυξη. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, από στελέχη του Π.Ο.Υ., αν υπήρχε συμμόρφωση με τα νέα όρια του 2021 θα μπορούσαν να είχαν αποτραπεί σε ποσοστό 80% οι θάνατοι που σχετίζονται με τα PM_{2,5} παγκοσμίως (World Health Organization, 2021). Η συμμόρφωση αυτή υπολογίζεται ότι θα οδηγήσει στη σωτηρία 5 έως 7 εκατομμυρίων ανθρώπων ετησίως από τους συνολικά 7 εκατομμύρια πρόωρους θανάτους που προκαλεί η ατμοσφαιρική ρύπανση στο σύνολο της (WHO, 2021).

Όμως, ερευνητές τονίζουν ότι η Ευρώπη θα δυσκολευτεί πολύ να συμμορφωθεί με τις νέες κατευθυντήριες γραμμές του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.) για την ποιότητα του αέρα που θεσπίστηκε το 2021, ακόμη και με χρονικό ορίζοντα έως το 2050 (Im et al., 2025). Σύμφωνα με το φιλόδοξο σενάριο αυτών των ερευνητών, το 65% των χωρών θα καταφέρει να συμμορφωθεί, μέχρι το 2050, για το στόχο 5μgm⁻³ PM_{2,5}, ενώ με λιγότερο αισιόδοξα σενάρια, μόλις το 10% των χωρών θα μπορέσει να συμμορφωθεί η πλειονότητα των οποίων ανήκει σε σκανδιναβικές χώρες (Φινλανδία, Νορβηγία, Σουηδία) που μπορεί να καταφέρουν να πετύχουν το στόχο. Αντίθετα, η συμμόρφωση με λιγότερο αυστηρές ενδιάμεσες τιμές (π.χ. 10μgm⁻³ ή 15μgm⁻³) είναι πολύ πιο εύκολη για την πλειονότητα των χωρών. Λαμβάνοντας υπόψη τις φυσικές πηγές, η επίτευξη του στόχου απομακρύνεται ακόμη περισσότερο επειδή οι φυσικές πηγές (σκόνη από την έρημο, θαλάσσιο αλάτι) αντιπροσωπεύουν έως και το 50% με 70% των PM_{2,5}, σε κάποιες περιοχές, συγκεντρώσεις που δεν μπορούν να μειωθούν με ανθρώπινες παρεμβάσεις. Όμως, από την άλλη πλευρά, άλλοι ερευνητές θεωρούν ότι η συμμόρφωση με τον Π.Ο.Υ. είναι τεχνικά δυνατή έως το 2030 και αναφέρουν ότι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αγνόησε στα μοντέλα της εξαιρετικά αποτελεσματικά, μη τεχνικά μέτρα, όπως είναι οι Ζώνες Μηδενικών Εκπομπών, η μείωση της κυκλοφορίας οχημάτων στις γειτονιές, η ενίσχυση των μέσων μαζικής μεταφοράς και οι τοπικές απαγορεύσεις καύσης άνθρακα/βιομάζας (Boogaard et al., 2023).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η αξιόπιστη εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, πραγματοποιείται με την εγκατάσταση δικτύων σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στους οποίους είναι εγκαταστημένοι αυτόματοι αναλυτές (όργανα συνεχούς καταγραφής των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων), που λειτουργούν σε συνεχή βάση, καθ' όλο το 24ώρο. Η χωρική τοποθέτηση των σταθμών ελέγχου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα της τοπογραφίας και την ύπαρξη κοντινών πηγών έκλυσης ατμοσφαιρικών ρύπων (ΥΠΕΝ, 2001-2025).

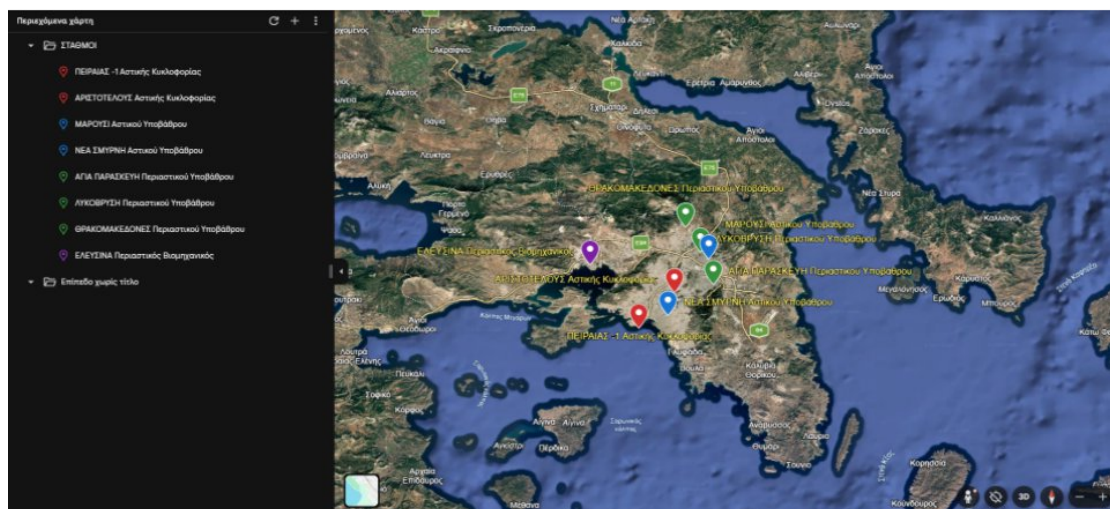
3.1. Σταθμοί αναφοράς στην περιοχή μελέτης

Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις ελληνικές αστικές περιοχές παρακολουθούνται από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), που αποτελεί το επίσημο Δίκτυο της χώρας (Χάρτης 1), για τη συστηματική μέτρηση και έλεγχο της ποιότητας του αέρα και λειτουργεί υπό την ευθύνη της Διεύθυνσης Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας Ατμόσφαιρας, του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Προκειμένου να παρακολουθείται η διαχρονική εξέλιξη των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, απαιτείται η εγκατάσταση δικτύου διαφόρων κατηγοριών σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κατανεμημένων ανάλογα με τις ανάγκες και τα προβλήματα της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του ΥΠΕΝ, διαθέτει πιστοποιημένους σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που καλύπτουν διαφορετικά προφίλ ρύπανσης. Σύμφωνα με την Ετήσια Έκθεση Ποιότητας Ατμόσφαιρας του 2025, του ΥΠΕΝ, στο πλαίσιο του ΕΔΠΑΡ, κατά το έτος 2025, λειτουργούσαν συνολικά 54 σταθμοί ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σ' ολόκληρη την ελληνική επικράτεια, ενώ λειτούργησε δεκατέσσερις σταθμούς μέτρησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή της Αττικής (Χάρτης 2), καθώς και ένα σταθμό στην Αλίαρτο Βοιωτίας (ΥΠΕΝ, 2001-2025). Οι σταθμοί αυτοί καλύπτουν διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος και χαρακτηρίζονται μεταξύ άλλων ως αστικοί κυκλοφορίας, αστικοί υποβάθρου, καθώς και περιαστικοί ή βιομηχανικοί

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

προκειμένου να αποτυπώνονται, τόσο οι άμεσες επιδράσεις της κυκλοφορίας των οχημάτων και της βιομηχανικής δραστηριότητας, όσο και τα γενικότερα επίπεδα αστικού και περιαστικού υποβάθρου (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).



**Χάρτης 1: α) Γεωγραφική κατανομή των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) στην ελληνική επικράτεια (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).
β) Χωρική αποτύπωση και κατηγοριοποίηση των επιλεγμένων σταθμών μέτρησης στην περιφέρεια Αττικής (Google Earth).**

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Στο Χάρτη 1 και στο Χάρτη 2 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, του δικτύου ΕΔΠΑΡ, στην ελληνική επικράτεια και στην Περιφέρεια Αττικής, αντίστοιχα. Έτσι, το δίκτυο των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ προσφέρει ένα σύνολο δεδομένων, από σταθμούς που βρίσκονται σε περιοχές με υψηλή αστική κυκλοφορία, σε βιομηχανικές περιοχές, αλλά και σε περιοχές απομακρυσμένες από τα αστικά κέντρα, αστικού ή περιαστικού υποβάθρου, με αποτέλεσμα να παρέχουν μία συνολική εικόνα για την ποιότητα της ατμόσφαιρας των περιοχών αυτών. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η χωρική κατανομή των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ στον ελλαδικό δείχνει την προσπάθεια γεωγραφικής κάλυψης, τόσο των μεγάλων μητροπολιτικών κέντρων, όσο και επιλεγμένων περιφερειακών περιοχών (ΥΠΕΝ, 2025).

Οι αυτόματοι αναλυτές παρέχουν πρωτογενή δεδομένα σε υψηλή χρονική ανάλυση (ανά λεπτό), τα οποία τυγχάνουν επεξεργασίας για τον υπολογισμό των μέσων ωριαίων τιμών, οι οποίες στη συνέχεια μεταβιβάζονται τηλεμετρικά σε κεντρικό υπολογιστή της Υπηρεσίας.

Οι σταθμοί του δικτύου, όπως προαναφέρθηκε, ταξινομούνται σε συγκεκριμένες κατηγορίες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης και τις κύριες πηγές ρύπανσης που παρακολουθούν:

- **Σταθμοί Αστικής Κυκλοφορίας** (σταθμοί στο κέντρο των αστικών περιοχών, πλησίον οδικών αξόνων με υψηλό φορτό οδικής κυκλοφορίας)
- **Σταθμοί Αστικού Υποβάθρου** (αποτύπωση των γενικών επιπέδων ρύπανσης μακριά από άμεσες εστίες εκπομπών, εντός των αστικών περιοχών)
- **Αστικοί Βιομηχανικοί Σταθμοί** (σταθμοί που βρίσκονται κοντά σε βιομηχανικά κέντρα, σε απόσταση μικρότερη του ενός χιλιομέτρου)
- **Περιαστικοί Βιομηχανικοί Σταθμοί** (σταθμοί που βρίσκονται κοντά σε βιομηχανικά κέντρα, που βρίσκονται στις προαστικές περιοχές)
- **Περιαστικοί Σταθμοί Υποβάθρου** (αποτύπωση των επιπέδων ρύπανσης μακριά από άμεσες εστίες εκπομπών και η απόστασή τους από σημαντικές πηγές ρύπανσης (αστικά κέντρα, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, αυτοκινητόδρομοι) είναι μεγάλη (τουλάχιστον 10km)

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5}, από σταθμούς που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες αστικών σταθμών, της Περιφέρειας Αττικής, του ΕΔΠΑΡ, του ΥΠΕΝ, για τα έτη από 2001 έως το 2025.

Έτσι, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εξετάζονται σταθμοί (Πίνακας 5) με διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Ο σταθμός «**Πειραιάς 1**» (Αστικός Κυκλοφορίας) αποτελεί έναν από τους πλέον επιβαρυσμένους σταθμούς του δικτύου, λόγω της θέσης του πλησίον κεντρικών οδικών αρτηριών και του λιμένα του Πειραιά.
- Ο σταθμός «**Αριστοτέλους**» (Αστικός Κυκλοφορίας) αποτελεί έναν επιβαρυσμένο σταθμό του δικτύου, λόγω της θέσης του πλησίον κεντρικών οδικών αρτηριών στο κέντρο της Αθήνας.
- Οι σταθμοί «**Αγίας Παρασκευής**», «**Λυκόβρυσης**» και «**Θρακομακεδόνες**» (Περιαστικοί Υποβάθρου) λειτουργούν ως σημεία αναφοράς για περιοχές μακριά από άμεσες πηγές ρύπανσης, δηλαδή σε σημαντικές αποστάσεις από άμεσες εστίες εκπομπών, αποτυπώνοντας το επίπεδο του υποβάθρου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Αττική.
- Οι σταθμοί «**Νέας Σμύρνης**» και «**Μαρούσι**» (Αστικοί Υποβάθρου) αποτυπώνουν τα επίπεδα ρύπανσης μακριά από άμεσες εστίες εκπομπών, εντός των αστικών περιοχών και έτσι καταγράφουν τη γενική έκθεση του πληθυσμού εντός του αστικού ιστού, μακριά από μεγάλους κυκλοφοριακούς άξονες.
- Ο σταθμός «**Ελευσίνας**» (Περιαστικός Βιομηχανικός) βρίσκεται εκτός του ευρύτερου αστικού κέντρου, αλλά επηρεάζεται άμεσα από τις βιομηχανικές δραστηριότητες της ευρύτερης περιοχής του Θριασίου Πεδίου.

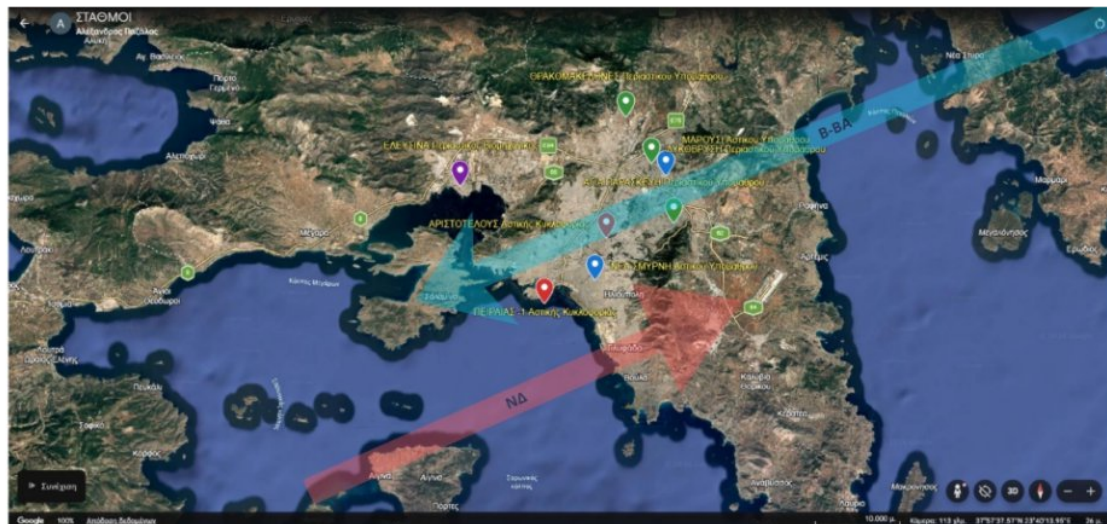
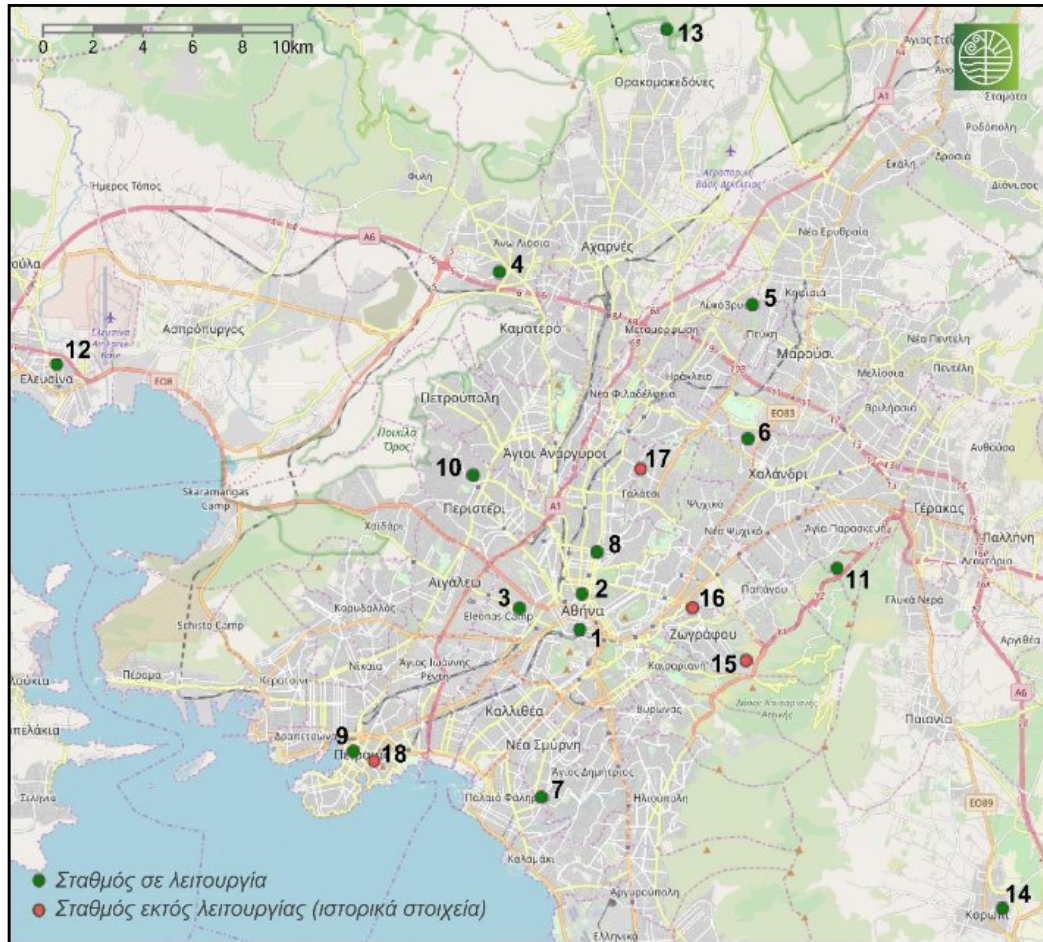
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Πίνακας 5. Σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του δικτύου του ΕΔΠΑΡ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο αριθμός τους στο Χάρτη 2 και ο χαρακτηρισμός τους (ΥΠΕΝ, 2025).

Σταθμός / Θέση στο Χάρτη 2	Χαρακτηρισμός
Αριστοτέλους (2)	Αστικός-Κυκλοφορίας
Πειραιάς-1 (9)	Αστικός-Κυκλοφορίας
Νέα Σμύρνη (7)	Αστικός-Υποβάθρου
Μαρούσι (6)	Αστικός-Υποβάθρου
Ελευσίνα (12)	Περιστατικός-Βιομηχανικός
Λυκόβρυση (5)	Περιστατικός-Υποβάθρου
Θρακομακεδόνες (13)	Περιστατικός-Υποβάθρου
Αγ. Παρασκευή (11)	Περιστατικός-Υποβάθρου

Τα δεδομένα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης των σωματιδιακών ρύπων PM_{10} και $PM_{2,5}$ σε $\mu g/m^3$, για το χρονικό διάστημα από το 2001 έως το 2025. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα δεδομένα του δικτύου του ΥΠΕΝ παρατηρούνται αρκετές ασυνέχειες σε ορισμένους σταθμούς. Οι ελλείψεις αυτές στα δεδομένα, συνήθως οφείλονται σε βλάβες και προβλήματα λειτουργίας των αναλυτών των σταθμών. Στους σταθμούς Νέας Σμύρνης και Μαρούσι τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν μετρήσεις μόνο των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} .

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Χάρτης 2: α) Σταθμοί ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην Περιφέρεια Αττικής (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>).

β) Οι επικρατούσες διευθύνσεις ανέμων στο λεκανοπέδιο της Αττικής (Πηγή Google Earth)

3.2. Μέθοδοι Μέτρησης

Η μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων στο δίκτυο ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ, γίνεται σε συνεχή βάση με **πρότυπες μεθόδους μέτρησης** (ΥΠΕΝ, 2025) και υλοποιείται με τη χρήση αυτόματων αναλυτών, οι οποίοι βασίζονται στις ακόλουθες πρότυπες φυσικοχημικές μεθόδους:

- **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):** Προσδιορίζεται με τη μέθοδο της μη διαφορικής απορρόφησης στο υπέρυθρο (NDIR).
- **Οξείδια του αζώτου (NO, NO₂):** Μέτρηση μέσω της μεθόδου της χημειοφωταύγειας (chemiluminescence).
- **Όζον (O₃):** Προσδιορίζεται με τη μέθοδο της απορρόφησης στο υπεριώδες φάσμα (UV absorption).
- **Διοξείδιο του θείου (SO₂):** Μέτρηση μέσω φθορισμομετρίας στο υπεριώδες (UV fluorescence).
- **Αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀, PM_{2,5}):** Μέτρηση με τη μέθοδο της απορρόφησης β-ακτινοβολίας.
- **Βενζόλιο (C₆H₆):** Προσδιορίζεται με τη μέθοδο της αέριας χρωματογραφίας (GC).
- **Βαρέα μέταλλα & Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες-Βενζο(α)πυρένιο:** Μέτρηση με φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης και αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας (GC-MS).

3.2.1 Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας

Η πρότυπη μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους αυτόματους αναλυτές του ΕΔΠΑΡ για τη συνεχή, 24ωρη παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας (Beta Attenuation Monitoring) (ΥΠΕΝ, 2025). Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στη μέτρηση της μείωσης της έντασης μιας δέσμης ηλεκτρονίων (ακτίνες β) κατά τη δίοδό της μέσα από διηθητικό φίλτρο, διαμορφωμένου σαν κινούμενη ταινία, εξαιτίας της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Καθώς η εξασθένηση της β-ακτινοβολίας είναι ανάλογη της μάζας των κατακρατούμενων από τη φιλτροταινία σωματιδίων, που υπάρχουν στο δειγματοληπτούμενο αέρα, η μέθοδος επιτρέπει τον ακριβή

προσδιορισμό τους (Καμπεξίδης & Ματράλης, 2004). Ουσιαστικά, ο προσδιορισμός της μάζας των σωματιδίων, πραγματοποιείται αφού ποσότητα δειγματοληπτούμενου αέρα διαβιβάζεται διαμέσου κατάλληλα θερμοστατούμενου αγωγού στην κινούμενη φιλτροταινία, που συγκρατεί τα αιωρούμενα σωματίδια. Η φιλτροταινία βρίσκεται μεταξύ μιας ραδιενεργούς πηγής χαμηλής έντασης (συνήθως C 14) και ενός ανιχνευτή (συνήθως Geiger-Muller). Η ραδιενεργός πηγή εκπέμπει β-ακτινοβολία προς τη φορτισμένη με σωματίδια φιλτροταινία που είναι τοποθετημένη απέναντι από τη ραδιενεργό πηγή. Στη συνέχεια, από τη διαφορά της έντασης της β-ακτινοβολίας, που μετράται στον ανιχνευτή, η οποία προκύπτει μεταξύ, της φιλτροταινίας, που έχει συγκρατήσει τα σωματίδια, σε σχέση με την αρχική κατάσταση της καθαρής φιλτροταινίας (η απορροφητική ικανότητα της ταινίας στην β-ακτινοβολία μετριέται πριν πραγματοποιηθεί η διήθηση του δειγματοληπτούμενου αέρα) γίνεται ο προσδιορισμός της μάζας των σωματιδίων του δειγματοληπτούμενου αέρα. Το όργανο, αναλόγως με την κεφαλή, που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό και η οποία τοποθετείται στην είσοδο της διάταξης, επιτρέπει, τη μέτρηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ και των PM_{2,5}. Η διάταξη διαθέτει αντλία και έναν αγωγό ο οποίος μετρά και ελέγχει την ποσότητα ροής του δειγματοληπτούμενου ατμοσφαιρικού αέρα (Καμπεξίδης & Ματράλης, 2004; Κανελλοπούλου, 2015; Κανελλοπούλου κ.ά., 2016). Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην ικανότητα παροχής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time), γιατί είναι μια αυτόματη μέθοδος συνεχούς μέτρησης και προσδιορισμού, της συγκέντρωσης των PM₁₀ και PM_{2,5}, ανά ώρα, στην ατμόσφαιρα (Χαϊνά κ.ά, 2015).

3.2.2 Σταθμική Μέθοδος

Η σταθμική μέθοδος (gravimetric method) αποτελεί πρότυπη μέθοδο αναφοράς (reference method) σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων πάνω σε κατάλληλο διηθητικό φίλτρο, για συνεχές διάστημα 24 ωρών, με τη βοήθεια κατάλληλης αντλίας και αγωγού, η οποία μετρά και ελέγχει την ποσότητα ροής του δειγματοληπτούμενου ατμοσφαιρικού αέρα. Στη συνέχεια ακολουθεί εργαστηριακή ζύγιση του φίλτρου πριν και μετά τη δειγματοληψία του αέρα. Έτσι, από τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που προκύπτει από τη ζύγιση του φίλτρου, πριν και μετά τη δειγματοληψία και το γνωστό όγκο του δειγματοληπτούμενου ατμοσφαιρικού αέρα

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

αέρα προσδιορίζεται η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (Καμπεζίδης & Ματράλης, 2004). Για τη διασφάλιση της μέγιστης αξιοπιστίας, η ζύγιση πραγματοποιείται υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Το φίλτρο πρέπει να θερμαίνεται για να αποφευχθεί η δημιουργία υγρασίας, καθώς η υγρασία αυξάνει την αντίσταση στη ροή διαμέσου του φίλτρου. Η θερμοκρασία θέρμανσης του φίλτρου πρέπει να είναι χαμηλή, όπως και η ταχύτητα ροής του αερίου για να αποφευχθεί η εξάτμιση πτητικών σωματιδίων και ο σχηματισμός χημικών αντιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων καθώς διέρχονται από το φίλτρο. Το όργανο, αναλόγως με την κεφαλή/καλύπτρα, που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό και η οποία τοποθετείται στην είσοδο της διάταξης, επιτρέπει, τη μέτρηση της συγκέντρωσης των PM διαφορετικού μεγέθους. Έτσι, για να μετρήσουμε μόνο τα σωματίδια που εισέρχονται στον πνεύμονα χρησιμοποιείται ειδική καλύπτρα στο φίλτρο που συγκρατεί τα αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 10μm. Το φίλτρο κατασκευάζεται συνήθως από ίνες γυαλιού. Σπανιότερα μπορούμε να βρούμε φίλτρο κατασκευασμένο από χαρτί ή πολυμερικές μεμβράνες (Καμπεζίδης & Ματράλης, 2004). Λόγω της υψηλής της ακρίβειας, οι τιμές της σταθμικής μεθόδου χρησιμοποιούνται και για τη βαθμονόμηση και την επαλήθευση των αυτόματων αναλυτών β-ακτινοβολίας.

3.2.3. Πρωτόκολλο Δειγματοληψίας και Διαδικασία Βαθμονόμησης

Η διασφάλιση της ποιότητας και η εγκυρότητα των λαμβανομένων μετρήσεων του δικτύου βασίζονται στην εφαρμογή αυστηρών πρωτοκόλλων τακτικής βαθμονόμησης (calibration) των οργάνων. Για τη βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης των αερίων ρύπων, χρησιμοποιείται ειδική διάταξη δυναμικής αραίωσης, η οποία αναμιγνύει φιλτραρισμένο «καθαρό» αέρα με πρότυπα αέρια γνωστής συγκέντρωσης από φιάλες αναφοράς. Με τη μεταβολή της αναλογίας των δύο ροών, δημιουργούνται πρότυπα μείγματα ακριβείας για τον έλεγχο και τη ρύθμιση της γραμμικότητας των αναλυτών (ΥΠΕΝ, 2025).

Ειδικά για τη βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, με τη μέθοδο της απορρόφησης της β-ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται διάταξη από πρότυπα δείγματα (μεμβράνες) γνωστής μάζας. Για τη βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, με τη σταθμική μέθοδο, το επιχειρησιακό πρωτόκολλο για τον

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

προσδιορισμό του κλάσματος των σωματιδίων PM_{10} περιλαμβάνει τη δειγματοληψία σε φίλτρα χαλαζία ή Teflon και τη χρήση ημιαυτόματου δειγματολήπτη χαμηλού όγκου (Low Volume Sampler - LVS) (ΥΠΕΝ, 2025).

Η δειγματοληψία και η εργαστηριακή ανάλυση εναρμονίζονται πλήρως με τη μέθοδο αναφοράς που περιγράφεται στο πρότυπο της οδηγίας 2008/50. Μέσω της παράλληλης λειτουργίας των αυτόματων οργάνων και των διατάξεων LVS, εξάγονται οι 24ωρες μέσες τιμές με τη μέγιστη επιστημονική εγκυρότητα. Σε περίπτωση εντοπισμού συστηματικών αποκλίσεων μεταξύ της αυτοματοποιημένης καταγραφής και της σταθμικής μεθόδου αναφοράς, εισάγονται οι κατάλληλοι διορθωτικοί συντελεστές, για τη βελτιστοποίηση της ακρίβειας των μελλοντικών μετρήσεων (ΥΠΕΝ, 2025).

3.3. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Για τον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από βιομηχανικές δραστηριότητες, όπως η παραγωγή ενέργειας, η εξόρυξη και η τσιμεντοβιομηχανία, κρίνεται απαραίτητη η χρήση εξειδικευμένων τεχνολογιών κατακράτησης σωματιδίων. Τα συστήματα αυτά είναι ειδικές εγκαταστάσεις και συστήματα διαχωρισμού σωματιδίων-αερίων που χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό βιομηχανικών αερίων από σωματιδιακούς ρύπους. Τα βιομηχανικά αερία περιέχουν σωματίδια τα οποία είναι μικρότερα των 100 μm . Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι οι κυκλώνες, τα ηλεκτροστατικά φίλτρα τα σακόφιλτρα και οι πλυντρίδες (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004). Ειδικότερα, οι κυκλώνες και οι μηχανικοί συλλέκτες είναι χαμηλού κόστους και χρησιμοποιούν τη φυγοκέντρωση ή τις βαρυτικές δυνάμεις για την παγίδευση των μεγαλύτερων σωματιδίων, όπως τα PM_{10} . Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, που αξιοποιούν τον ιονισμό και ηλεκτρικά πεδία, και τα σακόφιλτρα, που βασίζονται στη φυσική διήθηση μέσω υφάσματος θεωρούνται εξαιρετικά αποτελεσματικά στη κατακράτηση των μικρών σωματιδίων και κυρίως των λεπτόκοκκων. Η εύρεση του κατάλληλου φίλτρου όμως για την επιλογή δεν βασίζεται μόνο στην αποδοτικότητα του αλλά και στο συνολικό κόστος του κύκλου ζωής του φίλτρου, αλλά και στην ικανότητα των συστημάτων να ενσωματώνουν “έξυπνους αισθητήρες” για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (real time) (Venkatesh et al., 2026). Γενικά, για την επιλογή της κατάλληλης

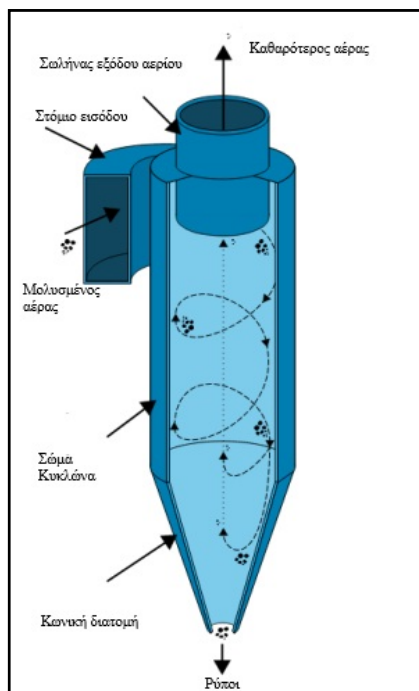
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

τεχνολογίας αντιρύπανσης πρέπει να ληφθούν υπόψιν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου (Πίνακας 6) και διάφοροι παράγοντες, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, οι φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων, η σύσταση και η συγκέντρωσή τους, η θερμοκρασία τα χαρακτηριστικά (πχ αν είναι αδρανές ή διαβρωτικό, η διαλυτότητα στο νερό, κλπ) και η ογκομετρική παροχή του αέριου ρεύματος, η απαιτούμενη ποιότητα του καθαρισμένου αερίου, κλπ. (Βερύκιος, 2003).

3.3.1. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων. Θάλαμοι κατακάθισης-Κυκλώνες

Οι θάλαμοι κατακάθισης και οι κυκλώνες είναι όργανα που οδηγούν τα σωματίδια προς κάποια επιφάνεια συλλογής, χρησιμοποιώντας είτε τη δύναμη της βαρύτητας είτε τη φυγόκεντρο δύναμη, που είναι δυνάμεις μικρής έντασης (μέθοδοι διαχωρισμού αδρανείας) και έτσι σωματίδια $< 10 \mu\text{m}$ δεν απομακρύνονται από το αέριο ρεύμα. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται στην απομάκρυνση σωματιδιακών ρύπων σχετικά μεγάλου μεγέθους, ενώ η απόδοση τους είναι μικρή έως μέτρια (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004).

Οι θάλαμοι κατακάθισης είναι εγκαταστάσεις διαχωρισμού σωματιδίων-αερίων με τη μέθοδο της κατακάθισης με τη βαρύτητα. Οι θάλαμοι κατακάθισης, αποτελούνται από μεγάλους θαλάμους, στους οποίους εισέρχεται το αέριο ρεύμα με μικρή ταχύτητα (1-3 m/s). Καθώς το αέριο κινείται οριζόντια, τα σωματίδια λόγω της βαρύτητας κατακάθονται στον πυθμένα. Πρόκειται για μια πολύ απλή συσκευή, η οποία απαιτεί χειρωνακτικό καθαρισμό σε τακτά χρονικά διαστήματα, χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση και συνήθως χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες οι οποίες παράγουν απαέρια βεβαρημένα με μεγάλα σωματίδια (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004).



Εικόνα 4. Διάγραμμα ροής ενός κυκλώνα.
(https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator)

Οι διαχωριστές τύπου κυκλώνα αποτελούν μία από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς έχουν μικρό κόστος, δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη και μπορούν να αντέχουν σε δύσκολες συνθήκες λειτουργίας (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004). Οι κυκλώνες αποτελούν όργανα καθαρισμού αερίων από τα σωματίδια, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στη φυγόκεντρο δύναμη, που αναπτύσσεται από περιστρεφόμενο αέριο ρεύμα. Καθώς το αέριο, μέσω ενός αγωγού στην κορυφή του κυκλώνα, εισέρχεται εφαπτομενικά στο κυλινδρικό σώμα του κυκλώνα, δημιουργείται μια διπλή δίνη (). Η εξωτερική δίνη σπρώχνει τα σωματίδια στα τοιχώματα λόγω αδράνειας, ενώ ταυτόχρονα κινείται προς τα κάτω. Εξαιτίας της τριβής τα σωματίδια χάνουν ταχύτητα και πέφτουν στο κώνο συλλογής, από τον οποίο αποσύρονται. Το καθαρό αέριο σχηματίζει μια εσωτερική δίνη και εξέρχεται από το πάνω μέρος του κυκλώνα (Βερύκιος, 2003).

Οι κυκλώνες είναι αποτελεσματικοί για τα μεγάλα σωματίδια ($>10 \mu\text{m}$) ενώ η απόδοση τους μειώνεται σημαντικά για τα μικρότερα σωματίδια ($<5 \mu\text{m}$). Υψηλότερη ταχύτητα εισόδου του αέρα που φέρει σωματίδια σημαίνει καλύτερη συλλογή, αλλά

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

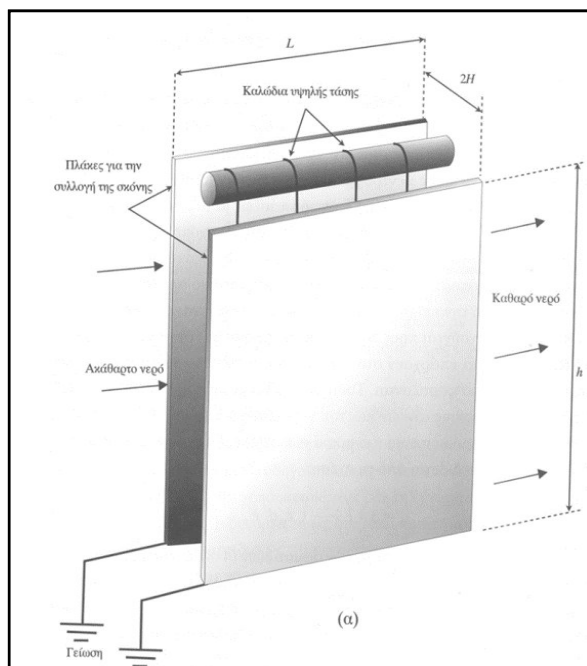
και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Οι κυκλώνες έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης ενώ παρουσιάζουν αντοχή σε συνθήκες ακραίων θερμοκρασιών και πίεσης, δίχως να περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη. Από την άλλη πλευρά, έχουν χαμηλή απόδοση στα λεπτά σωματίδια και αν η εισερχόμενη σκόνη είναι σκληρή μπορεί να οδηγήσει στη διάβρωση τους (Cooper & Alley, 2004).

3.3.2. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων. Ηλεκτροστατικά Φίλτρα

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (Electrostatic Precipitators - ESPs) είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες για τον έλεγχο των λεπτών σωματιδίων. Τα σωματίδια μπορούν να είναι ξηρά ή υγρά σωματίδια. Τα ηλεκτρόφιλτρα ή ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστήρες διαχωρίζουν μικρά σωματίδια από αέρια ρεύματα χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Ο συνηθέστερος σχεδιασμός ηλεκτρικού κατακρημνιστήρα, είναι αυτός που αποτελείται από σειρές παράλληλων πλακών, ανάμεσα στις οποίες υπάρχουν συρμάτινα ηλεκτρόδια, τα οποία είναι τοποθετημένα μεταξύ των πλακών και στα οποία εφαρμόζεται υψηλή τάση 20-60kV (Εικόνα 5) (Βερύκιος, 2003). Η μεγάλη διαφορά τάσεως μεταξύ των ηλεκτροδίων, προκαλεί τη ροή των ηλεκτρονίων από το ηλεκτρόδιο στο διερχόμενο αέριο. Τα ηλεκτρόνια ενσωματώνονται στα μόρια του αερίου, παράγοντας αρνητικά ιόντα, κάτι που είναι εμφανές από τον σχηματισμό αρνητικής εκκένωσης (corona). Υπό την επήρεια των μεγάλων ηλεκτροστατικών δυνάμεων, τα αρνητικά ιόντα κινούνται προς τις γειωμένες πλάκες και συγκρούονται με τα σωματίδια που υπάρχουν στο αέριο, με αποτέλεσμα τα σωματίδια να φορτίζονται. Τα φορτισμένα σωματίδια στη συνέχεια έλκονται και προσκολλώνται σε πλάκες συλλογής, που είναι φορτισμένες με αντίθετο φορτίο. Τα σωματίδια απομακρύνονται από τις πλάκες (συνήθως με μηχανική κρούση – δόνηση) και πέφτουν σε κάδους συλλογής. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα μπορούν να συλλέξουν πολύ μικρά σωματίδια (1 μm) με απόδοση που συχνά υπερβαίνει το 99%. Επειδή η αντίσταση στη ορμή του αέρα είναι μικρή, μειώνεται το ενεργειακό κόστος λειτουργίας τους. Έχουν την αντοχή να διαχειριστούν πολύ μεγάλους όγκους αερίων σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν τα σωματίδια έχουν πολύ πολύ υψηλή αντίσταση (π.χ. χαμηλό θείο στα καυσαέρια), τα σωματίδια δεν αποφορτίζονται εύκολα, μειώνοντας την απόδοση του συστήματος. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, όπως σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

(για την ιπτάμενη τέφρα), σε τσιμεντοβιομηχανίες και στα χαλυβουργεία (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004).



Εικόνα 5. Διάταξη ηλεκτροστατικού φίλτρου. (Βερύκιος, 2003).

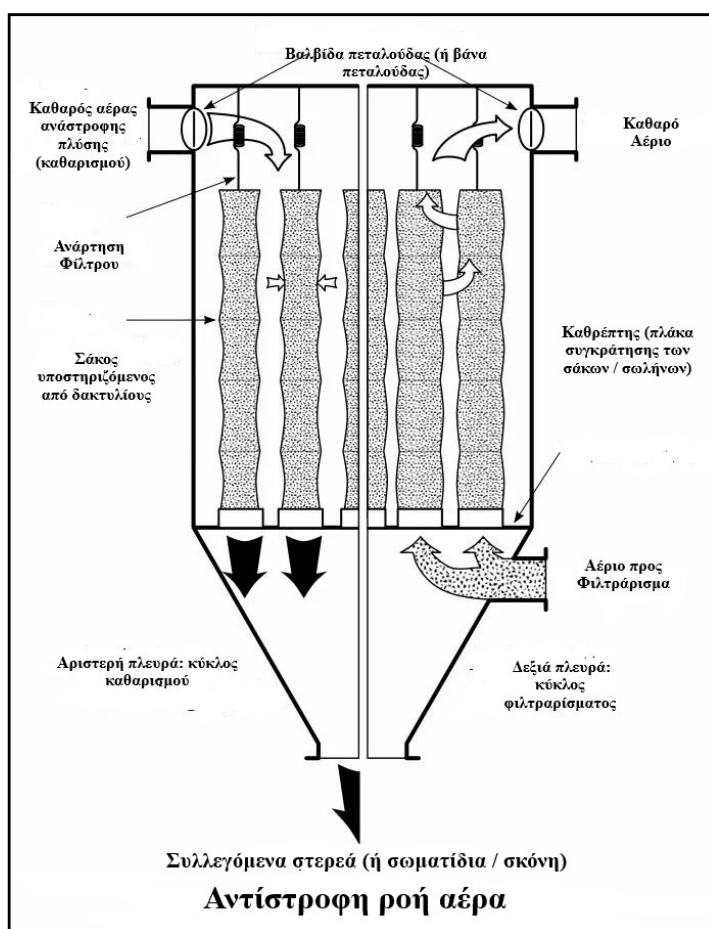
3.3.3. Κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων. Σακκόφιλτρα

Η διήθηση αερίων είναι μια από τις πιο παλιές μεθόδους διαχωρισμού σωματιδίων από αέρια ρεύματα και έχουν εφαρμοστεί περισσότερο από οτιδήποτε άλλο σε βιομηχανικές εφαρμογές, με χρήση φίλτρων. Τα φίλτρα είναι πορώδεις δομές συνήθως από ινώδη (υφαντά) μέσα ή πορώδη υλικά, που τείνουν να συγκρατούν τα σωματίδια, καθώς το αέριο διέρχεται από αυτά. Έτσι, τα σακκόφιλτρα αποτελούν μια μέθοδο ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τη χρήση υφάσματος και χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό σωματιδίων από βιομηχανικά αερία (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004).

Τα σακκόφιλτρα (Fabric Filters ή Baghouses) είναι μια από τις πιο αξιόπιστες και αποδοτικές μεθόδους για το διαχωρισμό ξηρών σωματιδίων από ένα ρεύμα αερίου, ειδικά όταν απαιτείται πολύ υψηλή απόδοση σε μικρά μεγέθη σωματιδίων. Η συλλογή των σωματιδίων δεν γίνεται μόνο από το ίδιο το ύφασμα, αλλά κυρίως από το στρώμα σωματιδίων (cake), που δημιουργείται πάνω στην επιφάνειά του

υφάσματος. Λόγω αυτού του μηχανισμού της διήθησης, η απόδοση του φίλτρου αυξάνει με το χρόνο, καθώς αυξάνει το πάχος του cake. Το καθαρισμένο αέριο ρεύμα ρέει από την άλλη πλευρά του φίλτρου (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004). Οι σάκκοι μπορούν να καθαρίζονται με μηχανική δόνηση, στην οποία τινάζονται περιοδικά, με χαμηλής πίεσης αέρα, που φυσάει με αντίστροφη ροή. Η πιο διαδεδομένη σύγχρονη όμως μέθοδος είναι η παλμική δόνηση κατά την οποία σύντομοι παλμοί πεπιεσμένου αέρα υψηλής πίεσης, καθαρίζουν τους σάκους ενώ το φίλτρο είναι σε λειτουργία (Cooper & Alley, 2004).

Τα υφασμάτινα φίλτρα μπορούν να είναι πολλών ειδών, να έχουν διαφορετικούς τρόπους ύφανσης και διάφορα μεγέθη σάκων, συνήθως όμως έχουν μορφή κυλινδρικών σωλήνων και επικρέμονται σε πολλαπλές σειρές (Εικόνα 6), φτάνοντας σε αποδόσεις μεταξύ 99-99,99% (Βερύκιος, 2003). Στις βιομηχανικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται σακόφιλτρα που αποτελούνται από σάκους διαμέτρου 10-20cm, μήκους 2-5m και συνολικής διηθητικής επιφάνειας του κάθε θαλάμου που κυμαίνεται μεταξύ 100-200m² (Βερύκιος, 2003).



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Εικόνα 6. Διάταξη σακόφιλτρων.
<https://torch-air.com/blog/baghouse-filter-advantages-and-disadvantages>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα τεχνολογιών αντιρύπανσης (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004).

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σακκόφιλτρα	Υψηλή απόδοση, της τάξης 99% (ακόμα και σε πολύ μικρά σωματίδια)	Απαίτηση μεγάλων επιφανειών δαπέδου έδρασης
	Δυνατότητα χρήσης τους για μεγάλο εύρος ογκομετρικής παροχής	Δυνατότητα ζημίας υφασμάτων σακκόφιλτρων λόγω διαβρωτικών μέσων ή λόγω υψηλής θερμοκρασίας
	Λειτουργούν για ένα μεγάλο εύρος από είδη σωματιδίων	Κίνδυνος πυρκαγιάς και εκρήξεων
	Απαιτούν χαμηλές πιέσεις πίεσης και όχι υπερβολικές απαιτήσεις ισχύος	Δυσκολία στην επεξεργασία υδροσκοπικών υλικών, καθώς δημιουργούνται προβλήματα στον καθαρισμό των φίλτρων
	Ευελιξία σχεδιασμού καθώς υπάρχει ποικιλία φίλτρων και μεθόδων καθαρισμού. Δυνατότητα συναρμολόγησης στη μονάδα	
Κυκλώνες	Χαμηλό κόστος κατασκευής – απλή κατασκευή	Χαμηλή απόδοση (ειδικά σε πολύ μικρά σωματίδια)
	Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες	Υψηλό κόστος λειτουργίας, εξαιτίας της υψηλής πτώσης πίεσης
	Χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης	Μεγάλη κατασκευή που καταλαμβάνει πολύ χώρο
	Η απομάκρυνση και διάθεση του συσσωρευμένου σωματιδιακού υλικού είναι εύκολη	Πολλές φορές πρέπει να συνδυαστούν με άλλες συσκευές καθαρισμού αερίων
Ηλεκτρόφιλτρα	Υψηλή απόδοση, της τάξης 90-99% (ακόμα και σε πολύ μικρά σωματίδια τάξης μεγέθους 1mm)	Υψηλό κόστος εγκατάστασης για εργασίες μικρής δυναμικότητας
	Χαμηλό κόστος λειτουργίας – μικρή κατανάλωση ενέργειας	Απαραίτητη η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης – Η χρήση υψηλής τάσης απαιτεί προστατευτικά μέτρα
	Δυνατότητα λειτουργίας για αέρια υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης - Επεξεργασία μεγάλου όγκου αερίων	Καταλαμβάνουν πολύ χώρο
Πλυντηρίδες	Μικρή απαίτηση χώρου – Μικρό κατασκευαστικό κόστος και σχετικά χαμηλή συντήρηση	Ευαισθησία στη διάβρωση – Τα λύματα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία
	Υψηλή απόδοση συλλογής – Ικανότητα συλλογής αερίων και σωματιδιακών ρύπων	Υψηλή απαίτηση σε ισχύ

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

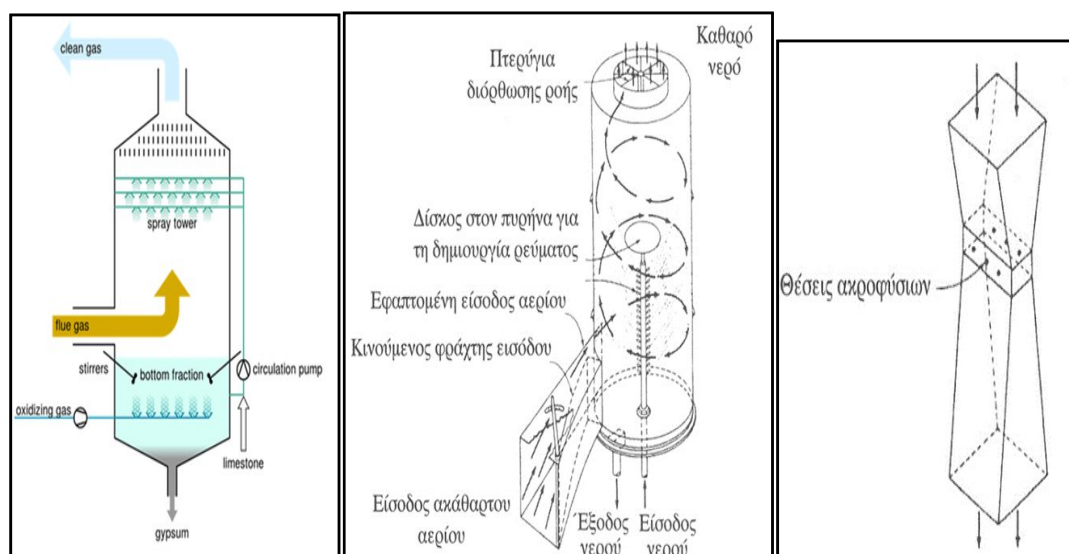
	Απαίτηση μικρότερων εξαρτημάτων	Απαιτεί πολύ χαμηλή πτώση πίεσης γεγονός που αυξάνει το κόστος
	Δυνατότητα επεξεργασίας αερίων σε υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία (χωρίς συμπυκνώσεις που εμφανίζονται κατά τη χρήση σακκόφιλτρων)	Τα συλλεγόμενα σωματίδια είναι σε μορφή λάσπης και μπορεί να είναι ρυπασμένα και να μην ανακυκλώνονται
	Δεν δημιουργούν δευτερογενείς πηγές σκόνης	Ειδική διαχείριση νερού που συνεπάγεται επιπλέον κόστος
	Ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος φωτιάς ή εκρήξεων	Η διάθεση της λάσπης μπορεί να είναι ακριβή

Τα σακόφιλτρα μπορούν να απομακρύνουν ένα μεγάλο εύρος ειδών σωματιδίων με πολύ υψηλές αποδόσεις συλλογής, ακόμη και για τα πολύ μικρά σωματίδια. Απαιτούν σχετικά χαμηλές πτώσεις πίεσης και μπορούν να λειτουργήσουν σ' ένα εξαιρετικά εκτεταμένο εύρος ογκομετρικών παροχών. Στα μειονεκτήματά τους είναι ο μεγάλος όγκος της εγκατάστασης, η ευαισθησία τους σε υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία και η ανάγκη τακτικής αντικατάστασης των σάκων (Cooper & Alley, 2004).

3.3.4 Κύριες Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων. Πλυντρίδες

Οι πλυντρίδες (Wet Scrubbers) είναι συστήματα που απομακρύνουν ταυτόχρονα σωματίδια και αέριους ρύπους χρησιμοποιώντας ένα υγρό συλλογής (συνήθως νερό). Τα πλυντήρια είναι εγκαταστάσεις στις οποίες βιομηχανικά αέρια που περιέχουν μικρά σωματίδια έρχονται σε επαφή με σταγόνες νερού, στις οποίες μεταφέρονται τα σωματίδια από το αέριο ρεύμα, είτε με πρόσκρουση, είτε με διάχυση (Βερύκιος, 2003). Η πρόσκρουση είναι ο βασικότερος μηχανισμός για σωματίδια $> 1 \mu\text{m}$, ενώ η διάχυση είναι σημαντική μόνο για τα πολύ μικρά σωματίδια ($< 0.1 \mu\text{m}$). Οι πλυντρίδες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικούς τύπους: στους πύργους καταιονισμού, στους υγρούς κυκλώνες και στα πλυντήρια τύπου Venturi (Εικόνα 7) (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004). Οι πύργοι καταιονισμού είναι οι πιο απλές συσκευές αυτού του είδους. Το αέριο ρεύμα που περιέχει τα σωματίδια εισέρχεται στον πυθμένα του πύργου και ρέει προς τα πάνω. Τα σωματίδια συγκρούονται με τις σταγόνες οι οποίες παράγονται από ακροφύσια τοποθετημένα κατά την κατεύθυνση της ροής του αερίου. Εάν η ροή του αερίου είναι σχετικά χαμηλή, τα σταγονίδια

επικάθονται λόγω βαρύτητας και εξέρχονται από το πυθμένα του πύργου (Βερύκιος, 2003). Οι πιο αποδοτικές πλυντρίδες για τα λεπτά σωματίδια είναι οι Πλυντρίδες Venturi (Venturi Scrubbers). Στα πλυντήρια τύπου Venturi τα αέρια εισέρχονται με μεγάλη ταχύτητα σε κατακόρυφο σωλήνα Venturi, στο στένεμα του οποίου εισάγεται το νερό με ακροφύσια. Στο σημείο αυτό η ταχύτητα του αερίου είναι μεγάλη και βεβαίως το ίδιο μεγάλη είναι η ταχύτητα των σωματιδίων τα οποία προσκρούουν στις σταγόνες του νερού.



Εικόνα 7. Διατάξεις πλυντρίδων.

(α) Πύργος καταιονισμού (β) υγρός κυκλώνας και (γ) Πλυντρίδα Venturi
(https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wet_scrubber; Βερύκιος 2003)

Για τα μεγάλα σωματίδια χρησιμοποιούνται συνήθως οι υγροί κυκλώνες-πύργοι ψεκασμού (Spray Towers). Οι υγροί κυκλώνες είναι παρόμοιοι με τους κλασικούς κυκλώνες, μόνο που τώρα ακροφύσια εισάγουν σταγόνες νερού, οι οποίες συλλέγουν τα σωματίδια στην εξωτερική δύνη και κατόπιν προσκρούουν στα τοιχώματα του κυκλώνα. Το υγρό, το οποίο περιέχει και τα σωματίδια, ρέει στο τοίχωμα του κυκλώνα και συλλέγεται στον πυθμένα. Το νερό συνήθως εισάγεται από πολλαπλά ακροφύσια στο κέντρο του κυκλώνα, τα οποία το εκτοξεύουν ακτινικά προς τα έξω (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004). Με τις πλυντρίδες, έχουμε μικρό κίνδυνο πυρκαγιάς ή έκρηξης, καλή διαχείριση θερμών και υγρών αερίων καθώς και εξουδετέρωση διαβρωτικών αερίων. Από την άλλη όμως πλευρά, παράγονται υγρά απόβλητα (λάσπη) που απαιτούν επεξεργασία και εγκυμονούν κίνδυνο διάβρωσης του εξοπλισμού. Επίσης, αν απαιτείται υψηλή απόδοση το κόστος λειτουργίας είναι υψηλό (Cooper & Alley, 2004).

3.4 Τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων από τα πετρελαιοκίνητα οχήματα.

Μια από τις πιο χρήσιμες εφευρέσεις της ανθρωπότητας, που είχε το μεγαλύτερο αντίκτυπο στην κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον, είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης των οχημάτων. Τα αυτοκίνητα αποτελούν μία σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κυρίως στα μεγάλα αστικά κέντρα. Τα κυριότερα υγρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σ' αυτές είναι η βενζίνη στους βενζινοκινητήρες και το πετρέλαιο, στους πετρελαιοκινητήρες. Οι κυριότεροι ρύποι οι οποίοι παράγονται και εκπέμπονται από βενζινοκινητήρες είναι το CO, οι υδρογονάνθρακες και τα NO_x. Οι εκπομπές των κινητήρων diesel είναι πιο πολύπλοκες από αυτές των βενζινοκινητήρων. Οι μηχανές diesel εκπέμπουν και στις τρεις φάσεις: στερεά, υγρά και αέρια. Τα στερεά και υγρά είναι τα γνωστά μας αιωρούμενα σωματίδια, ενώ η αέρια φάση περιλαμβάνει υδρογονάνθρακες, CO, NO_x και SO₂ (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004; Seinfeld & Pandis, 2006).

Επομένως, όσον αφορά τις εκπομπές σωματιδίων από οχήματα αυτά οφείλονται μόνο στα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνολογίες για την μείωση των εκπεμπόμενων σωματιδιακών ρύπων από τους πετρελαιοκινητήρες και την προστασία του αστικού περιβάλλοντος. Τα φίλτρα σωματιδίων αιθάλης (DPF), σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής, κλπ, αποτελούν τεχνολογίες αντιρύπανσης που χαρακτηρίζουν αυτούς τους κινητήρες, που χρησιμοποιούνται ανάλογα για την προσαρμογή στις ευρωπαϊκές προδιαγραφές καυσαερίων (Euro), που είναι τα όρια που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τους ρύπους, που επιτρέπεται να εκπέμπουν τα οχήματα.

Τα φίλτρα σωματιδίων (Diesel Particulate Filters) ή παγίδες αιθάλης ή φίλτρα αιθάλης, είναι η πιο κοινή εγκεκριμένη τεχνολογία για τη μείωση των σωματιδίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από τα πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα, η οποία μπορεί να πετύχει φιλτράρισμα σε ποσοστό πάνω από 90%, για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας της μηχανής (Ψαθάς 2015). Πιο συγκεκριμένα, λόγω του μηχανισμού που χρησιμοποιείται για την κατακράτηση των σωματιδίων, τα φίλτρα είναι αποτελεσματικά στον έλεγχο του στερεού κλάσματος των σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένου του στοιχειακού άνθρακα (αιθάλη) και του εκπεμπόμενου

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

μαύρου καπνού. Όμως, μπορεί να έχουν περιορισμένη ή και μηδενική απόδοση στον έλεγχο του μη στερεού κλάσματος των σωματιδίων, το οποίο σχηματίζεται μετά το φίλτρο και όταν τα καυσαέρια αρχίζουν και ψύχονται. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μαζί με οξειδωτικό καταλύτη και με σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR), ή παγίδες οξειδίων του αζώτου. Όλα τα φίλτρα είναι σχεδιασμένα να κατακρατούν μια συγκεκριμένη ποσότητα αιθάλης. Αν το φίλτρο υπερφορτωθεί, τα σωματίδια δημιουργούν ένα εμπόδιο στη ροή των καυσαερίων, με αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσης πίεσης και το βούλωμα του φίλτρου. Ως εκ τούτου, πρέπει να υπάρχουν αξιόπιστοι μηχανισμοί αναγέννησης για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας των φίλτρων. Για την αναγέννηση των φίλτρων σωματιδίων πρέπει η θερμοκρασία των καυσαερίων να φτάσει τους 550-650°C, κάτι που δε συμβαίνει συχνά, παρά μόνο όταν η μηχανή λειτουργεί με πλήρες φορτίο. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι αναγέννησης, οι οποίες διακρίνονται σε παθητικές ή ενεργητικές, καθώς και σε συνδυαστικές των δυο αυτών μεθόδων. Οι παθητικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τη τεχνική μείωσης της θερμοκρασίας ισορροπίας και οι ενεργητικές την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων (Ψαθάς 2015). Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να αναπτυχθούν καταλυτικά υλικά τα οποία θα μειώσουν την θερμοκρασία καύσης της αιθάλης, ώστε η αναγέννηση της να γίνεται συνεχώς. Αν και έχει επιτευχθεί κάποια πρόοδος, ακόμα δεν έχουν αναπτυχθεί εμπορικά ολοκληρωμένες αναγεννώμενες παγίδες αιθάλης. Τέλος, πρέπει να αναπτυχθούν από την πολιτεία γενικότερα μέτρα για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα οχήματα, όπως προγράμματα επιθεωρήσεων και συντήρησης, μέτρα ελέγχου των μεταφορών και τεχνικές διαχείρισης της κυκλοφορίας, αλλαγές και βελτιώσεις στην τεχνολογία καυσίμων και οχημάτων, κλπ (Βερύκιος, 2003; Cooper & Alley, 2004; Seinfeld & Pandis, 2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ PM_{10} και $PM_{2,5}$ ΣΤΟ ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση των μεταβολών των συγκεντρώσεων σημαντικών δεικτών σωματιδιακής ρύπανσης, δηλαδή των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, οι οποίοι θεωρούνται αντιπροσωπευτικοί της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, για την περίοδο 2001-2025. Η ανάλυση βασίζεται σε χρονοσειρές συγκεντρώσεων, με δεδομένα από αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης του ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ, οι οποίοι επιλέχθηκαν βάσει επάρκειας και διαθεσιμότητας δεδομένων και αντιπροσωπευτικότητας διαφορετικών τύπων σταθμών, σε σχέση με τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά (αστικός -κυκλοφορίας, αστικός - υποβάθρου, περιαστικός - βιομηχανικός, περιαστικός - υποβάθρου) και τη γεωγραφική τους θέση (εγγύτητά τους σε πηγές εκπομπής), εξασφαλίζοντας, όσο το δυνατόν, αντιπροσωπευτική απεικόνιση της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (ΥΠΕΝ, 2025).

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις των εγκατεστημένων σταθμών του ΕΔΠΑΡ, όπως αναρτώνται στην επίσημη ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ (<https://ypen.gov.gr>). Έτσι, έγινε προσπάθεια πραγματοποίησης μελέτης της διαχρονικής εξέλιξης της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συγκεκριμένα διερευνώνται οι ετήσιες, εποχικές και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, για την περίοδο 2001-2025. Σε κάθε υποενότητα παρουσιάζεται η εξέλιξη των επιπέδων των συγκεντρώσεων, ανά ατμοσφαιρικό ρύπο και σταθμό, ώστε να αποτυπώνεται, όσο το δυνατόν καλύτερα, η μεταβολή των συγκεντρώσεων στην περίοδο μελέτης.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Τα δεδομένα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης των σωματιδιακών ρύπων PM_{10} και $PM_{2,5}$ σε $\mu g/m^3$ για το χρονικό διάστημα από το 2001 έως το 2025. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα δεδομένα του δικτύου του ΥΠΕΝ παρατηρούνται αρκετές ασυνέχειες σε ορισμένους σταθμούς και μάλιστα πολλές φορές σε περισσότερα του ενός ετών. Οι ελλείψεις αυτές στα δεδομένα, συνήθως οφείλονται σε βλάβες και προβλήματα λειτουργίας των αναλυτών των σταθμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζονται διάφορες ασυνέχειες στα διαγράμματα, που έχουν δημιουργηθεί μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων και να προκύπτουν δυσκολίες στην εξαγωγή συμπερασμάτων.

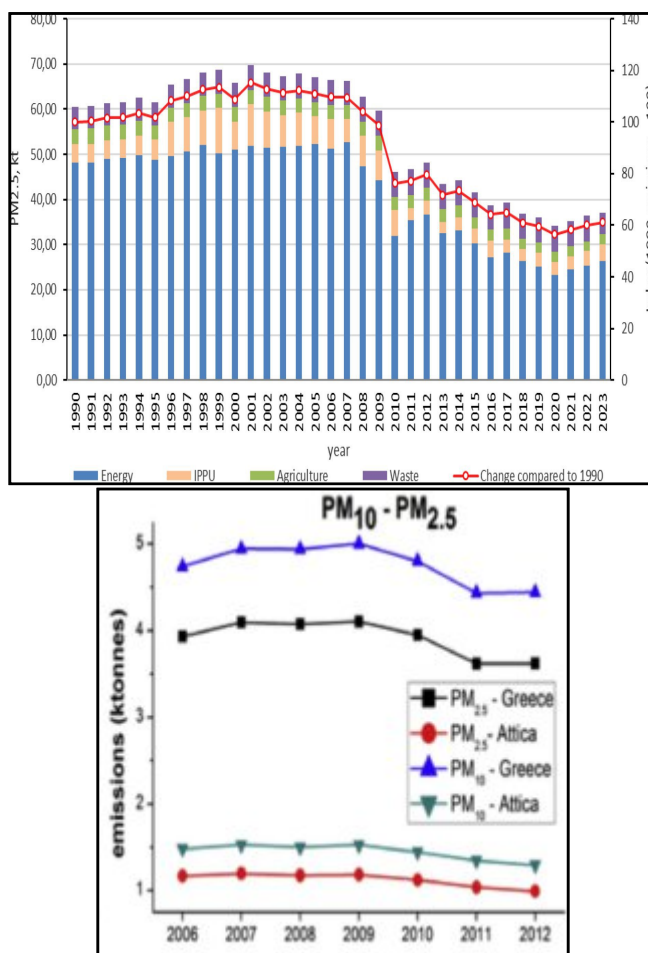
4.1 Χαρακτηριστικά και πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας

Η πληθυσμιακή αύξηση και η επέκταση του αστικού ιστού οδήγησαν σε σημαντική χωρική ανάπτυξη της αστικής περιοχής της Αττικής. Χαρακτηριστικό της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, είναι η πολυσύνθετη τοπογραφία, η οποία περιλαμβάνει το λεκανοπέδιο της Αθήνας, εντός του οποίου λαμβάνουν χώρα αστικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Το λεκανοπέδιο περικυκλώνεται από το όρος Υμηττός στα ανατολικά, το όρος Πεντέλη στα βόρεια, το όρος Πάρνηθα στα δυτικά και το Σαρωνικό κόλπο στα νότια. Στα δυτικά του λεκανοπεδίου της Αθήνας, βρίσκεται το Θριάσιο Πεδίο (κυρίως βιομηχανικές δραστηριότητες) και στα ανατολικά τα Μεσόγεια (ύπαιθρος και προάστια με ταχεία εξέλιξη λόγω των έργων υποδομής όπως οι νέοι αυτοκινητόδρομοι και το Διεθνές Αεροδρόμιο της Αθήνας) (Kassomenos et al., 1994; Παρταλίδου, 2018). Οπότε, είναι φανερό ότι λόγω της πολύπλοκης τοπογραφίας και της μεγάλης πυκνότητας των υψηλών κτηρίων προκύπτει ιδιαίτερη δυσκολία, όσον αφορά τη διασπορά των αερίων μαζών, ενώ ταυτόχρονα οι σημαντικές ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανικές δραστηριότητες, κίνηση των οχημάτων, θέρμανση κατοικιών), οδηγούν στη συσσώρευση των ατμοσφαιρικών ρύπων (Diapouli et al., 2017; Dimitriou & Mihalopoulos, 2024; Kassomenos et al., 1999; 2014). Η περιοχή είναι τυπική Μεσογειακή και το κλίμα της χαρακτηρίζεται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια, καθώς επίσης και από υγρούς και ήπιους χειμώνες, ενώ η μέση ημερήσια θερμοκρασία τον χειμώνα και το καλοκαίρι κυμαίνεται περίπου στους 17°C και 26°C, αντίστοιχα (Kassomenos et al., 1994; Παρταλίδου, 2018).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας χαρακτηρίζεται από αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, που προέρχονται από τοπικές πηγές και μεταφερόμενη σωματιδιακή ύλη από μακρινές αποστάσεις (επεισόδια Σαχάρας), αλλά και λόγω της έλλειψης των κατακρημνίσεων από την άνοιξη έως τα τέλη του φθινοπώρου, που αποτελούν ευνοϊκές συνθήκες για τη συσσώρευση των ατμοσφαιρικών ρύπων (Diapouli et al., 2017; Kassomenos et al., 2014; Mantas et al., 2014).

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



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

**Εικόνα 8. (α) Διαχρονική εξέλιξη των συνολικών εκπομπών των $PM_{2,5}$ στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2023 (YPEN, 2025) <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provlepseis-ekpobon-rypon>
(β) Ετήσια διακύμανση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, την περίοδο 2006-2012 (Fameli & Assimakopoulos, 2016).**

Από την κατάρτιση των εθνικών απογραφών και προβλέψεων των εκπομπών των ρύπων (YPEN, 2025) και των στατιστικών λογαριασμών εκπομπών (ΕΛΣΤΑΤ, 2021) προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες για την εκτίμηση της εξέλιξης των ανθρωπογενών εκπομπών στον ελλαδικό χώρο. Στην Εικόνα 8(α). παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των συνολικών εκπομπών των $PM_{2,5}$ στην Ελλάδα, για την περίοδο 1990-2023 (YPEN, 2025). Οι συνολικές εκπομπές των $PM_{2,5}$ μειώθηκαν από 59,87kt το 1990 σε 31,53kt το 2024 και έτσι οι εκπομπές το 2024 παρουσίασαν μείωση κατά 47,3% και 52,5% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα. Ακόμη, οι συνολικές εκπομπές των PM_{10} μειώθηκαν από 90,3kt το 2012 σε 78,3kt το 2021, δηλαδή μείωση κατά 13,3% περίπου (ΕΛΣΤΑΤ, 2021). Οι συνολικές εκπομπές των PM_{10} είχαν παρουσιάσει επίσης μείωση της τάξης του 28% στον ελλαδικό χώρο και 23,9% στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, μεταξύ των ετών 2006-2012 (Fameli & Assimakopoulos, 2016). Επίσης, σε σχέση με τις οδικές μεταφορές, στην Εικόνα 8(β) βλέπουμε την ετήσια διακύμανση των εκπομπών από τον τομέα των οδικών μεταφορών, στην Ελλάδα, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Την περίοδο 2006-2012 οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές στην Αττική κυμάνθηκαν από 19-28% σε σχέση με τις συνολικές εκπομπές στην περιοχή αυτή (Fameli & Assimakopoulos, 2016). Έτσι, παρόλη την πληθυσμιακή αύξηση και την επέκταση του αστικού ιστού των τελευταίων δεκαετιών, που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των διανυόμενων αποστάσεων των οχημάτων, το ύψος των εκπομπών δεν παρουσίασε αντίστοιχη αύξηση, εξαιτίας της αλλαγής των κοινωνικών και οικονομικών συνθηκών, ειδικά μετά το 2010. Αντίθετα, παρατηρήθηκε μια αύξηση των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων, ιδιαίτερα μετά το 2011, εξαιτίας κυρίως της αυξημένης χρήσης βιομάζας, όπως καυσόξυλα και πέλλετ, ως εναλλακτική λύση στο πετρέλαιο θέρμανσης, για οικιακή θέρμανση (Fameli & Assimakopoulos, 2016). Γενικά παρατηρήθηκε σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία αποδίδεται κυρίως στη βελτίωση της τεχνολογίας και στην ανανέωση του στόλου των οχημάτων, στην αλλαγή του ενεργειακού μείγματος με αυξημένη χρήση φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων παραγωγής. Επιπλέον, η ελληνική οικονομική ύφεση, ειδικά μετά το 2010, και οι περιορισμοί στις μετακινήσεις κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19, συνέβαλαν περαιτέρω στη μείωση αυτών των εκπομπών.

4.2 Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 έως 2025.

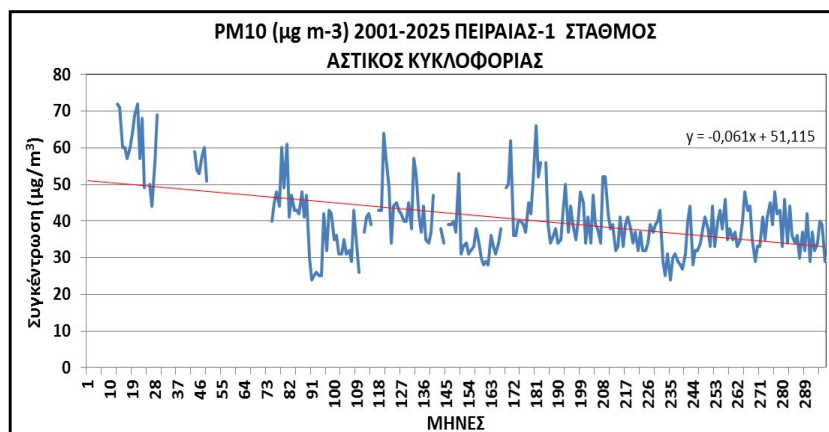
Στην υποενότητα αυτή εξετάζονται οι μέσες ετήσιες και οι μέσες μηνιαίες μεταβολές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, από μετρήσεις σε αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Πειραιάς-1, Αριστοτέλους, Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Ελευσίνα Λυκόβρυση, Αγία Παρασκευή, και Θρακομακεδόνες) του ΕΔΠΑΡ (ΥΠΕΝ, 2025, <http://www.ypen.gov.gr>), στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025. Τα διαγράμματα αποτυπώνουν τη συγκριτική απεικόνιση των διαθέσιμων δεδομένων των μέσων ετήσιων και μέσων μηνιαίων τιμών των PM_{10} και $PM_{2,5}$, ανά σταθμό, για την περίοδο μελέτης, ώστε να διευκολύνεται η συνολική αποτίμηση των επιπέδων ρύπανσης και η συσχέτισή τους με τον χωρικό και λειτουργικό χαρακτήρα της κάθε θέσης. Τα διαγράμματα περιλαμβάνουν και γραμμές τάσης, προκειμένου να διαπιστωθούν πιθανές μακροχρόνιες μεταβολές στις συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, καθώς και πιθανές μεταβολές που σχετίζονται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες ή κλιματικές συνθήκες. Η αποτύπωση των διαχρονικών μεταβολών συμβάλλει στην κατανόηση της αποτελεσματικότητας περιβαλλοντικών πολιτικών και της επίδρασης μεταβολών κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων στη σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση των αστικών, περιαστικών και βιομηχανικών περιοχών.

Οι σταθμοί Πειραιάς-1 και Αριστοτέλους είναι αστικής κυκλοφορίας, οι σταθμοί, Νέα Σμύρνη και Μαρούσι είναι σταθμοί αστικού υποβάθρου, οι σταθμοί Λυκόβρυσης, Θρακομακεδόνες και Αγίας Παρασκευής είναι σταθμοί περιαστικού υποβάθρου και ο σταθμός της Ελευσίνας είναι περιαστικός βιομηχανικός. Στους σταθμούς Νέας Σμύρνης και Μαρούσι τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν μετρήσεις μόνο των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} .

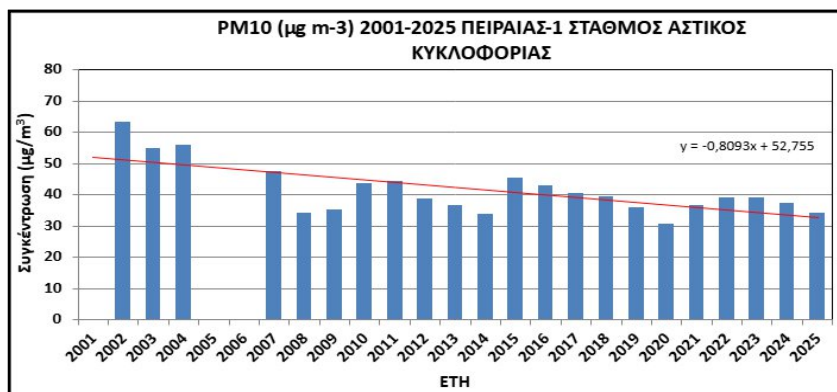
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

4.2.1 Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 - 2025.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και των μέσων μηνιαίων μεταβολών των συγκεντρώσεων των PM₁₀, με τις γραμμικές τάσεις, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.

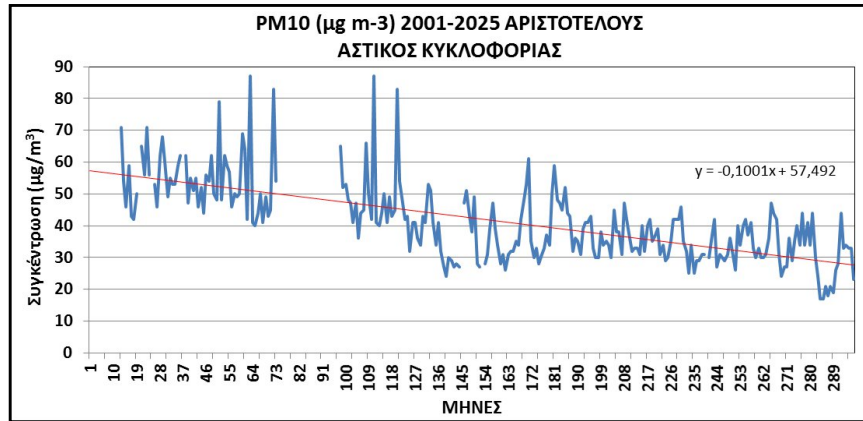


Διάγραμμα 1: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.

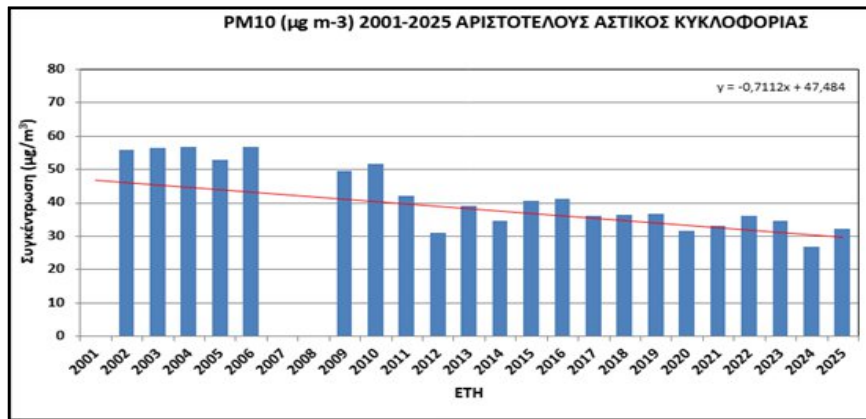


Διάγραμμα 2: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.

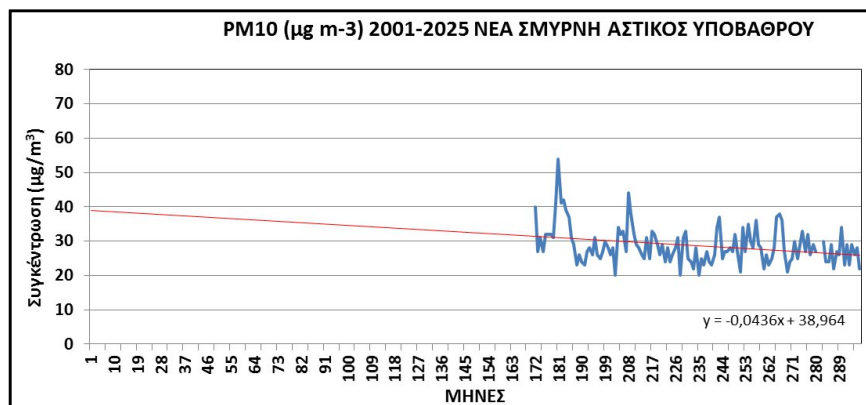
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 3: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

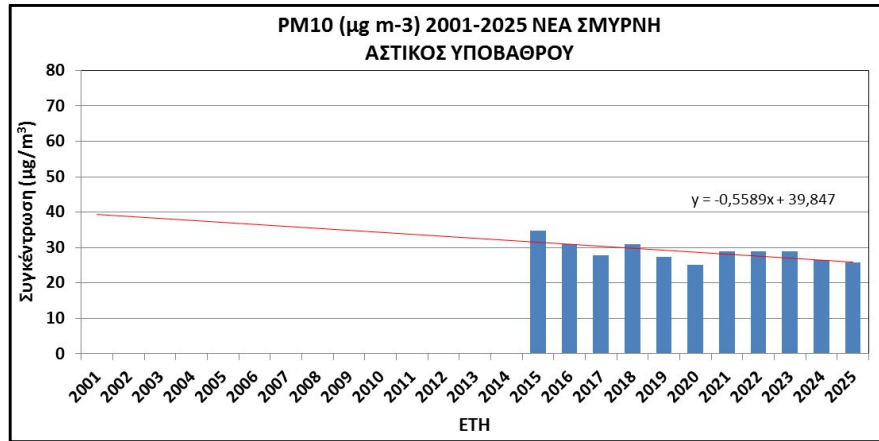


Διάγραμμα 4: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

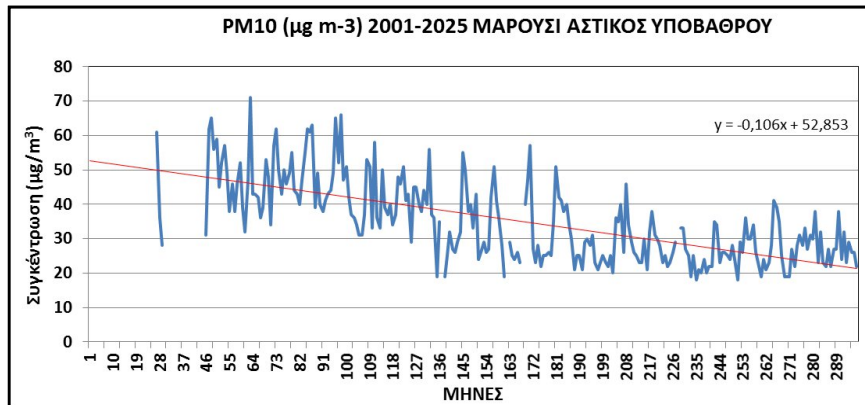


Διάγραμμα 5: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Νέα Σμύρνη, την περίοδο 2001- 2025.

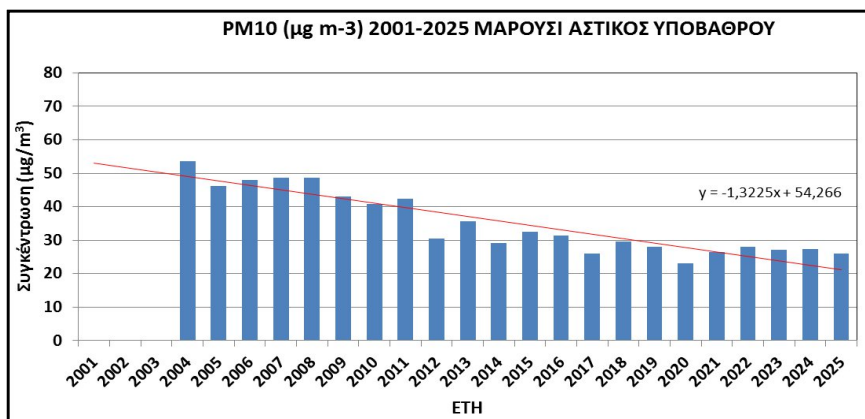
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 6: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Νέα Σμύρνη, την περίοδο 2001- 2025.

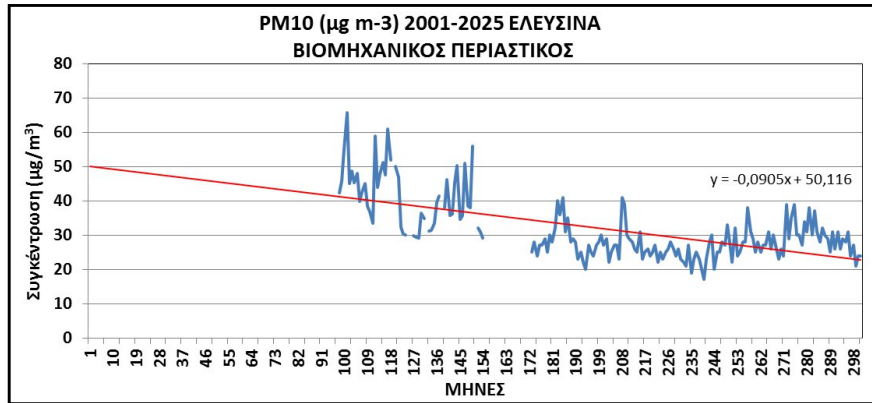


Διάγραμμα 7: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Μαρούσι, την περίοδο 2001- 2025.

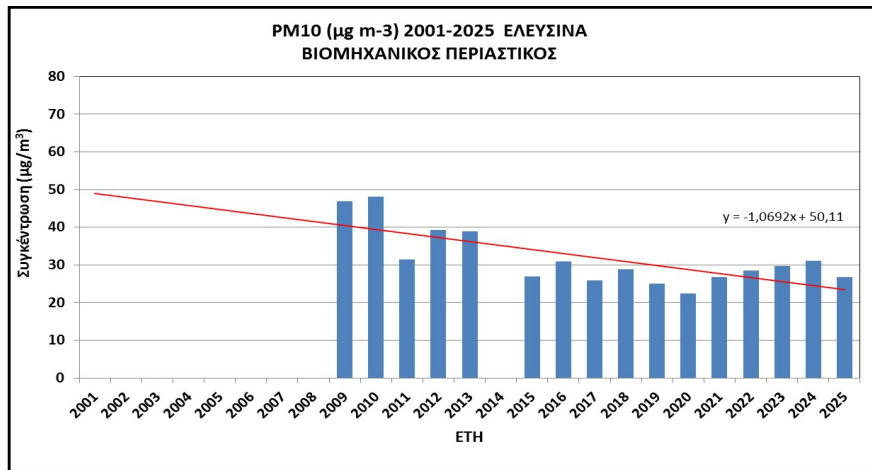


Διάγραμμα 8: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Μαρούσι, την περίοδο 2001- 2025.

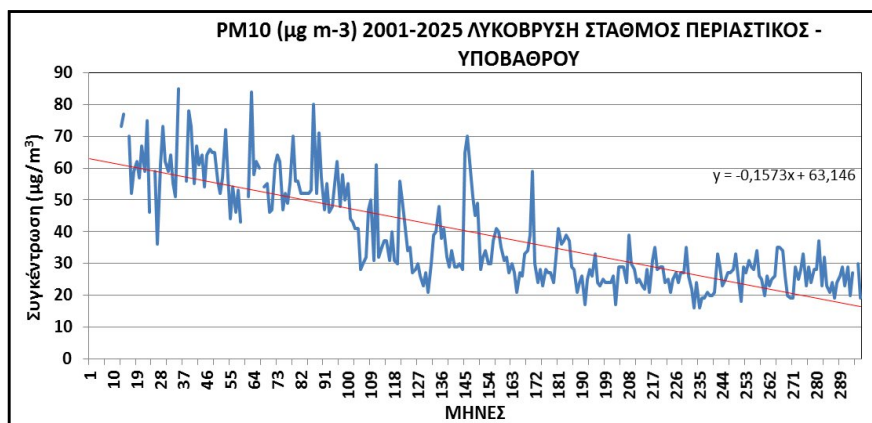
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 9: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.

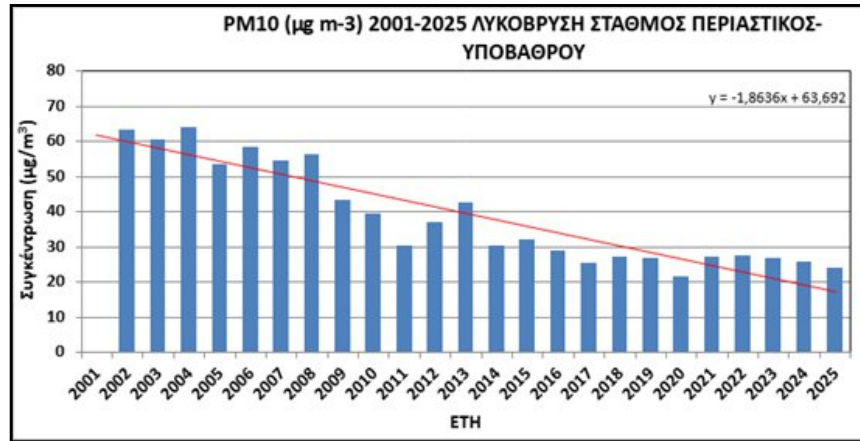


Διάγραμμα 10: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.

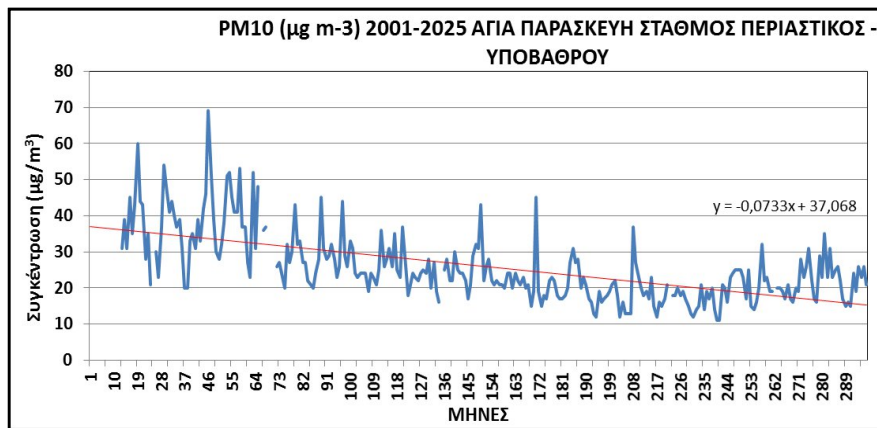


Διάγραμμα 11: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.

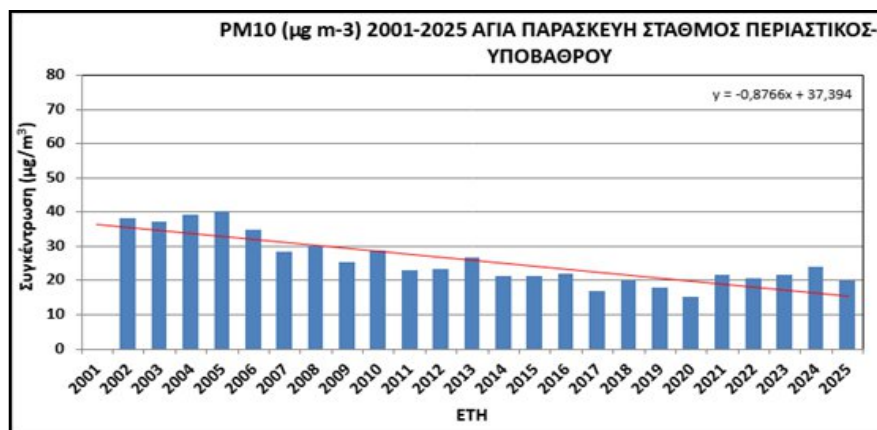
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 12: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.

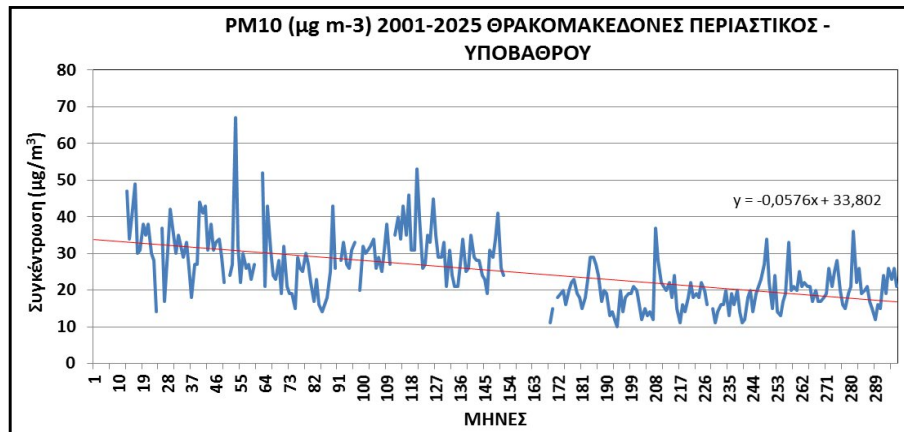


Διάγραμμα 13: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.

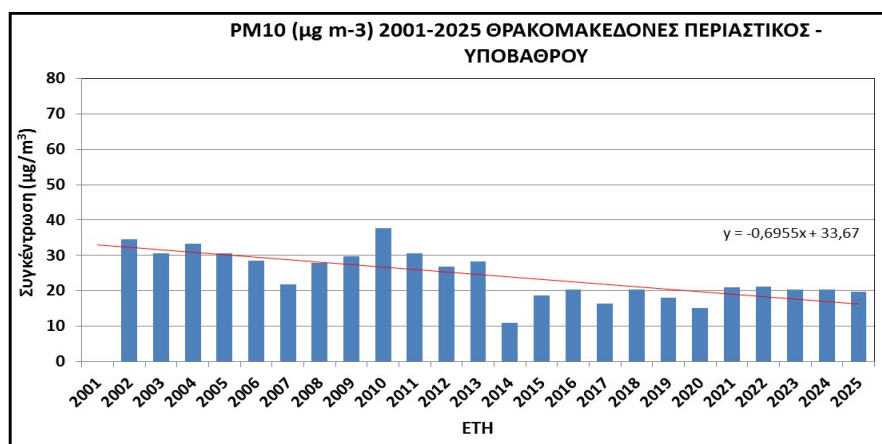


Διάγραμμα 14: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 15: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Θρακομακεδόνες, την περίοδο 2001- 2025.

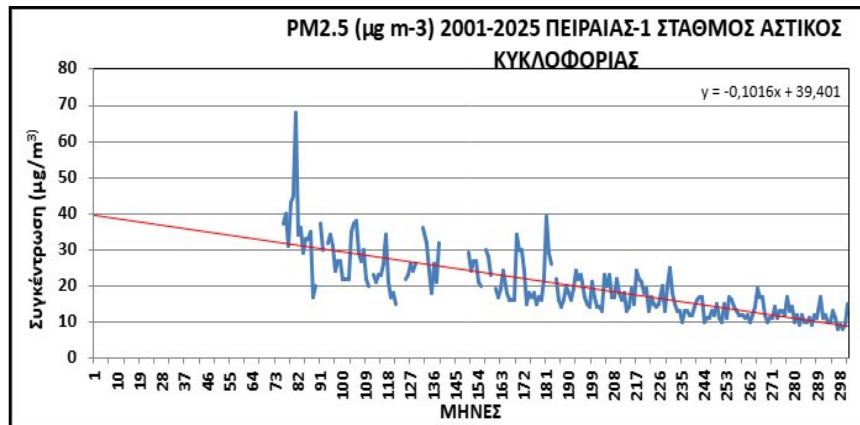


Διάγραμμα 16: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Θρακομακεδόνες, την περίοδο 2001- 2025.

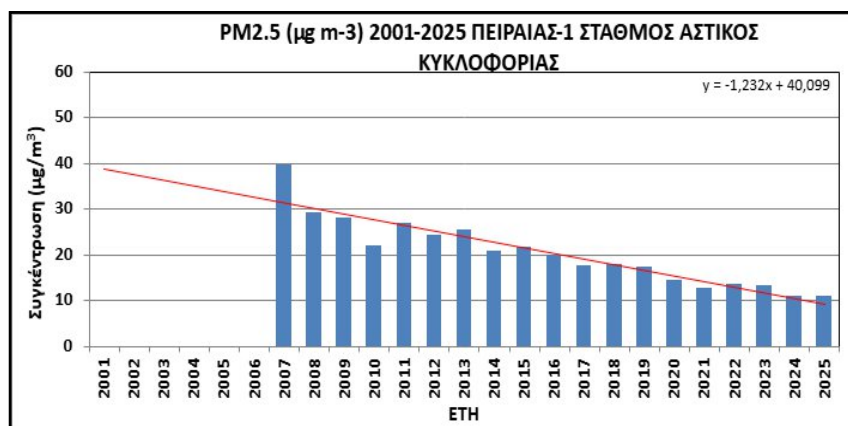
4.2.2 Ετήσιες και μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 έως 2025.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων και των μέσων μηνιαίων μεταβολών των συγκεντρώσεων των $PM_{2,5}$, με τις γραμμικές τάσεις, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.

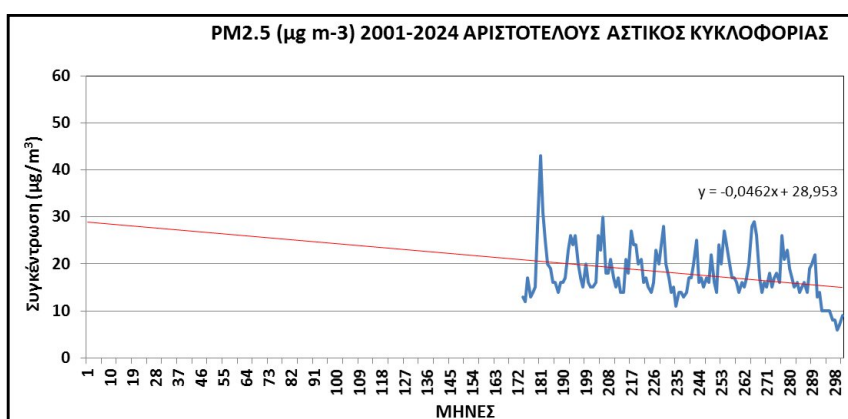
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 17: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.

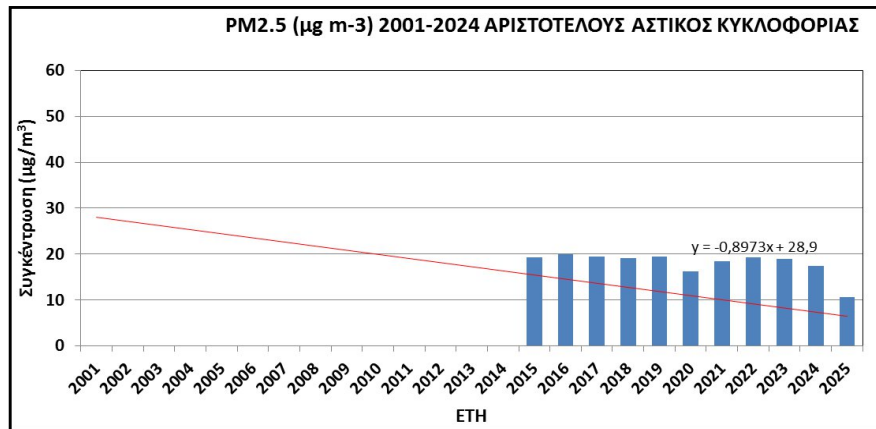


Διάγραμμα 18: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.

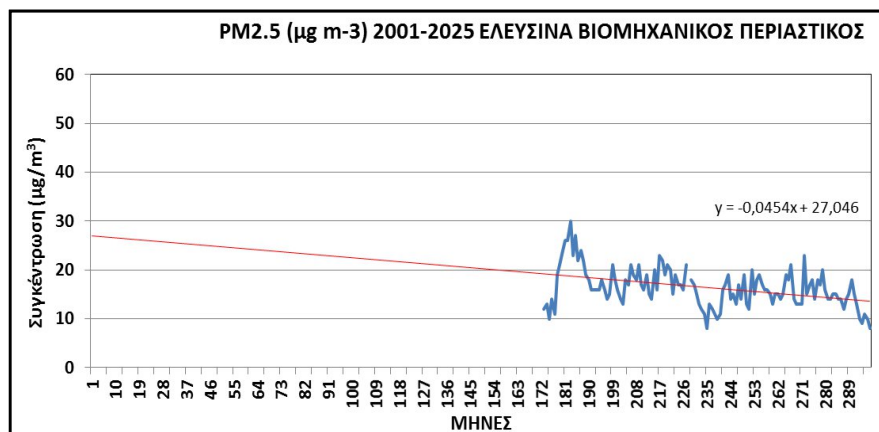


Διάγραμμα 19: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

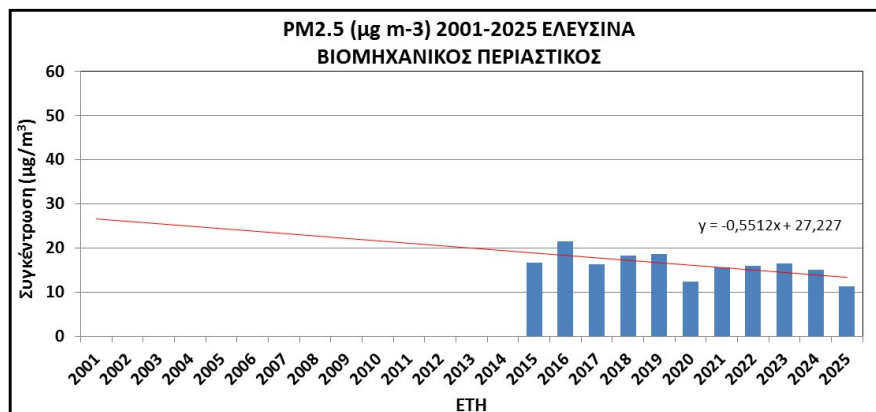
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 20: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

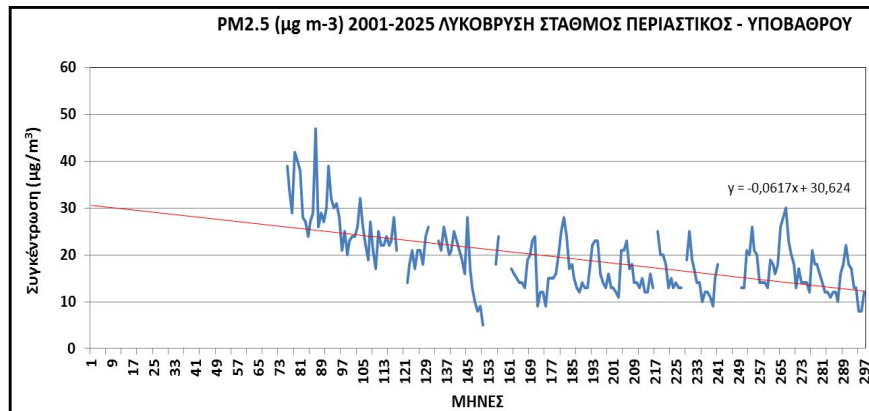


Διάγραμμα 21: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.

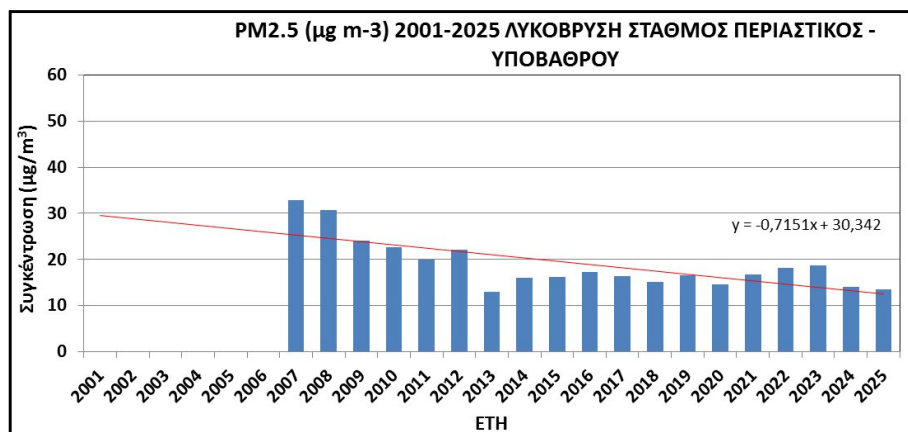


Διάγραμμα 22: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.

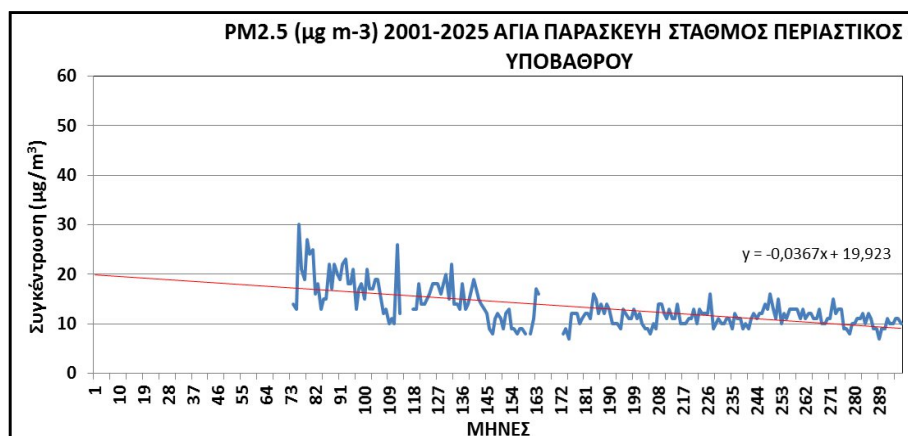
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 23: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.

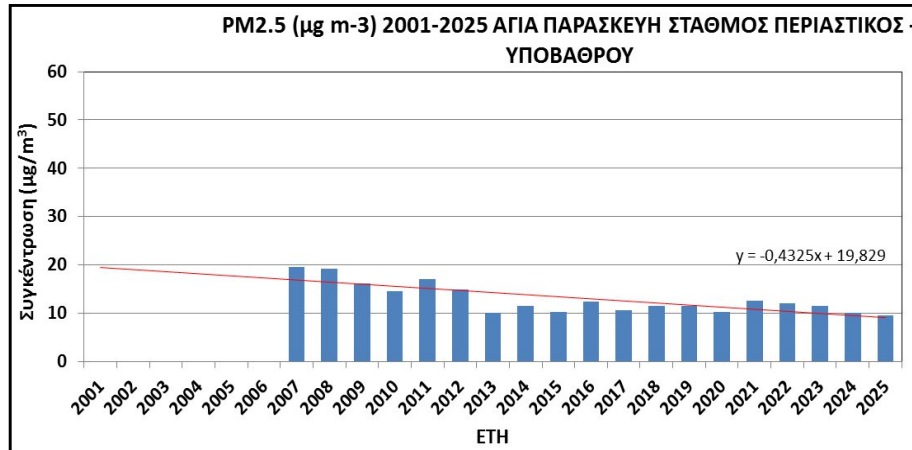


Διάγραμμα 24: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.

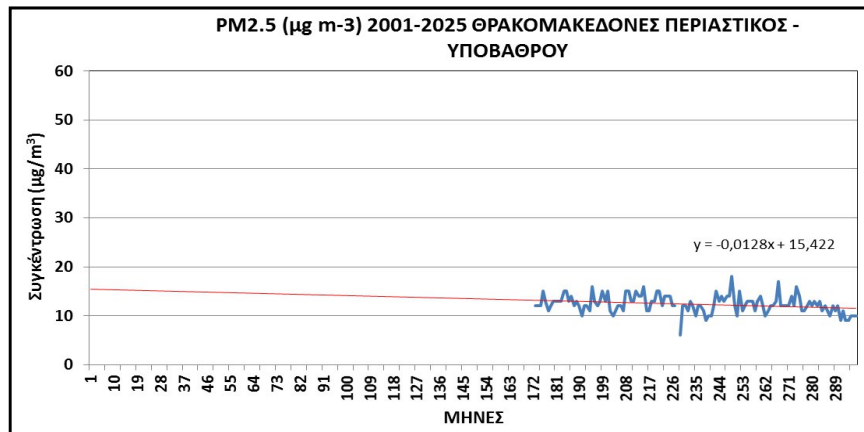


Διάγραμμα 25: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.

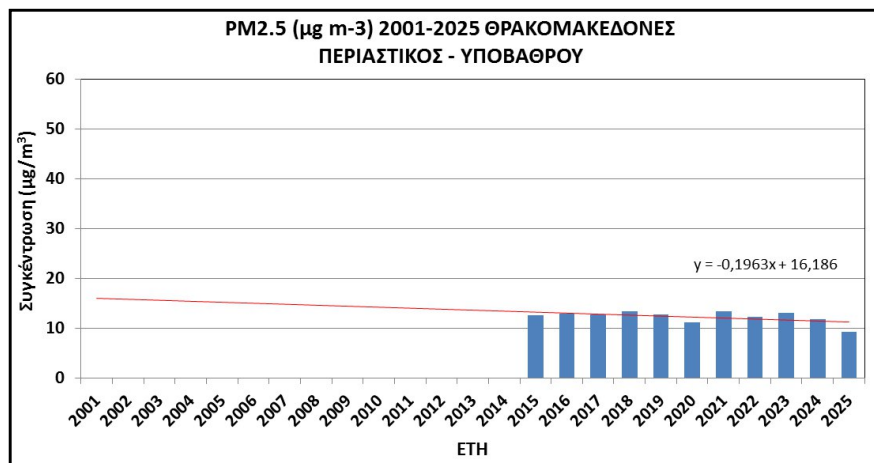
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 26: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.



Διάγραμμα 27: Μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Θρακομακεδόνες, την περίοδο 2001- 2025.



Διάγραμμα 28: Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Θρακομακεδόνες, την περίοδο 2001- 2025.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Από τα Διαγράμματα 1-28 προκύπτει πως τα μεγαλύτερα επίπεδα συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, την περίοδο 2001-2025, παρατηρήθηκαν στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Πειραιάς-1 και Αριστοτέλους) και στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση. Έτσι, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, των PM_{10} και $PM_{2,5}$, παρουσιάστηκαν στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, των οποίων η θέση είναι παραπλεύρως κεντρικών οδικών αξόνων και σε περιοχές με πυκνή δόμηση, όπως το κέντρο της πόλης της Αθήνας. Ειδικά για το σταθμό Πειραιάς-1 οι υψηλές συγκεντρώσεις, των PM_{10} και $PM_{2,5}$, μπορεί να οφείλονται και από τις πρόσθετες δραστηριότητες στην περιοχή, εξαιτίας των ναυτιλιακών υπηρεσιών του λιμανιού του Πειραιά. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν στον περιαστικό βιομηχανικό σταθμό Ελευσίνα, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών (βιομηχανική δραστηριότητα, διυλιστήρια και λιμενικές εγκαταστάσεις του Θριάσιου Πεδίου) και στο σταθμό αστικού υποβάθρου Μαρούσι (περιοχή γειτονική με μεγάλους κυκλοφοριακούς άξονες, όπως η Αττική Οδός), λόγω των τοπικών πηγών (καύση βιομάζας για θέρμανση, οχήματα), αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης (τοπικά συστήματα ανέμου) από παρακείμενες περιοχές. Πρέπει να επισημανθεί ότι Λυκόβρυση και Μαρούσι βρίσκονται βόρεια-βορειοανατολικά, πλησίον της αστικής περιοχής της Αθήνας και επομένως δέχονται την επίδραση της επικρατούσας διεύθυνσης του ανέμου στο λεκανοπέδιο που είναι, είτε Βορειοανατολική, είτε Νοτιοδυτική (ΥΠΕΝ, 2025). Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου παρουσιάστηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση, στα βορειοανατολικά του λεκανοπεδίου Αττικής (περιοχή με χαμηλή δόμηση), φαίνεται προκύπτουν κυρίως από την καύση βιομάζας για θέρμανση, τους δευτερογενείς μετασχηματισμούς, αλλά και τη μεταφερόμενη ρύπανση (τοπικά συστήματα ανέμου) από παρακείμενες περιοχές, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του αέρα στα συγκεκριμένα προάστια.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πιθανότατα το σημαντικότερο πρόβλημα των χονδρόκοκκων (PM_{10}), αλλά και των λεπτόκοκκων ($PM_{2,5}$) αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας προέρχεται, τόσο από οδικές μεταφορές, όσο και από άλλες πηγές όπως η θέρμανση κατοικιών (καύση βιομάζας τη χειμερινή περίοδο) και δευτερογενείς μετασχηματισμούς. Επίσης, η μεταφορά των αιωρούμενων

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

σωματιδίων λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών (κυρίως η διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου) και της επαναιώρησης της σκόνης, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων, ειδικά στους σταθμούς υποβάθρου.

Διαχρονικά την περίοδο 2001-2025, σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στις μέσες ετήσιες και μηνιαίες συγκεντρώσεις των χονδρόκοκκων (PM_{10}), αλλά και των λεπτόκοκκων ($PM_{2,5}$) αιωρούμενων σωματιδίων, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Μεγαλύτερη μείωση, όσον αφορά τα επίπεδα των PM_{10} παρατηρήθηκε στους σταθμούς υποβάθρου Λυκόβρυση και Μαρούσι, ενώ η μικρότερη πτωτική τάση εμφανίζεται στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, αλλά και στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Θρακομακεδόνες. Ο σταθμός Νέα Σμύρνη εμφανίζει τη μικρότερη πτωτική τάση, αλλά λόγω της μικρής περιόδου των μετρήσεων (2015-2025) σε σχέση με τους άλλους σταθμούς, το αποτέλεσμα αυτό πρέπει να εξετασθεί με επιφύλαξη. Μεγαλύτερη πτωτική τάση, όσον αφορά τα επίπεδα των $PM_{2,5}$ παρατηρήθηκε στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, ενώ η μικρότερη στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου. Ειδικότερα, την περίοδο μετά το 2010, σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, μειώνονται με σημαντικό ρυθμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως, στη σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, που προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η οποία αποδίδεται κυρίως στη βελτίωση της τεχνολογίας και στην ανανέωση του στόλου των οχημάτων, της ολοκλήρωσης μεγάλων κυκλοφοριακών έργων, της διεύρυνσης της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (συνεχής επέκταση των γραμμών του μετρό, τραμ, κλπ), στην αλλαγή του ενεργειακού μείγματος με αυξημένη χρήση φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών και της αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας στον τομέα της βιομηχανίας και της συνεχούς αυστηροποίησης των μέτρων ελέγχου εκπομπής ρύπων, καθώς και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων παραγωγής (Diapoulis et al., 2017; Dimitriou & Mihalopoulos, 2024; Kosmopoulos, et al., 2022; Logothetis et al., 2024; Paraskevopoulou et al., 2015). Επιπλέον, η ελληνική οικονομική κρίση, ειδικά μετά το 2010, μείωσε τον αριθμό των Ι.Χ. που κυκλοφορούσαν στους δρόμους και τη χρήση καυσίμων για θέρμανση (Akritidis, et al., 2025; Progiou et al., 2022; Saffari et

al., 2013; Samara et al., 2014; Vouitsis et al., 2015). Επίσης, κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19, οι περιορισμοί κυκλοφορίας που εφαρμόστηκαν τα έτη 2020-2021, μείωσε τον αριθμό των Ι.Χ. που κυκλοφορούσαν στους δρόμους, με αποτέλεσμα οι εκπομπές σωματιδιακών ρύπων από μεταφορές να μειωθούν σημαντικά (Akritidis, et al., 2021; Kofinas et al., 2024; Progiou et al., 2022).

Πρέπει να επισημανθεί ότι στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, την περίοδο 2001-2025, υπήρξαν συστηματικές υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίου των $40\mu g/m^3$ και $25\mu g/m^3$, αντίστοιχα (Πίνακας 7). Ειδικότερα, όσον αφορά τα PM_{10} , οι υπερβάσεις ήταν περισσότερες στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Πειραιάς-1 και Αριστοτέλους), στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση και στον αστικό υποβάθρου Μαρούσι, και κυρίως την περίοδο 2001-2010. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου ορίου των PM_{10} και μόνο στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή και Θρακομακεδόνες, ουσιαστικά δεν υπήρξε αριθμός υπερβάσεων. Όσον αφορά τα $PM_{2,5}$, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου θεσμοθετημένου ορίου μόνο στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Πειραιάς-1 και στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση. Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις και οι περισσότερες υπερβάσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος των οδικών αξόνων (σε σύγκριση με τους σταθμούς σε σημεία υποβάθρου) πιθανότατα οφείλονται στις εκπομπές κυρίως από τα οχήματα και την πυκνή δόμηση του αστικού κέντρου της πόλης της Αθήνας. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, για όλα τα έτη της περιόδου μελέτης (Πίνακες 4 και 7).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.

Σταθμός	PM ₁₀ Μέση Τιμή (μg/m ³) 2001-2025	PM _{2,5} Μέση Τιμή (μg/m ³) 2001-2025	Ετήσιες Υπερβάσεις PM ₁₀ Οδ. 2008/50 – Οδ.2024/2881	Ετήσιες Υπερβάσεις PM _{2,5} Οδ. 2008/50 – Οδ.2024/2881
Πειραιάς-1 Αστικός Κυκλοφορίας	41,2	20,4	9 -- 22 (όλα τα έτη)	5 -- 19 (όλα τα έτη)
Αριστοτέλους Αστικός Κυκλοφορίας	41,3	18,1	10 -- 22 (όλα τα έτη)	Καμία -- 11 (όλα τα έτη)
Νέα Σμύρνη Αστικός Υποβάθρου	28,7	--	Καμία -- 11 (όλα τα έτη)	--
Μαρούσι Αστικός Υποβάθρου	34,9	--	7 -- 22 (όλα τα έτη)	--
Λυκόβρυση Περιαστικός Υποβάθρου	38,2	18,9	9 -- 24 (όλα τα έτη)	2 -- 19 (όλα τα έτη)
Αγ. Παρασκευή Περιαστικός Υποβάθρου	25,5	12,9	1 – 19	Καμία -- 16
Θρακομακεδόνες Περιαστικός Υποβάθρου	24,4	12,3	Καμία -- 18	Καμία -- 10
Ελευσίνα Βιομηχανικός Περιαστικός	31,7	16,2	2 -- 16 (όλα τα έτη)	Καμία -- 11 (όλα τα έτη)

Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι στις διαθέσιμες μετρήσεις του δικτύου των σταθμών ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ, την περίοδο 2001-2025, παρατηρήθηκαν αρκετές ελλείψεις στα δεδομένα και ειδικά στις μετρήσεις των PM_{2,5} (ακόμη είναι μικρός ο αριθμός των σταθμών που μετρά τα συγκεκριμένα σωματίδια και μάλιστα οι μετρήσεις ξεκίνησαν μετά το 2007) (ΥΠΕΝ, 2025). Έτσι, σε ορισμένους σταθμούς οι παρατηρούμενες ασυνέχειες στα παραπάνω διαγράμματα, έχει σαν αποτέλεσμα να πρέπει εξετάζονται τα συμπεράσματα με επιφύλαξη και να προκύπτουν δυσκολίες στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

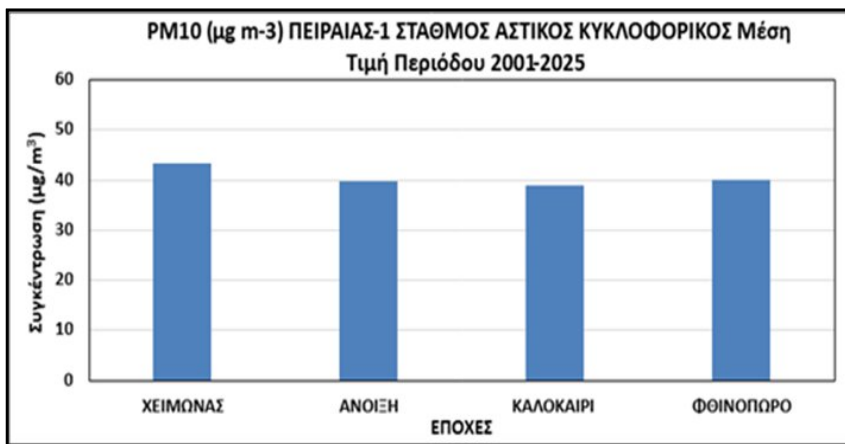
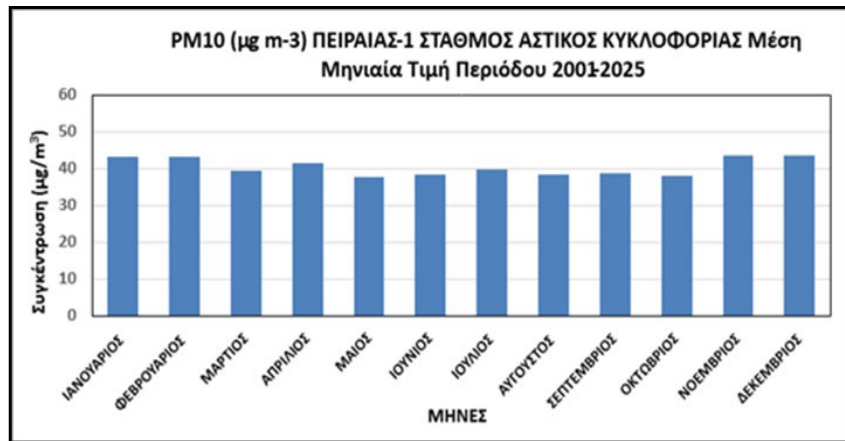
Έτσι, διαπιστώνεται ότι η διαχρονική μείωση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, την περίοδο 2001-2025, οφείλεται κυρίως στα μέτρα που έχει λάβει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελλάδα με σκοπό την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέτρα όπως, η λειτουργία του μετρό που εξυπηρετεί καθημερινά περίπου ένα εκατομμύριο επιβάτες, αντιστοιχεί με την κυκλοφορία εκατοντάδων χιλιάδων λιγότερων αυτοκινήτων και κατά συνέπεια την εκπομπή λιγότερων αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπρόσθετα, η οριοθέτηση νέων λεωφορειολωρίδων αύξησαν τη μέση ταχύτητα των λεωφορείων καθιστώντας τα πιο ελκυστικά για το κοινό, με αποτέλεσμα περισσότερα άτομα να χρησιμοποιούν το λεωφορείο μειώνοντας περαιτέρω τη χρήση των αυτοκινήτων. Επίσης, η αντικατάσταση του ορυκτού καυσίμου με φυσικό αέριο έχει βοηθήσει στη σημαντική μείωση των εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιπρόσθετα, έχουν εφαρμοστεί τα προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων, με την εφαρμογή μεταξύ άλλων καλύτερης θερμικής μόνωσης των τοίχων και των κουφωμάτων, που μειώνουν τις απώλειες θερμότητας. Πρέπει να επισημανθεί ότι η θέρμανση των κτιρίων είναι μια από τις σημαντικές πηγές χονδροκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Diapouli et al., 2017). Έτσι, με την χρήση μικρότερης ποσότητας καυσίμου οι εκπομπές από τους καυτήρες είναι λιγότερες.

4.3 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 έως 2025.

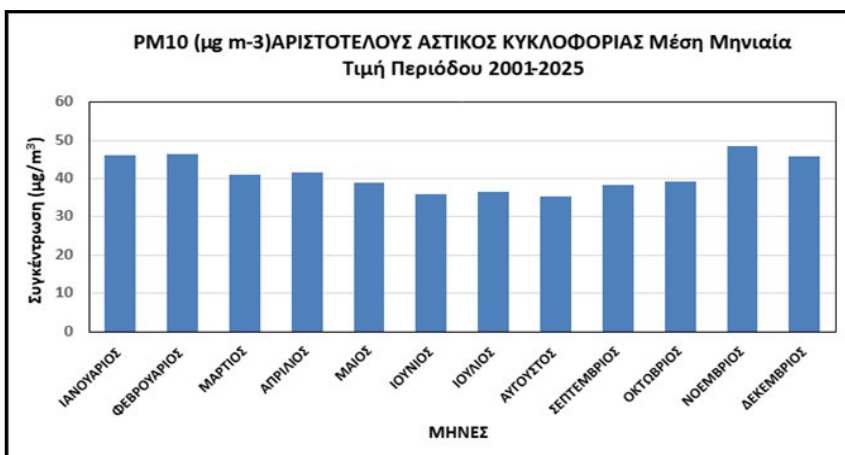
4.3.1. Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 - 2025.

Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων εποχικών και των μέσων μηνιαίων μεταβολών των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.

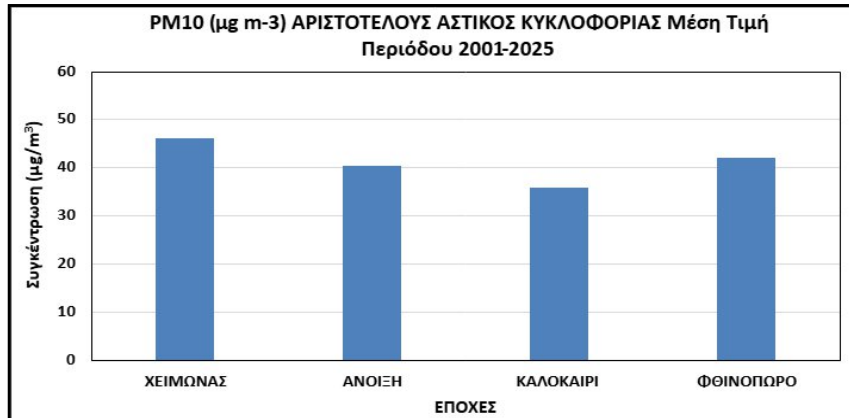
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



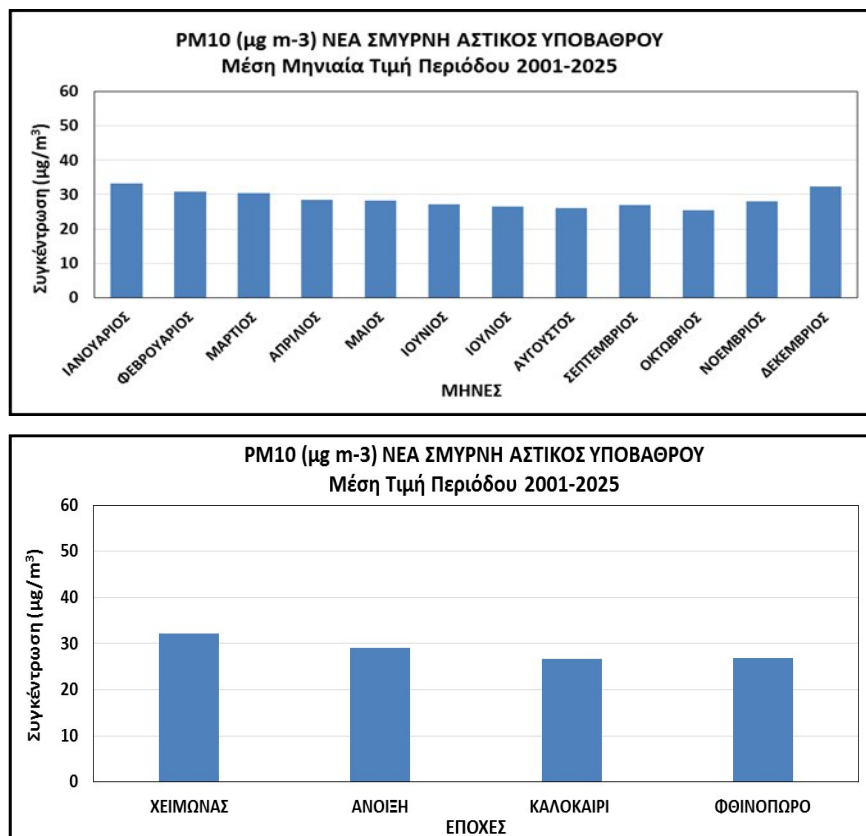
Διάγραμμα 29: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

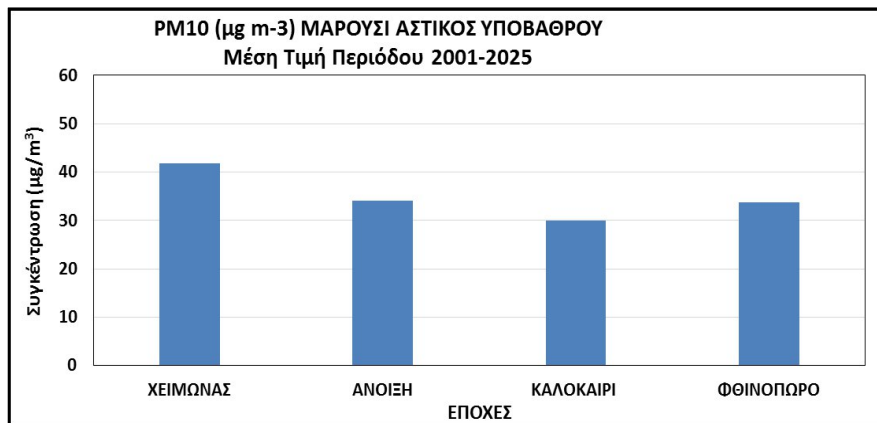
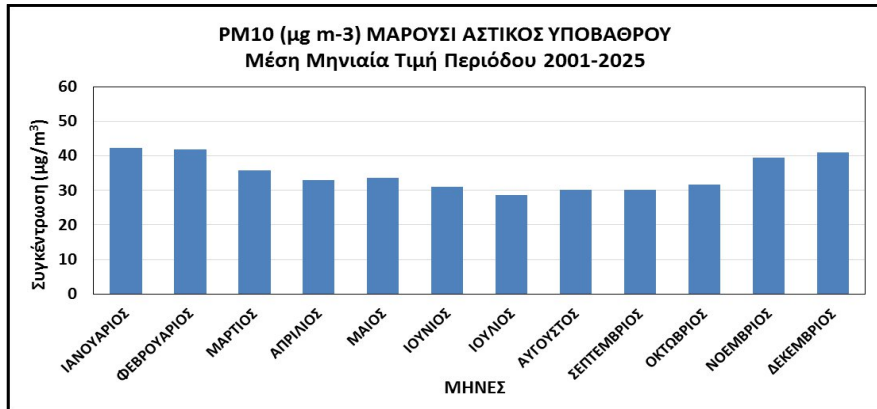


Διάγραμμα 30: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

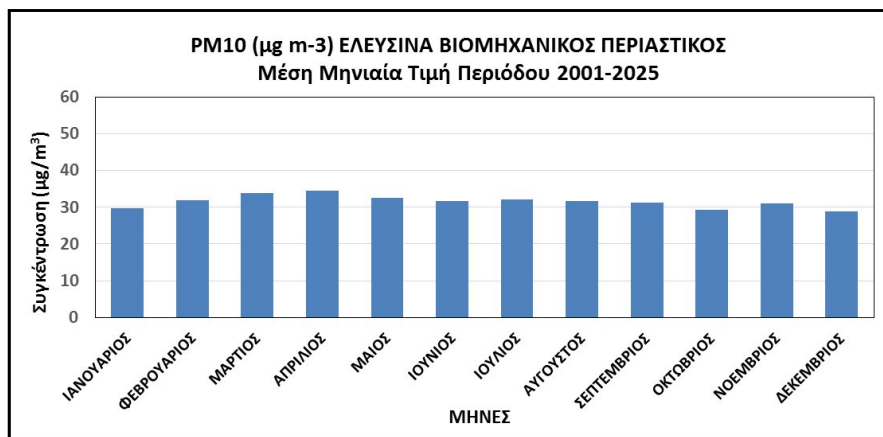


Διάγραμμα 31: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Νέα Σμύρνη, την περίοδο 2001- 2025.

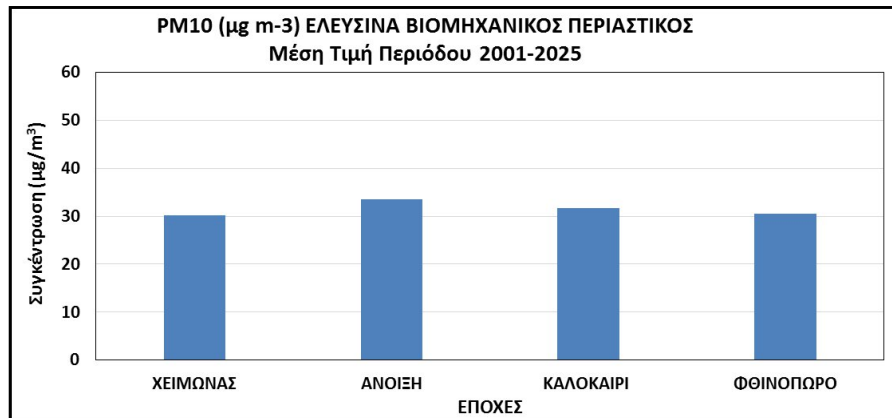
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



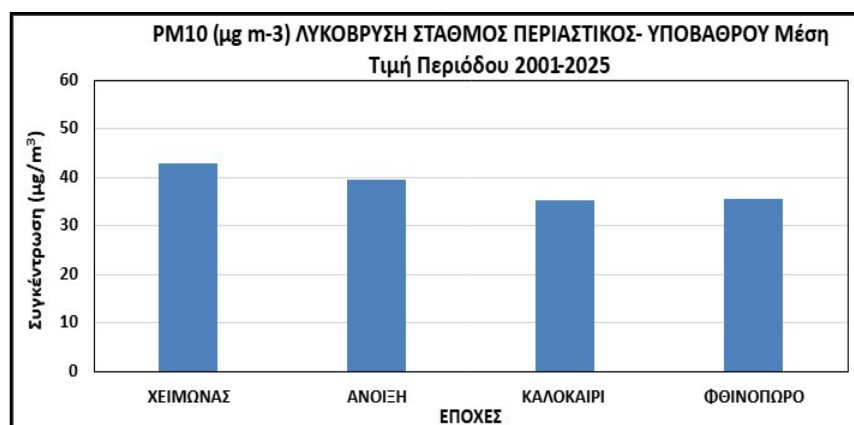
Διάγραμμα 32: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Αστικού Υποβάθρου, Μαρούσι, την περίοδο 2001- 2025.



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

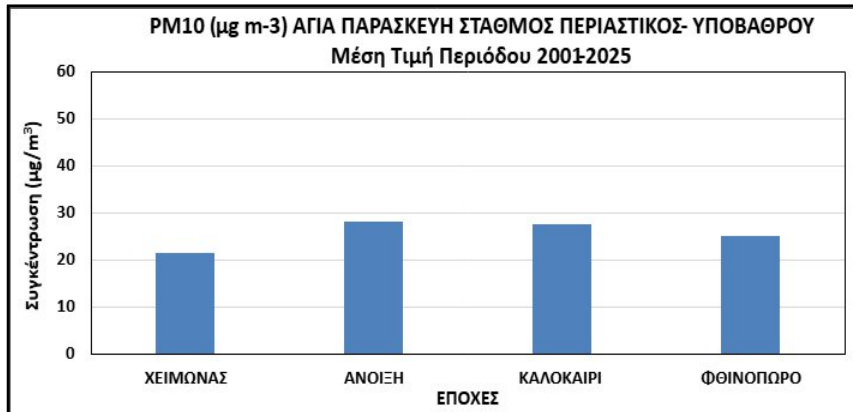


Διάγραμμα 33: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.



Διάγραμμα 34: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM₁₀, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.

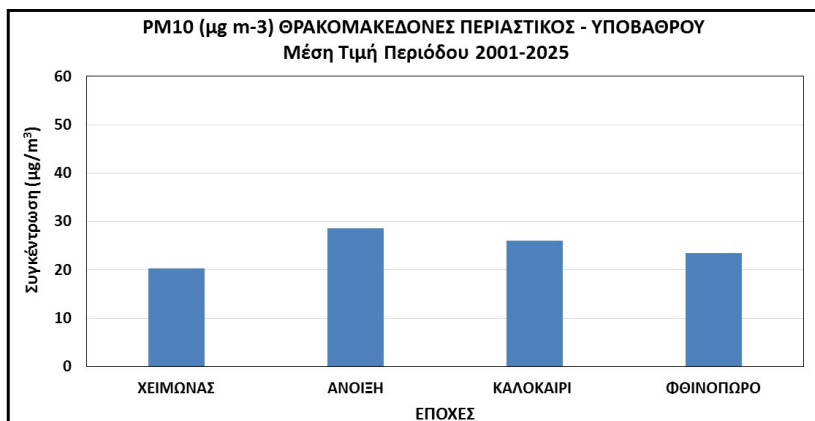
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 35: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



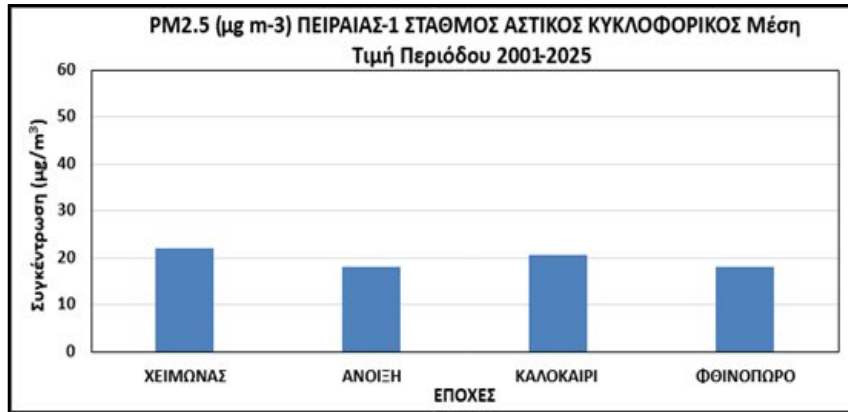
Διάγραμμα 36: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , στο Σταθμό Περιστερικού Υποβάθρου, Θεσσαλονίκη, την περίοδο 2001- 2025.

4.3.2 Εποχικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2.5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001 - 2025.

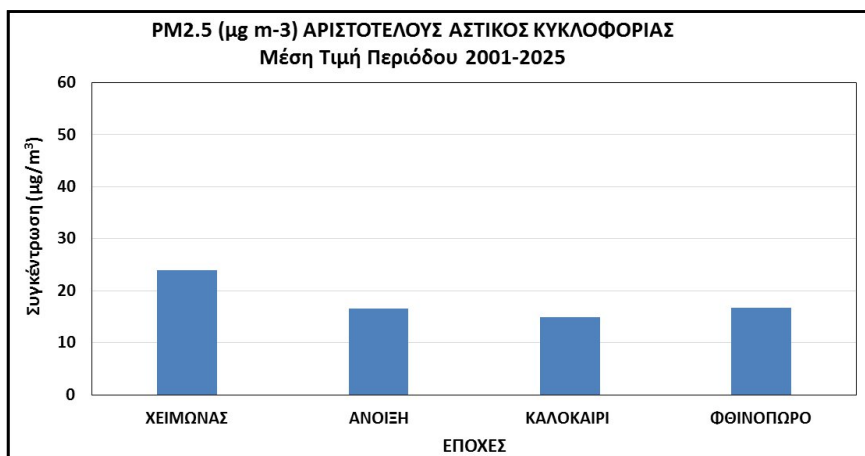
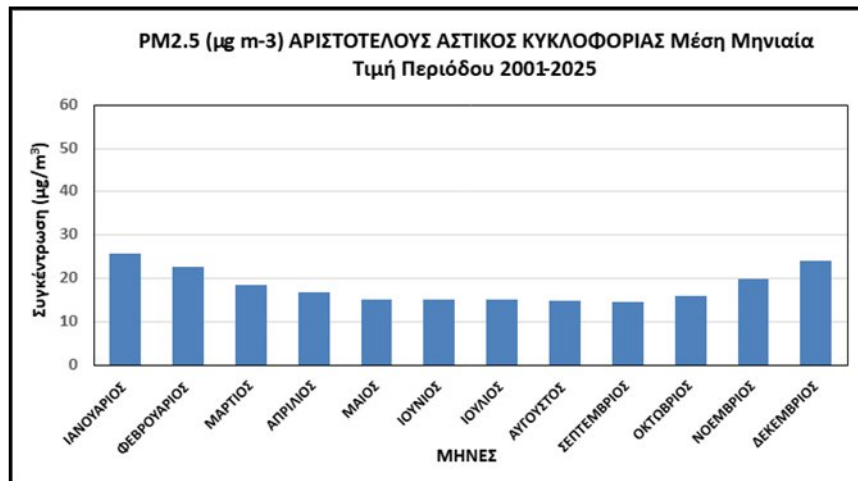
Η συγκεκριμένη υποενότητα περιλαμβάνει τα διαγράμματα με τις διακυμάνσεις των μέσων εποχικών και των μέσων μηνιαίων μεταβολών των συγκεντρώσεων των $PM_{2.5}$, στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

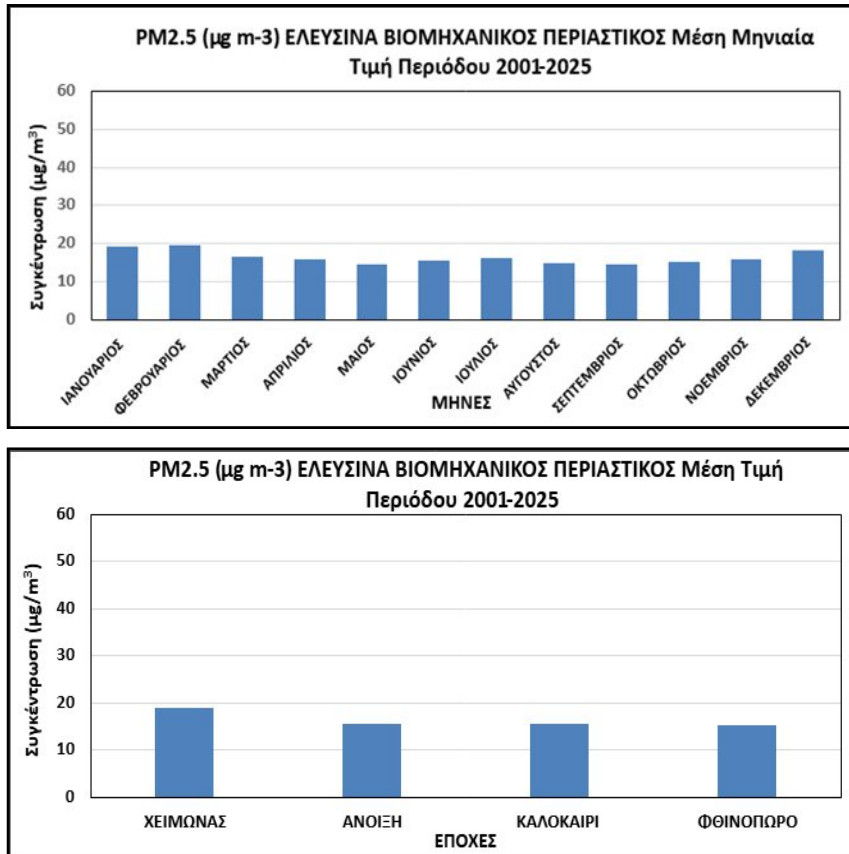


Διάγραμμα 37: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Πειραιάς-1, την περίοδο 2001- 2025.

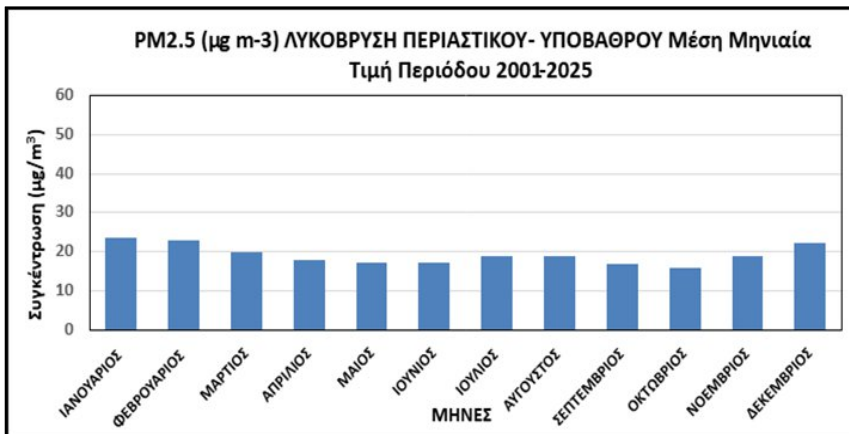


Διάγραμμα 38: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Αστικής Κυκλοφορίας, Αριστοτέλους, την περίοδο 2001- 2025.

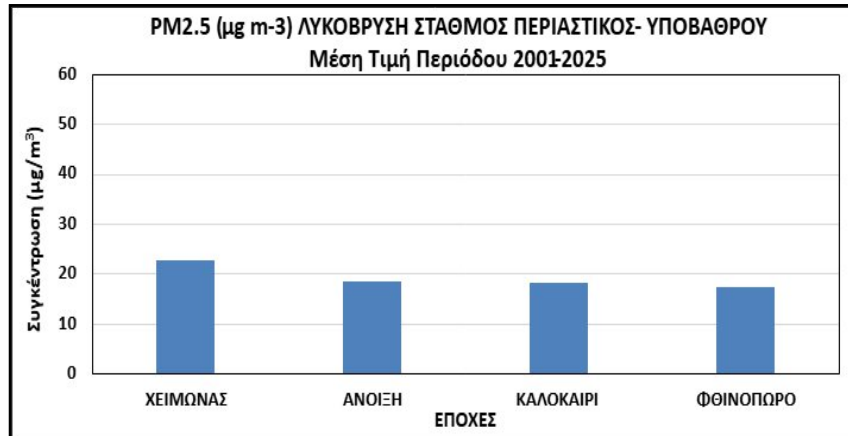
Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



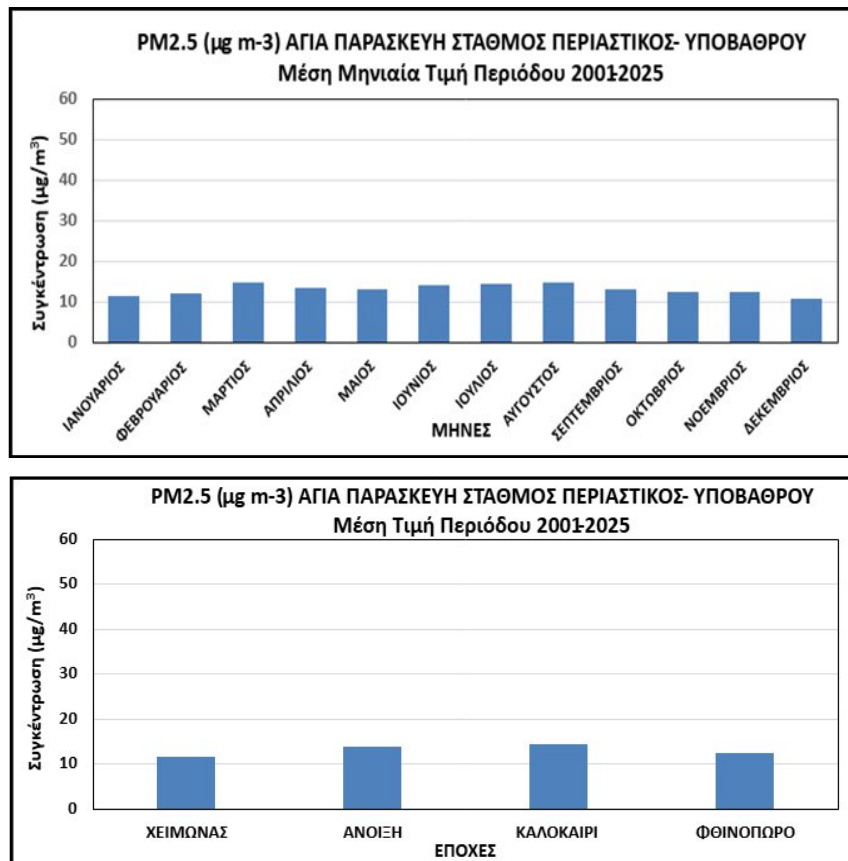
Διάγραμμα 39: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στον Περιαστικό Βιομηχανικό Σταθμό, Ελευσίνα, την περίοδο 2001- 2025.



Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

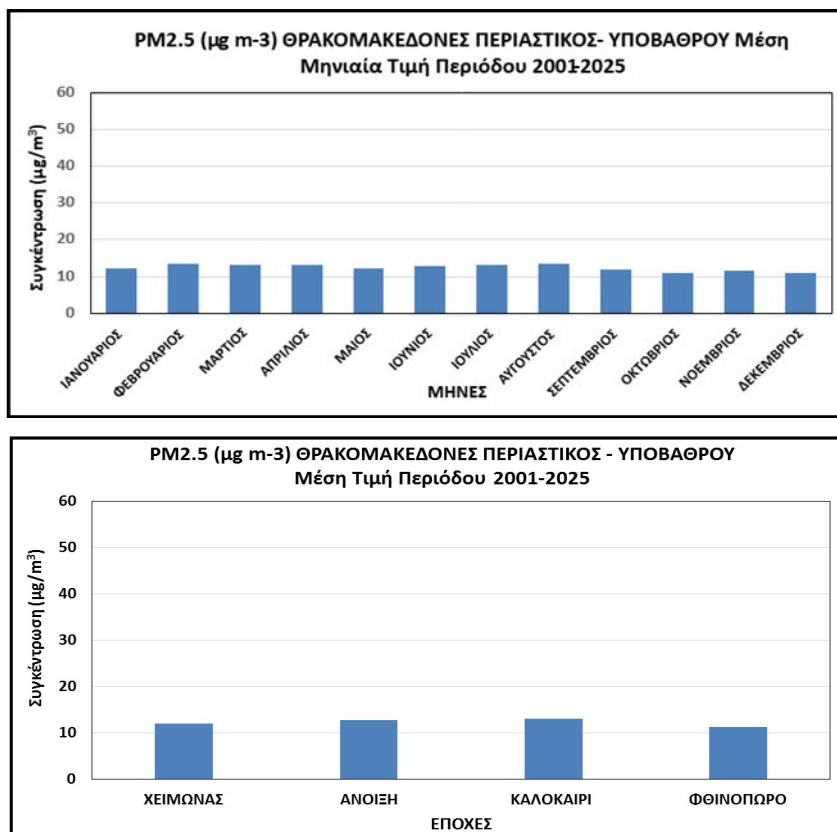


Διάγραμμα 40: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των $\text{PM}_{2.5}$, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Λυκόβρυση, την περίοδο 2001- 2025.



Διάγραμμα 41: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των $\text{PM}_{2.5}$, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Αγ. Παρασκευή, την περίοδο 2001- 2025.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»



Διάγραμμα 42: Μέση εποχική και μέση μηνιαία διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{2,5}, στο Σταθμό Περιαστικού Υποβάθρου, Θρακομακεδόνες, την περίοδο 2001- 2025.

Από τα Διαγράμματα 29-42, της μηνιαίας και εποχικής ανάλυσης των επιπέδων των συγκεντρώσεων των PM₁₀ και PM_{2,5} στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025, προέκυψε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι (Πίνακας 8). Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων, στις εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (ειδικά με την αύξηση της καύσης βιομάζας μετά το 2011) και στις αυξημένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, τοπικά συστήματα ανέμου, κλπ) κάθε εποχής του έτους. Επίσης, η μείωση των συγκεντρώσεων των PM₁₀ και PM_{2,5} τους θερινούς μήνες πιθανώς να οφείλεται στην ύφεση των δραστηριοτήτων της πόλης και επομένως τη μείωση της κυκλοφορίας των οχημάτων εξαιτίας των καλοκαιρινών διακοπών. Ειδικά, το καλοκαίρι στο σταθμό Πειραιάς-1

παρουσιάστηκαν ελαφρώς αυξημένες τιμές στα $PM_{2,5}$, που μπορεί να οφείλονται στην αυξημένη κυκλοφορία και δραστηριότητα στο λιμάνι του Πειραιά τη θερινή περίοδο του έτους. Στη Λυκόβρυση οι υψηλές χειμερινές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων πιθανότατα οφείλονται στην καύση ξύλου και βιομάζας για οικιακή θέρμανση σε συνδυασμό με το μικροκλίμα των βορείων προαστίων που ευνοεί τις έντονες θερμοκρασιακές αναστροφές τις κρύες νύχτες, οι οποίες συγκρατούν τον καπνό κοντά στο έδαφος. Αντίθετα, στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου Αγία Παρασκευή και Θρακομακεδόνες οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάστηκαν την άνοιξη, αλλά και το καλοκαίρι, πιθανότατα εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από παρακείμενες αστικές περιοχές και των δευτερογενών σχηματισμών σωματιδίων, λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών αυτήν την περίοδο του έτους (επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου σε σχέση με τη θέση των σταθμών, ηλιοφάνεια, κλπ). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι περιοχές αυτές δεν επιβαρύνονται ιδιαίτερα από τοπικές πηγές καύσης βιομάζας τη χειμερινή περίοδο του έτους. Η ανοιξιότικη έξαρση κατά ένα ποσοστό πιθανότατα οφείλεται και στα επεισόδια μεταφοράς Αφρικανικής Σκόνης από τη Σαχάρα, τα οποία εμφανίζουν τη μέγιστη συχνότητα και ένταση στην Ελλάδα κατά τους ανοιξιότικους μήνες (Mantas et al., 2014). Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου λόγω των παρατηρούμενων χαμηλότερων επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων τα επεισόδια αυτά έχουν ισχυρότερο αποτύπωμα σε σχέση με τους άλλους σταθμούς. Στον περιαστικό βιομηχανικό σταθμό Ελευσίνα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές των PM_{10} την άνοιξη, ενώ τα $PM_{2,5}$ εμφάνισαν μέγιστο το χειμώνα, ενώ γενικά οι εποχικές μεταβολές ήταν περιορισμένες. Τα αποτελέσματα αυτά μπορεί να οφείλονται και στο ότι, στο σταθμό αυτό, παρατηρήθηκαν αρκετές ελλείψεις στα δεδομένα και ειδικά στις μετρήσεις των $PM_{2,5}$ και επομένως τα αποτελέσματα πρέπει εξετάζονται με επιφύλαξη. Παρά τις παραπάνω διαφορές ανά σταθμό και περιοχή, η πλειονότητα των σταθμών εμφάνισε σταθερά καθοδική τάση από τις χειμερινές προς τις καλοκαιρινές συγκεντρώσεις.

Γενικά, η μηνιαία μεταβολή των PM_{10} και $PM_{2,5}$ μπορεί να αλλάζει από έτος σε έτος λόγω και των φυσικών πηγών τους (μεταφορά σκόνης από ξηρές περιοχές εντός και εκτός χώρας, θαλάσσια και βιογενή αερολύματα, κλπ) στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (ΥΠΕΝ, 2025). Η κλειστή τοπογραφία του λεκανοπέδιου της Αθήνας, δυσχεραίνει τον αερισμό και τη διάχυση των ρύπων, λόγω της ύπαρξης ορεινών

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

όγκων, ενώ έχει ως αποτέλεσμα, η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου να είναι, είτε Βορειοανατολική, είτε Νοτιοδυτική. Αυτό οφείλεται στον καναλισμό του ανέμου εξαιτίας του ανοίγματος στα βορειοανατολικά μεταξύ Πάρνηθας και Πεντέλης και στα νότια στο Σαρωνικό κόλπο. Σε περίπτωση ασθενούς ή απουσίας συνοπτικής ροής, οι άνεμοι του νότιου τομέα είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης τοπικού συστήματος κυκλοφορίας (θαλάσσια-απόγειος αύρα), γεγονός που ευνοεί τη δημιουργία υψηλών συγκεντρώσεων δευτερογενών ρύπων στην περιφέρεια του λεκανοπεδίου προς βορρά (ΥΠΕΝ, 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Διακόμανση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025.

Σταθμός	Μακροπρόθεσμη Τάση PM ₁₀ (2001-2025)	Μακροπρόθεσμη Τάση PM _{2,5} (2001-2025)	Μέγιστα Εποχικά Επίπεδα	Κυριότερες Πηγές Ρύπανσης
Πειραιάς-1 Αστικός Κυκλοφορίας	Μείωση	Σημαντική Μείωση	Χειμώνας	Οχήματα, Λιμάνι, Θέρμανση
Αριστοτέλους Αστικός Κυκλοφορίας	Μείωση	Σημαντική Μείωση	Χειμώνας	Οχήματα, Θέρμανση
Νέα Σμύρνη Αστικός Υποβάθρου	Μικρή Μείωση	---	Χειμώνας	Θέρμανση, Μεταφορά, οχήματα
Μαρούσι Αστικός Υποβάθρου	Σημαντική Μείωση	---	Χειμώνας	Θέρμανση, Μεταφορά, οχήματα
Λυκόβρυση Περιαστικός Υποβάθρου	Σημαντική Μείωση	Μείωση	Χειμώνας	Θέρμανση, Δευτερογενή σωματίδια, Μεταφορά
Αγ. Παρασκευή Περιαστικός Υποβάθρου	Μείωση	Μικρή Μείωση	Άνοιξη και Καλοκαίρι	Δευτερογενή σωματίδια, Μεταφορά
Θρακομακεδόνες Περιαστικός Υποβάθρου	Μείωση	Μικρή Μείωση	Άνοιξη και Καλοκαίρι	Δευτερογενή σωματίδια, Μεταφορά
Ελευσίνα Βιομηχανικός Περιαστικός	Μείωση	Μείωση	Άνοιξη (PM ₁₀) Χειμώνας (PM _{2,5})	Βιομηχανία, Θέρμανση

Πρέπει να επισημανθεί ότι Λυκόβρυση και Μαρούσι βρίσκονται βόρεια-βορειοανατολικά, πλησίον της αστικής περιοχής της Αθήνας και επομένως δέχονται την επίδραση των προαναφερόμενων τοπικών συστημάτων ανέμου. Έτσι, οι ισχυροί άνεμοι ενδέχεται να επηρεάζουν αυξητικά τα επίπεδα της σωματιδιακής ρύπανσης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις γειννίας του σταθμού με χωμάτινο έδαφος λόγω αιώρησης ή με άλσος λόγω γύρης. Επίσης, άνεμοι νοτίου τομέα, όχι απαραίτητα επιφανειακοί, με μεγάλη ένταση μεταφέρουν σκόνη από τη Σαχάρα και την υποσαχάρια ζώνη (ΥΠΕΝ, 2025).

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, οι εποχικές μεταβολές των εκπομπών των PM_{10} και $PM_{2,5}$, αλλά και οι εποχικές μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών, επηρεάζουν σημαντικά τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες (δευτερογενείς μετασχηματισμούς) των σωματιδιακών ατμοσφαιρικών ρύπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, το οποίο επιφέρει αρνητικές συνέπειες στους ανθρώπους, στο περιβάλλον και στα διάφορα οικοσυστήματα. Στα μεγάλα αστικά κέντρα ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η κίνηση των οχημάτων, η θέρμανση κτιρίων και οι βιομηχανικές δραστηριότητες, παράγουν σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων. Στον ελλαδικό χώρο, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω των εκπομπών από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης δημιουργούνται πολλά προβλήματα σε μεγάλες αστικές και βιομηχανικές περιοχές, όπως η ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

Στην περιοχή της Αττικής οι ανθρωπογενείς εκπομπές, όπως η μετακίνηση μεγάλου αριθμού οχημάτων, η πυκνή δόμηση, αλλά και οι βιομηχανικές δραστηριότητες, σε συνδυασμό με την περίπλοκη τοπογραφία, τις φυσικές πηγές και τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες τη συσσώρευση σωματιδιακής ρύπανσης. Πρέπει να επισημανθεί ότι σύμφωνα με την απογραφή του 2021, ο μόνιμος πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Αττικής ανέρχεται σε 3.814.064 κατοίκους, ενώ του Δήμου Αθηναίων σε 637.798 κατοίκους και ολόκληρο το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας φιλοξενεί πάνω από 3 εκατομμύρια ανθρώπους. Ο συνολικός αριθμός επιβατικών οχημάτων που κινείται στην Αττική ανέρχεται περίπου στα 3,4 εκατομμύρια οχήματα (αριθμός αντιστοιχεί περίπου στο 56% του συνολικού στόλου οχημάτων ολόκληρης της χώρας). Επίσης, από την κατάρτιση των εθνικών απογραφών, προβλέψεων και στατιστικών λογαριασμών των εκπομπών των ρύπων (ΥΠΕΝ, 2025; ΕΛΣΤΑΤ, 2021) προκύπτει ότι οι συνολικές εκπομπές των $PM_{2,5}$ στην Ελλάδα, για την περίοδο 1990-2023 παρουσίασαν μείωση κατά 47,3% και 52,5% σε σύγκριση με το 1990 και το 2005, αντίστοιχα. Ακόμη, οι συνολικές εκπομπές των PM_{10} μειώθηκαν το 2021, κατά 13,3% περίπου σε σχέση με το 2012 και κατά 28% στον ελλαδικό χώρο και 23,9% στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, μεταξύ των ετών 2006-2012.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη των επιπέδων, αλλά και της διαχρονικής εξέλιξης των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, PM_{10} και $PM_{2,5}$, τις τελευταίες δεκαετίες, στη μεγαλύτερη αστική περιοχή της Ελλάδας, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκε συλλογή και επεξεργασία των διαθέσιμων μετρήσεων, των

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, για τη χρονική περίοδο 2001 έως 2025. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από 8 αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του δικτύου ΕΔΠΑΡ του ΥΠΕΝ (Πειραιάς-1, Αριστοτέλους, Νέα Σμύρνη, Μαρούσι, Λυκόβρυση, Αγ. Παρασκευή, Θρακομακεδόνες, Ελευσίνα). Οι σταθμοί επελέγησαν με κριτήρια πληρότητας δεδομένων και χωρικής αντιπροσωπευτικότητας, σε σχέση με τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά, ώστε να καλύπτονται διαφορετικοί τύποι αστικού περιβάλλοντος (σταθμοί κυκλοφορίας, αστικού υποβάθρου, περιαστικοί βιομηχανικοί και περιαστικού υποβάθρου). Έτσι, επειδή η συγκεκριμένη μελέτη καλύπτει ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μετρήσεων των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, στη μεγαλύτερη αστική περιοχή της χώρας, δίνεται μία αρκετά ολοκληρωμένη εικόνα για την αξιολόγηση των επιπέδων της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον ελλαδικό χώρο.

Σε ορισμένους σταθμούς ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρατηρήθηκε έλλειψη καταγραφής δεδομένων, για μεγάλες ή μικρές χρονικές περιόδους, λόγω διαφόρων προβλημάτων συντήρησης των αναλυτών, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται μερικώς η διακύμανση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων που εξετάστηκαν σ' αυτή την εργασία.

Από τη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματική εργασίας, για τις συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

❖ Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, των PM_{10} και $PM_{2,5}$, παρουσιάστηκαν στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, των οποίων η θέση είναι παραπλεύρως κεντρικών οδικών αξόνων και σε περιοχές με πυκνή δόμηση, όπως το κέντρο της πόλης της Αθήνας και το λιμάνι του Πειραιά. Σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίσθηκαν στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση, στο σταθμό αστικού υποβάθρου Μαρούσι και στον περιαστικό βιομηχανικό σταθμό Ελευσίνα. Στους δύο πρώτους λόγω των τοπικών πηγών (καύση βιομάζας για θέρμανση, οχήματα), των δευτερογενών μετασχηματισμών, αλλά και της μεταφερόμενης ρύπανσης (τοπικά συστήματα ανέμου) από παρακείμενες περιοχές, ενώ στο βιομηχανικό σταθμό, λόγω των παρακείμενων βιομηχανικών εκπομπών (βιομηχανική δραστηριότητα, δυλιστήρια και λιμενικές εγκαταστάσεις του Θριάσιου Πεδίου). Πρέπει να

επισημανθεί ότι Λυκόβρυση και Μαρούσι βρίσκονται βόρεια-βορειοανατολικά, πλησίον της αστικής περιοχής της Αθήνας και επομένως δέχονται την επίδραση της επικρατούσας διεύθυνσης του ανέμου στο λεκανοπέδιο, που είναι, είτε Βορειοανατολική, είτε Νοτιοδυτική και επομένως σημαντικά μεταφερόμενα φορτία ρύπανσης από παρακείμενες περιοχές. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου παρουσιάστηκαν οι μικρότερες συγκεντρώσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, εξαιτίας κυρίως έλλειψης τοπικών πηγών.

- ❖ Διαχρονικά την περίοδο 2001-2025, σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, παρατηρήθηκε μια πτωτική τάση στις μέσες ετήσιες και μηνιαίες συγκεντρώσεις των χονδρόκοκκων (PM_{10}), αλλά και των λεπτόκοκκων ($PM_{2,5}$) αιωρούμενων σωματιδίων, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Μεγαλύτερη μείωση, όσον αφορά τα επίπεδα των PM_{10} παρατηρήθηκε στους σταθμούς υποβάθρου Λυκόβρυση και Μαρούσι, ενώ η μικρότερη πτωτική τάση εμφανίζεται στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας και στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου. Ειδικότερα, την περίοδο μετά το 2010, σ' όλους τους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, μειώνονται με σημαντικό ρυθμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως, στη σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, που προαναφέρθηκε.
- ❖ Πρέπει να επισημανθεί ότι στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, την περίοδο 2001-2025, υπήρξαν συστηματικές υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ετήσιων ορίου των $40\mu g/m^3$ και $25\mu g/m^3$, αντίστοιχα. Ειδικότερα, όσον αφορά τα PM_{10} , οι υπερβάσεις ήταν περισσότερες στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας (Πειραιάς-1 και Αριστοτέλους), στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση και στον αστικό υποβάθρου Μαρούσι, και κυρίως την περίοδο 2001-2010. Κατά την υπόλοιπη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου ορίου των PM_{10} και μόνο στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας. Όσον αφορά τα $PM_{2,5}$, παρατηρήθηκε μικρός αριθμός υπερβάσεων του ετήσιου θεσμοθετημένου ορίου μόνο στο σταθμό αστικής κυκλοφορίας Πειραιάς-1 και στο σταθμό περιαστικού υποβάθρου Λυκόβρυση. Όμως, με τα νέα χαμηλότερα ετήσια όρια που θεσπίζει η Οδηγία 2024/2881, σχεδόν σ' όλους τους

σταθμούς που εξετάστηκαν, υπάρχουν συνεχείς υπερβάσεις των PM_{10} και $PM_{2,5}$, για όλα τα έτη της περιόδου μελέτης

- ❖ Από τη μηνιαία και εποχική ανάλυση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ στους επιλεγμένους αντιπροσωπευτικούς σταθμούς ελέγχου ατμοσφαιρική ρύπανσης, στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, την περίοδο 2001-2025, προέκυψε ότι στις περισσότερες περιοχές υπήρξε σαφής εποχικότητα, με μέγιστες τιμές το χειμώνα και ελάχιστες το καλοκαίρι. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων, στις εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (ειδικά με την αύξηση της καύσης βιομάζας μετά το 2011) και στις αυξημένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες τη χειμερινή περίοδο του έτους, καθώς και στις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών (θερμική αναστροφή, αιολικό δυναμικό, τοπικά συστήματα ανέμου, κλπ) κάθε εποχής του έτους. Επίσης, η μείωση των συγκεντρώσεων των PM_{10} και $PM_{2,5}$ τους θερινούς μήνες πιθανώς να οφείλεται στην ύφεση των δραστηριοτήτων της πόλης και επομένως τη μείωση της κυκλοφορίας των οχημάτων εξαιτίας των καλοκαιρινών διακοπών. Αντίθετα, στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου Αγία Παρασκευή και Θρακομακεδόνες οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάστηκαν την άνοιξη, αλλά και το καλοκαίρι, πιθανότατα εξαιτίας της μεταφοράς σκόνης από παρακείμενες αστικές περιοχές και των δευτερογενών σχηματισμών σωματιδίων, λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών αυτήν την περίοδο του έτους (επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου σε σχέση με τη θέση των σταθμών, ηλιοφάνεια, κλπ). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι περιοχές αυτές δεν επιβαρύνονται ιδιαίτερα από τοπικές πηγές καύσης βιομάζας τη χειμερινή περίοδο του έτους. Η ανοιξιάτικη έξαρση κατά ένα ποσοστό πιθανότατα οφείλεται και στα επεισόδια μεταφοράς Αφρικανικής Σκόνης από τη Σαχάρα, τα οποία εμφανίζουν τη μέγιστη συχνότητα και ένταση στην Ελλάδα κατά τους ανοιξιάτικους μήνες. Στους σταθμούς περιαστικού υποβάθρου λόγω των παρατηρούμενων χαμηλότερων επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων τα επεισόδια αυτά έχουν ισχυρότερο αποτύπωμα σε σχέση με τους άλλους σταθμούς. Τέλος, η μηνιαία μεταβολή των PM_{10} και $PM_{2,5}$ μπορεί να αλλάζει από έτος σε έτος λόγω και των φυσικών πηγών τους (μεταφορά σκόνης από ξηρές περιοχές εντός και εκτός χώρας, θαλάσσια και βιογενή αερολύματα, κλπ) στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

- ❖ Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, οι εποχικές μεταβολές των εκπομπών των PM_{10} και $PM_{2,5}$, αλλά και οι εποχικές μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών, επηρεάζουν σημαντικά τη διασπορά και τις χημικές διεργασίες (δευτερογενείς μετασχηματισμούς) των σωματιδιακών ατμοσφαιρικών ρύπων.
- ❖ Επίσης, προκύπτει ότι πιθανότατα το σημαντικότερο πρόβλημα των χονδρόκοκκων (PM_{10}), αλλά και των λεπτόκοκκων ($PM_{2,5}$) αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας προέρχεται, τόσο από οδικές μεταφορές, όσο και από άλλες πηγές όπως η θέρμανση κατοικιών (καύση βιομάζας τη χειμερινή περίοδο) και δευτερογενείς μετασχηματισμούς. Επίσης, η μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών (κυρίως η διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου) και της επαναιώρησης της σκόνης, καθώς και τα μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων, ειδικά στους σταθμούς υποβάθρου.
- ❖ Έτσι, διαπιστώνεται ότι η διαχρονική μείωση των επιπέδων των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$, την περίοδο 2001-2025, οφείλεται κυρίως στα μέτρα που έχει λάβει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελλάδα με σκοπό την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- ❖ Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως, στη σημαντική μείωση των συνολικών εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία αποδίδεται κυρίως στη βελτίωση της τεχνολογίας και στην ανανέωση του στόλου των οχημάτων, της ολοκλήρωσης μεγάλων κυκλοφοριακών έργων, της διεύρυνσης της χρήσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (συνεχής επέκταση των γραμμών του μετρό, τραμ, κλπ), στην αλλαγή του ενεργειακού μείγματος με αυξημένη χρήση φυσικού αερίου και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις βιομηχανίες και στη θέρμανση των κατοικιών και της αυστηρότερης περιβαλλοντικής νομοθεσίας στον τομέα της βιομηχανίας και της συνεχούς αυστηροποίησης των μέτρων ελέγχου εκπομπής ρύπων, καθώς και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μονάδων παραγωγής. Επιπλέον, η ελληνική οικονομική κρίση, ειδικά μετά το 2010, μείωσε τον αριθμό των Ι.Χ. που κυκλοφορούσαν στους δρόμους και τη χρήση καυσίμων για θέρμανση. Επίσης, κατά την περίοδο της πανδημίας COVID-19, οι περιορισμοί κυκλοφορίας που εφαρμόστηκαν τα έτη 2020-2021, μείωσε τον αριθμό των Ι.Χ. που κυκλοφορούσαν στους δρόμους, με αποτέλεσμα οι εκπομπές σωματιδιακών ρύπων από μεταφορές να μειωθούν σημαντικά

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

- ❖ Επιπρόσθετα, η οριοθέτηση νέων λεωφορειολωρίδων αύξησαν τη μέση ταχύτητα των λεωφορείων καθιστώντας τα πιο ελκυστικά για το κοινό, με αποτέλεσμα περισσότερα άτομα να χρησιμοποιούν το λεωφορείο μειώνοντας περαιτέρω τη χρήση των αυτοκινήτων. Επίσης, η αντικατάσταση του ορυκτού καυσίμου με φυσικό αέριο έχει βοηθήσει στη σημαντική μείωση των εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Επιπρόσθετα, έχουν εφαρμοστεί τα προγράμματα ενεργειακής αναβάθμισης των κτιρίων, με την εφαρμογή μεταξύ άλλων καλύτερης θερμικής μόνωσης των τοίχων και των κουφωμάτων, που μειώνουν τις απώλειες θερμότητας

Έτσι, από την παραπάνω ανάλυση των μετρήσεων από το δίκτυο σταθμών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας αναδεικνύεται η έντονη χωρική και εποχική ανομοιογένεια των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή του λεκανοπεδίου. Σημαντικό επίσης, είναι να τονισθεί ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις και οι περισσότερες υπερβάσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, στους σταθμούς αστικής κυκλοφορίας, κατά μήκος των οδικών αξόνων (σε σύγκριση με τους σταθμούς σε σημεία υποβάθρου) πιθανότατα οφείλονται στις εκπομπές κυρίως από τα οχήματα και την πυκνή δόμηση του αστικού κέντρου της πόλης της Αθήνας.

Επομένως, γίνεται σαφές ότι τα αιωρούμενα σωματίδια δεν συνιστούν απλώς έναν δείκτη ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αλλά έναν πολυπαραγοντικό παράγοντα κινδύνου που επηρεάζει άμεσα τη δημόσια υγεία, το φυσικό περιβάλλον και τα μνημεία. Η επίδραση των PM_{10} , $PM_{2,5}$ και των υπέρλεπτων σωματιδίων (UFPs) εκτός από το αναπνευστικό σύστημα, όπως επισημαίνεται σε πρόσφατη βιβλιογραφία, δημιουργεί καρδιαγγειακά επεισόδια, νευρολογικές βλάβες και επιπλοκές στην κύηση, ενώ η απουσία ενός ασφαλούς κατώτατου ορίου έκθεσης, συνεπάγεται ότι ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αυξάνεται η πιθανότητα εκδήλωσης χρόνιων νοσημάτων, όπως ο διαβήτης, η άνοια και οι αυτοάνοσες διαταραχές. Στην Ελλάδα, η γήρανση του πληθυσμού επιτείνει αυτή την ευαλωτότητα. Παράλληλα, τοπικές ιδιομορφίες όπως η εκτεταμένη ακτογραμμή και η γειτνίαση με τη Βόρεια Αφρική επιβαρύνουν το υπόβαθρο των σωματιδίων στην περιοχή, εξαιτίας των θαλάσσιων υδροσταγονιδίων στις παράκτιες περιοχές και της μεταφερόμενης αφρικανικής

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

σκόνης, δυσχεραίνοντας την επίτευξη στόχων χαμηλών επιπέδων συγκεντρώσεων σωματιδίων.

Η έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια όμως εκτός από την βλαβερή επίδραση στην υγεία, προκαλεί σημαντικές διαταραχές στα οικοσυστήματα, αλλοιώνοντας τη χημική σύσταση της ατμόσφαιρας, παρεμποδίζοντας τη φωτοσύνθεση στα φυτά και μεταφέρει βαρέα μέταλλα στα ύδατα. Στο πεδίο της πολιτιστικής κληρονομιάς, ο σχηματισμός «μαύρης κρούστας» στις μαρμάρινες επιφάνειες επιταχύνει τη φθορά των μνημείων. Οι διαπιστώσεις αυτές καθιστούν επιτακτική την ανάγκη προσέγγισης του αυστηρού ορίου των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που συστήνει ο ΠΟΥ για τα $\text{PM}_{2,5}$. Αν και η βιομηχανία διαθέτει πλέον εξελιγμένα συστήματα κατακράτησης (ηλεκτροστατικά φίλτρα, σακκόφιλτρα, κυκλώνες), η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τη συνεχή επιτήρηση και τη δυνατότητα συγκράτησης των πολύ λεπτών σωματιδίων.

Ενόψει της εφαρμογής της αναθεωρημένης Ευρωπαϊκής Οδηγίας για την Ποιότητα του Αέρα, που θέτει αυστηρά δεσμευτικά όρια για το 2030 ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα $\text{PM}_{2,5}$ και $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα PM_{10}), η Αττική καλείται να αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις. Η διαχρονική εξέλιξη των μετρήσεων δείχνει ότι περιοχές όπως η Αγία Παρασκευή και οι Θρακομακεδόνες (με μέσες τιμές PM_{10} $24\text{-}25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $\text{PM}_{2,5}$ $12\text{-}13 \mu\text{g}/\text{m}^3$) βρίσκονται σε τροχιά εναρμόνισης. Αντίθετα, σταθμοί με επιβαρυνόμενο κυκλοφοριακό φόρτο ή βιομηχανική δραστηριότητα, όπως ο Πειραιάς-1, η Αριστοτέλους, η Ελευσίνα, απέχουν αρκετά από τους νέους στόχους.

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

Κατά συνέπεια, η επίτευξη των νέων περιβαλλοντικών στόχων απαιτεί μια πολυδιάστατη στρατηγική. Αυτή οφείλει να εστιάσει στον αυστηρότερο έλεγχο της ανεξέλεγκτης καύσης βιομάζας στα αστικά κέντρα, στην ουσιαστική αναβάθμιση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς και στη μείωση της αλόγιστης χρήσης των ιδιωτικών οχημάτων, στη συστηματική παρακολούθηση των βιομηχανικών εκπομπών και στον εκσυγχρονισμό του εθνικού δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόγλωσση Βιβλιογραφία

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

Αναστασιάδου, Π. (2020). Μελέτη των επιπέδων της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Θεσσαλονίκης με αισθητήρες χαμηλού κόστους. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Αραμπατζή, Ε. (2025). Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Βαλαβανίδης, Α., Περδικάρης, Σ., & Βλαχογιάννη, Θ. (2013). Ατμοσφαιρική ρύπανση από την καύση βιομάζας σε τζάκια σε αστικές περιοχές και Επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων από εισπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια. Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Αθηνών.

Βαλεριάνου, Κ. (2019). Ανάλυση μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες αστικές περιοχές. Μελέτη περίπτωσης: Η ποιότητα της ατμόσφαιρας στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Βαρσαμίδης, Χ. (2018). Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας: Επίπεδα, χρονικές διακυμάνσεις και συσχετίσεις. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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

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

Γεωργιώτη, Ε. (2017). Η επίδραση της ατμοσφαιρικής σωματιδιακής ρύπανσης στη δημόσια υγεία των πληθυσμών των μεγάλων αστικών κέντρων. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Γιαμμάκης, Α. (2025). Οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία, το κλίμα και το περιβάλλον. Μελέτη της εξέλιξης της ρύπανσης του αέρα από αιωρούμενα σωματίδια PM10 και PM2.5 στην πόλη του Πειραιά από το 2007 μέχρι σήμερα και των επιπτώσεων της στην υγεία των κατοίκων. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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

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

Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο. (2025). Ειδική έκθεση 02/2025: Αστική ρύπανση στην ΕΕ – Καθαρότερος ο αέρας στις πόλεις, αλλά η ρύπανση εξακολουθεί να έχει σημαντικό κόστος για

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

την υγεία. Εκδόσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
<https://www.eca.europa.eu/el/publications?ref=SR-2025-02>

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

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

Καλπαξίδη, Ε. (2024). Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε αστικές και περιφερειακές περιοχές: Χωροχρονικές μεταβολές των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων σε μεγάλες ελληνικές πόλεις. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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

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

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

Κελέσης, Α.Γ., Κασσωμένος, Π., Καρακατσούλη, Ε., Κελέση, Δ., & Πετρακάκης, Μ.Ι. (2014). Σύγκριση των επιπέδων του βενζολίου σε αστικές περιοχές της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. 5ο Διεθνές Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας (σελ. 58 (CD)). Θεσσαλονίκη, 14-16 Μαρτίου.

Κοινή Υπουργική Απόφαση Η.Π. 14122/549/Ε103. (2011). Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας (ΦΕΚ 1355/Β/14-6-2011). Κουιμτζής, Θ., & Σαμαρά, Κ. (1994). Έλεγχος αέριας ρύπανσης. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

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

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

Λίτου, Φ. (2016). Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια στη Δυτική Μακεδονία. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Λίτσας, Ν. (2024). Αιωρούμενα σωματίδια και ποιότητα αέρα σε βιομηχανικές περιοχές: Η περίπτωση της κοιλάδας Κοζάνης-Πτολεμαΐδας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

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

Μέντης, Β. (2017). Η επίδραση των αεροπορικών μεταφορών στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον: Η περίπτωση του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.

Μπάης, Α., Μελάς, Δ., & Μπαλής, Δ. (2011). Ατμοσφαιρική τεχνολογία [Σημειώσεις μαθήματος]. ΑΠΘ, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας.

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

Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας. (2016). «Έκθεση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2005-2016», Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωρικού Σχεδιασμού, Τμήμα Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη.

Πετρακάκης, Μ.Ι., Κελέσης, Α.Γ., Τζουμάκα, Π.Ν., Ζουμάκης, Ν., Κασσωμένος, Π., Κανελλοπούλου, Ζ., Τσακνιά, Α., & Κούτσαρη, Ε. (2011). Το Βενζόλιο και τα Αιωρούμενα Σωματίδια PM_{2.5} στην Περιοχή της Θεσσαλονίκης. 4ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 18-20 Μαρτίου 2011.

Πετρακάκης, Μ.Ι., Κελέσης, Α.Γ., Τζουμάκα, Π., Σαμαρά, Κ., & Κασσωμένος, Π. (2014). «Η επίδραση της οικονομικής κρίσης στα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων στη ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης». 5ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη 14-16 Μαρτίου 2014.

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

Πετροπούλου, Γ. (2020). Ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή Μεγαλόπολη Ν. Αρκαδίας. Πηγές - Επιπτώσεις - Ο ρόλος του ΑΗΣ. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Ράρης, Θ. (2023). Επιπτώσεις των Αιωρούμενων Σωματιδίων στην Ανθρώπινη Υγεία. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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

Ρίζος, Δ. (2019). Αέρια ρύπανση προερχόμενη από αιωρούμενα σωματίδια βιομηχανικών μονάδων και τεχνολογίες αντιρρύπανσης αυτής. Η περίπτωση του Θριάσιου Πεδίου Αττικής. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Σμοκοβίτης, Α. (2014). Φυσιολογία (8η έκδ.). Εκδόσεις Κυριακίδη.

Σούλη, Α. (2021). Αιωρούμενα σωματίδια και ποιότητα αέρα σε αστικές περιοχές: εφαρμογή στην πόλη της Ορεστιάδας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

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

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Τσάμη, Ε. (2023). Ατμοσφαιρική ρύπανση και επιδράσεις στο κλίμα και στον άνθρωπο. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

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

Τσίχλας, Σ. (2019). Η επίδραση των αερολυμάτων (aerosols) ως σχηματισμός δευτερογενών ατμοσφαιρικών σωματιδίων και ιόντων και ως αποτελεσματικών καταλυτών στις ατμοσφαιρικές χημικές διεργασίες και τη ρύπανση. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΑΠ, Πάτρα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας [Υ.Π.Ε.Ν.]. (2001-2025). Ετήσιες Εκθέσεις ποιότητας της ατμόσφαιρας 2001-2025, Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας–ΕΔΠΑΡ, Αθήνα, Ανακτήθηκε από <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ektheseis/>

ΥΠΕΝ-ΥΠΕΚΑ, 2015, Ετήσια έκθεση Ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας–ΕΔΠΑΡ, Αθήνα, 2015.

Φωτιάδη, Α. (2015). Γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας [Διαφάνειες παρουσίασης]. Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Πατρών. <https://eclass.upatras.gr/modules/document/document.php?course=ENV109>

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

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

Χριστοφορίδου, Δ. (2014). «Η ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές και Ευρωπαϊκές μεγαλουπόλεις». Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: ΕΑΠ.

Ψαθάς, Μ. (2015). Τεχνολογίες αντιρρύπανσης για τις εκπομπές καυσαερίων των μηχανών εσωτερικής καύσης οχημάτων. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: ΕΑΠ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Akimoto H & Hirokawa J (2020) Atmospheric Multiphase Chemistry

Akritidis, D., Georgoulas, A. K., Steffens, B., Pozzer, A., & Zanis, P. (2025). The future health burden of air pollution in Greece and the associated drivers. Science of the Total Environment, 994, 179897. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969725015384>

Akritidis, D., Zanis, P., Georgoulas, A., K., Papakosta, E., Tzoumaka, P., Kelessis, A., 2021, Implications of COVID-19 Restriction Measures in Urban Air Quality of Thessaloniki, Greece:

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

A Machine Learning Approach, Atmosphere, 12, 1500. <https://doi.org/10.3390/atmos12111500>.

Al-Kindi, S. G., Brook, R. D., Biswal, S., et al. (2020). Environmental determinants of cardiovascular disease: Lessons learned from air pollution. *Nature Reviews Cardiology*, 17, 656–672. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32382149/>

Alimi, O. S., Budhz, J. V., Hernandez, L. M., & Tufenkji, N. (2018). Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Science of the Total Environment*, 633, 1270–1281. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29265806/>

Andreae, M. O., & Gelencsér, A. (2006). Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10), 3131–3148. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3131-2006>

Anusasananan, P., Suwanarat, S., & Thangprasert, N. (2023). The effect of meteorological parameters on air particulate matter. *Journal of Physics: Conference Series*, 2653, 012068. https://www.researchgate.net/publication/376850215_The_effect_of_meteorological_parameter_s_on_air_particulate_matter

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

Athens is suffocating: a new study explains why the capital's air is dangerous. <https://en.rua.gr/2025/11/01/athens-is-suffocating-a-new-study-explains-why-the-capitals-air-is-dangerous>

Bedard, K., & Krause, K. H. (2007). The NOX family of ROS-generating NADPH oxidases: physiology and pathophysiology. *Physiological Reviews*, 87(1), 245-313. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17237347/>

Begou, P., Evagelopoulos, V., & Charisiou, N. D. (2024). Air pollution levels at an area under energy transition (Western Macedonia, Greece). *E3S Web of Conferences*, 585, 09009. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/115/e3sconf_iced2024_09009/e3sconf_iced2024_09009.html

Bimenyimana, E., Sciare, J., Pikridas, M., Oikonomou, K., Iakovides, M., Vasiliadou, E., Savvides, C., & Mihalopoulos, N. (2026). Persistent high PM pollution in the Eastern Mediterranean and Middle East: Insights from long-term observations and source apportionment in Cyprus. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 26, 1605–1622. <https://acp.copernicus.org/articles/26/1605/2026/>

Bond, T. C., & Bergstrom, R. W. (2006). Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review. *Aerosol Science and Technology*, 40(1), 27-67. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786820500421521>

Bongaerts, E., Lecante, L. L., Bove, H., et al. (2022). Maternal exposure to ambient black carbon particles and their presence in maternal and fetal circulation and organs: An analysis of two independent population-based observational studies. *The Lancet Planetary Health*, 6(10), e804–e811. [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00200-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00200-5/fulltext)

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Boogaard, H., Andersen, Z. J., Brunekreef, B., Forastiere, F., Forsberg, B., Hoek, G., Krzyzanowski, M., Malmqvist, E., Nieuwenhuijsen, M., & Hoffmann, B. (2023). Clean air in Europe for all: A call for more ambitious action. *Environmental Epidemiology*, 7(2), e245. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10097564/>

Braithwaite, I., Zhang, S., Kirkbride, J. B., Osborn, D. P. J., & Hayes, J. F. (2019). Air pollution (particulate matter) exposure and associations with depression, anxiety, bipolar, psychosis and suicide risk: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*, 127(12), 126002-1–126002-23. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31850801/>

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., ... & Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38), 9518-9523. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30181279/>

Buteau, S., Belkaibech, S., Bilodeau-Bertrand, M., Hatzopoulou, M., Smargiassi, A., & Auger, N. (2020). Association between Kawasaki disease and prenatal exposure to ambient and industrial air pollution: A population-based cohort study. *Environmental Health Perspectives*, 128(10), 107006. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33074736/>

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

Cheng, S. L., Hedges, M., Keski-Rahkonen, P., et al. (2024). Multiomic signatures of traffic-related air pollution in London reveal potential short-term perturbations in gut microbiome-related pathways. *Environmental Science & Technology*, 58, 8771–8782. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38728551/>

Chinago, A. B., & Ajiboye, S. A. (2024). The impact of climate change on air pollution: A review of current evidence. *Journal of Pollution Effects & Community Health*, 3(2). <https://doi.org/10.58489/2836-3590/022>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., .. & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140673617305056>

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

Desservettaz, M., Pikridas, M., Stavroulas, I., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Hatzianastassiou, N., Sciare, J., Mihalopoulos, N., & Bourtsoukidis, E. (2023). Emission of volatile organic compounds from residential biomass burning and their rapid chemical transformations. *Science of the Total Environment*, 903, 166592. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723052178>

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

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Dilara, P. (2024). Clean air policy update. United Nations Economic Commission for Europe https://unece.org/sites/default/files/2024-10/19_Dilara_Clean%20Air%20Policy%20Update.pdf

Dimitriou K., P.A. Kassomenos, A.K. Paschalidou (2013): Assessing air quality with regards to its effect on human health in the European Union through air quality indices. *Ecological Indicators*, 27, 108-115.

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

Donahue, N. M. (2018). Air pollution and air quality. In *Green chemistry: An inclusive approach* (pp. 151-176). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00007-8>

Eleftheriadis K., Balis D., Ziomas I.C., Colbeck I., Manalis N., (1998) Atmospheric aerosol and gaseous species in Athens, Greece. *Atmos. Environ.*, 32(12): 2183-2191.

Eleftheriadis K., Ochsenkuhn K.M., Lymperopoulou Th., Karanasiou A., Razos P., Ochsenkuhn-Petropoulou M., (2014) Influence of local and regional sources on the observed spatial and temporal variability of size resolved atmospheric aerosol mass concentrations and water- soluble species in the Athens metropolitan area. *Atmos. Environ.*, 97: 252–261.

Esteban-Cantillo, O. J., Menendez, B., & Quesada, B. (2024). Climate change and air pollution impacts on cultural heritage building materials in Europe and Mexico. *Science of the Total Environment*, 921, 170945. <https://hal.science/hal-04759613v1/file/climate%20change%20and%20air%20pollution.pdf>

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

European Committee for Standardization. (2023). Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM₁₀ or PM_{2,5} mass concentration of suspended particulate matter (Standard No. EN 12341:2023). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/9e212b76-3171-40b4-9d69-07409bc6bf75/en-12341-2023>

European Environment Agency. (2026). Zero-pollution, decarbonisation, and circular economy in energy-intensive industries (Briefing) <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/zero-pollution-decarbonisation-and-circular-economy-in-energy-intensive-industries>

European Environmental Agency. (2024). Greece – Air pollution country fact sheet. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/air-pollution-country-fact-sheets-2024>

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

Feng, M., Padula, M. P., Al Asaad, S., Bai, X., Cranfield, C., Town, S. E., Saad, S., Oliver, B. G., George, J., & Chen, H. (2025). Prolonged exposure to low-dose traffic-derived PM_{2.5} causes fatty liver disorder in mice. *Journal of Environmental Sciences*, 158, 621–632. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074225000324>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

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

Flocas, H.A., Assimakopoulos V.D., Helmis C.G. and Gusten H. (2003), VOC and O₃ Distributions over the Densely Populated Area of Greater Athens, Greece J. Appl. Meteor., 42, 1799–1810.

Florou, K., Liangou, A., Kaltsonoudis, C., Louvaris, E., Tasoglou, A., Patoulas, D., Kouvarakis, G., Kalivitis, N., Kourtchev, I., Kalberer, M., Tsagkarakaki, M., Mihalopoulos, N., & Pandis, S. N. (2024). Chemical characterization and sources of background aerosols in the eastern Mediterranean. Atmospheric Environment, 324, 120423. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231024000980>

Fujii, F., Egami, N., Inoue, M., & Koga, H. (2020). Weather condition, air pollutants, and epidemics as factors that potentially influence the development of Kawasaki disease. Science of the Total Environment, 741, 140469. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32610244/>

Fundamentals of Secondary Aerosol Formation, John Wiley & Sons Ltd, 2019

Gheissari, R., Liao, J., Garcia, E., Pavlovic, N., Gilliland, F. D., Xiang, A. H., & Chen, Z. (2022). Health outcomes in children associated with prenatal and early-life exposures to air pollution: A narrative review. Toxics, 10(8), 458. <https://www.mdpi.com/2305-6304/10/8/458>

Gokul, T., Ramesh Kumar, K., Veeramanikandan, V., Arun, A., Balaji, P., & Faggio, C. (2023). Impact of particulate pollution on aquatic invertebrates. Environmental Toxicology and Pharmacology, 100, 104146. linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1382668923000881

Hamanaka, R. B., & Mutlu, G. M. (2025). Particulate matter air pollution: Effects on the respiratory system. The Journal of Clinical Investigation, 135(17), e194312. <https://www.jci.org/articles/view/194312>

Health risks of air pollution in Europe: HRAPIE-2 project: updated guidance on concentration–response functions for health risk assessment of air pollution in the WHO European Region <https://www.who.int/publications/i/item/9789289062633>

Hill, W., Lim, E. L., Weeden, C. E., Lee, C., Augustine, M., Chen, K., Kuan, F.-C., Marongiu, F., Evans, E. J., Moore, D. A., Rodrigues, G. P., Matsushita, H., Hamilton, H., Rosa, A., Ramon, G., Skoulidis, F., Koch, A., Beattie, R. J., ... Swanton, C. (2023). Lung adenocarcinoma promotion by air pollutants. Nature, 616(7955), 159–167. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05874-3>

Hopke, P. K., Feng, Y., & Dai, Q. (2022). Source apportionment of particle number concentrations: A global review. Science of The Total Environment, 819, 153104. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722001942>

Hou, T., Jiang, Y., Zhang, J., Hu, R., Li, S., Fan, W., Chen, R., Zhang, L., Li, R., Qin, L., Gu, W., Wu, Y., Zhang, L., Zeng, X., Sun, Q., Mao, Y., & Liu, C. (2024). Kidney injury evoked by fine particulate matter: Risk factor, causation, mechanism and intervention study. Advanced Science, 11(43), 2403222. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39316383/>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Huang, F., Zhou, L., Lu, Y., Liao, R., Li, Y., & Li, M. (2024). Visualization and analysis of PM2.5, health effects, 2013 to 2023: Bibliometrics of PM2.5 and health effects. *Medicine*, 103(13), e37597 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39654189/>

Huang, X., Steinmetz, J., Marsh, E. K., Aravkin, A. Y., Ashbaugh, C., Murray, C. J. L., Yang, F., Ji, J. S., Zheng, P., Sorensen, R. J. D., Wozniak, S., Hay, S. I., McLaughlin, S. A., Garcia, V., Brauer, M., & Burkart, K. (2025). A systematic review with a Burden of Proof meta-analysis of health effects of long-term ambient fine particulate matter (PM2.5) exposure on dementia. *Nature Aging*. <http://dx.doi.org/10.1038/s43587-025-00844-y>

Im, U., Ye, Z., Schuhen, N., Chowdhury, S., Christensen, J. H., Geels, C., Hänninen, R., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Sofiev, M., Brandt, J., & Aunan, K. (2025). Europe will struggle to meet the new WHO Air Quality Guidelines. *npj Clean Air*, 1, Article 13. <https://doi.org/10.1038/s44407-025-00013-w>

Jacob J. D. (1999) *Introduction to atmospheric chemistry* Princeton University Press Princeton, New Jersey

Ji, Y., Song, F., Xu, B., Zhu, Y., Lu, C., & Xia, Y. (2025). Association between exposure to particulate matter during pregnancy and birthweight: A systematic review and a meta-analysis of birth cohort studies. *Journal of Biomedical Research*, 39(5), 538–548. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6352882/>

Kalogridis, A.-C., Vratolis, S., Liakakou, E., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., and Eleftheriadis, K. (2018). Assessment of wood burning versus fossil fuel contribution to wintertime black carbon and carbon monoxide concentrations in Athens, Greece. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 10219–10236. <https://acp.copernicus.org/articles/18/10219/2018/>

Karydis, V. A., Tsimpidi, A. P., Pozzer, A., Astitha, M., and Lelieveld, J.: Effects of mineral dust on global atmospheric nitrate concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 1491–1509, <https://doi.org/10.5194/acp-16-1491-2016>, 2016. <https://acp.copernicus.org/articles/16/1491/2016/>

Kaskaoutis, D. G., Grivas, G., Oikonomou, K., Tavernarakis, P., Papoutsidaki, K., Tsagkaraki, M., Stavroulas, I., Zarmas, P., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Gavrouzou, M., Dumka, U. C., Hatzianastassiou, N., Sciare, J., Gerasopoulos, E., & Mihalopoulos, N. (2022). Impacts of severe residential wood burning on atmospheric processing, water-soluble organic aerosol and light absorption, in an inland city of Southeastern Europe. *Atmospheric Environment*, 280, 119139. linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231022002047

Kassomenos P., Kotroni V., Kallos G. (1994). Analysis of climatological and air quality observations from Greater Athens Area. *Atmospheric Environment*, 29, 3671- 3688.

Kassomenos P, Skouloudis A.N., Lykoudis S, Flocas H.A., (1999), «Air-quality indicators for uniform indexing of atmospheric pollution over large metropolitan areas» *Atmospheric Environment* , 33, p.g. 1861—1879.

Kassomenos P., Vardoulakis S., Chaloulakou A., Paschalidou A., Grivas G., Borge R., Lumbreras J., 2014, «Study of PM10 and PM2.5 levels in three European cities: Analysis of intra and inter urban variations», *Atmospheric Environment*, 78, 153-163.

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

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

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

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

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

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

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

Kotrikla, A. M., Fameli, K. M., & Polydoropoulou, A. (2023, September 20–22). Monitoring of PM_{2.5} concentrations at six Greek islands with LCSs [Conference presentation]. 11th International Congress on Transportation Research (ICTR 2023), Heraklion, Crete, Greece. https://www.researchgate.net/publication/375742336_Monitoring_of_PM_25_concentrations_at_six_Greek_islands_with_LCSs

Kourtidis, K. A., Ziomas, I., Zerefos, C., Kosmidis, E., Symeonidis, P., Christophilopoulos, E., Karathanassis, S., & Mploutsos, A. (2002). Benzene, toluene, ozone, NO₂ and SO₂ measurements in an urban street canyon in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 36, 5355–5364. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231002005800>

Kuo, N. C., Lin, C. H., & Lin, M. C. (2022). Prenatal and early life exposure to air pollution and the incidence of Kawasaki disease. *Scientific Reports*, 12, 3415. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-07081-y>

Landrigan, P. J., Fuller, R., Acosta, N. J. R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., Baldé, A. B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J. I., Breyse, P. N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll-Seck, A. M., Cropper, M. L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Haines, A., ... Zhong, M. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. *The Lancet*, 391(10119), 462–512. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29056410>

Laskin, A., Laskin, J., & Nizkorodov, S. A. (2015). Chemistry of atmospheric brown carbon. *Chemical Reviews*, 115(10), 4333-4375. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr5006167>

Li, S., Huff, R. D., Rider, C. F., et al. (2024). Controlled human exposures to diesel exhaust or particle-depleted diesel exhaust with allergen modulates transcriptomic responses in the lung. *Science of the Total Environment*, 945, 173688. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972403835X>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Li, T., Fang, J., Tang, S., Du, H., Zhao, L., Wang, Y., Deng, F., Liu, Y., Du, Y., Cui, L., Shi, W., Wang, Y., Wang, J., Zhang, Y., Dong, X., Gao, Y., Shen, Y., Dong, L., Zhou, H., ... Shi, X. (2022). PM2.5 exposure associated with microbiota gut-brain axis: Multi-omics mechanistic implications from the BAPE study. *The Innovation*, 3(2), 100213. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35243467/>

Li, W., Bai, X., & Pan, Z. (2025). Air pollution and its impact on stone heritage sites: Mechanisms and mathematical models. *npj Heritage Science*, 3(1), 182. <https://www.nature.com/articles/s40494-025-01820-w>

Li, W., Ito, A., Wang, G., Zhi, M., Xu, L., Yuan, Q., Zhang, J., Liu, L., Wu, F., Laskin, A., Zhang, D., Zhang, X., Zhu, T., Chen, J., Mihalopoulos, N., Bougiatioti, A., Kanakidou, M., Wang, G., Hu, H., ... Shi, Z. (2025). Aqueous-phase secondary organic aerosol formation on mineral dust. *National Science Review*, 12, nwaf221. <https://academic.oup.com/nsr/article/12/7/nwaf221/8154540>

Li, W., Lin, G., Xiao, Z., Zhang, Y., Li, B., Zhou, Y., Ma, Y., & Chai, E. (2022). A review of respirable fine particulate matter (PM2.5)-induced brain damage. *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 15, 967174. <https://www.frontiersin.org/journals/molecular-neuroscience/articles/10.3389/fnmol.2022.967174/full>

Logothetis, S.-A., Kosmopoulos, G., Panagopoulos, O., Salamalikis, V., Kazantzidis, A. (2024). Forecasting the Exceedances of PM2.5 in an Urban Area. *Atmosphere*, 15, 594. <https://doi.org/10.3390/atmos15050594>.

Lockerby, D. A. (2025). A correction tensor for approximating drag on slow-moving particles of arbitrary shape and Knudsen number. *Journal of Fluid Mechanics*, 1022, R1. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/correction-tensor-for-approximating-drag-on-slowmoving-particles-of-arbitrary-shape-and-knudsen-number/24A36A6C4A6CB3301E18A6A596756095>

Manlhiot, C., Mueller, B., O'Shea, S., Majeed, H., Bernknopf, B., Labelle, M., Westcott, K. V., Bai, H., Chahal, N., Birken, C. S., et al. (2018). Environmental epidemiology of Kawasaki disease: Linking disease etiology, pathogenesis and global distribution. *PLoS One*, 13(2), e0191087. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29415012/>

Mantas E., Remoundaki E., Halari I., Kassomenos P., Theodosi C., Hatzikioseyan A., Mihalopoulos N., 2014, "Mass closure and source apportionment of PM2.5 by Positive Matrix Factorization analysis in urban Mediterranean environment", *Atmospheric Environment*, Vol. 94, 154-163.

Manousakas, M., Diapouli, E., Belis, C., Vasilatou, V., Gini, M., Lucarelli, F., Querol, X., Eleftheriadis, K. (2021). Quantitative assessment of the variability in chemical profiles from source apportionment analysis of PM10 and PM2.5 at different sites within a large metropolitan area. *Environ. Res.*, 192, 110257.

Maravelaki-Kalaitzaki, P. (2005). Black crusts and patinas on Pentelic marble from the Parthenon and Erechtheum (Acropolis, Athens). *Analytica Chimica Acta*, 532(2), 187–198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003267004014102>

Marín-Palma, D., Fernandez, G. J., Ruiz-Saenz, J., et al. (2023). Particulate matter impairs immune system function by up-regulating inflammatory pathways and decreasing pathogen response gene expression. *Scientific Reports*, 13, 12773. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-39921-w>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Mayntz, S. P., Mohamed, R. A., Mejdal, A., Møller, J. J. K., Lindholt, J. S., Diederichsen, A. C. P., Frohn, L. M., Brandt, J., Ketzel, M., Khan, J., & Lambrechtsen, J. (2025). Association between long-term fine particulate matter exposure and incident type 2 diabetes in a low-exposure Danish cohort: An AIRCARD analysis. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 19, 103298. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40982996/>

McCrindle, B. W., Rowley, A. H., Newburger, J. W., Burns, J. C., Bolger, A. F., Gewitz, M., Baker, A. L., Jackson, M. A., Takahashi, M., Shah, P. B., et al. (2017). Diagnosis, treatment, and long-term management of Kawasaki disease: A scientific statement for health professionals from the American Heart Association. *Circulation*, 135(17), e927–e999. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28356445/>

Mihalopoulos, N., Kerminen, V. M., Kanakidou, M., Berresheim, H., & Sciare, J., 2007, Formation of particulate sulfur species (sulfate and methanesulfonate) during summer over the Eastern Mediterranean: A modelling approach, *Atmospheric Environment*, 41(32), 6860-6871.

Milousis, A., Klingmüller, K., Tsimpidi, A. P., Kok, J. F., Kanakidou, M., Nenes, A., & Karydis, V. A. (2025). Impact of mineral dust on the global nitrate aerosol direct and indirect radiative effect. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(2), 1333–1351. <https://acp.copernicus.org/articles/25/1333/2025/>

Mitsos, D., Kantarelou, V., Palamara, E., Karydas, A. G., Zacharias, N., & Gerasopoulos, E. (2022). Characterization of black crust on archaeological marble from the Library of Hadrian in Athens and inferences about contributing pollution sources. *Journal of Cultural Heritage*, 53, 236–243. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207421001886>

Moraitou, G., Siotis, I., Yannas, I., & Dogani, I. (2000). Surface studies of the Parthenon colonnade. In *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* (pp. 437–444)

Neroladaki, A. M., Tsagkaraki, M., Papoutsidaki, K., Tavernaraki, K., Boufidou, F., Zampas, P., Tsiodra, I., Liakakou, E., Bougiatioti, A., Kouvarakis, G., Kalivitis, N., Kaltsonoudis, C., Karagioras, A., Balis, D., Michailidis, K., Kourtidis, K., Myriokefalitakis, S., Hatzianastassiou, N., Pandis, S. N., Nenes, A., Mihalopoulos, N., & Kanakidou, M. (2025). Spatial and temporal distribution of fine aerosol acidity in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25, 17953–17971. <https://acp.copernicus.org/articles/25/17953/2025/>

O'Hagan, D. T. (1996). The intestinal uptake of particles and the implications for drug and antigen delivery. *Journal of Anatomy*, 189(Pt 3), 477–482. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1167686/>

Orellano, P., Kasdagli, M.-I., Pérez Velasco, R., & Samoli, E. (2024). Long-term exposure to particulate matter and mortality: An update of the WHO Global Air Quality Guidelines systematic review and meta-analysis. *International Journal of Public Health*, 69, 1607683. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39399882/>

Paraskevopoulou D., E. Liakakou, E. Gerasopoulos, N. Mihalopoulos, 2015, Sources of atmospheric aerosol from long-term measurements (5 years) of chemical composition in Athens, Greece, *Science of the Total Environment* 527–528, 165–178.

Parliari D, Giannaros C, Papadogiannaki S and Melas D, De Marco, A., Proietti, C., Anav, A., Ciancarella, L., D'Elia, I., Fares, S., Fornasier, M. F., Fusaro, L., Gualtieri, M., Manes, F., Marchetto, A., Mircea, M., Paoletti, E., Piersanti, A., Rogora, M., Salvati, L., Salvatori, E.,

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Screpanti, A., Vialletto, G., Vitale, M., & Leonardi, C. (2019). Impacts of air pollution on human and ecosystem health, and implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy. *Environment International*, 125, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.064>

Paschalidou A.K., P. Kassomenos, P. Karanikola, 2015, Disaggregating the contribution of local dispersion and long-range transport to the high PM10 values measured in a Mediterranean urban environment, *Science of the Total Environment*, Vol. 527-528, Pages 119–125.

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

Popek, R., Przybysz, A., Gawrońska, H., Klamkowski, K., & Gawroński, S. W. (2018). Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 56–62. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651318306468>

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

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

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

Rasking, L., Koshy, P., Bongaerts, E., et al. (2023). Ambient black carbon reaches the kidneys. *Environment International*, 177, 107997. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412023002702>

Remoundaki, E., Kassomenos, P., Mantas, E., Mihalopoulos, N., Tsezos, M., 2013. «Composition and mass closure of PM2.5 in urban environment (Athens, Greece)» *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 72-82.

Ruffolo, S. A., La Russa, M. F., Rovella, N., & Ricca, M. (2023). The impact of air pollution on stone materials. *Environments*, 10(7), 119. <https://www.mdpi.com/2076-3298/10/7/119>

Ruiz-Ortega, M., Esteban, V., Ruperez, M., Sanchez-Lopez, E., Rodriguez-Vita, J., Carvajal, G., & Egido, J. (2006). Renal and vascular hypertension-induced inflammation: Role of angiotensin II. *Current Opinion in Nephrology and Hypertension*, 15(2), 159–166. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16481883/>

Rundblad, A., Das, S., Ginos, B. N. R., Matthews, J., Holven, K. B., Voortman, T., & Ulven, S. (2025). Exposure to fine particulate matter in adults is associated with immune cell gene expression related to inflammation, the electron transport chain, and cell cycle regulation. *Environmental Epigenetics*, 11(1), <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40510537/>

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

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Samara C., Voutsas D., Kouras A., Petrakakis M., Kelessis A., and Tzoumaka P., 2014, «PM2.5 and carbonaceous species in Thessaloniki, Greece during the economic recession period», Proceedings of 9th International Conference on Air Quality Science and Application, Garmisch-Partenkirchen, pp. 266, 24-28 March 2014.

Schraufnagel, D. E. (2020). The health effects of ultrafine particles. *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 311–317. <https://www.nature.com/articles/s12276-020-0403-3>

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

Short-Term Effects of Air Pollution on Mortality in the Urban Area of Thessaloniki, Greece (2023) <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/6/5305>

Son, Y., Carranza, C., Subramhanya, S., Gardner, C., Black, K., Jones, L., Meng, Q., Torres, M., Osornio Vargas, A., Zhang, J. J., O'Neill, M. S., Strickland, P. O., & Schwander, S. (2025). Correlations between human alveolar macrophage particulate matter load, air pollution particulate matter levels, and systemic inflammation markers in Mexico City. *Scientific Reports*, 15, 29903. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40813804/>

Sørensen, M., Poulsen, A. H., Nøhr, B., Khan, J., Ketzel, M., Brandt, J., Raaschou-Nielsen, O., & Jensen, A. (2024). Long term exposure to road traffic noise and air pollution and risk of infertility in men and women: Nationwide Danish cohort study. *BMJ*, 386, e080664. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39231578/>

Soukup, J. M., & Becker, S. (2001). Human Alveolar Macrophage Responses to Air Pollution Particulates Are Associated with Insoluble Components of Coarse Material, Including Particulate Endotoxin. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 171, 20–26. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11181108/>

Stavraka, T., Kapsomenakis, J., Poupkou, A., Douvis, K., & Kalabokas, P. (2025). The evolution of the interannual and seasonal variation of the main gaseous and particulate pollutants in Athens, Greece, for 2001–2023. *Environmental and Earth Sciences Proceedings*, 35(1), 41. <https://www.mdpi.com/3042-5743/35/1/41>

Thiagarajan, V., Nah, T., & Xin, X. (2024). Impacts of atmospheric particulate matter deposition on phytoplankton: A review. *Science of the Total Environment*, 950, 175280. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39122032/>

Thompson, J. E. (2018). Airborne particulate matter: Human exposure and health effects. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 60(5), 392–423. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29334526/>

The Lancet, Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, 396(10258), 1223–1249. [https://www.thelancet.com/article/S0140-6736\(20\)30752-2/fulltext](https://www.thelancet.com/article/S0140-6736(20)30752-2/fulltext)

Tsiodra, I., Tavernaraki, K., Grivas, G., Parinos, C., Papoutsidaki, K., Paraskevopoulou, D., Liakakou, E., Gogou, A., Bougiatioti, A., Gerasopoulos, E., Kanakidou, M., & Mihalopoulos, N. (2024). Spatiotemporal gradients of PAH concentrations in Greek cities and associated exposure impacts. *Toxics*, 12(4), 293. <https://www.mdpi.com/2305-6304/12/4/293>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Uzeloto, J. S., Ramos, D., Silva, B. S. A., et al. (2021). Mucociliary clearance of different respiratory conditions: A clinical study. *International Archives of Otorhinolaryngology*, 25(1), e35–e40. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33542749/>

Valavanidis, A., Vlachogianni, T., Loridas, S., & Fiotakis, C. (2015). Atmospheric pollution in urban areas of Greece and economic crisis. *Trends in Air Quality and Atmospheric Pollution Data, Research and Adverse Health Effects*. http://webapps.chem.uoa.gr/efs/scinews/Reports/PDF/ATMOSPH_POLLUT_GREECE.pdf

Van Pee, W., et al. (2024). Accumulation of fine black carbon particles in the human intestinal submucosa. *eBioMedicine*, 105000. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39580969/>

van Voorhis M, Knopp S, Julliard W, Fechner JH, Zhang X, Schauer JJ, et al. (2013) Exposure to Atmospheric Particulate Matter Enhances Th17 Polarization through the Aryl Hydrocarbon Receptor. *PLoS ONE* 8(12): e82545. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082545>

Vanbrabant, K., Van Dam, D., Bongaerts, E., et al. (2024). Accumulation of ambient black carbon particles within key memory-related brain regions. *JAMA Network Open*, 7, e245678. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38592718/>

Venkatesh, C., Choubey, S., Pandey, H., & Sahdev. (2026). Comparative review of industrial air pollution control technologies for particulate matter removal. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 13(4) <https://www.jetir.org/view?paper=JETIR2604272>

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

Vogel, F., Putero, D., Bonasoni, P., Cristofanelli, P., Zanatta, M., & Marinoni, A. (2025). Saharan dust transport event characterization in the Mediterranean atmosphere using 21 years of in-situ observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(21), 15453–15468. <https://acp.copernicus.org/articles/25/15453/2025/>

Vouitsis, I., Amanatidis, S., Ntziachristos, L., Kelessis, A., Petrakakis, M., Stamos, I., Mitsakis, E., & Samaras, Z. (2015). Daily and seasonal variation of traffic related aerosol pollution in Thessaloniki, Greece, during the financial crisis. *Atmospheric Environment*, 122, 577–587. <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/daily-and-seasonal-variation-of-traffic-related-aerosol-pollution/>

Vrijens, K., Winckelmans, E., Tsamou, M., et al. (2017). Sex-specific associations between particulate matter exposure and gene expression in independent discovery and validation cohorts of middle-aged men and women. *Environmental Health Perspectives*, 125(4), 660–669. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5381989/>

Wang, L., Wei, L. Y., Ding, R., Feng, Y., Li, D., Li, C., Malko, P., Syed Mortadza, S. A., Wu, W., Yin, Y., & Jiang, L.-H. (2020). Predisposition to Alzheimer's and age-related brain pathologies by PM2.5 exposure: Perspective on the roles of oxidative stress and TRPM2 channel. *Frontiers in Physiology*, 11, 155. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7054442/>

Warkentin, S., Fossati, S., Marquez, S., Nybo Andersen, A.-M., Andrusaityte, S., Avraam, D., Ballester, F., Cadman, T., Casas, M., de Castro, M., Chatzi, L., Elhakeem, A., d'Errico, A., Guxens, M., Grazuleviciene, R., Harris, J. R., Iñiguez Hernandez, C., Heude, B., Isaevska, E., ... Vrijheid, M. (2025). Ambient air pollution and childhood obesity from infancy to late

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

childhood: An individual participant data meta-analysis of 10 European birth cohorts. *Environment International*, 200, 109527. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412025002788>

Wathanavasin, W., Banjongjit, A., Phannajit, J., Eiam-Ong, S., & Susantitaphong, P. (2024). Association of fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure and chronic kidney disease outcomes: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 1048. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38200164/>

Wen, J., Zhang, J., Zhang, H., et al. (2024). Large-scale genome-wide association studies reveal the genetic causal etiology between air pollutants and autoimmune diseases. *Journal of Translational Medicine*, 22, 392. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38685026/>

Wollenweber, M., Schmitz, M., Albaseer, S. S., Schiwy, S., Reininger, N., Brack, W., Oehlmann, J., Curtius, J., Vogel, A. L., & Hollert, H. (2025). Aquatic ecosystems as a final receptor of atmospheric organic particulate-bound pollutants: a plea for the integration of aquatic ecotoxicology into the risk assessment of air pollution. *Environmental Sciences Europe*, 37(109). <https://link.springer.com/article/10.1186/s12302-025-01136-3>

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

Wu, J.-L., Chang, Y.-T., Lee, P.-C., Cheng, Y.-Y., Yu, T., Wong, P.-Y., Wu, C.-D., Chen, P.-S., & Li, C.-Y. (2026). Association between exposure to air pollution and kidney function decline. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 41(1), 112–124. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40758418/>

Xian, M., Ma, S., Wang, K., et al. (2020). Particulate Matter 2.5 Causes Deficiency in Barrier Integrity in Human Nasal Epithelial Cells. *Allergy Asthma Immunology Research*, 12(1), 56-71. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31743964/>

Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C., & Cong, Z. (2018). Review of brown carbon aerosols: Recent progress and perspectives. *Science of the Total Environment*, 634, 1475-1485. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29710646/>

Yan, Y., & Wang, Y. (2024). A review of atmospheric deterioration and sustainable conservation of calcareous stone in historical buildings and monuments. *Sustainability*, 16(23), 10751. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10751>

Yang, S., & Lian, G. (2020). ROS and diseases: Role in metabolism and energy supply. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 467(1-2), 1–12. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31813106/>

Yorifuji, T., Tsukahara, H., Kashima, S., & Doi, H. (2018). Intrauterine and early postnatal exposure to particulate air pollution and Kawasaki disease: A nationwide longitudinal survey in Japan. *The Journal of Pediatrics*, 193, 147–154.e2. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29212623/>

Yu, X., Qiu, Z., Zeng, X., Zhang, S., Tang, J., Wu, Y., Zhang, L., Huo, X., Liu, C., & Liu, D. (2025). Influences of PM_{2.5} on gut physiology, microbiota and metabolites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 307, 119423. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651325017683>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

Zachariah, J. P., Jone, P.-N., Agbaje, A. O., Ryan, H. H., Trasande, L., Perng, W., & Farzan, S. F. (2024). Environmental exposures and pediatric cardiology: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 149(24). <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIR.0000000000001234>

Zerefos, C. S., Tetsis, P., Kazantzidis, A., Amiridis, V., Zerefos, S. C., Luterbacher, J., ... & Papayannis, A. (2014). Further evidence of important environmental information content in red-to-green ratios as depicted in paintings by great masters. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(6), 2987–3015. <https://acp.copernicus.org/articles/14/2987/2014/acp-14-2987-2014.html>

Zhang, A., Wang, Y., Zhang, Y., Weber, R. J., Song, Y., Ke, Z., & Zou, Y. (2020). Modeling the global radiative effect of brown carbon: a potentially larger heating source in the tropical free troposphere than black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(4), 1901-1920. <https://acp.copernicus.org/articles/20/1901/2020/>

Zhao, N., Smargiassi, A., Chen, H., Choi, M. Y., Fritzler, M. J., Touma, Z., Aviña-Zubieta, J. A., & Bernatsky, S. (2026). Fine particulate matter air pollution and antinuclear antibodies. *Rheumatology*, 65(1), <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41131821/>

Πηγές Εικόνων

Εικόνα 1 Mauricio-Álvarez, L. E., Aceves-Fernandez, M. A., Pedraza-Ortega, J. C., Ramos-Arreguín, J. M., Mendoza-Ibarra, A., & Sotomayor-Olmedo, A. (2024). *Size Comparison of Particulate Matter (PM) with Human Hair and Beach Sand: A Visual Representation* [Figure]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Size-Comparison-of-Particulate-Matter-PM-with-Human-Hair-and-Beach-Sand-A-Visual_fig1_380788578

Εικόνα 2 National Cancer Institute. (2023, June 14). *Ultrafine particulate matter and lung cancer risk*. <https://dceg.cancer.gov/news-events/news/2023/ultrafine-pollution-lung>

Εικόνα 3 Pelgrims, I. (2024). *Assessing the benefits of hypothetical air quality interventions on chronic diseases in Belgium* [Παρουσίαση σε συνέδριο/Εκθεση]. Sciensano. https://www.sciensano.be/sites/default/files/ellis_airpollution_hi_ingridpelgrims.pdf

Εικόνα 4 Lim, E. Y., & Kim, G.-D. (2024). Particulate Matter-Induced Emerging Health Effects Associated with Oxidative Stress and Inflammation. *Antioxidants*, 13(10), 1256. <https://www.mdpi.com/2076-3921/13/10/1256>

Εικόνα 5. Διάταξη ηλεκτροστατικού φίλτρου(Βερούκιος, 2003).

Εικόνα 6. Διάταξη σακόφιλτρων.
<https://torch-air.com/blog/baghouse-filter-advantages-and-disadvantages>

Εικόνα 7. Διατάξεις πλυντρίδων (Βερούκιος 2003)

Διαδικτυακές πηγές

ΥΠΕΝ, 2025, Ανακτήθηκε στις 15-1-2026 από <http://www.ypen.gov.gr>

Αλέξανδρος Παζάλος «Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικές πόλεις. Αιτίες, επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον και τεχνολογίες ελέγχου για τη μείωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων»

<https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/ethnikes-apografes-kai-provleψεις-ekprobon-rypon>, Ανακτήθηκε στις 15-1-2026

Air Pollution Crisis in Greek Cities: Levels Exceed EU Limits, Threatening Public Health. Ανακτήθηκε από <https://greekcitytimes.com/2025/04/10/air-pollution-greek-cities>

Centers for Disease Control and Prevention. (n.d.). *About Kawasaki disease*. Ανακτήθηκε από <https://www.cdc.gov/kawasaki/about/index.html>

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

https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator
Ανακτήθηκε από energyeducation.ca

https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wet_scrubber
Ανακτήθηκε από energyeducation.ca

<https://torch-air.com/blog/baghouse-filter-advantages-and-disadvantages>
Ανακτήθηκε από torch-air.com

<https://www.statistics.gr>, Ανακτήθηκε στις 20-2-2026.

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

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