



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Διαχείριση Αποβλήτων MSc

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτρης Παπαναστασίου

Θεσσαλονίκη, Σεπτέμβριος 2023

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2023

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.

Θωμάς Παρής

Επιπτώσεις των Αιωρούμενων Σωματιδίων στην Ανθρώπινη Υγεία

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτρης Παπαναστασίου
Μέλος ΣΕΠ, ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Πέτρος Κοκκίνος
Μέλος ΣΕΠ, ΕΑΠ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Δημήτρη Παπαναστασίου για τη βοήθεια, την υπομονή και την καθοδήγηση του, κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συν-επιβλέποντα καθηγητή κύριο Πέτρο Κοκκίνο.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, στη σύζυγο μου Αλεξάνδρα και στον υιό μου Χριστόδουλο.

Περίληψη

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα παγκόσμιο πρόβλημα δημόσιας υγείας τις τελευταίες δεκαετίες. Τα σωματίδια αυτά προκύπτουν τόσο από φυσικές πηγές, όσο και από ανθρωπογενείς εκπομπές από τα αυτοκίνητα, τα πλοία, τα γεωργικά μηχανήματα και τις βιομηχανικές περιοχές. Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα και τα χαρακτηριστικά τους, όπως το μέγεθος τους, σχετίζονται με προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα, διερευνήθηκαν οι πιθανοί κίνδυνοι των αιωρούμενων σωματιδίων για την υγεία και μελετήθηκε η χημική σύσταση των PM, οι μετασχηματισμοί τους στην ατμόσφαιρα και οι τρόποι πρόκλησης δυσμενών επιπτώσεων. Επιπρόσθετα, συνοψίστηκαν μελέτες με αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{2.5} και PM₁₀ και στις επιπτώσεις τους. Επίσης, παρουσιάστηκε το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο και οι στόχοι μείωσης των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων.

Αυτό που είναι γνωστό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} είναι πιο επιβλαβή, σε σύγκριση με τα PM₁₀ και ενισχύουν την πρόκληση αναπνευστικών και καρδιαγγειακών προβλημάτων, καθώς και την ανάπτυξη του σακχαρώδους διαβήτη. Η κύρια οδός έκθεσης των ανθρώπων στα σωματίδια είναι η εισπνοή, τόσο σε εσωτερικούς, όσο και σε εξωτερικούς χώρους, γεγονός που θέτει σε κίνδυνο την υγεία τους. Εκτός από την περιβαλλοντική παρακολούθηση των σωματιδίων, είναι απαραίτητο να δοθεί προσοχή και στη χημική τους σύνθεση.

Λέξεις – κλειδιά: επιπτώσεις, αιωρούμενα σωματίδια, ανθρώπινη υγεία, νομοθεσία, ασθένειες, ρύπανση.

Abstract

Suspended solids are a worldwide public health problem in recent decades. These particles result from both natural and manmade emissions from cars, ships, agricultural machinery and industrial areas. The concentrations of suspended particles in atmospheric air and their characteristics, such as their size are related problems of human health.

In this thesis, the study of the effects of suspended particles on human health was carried out. In particular, the potential risks of suspended particles for health were investigated and the chemical compositions of PM, their transformations in the atmosphere and their modes of causing adverse effects were studied. In addition, studies of the main characteristics of suspended particles PM_{2.5} and PM₁₀ and their effects were summarized. Also, the current legislative framework and the targets for reducing the concentrations of suspended particles are presented.

From the literature review it is known that PM_{2.5} are more harmful, compared to PM₁₀ and enhance the development of respiratory and cardiovascular problems, as well as the development of diabetes mellitus. The main route of human exposure to particles is inhalation, which puts their health at risk. In addition to the environmental monitoring of particles, it is necessary to pay attention to their chemical composition.

Keywords: impacts, particulate matter, human health, legislation, disease, pollution

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	2
Κατάλογος Εικόνων	5
Κατάλογος Πινάκων	5
Εισαγωγή	6
Μεθοδολογία - Δομή	8
1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι	12
1.1 Εισαγωγή στους ατμοσφαιρικούς ρύπους	12
1.2 Κατηγορίες των ατμοσφαιρικών ρύπων	13
1.3 Πηγές των ατμοσφαιρικών ρύπων	14
1.4 Ρύποι των αιωρούμενων σωματιδίων	15
2. Αιωρούμενα σωματίδια	15
2.1 Εισαγωγή στα ΑΣ	16
2.2 Οι μορφές, το μέγεθος και η ταξινόμηση των ΑΣ	16
2.3 Οι μέθοδοι σχηματισμού των ΑΣ	18
2.4 Η χημική σύσταση των ΑΣ	18
3. Τρόποι εισχώρησης των ΑΣ στον ανθρώπινο οργανισμό	19
3.1 Εισπνεόμενα σωματίδια	19
3.2 Θωρακικά σωματίδια	21
3.3 Αναπνεόμενα σωματίδια	21

3.4 Αλληλεπιδράσεις των ΑΣ με άλλους ρύπους	22
4. Νομοθεσία για τα ΑΣ.....	24
4.1 Νομοθετικό πλαίσιο της Ε.Ε. – Βασική Ευρωπαϊκή Οδηγία	24
4.2. Ισχύον θεσμικό πλαίσιο	27
4.3. Οριακές τιμές της ποιότητας του αέρα για τα ΑΣ	29
5. Πρότυπα ποιότητας του αέρα στην Ελλάδα και την ΕΕ	32
5.2 Επίδραση των ΑΣ στο αναπνευστικό σύστημα	44
5.3 Επίδραση των ΑΣ στο καρδιαγγειακό σύστημα	52
5.4 Επίδραση των ΑΣ στην εμφάνιση διαβήτη τύπου Β	52
5.5 Επίδραση των ΑΣ στο καρκίνο του πνεύμονα.....	55
Συμπεράσματα	61
Βιβλιογραφία	65

Κατάλογος Εικόνων

<u>Εικόνα 1.</u> Διαφορετικοί τύποι σωματιδίων και σύγκριση των μεγεθών μεταξύ τους (Kumar & Dwivedi, 2022).	17
<u>Εικόνα 2.</u> Οι πιο σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικών ΑΣ και αερομεταφερόμενων μικροβίων στο περιβάλλον και η επίδραση τους στην ανθρώπινη υγεία και στις γεωργικές καλλιέργειες (Kumar & Dwivedi, 2022).....	44
<u>Εικόνα 3.</u> Παρουσίαση της επιρροής χώρων πρασίνου στο παιδικό άσθμα (Hu et al., 2023).....	48

Κατάλογος Πινάκων

<u>Πίνακας 1.</u> Η κατάσταση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρώπη (Eur-Lex, 2023).....	26
<u>Πίνακας 2.</u> Οριακές τιμές βασικών αιωρούμενων σωματιδίων (Eur-Lex, 2023).....	31
<u>Πίνακας 3.</u> Οριακή τιμή -στόχος των PM _{2,5} (Eur-Lex, 2023).....	32

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα έχει βελτιωθεί σημαντικά στις περισσότερες χώρες. Σε αυτό συμβάλει και η Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (UNECE), η οποία αποτελεί ένα φόρουμ όπου οι χώρες της Βόρειας Αμερικής, της δυτικής, κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης και της κεντρικής Ασίας, ενώνονται για να διαμορφώσουν τους τρόπους της οικονομικής τους συνεργασίας. Αυτό έχει επιτευχθεί με μια σειρά μέτρων για τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών στην ατμόσφαιρα και αυτών που ορίζονται από τα διάφορα πρωτόκολλα της Σύμβασης της Διασυννοριακής Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (UNECE, 2012).

Παρά την ύπαρξη της UNECE, υπάρχουν πειστικά στοιχεία ότι τα τρέχοντα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε τροποποιήσεις στο Πρωτόκολλο της Σύμβασης του 1999 του Γκέτεμποργκ για τη μείωση όλων των αερίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, του ευτροφισμού και τη μείωση των τιμών του όζοντος (UNECE, 2012; Janssen et al., 2012).

Σε μεγάλες αστικές περιοχές, η επίλυση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γίνεται ολοένα και δυσκολότερη. Η έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Ως εκ τούτου, η μείωση της έκθεσης του κοινού στην ατμοσφαιρική ρύπανση θα μπορούσε να μειώσει τους πρόωρους θανάτους και ένα σημαντικό αριθμό ασθενειών (Chen et al., 2007; Zheng et al., 2010).

Η έκθεση των ανθρώπων στο περιβάλλον επιφέρει επιπτώσεις στην υγεία τους, μέσω της εισπνοής των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η μελέτη των επιπτώσεων αυτών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Η μακροχρόνια και η οξεία έκθεση σε αυτούς τους ρύπους ενδέχεται να προκαλέσει διαφορετικής βαρύτητας επιπτώσεις στην υγεία (Chandia-Poblete et al., 2022).

Μετά από πολυετείς διαπραγματεύσεις, προέκυψε το πλέον εγκεκριμένο και αναθεωρημένο κείμενο, το οποίο έχει ως στόχο να προσδιορίζει τις εθνικές δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων που έπρεπε να επιτευχθούν από τις χώρες της UNECE από το 2020 και μετά. Το αναθεωρημένο

πρωτόκολλο περιλαμβάνει, για πρώτη φορά, δεσμεύσεις για μείωση των εκπομπών λεπτών σωματιδίων, όπως είναι τα PM_{2.5}. Επιπλέον, ο άνθρακας ή η αιθάλη περιλαμβάνονται πλέον στην αναθεώρηση ως σημαντικό συστατικό των PM_{2.5}, αφού ο άνθρακας είναι ένας ατμοσφαιρικός ρύπος που επηρεάζει τόσο την υγεία, όσο και την κλιματική αλλαγή (Janssen et al., 2012).

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία του ανθρώπου και συγκεκριμένα στην πρόκληση νοσημάτων του αναπνευστικού και του καρδιαγγειακού συστήματος, της εμφάνισης διαβήτη τύπου 2 και καρκίνου του πνεύμονα. Ταυτόχρονα, μέσω της μελέτης αυτής συνοψίζονται στοιχεία καινοτομίας που σχετίζονται με τις νέες τεχνολογίες και τις ορθές πρακτικές που έχουν προκύψει μέσα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά σε νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις των αιωρούμενων σωματιδίων και στον τρόπο που αυτά εμπλέκονται στα μεταβολικά νοσήματα και στην υγεία του ανθρώπου.

Μεθοδολογία - Δομή

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχει ως στόχο τη μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων και των επιπτώσεων τους όσον αφορά την πρόκληση νοσημάτων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση του θέματος ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση επιλεγμένων ηλεκτρονικών πηγών. Οι περισσότερες από τις πηγές αυτές αφορούσαν άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά, καθώς και άρθρα και ιστοσελίδες οργανισμών. Επίσης, μελετήθηκαν και ορισμένες μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες. Αξίζει να αναφερθεί ότι το χρονικό διάστημα δημοσίευσης των ηλεκτρονικών πηγών ήταν αρκετά πρόσφατο και περιορίστηκε στη χρονική περίοδο 2010-2023. Ωστόσο, αξιοποιήθηκαν και κάποιες επιστημονικές δημοσιεύσεις παλαιότερων ετών, από το 2002 έως το 2008.

Όσον αφορά τη δομή της διπλωματικής εργασίας, περιλαμβάνει πέντε κύρια κεφάλαια:

1^ο κεφάλαιο: Παρουσιάζονται η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι κατηγορίες και οι πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αιωρούμενα σωματίδια, προέρχονται από την

καύση των καυσίμων, όπως για παράδειγμα για την οικιακή θέρμανση και προκαλούν σημαντικά προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου, όπως παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος.

2^ο κεφάλαιο: Γίνεται αναφορά στα αιωρούμενα σωματίδια ως προς τις μορφές και το μέγεθος τους, τις μεθόδους σχηματισμού τους, τη χημική σύσταση και την ταξινόμησή τους. Αναλύεται η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, η οποία εξαρτάται από τις πηγές δημιουργίας τους. Όσον αφορά τις μεθόδους σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων, γίνεται ανάλυση για τα σωματίδια που προέρχονται από ιπτάμενη τεφρά, σκόνη, ομίχλη και καπνό. Η ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων γίνεται ανάλογα με τη χωρική προέλευση τους, όπως σε θαλάσσια και αστικά σωματίδια.

3^ο κεφάλαιο: Γίνεται αναφορά στους τρόπους που εισχωρούν τα αιωρούμενα σωματίδια στον άνθρωπο: α) εισπνεόμενα σωματίδια, β) θωρακικά σωματίδια και γ) αναπνεύσιμα σωματίδια. Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρεται ο τρόπος αλληλεπίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων με άλλους ρύπους. Το μέγεθος των σωματιδίων καθορίζει και το βαθμό διεισδυτικότητας τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Η αλληλεπίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων με άλλους ρύπους οδηγεί σε δευτερογενή παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων με διάφορους μηχανισμούς.

4^ο κεφάλαιο: Παρουσιάζεται η νομοθεσία που αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, το νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, και οι οριακές τιμές της ποιότητας του αέρα για τα αιωρούμενα σωματίδια. Τα θεσπιζόμενα όρια νομοθετήθηκαν γνωρίζοντας την επικινδυνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων για την υγεία του ανθρώπου. Οι οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων, σύμφωνα με το δίκαιο της ΕΕ (Eur-Lex, 2023), συνοψίζονται παρακάτω. Για τα PM10 έχουν οριστεί ως μέγιστο επιτρεπτό όριο τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για διάστημα 24 ωρών, με περίοδο ανοχής ανά 1 έτος στις 35 υπερβάσεις, ενώ για τα PM2.5 έχουν οριστεί ως μέγιστο επιτρεπτό όριο τα 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για διάστημα 1 έτους χωρίς καμία ανοχή για καμία υπέρβαση. Η Ε.Ε έχει εκδώσει την Οδηγία 2008/50/ΕΚ, για τα PM10 έχει οριστεί ως μέγιστο επιτρεπτό όριο τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και για τα PM2.5 έχει οριστεί ως μέγιστο επιτρεπτό όριο τα 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5^ο κεφάλαιο: Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό αυτής της

διπλωματικής εργασίας, αφού γίνεται αναφορά στα μεταβολικά νοσήματα που προκαλούνται από την έκθεση του ανθρώπου στα αιωρούμενα σωματίδια. Οι κύριες επιπτώσεις των PM10 και PM2.5, σχετίζονται με το αναπνευστικό σύστημα, με τις παθήσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα να ακολουθούν. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής, δείχνει ότι η μακροχρόνια έκθεση του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια σχετίζεται επίσης με εμφάνιση διαβήτη τύπου Β. Περιγράφονται ακόμα τα PM2.5, σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους, τα οποία εισχωρούν βαθύτερα και φτάνουν στις κυψελίδες των πνευμόνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παγιδεύονται εκεί και να προκαλούν καρκινογενέσεις σε διαφορετικά σημεία των πνευμόνων.

1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοστίζουν στην κοινωνία από 231 έως 853 δισεκατομμύρια ευρώ περίπου ετησίως. Η οικονομία της Ε.Ε. επηρεάζεται άμεσα, καθώς οι ζημιές στα κτίρια, στις αποδόσεις των καλλιεργειών, στα δάση και σε διάφορα άλλα οικοσυστήματα, ανέρχονται επίσης σε δεκάδες δισεκατομμύρια, ετησίως (EEA, 2021).

Ο προϋπολογισμός για την επίτευξη των νέων οριακών τιμών παραμένει πολύ κάτω από το 0,1% του ΑΕΠ με μηδενικά οφέλη για την κοινωνία. Σημαντικά οφέλη από άλλες πολιτικές, όπως η δράση για το κλίμα, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος της βελτίωσης της ποιότητας του αέρα. Το κόστος για την τήρηση των νέων οριακών τιμών αναμένεται να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου, ενώ η βιομηχανική παραγωγή και η φυτική παραγωγή αναμένεται να αυξηθούν (Eur-Lex, 2023).

1.1 Εισαγωγή στους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO, 2016), αναφέρει ότι περίπου 7 εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν κάθε χρόνο εξαιτίας των συνεπειών της ρύπανσης του αέρα. Το 2016, η ατμοσφαιρική ρύπανση, ειδικά σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος, προκάλεσε 4,2 εκατομμύρια θανάτους. Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλείται από αέρια, σωματίδια και βιολογικά συστατικά της ατμόσφαιρας της γης. Οι τοξικές επιδράσεις που προκαλούνται από τη σωματιδιακή ρύπανση στον άνθρωπο εξαρτώνται από το μέγεθός τους, την επιφάνειά τους και τη χημική σύνθεσή τους (WHO, 2016).

Αξίζει να αναφερθεί, ότι έχουν μελετηθεί εκτενώς τις τελευταίες δεκαετίες, οι δυσμενείς επιπτώσεις των αέριων ρύπων στην υγεία. Η ρύπανση του αέρα είναι ο μοναδικός και ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αιτιολογικός παράγοντας διαφόρων ασθενειών. Οι επιπτώσεις στην υγεία που προκαλούνται από την έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση εκδηλώνονται κυρίως σε άτομα με προϋπάρχουσες καρδιοπνευμονικές και εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις, νευροεκφυλιστικές ασθένειες, βρογχίτιδα, εμφύσημα και με αυξημένο ερεθισμό των ματιών και του αναπνευστικού (Philip et al., 2017). Στον περιβάλλοντα χώρο, ο όρος «σωματίδια» αναφέρεται συνήθως σε σωματίδια σκόνης, ομίχλης ή αναθυμιάσεων που έχουν αιωρηθεί στον περιβάλλοντα αέρα. Ο κίνδυνος με τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ότι η χημική ουσία

που εισέρχεται μέσω της αναπνοής σε ένα άτομο μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του (Chen et al., 2022).

1.2 Κατηγορίες των ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι περισσότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Μερικοί προέρχονται από φλεγόμενα δάση και κάποιοι οφείλονται στην εξάτμιση χημικών (Παπαδάτος- Φράγκος, 2019). Η κύρια αλλαγή στην ατμοσφαιρική σύνθεση οφείλεται κυρίως στην καύση ορυκτών καυσίμων, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και για τις μεταφορές. Έχουν αναφερθεί παραλλαγές ατμοσφαιρικών ρύπων που διαφέρουν ως προς τη χημική τους σύνθεση, τις ιδιότητες αντίδρασης, την εκπομπή, την ανθεκτικότητα στο περιβάλλον, την ικανότητα μεταφοράς σε μεγάλες ή μικρές αποστάσεις και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις τους στην υγεία του ανθρώπου (Kampa & Catanas, 2008).

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ατμοσφαιρικών ρύπων, οι οποίοι είναι (1) οι πρωτογενείς και (2) οι δευτερογενείς.

Οι πρωτογενείς ρύποι εισέρχονται απευθείας στον αέρα. Μερικά αέρια απελευθερώνονται με φυσικές διαδικασίες, όπως η τέφρα από τα ηφαίστεια. Οι περισσότεροι απελευθερώνονται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα οξείδια του άνθρακα απελευθερώνονται όταν καίγονται ορυκτά καύσιμα και τα οξείδια του αζώτου σχηματίζονται όταν το άζωτο και το οξυγόνο συνδυάζονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει σε εξατμίσεις οχημάτων, εργοστασίων και σταθμών παραγωγής ενέργειας. Στα τοξικά βάρεια μέταλλα περιλαμβάνονται ο υδράργυρος και ο μόλυβδος. Ο υδράργυρος προέρχεται από πηγές όπως είναι η καύση. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι και τα δύο μέταλλα έχουν βιομηχανικές χρήσεις. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) είναι ενώσεις άνθρακα, όπως το μεθάνιο, που απελευθερώνονται από πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες. Η εκτροφή ζώων, για παράδειγμα, παράγει μεγάλη ποσότητα μεθανίου. Όσον αφορά αυτά τα σωματίδια, είναι στερεά και μπορεί να είναι σε μορφή τέφρας ή σκόνης. Πολλά απελευθερώνονται όταν καίγονται ορυκτά καύσιμα (Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003; Ζάνης, 2014).

Οι δευτερογενείς ρύποι σχηματίζονται από τους πρωτογενείς ρύπους. Πολλοί εμφανίζονται ως μέρος της φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Αυτός ο τύπος αιθαλομίχλης

σχηματίζεται όταν ορισμένοι ρύποι αντιδρούν χημικά παρουσία ηλιακού φωτός. Η φωτοχημική αιθαλομίχλη αποτελείται κυρίως από όζον (O_3). Το όζον κοντά στο έδαφος είναι ρύπος και είναι επιβλαβές για τον άνθρωπο και άλλα έμβια όντα. Ωστόσο, το όζον στη στρατόσφαιρα προστατεύει τη Γη από την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου (Ζάνης, 2014).

1.3 Πηγές των ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή με διαφορετικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς: μέσω της εισπνοής, της κατάποσης, της δερματικής επαφής ή των ματιών. Η ατμοσφαιρική ρύπανση συμβάλλει, σε μεγάλο βαθμό, στη ρύπανση των τροφίμων και του νερού, γεγονός που καθιστά την κατάποση, σε αρκετές περιπτώσεις, την κύρια οδό πρόσληψης ρύπων. Μέσω του γαστρεντερικού συστήματος και της αναπνευστικής οδού, μπορεί να συμβεί απορρόφηση ρύπων, ενώ ένας αριθμός τοξικών ουσιών μπορεί να βρεθεί στη γενική κυκλοφορία και τελικά να εναποτεθεί στον ανθρώπινο οργανισμό (Kampa & Castanas, 2008).

Όπως αναφέρθηκε, οι περισσότεροι ρύποι εισέρχονται στον αέρα όταν καίγονται ορυκτά καύσιμα. Μερικοί ρύποι απελευθερώνονται όταν καίγονται δάση και άλλοι εισέρχονται στον αέρα μέσω εξάτμισης. Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κύριες πηγές των ατμοσφαιρικών ρύπων (Τσιλιγκιρίδης, 2015):

- Καύση ορυκτών καυσίμων: Η καύση ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει πολλούς ρύπους στον αέρα. Αυτοί οι ρύποι περιλαμβάνουν το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του αζώτου και το διοξείδιο του θείου. Για παράδειγμα, τα μηχανοκίνητα οχήματα αντιπροσωπεύουν σχεδόν το ήμισυ της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής και τα εργοστάσια αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το ένα τέταρτο της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Ακόμη, σπίτια και άλλα κτίρια καίνε συνεχώς ορυκτά καύσιμα (Τσιλιγκιρίδης, 2015).
- Φλεγόμενα Δάση: Εκατομμύρια στρέμματα δάσους έχουν κοπεί και καεί για γεωργικούς σκοπούς. Η καύση των δέντρων παράγει τους περισσότερους από τους ίδιους ρύπους με την καύση ορυκτών καυσίμων (Τσιλιγκιρίδης, 2015).
- Εξάτμιση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs): Αυτοί οι ρύποι εισέρχονται

στον αέρα με εξάτμιση. Οι συγκεκριμένες πτητικές οργανικές ενώσεις βρίσκονται σε πολλά προϊόντα, όπως τα χρώματα και τα προϊόντα πετρελαίου. Αξίζει να επισημανθεί ότι το μεθάνιο είναι μια VOC που εξατμίζεται από τα ζωικά απόβλητα και τις χωματερές (Τσιλιγκιρίδης, 2015).

- Εσωτερικοί χώροι: Τα αιωρούμενα σωματίδια παράγονται από συνήθεις εσωτερικές δραστηριότητες, όπως ο καπνός του τσιγάρου, το μαγείρεμα, το κάψιμο κεριών ή λαμπτήρων λαδιού και η λειτουργία τζακιών και συσκευών καύσης καυσίμων (Τσιλιγκιρίδης, 2015).

1.4 Ρύποι των αιωρούμενων σωματιδίων

Οι ρύποι των αιωρούμενων σωματιδίων περιλαμβάνουν μικρές ενώσεις, με τη μορφή ιχνοστοιχείων, που αντιπροσωπεύονται από βαρέα μέταλλα όπως μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος, νικέλιο, χρώμιο, ψευδάργυρος ή μαγγάνιο και ίχνη οργανικών ενώσεων, που σχηματίζονται από πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες και αλειφατικούς, αλδεΐδες, καρβοξυλικά οξέα και κετόνες (Kumar & Dwivedi, 2022).

Αναφορικά με τις επιπτώσεις που έχουν τα σωματίδια στην ανθρώπινη υγεία, λαμβάνοντας υπόψη τη σύστασή τους, έχουν βλαβερές επιπτώσεις λόγω της ύπαρξης βαρέων μετάλλων. Ορισμένα ατμοσφαιρικά ανθρωπογενή μέταλλα μπορεί να σχετίζονται με υπερβολική θνησιμότητα, ακόμη και σε περιοχές με σχετικά χαμηλά επίπεδα έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση (Chen et al., 2022).

2. Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι από τους σημαντικότερους ρύπους της ατμόσφαιρας των αστικών περιοχών. Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα. Ορίζονται ως τα στερεά ή υγρά σωματίδια που βρίσκονται σε διασπορά στον αέρα. Οι επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι σημαντικές σε διάφορους τομείς του περιβάλλοντος.

Στις ανεπτυγμένες χώρες, πολλά προβλήματα δημόσιας υγείας έχουν αντιμετωπιστεί και λυθεί σε μεγάλο βαθμό. Σύμφωνα με τους Karagulian et al. (2015), η εκτεταμένη εξάρτηση από το αυτοκίνητο ως μέσο μεταφοράς συμβάλει στη ρύπανση της ατμοσφαιράς. Ένα σημαντικό πρόβλημα δημόσιας υγείας που έχει λάβει

μεγαλύτερη προσοχή τις τελευταίες δεκαετίες λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων στις προηγμένες οικονομίες είναι η κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα, που προκύπτει από εκπομπές που παράγονται από αυτοκίνητα, φορτηγά, πλοία, βιομηχανικές περιοχές και γεωργικά μηχανήματα (Jakubiak-Lasocka et al., 2015).

2.1 Εισαγωγή στα ΑΣ

Τα αιωρούμενα σωματίδια, αποτελούνται από στερεά και υγρά σωματίδια που εκλύονται απευθείας στον αέρα ως αποτέλεσμα δραστηριοτήτων (καύσης ντίζελ, οικιακών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, μεταφορών και γεωργικών δραστηριοτήτων με έκλυση -οδικής και γεωργικής σκόνης, αντίστοιχα). Τα μορφολογικά, χημικά, φυσικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων είναι ποικίλα. Λόγω του μεγέθους, της πυκνότητας, καθώς και των θερμοκρασιακών συνθηκών και της ταχύτητας του ανέμου, αυτά παραμένουν αιωρούμενα στον αέρα, με αποτέλεσμα τη ρύπανσή του (Yang et al., 2018).

2.2 Οι μορφές, το μέγεθος και η ταξινόμηση των ΑΣ

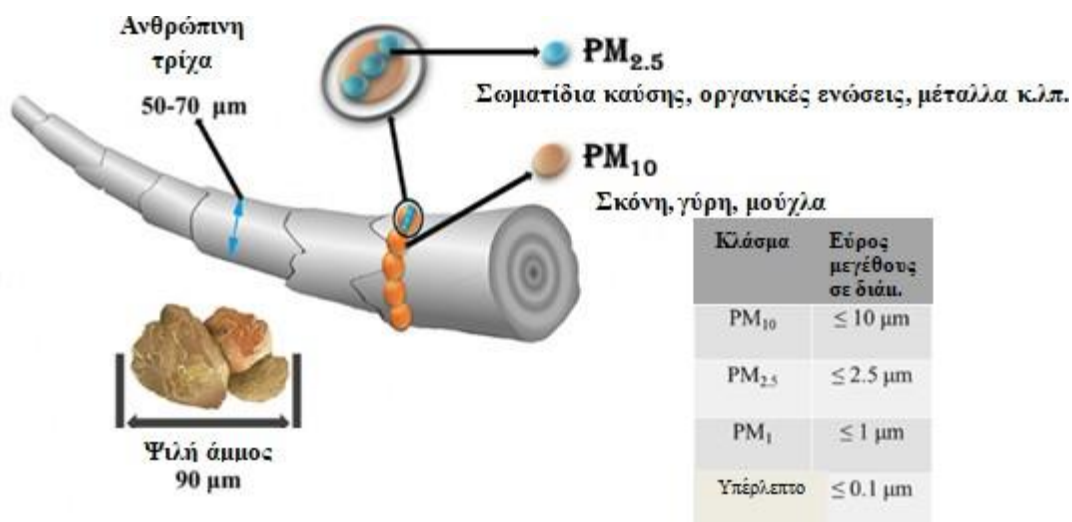
Τα αιωρούμενα σωματίδια βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε διάφορες μορφές, όπως: η σκόνη, η ομίχλη, η αιθάλη, ο καπνός, η κάπνα, η υδατομίχλη, η αιθαλομίχλη και η άχλυς. Είναι σωματίδια που υπάρχουν στον αέρα και προκαλούν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία. Η επίδραση τους οφείλεται στο μικρό τους μέγεθος, το οποίο τους επιτρέπει να φτάσουν στο βαθύτερο μέρος του αναπνευστικού συστήματος και στην κυκλοφορία του αίματος (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2021). Οι βασικοί τύποι αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα μη ρυπογόνα και ρυπογόνα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία είναι ουσίες που υπάρχουν στον αέρα και προκαλούν τα περισσότερα προβλήματα υγείας. Αυτή η καταστροφική επίδραση οφείλεται στο μικρό τους μέγεθος, το οποίο τους επιτρέπει να φτάσουν στο βαθύτερο μέρος του αναπνευστικού συστήματος και ακόμη και στην κυκλοφορία του αίματος (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2021).

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να θεωρηθούν ως ένα άθροισμα στερεών και υγρών ενώσεων, εκτός από το καθαρό νερό, που βρίσκονται στον αέρα. Τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 20 μm περιγράφονται επίσης από τον όρο αυτό. Το μέγεθος των σωματιδίων είναι μια από τις πιο σημαντικές φυσικές

μεταβλητές, καθώς αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για τον προσδιορισμό του βαθμού επίδρασης τους στην ανθρώπινη υγεία. Αν και για την ταξινόμησή τους γίνεται αναφορά στη διάμετρο ή την ακτίνα, υπονοώντας ότι τα σωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα, στη φύση τα σωματίδια έχουν γενικά πολύ ακανόνιστα σχήματα (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2021).

Η ταξινόμηση των σωματιδίων ανά μέγεθος ποικίλλει ανάλογα με τον επιστημονικό κλάδο μελέτης ή εάν ληφθούν υπόψη οι διαδικασίες σχηματισμού τους. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν ταξινομηθούν σε σχέση με την προέλευση τους ή σε σχέση με τη συμπεριφορά τους και τις επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα. Ορίζονται ως σωματίδια «με ανώτατο όριο μεγέθους περίπου 100 μικρομέτρων (μm) αεροδυναμικής ισοδύναμης διαμέτρου», ως (Lee et al., 2023):

- Τα PM_{10} , σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα (μm).
- Τα $\text{PM}_{2,5}$, σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα (μm).
- Τα PM_1 , σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1 μικρόμετρο (μm).



Εικόνα 1. Διαφορετικοί τύποι σωματιδίων και σύγκριση των μεγεθών μεταξύ τους (Kumar & Dwivedi, 2022).

Ο όρος PM_{10} , περιγράφει όλα τα μικροσκοπικά σωματίδια μεγέθους 10 μικρομέτρων ή λιγότερο, που αιωρούνται στον αέρα. Αυτά τα σωματίδια είναι τόσο λεπτά που μπορούν να καταλήξουν στους πνεύμονες και να βλάψουν την υγεία. Τα PM_{10} παράγονται, μεταξύ άλλων, από μηχανοκίνητα οχήματα, οικιακή θέρμανση και

από τη γεωργία, τα πλοία και τη βιομηχανία. Αυτά τα σωματίδια αιθάλης, που εκπέμπονται κυρίως από τη βιομηχανία, την κυκλοφορία και την οικιακή θέρμανση, μπορούν να προκαλέσουν άσθμα, καρδιαγγειακά προβλήματα, καρκίνο του πνεύμονα και πρόωρο θάνατο. Είναι μικροσκοπικά σωματίδια, τα οποία κρίνονται ιδιαίτερα επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία (Ρεμουντάκη, 2010).

Ένα αιωρούμενο σωματίδιο είναι ένα σύνθετο μείγμα που αποτελείται από πολυάριθμα οργανικά και ανόργανα συστατικά. Οι χημικές συνθέσεις των PM διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της περιβαλλοντικής τύχης και της τοξικότητας. Τα μεγέθη των σωματιδίων συνδέονται επίσης άμεσα με τη διάρκεια ζωής τους στην ατμόσφαιρα, καθώς και με τη δυνατότητά τους να προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία μέσω της εισπνοής. Τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm έχουν σχετικά σύντομο χρόνο ημιζωής αιωρήματος και μπορούν να φιλτραριστούν σε μεγάλο βαθμό από τη μύτη και τους ανώτερους αεραγωγούς. Τα μικρότερα σωματίδια, όπως τα λεπτά σωματίδια PM_{2,5}, με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm ή τα εξαιρετικά λεπτά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm , μπορούν να εναποτεθούν βαθιά στους πνεύμονες και δεν μπορούν εύκολα να εξαχθούν από το αναπνευστικό σύστημα (Anderson et al., 2012; Franklin et al., 2015; Xia et al., 2016).

Συνοπτικά, ο χαρακτηρισμός των ρυπογόνων και μη αιωρούμενων σωματιδίων ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος, τη χημική σύσταση ή την προέλευσή τους. Ωστόσο, και ανεξάρτητα από την τυπολογία τους, όλα είναι πιθανό να παρακολουθούνται μέσω των δικτύων ποιότητας αέρα (Kampa & Castanas, 2008).

2.3 Οι μέθοδοι σχηματισμού των ΑΣ

Η χημική σύνθεση των σωματιδίων ποικίλλει ανάλογα με την πηγή εκπομπής, τη διαδικασία σχηματισμού, η οποία μπορεί να έχει φυσική ή ανθρωπογενή προέλευση και τον μηχανισμό, που μπορεί να είναι πρωτογενής ή δευτερογενής. Για παράδειγμα, τα σωματίδια σε ακτές θα έχουν μεγάλη ποσότητα χλωριούχου νατρίου, ενώ αυτά από κινητήρες εσωτερικής καύσης θα έχουν μείγμα άνθρακα, μετάλλων και θεικών αλάτων (Lim et al., 2022).

Μπορεί να διακριθεί μια σειρά από κύριες και δευτερεύουσες ενώσεις. Κύριες

ενώσεις, που αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας και μεταξύ των οποίων υπάρχουν θειικά άλατα, νιτρικά άλατα, αμμώνιο, νάτριο και χλώριο, στοιχειακός άνθρακας, οργανικός άνθρακας, μεταλλικά συστατικά και νερό (Kampa & Castanas, 2008).

2.4 Η χημική σύσταση των ΑΣ

Τα αιωρούμενα σωματίδια περιέχουν κυρίως ανθρακικά και διττανθρακικά νιτρικά, χλωρίδια και φωσφορικά, Mg, Ca, Na, K και οργανικές ενώσεις. Η μεταφορά οξυγόνου μεταξύ νερού και αέρα εμποδίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, τα οποία μπορούν να εισέλθουν στο αναπνευστικό Αιωρούμενα σωματίδια σας αυτά προέρχονται από κλωστοϋφαντουργικά απόβλητα (Λοϊζίδου, 2006).

Η υψηλή θολότητα μπορεί να προκαλέσει εξάντληση οξυγόνου σε ένα υδατικό μέσο λόγω της παρουσίας υψηλής συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών. Εμποδίζει τη ζωτική διείσδυση του ηλιακού φωτός στο σύστημα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας πολλών φυτών να παράγουν οξυγόνο και τροφή. Ακόμη, μπορεί να απορροφά απευθείας το ηλιακό φως, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού (Holloway & Wayne, 2010).

3. Τρόποι εισχώρησης των ΑΣ στον ανθρώπινο οργανισμό

Τα σωματίδια που έχουν αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm εναποτίθενται στη ρινοφαρυγγική περιοχή, δηλαδή στις άνω διόδους αεραγωγών όπως είναι η μύτη, η ρινική κοιλότητα και ο λαιμός, σε μεγάλο βαθμό με πρόσκρουση. Οι αλλαγές στην κατεύθυνση ροής του αέρα προκαλούν την πρόσκρουση πολλών σωματιδίων στα τοιχώματα της διόδου του αέρα και έτσι τα σωματίδια εναποτίθενται ή καθιζάνουν σε αυτή την περιοχή. Μικρότερα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο περίπου 0,003 έως 5 μm εναποτίθενται στις τραχειοβρογχικές και κυψελιδικές περιοχές. Η καθίζηση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος γιατί σε αυτό το σημείο ο αέρας έχει επιβραδυνθεί αρκετά ώστε τα σωματίδια να «καθιζάνουν» (Ρεμουντάκη, 2010).

Όταν ο αέρας φτάνει στην κυψελιδική περιοχή των πνευμόνων, έχει επιβραδυνθεί ακόμη περισσότερο. Τα σωματίδια που φτάνουν τόσο βαθιά είναι συνήθως 0,5 μm ή μικρότερα και ουσιαστικά εισέρχονται και προσκολλώνται τελικά

στον πνεύμονα με τυχαία πρόσκρουση (Ding et al., 2013).

3.1 Εισπνεόμενα σωματίδια

Η εισπνοή είναι η πιο σημαντική οδός έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια. Όταν τα σωματίδια βρίσκονται στον αέρα, υπάρχει η πιθανότητα εισπνοής τους από τον ανθρώπινο οργανισμό. Το πόσο εισχωρεί το σωματίδιο του αέρα και τι κάνει όταν εναποτίθεται εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την πυκνότητα του σωματιδιακού υλικού. Ακόμη εξαρτάται από τις χημικές και τοξικές ιδιότητες του υλικού που εισπνέεται από τον άνθρωπο (Morawska et al., 2022). Ανεξαρτήτως υλικού, τα εισπνεόμενα σωματίδια είναι επικίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό όταν εναποτίθενται οπουδήποτε στην αναπνευστική οδό. Τα σωματίδια εναποτίθενται στους πνεύμονες με έναν από τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους: αναχαίτιση, πρόσκρουση, καθίζηση και διάχυση (Politis et al., 2008; Morawska et al., 2022).

(1) Αναχαίτιση: Ένα σωματίδιο εναποτίθεται όταν ταξιδεύει τόσο κοντά σε μια επιφάνεια των διόδων των αεραγωγών που μια άκρη του σωματιδίου αγγίζει την επιφάνεια. Αυτή η μέθοδος εναπόθεσης είναι πιο σημαντική για ίνες όπως ο αμιάντος. Το μήκος της ίνας καθορίζει πού θα αναχαιτιστεί το σωματίδιο. Για παράδειγμα: στο βρογχικό δέντρο θα εναποτίθενται ίνες με διάμετρο 1 μικρόμετρο (μm) και μήκος 200 μm .

(2) Κρούση: Όταν τα σωματίδια αιωρούνται στον αέρα, έχουν την τάση να ταξιδεύουν κατά μήκος της αρχικής τους διαδρομής. Όταν υπάρχει κάμψη στο σύστημα αεραγωγών, για παράδειγμα, πολλά σωματίδια δεν περιστρέφονται με τον αέρα αλλά μάλλον προσκρούουν ή κολλάνε σε μια επιφάνεια στην αρχική διαδρομή των σωματιδίων. Η πιθανότητα πρόσκρουσης εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα και τη μάζα των σωματιδίων. Τα περισσότερα σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm (αεροδυναμική διάμετρος) εναποτίθενται στη μύτη ή το λαιμό και δεν μπορούν να διεισδύσουν στους κατώτερους ιστούς της αναπνευστικής οδού. Η αεροδυναμική διάμετρος είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει την ίδια ταχύτητα καθίζησης με ένα άλλο σωματίδιο ανεξάρτητα από το σχήμα, το μέγεθος ή την πυκνότητά του. Η χρήση αεροδυναμικών διαμέτρων επιτρέπει στους ειδικούς επιστήμονες της υγείας να συγκρίνουν σωματίδια διαφορετικών μεγεθών, σχημάτων και

πυκνοτήτων ως προς το πώς θα καθιζάνουν έξω από το ρεύμα ροής του αέρα.

(3) Καθίζηση: Καθώς τα σωματίδια ταξιδεύουν μέσω του αέρα, οι βαρυτικές δυνάμεις και η αντίσταση του αέρα τελικά ξεπερνούν την άνωσή τους, δηλαδή την τάση του σωματιδίου να μένει όρθιο. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα σωματίδια θα κατακαθίσουν σε μια επιφάνεια του πνεύμονα. Αυτός ο τύπος εναπόθεσης είναι πιο κοινός στους βρόγχους και στα βρογχιόλια. Η καθίζηση δεν είναι σημαντικός παράγοντας όταν η αεροδυναμική διάμετρος του σωματιδίου είναι μικρότερη από 0,5 μm.

(4) Διάχυση: Η τυχαία κίνηση των σωματιδίων είναι παρόμοια με τα μόρια αερίου στον αέρα όταν τα σωματίδια είναι μικρότερα από 0,5 μm. Όταν τα σωματίδια βρίσκονται σε τυχαία κίνηση, εναποτίθενται στα τοιχώματα των πνευμόνων κυρίως τυχαία. Αυτή η κίνηση είναι επίσης γνωστή ως «κίνηση Brownian». Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο πιο έντονη είναι η κίνηση. Η διάχυση είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός εναπόθεσης στους μικρούς αεραγωγούς και τις κυψελίδες του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος. Πολύ λεπτά σωματίδια μερικών μm ή μικρότερα παγιδεύονται επίσης στον ανώτερο αεραγωγό.

3.2 Θωρακικά σωματίδια

Τα θωρακικά σωματίδια είναι επικίνδυνα όταν εναποτίθενται οπουδήποτε μέσα στους αεραγωγούς των πνευμόνων και στην περιοχή ανταλλαγής αερίων, δηλαδή τις κάτω διόδους αεραγωγών. Αποτελούν σωματίδια 10 μm με 30 μm και μπορούν να παγιδευτούν και στη συνέχεια να ελευθερωθούν μέσω της αναπνοής του βήχα ή του φταρνίσματος (Brown et al., 2013).

Έχει αποδειχθεί ότι περίπου το 50% των σωματιδίων στον αέρα, με μία αεροδυναμική διάμετρο 10 μm ανήκουν στο θωρακικό κλάσμα. Συνεπώς, τα σωματίδια μεγέθους θωρακικού κλάσματος μπορεί να προέρχονται από φυσικές πηγές, όπως ηφαίστεια, σκόνη και καταιγίδες. Ακόμη και από ανθρωπογενείς πηγές, όπως σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανικές διεργασίες, οχήματα κυκλοφορίας, καύση άνθρακα και τζάκια (Brown et al., 2013).

3.3 Αναπνεόμενα σωματίδια

Το αναπνευστικό σύστημα μπορεί να χωριστεί σε δύο συστήματα, τις άνω διόδους αεραγωγών και τις κάτω διόδους αεραγωγών. Οι άνω αεραγωγοί περιλαμβάνουν τη μύτη, τις ρινικές οδούς, το στόμα και τον φάρυγγα, μέχρι τις φωνητικές χορδές στο λάρυγγα. Οι κατώτερες δίοδοι αεραγωγών ξεκινούν από τις φωνητικές χορδές, εκτείνονται προς τα κάτω στην τραχεία και συνεχίζουν μέχρι τους μικρούς αερόσακους, στο τέλος κάθε κλάδου του βρογχικού δέντρου. Το βρογχικό δέντρο περιλαμβάνει την τραχεία, το βρόγχο και βρογχιόλια, τα κλαδιά των βρόγχων (Kumar & Dwivedi, 2022).

Τα αναπνεύσιμα σωματίδια προορίζονται για σωματίδια που είναι αρκετά μικρά ώστε να φτάσουν στην περιοχή ανταλλαγής αερίων και είναι επικίνδυνα μόνο εάν εναποτίθενται σε αυτή την περιοχή. Αποτελούνται από αρκετά μικρά σωματίδια για να διεισδύσουν στη φυσική άμυνα της μύτης, του λαιμού και των πνευμόνων. Μπορεί να προκαλέσουν ερεθισμό, φλεγμονή, πυριτίαση και καρκίνο του πνεύμονα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 50% των αερομεταφερόμενων σωματιδίων με διάμετρο 4 μ m, τα οποία διεισδύουν στην κατώτερη περιοχή ανταλλαγής αερίων του πνεύμονα, βρίσκονται στο αναπνεύσιμο κλάσμα (Rosenfeld et al., 2008).

3.4 Αλληλεπιδράσεις των ΑΣ με άλλους ρύπους

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα, τον καιρό και το κλίμα μέσω πολλών μηχανισμών. Αυτά μπορεί να είναι και κολλοειδή λεπτών στερεών σωματιδίων ή υγρών σταγονιδίων που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα.

Όπως έχουν δείξει ορισμένες αναφορές, οι ιδιότητες του νέφους και της βροχόπτωσης επηρεάζονται σημαντικά από τα αυξημένα αιωρούμενα σωματίδια. Οι χημικές αντιδράσεις μπορούν να συμβούν στην επιφάνεια των σωματιδίων ή στο σώμα των υγρών σταγονιδίων. Οι διεργασίες αυτές είναι βασικές για τη βιογεωχημεία του πλανήτη (Holloway & Wayne, 2010; Anenberg et al., 2010).

Η αλληλεπίδραση αιωρούμενων σωματιδίων με άλλους ρύπους, επηρεάζει τη σκέδαση και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από αιωρούμενα σωματίδια. Αυτά μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος και έτσι να μειώσουν τις αισθητές ροές θερμότητας που οδηγούν την ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας. Οι αντιδράσεις υδατικής φάσης του NO₂ και του SO₂ σε ομίχλη και σύννεφα ή νερό είναι σημαντικές

για το σχηματισμό θεικών αλάτων σε συνθήκες ομίχλης, σε χώρες όπως είναι για παράδειγμα η Κίνα (Ding et al., 2013; Wang et al., 2013; Cheng et al., 2016).

Οι διάφορες αλληλεπιδράσεις μπορούν να επιδεινώσουν σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση, ακόμη και αν τα ποσοστά εκπομπών παραμένουν τα ίδια. Μελέτες παρατήρησης και μοντελοποίησης δείχνουν ότι τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα. (Rosenfeld et al., 2008).

Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει μια αναστροφή θερμοκρασίας που συχνά σχετίζεται με σοβαρά επεισόδια ρύπανσης. Όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους ενός στρώματος είναι μεγαλύτερη από -7°C , ακολουθεί σοβαρή ρύπανση. Μερικά από τα πιο σοβαρά γεγονότα ρύπανσης στην ιστορία έχουν συσχετιστεί με αυξημένη αναστροφή θερμοκρασίας. Γενικά, υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων τείνουν να εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα με αναστροφή θερμοκρασίας. Αέριοι ρύποι όπως το SO_2 και το NO_2 έχουν επίσης βρεθεί ότι συνδέονται στενά με αναστροφή θερμοκρασίας (Cheng et al., 2016).

4. Νομοθεσία για τα ΑΣ

Η νομοθεσία για τον καθαρό αέρα απαιτεί τον ορισμό εθνικών προτύπων ποιότητας του αέρα για τα σωματίδια που θεωρούνται επιβλαβή για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Ο νόμος απαιτεί να επανεξετάζονται περιοδικά τα πρότυπα για να διασφαλίζεται συνεχώς ότι παρέχεται επαρκής προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος και να ενημερώνονται τα πρότυπα αυτά, όπως απαιτείται (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2023).

Η νομοθεσία για τον καθαρό αέρα απαιτεί τον ορισμό Εθνικών Προτύπων Ποιότητας Περιβάλλοντος Αέρα. Για να πληρούνται αυτά τα πρότυπα, απαιτείται η συνεργασία με εταίρους σε κρατικούς, τοπικούς και διεθνείς οργανισμούς ποιότητας αέρα (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2023).

4.1 Νομοθετικό πλαίσιο της Ε.Ε – Βασική Ευρωπαϊκή Οδηγία

Ο καθαρός αέρας είναι απαραίτητος για την ανθρώπινη υγεία και για το περιβάλλον. Λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που προκαλούν ρυπογόνες εκπομπές, η ποιότητα του αέρα έχει επιδεινωθεί σημαντικά (WHO, 2018). Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι το νούμερο ένα πρόβλημα περιβαλλοντικής υγείας στην Ε.Ε. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα. (UNECE, 2012).

Η Ευρωπαϊκή οδηγία 2008/50 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου ορίζει μέτρα για την επίτευξη των στόχων καθαρού αέρα και αποδεκτών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων. Ο σκοπός της οδηγίας 2008/50 είναι:

- (1) Καθορισμός στόχων για την ποιότητα του αέρα με σκοπό την αποφυγή, την πρόληψη ή τον μετριασμό των επιβλαβών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον στο σύνολο του.
- (2) Αξιολόγηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα στα κράτη μέλη της Ένωσης, με βάση γενικές μεθόδους και κριτήρια.
- (3) Συλλογή πληροφοριών για την ποιότητα του αέρα με σκοπό την προώθηση της καταπολέμησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των οχλήσεων και παρακολούθηση των μακροπρόθεσμων τάσεων και βελτιώσεων που προκύπτουν από τοπικά και εθνικά μέτρα.

- (4) Διασφάλιση της πρόσβασης του κοινού σε πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του αέρα.
- (5) Συντήρηση και βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος αέρα.
- (6) Προώθηση της βέλτιστης συνεργασίας μεταξύ των κρατών-μελών για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα σημαντικό στοιχείο για την υιοθέτηση, την ανάπτυξη και την ορθή εφαρμογή των μέτρων της Οδηγίας 2008/50 είναι η ανάληψη των ευθυνών κάθε κράτους της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με την οδηγία 2008/50. Τα κράτη θα πρέπει να ορίσουν, σε κατάλληλα επίπεδα, τις αρμόδιες αρχές και τα ιδρύματα που θα είναι υπεύθυνα για την αξιολόγηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, την έγκριση συστημάτων μέτρησης, τη διασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων και την ανάλυση μεθόδων αξιολόγησης, καθώς και το συντονισμό των προγραμμάτων διασφάλισης ποιότητας στην επικράτειά του. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη μέλη της Ευρώπης, καθορίζουν απαιτήσεις σύμφωνα με τις οποίες οι καταχωρημένες τιμές είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων τόσο για τα PM₁₀, όσο και για τα υπόλοιπα σωματίδια. Η πολιτική της Ε.Ε. για καθαρό αέρα αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και στην αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στην προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. Ειδικότερα, για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την επίτευξη του επιθυμητού στόχου της Ε.Ε. για μηδενική ρύπανση έως το 2050, η Ε.Ε. έχει μια ολοκληρωμένη πολιτική καθαρού αέρα που βασίζεται σε τρεις πυλώνες: (1) πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, (2) μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης και (3) πρότυπα εκπομπών για βασικές πηγές ρύπανσης (EEA, 2021).

Η Ε.Ε. στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, οι πολιτικές της Ε.Ε. στοχεύουν στη μείωση του αριθμού των πρόωρων θανάτων και των ασθενειών που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική ρύπανση και στη μείωση της πίεσης της ρύπανσης στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα. Οι συγκεκριμένες πολιτικές της αφορούν (EEA, 2021; Eur- Lex, 2023):

- ❖ Την ποιότητα του αέρα, αφού η Ε.Ε. έχει θεσπίσει πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που πρέπει να επιτευχθούν από όλες τις χώρες της ΕΕ.

- ❖ Τη μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων (ως αποτέλεσμα οι κανόνες της Ε.Ε. ορίζουν εθνικές δεσμεύσεις μείωσης για πέντε κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους).
- ❖ Τη διεθνή συνεργασία, αφού η Ε.Ε. συνεργάζεται πλέον με στρατηγικούς εταίρους για την αντιμετώπιση της διασυνοριακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- ❖ Την ατμοσφαιρική ρύπανση από βασικούς τομείς. Υπάρχουν νόμοι της Ε.Ε. που ρυθμίζουν τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από διάφορες πηγές.
- ❖ Τα διάφορα εργαλεία και όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των σωματιδίων.
- ❖ Το διάλογο για καθαρό αέρα, με την διεξαγωγή διμερών συζητήσεων μεταξύ των χωρών της Ε.Ε. και της Επιτροπής σχετικά με τον τρόπο επίτευξης καθαρότερου αέρα.
- ❖ Τον δείκτη ποιότητας αέρα και την εφαρμογή του, που επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν τα βραχυπρόθεσμα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπου ζουν.
- ❖ Τη δημιουργία ενός φόρουμ για τον καθαρό αέρα, όπου πραγματοποιούνται μεγάλες εκδηλώσεις πολιτικής για τον καθαρό αέρα, κάθε δύο χρόνια σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Ε.Ε.
- ❖ Εκθέσεις που αναλύουν τις προοπτικές για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ε.Ε. έως το 2030 αλλά και μετά.
- ❖ Τη χρηματοδότηση για καθαρό αέρα, μέσω οικονομικής υποστήριξης προς τις χώρες της Ε.Ε. για την εφαρμογή πολιτικής σχετικά με τον καθαρό αέρα.
- ❖ Πλατφόρμα Ενδιαφερομένων για Μηδενική Ρύπανση, αφού η φιλοδοξία της Ε.Ε. για μηδενική ρύπανση ορίστηκε στην Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία για την προστασία των πολιτών και των οικοσυστημάτων της Ευρώπης.
- ❖ Πληροφορίες για τη στήριξη που παρέχεται και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.
- ❖ Χρήση της εφαρμογής Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), η οποία παρακολουθεί και προβλέπει την ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη και τη μεταφορά ρύπων σε μεγάλη απόσταση σε όλο τον κόσμο.

4.2. Ισχύον θεσμικό πλαίσιο

Οι κανόνες της Ε.Ε. για την ποιότητα του αέρα πρέπει να εκσυγχρονιστούν. Περίπου 300.000 πρόωροι θάνατοι ετησίως και ένας σημαντικός αριθμός μη μεταδοτικών ασθενειών αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση. (EEA, 2021)

Ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει όλους τους ανθρώπους, έχει τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στις πιο ευάλωτες και ευαίσθητες ομάδες της κοινωνίας, όπως είναι τα παιδιά, τα άτομα με παθήσεις, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα που ζουν σε χειρότερες κοινωνικοοικονομικές συνθήκες, καθώς συχνά ζουν σε περιοχές με υψηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. (Ρεμουντάκη, 2010)

Επί του παρόντος, η Αρχή Περιβάλλοντος και Πόρων (ERA, Environmental and Resources Authority) αποτελεί τη ρυθμιστική αρχή που είναι υπεύθυνη για το φυσικό περιβάλλον στη Μάλτα. Η ERA συγκροτήθηκε από τη διάσπαση της Αρχής Περιβάλλοντος και Σχεδιασμού της Μάλτας το 2016, η οποία κατέληξε επίσης στη δημιουργία της Αρχής Σχεδιασμού. Η ERA έχει πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πρότυπα για τα PM_{2,5}, δηλαδή ετήσια μέσα πρότυπα με επίπεδα 12,0 μg/m³ και 15,0 μg/m³, αντίστοιχα. Επίσης, έχει πρότυπα 24 ωρών (επίπεδα 35 μg/m³). Όσον αφορά τα PM₁₀, κατέχει πρότυπα 24 ωρών με μια αναμενόμενη υπέρβαση και επίπεδα 150 μg/m³. Αξίζει να επισημανθεί ότι μετά από προσεκτική εξέταση των πιο πρόσφατων διαθέσιμων επιστημονικών στοιχείων και τεχνικών πληροφοριών και μετά από διαβούλευση με τους ανεξάρτητους επιστημονικούς συμβούλους του Οργανισμού, η ERA πρότεινε την αναθεώρηση του πρωτεύοντος, βασισμένο στην υγεία, ετήσιου προτύπου PM_{2.5} από το τρέχον επίπεδο 12,0 μg/m³ έως 9,0 με 10,0 μg/m³. Ταυτόχρονα, ο νόμος για τον καθαρό αέρα απαιτεί από τον ERA να ορίσει εθνικά πρότυπα ποιότητας του αέρα για τα σωματίδια που θεωρούνται επιβλαβή για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (Eur-Lex, 2023). Παρακάτω, γίνεται αναφορά στις βασικές ισχύουσες Οδηγίες – Θεσμικά Πλαίσια της Ε.Ε για τα αιωρούμενα σωματίδια:

- Θεσμικό Πλαίσιο για την Ποιότητα του Αέρα, Οδηγία 96/62/EK.
- Η Οδηγία 2008/50/EK.
- Νομοθετικά, αναθεωρήθηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα (WHO, 2021).

Η αξιολόγηση και ο έλεγχος καταλληλότητας των οδηγιών για την ποιότητα του αέρα περιβάλλοντος έδειξε ότι οι ισχύουσες οδηγίες συνέβαλαν στη μείωση της

ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε σύγκριση με τη δεκαετία του 1990, υπάρχουν περίπου 70% λιγότεροι πρόωροι θάνατοι που αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Ο αέρας της Ευρώπης εξακολουθεί να είναι πολύ ρυπασμένος, εις βάρος της υγείας του ανθρώπου (GBD 2016 Risk Factors Collab, 2016).

Μαζί με άλλες πολιτικές της Ε.Ε., η προτεινόμενη οδηγία μπορεί να μειώσει τον αριθμό των πρόωρων θανάτων που αποδίδονται στον κύριο ατμοσφαιρικό ρύπο, που είναι τα λεπτά σωματίδια PM_{2,5}, κατά περισσότερο από 75% σε δέκα χρόνια. Επίσης, θα μειώσει την ποσότητα και τη βαρύτητα των ασθενειών που προκαλούνται ή επιδεινώνονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως οι αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις. Ως αποτέλεσμα, αυτό θα ωφελήσει ιδιαίτερα τους πιο ευαίσθητους και ευάλωτους πληθυσμούς (Eur-Lex, 2023).

Η προτεινόμενη αναθεώρηση μπορεί να καθορίσει ενδιάμεσα πρότυπα ποιότητας του αέρα της Ε.Ε. για το 2030, τα οποία θα ευθυγραμμίζονται περισσότερο με τις συστάσεις του ΠΟΥ, ενώ παράλληλα μπορεί να θέσει την Ε.Ε. σε τροχιά μηδενικής ρύπανσης του αέρα το αργότερο έως το 2050, σε συνέχεια με τις προσπάθειες για την κλιματική ουδετερότητα. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται από την Ε.Ε. μια τακτική αναθεώρηση των προτύπων ποιότητας του αέρα για την επαναξιολόγησή τους, σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα επιστημονικά στοιχεία, καθώς και με τις κοινωνικές και τεχνολογικές εξελίξεις. Η πρώτη αναθεώρηση αναμένεται να πραγματοποιηθεί έως τα τέλη του 2028, με στόχο ιδίως να εξασφαλιστεί η πλήρης ευθυγράμμιση με τις συστάσεις του ΠΟΥ. Για παράδειγμα, η ετήσια οριακή τιμή για τα λεπτά σωματίδια PM_{2,5} αναμένεται να μειωθεί περισσότερο από το μισό το 2030, από 25 μg/m³ σε 10 μg/m³ το 2030 (WHO, 2021).

Η αναθεώρηση αυτή μπορεί να διασφαλίσει ότι τα άτομα που υποφέρουν λόγω θεμάτων υγείας, που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, έχουν το δικαίωμα αποζημίωσης σε περίπτωση παραβίασης των κανόνων της Ε.Ε. για την ποιότητα του αέρα. Ακόμη, θα έχουν το δικαίωμα να εκπροσωπούνται από μη κυβερνητικές οργανώσεις για αποζημίωση ζημιών. Η πρόταση αυτή διασαφηνίζει θέματα σχετικά με την πρόσβαση στη δικαιοσύνη, αποτελεσματικές κυρώσεις και καλύτερη ενημέρωση του κοινού σχετικά με την ποιότητα του αέρα (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2021).

Οι βελτιωμένοι κανόνες για την παρακολούθηση και τη μοντελοποίηση της

ποιότητας του αέρα, καθιστούν δυνατό τον πιο στενό έλεγχο της συμμόρφωσης με τα πρότυπα, σε χαμηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων που είναι πλέον γνωστό ότι είναι επίσης επιβλαβή, και υποστηρίζουν αποτελεσματικότερη δράση για την πρόληψη και την αντιμετώπιση παραβάσεων των προτύπων. Έτσι, η προτεινόμενη νομοθεσία στηρίζει καλύτερα τις τοπικές αρχές στην επίτευξη καθαρότερου αέρα. Εκτός από την αντιμετώπιση των παραβάσεων των προτύπων ποιότητας του αέρα, η πρόταση απαιτεί προληπτικά σχέδια για την ποιότητα του αέρα όταν υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης μιας οριακής τιμής το 2030 (WHO, 2021).

Η αναθεώρηση εξορθολογεί και απλοποιεί επίσης τους ισχύοντες νόμους, συγχωνεύοντας τις δύο ισχύουσες οδηγίες για την ποιότητα του αέρα σε μία. Πρέπει να οριστούν πρότυπα ποιότητας του αέρα και να ισχύουν σε όλη την Ε.Ε. Τα κράτη μέλη πρέπει να συνεχίσουν να είναι υπεύθυνα για την επιλογή των καταλληλότερων μέτρων για την επίτευξη προτύπων ποιότητας του αέρα και την προσαρμογή τους στις εθνικές και τοπικές συνθήκες (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2021).

4.3. Οριακές τιμές της ποιότητας του αέρα για τα ΑΣ

Τα πρότυπα και οι στόχοι της Ε.Ε. για την ποιότητα του αέρα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Αυτά ισχύουν για διαφορετικές χρονικές περιόδους, επειδή οι παρατηρούμενες επιπτώσεις στην υγεία που σχετίζονται με τους διάφορους ρύπους συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης. Σύμφωνα με το δίκαιο της Ε.Ε., μια οριακή τιμή είναι νομικά δεσμευτική από την ημερομηνία έναρξης ισχύος της, με την επιφύλαξη τυχόν υπερβάσεων που επιτρέπονται από τη νομοθεσία. Για μια τιμή που αποτελεί στόχο, η υποχρέωση είναι να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα που δεν συνεπάγονται δυσανάλογο κόστος για να διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη τιμή-στόχος και επομένως είναι λιγότερο αυστηρή από μια οριακή τιμή (ΕΕΑ, 2021).

Η οδηγία 2008/50/ΕΚ έχει θεσπίσει νέες οριακές τιμές για τα $PM_{2.5}$. Αυτοί οι στόχοι τίθενται σε εθνικό επίπεδο και βασίζονται στο δείκτη μέσης έκθεσης που καθορίζεται ως μια τρέχουσα τριετής μέση συγκέντρωση $PM_{2.5}$ που υπολογίζεται κατά μέσο όρο στους επιλεγμένους σταθμούς παρακολούθησης σε οικισμούς και μεγαλύτερες αστικές περιοχές. Η επιλογή των αστικών τοποθεσιών γίνεται για την καλύτερη αξιολόγηση της έκθεσης $PM_{2.5}$ του γενικού πληθυσμού σε νοσήματα που

επιβαρύνονται από την ύπαρξη αυτών των σωματιδίων (Eur-Lex, 2023).

Πίνακας 1. Οριακές τιμές βασικών αιωρούμενων σωματιδίων (Eur-Lex, 2023).

Ρύπος	Συγκέντρωση	Μέση περίοδος	Νομική φύση	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις κάθε χρόνο
Λεπτά σωματίδια (PM_{2,5})	25 µg/m ³	1 χρόνος	Η τιμή στόχος πρέπει να επιτευχθεί από 1.1.2010 Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2015	-
Λεπτά σωματίδια (PM_{2,5})	20 µg/m ³	1 χρόνος	Οριακή τιμή σταδίου 2 που πρέπει να τηρηθεί από την 1.1.2020	-
Σωματίδια (PM₁₀)	50 µg/m ³	24 ώρες	Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2005	35
Σωματίδια (PM₁₀)	40 µg/m ³	1 έτος	Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2005	-

Πίνακας 2. Οριακή τιμή-στόχος των PM_{2,5} (Eur-Lex, 2023).

Τίτλος	Μετρική	Μέση περίοδος	Νομική φύση	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις κάθε χρόνο
PM_{2,5} Υποχρέωση συγκέντρωσης έκθεσης	20 µg/m ³ (AEI)	Με βάση τον μέσο όρο 3 ετών	Νομικά δεσμευτικό το 2015 (έτη 2013, 2014, 2015)	-

PM2,5 Στόχος μείωσης έκθεσης	Ποσοστό μείωσης + όλα τα μέτρα για να φτάσετε τα 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (AEI)	Με βάση τον μέσο όρο 3 ετών	Μείωση που πρέπει να επιτευχθεί όπου είναι δυνατόν το 2020, που προσδιορίζεται με βάση την τιμή του δείκτη έκθεσης το 2010	-
---	--	-----------------------------	--	---

Τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν μειωθεί, κυρίως λόγω των θέσπισης οριακών τιμών των αιωρούμενων σωματιδίων για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα και των βελτιώσεων στην τεχνολογία και τη βιομηχανία. ΕΜε βάση την ισχύουσα νομοθεσία για την ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη (AAQD) τέθηκαν οριακές τιμές για τον ετήσιο μέσο όρο των ατμοσφαιρικών ρύπων PM2,5 και NO₂ έως 25 και 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα, από το έτος 2008 (Eur-Lex, 2023).

Αυτές οι οριακές τιμές είναι ανεπαρκείς για την προστασία της υγείας των πολιτών. Η ποιότητα ζωής των πολιτών της Ε.Ε. κρίνεται χαμηλή, λόγω των δυσμενών επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία και την προστασία των οικονομιών της Ε.Ε., το κόστος που σχετίζεται με την υγειονομική περίθαλψη και τον πρόωρο θάνατο (Anderson et al., 2012; Eur-Lex, 2023).

5. Πρότυπα ποιότητας του αέρα στην Ελλάδα και την ΕΕ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η κύρια περιβαλλοντική αιτία ασθενειών στην Ευρώπη, συμβάλλοντας στη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα, ιδιαίτερα από καρδιομεταβολικά και αναπνευστικά νοσήματα (Anderson et al., 2012; Eur-Lex, 2023). Τα επίπεδα των τιμών για την ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη είναι υψηλά, παρά τη σημαντική μείωση των εκπομπών βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων και των συγκεντρώσεων τους στον αέρα, κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών. Η ατμοσφαιρική ρύπανση, αποτελεί τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, αφού επηρεάζει σημαντικά τον πληθυσμό των αστικών περιοχών (EEA, 2022).

Η εξειδικευμένη υπηρεσία που ασχολείται με την υγεία έχει υποστηρίξει την υιοθέτηση των νέων κατευθυντήριων γραμμών του ΠΟΥ (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας) για την ποιότητα του αέρα στη νομοθεσία της Ε.Ε., λόγω του ότι η επιβάρυνση ασθενειών που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση μεταξύ των Ευρωπαίων παραμένει σε υψηλά επίπεδα, αφού τουλάχιστον 300.000 πρόωροι θάνατοι σημειώνονται στην Ε.Ε. κάθε χρόνο, λόγω της ρύπανσης με PM_{2.5}, NO₂ και O₃. Επιπλέον, νέα περιστατικά άσθματος και βρογχίτιδας σε παιδιά και καρδιαγγειακές παθήσεις, εγκεφαλικά επεισόδια, διαβήτης, πνευμονία και καρκίνος του πνεύμονα εμφανίζονται συνεχώς λόγω της ρύπανσης αυτής (WHO, 2016; World Bank, 2016).

Συγκεκριμένα, στην τελευταία έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency, 2022), το έτος 2020, ένα μεγάλο ποσοστό του ευρωπαϊκού πληθυσμού, της τάξεως του 96%, εκτέθηκε σε επίπεδα λεπτών σωματιδίων πάνω από το επιτρεπόμενο επίπεδο για την προστασία της υγείας, που έχει ορίσει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας. Η έκθεση σε συγκεντρώσεις λεπτών σωματιδίων πάνω από το επιτρεπόμενο όριο του ΠΟΥ του 2021 είχε ως αποτέλεσμα 238.000 πρόωρους θανάτους (EEA, 2022). Η ρύπανση αυτή προκαλεί κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιγραμματικά, οι επιπτώσεις της έκθεσης σε σωματιδιακή ρύπανση συνδέονται με δυσκολία στην αναπνοή και αυξημένα περιστατικά αλλεργίας, αυξημένη βρεφική θνησιμότητα και πρόωρους θανάτους, αυξημένο κίνδυνο καρδιαγγειακών παθήσεων, συμπεριλαμβανομένων των καρδιακών προσβολών, των εγκεφαλικών επεισοδίων και της ισχαιμικής καρδιακής νόσου, αυξημένη ανάπτυξη και σοβαρότητα επιδείνωσης

του παιδικού άσθματος, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια σε ενήλικες, επιβράδυνση της ανάπτυξης της πνευμονικής λειτουργίας σε παιδιά και εφήβους, καρκίνο, βλάβες νευρικού συστήματος και βλάβες του αναπνευστικού συστήματος (Kim et al., 2015).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι απαιτείται η άμεση παρέμβαση της Ε.Ε. μέσω ενός σχεδίου δράσης, το οποίο θα στοχεύσει στη μηδενική ρύπανση και στη μείωση του αριθμού των πρόωρων θανάτων λόγω της έκθεσης σε λεπτά σωματίδια. Ειδικότερα, προβλέπεται μείωση κατά 55% έως το 2030, σε σύγκριση με το 2005. Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί ότι σε σύγκριση με το 2005, το έτος 2020 οι πρόωροι θάνατοι που αποδίδονται στην έκθεση σε λεπτά σωματίδια μειώθηκαν κατά 45%. Όσον αφορά τη μηδενική ρύπανση και σε σύγκριση με το 2005, προβλέπεται μείωση κατά 25% των οικοσυστημάτων που επηρεάζονται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, έως το 2030.

Στην Ελλάδα, η ενημέρωση των πολιτών για την κατάσταση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, λαμβάνει χώρα μέσω της σύνταξης ετήσιων και περιοδικών εκθέσεων, σύμφωνα με τα πρότυπα των σχετικών Οδηγιών και των απαιτήσεών τους, οι οποίες παρουσιάζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των ρύπων. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην Ελλάδα, υπεύθυνη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος των σταθμών για την ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η Διεύθυνση της Κλιματικής Αλλαγής και της Ποιότητας Ατμόσφαιρας (ΥΠΠΕΝ, 2022).

Στην τελευταία Ελληνική ετήσια έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας (2022), έγινε σύγκριση των συγκεντρώσεων από τους μετρούμενους ρύπους με τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας και τις ενδεικτικές οριακές τιμές που ισχύουν, οι οποίες καθορίζονται από τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι εντοπίστηκαν υπερβάσεις σε συγκεκριμένους ρύπους. Συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀, τα οποία αποτελούν έναν από τους προβληματικούς ρύπους στην Ευρώπη, υπερέβησαν το μέσο ημερήσιο όριο στην Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη και το Βόλο, αλλά δεν υπερέβησαν το ετήσιο όριο όσον αφορά τη μετρούμενη συγκέντρωση μετά την αφαίρεση της συνεισφοράς της σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5}, δεν υπερέβησαν την πρότυπη τιμή σε κανένα από τα σημεία μέτρησης. Αυτές οι παρατηρήσεις οφείλονται κυρίως στη γεωγραφική θέση της Ελλάδας, δηλαδή όπου επικρατούν μεγάλη ηλιοφάνεια και υψηλές θερμοκρασίες (ΥΠΠΕΝ, 2022).

5.1 Εισαγωγή στις επιδράσεις των ΑΣ στα μεταβολικά νοσήματα

Σποραδικά γεγονότα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως η ιστορική ομίχλη του Λονδίνου το 1952 και μια σειρά από βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιδημιολογικές μελέτες διερεύνησαν τις επιπτώσεις των αλλαγών της ποιότητας του αέρα στην ανθρώπινη υγεία. Ένα σταθερό εύρημα είναι ότι η διαφορετική σύνθεση των ατμοσφαιρικών ρύπων, η δόση και ο χρόνος έκθεσης και το γεγονός ότι ο άνθρωπος συνήθως εκτίθεται σε μείγματα ρύπων παρά σε μεμονωμένες ουσίες, μπορεί να αποβούν μοιραία για την ανθρώπινη υγεία (Kampa & Castanas, 2008). Στην εργασία των Kampa & Castanas (2008), αναφέρεται ότι μέσω του γαστρεντερικού και της αναπνευστικού οδού, μπορεί να συμβεί απορρόφηση ρύπων, ενώ ένας αριθμός από τοξικές ουσίες μπορούν να βρεθούν στη γενική κυκλοφορία και να εναποτεθούν σε διαφορετικούς ιστούς.

Στην καθημερινή ζωή, όλοι είναι εκτεθειμένοι σε διάφορα είδη ρύπων. Οι επιπτώσεις στην υγεία, εξαρτώνται από τον τύπο του ρύπου, τη συγκέντρωσή του, τη διάρκεια έκθεσης, άλλους συνυπάρχοντες ρύπους και την ατομική ευαισθησία. Οι άνθρωποι που ζουν στις πόλεις εκτίθενται σε μεγαλύτερο βαθμό, ως συνέπεια της αυξημένης εκβιομηχάνισης, της αυξημένης χρήσης ενέργειας και της των μηχανοκίνητων οχημάτων. Η επαγγελματική έκθεση είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη (Kampa & Castanas, 2008).

Κοινός κυτταρικός μηχανισμός με τον οποίο οι περισσότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι ασκούν τις δυσμενείς επιπτώσεις τους είναι η ικανότητά τους να δρουν άμεσα ως προοξειδωτικά λιπιδίων και πρωτεϊνών ή ως γεννήτριες ελεύθερων ριζών, προάγοντας το οξειδωτικό στρες και την πρόκληση φλεγμονών. Οι ελεύθερες ρίζες, δηλαδή δραστικά είδη οξυγόνου και αζώτου, είναι επιβλαβείς σε κυτταρικά λιπίδια, πρωτεΐνες και πυρηνικό ή μιτοχονδριακό DNA, αναστέλλοντας την κανονική λειτουργία τους (Brook et al., 2013). Όταν η συγκέντρωση ελεύθερων ριζών αυξάνεται, εμφανίζεται μια κατάσταση οξειδωτικού στρες, ως άμυνας του οργανισμού. Αυτή η οξειδωτική κατάσταση εμπλέκεται σε μια μεγάλη ποικιλία εκφυλιστικών ασθενειών, όπως η αθηροσκλήρωση, καρδιακές προσβολές, ασθένειες στομάχου, χρόνιες φλεγμονώδεις παθήσεις, καταρράκτης, διαταραχές του κεντρικού νευρικού συστήματος, διαταραχές που σχετίζονται με την ηλικία και τέλος τον καρκίνο (Valko et al., 2006).

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης του αέρα παγκοσμίως. Πρόσφατα διατυπώθηκε η υπόθεση ότι προκαλούν καρδιομεταβολικό σύνδρομο, συμπεριλαμβανομένης της καρδιαγγειακής δυσλειτουργίας, της παχυσαρκίας και του διαβήτη. Από επιδημιολογικά και τοξικολογικά ευρήματα έχουν αποκαλυφθεί σταθερές συσχετίσεις μεταξύ της έκθεσης σε PM που σχετίζεται με την κυκλοφορία και της καρδιομεταβολικής υγείας (Brook et al., 2013).

Στην εργασία των Brook et al. (2013), διερευνήθηκε αν οι υποξείες εκθέσεις σε επίπεδο περιβάλλοντος μπορούν να βλάψουν την ευαισθησία στην ινσουλίνη. Στην έρευνα συμμετείχαν είκοσι πέντε υγιείς ενήλικες που ζούσαν στην αγροτική περιοχή του Μίσιγκαν, των ΗΠΑ και μεταφέρθηκαν σε μια αστική τοποθεσία για πέντε συνεχόμενες ημέρες με ημερήσια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση διάρκειας τεσσάρων έως πέντε ωρών. Τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} παρακολούθηθηκαν στο σημείο αστικής έκθεσης και στην κοινότητα κοντά στις κατοικίες των ατόμων. Επίσης, υπολογίστηκαν τρεις (3) περίοδοι διάρκειας περίπου 5 ημερών, σε υποξεία έκθεση, ξεκινώντας αναδρομικά από τη στιγμή των μετρήσεων του αποτελέσματος της υγείας, με εύρη PM_{2.5} από $9,7 \pm 3,9$ έως $11,2 \pm 3,9$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Αυτό που παρατηρήθηκε στην εργασία των Brook et al., (2013) ήταν μια αύξηση $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στις υποξείες εκθέσεις PM_{2.5}, η οποία συσχετίστηκε με αυξημένη HOMA-IR και μειωμένη μεταβλητότητα καρδιακού ρυθμού. Ακόμη, δεν σημειώθηκαν αλλοιώσεις σε άλλα αποτελέσματα, όπως είναι οι δείκτες φλεγμονής και η αγγειακή λειτουργία, σε σχέση με τις εκθέσεις σε PM_{2.5}. Συμπερασματικά, τα ευρήματα της έρευνας αυτής υποδηλώνουν ότι τα PM_{2.5} του περιβάλλοντος, ακόμη και σε χαμηλά επίπεδα, μπορεί να μειώσουν τη μεταβολική ευαισθησία στην ινσουλίνη. Η ατμοσφαιρική ρύπανση θα μπορούσε να ενισχύσει την ανάπτυξη του σακχαρώδους διαβήτη.

Τα μικρότερα μεγέθη PM, ιδιαίτερα τα εξαιρετικά λεπτά σωματίδια, αποδεικνύονται πιο επιβλαβή λόγω των μεγαλύτερων συγκεντρώσεων, της σύνθεσής τους, της μεγαλύτερης κατακράτησης τους στους πνεύμονες και της βιοδιαθεσιμότητάς τους. Τα ενεργά συστατικά των PM που σχετίζονται με την κυκλοφορία θα μπορούσαν να αποδοθούν σε μέταλλα, στοιχειακό άνθρακα, πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες και σωματίδια καυσαερίων ντίζελ. Τα υπάρχοντα στοιχεία δείχνουν ότι η ανάπτυξη καρδιομεταβολικών συμπτωμάτων

μπορεί να συμβεί μέσω χρόνιας συστηματικής φλεγμονής και αυξημένου οξειδωτικού στρες. Οι ηλικιωμένοι, τα παιδιά, τα ευπαθή άτομα και τα άτομα με προϋπάρχουσες παθήσεις προσδιορίζονται ως ευάλωτες ομάδες (Du et al., 2016; Wei et al., 2016).

Μια μετα-ανάλυση που πραγματοποιείται στην εργασία των Perez et al., (2015) από τέσσερις ευρωπαϊκές μελέτες κοόρτης στη μελέτη ESCAPE, βρίσκει μόνο θετικές, αλλά όχι σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ του CIMT και της μακροχρόνιας έκθεσης στα PM_{2,5}. Πολλά επιδημιολογικά στοιχεία εξακολουθούν να τεκμηριώνουν ότι η έκθεση σε PMs παίζει ρόλο στην ανάπτυξη της αθηροσκλήρωσης. Συγκεκριμένα, στην εργασία των Perez et al. (2015), διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της μακροχρόνιας έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση και του πάχους του εσωτερικού μέσου της κοινής καρωτίδας (CIMT), ενός προκλινικού δείκτη αθηροσκλήρωσης. Στη μελέτη αυτή, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα δεδομένα (επίπεδα διοξειδίου του αζώτου, οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων PM_{2,5}, απορρόφηση σωματιδίων, δείκτες εγγύτητας σε δρόμους με μεγάλη κυκλοφορία), στο πλαίσιο ενός τυπικού πρωτοκόλλου έκθεσης (Ευρωπαϊκή μελέτη κοορτών για τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης — μελέτη ESCAPE) στην περιοχή της Στοκχόλμης (Σουηδία), στην περιοχή Ausburg και Ruhr (Γερμανία) και στην περιοχή Girona (Ισπανία). Αυτό που αποδείχθηκε ήταν ότι η μετα-ανάλυση με 9.183 άτομα οδήγησε σε εκτιμώμενη αύξηση του CIMT κατά 0,72% ανά 5 μg/m³ αύξηση στα PM_{2,5} και 0,42% ανά 10 μg/m³ αύξηση σε απορρόφηση PM_{2,5}. Από τα αποτελέσματα και μέσω της χρήσης ενός τυποποιημένου πρωτόκολλου έκθεσης και ανάλυσης, παρατηρήθηκε ότι οι συσχετίσεις μεταξύ του CIMT και των οκτώ δεικτών ESCAPE της μακροχρόνιας έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση των κατοικιών δεν είχαν στατιστική σημασία. Η πρόσθετη μετα-ανάλυση του CIMT και του PM_{2.5} σε όλες τις δημοσιευμένες μελέτες έδειξε επίσης θετική αλλά όχι σημαντική συσχέτιση (Perez et al., 2015).

Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία μπορούν να αποδοθούν σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές κυκλοφορίας που προκύπτουν από την ταχεία αστικοποίηση και τον αυξημένο κυκλοφοριακό φόρτο τις τελευταίες δεκαετίες. Λόγω της ατελούς καύσης ορυκτών καυσίμων, οι εκπομπές από την κυκλοφορία απελευθερώνουν μεγάλη ποσότητα ρύπων στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένων των σωματιδίων (Zhang & Batterman, 2013; Jakubiak-Lasocka et al., 2015; Libalova

et al., 2018).

Στην εργασία των Jakubiak-Lasocka et al. (2015), διαπιστώθηκε ότι οι οδικές μεταφορές συμβάλλουν σημαντικά στα προβλήματα ποιότητας του αέρα μέσω των εκπομπών των οχημάτων, οι οποίες έχουν διάφορες επιζήμιες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον. Μέσω της έρευνάς τους, αξιολόγησαν τον αντίκτυπο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σχετίζεται με την κυκλοφορία στην υγεία των πολιτών της Βαρσοβίας, ακολουθώντας τις βασικές αρχές της μεθόδου Αξιολόγησης Επιπτώσεων στην Υγεία (HIA) και το κοινωνικό της κόστος. Τα PM10 επιλέχθηκαν ως δείκτης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σχετίζεται με την κυκλοφορία και μελετήθηκαν οι σχέσεις έκθεσης-απόκρισης μεταξύ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεων στην υγεία. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς τους, περίπου 827 πολίτες της Βαρσοβίας πεθαίνουν κάθε έτος εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία σχετίζεται με την κυκλοφορία. Επίσης, περίπου 566 και 250 εισαγωγές στα νοσοκομεία λόγω καρδιαγγειακών και αναπνευστικών παθήσεων, αντίστοιχα, και περισσότερες από 128.453 ημέρες περιορισμένης δραστηριότητας μπορούν να αποδοθούν στις εκπομπές ρύπων. Συμπερασματικά, διαπίστωσαν ότι από κοινωνικής άποψης, αυτές οι απώλειες προκαλούν τεράστιο κόστος, το οποίο είναι πολύ υψηλό και θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στην ολοκληρωμένη περιβαλλοντική πολιτική υγείας (Jakubiak-Lasocka et al., 2015).

Μία έρευνα η οποία ασχολήθηκε με τη μελέτη των οχημάτων ως σημαντικής πηγής εκπομπής δυνητικά επιβλαβών σωματιδίων για την ανθρώπινη υγεία, είναι αυτή των Libalova et al., (2018). Σύμφωνα με τους ερευνητές, έγινε συλλογή και χαρακτηρισμός των σωματιδίων καυσαερίων βενζίνης (GEP) που παράγονται από καθαρό καύσιμο βενζίνης (E0) και τα μείγματά με 15% αιθανόλη (E15), 25% n-βουτανόλη (n-But25) και 25% ισοβουτανόλη (i-But25). Για τη μελέτη των τοξικών επιδράσεων των οργανικών ενώσεων που εξάγονται από GEPs, ανέλυσαν τα προφίλ έκφρασης γονιδίων σε κύτταρα BEAS-2B του ανθρώπινου πνεύμονα. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι παρά τη χαμηλότερη μάζα GEP, το εκχύλισμα n-But25 περιείχε την υψηλότερη συγκέντρωση πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs), ενώ το εκχύλισμα i-But25 τη χαμηλότερη. Η ανάλυση γονιδιακής έκφρασης εντόπισε ενεργοποίηση της απόκρισης βλάβης στο DNA και άλλων μονοπατιών (π.χ. διακοπή του κυτταρικού κύκλου, μεταβολές της εξωκυτταρικής μήτρας, μεταβολές της κυτταρικής προσκόλλησης, αναστολή της βιοσύνθεσης χοληστερόλης, κ.α.), μετά

από έκθεση 4 ωρών σε όλα τα εκχύλισμα GEP. Το εκχύλισμα i-But25 προκάλεσε το πιο χαρακτηριστικό μοτίβο γονιδιακής έκφρασης, ιδιαίτερα μετά από έκθεση 24 ωρών. Οι επεξεργασίες με εκχύλισμα E0, E15 και n-But25 οδήγησαν σε σηματοδότηση στρες (συμπεριλαμβανομένης της απόκρισης βλάβης στο DNA, του οξειδωτικού στρες, του μεταβολισμού των PAH ή της προφλεγμονώδους απόκρισης). Ακόμη, το i-But25 προκάλεσε αλλαγές που σχετίζονται με το μεταβολισμό των κυτταρικών θρεπτικών συστατικών. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής υπέδειξαν ότι το εκχύλισμα i-But25 είχε την πιο αδύναμη γονοτοξική ισχύ, πιθανώς λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε PAH (Libalova et al., 2018).

Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων που σχετίζονται με την κυκλοφορία ποικίλλουν, ανάλογα με τον τύπο των καυσίμων, την απόδοση του κινητήρα και τις τεχνολογίες καυσαερίων. Οι εξατμίσεις των κινητήρων ντίζελ και βενζίνης αποβάλλουν καρκινογόνες ουσίες. Τα μέταλλα, το βενζο(α)πυρένιο και τα παράγωγά του, ανιχνεύονται συνεχώς στα PM καυσαερίων από τη λειτουργία των οχημάτων και αναγνωρίζονται ως τα κύρια συστατικά που αυξάνουν τους κινδύνους μεταλλαξιόγνων ή καρκινογόνων επιδράσεων (Karavalakis et al., 2015; Bisig et al., 2016; Roth et al., 2017).

Στην έρευνα των Karavalakis et al. (2015), αξιολογήθηκε συγκεκριμένη ομάδα αιωρούμενων σωματιδιακών εκπομπών, επτά ελαφρών βενζινοκίνητων οχημάτων, με χρήση καυσίμου βενζίνης κατά τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης. Η ομάδα δοκιμών περιελάμβανε οχήματα μοντέλου 2012 εξοπλισμένα με τεχνολογία ανάφλεξης με σπινθήρα (SI) και είτε ψεκασμού καυσίμου PFI, είτε άμεσου ψεκασμού DI. Ακόμη, έλαβε χώρα η ανάμειξη τριών καυσίμων βενζίνης για να επιτευχθεί μια σειρά στόχων συνολικών αρωματικών ουσιών με 15%, 25% και 35% κατ' όγκο, ενώ διατήρησαν τις άλλες ιδιότητες καυσίμου σχετικά σταθερές εντός καθορισμένων ορίων και ένα τέταρτο καύσιμο διαμορφώθηκε για να ικανοποιεί ένα 35% κατ' όγκο στόχο ολικών αρωματικών, αλλά με μεγαλύτερο αριθμό οκτανίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν στατιστικά σημαντικές αυξήσεις σε μονοξειδίο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες, αριθμό σωματιδίων και εκπομπές άνθρακα με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε αρωματικά και για τα επτά οχήματα που δοκιμάστηκαν. Οι αλλαγές στη σύνθεση του καυσίμου δεν είχαν στατιστικά σημαντική επίδραση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), φορμαλδεΰδης ή ακεταλδεΰδης. (Karavalakis et al., 2015).

Οι Bisig et al., (2016) διερεύνησαν πιθανές τοξικές επιδράσεις των

αερολυμάτων καυσαερίων από μείγματα αιθανόλης-βενζίνης χρησιμοποιώντας ένα πολυκυτταρικό μοντέλο του ανθρώπινου πνεύμονα και έδειξαν ότι οι περισσότερες επιπτώσεις στην υγεία σχετικά με τις εκπομπές των αυτοκινήτων εντοπίζονται με καυσαέρια ντίζελ, ενώ υπάρχουν μόνο λίγα δεδομένα για άλλα καύσιμα. Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιήθηκε επιβατικό αυτοκίνητο με τρεις διαφορετικές επιλογές καυσίμου, E10, E85 ή καθαρή βενζίνη (E0). Τα καυσαέρια εφαρμόστηκαν απευθείας για 6 ώρες σε αραιώση 1:10 σε ένα πολυκυτταρικό μοντέλο ανθρώπινου πνεύμονα. Για τη μελέτη της βιολογικής απόκρισης αξιολογήθηκε η κυτταροτοξικότητα, η προφλεγμονή, το οξειδωτικό στρες και η βλάβη του DNA. Για σύγκριση, στη μελέτη συμπεριλήφθηκε επίσης έκθεση στα καυσαέρια ντίζελ. Σε συνθήκες έκθεσης αιθανόλης-βενζίνης δεν παρατηρήθηκαν κυτταροτοξικότητα και μορφολογικές αλλαγές στις πνευμονικές κυτταροκαλλιέργειες. Η ανάλυση γονιδιακής έκφρασης δεν έδειξε επαγωγή σε κανένα από τα δοκιμασμένα γονίδια, συμπεριλαμβανομένων των επιπέδων mRNA γονιδίων που σχετίζονται με το οξειδωτικό στρες και την προφλεγμονή. Από την άλλη πλευρά, κυτταρικός θάνατος, οξειδωτικό στρες, καθώς και αύξηση των προφλεγμονωδών κυτοκινών παρατηρήθηκε για κύτταρα που εκτέθηκαν σε καυσαέρια ντίζελ, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα άλλων μελετών και τη δυνατότητα εφαρμογής του συστήματος αυτής της έκθεσης. Συμπερασματικά, από τη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε ότι τα ελεγμένα καυσαέρια από ένα όχημα βενζίνης που χρησιμοποιεί διαφορετικά μείγματα αιθανόλης-βενζίνης δεν προκάλεσαν δυσμενείς αποκρίσεις κυττάρων σε αυτή την οξεία έκθεση (Bisig et al., 2016).

Επιπλέον, ένας αυξανόμενος αριθμός επιδημιολογικών μελετών ανέφερε σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ της έκθεσης σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες ή του μείγματος καυσαερίων ντίζελ και των επιπτώσεων στην υγεία, της δυσλειτουργίας των β-κυττάρων, της αντίστασης στην ινσουλίνη και της αυξημένης αρτηριακής πίεσης (Kim et al. 2015).

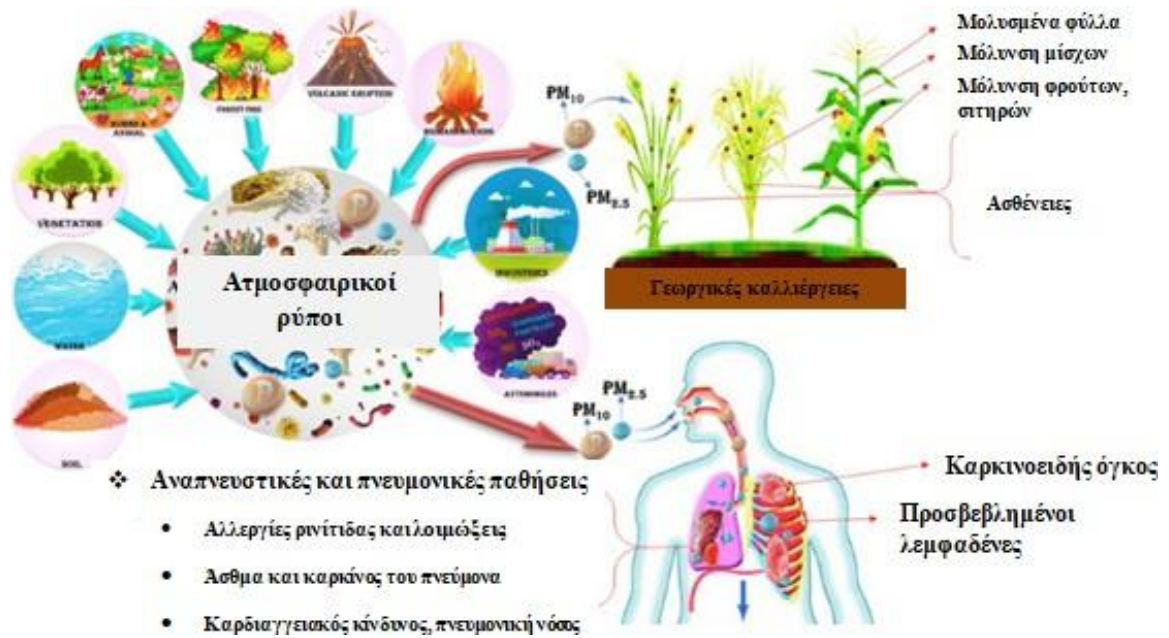
Το καρδιομεταβολικό σύνδρομο ορίζεται από μια ομάδα συμπτωμάτων, όπως υπέρταση, παχυσαρκία, αντίσταση στην ινσουλίνη, δυσλιπιδαιμία, χαμηλής πυκνότητας λιποπρωτεΐνες, υπερτριγλυκεριδαιμία, διαταραχή της ομοιόστασης της γλυκόζης και αυξημένη απέκκριση λευκοματίνης στα ούρα (Eze et al., 2015). Οι εμφανίσεις αυτών των συνδρόμων συμβάλουν στο διαβήτη τύπου 2 και στις καρδιαγγειακές περιπτώσεις ασθενειών, με αποτέλεσμα να αυξάνουν σε μεγάλο βαθμό το παγκόσμιο κόστος της υγειονομικής περίθαλψης (World Bank, 2016;

Einarson et al., 2018). Υποθέτοντας ότι τα αιωρούμενα σωματίδια σχετίζεται με την κυκλοφορία ως ένας παράγοντας κινδύνου, η κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών έκθεσης του καρδιομεταβολικού συνδρόμου είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των ασθενειών διαβήτη και τη μείωση της καρδιαγγειακής νοσηρότητας.

Στην εργασία των Eze et al. (2015), τα αιωρούμενα σωματίδια, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο και στην υποκλινική φλεγμονή και σχετίζονται με καρδιαγγειακή νοσηρότητα και θνησιμότητα. Το μεταβολικό σύνδρομο (MetS) είναι φλεγμονώδες και προηγείται της καρδιαγγειακής νοσηρότητας και του διαβήτη τύπου 2. Έτσι, μπορεί να υποτεθεί μια θετική συσχέτιση μεταξύ αιωρούμενων σωματιδίων και MetS. Στην εργασία τους, οι Eze et al. (2015) εξερεύνησαν αυτή τη συσχέτιση και τους πιθανούς τροποποιητές της σε ενήλικες Ελβετούς. Μελετήθηκαν 3.769 συμμετέχοντες της ελβετικής μελέτης κοόρτης για την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις πνευμονικές και καρδιακές παθήσεις σε ενήλικες, οι οποίοι υποβλήθηκαν σε τουλάχιστον τέσσερις ώρες νηστείας πριν από την έναρξη της ερευνητικής πειραματικής διαδικασίας. Οι εκθέσεις ήταν των αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ και του NO₂. Ο επιπολασμός των MetS-W (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας), MetS-I (Διεθνής Ομοσπονδία Διαβήτη) και MetS-A (Ενήλικες III) ήταν 10%, 22% και 18%, αντίστοιχα. Οι πιθανότητες MetS-W, MetS-I και MetS-A αυξήθηκαν κατά 72%, 31% και 18% ανά 10μg/m³. Η αύξηση στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ αναμένεται σε 10 χρόνια.

Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκαν ασθενέστερες συσχετίσεις με το NO₂. Οι συσχετίσεις ήταν ισχυρότερες μεταξύ των σωματικά ενεργών, των μόνιμα καπνιστών και των μη διαβητικών συμμετεχόντων, ιδιαίτερα με τα PM₁₀. Οι συσχετίσεις παρέμειναν ισχυρές σε αναλύσεις συμπεριλαμβανομένων περιπτώσεων διαβήτη.

Όσον αφορά τα συστατικά του MetS, παρατηρήθηκαν ισχυρότερες συσχετίσεις με μειωμένη γλυκαιμία νηστείας και θετικές αλλά ασθενέστερες συσχετίσεις με την υπέρταση και την παχυσαρκία με βάση την περίμετρο της μέσης. Οι καρδιομεταβολικές επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να οφείλονται κυρίως στη διαταραχή της ομοιόστασης της γλυκόζης και, σε λιγότερο ισχυρό βαθμό, από τη σπλαχνική παχυσαρκία (Eze et al., 2015).



Εικόνα 2. Οι πιο σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικών ΑΣ και αερομεταφερόμενων μικροβίων στο περιβάλλον και η επίδρασή τους στην ανθρώπινη υγεία και στις γεωργικές καλλιέργειες (Kumar, 2022).

5.2 Επίδραση των ΑΣ στο αναπνευστικό σύστημα

Ο αέρας που εισέρχεται στους πνεύμονες περιέχει αέρια μόρια σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και σωματίδια που αιωρούνται. Τα μόρια αερίου διέρχονται από την κυψελιδική-τριχοειδική μεμβράνη προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, ανάλογα με τη μερική πίεση σε κάθε πλευρά, ενώ εισπνεόμενα σωματίδια εναποτίθενται κατά μήκος των τοιχωμάτων των πνευμόνων, αν και τα μικρότερα μόρια μπορούν επίσης να διαπεράσουν τον ανατομικό φραγμό και να διεισδύσουν στην κυκλοφορία του αίματος. Η ακριβής θέση εναπόθεσης των σωματιδίων εξαρτάται από το μέγεθός τους, την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν, τη χημική τους σύνθεση και την ικανότητά τους να προσκολλώνται στα τοιχώματα των πνευμόνων ή στους υποδοχείς που συναντούν (Phalen & Raabe, 2016; Bui et al., 2020).

Τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες και να προκαλέσουν ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στην υγεία, ιδίως αναπνευστικών και καρδιαγγειακών παθήσεων. Πρόσφατες ιατρικές έρευνες δείχνουν ότι ο κίνδυνος για διάφορες επιπτώσεις στην υγεία αυξάνεται με την έκθεση και υπάρχουν λίγα στοιχεία που να υποδεικνύουν ένα όριο κάτω από το οποίο δεν αναμένονται δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι οι κίνδυνοι

για την υγεία θα ήταν υψηλότεροι για τα σωματίδια PM_{2,5}. Οι δυσμενείς επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία, ιδιαίτερα του καρδιαγγειακού και του αναπνευστικού συστήματος, έχουν επιβεβαιωθεί σε αρκετές μελέτες (Kampa & Castanas, 2008; Brook, 2008; Gotschi et al., 2008). Στα παιδιά, η ατμοσφαιρική ρύπανση αυξάνει τον επιπολασμό και τη συχνότητα εμφάνισης του άσθματος. Σε όλες τις ηλικιακές ομάδες, σχετίζεται με παροξύνσεις άσθματος, βρογχίτιδας, χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας και εισαγωγών σε νοσοκομεία για αναπνευστικές παθήσεις (Andersen et al., 2008; Ruckerl et al., 2008).

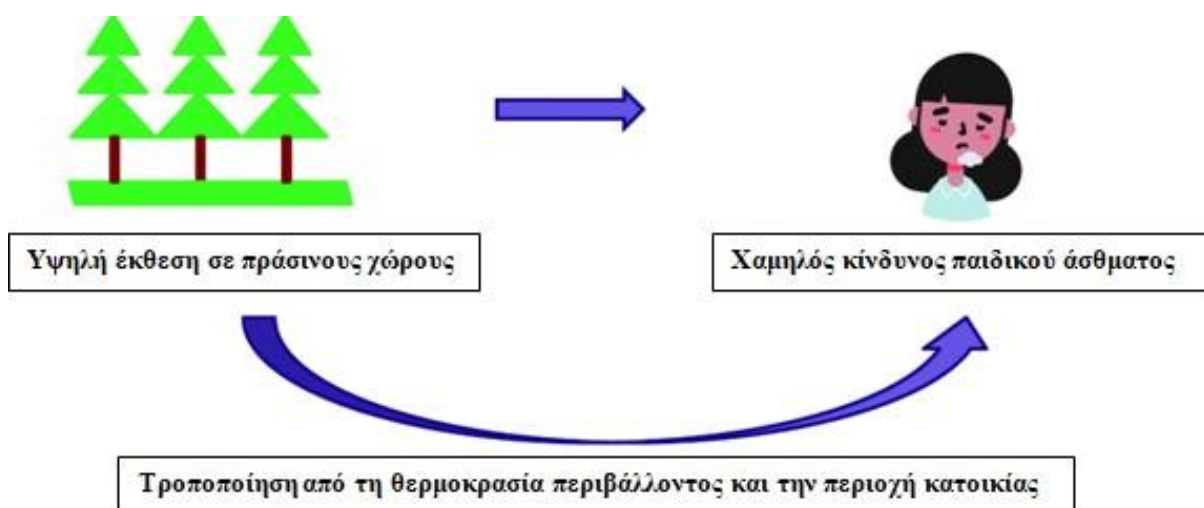
Στην εργασία των Lee et al. (2007), διερευνήθηκε η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στα ποσοστά εισαγωγής ασθενών σε νοσοκομείο της πόλης Μπουσάν της Κορέας, για αναπνευστικές ασθένειες. Το Μπουσάν είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Δημοκρατίας της Κορέας, όπου η υψηλή συγκέντρωσή του σε PM οφείλεται στα καυσαέρια των αυτοκινήτων και στην παρουσία βιομηχανιών μεσαίου έως μικρού επιπέδου, όπως οι χημικές και ναυπηγικές βιομηχανίες, και στα ενεργά λιμάνια του. Επειδή το νότιο άκρο του Μπουσάν συναντά τη θάλασσα και το βόρειο άκρο περιβάλλεται από βουνά, ο καιρός της πόλης είναι σχετικά ζεστός και υγρός. Αν και ένας αριθμός φυσικών δραστηριοτήτων, όπως είναι τα ηφαίστεια και οι πυρκαγιές, μπορεί να απελευθερώσουν διαφορετικούς ρύπους στο περιβάλλον, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι η κύρια αιτία της περιβαλλοντικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πόλης Μπουσάν.

Οι επικίνδυνες χημικές ουσίες των ατμοσφαιρικών ρύπων, μπορούν να εισέλθουν στο περιβάλλον εξαιτίας ανθρωπογενών παραγόντων και να απελευθερωθούν από βιομηχανικές εγκαταστάσεις και άλλες δραστηριότητες. Μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Ο επιπολασμός του άσθματος και των αλλεργιών έχει αυξηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, ιδιαίτερα στις δυτικοποιημένες χώρες. Η ταχεία αστικοποίηση και η εκβιομηχάνιση έχουν αυξήσει τη ρύπανση του αέρα και την έκθεση του πληθυσμού. Επομένως, υπάρχουν πιθανές σχέσεις μεταξύ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αναπνευστικών παθήσεων. Η έκθεση σε σωματίδια μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη πνευμονική λειτουργία, φλεγμονή κατώτερων αεραγωγών και ερεθισμό των ανώτερων αεραγωγών, καθώς και σε εισαγωγές στο νοσοκομείο για άσθμα, αύξηση της συχνότητας του άσθματος, παροξύνσεις άσθματος και αναπνευστική αλλεργία.

Στην εργασία των Baldacci et al. (2015), η συνδυασμένη έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και τα αλλεργιογόνα μπορεί να έχουν συνεργική επίδραση στο άσθμα και σε αλλεργίες. Τόσο η ατμοσφαιρική ρύπανση, όσο και οι καιρικές συνθήκες, επηρεάζουν τη νοσηλεία για αναπνευστικές ασθένειες. Ωστόσο, λίγες μελέτες έχουν διερευνήσει τη συμβολή του καιρού στη νοσηλεία που σχετίζεται με τις δυσμενείς επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στην εργασία των Jo et al. (2017), μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στις καθημερινές εισαγωγές σε νοσοκομεία που σχετίζονται με το αναπνευστικό, λαμβάνοντας υπόψη τους μετεωρολογικούς παράγοντες. Οι καθημερινές εισαγωγές στο νοσοκομείο για αναπνευστικές ασθένειες, όπως οξείας βρογχίτιδας, αλλεργικής ρινίτιδας και άσθματος, ελήφθησαν μεταξύ 2007 και 2010 και εξήχθησαν από την National Health Insurance Corporation, Κορέα. Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν ήταν ότι ο μέσος αριθμός ασθενών που εισήχθησαν με οξεία βρογχίτιδα, αλλεργική ρινίτιδα και άσθμα ήταν $5,8 \pm 11,9$, $4,4 \pm 6,1$ και $3,3 \pm 3,3$, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM₁₀ και PM_{2,5} ήταν $49,6 \pm 20,5$ και $24,2 \pm 10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα αυτά διαπιστώθηκε ότι τα ποσοστά εισαγωγής στο νοσοκομείο για ασθένειες του αναπνευστικού αυξήθηκαν με την αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων και της θερμοκρασίας και με τη μείωση της σχετικής υγρασίας. Μια πολυπαραγοντική ανάλυση έδειξε σημαντική αύξηση στις εισαγωγές που σχετίζονται με το αναπνευστικό με αυξανόμενα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων. Τα υψηλότερα επίπεδα PM_{2,5} είχαν μεγαλύτερη επίδραση στην εισαγωγή στο νοσοκομείο που σχετίζεται με το αναπνευστικό, από ότι τα επίπεδα PM₁₀ στα παιδιά. Οι ηλικιωμένοι ήταν οι πιο επιρρεπείς στην εισαγωγή στο νοσοκομείο για αναπνευστικές παθήσεις. Συμπερασματικά, από την εργασία αυτή των Jo et al. (2017), τα επίπεδα PM και οι μετεωρολογικοί παράγοντες επηρέασαν τη νοσηλεία για αναπνευστικές παθήσεις, ειδικά σε παιδιά και ηλικιωμένους. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η επίδραση των PM στις ασθένειες του αναπνευστικού αυξήθηκε καθώς μειώθηκε η σχετική υγρασία.

Στην εργασία των Hu et al. (2023), ερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ του πράσινου χώρου που υπήρξε γύρω από τις κατοικίες παιδιών και του άσθματος στα παιδιά. Συγκεκριμένα, το 2022 διεξήχθη μια συγχρονική μελέτη σε όλη την πόλη Σαγκάη της Κίνας, όπου συμμετείχαν 16.605 παιδιά ηλικίας 3-12 ετών. Τα δεδομένα για τα συμπτώματα του άσθματος και τις συμμεταβλητές συλλέχθηκαν από

επικυρωμένα ερωτηματολόγια που αναφέρθηκαν από τα ίδια τα παιδιά. Ο χώρος πρασίνου που υπήρχε γύρω από τις οικίες τους μετρήθηκε χρησιμοποιώντας δορυφορικό δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI) και ενισχυμένο δείκτη βλάστησης (EVI). Πληροφορίες για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τα σωματίδια με δυναμική διάμετρο $<1 \mu\text{m}$ (PM1) και $2,5 \mu\text{m}$ (PM2,5) συλλέχθηκαν επίσης από δορυφορικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα παλινδρόμησης για να αξιολογηθούν οι συσχετίσεις της έκθεσης των παιδιών στο χώρο πρασίνου με το άσθμα, καθώς και για να αξιολογηθεί η τροποποίηση της επίδρασης από συμμεταβλητές. Διαπιστώθηκε ότι ο επιπολασμός του άσθματος στα παιδιά ήταν 4,8 %. Μια αύξηση του δορυφορικού δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI) από το 2016 έως το 2018 συσχετίστηκε με μειωμένες πιθανότητες άσθματος το 2019. Η συσχέτιση χώρου πρασίνου-άσθματος τροποποιήθηκε από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την οικιστική περιοχή. Οι αναλύσεις ευαισθησίας με χρήση διαφόρων μοντέλων και η έκθεση στο EVI έδειξαν τη στιβαρότητα των αποτελεσμάτων. Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι η υψηλότερη ατομική έκθεση στον πράσινο χώρο συσχετίστηκε με μειωμένες πιθανότητες άσθματος στα παιδιά και η συσχέτιση φάνηκε να τροποποιείται από διαφορετικούς περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς και δημογραφικούς παράγοντες (Hu et al., 2023).



Εικόνα 3. Παρουσίαση της επιρροής χώρων πρασίνου στο παιδικό άσθμα (Hu et al., 2023).

Τα παραπάνω ευρήματα παρέχουν πρόσθετα στοιχεία για την προώθηση του αστικού πρασίνου για την προστασία της υγείας και της ευημερίας των παιδιών. Λόγω της ταχείας αστικοποίησης και συνεπώς της αύξησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της έκθεσης στο χώρο πρασίνου στην ανθρώπινη υγεία.

Η κύρια οδός έκθεσης στα σωματίδια είναι η εισπνοή, τόσο σε εσωτερικούς, όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Εκτός από την περιβαλλοντική παρακολούθηση των σωματιδίων, είναι απαραίτητο να δοθεί προσοχή στη χημική σύνθεση αυτού του περιβαλλοντικού ρύπου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι από διάφορες τοξικολογικές μελέτες, ο σχηματισμός δραστικών ειδών οξυγόνου (ROS) θεωρείται σημαντική συνέπεια των αιωρούμενων σωματιδίων που μπορούν να οδηγήσουν σε δυσμενείς επιπτώσεις στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Στην εργασία των Khoshnamvand et al. (2022), ερευνήθηκε εάν το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει το οξειδωτικό δυναμικό (OP) μέσω της αναζήτησης των κύριων βάσεων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των PubMed, Scopus, Embase και Web of Science. Κατά τη μελέτη τους, αναζητήθηκαν όλα τα άρθρα που δημοσιεύτηκαν μέχρι το 2021 και ως κριτήρια επιλογής ήταν ότι τα άρθρα θα πρέπει να περιέχουν την κατανομή μεγέθους σωματιδίων, τη μέτρηση του οξειδωτικού δυναμικού, τη μέθοδο μέτρησης του οξειδωτικού δυναμικού, τη μέτρηση του οξειδωτικού δυναμικού του ατμοσφαιρικού αέρα. Έτσι, 25 μελέτες συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ μεγέθους σωματιδίων και τιμών OP έχει σημαντική διαφορά μεταξύ των κατηγοριών των αιωρούμενων σωματιδίων, μικρότερων των 2,5 μm ή και μικρότερων του 1 μm. Από την ανάλυση της μελέτης αυτής δεν εντοπίστηκε σημαντική διαφορά στο OP στις διαφορετικές κατηγορίες μεγέθους κατανομής. Αυτό που συμπεραίνεται από τη μελέτη είναι ότι μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων μεγαλύτερα από 2,5 μm δεν είχαν μεγάλη επίδραση στην ανθρώπινη υγεία.

Σε ορισμένες εργασίες, όπως αυτή των Perrone et al. (2019), τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2.5} συλλέχθηκαν για ένα ολόκληρο έτος σε μια παράκτια τοποθεσία της Κεντρικής Μεσογείου και αναλύθηκαν για τη χημική τους σύνθεση και το οξειδωτικό δυναμικό (OP), που προσδιορίστηκε από αναλύσεις της διθειοθρεϊτόλης (DTT) και του ασκορβικού οξέος (AA). Συνολικά, σημαντική εποχικότητα παρατηρήθηκε με υψηλότερες τιμές το φθινόπωρο με το χειμώνα από ότι την άνοιξη με το καλοκαίρι,

δηλαδή 1,5 και 2,3 φορές αύξηση για το OPDTTV και το OPAAV, αντίστοιχα. Επίσης, κατά την ψυχρή περίοδο, η δραστηριότητα του OPV συσχετίστηκε ευρέως με μέταλλα και είδη άνθρακα, όπως K^+ , NO_3^- , Ba, Cd, Cu, Fe, Mn, P, V, OC, EC, Οξικό, Οξαλικό και Γλυκολικό. Αυτό υποδηλώνει την κύρια συμβολή μιας «μικτής ανθρωπογενούς» πηγής, που αποτελείται από τις εκπομπές καύσης βιομάζας (K^+ , OC και EC) και κυκλοφορίας (Ba, Cu, Fe, Mn, V, EC). Την περίοδο άνοιξη με καλοκαίρι, το OPV συσχετίστηκε σημαντικά με λίγα μόνο είδη, όπως OC, EC, Cu και NO_3^- , υποδηλώνοντας την κύρια συσχέτιση με τις πηγές μικτής ανθρωπογενούς και αντιδρούσας σκόνης. Από τη μελέτη αυτή συνήχθη το συμπέρασμα ότι η ανάλυση DTT ήταν πιο ευαίσθητη στα PM_{2,5} παρά στα σωματίδια PM₁₀.

Στην εργασία των Nishita-Hara et al. (2019), το οξειδωτικό δυναμικό είναι μια σημαντική ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων και θεωρείται ως μια μέτρηση πιο σχετική με την υγεία από τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων. Στην εργασία των Nishita-Hara et al. (2019) ερευνήθηκε το οξειδωτικό δυναμικό των αιωρούμενων σωματιδίων διαχωρισμένων ως προς το μέγεθος και τις επιπτώσεις της ασιατικής σκόνης στη Φουκουόκα, στη δυτική Ιαπωνία. Από τις 16 Μαρτίου έως τις 26 Μαΐου 2016 συλλέγονταν συνεχώς σωματίδια αερολύματος με διαμέτρους μικρότερες και μεγαλύτερες από 2,5 μm. Το οξειδωτικό δυναμικό αναλύθηκε με τη χρήση της δοκιμασίας διθειοθρεϊτόλης (DTT) και βρέθηκαν επίσης χημικά συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι η μέση DTT όλων των δειγμάτων λεπτών σωματιδίων ήταν μεγαλύτερη από τα δείγματα χονδρών σωματιδίων. Έτσι, το DTTν των λεπτών σωματιδίων συσχετίστηκε σε μεγάλο βαθμό με στοιχεία που κυριαρχούν σε ανθρωπογενείς πηγές καύσης και με τα στοιχεία που εκπέμπονται από πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένης της σκόνης από τα ορυκτά και των πηγών καύσης. Το DTTν των χονδροειδών σωματιδίων συσχετίστηκε ισχυρά με τα στοιχεία που προέρχονται από ορυκτή σκόνη, υποδηλώνοντας τη συγκέντρωση σωματιδίων ορυκτής σκόνης ως σημαντικό παράγοντα ελέγχου ειδικά για το οξειδωτικό δυναμικό των χονδροειδών σωματιδίων.

Στην εργασία των Fujitani et al. (2017), αναφέρθηκε ότι οι οξειδωτικές ικανότητες των αιωρούμενων σωματιδίων βασίζονται στην ποσότητα του οργανικού άνθρακα όταν αφαιρεθούν τα στοιχεία των μετάλλων της μετάπτωσης. Το ίδιο δεν συμβαίνει όταν μελετάται η κυκλοφορία κατά την περίοδο του καλοκαιριού.

Συγκεκριμένα, περιβαλλοντικά δείγματα PM_{2,5} συλλέχθηκαν σε μια διασταύρωση κυκλοφορίας στο Kawasaki της Ιαπωνίας και σε μια οικιστική τοποθεσία, την Tsukuba της Ιαπωνίας, το καλοκαίρι και το χειμώνα, όπου προσδιορίστηκαν οι χημικές συνθέσεις των δειγμάτων και οι οξειδωτικές τους ικανότητες στη διθειοθρεϊτόλη (DTT). Ερευνήθηκαν επίσης τα αερολύματα που παράγονται στο εργαστήριο. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία με χηλικά αντιδραστήρια για να καλύψουν τα αποτελέσματα των μετάλλων μετάπτωσης. Οι μέσες τιμές κατανάλωσης DTT για τα δείγματα PM που συλλέχθηκαν στο σημείο κυκλοφορίας ήταν 53 και 50 $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \mu\text{g}^{-1}$ το καλοκαίρι και το χειμώνα, αντίστοιχα και αυτές οι τιμές ήταν 1,3 και 1,1 φορές οι αντίστοιχες τιμές στην οικιστική τοποθεσία και ήταν επίσης υψηλότερες από τις τιμές για τα αερολύματα που παράγονται στο εργαστήριο. Μετά την απομάκρυνση της επίδρασης των μετάλλων μετάπτωσης με τα αντιδραστήρια χηλοποίησης, οι οξειδωτικές ικανότητες των περιβαλλοντικών δειγμάτων συσχετίστηκαν με τις ποσότητες οργανικού άνθρακα, υδατοδιαλυτού οργανικού άνθρακα και οργανικών οξέων και συσχετίστηκαν ασθενώς με τις ποσότητες στοιχειακού άνθρακα και ανόργανα ιόντα. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι οι οξειδωτικές ικανότητες βασίζονται στην ποσότητα του οργανικού άνθρακα μετά την αφαίρεση των επιπτώσεων των μετάλλων μετάπτωσης.

Στην εργασία των Jovanovic et al. (2019) εκτιμήθηκε το οξειδωτικό δυναμικό (OP) των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) με εφαρμογή DTT και διχλωρο- διϋδρο- φθοροσκεΐνη διοξική (DCFH-DA). Η απόδοση τους συγκρίθηκε με 9,10-δισ (φαινυλαιθυνύλιο) ανθρακένιο-νιτροξείδιο (BPEAnit). Αξίζει να αναφερθεί ότι η μελέτη αποτελεί την πρώτη μελέτη στην οποία η απόδοση του DTT και του DCFH συγκρίθηκε με τον ανιχνευτή BPEAnit. Προσδιορίστηκαν οι μέσες συγκεντρώσεις PM, οργανικού άνθρακα (OC) και στοιχειακού άνθρακα (EC) για λεπτά (PM_{2,5}) και χονδροειδή (PM₁₀) σωματίδια. Τα αποτελέσματα ήταν $44,8 \pm 13,7$, $9,8 \pm 5,1$ και $9,3 \pm 4,8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ για PM_{2,5} και $75,5 \pm 25,1$, $16,3 \pm 8,7$ και $11,8 \pm 5,3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, αντίστοιχα για PM₁₀. Το OPBPEAnit είχε την κορύφωσή του στις 2 μ.μ. το απόγευμα, δεδομένου ότι ήταν τρεις φορές υψηλότερος σε σύγκριση με τις τιμές το πρωί και αργά το απόγευμα. Τα αποτελέσματα DCFH και BPEAnit συσχετίστηκαν, ενώ δεν υπήρχε καλή συμφωνία μεταξύ του BPEAnit και του DTT. Η συνολική οργανική περιεκτικότητα σε PM δεν αντιπροσώπευε απαραίτητα οξειδωτική ικανότητα και παρουσίαζε ποικίλη συσχέτιση με το OP. Όσον αφορά τα δύο κλάσματα PM που

μελετήθηκαν, το OP συσχετίστηκε κυρίως με μικρότερα σωματίδια PM. Συνεπώς, διαπιστώθηκε ότι το μεγαλύτερο μέρος του OP σχετίζεται με τη λειτουργία PM_{2.5} (Jovanovic et al., 2019).

Από τις παραπάνω μελέτες διαπιστώνεται ότι τα μικρότερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερο οξειδωτικό δυναμικό. Τα σωματίδια μικρότερα από τα PM_{2.5} αποτελούν μεγαλύτερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και συνιστάται η προσοχή να επικεντρωθεί στα PM_{2.5}. Η δραστηριότητα DTT στο υδατοδιαλυτό κλάσμα εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα σε μέταλλο και τα οργανικά είδη από την καύση.

5.3 Επίδραση των ΑΣ στο καρδιαγγειακό σύστημα

Εκτεταμένα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες δείχνουν ότι η έκθεση σε PM_{2.5} αυξάνει τον κίνδυνο θνησιμότητας από καρδιαγγειακά νοσήματα. Τόσο οι επεισοδιακές όσο και οι χρόνιες εκθέσεις φαίνονται σημαντικές. Οι σύντομες εκθέσεις πυροδοτούν οξεία κλινικά συμβάντα, όπως έμφραγμα του μυοκαρδίου και εγκεφαλικό επεισόδιο και οι χρόνιες εκθέσεις επιταχύνουν την εξέλιξη της υποκλινικής αθηρωματικής νόσου, οδηγώντας σε πρόωρη καρδιαγγειακή θνησιμότητα (Cosselman et al., 2015; Kaufman et al., 2020; Al-Kindi et al. 2020). Στην εργασία των Atkinson et al. (2014), πραγματοποιήθηκε μια μετα-ανάλυση 110 μελετών χρονοσειρών σχετικά με τη συσχέτιση μεταξύ PM_{2.5} και ημερήσιας θνησιμότητας. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν μια αύξηση 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ στα PM_{2.5}, που συσχετίστηκε με 1,04% αύξηση του κινδύνου θανάτου και 0,84% αύξηση του θανάτου από καρδιαγγειακά αίτια.

Όπως οι οξείες εκθέσεις, οι χρόνιες εκθέσεις σχετίζονται με αύξηση του κινδύνου θνησιμότητας από καρδιαγγειακά νοσήματα και έχει εκτιμηθεί ο παγκόσμιος αντίκτυπος των PM_{2.5} στην καρδιαγγειακή θνησιμότητα. Αυτές οι εκτιμήσεις βασίστηκαν αρχικά στο ολοκληρωμένο μοντέλο έκθεσης-απόκρισης, το οποίο, ελλείψει δεδομένων από χώρες υψηλής ρύπανσης, συνδύαζε πληροφορίες από το παθητικό κάπνισμα, την οικιακή ατμοσφαιρική ρύπανση και το ενεργό κάπνισμα (GBD 2016 Risk Factors Collab, 2016). Με την πρόσφατη διαθεσιμότητα δεδομένων από την εργασία των Burnett et al. (2018), τα οποία συλλέχθηκαν στα υψηλότερα

επίπεδα έκθεσης από την Κίνα, εκτιμήθηκε, παγκοσμίως, η έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση από λεπτά σωματίδια του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τους ίδιους, αυτή η ατμοσφαιρική ρύπανση σχετίζεται με 8,9 εκατομμύρια θανάτους λόγω μη μεταδοτικών ασθενειών και λοιμώξεων του κατώτερου αναπνευστικού, που αντιπροσωπεύουν σχεδόν όλους τους μη τυχαίους θανάτους. Αυτή η εκτίμηση είναι 120% υψηλότερη από την προηγούμενη και υποδηλώνει ότι η επιβάρυνση της υγείας από την ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να είναι συγκρίσιμη με αυτή του καπνίσματος στα 6,3 εκατομμύρια και της διατροφής στα 10,3 εκατομμύρια, καθιστώντας την ατμοσφαιρική ρύπανση κύρια αιτία αποτρέψιμων θανάτων παγκοσμίως.

Μια άλλη μετα-ανάλυση 42 μελετών, η οποία έλαβε χώρα στην εργασία των Alexeeff et al. (2021), δείχνει ξεκάθαρα ότι η μακροχρόνια έκθεση σε $PM_{2,5}$ σχετίζεται με αύξηση της θνησιμότητας λόγω καρδιαγγειακών ασθενειών. Ενώ έχει αναφερθεί σχεδόν διπλάσια αύξηση του κινδύνου για υποτροπιάζον οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου όταν οι επιδράσεις του $PM_{2,5}$ είναι κάπως μικρότερες του 8% (Koton et al., 2013). Οι ασθενείς με προηγούμενο ιστορικό εμφράγματος του μυοκαρδίου είναι πιθανότερο να είναι πιο επιρρεπείς σε PM επειδή έχουν προϋπάρχουσα καρδιαγγειακή νόσο.

Η έκθεση σε $PM_{2,5}$ σχετίζεται με αύξηση του κινδύνου, τόσο ισχαιμικού, όσο και αιμορραγικού εγκεφαλικού επεισοδίου. Δεν είναι γνωστό γιατί ο κίνδυνος ισχαιμικού εγκεφαλικού είναι ελαφρώς υψηλότερος από αυτόν του αιμορραγικού εγκεφαλικού επεισοδίου, αλλά η ευαισθησία του αιμορραγικού εγκεφαλικού με $PM_{2,5}$ παρομοιάζεται με αυτή που παρατηρείται με την έκθεση στον καπνό του τσιγάρου, η οποία έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη στεφανιαία νόσο και σε ισχαιμικό εγκεφαλικό παρά στο αιμορραγικό εγκεφαλικό (Lee et al., 2017). Η υπέρταση είναι πιο διαδεδομένη πάθηση στους ασθενείς με ισχαιμικό εγκεφαλικό, οι οποίοι τείνουν επίσης να είναι μεγαλύτεροι σε ηλικία και να έχουν πιο σοβαρή αθηροσκληρωτική νόσο από αυτούς με αιμορραγικό εγκεφαλικό (Bilic et al., 2009).

Οι αυξήσεις στα επίπεδα $PM_{2,5}$ του περιβάλλοντος έχουν συνδεθεί με αυξήσεις στις εισαγωγές περιστατικών καρδιακής ανεπάρκειας σε νοσοκομεία και με το θάνατο (Shah et al., 2013). Οι ισχυρότερες συσχετίσεις μεταξύ των επιπέδων $PM_{2,5}$ και της καρδιακής ανεπάρκειας έχουν παρατηρηθεί την ημέρα της έκθεσης, υποδεικνύοντας οξεία έξαρση της καρδιακής ανεπάρκειας. Ο κίνδυνος φαίνεται να είναι ακόμη

μεγαλύτερος στους λήπτες μοσχευμάτων καρδιάς (Al-Kindi et al., 2019). Οι ασθενείς με μεταμόσχευση πνεύμονα και νεφρού εμφανίζουν παρόμοια υψηλή ευαισθησία στους περιβαλλοντικούς ρύπους, υποδηλώνοντας ότι η μοναδική τους ανοσολογική κατάσταση μπορεί να καταστήσει τους μεταμοσχευμένους ασθενείς ιδιαίτερα ευάλωτους σε δυσμενείς περιβαλλοντικές εκθέσεις (Pope & Bhatnagar, 2019). Εκτός από το ότι επηρεάζει την καρδιακή ανεπάρκεια, η έκθεση σε PM_{2,5} φαίνεται να επηρεάζει άμεσα την καρδιακή λειτουργία. Ακόμη και σε έναν τυχαία στρατολογημένο πληθυσμό μέσης ηλικίας, η λειτουργία της αριστερής κοιλίας συσχετίστηκε εγκάρσια με τη μακροχρόνια έκθεση σε PM_{2,5}, υποδηλώνοντας σημαντική αναδιαμόρφωση, η οποία μπορεί να σχετίζεται είτε με τις αυτόνομες επιδράσεις PM_{2,5} ή στις αγγειακές και ηλεκτροφυσιολογικές συνέπειες της έκθεσης σε PM (Yang et al., 2017).

Οι διαταραχές που προκαλούνται από την έκθεση σε PM_{2,5} μπορούν να επηρεάσουν τον κίνδυνο και για κολπική μαρμαρυγή. Οι επιπτώσεις φαίνεται να είναι μάλλον άμεσες, αφού σε ασθενείς με εμφυτεύσιμο απινιδωτή καρδιομετατροπής, οι πιθανότητες κολπικής μαρμαρυγής αυξάνονται με αυξημένα επίπεδα PM_{2,5} εντός 2 ωρών. Σε ενήλικες μεγαλύτερης ηλικίας με υπέρταση, οι ωριαίες αλλαγές PM συσχετίζονται με μεγαλύτερο κίνδυνο οξέων επεισοδίων τόσο ασυμπτωματικής, όσο και συμπτωματικής κολπικής μαρμαρυγής.

Η έκθεση σε PM_{2,5} έχει επίσης συσχετιστεί με αύξηση της συχνότητας εμφάνισης της νεοεμφανιζόμενης κολπικής μαρμαρυγής σε ευαίσθητους ασθενείς. Σε τέτοιους ασθενείς, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν κολπική μαρμαρυγή λόγω αλλαγών στην κολπική ισχαιμία, την κολπική πίεση ή τον αυτόνομο τόνο. Το πώς συμβαίνουν αυτές οι αλλαγές, και πώς σχετίζονται με το πνευμονικό οξειδωτικό στρες και τη φλεγμονή, παραμένει ασαφές (Al-Kindi et al., 2020).

Όσον αφορά τις καρδιακές αρρυθμίες, την εξωνοσοκομειακή καρδιακή ανακοπή (OHCA) και την έκθεση σε σωματίδια PM, αρκετές μελέτες έχουν παρατηρήσει μια θετική συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε PM περιβάλλοντος και της συχνότητας των κοιλιακών αρρυθμιών σε ασθενείς στους οποίους έχουν εμφυτευθεί αυτόματοι απινιδωτές. Στην εργασία των Chiu et al. (2013), η οποία έλαβε χώρα στην Ταϊπέι, διαπιστώθηκε ότι ο αυξημένος αριθμός επισκέψεων καρδιακής αρρυθμίας στα επείγοντα περιστατικά συσχετίστηκε σημαντικά με PM_{2,5} τόσο τις ζεστές ημέρες, με θερμοκρασία περιβάλλοντος πάνω από 23 °C, όσο και τις ψυχρές ημέρες, με

θερμοκρασία περιβάλλοντος κάτω από τους 23 °C. Ειδικότερα, αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε για να προσδιοριστεί εάν υπήρχε συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων των λεπτών σωματιδίων PM_{2.5} και του αριθμού των επειγόντων συμβάντων στο νοσοκομείο (ER) για καρδιακές αρρυθμίες στην Ταϊπέι της Ταϊβάν. Οι επισκέψεις στο ER για καρδιακές αρρυθμίες και δεδομένα της ρύπανσης του αέρα του περιβάλλοντος της Ταϊπέι ελήφθησαν για την περίοδο 2006 με 2010. Σύμφωνα με τη μελέτη, ο σχετικός κίνδυνος (RR) των επισκέψεων ER υπολογίστηκε ελέγχοντας τις μεταβλητές του καιρού, την ημέρα της εβδομάδας, την εποχικότητα και τις μακροπρόθεσμες τάσεις του χρόνου. Για το μοντέλο ενός μόνο ρύπου, χωρίς προσαρμογή για άλλους ρύπους, αυξημένος αριθμός επισκέψεων καρδιακής αρρυθμίας ER συσχετίστηκε σημαντικά με PM_{2.5} τόσο τις ζεστές ημέρες, όσο και τις ψυχρές ημέρες. Στα μοντέλα δύο ρύπων, τα επίπεδα PM_{2.5} παρέμειναν σημαντικά μετά τη συμπερίληψη του διοξειδίου του θείου SO₂ ή του όζοντος O₃, τόσο τις ζεστές, όσο και τις ψυχρές ημέρες.

Την ίδια χρονιά, στην εργασία των Link et al. (2013), αξιολογήθηκε η συσχέτιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με την έναρξη της κολπικής μαρμαρυγής (AF) σε 176 ασθενείς με εμφυτεύσιμους καρδιομετατροπείς- απινιδωτές διπλού θαλάμου (ICDs). Ασθενείς με εμφυτεύσιμους απινιδωτές καρδιομετατροπής διπλού θαλάμου (ICDs) εγγράφηκαν και παρακολούθηθηκαν προοπτικά. Η συσχέτιση της έναρξης AF με την ποιότητα του αέρα, συμπεριλαμβανομένων των PM_{2.5} περιβάλλοντος στις 24 ώρες πριν από την αρρυθμία, εξετάστηκε χρησιμοποιώντας τη συλλογή πληροφοριών και την ανάλυση των περιπτώσεων στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σε αναλύσεις ευαισθησίας, εξετάστηκαν συσχετισμοί με την ατμοσφαιρική ρύπανση μεταξύ 2 και 48 ωρών πριν από την AF. Από τους 176 ασθενείς που παρακολούθηθηκαν για 1,9 χρόνια κατά μέσο όρο, 49 ασθενείς είχαν 328 επεισόδια κολπικής μαρμαρυγής διάρκειας μεγαλύτερης ή ίσης των 30 δευτερολέπτων. Επίσης, βρέθηκαν θετικές αλλά μη σημαντικές συσχετίσεις για τα PM_{2.5} τις προηγούμενες 24 ώρες, αλλά ισχυρότερες συσχετίσεις βρέθηκαν με μικρότερα παράθυρα έκθεσης. Οι ίδιοι αποκάλυψαν ότι τα PM_{2.5} προκαλούν μια οξεία ενεργοποίηση της κολπικής μαρμαρυγής, η οποία συσχετίστηκε με αυξημένες πιθανότητες έναρξης AF, με 26% αύξηση για κάθε αύξηση 6,0 mg/m³ στη συγκέντρωση PM_{2.5}, εντός ωρών μετά την έκθεση σε ασθενείς με γνωστή καρδιακή νόσο.

Η συχνότητα του αιφνιδίου καρδιακού θανάτου και των καρδιακών αρρυθμιών σχετίζεται στενά με τη δραστηριότητα του αυτόνομου νευρικού συστήματος και η

δραστηριότητά του σε ευαίσθητους ασθενείς μπορεί να αξιολογηθεί μετρώντας τις αλλαγές στη μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού (HRV). Η HRV μεσολαβείται από μια ισορροπία μεταξύ συμπαθητικών και παρασυμπαθητικών κλάδων του αυτόνομου νευρικού συστήματος, η οποία αναγνωρίζεται ως δείκτης για την πρόγνωση της συχνότητας της κοιλιακής αρρυθμίας. Η μειωμένη HRV συχνά προβλέπει την πιθανότητα εμφάνισης κοιλιακών αρρυθμιών σε ασθενείς μετά από ΜΙ και καρδιακή ανεπάρκεια. Οι μειώσεις του HRV παρατηρήθηκαν κατά την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια περιβάλλοντος, οικιακής έκθεσης ή εργασίας σε υγιείς εθελοντές, ευαίσθητους ασθενείς, νοικοκυρές και εργαζόμενους (Huang et al., 2014). Στην εργασία των Huang et al. (2014), πραγματοποιήθηκε μία 24ωρη συνεχής παρακολούθηση του ηλεκτροκαρδιογραφήματος και μετρήθηκε η οικιακή έκθεση PM σε 50 νοικοκυρές. Τα οικιακά PM μετρήθηκαν ως η συγκέντρωση μάζας του PM με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm και χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα μικτών επιπτώσεων για να εξεταστεί η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στα PM_{2,5} των νοικοκυριών και των δεικτών HRV. Μετά τον εντοπισμό των πιθανών συγχυτικών παραγόντων, μια μεταβολή του εύρους των PM_{2,5} των νοικοκυριών με μέσο όρο 1 έως 4 ώρες συσχετίστηκε με μειώσεις από 1,25–4,31% και 0,12–3,71%. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι το τηγάνισμα, το καθάρισμα με απορρυπαντικό και το θυμιάμα μπορεί να αυξήσουν τις συγκεντρώσεις PM_{2,5} στα νοικοκυριά και να τροποποιήσουν την επίδραση των οικιακών PM_{2,5} στους δείκτες HRV μεταξύ των νοικοκυριών.

5.4 Επίδραση των ΑΣ στην εμφάνιση διαβήτη τύπου Β

Μια συστηματική ανασκόπηση, που πραγματοποιήθηκε στην εργασία των Meo et al. (2015), τόνισε τις επιπτώσεις της μακροχρόνιας έκθεσης σε PM που σχετίζονται με την κυκλοφορία, στον αυξημένο κίνδυνο διαβήτη τύπου 2. Συγκεκριμένα, στόχος της μελέτης αυτής ήταν ο προσδιορισμός της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ως ένας νέος παράγοντας κινδύνου για την αντίσταση στην ινσουλίνη και την εμφάνιση σακχαρώδους διαβήτη τύπου 2 (ΣΔ2). Τα στοιχεία είναι περιορισμένα και ποικίλα. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αξιολογήσει την επίδραση της περιβαλλοντικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην επίπτωση του σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2. Κατά τη διεξαγωγή της έρευνας, εντοπίστηκαν 102 δημοσιευμένες μελέτες μέσω μιας συστηματικής αναζήτησης βάσεων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των ISI-Web of Science, EMBASE και PubMed. Η σχετική βιβλιογραφία αναζητήθηκε

χρησιμοποιώντας τους βασικούς όρους, όπως σακχαρώδης διαβήτης, ατμοσφαιρική ρύπανση, επαγγελματική και περιβαλλοντική ρύπανση, αέρια, NO₂, ρύποι σωματιδίων PM_{2.5} και PM₁₀. Στη μελέτη συμπεριλήφθηκαν μελέτες στις οποίες συζητήθηκε ο σακχαρώδης διαβήτης, η αντίσταση στην ινσουλίνη, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ρύπανση εργασίας και περιβάλλοντος. Από την επιλεγμένη βιβλιογραφία αντλήθηκαν περιγραφικές και ποσοτικές πληροφορίες και τελικά συμπεριλήφθηκαν 21 δημοσιεύσεις, ενώ οι υπόλοιπες μελέτες αποκλείστηκαν. Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, παρατηρήθηκε ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η κύρια αιτία αντίστασης στην ινσουλίνη και συχνότητας εμφάνισης σακχαρώδους διαβήτη τύπου 2. Η συσχέτιση μεταξύ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του διαβήτη είναι ισχυρότερη για τους ρύπους που σχετίζονται με την κυκλοφορία, τα αέρια, το διοξείδιο του αζώτου, τον καπνό του τσιγάρου και τα σωματίδια. Συνεπώς, η έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους σχετίζεται σημαντικά με αυξημένο κίνδυνο για σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2.

Στην εργασία των Dian et al. (2017), παρουσιάστηκε μία μετα-ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε για να αξιολογήσει τη συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5} της ατμόσφαιρας και του σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2 ή του σακχαρώδη διαβήτη κύησης. Σύμφωνα με τους ερευνητές, έλαβε χώρα η αναζήτηση των βάσεων δεδομένων Medline, EMBASE, Cochrane και Web of Science για να βρεθούν άρθρα σύμφωνα με τις καθορισμένες στρατηγικές αναζήτησης βιβλιογραφίας. Μεταξύ των 279 άρθρων που προσδιορίστηκαν συνολικά, 55 εξετάστηκαν σε βάθος, εκ των οποίων τα 11 άρθρα ήταν αυτά που πληρούσαν τα απαραίτητα κριτήρια. Μόνο μελέτες που αποκάλυψαν τη συσχέτιση μεταξύ PM_{2,5} και σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2 ή GDM συμπεριλήφθηκαν στη μελέτη αυτή. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι θετικές συσχετίσεις μεταξύ των PM_{2,5} και της επίπτωσης του σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2 βρέθηκαν στη μακροχρόνια περίοδο έκθεσης, που έδειξε ότι με κάθε 10 μg/m³ αύξηση PM_{2,5}, ο κίνδυνος για σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2 θα αυξανόταν κατά 25% στη μακροχρόνια έκθεση. Αν και δεν εντοπίστηκαν σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ της έκθεσης εγκύου στα PM_{2,5} και του GDM στο πρώτο τρίμηνο, το δεύτερο τρίμηνο και σε ολόκληρη την περίοδο εγκυμοσύνης, μπορεί να διαπιστωθεί ότι η έκθεση της μητέρας στα PM_{2,5} σε ολόκληρη την περίοδο της εγκυμοσύνης θα ήταν πιο πιθανό να οδηγήσει στην ανάπτυξη GDM. Η μακροχρόνια έκθεση στα PM_{2,5} θα ήταν πιο πιθανό να οδηγήσει στην ανάπτυξη σακχαρώδους διαβήτη τύπου

2.

Σε μία πολύ πρόσφατη εργασία των Zhengyu Yang et al. (2022), διερευνήθηκε μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η υγεία και οι επιπτώσεις της μακροχρόνιας έκθεσης πολιτών σε περιοχές της Ασίας σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5}. Αξίζει να αναφερθεί ότι συνοψίστηκαν υπάρχοντα στοιχεία και μελέτες κούρτης. Από τα πρόσφατα ευρήματα σε περιοχές της Ασίας και του Ειρηνικού, πραγματοποιήθηκαν 60 μελέτες στην Αυστραλία, την ηπειρωτική Κίνα, το Χονγκ Κονγκ, την Ταϊβάν και τη Νότια Κορέα. Αυτό που διαπιστώθηκε, ήταν η σταθερή υποστήριξη των συσχετίσεων της μακροχρόνιας έκθεσης στα PM_{2,5} με αυξημένη θνησιμότητα από κάθε αιτία, μη τυχαία και καρδιαγγειακή νόσο, καθώς και με τη συχνότητα εμφάνισης καρδιαγγειακών παθήσεων, σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2, νεφρικών παθήσεων και χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας. Ωστόσο, τα στοιχεία για άλλες επιπτώσεις στην υγεία ήταν περιορισμένα.

5.5 Επίδραση των ΑΣ στο καρκίνο του πνεύμονα

Οι Silverman et al., (2012) αξιολόγησαν τη σχέση μεταξύ των ποσοτικών εκτιμήσεων της έκθεσης στα καυσαέρια ντίζελ και της θνησιμότητας από καρκίνο του πνεύμονα μετά από προσαρμογή για το κάπνισμα και άλλους πιθανούς συγχυτικούς παράγοντες. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη περίπτωσης σε μια ομάδα 12.315 εργαζομένων σε οκτώ εγκαταστάσεις εξόρυξης μετάλλων. Η μελέτη συμπεριελάμβανε 198 θανάτους από καρκίνο του πνεύμονα και 562 άτομα μάρτυρες. Για κάθε υποκείμενο περίπτωσης, επιλέχθηκαν έως και τέσσερα άτομα ελέγχου, τα οποία ταιριάστηκαν μεμονωμένα ως προς την εγκατάσταση εξόρυξης, το φύλο, τη φυλή, την εθνικότητα και το έτος γέννησης. Ταυτόχρονα, υπολογίστηκε η έκθεση των καυσαερίων ντίζελ, που αντιπροσωπεύεται από αναπνεύσιμο στοιχειακό άνθρακα (REC), ανά εργασία και έτος, για κάθε άτομο, με βάση μια εκτενή αναδρομική αξιολόγηση έκθεσης σε κάθε εγκατάσταση εξόρυξης. Από τη διεξαγωγή της μελέτης αυτής, οι Silverman et al., (2012) παρατήρησαν στατιστικά σημαντικές αυξητικές τάσεις στον κίνδυνο καρκίνου του πνεύμονα. Μεταξύ των εργαζομένων με έντονη έκθεση, ο κίνδυνος ήταν περίπου τρεις φορές μεγαλύτερος από αυτόν μεταξύ των εργαζομένων στο χαμηλότερο επίπεδο έκθεσης. Διαπιστώθηκε ότι η έκθεση στα καυσαέρια ντίζελ μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του πνεύμονα στους ανθρώπους και μπορεί να εγκυμονεί μεγάλο κίνδυνο για τη δημόσια υγεία (Silverman et al., 2012).

Στην εργασία των Zhenyu Zhang et al. (2019), υπολογίστηκε η συσχέτιση μεταξύ της συχνότητας εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα και της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση PM_{2,5} σε δικαιούχους της Βασικής Ιατρικής Ασφάλισης Υπαλλήλων Urban Employee (UEBMI) στην Κίνα. Συνολικά 16.483 νέες περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα διαγνώστηκαν από 12.966.137 δικαιούχους UEBMI από 36 πόλεις μεταξύ 2013 και 2016. Ο σχετικός κίνδυνος για καρκίνο του πνεύμονα σχετιζόταν με αύξηση 10 μg/m³ στην έκθεση 2 ετών. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι ο αποδιδόμενος στον πληθυσμό κίνδυνος που εκτιμήθηκε για μείωση της συγκέντρωσης PM_{2,5} στα 35 μg/m³ αντιστοιχούσε σε μείωση 14% στις περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα. Η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από PM_{2,5} έχει σημαντικό όφελος για τη δημόσια υγεία.

Στην εργασία των Changpeng Liu et al. (2023 et al. (2023), διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης στα PM_{2,5} και της επιβίωσης ασθενών με καρκίνο του πνεύμονα μετά από λοβεκτομή. Συγκεκριμένα, αυτή η μελέτη περιελάμβανε 3.327

ασθενείς με καρκίνο του πνεύμονα που υποβλήθηκαν σε διαδικασίες λοβεκτομής. Έπειτα, κατέγραψαν τις διευθύνσεις των κατοικιών μεμονωμένων ασθενών ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα στοιχεία με σκοπό τον υπολογισμό των ημερήσιων επιπέδων εκθέσεων τους σε PM_{2,5} και O₃. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα μοντέλο πολυμεταβλητής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της συγκεκριμένης μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ της έκθεσης στα PM_{2,5} και της επιβίωσης από καρκίνο του πνεύμονα. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι για κάθε 10 μg/m³ αύξηση στη μηνιαία συγκέντρωση PM_{2,5} τον πρώτο και δεύτερο μήνα μετά τη λοβεκτομή αυξάνεται ο κίνδυνος θανάτου. Οι μη καπνιστές, οι νεότεροι ασθενείς και οι ασθενείς με μεγαλύτερη διάρκεια νοσηλείας είχαν χειρότερα ποσοστά επιβίωσης όταν εκτέθηκαν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Η υψηλή μετεγχειρητική έκθεση σε PM_{2,5} αμέσως μετά τη λοβεκτομή μείωσε την επιβίωση των ασθενών με καρκίνο του πνεύμονα.

Από τις παραπάνω μελέτες επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στον καρκίνο του πνεύμονα, συμπεραίνεται ότι η έκθεση σε λεπτά σωματίδια PM_{2,5} συνδέεται και με τη συχνότητα εμφάνισης και τη θνησιμότητα καρκίνου του πνεύμονα. Ο αντίκτυπος της έκθεσης στα PM_{2,5} σε ασθενείς με καρκίνο του πνεύμονα μετά από λοβεκτομή, η οποία παραμένει η κύρια θεραπεία για τον καρκίνο του πνεύμονα σε πρώιμο στάδιο, είναι επικίνδυνη. Συνεπώς, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι σε ασθενείς που ζουν σε περιοχές με υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης PM_{2,5}, θα πρέπει να τους προσφέρεται η ευκαιρία να μεταφερθούν σε περιοχές με καλύτερη ποιότητα αέρα μετά από λοβεκτομές, για να παραταθούν οι χρόνοι επιβίωσής τους (Zhang et al., 2019).

Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδείχθηκαν τα αποτελέσματα μιας ενημερωμένης επισκόπησης σχετικά με τις συσχετίσεις μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και των επιδράσεών τους στην ανθρώπινη υγεία, με έμφαση στα αποτελέσματα της καρδιαγγειακής υγείας, της μεταβολικής δυσλειτουργίας και του διαβήτη. Παρουσιάστηκαν συστηματικά στοιχεία τόσο από επιδημιολογικές, όσο και από τοξικολογικές ερευνητικές μελέτες που δημοσιεύθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια.

Ο ατμοσφαιρικός ρύπος είναι κάθε ουσία που μπορεί να βλάψει τους ανθρώπους, τα ζώα, τη βλάστηση ή κάποιο υλικό. Όσον αφορά τον άνθρωπο, ένας ατμοσφαιρικός ρύπος μπορεί να προκαλέσει ή να συμβάλει σε αύξηση της θνησιμότητας ή στην εκδήλωση σοβαρών ασθενειών ή μπορεί να αποτελέσει υφιστάμενο ή δυνητικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Ο προσδιορισμός του εάν μια ουσία ενέχει ή όχι κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου βασίζεται σε κλινικές και επιδημιολογικές μελέτες που αποδεικνύουν ότι η έκθεση σε μια ουσία σχετίζεται με επιπτώσεις στην υγεία. Στο πλαίσιο προστασίας της ανθρώπινης υγείας, κίνδυνος είναι η πιθανότητα να εμφανιστούν επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συντριπτική πλειοψηφία του ευρωπαϊκού πληθυσμού ζει σε αστικές περιοχές όπου τα επίπεδα PM υπερβαίνουν τα όρια στον αέρα, η ρύπανση που προέρχεται από PM προκαλεί μια αξιοσημείωτη επιβάρυνση ασθενειών.

Η σωματιδιακή ρύπανση αναφέρεται στο συνδυασμό μικροσκοπικών στερεών και υγρών σωματιδίων στον αέρα και μπορεί να είναι επικίνδυνη η εισπνοή επειδή η ρύπανση από σωματίδια μπορεί να προκαλέσει άσθμα, νοσηλεία και πρόωρο θάνατο. Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ένας από τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους, καθώς αποτελούνται από εισπνεύσιμα σωματίδια που διεισδύουν στη θωρακική περιοχή του αναπνευστικού συστήματος, οδηγώντας σε εξαιρετικά δυσμενείς επιπτώσεις για την υγεία. Ακόμη, τα αναπνεύσιμα, τα θωρακικά και τα εισπνεόμενα σωματίδια είναι ατμοσφαιρικοί ρύποι που δρουν ως κύριοι στρεσογόνοι παράγοντες της ποιότητας του αέρα.

Ο αέρας εισπνέεται, εισέρχεται μέσω της μύτης ή του στόματος στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, που αποτελείται από ρινικές οδούς, την τραχεία και τους αεραγωγούς που οδηγούν τη ροή προς τους πνεύμονες που περιλαμβάνουν τους βρόγχους και τα βρογχίδια. Ο εισπνεόμενος αέρας γίνεται υγρός και

σ τ ρ ο β ι λ ί ζ ε τ α ι μέσω των ρινικών οδών και των διακλαδιζόμενων αεραγωγών. Ωστόσο, η φυσική άμυνα του ανθρώπου βοηθά, μέσω του βήχα ή του φτερνίσματος, την απομάκρυνση κάποιων χονδροειδών σωματιδίων από το σώμα, αλλά τα λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια ενέχουν τον κίνδυνο να εισέλθουν στο σώμα και να παγιδευτούν στους πνεύμονες, να περάσουν στην κυκλοφορία του αίματος και να οδηγήσουν σε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

Η πλειονότητα των λεπτών σωματιδίων μπορεί να εισχωρήσει βαθιά στους πνεύμονες λόγω μειωμένης αδράνειας όταν κάποιος παίρνει βαθιές αναπνοές ή εισπνέει αργά. Διεισδύουν βαθιά, περνώντας από τους αεραγωγούς χωρίς να εναποτίθενται. Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν 3 κύριοι τρόποι με τους οποίους τα σωματίδια εναποτίθενται μόλις εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα. Αυτά είναι η πρόσκρουση, όπου τα χονδροειδή σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στις ρινικές, φαρυγγικές και λαρυγγικές οδούς, την τραχεία και τους βρόγχους, η καθίζηση, όπου τα λεπτά σωματίδια εναποτίθενται κυρίως στα αναπνευστικά βρογχιόλια και τις κυψελίδες, και η διάχυση, όπου τα εξαιρετικά λεπτά σωματίδια διαχέονται στις αναπνευστικές επιφάνειες και εναποτίθενται.

Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι έχει τεράστια σημασία το μέγεθος των σωματιδίων όταν πρόκειται για εισπνοή. Ενώ ο κίνδυνος των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από τη συγκέντρωση στον αέρα, το πόσο εναποτίθενται και τη χημική σύνθεση, δηλαδή την τύχη και τις βιολογικές αποκρίσεις στην παρουσία σωματιδίων, το μέγεθος των σωματιδίων είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το σωματίδιο διεισδύει και εναποτίθεται στο ανθρώπινο σώμα. Τα λεπτά και εξαιρετικά λεπτά σωματίδια είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας για δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, καθώς είναι αρκετά μικρά ώστε να περνούν μέσω του πνευμονικού ιστού και στην κυκλοφορία του αίματος, ενώ τα χονδροειδή σωματίδια δεν είναι τόσο επικίνδυνα λόγω του σχετικά μεγάλου μεγέθους τους.

Καταλήγοντας, ο ΠΟΥ, από τις νέες κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα το Σεπτέμβριο του 2021, βασισμένες σε μια ολοκληρωμένη σύνθεση των επιστημονικών στοιχείων σχετικά με τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία, σύστησε ότι οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM_{2,5} δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 5 μg/m³, αποδεικνύοντας ότι υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία πάνω από αυτές τις τιμές. Με την προτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για ευθυγράμμιση των

πρόσφατα προτεινόμενων οριακών τιμών και των κατευθυντήριων γραμμών ποιότητας έως το 2030 από τον ΠΟΥ το 2021, ορίστηκαν οριακές τιμές $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για ετήσια $\text{PM}_{2,5}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αντιμετωπιστεί σε ένα βαθμό η ατμοσφαιρική ρύπανση. Η μείωση της έκθεσης πρέπει να αντιμετωπίζεται ανά περιοχή με υψηλές τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων.

Αυτή η διπλωματική παρουσιάζει τις δυσμενείς επιπτώσεις ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων στην ανθρώπινη υγεία. Όπως φαίνεται, μπορούν να παρατηρηθούν σημαντικές βλάβες διαφορετικών οργάνων. Στην εργασία των Brook et al. (2013) διαπιστώθηκε ότι τα $\text{PM}_{2,5}$ μπορούν να ενισχύσουν την ανάπτυξη του σακχαρώδους διαβήτη. Στην εργασία των Eze et al. (2015), τα αιωρούμενα σωματίδια σχετίζονται με υποκλινική φλεγμονή με καρδιαγγειακή νοσηρότητα. Στην εργασία των Lee et al. (2007), η βενζίνη και τα παράγωγά της, ανιχνεύονται συνεχώς στα PM καυσαερίων από τη λειτουργία των οχημάτων και αναγνωρίζονται ως τα κύρια συστατικά που αυξάνουν τους κινδύνους καρκινογόνων επιδράσεων. Από την άλλη, στην εργασία των Jo et al. (2017), τα επίπεδα PM συσχετίστηκαν με αναπνευστικές παθήσεις, ειδικά σε παιδιά και ηλικιωμένους. Ωστόσο, αυτό που παρατηρήθηκε στην εργασία των Alexeeff et al. (2021), δείχνει ξεκάθαρα ότι η μακροχρόνια έκθεση σε $\text{PM}_{2,5}$ σχετίζεται με αύξηση της θνησιμότητας λόγω καρδιαγγειακών ασθενειών. Ακόμα, αναφέρεται ότι η μακροχρόνια έκθεση στα $\text{PM}_{2,5}$ θα ήταν πιο πιθανό να οδηγήσει στην ανάπτυξη σακχαρώδους διαβήτη τύπου 2 και σε περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα.

Το βασικό συμπέρασμα που συνάγεται είναι ότι, εν όψει της αυξημένης έκθεσης του ανθρώπου σε μια ποικιλία ρύπων, οι κρατικές και νομικές παρεμβάσεις σε συνεργασία με τα κέντρα υγείας μπορούν να προστατεύσουν την ανθρώπινη υγεία από τις επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Τέλος, για να βελτιστοποιηθεί ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η πρόληψη της δημόσιας υγείας, χρειάζονται περαιτέρω μελέτες για την αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία της μακροχρόνιας έκθεσης ανθρώπων κυρίως στα $\text{PM}_{2,5}$. Ιδιαίτερα σε περιοχές που δεν έχουν μελετηθεί, οι επιπτώσεις στην υγεία της μακροχρόνιας έκθεσης σε $\text{PM}_{2,5}$, η θνησιμότητα, ο κίνδυνος για σακχαρώδη διαβήτη τύπου 2, ο καρκίνος του πνεύμονα, κ.α., χρήζουν μελέτης.

Βιβλιογραφία

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Alexeeff, S. E., et al. (2021). Long-term PM_{2.5} exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: review and meta-analysis. *J. Am. Heart Assoc.*

Al-Kindi, S. G., et al. (2019). Ambient air pollution and mortality after cardiac transplantation. *J. Am. Coll. Cardiol.*, pp. 3026–3035.

Al-Kindi, S. G., et al. (2020). Environmental determinants of cardiovascular disease: lessons learned from air pollution. *Nat. Rev. Cardiol.*, pp. 656–672.

Andersen, Z. J., et al. (2008). Size distribution and total number concentration of ultrafine and accumulation mode particles and hospital admissions in children and the elderly in Copenhagen, Denmark. *Occup. Environ. Med.*, pp. 458-466.

Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., Stolbach, A. (2012). Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *J. Med. Toxicol.*, pp. 166-175.

Anenberg, S. C., et al. (2010). An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling. *Environ. Health Perspect.*, pp. 1189–1195.

Atkinson, R. W., et al. (2014). Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax*, pp. 660–665.

Baldacci, S., et al. (2015). Allergy and asthma: effects of the exposure to particulate matter and biological allergens. *Respir. Med.*, pp. 1089-1104.

Bilić, I., Dzamonja, G., Lusic, I. (2009). Risk factors and outcome differences between

ischemic and hemorrhagic stroke. *Acta Clin. Croat.*, pp. 399–403.

Bisig, C., Roth, M., Muller, L. Comte, P., Heeb, N., Mayer, A., Czerwinski, J., Petri-Fink, A., Rothen-Rutishauser, B. (2016). Hazard identification of exhausts from gasoline-ethanol fuel blends using a multi-cellular human lung model. *Environ. Res.*, pp. 789-796.

Boucher, O., et al. (2013). Clouds and aerosols. In D. Q.-K. T. Stocker, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571–658). Cambridge: Cambridge University Press.

Brook, R. (2008). Cardiovascular effects of air pollution. *Clin. Sci.*, pp. 175-187

Brook, R. D., et al. (2013). Reduced metabolic insulin sensitivity following sub-acute exposures to low levels of ambient fine particulate matter air pollution. *Sci. Total Environ.*, pp. 66-71.

Brown, J. S., Gordon, T., et al. (2013). Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. *Part Fibre Toxicol.* 8.

Burnett, R., et al. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *PNAS*, pp. 9592–9597.

Chandia-Poblete, D., Cole. -Hunter, T., et al. (2022). The influence of air pollution exposure on the short-and long-term health benefits associated with active mobility: A systematic review. *Science of the Total Environment* (850).

Che, W., Zhang, Y., et al. (2023). Impacts of pollution heterogeneity on population exposure in dense urban areas using ultra-fine resolution air quality data. *Journal of Environmental Sciences (China)*(125), pp. 277-289.

Chen, H., Oliver, B. G., et al. (2022). Effects of air pollution on human health – Mechanistic evidence suggested by in vitro and in vivo modelling. *Environmental Research* (212).

Chen, T.-M., et al. (2007). Outdoor Air Pollution: Ozone Health Effects. *The American Journal of the Medical Sciences*, pp. 244-248.

Cheng, Y., et al. (2016). Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China. *Sci. Adv.*

Cosselman, K. E., et al. (2015). Environmental factors in cardiovascular disease. *Nat. Rev. Cardiol.*, pp. 627-642.

Ding, A. J., Fu, C. B., Yang, X. Q. (2013). Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China. *Atmos Chem. Phys.*, 10545–10554.

Du, Y. X., et al. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence. *J. Thoracic Dis.*, pp. 8-19.

EEA. (2021). Το νέο παρατηρητήριο της ποιότητας του αέρα των ευρωπαϊκών πόλεων σάς προσφέρει τη δυνατότητα να ελέγχετε το επίπεδο της μακροχρόνιας ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή σας. Retrieved from European Environment Agency: <https://www.eea.europa.eu/el/highlights/to-neo-paratiritirio-tis-poiotitas>

Eur-Lex. (2023). Retrieved from Eur-Lex. Europa: <https://eur-lex.europa.eu/legal>

Eze, I. C., Schaffner, E., et al. (2015). Long-term exposure to ambient air pollution and metabolic syndrome in adults. *PLoS ONE*.

Franklin, B. A., Brook, R., Pope, C. A. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Curr. Prob. Cardiol.* , pp. 207-23 Guo, J., Deng, M., Lee, S. S. (2016). Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses. *J. Geophys. Res. Atmos.*, pp. 6472- 6488.

GBD 2016 Risk Factors Collab. (2016). Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of

Disease Study 2015. *Lancet*, pp. 1659–16724.

Greenstone, M. (2023). Particulate matter: sources of pollution and impact on health.

Gehring, U., et al. (2015). Particulate matter composition and respiratory health: the PIAMA Birth Cohort study. *Epidemiology*, pp. 300-309.

Gotschi, T., et al. (2008). Long-term effects of ambient air pollution on lung function: a review. *Epidemiology*, pp. 690-701.

He, D., Wu, S., et al. (2017). Association between particulate matter 2.5 and diabetes mellitus: A meta-analysis of cohort studies. *J. Diabetes Investig.*, pp. 687- 696.

He, X., Zhai, S., et al. (2022). Interactive short-term effects of meteorological factors and air pollution on hospital admission for cardiovascular diseases *Environmental Science and Pollution Research*, 45(Hoet, P. H. M., et al. (2004). Nanoparticles—Known and unknown health risks. *J. Nanobiotechnol.*

Holloway, A. M., Wayne, R. P. (2010). *Atmospheric Chemistry*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Hu, Y., Chen, Y., Liu, S. et al. (2023). Residential greenspace and childhood asthma: An intra-city study. *Science of the Total Environment* (857).

Jakubiak-Lasocka, J., Lasocki, J., et al. (2015). *Impact of traffic-related air pollution on health. In Environment Exposure to Pollutants*. Cham, Switzerland: Springer.

Janssen, N. A. H., et al. (2012). *Health effects of black carbon*. Retrieved from WHO Regional Office for Europe: <http://www.euro.who.int/en/what-we-do/health-topics/environmentand-health/air-quality/publications/2012/health-effects-of-black-carbon>.

Kampa, M., Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environ. Pollut.*, pp. 362-367.

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C. et al. (2015). Contributions to cities'

ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmos. Environ.*, pp. 475-483.

Karavalakis, G., Short, D., Vu, D., et al. (2015). Evaluating the effects of aromatics content in gasoline on gaseous and particulate matter emissions from SI-PFI and SIDI vehicles. *Environ. Sci. Technol.*, pp. 7021-7031.

Kaufman, J. D., Elkind, M. S. V., Bhatnagar, A. (2020). Guidance to reduce the cardiovascular burden of ambient air pollutants: a policy statement from the American Heart Association. *Circulation.*, pp. 432-447.

Kim, K. H., et al. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ. Int.*, pp. 136-143.

Koton, S., et al. (2013). Cumulative exposure to particulate matter air pollution and long-term post-myocardial infarction outcomes. *Prev. Med.*, pp. 339–344.

Kumar, S., Dwivedi, S. K. (2022). Chemical and biological components of atmospheric particulate matter and their impacts on human health and crops: a review. *Aerobiologia*, 3(38), pp. 287-327.

Lee, J. T., Son, J. Y., Cho, Y. S. (2007). Benefits of mitigated ambient air quality due to transportation control on childhood asthma hospitalization during the 2002 summer Asian games in Busan, Korea. *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, pp. 968-973.

Lee, H. Y., et al. (2023). The impact of ambient air pollution on lung function and ¹ respiratory symptoms in elite athletes. *Science of the Total Environment* (855).

Lee, P. N., et al. (2017). Environmental tobacco smoke exposure and risk of stroke in never smokers: an updated review with meta-analysis. *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.*, pp. 204–216.

Li, Z., et al. (2022). Association between ambient air pollution and hospital

admissions, length of hospital cost for patients with cardiovascular diseases and comorbid diabetes mellitus: Based on 1,969,755 cases in Beijing China, 2014-2019. *Environmental International* (165).

Liao, H., Chang, W., Yang, Y. (2015). Climatic effects of air pollutants over China: a review. *Adv. Atmos. Sci.*, pp. 115–139.

Libalova, H., Rossner, P., et al. (2018). Transcriptional response to organic compounds from diverse gasoline and biogasoline fuel emissions in human lung cells. *Toxicol. In Vitro*, pp. 329-341.

Lim, S., et al. (2022). Comparing human exposure to fine particulate matter in low and high-income countries: A systematic review of studies measuring personal PM 2.5 exposure. *Science of the Total Environment* (833).

Leitte, A.M., Petrescu, C., Frank, U. (2009). Respiratory health, effects of ambient air pollution and its modification by air humidity in Drobeta-Turnu Severin, Romania. *Sci. total Environ.*, pp. 4004-4011.

Liang, F., Liu, F., Huang, K. (2020). Long-term exposure to fine particulate matter and cardiovascular disease in China. *J. Am. Coll. Cardiol.*, pp. 707–17.

Liu, C., Yang, D., et al. (2023). The effect of ambient PM2.5 exposure on survival of lung cancer patients after lobectomy. *Environmental Health*.

Meo, S. A., et al. (2015). Effect of environmental air pollution on type 2 diabetes mellitus. *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.*, pp. 123-128.

Meszaros, D., Markos, J., et al. (2015). An observational study of PM10 and hospital admissions for acute exacerbations of chronic respiratory disease in Tasmania, Australia 1992-2002. *BMJ open Respir. Res.*

Morawska, L., et al. (2022). The physics of respiratory particle generation, fate in the air, and inhalation. *Nature Reviews Physics*, pp. 723-734.

Oh, J., et al. (2022). Association of long-term exposure to PM 2.5 and survival following ischemic heart disease. *Environmental Research* (216).

Philip, S., et al. (2017). Anthropogenic fugitive, combustion and industrial dust is a significant, underrepresented fine particulate matter source in global atmospheric models. *Environ. Res. Lett.*

Politis, M., et al. (2008). Ultrafine Particles (UFP) And Health Effects. *Global NEST Journal*, pp. 439-452.

Pope, C. A., Bhatnagar, A. (2019). Does air pollution increase risk of mortality after cardiac transplantation? *J. Am. Coll. Cardiol.*, pp. 3036–3038.

Pope, C. A., Burnett, R. T., Krewski, D. (2009). Cardiovascular mortality and exposure to airborne fine particulate matter and cigarette smoke: shape of the exposure–response relationship. *Circulation*, pp. 941–48.

Roth, M., et al. (2017). Effects of gasoline and ethanol-gasoline exhaust exposure on human bronchial epithelial and natural killer cells in vitro. *Toxicol. In Vitro*, pp. 101-110.

Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G. B. (2008). Flood or drought: how do aerosols affect precipitation. *Science*, pp. 1309-1313.

Ruckerl, R., et al. (2011). Health effects of particulate air pollution: a review of epidemiological evidence. *Inhal. Toxicol.*, pp. 555-592.

Silverman, D. T., Samanic, C. M., et al. (2012). The diesel exhaust in miners study: A nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust. *J. Natl. Cancer Inst.*, pp. 855-868.

Shah, S. A., et al. (2013). Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*, pp. 1039–1048.

UNECE. (2012). *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*. Retrieved from Geneva, United Nations Economic Commission for Europe: <http://www.unece.org/env/lrtap/>

Wang, G., Zhang, R., Gomez, M. (2016). Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, pp. 13630–13635.

Wei, Y. J., et al. (2016). Chronic exposure to air pollution particles increases the risk of obesity and metabolic syndrome: Findings from a natural experiment in Beijing. *FASEB J.*, pp. 2115–2122.

WHO. (2016). *World Health Statistics 2016*. Retrieved from World Health Organization: <https://www.who.int/docs/default-source/gho-documents/world-health-statistic-reports/world-health-statistics-2016.pdf>

WHO (World Health Organization). (2018). *Ambient (Outdoor) Air Quality and Health; Sheet, Fact*. Geneva, Switzerland: WHO.

WHO. (2021). *New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution*. Retrieved from <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

World Bank. (2016). *The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action*. Washington, DC, USA: World Bank.

Xia, T., et al. (2016). Pulmonary diseases induced by ambient ultrafine and engineered nanoparticles in twenty-first century. *Natl. Sci. Rev.*, pp. 416–429.

Yang, W. Y., et al. (2017). Left ventricular function in relation to chronic residential air pollution in a general population. *Eur. J. Prev. Cardiol.*, pp. 1416–1428.

Yang, X., et al. (2018). Cytotoxicity induced by fine particulate matter (PM_{2.5}) via mitochondria-mediated apoptosis pathway in human cardiomyocytes. *Ecotoxicol.*

Environ. Saf., pp. 198–207.

Yang, Z., et al. (2022). Health Effects of Long- Term Exposure to Ambient PM 2.5 in Asia-Pacific: A Systematic Review of Cohort Studies. *Current Environmental Health Reports*, 2(9), pp. 130-151.

Zhang, K., Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *ci. Total Environ.*, pp. 307-316.

Zheng, J. et al. (2010). Ground-level ozone in the Pearl River Delta region: Analysis of data from a recently established regional air quality monitoring network. *Atmospheric Environment*, pp. 814-823.

Zhang, Z., et al. (2019). Association between particulate matter air pollution and lung cancer. *BMJ Journals*.

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

Αστεριού, Χ. (2004). *Συνεχής παρακολούθηση των συγκεντρώσεων κατά αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων σε κεντρική περιοχή της Αθήνας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Πανεπιστήμιο Πειραιά: Τμήμα συστημάτων Ενέργειας & Προστασίας περιβάλλοντος – Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

ΕΛΙΝΥΑΕ. (2023). *Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας*. Retrieved from elinyae.gr: <https://www.elinyae.gr/en/node>

Ζάνης, Π. (2014). *Σημειώσεις για την ρύπανση και την χημεία της ατμοσφαιράς*. Θεσσαλονίκη.

Ζιώμας, Ι., Ρεμουντακη, Ε. (2003). *Η ατμόσφαιρα ως Αποδέκτης Αποβλήτων*. Πάτρα: Εκδόσεις: ΕΑΠ.

Λοϊζίδου, Μ. (2006). *Σημειώσεις: Υγρά απόβλητα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπαδάτος-Φράγκος, Ι. (2019). *Τα αιωρούμενα σωματίδια και οι επιπτώσεις στην υγεία*. Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών: Τμήμα διαχείρισης περιβαλλοντικών θεμάτων με επιπτώσεις στην υγεία – Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών.

Ρεμουντάκη, Ε. (2010). *Αέρας και ατμοσφαιρική ρύπανση*. Αθήνα: WWF Ελλάς.

Τσιλιγκιρίδης, Γ. (2015). *Πηγές Ρύπανσης. Εκπαιδευτικό βοήθημα*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (2023). *Ποιότητα της Ατμόσφαιρας: Νομοθεσία*. Retrieved from [ypen.gov: https://ypen.gov.gr/perivallon/poioititatis-atmosfairas/nomothesia/](https://ypen.gov.gr/perivallon/poioititatis-atmosfairas/nomothesia/)

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. (2021). *Ετήσια Έκθεση Ποιότητας Της*

Ατμόσφαιρας. Retrieved from ypen.gov: <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/06/%CE%95%CE%9A%CE%98%CE%95%CE%A3%CE%97-2020.pdf>