

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



ΣΧΟΛΗ: ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΤΗΝ

«ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»

ΜΕ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ

ΣΤΑ

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Με τίτλο

« Έκθεση του πληθυσμού της Αθήνας σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση κατά τη μετακίνηση του με το μετρό της Αθήνας»

Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: Σανιδά Αμαλία Α.Μ.: 0706

Επιβλ. καθηγήτρια: Αναπλ. Καθηγήτρια, Αρχοντούλα Χαλουλάκου

**Μέλη επιτροπής: Αναπλ. Καθηγήτρια, Αρχοντούλα Χαλουλάκου
Καθηγήτρια, Δανάη Διακουλάκη,
Αναπλ. Καθηγήτρια, Μαρία Μανδαράκα,**

Αθήνα, Ιούλιος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών, «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων», του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς και του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη της Αναπληρ. καθηγήτριας κ. Αρχοντούλα Χαλουλάκου. Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Χαλουλάκου Αρχοντούλα αναπληρώτρια καθηγήτρια, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο που ανταποκρίνεται απολύτως στα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή της καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους μου που πίστεψαν σε μένα και με ενθάρρυναν σε κάθε στάδιο των σπουδών μου, καθώς και όσους συναδέλφους συμφοιτητές συνέβαλαν με τα σχόλια, την κριτική και τις γνώσεις τους στην αντιμετώπιση των δυσκολιών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω προς την οικογένειά μου και κυρίως τους γονείς μου Γεώργιο και Ρεβέκκα και την αδελφή μου Μαριλένα για την διαχρονική συμπαράστασή τους και την υλική και ηθική στήριξη των επιλογών μου.

*Στους γονείς μου, Γεώργιο και Ρεβέκκα,
Στην αδελφή μου Μαριλένα και στον αγαπητό μου φίλο Τάσο.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα μετρό ή υπόγεια συστήματα όπως αναφέρονται στην βιβλιογραφία έχουν θεωρηθεί ως ένα σημαντικό μέσο μεταφοράς που βελτιώνει την ποιότητα της μεταφοράς και μετριάξει την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αποτελούν ένα μοναδικό μικροπεριβάλλον μέσα στο οποίο είναι δυνατόν να προωθείται η συγκέντρωση μολυσματικών/ρυπαντικών παραγόντων οι οποίοι προέρχονται είτε από εσωτερικές είτε από εξωτερικές πηγές.

Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορες χώρες παγκοσμίως έχουν αναγνωρίσει ότι το συγκοινωνιακό σύστημα του μετρό είναι μια σημαντική πηγή που επιδρά δυσμενώς στην δημόσια υγεία. Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες με συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία σύμφωνα με τις Επιδημιολογικές μελέτες είναι η έκθεση των χρηστών και των εργαζομένων στα αιωρούμενα σωματίδια.

Τα αποτελέσματα μελετών που έχουν διεξαχθεί διεθνώς σε διάφορα αστικά κέντρα έχουν αποκαλύψει υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα συστήματα του μετρό. Αντίστοιχα οι επιδημιολογικές μελέτες αναγνωρίζουν ότι η υπέρβαση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στα συστήματα μετρό προκαλεί ασθένειες όπως οξειδωτικό στρες και φλεγμονή.

Το σύστημα του μετρό στην Αθήνα ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Ιανουάριο του 2000 και αποτελείται από δύο γραμμές, την μπλε και την κόκκινη. Επειδή είναι σχετικά πρόσφατα κατασκευασμένο, δημοσιευμένες πληροφορίες για τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης σε αυτό είναι ανύπαρκτες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρείται για πρώτη φορά μια συστηματική καταγραφή των επιπέδων της σωματιδιακής ύλης PM_{10} για ολόκληρη την μπλε γραμμή. Η συμβολή και σημασία της εργασίας αυτής έγκειται αφενός μεν, στο ότι πρώτη φορά εφαρμόζεται επιστημονικά σχεδιασμένη μεθοδολογία στην ανάλυση ενός τόσο σημαντικού θέματος για την ανθρώπινη υγεία, αφετέρου δε στο ότι το μετρό συγκαταλέγεται ως δεύτερο σε επιβατική κίνηση μέσο μεταφοράς στην Αθήνα. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία για το έτος 2009, η μέση ετήσια επιβατική κίνηση στο σύστημα του μετρό ανήλθε σε 178.246.208 και η μέση ημερήσια επιβατική κίνηση έφτασε στις 571.532 επιβιβάσεις

Σε ένα πρώτο στάδιο μετά από μια συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση πραγματοποιήθηκε ένα σύντομο πρόγραμμα προκαταρκτικών μετρήσεων. Στα επόμενα στάδια σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα τεκμηριωμένο πρωτόκολλο μετρήσεων καθώς και μια πλήρης μεθοδολογία για τη διαχείριση του θέματος. Η έρευνα πεδίου έδωσε αποτελέσματα συστηματικών μετρήσεων των σωματιδίων PM₁₀ με όργανο συνεχούς καταγραφής, για 60 ημέρες, σε όλους τους χώρους της μπλε γραμμής του μετρό της Αθήνας: στο εσωτερικό των συρμών σε κίνηση, στις αποβάθρες και των 11 σταθμών της και στις αντίστοιχες εξόδους τους.

Μια πρώτη γενική διαπίστωση με βάση τα συνολικά αποτελέσματα της έρευνας είναι ότι:

- ❖ τα καταγραφέντα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στους χώρους της μπλε γραμμής του μετρό της Αθήνας είναι σοβαρά και υπερβαίνουν κατά πολύ τις οριακές τιμές που ισχύουν για την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην Ε.Ε.
- ❖ παρόμοια υψηλά επίπεδα με αυτά της Αθήνας έχουν αναφερθεί σε ορισμένες πόλεις ασιατικών χωρών, όπως στο Πεκίνο (Li et al., 2007) και στη Σεούλ (Kim et al., 2008).

Η εργασία αυτή καταλήγει με την πρόταση δέσμης συγκεκριμένων μέτρων για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στο εσωτερικό του συστήματος μετρό της Αθήνας.

Εισαγωγή

Η οικονομική ανάπτυξη και η αλόγιστη χρήση των φυσικών πόρων έχει επιφέρει μια ραγδαία αλλαγή στην πρόοδο, τη δομή της βιομηχανίας και έχει κάνει εφικτή στην κοινωνία την απόλαυση της μαζικής παραγωγής και κατανάλωσης. Παρόλα ταύτα η αυξανόμενη επέκταση και το άνοιγμα της οικονομίας έχουν συντελέσει στην άναρχη πληθυσμιακή ανάπτυξη των πόλεων δίχως την συστηματική και καθορισμένη χωροταξική ανάπτυξη του αστικού πληθυσμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εκτός των άλλων προβλημάτων που συντελούνται στις πόλεις να παρουσιάζεται μια συνεχώς αυξανόμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Όπως και άλλες μεγάλες πόλεις στον κόσμο, έτσι και η Αθήνα, έχει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Για το λόγο αυτό επιδιώκεται από την πολιτεία μια πιο αποτελεσματική χωροθέτηση των μέσων μαζικής μεταφοράς με την κατάλληλη λειτουργικότητα για την εξυπηρέτηση των πολιτών επιδιώκοντας ταυτόχρονα τον περιορισμό των επιβλαβών συνεπειών της κυκλοφορίας των οχημάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση η λειτουργία του μετρό της Αθήνας αποτελεί ένα από τα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα.

Μέχρι τώρα, αν και ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ερευνών έχει εξετάσει τη ρύπανση που προκαλείται από την σωματιδιακή ύλη σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα του τομέα μεταφοράς, λίγες όμως από αυτές έχουν εστιάσει στο σύστημα του μετρό, ένα μέσο μεταφοράς που εξυπηρετεί δισεκατομμύρια επιβάτες κάθε χρόνο σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό πόλεων ανά τον κόσμο. Έτσι, η έκθεση των επιβατών σε ρυπογόνους παράγοντες δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ασήμαντο γεγονός. Έχει ήδη αποδειχθεί ότι η ποιότητα του αέρα που διοχετεύεται στα διάφορα μέσα μεταφοράς δεν είναι τόσο υψηλή, όσο αρχικά πιστεύεται (Abadie et al., 2004; Adams et al., 2001a,b; Chan et al., 1999; Gee and Paper, 1999; Johansson and Johansson, 2003; Leutwyler et al., 2002, Mukherjee et al., 2003; Pfeiffer et al., 1999). Ανάμεσα στα υπάρχοντα μέσα μεταφοράς το σύστημα του μετρό έχει αποδειχθεί σαν ένα σχετικά υψηλά ρυπογόνο περιβάλλον (Adams et al., 2001a; Johansson and Johansson, 2003; Sitzmann et al., 1999).

Έρευνες έχουν δείξει ότι παρόλο που η οδική κυκλοφορία προκαλεί και δημιουργεί υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης στον αστικό αέρα, οι χρήστες του μετρό εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα σωματιδιακής ύλης. Υψηλές συγκεντρώσεις

σωματιδιακής ύλης έχουν μετρηθεί σε πολλούς σταθμούς του μετρό, όπως στο Λονδίνο (Pfeifer et al., 1999; Sitzmann et al., 1999; Adams et al., 2001; Seaton et al., 2005), Στοκχόλμη (Johansson and Johansson, 2003), Πράγα (Branis, 2006), Ρώμη (Ripanicci et al., 2006), Βερολίνο (Fromme et al., 1998), Σεούλ (Kim et al., 2008; Park and Ha, 2008) and Πεκίνο (Li et al., 2007).

Η εργασία αυτή εστίασε σε μετρήσεις συγκεντρώσεων σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο έως 10 μικρομέτρων (PM_{10}). Σε σχετική μελέτη ο Ripanicci et al. (2006) παρατήρησε ότι τα κατά μέσο όρο επίπεδα PM_{10} στις αποβάθρες και στις σήραγγες του μετρό στη Ρώμη ήταν 3.5 φορές μεγαλύτερα από ότι το μέσο επίπεδο των ίδιων σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον. Όσο αφορά τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία τα σωματίδια αυτά μπορούν να διεισδύσουν στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και στους πνεύμονες, προκαλώντας καταρροή, φαρυγγίτιδα, ιγμορίτιδα (Mitsakou et al., 2008). Επίσης είναι πιθανό να εμφανιστούν συμπτώματα λόγω επίδρασης των PM_{10} και στο κατώτερο αναπνευστικό, όπως δύσπνοια, βήχας, μειωμένη αναπνευστική αντοχή κ.α. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι εμφανίζονται αλλεργίες, ενώ υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κρίσεως άσθματος και η μακροχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια συμβάλλει στη δημιουργία πνευμονικών νοσημάτων (π.χ. καρκίνος), στην αύξηση κινδύνου καρδιακής ανακοπής, ενώ είναι δυνατόν να οδηγήσει σε πρόωρο θάνατο. Σχετικά ο Karlsson et al., (2005) στην μελέτη του εκτίμησε ότι τα σωματίδια που παράγονται από το μετρό είναι οκτώ (8) φορές πιθανότερο και ευκολότερο να προκαλέσουν καταστροφή στο DNA και τέσσερις (4) φορές πιθανότερο να επιφέρουν οξειδωτικό στρες στα κύτταρα του πνεύμονα.

Η παρούσα εργασία επιδιώκει για πρώτη φορά να αναλύσει και με την βοήθεια στοιχείων από τη βιβλιογραφική επισκόπηση τις συνθήκες ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συγκεκριμένα τα επίπεδα PM_{10} στους χώρους του μετρό της Αθήνας και να προτείνει λύσεις. Για την απάντηση ενός τόσο δύσκολου επιστημονικού ερωτήματος απαιτήθηκε συστηματική έρευνα για την καταγραφή και ταξινόμηση των συμπερασμάτων των σχετικών ερευνών της διεθνούς βιβλιογραφίας καθώς και η διενέργεια έρευνας πεδίου με έγκριτη μεθοδολογία έρευνας και διαπιστευμένα όργανα. Αναλυτικότερα η διάρθρωση της εργασίας για την τεκμηρίωση των επιστημονικών μας ερωτημάτων αποτελείται από τα εξής κεφαλαία:

Στο 1ο κεφάλαιο, δίνονται κάποιες βασικές έννοιες των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως η κατανομή σύμφωνα με το μεγέθός τους, η σχέση τους με το ενεργειακό ισοζύγιο, αναλύονται οι μηχανισμοί απομάκρυνσής τους και περιγράφονται οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον γενικότερα. Γίνεται κατάταξή τους στις διάφορες κατηγορίες ανάλογα με βασικά τους χαρακτηριστικά (π.χ. μέγεθος – χημική σύσταση – πηγές εκπομπής) και περιγράφεται η νομοθεσία που ισχύει για τις οριακές τιμές τους.

Στο 2ο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα μετρήσεων αναφορικά με τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης στα συστήματα μετρό σε χώρες του εξωτερικού και αναλύονται οι τοξικολογικές και επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν την επίδραση των σωματιδίων του μετρό στη δημόσια υγεία.

Στο 3ο κεφάλαιο επιχειρείται μια αναλυτικότερη περιγραφή του συστήματος μετρό της Αθήνας, αναλύονται τα τεχνικά και ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά του και παραθέτονται διάφορα στατιστικά στοιχεία επιβατικής κίνησης.

Στο 4ο κεφάλαιο καταγράφεται η μεθοδολογική προσέγγιση του θέματος, όπου περιγράφονται οι πηγές των δεδομένων, ο τρόπος επεξεργασίας τους, η στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη συσχέτιση τους καθώς και αναλυτική περιγραφή του οργάνου μέτρησης.

Στο 5ο κεφάλαιο αναφέρονται τα αποτελέσματα της έρευνας καθώς επίσης γίνεται αναλυτικός σχολιασμός τους και σύγκριση με τις αντίστοιχες έρευνες του εξωτερικού ενώ στο 6ο κεφάλαιο καταγράφονται προτάσεις και συμπεράσματα με βάση την παρούσα μελέτη και την υπάρχουσα βιβλιογραφία και ταυτόχρονα υποβάλλονται και τα επιστημονικά ερωτήματα για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αντιμετωπίστηκαν αντικειμενικές και υποκειμενικές δυσκολίες.

Αρχικά, η έλλειψη εμπειριστατωμένης προηγούμενης έρευνας αλλά και η δυσκολία πραγματοποίησης της έρευνας μέσα στο χώρο του μετρό, που πολλές φορές κωλυσιέργησαν ή βράδυναν την περάτωση της μελέτης.

Ταυτόχρονα, το γεγονός ότι μέσα στο χώρο του μετρό κυρίως λόγω των αναγκών για την ασφάλεια των επιβατών προβλεπόμενων μέτρων ασφαλείας, πολλές φορές η έρευνα ήταν ανάγκη να ελεγχθεί από τα αρμόδια όργανα (υπάλληλοι φύλαξης και ασφαλείας χώρου και προσώπων) επίσης αντιμετωπίστηκαν προβλήματα διεκπεραίωσης και ταχείας διεξαγωγής. Δεν έλειψαν οι περιπτώσεις καχύποπτης θεώρησης του διεξάγοντος ερευνητή της έρευνας τόσο από τα όργανα φύλαξης, όσο

και από τους διερχόμενους επιβάτες οι οποίοι σχεδόν με διάθεση φόβου υπέβλεπαν την έρευνα, ταυτίζοντας ενίοτε το πρόσωπο του ερευνώντος με άτομα αμφιβόλου δράσης (παραβατικά, τρομοκρατικά, κτλ.).

Ωστόσο παράλο τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει μια τέτοια έρευνα είμαστε βαθύτατα πεπεισμένοι ότι για την προστασία της δημοσίας υγείας και την αποτελεσματική λειτουργία του μέτρου η συνέχιση της έρευνας μας και η συστηματική μελέτη των συνθηκών ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο μετρό της Αθήνας είναι απαραίτητη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Εισαγωγή.....	6

I. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας

1.1. Ατμόσφαιρα –εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων.....	13
1.2. Ατμοσφαιρικά σωματίδια –πηγές εκπομπής.....	15
1.3. Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς τη μορφή.....	17
1.4. Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς το μέγεθος.....	20
1.5. Μηχανισμοί μετατροπών αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.....	23
1.6. Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων.....	25
1.7. Επιπτώσεις σωματιδιακής ρύπανσης.....	26
1.7.1. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	26
1.7.2. Επιπτώσεις στην ορατότητα.....	27
1.7.3. Επιπτώσεις στο οικοσύστημα.....	33
1.7.4. Επιπτώσεις στο κλίμα.....	33
1.7.4.1. Άμεσες επιδράσεις.....	33
1.7.4.2. Έμμεσες επιδράσεις.....	34
1.8. Νομοθεσία για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.....	35

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1. Καταγραφή και συστηματοποίηση των ερευνών που διερευνούν τα επίπεδα της σωματιδιακής ύλης που συσσωρεύεται στα δίκτυα του μετρό.....	40
2.2. Καταγραφή και συστηματοποίηση των ερευνών που συσχετίζουν την επίδραση της λειτουργίας του μετρό με τη δημόσια υγεία.....	47
2.3. Καταγραφή και συστηματοποίηση των επιδράσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στο μετρό σύμφωνα με τις τοξικολογικές και επιδημιολογικές μελέτες.....	48

3. Ο υπόγειος σιδηρόδρομος (το μετρό) στην Αθήνα, Ελλάδα

3.1. Γενικά χαρακτηριστικά του υπόγειου σιδηροδρόμου (μετρό) στην Ελλάδα.....	53
3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά (Τροχαίο υλικό).....	55
3.3. Ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα.....	57
3.3.1. Αερισμός.....	57
3.3.2. Ψύξη – Θέρμανση.....	57
3.4. Στατιστικά στοιχεία επιβατικής κίνησης.....	58

II. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4. Μεθοδολογία

4.1. Σχεδιασμός δειγματοληψίας.....	63
4.2. Περιγραφή οργάνου μέτρησης.....	65

5. Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} στο σύστημα του μετρό, στην Αθήνα.....	67
5.2. Σχέση ανάμεσα στα εσωτερικά PM_{10} επίπεδα και στα εξωτερικά PM_{10} επίπεδα.....	76

6. Γενικές διαπιστώσεις -Προτάσεις - Μέτρα ελέγχου

6.1. Προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση-επέκταση της εργασίας.....	84
--	----

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

I. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα είναι το αεριώδες περίβλημα της γης, ο προστατευτικός μανδύας της ζωής και αποτελεί ένα σώμα με τη γη μετέχοντας σε όλες τις κινήσεις της. Η ατμόσφαιρα είναι αόρατη, άοσμη και παρουσιάζει ένα πλήθος ιδιοτήτων που αποτελούν τις συνθήκες επιβίωσης των ζωικών και φυτικών οργανισμών (Manahan, 2005). Αποτελείται από ένα μείγμα αερίων, γνωστό ως ατμοσφαιρικός αέρας, τα οποία συγκρατούνται στην επιφάνεια της γης λόγω της βαρύτητας. Η σύσταση, η δομή και τα φυσικοχημικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα, επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τους βιογαιοχημικούς κύκλους και τα οικοσυστήματα (Κουϊμτζής και συν., 1998). Η δυναμική της έχει άμεση επίδραση στις καιρικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν το κλίμα και τη διαβίωση των ανθρώπων.

Δυστυχώς, τα τελευταία χρόνια η ρύπανση του περιβάλλοντος και ειδικότερα της ατμόσφαιρας απασχολεί έντονα τη σύγχρονη κοινωνία. Η ρύπανση έχει αποτελέσει διεγνωσμένο πρόβλημα στις μεγάλες πόλεις από τις αρχές του 14^{ου} αιώνα, οπότε χρησιμοποιούνταν το κάρβουνο για τη θέρμανση των κατοικιών (Manahan, 2005). Ωστόσο, η ατμοσφαιρική ρύπανση στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος έχει διαφοροποιηθεί σημαντικά στη διάρκεια του χρόνου.

1.1. Ατμόσφαιρα –εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων

Η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι επιπτώσεις της στην ποιότητα του αέρα και στο περιβάλλον αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην Ελλάδα και παγκοσμίως.

Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι: το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO , CO_2), οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις (NMVOCs), το μεθάνιο (CH_4), τα οξειδία και το υποξείδιο του αζώτου (NO_x , N_2O), η αμμωνία (NH_3), το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM), τα βαρέα μέταλλα, οι έμμονοι οργανικοί ρύποι (Persistent Organic Pollutants), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) και τα παράγωγά τους, οι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες (Aliphatic Hydrocarbons) (Manahan, 2005).

Οι ρύποι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα είτε στην αέρια (με τη μορφή αερίων ή ατμών), είτε στη στερεή κατάσταση (με τη μορφή αιωρούμενων στερεών σωματιδίων

ή σταγονιδίων) οπότε αντίστοιχα ονομάζονται αέριοι ή σωματιδιακοί ρύποι (Κουϊμτζής και συν., 1998).

Αέριος ρύπος είναι κάθε ουσία η οποία διοχετεύεται άμεσα ή έμμεσα στον αέρα του περιβάλλοντος και ενδέχεται να έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή / και στο περιβάλλον στο σύνολο του. Αέρας του περιβάλλοντος θεωρείται ο εξωτερικός αέρας της τροπόσφαιρας, εξαιρουμένου του αέρα στους χώρους εργασίας (Κ.Υ.Α. 3277/209/2000).

Οι ρύποι στην ατμόσφαιρα είναι δυνατόν να εκπεμφθούν είτε από φυσικές είτε από ανθρωπογενείς πηγές.

Ο όρος **φυσικές πηγές** αναφέρεται σε εκείνες τις πηγές εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων που δεν οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα.

Οι φυσικές πηγές διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες (αναφέρονται και οι αντίστοιχοι κυριότεροι εκπεμπόμενοι ρύποι από κάθε πηγή) (NATAIR 2007):

- Χλωρίδα (Biogenic Volatile Organic Compounds – BVOCs)
- Εδάφη – καλλιέργειες (NO_x)
- Καύση βιομάζας και πυρκαγιές δασών (NO_x , Non-Methane Volatile Organic Compounds – NMVOCs)
- Υδροβιότοποι – Ωκεανοί (CH_4 , Dimethyl sulphide – DMS)
- Άγρια ζώα (NH_3 , CH_4)
- Ηφαίστεια (SO_2 , NO_x , PM_{10})
- Αστραπές (NO_x)
- Αλάτι θάλασσας (PM_{10})
- Σκόνη από το έδαφος (PM_{10})
- Βιολογικές διεργασίες, π.χ. γύρη, βακτήρια, ιοί (Primary Biological Aerosol Particles – PBAPs, PM_{10}).

Από την άλλη πλευρά, οι κυριότερες **ανθρωπογενείς πηγές** των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι η καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεταφορές, η βιομηχανία, οι βιομηχανικές διεργασίες και η χρήση διαλυτών, π.χ. στις βιομηχανίες χημικών και ορυκτών, η γεωργία και η επεξεργασία λυμάτων.

1.2. Ατμοσφαιρικά σωματίδια –πηγές εκπομπής

Με τον όρο **αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη** (Particulate Matter) εννοούμε κάθε συστατικό, εκτός από το καθαρό νερό, που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ως υγρό ή στερεό, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και έχει μέγεθος της τάξης μερικών μm ή και μικρότερο αλλά μεγαλύτερο από τη μοριακή διάσταση (περίπου 2Å) (Καραθανάσης 2007).

Ένας ενδιαφέρων διαχωρισμός τους γίνεται από τον Fraser, ο οποίος τα κατηγοριοποιεί σε πανταχού παρόντα σωματίδια (omnipresent haze) με διαστάσεις 1-20 μm και σε σωματίδια νεφών (cloud particles) με διαστάσεις 1-100 μm (Fraser, 1975).

Με τον όρο αερόλυμα (aerosol) ορίζεται το αιώρημα στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων μέσα σε ένα αέριο. Τα αερολύματα διαφέρουν από τα σωματίδια κατά το ότι τα αερολύματα συμπεριλαμβάνουν και τα σωματίδια και το αέριο στο οποίο αυτά αιωρούνται.

Γενικά σαν αιωρούμενα σωματίδια εννοούμε κάθε σώμα (στερεό ή υγρό) που βρίσκεται σε διασπορά στην ατμόσφαιρα και έχει διάμετρο μεγαλύτερη από $2 \cdot 10^{-4}$ μm και μικρότερη από 500 μm. Κατατάσσονται ανάλογα με τα φυσικά (μέγεθος, τρόπος σχηματισμού, ιδιότητες κατακαθίσεως, και οπτικές ιδιότητες), χημικά (οργανική ή ανόργανη σύσταση) και βιολογικά (βακτήρια, ιοί, σπορίδια, γύρη) χαρακτηριστικά τους (Καρβούνης και Γεωργακέλλος, 2003).

Η σύσταση τους έχει μεγάλη ανομοιογένεια με διαφοροποιήσεις ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, το τοπικό κλίμα, την εποχή του έτους, τις βιομηχανικές δραστηριότητες της περιοχής και την κυκλοφορία των οχημάτων. Είναι ένα ετερογενές μείγμα ποικίλου μεγέθους και χημικής σύστασης. Οι φυσικές τους ιδιότητες, τους παρέχουν τη δυνατότητα να μετακινούνται, να διεισδύουν και να επικάθονται μέσα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου, ενώ οι χημικές τους θεωρούνται υπεύθυνες για τις μετέπειτα επιπτώσεις τους στην υγεία (Fadel, 2000).

Οι επιβλαβείς επιδράσεις των σωματιδίων στους ζώντες οργανισμούς οφείλονται σε τρεις παράγοντες: στην τοξικότητα των ουσιών που αποτελούν τα σωματίδια, στην τοξικότητα των ουσιών που απορροφώνται από αυτά και στην παρεμπόδιση των αναπνευστικών λειτουργιών (Μάλλιαρος, 2000).

Τα πιο συνήθη μεγέθη σωματιδίων στα οποία έχουν βασιστεί και οι περισσότερες έρευνες είναι: α) Τα PM₁₀, διαμέτρου έως 10 μικρομέτρων, τα οποία κατακάθονται

στη γη σχετικά γρήγορα εξαιτίας του βάρους τους, β) τα μικρότερα σωματίδια διαμέτρου μέχρι 2,5 μικρομέτρων ($PM_{2.5}$) που μένουν αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν κατακαθίσουν στο έδαφος και γ) τα πολύ μικρά σωματίδια διαμέτρου μέχρι 0,1 μικρομέτρων (ultrafine particles, UFP) που είναι δυνατόν να αιωρούνται διαρκώς έως ότου προσροφηθούν κάπου ή συσσωματωθούν μεταξύ τους σε μεγαλύτερα μεγέθη (Κωτσοβίνου, 1992).

Η παρουσία των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής. Ας σημειωθεί ότι οι εκλυόμενες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων από τις φυσικές πηγές είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Pacyna, 1995).

Οι κυριότερες **φυσικές πηγές** των σωματιδίων είναι:

- Υλικά του εδαφικού φλοιού (π.χ. σκόνη) και της επιφάνειας των ωκεανών (π.χ. θαλάσσιο άλας).
- Προϊόντα χημικών αντιδράσεων αέριας φάσης στην ατμόσφαιρα (διάφορες μετατροπές αερίων – προς – σωματίδια). Οι πρόδρομες ενώσεις των αντιδράσεων αυτών προέρχονται από καύσεις ή βιολογικές δραστηριότητες.
- Ηφαιστειακές εκρήξεις που δημιουργούν θειούχες ενώσεις (SO_2 , H_2S) στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα το σχηματισμό αεροζόλ θειικού οξέος.
- Αιθάλη από φυσικές πυρκαγιές.
- Σύννεφα ατμοσφαιρικού νερού (υγρασίας).

Οι κυριότερες **ανθρωπογενείς πηγές** εκπομπής σωματιδίων είναι:

- Μηχανικές διεργασίες, όπως καταστροφή εδαφικών υλικών και ψεκασμός.
- Οικιακή θέρμανση και εξατμίσεις αυτοκινήτων.
- Διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε υψηλή θερμοκρασία, όπως η καύση γαιάνθρακα και πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Βιομηχανικές διεργασίες παραγωγής καταναλωτικών αγαθών.
- Καύση αστικών απορριμμάτων (Pacyna, 1995).

Τα αιωρούμενα σωματίδια απαντώνται τόσο στην τροπόσφαιρα (δηλαδή, από το έδαφος έως περίπου τα 10-12 km ύψος), όσο και στην στρατόσφαιρα (12-40 km ύψος) με τη μόνη διαφορά ότι τα στρατοσφαιρικά σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην στρατόσφαιρα σε αντίθεση με τα σωματίδια της τροπόσφαιρας που παρουσιάζουν μικρότερους χρόνους παραμονής σε αυτήν.

1.3. Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς τη μορφή

Τα αιωρούμενα σωματίδια εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα με τις παρακάτω μορφές (Arya 1998; Κουϊμτζής, 1998; Seinfeld and Pandis, 1997):

1. Σκόνη (dust). Είναι τα στερεά σωματίδια μεγάλου σχετικά μεγέθους, με διάμετρο μεγαλύτερη από 1μm, που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα διάβρωσης ή κατακερματισμού στερεών υλικών (π.χ. σκόνη εδάφους, σωματίδια φυτών κ.λ.π.)
2. Καπνός (smoke). Είναι τα λεπτότατα σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,01 μm, που σχηματίζονται κατά την ατελή καύση ουσιών που περιέχουν άνθρακα.
3. Αιθάλη (soot). Είναι η συσσώρευση σωματιδίων άνθρακα, που σχηματίζονται κατά την καύση ανθρακικών ενώσεων.
4. Ιπτάμενη τέφρα (fly ash). Λεπτόκοκκα σωματίδια τέφρας στερεών καυσίμων που παρασύρονται με τα καυσαέρια.
5. Κάπνα (fume). Στερεά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1μm, που σχηματίζονται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα από συμπύκνωση ουσιών που βρέθηκαν λόγω ειδικών συνθηκών στην αέρια φάση.
6. Ομίχλη (fog). Ορατά σταγονίδια σε διασπορά στην ατμόσφαιρα, συνήθως κοντά στο έδαφος.
7. Αχλύς (mist). Σταγονίδια αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα με διάμετρο μεγαλύτερη από 1μm, που σχηματίζονται από μηχανικές δράσεις ή από συμπύκνωση αερίων.
8. Καπνομίχλη (smog). Συνδυασμός ομίχλης και καπνού.
9. Καταχνιά (haze). Είναι συνδυασμός σταγονιδίων νερού, σκόνης, σωματιδίων καπνού και φωτοχημικών ρύπων που μειώνουν την ορατότητα. Έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 μm.

Ένας πιο συνοπτικός διαχωρισμός σχετικά με τη μορφή με την οποία εμφανίζονται τα αερολύματα στην ατμόσφαιρα (Wark K., Warher C.F., Davis W.T., 1998) είναι ο εξής: Α) Στερεά αερολύματα και Β) Υγρά αερολύματα.

Α) Στερεά αερολύματα

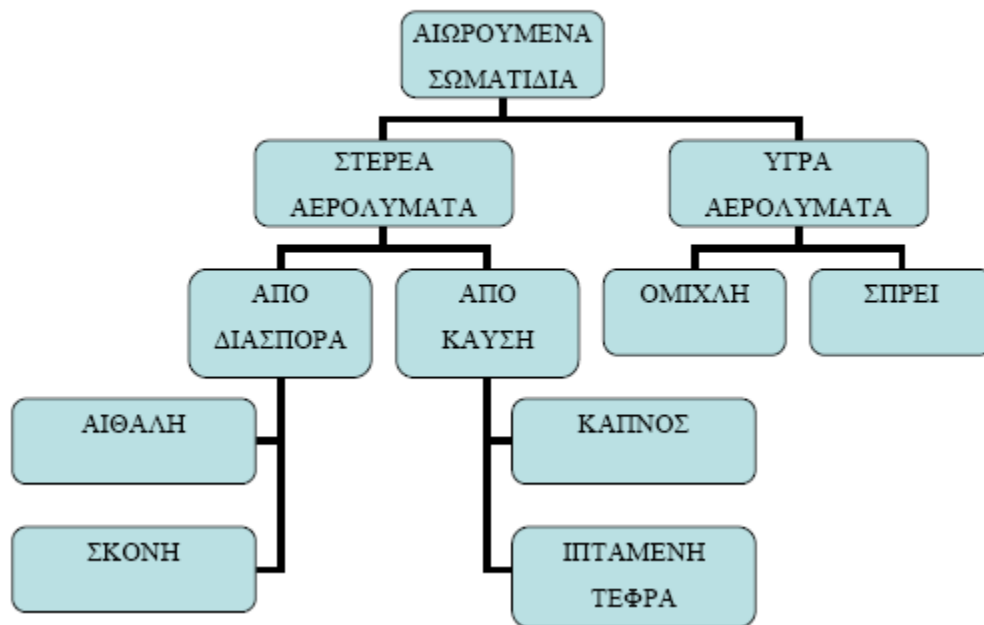
Σχηματίζονται από τη διασπορά στερεών σωματιδίων σε αέριο μέσο. Ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων διαχωρίζονται σε αιθάλη και σκόνη.

Τα σωματίδια που προκύπτουν από διαδικασίες καύσης χωρίζονται σε καπνό και ιπτάμενη τέφρα.

Β) Υγρά αερολύματα

Σχηματίζονται από τη διασπορά υγρών σωματιδίων σε αέριο μέσο. Ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων διαχωρίζονται σε ομίχλη και σπρέι.

Στο Σχήμα 1 φαίνεται σχηματικά η κατηγοριοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 1
Είδη αιωρούμενων σωματιδίων

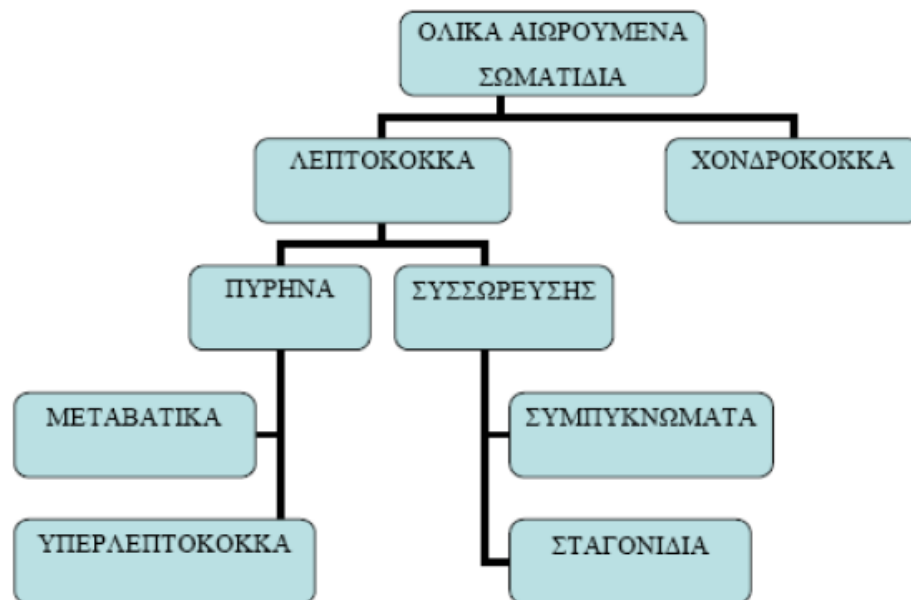
1.4. Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς το μέγεθος

Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη, συντίθεται από σωματίδια έντονα διαφοροποιημένα ως προς το μέγεθος. Τα μικρότερα σωματίδια έχουν μέγεθος κάτω από 5 nm σε διάμετρο. Αντιθέτως τα πιο μεγάλα σωματίδια έχουν μέγεθος έως και 100μm. Τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSP) είναι ο όρος που δόθηκε στο σύνολο των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθος τους σε δύο βασικές κατηγορίες: λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα. Σαν λεπτόκοκκα σωματίδια (fine mode particles) χαρακτηρίζονται τα σωματίδια με ισοδύναμη διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm, ενώ σαν χονδρόκοκκα τα σωματίδια με ισοδύναμη διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 μm.

Ο προσδιορισμός του μεγέθους τους γίνεται με την “ισοδύναμη διάμετρο”, που είναι η διάμετρος που έχει ένα σφαιρικό σωματίδιο που παρουσιάζει την ίδια αντίσταση στον αέρα κατά την κίνηση του με το προς εξέταση σωματίδιο (Λαζαρίδης, 2005).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα είδη ολικών αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο το μέγεθος.



Σχήμα 2

Είδη ολικών αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο το μέγεθος

Ένας πιο περιγραφικός διαχωρισμός του μεγέθους των σωματιδίων που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα (USEPA, 2004a) είναι ο εξής :

1. Περιοχή Πυρήνωσης (Nucleation mode): αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου $<0,2 \mu\text{m}$.
2. Περιοχή Συσσώρευσης (Accumulation mode): αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου από περίπου $0,2 \mu\text{m}$ μέχρι $2,5 \mu\text{m}$.
3. Περιοχή Αδρών Σωματιδίων (Coarse mode): αποτελείται από σωματίδια μεγέθους $>2,5 \mu\text{m}$ (PM_{10}).

Ειδικότερα στην περιοχή των μικρών σωματιδίων διακρίνονται οι ακόλουθες περιοχές:

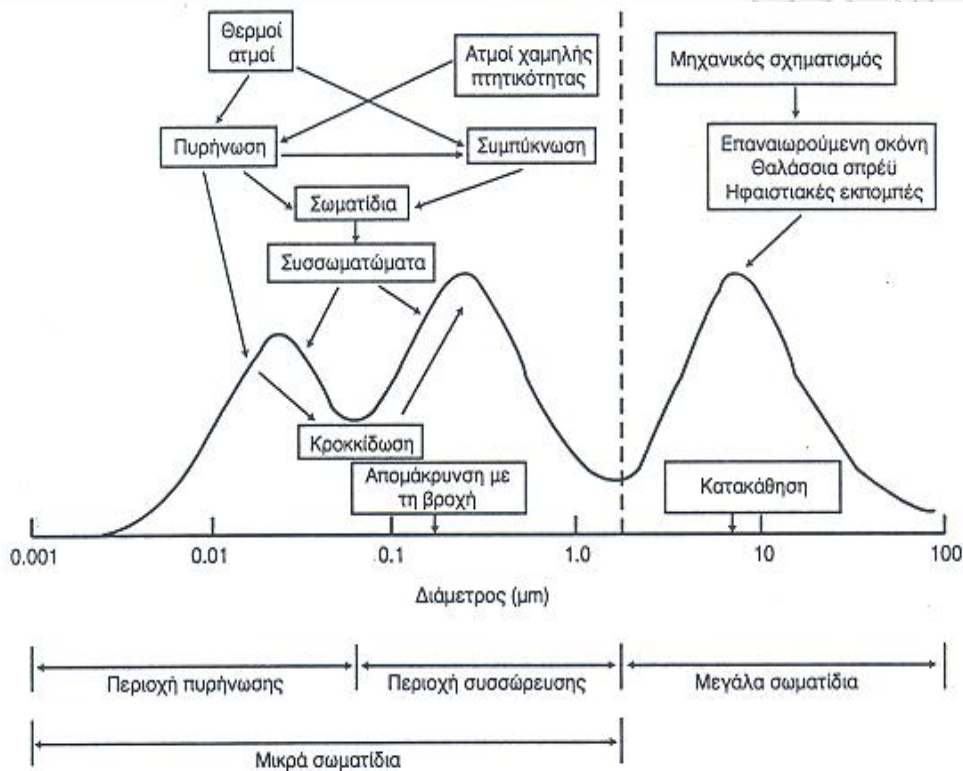
- Περιοχή Aitken: αποτελείται από σωματίδια διαμέτρου μεταξύ 10-100nm, που προκύπτουν από την αύξηση του μεγέθους μικρών σωματιδίων ή την πυρήνωση
- Υπέρμικρα σωματίδια (Ultrafine particles): τα σωματίδια αυτά περιέχουν την περιοχή πυρήνωσης (<10nm) και ένα μέρος της Aitken (10-100nm) και δεν αποτελούν ξεχωριστή περιοχή (USEPA,2004a)

Ο συνδυασμός των περιοχών πυρήνωσης, Aitken και συσσώρευσης, αποτελεί την περιοχή των μικρών σωματιδίων (fine particles, PM_{2.5}) (Κουϊμτζής και συν.,1998).

Το μέγεθος των σωματιδίων δίνει σημαντικές πληροφορίες για τις διαδικασίες παραγωγής τους. Έτσι τα " χονδρά" σωματίδια αποτελούνται από στοιχεία του εδάφους και της θάλασσας (Si, Al, Ca, Fe, Ti, K, Mn, Sr, Na, Cl, S) στην κρυσταλλική και ιοντική μορφή, καθώς προέρχονται από εκπομπές των ανωτέρων φυτικών οργανισμών, από ηφαίστεια, από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και από τη θάλασσα. Παρατηρούνται κυρίως πάνω από ηπειρωτικές περιοχές. Αντίθετα τα λεπτά σωματίδια προέρχονται είτε από διεργασίες καύσης, οπότε και παρατηρούνται κοντά στις περιοχές προέλευσης, είτε από συμπύκνωση πυρήνων οι οποίοι προκύπτουν από τις χημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα. Τα λεπτά σωματίδια αποτελούνται από ιόντα όπως SO₄⁻², NO₃⁻, NH₄⁺, μεταβατικά στοιχεία (Cu, Mn, Zn, As, Ni, Pb) σε διάφορες χημικές μορφές, από στοιχειακό άνθρακα, αιθάλη και από ενώσεις του οργανικού άνθρακα (Hatakeyama et al, 1989; Seinfeld and Pandis, 1997)

1.5. Μηχανισμοί μετατροπών αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Οι κυριότερες διεργασίες στις οποίες εμπλέκονται τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Μηχανισμοί παραγωγής ατμοσφαιρικών σωματιδίων

(Whitby and Cantrell, 1978)

Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να αντιδράσουν με αέρια, να παρατηρηθεί συμπύκνωση ατμών και υδρατμών στην επιφάνεια των σωματιδίων, συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων σε μεγαλύτερα και τελικά κατακρήμιση λόγω βαρύτητας ή ενσωμάτωσης τους στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχές και χιόνια).

Στο κάτω μέρος του σχήματος συσχετίζεται ο μηχανισμός γένεσης των σωματιδίων με τη μέση διάμετρο τους. Παρατηρείται ότι οι φυσικές – μηχανικές διεργασίες οδηγούν σε σχηματισμό σωματιδίων μεγέθους μεγαλύτερου του 1μm, ενώ οι χημικές διεργασίες οδηγούν σε σχηματισμό σωματιδίων μεγέθους μικρότερο του 1μm. Αυτό εξηγείται εύκολα γιατί η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση ενός

υλικού σε πολύ μικρά σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται ή και εκλύεται κατά το σχηματισμό ενός σωματιδίου μέσω χημικής σύνθεσης ή συσσωμάτωσης μικρότερων σωματιδίων. Επομένως, τα σωματίδια που προκύπτουν από φυσικές – μηχανικές διεργασίες έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερο μέγεθος από αυτά που προκύπτουν μέσω χημικών διεργασιών.

Στο δεξιό τμήμα του σχήματος, παρουσιάζονται κυρίως πρωτογενώς εκπεμπόμενα σωματίδια τα οποία σχηματίστηκαν με μηχανικό τρόπο και αντιστοιχούν κυρίως σε φυσικές πηγές εκπομπής. Παρατηρείται ότι τα σωματίδια αυτά ανήκουν σε κατανομές μεγέθους με μέση διάμετρο 10 μm .

Το πάνω αριστερό τμήμα του σχήματος, αναφέρεται στο μηχανισμό που οδηγεί σε σχηματισμό σωματιδίων στην ατμόσφαιρα από τη συμπύκνωση θερμών ατμών. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται είτε διεργασία μετατροπής αερίου σε σωματίδια ή συμπύκνωση των ατμών πάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια στην ατμόσφαιρα.

Στο μεσαίο τμήμα του σχήματος, παρουσιάζεται μια κατηγορία σωματιδίων που προκύπτουν από χημική μετατροπή αερίων σε ατμούς χαμηλής πτητικότητας. Κύριοι εκπρόσωποι τέτοιων σωματιδίων προκύπτουν από διαδικασίες οξείδωσης αερίων στην ατμόσφαιρα είτε φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης. Διεργασίες οξείδωσης αερίων μπορεί να λάβουν χώρα ή στην αέρια φάση ή στην υγρή, δηλαδή σε ατμοσφαιρικά σταγονίδια. Τα προϊόντα της οξείδωσης είναι συνήθως ενώσεις χαμηλής πτητικότητας οι οποίες είτε συμπυκνώνονται πάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια ή σταγονίδια είτε σχηματίζουν νέα σωματίδια. Τα σωματίδια που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο είναι συνήθως πολύ μικρού μεγέθους με μέση διάμετρο 0.01 μm .

1.6. Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια, είτε προέρχονται από ανθρωπογενείς είτε από φυσικές πηγές, απομακρύνονται από την πηγή εκπομπής με διάφορους ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς. Ακόμη, έχουν έναν ορισμένο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα, οπότε, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αποτίθενται στο έδαφος. Πιο αναλυτικά, οι κυριότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι εξής (Δ. Μελάς, 2005):

- Οριζόντια μεταφορά: Τα αιωρούμενα σωματίδια μεταφέρονται μακριά με τη βοήθεια του επιφανειακού ανέμου. Η μεγάλη ταχύτητα του ανέμου έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη διασπορά των ρύπων, επομένως επηρεάζει το βαθμό αραίωσης τους ενώ η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει προς ποια περιοχή θα κατευθυνθούν οι ρύποι.
- Κατακόρυφη μεταφορά: Από τη στιγμή που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, παραμένουν για κάποιο διάστημα μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο κυριαρχούν τυρβώδεις κινήσεις οι οποίες συμβάλλουν στην αραίωση των σωματιδίων. Ανάλογα με το ύψος του οριακού στρώματος οι τυρβώδεις κινήσεις είναι έντονες ή ασθενείς.
- Ξηρή απόθεση: Στην περίπτωση των μεγάλων σωματιδίων, πολύ λίγο μετά την εκπομπή τους υφίστανται καθίζηση. Οπότε απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα λίγα μέτρα μετά την πηγή. Οι αέριοι ρύποι που μεταφέρονται με τον αέρα, κάποια στιγμή έρχονται σε επαφή με τον άνθρωπο, τα ζώα, τα φυτά, τα κτίρια, το έδαφος κ.α.
- Υγρή απόθεση: Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια είναι δυνατόν να προσληφθούν από τα υδροσταγονίδια των νεφών, της βροχής ή του χιονιού και να καταλήξουν πάλι στο έδαφος.

Επίσης, ένα μέρος της ποσότητας των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, διαφεύγει πάνω από το οριακό στρώμα, στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Όμως εκεί οι τυρβώδεις κινήσεις είναι αμελητέες με συνέπεια να μην ευνοείται η διάχυση των ρύπων. Συγχρόνως όμως, κυριαρχούν μηχανισμοί μεγάλης χωρικής κλίμακας με αποτέλεσμα αυτά να μεταφέρονται σε άλλες περιοχές του πλανήτη. Το γεγονός αυτό εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής του σωματιδίου.

1.7. Επιπτώσεις σωματιδιακής ρύπανσης

Οι κυριότερες αρνητικές συνέπειες της σωματιδιακής ρύπανσης που αφορούν τις ιδιότητες της ατμόσφαιρας είναι καταρχήν, η μείωση της ορατότητας και η αύξηση της συχνότητας σχηματισμού ομίχλης (Yiu-chung Chan, 1997). Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια συμβάλλουν στη μείωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και στη μεταβολή του κλίματος (IPPC, 2001). Πιο συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια σκεδάζουν και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία οδηγώντας σε ψύξη ή θέρμανση στην επιφάνεια της γης. Αναλυτικότερη περιγραφή για της επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια.

Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια εφόσον μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις μέσω των μηχανισμών που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και να εγκατασταθούν έπειτα στο έδαφος ή το νερό, είναι πιθανό να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Για παράδειγμα, καθιστούν τις λίμνες όξινες, αλλάζουν τη θρεπτική ισορροπία στα παράκτια ύδατα και τις μεγάλες λεκάνες των ποταμών, οδηγούν σε μείωση των θρεπτικών ουσιών στο χώμα, καταστρέφουν τα ευαίσθητα δάση και τις αγροτικές συγκομιδές. Ακόμη, η ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να λεκιάσει και να βλάψει την πέτρα και άλλα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των πολιτιστικά σημαντικών αντικειμένων όπως τα αγάλματα και τα μνημεία (U.S.EPA).

1.7.1. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, που καθορίζονται τόσο από το μέγεθος, όσο και από τη χημική τους σύσταση. Σύμφωνα με επιδημιολογικές μελέτες, τα σωματίδια σχετίζονται με αυξημένη θνησιμότητα και νοσηρότητα (Schlesinger, 1995; Harrison and Yin, 2000; Pope et al., 2002, 2004; Green, 2003). Τα αιωρούμενα σωματίδια προσβάλλουν το αναπνευστικό σύστημα, στο οποίο εισέρχονται με την αναπνοή. Πιο συγκεκριμένα προκαλούν άμεσες επιπτώσεις όπως βρογχίτιδα, πνευμονία, επιδείνωση χρόνιων αποφρακτικών νόσων του αναπνευστικού και καρδιακά προβλήματα.

Στο αναπνευστικό σύστημα εισέρχονται σωματίδια $\leq 10\mu\text{m}$, που αποτελούν το εισπνεύσιμο κλάσμα των σωματιδίων (PM_{10}) (Κουϊμτζής και συν., 1998). Τα μεγαλύτερα σωματίδια του κλάσματος PM_{10} , έχουν την τάση να εναποτίθενται στην έξω θωρακική χώρα (μύτη, λάρυγγας), τα σωματίδια που διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού, ονομάζονται θωρακικά ($\leq 7\mu\text{m}$), ενώ τα μικρότερα ($\leq 2,5\mu\text{m}$) τείνουν να εισχωρούν βαθύτερα στους πνεύμονες και ειδικότερα στην κυψελιδική περιοχή, όπου αποθέτονται με μηχανισμούς καθίζησης και διάχυσης. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $2,5\mu\text{m}$ αποτελούν το αναπνεύσιμο κλάσμα ($\text{PM}_{2,5}$) το κυριότερο από πλευράς επιπτώσεων στην υγεία (Κουϊμτζής και συν., 1998).

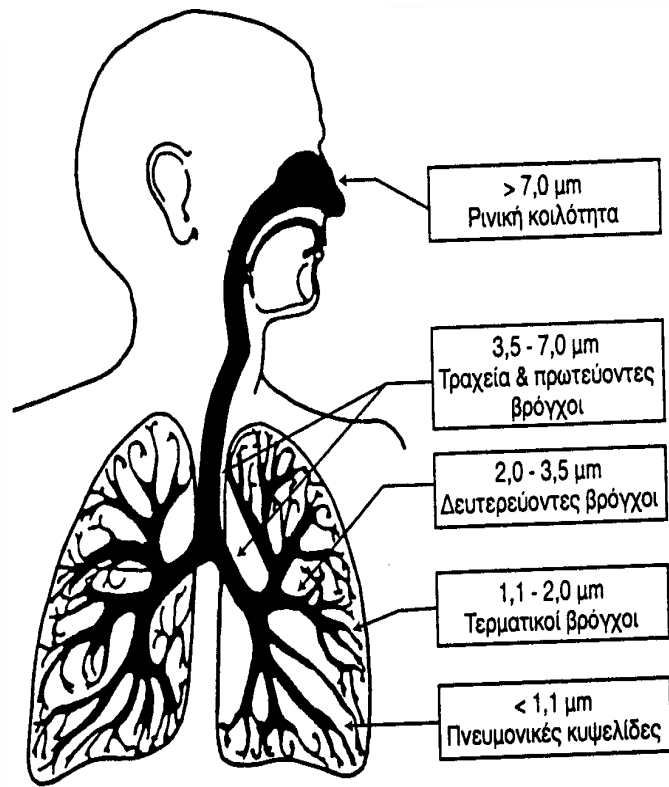
Στο σχήμα 4 δίνεται η διείδυση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα ενώ στο σχήμα 5 δίνεται μια τυπική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα ανάλογα με τη διάμετρό τους. Όπως φαίνεται, για σωματίδια με διάμετρο $10\mu\text{m}$, περίπου το 80% της μάζας τους είναι εισπνεύσιμο, το 50% θωρακικό, ενώ ελάχιστο ποσοστό είναι αναπνεύσιμο. Αντίθετα, σχεδόν το 90% της μάζας των σωματιδίων με $d \leq 2,5\mu\text{m}$ είναι αναπνεύσιμο.

Η τύχη των εισπνεόμενων σωματιδίων δεν είναι πλήρως γνωστή. Τα υδροδιαλυτά συστατικά των σωματιδίων διαλύονται στην υγρή φάση των βρόγχων και εισέρχονται στη λέμφο ή την κυκλοφορία σε κάποιο επίπεδο του αναπνευστικού συστήματος. Τα σωματίδια που είναι αδιάλυτα στην υδατική φάση, φαγοκυτταρώνονται μέσα σε λίγες ώρες από τα κυψελιδικά μακροφάγα. Ο βιολογικός χρόνος της ημίσειας ζωής τους κυμαίνεται από ημέρες έως και χρόνια (Κουϊμτζής και συν., 1998).

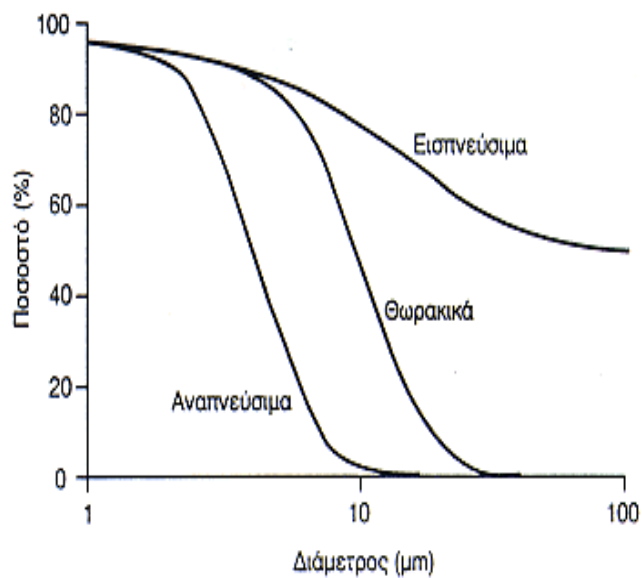
Στον Πίνακα 1 συνοψίζεται η ικανότητα αναπνευστικής διείδυσης σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων.

Πίνακας 1. Ικανότητα αναπνευστικής διείσδυσης σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων (Emission, Dispersion and Concentration of Particles, J. Spegler and R. Wilson, in Particles in our Air, Concentrations and Health Effects, Harvard School of Public Health, 1996 Harvard University Press).

- $> 11\mu\text{m}$: δεν διεισδύουν στο αναπνευστικό σύστημα
- $7-11\mu\text{m}$: εισχωρούν στη ρινική κοιλότητα
- $4,7-7\mu\text{m}$: εισχωρούν στο φάρυγγα
- $3,3-4,7\mu\text{m}$: εισχωρούν στην τραχεία και την αρχή των βρόγχων
- $2,1-3,3\mu\text{m}$: εισχωρούν στο μέσον των βρόγχων
- $1,1-2,1\mu\text{m}$: εισχωρούν στα τελευταία τμήματα των βρόγχων
- $0,65-1,1\mu\text{m}$: εισχωρούν στα βρογχιόλια
- $0,43-0,65\mu\text{m}$: εισχωρούν στις κυψελίδες των πνευμόνων



Σχήμα 4: Διείσδυση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (Κουϊμτζής και συν., 1998)



Σχήμα 5: Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα ανάλογα με το μέγεθός τους (Κουϊμτζής και συν., 1998)

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις επιδημιολογικές προσεγγίσεις των επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία (Pope et al., 2002, 2004; de Kok et al., 2005; Vineis et al., 2005; Claxton and Woodall, 2007).

Σύμφωνα με τις έρευνες αυτές, αύξηση της συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ κατά $10 \mu g m^{-3}$, προκαλεί αύξηση της θνησιμότητας από καρκίνο του πνεύμονα κατά 8% και από καρδιοαναπνευστικά προβλήματα κατά 6% αντιστοίχως (Pope et al., 2002).

Από τις επιδημιολογικές μελέτες και τα ελάχιστα πειράματα στα ζώα και *in vitro* σε ανθρώπινα κύτταρα προέκυψαν διάφοροι μηχανισμοί αρνητικής επίδρασης των σωματιδίων στον άνθρωπο με τους οποίους τα σωματίδια προκαλούν τοξικότητα στον άνθρωπο (Schlesinger, 1995; Hodgson, 2004), όπως α) εξασθένηση των λειτουργιών του ανθρώπινου οργανισμού στο νευρικό σύστημα, β) στην δεξιά καρδιακή κοιλία, γ) στην κυκλοφορία του αίματος δ) στους πνεύμονες, ε) οξειδωτικό στρες, στ) οίδημα, ζ) φλεγμονές (Schins et al., 2004), η) ινωμάτωση, θ) θρόμβωση του αίματος, ι) εμφύσημα και υποτοξικό στρες λόγω της μικρής διάχυσης αερίων (Τσιφτσόγλου, 1997). Ακόμα, δεν έχει διευκρινιστεί πλήρως ο τρόπος, με τον οποίο προκαλούνται αυτές οι δυσλειτουργίες, εκτιμάται ότι κύριο ρόλο έχουν τα κύτταρα του επιθηλίου και οι μακροφάγοι, που ενεργοποιούνται κατά την επαφή τους με σωματίδια και πιθανότατα ελευθερώνουν ουσίες που επηρεάζουν τα άλλα κύτταρα (Costa et al, 2005).

Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Περιβάλλοντος (Martuzzi et al., 2006) για 13 πόλεις της Ιταλίας, αποδόθηκαν 8220 θάνατοι κατά μέσο όρο ετησίως (για τη χρονική περίοδο 2002-2004) στα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} με μέση συγκέντρωση άνω των $20 \mu g/m^3$.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν ομάδες ανθρώπων που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην έκθεση των υψηλών επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης. Έχει αποδειχθεί ότι οι πιο ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού είναι τα παιδιά (Kleinman, 2000). Το γεγονός αυτό, οφείλεται καταρχήν στο ότι τα παιδιά κατά τη διάρκεια έντονης σωματικής άσκησης εισπνέουν 20- 50% περισσότερο αέρα, με συνέπεια περισσότερα σωματίδια, σε σχέση με έναν ενήλικα (Kleinman, 2000). Επίσης, τα παιδιά είναι πιο ευάλωτα στην ατμοσφαιρική ρύπανση γιατί βρίσκονται σε ανάπτυξη όπως και οι πνεύμονές τους (Kleinman, 2000).

Αμέσως μετά τα παιδιά, η επόμενη ευπαθής ομάδα είναι οι ηλικιωμένοι (άνω των 65 ετών) και στη συνέχεια ακολουθούν τα άτομα που πάσχουν από άσθμα ή αυτοί που αντιμετωπίζουν καρδιολογικά προβλήματα.

Σύμφωνα με τα Αμερικανικά Κριτήρια Ποιότητας του Αέρα υπάρχουν συγκεκριμένα συμπτώματα από την έκθεση του ανθρώπου στα αιωρούμενα σωματίδια (πίνακας 2) (Boudel et al., 1994).

Πίνακας 2: Ανθρώπινα συμπτώματα από την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀).

Συγκέντρωση ρύπου PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Χρόνος Έκθεσης	Ανθρώπινα συμπτώματα
750	-	Σημαντική ένταση ασθενειών
350	24 hr	Οξεία επιδείνωση ασθενειών με χρόνια βρογχίτιδα
150	24 hr	Αυξημένες απουσίες βιομηχανικών εργατών
90	24 hr	Αύξηση αναπνευστικών ασθενειών σε παιδιά
55	24 hr	Αύξηση κινδύνου αναπνευστικών ασθενειών
50	Ετήσιος γεωμετρικός μέσος	Αύξηση του ρυθμού θανάτων για ηλικίες άνω των 50 ετών

Συνοψίζοντας, οι επιπτώσεις των PM₁₀ και PM_{2.5} στην ανθρώπινη υγεία είναι δυνατό να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακές παθήσεις καθώς και επεισόδια άσθματος, να προκαλέσουν βλάβη στους ιστούς των πνευμόνων και καρκινογενέσεις, να οδηγήσουν σε ιατροφαρμακευτική περίθαλψη, αύξηση των επισκέψεων σε γιατρούς, εισαγωγές στα νοσοκομεία, μείωση του προσδόκιμου ορίου ζωής και πρόωρο θάνατο. Στις συνέπειες συγκαταλέγονται ακόμη και κάποιες λιγότερο επώδυνες όπως επίμονος βήχας, φλέγματα, ζαλάδες και αδιαθεσία (Barry Carbon, 2003; Mage D., Wilson W., Hasselblad., V., Grant L., 1999).

1.7.2. Επιπτώσεις στην ορατότητα

Η ορατότητα προσδιορίζεται ως η μέγιστη απόσταση από τη οποία ένα μαύρο αντικείμενο με κατάλληλες διαστάσεις το οποίο βρίσκεται κοντά στο έδαφος, μπορεί να παρατηρηθεί, να αναγνωριστεί και να μειωθεί λόγω της οπτικής σκέδασης των σωματιδίων (Hinds, 1999). Γενικά, με τον όρο ορατότητα εννοούμε την μέγιστη απόσταση στην οποία ένα αντικείμενο επαρκών διαστάσεων, είναι ορατό και αναγνωρίζεται ως προβαλλόμενο στον ορίζοντα. Η εξασθένηση της ορατότητας περιλαμβάνει την υποβάθμιση της δυνατότητας να γίνεται αντιληπτό το περιβάλλον.

Η υποβάθμιση της ορατότητας ή εναλλακτικά η μείωση της ορατότητας είναι δυνατόν να παρατηρηθεί από τον άνθρωπο και να δηλωθεί έτσι η ύπαρξη των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Biskos, 2004; Boubel et al., 1994). Η μείωση της ορατότητας προκαλείται από τη σκέδαση του φωτός λόγω των σωματιδίων των αερίων και από την απορρόφηση του φωτός από τα αέρια και τα σωματίδια (Hinds, 1999). Τόσο η σκέδαση όσο και η απορρόφηση του φωτός είναι συνάρτηση της σύστασης, της συγκέντρωσης και του μεγέθους των σωματιδίων. Στον πίνακα 3 αναφέρεται η ορατότητα σε χιλιόμετρα, σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (Σκούλλος Μ, Σίσκος Π, 2009).

Πίνακας 3: Η ορατότητα της ατμόσφαιρας σε km σε συνάρτηση με την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Περιοχή	Αιωρούμενα σωματίδια ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ορατότητα (km)
Ύψαιθος	30	40
Κοντά σε πόλη	100	12
Μέσα στην πόλη	200	6
Βαρεία ρύπανση	700	1,6

1.7.3. Επιπτώσεις στο οικοσύστημα

Τα φυτά εκτίθενται στη σωματιδιακή μόλυνση είτε μέσω του φυλλώματος τους, είτε μέσω της αναρρόφησης από τις ρίζες τους. Τα υδρόφιλα σωματίδια διαλύονται στο νερό και είναι ευκολότερη η απορρόφηση τους από το φυτό. Υποστηρίζεται ότι ο συνδυασμός των σωματιδίων με άλλους ρύπους ενισχύει την προσβολή τους από βαρέα μέταλλα. Τα χονδρόκοκκα σωματίδια αποτίθενται στα φύλλα των φυτών, μειώνοντας την ανταλλαγή ζωτικών, για το φυτό, αερίων, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας και επιβραδύνοντας τη φωτοσύνθεση, οπότε τα φύλλα του κιτρινίζουν.

Επιπλέον, φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά και η υγεία των ζώων. Ύστερα από πειράματα που έχουν γίνει πάνω στα ζώα σε εργαστηριακή κλίμακα, φαίνεται ότι οι επιπτώσεις των σωματιδίων πάνω τους είναι ανάλογες με αυτές που υφίσταται ο άνθρωπος (π.χ. καρκίνος, λοιμώξεις των πνευμόνων και θάνατος). Η επιρροή όμως, στα ζώα είναι και έμμεση μέσω της διατροφής τους με φυτά, των οποίων οι ιστοί έχουν επηρεαστεί από τα σωματίδια και από τοξική ύλη. Η τοξική αυτή ύλη είναι δυνατόν να απορροφηθεί και από τους ιστούς των ζώων (Harrison R.M., Yin. J, 2000).

1.7.4. Επιπτώσεις στο κλίμα

Τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται στην τροπόσφαιρα επηρεάζουν το κλίμα με δύο τρόπους:

- **άμεσα** μέσω της ανάκλασης και της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας.
- **έμμεσα** μεταβάλλοντας τη διάρκεια ζωής και τις οπτικές ιδιότητες των νεφών.

1.7.4.1. Άμεσες επιδράσεις

Η γη εκπέμπει Υπέρυθρη (IR) ακτινοβολία, προς το διάστημα. Μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από αέρια, όπως οι υδρατμοί, το CO₂ κ.α., με αποτέλεσμα αυτή η ακτινοβολία να δεσμεύεται στα κατώτερα μέρη της ατμόσφαιρας και να μην διαφεύγει προς το διάστημα. Το φαινόμενο αυτό είναι θεμιτό (ως ένα βαθμό) διότι έτσι η μέση θερμοκρασία πάνω στη γη είναι 15 °C, ενώ αν δεν συνέβαινε αυτή η "παγίδευση" της ακτινοβολίας, η γη θα είχε μέση θερμοκρασία -18°C. Τα τελευταία όμως χρόνια στη γη παρουσιάζεται υπέρμετρη αύξηση των εκπομπών αερίων όπως τα CO₂, CH₄, N₂O, τα οποία απορροφούν την εκπεμπόμενη από τη γη IR ακτινοβολία,

αυξάνοντας επιπλέον την θερμοκρασία της. Στην περιοχή IR 8-12 μm υπάρχουν τα λεγόμενα "παράθυρα IR" από τα οποία η ακτινοβολία της γης θα μπορούσε να διαφύγει προς το διάστημα. Τα μόρια, όμως, που μόλις προαναφέρθηκαν απορροφούν στην περιοχή IR 8-12 μm (με αποτέλεσμα να εμποδίζουν την ακτινοβολία να διαφύγει προς το διάστημα) και αυτό καθιστά την παρουσία αυτών των μορίων πολύ σημαντική ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις.

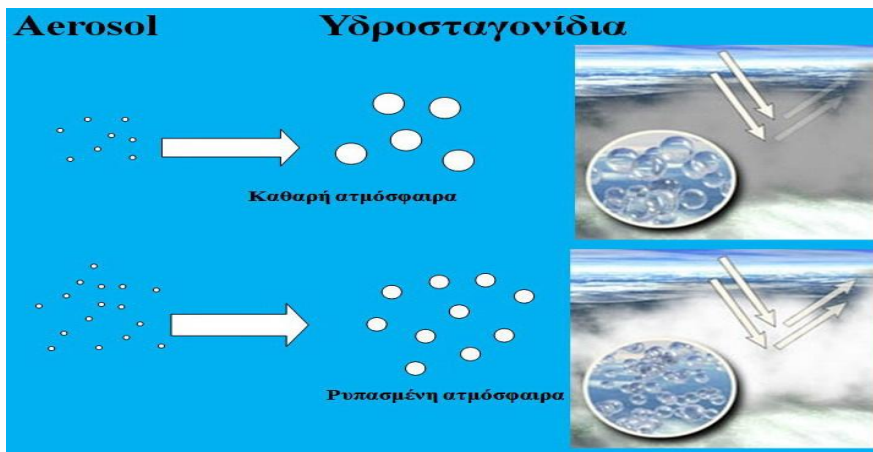
Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 0.5 $^{\circ}\text{C}$, απειλώντας, σε περίπτωση συνεχούς αύξησης, την ομαλή λειτουργία του οικοσυστήματος στο άμεσο μέλλον. Όμως, το ενεργειακό ισοζύγιο της γης δεν εξαρτάται μονάχα από τα αέρια που προαναφέρθηκαν, αλλά και από τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία εξαιτίας της αντανάκλασης που προκαλούν στο ηλιακό φως, εμποδίζουν ένα μέρος του να φτάσει στην επιφάνεια της γης, συντελώντας έτσι στη μείωση της θερμοκρασίας του πλανήτη, δρουν δηλαδή ανταγωνιστικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Charlson et al, 1992)

Τα περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια απορροφούν και σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που επιστρέφει στο διάστημα από το σύστημα πλανήτη και ατμόσφαιρα (albedo). Οπότε, όταν υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σωματίδια σε μεγάλες συγκεντρώσεις, φθάνει στην επιφάνεια της γης λιγότερη ακτινοβολία και επομένως αναμένονται μικρότερες θερμοκρασίες στην ατμόσφαιρα (West et al., 1997; Highwood et al., 2006).

1.7.4.2. Έμμεσες επιδράσεις

Τα αιωρούμενα σωματίδια, ιδιαίτερα αυτά που είναι υγροσκοπικά και έχουν αυξημένη διαλυτότητα στο νερό, παραδείγματος χάρη αυτά που περιέχουν ανόργανα άλατα χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nuclei, CCN). Αυξημένες συγκεντρώσεις τέτοιων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα οδηγούν σε αυξημένη νεφοκάλυψη. Η αυξημένη συγκέντρωση πυρήνων συμπύκνωσης σημαίνει αυξημένο αριθμό σταγονιδίων στα νέφη με αποτέλεσμα, το μέγεθος των σταγονιδίων να μειώνεται και επομένως να καθυστερεί η εκδήλωση βροχόπτωσης και να παρατείνεται ο χρόνος ζωής των νεφών στην ατμόσφαιρα. Τα νέφη ανακλούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συνεισφέροντας και αυτά σε μείωση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας (Biskos, 2004; West et al., 1997).

Εικόνα 1



Εικόνα 1: Αύξηση της λαμπρότητας των νεφών σε ρυπασμένη ατμόσφαιρα.

1.8. Νομοθεσία για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Στη χώρα μας ισχύουν τα νομοθετημένα όρια προστασίας της ανθρώπινης υγείας για το ρύπο των αιωρούμενων σωματιδίων, σύμφωνα με αυτά που έχουν καθιερωθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Με βάση την οδηγία – πλαίσιο για την ατμοσφαιρική ρύπανση 1996/62/ΕΚ και τη θυγατρική της 1999/30/ΕΚ, για τις οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων (PM₁₀) στην ατμόσφαιρα, έχουν θεσπιστεί τα όρια που απεικονίζονται στον Πίνακα 4 (Directive 1999/30/EC).

Πίνακας 4: Όρια συγκέντρωσης ρύπου στην ατμόσφαιρα με βάση την οδηγία 1999/30/ΕΚ.

Ρύπος	Οριακή Τιμή	Έτος ισχύος	Ενδεικτική οριακή τιμή για προετοιμασία			
			2001	2002	2003	2004
Αιωρούμενα σωματίδια PM ₁₀	50 μg/m ³ Μέση ημερήσια τιμή, των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές ανά έτος.	1/1/2005	70	65	60	55
	40 μg/m ³ μέση	1/1/2005	46,4	44,8	43,2	41,6

	ετήσια τιμή		$\mu\text{g}/\text{m}^3$
--	-------------	--	--------------------------

Με βάση το πρόγραμμα 'Καθαρός Αέρας για την Ευρώπη' (Clean Air for Europe, CAFE) και την οδηγία 1999/30/EC, επιβλήθηκε μέση 24ωρη οριακή τιμή για τα PM_{10} τα $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το 2000, η οποία θα έπρεπε να μειωθεί σταδιακά στα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ από 1/1/2005 (Πίνακας 5). Το όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ δεν πρέπει να παραβιαστεί περισσότερες από 35 ημέρες ετησίως (δηλαδή το 10% των ημερών) ενώ ως το 2010 το όριο αυτό δεν πρέπει να ξεπεραστεί πάνω από 7 ημέρες το χρόνο (δηλαδή το 7% των ημερών)

Πίνακας 5: Οριακές τιμές της Ευρωπαϊκής Νομοθεσίας για τα PM_{10} σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

	Φάση 1	Φάση 2¹
	από 1 Ιανουαρίου 2005	από 1 Ιανουαρίου 2010
Ετήσιος μέσος όρος	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Ημερήσιος μέσος όρος (24-ωρο)	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
επιτρεπτός αριθμός υπερβάσεων /χρόνο	35	7

¹ ενδεικτική τιμή.

Σύμφωνα με την τελευταία Οδηγία που δημοσιεύθηκε στην Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 11.6.2008 (Directive 2008/50/EC) τίθενται τα ακόλουθα όρια – στα Κράτη Μέλη - για τα αιωρούμενα σωματίδια (PM):

A. ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ:

Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή τιμή
PM ₁₀		
1 ημέρα	50 μg/m ³ , δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος	— ⁽¹⁾
Ημερολογιακό έτος	40 μg/m ³	— ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ισχύει ήδη από 1ης Ιανουαρίου 2005.

ΤΙΜΗ ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΑ PM_{2.5}

B. Υποχρέωση όσον αφορά τη συγκέντρωση της έκθεσης

Υποχρέωση όσον αφορά τη συγκέντρωση της έκθεσης	Έτος στο οποίο πρέπει να έχει επιτευχθεί η τιμή της υποχρέωσης
20 μg/m ³	2015

Γ. Τιμή στόχος

Περίοδος μέσου όρου	Τιμή στόχος	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η τιμή στόχος
Ημερολογιακό έτος	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1η Ιανουαρίου 2010

Δ. Οριακή τιμή

Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή τιμή
ΣΤΑΔΙΟ 1		
Ημερολογιακό έτος	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1η Ιανουαρίου 2015
ΣΤΑΔΙΟ 2 ⁽¹⁾		
Ημερολογιακό έτος	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1η Ιανουαρίου 2020

⁽¹⁾ Στάδιο 2 — Ενδεικτική οριακή τιμή που θα επανεξετασθεί από την Επιτροπή το 2013 υπό το φως περαιτέρω πληροφοριών σχετικά με τις επιδράσεις στην υγεία και το περιβάλλον και της εμπειρίας από την τιμή στόχο στα κράτη μέλη.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Για να διερευνηθεί το επιστημονικό ερώτημα της μελέτης μας ανατρέξαμε στη διεθνή βιβλιογραφία και σε ειδικευμένα επιστημονικά περιοδικά για να διαπιστώσουμε πώς η επιστημονική κοινότητα έχει πλαισιώσει με επιστημονική έρευνα αντίστοιχα ερωτήματα. Η πρώτη σχετική έρευνα πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του ογδόντα και αφορούσε στο πληθυσμό εκείνων των ανθρώπων που ταξίδευαν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρό και διεξήχθη στη Βοστώνη, MA (Chan et al., 1991). Μετά από αυτήν περισσότερες μελέτες ακολούθησαν που προσδιόριζαν τα επίπεδα της μόλυνσης στα συστήματα του μετρό. Μετά από περισσότερο από μια δεκαετία έρευνας, διαφορετικοί μολυσματικοί παράγοντες όπως σωματιδιακή ύλη, PAHs (Fromme et al., 1998; Furuya et al., 2001; Velasco et al., 2004), υδρογονάνθρακες (Dor et al., 1995; Chan et al., 1999), VOCs (Chan et al., 1991; Chan et al., 2003; Shiohara et al., 2005), μονοξείδιο του άνθρακα (Fernandez-Bremauntz and Ashmore, 1995; Dor et al., 1995; Chan et al., 1999; Chan et al., 2002a, b), διοξείδιο του αζώτου (Chan et al., 1999), όζον (Chan et al., 1999), μέταλλα (Chillrud et al., 2004; Seaton et al., 2005; Aarnio et al., 2005) και διαφορετικοί βιολογικοί ρυπογόνοι παράγοντες (Awad, 2002; Birenzige et al., 2003) έχουν μετρηθεί, με χρήση τόσο χρονικά σταθμισμένων δειγματοληπτών όσο και οργάνων ελέγχου και παρακολούθησης των συγκεντρώσεων σε πραγματικό χρόνο.

2.1. Καταγραφή και συστηματοποίηση των ερευνών που διερευνούν τα επίπεδα της σωματιδιακής ύλης που συσσωρεύεται στα δίκτυα του Μετρό

Έρευνες πάνω στον τομέα της αποτίμησης των επιπέδων σωματιδιακής ύλης που συσσωρεύεται στα δίκτυα του μετρό έχουν λάβει χώρα από άκρο σε άκρο του κόσμου όπως: Νέα Υόρκη (Αμερική) (Chillrud et al., 2004), Λονδίνο (Αγγλία) (Adams et al., 2001), Βερολίνο (Γερμανία) (Fromme et al., 1998), Στοκχόλμη (Σουηδία) (Johansson, 2003), Ελσίνκι (Φιλανδία) (Aarnio et al., 2005), Τόκιο (Ιαπωνία) (Furuya et al., 2001), Χονγκ Κονγκ (Chan et al., 2002) κ.α.

Οι Πίνακες 7 και 8 περιλαμβάνουν, για λόγους οικονομίας χώρου, συγκεντρωμένα αποτελέσματα από έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου αναφορικά με τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα συστήματα μετρό. Εν συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα κάποιες από αυτές τις μελέτες.

Πίνακας 7: Επίπεδα PM_{10} (μέση τιμή και εύρος) εκφρασμένα σε $\mu g\ m^{-3}$ για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο.

Πόλη	Εύρος	Μέση τιμή	Περιβάλλον μέτρησης	Αναφορά
Πεκίνο	-	325	Μέσα σε συρμούς	Li et al. (2007)
Λονδίνο		1000-1500	Αποβάθρα σταθμού	Seaton et al. (2005)
Βερολίνο	-	147	Μέσα σε συρμούς	Fromme et al. (1998)
Βουδαπέστη	85-234	180	Αποβάθρα σταθμού	Salma et al. (2007)
Καντόνα	26-123	67	Μέσα σε συρμούς	Chan et al. (2002b)
Χονγκ Κονγκ	23-85	44	Μέσα σε συρμούς	Chan et al. (2002a)
Πράγα	10-210	103	Σε σταθμό	Branis (2006)
	24-218	114	Μέσα σε συρμούς	

Ρώμη	71-877	407	Σε πέντε διαφορετικές αποβάθρες σταθμών	Ripanucci et al. (2006)
Τόκυο		30-120	Σε σταθμούς	Furuya et al. (2001)
Σεούλ	238-480	359	Αποβάθρα σταθμού	Kim et al. (2008)
	289-356	312	Μέσα σε συρμούς	
Σεούλ	-	129	Αποβάθρα σταθμού	Park and Ha (2008)
	-	145	Μέσα σε συρμό	
Στοκχόλμη	212-722	469	Αποβάθρα σταθμού (Εργάσιμες ημέρες)	Johansson and Johansson (2003)
	59-597	336	Αποβάθρα σταθμού (Σαββατοκύριακο)	
Ταϊπέι	11-137	51	Αποβάθρα σταθμού	Yu-Hsiang Cheng et al. (2008)
	10-97	41	Μέσα σε συρμούς	

Πίνακας 8: Επίπεδα $PM_{2.5}$ (μέση τιμή και εύρος) εκφρασμένα σε $\mu g m^{-3}$ για διαφορετικά συστήματα μετρό ανά τον κόσμο.

Πόλη	Εύρος	Μέση τιμή	Περιβάλλον μέτρησης	Αναφορά
Πεκίνο	-	112	Μέσα σε συρμούς	Li et al. (2007)
Λονδίνο	-	270-480	Σε τρεις διαφορετικές	Seaton et al. (2005)
		130-200		

			αποβάθρες σταθμών Μέσα σε τρεις διαφορετικούς συρμούς	
Λονδίνο	-	246	Σε αποβάθρα σταθμού και μέσα σε συρμούς	Pfeifer et al. (1999)
Λονδίνο	12-371	228	Μέσα σε συρμούς	Adams et al. (2001)
Ελσίνκι	23-103 17-26	60 21	Σε σταθμό Μέσα σε συρμούς	Aarnio et al.(2005)
Καντόνα	-	44	Μέσα σε συρμούς	Chan et al. (2002b)
Χονγκ Κονγκ	21-48	33	Μέσα σε συρμούς	Chan et al. (2002a)
Μεξικό	8-68	-	Μέσα σε συρμό σε ώρα αιχμής	Gomez-Perales et al. (2007)
Νέα Υόρκη	-	62	Σε αποβάθρα σταθμού και μέσα σε συρμούς	Chillrud et al. (2004)
Ταϊπέι	7-100 8-68	35 32	Σε αποβάθρα σταθμού Μέσα σε συρμούς	Yu-Hsiang Cheng et al. (2008)
Σεούλ	82-176 115-136	129 126	Αποβάθρα σταθμού Μέσα σε συρμούς	Kim et al. (2008)
Σεούλ	- -	105 117	Αποβάθρα σταθμού Μέσα σε συρμούς	Park and Ha (2008)

Στοκχόλμη	105-388	258	Αποβάθρα σταθμού (Εργάσιμες ημέρες)	Johansson and Johansson (2003)
	24-344	185	Αποβάθρα σταθμού (Σαββατοκύριακο)	

Στο παλαιότερο μετρό του κόσμου, στο Λονδίνο, έχει διεξαχθεί μια περιεκτική μελέτη έκθεσης σε επίπεδα $PM_{2.5}$ γι' αυτούς που ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρό κατά τη διάρκεια δύο εποχών, χειμώνα και καλοκαίρι (Adams et al., 2001a). Η έρευνα έδειξε ότι οι επιβάτες που χρησιμοποιούσαν τις υπόγειες γραμμές του μετρό είχαν μέχρι και οκτώ φορές υψηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με τα επίπεδα έκθεσης που διαπιστώθηκαν σε όσους χρησιμοποιούσαν τις υπέργειες γραμμές του μετρό. Επίσης, οι επιβάτες των υπέργειων συρμών του μετρό παρουσίασαν ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με αυτά των ανθρώπων που ταξίδευαν καθημερινά χρησιμοποιώντας άλλα μέσα μεταφοράς. Η καλοκαιρινή καμπάνια μετρήσεων έδειξε υψηλότερα επίπεδα έκθεσης ($247 \mu g/m^3$) συγκρινόμενη με τη χειμερινή καμπάνια ($157 \mu g/m^3$). Στη συνέχεια ο Seaton et al. (2005) μέτρησε τα επίπεδα συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές μέτρησης και τις συγκεντρώσεις του πλήθους των σωματιδίων (PNC) με στατικούς δειγματολήπτες σε τρεις κατηγορίες ατόμων / χώρων: 1) στους οδηγούς, 2) στο λοιπό προσωπικό και 3) στις αποβάθρες. Τα επίπεδα σε $PM_{2.5}$ ήταν περίπου δύο και τρεις φορές υψηλότερα στις αποβάθρες συγκρινόμενα με αυτά των οδηγών και του λοιπού προσωπικού. Επιπλέον, μετρήσεις αναφορικά με τις συγκεντρώσεις του αριθμού σωματιδίων που έγιναν σε αποβάθρες στην επιφάνεια έδειξαν υψηλότερες κατά αριθμό συγκεντρώσεις σωματιδίων σε σύγκριση με τις υπόγειες· αντίθετα χαμηλότερα ήταν τα επίπεδα των $PM_{2.5}$ στις υπόγειες αποβάθρες σε σύγκριση με αυτές στην επιφάνεια.

Στο μετρό του Βερολίνου τα επίπεδα των PM_{10} , ο συνολικός άνθρακας (TC) και ο στοιχειακός άνθρακας (EC) μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια μετακίνησης μέσα σε ένα ηλεκτρικό τρένο με χρήση σταθμικών δειγματοληπτών αέρα (Fromme et al., 1998).

Τα επίπεδα για όλους τους ρυπογόνους παράγοντες βρέθηκαν να είναι υψηλότερα στο μετρό σε σύγκριση με αυτά στο εσωτερικό ενός ιδιωτικού αυτοκινήτου που ακολουθούσε την ίδια διαδρομή και συγκεκριμένα τα επίπεδα σε PM_{10} ήταν 3.4 φορές υψηλότερα στο μετρό σε σύγκριση με το ιδιωτικό όχημα.

Στη Νέα Υόρκη, μετρήθηκε μια ομάδα μαθητών γυμνασίου, με στόχο την εκτίμηση των πηγών και των επιπέδων μαγνησίου, χρωμίου και σιδήρου μέσα σε περιόδους των 48 ωρών (Chillrud et al., 2004). Βρέθηκε ότι ανάμεσα στην ομάδα των μαθητών οι χρήστες του μετρό είχαν τα υψηλότερα επίπεδα μέσης 48-ώρης έκθεσης και μάλιστα ότι οι συγκεντρώσεις αυτών των τριών στοιχείων στον περιβάλλοντα αέρα ήταν χαμηλότερες κατά δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις συγκεντρώσεις έκθεσης των αναβατών του μετρό.

Ο Furuya et al. (2001) μελέτησε τρεις σταθμούς του μετρό στη ευρύτερη περιοχή του Τόκιο με διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας αέρα. Μετρήθηκε η συγκέντρωση του αριθμού των UFP με χρήση αυτόματων συσκευών μέτρησης. Επίσης, προσδιορίστηκε η συγκέντρωση της μάζας των PM_{10} και η στοιχειακή τους σύνθεση, αποτελούμενη από 13 στοιχεία, με χρήση στατικών δειγματοληπτών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια διαφορετικών εποχών του χρόνου. Η συγκέντρωση μάζας έδειξε εποχιακή διακύμανση και ήταν υψηλότερη το Δεκέμβριο και τον Οκτώβριο ($85-120 \mu\text{g m}^{-3}$) σε σχέση με το Μάρτιο και τον Ιούνιο ($30-85 \mu\text{g m}^{-3}$). Τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στις αποβάθρες του μετρό ήταν υψηλότερα από εκείνα που βρέθηκαν σε επιφανειακές αποβάθρες με διακύμανση μεγέθους $0.5-5.0 \mu\text{m}$.

Στην πόλη της Στοκχόλμης, (Σουηδία), ελήφθησαν μετρήσεις των PM_{10} και $PM_{2.5}$ με αυτόματους μετρητές, σε αποβάθρες μετρό. Έπειτα συγκρίθηκαν με μετρήσεις που ελήφθησαν σε δρόμο έντονης κυκλοφορίας (Johansson και Johansson, 2003). Τα μέσα επίπεδα των PM_{10} και $PM_{2.5}$ υπολογίστηκαν ίσα με 470 και $260 \mu\text{g m}^{-3}$, αντίστοιχα, και ήταν πέντε και δέκα φορές υψηλότερα στις αποβάθρες σε σχέση με αυτά του δρόμου. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, οι τοίχοι στις σήραγγες πλύθηκαν με νερό. Τα επίπεδα σε PM_{10} και $PM_{2.5}$ που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 12 ημερών μετά το καθάρισμα είχαν μειωθεί κατά 13% και 10%, αντίστοιχα, συγκρινόμενα με τα επίπεδα πριν τον καθαρισμό με νερό. Διαπιστώθηκε συνεπώς ότι η σωματιδιακή ύλη από τους τοίχους των σηράγγων συνεπιδρά κατά ένα μικρό ποσοστό στα παρατηρούμενα επίπεδα.

Οι Gomez-Perales et al. (2004) μέτρησαν τα επίπεδα έκθεσης σε $PM_{2.5}$ και επιμέρους χημικά συστατικά τους, σε επιβάτες διαφορετικών μέσων μεταφοράς (συμπεριλαμβανομένου και μετρό) στην πόλη του Μεξικού. Χρησιμοποίησαν προσωπικούς δειγματολήπτες οι οποίοι έπειτα χρησιμοποιήθηκαν και στη μελέτη του Adams στο Λονδίνο (Adams et al., 2001a) τον Μάιο- Ιούνιο 2002. Τα επίπεδα έκθεσης σε $PM_{2.5}$ έδειξαν παρόμοιες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια πρωινών και απογευματινών ωρών αιχμής ($AM = 61 \mu g m^{-3}$) για τους χρήστες του μετρό ενώ η έκθεση των επιβατών στο μετρό ήταν ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με αυτών που χρησιμοποιούσαν λεωφορείο ($AM = 68 \mu g m^{-3}$) και minibus ($AM = 71 \mu g m^{-3}$).

Μετρήσεις βιολογικών και μη βιολογικών σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο, με τη χρήση οπτικού μετρητή αερολυμάτων και αναλυτή φθορισμού σωματιδίων, διενεργήθηκαν σε μια ποιοτική ανάλυση στο μετρό της Ουάσιγκτον το Σεπτέμβριο του 1999 για μία εβδομάδα (Birenzvige, 2003). Οι ώρες κορύφωσης και μη κορύφωσης κυκλοφορίας μετρήθηκαν στο σταθμό του Πενταγώνου. Η συχνότητα διέλευσης των τρένων επηρέασε τη συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης. Αύξηση στα επίπεδα σωματιδιακής ύλης ξεκάθαρα παρατηρήθηκε όταν η λειτουργία των σταθμών ξεκίνησε στις 5.30 πμ. και έφτασε στην υψηλότερη συγκέντρωση της στις 8 πμ.

Ο Aarnio et al. (2005) μέτρησε την συγκέντρωση της μάζας των λεπτόκοκκων σωματιδίων ($PM_{2.5}$) και του αριθμού των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων (UFP) στο σύστημα του μετρό στο Ελσίνκι το Μάρτιο του 2004 και για διάστημα 2 εβδομάδων. Τα μέσα ημερήσια επίπεδα των $PM_{2.5}$ (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) ήταν $47 (\pm 4)$ και $60 (\pm 18) \mu g m^{-3}$ στους δύο υπόγειους σταθμούς του μετρό και $19 (\pm 6)$ και $21 (\pm 4) \mu g m^{-3}$ σε σταθμό ευρισκόμενο στο επίπεδο του εδάφους και στα βαγόνια του μετρό αντίστοιχα. Για την ίδια περίοδο μέτρησης οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ σε τοποθεσία που βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον και σε τοποθεσία που βρίσκεται γειννίαση με δρόμο έντονης κυκλοφορίας ήταν $10 (\pm 7)$ και $17 (\pm 10) \mu g m^{-3}$ αντίστοιχα. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων (μεγέθους μικρότερου από 320 nm) ήταν $31,000 (\pm 14,000)$ σωματίδια cm^{-3} συγκρινόμενη με τα $27,000 (\pm 17,000)$ σωματίδια cm^{-3} που μετρήθηκαν σε θέση αστικού περιβάλλοντος. Για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 500 nm διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις του αριθμού σωματιδίων στον υπόγειο σταθμό του μετρό ήταν όμοιες με αυτές που μετρήθηκαν σε τοποθεσία που βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον.

Στο Κάιρο, ο Awad (2002), μέτρησε τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιώντας σταθμικό δειγματολήπτη. Τα μετρήσιμα επίπεδα ήταν κατά μέσο

όρο 938.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ στους υπόγειους σταθμούς και 447.3 $\mu\text{g m}^{-3}$ στους σταθμούς επιφανείας.

Σε μία μελέτη που διεξήχθη στο Χονγκ Κονγκ, τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα σιδηροδρομικά μέσα μεταφοράς συγκρίθηκαν με τα μέσα μεταφοράς του δρόμου κλιματιζόμενα και μη κλιματιζόμενα, με τη χρήση αυτόματων οργάνου ελέγχου και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (Chan et al., 2002a). Τα επίπεδα έκθεσης σε $\text{PM}_{2.5}$ (AM = 33 $\mu\text{g m}^{-3}$) και PM_{10} (AM = 44 $\mu\text{g m}^{-3}$) στο σύστημα του μετρό ήταν τα χαμηλότερα συγκρινόμενα με τα επίπεδα σε άλλα μέσα μεταφοράς. Μια παρόμοια μελέτη επιβατών διεξήχθη στην Καντόνα, (Κίνα), επίσης με όργανο συνεχούς μέτρησης (Chan et al., 2002b). Τα χαμηλότερα κατά μέσο όρο επίπεδα σε $\text{PM}_{2.5}$ (44 $\mu\text{g m}^{-3}$) και PM_{10} (55 $\mu\text{g m}^{-3}$) μετρήθηκαν στο μετρό σε σύγκριση με όλα τα άλλα μέσα μεταφοράς.

Τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης, όπως συνάγεται από τα ανωτέρω, δεν ήταν πάντα άμεσα συγκρίσιμα ανάμεσα στις διαφορετικές μελέτες, επειδή κάποιες μελέτες χρησιμοποιούσαν στατικούς δειγματολήπτες για να μετρήσουν τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης, ενώ άλλες χρησιμοποιούσαν εξοπλισμό συνεχούς καταγραφής. Μια από τις δυσκολίες που παρουσιάζονται στις μελέτες της προσωπικής έκθεσης επιβατών κατά την διάρκεια πραγματικών ταξιδιών, είναι ο μικρός χρόνος δειγματοληψίας. Για τα επίπεδα συγκέντρωσης που μετρώνται, ο χρόνος αυτός δεν είναι συχνά επαρκής για την συλλογή μετρήσιμων ποσοτήτων σωματιδιακής ύλης από τους σταθμικούς δειγματολήπτες. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τον οποίο κάποιες μελέτες τάσσονται υπέρ της στατικής δειγματοληψίας, ακόμη και όταν αυτές δεν παρέχουν αντιπροσωπευτικά δείγματα, όσον αφορά την προσωπική έκθεση.

Ο Adams (2001) σχεδίασε το δικό του προσωπικό σταθμικό δειγματολήπτη, με σχετικά υψηλό ρυθμό ροής (161 min^{-1}) και αυτό το όργανο μεταγενέστερα χρησιμοποιήθηκε από τους Gomez-Perales et al. (2004,2007) στη πόλη του Μεξικού, διευκολύνοντας τη σύγκριση αποτελεσμάτων. Ο Chan et al. (2002a,b) από την άλλη πλευρά χρησιμοποίησε ένα DustTrak (Μοντέλο 8520, TSI, Inc.), ένα φωτόμετρο που καταγράφει τις συγκεντρώσεις σε πραγματικό χρόνο, στα πλαίσια μετρήσεων των επιπέδων σωματιδιακής ύλης στο Χονγκ Κονγκ και στην Καντόνα. Το παραπάνω όργανο χρησιμοποιήθηκε και στη παρούσα μελέτη όπως και σε αρκετές μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορα μέρη του κόσμου, γεγονός που διευκόλυνε την άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων.

2.2. Καταγραφή και συστηματοποίηση των ερευνών που συσχετίζουν την επίδραση της λειτουργίας του μετρό με τη δημόσια υγεία

Έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε διάφορες χώρες του κόσμου έχουν δείξει ότι το μετρό συνεπιδρά σημαντικά στην ολική έκθεση που υφίσταται το άτομο. Όσοι ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρό, παρόλο που ξοδεύουν ένα μικρό τμήμα της ημέρας τους μέσα σε αυτό, έχει αποδειχθεί ότι, αν τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης είναι υψηλά, ακόμα και κατά τη διάρκεια μικρών χρονικά διαδρομών, μπορούν να επιδράσουν σημαντικά στην ολική έκθεση του ατόμου και να σχετίζονται με οποιοδήποτε μελλοντικό πρόβλημα υγείας. Ο Seaton et al. (2005) υπολόγισε ότι για το μετρό του Λονδίνου και συγκεκριμένα για την κατηγορία των ανθρώπων που ταξιδεύουν καθημερινά χρησιμοποιώντας ως μέσο μεταφοράς το μετρό, ξοδεύοντας δύο ώρες την ημέρα σ'αυτό, επίκειται αύξηση της ημερήσιας έκθεσης τους κατά $17 \mu\text{g m}^{-3}$.

Ο Aarnio et al. (2005) παρείχε έναν πρόχειρο υπολογισμό για την πρόσθετη έκθεση που προκαλείται από τη μετακίνηση με μετρό στο Ελσίνκι, υποθέτοντας 1) παραμονή 30 λεπτών/ημέρα στο βαγόνι του μετρό, 2) 4 λεπτών στον υπόγειο σταθμό και 3) 5 λεπτών σε σταθμό που βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους (με βάση τα διαστήματα αναχώρησης των τρένων). Η συγκέντρωση έκθεσης για το υπόλοιπο της ημέρας υποτέθηκε ότι είναι ο ετήσιος μέσος όρος ενός σταθμού που βρίσκεται σε αστικό περιβάλλον. Τα αποτελέσματά του έδειξαν ότι η μετακίνηση με το μετρό επιδρά κατά 3% σε ό,τι αφορά τα επίπεδα έκθεσης σε $\text{PM}_{2.5}$, και σε αρκετά μεγάλα ποσοστά σε ό,τι αφορά διάφορα μέταλλα.

Παρόλο που άλλες μελέτες δεν έχουν υπολογίσει συγκεκριμένα την επίδραση του μετρό στη συνολική έκθεση, εντούτοις έχουν αναγνωρίσει ότι το μετρό είναι μια σημαντική πηγή που επιδρά στην ολική έκθεση. Ο Pfeiffer (1996) συνέκρινε την έκθεση σε μαγγάνιο στους οδηγούς ταξί και στο προσωπικό ενός γραφείου στο Λονδίνο και τα αποτελέσματα της έρευνάς του έδειξαν ότι το προσωπικό του γραφείου εμφάνισε υψηλότερη έκθεση σε μαγγάνιο σε σύγκριση με τους οδηγούς ταξί. Επιπλέον, περαιτέρω έρευνα έδειξε ότι η ομάδα από το προσωπικό του γραφείου που ταξίδευε υπογείως εμφάνισε υψηλότερη έκθεση σε μαγγάνιο. Επιπρόσθετα, η συγκέντρωση της ολικά αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης ήταν κάπως υψηλότερη στην ομάδα εκείνη του προσωπικού που ταξίδευε υπογείως σε σύγκριση με τους

οδηγούς ταξί. Περαιτέρω μετρήσεις έδειξαν ότι η κατά μέσο όρο συγκέντρωση έκθεσης σε PM_{2.5} και TSP ήταν οκτώ και δώδεκα φορές υψηλότερη για τα άτομα που ταξίδευαν με το μετρό συγκρινόμενη με τους οδηγούς ταξί.

Ο Chillrud et al (2004) στα πλαίσια έρευνας που έλαβε χώρα σε 38 μαθητές στη Νέα Υόρκη κατά τη διάρκεια της 24 ώρης παρακολούθησης τους αναγνώρισε το μετρό σαν μια πηγή για αυξημένα επίπεδα έκθεσης σε διάφορα μέταλλα και υποστήριξε την άποψη ότι η κύρια αιτία έκθεσης για αυτά τα μέταλλα είναι το μετρό.

Στις μελέτες που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρατηρούμε ότι μερικές έχουν αναφέρει υψηλότερα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στο σύστημα του μετρό (π.χ Λονδίνο, Ελσίνκι, Στοκχόλμη) σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς, ενώ άλλες μελέτες ανέφεραν χαμηλότερα επίπεδα στο σύστημα του μετρό (π.χ Χονγκ Κονγκ, Πόλη Μεξικού). Γενικά, αυτά τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι σε μερικές περιπτώσεις, το μετρό μπορεί να ασκήσει σημαντική επίδραση στην ολική έκθεση των επιβατών, ακόμη και αν ο χρόνος που ξοδεύεται μέσα σε αυτό είναι σχετικά μικρός.

2.3. Καταγραφή και συστηματοποίηση των επιδράσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων στο Μετρό σύμφωνα με τις τοξικολογικές και επιδημιολογικές μελέτες

Επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει δυσμενείς επιδράσεις στην υγεία από την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια. Οι μηχανισμοί πίσω από αυτές τις επιδράσεις περιλαμβάνουν οξειδωτικό στρες και φλεγμονή. Η τοξικότητα της σκόνης έχει δοκιμαστεί μόνο στο εργαστήριο και καμία ολοκληρωμένη μελέτη δεν έχει δημοσιευτεί που να έχει διεξαχθεί σε άνθρωπο ή ζώο, γεγονός που κάνει πιο δύσκολο να υπολογίσουμε τους κινδύνους που δημιουργούνται στην υγεία για τον άνθρωπο.

Ο Seaton et al. (2005) περισυνέλεξε τη σωματιδιακή ύλη που συγκέντρωσαν στο μετρό του Λονδίνου από τα φίλτρα και διεξήγαγε έναν αριθμό από τοξικολογικές δοκιμές σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η τοξικότητα της σκόνης ήταν συγκρίσιμη με τη σκόνη από οξυγονοκόλληση, περισσότερο τοξική από το διοξείδιο του τιτανίου και αισθητά λιγότερο τοξική από το χαλαζία.

Ο Karlsson et al. (2005) συνέκρινε την ικανότητα των σωματιδίων που παράγονται από ένα σταθμό του μετρό και ένα γειτονικό πολυσύχναστο αστικό δρόμο, αντίστοιχα, στο να προκαλέσουν καταστροφή του DNA και να επιφέρουν οξειδωτικό

στρες . Ανακάλυψαν ότι τα σωματίδια του μετρό ήταν περίπου οκτώ φορές πιο βλαβερά, τοξικά για τα γονίδια και τέσσερις φορές πιο επικίνδυνα να επιφέρουν οξειδωτικό στρες στα κύτταρα των πνευμόνων. Η οξειδωτική ικανότητα των σωματιδίων του μετρό οφειλόταν στη δράση ενεργών στερεών μετάλλων. Μάλιστα με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διαπιστώθηκε ότι η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα σωματίδια και στα κύτταρα των πνευμόνων ήταν εμφανής.

Η υψηλότερη τοξικότητα μπορεί να οφείλεται στην υψηλότερη περιεκτικότητα σε σίδηρο. Ο Karlsson et al. (2005), έδειξε ότι το οξυγόνο και ο σίδηρος είναι τα κυρίαρχα συστατικά που αποτελούν ένα τυπικό σωματίδιο που παράγεται από το μετρό και μάλιστα ότι η τοξικολογική σημασία των ποσοτήτων σιδήρου στα αιωρούμενα σωματίδια εξαρτάται από το στάδιο οξείδωσης. Ο σίδηρος που περιέχεται στα σωματίδια που παράγονται από το δρόμο εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή αιματίτη (Fe_2O_3), ενώ ο σίδηρος που περιέχεται στα σωματίδια που παράγονται από το μετρό εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή μαγνητίτη (Fe_3O_4). Αυτό εξηγεί την οξειδωτική ικανότητα των σωματιδίων του μετρό, αφού ο μαγνητίτης εμφανίζεται σε δύο μορφές Fe^{+2} και Fe^{+3} .

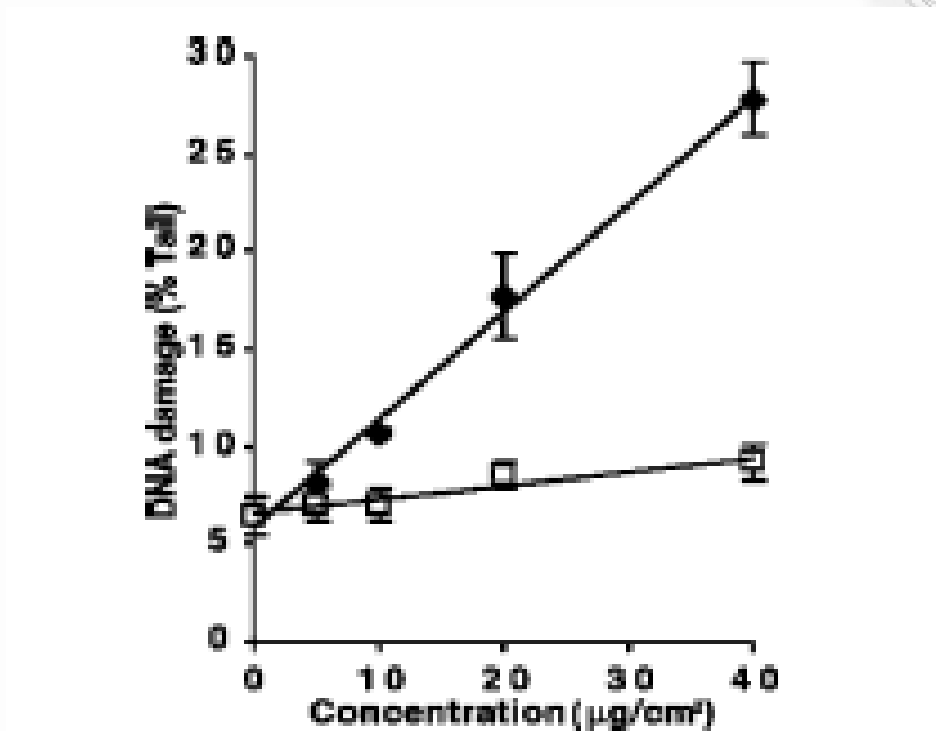
Περαιτέρω έρευνα χρειάζεται για να προσδιορίσουμε τους ακριβείς μηχανισμούς δράσης των αιωρούμενων σωματιδίων από το μετρό.

Η έλλειψη επιδημιολογικών μελετών μπορεί να οφείλεται στις δυσκολίες πραγματοποίησης τέτοιου είδους μελετών αλλά και στο ότι μέχρι τώρα δεν υπήρχαν συγκεκριμένες ανησυχίες. Οι υπάλληλοι του μετρό αποτελούν μια αντιπροσωπευτική ομάδα για μελέτη καθώς βρίσκονται πολλή ώρα σε αυτό σε αντίθεση με το πλήθος κόσμου που απλά το χρησιμοποιεί ως μέσο μεταφοράς. Από την άλλη, παρόλο που η διάρκεια έκθεσης των επιβατών στο σύστημα του μετρό είναι μικρή, η ένταση της έκθεσης και ο υψηλός αριθμός των ατόμων που κινούνται καθημερινά σε αυτό (συμπεριλαμβανομένου και ευαίσθητων ομάδων, όπως οι ηλικιωμένοι και οι ασθματικοί) σε συνδυασμό με την αυξημένη τοξικότητα των σωματιδίων του μετρό, (Karlsson et al., 2005), αποτελούν καλούς λόγους για περαιτέρω εξέταση των πιθανών επιδράσεων στην υγεία που προκαλούνται από τα σωματίδια που παράγονται στο σύστημα του μετρό.

Η εικόνα 2 απεικονίζει την καταστροφή που προκαλείται στο DNA στα ανθρώπινα κύτταρα του πνεύμονα μετά από έκθεση σε σωματίδια που παράγονται 1) από το μετρό και 2) από έναν αστικό δρόμο αντίστοιχα. Κάθε σημείο αντιπροσωπεύει το μέσο όρο τεσσάρων ανεξαρτήτων πειραμάτων \pm SD (τυπική απόκλιση). Η κλίση

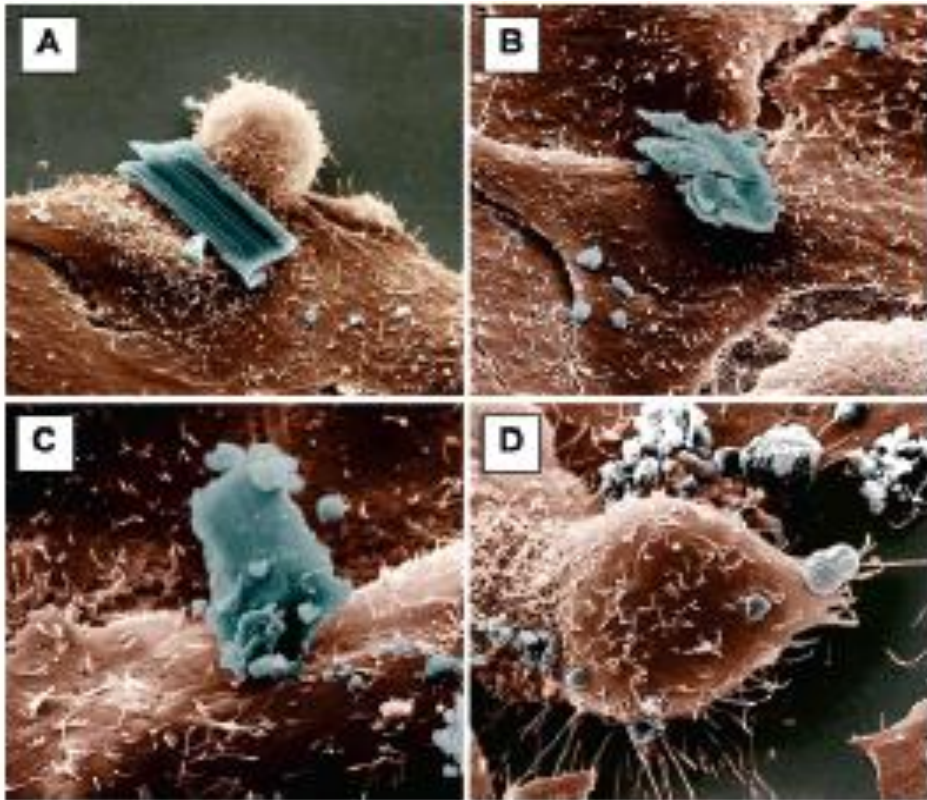
της καμπύλης είναι οκτώ φορές μεγαλύτερη για τα σωματίδια που παράγονται από το μετρό (Karlsson et al. 2005).

Εικόνα 2



Στην εικ. 3 απεικονίζονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ανθρώπινα κύτταρα του πνεύμονα, τα οποία έχουν εκτεθεί σε σωματίδια. Οι εικόνες A-C απεικονίζουν σωματίδια που παράγονται από το μετρό ενώ η εικόνα D αντιπροσωπεύει σωματίδια που δημιουργούνται σε αστικό δρόμο. Όπως φαίνεται από τις εικόνες, τα σωματίδια είναι προσκολλημένα στα κύτταρα. Οι εικόνες A και B απεικονίζουν σωματίδια με πλάτος περίπου 6 μm , η εικόνα C σωματίδιο πλάτους 4 μm και τέλος η εικόνα D σωματίδιο πλάτους 1 μm (Karlsson et al. 2005).

Εικόνα 3



3. Ο υπόγειος σιδηρόδρομος (το μετρό) στην Αθήνα, Ελλάδα

Τα συστήματα ΜΕΤΡΟ (ή "υπόγεια" συστήματα, όπως αναφέρονται) έχουν θεωρηθεί σαν ένα σημαντικό μέσο, ώστε να βελτιώσουν την ποιότητα της μεταφοράς, να ανακουφίσουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση και να ενισχύσουν την ανεπάρκεια στις δημόσιες μεταφορές (Vasconcellos, 2001).

Η λειτουργία του μετρό ξεκίνησε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Το αρχαιότερο μετρό του κόσμου ήταν αυτό του Λονδίνου με τον ατμό ως πρώτη πηγή ενέργειας (Fischler,2001). Μερικά χρόνια αργότερα, στη Βοστώνη λειτούργησε το πρώτο ηλεκτρικό μετρό στην Αμερικανική ήπειρο. Επιπρόσθετα το πρώτο που λειτούργησε στην ηπειρωτική Ευρώπη ήταν το μετρό της Βουδαπέστης. Αναμφίβολα, στον παρόντα χρόνο το μετρό είναι το σύστημα δημόσιας μεταφοράς που μεταφέρει περισσότερους επιβάτες από κάθε άλλο μέσο ανά δρομολόγιο σε μερικές αστικές περιοχές. Εκατομμύρια άνθρωποι περνούν ένα μέρος της ζωής τους μετακινούμενοι σε συστήματα μετρό.

3.1. Γενικά χαρακτηριστικά του υπόγειου σιδηροδρόμου (μετρό) στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα σήμερα και συγκεκριμένα στην Αθήνα λειτουργούν δύο Γραμμές του Μετρό. 1) Η Γραμμή 2 (Άγιος Αντώνιος - Άγιος Δημήτριος • Αλέξανδρος Παναγούλης) με δεκατέσσερις (14) σταθμούς και μήκος γραμμής 10,9 χιλιόμετρα. 2) Η Γραμμή 3 (Αιγάλεω - Δουκίσσης Πλακεντίας) με δεκατέσσερις (14) σταθμούς και μήκος γραμμής 16,4 χιλιόμετρα.

Συνέχεια της Γραμμής 3 αποτελεί διαδρομή μήκους 21,2 χιλιομέτρων στο δίκτυο του Προαστιακού σιδηροδρόμου, μέσω της οποίας ο Διεθνής Αερολιμένας Αθηνών Ελευθέριος Βενιζέλος, καθώς και η περιοχή των Μεσογείων, εξυπηρετούνται για την απευθείας σύνδεσή τους με το κέντρο της πόλης με συρμούς του μετρό, από τους τέσσερις (4) σταθμούς: Αεροδρόμιο, Κορωπί, Παιανία - Κάντζα και Παλλήνη.

Οι γραμμές του μετρό άρχισαν να κατασκευάζονται στα τέλη του 1992. Τον Ιανουάριο του 2000 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο τμήμα του έργου: η Γραμμή 2: «Σύνταγμα-Σεπόλια» και η Γραμμή 3: «Εθνική Άμυνα-Σύνταγμα», συνολικού μήκους 13 χλμ. με δεκατέσσερις (14) σταθμούς. Το Νοέμβριο του 2000 προστέθηκε στο δίκτυο το τμήμα της Γραμμής 2: «Σύνταγμα-Δάφνη, μήκους 5 χλμ. με πέντε (5) νέους σταθμούς. Τον Απρίλιο του 2003 προστέθηκε στο δίκτυο του Μετρό το τμήμα της γραμμής 3: «Σύνταγμα-Μοναστηράκι» μήκους 1,5 χλμ.

Επίσης, το καλοκαίρι του 2004 παραδόθηκαν οι πρώτες επεκτάσεις του δικτύου:

- Η Γραμμή 3: «Μοναστηράκι – Εθνική Άμυνα» επεκτάθηκε υπογείως προς τα βόρεια (κατά 5,9 χλμ.) έως τον σταθμό Δουκίσσης Πλακεντίας και από εκεί οι νέοι συρμοί του Μετρό αναδύθηκαν στην επιφάνεια και μέσω των γραμμών του Προαστιακού Σιδηροδρόμου έφθασαν στο σταθμό του Διεθνούς Αεροδρομίου Αθηνών “Ελευθέριος Βενιζέλος”.
- Η Γραμμή 2: «Σεπόλια – Δάφνη» επεκτάθηκε και στα δύο της άκρα και το μετρό πλέον έφτασε δυτικότερα στο σταθμό Άγιο Αντώνιο (Περιστερί) και νοτιότερα στο σταθμό Άγιο Δημήτριο/Αλέκο Παναγούλη.

Το Μάιο του 2007 εντάχθηκε στο δίκτυο του Μετρό η επέκταση της Γραμμής 3 από το Μοναστηράκι έως το Αιγάλεω, μήκους 4,2 χλμ. με τρεις (3) νέους σύγχρονους σταθμούς, βελτιώνοντας σημαντικά τη συγκοινωνιακή εξυπηρέτηση των κατοίκων των Δυτικών Προαστίων.

Το δίκτυο του Μετρό συνεχίζει να επεκτείνεται με νέους σταθμούς και ήδη σε προχωρημένο στάδιο κατασκευής βρίσκεται η περαιτέρω επέκταση της Γραμμής 3 προς το Χαϊδάρι, μήκους 1,5 χλμ. με έναν νέο σταθμό, ενώ στο στάδιο αρχιτεκτονικών τελειωμάτων βρίσκονται τα έργα στους σταθμούς: «Περιστέρι και Ανθούπολη».

Το έργο της επέκτασης της Γραμμής 2 προς το Ελληνικό θα προσθέσει στο δίκτυο του Μετρό της Αθήνας 5,5 χλμ. υπόγειας γραμμής και τέσσερις (4) νέους σταθμούς: «Ηλιούπολη, Άλιμος, Αργυρούπολη, Ελληνικό».

Ένα από τα πιο σημαντικά και εξίσου πολύπλοκα έργα που λαμβάνουν χώρα σήμερα είναι η κατασκευή Μετρό στη Θεσσαλονίκη. Η Σύμβαση για την κατασκευή Μετρό μήκους 9,6 χλμ. με δεκατρείς (13) σύγχρονους σταθμούς υπογράφηκε στις 7 Απριλίου 2006 και οι κατασκευαστικές εργασίες του έργου βρίσκονται ήδη σε προχωρημένο στάδιο.

Σε πλήρη εξέλιξη βρίσκονται σήμερα οι κατασκευαστικές εργασίες στους νέους σταθμούς της Γραμμής 3: «Χολαργός και Αγία Παρασκευή». Ο σταθμός «Νομισματοκοπείο» δόθηκε στο επιβατικό κοινό στις 2 Σεπτεμβρίου 2009, ενώ σύντομα αναμένεται να λειτουργήσει και ο σταθμός Χολαργός.

Το Μετρό της Αθήνας επεκτείνεται και προς την «Αγία Βαρβάρα», τον «Κορυδαλλό», τη «Νίκαια», τα «Μανιάτικα» και τον «Πειραιά» με έξι (6) νέους σταθμούς και 7,6 χλμ. επιπλέον υπόγειας γραμμής.

Παράλληλα, προχωρεί η υλοποίηση νέων επεκτάσεων του δικτύου και ήδη σε εξέλιξη βρίσκεται ο διαγωνισμός για την περαιτέρω επέκταση της Γραμμής 3 από το Χαϊδάρι μέχρι τον Πειραιά, προκειμένου ο Δήμος Πειραιά να αποκτήσει τρεις (3) σταθμούς Μετρό και να συνδεθεί με το Αεροδρόμιο. Επίσης, το Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων εξετάζει όλους τους πιθανούς τρόπους

χρηματοδότησης για την κατασκευή μιας νέας γραμμής, η οποία-με τον εκτιμώμενο αριθμό των επιβατών να ανέρχεται στις 400.000 σε καθημερινή βάση- αναμένεται να αλλάξει δραστικά το συγκοινωνιακό χάρτη της Αθήνας, αλλά και να αναβαθμίσει σημαντικά τη ζωή στο Λεκανοπέδιο. Πρόκειται για τη Γραμμή 4, μήκους 20,9 χλμ. με είκοσι (20) Σταθμούς η οποία θα καλύψει τη διαδρομή: «Άλσος Βεΐκου – Πανεπιστήμιο – Ευαγγελισμός – Άνω Ιλίσια – Κατεχάκη – Μαρούσι».

3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά (Τροχαίο υλικό)

Στο μετρό έχουν τεθεί σε εφαρμογή δύο είδη συρμών. Οι συρμοί πρώτοι γενιάς και οι συρμοί δεύτερης γενιάς. Οι τελευταίοι λειτουργούν σήμερα, είναι υπερσύγχρονοι και μαζί με τους πρώτους εξυπηρετούν τις ανάγκες του επιβατικού κοινού.

Στον πίνακα 9 και στον πίνακα 10 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συρμών πρώτης και δεύτερης γενιάς αντίστοιχα:

Πίνακας 9: Συρμοί πρώτης γενιάς

Γενικές πληροφορίες	
Αριθμός Συρμών	28 (Γραμμές 2 και 3)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Πόρτες ανά Όχημα	4 ανά πλευρά
Χωρητικότητα Συρμού	224 Καθίσματα 806 όρθιοι (5 Επιβάτες / τ.μ.) 1030 Επιβάτες / Συρμό
Διευκολύνσεις Επιβατών	Αερισμός με Αέρα Βεβιασμένης Κυκλοφορίας Σύστημα Αυτόματων Ανακοινώσεων Σταθμών
Τεχνικά χαρακτηριστικά	
Διαμόρφωση Συρμού	Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων πλάτη με πλάτη Ιθυνήριο Όχημα - Κινητήριο Όχημα - Κινητήριο Όχημα.
Μήκος συρμού	106μ.
Πλάτος Οχήματος	2800χιλ.
Ύψος Οχήματος	3600χιλ.
Εσωτερικό Ύψος Οροφής Οχήματος	2180χιλ.
Βάρος Συρμού	178 τόνοι κενός 245 τόνοι με πλήρες φορτίο
Εύρος Τροχιάς	1435χιλ.
Πέδηση	Αναγεννητική - Δυναμική / Πνευματική Πέδηση
Μέση Επιτάχυνση	1.00μ. / δευτερόλεπτο ²
Μέση Επιβράδυνση	1.08μ. / δευτ.2 (Υπό Κανονικές Συνθήκες) 1.20μ. / δευτ.2 (Σε Συνθήκες Έκτακτης

	Ανάγκης)
Μέγιστη Ταχύτητα	80χλμ. / ώρα
Κατασκευή Αμαξώματος	Ανοξείδωτος Χάλυβας

Πίνακας 10: Συρμοί δεύτερης γενιάς

Γενικές πληροφορίες	
Αριθμός Συρμών	21 (7 Συρμοί DC/AC και 14 Συρμοί DC)
Σύνθεση Συρμού	6 Οχήματα
Πόρτες ανά Όχημα	4 ολισθαίνουσες θύρες εφαρμοστού τύπου ανά πλευρά
Χωρητικότητα Συρμών DC	196 Καθίσματα 866 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1062 Επιβάτες/Συρμό
Χωρητικότητα Συρμών DC-AC	158 Καθίσματα 868 όρθιοι (5 Επιβάτες/τ.μ.) 1026 Επιβάτες/Συρμό
Διευκολύνσεις Επιβατών	Κλιματισμός στους Συρμούς. Εσωτερικές πινακίδες προορισμού με δυνατότητες εναλλασσόμενων μηνυμάτων. Χώροι αποκλειστικής χρήσης από άτομα με ειδικές ανάγκες. Γέφυρες επικοινωνίας μεγάλου εύρους που επιτρέπουν να κατανέμεται ισομερώς η φόρτιση των επιβατών στα οχήματα. Κομβία ανοίγματος θυρών προς χρήση από τους επιβάτες σε ώρες μη αιχμής
Τεχνικά χαρακτηριστικά	
Διαμόρφωση Συρμού	Δύο μονάδες τριών (3) οχημάτων συνδεδεμένων κατοπτρικά Κινητήριο/Ιθυστήριο Όχημα - Ρυμουλκούμενο Όχημα - Κινητήριο Όχημα
Μήκος συρμού	106μ.
Πλάτος Οχήματος	2800χιλ.
Ύψος Οχήματος	3600χιλ.
Εσωτερικό Ύψος Οροφής Οχήματος	2100χιλ. έως 2200χιλ.
Βάρος Συρμού DC/AC	202 τόνοι κενός 275 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Βάρος Συρμού DC	182 τόνοι κενός 255 τόνοι (5 Επιβάτες/τ.μ.)
Εύρος Τροχιάς	1435χιλ.
Πέδηση	Ανάκτησης

	ενέργειας/Δυναμική/Πνευματική
Μέση Επιτάχυνση	1.00μ. / δευτερόλεπτο ²
Μέση Επιβράδυνση	1,1μ./δευτ.2 (Υπό Κανονικές Συνθήκες) 1,20μ./δευτ.2 (Σε Συνθήκες Έκτακτης Ανάγκης)
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC/AC	120χλμ. / ώρα
Μέγιστη Ταχύτητα Συρμού DC	80χλμ. / ώρα
Κατασκευή Αμαξώματος	Ανοξειδωτος Χάλυβας

3.3. Ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα

3.3.1. Αερισμός

Τα συστήματα αερισμού του μετρό χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στο σύστημα αερισμού σηράγγων και χώρων κοινού στους σταθμούς και στα διάφορα άλλα επιμέρους συστήματα αερισμού για όλους τους χώρους προσωπικού καθώς και για όλους τους τεχνικούς χώρους που υπάρχουν διάσπαρτοι μέσα σε κάθε σταθμό. Το σύστημα αερισμού σηράγγων και χώρων κοινού στους σταθμούς παρέχει νωπό αέρα για αερισμό σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας και για την απαγωγή καπνού σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, τα συστήματα αερισμού στα αμαξοστάσια και τους σταθμούς εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία του τεχνικού εξοπλισμού και εξασφαλίζουν τις κατάλληλες συνθήκες εργασίας για το προσωπικό.

3.3.2. Ψύξη-Θέρμανση

Μονάδες ψύξης – θέρμανσης υπάρχουν σε όλους τους σταθμούς και στα αμαξοστάσια του μετρό καθώς και σε χώρους όπου λειτουργεί ευαίσθητος εξοπλισμός, προσφέροντας ιδανικές συνθήκες εργασίας στο προσωπικό. Οι χώροι κοινού των σταθμών δεν απαιτούν θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες, αφενός γιατί το σύστημα του μετρό βρίσκεται σε μεγάλο βάθος όπου δεν υφίστανται μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, και αφετέρου διότι η συνεχής λειτουργία των συρμών και του εξοπλισμού εκλύει πρόσθετη θερμότητα. Επιπροσθέτως, σε όλους τους σταθμούς του μετρό υπάρχουν εφεδρικοί χώροι όπου δύναται στο μέλλον να εγκατασταθούν μηχανήματα κλιματισμού στους χώρους κοινού.

3.4. Στατιστικά στοιχεία επιβατικής κίνησης

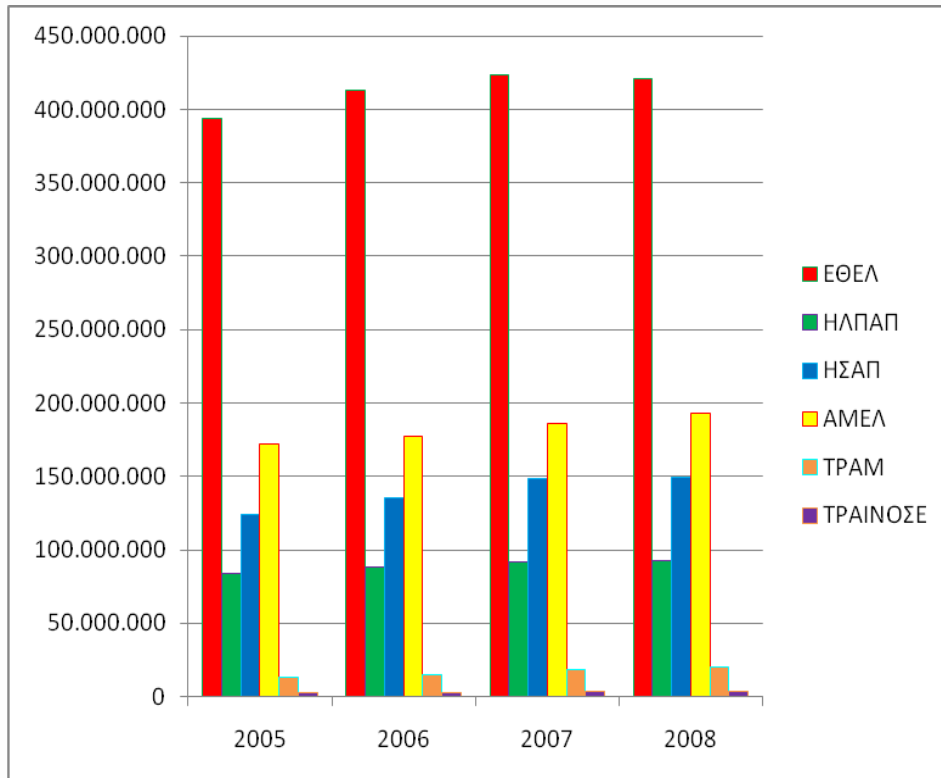
Η επιβατική κίνηση ανά φορέα για τα έτη 2005 έως και 2008 παρουσιάζεται στον Πίνακα 11: (για το έτος 2009 δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία).

Πίνακας 11: Ετήσια επιβατική κίνηση

	2005	2006	2007	2008
ΕΘΕΛ	393.611.762	413.292.350	423.509.574	421.080.000
ΗΛΠΑΠ	84.231.072	88.442.626	91.815.297	92.200.000
ΗΣΑΠ	124.038.181	135.821.809	148.725.181	149.050.000
ΑΜΕΛ	172.197.626	177.363.555	185.719.257	193.100.000
ΤΡΑΜ	12.922.259	14.488.146	18.729.130	19.800.000
ΤΡΑΙΝΟΣΕ	2.905.457	2.741.216	3.345.974	3.500.000
Σύνολο	789.906.358	832.149.702	871.844.413	878.730.000

Πηγή: Έκθεση Πεπραγμένων, Περιόδου 1.1.2008-31.12.2008, ΟΑΣΑ.

ΕΠΙΒΑΤΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΦΟΡΕΩΝ 2005-2008



Κατά τη διάρκεια του 2009 ο συνολικός αριθμός επιβιβάσεων στο μετρό ανήλθε σε 178.246.208 και η μέση ημερήσια επιβατική κίνηση έφτασε στις 571.532 επιβιβάσεις. Αντίθετα το έτος 2008 η μέση ημερήσια επιβατική κίνηση ανήλθε σε 631.092 επιβιβάσεις.

Σε ό,τι αφορά την κατάταξη των σταθμών ανάλογα με την κατανομή των επιβιβάσεων για το έτος 2009, στην πρώτη θέση βρίσκεται ο σταθμός του Συντάγματος, αφού εκεί επιβιβάζεται το 9,70% του συνόλου των επιβατών.

Ακολουθούν οι σταθμοί «Πανεπιστήμιο» με 5,99%, «Ομόνοια» με 5,87%, «Άγιος Δημήτριος» με 5,43%, «Αμπελόκηποι» με 5,38% και «Άγιος Αντώνιος» με 4,95%.

Αντίστοιχα για το έτος 2008, στην πρώτη θέση βρισκόταν επίσης ο σταθμός του Συντάγματος με ποσοστό 9,58% του συνόλου των επιβατών. Ακολουθούσαν οι σταθμοί «Ομόνοια» με 7,42%, «Πανεπιστήμιο» με 5,76%, «Άγιος Δημήτριος» με 5,65%, «Αμπελόκηποι» με 5,28% και «Άγιος Αντώνιος» με 5,15%.

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα ποσοστά επιβιβάσεων ανά σταθμό και για τις δύο γραμμές του μετρό για το έτος 2009.

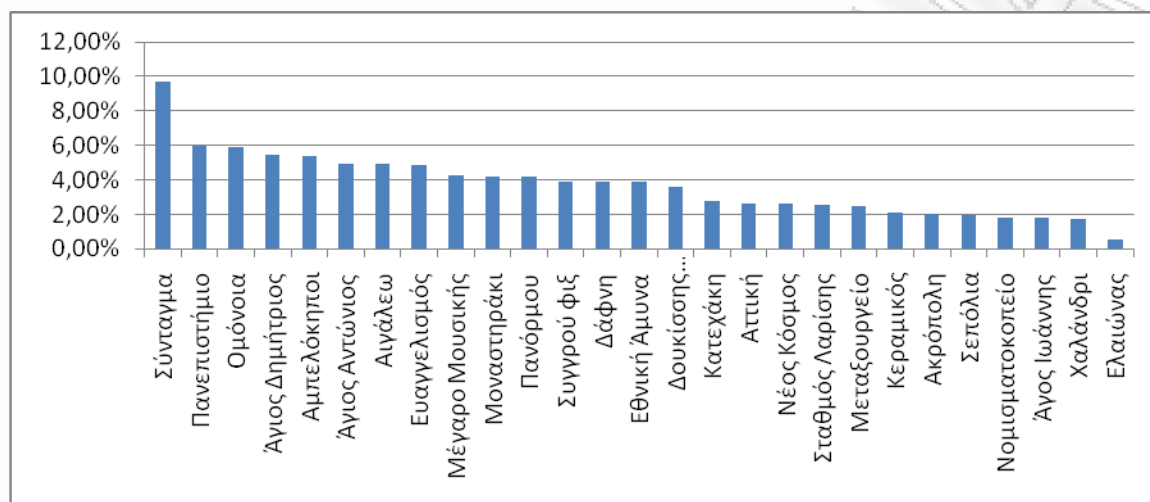
Πίνακας 12: Ποσοστά επιβιβάσεων ανά σταθμό για το έτος 2009

Σύνταγμα	9,70%
Πανεπιστήμιο	5,99%
Ομόνοια	5,87%
Άγιος Δημήτριος	5,43%
Αμπελόκηποι	5,38%
Άγιος Αντώνιος	4,95%
Αιγάλεω	4,94%
Ευαγγελισμός	4,87%
Μέγαρο Μουσικής	4,24%
Μοναστηράκι	4,18%
Πανόρμου	4,16%
Συγγρού φιξ	3,92%
Δάφνη	3,91%
Εθνική Άμυνα	3,86%
Δουκίσσης Πλακεντίας	3,57%
Κατεχάκη	2,80%
Αττική	2,61%
Νέος Κόσμος	2,60%
Σταθμός Λαρίσης	2,55%
Μεταξουργείο	2,45%
Κεραμικός	2,09%
Ακρόπολη	2,06%
Σεπόλια	1,97%
Νομισματοκοπέιο	1,81%
Άγος Ιωάννης	1,78%
Χαλάνδρι	1,75%
Ελαιώνας	0,53%

Πηγή: Ιστοσελίδα της Αττικό Μετρό Εταιρία Λειτουργίας Α.Ε.

Συμπεραίνεται ότι οι επιβιβάσεις κατανέμονται περίπου εξίσου στις δύο γραμμές (50%-50%).

Κατανομή επιβατικής κίνησης ανά σταθμό.



II. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΡΟΣ

4. Μεθοδολογία

4.1. Σχεδιασμός δειγματοληψίας

Το σχήμα 4 απεικονίζει το χάρτη της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας, το σιδηροδρομικό δίκτυο της Αθήνας καθώς και τις περιοχές, σταθμούς, όπου έλαβαν χώρα οι μετρήσεις (μπλε γραμμή, γραμμή 3). Για τη διαδρομή «Εθνική Άμυνα – Αιγάλεω» και για τους έντεκα (11) σταθμούς της μετρήθηκαν τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης PM_{10} . Μετρήσεις δεν έλαβαν χώρα για τη διαδρομή «Εθνική Άμυνα- Δουκίσσης Πλακεντίας», λόγω κατασκευαστικών έργων στους σταθμούς «Χολαργό», «Αγία Παρασκευή», «Νομισματοκοπείο». Η γραμμή αυτή είναι υπόγεια σε όλα τα σημεία της και αποτελείται από έντεκα (11) σταθμούς οι οποίοι είναι: 1) Αιγάλεω (Σ1), 2) Κεραμεικός (Σ2), 3) Ελαιώνας (Σ3), 4) Μοναστηράκι (Σ4), 5) Σύνταγμα (Σ5), 6) Ευαγγελισμός (Σ6), 7) Μέγαρο Μουσικής (Σ7), 8) Αμπελόκηποι (Σ8), 9) Πανόρμου (Σ9), 10) Κατεχάκη (Σ10) και 11) Εθνική Άμυνα (Σ11).

Όλοι οι παραπάνω σταθμοί είναι υπόγειοι. Ο σταθμός στο Σύνταγμα είναι ένας μεγάλος σταθμός μεταβίβασης, καθώς συνδέεται με τη γραμμή 2, «Άγιος Δημήτριος- Άγιος Αντώνιος», ενώ ο σταθμός στο «Μοναστηράκι» συνδέει το μετρό με τον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο αποτελώντας επίσης ένα μεγάλο σταθμό μεταβίβασης.

Η έρευνα μας διεξήχθη: 1) από τις 28 Μαρτίου 2009 μέχρι τις 7 Μαΐου 2009, εκτός του χρονικού διαστήματος από 14 Απριλίου 2009 μέχρι τις 23 Απριλίου 2009 λόγω της εορτής του Πάσχα και 2) από τις 19 Μαΐου 2009 μέχρι τις 12 Ιουνίου 2009. Οι εν λόγω μετρήσεις έλαβαν χώρα κατά τις εργάσιμες ημέρες δηλαδή από Δευτέρα έως Παρασκευή, καθημερινά κατά τις ώρες 12 μμ - 8 μμ (ώρες αιχμής), εκτός των ημερών 3 Απριλίου 2009 και 7 Απριλίου 2009, οπότε έλαβαν χώρα μετρήσεις από 7 πμ έως 10 πμ.

Συγκεκριμένα, από τις 3 Απριλίου 2009 έως τις 9 Απριλίου 2009, έγιναν μετρήσεις μέσα στους συρμούς και μάλιστα εναλλάξ δηλαδή μια φορά τη διαδρομή «Εθνική Άμυνα – Αιγάλεω» και αμέσως αντίστροφα. Από τις 13 Απριλίου 2009 έως τις 7 Μαΐου 2009, έγιναν μετρήσεις μέσα στους συρμούς και μάλιστα δύο φορές αμέσως εναλλάξ τη διαδρομή «Εθνική Άμυνα – Αιγάλεω». Από τις 28 Μαρτίου 2009 έως τις 13 Απριλίου 2009 έγιναν μετρήσεις διάρκειας 5 λεπτών στις αποβάθρες όλων των σταθμών. Από τις 24 Απριλίου 2009 έως τις 7 Μαΐου 2009 έγιναν μετρήσεις

διάρκειας 10 λεπτών στις αποβάθρες όλων των σταθμών. Από τις 19 Μαΐου 2009 έως τις 12 Ιουνίου 2009 έγιναν μετρήσεις διάρκειας 10 λεπτών σε κάθε σταθμό μέσα στην αποβάθρα και έξω από κάθε σταθμό, στις εξόδους τους. Μετρήσεις διάρκειας 10 λεπτών έλαβαν χώρα κατά τις 14 Ιουνίου 2009, ημέρα Κυριακή, μέσα σε ένα χρονικό εύρος ωρών από 12μμ μέχρι 20μμ (ώρες αιχμής) σε κάθε σταθμό μέσα στην αποβάθρα και έξω από κάθε σταθμό, στις εξόδους τους. Με τις μετρήσεις αυτές επιχειρήθηκε σύγκριση στις τιμές συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης σε ημέρα θεωρητικώς μικρότερης επιβατικής κίνησης στο μετρό και με μειωμένη συχνότητα διέλευσης των συρμών (Κυριακή) συγκριτικά με μία καθημερινή με τις εργάσιμες ημέρες οπότε η κίνηση είναι αντικειμενικά αυξημένη και η διέλευση των συρμών τακτικότερη. Κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας η μόνη ημέρα που έβρεχε ήταν η Παρασκευή 24 Απριλίου 2009.

Τα επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων σε PM_{10} μετρήθηκαν σε όλους τους χώρους του μετρό (συρμοί, αποβάθρες, εξωτερικοί χώροι) με τη χρήση αυτόματου φορητού οργάνου συνεχούς καταγραφής DustTrak (Μοντέλο 8520), της εταιρείας TSI, Inc. Το πλεονέκτημα του οργάνου αυτού είναι ότι επιτρέπει τη μέτρηση της συγκέντρωσης σε πραγματικό χρόνο (δηλαδή σε συνεχή βάση, με μικρό χρόνο αναφοράς). Επίσης, είναι ένα όργανο φορητό και δεν απαιτεί παροχή ρεύματος, επομένως ενδείκνυται για μετρήσεις σε μέσα μεταφοράς (όπως το μετρό). Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας αποφεύχθηκε σκοπίμως η επαφή του στομίου του δειγματολήπτη τόσο με άτομα ή με αντικείμενα, οπότε αυτό μπορούσε να συμβεί. Για όλες τις μετρήσεις ο χρόνος αναφοράς καθορίστηκε στο 1 λεπτό. Η συσκευή μέτρησης ετίθετο σε λειτουργία πριν τη διέλευση στο χώρο του μετρό, για να ξεκινήσει η διαδικασία δειγματοληψίας και έπαυε να λειτουργεί μόλις τελείωνε η όλη διαδικασία, δηλαδή με την αποχώρηση από το μετρό. Καθόλη τη διαδικασία μέτρησης τηρούνταν σε ημερολόγιο σημειώσεις ώστε να είναι γνωστό κάθε δεδομένο συγκέντρωσης του οργάνου σε ποιο είδος μικροπεριβάλλοντος αντιστοιχούσε.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson του γινομένου των ροπών εφαρμόστηκε για να υπολογιστεί η συσχέτιση ανάμεσα στα επίπεδα PM_{10} στο εσωτερικό των σταθμών του μετρό και στις εξόδους τους αντίστοιχα.

Πριν από κάθε δειγματοληψία, πραγματοποιείται έλεγχος και επαναρύθμιση της ροής του οργάνου, καθώς και έλεγχος μηδενισμού του, σύμφωνα με τις οδηγίες που αναγράφονται στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή.



Σχήμα 4. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας που απεικονίζει το σιδηροδρομικό δίκτυο της Αθήνας καθώς και την περιοχή μελέτης που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις (μπλε γραμμή).

4.2. Περιγραφή οργάνου μέτρησης

ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΤΗΣ DUSTTRAK 8520

Η συνεχής παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός αυτόματου μετρητή συνεχούς καταγραφής DustTrak (Μοντέλο 8520), της εταιρείας TSI, Inc (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Αυτόματος μετρητής DustTrak (Μοντέλο 8520, TSI, Inc.).

Ο μετρητής χρησιμοποιεί τη διασπορά φωτός σε γωνία 90° για να υπολογίσει την κατά μάζα συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε αέριο ρεύμα. Το ρεύμα αέρα εισέρχεται στον δειγματολήπτη με παροχή $1,7 \text{ L/min}$, μέσω εσωτερικής αντλίας και στην συνέχεια διασταυρώνεται με ακτίνα laser. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων προσδιορίζεται μέσω της σκέδασης του φωτός από τα σωματίδια. Ο μετρητής είναι δυνατόν να μετρήσει συγκεντρώσεις στο εύρος $0,001 - 100 \text{ mg/m}^3$, με ανάλυση ίση με $\pm 0,1 \%$ ή $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (όποιο από τα δύο δίνει την μεγαλύτερη τιμή). Η χρήση διαφορετικών κεφαλών εισόδου, επιτρέπει τον προσδιορισμό της μάζας των σωματιδίων PM_{10} , PM_4 , $\text{PM}_{2.5}$ και PM_1 . Για σωματίδια μεγέθους μικρότερου από το $1/3$ του μήκους κύματος της ακτίνας laser (780 nm), το σκεδαζόμενο φως μειώνεται συναρτήσει της 6^{ης} δύναμης της διαμέτρου, με αποτέλεσμα η ελάχιστη ανιχνεύσιμη διάμετρος να ισούται κατά προσέγγιση με $0,1 \text{ } \mu\text{m}$.

Ο μετρητής έχει βαθμονομηθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία με πρότυπη σκόνη ISO 12103-1, A1 Arizona road dust (μεγέθους $0,1 - 10 \text{ } \mu\text{m}$). Η συγκεκριμένη σκόνη χρησιμοποιείται συχνά σε βαθμονομήσεις, καθώς θεωρείται αντιπροσωπευτική για ένα ευρύ φάσμα αερολυμάτων της ατμόσφαιρας (TSI, 2006).

5. Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων PM₁₀ στο σύστημα του μετρό, στην Αθήνα

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναφορικά με τα κατά μέσο όρο επίπεδα των PM₁₀, συνολικά για τις διαδρομές, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

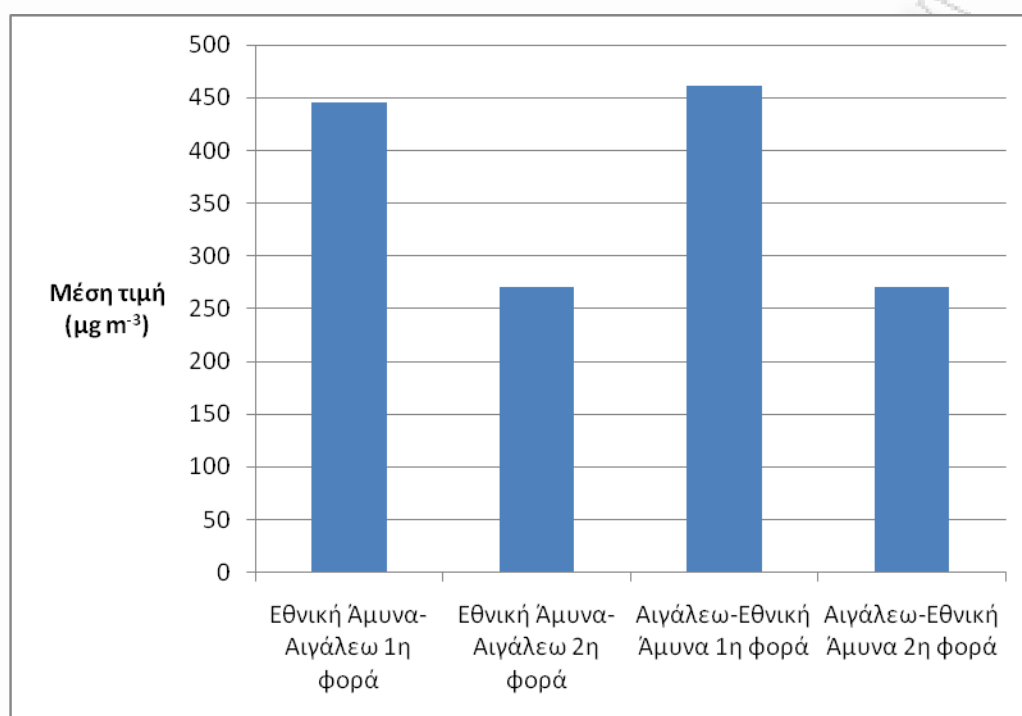
Πίνακας 13

Οι μέσες τιμές συγκεντρώσεων των PM₁₀ (μg m⁻³) μέσα στους συρμούς για τις διάφορες διαδρομές στο σύστημα του μετρό στην Αθήνα.

Διαδρομή από και προς τον αρχικό σταθμό επιβίβασης	Μέση τιμή (μg m ⁻³)	Τυπική απόκλιση	Εύρος ¹	Μέση χρονική διάρκεια διαδρομής (λεπτά)
Εθνική Άμυνα-Αιγάλεω 1 ^η φορά	446	188	250- 1000 (379)	25
Εθνική Άμυνα-Αιγάλεω 2 ^η φορά	270	81	173-414 (244)	22
Αιγάλεω-Εθνική Άμυνα 1 ^η φορά	461	148	254-785 (439)	24
Αιγάλεω-Εθνική Άμυνα 2 ^η φορά	271	66	159-361 (279)	22

¹ Ελάχιστη τιμή- μέγιστη τιμή (διάμεσος).

Διάγραμμα 1: Μέσες τιμές συγκεντρώσεων σωματιδιακής ύλης για τις διάφορες διαδρομές.



Για τη διαδρομή Εθνική Άμυνα –Αιγάλεω υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική της απόκλιση, το εύρος και η διάμεσος της. Μέση τιμή: $375 \mu\text{g m}^{-3}$, Τυπική απόκλιση: $175 \mu\text{g m}^{-3}$, Εύρος: $173\text{-}1000 \mu\text{g m}^{-3}$ και Διάμεσος: $366 \mu\text{g m}^{-3}$.

Ομοίως, για τη διαδρομή Αιγάλεω –Εθνική Άμυνα έχουμε: Μέση Τιμή: $390 \mu\text{g m}^{-3}$, Τυπική απόκλιση: $154 \mu\text{g m}^{-3}$, Εύρος: $159\text{-}785 \mu\text{g m}^{-3}$ και Διάμεσος: $349 \mu\text{g m}^{-3}$. Συγκεντρωτικά για ολόκληρη τη γραμμή 3 (περιλαμβάνεται η διαδρομή Εθνική Άμυνα – Αιγάλεω και η διαδρομή Αιγάλεω – Εθνική Άμυνα), υπολογίστηκαν η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, το εύρος και η διάμεσος της. Μέση τιμή: $382 \mu\text{g m}^{-3}$, Τυπική απόκλιση: $164 \mu\text{g m}^{-3}$, Εύρος: $159\text{-}1000 \mu\text{g m}^{-3}$ και Διάμεσος: $361 \mu\text{g m}^{-3}$.

Παρατηρούμε ότι τα επίπεδα των PM_{10} για τις δύο κατευθύνσεις συγκλίνουν μεταξύ τους, με τη διαδρομή Αιγάλεω-Εθνική Άμυνα να εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με αυτά της διαδρομής Εθνική Άμυνα- Αιγάλεω.

Επίσης, σε σύγκριση με μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε άλλα συστήματα μετρό παγκοσμίως αναφορικά με τα επίπεδα PM_{10} στο εσωτερικό συρμών, τα επίπεδα PM_{10} που καταγράφηκαν στους συρμούς της γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας βρέθηκαν

υψηλότερα από αυτά του Βερολίνου (Fromme et al., 1998), της Καντόνα (Chan et al., 2002b), του Χονγκ Κονγκ (Chan et al., 2002a), της Πράγας (Branis., 2006), της Σεούλ (Park and Ha., 2008) και της Ταϊπέι (Yu-Hsiang Cheng., 2008). Παρόμοια επίπεδα μετρήθηκαν όμως στην Σεούλ (στα πλαίσια διαφορετικής μελέτης) και στο Πεκίνο. Ο Li et al. (2007) μέτρησε μέσο επίπεδο συγκέντρωσης των PM₁₀ μέσα στους συρμούς ίσο με 325 $\mu\text{g m}^{-3}$, στο σύστημα του μετρό στο Πεκίνο. Η μέση συγκέντρωση PM₁₀ όπως μετρήθηκε από τους Kim et al. (2008) μέσα στους συρμούς στο σύστημα του μετρό της Σεούλ ήταν 312 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει τις μέσες πεντάλεπτες τιμές αναφορικά με τα επίπεδα PM₁₀ στις αποβάθρες του συστήματος μετρό, στην Αθήνα.

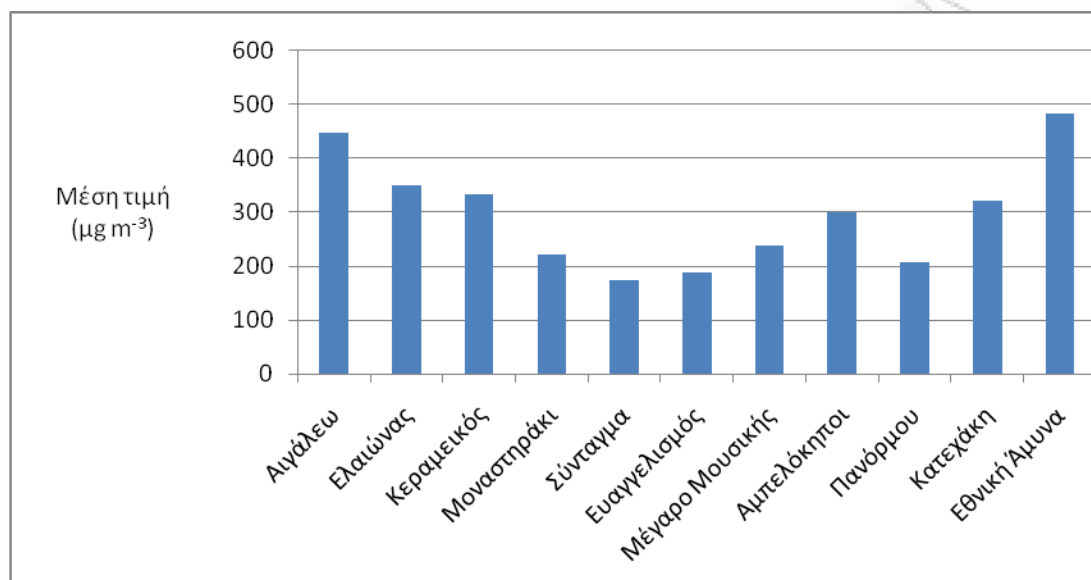
Πίνακας 14

Οι μέσες πεντάλεπτες τιμές αναφορικά με τα επίπεδα PM₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$) στις αποβάθρες του συστήματος μετρό, στην Αθήνα.

Αποβάθρες	Μέση τιμή ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Τυπική απόκλιση	Εύρος ¹
Αιγάλεω	447	188	269-864 (381)
Ελαιώνας	349	242	202-710 (241)
Κεραμεικός	333	279	167-750 (209)
Μοναστηράκι	222	102	129-426 (187)
Σύνταγμα	174	47	126-247 (173)
Ευαγγελισμός	189	86	116-333 (183)
Μέγαρο Μουσικής	238	105	173-394 (193)
Αμπελόκηποι	300	171	94-574 (232)
Πανόρμου	207	73	81-271 (227)
Κατεχάκη	322	239	111-732 (248)
Εθνική Άμυνα	482	402	114-1174 (251)

¹ Ελάχιστη τιμή- μέγιστη τιμή (διάμεσος).

Διάγραμμα 2: Οι μέσες πεντάλεπτες τιμές συγκεντρώσεως σωματιδιακής ύλης στις αποβάθρες της μπλε γραμμής «Εθνική Άμυνα –Αιγάλεω».



Συνολικά, τα κατά μέσο όρο πεντάλεπτα επίπεδα PM_{10} για όλες τις αποβάθρες είναι $297 \mu\text{g m}^{-3}$. Η τυπική απόκλιση υπολογίστηκε σε: $103 \mu\text{g m}^{-3}$, το εύρος: $174\text{-}482 \mu\text{g m}^{-3}$ και η διάμεσος: $300 \mu\text{g m}^{-3}$.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατέδειξαν αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων σωματιδιακής ύλης στο σύστημα του μετρό, στην Αθήνα με τα υψηλότερα κατά μέσο όρο επίπεδα PM_{10} να εμφανίζονται στην Εθνική Άμυνα, στο Αιγάλεω, στον Ελαιώνα, στο Κεραμεικό, στη Κατεχάκη και ακολουθούν οι Αμπελόκηποι, το Μέγαρο Μουσικής, το Μοναστηράκι, η Πανόρμου, ο Ευαγγελισμός και τέλος το Σύνταγμα.

Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει τις μέσες δεκάλεπτες τιμές αναφορικά με τα επίπεδα PM₁₀ στις αποβάθρες του συστήματος μετρό, στην Αθήνα.

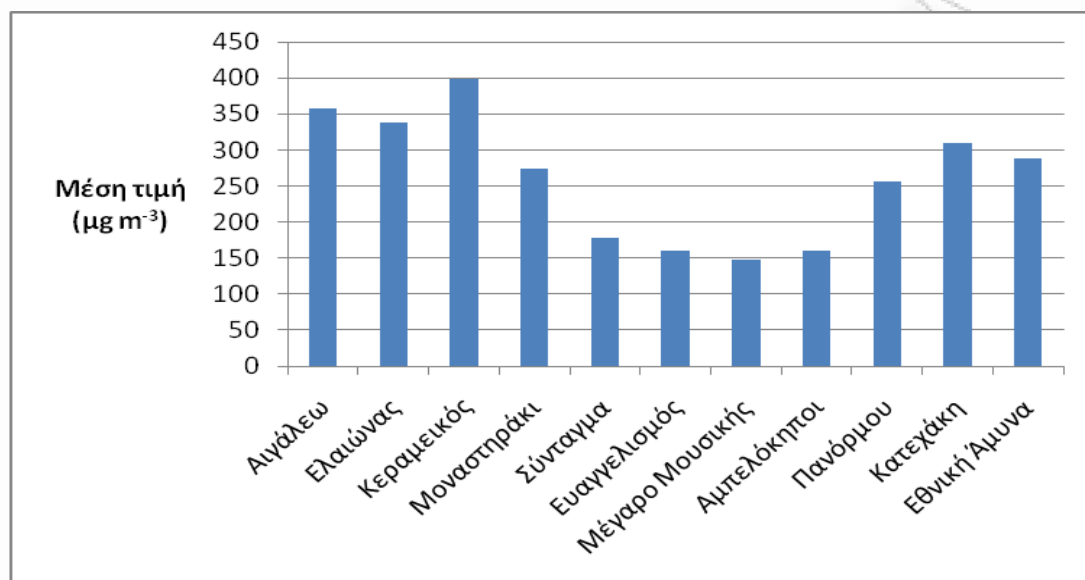
Πίνακας 15

Οι μέσες δεκάλεπτες τιμές αναφορικά με τα επίπεδα PM₁₀ (μg m⁻³) στις αποβάθρες του συστήματος μετρό, στην Αθήνα.

Αποβάθρες	Μέση τιμή (μg m ⁻³)	Τυπική απόκλιση	Εύρος ¹
Αιγάλεω	358	109	206-525 (371)
Ελαιώνας	339	85	175-466 (327)
Κεραμεικός	399	163	216-695 (342)
Μοναστηράκι	274	102	145-432 (243)
Σύνταγμα	178	60	84-300 (178)
Ευαγγελισμός	161	42	107-237 (158)
Μέγαρο Μουσικής	148	34	93-225 (147)
Αμπελόκηποι	161	43	76-234 (173)
Πανόρμου	257	154	75-532 (205)
Κατεχάκη	310	156	98-589 (301)
Εθνική Άμυνα	289	187	67-664 (240)

¹ Ελάχιστη τιμή- μέγιστη τιμή (διάμεσος).

Διάγραμμα 3: Οι μέσες δεκάλεπτες τιμές συγκεντρώσεως σωματιδιακής ύλης στις αποβάθρες της μπλε γραμμής «Εθνική Άμυνα –Αιγάλεω».

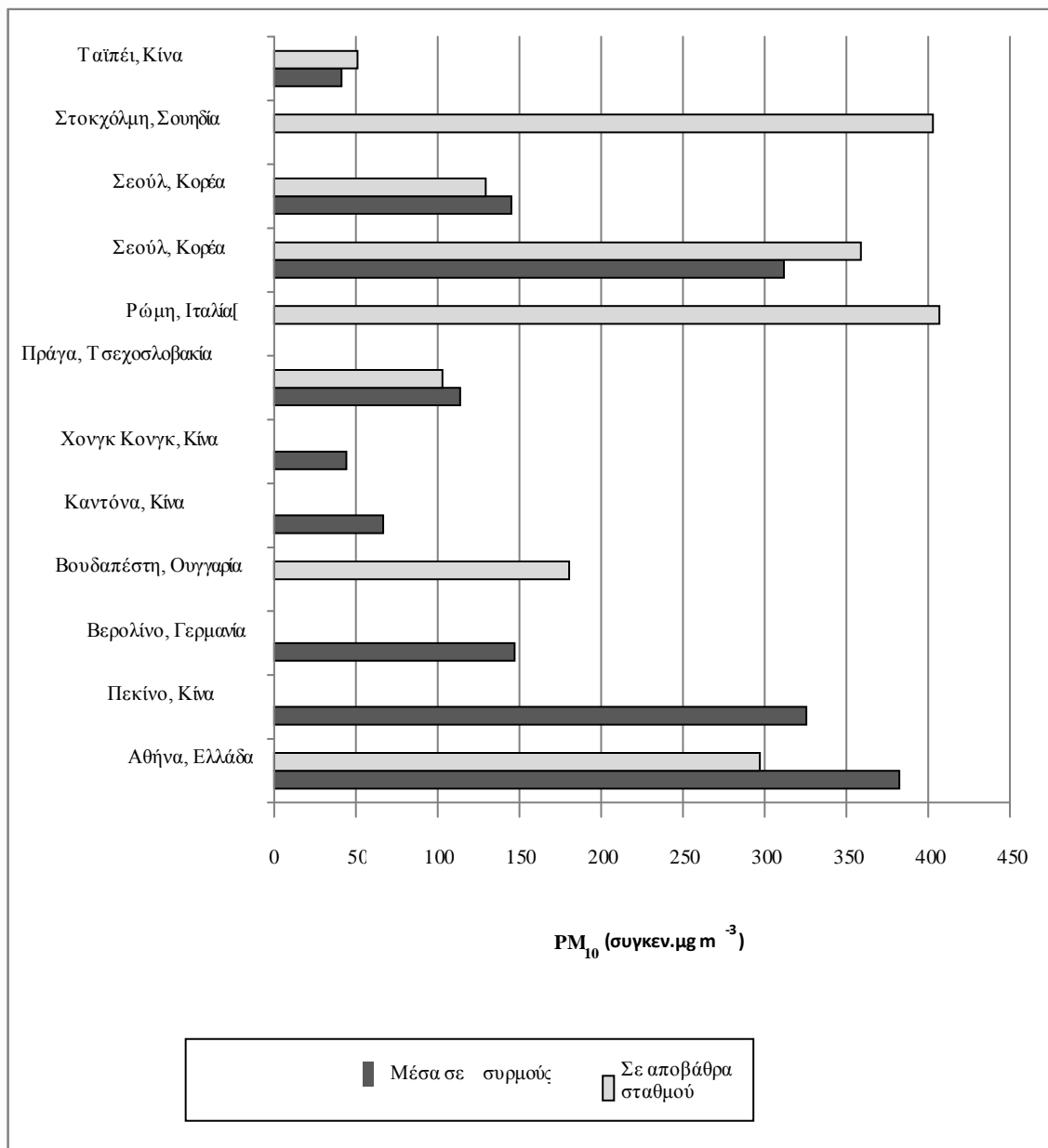


Συνολικά, τα κατά μέσο όρο δεκάλεπτα επίπεδα PM_{10} για όλες τις αποβάθρες είναι $262 \mu\text{g m}^{-3}$. Η τυπική απόκλιση υπολογίστηκε σε: $88 \mu\text{g m}^{-3}$, το εύρος: $148\text{-}399 \mu\text{g m}^{-3}$ και η διάμεσος: $274 \mu\text{g m}^{-3}$.

Ομοίως, τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατέδειξαν και σε αυτή την περίπτωση αυξημένα επίπεδα σωματιδιακής ύλης με τα υψηλότερα από αυτά να εμφανίζονται στο Κεραμεικό, στο Αιγάλεω, στον Ελαιώνα, στη Κατεχάκη, στην Εθνική Άμυνα και ακολουθούν το Μοναστηράκι, η Πανόρμου, το Σύνταγμα, ο Ευαγγελισμός, οι Αμπελόκηποι και τέλος το Μέγαρο Μουσικής.

Στο διάγραμμα 4 απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναφορικά με τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης σε PM_{10} στους συρμούς (βαγόνια) και σε αποβάθρα σταθμού σε συστήματα μετρό σε χώρες του εξωτερικού και στην Ελλάδα ώστε να επιτευχθεί μια πιο άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων και να εξαχθούν σημαντικά και χρήσιμα συμπεράσματα.

Διάγραμμα 4: Επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης μέσα σε συρμούς και σε αποβάθρα σταθμού σε συστήματα μετρό σε χώρες του εξωτερικού και στην Ελλάδα



Παρατηρούμε ότι τα επίπεδα έκθεσης σε PM_{10} μέσα στα βαγόνια του συστήματος μετρό είναι υψηλότερα στο σύστημα του μετρό της Αθήνας σε σύγκριση με συστήματα μετρό σε άλλες χώρες ενώ τα αντίστοιχα επίπεδα για τις αποβάθρες για το μετρό της Αθήνας βρέθηκαν να είναι και αυτά ανάμεσα στα υψηλότερα στο σύνολο των χωρών παγκοσμίως.

Ο Pfeiffer et al. (1999) πρότεινε τρεις πιθανές πηγές σωματιδιακής ύλης στο σύστημα του μετρό:

1. Φθορά του ατσαλιού από την τριβή μεταξύ τροχών και σιδηροτροχιάς.
2. Φθορά των φρένων
3. Εξάτμιση των μετάλλων εξαιτίας σπινθηρισμών.

Επιπλέον, πρέπει όμως να αναφερθούν η επαναιώρηση της σκόνης που συνδέεται με τις δραστηριότητες των επιβατών, η κίνηση του τρένου που δρα σαν έμβολο μέσα στη σήραγγα και ο καθαρισμός του δαπέδου (Awad,2002). Οι σήραγγες, ο εξαερισμός η κυκλοφορία και η συχνότητα των τρένων προτάθηκαν σαν άλλοι σημαντικοί παράγοντες υψηλών επιπέδων έκθεσης σωματιδιακής ύλης (Furuya et al.,2001). Τα σωματίδια που μεταφέρονται από τους επιβάτες, η λειτουργία ανελκυστήρων και κυλιόμενες κλίμακες, οι εργασίες κατασκευής που διεξάγονται στις σήραγγες και στους σταθμούς όπως επίσης και εργασίες συντήρησης, επιπλέον και ο περιβάλλον αέρας που διεισδύει στο σύστημα του μετρό μέσω εξαερισμού, θεωρούνται επίσης σημαντικές πηγές σωματιδίων στο μετρό (LU 2006).

Επιπλέον, αιωρούμενα σωματίδια τα οποία δημιουργούνται εξωτερικά στον ατμοσφαιρικό αέρα, είναι δυνατόν να εισέρχονται στους σταθμούς μέσω των σιδηράγων του μετρό και να συσσωρεύονται στο υπόγειο σύστημα δημιουργώντας σχετικά υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης. Υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης βρέθηκαν και στις αποβάθρες, με πιθανή αιτία την επαναιώρηση των σωματιδίων στις αποβάθρες εξαιτίας της κίνησης των συρμών ή των επιβατών. Αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται και κατά τη λειτουργία του τρένου. Χονδροειδή αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να προκληθούν από μηχανικές διαδικασίες αποσύνθεσης μέσα στα συστήματα μετρό.

Παρόλο που το σύστημα του μετρό στην Αθήνα είναι σχετικά καινούργιο, σε σύγκριση με συστήματα σε άλλες χώρες, και ενδεχομένως να αναμέναμε χαμηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης σε αυτό, αντιθέτως, τα μετρούμενα επίπεδα καταδεικνύουν σημαντική έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} μέσα στους χώρους του, και μάλιστα υψηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σύγκριση με παλαιότερα συστήματα μετρό άλλων μεγαλουπόλεων. Πρέπει να αναφερθεί όμως ότι σύμφωνα με άλλες μελέτες που έχουν δημοσιευθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, τα υψηλότερα

επίπεδα συνήθως εμφανίζονται αργά την άνοιξη καθώς οι δρόμοι είναι πιο στεγνοί και η επαναιώρηση σωματιδίων σκόνης από το δρόμο μεγιστοποιείται, γεγονός που ενδεχομένως να σχετίζεται με τα υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης που βρέθηκαν στο μετρό της Αθήνας.

Ο Salma et al. (2007) τόνισε ότι οι διαφορές στα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στα διαφορετικά συστήματα μετρό μπορεί να οφείλονται στο διαφορετικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε αυτά και στις διαφορετικές τεχνικές, όπως το σύστημα ισχύος, το σύστημα τροχοπέδησης, το σύστημα αερισμού και οι συνθήκες λειτουργίας. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να συσσωρεύονται στα συστήματα αερισμού ή να παραχθούν από τον εξοπλισμό, δημιουργώντας υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης στα συστήματα μετρό. Ο Kim et al. (2008) τόνισε ότι τα διαφορετικά επίπεδα σωματιδιακής ύλης ανάμεσα σε διαφορετικά συστήματα μετρό μπορεί να οφείλονται στις διαφορετικές συνθήκες ελέγχου και παρακολούθησης, όπως η περίοδος μέτρησης, ο χώρος, η εποχή, ο εξοπλισμός και οι εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Η διαφορά στα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στους υπόγειους σταθμούς ανάμεσα σε διάφορες πόλεις εκτός των ανωτέρω μπορεί να οφείλεται στη πυκνότητα της επιβατικής κίνησης και στο βάθος της σήραγγας (Park and Ha, 2008).

5.2. Σχέση ανάμεσα στα εσωτερικά PM₁₀ επίπεδα και στα εξωτερικά PM₁₀ επίπεδα

Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει τα μέσα επίπεδα σε PM₁₀ στις αποβάθρες των σταθμών και στις εξόδους τους αντίστοιχα, κατά τις εργάσιμες ημέρες σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στη προηγούμενη ενότητα. Αναγράφεται επίσης ο λόγος εσωτερικών προς εξωτερικές συγκεντρώσεις (indoor-to-outdoor, I/O), όπως υπολογίστηκε από τα καταγραφέντα επίπεδα.

Πίνακας 16

Οι μέσες δεκάλεπτες τιμές συγκεντρώσεων PM₁₀ (μg m⁻³) στις αποβάθρες των σταθμών και στις εξόδους τους αντίστοιχα, τις εργάσιμες ημέρες. Μέσος λόγος εσωτερικών προς εξωτερικές συγκεντρώσεις (I/O).

Μέσα στις αποβάθρες			Στις εξόδους		Λόγος I/O
Τοποθεσία	Μέση τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Εύρος	
Εθνική Άμυνα	193	34-570	183	62-679	1.06
Κατεχάκη	310	77-731	145	63-263	2.14
Πανόρμου	267	65-633	178	52-580	1.50
Αμπελόκηποι	217	55-689	147	58-273	1.48
Μέγαρο Μουσικής	139	46-308	144	56-280	0.97
Ευαγγελισμός	119	77-270	132	83-317	0.90
Σύνταγμα	142	52-344	123	55-206	1.15
Μοναστηράκι	168	64-438	121	65-241	1.39
Κεραμεικός	192	69-403	140	84-286	1.37
Ελαιώνας	264	69-488	200	91-381	1.32
Αιγάλεω	134	62-299	176	69-351	0.76

Οι μέσες 10-λεπτες συγκεντρώσεις των PM₁₀ στο εξωτερικό περιβάλλον για το σύνολο των σταθμών μετρήθηκαν στο εύρος 121-200 $\mu\text{g m}^{-3}$ (μέση τιμή = 154 $\mu\text{g m}^{-3}$ και τυπική απόκλιση = 26 $\mu\text{g m}^{-3}$). Οι αντίστοιχες τιμές στις αποβάθρες των σταθμών είναι 119-310 $\mu\text{g m}^{-3}$ (μέση τιμή = 195 $\mu\text{g m}^{-3}$ και τυπική απόκλιση = 63 $\mu\text{g m}^{-3}$). Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα τα επίπεδα στο εσωτερικό σχεδόν όλων των σταθμών είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά στο εξωτερικό περιβάλλον με εξαίρεση τους σταθμούς « Μέγαρο Μουσικής, Ευαγγελισμό και Αιγάλεω». Για το σύνολο των σταθμών, ο λόγος εσωτερικών προς εξωτερικές συγκεντρώσεις υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 1.28.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson για κάθε σταθμό ώστε να καθοριστεί η συσχέτιση ανάμεσα στα εσωτερικά και στα εξωτερικά επίπεδα PM₁₀.

Πίνακας 17

Υπολογισμός του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson για κάθε σταθμό.

Σταθμός	R _{Pearson}
Εθνική Άμυνα	0.73
Κατεχάκη	0.27
Πανόρμου	0.57
Αμπελόκηποι	0.49
Μέγαρο Μουσικής	0.62
Ευαγγελισμός	0.67
Σύνταγμα	0.29
Μοναστηράκι	0.13
Κεραμεικός	0.32
Ελαιώνας	0.14
Αιγάλεω	0.17

Για το σταθμό «Εθνική Άμυνα» παρατηρούμε ότι τόσο τα εξωτερικά όσο και τα εσωτερικά επίπεδα PM_{10} είναι πολύ κοντά μεταξύ τους αφού πρόκειται για τερματικό σταθμό, με έντονη επιβατική κίνηση και στις εξόδους του οποίου ήταν σταθμευμένα λεωφορεία που εξυπηρετούσαν τους πολίτες λόγω αναγκαίων κατασκευαστικών έργων στο υπόλοιπο της γραμμής από «Εθνική Άμυνα μέχρι Αεροδρόμιο». Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson υπολογίστηκε στη τιμή 0.73, απεικονίζοντας μια ισχυρή συσχέτιση των δύο αυτών επιπέδων γεγονός που εξηγείται από τα ανωτέρω.

Επίσης, για τους σταθμούς «Μέγαρο Μουσικής και Ευαγγελισμός», ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson υπολογίστηκε στα 0.62 και 0.67 αντίστοιχα απεικονίζοντας και εδώ μια δυνατή συσχέτιση ανάμεσα στα δύο επίπεδα και για τους δύο σταθμούς, αφού και οι δύο παρουσιάζουν μια έντονη επιβατική κίνηση και στις εξόδους των οποίων διέρχονται τα μέσα μαζικής μεταφοράς (λεωφορεία, τρόλεϊ) που μεταφέρουν τους πολίτες από και προς το κέντρο της Αθήνας.

Οι πιο χαμηλοί συντελεστές γραμμικής συσχέτισης Pearson παρουσιάστηκαν στους σταθμούς « Μοναστηράκι, Ελαιώνα και Αιγάλεω», με τιμές 0.13, 0.14 και 0.17 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο Μοναστηράκι, μπορεί να αποβιβάζεται και να επιβιβάζεται αρκετός κόσμος για αυτό το λόγο και τα αυξημένα επίπεδα στο εσωτερικού του σταθμού αλλά δεν ισχύει το ίδιο και στις εξόδους του. Η έξοδος του σταθμού που έλαβαν χώρα οι μετρήσεις οδηγεί σε μια πλατεία η οποία έχει αρκετό πλάτος και η οποία έξοδος απέχει πολύ από κεντρικούς δρόμους.

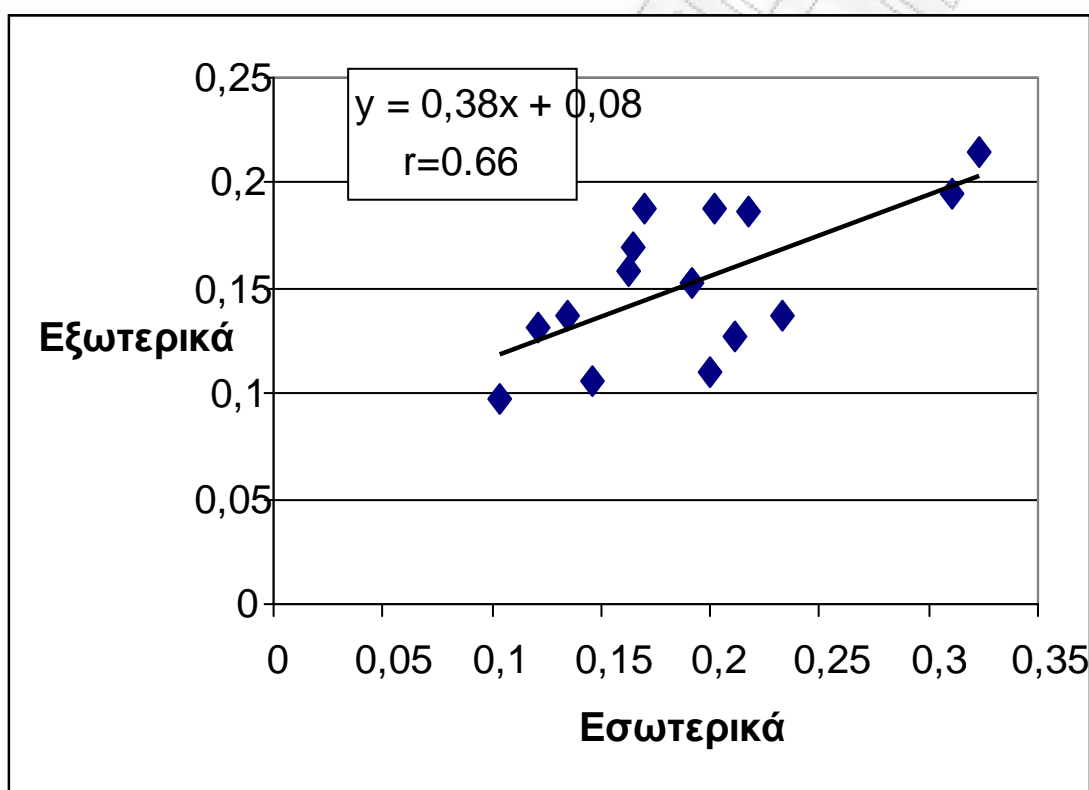
Στον Ελαιώνα και τα εξωτερικά και τα εσωτερικά επίπεδα βρέθηκαν ιδιαίτερα αυξημένα σε σύγκριση με τα επίπεδα των υπολοίπων σταθμών, αφού πρόκειται για μια περιοχή με ιδιαίτερη εξωτερική ατμοσφαιρική μόλυνση από τις γειτονικές βιομηχανίες και εργοστάσια. Ο Ελαιώνας δε χαρακτηρίζεται από έντονη επιβατική κίνηση, αλλά φαίνεται ότι η εξωτερική μόλυνση επηρεάζει τα επίπεδα στο εσωτερικό του σταθμού, ενώ η έξοδος του σταθμού οδηγεί σε μια αρκετά μεγάλη πλατεία, όπου η κίνηση είναι ιδιαίτερα μειωμένη.

Ο σταθμός στο Αιγάλεω, αν και τερματικός, δε παρουσίασε ιδιαίτερη επιβατική κίνηση για αυτό το λόγο βρέθηκαν χαμηλά τα επίπεδα στο εσωτερικό αλλά τα εξωτερικά παρουσιάστηκαν ανεβασμένα διότι η έξοδος που έλαβαν χώρα οι

μετρήσεις ήταν δίπλα σε κεντρικό δρόμο, αρκετά πολυσύχναστο γεγονός που δικαιολογεί τις αυξημένες συγκεντρώσεις σε PM_{10} .

Ο συντελεστής συσχέτισης των εξωτερικών και εσωτερικών συγκεντρώσεων για το σύνολο των σταθμών υπολογίστηκε ίσος με 0.66 (Διάγραμμα 5).

Διάγραμμα 5: Διάγραμμα διασποράς με γραμμική μορφή το οποίο απεικονίζει την συσχέτιση ανάμεσα στα εξωτερικά και εσωτερικά PM_{10} επίπεδα στο σύνολο των σταθμών (mg/m^3).



Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα εσωτερικά και τα εξωτερικά επίπεδα PM_{10} παρουσιάζουν μια θετική συσχέτιση, αποδεικνύοντας ότι τα εξωτερικά παραγόμενα σωματίδια εισέρχονται στους εσωτερικούς χώρους του μετρό, επηρεάζοντας κατά ένα ποσοστό την διαμόρφωση των εσωτερικών επιπέδων. Ο Branis (2006) υποστηρίζει ότι τα εξωτερικά επίπεδα σωματιδιακής ύλης επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα στα υπόγεια συστήματα μετρό, με την διείσδυση των εξωτερικών σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους μέσω των συστημάτων αερισμού, από τις κυλιόμενες σκάλες των σταθμών και από τους διαδρόμους που υπάρχουν στους σταθμούς. Ο Cheng et al. (2008) επίσης πρότεινε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια

μπορεί να παράγονται εξωτερικά στον περιβάλλον αέρα και να εισέρχονται στους σταθμούς μέσω των σηράγγων.

Με βάση τις μετρήσεις που παρουσιάζονται εδώ για τα επίπεδα σωματιδιακής ύλης στο σύστημα του μετρό στην Αθήνα, είναι σαφές ότι η εξωτερική οδική κυκλοφορία με τα καυσαέρια από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων ή άλλες πηγές που συνδέονται με την κυκλοφορία μπορεί να είναι μια σημαντική πηγή για τα ανεβασμένα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων στο μετρό της Αθήνας. Συσχέτιση ανάμεσα στην ποιότητα του αέρα μέσα στους υπόγειους σταθμούς του μετρό και στα εξωτερικά επίπεδα μόλυνσης έχει προσδιοριστεί στο Ελσίνκι και στη Πράγα (Branis, 2006; Aarnio et al., 2005). Υψηλότερες τιμές σωματιδιακής μόλυνσης στο μετρό σε σύγκριση με το δρόμο έχουν διαπιστωθεί από τον Johansson και Johansson (2003) στη Στοκχόλμη, από τον Pfeiffer et al. (1999), Sitzmann et al. (1999) και Adams et al. (2001a) στο Λονδίνο.

Ο Πίνακας 18 παρουσιάζει τα μέσα επίπεδα PM_{10} στις αποβάθρες των σταθμών και στις εξόδους τους αντίστοιχα, την ημέρα Κυριακή, 14 Ιουνίου 2009.

Πίνακας 18

Οι μέσες δεκάλεπτες τιμές συγκεντρώσεων των PM_{10} ($\mu g\ m^{-3}$) στις αποβάθρες των σταθμών και στις εξόδους τους αντίστοιχα, την ημέρα Κυριακή.

Μέσα στις αποβάθρες			Στις εξόδους		Λόγος I/O
Τοποθεσία	Μέση τιμή	Εύρος	Μέση τιμή	Εύρος	
Εθνική Άμυνα	84	53-135	107	50-182	0.79
Κατεχάκη	497	237-714	310	26-1727	1.60
Πανόρμου	503	74-1211	415	90-1057	1.21
Αμπελόκηποι	169	39-418	184	35-610	0.92
Μέγαρο Μουσικής	241	49-777	183	44-346	1.32
Ευαγγελισμός	153	51-295	317	53-989	0.48
Σύνταγμα	214	49-966	143	60-242	1.50
Μοναστηράκι	64	38-128	156	66-351	0.41

Κεραμεικός	82	43-212	110	86-134	0.75
Ελαιώνας	91	59-138	166	83-374	0.55
Αιγάλεω	136	47-301	233	109-369	0.58

Οι μέσες 10-λεπτες συγκεντρώσεις των PM_{10} στο εξωτερικό περιβάλλον για το σύνολο των σταθμών μετρήθηκαν στο εύρος $26-1727 \mu\text{g m}^{-3}$ (μέση τιμή = $211 \mu\text{g m}^{-3}$ και τυπική απόκλιση = $98 \mu\text{g m}^{-3}$). Οι αντίστοιχες τιμές στις αποβάθρες των σταθμών είναι $38-1211 \mu\text{g m}^{-3}$ (μέση τιμή = $203 \mu\text{g m}^{-3}$ και τυπική απόκλιση = $157 \mu\text{g m}^{-3}$). Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα τα επίπεδα στο εσωτερικό των σταθμών «Κατεχάκη, Πανόρμου, Μέγαρο Μουσικής, Σύνταγμα» είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά στο εξωτερικό περιβάλλον σε αντίθεση με τους υπόλοιπους σταθμούς, οι οποίοι εμφανίζουν αυξημένα τα εξωτερικά τους επίπεδα σε αντίθεση με τα εσωτερικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκείνη την ημέρα, σε αυτούς τους σταθμούς εμφανίστηκε έντονη επιβατική κίνηση σε σχέση με τους υπόλοιπους. Για το σύνολο των σταθμών, ο λόγος εσωτερικών προς εξωτερικές συγκεντρώσεις υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 0.92.

Από τα αποτελέσματα μετρήσεων που έλαβαν χώρα τις εργάσιμες ημέρες, τα εσωτερικά επίπεδα σωματιδιακής ύλης βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερα από τα εξωτερικά και ενώ τη Κυριακή τα εξωτερικά επίπεδα ήταν μεγαλύτερα από τα εσωτερικά. Σαν πιθανές αιτίες μπορούμε να αναφέρουμε την μειωμένη επιβατική κίνηση που έλαβε χώρα την Κυριακή, σε σύγκριση με μια καθημερινή ημέρα και την μειωμένη συχνότητα κίνησης των δρομολογίων των συρμών. Η εξωτερική κυκλοφορία είναι πιο έντονη τις εργάσιμες ημέρες σε σχέση με μια ημέρα από το Σαββατοκύριακο, με αποτέλεσμα εξωτερικά PM_{10} σωματίδια καθώς εισέρχονται στους υπόγειους σταθμούς μέσω των σηράγγων, να επιφέρουν σχετικά υψηλά επίπεδα κατά τις εργάσιμες ημέρες από ότι μια ημέρα από το Σαββατοκύριακο.

Τόσο τις εργάσιμες ημέρες όσο και την ημέρα Κυριακή, παρατηρείται μια διακύμανση στις τιμές των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στις εξόδους των σταθμών οι οποίες βρίσκονται κοντά σε δρόμους. Η εξωτερική κυκλοφορία αλλά και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται στα επίπεδα σωματιδιακής ύλης κοντά στο δρόμο.

6. Γενικές διαπιστώσεις-Προτάσεις - Μέτρα ελέγχου

Δημοσιευμένες πληροφορίες για τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης PM_{10} στο εσωτερικό του συστήματος μετρό της Αθήνας είναι ανύπαρκτες. Με τη παρούσα μελέτη επιχειρείται για πρώτη φορά μια συστηματική καταγραφή των επιπέδων σωματιδιακής ύλης (PM_{10}) στο σύστημα του μετρό της Αθήνας. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η ποιότητα του αέρα στο σύστημα του μετρό στην Αθήνα είναι αρκετά έως σοβαρά υποβαθμισμένη.

Συγκεκριμένα:

- ❖ Τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης PM_{10} μέσα στους συρμούς (βαγόνια) για τη μπλε γραμμή του συστήματος μετρό της Αθήνας ήταν τα υψηλότερα που έχουν καταγραφεί με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί σε άλλες χώρες και υπερβαίνουν κατά πολύ τα επίπεδα των οριακών τιμών με βάση την ισχύουσα νομοθεσία της Ε.Ε.
- ❖ Υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ύλης PM_{10} καταγράφηκαν και στις αποβάθρες σε σύγκριση με μελέτες που έχουν διεξαχθεί ανά τον κόσμο όπου και πάλι παρατηρήθηκε υπέρβαση των ορίων που ισχύουν για την ποιότητα του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον.
- ❖ Τα επίπεδα έκθεσης σε PM_{10} στις αποβάθρες των σταθμών βρέθηκαν να είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα επίπεδα στις εξόδους τους κατά τη διάρκεια μετρήσεων που διενεργήθηκαν τις εργάσιμες ημέρες ενώ αντίθετα τη Κυριακή τα εξωτερικά επίπεδα ήταν μεγαλύτερα από τα εσωτερικά. Ο αριθμός των επιβατών, η συχνότητα διέλευσης των συρμών και η εξωτερική οδική κυκλοφορία, επηρέασαν την συγκέντρωση σωματιδιακής ύλης PM_{10} στο εσωτερικό του συστήματος μετρό της Αθήνας καθώς μάλιστα παρατηρούνται πιο έντονα τις εργάσιμες ημέρες με αποτέλεσμα να οδηγούν σε αύξηση των επιπέδων σε σύγκριση με μια ημέρα από το Σαββατοκύριακο όπου τα φαινόμενα αυτά είναι πιο ήπια.
- ❖ Τα εσωτερικά και τα εξωτερικά επίπεδα PM_{10} παρουσίασαν μια θετική συσχέτιση, με το συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R_{Pearson} να έχει υπολογιστεί ίσος με 0.66, υποδεικνύοντας ότι τα εξωτερικά παραγόμενα

σωματίδια εισέρχονται στους εσωτερικούς χώρους του μετρό, επηρεάζοντας κατά ένα ποσοστό την διαμόρφωση των εσωτερικών επιπέδων.

Από τις ανωτέρω διαπιστώσεις συνάγεται το συμπέρασμα ότι η λειτουργία του μετρό επιδρά στα επίπεδα σωματιδιακής ύλης μέσα σε αυτό οδηγώντας σε αύξηση τους.

Επίσης, σε ανάλογες έρευνες, έχει διαπιστωθεί ότι το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι τροχοί επιδρά στη συγκέντρωση της σωματιδιακής ύλης. Συγκεκριμένα, στα συστήματα του μετρό που διαθέτουν ατσάλινους τροχούς παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα σωματιδιακής ύλης σε σύγκριση με συστήματα μετρό που δε διαθέτουν ατσάλινους τροχούς, γεγονός που διαπιστώνεται και στο μετρό της Αθήνας και με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συρμών όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.

Εν κατακλείδι, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα της έρευνας μας, τα επίπεδα συγκεντρώσεως αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} μέσα στο χώρο του μετρό της Αθήνας, φαίνονται να επηρεάζονται τόσο από το εξωτερικό περιβάλλον, αφού εξωτερικά παραγόμενα σωματίδια εισέρχονται σε αυτό όσο και από εσωτερικές πηγές. Το πρόβλημα του ορθού εξαερισμού θεωρείται πρώτης προτεραιότητας και ένας αξιόπιστος σχεδιασμός του οφείλει να αντιμετωπίζει επιτυχώς τις δύο βασικές πηγές δημιουργίας PM_{10} μέσα στο χώρο.

Μία πρόκληση είναι επίσης να μειωθούν τα επίπεδα σωματιδίων στα συστήματα του μετρό από συγκεκριμένες εσωτερικές πηγές. Μερικές πιθανές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν είναι **1)** ηλεκτρικό σύστημα φρένων και **2)** η πρώτη ύλη κατασκευής τροχών να είναι από καουτσούκ. Μπορεί, όμως, να μην είναι τεχνολογικά ή/και οικονομικά εφικτό να εγκατασταθούν αυτές οι τεχνολογίες σε παλαιότερα συστήματα μετρό. Πιο πρόσφατα κατασκευασμένα συστήματα μετρό παρουσιάζονται να έχουν χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης όταν ηλεκτρικά φρένα και τροχοί από καουτσούκ χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των συρμών, τρένων. Άλλες συγκεκριμένες προτάσεις είναι η περιοδική εξέταση και ο έλεγχος της κατάστασης των γραμμών καθώς και οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας των συρμών (ομαλό ξεκίνημα και αποφυγή απότομου φρεναρίσματος). Όσον αφορά το σύστημα εξαερισμού διάφορες λύσεις έχουν προταθεί κατά καιρούς από διάφορους

ερευνητές αλλά γενική διαπίστωση παραμένει ότι το σοβαρό αυτό θέμα είναι ανοικτό και επιδέχεται σημαντική βελτίωση με συγκεκριμένες αξιόπιστες προτάσεις λύσεων.

6.1. Προτάσεις για περαιτέρω συνέχιση- επέκταση της εργασίας

Το θέμα της ποιότητας του αέρα σε διάφορα μικροπεριβάλλοντα (εσωτερικούς χώρους) όπως είναι και το περιβάλλον του μετρό που μελετάται στη παρούσα εργασία δεν έχει δυστυχώς ακόμα τύχει νομοθετικής ρύθμισης. Οι οριακές τιμές που ισχύουν από τη νομοθεσία της Ε.Ε αναφέρονται στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο. Για αυτό το λόγο η συντεταγμένη πολιτεία για τη προστασία της δημόσιας υγείας απαιτείται να καθορίσει συγκεκριμένα όρια για τα αιωρούμενα σωματίδια στους υπόγειους χώρους του μετρό και με τους συνεχούς ελέγχους από τα όργανα της πολιτείας να επιβλέπει την εφαρμογή τους.

Συγκεκριμένα, οι προτάσεις για συνέχιση και επέκταση της εργασίας εστιάζονται στις ακόλουθες:

- ❖ Καταρχήν είναι σημαντικό να οργανωθούν και μετρήσεις σε αιωρούμενα σωματίδια όπως $PM_{2.5}$ και UFP στο μετρό της Αθήνας εκτός από PM_{10} (τα οποία μέχρι σήμερα μόνο έχουν μετρηθεί) αλλά και σε άλλους ρύπους (οξειδία του αζώτου, VOCs, CO, κ.α) προκειμένου να οργανώσουμε τις πληροφορίες μας για την συνολική ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό του συστήματος μετρό της Αθήνας.
- ❖ Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η μελέτη μορφολογικών και χημικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων για παραπέρα συστηματική διερεύνηση της σύστασης τους και του είδους πηγών προέλευσης τους.
- ❖ Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον η μελέτη από επιδημιολογική άποψη της καθημερινής έκθεσης των επιβατών στη σωματιδιακή ρύπανση και της πιθανής συσχέτισης της με επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.
- ❖ Τέλος, επειδή οι επιβάτες των συστημάτων μετρό αποτελούν μια ανθρώπινη ομάδα που χρησιμοποιεί το μέσο αυτό για τις μετακινήσεις της καταναλώνοντας ένα μικρό ποσοστό του εικοσιτετραώρου τους σε αυτό, είναι αναγκαίο να διερευνηθεί η επίδραση των επιπέδων των σωματιδίων στο

ανθρώπινο δυναμικό που καταναλώνει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό του εικοσιτετραώρου του στους χώρους αυτούς, όπως οι οδηγοί, το προσωπικό, κτλ.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

- 1) Aarnio, P., Yi-Tuomi, T., Kousa, A., Makela, T., Hirsikko, A., Hammeri, K., Raisanen, M., Hillamo, R., Koskentalo, T., Jantunen, M., 2005. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system. *Atmospheric Environment* 39 (28), 5059-5066.
- 2) Abadie, M., Limam, K., Bouily, J., Ge'nin, D., 2004. Particle pollution in French high-speed train (TGV) smoker cars: measurement and prediction of passenger exposure. *Atmospheric Environment* 38, 2017–2027.
- 3) Adams, H.S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colvile, R.N., McMullen, M.A.S., Khandelwal, P., 2001a. Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *The Science of the Total Environment* 279, 29–44.
- 4) H.S. Adams, M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, Determinants of fine particle personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK, *Atmos. Environ.* 35 (2001) 4557–4566.
- 5) Arya S.P. (1998). *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press Inc., New York, USA.
- 6) Awad, A.H.A., 2002. Environmental Study in subway metro stations in Cairo, Egypt. *Journal of Occupational Health* 44, 112-118.
- 7) Barry Carbon (2003). *Health effects of PM₁₀ in New Zealand*. Air Quality Technical Report No 39 Ministry for the Environment. ISBN 0-478-18907-9
- 8) A. Birenzvice, J. Eversole, M. Seaver, S. Francesconi, E.Valdes, H.Kulaga, Aerosol characteristics in a subway environment, *Aerosol Sci. Technol.* 37 (2003) 210–220.
- 9) Biskos, G., 2004. *Theoretical and Experimental Investigation of the Differential Mobility Spectrometer*. Queen's College.
- 10) Boubel R, Fox D., Turner B., Stern A., (1994), *Fundamentals of Air Pollution*, 3rd edition, Academic Press, Καλιφόρνια.
- 11) Branisˇ, M., 2006. The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system. *Atmospheric Environment* 40, 348–356.

- 12) Chan, C.C., Spengler, J.D., Ozkaynak, H., Lefkopoulou, M., 1991. Commuter exposures to VCOs in Boston, Massachusetts. *Journal of the Air and Waste Management Association* 41 (12), 1594-1600.
- 13) Chan, L.Y., Chan, C.Y., Qin, Y., 1999. The effect of commuting microenvironment on commuter exposures to vehicular emission in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 33 (11), 1777-1787.
- 14) L.Y. Chan, W.L. Lau, S.C. Lee, C.Y. Chan, 2002a. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong, *Atmos. Environ.* 36 (2002) 3363–3373.
- 15) L.Y. Chan, W.L. Lau, S.C. Zou, Z.X. Cao, S.C. Lai, 2002b. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China, *Atmos. Environ.* 36 (2002) 5831–5840.
- 16) Chan, L.Y., Lau, W.L., Wang, X.M., Tang, J.H., 2003. Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China. *Environment International* 29 (4), 429-435.
- 17) Charlson R.J., Schwartz S.E. Hales J.M., Cess R.D., Coakley J.A., Hansen J.E., 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-429
- 18) Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., Kinney, P.L., 2004. Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York city's subway system. *Environmental Science and Technology* 38, 732–737.
- 19) Claxton L.D., Woodall M.D.Jr., (2007). A review of the mutagenicity and rodent carcinogenicity of ambient air. *Mutation Research*, 636, 36-94.
- 20) Costa G.L., Hodgson E., Lawrence A.D., Reed J.D., Greenlee W.F., (2005). *Current Protocols in Toxicology*. John Wiley and Sons, Inc.
- 21) De Kok T., Hogervost J., Briede J., Herwijnen M.H., Maas I., Moonen E., Driee H., Kleinjans J., (2005). Genotoxicity and physicochemical characteristics of traffic-related ambient particulate matter. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 46, 71-80.
- 22) Dor, F., Lemoullec, Y., Festy, B., 1995. Exposure of city residents to carbon monoxide and monocyclic aromatic hydrocarbons during commuting trips in the Paris Metropolitan Area. *Journal of the Air and Waste Management Association* 45 (2), 103-110.

- 23) EPA U.S. Environmental Protection Agency, United States. 1995. Compilation of air pollutant emission factors. Volume 1: Stationary Point and Area Sources. AP-42, Fifth Edition.
- 24) Fadel M., Massoud M. (2000), “ Particulate matter in urban areas: health – based economy assessment”, *The Science of Total Environment*, Vol. 257 pp. 133-146.
- 25) Fernandez-Bremauntz, A.A., Ashmore, M.R., 1995. Exposure of commuters to carbon monoxide in Mexico City-I. Measurement of in-vehicle concentrations. *Atmospheric Environment* 29(4), 525-532.
- 26) Fischler, S., 2000. *Subways of the World*. Motorbooks International, USA.
- 27) Fraser, A.B (1975), *Atmosphere* 13, 1-10.
- 28) H. Fromme, A. Oddoy, M. Piltoy, M. Krause, T. Lahrz, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and diesel engine emission (elemental carbon) inside a car and a subway train, *Sci. Total Environ.* 217 (1998) 165–173.
- 29) K. Furuya, Y. Kudo, K. Okinaga, M. Yamuki, S. Takahashi, Y. Araki, Y. Hisamatsu, Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Soil Environ. Sci.* 19 (2001) 469–485.
- 30) Gee, I.L., Raper, D.W., 1999. Commuter exposure to respirable particles inside buses and bicycle. *Science of the Total Environment* 235, 403–405.
- 31) J.E. Gomez-Perales, R.N. Covile, M.J. Nieuwenhuijsen, A. Fernandez- Brem, V.J. Gutierrez-Avedoy, V.H. Paramo-Figueroa, S. Blanco-Jimenez, E. Bueno-Lopez, F. Mandujano, R. Benabe-Cabanillas, E. Ortiz-Segovia, Commuters’ exposure to PM_{2.5}, CO and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City, *Atmos. Environ.* 38 (2004) 1219– 1229.
- 32) Gomez-Perales, J.E., 2005. Commuters’ exposure to air pollution in Mexico City. PhD, Imperial College London, Department of Environmental Science and Technology, University of London.
- 33) Gomez-Perales, J.E., Colvile, R.N., Fernandez-Bremauntz, A.A., Gutierrez Avedoy, V., Paramo-Figueroa, V.H., Blanco-Jimenez, S., Bueno- Lopez, E., Bernabe -Cabanillas, R., Mandujano, F., Hidalgo-Navarro, M., Nieuwenhuijsen, M.J., 2007. Bus, minibus, metro inter-comparison of commuters’ exposure to air pollution in Mexico City. *Atmospheric Environment* 41, 890–901.
- 34) Green C.L., Armstrong S.R., (2003). Particulate matter in ambient air and mortality: toxicological perspectives. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 38, 326-335.

- 35) Harrison, R.M, Yin, J., (2000). Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *The Science of the Total Environment*, 249, 85-101.
- 36) Hatakeyama S., Izumi K., Fukuyama T and Akimoto H., (1989) Reactions of ozone with α -pinene and β -pinene in air: Yields of gaseous and particulate products, *J. Geophys. Res.*, 94, 13013-13024.
- 37) Highwood, E.J. & Kinnersley, R.P., 2006. When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health. *Environment International*, 32(4), 560-566.
- 38) Hinds, W.C., 1999. *Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles* Second edition., John Wiley & Sons Inc.
- 39) Hodgson, E., (2004). *A Textbook of Modern Toxicology*. John Wiley and Sons, Inc.
- 40) IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change 2001. *Climate Change 2001, Working Group I. Third Assessment Report*.
- 41) C.J. Johansson, P.A. Johansson, Particulate matter in the underground in Stockholm, *Atmos. Environ.* 37 (2003) 3–9.
- 42) Karlsson, H.L., Nilsson, L., Moller, L., 2005. Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells. *Chemical Research in Toxicology* 18, 19–23.
- 43) Kim, K.Y., Kim, Y.S., Roh, Y.M., Lee, C.M., Kim, C.N., 2008. Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations. *Journal of Hazardous Materials* 154, 440–443.
- 44) Kleinman, M., 2000. *THE HEALTH EFFECTS OF AIR POLLUTION ON CHILDREN. SOUTH COAST AIR QUALITY MANAGEMENT DISTRICT*. Department of Community and Environmental Medicine, University of California, Irvine.
- 45) Leutwyler, M., Sieegmann, K., Monn, Ch., 2002. Suspended particulate matter in railway coaches. *Atmospheric Environment* 36, 1–7.
- 46) Li, T.T., Bai, Y.H., Liu, Z.R., Li, J.L., 2007. In-train air quality assessment of the railway transit system in Beijing: a note. *Transportation Research Part D* 12, 64–67.
- 47) LU (2006). *London underground environment report 2006*. Retrieved from <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/environmental-report-2006.pdf>.

- 48) Mage D., Wilson W., Hasselblad V., Grant L., "Assessment of human exposure to ambient particulate matter", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 49(1999)
- 49) Manahan, S.E., (2005). *Environmental Chemistry*, 8th Edition. CRC Lewis Publishers.
- 50) MARTUZZI, M., MITIS, F., IAVARONE, I., SERINELLI, M., 2006. HEALTH IMPACT OF PM10 AND OZONE IN 13 ITALIAN CITIES. World Health Organization Regional Office for Europe. ISBN 92-890-2293-0 WHOLIS number E88700.
- 51) Mukherjee, A.K., Bhattacharya, S.K., Ahmed, S., Roy, S.K., Roychowdhury, A., Sen, S., 2003. Exposure of drivers and conductors to noise, heat, dust and volatile organic compounds in the state transport special busses of Kolkata City. *Transportation Research Part D* 8, 11–19.
- 52) NATAIR, 2007, Ing. Rainer Friedrich. Improving and applying methods for the calculation of natural and biogenic emissions and assessment of impacts to the air quality. Publishable final activity report. SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FP6-2003-SSP-3 – Policy Oriented Research SPECIFIC TARGETED RESEARCH OR INNOVATION PROJECT. Proposal No.: 513699
- 53) Pacyna (1995). Sources, particle size distribution and transport of aerosols. *Airborne particulate matter – The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer.
- 54) Park, D.U., Ha, K.C., 2008. Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea. *Environment International* 34, 629–634.
- 55) Pfeifer, G.D., Harrison, R.M., Lynam, D.R., 1999. Personal exposure to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996. *The Science of the Total Environment* 235, 253–260.
- 56) Pope C., Burnet, R., Thun, M., et al., (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287, 1132-1141.
- 57) Pope, C., Burnet, R., Thun, M., et al., (2004). Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation* 109, 71-77.

- 58) Ripanucci, G., Grana, M., Vicentini, L., Magrini, A., Bergamaschi, A., 2006. Dust in the underground railway tunnels of an Italian town. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 3, 16–25.
- 59) Salma, I., Weidinger, T., Maenhaut, W., 2007. Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station. *Atmospheric Environment* 41, 8391–8405.
- 60) Schins Roel P.F., Lightbody J.H., Borm J.A., Shi T., Donaldson K., Stone V., (2004). Inflammatory effects of coarse and fine particulate matter in relation to chemical and biological constituents. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 195, 1-11.
- 61) Schlesinger R.B., (1995). Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: does it support the human experience? *Inhalation Toxicology*, 7, 99-109.
- 62) Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F., Tran, C.L., 2005. The London underground: dust and hazards to health. *Occupational and Environmental Medicine* 62, 355–362.
- 63) Seinfeld J. and Pandis S., (1997) *Atmospheric chemistry and physics: From Air Pollution to Climate Changes*, John Wiley & Sons., London, England.
- 64) Shiohara, N., Fernandez-Bremauntz, A., Blanco, S., Yanagisawa, Y., 2005. The commuters' exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City. *Atmospheric Environment* 39 (19), 3481-4389.
- 65) Sitzmann, B., Kendal, M., Williams, I., 1999. Characterization of airborne particles in London by computer-controlled scanning electron microscopy. *Science of the Total Environment* 241, 63–73.
- 66) US EPA (2004). *Air quality Criteria for Particulate Matter*, Vol a.
- 67) Vasconcellos, E.A., 2001. Transport planning proposals. In: Vasconcellos, E.A. (Ed.), *Urban Transport Environment and Equity. The Case for Developing Countries*, 2000 ed. Earthscan, London, pp. 264-278.
- 68) Velasco, E., Siegmann, P., Siegmann, H.C., 2004. Exploratory study of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in different environments of Mexico City. *Atmospheric Environment* 38 (29), 4957-4968.
- 69) Vineis P., Husgafvel-Pursiainen K., (2005). Air pollution and cancer: biomarker studies in human populations. *Carcinogenesis*, 26, 1846-1855.

- 70) Wark K., Warher C.F., Davis W.T., "Air pollution: its origin and control", Addison Wesley Longman, 1998
- 71) West, J.J., Hope, C. & Lane, S.N., 1997. Climate change and energy policy : The impacts and implications of aerosols. *Energy Policy*, 25(11), 923-939.
- 72) Whitby K.T. and Cantrell B., 1978, Fine Particles, in conference on Environmental Sensing and Assesment, Las Vegas, NV, Institute of Electrical and electronic Engineers
- 73) Yiu-chung Chan, 1997. Identifications of sources of PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane. Submitted to Griffith University for the Deggre of Doctor of Philosophy, July 1997.
- 74) Yu-Hsiang Cheng, Yi-Lun Lin, Chia-Chen Liu, 2008. Levels of PM_{2.5} and PM₁₀ in Taipei Rapid Transmit System. *Atmospheric Environment* 42 (2008), 7242-7249.

Ελληνική βιβλιογραφία.

- 1) Καραθανάσης Σ., 2006. Ατμοσφαιρική ρύπανση. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη. ISBN 960-418-096-7.
- 2) Καρβούνης Σ., Γεωργάκελλος Δ. (2003), Διαχείριση του Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
- 3) Κουϊμπζής Θ., Σαμαρά –Κωνσταντίνου Κ., Φυτιανός Κ., (1998). Χημεία Περιβάλλοντος, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- 4) Κ.Υ.Α. 3277/209/2000 (ΦΕΚ 180Β/17-2-2000), "Καθορισμός γενικών αρχών και αρμόδιων υπηρεσιών, για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα περιβάλλοντος".
- 5) Κωτσοβίνου Ν. (1992), Ρύπανση και προστασία περιβάλλοντος, Εκδόσεις Φουντάς, Αθήνα.
- 6) Λαζαρίδης Μ., (2005) Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- 7) Μάλλιαρος Χ. (2000), Περιβάλλον Ρύπανση Τεχνικές Αντιρύπανσης, Εκδόσεις Μεταίχμιο, Αθήνα.
- 8) Μελάς Δ., 2005. Ατμοσφαιρική διάχυση και διασπορά. Εργαστήριο Φυσικής Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής Α.Π.Θ.
- 9) Σκούλλος Μ., Σίσκος Π. (2009), Χημεία Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

10) Τσιφτσόγλου Σ.Α., (1997). Βασική και Κλινική Τοξικολογία. Εκδόσεις Art of Text, Θεσσαλονίκη.

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις.

- 1) www.oasa.gr (Εκθεση Πεπραγμένων, ΠΕΡΙΟΔΟΥ 1.1.2008-31.12.2008).
- 2) www.amel.gr. (Αττικό Μετρό Εταιρία Λειτουργίας Α.Ε.)

ΓΑΛΕΡΙΣΤΕΛΕΜΟ ΓΕΡΑΝΑ