



ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ - ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ:
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

*«Εκτίμηση της έκθεσης πεζών σε αέρια σωματιδιακή
ρύπανση (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) σε οδούς πυκνής κυκλοφορίας σε
περιοχή κατοικιών της Αθήνας»*

Κανελλοπούλου Π. Μαριάνθη

Επιβλέπουσα:

Α. Χαλουλάκου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω με τρόπο πραγματικό και ειλικρινή τις αληθινές και εγκάρδιες ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν και στάθηκαν δίπλα μου στη σύνταξη και ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής μου εργασίας. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την κυρία Αρχοντούλα Χαλουλάκου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΕΜΠ, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για τη βοήθεια της, την καθοδήγησή της, τις συμβουλές και τις υποδείξεις της που μου παρείχε στα διάφορα στάδια εκπόνησης αυτής.

Επιπροσθέτως όμως αισθάνομαι την ιδιαίτερη ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, υλικά, πνευματικά και ψυχικά και συνέβαλε τα μέγιστα για την ολοκλήρωση αυτών, καθώς επίσης και τους ανθρώπους που με το δικό τους τρόπο και στάση παρείχαν το ίδιο έργο και φροντίδα από διαφορετική θέση και σχέση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Εκτίμηση της έκθεσης πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1) σε οδούς πυκνής κυκλοφορίας σε περιοχή κατοικιών της Αθήνας», εκπονήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Συστήματα διαχείρισης της ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος», το διάστημα μεταξύ των μηνών Ιανουάριο και Οκτώβριο του έτους 2011, υπό την επίβλεψη της αναπληρώτριας καθηγήτριας του ΕΜΠ κας Α. Χαλουλάκου.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της έκθεσης πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση σε χαρακτηριστικές κεντρικές οδούς έντονης κυκλοφορίας στην περιοχή της Αθήνας. Οι μετρήσεις έγιναν κύρια στη λεωφόρο Αλεξάνδρας, ενώ ενδεικτικές συμπληρωματικές μετρήσεις έγιναν και σε παράπλευρες οδούς κυκλοφορίας εμπορικών δραστηριοτήτων και κατοικιών (οδός Γκύζη, οδός Κουμανούδη, οδός Μουστοξύδη). Οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι:

- να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων,
- να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα σχετικά πρότυπα των διεθνών οργανισμών,
- να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα αντίστοιχα επίπεδα άλλων σχετικών ευρωπαϊκών μελετών και
- να εξεταστεί η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών και της κυκλοφορίας στα καταγραφόμενα επίπεδα.

Η έκθεση πεζών σύμφωνα με την εν λόγω μελέτη εκτιμάται ως *σοβαρή*. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} για τα διαστήματα των μετρήσεων, ανέρχεται στην τιμή των $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ξεπερνώντας την μέση ωριαία εικοσιτετράωρη τιμή του προτύπου που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τα σωματίδια PM_{10} και η οποία ανέρχεται στα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Από τις συνολικές ημέρες των μετρήσεων το ποσοστό των 58,3% υπήρξε πάνω από το επιτρεπτό όριο και το γεγονός αυτό επιβάλλει μια ευρύτερη μελέτη/επέκταση της παρούσας εργασίας και σε άλλες κεντρικές λεωφόρους του Λεκανοπεδίου (βλέπε Προτάσεις για επέκταση της εργασίας).

Σημαντική αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων παρατηρείται το πρωινό διάστημα των μετρήσεων σε σχέση με το μεσημεριανό

(33%), φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί και σε άλλες αντίστοιχες ευρωπαϊκές μελέτες.

Επίσης σημειώνεται ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης στην πλευρά της ανόδου ήταν αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα στην πλευρά της καθόδου (13-16%).

Σημαντικά υψηλότερα επίπεδα έκθεσης παρατηρούνται τις εργάσιμες ημέρες της εβδομάδας από τα αντίστοιχα τα Σαββατοκύριακα (34%).

Αξιόλογη επίδραση στα αποτελέσματα της εργασίας μας έχουν οι δύο παράμετροι, η ένταση πηγών και οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Από τις μετεωρολογικές συνθήκες η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες επηρεασμού των επιπέδων συγκέντρωσης των σωματιδίων, και συγκεκριμένα οι βόρειοι άνεμοι καθαρίζουν την ατμόσφαιρα, ενώ οι νότιοι την επιβαρύνουν και η μείωση της ταχύτητας του ανέμου επιφέρει αύξηση των συγκεντρώσεων.

Από την ανάλυση των στοιχείων κυκλοφορίας διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των οχημάτων στην πλευρά της ανόδου είναι μεγαλύτερος από την πλευρά της καθόδου γεγονός που έχει αντίκτυπο στα μετρούμενα επίπεδα.

Στη μελέτη αυτή δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφοροποίηση στα μετρούμενα επίπεδα στα δύο σημεία του πεζοδρομίου, γειτνίαση με το δρόμο ή άμεση γειτνίαση με τα κτίρια.

Επιπροσθέτως, τα επίπεδα των συγκεντρώσεων που προέκυψαν από τις δειγματοληπτικές μετρήσεις στους δύο υπαίθριους χώρους αναψυχής είναι αρκετά σοβαρά. Στο μικρό αλσύλιο διαπιστώθηκε μια όχι σημαντική μείωση (15%) των επιπέδων από τα αντίστοιχα της λεωφόρου, γεγονός που οφείλεται στην άμεση γειτνίαση του αλσυλίου με τη λεωφόρο. Στο πεδίο του Άρεως δεν διαπιστώθηκε διαφορά στα μετρούμενα επίπεδα με αυτά της λεωφόρου. Το πάρκο βρίσκεται στην ίδια περιοχή μελέτης και η αλλαγή της σύστασης πηγών επιφέρει αλλαγή της ποσοστιαίας σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στους παράπλευρους δρόμους διαπιστώθηκαν παρόμοια επίπεδα με αυτά της κεντρικής λεωφόρου. Τα επίπεδα δεν είναι καθόλου ευκαταφρόνητα.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ευχόμαστε να είναι μια καλή αφορμή για την οργάνωση μιας συστηματικής μελέτης έκθεσης του κοινού σε αιωρούμενα σωματίδια σε διάφορες κατηγορίες μέσω μεταφοράς, ιδιωτικά και δημόσια, καθώς επίσης και για την πραγματοποίηση μετρήσεων και σε άλλες χαρακτηριστικές αρτηρίες πυκνής κυκλοφορίας στο κέντρο της Αθήνας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ	13
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	13
2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	17
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	17
2.2 ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΡΥΠΑΝΤΕΣ.....	18
2.3 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΡΥΠΑΝΤΕΣ.....	21
2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ.....	26
2.5 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	28
3 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	32
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	32
3.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	32
3.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	35
3.3.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	35
3.3.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ.....	39
3.3.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ.....	45
3.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	47
3.5 ΠΗΓΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	49
3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	49
3.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	50
3.5.2.1 Επαναίωρηση σκόνης από το έδαφος.....	51
3.5.2.2 Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις.....	52
3.5.2.3 Υδρόλυμα Θαλάσσης.....	53
3.5.2.4 Ηφαιστειακή δραστηριότητα και εκρήξεις.....	54
3.5.3 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ.....	55
3.5.3.1 Εκπομπές από τα οχήματα.....	55
3.5.3.2 Βιομηχανικές εκπομπές.....	56
3.5.3.3 Δασικές και γεωργικές πυρκαγιές.....	58
3.5.3.4 Οικιακές πηγές.....	59
3.6 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	60
3.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	66
3.7.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ.....	66
3.7.1.1 Συμπτώματα της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια.....	66
3.7.1.2 Τρόπος επίδρασης των διαφορετικών σωματιδιακών κλασμάτων.....	69
3.7.1.3 Τοξικότητα των αιωρουμένων σωματιδίων.....	72
3.7.1.4 Δευτερογενείς επιπτώσεις στην υγεία.....	73
3.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	74
3.7.2.1 Επιπτώσεις στην ορατότητα.....	74
3.7.2.2 Επιπτώσεις στο κλίμα.....	74
3.7.2.3 Επιφανειακές αλλοιώσεις.....	76
3.8 ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	78
3.8.1 Γενικά Στοιχεία.....	78
3.8.2 Η Ευρωπαϊκή θυγατρική οδηγία - πλαίσιο.....	79
3.8.3 Πρότυπα ποιότητας κατά US-EPA.....	83
3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....	87
3.9.1 Γενικά Στοιχεία.....	87
3.9.2 Προσδιορισμός σωματιδιακής ύλης.....	89

4	ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	92
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	92
4.2	ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	95
4.3	ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	100
4.3.1	<i>Ρυθμός εξαερισμού (α)</i>	101
4.3.2	<i>Ρυθμός εναπόθεσης (κ)</i>	102
4.3.3	<i>Ικανότητα διείσδυσης (Ρ)</i>	103
	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ	105
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	110
5.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	110
5.2	ΣΥΝΤΑΞΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	110
5.3	ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ	114
5.3.1	<i>Αυτόματος μετρητής DustTrak Aerosol Monitor Model 8533</i>	114
5.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	117
5.4.1	<i>Γενικά Αποτελέσματα</i>	117
5.4.2	<i>Αναλυτικά Αποτελέσματα</i>	119
5.5	ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ	137
5.6	ΓΕΝΙΚΑ ΜΕΤΡΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	140
5.7	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	141
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	142

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Ποσοστό των αερίων από τα οποία αποτελείται ο ατμοσφαιρικός αέρας	13
Εικόνα 1.2. Τα στρώματα της ατμόσφαιρας.....	14
Εικόνα 2.1. Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά	28
Εικόνα 3.1. Αιωρούμενα σωματίδια όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	38
Εικόνα 3.2. Τυπικό μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων (EPA).....	40
Εικόνα 3.3. Τυπικό μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.....	44
Εικόνα 3.4. Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων	50
Εικόνα 3.5. Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα.....	53
Εικόνα 3.6. Ηφαιστειακή Δραστηριότητα.....	54
Εικόνα 3.7. Θύσανοι από τις μεγάλες πυρκαγιές στην Ελλάδα το έτος 2007.....	59
Εικόνα 3.8. Ρύποι που εκπέμπονται από την εξάτμιση του αυτοκινήτου και που εισπνέονται.....	68
Εικόνα 3.9. Είσοδος των αιωρούμενων σωματιδίων στον οργανισμό.....	69
Εικόνα 3.10. Διεισδυτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.....	70
Εικόνα 3.11. Ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων των νεφών λόγω αυξημένης	75
Εικόνα 4.1. Πηγές ρύπανσης εσωτερικών χώρων.....	96
Εικόνα 4.2. Πηγές ρύπανσης εσωτερικών χώρων.....	100
Εικόνα 5.1. DustTrak Aerosol Monitor Model 8533.....	115
Εικόνα 5.2. Το όργανο μέτρησης DustTrak με τον σωλήνα μέσω του οποίου έγινε η είσοδος.....	116
Εικόνα 5.3. Το όργανο μέτρησης DustTrak με το zero filter για την επίτευξη της...	116

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Κατανομή θερμοκρασιών, πιέσεων και χημικών ουσιών στα διάφορα στρώματα της.....	16
Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση εκπομπών και διεργασιών ρύπων στη ατμόσφαιρα.....	31
Σχήμα 3.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων.....	33
Σχήμα 3.2. Αιωρούμενα σωματίδια και τομείς με τους οποίους σχετίζονται.....	39
Σχήμα 3.3. Σχηματικό διάγραμμα κατανομής του ατμοσφαιρικού αερολύματος, σε σχέση με.....	43
Σχήμα 3.4. Ιδανική κατανομή κατά μέγεθος αιωρουμένων σωματιδίων της εξωτερικής.....	44
Σχήμα 3.5. Διεσδυτικότητα των αιωρουμένων σωματιδίων.....	46
Σχήμα 3.6. Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων και περιοχές στις οποίες επιδρούν στον.....	46
Σχήμα 3.7. Κυριότερα κλάσματα αιωρουμένων σωματιδίων (EPA 1996).	48
Σχήμα 3.8. Εναπόθεση εισπνεόμενων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών στο ανώτερο και.....	71
Σχήμα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα των πολλών αλληλεπιδράσεων των αερολυμάτων στο.....	74
Σχήμα 3.10. Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, διεργασίες και αλληλεπιδράσεις στο.....	77
Σχήμα 3.11. Δειγματοληψία σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.....	88
Σχήμα 3.12. Σχηματικό διάγραμμα μετρητή της μάζας σωματιδιακής ύλης β-ακτινοβολίας.....	90
Σχήμα 4.1. Διεργασιών εισαγωγής, δημιουργίας και απομάκρυνσης αιωρουμένων.....	94
Σχήμα 4.2. Αριθμός δηλητηριάσεων λόγω εισπνοής ειδών οικιακής χρήσης, σύμφωνα με ετήσιο απολογισμό του κέντρου δηλητηριάσεων.....	98
Σχήμα 4.3. Σύνθεση πειραματικών και θεωρητικών τιμών του ρυθμού εναπόθεσης.....	103
Σχήμα 4.4. Αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου: Τιμές της ικανότητας διείδυσης.....	104
Σχήμα 5.1. Περιοχή δειγματοληψίας (λεωφόρος Αλεξάνδρας από την οδό Κουμανούδη μέχρι.....	111
Σχήμα 5.2. Περιοχή δειγματοληψίας (λεωφόρος Αλεξάνδρας και αλσύλιο).....	113
Σχήμα 5.3. Περιοχή Δειγματοληψίας (Αλσύλιο, Πεδίον Άρεως, οδός Μουστοξύδη, οδός.....	113

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Βασικότεροι ρυπαντές που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ανά κλάδο βιομηχανικής δραστηριότητας.....	23
Πίνακας 2.2. Κύριοι ρυπαντές, οι πηγές τους και οι επιδράσεις τους στην υγεία και το.....	24
Πίνακας 2.3. Αέριοι Ρυπαντές της ατμόσφαιρας και οι σημαντικότερες ιδιότητες τους.....	25
Πίνακας 3.1. Χρόνος που απαιτείται για την κάθοδο ενός σωματιδίου λόγω βαρυντικής.....	34
Πίνακας 3.2. Οι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων.....	50
Πίνακας 3.3. Εκπομπές αερίων ρύπων στην Αθήνα (t/έτος).....	56
Πίνακας 3.4. Οδηγία της Ε.Ε. για τα TSP (1983).....	79
Πίνακας 3.5. Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM ₁₀ (1999/30/ΕΚ).....	81
Πίνακας 3.6. Θέσπιση μέσης ετήσιας οριακής τιμής της συγκέντρωσης των PM _{2,5} από την Ε.Ε.....	82
Πίνακας 3.7. Οριακή τιμή για τα σωματίδια PM ₁₀	83
Πίνακας 3.8. Τιμή Στόχος για τα σωματίδια PM _{2,5}	83
Πίνακας 3.9. Οριακή Τιμή για τα σωματίδια PM _{2,5}	83
Πίνακας 3.10. Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM ₁₀ και PM _{2,5} κατά US - EPA.....	85
Πίνακας 3.11. Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM ₁₀ και PM _{2,5} κατά US-EPA 2006.....	86
Πίνακας 3.12. Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών.....	86
Πίνακας 3.13. Διάφορες μέθοδοι για τη δειγματοληψία των αιωρούμενων σωματιδίων.....	89
Πίνακας 5.1. Μέση ημερήσια συγκέντρωση σωματιδίων και ελάχιστη-μέγιστη τιμή, τις.....	117
Πίνακας 5.2. Μέση ημερήσια συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, τις καθημερινές.....	117
Πίνακας 5.3. Μέση συγκέντρωση σωματιδίων, τις καθημερινές, τα Σάββατα και τις.....	118
Πίνακας 5.4. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων την Κυριακή 06/03/2011.....	119
Πίνακας 5.5. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες την Κυριακή 06/03/2011.....	119
Πίνακας 5.6. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων τη Δευτέρα 14/03/2011.....	120
Πίνακας 5.7. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες τη Δευτέρα 14/03/2011.....	120
Πίνακας 5.8. Μέτρηση της κυκλοφορίας τη Δευτέρα 14/03/2011.....	120
Πίνακας 5.9. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες.....	121
Πίνακας 5.10. Μέτρηση της κυκλοφορίας.....	121
Πίνακας 5.11. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων την Τρίτη 05/04/2011.....	122
Πίνακας 5.12. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες την Τρίτη 05/04/2011.....	122
Πίνακας 5.13. Μέτρηση της κυκλοφορίας την Τρίτη 05/04/2011.....	123
Πίνακας 5.14. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές.....	124
Πίνακας 5.15. Μέτρηση της κυκλοφορίας.....	124
Πίνακας 5.16. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές.....	125
Πίνακας 5.17. Μέτρηση της κυκλοφορίας την Τετάρτη 16/03/2011.....	126

Πίνακας 5.18. Ημέρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες και τα αντίστοιχα επίπεδα	127
Πίνακας 5.19. Η μέτρηση της κυκλοφορίας για τις αντίστοιχες ημέρες και για το πρωϊνό	127
Πίνακας 5.20. Ημέρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες και τα αντίστοιχα επίπεδα συγκεντρώσεων των σωματιδίων για τις μεσημεριανές μετρήσεις.....	128
Πίνακας 5.21. Η μέτρηση της κυκλοφορίας για τις αντίστοιχες ημέρες και για το ..	128
Πίνακας 5.22. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού το Σάββατο	129
Πίνακας 5.23. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού την Κυριακή	129
Πίνακας 5.24. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές (weekdays)	129
Πίνακας 5.25. Σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης της οδού Γκύζη με την λεωφόρο	132
Πίνακας 5.26. Σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης της οδού Γκύζη με την λεωφόρο	132
Πίνακας 5.27. Αναφορά σχετικών μελετών και αντίστοιχων επιπέδων συγκέντρωσης	134
Πίνακας 5.28. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του	135

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το περιβάλλον των μεταφορικών μέσων και των οδών κυκλοφορίας είναι αναγκαίο να μελετηθεί αφού οι διάφορες υποομάδες πληθυσμού καταναλώνουν ουσιαστικό ποσοστό του χρόνου τους σε αυτό, στο οποίο η έκθεσή τους σε αέριους ρύπους είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες χώρων. Κρίνεται ιδιαίτερα σκόπιμο να εξεταστεί λόγω της αυξανόμενης συσχέτισης της έκθεσης πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση (PM_{10} , $PM_{2,5}$ και PM_1) και των αρνητικών αποτελεσμάτων που επιφέρουν στην υγεία αυτών (Schweizer et al., 2005, Peters et al., 2004, Pope et al., 2002). Θεωρείται ότι πολλές χρόνιες ασθένειες υποομάδων πληθυσμού είναι αποτέλεσμα της επαναλαμβανόμενης έκθεσης σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Schwartz, 2000). Επιπροσθέτως, η σημασία των βραχυχρόνιων εκθέσεων (short-term exposure) σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης είναι ιδιαίτερα σημαντική και κρίσιμη για την ανθρώπινη υγεία.

Ο πληθυσμός που εκτίθεται σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση δεν περιορίζεται μόνο σε υποομάδες που χρησιμοποιούν τα μέσα μεταφοράς, αλλά περιλαμβάνει εκείνες τις υποομάδες πληθυσμού που κυκλοφορούν σε δρόμους αυξημένης κυκλοφοριακής συμφόρησης, εκείνες που εργάζονται σε ένα πολυσύχναστο δρόμο, εκείνες των οποίων τα διαμερίσματα, τα μαγαζιά και άλλα δημόσια μέρη βρίσκονται σε δρόμους με πυκνή κυκλοφορία, εκείνες τις υποομάδες οι οποίες κυκλοφορούν με το ποδήλατο και εκείνες οι οποίες περιμένουν στη στάση για να χρησιμοποιήσουν τις δημόσιες συγκοινωνίες (πχ. το λεωφορείο) (Kaur et al., 2005b).

Καθώς λοιπόν οι πεζοί κυκλοφορούν σε ένα δίκτυο δρόμων στο αστικό περιβάλλον εκτίθονται αναπόφευκτα σε ρύπους οι οποίοι εκπέμπονται από τα οχήματα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κίνησης και επηρεάζονται από διάφορες συνθήκες διασποράς, προκαλώντας πολλές σοβαρές και αρνητικές επιπτώσεις για την υγεία (Kaur et al., 2005a).

Μελέτες οι οποίες εξετάζουν την προσωπική έκθεση πεζών σε ένα περιβάλλον οδών κυκλοφορίας όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν αυξηθεί σταθερά σε αριθμό την τελευταία δεκαετία γεγονός που δείχνει τη σοβαρότητα της έκθεσης σε αυτή την κατηγορία ρύπων (Buonanno et al., 2011, Kaur et al., 2005a, Zhao et al., 2004, Gulliver and Briggs, 2004, Duci et al., 2003, Wong, 2002). Παρόλα αυτά παραμένει το γεγονός ότι οι μελέτες αυτές υστερούν σε αριθμό σε σχέση με μελέτες

σε μέσα μεταφοράς, καθώς και στη μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων και τοπικών χαρακτηριστικών.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η παρούσα εργασία ασχολήθηκε με την έκθεση πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση (PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1) σε χαρακτηριστικές κεντρικές οδούς έντονης κυκλοφορίας στην περιοχή της Αθήνας.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή και ανάλυση του πειραματικού μέρους της διπλωματικής εργασίας, στα κεφάλαια που ακολουθούν αναφέρουμε γενικά στοιχεία για την ατμόσφαιρα, την ατμοσφαιρική ρύπανση και τα αιωρούμενα σωματιδιακά κλάσματα (PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1).

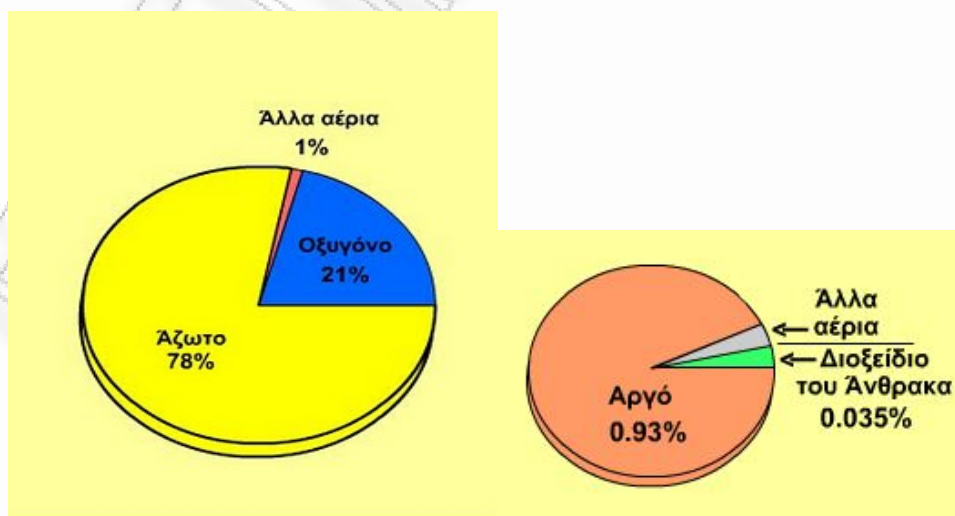
1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ

1.1 Γενικά Στοιχεία

Ατμόσφαιρα καλείται το αεριώδες περίβλημα που περιβάλλει τη Γη, το οποίο συγκρατείται λόγω της βαρύτητας της, και φθάνει σε ύψος περίπου 3.500 km. Στην ατμόσφαιρα της Γης οφείλεται η ύπαρξη ζωής, εφόσον σε αυτήν οφείλονται η απορρόφηση μεγάλου τμήματος της υπεριώδους ακτινοβολίας και η μείωση της διαφοράς των ακραίων θερμοκρασιών που θα υπήρχαν μεταξύ ημέρας και νύχτας χωρίς αυτήν.

Η σύνθεση της από την επιφάνεια της θάλασσας και μέχρι τα 50 km ύψος, παραμένει περίπου αμετάβλητη. Αντίθετα η πυκνότητά της ατμόσφαιρας ελαττώνεται πολύ γρήγορα έτσι ώστε η αναπνοή στη κορυφή του Έβερεστ (8.850 m) να είναι πολύ δύσκολη μέχρι αδύνατη, αφού η πυκνότητα της εκεί, φθάνει μόλις τα 2/5 της πυκνότητας που παρατηρείται στην επιφάνεια της θάλασσας.

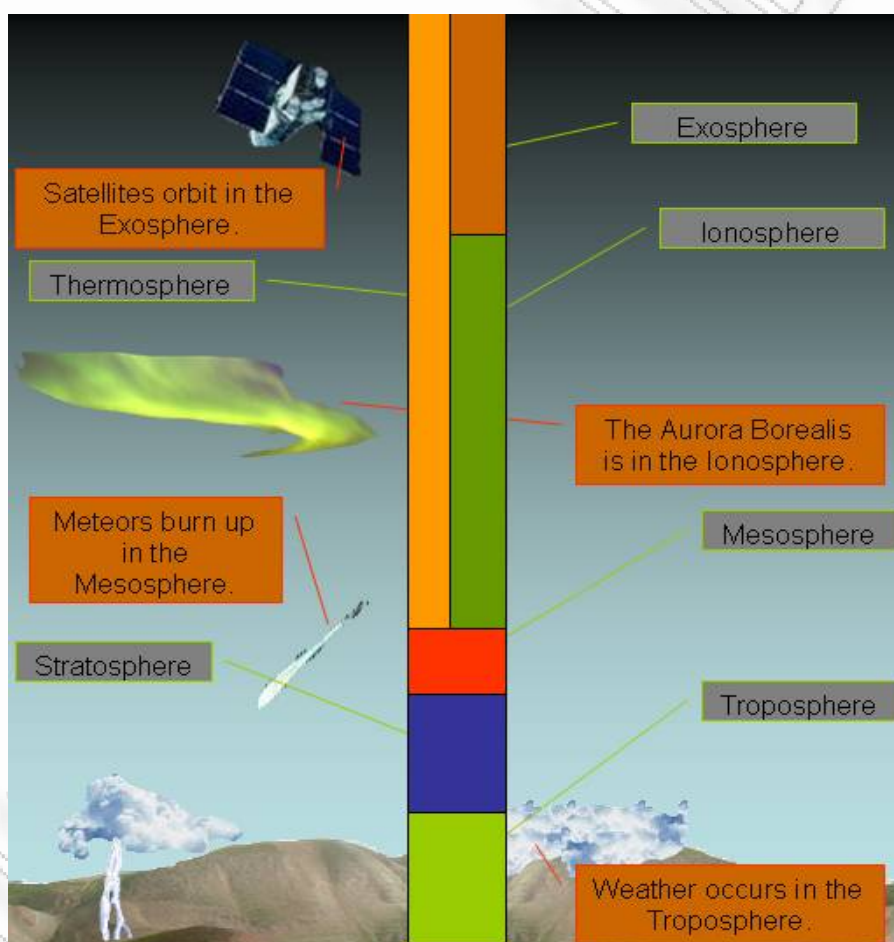
Ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί μίγμα πολλών αερίων, με το μεγαλύτερο ποσοστό σε όγκο να κατέχει το άζωτο (78%) και το οξυγόνο (21%). Εκτός αυτών υπάρχει το διοξείδιο του άνθρακα, ευγενή αέρια, ίχνη υδρογόνου, όζοντος κλπ. Στην ατμόσφαιρα επίσης αιωρούνται σχεδόν πάντοτε και μόρια κονιορτού, καπνού, άλατος (από τα σταγονίδια των κυμάτων), καθώς επίσης και μεγάλη ποσότητα υδρατμών που προέρχεται από την εξάτμιση θαλασσών, λιμνών.



Εικόνα 1.1. Ποσοστό των αερίων από τα οποία αποτελείται ο ατμοσφαιρικός αέρας

Η ατμόσφαιρα, είναι εκείνη η οποία συγκρατεί την υπεριώδη ακτινοβολία, προκαλεί τους χρωματισμούς του ουρανού και των νεφών, ενώ συγχρόνως αποτελεί το μέσον στη διάδοση του ήχου, αλλά και στη διάχυση του φωτός. Χωρίς αυτή, ο ουρανός θα ήταν σκοτεινός, ενώ στη σκιά θα επικρατούσε πλήρες σκοτάδι και οι αστέρες θα έλαμπαν με σταθερό φως νύκτα και μέρα.

Η χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας μέχρι το ύψος των 80-100 km είναι αμετάβλητη. Ανάλογα όμως της μεταβολής της θερμοκρασίας διακρίνονται σ' αυτή τα ακόλουθα στρώματα: η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα, η μεσόσφαιρα, η θερμόσφαιρα και η εξώσφαιρα.



Εικόνα 1.2. Τα στρώματα της ατμόσφαιρας

Η **τροπόσφαιρα** είναι το πιο κοντινό ατμοσφαιρικό στρώμα στην επιφάνεια της γης και σ' αυτό εξελίσσονται όλα σχεδόν τα καιρικά φαινόμενα. Ο αέρας βρίσκεται σε συνεχή κίνηση καθώς θερμαίνεται και ψύχεται. Σύννεφα δημιουργούνται καθώς το νερό εξατμίζεται και συμπυκνώνεται. Αυτή η συνεχής μεταφορά αέρα, θερμότητας

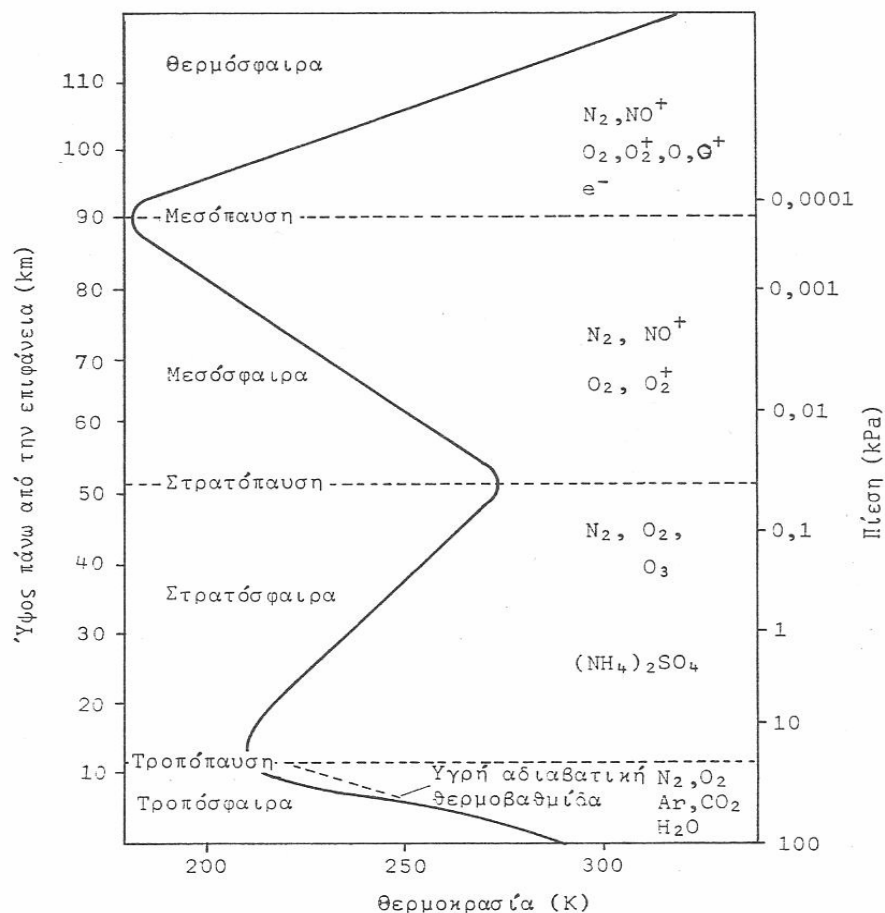
και νερού, δημιουργεί τον καιρό. Το ύψος της τροπόσφαιρας ποικίλλει στις διάφορες περιοχές της γης. Για παράδειγμα, στον Ισημερινό η τροπόσφαιρα εκτείνεται σε ύψος έως και 20 km. Στους πόλους, το ύψος της φτάνει τα 10 km. Έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα απ' όλα τα στρώματα και περιλαμβάνει περίπου το 80% των αερίων της ατμόσφαιρας και όλους τους υδρατμούς. Τα αέρια της τροπόσφαιρας λειτουργούν σαν «θερμοκήπιο» εγκλωβίζοντας ένα μέρος της θερμότητας. Έτσι η θερμοκρασία της Γης φτάνει κατά μέσο όρο στους +15°C αντί για -18°C. Καθώς ανεβαίνουμε σε μεγαλύτερα ύψη, ο αέρας γίνεται όλο και πιο αραιός. Μόνο στα κατώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας υπάρχει αρκετός αέρας ώστε να μπορούμε να αναπνέουμε. Η θερμοκρασία του αέρα πέφτει όσο ανεβαίνουμε ψηλότερα και φτάνει στους -80°C στο άνω όριο της τροπόσφαιρας που ονομάζεται τροπόπαυση.

Η **στρατόσφαιρα** είναι το ατμοσφαιρικό στρώμα πάνω από την τροπόσφαιρα. Εκτείνεται σε ύψος από 16 μέχρι 50 περίπου km και περιέχει σχεδόν ολόκληρο τον υπολειπόμενο αέρα. Είναι θερμότερη από την ανώτερη τροπόσφαιρα κι αυτός ο ζεστός αέρας λειτουργεί σαν καπάκι που παγιδεύει τα σύννεφα στην τροπόσφαιρα. Η θερμοκρασία στα χαμηλότερα επίπεδα της στρατόσφαιρας είναι γύρω στους -60°C και αυξάνεται με το ύψος μέχρι τους 0°C. Τα αεριωθούμενα αεροσκάφη πετάνε συχνά στη στρατόσφαιρα, καθώς εκεί, σε αντίθεση με την τροπόσφαιρα δεν παρατηρούνται δυνατοί άνεμοι. Η θερμοκρασία κυμαίνεται από τους -80°C μέχρι τους -3°C στο ανώτερο όριο της που είναι η στρατόπαυση. Η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στη στρατόσφαιρα, οφείλεται στην απορρόφηση ενός μεγάλου τμήματος της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου από το όζον (O₃) η παρουσία του οποίου αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της στρατόσφαιρας. Χωρίς το στρώμα του όζοντος η ζωή στη γη θα ήταν αδύνατη. Τα τελευταία χρόνια το στρώμα του όζοντος έχει μειωθεί σημαντικά λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας (τρύπα του όζοντος).

Η **μεσόσφαιρα** εκτείνεται σε ύψος από 50 έως 85 km από την γήινη επιφάνεια. Είναι αρκετά ψυχρή, με θερμοκρασίες συχνά χαμηλότερες από τους -100°C. Στην μεσόσφαιρα εμφανίζονται τα μετέωρα, που είναι συνήθως θραύσματα διαστημικών πετρωμάτων που καίγονται κατά την είσοδο τους στην ατμόσφαιρα της γης. Στο τελευταίο μέρος της μεσόσφαιρας βρίσκεται η μεσόπαυση που είναι η πιο ψυχρή περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας επειδή δεν υπάρχει το όζον.

Η **θερμόσφαιρα** είναι το θερμότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, καθώς τα λιγοστά μόρια αέρα που περιέχει απορροφούν απευθείας ακτινοβολία από τον ήλιο. Στην θερμόσφαιρα ανήκει και η **ιονόσφαιρα**, ένα στρώμα φορτισμένων σωματιδίων που αντανακλά τα ραδιοκύματα. Εκτείνεται από τα 85 μέχρι τα 500 km. Το ανώτερο μέρος της λέγεται θερμόπαυση. Η θερμοκρασία στη θερμόσφαιρα αρχίζει από $-92\text{ }^{\circ}\text{C}$ και φθάνει μέχρι μερικές χιλιάδες βαθμούς στα 400 km.

Τέλος η **εξώσφαιρα** είναι το ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, πέρα από το οποίο αρχίζει το διάστημα, διότι τα συστατικά της αποκτούν ικανή κινητική ενέργεια, ώστε να υπερνικούν το πεδίο βαρύτητας της γης. Σε ύψος περίπου 900 km από την γήινη επιφάνεια, ο αέρας που διαθέτει είναι πάρα πολύ αραιός. Αρκετοί δορυφόροι περιφέρονται σε τροχιά λίγο πιο πάνω από την εξώσφαιρα.



Σχήμα 1.1. Κατανομή θερμοκρασιών, πιέσεων και χημικών ουσιών στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας. (1atm=101,3 kPa) (Πηγή: Moore and Moore, 1976).

2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ρύπανση του Περιβάλλοντος

Ως ρύπανση του περιβάλλοντος νοείται η είσοδος κάθε ουσίας ή ενέργειας (θερμότητας, ήχου, ραδιενέργειας κ.α) στο περιβάλλον με ρυθμό ταχύτερο απ' ό,τι αυτό μπορεί να αφομοιώσει, προκαλώντας έτσι βλάβες στην υγεία των ανθρώπων, αλλά και σε άλλους έμβιους οργανισμούς, σε οικολογικά συστήματα, σε κατασκευές αλλά και ενόχληση στην έννομη χρήση του περιβάλλοντος. Η αφομοίωση των ρυπαντικών ουσιών από το ατμοσφαιρικό περιβάλλον γίνεται συνήθως με διασπορά, αποικοδόμηση, ανακύκλωση ή αποθήκευση υπό αβλαβή μορφή (Μπεργελές 2005).

Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια που έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της δομής, της σύστασης και των χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του.

Ορισμένα από τα προβλήματα που προκαλεί η ατμοσφαιρική ρύπανση στην υγεία των ανθρώπων είναι τσούξιμο στα μάτια, βήχα, σοβαρά αναπνευστικά, νευρικά και τοξικολογικά προβλήματα. Σοβαρές όμως είναι και οι επιπτώσεις της ρύπανσης του αέρα στο κλίμα της γης, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή, η τρύπα του όζοντος.

Κυριότερες αιτίες της αυξημένης περιβαλλοντικής ρύπανσης αποτελούν η αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως, η συγκέντρωση του στις πόλεις και η αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά κάτοικο (και κατά συνέπεια των ρυπαντικών ουσιών στην ατμόσφαιρα).

Με τον όρο ρυπαντές νοούνται γενικά ουσίες στερεές, υγρές ή αέριες που εκπέμπονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, ή προκύπτουν μετά από αλληλεπίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας με το οικοσύστημα, και οι οποίες επιφέρουν άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην άνεση, ευεξία και υγεία του ανθρώπου και όλων των έμβιων οργανισμών.

Οι ρυπαντές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους πρωτογενείς και τους δευτερογενείς ρυπαντές. Πρωτογενείς ρυπαντές είναι οι ρυπαντές που εκπέμπονται άμεσα από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Δευτερογενείς ρυπαντές είναι εκείνοι που προκύπτουν από τους πρωτογενείς ρυπαντές μετά από αλληλεπίδραση τους με το οικοσύστημα (λεξικό Τεγόπουλου – Φυτράκη).

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα στοιχεία για τους κυριότερους πρωτογενείς και δευτερογενείς ρυπαντές:

2.2 Πρωτογενείς ρυπαντές

Διοξείδιο του θείου (SO₂)

Το SO₂ είναι αέριο άχρωμο, με οξεία ερεθιστική οσμή (για συγκέντρωση μεγαλύτερη από 3 ppm) και οξειδώνεται με φωτοχημική ή καταλυτική διαδικασία σε τριοξείδιο του θείου (SO₃). Απορροφώντας την ατμοσφαιρική υγρασία σχηματίζει θειικό οξύ το οποίο είτε πέφτει στο έδαφος με τη βροχή είτε προσροφάται από τα αιωρούμενα στον αέρα σωματίδια σχηματίζοντας θειικά άλατα σε μορφή σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά λόγω βαρυτικής κατακρήσσης πέφτουν στο έδαφος ή εισπνέονται. Τα οξείδια του θείου ερεθίζουν το αναπνευστικό σύστημα και προκαλούν μείωση της ορατότητας. Σοβαρές βλάβες προκαλούνται στο φυτικό κόσμο καθώς το διοξείδιο του θείου μειώνει την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα, αν και σε μικρές ποσότητες είναι χρήσιμο γιατί αναπληρώνει το θείο σε εδάφη όπου υπάρχει έλλειψη σε θειικά άλατα. Στα μάρμαρα προκαλούνται διαβρωτικές διεργασίες και θεωρείται υπεύθυνο για την καταστροφή των μνημείων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ακρόπολη στην Αθήνα και το Κολοσσαίο στη Ρώμη που για χιλιάδες χρόνια έμειναν ανέπαφα στις επιδράσεις των ατμοσφαιρικών συνθηκών αλλά τις τελευταίες δεκαετίες υφίστανται σοβαρές φθορές. Υλικά όπως το δέρμα, το χαρτί, οι ηλεκτρικές συνδέσεις, οι μπογιές και τα τεχνητά υφάσματα, όπως το νάιλον επηρεάζονται έντονα από το διοξείδιο του θείου. Μέταλλα όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, και το νικέλιο διαβρώνονται με αυξημένους ρυθμούς υπό

την παρουσία διοξειδίου του θείου. Επίσης το διοξείδιο του θείου αντιδρώντας με την υγρασία της ατμόσφαιρας ή τη βροχή μετατρέπεται σε θειικό οξύ που αποτελεί το βασικότερο συστατικό της όξινης βροχής.

Το αέριο διοξείδιο του θείου προέρχεται από την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο καθώς και από πλήθος βιομηχανικών διεργασιών, όπως η βιομηχανία θειικού οξέος, τα διυλιστήρια και τα εργοστάσια λιπασμάτων. Το 80% του παγκοσμίως παραγόμενου διοξειδίου του θείου οφείλεται σε φυσικές διεργασίες και συγκεκριμένα στην οξείδωση του αερίου υδρόθειου, το οποίο προέρχεται από έλη, ηφαιστεια κ.α. Το υπόλοιπο 20% οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες, πηγές ρύπανσης που σε αντιδιαστολή με τις φυσικές πηγές είναι συγκεντρωμένες σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Οι ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης για το SO₂ και γενικότερα οξείδια του θείου μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Βιομηχανικές δραστηριότητες: βιομηχανική καύση μαζούτ για θέρμανση ή παραγωγή ατμού, βιομηχανίες οξείδωσης θειούχων ορυκτών για την εξαγωγή μετάλλου, διυλιστήρια πετρελαιοειδών.
- Εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: καύση μαζούτ ή άνθρακα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Κεντρική θέρμανση κατοικιών: καύση μαζούτ, πετρελαίου.
- Μεταφορές: διάφορα μεταφορικά μέσα, κυρίως φορτηγά που κινούνται με ακάθαρτο πετρέλαιο.

Μακροχρόνια έκθεση στο διοξείδιο του θείου μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, να τροποποιήσει τον αμυντικό μηχανισμό των πνευμόνων και να επιδεινώσει τυχόν υπάρχουσες καρδιοαγγειακές παθήσεις. Άτομα με καρδιοαγγειακές, χρόνιες πνευμονολογικές παθήσεις καθώς και μικρά παιδιά και ηλικιωμένοι είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε τέτοιες συνθήκες.

Υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα συμβάλλουν επίσης στη μείωση της ορατότητας, στην αύξηση της οξύτητας των λιμνών και των ποταμών και προκαλούν αλλοιώσεις στη βλάστηση και τα μέταλλα.

Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι άχρωμο, άοσμο αέριο και παράγεται κυρίως από ατελείς καύσεις οργανικών ενώσεων λόγω έλλειψης οξειδωτικού και από κάποιες βιολογικές και βιομηχανικές διεργασίες. Προέρχεται κυρίως από τα καυσαέρια των

αυτοκινήτων σε ποσοστό μέχρι και 10%, κυρίως σε συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα στο ρελαντί.

Λόγω της μικρής ταχύτητας διάχυσης, δημιουργεί πρόβλημα κυρίως στην περιοχή στην οποία εκπέμπεται. Για τις αστικές περιοχές οι συγκεντρώσεις CO σχετίζονται κυρίως με την πυκνότητα της κυκλοφορίας και τις καιρικές συνθήκες. Επειδή το CO αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη του αίματος 200 φορές ταχύτερα σε σύγκριση με το οξυγόνο, τελικά γίνεται ελλειμματική η τροφοδοσία των ιστών με οξυγόνο, διαδικασία που οδηγεί στο θάνατο. Το φυσικό περιβάλλον εκτός πόλης περιέχει CO σε συγκεντρώσεις 10-200 ppb, ενώ μέσα στις πόλεις οι συγκεντρώσεις μπορεί να φθάσουν και μέχρι 500 ppm.

Υδρογονάνθρακες (HC)

Ελαφρείς (κορεσμένοι και ακόρεστοι) και πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες υπάρχουν στην ατμόσφαιρα μιας αστικής περιοχής. Οι πρώτοι προέρχονται από την εξάτμιση κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση περελαιοειδών και κυρίως της βενζίνης, από βιομηχανίες, με οργανικούς διαλύτες. Οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες σχηματίζονται στις καύσεις και απορροφώνται από τα ιπτάμενα σωματίδια που περιέχονται στα άκαυστα του καυσίμου. Ο ρόλος τους στη ρύπανση είναι ότι παίρνουν μέρος στις φωτοχημικές διαδικασίες και παράγουν αλδεύδες και ακόρεστους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAN).

Αιωρούμενα σωματίδια (PM)

Τα αιωρούμενα σωματίδια αναλύονται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Μόλυβδος (Pb)

Πραγματικό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία αποτελούν τα τοξικά μέταλλα βηρύλλιο, κάδμιο, υδράργυρος, μόλυβδος και νικέλιο που βρίσκονται στον αέρα σε μορφή αιωρούμενων σωματιδίων. Εκτός από το μόλυβδο τα υπόλοιπα απασχολούν κυρίως τους κατοίκους περιοχών κοντά σε τοξικές πηγές (εργοστάσια, χωματερές).

Η κύρια πηγή του μολύβδου στον αέρα είναι η χρησιμοποίηση βενζίνης με μόλυβδο, σε αναλογία μέχρι 0,5g Pb ανά λίτρο βενζίνης. Ο λόγος συμπίεσης της μηχανής ενός αυτοκινήτου προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τα οκτάνια της απαιτούμενης βενζίνης για την παραγωγή της μέγιστης ισχύος της μηχανής και της βέλτιστης λειτουργίας της. Για την ανταπόκριση σε αυτές τις υψηλές απαιτήσεις και την αποφυγή εμφάνισης της προανάφλεξης, προστίθενται στη βενζίνη ενώσεις

τετραμεθυλιούχου και τετρααιθυλιούχου μολύβδου για την αύξηση του αριθμού των οκτανίων της βενζίνης. Ο μολύβδος δεν είναι απαραίτητος στη βενζίνη, απλώς συμβαίνει να είναι πιο φθηνός από άλλα μέσα που ανεβάζουν τον αριθμό των οκτανίων.

Εισέρχεται στον οργανισμό είτε μέσω της αναπνοής είτε μέσω της τροφικής αλυσίδας. Στη συνέχεια διαλύεται στο αίμα και φτάνει σε διάφορα όργανα του ανθρώπινου οργανισμού (νεφρά, συκώτι) και ιδιαίτερα στα οστά, όπου και συσσωρεύεται.

Ο μολύβδος και οι ενώσεις του επιδρούν στην καρδιά και το νευρικό σύστημα. Τα συμπτώματα της χρόνιας δηλητηρίασης από μολύβδο περιλαμβάνουν πονοκεφάλους, απώλεια όρεξης, ναυτία, αναιμία, αδυναμία. Ο μολύβδος αλλάζει το μέγεθος και το σχήμα των ερυθρών αιμοσφαιρίων και τα κάνει ευπαθή. Σε περιοχές κατοικίας με μεγάλη κυκλοφορία αυτοκινήτων ο αερομεταφερόμενος μολύβδος συσχετίζεται με υψηλό ποσοστό καρδιοπαθειών. Η οξεία δηλητηρίαση από το μολύβδο προκαλεί αναισθησία, κώμα και ενδεχομένως θάνατο. Ο μολύβδος είναι ένα συσσωρευτικό δηλητήριο και, παρά το γεγονός ότι η χρόνια δηλητηρίαση από μολύβδο είναι πολύ δύσκολο να διαγνωσθεί, πολλοί θεωρούν ότι ελαφρά συμπτώματα υπάρχουν ήδη.

Περίπου το 3% κατά βάρος των αιωρούμενων σωματιδίων στις μεγαλουπόλεις αποτελείται από άλατα μολύβδου. Μέχρι 90% του μολύβδου από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων είναι σε μορφή αεροσωματιδίων διαμέτρου μικρότερης των 0,5μm. Αυτά τα μικρά σωματίδια μπορούν να παραμένουν αιωρούμενα στον αέρα για αρκετό χρόνο μέχρι να παρασυρθούν από τη βροχή και να ρυπάνουν τις λίμνες ή τις θάλασσες ή να εισαχθούν στον άνθρωπο μέσω της αναπνοής ή της τροφικής αλυσίδας.

2.3 Δευτερογενείς ρυπαντές

Οξειδία του Αζώτου (NO_x)

Το άζωτο αποτελεί το 79% του όγκου του αέρα που εισπνέουμε, ενώ σχηματίζει διάφορα οξειδία του αζώτου, κατά την καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσης (αυτοκίνητα) και σε κλιβάνους όπου καίγονται ορυκτά καύσιμα. Περισσότερο από το 60% του συνόλου των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου λαμβάνουν χώρα στις αστικές περιοχές. Η κύρια ένωση του αζώτου η οποία περιέχεται στα καυσαέρια των αυτοκινήτων είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO). Όσο υψηλότερη είναι η

θερμοκρασία της καύσης, τόσο μεγαλύτερη και η ποσότητα του οξειδίου του αζώτου που σχηματίζεται. Μείωση των υδρογονανθράκων και του μονοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια των αυτοκινήτων μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της θερμοκρασίας καύσης. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εκπομπής οξειδίου του αζώτου. Το NO παρουσία O_2 του ατμοσφαιρικού αέρα μετατρέπεται μερικώς σε NO_2 . Από τις δυνατές χημικές μορφές των οξειδίων του αζώτου, μόνο το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), το οξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), βρίσκονται σε αξιόλογες συγκεντρώσεις, ενώ από τις τρεις αυτές ενώσεις μόνο το NO και το NO_2 δημιουργούν προβλήματα ρύπανσης του αέρα. Από τα δύο αυτά οξείδια μόνο το NO_2 θεωρείται τοξικό στις συνήθεις συγκεντρώσεις. Τα οξείδια του αζώτου θεωρούνται ότι έχουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της φωτοχημικής ρύπανσης.

Το διοξείδιο του αζώτου έχει έντονη μυρωδιά και καφεκόκκινο χρώμα που ίσως συμβάλλει στην όψη της σκουριάς που έχει η φωτοχημική αιθαλομίχλη. Το NO_2 ερεθίζει τα μάτια, τη μύτη, το βρογχικό σύστημα και τους πνεύμονες. Όταν έλθει σε επαφή με υγρασία, είτε στον αέρα είτε στο ανθρώπινο σώμα, τότε σχηματίζεται το εξαιρετικά διαβρωτικό νιτρικό οξύ.

Τα οξείδια του αζώτου θεωρούνται ότι κατέχουν το δεύτερο ρόλο μετά τις ενώσεις θείου όσον αφορά στη συμβολή τους στη δημιουργία όξινης βροχής.

Οξειδωτικά φωτοχημικά (όζον O_3 , PAN)

Τα οξειδωτικά φωτοχημικά εξετάζονται μαζί επειδή έχουν κοινές ιδιότητες, σχηματίζονται από τις ίδιες φωτοχημικές διαδικασίες ταυτόχρονα και ανιχνεύονται με τις ίδιες μεθόδους.

Το όζον σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι κανονικό συστατικό της ατμόσφαιρας, αλλά στην περίπτωση δημιουργίας φωτοχημικού νέφους εμφανίζεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις, όπως για παράδειγμα στο Λος Άντζελες έφτασε τα 430mg/m^3 . Μετά το 1970, τέτοια επεισόδια άρχισαν να εμφανίζονται και σε άλλες μεγάλες πόλεις της Ευρώπης, της Αυστραλίας και της Ιαπωνίας. Αυτό έγινε επειδή αυξήθηκαν οι εκπομπές υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου λόγω της αύξησης του αριθμού των αυτοκινήτων.

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις όζοντος δεν εμφανίζονται σε απόσταση μικρότερη από 10-20 km από την πηγή των εκπομπών που οδηγούν στο σχηματισμό του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φωτοχημικές αντιδράσεις που παράγουν το όζον χρειάζονται μέχρι και τρεις ώρες για συνήθεις υδρογονάνθρακες και μέχρι μία μόνο

ώρα για τους πολύ αντιδραστικούς, προκειμένου να κλείσουν ένα φωτοχημικό κύκλο αντιδράσεων, που για κάποιους ερευνητές περιλαμβάνει πλέον των εκατό ενδιάμεσων χημικών ενώσεων.

Η μυρωδιά χλωρίου αποτελεί ένδειξη ότι αρχίζει να υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση όζοντος. Οι επιπτώσεις των υψηλών συγκεντρώσεων είναι το τσούξιμο στα μάτια και στο λαιμό. Το όζον προσβάλλει το ευαίσθητο άκρο των αέριων αγωγών και των κυψελίδων των πνευμόνων και προκαλεί καταστολή της σύνθεσης του DNA, διάσπαση των κυτταρικών μεμβρανών και μεταβολές στις πρωτεΐνες και τα λιπίδια.

Το όζον, καθώς είναι ισχυρότερο οξειδωτικό από το οξυγόνο, προκαλεί σπάσιμο τεντωμένου καουτσούκ σε μικρές συγκεντρώσεις, ενώ ελαττώνει την αντοχή βαμβακερών ή πολυεστερικών υφασμάτων και ξεθωριάζει τα χρώματα τους. Τέλος προκαλεί χαραγές ή κηλίδες στα φύλλα των φυτών.

Πίνακας 2.1. Βασικότεροι ρυπαντές που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ανά κλάδο βιομηχανικής δραστηριότητας

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	ΡΥΠΑΝΤΕΣ
Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί	Καπνός, σωματίδια, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, υδρογονάνθρακες
Διυλιστήρια πετρελαίου	Υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, σωματίδια, υδρόθειο
Εργοστάσια τσιμέντου	Σωματίδια, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου
Χαλυβουργεία	Σωματίδια, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, υδρογονάνθρακες
Λιπάσματα	Σωματίδια, αμμωνία ή/και φθοριούχα ή/και θειικά ή/και νιτρικά παράγωγα
Βιομηχανία γυαλιού	Οξείδια του θείου, οξείδια του αζώτου, φθοριούχα παράγωγα, σωματίδια
Κυκλοφορία	CO, HC, NOx, διοξείδιο του θείου, σωματίδια

Πίνακας 2.2. Κύριοι ρυπαντές, οι πηγές τους και οι επιδράσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον.

ΡΥΠΑΝΤΗΣ	ΚΥΡΙΕΣ ΠΗΓΕΣ	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Μηχανές Εσωτερικής Καύσης αυτοκινήτων. Πολύ μικρότερη συνεισφορά από βιομηχανικές δραστηριότητες	Πονοκέφαλοι, μειωμένη διαύγεια, θάνατος, καρδιακές αλλοιώσεις
Διοξείδιο του θείου (SO₂)	Καύση πετρελαίου και γαιανθράκων για ηλεκτροπαραγωγή και θέρμανση κτιρίων. Μικρότερες ποσότητες από βιομηχανικές δραστηριότητες	Ερεθισμός ματιών, αλλοιώσεις πνευμόνων, καταστροφή υδρόβιας ζωής, όξινη βρογχίτις, καταστροφή δασών, καταστροφή μνημείων.
Υδρογονάνθρακες (HC)	Μηχανές Εσωτερικής Καύσης αυτοκινήτων. Μικρότερες ποσότητες από βιομηχανικές δραστηριότητες	Συμβολή στο φωτοχημικό νέφος, μείωση ορατότητας, επίδραση στους πνεύμονες (μόλυβδος από μολυβδομένη βενζίνη επίδραση στα νεφρά και στον εγκέφαλο, είσοδο στην τροφική αλυσίδα)
Στερεά σωματίδια ή αεροσωματίδια	Καύση πετρελαίου και γαιανθράκων για ηλεκτροπαραγωγή, βιομηχανικές χρήσεις, θέρμανση κτιρίων. Μικρότερες ποσότητες από αυτοκίνητα	Επίδραση στους πνεύμονες, ερεθισμός ματιών, ζημιές στη γεωργική παραγωγή, μείωση ορατότητας, αλλοίωση χρωμάτων και μνημείων.
Οξείδια του αζώτου κυρίως μονοξείδιο (NO) και διοξείδιο (NO₂)	Μηχανές εσωτερικής καύσης και μεγάλες στάσιμες μονάδες καύσης όπως εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής	Ζημιές πνευμόνων, όξινη βρογχίτις, καταστροφή μνημείων, καταστροφή δασών, σχηματισμός φωτοχημικής ομίχλης

Πίνακας 2.3. Αέριοι Ρυπαντές της ατμόσφαιρας και οι σημαντικότερες ιδιότητες τους

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΣΗΜΑΣΙΑ ΩΣ ΑΕΡΙΟΣ ΡΥΠΑΝΤΗΣ
Διοξείδιο του θείου	SO ₂	Άχρωμο, χαρακτηριστικής οσμής, διαλυτό στο νερό σχηματίζοντας θειώδες οξύ H ₂ SO ₃	Επιδρά στα φυτά, στις κατασκευές και στην υγεία
Τριοξείδιο του θείου	SO ₃	Διαλυτό στο νερό σχηματίζοντας θειικό οξύ H ₂ SO ₄	Ιδιαίτερα διαβρωτικό
Υδρόθειο	H ₂ S	Οσμή χαλασμένου αυγού σε μικρές συγκεντρώσεις, άοσμο σε υψηλές	Ιδιαίτερα δηλητηριώδες
Υποξείδιο του αζώτου	N ₂ O	Άχρωμο, προωθητικό στις φιάλες αεροζόλ και σπρέι	Σχετικά αδρανές, δεν παράγεται κατά την καύση
Μονοξείδιο του αζώτου	NO	Άχρωμο αέριο	Παράγεται σε καύσεις με υψηλή θερμοκρασία και πίεση, οξειδώνεται σε NO ₂
Διοξείδιο του αζώτου	NO ₂	Καστανόχρωμο αέριο	Κύριο συστατικό στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους
Μονοξείδιο του άνθρακα	CO	Άχρωμο, άοσμο αέριο	Προϊόν ατελούς καύσης, δηλητηριώδες
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	Άχρωμο, άοσμο αέριο	Παράγεται κατά την τέλεια καύση, επιπτώσεις στην αλλαγή του κλίματος της Γης
Όζον	O ₃	Ισχυρά δραστικό	Επιδρά στα φυτά και στις κατασκευές, παράγεται κυρίως κατά το σχηματισμό φωτοχημικού νέφους
Υδρογονάνθρακες	HC	Πολλές	Ορισμένοι υδρογονάνθρακες εκπέμπονται από τα αυτοκίνητα και τη βιομηχανία, άλλοι σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα

2.4 Μετεωρολογία και ατμοσφαιρική ρύπανση

Υπάρχει σημαντική συσχέτιση ανάμεσα στην ατμοσφαιρική ρύπανση και τη μετεωρολογία. Ακολουθεί η περιγραφή ορισμένων βασικών μετεωρολογικών στοιχείων:

Νέφωση

Η νέφωση επηρεάζει σημαντικά το ισοζύγιο της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του εδάφους, αφού μπορεί να απορροφήσει, να σκεδάσει ή να ανακλάσει διάφορα μήκη κύματος.

Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα (υετός)

Όλες οι μορφές υετού (βροχή, χιόνι, κ.λ.π.) επιδρούν σημαντικά στα επίπεδα ρύπανσης. Σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών ρύπων μεταφέρονται μέσω του υετού (υγρή απόθεση) στο έδαφος, καθώς εγκλωβίζονται στις σταγόνες της βροχής κατά το σχηματισμό τους. Επιπλέον, η δημιουργία υετού συνοδεύεται από αυξημένη νέφωση και αγωγή θερμότητας.

Ταχύτητα και Διεύθυνση Ανέμου

Η οριζόντια μεταφορά και διασπορά των ρύπων εξαρτάται καθοριστικά από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Πολλές μελέτες έχουν αποδείξει ότι χαμηλές ταχύτητες ανέμου συνδέονται με αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επιπλέον η ποιότητα της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή επηρεάζεται και από τη δημιουργία διαφόρων συστημάτων κυκλοφορίας αέρα μικρής και μεσαίας κλίμακας. Για παράδειγμα, το σύστημα κυκλοφορίας της θαλάσσιας αύρας μπορεί να βελτιώσει ή να επιδεινώσει την ποιότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή που αναπτύσσεται, αφού καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τις συνθήκες στασιμότητας, αερισμού και επανακυκλοφορίας στην ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, η δημιουργία της θαλάσσιας αύρας ευνοεί τη δημιουργία δευτερογενών σωματιδιακών ρύπων.

Θερμοκρασία

Υψηλές θερμοκρασίες στην ατμόσφαιρα σχετίζονται με βραδέως κινούμενα αντικυκλωνικά συστήματα, ανέφελο ουρανό, αυξημένη ροή ηλιακής ακτινοβολίας, συνθήκες στασιμότητας και μεταφορά αερίων μαζών σε χαμηλότερα ύψη. Οι παραπάνω συνθήκες συμβάλουν στην παραγωγή και συσσώρευση των ρύπων.

Επιπλέον οι αλλαγές στη θερμοκρασία προκαλούνται εξαιτίας της μεταβολής της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται με την ανάπτυξη του οριακού στρώματος και την παραγωγή δευτερογενών ρύπων.

Υγρασία

Η ατμοσφαιρική υγρασία συσχετίζεται σημαντικά με τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας συνήθως συνεπάγεται μείωση της σχετικής υγρασίας. Η υγρασία επηρεάζει την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας με δύο τρόπους. Αφενός με την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη Γη η οποία σε διαφορετική περίπτωση (ξηρή και ανέφελη ατμόσφαιρα) θα διέφευγε προς το διάστημα και αφετέρου με την εκπομπή λανθάνουσας θερμότητας κατά τη συμπύκνωση των υδρατμών.

Ηλιακή Ακτινοβολία

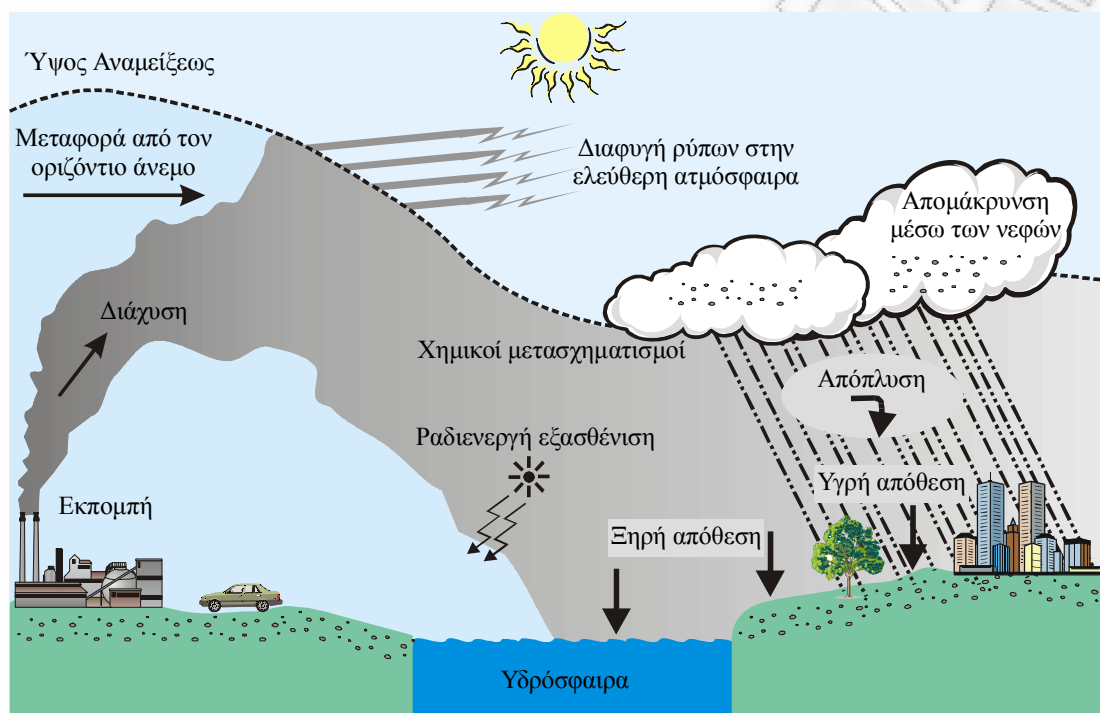
Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι διπλή. Αφενός συμβάλει καταλυτικά στην πραγματοποίηση πληθώρας φωτοχημικών αντιδράσεων με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ρύπων, όπως όζον, αιωρούμενα σωματίδια, κ.λ.π. και αφετέρου καθορίζει την ανάπτυξη του οριακού στρώματος, αφού αυξάνει την κινητική ενέργεια των τυρβώδων στροβίλων, η οποία καθορίζει το ύψος στο οποίο αυτοί φτάνουν, το οποίο ταυτίζεται με το ύψος του οριακού στρώματος.

Ύψος Οριακού Στρώματος

Το οριακό στρώμα είναι το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας στο οποίο επικρατεί τυρβώδης ροή. Μέσω της τύρβης θερμότητα, ορμή, αέριοι και σωματιδιακοί ρύποι διαχέονται από και προς την επιφάνεια του εδάφους. Όταν το ύψος του οριακού στρώματος είναι μικρό δεν ευνοείται η κατακόρυφη διάχυση των ρύπων, με συνέπεια οι ρύποι να συσσωρεύονται σε χαμηλά ύψη και να παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις κοντά στο έδαφος. Η διακύμανση του ύψους του οριακού στρώματος ακολουθεί την ημερήσια μεταβολή της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσο αυτή αυξάνεται στη διάρκεια της ημέρας, αυξάνεται και το ύψος του οριακού στρώματος.

2.5 Διεργασίες απομάκρυνσης των ρύπων από την ατμόσφαιρα

Μια ποικιλία ατμοσφαιρικών μηχανισμών είναι υπεύθυνη για την μεταφορά και τον μετασχηματισμό των αέριων ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Η παρακάτω εικόνα δείχνει σχηματικά τις διαδικασίες οι οποίες συντελούν στην διασπορά των αέριων ρύπων που εκπέμπονται από μία καμινάδα.



Εικόνα 2.1. Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά των ρύπων.

α. Ο καπνός μεταφέρεται μακριά από την πηγή από τον **μέσο οριζόντιο άνεμο**. Η **οριζόντια μεταφορά** αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραιώσης των ρύπων. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή (άπνοια) οι συνθήκες διασποράς είναι άσχημες και υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης επεισοδίου ρύπανσης σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα εκπομπών. Τέτοιες συνθήκες εμφανίζονται συνήθως κοντά στο κέντρο αντικυκλωνικών συστημάτων.

β. Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα (τυρβώδεις στρόβιλοι) είναι υπεύθυνες για την **κατακόρυφη μεταφορά** και την διαπλάτυνση του θυσάνου, με τελικό αποτέλεσμα την αραιώση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διάχυση**. Η κλίμακα και η ένταση της αραιώσης εξαρτώνται από τον βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας. Σε

συνθήκες ευστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά, ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη. Η διάχυση των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμειξης. Το στρώμα το οποίο περιέχεται ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και το ύψος ανάμειξης ονομάζεται στρώμα ανάμειξης.

γ. Η μεταφορά των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ονομάζεται **απόθεση**.

Γενικά ξεχωρίζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους απόθεσης:

- **Καθίζηση** ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων.
- **Ξηρή απόθεση** υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριες ενώσεις τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται, όταν έρθουν σε επαφή, από την υποκείμενη επιφάνεια. Ξηρή απόθεση είναι η απ' ευθείας μεταφορά ενός αερίου ή σωματιδιακού ρύπου στο έδαφος ή στους ωκεανούς.

Η ξηρή απόθεση των αερίων ρύπων οφείλεται σε μηχανισμούς προσρόφησης ή απορρόφησης σε μια στερεή ή υγρή φάση, αντίστοιχα. Η ξηρή απόθεση είναι ταχύτερη για τους αέριους ρύπους που είναι ευδιάλυτοι (π.χ. SO_2). Διαπιστώθηκε ότι το SO_2 αποτίθεται πολύ γρηγορότερα σε βλάστηση που είναι καλυμμένη με πρωινή δροσιά παρά σε ξηρή βλάστηση.

Οι ωκεανοί αποτελούν σημαντικό αποδέκτη για πολλούς αέριους ρύπους, αφού η ταχύτητα απόθεσης τους σ' αυτούς είναι αρκετά μεγάλη.

Η απόθεση σε στερεές επιφάνειες είναι επίσης σημαντική. Βιολογικές δράσεις (π.χ. μικρόβια του εδάφους που καταναλώνουν CO) ή χημικά φαινόμενα (π.χ. αντίδραση όξινων αερίων, όπως το CO_2 και το SO_2 , προς σχηματισμό ανθρακικών και θεικών ορυκτών) ενισχύουν την απόθεση αυτή.

- **Υγρή απόθεση** λαμβάνει χώρα σε περίπτωση υετού οπότε μπορεί να συμβεί κάποιο από τα παρακάτω ενδεχόμενα: Είτε σάρωση των ρύπων οι οποίοι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα από την βροχή ή το χιόνι (απόπλυση) είτε πρόσληψη των ρύπων σε ένα προηγούμενο στάδιο από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής.

Υγρή απόθεση είναι δηλαδή η μεταφορά αέριων και σωματιδιακών ρύπων στο έδαφος ή τους ωκεανούς με τη βροχή.

Πολλά αέρια διαλύονται στα αιωρούμενα σταγονίδια της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρική υγρασία).

Η βροχή επηρεάζει σημαντικά και την απομάκρυνση αερολυμάτων από την ατμόσφαιρα. Η απομάκρυνση πραγματοποιείται με διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά το σχηματισμό του νέφους, μέσα και κάτω από αυτό και κατά την πτώση της βροχής.

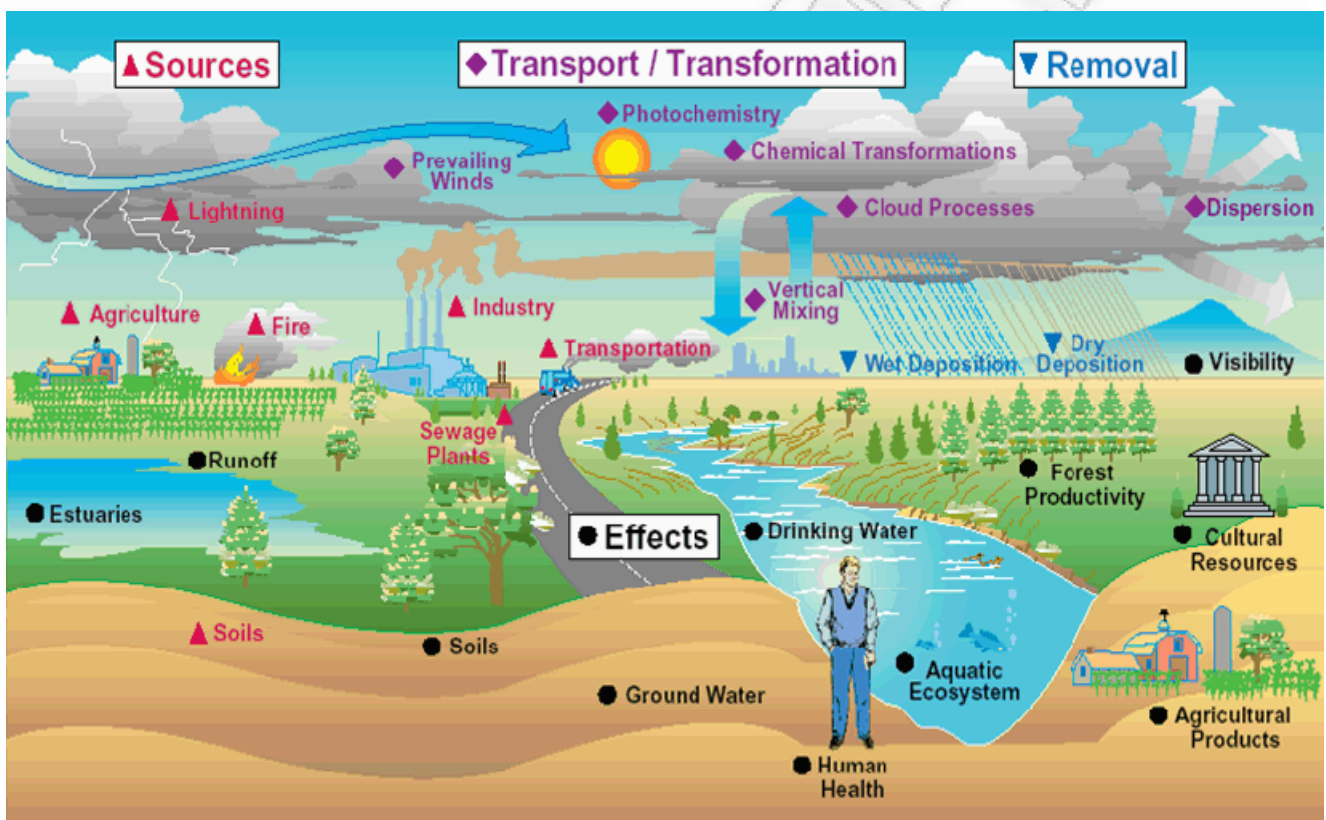
Τα σταγονίδια του νέφους σχηματίζονται με συμπύκνωση υδρατμών γύρω από μικροσκοπικά αιωρούμενα σωματίδια (με διάμετρο συνήθως 0,1-0,2 μm) που ονομάζονται πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (cloud condensation nuclei, CCN). Σε καθαρή ατμόσφαιρα, οι πυρήνες αυτοί είναι, κυρίως, κρύσταλλοι αλάτων, ενώ στην ατμόσφαιρα αστικών περιοχών έχουν και ανθρωπογενή προέλευση. Γύρω από τους πυρήνες αυτούς σχηματίζονται σταγονίδια με διάμετρο 5-20 μm , τα οποία στη συνέχεια μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής ή νιφάδες χιονιού με πολύπλοκες μικροφυσικές διεργασίες. Το μέγεθος των σταγόνων της βροχής ποικίλλει σημαντικά (0,1-5 mm). Οι σταγόνες, κατά τη πτώση τους στο έδαφος παρασύρουν σημαντικές ποσότητες αερολύματος κυρίως μικρού μεγέθους (< 1 μm). Εκτιμάται ότι το 70 με 80% της μάζας των αερολυμάτων που υπάρχει στο χώρο κάτω από ένα σύννεφο απομακρύνεται με τη βροχή.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης παρατηρούνται με βροχές μεγάλης έντασης και διάρκειας. Η βροχή, επομένως, συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση ρύπων από την ατμόσφαιρα, τόσο κατά το στάδιο του σχηματισμού της (rain out), όσο και κατά την πτώση της (wash out).

δ. Κατά τον χρόνο της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα οι ρύποι υφίστανται διάφορους **χημικούς μετασχηματισμούς** λόγω αντιδράσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα είναι ένα αποτελεσματικό εργαστήριο αντιδράσεων μέσα στο οποίο διοχετεύονται χημικά ενεργά συστατικά με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός αριθμού καινούργιων ουσιών. Οι καινούργιες ουσίες παράγονται από αέρια και υγρά τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους και με τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Οι χημικές αντιδράσεις των ρύπων μπορεί να δώσουν και ουσίες οι οποίες δεν είναι ρύποι. Σε πολλές περιπτώσεις όμως στα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων περιλαμβάνονται και

νέοι ρύποι οι οποίοι ονομάζονται δευτερογενείς ρύποι σε αντιδιαστολή με αυτούς που εκπέμπονται από τις πηγές οι οποίοι ονομάζονται πρωτογενείς ρύποι, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως. Οι αντιδράσεις αυτές μπορεί να είναι ομογενείς (στην αέρια φάση) ή ετερογενείς (στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων). Οι ομογενείς αντιδράσεις διακρίνονται σε θερμικές, φωτοχημικές και αντιδράσεις ελευθέρων ριζών.

Η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο παραμονής των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση εκπομπών και διεργασιών ρύπων στη ατμόσφαιρα.

3 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

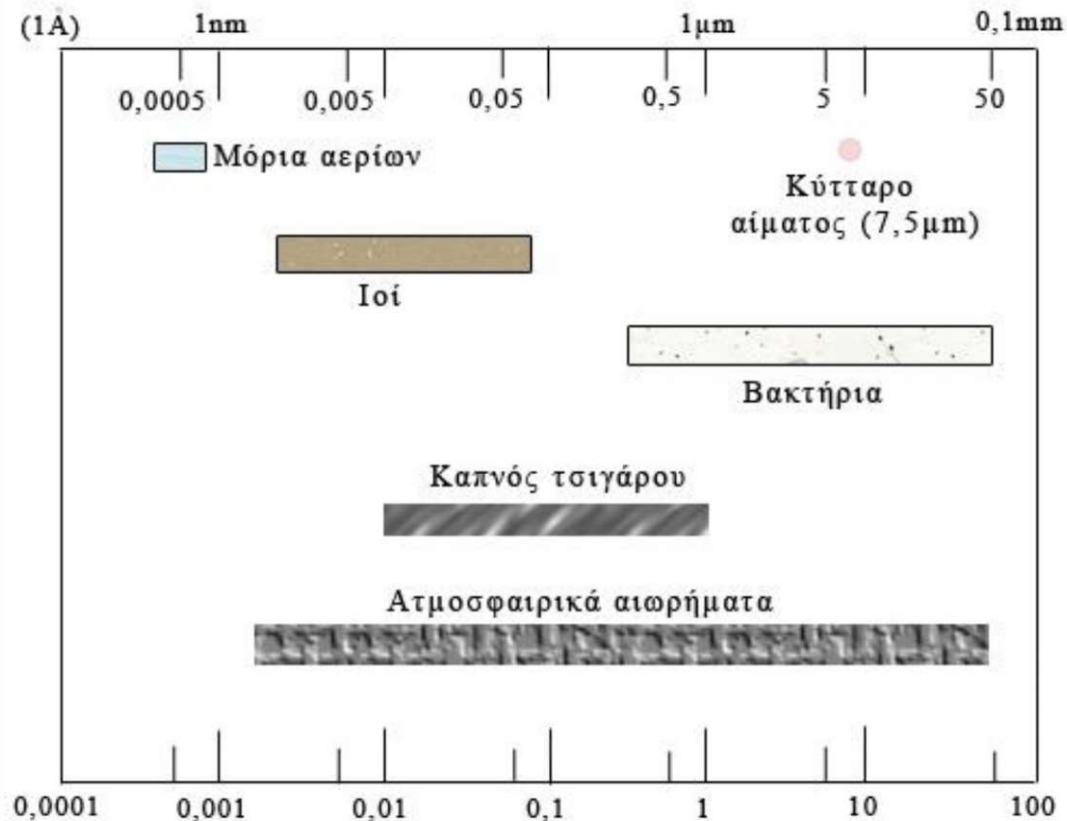
Με τον όρο «αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη» ή «αιωρούμενα σωματίδια» (particulate matter, PM) περιγράφουμε τα διεσπαρμένα στον αέρα, στερεά ή υγρά σωματίδια, με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων (περίπου $2 \cdot 10^{-4}$ μm σε διάμετρο), αλλά μικρότερο από 500 μm . Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από μια μεγάλη ποικιλία πηγών και έχουν ένα σημαντικό εύρος διαφορετικών μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Στην ατμόσφαιρα έχουν ανιχνευθεί συγκεντρώσεις αιωρουμένων σωματιδίων ως προς την μάζα από μερικά $\mu\text{g}/\text{m}^3$ έως και αρκετές εκατοντάδες $\mu\text{g}/\text{m}^3$ σε ατμοσφαιρικά επιβαρυνόμενες περιοχές (Seinfeld & Pandis 2006).

3.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα διαφέρουν από τα αέρια σε δύο σημεία. Αρχικά ένα αέριο αποτελείται από ξεχωριστά άτομα ή μόρια τα οποία είναι διαχωρισμένα ενώ ένα σωματίδιο αποτελείται από μια συνάθροιση μορίων και ατόμων δεσμευμένα μεταξύ τους. Κατά συνέπεια, τα σωματίδια έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από τα άτομα και τα μόρια των αερίων. Δεύτερον, σε αντίθεση με τα αέρια τα σωματίδια βρίσκονται σε υγρή ή στερεή φάση. Οι όροι αιωρούμενα σωματίδια και αερολύματα (aerosols) χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις αδιάκριτα.

Συγκεκριμένα με τον όρο αερολύματα (aerosols) χαρακτηρίζονται τα κολλοειδή συστήματα όπου κάποια αέρια, υγρή ή στερεά ουσία κολλοειδών διαστάσεων βρίσκεται διασκορπισμένη μέσα σε αέριο μέσο διασποράς. Η περίπτωση διασποράς αερίου σε αέριο στην πραγματικότητα είναι δυνατή σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή στην ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα θεωρείται ένα αερόλυμα, όπου εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων, μπορεί να λεχθεί ότι τμήματα αέρα μεγάλης πυκνότητας είναι διασκορπισμένα μέσα στον αέρα σε κολλοειδείς διαστάσεις (στο γεγονός αυτό οφείλεται και το γαλάζιο χρώμα του ουρανού). Συνεπώς ως ατμοσφαιρικά αερολύματα μπορούν να χαρακτηριστούν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κολλοειδών διαστάσεων. Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα αποτελούνται από υγρά ή στερεά σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 100 μm .

Πολλές φορές η συγκέντρωση των σωματιδίων αντιπροσωπεύεται από τον αριθμό σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα αλλά συνήθως μετρείται ως η μάζα των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αέρα. Σε αντίθεση με τους αέριους ρύπους, για τον πλήρη χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων δεν επαρκεί μόνο η συγκέντρωσή τους αλλά απαιτούνται επίσης πληροφορίες για την κατανομή του μεγέθους τους και την χημική τους σύσταση.



Σχήμα 3.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων.

Ο χρόνος παραμονής τους στην ατμόσφαιρα εξαρτάται τόσο από το μέγεθος τους όσο και από το ατμοσφαιρικό στρώμα στο οποίο βρίσκονται. Έτσι ο μέσος χρόνος ζωής στην κατώτερη τροπόσφαιρα είναι 5 ημέρες, ενώ στην ανώτερη τροπόσφαιρα φθάνει τον 1 μήνα. Όταν τα σωματίδια βρεθούν στη στρατόσφαιρα, π.χ. λόγω της έκρηξης ηφαιστείου, ο χρόνος παραμονής φθάνει τα 2-3 χρόνια.

Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των αερολυμάτων βρίσκεται στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται κοντά στο έδαφος οπότε οι μικροί, σχετικά, χρόνοι

παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα δεν αφήνουν μεγάλα χρονικά περιθώρια για την μεταφορά τους σε μεγάλα ύψη.

Έτσι οι συγκεντρώσεις των αερολυμάτων στην ανώτερη τροπόσφαιρα είναι 1-2 τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις αντίστοιχες στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος που η ορατότητα βελτιώνεται δραματικά όταν ξεπεράσουμε τα χαμηλότερα 1-2 χιλιόμετρα της ατμόσφαιρας. Παρ' όλα αυτά στην στρατόσφαιρα υπάρχει ένα σημαντικό στρώμα αερολυμάτων $H_2SO_4-H_2O$ στο ύψος ~15-25 χιλιομέτρων, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη χημεία του όζοντος. Το στρώμα αυτό προέρχεται κυρίως από την οξείδωση του σουλφιδίου του καρβονυλίου (COS), ενός αερίου βιογενούς προέλευσης το οποίο έχει σημαντικό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα και μπορεί να εισχωρήσει στη στρατόσφαιρα. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 3.1 που μας δείχνει την εξάρτηση της διαμέτρου σωματιδίου με το χρόνο καθίζησης.

Πίνακας 3.1. Χρόνος που απαιτείται για την κάθοδο ενός σωματιδίου λόγω βαρυντικής καθίζησης κατά 1 χιλιόμετρο στην ατμόσφαιρα.

Διάμετρος σωματιδίου	Χρόνος καθόδου 1 χιλιομέτρου
0.02	228 χρόνια
0.1	36 χρόνια
1.0	328 ημέρες
10.0	3.6 ημέρες
100.0	1.1 ώρες
1000.0	4 λεπτά

3.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3.3.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ανάλογα με την προέλευση τους, είτε από πρωτογενείς πηγές, είτε από δευτερογενείς διαδικασίες, τα σωματίδια διαχωρίζονται σε πρωτογενή και δευτερογενή.

• Πρωτογενή σωματίδια

Είναι αυτά τα οποία εκπέμπονται κατευθείαν από πηγές. Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις τους είναι συνήθως ανάλογες με τις εκπεμπόμενες ποσότητες.

Μια κατηγορία πρωτογενών σωματιδίων είναι τα προερχόμενα από τη θραύση μεγαλύτερων μαζών και την επαναιώρηση των θραυσμάτων από τον αέρα. Η κύρια μάζα αυτών των πρωτογενών σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερου από 1 μm όμως η κατ' αριθμό κατανομή τους παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή 0,1 – 1 μm. Αυτή η κατηγορία σωματιδίων υπόκειται σε ελάχιστες διαδικασίες μετασχηματισμού μετά την εκπομπή τους. Λόγω του μεγάλου τους σχετικά μεγέθους δε συσσωματώνονται εύκολα μεταξύ τους, αλλά αναμειγνύονται με άλλα ατμοσφαιρικά συστατικά μέσω διαδικασιών μεταφοράς μάζας στην αέρια φάση.

Μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία πρωτογενών σωματιδίων είναι τα σωματίδια στοιχειακού άνθρακα που σχηματίζονται από διαδικασίες καύσης. Αρχικά έχουν μέγεθος 5 – 20 nm, αλλά συσσωματώνονται γρήγορα προς σχηματισμό μεγαλύτερων μαζών. Κατόπιν μεταπίπτουν σε πιο σύνθετες μορφές μεγέθους πολλών δεκάδων nm με την επίδραση τριχοειδών δυνάμεων από ατμούς που συμπυκνώνονται επί αυτών.

• Δευτερογενή σωματίδια

Δευτερογενή σωματίδια ονομάζονται αυτά τα οποία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από μετατροπή αερίων άμεσα εκπεμπόμενων από πηγές. Κύριες πρόδρομες ενώσεις για τα δευτερογενή σωματίδια είναι το διοξείδιο του θείου, η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου.

Ακόμα αρκετές πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) μπορούν να μετασχηματιστούν σε σωματίδια. Η πλειοψηφία αυτών των μετατροπών είναι αποτέλεσμα έντονων φωτοχημικών αντιδράσεων.

Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των δευτερογενών σωματιδίων δεν είναι κατ' ανάγκη ανάλογες προς τις εκπεμπόμενες ποσότητες των πρόδρομων ενώσεων, καθώς

η ελάττωση του ρυθμού σχηματισμού μπορεί να καθορίζεται και από διαφορετικούς παράγοντες από την συγκέντρωση των αντιδρώντων ουσιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δευτερογενές νιτρικό αμμώνιο, μια ασταθής ένωση, η ισορροπία της οποίας με την αμμωνία και το νιτρικό οξύ επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία.

Παρότι η σκόνη που επαναιωρείται από το έδαφος ανήκει στα πρωτογενή σωματίδια, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων.

Για παράδειγμα, το νιτρικό αμμώνιο που περιέχεται στα λιπάσματα είναι δυνατό να εξατμιστεί σε αμμωνία και νιτρικό οξύ, οπότε συμβάλλει στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων.

Τα δευτερογενή σωματίδια συνήθως σχηματίζονται μέσα σε λίγες ώρες και το μέγεθος τους κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 1 μm .

Βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού

Οι βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η **συσσωμάτωση** (coagulation), η **ομογενής πυρηνοποίηση** (homogeneous nucleation) και η **ετερογενής πυρηνοποίηση** ή συμπύκνωση (heterogeneous nucleation).

Συσσωμάτωση είναι η διαδικασία κατά την οποία σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής κίνησης και σχηματίζουν σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους.

Σύμφωνα με τον μηχανισμό της ομογενούς πυρηνοποίησης έχουμε αντιδράσεις αερίων και τον σχηματισμό προϊόντων χαμηλής τάσης ατμών τα οποία συμπυκνώνονται ώστε να σχηματιστούν σωματίδια μέσω συμπλεγμάτων (clusters).

Τέλος η ετερογενής πυρηνοποίηση, περιλαμβάνει αντιδράσεις αερίων πάνω στις επιφάνειες ήδη υπάρχοντων σωματιδίων και μετατροπή τους σε σωματιδιακή ύλη. Για παράδειγμα τα αέρια NO_2 και HNO_3 αντιδρούν με τα σταγονίδια του θαλάσσιου αερολύματος και σχηματίζουν σωματιδιακό NaNO_3 .

Ανάλογα λοιπόν με τον τρόπο σχηματισμού τους, τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε: σκόνη, καπνό, ιπτάμενη τέφρα, αιθάλη, σπρέι, ομίχλη, αχλύς. Τα πρώτα τέσσερα είναι στερεά και τα τρία τελευταία υγρά αερολύματα (Natural Resources Defense Council 1996b).

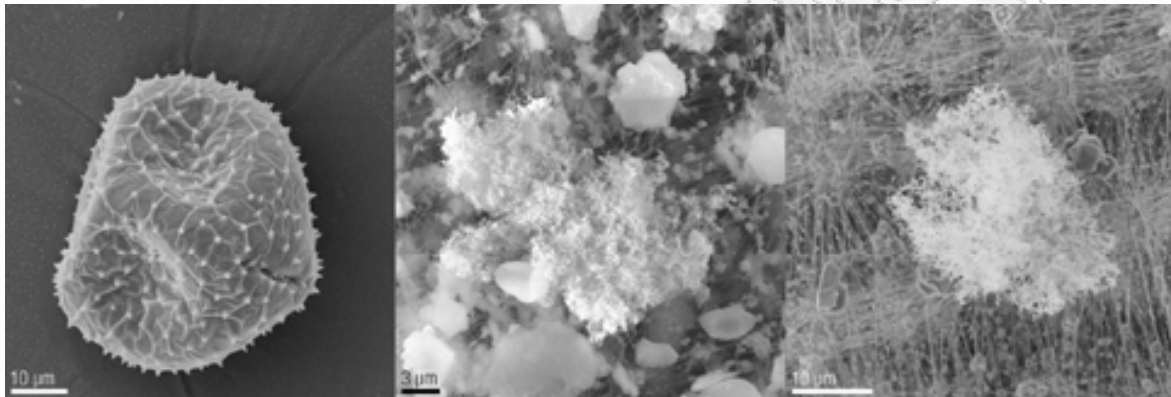
- **Σκόνη:** Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από τη θραύση μεγαλύτερων μαζών κατά την διάρκεια διαδικασιών όπως σύνθλιψη, τριβή, έκρηξη.
Τυπικό μέγεθος: 1 έως 10.000 μm
- **Καπνός:** Μικρά στερεά σωματίδια που προκύπτουν από την ατελή καύση οργανικών υλών όπως το κάρβουνο, ο καπνός ή το ξύλο.
Τυπικό μέγεθος: 0,5 έως 1 μm.
- **Ιπτάμενη τέφρα:** Μικρά, μη καύσιμα ορυκτά ή μεταλλικά σωματίδια που εκπέμπονται από τις καπνοδόχους κατά τη καύση κάρβουνου.
Τυπικό μέγεθος: 1 έως 1.000 μm.
- **Αιθάλη:** Μικρά, στερεά σωματίδια, τα οποία σχηματίζονται από την συμπύκνωση ατμών στερεών υλικών, συχνά οξειδίων των μετάλλων (όπως είναι τα οξείδια του ψευδαργύρου και του μολύβδου) και στοιχειακό άνθρακα.
Τυπικό μέγεθος: 0,03 έως 0,3 μm.
- **Σπρέι:** Υγρά σωματίδια που μορφοποιούνται από το ράντισμα υγρών, όπως τα φυτοφάρμακα ή τα παρασιτοκτόνα.
Τυπικό μέγεθος: 10 έως 1.000 μm.
- **Ομίχλη (fog):** Υγρά σωματίδια ή σταγονίδια που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση ατμών.
Τυπικό μέγεθος: 0,1 έως 10 μm.
Ο μετεωρολογικός αυτός όρος υποδηλώνει την ύπαρξη νέφους σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους και με πυκνότητα τέτοια, ώστε η ορατότητα σε οριζόντια διεύθυνση να είναι μικρότερη από 1000 m.
- **Αχλός (haze):** Ονομάζεται το αερόλυμα το οποίο γίνεται κάτω από παρόμοιες συνθήκες με την ομίχλη, αλλά με ορατότητα μεγαλύτερη των 1000 m. Το τυπικό μέγεθος των σωματιδίων των νεφών κυμαίνεται από 2 έως 80 μm.

Τέλος υπάρχουν τα υγρά σωματίδια που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα σε μέγεθος μεγαλύτερο από 100 μm, έχουν ελάχιστο χρόνο αιώρησης και η ονομασία τους ταυτίζεται με τα ορατά φαινόμενα της βροχής (άνω των 500 μm) ή για μικρότερο μέγεθος, της **ψιγάλας (drizzle)**.

Γύρη

Ιπτάμενη τέφρα

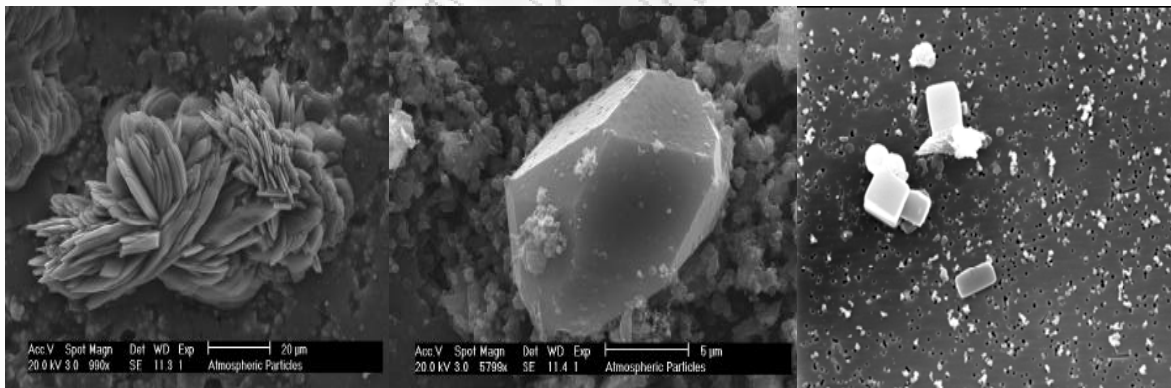
Αιθάλη



Γύψος

Σκόνη εδάφους

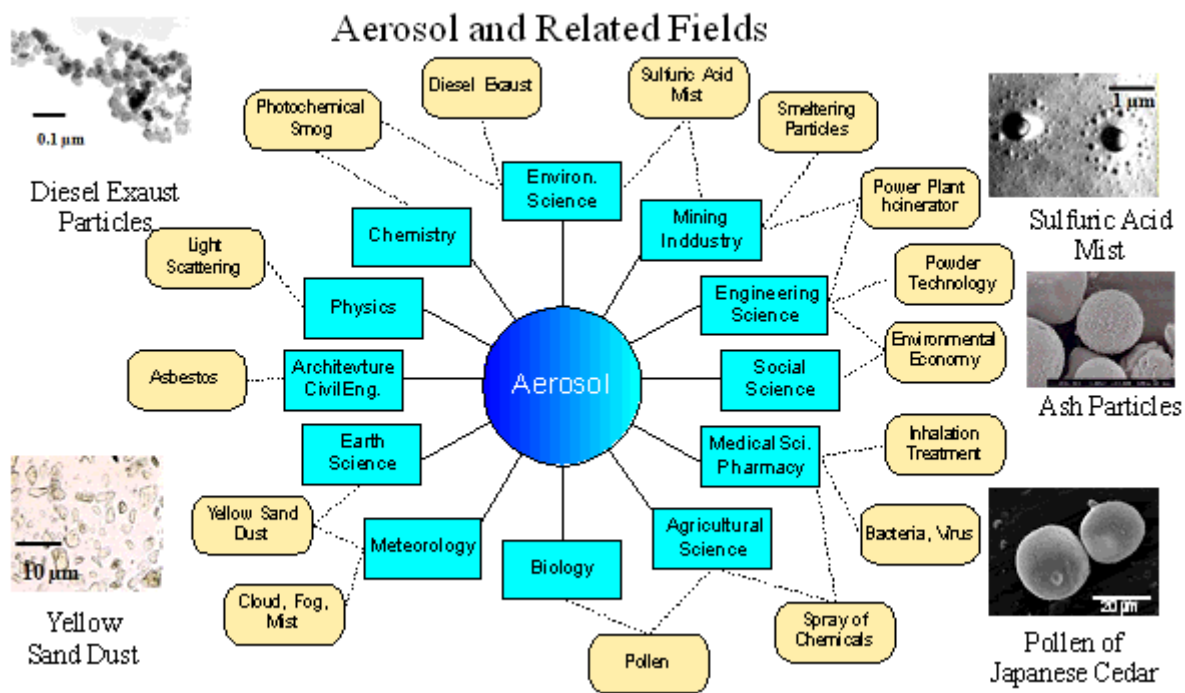
Θαλάσσιο αερόλυμα



Εικόνα 3.1. Αιωρούμενα σωματίδια όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Τα αιωρούμενα σωματίδια όπως αναφέρεται εκτενώς παρακάτω προέρχονται από πολλές πηγές (φυσικές και ανθρωπογενείς) και σχετίζονται με διάφορους τομείς.

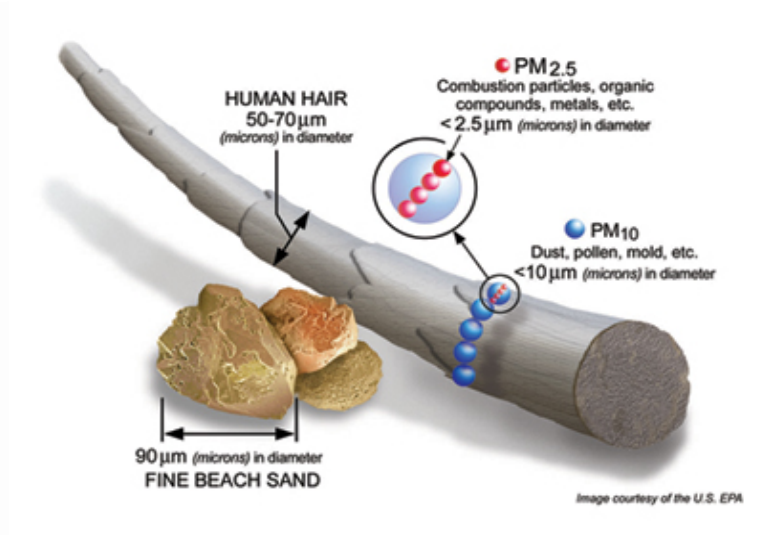
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα αιωρούμενα σωματίδια και οι σχετιζόμενοι τομείς.



Σχήμα 3.2. Αιωρούμενα σωματίδια και τομείς με τους οποίους σχετίζονται.

3.3.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ

Τα σωματίδια έχουν διάφορα σχήματα και, συνεπώς, είναι αδύνατη η έκφραση κοινής παραμέτρου μεγέθους, αφού πολλές ιδιότητες των σωματιδίων εξαρτώνται από το μέγεθος τους (όγκο, μάζα, ταχύτητα εναπόθεσης). Στις κατανομές κατά μέγεθος, ως κριτήριο κατάταξης χρησιμοποιείται το μέγεθος της “ισοδύναμης διαμέτρου” του σωματιδίου. Καθώς το μέγεθος αυτό είναι μία έννοια συμβατική, υπάρχουν διαφορετικοί ορισμοί.



Εικόνα 3.2. Τυπικό μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων (EPA).

Η ισοδύναμη διάμετρος ενός σωματιδίου είναι δυνατόν να προσδιορισθεί:

- Γεωμετρικά (με οπτική ή ηλεκτρονική μικροσκοπία)
- Από την σκέδαση που προκαλεί στο φως
- Από τα χαρακτηριστικά του, όπως είναι η ηλεκτρική ευκινησία, η ταχύτητα εναπόθεσης ή η αεροδυναμική του συμπεριφορά.

Συνήθως, ως κριτήριο καθορισμού της ισοδύναμης διαμέτρου, χρησιμοποιείται η φυσική συμπεριφορά του σωματιδίου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η διάμετρος Stokes (D_p) ή η αεροδυναμική διάμετρος (D_a). Ο ορισμός της πρώτης βασίζεται στο προσδιορισμό της αντίστασης που εμφανίζεται πάνω στο σωματίδιο, όταν αυτό κινείται μέσα σε ένα ρευστό με διαφορετική ταχύτητα. Σωματίδια με ίδια διάμετρο Stokes και ίδια πυκνότητα έχουν την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης. Η αεροδυναμική διάμετρος εξαρτάται από την πυκνότητα του σωματιδίου και ορίζεται ως «η διάμετρος σφαίρας πυκνότητας μονάδας (1 g/cm^3), η οποία έχει την ίδια τελική ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το υπό εξέταση σωματίδιο».

Η αεροδυναμική διάμετρος συσχετίζεται με την διάμετρο Stokes, προσεγγιστικά, με την παρακάτω απλοποιημένη εξίσωση:

$$D_a = D_p \cdot \rho_p^{1/2}$$

όπου: ρ_p η πυκνότητα του σωματιδίου.

Σωματίδια με το ίδιο πρακτικό μέγεθος και σχήμα, αλλά με διαφορετικές πυκνότητες, θα έχουν ίδιες διαμέτρους Stokes αλλά όχι τις ίδιες αεροδυναμικές διαμέτρους. Για σωματίδια μεγαλύτερα από 0,5 μm χρησιμοποιείται η αεροδυναμική διάμετρος, διότι από αυτή εξαρτάται η μεταφορά του σωματιδίου από αέρια ρεύματα, η συλλογή στους δειγματολήπτες και η εναπόθεση μέσα στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα.

ΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ (TSP)

Είναι ο όρος που δόθηκε στο σύνολο των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων. Τα TSP ποικίλουν γενικά σε μέγεθος από 0,01 μm έως και μερικές εκατοντάδες μm . Ωστόσο τα σωματίδια εκείνα με μέγεθος άνω των 50 μm έχουν την τάση να καθιζάνουν πολύ εύκολα. Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε δύο τύπους σωματιδίων, οι οποίοι με τη σειρά τους ομαδοποιούνται σε επιμέρους κλάσματα.

A) Τα λεπτόκοκκα (fine mode)

Λεπτόκοκκα καλούνται τα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μέχρι 2,5 μm . Συνήθως τα σωματίδια αυτά παράγονται δευτερογενώς από αέριες ενώσεις. Χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο κατηγορίες.

• Υποκατηγορία πυρήνα (nuclei mode / nuclei range)

Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος από 0,01 έως 0,05 μm και προέρχονται άμεσα από πηγές καύσης ή είναι συμπυκνώματα προϊόντων καύσης. Παρουσιάζουν μικρό χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα γιατί συσσωματώνονται μεταξύ τους ή με λίγο μεγαλύτερα σωματίδια, προς σχηματισμό σωματιδίων μεγαλύτερης διαμέτρου. Η υποκατηγορία αυτή χωρίζεται στις επόμενες δύο ομάδες:

- Μεταβατικά σωματίδια πυρήνα (Aitken Nuclei)

Αντιπροσωπεύει εκείνη την ομάδα των σωματιδίων πυρήνα που παρουσιάζει τοπικό μέγιστο στην κατανομή κατά πλήθος πάνω από τα 15 nm.

- *Υπερλεπτόκοκκα σωματίδια πυρήνα (Ultra-fine Nuclei)*

Πρόκειται για τα υπόλοιπα σωματίδια πυρήνα. Τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν τοπικό μέγιστο στην κατανομή κατά πλήθος κάτω από τα 15 nm.

• **Υποκατηγορία συσσώρευσης (accumulation range)**

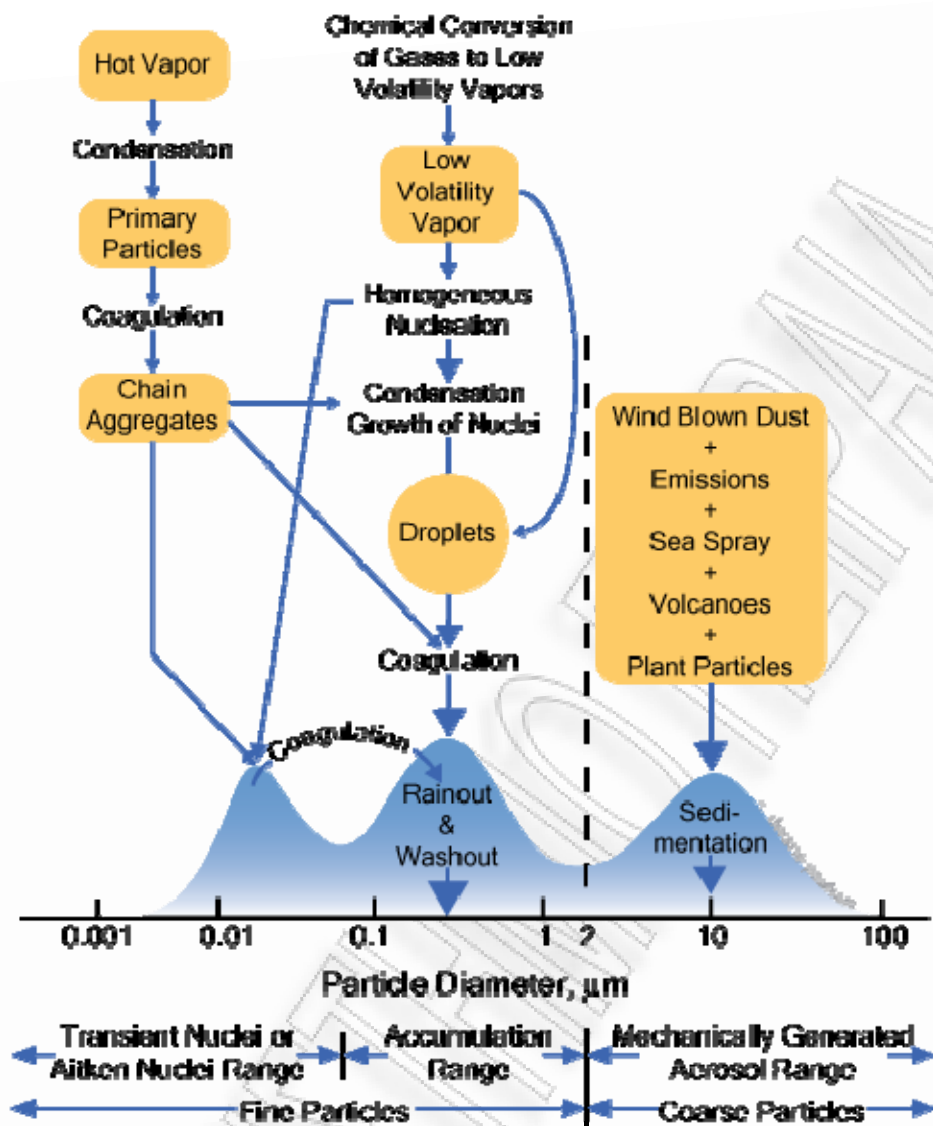
Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος από 0,05 έως 2,5 μm και παράγονται από συσσωματώσεις μικρότερων σωματιδίων (υποκατηγορίας πυρήνα) και από συμπυκνώσεις επιπρόσθετου υλικού στις συσσωματώσεις αυτές. Παρουσιάζουν χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα από 7 έως 30 ημέρες. Τα σωματίδια συσσώρευσης ομαδοποιούνται με τη σειρά τους σε:

- *Σταγονίδια (droplet mode)*

Είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιδράσεις υγρής φάσης μεταξύ σταγονιδίων μέσα σε νέφη ή ομίχλη ή παρουσία πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, επάνω στην επιφάνεια αιωρουμένων σωματιδίων. Η συσσωμάτωση που επέρχεται ως αποτέλεσμα, δημιουργεί την ομάδα των σταγονιδίων.

- *Συμπυκνώματα (condensation mode)*

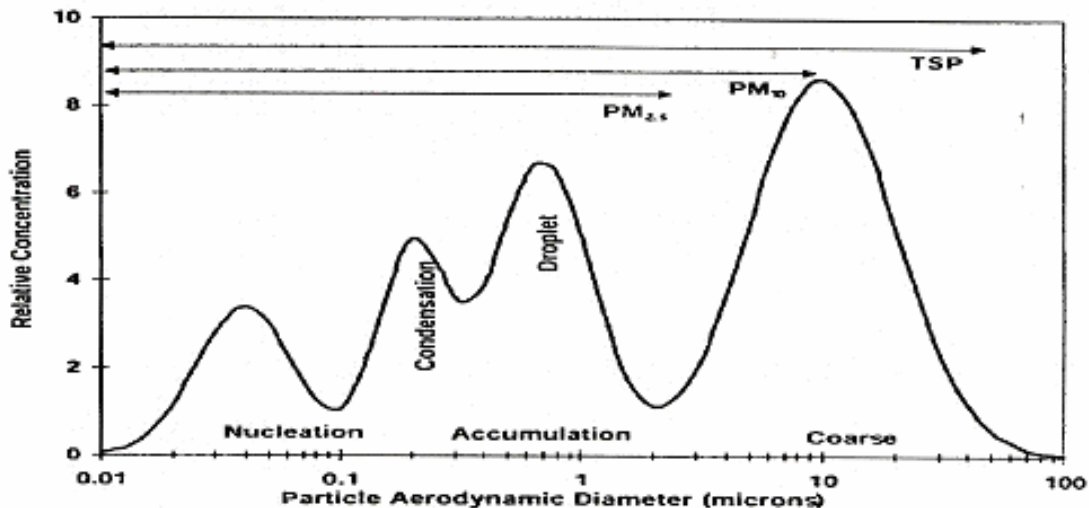
Πρόκειται για μικρότερα σωματίδια από τα προηγούμενα. Σχηματίζονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων πυρήνα.



Σχήμα 3.3. Σχηματικό διάγραμμα κατανομής του ατμοσφαιρικού αερολύματος, σε σχέση με τις πηγές εκπομπής και τις κύριες διεργασίες σχηματισμού αιωρούμενων σωματιδίων.

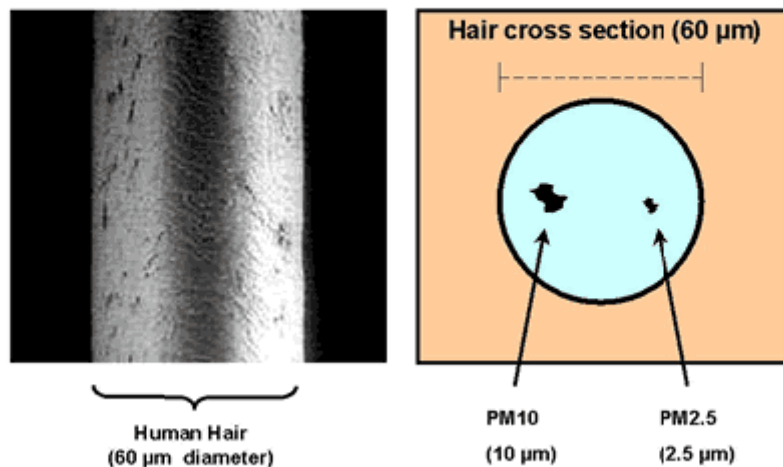
B) Τα χονδρόκοκκα (coarse mode)

Χονδρόκοκκα καλούνται τα αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου άνω των 2,5 μm. Παράγονται συνήθως με μηχανικούς τρόπους.



Σχήμα 3.4. Ιδανική κατανομή κατά μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας (Watson et al. 1997).

HOW SMALL IS PM?



Εικόνα 3.3. Τυπικό μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα μεγαλύτερα σωματίδια (για παράδειγμα εκείνα με διάμετρο 10 μm) είναι δυνατόν να μείνουν σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα 10 με 20 ώρες, πριν την καθίζησή τους στο κάτω τμήμα της τροπόσφαιρας. Θεωρώντας μια μέση ταχύτητα του ανέμου ίση με περίπου 7 m/s, υπολογίζεται ότι τα σωματίδια αυτά είναι δυνατόν να ταξιδέψουν έως 20 με 30 χιλιόμετρα. Αντίστοιχα, τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου 0,1 έως 1 μm) είναι δυνατόν να απομακρυνθούν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο εκπομπής τους. Ένα μικρό ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να φτάσει έως το άνω τμήμα της τροπόσφαιρας (περίπου 8 με 15 χιλιόμετρα ύψος) και να μείνει αιωρούμενο για μεγάλους χρόνους (έως και 1 έτος) (EEA & WHO 1999a, EPA 1996).

3.3.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

Η συμπεριφορά των σωματιδίων μέσα στον ανθρώπινο οργανισμό (αναπνευστικό σύστημα, στομάχι) είναι θέμα που έχει απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα, και που ακόμη μελετάται. Ωστόσο, τα μέχρι σήμερα συμπεράσματα φαίνονται να εντοπίζονται στις εξής υποομάδες των συνολικά αιωρούμενων σωματιδίων (TSP):

A) Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles)

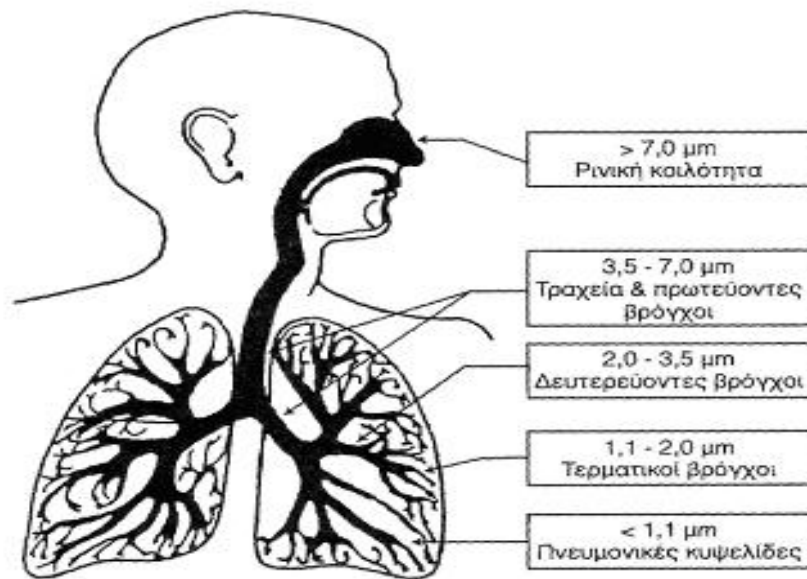
Εισπνεύσιμα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm , καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm κατακρατούνται στην στοματική και τη ρινική κοιλότητα.

B) Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles)

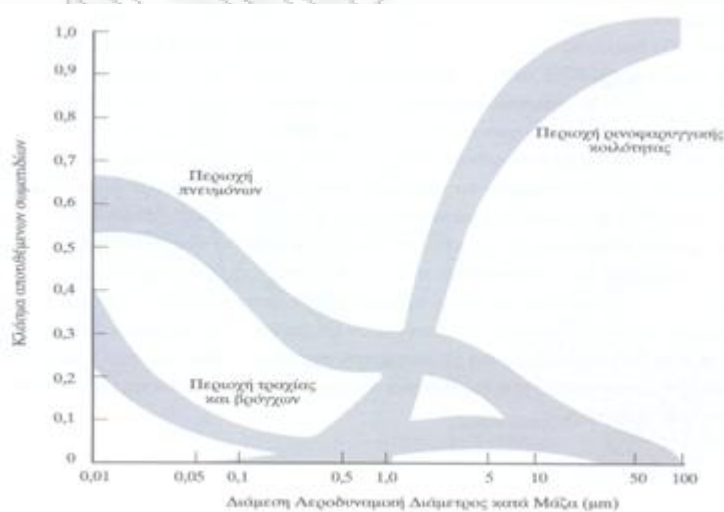
Τα θωρακικά σωματίδια αποτελούν το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο των 7 μm .

Γ) Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles)

Το σωματιδιακό κλάσμα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερο από 2,5 μm είναι το πιο σημαντικό από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια αυτά καταφέρνουν γενικά να διεισδύσουν έως τα βάθη των πνευμόνων και γι' αυτό καλούνται αναπνεύσιμα (E.C. Technical Working Group on Particles 1996, Natural Resources Defense Council 1996b).



Σχήμα 3.5. Διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.



Σχήμα 3.6. Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων και περιοχές στις οποίες επιδρούν στον ανθρώπινο οργανισμό.

3.4 ΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

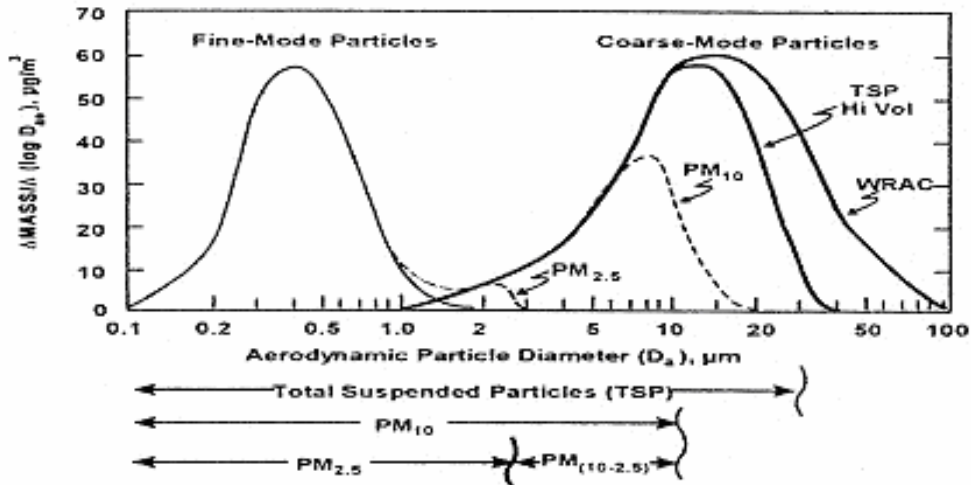
Βάσει της κατάταξης των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων κατά μέγεθος (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα), και σε συσχέτιση με την διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό (εισπνεύσιμα και αναπνεύσιμα), ορίσθηκαν οι δύο βασικές κατηγορίες μετρούμενων σωματιδιακών κλασμάτων, τα PM_{10} και τα $PM_{2.5}$. Και τα δύο αυτά κλάσματα συμπεριλαμβάνονται στους ρύπους – κριτήρια για την ποιότητα του αέρα και, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α., έχουν ορισθεί ανώτερα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης τους στην εξωτερική ατμόσφαιρα.

Γενικά, θεωρείται ότι τα PM_{10} ταυτίζονται με την κατηγορία των εισπνεύσιμων σωματιδίων και έχουν διάμετρο έως 10 μm . Ωστόσο, ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι είναι αδύνατον να κατασκευασθεί δειγματολήπτης ικανός να λειτουργεί υπό μορφή βηματικής συνάρτησης, οπότε να αποκλείει τη συλλογή των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο παραπλήσια της επιθυμητής, ώστε να είναι δυνατόν να προσδιορισθούν σωματίδια μέχρι ή από μία διάμετρο και πέρα. Στην πράξη δηλαδή, τα PM_{10} περιλαμβάνουν και ένα περιορισμένο αριθμό σωματιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm . Για το λόγο αυτό ο αυστηρός ορισμός, όπως αναφέρεται στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), είναι :

« PM_{10} νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50 % των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm ».

Αντίστοιχα, τα $PM_{2.5}$ ταυτίζονται με τα αναπνεύσιμα σωματίδια και ο σχετικός ορισμός της Ε.Ε. είναι:

« $PM_{2.5}$ νοούνται σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50 % των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2,5 μm ».



Σχήμα 3.7. Κυριότερα κλάσματα αιωρούμενων σωματιδίων (EPA 1996).

Την τελευταία δεκαετία, ωστόσο, η ερευνητική δραστηριότητα επικεντρώνεται επίσης στην μελέτη ενός άλλου, μικρότερου σωματιδιακού κλάσματος. Πρόκειται για τα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια (ultrafine particles, UFPs), δηλαδή τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1 μm. Το συγκεκριμένο σωματιδιακό κλάσμα συνεισφέρει ελάχιστα στην ολική κατά μάζα συγκέντρωση (λόγω του πολύ μικρού μεγέθους του), κυριαρχεί όμως στην κατά αριθμό συγκέντρωση (Woo et al. 2001). Έχει παρατηρηθεί ότι σε αστικά κέντρα, όπου κυρίαρχη πηγή σωματιδίων είναι η κυκλοφορία των οχημάτων, τα UFPs αποτελούν περισσότερο από το 90 % των συνολικών σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Gramotnev & Ristovski 2004, Morawska et al. 2004).

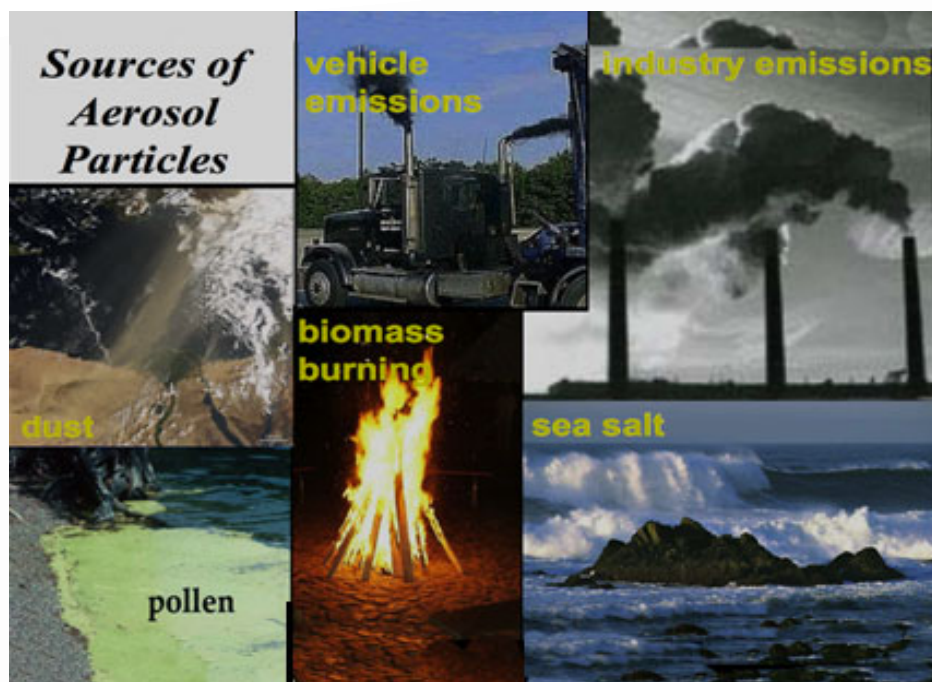
3.5 ΠΗΓΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει αναφερθεί οι πηγές των αιωρουμένων σωματιδίων είναι είτε **πρωτογενείς** (δηλαδή εκπέπονται μέσα στην ατμόσφαιρα) ή **δευτερογενείς** (δηλαδή σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από αέριες ενώσεις μέσω ομογενών ή ετερογενών χημικών αντιδράσεων). Εξαιτίας αυτής της διαφοροποίησης των πηγών, τα σωματίδια παρουσιάζουν διαφορετική σύσταση και κατανομή κατά μέγεθος.

Όσον αφορά τα πρωτογενή σωματίδια, αυτά είναι δυνατόν να προέλθουν από την κίνηση των οχημάτων, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καύσεις (αστικές και βιομηχανικές), εμπρησμούς δασών ή ακόμα από οικοδομές, λατομεία, ορυχεία, όπως επίσης και από τα θαλάσσια αερολύματα, την επαναιώρηση σωματιδίων από τον άνεμο και τέλος από εκπομπές ηφαιστειών. Τα δε δευτερογενή σωματίδια παράγονται κυρίως από την έντονη κυκλοφοριακή κίνηση των οχημάτων και από βιομηχανικές διεργασίες, ενώ είναι δυνατόν, επίσης, να παραχθούν και από φυσικά αίτια. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του θείου σχηματίζεται από την οξείδωση του διμέθυλο-σουλφιδίου, το οποίο παράγεται από το φυτοπλακτόν στην θάλασσα, ενώ διοξείδιο του θείου εκπέμπεται και από ηφαίστεια. Τα δευτερογενή σωματίδια σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσα σε διάστημα ωρών ή ημερών.

Στις αστικές περιοχές, η κυρίαρχη πηγή αιωρουμένων σωματιδίων είναι οι κινητήρες των οχημάτων και ο σχηματισμός σωματιδίων στην ατμόσφαιρα με χημικές αντιδράσεις από τα αέρια οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι συγκεντρώσεις των αιωρουμένων σωματιδίων τείνουν να εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένες σε περιοχές με μεγαλύτερη πληθυσμιακή πυκνότητα, κοντινές βιομηχανικές περιοχές ή γεωργικές εκτάσεις ή όπου η τοπογραφία ή οι μετεωρολογικές συνθήκες συμβάλουν σε αναστροφές του στρώματος αέρα (EEA & WHO 1999b, EC Technical Working Group on Particles 1996).



Εικόνα 3.4. Πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων

3.5.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Οι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων συγκεντρώνονται στον πίνακα που ακολουθεί και αναλύονται στη συνέχεια.

Πίνακας 3.2. Οι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	
Επιφάνεια ωκεανών	Σταγονίδια που περιέχουν διάφορα άλατα από την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας
Επιφάνεια εδαφών	Σκόνη
Ηφαιστειακές εκρήξεις	Περιλαμβάνονται πρωτογενή και δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια
Βιογενής ύλη	Πρωτογενή και δευτερογενή σωματίδια από συμπύκνωση οργανικών ενώσεων που εκπέμπονται από τα φυτά
Καύση βιογενούς ύλης	Αιθάλη
Προϊόντα φυσικής μετατροπής αερίου σε σωματίδιο	Θειικά από ενώσεις του θείου που εκπέμπονται από την επιφάνεια των ωκεανών

3.5.2.1 Επαναιώρηση σκόνης από το έδαφος

Η επαναιώρηση της σκόνης από το έδαφος οφείλεται σε μετεωρολογικούς μηχανισμούς, όπως είναι ο άνεμος, οι μεταβολές στη θερμοκρασία και η υγρασία. Η σκόνη αυτή είναι δυνατόν να μεταφερθεί από τον άνεμο. Η κατανομή της ως προς το μέγεθος εξαρτάται από το είδος της αρχικής πηγής (πέτρα, ορυκτό). Γενικά το μέγεθος κυμαίνεται μέσα στο εύρος 5 - 50 μm . Η χημική σύσταση της σκόνης από χώμα είναι όμοια με εκείνη της γεωλογικής πηγής (για παράδειγμα, δολομίτης, γύψος, χαλαζίας και αργιλικά πετρώματα).

Η επίδραση των ανέμων σε επιφάνειες ξηρού χώματος έχει ως αποτέλεσμα να μεταφέρονται τα σωματίδια αυτά στον αέρα. Οι παράγοντες που εντείνουν το φαινόμενο είναι το ποσό της εκτιθέμενης ξηρής επιφάνειας από σωματίδια και η ταχύτητα του ανέμου. Στις πόλεις, τέτοιου είδους εκτεθειμένες χωμάτινες επιφάνειες είναι μάλλον σπάνιες, ιδιαίτερα στις κεντρικές περιοχές. Υπάρχουν όμως, αξιοσημείωτες ποσότητες σκόνης πάνω στους δρόμους και στα πεζοδρόμια. Η σκόνη αυτή προέρχεται από:

- τη σκόνη που μεταφέρεται πάνω στα ελαστικά των οχημάτων,
- τη σκόνη που καθιζάνει από την ατμόσφαιρα,
- τη φθορά της επιφάνειας του ίδιου του δρόμου και
- τη σταδιακή αποσάρθρωση τμημάτων του οχήματος, ιδιαίτερα των ελαστικών

Καθώς η σκόνη αυτή επικάθεται επάνω σε επιφάνειες όπου και ξηραίνεται εύκολα, είναι εκτεθειμένη στους αέριους στροβιλισμούς που δημιουργεί το πέρασμα των οχημάτων. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει πάντα μία εν δυνάμει πηγή αιωρουμένων σωματιδίων. Η ποσότητα των σωματιδίων που μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί ή να μετρηθεί, καθώς εξαρτάται έντονα από παράγοντες όπως:

- το φορτίο των επικαθιμένων σωματιδίων επάνω στην επιφάνεια,
- τον χρόνο ξήρανσης που προηγείται της επαναιώρησης και
- την ταχύτητα των κινούμενων οχημάτων

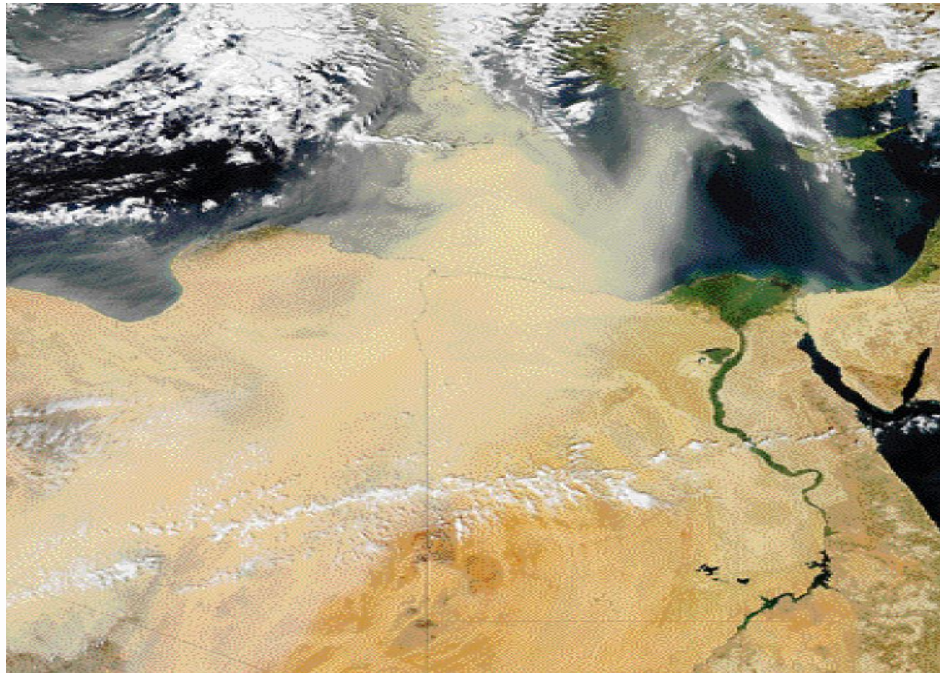
Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην California για το έτος 1995, ο ρυθμός εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ από την επαναιώρηση σκόνης από τους δρόμους ήταν 12,9 ton/ημέρα για ασφαλτοστρωμένους δρόμους και 21,0 ton/ημέρα για μη ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Η αντίστοιχη τιμή για την αερομεταφερόμενη σκόνη ήταν 7,6 ton/ημέρα (Magliano et al. 1999).

3.5.2.2 Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις

Έχει εκτιμηθεί ότι τα αέρια ρεύματα που παρασύρουν αιωρούμενα σωματίδια από την έρημο της Σαχάρας, μεταφέρουν 150 εκ. τόννους σκόνης ετησίως προς το βόρειο ημισφαίριο. Με τον ίδιο τρόπο εκτιμάται ότι μεταφέρονται 3,9 εκ. τόννοι σκόνης ετησίως από την έρημο της Σαχάρας προς τη βορειοδυτική περιοχή της Μεσογείου, εμφανής ως κόκκινη βροχή. Παρόλο που ο κύριος όγκος των σωματιδίων από τη Σαχάρα μεταφέρεται προς τη περιοχή της Μεσογείου, τέτοια σωματίδια μεταφέρονται επίσης και προς τη βόρεια Ευρώπη, όπως και προς άλλες περιοχές, όπως την Αμερικανική Ήπειρο.

Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται άμεσα με τις ανεμοθύελλες στις ερήμους, που είναι συνηθισμένες κατά την διάρκεια περιόδων με ισχυρούς ανέμους. Ωστόσο, το ίδιο παρατηρείται και σε άλλες περιοχές της υφελίου. Η ένταση του φαινομένου γενικά μειώνεται όσο η υγρασία του εδάφους αυξάνει και όσο περισσότερο καλύπτεται η επιφάνεια του από βλάστηση. Εκτιμάται ότι, κάθε χρόνο, η συνολική συνεισφορά του φαινομένου στην σωματιδιακή μάζα του βόρειου ημισφαιρίου είναι 300 εκ. τόννοι.

Τα σωματίδια που μεταφέρονται από την Σαχάρα είναι συνήθως χονδρόκοκκα. Η σύσταση τους εμφανίζει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη, με κάποιες ποσότητες γύψου, αργιλικών υλικών και μετάλλων.



Εικόνα 3.5. Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα.

3.5.2.3 Υδρόλυμα Θαλάσσης

Η θραύση των κυμάτων στην θάλασσα δημιουργεί πολλά μικρά σταγονίδια από θαλασσινό νερό, τα οποία ξηραίνονται με την εξάτμιση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αιωρούμενα σωματίδια από θαλασσινό αλάτι. Σωματίδια επίσης εκπέμπονται και άμεσα, με το σπάσιμο αέριων φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος που κυμαίνεται από 1 έως 20 μm . Παρόλο που τα περισσότερα ανήκουν στο χονδρόκοκκο κλάσμα, ένα μικρό ποσοστό της μάζας τους έχει μέγεθος αρκετά μικρό ώστε να παρουσιάζει χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα έως και 3 ημέρες.

Το αιωρούμενο θαλασσινό αλάτι έχει μεγάλη ομοιότητα στη χημική του σύσταση με το θαλασσινό αλάτι, με θεικά ανιόντα και ανιόντα χλωρίου και κατιόντα ασβεστίου, μαγνησίου και φωσφόρου. Επίσης σε περιοχές με λιμενικές εγκαταστάσεις, έχουν ανιχνευθεί και μεταλλικά ιχνοστοιχεία, όπως κάδμιο, μόλυβδος, βανάδιο και ψευδάργυρος. Αυτός ο εμπλουτισμός σε μέταλλα προέρχεται από εκείνες τις φυσαλίδες του νερού που έρχονται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα προτού διαραγούν.

3.5.2.4 Ηφαιστειακή δραστηριότητα και εκρήξεις

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα λαμβάνει ακόμη χώρα σε κάποιες νησιωτικές περιοχές της Ευρώπης, όπως είναι οι Κανάριοι Νήσοι και η Σικελία. Η ιπτάμενη τέφρα που εκπέμπουν τα ηφαίστεια είναι δυνατόν να αποτελέσει μια σημαντική τοπική πηγή σωματιδίων σε κοντινές πόλεις. Για παράδειγμα, έχει εκτιμηθεί ότι το ηφαίστειο στο βουνό Αίτνα εκπέμπει κατά μέσο όρο 4.000 τόννους διοξειδίου του θείου ημερησίως.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν μια συγκεντρωμένη πηγή όλων των ατμοσφαιρικών ρύπων και ιδιαίτερα των σωματιδίων. Η έκρηξη του ηφαιστίου της Αγίας Ελένης στις 18 Μαΐου 1980 εκτόξευσε όγκο σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ίσο με 4 km³. Η ποσότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από το συνολικό ετήσιο ποσό των εκπεμπόμενων σωματιδίων που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες στην Βόρεια Αμερική. Το μέγεθος των εκπεμπόμενων σωματιδίων κυμάνθηκε από στερεά σώματα, ορατά με γυμνό μάτι, έως και υπερλεπτόκοκκα σωματίδια, διαμέτρου 0,001 μm.



Εικόνα 3.6. Ηφαιστειακή Δραστηριότητα.

Η ενέργεια των ηφαιστειακών εκρήξεων είναι συχνά αρκετή ώστε να μεταφέρει τα αέρια και τα σωματίδια, δια μέσω των χαμηλών στρωμάτων της ατμόσφαιρας, στην στρατόσφαιρα, όπου οι φυσικές διαδικασίες απομάκρυνσης είναι πολύ βραδείες (ARIC 1997, EC Technical Working Group on Particles 1996).

3.5.3 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

3.5.3.1 Εκπομπές από τα οχήματα

Οι κύριες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από τα οχήματα είναι τα καυσαέρια των οχημάτων και η φθορά από την χρήση των ελαστικών και των φρένων (Natural Resources Defense Council 1996a). Οι εκπομπές σωματιδίων από τους κινητήρες ντήζελ είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των βενζινοκινητήρων, γεγονός που είναι σύμφωνο με την γενική αρχή ότι, όσο βαρύτερο είναι το κλάσμα πετρελαίου που καίγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή σωματιδίων. Βέβαια δεν είναι δυνατόν να αγνοηθεί η εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων σωματιδίων από βενζινοκινητήρες, και ιδιαίτερα από μη καταλυτικά οχήματα.

Οι εκπομπές από μηχανές ντήζελ περιέχουν κυρίως αιθάλη, δηλαδή σωματίδια στοιχειακού άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις και μερικά θειικά από το θείο που περιέχει το καύσιμο. Όταν οι οργανικές ενώσεις και τα θειικά διοχετεύονται από την εξάτμιση του οχήματος στο περιβάλλον, συμπυκνώνονται πάνω σε αιωρούμενα σωματίδια και κυρίως επάνω στα σωματίδια άνθρακα που βρίσκονται και αυτά μέσα στα ίδια καυσαέρια. Τα σωματίδια που σχηματίζονται με τον τρόπο αυτό έχουν μέγεθος από 0,01 έως 2,5 μm .

Η χρήση καταλυτών, αντίστοιχων με αυτούς που χρησιμοποιούνται στους βενζινοκινητήρες, αποτελεί μια λύση για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων, αλλά παρουσιάζει ουσιαστικά προβλήματα. Καθώς ο κινητήρας ντήζελ λειτουργεί με περίσσεια αέρα, ο καταλύτης που θα εφαρμοστεί στα αέρια της εξάτμισης, θα λειτουργεί σε οξειδωτικό περιβάλλον. Επίσης είναι ενδεχόμενη η αστοχία ενός καταλυτικού συστήματος, λόγω της παρουσίας σωματιδίων στα καυσαέρια και λόγω της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο. Το θείο οξειδώνεται σε τριοξείδιο του θείου και σε θειικό οξύ, οδηγώντας σε όξινες εκπομπές, αλλά και σε σχηματισμό θεικών σωματιδίων. Αυτό το φαινόμενο είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αύξηση των σωματιδιακών εκπομπών, σε περίπτωση που η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο είναι άνω του 0,2 % κ.β. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας στο καταλύτη, όπου δεν ευνοείται η μετατροπή του SO_2 σε SO_3 , και με χρήση ντήζελ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Η περιεκτικότητα ενός καυσίμου σε θείο επηρεάζει σημαντικά τις σωματιδιακές εκπομπές, λόγω της μετατροπής του σε θειικά άλατα. Η ισχύουσα προδιαγραφή των 500 ppm έχει συμβάλλει σημαντικά στην μείωση των εκπομπών σωματιδίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση των σωματιδιακών εκπομπών από κινητήρες ντήζελ δεν είναι εύκολη, καθώς οι συνθήκες που ευνοούν την μείωση των εκπομπών σωματιδίων, αυξάνουν την παραγωγή οξειδίων του αζώτου.

Πίνακας 3.3. Εκπομπές αερίων ρύπων στην Αθήνα (t/έτος).

	NO_x	NMVOC	CO	PM10	SO₂
Οδικές Μεταφορές	27,951	42,924	281,440	979	172
Σιδηροδρομικές Μεταφορές	235	26	64	27	6
Θαλάσσιες Μεταφορές	8,562	220	524	667	4,921
Αεροπορικές Μεταφορές	1,389	350	1,266	0	3
Κεντρική Θέρμανση	2,985	240	1,256	147	487
Βιομηχανική Δραστηριότητα	16,684	9,624	9,879	14,127	49,225

Τέλος η κίνηση των οχημάτων στους δρόμους προκαλεί την επαναιώρηση της σκόνης του δρόμου. Σωματίδια εκπέμπονται επίσης ως αποτέλεσμα της φθοράς των φρένων και των ελαστικών, κατά την χρήση τους. Τα σωματίδια αυτά εκτιμάται ότι είναι στο εύρος μεγέθους 3 – 30 μm.

3.5.3.2 Βιομηχανικές εκπομπές

Οι βιομηχανικές εκπομπές συνεισφέρουν στη παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές, ανάλογα με την απόσταση της βιομηχανίας από την αστική περιοχή και την τεχνολογία που εφαρμόζουν. Τα σωματίδια που προέρχονται από βιομηχανικές εκπομπές έχουν γενικά μέγεθος από 0,5 έως 100 μm, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της πηγής.

Σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας. Η ατελής καύση ανθρακούχων ορυκτών οδηγεί σε εκπομπή σωματιδίων αιθάλης. Σε μονάδες όπου η εισαγωγή του κάρβουνου στις καμίνους γίνεται σε κονιορτοποιημένη μορφή, η καύση του είναι σχεδόν πλήρης. Στην περίπτωση αυτή, τα παραγόμενα σωματίδια συνίστανται κυρίως από την ανόργανη υπολειμματική τέφρα.

Κατά την χρήση πετρελαίου ως καύσιμο, οι σωματιδιακές εκπομπές εξαρτώνται από το είδος του. Τα ελαφρύτερα κλάσματα παράγουν σημαντικά λιγότερα σωματίδια σε σχέση με τα βαρύτερα. Για τα βαρύτερα κλάσματα θεωρείται ότι η παραγωγή σωματιδίων είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο. Αιτία είναι ότι τόσο το ακατέργαστο πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (λόγω προέλευσης), όσο και πετρέλαιο που έχει υποστεί διαδικασίες αποθείωσης περιέχουν χαμηλότερα ποσοστά ασφαλτενίων και τέφρας, και έχουν μικρότερο ιξώδες, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά καύσης.

Τέλος όσον αφορά τις σωματιδιακές εκπομπές κατά την καύση βιομάζας, είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με τα άλλα είδη καυσίμου. Εκτιμάται ότι η καύση άχυρου παράγει 4 φορές λιγότερα σωματίδια σε σχέση με την καύση ανθρακούχων ορυκτών. Κατά την καύση ξύλου, περίπου το 80 – 95 % των ανόργανων συστατικών του μετατρέπεται σε ιπτάμενη τέφρα στον καυστήρα. Το 10 – 30 % των παραγόμενων σωματιδίων εντάσσεται στην κατηγορία των PM_{10} . Το πρόβλημα της εκπομπής σωματιδίων γίνεται όμως σημαντικό στην περίπτωση που το καύσιμο περιέχει θαλασσινό αλάτι (για παράδειγμα κορμοί δέντρων που μεταφέρονται πάνω στο νερό) (Olstrom et al. 2000).

Σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, η μέθοδος της αποτέφρωσης χρησιμοποιείται ως μία σημαντική οδός διάθεσης αποβλήτων. Τα εκπεμπόμενα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από άκαυστη ανόργανη ύλη, που μεταφέρεται από το αέριο που εξέρχεται της καπνοδόχου. Το τυπικό μέγεθος τους κυμαίνεται από 1 έως 50 μm . Σημαντική είναι η εκπομπή επίσης βαρέων μετάλλων, με πιο χαρακτηριστικά το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο, τον μόλυβδο, τον ψευδάργυρο και τον υδράργυρο, υπό την μορφή οξειδίων και χλωριδίων τους. Οι εν λόγω ενώσεις παράγονται λόγω της παρουσίας στα απορρίματα υλικών όπως μπαταρίες, πλαστικά και μεταλλικά κράματα. Κάποιες από τις παραπάνω ενώσεις έχουν σημεία ζέσεως χαμηλότερα από 1.000 °C, θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν τα συστήματα αποτέφρωσης, και επομένως ατμοποιούνται στο αέριο εξόδου. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, τείνουν να συμπυκνωθούν και να προσροφηθούν στα λεπτόκοκκα σωματίδια του καυσαερίου, μεγέθους 0,2 – 0,7 μm . Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν και αρκετές οργανικές ενώσεις που παράγονται κατά την διαδικασία. Ορισμένα πιο πτητικά μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και ο υδράργυρος, είναι δυνατόν να παραμείνουν στην

αέρια φάση. Όπως και στις υπόλοιπες διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών όπου παράγονται σωματίδια, η εναπόθεση βαρέων μετάλλων σε αυτά εξαρτάται από το μέγεθος και τον αριθμό των σωματιδίων και την θερμοκρασία του καυσαερίου (Ρήγας 1997).

Τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από τις διαφορετικού τύπου βιομηχανίες παρουσιάζουν ποικίλα χαρακτηριστικά, ανάλογα με τα είδη των διεργασιών που εφαρμόζονται. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,5 έως 100 μm. Μεταξύ των βιομηχανιών που παράγουν σημαντικές ποσότητες σωματιδίων είναι (Querol et al. 2000):

- Οι χημικές βιομηχανίες (παραγωγή καυστικής σόδας και χλωρίνης, φωσφορικού οξέος, πολυμερών, φθαλικού ανυδρίτη, ενεργού άνθρακα, απορρυπαντικών)
- Οι γεωργικές βιομηχανίες και οι βιομηχανίες τροφίμων (επεξεργασία δημητριακών, καφέ, εκτροφεία ζώων, παραγωγή λιπασμάτων)
- Οι μεταλλουργικές βιομηχανίες (παραγωγή αλουμινίου, μεταλλουργικού κωκ, επεξεργασία χαλκού, παραγωγή ψευδαργύρου ή μολύβδου, χυτήρια, χαλυβουργεία)
- Οι βιομηχανίες παραγωγής ανόργανων και ορυκτών προϊόντων (τσιμεντοβιομηχανίες, παραγωγή fiberglass, υαλουργία, λατομεία)
- Οι βιομηχανίες παραγωγής χημικής χαρτόμαζας
- Τα διυλιστήρια πετρελαίου

3.5.3.3 Δασικές και γεωργικές πυρκαγιές

Όσον αφορά στις δασικές και γεωργικές φωτιές, η γενική συμβολή στη ρύπανση της ατμόσφαιρας από τον καπνό της φωτιάς είναι προσωρινή. Σε περιοχές, όμως, με μεγάλες δασικές πυρκαγιές, αυτή η πηγή μπορεί να αποκτήσει μεγάλη σημασία. Τόσο οι άμεσες εκπομπές όσο και η επαναιώρηση σωματιδίων από την καμμένη γη, είναι δυνατόν να αποτελέσουν μια σημαντική πηγή αιωρουμένων σωματιδίων. Το πυρογενές αυτό υλικό αποτελείται από οργανική ύλη, στοιχειακό άνθρακα και ανόργανα υλικά. Είναι σε μεγάλο ποσοστό μεγέθους κάτω από 10 μm και γι' αυτό μπορεί εύκολα να επαναιωρηθεί λόγω του ανέμου.

Εκτιμάται ότι οι γεωργικές και δασικές πυρκαγιές στις τροπικές ζώνες είναι υπεύθυνες για την εκπομπή στην ατμόσφαιρα 1 Mtp/έτος χαλκού, 3 Mtp/έτος ψευδαργύρου και 2,2 Gtp/έτος στοιχειακού άνθρακα. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν, κατά μέσο όρο, το 2 %, 3 % και 12 % αντίστοιχα του παγκόσμιου συνόλου εκπομπών αυτών των χημικών ειδών (Yamasoe et al. 2000).



Εικόνα 3.7. Θύσανοι από τις μεγάλες πυρκαγιές στην Ελλάδα το έτος 2007.

3.5.3.4 Οικιακές πηγές

Η χρήση κάρβουνου μέσα στα σπίτια ήταν στο παρελθόν μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων κατά τους χειμερινούς μήνες. Στην εποχή μας, μόνο σε κάποιες βόρειες ευρωπαϊκές πόλεις, όπως το Belfast, εξακολουθεί η οικιακή χρήση κάρβουνου. Επίσης, η καύση ξύλων για οικιακή θέρμανση, για την οποία εμφανίζεται νέο ενδιαφέρον στις ανεπτυγμένες χώρες, αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο σωματιδιακής ρύπανσης προς εξέταση (Jones 1999).

Η πλέον δημοφιλής μέθοδος οικιακής θέρμανσης είναι η καύση πετρελαίου, η οποία, όπως έχει προαναφερθεί, αποτελεί σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον η χρήση πετρελαίου θέρμανσης στην Ελλάδα επιβαρύνει ακόμη περισσότερο το περιβάλλον, καθώς το πετρέλαιο θέρμανσης περιέχει 2 φορές περισσότερα ανόργανα υλικά και 4 φορές περισσότερο θείο, από το κοινό ντήζελ κίνησης.

3.6 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα σχετικών ερευνητικών μελετών, η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελείται από τις παρακάτω βασικές κατηγορίες συστατικών (Harrison & Yin 2000):

Τα θειϊκά, τα νιτρικά, τα αμμωνιακά, τα χλωριόντα, τον οργανικό άνθρακα, τον στοιχειακό άνθρακα, τα γεωλογικά υλικά, τα βιολογικά υλικά, τα μέταλλα και τα ισχυρά οξέα.

Επιπλέον το υγρό H_2O είναι ένα ακόμα βασικό συστατικό στα διαλυτοποιήσιμα σωματίδια. Προσροφάται σε αυτά όταν η σχετική υγρασία υπερβαίνει περίπου το 70%. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού του νερού εξατμίζεται στα φίλτρα πριν από τη μέτρηση (Ohta et al. 1998).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι χημικές ενώσεις και ομάδες που συνθέτουν την μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων.

Θειϊκά

Τα θειϊκά προέρχονται κυρίως από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα και συνήθως βρίσκονται υπό την μορφή θειϊκού αμμωνίου. Οι ενώσεις αυτές είναι υδατοδιαλυτές και συναντώνται σχεδόν αποκλειστικά στα $PM_{2,5}$. Θειϊκό νάτριο είναι δυνατόν να ανιχνευθεί σε παραλιακές περιοχές, όπου το θειϊκό οξύ έχει εξουδετερωθεί από το χλωριούχο νάτριο του θαλάσσιου αλατιού. Παρόλο που ο γύψος και κάποια άλλα γεωλογικά υλικά περιέχουν θειϊκά, αυτά δεν είναι εύκολα διαλυτοποιήσιμα στο νερό ώστε να αναλυθούν χημικά, είναι πιο άφθονα σε χονδρόκοκκα σωματίδια έναντι των $PM_{2,5}$ και συνήθως ταξινομούνται στα γεωλογικά υλικά (Harrison & Yin 2000).

Νιτρικά

Τα νιτρικά σχηματίζονται κυρίως από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Το νιτρικό αμμώνιο (NH_4NO_3) είναι το πιο συχνά απαντώμενο και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε ισορροπία με τις πρόδρομες αέριες ουσίες του, την αμμωνία (NH_3) και τους ατμούς νιτρικού οξέος (HNO_3) (Seinfeld & Pandis 2006, Lunden et al. 2003). Σε ορισμένες περιπτώσεις το νιτρικό νάτριο ($NaNO_3$) κυριαρχεί. Λόγω της ταχύτερης οξείδωσης του NO_2 σε σχέση με το SO_2 , και της ευαισθησίας του NH_4NO_3 στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις της NH_3 (οι

οποίες επηρεάζουν την διάσπαση του), η χωρική κατανομή των νιτρικών είναι πολύ λιγότερο ομοιόμορφη από αυτή των θειικών (Harrison & Yin 2000).

Αμμωνιακά

Κατά τον αρχικό σχηματισμό των θειικών και νιτρικών ιόντων στην ατμόσφαιρα, αυτά βρίσκονται υπό την μορφή των αντίστοιχων οξέων. Σταδιακά, τα οξέα αυτά εξουδετερώνονται από την ατμοσφαιρική αμμωνία, σχηματίζοντας αμμωνιακά άλατα. Στις περισσότερες αστικές περιοχές, το αμμωνιακό ιόν (NH_4^+) υπερέχει σημαντικά του ιόντος του υδρογόνου (H^+), το οποίο και αντικαθιστά στη διαδικασία εξουδετέρωσης. Η συντριπτική πλειοψηφία των αμμωνιακών ενώσεων εντάσσεται στο λεπτόκοκκο κλάσμα των σωματιδίων. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα χονδρόκοκκα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από ορυκτά υλικά, τα οποία είναι αλκαλικά και δεν αντιδρούν με την αέρια αμμωνία (Harrison & Yin 2000).

Χλωριόντα

Η κύρια πηγή των ιόντων χλωρίου είναι το υδρόλυμα θαλάσσης (sea spray), ακόμη και σε περιοχές που βρίσκονται εκατοντάδες χιλιόμετρα από την ακτή. Οι θαλάσσιες πηγές χλωριούχων σωματιδίων συνεισφέρουν κυρίως σε χλωριούχο νάτριο (NaCl). Η κατηγορία αυτή σωματιδίων εντάσσεται στο χονδρόκοκκο κλάσμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην Ανταρκτική όπου λόγω της προφανούς έλλειψης ανθρωπογενών πηγών, άνω του 70 % των ατμοσφαιρικών σωματιδίων αποτελείται από θαλάσσιο NaCl , η κατά μάζα κατανομή μεγέθους παρουσιάζει μέγιστο για σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο περίπου ίση με 3 μm (Veli-Matti et al. 2000).

Κατά τους χειμερινούς μήνες, πηγή χλωριόντων αποτελεί επιπλέον και η ρίψη αλατιού στους δρόμους, για την αντιμετώπιση του πάγου. Τέλος, οι χλωριούχες ενώσεις εισέρχονται στην αέρια σωματιδιακή μάζα και με δευτερογενείς διαδικασίες, όπως η εξουδετέρωση της ατμοσφαιρικής αμμωνίας από τους αμούς υδροχλωρικού οξέος (HCl), το οποίο εκπέμπεται από πηγές όπως αποτεφρωτήρες και σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Οι δευτερογενείς χλωριούχες ενώσεις ανήκουν στο λεπτόκοκκο κλάσμα και συνίστανται κυρίως σε χλωριούχο αμμώνιο.

Οργανικός άνθρακας

Ο οργανικός άνθρακας είναι δυνατόν να εκπέμπεται από πρωτογενείς πηγές εκπομπής. Σημαντική όμως ποσότητα παράγεται δευτερογενώς, μέσω ατμοσφαιρικών φωτοχημικών διεργασιών μεταξύ πρωτογενών αέριων οργανικών χημικών ειδών, οι οποίες παράγουν χαμηλής πτητικότητας οργανικές ενώσεις. Σύμφωνα με ερευνητικές εργασίες, ο σχηματισμός δευτερογενών σωματιδίων συσχετίζεται με τον λόγο οργανικού προς στοιχειακό άνθρακα. Συγκεκριμένα, τιμές του λόγου άνω του 2 υποδεικνύουν δευτερογενή παραγωγή οργανικού άνθρακα (Kavouras et al. 1999).

Οι οργανικές ενώσεις που απαντώνται στα αιωρούμενα σωματίδια είναι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, είτε αρωματικές ενώσεις, είτε οξυγονωμένα παράγωγα των υδρογονανθράκων. Οι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες που ανιχνεύονται στα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από κανονικά αλκάνια, 16 – 36 ατόμων άνθρακα, ενώ σημαντική είναι και η περιεκτικότητα σε διακλαδισμένες και ακόρεστες ενώσεις. Είναι αδρανείς ενώσεις, σχετικά μη τοξικές και δεν συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Τα n-αλκάνια που αποτελούνται μέχρι και από 25 άτομα άνθρακα χαρακτηρίζονται ως πετρογενή (petrogenic) και η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα σχετίζεται με εκπομπές και καύση ορυκτών καυσίμων. Αντίθετα, τα C₂₅ – C₃₆ αλκάνια χαρακτηρίζονται ως βιογενή και προέρχονται από φυσικές πηγές.

Εκτός από τους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, στις οργανικές ενώσεις των αιωρουμένων σωματιδίων περιέχονται και πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHs), οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της αποδεδειγμένης καρκινογόνου και μεταλλαξιογόνου δράσης τους (Junker et al. 2000, Kavouras et al. 1999). Κύρια διαδικασία σχηματισμού των PAHs είναι η πυροσύνθεση. Κατά την πυροσύνθεση, σε θερμοκρασίες περίπου 500°C, διαρρηγνύονται οι δεσμοί C-C και C-H των υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους, προς σχηματισμό ελεύθερων ριζών. Κατόπιν, οι ελεύθερες ρίζες αφυδρογονώνονται και συνδυάζονται χημικά, για να σχηματίσουν δομές αποτελούμενες από αρωματικούς δακτύλιους, ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες. Η ευχέρεια των υδρογονανθράκων να σχηματίσουν PAHs με πυροσύνθεση δίνεται από την ακολουθία: Αρωματικοί > κυκλοολεφίνες > ολεφίνες > παραφίνες

Οι PAHs εντάσσονται στην κατηγορία των τοξικών οργανικών μικρο-ρύπων (Toxic Organic Micro Pollutants, TOMPs), όπου ανήκουν και οι πολυχλωριωμένες διοξίνες και φουράνια, καθώς και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), ομάδες ενώσεων που πρόσφατα γνώρισαν μεγάλη δημοσιότητα και επίσης σχετίζονται με τα αιωρούμενα σωματίδια.

Τέλος, στο οργανικό κλάσμα των αιωρούμενων σωματιδίων εντάσσονται ουδέτερα οξυγονωμένα παράγωγα των υδρογονανθράκων (αλδεΐδες, κετόνες, εποξειδία, εστέρες, λακτόνες, κινόνες), οργανικά οξέα (μυριστικό, ελαϊκό, λινολεϊκό, στεατικό, παλμιτικό) και αλκαλικές ενώσεις όπως η ακριδίνη.

Στοιχειακός άνθρακας

Κατά τις διαδικασίες καύσης, και ιδίως εξαιτίας της κυκλοφορίας οχημάτων, εκπέμπονται σωματίδια αιθάλης, τα οποία περιέχουν άνθρακα υπό μορφή ενός πυρήνα από στερεό μαύρο στοιχειακό άνθρακα (είτε καθαρό γραφίτη ή υψηλού μοριακού βάρους μη πτητική ύλη, όπως πίσσα ή κωκ). Στην επιφάνεια του πυρήνα συχνά υπάρχει επικάλυψη από ημι-πτητικές οργανικές ενώσεις, οι οποίες συμπυκνώνονται από τα αέρια καύσης. Περιέχονται επίσης και κάποιες χαρακτηριστικές ομάδες (υδροξυλικές, φαινολικές, καρβονυλικές, καρβοξυλικές κ.α.).

Ο στοιχειακός άνθρακας θεωρείται καλός δείκτης της πρωτογενούς ανθρωπογενούς αέριας ρύπανσης, καθώς οι χημικές μεταβολές του (χημικές αντιδράσεις ή εναλλαγές φάσεων) είναι περιορισμένες γενικά (Offenberg & Baker 2000).

Γεωλογικά υλικά

Στην κατηγορία των γεωλογικών υλικών περιλαμβάνεται επιφανειακή σκόνη και αερομεταφερόμενα αποσαθρωμένα πετρογενή ορυκτά υλικά. Η σύστασή τους δεν είναι σταθερή, αλλά αντικατοπτρίζει τα εκάστοτε τοπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά και τις επιφανειακές συνθήκες. Η συγκέντρωσή τους εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις διαδικασίες οι οποίες οδηγούν στην επαναιώρηση τους από το έδαφος (Harrison & Yin 2000).

Ορισμένα από τα φυσικά ορυκτά που έχουν αναγνωρισθεί στην σωματιδιακή μάζα είναι: χαλαζίας (SiO_2), ασβεστίτης (CaCO_3), γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), αστρίοι

(feldspar, $KAlSi_3O_8$), εψωμίτης ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), χλωρίτης, καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, αιμανίτης κ.α.

Βιολογικά υλικά

Ορισμένες μελέτες έχουν διαχωρίσει την σωματιδιακή ύλη βιολογικής προέλευσης (Biological Aerosol Particles, BAP), η οποία είναι δυνατόν να περιλαμβάνει μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια, αλλά και σπόρια, γύρη και τεμαχίδια κυτταρινούχου φυτικού υλικού. Με εξαίρεση κάποιους ιούς, και άλλα σωματίδια που εκπέμπονται είτε από το ανθρώπινο σώμα ή από βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες (για παράδειγμα αποχετευτικό σύστημα), τα σωματίδια αυτά είναι στην πλειοψηφία τους χονδρόκοκκα. Στις περισσότερες μελέτες χαρακτηρίζονται ως οργανικός άνθρακας παρά ως βιολογικά υλικά (Harrison & Yin 2000, Mattias-Maser et al. 2000).

Μέταλλα και μεταλλικά ιχνοστοιχεία

Τα μέταλλα που απαντώνται σε μεγάλη αναλογία στην μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα: νάτριο, ασβέστιο, μαγνήσιο και κάλιο, υπό την μορφή των ιόντων τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αναλύσεων, τα ποσοστά τους επί των συνολικών ιόντων της αέριας σωματιδιακής μάζας είναι κατά προσέγγιση ίσα με 5,6 % για το νάτριο, 1,8 % για το ασβέστιο, 0,8 % για το κάλιο και 0,6 % για το μαγνήσιο.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ιοντικά είδη, τα παραπάνω μέταλλα εμφανίζονται κυρίως στο χονδρόκοκκο σωματιδιακό κλάσμα, γεγονός αναμενόμενο λόγω της προέλευσης τους από τα θαλάσσια αερολύματα και την επιφανειακή σκόνη. Το νάτριο είναι κυρίως παρόν ως $NaCl$ και Na_2SO_4 (Harrison & Yin 2000).

Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι ορισμένα μεταλλικά ιχνοστοιχεία, όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το βηρύλλιο (το οποίο έχει και το χαμηλότερο επιτρεπτό όριο στην ατμόσφαιρα), το βανάδιο, το κάδμιο, το νικέλιο και το αρσενικό (μεταλλοειδές), είναι ιδιαίτερα τοξικά σε συγκεκριμένες δόσεις.

Ο μόλυβδος βρίσκεται στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή αλαγονιδίων του ($PbCl_2$, $PbClBr$, $PbBr_2$), τα οποία σχηματίζονται κατά την αντίδραση των αντικροτικών ουσιών του καυσίμου (τετρααιθυλιούχος μόλυβδος) με το διχλωροαιθάνιο ή το

διβρωμοαιθάνιο που προστίθενται για να αποτρέψουν την συσσώρευση των οξειδίων του μολύβδου μέσα στους κινητήρες. Τα αλογονίδια του μολύβδου είναι αρκετά πτητικά ώστε να εξέλθουν από την εξάτμιση, αλλά συμπυκνώνονται σε σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Ο υγράργυρος είναι παρών στην ατμόσφαιρα με την μορφή οργανομεταλλικών ενώσεων του, όπως οι: $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ και $(\text{CH}_3)\text{HgBr}$. Άλλα μέταλλα απαντώνται με την μορφή των οξειδίων τους, όπως Fe_3O_4 , V_2O_5 , CaO .

Σε αστικές περιοχές, θεωρείται ότι η έκθεση σε μεταλλικά ιχνοστοιχεία μέσω της εισπνοής αιωρούμενων σωματιδίων είναι ανεπαρκής ώστε να έχει τοξική επίδραση στον άνθρωπο. Εντούτοις, έχει αποδειχθεί ότι κάποια στοιχεία μετάπτωσης, και συγκεκριμένα ο σίδηρος, είναι δυνατόν να παρουσιάσουν αρνητικά αποτελέσματα μέσω μη-συνήθων μηχανισμών, όπως η συμβολή στην παραγωγή ριζών υδροξυλίου μέσω της αντίδρασης Fenton (Harrison & Yin 2000, Valavanidis et al. 2000).

Με εξαίρεση μέταλλα όπως ο μολύβδος, του οποίου η κύρια πηγή είναι η κυκλοφορία οχημάτων που οδηγεί στην ευρεία διασπορά του στην αστική ατμόσφαιρα, τα άλλα μεταλλικά ιχνοστοιχεία προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές διαδικασίες, και συνεπώς η κατανομή τους στο χώρο είναι ανομοιόμορφη (Harrison & Yin 2000).

Ισχυρά Οξέα

Ο σχηματισμόςθειικών και νιτρικών στην ατμόσφαιρα, μέσω της οξείδωσης των SO_2 και NO_2 , αρχικά γίνεται υπό την μορφή των ισχυρών τους οξέων H_2SO_4 και HNO_3 . Το νιτρικό οξύ, λόγω της μεγάλης του πτητικότητας, είναι δυνατόν να ενσωματωθεί στα αιωρούμενα σωματίδια μόνο μέσω απώλειας της οξύτητας του (είτε αντίδρασης με υδροχλωρικό οξύ ή εξουδετέρωσης από την αμμωνία). Αντιθέτως, τοθειικό οξύ είναι μη πτητικό και, μόλις σχηματιστεί, ενσωματώνεται κατευθείαν στα σωματίδια, όπου κατόπιν είναι δυνατόν να εξουδετερωθεί από την αμμωνία της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, σε περιβάλλοντα με χαμηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικής αμμωνίας, τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν ένα σημαντικό ποσοστό ισχυρού οξέος, το οποίο αντικατοπτρίζει το μη εξουδετερωμένο ή μερικά εξουδετερωμένοθειικό οξύ. Ορισμένες παλαιότερες μελέτες υποστηρίζουν ότι η παρουσία ισχυρού οξέος είναι υπαίτια για την τοξική δράση των σωματιδίων (Harrison & Yin 2000).

3.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.7.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

3.7.1.1 Συμπτώματα της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια

Πλήθος επιδημιολογικών μελετών συνδέουν την έκθεση σε σωματίδια PM_{10} , $PM_{2,5}$ και UFPs με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία (Pope and Dockery 2006, Pope et al. 2002, 2000a, b, Von Klot et al. 2002, Katsouyanni et al. 2001, Goldberg et al. 2001, Penttinen et al. 2001, Peters 2000). Τα συμπτώματα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι πολλά. Η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να προκαλέσει ή να επιδεινώσει προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος, καρδιοαγγειακές ασθένειες, να επιδράσει στο μηχανισμό αυτοκαθαρισμού του σώματος από ξένα σωματίδια, να προκαλέσει βλάβη στους ιστούς των πνευμόνων, καρκινογένεσις και πρόωρο θάνατο. Στις συνέπειες συγκαταλέγονται ακόμη και κάποιες λιγότερο επώδυνες, όπως: επίμονος βήχας, φλέγματα, ζαλάδες και αδιαθεσία. Οι τοξικολογικές έρευνες συνεχίζονται ώστε να καθοριστούν οι αιτίες και οι μηχανισμοί δράσης των αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούν τις αρνητικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (Godleski et al. 2000, Gordon et al. 2000). Είναι γενικά παραδεκτό, όμως, ότι η μακροχρόνια έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να μειώσει τη διάρκεια της ζωής από 1 έως 2 χρόνια κατά μέσο όρο. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization, WHO), η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί την αιτία περίπου 3.000.000 θανάτων ετησίως, σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, σύμφωνα με σχετικές μελέτες, τα σωματίδια δρουν επιβαρυντικά για την υγεία ακόμη και σε συγκεντρώσεις κατά πολύ μικρότερες από τα προβλεπόμενα ανώτατα επιτρεπτά όρια. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας αναφέρει ότι «τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την μακροχρόνια και βραχυχρόνια έκθεση του πληθυσμού σε σωματίδια PM_{10} και $PM_{2,5}$ δεν επιτρέπουν τον καθορισμό συγκεκριμένων οριακών τιμών συγκέντρωσης, κάτω από τις οποίες η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση δεν παρουσιάζει καμία επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία» (WHO 2000).

Υπάρχει, επίσης, έντονη ανησυχία διεθνώς σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία της βραχυχρόνιας έκθεσης σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις PM. Πολλές πρόσφατες

μελέτες συνδέουν τα, μικρής διάρκειας, υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης με σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα, και καρδιαγγειακές παθήσεις (Nemmar et al. 2004, Gold et al. 2000, Michaels & Kleinman 2000). Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι πολλά χρόνια συμπτώματα οφείλονται στην επαναλαμβανόμενη βραχυχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Schwartz 2000).

Σε επιδημιολογική έρευνα που αναρτήθηκε στην ηλεκτρονική έκδοση του περιοδικού Lancet στα τέλη Φεβρουαρίου 2011, η ατμοσφαιρική ρύπανση αναδεικνύεται στο σημαντικότερο παράγοντα πυροδότησης ενός εμφράγματος του μυοκαρδίου. Η κατακόρυφη αύξηση των σωματιδίων μικρότερων από 10 μm (PM₁₀) στην ατμόσφαιρα αναδείχθηκε σημαντικότερη σε επίπεδο πληθυσμού από τη χρήση κοκαΐνης, την έντονη άσκηση, ένα βαρύ φαγητό και τη σεξουαλική πράξη, παράγοντες που έχουν ενοχοποιηθεί σε αρκετές περιπτώσεις να προηγούνται λεπτά ή ώρες του εμφράγματος. Η πρακτική αξία της μελέτης είναι η ενδεχόμενη μείωση των εμφραγμάτων εάν επιτευχθεί μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπολογίζεται ότι στην πλειονότητα των μεγάλων πόλεων Ευρώπης και ΗΠΑ, η μείωση της ρύπανσης κατά 10 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ PM₁₀ θα οδηγούσε σε ελάττωση των εμφραγμάτων κατά 1,6%. Η αντίστοιχη μείωση θα μπορούσε να είναι 4,8% σε λίγες ευρωπαϊκές πόλεις με υψηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης PM₁₀, εάν μειωνόταν η συγκέντρωση PM₁₀ κατά 30 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (Ελληνικό Ίδρυμα Καρδιολογίας 2011).

Πλέον ευαίσθητες υποομάδες πληθυσμού ως προς την έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση αναδεικνύονται τα πολύ νεαρά και ηλικιωμένα άτομα, καθώς και οι πάσχοντες από αναπνευστικές και καρδιακές παθήσεις. Ιδιαίτερα όσον αφορά τα παιδιά προεφηβικής ηλικίας, οι επιπτώσεις που προκαλεί η έκθεση τους σε αιωρούμενα σωματίδια, έχουν απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα την τελευταία δεκαετία.

Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀, PM_{2,5}, UFPs, καθώς και μαύρου καπνού (black smoke, BS) έχει βρεθεί ότι σχετίζονται με αναπνευστικά συμπτώματα σε νεαρά άτομα, απουσίες από το σχολείο και αυξημένη χρήση φαρμακευτικής αγωγής για τα παιδιά που πάσχουν από άσθμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην πολλή του Μεξικού (Romieu et al. 1996), αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ κατά 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ συνδέεται με κατά 8 % αύξηση

ασθενειών του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος σε ασθματικά παιδιά. Σε μεταγενέστερη μελέτη, οι Hoek et al (1998) υπολόγισαν ότι αύξηση της συγκέντρωσης των PM_{10} στην ατμόσφαιρα κατά $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, συνδέεται με 10 % ελάττωση του μέγιστου ρυθμού εκπνοής (Peak Expiratory Flow Rate, PEFr). Στα πλαίσια μιας 10-ετούς επιδημιολογικής μελέτης στην Νότια Καλιφόρνια, βρέθηκαν ενδείξεις ελλειπούς ανάπτυξης της πνευμονικής λειτουργίας των παιδιών, οι οποίες σχετίζονταν με υψηλές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (Wu et al. 2005). Αρκετές ερευνητικές μελέτες αναφέρουν, τέλος, αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα σε παιδιά που κατοικούν ή κινούνται σε περιοχές έντονης κυκλοφορίας (English et al. 1999, Ciccone 1998, Van Vliet et al. 1997).

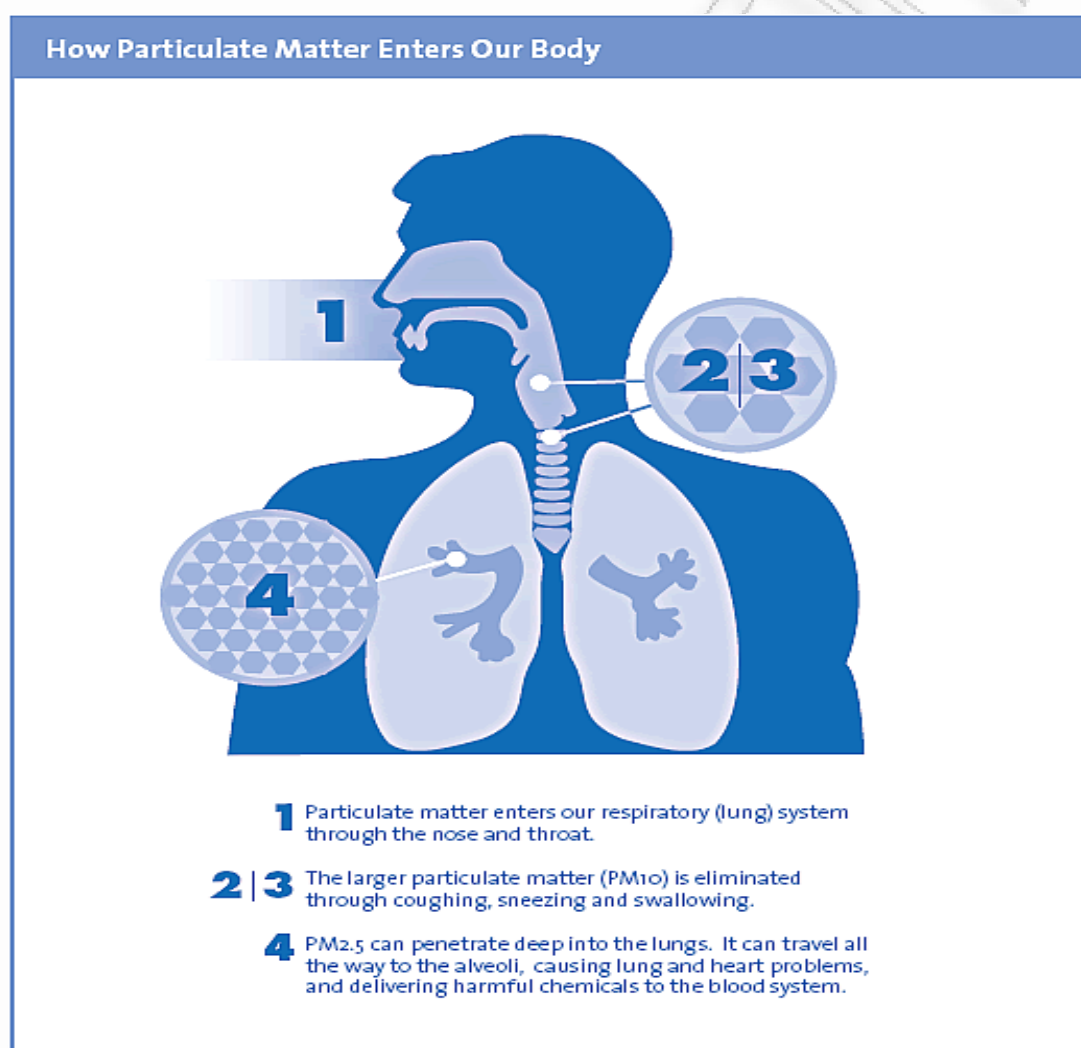
Η αυξημένη ευαισθησία των παιδιών ως προς την ατμοσφαιρική ρύπανση οφείλεται στο ότι το φυσιολογικό και ανοσοποιητικό τους σύστημα είναι ακόμη υπό ανάπτυξη (Farhat et al. 2005). Είναι πιθανό, επίσης, να λαμβάνουν αυξημένη δόση σωματιδιακής μάζας στους πνεύμονες τους, σε σχέση με αυτή των ενηλίκων. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τον μικρό μέγεθος των πνευμόνων τους, που οδηγεί σε υψηλότερο ποσοστό επικάθησης των PM με κάθε αναπνοή ή / και μεγαλύτερη εναλλαγή του αέρα σε αυτούς (Gauderman et al. 2000).



Εικόνα 3.8. Ρύποι που εκπέμπονται από την εξάτμιση του αυτοκινήτου και που εισπνέονται από ένα βρέφος.

3.7.1.2 Τρόπος επίδρασης των διαφορετικών σωματιδιακών κλασμάτων

Γενικά τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm απομακρύνονται από τον οργανισμό με κατακράτηση από το στόμα ή την μύτη. Τα PM₁₀, αντιθέτως, είναι δυνατόν να διαφύγουν σε πρώτη φάση από τους μηχανισμούς κατακράτησης, και για τον λόγο αυτό καλούνται εισπνεύσιμα (inhalable). Ο κύριος όγκος, όμως, των χονδρόκοκκων σωματιδίων αποβάλλεται από το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα. Τελικά το 10 – 60 % αυτών είναι πιθανόν να εναποτεθεί στους πνεύμονες.

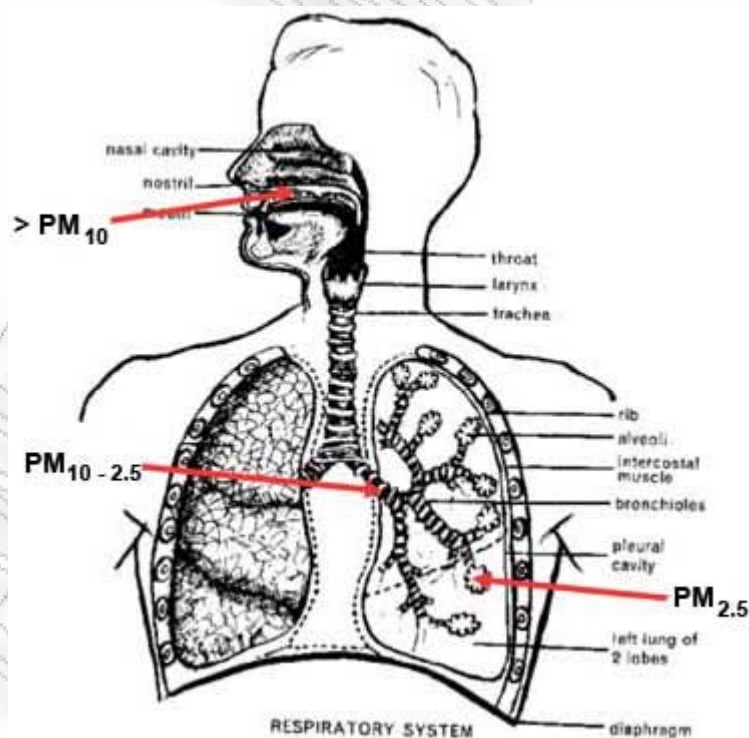


Εικόνα 3.9. Είσοδος των αιωρούμενων σωματιδίων στον οργανισμό.

Τα λεπτόκοκκα σωματίδια PM_{2,5} καταφέρνουν να εισχωρήσουν βαθύτερα στους βρόγχους, και να προκαλέσουν σημαντικότερη βλάβη. Στην πορεία τους, τα σωματίδια περνούν μέσα από τους ολοένα και στενότερους βρόγχους, και είναι δυνατόν να φτάσουν έως και τις κυψελίδες των πνευμόνων, δια μέσω των οποίων

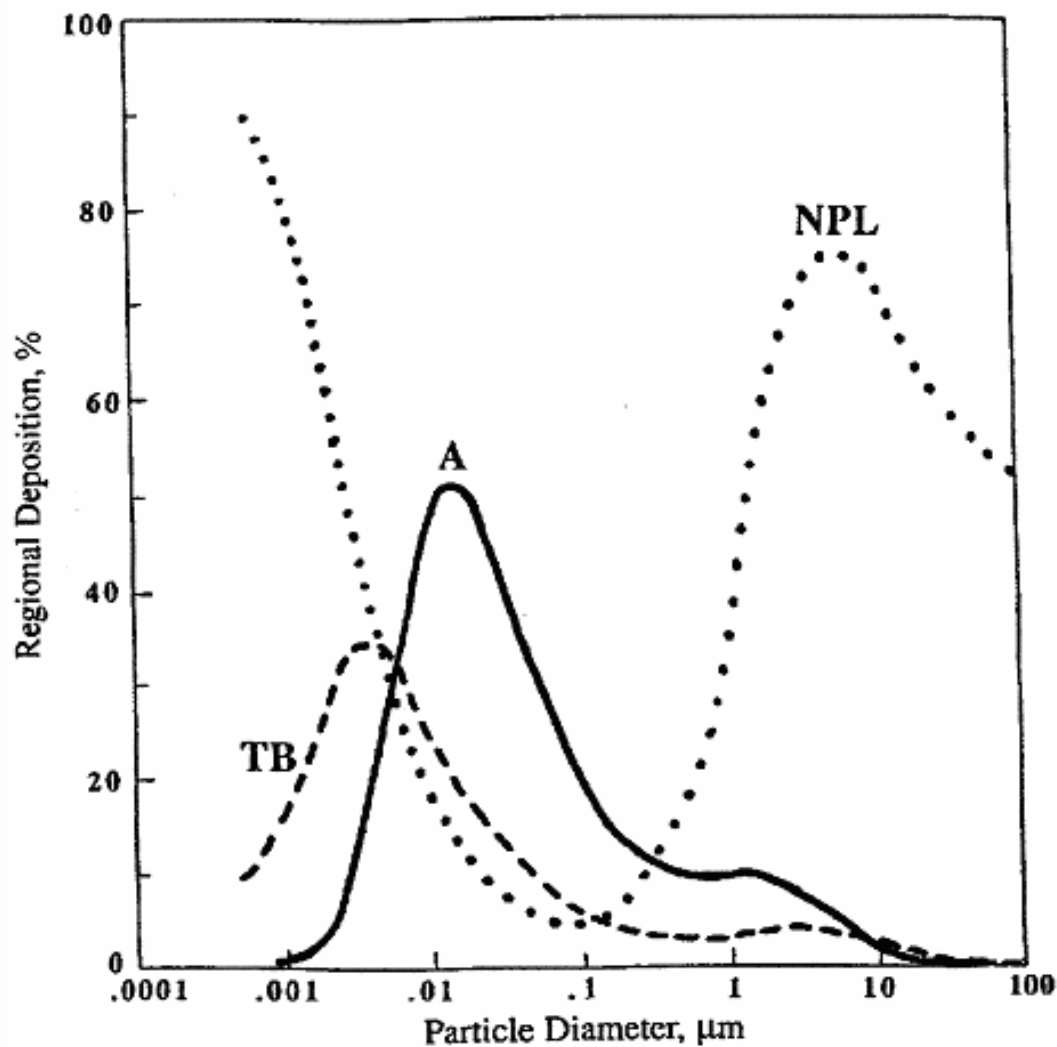
εισέρχεται το οξυγόνο στο αίμα. Τα σωματίδια που παγιδεύονται σε αυτούς τους υπερευαίσθητους ιστούς επεμβαίνουν στην οξυγόνωση του αίματος. Παράλληλα, σε όλη την διαδρομή, τοξικές και καρκινογόνες ενώσεις που μεταφέρονται προσροφημένες αρχικά στην επιφάνεια των σωματιδίων, προσροφούνται στη συνέχεια σε διαφορετικά σημεία των πνευμόνων (ALAW 2004).

Λόγω των μεταβολών στη ροή του αέρα στην τραχειοβρογχική ζώνη, τα σημεία εναπόθεσης των σωματιδίων είναι κυρίως πάνω ή κοντά στους βρόγχους. Σε αυτά τα σημεία υπάρχουν συγκεντρωμένες πολλές νευρικές απολήξεις. Οι μηχανικοί ερεθισμοί που προκαλούνται από τα σωματίδια, συχνά οδηγούν σε αντανακλαστικό βήχα και σε συστολή των βρόγχων. Η ευαισθησία των νευρικών απολήξεων στις χημικές διεγέρσεις έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού αναπνοής και την μείωση της ικανότητας του πνεύμονα να λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά στις αυξομειώσεις της πίεσης κατά την αναπνοή.



Εικόνα 3.10. Δεισδυτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται η εναπόθεση των σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών στο εσωτερικό του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού, σύμφωνα με τα αποτελέσματα μοντέλου πρόβλεψης που αναπτύχθηκε από την Διεθνή Επιτροπή Προστασίας από την Ακτινοβολία (International Committee on Radiological Protection, ICRP) (ICRP 1994).



Fractional Deposition Nose Breathing

A = Alveolar; TB = Tracheo-bronchial; NPL = Nasal, Pharynx, Larynx

Σχήμα 3.8. Εναπόθεση εισπνεόμενων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών στο ανώτερο και κατώτερο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού.

3.7.1.3 Τοξικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων

Το έτος 1995 η επιτροπή του Υπουργείου Υγείας της Μ. Βρετανίας, που εξετάζει τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αποφάνθηκε ότι δεν υπάρχει γνωστή χημική ένωση επαρκούς τοξικότητας, δεδομένων των επιπέδων έκθεσης σε σωματιδιακή ρύπανση, ικανή να εξηγήσει το παρατηρούμενο μέγεθος των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία από τα σωματίδια. Ακόμη και οι τοξικές ουσίες που αναπτύσσονται για τις εφαρμογές του χημικού πολέμου, δεν έχουν την απαιτούμενη τοξικότητα (Harrison & Yin 2000).

Δεν είναι, όμως, εύκολο να γίνει αποδεκτή η άποψη ότι η χημική σύσταση των σωματιδίων είναι εντελώς αμέτοχη στην τοξικότητα των σωματιδίων. Γενικά θεωρείται ότι η τοξικότητα οφείλεται στον συνδυασμό της χημικής τους σύστασης, της περιεκτικότητας τους σε ορισμένα ιδιαίτερα τοξικά χημικά είδη και της κατανομής του μεγέθους τους.

Η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην τοξικότητα τους αναλύθηκε παραπάνω. Όσον αφορά τα κύρια συστατικά της σωματιδιακής ύλης, περισσότερο επικίνδυνα θεωρούνται τα θειικά, καθώς βλάπτουν σοβαρά την ικανότητα των πνευμόνων να αποβάλλουν τα σωματίδια. Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι τα υδατοδιαλυτά συστατικά, τα οποία διαλύονται ταχύτατα στα υγρά που επενδύουν τα τοιχώματα του αναπνευστικού συστήματος, είναι μάλλον απίθανο να ασκήσουν οποιαδήποτε σημαντική επίδραση. Γύρω από αυτό το ζήτημα υπάρχει, όμως, ακόμη αρκετή αβεβαιότητα.

Όσον αφορά την επίδραση των μεταλλικών ιχνοστοιχείων, η καταλυτική δράση ορισμένων μετάλλων σε αντιδράσεις σχηματισμού ελεύθερων ριζών υδροξυλίου, οι οποίες έχουν αποδεδειγμένη επίδραση στον ερεθισμό των ιστών, φαίνεται να αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα τοξικότητας, από ό,τι αυτή καθαυτή η τοξικότητα τους. Τα σωματίδια PM_{10} έχουν έντονη δραστηριότητα μέσω των ελεύθερων ριζών, γεγονός που αποδεικνύεται πειραματικά με αποσύνθεση του DNA. Μέρος αυτής της δραστηριότητας οφείλεται στην ρίζα υδροξυλίου, μια ελεύθερη ρίζα ισχυρά δηλητηριώδη, η οποία εκλύεται από τα PM_{10} σε υδατικό μέσο. Επίσης, το ίδιο σωματιδιακό κλάσμα εκλύει σε σημαντικές ποσότητες Fe^{+3} σε pH ίσο με 7,2, το

οποίο είναι το pH της επιφάνειας των πνευμόνων. Η έκλυση σιδήρου είναι ακόμη πιο επικίνδυνη, καθώς ευνοεί την διαδικασία σχηματισμού ριζών υδροξυλίου.

Πολύ μεγαλύτερη φαίνεται να είναι η επίδραση ορισμένων οργανικών ενώσεων, και ιδίως των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs), η καρκινογόνος και μεταλλαξιογόνος δράση των οποίων είναι αναγνωρισμένη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξέταση ενός μίγματος χημικών ενώσεων, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, δίνει μια πιο ρεαλιστική βάση για την μεταλλαξιογόνο επίδραση, σε σχέση με την εξέταση μεμονωμένων συστατικών, λόγω της εμφάνισης συνεργετικών ή ανταγωνιστικών μηχανισμών στο μίγμα. Η ανάλυση του μεταλλαξιογόνου χαρακτήρα των σωματιδίων έχει προγνωστική αξία για τις πιθανές καρκινογενέσεις, καθώς οι περισσότερες ουσίες που έχουν ταξινομηθεί ως μεταλλαξιογόνες έχουν και καρκινογενή δράση (Villalobos-Pietrini et al. 2000).

3.7.1.4 Δευτερογενείς επιπτώσεις στην υγεία

Τα παρατηρούμενα προβλήματα υγείας κατά την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια δεν οφείλονται αποκλειστικά στην διείσδυση τους στο αναπνευστικό σύστημα και την τοξική τους δράση, αλλά και, δευτερογενώς, στην εξασθένηση του οργανισμού. Πλήθος μελετών αποδεικνύουν ότι η έκθεση σε PM είναι δυνατόν να προκαλέσει εμφάνιση αναπνευστικών προβλημάτων, αλλοιώσεις στην λειτουργία των πνευμόνων και στους μηχανισμούς αυτοκαθαρισμού τους, καθώς και δημιουργία φλεγμονών σε αυτούς. Τα παραπάνω συμπτώματα οδηγούν σε αυξημένη ευαισθησία του οργανισμού, η οποία ευνοεί την συμπύκνωση υγρού μέσα στους πνεύμονες, ιδιαίτερα σε άτομα με καρδιακές παθήσεις. Η έκθεση σε PM είναι δυνατόν, επίσης, να αυξήσει την ευαισθησία των πνευμόνων σε μολύνσεις από βακτήρια ή ιούς. Το γεγονός αυτό προκαλεί την αύξηση επεισοδίων πνευμονίας στην ομάδα των ευπαθών ατόμων (Natural Resources Defense Council 1996a).

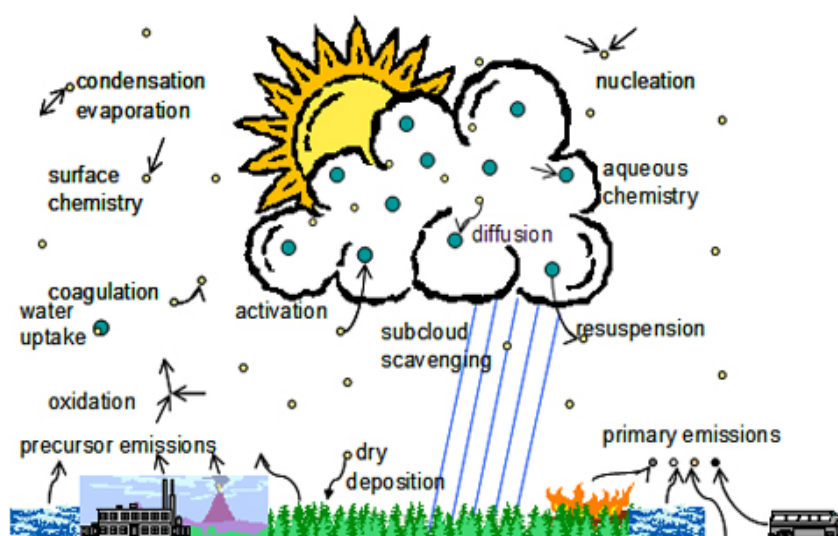
3.7.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.7.2.1 Επιπτώσεις στην ορατότητα

Η αέρια σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να αλλοιώσει την αντίληψη μας για τα χρώματα αντικειμένων που παρατηρούμε μέσα στην ατμόσφαιρα αλλά και τα χρώματα της ίδιας της ατμόσφαιρας. Η ελάττωση της ορατότητας είναι άμεσο αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm και της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα PM_{2,5} δρουν ως ένα είδος φίλτρου ως προς την ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα μόνο ένα ποσοστό από αυτή να καταφέρνει να τα διαπεράσει, ενώ η υπόλοιπη διαχέεται, απορροφάται από τα σωματίδια ή ανακλάται. Η μειωμένη και αλλοιωμένη ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε ελαττωμένη ορατότητα. Αναφέρεται ότι σωματιδιακή συγκέντρωση περίπου 150 μg/m³ συνεπάγεται μέγιστη ορατότητα ίση με 8 χιλιόμετρα. Μια άλλη συνέπεια από τη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της επίδρασης των σωματιδίων είναι η ελάττωση της γεωργικής παραγωγής στις αγροτικές περιοχές.

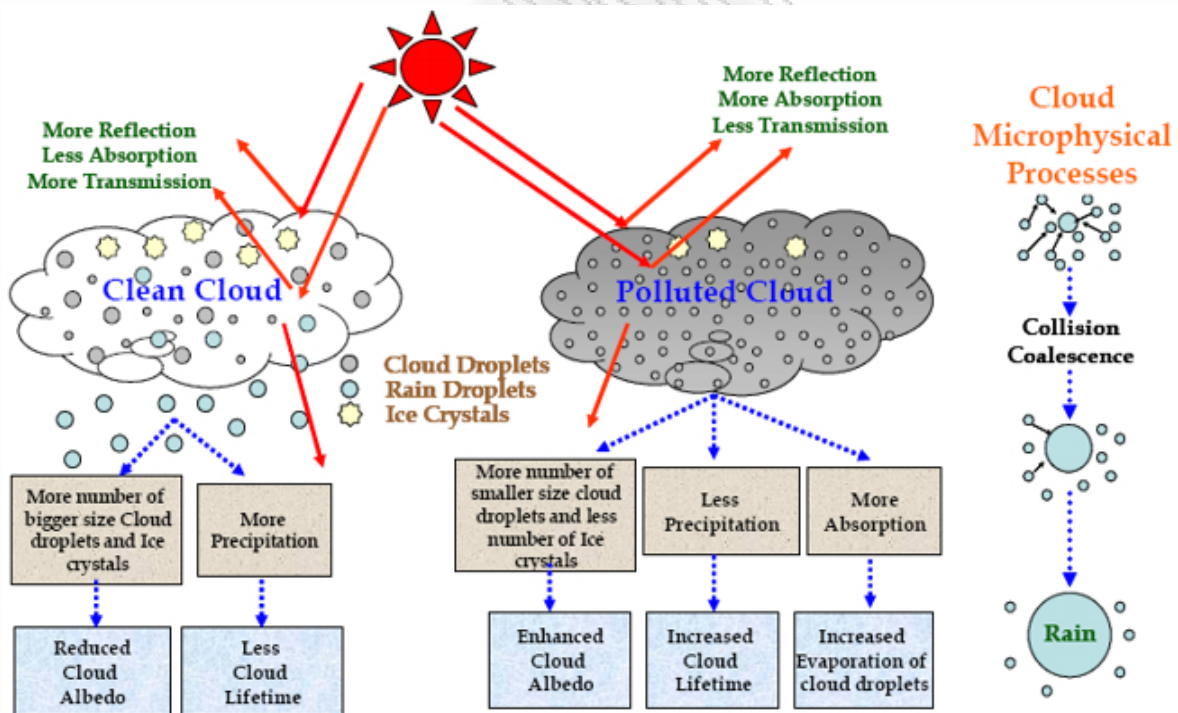
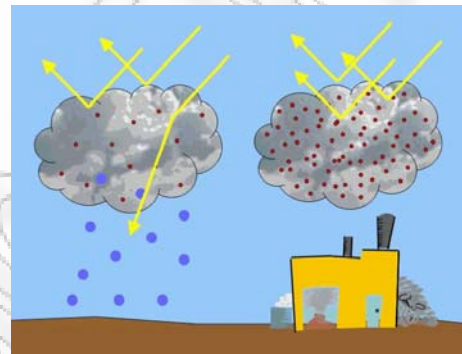
3.7.2.2 Επιπτώσεις στο κλίμα

Σημαντικές είναι, επίσης, οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα. Η επίδραση τους ποικίλει στο χώρο και στο χρόνο και εξαρτάται ισχυρά από τις τοπικές εκπομπές σε σωματίδια, τον σχετικά μικρό χρόνο ζωής και τον τρόπο αλληλεπίδρασης των σωματιδίων αυτών με την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα των πολλών αλληλεπιδράσεων των αερολυμάτων στο περιβάλλον και με τα σύννεφα.

Ανάλογα με το μέγεθος και τον βαθμό ανάκλασης τους, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ανακλούν την μικρού μήκους κύματος εισερχόμενη προς τη γη υπεριώδη ακτινοβολία ή τη μεγάλου μήκους κύματος εξερχόμενη από τη γη υπέρυθη ακτινοβολία. Στη πρώτη περίπτωση επέρχεται ψύξη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση προκαλείται η θέρμανση της ατμόσφαιρας, γνωστή και ως φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα αιωρούμενα σωματίδια, ωστόσο, επιδρούν και με έναν ακόμη, έμμεσο, τρόπο στο παγκόσμιο κλίμα. Η έμμεση αυτή δράση προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο επιδρούν τα σωματίδια στις μικροφυσικές ιδιότητες των νεφών. Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα είναι η ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων των νεφών. Αυτό συμβαίνει διότι τα σωματίδια δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης, προκαλώντας τον σχηματισμό σταγόνων και στερώντας έτσι τα σύννεφα πρώτιστα από τα ογκωδέστερα των σταγονιδίων τους.



Εικόνα 3.11. Ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων των νεφών λόγω αυξημένης συγκέντρωσης σωματιδίων.

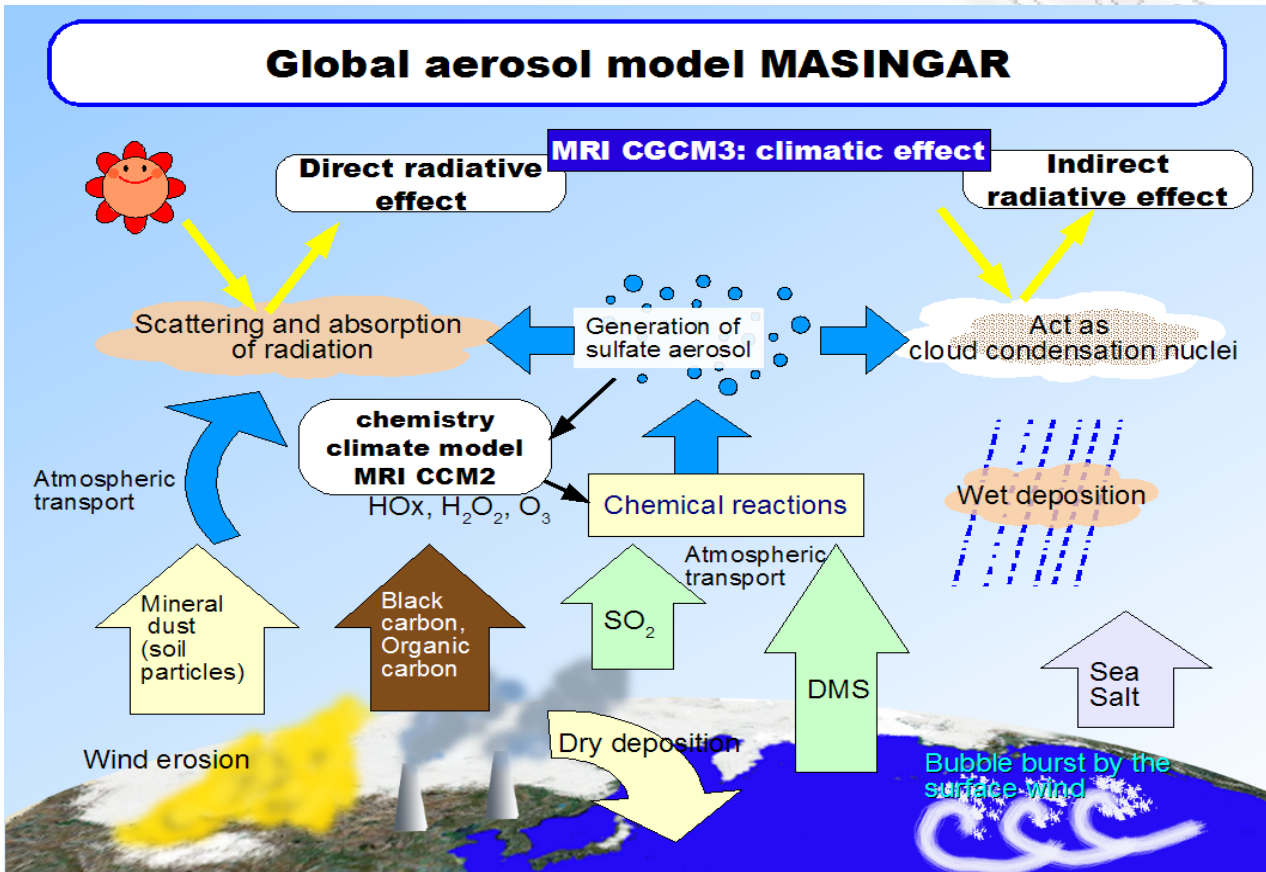
Μια άλλη επίπτωση είναι η αύξηση της ζωής των συννεφών αλλά και η χημική ρύπανση των σταγόνων (όξινη βροχή).

3.7.2.3 Επιφανειακές αλλοιώσεις

Επιπλέον, είναι γνωστό ότι τα αιωρούμενα σωματίδια είναι δυνατόν να προκαλέσουν επιφανειακές αλλοιώσεις σε σχεδόν κάθε επιφάνεια του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι επιφανειακές αλλοιώσεις προκαλούνται σε φυτά, δένδρα, μεταλλικές επιφάνειες, υφάσματα, χρωματισμένες επιφάνειες, ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.α. Οι δύο βασικές κατηγορίες μηχανισμών που εξηγούν αυτές τις αλλοιώσεις είναι:

- **Διάβρωση:** Η έκθεση σε φορτισμένα σωματίδια είναι δυνατόν να επιτείνει σημαντικά το ρυθμό διάβρωσης ιδιαίτερα των ηλεκτρονικών συσκευών, μέχρι προκλήσεως βλαβών. Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος από μερικές δεκάδες Angstroms έως 1 μm και προκαλούν διάβρωση καθώς είναι υγροσκοπικά και διαβρωτικά στις φυσιολογικές συνθήκες σχετικής υγρασίας, ώστε να επιδρούν άμεσα στα μεταλλικά εξαρτήματα ή ακόμη και να σχηματίζουν λεπτά αγωγίμα φίλμ υγρασίας, προκαλώντας βραχυκυκλώματα στη συσκευή. Η επίδραση των σωματιδίων δεν είναι μόνο άμεση. Τα σωματίδια λειτουργούν με δύο επί πλέον τρόπους. Κατά πρώτον λειτουργούν άμεσα ως φορείς ενώσεων οι οποίοι δρουν διαβρωτικά επιτυγχάνοντας να εισχωρήσουν και κάτω από την επιφάνεια του υλικού. Επιπλέον, τα εναποτιθέμενα σωματίδια είναι δυνατόν να λειτουργήσουν και ως σημεία συμύκνωσης και άλλων ρύπων, που με τη σειρά τους διαβρώνουν την επιφάνεια. Τα σωματίδια, δρώντας συνεργετικά, ευνοούν και επιτείνουν τη διαβρωτική επίδραση των φυσικών περιβαλλοντικών παραγόντων (άνεμος, βροχή, ήλιος κλπ.). Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντική επίδραση και στο χρόνο ζωής των υλικών.
- **Επικάθηση:** Μια από τις σημαντικότερες επιπτώσεις των αιωρουμένων σωματιδίων είναι η επικάθηση τους πάνω στις επιφάνειες. Ήδη από το 1959 είχε μελετηθεί το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν σωματίδια βομβάρδιζαν μια χάρτινη επιφάνεια σε χώρο με υψηλή συγκέντρωση αιωρουμένων σωματιδίων, το χαρτί παρέμενε καθαρό για ένα διάστημα και στη συνέχεια φαινόταν ξαφνικά σκονισμένο. Το καθάρισμα, το πλύσιμο ή το βάνισμο είναι κατά περίπτωση η λύση αυτού του φαινομένου. Η αύξηση της συχνότητας αυτών των δραστηριοτήτων, όμως, συνεπάγεται άμεσο οικονομικό κόστος αλλά και μείωση του χρόνου ωφέλιμης χρήσης της επιφάνειας. Εξάλλου, εκτός από την επίπτωση στην

αισθητική, η επικάλυψη των σωματιδίων μειώνει την ανακλαστικότητα των αδιαφανών επιφανειών, αλλά και το ποσοστό του φωτός που διεισδύει τις διαφανείς επιφάνειες (Koloutsou-Valais 1999, EPA 1996).



Σχήμα 3.10. Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, διεργασίες και αλληλεπιδράσεις στο περιβάλλον.

3.8 ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

3.8.1 Γενικά Στοιχεία

Για τη διασφάλιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, έτσι ώστε να αποκλείονται δυσμενείς επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον άνθρωπο, στα ζώα, στα φυτά και στο υλικό περιβάλλον, έχουν θεσπιστεί από διάφορες χώρες ή οργανισμούς *πρότυπα ποιότητας του αέρα*. Τα πρότυπα αυτά είναι νομικά θεσμοθετημένες ή προτεινόμενες τιμές συγκεντρώσεων ρύπων για καθορισμένες χρονικές περιόδους.

Τα πρότυπα ποιότητας του αέρα εκφράζονται ως οριακές τιμές ή κατευθυντήριες τιμές. Οι πρώτες είναι ανώτατες (οριακές) επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρύπων για καθορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ ένα έτος, μία ημέρα, μία ώρα κ.α.). Ο στόχος των ορίων είναι κυρίως, η προστασία της υγείας του ανθρώπου. Οι κατευθυντήριες τιμές εκφράζουν την επιθυμητή ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα όπως αυτή καθορίζεται από συγκεκριμένους στόχους. Οι κατευθυντήριες τιμές ισχύουν για καθορισμένες χρονικές περιόδους, όπως και οι οριακές και προορίζονται να χρησιμεύσουν για τη μακροπρόθεσμη πρόληψη σε θέματα υγείας και προστασίας του περιβάλλοντος, και ως σημεία αναφοράς για τη θέσπιση ειδικών καθεστώτων σε διάφορες περιοχές (π.χ. ζώνες προστασίας, αρχαιολογικούς χώρους κ.α.).

Η διαδικασία θεσμοθέτησης των προτύπων ποιότητας του αέρα είναι πολύπλοκη και διαφέρει από χώρα σε χώρα. Βασικό άξονα της διαδικασίας αυτής αποτελούν τα κριτήρια ποιότητας του αέρα. Αυτά είναι τιμές συγκεντρώσεων ρύπων και χρόνοι έκθεσης σ' αυτούς που συνδέονται με ειδικές επιδράσεις στον άνθρωπο, στα ζώα, στα φυτά και γενικά στο περιβάλλον.

Παράλληλα, καθορίζονται οι στόχοι για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο ιδανικός στόχος για τις κατοικημένες περιοχές είναι φυσικά, ίδια ποιότητα αέρα με τις μη ρυπασμένες περιοχές.

Με βάση τα κριτήρια ποιότητας του αέρα διαμορφώνονται τα πρότυπα ποιότητας του αέρα. Στην τελική διαμόρφωση των προτύπων υπεισέρχονται και άλλες παράμετροι, όπως η ατμοσφαιρική διασπορά κάθε τύπου, οι ατμοσφαιρικές χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και κυρίως οι οικονομικές, τεχνικές και πολιτικές παράμετροι.

Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σ' ένα πλήθος ορίων διαφορετικών από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα ισχύουν τα όρια που έχουν θεσπιστεί ή προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα κράτη μέλη με βάση αποτελέσματα σχετικών μελετών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας ή άλλων αναγνωρισμένων ερευνητικών κέντρων.

3.8.2 Η Ευρωπαϊκή θυγατρική οδηγία - πλαίσιο

Οι δυνατότητες της εκάστοτε διοίκησης να ελέγξει τις πηγές και τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συχνά υπαγορεύονται από διεθνείς και εθνικές πολιτικές και νόμους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εκδίδει οδηγίες - πλαίσιο, βάσει των οποίων οφείλουν τα κράτη μέλη να προσαρμόζουν την εθνική τους νομοθεσία. Η οδηγία - πλαίσιο της Ε.Ε. προβλέπει την έκδοση θυγατρικών οδηγιών. Κάθε θυγατρική οδηγία αναφέρεται σε ένα ρύπο ή μία κατηγορία ρύπων.

Η παλαιότερη θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM, που είχε εκδοθεί το 1983, αναφερόταν στα ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP) και πρότεινε τις παρακάτω τιμές:

Πίνακας 3.4. Οδηγία της Ε.Ε. για τα TSP (1983).

Ετήσια τιμή (μέσος όρος 24-ωρων μετρήσεων)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Τιμή χειμερινής περιόδου (μέσος όρος 24-ωρων μετρήσεων)	130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
98 ^ο εκατοστημόριο των 24-ωρων μετρήσεων του έτους	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Στις 24 Μαρτίου 1999, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε, μετά από επίπονη προετοιμασία, μια νέα θυγατρική οδηγία για τον έλεγχο της ποιότητας της ατμόσφαιρας, που αναφέρεται στα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀. Η οδηγία αναφέρει ότι τα κράτη μέλη οφείλουν να λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα, ώστε οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM₁₀ στον ατμοσφαιρικό αέρα να μην ξεπερνούν τις οριακές τιμές που δίδονται στον Πίνακα 3.5, στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα και πριν από τις αναφερόμενες στην οδηγία ημερομηνίες. Επίσης, σύμφωνα με την οδηγία, τα κράτη μέλη οφείλουν να εγκαταστήσουν και να λειτουργήσουν σταθμούς μέτρησης για τη συλλογή στοιχείων σχετικών με τις συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Τα κράτη μέλη οφείλουν να διαβιβάζουν ετησίως στην Επιτροπή, όχι αργότερα από εννέα μήνες μετά το τέλος κάθε έτους, τον αριθμητικό μέσο, το διάμεσο, το 98^ο εκατοστημόριο και τη μέγιστη συγκέντρωση, όπως υπολογίζονται από τις 24-ωρες

μετρήσεις $PM_{2,5}$ μέσα στο έτος. Στόχος της καταγραφής των επιπέδων συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2,5}$ ήταν η συλλογή στοιχείων για την θέσπιση οριακών τιμών και για το κλάσμα αυτό (Οδηγία 1999/30/EC).

Το Δεκέμβριο του 2004, εκδόθηκε η τελική έκθεση της ομάδας εργασίας C.A.F.E (Clean Air For Europe), πάνω στην αιωρούμενη σωματιδιακή ρύπανση, που συστάθηκε από την Ε.Ε., με στόχο να:

- θέσει τις προτεραιότητες για τον μελλοντικό σχεδιασμό της πολιτικής ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- αναθεωρήσει τα ισχύοντα πρότυπα ποιότητας αέρα και
- αναπτύξει καλύτερα συστήματα συλλογής δεδομένων και πρόβλεψης των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Μετά από ενδελεχή μελέτη των διαθέσιμων στοιχείων από μετρήσεις των επιπέδων συγκέντρωσης των PM στην Ευρώπη και από σχετικές επιδημιολογικές μελέτες, η ομάδα εργασίας C.A.F.E. καταλήγει στην επιλογή της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2,5}$, και όχι αυτής των PM_{10} , ως βασικό μέτρο της έκθεσης του πληθυσμού σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση. Η ομάδα αναφέρει ότι η ετήσια οριακή τιμή των $PM_{2,5}$ δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ προτείνει και 24-ωρη οριακή τιμή ίση με $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (να μην υπερβαίνεται περισσότερο από το 10 % των ημερών μέσα στο έτος). Παράλληλα, υποστηρίζει ότι οι οριακές τιμές για τα σωματίδια PM_{10} που έχουν ορισθεί στο στάδιο 2 της θυγατρικής οδηγίας 1999/30/EC, είναι απαραίτητο να διατηρηθούν, ώστε να επιτευχθεί και ο έλεγχος των χονδρόκοκκων σωματιδίων $PM_{2,5-10}$ (CAFE 2004).

Με βάση τις γενικές διαπιστώσεις και τις προτάσεις που περιέχονται στην τελική έκθεση της ομάδας C.A.F.E., η Ε.Ε. προχώρησε στην θέσπιση ετήσιας οριακής τιμής για τα σωματίδια $PM_{2,5}$ (Πίνακας 3.6) (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 2005).

Πίνακας 3.5. Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM₁₀ (1999/30/ΕΚ).

	Περίοδος αναφοράς	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Προθεσμία για την συμμόρφωση προς την οριακή τιμή
ΣΤΑΔΙΟ 1				
24-ωρη οριακή τιμή	24 ώρες	50 µg/m ³ (να μην υπερβαίνεται πάνω από 35 φορές / έτος)	50 % κατά την έναρξη της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 και κάθε 12 μήνες κατά ίσο ποσοστό, ώστε να φτάσει το 0 % την 1/1/2005	1 ^η Ιανουαρίου 2005
Ετήσια οριακή τιμή	Ημερολογιακό έτος	40 µg/m ³	20 % κατά την έναρξη της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 και κάθε 12 μήνες κατά ίσο ποσοστό, ώστε να φτάσει το 0 % την 1/1/2005	1 ^η Ιανουαρίου 2005
ΣΤΑΔΙΟ 2				
24-ωρη οριακή τιμή	24 ώρες	50 µg/m ³ (να μην υπερβαίνεται πάνω από 7 φορές / έτος)	Θα υπολογιστεί βάσει δεδομένων που θα είναι ισοδύναμα με την οριακή τιμή του σταδίου 1	1 ^η Ιανουαρίου 2010 Παράταση Προθεσμίας: 11 ^η Ιουνίου 2011
Ετήσια οριακή τιμή	Ημερολογιακό έτος	20 µg/m ³	50 % την 1/1/2005, μειούμενο κάθε 12 μήνες κατά ίσο ποσοστό, ώστε να φτάσει το 0 % την 1/1/2010	1 ^η Ιανουαρίου 2010 Παράταση Προθεσμίας: 11 ^η Ιουνίου 2011

Πίνακας 3.6. Θέσπιση μέσης ετήσιας οριακής τιμής της συγκέντρωσης των PM_{2,5} από την Ε.Ε.

Περίοδος αναφοράς	Ημερολογιακό έτος
Ανώτατο όριο συγκέντρωσης	25 µg/m ³
Περιθώριο ανοχής	20 % κατά τη θέση σε ισχύ της οδηγίας, μειούμενο έως την 1 ^η του επόμενου Ιανουαρίου, και εν συνεχεία ανά εφεξής 12-μηνο, κατά ίσα ετήσια ποσοστά, ώστε να φτάσει το 0 % την 1/1/2010.
Τελική ημερομηνία για επίτευξη της οριακής συγκέντρωσης	1 ^η Ιανουαρίου 2010

Οδηγία 2008/50/EK

Η νέα Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21^{ης} Μαΐου 2008, τέθηκε σε ισχύ από τις 11 Ιουνίου 2008 για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού Αέρα και τον Καθαρότερο Αέρα για την Ευρώπη. Οι παρακάτω οδηγίες: Η οδηγία 96/62/EK, για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας αέρα του περιβάλλοντος, η οδηγία 1999/30/EK, σχετικά με τις οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, διοξειδίου του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου στον αέρα του περιβάλλοντος, η οδηγία 2000/69/EK, για οριακές τιμές βενζολίου και μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα του περιβάλλοντος και η οδηγία 2002/3/EK, σχετικά με το όζον στον ατμοσφαιρικό αέρα, αναθεωρούνται και ενσωματώνονται στην οδηγία 2008/50/EK, έτσι ώστε να ενσωματώσουν τις πλέον πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της υγείας και της επιστήμης. Η ισχύς αυτών των Οδηγιών θα τερματιστεί την ημερομηνία που η νέα Οδηγία θα έχει μεταφερθεί στις Εθνικές Νομοθεσίες.

Οι οριακές τιμές για τα σωματίδια PM₁₀, καθώς και η τιμή στόχος και η οριακή τιμή για τα σωματίδια PM_{2,5}, σύμφωνα με τη νέα οδηγία φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν:

Πίνακας 3.7. Οριακή τιμή για τα σωματίδια PM₁₀

Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή τιμή
1 ημέρα	50 µg/m ³ , δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος	50 %	— ⁽¹⁾
Ημερολογιακό έτος	40 µg/m ³	20 %	— ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ισχύει ήδη από 1ης Ιανουαρίου 2005.

Πίνακας 3.8. Τιμή Στόχος για τα σωματίδια PM_{2,5}

Περίοδος μέσου όρου	Τιμή στόχος	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η τιμή στόχος
Ημερολογιακό έτος	25 µg/m ³	1η Ιανουαρίου 2010

Πίνακας 3.9. Οριακή Τιμή για τα σωματίδια PM_{2,5}

Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή τιμή
ΣΤΑΔΙΟ 1			
Ημερολογιακό έτος	25 µg/m ³	20 % στις 11 Ιουνίου 2008, μειούμενο έως την 1η του επόμενου Ιανουαρίου και εν συνεχεία ανά εφεξής δωδεκάμηνο κατά ίσα ετήσια ποσοστά ώστε να καταλήξει σε 0 % έως την 1η Ιανουαρίου 2015	1η Ιανουαρίου 2015
ΣΤΑΔΙΟ 2 ⁽¹⁾			
Ημερολογιακό έτος	20 µg/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, του τεχνικός εφοκτού και της εμπειρίας από την τιμή στόχο στα κράτη μέλη.

3.8.3 Πρότυπα ποιότητας κατά US-EPA

Ο ρόλος του Αμερικανικού Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S Environmental Protection Agency, EPA), είναι, σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης των ΗΠΑ (US Clean Air Act 1970,1977,1990), να ορίζει και να θέτει σε ισχύ τα εθνικά πρότυπα ποιότητας αέρα της χώρας (National Ambient Air Quality Standards - NAAQS). Αυτά τα όρια πρέπει να είναι αρκετά αυστηρά ώστε να προστατεύεται η υγεία ακόμα και των πιο ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι για την EPA ένας από τους ρύπους - κριτήρια. Ρύποι-κριτήρια καλούνται οι ρύποι εκείνοι που η EPA έχει αποφασίσει ότι είναι απαραίτητοι για τον προσδιορισμό και την καταπολέμηση της αέριας ρύπανσης. Έτσι, τα εθνικά πρότυπα ποιότητας (NAAQS) των Η.Π.Α. αναφέρονται στους αέριους ρύπους: μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του θείου, όζον, σωματιδιακό μόλυβδο και αιωρούμενα σωματίδια.

Κατά την θέσπιση των NAAQS, ορίστηκε ότι είναι απαραίτητο να επανεξετάζονται κάθε πέντε χρόνια, από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (US-EPA), ώστε να αντανακλούν την πρόσφατη επιστημονική γνώση.

Το 1987 θεσπίστηκε το πρώτο εθνικό αμερικάνικο πρότυπο ποιότητας αέρα (NAAQS) για τα PM_{10} . Συγκεκριμένα, το πρότυπο δεν επέτρεπε οι συγκεντρώσεις στο περιβάλλον να υπερβαίνουν τα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέση ετήσια τιμή) περισσότερο από μια φορά σε τρία συνεχόμενα έτη, και τα $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέση 24-ωρη τιμή) περισσότερο από τρεις φορές μέσα σε τρία έτη.

Το 1992, η αμερικάνικη πνευμονολογική εταιρεία (American Lung Association) μήνυσε την US-EPA επειδή δεν είχε επανεξετάσει το πρότυπο ποιότητας αέρα των PM_{10} . Το δικαστήριο που έγινε στην πολιτεία της Αριζόνα απεφάνθη στις 6 Οκτωβρίου 1994, ότι η EPA οφείλει να επανεξετάσει το πρότυπο ποιότητας αέρα των PM_{10} και, αν κριθεί απαραίτητο, να αναθεωρήσει τα αμερικάνικα πρότυπα ποιότητας αέρα το αργότερο έως τις 31 Δεκεμβρίου 1997.

Ήδη τον Ιούλιο 1997, η EPA είχε προσδιορίσει τις αναθεωρήσεις που έπρεπε να γίνουν στο πρότυπο ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια, ώστε να ανταποκρίνονται στην τότε τρέχουσα επιστημονική γνώση. Τελικά, οι αναθεωρήσεις αυτές (40 CFR Part 50) τέθηκαν σε ισχύ στις 16 Σεπτεμβρίου 1997. Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζονται τα πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια όπως ίσχυαν το 1987, καθώς και με την αναθεώρηση που πραγματοποιήθηκε το 1997 (Milloy 1998, US EPA 1997a, b, c).

Πίνακας 3.10. Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2,5} κατά US - EPA.

Σωματιδιακό κλάσμα	Οριακή τιμή 1987	Επεξήγηση	Οριακή τιμή 1997	Επεξήγηση
PM ₁₀	Ετήσια 50 µg/m ³	Ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ωρων μετρήσεων δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή πάνω από 1 φορά σε 3 συνεχόμενα έτη.	Ετήσια 50 µg/m ³	Καμία αλλαγή σε σχέση με το 1987.
	24-ωρη 150 µg/m ³	Οι 24-ωρες μετρήσεις από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν πρέπει να υπερβούν την οριακή τιμή περισσότερες από 3 φορές σε 3 συνεχόμενα έτη.	24-ωρη 150 µg/m ³	Το 99 ^ο εκατοστημόριο του συνόλου των 24-ωρων συγκεντρώσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή περισσότερο από 3 φορές σε 3 συνεχόμενα έτη.
PM _{2,5}		Δεν υπάρχει οριακή τιμή.	Ετήσια 15 µg/m ³	Ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ωρων μετρήσεων από έναν ή περισσότερους σταθμούς σε οικιστικές περιοχές, δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή.
		Δεν υπάρχει οριακή τιμή.	24-ωρη 65 µg/m ³	Το 98 ^ο εκατοστημόριο του συνόλου των 24-ωρων συγκεντρώσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή περισσότερο από 3 φορές σε 3 συνεχόμενα έτη.

Η ΕΡΑ αναθεώρησε τα πρότυπα ποιότητας του αέρα για τα αιωρούμενα σωματίδια το έτος 2006. Η 24-ωρη επιτρεπτή τιμή για τα $PM_{2.5}$ έγιναν τα $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ από τα $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που ίσχυαν, ενώ η ετήσια τιμή παρέμεινε τα $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η 24-ωρη επιτρεπτή τιμή για τα PM_{10} παρέμεινε στα $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Πίνακας 3.11. Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} και $PM_{2.5}$ κατά US-EPA 2006.

Σωματιδιακό Κλάσμα	Οριακή Τιμή	Περίοδος Αναφοράς
PM_{10}	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Ετήσια
	$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	24-ωρη
$PM_{2.5}$	$15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Ετήσια
	$35 \mu\text{g}/\text{m}^3$	24-ωρη

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι οριακές τιμές των σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2.5}$, που έχουν ορίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η US-EPA.

Πίνακας 3.12. Συγκεντρωτικός πίνακας οριακών τιμών

	Περίοδος Αναφοράς	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Ευρωπαϊκή Ένωση	24-ωρη	50	-
	Ετήσια	40	25
US-EPA	24-ωρη	150	35
	Ετήσια	50	15

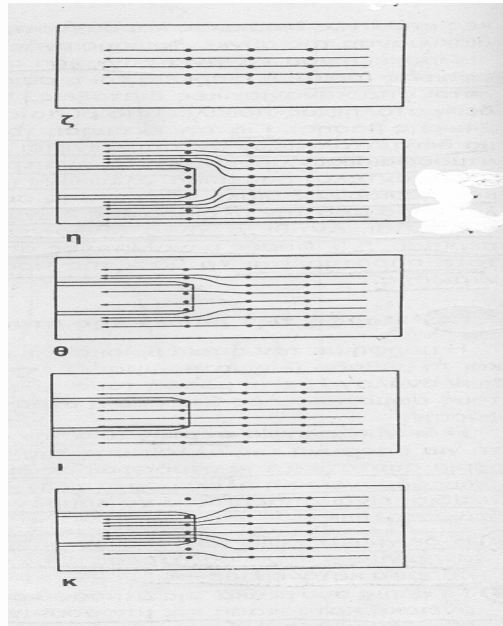
3.9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

3.9.1 Γενικά Στοιχεία

Το πρώτο και βασικότερο στάδιο μιας χημικής ανάλυσης είναι η δειγματοληψία. Βασικός στόχος κάθε δειγματοληψίας είναι η συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος. Κανένα αναλυτικό αποτέλεσμα, ανεξάρτητα από την ακρίβεια και την ευαισθησία της μεθόδου που εφαρμόζεται, δεν μπορεί να είναι χρήσιμο αν το δείγμα που υπόκειται σε ανάλυση δεν είναι αντιπροσωπευτικό. Συγκεκριμένα, κατά τη συλλογή της σωματιδιακής ύλης, θα πρέπει ορισμένες παράμετροι όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση του δείγματος να διατηρούνται σταθερές ώστε να αποφευχθεί αλλοίωση της σύστασης του δείγματος.

Τα αερολύματα (aerosols) σε αντίθεση με τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας αποτελούνται από διακριτά σωματίδια μάζας και συνεπώς υπόκεινται στην επίδραση δυνάμεων αδράνειας. Κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας τα σωματίδια κινούνται μέσα στην ομοιόμορφη αέρια μάζα και έχουν αδράνεια παράλληλη με τις ρευστοδυναμικές γραμμές (σχήμα 3.11). Αν όμως οι γραμμές αυτές εξαναγκασθούν να αλλάξουν πορεία, οι δυνάμεις συνοχής των μορίων της αέριας μάζας δε θα είναι ικανές να παρασύρουν και τα σωματίδια σε αυτή την αλλαγή. Συνεπώς αξιόπιστη δειγματοληψία, θεωρείται η ισοκίνητική δειγματοληψία (σχήμα 3.11, περίπτωση ι), δηλαδή στην περίπτωση κατά την οποία η ταχύτητα εισόδου της αέριας μάζας μέσα στο σωλήνα δειγματοληψίας γίνει ίση με την ταχύτητα κίνησης της έξω από αυτόν.

Επιπρόσθετα, θα πρέπει κατά τη δειγματοληψία να αποφεύγονται υψηλές ή χαμηλές ταχύτητες ροής του δείγματος καθώς επίσης και οι ρευστοδυναμικές γραμμές να έχουν μικρό πάχος ώστε να αποφευχθούν απώλειες εξαιτίας φαινομένων βαρύτητας και τυρβώδους εναπόθεσης. Απώλεια δείγματος μπορεί να συμβεί και εξαιτίας ηλεκτροστατικών δυνάμεων που εμφανίζονται μεταξύ των σωματιδίων.



Σχήμα 3.11. Δειγματοληψία σωματιδίων από την ατμόσφαιρα

Όπως έχει προαναφερθεί, η δειγματοληψία και η ανάλυση λεπτόκοκκων σωματιδίων ($\leq 2,5\mu\text{m}$) είναι απαραίτητη εξαιτίας της επικινδυνότητάς τους (περίπου το 90% του κλάσματος αυτού είναι αναπνεύσιμο για τον άνθρωπο). Συνεπώς απαιτείται αρκετές φορές κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας, η απομάκρυνση των χονδρόκοκκων σωματιδίων χρησιμοποιώντας είτε φίλτρα, είτε συλλέκτες κυκλώνα, είτε φυγοκεντρικούς προσκρουστήρες.

Η δειγματοληψία της σωματιδιακής ύλης στηρίζεται στα φαινόμενα της διήθησης, της πρόσκρουσης, της διάχυσης, της φυγοκέντρωσης, της βαρυντικής κατακάθισης, και της ηλεκτροστατικής και θερμικής κατακρήμνισης.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου δειγματοληψίας εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η σύσταση και το μέγεθος του σωματιδίου, από το σκοπό της δειγματοληψίας, καθώς και από την ταχύτητα ροής του δείγματος. Στον πίνακα 3.13 παρατίθενται οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι δειγματοληψίας συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων.

Πίνακας 3.13. Διάφορες μέθοδοι για τη δειγματοληψία των αιωρούμενων σωματιδίων

Μέθοδος	Μέγεθος σωματιδίου (μm)
Κατακάθιση	
➤ Βαρύτητα	>10
➤ Φυγοκέντρωση	0.1-10
Κατακρήμνιση	
➤ Ηλεκτροστατική	0.05-5
➤ Θερμική	0.005-5
Πρόσκρουση	>0.5 (P=1 atm) >0.05 (P<1atm)
Διήθηση	>0.03

3.9.2 Προσδιορισμός σωματιδιακής ύλης

Ο προσδιορισμός της συνολικής μάζας των σωματιδίων ανά δειγματοληπτούμενο όγκο αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα. Οι μέθοδοι προσδιορισμού της μάζας είναι οι εξής:

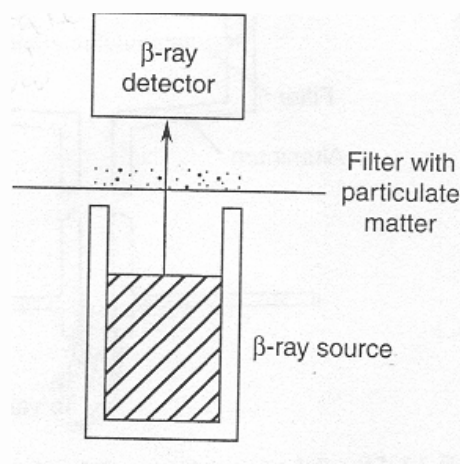
❖ Σταθμικός προσδιορισμός (Gravimetric Methods)

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη ζύγιση του μέσου συλλογής των σωματιδίων (φίλτρου ή δοχείου) πριν και μετά τη δειγματοληψία. Πριν από τη ζύγιση, η συλλεγμένη σωματιδιακή ύλη φυλάσσεται σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και υγρασίας (π.χ. σε ξηραντήρα) μέχρι σταθερού βάρους. Επιπλέον προβλήματα μπορεί να προκύψουν λόγω στατικού ηλεκτρισμού. Βέβαια η αυξανόμενη συλλογή σωματιδίων μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα ροής, ώστε αυτό να οδηγήσει σε εσφαλμένους υπολογισμούς του δειγματοληπτούμενου όγκου.

❖ Μέθοδος απορρόφησης β- ακτινοβολίας (β-ray attenuation)

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέτρηση της απορρόφησης της β-ακτινοβολίας κατά τη διέλευση της μέσα από τη σωματιδιακή ύλη που έχει συλλεχθεί σε ένα φίλτρο (η β- ακτινοβολία προτιμάται έναντι της α και της γ, διότι η ακτινοβολία α δε διαπερνά ικανοποιητικά το φίλτρο, ενώ η ακτινοβολία γ διαπερνά τόσο έντονα το δείγμα ώστε να απαιτείται μεγάλη ποσότητα αυτού). Στο σχήμα 3.12 περιγράφεται σχηματικά ένας μετρητής μάζας β- ακτινοβολίας, ο οποίος αποτελείται κυρίως από

μια ραδιενεργό πηγή ^{14}C , από τον ανιχνευτή ακτινοβολίας β και από ένα μέσο το οποίο κινεί αυτόματα το φίλτρο ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 3.12. Σχηματικό διάγραμμα μετρητή της μάζας σωματιδιακής ύλης β-ακτινοβολίας

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια ή το κλάσμα των αναπνεύσιμων, αν προηγουμένως απομακρυνθούν τα μεγάλα σωματίδια ($>10\mu\text{m}$) με τη βοήθεια ενός κυκλώνα.

❖ Ανακλωμετρικός προσδιορισμός (Μέθοδος αμαύρωσης φίλτρου)

Η μέθοδος στηρίζεται στην εξαναγκασμένη διέλευση ατμοσφαιρικού αέρα μέσα από ένα φίλτρο και τη μέτρηση του βαθμού αμαύρωσης του φίλτρου με την βοήθεια ενός ανακλώμετρου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του καπνού. Με τον όρο καπνός εννοούμε τα αιωρούμενα σωματίδια (με διάμετρο $< 10\mu\text{m}$) όπως μετρούνται με βάση την ικανότητα αμαύρωσης του φίλτρου. Το κυριότερο υλικό που προκαλεί αμαύρωση των φίλτρων κατά τη δειγματοληψία είναι ο στοιχειακός άνθρακας, ο οποίος προέρχεται κυρίως από ατελείς καύσεις.

Παρεμποδίσεις: Η μέθοδος ανακλωμετρικού προσδιορισμού δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής. Το ποσοστό του φωτός που ανακλάται από το φίλτρο επηρεάζεται από την παρουσία άλλων σωματιδίων (π.χ κρυσταλλικής ύλης), τα οποία δεν προκαλούν αμαύρωση. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες ως προς την αξιοπιστία της βαθμονόμησης της καμπύλης αναφοράς και ως προς το μέγεθος των συλλεγόμενων σωματιδίων.

❖ Μέθοδος σκεδασμού του φωτός

Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων να προκαλούν σκεδασμό του φωτός. Η σχέση που συνδέει τον σκεδασμό με το σωματιδιακό φορτίο εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Γενικά, όμως η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων σε μία τυπική ατμόσφαιρα κατοικημένης περιοχής μπορεί να εκφραστεί από το σκεδασμό χωρίς σημαντικό σφάλμα. Για τον προσδιορισμό των σωματιδίων με βάση την παραπάνω μέθοδο χρησιμοποιείται το ολοκληρωτικό νεφελόμετρο (integrating nefelometer).

Στην ίδια αρχή στηρίζεται και η λειτουργία των οργάνων καταμέτρησης σωματιδίων (aerosols counters), τα οποία προσδιορίζουν τον αριθμό των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε καθαρούς χώρους, όπου υπάρχουν περιορισμοί όχι μόνο για το συνολικό σωματιδιακό φορτίο, αλλά και για το μέγεθος των σωματιδίων.

Είναι ευνόητο ότι με τη μέθοδο σκεδασμού του φωτός γίνεται απλώς μέτρηση του σωματιδιακού φορτίου, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης της χημικής τους σύστασης.

4 ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών σχετικών με την χωρο-χρονική απασχόληση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα, το 87 - 90 % του ημερήσιου χρόνου καταναλώνεται σε εσωτερικούς χώρους. Η κατοικία αποτελεί το σημαντικότερο μικρο-περιβάλλον όσον αφορά τον χρόνο παραμονής (62 – 87 %), με δεύτερο τον εργασιακό χώρο ή το σχολείο (17 – 25 %) (Adgate et al. 2002, Brauer et al. 2000b).

Οι πηγές ρύπανσης των εσωτερικών χώρων διακρίνονται ανάλογα με:

- την επικινδυνότητα τους,
- τη θέση τους ως προς τον εσωτερικό χώρο και
- την περιοδικότητα εκπομπής των ρύπων

Η επικινδυνότητα μιας πηγής καθορίζεται από την επικινδυνότητα των ρύπων που εκπέμπει και από το ύψος των συγκεντρώσεων τους και χαρακτηρίζεται ως *μικρή, μεσαία ή μεγάλη*.

Ανάλογα με τη θέση τους ως προς τον εσωτερικό χώρο διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. *Εσωτερικές* ονομάζονται όσες βρίσκονται μόνιμα μέσα στον εσωτερικό χώρο. *Εξωτερικές* ονομάζονται όσες βρίσκονται έξω από τους κλειστούς χώρους αλλά οι ρύποι που εκπέμπουν εισέρχονται στον εσωτερικό χώρο.

Τέλος, ανάλογα με την περιοδικότητα εκπομπής των ρύπων, διακρίνονται σε *πηγές συνεχούς εκπομπής*, όπως το έδαφος που αποτελεί πηγή ραδονίου και *πηγές περιοδικής εκπομπής*, όπως οι καύσεις που εκπέμπουν ρύπους μόνο κατά τη διάρκεια τους.

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να οφείλονται:

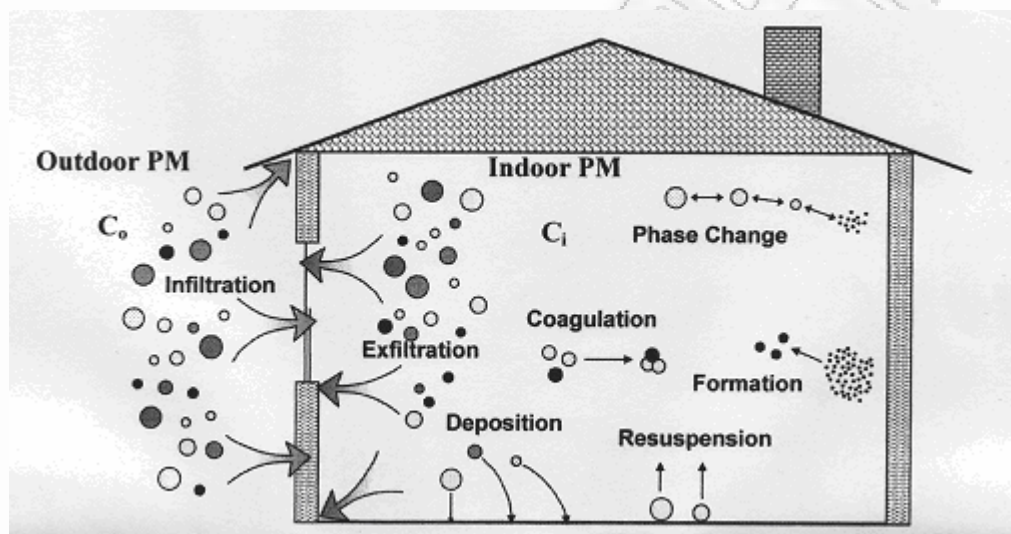
- στην παραγωγή σωματιδίων στο εσωτερικό των χώρων και
- στη διείσδυση σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας στους εσωτερικούς χώρους.

Παράγοντες που επηρεάζουν, επίσης, την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια σε εσωτερικούς χώρους είναι:

- Η ανάμιξη του εσωτερικού αέρα: Οι εσωτερικές πηγές σωματιδίων τείνουν να είναι περιστασιακές και τοπικού χαρακτήρα. Επομένως τα επίπεδα έκθεσης των ατόμων στις πρωτογενείς αυτές εκπομπές εξαρτώνται, ως ένα βαθμό, από την ανάμιξη του αέρα στον υπό μελέτη χώρο.
- Η διαζωνική μεταφορά: Η ροή αέρα μεταξύ των χώρων ενός κτιρίου είναι δυνατόν να επηρεάσει σημαντικά τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Η επαναιώρηση: Συνηθισμένες εσωτερικές δραστηριότητες, όπως το περπάτημα ή οι καθημερινές εργασίες καθαριότητας, είναι δυνατόν να προκαλέσουν την επαναιώρηση σωματιδίων τα οποία έχουν εναποτεθεί στις διαφορετικές εσωτερικές επιφάνειες. Η ποσότητα της επαναιωρούμενης ύλης στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων που βρίσκεται εναποτεθειμένη στις διαφορετικές επιφάνειες του χώρου.
- Η συσσωμάτωση: Κατά την σύγκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους συχνά προκαλείται συσσωμάτωση τους. Η διεργασία αυτή δεν επηρεάζει άμεσα την κατά μάζα συγκέντρωση των σωματιδίων, μεταβάλλει όμως την κατανομή μεγέθους τους. Η συσσωμάτωση εξαρτάται από το τετράγωνο της συγκέντρωσης, επομένως είναι σημαντική σε υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων. Ο βασικός μηχανισμός συσσωμάτωσης είναι οι κινήσεις Brown, οι οποίες παρατηρούνται κυρίως στο υπερλεπτόκοκκο κλάσμα. Επομένως η επίδραση της συσσωμάτωσης είναι δυνατόν να είναι μεγάλη κατά την διάρκεια εσωτερικής παραγωγής υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, οπότε η κατά αριθμό συγκέντρωσή τους θα είναι ιδιαίτερα υψηλή (Nazaroff 2004).
- Οι μετατροπές φάσεων: Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη σε εσωτερικούς χώρους είναι δυνατόν να μεταβληθεί λόγω διεργασιών μετατροπής φάσεων. Οι Dua & Horke (1996) αναφέρουν μεταβολές του μεγέθους των σωματιδίων λόγω απορρόφησης ή αποδέσμευσης νερού, όταν αλλάζουν οι συνθήκες υγρασίας. Σε πολλές ερευνητικές εργασίες μελετάται επίσης η κατανομή ημι-πτητικών οργανικών ενώσεων στην αέρια και σωματιδιακή φάση (Naumova et al. 2003, Weschler 2003). Επιπλέον, αρκετές μελέτες αναφέρουν εσωτερική δευτερογενή παραγωγή σωματιδίων κατά την αντίδραση του όζοντος με τερπένια (Fan et al. 2003, Sarwar et al. 2003, Wainman et

al. 2000). Πρόσφατες ερευνητικές εργασίες, τέλος, επισημαίνουν την μετατροπή των σωματιδίων νιτρικού αμμωνίου (NH_4NO_3) σε αέρια αμμωνία (NH_3) και νιτρικό οξύ (HNO_3), κατά την είσοδο του ατμοσφαιρικού αέρα σε εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων εξωτερικής προέλευσης στην εσωτερική ατμόσφαιρα (Lunden et al. 2003a).

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι διαφορετικές διεργασίες που συντελούνται σε εσωτερικό χώρο και επηρεάζουν την διαμόρφωση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε αυτόν.



Σχήμα 4.1. Διεργασιών εισαγωγής, δημιουργίας και απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικό χώρο (Thatcher et al. 2003).

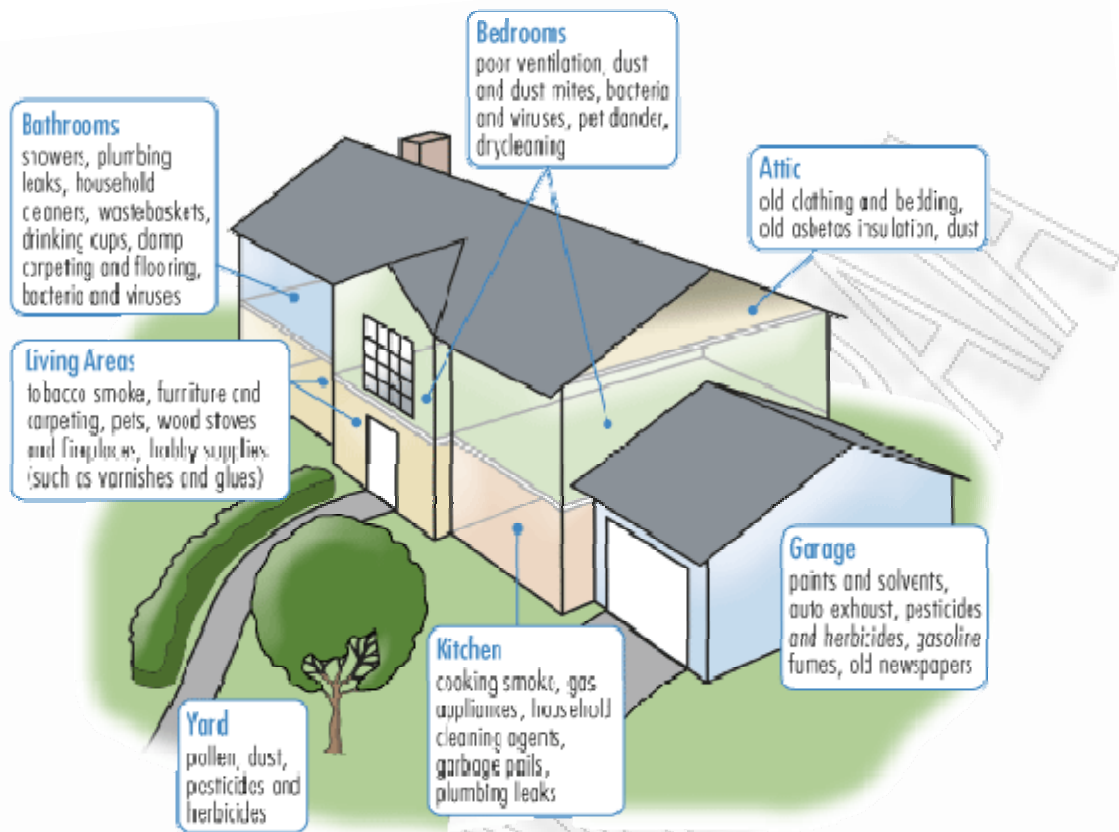
Οι σχετικές τοξικότητες των σωματιδίων εξωτερικής και εσωτερικής προέλευσης δεν έχουν μελετηθεί συστηματικά. Σύμφωνα με τις πρώτες ερευνητικές ενδείξεις, είναι πολύ πιθανό οι δύο αυτές κατηγορίες να διαφέρουν σημαντικά ως προς το είδος και τον βαθμό τοξικότητας (Ebelt et al. 2005, Godleski et al. 2002, Saldiva et al. 2002, Long et al. 2001b). Λόγω των υπαρχόντων προτύπων ποιότητας, που αφορούν μόνο στον εξωτερικό αέρα, οι επιδημιολογικές και τοξικολογικές μελέτες παραδοσιακά εξετάζουν τις επιπτώσεις στην υγεία, των σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας. Εντούτοις, η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια εσωτερικής προέλευσης είναι δυνατόν να σχετίζεται άμεσα με την δημόσια υγεία, καθώς οι εσωτερικές πηγές συχνά οδηγούν σε ιδιαίτερα υψηλές βραχυχρόνιες συγκεντρώσεις στους εσωτερικούς χώρους.

4.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η μελέτη των εσωτερικών πηγών που συνεισφέρουν στην διαμόρφωση των εσωτερικών επιπέδων συγκέντρωσης αποτελεί αντικείμενο πλήθους ερευνητικών εργασιών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σχετικών μελετών, οι εσωτερικές πηγές σωματιδίων τείνουν να δημιουργούν βραχυχρόνια επεισόδια ιδιαίτερα υψηλών συγκεντρώσεων (Long et al. 2000). Η εσωτερική παραγωγή σωματιδίων είναι δυνατόν να οφείλεται σε:

- διεργασίες καύσης (λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών, κάπνισμα)
- υλικά κατασκευής των χώρων
- χρήση προϊόντων σε μορφή αερολύματος (σπρέι)
- εσωτερική κινητικότητα

Οι κυριότερες δραστηριότητες που επηρεάζουν τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων είναι: το κάπνισμα, το μαγείρεμα, το καθάρισμα και η γενικότερη παρουσία και κινητικότητα ατόμων (Long et al. 2001a). Το μέγεθος των σωματιδίων αντανακλά τον μηχανισμό παραγωγής. Οι διεργασίες καύσης παράγουν κυρίως λεπτόκοκκα σωματίδια, ενώ οι μηχανικές διεργασίες χονδρόκοκκα. Οι παραπάνω δραστηριότητες προκαλούν αύξηση των εσωτερικών επιπέδων συγκέντρωσης κατά πολλές τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις, και μεταβάλλουν την κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους.



Εικόνα 4.1. Πηγές ρύπανσης εσωτερικών χώρων.

Το κάπνισμα (ενεργητικό ή παθητικό)

Το κάπνισμα έχει αναγνωρισθεί ως η βασική εσωτερική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων, και ιδιαίτερα για το λεπτόκοκκο κλάσμα (Nazaroff & Klepeis 2004, Koistinen et al. 2001). Ο καπνός του τσιγάρου είναι ένα αερόλυμα που περιέχει μερικές χιλιάδες διαφορετικές ουσίες, σε σωματιδιακή και αέρια φάση. Στον καπνό του τσιγάρου έχουν ταυτοποιηθεί χιλιάδες διαφορετικές χημικές ουσίες. Η νικοτίνη, οι νιτροδαμίνες, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου, το υδροκυάνιο (HCN), η ακρολεΐνη, η υδραζίνη, αποτελούν μερικές από αυτές τις χημικές ουσίες, ενώ στον καπνό του τσιγάρου έχει πιστοποιηθεί η ύπαρξη καρκινογόνων ουσιών, όπως το βενζόλιο, η πίσσα, η φορμαλδεΐδη, το βενζοπυρένιο κ.ά.

Τα παραγόμενα σωματίδια βρίσκονται στο εύρος μεγέθους 0,1 – 1,5 μm. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Ozkaynak et al. (1996), κάθε τσιγάρο εκπέμπει κατά μέσο όρο 22 ± 8 mg σωματιδίων PM₁₀, ενώ περίπου τα 2/3 της ποσότητας αυτής

(14 ± 4 mg) ανήκουν στο λεπτόκοκκο κλάσμα. Υπολογίστηκε, επίσης, ότι το κάπνισμα ενός τσιγάρου αυξάνει την μέση 12-ωρη εσωτερική συγκέντρωση των PM_{10} και $PM_{2,5}$ σε χώρους κατοικιών, κατά 2 και $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Σε αντίστοιχη ερευνητική μελέτη, οι Spengler et al. (1981) υπολόγισαν ότι το κάπνισμα ενός πακέτου τσιγάρων την ημέρα προκαλεί αύξηση της μέσης 24-ωρης συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2,5}$ κατά $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ οι βραχυχρόνιες συγκεντρώσεις κατά την διάρκεια επεισοδίων καπνίσματος μετρήθηκαν ίσες με $500 - 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τέλος οι Koutrakis et al. (1992) αναφέρουν ότι το 54% των σωματιδίων $PM_{2,5}$ που απαντώνται σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών καπνιστών, προέρχονται από τον καπνό τσιγάρων.

Τα συστήματα καύσης

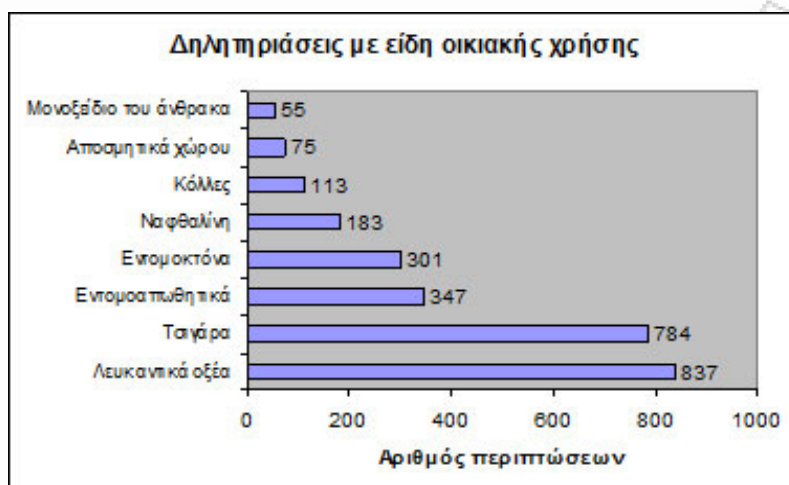
Πρόκειται για συσκευές θέρμανσης, όπως σόμπες, θερμάστρες, λέβητες φυσικού αερίου, φούρνους, μαγκάλια και τζάκια, μέσα στις οποίες καίγονται, ανάλογα με τον τύπο τους, ξύλα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κηροζίνη κ.ά., και διάφορες φωτιστικές συσκευές (λάμπες πετρελαίου ή λαδιού). Τα καυσαέρια όλων των παραπάνω, όταν δεν απάγονται (απομακρύνονται), έχουν ως αποτέλεσμα την εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), διοξειδίου του θείου (SO_2), οξειδία του αζώτου (NO_x) και αιωρούμενων σωματιδίων.

Σημαντική εσωτερική παραγωγή σωματιδίων παρατηρείται και κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων μαγειρέματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης των Ozkaynak et al (1996), σε χώρους κατοικιών στις Η.Π.Α., το μαγείρεμα παράγει $4,0 \pm 1,6 \text{ mg}/\text{min}$ σωματιδίων PM_{10} , ενώ περίπου το 40% αυτών ($1,7 \pm 0,6 \text{ mg}/\text{min}$) αποτελείται από σωματίδια $PM_{2,5}$. Επιπλέον έχουν καταγραφεί και σημαντικές εκπομπές υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, ιδιαίτερα κατά την χρήση συσκευών που λειτουργούν με αέριο (Dennekamp et al. 2001, Long et al. 2000).

Τα είδη οικιακής χρήσης, τα υλικά και προϊόντα καθαρισμού, συντήρησης, προσωπικής υγιεινής και καταπολέμησης ανεπιθύμητων μορφών ζωής.

Πρόκειται για τα απορρυπαντικά, τα κάθε είδους καθαριστικά για υγρό και στεγνό καθάρισμα, τα εντομοκτόνα, τα παρασιτοκτόνα και τα αποσμητικά χώρου, τα οποία περιέχουν δραστικές ουσίες με τοξική επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό. Το λεμονένιο, το πινένιο, ο τετραχλωράνθρακας, το χλωροφόρμιο, το ναθφαλίνιο, το p-διχλωροβενζόλιο, το m-διχλωροβενζόλιο, το 1,1,1-τριχλωροαιθάνιο, το μυρκένιο,

το τετραχλωροαιθυλένιο, το εννεάνιο, το δεκάνιο αποτελούν κάποιες από τις δραστικές ουσίες που υπάρχουν στα προϊόντα αυτά.



Σχήμα 4.2. Αριθμός δηλητηριάσεων λόγω εισπνοής ειδών οικιακής χρήσης, σύμφωνα με ετήσιο απολογισμό του κέντρου δηλητηριάσεων (Ατμοσφαιρική Ρύπανση Εσωτερικών Χώρων-Άρρωστα Κτήρια).

Σε μικρότερο βαθμό, τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης επηρεάζονται από τις καθημερινές δραστηριότητες συντήρησης των χώρων (σκούπισμα, ξεσκόνισμα, καθάρισμα των χαλιών, χρήση καθαριστικών), λόγω της επαναιώρησης των σωματιδίων, της επιφανειακής φθοράς των υλικών επίπλωσης και κατασκευής των χώρων, αλλά και της χρήσης προϊόντων σε μορφή σπρέι (Nazaroff 2004, Long et al. 2000). Η χρήση ηλεκτρικής σκούπας ιδιαίτερα, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα κατασκευαστικά υλικά και τα στοιχεία εσωτερικού διακόσμου

Πρόκειται για τα υλικά που περιέχουν αμιάντο (αμιαντοκονιόματα), διάφορα βιομηχανικά είδη ξύλου (π.χ. καπλαμάδες) που συγκολλούνται με κόλλες, που περιέχουν φορμαλδεΰδη και από τα οποία κατασκευάζονται έπιπλα, πάγκοι, επενδύσεις, δάπεδα κ.ά., διάφορα μονωτικά υλικά, τα συνθετικά χαλιά και κάποια υλικά οικοδομών, τα οποία αποτελούν πηγή πτητικών οργανικών ενώσεων, διάφορα χρώματα (υδροχρώματα, ελαιοχρώματα, πλαστικά, κ.ά.), τα διαλυτικά και τα ξηραντικά χρωμάτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα (μόλυβδο, υδράργυρο, κάδμιο κ.ά.) και μεταλλικές ίνες.

Οι διάφορες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές

Πρόκειται για συσκευές, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι τηλεοράσεις, τα φωτοτυπικά μηχανήματα, τα στερεοφωνικά, τα καλώδια εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων κ.ά. Όλες αυτές οι συσκευές εκπέμπουν διάφορες ουσίες, όπως αμμωνία, όζον, γραφίτη, βρωμιούχους επιβραδυντές καύσης, ενδοκρινικούς διαταράκτες, φθαλικές ενώσεις, αλλά και ακτινοβολία. Το έδαφος συνεισφέρει σε εκπομπές ραδονίου, το οποίο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό στοιχείο.

Εσωτερική Κινητικότητα

Η παρουσία και η κινητικότητα ατόμων μέσα στους χώρους είναι δυνατόν να συνεισφέρουν στην εσωτερική παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων και ιδιαίτερα με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm. Το περπάτημα ατόμων προς και από τον χώρο, είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση της συγκέντρωσης των χονδρόκοκκων σωματιδίων κατά σχεδόν 100%. Η παρουσία παιδιών βρίσκεται ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης των μεγαλύτερων από 1μm σωματιδίων.

Ο άνθρωπος, το νερό, τα τρόφιμα και τα κατοικίδια ζώα

Ο άνθρωπος μεταφέρει καθημερινώς ρύπους μέσω των ρούχων του και των παπουτσιών του, ενώ εκπέμπει και ο ίδιος ουσίες, όπως, για παράδειγμα, η ακετόνη, το οξικό οξύ και η ακεταλδεΐδη, μέσω της αναπνοής του ή του δέρματος του. Το πόσιμο νερό από πηγές κοντά σε ραδιενεργά πετρώματα, ενδεχομένως περιέχει ραδόνιο, ενώ στο ζεστό νερό του ντους, όταν είναι υπερχλωριωμένο, ενδεχομένως σχηματίζονται ενώσεις, όπως το χλωροφόρμιο και το τριχλωροαιθυλένιο. Τα ζώα παράγουν διάφορες αλλεργιογόνες ουσίες, ενώ τα οικιακά απορρίμματα αποτελούν πηγή εσωτερικής ρύπανσης, αφού αποτελούνται κυρίως από υπολείμματα φαγητών, τα οποία μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα αλλοιώνονται, αναπτύσσουν μεγάλους μικροβιακούς πληθυσμούς και δυσάρεστες οσμές.

4.3 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Πέρα από τις διαφορετικές εσωτερικές πηγές, η εξωτερική ατμόσφαιρα αποτελεί επίσης μια σημαντική πηγή σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους (Riley et al. 2002, Ozkaynak et al. 1996). Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις σωματιδίων εξωτερικής προέλευσης εξαρτώνται κυρίως από: τις διεργασίες διασποράς της ρύπανσης στο εξωτερικό του υπό μελέτη κτιρίου, τον αερισμό και την αεροπερατότητα του κτιρίου, καθώς και τις φυσικο-χημικές ιδιότητες των σωματιδίων. Σημαντικό ρόλο είναι δυνατόν να παίξουν και οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν, αφ' ενός την δυνατότητα διασποράς των σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας, και αφ' ετέρου τη διείσδυσή τους στους εσωτερικούς χώρους (Milner et al. 2005).



Εικόνα 4.2. Πηγές ρύπανσης εσωτερικών χώρων.

Ο εξωτερικός αέρας μεταφέρεται στους εσωτερικούς χώρους μαζί με διάφορους εξωτερικούς ρύπους, όπως το διοξείδιο του θείου, τα οξείδια του αζώτου, το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα και διάφορες πτητικές ενώσεις (VOCs), όπως τη φορμαλδεΐδη, το βενζόλιο, τα m- και p- ξυλένια και διάφορα αιωρούμενα σωματίδια, σκόνη, γύρη κ.ά.

Δεδομένης της επίδρασης της εξωτερικής ατμόσφαιρας στην διαμόρφωση της ποιότητας αέρα στους εσωτερικούς χώρους, η μελέτη των μηχανισμών και παραμέτρων που επιδρούν στην διείσδυση και την μετέπειτα πορεία των σωματιδίων

εξωτερικής προέλευσης αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Οι παράμετροι που καθορίζουν την διείσδυση στο εσωτερικό, των σωματιδίων εξωτερικής προέλευσης είναι:

- ο ρυθμός εξαερισμού του υπό μελέτη χώρου (a) [hr^{-1}],
- η ικανότητα διείσδυσης των σωματιδίων (P) (αδιάστατο μέγεθος) (δηλαδή η ικανότητα των σωματιδίων να περνούν δια μέσω των τοιχωμάτων του χώρου) και
- ο ρυθμός εναπόθεσης (k) [hr^{-1}] (δηλαδή ο ρυθμός απομάκρυνσης των σωματιδίων μέσα στον εσωτερικό χώρο λόγω της επικάθησης τους στις διαφορετικές επιφάνειες)

Η γνώση των τριών παραμέτρων εξαερισμού (a, P, k), καθώς και της εξωτερικής σωματιδιακής συγκέντρωσης (C_{out}), επιτρέπει τον υπολογισμό της αντίστοιχης εσωτερικής συγκέντρωσης σωματιδίων εξωτερικής προέλευσης (outdoor generated, C_{og}), μέσω της σχέσης:

$$C_{og} = \frac{a \cdot P}{a + k} \cdot C_{out}$$

Παρακάτω αναλύονται οι τρεις παράμετροι εξαερισμού καθώς και οι διαφορετικές μεθοδολογίες προσδιορισμού τους.

4.3.1 Ρυθμός εξαερισμού (a)

Ο ρυθμός εξαερισμού (a) ενός χώρου ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του εξωτερικού αέρα που εισέρχεται μέσα στον χώρο ανά ώρα, προς τον ενεργό όγκο¹ του χώρου. Εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (τεχνική και ποιότητα της κατασκευής, αεροπερατότητα του κελύφους, διάταξη των χωρισμάτων).
- Τις μετεωρολογικές συνθήκες (Για παράδειγμα, αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής ατμόσφαιρας, καθώς και της ταχύτητας του ανέμου, οδηγεί σε άνοδο του ρυθμού εξαερισμού, καθώς

¹ Ο ενεργός όγκος ενός χώρου είναι ο όγκος του αέρα μέσα στο χώρο (καθώς και σε διπλανούς χώρους οι οποίοι συνδέονται με τον υπό μελέτη, με αποτέλεσμα να διακινείται ελεύθερα ο αέρας μεταξύ τους), εφόσον εξαιρεθεί ο μη αναμεμιγμένος αέρας ο οποίος βρίσκεται παγιδευμένος (για παράδειγμα μέσα σε έπιπλα).

μεγαλώνει τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού χώρου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας).

- ο Τις εσωτερικές συνθήκες και συνήθειες των ενοίκων (αριθμός και ηλικίες των παιδιών, αριθμός των κατοικίδιων ζώων που κινούνται μέσα και έξω από τον χώρο που μελετάται, χρήση ή όχι κλιματισμού, χρόνος κατά τον οποίο τα παράθυρα παραμένουν ανοιχτά μέσα στο 24ωρο).

4.3.2 Ρυθμός εναπόθεσης (k)

Κατά την είσοδο τους στους εσωτερικούς χώρους, τα αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζουν την τάση να εναποτίθενται πάνω στις διαφορετικές επιφάνειες. Ο ρυθμός εναπόθεσης των σωματιδίων (k) ορίζεται από την σχέση:

$$k = v_d \cdot \frac{S}{V}$$

όπου: v_d η ταχύτητα εναπόθεσης,

V ο όγκος του χώρου και

S το εμβαδό των διαθέσιμων επιφανειών εναπόθεσης στον υπό μελέτη χώρο.

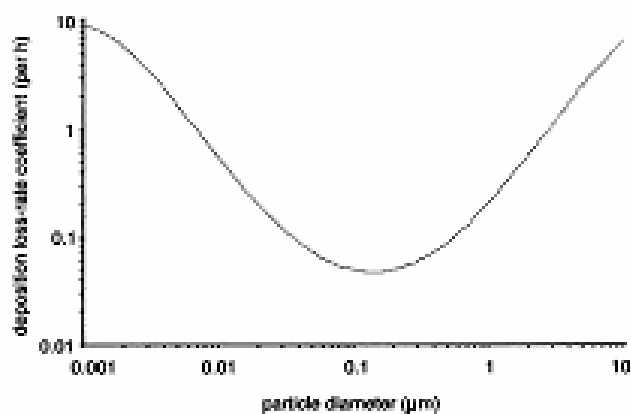
Η τιμή του ρυθμού εναπόθεσης εξαρτάται από (Halios & Helmis 2007, Thatcher et al. 2002):

- ο το μέγεθος, το σχήμα και την πυκνότητα των σωματιδίων,
- ο την εσωτερική ταχύτητα ροής του αέρα,
- ο την ποσότητα και ποιότητα της επίπλωσης και των επιφανειών της,
- ο τον εσωτερικό λόγο επιφάνειας προς όγκο,
- ο τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και των επιφανειών στον εσωτερικό χώρο και
- ο τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούν στον χώρο.

Στην περίπτωση των χονδρόκοκκων σωματιδίων, ο ρυθμός εναπόθεσης συνδέεται κυρίως με την βαρυντική καθίζηση, η οποία ενδεχομένως να ευνοείται από πρόσκρουση λόγω αδράνειας. Για τα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια, αντίθετα, βασικός μηχανισμός εναπόθεσης είναι η διάχυση λόγω κινήσεων Brown, με αποτέλεσμα η εναπόθεση σε κατακόρυφες επιφάνειες να είναι επίσης σημαντική. Όσον αφορά τα σωματίδια κατηγορίας συσσώρευσης, παρουσιάζουν τον χαμηλότερο ρυθμό

εναπόθεσης, καθώς δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από κανέναν από τους παραπάνω μηχανισμούς (Nazaroff 2004).

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται μια σύνθεση αποτελεσμάτων από πειραματικές μετρήσεις και θεωρητικά μοντέλα, σχετικά με την μεταβολή του ρυθμού εναπόθεσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων (Riley et al. 2002). Αξίζει να σημειωθεί, όμως, ότι οι τιμές του k που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, και βασίζονται σε διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης, παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση, ακόμη και για ίδια σωματιδιακά κλάσματα (Lai 2002).



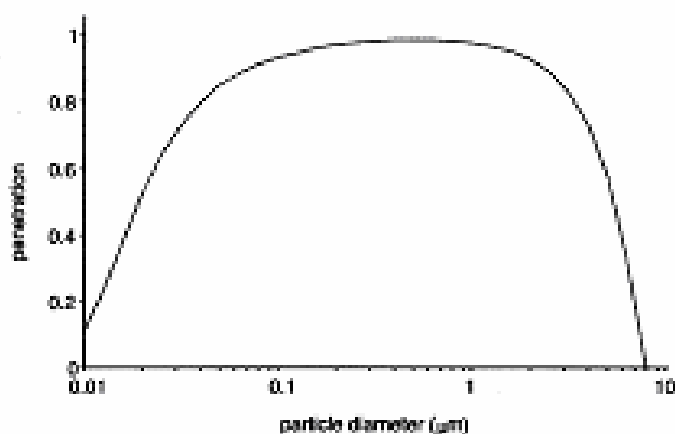
Σχήμα 4.3. Σύνθεση πειραματικών και θεωρητικών τιμών του ρυθμού εναπόθεσης συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (Riley et al. 2002).

4.3.3 Ικανότητα διείσδυσης (P)

Η ικανότητα διείσδυσης (P) ορίζεται ως το κλάσμα των σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας που εισέρχεται, μέσω χαραμιάδων και σχισμών του κτιρίου, σε εσωτερικό χώρο. Η τιμή της εξαρτάται από:

- ο το μέγεθος των σωματιδίων,
- ο τον αριθμό και τη γεωμετρία των χαραμιάδων του κτιρίου και
- ο την ταχύτητα του αέρα που εισέρχεται μέσα από αυτές, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση του ρυθμού εξαερισμού (α).

Η μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης αναμένεται να αντιστοιχεί σε σωματίδια κατηγορίας συσσώρευσης. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση σωματιδίων κατά την εισροή, και επομένως οι χαμηλότερες τιμές ικανότητας διείσδυσης, παρατηρούνται σε σωματίδια μικρότερα από 0,1 μm , λόγω διάχυσης μέσω των κινήσεων Brown, και σε σωματίδια μεγαλύτερα από 1,5 μm , λόγω διαδικασιών πρόσκρουσης, ανάσχεσης και βαρυτικής εναπόθεσης. Σημαντική παράμετρος κατά την διείσδυση των σωματιδίων είναι όμως και η παρουσία υψηλού ποσοστού πτητικών ή ασταθών ενώσεων στην συνολική μάζα των σωματιδίων. Η εξάτμιση ή μετατροπή αυτών των χημικών ειδών κατά την εισροή του εξωτερικού αέρα στο εσωτερικό κτιρίων, μεταβάλλει σημαντικά το ποσοστό και τη χημική σύσταση των σωματιδίων που καταφέρνουν να διεισδύσουν στους εσωτερικούς χώρους (Nazaroff 2004). Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου, σχετικά με την αναμενόμενη ικανότητα διείσδυσης δια μέσω πολύ λεπτής οπής, σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών (Liu & Nazaroff 2001).



Σχήμα 4.4. Αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου: Τιμές της ικανότητας διείσδυσης συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τα παρακάτω δεδομένα: Η οπή εισροής/εκροής έχει ύψος 1 mm και μήκος 10 cm. Η ροή του αέρα προκαλείται από πτώση πίεσης ίση με 4 Pa. Η πυκνότητα των σωματιδίων ισούται με 1 g/cm^3 (Liu & Nazaroff 2001).

Ανασκόπηση σχετικών μελετών

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση του πειραματικού μέρους της εργασίας είναι σκόπιμο να κάνουμε μια ενδεικτική αναφορά σε αντίστοιχες μελέτες.

Είναι γεγονός ότι διεθνώς οι μελέτες που αφορούν έκθεση πεζών σε σωματιδιακή ρύπανση δεν είναι πολλές και όλες είναι σχετικά πρόσφατες. Υπάρχει επομένως ένα διαπιστωμένο κενό, ενώ τα τελευταία ιδίως χρόνια παρατηρείται ότι σε μεγάλα αστικά κέντρα πολλές υποομάδες πληθυσμού προτιμούν να κυκλοφορήσουν χωρίς τη χρήση μέσων μεταφοράς, δημόσιων ή ιδιωτικών. Στην τάση αυτή του πληθυσμού στα αστικά κέντρα έχουν υποβοηθήσει τα ευρήματα/διαπιστώσεις σχετικών μελετών για τις θετικές επιπτώσεις στην υγεία από το καθημερινό περπάτημα (Howard D Sesso, 2000). Το περπάτημα αποτελεί έναν καθολικό και κοινό τρόπο μεταφοράς σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο συγκεκριμένα για την έκθεση πεζών διαπιστώνεται η έως και σημαντική αύξηση της έκθεσης πεζών σε αιωρούμενα σωματίδια απ' ότι πολιτών που χρησιμοποιούν μαζικά μέσα συγκοινωνίας (Gulliver and Briggs 2007, Briggs et al. 2008). Η πλειοψηφία των μελετών προσωπικής έκθεσης πληθυσμού στα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ φαίνεται να έχει πραγματοποιηθεί κατά κύριο λόγο στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Ακολουθεί η ανασκόπηση αντίστοιχων μελετών και τα επίπεδα έκθεσης πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες.

Οι Gulliver and Briggs (2004) βρήκαν ότι τα επίπεδα έκθεσης πεζών στο Νορθάμπτον στο Ηνωμένο Βασίλειο για τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 είναι $38.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $15.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $7.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Η μελέτη έλαβε μέρος τον χειμώνα του 1999/2000 (Νοέμβριο 1999 – Απρίλιο 2000). Η διάρκεια της διαδρομής ήταν τα 15 λεπτά. Το όργανο μέτρησης ήταν η φορητή συσκευή σκέδασης του φωτός OSIRIS από την εταιρεία Turnkey Instruments, UK.

Οι Gulliver and Briggs (2007) μελέτησαν στο Λέστερ στο Ηνωμένο Βασίλειο την έκθεση πληθυσμού σε σωματιδιακή ρύπανση και συγκεκριμένα σε TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 , σε δύο κυκλικές διαδρομές με δύο μέσα μεταφοράς (το περπάτημα και το αυτοκίνητο). Η μελέτη έλαβε μέρος τον χειμώνα του 2004/2005 (Ιανουάριο 2004 – Μάρτιο 2005). Η μέση διάρκεια και για τις δύο διαδρομές ήταν περίπου 40 λεπτά. Η

μέση συγκέντρωση της έκθεσης πεζών στα σωματίδια τείνει να είναι μεγαλύτερη από αυτή μέσα στο αυτοκίνητο. Η μέση συγκέντρωση της έκθεσης πεζών στα TSP-PM₁₀, στα χονδρόκοκκα σωματίδια (PM₁₀-PM_{2.5}), στα λεπτόκοκκα (PM_{2.5}-PM₁) και στα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια (<PM₁) είναι αντίστοιχα 19.1 μg/m³, 22.1 μg/m³, 10.9 μg/m³ και 4.8 μg/m³. Τα όργανα μέτρησης ήταν οι φορητές συσκευές σκέδασης του φωτός OSIRIS και DUSTMATE από την εταιρεία Turnkey Instruments, UK.

Ο Briggs et al. (2008) μελέτησε την έκθεση πληθυσμού σε σωματιδιακή ρύπανση σε 48 διαδρομές στο Λονδίνο στο Ηνωμένο Βασίλειο με δύο μέσα μεταφοράς (το περπάτημα και το αυτοκίνητο). Η μελέτη έλαβε μέρος μεταξύ Μαΐο και Ιουνίου 2005. Το μήκος των διαδρομών καθώς και η διάρκεια μέτρησης κυμαίνονταν από 601-1351 μέτρα και 7,3 – 30 λεπτά αντίστοιχα. Η μέση διάρκεια μέτρησης ανέρχεται σε 12,8 λεπτά. Η μέση συγκέντρωση της έκθεσης πεζών σε σωματίδια τείνει να είναι μεγαλύτερη από αυτή μέσα στο αυτοκίνητο. Η μέση συγκέντρωση της έκθεσης των πεζών στα χονδρόκοκκα σωματίδια (PM₁₀-PM_{2.5}), στα λεπτόκοκκα (PM_{2.5}-PM₁) και στα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια (<PM₁) είναι αντίστοιχα 27.56 μg/m³, 6.59 μg/m³ και 3.37 μg/m³. Το όργανο μέτρησης ήταν η φορητή συσκευή σκέδασης του φωτός OSIRIS, από την εταιρεία Turnkey Instruments, UK.

Ο Dennekamp et al. (2002) συνέλεξε δεδομένα από μετρήσεις πεζών στο κράσπεδο του πεζοδρομίου κατά μήκος ενός δρόμου με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση στο Αμπερντίν στο Ηνωμένο Βασίλειο και παρατήρησε ότι η μέση συγκέντρωση της έκθεσης σε PM_{2.5} είναι περίπου 20 μg/m³. Η μελέτη έλαβε μέρος το Σεπτέμβριο του 2000 και διήρκησε ένα χρόνο. Το όργανο μέτρησης ήταν το φορητό λέιζερ-φωτόμετρο, DustTrak της εταιρείας TSI.

Ο McCreanor et al. (2005) κατέγραψε μια παρόμοια τιμή με αυτή του Dennekamp et al. για τη μέση συγκέντρωση της έκθεσης σε PM_{2.5} (22.5 μg/m³) στο Hyde Park του Λονδίνου αλλά σχεδόν διπλάσια τιμή του επιπέδου συγκέντρωσης της έκθεσης πεζών γύρω από την Oxford Street (47.9 μg/m³), μια τοποθεσία στην οποία επιτρέπονται μόνο πεζοί, πετρελαιοκίνητα λεωφορεία και ταξί. Η μελέτη έλαβε μέρος τον χειμώνα του 2001. Το όργανο μέτρησης ήταν το HFPS (High Flow Personal Samplers) που αναπτύχθηκε από τον Adams et al. 2001a,b.

Ο Kaur et al. (2005a, b) εξέτασε τις συγκεντρώσεις της έκθεσης πεζών σε δύο ξεχωριστές μελέτες ως μέρος του προγράμματος DAPPLE (Arnold et al., 2004, Colville et al., 2004) στο Κεντρικό Λονδίνο στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Στην πρώτη μελέτη του προγράμματος ο Kaur et al. (2005b) εξέτασε τις συγκεντρώσεις της έκθεσης πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ ως μέρος της εκτίμησης της έκθεσης σε πολλά μέσα μεταφοράς και βρήκε ότι η μέση συγκέντρωση της έκθεσης πεζών είναι $27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – πολύ χαμηλή σε σχέση με τα άλλα μέσα μεταφοράς που εξετάστηκαν (ποδήλατο, λεωφορείο, αυτοκίνητο και ταξί). Η μελέτη έλαβε μέρος μεταξύ Απρίλιο και Μάϊο του 2003. Η μέτρηση διαρκούσε τουλάχιστον 18 λεπτά. Το όργανο μέτρησης ήταν το HFPS (High Flow Personal Samplers) που αναπτύχθηκε από τον Adams et al. 2001a,b.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης μελέτης του προγράμματος η μέση συγκέντρωση της έκθεσης πεζών υπολογίστηκε σε $37.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Kaur et al., 2005a). Αυτή η μελέτη πραγματοποιήθηκε μεταξύ Απρίλιο και Ιούνιο του έτους 2004 και η διάρκεια της μέτρησης ήταν 20 λεπτά. Ωστόσο η μελέτη αυτή περιλαμβάνει επίσης την έκθεση πεζών βασισμένη στη θέση στο πεζοδρόμιο, την κατεύθυνση του ταξιδιού (από ανατολή σε δύση ή αντίστροφα) και την πλευρά του δρόμου (βόρεια ή νότια) κατά μήκος του οποίου περπατούν οι πεζοί. Παρόλο που δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση της έκθεσης πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ εξαρτώμενη από τη θέση στο πεζοδρόμιο ή την κατεύθυνση της διαδρομής κατά μήκος της οδού Marylebone, η συγκέντρωση της έκθεσης στη βόρεια πλευρά του δρόμου ήταν σημαντικά υψηλότερη ($40.8 \pm 16.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) σε σύγκριση με τη νότια πλευρά ($34.4 \pm 16.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) γεγονός που αποδόθηκε στη μετεωρολογία και την τοπογραφία του δρόμου (Kaur et al., 2005b). Επιπλέον το επίπεδο έκθεσης των $PM_{2.5}$ ήταν σημαντικά χαμηλότερο το πρωί ($34.5 \pm 16.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) σε σύγκριση με το απόγευμα ($41.3 \pm 16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Kaur et al., 2005a). Το όργανο μέτρησης ήταν το HFPS (High Flow Personal Samplers) που αναπτύχθηκε από τον Adams et al. 2001a,b.

Ο Lung et al. (2005) μελέτησε την έκθεση πεζών σε $PM_{2.5}$ στην Ταιβάν όπου άνθρωποι έκαναν μετρήσεις γύρω από τη ζώνη αναπνοής τους, ενώ περίμεναν στα φανάρια σε δύο διαφορετικές διασταυρώσεις. Μία διασταύρωση όπου τα κτίρια βρίσκονται δίπλα στο δρόμο και μία άλλη με τα κτίρια να βρίσκονται περίπου 20 μέτρα από την πλευρά του δρόμου. Η μέση συγκέντρωση της έκθεσης στα

αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2.5}$ ήταν $214 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η μέση συγκέντρωση της έκθεσης ήταν περίπου διπλάσια στις θέσεις της διασταύρωσης που γειτνιάζουν με τα κτίρια ($268 \pm 144 \mu\text{g}/\text{m}^3$) σε αντίθεση με τις περιοχές που περιβάλλονται από ανοιχτό χώρο ($145 \pm 84 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Το όργανο μέτρησης ήταν το φορητό λέιζερ-φωτόμετρο, DustTrak της εταιρείας TSI.

Η μέλετη του Buonanno et al. (2011) που πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικούς δρόμους της ιταλικής πόλης Cassino είχε ως σκοπό την εκτίμηση της έκθεσης πεζών σε συγκέντρωση των σωματιδίων ως προς τον αριθμό, την επιφάνεια και τη συγκέντρωση μάζας, καθώς επίσης και την εκτίμηση των παραμέτρων που μπορούν να επιδράσουν στην έκθεση πεζών. Η μελέτη έλαβε μέρος από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2010 και η διάρκεια της μέτρησης ήταν τα 10 λεπτά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων ποικίλει μεταξύ των διαφορετικών δρόμων εξαιτίας της πυκνότητας της κυκλοφορίας.

Επιπλέον ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την έκθεση των πεζών είναι η γεωμετρία του δρόμου. Οι δρόμοι φαράγγι τείνουν να μειώνουν τα φαινόμενα αερισμού σε σύγκριση με τους πιο ευρύς δρόμους.

Η διεύθυνση του ανέμου είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για να αξιολογηθεί η επίδραση του εξαερισμού του δρόμου. Υψηλότερες συνθήκες αερισμού, που είναι τυπικές των μεγαλύτερων δρόμων, δείχνουν ότι οι μεγάλες συγκεντρώσεις των σωματιδίων εξαιτίας της διέλευσης των βαρέων οχημάτων, τείνουν να μειωθούν σε σύγκριση με τις πιο στάσιμες συνθήκες που υπάρχουν στους δρόμους φαράγγι.

Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί επίσης να επηρεάσει τον εξαερισμό του δρόμου και επομένως την συγκέντρωση των σωματιδίων. Μετρήσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων οι οποίες γίνονται κατά μήκος ενός δρόμου φαράγγι στον οποίο επικρατεί η ίδια διεύθυνση του ανέμου αλλά διαφορετική ταχύτητα, δείχνουν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων.

Η συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} είναι μεγαλύτερη εκεί όπου υπάρχει μεγαλύτερη κυκλοφοριακή συμφόρηση και επομένως οι εκπομπές των οχημάτων είναι αυξημένες. Από την άλλη μεριά τα χονδρόκοκκα κλάσματα εμφανίζονται λόγω της κίνησης (ροής) των οχημάτων η οποία οδηγεί σε πιο έντονα φαινόμενα επαναιώρησης των σωματιδίων.

Τέλος η έκθεση πεζών επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση στο πεζοδρόμιο που επιλέγουν οι πεζοί για να περπατήσουν. Το περπάτημα δίπλα από την πηγή των εκπομπών των οχημάτων (ρείθρο πεζοδρομίου) μπορεί να διπλασιάσει τη μέση έκθεση πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια σε σύγκριση με το περπάτημα κοντά στα κτίρια, όπου και η μικρής διάρκειας έκθεση είναι λιγότερο έντονη από την αντίστοιχη στο ρείθρο του πεζοδρομίου.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Σκοπός της εργασίας

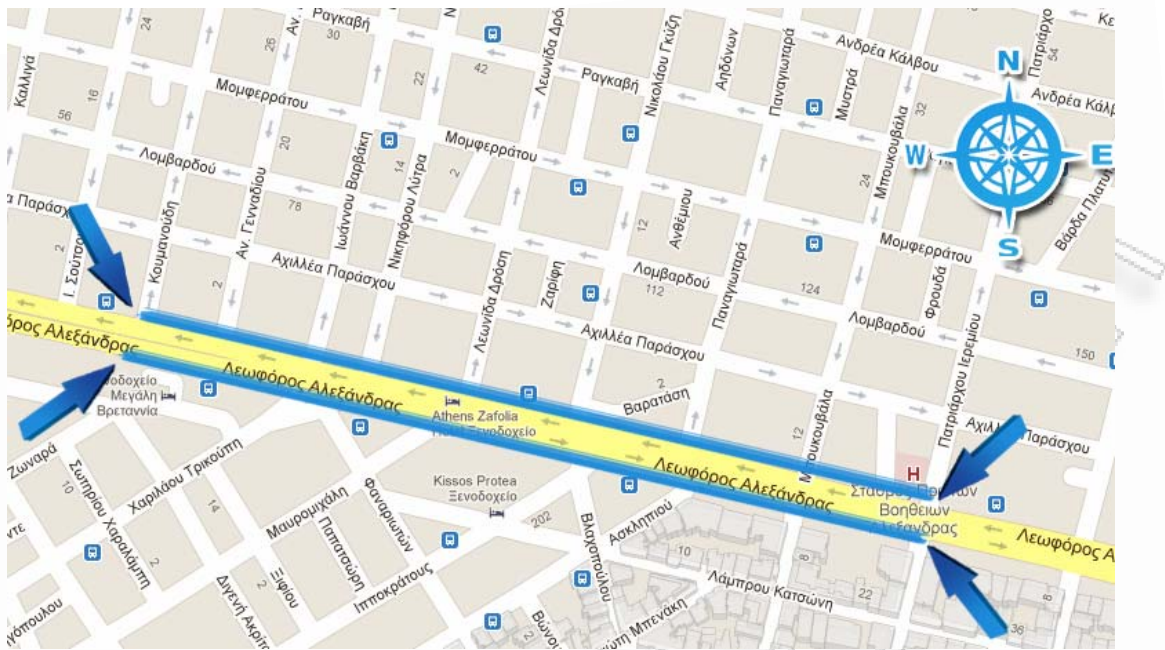
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της έκθεσης πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση (PM₁₀, PM_{2.5} και PM₁) σε χαρακτηριστικές κεντρικές οδούς έντονης κυκλοφορίας στην περιοχή της Αθήνας. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις έγιναν κύρια στη λεωφόρο Αλεξάνδρας, ενώ ενδεικτικές συμπληρωματικές μετρήσεις έγιναν και σε παράπλευρες οδούς κυκλοφορίας εμπορικών δραστηριοτήτων και κατοικιών (οδός Γκύζη, οδός Κουμανούδη, οδός Μουστοξύδη). Οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι:

1. να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων,
2. να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα σχετικά πρότυπα των διεθνών οργανισμών,
3. να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα αντίστοιχα επίπεδα άλλων σχετικών ευρωπαϊκών μελετών και
4. να εξεταστεί η επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών και της κυκλοφορίας στα καταγραφόμενα επίπεδα.

5.2 Σύνταξη Πρωτοκόλλου Μετρήσεων - Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η δειγματοληψία της παρούσας μελέτης, έλαβε χώρα κύρια στην λεωφόρο Αλεξάνδρας, μία λεωφόρο που συνδέει την οδό Πατησίων με την οδό Κηφισίας.

Συγκεκριμένα, η λεωφόρος Αλεξάνδρας αποτελείται από δύο ρεύματα κυκλοφορίας όπου το κάθε ένα έχει τρεις λωρίδες κυκλοφορίας συμπεριλαμβανομένου και της λεωφορειολωρίδας. Το τμήμα της λεωφόρου στο οποίο έγινε η υπό εξέταση μελέτη έχει μήκος περίπου 550m και εκτείνεται από την οδό Κουμανούδη μέχρι την οδό Πατριάρχου Ιερεμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.1. Περιοχή δειγματοληψίας (λεωφόρος Αλεξάνδρας από την οδό Κουμανούδη μέχρι την οδό Πατριάρχου Ιερεμίου).

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν μεταξύ της περιόδου 04/03/2011 και 06/04/2011 με το όργανο συνεχούς καταγραφής Dust Trak Μοντέλο 8533, της εταιρείας TSI, και σύμφωνα με το πρωτόκολλο μετρήσεων που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Προηγήθηκε μια σειρά δοκιμαστικών μετρήσεων στους υπονήφιους προς μελέτη χώρους (25/01/2011 – 28/02/2011).

Η δειγματοληψία της μελέτης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) κύρια στη λεωφόρο Αλεξάνδρας έχει ως εξής:

Για τις ημέρες των μετρήσεων, τις καθημερινές, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις το πρωί στο διάστημα 8:00-10:00 και δύο μετρήσεις το μεσημέρι στο διάστημα 14:00-16:00 για τα δύο ρεύματα κυκλοφορίας. Σε κάθε ένα ρεύμα κυκλοφορίας (κάθοδο ή άνοδο) πραγματοποιήθηκε δηλαδή, μια μέτρηση το πρωί και μία το μεσημέρι. Η κάθε διαδρομή διήρκεσε 16 λεπτά για το κάθε ρεύμα κυκλοφορίας, κατά την διάρκεια της οποίας τα 8 λεπτά έγιναν από δύση προς ανατολή και αντίστροφα. Για τα Σαββατοκύριακα οι ώρες μέτρησης το πρωί είναι διαφοροποιημένες από τις καθημερινές, δηλαδή τα χρονικά διαστήματα μέτρησης είναι μετατοπισμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα τις καθημερινές, λόγω των

διαφορετικών χρήσεων του δρόμου και των διαφορετικών συνηθειών του πληθυσμού. Συγκεκριμένα το πρωινό διάστημα των μετρήσεων ήταν μεταξύ 10:00-12:00 και το μεσημεριανό διάστημα, όπως και τις καθημερινές, μεταξύ 14:00-16:00.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι για αρκετές από τις ημέρες πραγματοποιήθηκε συστηματική μέτρηση της κυκλοφορίας για τα ίδια χρονικά διαστήματα των μετρήσεων. Η μέτρηση της κυκλοφορίας έγινε ανά κατηγορία οχημάτων και πιο συγκεκριμένα για τα ιδιωτικά οχήματα, τα ταξί, τα λεωφορεία και τα μηχανάκια.

Για τις συμπληρωματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε παράπλευρες οδούς κυκλοφορίας είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κινούνται μεγάλες υποομάδες πληθυσμού. Η οδός Κουμανούδη, η οδός Μουστοξύδη και η οδός Γκύζη αποτελούν χαρακτηριστικό δρόμο κατοικιών, ενώ η τελευταία αποτελεί και χαρακτηριστικό δρόμο εμπορικών δραστηριοτήτων.

Ενδεικτικές μετρήσεις των συγκεντρώσεων που προκύπτουν από τη θέση του πεζού στο πεζοδρόμιο (γεινίαση με το δρόμο ή άμεση γεινίαση με τα κτίρια) έγιναν επιπλέον στην λεωφόρο Αλεξάνδρας.

Επίσης πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικές μετρήσεις σε δύο υπαίθριους χώρους αναψυχής:

- σε ένα μικρό ασύλιο, παρακείμενο της λεωφόρου Αλεξάνδρας προς την πλευρά της ανόδου και
- σε ένα μεγάλο πάρκο που βρίσκεται στην περιοχή, το πεδίο του Άρεως.

Και στους δύο προαναφερθέντες υπαίθριους χώρους αναψυχής υποομάδες πληθυσμού παραμένουν αρκετές ώρες στο διάστημα της ημέρας, όπως μητέρες με τα παιδιά τους και ηλικιωμένοι.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα πάρθηκαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό METEONET του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του Ε.Μ.Π. στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

Ακολουθούν εικόνες της περιοχής στην οποία έγινε η δειγματοληψία.



Σχήμα 5.2. Περιοχή δειγματοληψίας (λεωφόρος Αλεξάνδρας και ασύλιο)



Σχήμα 5.3. Περιοχή Δειγματοληψίας (Ασύλιο, Πεδίον Άρεως, οδός Μουστοξύδη, οδός Κουμανούδη, οδός Γκίζη).

5.3 Οργανολογία

5.3.1 Αυτόματος μετρητής DustTrak Aerosol Monitor Model 8533

Η παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός αυτόματου μετρητή συνεχούς καταγραφής DustTrak Aerosol Monitor Model 8533, της εταιρείας TSI. Το όργανο ελέγχου των αερολυμάτων, είναι ένα φορητό λέιζερ-φωτόμετρο. Παρέχει αξιόπιστη αξιολόγηση της έκθεσης σε σωματίδια, μετρώντας συγκεντρώσεις σε PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 , και κλάσματα αναπνεύσιμων σωματιδίων, Respirable και Total PM.

Είναι κατάλληλο για μέτρηση συγκεντρώσεων σε γραφεία καθώς και σε βιομηχανικούς εργασιακούς χώρους, στις κατασκευές, σε περιβαλλοντικούς χώρους και σε άλλες υπαίθριες εφαρμογές.

Ο μετρητής DustTrak DRX μετράει το αερόλυμα ρύπων, όπως σκόνη, καπνό και νέφος. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν:

- έρευνες υγιεινής σε βιομηχανικούς και λοιπούς εργασιακούς χώρους
- εσωτερικές έρευνες ποιότητας της ατμόσφαιρας
- εξωτερικό περιβαλλοντικό έλεγχο
- αξιολόγηση φίλτρων και μηχανικού ελέγχου
- έλεγχο απομακρυσμένων περιοχών και εκπομπών σε πραγματικό χρόνο
- ερευνητικές μελέτες των αερολυμάτων

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 L/min, μέσω εσωτερικής αντλίας και στη 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 $0,001 - 150 \text{ mg/m}^3$, με ανάλυση ίση με $\pm 0,1\%$ ή $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (όποιο από τα δύο δίνει την μεγαλύτερη τιμή).

Το όργανο ελέγχου DustTrak 8533 περιέχει μια ευανάγνωστη έγχρωμη ψηφιακή οθόνη αφής η οποία παρουσιάζει σε πραγματικό χρόνο τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των σωματιδίων σε χιλιοστά του γραμμαρίου ανά κυβικό μέτρο αέρα (mg/m^3).

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του DustTrak 8533 είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να λαμβάνει και να αποθηκεύει μετρήσεις χωρίς να είναι αναγκαία η παρουσία του στον ελεγχόμενο χώρο. Το όργανο περιέχει μικροεπεξεργαστές και λογισμικό με το οποίο προγραμματίζεται η έναρξη και η διάρκεια των δειγματοληψιών. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα αποθηκεύονται στη μνήμη του οργάνου η οποία υποστηρίζεται από μια μπαταρία λιθίου. Το DustTrak 8533 είναι συμβατό με τους κοινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα λογισμικά τους με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η φόρτωση των αποθηκευμένων δεδομένων του οργάνου σε αυτούς και έτσι να είναι εφικτή η στατιστική ανάλυσή τους.

Είναι φορητή συσκευή χειρός, μικρού βάρους, που επιτρέπει την μέτρηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων κατά τη διάρκεια διαδρομών – ταξιδιών, με διάφορα μέσα και κυρίως στο περπάτημα.

Για την παρούσα μελέτη το όργανο τοποθετήθηκε σε σακίδιο χειρός όπου ο σωλήνας μέσω του οποίου έγινε η είσοδος των σωματιδίων (εικόνα 5.2) απείχε περίπου 30cm από το στόμα. Επισημαίνεται ότι πριν από κάθε μέτρηση έγινε βαθμονόμηση (zero calibration) με το zero φίλτρο (εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.1. DustTrak Aerosol Monitor Model 8533



Εικόνα 5.2. Το όργανο μέτρησης DustTrak με τον σωλήνα μέσω του οποίου έγινε η είσοδος των σωματιδίων.



Εικόνα 5.3. Το όργανο μέτρησης DustTrak με το zero filter για την επίτευξη της βαθμονόμησης .

5.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γενικά και τα αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

5.4.1 Γενικά Αποτελέσματα

Από το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε στη λεωφόρο Αλεξάνδρας προέκυψε ότι η μέση ημερήσια συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων για τις καθημερινές, τα Σάββατα και τις Κυριακές, ανέρχεται σε:

Πίνακας 5.1. Μέση ημερήσια συγκέντρωση σωματιδίων και ελάχιστη-μέγιστη τιμή, τις καθημερινές, τα Σάββατα και τις Κυριακές

<i>Μέση ημερήσια συγκέντρωση</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>
Καθημερινές	61	26-146	57	25-140	56	24-138
Σάββατα	41	22-57	39	21-55	38,5	21-55
Κυριακές	40	19-107	38	18-106	37,5	18-105

Τα Σάββατα και τις Κυριακές μπορούμε να τα ομαδοποιήσουμε διότι τα επίπεδα συγκέντρωσης είναι σχεδόν τα ίδια και επίσης οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τα ίδια χρονικά διαστήματα σε σχέση με τις καθημερινές. Προκύπτει λοιπόν ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας των μέσων ημερήσιων επιπέδων συγκέντρωσης για τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα:

Πίνακας 5.2. Μέση ημερήσια συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, τις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα.

<i>Μέση ημερήσια συγκέντρωση</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>
Καθημερινές	61	26-146	57	25-140	56	24-138
Σ/Κ	40,5	19-107	38,5	18-106	38	18-105

Φαίνεται λοιπόν αισθητά η μείωση των συγκεντρώσεων τα Σαββατοκύριακα σε σχέση με τις καθημερινές, γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική χρήση του δρόμου αυτές τις διαφορετικές ημέρες.

Επιπλέον η μέση συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων τις καθημερινές, τα Σάββατα και τις Κυριακές, για τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα (πρωί-μεσημέρι) ανέρχεται σε:

Πίνακας 5.3. Μέση συγκέντρωση σωματιδίων, τις καθημερινές, τα Σάββατα και τις Κυριακές για τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα (πρωί-μεσημέρι).

Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού		PM ₁₀ (μg/m ³)	Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)	Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m ³)
Καθημερινές	Πρωϊ	73	28-146	70	27-140	69	27-138
	Μεσημέρι	49	26-116	46	25-88	44,4	24-84
Σάββατα	Πρωϊ	43	22-44	41	21-42	40,5	21-42
	Μεσημέρι	38	25-54	37	22-53	36	21-52
Κυριακές	Πρωϊ	48	19-107	47	18-106	46	18-105
	Μεσημέρι	31	21-41	29	20-39	28,5	19-39

Παρατηρούμε ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης είναι πιο αυξημένα τις καθημερινές από ότι είναι τα Σάββατα και τις Κυριακές, καθώς επίσης είναι πιο αυξημένα το πρωί σε σχέση με το μεσημέρι. Βέβαια η μέση ημερήσια συγκέντρωση τις καθημερινές για τα PM₁₀ είναι 61 μg/m³, ποσό που ξεπερνάει την μέση ωριαία εικοσιτετράωρη τιμή του προτύπου που είναι τα 50 μg/m³, γεγονός που αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Επιπροσθέτως αναφέρεται ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης στην πλευρά της ανόδου της λεωφόρου Αλεξάνδρας είναι πιο αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα στην πλευρά της καθόδου (13%-16%).

5.4.2 Αναλυτικά Αποτελέσματα

Το σύνολο των μετρήσεων ταξινομήθηκε και αναλύθηκε για ειδικές περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα περιγράφονται παρακάτω:

Για τις μετρήσεις στη Λεωφόρο Αλεξάνδρας

Αρχικά αναφέρονται, κατά χρονολογική σειρά, ξεχωριστά οι ημέρες οι οποίες χαρακτηρίζονται από επεισόδια στα οποία η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν ιδιαίτερα αυξημένη και πιο συγκεκριμένα:

➤ Την **Κυριακή 06/03/2011** το πρωί τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο της λεωφόρου Αλεξάνδρας ήταν αυξημένα όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.4. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων την Κυριακή 06/03/2011

	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)
Κάθοδος	97	96	95
Άνοδος	107	106	105

Και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν ήταν οι εξής:

Πίνακας 5.5. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες την Κυριακή 06/03/2011

	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Κάθοδος	89,3	SW	1,58	10,35	191,55
Άνοδος	88,56	SSW	1,13	10,47	234,96

Παρατηρείται ότι το ποσοστό της υγρασίας είναι ιδιαίτερα αυξημένο, η διεύθυνση του ανέμου είναι η νοτιοδυτική και η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, χαρακτηριζόμενη από «σχεδόν άπνοια» (ελαφρύ αεράκι). Οι μετεωρολογικές αυτές συνθήκες φαίνεται να οφείλονται για την αυξημένη συγκέντρωση των σωματιδίων που παρατηρήθηκε την ημέρα αυτή.

➤ Τη Δευτέρα 14/03/2011 το πρωί τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν αυξημένα κυρίως στην πλευρά της ανόδου όπως φαίνεται παρακάτω:

Πίνακας 5.6. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων τη Δευτέρα 14/03/2011

	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)
Άνοδος	84	81	80
Κάθοδος	69	66	65

Και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν ήταν οι εξής:

Πίνακας 5.7. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες τη Δευτέρα 14/03/2011

	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Άνοδος	85,16	S	0,82	13,20	416,19
Κάθοδος	82,24	SSW	0,92	14,02	476,20

Επιπλέον για την ημέρα αυτή πραγματοποιήθηκε δεκάλεπτη μέτρηση του αριθμού των οχημάτων σε κάθε ρεύμα κυκλοφορίας, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.8. Μέτρηση της κυκλοφορίας τη Δευτέρα 14/03/2011

	IX	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Άνοδος	323	85	8	136	552
Κάθοδος	305	79	8	124	516

Παρατηρείται και αυτή την ημέρα ότι το ποσοστό της υγρασίας είναι αυξημένο, η διεύθυνση του ανέμου είναι η νότιο, νοτιοδυτική και η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, χαρακτηριζόμενη από «σχεδόν άπνοια» (ελαφρύ αεράκι). Οι μετεωρολογικές αυτές συνθήκες και ο μεγάλος αριθμός των οχημάτων οφείλονται για την αυξημένη συγκέντρωση των σωματιδίων.

➤ Στη συνέχεια είναι σκόπιμο να μελετηθούν οι παρακάτω ημέρες:

Η Τρίτη 15/03/2011, η Τετάρτη 16/03/2011, η Πέμπτη 17/03/2011 και η Παρασκευή 18/03/2011 είναι τέσσερις ημέρες με αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων των σωματιδίων τις πρωινές ώρες, ενώ για την Πέμπτη είναι αυξημένα και τις μεσημεριανές, τόσο στην πλευρά της ανόδου όσο και στην πλευρά της καθόδου. Στον παρακάτω πίνακα είναι συγκεντρωμένες οι μετρηθείσες τιμές:

Πίνακας 5.9. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες

		PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Τρίτη 15/03/2011	Άνοδος	78	76	75	87,85	S	0,48	14,58	390,75
Τετάρτη 16/03/2011	Κάθοδος	102	98	97	82,44	WSW	0,87	15,37	354,74
	Άνοδος	115	111	110	78,63	WSW	0,91	15,68	430,13
Πέμπτη 17/03/2011	Κάθοδος	78	72	70	88,36	SSE	0,64	15,53	301,4
	Άνοδος	85	79	76	82,03	ESE	0,65	15,9	414,21
	Άνοδος μεσημέρι	116	88	84	85,8	SSE	0,97	14,11	57,27
Παρασκευή 18/03/2011	Κάθοδος	72	68	66	77,24	SW	1,05	14,93	132,56
	Άνοδος	86	83	81	78,92	SE	0,61	14,99	111,64

Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κυκλοφορίας και στα δύο ρεύματα, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.10. Μέτρηση της κυκλοφορίας

		IX	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Τετάρτη 16/03/2011	Κάθοδος	319	85	8	142	554
	Άνοδος	344	90	7	145	586
Παρασκευή 18/03/2011	Κάθοδος	299	86	5	122	512
	Άνοδος	310	97	7	139	553

Για τις ημέρες που προαναφέρθηκαν παρατηρείται ότι το ποσοστό της υγρασίας είναι αυξημένο, η διεύθυνση του ανέμου είναι κυρίως η νότιο νοτιοανατολική, ενώ για την ημέρα Τετάρτη 16/03/2011 είναι η δυτική, νοτιοδυτική. Ο νότιος άνεμος φαίνεται να επικρατεί και αυτές τις ημέρες. Η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, χαρακτηριζόμενη από «σχεδόν άπνοια» (ελαφρύ αεράκι). Για την Τετάρτη και την Παρασκευή οι μετρήσεις του αριθμού των οχημάτων στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας που πραγματοποιήθηκαν δικαιολογούν τα πολύ αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων συμπληρωματικά με τα μετεωρολογικά δεδομένα.

➤ Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί η ημέρα **Τρίτη 05/04/2011** της οποίας τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων το πρωί ήταν αυξημένα περισσότερο από κάθε άλλη ημέρα, ενώ το μεσημέρι υπήρξε πτώση των επιπέδων αλλά και πάλι τα επίπεδα ήταν υψηλά. Συγκεκριμένα προέκυψαν οι παρακάτω τιμές:

Πίνακας 5.11. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων την Τρίτη 05/04/2011

		PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)
Πρωϊ	Κάθοδος	119	113	112
	Άνοδος	146	140	138
Μεσημέρι	Κάθοδος	70	68	67
	Άνοδος	83	80	78

Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν ήταν οι εξής:

Πίνακας 5.12. Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες την Τρίτη 05/04/2011

		Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Πρωϊ	Κάθοδος	74,7	WSW	1,3	15,07	502,01
	Άνοδος	72,65	SSW	1,27	15,48	561,18
Μεσημέρι	Κάθοδος	71,36	SW	1,98	19,06	537,7
	Άνοδος	71,49	SW	1,84	19,16	606,66

Η μέτρηση της κυκλοφορίας που πραγματοποιήθηκε έδειξε τον αριθμό των οχημάτων ο οποίος φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.13. Μέτρηση της κυκλοφορίας την Τρίτη 05/04/2011

		ΙΧ	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Πρωϊ	Κάθοδος	213	78	9	127	427
	Άνοδος	238	89	7	117	451
Μεσημέρι	Κάθοδος	193	66	6	142	407
	Άνοδος	232	43	5	141	421

Αξίζει να σημειώσουμε ότι η συγκεκριμένη ημέρα, σύμφωνα με τα δεδομένα που εξετάστηκαν και την προσωπική αίσθηση που καταγράφηκε στα σχόλια που κρατούσα καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων μου, είναι ιδιόμορφη λόγω του ότι υπήρξε το λεγόμενο «*Σαχάρα Φαινόμενο*». Η ατμόσφαιρα ήταν αποπνικτική και η ορατότητα περιορισμένη από τη σκόνη. Επομένως λόγω αυτού του φαινομένου δικαιολογείται η μεγάλη αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδιακών κλασμάτων, η οποία δε μπορεί να δικαιολογηθεί από την κυκλοφορία.

Παρατηρείται και για αυτή την ημέρα ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα έχουν ως εξής: Η διεύθυνση του ανέμου είναι κυρίως η νοτιοδυτική και η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, χαρακτηριζόμενη από «σχεδόν άπνοια» (ελαφρύ αεράκι) τις πρωινές ώρες και χαρακτηριζόμενη ως «πολύ ασθενής» (ελαφριά αύρα) το μεσημέρι. Επίσης η μέση θερμοκρασία είναι πιο υψηλή σε σχέση με τις άλλες ημέρες που μελετήθηκαν. Το μεσημέρι αυτής της ημέρας η συγκέντρωση ήταν χαμηλότερη από το πρωϊ, που οφείλεται στη σχετική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και στα λιγότερα ταξί που κυκλοφορούσαν το μεσημέρι σε σχέση με το πρωϊ.

➤ Από την άλλη μεριά υπήρξαν κάποιες ημέρες στις οποίες τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων ήταν χαμηλά. Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται ενδεικτικά αυτές οι ημέρες, τα επίπεδα συγκέντρωσης και οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν.

Πίνακας 5.14. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες

		PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2,5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Κυριακή 20/03/2011	Πρωΐ	19	18	18	75,3	NW	2,54	14,27	206,46
	Μεσημέρι	21	20	19	82,93	ESE	3,75	12,65	98,42
Σάββατο 19/03/2011	Πρωΐ	22	21	21	64,74	SSW	1,8	17,57	811,47
	Μεσημέρι	25	22	21	71,71	SSW	3,58	15,68	198,11
Τετάρτη 16/03/2011	Μεσημέρι	26	25	24	59,59	SW	2,32	18,23	428,2
Δευτέρα 21/03/2011	Πρωΐ	28	27	27	84,74	NW	4,75	8,39	62,89
Κυριακή 27/03/2011	Μεσημέρι	28	27	27	59,01	SSW	3,47	17,73	346,77

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα στοιχεία που προκύπτουν από τη μέτρηση της κυκλοφορίας για την Τετάρτη 16/03/2011 και την Κυριακή 27/03/2011.

Πίνακας 5.15. Μέτρηση της κυκλοφορίας

	IX	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Τετάρτη 16/03/2011	223	58	6	128	415
Κυριακή 27/03/2011	180	52	0	52	284

Παρατηρείται ότι για την Τετάρτη 16/03/2011 και την Κυριακή 27/03/2011, αν και η διεύθυνση του ανέμου είναι η νοτιο νοτιοδυτική, η ταχύτητα του ανέμου και η θερμοκρασία είναι υψηλές και η μέτρηση της κυκλοφορίας δείχνει ότι υπήρχαν λίγα οχήματα που κυκλοφορούσαν στον δρόμο σε σχέση με τις άλλες ημέρες όπου υπήρξαν τα επεισόδια με τις υψηλές συγκεντρώσεις.

Για τις άλλες ημέρες παρατηρούμε ότι επικρατεί ο βορειοδυτικός άνεμος, δηλαδή φαίνεται να επικρατεί ο βόρειος άνεμος και η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή, γεγονός που συμβάλλει στην ελάττωση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

➤ Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων είναι αυξημένα στην πλευρά της ανόδου σε σχέση με την πλευρά της καθόδου σε ποσοστό της τάξης 13% - 16%, αλλά η μεγάλη διαφορά στα επίπεδα συγκέντρωσης υπάρχει τις πρωινές ώρες σε σύγκριση με τις μεσημεριανές και στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας, γεγονός που θα αναλυθεί παρακάτω.

➤ Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε συστηματική σημαντική αύξηση των καταγραφόμενων επιπέδων ρύπανσης σε συγκεκριμένη περιοχή διασταύρωσης. Η διασταύρωση αυτή της λεωφόρου Αλεξάνδρας με την κεντρική οδό Ιπποκράτους, βρίσκεται στην πλευρά της ανόδου της λεωφόρου. Η αύξηση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη και την επόμενη συγκέντρωση ανέρχεται σε ποσοστό της τάξης 16% και φτάνει μέχρι 41%. Σημειώνουμε ότι για τους εργαζόμενους στους δρόμους (π.χ. περιπτεράς, καστανάς κ.α.), που αναγκάζονται να παραμένουν για αρκετό χρονικό διάστημα στους δρόμους και αποτελούν την ομάδα υψηλού κινδύνου έκθεσης στα αιωρούμενα σωματίδια, αυτή η αύξηση των επιπέδων στη συγκεκριμένη διασταύρωση μπορεί να προκαλέσει ακόμα μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία τους.

➤ Η μέτρηση της κυκλοφορίας έδειξε ότι ο αριθμός των οχημάτων είναι μεγαλύτερος στην πλευρά της ανόδου σε σχέση με την πλευρά της καθόδου, ενώ το μεσημέρι σε σχέση με το πρωί υπάρχει πτώση του αριθμού των οχημάτων, γεγονός που δικαιολογεί και την πτώση των επιπέδων συγκέντρωσης το μεσημέρι σε σύγκριση με το πρωί.

Η **Τετάρτη 16/03/2011** είναι μία ημέρα στην οποία υπάρχει μεγάλη διαφορά στα επίπεδα της συγκέντρωσης των σωματιδίων στα διαφορετικά χρονικά διαστήματα, δηλαδή το πρωί σε σχέση με το μεσημέρι, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.16. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων και Επικρατούσες Μετεωρολογικές Συνθήκες την Τετάρτη 16/03/2011

		PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)
Πρωϊ	Κάθοδος	102	98	97	82,44	WSW	0,87	15,37	354,74
	Ανοδος	115	111	110	78,63	WSW	0,91	15,68	430,13
Μεσημέρι	Κάθοδος	26	25	24	59,59	SW	2,32	18,23	428,2
	Ανοδος	36	35	34	62,4	SW	2,34	18,41	522,15

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η μέτρηση της κυκλοφορίας των οχημάτων για αυτή την ημέρα.

Πίνακας 5.17. Μέτρηση της κυκλοφορίας την Τετάρτη 16/03/2011

		ΙΧ	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Πρωϊ	Κάθοδος	319	85	8	142	554
	Άνοδος	344	90	7	145	586
Μεσημέρι	Κάθοδος	223	58	6	128	415
	Άνοδος	235	65	5	131	436

Η μεγάλη διαφορά, τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο, το πρωϊ σε σχέση με το μεσημέρι, οφείλεται κατά κύριο λόγο στην κυκλοφορία. Η μέτρηση των παραμέτρων της κυκλοφορίας είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους μελέτες εκτός από τα μετεωρολογικά δεδομένα και τις μετρήσεις. Έτσι λοιπόν η αισθητή πτώση των επιπέδων οφείλεται πρώτα στη μείωση του αριθμού των οχημάτων και συγκεκριμένα των ΙΧ και των ταξί, το μεσημέρι σε σχέση με το πρωϊ. Επίσης σημαντικό ρόλο έπαιξαν και τα διαφορετικά μετεωρολογικά στοιχεία που επικρατούσαν στα εν λόγω διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η ταχύτητα του ανέμου το μεσημέρι αυξήθηκε σε σχέση με το πρωϊ, που αποτελεί ακόμη ένα γεγονός που συμβάλλει στη μείωση των επιπέδων συγκέντρωσης συμπληρωματικά με την ένταση πηγών.

➤ Επιπροσθέτως μελετήθηκαν οι ημέρες στις οποίες επικρατούσαν παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες, για τα παρόμοια χρονικά διαστήματα (πρωϊ - μεσημέρι), και συγκρίνοντας τον αριθμό των οχημάτων, διαπιστώσαμε ότι η διαφορά στα επίπεδα συγκέντρωσης οφειλόταν στον διαφορετικό αριθμό των οχημάτων που κινούνταν στον δρόμο. *Ενδεικτικά* παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν κάποια από τα στοιχεία που οδήγησαν στην παραπάνω διαπίστωση για τις πρωϊνές και μεσημεριανές μετρήσεις ξεχωριστά και σύμφωνα με χρονολογική σειρά:

Πίνακας 5.18. Ημέρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες και τα αντίστοιχα επίπεδα συγκεντρώσεων των σωματιδίων για τις πρωινές μετρήσεις.

Πρωινές Μετρήσεις	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)
Δευτέρα 14/03/2011	85,16	S	0,82	13,2	416,19	84	81	80
Τετάρτη 16/03/2011	78,63	WSW	0,91	15,68	430,13	115	111	110
Παρασκευή 18/03/2011	77,24	SW	1,05	14,93	132,56	72	68	66

Πίνακας 5.19. Η μέτρηση της κυκλοφορίας για τις αντίστοιχες ημέρες και για το πρωινό διάστημα μετρήσεων.

	ΙΧ	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Δευτέρα 14/03/2011	323	85	8	136	552
Τετάρτη 16/03/2011	344	90	7	145	586
Παρασκευή 18/03/2011	299	86	5	122	512

Πίνακας 5.20. Ημέρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες και τα αντίστοιχα επίπεδα συγκεντρώσεων των σωματιδίων για τις μεσημεριανές μετρήσεις.

Μεσημεριανές Μετρήσεις	Υγρασία (%)	Διεύθυνση ανέμου	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁ (μg/m ³)
Δευτέρα 14/03/2011	63,66	SW	2,58	17,9	571,55	46	45	44
Τετάρτη 16/03/2011	59,59	SW	2,32	18,23	428,2	26	25	24

Πίνακας 5.21. Η μέτρηση της κυκλοφορίας για τις αντίστοιχες ημέρες και για το μεσημεριανό διάστημα μετρήσεων.

	ΙΧ	Ταξί	Λεωφορεία	Μηχανάκια	Σύνολο
Δευτέρα 14/03/2011	275	73	5	114	467
Τετάρτη 16/03/2011	223	58	6	128	415

➤ **Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού (Σάββατο, Κυριακή, καθημερινές)**

Η μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μετρήσεις ακόμα και εκείνες των ημερών στις οποίες υπήρξαν τα επεισόδια της ιδιαίτερα αυξημένης συγκέντρωσης των σωματιδίων.

Μελετήθηκαν οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τα Σάββατα και προέκυψε ότι η μέση τιμή έκθεσης πεζών για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα (πρωϊ-μεσημέρι) είναι:

Πίνακας 5.22. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού το Σάββατο

<i>Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού το Σάββατο</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>
Πρωϊ	43	22-44	41	21-42	40,5	21-42
Μεσημέρι	38	25-54	37	22-53	36	21-52

Για τις *Κυριακές* και για τα κοινά χρονικά διαστήματα (πρωϊ -μεσημέρι) προέκυψαν οι παρακάτω τιμές μέσης έκθεσης του πληθυσμού:

Πίνακας 5.23. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού την Κυριακή

<i>Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού την Κυριακή</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>
Πρωϊ	48	19-107	47	18-106	46	18-105
Μεσημέρι	31	21-41	29	20-39	28,5	19-39

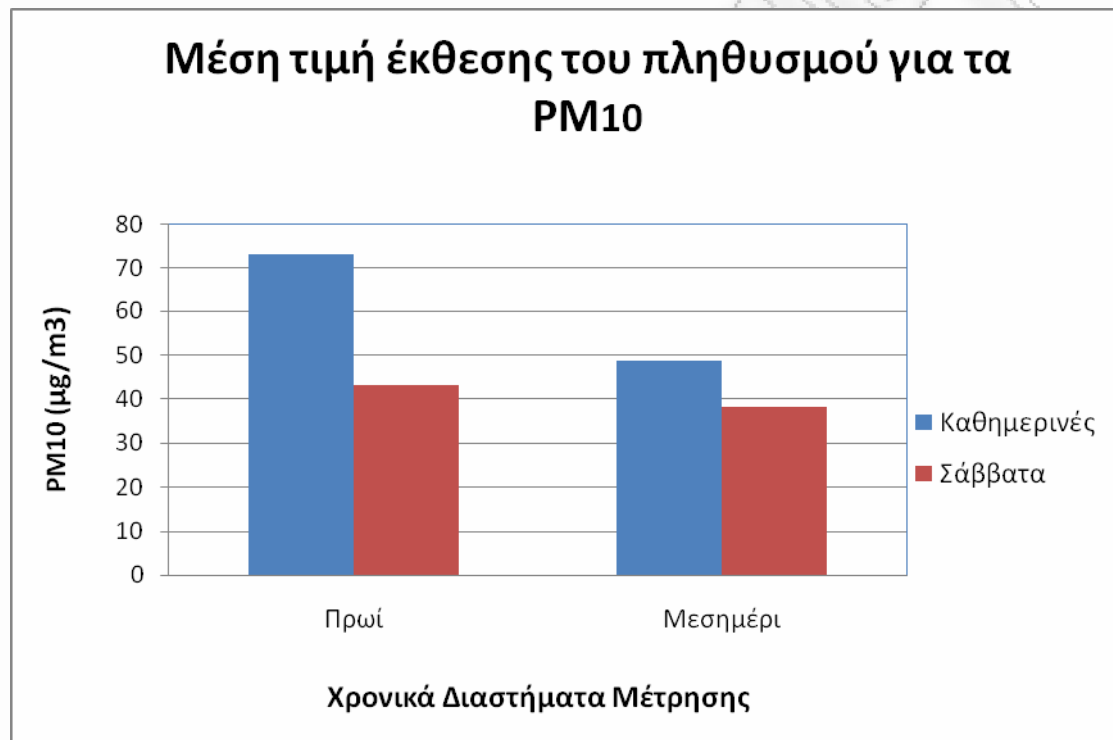
Ακολούθως προέκυψε η μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού που κυκλοφορεί στο δρόμο την εποχή που έγιναν οι μετρήσεις, τις ημέρες της εβδομάδας εκτός του Σαββατοκύριακου, δηλαδή τις *καθημερινές*:

Πίνακας 5.24. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές (weekdays)

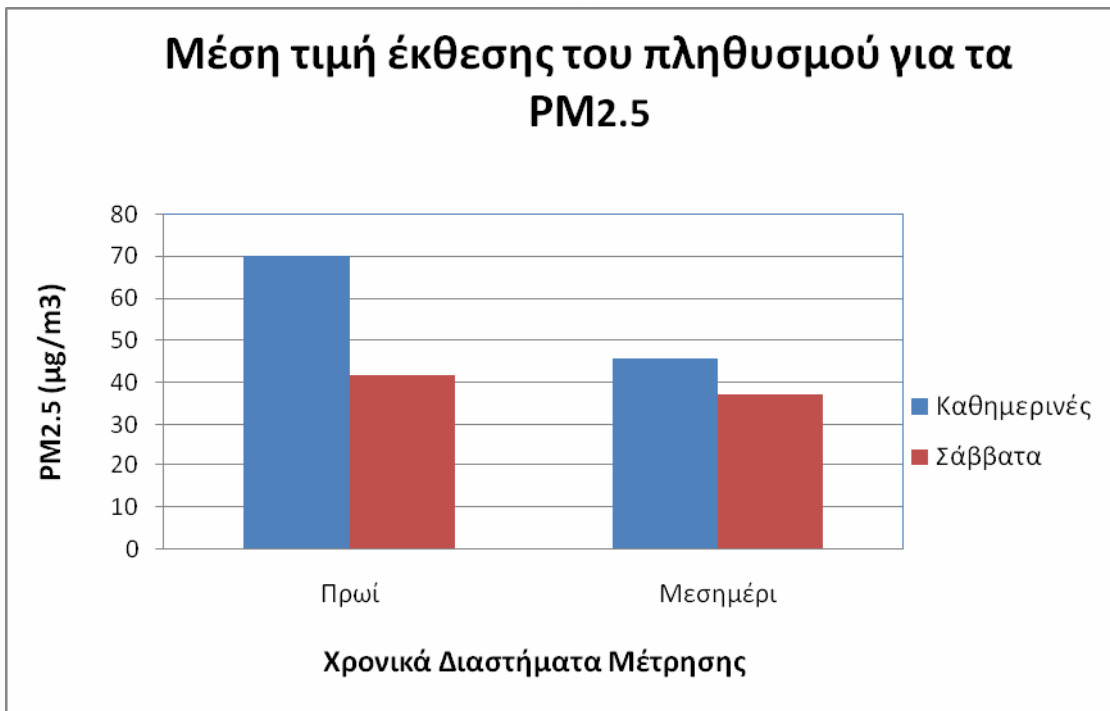
<i>Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>	<i>Ελάχιστη-Μέγιστη Τιμή (μg/m³)</i>
Πρωϊ	73	28-146	70	27-140	69	27-138
Μεσημέρι	49	26-116	46	25-88	44,4	24-84

Παρατηρείται ότι τα Σάββατα, τις Κυριακές και τις καθημερινές τα επίπεδα συγκέντρωσης ήταν πιο αυξημένα το πρωί σε σχέση με το μεσημέρι. Τα μεγαλύτερα επίπεδα ήταν τις καθημερινές όπου ο κόσμος κυκλοφορεί για να πάει στη δουλειά του σε σύγκριση με το Σάββατο και την Κυριακή.

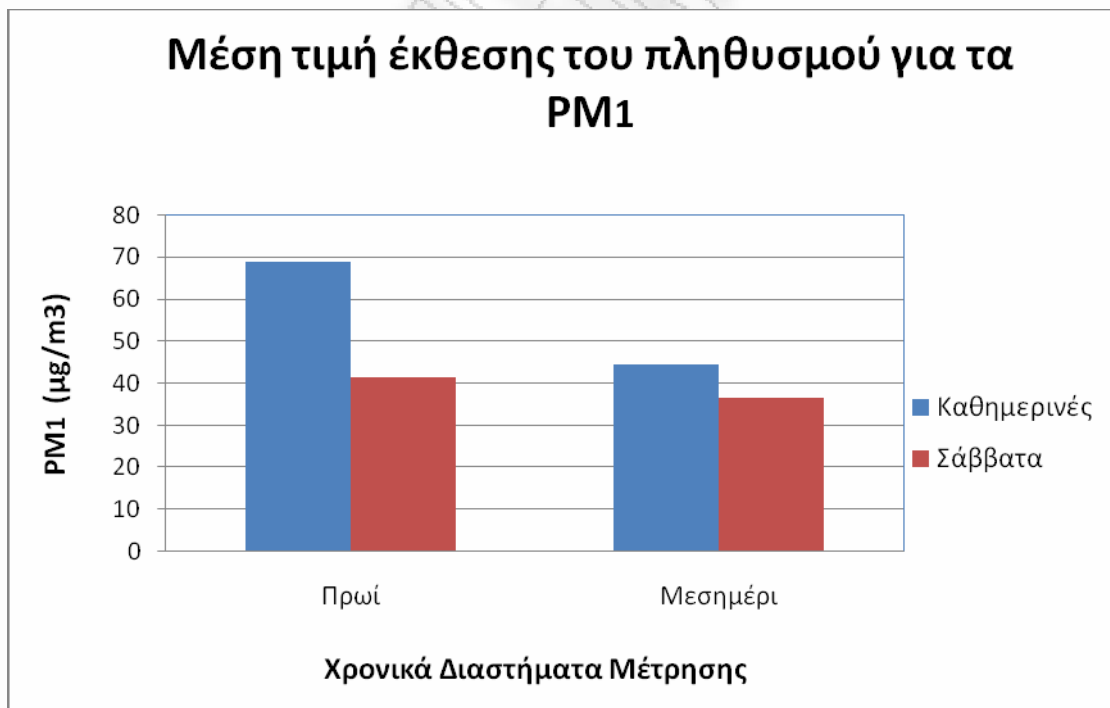
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές σε σύγκριση με τα Σάββατα για τα PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5-1. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές σε σύγκριση με τα Σάββατα για τα PM_{10}



Διάγραμμα 5-2. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές σε σύγκριση με τα Σάββατα για τα PM_{2.5}



Διάγραμμα 5-3. Μέση τιμή έκθεσης του πληθυσμού τις καθημερινές σε σύγκριση με τα Σάββατα για τα PM₁

➤ **Σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης των σωματιδίων της οδού Γκύζη με την λεωφόρο Αλεξάνδρας**

Επιπροσθέτως ενδεικτικά γίνεται για την Κυριακή το μεσημέρι σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης των σωματιδίων στην οδό Γκύζη με την μέση συγκέντρωση για τις Κυριακές στην οδό Αλεξάνδρας σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.25. Σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης της οδού Γκύζη με την λεωφόρο Αλεξάνδρας την Κυριακή.

<i>Κυριακή μεσημέρι</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>
Γκύζη	43	42	42
Αλεξάνδρας	31	29	28,5

Με την ίδια διαδικασία για τη Δευτέρα το μεσημέρι έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.26. Σύγκριση του επιπέδου συγκέντρωσης της οδού Γκύζη με την λεωφόρο Αλεξάνδρας τη Δευτέρα

<i>Δευτέρα μεσημέρι</i>	<i>PM₁₀ (μg/m³)</i>	<i>PM_{2.5} (μg/m³)</i>	<i>PM₁ (μg/m³)</i>
Γκύζη	74	73	72
Αλεξάνδρας	49	46	44,4

Παρατηρείται ότι οι τιμές συγκέντρωσης των σωματιδίων στην οδό Γκύζη είναι αυξημένες σε σχέση με την λεωφόρο Αλεξάνδρας την Κυριακή και ακόμα περισσότερο αυξημένες τη Δευτέρα. Η οδός Γκύζη χαρακτηρίζεται ως canyon street (δρόμος φαράγγι) στον οποίο υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων από την αντίστοιχη σε μια φαρδιά λεωφόρο, διότι δεν υπάρχει αρκετός αερισμός.

Δεν πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη σύγκριση για τα πρωινά διαστήματα λόγω του ότι η οδός Γκύζη έχει μια ιδιομορφία σαν δρόμος, και συγκεκριμένα δεν υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην κίνηση καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, διότι οι δραστηριότητες που λαμβάνουν μέρος καθώς και οι χρήσεις του δρόμου από τους κατοίκους της περιοχής δεν έχουν ιδιαίτερες αλλαγές.

- Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην οδό Γκύζη δείχνουν ότι υπάρχει παραμένονσα τιμή (background) που κυμαίνεται στα 30-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ όταν η διεύθυνση του ανέμου είναι ανατολική βορειοανατολική και βορειοανατολική και η ταχύτητα του ανέμου είναι σχετικά μεγάλη. Αυτή η τιμή με την αύξηση της κυκλοφορίας, τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου και τη διεύθυνση του ανέμου σε νότιο νότιοανατολική και σε νοτιοδυτική ξεπερνάει το επίπεδο των 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Ο συντελεστής συσχέτισης αποτελεί μια καλή ένδειξη του βαθμού συσχέτισης δύο μεταβλητών, της συγκέντρωσης των σωματιδίων και της ταχύτητας του ανέμου. Ο συντελεστής αρνητικής συσχέτισης των δύο μεταβλητών λαμβάνει την τιμή **R= -0,662**.
- *Σύγκριση της μέσης έκθεσης πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια της εν λόγω εργασίας με την αντίστοιχη άλλων σχετικών ευρωπαϊκών μελετών.*

Ενδεικτικά στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα επίπεδα της μέσης συγκέντρωσης των σωματιδίων άλλων σχετικών ευρωπαϊκών μελετών και παρατηρείται ότι στην εργασία μας η μέση έκθεση πεζών είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη άλλων ευρωπαϊκών μελετών. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι 2,5 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη των άλλων μελετών. Η μελέτη που έλαβε μέρος στο πάρκο (πεδίο Άρεως) έδειξε ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης είναι διπλάσια από τα αντίστοιχα στο Hyde Park του Λονδίνου.

Πίνακας 5.27. Αναφορά σχετικών μελετών και αντίστοιχων επιπέδων συγκέντρωσης

Αναφορά	Περίοδος Μέτρησης	Περιοχή Μέτρησης	Μέση Συγκέντρωση (μg/m ³)		
			PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁
Dennekamp et al. (2002)	Έτος 2000-2001	Αμπερντίν, Ηνωμένο Βασίλειο	-	20	-
Gulliver and Briggs, (2004)	Νοέμβριος 1999- Απρίλιος 2000	Νορθάμπτον, Ηνωμένο Βασίλειο	38,18	15,06	7,14
Gulliver and Briggs, (2007)	Ιανουάριος 2004- Μάρτιος 2005	Λέστερ, Ηνωμένο Βασίλειο	22,1	10,9	4,8
Briggs et al. (2008)	Μάιος-Ιούνιος 2005	Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	27,56	6,59	3,37
McCreanor et al. (2005)	Χειμώνας του 2001	Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	PM_{2.5}		
			Hyde Park: 22,5 Oxford Street: 47,9		
Kaur et al. (2005b)	Απρίλιος-Μάιος 2003	Κεντρικό Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	-	27,5	-
Kaur et al. (2005a)	Απρίλιος-Ιούνιος 2004	Κεντρικό Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο	-	37,7	-
Διπλωματική Εργασία	Ιανουάριος-Απρίλιος 2011	Αθήνα, Ελλάδα	61	57	56

➤ Για την Τρίτη 05/04/2011, λόγω της ιδιομορφίας της ημέρας, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο και στο επίπεδο του δρόμου (οδός Κουμανούδη), καθώς επίσης και μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο του διαμερίσματος (5^{ος} όροφος) και στο εσωτερικό, για το πρωί και για το μεσημέρι, και τα επίπεδα των συγκεντρώσεων ανέρχονται, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί, σε:

Πίνακας 5.28. Επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο του διαμερίσματος και στον εξωτερικό χώρο στο επίπεδο του δρόμου (οδός Κουμανούδη).

		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Πρωϊ	Εξωτερικός χώρος κατοικίας	115	110	109
	Εσωτερικός χώρος κατοικίας	113	103	101
	Είσοδο Πολυκατοικίας	90	87	86
	Οδός Κουμανούδη	126	121	119
Μεσημέρι	Εξωτερικός χώρος κατοικίας	69	66	66
	Εσωτερικός χώρος κατοικίας	97	83	81
	Είσοδο Πολυκατοικίας	66	63	62
	Οδός Κουμανούδη	68	65	65

Παρατηρείται ότι το πρωϊ στον εξωτερικό χώρο και στο επίπεδο του δρόμου (οδός Κουμανούδη) που αποτελεί έναν παράπλευρο και εσωτερικό δρόμο της λεωφόρου Αλεξάνδρας, τα επίπεδα συγκεντρώσεων είναι χαμηλότερα από τα αντίστοιχα της λεωφόρου, της τάξεως του 9%, όπως και αναμένετο, αφού η κυκλοφορία στην οδό Κουμανούδη είναι μειωμένη από την αντίστοιχη της λεωφόρου, αλλά και πάλι είναι αρκετά υψηλά λόγω του ότι δεν υπάρχει αρκετός αερισμός του δρόμου και η ημέρα αυτή είναι η ημέρα μεταφοράς σκόνης από την Αφρική. Ακολουθούν οι τιμές στον εξωτερικό χώρο του διαμερίσματος (5^{ος} όροφος) και στον εσωτερικό χώρο.

Όσον αφορά τις μετρήσεις το μεσημέρι της Τρίτης στον εξωτερικό χώρο και στο επίπεδο του δρόμου (οδός Κουμανούδη) τα επίπεδα συγκεντρώσεων είναι χαμηλότερα από τα αντίστοιχα της λεωφόρου, της τάξεως του 11%. Υπάρχει διαφορά των επιπέδων το πρωϊ σε σχέση με το μεσημέρι και το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται με τις μετρήσεις στη λεωφόρο Αλεξάνδρας (βλέπε Πίνακα 5.11).

Κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι ενώ οι συγκεντρώσεις στον εξωτερικό χώρο έχουν μειωθεί αισθητά της τάξης του 40-45% το μεσημέρι σε σχέση με το πρωϊ, στον εσωτερικό χώρο του διαμερίσματος υπάρχει πολύ μικρή μείωση της συγκέντρωσης λόγω του φαινομένου της παραμένουσας ρύπανσης και της καθυστέρησης ανταπόκρισης ενός εσωτερικού χώρου στη μείωση των επιπέδων ρύπανσης που συμβαίνουν στον εξωτερικό χώρο (Chaloulakou et al. 2002, 2003).

➤ Επιπλέον μετρήσαμε, στην λεωφόρο Αλεξάνδρας, τις συγκεντρώσεις που προκύπτουν από τη θέση του πεζού στο πεζοδρόμιο (γεινίαση με το δρόμο ή άμεση γεινίαση με τα κτίρια). Από τη σειρά μετρήσεων που διεξήχθησαν δεν αναδεικνύεται κάποια διαφοροποίηση στα μετρούμενα επίπεδα στα δύο σημεία του πεζοδρομίου. Στην ίδια διαπίστωση καταλήγουν και κάποιες από αντίστοιχες ευρωπαϊκές μελέτες (Kaur et al. 2005a), ενώ σε κάποιες άλλες διαπιστώνεται διαφορά στα μετρούμενα επίπεδα (Lung 2005). Η διάρκεια και το πλήθος των δικών μας μετρήσεων δεν επιτρέπει τη διατύπωση μιας ξακάθαρης διαφοροποίησης.

➤ Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα μικρό αλσύλιο παρακείμενο της λεωφόρου Αλεξάνδρας προς τη διεύθυνση της ανόδου. Το αλσύλιο αυτό χρησιμοποιείται ως υπαίθριος χώρος αναψυχής από τους κατοίκους της περιοχής, ιδίως για μικρά παιδιά και ηλικιωμένους. Η μέση απόσταση του αλσυλίου από το ρείθρο του πεζοδρομίου είναι 9m. Διαπιστώθηκε μια μέση μείωση του επιπέδου της συγκέντρωσης των σωματιδίων της τάξεως του 15% στο αλσύλιο σε σχέση με το ρείθρο και τα επίπεδα της συγκέντρωσης ήταν πάνω από τα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η μικρή μείωση και τα σχετικά υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων που μετρήθηκαν, δηλαδή πάνω από τα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που αποτελεί τη μέση εικοσιτετράωρη τιμή του προτύπου, οφείλονται στην άμεση γεινίαση του αλσυλίου με τις λωρίδες κυκλοφορίας της λεωφόρου.

➤ ***Οδός Μουστοξύδη και πάρκο***

Ενδεικτικές μετρήσεις στην οδό Μουστοξύδη κατέδειξαν παρόμοια επίπεδα συγκεντρώσεων με αυτά στην λεωφόρο Αλεξάνδρας για το ίδιο χρονικό διάστημα, της τάξεως των $60\text{-}63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Στο πεδίο του Άρεως παρατηρήθηκε μια αύξηση των συγκεντρώσεων. Το πιο σημαντικό που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι παρατηρήθηκε απόκλιση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} από τα $\text{PM}_{2.5}$ και τα PM_{1} , γεγονός που οφείλεται στη συμβολή διαφορετικού είδους πηγών εκπομπής των σωματιδίων. Στο πάρκο λόγω εργασιών που λάμβαναν μέρος υπήρχε στο έδαφος αρκετό χώμα και χαλίκια που οδήγησαν στην αύξηση των χονδρόκοκκων σωματιδίων PM_{10} , ενώ στο δρόμο οι πηγές προέρχονταν σε συντριπτικό ποσοστό από την κυκλοφορία. Έτσι η συμβολή των $\text{PM}_{2.5}$ στη συνολική μάζα των PM_{10} στους δρόμους κυκλοφορίας ανέρχεται σε ποσοστό 95-98%, ενώ στο χώρο του πεδίου Άρεως ανέρχεται σε ποσοστό 77-84%.

5.5 Γενικές Διαπιστώσεις

Ύστερα από συστηματική ανάλυση των μετρήσεων που έγιναν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, καταλήξαμε στις παρακάτω διαπιστώσεις.

1. Η έκθεση πεζών σε αέρια σωματιδιακή ρύπανση (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) σε κεντρικές λεωφόρους της Αθήνας με πυκνή κυκλοφορία, εκτιμάται ως *σοβαρή*. Η μέση ημερήσια συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τα επιτρεπτά όρια των προτύπων, λόγω της ειδικής χρήσης του μικροπεριβάλλοντος, αλλά πρέπει να γίνει μια σχετική αναφορά. Συγκεκριμένα η μέση ημερήσια συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} ανέρχεται στην τιμή των $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ξεπερνώντας την μέση ωριαία εικοσιτετράωρη τιμή του προτύπου που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τα σωματίδια PM_{10} και η οποία ανέρχεται στα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Από τις συνολικές ημέρες των μετρήσεων το ποσοστό των 58,3% υπήρξε πάνω από το επιτρεπτό όριο. Η μέση ημερήσια τιμή της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2.5}$ ανέρχεται στην τιμή των $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα εικοσιτετράωρα πρότυπα της US-EPA παρατηρήθηκαν υπερβάσεις του επιτρεπτού ορίου των $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για όλες τις ημερήσιες μετρήσεις μας. Το γεγονός αυτό προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία για την ανθρώπινη υγεία.

Ιδίως τις πρωινές ώρες των μετρήσεων παρατηρούνται ακόμα υψηλότερα επίπεδα έκθεσης για τα αιωρούμενα σωματίδια σε σύγκριση με τις μεσημεριανές ώρες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, σε ποσοστό έως και 33% υψηλότερα. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται το γεγονός ότι οι βραχυχρόνιες εκθέσεις πεζών, διάρκειας ακόμη και μερικών λεπτών, σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης, έχουν μεγάλη σημασία για την υγεία του πληθυσμού και γι' αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν και τέτοιου είδους μετρήσεις. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι παρατηρήθηκε σημαντική συστηματική αύξηση των καταγραφόμενων επιπέδων συγκέντρωσης στη διασταύρωση της λεωφόρου Αλεξάνδρας με την κεντρική οδό Ιπποκράτους. Η αύξηση αυτή σε σχέση με την προηγούμενη και την επόμενη συγκέντρωση ανέρχεται σε ποσοστό της τάξης 16% - 41%.

Επίσης τα επίπεδα συγκέντρωσης στην πλευρά της ανόδου ήταν αυξημένα σε σχέση με τα αντίστοιχα στην πλευρά της καθόδου (13-16%).

Η σύγκριση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων, που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, με άλλες αντίστοιχες ευρωπαϊκές μελέτες (βλέπε Πίνακα 5.27) δείχνει ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ υψηλότερα σε σχέση με τα επίπεδα που προέκυψαν από τις άλλες μελέτες.

Σημαντική διαφορά στα επίπεδα έκθεσης παρατηρείται τις εργάσιμες ημέρες της εβδομάδας από τα αντίστοιχα τα Σαββατοκύριακα. Η έκθεση αφορά υποομάδες πληθυσμού. Την Κυριακή συγκεκριμένα μετατίθεται ο χρόνος που υπάρχουν οι υψηλές συγκεντρώσεις, λόγω του ότι είναι διαφορετικές οι συνήθειες-συμπεριφορά του κοινού και κατεπέκταση διαφορετικές οι ώρες κίνησης των οχημάτων στον δρόμο. Διαφορετικός ο αριθμός των οχημάτων αλλά και τα διαστήματα στα οποία παρατηρούνται οι υψηλές συγκεντρώσεις.

2. Και οι δύο παράμετροι που επηρεάζουν τα μετρούμενα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων, η ένταση πηγών και οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα της εργασίας μας. Οι σημαντικότεροι παράγοντες επηρεασμού των επιπέδων από τις μετεωρολογικές συνθήκες φαίνεται να είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Συγκεκριμένα οι βόρειοι άνεμοι καθαρίζουν την ατμόσφαιρα, ενώ οι νότιοι την επιβαρύνουν. Επιπλέον η μείωση της ταχύτητας του ανέμου επιφέρει αύξηση των συγκεντρώσεων. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται για την ημέρα μεταφοράς σκόνης από την Αφρική, την Τρίτη 05/04/2011, στην οποία τα μετρούμενα επίπεδα ήταν αυξημένα από τη μέση ημερήσια συγκέντρωση, σε ποσοστό της τάξης 35-45%. Όσον αφορά την ένταση πηγών, ημέρες με παρόμοιες μετεωρολογικές συνθήκες είχαν διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης λόγω της κυκλοφορίας. Ειδικότερα η εσωτερική σύνθεση του στόλου των πηγών διαδραματίζει μεγάλο ρόλο. Πολλά περισσότερα ταξί που είναι ιδιαιτέρως ρυπογόνα λόγω χρήσης πετρελαίου ντίζελ, όταν κυκλοφορούν στο δρόμο οδηγούν στην αύξηση των συγκεντρώσεων.
3. Παρόλο που κάποιες μελέτες καταλήγουν σε διαφορά στα μετρούμενα επίπεδα των συγκεντρώσεων που προκύπτουν από τη θέση του πεζού στο πεζοδρόμιο, γειννίαση με το δρόμο ή άμεση γειννίαση με τα κτίρια (Lung et al. 2005) (αρκετά μεγάλο πλάτος πεζοδρομίου σε σχέση με το δικό μας), στη μελέτη αυτή δεν παρατηρήθηκε κάποια διαφοροποίηση στα μετρούμενα επίπεδα στα δύο σημεία

του πεζοδρομίου. Η διάρκεια και το πλήθος των δικών μας μετρήσεων, καθώς και η διαφορά στο πλάτος των πεζοδρομίων, δεν επιτρέπει τη διατύπωση μιας ξακάθαρης διαφοροποίησης.

4. Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων που προέκυψαν από τις δειγματοληπτικές μετρήσεις στους δύο υπαίθριους χώρους αναψυχής (το αλσύλιο και το πεδίο του Άρεως) είναι αρκούτως σοβαρά. Τα επίπεδα είναι υψηλά τόσο στο αλσύλιο λόγω της άμεσης γειννίασης με τη λεωφόρο όσο και στο πάρκο που βρίσκεται στην ίδια περιοχή. Στο αλσύλιο διαπιστώθηκε μια μικρή μείωση των επιπέδων (15%) από τα αντίστοιχα στη λεωφόρο, αλλά ήταν υψηλά, ξεπερνώντας τα επιτρεπτά όρια των προτύπων. Στο πάρκο δε διαπιστώθηκε διαφορά από τη λεωφόρο. Η αλλαγή της σύστασης πηγών επιφέρει αλλαγή της ποσοστιαίας σύστασης των αιωρούμενων σωματιδίων. Είναι λοιπόν εύλογο το ερώτημα αν όντως αποτελούν ή όχι υπαίθριους χώρους αναψυχής!!!
5. Όσον αφορά τις μετρήσεις στους παράπλευρους δρόμους διαπιστώθηκαν παρόμοια επίπεδα με αυτά της κεντρικής λεωφόρου. Σε μια κατοικία τα μετρούμενα επίπεδα δεν είναι καθόλου ευκαταφρόνητα από το δρόμο, στην οποία οι άνθρωποι καταναλώνουν μεγάλο ποσοστό του χρόνου τους καθημερινά.
6. Επισημαίνουμε ότι οι χρήστες/εργαζόμενοι στους δρόμους (street sellers) (π.χ. περιπτεράς, καστανάς, πλασιέ), που αναγκάζονται να παραμένουν για αρκετό χρονικό διάστημα στα πλαίσια της εργασίας τους στους δρόμους, αποτελούν την ομάδα υψηλού κινδύνου έκθεσης στα αιωρούμενα σωματίδια.

5.6 Γενικά Μέτρα – Προτάσεις

- ❖ Σημαντική η καλή συντήρηση των οχημάτων, όχι μόνο των ιδιωτικών αλλά και των δημόσιων. Πολύ καλή συντήρηση για τα ταξί που είναι ιδιαίτερα ρυπογόνα (χρήση πετρελαίου ντίζελ) και για τα μηχανάκια.
- ❖ Η απόσυρση των παλιών οχημάτων και η ανανέωση του στόλου.
- ❖ Σε περιβάλλον τέτοιων δρόμων να μειώνεται κατά το δυνατόν η διάρκεια παραμονής του πληθυσμού.
- ❖ Να δοθούν συγκεκριμένα κίνητρα για χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς (αύξηση της συνέπειας και της συχνότητας των δρομολογίων), έτσι ώστε να μειωθεί η χρήση των ιδιωτικών οχημάτων και κατεπέκταση να ελαττωθεί η κυκλοφορία οχημάτων, γεγονός που θα οδηγήσει στη μείωση των εκπομπών.
- ❖ Να υπάρχει έλεγχος της ποιότητας των καυσίμων, για τυχόν νοθεία της περιεκτικότητας σε θείο, διότι το SO₂ που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση αποτελεί βασική πηγή δευτερογενούς σχηματισμού σωματιδίων.
- ❖ Να τηρείται ο Κώδικας Οδικής Κυκλοφορίας, καθώς και να διαμορφωθούν μικροί δακτύλιοι κυκλοφορίας κοντά σε περιοχές όπου κινούνται ευαίσθητες σε εκθέσεις ομάδες πληθυσμού (νοσοκομεία, σχολεία).
- ❖ Στον καιρό δεν μπορούμε να επεμβούμε αλλά προφανώς ο καλός θεός άνεμος του λεκανοπεδίου Αττικής, ο Βοριάς υποβοηθεί τη σημαντική μείωση των επιπέδων ρύπανσης στις κεντρικές λεωφόρους της Αθήνας, καθιστώντας έτσι πιο άνετη την κίνηση των πεζών.

5.7 Προτάσεις για επέκταση της εργασίας

Για επιβεβαίωση άλλων ευρωπαϊκών μελετών ότι η έκθεση πεζών στα αιωρούμενα σωματίδια είναι έως και πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέσα σε οχήματα (Gulliver and Briggs 2007, Briggs 2008), κρίνεται σκόπιμη στο μέλλον μια συστηματική μελέτη έκθεσης του κοινού σε αιωρούμενα σωματίδια σε διάφορες κατηγορίες μέσων μεταφοράς, ιδιωτικά και δημόσια, στην περιοχή της Αθήνας. (Μία τέτοια συστηματική μελέτη για την περιοχή της Αθήνας έχει γίνει από Chaloulakou et al. 2003, και αφορά την έκθεση του πληθυσμού σε CO).

Προτείνεται επίσης να πραγματοποιηθούν μετρήσεις επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδιακών κλασμάτων και σε άλλες χαρακτηριστικές αρτηρίες πυκνής κυκλοφορίας στο κέντρο της Αθήνας, όπως για παράδειγμα στη λεωφόρο Ακαδημίας που αποτελεί μια κεντρική αρτηρία, μονής κατεύθυνσης (ανόδος) και αρκετής κλίσης για τα διερχόμενα οχήματα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adgate J.L., Ramachandran G., Pratt G.C., Waller L.A., Sexton K., “Spatial and Temporal Variability in Outdoor, Indoor, and Personal PM_{2.5} Exposure”, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 3255-3265, 2002.
2. American Lung Association of Washington (ALAW), “Facts about Particulate Matter Air Pollution”, <http://alaw.org/pmfact.html>, 2004.
3. Arnold, S.J., ApSimon, H., Barlow, J., Belcher, S., Bell, M., Boddy, J.W., et al., 2004. Introduction to the DAPPLE Air Pollution Project. *Science of The Total Environment* 332 (1–3), 139.
4. Atmospheric Research and Information Center (ARIC), “ARIC Briefing Note: Particulate Matter”, <http://doc.mmu.ac.uk/aric/notes/bn52.htm>, 1997.
5. Brauer M., Hrubá F., Mihaliková E., Fabianová E., Misković P., Plzíkova A., Lendacká M., Vandenberg J., Cullen A., “Personal Exposure to Particles in Banská Bystrica, Slovakia”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental*, Vol. 10, pp. 478-487, 2000(b).
6. Briggs, D.J., de Hoogh, K., Morris, C., Gulliver, J., 2008. Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution. *Environment International* 34, 12-22.
7. Buonanno, G., Fuoco, F.C., Stabile, L., 2011. Influential parameters on particle exposure of pedestrians in urban microenvironments. *Atmospheric Environment* 45, 1434-1443.
8. CAFE, 2004. Clean Air for Europe (CAFE) Working Group on Particulate Matter, Second Position Paper on Particulate Matter.
9. Chaloulakou, A., Mavroidis, I. “Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school. Evaluation of an indoor air quality model”, *Atmospheric Environment*, Vol. 36 (11), pp. 1769-1781, 2002.
10. Chaloulakou, A., Mavroidis, I., Duci, A., “Indoor and outdoor carbon monoxide concentration relationships at different microenvironments in the Athens area”, *Chemosphere*, Vol. 52 (6), pp. 1007-1019, 2003.
11. Ciccone G., “Road Traffic and Adverse Respiratory Effects in Children”, *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 55, pp. 771-778, 1998.
12. Colville, R.N., Kaur, S., Britter, R., Robins, A., Bell, M.C., Shallcross, D., et al., 2004. Sustainable development of urban transport systems and human exposure to air pollution. *Science of The Total Environment* 334–335, 481.
13. Dennekamp, M., Mehenni, O., Cherrie, J., Seaton, A., 2002. Exposure to ultrafine particles and PM_{2.5} in different microenvironments. *Annals of Occupational Hygiene* 46 (Suppl. 1), 412.

14. Dennekamp M., Howarth S., Dick C.A.J., Cherrie J.W., Donaldson K., Seaton A., “Ultrafine Particles and Nitrogen Oxides Generated by Gas and Electric Cooking”, *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 58, pp. 511-516, 2001.
15. Dua S.K., Hopke P.K., “Hygroscopic Growth of Assorted Indoor Aerosols”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 24, pp. 151-160, 1996.
16. Duci, A., Chaloulakou, A., Spyrellis, N., 2003. Exposure to carbon monoxide in the Athens urban area during commuting. *The Science of the Total Environment* 309 (1–3), 47.
17. Ebel S.T., Wilson W.E., Brauer M., “Exposure to Ambient and Nonambient Components of Particulate Matter. A Comparison of Health Effects”, *Epidemiology*, Vol. 16(3), pp. 396-405, 2005.
18. E.C. Technical Working Group on Particles, “Ambient Air Pollution by Particulate Matter - Draft Position Paper”, Version 4.0, 1996.
19. English P., Neutra R., Scalf R., Sullivan M., Waller L., Zhu L., “Examining Association between Childhood Asthma and Traffic Flow using a Geographic Information System”, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 107, pp. 761-767, 1999.
20. Environmental Protection Agency’s (EPA) Office of Research and Development (ORD), “Air Quality Criteria for Particulate Matter”, (EPA/600/P-95/001aF-cF), *Federal Register* 61(89): 20522, 1996.
21. EPA, “Air Quality Criteria for Particulate Matter”, Vol. 1, Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1996.
22. European Environment Agency & World Health Organization, “Air and Health-Some Common Air Pollutants”, <http://www.eea.eu.int/Document/Topicrep/air/AirHealth/air%20pollutants.htm>1999(a).
23. European Environment Agency & World Health Organization, “Air and Health-Sources of Air Pollution”, <http://www.eea.eu.int/Document/Topicrep/air/Air Health/sources.htm>, 1999(b).
24. European Commission Environment, “Air Quality, Time Extensions for PM₁₀”, http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/time_extensions.htm.
25. Ελληνικό Ίδρυμα Καρδιολογίας, “Στους ρυθμούς της καρδιάς”, Τόμος 20, τεύχος 226, Μάρτιος – Απρίλιος 2011.
26. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, “Πρόταση Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού Αέρα και Καθαρότερου Αέρα για την Ευρώπη”, COM(2005) 447 τελικό 2005/0183 (COD) SEC(2005) 1133, 2005.
27. Fan Z.H., Liou P., Weschler C., Fiedler N., Kipen H., Zhang J.F., “Ozone – Initiated Reactions with Mixtures of Volatile Organic Compounds under Simulated

Indoor Conditions”, *Environmental Science and Technology*, Vol. 37, pp. 1811-1821, 2003.

28. Farhat S.C.L., Paulo R.L.P., Shimoda T.M., Conceicao G.M.S., Lin C.A., Braga A.L.F., Warth M.P.N., Saldiva P.H.N., “Effect of Air Pollution on Pediatric Respiratory Emergency Room Visits and Hospital Admissions”, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, Vol. 38, pp. 227-235, 2005.

29. Gauderman W.J., McConnell R., Gilliland F., London S., Thomas D., Avol E., Vora H., Berhane K., Rappaport E.B., Lurmann F., Margolis H.G., Peters J., “Association Between Air Pollution and lung Function Growth in Southern California Children”, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 162, pp. 1383-1390, 2000.

30. Godleski J.J., Verrier R.L., Koutrakis P., Catalano P., “Mechanisms of Morbidity and Mortality from Exposure to Ambient Air Particles”, *Research Report 91*, Cambridge, MA, Health Effects Institute, 2000.

31. Godleski J.J., Clarke R.W., Coull B.A., Saldiva P.H.N., Jiang N.F., Lawrence J., Koutrakis P., “Composition of Inhaled Urban Air Particles Determines Acute Pulmonary Responses”, *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 46(Suppl. 1), pp. 419 – 424, 2002.

32. Gold D.R., Litonjua A., Schwartz J., Lovett E., Larson A., Nearing B., Allen G., Verrier M., Cherry R., Verrier R., “Ambient Pollution and Heart Rate Variability”, *Circulation*, Vol. 101(11), pp. 1267-1273, 2000.

33. Goldberg M.S., Burnett R.T., Bailar J.C., Brook J., Bonvalot Y., Tamblyn R., Singh R., Valois M.F., Vincent R., “The Association between Daily Mortality and Ambient Air Particle Pollution in Montreal, Quebec, 2. Cause-Specific Mortality”, *Environmental Research*, Vol. A86, pp. 26-36, 2001.

34. Gordon T., Nadziejko C., Chen L.C., Schlesinger R., “Effects of Concentrated Ambient Particles in Rats and Hamsters: An Exploratory Study”, *Research Report 93*, Cambridge, MA, Health Effects Institute, 2000.

35. Gramotnev G., Ristovski Z., “Experimental Investigation of Ultrafine Particle Size Distribution near a Busy Road”, *Atmospheric Environment*, Vol. 38(12), pp. 1767-1776, 2004.

36. Greaves, St., Issarayangyun, Th., Liu, Q., 2008. Exploring variability in pedestrian exposure to fine particulates (PM_{2.5}) along a busy road. *Atmospheric Environment* 42, 1665-1676.

37. Gulliver, J., Briggs, D.J., 2004. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments. *Atmospheric Environment* 38, 1-8.

38. Gulliver, J., Briggs, D.J., 2007. Journey-time exposure to particulate air pollution. *Atmospheric Environment* 41, 7195-7207.

39. Halios C.H., Helmis C.G., "On the Estimation of Characteristic Indoor Air Quality Parameters using Analytical and Numerical Methods", *Science of the Total Environment*, Vol. 381(1-3), pp. 222-232, 2007.
40. Harrison R.M., Yin J., "Particulate Matter in the Atmosphere: Which Particles Properties are Responsible for its Effects on Health", *Science of the Total Environment*, Vol. 249, pp. 85-101, 2000.
41. Howard de Sessa, "A drive for the health benefits of walking", *The American Journal of Medicine*, Vol. 109, Issue 2, pp. 160-161, 2000.
42. Hoek G., Dockery D.W., Pope A., Neas L., Roemer W., Brunekreef B., "Association between PM₁₀ and Decrements in Peak Expiratory Flow Rates in Children, Reanalysis of Data from Five Panel Studies", *European Respirator Journal*, Vol. 11, pp. 1307-1311, 1998.
43. ICRP, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection", ICRP Publication 66, Pergamon Press, Oxford, 1994.
44. Jones A.P., "Indoor Air Quality and Health", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4535-4564, 1999.
45. Junker M., Kasper M., Roosli M., Camenzind M., Kunzli N., Monn C., Theis G., Braun-Fahrlander C., "Airborne Particle Number Profiles, Particle Mass, Distributions and Particle – Bound PAH Concentrations within the City Environment of Basel", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 3171-3181, 2000.
46. Katsouyanni K., Touloumi G., Samoli E., Gryparis A., La Tertre A., Monopolis Y., Rossi G., Zmirou D., Ballester F., Boumghar A., Anderson H.R., Wojtyniak B., Paldy A., Braunstein R., Pekkanen J., Schindler C., Schwartz J., "Confounding and Effect Modification in the Short-Term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project", *Epidemiology*, Vol. 12(5), pp. 521-531, 2001.
47. Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., Colvile, R., 2005a. Pedestrian exposure to air pollution along a major road in Central London, UK. *Atmospheric Environment* 39, 7307-7320.
48. Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., Colvile, R., 2005b. Personal exposure of street canyon intersection users to PM_{2.5}, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK. *Atmospheric Environment* 39, 3629-3641.
49. Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., Colvile, R., 2007. Review. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment* 41, 4781-4810.
50. Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M., 2009. Determinants of Personal Exposure to PM_{2.5}, ultrafine particle counts and CO in a Transport Microenvironment. *Environmental Science & Technology* 43, 4737-4743.

51. Kavouras I.G., Joy L., Koutrakis P., Stephanou E.G., Oyola P., "Measurement of Particulate Aliphatic and Polynuclear Aromatic Hydrocarbons in Santiago de Chile: Source Reconciliation and Evaluation of Sampling Artifacts", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4977-4986, 1999.
52. Koistinen K.J., Hanninen O., Rotko T., Edwards R.D., Moschandreas D., Jantunen M.J., "Behavioral and Environmental Determinants of Personal Exposures to PM_{2.5} in EXPOLIS – Helsinki, Finland", *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 2473-2481, 2001.
53. Koloutsou-Valais S., "Global Issue; Aerosol particles and Global Climate Change", University of Illinois at Urban-Champaign, http://www.gnest.org/Global_Issues/Aerosol.htm, 1999.
54. Koutrakis P., Briggs S.L.K., Leaderer B.P., "Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York", *Environmental Science and Technology*, Vol. 26(3), pp. 521-527, 1992.
55. Lai A.C.K., "Particle Deposition Indoors: A Review", *Indoor Air*, Vol. 12, pp. 211-214, 2002.
56. Liu D.L., Nazaroff W.W., "Modeling Pollutant Penetration across Building Envelopes", *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 4451-4462, 2001.
57. Long C.M., Suh E.E., Catalano P.J., Koutrakis P., "Using Time- and Size-Resolved Particulate Data to Quantify Indoor Penetration and Deposition Behavior", *Environmental Science and Technology*, Vol. 35, pp. 2089-2099, 2001(a).
58. Long C.M., Suh H.H., Kobzik L., Catalano P.J., Ning Y.Y., Koutrakis P., "A Pilot Investigation of the Relative Toxicity of Indoor and Outdoor Fine Particles: In Vitro Effects of Endotoxin and other Particulate Properties", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 109, pp. 1019-1026, 2001(b).
59. Long C.M., Suh E.E., Koutrakis P., "Characterization of Indoor Particle Sources Using Continuous Mass and Size Monitors", *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50, pp. 1236-1250, 2000.
60. Lunden M.M., Revzan K.L., Fischer M.L., Thatcher T.L., Littlejohn D., Hering S.V., Brown N.J., "The Transformation of Outdoor Ammonium Nitrate Aerosols in the Indoor Environment", *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 5633-5644, 2003(a).
61. Lung, S.C., Kao, H.Y., Peng, C.W., 2005. Pedestrians' exposure concentrations of PM_{2.5}, ultrafine particles and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in Taiwan at intersections with different surroundings. Unpublished manuscript.
62. Magliano K.M., Hugues V.M., Chinkin L., Coe D.L., Haste T.L., Kumar N., Lurmann F.W., "Spatial and Temporal Variations in PM₁₀ and PM_{2.5} Source Contributions and Comparison to Emissions during the 1995 Integrated Monitoring Study", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4757-4773, 1999.

63. Mattias-Maser S., Obolkin V., Khodzer T., Jaeniche R., “Seasonal Variation of Primary Biological Aerosol Particles in the Remote Continental Region of Lake Baikal / Siberia”, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 3805-3811, 2000.
64. McCreanor, J., Stewart-Evans, J., Malliarou, E., Han, I., Zhang, J., Svartengren, M., et al., 2005. Health effects of diesel exhaust in asthmatic patients: a real-world study in London. Paper presented at the Ninth Annual UK Review Meeting on Outdoor and Indoor Air Pollution Research, Institute for Environment and Health, Leicester, UK.
65. Michaels R.A., Kleinman M.T., “Incidence and Apparent Health Significance of Brief Airborne Particles Excursions”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 32, pp. 93-105, 2000.
66. Milloy S.J., “Scientists at Toxicology Meeting Question Data Adequacy for PM Standard”, *Bureau of National Affairs Daily Environment Report* (9 March 1998), <http://www.alaw.org/pmfact.html>, 1998.
67. Milner J.T., Dimitroulopoulou C., ApSimon H.M., “Indoor Concentrations in Buildings from Sources Outdoors” in *ADMLC Annual Report 2004/2005*, Atmospheric Dispersion Modeling Liaison Committee, U.K., 2005.
68. Morawska L., Thomas S., Hofmann W., Ristovski Z., Jamriska M., Rettenmoser T., Kagerer S., “Exploratory Cross-Sectional Investigations on Ambient Submicrometer Particles in Salzburg, Austria”, *Atmospheric Environment*, Vol. 38(21), pp. 3529-3533, 2004.
69. Μπεργελές Γ., «Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης», Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων μηχανικών, Αθήνα 2005.
70. National Research Council – Committee on Research Priorities for Airborne Particulate Matter, “Research Priorities for Airborne Particulate Matter”, National Academy Press, Washington, DC, Vol. 1, 1998.
71. Natural Resources Defense Council, “Air Pollution FAQ”, Natural Resources Defense Council, <http://mail.igc.apc.org/nrdc/faqs/aibrefaq.html>, 1996(a).
72. Natural Resources Defense Council, “Danger in the Air: Thousands of Early Deaths could be Averted with Cleaner Air Standard”, Natural Resources Defense Council, <http://www.nrdc.org/find/aibresum.html>, 1996(b).
73. Naumova Y.Y., Offenberg J.H., Eisenreich S.J., Meng Q.Y., Polidori A., Turpin B.J., Weisel C.P., Morandi M.T., Colome S.D., Stock T.H., Winer A.M., Alimokhtari S., Kwon J., Maberti S., Shendell D., Jones J., Farrar C., “Gas / Particle Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coupled Outdoor / Indoor Atmospheres”, *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 703-719, 2003.
74. Nazaroff W.W., “Indoor Particle Dynamics”, *Indoor Air*, Vol. 14(Suppl. 7), pp. 175-183, 2004.

75. Nazaroff W.W., Klepeis N.E., “Environmental Tobacco Smoke Particles”, *Indoor Environment: Airborne Particles and Settled Dust*, Morawska L., Salthammer T. Eds., pp. 245-274, 2004.
76. Nemmar A., Hoylaerts M.F., Hoet P.H.M., Nemery B., “Possible Mechanisms of the Cardiovascular Effects of Inhaled Particles: Systematic Translocation and Prothrombotic Effects”, *Toxicology Letters*, Vol. 149(1-3), pp. 243-253, 2004.
77. Offenberg J.H., Baker J.E., “Aerosol Size Distributions of Elemental and Organic Carbon in Urban and Over Water Atmospheres”, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 1509-1517, 2000.
78. Oglesby L., Kunzli N., Roosli M., Fahriander C.B., Mathys P., Stern W., Jantunen M., Kousa A., “Validity of Ambient Levels of Fine Particles as Surrogate for Personal Exposure to Outdoor Air Pollution – Results of the European EXPOLIS-EAS Study (Swiss Center Basel)”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50, pp. 1251-1261, 2000.
79. Ohta S., Hori M., Yamagata S., Murao N., “Chemical Characterization of Atmospheric Fine Particles in Sapporo with Determination of Water Content”, *Atmospheric Environment*, Vol. 32(6), pp. 1121-1125, 1998.
80. Olhstrom M.O., Lehtinen K., Moisio M., Jokiniemi J.K., “Fine Particle Emissions of Energy Production in Finland”, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 3701-3711, 2000.
81. Ott W., Wallace L., Mage D., “Predicting Particulate (PM₁₀) Personal Exposure Distributions Using a Random Component Superposition Statistical Model”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50, pp. 1390 – 1406, 2000.
82. Ozkaynak H., Xue J., Spengler J., Wallace L., Pellizzari E., Jenkins P., “Personal Exposure to Airborne Particles and Metals Results from the Particle TEAM Study in Riverside, California”, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol. 6, pp. 57-78, 1996.
83. Penttinen P., Timonen K.L., Tiittanen P., Mirme A., Ruuskanen J., Pekkanen J., “Ultrafine Particles in Urban Air and Respiratory Health among Adult Asthmatics”, *European Respiratory Journal*, Vol. 17, pp. 428-435, 2001.
84. Peters, A., von Klot, S., Heier, M., Trentinaglia, I., Hormann, A., Wichmann, H.E., et al., 2004. Exposure to traffic on the onset of myocardial infarction. *New England Journal of Medicine* 351 (17), 1721-1730.
85. Peters A., “Air Pollution and Incidence of Cardiac Arrhythmia”, *Epidemiology*, Vol. 11, pp. 11-17, 2000.
86. Polidori A., Arhami M., Sioutas C., Delfino R.J., Allen R., “Indoor / Outdoor Relationships, Trends, and Carbonaceous Content of Fine Particulate Matter in Retirement Homes of the Los Angeles Basin”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 57, pp. 366-379, 2007.

87. Pope C.A., Dockery D.W., "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect", *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 56, pp. 709-742, 2006.
88. Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K., Thurston G.D., "Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution", *Journal of the American Medical Association*, Vol. 287(9), pp. 1132-1141, 2002.
89. Pope C.A., "Review: Epidemiological Basis for Particulate Air Pollution Health Standards", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 32, pp. 4-14, 2000(a).
90. Pope III C.A., "Epidemiology of Fine Particulate Air Pollution and Human Health: Biologic Mechanisms and Who's at Risk", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108(Suppl. 4), pp. 713-723, 2000(b).
91. Querol X., Alastuey A., Lopez-Soler A., Plana F., "Levels and Chemistry of Atmospheric Particulates induced by a Spill of Heavy Metal Mining Wastes in Donana Area, Southwest Spain", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 239-253, 2000.
92. Raes F., van Dingenen R., Vignati E., Wilson J., Putaud J.P., Seinfeld J.S., Adams P., "Formation and Cycling of Aerosols in the Global Troposphere", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 4215-4240, 2000.
93. Riley W.J., McKone T.E., Lai A.C., Nazaroff W.W., "Indoor Particulate Matter of Outdoor Origin: Importance of Size-Dependent Removal Mechanisms", *Environmental Science and Technology*, Vol. 37, pp. 200-207, 2002.
94. Romieu I., Meneses F., Ruiz-Velazco S., Sierra-Monge J.J., Huerta J., White M.C., Etzel R., "Effects of Air Pollution on the Respiratory Health of Asthmatic Children Living in Mexico City", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 154, pp. 300-307, 1996.
95. Ρήγας Φ., "Επιστήμη και Τεχνολογία Περιβάλλοντος", Αθήνα, 1997.
96. Saldiva P.H.N., Clarke R.W., Coull B.A., Stearns R., Lawrence J., Koutrakis P., Suh H., Tsuda A., Godleski J.J., "Acute Pulmonary Inflammation Induced by Concentrated Ambient Air Particles is Related to Particle Composition", *American Journal of Critical Care Medicine*, Vol. 165, pp. 1610-1617, 2002.
97. Sarwar G., Corsi R., Allen D., Weschler C., "The Significance of Secondary Organic Aerosol Formation and Growth in Buildings: Experimental and Computational Evidence", *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 1365-1381, 2003.
98. Schwartz J., 2000. Is There Harvesting in the Association of Airborne Particles with Daily Deaths and Hospital Admissions? *Epidemiology*, Vol. 12, pp. 55-61.
99. Schweizer, C., Edwards, R.D., Bayer-Oglesby, L., et al., 2005. Time Spent in Traffic across Europe. *Environmental Health Perspectives*, submitted for publication.

100. Seinfeld J.H., Pandis S.N., "Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.
101. Spengler J.D., Dockery D.W., Turner W.A., Wolfson J.M., Ferris B.G., "Long-Term Measurements Of Respirable Sulfates and Particles Inside and Outside Homes", *Atmospheric Environment*, Vol. 15, pp. 23-30, 1981.
102. Σίσκος Π., Σκούλλος Μ., «Περιβαλλοντική Χημεία Ι», Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Χημείας, Αθήνα 1992.
103. Thatcher T.L., Lunden M.M., Revzan K.L., Sextro R.G., Brown N.J., "A Concentration Rebound Method for Measuring Particle Penetration and Deposition in the Indoor Environment", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 37, pp. 847-864, 2003.
104. Thatcher T.L., Lai A.C.K., Moreno-Jackson R., Sextro R.G., Nazaroff W.W., "Effect of Room Furnishings and Air Speed on Particle Deposition Rates Indoors", *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 1811-1819, 2002.
105. U.S. Environmental Protection Agency, "40 CFR Part 50; National Ambient Air Quality Standards for Particulate matter; Final Rule", *Federal Register/ Vol.62, No.138/ Friday, July 18 1997/Prepublication, 1997(a)*
106. U.S. Environmental Protection Agency, "Current and Revised Standards for Ozone and Particulate Matter", <http://www.epa.gov/oar/oaqps/ozpmbro/current.html>, 1997(b).
107. U.S. Environmental Protection Agency, "What Changes Were Made to the Particulate Matter Standards", <http://www.epa.gov/oar/oaqps/ozpmbro/partstan.html>, 1997(c).
108. Valavanidis A., Salica A., Theodoropoulou A., "Generation of Hydroxy Radicals by Urban Suspended Particulate Matter. The Role of Iron Ions", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 2379-2386, 2000.
109. Van Vliet P., Knape M., de Hartog J., Janssen N., Harssema H., Brunekreef B., "Motor Vehicle Exhaust and Chronic Respiratory Symptoms in Children Living near Freeways", *Environmental Research*, Vol. 74, pp. 122-132, 1997.
110. Veli-Matti K., Kimmo T., Risto H., "Chemistry of the Sea-Salt Particles in the Summer Antarctic Atmosphere", *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 2817-2825, 2000.
111. Villalobos-Pietrini R., Blanco S., Gomez-Arroyo S., "Mutagenicity Assessments of Airborne Particles in Mexico City", *Atmospheric Environment*, Vol. 29, pp. 517-524, 2000.

112. Von Klot S., Wolke G., Tuch T., Heinrich J., Dockery D.W., Schwartz J., Kreyling W.G., Wichmann H.E., Peters A., “Increased Asthma Medication Use in Association with Ambient Fine and Ultrafine Particles”, *European Respiratory Journal*, Vol. 20, pp. 691-702, 2002.
113. Wainman T., Zhang J.F., Weschler C.J., Lioy P.J., “Ozone and Limonene in Indoor Air: A Source of Submicron Particle Exposure”, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, pp. 1139-1145, 2000.
114. Weschler C.J., “Indoor / Outdoor Concentrations Exemplified by Processes that Depend on an Organic Compound’s Saturation Vapor Pressure”, *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 5455-5465, 2003.
115. WHO, “Air Quality Guidelines for Europe”, 2nd Edition, World Health Organization, Copenhagen, 2000.
116. Wong, A., 2002. Personal exposure to air pollution from transport sources. M.Sc. Thesis, University of Bradford.
117. Woo K.S., Chen D.R., Pui D.Y.H., McMurry P.H., “Measurement of Atlanta Aerosol Size Distribution: Observations of Ultrafine Particle Events”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 34(1), pp. 75-87, 2001.
118. Wu C.F., Delfino R.J., Floro J.N., Quintana P.J.E., Samimi B.S., Kleinman M.T., Allen R.W., Liu L.J.S., “Exposure Assessment and Modeling of Particulate Matter for Asthmatic Children Using Personal Nephelometers”, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 3457-3469, 2005.
119. Χαλουλάκου Α., Σημειώσεις μαθήματος «Ποιότητα περιβάλλοντος και νομοθεσία», μεταπτυχιακού προγράμματος «Συστήματα διαχείρισης ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2010.
120. Χαλουλάκου Α., Σημειώσεις μαθήματος «Ασφάλεια και υγιεινή της εργασίας», μεταπτυχιακού προγράμματος «Συστήματα διαχείρισης ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2010.
121. Yamasoe M.A., Artaxo P., Miguel A.H., Allen A.G., “Chemical Composition of Aerosol Particles from Direct Emissions from Vegetation Fires in the Amazon Basin: Water Soluble Species and Trace Elements”, *Atmospheric Environment*, Vol. 34, pp. 1641-1653, 2000.
122. Zhao, L., Wang, X., He, Q., Wang, H., Sheng, G., Chan, L.Y., Fu, J., Blake, D.R., 2004. Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM10 and CO while walking along streets in urban Guangzhou, China. *Atmospheric Environment* 38, 6177–6184.
123. Ζιώμας Ι., «Ατμόσφαιρα-Ατμοσφαιρική ρύπανση», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2007.