



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

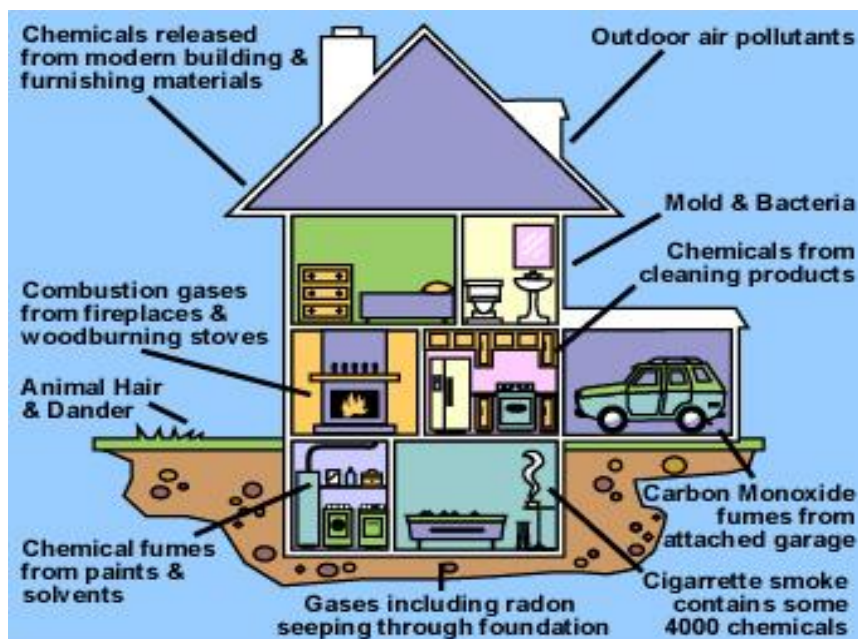


Πανεπιστήμιο Πειραιά
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης
& Τεχνολογίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΥΠΟΟΜΑΔΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Α.
ΧΑΛΟΥΛΑΚΟΥ



ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΜΠΣ/0730

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η Διπλωματική μου Εργασία είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς αλληλεπιδράσεων με διάφορα άτομα, καθένα από τα οποία συνέβαλλε στην εξέλιξή της. Αξίζει, λοιπόν, να αφιερώσω την παρούσα σελίδα για να ευχαριστήσω ειλικρινά τα άτομα αυτά για την βοήθεια την οποία απλόχερα μου προσέφεραν.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κα. Χαλουλάκου που με εμπιστεύτηκε να ξεκινήσω την παρούσα Διπλωματική Εργασία και μου προσέφερε πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη όποτε τη χρειαζόμουν.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την κα. Ε.Διαπούλη για την ιδιαίτερη συμβολή και τον καταλυτικό της ρόλο στο να αναπτύξω ικανότητες που πίστευα πως δε ν έχω και να διευρύνω τις γνώσεις μου στο επιστημονικό πεδίο της προστασίας του περιβάλλοντος.

Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στα αγαπημένα μου πρόσωπα, στους γονείς μου και στη γυναίκα μου, που αποδέχτηκαν τις επιλογές μου και μου παρείχαν στήριξη όλο αυτό το διάστημα, χωρίς την οποία τίποτα από όσα έχω καταφέρει έως σήμερα δεν θα ήταν πραγματικότητα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 5 -
1. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	- 7 -
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 7 -
1.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	- 7 -
1.2.1. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	- 7 -
1.2.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	- 8 -
1.2.3. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ	- 12 -
1.3. ΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ	- 13 -
1.4. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	- 16 -
1.5. ΠΗΓΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	- 26 -
1.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 26 -
1.5.2. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ	- 27 -
1.5.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	- 32 -
1.6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	- 35 -
1.6.1. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ.....	- 35 -
1.6.1.1. ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....	- 35 -
1.6.1.2. ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ.....	- 38 -
1.6.1.3. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	- 40 -
1.6.1.4. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	- 41 -
1.6.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	- 42 -
1.7. ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	- 44 -
1.7.1. Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΘΥΓΑΤΡΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ - ΠΛΑΙΣΙΟ.....	- 44 -
1.7.2. ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ US-ΕΡΑ.....	- 48 -
2. ΠΡΟΣΩΠΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ	- 52 -
2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	- 52 -
2.2. ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ.....	- 53 -
2.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 53 -
2.2.2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	- 56 -
2.2.3. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	- 58 -
2.2.3.1. ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (α).....	- 59 -
2.2.3.2. ΡΥΘΜΟΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (k).....	- 60 -
2.2.3.3. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ (P).....	- 61 -
2.2.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	- 62 -
2.2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	- 64 -
3. ΣΚΟΠΟΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	- 66 -
3.1. ΣΤΟΧΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	- 66 -

3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΘΕΣΗΣ.....	- 67 -
3.2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ.....	- 68 -
3.2.2. ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ ΟΜΑΔΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ.....	- 70 -
4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	- 74 -
4.1. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΠΑΙΔΙΩΝ.....	- 74 -
4.2. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ	- 79 -
4.3. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΗΛΙΚΙΩΜΕΝΩΝ-ΣΥΝΤΑΞΙΟΥΧΩΝ.....	- 89 -
5. ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ-ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 95 -
5.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ.....	- 95 -
5.2. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 96 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 98 -

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία διεξήχθη στην Αθήνα, στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κατά την περίοδο 2010-2012, υπό την εποπτεία της Αναπλ. Καθηγήτριας κας Α. Χαλουλάκου, σε συνεργασία με την κα Ε. Διαπούλη, Δρ. Χημικό Μηχανικό.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ρύπανσης που καταγράφονται στην ατμόσφαιρα των μεγάλων αστικών κέντρων, καθώς και η συσχέτιση που παρουσιάζουν με αρνητικά συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία, ανέδειξαν την ανάγκη μελέτης της έκθεσης των αστικών πληθυσμών σε αυτούς τους ρύπους. Βασικός σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν ο υπολογισμός της μέσης 24-ωρης προσωπικής έκθεσης υποομάδων πληθυσμού της Αθήνας σε μικροσωματίδια PM_{10} . Παράλληλα μελετήθηκε η επιμέρους συνεισφορά των διαφορετικών μικροπεριβαλλόντων στην ολική έκθεση, και η συμβολή συγκεκριμένων εσωτερικών πηγών ρύπανσης (κάπνισμα, μαγείρεμα) στην διαμόρφωση αυξημένων επιπέδων σωματιδιακής συγκέντρωσης.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο έκθεσης βασισμένο στην μικροπεριβαλλοντική προσέγγιση. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου προέρχονται από πειραματικές μελέτες της ερευνητικής ομάδας στην περιοχή της Αθήνας, καθιστώντας τα τελικά αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά για τον πληθυσμό της πόλης. Επιλέχθηκαν προς μελέτη τρεις υποομάδες πληθυσμού (παιδιά, ενήλικες εργαζόμενοι και συνταξιούχοι-ηλικιωμένοι) και αναπτύχθηκαν διαφορετικά σενάρια χωρο-χρονικής απασχόλησης για κάθε ομάδα, για εργάσιμες και μη εργάσιμες ημέρες. Τα υπολογιζόμενα επίπεδα έκθεσης συγκρίθηκαν με την 24ωρη οριακή τιμή συγκέντρωσης της Ε.Ε. για την εξωτερική ατμόσφαιρα ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ επισημάνθηκαν βασικοί παράγοντες που φαίνεται να καθορίζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν σημαντικά επίπεδα προσωπικής έκθεσης και για τις τρεις υποομάδες πληθυσμού, με συγκεντρώσεις συχνά πολύ υψηλότερες των προτύπων ποιότητας της Ε.Ε. για την εξωτερική ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερα η παρουσία καπνιστών στους εσωτερικούς χώρους αυξάνει εξαιρετικά τα επίπεδα συγκέντρωσης, καθιστώντας την ατμόσφαιρα επιβλαβή για την δημόσια υγεία. Ακόμα όμως και απουσία σημαντικών εσωτερικών πηγών ρύπανσης, τα προσωπικά επίπεδα έκθεσης, αν και χαμηλότερα από τα αντίστοιχα εξωτερικά επίπεδα, παραμένουν εν τούτοις υψηλά, ιδιαίτερα σε κεντρικές περιοχές όπου η εξωτερική ατμόσφαιρα είναι πολύ επιβαρυνμένη. Τα συνολικά αποτελέσματα αναδεικνύουν την αδυναμία των μετρήσεων της εξωτερικής ατμόσφαιρας να αποτυπώσουν την πραγματική ολική έκθεση του πληθυσμού, υπογραμμίζοντας την ανάγκη εφαρμογής μοντέλων εκτίμησης προσωπικής έκθεσης κατά τον σχεδιασμό μέτρων ελέγχου της ρύπανσης και προστασίας της δημόσιας υγείας.

1. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο «αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη» (particulate matter, PM) ή «αιωρούμενα σωματίδια» 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 επιβαρυμένες περιοχές (Seinfeld & Pandis 2006, Wark et al. 1998, Manahan 1994).

1.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

1.2.1. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους, τα αιωρούμενα σωματίδια κατατάσσονται σε: σκόνη, καπνό, ιπτάμενη τέφρα, αιθάλη, σπρέι ή ομίχλη. Τα πρώτα τέσσερα είναι στερεά και τα δύο τελευταία υγρά αερολύματα (Natural Resources Defense Council 1996b, Paterson 1995).

- **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 κάρβουνο.
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 οξειδία 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:** Υγρά σωματίδια ή σταγονίδια που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση ατμών.
Τυπικό μέγεθος: 0,1 έως 10 μm .

1.2.2. 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 μέγεθός 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. 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:

$$D_a = D_p \cdot \rho_p^{1/2} \quad (2.1)$$

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 $0,5 \mu\text{m}$ 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 $0,01 \mu\text{m}$ έως και μερικές εκατοντάδες μm . Ωστόσο τα σωματίδια εκείνα με μέγεθος άνω των $50 \mu\text{m}$ 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 $2,5 \mu\text{m}$. Συνήθως τα σωματίδια αυτά παράγονται δευτερογενώς από αέριες ενώσεις. Χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο κατηγορίες.

A1) 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.

A2) 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)**

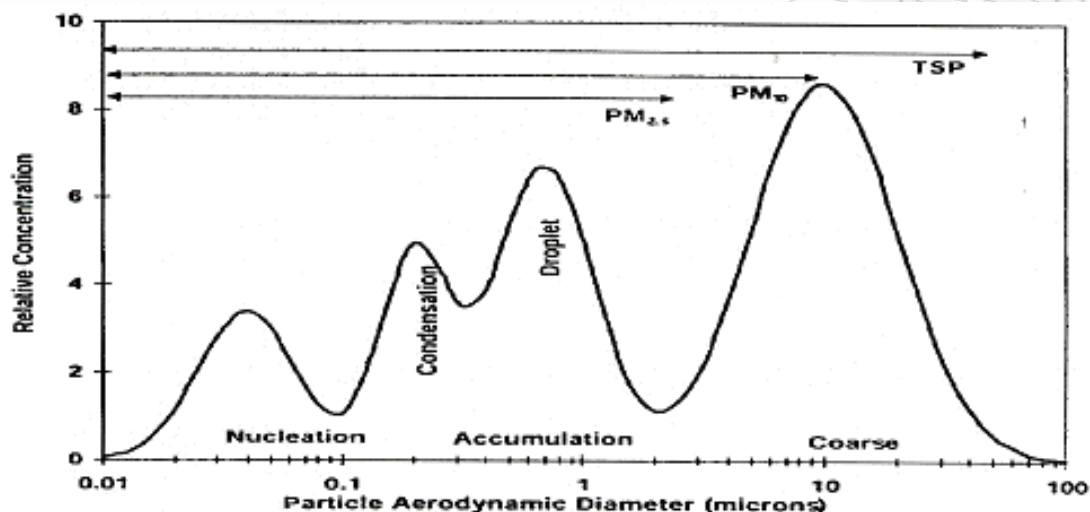
Είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιδράσεις υγρής φάσης μεταξύ σταγονιδίων μέσα σε νέφη ή ομίχλη ή παρουσία πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, επάνω στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων. Η συσσωμάτωση που επέρχεται ως αποτέλεσμα, δημιουργεί την ομάδα των σταγονιδίων.

- ❖ **Συμπυκνώματα (condensation mode)**

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

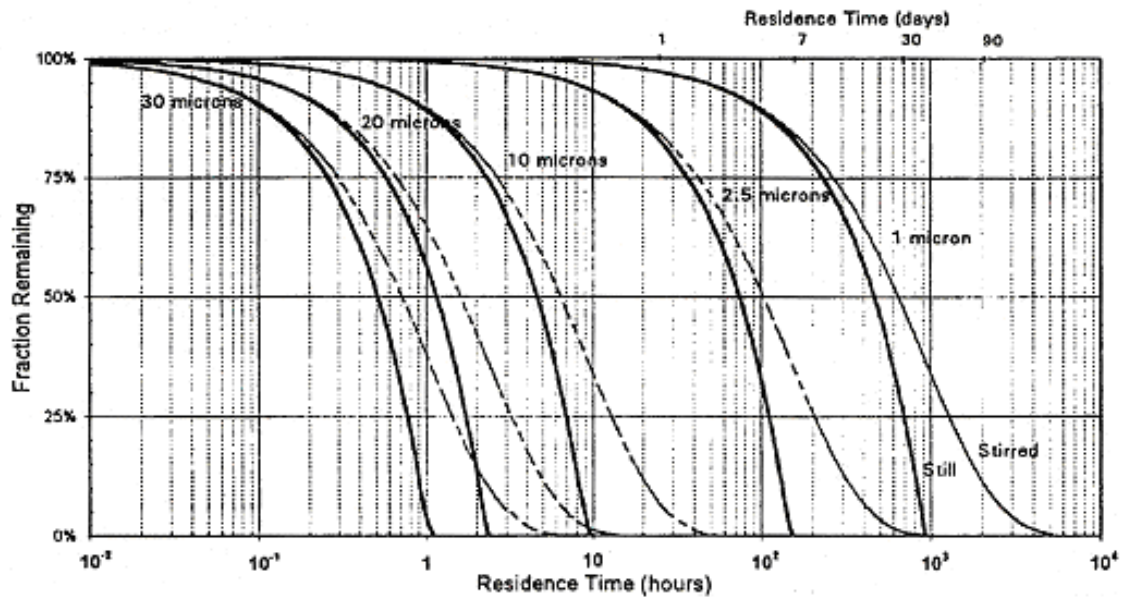
B) Τα χονδρόκοκκα (coarse mode)

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



Σχήμα 1.1. Ιδανική κατανομή κατά μέγεθος αιωρουμένων σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας (Watson et al. 1997).

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 αιωρουμένων 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, Chow 1995).



Σχήμα 1.2. Χρόνος αιώρησης σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους. Τα στοιχεία αναφέρονται σε μέγιστο ύψος 100 m και στις περιπτώσεις: α. ακίνητου αέρα (Still) και β. Αναδευόμενου αέρα (Stirred) (Watson et al. 1997).

1.2.3. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ 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)

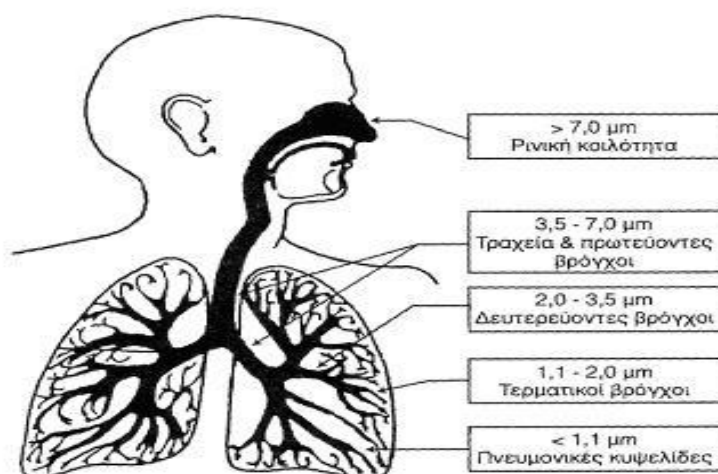
Εισπνεύσιμα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm , καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm κατακρατούνται στην στοματική και τη ρινική κοιλότητα.

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, Paterson 1995).



Σχήμα 1.3. Διεισδυτικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.

1.3. 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 συγκέντρωσής τους στην εξωτερική ατμόσφαιρα.

Γενικά, θεωρείται ότι τα PM₁₀ ταυτίζονται με την κατηγορία των εισπνεύσιμων σωματιδίων και έχουν διάμετρο έως 10 μm. Ωστόσο, ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπ'όψη 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 PM₁₀ 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 :

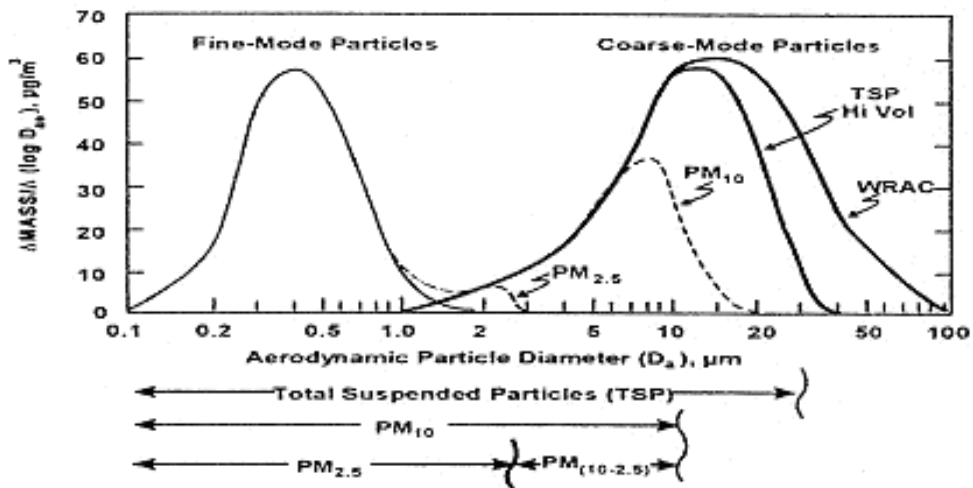
« PM₁₀ νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50 % των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm.»

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.»

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, Keywood et al. 1999). 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, Thomas & Morawska 2002, Wahlin et al. 2001).

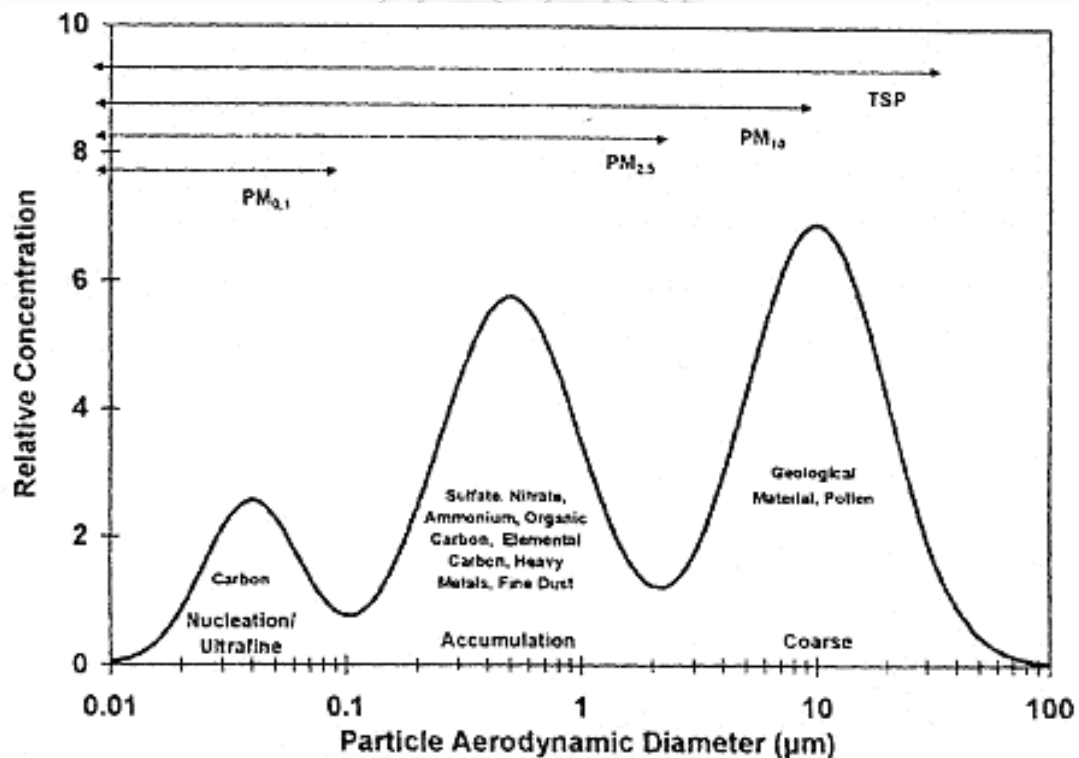


Σχήμα 1.4. Κυριότερα κλάσματα αιωρούμενων σωματιδίων (EPA 1996).

1.4. 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):

- Θειικά
- Νιτρικά
- Αμμωνιακά
- Χλωριόντα
- Οργανικό άνθρακα
- Στοιχειακό άνθρακα
- Γεωλογικά υλικά
- Βιολογικά υλικά
- Μέταλλα
- Ισχυρά οξέα



Σχήμα 1.5. Αντιπροσωπευτική κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων κατά μάζα και κυριότερα συστατικά (Watson et al. 1998).

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, Chow 1995).

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

ΘΕΙΙΚΑ

Τα θειικά προέρχονται κυρίως από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου (SO_2) στην ατμόσφαιρα και συνήθως βρίσκονται υπό την μορφή θειικού αμμωνίου. Οι ενώσεις αυτές είναι υδατοδιαλυτές και συναντώνται σχεδόν αποκλειστικά στα $PM_{2.5}$. Θειικό νάτριο είναι δυνατόν να ανιχνευθεί σε παραλιακές περιοχές, όπου το θειικό οξύ έχει εξουδετερωθεί από το χλωριούχο νάτριο του θαλάσσιου αλατιού. Παρόλο που ο γύψος και κάποια άλλα γεωλογικά υλικά περιέχουν θειικά, 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).

ΝΙΤΡΙΚΑ

Τα νιτρικά σχηματίζονται κυρίως από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Το νιτρικό αμμώνιο (NH_4NO_3) είναι το πιο συχνά απαντημένο 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 διάσπασή του), η χωρική

κατανομή των νιτρικών είναι πολύ λιγότερο ομοιόμορφη από αυτή των θειικών (Harrison & Yin 2000, Raes et al. 2000).

ΑΜΜΩΝΙΑΚΑ

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, Chow 1995, Harrison & Jones 1995).

ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ

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 του ατμούς 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 (Harrison & Jones 1995).

ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ

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 πιητικότητας 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 (Manahan 1994). 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, Menichini 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 (Manahan 1994):

Αρωματικοί > κυκλολεφίνες > 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 (Harrison & Jones 1995).

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.

ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ

Κατά τις διαδικασίες καύσης, και ιδίως εξ' αιτίας 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, Kim et al. 1999, Molnar et al. 1999) .

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

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 επαναιώρησή 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 ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), χλωρίτης, καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, αιμανίτης κ.α. (Harrison & Jones 1995).

ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

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 χονδροκόκκα. Στις περισσότερες μελέτες χαρακτηρίζονται ως οργανικός άνθρακας παρά ως βιολογικά υλικά (Harrison & Yin 2000, Mattias-Maser et al. 2000).

ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΙΧΝΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

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 (Harrison & Jones 1995).

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ιοντικά είδη, τα παραπάνω μέταλλα εμφανίζονται κυρίως στο χονδρόκοκκο σωματιδιακό κλάσμα, γεγονός αναμενόμενο λόγω της προέλευσής τους από τα θαλάσσια αερολύματα και την επιφανειακή σκόνη. Το νάτριο είναι κυρίως παρόν ως NaCl και Na₂SO₄ (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 αλογονιδίων του (PbCl₂, PbClBr, PbBr₂), 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 υδράργυρος είναι παρών στην ατμόσφαιρα με την μορφή οργανομεταλλικών ενώσεων του, όπως οι: (CH₃)₂Hg και (CH₃)HgBr. Άλλα μέταλλα απαντώνται με την μορφή των οξειδίων τους, όπως Fe₃O₄, V₂O₅, CaO (Manahan 1994).

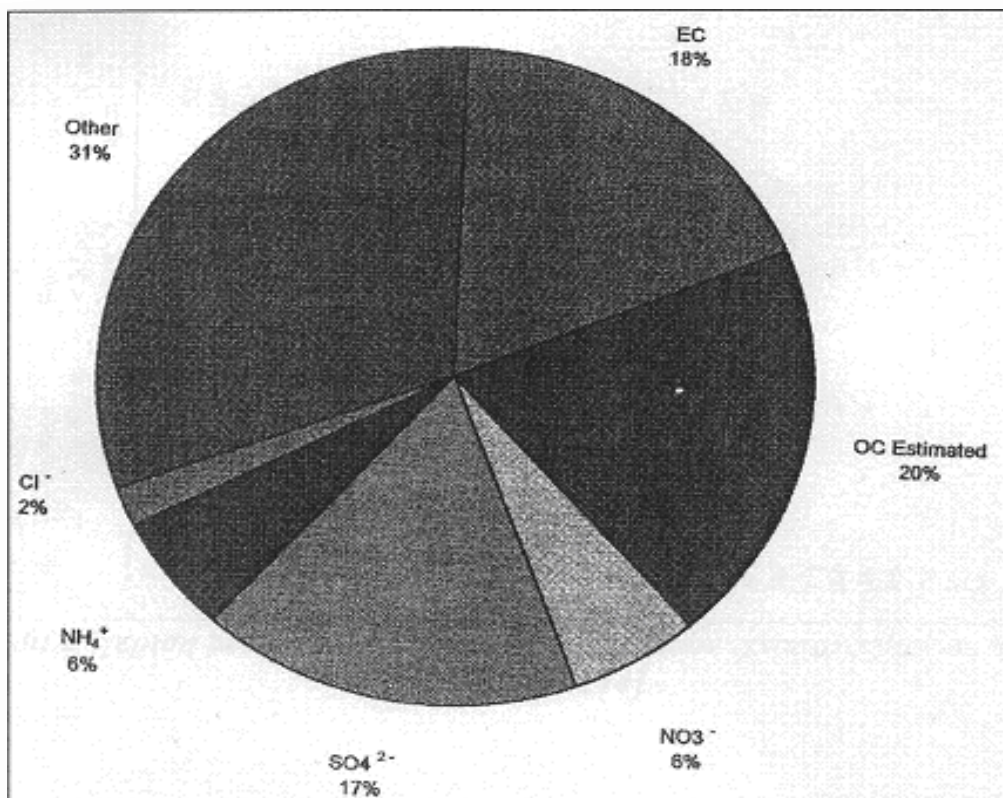
Σε αστικές περιοχές, θεωρείται ότι η έκθεση σε μεταλλικά ιχνοστοιχεία μέσω της εισπνοής αιωρούμενων σωματιδίων είναι ανεπαρκής ώστε να έχει τοξική επίδραση στον άνθρωπο. Εντούτοις, έχει αποδειχθεί ότι κάποια στοιχεία μετάπτωσης, και συγκεκριμένα ο σίδηρος, είναι δυνατόν να παρουσιάσουν αρνητικά αποτελέσματα 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 μόλυβδος, 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).

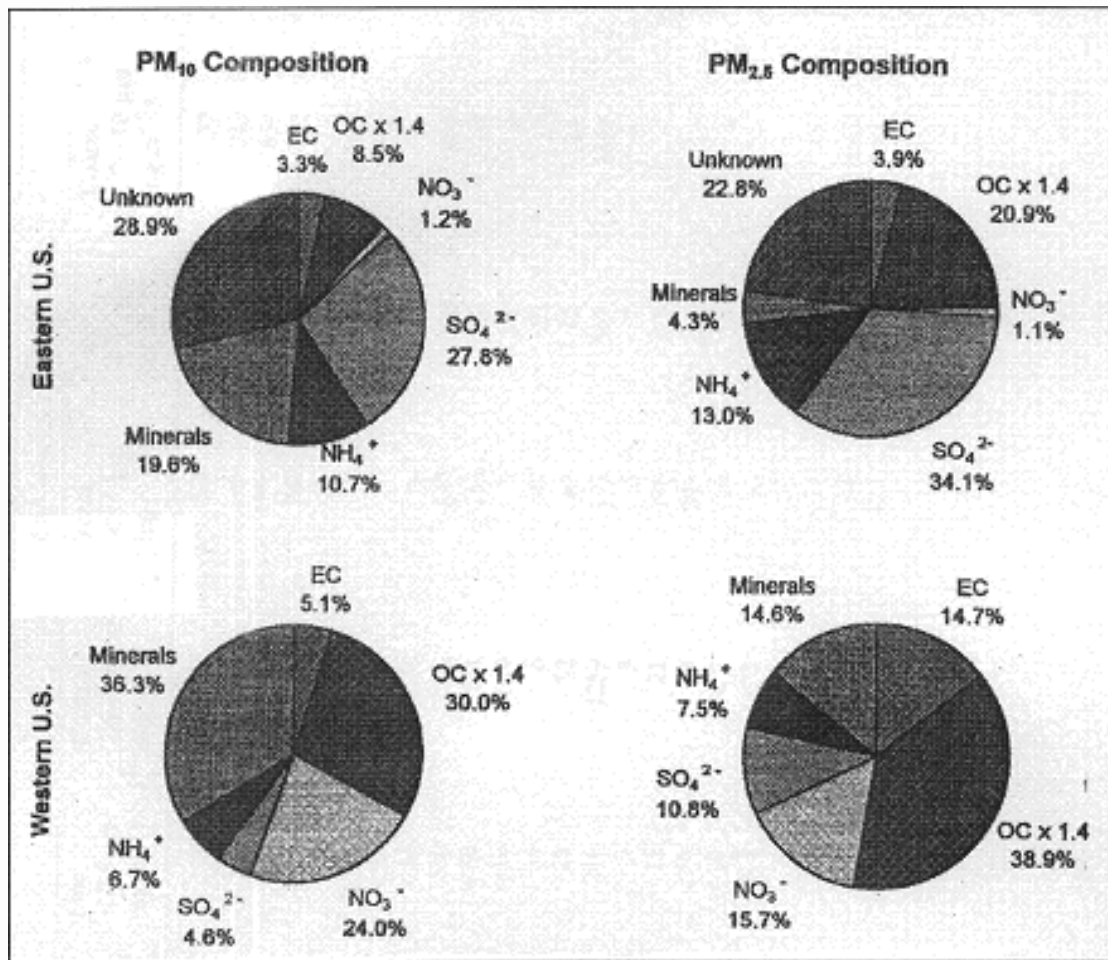
ΙΣΧΥΡΑ ΟΞΕΑ

Ο σχηματισμός θειικών και νιτρικών στην ατμόσφαιρα, μέσω της οξειδωσης 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 οξύτητάς του (μέσω είτε αντίδρασης με υδροχλωρικό οξύ ή εξουδετέρωσης από την αμμωνία). Αντιθέτως, το θειικό 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 εξουδετερωμένο θειικό οξύ. Ορισμένες παλαιότερες μελέτες υποστηρίζουν ότι η παρουσία ισχυρού οξέος είναι υπαίτια για την τοξική δράση των σωματιδίων (Harrison & Yin 2000).



Σχήμα 1.6. Τυπική σύσταση σωματιδίων PM₁₀ στο Birmingham, U.K.
(Watson et al. 1998)



Σχήμα 1.7. Κατανομή των κύριων συστατικών των αιωρούμενων σωματιδίων στις Ανατολικές και Δυτικές Η.Π.Α. (Harrison and Yin 2000).

1.5. ΠΗΓΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

1.5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πηγές των αιωρουμένων σωματιδίων είναι είτε **πρωτογενείς** (δηλαδή εκπέμπονται 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 οξειδωση του διμέθυλο-σουλφιδίου, το οποίο παράγεται από το φυτοπλαγκτόν στην θάλασσα, ενώ διοξείδιο του θείου εκπέμπεται και από ηφαιστεία. 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 οξειδία 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, Chow 1995).

1.5.2 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

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 θειικών 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 SO₂ σε SO₃, 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 συμβάλει 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.

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 (Wark et al. 1998).

Πίνακας 1.1. Οργανικός και στοιχειακός άνθρακας στα καυσαέρια των κινητήρων οχημάτων (EPA 1996).

Fuel Type	Organic Carbon	Elemental Carbon	N ^c	Sources
<u>Diesel</u>				
Denver, CO ^a	23 ± 8%	74 ± 21%	3	1, 2
Los Angeles, CA ^a	36 ± 3%	52 ± 5%	2	3, 4, 5, 6
Bakersfield, CA ^a	49 ± 13%	43 ± 8%	3	7
Phoenix, AZ ^b	40 ± 7%	33 ± 8%	8	8
<u>Unleaded gasoline</u>				
Denver, CO ^a	76 ± 29%	18 ± 11%	8	1, 2
Los Angeles, CA ^a	93 ± 52%	5 ± 7%	11	3, 4, 5, 6
Los Angeles, CA ^a	49 ± 10%	39 ± 9%	11	3, 4, 5, 6
Phoenix, AZ ^b	30 ± 12%	14 ± 8%	9	8
<u>Leaded gasoline</u>				
Denver, CO ^a	67 ± 23%	16 ± 7%	3	1, 2
Los Angeles, CA ^a	52 ± 4%	13 ± 1%	3	3, 4, 5, 6
Los Angeles, CA ^a	31 ± 20%	15 ± 2%	3	3, 4, 5, 6
<u>Mixed (tunnel and roadside)</u>				
Denver, CO	50 ± 24%	28 ± 19%		1, 2
Los Angeles, CA ^d	38 ± 6%	38 ± 5%	3	3
Phoenix, AZ	39 ± 19%	36 ± 11%		8

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

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. Κύρια συστατικά της ιπτάμενης τέφρας είναι τα: SiO₂ (10 – 70 %), Al₂O₃ (8 – 38 %), Fe₂O₃ (2 – 50 %), CaO (0,5 – 50 %), MgO (0,3 – 8 %), Na₂O (0,1 – 3 %), K₂O (0,1 – 3 %), TiO₂ (0,4 – 4 %).

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 ασφατενίων και τέφρας, και έχουν μικρότερο ιξώδες, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά καύσης (AWMA 1992).

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 PM₁₀. 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) (Oihstrom 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 μέγεθός 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 υγράργυρο, 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 εξόδο. 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 μέγεθός 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

ΟΙΚΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

Η χρήση κάρβουνου μέσα στα σπίτια ήταν στο παρελθόν μια σημαντική πηγή αιωρουμένων 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 αιωρουμένων 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 ντίζελ κίνησης (Στούρνας et al. 1993).

ΔΑΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

Όσον αφορά στις δασικές και γεωργικές φωτιές, η γενική συμβολή στη μόλυνση 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 αιωρούμενων 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 Mtn/έτος χαλκού, 3 Mtn/έτος ψευδαργύρου και 2,2 Gtn/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).

1.5.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ

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 ανεμοθύελες στις ερήμους, που είναι συνηθισμένες κατά την διάρκεια περιόδων με ισχυρούς ανέμους. Ωστόσο, το ίδιο παρατηρείται και σε άλλες περιοχές της υφής. Η ένταση του φαινομένου γενικά μειώνεται όσο η υγρασία του εδάφους αυξάνει και όσο περισσότερο καλύπτεται η επιφάνειά 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 σύστασή τους εμφανίζει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη, με κάποιες ποσότητες γύψου, αργιλικών υλικών και μετάλλων.

ΕΠΑΝΑΙΩΡΗΣΗ ΣΚΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η επαναιώρηση της σκόνης από το χώμα 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 χαλαρές 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 :

- την σκόνη που μεταφέρεται πάνω στα ελαστικά των οχημάτων,
- την σκόνη που καθιζάνει από την ατμόσφαιρα,
- την φθορά της επιφάνειας του ίδιου του δρόμου και
- την 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 :

- ο το φορτίο των επικαθιμένων σωματιδίων επάνω στην επιφάνεια,
- ο τον χρόνο ξήρανσης που προηγείται της επαναιώρησης και
- ο 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).

ΥΔΡΟΛΥΜΑ ΘΑΛΑΣΣΗΣ

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 θειικά 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.

ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΚΡΗΞΕΙΣ

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 ηφαιστείου 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.

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).

1.6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

1.6.1. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

1.6.1.1. ΣΥΜΠΤΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Πλήθος επιδημιολογικών μελετών συνδέουν την έκθεση σε σωματίδια PM₁₀, PM_{2,5} και UFPs με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία (Pope and Dockery 2006, Pope et al. 2002, Von Klot et al. 2002, Katsouyanni et al. 2001, Goldberg et al. 2001, Penttinen et al. 2001, Peters 2000, Pope 2000a, b, Pekkanen et al. 1997, Peters et al. 1997b). 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, καρκινογενέσεις 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 καρδιοαγγειακές παθήσεις (Nemmar et al. 2004, Gold et al. 2000, Michaels & Kleinman 2000, Li et al. 1999, Delfino et al. 1998, Korrick et al. 1998, Morgan et al. 1998). Επιπλέον, υποστηρίζεται ότι πολλά χρόνια συμπτώματα οφείλονται στην επαναλαμβανόμενη βραχυχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Schwartz 2000).

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 έκθεσή τους σε αιωρούμενα σωματίδια, έχουν απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα την τελευταία δεκαετία.

Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$, 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 (Pekkanen et al. 1997, Peters et al. 1997a). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην πόλη του Μεξικού (Romieu et al. 1996), αύξηση της συγκέντρωσης των PM_{10} 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 ελλιπούς 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, Oosterlee et al. 1996).

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 πνεύμονές 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, Bennett & Zeman 1998).

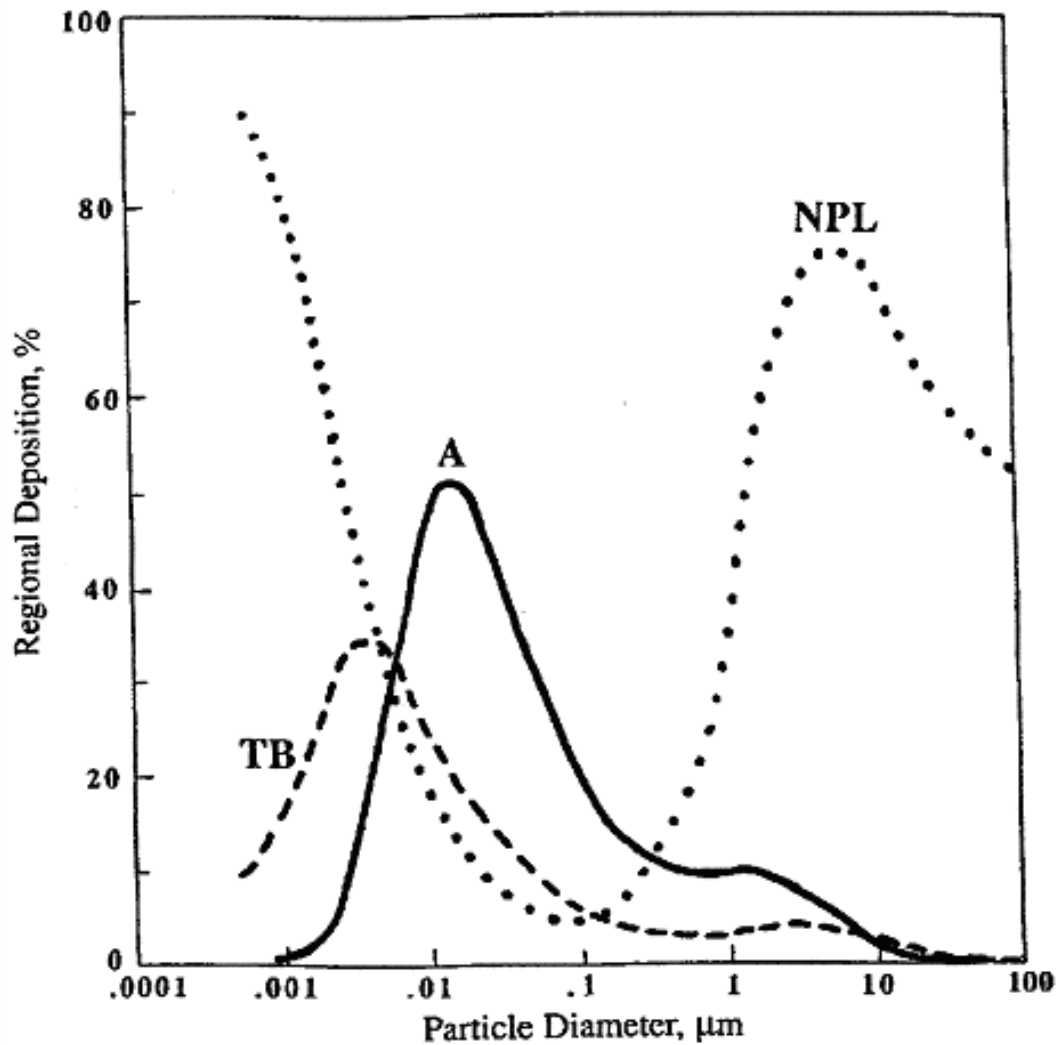
1.6.1.2. ΤΡΟΠΟΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΚΛΑΣΜΑΤΩΝ

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, το χονδρόκοκκων σωματιδίων αποβάλλεται από το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα. Τελικά το 10 – 60 % αυτών είναι πιθανόν να εναποτεθεί στους πνεύμονες

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, προσροφόνται στη συνέχεια σε διαφορετικά σημεία των πνευμόνων (ALAW 2004).

Λόγω των μεταβολών στη ροή του αέρα στην ταχειοβρογχική 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.

Στο Σχήμα 1.8 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 1.8. Εναπόθεση εισπνεόμενων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών στο ανώτερο και κατώτερο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού.

1.6.1.3. ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Το 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 περιεκτικότητάς τους σε ορισμένα ιδιαίτερα τοξικά χημικά είδη και της κατανομής του μεγέθους τους.

Η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην τοξικότητά 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 καθ'εαυτή η τοξικότητά 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 (Gilmour et al. 1996).

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).

1.6.1.4. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Τα παρατηρούμενα προβλήματα υγείας κατά την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια δεν οφείλονται αποκλειστικά στην διείσδυσή τους στο αναπνευστικό σύστημα και την τοξική τους δράση, αλλά και, δευτερογενώς, στην εξασθένιση 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).

1.6.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η αέρια σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να αλλοιώσει την αντίληψή 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.

Σημαντικές είναι, επίσης, οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα. Η επίδρασή 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. Ανάλογα με το μέγεθος και τον βαθμό ανάκλασής 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. Μια άλλη επίπτωση

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

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 φιλμ 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 συμπύκνωσης 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 επικάθησή 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 βάσιμο 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 διεπερνά τις διαφανείς επιφάνειες (Koloutsou-Valais 1999, EPA 1996).

1.7. ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

1.7.1. Η ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΘΥΓΑΤΡΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ - ΠΛΑΙΣΙΟ

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-Πλαίσια, βάσει των οποίων οφείλουν τα κράτη μέλη να προσαρμόζουν την εθνική τους νομοθεσία. Κάθε Οδηγία-Πλαίσιο της Ε.Ε. προβλέπει την έκδοση θυγατρικών Οδηγιών, οι οποίες αναφέρονται 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 1.2. 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 1.3, 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 των 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).

Τον 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 PM₁₀, 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 μg/m³, ενώ προτείνει και 24-ωρη οριακή τιμή ίση με 35 μg/m³ (να μην υπερβαίνεται περισσότερο από το 10 % των ημερών μέσα στο έτος). Παράλληλα, υποστηρίζει ότι οι οριακές τιμές για τα σωματίδια PM₁₀ 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).

Πίνακας 1.3. Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM₁₀ (1999).

	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
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

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 1.4) (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 2005).

Πίνακας 1.4. 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

Τέλος, στις 21 Μαΐου 2008 εκδόθηκε η πιο πρόσφατη Οδηγία (2008/50/ΕΚ) του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη. Στους Πίνακες 1.5 και 1.6 παρουσιάζονται οι σχετικές οριακές τιμές για τα σωματίδια PM₁₀ και PM_{2,5} αντίστοιχα.

Πίνακας 1.5. Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM₁₀ (2008).

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 %	Ισχύει ήδη από 1ης Ιανουαρίου 2005.
Ημερολογιακό έτος	40 µg/m ³	20 %	Ισχύει ήδη από 1ης Ιανουαρίου 2005.

Πίνακας 1.6. Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM_{2,5} (2008).

Τιμή στόχος

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

Οριακή τιμή

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 (*)			
Ημερολογιακό έτος	20 μg/m ³		1η Ιανουαρίου 2020

(*) 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 τεχνικώς εφικτού και της εμπειρίας από την τιμή στόχο στα κράτη μέλη.

1.7.2. ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ US-EPA

Ο ρόλος του Αμερικανικού Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S Environmental Protection Agency, EPA), είναι, σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης των Η.Π.Α. (U.S. 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: μονοξειδίο 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 αντανakλούν 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.

Την 21^η Σεπτεμβρίου του 2006, με βάση και τα νεώτερα στοιχεία των επιδημιολογικών και τοξικολογικών ερευνών, η EPA προχώρησε σε νέες αναθεωρήσεις, θεσπίζοντας πιο αυστηρά πρότυπα ποιότητας και μέτρα ελέγχου, ορίζοντας παράλληλα επανεξέτασή τους ανά 5 έτη, σύμφωνα και με σχετικές εισηγήσεις από την Επιστημονική Συμβουλευτική Επιτροπή καθαρού αέρα (Clean Air Scientific Advisory Committee, CASAC), την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα, την βιομηχανία, κλπ.

Στον Πίνακα 1.7 παρουσιάζονται τα πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια όπως ίσχυαν το 1987, καθώς και με τις αναθεωρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το 1997 (Milloy 1998, US EPA 1997a, b, c, Chow 1995) και το 2006.

Πίνακας 1.7. Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM10 και PM2,5 κατά US - EPA.

Σωματιδιακό κλάσμα	Οριακή τιμή 1987	Επεξήγηση	Οριακή τιμή 1997	Επεξήγηση	Οριακή τιμή 2006	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.	Ανακλήθηκε	Λόγω έλλειψης των στοιχείων που συνδέουν τα προβλήματα υγείας με τη μακροπρόθεσμη έκθεση του ατόμου σε αυτά τα σωματίδια.
	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.	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 1 φορά 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.	Ετήσια 15 μg/m ³	Ο 3ετης 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.	24-ωρη 35 μg/m ³	Ο 3ετής μέσος του 98 ^ο εκατοστημόριο του συνόλου των 24-ωρων συγκεντρώσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή.

2. ΠΡΟΣΩΠΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

Οι υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ρύπανσης που καταγράφονται στην ατμόσφαιρα, κυρίως των μεγάλων αστικών κέντρων, καθώς και η συσχέτιση που παρουσιάζουν με αρνητικά συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία, ανέδειξαν την ανάγκη μελέτης της έκθεσης των αστικών πληθυσμών σε αυτούς τους ρύπους.

Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, επιχειρήθηκε ο πειραματικός προσδιορισμός της έκθεσης, μέσω προσωπικών δειγματοληψιών αντιπροσωπευτικού δείγματος του πληθυσμού. Παράλληλα, αναπτύχθηκε και μια έμμεση μέθοδος προσδιορισμού, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της ολικής προσωπικής έκθεσης, ως το άθροισμα των επιμέρους επιπέδων έκθεσης τα οποία υφίσταται το υπό μελέτη υποκείμενο, ενώ κινείται στα διαφορετικά μικρο-περιβάλλοντα (Wilson et al. 2000). Βάσει του έμμεσου προσδιορισμού, η ολική προσωπική έκθεση (E) ενός υποκειμένου κατά την χρονική περίοδο (T) ισούται με:

$$E = \frac{1}{T} \cdot \sum_j \int C_j \cdot dt_j \quad (2.1)$$

όπου: C_j η χρονικά μεταβαλλόμενη συγκέντρωση στο μικρο-περιβάλλον j και t_j ο χρόνος παραμονής στο εν λόγω μικρο-περιβάλλον.

Το άθροισμα αναφέρεται σε όλα τα μικρο-περιβάλλοντα στα οποία κινήθηκε το υποκείμενο κατά την χρονική περίοδο αναφοράς (T).

Καθώς κατά την διάρκεια συγκεκριμένων δραστηριοτήτων, η προσωπική έκθεση του υποκειμένου είναι δυνατόν να μην αντιστοιχεί στην συγκέντρωση που καταγράφεται στον χώρο μέσα στον οποίο βρίσκεται, για τον υπολογισμό της ολικής προσωπικής του έκθεσης έχει προταθεί και η χρήση της σχέσης:

$$E = \sum_j E_j + E_{pact} = \frac{1}{T} \cdot \left(\sum_j \int C_j \cdot dt_j + \sum_l \int C_{pact,l} \cdot dt_l \right) \quad (2.2)$$

όπου: $C_{pact,i}$ η συγκέντρωση που οφείλεται στην προσωπική δραστηριότητα (personal activity) / και

t_i ο χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιείται η εν λόγω δραστηριότητα.

2.2. ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

2.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνολική προσωπική έκθεση του πληθυσμού καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από τα επίπεδα συγκέντρωσης στα οποία εκτίθεται ενώ κινείται σε διαφορετικά μικρο-περιβάλλοντα.. 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. 2000, Klepeis et al. 1996).

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να οφείλονται:

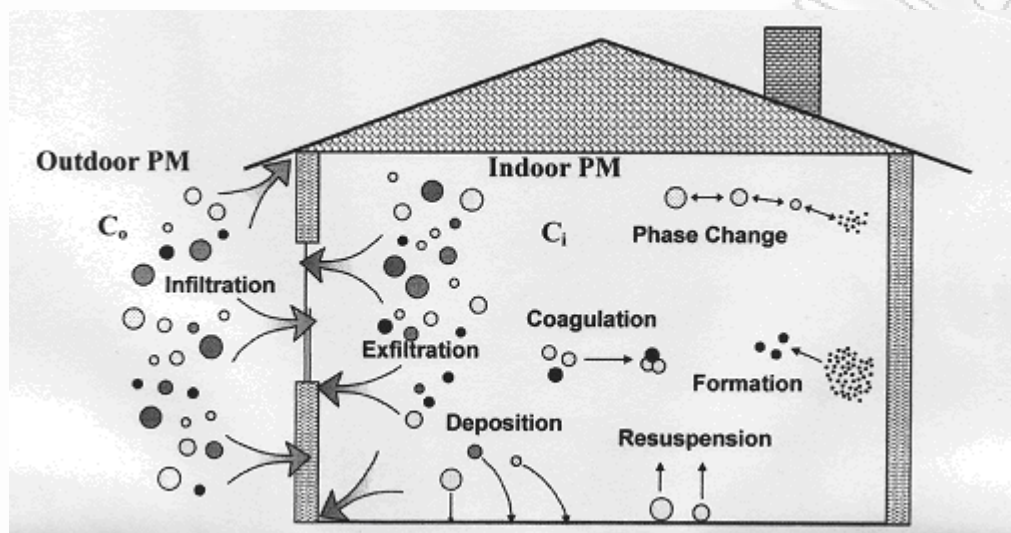
- ο στην παραγωγή σωματιδίων στο εσωτερικό των χώρων και
- ο στη διείσδυση σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας στους εσωτερικούς χώρους.

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

- ο 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.
- ο 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 (Abt et al. 2000a,b). Η ποσότητα της επαναιωρούμενης ύλης στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων που βρίσκεται εναποτεθημένη στις διαφορετικές επιφάνειες του χώρου (Lange 1995).
- Η συσσωμάτωση: Κατά την σύγκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους, συχνά προκαλείται συσσωμάτωσή 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. Για παράδειγμα, 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).

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται σχηματικά οι διαφορετικές διεργασίες που συντελούνται σε εσωτερικό χώρο και επηρεάζουν την διαμόρφωση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε αυτόν.



Σχήμα 2.1. 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, Long et al. 2001b). Λόγω των υπάρχοντων 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.

2.2.2. 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 (Wadden & Scheff 1983).

Οι κυριότερες δραστηριότητες που επηρεάζουν τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης αιωρουμένων σωματιδίων είναι: το κάπνισμα, το μαγείρεμα, το καθάρισμα και η γενικότερη παρουσία και κινητικότητα ατόμων (Abt et al. 2000a, b, Long et al 2001a, 2000). Το μέγεθος των σωματιδίων αντανakλά τον μηχανισμό παραγωγής. Οι διεργασίες καύσης παράγουν κυρίως λεπτόκοκκα σωματίδια, ενώ οι μηχανικές διεργασίες χονδροκόκκα. 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 αιωρουμένων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους.

Το κάπνισμα έχει αναγνωρισθεί ως η βασική εσωτερική πηγή αιωρουμένων 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 (Gold 1992). Τα παραγόμενα σωματίδια βρίσκονται στο εύρος μεγέθους 0,1 – 1,5 μm (Chen et al. 1990). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Ozkaynak et al. (1996), κάθε τσιγάρο εκπέμπει κατά μέσο όρο 22 ± 8 mg σωματιδίων PM_{10} , 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 $\text{PM}_{2,5}$ 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 $\text{PM}_{2,5}$ 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 $\text{PM}_{2,5}$ που απαντώνται σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών καπνιστών, προέρχονται από τον καπνό τσιγάρων.

Σημαντική εσωτερική παραγωγή σωματιδίων παρατηρείται και κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων μαγειρέματος (Kamens et al. 1991). 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 mg/min σωματιδίων PM_{10} , ενώ περίπου το 40% αυτών (1,7 \pm 0,6 mg/min) αποτελείται από σωματίδια $\text{PM}_{2,5}$. 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).

Σε μικρότερο βαθμό, τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης επηρεάζονται και 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). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης των Kamens et al. (1991), η χρήση ηλεκτρικής σκούπα ιδιαίτερα, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, 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 χώρο, είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση της συγκέντρωσης των χονδρόκοκκων σωματιδίων κατά σχεδόν 100 % (Thatcher & Layton 1995). Οι Lefcoe & Inculet (1975) αναγνώρισαν, επίσης, την

παρουσία παιδιών ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης των μεγαλύτερων από 1 μm σωματιδίων. Οι Raunemaa et al. (1989) υπολόγισαν ότι η συγκέντρωση των μεγαλύτερων από 1,5 μm σωματιδίων αυξάνει κατά προσέγγιση γραμμικά με τον χρόνο παραμονής των ενοίκων στους υπό μελέτη χώρους.

2.2.3. 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. 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 την διείσδυσή τους στους εσωτερικούς χώρους (Milner et al. 2005).

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 (α) [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 επικάθησής τους στις διαφορετικές επιφάνειες).

Η γνώση των τριών παραμέτρων εξαερισμού (α , 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:

$$C_{og} = \frac{\alpha \cdot P}{\alpha + k} \cdot C_{out} \quad (2.3)$$

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

2.2.3.1. ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΑΕΡΙΣΜΟΥ (α)

Ο ρυθμός εξαερισμού (α) 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 μεγαλώνει τη διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού χώρου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας.)
- 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).

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).

2.2.3.2. ΡΥΘΜΟΣ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗΣ (k)

Κατά την είσοδό 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:

$$k = v_d \cdot \frac{S}{V} \quad (2.4)$$

όπου: v_d η ταχύτητα εναπόθεσης,

V ο όγκος του χώρου και

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

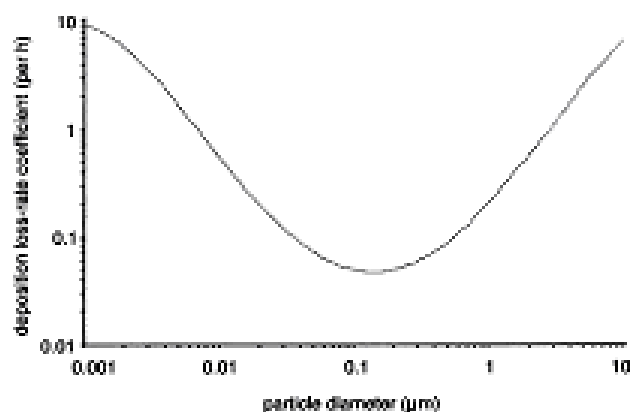
Η τιμή του ρυθμού εναπόθεσης εξαρτάται από (Halios & Helmis 2007, Thatcher et al. 2002, Nazaroff et al. 1993):

- 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 την 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 χονδροκόκκων σωματιδίων, ο ρυθμός εναπόθεσης συνδέεται κυρίως με την βαρυτική 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, Wallace 1996, Nazaroff et al. 1993).

Στο Σχήμα 2.2 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 2.2. Σύνθεση πειραματικών και θεωρητικών τιμών του ρυθμού εναπόθεσης συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (Riley et al. 2002).

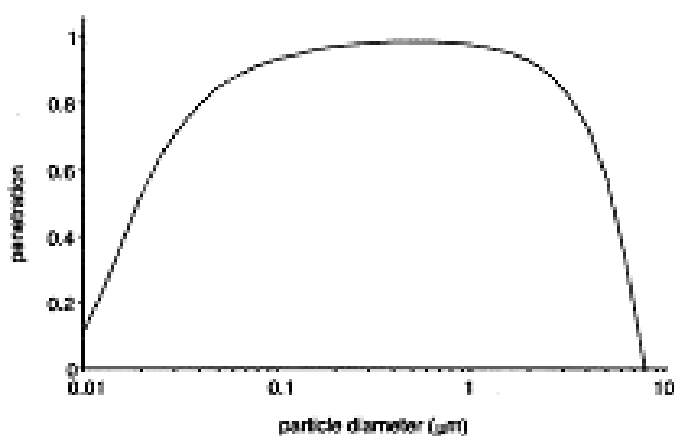
2.2.3.3. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ (P)

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

- το μέγεθος των σωματιδίων,
- τον αριθμό και τη γεωμετρία των χαραμάδων του κτιρίου και
- 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 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου, σχετικά με την αναμενόμενη ικανότητα διείσδυσης δια μέσω πολύ λεπτής οπής, σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών (Liu & Nazaroff 2001).



Σχήμα 2.3. 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/cm³ (Liu & Nazaroff 2001)

2.2.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Κατά την εκτίμηση της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού, καθώς αυτός κινείται σε διάφορα μικρο-περιβάλλοντα μέσα στην ημέρα, απαιτείται η γνώση των επιπέδων συγκέντρωσης πλήθους διαφορετικών εσωτερικών χώρων (κατοικίες, χώροι εργασίας, χώροι αναψυχής), στους οποίους αναμένεται να εμφανίζονται διαφορετικές πηγές, ανάλογα με τη διαμόρφωσή τους και τις

δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε αυτούς. Είναι φανερό ότι η πειραματική προσέγγιση του προβλήματος εμφανίζει μεγάλες εγγενείς δυσκολίες. Η παρακολούθηση των συγκεντρώσεων σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών εσωτερικών χώρων και για ικανό χρονικό διάστημα, εγείρει μεγάλες απαιτήσεις σε ειδικό πειραματικό εξοπλισμό καθώς και υψηλό οικονομικό κόστος. Παράλληλα, θα πρέπει να ληφθεί υπ'όψιν και η γενικότερη αναδιάρθρωση που απαιτείται στη χρήση των χώρων, γεγονός που ενδεχομένως να καθιστά δύσκολη την μακροχρόνια παρακολούθησή τους.

Τα προβλήματα αυτά ώθησαν την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης των συγκεντρώσεων σε εσωτερικούς χώρους, βάσει της επίδρασης των εσωτερικών και εξωτερικών πηγών στην διαμόρφωση των επιπέδων συγκέντρωσης. Η βασική εξίσωση ισοζυγίου μάζας που απαντάται στην πλειοψηφία των μελετών έχει την μορφή:

$$\frac{dC_{in}(t)}{dt} = a \cdot P \cdot C_{out}(t) - (a + k) \cdot C_{in}(t) + \frac{Q_{is}}{V} \quad (2.5)$$

όπου: $C_{in}(t)$ και $C_{out}(t)$ η εσωτερική και εξωτερική συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων [$\mu\text{g}/\text{m}^3$],

a ο ρυθμός εξαερισμού [hr^{-1}],

P η ικανότητα διείσδυσης (αδιάστατο μέγεθος),

k ο ρυθμός εναπόθεσης [hr^{-1}],

V ο όγκος του χώρου που μελετάται [m^3] και

Q_{is} ο ρυθμός παραγωγής σωματιδίων από εσωτερικές πηγές (indoor sources) [$\mu\text{g}/\text{hr}$].

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στην υπόθεση της τέλει ανάμιξης του εσωτερικού αέρα. Επίσης παραλείπονται οι όροι που αντιστοιχούν σε διεργασίες εξάτμισης, συμπύκνωσης, πυρηνοποίησης και συσσωμάτωσης, καθώς η επίδρασή τους στην διαμόρφωση της εσωτερικής συγκέντρωσης θεωρείται αμεληταία, για τις συνήθεις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στους χώρους που μελετώνται.

Επομένως, για την εκτίμηση της εσωτερικής συγκέντρωσης ενός χώρου όγκου V , βάσει διαθέσιμων δεδομένων εξωτερικών μετρήσεων, είναι απαραίτητη η γνώση των παραμέτρων εξαερισμού α , P και k , καθώς και του δυναμικού παραγωγής σωματιδίων των διαφόρων εσωτερικών πηγών Q_{is} .

2.2.5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες η ερευνητική κοινότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της προς την ποιότητα της εσωτερικής ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα πλήθος μελετών στην διεθνή βιβλιογραφία σχετικών με επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Οι βασικοί χώροι που επιλέγονται προς παρακολούθηση είναι η κατοικία και ο χώρος εργασίας (γραφεία ή σχολεία), δεδομένου ότι ο χρόνος παραμονής σε αυτούς καλύπτει περισσότερο από τα 2/3 του ημερήσιου χρόνου. Άλλοι χώροι που έχουν μελετηθεί είναι χώροι διασκέδασης, μέσα μαζικής μεταφοράς, ιδιωτικά οχήματα κ.α.

Οι συγκεντρώσεις στους παραπάνω εσωτερικούς χώρους είναι δυνατόν να είναι πολύ αυξημένες, ανάλογα με την ύπαρξη εσωτερικών πηγών εκπομπής και επιπλέον λόγω της περιορισμένης δυνατότητας διασποράς της ρύπανσης μέσα στους χώρους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα μέτρησης της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} σε διαφορετικούς χώρους.

Πίνακας 2.1. Ενδεικτικά αποτελέσματα μετρήσεων των σωματιδίων PM₁₀ σε εσωτερικούς χώρους.

Περιοχή	Μικρο-περιβάλλον	Συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³)	Χρόνος αναφοράς	Βιβλιογραφία
Αθήνα	Σπίτι/γραφείο (χωρίς κάπνισμα)	16 - 186	24 ώρες	Diapouli et al. 2010
Αθήνα	Σχολικές αίθουσες	75 – 670	8 ώρες	Diapouli et al. 2007
U.K.	Σπίτι/γραφείο (χωρίς κάπνισμα)	26 ± 9 (χειμώνας) 52 ± 20 (καλοκαίρι)	24 ώρες	Dimitroulopoulou et al. 2005
U.K.	Σπίτι (με κάπνισμα)	113 (χειμώνας) 134 (καλοκαίρι)	24 ώρες	Dimitroulopoulou et al., 2005
Stockholm, Sweden	Μετρό	470	12 ώρες (7:00 – 19:00)	Johansson & Johansson 2003
Berlin, Germany	Μετρό	141± 17 (χειμώνας) 153 ± 22 (καλοκαίρι)	9 ώρες (7:00 – 16:00)	Fromme et al. 1998
Munich, Germany	Λεωφορείο	80 – 236	4 ώρες	Praml & Schierl 2000
Hong-Kong, China	Λεωφορείο (χωρίς κλιματισμό)	112 - 137	40 – 50 λεπτά	Chan et al. 2002
Hong-Kong, China	Λεωφορείο (με κλιματισμό)	63 - 74	30 – 40 λεπτά	Chan et al. 2002
Αθήνα	Ιδιωτικό αυτοκίνητο	70 - 220	15 λεπτά	Diapouli et al. 2008

3. ΣΚΟΠΟΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΣΤΟΧΟΙ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Αθήνα είναι ένα μεγάλο αστικό κέντρο με συχνά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης, λόγω τόσο της ύπαρξης σημαντικών πηγών, όσο και της ιδιάζουσας τοπογραφίας και μετεωρολογικών συνθηκών (μεγάλο ποσοστό ημερών με υψηλή θερμοκρασία και ηλιοφάνεια). Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας ήταν ο υπολογισμός της μέσης 24-ωρης προσωπικής έκθεσης υποομάδων πληθυσμού της Αθήνας σε μικροσωματίδια PM_{10} . Παράλληλα μελετήθηκε η επιμέρους συνεισφορά των διαφορετικών μικροπεριβαλλόντων στην ολική έκθεση, και η συμβολή συγκεκριμένων εσωτερικών πηγών ρύπανσης (κάπνισμα, μαγείρεμα) στην διαμόρφωση αυξημένων επιπέδων σωματιδιακής συγκέντρωσης.

Η εκτίμηση της προσωπικής έκθεσης πραγματοποιήθηκε μέσω μοντέλου έκθεσης που βασίζεται στην μικροπεριβαλλοντική προσέγγιση (Burke et al. 2001, Wilson et al. 2000, Klepeis 1996). Η προσέγγιση αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη και στηρίζεται στην ανάλυση δεδομένων που αφορούν τα επίπεδα συγκέντρωσης σε διαφορετικά εσωτερικά μικροπεριβάλλοντα και στην εξωτερική ατμόσφαιρα, και την χωρο-χρονική απασχόληση των υπό μελέτη πληθυσμιακών ομάδων.

Τα τελικά αποτελέσματα αφορούν τρεις πληθυσμιακές ομάδες: παιδιά προεφηβικής ηλικίας, ενήλικες εργαζόμενοι και ηλικιωμένοι-συνταξιούχοι. Επιλέχθηκαν επίσης δύο τύποι περιοχών την Αθήνας: οικιστική περιοχή στο κέντρο της Αθήνας (ΚΑ) και προαστιακή περιοχή με εμπορική δραστηριότητα (ΠΑ). Και οι δύο τύποι περιοχών εμφανίζουν υψηλά εξωτερικά επίπεδα σωματιδίων, καθιστώντας ενδιαφέρουσα την μελέτη της έκθεσης του πληθυσμού που κινείται σε αυτές.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου έκθεσης προέρχονται από μετρήσεις πεδίου στην περιοχή της Αθήνας, από προηγούμενες μελέτες της επιστημονικής ομάδας. Τα υπολογιζόμενα επίπεδα έκθεσης συγκρίθηκαν με την 24ωρη οριακή τιμή για την εξωτερική συγκέντρωση που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ παράλληλα επισημάνθηκαν σημαντικοί παράγοντες που είναι δυνατόν να καθορίζουν τα επίπεδα των συγκεντρώσεων.

3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΘΕΣΗΣ

Το μοντέλο έκθεσης που εφαρμόστηκε βασίζεται στην μικροπεριβαλλοντική προσέγγιση των Wilson et al. (2000), η οποία εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$E = \frac{1}{T} \cdot \sum_j \int C_j \cdot dt_j \quad (3.1)$$

όπου: C_j η χρονικά μεταβαλλόμενη συγκέντρωση στο μικρο-περιβάλλον j και t_j ο χρόνος παραμονής στο εν λόγω μικρο-περιβάλλον.

Για την εφαρμογή του μοντέλου ήταν απαραίτητη η εκτίμηση των επιπέδων συγκέντρωσης (C_j) και ο χρόνος παραμονής σε αυτά, βάσει των ημερήσιων προγραμμάτων κίνησης και απασχόλησης των πληθυσμιακών ομάδων. Το χρονικό βήμα κατά τους υπολογισμούς ορίστηκε στα 15 λεπτά. Υπολογίστηκαν η μέση 24ωρη προσωπική έκθεση για κάθε υποομάδα πληθυσμού καθώς και η επιμέρους συνεισφορά κάθε μικροπεριβάλλοντος σε αυτή.

3.2.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ

Κατά την εφαρμογή του μοντέλου, αρχικά υπολογίστηκαν οι εσωτερικές συγκεντρώσεις με χρήση της δυναμικής εξίσωσης ισοζυγίου μάζας:

$$\frac{dC_{in}(t)}{dt} = \alpha \cdot P \cdot C_{out}(t) - (\alpha + k) \cdot C_{in}(t) + \frac{Q_{is}}{V} \Rightarrow \quad (3.2)$$

$$C_{in}(t) = \frac{\alpha \cdot P \cdot C_{out}(t)}{k + \alpha} \cdot (1 - e^{-(k+\alpha)\Delta t}) + C_{in}(t - \Delta t) \cdot e^{-(k+\alpha)\Delta t} + C_{ig}$$

όπου: C_{in} : εσωτερική συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{out} : εξωτερική συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{ig} : συγκέντρωση από εσωτερικές πηγές ρύπανσης (κάπνισμα & μαγείρεμα) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

α : ρυθμός εξαερισμού (hr^{-1})

P : συντελεστής διείσδυσης μικροσωματιδίων

k : συντελεστής αποσάθρωσης (hr^{-1})

Το παραπάνω μοντέλο δυναμικής εκτίμησης της εσωτερικής συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε για δύο βασικά μικροπεριβάλλοντα: την κατοικία και τον χώρο εργασίας (γραφείο). Και για τους δύο αυτούς τύπους χώρων υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα συγκέντρωσης από προγενέστερες καμπάνιες μετρήσεων της ομάδας. Παρ'όλα αυτά επιλέχθηκε η χρήση του μοντέλου εκτίμησης έτσι ώστε να υπολογιστεί η διακύμανση της εσωτερικής συγκέντρωσης σε μικρά διαστήματα (15 λεπτών) για διαφορετικά σενάρια εσωτερικών και εξωτερικών συνθηκών, πχ. για περιοχές με διαφορετική επιβάρυνση όσο αφορά την ρύπανση της εξωτερικής ατμόσφαιρας, και για διάφορες δραστηριότητες στο εσωτερικό.

Σαν εσωτερική πηγή ρύπανσης για το μεν μικροπεριβάλλον του γραφείου θεωρήθηκε μόνο το τσιγάρο για το δε σπίτι το τσιγάρο και οι εκπομπές από το μαγείρεμα. Οι υπολογισμοί έγιναν υποθέτοντας ότι κάθε καπνιστής καπνίζει ένα τσιγάρο ανά ώρα, δηλαδή μεσολαβεί χρόνος μιας ώρα μέχρι να ανάψει το επόμενο τσιγάρο (Dimitrouloroulou et al. 2005), και η συχνότητα αυτή επαναλαμβάνεται μέσα στο εικοσιτετράωρό του εφόσον είναι στο γραφείο ή στο σπίτι και δεν κοιμάται, ακολουθώντας έτσι ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα καπνίσματος (Ott 1999). Όσον αφορά το μαγείρεμα, δεδομένου ότι οι μαγειρικές συνήθειες των ελλήνων δεν προκαλούν σημαντική εκπομπή ρύπων (πχ. χρήση ηλεκτρικής κουζίνας) υποτέθηκε ότι ο μέσος χρόνος μαγειρέματος που συμβάλει στην συγκέντρωση είναι 10 λεπτά ημερησίως. Επιπλέον υποθέσαμε ότι μετά το μαγείρεμα ακολουθούν 15 λεπτά με ανοιχτά παράθυρα προκειμένου να γίνει καλύτερος αερισμός του σπιτιού. Τιμές για τον ρυθμό εκπομπής σωματιδίων από τις δύο παραπάνω πηγές ελήφθησαν από την διεθνή βιβλιογραφία. Άλλες εσωτερικές πηγές όπως ξησκόνισμα-σκούπισμα και η παρουσία ανθρώπινης δραστηριότητας δε λήφθησαν υπόψη λόγω έλλειψης στοιχείων για τον ρυθμό εκπομπής. Επομένως, η συγκέντρωση ο ρυθμός εσωτερικής παραγωγής σωματιδίων ισούται με:

Για τον χώρο της κατοικίας: $C_{ig} = (N_{cig} * E.R._{cig} + T_{cook} * E.R._{cook})/V$

Για τον χώρο του γραφείου: $C_{ig} = (N_{cig} * E.R._{cig})/V$

όπου: N_{cig} : ο αριθμός τσιγάρων που καπνίστηκαν

$E.R._{cig}$: ο ρυθμός εκπομπής σωματιδίων PM_{10} ανά τσιγάρο (μg/τσιγάρο)

T_{cook} : ο χρόνος μαγειρέματος (min)

$E.R._{cook}$: ο ρυθμός εκπομπής σωματιδίων PM_{10} (μg/min)

V : ο όγκος των υπό μελέτη χώρου (m^3).

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμέτρους α , P και k είναι αντιπροσωπευτικές για την περιοχή της Αθήνας καθώς προέκυψαν από μετρήσεις και υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας στα πλαίσια προηγούμενης έρευνας (Διαπούλη 2008). Οι τιμές αφορούν χώρους με φυσικό αερισμό και κλειστά παράθυρα. Στην ειδική περίπτωση που τα παράθυρα είναι ανοιχτά (κατά τα διαστήματα αερισμού

των χώρων), ο ρυθμός εξαερισμού (α) θεωρείται ότι διπλασιάζεται (Dimitroulopoulou et al. 2005) και η ικανότητα διείσδυσης (P) ισούται με 1,0.

Όσον αφορά άλλα μικροπεριβάλλοντα (όπως σχολικές αίθουσες, Μ.Μ.Μ, ιδιωτικά αυτοκίνητα, χώροι μαζικής εστίασης-διασκέδασης), χρησιμοποιήθηκε ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική συγκέντρωση (indoor-to-outdoor, I/O) που είχε υπολογιστεί βάσει προηγούμενων μετρήσεων της ομάδας. Ειδικά για την περίπτωση των χώρων διασκέδασης, οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν χώρους όπου επιτρεπόταν το κάπνισμα.

Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την εκτίμηση των εσωτερικών συγκεντρώσεων όσο και για τις περιόδους όπου θεωρείται ότι το υπό μελέτη άτομο (πληθυσμιακή ομάδα) κινείται σε εξωτερικό χώρο, ελήφθησαν από αποτελέσματα προηγούμενων μετρήσεων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν χειμερινή περίοδο και έχουν ληφθεί από δύο διαφορετικές περιοχές της Αθήνας: (1) οικιστική περιοχή στο Κέντρο της Αθήνας (ΚΑ) και (2) Προάστιο της Αθήνας με εμπορική δραστηριότητα και θέση δειγματοληψίας κοντά σε κεντρική οδική αρτηρία (ΠΑ).

Τέλος, συγκεκριμένες τιμές δόθηκαν για τον όγκο των χώρων κατοικιών (υπνοδωμάτιο και κουζίνα 30 m^3 , καθιστικό 50 m^3) και γραφείων (50 m^3). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων στα διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.1.

3.2.2. ΧΩΡΟ-ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ ΟΜΑΔΩΝ ΠΛΗΘΥΣΜΟΥ

Τρεις βασικές υποομάδες πληθυσμού μελετήθηκαν (παιδιά, εργαζόμενοι, ηλικιωμένοι-συνταξιούχοι) και εξετάστηκαν οι διαφορές στα επίπεδα έκθεσης που προέκυψαν με γνώμονα την επίδραση των διαφορετικών ημερήσιων προγραμμάτων της κάθε υποομάδας. Τα σενάρια ημερήσιων προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν βασίζονται στην χωρο-χρονική απασχόληση των υποομάδων όπως παρουσιάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία (Klepeis et al.

1996), με τα δεδομένα προσαρμοσμένα στις συνθήκες και συνήθειες του πληθυσμού της Αθήνας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

Πίνακας 3.1. Τιμές παραμέτρων για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων στα διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα.

Παράμετρος	Τιμές	Βιβλιογραφική Αναφορά
Συγκέντρωση σε PM ₁₀	Μέση 24-ωρη τιμή: ΚΑ: 80,6 ± 26,0 μg m ⁻³ ΠΑ: 70,0 ± 25,0 μg m ⁻³ (χρονικό βήμα: 15 λεπτά)	Διαπούλη 2008: Πειραματικές μετρήσεις στη χειμερινή περίοδο 2005-2006
Λόγος I/O για σχολεία	1,5 (τάξη) 2,75 (αίθουσα γυμναστικής)	Diarouli et al. 2007
Λόγος I/O για ιδιωτικά οχήματα	2	Diarouli et al. 2008: Πειραματικές μετρήσεις κατά τη χειμερινή περίοδο 2003-2006
Λόγος I/O για μετρό	1,2	Sanida et al. 2010: Πειραματικές μετρήσεις κατά την περίοδο 2009
Λόγος I/O δείκτης για χώρους διασκέδασης (επιτρέπεται το κάπνισμα)	25	Μη δημοσιευμένα δεδομένα: Πειραματικές μετρήσεις κατά την περίοδο 2003-2004
<i>Παράμετροι εξαερισμού (κλειστά παράθυρα)</i>		
Ρυθμός εξαερισμού (α)	1,19 hr ⁻¹	Διαπούλη 2008
Συντελεστής διείσδυσης (P)	0,76	
Συντελεστής αποσάθρωσης (k)	0,29 hr ⁻¹	
<i>Εκπομπές από εσωτερικές πηγές ρύπανσης</i>		
Κάπνισμα	22 mg / τσιγάρο	Wallace, 1996
Μαγείρεμα	4,1 mg / min	Ozkaynak, 1996
<i>Όγκος δωματίων</i>		
Υπνοδωμάτιο / Κουζίνα	30 m ³	
Καθιστικό / Γραφείο	50 m ³ / 50 m ³	

Πιο αναλυτικά, τα σενάρια που σχετίζονται με την έκθεση των παιδιών αφορούσαν το μικροπεριβάλλον της κατοικίας, του μεταφορικού μέσου (διαδρομή προς και από το σχολείο), του σχολείου και το εξωτερικό περιβάλλον (παιχνίδι-βόλτα κλπ). Στο σπίτι μελετήθηκαν οι περιπτώσεις να

μην καπνίζει κανείς από τους γονείς ή να καπνίζει ο ένας από τους δύο ή και οι δύο. Εξετάστηκαν επίσης οι περιπτώσεις να πηγαίνει το παιδί στο σχολείο με το αυτοκίνητο ή με τα πόδια. Στην περίπτωση του μικροπεριβάλλοντος του σχολείου, θεωρήθηκε ότι θα βρίσκονται για μια διδακτική ώρα μέσα στη μέρα στο γυμναστήριο. Επιπλέον, ανάλογα σενάρια έγιναν για τα Σαβ/κύριακα και αργίες, ημέρες κατά τις οποίες τα παιδιά δεν έχουν σχολείο και περνούν διαφορετικά το χρόνο τους, ενδεχομένως με περισσότερες ώρες μέσα στο σπίτι ή σε εξωτερικό παιχνίδι.

Σχετικά με τους ενήλικες εργαζόμενους εξετάστηκαν κι εδώ αρκετές διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με το πόσους καπνιστές έχει το κάθε σπίτι (κανέναν ή έναν ή δύο) και πόσοι καπνιστές βρίσκονται στον εργασιακό χώρο. Ακόμα μελετήθηκαν σενάρια που περιελάμβαναν χρόνο μαγειρέματος στο σπίτι ή όχι, και πιθανοί συνδυασμοί (πχ. και καπνιστές και μαγείρεμα). Ως προς το μέσο μεταφοράς, ερευνήθηκε κατά πόσο το διαφορετικό μέσο προς την εργασία ή τη διασκέδαση επηρεάζει την συνολική έκθεση. Επιπλέον, ανάλογα σενάρια έγιναν για τα Σαβ/κύριακα και αργίες, ημέρες κατά τις οποίες οι ενήλικες δεν πηγαίνουν στην εργασία τους και άρα διαχειρίζονται διαφορετικά το χρόνο τους, ενδεχομένως με περισσότερες ώρες μέσα στο σπίτι ή στο εξωτερικό περιβάλλον (περίπατος, ψώνια) ή σε διασκέδαση.

Τέλος, για την υποομάδα των ηλικιωμένων-συνταξιούχων, θεωρήθηκε ότι το πρόγραμμά τους είναι συνήθως αρκετά πιο απλό από τις υπόλοιπες υποομάδες. Τα σενάρια αφορούσαν περιπτώσεις καπνιζόντων εντός της οικίας, χρόνο μαγειρέματος ή όχι και πιθανούς συνδυασμούς, καθώς και χρόνο στο εξωτερικό περιβάλλον (για ψώνια κλπ). Τα Σαβ/κύριακα το πρόγραμμά τους δεν παρουσίασε δραστικές αλλαγές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα σενάρια που εξετάστηκαν για κάθε υποομάδα πληθυσμού έγιναν και για τις δύο περιοχές της Αθήνας, διατηρώντας μεν το ίδιο πρόγραμμα δραστηριοτήτων, αλλάζοντας όμως κάθε φορά τις εξωτερικές συγκεντρώσεις ανάλογα με την περιοχή στην οποία τα άτομα βρίσκονταν κάθε φορά (σπίτι ή γραφείο ή σχολείο ή εξωτερικό περιβάλλον).

4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εφαρμόστηκε μοντέλο υπολογισμού της μέσης 24-ωρης προσωπικής έκθεσης σε σωματίδια PM₁₀, για τρεις υποομάδες πληθυσμού και δύο διαφορετικές περιοχές της Αθήνας, με ανάπτυξη σεναρίων χωρο-χρονικής απασχόλησης για τις καθημερινές και τις μη εργάσιμες ημέρες (Κυριακή ή αργίες) ξεχωριστά.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά πληθυσμιακή ομάδα. Για κάθε ομάδα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της μέσης 24-ωρης έκθεσης σε PM₁₀, ανά περιοχή και ημέρα (εργάσιμη ή μη), για διαφορετικά σενάρια (Πίνακες 4.1, 4.4 και 4.7). Επίσης παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα της διακύμανσης των επιπέδων έκθεσης μέσα στην ημέρα (Σχήματα 4.1 – 4.4 και 4.6 – 4.7). Τέλος παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την συνεισφορά κάθε μικροπεριβάλλοντος στην μέση προσωπική έκθεση που υπολογίστηκε (Πίνακες 4.2 - 4.3, 4.5 - 4.6 και 4.8 - 4.9).

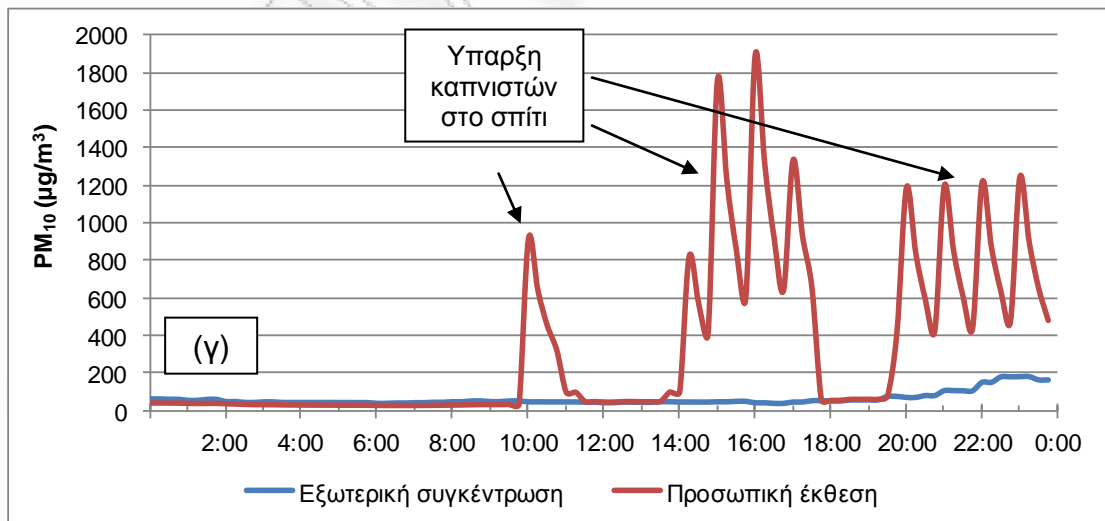
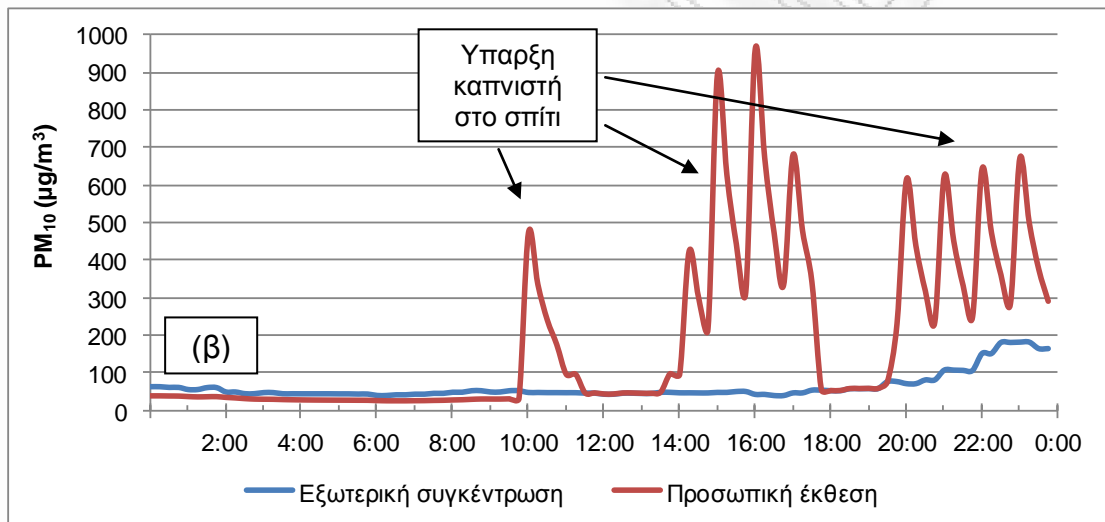
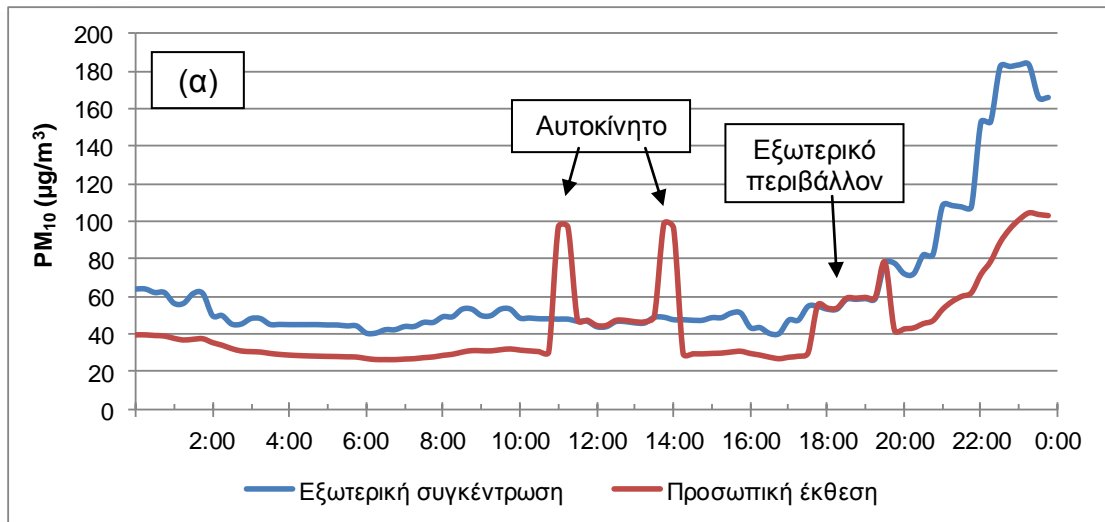
4.1. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΠΑΙΔΙΩΝ

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, ανεξάρτητα από την περιοχή κατοικίας (κέντρο, προάστια), τα επίπεδα προσωπικής έκθεσης είναι πολύ υψηλά και υπερβαίνουν το όριο των 50 μg/m³ που έχει θέσει η Ε.Ε. για την συγκέντρωση των σωματιδίων PM₁₀ στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Μοναδική εξαίρεση, με επίπεδα έκθεσης μικρότερα από το πρότυπο ποιότητας, είναι η περίπτωση μ εργάσιμων ημερών και ειδικά για το σενάριο μη ύπαρξης καπνιστών μέσα στην κατοικία.

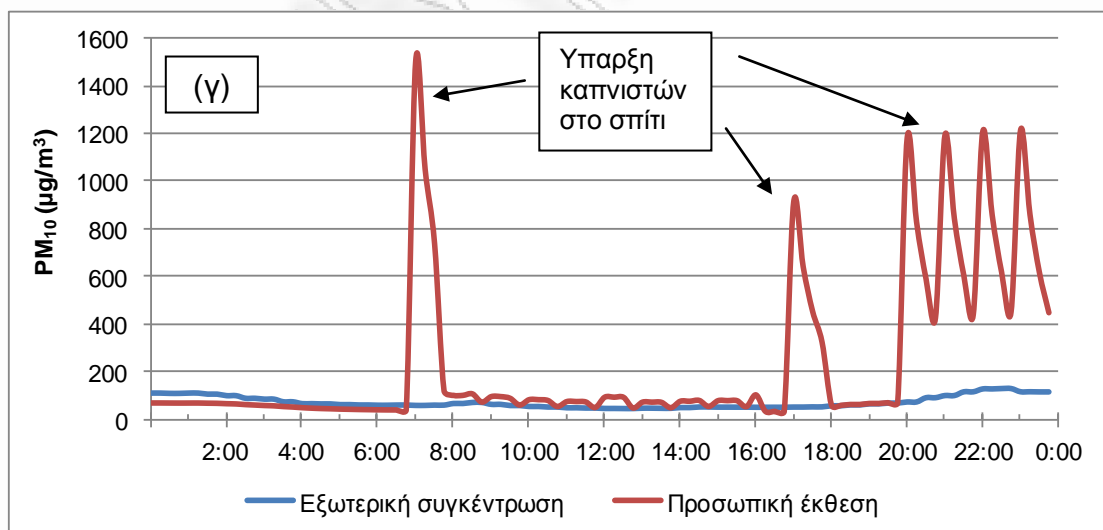
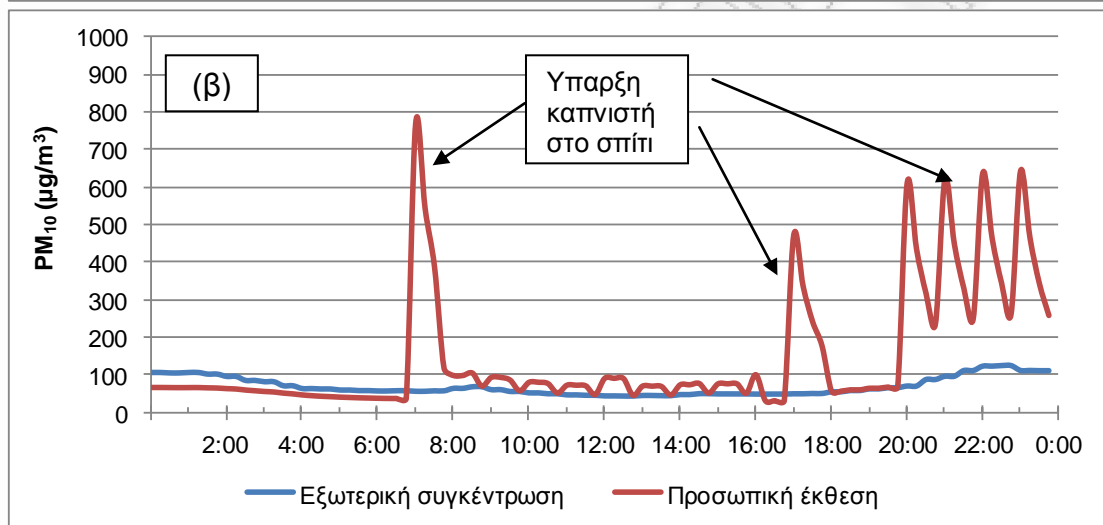
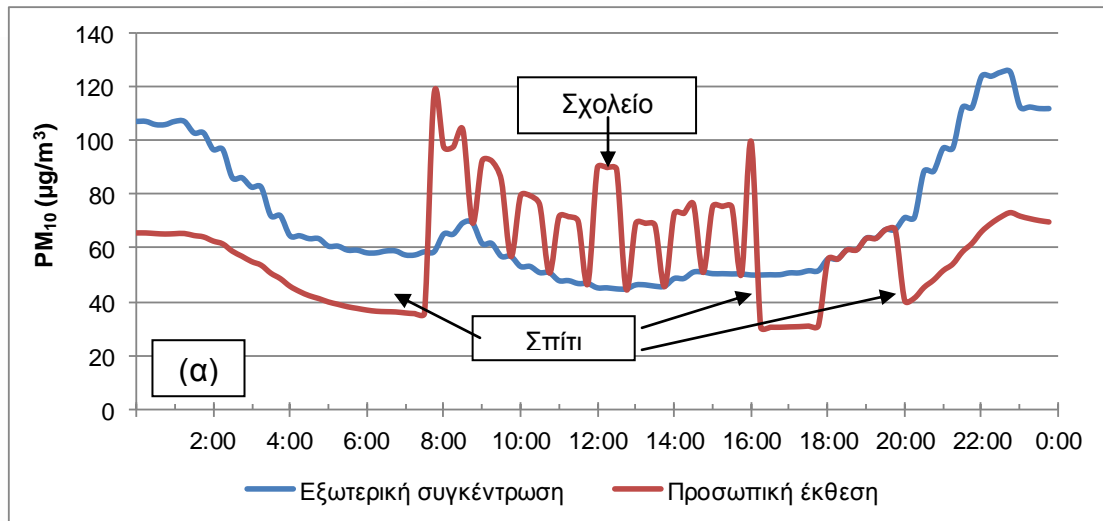
Τα διαγράμματα βραχυχρόνιας μεταβολής της έκθεσης, σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μεταβολή της εξωτερικής συγκέντρωσης, δίνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το πώς οι δραστηριότητες και οι χώροι στους οποίους κινούνται τα άτομα μέσα στη ημέρα επηρεάζουν την προσωπική τους έκθεση. Κατά τη διάρκεια της νύχτας για παράδειγμα οι συγκεντρώσεις είναι πολύ χαμηλές και μάλιστα κάτω από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις όπως και αναμενόταν διότι τα άτομα δεν εκτίθενται σε σημαντικές πηγές εσωτερικών

Πίνακας 4.1. Μέση 24-ωρη έκθεση σε PM₁₀ (μg/m³) για την υποομάδα των Παιδιών

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	ΜΕΣΗ 24-ΩΡΗ ΕΚΘΕΣΗ	
		Κεντρο Αθηνas	Προαστιο
Κανένas Καπνιστής	Καθημερινή	71,9	60,3
1 Καπνιστής (σπίτι)		166,9	147,6
2 Καπνιστές (σπίτι)		261,8	234,8
Κανένas Καπνιστής	Κυριακή	44,1	37,6
1 Καπνιστής (σπίτι)		180,6	180,6
2 Καπνιστές (σπίτι)		330,0	323,6



Σχήμα 4.1. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των παιδιών, στο κέντρο της Αθήνας, ημέρα Κυριακή, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής, (β) 1 καπνιστής, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.



Σχήμα 4.2. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των παιδιών, στα Προάστια, Καθημερινές, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής, (β) 1 καπνιστής, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.

ρύπων όπως το τσιγάρο ή το μαγείρεμα. Η μέση 24-ωρη έκθεση επηρεάζεται από το μικροπεριβάλλον του σχολείου ενώ αυξάνεται σημαντικά στο σπίτι με την ύπαρξη ενός γονέα καπνιστή και ακόμα περισσότερο όταν και οι δύο γονείς είναι καπνιστές.

Όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 4.2 και 4.3, στην περίπτωση μη ύπαρξης καπνιστή στο σπίτι, και ιδιαίτερα για την περίπτωση των προαστιακών περιοχών, η συνεισφορά του σπιτιού και του σχολείου είναι παρόμοιες, παρόλο που ο χρόνος παραμονής στο σπίτι είναι σχεδόν ο διπλάσιος με αυτόν στο σχολείο. Όσον αφορά τα μικροπεριβάλλοντα μετακίνησης, η μεταφορά με ιδιωτικό όχημα ή με τα πόδια είχαν παρόμοια συνεισφορά (περίπου 3%) .

Πίνακας 4.2_ Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των παιδιών - κατοίκων του κέντρου.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ			
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΜΕΤΑΦ. ΜΕΣΟ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	51,2	34,1	4,8	9,8
1 Καπνιστής (σπίτι)	Καθημερινή	79,9	14,7	2,1	4,2
2 Καπνιστές (σπίτι)	Καθημερινή	86,6	9,4	1,3	2,7
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	69,8	0	9,1	21,1
1 Καπνιστής (σπίτι)	Κυριακή	92,9	0	2,2	5,0
2 Καπνιστές (σπίτι)	Κυριακή	96,0	0	1,2	2,8

Πίνακας 4.3. Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των παιδιών - κατοίκων των προαστίων.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ			
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΣΧΟΛΕΙΟ	ΜΕΤΑΦ. ΜΕΣΟ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	47,1	40,7	3,7	8,5
1 Καπνιστής (σπίτι)	Καθημερινή	78,4	16,6	1,5	3,5
2 Καπνιστές (σπίτι)	Καθημερινή	86,4	10,5	1,0	2,2
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	75,6	0	7,3	17,1
1 Καπνιστής (σπίτι)	Κυριακή	94,9	0	1,5	3,6
2 Καπνιστές (σπίτι)	Κυριακή	97,2	0	0,9	2,0

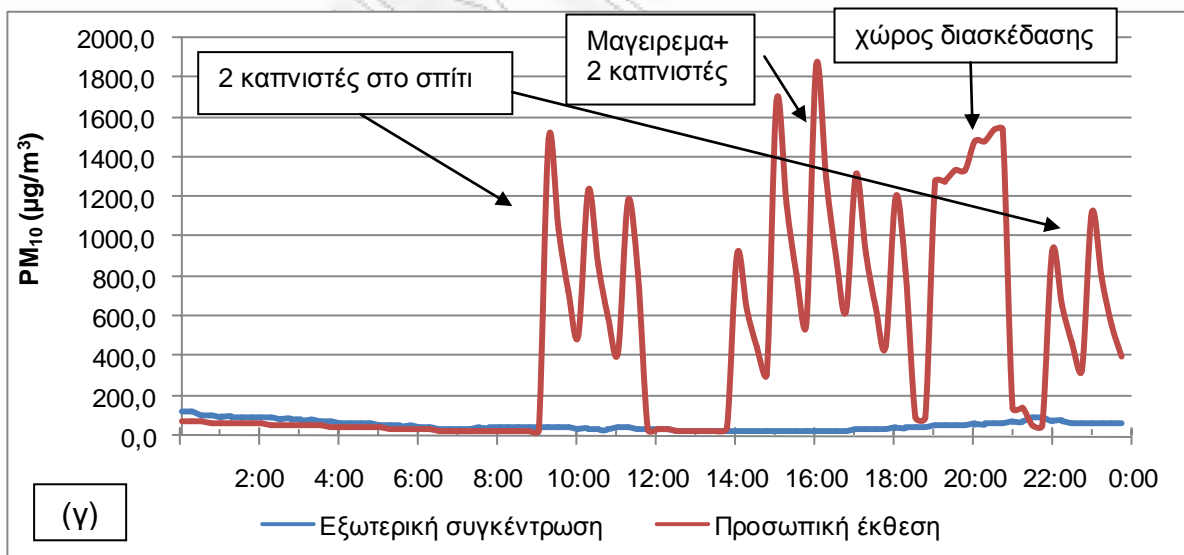
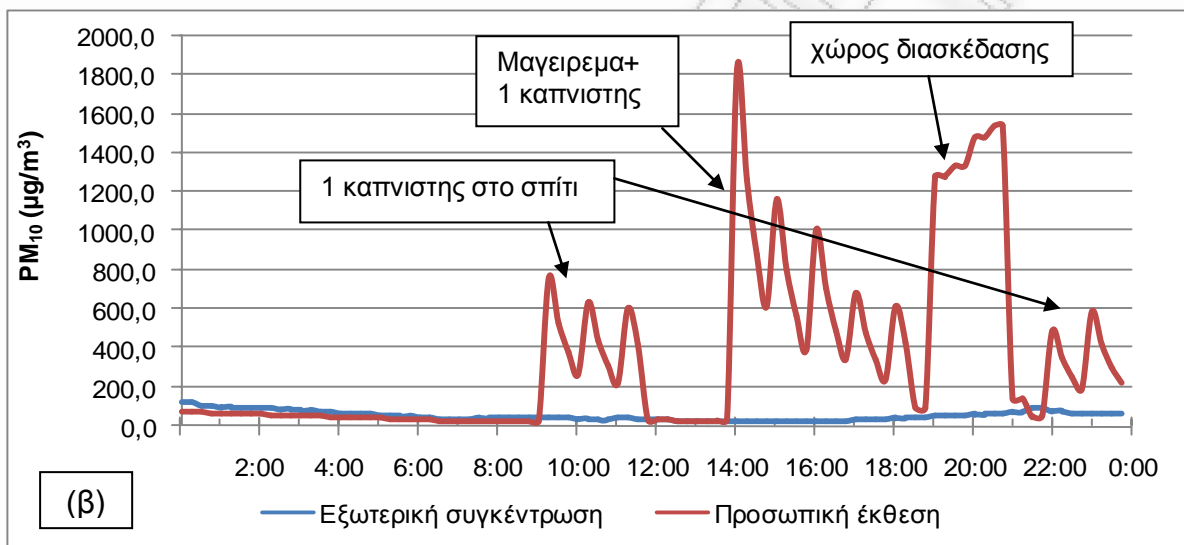
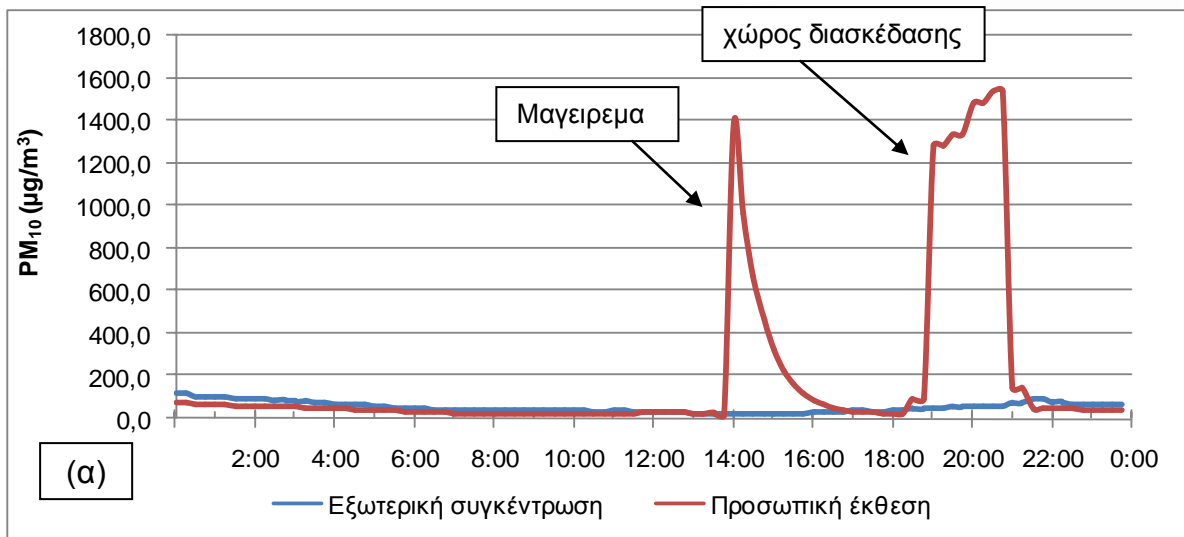
4.2. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ

Η έκθεση της υποομάδας των εργαζομένων σε PM_{10} είναι πολύ μεγάλη ενώ δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές λόγω διαφορετικής περιοχής κατοικίας. Όπως παρατηρείται όμως, η συγκέντρωση υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο συγκέντρωσης της Ε.Ε. σε κάθε σενάριο και για κάθε μέρα (Πίνακας 4.4). Κύρια πηγή της αυξημένης έκθεσης φαίνεται να είναι το κάπνισμα στους χώρους εργασίας και διασκέδασης.

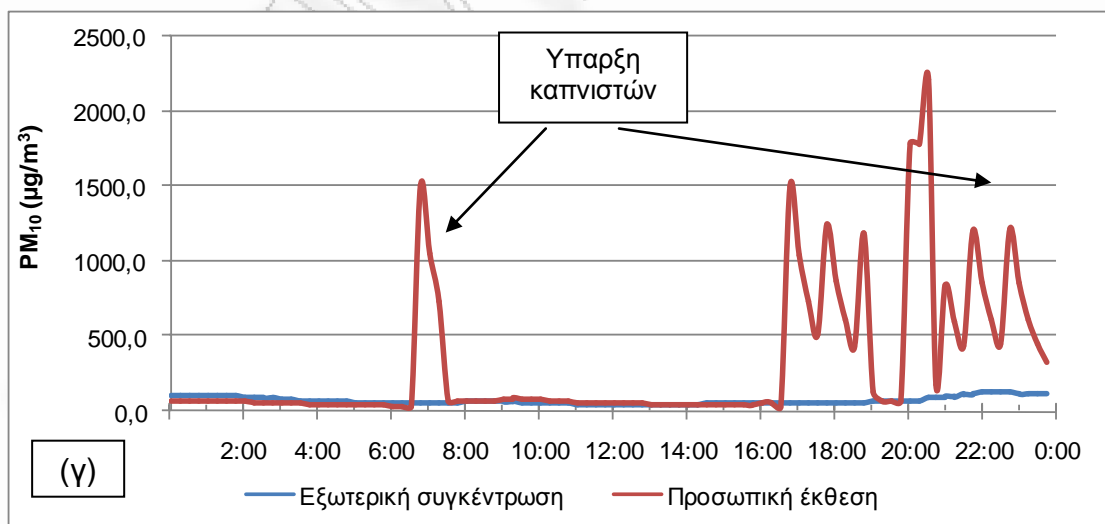
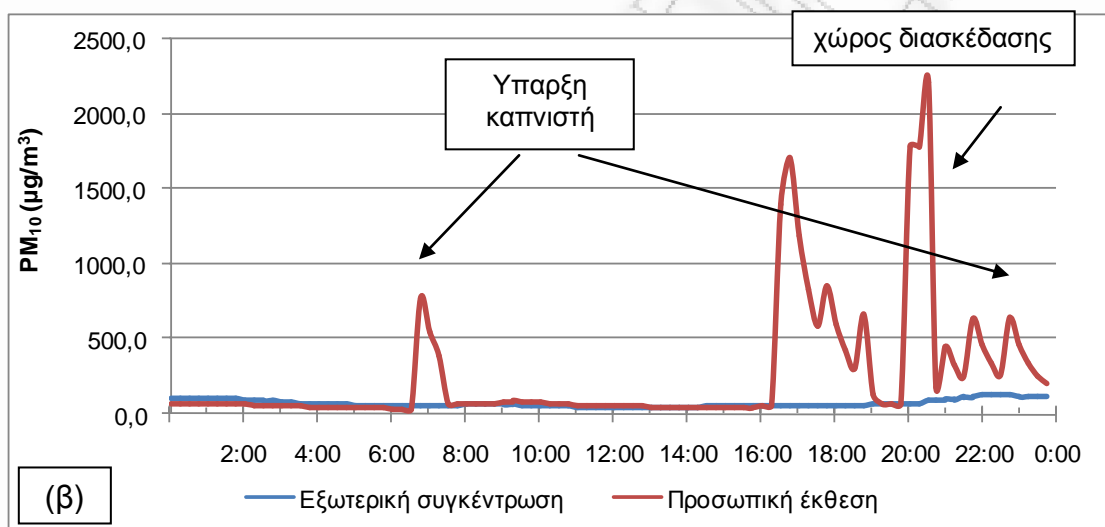
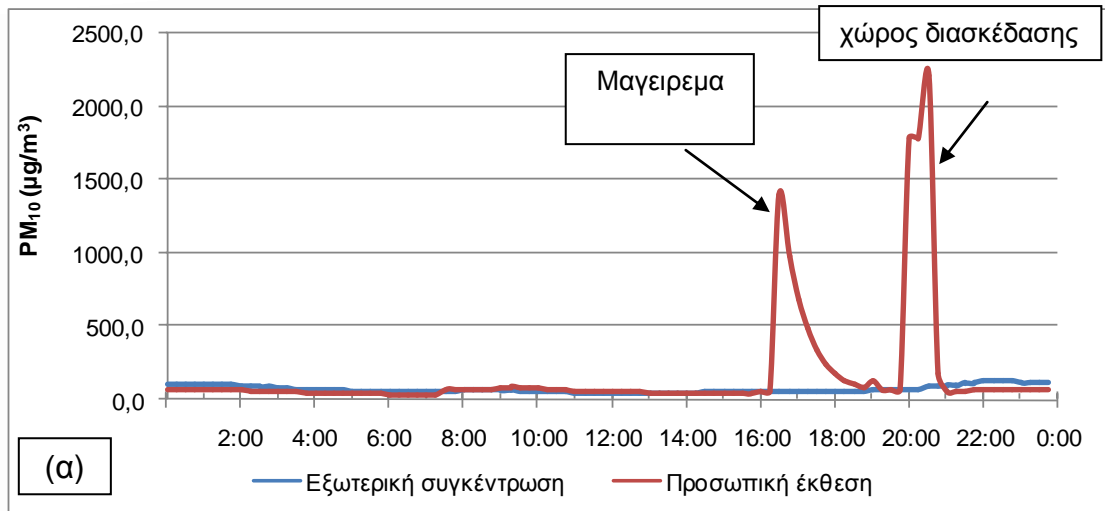
Πίνακας 4.4. Μέση 24-ωρη έκθεση σε PM₁₀ (μg/m³) για την υποομάδα των Εργαζομένων

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	ΜΕΣΗ 24-ΩΡΗ ΕΚΘΕΣΗ	
		Κεντρο Αθηνas	Προαστιο
Κανένas Καπνιστής	Καθημερινή	156,7	114,24
Κανένas Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		201,7	159,19
1 Καπνιστής (σπίτι)		250,4	207,9
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		299,0	256,5
2 Καπνιστές (1 σπίτι/1 εργασία)		368,2	325,77
2 Καπνιστές (σπίτι)		351,4	308,9
3 Καπνιστές (1 σπίτι/2 εργασία)		482,4	439,96
3 Καπνιστές (2 σπίτι/1 εργασία)		465,6	423,1
4 Καπνιστές (2 σπίτι/2 εργασία)		579,8	537,3

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	ΜΕΣΗ 24-ΩΡΗ ΕΚΘΕΣΗ	
		Κεντρο Αθηνas	Προαστιο
Κανένas Καπνιστής	Κυριακή	192,5	152,3
Κανένas Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		238,5	198,3
1 Καπνιστής (σπίτι)		348,1	307,8
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		394,0	353,8
2 Καπνιστές (σπίτι)		503,6	463,4



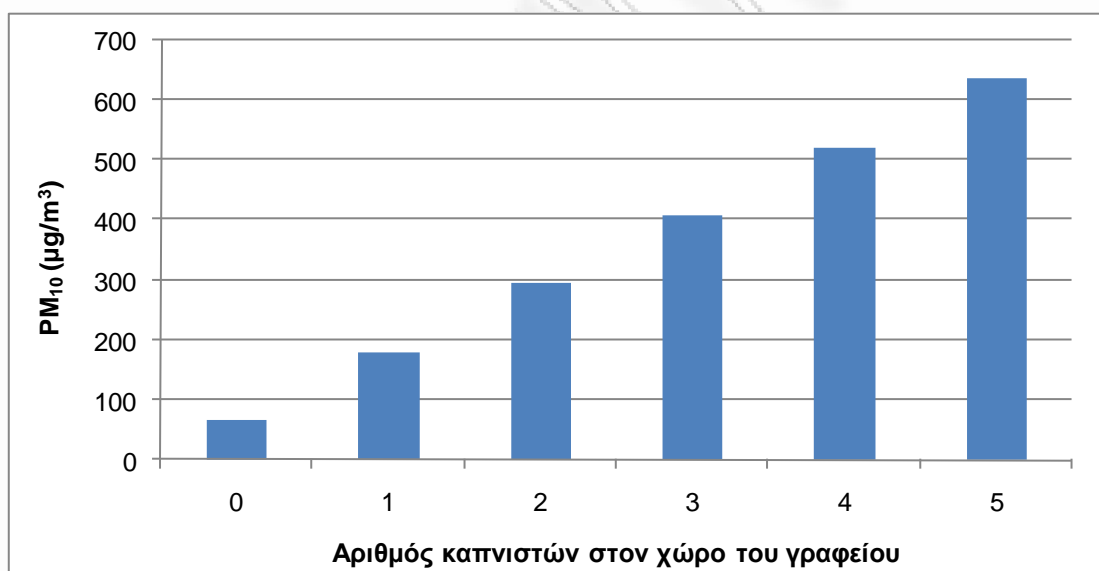
Σχήμα 4.3. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των εργαζομένων, στο κέντρο της Αθήνας, Κυριακές, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής+μαγείρεμα, (β) 1 καπνιστής+μαγείρεμα, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.



Σχήμα 4.4. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των εργαζομένων, στα Προάστια, Καθημερινές, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής+μαγείρεμα, (β) 1 καπνιστής+μαγείρεμα, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.

Τα παραπάνω διαγράμματα τονίζουν την συμβολή της ύπαρξης καπνιστών σε κλειστούς χώρους στην αύξηση των επιπέδων έκθεσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι χώροι διασκέδασης, συνήθως χώροι μικροί με συνοστισμό και πολλούς καπνιστές, όπου η έκθεση σε σωματίδια είναι εξαιρετικά υψηλή.

Αντίστοιχα, η συνεισφορά του μικροπεριβάλλοντος του εργασιακού χώρου στην ολική προσωπική έκθεση αυξάνει συνεχώς με την παρουσία κάθε επιπλέον καπνιστή. Χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα που ακολουθεί στο οποίο φαίνεται πόσο ο κάθε επιπλέον καπνιστής σε ένα γραφείο επηρεάζει τα επίπεδα έκθεσης. Στην περίπτωση ενός γραφείου (50m^2) με 5 καπνιστές για παράδειγμα η συγκέντρωση φτάνει πάνω από τα $600\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 4.5. Μεταβολή της συγκέντρωσης των PM₁₀ σε χώρο γραφείου σε συνάρτηση με τον αριθμό καπνιστών.

Πίνακας 4.5. Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των Εργαζόμενων - κατοίκων του κέντρου.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	24,5	17,0	4,5	52,1	0,9
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		46,4	12,1	3,5	38,0	1,0
1 Καπνιστής (σπίτι)		60,1	10,1	2,3	26,6	0,9
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		67,4	6,3	2,0	23,6	0,7
2 Καπνιστές (1 σπίτι/1 εργασία)		37,2	41,5	1,8	19,0	0,5
2 Καπνιστές (σπίτι)		73,7	6,4	1,9	17,4	0,6
3 Καπνιστές (1 σπίτι/2 εργασία)		24,5	59,2	1,3	14,5	0,5
3 Καπνιστές (2 σπίτι/1 εργασία)		56,5	30,6	1,4	11,0	0,5
4 Καπνιστές (2 σπίτι/2 εργασία)		43,3	45,0	1,1	10,2	0,4

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	17,1	0	3,0	79,5	1,4
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		36,5	0	2,4	61,1	1,0
1 Καπνιστής (σπίτι)		61,4	0	1,6	36,3	0,7
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		65,2	0	1,2	33,0	0,6
2 Καπνιστές (σπίτι)		75,0	0	1,0	23,5	0,5

Πίνακας 4.6. Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των Εργαζόμενων - κατοίκων των προαστίων.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	23,9	16,5	5,1	52,7	1,8
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		45,4	11,8	3,7	37,8	1,3
1 Καπνιστής (σπίτι)		59,2	9,0	2,8	28,6	1,0
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		66,1	7,3	2,3	23,5	0,8
2 Καπνιστές (1 σπίτι/1 εργασία)		38,3	40,8	1,8	18,5	0,6
2 Καπνιστές (σπίτι)		71,8	6,1	1,9	19,5	0,7
3 Καπνιστές (1 σπίτι/2 εργασία)		28,3	56,2	1,3	13,7	0,5
3 Καπνιστές (2 σπίτι/1 εργασία)		52,5	31,4	1,4	14,0	0,5
4 Καπνιστές (2 σπίτι/2 εργασία)		41,3	46,0	1,1	11,2	0,4

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟ ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	18,1	0	3,2	77,2	1,6
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		37,1	0	2,4	59,3	1,2
1 Καπνιστής (σπίτι)		59,5	0	1,6	38,2	0,7
1 Καπνιστής (σπίτι) + Μαγείρεμα (10')		64,8	0	1,4	33,2	0,7
2 Καπνιστές (σπίτι)		73,1	0	1,0	25,4	0,5

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η μεγαλύτερη συνεισφορά στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των Εργαζόμενων αντιστοιχεί στα μικροπεριβάλλοντα όπου υπάρχουν περισσότεροι καπνιστές και στα οποία τα άτομα περνούν το μεγαλύτερο μέρος του καθημερινού τους χρόνου, όπως το σπίτι ή οι χώροι διασκέδασης και το γραφείο τις καθημερινές.

4.3. ΥΠΟΟΜΑΔΑ ΗΛΙΚΙΩΜΕΝΩΝ-ΣΥΝΤΑΞΙΟΥΧΩΝ

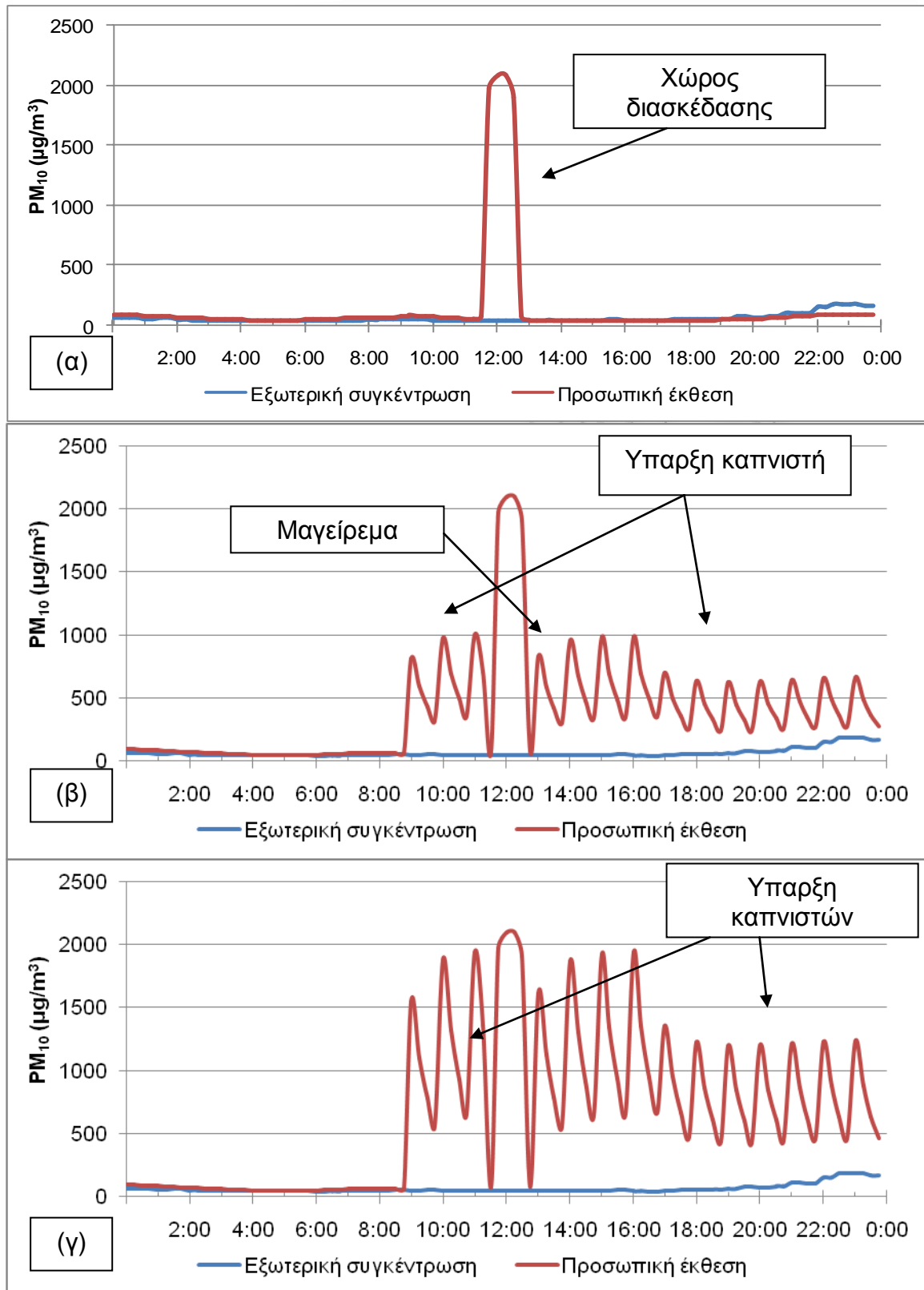
Όπως αναμενόταν, η έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των ηλικιωμένων-συνταξιούχων είναι γενικά σε χαμηλότερα επίπεδα, ιδιαίτερα σε σχέση με την ομάδα των εργαζομένων. Παρόλα αυτά, οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν υπερβαίνουν σημαντικά τα πρότυπα ποιότητας, γεγονός που χρήζει προσοχής δεδομένου ότι πρόκειται για μια υποομάδα ιδιαίτερα ευπαθή στην ατμοσφαιρική ρύπανση (Πίνακας 4.7).

Με βάση τα σενάρια που αναπτύχθηκαν για το καθημερινό πρόγραμμα της συγκεκριμένης υποομάδας, τα άτομα περνούν τον περισσότερο χρόνο της ημέρας στο σπίτι, όπου οι πηγές ρύπων είναι περιορισμένες και ελεγχόμενες και βγαίνουν έξω μόνο για μικρά διαστήματα (βόλτα, ψώνια). Υψηλές συγκεντρώσεις παρουσιάζονται με την ύπαρξη ενός ή και δύο καπνιστών, ενώ και το μαγείρεμα φαίνεται επίσης να επιβαρύνει σημαντικά την κατάσταση (Σχήματα 4.6 - 4.7).

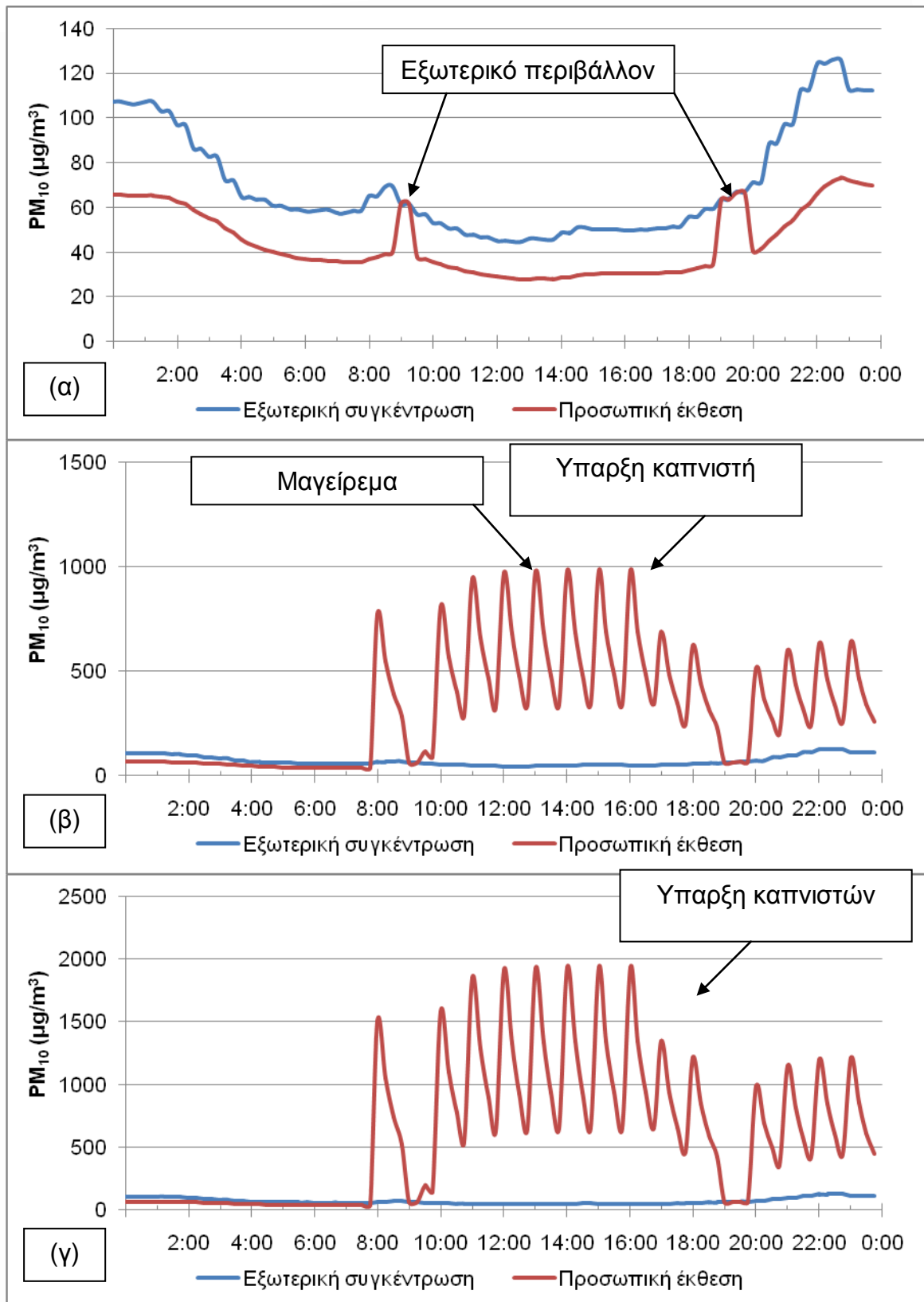
Όπως ήταν αναμενόμενο, ο χώρος της κατοικίας σαν μικροπεριβάλλον συνεισφέρει σχεδόν το 90% στην προσωπική έκθεση. Το ποσοστό αυτό μειώνεται όταν το ημερήσιο πρόγραμμα περιλαμβάνει και κάποιες ώρες διασκέδασης (παραμονή σε καφετέρια ή εστιατόριο όπου επιτρέπεται τον κάπνισμα, στα σενάρια της Κυριακής), οπότε στην ολική έκθεση συνεισφέρει σημαντικά και ο χώρος διασκέδασης (Πίνακες 4.8 – 4.9).

Πίνακας 4.7 Μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των Συνταξιούχων-Ηλικιωμένων

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	ΜΕΣΗ 24ΩΡΗ ΕΚΘΕΣΗ	
		Κέντρο Αθήνας	Προάστιο
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	64,2	44,4
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		110,2	90,4
1 Καπνιστής (σπίτι)		339,9	320,1
2 Καπνιστές (σπίτι)		615,7	595,8
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	143,0	89,1
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		189,0	135,1
1 Καπνιστής (σπίτι)		401,8	347,9
2 Καπνιστές (σπίτι)		660,7	606,7



Σχήμα 4.6. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των Συνταξιούχων, στο κέντρο της Αθήνας, Κυριακές, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής, (β) 1 καπνιστής, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.



Σχήμα 4.7. Ημερήσια διακύμανση της προσωπικής έκθεσης για την υποομάδα των Συνταξιούχων, στα Προάστια, Καθημερινές, για διαφορετικά σενάρια: (α) Κανένα καπνιστής, (β) 1 καπνιστής, (γ) 2 καπνιστές μέσα στον χώρο της κατοικίας.

Πίνακας 4.8. Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των συνταξιούχων- κατοίκων του κέντρου.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦ. ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	88,7	0	3,8	0	7,5
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		93,4	0	2,2	0	4,4
1 Καπνιστής (σπίτι)		97,9	0	0,7	0	1,4
2 Καπνιστές (σπίτι)		98,8	0	0,4	0	0,8
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	40,2	0	0,2	58,7	0,9
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		54,7	0	0,3	44,3	0,7
1 Καπνιστής (σπίτι)		78,7	0	0,1	20,9	0,3
2 Καπνιστές (σπίτι)		87,1	0	0,05	11,7	0,15

Πίνακας 4.9. Συνεισφορά (%) του κάθε μικροπεριβάλλοντος στη μέση 24-ωρη έκθεση σε PM_{10} για την υποομάδα των συνταξιούχων- κατοίκων των προαστίων.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΗΜΕΡΑ	% ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ				
		ΚΑΤΟΙΚΙΑ	ΕΡΓΑΣΙΑ	ΜΕΤΑΦ. ΜΕΣΟ	ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΗ	ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
Κανένας Καπνιστής	Καθημερινή	91,0	0	3,0	0	6,0
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		95,6	0	1,4	0	3,0
1 Καπνιστής (σπίτι)		98,7	0	0,4	0	0,9
2 Καπνιστές (σπίτι)		99,3	0	0,25	0	0,45
Κανένας Καπνιστής	Κυριακή	46,0	0	0,3	53,0	0,7
Κανένας Καπνιστής + Μαγείρεμα (10')		64,4	0	0,25	34,9	0,45
1 Καπνιστής (σπίτι)		86,2	0	0,05	13,6	0,15
2 Καπνιστές (σπίτι)		92,0	0	0,05	7,8	0,15

5. ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ-ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1. ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια εκτίμηση της ολικής έκθεσης σε σωματίδια PM₁₀ για διαφορετικές υποομάδες του πληθυσμού της Αθήνας. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της προσωπικής έκθεσης πρήλθαν από πειραματικά δεδομένα προηγούμενων μετρήσεων της ομάδας σε διαφορετικές περιοχές της Αθήνας και επομένως τα αποτελέσματα κρίνονται αντιπροσωπευτικά για την ολική έκθεση του πληθυσμού της πόλης.

Οι σημαντικότερες γενικές διαπιστώσεις που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της εργασίας είναι:

- Το ημερήσιο πρόγραμμα χωρο-χρονικής απασχόλησης επηρεάζει σημαντικά τα επίπεδα έκθεσης των ατόμων. Για παράδειγμα η μειωμένη δραστηριότητα της ομάδας των ηλικιωμένων ατόμων οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα έκθεσης σε σχέση με τις άλλες δύο υποομάδες. Οι συγκεντρώσεις όμως παραμένουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα, και κρίνονται σοβαρές, δεδομένης και της ευαισθησίας που παρουσιάζει η συγκεκριμένη υποομάδα στην ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Απουσία εσωτερικών πηγών, τα προσωπικά επίπεδα έκθεσης είναι πάντα χαμηλότερα από τα αντίστοιχα εξωτερικά επίπεδα. Παρ'όλα αυτά τα υπολογιζόμενα επίπεδα έκθεσης παραμένουν υψηλά, ιδιαίτερα στην περιοχή του κέντρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή η έκθεση αφορά σε σωματίδια που έχουν παραχθεί στο εξωτερικό περιβάλλον και διεισδύουν στους εσωτερικούς χώρους.
- Το κάπνισμα και το μαγείρεμα αναδεικνύονται ως δύο βασικές εσωτερικές πηγές σωματιδιακής ρύπανσης για τα μικροπεριβάλλοντα στα οποία κινείται καθημερινά ο πληθυσμός της πόλης.
- Ιδιαίτερα η παρουσία καπνιστών αυξάνει σημαντικά τα επίπεδα συγκέντρωσης σε εσωτερικούς χώρους. Σε κάθε σενάριο που εξετάστηκε και για κάθε υποομάδα, η ύπαρξη έστω και ενός καπνιστή

στο σπίτι ή στον χώρο εργασίας οδήγησε σε επίπεδα ολικής έκθεσης πολύ υψηλότερα του ημερήσιου προτύπου που έχει θέσει η Ε.Ε. για την εξωτερική ατμόσφαιρα ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Η κατάσταση επιβαρυνόταν σημαντικά και με κάθε επιπλέον καπνιστή.

- Σε χώρους διασκέδασης ή εργασίας που επιτρέπεται το κάπνισμα, η συγκέντρωση πολλών καπνιστών σε συχνά μικρούς χώρους δημιουργεί ένα εξαιρετικά επιβλαβές περιβάλλον, με επίπεδα έκθεσης ιδιαίτερα υψηλά και επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία .
- Παρόλο που στην Ελλάδα ισχύει εδώ και καιρό η απαγόρευση του καπνίσματος σε δημόσιους χώρους, οι σχετικές διατάξεις του νόμου συνά δεν τηρούνται, ειδικά σε χώρους μαζικής εστίασης (εστιατόρια και μπαρ). Οι πολύ υψηλές συγκεντρώσεις που παρατηρούνται όμως κάνουν επιτακτική την ανάγκη πλήρους απαγόρευσης του καπνίσματος σε εσωτερικούς δημόσιους χώρους και σχεδιασμού καταλληλων μέτρων προστασίας της δημόσιας υγείας.

5.2. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων και έκθεσης που παρατηρήθηκαν για τα διάφορα σενάρια κάνουν επιτακτική την ανάγκη σχεδιασμού μέτρων προστασίας της δημόσιας υγείας όπως:

- Την πλήρη απαγόρευση του καπνίσματος σε εσωτερικούς δημόσιους χώρους και χώρους μαζικής εστίασης (καφέ-μπάρ-εστιατόρια κλπ).
- Την πλήρη απαγόρευση του καπνίσματος σε εργασιακούς χώρους.
- Πρόβλεψη για κατάλληλο σύστημα εξαερισμού και τακτικό αερισμό των εσωτερικών χώρων.
- Σε προσωπικό επίπεδο, τον περιορισμό χρήσης μέσων μαγειρικής με έντονη παραγωγή σωματιδίων (όπως το τηγάνισμα), καθώς και τον περιορισμό του καπνίσματος μόνο σε υπαίθριους χώρους (πχ βεραντα σπιτιού).

Οι συγκεντρώσεις που καταγράφονται στο εξωτερικό περιβάλλον δεν είναι αντιπροσωπευτικές της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού, υπογραμμίζοντας την ανάγκη εφαρμογής μοντέλων εκτίμησης προσωπικής έκθεσης κατά τον σχεδιασμό μέτρων ελέγχου της ρύπανσης και προστασίας της δημόσιας υγείας.

Το μοντέλο υπολογισμού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την μελέτη της επίδρασης διαφορετικών μέτρων και πρακτικών μείωσης της ρύπανσης (όπως συχνός αερισμό των εσωτερικών χώρων, απαγόρευση του καπνίσματος, έλεγχος των επιπέδων συγκέντρωσης του περιβάλλοντος) στην διαμόρφωση των επιπέδων έκθεσης του πληθυσμού συνολικά αλλά και συγκεκριμένων υποομάδων του, όπως οι ιδιαίτερα ευπαθείς ομάδες των παιδιών και των ηλικιωμένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abt E. Suh H.H., Allen G., Koutrakis P., "Characterization of Indoor Particle Sources: A Study Conducted in the Metropolitan Area of Boston", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, pp. 35-44, 2000(a).
2. Abt E. Suh H.H., Catalano P., Koutrakis P., "Relative Contribution of Outdoor and Indoor Particle Sources to Indoor Concentrations", *Environmental Science and Technology*, Vol. 34(17), pp. 3579-3587, 2000(b).
3. 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.
4. Air & Waste Management Association (AWMA), "Air Pollution Engineering Manual", Buonicore A.J. & Davis W.T. Eds, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
5. American Lung Association of Washington (ALAW), "Facts about Particulate Matter Air Pollution", <http://alaw.org/pmfact.html>, 2004.
6. Atmospheric Research and Information Center (ARIC), "ARIC Briefing Note: Particulate Matter", <http://doc.mmu.ac.uk/aric/notes/bn52.htm>, 1997.
7. Bennett W.O., Zeman K.L., "Deposition of Fine Particles in Children Spontaneously Breathing at Rest", *Inhalation Toxicology*, Vol. 10, pp. 831-842, 1998.
8. Brauer M., Hrubá F., Mihaliková E., Fabianová E., Misković P., Pliziková A., Lendacká M., Vandenberg J., Cullen A., "Personal Exposure to Particles in Banská Bystrica, Slovakia", *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol. 10, pp. 478-487, 2000.
9. Burke J.M., M.J. Zufall, H. Ozkaynak, "A population exposure model for particulate matter: Case study results for PM_{2.5} in Philadelphia, PA" *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol. 11, pp. 470-489, 2001.

10. CAFE Working Group on Particulate Matter, "Second Position Paper on Particulate Matter", 2004.
11. Chan et al. "Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong", *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 3363–3373, 2002.
12. Chen B.T., Nanenyi J., Yeh H.C., Mauderly J.L., Cuddihy R.G., "Physical Characterization of Cigarette-Smoke Aerosol Generated from a Walton Smoke Machine", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12(2), pp. 364-375, 1990.
13. Chow J.C., "Measurement Methods to Determine Compliance with Ambient Air Quality Standards for Suspended Particles", *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 45, pp. 320-382, 1995.
14. Ciccone G., "Road Traffic and Adverse Respiratory Effects in Children", *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 55, pp. 771-778, 1998.
15. Delfino R.J., Zeiger R.S., Seltzer J.M., Street D.H., "Symptoms in Pediatric Asthmatics and Air Pollution: Differences in Effects by Symptom Severity, Anti-inflammatory Medication Use and Particulate Averaging Time", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 106, pp. 751-761, 1998.
16. 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.
17. Diapouli E., Chaloulakou A., Spyrellis N., "Indoor/Outdoor PM Levels and EC Surrogate, at Typical Microenvironments in the Athens area", *Global NEST*, Vol 12(1), pp 12-19, 2010.
18. Διαπούλη Ε., "Έκθεση Υποομάδων Πληθυσμού σε Αέρια Σωματιδιακή Ρύπανση – Συμμετοχή Πηγών και Συγκεντρώσεων σε Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Χώρους", Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2008.
19. Diapouli E., Grivas G., Chaloulakou A., Spyrellis N., "PM₁₀ and Ultrafine Particles Counts In-vehicle and On-road in the Athens Area", *Water Air & Soil Pollution - Focus*, Vol. 8(1), pp. 89-97, 2008.

20. Diapouli E, Chaloulakou A., Spyrellis N., "Indoor and Outdoor PM Concentrations at Schools in the Athens Area", *Indoor & Built Environment*, Vol. 16(1), pp. 55-61, 2007.
21. Dimitroulopoulou C., Crump D., Coward S.K.D., Brown B., Squire R., Mann H., White M., Pierce B., Ross D., "Ventilation, Air Tightness and Indoor Air Quality in New Homes", BR477, BRE Bookshop, 2005.
22. Dua S.K., Hopke P.K., "Hygroscopic Growth of Assorted Indoor Aerosols", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 24, pp. 151-160, 1996.
23. Ebelt 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.
24. E.C. Technical Working Group on Particles, "Ambient Air Pollution by Particulate Matter - Draft Position Paper", Version 4.0, 1996.
25. 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.
26. 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.
27. 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).
28. European Environment Agency & World Health Organization, "Air and Health-Sources of Air Pollution", <http://www.eea.eu.int/Document/Topicrep/air/AirHealth/sources.htm>, 1999(b).
29. 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.

30. 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.
31. Fromme et al. "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and diesel Enghien emission (elemental carbon) inside a car and a subway train", *Sci. Total Environ.*, Vol. 217, pp. 165–173, 1998.
32. 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.
33. Gilmour P.S., Brown D.M., Lindsay T.G., Beswick P.H., MacNee W., Donaldson K., "Adverse Health Effects of PM10 Particles: Involvement of Iron in Generation of Hydroxyl Radical", *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 53, pp. 817-825, 1996.
34. 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.
35. 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.
36. Gold D.R., "Indoor Air Pollution", *Clinics in Chest Medicine*, Vol. 13(2), pp. 215-229, 1992.
37. 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.
38. 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.

39. 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.
40. Gramotnev G., Ristovski Z., "Experimental Investigation of Ultrafine Particle Size Distribution near a Busy Road", Atmospheric Environment, Vol. 38(12), pp. 1767-1776, 2004.
41. 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.
42. 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.
43. Harrison R.M., Jones M., "The Chemical Composition of Airborne Particles in the U.K. Atmosphere", Science of the Total Environment, Vol. 168, pp. 195-214, 1995.
44. 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.
45. ICRP, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection", ICRP Publication 66, Pergamon Press, Oxford, 1994.
46. Johansson C. & Johansson P. A. "Particulate matter in the underground of Stockholm", Atmos. Environ., Vol.37, pp. 3-9, 2003.
47. Jones A.P., "Indoor Air Quality and Health", Atmospheric Environment, Vol. 33, pp. 4535-4564, 1999.
48. 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.
49. Kamens R., Lee C., Wiener R., Leith D., "A Study to Characterize Indoor Particle in three Non-Smoking Homes", Atmospheric Environment, Vol. 25A, pp. 939-948, 1991.

50. Katsouyanni K., Touloumi G., Samoli E., Gryparis A., La Tertre A., Monopoli 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.
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. Keywood M.D., Ayers G.P., Gras J.L., Gillett R.W., Cohen D.D., "Relationships Between Size Segregated Mass Concentration Data and Ultrafine Particle Number Concentrations in Urban Areas", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 2907-2913, 1999.
53. Kim Y.P., Moon K.C., Lee J.H., Baik N.J., "Concentrations of Carbonaceous Species in Particles at Seoul and Cheju in Korea", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 2751-2758, 1999.
54. Klepeis N.P., Tsang A.M., Bejar J.V., "Analysis of the National Human Activity Pattern Survey Respondents from a Standpoint of Exposure Assessment", U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV, 1996.
55. 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.
56. 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.
57. Korrick S.A., Neas L.M., Dockery D.W., Gold D.R., Allen G.A., Hill L.B., Kimball K.D., Rosner B.A., Speizer F.E., "Effects of Ozone and other Pollutants on the Pulmonary Function of Adult Hikers", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 106, pp. 93-99, 1998.

58. 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.
59. Lai A.C.K., "Particle Deposition Indoors: A Review", *Indoor Air*, Vol. 12, pp. 211-214, 2002.
60. Lange C., "Indoor Deposition and the Protective Effect of Houses against Airborne Pollution", Riso Report Riso-R-780(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1995.
61. Lefcoe N.M., Incullet I.I., "Particulates in Domestic Premises II. Ambient Levels and Indoor-Outdoor Relationships", *Archives of Environmental Health*, Vol. 30, pp. 565-570, 1975.
62. Li X.Y., Brown D., Smith S., MacNee W., Donaldson K., "Short-Term Inflammatory Responses following Intratracheal Instillation of Fine and Ultrafine Carbon Black in Rats", *Inhalation Toxicology*, Vol. 11(8), pp. 709-731, 1999.
63. Liu D.L., Nazaroff W.W., "Modeling Pollutant Penetration across Building Envelopes", *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp. 4451-4462, 2001.
64. 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).
65. 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).
66. 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.
67. 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.

68. 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 PM2.5 Source Contributions and Comparison to Emissions during the 1995 Integrated Monitoring Study", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4757-4773, 1999.
69. Manahan S.E., "Environmental Chemistry", 6th Edition, Lewis Publishers, Florida, 1994.
70. 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.
71. Menichini E., Monfrendini F., Merli F., "The Temporal Variability of the Profile of Carcinogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Air: A Study in a Medium Traffic Area in Rome", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3739-3750, 1999.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. Molnar A., Meszaros E., Hansson H.C., Karlsson H., Gelenscer A., Kiss G., Krivacsy Z., "The Importance of Organic and Elemental Carbon in the Fine Atmospheric Aerosol Particles", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 2745-2750, 1999.
76. 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.

77. Morgan G., Corbett S., Wlodarczyk J., "Air Pollution and Hospital Admissions in Sydney, Australia, 1990-1994", *American Journal of Public Health*, Vol. 88, pp. 1761-1766, 1998.
78. Natural Resources Defense Council, "Air Pollution FAQ", Natural Resources Defense Council, <http://mail.igc.apc.org/nrdc/faqs/aibrefaq.html>, 1996(a).
79. 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).
80. 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.
81. Nazaroff W.W., Gadgil A.J., Weschler C.J., "Critique of the Use of Deposition Velocity in Modeling Indoor Air Quality", *Modeling of Indoor Air Quality and Exposure*, Nagda, N.L. Ed., ASTM STP 1205, 81-104, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.
82. Nazaroff W.W., "Indoor Particle Dynamics", *Indoor Air*, Vol. 14(Suppl. 7), pp. 175-183, 2004.
83. 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.
84. 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.
85. 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.

86. 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.
87. 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.
88. Oosterlee A., Drijver M., Lebret E., Brunekreef B., "Chronic Respiratory Symptoms in Children and Adults Living along Streets with High Traffic Density", *Occupational Environmental Medicine*, Vol. 53, pp. 241-247, 1996.
89. Ott W.R. "Mathematical models for predicting indoor air quality from smoking activity" *Environmental Health Perspectives*, Vol. 107(Suppl. 2), pp. 375-381, 1999.
90. 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.
91. Paterson K., "CE352 Air Particulate Laboratory: Analysis of Second Hand Smoke, Types of Air Particulate, Representative Sizes of Air Particulate", http://www.bic.ac.civil.mtu.edu/public_html/classes/cd352/labs/particulates.html, First Prototype Internet Laboratory of the MTU Environment Course Ware Series, 1995.
92. Pekkanen J., Timonen K.L., Ruuskanen J., Reponen A., Mirme A., "Effects of Ultrafine and Fine Particles in an Urban Air on Peak Expiratory Flow among Children with Asthmatic Symptoms", *Environmental Research*, Vol. 74, pp. 24-33, 1997.
93. 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.
94. Peters A., "Air Pollution and Incidence of Cardiac Arrhythmia", *Epidemiology*, Vol. 11, pp. 11-17, 2000.

95. Peters A., Dockery D.W., Heinrich J., Wichmann H.E., "Short-Term Effects of Particulate Air Pollution on Respiratory Morbidity in Asthmatic Children", *European Respiratory Journal*, Vol. 10, pp. 872-879, 1997(a).
96. Peters A., Wichmann H.E., Tuch T., Heinrich J., Heyder J., "Respiratory Effects are Associated with the Number of Ultra-Fine Particles", *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Vol. 155, pp. 1376-1383, 1997(b).
97. 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.
98. 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.
99. Pope C.A., "Review: Epidemiological Basis for Particulate Air Pollution Health Standards", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 32, pp. 4-14, 2000(a).
100. 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).
101. Praml & Schierl "Dust exposure in Munich public transportation: a comprehensive 4-year survey in buses and trams", *International Archives of Occupational and Environmental Health*, Vol. 73, Number 3, pp. 209-214, 2000.
102. 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.
103. 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.

104. Raunemaa T., Kulmala M., Saari J, Olin M., Kulamala M.H., “Indoor Air Aerosol Model: Transport Indoors and Deposition of Fine and Coarse Particles”, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 11, pp. 11-25, 1989.
105. 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.
106. 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.
107. Ρήγας Φ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Περιβάλλοντος”, Αθήνα, 1997.
108. Sanida A., Diapouli E., Chaloulakou A., "Assessment of Exposure to PM10 for Commuters in the Blue Line of the Metro System in Athens, Greece", *Protection and Restoration of the Environment X*, Corfu, Greece, 5 - 9 July 2010.
109. Schwartz J., ‘Is There Harvesting in the Association of Airborne Particles with Daily Deaths and Hospital Admissions?’, *Epidemiology*, Vol. 12, pp. 55-61, 2000.
110. 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.
111. 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.
112. Στούρνας Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., “Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών”, Αθήνα, 1993.
113. 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.

114. Thatcher T.L., Layton D.W., "Deposition, Resuspension, and Penetration of Particles Within a Residence", Atmospheric Environment, Vol. 29, pp. 1487-1497, 1995.
115. 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.
116. Thomas S., Morawska L. "Size-Selected Particles in an Urban Atmosphere of Brisbane, Australia", Atmospheric Environment, Vol. 36(26), pp. 4277-4288, 2002.
117. 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)
118. 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).
119. 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).
120. 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.
121. 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.
122. 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.
123. Villalobos-Pietrini R., Blanco S., Gomez-Arroyo S., "Mutagenicity Assessments of Airborne Particles in Mexico City", Atmospheric Environment, Vol. 29, pp. 517-524, 2000.

124. 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.
125. Wadden R.A., Scheff P.A., "Indoor Air Pollution. Characterization, Prediction, and Control", John Wiley & Sons Inc., U.S.A., 1983.
126. Wahlin P., Palmgren F., van Dingenen R., "Experimental Studies of Ultrafine Particles in Streets and the Relationship to Traffic", *Atmospheric Environment*, Vol. 35(Suppl. 1), pp. S63-S69, 2001.
127. Wallace L. "Indoor particles: A review" *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 46, pp. 98-126, 1996.
128. Wark K., Warher C.F., Davis W.T., "Air Pollution: Its Origin and Control", Addison Wesley Longman, 1998.
129. Watson J.G., Chow J.C., Moosmoller H., Green M., Frank N., Pitchfird M., "Guidance for Using Continuous Monitors in PM2.5 Monitoring Network", Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
130. Watson J.G., Chow J.C., Dubois D., Green M., Frank N., Pitchford M., "Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM2.5 and PM10", Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC27711), 1997.
131. 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.
132. WHO, "Air Quality Guidelines for Europe", 2nd Edition, World Health Organization, Copenhagen, 2000.
133. Wilson W.E., D.T. Mage, L.D. Grant "Estimating separately personal exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: Why and how" *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50(7), pp. 1167-1183, 2000.
134. 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.

135. 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.
136. 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.