



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

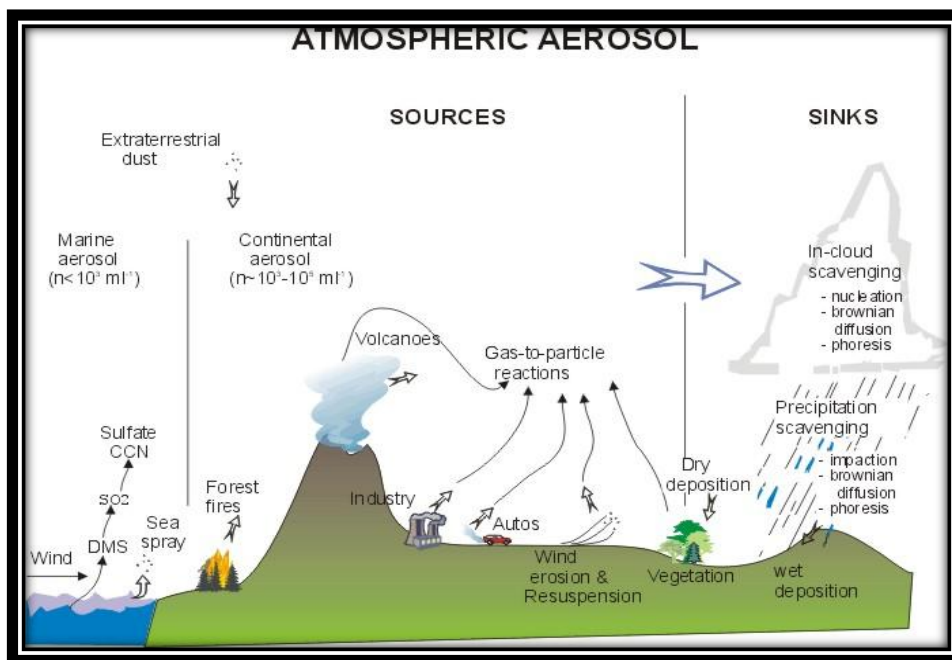


Πανεπιστήμιο Πειραιά
Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης
& Τεχνολογίας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μετρήσεις σωματιδιακών κλασμάτων (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1) σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους αστικού περιβάλλοντος. Εκτίμηση έκθεσης υποομάδων πληθυσμού.

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Α. ΧΑΛΟΥΛΑΚΟΥ



ΜΗΝΑ ΜΙΧΑΛΗΣ

ΜΠΣ/0913

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μετρήσεις σωματιδιακών κλασμάτων (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους αστικού περιβάλλοντος-Εκτίμηση έκθεσης υποομάδων πληθυσμού», εκπονήθηκε από το Νοέμβριο 2010 έως τον Ιούνιο 2011 στα πλαίσια του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Συστήματα διαχείρισης της ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος».

Τα τελευταία χρόνια το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ιδιαίτερα έντονο στο λεκανοπέδιο της Αθήνας. Η οικονομική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών, η συσσώρευση των δραστηριοτήτων του 50% σχεδόν του πληθυσμού της χώρας, η κυκλοφοριακή συμφόρηση και η αυξανόμενη βιομηχανική λειτουργία οδήγησαν στη σημερινή κατάσταση. Επίσης, η γεωμορφολογία του λεκανοπεδίου και τα ιδιαίτερα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά του, παίζουν σημαντικό ρόλο στη συσσώρευση των εκπεμπόμενων ρύπων. Όλοι οι κάτοικοι του λεκανοπεδίου ζουν καθημερινά τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ποιότητα ζωής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή Ζωγράφου όπου διαμένουν χιλιάδες φοιτητές.

Οι στόχοι αυτής της μελέτης ήταν να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά σε δρόμο πυκνής κυκλοφορίας (Ούλωφ Πάλμε) στην περιοχή Ζωγράφου από δύο διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας (αυτόματη και σταθμική), να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, να βρεθεί ο λόγος $PM_{2.5}/PM_{10}$, να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα σχετικά πρότυπα των διεθνών οργανισμών, να εξεταστεί η επίδραση του ανέμου και άλλων μετεωρολογικών παραγόντων στα καταγραφόμενα επίπεδα, να μελετηθούν οι εσωτερικές συγκεντρώσεις και η επίδραση του καπνίσματος και να εξεταστεί η σχέση μεταξύ εσωτερικών (indoor) και εξωτερικών (outdoor) συγκεντρώσεων.

Η μέση 24-ωρη τιμή της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} από την αυτόματη μέθοδο δειγματοληψίας βρέθηκε $51.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της Ε.Ε. τις 11 από τις 22 ημέρες (ποσοστό 50%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Παράλληλα, η μέση 24-ωρη τιμή της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2.5}$ βρέθηκε $48.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της US-EPA τις 15 από τις 22 ημέρες (ποσοστό 68%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Όσο αφορά τη σταθμική μέθοδο δειγματοληψίας, η μέση 24-ωρη τιμή της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} βρέθηκε $34.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της Ε.Ε. τις 4 από τις 16 ημέρες (ποσοστό 25%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ακόμα, η μέση 24-ωρη τιμή της συγκέντρωσης των σωματιδίων $PM_{2.5}$ βρέθηκε $24.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της US-EPA τη 1 από τις 9 ημέρες (ποσοστό 11%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ο λόγος των συγκεντρώσεων σωματιδίων $PM_{2.5}$ προς PM_{10} ($PM_{2.5}/PM_{10}$), βρέθηκε 0.70. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστική σε σημεία δειγματοληψίας που επηρεάζονται κυρίως από την κυκλοφορία οχημάτων, όπως παρατηρείται και σε άλλα αστικά κέντρα.

Ο λόγος PM_{10} I/O (indoor/outdoor) όπως αναμενότανε, λόγω της πρόσθετης έντονης πηγής στον εσωτερικό χώρο (κάπνισμα), βρέθηκε πάνω από την μονάδα (1.92).

Επιπρόσθετα, ο λόγος D/G τόσο για τα PM_{10} όσο και για τα $PM_{2.5}$, είναι μεγαλύτερος της μονάδας (1.23 και 1.63 αντίστοιχα), η δε μέση τιμή του (τιμή αναφοράς) είναι στα επίπεδα που η Ε.Ε. προτείνει ως συντελεστή διόρθωσης κατά τη χρήση μετρητών συνεχούς λειτουργίας (real time monitor). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων καταγράφηκαν κατά τις ανατολικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις του ανέμου ενώ τα καταγραφόμενα επίπεδα ήταν σημαντικά χαμηλότερα κατά τις δυτικές διευθύνσεις. Η διαπίστωση αυτή σχετίζεται άμεσα με την διεύθυνση/προσανατολισμό του σημείου δειγματοληψίας (ανατολική-βορειοανατολική). Διαπιστώθηκε επίσης η χαρακτηριστική μείωση της συγκέντρωσης των σωματιδίων με την ταχύτητα του ανέμου και η πολύ καλή αρνητική συσχέτιση τόσο με τη μέγιστη όσο και με τη μέση ταχύτητα ανέμου. Όσο αφορά τη βροχόπτωση, παρατηρείται μεγαλύτερη αρνητική συσχέτιση σωματιδίων PM_{10} σε σχέση με $PM_{2.5}$ λόγω μεγαλύτερης μάζας, πράγμα αναμενόμενο.

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη και πολύτιμη αρωγή της κα. Αρχοντούλας Χαλουλάκου, αναπληρώτρια καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., την οποία ευχαριστώ για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής, την αδιάλειπτη βοήθεια της και τη συνεχή καθοδήγησή της σε όλη τη χρονική διάρκεια της εκπόνησης της. Οι πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις, καθώς και το αμείωτο ενδιαφέρον της ήταν αποφασιστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον διδακτορικό φοιτητή Χεριστανίδη Σταύρο, που χωρίς τη βοήθεια του η εκπόνηση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Ιούνιος 2011

Μηνά Μιχάλης

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	7
1.1. Ατμόσφαιρα.....	7
1.2. Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	9
1.3. Εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα.....	9
1.4. Πρωτογενείς και δευτερογενείς ρύποι.....	9
1.5. Μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων.....	11
Κεφάλαιο 2: Μηχανισμοί μεταφοράς, αραίωσης και απομάκρυνσης ρύπων από την ατμόσφαιρα.....	12
2.1. Διασπορά ρύπων-οριζόντια μεταφορά.....	12
2.2. Διάχυση ρύπων-κατακόρυφη μεταφορά.....	12
2.3. Χημικές αντιδράσεις με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας.....	12
2.4. Διαφυγή στην ελεύθερη ατμόσφαιρα.....	13
2.5. Απόθεση.....	13
2.5.1. Βαρυτική καθίζηση.....	13
2.5.2. Ξηρή απόθεση.....	14
2.5.3. Υγρή απόθεση.....	14
Κεφάλαιο 3: Μετεωρολογικοί και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των ρύπων.....	15
3.1. Ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου.....	15
3.2. Εμμόνη επιπέδων ρύπου.....	15
3.3. Οριακό στρώμα.....	16
3.4. Ηλιακή ακτινοβολία.....	16
3.5. Θερμοκρασία αέρα.....	17
3.6. Αναστροφή θερμοκρασίας.....	17
3.7. Σχετική υγρασία.....	17
3.8. Νέφωση.....	18
3.9. Βροχόπτωση.....	18
3.10. Συγκέντρωση άλλων ρύπων.....	18
3.11. Χρονικές διακυμάνσεις συγκέντρωσης ρύπου.....	18
Κεφάλαιο 4: Αιωρούμενα σωματίδια.....	19
4.1. Κατάταξη αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο τον τρόπο σχηματισμού.....	21
4.1.1. Πρωτογενή σωματίδια.....	22
4.1.2. Δευτερογενή σωματίδια.....	23
4.1.3. Τα στρατοσφαιρικά αερολύματα.....	23

4.2.	Κατάταξη αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο το μέγεθος.....	24
4.2.1.	Τα λεπτόκοκκα (fine mode).....	25
4.2.2.	Τα χονδρόκοκκα (coarse mode).....	26
4.3.	Κατάταξη με κριτήριο τη διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό.....	28
4.3.1.	Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles).....	28
4.3.2.	Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles).....	28
4.3.3.	Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles)	28
4.4.	Ορισμοί μετρούμενων σωματιδιακών ρύπων.....	29
4.5.	Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων.....	31
4.5.1.	Θειικά.....	31
4.5.2.	Νιτρικά.....	31
4.5.3.	Αμμωνιακά.....	31
4.5.4.	Χλωριόντα.....	32
4.5.5.	Οργανικός άνθρακας.....	32
4.5.6.	Στοιχειακός άνθρακας.....	33
4.5.7.	Γεωλογικά υλικά.....	34
4.5.8.	Βιολογικά υλικά.....	34
4.5.9.	Μέταλλα και μεταλλικά ιχνοστοιχεία	35
4.5.10.	Ισχυρά οξέα.....	35
4.6.	Διεργασίες αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.....	37
4.6.1.	Συσσωμάτωση.....	37
4.6.2.	Πυρηνοποίηση.....	37
4.6.3.	Συμπύκνωση.....	38
4.6.4.	Ξηρή εναπόθεση.....	38
4.6.5.	Υγρή Εναπόθεση.....	39
4.6.6.	Ταχύτητα εναπόθεσης.....	40
4.6.7.	Μεταφορά σωματιδίων.....	40
4.6.8.	Μορφές Πλανητικής Χωρικής Απόθεσης των Σωματιδίων των Αερολυμάτων.....	42
4.6.9.	Χρόνοι Παραμονής των Σωματιδίων των Αερολυμάτων στην Ατμόσφαιρα.....	42
Κεφάλαιο 5: Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.....		46
5.1.	Φυσικές πηγές.....	46
5.1.1.	Επαναιώρηση σκόνης και διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο	46
5.1.2.	Υδρόλυμα θαλάσσης.....	47
5.1.3.	Ηφαίστεια.....	48
5.1.4.	Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις.....	48
5.1.5.	Μετατροπή αερίου σε σωματίδιο	49

5.2.	Ανθρωπογενής πηγές.....	50
5.2.1.	Εκπομπές από οχήματα.....	51
5.2.2.	Βιομηχανικές εκπομπές.....	53
5.2.3.	Οικιακές πηγές.....	53
5.2.4.	Η καύση βιομάζας	54
Κεφάλαιο 6: Επιπτώσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια.....		58
6.1.	Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	58
6.1.1.	Συμπτώματα της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια.....	58
6.1.2.	Τρόπος επίδρασης των διαφορετικών σωματιδιακών κλασμάτων.....	59
6.1.3.	Τοξικότητα των αιωρουμένων σωματιδίων.....	61
6.1.4.	Αιωρούμενα σωματίδια και καρκινογένεση.....	63
6.1.5.	Δευτερογενείς επιπτώσεις στην υγεία.....	64
6.2.	Επιπτώσεις στο περιβάλλον.....	65
6.2.1.	Ορατότητα.....	65
6.2.2.	Κλίμα.....	66
6.2.3.	Υλικά.....	68
Κεφάλαιο 7: Πρότυπα ποιότητας αέρα για τα αιωρούμενα σωματίδια.....		70
7.1.	Η ευρωπαϊκή θυγατρική οδηγία-πλαίσιο.....	70
7.1.1.	Παρατηρήσεις για την παραπάνω Οδηγία.....	73
7.2.	Η οδηγία 2008/50/ΕΚ.....	73
7.2.1.	Οριακές τιμές PM ₁₀ για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.....	73
7.2.2.	Τιμή στόχος και οριακή τιμή για τα PM _{2.5}	74
7.3.	Τυπικές τιμές.....	74
7.4.	Μη συμμόρφωση με τους κανόνες της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα.....	75
7.5.	Πρότυπα ποιότητας κατά US-EPA.....	77
Κεφάλαιο 8: Επίπεδα συγκέντρωσης σε εσωτερικούς χώρους.....		80
8.1.	Εισαγωγή.....	80
8.2.	Εσωτερική παραγωγή σωματιδίων.....	82
8.3.	Διείσδυση του εξωτερικού αέρα στους εσωτερικούς χώρους.....	87
8.3.1.	Ρυθμός εξαερισμού (α).....	88
8.3.2.	Ρυθμός εναπόθεσης (κ).....	89
8.3.3.	Ικανότητα διείσδυσης (Ρ).....	90

Κεφάλαιο 9: Πειραματικό μέρος.....	92
9.1. Σκοπός της παρούσας εργασίας.....	92
9.2. Χώρος δειγματοληψίας-πειραματική διαδικασία.....	96
9.3. Οργανολογία.....	98
9.3.1. Αυτόματος μετρητής DustTrak Aerosol Monitor Model 8533.....	98
9.3.2. Δειγματολήπτες Harvard PEMs.....	101
Κεφάλαιο 10: Αποτελέσματα.....	103
10.1. Αποτελέσματα από όργανο συνεχούς καταγραφής Dust Trak.....	103
10.1.1. Μέση 24-ωρη εξωτερική συγκέντρωση.....	105
10.1.2. Συμμετοχή λεπτόκοκκων και υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων στη μάζα των PM ₁₀	106
10.1.3. Επίδραση ανέμου στα καταγραφόμενα επίπεδα.....	107
10.1.4. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση	111
10.1.5. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM ₁₀ εκτός Κυριακών.....	113
10.1.6. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM ₁₀ Κυριακών.....	113
10.1.7. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM ₁₀ την Κυριακή 12/12/'10.....	114
10.1.8. Εσωτερικές/εξωτερικές συγκεντρώσεις.....	115
10.1.9. Εσωτερικές συγκεντρώσεις.....	119
10.1.10. Μέση μισάωρη εσωτερική συγκέντρωση στις 28/1/'11.....	124
10.2. Συγκεντρώσεις από σταθμική μέθοδο δειγματοληψίας	125
10.3. Σύγκριση μεταξύ αυτόματης και σταθμικής μεθόδου δειγματοληψίας.....	126
10.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	127
10.4.1. Αυτόματη δειγματοληψία.....	127
10.4.2. Σταθμική δειγματοληψία.....	128
10.4.3. Σύγκριση αυτόματης και σταθμικής μεθόδου δειγματοληψίας.....	129
10.4.4. Επίλογος-Προτάσεις.....	129
Βιβλιογραφία.....	131

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

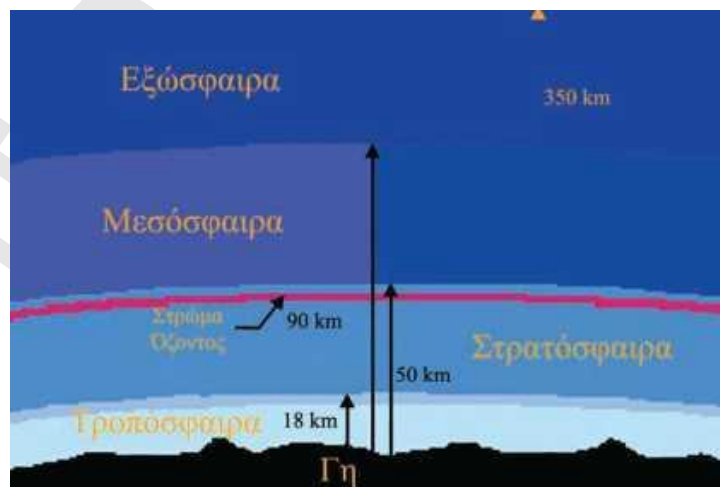
1.1. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η ατμόσφαιρα είναι ένα κολλοειδές μέσο (απαρτίζεται δηλαδή από στερεά, υγρά και αέρια), που περιβάλλει τη γη και συγκρατείται σε αυτή με τη βαρύτητα. Έτσι, έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα της στο έδαφος και βαθμιαία, καθώς αυξάνεται η απόσταση της από τη γη, γίνεται όλο και πιο αραιή, μέχρι να μην είναι δυνατό να διαχωριστεί τελικά από το διαπλανητικό αέριο. Συνεπώς δεν είναι δυνατό θεωρητικά, να καθορισθεί με ακρίβεια η οροφή της ατμόσφαιρας.

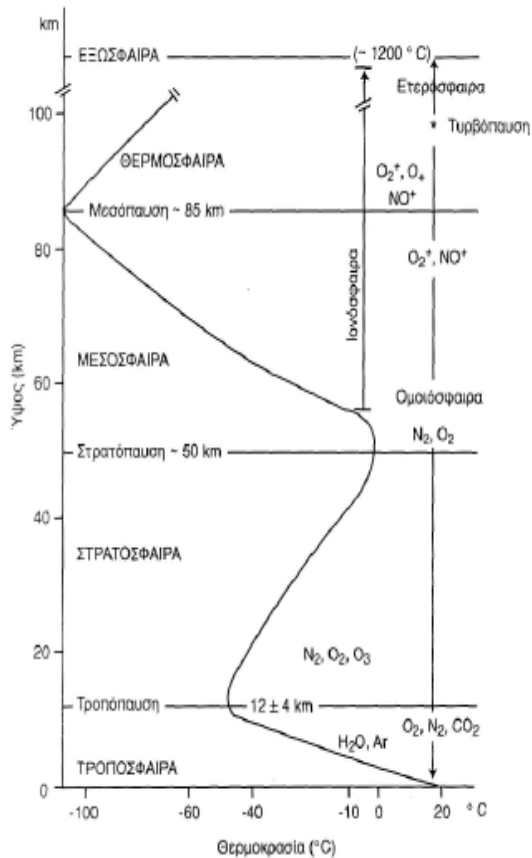
Καθώς απομακρύνεται κανείς από την επιφάνεια της γης, διασχίζει διάφορες περιοχές με εντελώς διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Η ατμοσφαιρική πίεση, ελαττώνεται με το ύψος, έτσι ώστε η πίεση σε κάθε στάθμη να εκφράζει συνήθως το βάρος της ακτινικής στήλης του αέρα μοναδιαίας διατομής, που βρίσκεται πάνω από τη στάθμη αυτή. Το 90% της μάζας της ατμόσφαιρας περιέχεται στα πρώτα 20 km και το 99.9% στα πρώτα 50 km περίπου. Η σύγκριση των αποστάσεων αυτών με τη μέση ακτίνα της γης (~6370 km) φανερώνει ότι η ατμόσφαιρα είναι ένα πολύ λεπτό σχετικά στρώμα γύρω από τη γη.

Το στρώμα όμως αυτό είναι ζωογόνο, αφού σ' αυτό οφείλουμε την ύπαρξη μας. Σε μια βαθιά εισπνοή εισάγονται στο σώμα μας τρισεκατομμύρια μόρια, μέρος των οποίων παραμένει σ' αυτό, ενώ τα υπόλοιπα εκπνέονται. Συγκεκριμένα, ο μέσος όγκος αέρα μιας εισπνοής είναι περίπου ένα λίτρο, που κοντά στο επίπεδο της θάλασσας περιέχει 10^{22} μόρια αέρα, όσα είναι περίπου και τα αστέρια του γνωστού μας σύμπαντος (Varotsos C., 2001).

Η ατμόσφαιρα της γης, στα κατώτερα κυρίως στρώματα αποτελείται από ένα μίγμα αερίων που αποτελούν τον ξηρό αέρα, από νερό και στις τρεις φάσεις του και από στερεά ή υγρά σωματίδια.



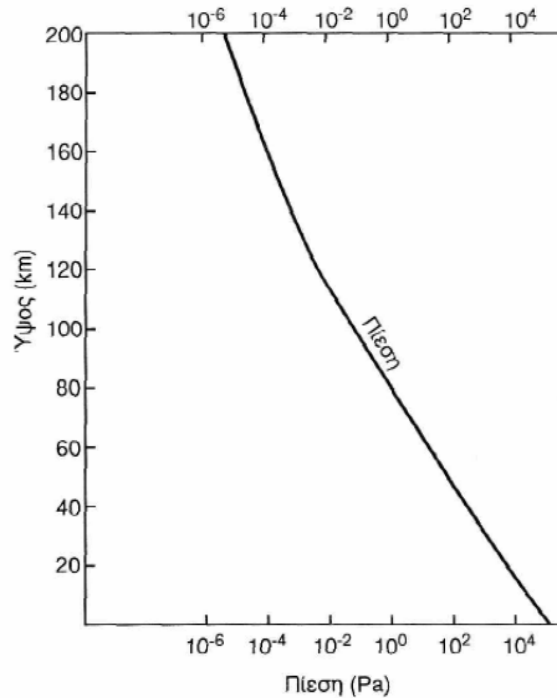
Εικόνα 1.1: Τα στρώματα της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 1.2: Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας. Μεταβολή θερμοκρασίας με το ύψος.

Συστατικό	Συγκέντρωση (V/V)	
Αζώτο	78,048	%
Οξυγόνο	20,946	%
Αργό	0,934	%
Διοξείδιο του άνθρακα	340	ppm
Νέο	18,18	ppm
Ήλιο	5,24	ppm
Μεθάνιο	1,3 – 1,6	ppm
Κρυπτό	1,14	ppm
Υδρογόνο	0,5	ppm
N ₂ O	0,25 – 0,35	ppm
Μονοξείδιο του άνθρακα	0,12	ppm
Ξένο	0,087	ppm
Όζον	0,025	ppm
Αμμωνία	0,001	ppm

Εικόνα 1.3: Μίγμα αερίων που αποτελούν τον ξηρό αέρα.



Εικόνα 1.4: Μεταβολή ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος.

1.2. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Ως ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται κάθε κατάσταση στην οποία υπάρχουν ουσίες στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις αρκετά υψηλότερες από τα φυσιολογικά επίπεδα του περιβάλλοντος, οι οποίες μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στον άνθρωπο, στα ζώα, στη βλάστηση ή στα υλικά. Με τον όρο ουσίες εννοείται κάθε φυσική ή ανθρωπογενής χημική ένωση ή χημικό στοιχείο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα σε αέρια, υγρή ή στερεά μορφή. Επομένως, ως ρύπος χαρακτηρίζεται κάποια ουσία, η οποία προκαλεί κάποια μορφή ρύπανσης, όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω.

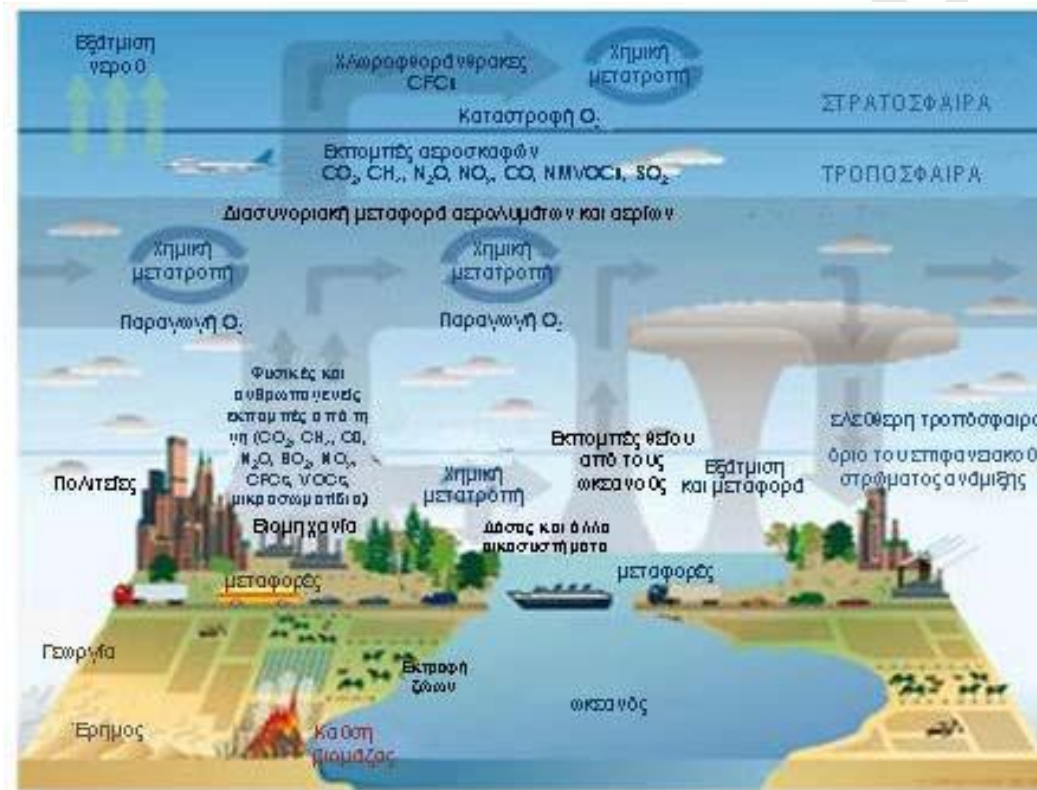
Η ρύπανση δεν πρέπει να συγχέεται με την μόλυνση. Η μόλυνση αποτελεί μια ιδιαίτερη κατηγορία ρύπανσης, η οποία οφείλεται σε μικροοργανισμούς.

1.3. ΕΚΠΟΜΠΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα οφείλεται τόσο σε φυσικές διεργασίες (βιολογικές δραστηριότητες, ηφαίστεια, πυρκαγιές κ.α.), όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (βιομηχανία, παραγωγή ενέργειας, θέρμανση, αυτοκίνητα κ.α.). Σε παγκόσμια κλίμακα οι εκπομπές ορισμένων αερίων ρύπων από την ίδια τη φύση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Επειδή όμως οι ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων συγκεντρώνονται σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι

συγκεντρώσεις των ρύπων στις περιοχές αυτές είναι πολλές φορές μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια.

Οι ρύποι-κριτήρια που αναφέρονται τόσο στις ευρωπαϊκές όσο και στις αμερικάνικες νομοθεσίες είναι: το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), ο μόλυβδος (Pb), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οξείδια του θείου (SO_x), το όζον (O₃), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), οι πτητικές αρωματικές ενώσεις (VOCs) και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs).



Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση εκπομπών και διεργασιών ρύπων στη ατμόσφαιρα.

1.4. ΠΡΩΤΟΓΕΝΕΙΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΡΥΠΟΙ

Οι ρύποι που εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα ονομάζονται πρωτογενείς (π.χ. SO₂, NO_x, υδρογονάνθρακες κ.α.). Υπάρχουν όμως και ρύποι που δεν εκπέμπονται από κάποια πηγή, αλλά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα χημικού μετασχηματισμού πρωτογενών ρύπων (π.χ. το SO₃ σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα με οξείδωση του πρωτογενούς εκπεμπόμενου SO₂), ή σαν προϊόντα διαφόρων αντιδράσεων (π.χ. όζον, νιτρικό υπερακετύλιο, θειικό αμμώνιο κ.α.). Οι ρύποι αυτοί ονομάζονται δευτερογενείς και ο σχηματισμός τους μπορεί να λάβει χώρα σε χρόνο και τόπο διαφορετικό από το χρόνο και τον τόπο εκπομπής των προδρόμων ουσιών από τις οποίες προέρχονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι δευτερογενείς ρύποι μπορεί να είναι πιο επικίνδυνοι από τους πρωτογενείς.

1.5. ΜΟΡΦΕΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι ρύποι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα είτε στην αέρια κατάσταση (με τη μορφή αερίων ή ατμών), είτε στη στερεή ή υγρή κατάσταση (με τη μορφή αιωρούμενων στερεών σωματιδίων ή σταγονιδίων). Αντίστοιχα, ονομάζονται αέριοι ή σωματιδιακοί ρύποι.

Ως αέρια (gases) ορίζονται τα άμορφα ρευστά, τα οποία σε φυσική κατάσταση διαχέονται και καταλαμβάνουν το χώρο μέσα στον οποίο περικλείονται. Σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, δεν εμφανίζονται σε στερεή ή υγρή κατάσταση. Μπορούν να μεταπέσουν σε υγρή ή στερεή κατάσταση μόνο με συνδυασμένη επίδραση αυξημένης πίεσης και ελαττωμένης θερμοκρασίας (πχ. μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, χλώριο, υδρόθειο, διοξείδιο του θείου). Το μέγεθος τους είναι μοριακής τάξης.

Ατμοί (vapors) είναι οι αέριες μορφές ουσιών, που σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης βρίσκονται σε υγρή ή στερεή κατάσταση (πχ. ατμοί βενζολίου, τολουολίου, τριχλωροαιθυλενίου, τετραχλωράνθρακα, υδραργύρου). Το μέγεθος τους είναι μοριακής τάξης.

Για τους σωματιδιακούς ρύπους, χρησιμοποιείται ο γενικός όρος αιωρούμενα σωματίδια. Αποτελούν το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας και θα ασχοληθούμε διεξοδικά στη συνέχεια.

Ουσία	Χρόνος παραμονής
O ₃	0.4-90 ημέρες
NO	4-5 ημέρες
NO ₂	2-8 ημέρες
NO ₃	4-20 ημέρες
NH ₄	7-19 ημέρες
H ₂ S	0.08-2 ημέρες
SO ₂	0.01-7 ημέρες
SO ₄	3-5 ημέρες
Hg	11-2080 ημέρες
CO	0.9-2.7 έτη
CCl ₄	1 έτος
CH ₄	1.5-2 έτη
Freon	16 έτη
CO ₂	2-10 έτη

Εικόνα 1.6: Μέση χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα διαφόρων ουσιών.

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΑΡΑΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

2.1. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΡΥΠΩΝ – ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Διασπορά (dispersion) των ρύπων ονομάζεται η διαδικασία εξάπλωσης και μεταφοράς των ρύπων που εκπέμπονται από κάποια πηγή στην ατμόσφαιρα. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι όταν εκπέμπονται από την πηγή τους (π.χ. καμινάδα) είναι κατά κανόνα θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την αρχική ορμή που έχουν τα καυσαέρια, έχει ως αποτέλεσμα οι ρύποι να ανυψώνονται και κατόπιν να μεταφέρονται μακριά από την πηγή μέσω του άνεμου. Η οριζόντια μεταφορά (advection) των ρύπων αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραιώσής τους.

2.2. ΔΙΑΧΥΣΗ ΡΥΠΩΝ – ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Διάχυση (diffusion) των ρύπων ονομάζεται η διαδικασία εξάπλωσης σε διάφορα ύψη των ρύπων που εκπέμπονται από κάποια πηγή. Η διάχυση πραγματοποιείται εξαιτίας της τύρβης, δηλαδή των αναταρακτικών κινήσεων του αέρα (τυρβώδεις στρόβιλοι, turbulent eddies) και μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από το έδαφος, που ονομάζεται ύψος ανάμειξης (mixing height). Το στρώμα της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια της Γης μέχρι το ύψος ανάμειξης ονομάζεται στρώμα ανάμειξης (mixing layer) ή ατμοσφαιρικό ή πλανητικό οριακό στρώμα (atmospheric ή planetary boundary layer). Η τυρβώδης διάχυση των ρύπων, όπως και η διασπορά τους, έχει ως τελικό αποτέλεσμα την αραιώση των ρύπων και άρα τη μείωση των παρατηρούμενων συγκεντρώσεών τους. Η κλίμακα και η ένταση της αραιώσής τους εξαρτώνται από το βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας. Σε συνθήκες ευστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται πολύ αργά, ενώ σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη.

2.3. ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΜΕ ΑΛΛΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Οι αντιδράσεις αυτές μπορεί να είναι ομογενείς (στην αέρια φάση), ή ετερογενείς (στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων). Οι ομογενείς αντιδράσεις διακρίνονται σε θερμικές, φωτοχημικές και αντιδράσεις ελευθέρων ριζών. Η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Θα πρέπει επίσης να παρατηρήσει κανείς ότι από τις χημικές αντιδράσεις μπορεί να παραχθούν δευτερογενείς ρύποι που είναι πιο επικίνδυνοι από τους πρωτογενείς. Για να μπορέσουν δύο μόρια κάποιων αερίων να αντιδράσουν μεταξύ τους θα πρέπει να συμβαίνουν τα εξής:

α. Τα μόρια να συγκρουστούν ή να έρθουν πολύ κοντά μεταξύ τους, ώστε να μπορέσουν ανταλλάξουν ενέργεια για να διασπαστούν οι χημικοί δεσμοί.

β. Να υπάρχει διαθέσιμη επαρκής ενέργεια ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί διάσπαση των δεσμών. Αν η διαθέσιμη ενέργεια δεν επαρκεί για τη διάσπαση των χημικών δεσμών, τότε μια σύγκρουση δύο μορίων δεν καταλήγει στην αντίδρασή τους.

2.4. ΔΙΑΦΥΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Ένα μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων διαφεύγει πάνω από το οριακό στρώμα, στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Εκεί δεν υπάρχουν αναταρακτικοί στρόβιλοι αλλά κυριαρχεί η μοριακή διάχυση, η οποία πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς. Η χωρική και χρονική κλίμακα των ατμοσφαιρικών μηχανισμών που παρατηρούνται στην ελεύθερη ατμόσφαιρα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των φαινομένων που συμβαίνουν στο οριακό στρώμα, οπότε το πρόβλημα της ρύπανσης παύει να είναι τοπικού ενδιαφέροντος.

2.5. ΑΠΟΘΕΣΗ

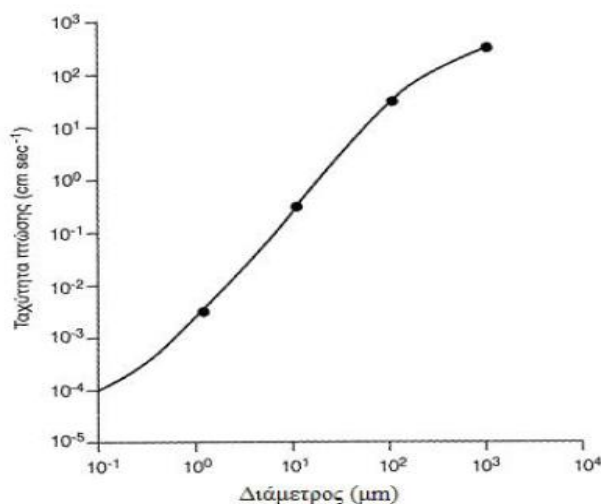
Απόθεση (deposition) ονομάζεται η μεταφορά των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι απόθεσης, η βαρυτική καθίζηση, η ξηρή και η υγρή απόθεση.

2.5.1. Βαρυτική καθίζηση

Βαρυτική καθίζηση (sedimentation–gravitational settling) ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά έχουν ταχύτητες ελεύθερης πτώσης παραπλήσιες ή μεγαλύτερες των συνήθως παρατηρούμενων καθέτων ταχυτήτων των στροβίλων. Τέτοιες ταχύτητες είναι κάποια δέκατα του εκατοστού το δευτερόλεπτο ή περισσότερο, για τις οποίες η βαρυτική καθίζηση είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός απομάκρυνσης, των σχετικά μεγάλων, σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.

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

Εικόνα 2.1: Χρόνος που απαιτείται για την κάθοδο ενός σωματιδίου λόγω βαρυτικής καθίζησης κατά 1 km στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 2.2: Ταχύτητα πτώσης αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους.

2.5.2. Ξηρή απόθεση

Ξηρή απόθεση (dry deposition) ονομάζεται η απευθείας μεταφορά ενός αερίου ή σωματιδιακού ρύπου στο έδαφος ή στους ωκεανούς. Ξηρή απόθεση υφίστανται οι αέριες ενώσεις και τα μικρά σωματίδια τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται όταν έρθουν σε επαφή από την υποκείμενη επιφάνεια. Η ξηρή απόθεση μπορεί να θεωρηθεί ότι συντελείται σε τρία στάδια. Πρώτα οι ρύποι μεταφέρονται με τους στροβίλους κοντά στο έδαφος, κατόπιν περνούν με μοριακή διάχυση από το ιξώδες υπόστρωμα και τέλος κάποιοι από αυτούς αποτίθενται στο έδαφος.

2.5.3. Υγρή απόθεση

Υγρή απόθεση (wet deposition) ονομάζεται η μεταφορά αερίων και σωματιδιακών ρύπων στο έδαφος ή στους ωκεανούς, μέσω κάθε μορφής υετού. Υπάρχουν δύο είδη υγρής απόθεσης, η βροχόπληση και η απόπλυση. Γενικά, η υγρή απόθεση, και με τις δύο της μορφές, συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση των ρύπων από την ατμόσφαιρα. Εκτιμάται ότι το 70-80% της μάζας των αερολυμάτων που υπάρχει στο χώρο κάτω από ένα σύννεφο απομακρύνεται με τη βροχή. Τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης παρατηρούνται, προφανώς, με βροχές μεγάλης έντασης και διάρκειας.

3. ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΚΑΙ ΑΛΛΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι κυριότερες μετεωρολογικές διεργασίες που επηρεάζουν τοπικά τη συγκέντρωση των ρύπων είναι η ξηρή και η υγρή απόθεση, η οριζόντια μεταφορά από τον άνεμο, η κατακόρυφη αραίωση μέσα στο οριακό στρώμα που προκαλείται κυρίως από τους τυρβώδεις στροβίλους και οι φωτοχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, όλοι εκείνοι οι μετεωρολογικοί και μη παράγοντες που σχετίζονται με τις παραπάνω διεργασίες, θα επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τη συγκέντρωση των ρύπων σε μια περιοχή.

3.1. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Οι βασικές μετεωρολογικές παράμετροι που επηρεάζουν την οριζόντια μεταφορά και τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό αραίωσης των ρύπων. Η άπνοια ή οι άνεμοι χαμηλής έντασης είναι μετεωρολογικές συνθήκες που δεν ευνοούν τη διασπορά των ρύπων, οπότε συντελούν στην αύξηση των επιπέδων ρύπανσης (Kassomenos et al., 1995, 1998; Hubbard and Cobourn, 1998; Chaloulakou et al., 2003; Papanastasiou and Melas, 2007; Papanastasiou et al., 2007). Επίσης, η ανάπτυξη του συστήματος κυκλοφορίας της θαλάσσιας αύρας, η οποία σχετίζεται γενικά με ασθενέστερους ανέμους σε σχέση με αυτούς που πνέουν συνήθως, συμβάλει σημαντικά στην παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων (Colbeck et al., 2002). Όπως είναι προφανές, η διεύθυνση του ανέμου έχει άμεση σχέση με την κατεύθυνση προς την οποία θα μεταφερθούν οι ρύποι στην ατμόσφαιρα, οπότε σχετίζεται άμεσα με την επιβάρυνση μιας συγκεκριμένης περιοχής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίδρασης της διεύθυνσης του ανέμου στα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής είναι αυτό που συμβαίνει στο λεκανοπέδιο της Αττικής. Εκεί έχει βρεθεί ότι όταν πνέουν οι ετησίες άνεμοι, τα γνωστά μελέμια (διεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά) υπάρχει επαρκής εξαερισμός της περιοχής και άρα δεν ευνοούνται επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όταν όμως δεν πνέουν οι άνεμοι αυτοί, επικρατούν κάποια τοπικά συστήματα κυκλοφορίας αέρα, όπως η θαλάσσια αύρα, με διεύθυνση αντίθετη, από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά, οπότε οι ρύποι εγκλωβίζονται από τα γύρω βουνά κι έτσι καταγράφονται επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

3.2. ΕΜΜΟΝΗ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΡΥΠΟΥ

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές μελέτες (Robeson and Steyn, 1990; Zannetti, 1990; Ziomas et al., 1995; Hubbard et al., 1998; Massart et al., 1998; Fuller et al., 2002; Perez et al., 2002; Papanastasiou and Melas, 2007; Papanastasiou et al., 2007) από τις οποίες προκύπτει το

συμπέρασμα ότι η πιθανότητα εμφάνισης ενός επεισοδίου ρύπανσης είναι αυξημένη όταν τα επίπεδα των ρύπων την προηγούμενη ημέρα είναι υψηλότερα από τα φυσιολογικά, εφόσον οι μετεωρολογικές συνθήκες παραμένουν σταθερές.

3.3. ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Το ύψος του στρώματος αυτού είναι περίπου 1 km, το οποίο όμως μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και λόγω μετεωρολογικών φαινομένων. Η κατακόρυφη αραίωση των ατμοσφαιρικών ρύπων συμβαίνει μέσα στο οριακό στρώμα. Επομένως, το ύψος του οριακού στρώματος είναι ένας σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση μιας περιοχής. Όσο πιο ψηλά εκτείνεται το οριακό στρώμα, τόσο μεγαλύτερη αραίωση των ρύπων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των τυρβωδών στροβίλων, άρα τόσο μικρότερες είναι οι συγκεντρώσεις αυτών κοντά στο έδαφος. Αντίθετα, αν το ύψος του οριακού στρώματος είναι μικρό, η αραίωση των ρύπων είναι μικρή, οι ρύποι τείνουν να συγκεντρώνονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, άρα και οι συγκεντρώσεις αυτών εκεί θα είναι μεγαλύτερες.

Το ύψος του οριακού στρώματος μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά από τις τιμές της θερμοκρασίας καθ' ύψος που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας ραδιοβόλισης, αφού το ύψος ανάμειξης ταυτίζεται με τη βάση της θερμοκρασιακής αναστροφής που παρατηρείται χαμηλά στην ατμόσφαιρα. Όμως, αυτές οι μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικές, αφού αλλοιώνονται από την ύπαρξη των θερμικών, δηλαδή των ανοδικών κινήσεων του αέρα με μεγάλες ταχύτητες. Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει ότι οι αλλαγές της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας σε ύψος στο οποίο η ατμοσφαιρική πίεση ισούται με 850 hPa είναι ικανές να προσδιορίσουν το βαθμό ευστάθειας του στρώματος που βρίσκεται πάνω από το οριακό στρώμα. Όσο μεγαλύτερη ευστάθεια εμφανίζει το στρώμα αυτό, τόσο μικρότερο είναι το ύψος του οριακού στρώματος. Άρα, από τις αλλαγές της θερμοκρασίας στα 850 hPa μπορεί κανείς να εκτιμήσει έμμεσα και το ύψος του οριακού στρώματος.

3.4. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη συγκέντρωση των ρύπων με δύο τρόπους: αφενός παίζει σημαντικό ρόλο στις φωτοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα και επομένως επηρεάζει τους ρύπους που παράγονται από αυτές (Boy and Kulmala, 2002) και αφετέρου σχετίζεται με την ανάπτυξη του οριακού στρώματος. Η ηλιακή ακτινοβολία σχετίζεται άμεσα με την τυρβώδη κινητική ενέργεια, με την κινητική ενέργεια δηλαδή των στροβίλων, η οποία και καθορίζει το ύψος μέχρι το οποίο θα φτάσουν οι στροβίλοι, καθορίζει δηλαδή το ύψος του οριακού στρώματος. Στη διάρκεια μιας φυσιολογικής ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο έντονη κατά τις μεσημεριανές ώρες. Τότε η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι μεγάλη, άρα και η τύρβη είναι πιο έντονη, οπότε το οριακό στρώμα είναι υψηλό. Αντίθετα το βράδυ που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, η τυρβώδης

κινητική ενέργεια ελαττώνεται σημαντικά ή ακόμη και μηδενίζεται, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικροί στρόβιλοι ή να μην υπάρχουν καθόλου, οπότε το ύψος του οριακού στρώματος είναι μικρό ή ακόμη και μηδενικό. Θα πρέπει επίσης να σημειώσει κανείς ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη εξαρτάται από το ύψος του ήλιου και από την απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας.

3.5. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ

Οι φωτοχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα είναι πολύ ευαίσθητες στη θερμοκρασία. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα σχετίζονται με τα βραδέως κινούμενα συστήματα πίεσης, τους ανέφελους ουραμούς, την αδρανή κυκλοφορία και την καταβύθιση του ανώτερου αέρα. Όλα αυτά τα φαινόμενα συμβάλουν αφενός στην παραγωγή ρύπων με φωτοχημικές διεργασίες, αφετέρου στη συσσώρευση ρύπων σε μια περιοχή. Οπότε η θερμοκρασία είναι ένας παράγοντας που επιδρά καθοριστικά στα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής.

3.6. ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Πολλές φορές η θερμοκρασία του αέρα αντί να ελαττώνεται με το ύψος, για διάφορους λόγους αυξάνεται μέσα σε ορισμένες περιοχές της ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναστροφή θερμοκρασίας. Η ατμόσφαιρα παρουσιάζει ευσταθή ισορροπία μέσα στο στρώμα της αναστροφής με αποτέλεσμα να μην ευνοούνται κατακόρυφες ανοδικές κινήσεις αερίων μαζών. Η θερμοκρασιακή αναστροφή μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό αερίων όγκων επιβαρυμένων με ατμοσφαιρικούς ρύπους στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό, μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα ρύπανσης μιας περιοχής. Οι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση θερμοκρασιακής αναστροφής είναι:

- α. η ψύξη των κατώτερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων (αναστροφή ακτινοβολίας).
- β. η αδιαβατική θέρμανση κατερχόμενου αέρα (αναστροφή κατάπτωσης).
- γ. η οριζόντια μεταφορά θερμού ή ψυχρού αέρα.

3.7. ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Η σχετική υγρασία είναι ένα μέγεθος που έχει άμεση σχέση με τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας συνήθως συνεπάγεται μείωση της τιμής της σχετικής υγρασίας. Επίσης, η υγρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την ελάχιστη θερμοκρασία μέσω δύο μηχανισμών. Πρώτον μέσω της απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη Γη, η οποία σε διαφορετική περίπτωση, όταν δηλαδή η ατμόσφαιρα θα ήταν ξηρή και χωρίς νέφωση, θα διέφευγε στο διάστημα και δεύτερον μέσω της εκπομπής της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης, όταν η θερμοκρασία πέφτει στη θερμοκρασία δρόσου.

3.8. ΝΕΦΩΣΗ

Η νέφωση που επικρατεί σε μία περιοχή επηρεάζει σημαντικά την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος. Υψηλό ποσοστό νέφωσης έχει ως συνέπεια την ανάκλαση και απορρόφηση μεγάλου μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε η ένταση της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος ελαττώνεται.

3.9. ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Η βροχή, που είναι ίσως η σημαντικότερη μορφή υετού, οδηγεί στην υγρή απόθεση των ρύπων. Επιπλέον, σχετίζεται σε μικρότερο βαθμό με την αυξημένη νέφωση και την αγωγή της θερμότητας. Οπότε είναι προφανές ότι συμβάλει αποφασιστικά στην απομάκρυνση των ρύπων από την ατμόσφαιρα, τόσο κατά το στάδιο του σχηματισμού της, όσο και κατά την πτώση της.

3.10. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΛΛΩΝ ΡΥΠΩΝ

Η χημεία της κατώτερης τροπόσφαιρας χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες και αλληλεπιδρώμενες χημικές αντιδράσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η διακύμανση της συγκέντρωσης κάποιου ρύπου να έχει άμεση σχέση με τη συγκέντρωση ενός άλλου ή άλλων ρύπων. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα σχετίζεται άμεσα με τις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου και του διοξειδίου του αζώτου, αφού οι δύο αυτές χημικές ενώσεις παίζουν σημαντικό ρόλο στην καταστροφή και στην παράγωγη του όζοντος αντίστοιχα.

3.11. ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΥΠΟΥ

Η συγκέντρωση ενός ρύπου είναι πιθανό να εμφανίζει σημαντικές χρονικές διακυμάνσεις, είτε μακροχρόνιες, όπως για παράδειγμα ετήσια, είτε βραχυχρόνιες, όπως για παράδειγμα εβδομαδιαία και ημερήσια. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε διάφορα περιοδικά μετεωρολογικά και μη φαινόμενα. Για παράδειγμα, οι συγκεντρώσεις του όζοντος και των αιωρούμενων σωματιδίων παρουσιάζουν σημαντικές ετήσιες, εβδομαδιαίες και ημερήσιες διακυμάνσεις.

4. ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Με τον όρο αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) χαρακτηρίζεται κάθε συστατικό εκτός από το καθαρό νερό που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ως υγρό ή στερεό κάτω από φυσιολογικές συνθήκες. Η διάμετρός τους κυμαίνεται από μερικά nm μέχρι δεκάδες μm και είναι πάντα μεγαλύτερη από τη μοριακή διάσταση (1 nm). Με εξαίρεση την περίπτωση που τα σωματίδια είναι υγρά, είναι πολύ σπάνιο να συναντήσουμε σφαιρικά σωματίδια.

Τα κολλοειδούς μεγέθους σωματίδια ονομάζονται και αερολύματα (aerosols). Αερόλυμα είναι μια χημικά ευσταθής αιώρηση στερεών ή υγρών σωματιδίων ή και αμφοτέρων, στην ατμόσφαιρα. Το ατμοσφαιρικό αερόλυμα είναι, συνεπώς, ο συνδυασμός όλου του υλικού που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε συμπυκνωμένη φάση, καθώς και ο αέρας, εντός του οποίου το αιωρούμενο υλικό παραμένει.

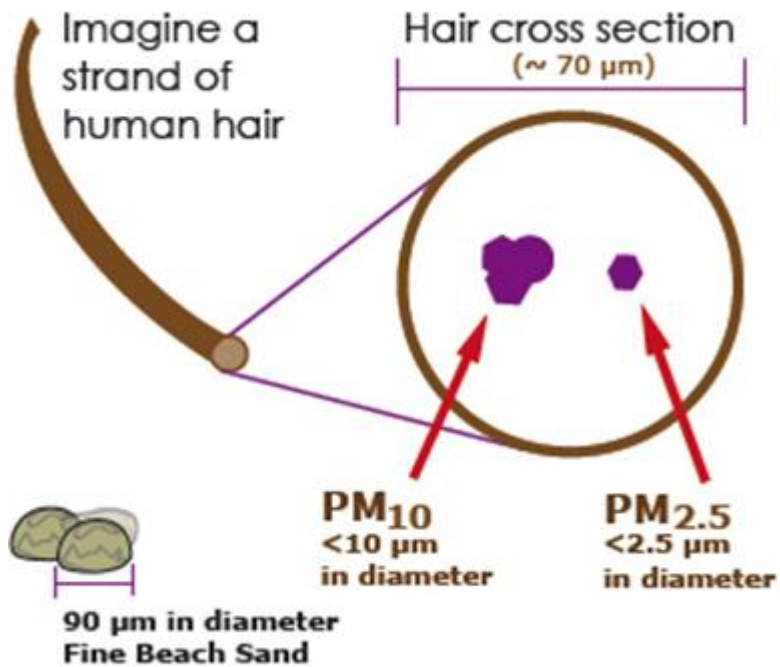
Για το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται η συντομογραφία TSP (Total Suspended Particles). Για αυτά που έχουν διάμετρο μικρότερη από 10 μm και 2,5 μm, οι συντομογραφίες PM₁₀ και PM_{2,5} αντίστοιχα.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα. Περιλαμβάνουν ουσίες διαφορετικής χημικής σύνθεσης που δεν είναι δυνατόν να αποτελέσουν μια ομάδα. Η πλήρης περιγραφή τους απαιτεί καθορισμό όχι μόνο της συγκέντρωσής τους αλλά και του μεγέθους τους, της χημικής τους σύνθεσης, της φυσικής τους κατάστασης (υγρά ή στερεά) και της μορφολογίας τους.

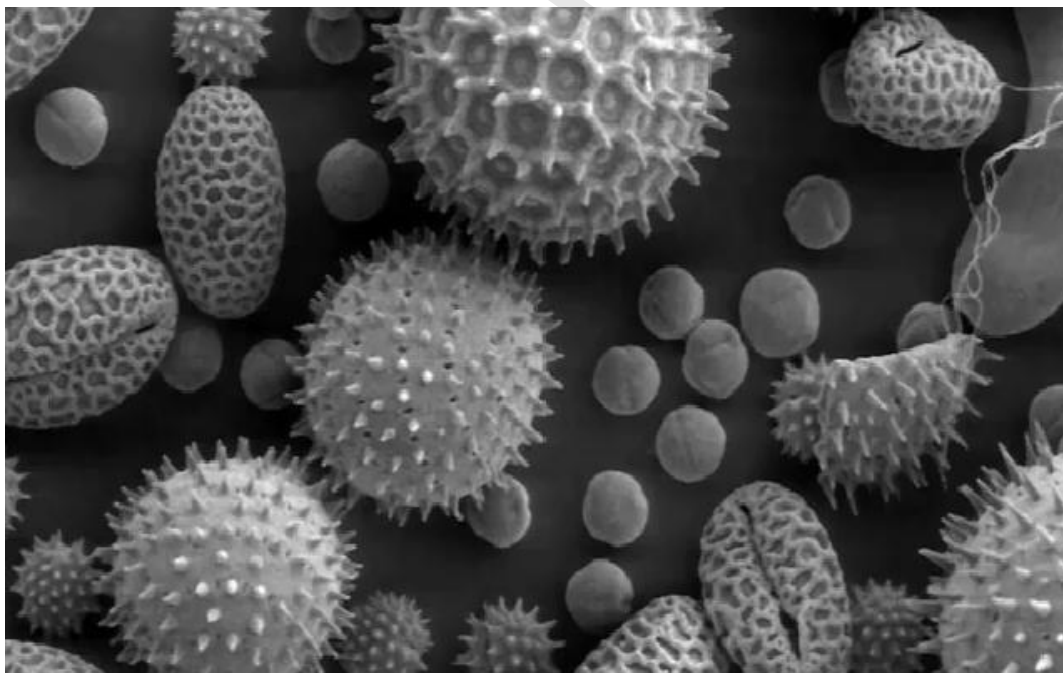
Σ' ένα κυβικό εκατοστό αέρα, σε μια μεγάλη πόλη, υπάρχουν περίπου 20000 αιωρούμενα σωματίδια. Αν αναλογιστούμε ότι αναπνέουμε περίπου 6 λίτρα κάθε λεπτό (12 περίπου αναπνοές το λεπτό), αναπνέουμε δηλαδή περίπου 500 cm³ σε κάθε αναπνοή. Έτσι, αν βρισκόμαστε σε μια μεγάλη πόλη σημαίνει ότι λαμβάνουμε σε κάθε αναπνοή γύρω στα 10 εκατομμύρια αιωρούμενα σωματίδια!

Αυτά, τα βλέπουμε μερικές φορές όταν μπαίνει μια ακτίνα φωτός σε ένα σκοτεινό δωμάτιο, όπου φαίνεται σαν μια δέσμη, οπότε παρατηρούμε ότι ο αέρας γύρω μας παραείναι «βρώμικος». Στην ουσία, στην περίπτωση αυτή, βλέπουμε μόλις το 1 στα 1000 σωματίδια. Τα υπόλοιπα είναι πολύ μικρά για να τα δούμε.

Τα αιωρούμενα σωματίδια, αποτελούν σήμερα το νούμερο ένα ρύπο για τις αστικές περιοχές. Κι όμως, αποτελούν ένα από τα πιο βασικά συστατικά του πλανήτη μας, γιατί πάνω τους συμπυκνώνεται το νερό και δημιουργούνται οι σταγόνες στα σύννεφα. Κάθε σταγόνα σε ένα σύννεφο, είναι ένα σωματίδιο πάνω στο οποίο έχει συμπυκνωθεί νερό. Αν δεν υπήρχαν αυτά τα σωματίδια στο πλανήτη μας, η υγρασία θα έφτανε 500%. Ο λόγος που η υγρασία φτάνει μέχρι 100%, είναι ότι μόλις φτάσει μέχρι εκεί, το νερό που περισσεύει συμπυκνώνεται στα σωματίδια. Οπότε είναι τελείως απαραίτητα για την υγεία του πλανήτη.



Εικόνα 4.1: Τυπικό μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα 4.2: Αιωρούμενα σωματίδια όπως φαίνονται από το μικροσκόπιο (NASA).

4.1. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΩΝ ΤΡΟΠΟ ΣΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Παρακάτω αναφέρονται και περιγράφονται οι διάφοροι όροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό των νεφών που σχηματίζονται από αιωρούμενα σωματίδια (Arya 1991; Κουιμτζής, 1998; Seinfeld and Pandis, 1998).

α. Σκόνη (dust): Είναι τα στερεά σωματίδια μεγάλου σχετικά μεγέθους, με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm , που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα διάβρωσης ή κατακερματισμού στερεών υλών (π.χ. σκόνη εδάφους, σωματίδια φυτών κ.λ.π.).

β. Καπνός (smoke): Είναι τα λεπτότατα σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,01 μm , που σχηματίζονται κατά την ατελή καύση ουσιών που περιέχουν άνθρακα.

γ. Αιθάλη (soot): Είναι η συσσώρευση σωματιδίων που περιέχουν άνθρακα, που σχηματίζονται κατά την ατελή καύση ουσιών (οι οποίες περιέχουν άνθρακα).

δ. Ιπτάμενη τέφρα (fly ash): Είναι τα λεπτόκοκκα σωματίδια τέφρας στερεών καυσίμων, που παρασύρονται με τα καυσαέρια.

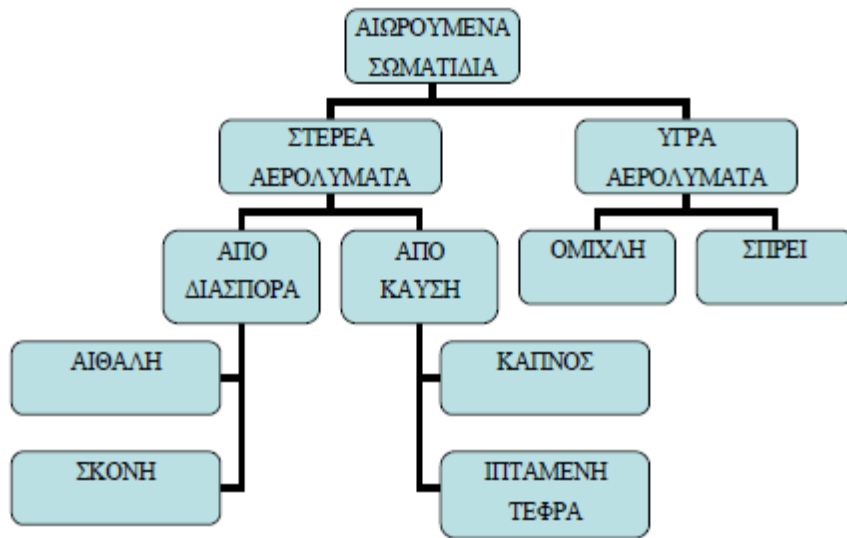
ε. Κάπνα (fume): Είναι τα στερεά σωματίδια, με διάμετρο μικρότερη από 1 μm , που σχηματίζονται δευτερογενώς στην ατμόσφαιρα από συμπύκνωση ουσιών, που βρέθηκαν λόγω ειδικών συνθηκών στην αέρια φάση.

στ. Ομίχλη (fog): Είναι τα ορατά σταγονίδια που είναι διεσπαρμένα στην ατμόσφαιρα και σχηματίζονται από τη συμπύκνωση των ατμών. Ο όρος χρησιμοποιείται συνήθως στη μετεωρολογία και η ουσία που βρίσκεται σε διασπορά είναι το νερό, με σταγονίδια μικρού σχετικά μεγέθους, σε μεγάλες συγκεντρώσεις.

ζ. Αχλός (mist). Είναι τα μεγάλα σχετικά μεγέθους αιωρούμενα σταγονίδια της ατμόσφαιρας, με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm , που βρίσκονται σε μικρές συγκεντρώσεις και σχηματίζονται από μηχανικές δράσεις ή από συμπύκνωση αερίων.

η. Καπνομίχλη (smog): Συνδυασμός καπνού και ομίχλης. Με αυτόν τον όρο χαρακτηρίζεται συχνά η εκτεταμένη ρύπανση της ατμόσφαιρας λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων.

θ. Καταχνιά ή ξηρή αχλός (haze): Είναι συνδυασμός σταγονιδίων νερού, σκόνης, σωματιδίων καπνού και φωτοχημικών ρύπων που μειώνουν την ορατότητα. Έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 μm .



Εικόνα 4.3: Είδη αιωρούμενων σωματιδίων.

4.1.1. Πρωτογενή σωματίδια

Πρωτογενή σωματίδια είναι αυτά τα οποία εκπέμπονται άμεσα από αναγνωρισμένες πηγές. Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις τους είναι στην γενική περίπτωση ανάλογες προς τις εκπεμπόμενες ποσότητες και με τη σημερινή τεχνολογία είναι δυνατός ο καθορισμός του είδους και της ποσότητας των πρωτογενών ρύπων που εκπέμπονται από κάθε πηγή, ενώ υπάρχει και αρκετή πληροφορία σχετικά με τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Εν' τούτοις, δεν είναι δυνατή καμία πρόβλεψη των τελικών επιπτώσεων με ικανοποιητική βεβαιότητα από τις παραπάνω πληροφορίες γιατί ένα πλήθος διεργασιών επενεργούν επί των σωματιδίων μέσα στο δυναμικό φυσικό ατμοσφαιρικό σύστημα.

Μια κατηγορία πρωτογενών σωματιδίων είναι τα προερχόμενα από την θραύση μεγαλύτερων μαζών και την επαναιώρηση των θραυσμάτων από τον αέρα. Η κύρια μάζα αυτών των πρωτογενών σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερου από 1μm, όμως η κατ' αριθμό κατανομή τους παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή 0,1-1μm. Αυτή η κατηγορία σωματιδίων υπόκειται σε ελάχιστες διαδικασίες μετασχηματισμού μετά την εκπομπή τους. Λόγω του μεγάλου τους σχετικά μεγέθους δεν συσσωματώνονται μεταξύ τους εύκολα, αλλά αναμιγνύονται με αλλά ατμοσφαιρικά συστατικά μέσω διαδικασιών μεταφοράς μάζας στην αέρια φάση. Μια ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία πρωτογενών σωματιδίων είναι τα σωματίδια στοιχειακού άνθρακα που σχηματίζονται από διαδικασίες καύσης. Αρχικά έχουν μέγεθος 5-20 nm αλλά συσσωματώνονται γρήγορα προς σχηματισμό μεγαλύτερων μαζών. Κατόπιν

μεταπίπτουν σε πιο σύνθετες μορφές, μεγέθους πολλών δεκάδων nm, με την επίδραση τριχοειδών δυνάμεων από ατμούς που συμπυκνώνονται επί αυτών.

4.1.2. Δευτερογενή σωματίδια

Δευτερογενή σωματίδια ονομάζονται αυτά τα οποία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα, από μετατροπή αερίων άμεσα εκπεμπόμενων από πηγές. Κύριες πρόδρομες ενώσεις για τα δευτερογενή σωματίδια είναι το διοξείδιο του θείου, η αμμωνία και τα οξείδια του αζώτου. Προϋπόθεση για την μετάπτωση μια αέριας ένωσης σε υγρή ή στερεά μορφή είναι η συγκέντρωση της στην αέρια φάση να υπερβαίνει την τάση ατμών της. Αυτή η προϋπόθεση στην ατμόσφαιρα ικανοποιείται, κατά τις παρακάτω διαδικασίες:

α. Χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης αέριων ενώσεων με χαμηλές τάσεις ατμών.

β. Ελάττωση της θερμοκρασίας η οποία οδηγεί σε ελάττωση της τάσης ατμών.

γ. Σχηματισμός πολυδισπαρμένου αερολύματος, οπότε η τάση ατμών των απλών ενώσεων πάνω από το αερόλυμα μειώνεται από την παρουσία άλλων ενώσεων στο αερόλυμα (Νόμος Raoult).

Ακόμα, αρκετές πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC's) μπορούν να μετασχηματιστούν σε σωματίδια. Η πλειοψηφία αυτών των μετατροπών είναι αποτέλεσμα έντονων φωτοχημικών αντιδράσεων. Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των δευτερογενών σωματιδίων δεν είναι κατ' ανάγκη ανάλογες προς τις εκπεμπόμενες ποσότητες των πρόδρομων ενώσεων, καθώς η ελάττωση του ρυθμού σχηματισμού μπορεί να καθορίζεται και από παράγοντες διαφορετικούς από την συγκέντρωση των αντιδρώντων ουσιών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δευτερογενές νιτρικό αμμώνιο, μια ασταθής ένωση, η ισορροπία της οποίας με την αμμωνία και το νιτρικό οξύ επηρεάζεται από την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία.

Παρότι η σκόνη που επαναιωρείται από το έδαφος ανήκει στα πρωτογενή σωματίδια, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων. Για παράδειγμα το νιτρικό αμμώνιο που περιέχεται στα λιπάσματα, είναι δυνατό να εξατμισθεί σε αμμωνία και νιτρικό οξύ, οπότε συμβάλλει στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων. Τα δευτερογενή σωματίδια συνήθως σχηματίζονται μέσα σε λίγες ώρες και το μέγεθος τους κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 1 μm.

4.1.3. Τα Στρατοσφαιρικά Αερολύματα

Σωματίδια αερολυμάτων υπάρχουν όχι μόνο στην τροπόσφαιρα, αλλά και στην στρατόσφαιρα. Πράγματι, έχει βρεθεί ότι υπάρχει μόνιμα ένα στρώμα μικρών σωματιδίων στη στρατόσφαιρα, σε ύψη γύρω από τα 25 Km στον Ισημερινό και γύρω από τα 17 Km στους Πόλους (στρώμα Junge). Το μέσο μέγεθος των στρατοσφαιρικών σωματιδίων τείνει να είναι πολύ μικρότερο από εκείνο των σωματιδίων της κατώτερης ατμόσφαιρας. Οι μετρήσεις με αισθητήρες προσαρμοσμένους σε αερόστατα δείχνουν ότι, το εύρος των μεγεθών είναι αρκετά σταθερό,

με εξαίρεση περιόδους ηφαιστειακής δραστηριότητας, κατά τις οποίες εισέρχονται στην ατμόσφαιρα σωματίδια μεγαλύτερα των συνήθων. Σημειώνεται, ότι ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην κατώτερη και μέση τροπόσφαιρα είναι της τάξης της εβδομάδας, ενώ στη στρατόσφαιρα της τάξης μηνών και ετών (Varotsos C., 2001).

4.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ

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

α. Γεωμετρικά (με οπτική ή ηλεκτρονική μικροσκοπία).

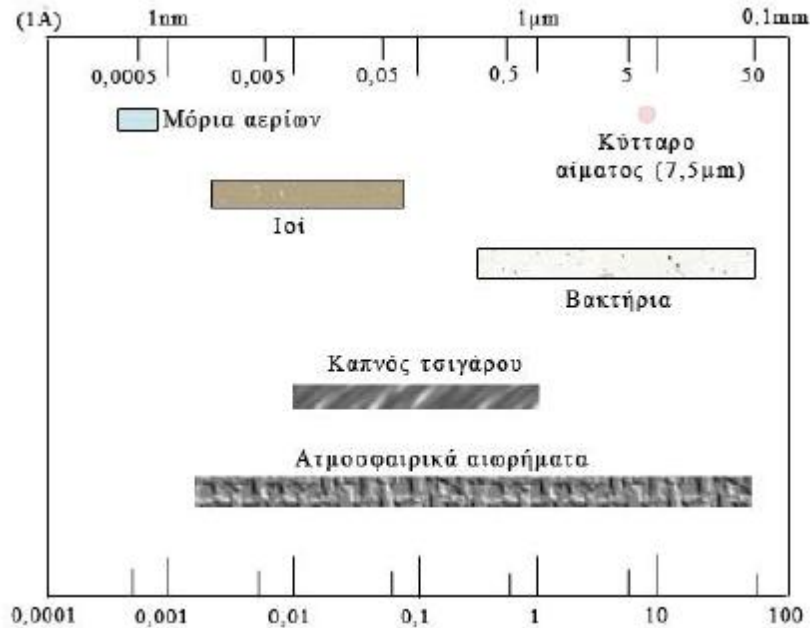
β. Από την σκέδαση που προκαλεί στο φως.

γ. Από τα χαρακτηριστικά του, όπως είναι η ηλεκτρική ευκινήσια, 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 μοναδιαίας πυκνότητας (1 g/cm^3), η οποία έχει την ίδια τελική ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το υπό εξέταση σωματίδιο». 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.

Κάτω από ένα τέτοιο ορισμό, τα αιωρούμενα σωματίδια καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος μεγεθών, ίσως τεσσάρων και περισσότερων τάξεων μεγέθους. Τα πρωτογενή ατμοσφαιρικά σωματίδια που δημιουργούνται από φυσικές διεργασίες, όπως ο κονιορτός από το έδαφος, ή τα σωματίδια άλατος από τη θάλασσα, τείνουν να περιλαμβάνονται στα μεγάλα μεγέθη του φάσματος, ενώ τα ατμοσφαιρικά σωματίδια, που προκύπτουν από βιομηχανική δραστηριότητα, όπως είναι οι καύσεις και η επεξεργασία μετάλλων, τείνουν να ανήκουν στα μικρά μεγέθη. Τα σωματίδια που παράγονται από τη βιόσφαιρα καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα, με τη γύρη να είναι μεγάλου μεγέθους και τα οργανικά αερολύματα που

σχηματίζονται από την μετατροπή των αερίων σε σωματίδια (δευτερογενή) και προέρχονται από εκπομπές χαμηλής πτητικότητας υδρογονανθράκων να είναι μικρά.



Εικόνα 4.4: Εύρος μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων.

4.2.1. Τα λεπτόκοκκα (fine mode)

Λεπτόκοκκα καλούνται τα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μέχρι 2,5 μm. Συνήθως τα σωματίδια αυτά παράγονται δευτερογενώς από αέριες ενώσεις. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την υποκατηγορία πυρήνα και την υποκατηγορία συσσώρευσης.

- 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:

- I. 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.

- II. Υπερλεπτόκοκκα σωματίδια πυρήνα (Ultra-fine Nuclei).

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

- Υποκατηγορία συσσώρευσης (accumulation range).

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

I. Σταγονίδια (droplet mode).

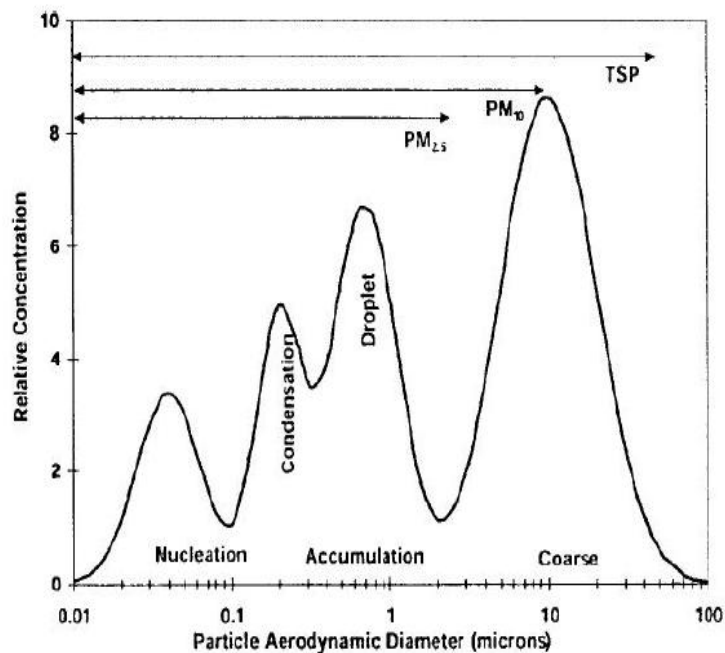
Είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιδράσεις υγρής φάσης μεταξύ σταγονιδίων μέσα σε νέφη ή ομίχλη ή παρουσία πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, επάνω στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων. Η συσσωμάτωση που επέρχεται ως αποτέλεσμα δημιουργεί την ομάδα των σταγονιδίων.

II. Συμπυκνώματα (condensation mode).

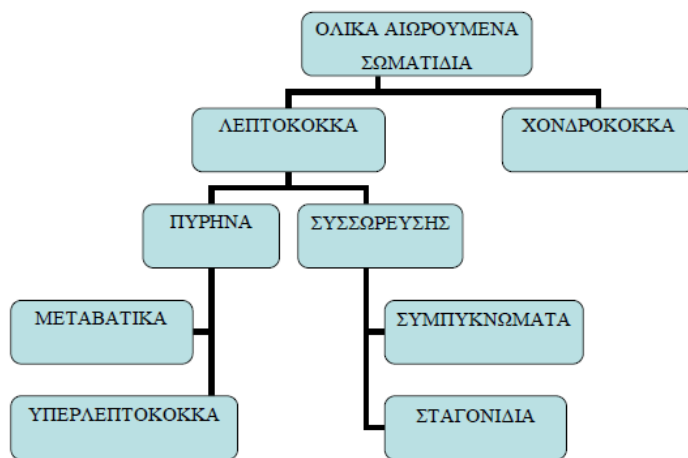
Πρόκειται για μικρότερα σωματίδια από τα προηγούμενα. Σχηματίζονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων πυρήνα.

4.2.2. Τα χονδρόκοκκα (coarse mode)

Χονδρόκοκκα καλούνται τα αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου άνω των 2,5 μm . Παράγονται συνήθως με μηχανικούς τρόπους. Τα μεγαλύτερα σωματίδια (για παράδειγμα εκείνα με διάμετρο 10 μm) είναι δυνατόν να μείνουν σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα 10 με 20 ώρες, πριν την καθίζηση τους στο κάτω τμήμα της τροπόσφαιρας. Θεωρώντας μια μέση ταχύτητα του ανέμου ίση με περίπου 7 m/s, υπολογίζεται ότι τα σωματίδια αυτά είναι δυνατόν να ταξιδέψουν έως 20 με 30 χιλιόμετρα. Αντίστοιχα, τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου 0,1 έως 1 μm) είναι δυνατόν να απομακρυνθούν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο εκπομπής τους. Ένα μικρό ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να φτάσει έως το άνω τμήμα της τροπόσφαιρας (περίπου 8 με 15 χιλιόμετρα ύψος) και να μείνει αιωρούμενο για μεγάλους χρόνους (έως και 1 έτος) (EEA & WHO 1999; EPA, 1996; Chow, 1995).



Εικόνα 4.5: Ιδανική κατανομή κατά μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα 4.6: Κατηγορίες με βάση το μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων.

4.3. 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 ακόμη μελετάται. Ωστόσο, τα μέχρι σήμερα συμπεράσματα φαίνονται να εντοπίζονται στις εξής υποομάδες των συνολικά αιωρούμενων σωματιδίων (TSP):

4.3.1. Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles)

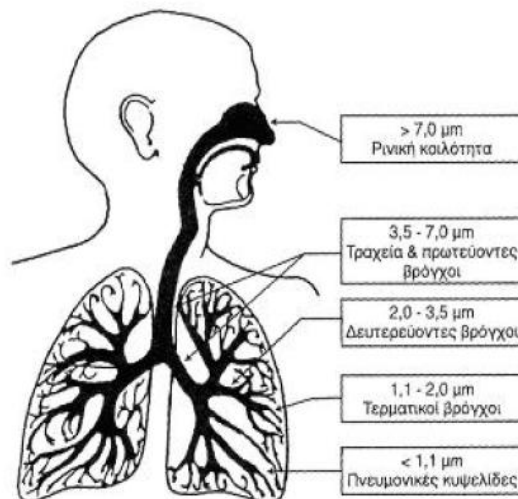
Εισπνεύσιμα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως 10 μm, καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm κατακρατούνται στην στοματική και τη ρινική κοιλότητα.

4.3.2. Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles)

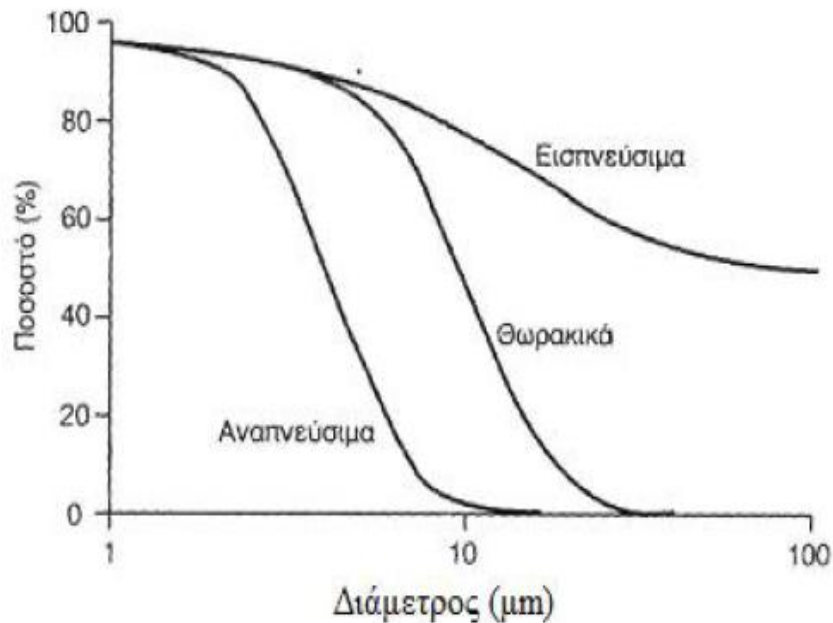
Τα θωρακικά σωματίδια αποτελούν το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο των 7 μm.

4.3.3. 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, 1996; Paterson, 1995).



Εικόνα 4.7: Διεισδυτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.



Εικόνα 4.8: Κατανομή σωματιδίων σε αναπνεύσιμα, θωρακικά και εισπνεύσιμα ανάλογα με το μέγεθος τους.

4.4. ΟΡΙΣΜΟΙ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

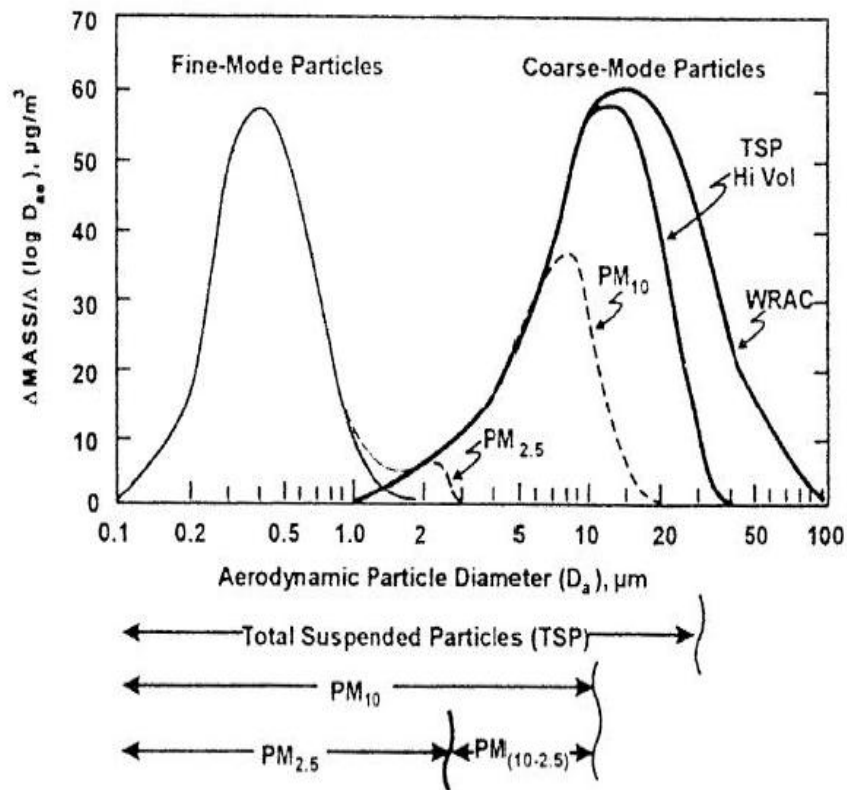
Βάσει της κατάταξης των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων κατά μέγεθος (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα), και σε συσχέτιση με την διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό (εισπνεύσιμα και αναπνεύσιμα), ορίστηκαν οι δύο βασικές κατηγορίες μετρούμενων σωματιδιακών κλασμάτων, τα PM_{10} και τα $PM_{2,5}$. Και 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 ατμόσφαιρα.

Γενικά, θεωρείται ότι τα PM_{10} ταυτίζονται με την κατηγορία των εισπνεύσιμων σωματιδίων και έχουν διάμετρο έως 10 μm . Ωστόσο, ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπ' όψιν του το γεγονός ότι είναι αδύνατον να κατασκευασθεί δειγματολήπτης ικανός να λειτουργεί υπό μορφή βηματικής συνάρτησης, οπότε να αποκλείει τη συλλογή σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο παραπλήσια της επιθυμητής, ώστε να είναι δυνατόν να προσδιορισθούν σωματίδια μέχρι ή από μία διάμετρο και πέρα. Στην πράξη, δηλαδή, τα PM_{10} περιλαμβάνουν και ένα περιορισμένο αριθμό σωματιδίων με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm .

Για το λόγο αυτό ο αυστηρός ορισμός, όπως αναφέρεται στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), είναι : « PM_{10} νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm .»

Αντίστοιχα, τα $PM_{2.5}$ ταυτίζονται με τα αναπνεύσιμα σωματίδια και ο σχετικός ορισμός της Ε.Ε. είναι: « $PM_{2.5}$ νοούνται σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50 % των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2.5 μm .»

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).



Εικόνα 4.9: Κυριότερα κλάσματα αιωρούμενων σωματιδίων.

4.5. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ 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 και Ισχυρά οξέα.

Επιπλέον, το υγρό H₂O 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 αναλυτικά οι χημικές ενώσεις και ομάδες που συνθέτουν την μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων.

4.5.1. Θειικά

Τα θειικά προέρχονται κυρίως από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου (SO₂) 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).

4.5.2. Νιτρικά

Τα νιτρικά σχηματίζονται κυρίως από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του αζώτου (NO₂). Το νιτρικό αμμώνιο (NH₄NO₃) είναι το πιο συχνά απαντώμενο και βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε ισορροπία με τις πρόδρομες αέριες ουσίες του, την αμμωνία (NH₃) και τους ατμούς νιτρικού οξέος (HNO₃) (Seinfeld & Pandis, 2006; Lunden et al., 2003). Σε ορισμένες περιπτώσεις το νιτρικό νάτριο (NaNO₃) κυριαρχεί. Λόγω της ταχύτερης οξείδωσης του NO₂ σε σχέση με το SO₂, και της ευαισθησίας του NH₄NO₃ στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις της NH₃ (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).

4.5.3. Αμμωνιακά

Κατά τον αρχικό σχηματισμό των θειικών και νιτρικών ιόντων στην ατμόσφαιρα, αυτά βρίσκονται υπό την μορφή των αντίστοιχων οξέων. Σταδιακά, τα οξέα αυτά εξουδετερώνονται από την ατμοσφαιρική αμμωνία, σχηματίζοντας αμμωνιακά άλατα. Στις περισσότερες αστικές περιοχές, το αμμωνιακό ιόν (NH₄⁺) 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).

4.5.4. Χλωριόντα

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

Τέλος, οι χλωριούχες ενώσεις εισέρχονται στην αέρια σωματιδιακή μάζα και με δευτερογενείς διαδικασίες, όπως η εξουδετέρωση της ατμοσφαιρικής αμμωνίας από 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).

4.5.5. Οργανικός άνθρακας

Ο οργανικός άνθρακας είναι δυνατόν να εκπέμπεται από πρωτογενείς πηγές εκπομπής. Σημαντική όμως ποσότητα παράγεται δευτερογενώς, μέσω ατμοσφαιρικών φωτοχημικών διεργασιών μεταξύ πρωτογενών αέριων οργανικών χημικών ειδών, οι οποίες παράγουν χαμηλής πτητικότητας οργανικές ενώσεις. Σύμφωνα με ερευνητικές εργασίες, ο σχηματισμός δευτερογενών σωματιδίων συσχετίζεται με τον λόγο οργανικού προς στοιχειακό άνθρακα. Συγκεκριμένα, τιμές του λόγου άνω του 2 υποδεικνύουν δευτερογενή παραγωγή οργανικού άνθρακα (Kavouras et al., 1999). Οι οργανικές ενώσεις που απαντώνται στα αιωρούμενα σωματίδια είναι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, είτε αρωματικές ενώσεις, είτε οξυγονωμένα παράγωγα των υδρογονανθράκων. Οι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες που ανιχνεύονται στα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από κανονικά αλκάνια, 16–36 ατόμων άνθρακα, ενώ σημαντική είναι και η περιεκτικότητα σε διακλαδισμένες και ακόρεστες ενώσεις. Είναι αδρανείς ενώσεις, σχετικά μη τοξικές και δεν συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα (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 αιωρούμενων σωματιδίων περιέχονται και πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHs), οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της αποδεδειγμένης καρκινογόνου

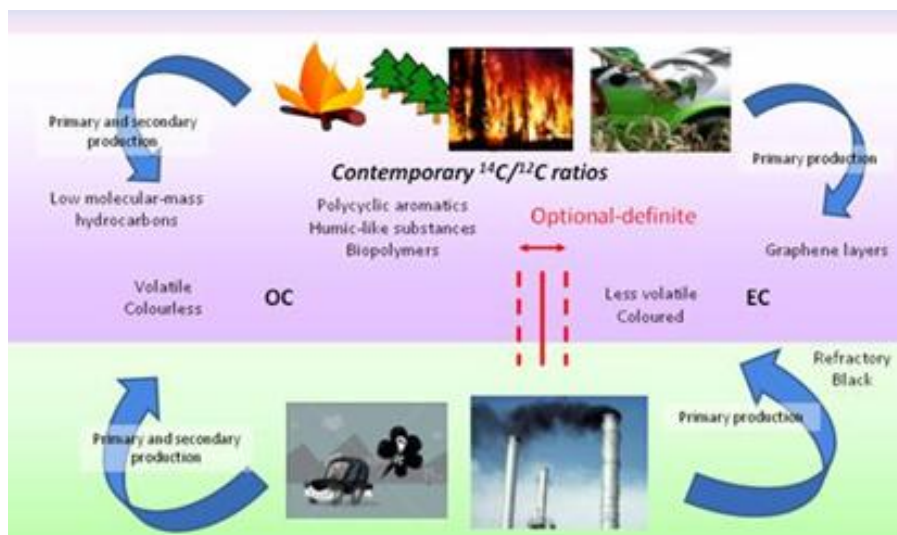
και μεταλλαξιόγνου δράσης τους (Junker et al., 2000; Kavouras et al., 1999; Menichini et al., 1999).

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 δακτυλίους, ανθεκτικές στις υψηλές θερμοκρασίες. Η ευχέρεια των υδρογονανθράκων να σχηματίσουν PAHs με πυροσύνθεση δίνεται από την ακολουθία (Manahan 1994): Αρωματικοί > κυκλοολεφίνες > ολεφίνες > παραφίνες.

Οι PAHs εντάσσονται στην κατηγορία των τοξικών οργανικών μικρο-ρύπων (Toxic Organic Micro Pollutants, TOMPs), όπου ανήκουν και οι πολυχλωριωμένες διοξίνες και φουράνια, καθώς και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), ομάδες ενώσεων που πρόσφατα γνώρισαν μεγάλη δημοσιότητα και επίσης σχετίζονται με τα αιωρούμενα σωματίδια (Harrison & Jones, 1995). Τέλος, στο οργανικό κλάσμα των αιωρουμένων 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.

4.5.6. Στοιχειακός άνθρακας

Κατά τις διαδικασίες καύσης και ιδίως εξαιτίας της κυκλοφορίας οχημάτων, εκπέμπονται σωματίδια αιθάλης, τα οποία περιέχουν άνθρακα υπό μορφή ενός πυρήνα από στερεό μαύρο στοιχειακό άνθρακα (είτε καθαρό γραφίτη ή υψηλού μοριακού βάρους μη πτητική ύλη, όπως πίσσα ή κωκ). Στην επιφάνεια του πυρήνα συχνά υπάρχει επικάλυψη από ημιπτητικές 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) .



Εικόνα 4.10: Οργανικός και στοιχειακός άνθρακας στα αιωρούμενα σωματίδια.

4.5.7. Γεωλογικά υλικά

Στην κατηγορία των γεωλογικών υλικών περιλαμβάνεται επιφανειακή σκόνη και αερομεταφερόμενα αποσπασμένα πετρογενή ορυκτά υλικά. Η σύστασή τους δεν είναι σταθερή, αλλά αντικατοπτρίζει τα εκάστοτε τοπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά και τις επιφανειακές συνθήκες. Η συγκέντρωσή τους εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις διαδικασίες οι οποίες οδηγούν στην επαναιώρηση τους από το έδαφος (Harrison & Yin, 2000). Ορισμένα από τα φυσικά ορυκτά που έχουν αναγνωρισθεί στην σωματιδιακή μάζα είναι: χαλαζίας (SiO_2), ασβεστίτης (CaCO_3), γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), αστρίοι (feldspar, KAlSi_3O_8), εψωμίτης ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), χλωρίτης, καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, αιμανίτης κ.α. (Harrison & Jones, 1995).

4.5.8. Βιολογικά υλικά

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

4.5.9. Μέταλλα και μεταλλικά ιχνοστοιχεία

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

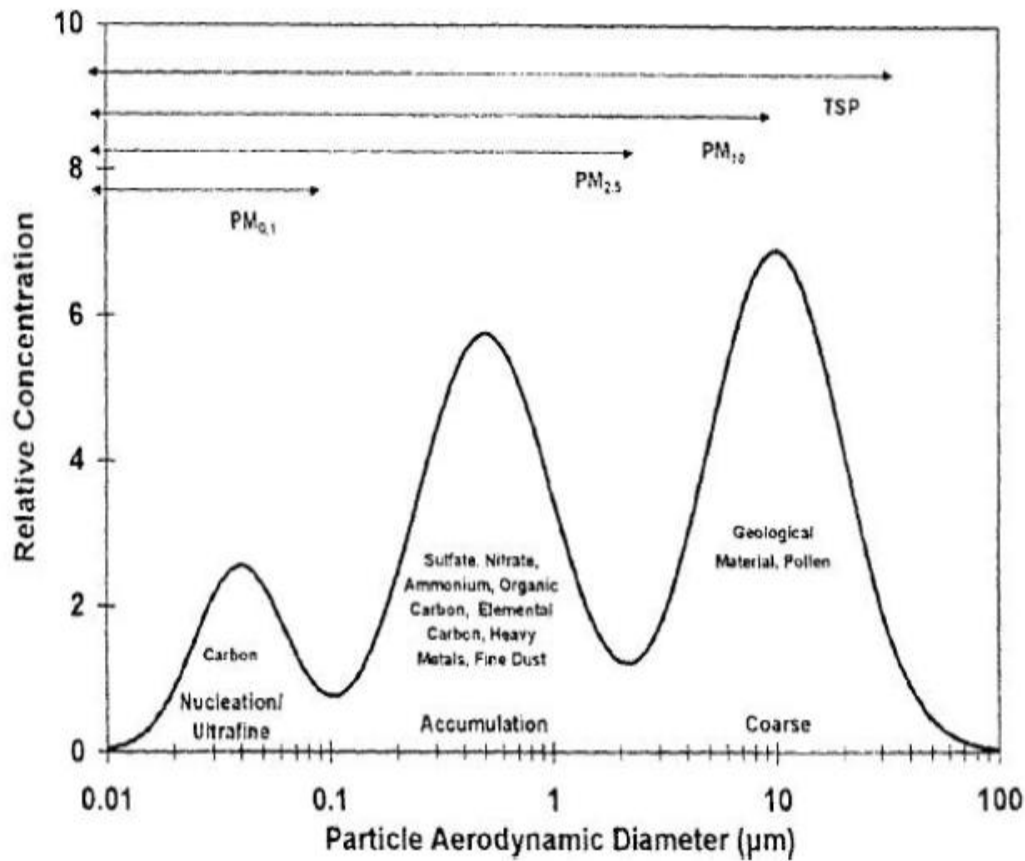
Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι ορισμένα μεταλλικά ιχνοστοιχεία, όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το βηρύλλιο (το οποίο έχει και το χαμηλότερο επιτρεπτό όριο στην ατμόσφαιρα), το βανάδιο, το κάδμιο, το νικέλιο και το αρσενικό (μεταλλοειδές), είναι ιδιαίτερα τοξικά σε συγκεκριμένες δόσεις. Ο μόλυβδος βρίσκεται στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή αλαγονιδίων 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 υγράργυρος είναι παρών στην ατμόσφαιρα με την μορφή οργανομεταλλικών ενώσεών του, όπως οι: (CH₃)₂Hg και (CH₃)HgBr. Άλλα μέταλλα απαντώνται με την μορφή των οξειδίων τους, όπως Fe₃O₄, V₂O₅ (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).

4.5.10. Ισχυρά οξέα

Ο σχηματισμόςθειικών και νιτρικών στην ατμόσφαιρα, μέσω της οξείδωσης των SO₂ και NO₂, αρχικά γίνεται υπό την μορφή των ισχυρών τους οξέων H₂SO₄ και HNO₃. 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 κατ' ευθείαν 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).



Εικόνα 4.11: Κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων κατά μάζα και κυριότερα συστατικά.

4.6. ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

4.6.1. Συσσωμάτωση

Συσσωμάτωση (coagulation) είναι η διαδικασία κατά την οποία σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής κίνησης που έχουν το ένα με το άλλο και σχηματίζουν μεγαλύτερα σωματίδια. Έτσι μειώνεται ο αριθμός των σωματιδίων ενώ αυξάνεται το μέγεθος τους. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που οδηγούν στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης. Όταν η σχετική κίνηση μεταξύ των σωματιδίων προέρχεται από την κίνηση Brown η διεργασία ονομάζεται θερμική συσσώρευση. Όταν η σχετική κίνηση προέρχεται από εξωτερικές δυνάμεις όπως από τη βαρύτητα, τα αεροδυναμικά φαινόμενα ή τις ηλεκτρικές δυνάμεις, η διεργασία ονομάζεται κινηματική συσσωμάτωση.

Το συνολικό αποτέλεσμα της συσσωμάτωσης είναι η ταχεία μείωση του αριθμού των πυρήνων Aitken. Χωρίς σταθερή ανανέωση του αριθμού των πυρήνων Aitken, όπως συμβαίνει στα βιομηχανικά κέντρα, οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων μπορεί να φθάσουν μέχρι τις $300000/\text{cm}^3$ (Katsoulis and Whelpdale, 1993). Υπεράνω θαλασσών, μακριά από ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης, οι συγκεντρώσεις τους μειώνονται σε λίγες εκατοντάδες ανά cm^3 .

Τα σωματίδια της γύρης, οι σπόροι, τα βακτηρίδια και τα περισσότερα αεροβιακά αερολύματα είναι πολύ μεγάλα για να επηρεασθούν άμεσα από τη συσσωμάτωση. Αρκετοί αέριοι ρυπαντές που επηρεάζουν τα βιολογικά συστήματα καθώς και λίγα σωματίδια φυσικής προέλευσης, όπως είναι η οργανική αχλύς και ο καπνός, βρίσκονται στην περιοχή μεγέθους των σωματιδίων Aitken.

Κατά το σχηματισμό των σταγόνων των νεφών ή της ομίχλης, ένας αριθμός μικρών σωματιδίων που κινείται κατά Brown και βοηθείται από τη ροή των μορίων του νερού προς το κέντρο της συμπύκνωσης, είναι δυνατόν να διαχυθεί μέσα σε μεγεθυνόμενες σταγόνες. Η επακολουθούσα εξάτμιση των σταγόνων οδηγεί σε συσσωμάτωση των σωματιδίων που συλλέχθηκαν. Μια καλή μαρτυρία για την αποτελεσματικότητα αυτής της διαδικασίας, καταφάνεται από την ταχεία μείωση των πυρήνων Aitken, πάνω από ήρεμη θάλασσα, με αποκορύφωμα να φθάνει σε μια συγκέντρωση πυρήνων, η οποία να προσεγγίζει τη μέση συγκέντρωση των σταγόνων στα νέφη της μορφής των σωρειτών (cumulus).

4.6.2. Πυρηνοποίηση

Η πυρηνοποίηση είναι μια από τις βασικότερες διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και παίζει πρωταρχικό ρόλο σε φαινόμενα όπως η συμπύκνωση, η δημιουργία νέων σωματιδίων και νεφών, η κρυστάλλωση και ο βρασμός. Η πυρηνοποίηση ορίζεται ως η μεταβολή φάσεως από μια φάση σε μια άλλη (π.χ. από την αέρια στην υγρή φάση). Η μεταβολή από την αέρια στην υγρή φάση δεν γίνεται άμεσα αλλά μέσω της δημιουργίας μικρών συσσωματώσεων μορίων σε μορφή πυρήνων (clusters). Η ιδεατή αυτή κατάσταση της δημιουργίας μικρών σωματιδίων κατευθείαν από την αέρια φάση δεν συμβαίνει εύκολα στην

ατμόσφαιρα λόγω του ότι προϋπάρχουν συγκεντρώσεις σωματιδίων με αποτέλεσμα να υπάρχει πυρηνοποίηση πάνω στην επιφάνεια αυτών των σωματιδίων. Η πυρηνοποίηση που γίνεται χωρίς την ύπαρξη σωματιδίων που προϋπάρχουν ονομάζεται ομογενής ενώ όταν προϋπάρχουν σωματίδια ονομάζεται ετερογενής.

Στην ατμόσφαιρα, όπως έχουμε αναφέρει, η ομογενής πυρηνοποίηση δεν συμβαίνει εύκολα. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν το μέσο όπου λαμβάνει χώρα μεταβολή φάσεως από την αέρια στην υγρή φάση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

4.6.3. Συμπύκνωση

Όταν τα σταγονίδια στην ατμόσφαιρα έχουν δημιουργηθεί τότε θα συνεχίζουν να αυξάνονται σε μέγεθος με συμπύκνωση υδρατμών. Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους των σταγονιδίων εξαρτάται από την σχετική υγρασία, το μέγεθος του σωματιδίου και το σχετικό μέγεθος των σωματιδίων ως προς το μέσο ελεύθερο μήκος.

Στη πρώτη φάση της αύξησης του μεγέθους του σωματιδίου, η διάμετρος του είναι μικρότερη από το ελεύθερο μήκος και ο ρυθμός αύξησης εξαρτάται από ρυθμό των τυχαίων μοριακών συγκρούσεων μεταξύ σωματιδίων και μορίων υδρατμών.

Στην περίπτωση που τα σωματίδια είναι αρκετά μεγαλύτερα από το μέσο ελεύθερο μήκος, ο ρυθμός αύξησης εξαρτάται από το ρυθμό της διάχυσης των μορίων των υδρατμών στην επιφάνεια των σωματιδίων.

Στην ατμόσφαιρα υπάρχουν κατά κύριο λόγο διαλυτά σωματίδια (π.χ. σωματίδια χλωριούχου νατρίου). Εισαγωγή αλατιού σε νερό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του σημείου βρασμού του νερού ελαττώνοντας την πίεση ισορροπίας πάνω από την επιφάνεια του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του σωματιδίου. Η έλξη επίσης του διαλυμένου άλατος με τα μόρια του νερού επιτρέπει το σχηματισμό σταθερών σταγόνων σε κορεσμένο ή ακόρεστο περιβάλλον.

4.6.4. Ξηρή εναπόθεση

Όταν απουσιάζουν πηγές εκπομπής σωματιδίων, ο ρυθμός της ξηράς εναπόθεσης μέσα σ' ένα στρώμα κτιριακών οροφών ή βλάστησης είναι ίσος με την προς τα κάτω ροή των σωματιδίων, στην κορυφή του κτιριακού συστήματος και φυτικού φυλλώματος, ή όταν δεν υπάρχουν κτίρια και βλάστηση, προς την επιφάνεια της ξηράς ή της θάλασσας. Η κατακόρυφη ροή μέσα στο στρώμα βλάστησης (αριθμός σωματιδίων που διέρχεται από την μονάδα της οριζόντιας επιφάνειας στη μονάδα του χρόνου), συνίσταται από δύο μέρη: σ' εκείνο που οφείλεται στη βαρυτική απόθεση και σ' εκείνο που οφείλεται στην ατμοσφαιρική ανατάραξη.

Εξαιρετικά μικρά σωματίδια συμπεριφέρονται όπως τα αέρια, των οποίων η τάση των υδρατμών είναι μηδέν, στην επιφάνεια απορρόφησης. Αυτά τα σωματίδια, αναμειγνύονται γρήγορα λόγω της ανατάραξης με τον αέρα, αλλά μεταφέρονται στην επιφάνεια με τη μοριακή διάχυση διαμέσου του στρώματος της στρωτής ροής. Η μεγαλύτερη βαθμίδα της

συγκέντρωσης συμβαίνει μέσα στο οριακό στρώμα, όπου η κίνηση των σωματιδίων είναι βραδεία.

Ο ρυθμός της απόθεσης, θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, είναι πολύ βραδύτερος για τα σωματίδια παρά για τα αέρια, επειδή η μοριακή διάχυση είναι πολύ μικρότερη. Καθώς το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνει, η αδράνεια τους αυξάνει και ο ρυθμός της απόθεσης τους αρχίζει να αντισταθμίζεται από μια μερικώς ελεύθερη αιώρηση μέσα στο στρώμα ροής. Επί του παρόντος, η καλύτερη εκτίμηση της ξηράς απόθεσης των σωματιδίων των αερολυμάτων της ατμόσφαιρας λαμβάνεται υποθέτοντας ότι τα σωματίδια καθιζάνουν με το βαρυτικό ρυθμό, δηλαδή, με ένα ρυθμό που είναι ίσος με το γινόμενο της συγκέντρωσης και της ταχύτητας πτώσεως του σωματιδίου.

4.6.5. Υγρή Εναπόθεση

Υπάρχουν δυο διεργασίες που δρουν κατά τη σάρωση των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Η πρώτη καλείται βροχόπλυση (rainout) και συμβαίνει όταν τα εξαιρετικά μικρά αερολύματα μεταφέρονται με τη μοριακή διάχυση και επικάθονται πάνω στις σταγόνες των νεφών και στους παγοκρυστάλλους. Η δεύτερη διεργασία καλείται απόπλυση (washout) και συμπαρασύρουν, όταν οι πίπτουσες βροχοσταγόνες ή νιφάδες χιονιού συγκρούονται και συγκρατούν, τα μεγάλα σωματίδια των αερολυμάτων.

Ο αριθμός των σωματιδίων που απομακρύνονται από τον αέρα σε αμφότερες τις περιπτώσεις, είναι ανάλογος του αριθμού των σωματιδίων που είναι παρόντα στην κατάλληλη περιοχή μεγέθους. Η απόπλυση, είναι αποτελεσματική μόνον για την απομάκρυνση γιγαντιαίων σωματιδίων. Η βροχόπλυση είναι αποτελεσματική για πυρήνες συμπύκνωσης μεγαλύτερης ακτίνας από 2 μm και για σωματίδια Aitken, ακτίνας μικρότερης από το 0.2 μm . Τα μικρά σωματίδια αποφεύγουν τη σύλληψη από τις πίπτουσες σταγόνες, κινούμενα με τη ροή του αέρα γύρω από τη σταγόνα που πέφτει. Τα μεγαλύτερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη αδράνεια, κινούνται βραδύτερα και άρα, συλλαμβάνονται από τη σταγόνα ευκολότερα. Υπάρχει ένα κενό μεταξύ 0.02 και 0.2 μm , για το οποίο τα σωματίδια δεν είναι εύκολο να απομακρυνθούν με τη διαδικασία του υετού. Τόσο η ξηρά εναπόθεση, όσο και η σάρωση των αερολυμάτων με τη βροχή (υγρά εναπόθεση), είναι σημαντικές διεργασίες απομάκρυνσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα.

Μια παρόμοια φυσική διαδικασία και άρα, ένας παρόμοιος χειρισμός, εφαρμόζεται για τη μελέτη της σάρωσης των σωματιδίων των αερολυμάτων και από τις νιφάδες του χιονιού. Για το ίδιο όμως, περιεχόμενο νερού, οι νιφάδες του χιονιού έχουν αρκετά μεγαλύτερες εμβαδικές επιφάνειες και γι' αυτό πίπτουν βραδύτερα μέσα στην ατμόσφαιρα. Ως συνέπεια αυτού προκύπτει ότι οι νιφάδες χιονιού είναι 10 έως 100 φορές αποτελεσματικότερες ως σαρωτές των αιωρούμενων σωματιδίων και των άλλων ρυπαντών.

4.6.6. Ταχύτητα εναπόθεσης

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας απόθεσης και καθίζησης των σωματιδίων είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα. Τα σωματίδια συνήθως, έχουν ακανόνιστες μορφές και δύσκολα μετρήσιμες πυκνότητες. Μπορεί να αλλάξουν οι πυκνότητες τους με τις αλλαγές της υγρασίας και έτσι να αλλάζουν οι συμπεριφορές τους. Αν είναι μικρά διολισθαίνουν μεταξύ των μορίων του αέρα, δημιουργούν ένα μικροκυματισμό και πίπτουν. Εάν πίπτουν πλησίον ενός τοίχου επιβραδύνεται η κίνηση τους, εάν πίπτουν ως ένα σύνολο επηρεάζουν την ταχύτητα πτώσεως των άλλων σωματιδίων και είναι ευαίσθητα στις πιέσεις που ασκούνται από την θερμοφόριση, τη διαχυσοφόριση, τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις, αλλά και από τα μικρότερα ρεύματα του αέρα.

Στην άκρη του διαστήματος μεγεθών των πυρήνων Aitken, τα σωματίδια συγκολλώνται γρήγορα για να σχηματίσουν μεγαλύτερα σωματίδια. Ένας αριθμός σωματιδίων που συγκεντρώνεται από μια σταγόνα σε ένα αναπτυσσόμενο νέφος συγκολλάται, όταν η σταγόνα εξατμίζεται. Πτητικές αεροβιολογικές ουσίες, όπως οι τερπίνες εξατμίζονται εύκολα.

4.6.7. Μεταφορά σωματιδίων

Από τη στιγμή κατά την οποία τα σωματίδια ανυψωθούν και φθάσουν στα κινούμενα ρεύματα του αέρα, είναι πιθανόν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις. Έχει γίνει αντιληπτό και αποδειχθεί την τελευταία 20ετία ότι το εύρος της ακτίνας μεταφοράς των σωματιδίων είναι πράγματι αρκετά μεγάλο, ιδιαίτερα, για εκείνα που αιωρούνται στον αέρα για αρκετό χρονικό διάστημα.

Από την ανάλυση της κλιματολογίας των τροχιών, οι οποίες εκκινούν από περιοχές μεγάλων συγκεντρώσεων αερολυμάτων (και άλλων ρυπαντών), έχει καταδειχθεί ότι η σκόνη και τα άλλα αιωρούμενα σωματίδια (φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης) μετακινούνται σε στάθμες πίεσης 850-700 hPa (1500-3500m ύψη) ή και ακόμη υψηλότερα μέσα στην ατμόσφαιρα, ενώ φθάνουν και αποτίθενται (κατακάθονται) σε αποστάσεις μέχρι 2000 Km ή και μεγαλύτερες (Katsoulis and Whelpdale, 1993).

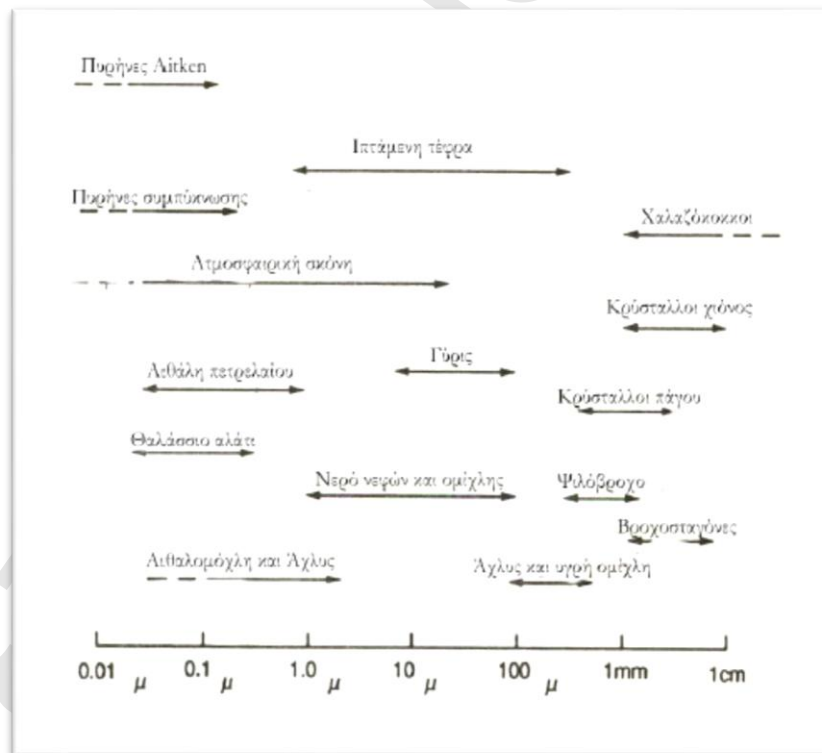
Η μεταφορά και η απόθεση των αερολυμάτων (και των συναφών ρυπαντών), πέραν του ότι επηρεάζεται χημικά, εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε, από το μέγεθος τους, αφού τα πολύ μικρά σωματίδια, συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά από τα μεγαλύτερα σωματίδια, των οποίων η ορμή τα αναγκάζει να ακολουθούν τις κινήσεις του αέρα στον οποίο είναι αναμειγμένα. Τα μεγάλα σωματίδια έχουν από μόνα τους αρκετή ορμή και είναι σχετικά ανεπηρέαστα από τις κινήσεις του αέρα.

Η απόθεση των σωματιδίων, όπως είδαμε, συμβαίνει είτε ως βαρυτική εναπόθεση (πτώση και μοριακή διάχυση), είτε ως ξηρά απόθεση και επικάθιση στην επιφάνεια του εδάφους και στη βλάστηση. Ακόμη, συμβαίνει με τη διαδικασία της σάρωσης του αέρα με τον υετό και τις υδροσταγόνες των νεφών και της ομίχλης, δηλαδή με τη βροχόπλυση και την απόπλυση των σωματιδίων των αερολυμάτων του αέρα.

Στην υγρά απόθεση, συμβαίνουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αερίων μορίων, ή των αερομεταφερομένων σωματιδίων και των σταγονιδίων του νερού της βροχής και των νεφών. Κάθε μεμονωμένο σωματίδιο είναι συνεχώς εκτεθειμένο στις βροχοσταγόνες και κάθε φορά υφίσταται κάποια πιθανότητα αδρανειακής ενσωμάτωσης σ' αυτές. Με την ίδια λογική, κάθε βροχοσταγόνα έχει πολλές πιθανότητες να συμπαρασύρει και να συλλέξει σωματίδια και κάθε μια σταγόνα βροχής, όταν φθάνει στο έδαφος, είναι δυνατόν να περιέχει ενσωματωμένα μέχρι και 10000 μικρά σωματίδια ($\leq 0.001\mu\text{m}$). Οι πυρήνες Aitken ($\leq 0.1\mu\text{m}$) δεν παίζουν κάποιο ενεργό ρόλο στη διεργασία του υετού. Σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης του $1\mu\text{m}$ έχουν υπερβολικά μεγάλη ορμή, για να ακολουθήσουν τον αναταρακτικό αέρα και να επιδράσουν δυναμικά πάνω στις επιφάνειες, με τις οποίες συγκρούονται.

Οι μεγάλοι πυρήνες είναι κυρίως, υπεύθυνοι για τη ελάττωση της ορατότητας, ενώ τόσο τα μεγάλα όσο και τα γιγαντιαία σωματίδια δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης.

Τα εύρη του μεγέθους μερικών συνήθων σωματιδίων συγκρίνονται στην εικόνα 4.12, με τα εύρη που χρησιμοποιούνται στην αέρια ρύπανση και στη φυσική των νεφών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η διαχωριστική γραμμή μεταξύ των διαμέτρων των αερολυμάτων και των σταγόνων της ομίχλης και των νεφών αφενός και των βροχοσταγόνων αφετέρου, βρίσκεται πλησίον του μεγέθους των $100\mu\text{m}$.



Εικόνα 4.12: Εύρος μεγέθους μερικών συνήθων σωματιδίων συγκρινόμενα με τα εύρη που χρησιμοποιούνται στη φυσική των νεφών.

4.6.8. Μορφές Πλανητικής Χωρικής Απόθεσης των Σωματιδίων των Αερολυμάτων

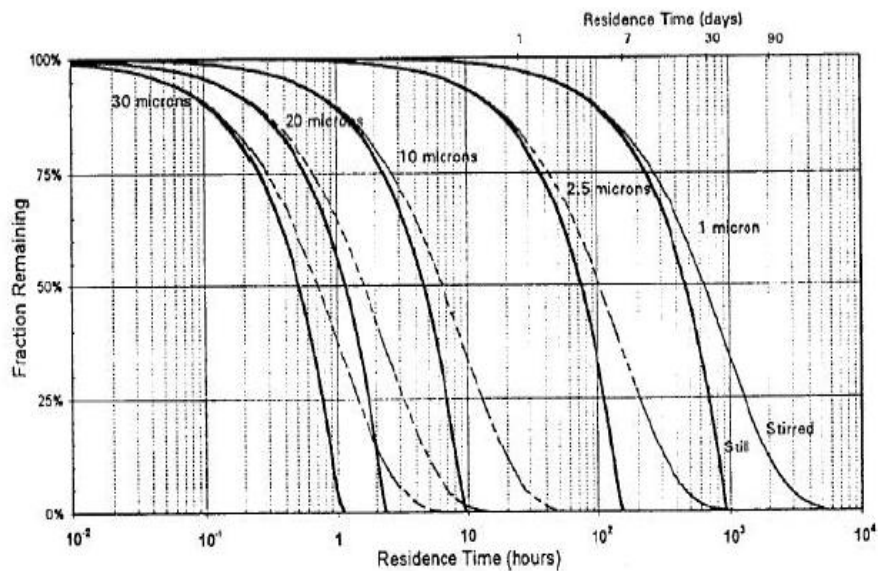
Μόλις τώρα τελευταία, έχουν γίνει αρκετές παρατηρήσεις σε απομακρυσμένα μέρη των Ηπείρων και των Ωκεανών, για να ξεκινήσει η διαδικασία ορισμού της μορφής των αποθέσεων των σωματιδίων. Τα δεδομένα που προέκυψαν, κατέστησαν σαφές ότι η ατμόσφαιρα είναι μια σημαντική δίοδος μεταφοράς πολλών φυσικών και ρυπαντικών υλικών από τις Ηπείρους στις Θάλασσες και από Ήπειρο σε Ήπειρο.

Όπως συμβαίνει με τα αέρια, έτσι και τα σωματίδια δεν μπορεί κανείς απλά να θεωρήσει τις θέσεις των περιοχών των πηγών τους, αλλά πρέπει να συνδυάσει πληροφορίες για τις πηγές, τη μεταφορά και την καταβόθρα τους, για να φθάσει σε μια χωρική εκτίμηση της απόθεσης. Μια τέτοια αξιολόγηση έχει πραγματοποιηθεί σχετικά πρόσφατα, η οποία καταλήγει στο ότι η πλανητική εκτίμηση της ροής της ατμοσφαιρικής απόθεσης των ορυκτών αερολυμάτων συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό στον Ειρηνικό Ωκεανό, στα ανατολικά της Ασίας, από τη μεταφερόμενη σκόνη των ερημικών περιοχών της Κίνας, καθώς και στον Ατλαντικό Ωκεανό, από τη μεταφερόμενη σκόνη της ερήμου της Σαχάρας. Σε μικρότερο βαθμό, παρατηρείται ροή απόθεσης αερολυμάτων και σε άλλες περιοχές του πλανήτη. Ο εφοδιασμός των θαλασσών με θρεπτικά συστατικά ίσως επηρεάζεται από την απόθεση των αερολυμάτων, ιδιαίτερα η θαλάσσια ζωή πλησίον Ηπείρων, οι οποίες υπόκεινται σε εκτεταμένη ερημοποίηση.

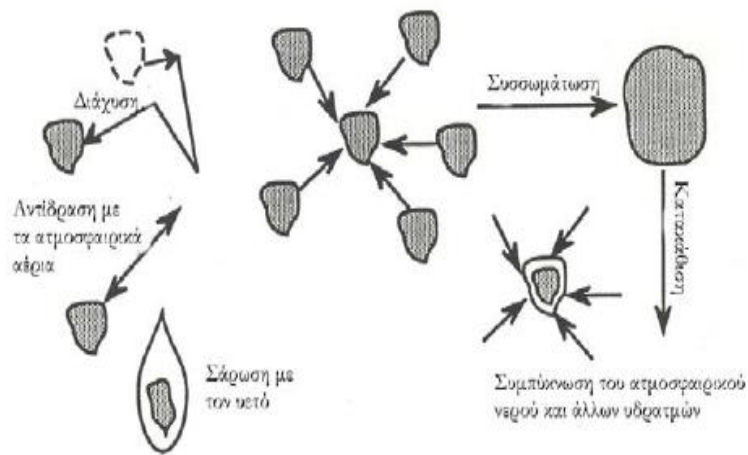
4.6.9. Χρόνοι Παραμονής των Σωματιδίων των Αερολυμάτων στην Ατμόσφαιρα

Οι χρόνοι παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων και της περιοχής της ατμόσφαιρας μέσα στην οποία αυτά βρίσκονται. Η επικρατούσα διεργασία εξαφάνισής τους για τα πολύ μικρά σωματίδια, είναι η συσσωμάτωση σε μεγαλύτερα σωματίδια, ως επακόλουθο της κίνησης Brown. Η συσσωμάτωση είναι ταχεία και οι χρόνοι ζωής αυτών των μικρών σωματιδίων είναι λίγες ώρες, ή ακόμη και λιγότερος χρόνος. Στο άλλο άκρο του φάσματος των μεγεθών, βρίσκονται τα μεγάλα σωματίδια με διάμετρο 10μm ή και μεγαλύτερα. Η βαρυτική κατακάθιση αυτών των σωματιδίων, ή ο ρυθμός της σύλληψής τους από τα υδρομετέωρα είναι τόσο ταχύς που οι χρόνοι ζωής τους είναι παρόμοιοι με αυτούς των μικρότερων σωματιδίων. Σωματίδια ενδιάμεσου μεγέθους, απομακρύνονται με κρούση και διάχυση σε επιφάνειες, καθώς και με ενσωμάτωση στον υετό. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, τα σωματίδια μεγέθους από 0.1-1.0μm μπορούν, επίσης, να δράσουν ως πυρήνες συμπύκνωσης για τις νεφοσταγόνες. Αυτή η διαδικασία της πυρηνοποίησης, είναι ο βασικός μηχανισμός για την απομάκρυνση των συσσωρευμένων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, η απομάκρυνση τους με την πυρηνοποίηση δεν είναι τόσο αποτελεσματική, ειδικά σε ύψη πάνω από 4Km και οι χρόνοι ζωής των συσσωρευμένων σωματιδίων μπορεί να είναι μακράς διάρκειας. Για σωματίδια της κατώτερης και μέσης τροπόσφαιρας, ο μέσος χρόνος ζωής είναι μια εβδομάδα, περίπου. Στη Στρατόσφαιρα, οι χρόνοι παραμονής είναι της τάξεως των μηνών ή και ετών. Αυτοί οι μακράς

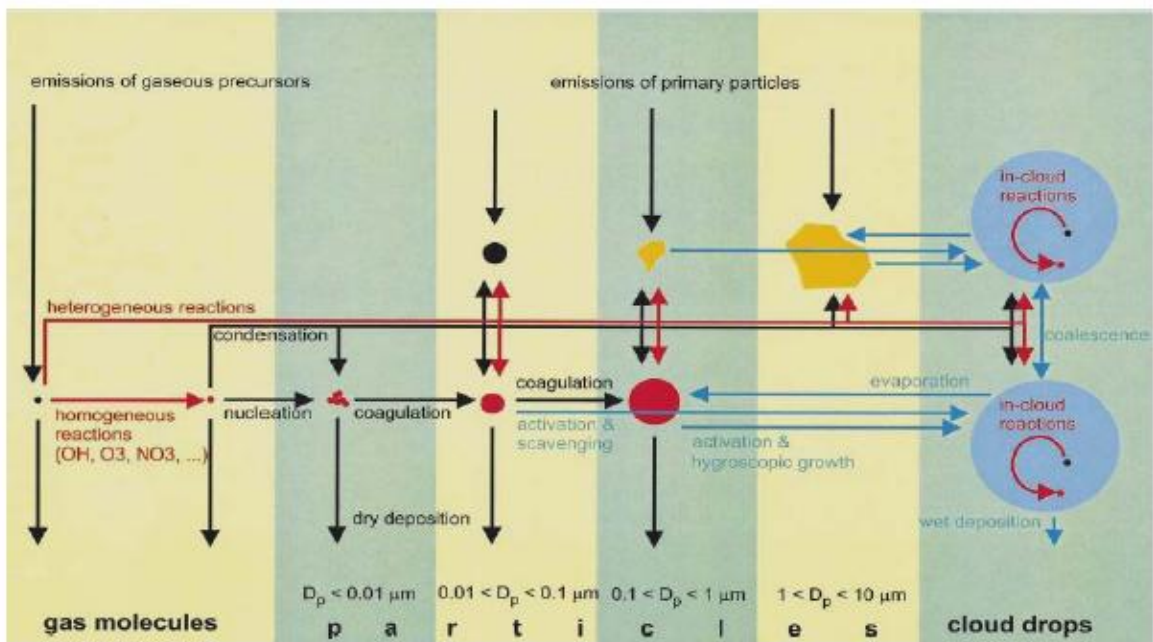
διάρκειας χρόνοι παραμονής είναι συνέπεια, πρωταρχικά, της ταχείας ελάττωσης της συχνότητας εμφάνισης νεφών και υετού, καθώς ανέρχεται κάποιος σε μεγαλύτερα ύψη. Λόγω της εξάρτησης της διάρκειας ζωής των σωματιδίων των αερολυμάτων από το μέγεθος, τα φάσματα μεγέθους των αερολυμάτων μεταβάλλονται με τη γήρανσή τους. Στα πρώτα στάδια της ζωής τους (σε θέσεις πλησίον των πηγών εκπομπής), το φάσμα του μεγέθους, είναι παρόμοιο με αυτό των πηγών τους, με την προσθήκη μικρών σωματιδίων που προέρχονται από τη μετατροπή αερίου σε σωματίδιο. Η μάζα του αερολύματος είναι συχνά σχετικά μεγάλη, το φάσμα των μεγεθών τους ευρύ και η χρονική και η χωρική μεταβολή μεγάλη. Μακριά από τις πηγές, η μάζα των αερολυμάτων ελαττώνεται, το φάσμα των μεγεθών τους ευνοεί τα ενδιάμεσα μεγέθη και η διακύμανση είναι πολύ μικρότερη απ' ό τι είναι στην περίπτωση που το αερόλυμα είναι χρονικά νέο.



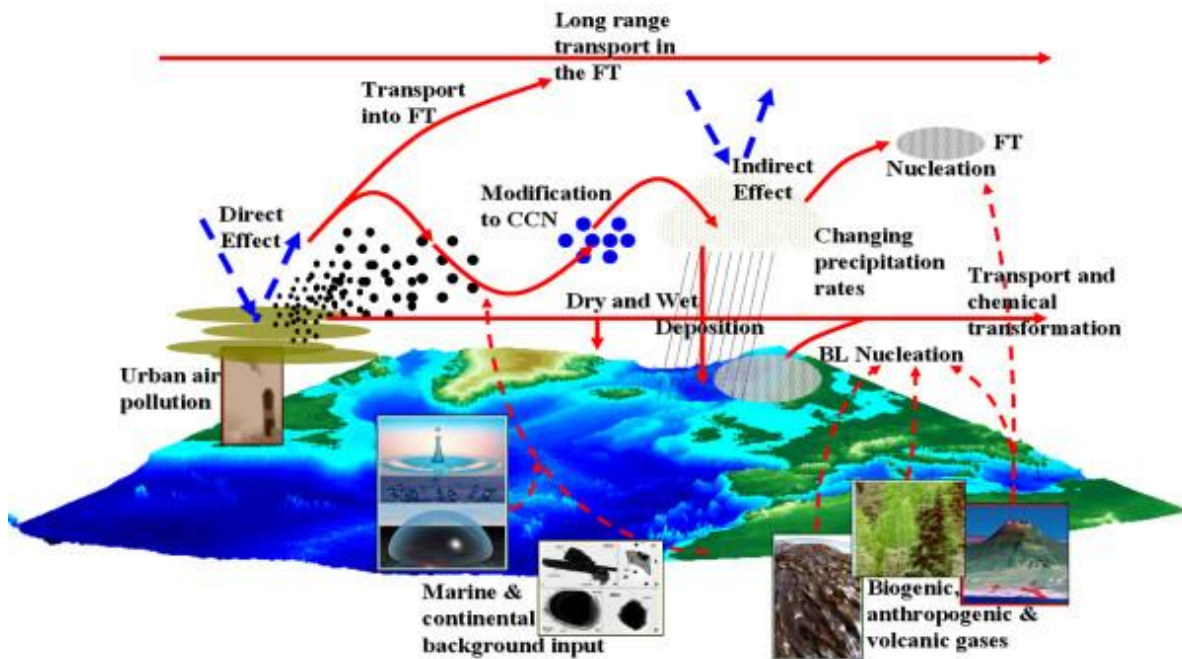
Εικόνα 4.13: Χρόνος αιώρησης αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους σε μέγιστο υψόμετρο 100 m (στις περιπτώσεις ακίνητου και κινητού αέρα).



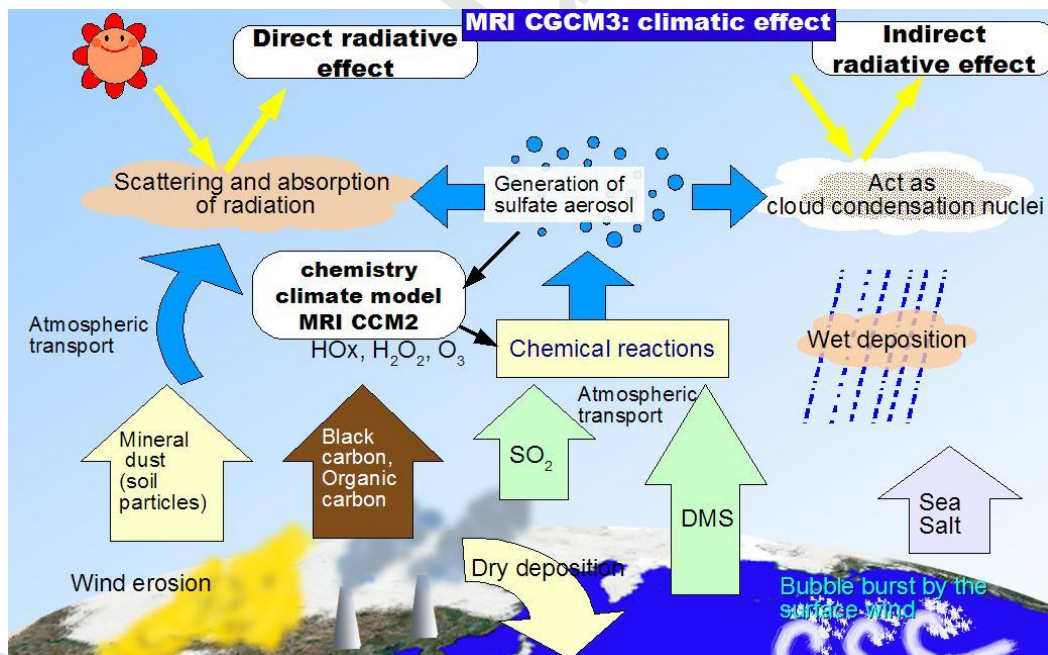
Εικόνα 4.14: Διάφορες διεργασίες που υπόκεινται τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 4.15: Διάφορες διεργασίες που υπόκεινται τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 4.16: Κύκλος ζωής αιωρούμενων σωματιδίων.



Εικόνα 4.17: Κύκλος ζωής αιωρούμενων σωματιδίων.

5. ΠΗΓΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

5.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

5.1.1. Επαναιώρηση σκόνης και διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο

Ο συχνότερος τρόπος φυσικής γένεσης των σωματιδίων των αερολυμάτων είναι η διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο. Τα σωματίδια του εδάφους συνήθως, συγκρατούνται στη θέση τους με τη βαρύτητα και με την προσκόλληση τους σε γειτονικά σωματίδια. Για κάθε σωματίδιο, υπάρχει ένα όριο ταχύτητας του ανέμου, το οποίο καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η δομή και η σύνθεση του εδάφους, πάνω από το οποίο αρχίζει η διάβρωση. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί το όριο αυτό, συμβαίνουν διάφορες κινήσεις. Πρώτον, το σωματίδιο κινείται πάνω στο έδαφος και η ταχύτητα του προσδιορίζεται από την τοπική ταχύτητα του ανέμου. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου είναι πιθανή η ανύψωση του σωματιδίου. Διαδοχικές συγκρούσεις σωματιδίων με το έδαφος, προκαλούν ανύψωση μικρότερων σωματιδίων.

Αν και κάποια διάβρωση από τον άνεμο, σχεδόν πάντοτε συμβαίνει, η γένεση των περισσότερων σωματιδίων είναι αποτέλεσμα σπανίων αλλά ισχυρότατων θυελλών σκόνης. Η σποραδική φύση αυτών των θυελλών καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της συχνότητάς τους. Είναι αναμφίβολα φανερό ότι, οι επιπτώσεις ολίγων τέτοιων θυελλών είναι δυνατόν να υπερκεράσουν τις επιπτώσεις από τις συχνές, χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, περιπτώσεις.

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 το χώμα είναι όμοια με εκείνη της γεωλογικής πηγής (π.χ. 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 χωματίνες 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 αποσάθρωση 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 αιωρούμενων σωματιδίων. Η ποσότητα των

σωματιδίων που μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί ή να μετρηθεί, καθώς εξαρτάται έντονα από παράγοντες όπως:

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

Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην California για το έτος 1995, ο ρυθμός εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} από την επαναιώρηση σκόνης από τους δρόμους ήταν 12,9 τη/ημέρα για ασφαλτοστρωμένους δρόμους και 21 τη/ημέρα για μη ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Η αντίστοιχη τιμή για την αερομεταφερόμενη σκόνη ήταν 7,6 τη/ημέρα (Magliano et al., 1999).

5.1.2. Υδρόλυμα θαλάσσης

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

Το αιωρούμενο θαλασσινό αλάτι έχει μεγάλη ομοιότητα στη χημική του σύσταση με το θαλασσινό αλάτι, με θειικά ανιόντα, 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 διαρραγούν.



Εικόνα 5.1: Ο άνεμος συμπαρασύρει υδροσταγονίδια από τη θάλασσα τα οποία περιέχουν άλατα.

5.1.3. Ηφαιίστεια

Τα ηφαιιστιογενή σωματίδια συνήθως εκπέμπονται μέσα στην κατώτερη ατμόσφαιρα (τροπόσφαιρα), πλην όμως, όταν η έκρηξη είναι αρκετά δραστική φθάνουν μέχρι και τη στρατόσφαιρα. Τέτοιες ισχυρές εκρήξεις τείνουν να συμβαίνουν μια φορά το χρόνο περίπου και η αφθονία στρατοσφαιρικών σωματιδίων ακολουθεί ένα διακυμαινόμενο περιοδικό κύκλο από τη μία έκρηξη έως την άλλη.

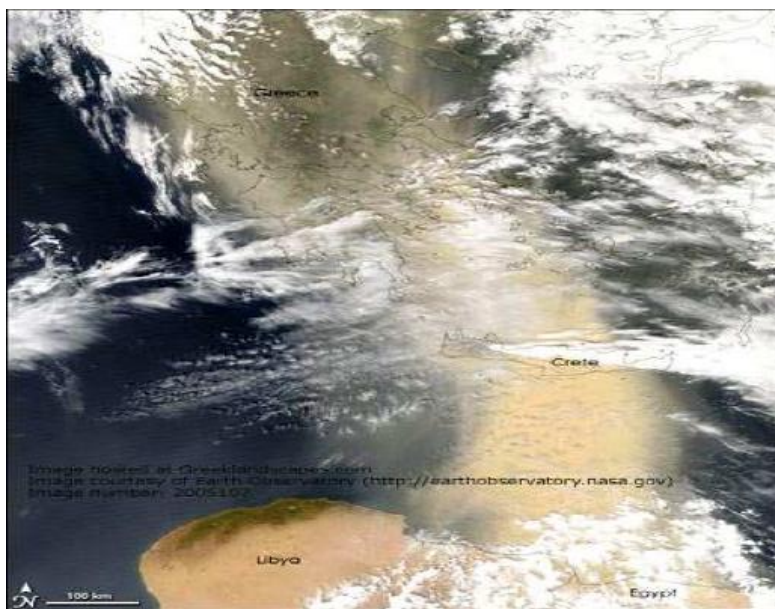
Οι ηφαιιστειακές εκρήξεις αποτελούν μια συγκεντρωμένη πηγή όλων των ατμοσφαιρικών ρύπων και ιδιαίτερα των σωματιδίων. Η έκρηξη του ηφαιιστείου της Αγίας Ελένης στις 18 Μαΐου 1980 εκτόξευσε όγκο σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ίσο με 4 km^3 . Η ποσότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από το συνολικό ετήσιο ποσό των 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 $0,001 \mu\text{m}$.

5.1.4. Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις

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

Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται άμεσα με τις ανεμοθύελλες στις ερήμους, που είναι συνηθισμένες κατά την διάρκεια περιόδων με ισχυρούς ανέμους. Ωστόσο, το ίδιο παρατηρείται και σε άλλες περιοχές της υφελίου. Η ένταση του φαινομένου γενικά μειώνεται όσο η υγρασία του εδάφους αυξάνει και όσο περισσότερο καλύπτεται η επιφάνειά του από βλάστηση.

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.

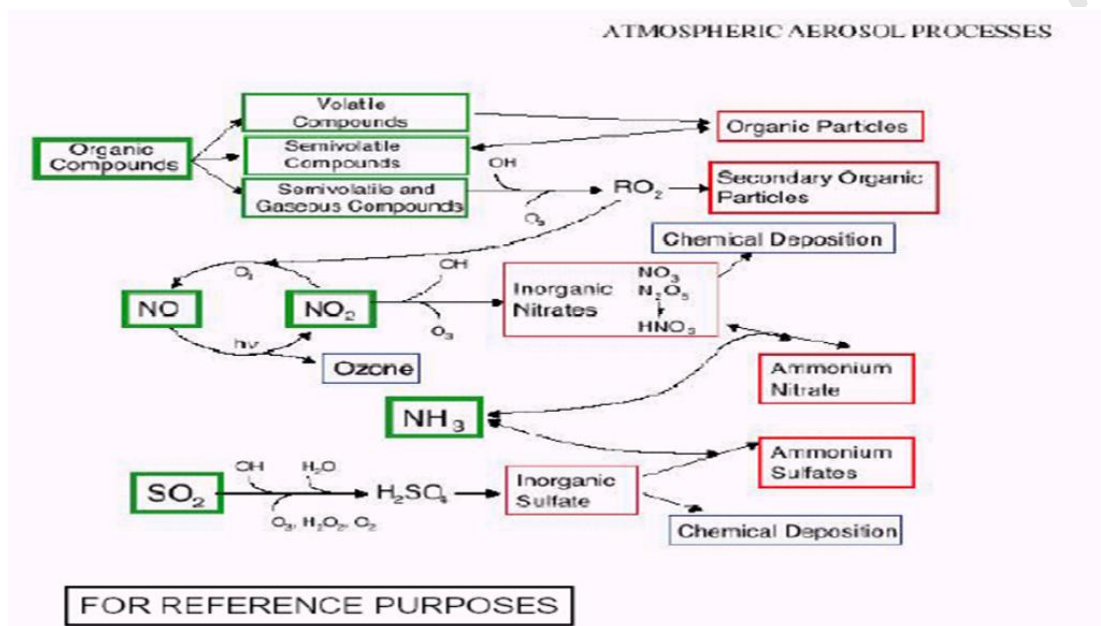


Εικόνα 5.2: Επεισόδιο μεταφοράς σκόνης στην Ελλάδα από τη Σαχάρα.

5.1.5. Μετατροπή Αερίου σε Σωματίδιο

Μια σημαντική πηγή μικρών σωματιδίων της ατμόσφαιρας, είναι η διαδικασία μετατροπής των αερίων σε σωματίδια. Αυτή η διεργασία, συνήθως, επικρατεί όταν συμβαίνει ενσωμάτωση του αερίου σε προϋπάρχοντα μικρά σωματίδια, αλλά μπορεί επίσης, να συμβεί με άμεση πυρηνοποίηση από την αέρια φάση. Ένα κοινό παράδειγμα, είναι η αχλύς των αστικών περιοχών, όπου συμβαίνουν ανθρωπογενείς οργανικές εκπομπές, χαμηλής πίεσης υδρατμών από οξυγονωμένα οργανικά αερολύματα.

Τα θειούχα αέρια συμμετέχουν επίσης, στη μετατροπή αερίων σε στερεά σωματίδια. Τα κοινά θειούχα είδη στην ατμόσφαιρα είναι το διοξείδιο του θείου (SO_2), το διμεθανοσουλφίδιο (CH_3SCH_3) και το υδρόθειο (H_2S). Αυτά τα χημικώς δραστικά αέρια, μετατρέπονται σε θειικό οξύ (H_2SO_4). Λόγω της εξαιρετικά χαμηλής ισορροπίας της τάσης των υδρατμών, το θειικό οξύ επικάθεται και συμπυκνώνεται στις υδροσταγόνες των νεφών και στις επιφάνειες των σωματιδίων των αερολυμάτων. Τα θειικά ιόντα από το θειικό οξύ και την αμμωνία και τα νιτρικά ιόντα από την αέρια αμμωνία και το νιτρικό οξύ, είναι τα αφθονότερα είδη σωματιδίων που προκύπτουν από τη μετατροπή αερίου σε σωματίδιο.



Εικόνα 5.3: Μετατροπή αερίου σε σωματίδιο.

5.2. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ

Σε αστικές και βιομηχανικές πηγές, τα περισσότερα σωματίδια σχετίζονται με τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως είναι η συγκοινωνία, η καύση ορυκτών καυσίμων, οι βιομηχανικές διεργασίες και τα στερεά απόβλητα. Η κατασκευαστική δραστηριότητα και οι αγροτικές εργασίες, επίσης, παράγουν σημαντικά ποσά αερομεταφερομένων σωματιδίων.

Οι πηγές των σωματιδίων διαφόρων μεγεθών είναι ευδιάκριτες. Τα μεγάλα σωματίδια (αυτά με διαμέτρους μεγαλύτερες από μερικά μm) είναι γενικά το αποτέλεσμα μηχανικών διεργασιών, όπως ο θρυμματισμός και ο ψεκασμός. Τα μικρότερα σωματίδια (αυτά με διαμέτρους μεταξύ μερικών εκατοστών του μικρομέτρου και λίγων μικρομέτρων) συνήθως, σχετίζονται με ατελή καύση ή με μεγάλης θερμοκρασίας βιομηχανικές διεργασίες. Τα πολύ μικρά σωματίδια (με διάμετρο μικρότερη των ολίγων δεκάτων του μικρομέτρου) είναι αποτέλεσμα της συμπύκνωσης εξατμιζόμενου υλικού που παράγεται από διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας. Τα ανθρωπογενή σωματίδια μπορούν να συσσωματώνονται, με διάφορους βαθμούς αποτελεσματικότητας, για να σχηματίσουν μεγαλύτερα σωματίδια, αλλά συνήθως δε θρυμματίζονται για να σχηματίσουν μικρότερα.

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Προγράμματος Συνεργασίας για την Παρακολούθηση και την Αξιολόγηση της Μεγάλης Κλίμακας Μεταφοράς των Αέριων Ρύπων στην Ευρώπη (EMEP) το περιφερειακό υπόβαθρο των ανθρωπογενών σωματιδίων στην Ελλάδα έχει μια πολύ σημαντική διασυννοριακή συνιστώσα η οποία για τα $\text{PM}_{2.5}$ φθάνει το $\sim 80\%$. Ακόμη και για τα πρωτογενή μεγαλύτερα σωματίδια η συνεισφορά της διασυννοριακής ρύπανσης είναι σημαντική ($\sim 45\%$).

5.2.1. Εκπομπές από οχήματα

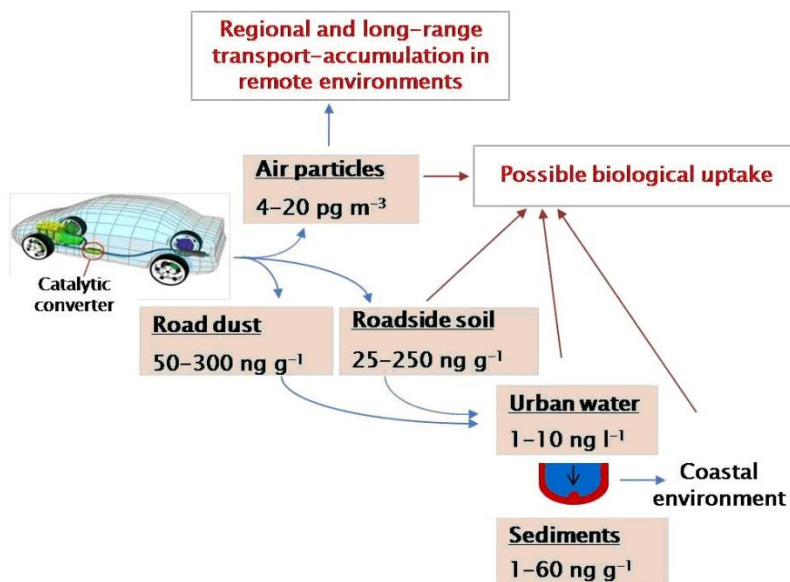
Οι κύριες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από τα οχήματα είναι τα καυσαέρια των οχημάτων και η φθορά από την χρήση των ελαστικών και των φρένων (Natural Resources Defense Council, 1996). Οι εκπομπές σωματιδίων από τους κινητήρες ντίζελ είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των βενζινοκινητήρων, 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 ντίζελ 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.

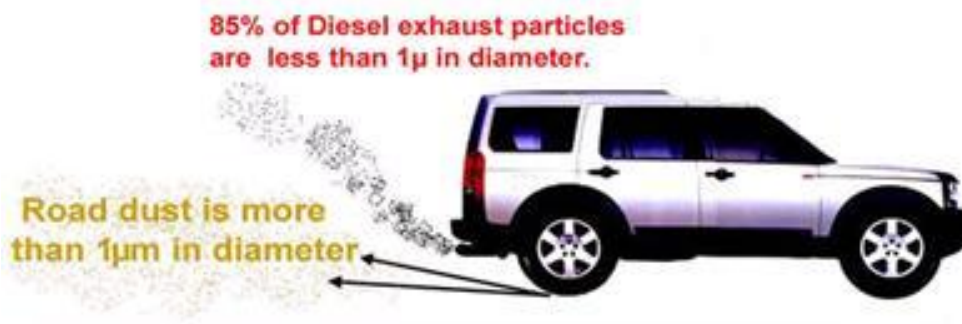
Η χρήση καταλυτών, αντίστοιχων με αυτούς που χρησιμοποιούνται στους βενζινοκινητήρες, αποτελεί μια λύση για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων αλλά παρουσιάζει ουσιαστικά προβλήματα. Καθώς ο κινητήρας ντίζελ λειτουργεί με περίσσεια αέρα, ο καταλύτης που θα εφαρμοστεί στα αέρια της εξάτμισης θα λειτουργεί 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 ντίζελ 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 ντίζελ 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).



Εικόνα 5.4: Εκπομπές από οχήματα.



Εικόνα 5.5: Εκπομπές σωματιδίων από πετρελαιοκίνητα οχήματα. Παρατηρούμε ότι τα PM_{10} αντιστοιχούν στο 85% των συνολικών εκπεμπόμενων σωματιδίων.

	NO_x	NM VOC	CO	PM ₁₀	SO ₂
Οδικές Μεταφορές	27,951	42,924	281,440	979	172
Σιδηροδρομικές Μεταφορές	235	26	64	27	6
Θαλάσσιες Μεταφορές	8,562	220	524	667	4,921
Αεροπορικές Μεταφορές	1,389	350	1,266	0	3
Κεντρική Θέρμανση	2,985	240	1,256	147	487
Βιομηχανική Δραστηριότητα	16,684	9,624	9,879	14,127	49,225

Εικόνα 5.6: Εκπομπές ρύπων στην Αθήνα (tn/year).

5.2.2. Βιομηχανικές εκπομπές

Οι βιομηχανικές εκπομπές συνεισφέρουν στη παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές ανάλογα με την απόσταση της βιομηχανίας από την αστική περιοχή και την τεχνολογία που εφαρμόζουν. Τα σωματίδια που προέρχονται από βιομηχανικές εκπομπές έχουν γενικά μέγεθος από 0,5 έως 100 μm, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της πηγής. Σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας. Η ατελής καύση ανθρακούχων ορυκτών οδηγεί σε εκπομπή σωματιδίων αιθάλης. Σε μονάδες όπου η εισαγωγή του κάρβουνου στις καμίνους γίνεται σε κονιορτοποιημένη μορφή, η καύση του είναι σχεδόν πλήρης. Στην περίπτωση αυτή, τα παραγόμενα σωματίδια συνίστανται κυρίως από την ανόργανη υπολειμματική τέφρα. 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 ασφαλτενίων 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) (Olhstrom 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 υδράργυρο, υπό την μορφή οξειδίων και χλωριδίων τους. Οι εν λόγω ενώσεις παράγονται λόγω της παρουσίας στα απορρίμματα υλικών όπως μπαταρίες, πλαστικά και μεταλλικά κράματα. Κάποιες από τις παραπάνω ενώσεις έχουν σημεία ζέσεως χαμηλότερα από 1000 °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):

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

5.2.3. Οικιακές πηγές

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 Μπέλφαστ, 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 (Stournas et al., 1993).

5.2.4. Η Καύση βιομάζας

Η καύση της βιομάζας, είτε φυσική (πυρκαγιές δασών) είτε ανθρωπογενής (κτήματα και λιβάδια που καίγονται μετά τη συγκομιδή), παράγει μεγάλες ποσότητες αερίων σωματιδίων.

Επιπλέον, τα σωματίδια αυτά εκπέμπονται μέσα στα αιωρούμενα σύννεφα και μπορεί να μεταφέρονται σε μακρινές αποστάσεις. Η φύση του καυσίμου και η αποτελεσματικότητα της καύσης είναι σημαντικές μεταβλητές για τον προσδιορισμό της ποσότητας των εξερχόμενων σωματιδίων από την καύση της βιομάζας.

Τα αερολύματα της καύσης της βιομάζας, συνίστανται από μερικώς οξυγονωμένη οργανική ύλη και απαρτίζουν το 6.5% του συνολικού οργανικού άνθρακα που απελευθερώνεται παγκοσμίως, ως αερόλυμα. Ένα πολύ μεταβλητό κλάσμα της εναπομένουσας μάζας αερολύματος, είναι ο μαύρος άνθρακας (αιθάλη), ο οποίος είναι άφθονος σε έντονες πυρκαγιές. Ακριβείς υπολογισμοί των εκπομπών είναι δύσκολο να γίνουν, αλλά θεωρείται ότι, η καιγόμενη βιομάζα ίσως είναι η βασική πηγή των αερολυμάτων μαύρου άνθρακα σε πλανητική βάση. Τα σωματίδια των αερολυμάτων μαύρου άνθρακα είναι πολύ μικρότερα των αερολυμάτων του οργανικού άνθρακα και επηρεάζουν τις ιδιότητες της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας και την αποτελεσματικότητα της συμπύκνωσης των νεφών (δρώντας ως πυρήνες συμπύκνωσης για τις βροχοσταγόνες).

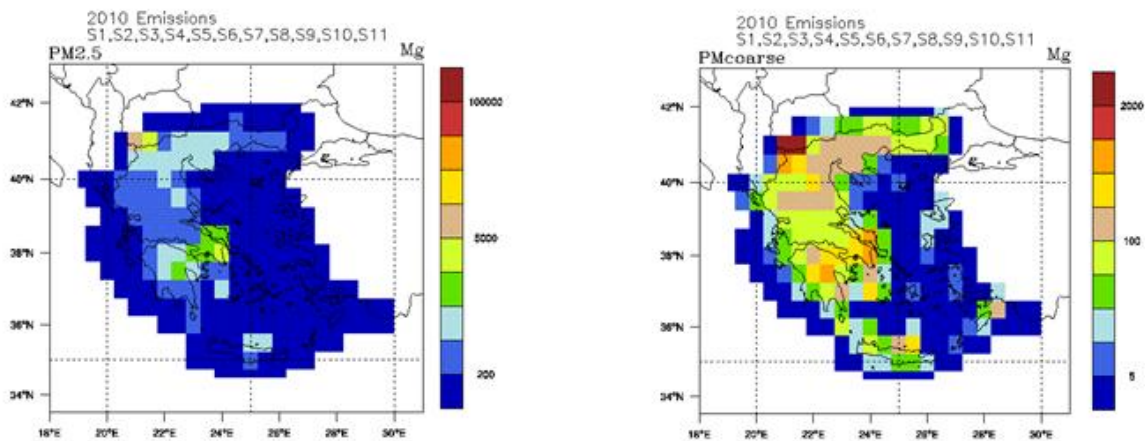
Εκτιμάται ότι οι γεωργικές και δασικές πυρκαγιές στις τροπικές ζώνες είναι υπεύθυνες για την εκπομπή στην ατμόσφαιρα 1 Mtn/έτος χαλκού, 3 Mtn/έτος ψευδαργύρου και 2,2 Gtn/έτος στοιχειακού άνθρακα. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν, κατά μέσο όρο, το 2%, 3% και 12% αντίστοιχα του παγκόσμιου συνόλου εκπομπών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



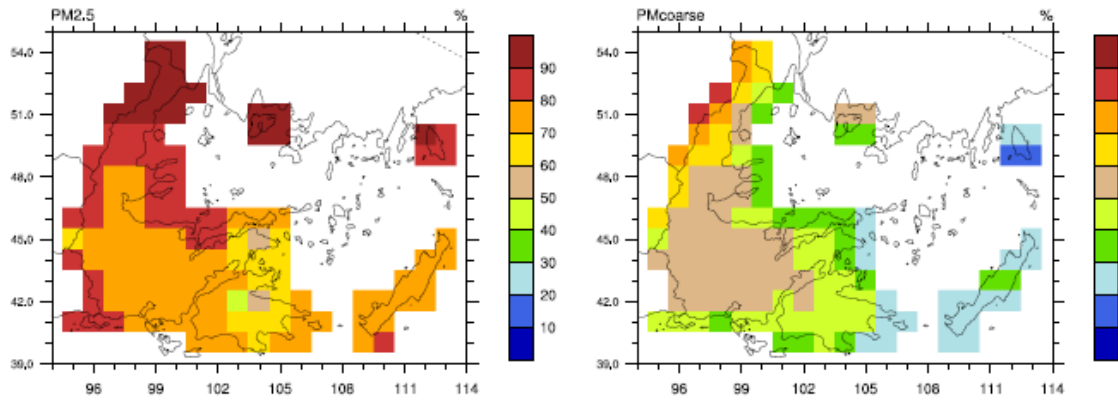
Εικόνα 5.7: Θύσανοι από τις μεγάλες πυρκαγιές στην Ελλάδα το 2007.

Εκτιμώμενα φυσικά αιωρήματα	Αιωρούμενα σωματίδια
Χωματόσκηνη και πέτρινη σκόνη	100-500
Πυρκαγιές δασών	3-150
Θαλάσσιο αλάτι	300
Ηφαιστειακή σκόνη	25-150
<i>Σωματίδια από αέριες εκπομπές:</i>	
Θειικά από H ₂ S	130-200
Αμμωνιακά από NH ₃	80-270
Νιτρικά από NO _x	60-430
Υδρογονάνθρακες από εκκρίσεις	75-2200
Ανθρωπογενή αιωρήματα	
Σωματίδια	10-90
<i>Σωματίδια από αέριες εκπομπές:</i>	
Θειικά από SO ₂	135-200
Νιτρικά από NO _x	30-35
Υδρογονάνθρακες (HxCy)	185-415
Ολικά σωματίδια	9-2615

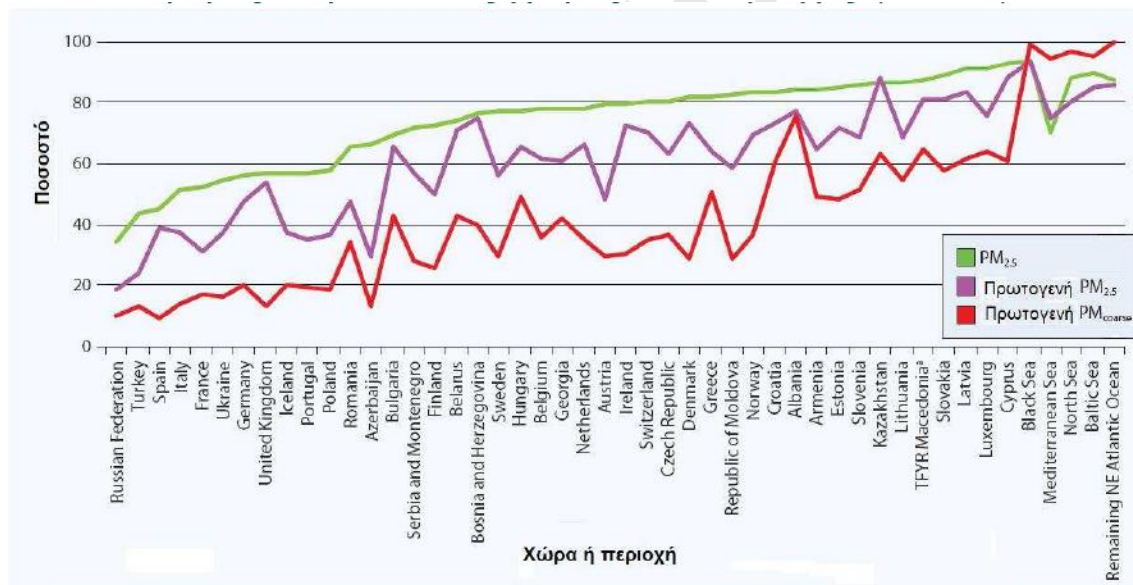
Εικόνα 5.8: Πηγές και εκτιμώμενες ποσότητες φυσικών και ανθρωπογενών αιωρούμενων σωματιδίων (οι μονάδες είναι συμβατικές).



Εικόνα 5.9: Εκτίμηση εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από την Ελλάδα για το έτος 2010 (EMEP).



Εικόνα 5.10: Ποσοτό της αύξησης, της ήδη υπάρχουσας συγκέντρωσης των $PM_{2.5}$ και PM_{coarse} στον Ελλαδικό χώρο, από διασυνοριακές πηγές (EMEP).



Εικόνα 5.11: Ποσοστιαία συμμετοχή της διασυνοριακά μεταφερόμενης ρύπανσης στα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και περιοχές.

6. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

6.1. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

6.1.1. Συμπτώματα της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια

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, 2000; Pekkanen et al., 1997; Peters et al., 1997). Τα συμπτώματα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία είναι πολλά: Η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να προκαλέσει ή να επιδεινώσει προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος, καρδιοαγγειακές ασθένειες, να επιδράσει στο μηχανισμό αυτοκαθαρισμού του σώματος από ξένα σωματίδια, να προκαλέσει βλάβη στους ιστούς των πνευμόνων, καρκινογένεσις και πρόωρο θάνατο. Στις συνέπειες συγκαταλέγονται ακόμη και κάποιες λιγότερο επώδυνες, όπως: επίμονος βήχας, φλέγματα, ζαλάδες και αδιαθεσία.

Οι τοξικολογικές έρευνες συνεχίζονται ώστε να καθοριστούν οι αιτίες και οι μηχανισμοί δράσης των αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούν τις αρνητικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (Godleski et al., 2000; Gordon et al., 2000). Είναι γενικά παραδεκτό, όμως, ότι η μακροχρόνια έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να μειώσει τη διάρκεια της ζωής από 1 έως 2 χρόνια κατά μέσο όρο. 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 PM₁₀ και PM_{2,5} δεν επιτρέπουν τον καθορισμό συγκεκριμένων οριακών τιμών συγκέντρωσης, κάτω από τις οποίες η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση δεν παρουσιάζει καμία επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία» (WHO, 2000).

Υπάρχει, επίσης, έντονη ανησυχία διεθνώς σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία της βραχυχρόνιας έκθεσης σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις PM. Πολλές πρόσφατες μελέτες συνδέουν τα, μικρής διάρκειας, υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης με σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα και καρδιαγγειακές παθήσεις (Nemmar et al., 2004; Gold et al., 2000; Michaels & Kleinman, 2000; 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).

Οι 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., 1997). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης (Romieu et al., 1996) που πραγματοποιήθηκε στη Πόλη του Μεξικού (από τις πολυπληθέστερες και πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις στον κόσμο), 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, (Hoek et al., 1998) βρέθηκε 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 επικάλυψης των PM με κάθε αναπνοή ή και μεγαλύτερη εναλλαγή του αέρα σε αυτούς (Gauderman et al., 2000; Bennett & Zeman, 1998).

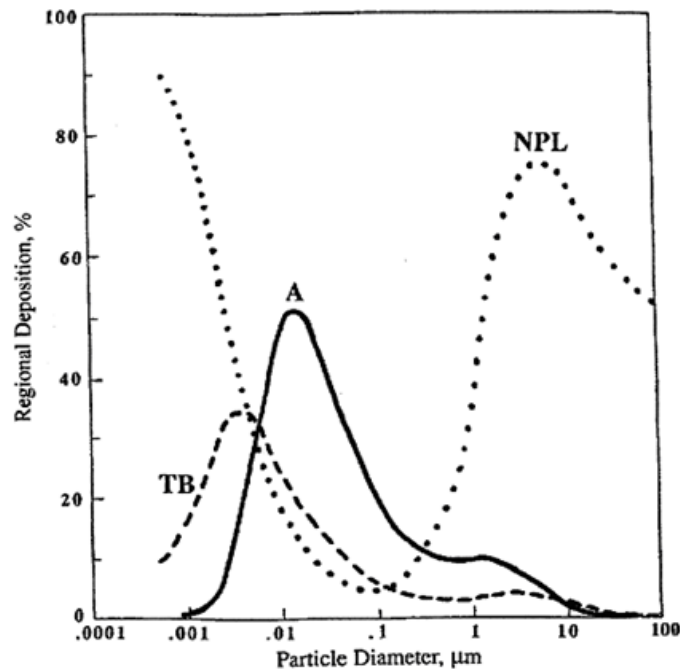
6.1.2. Τρόπος επίδρασης των διαφορετικών σωματιδιακών κλασμάτων

Γενικά, τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από $10 \mu\text{m}$ απομακρύνονται από τον οργανισμό με κατακράτηση από το στόμα ή την μύτη. Τα PM_{10} , 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 τραχειοβρογχική ζώνη, τα σημεία εναπόθεσης των σωματιδίων είναι κυρίως πάνω ή κοντά στους βρόγχους. Σε αυτά τα σημεία υπάρχουν συγκεντρωμένες πολλές νευρικές απολήξεις. Οι μηχανικοί ερεθισμοί που προκαλούνται από τα σωματίδια, συχνά οδηγούν σε αντανακλαστικό βήχα και σε συστολή των βρόγχων. Η ευαισθησία των νευρικών απολήξεων στις χημικές διεγέρσεις έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού αναπνοής και την μείωση της ικανότητας του πνεύμονα να λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά στις αυξομειώσεις της πίεσης κατά την αναπνοή.

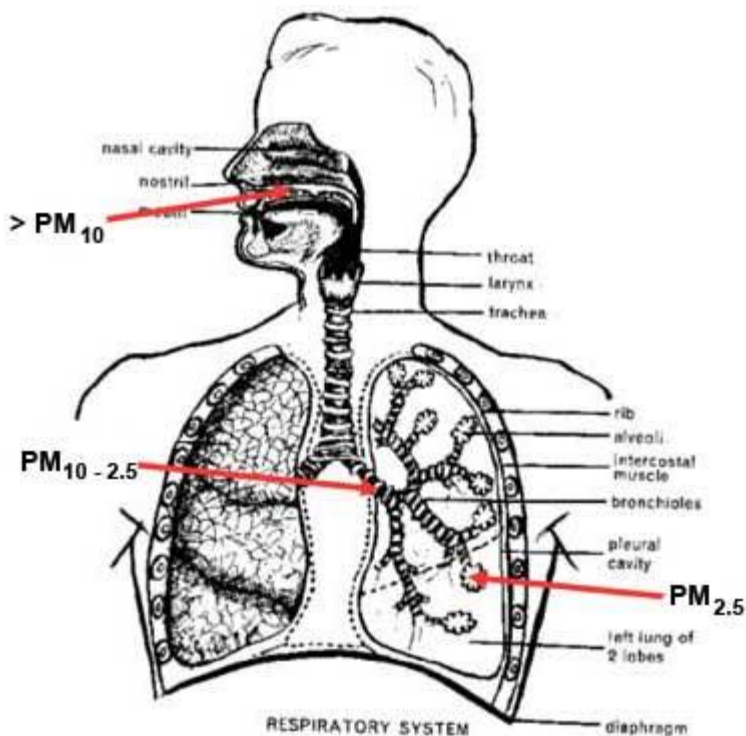


Fractional Deposition Nose Breathing

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

Εικόνα 6.1: Εναπόθεση εισπνεόμενων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών στο ανώτερο και κατώτερο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού.

Στην εικόνα 6.1 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).



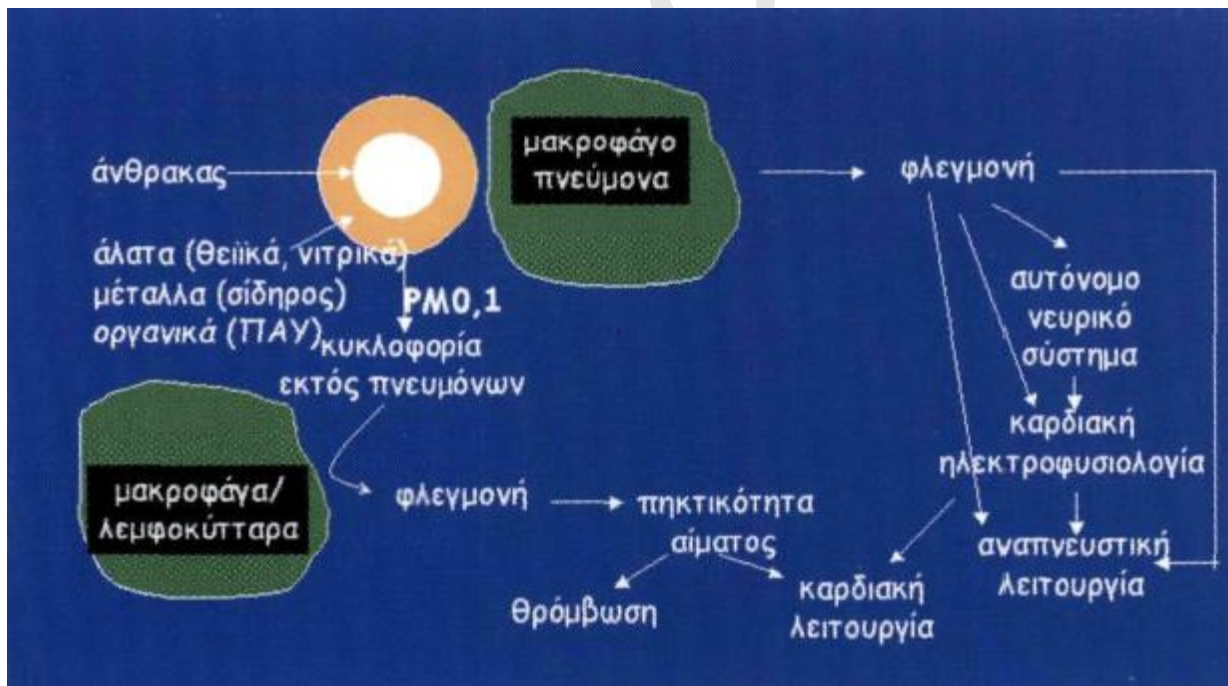
Εικόνα 6.2: Διεσδυτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.

6.1.3. Τοξικότητα των αιωρούμενων σωματιδίων

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. Ποιος άραγε είναι ο μηχανισμός με τον οποίο τα σωματίδια προκαλούν τις τοξικές τους επιπτώσεις; Η ερώτηση αυτή αποτελεί σήμερα ίσως το κύριο αντικείμενο έρευνας για όσους ασχολούνται με την τοξικολογία της ατμόσφαιρας. Γενικά, θεωρείται ότι η τοξικότητα των σωματιδίων οφείλεται στον συνδυασμό της χημικής τους σύστασης, της περιεκτικότητάς τους σε ορισμένα ιδιαίτερα τοξικά χημικά είδη και της κατανομής του μεγέθους τους.

Ο πνεύμονας είναι ίσως η σημαντικότερη οδός μέσω της οποίας εισβάλλουν στον οργανισμό φυσικοί και χημικοί παράγοντες του περιβάλλοντος. Η φύση έχει προνοήσει για την παρουσία στους πνεύμονες μιας αμυντικής «στρατιάς» από μηχανισμούς που προστατεύουν τον οργανισμό. Από τα βασικά μέλη της στρατιάς αυτής είναι μια κατηγορία κυττάρων που λέγονται μακροφάγα, των οποίων η δουλειά είναι να «περιπολούν» μέσα στον πνεύμονα και, όταν συναντούν ξένα σωματίδια, να τα «αγκαλιάζουν» και να τα εξουδετερώνουν. Για την εξουδετέρωση των ξένων σωματιδίων, τα μακροφάγα κύτταρα παράγουν ορισμένες ουσίες οι οποίες διαλύουν τους ανεπιθύμητους επισκέπτες. Πλην όμως, υπό συνθήκες παρατεταμένης έκθεσης, η συνεχής παραγωγή των ουσιών αυτών καταλήγει να είναι βλαβερή και για τον ίδιο τον οργανισμό, αφού οδηγεί στην πρόκληση φλεγμονής η οποία μπορεί πια να επιδράσει στο νευρικό σύστημα, την καρδιακή ηλεκτροφυσιολογία, την αναπνευστική λειτουργία και άλλα. Ένας δεύτερος μηχανισμός με τον οποίο τα σωματίδια οδηγούν σε βλάβες της υγείας αφορά αυτά τα πολύ μικρά, για τα οποία έχει ήδη αναφερθεί ότι μπορούν να εισχωρήσουν στην κυκλοφορία του αίματος και να φτάσουν σε άλλα όργανα. Εκεί πάλι μπορεί να συναντήσουν μακροφάγα, να προκαλέσουν τοπική φλεγμονή και να επηρεάσουν για παράδειγμα την πήκτικότητα του αίματος, οδηγώντας σε θρόμβωση, καρδιακά νοσήματα και άλλα.



Εικόνα 6.3: Πιθανοί μηχανισμοί τοξικότητας των σωματιδίων.

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, απ' ό,τι αυτή καθ' αυτή η τοξικότητά τους. Τα σωματίδια PM₁₀ 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 PM₁₀ 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).

6.1.4. Αιωρούμενα σωματίδια και καρκινογένεση

Το 2001 δημοσιεύτηκαν τα αποτελέσματα μιας αμερικανικής μελέτης στο πλαίσιο της οποίας είχε μελετηθεί επί πολλά χρόνια η έκθεση ενός μεγάλου αριθμού ατόμων σε ατμοσφαιρική ρύπανση, συμπεριλαμβανομένης και της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀, σε συνάρτηση με την εμφάνιση μεταξύ των ατόμων αυτών καρκίνου του πνεύμονα. Η μελέτη αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπήρχε συσχέτιση μεταξύ των δύο και ότι για κάθε 10 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο αύξηση στη συγκέντρωση των PM₁₀ αντιστοιχούσε αύξηση κατά 8% στη συχνότητα του καρκίνου του πνεύμονα. Να σημειώσουμε ότι οι συνήθεις συγκεντρώσεις των σωματιδίων, για παράδειγμα των PM₁₀, στις πόλεις κυμαίνονται από 20 ως 100 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο. Στις αμερικανικές, καθώς και τις «καθαρές» ευρωπαϊκές πόλεις, οι αντίστοιχες τιμές κυμαίνονται συνήθως κάτω των 50 μικρογραμμάτων ανά κυβικό μέτρο. Συνεπώς μπορεί κανείς να υπολογίσει, ότι μια συγκέντρωση 50 μικρογραμμάτων ανά κυβικό μέτρο θα σήμαινε αύξηση κατά 40% του καρκίνου του πνεύμονα λόγω των σωματιδίων.

Όπως έχει αναφερθεί, τα αιωρούμενα σωματίδια περιέχουν διάφορα συστατικά. Ποιο ή ποια απ' όλα αυτά ευθύνονται για την καρκινογένεση; Η απάντηση στο ερώτημα θα είχε μεγάλη σημασία, αφού θα μπορούσε να οδηγήσει στη λήψη μέτρων προστασίας. Για παράδειγμα, αν ήταν γνωστό ότι κύρια ευθύνη έχει ο σίδηρος, μια λύση θα ήταν να παραχθούν καύσιμα που να ελευθερώνουν λιγότερο σίδηρο στα σωματίδια. Αν και η απάντηση στο ερώτημα αυτό δεν είναι ακόμα γνωστή με βεβαιότητα, οι υποψίες για την υπαιτιότητα της καρκινογένεσης των σωματιδίων επικεντρώνονται κατά κύριο λόγο στους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες (ΠΑΥ). Πρόκειται για οργανικές ουσίες με γνωστή καρκινογόνο ικανότητα, οι οποίες βρίσκονται προσροφημένες στην επιφάνεια των PM και οι οποίες, μετά την είσοδο των σωματιδίων στον οργανισμό, απελευθερώνονται, υφίστανται μεταβολισμό και προκαλούν βλάβες στο DNA των κυττάρων οι οποίες οδηγούν σε χρωμοσωμικές ανωμαλίες και τελικά στην καρκινογένεση.

Ένας άλλος ύποπτος παράγοντας για την καρκινογένεση από τα σωματίδια είναι ο σίδηρος, ο οποίος, μετά την απελευθέρωση του στον οργανισμό, μπορεί να παράγει ελεύθερες ρίζες, δηλαδή πολύ δραστικά μόρια τα οποία επίσης προκαλούν βλάβες στο DNA και μπορούν να οδηγήσουν στην καρκινογένεση.

Τέλος, ένας τρίτος ενδεχόμενος μηχανισμός καρκινογένεσης από τα σωματίδια σχετίζεται με την αλληλεπίδραση τους με τα μακροφάγα και την πρόκληση φλεγμονής. Η φλεγμονή οδηγεί στην παραγωγή ελευθέρων ριζών, όπως ακριβώς αναφέρθηκε παραπάνω για τον σίδηρο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξέταση ενός μίγματος χημικών ενώσεων, όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, δίνει μια πιο ρεαλιστική βάση για την μεταλλαξιγόνο επίδραση, σε σχέση με την εξέταση μεμονωμένων συστατικών, λόγω της εμφάνισης συνεργητικών ή ανταγωνιστικών μηχανισμών στο μίγμα. Η ανάλυση του μεταλλαξιόγону χαρακτήρα των σωματιδίων έχει προγνωστική αξία για τις πιθανές καρκινογένεσεις, καθώς οι περισσότερες ουσίες που έχουν ταξινομηθεί ως μεταλλαξιόνες έχουν και καρκινογενή δράση (Villalobos-Pietrini et al., 2000).



Εικόνα 6.4: Σωματίδια και πιθανή καρκινογένεση.

6.1.5. Δευτερογενείς επιπτώσεις στην υγεία

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 εξασθένηση του οργανισμού. Πλήθος μελετών

αποδεικνύουν ότι η έκθεση σε PM είναι δυνατόν να προκαλέσει εμφάνιση αναπνευστικών προβλημάτων, αλλοιώσεις στην λειτουργία των πνευμόνων και στους μηχανισμούς αυτοκαθαρισμού τους, καθώς και δημιουργία φλεγμονών σε αυτούς. Τα παραπάνω συμπτώματα οδηγούν σε αυξημένη ευαισθησία του οργανισμού, η οποία ευνοεί την συμπύκνωση υγρού μέσα στους πνεύμονες, ιδιαίτερα σε άτομα με καρδιακές παθήσεις. Η έκθεση σε PM είναι δυνατόν, επίσης, να αυξήσει την ευαισθησία των πνευμόνων σε μολύνσεις από βακτήρια ή ιούς. Το γεγονός αυτό προκαλεί την αύξηση επεισοδίων πνευμονίας στην ομάδα των ευπαθών ατόμων (Natural Resources Defense Council, 1996).

6.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

6.2.1. Ορατότητα

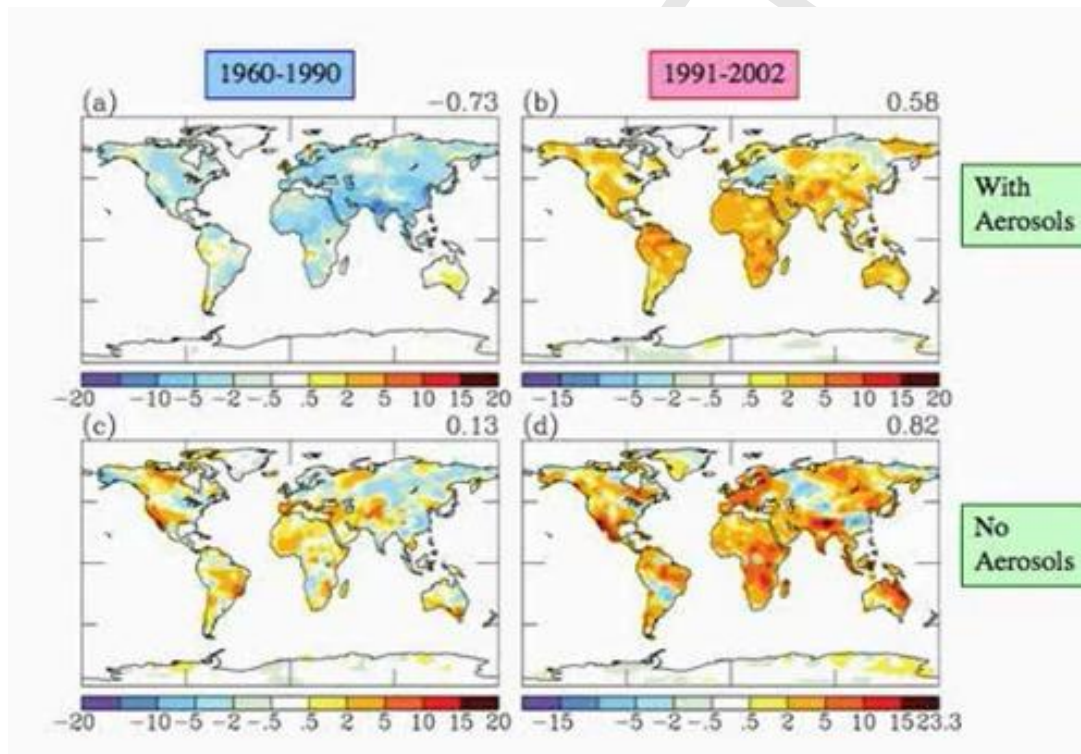
Η αέρια σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να αλλοιώσει την αντίληψή μας για τα χρώματα αντικειμένων που παρατηρούμε μέσα στην ατμόσφαιρα αλλά και τα χρώματα της ίδιας της ατμόσφαιρας. Η ελάττωση της ορατότητας είναι άμεσο αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη 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 km. Μια άλλη συνέπεια από τη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της επίδρασης των σωματιδίων είναι η ελάττωση της γεωργικής παραγωγής στις αγροτικές περιοχές.

Περιοχή	Αιωρούμενα σωματίδια (μg/m ³)	Ορατότητα (km)
Υπαιθρος	30	40
Προάστια	100	12
Κέντρο Πόλης	200	6
ΒΙ.ΠΕ.	700	1,6

Εικόνα 6.5: Συγκέντρωση σωματιδίων και ορατότητα.

6.2.2. Κλίμα

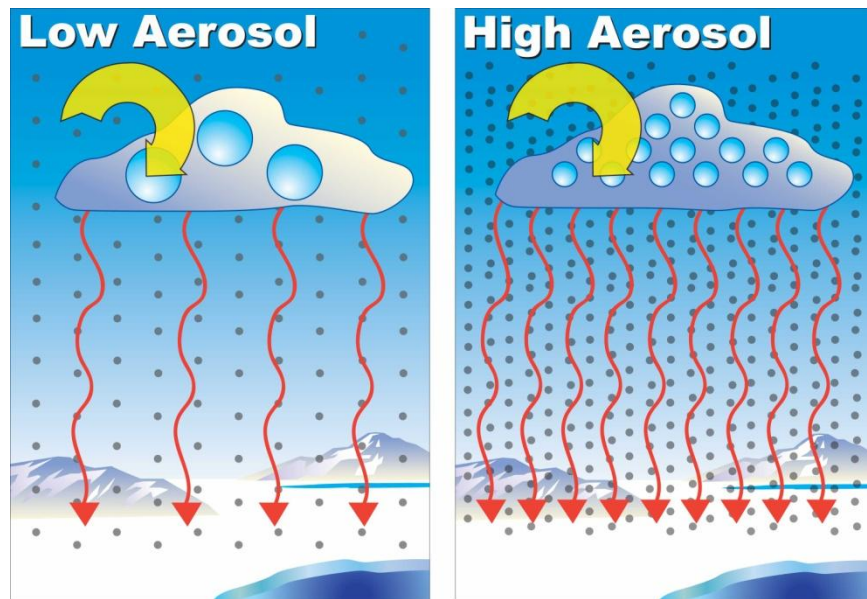
Σημαντικές είναι, επίσης, οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα. Η επίδρασή τους ποικίλει στο χώρο και στο χρόνο και εξαρτάται ισχυρά από τις τοπικές εκπομπές σε σωματίδια, τον σχετικά μικρό χρόνο ζωής και τον τρόπο αλληλεπίδρασης των σωματιδίων αυτών με την ηλιακή ακτινοβολία. Ανάλογα με 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. Σύμφωνα όμως με μελέτες του πανεπιστημίου του Berkeley, τα ανθρωπογενούς προέλευσης αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν ψύξη στον πλανήτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



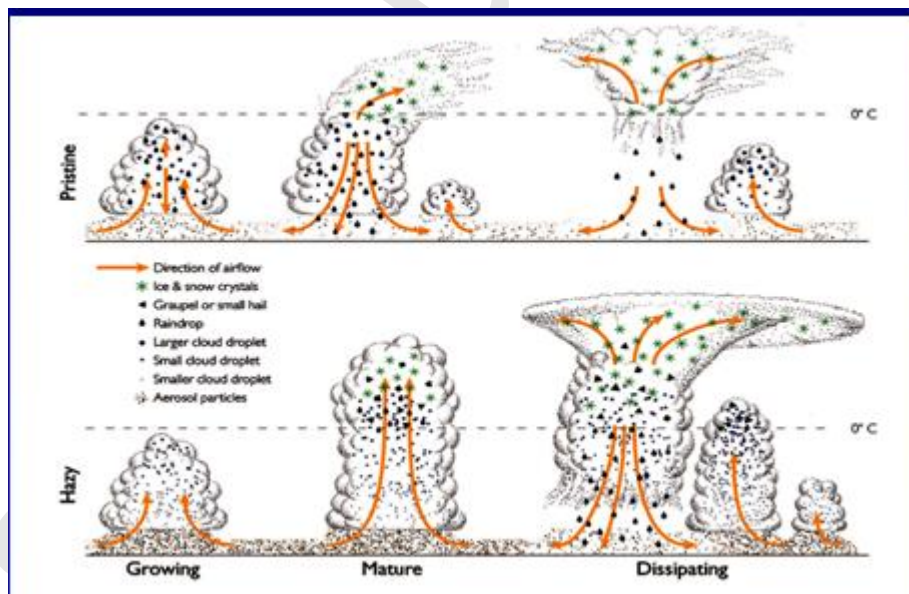
Εικόνα 6.6: Μοντέλο που απεικονίζει την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης με και χωρίς τα ανθρωπογενή αιωρούμενα σωματίδια (Nazarenko and Menon, 2005).

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

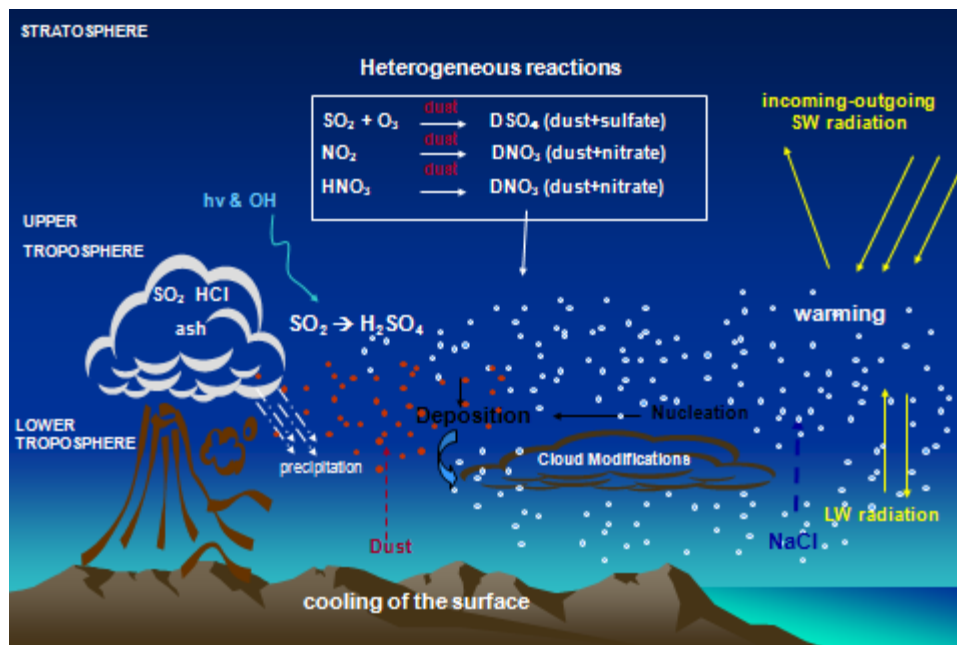
ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων των νεφών. Μια άλλη επίπτωση είναι η αύξηση της ζωής των σύννεφων αλλά και η χημική ρύπανση των σταγόνων (όξινη βροχή).



Εικόνα 6.7: Ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων των νεφών λόγω αυξημένης συγκέντρωσης σωματιδίων.



Εικόνα 6.8: Επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στο σχηματισμό των νεφών (Rosenfeld,2008).



Εικόνα 6.9: Αιωρούμενα σωματίδια και ρύποι στην ατμόσφαιρα: Διεργασίες αλληλεπίδρασης και κλίμα.

6.2.3. Υλικά

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:

α) 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 συνεργητικά, 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.

β) 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 βάψιμο 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 επικάθηση των σωματιδίων μειώνει την ανακλαστικότητα των αδιαφανών επιφανειών, αλλά και το ποσοστό του φωτός που διαπερνά τις διαφανείς επιφάνειες (Koloutsou-Valais, 1999; EPA, 1996).

7. ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

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 - πλαίσιο, βάσει των οποίων οφείλουν τα κράτη μέλη να προσαρμόζουν την εθνική τους νομοθεσία. Η οδηγία -πλαίσιο της Ε.Ε. προβλέπει την έκδοση θυγατρικών οδηγιών. Κάθε θυγατρική οδηγία αναφέρεται σε ένα ρύπο ή μία κατηγορία ρύπων.

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

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Εικόνα 7.1: Οδηγία της Ε.Ε. για τα TSP (1983).

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 παρακάτω, στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα και πριν από τις αναφερόμενες στην οδηγία ημερομηνίες. Επίσης, σύμφωνα με την οδηγία, τα κράτη μέλη οφείλουν να εγκαταστήσουν και να λειτουργήσουν σταθμούς μέτρησης για τη συλλογή στοιχείων σχετικών με τις συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Τα κράτη μέλη οφείλουν να διαβιβάζουν ετησίως στην Επιτροπή, όχι αργότερα από εννέα μήνες μετά το τέλος κάθε έτους, τον αριθμητικό μέσο, το διάμεσο, το 98^ο εκατοστημόριο και τη μέγιστη συγκέντρωση, όπως υπολογίζονται από τις 24-ώρες 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/ΕΚ).

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, να αναθεωρήσει τα ισχύοντα πρότυπα ποιότητας αέρα και να 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 μετά 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).

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} (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων 2005).

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

Εικόνα 7.2: Θέσπιση μέσης ετήσιας οριακής τιμής της συγκέντρωσης των PM_{2,5} από την Ε.Ε.

	Περίοδος αναφοράς	Οριακή τιμή	Περιθώριο ανοχής	Προθεσμία για την συμμόρφωση προς την οριακή τιμή
ΣΤΑΔΙΟ 1				
24-ωρη οριακή τιμή	24 ώρες	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	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

Εικόνα 7.3: Θυγατρική οδηγία της Ε.Ε. για τα PM_{10} (1999/30/ΕΚ).

7.1.1. Παρατηρήσεις για την παραπάνω Οδηγία:

Το 1^ο στάδιο εφαρμογής της ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2005. Μέχρι τότε και για τα έτη 2001 έως και 2004 είχε δοθεί ένα περιθώριο ανοχής που αθροίζονταν στην οριακή τιμή, παράγοντας έτσι μια ενδεικτική τιμή, η οποία ίσχυε για κάθε έτος αυτής της τετραετίας. Το περιθώριο ανοχής κάθε χρόνο μειώνονταν, έτσι ώστε κατά την έναρξη ισχύος της Οδηγίας αυτό να είναι μηδέν. Το περιθώριο ανοχής ήταν 20, 15, 10, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα έτη 2001 έως και 2004 αντίστοιχα για την 24ωρη οριακή τιμή και 6.4, 4.8, 3.2, 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα έτη 2001 έως και 2004 αντίστοιχα για την ετήσια οριακή τιμή. Το 2^ο στάδιο εφαρμογής της θα ξεκινήσει την 1η Ιανουαρίου 2010. Οι τιμές που αναφέρονται στο 2^ο στάδιο εφαρμογής της είναι ενδεικτικές και θα αναθεωρηθούν βάσει των νέων πληροφοριών για τις επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον, κατά πόσο είναι τεχνικά εφικτές και βάσει της πείρας από το 1^ο στάδιο εφαρμογής της από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

7.2. Η ΟΔΗΓΙΑ 2008/50/ΕΚ

Από τις 11 Ιουνίου 2008 τέθηκε σε ισχύ η νέα Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21 Μαΐου 2008 για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού Αέρα και καθαρότερο Αέρα για την Ευρώπη. Η Οδηγία ενοποιεί τις Οδηγίες 96/62/ΕΚ, 1999/30/ΕΚ, 2000/69/ΕΚ και 2002/3/ΕΚ. Η ισχύς αυτών των Οδηγιών θα τερματιστεί την ημερομηνία που η νέα Οδηγία θα έχει μεταφερθεί στις Εθνικές Νομοθεσίες.

7.2.1. Οριακές τιμές PM_{10} για την προστασία της ανθρώπινης υγείας

$\text{A}\Sigma_{10}$			
1 ημέρα	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος	50 %	— ⁽¹⁾
Ημερολογιακό έτος	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 %	— ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ισχύει ήδη από 1ης Ιανουαρίου 2005.

7.2.2. Τιμή στόχος και οριακή τιμή για τα PM_{2,5}

Τιμή στόχος

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

Οριακή τιμή

Περίοδος μέσου όρου	Οριακή τιμή	Περίοδος ανοχής	Ημερομηνία κατά την οποία πρέπει να έχει επιτευχθεί η οριακή τιμή
ΣΤΑΔΙΟ 1			
Ημερολογιακό έτος	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	20 % στις 11 Ιουνίου 2008, μειούμενο έως την 1η του επόμενου Ιανουαρίου και εν συνεχεία ανά εφεξής δωδεκάμηνο κατά ίσα ετήσια ποσοστά ώστε να καταλήξει σε 0 % έως την 1η Ιανουαρίου 2015	1η Ιανουαρίου 2015
ΣΤΑΔΙΟ 2 ⁽¹⁾			
Ημερολογιακό έτος	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		1η Ιανουαρίου 2020

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

7.3. ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ

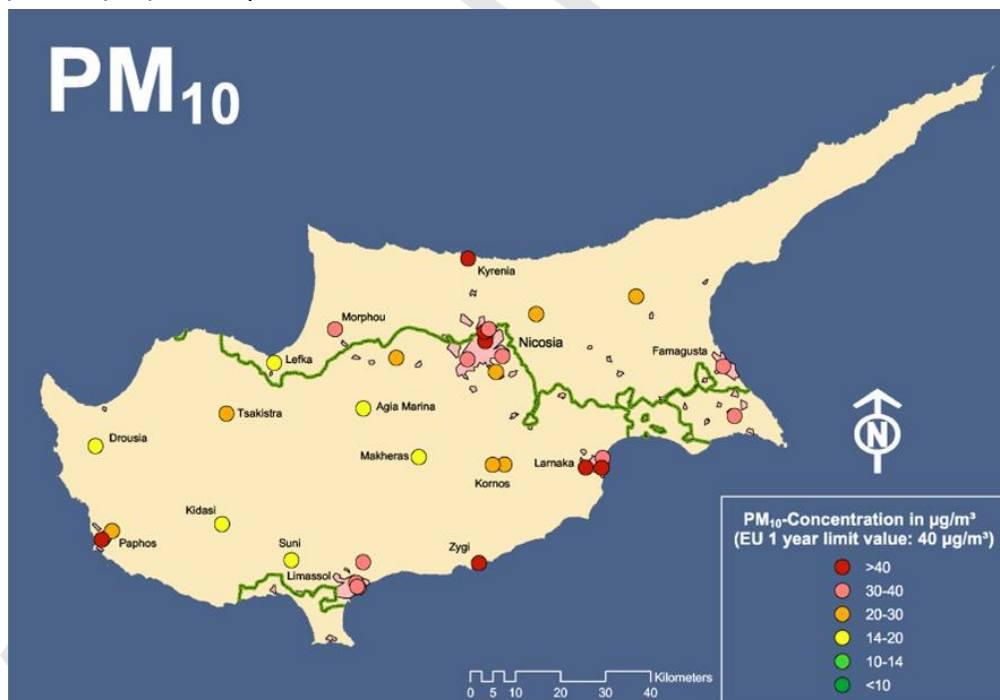
Η συγκέντρωση των PM₁₀ σε πολλές περιοχές της Ευρώπης πολύ συχνά ξεπερνά τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τη 2^η έκθεση για τα αιωρούμενα σωματίδια που συντάχθηκε από την αρμόδια ομάδα εργασίας του προγράμματος Clean Air For Europe (CAFE) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία στηρίχθηκε σε στοιχεία που αφορούσαν στα έτη 2000 και 2001, οι οριακές τιμές για τα αιωρούμενα σωματίδια ξεπεράστηκαν στο 34% των σταθμών μέτρησης, οι οποίοι είχαν πληρότητα δεδομένων τουλάχιστον 70%. Στις περισσότερες πόλεις με πληθυσμό περίπου 2 εκατομμύρια κατοίκους καταγράφονται υπερβάσεις για περισσότερες από 45 ημέρες το χρόνο, σε τουλάχιστον έναν από τους σταθμούς μέτρησης που λειτουργούν εκεί κατά τη διάρκεια των δύο παραπάνω ετών. Οι μεγαλύτερες ετήσιες μέσες τιμές (70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ το 2000 και 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ το 2001) και η μεγαλύτερη 36η ημερήσια μέση τιμή (110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ το 2000 και 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ το 2001) καταγράφηκαν στην Ισπανία. Ο μεγαλύτερος αριθμός υπερβάσεων της οριακής τιμής των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ καταγράφηκε στη Στοκχόλμη, ενδεχομένως λόγω της

επαναιώρησης της σκόνης από τους δρόμους λόγω των ελαστικών που φέρουν καρφιά. Να σημειωθεί βέβαια ότι η Οδηγία 1999/30 της Ευρωπαϊκής Ένωσης επιτρέπει την υπέρβαση των ορίων όταν αποδεικνύεται ότι αυτή οφείλεται στον παραπάνω λόγο.

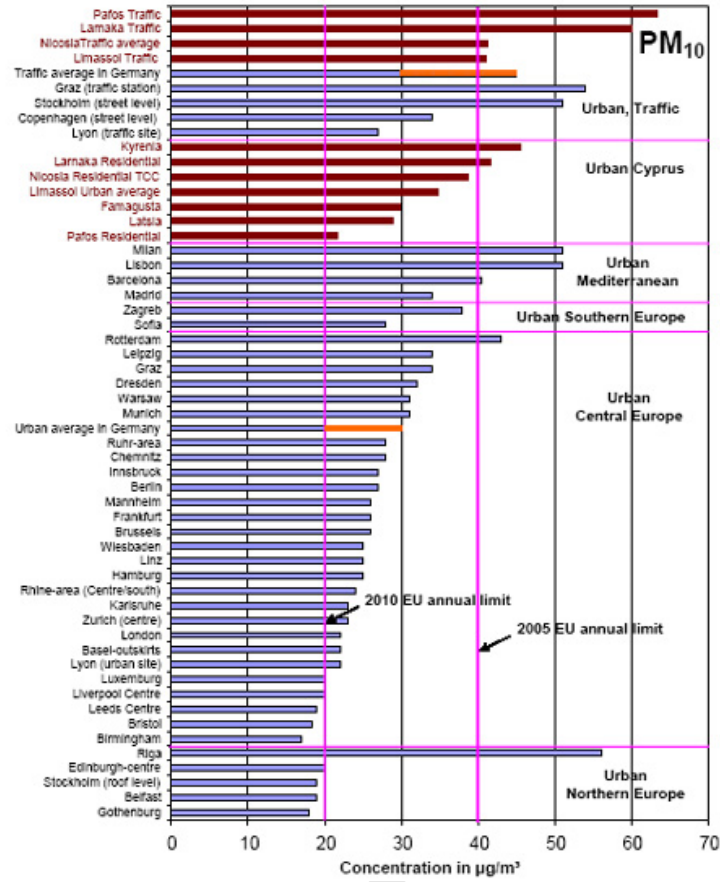
7.4. ΜΗ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΑΝΟΝΕΣ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ (Νοέμβριος 2010)

Από τις πληροφορίες που διαθέτει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προκύπτει ότι οι οριακές τιμές για τα PM_{10} δεν έχουν τηρηθεί σε πολλές ζώνες της Κύπρου, της Ιταλίας, της Πορτογαλίας και της Ισπανίας, αφότου ετέθη σε ισχύ η νομοθεσία, το 2005. Τα εν λόγω κράτη μέλη δεν έχουν αντιμετωπίσει, μέχρι στιγμής, αποτελεσματικά τις πέραν των επιτρεπόμενων ορίων εκπομπές PM_{10} . Κατόπιν τούτου, μετά από σύσταση του αρμόδιου για το περιβάλλον Ευρωπαίου Επιτρόπου Janez Potocnik, η Επιτροπή αποφάσισε να παραπέμψει στο Δικαστήριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης την Κύπρο, την Ιταλία, την Πορτογαλία και την Ισπανία.

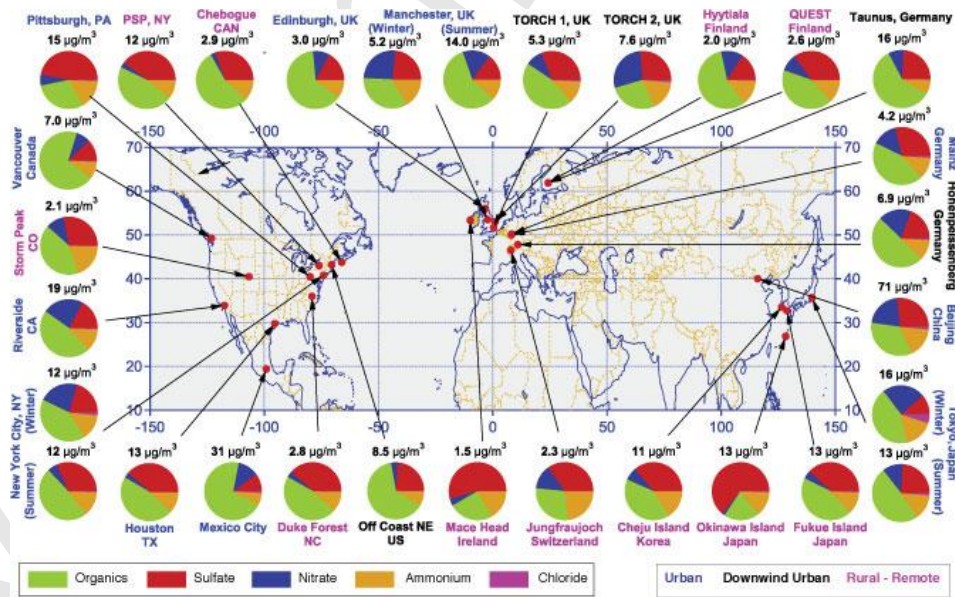
Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη των Πανεπιστημίων του Yale και του Columbia, σε συνεργασία με το World Economic Forum και το Joint Research Centre of the European Commission, κατέταξε την Κύπρο τελευταία στην Ε.Ε. σε ότι αφορά τις περιβαλλοντικές επιδόσεις της χώρας σε μια σειρά από αξιολογημένους τομείς (ατμοσφαιρική ρύπανση, διαχείριση νερού, κλιματικές αλλαγές, φυσικοί οικότοποι) με ιδιαίτερα ανησυχητική την επίδοση της Κύπρου στο τομέα της ποιότητας του αέρα.



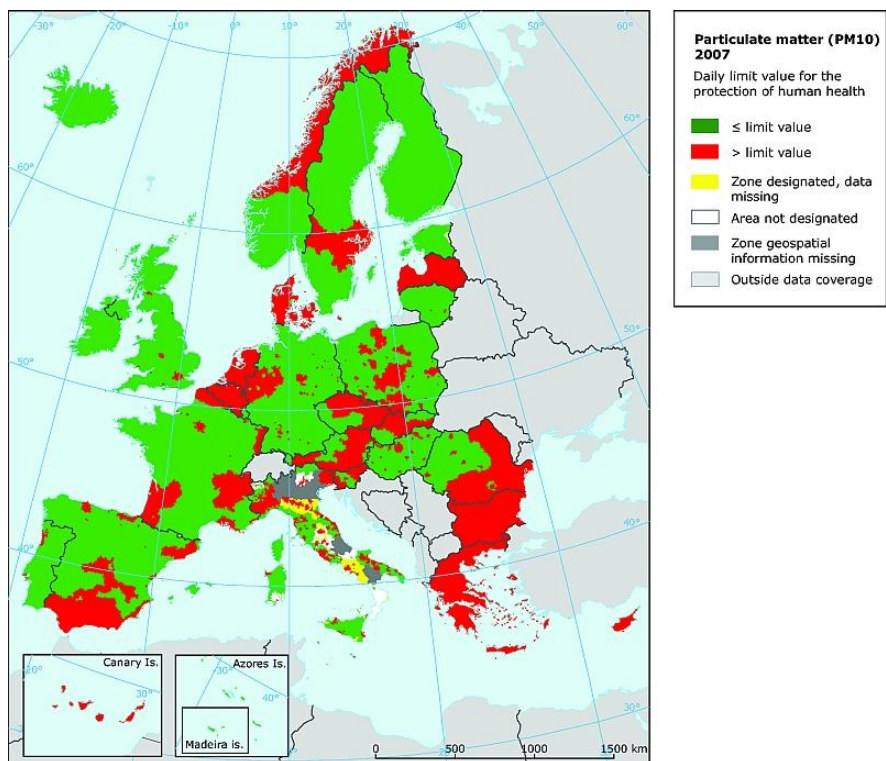
Εικόνα 7.4: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM_{10} σε διάφορες περιοχές της Κύπρου (Τμήμα επιθεώρησης εργασίας Κύπρου).



Εικόνα 7.5: Μέσες ετήσιες τιμές συγκεντρώσεων PM₁₀ διαφόρων ευρωπαϊκών πόλεων (Τμήμα επιθεώρησης εργασίας Κύπρου).



Εικόνα 7.6: Μέση μηνιαία συγκέντρωση και χημική σύσταση νανοσωματιδίων PM₁ σε διάφορες πόλεις του βορείου ημισφαιρίου (Zhang et al., 2007).



Εικόνα 7.7: Απεικόνιση ημερήσιων συγκεντρώσεων PM_{10} στην Ευρώπη το 2007. Παρατηρούμε ότι η Ελλάδα και η Κύπρος βρίσκονται πάνω από το όριο ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (ΕΕΑ, 2007).

7.5. 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 ΗΠΑ (US Clean Air Act 1970,1977,1990), να ορίζει και να θέτει σε ισχύ τα εθνικά πρότυπα ποιότητας αέρα της χώρας (National Ambient Air Quality Standards - NAAQS). Αυτά τα όρια πρέπει να είναι αρκετά αυστηρά ώστε να προστατεύεται η υγεία ακόμα και των πιο ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού.

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

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

Το 1987 θεσπίστηκε το πρώτο εθνικό αμερικάνικο πρότυπο ποιότητας αέρα (NAAQS) για τα PM_{10} . Συγκεκριμένα, το πρότυπο δεν επέτρεπε οι συγκεντρώσεις στο περιβάλλον να

υπερβαίνουν τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέση ετήσια τιμή) περισσότερο από μια φορά σε τρία συνεχόμενα έτη, και τα 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέση 24-ωρη τιμή) περισσότερο από τρεις φορές μέσα σε τρία έτη.

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

Ήδη τον Ιούλιο 1997, η EPA είχε προσδιορίσει τις αναθεωρήσεις που έπρεπε να γίνουν στο πρότυπο ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια, ώστε να ανταποκρίνονται στην τότε τρέχουσα επιστημονική γνώση. Τελικά, οι αναθεωρήσεις αυτές τέθηκαν σε ισχύ στις 16 Σεπτεμβρίου 1997. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια όπως ίσχυαν το 1987, καθώς και με την αναθεώρηση που πραγματοποιήθηκε το 1997 (Milloy, 1998; US EPA, 1997; Chow, 1995).

Σωματιδιακό κλάσμα	Οριακή τιμή 1987	Επεξήγηση	Οριακή τιμή 1997	Επεξήγηση
PM_{10}	Ετήσια 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Καμία αλλαγή σε σχέση με το 1987.
	24-ωρη 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	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.

Εικόνα 7.8: Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} κατά US - EPA.

PM _{2,5}		Δεν υπάρχει οριακή τιμή.	Ετήσια 15 μg/m ³	Ο ετήσιος αριθμητικός μέσος των 24-ωρων μετρήσεων από έναν ή περισσότερους σταθμούς σε οικιστικές περιοχές, δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή.
		Δεν υπάρχει οριακή τιμή.	24-ωρη 65 μg/m ³	Το 98 ^ο εκατοστημόριο του συνόλου των 24-ωρων συγκεντρώσεων από κάθε δειγματολήπτη μιας συγκεκριμένης περιοχής, δεν πρέπει να υπερβεί την οριακή τιμή περισσότερο από 3 φορές σε 3 συνεχόμενα έτη.

Εικόνα 7.9: Πρότυπα ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{2,5} κατά US - EPA.

Τον Δεκέμβριο του 2006, θεσπίστηκε ως νέα οριακή 24-ωρη τιμή για τα PM_{2,5} τα 35 μg/m³.

Ε.Ε.	PM₁₀	PM_{2,5}
ετήσια	40 mg/m ³	25 mg/m ³
24-ωρη	50 mg/m ³	-----

US-EPA	PM₁₀	PM_{2,5}
ετήσια	50 mg/m ³	15 mg/m ³
24-ωρη	150 mg/m ³	35 mg/m ³

Εικόνα 7.10: Συγκεντρωτικές οριακές τιμές.

8. ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

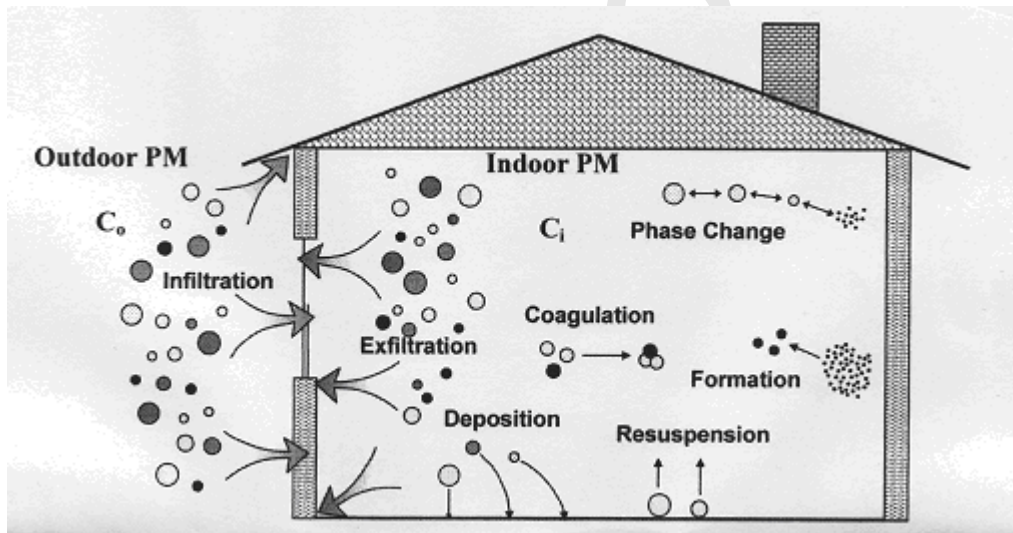
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών σχετικών με την χωροχρονική απασχόληση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα, το 87-90% του ημερήσιου χρόνου καταναλώνεται σε εσωτερικούς χώρους. Η κατοικία αποτελεί το σημαντικότερο μικροπεριβάλλον όσον αφορά τον χρόνο παραμονής (62–87%), με δεύτερο τον εργασιακό χώρο ή το σχολείο (17–25%) (Adgate et al., 2002; Brauer et al., 2000; Klepeis et al., 1996; Robinson & Nelson, 1995; Jenkins et al., 1992; Schwab et al., 1992; Szalai, 1972).

Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων είναι δυνατόν να οφείλονται στην παραγωγή σωματιδίων στο εσωτερικό των χώρων και στη διείσδυση σωματιδίων της εξωτερικής ατμόσφαιρας στους εσωτερικούς χώρους.

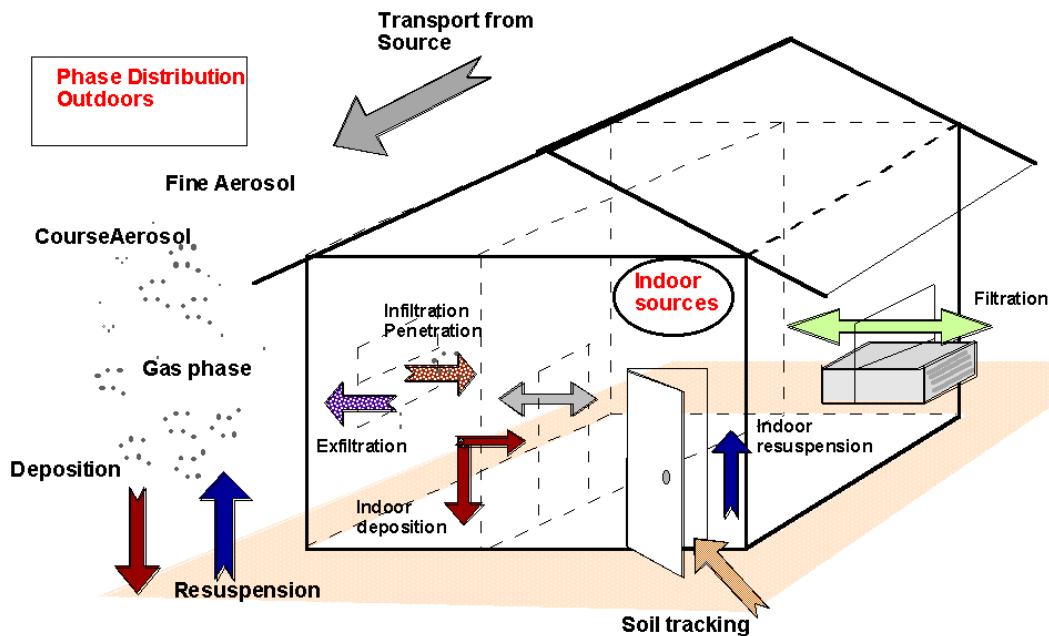
Παράγοντες που επηρεάζουν, επίσης, την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια σε εσωτερικούς χώρους είναι:

- i. 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.
- ii. Η διαζωνική μεταφορά: Η ροή αέρα μεταξύ των χώρων ενός κτιρίου είναι δυνατόν να επηρεάσει σημαντικά τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.
- iii. 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., 2000). Η ποσότητα της επαναιωρούμενης ύλης στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων που βρίσκεται εναποτεθειμένη στις διαφορετικές επιφάνειες του χώρου (Lange, 1995).
- iv. 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).

- v. Οι μετατροπές φάσεων: Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη σε εσωτερικούς χώρους είναι δυνατόν να μεταβληθεί λόγω διεργασιών μετατροπής φάσεων. Οι Dua & Horke (1996) αναφέρουν μεταβολές του μεγέθους των σωματιδίων λόγω απορρόφησης ή αποδέσμευσης νερού, όταν αλλάζουν οι συνθήκες υγρασίας. Σε πολλές ερευνητικές εργασίες μελετάται, επίσης, η κατανομή ημι-πτητικών οργανικών ενώσεων στην αέρια και σωματιδιακή φάση (Naumova et al., 2003; Weschler, 2003; Pankow et al., 1994). Επιπλέον, αρκετές μελέτες αναφέρουν εσωτερική δευτερογενή παραγωγή σωματιδίων κατά την αντίδραση του όζοντος με τερπένια (Fan et al., 2003; Sarwar et al., 2003; Wainman et al., 2000; Weschler & Shields, 1999). Πρόσφατες ερευνητικές εργασίες, τέλος, επισημαίνουν την μετατροπή των σωματιδίων νιτρικού αμμωνίου (NH_4NO_3) σε αέρια αμμωνία (NH_3) και νιτρικό οξύ (HNO_3), κατά την είσοδο του ατμοσφαιρικού αέρα σε εσωτερικούς χώρους, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η μάζα των αιωρουμένων σωματιδίων εξωτερικής προέλευσης στην εσωτερική ατμόσφαιρα (Lunden et al., 2003).



Εικόνα 8.1: Οι διαφορετικές διεργασίες που συντελούνται σε εσωτερικό χώρο και επηρεάζουν την διαμόρφωση των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρουμένων σωματιδίων σε αυτόν.



Εικόνα 8.2: Διεργασιών εισαγωγής, δημιουργίας και απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικό χώρο (Thatcher et al., 2003).

Οι σχετικές τοξικότητες των σωματιδίων εξωτερικής και εσωτερικής προέλευσης δεν έχουν μελετηθεί συστηματικά. Σύμφωνα με τις πρώτες ερευνητικές ενδείξεις, είναι πολύ πιθανό οι δύο αυτές κατηγορίες να διαφέρουν σημαντικά ως προς το είδος και τον βαθμό τοξικότητας (Ebelt et al., 2005; Godleski et al., 2002; Saldiva et al., 2002; Long et al., 2001). 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.

8.2. 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).

Οι κυριότερες δραστηριότητες που επηρεάζουν τα εσωτερικά επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων είναι: το κάπνισμα, το μαγείρεμα, το καθάρισμα και η γενικότερη παρουσία και κινητικότητα ατόμων (Abt et al., 2000). Το μέγεθος των σωματιδίων αντανακλά τον μηχανισμό παραγωγής. Οι διεργασίες καύσης παράγουν κυρίως λεπτόκοκκα σωματίδια, ενώ οι μηχανικές διεργασίες χονδρόκοκκα. Οι παραπάνω δραστηριότητες προκαλούν αύξηση των εσωτερικών επιπέδων συγκέντρωσης κατά πολλές τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις

αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις και μεταβάλλουν την κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους.

Το κάπνισμα έχει αναγνωρισθεί ως η βασική εσωτερική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων, ιδιαίτερα για το λεπτόκοκκο κλάσμα (Nazaroff & Klepeis, 2004; Koistinen et al., 2001; Ozkaynak et al., 1996; Wallace, 1996; Neas et al., 1994; Koutrakis et al., 1992). 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 έρευνας (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 (Spengler et al., 1981) υπολογίστηκε 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, (Koutrakis et al., 1992) αναφέρεται ότι το 54% των σωματιδίων $\text{PM}_{2,5}$ που απαντώνται σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών καπνιστών, προέρχονται από τον καπνό τσιγάρων.

Παρακάτω παρατίθεται μια έρευνα των επιστημόνων του ΕΜΠ (Α.Χαλουλάκου, Ν.Σπυρέλης, Ε.Διαπούλη) για το κάπνισμα σε εσωτερικούς χώρους, όπως δημοσιεύτηκε στην εφημερίδα «Το Βήμα» στις 4 Μαΐου 2008 :

«Ακόμη και ένα τσιγάρο μπορεί να επιβαρύνει την ατμόσφαιρα ενός δωματίου, αλλά και ενός διπλανού κλειστού χώρου, με καρκινογόνες ουσίες. Μετρήσεις που έγιναν από επιστήμονες του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) έδειξαν ότι από τη στιγμή που οι γονείς έσβησαν τη γόπα τους στο τασάκι του σαλονιού και για την επόμενη ώρα οι τοξικές ουσίες «εμπλούτιζαν» την ατμόσφαιρα στο παιδικό δωμάτιο. Όταν όμως ο κλειστός χώρος γίνεται... τεκές, τότε τα μηχανάκια που μετρούν τα επικίνδυνα αιωρούμενα σωματίδια παίρνουν φωτιά. Σε νεανικά στέκια των βορείων προαστίων της πρωτεύουσας, τα οποία μάλιστα διέθεταν και τραπέζια μη καπνιστών, η μέση τιμή των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} που καταγράφηκε για δίωρη παραμονή στον χώρο άγγιξε τα 1600 μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο αέρα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) με μέγιστη πεντάλεπτη τιμή τα 2300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$! Και αυτό όταν το ανεκτό όριο 24ώρου, ώστε να μην προκύψουν προβλήματα υγείας, με βάση τα διεθνή επιστημονικά δεδομένα είναι τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Στα ύψη

βρέθηκαν και οι συγκεντρώσεις επικίνδυνων αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} και $PM_{2.5}$) στις αίθουσες σχολείων της Αθήνας καθώς και στα γραφεία των καθηγητών, όπου κατά τις πρωινές ώρες παρατηρούνταν περιστασιακό κάπνισμα μερικών τσιγάρων. Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της επιστημονικής ομάδας του ΕΜΠ - αποτελείται από τον καθηγητή κ. Ν. Σπυρέλλη, την αναπληρώτρια καθηγήτρια κυρία Αρχοντούλα Χαλουλάκου και την περιβαλλοντολόγο μηχανικό και υποψήφια διδάκτωρ κυρία Ευαγγελία Διαπούλη - οι επικίνδυνοι για την υγεία ρύποι παρέμεναν στους χώρους για μεγάλο διάστημα μετά το τελευταίο τσιγάρο. Το... εσωτερικό νέφος συχνά αποδεικνύεται περισσότερο επικίνδυνο από το εξωτερικό, καθώς στατιστικά κάθε άνθρωπος (ιδιαίτερα τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι) περνά περισσότερο από το 85% του χρόνου του σε εσωτερικούς χώρους. Δεν είναι τυχαίο ότι στην Ελλάδα καταγράφεται το υψηλότερο ποσοστό θανάτων μεταξύ των παθητικών καπνιστών απ' όλα τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης - σε ετήσια βάση σημειώνονται 51 θάνατοι ανά 1 εκατομμύριο κατοίκους. Άλλωστε ως σήμερα όσες προσπάθειες έγιναν στη χώρα μας για τον περιορισμό του καπνίσματος, τουλάχιστον στους δημόσιους χώρους, έχουν αποτύχει. Γι' αυτό πρόσφατα ο υπουργός Υγείας κ. Δημ. Αβραμόπουλος αποφάσισε να θέσει «βέτο στο κάπνισμα» και παρουσίασε το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για το Κάπνισμα (2008-2012) που ενσωματώνει τη νομοθεσία της ΕΕ. Ωστόσο οι ειδικοί προειδοποιούν ότι δεν αρκούν τα μέτρα απαγόρευσης του καπνίσματος στους δημόσιους χώρους. Όπως υποστηρίζουν πρέπει να υπάρξει μακροχρόνια και συστηματική ενημέρωση των πολιτών διότι πρόκειται για ένα σοβαρό πρόβλημα δημόσιας υγείας. «Οι γονείς πρέπει να ενημερωθούν ότι ακόμη και ένα τσιγάρο μέσα στο σπίτι καθιστά την ατμόσφαιρα πολλαπλώς επικίνδυνη για την υγεία των παιδιών τους» επισημαίνει η κυρία Χαλουλάκου.

Σε κατοικίες που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με κεντρικές λεωφόρους, αλλά και σε ήσυχες γειτονιές, το περιστασιακό κάπνισμα ενός τσιγάρου προκάλεσε άμεση αύξηση της συγκέντρωσης σωματιδίων στον υπό μελέτη χώρο ή σε διπλανό δωμάτιο. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι επιστήμονες του ΕΜΠ κάνοντας μετρήσεις σε παιδικό υπνοδωμάτιο με κλειστές τις πόρτες, βρήκαν ότι μόνο ένα αναμμένο τσιγάρο σε διπλανό χώρο οδήγησε σε

βραχυχρόνια (30 λεπτών) συγκέντρωση σωματιδίων PM_{10} δύο φορές μεγαλύτερη από τα επίπεδα του ρύπου πριν από την πρώτη τζούρα. Για να επανέλθουν οι συγκεντρώσεις μικροσωματιδίων στην ατμόσφαιρα του παιδικού δωματίου στα επίπεδα που είχαν προτού αρχίσει το κάπνισμα στο σαλόνι χρειάστηκε περίπου μία ώρα. Σε άλλη κατοικία το κάπνισμα ενός τσιγάρου μέσα στον υπό μελέτη χώρο οδήγησε σε βραχυχρόνιες συγκεντρώσεις 5 ως 12 φορές υψηλότερες από εκείνες που μετρήθηκαν όταν το δωμάτιο ήταν... άκαπνο.

Τα παιδιά όμως επιβαρύνονται και στο σχολείο τους. Σε σχολικά συγκροτήματα της Αττικής μετρήθηκαν οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM_{10} και των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων (ultrafine particles - UFPs), τα οποία θεωρούνται τα πλέον επικίνδυνα για την υγεία, σε γραφείο καθηγητών όπου επιτρέπεται το κάπνισμα και σε αίθουσα διδασκαλίας κατά τις ώρες των μαθημάτων. Ενδεικτικά σε σχολική μονάδα στα βόρεια προάστια η μέση οκτάωρη συγκέντρωση των PM_{10} στην αίθουσα διδασκαλίας βρέθηκε στα $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και στο γραφείο των καθηγητών στα $247 \mu\text{g}/\text{m}^3$ όταν το ημερήσιο πρότυπο είναι τα $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$! Όσον αφορά τη μέση συγκέντρωση των εξαιρετικά επικίνδυνων UFPs, στο γραφείο των καθηγητών βρέθηκαν εκατομμύρια σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό (52×10^3 σωματίδια/ cm^3). Στην αίθουσα διδασκαλίας ο αριθμός τους ήταν σημαντικά μικρότερος ($5,8 \times 10^3$ σωματίδια/ cm^3). Σε γραφείο στο κέντρο της πόλης και σε άμεση γειτνίαση με κεντρική κυκλοφοριακή αρτηρία όπου ορισμένοι εργαζόμενοι κάπνιζαν περιστασιακά μερικά τσιγάρα τις πρωινές ώρες η μέγιστη βραχυχρόνια (30 λεπτών) συγκέντρωση έφτασε ως τα $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα PM_{10} και τα $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για τα $PM_{2.5}$. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις ήταν 5 ως και 25 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες σωματιδιακές συγκεντρώσεις κατά τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας. Μετά το κάπνισμα του τελευταίου τσιγάρου οι συγκεντρώσεις επανέρχονταν στις συνηθισμένες σε περίοδο περίπου μιας ώρας. Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ερευνητικής ομάδας κατά τη χειμερινή περίοδο σε καφετέριες όπου συχνάζουν κυρίως νέοι άνθρωποι έδειξαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές αιωρούμενων σωματιδίων.

Τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από $10 \mu\text{m}$ (μικρά) κατακρατούνται από το στόμα ή τη μύτη και δεν εισχωρούν στον

ανθρώπινο οργανισμό. Ωστόσο ένα 10% με 60% των PM_{10} - σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 10 μm (μικρά) - μπορεί να εναποτεθεί στους πνεύμονες. Όσο για τα λεπτόκοκκα σωματίδια $PM_{2.5}$ (μικρότερα από 2,5 μικρά) καταφέρνουν να εισχωρήσουν βαθύτερα στους βρόγχους και να προκαλέσουν σημαντικότερη βλάβη. Στην πορεία τους τα σωματίδια περνούν μέσα από τους ολοένα στενότερους βρόγχους και είναι δυνατόν να φτάσουν ως και στις κυψελίδες των πνευμόνων, διά μέσου των οποίων εισέρχεται το οξυγόνο στο αίμα. Τα σωματίδια που παγιδεύονται σε αυτούς τους υπερευαίσθητους ιστούς επεμβαίνουν στην οξυγόνωση του αίματος. Παράλληλα καθ' όλη τη διαδρομή μεταφέρονται τοξικές και καρκινογόνες ενώσεις, προσκολλημένες αρχικά στην επιφάνεια των σωματιδίων, οι οποίες στη συνέχεια επικάθονται σε διαφορετικά σημεία των πνευμόνων. Ο καπνός των τσιγάρων, των πούρων, της πίπας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες πηγές εσωτερικής ρύπανσης, καθώς περιέχει 250 ουσίες, ορισμένες από τις οποίες θεωρούνται βεβαιωμένα ή ύποπτα καρκινογόνα. Από ένα και μόνο τσιγάρο εκλύονται εκατοντάδες σωματίδια - τα περισσότερα όταν σιγοκαίει στο τασάκι παρά όταν καπνίζεται. Πρόσφατα το διεθνές επιστημονικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στην επίδραση της έκθεσης σε ακόμη μικρότερα σωματίδια, καθώς υπάρχουν ενδείξεις ότι τα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια (με μέγεθος μικρότερο από 0,1 μικρά) ενδεχομένως προκαλούν σοβαρότερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε σχέση με τα μεγαλύτερα σωματίδια. Πλήθος μελέτες καταδεικνύουν ότι, για την ίδια ποσότητα σωματιδιακής ύλης που έχει εναποτεθεί στους πνεύμονες, η τοξικότητα αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Υπάρχει επίσης έντονη ανησυχία σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία από τη βραχυχρόνια έκθεση σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις PM. Πολλές πρόσφατες μελέτες συνδέουν τα μικρής διάρκειας υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης με σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως μειωμένη πνευμονική λειτουργία, αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα και καρδιαγγειακές παθήσεις. Επιπλέον υποστηρίζεται ότι πολλά χρόνια συμπτώματα οφείλονται στην επαναλαμβανόμενη βραχυχρόνια έκθεση σε υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι πλέον ευαίσθητες ομάδες πληθυσμού, ως προς την έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση, είναι τα πολύ νεαρά και ηλικιωμένα άτομα,

καθώς και οι πάσχοντες από αναπνευστικές και καρδιακές παθήσεις.»

Σημαντική εσωτερική παραγωγή σωματιδίων παρατηρείται και κατά την διάρκεια δραστηριοτήτων μαγειρέματος (Kamens et al., 1991). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης (Ozkaaynak et al., 1996), σε χώρους κατοικιών στις Η.Π.Α., το μαγείρεμα παράγει $4,0 \pm 1,6$ mg/min σωματιδίων PM₁₀, ενώ περίπου το 40% αυτών ($1,7 \pm 0,6$ mg/min) αποτελείται από σωματίδια PM_{2.5}. Επιπλέον, έχουν καταγραφεί και σημαντικές εκπομπές υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, ιδιαίτερα κατά την χρήση συσκευών που λειτουργούν με αέριο (Dennekamp et al., 2001; Long et al., 2000).

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, Clayton et al., 1993; Lefcoe & Inculet, 1975). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελέτης (Kamens et al., 1991), η χρήση ηλεκτρικής σκούπας 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.

8.3. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΟΥ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

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

εξωτερικής ατμόσφαιρας, και αφ' ετέρου 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:

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

Η γνώση των τριών παραμέτρων εξαερισμού (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:

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

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

8.3.1. Ρυθμός εξαερισμού (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 όγκο (ο όγκος του αέρα μέσα στο χώρο εφόσον εξαιρεθεί ο μη αναμεμιγμένος αέρας ο οποίος βρίσκεται παγιδευμένος) του χώρου. Εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- i. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου (τεχνική και ποιότητα της κατασκευής, αεροπερατότητα του κελύφους, διάταξη των χωρισμάτων)
- ii. 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.)
- iii. 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).

8.3.2. Ρυθμός εναπόθεσης (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:

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

όπου: v_d η ταχύτητα εναπόθεσης,

V ο όγκος του χώρου και

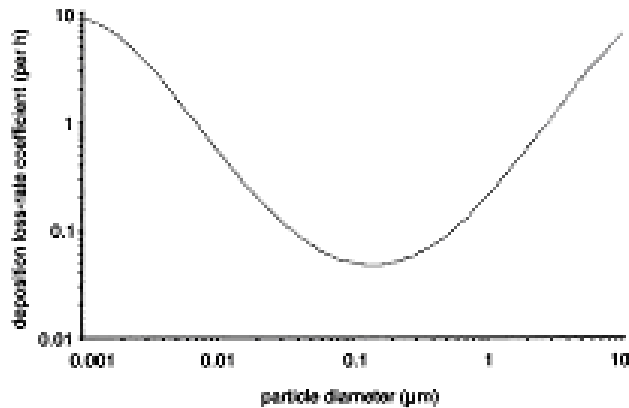
S το εμβαδό των διαθέσιμων επιφανειών εναπόθεσης στον υπό μελέτη χώρο.

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

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

Στην περίπτωση των χονδρόκοκκων 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).

Στην εικόνα 8.3 παρουσιάζεται μια σύνθεση αποτελεσμάτων από πειραματικές μετρήσεις και θεωρητικά μοντέλα, σχετικά με την μεταβολή του ρυθμού εναπόθεσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων (Riley et al., 2002). Αξίζει να σημειωθεί, όμως, ότι οι τιμές του k που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, και βασίζονται σε διαφορετικές μεθοδολογίες εκτίμησης, παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση, ακόμη και για ίδια σωματιδιακά κλάσματα (Lai, 2002).



Εικόνα 8.3: Σύνθεση πειραματικών και θεωρητικών τιμών του ρυθμού εναπόθεσης συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων (Riley et al. 2002).

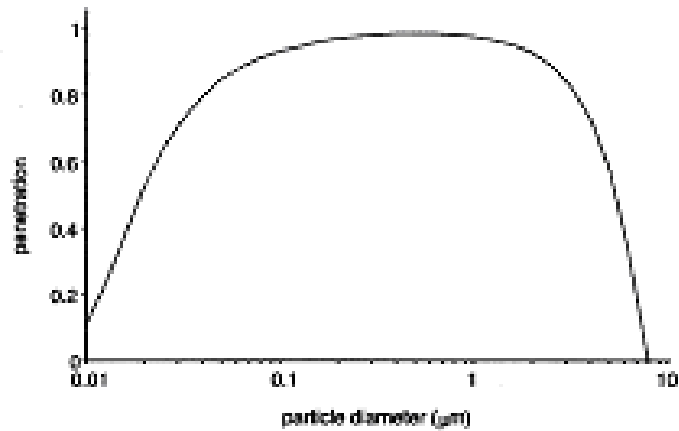
8.3.3. Ικανότητα διείσδυσης (P)

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:

- i. το μέγεθος των σωματιδίων,
- ii. τον αριθμό και τη γεωμετρία των χαραμάδων του κτιρίου και
- iii. 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). Στην εικόνα 8.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου, σχετικά με την αναμενόμενη ικανότητα διείσδυσης δια μέσω πολύ λεπτής οπής, σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών (Liu & Nazaroff, 2001).



Εικόνα 8.4: Αποτελέσματα θεωρητικού μοντέλου: Τιμές της ικανότητας διείσδυσης συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τα παρακάτω δεδομένα: Η οπή εισροής/εκροής έχει ύψος 1 mm και μήκος 10 cm. Η ροή του αέρα προκαλείται από πτώση πίεσης ίση με 4 Pa. Η πυκνότητα των σωματιδίων ισούται με 1 g/cm^3 (Liu & Nazaroff, 2001).

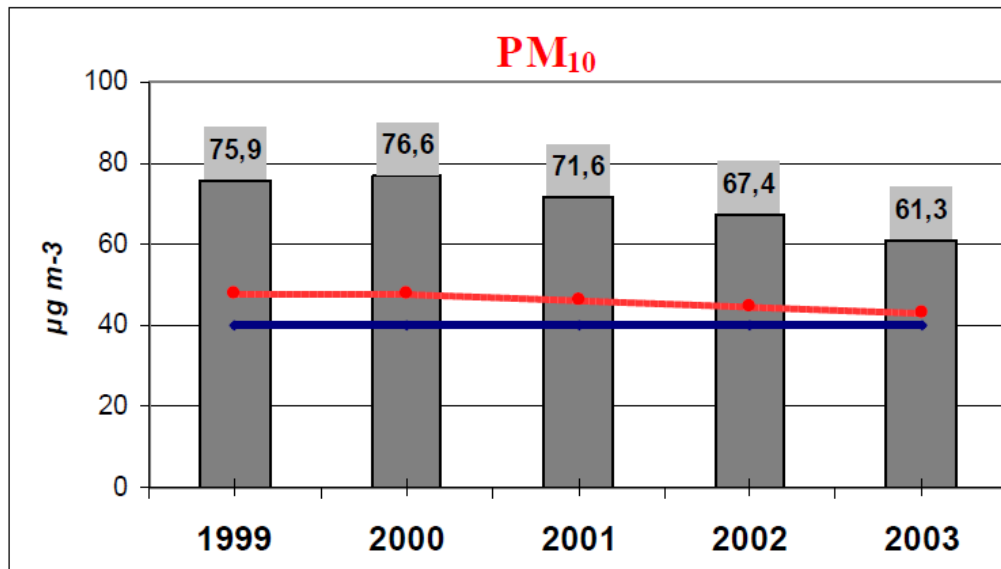
9. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

9.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το πρόβλημα της ρύπανσης του αέρα και των επιπτώσεων της στην υγεία προσελκύει το ενδιαφέρον πολλών ανθρώπων. Είναι ένα θέμα το οποίο συζητείται ιδιαίτερα συχνά στην Ελλάδα, αφού δεν περνάει σχεδόν εβδομάδα που να μην διαβάσουμε στις εφημερίδες κάτι σχετικό με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Οφείλουμε όμως να γνωρίζουμε ότι δεν πρόκειται για ένα αποκλειστικά ή ιδιαίτερα ελληνικό πρόβλημα, αφού κατατάσσεται ως ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της δημόσιας υγείας διεθνώς. Χαρακτηριστικά, η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO) έχει υπολογίσει ότι ίσως μέχρι και 30% των ασθενειών με τον ένα ή με τον άλλο τρόπο σχετίζονται με τη ρύπανση του αέρα, η οποία και μπορεί να ευθύνεται για μέχρι και 5% των θανάτων. Επομένως πρόκειται για ένα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο επηρεάζει την ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων και κυρίως όσων ζουν στις πόλεις.

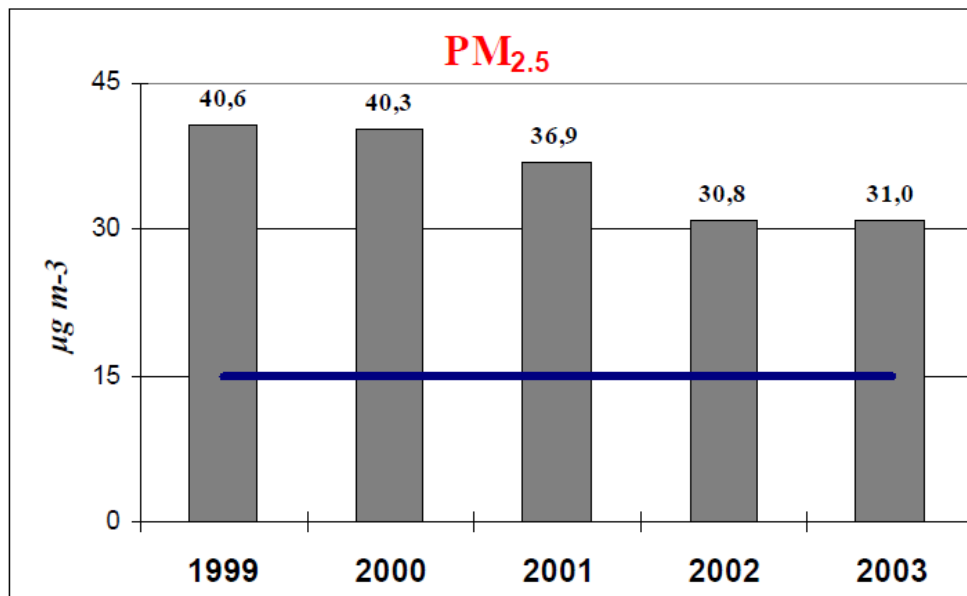
Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν το σημαντικότερο (αστικό) ρύπο. Έχουν κερδίσει το επιστημονικό ενδιαφέρον λόγω των επιδημιολογικών και πειραματικών στοιχείων που αποδεικνύουν τον αντίκτυπό τους στην υγεία του ανθρώπου. Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα που διεξήγαγε το Ευρωπαϊκό Κέντρο για την Ατμόσφαιρα και τις Κλιματικές αλλαγές, για λογαριασμό της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕΑ), σχεδόν μισό εκατομμύριο Ευρωπαίοι πολίτες (στις 27 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης) πεθαίνουν κάθε χρόνο από συγκεκριμένες ασθένειες λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα αιωρούμενα σωματίδια. Χίλιοι τέτοιοι θάνατοι αναλογούν στην Κύπρο. Εξάλλου σε μελέτη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (Μάρτιος 2009) υπολογίστηκε ότι στην Ελλάδα εξαιτίας της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια, περίπου 1300 άτομα ανά εκατομμύριο κατοίκους χάνουν πρόωρα τη ζωή τους ετησίως. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας υποστηρίζει ότι η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί την αιτία περίπου 3 εκατομμυρίων θανάτων ετησίως, σε παγκόσμιο επίπεδο. Επίσης, κάποιες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι οι κάτοικοι της Αθήνας χάνουν περίπου 3 χρόνια από τον μέσο όρο ζωής τους.

Τόσο η πόλη της Αθήνας, όσο και οι γύρω περιοχές εντός του λεκανοπεδίου Αττικής, έχουν αντιμετωπίσει πολλά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών δεκαετιών. Συγκεκριμένα, η επιστημονική ομάδα της Α. Χαλουλάκου πραγματοποίησε μελέτη που αφορούσε στη μέτρηση των επίπεδων συγκέντρωσης των PM_{10} και $PM_{2.5}$ στο κέντρο της πόλης των Αθηνών και τα αποτελέσματα αυτής ήταν άκρως ενδιαφέροντα, όσο και ανησυχητικά. Ο ετήσιος μέσος όρος συγκέντρωσης των PM_{10} και $PM_{2.5}$ βρέθηκε αρκετά υψηλότερος από το αντίστοιχο ετήσιο πρότυπο ατμοσφαιρικής ποιότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα PM_{10} και της USEPA για τα $PM_{2.5}$ αντίστοιχα. Επιπλέον, βάσει της ίδιας μελέτης, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των PM_{10} υπερέβησαν το όριο της Ε.Ε. για περίπου 42% επί των ημερών της δειγματοληψίας.



Οριακή τιμή μέσης ετήσιας συγκέντρωσης (ΕΕ): 40 μg/m³

Εικόνα 9.1: Διαχρονική μεταβολή μέσης ετήσιας συγκέντρωσης PM₁₀ στην Αθήνα (Α.Χαλουλάκου, 2005).



Οριακή τιμή μέσης ετήσιας συγκέντρωσης (USEPA): 15 μg/m³

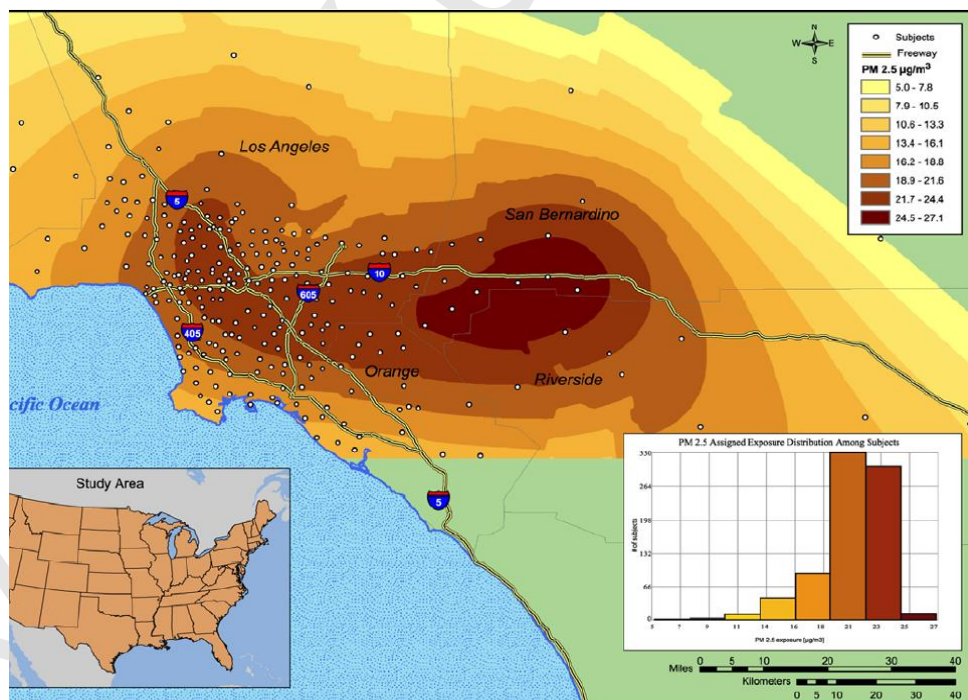
Προβλεπόμενη οριακή τιμή μέσης ετήσιας συγκέντρωσης Ε.Ε (CAFE): <20 μg/m³

Εικόνα 9.2: Διαχρονική μεταβολή μέσης ετήσιας συγκέντρωσης PM_{2.5} στην Αθήνα (Α.Χαλουλάκου, 2005).

Η αναπνοή αποτελεί τον κυριότερο τρόπο έκθεσής του ανθρώπου σε επικίνδυνες ουσίες. Η εμφάνιση αναπνευστικών συμπτωμάτων έχει βρεθεί ότι αυξάνεται σε κατοίκους περιοχών κοντά στους μεγάλους δρόμους, δεδομένου ότι η οδική κυκλοφορία είναι μια σημαντική πηγή σωματιδιακής ύλης.

Economic sector	PM ₁₀		PM _{2.5}		BS	
	1990	2000	1990	2000	1990	2000
Energy industries	16%	13%	11%	9%	1%	1%
Manufacturing industries and construction	15%	9%	13%	10%	3%	4%
Transport	6%	11%	9%	13%	31%	37%
Other sectors	33%	34%	36%	38%	46%	43%
Fugitive emissions from fuels	5%	5%	4%	3%	12%	7%
Mineral products	1%	3%	0%	0%	0%	0%
Chemical industry	4%	2%	4%	2%	0%	0%
Metal production	14%	11%	17%	14%	0%	0%
Other production	1%	3%	1%	1%	0%	0%
Manure management	2%	5%	1%	1%	0%	0%
Agricultural soils	0%	1%	0%	0%	0%	0%
Agriculture	0%	3%	2%	4%	5%	5%
Waste incineration	2%	1%	0%	1%	1%	1%
Other	0%	2%	1%	3%	1%	1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Total kilotonnes	11 195	5 442	6 814	3 651	759	639

Εικόνα 9.3: Εκτιμήσεις εκπομπών σωματιδίων από διάφορες πηγές στην Ευρώπη 1990-2000.



Εικόνα 9.4: Μέτρηση συγκέντρωσης PM_{2.5} γύρω από μεγάλους δρόμους του Los Angeles.

Regional / local gradients and near roadway studies:

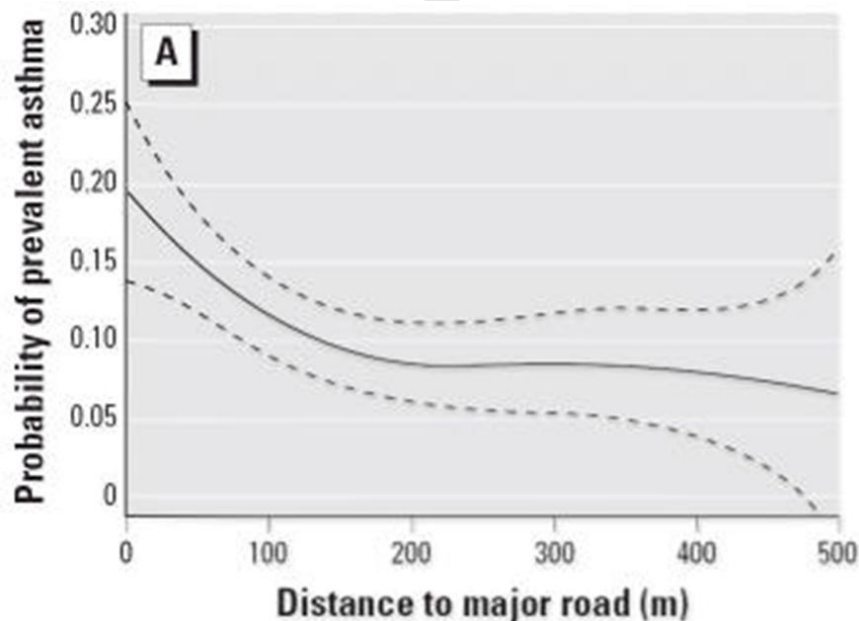
Jerrett LA ACS 2005 - (n=22,000) **11% to 17% overall mortality increase** per 10 micrograms; with **25 to 60% increase** in ischemic heart disease and lung cancer; **44% increase** in lung cancer within 500 m of highway intersections

Nyberg Stockholm 2000 - most mobile intense quintile of city has **60% greater lung cancer deaths** than least.

Finkelstein and Jerrett Hamilton 2004 - **40% increase** in cardiovascular deaths within 100 meters of highways, 50 of busy urban streets

Hoek and Brunekreef Netherlands 2002 - **95% increase** in cardiopulmonary mortality within 100 m of highways, 50 of busy city streets

Εικόνα 9.5: Διάφορες μελέτες για συμπτώματα στην υγεία σε ανθρώπους που διαμένουν κοντά σε μεγάλους δρόμους.



Εικόνα 9.6: Άσθμα και απόσταση από αυτοκινητόδρομο.

Οι στόχοι λοιπόν αυτής της μελέτης είναι να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων κοντά σε αστικό δρόμο στην περιοχή των Αθηνών, να εξεταστεί η σχέση μεταξύ εσωτερικών (indoor) και εξωτερικών (outdoor) συγκεντρώσεων αυτών, να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα σχετικά πρότυπα των διεθνών οργανισμών και να εξεταστεί η επίδραση του ανέμου και άλλων μετεωρολογικών παραγόντων στα καταγραφόμενα επίπεδα.

9.2. ΧΩΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η δειγματοληψία της παρούσας μελέτης, έλαβε χώρα σ' ένα τυπικό φοιτητικό διαμέρισμα της περιοχής Ζωγράφου. Ο Δήμος Ζωγράφου αριθμεί σήμερα περίπου 100 χιλιάδες μόνιμους κατοίκους και αποτελεί τον πλέον πυκνοκατοικημένο δήμο της Ευρώπης. Επίσης, λόγω της Πανεπιστημιούπολης και της Πολυτεχνειούπολης που υπάρχουν σ' αυτόν, στο Δήμο διαμένουν και χιλιάδες φοιτητές.

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν σε 2 στάδια: από τις 5/12/2010 μέχρι τις 20/12/2010 με το όργανο συνεχούς καταγραφής Dust Trak και από τις 19/1/2011 μέχρι τις 6/2/2011 με το Dust Trak καθώς και με τους σταθμικούς δειγματολήπτες Harvard PEMs.

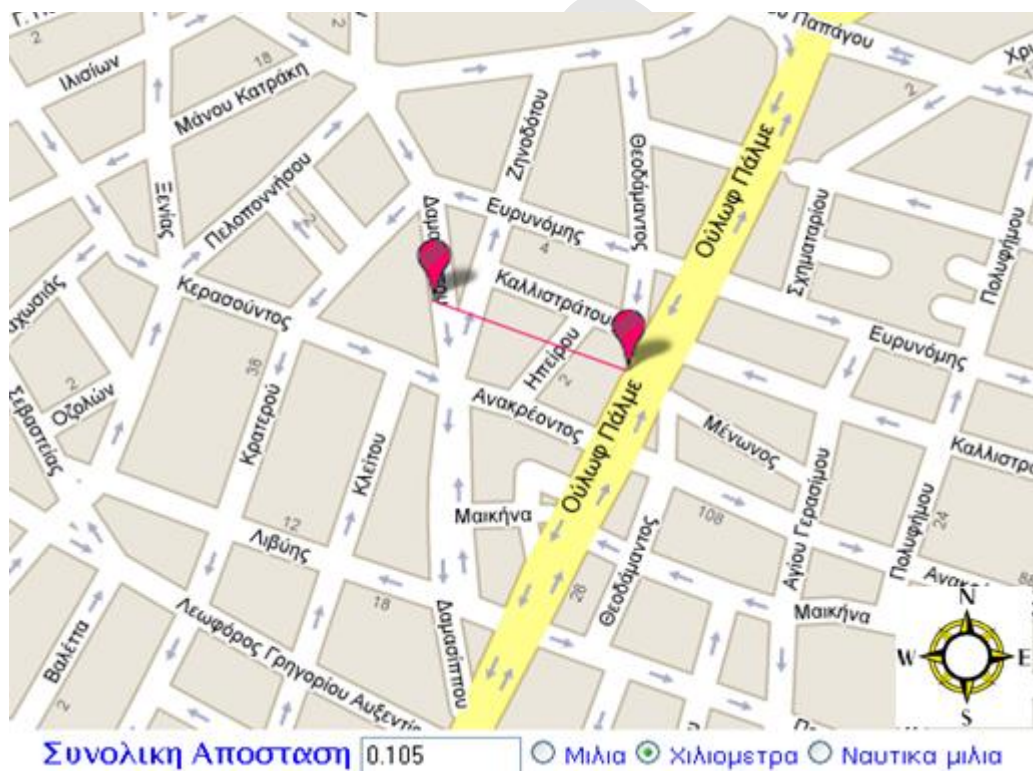
Στο πρώτο στάδιο μετρήθηκαν 24-ωρες εξωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) με ωριαία διαστήματα αναφοράς. Υπολογίστηκε επίσης η τιμή του λόγου I/O (indoor-outdoor) και για τα 3 κλάσματα για κάποια χρονικά διαστήματα ορισμένων ωρών ανά ημέρα κατά τις περιόδους αιχμής της κυκλοφορίας.

Στο δεύτερο στάδιο των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκαν σταθμικές μετρήσεις εξωτερικού χώρου για τα κλάσματα PM_{10} και $PM_{2.5}$ (μέσες 24-ωρες συγκεντρώσεις). Επίσης υπολογίστηκε η μέση 24-ωρη τιμή του λόγου I/O για το κλάσμα PM_{10} . Παράλληλα πραγματοποιήθηκαν και συνεχείς μετρήσεις με το όργανο Dust Trak τόσο στο εξωτερικό περιβάλλον όσο και στο εσωτερικό.

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



Εικόνα 9.7: Περιοχή δειγματοληψίας.



Εικόνα 9.8: Απόσταση χώρου δειγματοληψίας από Ούλωφ Πάλμε.



Εικόνα 9.9: Τα όργανα στο χώρο δειγματοληψίας. Κάτω αριστερά στο παράθυρο διακρίνεται το inlet του Dust Trak, πάνω αριστερά το Harvard PEM για τα $PM_{2.5}$ και πάνω δεξιά το Harvard PEM για τα PM_{10} . Η απόσταση τους από το έδαφος ήταν 1.88m, 2.21m και 2.24m αντίστοιχα.

9.3. ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ

9.3.1. Αυτόματος μετρητής DustTrak Aerosol Monitor Model 8533

Η συνεχής παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός αυτόματου μετρητή συνεχούς καταγραφής DustTrak (Μοντέλο 8533), της εταιρείας TSI. Το όργανο αυτό ελέγχου των αερολυμάτων, είναι ένα φορητό λέιζερ-φωτόμετρο. Παρέχει αξιόπιστη αξιολόγηση της έκθεσης σε σωματίδια, μετρώντας συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν σε PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 ή σε κλάσματα αναπνεύσιμων σωματιδίων ($PM_{resp}=PM_4$). Σε κάθε περίπτωση, για τη μέτρηση συγκεντρώσεων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών, είναι απαραίτητη η εφαρμογή και διαφορετικών ακροφυσίων στο σημείο εισόδου αυτών στο όργανο.

Ο μετρητής χρησιμοποιεί τη διασπορά φωτός σε γωνία 90° για να υπολογίσει την κατά μάζα συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε αέριο ρεύμα. Το ρεύμα αέρα εισέρχεται στον δειγματολήπτη με παροχή 1,7 L/min, μέσω εσωτερικής αντλίας και στην συνέχεια διασταυρώνεται με ακτίνα laser. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων

προσδιορίζεται μέσω της σκέδασης του φωτός από τα σωματίδια. Ο μετρητής είναι δυνατόν να μετρήσει συγκεντρώσεις στο εύρος 0,001–100 mg/m³, με ανάλυση ίση με ± 0,1 % ή 1 μg/m³ (όποιο από τα δύο δίνει την μεγαλύτερη τιμή). Η χρήση διαφορετικών κεφαλών εισόδου, επιτρέπει τον προσδιορισμό της μάζας των σωματιδίων PM₁₀, PM₄, PM_{2.5} και PM₁. Για σωματίδια μεγέθους μικρότερου από το 1/3 του μήκους κύματος της ακτίνας laser (780 nm), το σκεδαζόμενο φως μειώνεται συναρτήσει της 6^{ης} δύναμης της διαμέτρου, με αποτέλεσμα η ελάχιστη ανιχνεύσιμη διάμετρος να ισούται κατά προσέγγιση με 0,1 μm.

Χρησιμοποιείται για την καταγραφή συγκεντρώσεων σε μια ευρεία ποικιλία χώρων και συνθηκών, όπως σε γραφεία και βιομηχανικούς εργασιακούς χώρους έως εξωτερικά τοπία και εργοτάξια κατασκευαστικών εταιριών. Οι κλασικές εφαρμογές του περιλαμβάνουν:

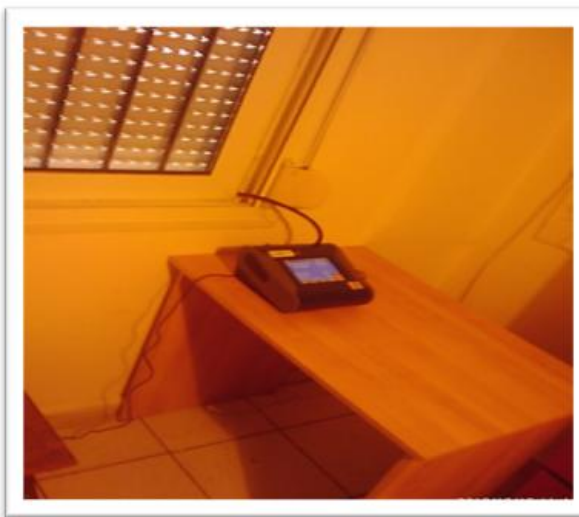
- εσωτερικές έρευνες ατμοσφαιρικής ποιότητας
- έλεγχο βιομηχανικών εργασιακών χώρων
- εξωτερικό περιβαλλοντικό έλεγχο
- αξιολόγηση φίλτρων και έλεγχο εφαρμοσμένης μηχανικής
- έλεγχο απομακρυσμένων περιοχών και περιμέτρων σε πραγματικό χρόνο

Το όργανο ελέγχου DustTrak 8533 περιέχει μια ευανάγνωστη ψηφιακή οθόνη η οποία παρουσιάζει σε πραγματικό χρόνο τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των σωματιδίων σε χιλιοστά του gr ανά κυβικό μέτρο αέρα (mg/m³). Ταυτόχρονα, τα καταγραμμένα δεδομένα αποθηκεύονται στη μνήμη του οργάνου η οποία είναι αρκετή για να αποθηκεύει δεδομένα εβδομάδων, ακόμη και αν αυτά έχουν ληφθεί σε διαστήματα ενός λεπτού. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα του DustTrak 8533, είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να λαμβάνει και να αποθηκεύει μετρήσεις χωρίς να είναι αναγκαία η παρουσία του στον ελεγχόμενο χώρο. Το όργανο περιέχει μικροεπεξεργαστές και λογισμικό το οποίο δύναται να προγραμματίζει την έναρξη και τη λήξη των δειγματοληψιών εκτελώντας τις οδηγίες του χρήστη με απόλυτη ακρίβεια. Τα πολύτιμα δεδομένα κατοχυρώνονται στη μνήμη η οποία υποστηρίζεται από μια μπαταρία λιθίου. Το DustTrak 8533 είναι συμβατό με τους κοινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα λογισμικά τους, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφόρτωση των αποθηκευμένων δεδομένων του οργάνου σε αυτούς και έτσι να είναι εφικτή η στατιστική ανάλυσή τους χωρίς να απαιτείται κάθε φορά από το χρήστη να τα καταγράφει ο ίδιος στο πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιεί.

Ο μετρητής έχει βαθμονομηθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία με πρότυπη σκόνη ISO 12103-1, A1 Arizona road dust (μεγέθους 0,1–10 μm). Η συγκεκριμένη σκόνη χρησιμοποιείται συχνά σε βαθμονομήσεις, καθώς θεωρείται αντιπροσωπευτική για ένα ευρύ φάσμα αερολυμάτων της ατμόσφαιρας.



Εικόνα 9.10: DustTrak Aerosol Monitor Model 8533.



Εικόνα 9.11: Το DustTrak στο χώρο δειγματοληψίας.

9.3.2. Δειγματολήπτες Harvard PEMs

Πρόκειται για ατομικούς δειγματολήπτες μάζας αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίοι έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί από ερευνητές της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Harvard (Harvard School of Public Health). Χρησιμοποιούνται κυρίως για μετρήσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους εργασίας. Τα PEMs μπορούν να συλλέξουν δύο κλάσματα αιωρούμενων σωματιδίων, τα PM_{10} και $PM_{2.5}$. Οι δειγματολήπτες αποτελούνται από μια βάση με μεταλλικό πλέγμα (κοινή και για τα δύο κλάσματα), πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων, μια μεταλλική πλάκα ενσφήνωσης (impaction plate) και μια κεφαλή. Στο impaction plate υπάρχει ένα κοίλο τμήμα στο οποίο τοποθετείται λιπαντικό μέσο για την κατακράτηση σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους από το επιθυμητό.

Οι δειγματολήπτες συνδέονται με μια αντλία (μέσω ενός ελαστικού αεραγωγού), η οποία ελκύει ατμοσφαιρικό αέρα με σταθερό ρυθμό ροής. Η ρύθμιση της παροχής στην επιθυμητή τιμή των 4 L/min γίνεται με τη βοήθεια βαθμονομημένου ροόμετρου και ενός συστήματος βαλβίδων οι οποίες στραγγαλίζουν τη ροή. Τα σωματίδια αναρροφούνται και συλλέγονται σε φίλτρα από τεφλόν διαμέτρου 37 mm. Τα φίλτρα αυτά φυλάγονται στο ψυγείο. Τα φίλτρα ζυγίζονταν πριν και μετά από κάθε δειγματοληψία σε ζυγό 5 δεκαδικών ψηφίων (Sartorius M2P Electronic Microbalance), του Εργαστηρίου Οργανικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Προκειμένου οι μετρήσεις να θεωρούνται αξιόπιστες, τα φίλτρα μετά την έξοδό τους από τους δειγματολήπτες τοποθετούνται σε ειδικά τριβλία ώστε να παραμείνει ανεπηρέαστο το βάρος τους από εξωτερικούς παράγοντες.



Εικόνα 9.12: Οι δειγματολήπτες Harvard PEMs για σωματίδια PM_{10} και $PM_{2.5}$ αντίστοιχα.



Εικόνα 9.13: Βάση με μεταλλικό πλέγμα, impaction plate και η κεφαλή των Harvard PEMs.



Εικόνα 9.14: Τα Harvard PEMs στο χώρο δειγματοληψίας.

10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

10.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΟΡΓΑΝΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ DUST TRAK

Πίνακας 1: Μέση 24-ωρη εξωτερική συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων, λόγος $PM_{2.5}/PM_{10}$ και λόγος PM_1/PM_{10} .

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$PM_{2.5}/PM_{10}$	PM_1/PM_{10}
5/12/2010	19.17	17.13	16.58	0.89	0.87
6/12/2010	38.21	35.17	34.79	0.92	0.91
8/12/2010	59.33	54.17	52.79	0.91	0.89
9/12/2010	58.17	50.29	48.04	0.86	0.83
12/12/2010	109.00	106.00	106.00	0.97	0.97
17/12/2010	36.33	35.33	35.33	0.97	0.97
18/12/2010	30.19	27.69	27.01	0.92	0.89
20/12/2010	69.00	60.00	57.00	0.87	0.83
19/1/2011	60.00	56.00	56.00	0.93	0.93
21/1/2011	64.00	61.00	60.00	0.95	0.94
22/1/2011	32.00	29.00	28.00	0.91	0.88
23/1/2011	31.00	28.00	27.00	0.90	0.87
24/1/2011	38.00	35.00	34.00	0.92	0.89
25/1/2011	36.00	34.00	34.00	0.94	0.94
26/1/2011	55.00	52.00	52.00	0.95	0.95
27/1/2011	70.00	67.00	67.00	0.96	0.96
30/1/2011	49.00	48.00	48.00	0.98	0.98
31/1/2011	52.00	49.00	49.00	0.94	0.94
2/2/2011	39.00	37.00	36.00	0.95	0.92
4/2/2011	31.00	29.00	29.00	0.94	0.94
5/2/2011	78.00	73.00	73.00	0.94	0.94
6/2/2011	80.00	74.00	74.00	0.93	0.93

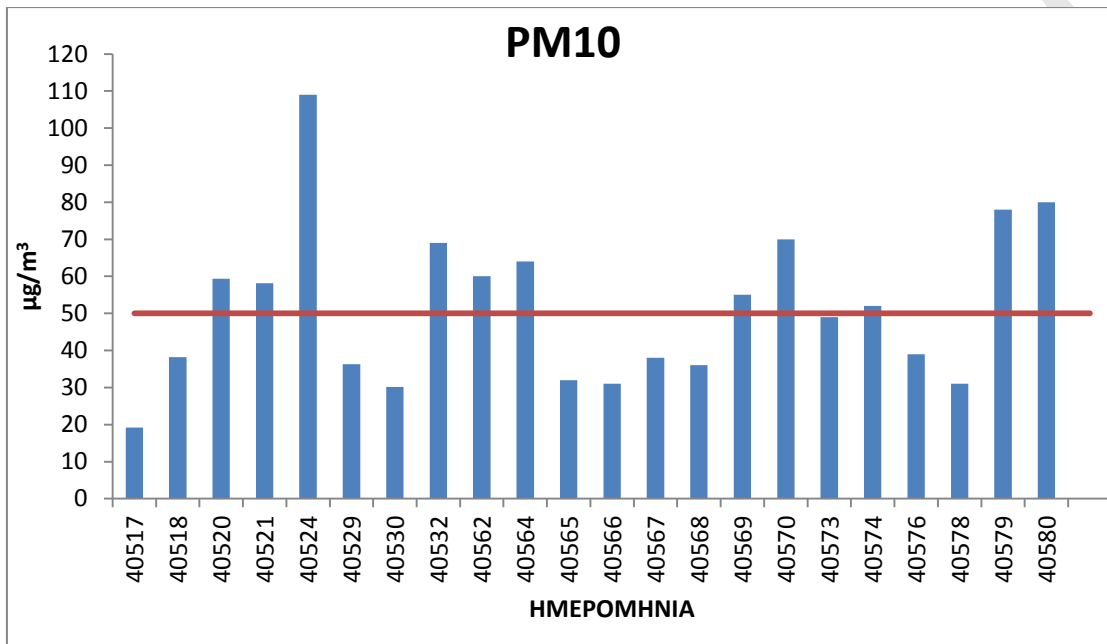
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία.

	Μέση τιμή N=22 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ελάχιστη-Μέγιστη συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Τυπική απόκλιση	Αριθμός/Ποσοστό Υπερβάσεων
PM_{10}	51.56	19.17-109.00	20.81	11/50%
$PM_{2.5}$	48.08	17.13-106.00	19.96	15/68%
PM_1	47.48	16.58-106.00	20.06	

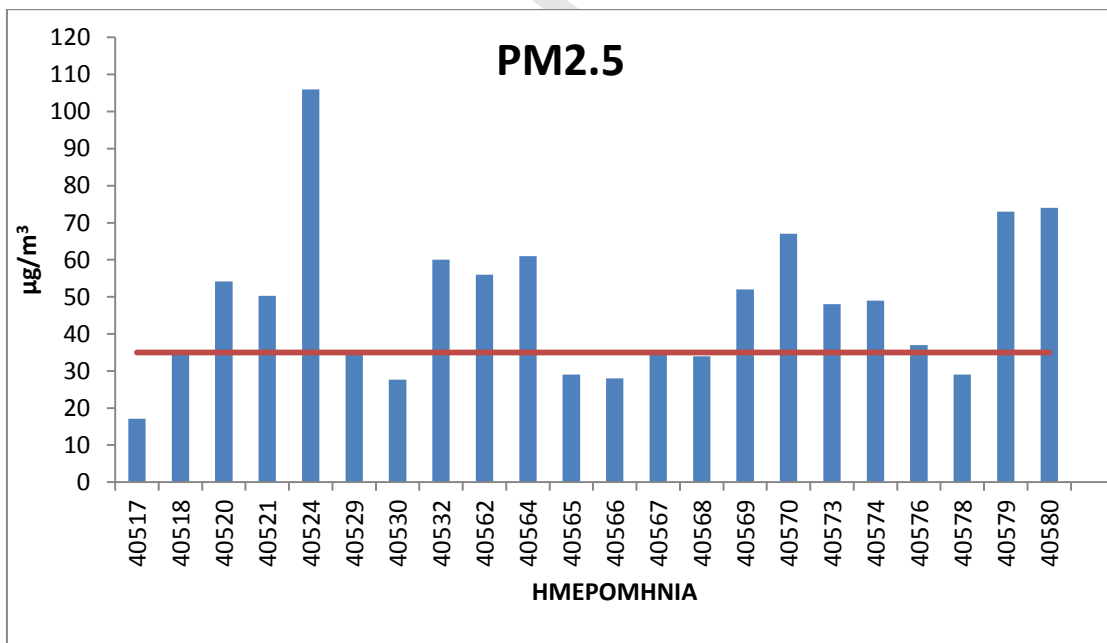
Πίνακας 3: Μετεωρολογικά δεδομένα (ΜΕΤΕΟΝΕΤ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων-ΕΜΠ).

ΗΜ/ΝΙΑ	ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΗ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΑ (w/m2)	ΗΛΙΟΦΑΝΕΑ (min)
5/12/'10	W	1.23	8.05	0.00	54.97	13.70	16.20	61.70	389.00
6/12/'10	NE	0.85	5.80	0.00	74.87	12.40	15.50	78.53	417.00
8/12/'10	S	1.12	4.03	0.00	79.23	16.30	19.80	76.85	461.00
9/12/'10	S	1.93	11.2	0.00	73.79	17.80	20.30	76.43	418.00
12/12/'10	N	1.04	12.08	0.00	54.47	5.00	8.80	57.61	460.00
17/12/'10	SE	0.88	4.47	0.40	79.56	8.00	10.70	50.34	60.00
18/12/'10	S	2.48	11.17	0.00	66.85	13.70	14.70	66.82	408.00
20/12/'10	SE	1.83	8.05	0.00	81.13	16.30	20.10	36.85	186.00
19/1/'11	E	0.68	3.58	0.20	77.93	11.70	16.20	56.50	412.00
21/1/'11	NE	0.62	8.05	2.20	90.30	12.40	15.10	56.22	155.00
22/1/'11	S	1.72	8.05	9.80	84.37	13.80	16.60	43.56	78.00
23/1/'11	S	1.68	6.69	0.20	74.27	13.10	15.00	51.91	158.00
24/1/'11	SW	0.84	4.92	9.80	84.97	10.80	13.20	45.09	430.00
25/1/'11	E	1.07	6.69	1.80	84.06	7.10	8.60	27.63	343.00
26/1/'11	NE	0.82	5.36	0.00	70.43	6.60	9.80	56.21	186.00
27/1/'11	NE	0.67	4.03	0.20	75.65	7.60	12.20	52.27	412.00
30/1/'11	N	1.60	6.25	0.00	70.76	7.30	8.70	56.01	29.00
31/1/'11	N	1.27	5.36	0.00	76.37	8.10	10.40	47.53	110.00
2/2/'11	NW	1.46	8.05	0.00	67.68	7.70	11.40	47.55	450.00
4/2/'11	N	2.88	9.83	4.40	76.03	7.30	8.20	34.81	0.00
5/2/'11	NE	1.33	9.38	0.00	60.67	8.90	13.30	43.77	517.00
6/2/'11	N	0.71	2.72	0.00	67.13	10.50	16.90	43.20	540.00

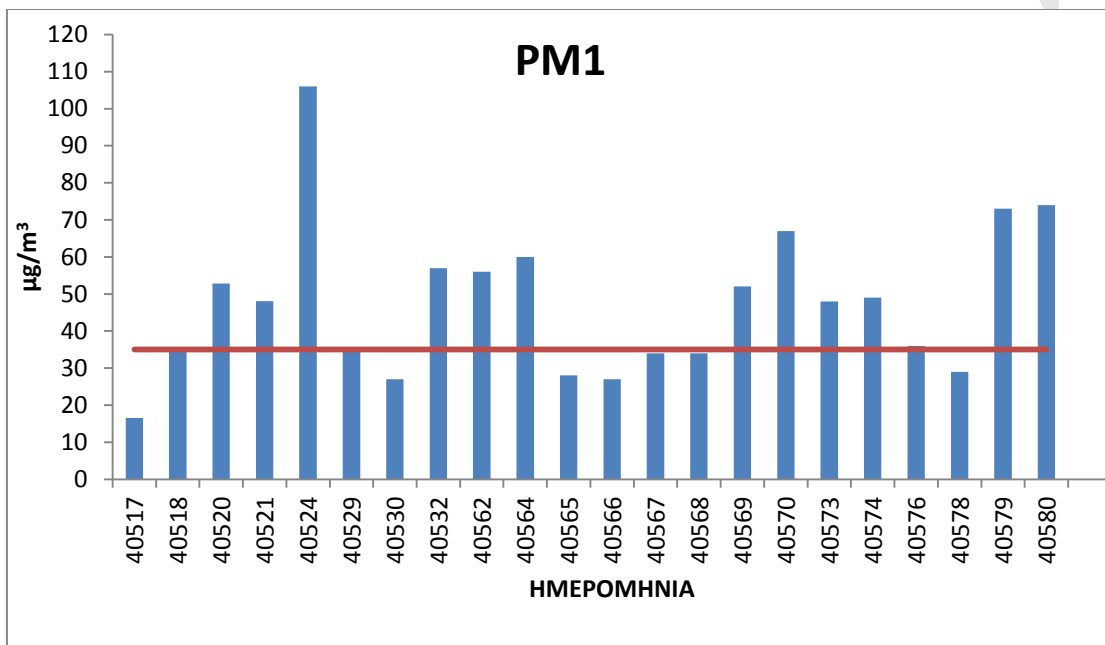
10.1.1. Μέση 24-ωρη εξωτερική συγκέντρωση



Διάγραμμα 1: Μέση 24-ωρη συγκέντρωση PM₁₀. Το 50% των ημερών είχαμε συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο της Ε.Ε. των 50 µg/m³.

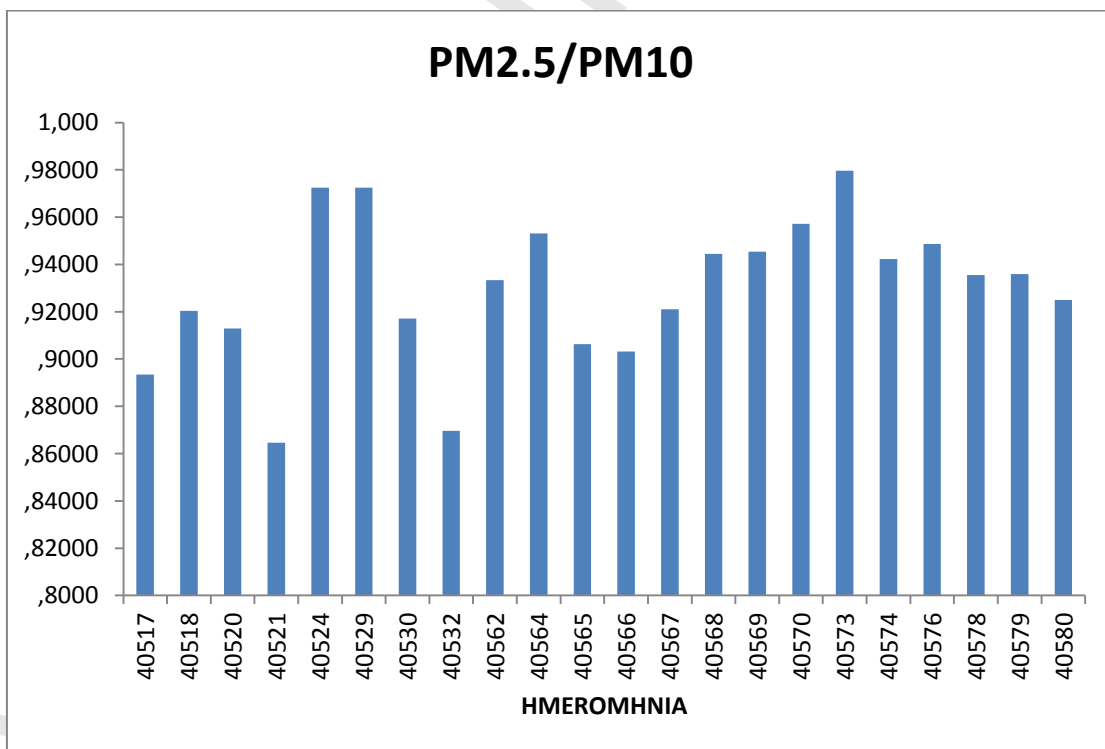


Διάγραμμα 2: Μέση 24-ωρη συγκέντρωση PM_{2.5}. Το 68% των ημερών είχαμε συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο της US-EPA και του υπό συζητήσεως από την Ε.Ε. (C.A.F.E.) των 35 µg/m³.

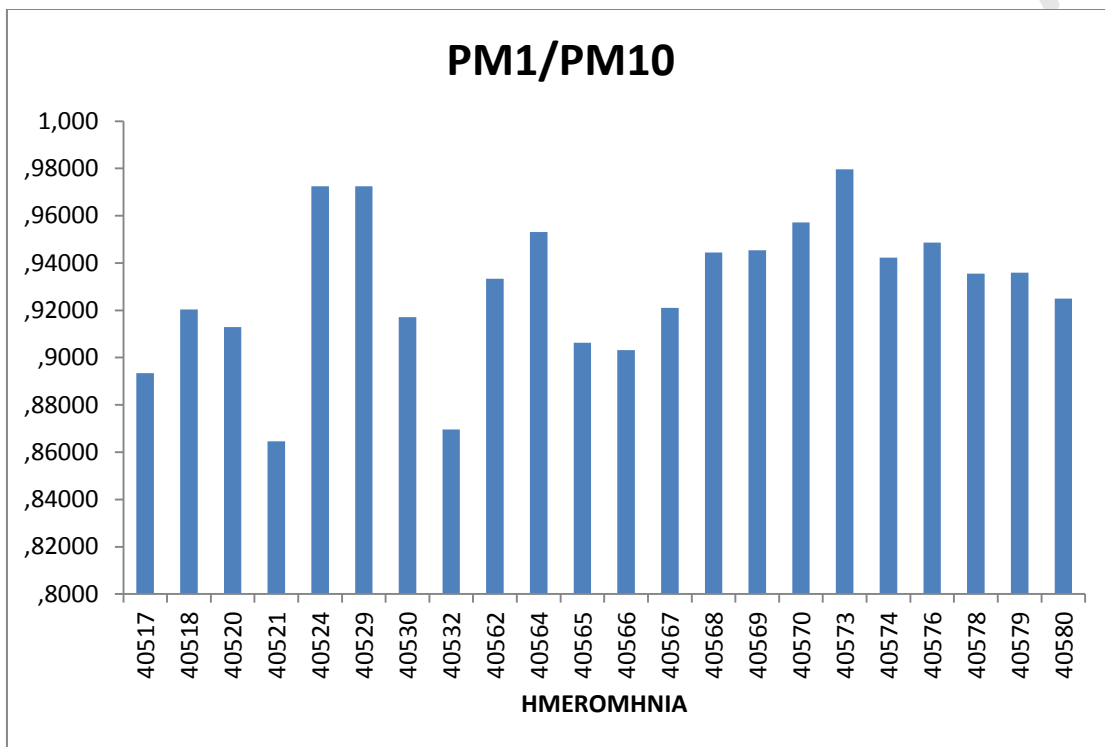


Διάγραμμα 3: Μέση 24-ωρη συγκέντρωση PM₁.

10.1.2. Συμμετοχή λεπτόκοκκων και υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων στη μάζα των PM₁₀

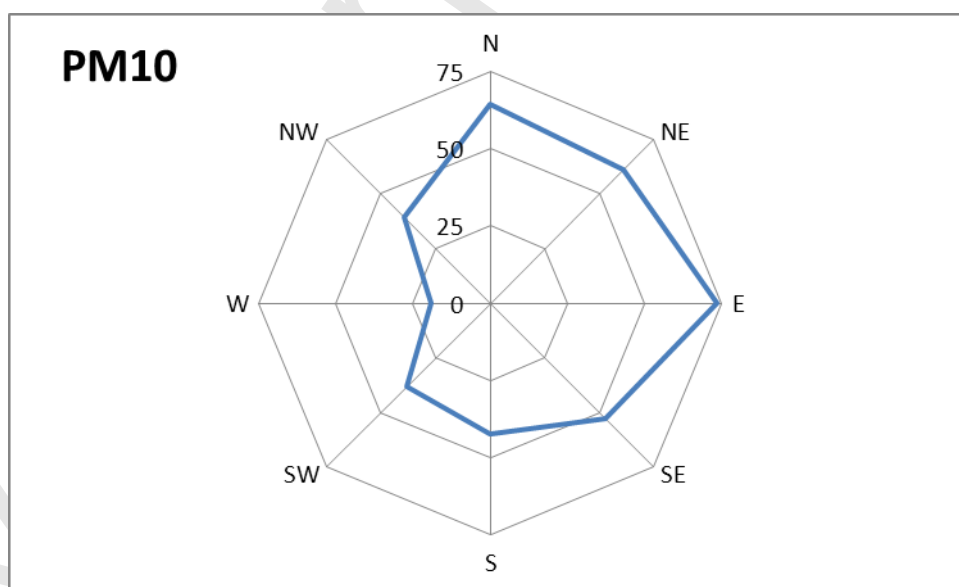


Διάγραμμα 4: Συμμετοχή λεπτόκοκκων σωματιδίων PM_{2.5} στη μάζα των PM₁₀. Κυμάνθηκε από 86% μέχρι 97%..

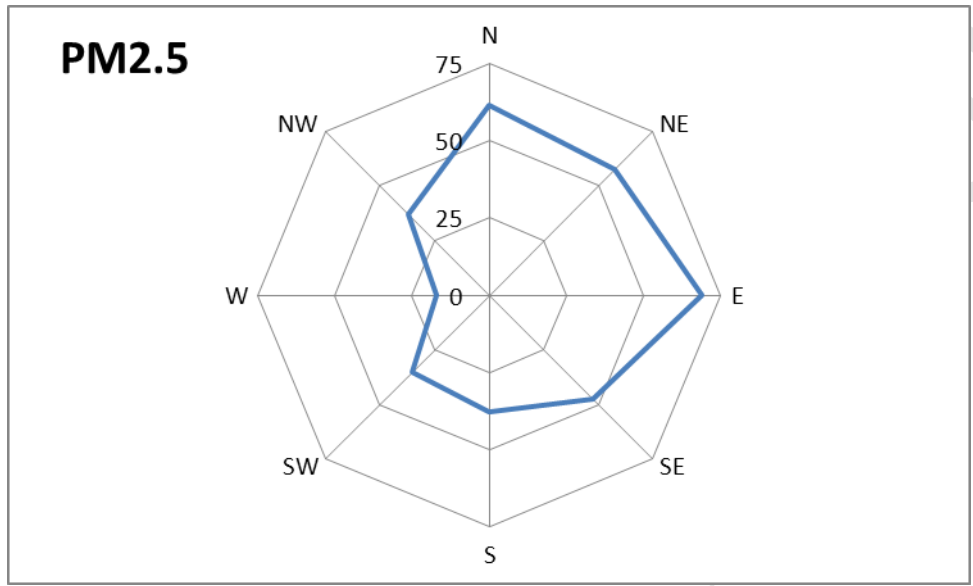


Διάγραμμα 5: Συμμετοχή υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων PM₁ στη μάζα των PM₁₀. Κυμάνθηκε από 83% μέχρι 97%.

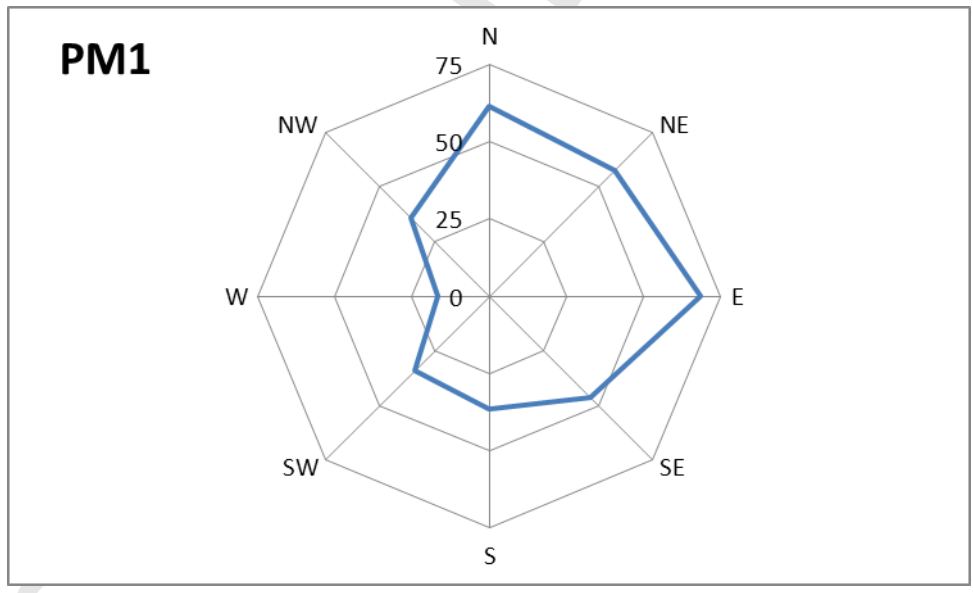
10.1.3. Επίδραση ανέμου στα καταγραφόμενα επίπεδα



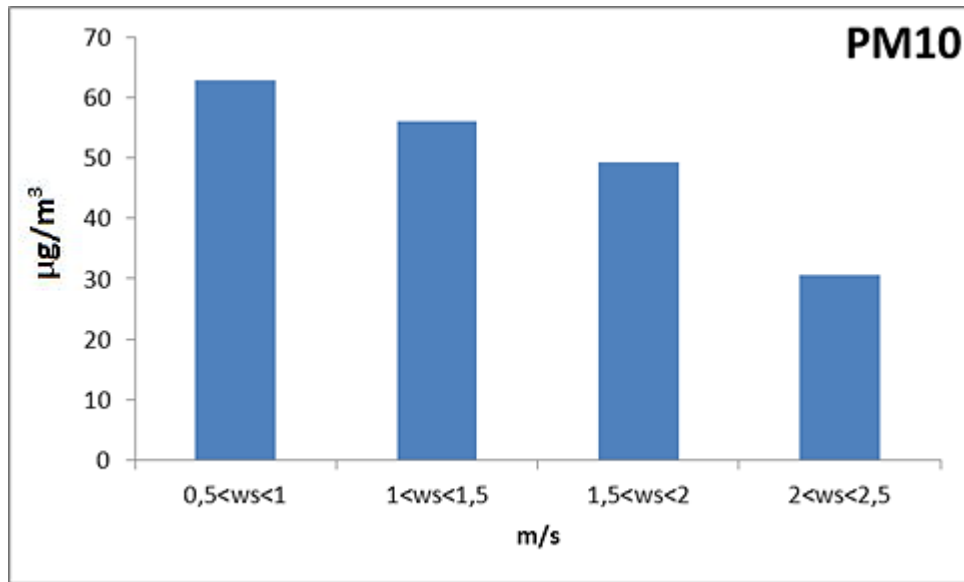
Διάγραμμα 6: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀ ανά διεύθυνση ανέμου.



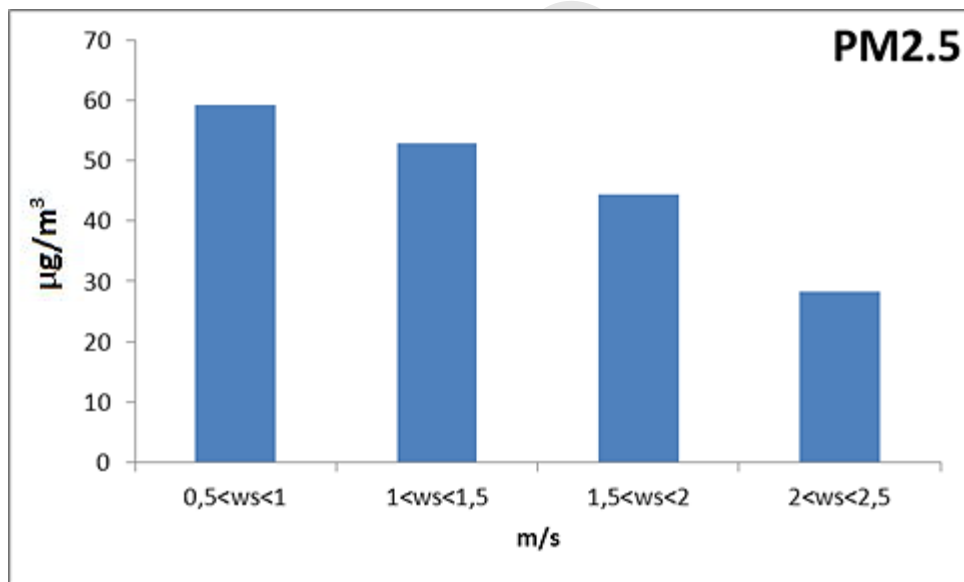
Διάγραμμα 7: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5} ανά διεύθυνση ανέμου.



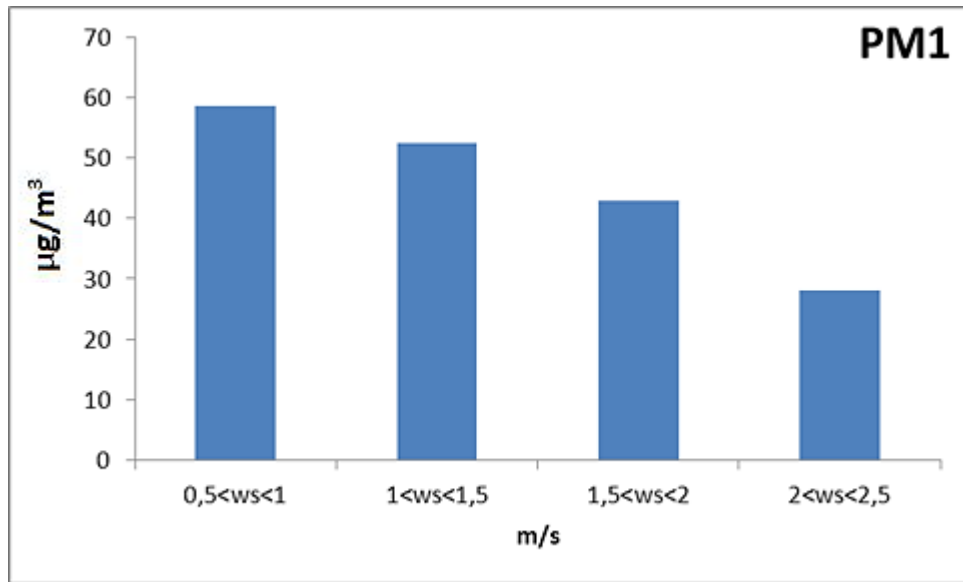
Διάγραμμα 8: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM₁ ανά διεύθυνση ανέμου.



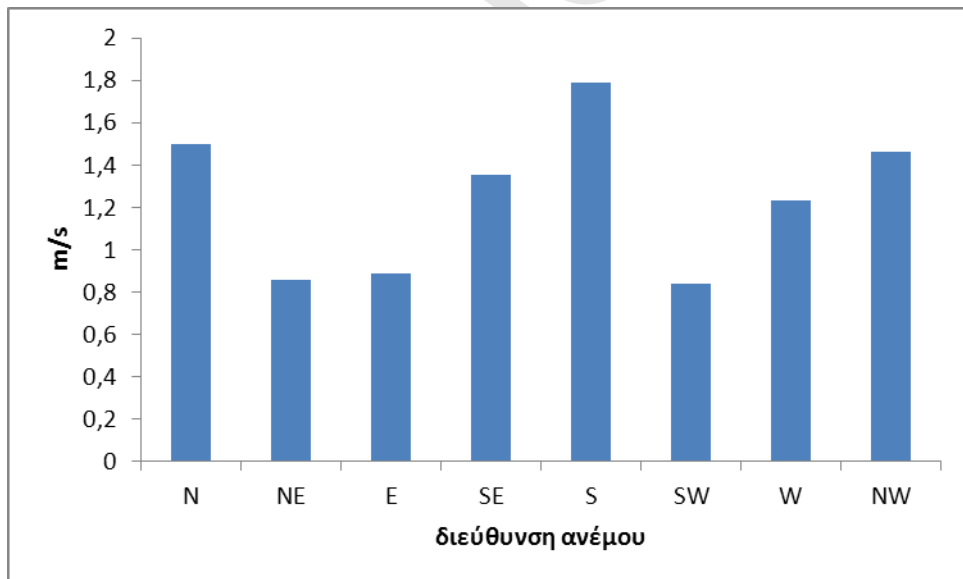
Διάγραμμα 9: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (ws).



Διάγραμμα 10: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5} συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (ws).

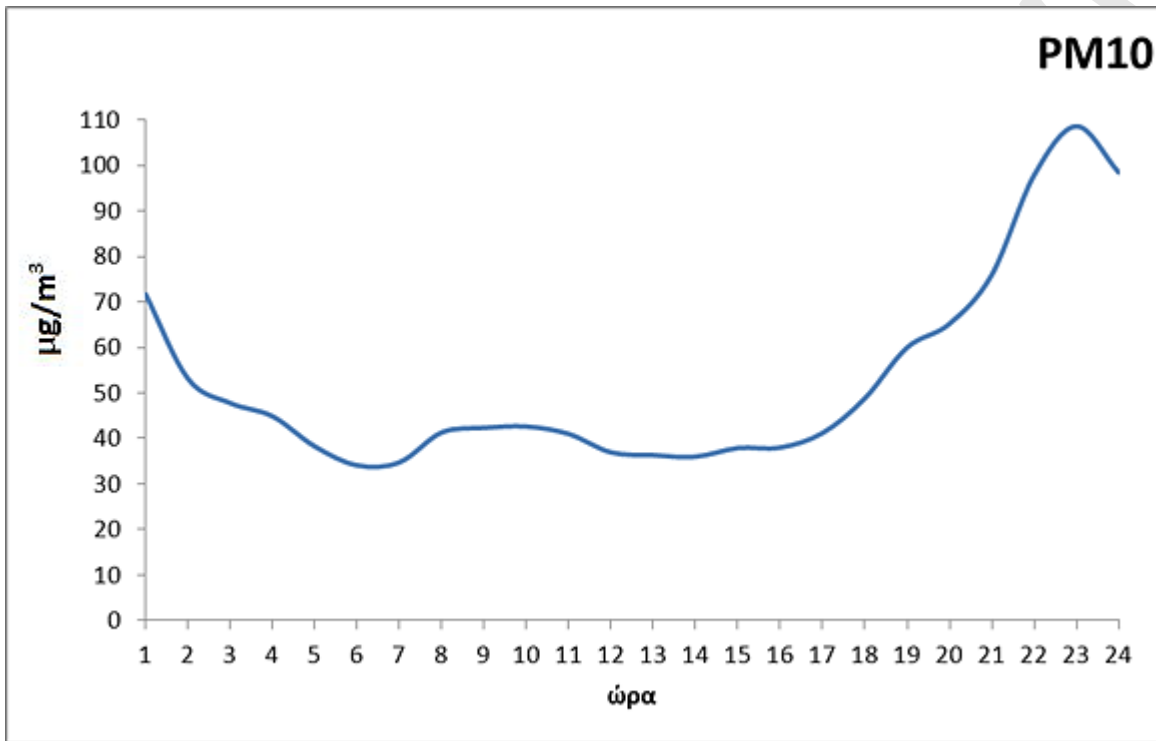


Διάγραμμα 11: Μέση συγκέντρωση σωματιδίων PM₁ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (ws).

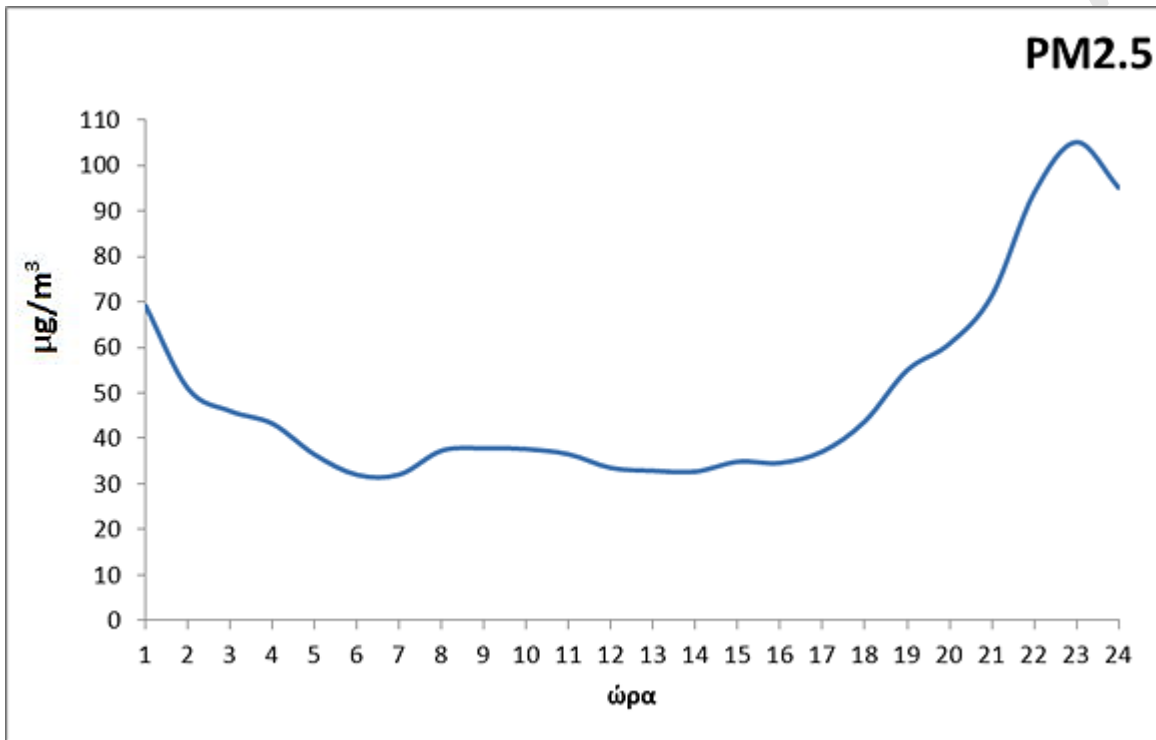


Διάγραμμα 12: Μέση ταχύτητα ανέμου ανά διεύθυνση.

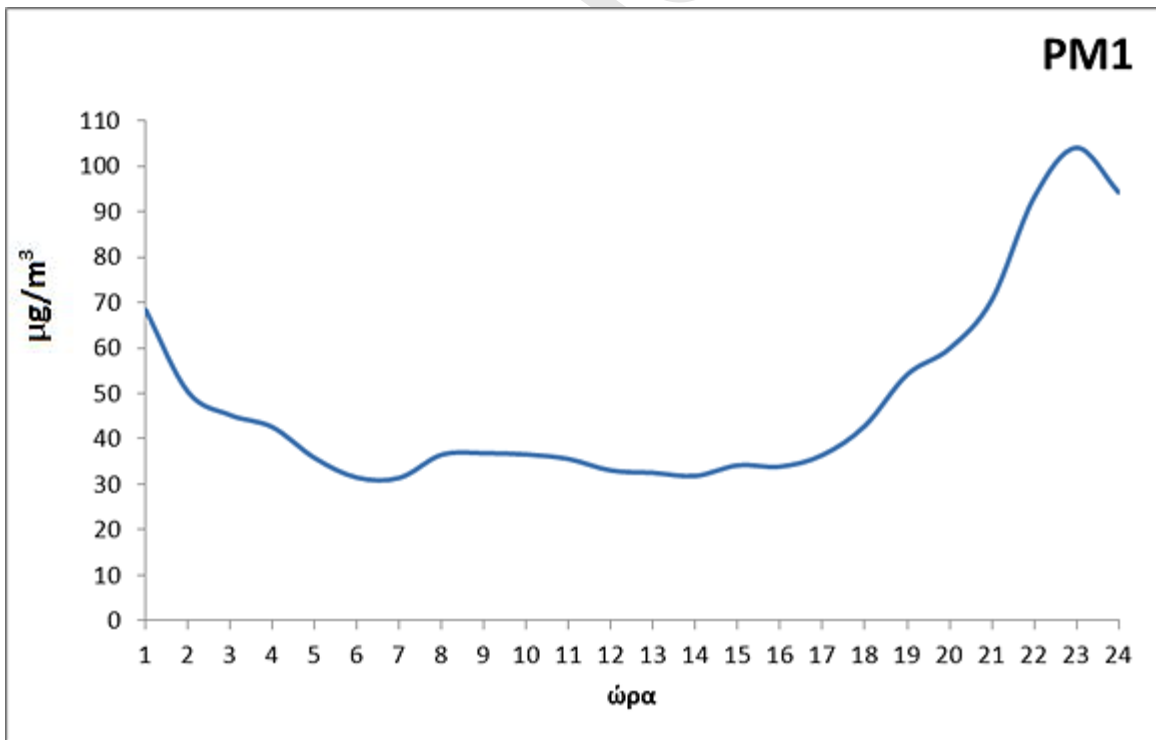
10.1.4. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση



Διάγραμμα 13: Μέση ωριαία συγκέντρωση PM₁₀.

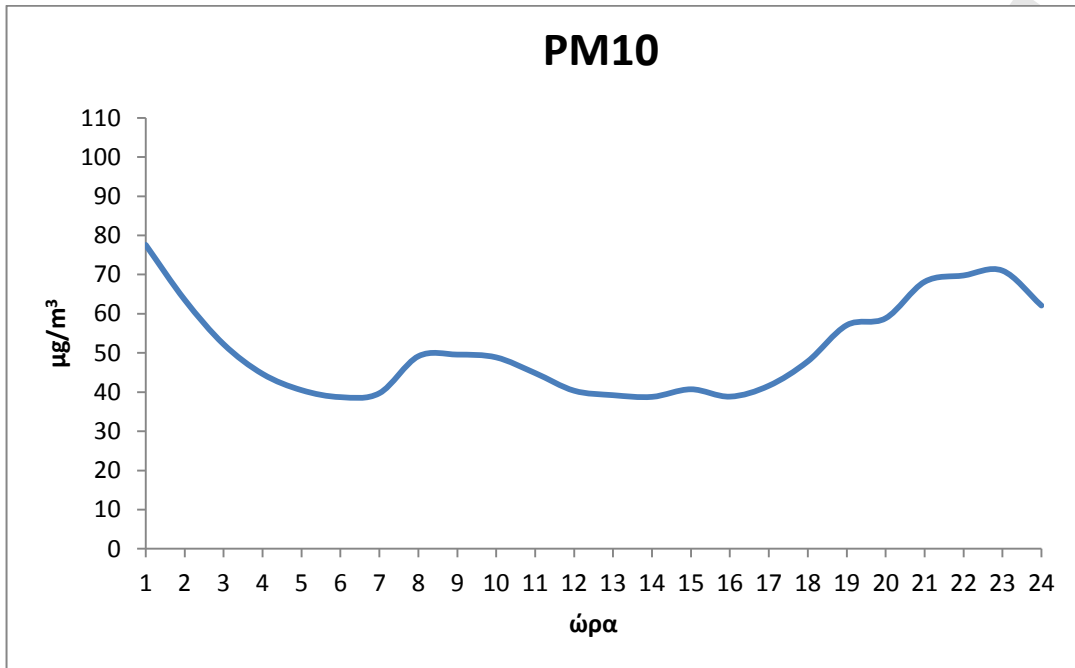


Διάγραμμα 14: Μέση ωριαία συγκέντρωση PM_{2.5}.



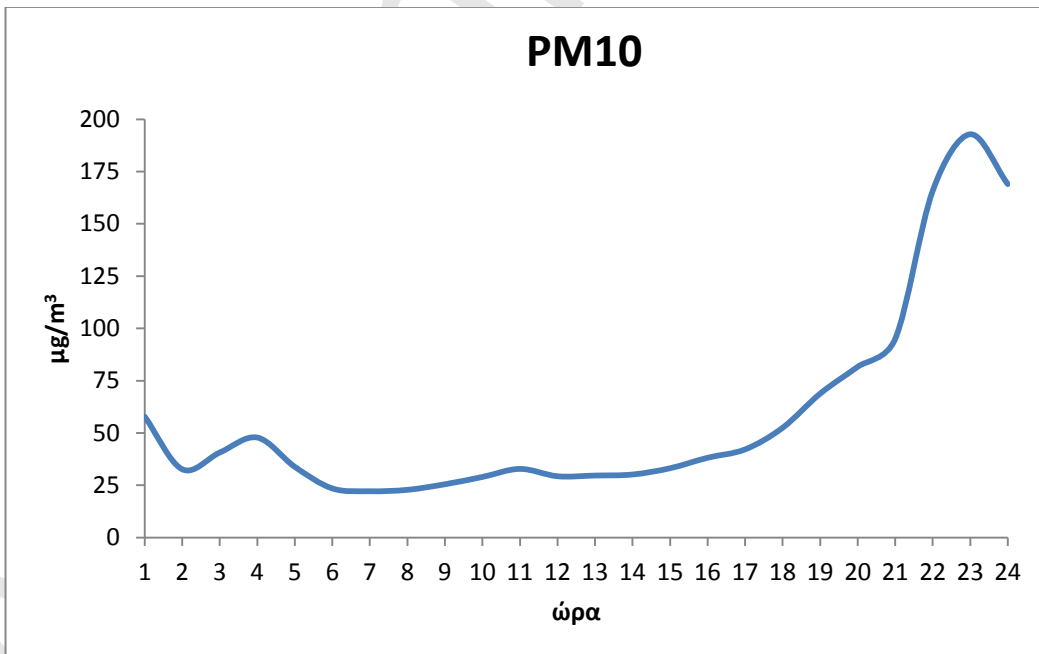
Διάγραμμα 15: Μέση ωριαία συγκέντρωση PM₁.

10.1.5. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ εκτός Κυριακών



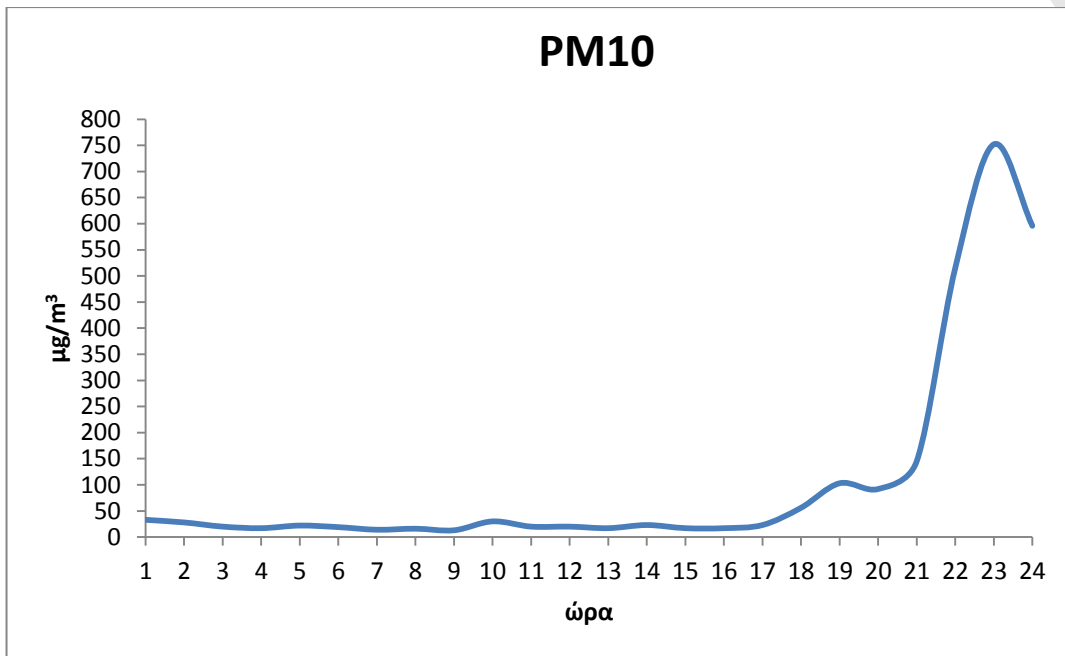
Διάγραμμα 16: Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ εκτός Κυριακών.

10.1.6. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ Κυριακών

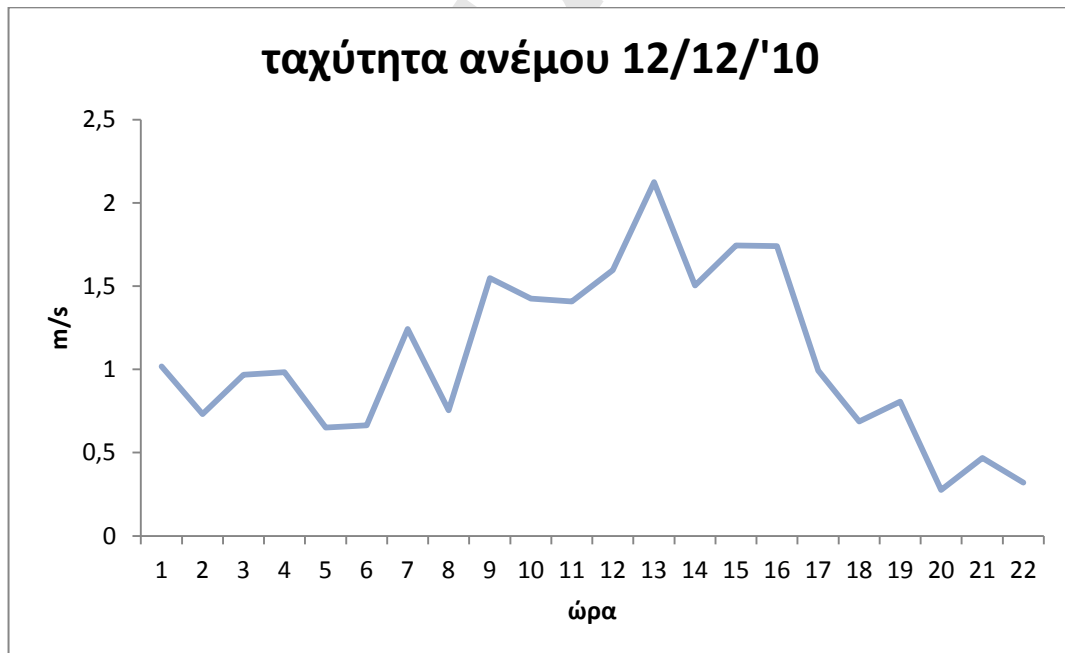


Διάγραμμα 17: Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ Κυριακών.

10.1.7. Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ την Κυριακή 12/12/'10



Διάγραμμα 18: Μέση ωριαία εξωτερική συγκέντρωση PM₁₀ την Κυριακή 12/12/'10.



Διάγραμμα 19: Μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου στις 12/12/'10. Ο αριθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ ταχύτητας ανέμου και συγκέντρωσης PM₁₀ είναι -0.58.

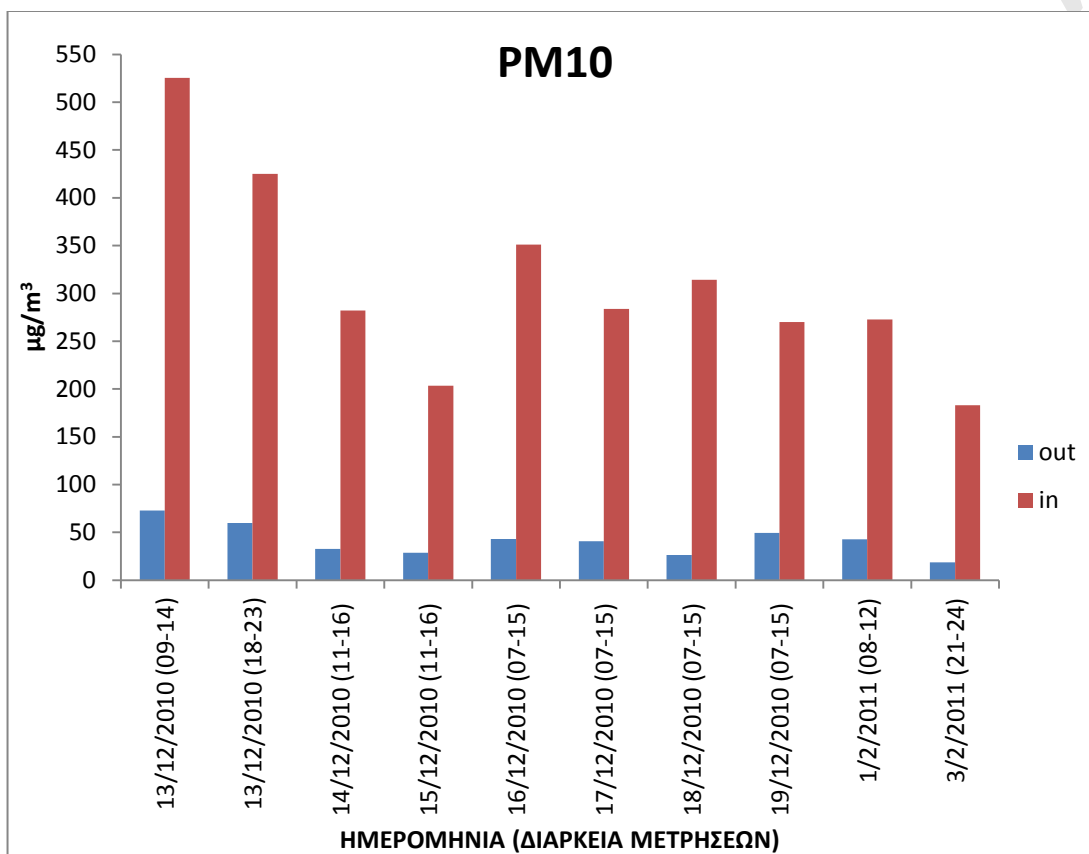
10.1.8. Εσωτερικές/εξωτερικές συγκεντρώσεις

Πίνακας 4: Μέσες τιμές εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και λόγος των εσωτερικών προς των εξωτερικών (I/O). Δίπλα από την ημερομηνία της κάθε μέτρησης βλέπουμε και την χρονική διάρκεια της.

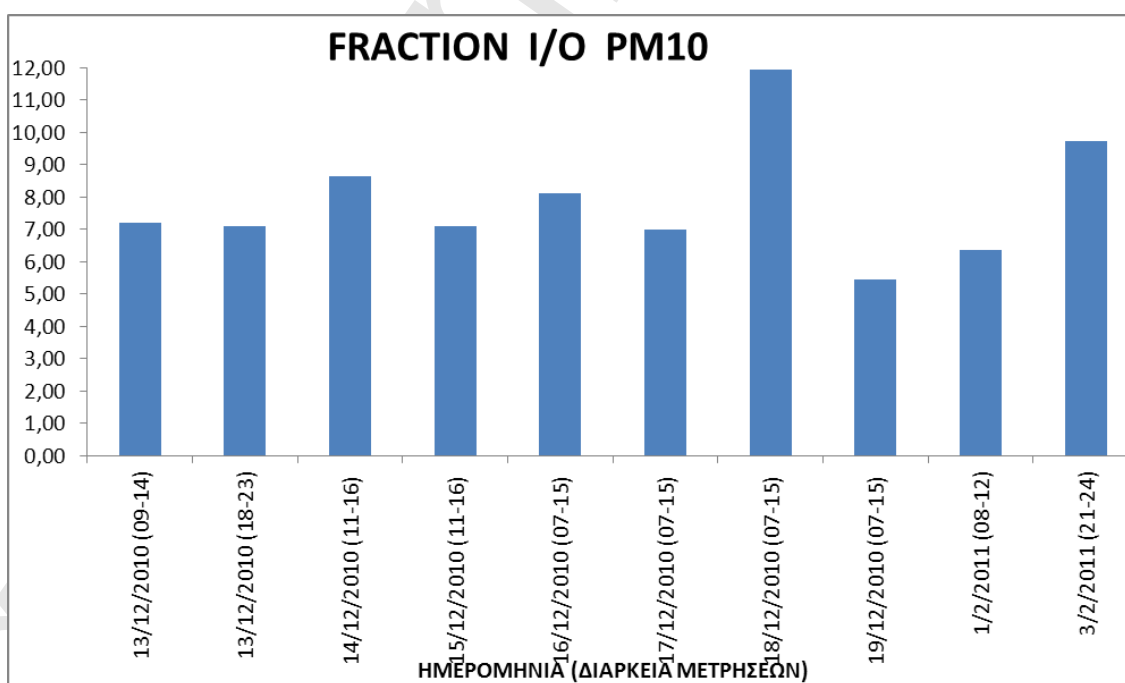
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			PM1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	out	in	I/O	out	in	I/O	out	in	I/O
13/12/'10 (09-14)	73.00	525.50	7.20	66.00	518.55	7.86	64.80	517.00	7.98
13/12/'10 (18-23)	60.00	425.00	7.08	58.00	420.00	7.24	58.10	419.00	7.21
14/12/'10 (11-16)	32.60	282.10	8.65	27.20	277.00	10.18	26.80	276.50	10.32
15/12/'10 (11-16)	28.70	203.50	7.09	26.80	200.20	7.47	26.70	199.70	7.48
16/12/'10 (07-15)	43.20	350.93	8.12	39.73	343.40	8.64	39.27	342.67	8.73
17/12/'10 (07-15)	40.65	283.62	6.98	34.94	272.92	7.81	34.35	271.77	7.91
18/12/'10 (07-15)	26.33	314.20	11.93	23.67	309.53	13.08	23.27	308.73	13.27
19/12/'10 (07-15)	49.53	270.20	5.45	44.20	261.80	5.92	42.53	260.67	6.13
1/2/'11 (08-12)	42.86	272.67	6.36	39.43	266.11	6.75	39.14	265.22	6.78
3/2/'11 (21-24)	18.83	183.17	9.73	18.50	181.33	9.80	18.50	180.83	9.77
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	41,57	311,09	7,86	37,85	305,09	8,48	37,35	304,21	8,56

Πίνακας 5: Μετεωρολογικά δεδομένα (ΜΕΤΕΟΝΕΤ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων-ΕΜΠ).

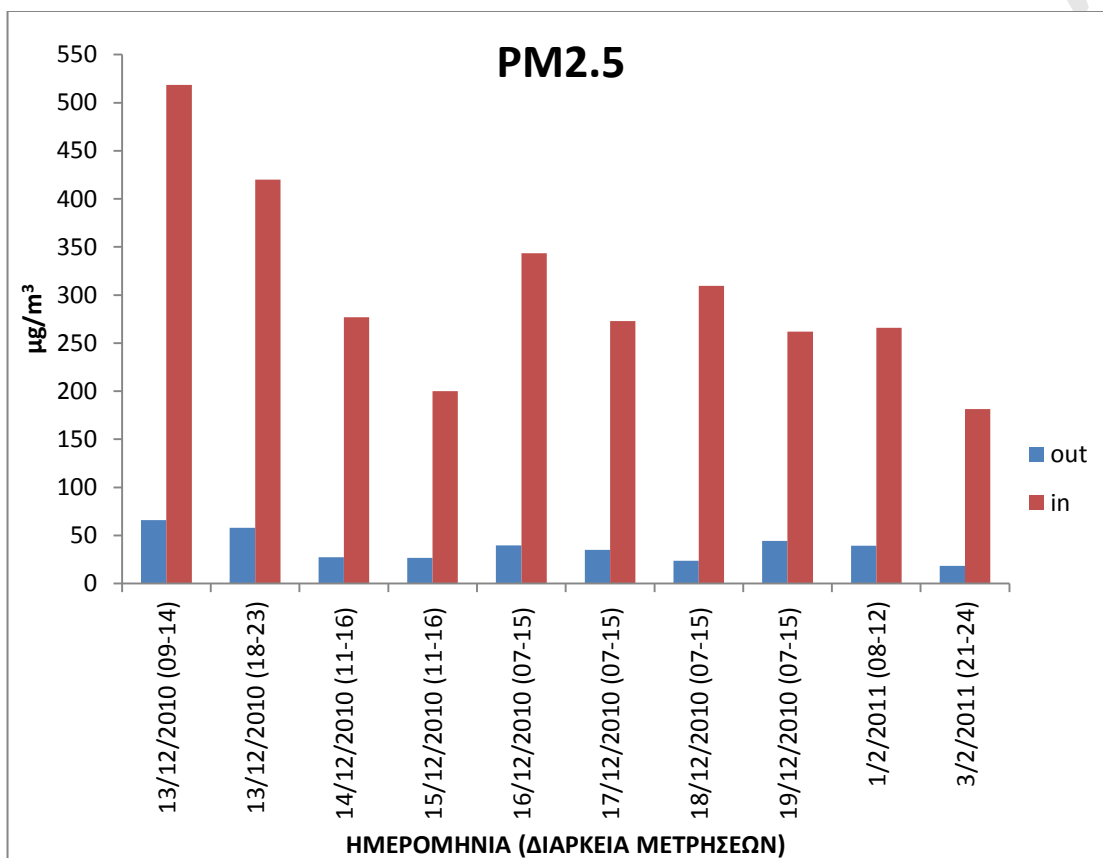
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (w/m^2)
13/12/2010	NE	0.75	4.20	86.64	15.35	31.81
14/12/2010	E	0.95	0.40	76.83	13.81	64.42
15/12/2010	SE	1.14	8.00	90.04	8.65	17.05
16/12/2010	NE	1.05	8.60	91.46	9.42	19.47
17/12/2010	SE	0.88	0.40	79.56	10.16	50.34
18/12/2010	S	2.48	0.00	66.85	14.81	66.82
19/12/2010	E	0.91	0.00	81.70	14.62	25.35
1/2/2011	N	2.08	0.00	63.31	9.12	44.01
2/2/2011	NE	1.46	0.00	67.68	11.53	47.55



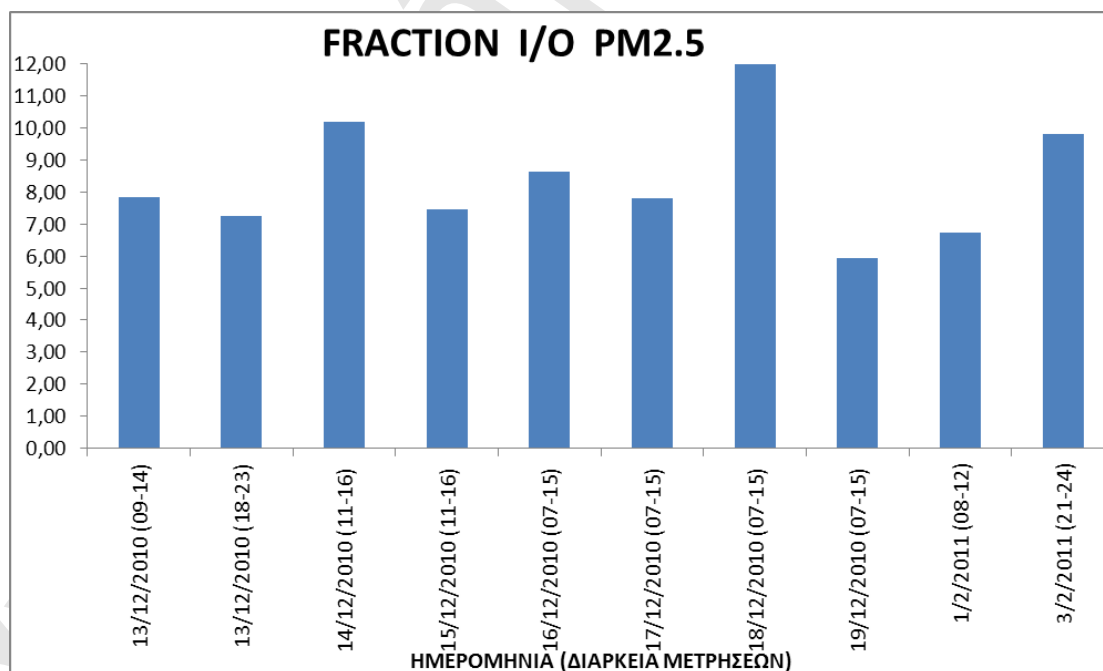
Διάγραμμα 20: Μέση εσωτερική και εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀ ανά διάρκεια μετρήσεων.



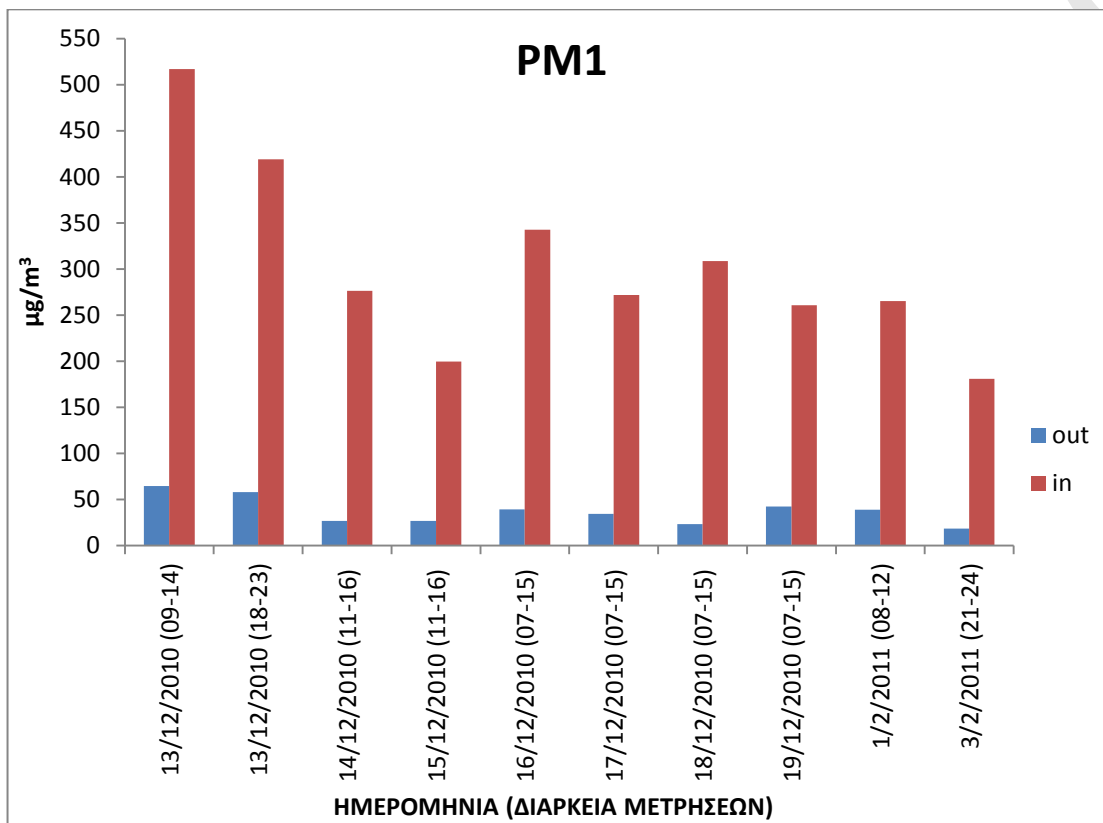
Διάγραμμα 21: Λόγος εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων σωματιδίων PM₁₀ ανά διάρκεια μετρήσεων.



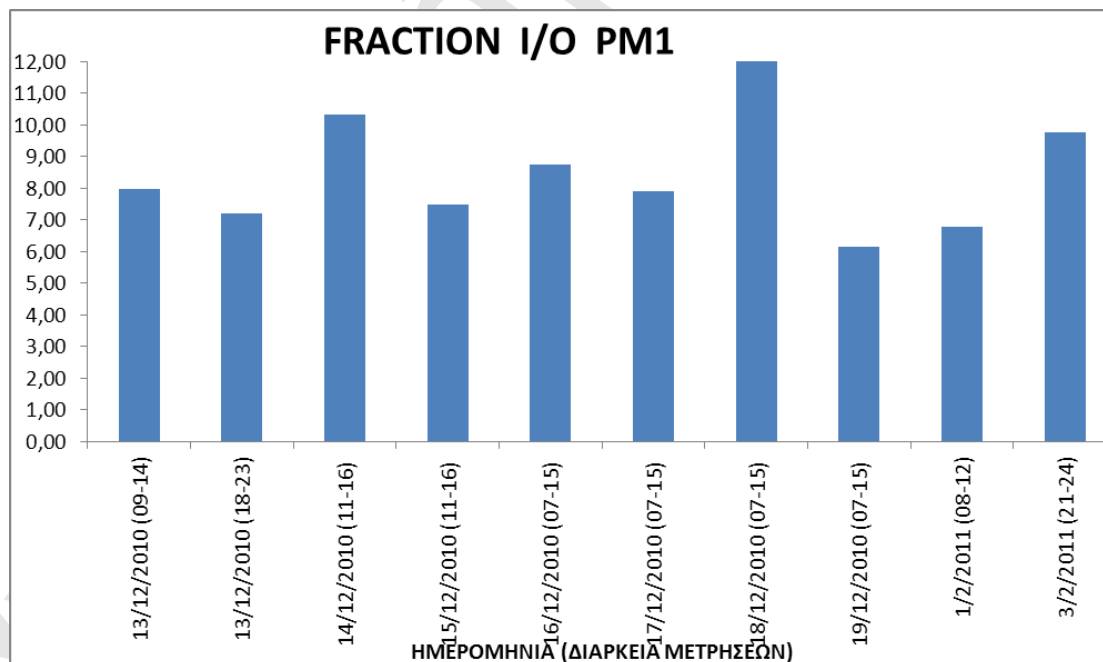
Διάγραμμα 22: Μέση εσωτερική και εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5} ανά διάρκεια μετρήσεων.



Διάγραμμα 23: Λόγος εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων σωματιδίων PM_{2.5} ανά διάρκεια μετρήσεων.

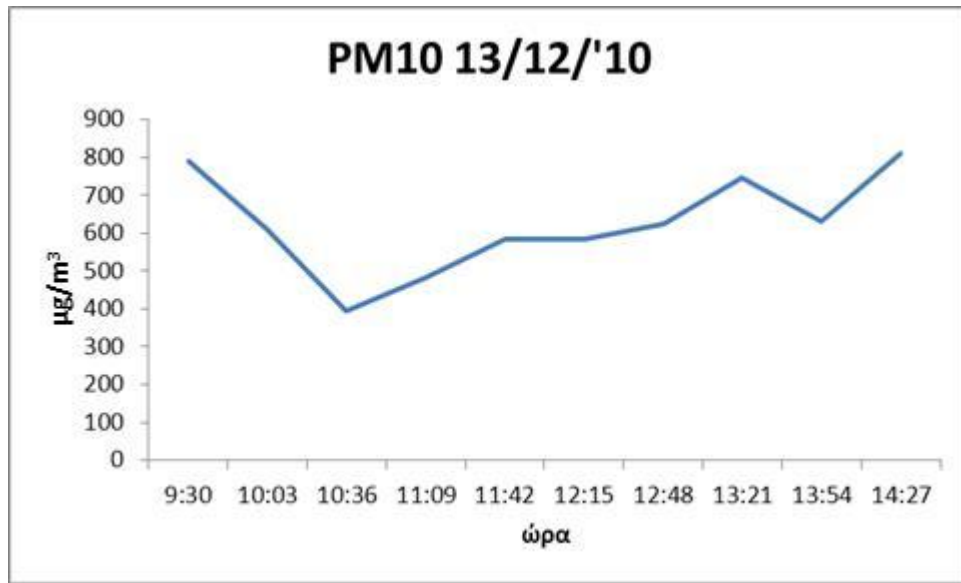


Διάγραμμα 24: Μέση εσωτερική και εξωτερική συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5} ανά διάρκεια μετρήσεων.

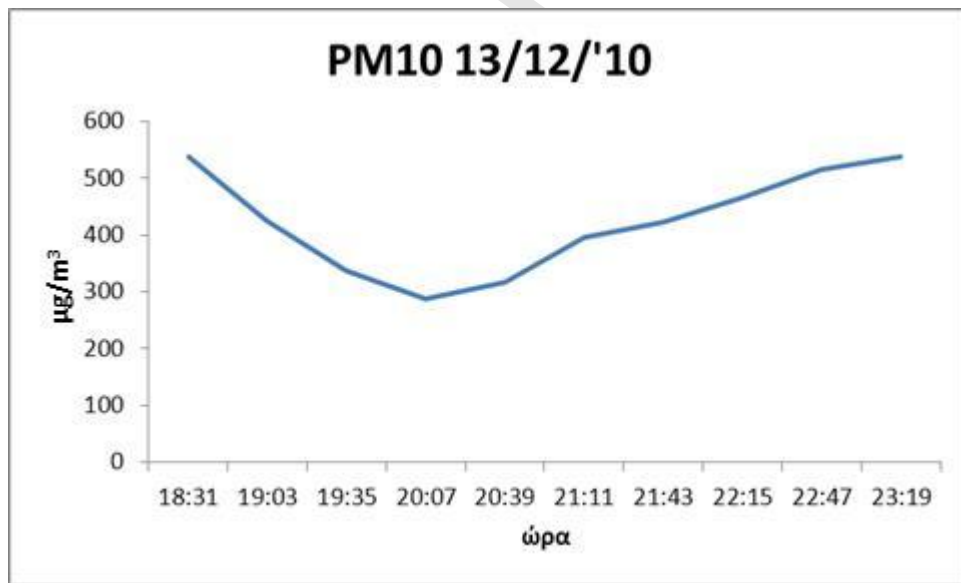


Διάγραμμα 25: Λόγος εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων σωματιδίων PM₁ ανά διάρκεια μετρήσεων.

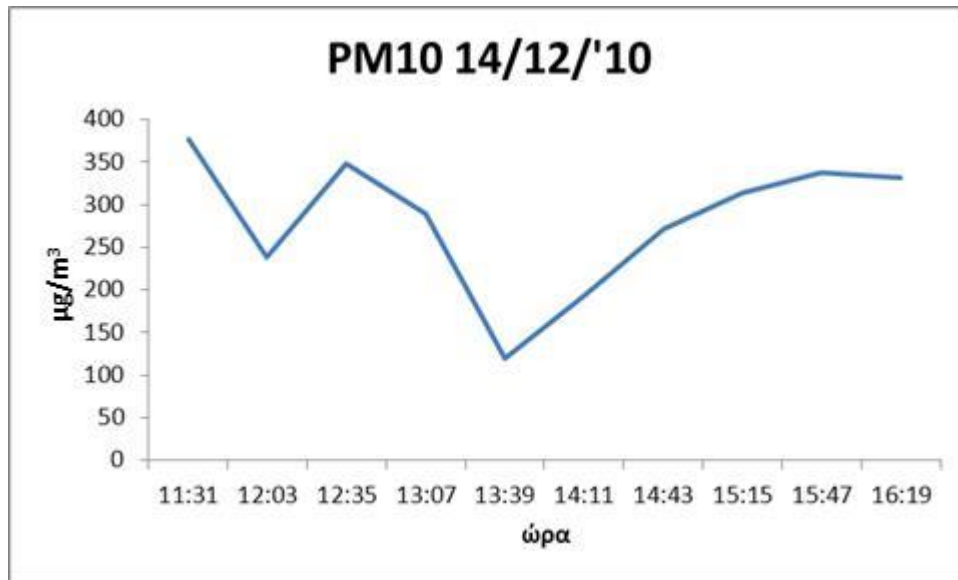
10.1.9. Εσωτερικές συγκεντρώσεις



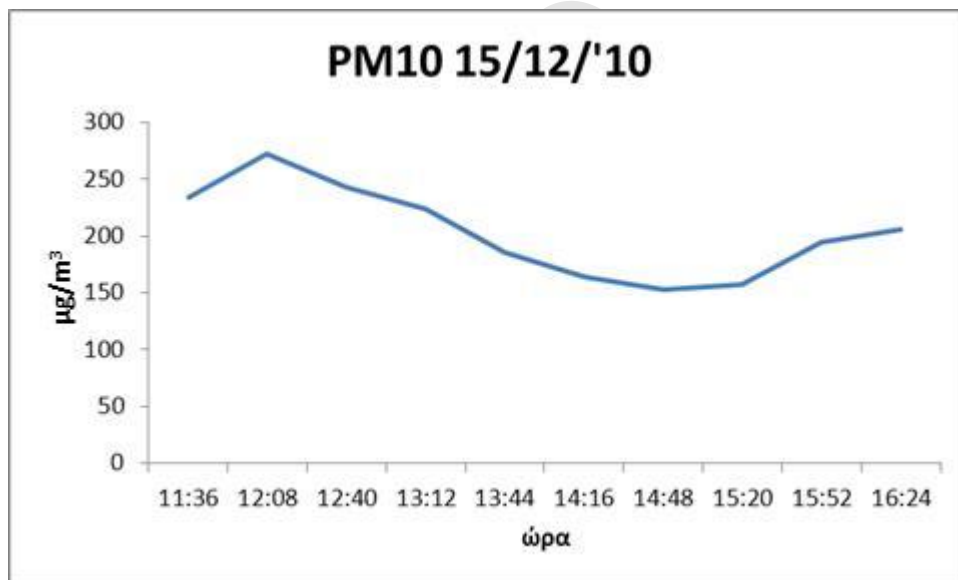
Διάγραμμα 26: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 5-ωρη μέτρηση.



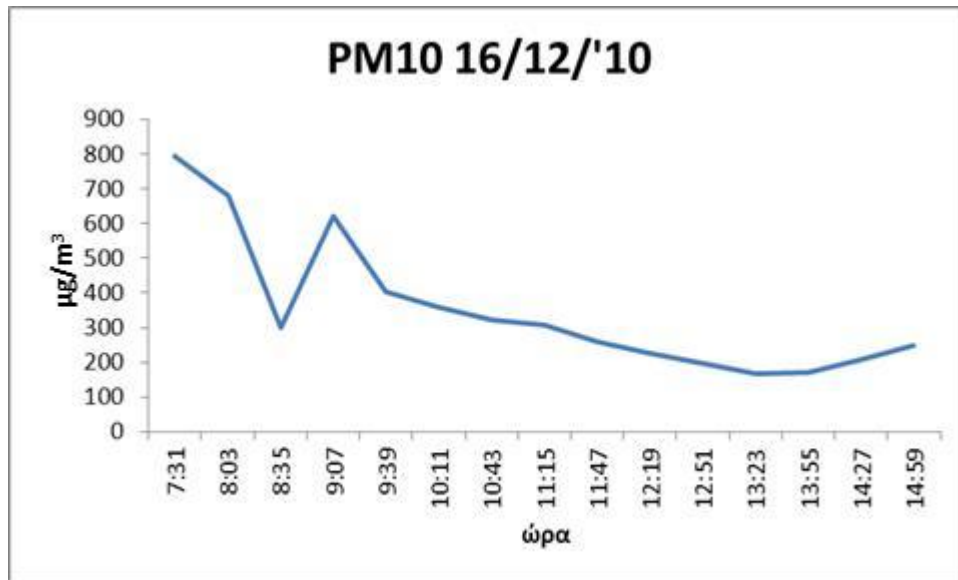
Διάγραμμα 27: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 5-ωρη μέτρηση.



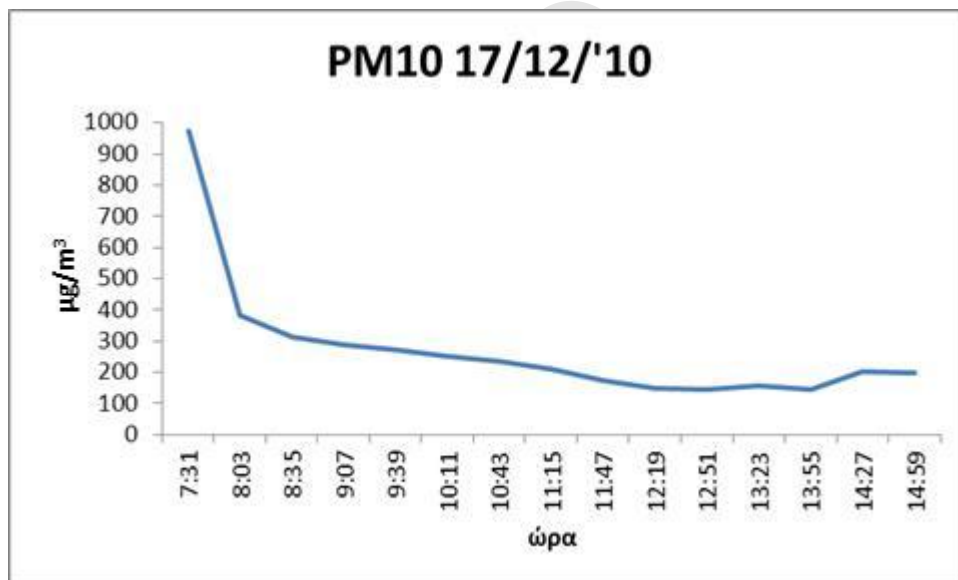
Διάγραμμα 28: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM_{10} σε 5-ωρη μέτρηση.



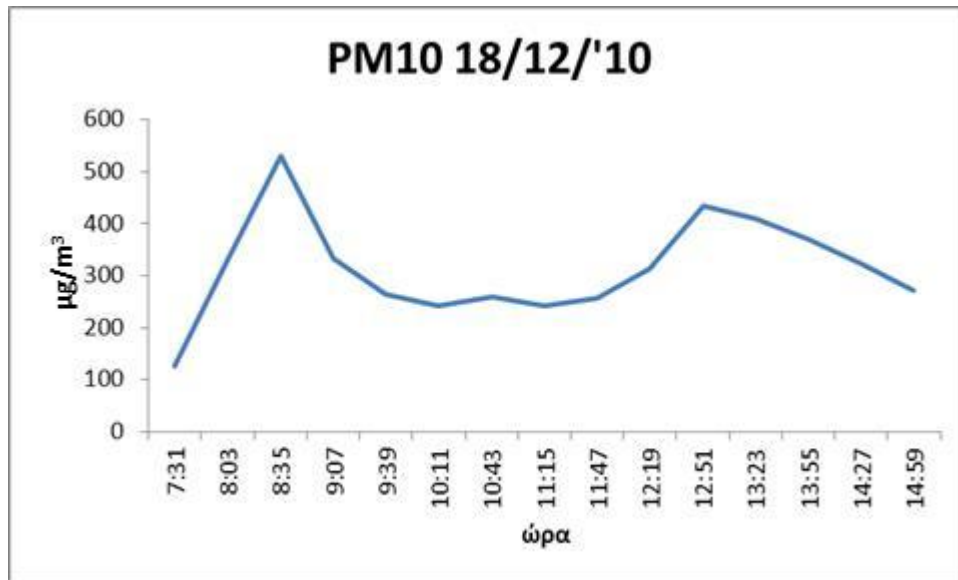
Διάγραμμα 29: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM_{10} σε 5-ωρη μέτρηση.



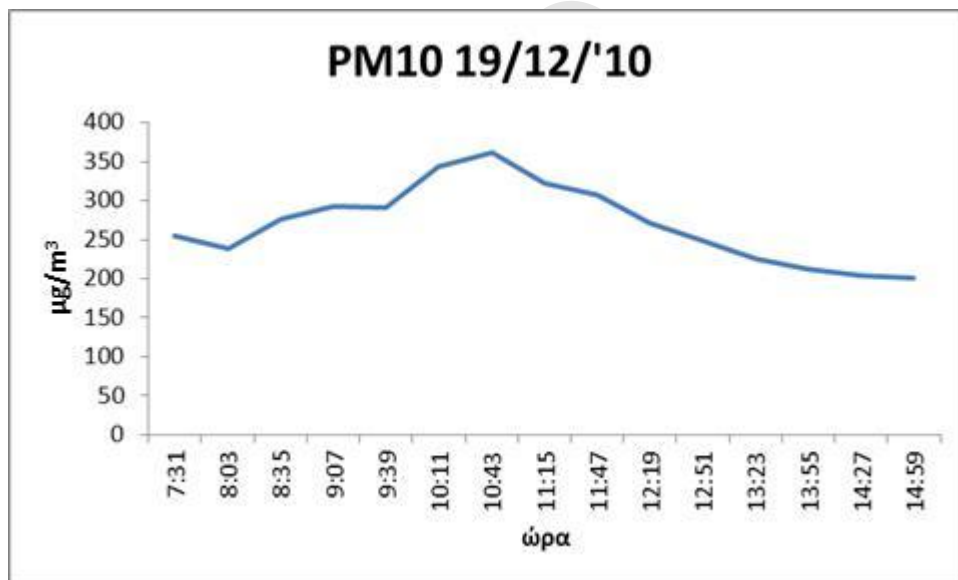
Διάγραμμα 30: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 8-ωρη μέτρηση.



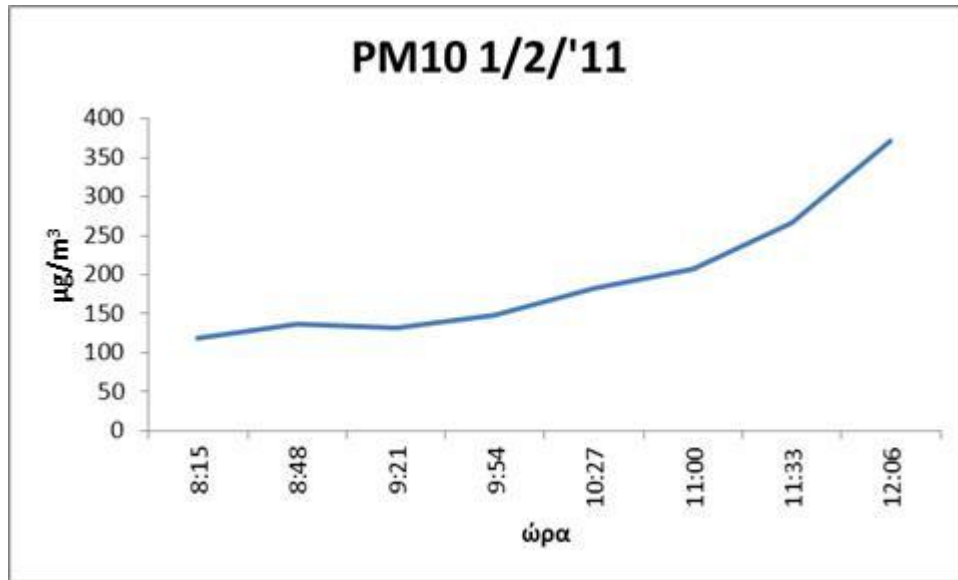
Διάγραμμα 31: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 8-ωρη μέτρηση.



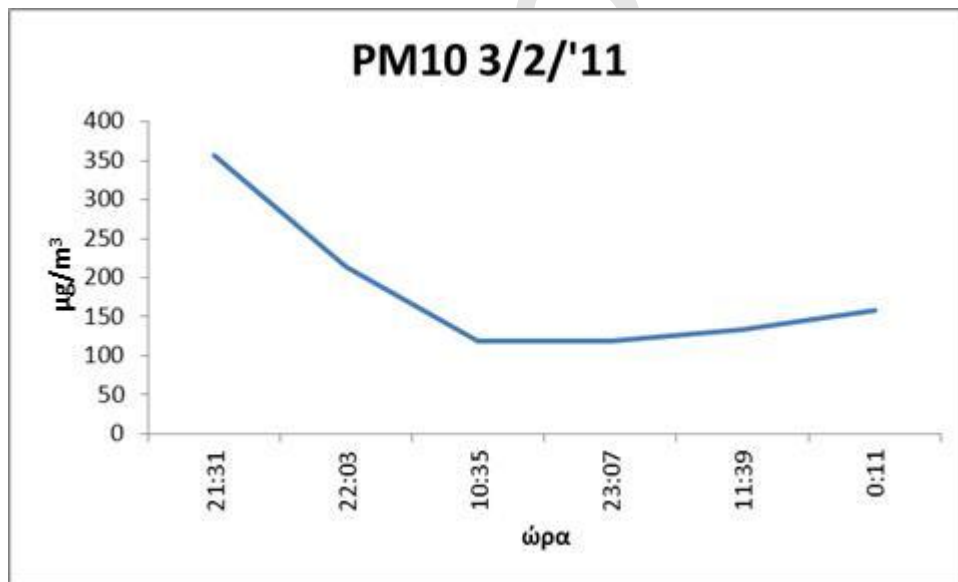
Διάγραμμα 32: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 8-ωρη μέτρηση.



Διάγραμμα 33: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 8-ωρη μέτρηση.

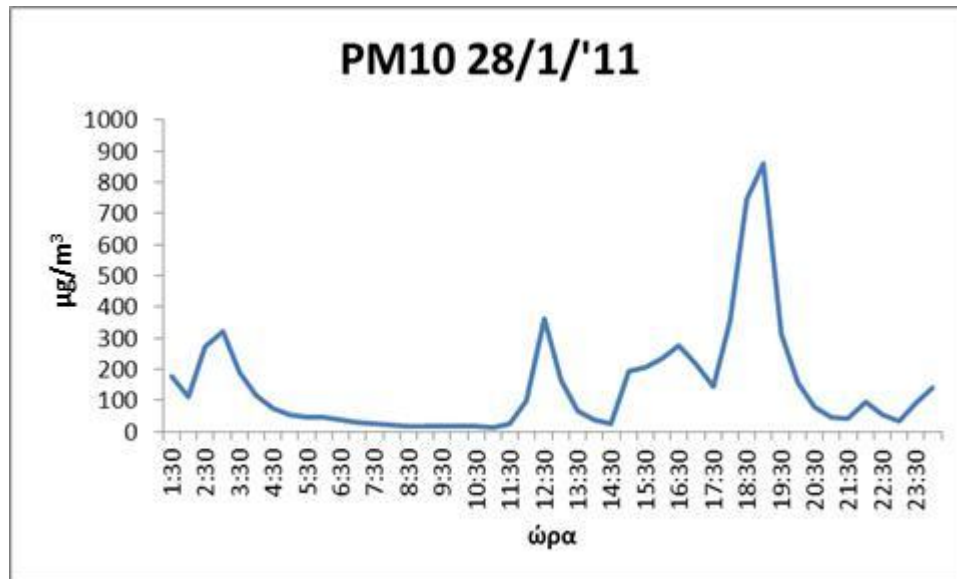


Διάγραμμα 34: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 4-ωρη μέτρηση.



Διάγραμμα 35: Μέση 15-λεπτη συγκέντρωση PM₁₀ σε 3-ωρη μέτρηση.

10.1.10. Μέση μισάωρη εσωτερική συγκέντρωση στις 28/1/'11



Διάγραμμα 36: Μέση μισάωρη συγκέντρωση PM₁₀ σε 24-ωρη μέτρηση. Μέση τιμή=145.61.

10.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΣΤΑΘΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία σταθμικής μεθόδου.

	Μέση τιμή ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ελάχιστη-Μέγιστη συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Τυπική απόκλιση	Αριθμός/Ποσοστό Υπερβάσεων
PM ₁₀ out	34.68	19.27-69.65	15.65	4 (N=16) 25%
PM _{2.5} out	24.57	15.08-66.65	15.87	1 (N=9) 11%
PM ₁₀ in	66.68	25.31-154.48	34.09	9 (N=16) 56%
PM ₁₀ I/O	1.92			
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.70			

Πίνακας 7: Μετεωρολογικά δεδομένα (ΜΕΤΕΟΝΕΤ, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων-ΕΜΠ).

ΗΜ/ΝΙΑ	ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ	ΜΕΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (m/s)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (w/m ²)	ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ (min)
20/1/2011	SE	0.39	4.47	0.00	84.66	12.10	15.50	55.10	366.00
21/1/2011	NE	0.62	8.05	2.20	90.30	12.40	15.10	56.22	155.00
22/1/2011	S	1.72	8.05	9.80	84.37	13.80	16.60	43.56	78.00
23/1/2011	S	1.68	6.69	0.20	74.27	13.10	15.00	51.91	158.00
24/1/2011	SW	0.84	4.92	9.80	84.97	10.80	13.20	45.09	430.00
25/1/2011	E	1.07	6.69	1.80	84.06	7.10	8.60	27.63	343.00
27/1/2011	NE	0.67	4.03	0.20	75.65	7.60	12.20	52.27	412.00
28/1/2011	NE	1.92	10.28	10.40	85.00	9.40	11.40	30.80	1.00
29/1/2011	NE	2.22	10.72	0.00	78.00	7.60	8.50	44.22	25.00
31/1/2011	N	1.27	5.36	0.00	76.37	8.10	10.40	47.53	110.00
1/2/2011	N	1.56	8.05	0.00	71.67	6.80	8.80	47.22	306.00
2/2/2011	NW	1.46	8.05	0.00	67.68	7.70	11.40	47.55	450.00
3/2/2011	NE	2.02	10.28	52.00	91.41	7.70	8.60	10.36	0.00
4/2/2011	N	2.88	9.83	4.40	76.03	7.30	8.20	34.81	0.00
5/2/2011	NE	1.33	9.38	0.00	60.67	8.90	13.30	43.77	517.00
6/2/2011	N	0.71	2.72	0.00	67.13	10.50	16.90	43.20	540.00

Πίνακας 8: Αριθμός γραμμικής συσχέτισης μεταξύ συγκέντρωσης σωματιδίων και μετεωρολογικών δεδομένων.

	Μέση ταχύτητα ανέμου	Μέγιστη Ταχύτητα ανέμου	Βροχόπτωση	Σχετική υγρασία	Μέση θερμοκρασία	Μέγιστη θερμοκρασία	Ηλιακή ακτινοβολία	Ηλιοφάνεια
PM ₁₀	-0.44	-0.55	-0.35	-0.45	-0.04	0.23	0.29	0.47
PM _{2.5}	-0.77	-0.86	-0.14	-0.41	0.07	0.24	0.17	0.64

10.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ (D) ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΙΚΗΣ (G) ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

Πίνακας 9: Μέση τιμή του λόγου συγκέντρωσης των 2 μεθόδων D/G (τιμή αναφοράς).

	D		G		D/G
	Μέση τιμή (μg/m ³)	Ελάχιστη-Μέγιστη συγκέντρωση (μg/m ³)	Μέση τιμή (μg/m ³)	Ελάχιστη-Μέγιστη συγκέντρωση (μg/m ³)	
PM ₁₀ out	42.83	31.00-80.00	34.68	19.27-69.65	1.23
PM _{2.5} out	40.11	29.00-74.00	24.57	15.08-66.65	1.63
PM ₁₀ in	145.61	145.61	66.68	25.31-154.48	2.18

10.4. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

10.4.1. Αυτόματη δειγματοληψία

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέσων 24-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και PM_1 , από το όργανο συνεχούς καταγραφής Dust Trak DRX 8533, διάρκειας 22 ημερών τη περίοδο 5/12/2010 έως 6/2/2011. Η συγκέντρωση των PM_{10} κυμάνθηκαν από 19.17-109.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 51.56 (± 20.81) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της Ε.Ε. τις 11 από τις 22 ημέρες (ποσοστό 50%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συγκέντρωση των $PM_{2.5}$ κυμάνθηκαν από 17.13-106.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 48.08 (± 19.96) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της US-EPA τις 15 από τις 22 ημέρες (ποσοστό 68%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συγκέντρωση των PM_1 κυμάνθηκαν από 16.58-106.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 47.48 (± 20.06) $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Από τα διαγράμματα 4 και 5 παρατηρούμε ότι η συμμετοχή των $PM_{2.5}$ στη μάζα των PM_{10} κυμάνθηκε από 86-97% ενώ των PM_1 από 83-97%.

Από το ροδόγραμμα ανέμου PM_{10} (επίδραση διεύθυνσης ανέμου στα καταγραφόμενα επίπεδα), του διαγράμματος 6, διαπιστώνεται ότι: οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις PM_{10} καταγράφηκαν κατά τις ανατολικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις του ανέμου ενώ τα καταγραφόμενα επίπεδα ήταν σημαντικά χαμηλότερα κατά τις δυτικές διευθύνσεις. Η διαπίστωση αυτή σχετίζεται άμεσα με την διεύθυνση/προσανατολισμό του σημείου δειγματοληψίας (ανατολική-βορειοανατολική). Αντίστοιχες διαπιστώσεις παρατηρούνται και από τα ροδογράμματα $PM_{2.5}$ και PM_1 (διαγράμματα 7 και 8 αντίστοιχα). Επιπλέον από το διάγραμμα 12 είναι ενδεικτικές οι χαμηλές ταχύτητες του ανέμου κατά τις ανατολικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις. Επίσης από τα διαγράμματα 9,10,11 διαπιστώνεται η χαρακτηριστική μείωση της συγκέντρωσης των σωματιδίων με την ταχύτητα του ανέμου. Ακόμα από το διάγραμμα 12 είναι ενδεικτικές οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου κατά τις ανατολικές-βορειοανατολικές διευθύνσεις.

Στο διάγραμμα 16 παρουσιάζεται ένας τυπικός ημερήσιος κύκλος, μέσος εβδομαδιαίος, εκτός των Κυριακών. Εντοπίζονται δύο χαρακτηριστικά μέγιστα, το πρώτο πρωινό 08:00-11:00, χαρακτηριστικό της πρωινής κίνησης και των δραστηριοτήτων του πληθυσμού. Το δεύτερο πιο σημαντικό μέγιστο παρουσιάζεται τις βραδινές ώρες 21:00-24:00 και όπου πιθανόν συμβάλλει και η λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης πέρα από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Οι ημερήσιοι κύκλοι των Κυριακών (διάγραμμα 17) έχουν ένα χαρακτηριστικό σχήμα τελείως διαφορετικό των υπόλοιπων ημερών. Παρουσιάζεται ένα μέγιστο πρωινό, μετατοπισμένο χρονικά μετά τις 09:00 το πρωί και ένα πολύ μεγαλύτερο βραδινό μέγιστο. Ειδικότερα για την Κυριακή 12/12/2010 παρατηρείται ένα μόνο μέγιστο βραδινό (διάγραμμα 18) 20:00-23:00, υψηλότερο, που αποδίδεται σε κάποια πιθανή ειδική κατάσταση καύσης

(ίσως μικρή πυρκαγιά στην εγγύτατη περιοχή) που συνοδευόταν και με χαρακτηριστική οσμή καύσης.

Στον πίνακα 4, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και ο λόγος των εσωτερικών προς των εξωτερικών (I/O), σε μετρήσεις που έλαβαν χώρα για διάφορες ώρες και ημέρες την περίοδο 13/12/2010 έως 3/2/2011. Παρατηρείται ότι τα επίπεδα των εσωτερικών συγκεντρώσεων είναι πολύ μεγαλύτερα (περίπου 10-πλάσια των εξωτερικών). Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πρόσθετη έντονη εσωτερική πηγή που είναι το κάπνισμα. Στα διαγράμματα 26 έως 36 παρουσιάζονται εσωτερικές συγκεντρώσεις PM_{10} , για διάφορες ώρες και ημέρες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα υψηλές (κάπνισμα) και παρουσιάζουν μεγάλη τυπική απόκλιση.

10.4.2. Σταθμική δειγματοληψία

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μέσων 24-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων PM_{10} και $PM_{2.5}$, καθώς και εσωτερικών (indoor) PM_{10} , από τη σταθμική μέθοδο δειγματοληψίας, που πραγματοποιήθηκαν (16 και 9 μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο για τα PM_{10} και $PM_{2.5}$ αντιστοίχως και 16 μετρήσεις PM_{10} σε εσωτερικό χώρο) την περίοδο 20/1/2011 έως 6/2/2011. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις των PM_{10} κυμάνθηκαν από 19.27-69.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 34.68 (± 15.65) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της Ε.Ε. τις 4 από τις 16 ημέρες (ποσοστό 25%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ κυμάνθηκαν από 15.08-66.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 24.57 (± 15.87) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με τα ισχύοντα 24-ωρα πρότυπα της US-EPA τη 1 από τις 9 ημέρες (ποσοστό 11%) μετρήθηκαν συγκεντρώσεις πάνω από το επιτρεπτό όριο των 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM_{10} κυμάνθηκαν από 25.31-154.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με μέση τιμή (τυπική απόκλιση) 66.68 (± 34.09) $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Σε σχέση με το (εξωτερικό) επιτρεπτό όριο της Ε.Ε. των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τις 9 από τις 16 ημέρες των μετρήσεων (56%) είχαμε υπέρβαση του ορίου. Ο λόγος των εξωτερικών συγκεντρώσεων σωματιδίων $PM_{2.5}$ προς PM_{10} ($PM_{2.5}/PM_{10}$), βρέθηκε 0.70. Η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστική σε σημεία δειγματοληψίας που επηρεάζονται κυρίως από την κυκλοφορία οχημάτων, όπως παρατηρούνται και σε άλλα αστικά κέντρα. Ο λόγος PM_{10} I/O (indoor/outdoor) όπως αναμενότανε, λόγω της πρόσθετης έντονης πηγής στον εσωτερικό χώρο (κάπνισμα), είναι πάνω από την μονάδα (1.92).

Στον πίνακα 8 παρουσιάζεται η συσχέτιση των (εξωτερικών) συγκεντρώσεων με τα μετεωρολογικά δεδομένα: παρατηρείται πολύ καλή αρνητική συσχέτιση τόσο με τη μέγιστη όσο και με τη μέση ταχύτητα ανέμου όπως και με την βροχόπτωση. Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά την βροχόπτωση, παρατηρείται μεγαλύτερη αρνητική συσχέτιση σωματιδίων PM_{10} σε σχέση με $PM_{2.5}$, πράγμα αναμενόμενο.

10.4.3. Σύγκριση αυτόματης (D) και σταθμικής (G) μεθόδου δειγματοληψίας

Για κάποιο αριθμό ημερών (11 ημέρες για εξωτερικά PM_{10} , 5 ημέρες για εξωτερικά $PM_{2.5}$ και 1 ημέρα για εσωτερικά PM_{10}) είχαμε κοινές μετρήσεις και από τις 2 μεθόδους, οπότε μπορούν να εξαχθούν κάποια σημαντικά συμπεράσματα (πίνακας 9). Όπως αναμενόταν, ο λόγος D/G τόσο για τα PM_{10} όσο και για τα $PM_{2.5}$, είναι μεγαλύτερος της μονάδας (1.23 και 1.63 αντίστοιχα), η δε μέση τιμή του (τιμή αναφοράς) είναι στα επίπεδα που η Ε.Ε. προτείνει ως συντελεστή διόρθωσης κατά τη χρήση μετρητών συνεχούς λειτουργίας (real time monitor).

- Θετικά Dust Trak: οι επιπλέον ποιοτικού χαρακτήρα πληροφορίες που δίνουν από ημερήσιους κύκλους, δηλαδή καταγράφουν χρονική μεταβλητότητα των επιπέδων ρύπανσης, από την οποία δυνατόν να αντληθούν χρήσιμα στοιχεία και παρατηρήσεις.
- Αρνητικά Dust Trak: η τιμή του λόγου $PM_{2.5}/PM_{10}$ είναι διαφοροποιημένη από αυτή της σταθμικής μεθόδου που περιγράφει πιο αξιόπιστα την πραγματική κατάσταση.
- Οι 2 μέθοδοι παρουσιάζουν εξαιρετική συσχέτιση γεγονός που υποδεικνύει την αξιόπιστη καταγραφή από πλευράς αυτόματης μεθόδου της μεταβλητότητας των τιμών.

10.4.4. Επίλογος-Προτάσεις

Με σκοπό την απόκτηση μιας πληρέστερης εικόνας της σωματιδιακής ρύπανσης στην περιοχή της Αθήνας προτείνεται η συνεχής παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των σωματιδιακών ρύπων. Είναι γεγονός ότι έχει γίνει αρκετή προσπάθεια σε αυτόν τον τομέα, όμως χρειάζονται ακόμα περισσότερα δεδομένα έτσι ώστε να μελετηθεί η εποχικότητα και η χωρική κατανομή των σωματιδιακών συγκεντρώσεων. Ειδικότερα για την χωρική κατανομή απαιτείται μεγάλο διάστημα παράλληλων μετρήσεων σε μια πλειάδα σταθμών τοποθετημένων σε περιοχές κλειδιά (π.χ. κέντρο, προάστια κλπ).

Επιπρόσθετα θα πρέπει να ληφθούν μέτρα από την πολιτεία για τον έλεγχο και την ελάττωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Ανάμεσα στα μέτρα συμπεριλαμβάνονται:

- Έλεγχος σωματιδιακών ρύπων από κεντρικές θερμάνσεις:

Ιδιαίτερη βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί στις κεντρικές θερμάνσεις που αποτελούν εξαιρετικά σημαντική εστία εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων. Η ανεξέλεγκτη και συχνά υπερβολική χρήση τους δημιουργεί μαζικές εκπομπές επιβλαβών για την υγεία σωματιδιακών ρύπων.

- Κίνητρα για χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς:

Με τη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς δημιουργούνται πολλαπλά οφέλη αναφορικά με τη μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Μεταξύ αυτών είναι η ελάττωση της χρήσης Ι.Χ. αυτοκινήτων και η συνεπαγόμενη ελάττωση της γενικότερης κυκλοφορίας οχημάτων που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών.

- Έλεγχος ποιότητας καυσίμων:

Θα πρέπει να ελέγχεται η περιεκτικότητα των καυσίμων σε SO₂. Η ένωση αυτή απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση και αποτελεί βασική πηγή δευτερογενούς σχηματισμού σωματιδίων.

➤ Κυκλοφοριακές ρυθμίσεις:

Ανάμεσα σε αυτές τις ρυθμίσεις θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται η αυστηρή τήρηση του Κ.Ο.Κ. καθώς και η διαμόρφωση μικρών δακτυλίων κυκλοφορίας κοντά σε περιοχές όπου κινούνται ευαίσθητες σε εκθέσεις ομάδες πληθυσμού (νοσοκομεία, σχολεία).

➤ Κάπνισμα:

Θα πρέπει να εφαρμοστεί κατά γράμμα ο νόμος της πλήρους απαγόρευσης του καπνίσματος και να γίνουν συχνότεροι και αυστηρότεροι έλεγχοι. Πρέπει επίσης να υπάρξει μακροχρόνια και συστηματική ενημέρωση των πολιτών διότι πρόκειται για ένα σοβαρό πρόβλημα δημόσιας υγείας. Ακόμη και ένα τσιγάρο μέσα στο σπίτι καθιστά την ατμόσφαιρα πολλαπλώς επικίνδυνη.

Τέλος, μια πρακτική που έχει θεσπιστεί και λειτουργεί με ιδιαίτερη επιτυχία στις Η.Π.Α είναι τα ειδικά προγράμματα ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα προγράμματα αυτά λειτουργούν στις διάφορες πολιτείες υπό την καθοδήγηση της Ε.Ρ.Α (Environmental Protection Agency) με δύο βασικούς στόχους:

1. Την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω οργανωμένων δικτύων μετρήσεων.
2. Την ενημέρωση των πολιτών για το βαθμό έκθεσής τους στη ρύπανση με σκοπό την προστασία και την ευαισθητοποίησή τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ασημακόπουλος Δ.Ν., Καρτάλης Κ., «Ατμοσφαιρική ρύπανση και προστασία περιβάλλοντος», Ε.Κ.Π.Α, Τμήμα Φυσικής, Αθήνα 2002.
2. Βαρώτσος Κ., «Ατμόσφαιρα και αεροπορική κυκλοφορία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2001.
3. Βαρώτσος Κ., Καρράς Γ., «Σημειώσεις εισαγωγής στη φυσική της ατμόσφαιρας», Ε.Κ.Π.Α, Τμήμα Φυσικής, Αθήνα 2000.
4. 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.
5. Ζιώμας Ι., «Ατμόσφαιρα-Ατμοσφαιρική ρύπανση», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2007.
6. Κατσούλης Β.Δ., Κασσωμένος Π.Α., «Μαθήματα Φυσικής του Περιβάλλοντος», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής, Ιωάννινα 2004.
7. Λαζαρίδης Μ., «Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας», Εκδόσεις Τζιόλα, Κρήτη 2005.
8. Μελάς Δ., «Ατμοσφαιρική Διάχυση και Διασπορά», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2003.
9. Ρήγας Φ., “Επιστήμη και Τεχνολογία Περιβάλλοντος”, Αθήνα, 1997.
10. Σαχσαμάνογλου Χ. Σ., Μακρογιάννης Τ. Ι., «Γενική μετεωρολογία», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1998.
11. Στούρνας Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., “Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών”, Αθήνα, 1993.
12. ΥΠΕΚΑ, Γεν. Δ/νση Περιβάλλοντος, Δ/νση ΕΑΡΘ, Τμήμα ποιότητας Ατμόσφαιρας, «Ετήσια έκθεση ατμοσφαιρικής ρύπανσης 2009», Αθήνα 2010.
13. Χαλουλάκου Α., Σημειώσεις μαθήματος «Ασφάλεια και υγιεινή της εργασίας», μεταπτυχιακού προγράμματος «Συστήματα διαχείρισης ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2010.
14. Χαλουλάκου Α., Σημειώσεις μαθήματος «Ποιότητα περιβάλλοντος και νομοθεσία», μεταπτυχιακού προγράμματος «Συστήματα διαχείρισης ενέργειας και προστασίας περιβάλλοντος», Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2010.
15. Air & Waste Management Association (AWMA), “Air Pollution Engineering Manual”, Buonicore A.J. & Davis W.T. Eds, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

16. Arya S.P. "Air Pollution Meteorology and Dispersion", Oxford University Press Inc., New York, USA, 1998.
17. 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.
18. Brauer M., Hirtle R., Lang B., Ott W., "Assessment of Indoor Fine Aerosol Contributions from Environmental Tobacco Smoke and Cooking with a Portable Nephelometer", Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, Vol. 10, pp. 136-144, 2000(a).
19. Bennett W.O., Zeman K.L., "Deposition of Fine Particles in Children Spontaneously Breathing at Rest", Inhalation Toxicology, Vol. 10, pp. 831-842, 1998.
20. Brauer M., Hrubá F., Mihaliková E., Fabianová E., Misković P., Plzíkova A., Lendacká M., Vandenberg J., Cullen A., "Personal Exposure to Particles in Banská Bystrica, Slovakia", Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, Vol. 10, pp. 478-487, 2000(b).
21. Chaloulakou A, Diapouli E, Spyrellis N, "Indoor and outdoor PM concentrations at a residential environment, in the Athens area", Global NEST Journal 10 (2) : 201-108, 2008.
22. Chaloulakou A., P. Kassomenos, N. Spyrellis, Philip Demokritou, P. Koutrakis Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece Atmospheric Environment, Volume 37, Issue 5, February 2003, Pages 649-660.
23. CAFE Working Group on Particulate Matter, "Second Position Paper on Particulate Matter", 2004.
24. Ciccone G., "Road Traffic and Adverse Respiratory Effects in Children", Occupational and Environmental Medicine, Vol. 55, pp. 771-778, 1998.
25. 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.
26. 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.
27. Colbeck L., McKenzie A.R. "Air pollution by photochemical oxidants. AirQuality Monographs, Vol. I", Elsevier, Amsterdam, 1994.
28. 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.

29. Ebel S.T., Wilson W.E., Brauer M., "Exposure to Ambient and Nonambient Components of Particulate Matter. A Comparison of Health Effects", *Epidemiology*, Vol. 16(3), pp. 396-405, 2005.
30. Ebel S.T., Petkau A.J., Vedal S., Fisher T.V., Brauer M., "Exposure of Chronic Obstructive Pulmonary Disease Patients to Particulate Matter: Relationships between Personal and Ambient Air Concentrations", *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 50, pp. 1081-1094, 2000.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. Halios C.H., Helmig 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.
39. 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.

40. 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.
41. 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.
42. ICRP, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection", ICRP Publication 66, Pergamon Press, Oxford, 1994.
43. 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.
44. Jenkins P.L., Phillips T.J., Mulberg J.M., Hui S.P., "Activity Patterns of Californians: Use of and Proximity to Indoor Pollutant Sources", *Atmospheric Environment*, Vol. 26A, pp. 2141-2148, 1992.
45. 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.
46. Katsouyanni K., Touloumi G., Samoli E., Gryparis A., La Tertre A., Monopolis Y., Rossi G., Zmirou D., Ballester F., Boumghar A., Anderson H.R., Wojtyniak B., Paldy A., Braunstein R., Pekkanen J., Schindler C., Schwartz J., "Confounding and Effect Modification in the Short-Term Effects of Ambient Particles on Total Mortality: Results from 29 European Cities within the APHEA2 Project", *Epidemiology*, Vol. 12(5), pp. 521-531, 2001.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.

52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. Lee K.P., Trochimowicz J.H., Reinhardt C.F., "Pulmonary Response of Rats Exposed to Titanium Dioxide (TiO₂) by Inhalation for Two Years", *Toxicology and Applied Pharmacology*, Vol. 79, pp. 179-192, 1985.
56. 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.
57. Manahan S.E., "Environmental Chemistry", 6th Edition, Lewis Publishers, Florida, 1994.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. Magliano K.M., Hugues V.M., Chinkin L., Coe D.L., Haste T.L., Kumar N., Lurmann F.W., "Spatial and Temporal Variations in PM₁₀ and PM_{2.5} Source Contributions and Comparison to Emissions during the 1995 Integrated Monitoring Study", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp.4757-4773, 1999.
63. 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.
64. Nazaroff W.W., "Indoor Particle Dynamics", *Indoor Air*, Vol. 14(Suppl. 7), pp. 175-183, 2004.

65. 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.
66. 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.
67. Nazaroff W.W., Cass G.R., "Mathematical Modeling of Indoor Aerosol Dynamics", *Environmental Science and Technology*, Vol. 23(2), pp. 157-166, 1989.
68. Nazarenko, L., and S. Menon, "Varying trends in surface energy fluxes and associated climate between 1960 and 2002 based on transient climate simulations", *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22704, doi: 10.1029/2005GL024089, 2005.
69. 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.
70. Neas L.M., Dockery D.W., Ware J.H., Spengler J.D., Ferris B.G. Jr., Speizer F.E., "Concentration of Indoor Particulate Matter as a Determinant of Respiratory Health in Children", *American Journal of Epidemiology*, Vol. 139, pp. 1088-1099, 1994.
71. 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.
72. N.J., "The Transformation of Outdoor Ammonium Nitrate Aerosols in the Indoor Environment", *Atmospheric Environment*, Vol. 37, pp. 5633-5644, 2003(a).
73. 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.
74. 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.
75. 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.
76. Papanastasiou D.K., Melas D., Kioutsioukis I. "Development and assessment of neural network and multiple regression models in order to predict PM10 levels in a medium sized Mediterranean city", 2007.

77. 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.
78. Peters A., "Air Pollution and Incidence of Cardiac Arrhythmia", *Epidemiology*, Vol. 11, pp. 11-17, 2000.
79. 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).
80. 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).
81. 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.
82. Pope C.A., "Review: Epidemiological Basis for Particulate Air Pollution Health Standards", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 32, pp. 4-14, 2000(a).
83. 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).
84. 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.
85. 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.
86. 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.
87. Schwartz J., "Is There Harvesting in the Association of Airborne Particles with Daily Deaths and Hospital Admissions?", *Epidemiology*, Vol. 12, pp. 55-61, 2000.
88. Szalai A., Ed., "The Use of Time: Daily Activities of Urban and Suburban Populations in Twelve Countries", Mouton, The Hague, 1972.
89. Saldiva P.H.N., Clarke R.W., Coull B.A., Stearns R., Lawrence J., Koutrakis P., Suh H., Tsuda A., Godleski J.J., "Acute Pulmonary Inflammation Induced by Concentrated Ambient Air Particles is Related to Particle Composition", *American Journal of Critical Care Medicine*, Vol. 165, pp. 1610-1617, 2002.

90. Spengler J.D., Treitman R.D., Tostenson T.D., Mage D.T., Soczek M.L., "Personal Exposures to Respirable Particulates and Implications for Air Pollution Epidemiology", *Environmental Science and Technology*, Vol. 19, pp. 700-707, 1985.
91. 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.
92. Smolik J., Lazaridis M., Moravec P., Schwarz J., Zaripov S.K., Zdimal V., "Indoor Aerosol Particle Deposition in an Empty Office", *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 165, pp. 301-312, 2005.
93. Seinfeld J.H., Pandis S.N., "Atmospheric Chemistry and Physics. From air pollution to climate change", John Wiley & Sons Inc., New York, USA 1998.
94. 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.
95. 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.
96. Thatcher T.L., Layton D.W., "Deposition, Resuspension, and Penetration of Particles Within a Residence", *Atmospheric Environment*, Vol. 29, pp. 1487-1497, 1995.
97. Tung T.C.W., Chao C.Y.H., Burnett J., "A Methodology to Investigate the Particulate Penetration Coefficient through Building Shell", *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 881-893, 1999.
98. 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)*
99. 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.
100. Villalobos-Pietrini R., Blanco S., Gomez-Arroyo S., "Mutagenicity Assessments of Airborne Particles in Mexico City", *Atmospheric Environment*, Vol. 29, pp. 517-524, 2000.
101. 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.
102. 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.

103. Wark K., Warher C.F., Davis W.T., "Air Pollution: Its Origin and Control", Addison Wesley Longman, 1998.
104. Watson J.G., Chow J.C., Dubois D., Green M., Frank N., Pitchford M., "Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM_{2.5} and PM₁₀", Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency (Research Triangle Park, NC27711), 1997.
105. Watson J.G., Chow J.C., Moosmoller H., Green M., Frank N., Pitchford M., "Guidance for Using Continuous Monitors in PM_{2.5} Monitoring Network", Office of Air Quality Planning and Standards - U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
106. Wilson W.E., Mage D.T., Grant L.D., "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.
107. 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.
108. WHO, "Air Quality Guidelines for Europe", 2nd Edition, World Health Organization, Copenhagen, 2000.
109. 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.
110. Υπουργείο εργασίας και κοινωνικών ασφαλίσεων Κύπρου, Τμήμα επιθεώρησης εργασίας, Κλάδος ποιότητας αέρα,
<http://www.airquality.dli.mlsi.gov.cy/>
111. EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme),
<http://www.emep.int/>
112. European Environment Agency & World Health Organization, "Air and Health-Some Common, Air Pollutants", 1999(a),
<http://www.eea.eu.int/Document/Topicrep/air/AirHealth/air%20pollutants.html>
113. European Environment Agency & World Health Organization, "Air and Health-Sources of Air Pollution", 1999(b),
<http://www.eea.eu.int/Document/Topicrep/air/Air Health/sources.html>
114. 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>

115. Natural Resources Defense Council, "Air Pollution FAQ", Natural Resources Defense Council, 1996(a),
<http://mail.igc.apc.org/nrdc/faqs/aibrefaq.html>
116. Natural Resources Defense Council, "Danger in the Air: Thousands of Early Deaths could be Averted with Cleaner Air Standard", Natural Resources Defense Council, 1996(b),
<http://www.nrdc.org/find/aibresum.html>
117. Paterson K., "CE352 Air Particulate Laboratory: Analysis of Second Hand Smoke, Types of Air Particulate, Representative Sizes of Air Particulate", First Prototype Internet Laboratory of the MTU Environment Course Ware Series, 1995.
http://www.bic.ac.civil.mtu.edu/public_html/classes/cd352/labs/particulates
118. U.S. Environmental Protection Agency, "Current and Revised Standards for Ozone and Particulate Matter", 1997(b),
<http://www.epa.gov/oar/oaqps/ozpmbro/current.html>
119. U.S. Environmental Protection Agency, "What Changes Were Made to the Particulate Matter Standards", 1997(c)
<http://www.epa.gov/oar/oaqps/ozpmbro/partstan.html>