

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

### 1.1. Σημασία της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα είναι ο προστατευτικός μανδύας της ζωής πάνω στη γη. Η σύσταση, η δομή και τα φυσικοχημικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τους βιογαιοχημικούς κύκλους και τα οικοσυστήματα. Η ατμόσφαιρα είναι η πηγή διοξειδίου του άνθρακα για τη φωτοσύνθεση των φυτών και η πηγή οξυγόνου για την αναπνοή. Η ατμόσφαιρα παρέχει το άζωτο, το οποίο χρησιμοποιούν βακτήρια και φυτά για τη σύνθεση ζωντανής ύλης. Ως βασικό τμήμα του υδρολογικού κύκλου, η ατμόσφαιρα μεταφέρει νερό από τους ωκεανούς στην ξηρά, λειτουργώντας σαν ψυκτήρας σ' έναν τεράστιο αποστακτήρα που θερμαίνεται από τον ήλιο.

Στα πλαίσια του ζωτικού προστατευτικού της ρόλου, η ατμόσφαιρα απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας προστατεύοντας έτσι τους ζώντες οργανισμούς από τις βλαβερές επιδράσεις της. Επίσης, απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος, επιτρέποντας τη διέλευση μόνο στις ακτινοβολίες με μήκη κύματος 300-2500 nm (εγγύς υπεριώδες - εγγύς υπέρυθρο) και 0,01-40 m (ραδιοκύματα). Η απορρόφηση της ακτινοβολίας σε μήκη κύματος μικρότερα από 300 nm έχει μεγάλη σημασία για την προστασία των ζώντων οργανισμών από την επικίνδυνη αυτή ακτινοβολία. Τέλος, η ατμόσφαιρα απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία με την οποία η απορροφηθείσα από τη γη ηλιακή ενέργεια επανεκπέμπεται στο διάστημα. Με τον τρόπο αυτό η ατμόσφαιρα δρα ως ρυθμιστικός παράγοντας της θερμοκρασίας του πλανήτη μας, έτσι ώστε, να μην παρατηρούνται μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές, όπως σε άλλους πλανήτες.

Για την κατανόηση της χημείας της ατμόσφαιρας και των αιτίων που τη ρυπαίνουν είναι σημαντικό να υπάρξει μία συνολική θεώρηση της ατμόσφαιρας, τόσο από πλευράς χημικής σύστασης και φυσικών χαρακτηριστικών, όσο και από πλευράς κίνησης των αερίων μαζών και του θερμικού ισοζυγίου.

### 1.2. Χημική σύσταση

Η σύσταση της ατμόσφαιρας απασχόλησε τους φυσικούς φιλοσόφους ήδη από την αρχαιότητα. Ο Εμπεδοκλής (5ος αι. π.Χ.) θεωρούσε τον αέρα ως ένα από τα τέσσερα στοιχεία, από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κόσμος. Ο Άγγλος χημικός R.

Boyle, τον 17ο αιώνα έγραφε ότι ο αέρας είναι ένα «συγκεχυμένο μίγμα» δύο κυρίως αερίων, του αζώτου και του οξυγόνου. Ακριβείς αναλύσεις του αέρα έγιναν από τον H. Cavendish στα 1780, ενώ το αδρανές συστατικό αργόν απομονώθηκε μόλις στα τέλη του προηγούμενου αιώνα (1896).

Στον Πίνακα 1.1 δίνεται η χημική σύσταση του ξηρού, καθαρού αέρα στην επιφάνεια της γης. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε % περιεκτικότητα ή σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Και στις δύο περιπτώσεις η συγκέντρωση εκφράζεται ως όγκος κατ' όγκο. Έτσι, 1 ppm ισοδυναμεί με 1 cm<sup>3</sup> αερίου συστατικού, ενώ 1% v/v ισοδυναμεί με 10.000 ppm. Σύμφωνα με το νόμο του Dalton, η μερική πίεση ενός αερίου εξαρτάται από τη μερική ποσότητα αυτού. Έτσι, στην επιφάνεια του εδάφους, όπου η πίεση είναι 1 atm, ένα αέριο σε συγκέντρωση 1 ppm θα έχει πίεση ίση με 10<sup>-6</sup> atm. (Για τον ίδιο λόγο, 1 ppb και 1 ppt αντιπροσωπεύουν πίεση ίση με 10<sup>-9</sup> και 10<sup>-12</sup> atm, στην επιφάνεια του εδάφους).

**Πίνακας 1.1:** Σύσταση καθαρού και ξηρού αέρα στην επιφάνεια της γης.

Συστατικό	Συγκέντρωση (V / V)	
Άζωτο	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
Διαζωτοξείδιο	0,25 – 0,35	ppm
Μονοξείδιο του άνθρακα	0,12	ppm
Ξένο	0,087	ppm
Όζον	0,025	ppm
Αμμωνία	0,001	ppm

Η συγκέντρωση των συστατικών του ατμοσφαιρικού αέρα μπορεί να εκφραστεί και ως μάζα κατ' όγκο, δηλαδή σε mg/m<sup>3</sup> ή μg/m<sup>3</sup>. Οι μονάδες mg/m<sup>3</sup> και ppm συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$C(ppm) \times \frac{M.B.(g)}{M.O.(L)} = C(mg / m^3)$$

σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (0°C, 1 atm). Ο όγκος ενός αερίου V σε θερμοκρασία t °C και πίεση P μετατρέπεται σε όγκο V<sub>0</sub> σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_0 = \frac{PV}{P_0(1 + at)}$$

οπού  $a=1/273$

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1, υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες συστατικών του ατμοσφαιρικού αέρα με βάση τη συγκέντρωσή τους: τα κύρια συστατικά (άζωτο και οξυγόνο), τα λιγότερο κύρια συστατικά (αργό και διοξείδιο του άνθρακα), τα ευγενή αέρια (νέο, κρυπτό, ήλιο, ξένο) και τα ιχνοσυστατικά. Επιπλέον, ο ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να περιέχει νερό σε συγκεντρώσεις 0,1% - 5% κατ' όγκο (συνήθως η συγκέντρωση των περιεχόμενων υδρατμών κυμαίνεται μεταξύ 1% και 3%).

Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας είναι σχεδόν σταθερή μέχρι τα 400 km περίπου. Σ' όλο αυτό το στρώμα, το μοριακό βάρος του αέρα είναι σταθερό και ίσο με 28,28. Μεταβάλλεται μόνον από περιοχή σε περιοχή η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> και των υδρατμών. Το στρώμα αυτό ονομάζεται **ομοιόσφαιρα** και η σταθερότητα της χημικής του σύστασης οφείλεται στην τυρβώδη ανάμιξη των συστατικών. Σε ύψη μεγαλύτερα των 100 km η σύσταση της ατμόσφαιρας παρουσιάζει μεγάλες διαφορές με το ύψος. Αυτό οφείλεται στη μοριακή διάχυση των συστατικών. Τα διάφορα αέρια διαχωρίζονται ανάλογα με το βάρος τους: τα ελαφρύτερα, όπως το υδρογόνο, φεύγουν σε μεγαλύτερα ύψη, ενώ τα βαρύτερα μένουν σε χαμηλότερα στρώματα. Για το λόγο αυτό η ατμόσφαιρα πάνω από τα 100 km ονομάζεται **ετερόσφαιρα**.

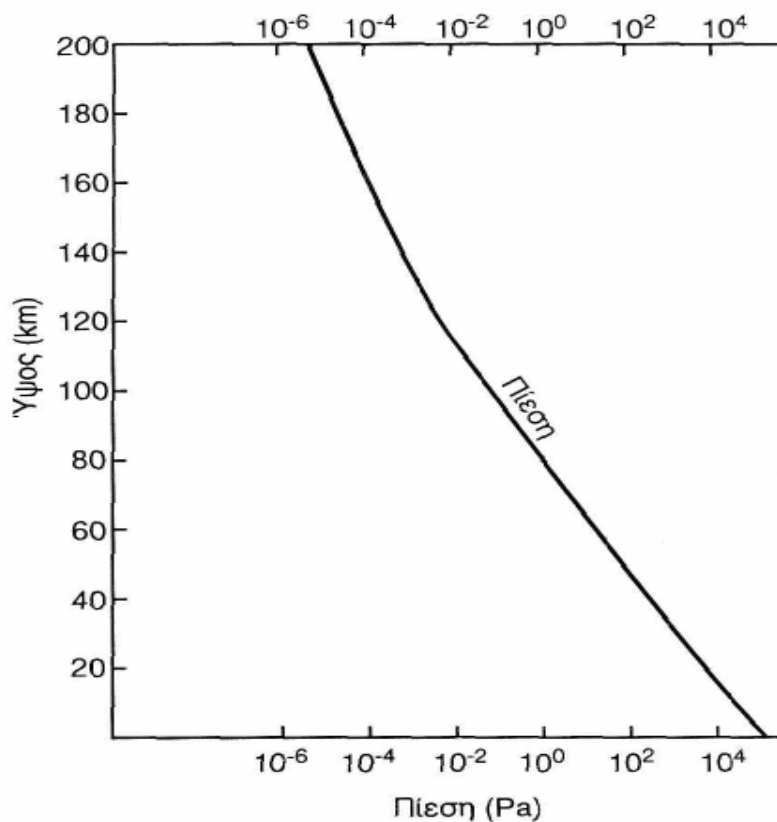
### 1.3. Μεταβολή της πυκνότητας και της πίεσης με το ύψος

Η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα ελαττώνεται απότομα με την αύξηση του ύψους σαν συνέπεια των νόμων των αερίων και της βαρύτητας. Περισσότερο από το 99% της συνολικής μάζας της ατμόσφαιρας βρίσκεται σ' ένα στρώμα 30 km από την επιφάνεια της γης. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι αμελητέο σε σύγκριση με τη διάμετρο της γης. Επίσης, αν και η συνολική μάζα της ατμόσφαιρας είναι πολύ μεγάλη ( $5,14 \times 10^{15}$  μετρικοί τόνοι), αυτή αποτελεί μόλις το 1 εκατομμυριοστό της συνολικής μάζας της γης.

Η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται με το ύψος σχεδόν εκθετικά (Σχήμα 1.1). Η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος δεν είναι γραμμική εξαιτίας των διακυμάνσεων που προκαλούνται από θερμοκρασιακές διαφορές και από την ανάμιξη των αερίων μαζών.

Η ατμοσφαιρική πίεση (όπως και η θερμοκρασία) μεταβάλλεται, επίσης, με την

εποχή του έτους, το γεωγραφικό πλάτος και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε πολύ μεγάλα ύψη, χημικά είδη που συνήθως είναι δραστικά (π.χ. το ατομικό οξυγόνο) παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα ύψη αυτά η ατμοσφαιρική πίεση είναι πολύ χαμηλή, με αποτέλεσμα η απόσταση που διανύει το χημικό είδος μέχρι να συγκρουσθεί με ένα άλλο συστατικό (μέση ελεύθερη διαδρομή) είναι πολύ μεγάλη. Ένα σωματίδιο με μέση ελεύθερη διαδρομή  $1 \times 10^{-6}$  cm στην επιφάνεια της θάλασσας, σε ύψος 500 km έχει μέση ελεύθερη διαδρομή 1 δισεκατομμύριο φορές μεγαλύτερη ( $1 \times 10^6$  cm).



**Σχήμα 1.1:** Μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης με το ύψος.

#### 1.4. Μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος-Στρωμάτωση της ατμόσφαιρας

Η μεταβολή της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα με το ύψος δίνεται στο Σχήμα 1.2. Με βάση την κατακόρυφη κλιμάκωση της θερμοκρασίας η ατμόσφαιρα χωρίζεται στα παρακάτω στρώματα:

**Τροπόσφαιρα.** Είναι το στρώμα της ατμόσφαιρας από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι το ύψος των 12-16 km, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την

εποχή του έτους. Η τροπόσφαιρα χαρακτηρίζεται από ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία, που φθάνει στην επιφάνεια της γης, απορροφάται από αυτή και θερμαίνει έμμεσα την τροπόσφαιρα από κάτω. Ο θερμός αέρας ανέρχεται ως ελαφρύτερος και επειδή η πίεση ελαττώνεται με το ύψος, αυτός εκτονώνεται αδιαβατικά, δηλαδή χωρίς ανταλλαγή ενέργειας με τον εξωτερικό αέρα. Έτσι, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται κατά το ποσό της θερμότητας που αντιστοιχεί στο έργο που παράγεται.

Η μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος ονομάζεται θερμοβαθμίδα και για ιδανικές καταστάσεις δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta T/\Delta Z = - M_m g/C_p$$

όπου:  $M_m$  = το μοριακό βάρος του αέρα (28,9 kg mol<sup>-1</sup>)

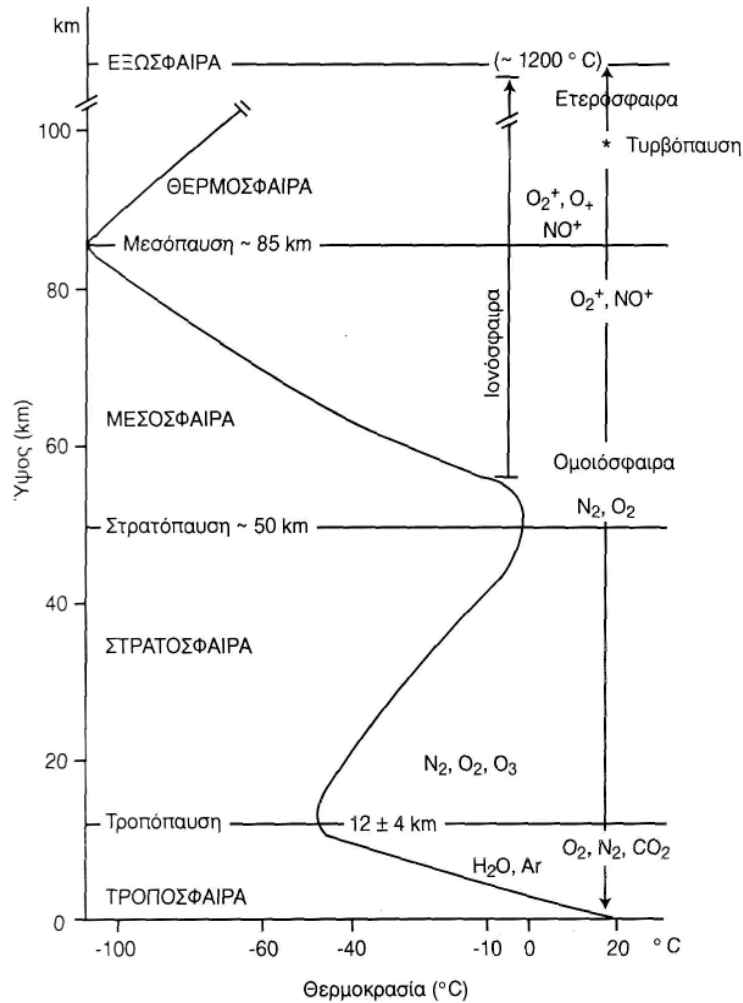
$g$  = η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m sec<sup>-2</sup>)

$C_p$  = μοριακή θερμοχωρητικότητα σε σταθερή πίεση (29,05 J mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

Η τιμή της θερμοβαθμίδας για τον ξηρό αέρα είναι ίση με -9,8°K/km (ξηροαδιαβατική θερμοβαθμίδα). Για τον υγρό αέρα, η ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος είναι μικρότερη (-6.5°K/km, υγραδιαβατική θερμοβαθμίδα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην τροπόσφαιρα υπάρχουν υδρατμοί που συμπυκνώνονται με την εκτόνωση του αέρα και ελευθερώνουν ενέργεια.

Η ελάττωση της θερμοκρασίας συνεχίζεται μέχρι την τροπόπαυση όπου φθάνει τους -55°C περίπου. Η χαμηλή αυτή θερμοκρασία της τροπόπαυσης αναγκάζει τους υδρατμούς να συμπυκνώνονται προς πάγο, έτσι ώστε να μην μπορούν να φθάσουν σε μεγαλύτερα ύψη όπου θα φωτοδιίσταντο με την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, το υδρογόνο που θα παράγονταν από τη φωτοδιάσπαση των υδρατμών θα διέφευγε από τη γήινη ατμόσφαιρα και θα χανόταν.

Το κενό που δημιουργείται από την άνοδο του θερμού αέρα των χαμηλών στρωμάτων της τροπόσφαιρας έρχεται να καλύψει ψυχρότερος αέρας από υψηλότερα στρώματα. Έτσι, προκαλείται μία κυκλική κυκλοφορία αερίων μαζών, η οποία είναι υπεύθυνη για την ομοιογένεια που παρουσιάζει η χημική σύσταση της τροπόσφαιρας. Ωστόσο, η περιεκτικότητα της τροπόσφαιρας σε υδρατμούς ποικίλλει σημαντικά εξαιτίας των νεφώσεων, της βροχής και της εξάτμισης νερού από τις ηπειρωτικές υδάτινες μάζες.



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

**Στρατόσφαιρα.** Αρχίζει από την τροπόπαυση και φθάνει μέχρι το ύψος των 50 km. Στα πρώτα χιλιόμετρα πάνω από την τροπόπαυση η θερμοκρασία είναι σταθερή. Στη συνέχεια και μέχρι τη στρατόπαυση, η θερμοκρασία αυξάνει (θετική θερμοβαθμίδα) και φθάνει στους 0°C. Επειδή στη στρατόσφαιρα έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας, η περιοχή αυτή είναι πιο σταθερή από την τροπόσφαιρα και η ανάμιξη των αερίων πολύ αργή. Έτσι τα συστατικά που μεταφέρονται στη στρατόσφαιρα παραμένουν εκεί για πολλά χρόνια. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί ένα λεπτό στρώμα θεικού αμμωνίου που έχει βρεθεί στα 20 km.

Η αύξηση της θερμοκρασίας στη στρατόσφαιρα οφείλεται στην παρουσία ενός στρώματος όζοντος, το οποίο απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία σε μήκη κύματος 200-300 nm. Η συγκέντρωση του όζοντος έχει μέγιστη τιμή (περίπου 10 ppm) σε ύψος 25-30 km.

**Μεσόσφαιρα.** Μετά τη στρατόπαυση παρατηρείται απότομη πτώση της θερμοκρασίας, η οποία συνεχίζεται μέχρι τα 85 km, όπου βρίσκεται η μεσόπαυση. Η μεσόπαυση είναι η πιο ψυχρή περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας. Η πτώση της θερμοκρασίας στη μεσόσφαιρα οφείλεται στην κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών, όπως και στην τροπόσφαιρα, και στη μικρή συγκέντρωση συστατικών που απορροφούν ακτινοβολία ενέργεια.

**Θερμόσφαιρα.** Πάνω από τη μεσόπαυση εκτείνεται η θερμόσφαιρα, στην οποία η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να αυξάνεται. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται περίπου μέχρι τα 400 km (θερμόπαυση), όπου επικρατούν θερμοκρασίες 1000°C ή και μεγαλύτερες, ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα. Η αύξηση της θερμοκρασίας στη θερμόσφαιρα αποδίδεται: στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας σε μήκη κύματος μικρότερα των 200 nm, στην ενέργεια που εκλύεται από διάφορες εξώθερμες αντιδράσεις και στην έλλειψη διεργασιών απόψυξης.

**Εξώσφαιρα.** Η περιοχή πάνω από τη θερμόπαυση είναι ισόθερμη και ονομάζεται εξώσφαιρα. Σ' αυτά τα μεγάλα ύψη τα συστατικά αποκτούν πολλές φορές κινητική ενέργεια τόσο μεγάλη, ώστε υπερνικούν το πεδίο βαρύτητας και φεύγουν στο διάστημα. Η πυκνότητα της εξώσφαιρας είναι πολύ χαμηλή.

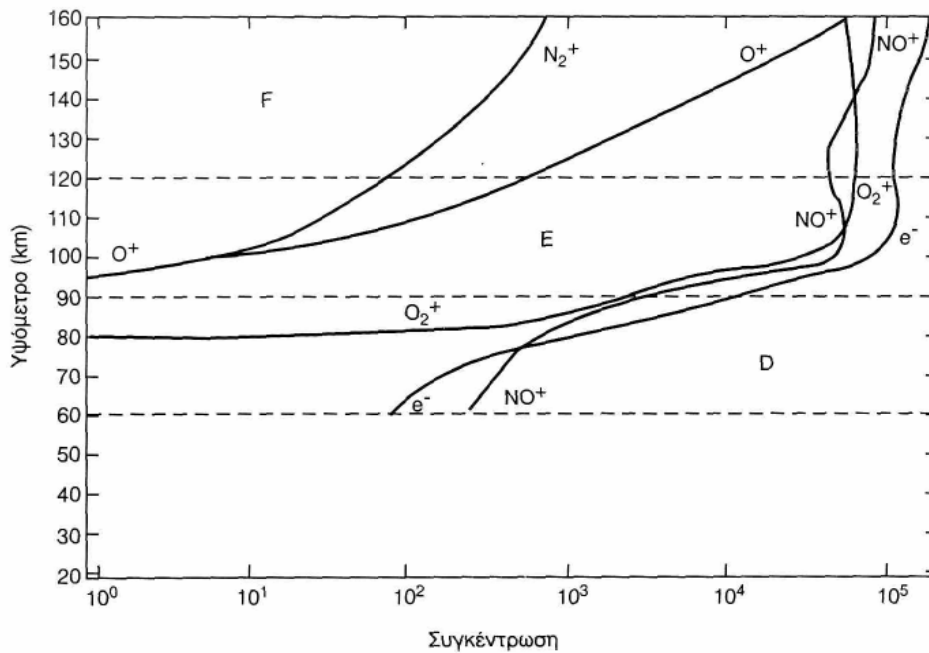
**Ιονόσφαιρα.** Πάνω από τα 60 km παρατηρείται ιονισμός των συστατικών της ατμόσφαιρας και για το λόγο αυτό η περιοχή ονομάζεται ιονόσφαιρα. Η ύπαρξη της ιονόσφαιρας έγινε γνωστή στις αρχές του αιώνα, όταν διαπιστώθηκε ότι τα ραδιοκύματα μπορούν να εκπέμπονται σε μακρινές αποστάσεις χωρίς να εμποδίζονται από την καμπύλη της γήινης επιφάνειας.

Η κύρια αιτία ιονισμού των συστατικών της ατμόσφαιρας είναι η απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ιονόσφαιρα χωρίζεται σε τρία επί μέρους στρώματα που φαίνονται στο Σχήμα 1.3:

α) Το στρώμα D, που εκτείνεται από τα 60 km μέχρι τα 90 km και στο οποίο παρατηρείται κυρίως φωτοϊονισμός του NO.

β) Το στρώμα E, που εκτείνεται από τα 90 km μέχρι τα 120 km και στο οποίο παρατηρείται φωτοϊονισμός του O<sub>2</sub>.

γ) Το στρώμα F, που εκτείνεται πάνω από τα 120 km και στο οποίο φωτοϊονίζονται τα NO, O<sub>2</sub>, O και N<sub>2</sub>.



**Σχήμα 1.3:** Τυπικές συγκεντρώσεις των κυριότερων ιόντων που δημιουργούνται στα τρία στρώματα της ιονόσφαιρας.

### 1.5. Φαινόμενο θερμοκηπίου

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη απορροφάται. Η ενέργεια αυτή πρέπει να επιστραφεί στο διάστημα για να διατηρηθεί η θερμοκρασιακή ισορροπία. Η μέση θερμοκρασία της γης διατηρείται στο επίπεδο των 15°C εξ' αιτίας ενός φυσικού «φαινομένου θερμοκηπίου» κατά το οποίο οι υδρατμοί κυρίως, και σε μικρότερο βαθμό το CO<sub>2</sub>, απορροφούν μεγάλο μέρος της εκπεμπόμενης από τη γη υπέρυθρης ακτινοβολίας και το επανεκπέμπουν προς αυτή. Αν δε συνέβαινε αυτό, η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους θα ήταν γύρω στους -18°C.

Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας η οποία έγκειται στην ενίσχυση και όχι σε αυτή καθαυτή την ύπαρξη του φαινομένου του θερμοκηπίου και η οποία σύμφωνα με όλες τις ενδείξεις οφείλεται κατά κύριο λόγο στον ανθρώπινο παράγοντα και παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες δημιουργούν χημικές ενώσεις ρυπαντές που αυξάνουν το ποσοστό της απορροφούμενης ακτινοβολίας που εκπέμπει η γη.

Η απορρόφηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στο διοξείδιο του άνθρακα (απορροφά ισχυρά στην περιοχή των 15 μm, όπου βρίσκεται το μέγιστο της θερμικής ακτινοβολίας), αλλά και σε άλλα αέρια όπως το μεθάνιο, το όζον, το διοξείδιο του αζώτου

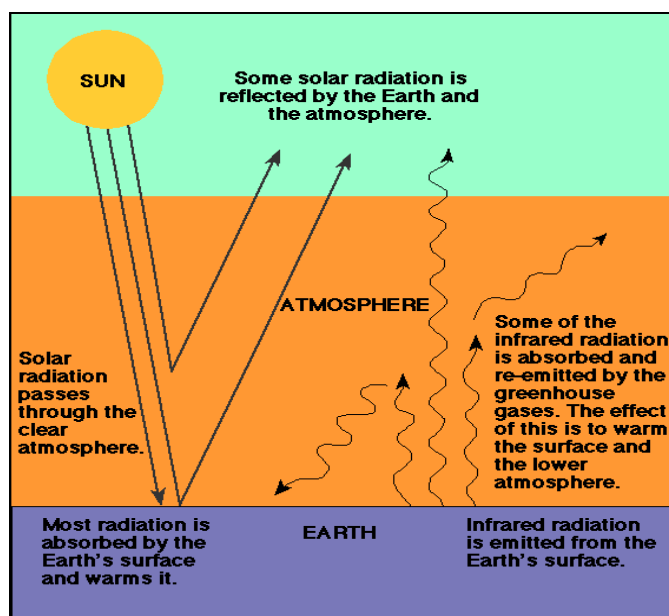


και οι χλωροφθοράνθρακες. Μία εκτίμηση της ποσοστιαίας συμμετοχής των παραπάνω ουσιών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου δίνεται στον Πίνακα 1.2.

**Πίνακας 1.2:** Ποσοστό συμμετοχής ουσιών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Ουσία	Συμμετοχή (%)	Διάρκεια ζωής
CO <sub>2</sub>	61	Μεγάλη
CH <sub>4</sub>	15	Μεγάλη
NO <sub>2</sub>	4	Μικρή
CFCs	11	Μεγάλη
HCFC – 22	0,5	Μικρή
O <sub>3</sub>	8,5	Μικρή

Ο κύριος υπεύθυνος, το CO<sub>2</sub>, εκλύεται στην ατμόσφαιρα από τις διάφορες καύσεις που γίνονται για παραγωγή ηλεκτρισμού, μεταφορές και διάφορους βιομηχανικούς σκοπούς. Κατά το 1990, η ετήσια εκπομπή CO<sub>2</sub> σε παγκόσμια κλίμακα έφθασε τα 5.900 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου άνθρακα.



**Σχήμα 1.4:** Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> παρουσιάζει συνεχή αύξηση κατά τα τελευταία 150 χρόνια (Σχήμα 1.5). Αιτία είναι ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων (~ 4% το χρόνο). Σύμφωνα με εκτιμήσεις, αν συνεχίσει ο ίδιος ρυθμός αύξησης των καύσεων πάνω στον πλανήτη, η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> το έτος 2030 θα είναι περίπου 600 ppm, δηλαδή διπλάσια από όσο ήταν

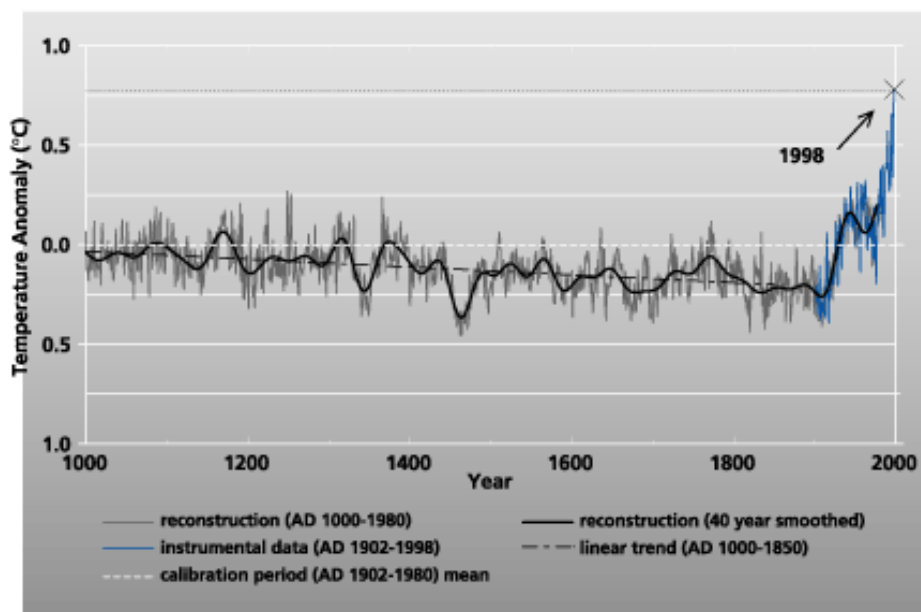
κατά την προβιομηχανική εποχή. Μια τέτοια αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub>, πιθανολογείται ότι θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3-5°C. Στο Σχήμα 1.6 δίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη χρονική περίοδο 1000 – 2000. Όπως φαίνεται, στα τελευταία 100 χρόνια, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας έχει αυξηθεί κατά 0,3-0,6°C. Η διαχρονική εξέλιξη της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας από το 160.000 π.Χ. μέχρι σήμερα δίνεται στο Σχήμα 1.7.

Οι συνέπειες της ενίσχυσης του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι δύσκολο να προεκτιμηθούν εξαιτίας του γεγονότος ότι η άνοδος της θερμοκρασίας συνδέεται με παράγοντες των οποίων ο ρόλος δεν είναι πλήρως γνωστός. Οι σημαντικότερες από τις πιθανολογούμενες συνέπειες είναι:

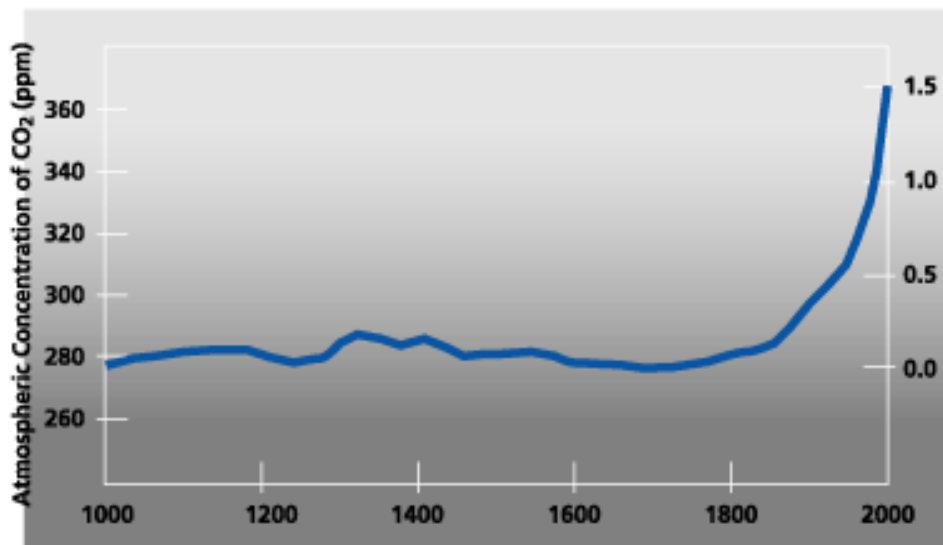
α) Τήξη των πάγων των πόλων με αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης των θαλασσών (κατά 50 cm περίπου). Έτσι, περιοχές που σήμερα βρίσκονται χαμηλότερα από το επίπεδο της θάλασσας ή λίγο υψηλότερα, θα πλημμυρίσουν. Τα δέλτα των ποταμών και μεγάλες καλλιεργήσιμες εκτάσεις ίσως πληγούν ανεπανόρθωτα.

β) Αλλαγή του κλίματος της γης με μετακίνηση των ζωνών βροχοπτώσεων από τον ισημερινό προς βορρά και ερημοποίηση του κάτω τμήματος της εύκρατης ζώνης, ανάμεσα στον 20ό και 40ό παράλληλο.

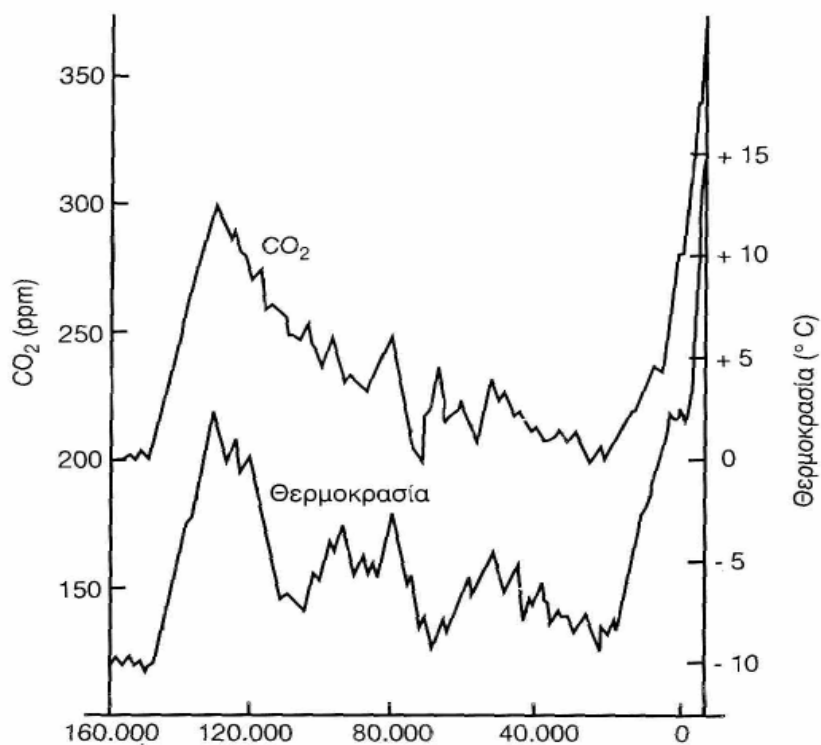
γ) Αύξηση εντόμων και παρασίτων.



Σχήμα 1.5: Μεταβολή της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> κατά τη χρονική περίοδο 1000-2000 μ.Χ..



Σχήμα 1.6: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη χρονική περίοδο 1000 – 2000 μ.Χ.



Σχήμα 1.7: Μεταβολή της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>, στην ατμόσφαιρα και της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας από το 160.000 π.Χ. μέχρι σήμερα.

Ωστόσο, διατυπώνονται και σενάρια κατά τα οποία η άνοδος της θερμοκρασίας θα έχει και ευνοϊκές για τη γη επιπτώσεις, αφού θα προκαλέσει μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και αύξηση της αγροτικής παραγωγής. Η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου επιτείνεται από τη συνεχιζόμενη αποψίλωση των μεγάλων τροπικών δασών, αφού από το σύνολο του CO<sub>2</sub>, της ατμόσφαιρας μόνον το 1/3 απορροφάται από τους ωκεανούς, ενώ τα 2/3 από τα φυτά. Αντίθετα, αντιστάθμιση του φαινομένου αποδίδεται στις εκρήξεις ηφαιστειών (π.χ. Πινατούμπο), με τις οποίες εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τα εκπεμπόμενα σωματίδια συμβάλλουν προσωρινά (για 2-5 χρόνια) στη μείωση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας εξαιτίας του σκεδασμού της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα κυριότερα μέτρα πρόληψης για να περιοριστεί η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι:

- α) Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας,
- β) Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης,
- γ) Η αξιοποίηση των καθαρών πηγών ενέργειας (υδατοπτώσεις, αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά κελιά, κ.ά.).
- δ) Η χρήση φυσικού αερίου.
- ε) Οι αναδασώσεις
- στ) Ο περιορισμός των εκπομπών των άλλων αερίων θερμοκηπίου.

**Βιβλιογραφικές αναφορές: [1], [4], [7]**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

### 2.1. Εισαγωγή

Ο άνθρωπος εισπνέει καθημερινά περίπου 15 m<sup>3</sup> αέρα. Η αναπνοή αποτελεί τον κυριότερο τρόπο έκθεσής του σε επικίνδυνες ουσίες. Η φύση της έκθεσης σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και το μέγεθος του πληθυσμού που εκτίθεται δημιουργεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατανόηση των διεργασιών που προκαλούν ρύπανση της ατμόσφαιρας.

Η εκπομπή ρύπων στην ατμόσφαιρα, οφείλεται τόσο σε φυσικές διεργασίες όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, τις οποίες θα αναλύσουμε διεξοδικά σε παρακάτω κεφάλαιο. 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 στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις των ρύπων στις περιοχές αυτές είναι πολλές φορές μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια.

Οι ρύποι που εκπέμπονται απ' ευθείας στην ατμόσφαιρα ονομάζονται **πρωτογενείς** (π.χ. SO<sub>2</sub>, NO, υδρογονάνθρακες κ.α.). υπάρχουν όμως και ρύποι που δεν εκπέμπονται από κάποια πηγή, αλλά σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα χημικού μετασχηματισμού πρωτογενών ρύπων (π.χ. το SO<sub>3</sub> σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα με οξείδωση του πρωτογενούς εκπεμπόμενου SO<sub>2</sub>) ή σαν προϊόντα διαφόρων αντιδράσεων (π.χ. όζον, νιτρικό υπεροξυ-ακετύλιο, 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 τόπο εκπομπής των πρόδρομων ουσιών από τις οποίες προέρχονται.

Στον Πίνακα 2.1 αναφέρονται οι κυριότερες διεργασίες με τις οποίες προκαλείται ανθρωπογενής ρύπανση της ατμόσφαιρας.

**Πίνακας 2.1:** Διεργασίες που προκαλούν ανθρωπογενή ρύπανση της ατμόσφαιρας.

Διεργασία	Σκοπός	Εκπομπές
Καύση	Θέρμανση, μεταφορές, παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας	Αιωρούμενα σωματίδια, καπνός, CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , υδρογονάνθρακες κ.α.
Εξάτμιση	Βιομηχανικές εφαρμογές	Αέριοι ρύποι(υδρογονάνθρακες, υδρόθειο, πτητικές οργανικές ενώσεις, κ.α.)
Τριβή	Βιομηχανικές εφαρμογές, αστικές δραστηριότητες	Αιωρούμενα σωματίδια

## 2.2. Μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι ρύποι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα είτε στην αέρια κατάσταση (με τη μορφή αερίων ή ατμών), είτε στη στερεή φυσική. Αντίστοιχα, ονομάζονται **αέριοι ή σωματιδιακοί** ρύποι. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter, PM) περιγράφουμε τα διεσπαρμένα στον αέρα στερεά και υγρά σωματίδια, με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των απλών μορίων (περίπου  $2 \times 10^{-4}$  μm σε διάμετρο), αλλά μικρότερο από 500 μm. Αναφέρονται επίσης και ως **αιωρούμενα σωματίδια** (suspended particles) ή απλά σωματίδια. Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότερες μορφές ατμοσφαιρικών ρύπων.

### ➤ Αέριοι ρύποι

**α. Αέρια (gases).** Ουσίες οι οποίες 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.

**β. Ατμοί (vapors).** Αέριες μορφές ουσιών που σε συνήθεις συνθήκες βρίσκονται σε υγρή ή στερεή κατάσταση.

### ➤ Σωματιδιακοί ρύποι

Πριν προχωρήσουμε στις μορφές των σωματιδιακών ρύπων, οι οποίοι θα απασχολήσουν και την παρούσα εργασία, πρέπει να αναφερθούμε στο γενικό όρο **αερολύματα (aerosols)**. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζουμε τα κολλοειδή συστήματα όπου κάποια αέρια, υγρή ή στερεά ουσία κολλοειδών διαστάσεων βρίσκεται διασκορπισμένη μέσα σε αέριο μέσο διασποράς. Η περίπτωση διασποράς αερίου σε αέριο στην πραγματικότητα είναι δυνατή σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή στην ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα θεωρείται ένα αερόλυμα, όπου εξ' αιτίας της διαφοράς θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων, μπορεί να λεχθεί ότι τμήματα αέρα μεγάλης πυκνότητας είναι διασκορπισμένα μέσα στον αέρα σε κολλοειδείς διαστάσεις (στο γεγονός αυτό οφείλεται και το γαλάζιο χρώμα του ουρανού). Συνεπώς, ως ατμοσφαιρικά αερολύματα μπορούν να χαρακτηριστούν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια κολλοειδών διαστάσεων. Τα ατμοσφαιρικά αερολύματα αποτελούνται από υγρά ή στερεά σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 100 μm.

Αμέσως παρακάτω περιγράφονται τα διάφορα είδη αερολυμάτων.

**α. Αιθάλη (Fume).** Μικρά, στερεά σωματίδια, τα οποία σχηματίζονται από τη συμπύκνωση ατμών στερεών υλικών συχνά οξειδίων των μετάλλων (όπως τα οξείδια του ψευδαργύρου και του μολύβδου) και από στοιχειακό άνθρακα (soot, carbon black).

Τυπικό μέγεθος 0,03 έως 1  $\mu\text{m}$ .

**β. Σκόνη (Dust).** Μικρά στερεά σωματίδια τα οποία σχηματίζονται από τη θραύση μεγαλύτερων μαζών, κατά τη διάρκεια διαδικασιών όπως σύνθλιψη, τριβή, έκρηξη. Η χρήση του όρου σκόνη υποδηλώνει σωματίδια φυσικής και συνήθως γεωλογικής προέλευσης.

**γ. Καπνός (Smoke).** Μικρά και λεπτότατα στερεά σωματίδια που προκύπτουν από την ατελή καύση υλών που περιέχουν άνθρακα. Τυπικό μέγεθος 0,5 έως 1  $\mu\text{m}$ .

**δ. Ιπτάμενη τέφρα (Fly ash).** Μικρά, ορυκτά σωματίδια που διαφεύγουν από τις καπνοδόχους, κατά την καύση ορυκτών καυσίμων. Η σύσταση της ιπτάμενης τέφρας εξαρτάται από το είδος του καυσίμου. Τα κύρια συστατικά της είναι οξείδια του αργιλίου, του ασβεστίου, του σιδήρου και του πυριτίου, αλλά και ιχνοστοιχεία όπως Mg, S, Ti, Na, K. Τυπικό μέγεθος των σωματιδίων αυτών είναι 1 έως 100  $\mu\text{m}$ .

**ε. Ομίχλη (Mist).** Υγρά σωματίδια ή σταγονίδια που σχηματίζονται από τη συμπύκνωση ατμών. Τυπικό μέγεθος από 0,1 έως 10  $\mu\text{m}$ .

**στ. Spray.** Υγρά σωματίδια που μορφοποιούνται από το ράντισμα υγρών, όπως τα φυτοφάρμακα και τα παρασιτοκτόνα. Τυπικό μέγεθος 10 έως 1000  $\mu\text{m}$ .

Στην ατμόσφαιρα και τα ατμοσφαιρικά υγρά αερολύματα, η μάζα των συμπυκνωμένων υδρατμών πάνω από το έδαφος, υπό τη μορφή ορατής συγκέντρωσης υγροσταγονιδίων, παγοκρυστάλλων ή και των δύο, ονομάζεται **νέφος (cloud)** ή απλά σύννεφο. Ο μετεωρολογικός όρος **ομίχλη (fog)**, υποδηλώνει την ύπαρξη νέφους σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους και με πυκνότητα τέτοια, ώστε η ορατότητα σε οριζόντια διεύθυνση να είναι μικρότερη από 1000 m.

Κάτω από παρόμοιες συνθήκες, αλλά με ορατότητα μεγαλύτερη των 1000 m, το αερόλυμα ονομάζεται **αχλός (haze)**. Το τυπικό μέγεθος των σωματιδίων των νεφών κυμαίνεται από 2 έως 80  $\mu\text{m}$ .

Τα υγρά σωματίδια που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα σε μέγεθος μεγαλύτερο από 100  $\mu\text{m}$ , έχουν ελάχιστο χρόνο αιώρησης και η ονομασία τους ταυτίζεται με τα ορατά φαινόμενα της βροχής (άνω των 500  $\mu\text{m}$ ) ή για μικρότερο μέγεθος, της **ψιχάλας (drizzle)**.

### 2.3. Χρόνος παραμονής, διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων από την ατμόσφαιρα

Εκτός από τις διεργασίες που οδηγούν σε εκπομπή ή δευτερογενή σχηματισμό ρύπων, στην ατμόσφαιρα λαμβάνουν χώρα και διεργασίες απομάκρυνσης. Η ατμόσφαιρα δηλαδή είναι ένα δυναμικό σύστημα, στο οποίο κάθε ρύπος έχει ορισμένο **χρόνο παραμονής** (residence time). Ο χρόνος παραμονής αποτελεί χρήσιμη παράμετρο για την περιγραφή συστημάτων που βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή όταν η ροή συστατικών από το σύστημα είναι ίση με τη ροή προς αυτό.

Οι κυριότερες διεργασίες απομάκρυνσης ρύπων από την ατμόσφαιρα είναι:

**α. Χημικές αντιδράσεις** των ατμοσφαιρικών ρύπων με άλλα συστατικά της ατμόσφαιρας. Οι αντιδράσεις αυτές μπορεί να είναι ομογενείς (στην αέρια φάση) ή ετερογενείς (στην επιφάνεια αιωρούμενων σωματιδίων ή σταγονιδίων). Οι ομογενείς αντιδράσεις διακρίνονται σε θερμικές, φωτοχημικές και αντιδράσεις ελευθέρων ριζών.

Η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο παραμονής των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ο χρόνος παραμονής προκύπτει εύκολα από αντιδράσεις πρώτης τάξης. Έτσι, για έναν αέριο Α που απομακρύνεται με μια χημική αντίδραση πρώτης τάξης ( $A \Rightarrow$  προϊόντα), η ταχύτητα απομάκρυνσης δίνεται από τη σχέση:

$$R = -\frac{d[A]}{dt} = K[A]$$

όπου  $K$  = η σταθερά της ταχύτητας αντίδρασης

Σε ένα ατμοσφαιρικό σύστημα που βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή η συγκέντρωση  $[A]$  παραμένει σταθερή εξ' αιτίας συνεχούς παραγωγής του συστατικού, η ροή από το σύστημα εκφράζεται από τη σχέση:

$$F_o = \frac{[A]}{\tau}$$

όπου  $[A]$  = η συγκέντρωση του συστατικού στο σύστημα

$\tau$  = ο χρόνος παραμονής του συστατικού στο σύστημα

Από το συνδυασμό των δύο παραπάνω σχέσεων προκύπτει ότι:

$$\frac{[A]}{\tau} = K[A] \Rightarrow \tau = 1/K$$

**β. Ξηρή απόθεση**, δηλαδή απ' ευθείας μεταφορά ενός αερίου ή σωματιδιακού ρύπου στο έδαφος ή στους ωκεανούς.

Η ξηρή απόθεση των αερίων ρύπων οφείλεται σε μηχανισμούς προσρόφησης ή



απορρόφησης σε μια στερεή ή υγρή φάση, αντίστοιχα. Η ξηρή απόθεση είναι ταχύτερη για τους αέριους ρύπους που είναι ευδιάλυτοι (π.χ. SO<sub>2</sub>). Πράγματι, διαπιστώθηκε ότι το SO<sub>2</sub> αποτίθεται πολύ γρηγορότερα σε βλάστηση που είναι καλυμμένη με πρωινή δροσιά παρά σε ξηρή βλάστηση.

Η ροή F ενός αερίου ρύπου προς το έδαφος, εκφράζεται με τη σχέση:

$$F = VgC$$

όπου C = η συγκέντρωση του ρύπου στην ατμόσφαιρα (μετράται σε ύψος 1 m)

Vg = η ταχύτητα απόθεσης

Η ίδια εξίσωση συχνά χρησιμοποιείται για την απόθεση των σωματιδίων. Όταν η απόθεση ενός αερίου γίνεται σε μια υγρή επιφάνεια, η ταχύτητα απόθεσης Vg αντικαθίσταται από τη σταθερά ανταλλαγής K, η οποία έχει τις ίδιες μονάδες όπως και η Vg.

Στον Πίνακα 2.2 δίνεται η ταχύτητα απόθεσης μερικών αερίων ρύπων σε διάφορες επιφάνειες.

Όπως φαίνεται, ακόμη και για υδατοδιαλυτά αέρια, όπως το SO<sub>2</sub>, η ταχύτητα απόθεσης σε υγρές επιφάνειες είναι συνήθως μικρότερη από 1cm/sec. Ωστόσο, αυτή η ταχύτητα απόθεσης συνεπάγεται μεγάλη ταχύτητα απομάκρυνσης. Έτσι, αν θεωρήσουμε έναν αέριο ρύπο με ταχύτητα απόθεσης 1 m/sec, η ποσότητα του ρύπου που περιέχεται σε μία στήλη ύψους 100 m από την επιφάνεια του εδάφους θα απομακρυνθεί σε χρονικό διάστημα 10<sup>4</sup> sec (περίπου 2,8 ώρες). Δηλαδή ο χρόνος παραμονής του ρύπου αυτού στην ατμόσφαιρα θα είναι 2,8 ώρες. Βέβαια, το παραπάνω μοντέλο είναι υπεραπλουστευμένο, επειδή τα αέρια δεν παραμένουν σε στήλες στην ατμόσφαιρα, αλλά διαχέονται.

**Πίνακας 2.2:** Ταχύτητα απόθεσης αερίων ρύπων σε περιβαλλοντικές επιφάνειες (cm sec<sup>-1</sup>)

Αέριο	Ταχύτητα απόθεσης	Επιφάνεια απόθεσης
SO <sub>2</sub>	0,14 – 2,2	Έδαφος και Βλάστηση
SO <sub>2</sub>	0,7 – 1	Ωκεανοί
SO <sub>2</sub>	0,8	Επιφάνεια γης
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,1	Επιφάνεια γης
HNO <sub>3</sub>	0,8	Επιφάνεια γης
O <sub>3</sub>	0,5	Επιφάνεια γης
NO <sub>2</sub>	0,1	Επιφάνεια γης
H <sub>2</sub> S	0,015 – 0,28	Επιφάνεια γης
CO	0,05	Έδαφος
COS	0,085	Έδαφος

Το αντίστροφο της ταχύτητας απόθεσης Vg ονομάζεται **αντίσταση (r)**. Η αντίσταση εκφράζει το βαθμό δυσκολίας στη διαδικασία της απόθεσης. Για παράδειγμα, κατά την

απόθεση SO<sub>2</sub> στη βλάστηση, το  $r$  εκφράζει τη συνολική αντίσταση στη μεταφορά του SO<sub>2</sub> δια μέσου της ατμόσφαιρας, του οριακού στρώματος αυτής και των στομάτων των φύλλων.

Οι ωκεανοί αποτελούν σημαντικό αποδέκτη για πολλούς αέριους ρύπους, αφού η ταχύτητα απόθεσης τους  $s'$  αυτούς είναι αρκετά μεγάλη (Πίνακας 2.2). Η ετήσια απόθεση SO<sub>2</sub>, και O<sub>3</sub> στις ωκεανούς, σε παγκόσμια κλίμακα, εκτιμάται σε  $5 \times 10^9$  και  $600 \times 10^9$  kg, αντίστοιχα.

Η απόθεση σε στερεές επιφάνειες είναι επίσης σημαντική. Βιολογικές δράσεις (π.χ. μικρόβια του εδάφους που καταναλώνουν CO) ή χημικά φαινόμενα (π.χ. αντίδραση όξινων αερίων, όπως το CO<sub>2</sub> και το SO<sub>2</sub>, προς σχηματισμό ανθρακικών και θεικών ορυκτών) ενισχύουν την απόθεση αυτή.

**γ) Υγρή απόθεση**, δηλαδή μεταφορά αερίων και σωματιδιακών ρύπων στο έδαφος ή τους ωκεανούς με τη βροχή.

Πολλά αέρια διαλύονται στα αιωρούμενα σταγονίδια της ατμόσφαιρας (ατμοσφαιρική υγρασία). Γενικά, η διαλυτότητα των αερίων στο νερό περιγράφεται από το νόμο του Henry. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, σε κατάσταση ισορροπίας, η μερική πίεση ενός αερίου πάνω από ένα υδατικό του διάλυμα είναι ανάλογη της μοριακής συγκέντρωσης του αερίου στο διάλυμα:

$$P_A = K_H C_W$$

όπου  $K_H$  είναι η σταθερά του νόμου του Henry. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της σταθεράς αυτής, τόσο λιγότερο ευδιάλυτο είναι ένα αέριο. Στον Πίνακα 2.3 δίνονται τυπικές τιμές της σταθεράς του νόμου του Henry για διάφορα αέρια και ημιπτητικές οργανικές ενώσεις.

**Πίνακας 2.3:** Σταθερές του νόμου του Henry για διάφορα αέρια στους 15°C.

Αέριο	$K_H$ (atm m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )
CO	1
O <sub>3</sub>	$5,0 \times 10^{-2}$
CO <sub>2</sub>	$2,2 \times 10^{-2}$
Ναφθαλίνιο	$4,8 \times 10^{-4}$
SO <sub>2</sub>	$1,9 \times 10^{-4}$
DDT	$3,6 \times 10^{-5}$
Aldrin	$1,2 \times 10^{-5}$
Αμμωνία	$1,1 \times 10^{-5}$
Πυρένιο	$5,0 \times 10^{-6}$
Lindane	$4,9 \times 10^{-7}$
Dieldrin	$2,0 \times 10^{-7}$
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$5,0 \times 10^{-9}$
Βενζο[α]πυρένιο	$1,4 \times 10^{-9}$

Η βροχή επηρεάζει σημαντικά και την απομάκρυνση αεροζόλ από την ατμόσφαιρα. Η απομάκρυνση πραγματοποιείται με διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά το σχηματισμό του

σύννεφου, μέσα στο σύννεφο και κάτω από αυτό, κατά την πτώση της βροχής.

Τα σταγονίδια του σύννεφου σχηματίζονται με συμπύκνωση υδρατμών γύρω από μικροσκοπικά αιωρούμενα σωματίδια (με διάμετρο συνήθως 0,1-0,2  $\mu\text{m}$ ) που ονομάζονται **πυρήνες συμπύκνωσης σύννεφων** (cloud condensation nuclei, CCN). Σε καθαρή ατμόσφαιρα, οι πυρήνες αυτοί είναι, κυρίως, κρύσταλλοι αλάτων, ενώ στην ατμόσφαιρα αστικών περιοχών έχουν και ανθρωπογενή προέλευση. Γύρω από τους πυρήνες αυτούς σχηματίζονται σταγονίδια με διάμετρο 5-20  $\mu\text{m}$ , τα οποία στη συνέχεια μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής ή νιφάδες χιονιού με πολύπλοκες μικροφυσικές διεργασίες.

Το μέγεθος των σταγόνων της βροχής ποικίλλει σημαντικά (0,1-5 mm). Οι σταγόνες, κατά τη πτώση τους στο έδαφος παρασύρουν σημαντικές ποσότητες αεροζόλ, κυρίως μικρού μεγέθους (< 1  $\mu\text{m}$ ). Εκτιμάται ότι το 70 με 80% της μάζας των αεροζόλ που υπάρχει στο χώρο κάτω από ένα σύννεφο απομακρύνεται με τη βροχή. Τα μεγαλύτερα ποσοστά απομάκρυνσης παρατηρούνται με βροχές μεγάλης έντασης και διάρκειας.

Η βροχή, επομένως, συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση ρύπων από την ατμόσφαιρα, τόσο κατά το στάδιο του σχηματισμού της (rain out), όσο και κατά την πτώση της (wash out).

**Βιβλιογραφικές αναφορές:** [1], [3], [4], [7], [9], [10], [11], [12], [13]

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ****3.1. Εισαγωγή**

Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελείται από τον ξηρό αέρα, τις διάφορες μορφές υδρατμών και τα σωματίδια σε αιώρηση. Με τον όρο σωματίδια (Particulate Matter–PM) χαρακτηρίζονται τα διακριτά σωματίδια που βρίσκονται σε στερεή ή υγρή φάση στην ατμόσφαιρα. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από μερικά nm μέχρι 100 μm. Με εξαίρεση την περίπτωση που τα σωματίδια είναι υγρά (τα οποία δεν θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία), είναι πολύ σπάνιο να συναντήσουμε σφαιρικά σωματίδια. Για παράδειγμα οι ίνες του αμιάντου είναι μακριές και λεπτές, το χώμα μοιάζει με νιφάδες και η μεταλλουργική σκόνη μπορεί να σχηματίσει αλυσίδες από συμπυκνωμένα σωματίδια. Τα αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζουν, όπως θα δούμε παρακάτω, μεγάλη ποικιλία ως προς την πυκνότητά τους, τη διάμετρό τους, τη χημική τους σύσταση και την προέλευσή τους.

Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 100 μm χαρακτηρίζονται ως αεροζόλ, ενώ ανάλογα με την προέλευση τους ταξινομούνται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Πρωτογενή αεροζόλ είναι τα σωματίδια που απελευθερώνονται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα από την καύση του ξύλου και των συμβατικών καυσίμων ή από άλλες διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών όπως η τήξη και η χύτευση των μετάλλων. Τα δευτερογενή σχηματίζονται από τη μετατροπή αερίων σε σωματίδια, όπως ο σχηματισμός του νιτρικού αμμωνίου από αμμωνία και οξείδια του αζώτου.

Τα αιωρούμενα σωματίδια εμφανίζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον από άποψη υγιεινής σε διάφορα εργασιακά πεδία όπως η βιομηχανία και τα ορυχεία, αλλά και σε πεδία όπως η γενικότερη αέρια ρύπανση και η ρύπανση εσωτερικών χώρων. Ιδιαίτερα ενεργή είναι η συμμετοχή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το φωτοχημικό νέφος, την όξινη βροχή και την τρυπά του όζοντος. Τελευταία παρατηρήθηκε και η μεγάλη συμβολή τους στο σχηματισμό της φωτοχημικής καπνομίχλης με τις γνωστές σε όλους επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Κάθε φυσική ή χημική διεργασία απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από το φυσικό ατμοσφαιρικό σύστημα είναι συνεχής και εξαρτάται άμεσα από το είδος των πηγών προέλευσής τους, από την μετεωρολογική κατάσταση και την τοπογραφία της εκάστοτε περιοχής.

Σε γενικές γραμμές τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε λεπτά και χονδροειδή. Τα λεπτά σωματίδια (που έχουν διάμετρο μικρότερη από 2.5  $\mu\text{m}$ ) περιλαμβάνουν σωματίδια μετάλλων, άνθρακα, πίσσας, ρητινών, βακτηριδίων, οξειδίων, νιτριδίων, χλωριδίων, φθοριούχων ενώσεων, μυκήτων, άκαυστων HC, καπνού και ένα πλήθος αδιευκρίνιστων στοιχείων. Μερικά είδη αιωρούμενων σωματιδίων που έκαναν την εμφάνισή τους σε αστικές περιοχές της Ελλάδας, προέρχονται από άλατα από θάλασσα, σκόνη από το έδαφος, σωματίδια από καύσεις δασών, από ηφαίστεια, ιπταμένη τεφρά από καύση άνθρακα, γεωργικές εκπομπές, σωματίδια από βιομηχανίες τσιμέντου, σωματίδια από καύσεις πετρελαίου και τέλος από εργασίες θραύσης και λείανσης πρώτων υλών.

Στα επόμενα εδάφια θα αναφερθούμε λεπτομερώς στα είδη των αιωρούμενων σωματιδίων, στα χαρακτηριστικά τους, στις επιπτώσεις της ύπαρξής τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, στις πηγές προέλευσής τους, στους τρόπους μέτρησης και αντιμετώπισής τους και στην υπάρχουσα νομοθεσία.

### 3.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη των αιωρούμενων σωματιδίων

Προκειμένου να χαρακτηριστεί η ρύπανση μιας αέριας μάζας ως προς την σωματιδιακή ύλη, απαιτείται ο προσδιορισμός μιας σειράς φυσικών, χημικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων που εμπεριέχονται σε αυτήν. Για παράδειγμα η χημική σύσταση, το μέγεθος, το σχήμα, καθώς και η συγκέντρωση των σωματιδίων, αποτελούν μεγέθη που χαρακτηρίζουν με τον πιο αναλυτικό τρόπο ένα σωματιδιακό ρυπαντή της ατμόσφαιρας. Αμέσως παρακάτω επιχειρείται η ανάλυση ορισμένων από τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των σωματιδίων, προκειμένου να δοθούν πληροφορίες για τις ιδιότητες της συλλεγόμενης σωματιδιακής ύλης.

#### ➤ Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων

Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων ρυθμίζεται από φυσικές διεργασίες. Το άνω όριο επηρεάζεται από τις δυνάμεις βαρύτητας, ενώ το κάτω ελέγχεται από μεθόδους συσσωμάτωσης.

Από παρατηρήσεις ηλεκτρονικής μακροσκοπίας έγινε γνωστό ότι το σχήμα των στερεών σωματιδίων ποικίλλει από σφαιρικό σχήμα μέχρι ακανόνιστο. Η συνήθης μέθοδος για να εκφραστεί το μέγεθος του σωματιδίου είναι η ακτίνα Stokes, η οποία ορίζεται ως ακτίνα μιας σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα πτώσεως όπως το σωματίδιο και μια πυκνότητα ίση με του υλικού σωματιδίου. Η ακτίνα Stokes ενός

απομονωμένου σωματιδίου της ατμόσφαιρας της μορφής του ατμού είναι σχεδόν απaráλλακτη με τη γεωμετρική ακτίνα, αλλά η ακτίνα Stokes ενός στερεού σωματιδίου σκόνης που σχηματίζεται από τη συσσωμάτωση άλλων σωματιδίων μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από τη μετρηθείσα ακτίνα.

Η διάμετρος των σωματιδίων είναι μια χαρακτηριστική αλλά δύσκολα μετρούμενη ποσότητα. Εάν τα σωματίδια είναι όλα σφαιρικά τότε προφανώς χρησιμοποιείται η ακτίνα της σφαίρας. Σωματίδια τα οποία προέρχονται από τεμαχισμό ενός στερεού σώματος ή με τη βοήθεια του φυσικού φαινομένου της κρυστάλλωσης, στην συντριπτική τους πλειοψηφία αποκλίνουν της σφαιρικής μορφολογίας. Έτσι, ο ορισμός της διαμέτρου για αυτά τα σωματίδια τροποποιείται και στη θέση της ορίζεται μια μέση διάμετρος.

Κατά τη διαδικασία της μέτρησης της μέσης διαμέτρου ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των πρωτογενών σωματιδίων συλλέγεται και σε αυτό εφαρμόζεται η αντίστοιχη μεθοδολογία. Ορίζεται μια σειρά διαστημάτων μεγεθών της διαμέτρου, επιλεγμένα τυχαία ή σχετικά με τις δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου οργάνου. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, σχεδιάζεται η κατανομή και εάν απαιτείται περαιτέρω μελέτη και ανάλυση του πληθυσμού των σωματιδιακών ρυπαντών επιχειρείται η προσαρμογή μιας συνάρτησης κατανομής.

Στη συνέχεια ορίζονται έξη μέσες διαμέτροι, συμβολιζόμενες από  $d_1$  έως  $d_6$  παρά το γεγονός ότι όλες είναι διαφορετικές έστω και αν πρόκειται για το ίδιο δείγμα. Η πρώτη ορίζεται ίση με το μετρούμενο μήκος επί μιας ιδιαίτερης κατεύθυνσης πάνω στο σωματίδιο. Για την αποφυγή δημιουργίας συγχύσεως συνίσταται η συνένωση δύο σημείων και η μέτρηση της μεταξύ τους απόστασης. Η επιλογή των σημείων είναι μοναδική αλλά πρέπει πάντα το ένα να είναι κορυφή και το άλλο πυθμένας του τοπικού καμπύλου ορίου του σωματιδίου και βεβαίως επί της παραλλήλου διεύθυνσης.

Η δεύτερη ορίζεται ως η αριθμητική μέση τιμή όλων των μηκών τα οποία μετρώνται προς διαφορετικές κατευθύνσεις, διατηρώντας πάντα τον ίδιο τρόπο επιλογής της δυάδας των σημείων. Ο τρίτος ορισμός σχετίζεται με την επιφανειακή έκταση και δηλώνει ότι το σωματίδιο θα έχει ίση διάμετρο με μια σφαίρα ίσης επιφανειακής έκτασης, δηλαδή:

$$d_3 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}}$$

Η επόμενη μέση διάμετρος,  $d_4$ , βασίζεται στην ειδική επιφάνεια, αναφέροντας ότι μια σφαίρα διαμέτρου  $d_4$  έχει την ίδια ειδική επιφάνεια με το εξεταζόμενο σωματίδιο. Αυτός ο συλλογισμός συνεπάγεται την εξίσωση:

$$d_4 = \frac{6V}{A_s}$$

Η πέμπτη διάμετρος  $d_5$ , ονομαζόμενη ογκομετρική διάμετρος, προκύπτει από τη θεώρηση μιας σφαίρας διαμέτρου  $d_5$  η οποία έχει τον ίδιο όγκο με το υπό μελέτη σωματίδιο καθώς και την ίδια μάζα εάν βέβαια έχουν και ίσες πυκνότητες. Η διάμετρος δίνεται από τη σχέση:

$$d_5 = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3}$$

Ο έκτος ορισμός για τη μέση διάμετρο βασίζεται στην ελεύθερη πτώση του εξεταζόμενου σωματιδίου εντός ρευστού, στη στρωτή περιοχή  $Re < 2.0$ . Συγκεκριμένα μια σφαίρα με διάμετρο  $d_6$  θα αποκτήσει την ίδια οριακή ταχύτητα με εκείνη του υπό εξέταση σωματιδίου, υπό την επίδραση της βαρύτητας και εντός προτύπου αέρα. Η διάμετρος αυτή ονομάζεται και **‘αεροδυναμική διάμετρος’**. Αυτή ορίζεται από τη σχέση:

$$d_6 = 0.00581 \sqrt{\frac{V_1}{\rho_p}}$$

Οι προηγούμενες μέθοδοι εμπεριέχουν κάποιο βαθμό σφάλματος. Το καλύτερο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής μέτρησης προσεγγίζει τη διαδικασία για την οποία θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα.

#### ➤ Συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων

Η εκτίμηση του βαθμού ρύπανσης του φυσικού ατμοσφαιρικού συστήματος απαιτεί την ποσοτική έκφραση τόσο των αερίων, όσο και των σωματιδιακών ρυπαντών. Μολονότι χρειάζεται εκτεταμένη πληροφορία για τον επαρκή χαρακτηρισμό μια σωματιδιακής παρουσίας, εντούτοις η πιο χρήσιμη παράμετρος είναι ο όρος ‘σωματιδιακό φορτίο’ ή ‘συγκέντρωση’. Το μέγεθος αυτό ορίζεται σαν η συνολική μάζα του σωματιδιακού ρυπαντή ανά μονάδα όγκου του μίγματος (ρυπαντή-αέρα).

Η συγκέντρωση έχει διάφορους ορισμούς οι οποίοι εφαρμόζονται εξίσου στους αέριους και σωματιδιακούς ρυπαντές. Στη συνέχεια ορίζονται τρία μεγέθη που

αφορούν τη συγκέντρωση τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε όλους του ρυπαντές.

Το πρώτο από αυτά τα μεγέθη αναφέρεται ως ‘συγκέντρωση μάζας’  $C_m$  και ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του ρυπαντή ( $m_p$ ) προς τη μάζα του αέρα συν τη μάζα του ρυπαντή. Η σχέση φαίνεται παρακάτω.

$$C_m = \frac{m_p}{m_a + m_p}$$

Στην εξίσωση,  $m_a$  είναι η μάζα του καθαρού αέρα σε κάποιο όγκο του αερίου μίγματος.

Το δεύτερο μέγεθος αναφέρεται ως ογκομετρική συγκέντρωση  $C_o$  και είναι το πηλίκο του όγκου του ρυπαντή  $V_p$  προς τον όγκο του μίγματος.

$$C_o = \frac{V_p}{V_a + V_p}$$

Η τρίτη συγκέντρωση είναι μάζα προς όγκο:

$$C_{mo} = \frac{m_p}{V_a + V_p}$$

Για την καλύτερη χρήση των προηγούμενων μεγεθών έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός σχέσεων μεταξύ τους, οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

$$C_o = \frac{C_{mo}}{\rho_o}, \quad C_o = \frac{\rho_a}{\rho_p} \times C_m, \quad C_m = \frac{C_{mo}}{\rho_a}$$

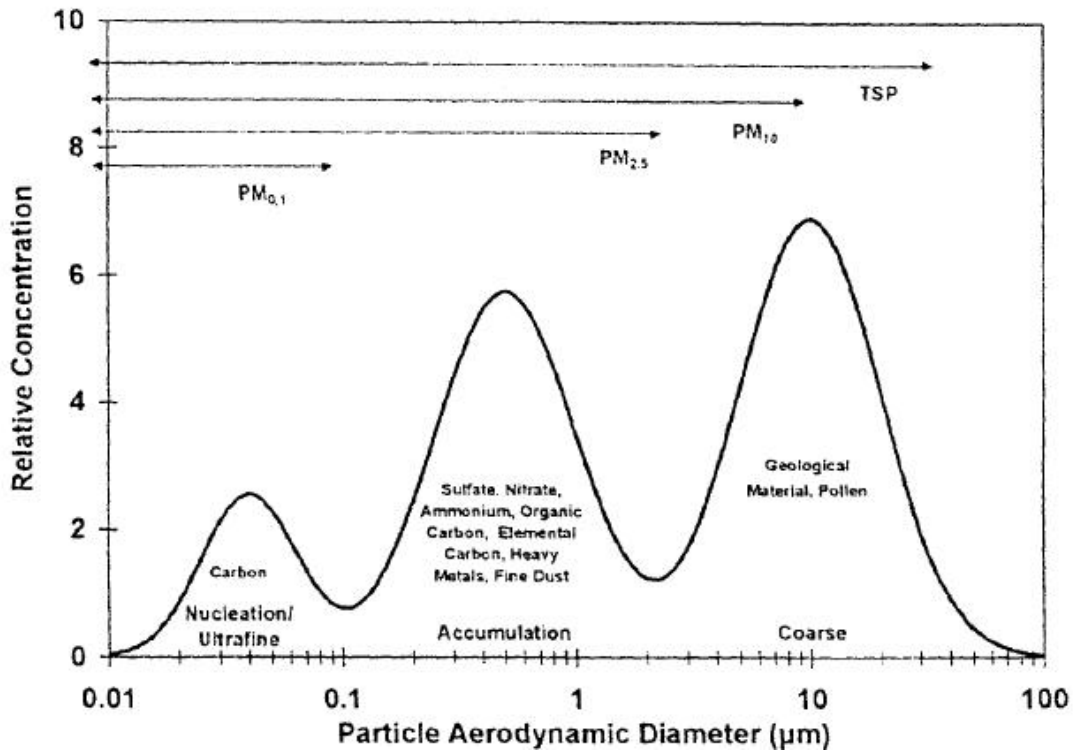
### ➤ Χημική σύσταση αιωρούμενων σωματιδίων

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των περισσότερων μελετών γύρω από τη χημική σύσταση των σωματιδίων η μάζα τους αποτελείται από τις παρακάτω βασικές κατηγορίες συστατικών:

- Θειικά
- Νιτρικά
- Αμμωνιακά
- Χλωριόντα
- Γεωλογικά υλικά
- Στοιχειακό άνθρακα
- Οργανικό άνθρακα
- Βιολογικά υλικά



- Μέταλλα
- Ισχυρά οξέα



Σχήμα 3.1: Κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων κατά μάζα και κυριότερα συστατικά.

Επιπλέον το υγρό  $H_2O$  είναι ένα ακόμα βασικό συστατικό στα διαλυτοποιήσιμα σωματίδια. Προσροφάται σε αυτά όταν η σχετική υγρασία υπερβαίνει περίπου το 70%. Ωστόσο το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού του νερού εξατμίζεται στα φίλτρα πριν τη μέτρηση. Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των χημικών ενώσεων και ομάδων οι οποίες συνθέτουν τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια:

### 1. Θεικά

Προέρχονται κυρίως από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα. Οι θεϊκές ενώσεις είναι παρούσες στην σωματιδιακή μάζα κυρίως υπό τη μορφή  $(NH_4)_2SO_4$  και σε μικρότερη αναλογία ως  $NH_4HSO_4$ . Επειδή η μετατροπή του διοξειδίου του θείου γίνεται με αργό ρυθμό σε απόσταση δεκάδων χιλιομέτρων από την πηγή εκπομπής του διοξειδίου του θείου, οι συγκεντρώσεις των θεϊκών μπορεί να είναι πολύ μικρές, όμως σε απόσταση εκατοντάδων ή χιλιάδων χιλιομέτρων μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Αυτές οι ενώσεις είναι υδατοδιαλυτές και συναντώνται σχεδόν αποκλειστικά στα PM<sub>2,5</sub> (λεπτόκοκκα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο έως 2,5 μm, θα αναλυθούν παρακάτω). Θεικό νάτριο είναι δυνατόν να ανιχνευθεί σε παραλιακές περιοχές όπου το θεικό οξύ έχει εξουδετερωθεί από το χλωριούχο νάτριο του θαλάσσιου αλατιού. Αν και ο γύψος και κάποια άλλα γεωλογικά υλικά περιέχουν θεικά, αυτά δεν είναι εύκολα διαλυτοποιήσιμα στο νερό για να αναλυθούν χημικά, είναι πιο άφθονα σε χονδρόκοκκα σωματίδια έναντι των PM<sub>2,5</sub> και συνήθως ταξινομούνται στα γεωλογικά υλικά.

### 2. Νιτρικά

Σχηματίζονται κυρίως από την οξείδωση του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του αζώτου και μία από τις κύριες μορφές του, το νιτρικό αμμώνιο NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, πιστεύεται ότι βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε ισορροπία με τις πρόδρομες του αέριες ουσίες, την αμμωνία NH<sub>3</sub> και τους ατμούς νιτρικού οξέος HNO<sub>3</sub>. Σε ορισμένες περιπτώσεις το νιτρικό νάτριο (NaNO<sub>3</sub>) κυριαρχεί. Καθότι το NO<sub>2</sub> οξειδώνεται ταχύτερα απ' ό τι το SO<sub>2</sub> και λόγω της ευαισθησίας του νιτρικού αμμωνίου στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις της αμμωνίας, οι οποίες επηρεάζουν τη διάσπασή του, η χωρική κατανομή των νιτρικών είναι πολύ λιγότερο ομοιόμορφη από αυτή των θεικών.

### 3. Αμμωνιακά

Όταν σχηματίζονται αρχικά στην ατμόσφαιρα τα νιτρικά και τα θεικά ιόντα είναι στην μορφή των θεικών και νιτρικών οξέων αντίστοιχα. Αυτά τα οξέα, σταδιακά εξουδετερώνονται από την ατμοσφαιρική αμμωνία σχηματίζοντας αμμωνιακά άλατα. Στις περισσότερες αστικές περιοχές, το ιόν του αμμωνίου NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, υπερέχει σημαντικά του ιόντος του υδρογόνου H<sup>+</sup>, 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 καθότι αλκαλικά, δεν αντιδρούν με την αέρια αμμωνία. Αν και το μεγαλύτερο ποσοστό του διοξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου που αποτελούν πρώτες ύλες για το σχηματισμό αμμωνιακών ενώσεων, προέρχονται από τη χρήση καυσίμου σε κινητές και στατικές πηγές, η περισσότερη από την αμμωνία προέρχεται από βιολογικές πηγές (π.χ. γεωργία, εκτροφεία ζώα).

#### 4. Χλωριόντα

Η κύρια πηγή των ιόντων χλωρίου είναι το υδρόλυμα θαλάσσης (sea spray), ακόμα και σε περιοχές που βρίσκονται εκατοντάδες χιλιόμετρα από την ακτή. Επίσης κατά τους χειμερινούς μήνες, πηγή αποτελεί η ρίψη αλατιού στους δρόμους για την αντιμετώπιση του πάγου.

Οι θαλάσσιες πηγές χλωριούχων σωματιδίων συνεισφέρουν κυρίως σε χλωριούχο νάτριο. Αυτή η κατηγορία σωματιδίων εντάσσεται στο χονδρόκοκκο κλάσμα. Σε μια μελέτη που έγινε στην Ανταρκτική, άνω του 70% των ατμοσφαιρικών σωματιδίων αποτελείται από θαλάσσιο NaCl, λόγω της προφανούς έλλειψης ανθρωπογενών πηγών.

Οι χλωριούχες ενώσεις εισέρχονται στην αέρια σωματιδιακή μάζα και με δευτερογενείς διαδικασίες όπως η εξουδετέρωση της ατμοσφαιρικής αμμωνίας από τους ατμούς υδροχλωρικού οξέος, το οποίο εκπέμπεται από πηγές όπως αποτεφρωτήρες και σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Οι δευτερογενείς χλωριούχες ενώσεις ανήκουν στο λεπτόκοκκο κλάσμα των σωματιδίων και συνίστανται κυρίως σε χλωριούχο αμμώνιο.

#### 5. Οργανικός άνθρακας

Ο οργανικός άνθρακας είναι δυνατόν να εκπέμπεται από πρωτογενείς πηγές εκπομπής. Όμως, σημαντική ποσότητα οργανικού άνθρακα είναι δυνατό να ενσωματωθεί στην σωματιδιακή μάζα ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών φωτοχημικών διεργασιών μεταξύ πρωτογενών αέριων οργανικών χημικών ειδών, οι οποίες παράγουν χαμηλής πτητικότητας οργανικές ενώσεις. Ο σχηματισμός δευτερογενών οργανικών σωματιδίων έχει συσχετιστεί με το λόγο οργανικού προς στοιχειακού άνθρακα, από συγκεκριμένες μελέτες, και έχει προταθεί ως χαρακτηριστική τιμή του λόγου αυτού η τιμή 2. Αν ο λόγος αυτός είναι πάνω από 2, θεωρείται ότι ο οργανικός άνθρακας σχηματίζεται με δευτερογενείς διαδικασίες.

Οι οργανικές ενώσεις που υπάρχουν 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 κι η περιεκτικότητα σε διακλαδισμένες και ακόρεστες ενώσεις. Είναι αδρανείς ενώσεις, σχετικά μη τοξικές και δεν συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα.

Τα n-αλκάνια που αποτελούνται μέχρι και από 25 άτομα άνθρακα χαρακτηρίζονται ως πετρογενή (petrogenic) και η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα σχετίζεται με εκπομπές από καύση ορυκτών καυσίμων. Αντίθετα τα C<sub>25</sub>-C<sub>36</sub> αλκάνια χαρακτηρίζονται ως βιογενή και προέρχονται από φυσικές πηγές.

Εκτός από τους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, στις οργανικές ενώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων περιέχονται οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons- PAH's), οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της αποδεδειγμένης καρκινογόνου και μεταλλαξιογόνου δράσης τους.

Κύριες ενώσεις που ανήκουν στην κατηγορία των PAH's είναι το βενζο[a]πυρένιο (BaP), το βενζο[e]πυρένιο (BeP), το βενζο[a]ανθρακένιο, το χρυσένιο, το βενζοπερυλένιο και η ινδενόλη. Αν και στην ατμόσφαιρα έχουν μετρηθεί συγκεντρώσεις PAH's που φθάνουν τα 20 μg/m<sup>3</sup>, μια έρευνα που έγινε σε 5 πόλεις του Ειρηνικού (Μελβούρνη, Σεούλ, Χονγκ Κονγκ, Μπανγκόγκ και Τζακάρτα) έδειξε μέσες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις PAH's από 6,4 έως 61,2 ng/m<sup>3</sup>, με το βενζο[e]πυρένιο και το βενζοπερυλένιο να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Κύρια διαδικασία σχηματισμού των PAH's είναι η πυροσύνθεση. Κατά την πυροσύνθεση, σε θερμοκρασίες περίπου 500°C, οι δεσμοί C-C και C-H των υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους, διαρρηγνύονται 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 PAH's με πυροσύνθεση δίνεται από την ακολουθία Αρωματικοί > κυκλοολεφίνες > ολεφίνες > παραφίνες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι PAH's εντάσσονται στην κατηγορία των τοξικών οργανικών μικρό ρύπων (Toxic Organic Micro Pollutants- TOMP's), όπου ανήκουν και οι πολυχλωριωμένες διοξίνες και φουράνια, καθώς και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB's), ομάδες ενώσεων που πρόσφατα γνώρισαν μεγάλη δημοσιότητα και επίσης σχετίζονται με τα αιωρούμενα σωματίδια.

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

## 6. Στοιχειακός άνθρακας

Κατά τις διαδικασίες καύσης και ιδίως εξ' αιτίας της κυκλοφορίας οχημάτων, εκπέμπονται σωματίδια αιθάλης τα οποία περιέχουν άνθρακα είτε υπό τη μορφή ενός πυρήνα από στερεό μαύρο στοιχειακό άνθρακα, είτε υπό μορφή είτε καθαρού γραφίτη, ή υπό μορφή υψηλού μοριακού βάρους μη πτητικής ύλης όπως πίσσας και κοκ. 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.).

Επειδή οι χημικές μεταβολές του στοιχειακού άνθρακα, όπως η χημική αντίδραση ή οι εναλλαγές μεταξύ σωματιδιακής και αέριας φάσης, είναι γενικά περιορισμένες, ο στοιχειακός άνθρακας θεωρείται καλός δείκτης της πρωτογενούς και ανθρωπογενούς αέριας ρύπανσης.

## 7. Γεωλογικά υλικά

Περιλαμβάνουν επιφανειακή σκόνη και αερομεταφερόμενα αποσθρωμένα πετρογενή ορυκτά υλικά. Δεν έχουν επομένως σταθερή χημική σύσταση και αντικατοπτρίζουν 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.

Ορισμένα από τα φυσικά ορυκτά που έχουν αναγνωρισθεί στην σωματιδιακή μάζα είναι τα παρακάτω: Χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ ), ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ), γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), αστρίοι (feldspar,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), εψωμίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), χλωρίτης, καολινίτης, μοντμοριλλονίτης, αιματίτης κ.α.

## 8. Βιολογικά υλικά

Ορισμένες μελέτες έχουν διαχωρίσει την σωματιδιακή ύλη βιολογικής προέλευσης (BAP- Biological Aerosol Particles), η οποία μπορεί να περιλαμβάνει μικροοργανισμούς όπως βακτήρια αλλά και σπόρια, γύρη και τεμαχίδια κυτταρινούχου φυτικού υλικού. Με την εξαίρεση κάποιων ιών και άλλων σωματιδίων που εκπέμπονται είτε από το ανθρώπινο σώμα, είτε από βιομηχανικές και αστικές δραστηριότητες (π.χ. αποχετευτικό σύστημα), αυτά τα σωματίδια είναι στην πλειοψηφία τους, χονδρόκοκκα. Στις περισσότερες μελέτες χαρακτηρίζονται ως οργανικός άνθρακας παρά ως βιολογικά υλικά.

### 9. Μέταλλα και μεταλλικά ιχνοστοιχεία

Τα μέταλλα που είναι παρόντα σε μεγαλύτερη αναλογία στα αιωρούμενα σωματίδια είναι το νάτριο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο και το κάλιο, υπό την μορφή των ιόντων τους. Σύμφωνα με αναλύσεις τα ποσοστά επί των συνολικών ιόντων της αέριας σωματιδιακής μάζας είναι κατά προσέγγιση 5,6-1,8-0,8-0,6% για τα  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  αντίστοιχα.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ιοντικά είδη, τα παραπάνω μέταλλα εμφανίζονται κυρίως στο χονδρόκοκκο κλάσμα των σωματιδίων. Αυτό είναι λογικό λόγω της προέλευσης τους από τα θαλάσσια αερολύματα και την επιφανειακή σκόνη. Το νάτριο είναι κυρίως παρόν ως  $\text{NaCl}$  και  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Είναι ευρέως αναγνωρισμένο το γεγονός 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 χρώμιο, το νικέλιο και το αρσενικό (μεταλλοειδές) είναι ιδιαίτερα τοξικά σε συγκεκριμένες δόσεις.

Ο μόλυβδος βρίσκεται στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή των αλογονιδίων του ( $\text{PbCl}_2$ ,  $\text{PbClBr}$ ,  $\text{PbBr}_2$ ), τα οποία σχηματίζονται κατά την αντίδραση των αντικροτικών ουσιών του καυσίμου (τετρααιθυλιούχος μόλυβδος) με το διχλωροαιθάνιο ή το διβρωμοαιθάνιο, που προστίθενται για να αποτρέψουν την συσσώρευση των οξειδίων του μολύβδου μέσα σε κινητήρες. Τα αλογονίδια του μολύβδου είναι αρκετά πτητικά ώστε να εξέλθουν από την εξάτμιση, αλλά συμπυκνώνονται σε σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Ο υδράργυρος είναι παρών στην ατμόσφαιρα με τη μορφή οργανομεταλλικών ενώσεων όπως οι  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ,  $(\text{CH}_3)\text{HgBr}$ . Αλλά μέταλλα απαντούν με την μορφή των οξειδίων τους όπως  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ .

Η έκθεση στα μεταλλικά ιχνοστοιχεία μέσω της αναπνοής αιωρούμενων σωματιδίων σε αστικές περιοχές αναπτυγμένων χωρών θεωρείται ότι είναι ανεπαρκής ώστε να έχει τοξική επίδραση στον άνθρωπο. Όμως, έχει αποδειχθεί ότι κάποια στοιχεία μετάπτωσης και συγκεκριμένα ο σίδηρος είναι δυνατό να έχουν αρνητικά αποτελέσματα μέσω μη-συνήθων μηχανισμών, όπως η συμβολή στην παραγωγή ριζών υδροξυλίου μέσω της αντίδρασης Fenton.

Με την εξαίρεση μετάλλων όπως ο μόλυβδος, του οποίου η κύρια πηγή είναι η κυκλοφορία οχημάτων η οποία οδηγεί στην ευρεία διασπορά του στον αέρα μιας πόλης, τα άλλα μεταλλικά ιχνοστοιχεία προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές διαδικασίες και συνεπώς η κατανομή τους στον χώρο είναι ανομοιόμορφη.

### 10. Ισχυρά οξέα

Ο σχηματισμός θεικών και νιτρικών στην ατμόσφαιρα από την οξείδωση των SO<sub>2</sub> και NO<sub>2</sub>, γίνεται αρχικά υπό τη μορφή των ισχυρών τους οξέων HNO<sub>3</sub> και H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, αντίστοιχα. Το νιτρικό οξύ λόγω της μεγάλης του πτητικότητας, μπορεί να ενσωματωθεί στα αιωρούμενα σωματίδια μόνο μέσω της απώλειας της οξύτητάς του, είτε μέσω της αντίδρασης του με το υδροχλωρικό οξύ, είτε μέσω της εξουδετέρωσης του από την αμμωνία. Αντιθέτως, το θειικό οξύ, είναι μη πτητικό και μόλις σχηματιστεί ενσωματώνεται κατ' ευθείαν στα σωματίδια, όπου κατόπιν μόνο εξουδετερώνεται από την αμμωνία της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, σε περιβάλλον με χαμηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικής αμμωνίας, τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν ένα σημαντικό περιεχόμενο ισχυρού οξέος το οποίο και αντικατοπτρίζει το μη εξουδετερωμένο ή μερικά εξουδετερωμένο θειικό οξύ. Ορισμένες παλαιότερες μελέτες υποστήριζαν σθεναρά ότι το περιεχόμενο ισχυρού οξέος είναι υπαίτιο για την τοξική δράση των σωματιδίων.

### 3.3. Φυσικές ιδιότητες των σωματιδίων που εξαρτώνται από το μέγεθός τους

Οι περισσότερες από τις φυσικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων (π.χ. όγκος, επιφάνεια, ταχύτητα πτώσης, διάχυση Brown, κ.ά.) αποτελούν συνάρτηση του μεγέθους τους. Αμέσως παρακάτω γίνεται αναφορά σε τρεις φυσικές ιδιότητες οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.

#### ➤ Ταχύτητα πτώσης

Η ταχύτητα πτώσης των αιωρούμενων σωματιδίων περιγράφεται από το νόμο του Stokes, ο οποίος ισχύει για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από την ελεύθερη διαδρομή των αερίων. Σύμφωνα με το νόμο του Stokes, η οριακή ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων στον αέρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας τους:

$$U_{op} = \frac{2g}{9} - \frac{(d - d')r^2}{n}$$

όπου  $g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας

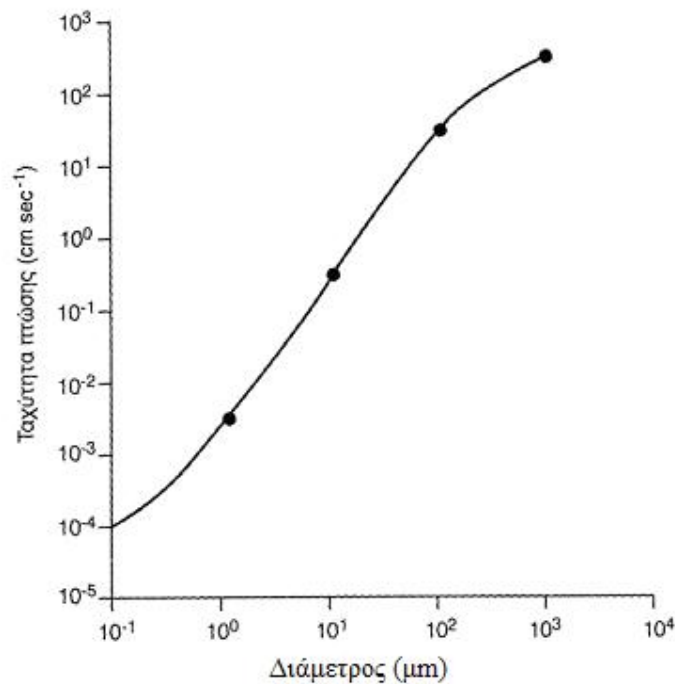
$d$  = πυκνότητα του σωματιδίου

$d'$  = πυκνότητα του μέσου πτώσης (ατμόσφαιρα)

$n$  = συντελεστής ιξώδους του μέσου πτώσης

$r$  = ισοδύναμη αεροδυναμική ακτίνα του σωματιδίου





**Σχήμα 3.2:** Ταχύτητα πτώσης σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους (0°C, 760 mmHg).

Στο Σχήμα 3.2 δίνεται η ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων σε σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Παρατηρούμε ότι τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο  $\geq 10 \mu\text{m}$  έχουν σημαντική ταχύτητα πτώσης σε σταθερές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τα σωματίδια αυτά αποτελούν ένα ξεχωριστό κλάσμα που ονομάζεται **πίπτουσα σκόνη** (dust fall) ή **ξηρή απόθεση** (dry deposition). Τα σωματίδια με διάμετρο  $< 10 \mu\text{m}$  έχουν πολύ μικρή ταχύτητα πτώσης με αποτέλεσμα να παραμένουν εν αιωρήσει στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

### ➤ Προσρόφηση

Η σωματιδιακή ύλη που αιωρείται στην ατμόσφαιρα έχει πολύ μεγάλη ενεργό επιφάνεια ανά μονάδα μάζας, εξαιτίας του μικρού μεγέθους της πλειονότητας των σωματιδίων. Η επιφάνεια αυτή υπολογίζεται σε  $10^6 \text{ m}^2/\text{g}$  σε σύγκριση με  $500\text{-}2000 \text{ m}^2/\text{g}$  που έχει ο ενεργός άνθρακας. Τόσο μεγάλη επιφάνεια ευνοεί την προσρόφηση μορίων από την αέρια φάση, ιδιαίτερα για συστατικά με χαμηλή πτητικότητα. Γενικά, μία ουσία με τάση ατμών  $< 0,1 \text{ mmHg}$  στους  $25^\circ\text{C}$  προσροφάται ισχυρά στα ατμοσφαιρικά σωματίδια. Αυτό σημαίνει ότι και τα μέταλλα που εξατμίζονται από ηφαιστειακές ή βιολογικές διεργασίες καταλήγουν στα αεροζόλ. Επίσης, ημιπτητικές οργανικές ενώσεις (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οργανοχλωριωμένες ενώσεις, κ.ά.) προσροφώνται σε μεγάλο βαθμό στα



αιωρούμενα σωματίδια. Η προσρόφηση τοξικών ουσιών στα αιωρούμενα σωματίδια αυξάνει την επικινδυνότητα τους.

➤ **Οπτική συμπεριφορά**

Τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας αποτελούν την κύρια αιτία μείωσης της ορατότητας σε πολλές περιοχές. Όταν το φως προσπίπτει στα σωματίδια, συμβαίνουν δύο διαφορετικά φαινόμενα: σκεδασμός, δηλαδή επανεκπομπή του φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις και απορρόφηση με μετατροπή της απορροφούμενης ενέργειας σε θερμότητα ή χημική ενέργεια. Ο σκεδασμός και η απορρόφηση φωτός από ένα μέσο εκφράζεται από το δείκτη διάθλασης.

Τόσο ο σκεδασμός, όσο και η απορρόφηση του φωτός είναι συνάρτηση της σύστασης, της συγκέντρωσης και του μεγέθους των σωματιδίων. Η μεγαλύτερη μείωση της ορατότητας οφείλεται στο σκεδασμό του φωτός από σωματίδια με μέγεθος στην περιοχή του ορατού φωτός (400-800 nm). Στον Πίνακα 3.1 δίνεται η ορατότητα σε σχέση με τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

**Πίνακας 3.1:** Ορατότητα σε σχέση με τη συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Περιοχή	Αιωρούμενα σωματίδια (μg/m <sup>3</sup> )	Ορατότητα (km)
Υπαιθρος	30	40
Προάστια	100	12
Κέντρο Πόλης	200	6
Βιομηχανική Περιοχή	700	1,6

**3.4. Κατάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο τον τρόπο σχηματισμού**

Η σωματιδιακή ύλη (PM ή Particulate Matter) είναι ένα απανταχού παρών ιχνοσυστατικό της κατώτερης ατμόσφαιρας και δεν περιορίζεται στην περιοχή την επαπτόμενη της γης όπου υπάρχει η πλειοψηφία των πηγών ρύπανσης, καθώς αέρια ρεύματα μεταφέρουν τα σωματίδια και στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Μερικά από τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια είναι αρκετά μικρά και σκοτεινόχρωμα με αποτέλεσμα να είναι εύκολο να τα δει το ανθρώπινο μάτι, όπως η αιθάλη ή ο καπνός. Άλλα σωματίδια είναι τόσο μικρά ώστε να ανιχνεύονται μόνο με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου. Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται από μια ποικιλία κινητών και ακίνητων πηγών, η φυσική και χημική τους σύσταση

ποικίλει ευρέως. Σε μια προσπάθεια ταξινόμησης των σωματιδιακών ρυπαντών, είναι δυνατόν να τους διακρίνουμε σε δύο γενικές ομάδες βάσει του τρόπου σχηματισμού τους:

### ➤ Πρωτογενή σωματίδια

Πρωτογενή σωματίδια είναι αυτά τα οποία εκπέμπονται άμεσα από τις 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 ρυπαντών 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 μόνο και αυτό 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 1 μm, όμως η κατ' αριθμό κατανομή τους παρουσιάζει μέγιστο στην περιοχή 0,1-1 μm.

Αυτή η κατηγορία σωματιδίων υπόκειται σε ελάχιστες διαδικασίες μετασχηματισμού μετά την εκπομπή τους. Λόγω του μεγάλου τους σχετικά μεγέθους 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.

### ➤ 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:

- Χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην αύξηση της συγκέντρωσης αέριων ενώσεων με χαμηλές τάσεις ατμών. Για παράδειγμα:  $\text{NO}_2 + \text{OH} \Rightarrow \text{HNO}_3$
- Ελάττωση της θερμοκρασίας η οποία οδηγεί σε ελάττωση της τάσης ατμών.
- Σχηματισμός πολυδισπαρμένου αερόλυματος, 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  $\mu\text{m}$ .

### 3.5. Κατάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο το μέγεθος

Τα σωματίδια έχουν διάφορα σχήματα και συνεπώς είναι αδύνατη η έκφραση κοινής παραμέτρου μεγέθους, αφού πολλές ιδιότητες των σωματιδίων εξαρτώνται από το μέγεθός τους (όγκος, 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 μπορεί να προσδιορισθεί γεωμετρικά (με οπτική ή ηλεκτρονική μικροσκοπία) από τη σκέδαση

που προκαλεί στο φως και από τα φυσικά χαρακτηριστικά του όπως είναι η ηλεκτρική ευκινησία, η ταχύτητα εναπόθεσης και η αεροδυναμική του συμπεριφορά.

Από τα παραπάνω, συνηθέστερο είναι να χρησιμοποιείται η φυσική συμπεριφορά του σωματιδίου ως κριτήριο καθορισμού της ισοδύναμης διαμέτρου. Συγκεκριμένα, συνήθως χρησιμοποιείται η διάμετρος Stokes ή η αεροδυναμική διάμετρος.

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.

Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη, συντίθεται από σωματίδια έντονα διαφοροποιημένα ως προς το μέγεθος. Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια έχουν μέγεθος κάτω από 5 nm σε διάμετρο και αποτελούνται μόνο από κάποιες δεκάδες μορίων. Αντιθέτως τα πιο μεγάλα σωματίδια έχουν μέγεθος έως και 100  $\mu\text{m}$ .

**Ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP)**, είναι ο ορός που δόθηκε στο σύνολο των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και σταγονιδίων. Τα TSP ποικίλουν γενικά σε μέγεθος από 0,01  $\mu\text{m}$  έως και μερικές εκατοντάδες  $\mu\text{m}$ . Ωστόσο τα σωματίδια εκείνα με μέγεθος άνω των 50  $\mu\text{m}$  έχουν την τάση να καθιζάνουν πολύ εύκολα.

Τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε δύο τύπους σωματιδίων, τα οποία με τη σειρά τους ομαδοποιούνται σε επιμέρους κλάσματα:

➤ **Τα λεπτόκοκκα (fine mode)**

Λεπτόκοκκα καλούνται τα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μέχρι 2,5  $\mu\text{m}$ . Χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο υποκατηγορίες:

**1. Υποκατηγορία πυρήνα (nucleation mode)**

Μέγεθος 0,01 έως 0,1  $\mu\text{m}$ . Τα σωματίδια αυτά προέρχονται άμεσα από πηγές καύσης ή είναι συμπυκνώματα προϊόντων καύσης, έχουν μικρό χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα γιατί συσσωματώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Το μέγεθος των δευτερογενών σωματιδίων αυξάνεται επίσης καθώς λειτουργούν ως εστίες συμπύκνωσης άλλων αερίων συστατικών.

Καθώς τα σωματίδια φθάνουν σε μια διάμετρο της τάξης των 60 nm η συμπύκνωση γίνεται ελεγχόμενη από τη διάχυση και επιβραδύνεται, ενώ η συσσωμάτωση η οποία είναι μια διεργασία δεύτερης τάξης τελικά σταματά, καθώς ο αριθμός των σωματιδίων μειώνεται. Εκτιμάται ότι η ανάπτυξη του μεγέθους των σωματιδίων σε 0,1 nm, σε συνήθεις συνθήκες αστικής ρύπανσης, απαιτεί λιγότερο από μια μέρα.

Η υποκατηγορία πυρήνα χωρίζεται στις επόμενες δύο ομάδες :

- **Μεταβατικά σωματίδια πυρήνα (*Aitken mode particles*)**

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

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

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

Τα πλέον λεπτόκοκκα σωματίδια που έχουν κατασκευαστεί για ερευνητικούς σκοπούς έχουν μέγεθος περίπου 10 nm. Η διαδικασία παραγωγής τους περιλαμβάνει την θέρμανση ενός μετάλλου ή ενός άλατος ως το σημείο εξάχνωσής του και εν συνεχεία την συμπύκνωση του ατμού, με γρήγορη ψύξη, ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία πολλών μικρών, αντί λίγων μεγαλύτερων σωματιδίων.

## **2. Υποκατηγορία συσσώρευσης (*accumulation range*)**

Μέγεθος 0,1 έως 2,5 μm. Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από συσσωματώσεις μικρότερων σωματιδίων (υποκατηγορίας πυρήνα) και από συμπυκνώσεις επιπρόσθετου υλικού στις συσσωματώσεις αυτές. Μια άλλη διαδικασία σχηματισμού των σωματιδίων υποκατηγορίας συσσώρευσης, είναι οι χημικές αντιδράσεις που γίνονται στα σύννεφα. Αυτές συνήθως αφορούν την οξείδωση αερίων ουσιών όπως το SO<sub>2</sub>, η οποία γίνεται στο υδατικό περιβάλλον των σταγόνων που σχηματίζονται γύρω από τα μικρότερα σωματίδια. Μετά την εξάτμιση της σταγόνας η μάζα του σωματιδίου είναι αυξημένη κατά το προϊόν της οξείδωσης.

Με βάση τα παραπάνω, τα σωματίδια της υποκατηγορίας συσσώρευσης χωρίζονται σε δύο ομάδες:

- **Συμπυκνώματα (*condensation mode*)**

Πρόκειται για τα μικρότερα σωματίδια της υποκατηγορίας. Σχηματίζονται από τη συσσωμάτωση μη υγροσκοπικών σωματιδίων πυρήνα και παρουσιάζουν μέγιστο στην κατανομή κατά μάζα περίπου στα 0,2 μm.

- **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, τα οποία παρουσιάζουν μέγιστο στην κατά μάζα κατανομή στα 0,7 μm.

Η απομάκρυνση των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα γίνεται με ξηρή και υγρή απόθεση. Τα σωματίδια υποκατηγορίας συσσώρευσης διαχέονται στην επιφάνεια της γης, μια διαδικασία που επιβραδύνεται καθώς το μέγεθος των σωματιδίων αυξάνει. Όσον αφορά την υγρή απόθεση, μόνο αν τα σωματίδια έχουν τις κατάλληλες υγροσκοπικές ιδιότητες μπορούν να απομακρυνθούν ως βροχή.

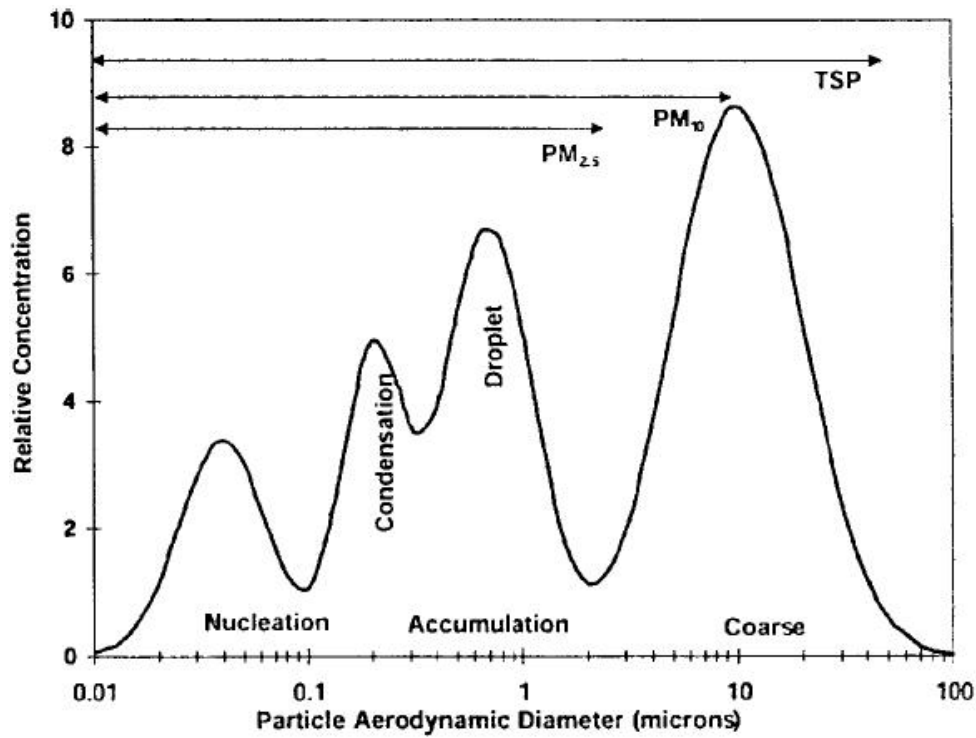
Συνεπώς η απομάκρυνση τους από την ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερα δύσκολη, για αυτό και τα σωματίδια συσσωρεύονται σε αυτή την κατηγορία μεγέθους. Τα σωματίδια υποκατηγορίας συσσώρευσης έχουν χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα από 7 έως 30 ημέρες.

- **Τα χονδρόκοκκα (*coarse mode*)**

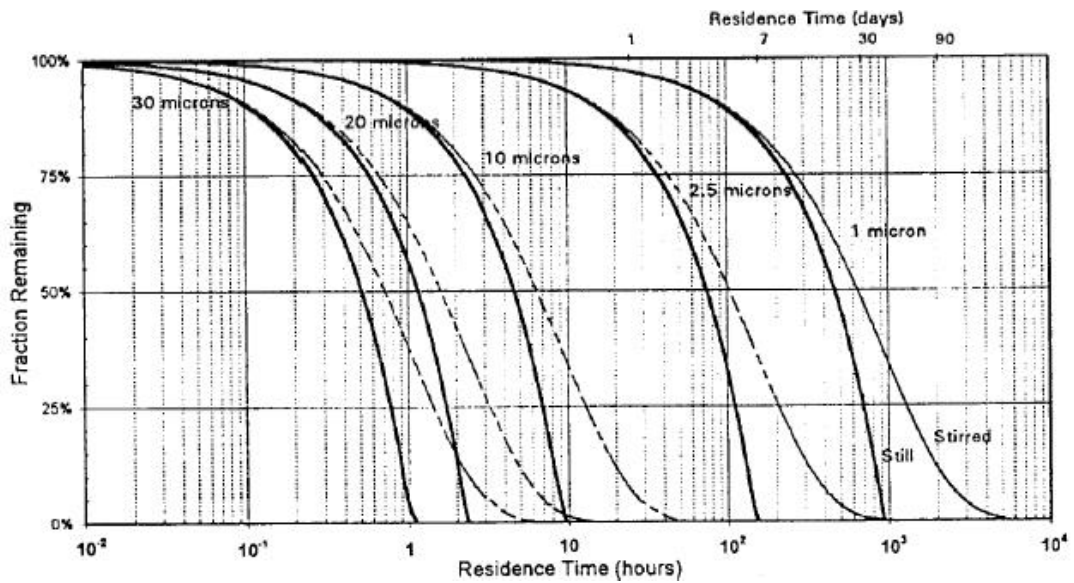
Χονδρόκοκκα καλούνται τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη των 2,5 μm. Παράγονται συνήθως με μηχανικούς τρόπους.

Στο περιβάλλον τα μεγαλύτερα σωματίδια, για παράδειγμα εκείνα με διάμετρο 10 μm, είναι δυνατόν να μείνουν σε αιώρηση 10 με 20 ώρες πριν την καθίζησή τους στο κάτω τμήμα της τροπόσφαιρας. Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι περίπου 7m/s, συνεπώς, τα σωματίδια αυτά μπορούν να ταξιδέψουν έως 20 με 30 χιλιόμετρα, ενώ τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου 0,1 έως 1 μm) μπορούν να απομακρυνθούν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο εκπομπής τους. Ένα μικρό ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να φτάσει έως το άνω τμήμα της τροπόσφαιρας (περίπου 8 με 15 χιλιόμετρα ύψος). Τα σωματίδια αυτά μπορούν να μείνουν αιωρούμενα για μεγάλους χρόνους (έως και 1 έτος).





Σχήμα 3.3: Κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων εξωτερικής ατμόσφαιρας κατά μέγεθος.



Σχήμα 3.4: Χρόνος αιώρησης αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους σε μέγιστο υψόμετρο 100 m (στις περιπτώσεις ακίνητου και κινητού αέρα).

### 3.6. Κατάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων με κριτήριο την ικανότητα διείσδυσης στον ανθρώπινο οργανισμό

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

#### ➤ Στα εισπνεύσιμα σωματίδια (insirable particles)

Αυτό το κλάσμα των ολικών σωματιδίων περιλαμβάνει σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες από 10  $\mu\text{m}$ . Τα μεγαλύτερα από αυτά αποτίθενται στη ρινική κοιλότητα, ενώ όσο μικραίνει η διάμετρός τους εισχωρούν βαθύτερα στους αεραγωγούς και τις κυψελίδες.

#### ➤ Στα θωρακικά σωματίδια (thoracic particles)

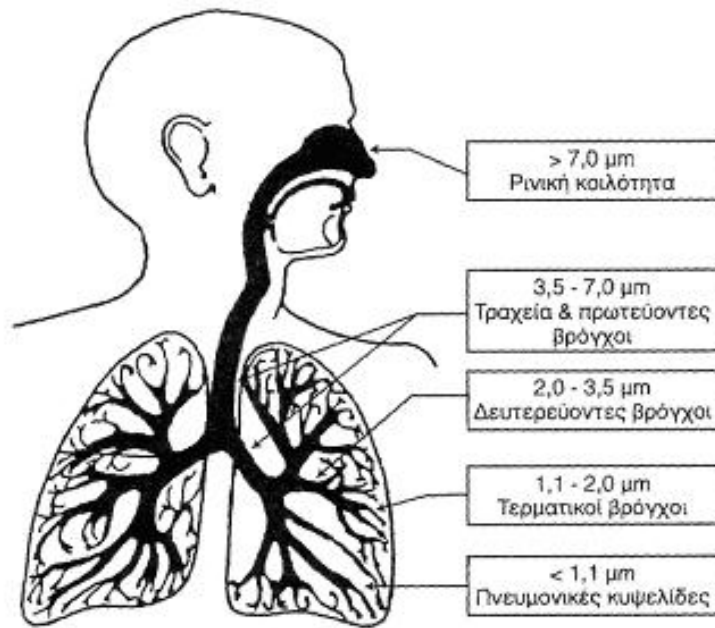
Θωρακικά σωματίδια καλείται το κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Θεωρείται ότι έχουν μέγεθος μικρότερο των 7  $\mu\text{m}$ .

#### ➤ Στα αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles)

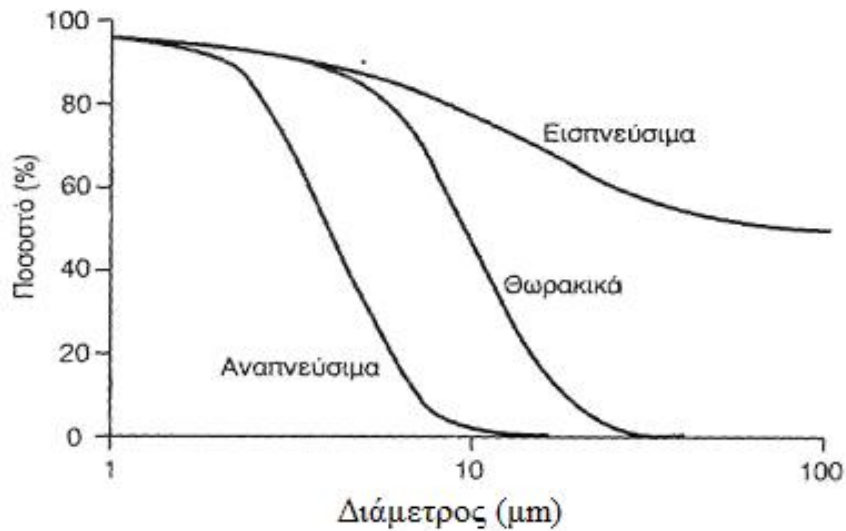
Το κλάσμα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου έως περίπου 2,5  $\mu\text{m}$  είναι το πιο σημαντικό από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια αυτά καταφέρνουν να διεισδύουν έως τα βάθη των πνευμόνων και γι' αυτό καλούνται αναπνεύσιμα.

Στο Σχήμα 3.6 δίνεται μια τυπική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα, ανάλογα με τη διάμετρό τους. Όπως φαίνεται, για σωματίδια με διάμετρο 10  $\mu\text{m}$ , περίπου 80% της μάζας τους είναι εισπνεύσιμα, το 50% είναι θωρακικά, ενώ ελάχιστο ποσοστό είναι αναπνεύσιμο. Αντίθετα, σχεδόν 90% της μάζας των σωματιδίων με διάμετρο 2,5  $\mu\text{m}$  είναι αναπνεύσιμο.





Σχήμα 3.5: Διείσδυση σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα.



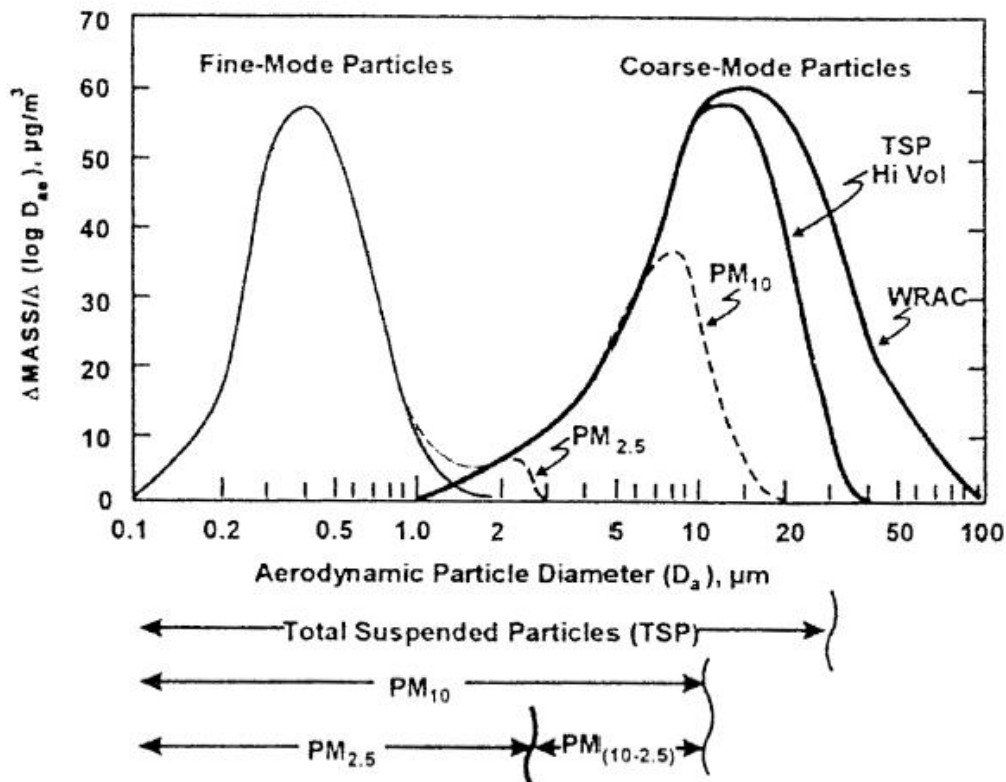
Σχήμα 3.6: Κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα ανάλογα με το μέγεθός τους.

### 3.7. Ορισμοί μετρούμενων σωματιδιακών ρύπων

Με βάση την ταξινόμηση των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων κατά μέγεθος (σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) και σε συσχέτιση με τη διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό (εισπνεύσιμα και αναπνεύσιμα), γίνεται η εισαγωγή δύο νέων ρυπαντικών παραμέτρων, των σωματιδίων  $PM_{10}$  και των σωματιδίων  $PM_{2.5}$ .

Θεωρείται γενικά ότι τα  $PM_{10}$  ταυτίζονται με την κατηγορία των εισπνεύσιμων σωματιδίων και έχουν διάμετρο έως 10  $\mu m$ . Ωστόσο ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπ' όψη του το γεγονός ότι είναι αδύνατον να κατασκευασθεί δειγματολήπτης ικανός να λειτουργεί υπό μορφή βηματικής συνάρτησης, οπότε να αποκλείει τη συλλογή των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο παραπλήσια της επιθυμητής, ώστε να μπορούμε να προσδιορίσουμε 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  $\mu m$ .

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται τα κυριότερα κλάσματα των αιωρούμενων σωματιδίων όπως ορίστηκαν παραπάνω. Φαίνεται ξεκάθαρα σε αυτό ότι στα  $PM_{10}$  περιλαμβάνεται και ένας αριθμός σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 10  $\mu m$ .



Σχήμα 3.7: Κατανομή αιωρούμενων σωματιδίων κατά μέγεθος.

Για τον παραπάνω λόγο, ο αυστηρός ορισμός των  $PM_{10}$  όπως τον αναφέρει η Ε.Ε. στις οδηγίες της είναι:

*“ $PM_{10}$  νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου  $10\mu m$ ”.*

Τα  $PM_{2,5}$  ταυτίζονται με την κατηγορία των αναπνεύσιμων σωματιδίων και θεωρείται ότι έχουν διάμετρο έως και  $2,5 \mu m$ . Ο αντίστοιχος ορισμός της Ε.Ε. για τα  $PM_{2,5}$  είναι:

*“ $PM_{2,5}$  νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου  $2,5\mu m$ ”.*

### 3.8. Μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων

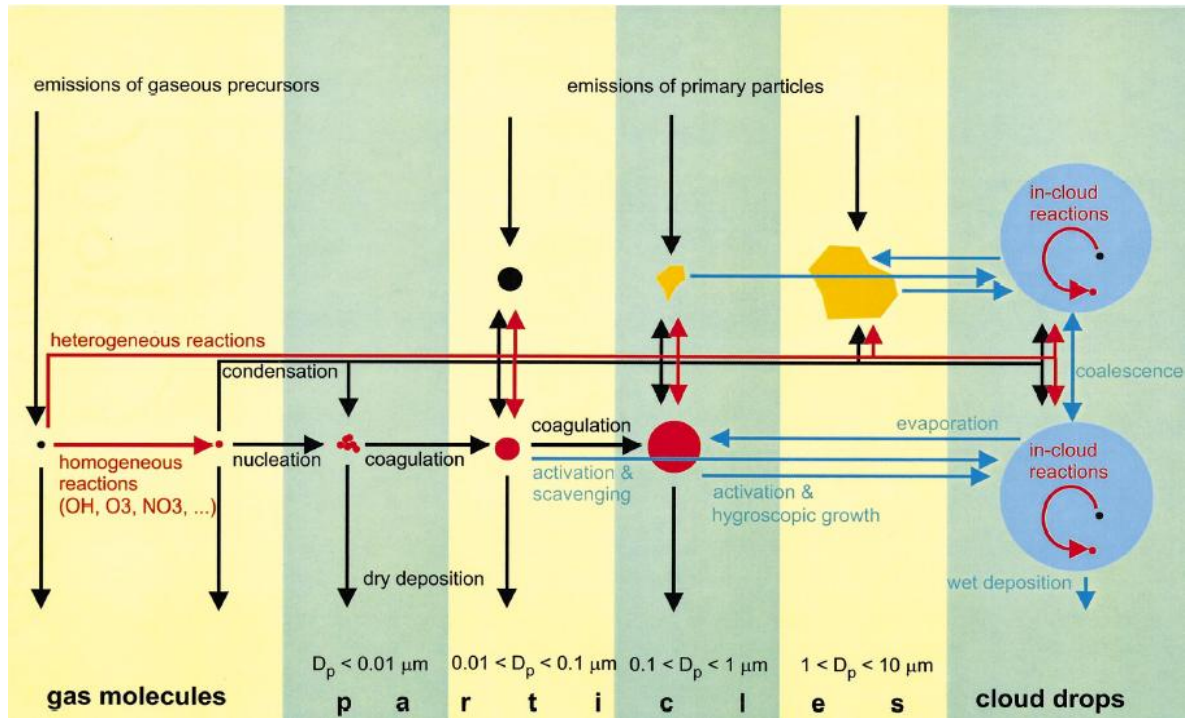
Τα αιωρούμενα σωματίδια υπόκεινται σε ένα πλήθος διεργασιών στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 3.8):

1. Τα μικρά σωματίδια ( $d < 0,1 \mu m$ ) υπόκεινται σε συγκρούσεις με μόρια αερίων. Η κίνηση αυτή ονομάζεται διάχυση **Brown**. Η ταχύτητα διάχυσης αυτών των μικρών σωματιδίων είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να συσσωματώνονται προς μεγαλύτερα σωματίδια.
2. Η προσρόφηση συστατικών από την αέρια φάση και η χημική αντίδραση των σωματιδίων με ατμοσφαιρικά αέρια ή σωματίδια προκαλεί αλλοίωση της αρχικής τους σύστασης. Η έκταση αυτής της ετερογενούς μετατροπής των σωματιδίων δεν είναι πλήρως γνωστή.
3. Τα σωματίδια απομακρύνονται με ενσωμάτωση τους στις σταγόνες της βροχής. Η διεργασία αυτή μπορεί να λάβει χώρα είτε κατά το σχηματισμό του σύννεφου της βροχής, είτε κατά την πτώση της βροχής. Πολύ μικρά σωματίδια, συνήθως υγροσκοπικά, π.χ.  $NaCl$  ή  $(NH_4)_2SO_4$ , δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης των υδρατμών. Έτσι, βοηθούν στη δημιουργία σταγονιδίων σύννεφου. Τα σωματίδια αυτά έχουν διάμετρο συνήθως  $0,1-0,2 \mu m$  και ονομάζονται **πυρήνες συμπύκνωσης σύννεφου** (cloud condensation nuclei, CCN). Η κατανόηση της ενεργοποίησης των αερολυμάτων σε σταγονίδια στα νέφη και ειδικότερα ο ρόλος των οργανικών ενώσεων σε αυτή τη διεργασία, είναι ένας τομέας που συνεχώς εξελίσσεται. Ενώ μέχρι πριν από μερικά χρόνια θεωρούνταν ότι μόνο τα

ανόργανα άλατα αποτελούσαν το διαλυτό κλάσμα του αερολύματος, είναι πλέον ξεκάθαρο ότι ένα μεγάλο κλάσμα οργανικών ενώσεων είναι υδατοδιαλυτό και επίσης υπάρχουν έμμεσα στοιχεία ότι αυτές οι ενώσεις συνεισφέρουν στην χημική σύσταση CCN. Η προέλευση τους είναι φυσική ή ανθρωπογενής. Εργαστηριακές μελέτες έχουν δείξει ότι προϊόντα οξείδωσης από ενώσεις προερχόμενες από βιολογικές διεργασίες, όπως τα τερπένια, είναι ελάχιστα υγροσκοπικές. Παρόλα αυτά αν αναμιχθούν εσωτερικά με σωματίδια θεικού αμμωνίου, τα οργανικά αυτά παράγωγα δεν εμποδίζουν την αναρρόφηση νερού σχηματίζοντας μια αδιαπέραστη μεμβράνη αλλά αναμιγνύονται ομογενώς με το θεικό αμμώνιο στο σταγονίδιο. Η δημιουργία μεμβρανών αναμένεται όταν οργανικά απορρυπαντικά αναμιγνύονται με σταγονίδια διαλυμάτων. Απορρυπαντικά έχουν βρεθεί σε σταγονίδια ομίχλης μολυσμένων αέριων μαζών, ωστόσο η συνολική επιρροή τους στην ενεργοποίηση του αερολύματος είναι σύνθετη. Μπορεί με την παρουσία τους να ελαττώνεται η επιφανειακή τάση των σταγονιδίων και έτσι να ελαττώνεται και ο βαθμός υπερκορεσμού που απαιτείται για ενεργοποίηση, παράλληλα όμως με την παρουσία τους ελαττώνουν τη μοριακότητα κατά βάρος εξαιτίας του μεγάλου τους μοριακού βάρους και επομένως αυξάνουν τον βαθμό υπερκορεσμού που απαιτείται για την ενεργοποίηση του σταγονιδίου. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι εκτός από τους υδατικούς ατμούς, άλλοι διαλυτοί ατμοί μπορεί επίσης να συμπυκνωθούν κατά την διεργασία ενεργοποίησης ενισχύοντας την αναλογία διάλυσης και επομένως μειώνοντας το απαιτούμενο βαθμό υπερκορεσμού. Με όλα αυτά τα στοιχεία γίνεται προφανές ότι η δημιουργία σταγονιδίων εξαρτάται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των πρόδρομων αμιγών σωματιδίων που εναλλακτικά καθορίζονται από τις διεργασίες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9. Μετά το σχηματισμό τους, οι σταγόνες της βροχής καθώς πέφτουν στο έδαφος παρασύρουν σημαντικές ποσότητες ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Εκτιμάται ότι 70-80% της μάζας των αεροζόλ που βρίσκονται κάτω από το σύννεφο βροχής, απομακρύνεται με τον τρόπο αυτό.

4. Τα σωματίδια απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα με απόθεση μέσα από το οριακό στρώμα του αέρα στην επιφάνεια του εδάφους. Η ταχύτητα απόθεσης των σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί με την ίδια εξίσωση που ισχύει για την ξηρή

απόθεση των αερίων (Κεφάλαιο 2.3). Η ταχύτητα απόθεσης των θεικών αεροζόλ είναι 0,1 cm/s.



Σχήμα 3.8: Διεργασίες στις οποίες υπόκεινται τα ατμοσφαιρικά σωματίδια.

Βιβλιογραφικές αναφορές: [1], [3], [8], [14], [15], [16], [17], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [29], [30], [31], [32], [33], [57], [58], [61]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Οι πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία συνδέεται με αιωρούμενους σωματιδιακούς ρυπαντές, είναι αρκετές και διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: **α) τις φυσικές και β) τις ανθρωπογενείς**. Αμέσως παρακάτω ακολουθεί η ανάλυση των δύο αυτών κατηγοριών προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

### 4.1. Φυσικές πηγές

Στην κατηγορία των φυσικών πηγών αναλυτικά ανήκουν:

#### ➤ **Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις**

Τα αέρια ρεύματα που παρασύρουν αιωρούμενα σωματίδια από την έρημο της Σαχάρας έχει εκτιμηθεί ότι μεταφέρουν 150 εκ. τόνους σκόνης ετησίως προς το βόρειο ημισφαίριο. Με τον ίδιο τρόπο εκτιμάται ότι μεταφέρονται 3,9 εκ. τόνοι σωματιδίων, τα οποία τελικά γίνονται εμφανή ως κόκκινη βροχή, από την έρημο της Σαχάρας προς τη βορειοδυτική περιοχή της Μεσογείου, ετησίως. Αν και ο κύριος όγκος των προερχόμενων από τη Σαχάρα σωματιδίων διοχετεύεται προς τη περιοχή της Μεσογείου, τέτοια σωματίδια μεταφέρονται επίσης προς τη βόρεια Ευρώπη 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 αυξάνεται και όσο περισσότερο καλύπτεται η επιφάνεια του από βλάστηση. Εκτιμάται ότι κάθε χρόνο η συνολική συνεισφορά του φαινομένου στα αιωρούμενα σωματίδια του βόρειου ημισφαιρίου είναι 300 εκατομμύρια τόνοι.

Τα σωματίδια που μεταφέρονται από τη Σαχάρα είναι συνήθως χονδρόκοκκα και συχνά έχοντας μικρό χρόνο ζωής μπορούν να μετατοπισθούν σε σχετικά μικρές ακτίνες. Όμως η ανίχνευση τους από την βόρεια Αφρική σε χώρες της βόρειας Ευρώπης αποδεικνύει ότι αυτός ο περιορισμός δεν ισχύει πάντα.

Η σύσταση των σωματιδίων που προέρχονται από τη Σαχάρα, εμφανίζει υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη, με κάποιες ποσότητες γύψου, αργιλικών υλικών και μετάλλων.



### ➤ Επαναιώρηση σκόνης από το έδαφος

Η επαναιώρηση της σκόνης από το έδαφος οφείλεται σε μετεωρολογικούς μηχανισμούς, όπως είναι ο άνεμος, οι μεταβολές στη θερμοκρασία και η υγρασία, διαμέσου των οποίων γίνεται δυνατή η αποσάθρωση πετρών και ορυκτών. 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 στα όρια των 5 έως 50  $\mu\text{m}$ . Η χημική σύσταση της σκόνης από χώμα είναι όμοια με εκείνη της γεωλογικής πηγής, όπως δολομίτης, γύψος, χαλαζίας και αργιλικά πετρώματα.

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

- τη σκόνη που μεταφέρεται πάνω στα ελαστικά των οχημάτων
- τη σκόνη που καθιζάνει από την ατμόσφαιρα
- τη φθορά της επιφάνειας του ίδιου του δρόμου
- τη σταδιακή αποσάθρωση τμημάτων των οχημάτων 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 μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί ή μετρηθεί καθώς εξαρτάται έντονα από παράγοντες όπως :

- το φορτίο των σωματιδίων που επικάθονται στην επιφάνεια
- το χρόνο ξήρανσης που προηγείται της επαναιώρησης
- την ταχύτητα των κινούμενων οχημάτων

Ο ρυθμός εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων  $\text{PM}_{10}$  στην Καλιφόρνια για το 1995 (όπως εκτιμήθηκε στα πλαίσια της ολοκληρωμένης ερευνάς για την παρακολούθηση των επιπέδων  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$  στην ατμόσφαιρα), από την επαναιώρηση σκόνης από τους δρόμους, είναι 12,9 ton/ημέρα για ασφαλτοστρωμένους δρόμους και 21,0 ton/ημέρα για μη ασφαλτοστρωμένους

δρόμους. Η αντίστοιχη τιμή για την αερομεταφερόμενη σκόνη είναι 7,6 ton/ημέρα. Η κατανομή κατά μέγεθος και η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων στις αστικές περιοχές δίνουν μια ξεκάθαρη ένδειξη ότι αυτή η πηγή συνεισφέρει σημαντικά στο φορτίο σε αιωρούμενα σωματίδια στις πόλεις.

### ➤ **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 σε ένα εύρος από 1 έως 20 μm, φθάνουν σε ύψος 500 m πάνω από τις θαλάσσιες περιοχές και μεταφέρονται από τους άνεμους μέχρι και 1500 km.

Αν και τα περισσότερα σωματίδια ανήκουν στο χονδρόκοκκο κλάσμα, ένα μικρό ποσοστό της μάζας τους έχει μέγεθος αρκετά μικρό ώστε να έχουν χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα έως και τρεις ημέρες.

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

### ➤ **Ηφαιστειακή δραστηριότητα και εκρήξεις**

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα λαμβάνει ακόμη χώρα σε κάποιες νησιωτικές περιοχές της Ευρώπης όπως είναι οι Κανάριοι Νήσοι και η Σικελία. Τα σωματίδια με τη μορφή ιπτάμενης τέφρας που εκπέμπουν τα ηφαίστεια, μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική τοπική πηγή σωματιδίων σε κοντινές πόλεις, αλλά και προδρόμων ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα το ηφαίστειο στο βουνό Αίτνα εκτιμήθηκε ότι εκπέμπει κατά μέσο όρο 4.000 τόνους διοξειδίου του θείου ημερησίως.

Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν μια συγκεντρωμένη πηγή όλων των ατμοσφαιρικών ρύπων και ιδιαίτερα των σωματιδίων. Για παράδειγμα η έκρηξη του



ηφαιστείου της Αγίας Ελένης στις 18 Μαΐου 1980 εκτόξευσε όγκο σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ίσο με 4 km<sup>3</sup>. Η ποσότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από το συνολικό ετήσιο πόσο των εκπεμπόμενων σωματιδίων που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες στην Βόρεια Αμερική. Το μέγεθος των εκπεμπόμενων σωματιδίων κυμάνθηκε από στέρεα σώματα, ορατά με το γυμνό μάτι, έως και υπερλεπτόκοκκα σωματίδια διαμέτρου 0,001 μm.

Η ενέργεια των ηφαιστειακών εκρήξεων είναι συχνά αρκετή ώστε να μεταφέρει τα αέρια και τα σωματίδια δια μέσου των χαμηλών στρωμάτων της ατμόσφαιρας, στη στρατόσφαιρα, όπου οι φυσικές διαδικασίες απομάκρυνσης είναι πολύ βραδείες.

Η χημική ανάλυση της ηφαιστειακής τέφρας που λήφθηκε σε απόσταση 650 km από το σημείο της έκρηξης, έδειξε ότι το 60-70% της σύστασης ήταν διοξείδιο του πυριτίου και το 16-18% τριοξείδιο του αργιλίου. Η χημική σύσταση και η κατανομή μεγεθών της τέφρας μεταβαλλόταν ανάλογα με την απόσταση από την πηγή, υποδεικνύοντας ότι τα συγκεκριμένα χημικά συστατικά συγκεντρώνονταν σε συγκεκριμένες τάξεις μεγέθους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ορισμένα στοιχεία, όπως ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και το αρσενικό, έχουν χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες εξάτμισης και συγκεντρώθηκαν σε σωματίδια μικρού μεγέθους, που σχηματίστηκαν με εξάχνωση μετά την έκρηξη.

### ➤ **Οι τυχαίες πυρκαγιές**

Οι πυρκαγιές μεγάλων δασών ή θαμνωδών περιοχών, θεωρούνται φυσικές πηγές ρύπανσης ακόμα και εάν έχουν προκληθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες ή αμέλειες. Μεγάλες και ανεξέλεγκτες φωτιές σε δασικές περιοχές εκπέμπουν ανυπολόγιστες ποσότητες σε μορφή καπνού, τέφρας και άλλων αέριων ρυπαντών.

Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια του καπνού είναι υδρογονάνθρακες και ρητίνες τα οποία έχουν συνήθως μια διάμετρο περίπου 0,075 μm και είναι εσπνεύσιμα. Το μικρό μέγεθος τους επιτρέπει να εισέρχονται στα κτίρια σαν τα αέρια. Η διάφορα με τα αέρια είναι ότι τα σωματίδια του καπνού έχουν μια μεγάλη κολλητική δύναμη και βρίσκονται αποτιθέμενα σε επιφάνειες. Το υπόλοιπο στέρεο υλικό το οποίο παραμένει από τις καύσεις των πυρκαγιών είναι η τεφρά η οποία παραμένει όταν ένα καύσιμο οξειδώνεται πλήρως.

#### 4.2. Ανθρωπογενείς πηγές

Οι ανθρωπογενείς πηγές επιμερίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα οχήματα, τις βιομηχανίες, τις οικιακές και τις αστικές δραστηριότητες. Αμέσως παρακάτω γίνεται μια εκτενέστερη ανάλυση των ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης οι οποίες συνδέονται με αιωρούμενα σωματίδια. Αναλυτικά:

##### ➤ **Εκπομπές από τα οχήματα**

Οι κύριες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από τα οχήματα είναι τα καυσαέρια των οχημάτων και η φθορά από τη χρήση των ελαστικών και των φρένων. Οι εκπομπές σωματιδίων από τους κινητήρες ντίζελ είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τους βενζινοκινητήρες, κάτι που είναι σύμφωνο με τη γενική αρχή, ότι όσο βαρύτερο είναι το κλάσμα πετρελαίου που καίγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή σωματιδίων. Βέβαια, δεν είναι δυνατό να αγνοηθεί η εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων σωματιδίων από βενζινοκινητήρες και ιδιαίτερα από μη καταλυτικά οχήματα.

Η χρήση του ντίζελ ως καυσίμου γίνεται κυρίως από επαγγελματικά αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία και αγοραία οχήματα, αλλά και σε ορισμένες χώρες και από ιδιωτικής χρήσης αυτοκίνητα. Δευτερεύουσες εστίες εκπομπής σωματιδίων, που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία είναι τα μηχανήματα βαρέως έργου που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες, οι αμαξοστοιχίες αλλά και τα πλοία, τα οποία επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα πάνω από λιμάνια και ωκεανούς.

Οι εκπομπές από μηχανές ντίζελ περιέχουν κυρίως αιθάλη, πτητικές οργανικές ενώσεις και μερικά θειικά από το θείο που περιέχει το καύσιμο. Ο σχηματισμός αιθάλης, σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, γίνεται στο πρώτο στάδιο της καύσης όταν υπάρχει φλόγα διάχυσης. Στην περίοδο αυτή, η φλόγα είναι πολύ φωτεινή, ένδειξη ύπαρξης ελευθέρου άνθρακα. Ένα πολύ μικρό μέρος του άνθρακα αυτού δεν προλαβαίνει να καεί, σχηματίζοντας έτσι αιθάλη, μέσω πολύπλοκων διεργασιών πυρόλυσης, πολυμερισμού και μερικής οξειδωσης. Τα σωματίδια σχηματίζονται από οργανικά και ανόργανα υλικά που εισέρχονται στον κινητήρα με το καύσιμο και τον αέρα. Τα πολύ μικρά σωματίδια αιθάλης, που δημιουργούνται κατά την καύση, λειτουργούν ως πυρήνες συσσωμάτωσης, δημιουργώντας έτσι τα σωματίδια που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.

Η φύση του άνθρακα που δημιουργείται είναι πολύπλοκη και περιλαμβάνει διάφορες δομές. Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό και την ανάπτυξη των σωματιδίων

παίζουν οι αντιδράσεις πυρόλυσης. Σε υψηλές θερμοκρασίες ευνοούνται οι αφυδρογόνωση και η διάσπαση των μορίων (ενδόθερμες δράσεις). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ευνοούνται ο πολυμερισμός και η συμπύκνωση (εξώθερμες δράσεις).

Μέσα στον κινητήρα συντελείται ο μετασχηματισμός ενός μορίου με 10-20 άτομα C σε σωματίδια αιθάλης με 105 άτομα C. Η όλη διεργασία πρέπει να περιλάβει τόσο τις αντιδράσεις αφυδρογόνωσης, όσο και τις αντιδράσεις πολυμερισμού. Ο ρυθμός των αντιδράσεων πυρόλυσης και πολυμερισμού είναι διαφορετικός για τους παραφινικούς και τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Οι παραφινικοί H/C διασπώνται σε ενώσεις ενός ή δύο ατόμων άνθρακα στους 450°C. Οι αντιδράσεις κυκλοποίησης και πολυμερισμού αρχίζουν από τους 600°C. Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες δεν υφίστανται διάσπαση αλλά απ' ευθείας πολυμερισμό και συμπύκνωση.

Οι κύριες φάσεις σχηματισμού της αιθάλης είναι τρεις: Ο σχηματισμός των μικρών πυρήνων, η αρχική συσσωμάτωση και αύξηση μεγέθους, και τέλος η δημιουργία των ακόμα μεγαλύτερων αδρομερών. Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε φλόγες διάχυσης, προωθούν τις αντιδράσεις πολυμερισμού και συμπύκνωσης, πριν τη φάση της αφυδρογόνωσης.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, αρωματικοί και πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες λειτουργούν ως αρχικοί πυρήνες. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σε προαναμειγμένες φλόγες και φλόγες τυρβώδους διάχυσης, προωθούν αντιδράσεις πυρόλυσης και διάσπασης μορίων. Ενδιάμεσο προϊόν αυτών των δράσεων είναι το ακετυλένιο. Οι πυρήνες συσσωμάτωσης αυξάνουν ταχύτερα σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Μετά την εκπομπή τους από τις θερμότερες περιοχές της φλόγας, τα μικρά αλλά πλήρως σχηματισμένα σωματίδια αιθάλης, συνεχίζουν την αύξηση του μεγέθους τους. Μέρος του σχηματιζόμενου άνθρακα καίγεται και ο τελικός ρυθμός εκπομπής αιθάλης είναι ανάλογος της διαφοράς του ρυθμού παραγωγής σωματιδίων και του ρυθμού καύσης τους.

Ο καπνός που εκπέμπεται από τους κινητήρες ντίζελ ανάλογα με το χρώμα του μπορεί να χαρακτηριστεί ως μαύρος, λευκός, γκριζός ή μπλε. Ο λευκός και ο γκριζός καπνός αποτελεί το μη αναφλέξιμο υπόλειμμα των σταγόνων του καυσίμου. Η παρουσία μπλε καπνού είναι ενδεικτική της εκπομπής άκαυστων σταγονιδίων καυσίμου ή σταγονιδίων λιπαντικού και συνήθως υποδεικνύει την ανάγκη συντήρησης του κινητήρα.

Ο χρονισμός ψεκασμού του καυσίμου, η καλή εκνέφωση του καυσίμου, η καλή ανάμειξη με τον αέρα, η πίεση ψεκασμού και η γεωμετρία του θαλάμου καύσης είναι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό αιθάλης.

Η αυτανάφλεξη του ντίζελ κατά την συμπίεση του εξαρτάται από τους ρυθμούς διάχυσης του αέρα προς τη ζώνη των σταγονιδίων καυσίμου και των ατμών του καυσίμου μακριά από τα σταγονίδια. Συνεπώς, ο σχηματισμός καπνού είναι δυνατό να ελαττωθεί με την ελάττωση του χρόνου, κατά τον οποίο η ανάφλεξη γίνεται στη φάση διάχυσης. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση του στροβιλισμού του καυσίμου μέσα στον κύλινδρο, η οποία οδηγεί σε καλύτερη ανάμειξη, σε ταχύτερη ανάφλεξη και σε παραγωγή ενός λεπτότερου σπρέι από σταγόνες καυσίμου, το οποίο ενισχύει το ρυθμό ατμοποίησης του.

Ο περιορισμός των εκπομπών σωματιδίων από κινητήρες ντίζελ είναι δυνατός και με την αλλαγή του σχεδιασμού του θαλάμου καύσης. Στους κινητήρες έμμεσου ψεκασμού το καύσιμο ψεκάζεται σε έναν προθάλαμο, όπου στροβιλίζεται και αναμιγνύεται με τον θερμό συμπιεσμένο αέρα και κατόπιν εισέρχεται στο θάλαμο καύσης. Το μειονέκτημα των κινητήρων έμμεσου ψεκασμού, σε σχέση με τους κινητήρες άμεσου ψεκασμού, είναι η απόδοση μικρότερης ισχύος για το ίδιο μέγεθος κινητήρα.

Η χρήση καταλυτών αντίστοιχων με αυτούς που χρησιμοποιούνται στους βενζινοκινητήρες, αποτελεί μια λύση για τη 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 θεικών σωματιδίων. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των σωματιδιακών εκπομπών στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο είναι άνω του 0,2% κ.β.. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας στον καταλύτη, όπου δεν ευνοείται η μετατροπή του SO<sub>2</sub> σε SO<sub>3</sub> 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 στη μείωση των εκπομπών σωματιδίων. Πρέπει

να σημειωθεί ότι η μείωση των σωματιδιακών εκπομπών από κινητήρες ντίζελ δεν είναι εύκολη, καθώς οι συνθήκες που ευνοούν τη μείωση των εκπομπών σωματιδίων, αυξάνουν την παραγωγή οξειδίων του αζώτου.

➤ **Εκπομπές από βιομηχανίες**

**1. Εκπομπές από διαδικασίες καύσης για παραγωγή ενέργειας**

**Ανθρακούχα ορυκτά (κάρβουνο)**

Τα ανθρακούχα ορυκτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας είναι, κατά φθίνουσα σειρά θερμογόνου δύναμης, ο ανθρακίτης, οι πισσούχοι (bituminous) και υποπισσούχοι (subbituminous) άνθρακες, ο λιγνίτης και η τύρφη. Η χρήση τους είναι διαδεδομένη σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, που διαθέτουν αποθέματα πρώτων υλών. Στην Ελλάδα η καύση λιγνίτη αποδίδει άνω του 90% του ηλεκτρικού ενεργειακού δυναμικού της χώρας.

Η ατελής καύση των 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. Συνεπώς, τα παραγόμενα σωματίδια συνίστανται κυρίως από την ανόργανη υπολειμματική τέφρα.

Κύρια συστατικά της ιπτάμενης τέφρας είναι τα  $\text{SiO}_2$  (10-70%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8-38%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2-50%),  $\text{CaO}$  (0,5-50%),  $\text{MgO}$  (0,3-8%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,1-3%),  $\text{K}_2\text{O}$  (0,1-3%),  $\text{TiO}_2$  (0,4-4%). Η μέση διάμετρος (υπολογισμένη με βάση την κατά μάζα κατανομή) των σωματιδίων κυμαίνεται μεταξύ 3,6 και 0,4  $\mu\text{m}$ .

**Πετρέλαιο**

Οι σωματιδιακές εκπομπές εξαρτώνται από το είδος του καιγομένου πετρελαίου. Τα ελαφρύτερα κλάσματα πετρελαίου παράγουν σημαντικά λιγότερα σωματίδια απ' ό,τι τα βαρύτερα. Θεωρείται ότι για τα βαρύτερα κλάσματα, η παραγωγή σωματιδίων είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο. Αυτό οφείλεται στο ότι, η προέλευση του καυσίμου είτε από ακατέργαστο πετρέλαιο χαμηλού θείου, είτε από διαδικασίες αποθείωσης, έχει ως αποτέλεσμα το να περιέχει λιγότερα ασφαλένια και τέφρα και να έχει μικρότερο ιξώδες. Συνεπώς, έχει καλύτερα χαρακτηριστικά καύσης.

### **Βιομάζα**

Η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα, σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στην καύση λιγνοκυτταρινούχων φυτικών, υπολειμματικών προϊόντων. Οι εκπομπές από καυστήρες που χρησιμοποιούν ξύλα ως καύσιμη ύλη, κυμαίνονται σε ένα εύρος 4,5-34 kg/τόνο καιγόμενου ξύλου. Περίπου 80-95% των ανόργανων συστατικών του ξύλου μετατρέπεται σε ιπτάμενη τέφρα στον καυστήρα. Στην κατηγορία των PM<sub>10</sub> εντάσσεται περίπου το 10-30% των παραγόμενων σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας.

Το πρόβλημα της παραγωγής σωματιδίων κατά την καύση υπολειμματικής ξυλείας, γίνεται ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση όπου η πρώτη ύλη περιέχει θαλασσινό αλάτι, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση κορμών που μεταφέρονται πάνω στο νερό.

Παρά τη δεδομένη εκπομπή σωματιδίων, εκτιμάται ότι η καύση βιομάζας και πιο συγκεκριμένα άχυρου, παράγει περίπου 4 φορές λιγότερα αιωρούμενα σωματίδια σε σχέση με την καύση ανθρακούχων ορυκτών.

### **2. Εκπομπές από αποτέφρωση απορριμμάτων**

Τα αιωρούμενα σωματίδια σε αυτήν την περίπτωση αποτελούνται κυρίως από άκαυστη ανόργανη ύλη, που μεταφέρεται από το αέριο που εξέρχεται της καπνοδόχου. Το τυπικό μέγεθος τους κυμαίνεται από 1 έως 50 μm. Μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής σωματιδίων έχουν οι καυστήρες RDF (refuse derived fuel), με ενδεικτική τιμή 20 kg PM<sub>10</sub>/ ton RDF (χωρίς σύστημα έλεγχου εκπομπών).

Σημαντικό είναι και το μέγεθος της εκπομπής βαρέων μετάλλων με πιο χαρακτηριστικά το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο, το μόλυβδο, τον ψευδάργυρο και τον υδράργυρο, υπό την μορφή των οξειδίων τους και των χλωριδίων τους. Οι εν λόγω ενώσεις παράγονται λόγω της παρουσίας υλικών όπως μπαταρίες, πλαστικά και μεταλλικά κράματα στα απορρίμματα. Κάποιες από τις παραπάνω ενώσεις έχουν σημεία ζέσης χαμηλότερα των 1000°C, όπου λειτουργούν τα συστήματα αποτέφρωσης και επομένως ατμοποιούνται στο αέριο εξόδου. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται τότε τείνουν να συμπυκνωθούν και να προσροφηθούν στα λεπτόκοκκα σωματίδια του καυσαερίου, με μέγεθος 0,2-0,7 μm. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν και αρκετές οργανικές ενώσεις που παράγονται κατά τη διαδικασία.

Είναι δυνατό ορισμένα πιο πτητικά μέταλλα, όπως ο μόλυβδος και ο υδράργυρος να παραμείνουν στην αέρια φάση. Όπως και στις υπόλοιπες διαδικασίες υψηλών θερμοκρασιών, όπου παράγονται σωματίδια, η εναπόθεση των βαρέων μετάλλων σε

αυτά εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, τον αριθμό των σωματιδίων και τη θερμοκρασία του καυσαερίου.

### **3. Εκπομπές από τη χημική βιομηχανία**

Στη συνέχεια του κειμένου παρουσιάζονται, οι περιπτώσεις εκπομπής σωματιδίων από τις διάφορες βιομηχανίες παραγωγής χημικών προϊόντων.

#### **Παραγωγή χαρτομάζας**

Οι σωματιδιακές εκπομπές κατά την παραγωγή χημικής χαρτόμαζας περιλαμβάνουν κυρίως  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ . Άνω του 75% των ολικών σωματιδιακών εκπομπών ανήκουν στα  $\text{PM}_{10}$ , εκ των οποίων τα  $\text{PM}_{2.5}$  συνιστούν ποσοστό έως και 90%.

#### **Παραγωγή καυστικής σόδας και χλωρίνης**

Παρατηρούνται σωματιδιακές εκπομπές υδραργύρου και αμιάντου.

#### **Παραγωγή φωσφορικού οξέος.**

Σε παλαιότερες βιομηχανίες η χρήση ως πρώτης ύλης φωσφορικών ορυκτών, σε μεγάλες ποσότητες υπό ξηρή μορφή (βράχοι), οδηγούσε σε παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων σκόνης κατά τις διαδικασίες μεταφοράς και χειρισμού. Στις νεότερες εγκαταστάσεις το πρόβλημα λύνεται, αν προηγηθεί υγρή κατεργασία και μείωση μεγέθους της πρώτης ύλης.

#### **Παραγωγή θειικού οξέος**

#### **Παραγωγή πολυμερών προϊόντων**

Ενδεικτικές τιμές παραγωγής σωματιδίων από βιομηχανίες θερμοπλαστικών πολυμερών είναι  $0,02 \text{ kgTSP/ton}$  πολυαιθυλενίου και  $0,02 \text{ kg/ton}$  πολυπροπυλενίου. Παραγωγή σωματιδίων υπάρχει και κατά τη διαδικασία θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και ιδίως εποξειδικών ρητινών όπως η διφαινόλη-α (BPA- bisphenol-a).

#### **Παραγωγή φθαλικού ανυδρίτη**

Ο φθαλικός ανυδρίτης είναι στερεά ένωση με σημείο εξάχνωσης τους  $130^\circ\text{C}$ , οπότε είναι δυνατή η διαφυγή του υπό αέρια μορφή και η συμπύκνωση του στην ατμόσφαιρα.

#### **Παραγωγή ενεργού άνθρακα**

Η παραγωγή σωματιδίων γίνεται κατά τις διαδικασίες μεταφοράς, μείωσης μεγέθους και μορφοποίησης σε μπρικέτες του ενεργού άνθρακα. Επίσης, η διαφυγή σωματιδίων πίσσας κατά την παραγωγική διαδικασία αποτελεί μια επιπλέον πηγή.



### **Παραγωγή απορρυπαντικών**

Τα σωματίδια των απορρυπαντικών που εμπεριέχονται στο αέριο εξόδο είναι σχετικά μεγάλα σε μέγεθος. Άνω του 50% αυτών των σωματιδίων έχουν διάμετρο πάνω από 40 μm. Αυτά τα σωματίδια αποτελούν περίπου το 95% του βάρους του συνόλου των αερίων ρύπων στο αέριο εξόδο. Αποτελούνται κυρίως από απορρυπαντικές ουσίες, αν και μερικά από τα σωματίδια είναι ανεξάρτητα φωσφορικά, θειικά και άλλες μεταλλικές ενώσεις.

### **Παραγωγή άνυδρου ανθρακικού νατρίου (sodium carbonate or soda ash)**

#### **4. Εκπομπές από γεωργικές βιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων**

##### **Βιομηχανία καφέ**

Η εκπομπή σωματιδίων από διαδικασίες επεξεργασίας του καφέ είναι σχετικά μικρή. Υπολογίζεται ότι για παραγωγή που περιλαμβάνει τη συνεχή επεξεργασία της πρώτης ύλης οι εκπομπές είναι 0,19 gr σωματιδίων/ft<sup>3</sup>, ενώ για ασυνεχείς διεργασίες είναι 0,16 gr/ft<sup>3</sup>. Η πλειοψηφία των εκπεμπόμενων σωματιδίων ανήκουν στο χονδρόκοκκο κλάσμα και πολλών το μέγεθος υπερβαίνει τα 100 μm.

##### **Βιομηχανίες επεξεργασίας δημητριακών**

Μεγάλες ποσότητες σωματιδίων απελευθερώνονται κατά την ξήρανση, την διαλογή, την άλεση και την επεξεργασία των δημητριακών. Περισσότερα από το 50% των σωματιδίων είναι μεγαλύτερα από 250 μm και συλλέγονται εύκολα. Τα σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα των εγκαταστάσεων αυτών συνιστούν ένα σημαντικό κίνδυνο έκρηξης, επομένως η απομάκρυνση τους από τον χώρο εργασίας είναι απαραίτητη. Συνεπώς, ο έλεγχος της ατμόσφαιρας των εγκαταστάσεων γίνεται με απομάκρυνση στον ελεύθερο αέρα των σωματιδίων που δεν είναι δυνατό να συλληχθούν.

Πρέπει να αναφερθεί ότι είναι πιθανή η μόλυνση των σωματιδίων από τοξικές ουσίες που είναι παρούσες στην πρώτη ύλη, όπως παρασιτοκτόνα και ζιζανιοκτόνα, αλλά και από το θειάφι που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των τρωκτικών και των μυκήτων στους χώρους αποθήκευσης.

##### **Εκτροφεία ζώων**

Πολύ μεγάλες ποσότητες σωματιδίων εκπέμπονται από εκτροφεία ζώων. Σε εκτροφεία βοοειδών στις Η.Π.Α., έχουν μετρηθεί μέσες 24-ωρες συγκεντρώσεις TSP έως και 1700 μg/m<sup>3</sup>. Σύμφωνα με την EPA (Environmental Protection Agency) ο μέσος ρυθμός εκπομπής σωματιδίων από εκτροφεία βοοειδών είναι 127 kg/ημέρα/



1000 εκτρεφόμενα ζώα. Τα  $PM_{10}$  αποτελούν περίπου το 40% των TSP, ενώ τα  $PM_{2.5}$  περίπου το 5%. Η κατά μέγεθος κατανομή των σωματιδίων εμφανίζει μέγιστο στην περιοχή 8,5-12,2  $\mu m$ .

Στην περίπτωση των πτηνοτροφείων, εκατοντάδες χιλιάδες πτηνών συγκεντρώνονται σε μια τοποθεσία. Βάσει παρατηρήσεων που έγιναν σε ένα τέτοιο εκτροφείο προέκυψε το συμπέρασμα ότι το 40% των σωματιδίων που διέφυγαν δια μέσου του συστήματος αερισμού είχε διάμετρο μικρότερο από 5  $\mu m$ .

#### **Βιομηχανίες παραγωγής λιπασμάτων**

Μια σημαντική κατηγορία λιπασμάτων είναι τα νιτρικά λιπάσματα, τα οποία αποτελούνται από νιτρικό αμμώνιο. Η τήξη του παραγόμενου νιτρικού αμμωνίου, προκειμένου να μορφοποιηθεί σε κόκκους, οδηγεί στην παραγωγή αερίων παραπροϊόντων αποσύνθεσης του, δηλαδή αμμωνία και νιτρικό οξύ. Αυτά, συνδυάζονται στην ψυχρότερη ατμόσφαιρα, ώστε να επανασηματισθεί το νιτρικό αμμώνιο υπό μορφή σωματιδίων, μεγέθους κάτω του 1  $\mu m$ , τα οποία γίνονται αντιληπτά υπό τη μορφή μπλε νέφους.

Ένα άλλο είδος αζωτούχου λιπάσματος, του οποίου η παραγωγή οδηγεί σε σωματιδιακές εκπομπές, είναι η ουρία. Σωματίδια παράγονται επίσης και κατά τις διεργασίες παραγωγής φωσφορικών λιπασμάτων, κυρίως υπό τη μορφή φωσφορικού αμμωνίου.

### **5. Εκπομπές από μεταλλουργικές βιομηχανίες**

#### **Βιομηχανίες παραγωγής αλουμινίου**

Η εκπομπή σωματιδίων από μονάδες παραγωγής αλουμινίου, γίνεται κυρίως από τα ηλεκτρολυτικά κελιά στα οποία γίνεται η μετατροπή της αλουμίνας. Οι σωματιδιακές εκπομπές ανέρχονται στα 20-35 kg/τόνο παραγόμενου αλουμινίου και αποτελούνται κυρίως από φθοριούχες ενώσεις ( $CaF_2$ ), στοιχειακό άνθρακα και αλουμίνα. Επίσης, υπάρχει εκπομπή σωματιδίων κατά τις διαδικασίες ξήρανσης του βωξίτη, προ της κατεργασίας του σε αλουμίνα.

#### **Παραγωγή μεταλλουργικού κωκ**

Εκπέμπονται προϊόντα συμπύκνωσης αερίων ενώσεων, τα οποία έχουν μέγεθος μικρότερο από 1  $\mu m$ .

### **Βιομηχανία επεξεργασίας χαλκού**

Κύριες σωματιδιακές ενώσεις που παράγονται είναι ο χαλκός και τα οξειδία του σιδήρου. Παράγονται επίσης οξειδία άλλων μετάλλων (Sb, Cd, Pb, Hg, Zn) και θεικές ενώσεις.

### **Βιομηχανία παραγωγής ψευδάργυρου**

Η σημαντικότερη διεργασία κατά την οποία υπάρχουν σωματιδιακές εκπομπές είναι η μετατροπή του ορυκτού σφαλερίτη (ZnS) σε οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO). Οι εκπομπές σωματιδίων στην περίπτωση χρησιμοποίησης αντιδραστήρων ρευστοστερέας κλίνης ανέρχονται σε 900 kg/τόνο παραγόμενου ψευδαργύρου.

### **Βιομηχανία παραγωγής μολύβδου**

Εκπέμπονται διάφορα είδη σωματιδίων, συμπεριλαμβανόμενων οξειδίων του μολύβδου, χαλαζία, ασβεστόλιθου, σιδηροπυρίτη, αρσενικού και άλλων μεταλλικών ενώσεων. Τα εκπεμπόμενα σωματίδια από μια μονάδα παραγωγής μολύβδου ανήκουν κατά 80%, περίπου, στην κατηγορία των PM<sub>2.5</sub>, ενώ το 60-70% των συνολικών σωματιδίων έχουν μέγεθος κάτω από 1 μm.

### **Χυτήρια**

Η εκπομπή σωματιδίων από τις υψικαμίνους των χυτηρίων σιδηρού υπολογίζεται στα 13-17 kg/τόνο πρώτης ύλης που τήκεται. Τα εκπεμπόμενα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από FeO, MgO, MnO, CaO, SiO<sub>2</sub>, ZnO, Pb και Cd. Μόνο το 15% αυτών των σωματιδίων είναι PM<sub>10</sub>.

### **Χαλυβουργία**

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής χάλυβα εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τα περισσότερα από αυτά τα σωματίδια είναι οξειδία του σιδηρού ή οξειδία μετάλλων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ειδικών κραμάτων και έχουν μέγεθος μικρότερο από 2 μm. Η αλλαγή που συντελέστηκε τις δύο τελευταίες δεκαετίες προς τους κλιβάνους οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων μικρότερου μεγέθους και μεγαλύτερων ποσοτήτων.

## **6. Εκπομπές από βιομηχανίες παραγωγής Ανόργανων και Ορυκτών προϊόντων**

### **Τσιμεντοβιομηχανία**

Οι κύριες διαδικασίες κατά τις οποίες παράγονται αιωρούμενα σωματίδια είναι η έψηση, η ψύξη και η άλεση του τσιμέντου. Κατά την έψηση, τα σωματίδια απομακρύνονται σχεδόν ολοκληρωτικά από τα αέρια της καμίνου, ακόμα και για παλιές εγκαταστάσεις. Η συλλεγόμενη από τα αέρια της καμίνου σκόνη, γνωστή ως

CKD (cement kiln dust) συνήθως ανατροφοδοτείται στην διεργασία, ενώ άλλοτε απομακρύνεται από αυτήν και χρησιμοποιείται συνήθως ως πληρωτικό υλικό. Ο χειρισμός, η αποθήκευση και η απόθεση της CKD, είναι πιθανές διαδικασίες εκπομπής σωματιδίων.

Τα λεπτόκοκκα σωματίδια που παράγονται κατά την άλεση του τσιμέντου συνιστούν το 30-65% των ολικών παραγόμενων σωματιδίων, ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου που παράγεται. Αναφέρεται ότι περίπου το 90% των σωματιδίων του τσιμέντου Portland διέρχονται από κόσκινο 325 mesh (44 $\mu$ m).

### **Παραγωγή Fiberglass**

Η πλειοψηφία των εκπεμπόμενων σωματιδίων που βρίσκονται στα αέρια της καπνοδόχου, ανήκουν στην κατηγορία των PM<sub>10</sub> και αποτελούνται κυρίως από CaCO<sub>3</sub>, NaF, CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> και βορικό οξύ.

### **Υαλουργία**

Τα σωματίδια που παράγονται κατά τη διαδικασία της θερμικής διεργασίας της τήξης, είναι μεγέθους μικρότερου από 1  $\mu$ m. Τα κύρια συστατικά των ολικών εκπεμπόμενων σωματιδίων είναι Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaF, NaSiF<sub>6</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

### **Λατομεία**

Τα ολικά παραγόμενα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται κατά σχετικά μικρό ποσοστό από PM<sub>10</sub> (5-30%), ενώ η παραγωγή PM<sub>2.5</sub> είναι αμελητέα. Συνεπώς, η επίδραση των εκπομπών στην ανθρώπινη υγεία είναι λιγότερο σημαντική σε σχέση με τα προβλήματα που προκαλούνται από την απόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα δεδομένα που ποσοτικοποιούν τις εκπομπές σε σωματίδια είναι ανεπαρκή, όμως κάποιες έρευνες που έγιναν στις ΗΠΑ δίνουν μία προσέγγιση για εκπομπές TSP. Σύμφωνα με αυτές, οι εκπομπές ολικών αιωρούμενων σωματιδίων σε ζώνες με μεγάλη οικονομική δραστηριότητα σε εξέλιξη, αναμένεται να φθάσουν τους 2,5 τόνοι/εκτάριο/μήνα. Οι συντελεστές εκπομπών που έχει υιοθετήσει η USEPA για μεταφορές πρώτων υλών, εργασίες σε ορυχεία και λατομεία, ποικίλουν από 0,007 έως 0,119 kg/τόνο ύλης.

Άλλες διαδικασίες κατά τις οποίες παράγονται σωματίδια είναι η εξόρυξη άνθρακα και βαρέων μετάλλων, η παραγωγή ασβέστη και οι χωματοουργικές εργασίες.

### ➤ Οικιακές πηγές

Η καύση κάρβουνου μέσα στα σπίτια ήταν στο παρελθόν μια σημαντική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων κατά τους χειμερινούς μήνες. Στην εποχή μας μόνο σε κάποιες βόρειες ευρωπαϊκές πόλεις, όπως το Belfast, οι κάτοικοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούν κάρβουνο, για οικιακή χρήση. Επίσης, η καύση ξύλων για οικιακή θέρμανση, για την οποία υπάρχει νέο ενδιαφέρον στις ανεπτυγμένες χώρες, αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο αέριας σωματιδιακής ρύπανσης. Η πλέον δημοφιλής μέθοδος οικιακής θέρμανσης είναι η καύση πετρελαίου. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αυτή οδηγεί σε σημαντική εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Αναφέρεται ότι στην Ελλάδα, η χρήση πετρελαίου θέρμανσης επιβαρύνει ακόμα περισσότερο το περιβάλλον, καθώς το πετρέλαιο θέρμανσης περιέχει 2 φορές περισσότερα ανόργανα υλικά και 4 φορές περισσότερο θείο από το κοινό ντίζελ κίνησης.

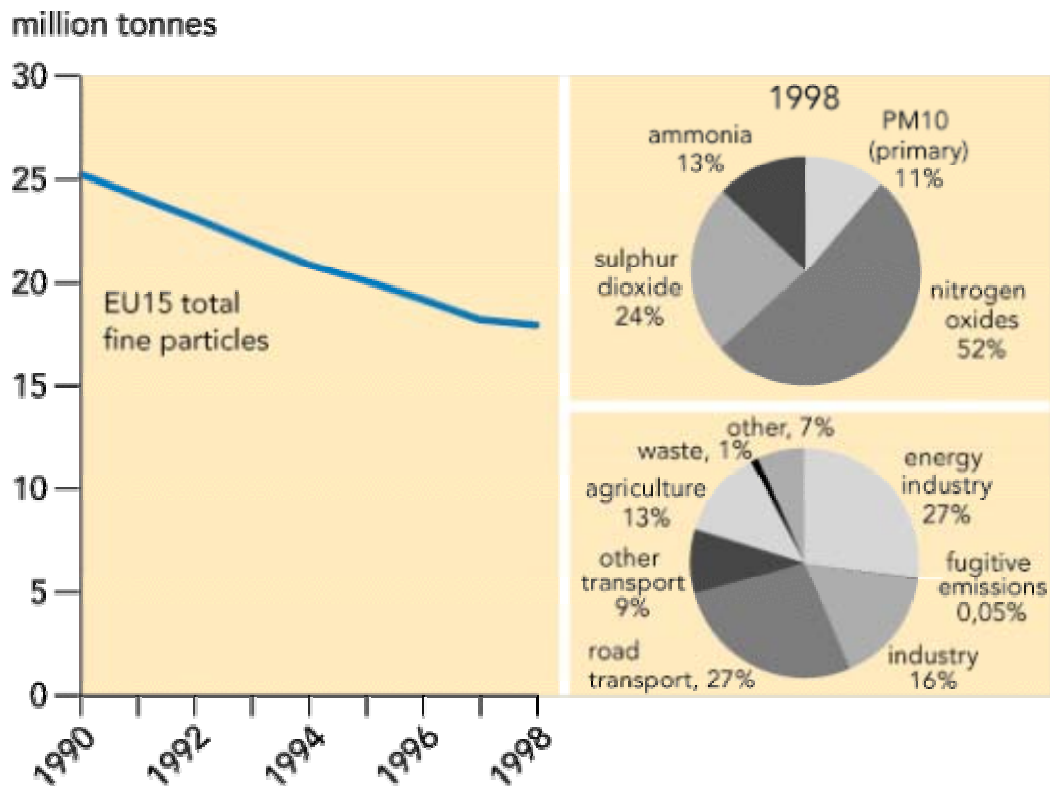
Οι εκπομπές από τη θέρμανση δεν είναι σταθερές με το χρόνο και εμφανίζουν αιχμές ανάλογα με την εποχή και τις ώρες που χρησιμοποιείται. Το φορτίο ρύπανσης από κεντρικές θερμάνσεις θεωρείται σε πρώτη προσέγγιση ανάλογο του κυβισμού των οικοδομών. Έτσι η γεωγραφική τους κατανομή είναι συνάρτηση του ύψους των οικοδομών. Η πηγή αυτή ποσοτικοποιείται με διάφορες μεθοδολογίες και στους υπολογισμούς γενικά θεωρείται σαν μια επιφανειακή πηγή (τετράγωνο αστικής περιοχής).

### ➤ Αστικές δραστηριότητες

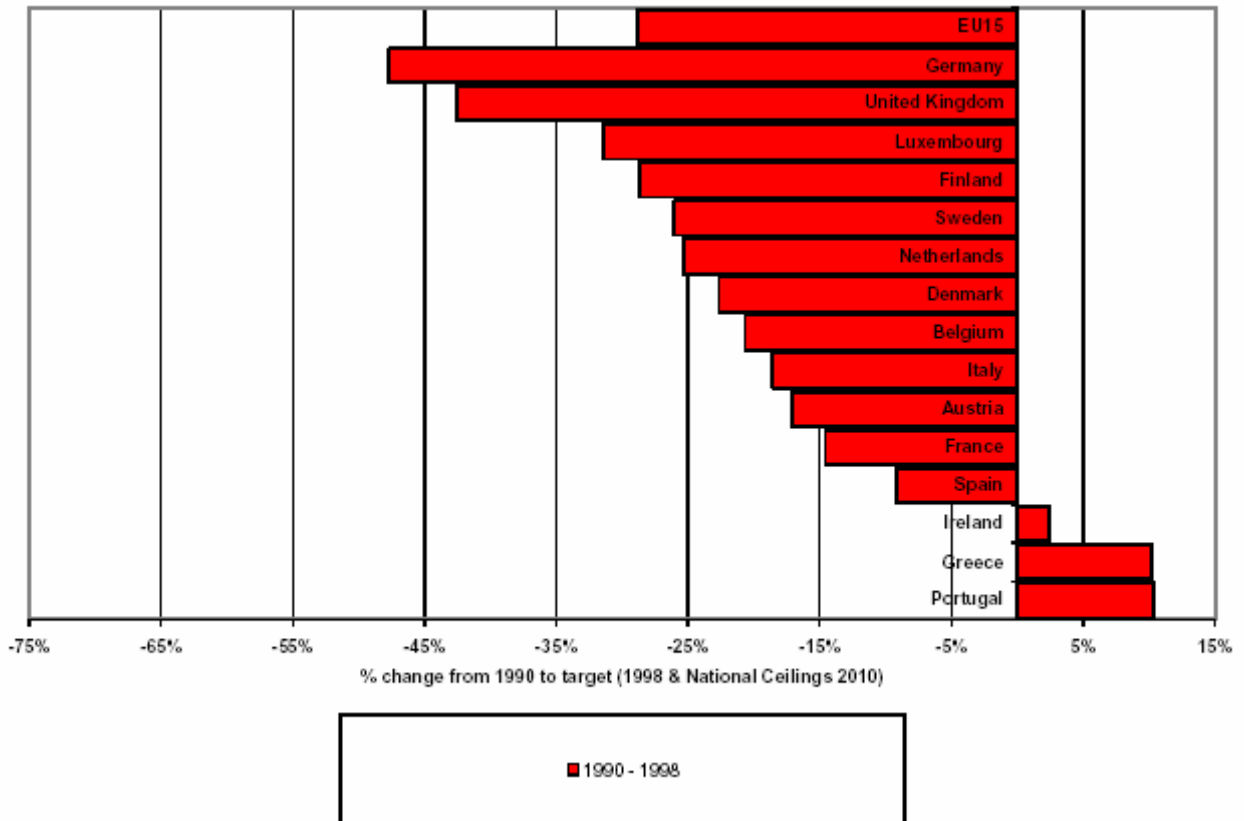
Αστικά λύματα και στέρεα απορρίμματα, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα ρύπανσης που αυξάνονται όσο μεγαλύτερο είναι το αστικό κέντρο. Ειδικότερα οι χωματερές εναπόθεσης και ταφής των απορριμμάτων αποτελούν βασικό συντελεστή εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων, είτε μέσω μεταφοράς τους από τον άνεμο, είτε μέσω παραγωγής τους από την επιτόπου καύση των απορριμμάτων.

Τέλος υπάρχουν διάφορες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα που δεν ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες. Τα χημικά εργαστήρια, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας στερεών αποβλήτων, τα εργοστάσια επεξεργασίας της πέτρας, οι αποτεφρωτήρες νοσοκομειακών απορριμμάτων κ.λ.π. είναι μερικές από αυτές.

Αμέσως παρακάτω ακολουθούν δύο γραφήματα σχετικά με τις πηγές εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων, το ποσοστό ρύπανσης της καθεμίας από αυτές και το ποσοστό μείωσης των εκπομπών αυτών στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο δημοσίευσε η Ε.Ε.Α. (European Environmental Agency) για τα έτη 1990-1998 μετά από σχετικές έρευνες.



**Σχήμα 4.1:** Γραφήματα που δείχνουν τη σταδιακή μείωση εκπομπών σωματιδίων στην Ε.Ε. και τα ποσοστά συμμετοχής κάθε πηγής στις εκπομπές αυτές.



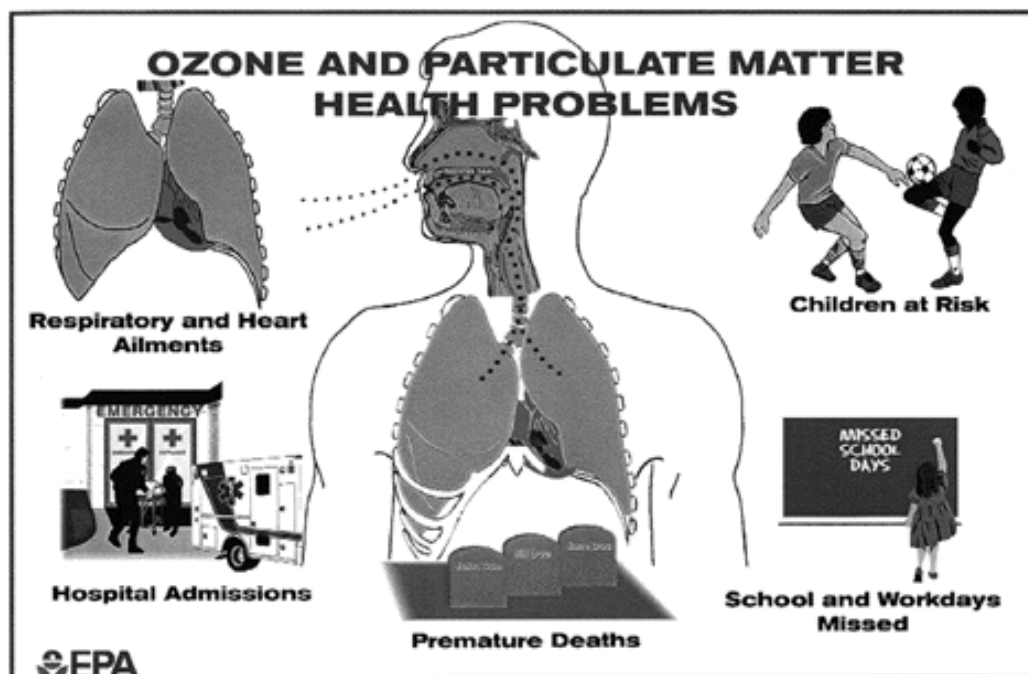
**Σχήμα 4.2:** Γράφημα που δείχνει το ποσοστό μείωσης εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων στα κράτη της Ε.Ε. από το 1990 έως το 1998.

**Βιβλιογραφικές αναφορές:** [3], [4], [5], [7], [9], [12], [14], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [27], [56], [57]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

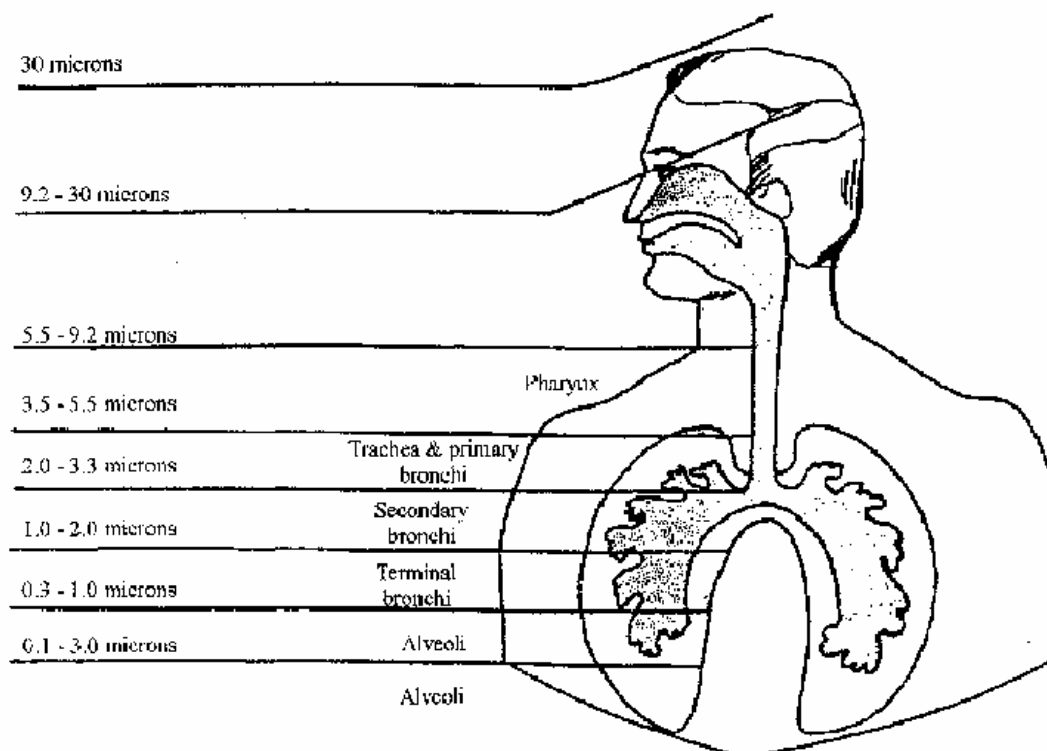
### 5.1. Επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου

Τα αναπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια, τόσο τα μικρού μεγέθους όσο και τα μεγαλύτερα, είναι βλαβερά για το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και γενικότερα των ζώντων οργανισμών. Συσσωρεύονται στο αναπνευστικό σύστημα και συνδέονται με πολυάριθμες επιπτώσεις στην υγεία. Η έκθεση σε μεγάλα σωματίδια ερεθίζει το αναπνευστικό σύστημα και παρουσιάζει συμπτώματα όπως το άσθμα και τη χρόνια βρογχίτιδα. Τα λεπτά σωματίδια συνδέονται περισσότερο με επιπτώσεις στην υγεία που απαιτούν την εισαγωγή στο νοσοκομείο, ακόμα και στην εντατική, όπως προβλήματα καρδιάς και πνευμόνων, συμπτώματα στο αναπνευστικό σύστημα, μειωμένη πνευμονική λειτουργία που μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε πρόωρο θάνατο. Ευαίσθητες ομάδες είναι τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι, τα άτομα με άσθμα και άτομα με καρδιαγγειακά ή χρόνια αναπνευστικά νοσήματα όπως βρογχίτιδα και εμφύσημα.



*Σχήμα 5.1: Η επίδραση της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης στην ανθρώπινη υγεία, όπως αυτή σχολιάζεται από την Environmental Protection Agency.*

Τα κριτήρια ποιότητας αέρα επικεντρώνονται στα λεπτά σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10  $\mu\text{m}$  (που ονομάζονται  $\text{PM}_{10}$ ), τα οποία είναι υπεύθυνα για τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία λόγω της ικανότητάς τους να φθάνουν στις κατώτερες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ θέτει ως κριτήρια ποιότητας του αέρα για τα  $\text{PM}_{10}$  τα  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  σε ετήσια βάση και τα  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  σε μέση ημερήσια βάση.



**Σχήμα 5.2:** Ικανότητα διείσδυσης των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με το μέγεθός τους.

Νεώτερες έρευνες δείχνουν ότι ακόμα πιο λεπτά σωματίδια, τα  $\text{PM}_{2,5}$ , με διάμετρο μικρότερη των 2,5  $\mu\text{m}$ , πιθανόν να έχουν ακόμα πιο σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και για αυτό θα πρέπει να τίθενται και κριτήρια ποιότητας της ατμόσφαιρας και για τα  $\text{PM}_{2,5}$ .

Η πιο συνηθισμένη μορφή σωματιδιακής ύλης στην ατμόσφαιρα είναι ανόργανη και μη τοξική σκόνη. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι είναι και αβλαβής. Το πόσο τοξικά είναι τα αιωρούμενα σωματίδια είναι συνάρτηση της τοξικότητας των χημικών ενώσεων που είναι προσκολλημένα ή προσροφημένα σε αυτά και του μεγέθους τους, που εξαρτάται άμεσα από την πηγή προέλευσής τους. Η λήψη τοξικών ουσιών όπως



οι ατμοί υδραργύρου ή ενώσεις υδράργυρου σε σωματιδιακή μορφή, μπορούν να προκαλέσουν απευθείας βιοχημικές αντιδράσεις στον οργανισμό. Πνευμονοκονίαση είναι μια συνηθισμένη πάθηση για αυτούς που εργάζονται σε ορυχεία και σε τσιμεντοβιομηχανίες. Το οίδημα των ‘μαύρων πνευμόνων’, μια μορφή πνευμονοκονίασης, είναι συνηθισμένη στους εργάτες των ορυχείων άνθρακα. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα σωματίδια ύλης έχουν το κατάλληλο μέγεθος ώστε να σφηνώνονται στις μεμβράνες των πνευμόνων, μειώνοντας έτσι τη δυνατότητα αποβολής τους, είτε μέσω της εκπνοής είτε μέσω των υγρών του σώματος. Ως αποτέλεσμα οι πνεύμονες εμφανίζουν μειωμένη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου στο κυκλοφοριακό σύστημα, προκαλώντας δυσκολία στην αναπνοή και πρόωρο θάνατο.

### **5.2. Επιδράσεις στα ζώα**

Εάν αναλογιστούμε ότι οι συνηθισμένοι ρύποι έχουν αρνητικά αποτελέσματα στη ευημερία και στη ζωή του ανθρώπου, είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι θα έχουν παρόμοια επίδραση και στα ζώα, τα οποία και έχουν παραπλήσια φυσιολογία με τον άνθρωπο. Αν και δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα για την επίδραση του διοξειδίου του αζώτου, του διοξειδίου του θείου, του μονοξειδίου του άνθρακα και των σωματιδιακών ρυπαντών στη ζωή των κατοικίδιων ζώων, πρέπει να δεχθούμε αξιωματικά ότι τα ζώα που ζουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές έχουν πιο σύντομη ζωή από αυτά που ζουν μακριά από βιομηχανικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές της γης. Η ελάττωση του πληθυσμού ή ακόμα και η πλήρης εξαφάνιση διαφόρων άγριων ζώων και πουλιών, συνδέονται πολλές φορές με το πρόβλημα της αέριας ρύπανσης.

### **5.3. Επιδράσεις στα φυτά**

Η βλάστηση επηρεάζεται από μια ευρεία κλίμακα αερίων και σωματιδιακών ρυπαντών και κλιματολογικών συνθηκών. Πολλοί είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης, ανάμεσά τους το είδος του φυτού, η ηλικία του, η θρεπτική του ισορροπία και η υγρασία και το ποσοστό ηλιοφάνειας. Το Υπουργείο Γεωργίας των Η.Π.Α. κάνει σαφή διαχωρισμό μεταξύ ζημιάς και πλήγματος από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ως πλήγμα θεωρείται κάθε αλλαγή στον φυτικό οργανισμό, η οποία μπορεί να παρατηρηθεί όταν αυτός εκτεθεί στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Η ζημιά ορίζεται σαν μια οικονομική απώλεια που οφείλεται στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Αυτός ο διαχωρισμός δείχνει ότι το πλήγμα

στα φυτά δεν οδηγεί κατ' ανάγκη και σε ζημιά, διότι κάθε πλήγμα που τυχόν δέχεται ένα φυτό από την ατμοσφαιρική ρύπανση δεν οδηγεί κατ' ανάγκη στην παρεμπόδιση της χρησιμοποίησης του ή της εμπορίας του.

Οι αιωρούμενοι ρυπαντές είναι δυνατόν να διεισδύσουν στα φυτικά συστήματα τόσο με άμεσο, όσο και με έμμεσο τρόπο. Ο άμεσος τρόπος είναι κάτι ανάλογο της ανθρώπινης αναπνοής. Τα φύλλα των φυτών με την μοναδική δομή τους, επιτελούν πολλές σημαντικές λειτουργίες ανάμεσα στις οποίες σημαντικότερες είναι η φωτοσύνθεση, η διαπνοή και η αναπνοή. Οι τρεις αυτές βασικές λειτουργίες περιλαμβάνουν τη διακίνηση οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και νερού μέσω των επιδερμικών στρωμάτων τους. Είναι λοιπόν εμφανής η αναλογία με τη διεργασία της ανθρώπινης αναπνοής. Με τη διάχυση αερίων από και προς το εσωτερικό του φύλλου, οι αιωρούμενοι ρυπαντές διαθέτουν μια απευθείας δίοδο προς το κυτταρικό σύστημα των φύλλων. Άμεση εναπόθεση ρύπων συμβαίνει και στις εξωτερικές επιφάνειες των φύλλων και έχει ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία τους.

Η έμμεση επίδραση των ατμοσφαιρικών ρύπων στους φυτικούς οργανισμούς γίνεται μέσω των ριζών του φυτού. Η εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδιακών ρυπαντών στην επιφάνεια του εδάφους καθώς και στις υδάτινες μάζες του πλανήτη, μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στη σύσταση των θρεπτικών συστατικών του εδάφους της ευρύτερης περιοχής γύρω από το φυτό και να οδηγήσει σε έμμεσες επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη βλάστηση.

Οι επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στους φυτικούς οργανισμούς κυμαίνονται από ανεπαίσθητες μέχρι καταστροφικές και ταξινομούνται σε ορατά και σε μη ορατά συμπτώματα. Ορατά συμπτώματα είναι η απόκλιση από την φυσιολογική, υγιή εμφάνιση του φυλλώματος των φυτών όπως η κατάρρευση ή νέκρωση ιστών του φύλλου και η απώλεια χρώματος. Μια άλλη ορατή συνέπεια της ρύπανσης στους φυτικούς οργανισμούς είναι η μεταβολή στη φυσιολογία τους που μπορεί να προκαλέσει πρόωρη γήρανση ή και πτώση των φύλλων ενός φυτού.

Στα μη ορατά αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται η μειωμένη ανάπτυξη, οι μεταβολές στις βιοχημικές διεργασίες καθώς και οι διαταραχές στον κύκλο αναπαραγωγής του φυτού.

#### 5.4. Επιδράσεις στο γενικότερο περιβάλλον

Τέλος στο εδάφιο αυτό γίνεται λόγος για τους μηχανισμούς επιρροής του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων στις ατμοσφαιρικές ιδιότητες, καθώς και για τις επιδράσεις αυτών σε διάφορους τομείς του περιβαλλοντικού μας συστήματος:

- *Καταλυτική συμπεριφορά.* Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του σωματιδίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνειά του. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια να καταλύονται χημικές αντιδράσεις αφού διάφορα αέρια ή υγρά υλικά (π.χ. οργανικές ενώσεις) απορροφούνται από τις μεγάλες αυτές επιφάνειες των μικρών σωματιδίων. Αυτά έχουν σχέση με το σχηματισμό φωτοχημικής καπνομίχλης η οποία επηρεάζει τόσο την υγεία του ανθρώπου όσο και το ίδιο το περιβάλλον.
- *Φαινόμενα ανακλάσεως.* Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Σωματίδια της τάξεως των 0,1-1 μm προκαλούν τα μεγαλύτερα φαινόμενα ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 10%) αφού η διάμετρός τους είναι συγκρίσιμη με τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας.

Γενικά τα σωματίδια αυτά ελαττώνουν την ορατότητα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία μέχρι αυτή να φτάσει στη γη. Αν αυτή η θολερότητα της ατμόσφαιρας αυξηθεί, αναμένεται αρκετή πτώση της θερμοκρασίας της γης τα επόμενα χρόνια.

- *Επίδραση στο κλίμα.* Σωματίδια σε τάξη μεγέθους 0,1-10 μm αποτελούν πυρήνες για το σχηματισμό σταγόνων βροχής, την αύξηση των σύννεφων και της βροχόπτωσης στις πόλεις. Αν τα σωματίδια είναι μικρότερου μεγέθους, τότε οι σταγόνες της βροχής είναι μικρότερες και δεν πέφτουν. Αυτό όμως έχει σαν συνέπεια την ελάττωση της βροχόπτωσης αλλά την αύξηση της συννεφιάς.
- *Μετατροπή των λιμνών και των ποταμών σε όξινα.*
- *Μεταβολή της θρεπτικής ισορροπίας σε παραλιακά νερά και σε εκβολές μεγάλων ποταμών.*
- *Καταστροφή ευαίσθητων δασών και σπαρτών των αγροκτημάτων.*
- *Επιρροή στην ποικιλία των οικοσυστημάτων.*
- *Βλάβη στην καλαισθησία.* Η αιθάλη, ένα είδος της σωματιδιακής ύλης PM<sub>10</sub>, φθείρει και προκαλεί μεγάλες ζημιές σε είδη πετρωμάτων και αλλά υλικά,

συμπεριλαμβανομένων και πολύ σημαντικών πολιτιστικών αντικειμένων όπως μνημεία και αγάλματα.

**Βιβλιογραφικές αναφορές:** [8], [14], [15], [17], [18], [19], [56], [59]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΘΟΔΟΙ – ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

### 6.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με τον άρθρο 109 της νομοθετικής πράξης περί ‘καθαρού αέρα’ της Αμερικανικής Κυβέρνησης, ο Οργανισμός Προστασίας του Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (USEPA) έχει θέσει σε ισχύ θεμελιώδεις και δευτερογενείς νόμους σύμφωνα με τους οποίους έχουν θεσπιστεί κριτήρια ποιότητας για έξι συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα, μεταξύ των οποίων και τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια.

Για την αποτίμηση και την εξακρίβωση της ποιότητας του εσπνεύσιμου αέρα, άρχισαν να αναπτύσσονται πειραματικές και αναλυτικές μέθοδοι μέτρησης του σωματιδιακού φορτίου, οι οποίες διασφάλιζαν με ακρίβεια και συνέπεια τον ποιοτικό και ποσοτικό έλεγχο ενός τυχαίου αερολύματος που αναλυόταν από τους επιστήμονες.

Ιστορικά, οι μέθοδοι μέτρησης της σωματιδιακής ύλης PM είχαν επικεντρωθεί τις προηγούμενες δεκαετίες στα ολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP), χωρίς ιδιαίτερη προτίμηση σε συγκεκριμένα μεγέθη σωματιδίων. Ωστόσο, η προσέγγιση της USEPA στο θέμα του ελέγχου και της μέτρησης του στερεού σωματιδιακού φορτίου της ατμόσφαιρας, εξελίχθηκε με τα χρόνια. Μέχρι το 1987 όλες οι μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης των σωματιδίων, στηρίζονταν στη ‘σύλληψη’ εντός φίλτρων, σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 100 μm όπως και άλλωστε ανέφερε και ο ορισμός των TSP. Το 1987 ορίστηκαν νέα θεμελιώδη κριτήρια για την ποιότητα του αέρα και έτσι τα TSP αντικαταστάθηκαν από τα σωματίδια PM<sub>10</sub> τα οποία είχαν διάμετρο μικρότερη από 10 μm και αργότερα αυτά αντικαταστάθηκαν εκ’ νέου από τα σωματίδια PM<sub>2,5</sub> (με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm). Αυτός ο κανονισμός τέθηκε σε ισχύ επειδή με την ταυτόχρονη εξέλιξη της ιατρικής ανακαλύφθηκε ότι τα σωματίδια μεγέθους 2,5 μm ήταν πιο εύκολα εσπνεύσιμα από τον ανθρώπινο οργανισμό και έφθαναν στο κατώτερο σημείο του αναπνευστικού συστήματος με πολύ σοβαρές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι βασικότερες τεχνικές μέτρησης σωματιδιακής ύλης. Σε αυτές τις τεχνικές στηρίζεται η λειτουργία των περισσότερων διαθέσιμων οργάνων παρακολούθησης και μέτρησης σωματιδίων σε κλειστούς χώρους και στην ατμόσφαιρα.

## 6.2. Τεχνική οπτικής ανίχνευσης

Η μέτρηση της σκέδασης και της απορρόφησης φωτεινής ακτινοβολίας από τα σωματίδια ενός αερολύματος είναι μια μέθοδος για τον εντοπισμό και την αποτίμηση της συγκέντρωσης κατά αριθμό των σωματιδίων στο αερόλυμα. Όταν τα σωματίδια αερολύματος εκτεθούν σε φως, σκεδάζουν και απορροφούν ένα μέρος της ακτινοβολίας και η μείωση στην ένταση της ακτινοβολίας περιγράφεται από το νόμο Lambert – Beer. Ο βαθμός σκέδασης της φωτεινής ακτινοβολίας από τα σωματίδια εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Για να αποτιμηθεί η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 50 nm, εφαρμόζεται η θεωρία Rayleigh. Για σωματίδια διαμέτρου 50 – 100 nm γίνεται εφαρμογή της θεωρίας Mie. Όταν η διάμετρος των σωματιδίων και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι της ίδιας κλίμακας, η εξήγηση του φαινομένου της σκέδασης περιπλέκεται. Σύμφωνα με τους νόμους Rayleigh και Mie η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ανάλογη της έκτης δύναμης της διαμέτρου των σωματιδίων. Έτσι είναι αναμενόμενο, η αύξηση της διαμέτρου των σωματιδίων να δημιουργεί ταχεία αύξηση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας.

Παράλληλα γίνεται κατανοητή και η αδυναμία της τεχνικής να ανιχνεύσει σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους μιας και η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας θα είναι πολύ μικρή και δύσκολα μετρήσιμη. Στη περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η ανάπτυξη του μεγέθους των σωματιδίων με ελεγχόμενο τρόπο. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος ανάπτυξης μεγέθους είναι η συμπύκνωση υπερκορεσμένων αερίων στην επιφάνεια των σωματιδίων. Αυτού του είδους οι συσκευές, ονομάζονται ‘Συμπυκνωτικοί Μετρητές Σωματιδίων’ και χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε διάφορα όργανα μέτρησης σωματιδίων.

Το κύριο πλεονέκτημα των συσκευών που χρησιμοποιούν τη παραπάνω τεχνική για την ανίχνευση και την μέτρηση των σωματιδίων είναι η γρήγορη απόκρισή τους, καθώς επίσης και το γεγονός ότι δεν είναι απαραίτητη η φυσική επαφή με τα σωματίδια για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Επιπλέον η υψηλή ευαισθησία τους και η ικανότητά τους να μετρούν πολύ μικρές συγκεντρώσεις σωματιδίων τα κατατάσσουν στα όργανα ακριβούς μέτρησης.

Οι οπτικοί ανιχνευτές μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται εκείνοι οι ανιχνευτές που μπορούν να ανιχνεύσουν σκέδαση φωτός που προκαλείται από ανεξάρτητα σωματίδια (**single particle**

counters). Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται οι ανιχνευτές που ανιχνεύουν σκέδαση φωτός για ομάδες σωματιδίων (**φωτομετρικοί ανιχνευτές, multiple particle counters**). Οι ανιχνευτές της πρώτης κατηγορίας μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις σωματιδίων. Σε ότι αφορά την αρχή λειτουργίας, ένα ρεύμα αερολύματος οδηγείται δια μέσου μιας συγκεντρωμένης ακτίνας φωτός. Το φως που σκεδάζεται από κάθε σωματίδιο συλλέγεται από ένα ανιχνευτή φωτός και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Η συγκέντρωση κατά αριθμό των σωματιδίων προσδιορίζεται από τον αριθμό των παλμών που παράγει ένας αισθητήρας ενώ μια ένδειξη για το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να παραχθεί από την έκταση του εξερχόμενου σήματος κάθε φορά. Οι πρώτοι ανιχνευτές αυτού του είδους έκαναν χρήση λευκού φωτός (πηγές πυρακτώσεως) για την ανίχνευση των σωματιδίων αλλά οι πιο πρόσφατα κατασκευασμένοι κάνουν χρήση πηγών laser (μονοχρωματική ακτινοβολία). Οι μονοχρωματικές πηγές παρέχουν φωτεινές εντάσεις αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να επιτευχθούν από πηγές πυρακτώσεως με αποτέλεσμα την ικανότητα ανίχνευσης σωματιδίων σημαντικά μικρότερου μεγέθους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι οπτικοί ανιχνευτές που χρησιμοποιούν εστίες laser μπορούν να ανιχνεύσουν σωματίδια μεγέθους έως και 0,05 μm ενώ οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούν μονοχρωματική ακτινοβολία δεν μπορούν να μετρήσουν σωματίδια μικρότερα των 0,3 μm σε διάμετρο.

Η δεύτερη κατηγορία ανιχνευτών (φωτομετρικοί ανιχνευτές) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεγαλύτερων συγκεντρώσεων σωματιδίων σε αερολύματα. Τα όργανα αυτά είναι πολύ πιο απλά συγκρινόμενα με τους ανιχνευτές της πρώτης κατηγορίας που περιγράψαμε παραπάνω. Η ροή του αερολύματος κατευθύνεται δια μέσου μιας δέσμης φωτός και μετράται η ολική σκέδαση που προκαλείται με τη βοήθεια ενός αισθητήρα έντασης φωτεινής ακτινοβολίας. Τα στοιχεία που προκύπτουν συσχετίζονται με τη συγκέντρωση κατά αριθμό των σωματιδίων στο αερόλυμα. Μια σημαντική παράμετρος για τα όργανα αυτού του τύπου είναι το είδος του αερίου στο οποίο αιωρούνται τα σωματίδια αφού θα έχει κάποια συνεισφορά στη σκέδαση της ακτινοβολίας και θα δημιουργεί σταθερό θόρυβο στις μετρήσεις. Για να αποφευχθεί αυτός ο θόρυβος χρησιμοποιούνται αέρια με γνωστές ιδιότητες σκέδασης.

Οι οπτικοί ανιχνευτές έχουν τη τάση να θερμαίνουν το αερόλυμα γεγονός που οδηγεί σε μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και αύξηση του δείκτη ανάκλασης για υγροσκοπικά ατμοσφαιρικά σωματίδια. Αυτός ο περιορισμός δημιουργεί

αβεβαιότητα στις μετρήσεις αλλά μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση εναλλακτών ελέγχου θερμοκρασίας εντός του οργάνου.

### 6.3. Τεχνική ηλεκτρικής μέτρησης

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις σωματιδίων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στα φασματόμετρα αερολυμάτων. Η απαρχή χρήσης της συγκεκριμένης τεχνικής έγινε όταν επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων ιονισμένων αερίων με μετρήσεις ηλεκτρικής κινητικότητας. Πιο συγκεκριμένα, έγινε χρήση ηλεκτρομέτρων για την ανίχνευση και τη μέτρηση συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικά και εργαστηριακά παραγόμενων ιόντων.

Με βάση την τεχνική αυτή, τα σωματίδια φορτίζονται από μια πηγή και στη συνέχεια μετρώνται τα παραγόμενα ρεύματα λόγω της κίνησής τους από ένα ηλεκτρόμετρο Faraday. Οι μετρήσεις αυτές που λαμβάνονται από κάθε κανάλι του φασματόμετρου ηλεκτρικής κινητικότητας μετατρέπονται σε συγκεντρώσεις κατά αριθμό σωματιδίων  $N_{p,i}$  μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$N_{p,i} = \frac{I_i}{g(n, d_p) neQ_a}$$

Όπου :

$I_i$ : είναι τη ένταση του ρεύματος στο κανάλι  $i$  του φασματόμετρου

$g(n, d_p)$ : πιθανότητα ένα σωματίδιο διαμέτρου  $d_p$  να φέρει  $n$  στοιχειώδη φορτία  $e$

$Q_a$ : ταχύτητα ροής του δείγματος αερολύματος

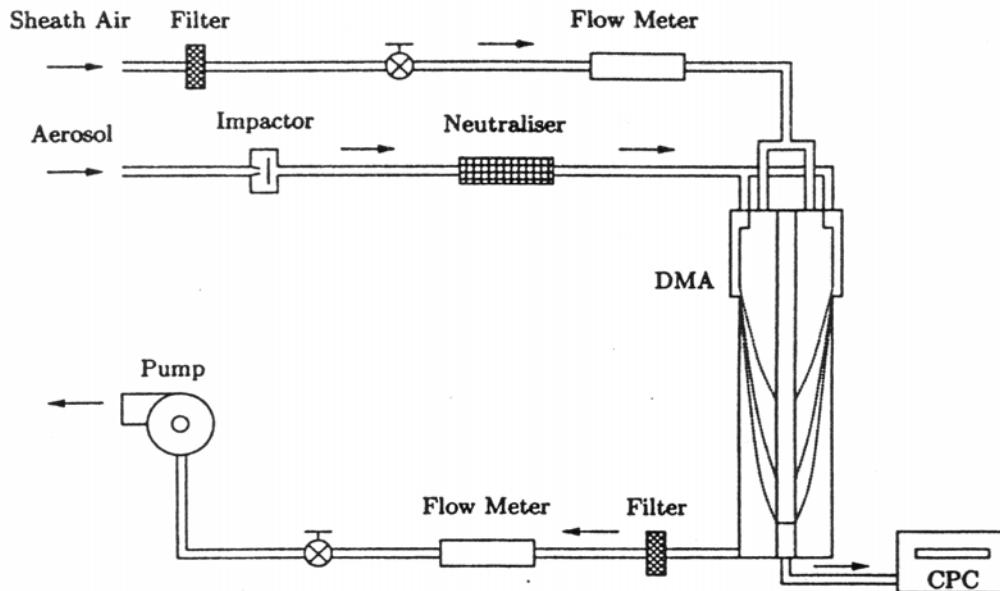
Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, η χρήση ηλεκτρομέτρων για τη μέτρηση της συγκέντρωσης κατά αριθμό των σωματιδίων έχει το μειονέκτημα ότι η ανταπόκριση του αισθητήρα είναι άμεσα συσχετισμένη με τον αριθμό στοιχειωδών φορτίων που φέρουν τα σωματίδια. Στη πραγματικότητα, είναι αναγκαία η χρήση ενός αναλυτικού μοντέλου πρόβλεψης της κατανομής φορτίου στα μονοδισπαρμένα σωματίδια του αερολύματος για να είναι αποδοτική η μετατροπή της έντασης του παραγόμενου ρεύματος σε συγκεντρώσεις κατά αριθμό.

Επίσης η ευαισθησία του ηλεκτρομέτρου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα αφού καθορίζει το εύρος συγκεντρώσεων που μπορούν να μετρηθούν από το όργανο. Τα τυπικά ηλεκτρόμετρα που χρησιμοποιούνται σε όργανα ανάλυσης αερολυμάτων



έχουν ευαισθησία της τάξεως μερικών fA που αντιστοιχούν σε μονοδιαεσπαρμένες συγκεντρώσεις λίγων χιλιάδων σωματιδίων ανά  $\text{cm}^{-3}$  για τυπικές ταχύτητες ροής.

Ένα χαρακτηριστικό όργανο που στηρίζει την αρχή λειτουργίας του στην τεχνική ηλεκτρικής μέτρησης, είναι ο σωματιδιακός μετρητής ελέγχου κινητικότητας (Scanning Mobility Particulate Sizer, SMPS). Είναι ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους μετρητές στην ανάλυση φασμάτων αερολυμάτων μεγέθους από 3 – 1000 nm. Το όργανο αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το φορτιστή των σωματιδίων, τη στήλη διαχωρισμού και το σύστημα ανίχνευσης και μια αναπαράστασή του φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Σχηματικό διάγραμμα σωματιδιακού μετρητή ελέγχου κινητικότητας.

#### 6.4. Τεχνική ταλαντευόμενης μεμβράνης

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, αέρας ωθείται δια μέσου ενός γυάλινου στοιχείου που ελαττώνει σταδιακά τη διατομή του και στο οποίο είναι προσαρτημένη μια ταλαντευόμενη μεμβράνη. Το στοιχείο αυτό ταλαντώνεται, με την εφαρμογή ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, σύμφωνα με μια χαρακτηριστική συχνότητα η οποία ελαττώνεται όσο η μάζα των σωματιδίων αυξάνεται μέσα στην προσαρτημένη μεμβράνη. Η μέτρηση της μεταβολής της χαρακτηριστικής αυτής συχνότητας,

μετατρέπεται μέσω γνωστών σχέσεων σε μέτρηση της συσσωρευμένης μάζας της σωματιδιακής ύλης.

Η μέθοδος αυτή μετρά σε πραγματικό χρόνο συγκεντρώσεις από  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως αρκετά  $\text{g}/\text{m}^3$  και λειτουργεί με την αρχή ότι υπάρχει συνεχής ροή και συλλογή σωματιδίων τα οποία κατόπιν συλλέγονται στη μεμβράνη που βρίσκεται στην άκρη του κοίλου γυάλινου στοιχείου. Στην είσοδο της συσκευής υπάρχει εξοπλισμός κατάλληλος για τον διαχωρισμό των σωματιδίων με διάμετρο  $10 \mu\text{m}$  πριν αυτά εισέλθουν στη ροή η οποία θα ελεγχθεί τελικά. Τα όργανα αυτού του τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση συγκέντρωσης σε σωματίδια  $\text{PM}_{2.5}$ , αρκεί πριν να αλλαχθεί το σύστημα εισδοχής της ροής ώστε να γίνεται ο κατάλληλος διαχωρισμός των σωματιδίων.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως οι παρακάτω, προκειμένου να λαμβάνονται πάντα αξιόπιστα αποτελέσματα:

- Το νερό που τυχόν θα απορροφηθεί, λόγω υψηλής υγρασίας, επηρεάζει τις μετρήσεις και τις καθιστά αναξιόπιστες.
- Οι μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν το ρυθμό ροής.
- Αν το αερόλυμα περιέχει και άλλα αέρια εκτός του αέρα, τότε αυτά πιθανόν να μεταβάλουν τις ιδιότητες της μεμβράνης.

### 6.5. Τεχνική σταθμικής μέτρησης

Η αρχή λειτουργίας αυτών των οργάνων είναι η εξής: μια αντλία αέρα ελκύει ατμοσφαιρικό αέρα με σταθερό ρυθμό ροής μέσα σε ένα ειδικά διαμορφωμένο πέρασμα, μέσα στο οποίο η σωματιδιακή ύλη διαχωρίζεται σε ομάδες ανάλογα με το μέγεθός της. Κατόπιν τα σωματίδια των συγκεκριμένων πλέον μεγεθών, συλλέγονται μέσα σε φίλτρα. Το καθένα από αυτά τα φίλτρα ζυγίζεται πριν και μετά τη χρήση προκειμένου να καθοριστεί η διαφορά βάρους η οποία φυσικά θα οφείλεται στην αποτιθέμενη σωματιδιακή ύλη. Ο συνολικός όγκος του αέρα είναι γνωστός εξ' αρχής από το σταθερό ρυθμό ροής που ρυθμίζεται στην αντλία και σε συνδυασμό με τη διάφορα βάρους όλων των φίλτρων τα οποία ζυγίστηκαν, είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση των σωματιδίων σε  $\mu\text{g}$  ανά  $\text{m}^3$  αέρα.

Τα όργανα αυτού του τύπου μπορούν να μετρήσουν συγκεντρώσεις σωματιδίων από  $30$  έως  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , σε θερμοκρασίες από  $-30^\circ \text{C}$  έως  $45^\circ \text{C}$ . Ορισμένες συσκευές διατίθενται με χαρακτηριστικές θερμοκρασίες προστασίας, οι οποίες όμως δεν είναι δεσμευτικές για τον χειριστή.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- Είναι δυνατόν να χαθεί σωματιδιακή ύλη κατά τη διάρκεια των διαδικασιών μεταχείρισης και ζύγισης των φίλτρων με συνέπεια το λάθος αποτέλεσμα στην τιμή της συγκέντρωσης.
- Αν το αερόλυμα περιέχει και άλλα αέρια εκτός του αέρα, τότε αυτά πιθανόν να μεταβάλουν τις ιδιότητες των φίλτρων.
- Το νερό που τυχόν θα απορροφηθεί λόγω υψηλής υγρασίας επηρεάζει τις μετρήσεις και τις καθιστά αναξιόπιστες.
- Η απομάκρυνση των φίλτρων και η πιθανή μεταφορά τους σε εργαστήριο για ανάλυση, μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα.
- Οι μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν το ρυθμό ροής.

Εκτός από τις παραπάνω κλασικές συσκευές μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, υπάρχουν εκατοντάδες άλλες πατέντες συσκευών οι οποίες έχουν μελετηθεί και κατασκευαστεί σε επιστημονικά εργαστήρια ανά τον κόσμο και έχουν πάρει την έγκριση από οργανισμούς όπως η USEPA και η ΕΕΑ (European Environmental Agency). Στόχος του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (WHO) είναι να εναρμονίσει τις τιμές οδηγίες για τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε όλα τα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δίνοντας παράλληλα και κίνητρα στους επιστήμονες να ασχοληθούν με την περαιτέρω έρευνα γύρω από νέες συσκευές και μεθόδους ελέγχου της αέριας ρύπανσης. Οι πρόσφατες αποδείξεις των επιδημικών επιπτώσεων που προκαλούν οι αιωρούμενοι σωματιδιακοί ρυπαντές στην υγεία του ανθρώπου, καθιστούν απαραίτητο ένα πολύ περιεκτικό πρόγραμμα αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού.

**Βιβλιογραφικές αναφορές: [2], [57], [60], [63]**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

### 7.1. Εισαγωγή

Η έννοια ‘έλεγχος των σωματιδιακών ρυπαντών’ μπορεί να αποδεχθεί πολλές ερμηνείες. Από το ευρύ κοινό ερμηνεύεται ως ο περιορισμός ή η απαγόρευση των εκπομπών τέτοιου είδους ρυπαντών, με τη χρήση θεσμικών μέτρων. Για την επιστημονική κοινότητα αντίθετα, έλεγχος σημαίνει πρόληψη της ρύπανσης στο επίπεδο των διεργασιών και στη χειρότερη περίπτωση περιστολή αυτής με τη βοήθεια αντιρρυπαντικών συσκευών. Το αντικείμενο του συγκεκριμένου εδαφίου έχει να κάνει με τον έλεγχο των σωματιδιακών ρυπαντών, οι οποίοι είναι προϊόντα των διαφόρων βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Οι σωματιδιακοί ρυπαντές, αν και έχουν διαφορετική προέλευση όπως είδαμε σε προηγούμενη αναφορά μας, έχουν την κοινή ιδιότητα ότι αποτελούνται από λεπτώς διαμερισμένα στερεά. Κάθε σωματίδιο έχει διαφορετικό σχήμα, μέγεθος, σύσταση, έχει την δική του ιστορία ως προς τον τρόπο παραγωγής, ανάπτυξης, αλληλεπίδρασης, αποσύνθεσης και απομάκρυνσης από την αέρια μάζα.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον έλεγχο των εκπομπών των αιωρούμενων σωματιδίων. Όλες σχεδόν βασίζονται στην ίδια αρχή, την εφαρμογή μιας δύναμης ικανής να προκαλέσει την απόθεση των σωματιδίων σε έναν αποδέκτη. Οι τεχνικές αυτές είναι η καθίζηση, η διήθηση, η φυγοκέντριση, η έκπλυση και η ηλεκτροστατική καθίζηση. Στη συνέχεια θα περιγραφούν αναλυτικά οι αντιρρυπαντικές συσκευές και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτών, των οποίων η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στις προαναφερθείσες τεχνικές.

Η πιο απλή συσκευή είναι ο θάλαμος καθίζησης ή εναπόθεσης. Αποτελείται από ένα μεγάλο θάλαμο εντός του οποίου η ταχύτητα του αέρα ελαττώνεται, επιτρέποντας στα αιωρούμενα σωματίδια να καθιζάνουν με τη βοήθεια της βαρύτητας. Μια άλλη αντιρρυπαντική συσκευή, ο κυκλώνας, στηρίζει τη λειτουργία του στη φυγοκέντριση και λειτουργεί με την επιβολή κυκλωνικής ροής στην εισερχόμενη αεροροή εντός ενός κλειστού κυλίνδρου. Λόγω της φυγοκεντρικής δύναμης που αναπτύσσεται επί των σωματιδίων, αυτά κινούνται προς τα έξω και συλλέγονται επί των τοιχωμάτων του κυλίνδρου. Στη συνέχεια αυτά γλιστρούν επί των τοιχωμάτων προς τα κάτω και καταλήγουν στον πυθμένα από τον οποίο στη συνέχεια απομακρύνονται. Η καθαρή

αεροροή εξαναγκάζεται σε ανάστροφη στο κέντρο του κυλίνδρου και εξέρχεται από την κορυφή του κυκλώνα.

Ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο αξιοποιεί την ηλεκτροστατική δύναμη που ενεργεί πάνω στα φορτισμένα σωματίδια και τα απομακρύνει λόγω της παρουσίας ισχυρού ηλεκτροστατικού πεδίου. Συγκεκριμένα, ένα μεγάλο ηλεκτροστατικό πεδίο αναπτύσσεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και τα σωματίδια που διέρχονται δια μέσου του πεδίου αποκτούν φορτίο. Τα φορτισμένα πλέον σωματίδια ταξιδεύουν μεταξύ αντιθέτως φορτισμένων πλακών όπου και συλλέγονται στην επιφάνεια αυτών αποφορτιζόμενα. Η καθαρή αεροροή εξέρχεται από τη συσκευή στο φυσικό περιβάλλον με ή χωρίς άλλη επεξεργασία.

Μια άλλη κατηγορία αντιρρυπαντικών συσκευών είναι οι υγροί συλλέκτες ή scrubbers (κατακρατητές). Αυτοί λειτουργούν με βάση την τεχνική της έκπλυσης των σωματιδίων με σταγόνες νερού. Με τη μέθοδο αυτή τα στέρεα σωματίδια συσσωματώνονται επί των σταγονιδίων του νερού και κατόπιν τα συσσωματώματα αυτά λόγω του μεγάλου μεγέθους απομακρύνονται εύκολα από τη ροή. Τέλος ένα σύνολο φίλτρων λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή της διήθησης, κατά την οποία ένα μίγμα σωματιδίων και αέρα εξαναγκάζεται να περάσει μέσα από μια συνάθροιση στοιχείων συλλογής, όπως ίνες ή πλεκόμενα φίλτρα.

Μερικά γενικά σχόλια γύρω από τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων εξοπλισμού συνοψίζονται στη συνέχεια. Οι μηχανικοί συλλέκτες, όπως οι συσκευές εναπόθεσης και οι κυκλώνες είναι φθηνότεροι αλλά έχουν μέτρια απόδοση. Εφόσον η απόδοση τους είναι υψηλή για μεγάλα σωματίδια, χρησιμοποιούνται ως προκαθαριστές σε πολύ ρυπασμένες αέριες μάζες.

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλες ογκομετρικές ταχύτητες ροών σε σχετικά χαμηλές πτώσεις πιέσεων με πολύ υψηλές αποδόσεις. Αυτά είναι δαπανηρά και σχετικώς μικρής προσαρμοστικότητας στις μεταβολές των λειτουργικών συνθηκών. Τα υφασμάτινα φίλτρα έχουν μεγάλο κόστος και υψηλό βαθμό απόδοσης, λειτουργούν σε ξηρές συνθήκες και χαμηλές θερμοκρασίες.

Τέλος οι Scrubbers λειτουργούν με υψηλές αποδόσεις και έχουν το πλεονέκτημα να συλλέγουν συγχρόνως αέριους και σωματιδιακούς ρυπαντές. Ωστόσο έχουν μεγάλο κόστος λειτουργίας λόγω της μεγάλης πτώσης πίεσης και της παραγόμενης υγρής λάσπης η οποία πρέπει να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία καθαρισμού.

## 7.2. Περιγραφή της απόδοσης συλλογής των σωματιδιακών ρυπαντών

Μερικές, αν όχι καμία, εκ' των συσκευών συλλογής είναι ικανές για την τέλεια απομάκρυνση των ρυπαντικών ουσιών από τον ρυπασμένο αέρα. Όπως προαναφέραμε κάποιες συσκευές είναι πιο αποδοτικές από άλλες και ακόμα και στην περίπτωση δύο ίδιων συσκευών είναι πιθανό η μια να συλλέξει περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια από την άλλη. Η αποτελεσματικότητα μιας συσκευής, όσον αφορά στην απομάκρυνση των σωματιδίων, εκφράζεται με την έννοια του συντελεστή απόδοσης.

Η απόδοση ορίζεται ως το πηλίκο της συλλεγόμενης ποσότητας προς την υπάρχουσα ολική ποσότητα. Διάφορες ιδιότητες όπως μάζα, αριθμός σωματιδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό της απόδοσης. Στην περίπτωση των σωματιδιακών ρυπαντών, αυτή η ιδιότητα μπορεί να είναι μια μοναδική τιμή της διαμέτρου ή επί ενός διαστήματος διαμέτρων. Εάν ο ορισμός εμπεριέχει το συνολικό διάστημα των σωματιδιακών διαμέτρων, τότε η απόδοση αναφέρεται ως συνολική απόδοση. Έτσι λοιπόν η απόδοση συλλογής για την γενικευμένη ιδιότητα  $\Psi$  θα είναι:

$$n_a = \frac{\Psi_c}{\Psi_p}$$

όπου  $\Psi_c$  είναι το συλλεγόμενο πόσο και  $\Psi_p$  η τιμή της ιδιότητας στην εισερχόμενη ροή. Επίσης ορίζουμε ως  $\Psi_0$  την αντίστοιχη τιμή της ιδιότητας με την οποία η ροή εγκαταλείπει τη συσκευή. Η  $\Psi_0$  ουσιαστικά προκύπτει από τη σχέση  $\Psi_0 = \Psi_p - \Psi_c$  και συνεπώς ισχύουν οι εναλλακτικές σχέσεις:

$$n_a = \frac{\Psi_c}{\Psi_0 + \Psi_c} = \frac{1}{1 + (\Psi_0 / \Psi_c)}$$

$$n_a = \frac{\Psi_p - \Psi_0}{\Psi_p} = 1 - \frac{\Psi_0}{\Psi_p}$$

Οι προηγούμενες σχέσεις μπορούν να εφαρμοσθούν για τον υπολογισμό αποδόσεων σε μια μόνο σωματιδιακή διάμετρο  $n(d)$ , οπότε:

$$n(d) = \frac{\Psi(d)}{\Psi_p(d)}$$

Η συνολική απόδοση μπορεί να σχετίζεται με την απόδοση μιας μοναδικής τιμής της διαμέτρου και στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$n_{\alpha} = \frac{\Psi_c}{\Psi_p} = \frac{\int_0^{\infty} n(d)\Psi_p(d)d(d)}{\int_0^{\infty} \Psi_p(d)d(d)}$$

Έτσι για τον προσδιορισμό του συντελεστή απόδοσης ως προς τη μάζα θα έχουμε:

$$n_{\alpha(m)} = \frac{m_c}{m_p} = \frac{\int_0^{\infty} n_{\alpha}(d)n(d)m_p(d)d(d)}{\int_0^{\infty} n(d)m_p(d)d(d)}$$

Η απόδοση ως προς τον αριθμό των σωματιδίων θα είναι:

$$n_{\alpha(N)} = \frac{\Psi_{nc}}{\Psi_{np}} = \frac{\int_0^{\infty} n_{\alpha}(d)n(d)d(d)}{\int_0^{\infty} n(d)d(d)}$$

Η συνολική απόδοση ως προς τη μάζα των σωματιδίων είναι συνήθως εύκολο να μετρηθεί πειραματικώς. Μια συσκευή δειγματοληψίας, συνήθως ένα φίλτρο, τοποθετημένο στην είσοδο και την έξοδο της συσκευής συλλέγει κατ' ουσία όλα τα σωματίδια.

### 7.3. Σχεδίαση και λειτουργία των συσκευών εναπόθεσης

Η απομάκρυνση των σωματιδιακών ρυπαντών από ένα αερόλυμα με τη βαρυτική καθίζηση, αποτελεί την πιο απλή συσκευή αντιρρύπανσης. Μια συσκευή εναπόθεσης είναι, κατ' αρχήν, απλά ένας μεγάλος θάλαμος δια μέσου του οποίου διέρχεται το αερόλυμα ενώ συγχρόνως σωματίδια διαφόρων μεγεθών καθιζάνουν στον πυθμένα με τη βοήθεια της βαρύτητας.

Η ταχύτητα του εισερχόμενου αερολύματος επιδιώκεται να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για δύο κυρίως λόγους. Ο ένας αφορά τη διάρκεια του χρόνου παραμονής των σωματιδίων μέσα στο θάλαμο της συσκευής και ο άλλος έχει σχέση με την επαναιώρηση των σωματιδίων από τον πυθμένα και την είσοδό τους εκ' νέου στην αρχική μη επιθυμητή ροή. Η επιθυμητή ταχύτητα επιτυγχάνεται συνήθως με το κατάλληλο γεωμετρικό σχήμα της εισόδου του θαλάμου.

Μολονότι, θεωρητικά, οι συσκευές εναπόθεσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για την κατακράτηση ακόμα και των μικρών σωματιδίων,



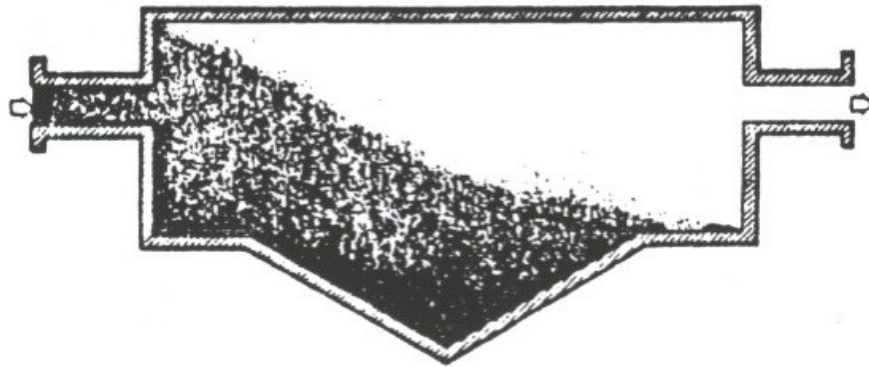
πρακτικοί λόγοι σχετικά με το μήκος τέτοιων θαλάμων περιορίζουν τη χρήση τους για σωματίδια μεγαλύτερα των 50 μm.

Κατά συνέπεια οι συσκευές εναπόθεσης χρησιμοποιούνται κανονικά σαν προκαθαριστές για την απομάκρυνση των μεγάλων σωματιδιακών ρυπαντών σε σύστημα συσκευών ελέγχου υψηλής απόδοσης. Με αυτόν το τρόπο η παρουσία τους συμβάλλει αφ' ενός στη βελτίωση της απόδοσης πιο πολύπλοκων και ευαίσθητων συσκευών (κυκλώνες, Η/Φ, φίλτρα) και αφ' ετέρου στην παράταση του χρόνου λειτουργίας, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του χρόνου συντήρησης και καθαρισμού. Τέλος η χρήση τους συνδέεται πάντα με ένα σημαντικό οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη χρήση μικρότερης κύριας συσκευής ενός συστήματος καθαρισμού.

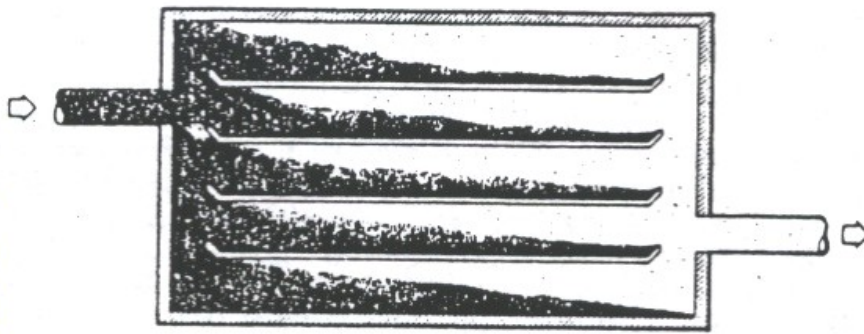
Η φιλοσοφία της ανακύκλωσης και ειδικότερα στις περιπτώσεις που το συλλεγόμενο υλικό έχει σοβαρό οικονομικό αντίκρισμα, δίνουν στις συσκευές αυτές τεραστία πλεονεκτήματα. Στα θετικά στοιχεία των συσκευών εναπόθεσης συμπεριλαμβάνονται: 1) η απλή κατασκευή και το χαμηλό κόστος, 2) η μικρή ενεργειακή απαίτηση λειτουργίας, 3) η συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων δε συνδέεται με τη χρησιμοποίηση νερού ή αλλού υγρού διαλύματος. Το κύριο τους μειονέκτημα είναι ο μεγάλος χώρος που απαιτεί η εγκατάστασή τους.

Όπως συμβαίνει συνήθως σε όλα τα τεχνολογικά συστήματα, τόσο η ερευνα όσο και η εμπειρία που αποκτάται συμβάλλει στη διαχρονική εξέλιξη και των συσκευών εναπόθεσης. Στα παρακάτω σχήματα προσφέρεται μια σύντομη εξελικτική εικόνα.

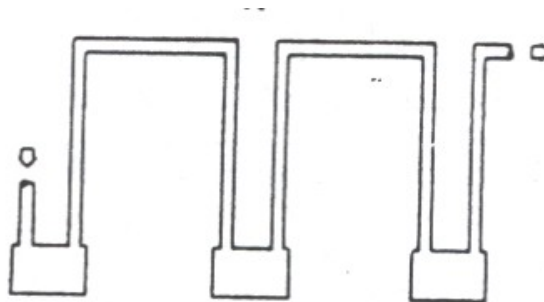
Στο Σχήμα 7.1 φαίνεται ένας απλός θάλαμος, ενώ η συσκευή του Σχήματος 7.2 συμπληρώνεται με δίσκους με πλεονέκτημα τη βελτιωμένη απόδοση. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρατήρηση ότι, εφ' όσον ουσιαστικά η ταχύτητα ροής παραμένει η ίδια για κάθε σωματίδιο τότε αυτό έχει να διανύσει μικρότερη απόσταση για να κατακαθίσει επί του κατώτερου δίσκου. Παρ' όλα αυτά η χρησιμοποίηση των δίσκων εμπεριέχει προβλήματα λόγω των δυσκολιών που εμφανίζονται κατά τον περιοδικό καθαρισμό τους από το συλλεγόμενο υλικό. Στο Σχήμα 7.3, η συσκευή συνδυάζει δύο λειτουργίες, την κατακράτηση των αιωρούμενων σωματιδιακών ρυπαντών και την ψύξη του αερίου ρεύματος συνήθως για περαιτέρω επεξεργασία και διάθεση.



Σχήμα 7.1: Απλή συσκευή εναπόθεσης.



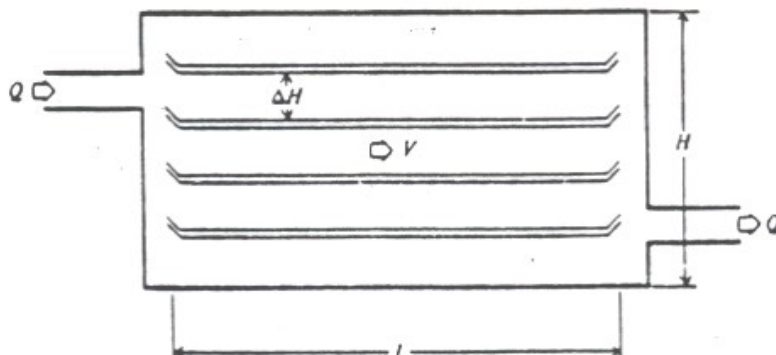
Σχήμα 7.2: Συσκευή εναπόθεσης σωματιδίων με δίσκους.



Σχήμα 7.3: Συσκευή εναπόθεσης που συνδυάζει κατακράτηση των σωματιδίων και ψύξη του αερίου ρεύματος.

➤ Υπολογισμός της απόδοσης των συσκευών εναπόθεσης

Έστω μια συσκευή εναπόθεσης που περιέχει και δίσκους όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.4: Στρωτή ροή σε συσκευή εναπόθεσης.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης θα κάνουμε δύο υποθέσεις:

- α) υπάρχει ένα στρώμα στρωτής ροής κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα του δίσκου στο οποίο οι δίνες δεν εισχωρούν. Έτσι οποιοδήποτε σωματίδιο θα περνάει σε αυτό το στρώμα της ροής και θα συλλαμβάνεται,
- β) στον υπόλοιπο χώρο της ροής η κίνηση των δινών θα έχει σαν αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδιακών ρυπαντών όλου του φάσματος των μεγεθών.

Για τον ορισμό της απόδοσης της συσκευής θεωρήσαμε ένα σωματίδιο εισερχόμενο στο μεσοδιάστημα των δύο δίσκων σε μια απόσταση  $y$  πάνω από τον κάτω δίσκο. Το σωματίδιο αυτό ταξιδεύει με μια ταχύτητα  $V$  οριζόντια και ίση με εκείνη του αερίου. Η κατακόρυφη ταχύτητα θα δίνεται από τη σχέση  $V_t = 29609 \rho d^2$  (υπό κανονικές συνθήκες). Ο απαιτούμενος χρόνος για να κατακαθίσει στον κάτω δίσκο το σωματίδιο είναι  $t = y/V_t$ . Με κατάλληλη εξίσωση κάποιων σχέσεων (τις οποίες δεν αναφέρουμε εδώ) προκύπτει η τελική σχέση η οποία μας δίνει το συντελεστή απόδοσης:

$$n_a = \frac{\eta W L V_t}{Q}$$

όπου  $\eta$  ο αριθμός των δίσκων,  $W$  το πλάτος του θαλάμου και  $L$  το μήκος των δίσκων.

Μια άλλη έκφραση του συντελεστή απόδοσης της συσκευής εναπόθεσης δίνεται αφού πρώτα υπολογίσουμε τον αριθμό των σωματιδίων που έχουν συλληφθεί,

συναρτήσει του τρέχοντος μήκους  $x$  των δίσκων της συσκευής. Ο αριθμός των σωματιδίων αυτών θα είναι:

$$N_{(x)} = N_0 e^{-V_x/V\Delta t}$$

Η απόδοση της συσκευής υπολογίζεται εύκολα από τη σχέση:

$$n_\alpha = 1 - \frac{N_{(L)}}{N_0}$$

και χρησιμοποιώντας τη σχέση  $V = Q/n(\Delta H)W$  (όπου  $\Delta H$  η απόσταση μεταξύ των δίσκων) προκύπτει τελικά:

$$n_\alpha = 1 - e^{-\eta L W V_i / Q}$$

#### 7.4. Σχεδίαση και λειτουργία των συσκευών φυγοκέντρισης

Οι συσκευές αδρανείας ή φυγοκέντρισης ή κυκλωνικοί διαχωριστές βασίζονται στην παρουσία δυνάμεων αδρανείας. Οι δυνάμεις αυτές προκαλούνται με τη μετατροπή μιας ροής αέρα σε μορφή κυκλωνική. Οι αναπτυσσόμενες εφαπτομενικές δυνάμεις οδηγούν τα στέρεα σωματίδια προς τα τοιχώματα συλλογής.

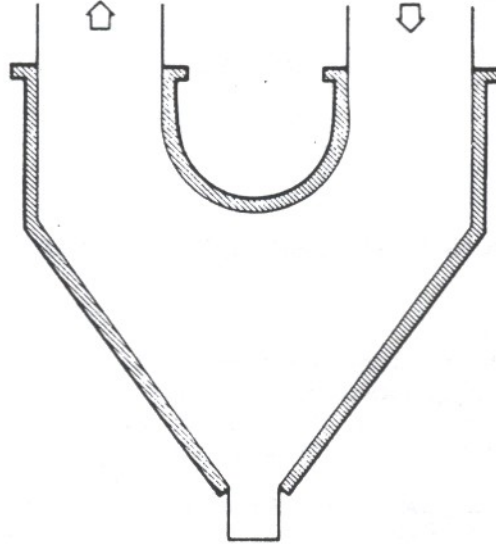
Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυκλωνικών διαχωριστών, οι οποίοι βασίζονται στον τρόπο με τον οποίο προσδίδεται η περιστροφική κίνηση στην αέρια μάζα που πρόκειται να υποστεί καθαρισμό.

Στη συνέχεια θα περιγράψουν οι κυκλώνες οι οποίοι έχουν ενδιαφέρον σε διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες και κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

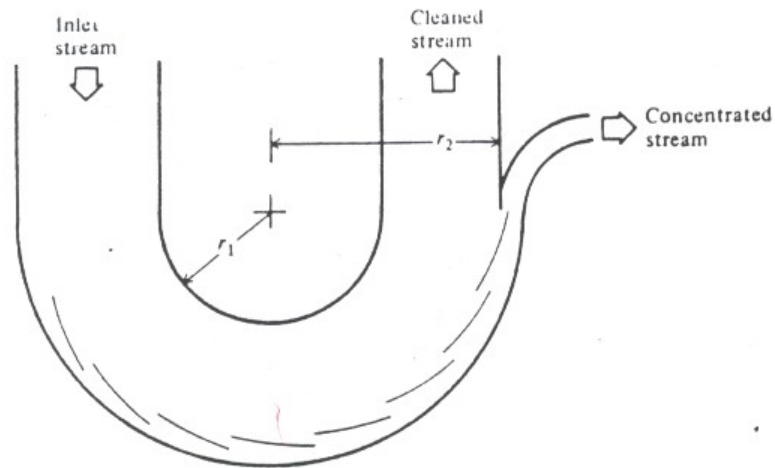
1) Οι φυγοκεντρικοί κυκλώνες αντιπροσωπεύονται από δύο χαρακτηριστικούς τύπους. Τον απλό φυγοκεντρικό συλλέκτη του Σχήματος 7.5, εντός του οποίου τα σωματίδια ακολουθούν περισσότερο ή λιγότερο κυκλικές τροχιές ωθούμενα προς τα έξω από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις. Όταν τα σωματίδια εισέλθουν στη νεκρή ζώνη (στρώμα) κινούνται προς την έξοδο όπου συλλέγονται. Αυτές οι συσκευές είναι εύκολες στην κατασκευή, έχουν χαμηλή πτώση πίεσης και δίνουν ουσιαστικώς μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης από τις συσκευές εναπόθεσης.

Ελαφρά τροποποιημένος συλλέκτης ή καλύτερα διαχωριστής φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Το αερόλυμα με υψηλή συγκέντρωση φορτίου οδηγείται από τις λάμες που είναι τοποθετημένες περιφερειακά σε μια δακτυλοειδή κίνηση απομονωμένη από την υπόλοιπη ροή. Το σύστημα αυτό προστατεύει τα σωματίδια από την επανείσοδό τους λόγω των διαταραχών της τυρβώδους ροής. Το κύριο

πλεονέκτημα αυτών των συσκευών είναι το συμπαγές, το δε μειονέκτημα τους είναι το στόμωμα της μονάδας από τα εγκαθιστάμενα σωματίδια.



Σχήμα 7.5: Απλός φυγοκεντρικός συλλέκτης αιωρούμενων σωματιδίων.



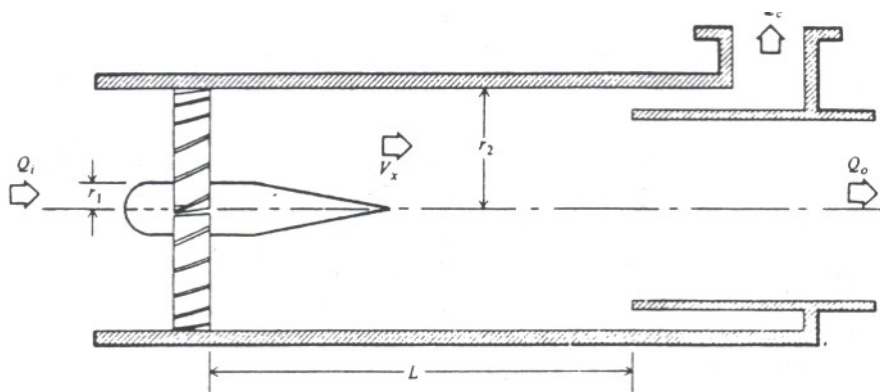
Σχήμα 7.6: Φυγοκεντρικός κυκλώνας δακτυλοειδούς κίνησης.

2) Το Σχήμα 7.7 παρουσιάζει μια άλλη πρακτική εφαρμογή της κυκλωνικής ροής για το διαχωρισμό των σωματιδιακών ρυπαντών από το αερόλυμα. Αυτή η συσκευή γνωστή ως ένας straight-through Cyclone Concentrator, προσδίδει μια στροβιλώδη κίνηση στην εισερχόμενη αεροροή με τη βοήθεια συστήματος από

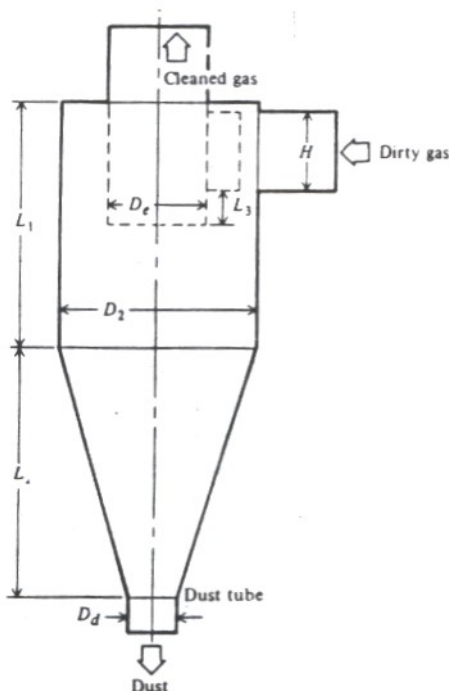
βάνες τοποθετημένες στην κορυφή της συσκευής. Η αεροροή έχει μια αξονική και μια εφαπτομενική συνιστώσα της ταχύτητας η οποία κατευθύνεται προς τον πυθμένα και όχι ανάστροφα. Η εφαπτομενική συνιστώσα εξασφαλίζει το διαχωρισμό των σωματιδίων ενώ η αξονική συνιστώσα συντηρεί τη ροή του ρεύματος δια μέσου της συσκευής καθώς και την έξοδο της από το άλλο άκρο.

3) Στην τελευταία κατηγορία περιγράφονται οι κυκλώνες ανάστροφης ροής. Η κάτοψη ενός τέτοιου κυκλώνα με τις διαστάσεις του φαίνεται στο Σχήμα 7.8. Η είσοδος του αερολύματος γίνεται εφαπτομενικά στην κορυφή της συσκευής. Αυτή προσδίδει μια στροβιλώδη κυκλωνική ροή στο αερόλυμα οδηγώντας έτσι τα σωματίδια διαδοχικά προς τα εξωτερικά τοιχώματα. Ταυτόχρονα ο κάτω κυλινδρικός κώνος επαναφέρει τις ροϊκές γραμμές προς την κεντρική περιοχή της συσκευής από όπου διοχετεύεται, μέσα από κατάλληλο σωλήνα, στην έξοδο που βρίσκεται επίσης στην κορυφή.

Η διεύθυνση του στροβιλισμού παραμένει η ίδια τόσο στον εξωτερικό δακτύλιο όσο και στον πυρήνα. Τα σωματίδια συσσωρεύονται στα πλευρικά τοιχώματα και ταυτόχρονα ολισθαίνουν προς τα κάτω στο συλλέκτη που υπάρχει στον πυθμένα. Το γεγονός ότι οι αναπτυσσόμενες φυγοκεντρικές δυνάμεις είναι πολύ μεγαλύτερες από τις βαρυτικές, προσδίδει μεγάλη ευελιξία στην προσαρμογή και εγκατάσταση των συσκευών. Προσοχή χρειάζεται μόνο όταν ο κυκλώνας χρησιμοποιηθεί σαν διαχωριστής. Επί πλέον της εφαπτομενικής εισόδου, που συζητήθηκε προηγουμένως, ένα ευρύ φάσμα επιλογών της εισόδου υπάρχει στο εμπόριο.



Σχήμα 7.7: Συσκευή κυκλωνικής ροής γνωστή ως *straight-through Cyclone Concentrator*.



Σχήμα 7.8: Κυκλώνας ανάστροφης ροής.

Πέρα από τη γενική περιγραφή των διαφόρων κατηγοριών των χρησιμοποιούμενων κυκλωνικών συσκευών, τεράστια σημασία έχει η επιλογή των υλικών κατασκευής και η περιοδική συντήρησή τους. Οι κυκλώνες κατασκευάζονται από οποιοδήποτε υλικό μεταλλικό ή κεραμικό, το οποίο να ανθίσταται στην υψηλή θερμοκρασία, στην σκληρότητα των στερεών σωματιδίων και στη διαβρωτική επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών.

Είναι απαραίτητη προϋπόθεση η εξομάλυνση της εσωτερικής επιφάνειας των τοιχωμάτων, έτσι ώστε τα συλλεγόμενα σωματίδια να ολισθαίνουν προς τα κάτω και να συλλέγονται. Η συσκευή δεν έχει κινητά μέρη και ως εκ τούτου η αναγκαία συντήρηση είναι γενικά απλή. Το χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, προβάλλει τους κυκλωνικούς συλλέκτες σαν ιδανικούς προκαθαριστές για πιο αποδοτικά τελικά συστήματα ελέγχου των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως τα ηλεκτροστατικά φίλτρα.

Μολονότι οι κυκλώνες παραδοσιακά έχουν χαρακτηριστεί σαν σχετικά χαμηλής απόδοσης συλλέκτες, μερικοί τύποι κυκλώνων διαθέσιμοι από τους κατασκευαστές, επιτυγχάνουν αποδόσεις μεγαλύτερες από 98% για σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μm σε αεροδυναμική διάμετρο. Γενικώς, οι συνήθεις κυκλώνες επιτυγχάνουν αποδόσεις των 90% για σωματίδια μεγαλύτερα από 15 έως 20 μm.



➤ Υπολογισμός της απόδοσης των κυκλωνικών συσκευών

α) Στρωτή Κυκλωνική Ροή

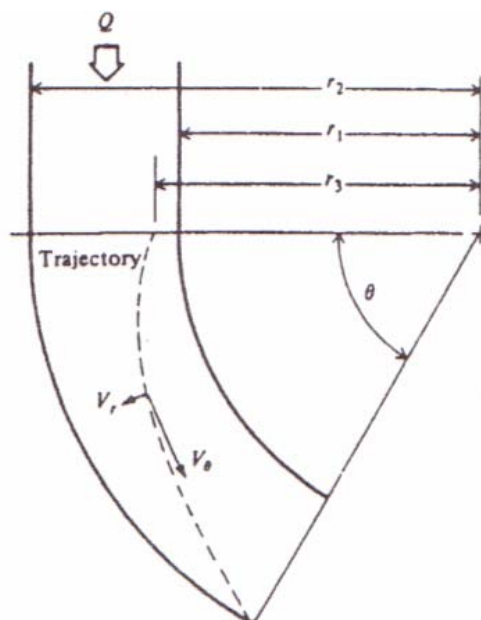
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ακολουθούμενη τροχιά ενός σωματιδίου το οποίο συμμετέχει σε κυκλωνική ροή με ακτινική απόσταση  $r_3$  κατά την είσοδο του και φθάνει στο εσωτερικό τοίχωμα αφού διαγράψει γωνία  $\theta$ . Παραλείποντας τα ενδιάμεσα βήματα προκειμένου να φθάσουμε στην τελική σχέση η οποία μας δίνει την απόδοση της συσκευής και υποθέτοντας ότι η κατανομή της συγκέντρωσης των σωματιδίων σε όλη τη διατομή της κυκλωνικής ροής είναι ομοιόμορφη, τότε υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης του συντελεστή απόδοσης από την παρακάτω σχέση:

$$n_a = \frac{r_2 - r_3}{r_2 - r_1}$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση μια εξίσωση η οποία συνδέει την οριακή ακτίνα  $r_3$  με τη γωνία  $\theta$ , προκύπτει η τελική απόδοση της κυκλωνικής συσκευής για στρωτή ροή:

$$n_a = \frac{1 - \left[ 1 - \frac{\rho Q d^2 \theta}{9 \mu r_2^2 W \ln(r_2 / r_1)} \right]}{1 - r_1 / r_2}$$

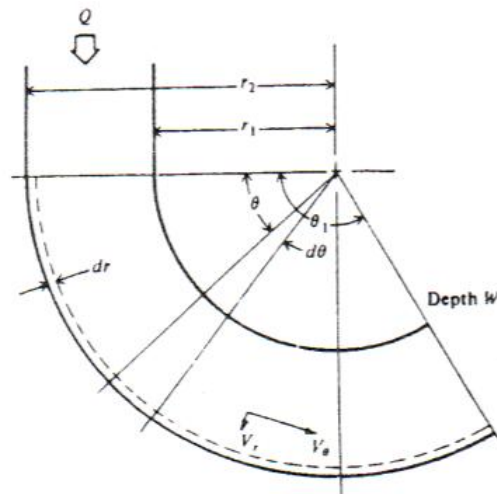
όπου,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού,  $d$  η διάμετρος του σωματιδίου.



Σχήμα 7.9: Τροχιά του σωματιδίου σε στρωτή κυκλωνική ροή.

### β) Τυρβώδης Κυκλωνική Ροή

Κατ' αρχάς ας υποθεθεί ότι η επίδραση των τυρβωδών διαταραχών έχει σαν αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων επί μιας διατομής που αντιστοιχεί σε οποιαδήποτε γωνία  $\theta$ . Η υπόθεση αυτή δεν είναι κατ' ανάγκη έγκυρη για κυκλωνική ροή και πράγματι ίσως αυτή είναι επίσης συντηρητική εφόσον η φυγόκεντρος δύναμη απομακρύνει τις τυρβώδης διαταραχές οι οποίες συμβαίνουν στην ενεργό διατομή της τυρβώδους ροής. Οπότε στη συνέχεια θα θεωρηθεί η δυνατότητα μιας διαφορικής σωματιδιακής κατανομής επί της διατομής.



Σχήμα 7.10: Τυρβώδης κυκλωνική ροή.

Θεωρείται ένα στρωτό στρώμα ροής κοντά στο εξωτερικό άκρο του κυκλώνα, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Έτσι όλα τα σωματίδια τα οποία εισέρχονται σε αυτό συλλαμβάνονται. Η απόδοση για τη γωνία  $\theta_1$  θα είναι:

$$n_a = 1 - \frac{N}{N_0} = 1 - \exp\left[-\frac{V_{R2} r_2 \theta_1}{V_{\theta 2} (r_2 - r_1)}\right]$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις σχέσεις των εφαπτομενικών και ακτινικών ταχυτήτων αντιστοίχως στην εξωτερική ακτίνα  $r_2$ , θα έχουμε την απόδοση της κυκλωνικής συσκευής για την περίπτωση της τυρβώδους ροής:

$$n_a = 1 - \exp\left[-\frac{\rho Q^2 d^2}{18 \mu r_2 W (r_2 - r_1) \ln(r_2 / r_1)}\right]$$

### 7.5. Σχεδίαση και λειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων

Η δυνατότητα φόρτισης των στερεών σωματιδίων ενός αερολύματος με τη βοήθεια της τεχνολογικής ανάπτυξης των ισχυρών ηλεκτροστατικών πεδίων, οδήγησε

στη σχεδίαση μιας ευρύτατα χρησιμοποιούμενης συσκευής ελέγχου των σωματιδιακών ρυπαντών. Αυτές οι συσκευές είναι τα γνωστά ηλεκτροστατικά φίλτρα ή ηλεκτροστατικοί κατακρυμνηστές.

Οι συσκευές αυτές κατασκευάζονται σε αρκετά μεγάλη ποικιλία μεγεθών και χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τα μεγάλα βιομηχανικά εργοστάσια, μέχρι και τις μικρές κλιματιστικές εγκαταστάσεις στα σπίτια. Είναι αρκετά ευέλικτα συστήματα και επιτυγχάνουν την κατακράτηση ευρέως φάσματος μεγεθών των σωματιδίων και στις δύο φυσικές καταστάσεις (στερεά και υγρά) με υψηλά επίπεδα απόδοσης. Μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις και η απαιτούμενη ισχύς είναι χαμηλή. Ωστόσο, τα φίλτρα αυτά έχουν και ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Για κάποια αιτία υπάρχουν σκόνες οι οποίες μπορούν να συλλεχθούν με μεγάλη δυσκολία μόνο. Επίσης τα ηλεκτροστατικά φίλτρα δεν κατακρατούν τους αέριους ρυπαντές. Εντούτοις πολλές φορές η απόδοση μεγαλώνει με την παρουσία αέριων ρυπαντών. Για παράδειγμα, αυτού του είδους τα φίλτρα που εγκαθίστανται στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια για την κατακράτηση της ιπτάμενης τέφρας εμφανίζουν υψηλό βαθμό απόδοσης μόνο με την παρουσία κάποιας ποσότητα SO<sub>3</sub>. Αυτή η δυσκολία του φίλτρου μπορεί να ξεπεραστεί λειτουργώντας το σύστημα με το αερόλυμα σε υψηλή θερμοκρασία.

Η πρώτη πατενταρισμένη ηλεκτροστατική συσκευή σχεδιάστηκε στις Η.Π.Α. από τον A. Walker το 1886. Η συσκευή αυτή δεν πέτυχε κατά τη λειτουργία της εξ' αιτίας της υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούσε. Το πρώτο επιτυχημένο Η/Φ σχεδιάστηκε από τον Dr. F. Cottrell το 1908. Η συσκευή αυτή χρησιμοποίησε τον πρόσφατο ανεπτυγμένο μηχανικό ανορθωτή και έναν υψηλής τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος μετασχηματιστή προς παραγωγή πεδίου 10-15 KV.

Οι πρώτες εμπειρικές μονάδες χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή της σκόνης στα εργοστάσια εξόρυξης μεταλλευμάτων. Η επιτυχία αυτή ενθάρρυνε τη χρήση των Η/Φ σε χυτήρια μολύβδου και ψευδαργύρου. Το 1912 εφαρμόστηκε με μεγάλη επιτυχία στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου.

#### ➤ Βασικές αρχές λειτουργίας και τύποι των Η/Φ

Η βασική λειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων συνοψίζεται στην φόρτιση των σωματιδίων και τη συλλογή τους επί των αντίθετα φορτισμένων επιπέδων ηλεκτροδίων με τη βοήθεια της δύναμης Coulomb.

Σημειώνεται ότι τόσο η φόρτιση όσο και η ελκτική δύναμη αφορούν απ' ευθείας το ίδιο το άτομο σε αντίθεση με τις μηχανικές μεθόδους διαχωρισμού. Για παράδειγμα στον κυκλώνα η φυγόκεντρος δύναμη εφαρμόζεται μεν σε κάθε σωματίδιο αλλά προκαλείται δια μέσου εφαρμοσμένων δυνάμεων σε ολόκληρη την αεροροή.

Όταν τα φορτισμένα αιωρούμενα σωματίδια διέρχονται μέσω του ηλεκτρικού πεδίου συλλογής οι επαγόμενες ηλεκτροστατικές δυνάμεις τα οδηγούν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων κινούμενα αντίθετα προς τη διεύθυνση ροής.

Τα σωματίδια συλλέγονται επί των ηλεκτροδίων. Εάν τα συλλεγόμενα σωματίδια είναι στερεά, τότε η απομάκρυνση τους γίνεται περιοδικά με τίναγμα των ηλεκτροδίων. Σε μερικές εφαρμογές το καθάρισμα επιτυγχάνεται με ξέπλυμα συνήθως με νερό. Η φόρτιση των σωματιδίων επιτυγχάνεται με την παραγωγή ιόντων με το φαινόμενο 'κορώνα' το οποίο εγκαθίσταται γύρω από ένα υψηλά φορτισμένο ηλεκτρόδιο. Το ηλεκτρικό πεδίο για τη συλλογή των σωματιδίων εγκαθίσταται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Έτσι δύο ηλεκτρόδια δημιουργούν το πεδίο φόρτισης και αλλά δύο το πεδίο συλλογής. Εάν το ίδιο το ζευγάρι εξυπηρετεί και τις δύο φυσικές διεργασίες, τότε το ηλεκτροστατικό φίλτρο ονομάζεται Η/Φ ενός βήματος. Αντίστοιχα όταν οι διεργασίες εξελίσσονται σε ανεξάρτητα ηλεκτρικά πεδία τότε ονομάζεται αντίστοιχα Η/Φ δύο βημάτων.

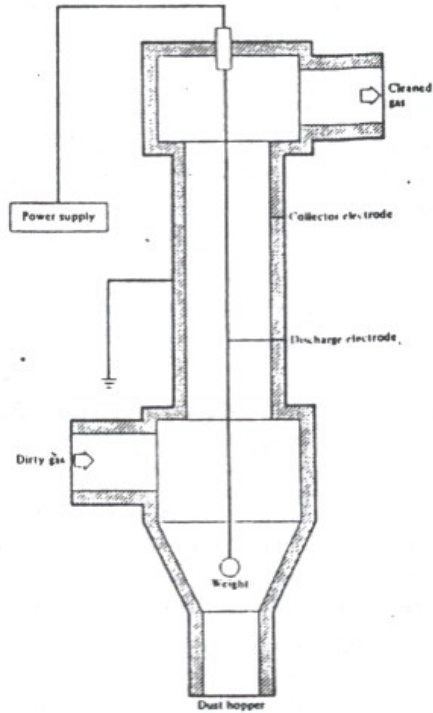
Το Σχήμα 7.11 δείχνει μια διατομή κυλινδρικού Η/Φ ενός βήματος. Το αερόλυμα εισέρχεται κοντά στον πυθμένα και ρέει προς το πάνω μέρος του κυλινδρικού συλλέκτη. Τα σωματίδια φορτίζονται με τη βοήθεια πεδίου γύρω από το κατακόρυφο ηλεκτρόδιο φόρτισης. Στη συνέχεια ρέουν προς την κυλινδρική επιφάνεια η οποία λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο συλλογής.

Το δυναμικό συνεχούς ρεύματος στο ηλεκτρόδιο φόρτισης είναι σταθερό ή ταλαντούμενο και έχει τιμή ίση με 50 KV. Μολονότι στην εικόνα αυτή φαίνεται ένας μόνο συλλέκτης, προφανώς στην πράξη ένας μεγάλος αριθμός συλλεκτών σε παράλληλη διάταξη συμπεριλαμβάνονται σε μια μεγάλη συσκευή.

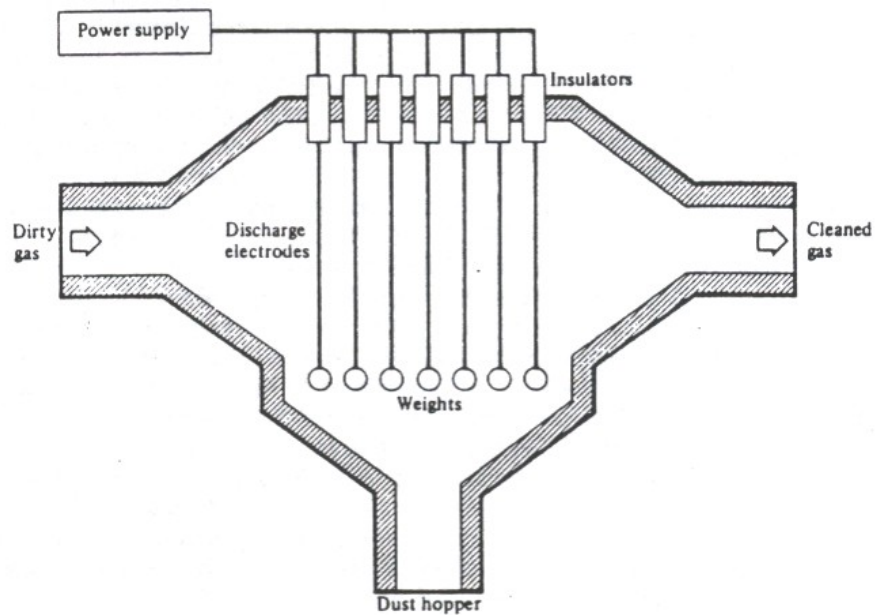
Μολονότι δεν χρησιμοποιείται πολύ, όπως συμβαίνει με τους συλλέκτες παραλλήλων πλακών, ο πολλαπλός κυλινδρικός συλλέκτης εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα για τη συλλογή υγρών και στερεών σωματιδίων. Ο συλλέκτης παραλλήλων πλακών φαίνεται στο Σχήμα 7.12.

Το αερόλυμα κινείται μεταξύ δύο κατακόρυφων παραλλήλων πλακών μεταξύ των οποίων αιωρούνται ένας αριθμός κατακόρυφων ηλεκτροδίων (υπό μορφή σύρματος)

τα οποία φορτίζουν τους σωματιδιακούς ρυπαντές. Το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο οφείλεται στο κατακόρυφα ηλεκτρόδια μεταξύ των πλακών δημιουργεί τη συλλεκτική δύναμη που ενεργεί πάνω στα σωματίδια.



Σχήμα 7.11: Κυλινδρικός συλλέκτης ενός βήματος.

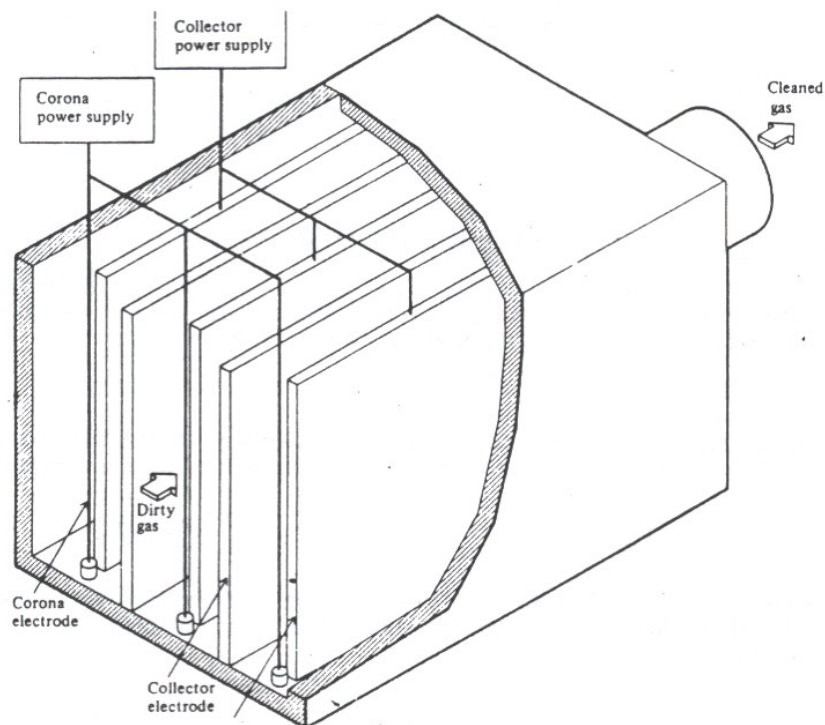


Σχήμα 7.12: Ηλεκτροστατικός συλλέκτης παραλλήλων πλακών.

Στα Η/Φ δύο βημάτων, το ζεύγος των ηλεκτροδίων φόρτισης είναι ξεχωριστό από το ζεύγος συλλογής. Εισερχόμενα τα σωματίδια στην ενεργό ζώνη της συσκευής, το φαινόμενο κορώνα αυτόματα προσδίδει φορτίο στα σωματίδια. Στις περισσότερες εφαρμογές των Η/Φ δύο βημάτων χρησιμοποιείται η θετική κορώνα. Το τμήμα φόρτισης είναι μικρό προξενώντας ένα χρόνο παραμονής των σωματιδίων της τάξεως κλάσματος του δευτερολέπτου. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η συλλογή τους σε αυτό το τμήμα.

Στη συνέχεια το αερόλυμα των φορτισμένων σωματιδίων εισέρχεται στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου συλλογής. Εάν έχει χρησιμοποιηθεί μια θετική κορώνα, το ηλεκτρόδιο συλλογής πρέπει να έχει μήκος συνήθως δέκα και περισσότερες φορές από αυτό στο τμήμα φόρτισης, προκειμένου να εξασφαλίζεται επαρκής χρόνος για την πλήρη συλλογή.

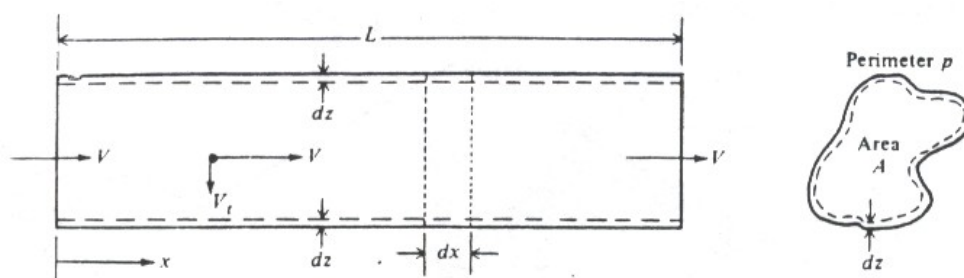
Το σχήμα 7.13 περιλαμβάνει ένα Η/Φ παραλλήλων πλακών και δύο βημάτων. Τα Η/Φ ενός βήματος χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε κλιματιστικές εφαρμογές, ενώ αυτά των δύο βημάτων σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι συσκευές ενός βήματος λειτουργούν γενικώς με αρνητική κορώνα, ενώ αυτές των δύο βημάτων με θετική.



Σχήμα 7.13: Ηλεκτροστατικός συλλέκτης παραλλήλων πλακών και δύο βημάτων.

➤ Συλλεκτική απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων

Για λόγους ευκολίας υπολογισμού του συντελεστή απόδοσης, υποτίθεται ότι είναι γνωστό το φορτίο  $q$  των σωματιδίων και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το τμήμα συλλογής ενός Η/Φ, ένας θάλαμος με περίμετρο  $P$  και ενεργό διατομή  $S$ .



Σχήμα 7.14: Διατομή θαλάμου συλλογής ενός Η/Φ.

Όταν το σωματίδιο θα κινείται εντός του ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως  $E$ , μια δύναμη  $F$  θα ενεργεί πάνω του με αποτέλεσμα να κινείται με τελική ταχύτητα  $u_t$ :

$$u_t = \frac{qEC}{d}$$

όπου  $C$  ο συντελεστής Gunningham και  $d$  η διάμετρος του σωματιδίου.

Αποφεύγοντας τις ενδιάμεσες σχέσεις προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοση του Η/Φ, παραθέτουμε την τελική εξίσωση υπολογισμού αυτής που είναι η εξής:

$$n_a = 1 - \exp\left(-\frac{S_C u_t}{Q}\right)$$

όπου  $S_C = P \cdot L$  η συλλεκτική επιφάνεια και  $Q = 5u$ .

Η παραπάνω τελική εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση Deutsch-Anderson των Η/Φ. Χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Exald Anderson σε εμπειρική μορφή το 1919 και παράχθηκε από τον W. Deutsch το 1922.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι για οποιαδήποτε ανάλυση των Η/Φ, απαιτείται ακριβής προσδιορισμός των θεμελιωδών παραμέτρων της ταχύτητας του σωματιδίου και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.



### 7.6. Σχεδίαση και λειτουργία των υγρών συλλεκτών

Μια ακόμη μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των αερολυμάτων από τα αιωρούμενα σωματίδια, είναι η μέθοδος της υγρής δέσμευσης ή έκπλυσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως wet scrubbing και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται ονομάζονται wet scrubbers. Τέλος, ο όρος αυτός αναφέρεται σε κάθε τεχνική που χρησιμοποιεί ένα υγρό για τον καθαρισμό των αερίων ή σωματιδιακών ρυπαντών.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των αερολυμάτων τόσο από τα τοξικά αέρια, όσο και από τους σωματιδιακούς ρυπαντές. Στην περίπτωση των σωματιδίων η μέθοδος εφαρμόζεται με διάφορες τροποποιήσεις από ότι στα αέρια, μιας και η αρχή λειτουργίας, δηλαδή η μεταφορά σωματιδίων από την αέρια στην υγρή φάση, είναι διαφορετική σε σχέση με την απορρόφηση-διάλυση των αερίων σε υγρό.

Οι υγροί συλλέκτες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

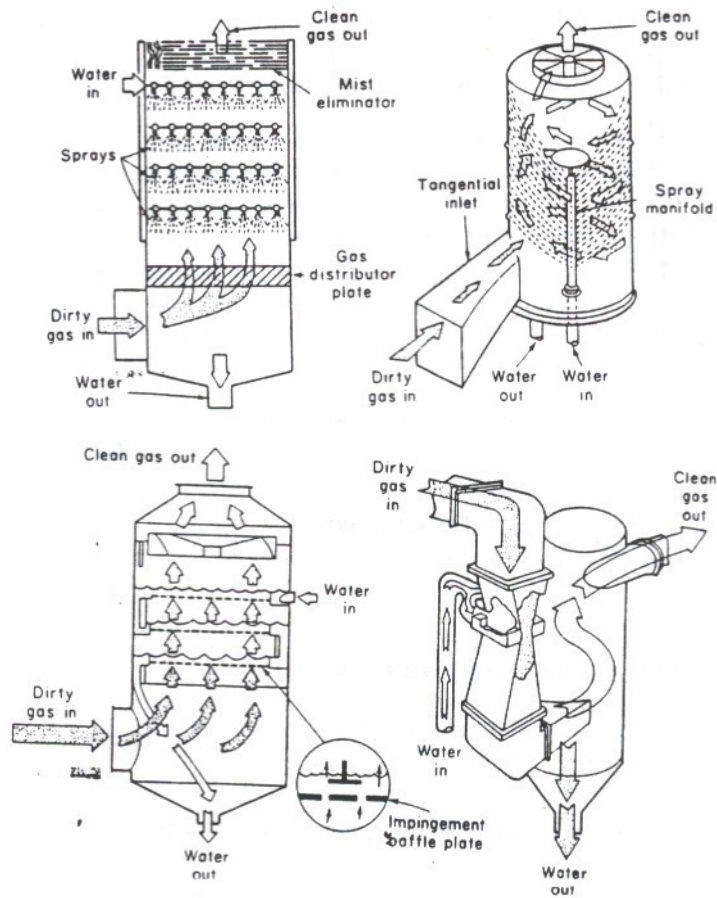
1. Εκείνη στην οποία το συλλεκτικό μέσο αποτελούν σειρές σταγόνων υγρού
2. Εκείνη στην οποία υγρές επιφάνειες διαφόρων τύπων συνιστούν το μέσο συλλογής.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι θάλαμοι ή πύργοι ψεκασμού, οι φυγοκεντρικοί ή κυκλωνικοί scrubbers και οι Venturi. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι πύργοι με δίσκους και οι πύργοι πληρώσεως.

Οι γενικές αρχές λειτουργίας όλων των συσκευών της πρώτης κατηγορίας αφορούν τη δημιουργία μεγάλων σταγόνων υγρού (ανάλογα με τον τύπο συσκευής) σε σχέση με το μέγεθος των υπό συλλογή σωματιδίων. Κάθε τύπος χρησιμοποιεί διαφορετικό τρόπο στεγανοποίησης αλλά και εξασφάλισης της οριακής ταχύτητας με την οποία διασταυρώνονται οι σταγόνες με τη μάζα του αερούματος.

Γενικά οι συσκευές έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης συλλογής, ακόμη και των μικρών σωματιδίων. Δυστυχώς η λειτουργία τους συνοδεύεται από ένα σοβαρό μειονέκτημα το οποίο έχει σχέση με τη διαχείριση του ανεπιθύμητου παραπροϊόντος της λάσπης των καταλοίπων. Όσες φορές αποβάλλεται στο περιβάλλον απ' ευθείας δημιουργεί τεράστια προβλήματα. Συνήθως υποβάλλεται σε επεξεργασία μετατοπίζοντας το πρόβλημα στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων που τελικά προκύπτουν.

Στο παρακάτω Σχήμα εμφανίζονται τέσσερις βασικοί τύποι των υγρών συλλεκτών εκ των οποίων θα αναλυθούν δύο.



Σχήμα 7.15: Τύποι υγρών συλλεκτών.

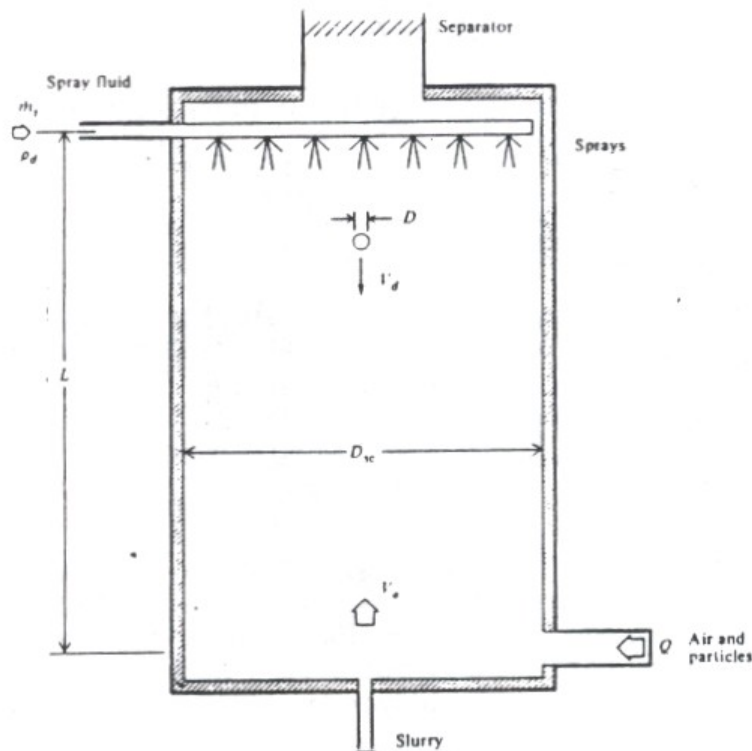
➤ **Θάλαμος ψεκασμού**

Η πιο απλή συσκευή για τη θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των υγρών συλλεκτών είναι ο θάλαμος ή πύργος ψεκασμού. Στο Σχήμα 7.16 φαίνεται ένα απλό διάγραμμα της συσκευής. Τα σταγονίδια παράγονται από μια σειρά ακροφυσίων στην κορυφή του θαλάμου. Αυτά κινούνται υπό την επίδραση της βαρύτητας προς τα κάτω αντίθετα προς την ανερχόμενη μάζα του αερολύματος.

Με τη βοήθεια και των τριών προαναφερθέντων μηχανισμών, τα σωματίδια προσκολλώνται στη μάζα των σταγόνων και συμπαρασύρονται στον πυθμένα. Το υγρό μίγμα της λάσπης υφίσταται διαχωρισμό των στερεών καταλοίπων από το νερό το οποίο χρησιμοποιείται εκ' νέου για την τροφοδοσία της συσκευής.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης συλλογής συνολικά, αρκεί να υπολογιστεί η συλλεκτική απόδοση μιας σταγόνας. Η συνολική απόδοση του θαλάμου θα αυξάνεται όμοια με την αύξηση της απόδοσης μιας σταγόνας. Αύξηση του μήκους και της

ταχύτητας ροής του υγρού προς εκείνη του αερολύματος και μείωση της διαμέτρου των σταγόνων, επίσης θα προκαλούν την επιθυμητή αύξηση του συνολικού συντελεστή απόδοσης.

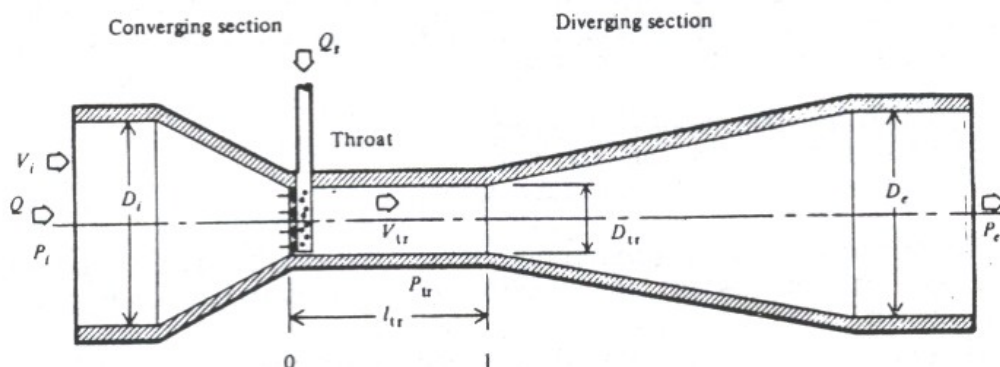


Σχήμα 7.16: Θάλαμος ψεκασμού.

### ➤ Συσσκευή Venturi

Για την αύξηση της αποτελεσματικότητας των θαλάμων ψεκασμού επιδιώκεται η ελάττωση του μεγέθους των σταγονιδίων του υγρού και η αύξηση της ταχύτητάς τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τις συσκευές Venturi. Στο Σχήμα 7.17 απεικονίζεται γραφικά ένας συνήθης τύπος Venturi.

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό του scrubber το μήκος του λαιμού είναι πρώτιστης σπουδαιότητας. Αυτό θα πρέπει να έχει επαρκές μήκος ώστε η πλειονότητα των σωματιδίων να συλλέγεται στο λαιμό. Επίσης για την εξασφάλιση μικρής πτώσης πίεσης ο λαιμός σχεδιάζεται με μεγάλη διάμετρο και μήκος ώστε να επιτυγχάνεται η ίδια απόδοση.



Σχήμα 7.17: Συσκευή Venturi.

### 7.7. Σχεδίαση και λειτουργία των φίλτρων

Μια σειρά συσκευών ελέγχου των αιωρούμενων σωματιδίων βασίζεται στο φιλτράρισμα τους από το αερόλυμα. Σήμερα υπάρχει μια ευρύτερη ποικιλία φίλτρων τα οποία χρησιμοποιούνται. Αυτά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

1. τα στρωματοποιημένα φίλτρα,
2. τα πακεταρισμένα φίλτρα και
3. τα πλεκτά φίλτρα

Τα δύο πρώτα είδη χρησιμοποιούνται στα συστήματα εξαερισμού ενώ εκείνα της τρίτης κατηγορίας χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία.

Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων από τα φίλτρα είναι απλή. Το αερόλυμα αναγκάζεται να περάσει μέσα από το φίλτρο, όπου συγκρατείται η σκόνη και διέρχονται τα αέρια συστατικά. Έτσι, πάνω στο φίλτρο σχηματίζεται ένα στρώμα σκόνης το οποίο στη συνέχεια επενεργεί και αυτό σαν φίλτρο για την παραπέρα κατακράτηση λεπτότερων σωματιδίων. Με την πάροδο του χρόνου το στρώμα αυξάνει σημαντικά, δημιουργούνται προβλήματα στην είσοδο και απαιτείται ως επακόλουθο περιοδικό καθαρίσμα του φίλτρου.

Οι μηχανισμοί που συμβάλουν στην καλή λειτουργία των φίλτρων είναι:

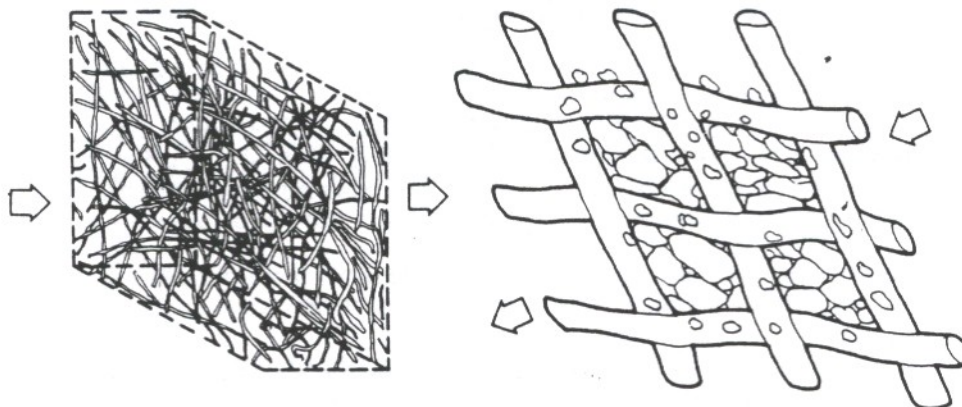
- **Κατακάθιση λόγω βαρύτητας.** Τα σωματίδια λόγω του βάρους τους δεν ακολουθούν τις ρευστοδυναμικές γραμμές αλλά επικάθονται στην επιφάνεια των ινών.
- **Πρόσκρουση λόγω αδράνειας.** Τα σωματίδια λόγω της αδράνειας δεν ακολουθούν τις ρευστοδυναμικές γραμμές γύρω από την ίνα, αλλά

προσκρούουν σε αυτή και συγκρατούνται. Ο μηχανισμός αυτής εμφανίζεται σε σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 1  $\mu\text{m}$ .

- **Ανάσχεση.** Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται σε σωματίδια τα οποία κινούνται ανάμεσα στις ίνες και στις δυναμικές γραμμές. Όταν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη της διαμέτρου των σωματιδίων, αυτά παρεμποδίζονται, δεν μπορούν να ακολουθήσουν το αερόλυμα και κατακρατούνται στις ίνες του φίλτρου.
- **Διάχυση.** Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0.5  $\mu\text{m}$  εγκαταλείπουν τις ρευστοδυναμικές γραμμές λόγω της κίνησης Brown. Έτσι, με την τυχαία κίνηση τους, προσπίπτουν στην επιφάνεια των ινών όπου και συγκρατούνται.
- **Ηλεκτροστατική καθίζηση.** Στην περίπτωση αυτή τα σωματίδια και οι ίνες φέρουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Έτσι, τα σωματίδια έλκονται από τις ίνες του φίλτρου προς τις οποίες κινούνται και συγκρατούνται.

Οι βασικές παράμετροι ενός φίλτρου είναι ο συντελεστής απόδοσης, η πτώση πίεσης κατά τη λειτουργία του και ο χρόνος ζωής που συγγενεύει με τη χωρητικότητα συγκράτησης και την αντοχή του φίλτρου. Η διαφορά πίεσης επηρεάζει άμεσα το κόστος λειτουργίας. Η απόδοση συλλογής εκφράζεται με το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων του αερολύματος που συγκρατείται. Η απόδοση συλλογής του φίλτρου διακρίνεται σε στιγμιαία και συσσωρευτική εξαιτίας του ότι η απόδοση είναι συνάρτηση του χρόνου λειτουργίας.

Ο χρόνος ζωής του φίλτρου είναι αρκετά σημαντικός γιατί συνδέεται με το κόστος αυτού, το οποίο είναι πολύ μεγάλο και συνεπώς δεν είναι δυνατή η συχνή αντικατάστασή του.



Σχήμα 7.18: Φίλτρα ινών.

Όπως προαναφέρθηκε, ο χρόνος ζωής του φίλτρου συγγενεύει με τη χωρητικότητα συγκράτησης. Με τον όρο αυτό εννοείται η ποσότητα μάζας των σωματιδίων που μπορεί να συγκρατηθεί ανά μονάδα επιφάνειας του φίλτρου για μια ορισμένη διάφορα πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου του αερολύματος. Στο Σχήμα 7.18 εμφανίζονται μερικοί τύποι εμπορικών φίλτρων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ & ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

### 8.1. Πρότυπα ποιότητας αέρα - Γενικά

Τα πρότυπα ποιότητας αέρα είναι συγκεντρώσεις ή ρυθμοί εκπομπής ρύπων που έχουν οριστεί για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος από πιθανούς κινδύνους λόγω της αέριας ρύπανσης. Αν υπήρχαν συγκεκριμένες τιμές συγκεντρώσεων πάνω από τις οποίες θα είχε παρατηρηθεί ότι απειλείται η υγεία, τότε η θέσπιση τέτοιων προτύπων θα ήταν εύκολη. Στην πραγματικότητα όμως τέτοια όρια όσον αφορά την αέρια ρύπανση και συγκεκριμένα τους σωματιδιακούς ρυπαντές δεν είναι γνωστά, με αποτέλεσμα οι απαραίτητες πληροφορίες για τη θέσπιση προτύπων να προέρχονται από δύο κυρίως πηγές:

1. Από παρατηρήσεις βραχυχρόνιων ή μακροχρόνιων επιπτώσεων των ατμοσφαιρικών ρυπαντών, επεισοδίων που προκαλούν φθορές στην ανθρώπινη ακεραιότητα, ποσοτικοποιημένων ζημιών σε αποδέκτη ή επιδημιολογικών μελετών σε μια ομάδα πληθυσμού.
2. Από συγκεκριμένα πειράματα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Μπορεί να είναι πειράματα σε ζώα ή σε εργαστηριακή κλίμακα, τα συμπεράσματα των οποίων χρησιμοποιούνται για μελέτες προς όφελος του γενικού πληθυσμού.

Πλήθος διαφορετικών φιλοσοφιών έχουν αναπτυχθεί για τον περιορισμό της αέριας ρύπανσης. Αυτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στις πρότυπες εκπομπές, που βασίζεται στη λογική ότι αν θεσπιστούν ανώτατες τιμές για τις εκπομπές, τότε είναι δυνατόν να επιτευχθούν οι τιμές στόχοι.
- Στην Ευρώπη και τις Η.Π.Α., η νομοθεσία καθορίζεται με βάση τα πρότυπα ποιότητας του αέρα, οπότε εξετάζεται πώς η συμβολή των πιθανών νέων πηγών εκπομπής δε θα προκαλέσει υπέρβαση αυτών.
- Σε πιο μεγάλη κλίμακα, η προσέγγιση του κρίσιμου φορτίου έκθεσης αποτελεί την πιο σύγχρονη άποψη η οποία συνδέει την απόθεση των ρύπων με τις επιπτώσεις τους στα τοπικά οικοσυστήματα. Η άποψη αυτή στηρίζεται σε μοντέλα διασποράς που υπολογίζουν τις μέγιστες αποδεκτές διασπορές, προκειμένου να μην ξεπεραστεί η τιμή του κρίσιμου φορτίου ενός συγκεκριμένου αποδέκτη.

Και οι τρεις προσεγγίσεις στηρίζονται σε ένα κοινό σημείο. Υποτίθεται ότι η έκθεση σε ένα ρύπο ασκεί πίεση σε ένα οργανισμό και τον αναγκάζει να αντιδράσει. Ο



μηχανισμός άμυνας μπορεί να αναστρέψει κάθε βλάβη, με την προϋπόθεση ότι η έκθεσή του στο αίτιο που προκάλεσε τη βλάβη δεν ξεπέρασε μια συγκεκριμένη ανώτατη τιμή κατωφλίου. Αυτή η τιμή κατωφλίου, διαιρούμενη με έναν αυθαίρετο συντελεστή προστασίας δίνει την πρότυπη τιμή. Παρόλο που η άποψη αυτή είναι βολική για νομοθέτες και επιστήμονες, ωστόσο οι αποδέκτες δεν αντιδρούν άμεσα, αλλά παρουσιάζουν ανταπόκριση σε όλα τα επίπεδα συγκεντρώσεων. Αν η ανταπόκριση αυτή έχει οικονομική και κοινωνική σημασία, τότε προκύπτει θέμα σύγκρισης του κινδύνου στον οποίο εκτίθεται ο πληθυσμός από τον ρυπαντή με τους άλλους κινδύνους στους οποίους είναι εκτεθειμένος.

Πολύ συχνά, οι αποδέκτες ενώ παρουσιάζουν μια επιφανειακή ομοιότητα (είτε είναι άνθρωποι, είτε ζώα, είτε φυτά), ανταποκρίνονται πολύ διαφορετικά ανάλογα με την ευαισθησία και την ανθεκτικότητά τους. Τα πρότυπα θεσπίζονται έτσι ώστε να προστατεύουν και τους πιο ευαίσθητους οργανισμούς. Συχνά δεν είναι δυνατό να εξακριβωθεί αν η σύντομη έκθεση σε ένα ρύπο μπορεί να επηρεάσει μακροχρόνια την υγεία ενός οργανισμού. Επιπλέον, η απόκριση δεν εξαρτάται μόνο από τη συγκέντρωση αλλά και από το χρονικό διάστημα που διαρκεί η έκθεση.

Αμέσως παρακάτω, γίνεται αναφορά στα πρότυπα ποιότητας αέρα τόσο για την εξωτερική ατμόσφαιρα, όσο και για την ατμόσφαιρα εσωτερικών χώρων η οποία και απασχόλησε την παρούσα εργασία.

### **8.2. Πρότυπα ποιότητας της εξωτερικής ατμόσφαιρας**

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

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

θέσπιση ειδικών καθεστώτων σε διάφορες περιοχές (π.χ. ζώνες προστασίας, αρχαιολογικούς χώρους, κ.ά.).

Η διαδικασία θεσμοθέτησης των προτύπων ποιότητας του αέρα είναι πολύπλοκη και διαφέρει από χώρα σε χώρα. Βασικό άξονα της διαδικασίας αυτής αποτελούν τα **κριτήρια ποιότητας του αέρα**. Αυτά είναι τιμές συγκεντρώσεων ρύπων και χρόνοι έκθεσης σ' αυτούς, που συνδέονται με ειδικές επιδράσεις στον άνθρωπο, στα ζώα, στα φυτά και γενικά στο περιβάλλον. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) ονομάζει τα κριτήρια αυτά **οδηγούς για την ποιότητα του αέρα** και τα κατατάσσει σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- ✓ Συγκεντρώσεις ρύπων και χρόνους έκθεσης μέχρι το όριο εκείνο για το οποίο - σύμφωνα με την υπάρχουσα ιατρική πληροφόρηση - δεν παρατηρούνται έμμεσες ή άμεσες επιδράσεις (περιλαμβανομένης της αλλοίωσης των αναπνευστικών, καθώς και των αντιδράσεων προσαρμογής ή προστασίας).
- ✓ Συγκεντρώσεις ρύπων και χρόνους έκθεσης μέχρι το όριο εκείνο για το οποίο υπάρχει πιθανότητα ερεθισμού των αισθητηρίων οργάνων, βλαβερές επιδράσεις στη βλάστηση, μείωση της ορατότητας κι άλλες «εχθρικές» προς το περιβάλλον επιδράσεις.
- ✓ Συγκεντρώσεις ρύπων και χρόνους έκθεσης μέχρι το όριο εκείνο για το οποίο υπάρχει πιθανότητα χειροτέρευσης ζωτικών φυσιολογικών λειτουργιών ή εμφάνισης αλλαγών που μπορούν να οδηγήσουν σε χρόνιες ασθένειες και επιβράχυνση της ζωής.
- ✓ Συγκεντρώσεις ρύπων και χρόνους έκθεσης μέχρι το όριο εκείνο για το οποίο υπάρχει πιθανότητα ακαριαίας ασθένειας ή θανάτου σε ευαίσθητες ομάδες πληθυσμού (βρέφη, ηλικιωμένοι, πάσχοντες από αναπνευστικά νοσήματα, κ.ά.).

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

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

Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σ' ένα πλήθος ορίων διαφορετικών από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα ισχύουν τα όρια που έχουν θεσπιστεί ή προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα κράτη μέλη με βάση αποτελέσματα σχετικών μελετών της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας ή

άλλων αναγνωρισμένων ερευνητικών κέντρων. Τέτοια όρια έχουν θεσπιστεί για τους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, ολικά αιωρούμενα σωματίδια, καπνό, μόλυβδο, κ.ά. Τα όρια αυτά δεν είναι οριστικά, αλλά μπορούν να αναθεωρηθούν, π.χ. επίκειται μείωση του ορίου για το Pb, αφού η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του έχει ελαττωθεί σημαντικά με τη χρήση της αμόλυβδης βενζίνης. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια για τη θέσπιση ορίων και για άλλους, μη θεσμοθετημένους ρύπους, οι οποίοι αποδεικνύεται ότι είναι επικίνδυνοι.

Τα διάφορα κράτη έχουν θεσπίσει, επίσης, όρια που έχουν ισχύ μόνον σε ορισμένες περιοχές και έχουν στόχο την αντιμετώπιση της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Έτσι, με την κυβερνητική ανακοίνωση «Μέτρα για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Αθήνας» (15/17 1982) θεσπίστηκαν όρια πάνω από τα οποία είναι αναγκαία η εφαρμογή μέτρων. Τα όρια αυτά είναι γνωστά ως «όρια επιφυλακής». Όταν οι συγκεντρώσεις των ρύπων υπερβούν τα όρια επιφυλακής, τότε τίθενται σε ετοιμότητα οι αρμόδιες υπηρεσίες για ενημέρωση τόσο των πολιτών, όσο και των αρχών σχετικά με την κατάσταση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Αν οι συγκεντρώσεις των ρύπων ξεπεράσουν τα όρια «συναγερμού» και «έκτακτης ανάγκης» (πρώτη και δεύτερη βαθμίδα μέτρων) και συγχρόνως υπάρχει πρόβλεψη συνέχισης των συνθηκών, που συντελούν στη συσσώρευση της ρύπανσης, τότε λαμβάνονται διάφορα περιοριστικά μέτρα, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές των ρύπων από τις διάφορες πηγές, ανάλογα με το ρύπο ο οποίος έχει υπερβεί τα παραπάνω όρια. Τα μέτρα αυτά κλιμακώνονται για διάφορες περιοχές και χρονικές περιόδους της ημέρας, ανάλογα με την έκταση του επεισοδίου ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα όρια της Αθήνας έχει υιοθετήσει και η Θεσσαλονίκη.

### 8.3. Όρια εκπομπής

Για να επιτευχθεί η ποιότητα του αέρα, όπως αυτή καθορίζεται από τα πρότυπα ποιότητας, απαιτείται έλεγχος στις πηγές εκπομπής ρύπων στην ατμόσφαιρα. Για το σκοπό αυτό θεσπίστηκαν τα **πρότυπα εκπομπής** (emission standards), τα οποία εκφράζουν ανώτατες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρύπων στο σημείο εκπομπής. Με το Προεδρικό Διάταγμα για την προστασία του περιβάλλοντος από τη βιομηχανική ρύπανση (ΦΕΚ Α' 239/6-ΙΟΙ 981) καθορίστηκαν όρια εκπομπής για αρκετούς ρύπους, όπως τον καπνό, το φθόριο, τον ανόργανο μόλυβδο, αρσενικό και κάδμιο, τα αιωρούμενα σωματίδια, το υδροχλωρικό οξύ, το SO, το NO<sub>2</sub>, το υδρόθειο, τον άνθρακα και τον αμίαντο.

Τα πρότυπα εκπομπής διακρίνονται σε **γενικά** και **κλαδικά**. Τα πρώτα ισχύουν για όλες τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ενώ τα δεύτερα μόνον σε ορισμένους βιομηχανικούς κλάδους. Για

παράδειγμα, ο κλάδος παραγωγής συσσωρευτών Pb έχει αυστηρότερο όριο εκπομπής σωματιδίων από τους άλλους κλάδους, επειδή τα σωματίδια που εκπέμπει είναι περισσότερο επιβαρημένα με Pb.

Τα πρότυπα εκπομπής, συνήθως, εκφράζονται ως μάζα ή όγκος ρύπων ανά μονάδα όγκου των αερολυμάτων. Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται όρια εκπομπής για τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία είχαν τεθεί σε ισχύ τη δεκαετία του 1980 για το βιομηχανικό κλάδο.

#### 8.4. Πρότυπα ποιότητας στην ατμόσφαιρα εσωτερικών χώρων

Τα πρότυπα ποιότητας της ατμόσφαιρας εσωτερικών χώρων αναφέρονται, κυρίως, στους χώρους εργασίας. Γι' αυτούς έχουν θεσπιστεί ανώτατες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρύπων, στους οποίους μπορούν οι εργαζόμενοι να εκτίθενται χωρίς κίνδυνο για την υγεία τους.

Οι οριακές αυτές τιμές εκφράζονται ως «μέγιστες συγκεντρώσεις σε χώρους εργασίας» (MAK-Werte, FRG), ως «τιμές μέγιστης επιτρεπτής έκθεσης» (PEL, OSHA/USA) ή ως «τιμές κατωφλίου» (TLV, ACGIH/ USA). Η επιτροπή βιομηχανικών υγειονολόγων των Η.Π.Α. (ACGIH) προτείνει τρεις κατηγορίες τιμών:

- TLV: TLV-οροφής (ανώτατες)
- TLV-σύντομης έκθεσης και
- TLV-χρονικά σταθμισμένη.

Η τελευταία είναι η μέση, χρονικά σταθμισμένη, τιμή της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης ενός ρύπου, στην οποία επιτρέπεται να εκτίθενται οι εργαζόμενοι για 8 ώρες την ημέρα επί 5 ημέρες την εβδομάδα. Η χρονικά σταθμισμένη TLV υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TLV = \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots + C_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots t_n}$$

όπου  $C_1, \dots, C_n$  είναι οι συγκεντρώσεις του ρύπου κατά τις χρονικές περιόδους,  $t_1, \dots, t_n$ , αντίστοιχα.

Για την ατμόσφαιρα των κατοικιών και γραφείων δεν έχουν θεσπιστεί ακόμη πρότυπα ποιότητας της ατμόσφαιρας, παρά μόνον για ειδικές περιπτώσεις, όπως π.χ. τη φορμαλδεΐδη, το ραδόνιο, κ.ά.

## ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ & ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

**Πίνακας 8.1: Πρότυπα ποιότητα αέρα για τα αιωρούμενα σωματίδια ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**

ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΧΩΡΑ ή ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ - ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ			ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ/ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	ΕΤΟΣ 1	ΜΗΝΕΣ 6	ΩΡΕΣ 24	
Οριακές τιμές  ΕΛΛΑΔΑ <sup>1</sup> ΕΟΚ <sup>2</sup>	80			ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΥΡΟΥ ΚΑΠΝΟΥ Διάμεσος των ημερήσιων μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους
	ΧΕΙΜΩΝΑΣ: 1/10 έως 31/3	130		Διάμεσος των ημερήσιων μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του χειμώνα
			250	98% όλων των ημερήσιων μέσων τιμών κατά τη διάρκεια του έτους δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή αυτή. Από τις 7 ημέρες (δηλαδή κατά τη διάρκεια του έτους 2%) που επιτρέπεται η ημερήσια μέση τιμή να ξεπερνά αυτή την οριακή τιμή, συνεχόμενες δεν πρέπει να είναι περισσότερες από τρεις
Οριακές τιμές  Ε.Ο.Κ. <sup>2</sup>	150			ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΕΡΑ (HIGH VOLUME SAMPLING) Αριθμητικός μέσος όρος των ημερήσιων μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους
			300	95% όλων των ημερήσιων μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή αυτή (δηλαδή η τιμή αυτή δεν πρέπει να ξεπερνιέται πάνω από 18 ημέρες το έτος)
Κατευθυντήριες τιμές  ΕΛΛΑΔΑ <sup>1</sup> ΕΟΚ <sup>2</sup>	40 - 60			ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΥΡΟΥ ΚΑΠΝΟΥ Αριθμητικός μέσος όρος ημερήσιων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους
			100 - 150	Ημερήσια μέση τιμή
Κατευθυντήριες τιμές  ΠΑΓΚΟΣΜΙΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΥΓΕΙΑΣ (Π.Ο.Υ.) <sup>3</sup>	40			ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΥΡΟΥ ΚΑΠΝΟΥ Αριθμητικός μέσος όρος ημερήσιων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους
			120	98% όλων των ημερήσιων μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή αυτή (δηλαδή η τιμή αυτή δεν πρέπει να ξεπερνιέται πάνω από 7 ημέρες το έτος)
			180	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΑΕΡΑ (HIGH VOLUME SAMPLING) Ημερήσια μέση τιμή
			110	ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΕΙΣΠΝΕΥΣΙΜΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (THORACIC PARTICLES) Ημερήσια μέση τιμή

Η ετήσια περίοδος αναφοράς αρχίζει την 1/4 του ημερολογιακού έτους και λήγει στις 31/3 του επόμενου έτους

ΟΡΙΟ ΕΠΙΦΥΛΑΚΗΣ ΑΘΗΝΑΣ:	250 (Μέση τιμή 24ώρου)
ΟΡΙΟ ΣΥΝΑΓΕΡΜΟΥ ΑΘΗΝΑΣ:	400 (Μέση τιμή 24ώρου)
ΟΡΙΟ ΕΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ ΑΘΗΝΑΣ:	600 (Μέση τιμή 24ώρου)

- 1) Πράξη 99 του Υπουργικού Συμβουλίου 10/7/87, «Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου και αιωρούμενα σωματίδια» ΦΕΚ 135/28.7.87.  
 2) Οδηγία 80/779/ΕΟΚ της 15/7/1980 που αφορά τις οριακές και καθοδηγητικές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας για το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια.  
 3) Air Quality Guidelines for Europe, Copenhagen World Health Organization, Regional Office for Europe, 1987, WHO regional publication. European Series No 23, page 357.

### 8.5. Πρότυπα ποιότητας αέρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του αέρα βασίζεται σε δύο κατηγορίες:

1. Οι τιμές-όρια (limit values) είναι συγκεντρώσεις που δεν πρέπει να ξεπερνιούνται για καθορισμένα χρονικά διαστήματα, εντός των ορίων των κρατών μελών της Ένωσης. Οι τιμές αυτές βασίζονται στις κατευθυντήριες τιμές της WHO για τις επιπτώσεις των ρύπων στην ανθρώπινη υγεία.
2. Οι τιμές-οδηγίες (guide values) έχουν τεθεί σαν μακροπρόθεσμες προφυλάξεις για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

#### *Παράδειγμα 1. Οδηγία 80/779/EEC, 15 Ιουλίου 1980*

Ήταν η πρώτη σημαντική νομοθετική πράξη στον τομέα της ποιότητας του αέρα και στόχευε στα δύο κλασικά συστατικά του αστικού νέφους: τα αιωρούμενα σωματίδια και το SO<sub>2</sub>. Ο Πίνακας 8.2 δίνει τις τιμές-οδηγούς και ο Πίνακας 8.3 τις τιμές-όρια για το SO<sub>2</sub> με τις συναφείς τιμές για τα αιωρούμενα σωματίδια (TSP-Total Suspended Particulates) τα οποία και εξετάζουμε στην παρούσα εργασία.

*Πίνακας 8.2: Τιμές οδηγίας για τα αιωρούμενα σωματίδια.*

Περίοδος αναφοράς	Καθοδηγητική τιμή για τα αιωρούμενα σωματίδια
Έτος	40 έως 60 (αριθμητικός μέσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)
24 ώρες	100 έως 150 (καθημερινή μέση τιμή)



Πίνακας 8.3: Τιμές ορίων ποιότητας για τα αιωρούμενα σωματίδια.

Περίοδος αναφοράς	Οριακή τιμή για το διοξείδιο του θείου	Συναφής τιμή για αιωρούμενα σωματίδια
Έτος	80 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)	> 40 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)
	120 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)	≤ 40 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)
Χειμώνας (1 Οκτωβρίου έως 31 Μαρτίου)	130 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του χειμώνα)	> 60 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του χειμώνα)
	180 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του χειμώνα)	≤ 60 (διάμεσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του χειμώνα)
Έτος (αποτελείται από μονάδες περιόδων μέτρησης 24 ωρών)	250 <sup>(2)</sup> (98ο εκατοστημόριο όλων των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)	> 150 (98ο εκατοστημόριο όλων των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)
	350 <sup>(2)</sup> (98ο εκατοστημόριο όλων των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)	≤ 150 (98ο εκατοστημόριο όλων των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)



Αξίζει να δούμε τον Πίνακα 8.3 προσεκτικά για να καταλάβουμε τα παρακάτω:

- Η νομοθεσία απαιτεί καθημερινή παρακολούθηση της ρύπανσης σε ετήσια βάση.
- Η οδηγία προσδιορίζει τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για τα σωματίδια (ανακλασιμότητα).
- Η μέθοδος μέτρησης των TSP ήταν συνεχώς υπό αμφισβήτηση. Παρόλο που η ανακλασιμότητα είναι μέθοδος φτηνή και διαδεδομένη, δε δίνει αποτελέσματα σε μονάδες βάρους. Τελικά η μέθοδος καθορίστηκε να είναι η ανακλασιμότητα και η συγκέντρωση να εκφράζεται σε μονάδες βάρους μέσω ενός πίνακα ώστε να συμβιβαστούν τα δύο συστήματα.
- Οι τιμές-όρια που καθορίζονται προέκυψαν έπειτα από συλλογή δεδομένων από ερευνητικές ομάδες και οργανισμούς όπως η WHO, κάνοντας συγκερασμό των αποτελεσμάτων από πειραματικές συνθήκες και αληθινά επεισόδια ρύπανσης.
- Τα στατιστικά μέτρα των συγκεντρώσεων είναι η διάμεσος (δηλαδή η συγκέντρωση που ξεπερνά περισσότερο από το μισό την ημερήσια μέση τιμή) και το 98<sup>ο</sup> εκατοστημόριο (υπέρβαση κατά 2% της ημερήσιας μέσης τιμής, ή 7 μέρες το χρόνο). Με τον τρόπο αυτό αναγνωρίζεται το γεγονός ότι μικρής διάρκειας επεισόδια λίγων ημερών, με ασυνήθιστα υψηλές τιμές συγκεντρώσεων, δεν αυξάνουν πάντα σημαντικά την ετήσια μέση τιμή αλλά μπορούν να προκαλέσουν δυσανάλογα σοβαρές βλάβες στην ανθρώπινη υγεία.
- Στην οδηγία παράλληλα με τα άρθρα δίνεται και το χρονοδιάγραμμα για την εφαρμογή των μέτρων αυτών. Οι τιμές-όρια ισχύουν από την 1 Απριλίου 1983. αν αυτό δεν επιτεύχθηκε σε ορισμένες ζώνες, τότε τα κράτη οφείλουν να προάγουν τα σχέδια της επιτροπής για τη βαθμιαία βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις περιοχές αυτές μέχρι την 1 Απριλίου 1993. η επιτροπή αναγνώρισε ότι ο περιορισμός της ρύπανσης είναι διαδικασία χρονοβόρα και ακριβή, αλλά οι ασκούμενες πιέσεις στοχεύουν στον περιορισμό της ρύπανσης και μόνο.

Η επιτροπή προσδιόρισε δύο εναλλακτικές μεθόδους δειγματοληψίας. Η πρώτη είναι κατάλληλη για σύστημα 24-ωρης παρακολούθησης σε σταθερά σημεία, οπότε εξάγονται οι ωριαίες μέσες τιμές. Η δεύτερη μέθοδος προσδιορίζεται για συστήματα στα οποία η δειγματοληψία συγκεντρώσεων πραγματοποιείται για μικρότερο χρονικό διάστημα και σε πολλά σημεία και χρησιμοποιείται για τη συμπλήρωση των μετρήσεων των TSP σε σταθερά σημεία (Πίνακας 8.2).

Η οδηγία του 1980 θεωρήθηκε ανεπαρκής. Η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διαφορετικές μεθόδους προώθησε την ανάπτυξη ομάδων δεδομένων που δεν μπορούσαν να συγκριθούν άμεσα. Ακόμα οι βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες τιμές-όρια προσέφεραν διαφορετικά επίπεδα αυστηρότητας, ενώ τα κράτη μέλη είχαν τη δυνατότητα να επιλέγουν οποία τιμή μπορούσαν να πλησιάσουν ευκολότερα. Το 1989 προγραμματίστηκε αναθεώρηση της οδηγίας προκειμένου να γίνει εναρμόνιση των διαδικασιών και αντικαταστάθηκε από την 89/427/EEC. Οι τιμές-όρια και οι τιμές-οδηγοί της συγκεκριμένης οδηγίας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

**Πίνακας 8.4:** Αναθεωρημένες τιμές οδηγίας 89/427/EEC για τα αιωρούμενα σωματίδια.

Περίοδος αναφοράς	Καθοδηγητική τιμή για τα αιωρούμενα σωματίδια
Έτος	40 έως 60 (αριθμητικός μέσος των καθημερινών μέσων τιμών που λαμβάνονται στη διάρκεια του έτους)
24 ώρες	100 έως 150 (καθημερινή μέση τιμή)

Πίνακας 8.5: Αναθεωρημένες τιμές-όρια για τα αιωρούμενα σωματίδια.

Περίοδος	Οριακή τιμή για το διοξείδιο του θείου	Συνδεόμενη τιμή για τα αιωρούμενα σωματίδια
Έτος	80 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)	> 150 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)
	120 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)	≤ 150 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)
Χειμώνας 1. 10. – 31. 3.	130 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του χειμώνα)	> 200 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του χειμώνα)
	180 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του χειμώνα)	≤ 200 (διάμεσος των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του χειμώνα)
Έτος (αποτελούμενο από μονάδες περιόδων μέτρησης 24 ωρών)	250 <sup>(1)</sup> (98ο εκατοστημόριο του συνόλου των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)	> 350 (98ο εκατοστημόριο του συνόλου των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)
	350 <sup>(1)</sup> (98ο εκατοστημόριο του συνόλου των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)	≤ 350 (98ο εκατοστημόριο του συνόλου των μέσων καθημερινών τιμών που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους)

### 8.6. Νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα οχήματα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση διαχωρίζει τα οχήματα σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βάρος τους: αυτοκίνητα (<2.5 τόνους), ελαφρού τύπου φορτηγά (<3.5 τόνους) και βαρέως τύπου φορτηγά.

Η πρώτη οδηγία για τα οχήματα εγκρίθηκε το 1970 και αποτελεί υιοθέτηση του κανονισμού νούμερο 15 της UNECE. Από τότε έχουν εκδοθεί επτά κύριες οδηγίες. Τα πρότυπα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα βενζινοκίνητα οχήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον κυβισμό της μηχανής: τα μικρά (κάτω από 1.4 lt), τα μεσαία (1.4-2 lt) και τα μεγάλα (πάνω από 2 lt). Οι σημαντικότερες οδηγίες ήταν οι 83/351/EEC, 88/458/EEC (περιορισμός των μεγίστων τιμών για τις δύο μεγαλύτερες κατηγορίες κινητήρων) και η 89/458/EEC (περιορισμός των μεγίστων τιμών για τους μικρότερους κινητήρες). Οι οδηγίες αυτές καταργήθηκαν από τη συγκεντρωτική οδηγία 91/441/EEC η οποία επιβάλλει αυστηρότερους ελέγχους σε όλα τα επιβατικά αυτοκίνητα που ζυγίζουν πάνω από 2500 kg (ανεξάρτητα από την ισχύ του κινητήρα, αλλά εξαιρεί εκείνα με κινητήρες άμεσης έκχυσης ντίζελ). Από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1993 όλα τα καινούργια αυτοκίνητα είναι υποχρεωμένα να συμβαδίζουν με τα πρότυπα για τις εκπομπές, που σημαίνει ότι είναι απαραίτητο να είναι εφοδιασμένα με τριοδικό καταλύτη. Τα πρότυπα απαιτούν εκπομπές λιγότερες από 0.14 gr σωματιδίων ανά km όταν κινούνται για περισσότερο από 7 km δοκιμαστικής πορείας, που περιλαμβάνει συνθήκες κυκλοφορίας σε αστική ζώνη και αυτοκινητόδρομο. Τα αυτοκίνητα πρέπει να μπορούν να περάσουν τον ίδιο έλεγχο και μετά από 30000 km. Από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1997, μια νέα σειρά μέτρων περιορίζει τα προηγούμενα όρια, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 8.6: Όριο εκπομπής σωματιδίων για επιβατικά αυτοκίνητα από το 1997.*

Τύπος κινητήρα	Όριο εκπομπής σωματιδίων (g/km)
Βενζίνης	---
Ντίζελ έμμεσης έγχυσης	0.08
Ντίζελ άμεσης έγχυσης	0.10

Η οδηγία 93/59/EEC εφαρμόζεται στα ελαφρά εμπορικά οχήματα (<9 ατόμων, <3.5 τόνων). Αναφέρεται ως η ‘οδηγία για τα μικρά φορτηγά (vans)’. Τα οχήματα της κατηγορίας αυτής υποδιαιρούνται σε τρεις μικρότερες ανάλογα με το απόβαρό τους. Η κατηγορία I περιλαμβάνει αυτά με βάρος μικρότερο από 1250 kg, η κατηγορία II αυτά

μεταξύ 1250-1700 kg και η κατηγορία III τα οχήματα βάρους από 1701-3500 kg. Τα όρια εκπομπών που δείχνει ο ακόλουθος πίνακας εφαρμόζονται για τα νέα οχήματα από την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1994, είτε χρησιμοποιούν βενζίνη, είτε ντίζελ.

*Πίνακας 8.7: Όριο εκπομπής σωματιδίων για μικρά φορτηγά.*

Κατηγορία οχήματος	Όριο εκπομπών σωματιδίων (g/km)
Κατηγορία I	0.14
Κατηγορία II	0.19
Κατηγορία III	0.25

Μέχρι το 1988 ο μόνος κανονισμός για τις εκπομπές των οχημάτων βαρέως τύπου (HDV) ήταν για τον έλεγχο της διαύγειας των καυσαερίων λόγω της εκπομπής σωματιδίων. Η οδηγία 88/77/EEC οριστικοποίησε τα όρια εκπομπής και για τους υπόλοιπους αέριους ρυπαντές. Τα βαρέως τύπου οχήματα πλέον υπόκεινται στην οδηγία 91/452/EEC η οποία περιορίζει τις πρότυπες εκπομπές σε δύο στάδια και εισάγει όρια εκπομπής για τα σωματίδια. Από την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1996 έχει τεθεί σε πλήρη ισχύ και τα όρια εκπομπής της φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 8.8: Όριο εκπομπής σωματιδίων για μεγάλα φορτηγά.*

Στάδιο	Όριο εκπομπής σωματιδίων (g/KWh)
Βήμα I	0.36 (>85 KW)
	0.61 (≤85 KW)
Βήμα II	0.15

Μέρος του περιεχόμενου θείου στο ντίζελ σχηματίζει σωματίδια, οπότε για να ικανοποιηθεί το αυστηρό όριο εκπομπής των σωματιδίων, η περιεκτικότητα του θείου στο ντίζελ έπεσε σταδιακά από το 0.3% κατά βάρος (87/219EEC), στο 0.05% κατά βάρος (93/12/EEC) από την 1<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1996.

### **8.7. Τελευταία οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα πρότυπα ποιότητας του αέρα σε σχέση με τα αιωρούμενα σωματίδια (1999/30/EK)**

Στο συγκεκριμένο εδάφιο, γίνεται λόγος για την οδηγία 1999/30/EK του συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τις οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων στον αέρα του περιβάλλοντος των κρατών μελών της. Η συγκεκριμένη

οδηγία αναφέρεται στις οριακές τιμές εκπομπών όλων των ρυπαντών (αερίων και στερεών), αλλά επί του παρόντος θα γίνει εκτενής αναφορά στο άρθρο 5 το οποίο αναφέρεται διεξοδικά στα σωματίδια της ατμόσφαιρας τα οποία και μας απασχολούν στην παρούσα εργασία. Για τους σκοπούς της παρούσας οδηγίας νοούνται ως  $AS_{10}$  τα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου 10  $\mu\text{m}$  και ως  $AS_{2.5}$  τα αντίστοιχα των 2.5  $\mu\text{m}$ .

Αμέσως παρακάτω ακολουθεί πιστό αντίγραφο του άρθρου 5 της οδηγίας καθώς επίσης και αναλυτικός πίνακας με τις οριακές τιμές για τα σωματίδια  $AS_{10}$ .

### Άρθρο 5

#### Σωματίδια

1. Τα κράτη μέλη λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι οι συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  στον αέρα του περιβάλλοντος, όπως εκτιμώνται σύμφωνα με το άρθρο 7, δεν υπερβαίνουν τις οριακές τιμές που αναφέρονται στο μέρος I του παραρτήματος III από τις καθοριζόμενες στο μέρος αυτό ημερομηνίες.

Τα περιθώρια ανοχής που καθορίζονται στο μέρος I του παραρτήματος III, εφαρμόζονται σύμφωνα με το άρθρο 8 της οδηγίας 96/62/EK.

2. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν σταθμοί μέτρησης για την παροχή στοιχείων σχετικά με τις συγκεντρώσεις  $AS_{2.5}$ . Ο αριθμός και η θέση των σταθμών μέτρησης  $AS_{2.5}$  επιλέγονται από τα κράτη μέλη, ώστε τα στοιχεία να είναι αντιπροσωπευτικά των συγκεντρώσεων  $AS_{2.5}$  εντός του κράτους μέλους αυτού. Ει δυνατόν, τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να συνδυάζονται με σημεία δειγματοληψίας για τα  $AS_{10}$ .

Τα κράτη μέλη διαβιβάζουν ετησίως στην Επιτροπή, εντός εννέα μηνών μετά το τέλος κάθε έτους, τον αριθμητικό μέσο, το διάμεσο, το 98ο εκατοστημόριο και τη μέγιστη συγκέντρωση που υπολογίζονται από τις μετρήσεις  $AS_{2.5}$  επί 24 ώρες εντός του έτους αυτού. Το 98ο εκατοστημόριο υπολογίζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που καθορίζεται στο μέρος 4 του παραρτήματος I της απόφασης 97/101/EK του Συμβουλίου, της 27ης Ιανουαρίου 1997, για την καθιέρωση διαδικασίας για την αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων που προέρχονται από τα δίκτυα και τους μεμονωμένους σταθμούς μετρήσεως της ρυπάνσεως του αέρα του περιβάλλοντος στα κράτη μέλη<sup>(1)</sup>.

3. Τα σχέδια δράσης για τα  $AS_{10}$  που καταρτίζονται σύμφωνα με το άρθρο 8 της οδηγίας 96/62/EK και οι γενικές στρατηγικές για τη μείωση των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  αποσκοπούν επίσης στη μείωση των συγκεντρώσεων  $AS_{2.5}$ .

4. Όταν σημειώνεται υπέρβαση των οριακών τιμών για τα  $AS_{10}$  που αναφέρονται στο μέρος I του παραρτήματος III λόγω συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  στον αέρα του περιβάλλοντος, οφειλομένων σε φυσικά φαινόμενα, η υπέρβαση δε αυτή συνεπάγεται συγκεντρώσεις υπερβαίνουσες σημαντικά τα συνήθη βασικά επίπεδα από φυσικές πηγές τα κράτη μέλη ενημερώνουν την Επιτροπή σύμφωνα με το άρθρο 11 παράγραφος 1 της οδηγίας 96/62/EK, και παρέχουν την αναγκαία αιτιολόγηση ώστε να αποδεικνύεται ότι οι υπερβάσεις αυτές οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα. Στις περιπτώσεις αυτές, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να εφαρμόζουν σχέδια δράσης σύμφωνα με το άρθρο 8 παράγραφος 3 της οδηγίας 96/62/EK, μόνον όταν οι οριακές τιμές που αναφέρονται στο μέρος I του παραρτήματος III σημειώνουν υπέρβαση οφειλόμενη σε άλλες αιτίες, εκτός των φυσικών φαινομένων.

5. Τα κράτη μέλη δύνανται να ορίζουν ζώνες ή οικισμούς εντός των οποίων οι οριακές τιμές για τα  $AS_{10}$  που αναφέρονται στο μέρος I του παραρτήματος III σημειώνουν υπέρβαση λόγω συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  στον αέρα του περιβάλλοντος, οφειλομένων στην επαναιώρηση σωματιδίων μετά την χειμερινή επίστρωση των οδών με άμμο. Τα κράτη μέλη διαβιβάζουν στην Επιτροπή κατάλογο αυτών των ζωνών ή οικισμών, συνοδευόμενο από πληροφορίες για τις εντός αυτών συγκεντρώσεις και πηγές  $AS_{10}$ . Όταν ενημερώνουν την Επιτροπή σύμφωνα με το άρθρο 11 παράγραφος 1 της οδηγίας 96/62/EK, τα κράτη μέλη παρέχουν την αναγκαία αιτιολόγηση, ώστε να αποδεικνύεται ότι οι υπερβάσεις αυτές οφείλονται στα επαναιωρούμενα αυτά σωματίδια, και ότι έχουν ληφθεί εύλογα μέτρα για τη μείωση των συγκεντρώσεων.

Εντός αυτών των ζωνών ή οικισμών, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να εφαρμόζουν σχέδια δράσης σύμφωνα με το άρθρο 8 παράγραφος 3 της οδηγίας 96/62/EK, μόνον όταν οι οριακές τιμές που αναφέρονται στο μέρος I του παραρτήματος III σημειώνουν υπέρβαση λόγω επιπέδων  $AS_{10}$  μη οφειλομένων στην χειμερινή επίστρωση των οδών με άμμο.

**Πίνακας 8.9:** Άρθρο 5 της οδηγίας 1999/30/EK περί σωματιδίων.



**Πίνακας 8.10:** Οριακές τιμές για τα σωματίδια  $AS_{10}$  σύμφωνα με την οδηγία 1999/30/ΕΚ.

ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ( $AS_{10}$ )				
	Περίοδος αναφοράς για τον υπολογισμό του μέσου όρου	Οριακή τιμή	Παράθερο ανοχής	Προθεσμία συμμόρφωσης προς την οριακή τιμή
<b>ΣΤΑΔΙΟ 1</b>				
1. 24ωρη οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	24 ώρες	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $AS_{10}$ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος	50 % κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1ης Ιανουαρίου 2001, και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσιο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0 % την 1η Ιανουαρίου 2005	1η Ιανουαρίου 2005
2. Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	Ημερολογιακό έτος	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $AS_{10}$	20 % κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1ης Ιανουαρίου 2001, και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσιο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0 % την 1η Ιανουαρίου 2005	1η Ιανουαρίου 2005
<b>ΣΤΑΔΙΟ 2 (*)</b>				
1. 24ωρη οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	24 ώρες	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $AS_{10}$ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 7 φορές ανά ημερολογιακό έτος	Θα υπολογιστεί βάσει δεδομένων και θα είναι ισοδύναμο με την οριακή τιμή του σταδίου 1	1η Ιανουαρίου 2010
2. Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	Ημερολογιακό έτος	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $AS_{10}$	50 % την 1η Ιανουαρίου 2005, μειούμενο κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσιο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0 % την 1η Ιανουαρίου 2010	1η Ιανουαρίου 2010
(*) Ενδεικτικές οριακές τιμές που θα αναθεωρηθούν βάσει των νέων πληροφοριών για τις επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον, την τεχνική εφικτότητα και βάσει της πείρας από την εφαρμογή των οριακών τιμών του σταδίου 1 στα κράτη μέλη.				

Τα αντίστοιχα πρότυπα ποιότητας αέρα (για τα αιωρούμενα σωματίδια) που ισχύουν στις Η.Π.Α. (σύμφωνα με την U.S.E.P.A.) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (W.H.O.) δεν προτείνει κατευθυντήριες τιμές για τα σωματίδια, καθώς πιστεύει ότι δεν υπάρχουν ευδιάκριτες κατώτερες τιμές συγκεντρώσεων που να συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την ανάπτυξη νόσων ή τη θνησιμότητα.

Πίνακας 8.11: Οριακές τιμές των  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  σύμφωνα με τα πρότυπα ποιότητας αέρα των ΗΠΑ.

### U.S. National Ambient Air Quality Standards

Pollutant	Primary Stds.	Averaging Times	Secondary Stds.
Carbon Monoxide	9 ppm (10 mg/m <sup>3</sup> )	8-hour <sup>1</sup>	None
	35 ppm (40 mg/m <sup>3</sup> )	1-hour <sup>1</sup>	None
Lead	1.5 µg/m <sup>3</sup>	Quarterly Average	Same as Primary
Nitrogen Dioxide	0.053 ppm (100 µg/m <sup>3</sup> )	Annual (Arithmetic Mean)	Same as Primary
Particulate Matter (PM <sub>10</sub> )	50 µg/m <sup>3</sup>	Annual <sup>2</sup> (Arith. Mean)	Same as Primary
	150 µg/m <sup>3</sup>	24-hour <sup>1</sup>	
Particulate Matter (PM <sub>2.5</sub> )	15 µg/m <sup>3</sup>	Annual <sup>3</sup> (Arith. Mean)	Same as Primary
	65 µg/m <sup>3</sup>	24-hour <sup>4</sup>	
Ozone	0.08 ppm	8-hour <sup>5</sup>	Same as Primary
	0.12 ppm	1-hour <sup>6</sup>	Same as Primary
Sulfur Oxides	0.03 ppm	Annual (Arith. Mean)	-----
	0.14 ppm	24-hour <sup>1</sup>	-----
	-----	3-hour <sup>1</sup>	0.5 ppm (1300 µg/m <sup>3</sup> )

<sup>1</sup> Not to be exceeded more than once per year.

<sup>2</sup> To attain this standard, the expected annual arithmetic mean PM<sub>10</sub> concentration at each monitor within an area must not exceed 50 µg/m<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> To attain this standard, the 3-year average of the annual arithmetic mean PM<sub>2.5</sub> concentrations from single or multiple community-oriented monitors must not exceed 15 µg/m<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> To attain this standard, the 3-year average of the 98th percentile of 24-hour concentrations at each population-oriented monitor within an area must not exceed 65 µg/m<sup>3</sup>.

Βιβλιογραφικές αναφορές: [56], [62], [64], [65], [66]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

### 9.1. Στόχος της μελέτης και της πειραματικής διαδικασίας - Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, ο άνθρωπος εισπνέει καθημερινά περίπου 15 m<sup>3</sup> αέρα. Η αναπνοή αποτελεί τον κυριότερο τρόπο έκθεσής του σε επικίνδυνες ουσίες με άμεση συνέπεια η φύση της έκθεσης σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, το μέγεθος, καθώς και τα χαρακτηριστικά των υποομάδων του πληθυσμού που εκτίθεται σε αυτούς, να δημιουργούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το ενδιαφέρον αυτό επικεντρώνεται πρωτίστως στα προβλήματα υγείας του ανθρώπου που προκύπτουν από την έκθεση αυτή και δευτερεύοντος στην κατανόηση των διεργασιών που προκαλούν ρύπανση της ατμόσφαιρας.

Υπάρχει μια αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τις δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλούνται στην ανθρώπινη υγεία εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ειδικά στις αστικές περιοχές, όπου συγκεντρώνονται πολλές πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων. Η ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια εμφανίζει μεν εξαιρετικό ενδιαφέρον σε εξωτερικούς χώρους (όπου γίνονται και οι περισσότερες μετρήσεις συνήθως), αλλά και από άποψη υγιεινής υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον τόσο στα διάφορα εργασιακά πεδία, όσο και σε πεδία που αφορούν τη γενικότερη ρύπανση εσωτερικών χώρων.

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν κερδίσει το επιστημονικό ενδιαφέρον λόγω των επιδημιολογικών και πειραματικών στοιχείων που αποδεικνύουν τον αντίκτυπό τους στην υγεία του ανθρώπου. Τόσο η μάζα, όσο και η συγκέντρωση των σωματιδίων έχουν αποδειχτεί ότι συσχετίζονται με τις οξείες επιπτώσεις στην υγεία και τις μετρήσιμες λειτουργικές αλλαγές στο καρδιαγγειακό και αναπνευστικό σύστημα. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους ερευνητές Donaldson, McNee και Ferin έδειξαν ότι, για το ίδιο ποσό μάζας σωματιδιακής ύλης που κατατίθεται στον πνεύμονα, η τοξικότητα τείνει να αυξηθεί καθώς το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αυξανόμενη επιφάνεια ανά μονάδα μάζας (εάν τα τοξικά συστατικά βρίσκονται στην επιφάνεια των σωματιδίων) ή στη δυνατότητα των λεπτόκοκκων σωματιδίων να διαπερνούν τους ιστούς των πνευμόνων. 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.

Για τους παραπάνω λόγους και αναλογιζόμενοι τη γεωγραφική ιδιομορφία του λεκανοπέδιου της Αττικής, το κυκλοφοριακό πρόβλημα και το μεγάλο πληθυσμό του, το εργαστήριο 'Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Αντιρρυπαντικής Τεχνολογίας' του Ε.Μ.Π., στοχεύει να μελετήσει στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και υπερλεπτόκοκκα σωματίδια) μιας συγκεκριμένης ευπαθούς υποομάδας πληθυσμού της ευρύτερης περιοχής και συγκεκριμένα των μαθητών της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης.

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 (Επίκουρος Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.) πραγματοποίησε μια μελέτη διάρκειας ενός έτους 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.

Συνεπώς, έχοντας πλέον σαν δεδομένο ότι η πόλη της Αθήνας και οι γύρω περιοχές αντιμετωπίζουν πρόβλημα μόλυνσης της ατμόσφαιρας από αιωρούμενα σωματίδια, γίνεται επιτακτική η ανάγκη μέτρησης της συγκέντρωσης αυτών σε χώρους όπου δρουν ευαίσθητες υποομάδες πληθυσμού, από όπου μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα και οι μετρήσεις αυτές να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των αρμοδίων αρχών που επιβλέπουν τη δημόσια υγεία.

Οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων σε **σχολεία πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης** στην περιοχή των Αθηνών και περιμετρικά αυτής σε μια 8ωρη, 24ωρη και βραχυπρόθεσμη (15-λεπτη) βάση, να μελετηθεί η έκθεση των μαθητών σε αυτά, να εξεταστεί η σχέση μεταξύ εσωτερικών (indoor) και εξωτερικών (outdoor) συγκεντρώσεων αυτών και να συγκριθούν οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις με τα σχετικά πρότυπα των διεθνών οργανισμών. Τα αποτελέσματα αυτά πιθανώς να βοηθήσουν στο μέλλον τις αρμόδιες αρχές να εφαρμόσουν μέτρα για τη βελτίωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο.

### 9.2. Λόγοι επιλογής της συγκεκριμένης ευπαθούς υποομάδας του πληθυσμού

Οι επιδημιολογικές μελέτες στο παρελθόν έχουν προσπαθήσει κυρίως να συσχετίσουν τα επίπεδα συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων με την επιδείνωση των προβλημάτων υγείας στον πληθυσμό. Οι περισσότεροι από αυτούς τους συσχετισμούς όμως, δεν έλαβαν υπόψη ότι τα άτομα που ελέγχονται κατά τη διάρκεια των επιδημιολογικών ερευνών ξοδεύουν συχνά μέχρι 90% του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, πολλές μελέτες έχουν βρει τα εσωτερικά επίπεδα ρύπανσης μεγαλύτερα από τα υπαίθρια επίπεδα. Ως εκ' τούτου, η σημασία της ατμοσφαιρικής ποιότητας των εσωτερικών χώρων είναι προφανής κατά τη μελέτη της έκθεσης υποομάδων πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Τα παιδιά είναι μια από τις πιο ευαίσθητες υποομάδες πληθυσμού δεδομένου ότι μπορούν να λάβουν αυξημένη δόση σωματιδιακής ύλης στους πνεύμονές τους σε σχέση με τους ενήλικες. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μεγαλύτερη κλασματική απόθεση σε κάθε αναπνοή τους ή στη μεγαλύτερη κυκλοφορία αέρα σε σχέση με το μέγεθος των πνευμόνων τους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα παιδί ξοδεύει ένα σημαντικό μέρος του χρόνου του στο σχολείο, ότι το σχολείο είναι ένας χώρος μεγάλης συγκέντρωσης παιδιών και ότι αυτό λειτουργεί σε ώρες αιχμής (όποτε και παρατηρείται ευρεία χρήση μέσων μεταφοράς), τότε γίνεται εμφανές ότι ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ποιότητας στις αίθουσες διδασκαλίας πρέπει να αποτελεί προτεραιότητα.

Αναφορικά σε αντίστοιχες έρευνες, μπορούμε να επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας σε διάφορες μελέτες που έχουν εξετάσει την εσωτερική ατμοσφαιρική ποιότητα στα σχολεία. Οι Lee και Chang (2000) μέτρησαν ένα μεγάλο αριθμό ρύπων σε πέντε διαφορετικές αίθουσες διδασκαλίας στο Χονγκ Κονγκ. Τόσο τα εσωτερικά, όσο και τα εξωτερικά επίπεδα των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$  υπερέβησαν τα ετήσια πρότυπα, ενώ σε ένα σχολείο η μέση συγκέντρωση των  $PM_{10}$  υπερέβη την 24-ωρη πρότυπη συγκέντρωση. Ο ερευνητής Wheeler (Ηνωμένο Βασίλειο, 2000) πραγματοποίησε μια πιο εκτενή μελέτη για την έκθεση των μαθητών στη σωματιδιακή ύλη, συμπεριλαμβάνοντας στη μελέτη του ατομικές μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , καθώς επίσης εσωτερικές και εξωτερικές μετρήσεις στα σχολεία και τις κατοικίες των μαθητών. Η μελέτη αποκάλυψε ότι οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  στα σπίτια και τις αίθουσες διδασκαλίας υπερέβησαν τις αντίστοιχες υπαίθριες συγκεντρώσεις.

Διάφορες μελέτες εξέτασαν επίσης την αναπνευστική υγεία των παιδιών που ζουν και παρακολουθούν τα μαθήματά τους σε σχολεία κοντά σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους. Η ερευνητική ομάδα του καθηγητή Van Klief (1997) συγκέντρωσε ερωτηματολόγια σχετικά με τα χρόνια αναπνευστικά συμπτώματα παιδιών που φοιτούσαν σε σχολεία τα οποία απείχαν λιγότερο από 1000 m από μεγάλους αυτοκινητόδρομους. Η μελέτη αποκάλυψε ότι η πυκνότητα της κίνησης στους δρόμους αυτούς και η συγκέντρωση του μαύρου καπνού που μετρήθηκε στα σχολεία, συνδέθηκαν άμεσα με τα χρόνια αναπνευστικά συμπτώματα των μαθητών.

Ο ερευνητής Janssen (2001) πραγματοποίησε μια πιο εκτενή μελέτη που αφορούσε παιδιά από σχολεία που ήταν γεωγραφικά τοποθετημένα κοντά σε 22 διαφορετικούς αυτοκινητόδρομους. Τα αποτελέσματα της μελέτης του επιβεβαίωσαν ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων εσωτερικά και εξωτερικά των σχολείων κοντά στους αυτοκινητόδρομους συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με την απόσταση από το δρόμο, την πυκνότητα και τη σύνθεση της κυκλοφορίας. Επίσης, σημείωσε ότι οι ετήσιες μέσες συγκεντρώσεις των μετρημένων ρύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να αξιολογηθεί και να μελετηθεί η μακροπρόθεσμη έκθεση των παιδιών που παρακολουθούν μαθήματα σε αυτά τα σχολεία.

### **9.3. Περιγραφή των περιοχών που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες**

Προκειμένου να αποτιμηθούν οι διαφορές κατά την έκθεση των μαθητών σε αιωρούμενα σωματίδια σε συνοικίες με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης και πυκνότητας οδικής κυκλοφορίας, επιλέχθηκαν τέσσερα σχολεία πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης σε διαφορετικές περιοχές του νομού Αττικής. Τα σχολεία αυτά ήταν εγκατεστημένα σε μια ημι-αγροτική περιοχή (Άγιος Στέφανος), σε μια αστική-κατοικημένη περιοχή (Κολωνάκι), σε μια κατοικημένη περιοχή (Μαρούσι) και σε μια περιοχή πολύ κοντινή σε μεγάλο αυτοκινητόδρομο (Άγιοι Ανάργυροι), αντίστοιχα. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε αυτές τις τέσσερις περιοχές του νομού μεταξύ Νοεμβρίου 2003 και Φεβρουαρίου 2004. Οι δειγματοληψίες στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων πραγματοποιήθηκαν σε μια αίθουσα εκδηλώσεων, σε μια αίθουσα γραμματείας, σε μια βιβλιοθήκη και σε ένα κλειστό γυμναστήριο, αντίστοιχα. Κανένα σύστημα εξαερισμού δεν υπήρχε σε οποιαδήποτε από τα σχολεία αυτά, ενώ οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν σε ύψος ενός τραπέζιου. Οι εξωτερικές (υπαίθριες) μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην αυλή κάθε σχολείου και συνήθως σε

κάποιο σημείο που δεν επισκέπτονταν συχνά οι μαθητές, για λόγους ασφάλειας των ίδιων αλλά και των οργάνων μέτρησης.

Όσον αφορά τις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα σχολεία, ο Δήμος Αγίου Στεφάνου βρίσκεται σε μια αγροτική περιοχή στο βόρειο τμήμα της Αθήνας. Δεν υπάρχει καμία εμπορική δραστηριότητα στην περιοχή, η κυκλοφορία των μέσων μαζικής μεταφοράς είναι γενικά πολύ χαμηλή και γύρω από το σχολείο υπάρχουν αρκετά μεγάλες άχτιστες εκτάσεις γης.

Η περιοχή του Κολωνακίου βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας, σε μια πυκνοκατοικημένη γειτονιά με πολύ βαριά κυκλοφορία οχημάτων, ενώ το σχολείο βρίσκεται δύο οικοδομικά τετράγωνα μακριά και από ένα μεγάλο δρόμο κυκλοφορίας.

Ο Δήμος Αμαρουσίου βρίσκεται σε μια κατοικημένη περιοχή, που περιβάλλεται από δύο μεγάλους δρόμους κυκλοφορίας, οι οποίοι μάλιστα συνδέουν τα βόρεια προάστια των Αθηνών με το κέντρο. Η πυκνότητα της κίνησης σε αυτούς είναι μεγάλη ειδικά σε ώρες αιχμής, οπότε και μετακινούνται οι κάτοικοι των βορείων προαστίων από και προς τις εργασίες τους.

Τέλος, όσον αφορά στο τέταρτο σχολείο που είναι εγκατεστημένο στην περιοχή των Αγίων Αναργύρων, αυτό βρίσκεται δύο οικοδομικά τετράγωνα μακριά από την εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας. Πρόκειται για μια περιοχή σχετικά αραιοκατοικημένη, με χαμηλή εμπορική δραστηριότητα, όπου έχουν έδρα όμως αρκετές παραγωγικές μονάδες μεγάλων εταιριών (κατά μήκος της εθνικής οδού).

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η γεωγραφική θέση των περιοχών αυτών και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχτηκαν για τις δειγματοληψίες μας (λόγω των δρόμων μεγάλης κυκλοφορίας π.χ.), παραθέτουμε αμέσως παρακάτω ένα γενικό χάρτη του νομού Αττικής, καθώς επίσης και ένα μεγενθυμένο χάρτη όπου εστιάζουμε στην ευρύτερη περιοχή των τεσσάρων αυτών δήμων του νομού. Στο δεύτερο χάρτη μάλιστα σημειώνονται με κόκκινο κύκλο οι εν' λόγω περιοχές που εδράζονται τα σχολεία, ενώ απεικονίζονται οι μεγάλοι δρόμοι κυκλοφορίας και η εθνική οδός Αθηνών-Λαμίας.





Φωτογραφία 9.1: Χάρτης του ευρύτερου νομού Αττικής.



Φωτογραφία 9.2: Χάρτης της ευρύτερης περιοχής των τεσσάρων δήμων του νομού Αττικής.



#### 9.4. Χαρακτηριστικά της δειγματοληψίας

Όπως προαναφέρθηκε, οι μετρήσεις μας έλαβαν χώρα το χρονικό διάστημα από το μήνα Νοέμβριο 2003 έως το Φεβρουάριο του 2004. Κάθε σχολείο μελετήθηκε πριν την έναρξη των μετρήσεων ως προς τις δυσκολίες που θα αντιμετωπίζαμε κατά την πραγματοποίηση αυτών. Συγκεκριμένα, αρχικά έγινε σε κάθε σχολείο μια διερευνητική επίσκεψη προκειμένου να διαπιστωθεί το κατά πόσο οι εσωτερικοί και εξωτερικοί χώροι είχαν την κατάλληλη υποδομή ώστε να στηθεί ο εργαστηριακός εξοπλισμός μετρήσεων χωρίς φόβο για πιθανή ζημία ή λήψη μετρήσεων που δεν θα ανταποκρίνονταν στην πραγματικότητα. Στόχος μας ήταν πάντοτε οι αίθουσες και οι εξωτερικοί χώροι στους οποίους θα μετρούσαμε τα αιωρούμενα σωματίδια, να έχουν σταθερή παροχή ρεύματος και να διαθέτουν βιβλιοθήκες ή γραφεία όπου θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τα όργανα των μετρήσεων σε ύψος τουλάχιστον 1 m από το έδαφος (ώστε να προσομοιώνεται το ύψος της αναπνοής των παιδιών). Τα όργανα θα έπρεπε να βρίσκονται σε σημείο που να μην είναι δυνατή η επαφή τους με τα παιδιά, ώστε να αποφεύγεται πιθανή απορύθμισή τους από αμέλεια. Τέλος οι χώροι των μετρήσεων να είναι αντιπροσωπευτικοί όσον αφορά τη χρήση τους από τους μαθητές.

Μετά την επιλογή των κατάλληλων σχολείων και το στήσιμο του εργαστηριακού εξοπλισμού, άρχισε η διαδικασία των μετρήσεων. Κάθε σχολείο ερευνήθηκε και κρατήθηκαν μετρήσεις για 5 εργάσιμες ημέρες κατά τη διάρκεια των σχολικών ωρών 8 π.μ. έως 4 μ.μ. Ελήφθησαν ταυτόχρονες 8-ωρες μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  σε εσωτερικούς και προαύλιους χώρους των σχολείων, χρησιμοποιώντας δειγματολήπτες Harward PEMs (θα αναλυθούν σε παρακάτω κεφαλαίο) με ρυθμό ροής 4 l/min. Στην αρχή και το τέλος κάθε περιόδου δειγματοληψίας μετριόνταν και καταγράφονταν οι παροχές ροής αέρα χρησιμοποιώντας βαθμονομημένο ροόμετρο, όπως επίσης και η παρερχόμενη χρονική περίοδος. Τα σωματίδια αναρροφούνταν και συλλέγονταν σε φίλτρα από τεφλόν διαμέτρου 37 mm με μέγεθος πόρου 2  $\mu m$ . Τα φίλτρα αυτά φυλάγονταν σε καθαρό δωμάτιο με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας πριν το ζύγισμα. Το ζύγισμά τους πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρονική ζυγαριά με ακρίβεια 0,01  $\mu g$ . Μετά το ζύγισμα ήμασταν σε θέση να υπολογίσουμε τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ .

Η συγκέντρωση των σωματιδίων  $PM_{10}$  στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων ελέγχθηκε επίσης σε συνεχή βάση από το όργανο DustTrak (TSI, Μοντέλο 8520), του οποίου η λειτουργία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Η ονομαστική παροχή αέρα

του DustTrak είναι 1,7 l/min και επιτυγχάνεται με μια εσωτερική αντλία που είναι προσαρτημένη στη δειγματοληπτική συσκευή.

Τέλος, μετρήθηκε σε συνεχή βάση η συγκέντρωση των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων εντός των σχολείων από ένα συμπυκνωτικό μετρητή σωματιδίων CPC (TSI, Μοντέλο 3007). Αυτό το όργανο επιτρέπει την ανίχνευση σωματιδίων με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,01 έως 1  $\mu\text{m}$ . Τα σωματίδια διευρύνονται σε σταγονίδια από τη συμπύκνωση τους με υπέρκορους ατμούς οινοπνεύματος και ανιχνεύονται έπειτα από μια ακτίνα λέιζερ.

Και τα δύο όργανα ήταν προγραμματισμένα για να καταγράφουν κάθε 1 λεπτό και κατόπιν υπολογίστηκαν 15-λεπτοι και 8-ωροι μέσοι όροι συγκεντρώσεων για κάθε ημέρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποια από τα σχολεία μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων  $\text{PM}_{10}$  σε 24-ωρη βάση προκειμένου να έχουμε έναν αντιπροσωπευτικό ημερήσιο πλήρη κύκλο μετρήσεων. Για τις ημέρες τις οποίες το όργανο DustTrak λειτουργούσε 24 ώρες, υπολογίστηκαν επίσης και οι 24-ωροι μεσοί όροι των συγκεντρώσεων.

Αξίζει να γίνει αναφορά και στις δυσκολίες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων μετρήσεων και είχαν ως αποτέλεσμα σε αρκετές περιπτώσεις τη μη αποδοχή αυτών και την επανέναρξή τους. Συγκεκριμένα, σε τρία από τα τέσσερα σχολεία δεν κατέστη δυνατό να ληφθούν μετρήσεις μεταξύ πέντε διαδοχικών εργάσιμων ημερών για τους λόγους που θα αναφέρουμε παρακάτω:

1. Σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάστηκε το φαινόμενο της πτώσης τάσης του ρεύματος στα σχολεία, με αποτέλεσμα τα όργανά μας να μην μετρήσουν συγκεντρώσεις για άγνωστο χρονικό διάστημα. Άμεση συνέπεια ήταν η μη χρησιμοποίηση των συγκεκριμένων μετρήσεων προς αποφυγή λανθασμένων αποτελεσμάτων κατά την ανάλυσή μας.
2. Παρατηρήθηκε στο τέλος κάποιων περιόδων δειγματοληψίας ότι η παροχή αέρα που είχε αρχικά ρυθμιστεί, διέφερε αρκετά από την επιθυμητή εξαιτίας πιθανού κουνήματος των οργάνων από υπάλληλους καθαριότητας του σχολείου. Κατά τη μετατόπιση των οργάνων και λόγω της εξαιρετικής ευαισθησίας των βαλβίδων ρύθμισης της παροχής, μεταβλήθηκε η παροχή αέρα στα όργανα με άμεση συνέπεια τη μη τήρηση του πρωτοκόλλου μετρήσεων και την αχρήστευση των μετρήσεων αυτών προς αποφυγή πάλι λανθασμένων αποτελεσμάτων.

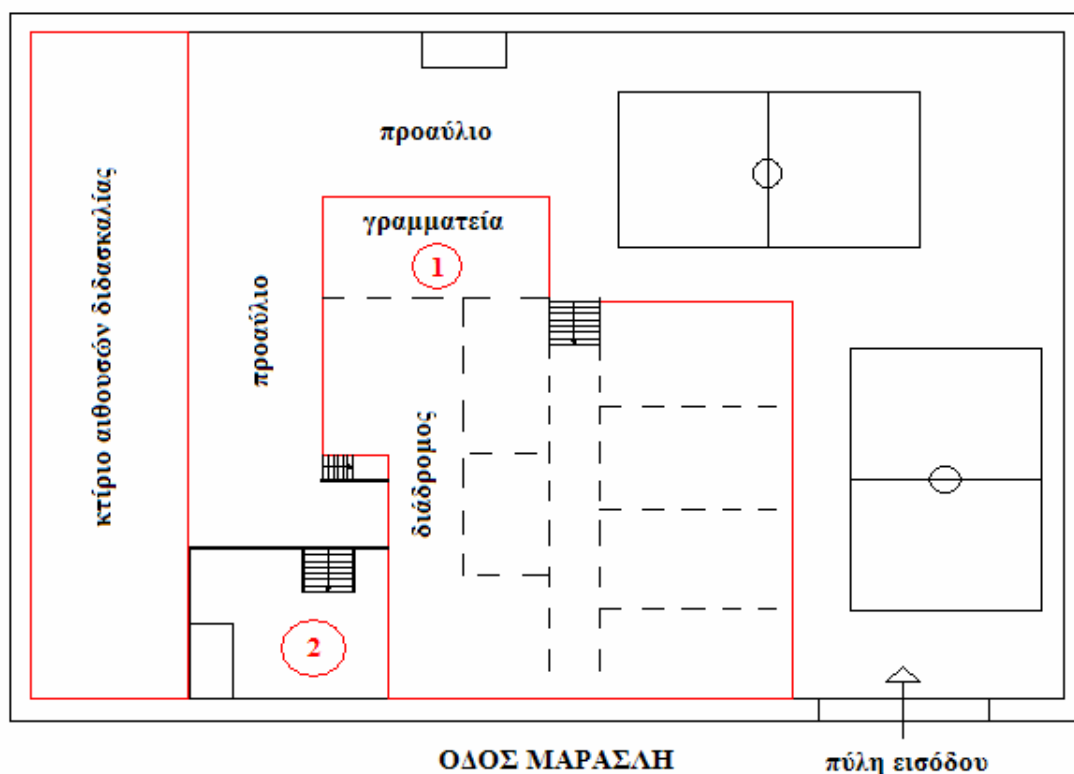
3. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στους προαύλιους χώρους των σχολείων και λόγω των κακών καιρικών συνθηκών του χειμώνα, στο τέλος ορισμένων περιόδων δειγματοληψίας παρατηρήθηκαν ότι τα φίλτρα στους Harward PEMs ήταν βρεγμένα. Τα φίλτρα αυτά αμέσως καθίστατο άχρηστα, καθώς η υγρασία επηρέαζε το βάρος τους και συνεπώς την υπολογιζόμενη συγκέντρωση σωματιδίων.
4. Στην περίπτωση του δημοτικού σχολείου του Αγίου Στεφάνου, το σχολείο παρέμεινε κλειστό για αρκετές ημέρες λόγω χιονιού, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η δειγματοληψία για πέντε συνεχόμενες εργάσιμες ημέρες.

### 9.5. Περιγραφή των εσωτερικών & εξωτερικών χώρων των δειγματοληψιών

Στο εδάφιο αυτό θα περιγράψουν οι εσωτερικοί και εξωτερικοί χώροι των τεσσάρων σχολείων που πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες. Θα δοθούν αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες τόσο για τα κτιριακά συγκροτήματα, όσο και για τις αίθουσες όπου στήθηκε ο εργαστηριακός εξοπλισμός. Τέλος, θα παρουσιαστούν απλά σκαριφήματα τα όποια παριστούν τα σχολικό συγκροτήματα και τους εσωτερικούς χώρους μετρήσεων από κάτοψη.

#### ➤ Δημοτικό σχολείο Κολωνακίου, Δήμος Αθηνών

Το δημοτικό σχολείο Κολωνακίου, είναι το πρώτο σχολείο το οποίο επισκεφθήκαμε κατά τη χρονική περίοδο από 25 Νοεμβρίου έως 3 Δεκεμβρίου 2003. Πρόκειται για ένα αρκετά μεγάλο κτιριακό συγκρότημα στο κέντρο της Αθηνάς και βρίσκεται επί της οδού 'Μαρασλή', μια οδός η οποία συναντάται κάθετα με τη λεωφόρο 'Βασιλίσσης Σοφίας'. Η 'Βασιλίσσης Σοφίας' είναι μια λεωφόρος μεγάλης κυκλοφοριακής πυκνότητας η οποία χρησιμοποιείται από δεκάδες χιλιάδες αυτοκίνητα ημερησίως.



Σχήμα 9.1: Συγκρότημα δημοτικού σχολείου Κολωνακίου από κάτοψη.

Το συγκρότημα αποτελείται από δύο μεγάλα κτίρια από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται για τη γραμματειακή υποστήριξη της σχολής, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται για καθαρά παιδαγωγικούς σκοπούς. Οι μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο του σχολείου έλαβαν χώρα στο κτίριο της γραμματείας και συγκεκριμένα στην αίθουσα που βρίσκεται στο σημείο 1 του κτιρίου, η οποία φαίνεται στο σκαρίφημα του συγκροτήματος από κάτοψη (Σχήμα 9.1). Οι εξωτερικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο σημείο 2, όπου υπάρχει προαύλιος χώρος με υψομετρική διαφορά 2,5 m από το επίπεδο της γραμματείας και συνδέεται με αυτή με εξωτερική σκάλα. Οι εξωτερικοί δειγματολήπτες τοποθετήθηκαν σε ύψος 1 m από το έδαφος και οι εσωτερικοί τοποθετήθηκαν σε τραπέζι ύψους 1 m στο εσωτερικό της γραμματείας.

Όσον αφορά στον εσωτερικό χώρο της γραμματείας, αυτός φαίνεται στο Σχήμα 9.2. από κάτοψη. Όπως παρατηρούμε, η αίθουσα αυτή έχει περιμετρικά της πέντε παράθυρα τα οποία βλέπουν στο προαύλιο και παρέμειναν κλειστά κατά τη διάρκεια των μετρήσεών μας. Στο χώρο υπάρχουν πέντε γραφεία των υπαλλήλων, μια μεγάλη βιβλιοθήκη και ένα μικρό τραπέζι στο οποίο τοποθετήθηκαν οι δειγματολήπτες. Η πόρτα της γραμματείας παρέμενε ανοιχτή τις πρωινές ώρες και κλειστή τις πρώτες μεσημεριανές ώρες. Στην αίθουσα βρίσκονταν συνήθως από 3-7 άτομα. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η σχολική ημέρα άρχιζε στις 8.30 π.μ. και τελείωνε στις 4.00 μ.μ.



Σχήμα 9.2: Αίθουσα μετρήσεων (γραμματεία σχολείου) από κάτοψη.



➤ **Δημοτικό σχολείο Αγίου Στεφάνου**

Το δημοτικό σχολείο Αγίου Στεφάνου είναι το δεύτερο, κατά σειρά, σχολείο στο οποίο μετρήσαμε και καταγράψαμε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη χρονική περίοδο 9 Δεκεμβρίου 2003 έως 14 Ιανουαρίου 2004. Καταγράφηκαν μετρήσεις έξι εργάσιμων ημερών, αλλά έως ότου θεωρηθούν αυτές αξιόπιστες, χρειάστηκε να επισκεφθούμε το χώρο και να πραγματοποιούμε δειγματοληψίες για δώδεκα ημέρες λόγω των απρόοπτων προβλημάτων που αναφέραμε στο εδάφιο 9.4.

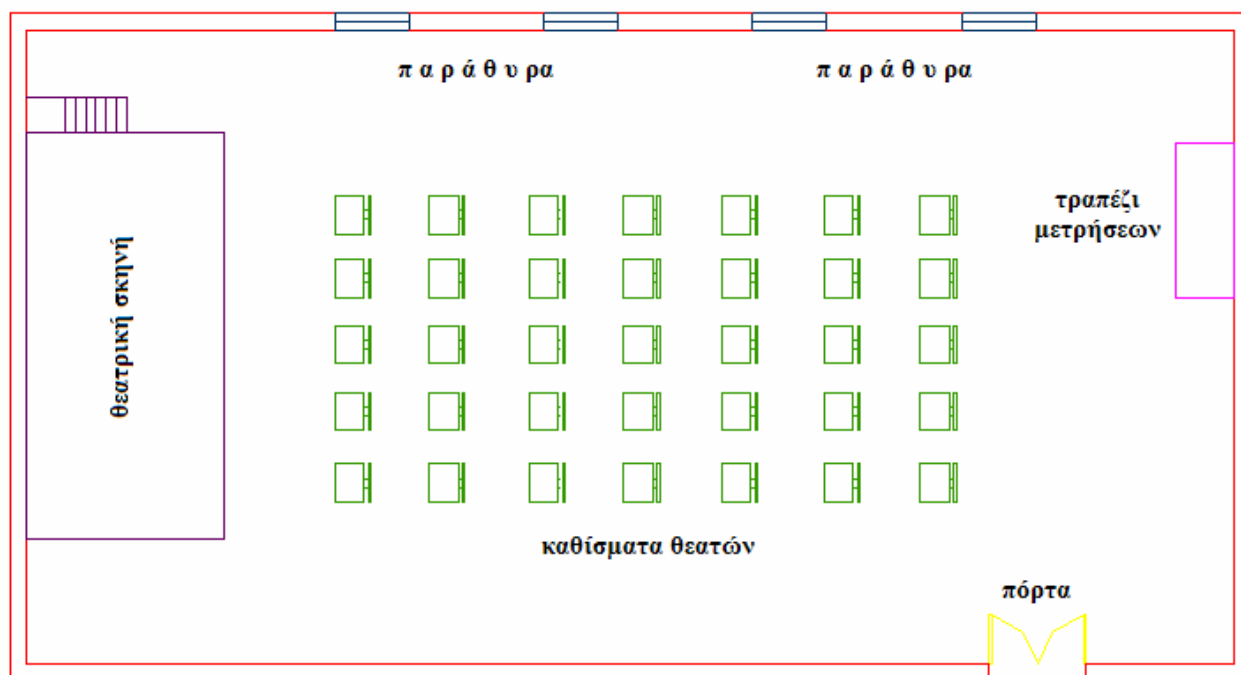
Το σχολικό συγκρότημα αποτελείται από ένα μεγάλο κτίριο και ένα μεγάλο προαύλιο χώρο και, όπως προείπαμε, βρίσκεται σε ημι-αγροτική περιοχή στο βόρειο τμήμα της Αθήνα όπου δεν υπάρχει εμπορική δραστηριότητα και η κυκλοφορία των μέσων μαζικής μεταφοράς είναι γενικά πολύ χαμηλή. Ένα χαρακτηριστικό σκαρίφημα του συγκροτήματος από κάτοψη φαίνεται στο Σχήμα 9.3. Οι εξωτερικές μετρήσεις έλαβαν χώρα στο σημείο 2 (όπως φαίνεται στο σχήμα), στο πίσω μέρος του σχολείου όπου η κυκλοφορία των αυτοκινήτων ήταν σχεδόν ανύπαρκτη. Οι δειγματολήπτες στήθηκαν στα σκαλιά του λεβητοστασίου του σχολείου και σε ύψος περίπου 0,5 m από το έδαφος. Η εσωτερική δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην αίθουσα εκδηλώσεων του σχολείου και συγκεκριμένα στο σημείο 1 του Σχήματος 9.3. Η αίθουσα αυτή φαίνεται από κάτοψη στο Σχήμα 9.4.



Σχήμα 9.3: Συγκρότημα δημοτικού σχολείου Αγίου Στεφάνου από κάτοψη.

Η αίθουσα εκδηλώσεων έχει περιμετρικά της τέσσερα παράθυρα τα οποία βλέπουν στον πίσω προαύλιο χώρο και παρέμειναν κλειστά κατά τη διάρκεια των μετρήσεών μας. Εντός του χώρου υπάρχει ένα μεγάλο βάθρο το οποίο χρησιμοποιείται ως θεατρική σκηνή για τις ανάγκες των εκδηλώσεων του σχολείου, καθώς και ένας μεγάλος αριθμός καθισμάτων (περίπου 60) που χρησιμοποιούνται από τους θεατές. Στο πίσω μέρος της αίθουσας τοποθετήσαμε ένα τραπέζι ύψους περίπου 0,6 m, πάνω στο οποίο στήθηκαν οι δειγματολήπτες μας.

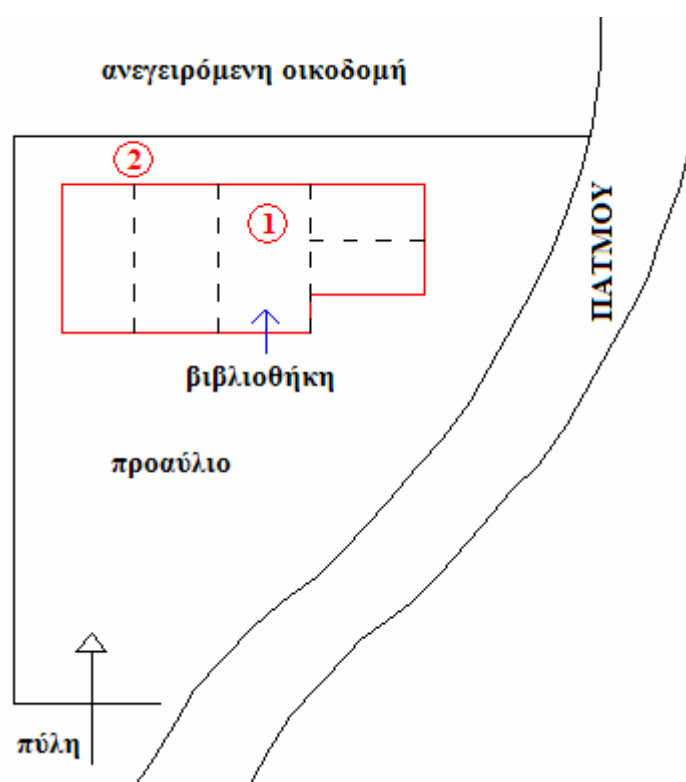
Πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος χώρος γειτνιάζει με τις αίθουσες διδασκαλίας, αλλά παρέμεινε κενός κατά τη διάρκεια των μαθημάτων εκτός από 1-2 ώρες ημερησίως. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, μια ομάδα 30-40 περίπου μαθητών πραγματοποιούσε πρόβες για τη σχολική εορτή των Χριστουγέννων.



**Σχήμα 9.4:** Αίθουσα μετρήσεων (αίθουσα εκδηλώσεων σχολείου) από κάτοψη.

➤ **Δημοτικό σχολείο Αμαρουσίου**

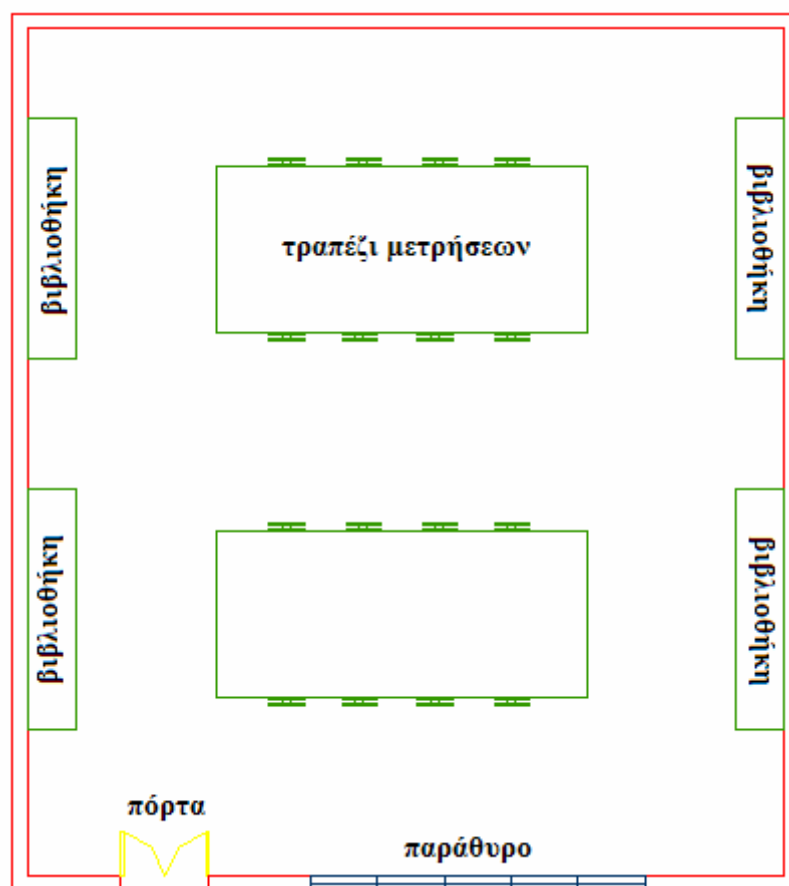
Οι δειγματοληψίες στο συγκεκριμένο σχολείο έλαβαν χώρα από 2-6 Φεβρουαρίου 2004. Πρόκειται για ένα σχετικά μικρό κτιριακό συγκρότημα στα όρια του Δήμου Αμαρουσίου και βρίσκεται επί της οδού ‘Πάτμου’, μια οδός η οποία συναντάται κάθετα με τη λεωφόρο ‘Κηφισίας’. Η λεωφόρος ‘Κηφισίας’ είναι μια λεωφόρος μεγάλης κυκλοφοριακής πυκνότητας η οποία χρησιμοποιείται από δεκάδες χιλιάδες αυτοκίνητα ημερησίως και συνδέει τα βόρεια προάστια του νομού Αττικής με το κέντρο της Αθήνας. Εκτός αυτού, το σχολείο απέχει δύο οικοδομικά τετράγωνα από μια άλλη λεωφόρο (λεωφόρος Καποδιστρίου) η οποία επίσης είναι επιβαρημένη κυκλοφοριακά. Στον περιβάλλοντα χώρο του σχολείου, υπήρχε μια νεοαναγειρόμενη οικοδομή, 2-3 βιομηχανίες επεξεργασίας μαρμάρου και δύο μεγάλοι ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων.



Σχήμα 9.5: Συγκρότημα δημοτικού σχολείου Αμαρουσίου από κάτωψη.

Οι μετρήσεις εξωτερικά του σχολείου πραγματοποιήθηκαν στο σημείο 2, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9.5 από κάτοψη. Πρόκειται για το πίσω μέρος του σχολείου, όπου η πρόσβαση για τους μαθητές είναι αδύνατη. Οι δειγματολήπτες τοποθετήθηκαν στο ύψος του εδάφους.

Όσον αφορά στις εσωτερικές μετρήσεις, αυτές έλαβαν χώρα στη βιβλιοθήκη του σχολείου, η οποία φαίνεται στον Σχήμα 9.6. από κάτοψη (σημείο 1). Όπως φαίνεται, η αίθουσα αυτή έχει ένα μεγάλο συρόμενο παράθυρο που βρίσκεται δίπλα στην πόρτα εισόδου και το οποίο παρέμενε πάντοτε κλειστό. Εντός του χώρου υπάρχουν περιμετρικά τέσσερις βιβλιοθήκες και στο κέντρο της αίθουσας έχουν τοποθετηθεί δύο μεγάλα τραπέζια τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν οι μαθητές για την ανάγνωση βιβλίων. Στο δεύτερο από αυτά, όπως δείχνεται και στο Σχήμα 9.6., τοποθετήθηκαν οι δειγματολήπτες μας σε ύψος περίπου 0,7 m.



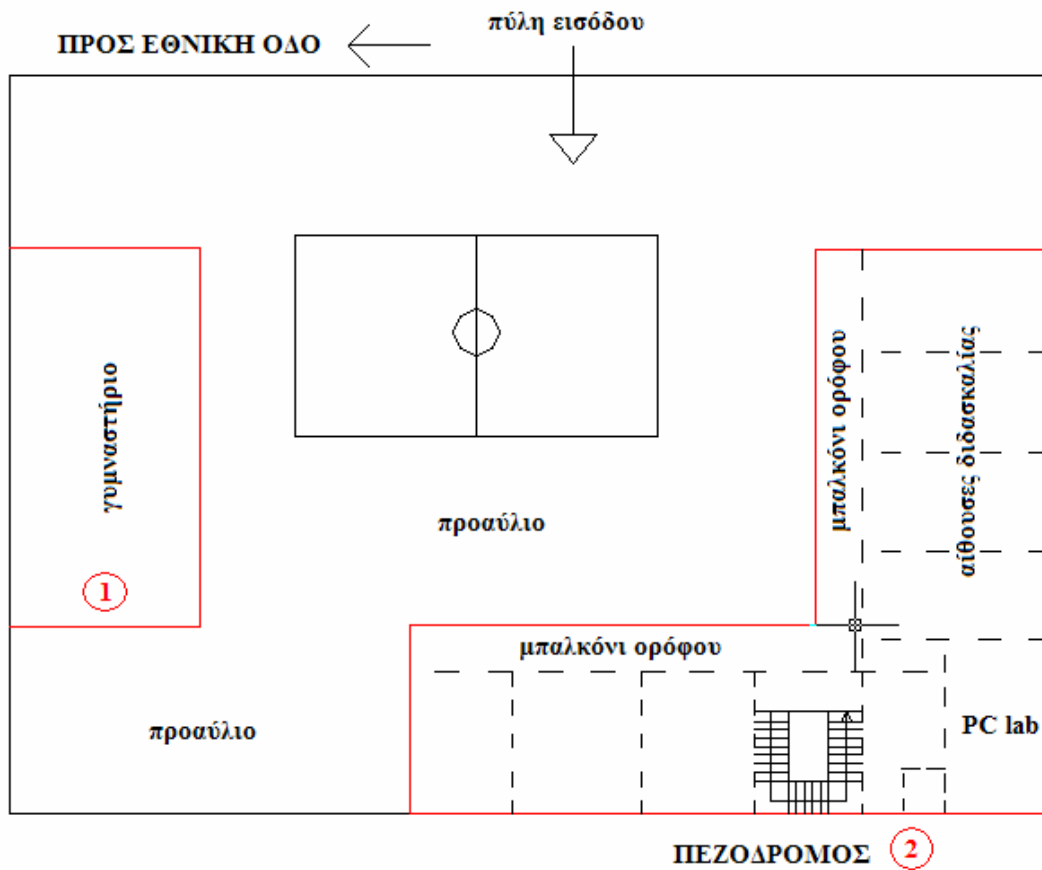
Σχήμα 9.6: Αίθουσα μετρήσεων (βιβλιοθήκη σχολείου) από κάτοψη.

### ➤ Δημοτικό σχολείο Αγίων Αναργύρων

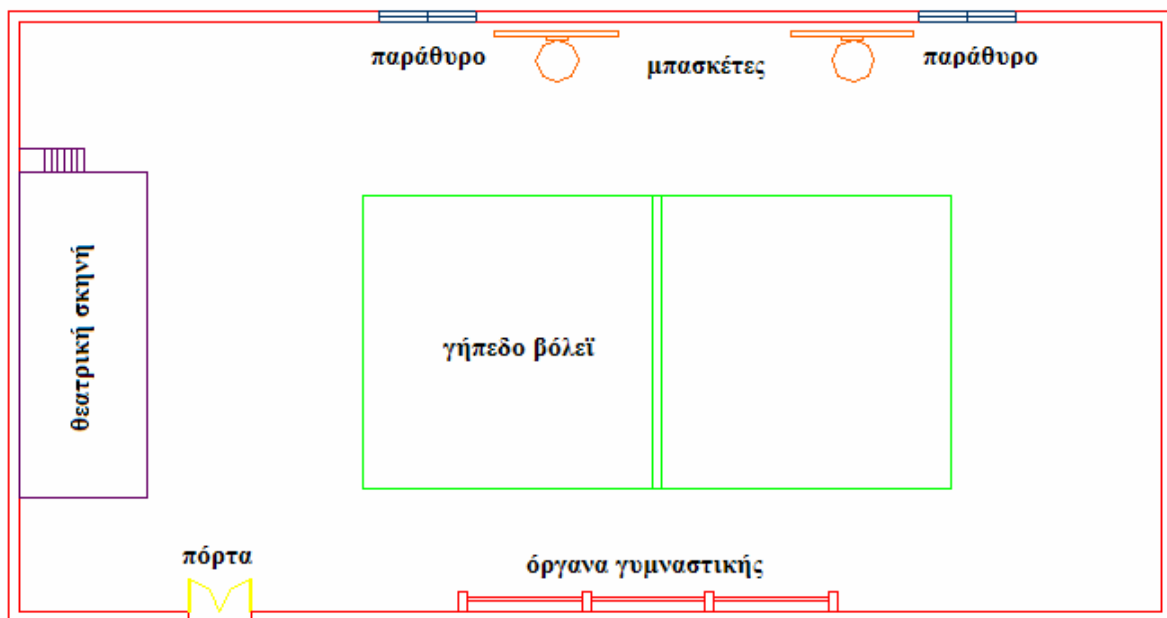
Το δημοτικό σχολείο Αγίων Αναργύρων είναι το τελευταίο σχολείο στο οποίο μετρήσαμε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη χρονική περίοδο από 17 Φεβρουαρίου έως 2 Μαρτίου 2004. Το σχολείο είναι εγκατεστημένο σε μια περιοχή που απέχει δύο οικοδομικά τετράγωνα από την εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας. Το κυκλοφοριακό πρόβλημα εκεί γίνεται πολύ έντονο στις ώρες αιχμής, οπότε και έχουμε αρκετές μετακινήσεις φορτηγών που ανήκουν σε εταιρίες που εδρεύουν στο νόμο Αττικής αλλά δραστηριοποιούνται και εκτός αυτού.

Το σχολικό συγκρότημα αποτελείται από ένα μεγάλο κτίριο και ένα μεγάλο προαύλιο χώρο και χαρακτηριστικό σκαρίφημά του από κάτοψη φαίνεται στο Σχήμα 9.7. Οι εξωτερικές μετρήσεις έλαβαν χώρα στο σημείο 2 που φαίνεται στο σχήμα. Πρέπει να αναφέρουμε ότι εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν υπήρχε τρόπος να παρέχεται ηλεκτρικό ρεύμα στους δειγματολήπτες στο ισόγειο του σχολείου, οι εξωτερικές μετρήσεις ελήφθησαν στο δεύτερο όροφο του κτιρίου, σε ύψος 5,5 m από το έδαφος. Συγκεκριμένα οι δειγματολήπτες είχαν τοποθετηθεί έξω από το παράθυρο μιας αίθουσας του δευτέρου ορόφου (δίπλα στο εργαστήριο ηλεκτρονικών υπολογιστών), στο πίσω μέρος του σχολείου όπου υπάρχει πεζόδρομος και η κυκλοφορία αυτοκινήτων είναι πολύ μικρή. Η εσωτερική δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στο γυμναστήριο του σχολείου και συγκεκριμένα στο σημείο 1 του Σχήματος 9.7. Το γυμναστήριο φαίνεται από κάτοψη στο Σχήμα 9.8.

Όπως παρατηρούμε, το γυμναστήριο έχει δύο παράθυρα τα οποία βλέπουν σε παρακείμενο δρόμο και παρέμειναν κλειστά κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Στο χώρο υπάρχει ένα μεγάλο υπερυψωμένο βάθρο το οποίο χρησιμοποιείται ως θεατρική σκηνή για τις ανάγκες των εκδηλώσεων του σχολείου. Πάνω στη σκηνή αυτή και σε ύψος περίπου 1,7 m από το έδαφος, τοποθετήθηκαν οι δειγματολήπτες πάνω σε ένα μικρό τραπέζι. Επίσης, στο χώρο υπάρχουν δύο μπασκέτες, ένα φιλέ του βόλεϊ και μονόζυγα γυμναστικής τοποθετημένα στον τοίχο. Στο χώρο γυμνάζονταν καθημερινά 20-25 μαθητές δύο φορές την ημέρα κατά την ώρα της γυμναστικής και συνήθως μετά το τέλος της σχολικής ημέρας (1.30 μ.μ.) ψυχαγωγούνταν ορισμένοι μαθητές περιμένοντας τους γονείς τους έως τις 3.30 μ.μ. Η πόρτα του γυμναστηρίου παρέμενε κλειστή τις περισσότερες ώρες της ημέρας.



Σχήμα 9.7: Συγκρότημα δημοτικού σχολείου Αγίων Αναργύρων από κάτοψη.



Σχήμα 9.8: Χώρος εσωτερικών μετρήσεων (γυμναστήριο σχολείου) από κάτοψη.

Βιβλιογραφικές αναφορές: [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 10.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας (θα περιγράψει σε επόμενα εδάφια), ελήφθησαν ταυτόχρονες 8-ωρες μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  σε εσωτερικούς και προαύλιους χώρους των σχολείων, χρησιμοποιώντας δειγματολήπτες Harvard PEMS (personal exposure monitoring systems). Μετρώντας τη μάζα των σωματιδίων και καταγράφοντας την παροχή αέρα (χρησιμοποιώντας βαθμονομημένο ροόμετρο) και την παρερχόμενη χρονική περίοδο, ήμασταν σε θέση να υπολογίσουμε τις μεσοσταθμικές συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ .

Η συγκέντρωση των σωματιδίων  $PM_{10}$  στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων ελέγχθηκε επίσης σε συνεχή βάση από το όργανο DustTrak (TSI, Μοντέλο 8520), ενώ μετρήθηκε και η συγκέντρωση των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων από έναν μετρητή συμπύκνωσης σωματιδίων CPC (TSI, Μοντέλο 3007). Αυτό το όργανο επιτρέπει την ανίχνευση σωματιδίων με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,01 έως 1  $\mu m$ . Και τα δύο όργανα ήταν προγραμματισμένα να καταγράφουν συγκεντρώσεις κάθε 1 λεπτό της ώρας και κατόπιν υπολογίστηκαν 15-λεπτοι και 8-ωροι (ημερήσιοι) μέσοι όροι συγκεντρώσεων.

Αμέσως παρακάτω θα γίνει αναφορά σε κάθε όργανο μετρήσεων ξεχωριστά. Θα αναλυθούν βασικές αρχές λειτουργίας τους και θα γίνει αναφορά στα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών.

### 10.2. DustTrak Aerosol Monitor Model 8520

Το όργανο αυτό ελέγχου των αερολυμάτων, είναι ένα φορητό λέιζερ-φωτόμετρο που μετρά και καταγράφει τις συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενης σκόνης. Παρέχει αξιόπιστη αξιολόγηση της έκθεσης σε σωματίδια, μετρώντας συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν σε  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{1.0}$  ή σε κλάσματα αναπνεύσιμων σωματιδίων  $PM_4$ . Σε κάθε περίπτωση, για τη μέτρηση συγκεντρώσεων σωματιδίων διαφορετικών μεγεθών, είναι απαραίτητη η εφαρμογή και διαφορετικών ακροφυσίων στο σημείο εισόδου αυτών στο όργανο (Εικόνες 10.2).

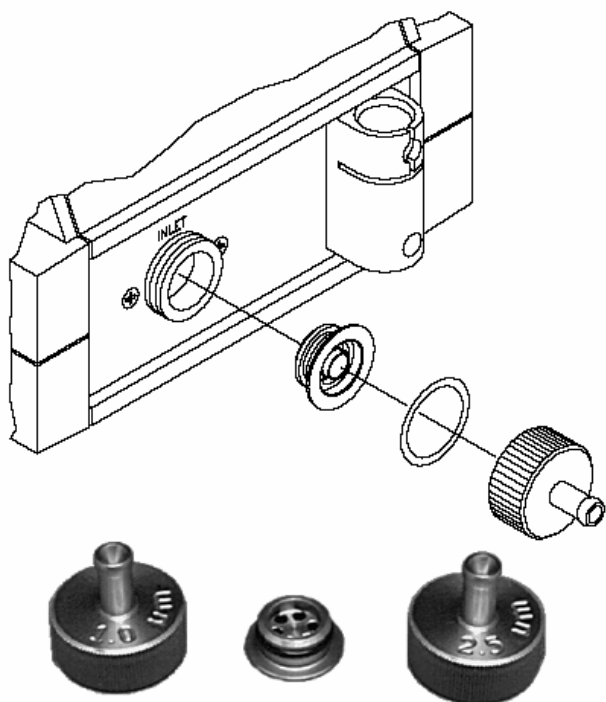
Το DustTrak παρέχει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο βασισμένο στη διάχυση δέσμης φωτός γωνίας  $90^\circ$ . Μια εσωτερική αντλία, η οποία είναι προσαρτημένη στη δειγματοληπτική συσκευή, αναρροφά το αερόλυμα διαμέσου ενός οπτικού



προθάλαμο, όπου και μετριέται. Ένα σύστημα αέρα απομονώνει το αερόλυμα στον προθάλαμο με σκοπό να κρατήσει την οπτική καθαρή και να υπάρχει προσθετή αξιοπιστία. Η ονομαστική παροχή αέρα του οργάνου είναι 1,7 l/min.



**Εικόνα 10.1:** Το όργανο μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης DustTrak 8520.



**Εικόνα 10.2:** Τοποθέτηση διαφορετικών ακροφυσίων στο DustTrak 8520.

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 8520 περιέχει μια ευανάγνωστη ψηφιακή οθόνη η οποία παρουσιάζει σε πραγματικό χρόνο τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των σωματιδίων σε χιλιοστά του gr ανά κυβικό μέτρο αέρα ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Ταυτόχρονα, τα καταγραφόμενα 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 8520, 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.

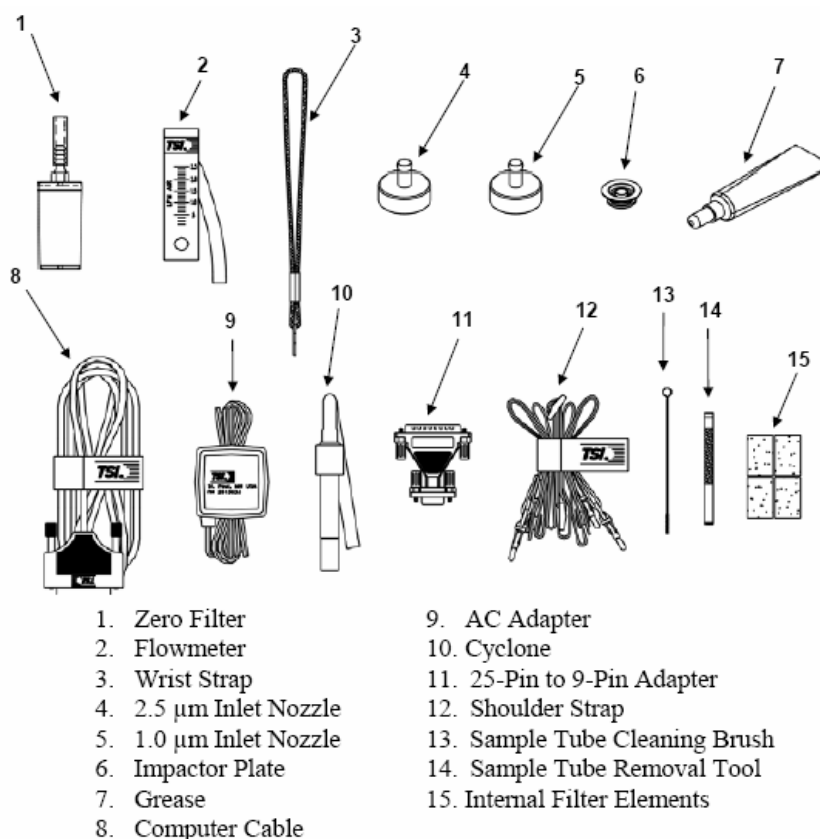
Το DustTrak 8520 είναι συμβατό με τους κοινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα λογισμικά τους, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφόρτωση των αποθηκευμένων δεδομένων του οργάνου σε αυτούς και έτσι να είναι εφικτή η στατιστική ανάλυσή τους χωρίς να απαιτείται κάθε φορά από το χρήστη να τα καταγράφει ο ίδιος στο πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιεί.

Το όργανο είναι εργοστασιακά βαθμονομημένο για το αναπνεύσιμο μέρος της τυποποιημένης σκόνης (ISO 12103-1, A1) που αντιπροσωπεύει τα κοινά περιβαλλοντικά αερολύματα. Ωστόσο, για απόλυτη ακρίβεια, μπορεί εύκολα να βαθμονομηθεί για κάποιο συγκεκριμένο αερομεταφερόμενο μολυσματικό παράγοντα του εξεταζόμενου χώρου. Αυτό είναι εφικτό μέσω της ρύθμισης του εσωτερικού

συντελεστή βαθμονόμησης αναλόγως. Επαναρυθμίζοντας το συντελεστή βαθμονόμησης στην τιμή 1, επαναφέρεται η αρχική εργοστασιακή βαθμονόμηση.

Η συσκευή DustTrak 8520 συνοδεύεται από έναν αριθμό βοηθητικών εξαρτημάτων όπως:

- ένα πρότυπο φίλτρο (zero filter) για να ελέγχεται ανά πάσα στιγμή η ακρίβεια του οργάνου, ώστε να βαθμονομείται ξανά εφόσον χρειάζεται,
- ένα ροόμετρο για τη ρύθμιση της παροχής αέρα στα επιθυμητά επίπεδα,
- δύο ακροφύσια εισόδου σωματιδίων διαμέτρου 2,5  $\mu\text{m}$  και 1  $\mu\text{m}$ ,
- ένα καλώδιο σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή,
- έναν προσαρμογέα εναλλασσόμενης τάσης,
- έναν κυκλώνα 10 mm για να απομονώνονται τα αναπνεύσιμα κλάσματα του αερούλουτος, σύμφωνα με τα διεθνώς αποδεκτά κριτήρια απομόνωσης αυτών με διάμετρο 4  $\mu\text{m}$  (50%),
- τέσσερα ανταλλακτικά εσωτερικά φίλτρα της συσκευής,
- ένα βουρτσάκι καθαρισμού του αγωγού από όπου περνάει το αερόλυμα,
- ένα ειδικό εργαλείο αφαίρεσης του αγωγού αυτού.



Εικόνα 10.3: Βοηθητικά εξαρτήματα του DustTrak 8520.

### 10.3. Condensation Particle Counter (TSI Model 3007)

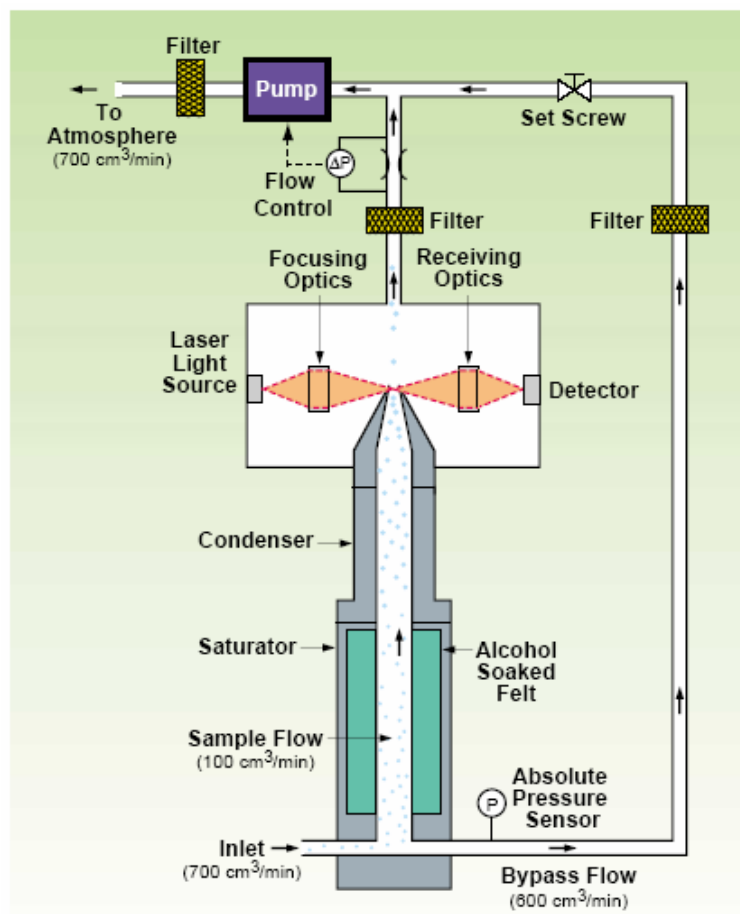
Ο Συμπυκνωτικός Μετρητής Σωματιδίων (CPC) TSI 3007 είναι ένα φορητό όργανο με δυνατότητες μέτρησης σωματιδίων μεγέθους από 0,01  $\mu\text{m}$  έως και 1  $\mu\text{m}$ . Η αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: το δείγμα εισέρχεται στο όργανο με τη βοήθεια ενσωματωμένης αντλίας. Μετά την είσοδο του δείγματος στο μετρητή, αυτό οδηγείται σε ένα αγωγό κορεσμού όπου ισοπροπυλική αλκοόλη πολύ υψηλής καθαρότητας ( $\geq 99,5\%$ ) εξατμίζεται και ενσωματώνεται με το αερόλυμα καθιστώντας το κορεσμένο. Στη συνέχεια το κορεσμένο δείγμα εισέρχεται σε ένα αγωγό ψύξης – συμπύκνωσης. Επακολουθεί υπερκορεσμός και η αλκοόλη συμπυκνώνεται σε σωματίδια μεγαλύτερα των 10 nm. Τα σταγονίδια που προκύπτουν εξέρχονται από το συμπυκνωτή και περνούν δια μέσω μιας λεπτής δέσμης laser ακτινοβολίας. Ένα σύστημα οπτικής ανίχνευσης συλλέγει την σκεδαζόμενη ακτινοβολία και την εστιάζει σε ένα ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής με τη σειρά του μετατρέπει το φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό το οποίο στη συνέχεια καταγράφεται σαν σωματιδιακή μέτρηση. Το όργανο καταναλώνει περίπου 1 ml ισοπροπυλικής αλκοόλης ανά ώρα και κατά συνέπεια είναι αναγκαία η τροφοδότηση του οργάνου με αλκοόλη ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Το όργανο λαμβάνει μετρήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων σε σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό (pt/cc). Γίνεται συνεχής καταγραφή αριθμού σωματιδίων σε τακτές χρονικές στιγμές και στη συνέχεια τα δεδομένα αποθηκεύονται αρχικά στη μνήμη του οργάνου και κατόπιν σε διασυνδεδεμένο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στις Εικόνες 10.4 και 10.5 παρουσιάζεται ο μετρητής CPC 3007 και η αρχή λειτουργίας του.



Εικόνα 10.4: Εξωτερική όψη του CPC 3007.



Εικόνα 10.5: Εσωτερική όψη του CPC 3007.

Η συσκευή CPC 3007 συνοδεύεται από έναν αριθμό βοηθητικών εξαρτημάτων όπως:

- **Μια κεφαλή ισοπροπυλικής αλκοόλης.** Πρόκειται για ένα εξάρτημα το οποίο κρατάει αποθέματα αλκοόλης στο εσωτερικό του με τη βοήθεια ενός πορώδους υλικού. Η κεφαλή αυτή τοποθετείται στην υποδοχή του CPC 3007 και παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα αλκοόλης για τη συμπύκνωση των σωματιδίων.
- **Μια κάψουλα αλκοόλης.** Πρόκειται για μια κάψουλα η οποία πληρώνεται με ισοπροπυλική αλκοόλη και εντός της οποίας τοποθετείται η κεφαλή με σκοπό τη φύλαξή της, αλλά και τον εμποτισμό της με την απαιτούμενη για τη συμπύκνωση ποσότητα αλκοόλης.
- **Ένα φιαλίδιο ισοπροπυλικής αλκοόλης.** Χρησιμοποιείται για τη συμπλήρωση της κάψουλας με ισοπροπυλική αλκοόλη.
- **Ένα καλώδιο σύνδεσης του οργάνου με ηλεκτρονικό υπολογιστή.**
- **Ένα πρότυπο μηδενικό φίλτρο (zero filter).** Χρησιμεύει στον έλεγχο της ακρίβειας του οργάνου, ώστε να βαθμονομείται ξανά εφόσον χρειάζεται. Εφαρμόζεται στην είσοδο (ακροφύσιο) του οργάνου για 30 δευτερόλεπτα και σε αυτή την περίπτωση το όργανο πρέπει να μέτρα μηδενικό αριθμό σωματιδίων. Αν δεν ισχύει αυτό, τότε το όργανο χρειάζεται βαθμονόμηση.
- **Δύο εφεδρικά πορώδη υλικά.** Πρόκειται για το υλικό που απορροφά και αποθηκεύει ισοπροπυλική αλκοόλη εντός της κεφαλής. Πρέπει να αντικαθιστάται σε τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να αποφεύγεται η είσοδος ακαθαρσιών στην κεφαλή και επομένως και στο εσωτερικό του CPC.



**Εικόνα 10.6:** Εφεδρικά πορώδη υλικά, zero filter και καλώδιο σύνδεσης με pc.



**Εικόνα 10.7:** Η κάμουλα αλκοόλης, η κεφαλή και το φιαλίδιο πλήρωσης (κατά σειρά).

#### 10.4. 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.



**Εικόνα 10.8:** Οι δειγματολήπτες Harvard PEMs για σωματίδια  $PM_{10}$  &  $PM_{2.5}$  αντίστοιχα.

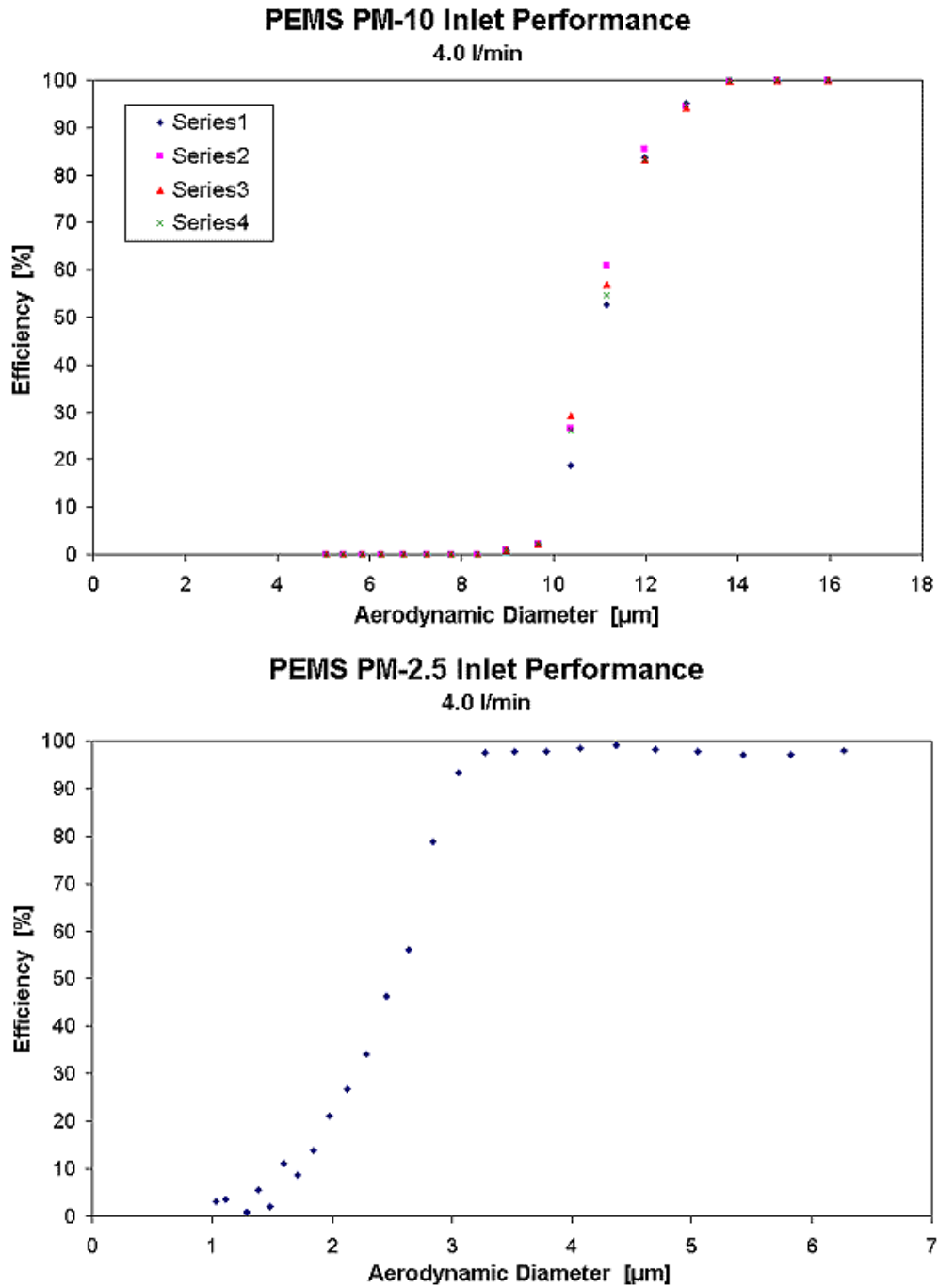




**Εικόνα 10.9:** Βάση με μεταλλικό πλέγμα, *impaction plate* και η κεφαλή των *Harvard PEMs*.

Στη συγκεκριμένη ερεύνα, όπως προαναφέραμε, ελήφθησαν ταυτόχρονες 8-ωρες μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  στους εσωτερικούς και προαύλιους χώρους των σχολείων, χρησιμοποιώντας τους δειγματολήπτες *Harvard PEMs* με ρυθμό ροής 4 l/min. Οι δειγματολήπτες συνδέονται με μια αντλία (μέσω ενός ελαστικού αεραγωγού), η οποία ελκύει ατμοσφαιρικό αέρα με σταθερό ρυθμό ροής και βοηθάει στην απόθεση σωματιδιακής ύλης στο εσωτερικό τους. Η ρύθμιση της παροχής στην επιθυμητή τιμή 4 l/min γίνεται με τη βαθμονομημένου ροόμετρου και ενός συστήματος βαλβίδων οι οποίες στραγγαλίζουν τη ροή.

Τα σωματίδια αναρροφούνται και συλλέγονται σε φίλτρα από τεφλόν διαμέτρου 37 mm με μέγεθος πόρου 2  $\mu\text{m}$ . Τα φίλτρα αυτά φυλάγονται σε καθαρό δωμάτιο με ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, ενώ το ζύγισμά τους πραγματοποιείται με ηλεκτρονική ζυγαριά με ακρίβεια 0,01  $\mu\text{g}$ . 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.



Διαγράμματα 10.1 & 10.2: Απόδοση συλλογής των ακροφυσίων εισόδου των PEMS συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων.

Βιβλιογραφικές αναφορές: [87], [88], [89]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 11.1. Προετοιμασία των οργάνων

#### ➤ Harvard PEMs (PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>)

Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα μετρήσεων και πριν ακόμα επισκεφθούμε το πρώτο σχολείο, τοποθετήσαμε πάνω στους τέσσερις δειγματολήπτες ετικέτες στις οποίες αναγράφονταν το κλάσμα των μετρούμενων σωματιδίων και ο χώρος δειγματοληψίας (π.χ. PM<sub>10</sub> indoors). Με τον τρόπο αυτό διευκολυνόταν η χρήση τους και αποφεύγονταν πιθανά πειραματικά σφάλματα. Παρόμοιες ετικέτες τοποθετήθηκαν και στα τριβλία των φίλτρων, στις οποίες αναγράφαμε τον αύξοντα αριθμό του φίλτρου ώστε να γνωρίζουμε ανά πάσα στιγμή σε ποια ημέρα και ποιο χώρο αντιστοιχεί το κάθε φίλτρο. Τα φίλτρα τοποθετούνταν με τη σειρά ακόμα και αν επρόκειτο για τυφλές δειγματοληψίες. Η πληροφορία αυτή αναγραφόταν κάθε φορά στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων (Τύπος δειγματοληψίας: Κανονική (Κ) ή Τυφλή (Τ)), το οποίο παρουσιάζεται στο τέλος του κεφαλαίου.

Πρώτο βήμα της πειραματικής διαδικασίας ήταν η συναρμολόγηση των δειγματοληπτών. Η συναρμολόγησή τους λάμβανε χώρα σε τρία στάδια:

1. Αρχικά πληρωνόταν το κοίλο τμήμα του impaction plate με το ειδικό λιπαντικό κατακράτησης των σωματιδίων μεγάλου μεγέθους. Στην προσπάθειά μας να επιτύχουμε όσο το δυνατόν πιο επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια στο λιπαντικό, χρησιμοποιούσαμε ένα ξυράφι με το οποίο γινόταν η απόξυση και απομάκρυνση του λιπαντικού που περίσσευε. Κατόπιν με ειδικά υγρά μαντιλάκια καθαρισμού, απομακρύναμε τα υπολείμματα λιπαντικού (εφόσον υπήρχαν) από τα υπόλοιπα μέρη του δειγματολήπτη.
2. Επόμενο βήμα ήταν η τοποθέτηση του ειδικού μεταλλικού πλέγματος στη βάση του δειγματολήπτη και στη συνέχεια αυτή του φίλτρου με το χαμηλότερο αύξοντα αριθμό. Προκειμένου να μην αγγίζουμε με γυμνά χέρια το φίλτρο και μεταβληθεί το βάρος του από πιθανές ακαθαρσίες, χρησιμοποιούσαμε ειδική λαβίδα με την οποία και το τοποθετούσαμε στη βάση του PEM. Η συγκράτηση με τη λαβίδα αυτή, γινόταν πάντοτε από το δακτύλιο του φίλτρου και ποτέ από το εσωτερικό του διότι υπήρχε κίνδυνος καταστροφής του λόγω της λεπτής κατασκευής του. Αμέσως μετά αναγράφαμε στο φύλλο μετρήσεων τον αύξοντα αριθμό του φίλτρου που τοποθετούσαμε στο δειγματολήπτη.

3. Τέλος, τοποθετούσαμε πάνω από τη βάση το impaction plate και την κεφαλή και συναρμολογούσαμε τα τμήματα αυτά με τέσσερις βίδες (Εικόνα 10.9). Ο δειγματολήπτης ήταν πλέον σε θέση να χρησιμοποιηθεί.

➤ **DustTrak Aerosol Monitor Model 8520**

Δεν απαιτείται καμία προετοιμασία για το συγκεκριμένο όργανο.

➤ **Condensation Particle Counter (TSI Model 3007)**

Αρχικά, πριν αναχωρήσουμε για το πεδίο μέτρησης, γινόταν ανεφοδιασμός του φιαλιδίου της αιθυλικής αλκοόλης. Κατόπιν, γινόταν έλεγχος της στάθμης της αλκοόλης στην ειδική κάψουλα φύλαξης της κεφαλής και συμπληρωνόταν με αλκοόλη αν η στάθμη αυτή είχε πέσει κάτω από το επιθυμητό σημείο.

## 11.2. Εκκίνηση της δειγματοληψίας

Η εκκίνηση των οργάνων γινόταν με την ακόλουθη σειρά:

➤ **Αντλίες των δειγματοληπτών Harvard PEMs**

Πρώτο βήμα του σταδίου εκκίνησης ήταν η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στις αντλίες και η προθέρμανσή τους για 5 λεπτά της ώρας (προτού αρχίσει η δειγματοληψία) προκειμένου να λειτουργούν με σταθερό ρυθμό και υψηλή απόδοση.

➤ **Condensation Particle Counter (TSI Model 3007)**

Κατά την εκκίνηση του συγκεκριμένου οργάνου, αρχικά γινόταν τοποθέτηση της κεφαλής της αλκοόλης στην υποδοχή του. Μετά τη σύνδεσή του με το ηλεκτρικό ρεύμα, απελευθερωνόταν το στόμιο εισόδου του και το όργανο ετίθετο σε λειτουργία μέσω του πλήκτρου εκκίνησης. Κατόπιν το όργανο παρέμενε ανοιχτό για προθέρμανση περίπου για 10 λεπτά της ώρας, οπότε και πραγματοποιούσε αντίστροφη μέτρηση από το 600. Μετά την ολοκλήρωση της αντίστροφης μέτρησης εφαρμοζόταν στην είσοδο του αερίου δείγματος το zero filter προκειμένου να γίνει έλεγχος αν το όργανο φθάνει στη μηδενική συγκέντρωση. Τέλος, με χρήση των πλήκτρων λειτουργίας γινόταν επιλογή της ρύθμισης 'LOG MODE 1' και με πληκτρολόγηση του πλήκτρου ENTER ξεκινούσε η δειγματοληψία. Αμέσως καταγραφόταν η ώρα εκκίνησης της δειγματοληψίας στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων.

➤ **DustTrak Aerosol Monitor Model 8520**

Κατά τη διάρκεια της αντίστροφης μέτρησης του οργάνου CPC, λάμβανε χώρα η εκκίνηση του DustTrak στα παρακάτω στάδια:

1. Αρχικά το όργανο συνδεόταν με το ηλεκτρικό ρεύμα.
2. Μετά το πάτημα του πλήκτρου ON/OFF το όργανο ετίθετο σε λειτουργία.
3. Ακολουθούσε αναμονή λίγων δευτερολέπτων μέχρι το DustTrak να αρχίσει να δείχνει τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων.
4. Επόμενο βήμα ήταν η εφαρμογή του ροομέτρου στην είσοδο του οργάνου με σκοπό τον έλεγχο της επιθυμητής τιμής παροχής αέρα των 1,7 l/min. Σε περίπτωση που η ροή είχε διαφορετική τιμή, αυτή ρυθμιζόταν με τη βοήθεια ενός μικρού κατσαβιδιού που έφερε το όργανο.
5. Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου της ροής, με χρήση του zero filter γινόταν έλεγχος αν το όργανο σταδιακά φθάνει στη μηδενική συγκέντρωση με απόκλιση  $\pm 0,001$ . Εφόσον είχε επιτευχθεί ο μηδενισμός απομακρυνόταν το φίλτρο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε το μηχάνημα να τεθεί εκτός λειτουργίας και να απευθυνθούμε στον κατασκευαστή του.
6. Με πάτημα του πλήκτρου SAMPLING MODE και κατόπιν του πλήκτρου SAMPLE, το όργανο άρχιζε να καταγράφει τη συγκέντρωση των  $PM_{10}$  ( $mg/m^3$ ). Παράλληλα γινόταν καταγραφή της ώρας εκκίνησης της δειγματοληψίας στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων.

➤ **Harvard PEMs ( $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ )**

Η εκκίνηση των δειγματοληπτών PEMs γινόταν με τα παρακάτω βήματα:

1. Πριν ο δειγματολήπτης τοποθετηθεί στη ροή της αντλίας, γινόταν μέτρηση της ροής αυτής και η τιμή αυτή καταγραφόταν στη στήλη TEST του φύλλου μετρήσεων.
2. Ακολουθούσε σύνδεση του δειγματολήπτη τοποθετώντας ανάμεσα στη βαλβίδα στραγγαλισμού της ροής και σε αυτόν μια παγίδα νερού με σκοπό την επαναμέτρηση της τιμής της ροής. Εφόσον η τιμή της ροής ήταν μέσα στο 5% της αρχικής, ρυθμιζόταν όσο πιο κοντά στην επιθυμητή τιμή των 100,5 divisions (περίπου 4 l/min). Σε διαφορετική περίπτωση συναρμολογούσαμε το δειγματολήπτη από την αρχή.
3. Καταγραφόταν η ακριβής ώρα εκκίνησης της δειγματοληψίας στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων.

Πρέπει εδώ να αναφέρουμε ότι την πρώτη ημέρα δειγματοληψίας σε κάθε σχολείο, ήταν απαραίτητο να γίνεται μια περιγραφή του χώρου και να σημειώνονται λεπτομερώς οι θέσεις των οργάνων στο χώρο. Η καταγραφή των παραπάνω πληροφοριών γινόταν στο φύλλο μετρήσεων ('Παρατηρήσεις'). Οποιαδήποτε αλλαγή υπήρχε τις επόμενες ημέρες σημειωνόταν επίσης στο ίδιο φύλλο.

### **11.3. Τερματισμός της δειγματοληψίας**

Ο τερματισμός της λειτουργίας των οργάνων γινόταν με την ακόλουθη σειρά:

#### **➤ DustTrak Aerosol Monitor Model 8520**

Κατά τον τερματισμό της λειτουργίας του συγκεκριμένου οργάνου, μετά το πάτημα του πλήκτρου SAMPLE το οποίο και σταματούσε την καταγραφή των δεδομένων της δειγματοληψίας, το DustTrak εμφάνιζε στην ψηφιακή οθόνη του την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή καταγεγραμμένης συγκέντρωσης, τη διάρκεια και τον αριθμό της δειγματοληψίας. Αμέσως μετά την πληκτρολόγηση του SAMPLE, σημειωνόταν στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων η ώρα τερματισμού της δειγματοληψίας. Ακολουθούσε το κλείσιμο του οργάνου πατώντας το ON/OFF και κατόπιν φυλασσόταν μαζί με όλα τα βοηθητικά εξαρτήματά του σε ειδική μεταλλική βαλίτσα, η οποία συγκρατούσε τα όργανο σε σταθερή θέση προκειμένου να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις και τα χτυπήματά του στο εσωτερικό της.

#### **➤ Condensation Particle Counter (TSI Model 3007)**

Μετά το πέρας των μετρήσεων και το πάτημα του κατάλληλου πλήκτρου για να τερματιστεί η δειγματοληψία, σημειωνόταν στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων η ώρα τερματισμού της. Κατόπιν, το όργανο ετίθετο εκτός λειτουργίας από το ίδιο πλήκτρο το οποίο εκκινούσε τη δειγματοληψία και ακολουθούσε η αποσύνδεσή του από την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και η αποσυναρμολόγησή του. Γινόταν αφαίρεση της κεφαλής της αλκοόλης από το CPC, φυλασσόταν στην ειδική κάψουλα και αυτή με τη σειρά της, όπως και όλα τα βοηθητικά αντικείμενα και το ίδιο το όργανο, στην ειδική βαλίτσα η οποία προστάτευε όλον τον εξοπλισμό από ταλαντώσεις και χτυπήματα.

➤ **Harvard PEMs (PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>)**

Τελευταίος κατά σειρά λάμβανε χώρα ο τερματισμός δειγματοληψίας των PEMs.

Ο τερματισμός τους γινόταν ως εξής:

1. Αρχικά γινόταν μέτρηση της παροχής αέρα με το ροόμετρο και καταγραφόταν η τιμή της στο ημερήσιο φύλλο μετρήσεων (στήλη OFF).
2. Ακολουθούσε αποσύνδεση των δειγματοληπτών από τον αγωγό που τους συνέδεε με τις αντλίες και παράλληλα σημειωνόταν η ώρα τερματισμού της δειγματοληψίας στο φύλλο μετρήσεων.
3. Αποσυνδέονταν οι αντλίες από την παροχή ρεύματος.
4. Επόμενο βήμα ήταν η αποσυναρμολόγηση των δειγματοληπτών και η τοποθέτηση των φίλτρων στα τριβλία τους.
5. Καθαρίζονταν τα εξωτερικά μέρη των PEMs από τυχόν υπολείμματα του λιπαντικού, ενώ όσον αφορά τα impaction plates αυτά μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μια εβδομάδα χωρίς λεπτομερή καθαρισμό. Μετά από κάθε μέτρηση απλά γινόταν απόξυση του επάνω στρώματος του λιπαντικού στο κοίλο μέρος του impaction plate ώστε να απομακρυνθούν οι συγκεντρωμένες ακαθαρσίες.
6. Τέλος, γινόταν λεπτομερής καθαρισμός των μεταλλικών πλεγμάτων και των λαστιχένιων δακτυλίων των δειγματοληπτών και κατόπιν αυτοί συναρμολογούνταν και φυλάσσονταν μέχρι την επόμενη μέρα σε πλαστική σακούλα.

**11.4. Επιστροφή των οργάνων**

Όσον αφορά στα δύο φορητά όργανα μέτρησης της συγκέντρωσης των σωματιδίων, το DustTrak και το CPC, δεν απαιτείτο κάποιος ιδιαίτερος καθαρισμός ή κάποια άλλη διαδικασία πριν την επιστροφή τους στο εργαστήριο του πανεπιστημίου. Έπρεπε όμως, μέχρι την επίσκεψη στον επόμενο σχολικό χώρο, να μεταφορτωθούν τα αποθηκευμένα δεδομένα των μετρήσεων σε κάποιο ηλεκτρονικό υπολογιστή, προκειμένου να υπάρχει αρκετή ελεύθερη μνήμη για την επόμενη δειγματοληψία.

➤ **Harvard PEMs (PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>)**

Η επιστροφή των συγκεκριμένων δειγματοληπτών στο εργαστήριο, προϋπόθετε λεπτομερή καθαρισμό τους, ο οποίος λάμβανε χώρα ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:



1. Αρχικά απομακρύνονταν τα υπολείμματα του λιπαντικού από το κοίλο μέρος του impaction plate με τη χρήση μια μικρής εργαστηριακής σπάτουλας.
2. Κατόπιν ακολουθούσε ο καθαρισμός των βάσεων και των κεφάλων των δειγματοληπτών. Συγκεκριμένα, γεμιζόταν ένα δοχείο με αποσταγμένο νερό και γινόταν προσθήκη μερικών σταγόνων ενός ήπιου απορρυπαντικού. Στο δοχείο αυτό πλένονταν οι βάσεις και οι κεφαλές των PEMs χρησιμοποιώντας ειδικό βουρτσάκι για καλύτερα αποτελέσματα. Το ξέβγαλμα των τμημάτων γινόταν επίσης με αποσταγμένο νερό έως ότου το νερό να μην περιέχει καθόλου σαπούνι.
3. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθούσε για τα impaction plates.
4. Επόμενο βήμα του καθαρισμού ήταν η τοποθέτηση σε δοχείο με αιθανόλη των μεταλλικών πλεγμάτων και των λαστιχένιων δακτυλίων. Αφήνονταν εκεί για μερικά λεπτά μέχρι να απομακρυνθούν οι ακαθαρσίες και αμέσως μετά τρίβονταν τα μεταλλικά πλέγματα με ειδικό βουρτσάκι, προσέχοντας πάντοτε να μην λυγίσουν με την εφαρμογή της πίεσης.
5. Τοποθετούνταν τα μεταλλικά πλέγματα σε δοχείο με αποσταγμένο νερό, το οποίο περιείχε μερικές σταγόνες ενός ήπιου απορρυπαντικού. Ακολουθούσε ανάμιξη του νερού με το βουρτσάκι και ξέβγαλμα με αποσταγμένο νερό μέχρι το νερό να μην περιέχει καθόλου σαπούνι. Η απομάκρυνση όλων των τμημάτων των PEMs από το δοχείο γινόταν με μια λαβίδα.
6. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθούσε για τους λαστιχένιους δακτυλίους.
7. Τέλος, αφήνονταν όλα τα τμήματα των δειγματοληπτών να στεγνώσουν ανάμεσα σε καθαρά χαρτομάντιλα.

**ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΦΥΛΛΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

**ΣΧΟΛΕΙΟ:**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:**

Τύπος δειγματολήπτη	Ταυτότητα φίλτρου		Μέτρηση ροής (Rotameter' s Divisions)			Αρχή δειγματολ.	Τέλος δειγματολ.
	Αριθμός	Τύπος	TEST	ON	OFF		
PEMs PM <sub>10</sub> -indoors							
PEMs PM <sub>2.5</sub> -indoors							
PEMs PM <sub>10</sub> -outdoors							
PEMs PM <sub>2.5</sub> -outdoors							
DustTrak							
CPC							

Παρατηρήσεις:

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

### 12.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα τέσσερα σχολεία του νόμου Αττικής. Συγκεκριμένα, παραθέτονται συγκεντρωτικοί πίνακες οι οποίοι μας δίνουν τις μέσες 8-ωρες τιμές των συγκεντρώσεων των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  και τις διακυμάνσεις αυτών ανά σχολείο, τόσο για τις δειγματοληψίες στο εσωτερικό των σχολείων, όσο και στο εξωτερικό αυτών. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι μέσες 8-ωρες τιμές των συγκεντρώσεων κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, καθώς επίσης οι μέσες τιμές και οι διακυμάνσεις των λόγων εσωτερικών (indoor) προς εξωτερικών (outdoor) συγκεντρώσεων των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  ανά σχολείο.

Κατόπιν, θα παρουσιαστούν χαρακτηριστικά διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$  και των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων στο εσωτερικό των σχολείων, όπως επίσης και τυπικοί ημερήσιοι κύκλοι των εσωτερικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων  $PM_{10}$ .

Προκειμένου να υπάρχει σαφής εικόνα και πεδίο σχολιασμού για τα επίπεδα ρύπανσης σε κάθε περιοχή από τις τέσσερις επιλεγθείσες, στο τέλος κάθε εδαφίου θα δίδονται συγκεντρωτικά διαγράμματα για κάθε σχολείο, όπου θα παραθέτουμε τα αποτελέσματα για όλες τις ημέρες δειγματοληψιών ανά σχολείο σε μορφή στατιστικών ράβδων.

### 12.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων σε μορφή συγκεντρωτικών πινάκων

Οι μέσες 8-ωρες τιμές των εσωτερικών συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων και οι μέσες 8-ωρες τιμές των εξωτερικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , φαίνονται στους Πίνακες 12.1 και 12.2 αντίστοιχα. Ο Πίνακας 12.3 περιέχει τις μέσες τιμές και τις διακυμάνσεις των λόγων εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ .

Σχολείο	PM <sub>10</sub>		PM <sub>2,5</sub>		Υπερλεπτόκοκκα	
	Μ.Ο.	Διακύμανση	Μ.Ο.	Διακύμανση	Μ.Ο.	Διακύμανση
Κολωνακίου	74,6	40,7-125,6	24,3	11,2-52,6	15684	12617-20076
Αγίου Στεφ.	107,3	41,4-185,7	40,3	5,5-62,4	6923	2187-12677
Αμαρουσίου	110,1	42,7-291,9	61,1	22,7-101,2	52003	51916-52090
Αγίων Αναρ.	202,9	183,3-222,4	86,3	56,4-115,0	16679	11133-20332

Πίνακας 12.1: Εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> (μg/m<sup>3</sup>) και συγκεντρώσεις κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων (pt/cm<sup>3</sup>) για κάθε σχολείο.

Σχολείο	PM <sub>10</sub>		PM <sub>2,5</sub>	
	Μ.Ο.	Διακύμανση	Μ.Ο.	Διακύμανση
Κολωνακίου	66,1	33,1-105,7	----	69,9-254,0
Αγίου Στεφάνου	69,0	35,6-84,5	45,2	20,0-71,3
Αμαρουσίου	176,7	90,0-347,1	99,0	45,2-204,6
Αγίων Αναργύρων	126,7	60,9-262,6	69,5	32,5-159,5

Πίνακας 12.2: Εξωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2,5</sub> (μg/m<sup>3</sup>) για κάθε σχολείο.

Σχολείο	PM <sub>10</sub>		PM <sub>2,5</sub>	
	Μ.Ο.	Διακύμανση	Μ.Ο.	Διακύμανση
Κολωνακίου	1,21	0,62-2,08	----	0,11-0,35
Αγίου Στεφάνου	1,62	0,49-2,57	0,58	0,18-1,20
Αμαρουσίου	0,78	0,18-2,05	1,12	0,29-2,60
Αγίων Αναργύρων	1,18	0,85-2,85	1,32	0,72-1,74

Πίνακας 12.3: Λόγοι συγκεντρώσεων I/O των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2,5</sub> (μg/m<sup>3</sup>) για κάθε σχολείο.

Οι μετρηθείσες εσωτερικές και εξωτερικές συγκεντρώσεις ήταν σημαντικές, όσο και ανησυχητικές για τα σωματίδια PM<sub>10</sub> και PM<sub>2,5</sub>. Μια πρώτη παρατήρηση από τα αποτελέσματα είναι ότι οι εσωτερικές και εξωτερικές μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> βρέθηκαν επάνω από την 24-ωρη μέση τιμή (50 μg/m<sup>3</sup>) των πρότυπων ποιότητας ατμόσφαιρας που δίνει η Ευρωπαϊκή Ένωση, σε όλες τις τοποθεσίες. Από την άλλη, οι εξωτερικές μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των PM<sub>2,5</sub> βρέθηκαν επάνω από την 24-ωρη μέση τιμή (65 μg/m<sup>3</sup>) των πρότυπων ποιότητας ατμόσφαιρας που δίνει η USEPA, εκτός από μια τοποθεσία. Οι Lee και Chang μέτρησαν τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων PM<sub>10</sub> σε σχολεία του Hong Kong με διακύμανση από 21-617 μg/m<sup>3</sup>. Σε παρόμοιες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Wheeler και Janssen, ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων ήταν πολύ χαμηλότερος. Συγκεκριμένα, στο Ηνωμένο Βασίλειο οι εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> κυμάνθηκαν από 78-80

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ οι αντίστοιχες για τα σωματίδια  $\text{PM}_{2.5}$  ήταν μεταξύ 19-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Στην Ολλανδία η μέση εσωτερική συγκέντρωση των  $\text{PM}_{2.5}$  κυμάνθηκε από 7,7-52,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ οι αντίστοιχες εξωτερικές συγκεντρώσεις ήταν μεταξύ 5,2-60,8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Τα εσωτερικά επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζονται από την εσωτερική παραγωγή σωματιδίων και από τη διείσδυση εξωτερικού αέρα. Η εσωτερική αυτή παραγωγή σωματιδίων μπορεί να προκαλείται από συγκεκριμένες πηγές (όπως για παράδειγμα η καύση ξύλου ή ο καπνός του τσιγάρου) ή από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ακόμα και η ίδια η παρουσία του ανθρώπου σε εσωτερικό χώρο προκαλεί από μόνη της αύξηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων. Η επίδραση του καπνίσματος στην εσωτερική συγκέντρωση των σωματιδίων καταγράφηκε με σαφήνεια κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων (2/2/3004) σε γραφείο διδακτικού προσωπικού στο δημοτικό σχολείο Αμαρουσίου, όπου και επιτρεπόταν το κάπνισμα. Η μετρηθείσα μέση 8-ωρη συγκέντρωση των  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$  ήταν 280,9 και 198,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Η μεταβλητότητα που παρατηρείται στις εσωτερικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων στα σχολεία, οφείλεται κυρίως στην ένταση των δραστηριοτήτων και στα υλικά των επίπλων και του εξοπλισμού στο εσωτερικό των χώρων που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 12.1, οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων στο εσωτερικό των σχολείων, είναι επίσης πολύ σημαντικές. Η υψηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης κατά αριθμό υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων παρατηρήθηκε στη μικρή βιβλιοθήκη του δημοτικού σχολείου Αμαρουσίου, ενώ η μικρότερη στην αίθουσα εκδηλώσεων του δημοτικού σχολείου Αγίου Στεφάνου. Αυτή η έντονη διάφορα στις δύο τιμές συγκεντρώσεων μπορεί να εξηγηθεί από τα χαρακτηριστικά κάθε χώρου. Συγκεκριμένα, ο λόγος ατόμων ανά  $\text{m}^3$  στην περίπτωση της βιβλιοθήκης, ήταν 3-4 φορές μεγαλύτερος από αυτόν της αίθουσας εκδηλώσεων. Επιπρόσθετα, η βιβλιοθήκη ήταν ο μοναδικός χώρος με καλυμμένο δάπεδο από τάπητα. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η σημασία των επιπέδων συγκέντρωσης των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων που μετρήθηκαν, παραθέτουμε αποτελέσματα από μια άλλη τρέχουσα έρευνα του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας. Σύμφωνα με αυτή, οι μέσες μετρηθείσες συγκεντρώσεις κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων σε κεντρικό δρόμο της Αθήνας κυμαίνονται από 120000-180000  $\text{pt}/\text{cm}^3$ , με τις βραχυπρόθεσμες (5-λεπτες) αιχμές να φθάνουν στα 210000  $\text{pt}/\text{cm}^3$ .

Οι λόγοι εσωτερικών προς εξωτερικών συγκεντρώσεων (I/O) για τα  $PM_{10}$ , βρέθηκαν κοντά ή πάνω από την τιμή 1,00 εκτός από την περίπτωση του Αμαρουσίου όπου οι εξωτερικές συγκεντρώσεις ήταν πολύ υψηλές λόγω του ότι λάμβαναν χώρα εντατικές εργασίες κατασκευαστικής εταιρίας στο πίσω μέρος του σχολείου. Για τις υπόλοιπες περιοχές η τιμή του λόγου I/O αυξήθηκε με την παρουσία ανθρώπων και την ένταση των δραστηριοτήτων. Στο δημοτικό σχολείο της περιοχής Κολωνακίου οι εσωτερικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη γραμματεία της σχολής, η οποία και χρησιμοποιείτο ορισμένες ώρες της ημέρας. Στο δημοτικό σχολείο Αγίου Στεφάνου οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στην αίθουσα εκδηλώσεων η οποία χρησιμοποιείτο εκείνες τις ημέρες για τις πρόβες της εορτής των Χριστουγέννων, ενώ στο δημοτικό σχολείο Αγίων Αναργύρων ο εσωτερικός χώρος μετρήσεων ήταν ένα γυμναστήριο όπου υπήρχε έντονη δραστηριότητα σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς, το γεγονός ότι οι λόγοι I/O βρέθηκαν κοντά ή πάνω από τη μονάδα θεωρείται απόλυτα φυσιολογικό επακόλουθο βάσει των παραπάνω.

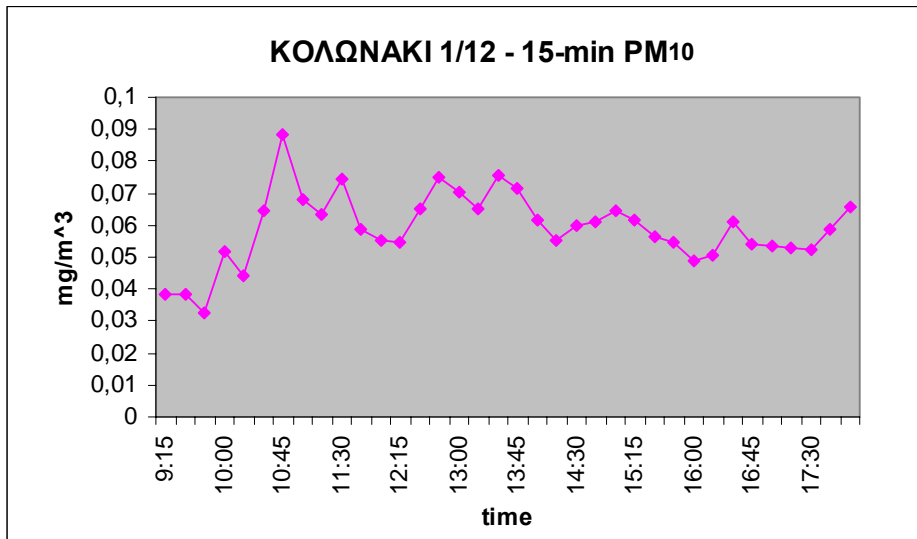
Όσον αφορά τους λόγους I/O για τα  $PM_{2.5}$ , αυτοί κυμάνθηκαν από 0,58-1,32. Στις περιπτώσεις του Αμαρουσίου και των Αγίων Αναργύρων, η έντονη δραστηριότητα στους εσωτερικούς χώρους των μετρήσεων είχε σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη υψηλών επιπέδων εσωτερικών συγκεντρώσεων των  $PM_{2.5}$ , με φυσιολογικό αποτέλεσμα οι τιμές των λόγων I/O για τις περιοχές αυτές να κυμαίνονται με μέση τιμή μεγαλύτερη της μονάδας. Αντίθετα, στην περίπτωση του σχολείου του Αγίου Στεφάνου, όπου η αίθουσα εκδηλώσεων χρησιμοποιείτο μόνο 1-2 ώρες ημερησίως, ο λόγος I/O υπολογίστηκε μικρότερος της μονάδας.

### **12.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανά σχολείο**

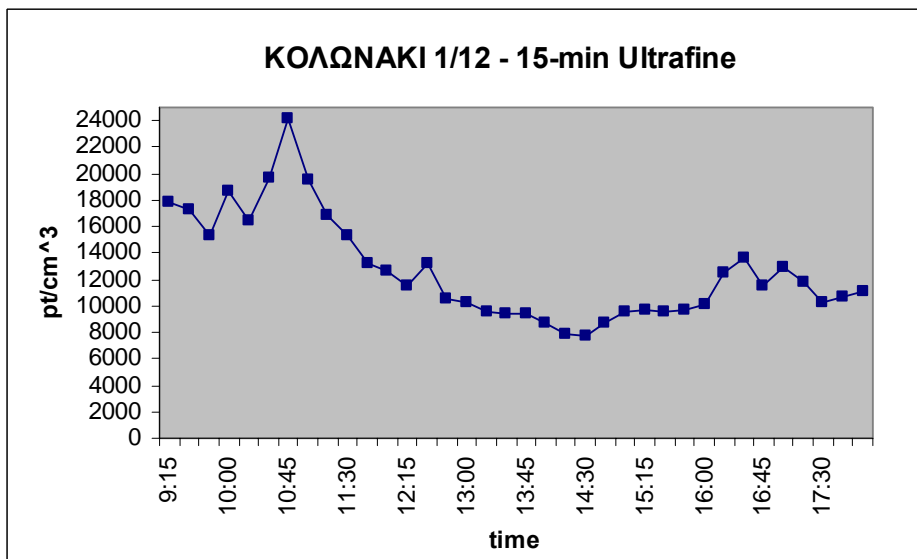
#### **➤ Δημοτικό Σχολείο Κολωνακίου**

Μια τυπική μεταβολή των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$  στο εσωτερικό του σχολείου, κατά τη διάρκεια ενός 8-ωρου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.1. Από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε αρχικά ένα πρώτο μέγιστο κατά τις πρωινές ώρες και συγκεκριμένα μεταξύ 10.30-11.00 π.μ. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η τιμή της μέσης 15-λεπτης συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  μετρήθηκε σχεδόν 2 φορές πάνω από τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση του σχολείου (μέση 8-ωρη για τις πέντε ημέρες της δειγματοληψίας). Μπορεί να δικαιολογηθεί από την ένταση των δραστηριοτήτων τις πρώτες πρωινές ώρες, ενώ είναι φανερά και τα διαδοχικά

διαστήματα στα οποία αυξανόταν η κίνηση στη γραμματεία από καθηγητές και μαθητές κατά τη διάρκεια των διαλειμμάτων.



Διάγραμμα 12.1: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.



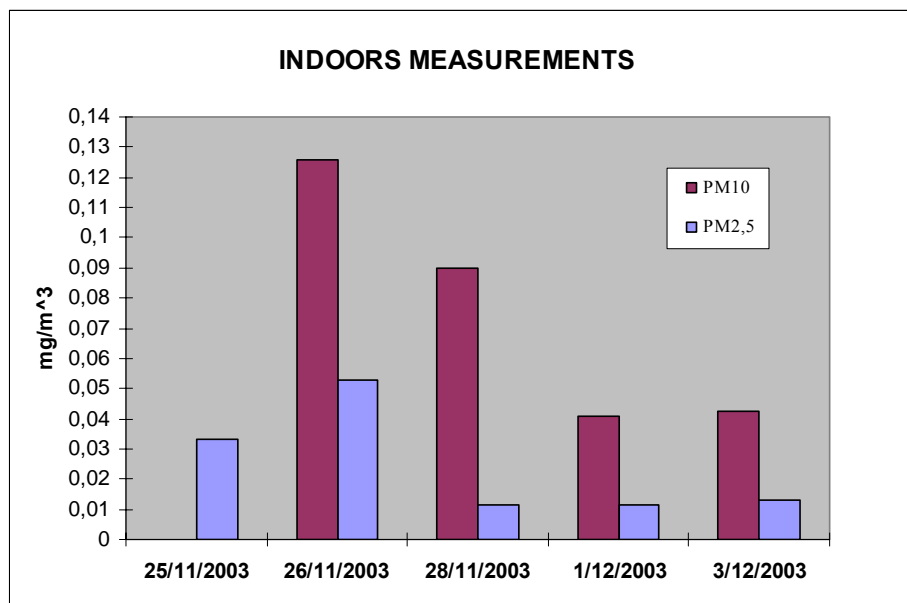
Διάγραμμα 12.2: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

Σε ότι αφορά τη μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, παρατηρείται συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> τις πρωινές ώρες με μέγιστη συγκέντρωση την ίδια σχεδόν χρονική περίοδο. Το γεγονός αυτό πιθανώς πιστοποιεί τις αλληλεπιδράσεις στη δημιουργία



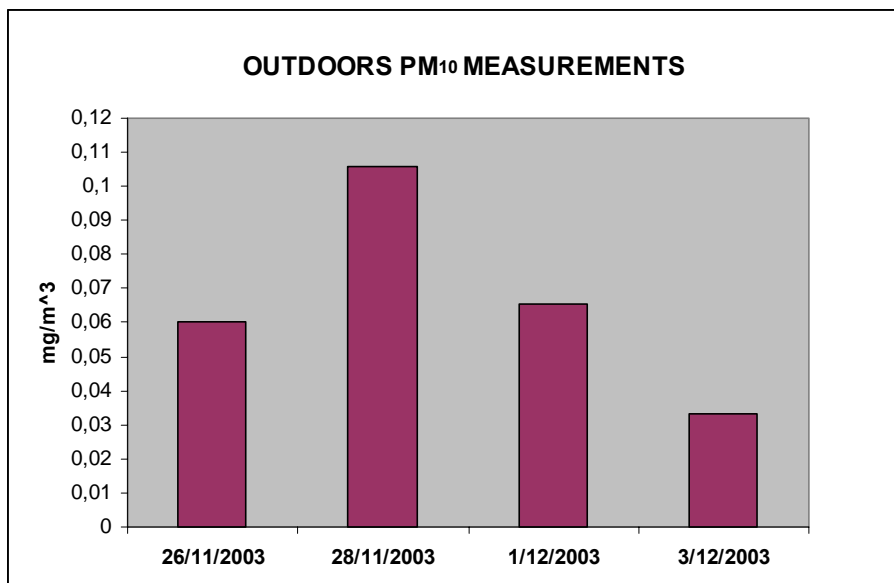
των σωματιδίων διαφορετικών κλασμάτων στους εσωτερικούς χώρους. Οι 15-λεπτες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 10000-24000 pt/cm<sup>3</sup> με μέση ημερήσια 8-ωρη τιμή πολύ κοντά στη μέση 8-ωρη που προέκυψε από τις πέντε ημέρες των μετρήσεων.

Στο Διάγραμμα 12.3 παρουσιάζονται οι μέσες 8-ωρες εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι όλες τις ημέρες οι συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> είναι κατά πολύ υψηλότερες από αυτές των PM<sub>2.5</sub>, των οποίων οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται μεταξύ 11,2-52,6 μg/m<sup>3</sup> και είναι οι χαμηλότερες που καταγράφηκαν στα τέσσερα σχολεία που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες.

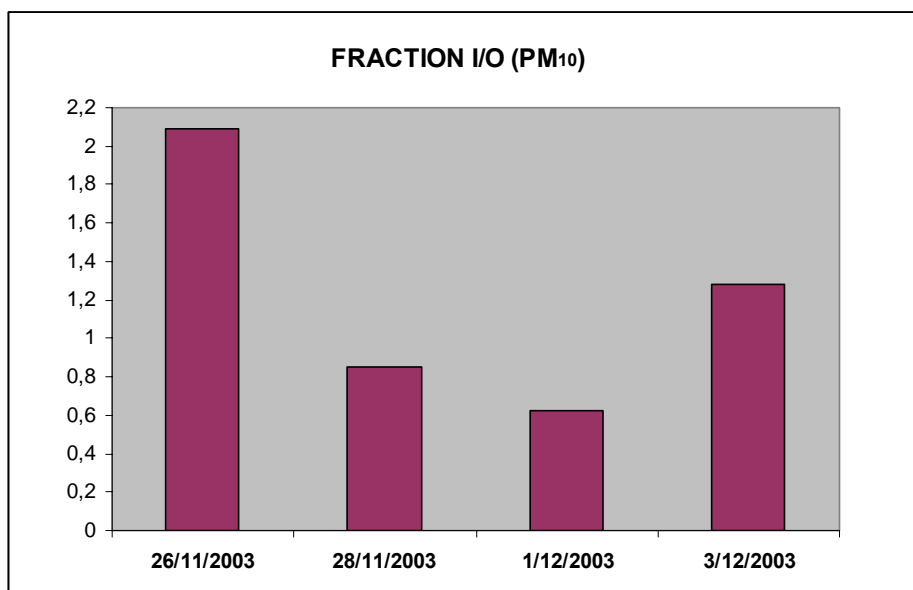


**Διάγραμμα 12.3:** Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εσωτερικών συγκεντρώσεων.

Οι μέσες 8-ωρες εξωτερικές συγκέντρωσες των PM<sub>10</sub> (Διάγραμμα 12.4) κινούνται πάνω από την 24-ωρη μέση τιμή συγκέντρωσης των 50,0 μg/m<sup>3</sup> της Ε.Ε. (εκτός μια περίπτωσης). Παρατηρείται επίσης μια μείωση των σωματιδίων μετά την πρώτη μέρα που οφείλεται (σύμφωνα με τα αρχεία μας) στην επιδείνωση του καιρού τις τρεις ενδιάμεσες ημέρες των μετρήσεων, όπου είχαμε κρύο και λίγες βροχές. Πρέπει εδώ να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση των εξωτερικών μετρήσεων παρουσιάστηκε βλάβη στη βαλβίδα στραγγαλισμού της ροής της αντλίας που χρησιμοποιήθηκε για τα σωματίδια PM<sub>2.5</sub>. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να μην σταθεροποιείται η ροή στην επιθυμητή τιμή των 100,5 divisions (περίπου 4 l/min) και για το λόγο αυτό οι μετρήσεις θεωρήθηκαν άκυρες και δεν καταγράφηκαν.



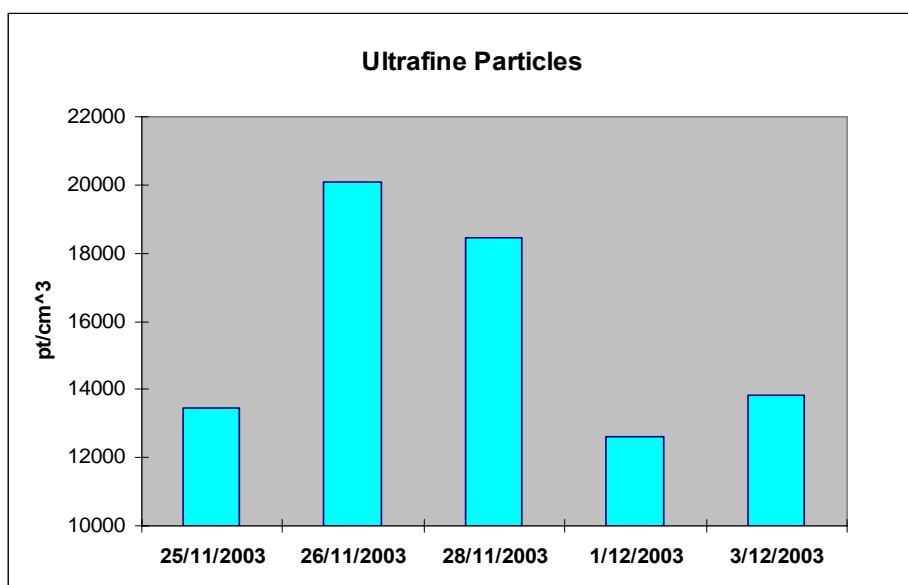
**Διάγραμμα 12.4:** Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων.



**Διάγραμμα 12.5:** Σύγκριση των λόγων I/O.

Η μέση τιμή των λόγων I/O για τα σωματίδια PM<sub>10</sub> κινήθηκε πάνω από τη μονάδα. Μια πιθανή αιτιολογία για αυτό είναι η αυξημένη δραστηριότητα που καταγράφηκε στη γραμματεία όλες τις ημέρες της δειγματοληψίας και η παρουσία πολλών ανθρώπων σε σχετικά μικρό χώρο. Η μέγιστη τιμή του λόγου παρατηρήθηκε στις 26/11 οπότε και η εξωτερική συγκέντρωση των PM<sub>10</sub> ήταν συγκριτικά μικρή εξαιτίας των δυνατών ανέμων που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της ημέρας (σύμφωνα με το αρχείο των μετρήσεων και τα επίσημα μετεωρολογικά δεδομένα).

Οι συγκεντρώσεις κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων κυμάνθηκαν, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 12.6, από 12617-2076  $\text{pt}/\text{cm}^3$  με μέγιστες τιμές να εμφανίζονται στις 26 και 28 Δεκεμβρίου 2003. Αξίζει να σημειωθεί ότι τις δύο αυτές ημέρες παρουσιάστηκαν υψηλές τιμές συγκεντρώσεων και για τα εσωτερικά  $\text{PM}_{10}$  και  $\text{PM}_{2.5}$ , αλλά και για το λόγο I/O των σωματιδίων  $\text{PM}_{10}$ . Συνεπώς, η δικαιολόγηση της υψηλής έντασης των δραστηριοτήτων κατά τις ημέρες αυτές, καθίσταται όλο και πιο λογική.

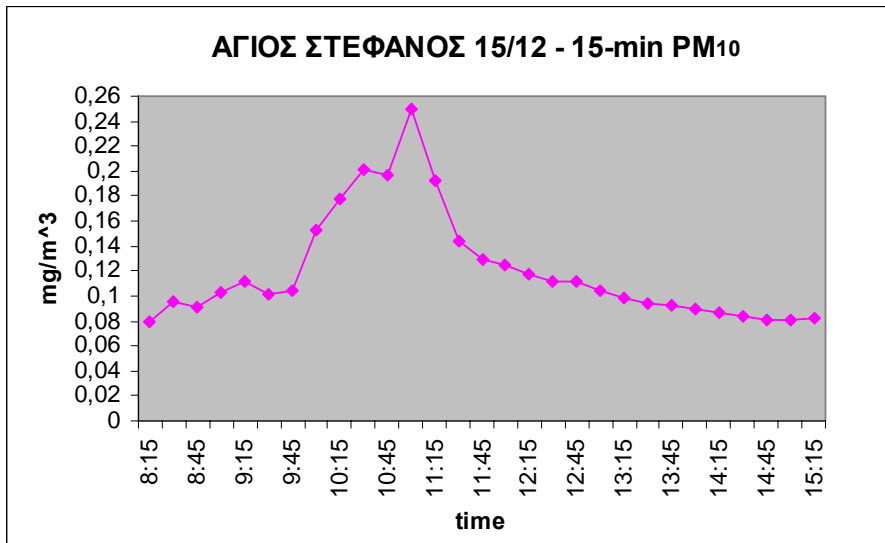


**Διάγραμμα 12.6:** Μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

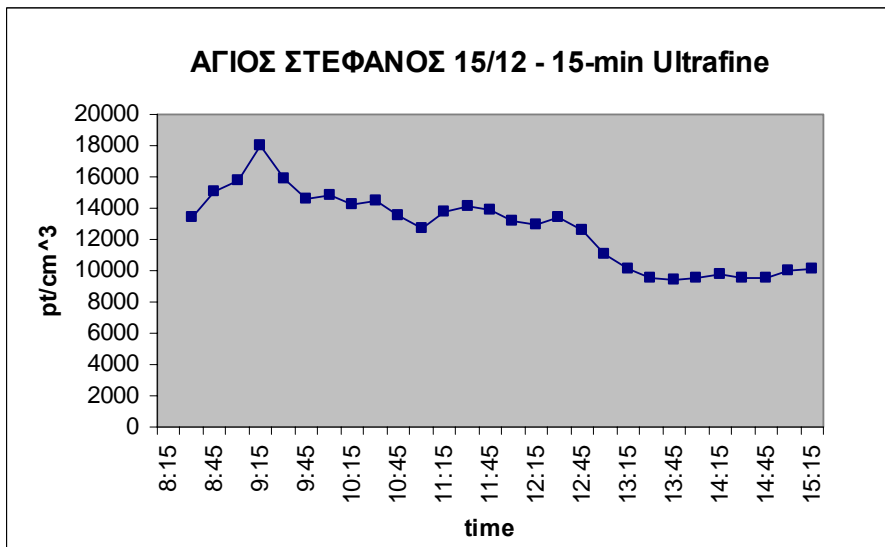
#### ➤ Δημοτικό Σχολείο Αγίου Στεφάνου

Μια τυπική μεταβολή των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων των  $\text{PM}_{10}$  στο εσωτερικό του σχολείου, κατά τη διάρκεια ενός 8-ωρου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.7. Στο διάγραμμα παρατηρούμε μια ανοδική πορεία των τιμών των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων κατά τις ώρες από 9.30-11.00 π.μ., με μια πολύ υψηλή αιχμή στις 11.00 π.μ. (όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στο προηγούμενο σχολείο). Σε αυτό το χρονικό διάστημα η τιμή της μέσης 15-λεπτης συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  μετρήθηκε σχεδόν 2,5 φορές πάνω από τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση των πέντε ημερών δειγματοληψίας. Η αυξητική τάση της συγκέντρωσης τις πρώτες πρωινές ώρες μπορεί να δικαιολογηθεί από την ένταση των δραστηριοτήτων τις ώρες αυτές, ενώ είναι φανερό και η βασική αιτία της ύπαρξης της μέγιστης τιμής των  $249,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , αφού κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 10-11 π.μ. πραγματοποιήθηκαν πρόβες για

την εορτή των Χριστουγέννων στην αίθουσα εκδηλώσεων του σχολικού συγκροτήματος.



Διάγραμμα 12.7: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.

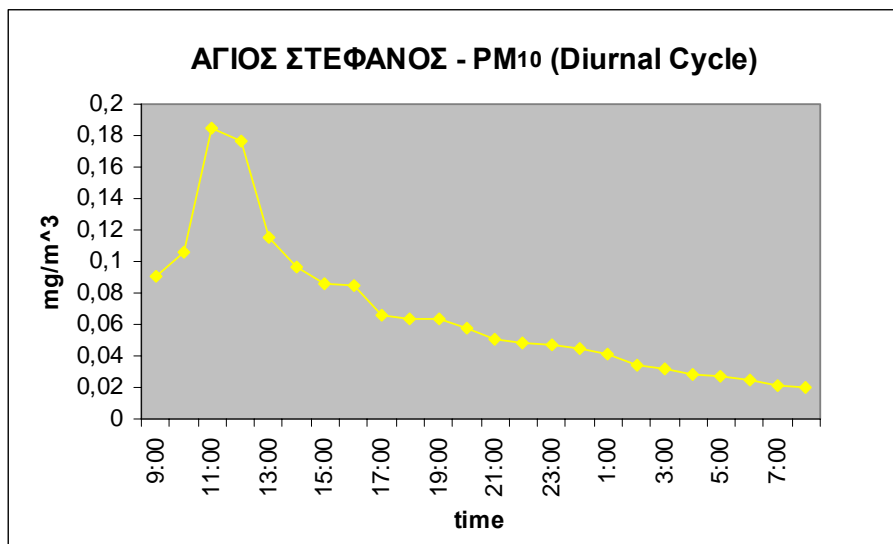


Διάγραμμα 12.8: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

Σε ότι αφορά τη μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, παρατηρείται μια κορυφή στην καμπύλη του διαγράμματος στις 9.15 π.μ. περίπου, με τιμή συγκέντρωσης άνω των 18000 pt/cm<sup>3</sup> που είναι και αρκετά υψηλότερη από τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση των 6923 pt/cm<sup>3</sup>. Κατά τα αλλά, από την κλίση της καμπύλης μπορούμε να συμπεράνουμε ότι

πρόκειται για μια ημέρα χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις στα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια, εφόσον αυτά κυμάνθηκαν ως επί το πλείστον από 10000-14000 pt/cm<sup>3</sup> στο μεγαλύτερο διάστημα της 8-ωρης λειτουργίας του σχολείου.

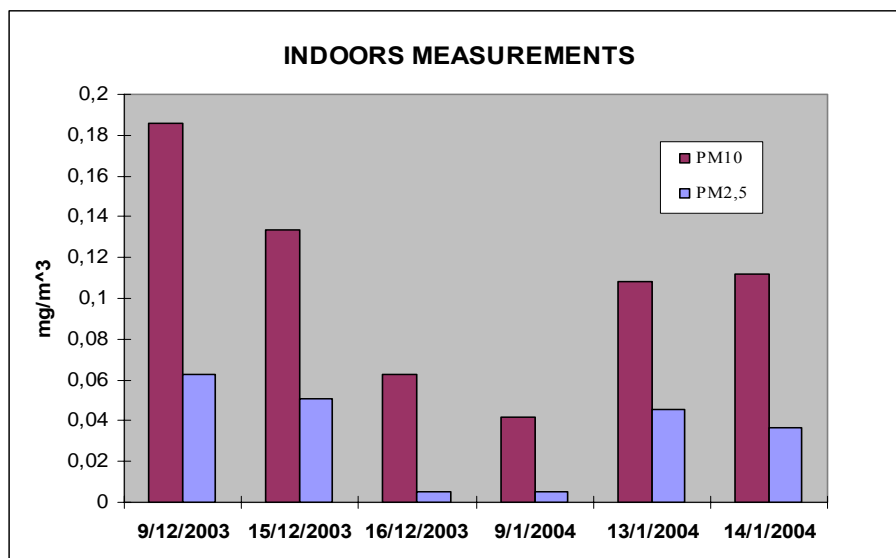
Ένας τυπικός ημερήσιος κύκλος των συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> στο εσωτερικό του σχολείου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.9. Οι 15-λεπτες μέσες συγκεντρώσεις ήταν σε ορισμένες περιπτώσεις 2-3,5 φορές επάνω από την 24-ωρη μέση συγκέντρωση του συγκεκριμένου σχολείου που μετρήθηκε 66,9 μg/m<sup>3</sup> (14% υψηλότερη από την αντίστοιχη μέση 24-ωρη των 50,0 μg/m<sup>3</sup> της Ε.Ε.). Είναι εμφανείς οι ώρες αιχμής και λειτουργίας του σχολείου, ενώ μετά τις 5 μ.μ. παρατηρείται σημαντική μείωση των επιπέδων συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub>. Η μείωση αυτή οφείλεται τόσο στο κλείσιμο του σχολείου, όσο και στην πτώση της θερμοκρασίας και την άνοδο της υγρασίας στην ευρύτερη ημι-αγροτική περιοχή.



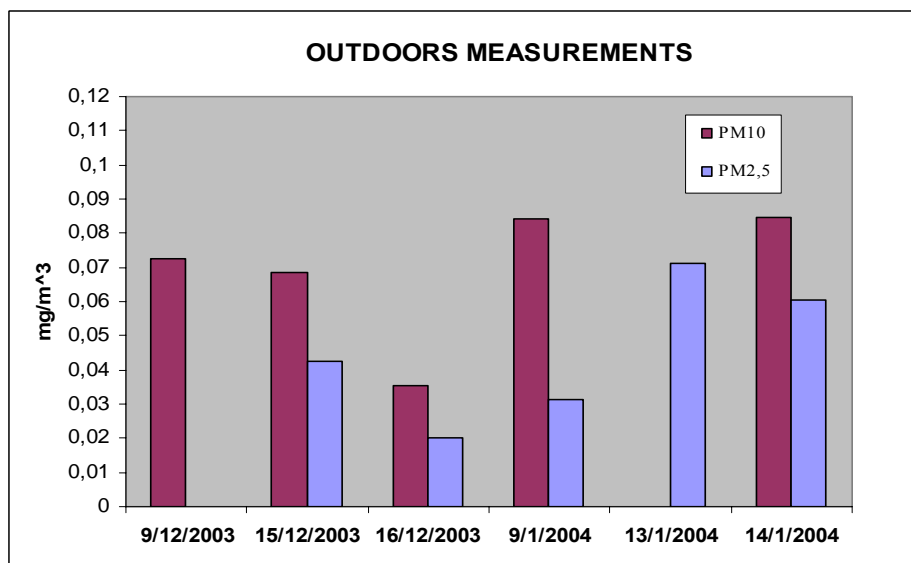
**Διάγραμμα 12.9:** Τυπικός ημερήσιος κύκλος των εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.

Στο Διάγραμμα 12.10 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μέσες 8-ωρες εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2,5</sub> για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι όλες τις ημέρες της δειγματοληψίας οι συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> είναι κατά πολύ υψηλότερες από αυτές των PM<sub>2,5</sub>. Αυτό πιθανώς δικαιολογείται από το γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις τα επίπεδα των εσωτερικών αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζονται από τη διείσδυση εξωτερικού αέρα. Στην ευρύτερη περιοχή, όπως προαναφέραμε στο κεφάλαιο 9, υπάρχουν αρκετά μεγάλες άχτιστες

εκτάσεις γης, οι οποίες αποτελούν πηγές αιρούμενης σκόνης και αυξάνουν τα επίπεδα συγκέντρωσης των  $PM_{10}$ .



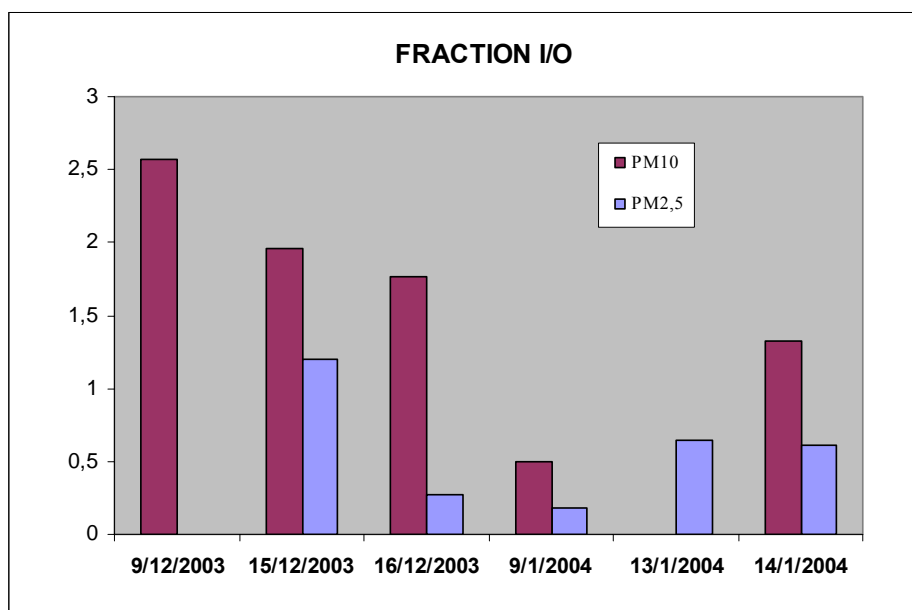
Διάγραμμα 12.10: Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εσωτερικών συγκεντρώσεων.



Διάγραμμα 12.11: Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων.

Από τη σύγκριση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων, φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  είναι αρκετά υψηλές, γεγονός φυσιολογικό λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε ελάχιστη κυκλοφοριακή πυκνότητα στην περιοχή και πολλές άχτιστες εκτάσεις που εκπέμπουν κυρίως χονδρόκοκκα σωματίδια. Οι μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  μετρήθηκαν (εκτός μιας περίπτωσης) πάνω από την

24-ωρη μέση τιμή συγκέντρωσης που προβλέπει η οδηγία 1999/30/EK της Ε.Ε., ενώ οι αντίστοιχες των  $PM_{2.5}$  μετρήθηκαν κοντά ή κάτω από την 24-ωρη μέση τιμή συγκέντρωσης των  $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$  της USEPA. Επιβεβαιώνεται η άμεση εξάρτηση των επιπέδων συγκέντρωσης σωματιδίων από τις μετεωρολογικές συνθήκες, αφού στις 16/12/2003 που καταγράφηκαν πολύ χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων επικρατούσαν ισχυροί άνεμοι, κρύο και βροχές.

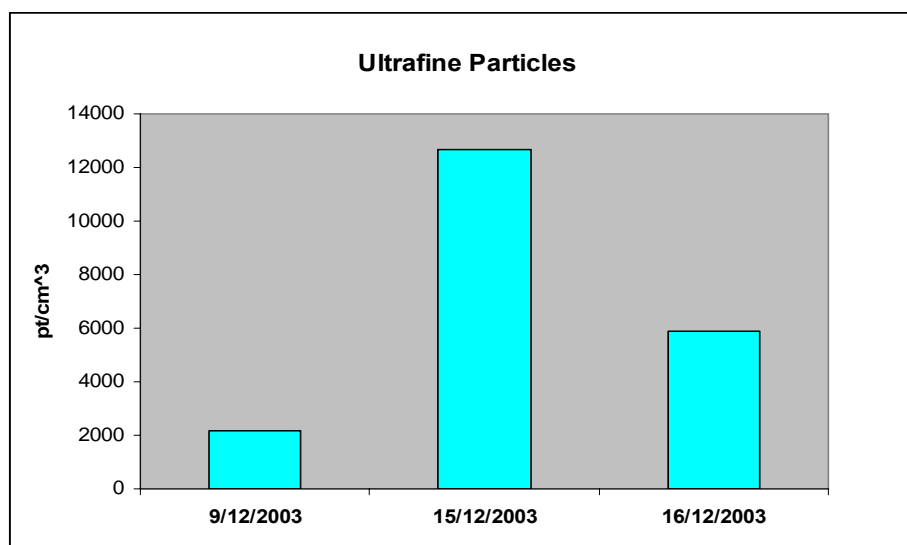


**Διάγραμμα 12.12:** Σύγκριση των λόγων I/O.

Στο Διάγραμμα 12.12 παρατηρούμε ότι οι λόγοι I/O για τα σωματίδια  $PM_{10}$  είναι πάντοτε πολύ μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους των  $PM_{2.5}$ . Οι τιμές των I/O για τα  $PM_{10}$  κυμαίνονται αρκετά πάνω από την τιμή 1,00 (εκτός από μια περίπτωση), γεγονός που κρίνεται ανησυχητικό αν αναλογιστούμε ότι ούτως ή άλλως το περιβάλλον της περιοχής είναι επιβαρημένο σε χονδρόκοκκα σωματίδια. Στην περίπτωση των λόγων I/O για τα  $PM_{2.5}$ , παρατηρούμε τιμές κάτω από τη μονάδα (εκτός μιας περίπτωσης), γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό για το εσωτερικό περιβάλλον του σχολείου. Αν θυμηθούμε δε ότι στο εξωτερικό περιβάλλον έχουμε πολύ μικρές συγκεντρώσεις των  $PM_{2.5}$  λόγω της χαμηλής κυκλοφορίας και των μετεωρολογικών συνθηκών της περιοχής, τότε εφόσον οι λόγοι I/O είναι μικρότεροι από 1,00, σημαίνει ότι τα επίπεδα των  $PM_{2.5}$  στο εσωτερικό κρίνονται ακίνδυνα για την υγεία των παιδιών.



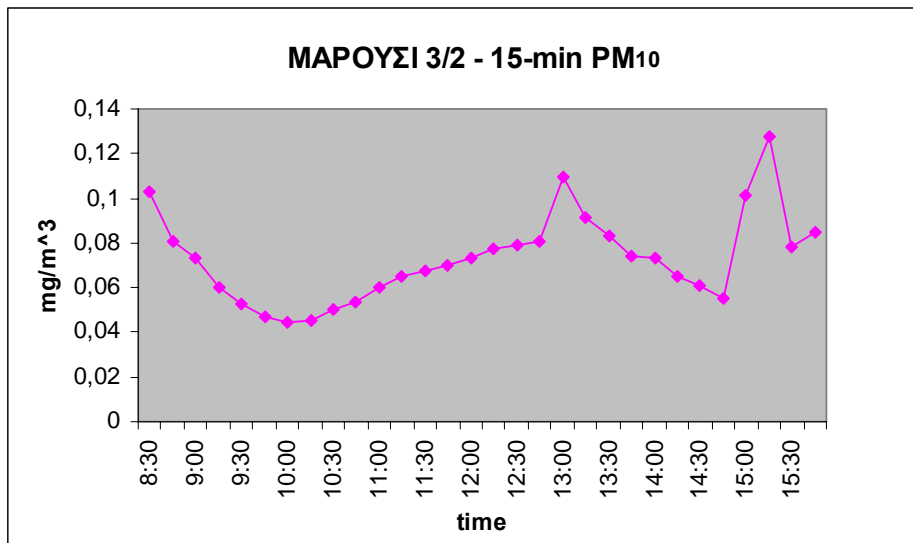
Τα επίπεδα συγκέντρωσης των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων κυμάνθηκαν από 2187-12677  $\mu\text{t}/\text{cm}^3$ , με μέση τιμή αρκετά μικρότερη από κάθε άλλο από τα τρία σχολεία (Διάγραμμα 12.13). Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η αίθουσα εκδηλώσεων ήταν μεγάλων διαστάσεων, ώστε ο λόγος ατόμων ανά  $\text{m}^3$  να παραμένει πάντα σε χαμηλά επίπεδα. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης παρατηρείται στις 15/12/2003, όποτε και στην αίθουσα πραγματοποιούνταν εντατικές πρόβες για την εορτή των Χριστουγέννων από μια ομάδα 25-30 μαθητών.



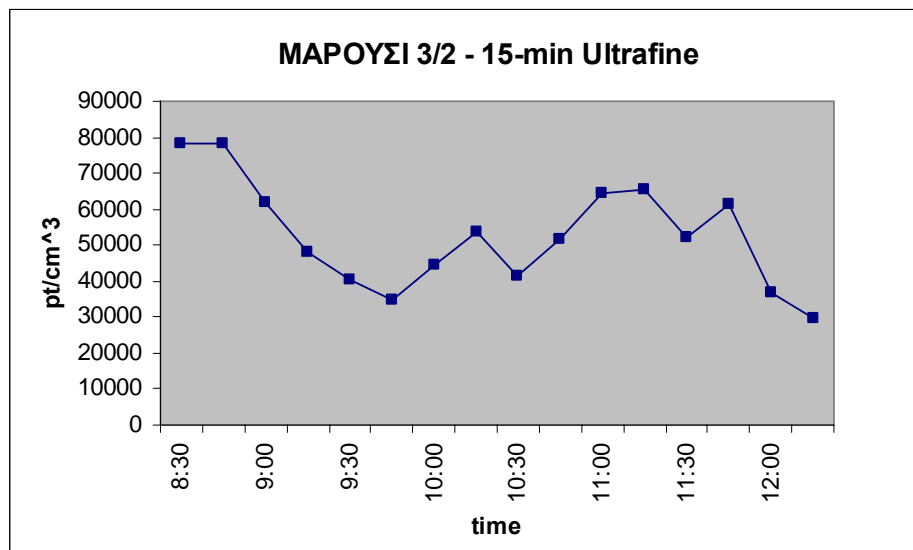
**Διάγραμμα 12.13:** Μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

#### ➤ Δημοτικό Σχολείο Αμαρουσίου

Μια τυπική μεταβολή των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων των  $\text{PM}_{10}$  στη βιβλιοθήκη του σχολείου, κατά τη διάρκεια ενός 8-ωρου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.14. Στο διάγραμμα παρατηρούμε μια ανοδική πορεία των τιμών των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων κατά τις ώρες από 10.00 π.μ. -1.00 μ.μ., με μια πρώτη υψηλή αιχμή στις 1.15 μ.μ. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η τιμή της μέσης 15-λεπτης συγκέντρωσης των  $\text{PM}_{10}$  μετρήθηκε  $109,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , τιμή περίπου ίση τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση του σχολείου (μέση 8-ωρη για όλη την περίοδο των μετρήσεων). Αξίζει να αναφέρουμε ότι κατά τη διάρκεια χρήσης της βιβλιοθήκης τις ώρες 2.30-3.30 μ.μ., όποτε και τα σχολικά μαθήματα έχουν τελειώσει και ορισμένοι μαθητές απασχολούνται στη βιβλιοθήκη αναμένοντας τους γονείς τους, η μέση 15-λεπτη συγκέντρωση των  $\text{PM}_{10}$  εμφανίζει ένα μέγιστο ημέρας, με τιμή 15,7% μεγαλύτερη από τη μέση 8-ωρη του σχολείου.



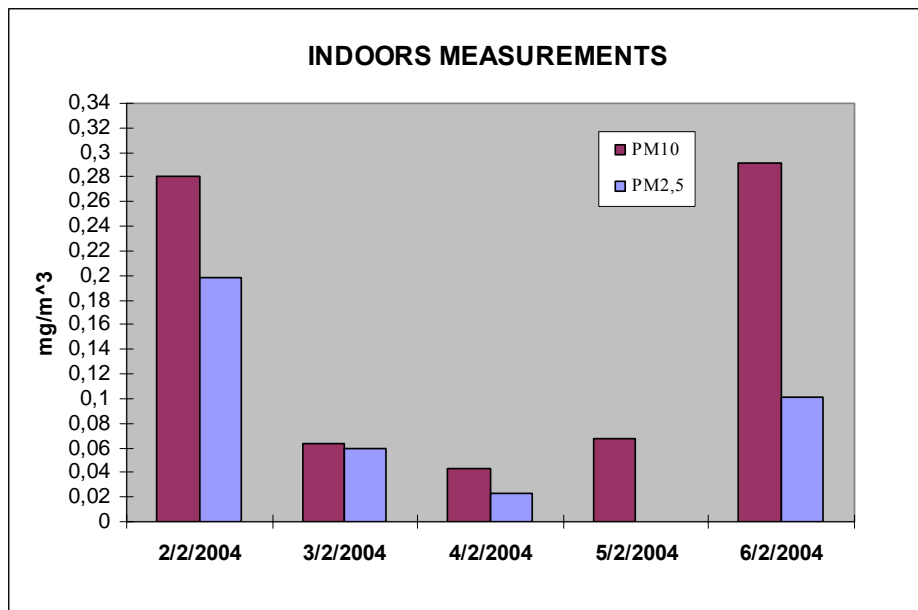
Διάγραμμα 12.14: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.



Διάγραμμα 12.15: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

Σε ότι αφορά τη μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων (Διάγραμμα 12.15), παρατηρείται μια διακύμανση από 29527-78245 pt/cm<sup>3</sup>, με μέση 8-ωρη τιμή (αλλά και μέση τιμή σχολείου) πολύ υψηλότερη από τα υπόλοιπα τρία σχολεία. Το γεγονός πιθανώς μπορεί να εξηγηθεί από το ότι ο λόγος ατόμων ανά m<sup>3</sup> στην περίπτωση της βιβλιοθήκης, ήταν 2-4 φορές μεγαλύτερος από τις αίθουσες μετρήσεων των υπολοίπων σχολείων. Επιπρόσθετα, η

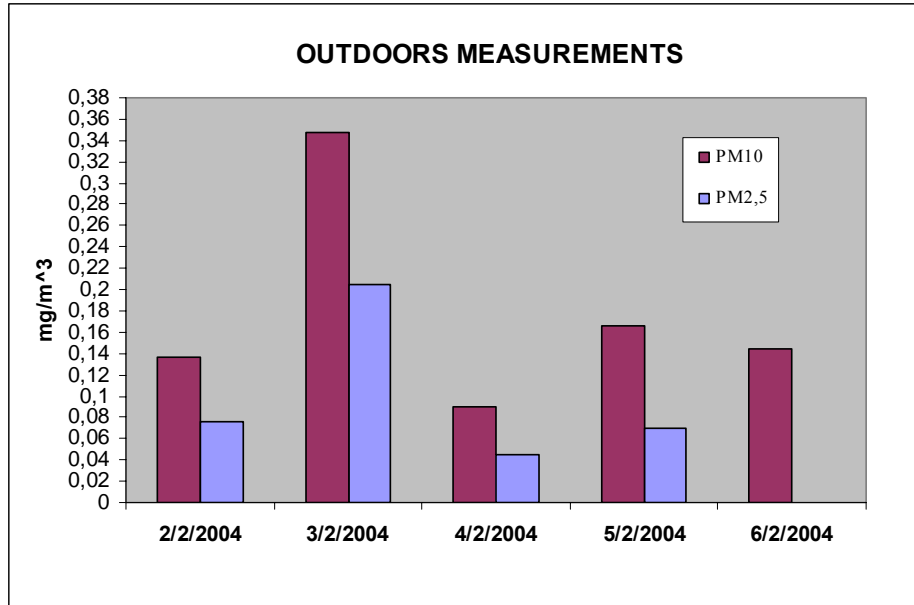
βιβλιοθήκη ήταν ο μοναδικός εσωτερικός χώρος με καλυμμένο δάπεδο από τάπητα, ο οποίος αποτελεί πηγή αποθήκευσης και επαναϊώρησης σωματιδίων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρατηρήθηκε απόλυτη συσχέτιση σε όλες τις καμπύλες μεταβολής των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων για το συγκεκριμένο σχολείο. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 12.1 καταγράφηκαν πολύ μικρές διαφορές στις μέσες 8-ωρες τιμές από ημέρα σε ημέρα, πράγμα που πιστοποιεί τα σταθερά και πολύ υψηλά επίπεδα των συγκεκριμένων σωματιδίων στο σχολείο.



**Διάγραμμα 12.16:** Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εσωτερικών συγκεντρώσεων.

Στο Διάγραμμα 12.16 παρουσιάζονται οι μέσες 8-ωρες εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι την πρώτη και τελευταία ημέρα της δειγματοληψίας οι συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> ήταν κατά πολύ υψηλότερες από αυτές των PM<sub>2.5</sub>. Οι διαφορές αυτές δικαιολογούνται από τη μεγάλη κινητικότητα στη βιβλιοθήκη τις δύο αυτές ημέρες, οπότε και η αίθουσα χρησιμοποιήθηκε αρκετές ώρες από τους μαθητές και το διδακτικό προσωπικό. Μια δεύτερη πιθανή εξήγηση είναι και η διείσδυση εξωτερικού αέρα (η πόρτα παρέμεινε αρκετές ώρες ανοιχτή τις δύο αυτές ημέρες), ο οποίος όπως προαναφέραμε είναι πολύ επιβαρημένος σε χονδρόκοκκα σωματίδια εξαιτίας νεοαναγειρόμενης οικοδομής και της ύπαρξης βιοτεχνιών επεξεργασίας μαρμάρου στο πίσω μέρος του σχολείου. Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε τις διαφορές στις συγκεντρώσεις μεταξύ των

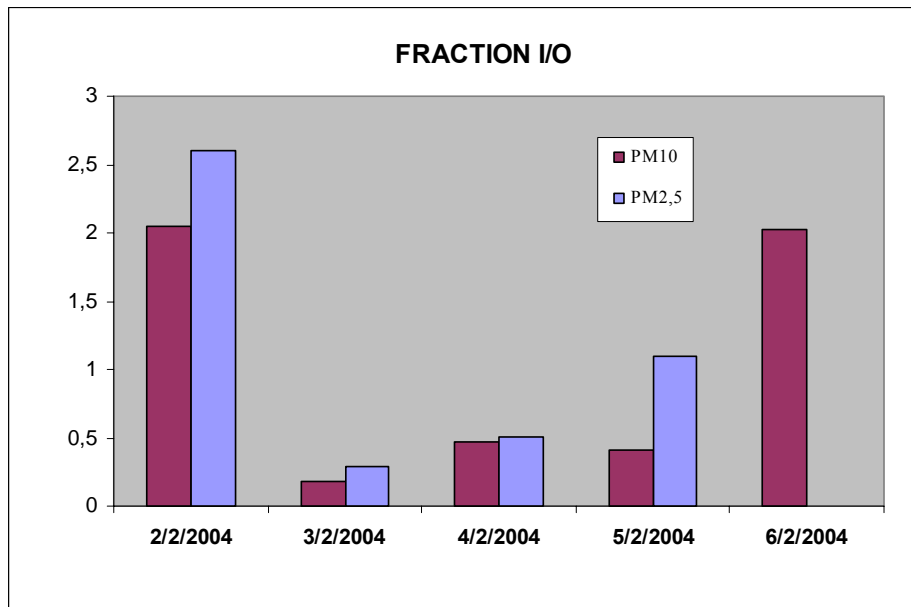
ημερών 4/2 και 6/2. Την πρώτη εκ' των δύο ημερών η βιβλιοθήκη δε χρησιμοποιήθηκε καθόλου, ενώ στις 6/2 ήταν στη διάθεση των μαθητών όλο το 8-ωρο και η πόρτα παρέμενε ανοιχτή κατά την ίδια χρονική περίοδο.



**Διάγραμμα 12.17:** Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων.

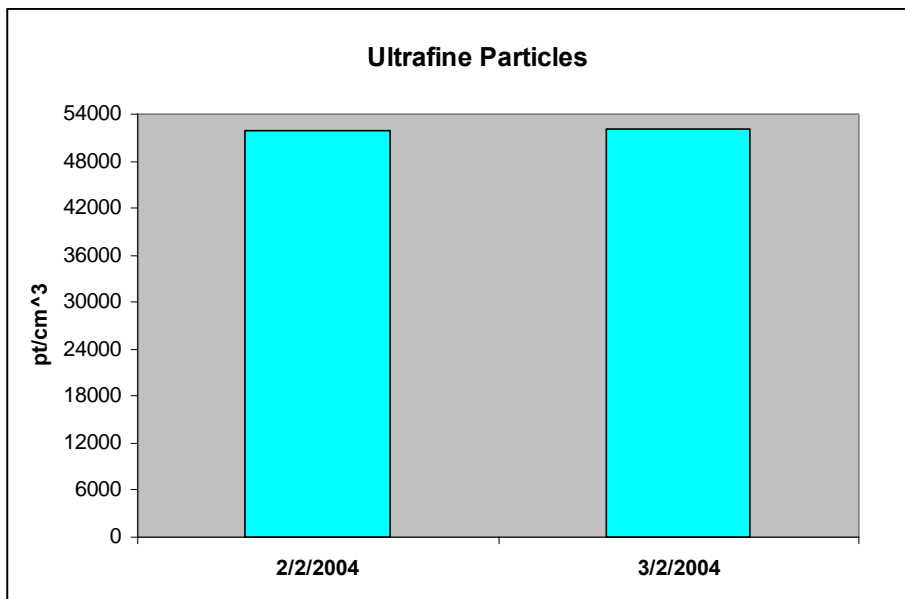
Από την παράθεση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων, φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων ήταν γενικά πολύ αυξημένες, γεγονός απόλυτα φυσιολογικό αναλογιζόμενοι το γεγονός ότι στο πίσω μέρος του σχολείου λάμβαναν χώρα εργασίες ανέγερσης οικοδομής, ενώ λειτουργούσαν και βιομηχανίες επεξεργασίας μαρμάρου. Οι μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> μετρήθηκαν πολύ πάνω από την 24-ωρη μέση τιμή συγκέντρωσης που προβλέπει η οδηγία 1999/30/EK της Ε.Ε., με μέγιστη μέση τιμή την 347,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (594% πάνω από το όριο). Επιβεβαιώνεται η άμεση εξάρτηση των επιπέδων συγκέντρωσης σωματιδίων από τις μετεωρολογικές συνθήκες, αφού στις 4/2/2004 που καταγράφηκαν πολύ χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων επικρατούσε κρύο (6 °C) και βροχόπτωση, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ημέρες που είχαμε ηλιοφάνεια. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των PM<sub>2.5</sub> έχουν μια μέση τιμή της τάξης των 99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (τιμή αρκετά υψηλή και ανάλογη του κέντρου της Αθήνας) που μπορεί να δικαιολογηθεί από την ύπαρξη αρκετών μεγάλων ιδιωτικών χώρων στάθμευσης στην περιοχή, όπως και από τους δύο μεγάλους παρακείμενους δρόμους κυκλοφορίας.

Στο Διάγραμμα 12.18 παρατηρούμε ότι οι λόγοι I/O για τα σωματίδια PM<sub>10</sub> είναι πάντοτε πολύ μικρότεροι από τους αντίστοιχους των PM<sub>2.5</sub>. Οι τιμές των I/O για τα PM<sub>10</sub> κυμαίνονται με μέση τιμή 0,78, γεγονός που εξηγείται από την επιβάρυνση της περιοχής σε χονδρόκοκκα σωματίδια. Στην περίπτωση των λόγων I/O για τα PM<sub>2.5</sub>, παρατηρούμε διακύμανση από 0,29-2,60 με μέση τιμή στο 1,12. Λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή κυκλοφοριακή πυκνότητα στους παρακείμενους δρόμους (δηλαδή υψηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις PM<sub>2.5</sub>), εντύπωση προκαλούν οι λόγοι I/O στις 2/2 και 6/2 οι οποίοι είναι αρκετά πάνω από την τιμή 1,00. Όπως προαναφέραμε όμως, τις δύο αυτές ημέρες η βιβλιοθήκη χρησιμοποιήθηκε αρκετές ώρες από τους μαθητές και το διδακτικό προσωπικό, με αποτέλεσμα να έχουμε έντονη δραστηριότητα στο εσωτερικό της.



**Διάγραμμα 12.18:** Σύγκριση των λόγων I/O.

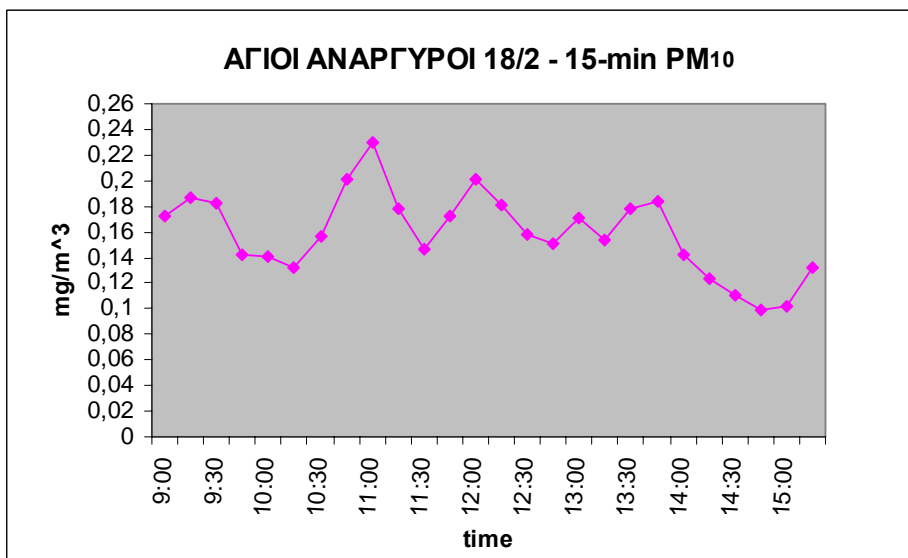
Τα επίπεδα συγκέντρωσης των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων (Διάγραμμα 12.19) κυμάνθηκαν από 51916-52090  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με μέση τιμή 3,0-7,5 φορές μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα τρία σχολεία (οι λόγοι αναφέρθηκαν παραπάνω). Πρόκειται για το κλάσμα των σωματιδίων που είναι το πλέον επικίνδυνο για την υγεία των μαθητών και για το λόγο αυτό θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην αντιμετώπιση του προβλήματος με πιθανή εγκατάσταση συστήματος εξαερισμού στη συγκεκριμένη αίθουσα.



Διάγραμμα 12.19: Μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

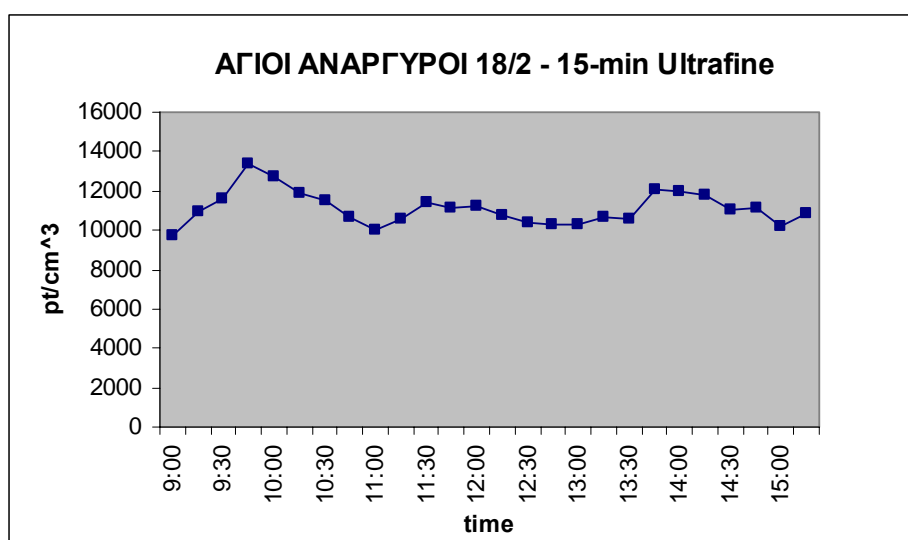
➤ Δημοτικό Σχολείο Αγίων Αναργύρων

Μια τυπική μεταβολή των μέσων 15-λεπτων συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> στο γυμναστήριο του σχολείου, κατά τη διάρκεια ενός 8-ωρου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.20.



Διάγραμμα 12.20: Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.

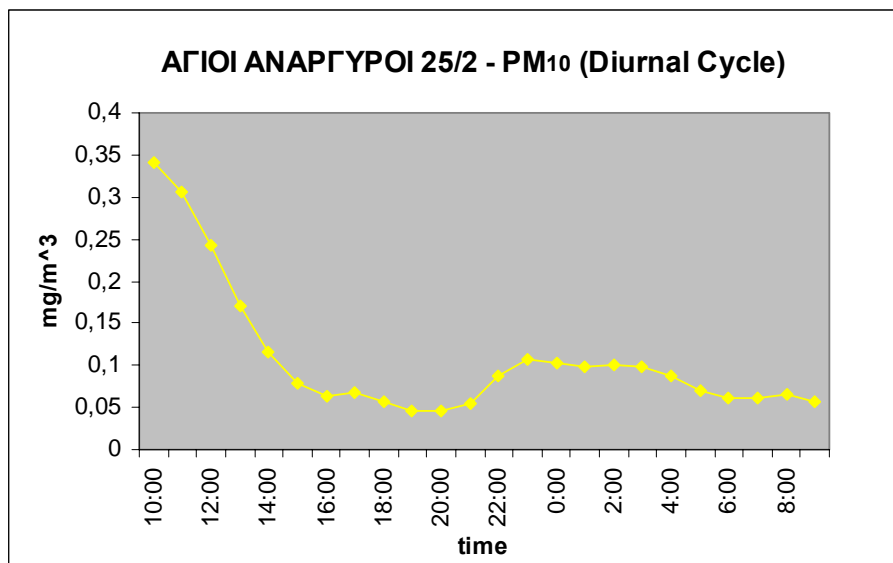
Είναι φανερά τα διαδοχικά διαστήματα κατά τα οποία το γυμναστήριο χρησιμοποιείται από τους μαθητές στα πλαίσια του μαθήματος της φυσικής αγωγής. Παρατηρούμε ένα μέγιστο στη συγκέντρωση κατά τις πρωινές ώρες και συγκεκριμένα μεταξύ 10.30-11.00 π.μ. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η τιμή της μέσης 15-λεπτης συγκέντρωσης των  $PM_{10}$  μετρήθηκε σχεδόν ίση με τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση του σχολείου (μέση 8-ωρη όλων των ημερών δειγματοληψίας). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση 8-ωρη συγκέντρωση βρέθηκε 4 φορές επάνω από την 24-ωρη μέση τιμή ( $50,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) των πρότυπων ποιότητας ατμόσφαιρας που δίνει η Ευρωπαϊκή Ένωση.



**Διάγραμμα 12.21:** Μεταβολή των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

Στην καμπύλη της μεταβολής των μέσων 15-λεπτων εσωτερικών συγκεντρώσεων των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, παρατηρείται μια κορυφή στις 9.45 π.μ. περίπου, με τιμή συγκέντρωσης τα  $13344 \text{ pt}/\text{cm}^3$  που είναι και χαμηλότερη από τη μέση 8-ωρη συγκέντρωση των  $16679 \text{ pt}/\text{cm}^3$  που υπολογίστηκε για τις πέντε ημέρες. Κατά τα άλλα, από την κλίση της καμπύλης μπορούμε να συμπεράνουμε ότι πρόκειται για μια ημέρα χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις στα υπερλεπτόκοκκα σωματίδια, η οποία μπορεί να δικαιολογηθεί από την ομαλή διάχυση των σωματιδίων στο χώρο εξαιτίας των μεγάλων του διαστάσεων του και του μικρού λόγου ατόμων ανά  $\text{m}^3$ .

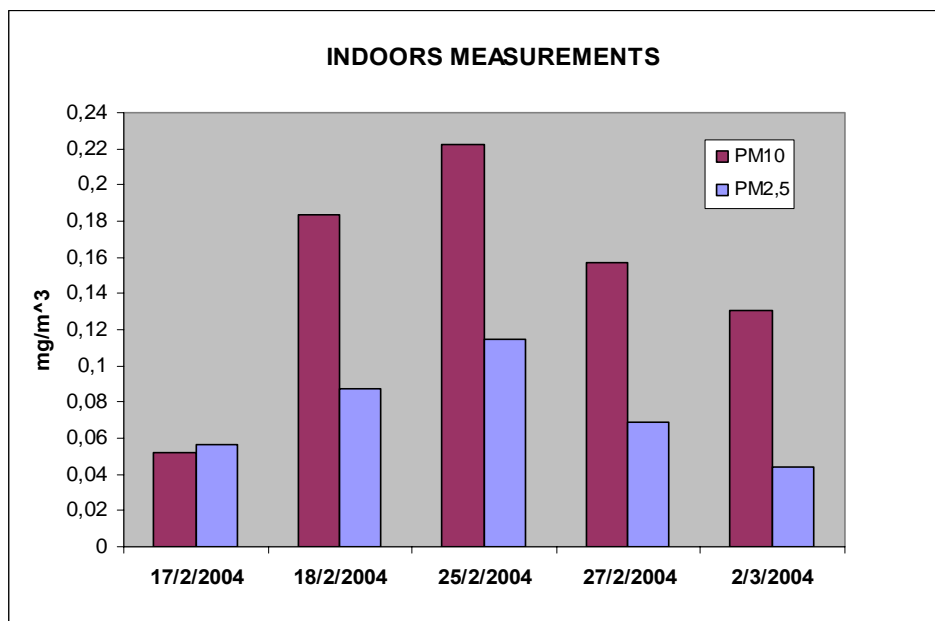




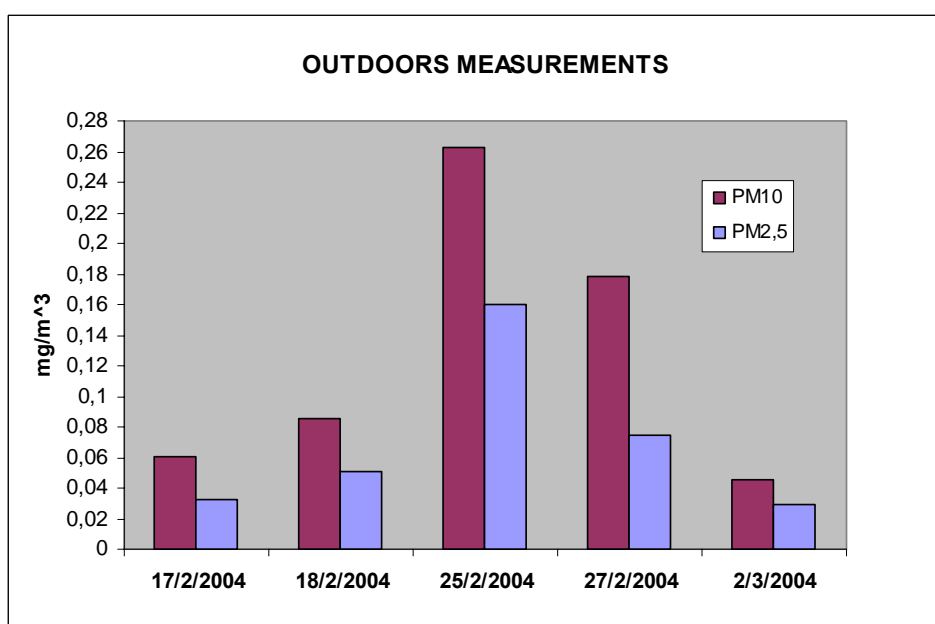
**Διάγραμμα 12.22:** Τυπικός ημερήσιος κύκλος των εσωτερικών συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub>.

Ένας τυπικός ημερήσιος κύκλος των συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> στο εσωτερικό του σχολείου, φαίνεται στο Διάγραμμα 12.22. Οι 15-λεπτες μέσες συγκεντρώσεις μετρήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις 2,5 φορές επάνω από την 24-ωρη μέση συγκέντρωση του συγκεκριμένου σχολείου, η οποία βρέθηκε 107,7 μg/m<sup>3</sup> (διπλάσια από την αντίστοιχη μέση 24-ωρη των 50,0 μg/m<sup>3</sup> της Ε.Ε.). Για ακόμη μια φορά έρχεται στην επιφάνεια ο κίνδυνος της έκθεσης των παιδιών σε υψηλές βραχυπρόθεσμες συγκεντρώσεις, του οποίου οι συνέπειες στην υγεία θα πρέπει να διερευνηθούν.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες 8-ωρες εσωτερικές συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> για όλη την περίοδο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι όλες τις ημέρες οι συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> είναι κατά πολύ υψηλότερες από αυτές των PM<sub>2.5</sub>. Οι συγκεντρώσεις τους κυμαίνονται με μέση τιμή 202,9 μg/m<sup>3</sup> που είναι η υψηλότερη μέση τιμή που καταγράφηκε στα τέσσερα σχολεία που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες και σχεδόν διπλάσια από την αντίστοιχη τιμή του δεύτερου κατά σειρά ρυπασμένου εσωτερικού χώρου σε χονδρόκοκκα σωματίδια (βιβλιοθήκη Αμαρουσίου). Ένα γεγονός που προκαλεί εντύπωση, είναι ότι υπάρχει απόλυτη συσχέτιση στη διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Τόσο οι μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub>, όσο και αυτές των PM<sub>2.5</sub>, ακολουθούν μια κανονική κατανομή με διαφορετική μέση τιμή και τυπική απόκλιση.



Διάγραμμα 12.23: Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εσωτερικών συγκεντρώσεων.

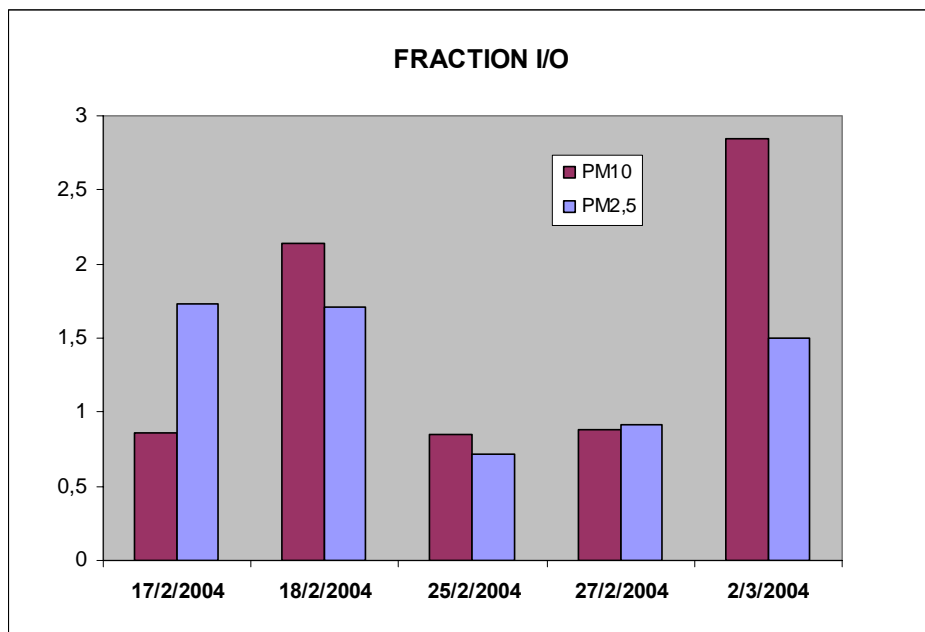


Διάγραμμα 12.24: Σύγκριση των μέσων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων.

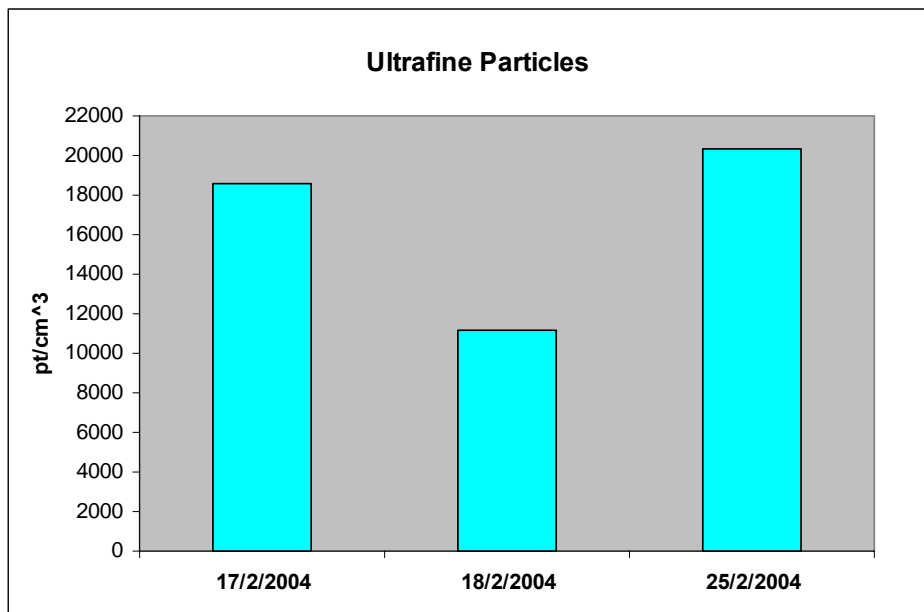
Από τη σύγκριση των μέσων ημερήσιων 8-ωρων εξωτερικών συγκεντρώσεων (Διάγραμμα 12.24), φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  είναι επίσης πολύ υψηλότερες από αυτές των  $PM_{2,5}$ , γεγονός απόλυτα φυσιολογικό λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι στο πίσω μέρος του σχολείου υπάρχει πεζόδρομος με μηδενική κυκλοφορία αυτοκινήτων και συνεπώς μικρότερη παραγωγή λεπτόκοκκων

σωματιδίων σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Οι μέσες 8-ώρες συγκεντρώσεις των PM<sub>10</sub> μετρήθηκαν πολύ πάνω από την 24-ωρη μέση τιμή συγκέντρωσης που προβλέπει η οδηγία 1999/30/EK της Ε.Ε., με μέγιστη μέση τιμή την 262,6 μg/m<sup>3</sup> (425% πάνω από το όριο). Οι τιμές των συγκεντρώσεων των PM<sub>2.5</sub> είχαν μια διακύμανση μεταξύ 32,5-159,5 μg/m<sup>3</sup> με μέση τιμή της τάξης των 69,5 μg/m<sup>3</sup>, τιμή σχετικά χαμηλή σε σχέση με τα υπόλοιπα σχολεία, λαμβάνοντας υπόψη ότι το σχολείο είναι εγκατεστημένο σε μια περιοχή που απέχει μόλις δύο οικοδομικά τετράγωνα από την εθνική οδό Αθηνών-Λαμίας.

Στο Διάγραμμα 12.25 παρατηρούμε ότι οι λόγοι I/O τόσο για τα σωματίδια PM<sub>10</sub>, όσο και για τα PM<sub>2.5</sub>, παρουσιάζουν μέσες τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Παρά το γεγονός ότι ο λόγος ατόμων ανά m<sup>3</sup> στο γυμναστήριο κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, ωστόσο η αυξημένη δραστηριότητα όταν αυτό χρησιμοποιείται από μαθητές που αθλούνται, οδηγεί σε τιμές των λόγων I/O μεγαλύτερων του 1,00. Αν και αρκετές ώρες της ημέρας η πόρτα του γυμναστήριου παραμένει ανοιχτή, η αυξημένη αυτή κινητικότητα οδηγεί, φυσιολογικά, σε μεγαλύτερες εσωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με τις αντίστοιχες εξωτερικές.



**Διάγραμμα 12.25:** Σύγκριση των λόγων I/O.



**Διάγραμμα 12.26:** Μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.

Τα επίπεδα συγκέντρωσης των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων κυμάνθηκαν από 11133-20332 pt/cm<sup>3</sup>, με μέση τιμή 16679 pt/cm<sup>3</sup>. Η μέση αυτή τιμή εκ' πρώτης όψεως δεν προκαλεί ανησυχία αν θυμηθούμε ότι οι μέσες μετρηθείσες συγκεντρώσεις κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων σε κεντρικό δρόμο της Αθήνας κυμαίνονται από 120000-180000 pt/cm<sup>3</sup> και ότι το σχολείο βρίσκεται κοντά σε εθνική οδό. Η σχετικά φυσιολογική μέση συγκέντρωση των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το γυμναστήριο ήταν μεγάλων διαστάσεων, ώστε ο λόγος ατόμων ανά m<sup>3</sup> να παραμένει πάντα σε χαμηλά επίπεδα.

Τέλος είναι σημαντικό να γίνει ένα γενικό σχόλιο και για τα τέσσερα σχολεία όσον αφορά στους λόγους των συγκεντρώσεων των PM<sub>10</sub> που μετρήθηκαν με τα Harvard PEMs προς τις συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν με το όργανο DustTrak. Οι λόγοι αυτοί (PEM/DT), κυμάνθηκαν σε ένα εύρος από 0,61-1,13 με μέση τιμή 0,86 και για τα τέσσερα σχολεία. Η μέση τιμή αυτή θεωρείται απόλυτα φυσιολογική και καθιστά τις μετρήσεις μας αξιόπιστες, από τη στιγμή που είναι γνωστό επιστημονικά ότι τα φωτόμετρα έχουν μικρότερη ακρίβεια σε σχέση με τα φίλτρα κατακράτησης σωματιδίων.

**Βιβλιογραφικές αναφορές:** [62], [66], [76], [81], [86], [90]

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

Η παρούσα ερευνητική εργασία εξετάζει τα επίπεδα συγκέντρωσης των  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  και υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων, σε τέσσερα δημοτικά σχολεία που βρίσκονται σε περιοχές με διαφορετικά επίπεδα αστικοποίησης και πυκνότητας κυκλοφορίας του νομού Αττικής. Κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών (Νοέμβριος 2003 – Μάρτιος 2004), έλαβαν χώρα ταυτόχρονες μετρήσεις σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$ , με σκοπό να εξεταστεί η σχέση μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων αυτών. Όπως αναμενόταν, οι μέσοι λόγοι εσωτερικών (indoor) προς εξωτερικές (outdoor) συγκεντρώσεις των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  κυμάνθηκαν πάνω από την τιμή 1,00 σχεδόν σε όλες τις τοποθεσίες.

Οι μέσες 15-λεπτες συγκεντρώσεις κατά μάζα των  $PM_{10}$  στο εσωτερικό των σχολείων παρουσίασαν υψηλά επίπεδα σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες 8-ωρες και μάλιστα σε αρκετές περιπτώσεις βρέθηκαν διπλάσιες από αυτές. Ίδια εικόνα παρατηρήθηκε και στις μέσες 15-λεπτες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες 24-ωρες, αφού οι πρώτες βρέθηκαν 2,0-3,5 φορές μεγαλύτερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο οι εσωτερικές, όσο και οι εξωτερικές μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  βρέθηκαν σε όλες τις τοποθεσίες πάνω από την 24-ωρη μέση τιμή ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) των πρότυπων ποιότητας ατμόσφαιρας που δίδει η Ευρωπαϊκή Ένωση.

Όσον αφορά στα σωματίδια  $PM_{2.5}$ , οι εξωτερικές μέσες 8-ωρες συγκεντρώσεις τους (κατά μάζα) βρέθηκαν πάνω από την 24-ωρη μέση τιμή ( $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) των πρότυπων ποιότητας ατμόσφαιρας που δίδει η USEPA, εκτός από μια περίπτωση. Οι αντίστοιχες εσωτερικές, κυμάνθηκαν από  $24,3-86,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  που είναι και οι υψηλότερες μετρηθείσες συγκεντρώσεις σε σχέση με παρόμοιες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια στην Ιαπωνία, Μεγάλη Βρετανία και Ολλανδία.

Οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων στο εσωτερικό των σχολείων κυμάνθηκαν σε σχετικά μέτρια επίπεδα συγκρινόμενες με τρέχουσα έρευνα του Εργαστηρίου Γενικής Χημείας σε κεντρικούς δρόμους της Αθήνας. Η υψηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης κατά αριθμό παρατηρήθηκε σε μια βιβλιοθήκη με υψηλό λόγο ατόμων ανά  $\text{m}^3$ , της οποίας μάλιστα το δάπεδο ήταν καλυμμένο με τάπητα. Στο συγκεκριμένο χώρο τα επίπεδα συγκέντρωσης των υπερλεπτόκοκκων

σωματιδίων μετρήθηκαν με μέση τιμή 3,0-7,5 φορές μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα σχολεία.

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης και λαμβάνοντας υπόψη πάντοτε τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και χώρου μετρήσεων, αξίζει να παρατηρήσουμε τα εξής:

- Τα υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης των σωματιδίων  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  που καταγράφηκαν τόσο στους εσωτερικούς, όσο και στους εξωτερικούς χώρους των σχολείων, αναδεικνύουν την ανάγκη για μια εκτενέστερη έρευνα όσον αφορά στην έκθεση των μαθητών σε αιωρούμενα σωματίδια στην περιοχή της Αθήνας. Ενδεχομένως να απαιτείται εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών (προτείνονται παρακάτω) με στόχο πάντα την προστασία των μικρών μαθητών, δεδομένου ότι τα παιδιά λαμβάνουν αυξημένη δόση σωματιδιακής ύλης στους πνεύμονές τους σε σχέση με τους ενήλικες. Ας μην ξεχνάμε ότι σε επίπεδο Ε.Ε. δεν έχουν θεσπιστεί ακόμα νομικά θεσμοθετημένες ή προτεινόμενες τιμές συγκεντρώσεων σωματιδίων για εσωτερικούς χώρους, ενώ για το εξωτερικό περιβάλλον δεν υπάρχει νομοθεσία όσον αφορά τα σωματίδια  $PM_{2.5}$  και τα υπερλεπτόκοκκα.
- Το γεγονός ότι σε όλες τις τοποθεσίες των μετρήσεων μετρήθηκαν οι μέσες 15-λεπτες συγκεντρώσεις των  $PM_{10}$  δύο φορές πάνω από τις αντίστοιχες 8-ωρες και 2,0-3,5 φορές πάνω από τις αντίστοιχες μέσες 24-ωρες, οδηγεί σε ερωτηματικά όσον αφορά τις επιπτώσεις στην υγεία των μαθητών από την έκθεση σε υψηλές βραχυπρόθεσμες συγκεντρώσεις σωματιδίων. Προκειμένου η επιστημονική κοινότητα να είναι σε θέση να χαρακτηρίζει την επικινδυνότητα τέτοιων καταστάσεων, θα πρέπει τα αποτελέσματα ερευνών παρόμοιων με τη δική μας να συνδυαστούν με επιδημιολογικές μελέτες ώστε να δημιουργηθούν πρότυπα ποιότητας για βραχυπρόθεσμες περιόδους έκθεσης. Επιβάλλεται δε να μελετηθεί η βραχυπρόθεσμη έκθεση των μαθητών σε όλα τα κλάσματα σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.
- Οι ημερήσιες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων (π.χ. Διάγραμμα 12.22) δείχνουν, όπως είναι φυσικό, μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων τις πρωινές ώρες λειτουργίας των σχολείων, πράγμα που κατά κύριο λόγο οφείλεται στην αυξημένη ένταση των δραστηριοτήτων. Ωστόσο, αύξηση των συγκεντρώσεων παρατηρείται και κατά τις βραδινές ώρες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην εντατική λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων τις βραδινές ώρες ή σε

μετεωρολογικές ιδιομορφίες κατά το ίδιο χρονικό διάστημα (π.χ. χαμηλή αναστροφή).

- Τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής, όπως το επίπεδο αστικοποίησης, η κυκλοφοριακή πυκνότητα και οι μετεωρολογικές συνθήκες, είναι πάντοτε συνυφασμένα με τα επίπεδα συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι διαφορές των εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων των σωματιδίων μεταξύ των περιοχών Αγίου Στεφάνου και Αμαρουσίου (Πίνακες 12.1 και 12.2). Για την αποφυγή εισπνοής των πλέον επικίνδυνων για την υγεία λεπτόκοκκων σωματιδίων που παράγονται από τη διεργασία καύσης των μέσων μαζικής μεταφοράς, προτείνεται (εφόσον δύναται) η εφαρμογή αυστηρών μέτρων Κ.Ο.Κ. γύρω από τα μεγάλα σχολικά συγκροτήματα, όπως για παράδειγμα η ισχύς απαγορευτικού δακτυλίου.
- Εκτός από την ένταση της κυκλοφορίας των μέσων μεταφοράς, ένας άλλος παράγοντας επιβάρυνσης του εξωτερικού περιβάλλοντος αποτελεί, όπως είδαμε στην περίπτωση του Αμαρουσίου, η αυξημένη οικοδομική δραστηριότητα. Οι εργασίες κατασκευαστικής εταιρίας στο πίσω μέρος του σχολείου, οδήγησαν σε πολύ υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων των  $PM_{10}$  εξαιτίας των αυξημένων επιπέδων σκόνης που παράγονται κατά τη διάρκεια των εργασιών. Μια πρόταση προς το αρμόδιο υπουργείο που εποπτεύει την οικοδομική δραστηριότητα, είναι να επιβληθεί στους αναδόχους των έργων η αποθήκευση των αδρανών και λοιπών οικοδομικών υλικών σε ειδικά σιλό και αποθηκευτικούς χώρους, ώστε να αποφεύγεται η περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε σωματίδια.
- Όσον αφορά στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων, ένα σημαντικό συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε είναι ότι τα μεγαλύτερα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης παρατηρούνται πάντοτε σε αίθουσες στις οποίες έχουμε αυξημένο λόγο ατόμων ανά  $m^3$ . Η έντονη δραστηριότητα των μαθητών σε συνδυασμό με το μικρό από άποψη διαστάσεων χώρο, οδηγούν (όπως είδαμε και στην περίπτωση της βιβλιοθήκης του δημοτικού σχολείου Αμαρουσίου) σε υψηλές συγκεντρώσεις κατά αριθμό των υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων. Υπενθυμίζεται ότι τα λεπτά σωματίδια συνδέονται περισσότερο με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, όπως αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα και έχουν οδηγήσει σε έξαρση του παιδικού άσθματος. Συνεπώς,



μια πρόταση για την ελαχιστοποίηση του παραπάνω προβλήματος είναι να χρησιμοποιούνται αίθουσες διδασκαλίας με χαμηλό λόγο ατόμων ανά  $m^3$ , ενώ σε ώρες διαλειμμάτων επιβάλλεται να εκκενώνονται προκειμένου να αερίζονται επαρκώς.

- Η επίδραση του καπνίσματος στην αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης των σωματιδίων είναι δεδομένη και καταγράφηκε με σαφήνεια κατά τη πραγματοποίηση μετρήσεων (2/2/3004) σε γραφείο διδακτικού προσωπικού στο δημοτικό σχολείο Αμαρουσίου.
- Η αυξημένη δραστηριότητα, τα υλικά των επίπλων και ο εξοπλισμός των εσωτερικών χώρων των σχολείων (όπως ο τάπητας του δαπέδου που αποτελεί πηγή κατακράτησης και επαναιώρησης σωματιδίων), έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των σωματιδίων. Όλα αυτά έχουν ως άμεση συνέπεια οι λόγοι I/O να κινούνται με μέσες τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Δηλαδή το εσωτερικό περιβάλλον των σχολείων καθίσταται πιο ρυπασμένο από το ήδη πολύ επιβαρημένο σε σωματίδια εξωτερικό περιβάλλον. Η λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί μόνο μέσω εγκατάστασης ‘έξυπνων’ συστημάτων εξαερισμού στα σχολεία. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων θα πρέπει να έρχονται σε συμφωνία με τα πρότυπα ποιότητας αέρα και να διαθέτουν λειτουργία ‘emergency’. Σε περιπτώσεις έξαρσης των συγκεντρώσεων, ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου με ενσωματωμένο μετρητή συγκέντρωσης (φωτόμετρο λέιζερ), θα δίνει την εντολή στους ανεμιστήρες του συστήματος να εξαερίζουν (αναρρόφηση) το χώρο έως ότου τα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης επανέλθουν σε ανεκτά για την υγεία των μαθητών επίπεδα.
- Διαφαίνεται η ανάγκη αναθεώρησης προς το αυστηρότερο των οριακών ή προτεινόμενων τιμών συγκεντρώσεων για τα σωματίδια, καθώς επίσης και η θέσπιση ορίων για όλα τα κλάσματα των αιωρούμενων σωματιδίων και ειδικότερα για τα υπερλεπτόκοκκα, τα οποία και προκαλούν τα σοβαρότερα προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία.
- Τέλος, τα υπουργεία Υγείας και Παιδείας των κρατών μελών της Ε.Ε. και η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO), σε μια προσπάθεια ελάττωσης των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους των σχολείων, επιβάλλεται να διοργανώνουν προς την κατεύθυνση αυτή ειδικές ενημερωτικές ημερίδες. Στις ημερίδες αυτές θα δίνεται η δυνατότητα σε

επαγγελματίες του χώρου της υγείας, σε δασκάλους, σε γονείς και σε εκπροσώπους της Δημόσιας Διοίκησης (Κέντρα Λήψης Αποφάσεων), να επικοινωνούν με επιστήμονες ειδικευμένους στην ατμοσφαιρική ρύπανση και να ενημερώνονται για τους πλέον αποτελεσματικούς τρόπους διαχείρισης του εσωτερικού περιβάλλοντος των σχολείων. Ένα τέτοιο πρόγραμμα ενημέρωσης, για παράδειγμα, είναι το IAQ TfS (Indoor Air Quality Tools for Schools) που έχει καθιερωθεί και διοργανώνεται στις Η.Π.Α. με απόλυτη επιτυχία και εντυπωσιακά αποτελέσματα. Πέραν αυτού όμως, θα πρέπει να δοθούν κίνητρα (όπως τακτικές επιχορηγήσεις και ειδικές βραβεύσεις) στα σχολεία προκειμένου να θέσουν σε εφαρμογή προγράμματα παρακολούθησης και ελέγχου της εσωτερικής ποιότητας αέρα. Με τον τρόπο αυτό, εκτός από το γεγονός ότι θα ενταθεί η περιβαλλοντική ευαισθησία των εμπλεκομένων, επί της ουσίας θα διασφαλίζεται υγιεινό περιβάλλον απασχόλησης για μαθητές και προσωπικό.