

Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος



Τίτλος διπλωματικής εργασίας:

«Μελέτη της ανθρώπινης έκθεσης και δόσης
σε σχολεία προσχολικής ηλικίας.»

Ονοματεπώνυμο: Μπατσαούρα Χρυσάφενια

Επιβλέπων Καθηγητής: Λαζαρίδης Μιχάλης

Μέλη επιτροπής: Κολοκοτσά Διονυσία και Κοπανάκης Ηλίας

Χανιά, Ιούλιος 2021

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτη”.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Μιχάλη Λαζαρίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη βοήθειά του.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στο Δρ. Ηλία Κοπανάκη για τη στήριξή του και τις κατευθύνσεις που μου έδινε καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελευθερία Χαλβατζάκη για την πολύτιμη βοήθειά της και τις συμβουλές της.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την Καθηγήτρια κα. Διονυσία Κολοκοτσά που δέχθηκε να συμμετάσχει στην αξιολόγηση της εργασίας μου.

Επίσης, θερμές ευχαριστίες στην υπεύθυνη του νηπιαγωγείου κα. Πηνελόπη Κοπανάκη για την άψογη συνεργασία μας.

Ένα ακόμη ευχαριστώ σε όλο το Διδακτικό Προσωπικό της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης που με υπομονή και επιμονή μας μεταλαμπάδευσε τις γνώσεις του και μας έμαθε να σκεφτόμαστε ολοκληρωμένα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε αυτό το μοναδικό ταξίδι των φοιτητικών χρόνων. Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιάννη και Αγγελίνα για την ηθική, ψυχολογική και οικονομική στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Στις αγαπημένες μου γιαγιάδες,

Όλγα και Χρυσάφω

***“Η Επιστήμη είναι ο πιο ειλικρινής φίλος του ανθρώπου
και ο πιο ευγενικός του βοηθός”***

Harvey Mackay

Περίληψη

Η μελέτη της παρουσίας των αιωρούμενων σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους είναι άκρως σημαντική, καθώς η εκτίμηση των επιπτώσεων τους στον άνθρωπο είναι εξαιρετικά πολύπλοκο ζήτημα για την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εκτιμηθεί εάν η αίθουσα του νηπιαγωγείου επηρεάζεται, ως προς τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν σε αυτήν, από τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια των μαθημάτων καθώς και να προσδιοριστεί η ανθρώπινη δόση.

Υπολογίσθηκε ότι η μέση συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} στο νηπιαγωγείο βρέθηκε ίση με $34,9 \pm 24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επίσης υπολογίσθηκε για κάθε περίοδο η μέση τιμή. Ειδικότερα, για την πρώτη περίοδο (00:00-07:30) η μέση τιμή είναι $24,3 \pm 12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τη δεύτερη περίοδο (07:30-16:30) και τρίτη περίοδο (16:30-00:00) η μέση τιμή είναι κατ' αντιστοιχία $47,4 \pm 30,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $30,8 \pm 15,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επομένως, προέκυψε το συμπέρασμα ότι τη δεύτερη περίοδο οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες γεγονός που εξηγείται αφού τις ώρες εκείνες το σχολείο είναι σε λειτουργία. Τέλος, βρέθηκε ότι η μέση συγκέντρωση έξω από την αίθουσα ήταν $24,7 \pm 6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Έπειτα, μέσω του μοντέλου ExDoM2 μετρήθηκε η εναποτιθέμενη δόση για παιδιά ηλικίας 5 ετών και για ενήλικες γυναίκες. Στα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι για την περίπτωση ανάπαυσης, η τιμή της δόσης είναι σχεδόν ίδια και για τις δυο ηλικίες. Για την περίπτωση που η δραστηριότητα είναι η ίδια αλλά εκτός από ανάπαυση υπάρχει και ήπια δραστηριότητα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές της δόσης αφού για τα παιδιά η τιμή οκτάωρης δόσης είναι $53,9 \mu\text{g}$ ενώ για την ενήλικη γυναίκα $79,9 \mu\text{g}$. Τέλος, με το μοντέλο HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) βρέθηκαν οι πορείες των αέριων μαζών για τις ημέρες που οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων ήταν ασυνήθιστα υψηλές.

Abstract

Studying the presence of particulate matters (PM) in indoor spaces is of high value, since evaluating their effect on humans is a highly complex issue investigated by the international research community. The aim of this thesis is twofold; firstly, to investigate if the concentration of PM inside a kindergarten class is affected by the nature of the activities that take place during lessons, and secondly to determine the personal dose.

The average concentration of PM_{10} particles inside the kindergarten overall was found equal to $34,9 \pm 24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Average concentration was also determined at every school period. Specifically, for the duration of the first period (00:00-07:30) the average value was $24,3 \pm 12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Over the second period (07:30-16:30) and the third period (16:30-00:00) the average values were $47,4 \pm 30,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $30,8 \pm 15,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. The conclusion that can be drawn is that throughout the second period PM concentration is elevated compared to the rest of the day, which can be attributed to the fact that this period corresponds to school hours. Finally, the average concentration outside the kindergarten class was found equal to $24,7 \pm 6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Herein, the personal deposited dose of particles in the human respiratory tract was determined using an exposure dose model, the Exposure Dose Model 2 (ExDoM2), across two categories of subjects; students and teachers. The first category comprises 5-year old children and the latter adult women. The conducted experiments demonstrate that in the case of inactivity, personal dose is effectively the same across the two categories. Comparing personal dose for the same level of activity, that involves both inactivity and mild activity, the results significantly diverged, averaging at $53,9 \mu\text{g}$ for children and $79,9 \mu\text{g}$ for adult women.

Finally, the (HYSPLIT) model was used to calculate air parcel trajectories over the days when a notable elevation in PM concentration was recorded.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Εισαγωγή | 9 |
| Κεφάλαιο Πρώτο: Θεωρητικό Υπόβαθρο | 13 |
| 1.1. Διάμετρος σωματιδίων | 13 |
| 1.2. Ταξινόμηση σωματιδίων | 13 |
| 1.2.1. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει του μεγέθους | 13 |
| 1.2.2. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει των παρατηρούμενων κατανομών | 15 |
| 1.2.3. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει του μηχανισμού σχηματισμού τους | 17 |
| 1.2.4. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει των πηγών εκπομπής τους..... | 20 |
| 1.2.5. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει της χωρικής τους προέλευσης | 22 |
| 1.2.6. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει της διεισδυτικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό | 22 |
| 1.3. Αεροζόλ εσωτερικών χώρων..... | 23 |
| 1.4. Βιοαεροζόλ..... | 24 |
| 1.5. Μέτρηση Αεροζόλ | 25 |
| 1.5.1. Οπτικές και σταθμικές μέθοδοι | 25 |
| 1.5.2. Μετρήσεις με σταθμικό προσδιορισμό ή σε πραγματικό χρόνο | 25 |
| 1.6. Έκθεση και δόση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια | 27 |
| 1.7. Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα (ΑΑΣ)..... | 28 |
| 1.7.1. Περιγραφή Αναπνευστικού Συστήματος | 28 |
| 1.7.2. Περιοχές Αναπνευστικού Συστήματος..... | 29 |
| 1.7.3. Εναπόθεση σωματιδίων στο Αναπνευστικό Σύστημα | 29 |
| 1.7.4. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το Αναπνευστικό Σύστημα..... | 30 |
| 1.7.5. Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην δημόσια υγεία..... | 31 |
| 1.8. Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στον περιβάλλον..... | 31 |
| 1.9. Νομοθεσία | 32 |
| Κεφάλαιο Δεύτερο: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας | 33 |
| 2.1. Περιοχή μελέτης | 33 |
| 2.2. Οργανολογία | 35 |
| 2.3. Περιγραφή του μοντέλου ExDoM2..... | 37 |
| 2.4. Εκτίμηση οπισθοπορειών αέριων μαζών (Backward Trajectory Analysis) | 40 |
| Κεφάλαιο Τρίτο: Αποτελέσματα | 41 |
| 3.1. Αποτελέσματα μετρήσεων δειγματολήπτη DustTrak..... | 41 |
| 3.2. Αποτελέσματα του μοντέλου ExDoM2 | 52 |
| 3.3. Αποτελέσματα μοντέλου HYSPLIT | 56 |
| Συμπεράσματα | 60 |
| Γενικά συμπεράσματα – Προτάσεις | 61 |
| Βιβλιογραφία | 62 |

Περιεχόμενα Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1. Αιωρούμενα σωματίδια όπως φαίνονται από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο | 11 |
| Εικόνα 2. Σύγκριση διαμέτρου αιωρούμενων σωματιδίων με μια ανθρώπινη τρίχα. | 15 |
| Εικόνα 3. Τυπικές κατανομές αριθμού και όγκου αεροζόλ σαν συνάρτηση της διαμέτρου τους. Ο συνολικός αριθμός και όγκος είναι το ολοκλήρωμα (επιφάνεια κάτω από τη γραμμή) αυτών των συναρτήσεων. | 15 |
| Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής επιφάνειας σωματιδίων ατμοσφαιρικού aerosol. Φαίνονται οι πηγές, οι βασικές διεργασίες και οι μηχανισμοί σχηματισμού και απομάκρυνσης σωματιδίων. | 17 |
| Εικόνα 5. Σχηματισμός πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων..... | 18 |
| Εικόνα 6. Πηγές ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους ενός σπιτιού..... | 23 |
| Εικόνα 7. Προσκρουστήρας Andersen και αρχή λειτουργίας..... | 26 |
| Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας οργάνου μέτρησης συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων. . | 27 |
| Εικόνα 9. Απεικόνιση αναπνευστικού συστήματος..... | 29 |
| Εικόνα 10. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Χανίων. Με κόκκινη πινέζα είναι η τοποθεσία του νηπιαγωγείου..... | 33 |
| Εικόνα 11. Εξωτερική όψη νηπιαγωγείου. | 34 |
| Εικόνα 12. Εσωτερικός χώρος νηπιαγωγείου. | 34 |
| Εικόνα 13. Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak. | 35 |
| Εικόνα 14. Αρχή λειτουργίας του DustTrak | 36 |
| Εικόνα 15. Διάγραμμα ροής του μοντέλου ExDoM2 (Chalvatzaki, Phd 2016). | 37 |
| Εικόνα 16. Περιβάλλον εργασίας ExDoM2. | 38 |
| Εικόνα 17. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ExDoM2. | 39 |
| Εικόνα 18. Οπισθοπορεία αέριας μάζας για την 21η Οκτωβρίου..... | 57 |
| Εικόνα 19. Οπισθοπορεία αέριας μάζας για την 23η Οκτωβρίου..... | 58 |

Περιεχόμενα Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1. Κάποια σοβαρά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης με σημαντικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία (Γεντεκάκης Ι., 2010, αναπροσαρμοσμένο)..... | 10 |
| Πίνακας 2. Συγκέντρωση και χημική σύσταση ατμοσφαιρικών σωματιδίων PM ₁₀ | 11 |
| Πίνακας 3. Διαχωρισμός σωματιδίων βάσει του μεγέθους τους..... | 14 |
| Πίνακας 4: Πηγές και εκπομπές ατμοσφαιρικών αεροζόλ σε παγκόσμιο επίπεδο. (Αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999) | 19 |
| Πίνακας 5. Νομοθετικά όρια για PM ₁₀ και PM _{2.5} | 32 |
| Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά DustTrak. | 35 |
| Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων από το δειγματολήπτη DustTrak..... | 42 |
| Πίνακας 8. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση των PM ₁₀ (21-22, 23-24, 24-25/10). | 44 |
| Πίνακας 9. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM ₁₀ (28-29/10, 5-6/11, 13-14/11, 14-15/11)..... | 45 |
| Πίνακας 10. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM ₁₀ (19-20/10, 26-27/10, 23-24/11)..... | 46 |
| Πίνακας 11. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM ₁₀ (20-21/10, 27-28/10, 24-25/11)..... | 47 |

Περιεχόμενα Γραφημάτων

| | |
|--|----|
| Γράφημα 1. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (21-22,23-24,24-25/10)..... | 43 |
| Γράφημα 2. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (28-29/10, 5-6, 13-14, 14-15/11) | 45 |
| Γράφημα 3. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (19-20, 26-27/10, 23-24/11) | 46 |
| Γράφημα 4. Διάγραμμα συγκεντρώσεων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (20-21,27-28/10, 24-25/11)..... | 47 |
| Γράφημα 5. Συγκριτικό διάγραμμα ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} καθημερινών με τα Σαββατοκύριακα. | 48 |
| Γράφημα 6. Συνολικό διάγραμμα διακύμανσης της συγκέντρωσης PM_{10} για όλες τις ημέρες μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου. | 49 |
| Γράφημα 7. Διάγραμμα συγκέντρωσης εξωτερικού χώρου συναρτήσει του χρόνου. | 49 |
| Γράφημα 8. Σύγκριση εσωτερικών και εξωτερικών μετρήσεων. | 50 |
| Γράφημα 9. 1 ^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2). | 52 |
| Γράφημα 10. Ρυθμός δόσης σε παιδί ηλικίας 5 ετών (σενάριο 1) | 53 |
| Γράφημα 11. Ρυθμός δόσης για ενήλικη γυναίκα (σενάριο 1) | 53 |
| Γράφημα 12. 2 ^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2)..... | 54 |
| Γράφημα 13. 3 ^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2). | 55 |

Εισαγωγή

Το ηλιακό σύστημα δημιουργήθηκε πριν περίπου 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια. Η αρχική ατμόσφαιρα της Γης ήταν πολύ διαφορετική από τη σημερινή. Η χημική της σύσταση ήταν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), άζωτο (N_2) και υδρατμοί (H_2O) με ίχνη υδρογόνου (H_2). Καθώς η θερμοκρασία του πλανήτη μειωνόταν, το μεγαλύτερο μέρος των υδρατμών συμπυκνώθηκε σχηματίζοντας έτσι τους ωκεανούς. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), είτε αντέδρασε δημιουργώντας πετρώματα είτε διαλύθηκε στους ωκεανούς. Αντίθετα, το άζωτο επειδή είναι δυσδιάλυτο στο νερό και δύσκολα συμπυκνώνεται, συσσωρεύθηκε στην ατμόσφαιρα. Τέλος, το οξυγόνο (O_2) αυξήθηκε πολύ εξαιτίας της φωτοσυνθετικής διαδικασίας και της φωτοδιάσπασης των υδρατμών (Λαζαρίδης Μ., 2016). Σήμερα η ατμόσφαιρα αποτελείται κυρίως από 78% άζωτο (N_2), 21% οξυγόνο (O_2) και 1% αργό (Ar). Το αμέσως επόμενο συστατικό είναι οι υδρατμοί (H_2O) που βρίσκονται συνήθως στο κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας και η συγκέντρωσή τους μεταβάλλεται πολύ χωρικά αλλά και χρονικά. Τέλος, σε ποσοστό λιγότερο από 1% βρίσκονται οι χημικές ενώσεις οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο ατμοσφαιρικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας κέντρισε το ενδιαφέρον επιστημόνων και φιλοσόφων από την αρχαιότητα. Ο Αριστοτέλης ήταν ο πρώτος που διαπίστωσε ότι η ατμόσφαιρα αποτελείται από ένα μίγμα αερίων και αυτό γιατί παρατηρούσε τα σύννεφα και τη βροχή μη μπορώντας να καταλάβει την προέλευσή τους. Μετά από πολλούς αιώνες, ο γιατρός John Mayow, παρατήρησε πως ο αέρας αποτελείται από δύο συστατικά: το πρώτο επιτρέπει στη φωτιά να καίει συνεχώς ενώ το άλλο είχε αντίθετες ιδιότητες, μέχρι να αποδειχθεί ότι επρόκειτο για το οξυγόνο (O_2). Έπειτα, ο γιατρός και χημικός Joseph Black ανακάλυψε το δεσμευμένο αέρα, ο οποίος αργότερα μετονομάστηκε από τον Lavoisier σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Αργότερα, ο χημικός Henry Cavendish ανακάλυψε τον άκαυστο αέρα δηλαδή το γνωστό σε όλους υδρογόνο (H_2). Τέλος, το άζωτο (N_2) ανακαλύφθηκε από τον Rutherford. Τα χρόνια μετά τον 19^ο αιώνα, οι επιστήμονες στράφηκαν στα δευτερεύοντα συστατικά της ατμόσφαιρας.

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί που θα μπορούσαν να περιγράψουν το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι «η προσθήκη κάθε υλικού, μοριακής ή σωματιδιακής φύσης, στην ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα τη βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη δηλητηρίαση της ζωής πάνω στον πλανήτη» (Γεντεκάκης Ι., 2010). Το υλικό αυτό θα μπορούσε να είναι είτε ραδιενεργό αέριο, είτε τοξικό είτε γενικότερα οτιδήποτε μπορεί να προξενήσει αλλαγή της σύστασης του αέρα.

Δυστυχώς, η ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα δεν είναι πρόβλημα μόνο των τελευταίων ετών αλλά παρουσιάστηκε κυρίως με την αύξηση της πυκνότητας των κατοίκων μιας πόλης αλλά και με κάθε βήμα της τεχνολογίας. Στην αρχαία Ελλάδα συχνά υπήρχαν προβλήματα δυσσομίας στις πολυπληθείς περιοχές όπου και καθήκον των ηγετών ήταν η απομάκρυνση των πηγών ρύπανσης. Επίσης, στο Λονδίνο από το 13^ο αιώνα έως και τον 17^ο, η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλούνταν από την καύση κάρβουνου και ξύλων για παραγωγή ενέργειας, ήταν σημαντικό πρόβλημα. Μετά τον 17^ο αιώνα και την ανακάλυψη της ατμομηχανής η κατάσταση επιδεινώθηκε αφού για να λειτουργήσει η μηχανή έκαιγε κάρβουνο. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η αύξηση των αυτοκινήτων και των βιομηχανικών δραστηριοτήτων δημιούργησαν μεγάλα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Πολλά περιστατικά ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν καταγραφεί, τα περισσότερα από τα οποία είχαν πολλά θύματα αλλά και περιβαλλοντικές συνέπειες. Το 1952 στις 5 Δεκεμβρίου το Λονδίνο πλήττεται από επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης που είχε ως συνέπεια το θάνατο 4000 ανθρώπων. Μια θερμοκρασιακή αναστροφή είχε σαν αποτέλεσμα να παγιδεύσει κρύο αέρα κάτω από μια θερμή μάζα αέρα, και σε συνδυασμό με την αυξημένη κατανάλωση κάρβουνου, δημιούργησε ένα δηλητηριώδες νέφος σε συνθήκες απόλυτης άπνοιας (Wilkins, 1954). Η ορατότητα ήταν τόσο

περιορισμένη που σταμάτησαν όλες οι συγκοινωνίες εκτός του μετρό. Το 1976 στις 10 Ιουλίου, σε ένα εργοστάσιο παραγωγής χημικών κοντά στο Μιλάνο έγινε βιομηχανικό ατύχημα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την υψηλότερη γνωστή έκθεση σε 2, 3, 7, 8 – τετραχλωροδιβενζο-π-διοξίνη (TCDD), η οποία είναι από τις τοξικότερες ενώσεις. Ως αποτέλεσμα αυτού του ατυχήματος ήταν ο θάνατος πολλών ζώων αλλά και η πρόκληση φλεγμονών του δέρματος σε πολλά παιδιά και ενήλικες (Eskenezaki et al., 2018). Υπάρχουν πολλά ακόμα τέτοια συμβάντα, πολλά εκ των οποίων έχουν σημειωθεί στον πίνακα που ακολουθεί.

| Χρονολογία | Τοποθεσία | Αριθμός θανάτων |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| Δεκέμβριος 1930 | Βέλγιο (Muese Valley) | 63 |
| Οκτώβριος 1948 | Donora, Pa | 20 |
| 26-30 Νοεμβρίου 1948 | Λονδίνο | 700-800 |
| 21 Νοεμβρίου 1950 | Μεξικό (Poza Rica) | 22 |
| 5-9 Δεκεμβρίου 1952 | Λονδίνο | 4000 |
| Νοέμβριος 1953 | Νέα Υόρκη (Πολιτεία) | Ελλιπή στοιχεία |
| 3-6 Ιανουαρίου 1956 | Λονδίνο | 1000 |
| 5-10 Δεκεμβρίου 1957 | Λονδίνο | 700-800 |
| 26-31 Ιανουαρίου 1959 | Λονδίνο | 200-250 |
| 5-10 Δεκεμβρίου 1962 | Λονδίνο | 700 |
| 7-22 Ιανουαρίου 1963 | Λονδίνο | 700 |
| 9 Ιαν.-12 Φεβρ. 1963 | Νέα Υόρκη (Πολιτεία) | 200-400 |
| 23-25 Νοεμβρίου 1966 | Νέα Υόρκη (Πολιτεία) | Ελλιπή στοιχεία |
| 24-30 Νοεμβρίου 1966 | Νέα Υόρκη (Πόλη) | 168 |

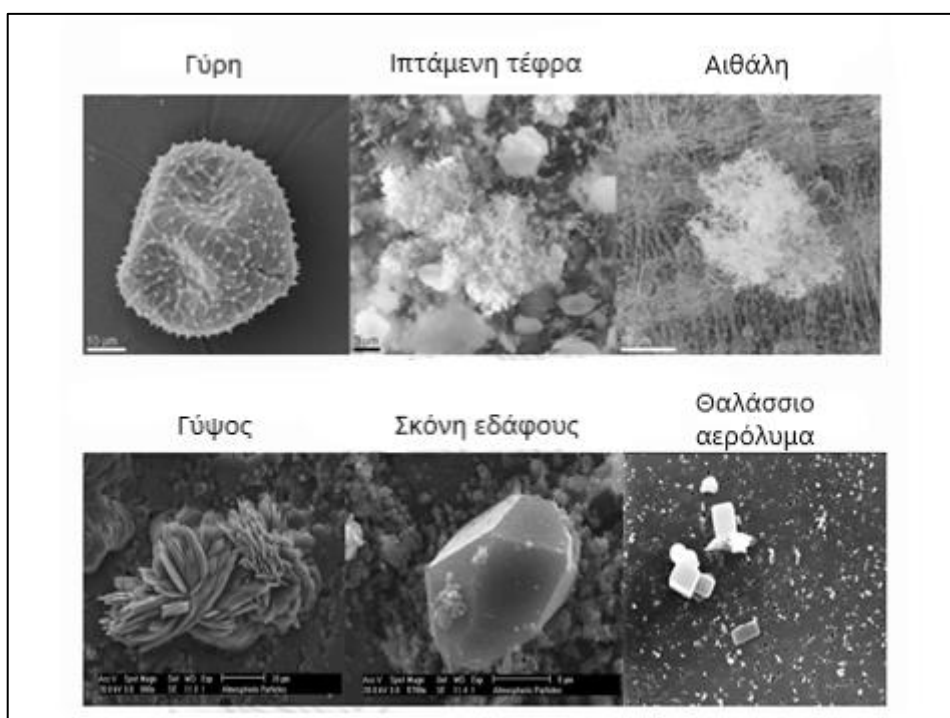
Πίνακας 1. Κάποια σοβαρά επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης με σημαντικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία (Γεντεκάκης Ι., 2010, αναπροσαρμοσμένο).

Μια από τις βασικότερες λειτουργίες των ζωντανών οργανισμών είναι η αναπνοή κατά την οποία γίνεται πρόσληψη οξυγόνου και αποβολή διοξειδίου του άνθρακα. Με μια βαθιά αναπνοή περίπου ένα εκατομμύριο σωματίδια εισέρχονται στον οργανισμό μας, γεγονός που καθιστά τη μελέτη των σωματιδίων ιδιαίτερα σημαντική. Τα πρώτα ερωτήματα που προκύπτουν είναι τι είναι αυτά τα σωματίδια, από που προέρχονται και πόσο βλαβερά μπορούν να γίνουν για τη δημόσια υγεία.

Αιωρούμενο σωματίδιο (Particulate Matter, PM) χαρακτηρίζεται κάθε σώμα, υγρό ή στερεό, που βρίσκεται διασπαρμένο στην ατμόσφαιρα και έχει διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 1nm(0,001μm) και 100μm. Αεροζόλ (αερόλυμα) είναι ένα σταθερό αιώρημα στερεών ή υγρών σωματιδίων συμπεριλαμβανομένου και του μέσου (συνήθως αέρας) στο οποίο αιωρούνται. Συνήθως οι δυο προαναφερθείσες έννοιες θεωρούνται ταυτόσημες στη βιβλιογραφία.

Οι πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι πάρα πολλές, αν σκεφτεί κανείς πως κάθε άνθρωπος μπορεί να αποτελέσει μια εν δυνάμει πηγή ρύπανσης μέσω των καθημερινών του δραστηριοτήτων. Αν και ο διαχωρισμός είναι αρκετά δύσκολος, οι πηγές αυτές μπορεί να χαρακτηριστούν ως φυσικές είτε ως ανθρωπογενείς. Φυσικές θεωρούνται οι πηγές εκείνες που δεν προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα (Γεντεκάκης Ι., 2010). Σε αυτές συγκαταλέγονται η έκρηξη ηφαιστειών, οι φωτιές σε δάση, τα θαλάσσια υδρολύματα, η επαναιώρηση σωματιδίων από το έδαφος και οι δυνατοί άνεμοι που παρασύρουν μεγάλες ποσότητες σωματιδιακής ύλης. Ανθρωπογενείς νοούνται οι πηγές εκείνες που συμβάλει αποκλειστικά ο άνθρωπος για τη δημιουργία τους. Τέτοιες είναι οι εκπομπές από οχήματα και οι βιομηχανικές εκπομπές αλλά και οι οικιακές πηγές.

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας πηγών, έχουν ένα σημαντικό εύρος διαφορετικών μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την ομαδοποίηση τους όπως η πηγή και ο μηχανισμός προέλευσης, η διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό αλλά και το μέγεθος τους που είναι και το πιο βασικό κριτήριο. Τα αιωρούμενα σωματίδια συναντώνται σε στερεή μορφή (σκόνη, καπνός, ιπτάμενη τέφρα, αιθάλη) αλλά και σε υγρή μορφή (σπρέι, ομίχλη, αχλύς) (Natural Resources Defense Council, 1996). Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των αερολυμάτων βρίσκεται στην κατώτερη τροπόσφαιρα γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται κοντά στο έδαφος.



Εικόνα 1. Αιωρούμενα σωματίδια όπως φαίνονται από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

| Περιοχή | Συνολική Μάζα (μg/m ³) | Χημική Σύσταση (μg/m ³) | | | | |
|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------------------|-------------------|
| | | SO_4^{2-} | NO_3^- | NH_4^+ | Στοιχειακός Άνθρακας | Οργανικές Ενώσεις |
| Απομακρυσμένη * | 4,8 | 1,1 | 0,1 | 0,3 | 0,01 | 1,0 |
| Αγροτική * | 15 | 5,6 | 0,6 | 1,7 | 0,8 | 7,2 |
| Αστική * | 32 | 9,0 | 1,9 | 2,6 | 2,9 | 13,9 |
| Λος Άντζελες ** | 90 | 5,4 | 18 | 5,4 | 2,7 | 22,7 |

Πίνακας 2. Συγκέντρωση και χημική σύσταση ατμοσφαιρικών σωματιδίων PM₁₀.

*Μέσος όρος μετρήσεων σε 10 περιοχές σε διαφορετικά μέρη του κόσμου

**Μετρήσεις στο Rubidoux, μια περιοχή με ιδιαίτερως έντονη ρύπανση

Τα αιωρούμενα σωματίδια, όπως έχει διαπιστωθεί, έχουν επιπτώσεις τόσο στην υγεία του ανθρώπου όσο και στο περιβάλλον. Οι επιπτώσεις στην υγεία αφορούν κυρίως στο αναπνευστικό σύστημα των οργανισμών και την ικανότητα της αναπνευστικής διείσδυσης σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων και την απόθεσή τους στα διάφορα μέρη του συστήματος. Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, γίνονται αντιληπτές μέσω της διαμόρφωσης του κλίματος, καθώς και από τις επιδράσεις τους στα διάφορα είδη οικοσυστήματα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ανάλογα με το είδος της ρύπανσης, οι επιπτώσεις ποικίλλουν. Παραπάνω, έγινε αναφορά σε “επεισόδια” ατμοσφαιρικής ρύπανσης που συνέβησαν στο παγκόσμιο γίγνεσθαι, τα οποία είχαν ως συνέπεια το θάνατο πολλών ανθρώπων. Τα επεισόδια αυτά έχουν άμεσα αντιληπτές συγκεντρώσεις ρύπων και συνέπειες (Γεντεκάκης Ι., 2010) . Υπάρχουν όμως και οι περιπτώσεις που η ρύπανση εκφράζεται μέσω χαμηλών συγκεντρώσεων με μεγάλη όμως διάρκεια έκθεσης που μπορεί να αποδειχθούν πιο καταστροφικές από τα “επεισόδια”. Σύμφωνα με μελέτη που βασίστηκε σε δεδομένα 2,5 ετών στην Ν. Υόρκη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «μικρή έως μέτρια αύξηση των συγκεντρώσεων ενός μήνα, μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη θνησιμότητα από αναπνευστικά και καρδιακά νοσήματα»(Hodgson, 1970).

Επιπλέον, βασική αρχή για την εκτίμηση των επιπτώσεων των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία είναι η δόση των σωματιδίων-ουσίας που φθάνει στο σώμα μας. Η δόση ουσιαστικά είναι η ποσότητα του ρύπου που εναποτίθεται σε διάφορα μέρη του ανθρώπινου σώματος (π.χ. αναπνευστικό σύστημα) σε ορισμένο χρονικό διάστημα (Λαζαρίδης Μ., 2016). Η δόση είναι διαφορετική από την έκθεση αφού η δεύτερη αναφέρεται στην συγκέντρωση του ρύπου που έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο σε ορισμένο χρόνο. Συμπερασματικά, η δόση είναι απαραίτητο δεδομένο για την εκτίμηση των επιπτώσεων αφού αναφέρεται στην ποσότητα που όντως εναποτέθηκε στον οργανισμό.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα υπαρκτό πρόβλημα το οποίο θα εντατικοποιείται όσο δεν υπάρχει η κατάλληλη ενημέρωση και δράση για τον περιορισμό της.

Κεφάλαιο Πρώτο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1. Διάμετρος σωματιδίων

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι τα σωματίδια στην πλειονότητα τους δεν είναι σφαιρικά, όμως κρίνεται αναγκαίο να τα κατατάσσουμε ανάλογα με το μέγεθος τους μιας και είναι από τους καθοριστικούς παράγοντες για το πόσο βλαβερά ή όχι είναι για τον ανθρώπινο οργανισμό.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η συμπεριφορά μη σφαιρικών σωματιδίων έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί ισοδύναμης διαμέτρου. Ισοδύναμη διάμετρος είναι η διάμετρος σφαιρικού σωματιδίου που έχει την ίδια τιμή μιας συγκεκριμένης ιδιότητας με αυτή που έχει το σωματίδιο ενδιαφέροντος (Hinds, 1999).

Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος είναι αυτός της αεροδυναμικής διαμέτρου (D_p) που ουσιαστικά είναι η διάμετρος σφαιρικού σωματιδίου με μοναδιαία πυκνότητα ($1\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) που έχει την ίδια μέγιστη ταχύτητα πτώσης στον αέρα με το υπό εξέταση σωματίδιο. Αποτελεί βασική παράμετρο των σωματιδιακών ιδιοτήτων ενώ σε πολλές εφαρμογές δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε κάποια άλλη παράμετρο για το σωματίδιο πέραν της αεροδυναμικής διαμέτρου (Hinds, 1999).

Η αεροδυναμική διάμετρος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D = D_g \cdot k \cdot (\rho_p/\rho_0)^{1/2}, \text{ όπου: } \quad (1)$$

- D_g : η γεωμετρική διάμετρος σφαίρας
- k : συντελεστής σχήματος που στην περίπτωση σφαίρας λαμβάνει την τιμή 1 (Chen και Fryrear, 2001)
- ρ_p : η πυκνότητα του υπό εξέταση σωματιδίου
- ρ_0 : η πυκνότητα αναφοράς

Ένας άλλος τύπος διαμέτρου είναι η διάμετρος Stokes D_s που ορίζεται ως η διάμετρος μιας σφαίρας που έχει την ίδια πυκνότητα και ταχύτητα καθίζησης με το υπό εξέταση σωματίδιο. Είναι σημαντικό να τονισθεί πως στην παρούσα εργασία ο όρος «διάμετρος σωματιδίου» αφορά την αεροδυναμική.

1.2. Ταξινόμηση σωματιδίων

Για να είναι πιο εύκολη η μελέτη των σωματιδίων, είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση τους. Τα κριτήρια αυτά αφορούν το μέγεθος, τις παρατηρούμενες κατανομές μεγέθους στην ατμόσφαιρα, το μηχανισμό σχηματισμού, την πηγή προέλευσης, τη χωρική προέλευση αλλά και τη διεισδυτικότητα των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό.

1.2.1. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει του μεγέθους

Ο πιο σημαντικός διαχωρισμός των αεροζόλ είναι αυτός που γίνεται με βάση το μέγεθος τους αφού καθορίζει πολλές από τις ιδιότητες αλλά και το χρόνο ζωής τους. Κριτήριο αυτού του διαχωρισμού είναι η αεροδυναμική διάμετρος. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από $2,5\mu\text{m}$ ονομάζονται λεπτόκοκκα ή λεπτά (fine particles) ενώ αυτά με μεγαλύτερη από $2,5\mu\text{m}$ είναι τα χονδρόκοκκα ή χονδρά (coarse particles).

Τα χονδρά αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της αιωρούμενης σωματιδιακής μάζας (Morawska, 2000). Λόγω του μεγάλου βάρους τους παραμένουν αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα από ορισμένα λεπτά έως και μερικές ημέρες, με αποτέλεσμα να μπορούν να μεταφερθούν λιγότερο από δεκάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή προέλευσής τους.

Τα λεπτά από την άλλη ανήκουν στο 80% περίπου του πλήθους των σωματιδίων. Λόγω του μικρού σχετικά βάρους τους μπορούν να αιωρούνται μέχρι και κάποιες εβδομάδες στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να έχουν τη δυνατότητα να απομακρυνθούν χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από το σημείο εκπομπής τους. Τα λεπτά χωρίζονται στην περιοχή συσσώρευσης για σωματίδια με διάμετρο από 0,1μm έως 2μm και την περιοχή των υπέρλεπτων για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,1μm. Η δεύτερη χωρίζεται στους πυρήνες Aitken που αντιπροσωπεύει σωματίδια με διάμετρο από 0,02μm έως 0,1μm και στα σωματίδια της περιοχής πυρηνοποίησης με διάμετρο μικρότερη από 0,02μm (20nm).

| Πρωτεύων Διαχωρισμός | Κατηγορίες | Υποκατηγορίες | Αεροδυναμική Διάμετρος D_p (μm) |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Λεπτόκοκκα Σωματίδια | Περιοχή συσσώρευσης | | 0,1μm – 2μm |
| | Περιοχή υπέρλεπτων | Πυρήνες Aitken | 0,02 μm – 0,1 μm |
| | | Περιοχή πυρηνοποίησης | < 0,02 μm |
| Χονδρόκοκκα Σωματίδια | | | > 2,5 μm |

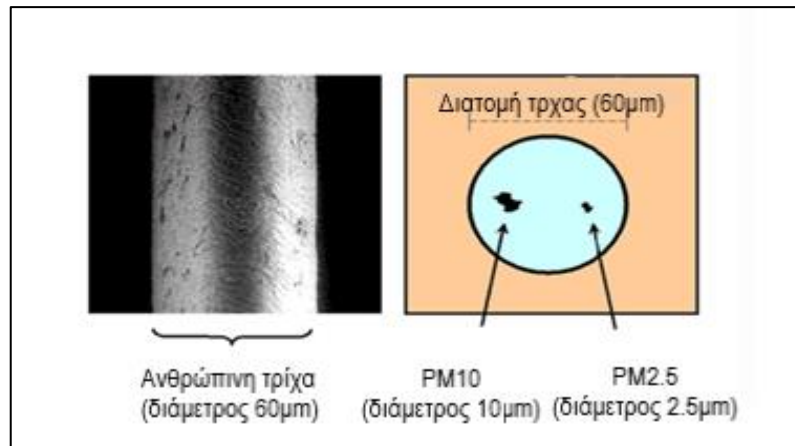
Πίνακας 3. Διαχωρισμός σωματιδίων βάσει του μεγέθους τους.

Η ορολογία που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό των συγκεντρώσεων σωματιδιακής μάζας σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, είναι τα συνολικά αιωρούμενα σωματίδια και τα κλάσματα $PM_{2.5}$ και PM_{10} .

Συνολικά αιωρούμενα σωματίδια (TSP, Total Suspended Particulates) είναι η συγκέντρωση μάζας ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) όλων των σωματιδίων. Το κλάσμα $PM_{2.5}$ (λεπτά σωματίδια) αποτελεί τη συγκέντρωση μάζας σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5μm και συνήθως ταυτίζονται με την κατηγορία των αναπνεύσιμων σωματιδίων. Αναφορικά με το κλάσμα PM_{10} , αποτελεί αντίστοιχη συγκέντρωση για σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10μm και ανήκουν στα εισπνεύσιμα.

Ωστόσο ο ορισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι είναι αδύνατον να κατασκευασθεί δειγματολήπτης ικανός να αποκλείει τη συλλογή των σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο παραπλήσια της επιθυμητής, ώστε να είναι δυνατόν να προσδιορισθούν σωματίδια μέχρι ή από μια διάμετρο και πέρα.

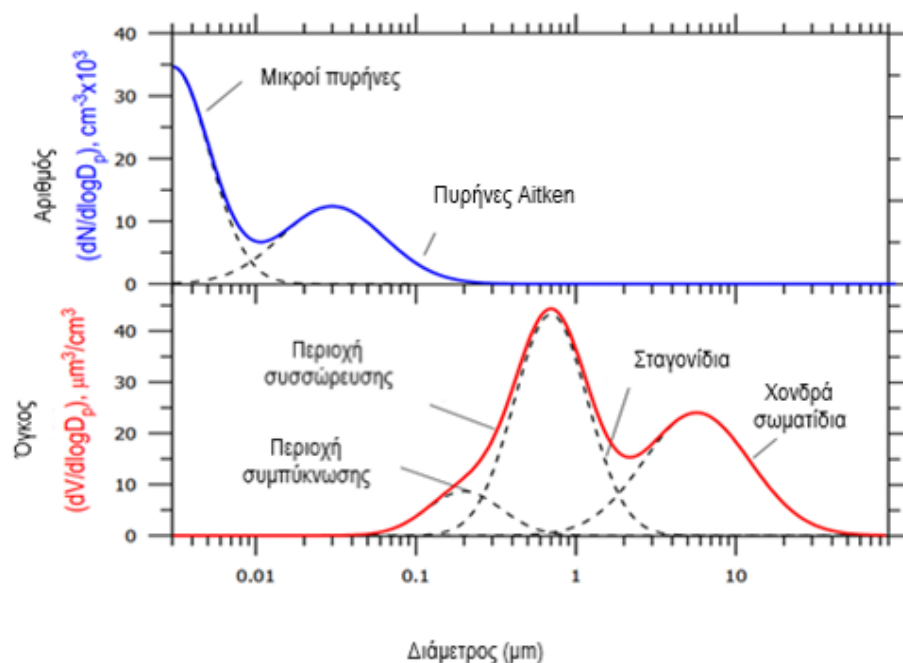
Ο αυστηρός ορισμός όπως αναφέρεται στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι: « PM_{10} νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10μm». Αντίστοιχα ως $PM_{2.5}$ νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους, το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2,5μm» (Οδηγία Ε.Ε, 2005).



Εικόνα 2. Σύγκριση διαμέτρου αιωρούμενων σωματιδίων με μια ανθρώπινη τρίχα.

1.2.2. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει των παρατηρούμενων κατανομών

Υπάρχουν γύρω στα 10.000 σωματίδια ανά κυβικό εκατοστό στην ατμόσφαιρα μιας πόλης. Από αυτά, τα πιο πολλά είναι μικρότερα των $0.1\mu\text{m}$ και δεν γίνονται αντιληπτά με γυμνό μάτι (εικόνα 3). Το μέγεθός τους είναι μικρότερο από το μήκος κύματος της ορατής ακτινοβολίας (περίπου 0.4 έως $0.7\mu\text{m}$) και δεν σκεδάζουν το φως. Εξ' αιτίας του μεγέθους τους αυτά τα σωματίδια έχουν ελάχιστη μάζα και δεν συνεισφέρουν ιδιαίτερα στην συνολική συγκέντρωση μάζας των ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Τα υπόλοιπα που είναι μεγαλύτερα, αν και σε αριθμό είναι λιγότερα, συνεισφέρουν πάρα πολύ στη συνολική μάζα των σωματιδίων (Seinfeld and Pandis, 2006).



Εικόνα 3. Τυπικές κατανομές αριθμού και όγκου αεροζόλ σαν συνάρτηση της διαμέτρου τους. Ο συνολικός αριθμός και όγκος είναι το ολοκλήρωμα (επιφάνεια κάτω από τη γραμμή) αυτών των συναρτήσεων.

Συνήθως οι κατανομές αριθμού ή όγκου παρουσιάζονται σε διάγραμμα $dN/d\log D_p$ ή $dV/d\log D_p$ με τον άξονα x , που αφορά τη διάμετρο, να είναι λογαριθμικός.

Η κατανομή αριθμού των αεροζόλ χαρακτηρίζεται από δύο μέγιστα (εικόνα 3). Το πρώτο αφορά σωματίδια πυρηνοποίησης με διαμέτρους μικρότερες από $0,01\mu m$. Πρόκειται για καινούρια πολύ μικρά σωματίδια που έχουν προκύψει από χημικές αντιδράσεις μέσω της πυρηνοποίησης. Το δεύτερο μέγιστο βρίσκεται γύρω στα $0,04\mu m$ και αναφέρεται στους πυρήνες Aitken. Επιπλέον, από το παραπάνω σχήμα, μπορεί να προκύψει πως η συνολική συγκέντρωση των σωματιδίων ισούται με την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη. Δηλαδή μαθηματικά εκφράζεται σαν ολοκλήρωμα όπως φαίνεται ακολούθως:

$$N = \int_0^{\infty} \frac{dN}{d \log D_p} d \log D_p \quad (2)$$

Η κατανομή όγκου (ή μάζας) έχει πολύ διαφορετικό σχήμα από αυτή του αριθμού. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης διαφοράς μεγέθους των χονδρών και λεπτών σωματιδίων. Η κατανομή όγκου συνήθως παρουσιάζει δυο μέγιστα. Η πρώτη ομάδα σωματιδίων με μέγιστο γύρω στα $0,7\mu m$ λέγονται σωματίδια περιοχής συσσώρευσης. Αυτή με τη σειρά της αποτελείται από δύο υποομάδες: την περιοχή συμπύκνωσης και την περιοχή σταγόνων. Η περιοχή συμπύκνωσης αποτελείται από πρωτογενή σωματίδια, τα οποία μέσω αντιδράσεων και συγκρούσεων μεγαλώνουν σε μέγεθος στην περιοχή των σταγόνων. Το δεύτερο μέγιστο είναι γύρω στα $5\mu m$ και επομένως αφορά τα χονδρά σωματίδια που κυρίως προέρχονται από μηχανικές διεργασίες (σκόνη, αλάτι θάλασσας).

Για τον υπολογισμό της κατανομής μάζας μέσω της κατανομής αριθμού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{dV}{d \log D_p} = \rho \frac{\pi}{6} D_p^3 \frac{dN}{d \log D_p} \quad (3)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, θα μπορούσαν μαθηματικά να ορισθούν ξανά οι έννοιες των ολικών σωματιδίων, των PM10 και των PM2.5.

- Ολικά αιωρούμενα σωματίδια: $TSP = \int_0^{\infty} \frac{dN}{d \log D_p} d \log D_p \quad (4)$

- $PM_{10} = \int_0^{10\mu m} \frac{dN}{d \log D_p} d \log D_p \quad (5)$

- $PM_{2.5} = \int_0^{2.5\mu m} \frac{dN}{d \log D_p} d \log D_p \quad (6)$

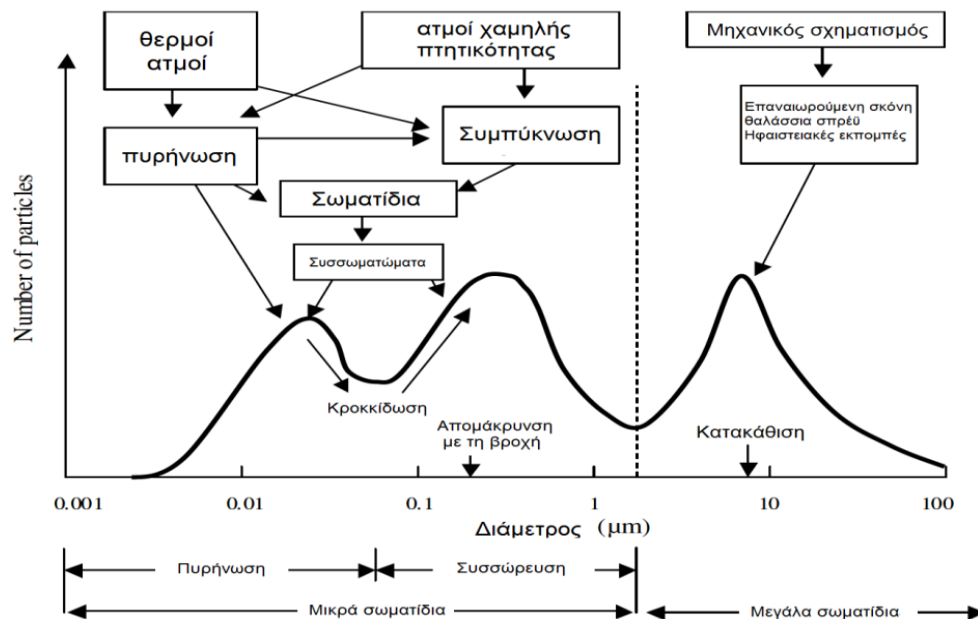
Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε λογαριθμικής κατανομής μεγέθους σωματιδίων είναι η μέση αεροδυναμική διάμετρος και η τυπική απόκλιση της. Η μέση αεροδυναμική διάμετρος είναι εκείνη για την οποία το 50% των σωματιδίων έχει μέγεθος μεγαλύτερο από αυτήν. Η εξίσωση λογαριθμικής κατανομής των σωματιδίων είναι:

$$F(d_{ae}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_g)} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu)^2}{2 \ln \sigma_g^2}\right) \quad (7)$$

Η εξίσωση της κατανομής μάζας των σωματιδίων, με δύο λογαριθμικές κατανομές (λεπτά και χονδρά σωματίδια) είναι:

$$F(d_{ae}) = \frac{a}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln(\sigma_{g,F})} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_F)^2}{2 \ln \sigma_{g,F}^2}\right) + \frac{1-a}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln(\sigma_{g,C})} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln d_{ae} - \ln \mu_C)^2}{2 \ln \sigma_{g,C}^2}\right) \quad (8), \text{ όπου:}$$

- ✓ α: ποσοστό λεπτών σωματιδίων
- ✓ μ: μέση διάμετρος
- ✓ F: συντελεστής που αναφέρεται στα λεπτά (fine) σωματίδια
- ✓ C: συντελεστής που αναφέρεται στα χονδρά (coarse) σωματίδια



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής επιφάνειας σωματιδίων ατμοσφαιρικού aerosol. Φαίνονται οι πηγές, οι βασικές διεργασίες και οι μηχανισμοί σχηματισμού και απομάκρυνσης σωματιδίων.

1.2.3. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει του μηχανισμού σχηματισμού τους

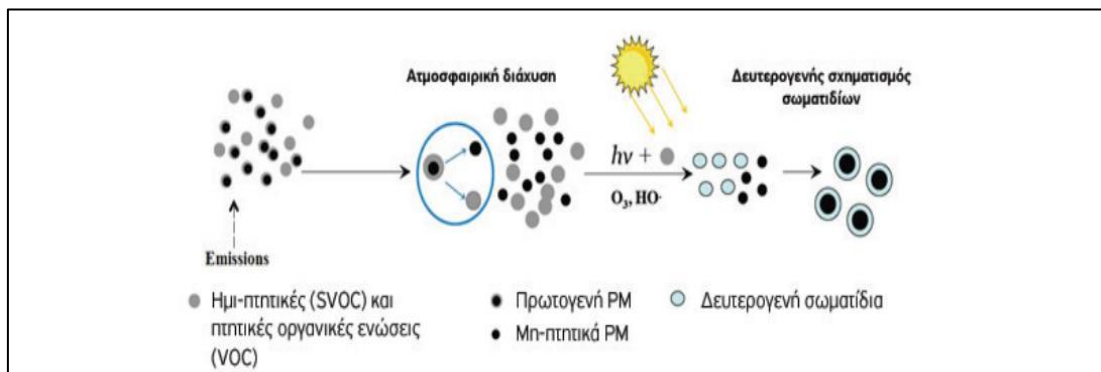
Τα αιωρούμενα σωματίδια βάσει του μηχανισμού σχηματισμού τους διακρίνονται σε:

- Πρωτογενή

Τα πρωτογενή σωματίδια είναι αυτά που εκλύονται άμεσα από φυσικές διεργασίες (θραύσματα φυτών, εκρήξεις ηφαιστειών, σκόνη εδάφους), είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες (βιομηχανική σκόνη, καύση χλωρίδας, κίνηση οχημάτων, αγροτικές δραστηριότητες, ανθρώπινες κατασκευές). Αυτή η κατηγορία σωματιδίων υπόκειται σε ελάχιστες διαδικασίες μετασχηματισμού μετά την εκπομπή τους. Λόγω του μεγάλου σχετικά μεγέθους τους δεν συσσωματώνονται εύκολα μεταξύ τους αλλά αναμειγνύονται με άλλα ατμοσφαιρικά συστατικά μέσω διαδικασιών μεταφοράς μάζας στην αέρια φάση.

- Δευτερογενή

Τα δευτερογενή σωματίδια είναι εκείνα που παράγονται έμμεσα στην ατμόσφαιρα ανάλογα με τις φυσικοχημικές συνθήκες που επικρατούν, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η παρουσία υδρατμών. Δημιουργούνται μέσω χημικών αντιδράσεων στις οποίες παίρνουν μέρος αέρια(π.χ. υδρατμοί), αντιδρώντα μόρια(π.χ. όζον O_3) και ρύποι.



Εικόνα 5. Σχηματισμός πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων.

| Υπολογισμένη Εκπομπή (Tg/y) | | | | |
|---|-------------|--------------|-------------|----------------------|
| Πηγή | Χαμηλή | Υψηλή | Βέλτιστη | Κατηγορία Σωματιδίων |
| Φυσικές πηγές | | | | |
| Πρωτογενείς εκπομπές | | | | |
| Σκόνη εδάφους | 1000 | 3000 | 1500 | Κυρίως χονδρά |
| Θαλάσσιο αλάτι | 1000 | 10000 | 1300 | χονδρά |
| Ηφαιστειακή σκόνη | 4 | 10000 | 30 | χονδρά |
| Βιολογικό υλικό | 26 | 80 | 50 | χονδρά |
| Δευτερογενείς εκπομπές | | | | |
| Θειικά από βιογενή αέρια | 80 | 150 | 130 | λεπτά |
| Θειικά από εκπομπές SO ₂ από ηφαίστεια | 5 | 60 | 20 | λεπτά |
| Οργανικά από εκπομπές βιογενών οργανικών πτητικών ενώσεων | 40 | 200 | 60 | λεπτά |
| Νιτρικά από NO _x | 15 | 50 | 30 | λεπτά και χονδρά |
| Σύνολο φυσικών πηγών | 2200 | 23500 | 3100 | |
| Ανθρωπογενείς πηγές | | | | |
| Πρωτογενείς εκπομπές | | | | |
| Βιομηχανική σκόνη(εκτός στοιχειακού άνθρακα) | 40 | 130 | 100 | λεπτά και χονδρά |
| Στοιχειακός άνθρακας | 5 | 20 | 10 | κυρίως λεπτά |
| Δευτερογενείς εκπομπές | | | | |
| Θειικά από εκπομπές SO ₂ | 170 | 250 | 190 | Λεπτά |
| Καύση βιομάζας | 60 | 150 | 90 | Λεπτά |
| Νιτρικά από εκπομπές NO _x | 25 | 65 | 50 | κυρίως χονδρά |
| Οργανικά από εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων | 5 | 25 | 10 | Λεπτά |
| Σύνολο ανθρωπογενών πηγών | 300 | 650 | 450 | |

Πίνακας 4: Πηγές και εκπομπές ατμοσφαιρικών αεροζόλ σε παγκόσμιο επίπεδο. (Αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999)

1.2.4. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει των πηγών εκπομπής τους

Ένας διαχωρισμός στον οποίο προβαίνουμε αρχικά είναι η κατάταξη των πηγών των αεροζόλ σε φυσικές και ανθρωπογενείς. Ο διαχωρισμός αυτός πολλές φορές δεν είναι εύκολος παρόλα αυτά είναι απαραίτητος.

Φυσικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης θεωρούνται εκείνες που δεν προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα (Γεντεκάκης Ι., 2010). Χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικής πηγής είναι το ηφαίστειο που όταν εκρήγνυται εκλύει σωματιδιακή ύλη και αέριους ρύπους όπως διοξείδιο του θείου(SO₂), μεθάνιο(CH₄), υδρόθειο (H₂S) κ.ά. Επίσης, μεγάλες δασικές πυρκαγιές απελευθερώνουν ποσότητες καπνού, άκαυστων υδρογονανθράκων αλλά και διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα δυσκολεύοντας ταυτόχρονα και την ορατότητα. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί πως οι ωκεανοί και οι θάλασσες εκλύουν αερολύματα με τη μορφή σωματιδιακών αλάτων(NaCl) διαβρώνοντας τα μέταλλα, και παράγουν πρωτογενή σωματίδια λόγω των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται. Τέλος, οι άνεμοι που μετακινούν μεγάλες ποσότητες σωματιδιακής ύλης και ειδικά στις ερημικές περιοχές προκαλούν πολύ μεγάλα προβλήματα. Αναλυτικότερα:

- Επαναιώρηση σκόνης από το έδαφος

Η επαναιώρηση σκόνης από το έδαφος οφείλεται σε μετεωρολογικούς μηχανισμούς, όπως είναι ο άνεμος, οι μεταβολές στη θερμοκρασία και η υγρασία. Η σκόνη αυτή είναι δυνατόν να μεταφερθεί από τον άνεμο. Η κατανομή της ως προς το μέγεθος εξαρτάται από το είδος της αρχικής πηγής (πχ. ορυκτό). Στις πόλεις, σημαντικό ποσοστό σκόνης υπάρχει σε δρόμους και πεζοδρόμια. Προέρχεται από τη φθορά της επιφάνειας του δρόμου και των ελαστικών αλλά και από αυτή που μεταφέρεται πάνω στα ελαστικά ή αυτή που έχει καθιζάνει από την ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην Καλιφόρνια για το έτος 1995, ο ρυθμός εκπομπής PM₁₀ από την επαναιώρηση σκόνης από τους δρόμους ήταν 12,9 tn/ημέρα για ασφαλτοστρωμένους δρόμους και 21,0 tn/ημέρα για μη ασφαλτοστρωμένους. Η αντίστοιχη τιμή για την αερομεταφερόμενη σκόνη ήταν 7,6 tn/ημέρα (Magliano et al., 1999).

- Μεταφορά σωματιδίων σε μεγάλες αποστάσεις

Έχει εκτιμηθεί ο αέρας που παρασύρει αιωρούμενα σωματίδια από την έρημο της Σαχάρα, μεταφέρει περίπου 150εκ. τόνους σκόνης στο Β. Ημισφαίριο. Το φαινόμενο αυτό έχει άμεση σύνδεση με τις ανεμοθύελλες. Η ένταση του φαινομένου μειώνεται όσο η βλάστηση και η υγρασία αυξάνονται. Τα σωματίδια που μεταφέρονται από τη Σαχάρα είναι συνήθως χονδρόκοκκα και έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη και αργιλικών υλικών και μετάλλων.

- Υδρόλυμα θαλάσσης

Η θραύση των κυμάτων στη θάλασσα δημιουργεί πολλά μικρά σταγονίδια από θαλασσινό νερό, τα οποία ξηραίνονται με την εξάτμιση δημιουργώντας έτσι αιωρούμενα σωματίδια από θαλασσινό αλάτι. Επιπλέον, με το σπάσιμο των φυσαλίδων στην επιφάνεια της θάλασσας, εκπέμπονται σωματίδια. Τα περισσότερα εξ' αυτών σωματίδια ανήκουν στα χονδρόκοκκα και η σύσταση του είναι παραπλήσια με αυτή που έχει το θαλασσινό αλάτι.

- Ηφαιστειακή δραστηριότητα

Η ηφαιστειακή δραστηριότητα λαμβάνει ακόμα χώρα σε κάποιες νησιωτικές περιοχές της Ευρώπης, όπως είναι η Σικελία και τα Κανάρια Νησιά. Η ιπτάμενη τέφρα που εκπέμπουν αποτελεί σημαντική τοπική πηγή σωματιδίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έκρηξη του ηφαιστείου της Αγίας Ελένης στην Ουάσιγκτον το 1980 που εκτόξευσε όγκο σωματιδίων ίσο με 4km³, ποσότητα μεγαλύτερη από το συνολικό ετήσιο ποσό των εκπεμπόμενων σωματιδίων που οφείλονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες στη Βόρεια Αμερική.

Ανθρωπογενείς νοούνται οι πηγές εκείνες που συμβάλει αποκλειστικά ο άνθρωπος για τη δημιουργία τους. Η ταχύρρυθμη ανάπτυξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε έξαρση της βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Αποτέλεσμα αυτής της δραστηριότητας είναι η δημιουργία όλο και περισσότερων ανθρωπογενών πηγών παραγωγής αεροζόλ. Η καύση ορυκτών καυσίμων, οι βιομηχανικές διεργασίες, η επίγεια, εναέρια και θαλάσσια μετακίνηση αλλά και οι μη βιομηχανικές πηγές ανθρώπινης δραστηριότητας είναι οι βασικότερες εκπομπές από ανθρώπινη δραστηριότητα (Seinfeld and Pandis, 2006). Πιο συγκεκριμένα:

- Εκπομπές από οχήματα

Οι κύριες πηγές εκπομπής σωματιδίων από τα οχήματα είναι τα καυσαέρια των αυτοκινήτων και η φθορά από τη χρήση των φρένων και των ελαστικών. Οι εκπομπές από κινητήρες diesel είναι μεγαλύτερες από αυτές των βενζινοκινητήρων αφού συνήθως όσο βαρύτερο είναι το κλάσμα του πετρελαίου που καίγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή σωματιδίων. Φυσικά, η εκπομπή μεγάλων ποσοστών σωματιδίων ιδιαίτερα από μη καταλυτικά βενζινοκίνητα οχήματα δεν είναι καθόλου αμελητέα. Οι εκπομπές από μηχανές diesel περιέχουν κυρίως αιθάλη, δηλαδή σωματίδια στοιχειακού άνθρακα, πτητικές οργανικές ενώσεις και μερικά θειικά (λόγω του καυσίμου). Όταν οι ενώσεις αυτές διοχετεύονται από την εξάτμιση στο περιβάλλον, συμπυκνώνονται πάνω σε αιωρούμενα σωματίδια. Η χρήση καταλυτών αποτελεί λύση για τη μείωση των εκπομπών αλλά παρουσιάζει αρκετά προβλήματα.

- Βιομηχανικές εκπομπές

Οι βιομηχανικές εκπομπές συνεισφέρουν στην παραγωγή αιωρούμενων σωματιδίων στα αστικά κέντρα ανάλογα με την απόσταση που έχουν από αυτά αλλά και την τεχνολογία που εφαρμόζουν. Επιπλέον, ανάλογα με το είδος της βιομηχανίας τα σωματίδια ποικίλλουν και το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,5 έως 100μm. Σημαντικές ποσότητες σωματιδίων παράγουν οι χημικές βιομηχανίες (παραγωγή καυστικής σόδας, χλωρίνης, ενεργού άνθρακα, απορρυπαντικών κ.ά), οι γεωργικές βιομηχανίες (παραγωγή λιπασμάτων), οι μεταλλουργικές βιομηχανίες (παραγωγή αλουμινίου, μολύβδου κ.ά) αλλά και τα διυλιστήρια πετρελαίου.

- Δασικές και γεωργικές πυρκαγιές

Αν πρόκειται για μικρής έκτασης φωτιά, η συμβολή τους στη ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι προσωρινή. Αντίθετα, στην περίπτωση μεγάλων δασικών πυρκαγιών τόσο οι άμεσες εκπομπές όσο και η επαναιώρηση σωματιδίων από την καμμένη γη μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή παραγωγής σωματιδίων. Το πυρογενές αυτό υλικό αποτελείται κυρίως από οργανική ύλη, στοιχειακό άνθρακα και άλλα ανόργανα υλικά. Η πλειονότητα των σωματιδίων αυτών έχει μέγεθος μικρότερο από 10μm και εύκολα μπορεί να επαναιωρηθεί λόγω του ανέμου.

- Οικιακές πηγές

Δεν είναι λίγες οι φορές που κατά τη χειμερινή περίοδο παρατηρείται στις πόλεις αιθαλομίχλη. Αυτό οφείλεται στην εκτεταμένη καύση ξύλων στα τζάκια και τις σόμπες αλλά και στην καύση πετρελαίου στους λέβητες για τη θέρμανση των σπιτιών. Τέτοιες μέθοδοι είναι απαραίτητες αλλά ταυτόχρονα επιζήμιες για το περιβάλλον λόγω της παραγωγής αιωρούμενων σωματιδίων. Μια ίσως λιγότερο επιζήμια μέθοδος θέρμανσης είναι η χρήση φυσικού αερίου

1.2.5. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει της χωρικής τους προέλευσης

Τα αιωρούμενα σωματίδια χωρίζονται ανάλογα με την προέλευσή τους σε αστικά, θαλάσσια, πολιτικά, ερημικά, αγροτικά και απομακρυσμένα ηπειρωτικά.

- **Αστικά:** είναι μίγματα πρωτογενών εκπομπών σωματιδίων από τη βιομηχανία, την παραγωγή ενέργειας αλλά και τις μεταφορές και οι αριθμητικές κατανομές τους αποτελούνται από σωματίδια μικρότερα από 1μm. Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις λεπτόκοκκων βρίσκονται κοντά στις πηγές εκπομπής αλλά μειώνονται γρήγορα όσο απομακρυνόμαστε από αυτές (Seinfeld and Pandis, 2006)
- **Αγροτικά Ηπειρωτικά:** πρόκειται για σωματίδια κυρίως φυσικής προέλευσης με μικρές επιρροές από ανθρωπογενείς πηγές. Οι κατανομές του αριθμού τους έχουν συνήθως περιοχή διαμέτρων 0,02 και 0,08μm ενώ οι κατανομές μάζας περίπου στα 7μm δηλαδή χονδρόκοκκα.
- **Απομακρυσμένα Ηπειρωτικά:** τα κύρια συστατικά τους είναι πρωτογενή και σωματίδια και δευτερογενή προϊόντα. Ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων PM₁₀ είναι περίπου 10μg/m³.
- **Θαλάσσια:** τα σωματίδια από τους απομακρυσμένους ωκεανούς είναι κυρίως θαλάσσιας προέλευσης. Οι κατανομές τους χαρακτηρίζονται από τρεις περιοχές: α) την περιοχή των πυρήνων Aitken β) την περιοχή συσσώρευσης και γ) την περιοχή των χονδρόκοκκων, με την τελευταία να αντιπροσωπεύει και το 95% της μάζας αλλά μόνο το 10% του αριθμού των σωματιδίων. Λόγω της υγροσκοπικότητάς τους, τα θαλάσσια αεροζόλ αλλάζουν μέγεθος αφού αλλάζει η περιβάλλουσα σχετική υγρασία (Seinfeld and Pandis, 2006).
- **Ερημικά:** τα αιωρούμενα σωματίδια που βρίσκονται πάνω από ερημικές περιοχές συνήθως εκτείνονται και σε γειτονικές περιοχές όπως οι ωκεανοί. Οι αριθμητικές τους κατανομές έχουν τρεις περιοχές με διαμέτρους 0,01μm, 0,05μm και 10μm αντίστοιχα. Καταιγίδες άμμου από τη Σαχάρα φαίνεται ότι μεταφέρουν υλικά μέχρι τις Ανατολικές ακτές των ΗΠΑ.
- **Πολικά:** πρόκειται για αεροζόλ που βρίσκονται στην Ανταρκτική και την Αρκτική, έχουν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις και περιέχουν ανθρακικά συστατικά, θαλάσσιο αλάτι και εδαφικά υλικά. Οι αριθμητικές κατανομές τους έχουν μέση διάμετρο περίπου 0,15μm. Οι συγκεντρώσεις PM₁₀ των αιωρούμενων σωματιδίων στους πόλους είναι χαμηλότερες από 5μg/m³, με τα θειικά να είναι σχεδόν το 40% αυτών.

1.2.6. Ταξινόμηση σωματιδίων βάσει της διεισδυτικότητας στον ανθρώπινο οργανισμό

Η συμπεριφορά των σωματιδίων εντός του ανθρώπινου οργανισμού και τί συνέπειες μπορεί να έχει, είναι θέμα που έχει απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο, κάποια συμπεράσματα φαίνεται να εντοπίζονται στις εξής υποομάδες των αιωρούμενων σωματιδίων:

- **Εισπνεύσιμα σωματίδια (inhalable particles)**

Πρόκειται για τα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού. Περιλαμβάνουν σωματίδια με διάμετρο έως 10μm καθώς η πλειονότητα των μεγαλύτερων από αυτή τη διάμετρο αεροζόλ, κατακρατούνται στη στοματική και ρινική κοιλότητα.

- Θωρακικά σωματίδια (thoracic particles)

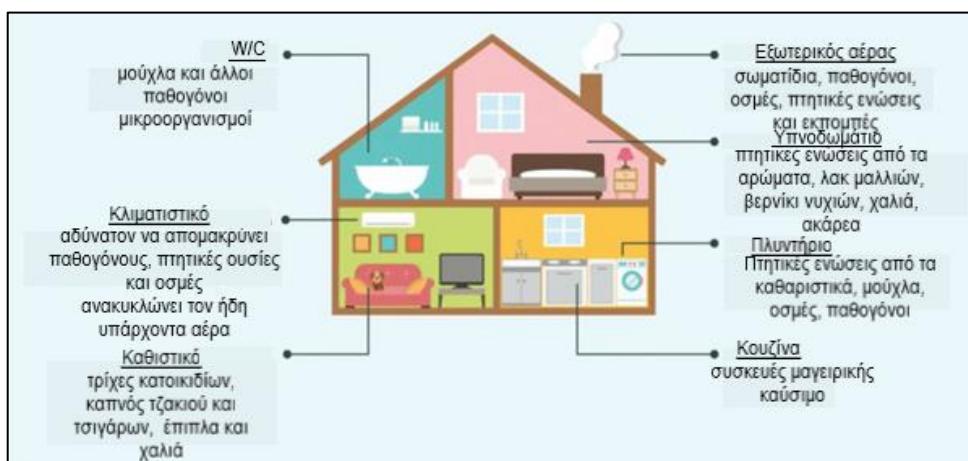
Τα θωρακικά είναι κλάσμα των εισπνεύσιμων σωματιδίων που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού. Θεωρείται ότι έχουν διάμετρο μικρότερη των 7μm.

- Αναπνεύσιμα σωματίδια (respirable particles)

Το σωματιδιακό κλάσμα με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερο από 2,5μm είναι το πιο σημαντικό από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία. Αυτό γιατί καταφέρνουν να διεισδύσουν ως τα βάθη των πνευμόνων και για αυτό καλούνται αναπνεύσιμα.

1.3. Αεροζόλ εσωτερικών χώρων

Η καλή ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία του ανθρώπου. Αρκετά συχνά όμως παρατηρούνται περιπτώσεις ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια σε εσωτερικούς χώρους, γεγονός αρκετά επικίνδυνο για τον άνθρωπο (Λαζαρίδης, 2015). Η προέλευση των σωματιδίων αυτών έως και κατά 60% προέρχεται από εξωτερικές πηγές (Koutrakis, 1992). Οι παράμετροι που καθορίζουν τη διείσδυση στο εσωτερικό ενός χώρου είναι ο ρυθμός εξαερισμού(α) [hr^{-1}] του υπό μελέτη χώρου, ο ρυθμός εναπόθεσης(k)[hr^{-1}] (λόγω επικάθησης σε διάφορες επιφάνειες) αλλά και η ικανότητα διείσδυσης (P) [αδιάστατο] των ίδιων των σωματιδίων στο χώρο. Η γνώση των τριών παραπάνω παραμέτρων καθώς και της συγκέντρωσης (C_{out}), αρκούν για την εύρεση της **εσωτερικής** σωματιδιακής συγκέντρωσης μέσω της σχέσης: $C_{in} = \frac{a \cdot P}{a+k} \cdot C_{out}$



Εικόνα 6. Πηγές ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους ενός σπιτιού.

Ο μηχανισμός παραγωγής των σωματιδίων αντανακλάται από το μεγεθός τους. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικές διεργασίες παράγουν κυρίως χονδρά σωματίδια ενώ οι διεργασίες καύσης παράγουν λεπτόκοκκα. Η εσωτερική παραγωγή σωματιδίων είναι δυνατόν να οφείλεται σε:

- **Διεργασίες καύσης:** Το κάπνισμα έχει αναγνωρισθεί ως η βασικότερη εσωτερική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων και ιδιαίτερα για το λεπτόκοκκο κλάσμα (Nazaroff W.W., 2004). Πρόκειται για ένα αερόλυμα που περιέχει ένα μίγμα αερίων και σωματιδίων. Σε αυτό, έχουν ταυτοποιηθεί χιλιάδες διαφορετικές χημικές ουσίες όπως νικοτίνη, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, υδροκυάνιο κ.ά. ενώ στον καπνό του τσιγάρου έχει πιστοποιηθεί η ύπαρξη καρκινογόνων ουσιών όπως το βενζόλιο, η πίσσα, η φορμαλδεΰδη κ.ά. Επιπροσθέτως, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι συσκευές θέρμανσης (τζάκια, θερμάστρες, σόμπες) μέσα στις οποίες καίγονται, ανάλογα με τον τύπο τους, ξύλα,

πετρέλαιο, κηροζίνη. Τα καυσαέρια όλων των παραπάνω δεν απομακρύνονται και έτσι εκπέμπονται ποσότητες βλαβερών αερίων και σωματιδίων. Τέλος, σημαντική πηγή σωματιδίων παρατηρείται κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος και βάση μιας έρευνας που διεξήχθη στις Η.Π.Α. το 60% αυτών αφορά PM_{10} (Ozkanynak H., 1996).

- Υλικά κατασκευής των χώρων: αφορά υλικά που περιέχουν αμίαντο, διάφορα βιομηχανικά είδη ξύλου, μονωτικά υλικά, χρώματα, διαλυτικά και ξηραντικά χρωμάτων τα οποία είναι τοξικά για τον άνθρωπο αν βρεθούν σε μεγάλες συγκεντρώσεις.
- Είδη οικιακής χρήσης, προϊόντα σε μορφή αερολύματος (σπρέι): πρόκειται για τα απορρυπαντικά, τα κάθε είδους καθαριστικά, παρασιτοκτόνα, τα οποία περιέχουν δραστικές ουσίες με τοξική επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό. Ο τετραχλωράνθρακας, το χλωροφόρμιο, το ναφθαλίνιο, το τετραχλωροαιθυλένιο, το p-διχλωροβενζόλιο αποτελούν κάποιες από τις δραστικές ουσίες που υπάρχουν στα προϊόντα αυτά.
- Εσωτερική κινητικότητα (περπάτημα, καθάρισμα): η παρουσία και η κίνηση ατόμων εντός του χώρου είναι δυνατόν να συνεισφέρει στην παραγωγή κυρίως χονδρών σωματιδίων. Όσον αφορά τις καθημερινές διαδικασίες καθαρισμού (σκούπισμα, ξεσκόνισμα), συνεισφέρουν σε πιο μικρό βαθμό στην αύξηση των σωματιδίων κυρίως λόγω της επαναιώρησης της σκόνης αλλά και της επιφανειακής φθοράς των υλικών.
- Νερό, τρόφιμα και κατοικίδια ζώα: το πόσιμο νερό από πηγές κοντά σε ραδιενεργά πετρώματα, ενδεχομένως περιέχει ραδόνιο, ενώ στο ζεστό νερό του ντους, όταν είναι υπερχλωριωμένο, ενδεχομένως σχηματίζονται ενώσεις όπως το χλωροφόρμιο. Τα κατοικίδια παράγουν διάφορες αλλεργιόνες ουσίες ενώ τα οικιακά απορρίμματα αποτελούν πηγή εσωτερικής ρύπανσης αφού αποτελούνται κυρίως από υπολείμματα φαγητών τα οποία αμέσως αλλοιώνονται και αναπτύσσουν κυρίως μικροβιακούς πληθυσμούς και οσμές.

1.4. Βιοαεροζόλ

Ως βιοαεροζόλ ορίζονται τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας τα οποία έχουν βιολογική προέλευση. Βιοαεροζόλ μπορούν να θεωρηθούν αερομεταφερόμενοι ιοί, βακτήρια, μύκητες, πρωτόζωα, γύρη, τμήματα κυττάρων ή εντόμων καθώς και προϊόντα μεταβολισμού διαφόρων ζώων οργανισμών όπως μυκοτοξίνες, βακτηριακές ενδοτοξίνες κ.ά. (Λαζαρίδης Μ., 2015).

Η συμπεριφορά τους αναφορικά με την διασπορά και εναπόθεσή τους εξαρτάται από το μέγεθός τους, τις αρχές τις φυσικής (διάχυση, βαρύτητα, τύρβη) αλλά και την κίνηση του αέρα. Μπορεί να προέλθουν από οποιαδήποτε φυσική ή ανθρωπογενή δραστηριότητα και η συγκέντρωσή τους μπορεί να κυμαίνεται από πολύ χαμηλά επίπεδα (σε χειρουργεία νοσοκομείων) έως πολύ υψηλά (σε βιομηχανικές δραστηριότητες).

Καθοριστικό ρόλο για την δημιουργία τους είναι η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός των μικροβίων και κατ' επέκταση η δημιουργία ιδανικών γι' αυτούς συνθηκών όπως κακή συντήρηση κλιματιστικού, έλλειψη αερισμού, απουσία υγιεινής εντός των χώρων κ.ά. Ο άνθρωπος εκτίθεται σε αυτού του είδους τους μικροοργανισμούς μέσω της εισπνοής, της κατάποσης και της επαφής με το δέρμα. Φυσικά η εισπνοή είναι ο επικρατέστερος τρόπος έκθεσης αν λάβουμε υπ' όψη ότι ο άνθρωπος εισπνέει κατά μέσο όρο περίπου 10 m^3 αέρα την ημέρα (Λαζαρίδης Μ., 2015).

Το μέγεθός τους ποικίλλει και η διάμετρός τους κυμαίνεται συνήθως από 0,5 έως $30 \mu\text{m}$. Βιοαεροζόλ με διάμετρο από 0,3 έως $8 \mu\text{m}$ απελευθερώνονται κατά την εκπνοή ενώ βιοαεροζόλ με

διάμετρο μικρότερη από 5μm απελευθερώνονται κατά την ομιλία, το φτέρνισμα, το φύσημα, το σφύριγμα και το σκούπισμα της μύτης. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι κατά το βήξιμο ή τη δυνατή ομιλία απελευθερώνονται σταγονίδια με συγκέντρωση περίπου 10^5 σταγονίδια ανά m^3 αέρα (Papineni et al., 1997).

Για την προστασία της ατμόσφαιρας των εσωτερικών χώρων από επιβλαβείς βιολογικούς παράγοντες πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τα φίλτρα HEPA (High Efficiency Particulate Air Filters) στα κλιματιστικά και επιπλέον διενεργούνται αποστειρώσεις αέρα με τεχνικές απενεργοποίησης και όχι θανάτου των μικροοργανισμών (πχ. Χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας)

1.5. Μέτρηση Αεροζόλ

Η είσοδος των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου οδήγησε στην ανάγκη σχεδιασμού και δημιουργίας οργάνων μέτρησης για διάφορα μεγέθη, ανάλογα με το κλάσμα σωματιδίων που μετράται κάθε φορά. Το πιο βασικό στάδιο μιας ανάλυσης είναι η δειγματοληψία. Βασικός στόχος είναι η συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος διατηρώντας σταθερή την υγρασία, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του δείγματος ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωση αυτού.

Τα αερολύματα επειδή αποτελούνται από διακριτά σωματίδια, υπόκεινται στην επίδραση δυνάμεων αδράνειας. Κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας τα σωματίδια κινούνται μέσα στην ομοιόμορφη αέρια μάζα και έχουν αδράνεια παράλληλα με τις ρευστοδυναμικές γραμμές. Σε περίπτωση που οι γραμμές αυτές αναγκασθούν να αλλάξουν πορεία, δεν θα είναι ικανές να συμπαράσώρουν και τα σωματίδια μαζί τους. Για αυτό το λόγο η δειγματοληψία ενδείκνυται να είναι ισοκινητική, δηλαδή η ταχύτητα εισόδου της αέριας μάζας εντός του σωλήνα να είναι ίση με την ταχύτητα έξω από αυτόν.

1.5.1. Οπτικές και σταθμικές μέθοδοι

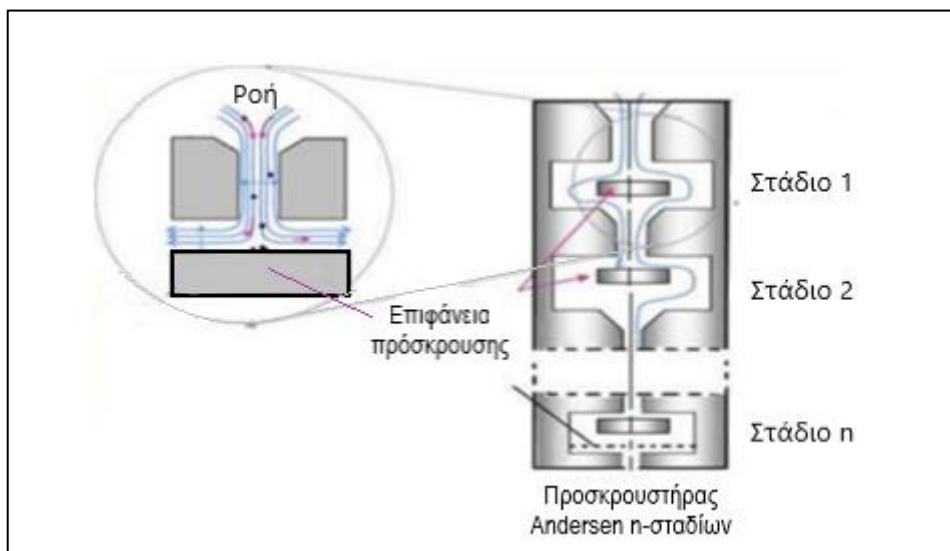
Ένας πρώτος διαχωρισμός των μεθόδων αυτών είναι σε οπτικές και σταθμικές. Οι οπτικές μέθοδοι βασίζονται στη διάχυση ορισμένης ακτίνας φωτός από το δείγμα. Τα όργανα που λειτουργούν σύμφωνα με την οπτική μέθοδο απαιτούν κατάλληλη βαθμονόμηση, αεροδυναμικό στόμιο εισόδου των σωματιδίων και κατάλληλη αντλία αέρα για τη συλλογή των επιθυμητών προς εξέταση σωματιδίων. Στις σταθμικές μεθόδους μέτρησης το δείγμα επιταχύνεται μέσω ορισμένων σταδίων ενός αδρανούς δειγματολήπτη και διαχωρίζεται σε κλάσματα ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Η μάζα αυτών υπολογίζεται με ζύγιση του μέσου συλλογής των σωματιδίων πριν και μετά τη δειγματοληψία. Τα σταθμικά όργανα μέτρησης απαιτούν εξωτερική αντλία αέρα και εργαστήριο εξοπλισμένο με τα κατάλληλα μέσα για τον υπολογισμό της σωματιδιακής ύλης (Λαζαρίδης Μ., 2015)

1.5.2. Μετρήσεις με σταθμικό προσδιορισμό ή σε πραγματικό χρόνο

Ένας επιπλέον διαχωρισμός των μεθόδων είναι οι μετρήσεις με σταθμικό προσδιορισμό ή σε πραγματικό χρόνο.

Οι δειγματοληπτικές τεχνικές σταθμικού προσδιορισμού βασίζονται στην αρχή της πρόσκρουσης των σωματιδίων κα τα όργανα στα οποία εφαρμόζεται ονομάζονται προσκρουστήρες διαχωρισμού. Τα αιωρούμενα σωματίδια αρχικά περνούν από μια οπή που οδηγεί σε επίπεδη επιφάνεια (επιφάνεια πρόσκρουσης), η οποία μετατοπίζει την ροή κατά 90° . Τα σωματίδια που έχουν εσω-

τερική ενέργεια μεγαλύτερη από μία οριακή τιμή δεν ακολουθούν τις γραμμές ροής και συγκρούονται με την επίπεδη επιφάνεια και κολλάνε πάνω σε αυτή. Τα υπόλοιπα ακολουθούν την γραμμή, παραμένουν αιωρούμενα και εξέρχονται από τον προσκρουστήρα. Με την προσθήκη φίλτρου στην έξοδο μπορούν να μελετηθούν τα σωματίδια που δεν εναποτέθηκαν στον προσκρουστήρα και με απλή ζύγιση αυτού προκύπτει σημαντική πληροφορία για την κατανομή της μάζας στο συγκεκριμένο μέγεθος σωματιδίων που μελετάται.



Εικόνα 7. Προσκρουστήρας Andersen και αρχή λειτουργίας.

Οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που δεν επαρκεί η γνώση της μέσης συγκέντρωσης του αερολύματος σε κάποιο χρονικό διάστημα αλλά χρειάζονται οι στιγμιαίες τιμές της για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, οι τεχνικές μέτρησης πραγματικού χρόνου αξιοποιούν κάποια φυσική ιδιότητα των σωματιδίων (οπτική, ηλεκτρική, μοριακή, πυρηνική, μηχανική). Πιο συχνά, χρησιμοποιούνται οι οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητές για την εκτίμηση της κατανομής των σωματιδίων αλλά και του ηλεκτρικού φορτίου αντίστοιχα.

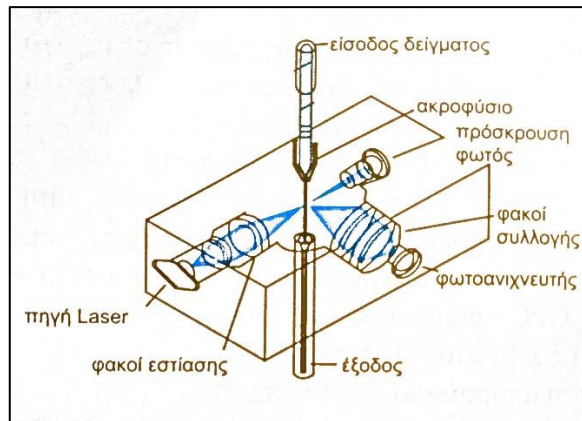
Η αρχή λειτουργίας των οργάνων που εκμεταλλεύονται την οπτική ιδιότητα των σωματιδίων είναι η εξασθένιση μιας δέσμης φωτός λόγω απορρόφησης ή διάχυσης από τα σωματίδια.

Η εξίσωση η οποία περιγράφει αυτή την εξασθένιση είναι η εξής:

$$\frac{I}{I_0} = e^{(-c_p \cdot Q \cdot X)} \quad (9)$$

Όπου:

- I_0 : η εκπεμπόμενη δέσμη φωτός.
- I : η δευτερεύουσα δέσμη φωτός, εξασθενημένη λόγω διάχυσης ή απορρόφησης.
- Q : ο συντελεστής σωματιδιακής εξασθένισης.
- X : το μήκος της οπτικής τροχιάς δια μέσου του αεροζόλ.
- C_p : μία προτεινόμενη τιμή για την συγκέντρωση του αερολύματος στην εξεταζόμενη περιοχή (Vincent, 1995).



Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας οργάνου μέτρησης συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Όπως προαναφέρθηκε, πέραν των οπτικών ιδιοτήτων των αεροζόλ, αξιοποιούνται και οι ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Τα αιωρούμενα σωματίδια διαθέτουν ηλεκτροστατικό φορτίο το οποίο μπορεί να μετρηθεί μέσω της αποφόρτισής τους. Στα όργανα που αξιοποιούνται οι ηλεκτρικές ιδιότητες, τα σωματίδια συλλέγονται σε έναν αγωγό ορθογώνιου σχήματος στο οποίο τα άκρα εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού. Τα σωματίδια διαχωρίζονται στα άκρα ανάλογα με το φορτίο τους ενώ στη συνέχεια μπορούν να διαχωριστούν και ανά μέγεθος, με την βοήθεια «οπτικών» μετρητών στις δύο εξόδους, καθώς μεταβάλλεται η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του αγωγού.

1.6. Έκθεση και δόση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια

Ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή καθημερινά με τα αιωρούμενα σωματίδια στα περιβάλλοντα όπου ζει και δραστηριοποιείται. Η έκθεση του σε αυτά εξαρτάται από το χρόνο παραμονής του σε ένα χώρο καθώς και τη συγκέντρωση του στο χώρο αυτό (Λαζαρίδης Μ., 2015).

Η περιγραφή της συνολικής ανθρώπινης έκθεσης είναι:

$$E_i = \sum_{j=1}^n C_j t_{ij}, \text{ όπου:}$$

- E_i : συνολική έκθεση του ατόμου i
- C_j : συγκέντρωση σωματιδίων στο περιβάλλον j
- t_{ij} : χρόνος παραμονής του ατόμου i στο χώρο j
- n : ο αριθμός των διαφορετικών χώρων στους οποίους εκτίθεται το άτομο i

Παρόλα αυτά δεν αρκεί να γνωρίζουμε την συνολική έκθεση μια και η πραγματική ποσότητα που εισέρχεται εντός του ανθρώπινου οργανισμού είναι η δόση. Η τελευταία μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης (συγκέντρωση, διάρκεια, φυσικοχημικά χαρακτηριστικά) αλλά και τον εκάστοτε ανθρώπινο οργανισμό (ηλικία, φύλλο, σωματική δραστηριότητα, μορφολογία αναπνευστικού συστήματος). Η δόση διακρίνεται σε δυνητική (πραγματική ποσότητα του ρύπου που

εισέρχεται στον οργανισμό), εφαρμοζόμενη (όση αποτίθεται στους ιστούς των πνευμόνων) και την εσωτερική (όση τελικά απορροφάται από τους ιστούς).

Η δόση ανά ώρα υπολογίζεται για έκθεση σε οποιεσδήποτε συνθήκες μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$H = n_0 \cdot c_A \cdot B \left(a \sum_i n_{fine,i} + (1 - a) \sum_i n_{coarse,i} \right) \quad (10), \quad \text{όπου:}$$

- H: ρυθμός δόσης (mg/h)
- n_0 : κλάσμα αναπνεύσιμων σωματιδίων (εισπνευσιμότητα)
- c_A : συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- B: ρυθμός αναπνοής (m^3/h)
- a: μαζικό κλάσμα μικρών σωματιδίων
- $n_{fine,i}$: συγκράτηση λεπτόκοκκων σωματιδίων στους πνεύμονες
- $n_{coarse,i}$: συγκράτηση χονδροκόκκων σωματιδίων στους πνεύμονες

Ένας ακόμη χρήσιμος ορισμός είναι αυτός της εισπνευσιμότητας. Πρόκειται για το ποσοστό των σωματιδίων συγκεκριμένης διαμέτρου που είναι δυνατόν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα μέσω του στόματος ή της μύτης, σε σχέση με τον πλήθος τους στον αέρα. Εξαρτάται από το μέγεθος και την ταχύτητα ανέμου.

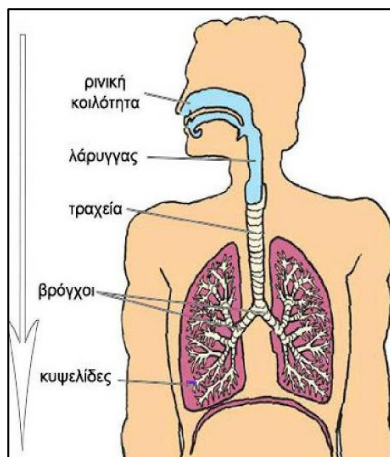
$$n_i = 1 - 0,5 \cdot \left[1 - \left(7,6 \cdot 10^{-4} d_{ae}^{2,8} + 1 \right) - 1 \right] 1^{-1} + 1,0 \cdot 10^{-5} U^{2,75} \exp(0,055 d_{ae}) \quad (11), \quad \text{όπου:}$$

- d_{ae} : αεροδυναμική διάμετρος σωματιδίων (μm)
- U: ταχύτητα ανέμου (m/s) που στην συγκεκριμένη σχέση θεωρείται 0 για λόγους τυποποίησης (ICRP, 1994)

1.7. Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα (ΑΑΣ)

1.7.1. Περιγραφή Αναπνευστικού Συστήματος

Το αναπνευστικό σύστημα είναι το σύστημα εκείνων των οργάνων που χρησιμεύουν στην πρόσληψη του ατμοσφαιρικού αέρα από το περιβάλλον, την εισαγωγή του στους πνεύμονες, την παραλαβή του οξυγόνου από αυτόν και την απόδοση του διοξειδίου του άνθρακα. Όλη αυτή η διαδικασία που τροφοδοτεί τον οργανισμό με το αναγκαίο οξυγόνο, καλείται αναπνοή.



Εικόνα 9. Απεικόνιση αναπνευστικού συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, ο αέρας εισέρχεται στο σώμα από τη ρινική ή τη στοματική κοιλότητα. Η πρώτη, θερμαίνει, υγραίνει αλλά και φιλτράρει τον αέρα που εισπνέουμε με τη βοήθεια της βλέννας η οποία παγιδεύει τις ακαθαρσίες και τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Στη συνέχεια, ο αέρας μεταφέρεται από το φάρυγγα στο λάρυγγα και μετά στην τραχεία που είναι ο κύριος αεραγωγός που μεταφέρει αέρα ανάμεσα στο λαιμό και τους πνεύμονες. Από την τραχεία ο αέρας διοχετεύεται στους βρόγχους που διακλαδίζονται σχηματίζοντας το βρογχικό δένδρο. Στις άκρες αυτού υπάρχουν οι κυψελίδες (μικροσκοπικοί σάκοι που περιβάλλονται από πολύ λεπτά αιμοφόρα αγγεία) όπου εκεί καταλήγει ο αέρας που εισπνέουμε.

1.7.2. Περιοχές Αναπνευστικού Συστήματος

Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα ανατομικά χωρίζεται σε δύο τμήματα, το μεταφορικό και το αναπνευστικό. Όμως για την εκτίμηση της προσλαμβανόμενης δόσης χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

- Εκτός θώρακα περιοχή ή ανώτερο αναπνευστικό σύστημα (ET)
Η βασική του λειτουργία είναι ο πρωτοβάθμιος καθαρισμός του αέρα, η ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας αλλά και η μεταφορά του στην τραχεία και τους πνεύμονες. Ο καθαρισμός του αέρα πραγματοποιείται με διασπορά και πρόσκρουση και ύστερα στο τριχωτό γίνεται φιλτράρισμα των σωματιδίων. Περιλαμβάνει την πρόσθια και ύστερη ρινική κοιλότητα, το στόμα, το φάρυγγα και το λάρυγγα.
- Τραχειοβρογχική (TB)
Η περιοχή αυτή είναι υπεύθυνη για τον καθαρισμό του αέρα με εναπόθεση αλλά και τη μεταφορά του. Αποτελείται από την τραχεία, τους πρωτεύοντες, δευτερεύοντες και τελικούς βρόγχους.
- Κυψελιδική περιοχή (AI)
Η κύρια διεργασία που πραγματοποιείται σε αυτήν την περιοχή είναι η αναπνοή αλλά και λειτουργίες που αφορούν τους ενδοκρινείς αδένες και την άμυνα του οργανισμού.

1.7.3. Εναπόθεση σωματιδίων στο Αναπνευστικό Σύστημα

Η εναπόθεση των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα γίνεται με τους παρακάτω μηχανισμούς:

- Πρόσκρουση: Οφείλεται στην αδυναμία των σωματιδίων να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής, όταν αυτές αλλάζουν απότομα ταχύτητα ή κατεύθυνση. Πρόκειται για τον σημαντικότερο μηχανισμό εναπόθεσης (κυρίως στη διακλάδωση) που αφορά σωματίδια με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 0,5μm.
Μια σημαντική παράμετρος που περιγράφει την απόκλιση της κίνησης των σωματιδίων μέσα σε ένα ρευστό είναι ο αδιάστατος αριθμός Stokes(Stk) και η εξίσωση που τον περιγράφει, είναι:

$$Stk = \frac{\rho \cdot d_e^2 \cdot C_c \cdot V}{18 \cdot n \cdot \chi \cdot L} \quad (12), \text{ όπου } \rho \text{ είναι η πυκνότητα του σωματιδίου, } d_e \text{ είναι η ισοδύ-$$

ναμη διάμετρος, C_c ο συντελεστής διόρθωσης Cunningham, V η ταχύτητα, n είναι η αριθμητική συγκέντρωση, χ ο συντελεστής διόρθωσης για μη σφαιρικά σωματίδια με τιμές μεταξύ 1-2 και L το χαρακτηριστικό μήκος ροής. Όταν $Stk \ll 1$, τα σωματίδια ακολουθούν τη ροή του ρευστού τέλεια ενώ για $Stk \gg 1$, τα σωματίδια συνεχίζουν να κινούνται σε ευθεία γραμμή, όταν το ρευστό αλλάζει κατεύθυνση.

- Καθίζηση: Είναι η εναπόθεση (κυρίως στους αεραγωγούς) λόγω βαρύτητας για σωματίδια με διάμετρο άνω των 0,5μm.
- Διάχυση: Αποτελεί σημαντικό μηχανισμό εναπόθεσης σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή και τα βρογχιόλια. Η διάχυση περιγράφεται από τη σχέση:

$$J = -D \nabla n \quad (13), \text{ όπου:}$$
 J είναι το διάνυσμα ροής των σωματιδίων (σωματίδια/m²s), n είναι η αριθμητική συγκέντρωση και D ο συντελεστής διάχυσης (m/s)
- Ενσφήνωση-Αναχαίτιση: Οφείλεται στη φυσική επαφή των σωματιδίων (κυρίως αυτών με ινώδη μορφή) με τα τοιχώματα της αναπνευστικής οδού. Εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων.
- Ηλεκτροστατική καθίζηση: Πρόκειται για την καθίζηση των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους τους και της ταχύτητας ροής του αέρα. Η εισπνοή βέβαια, φορτισμένων σωματιδίων είναι σπάνια αφού το φορτίο τους εξουδετερώνεται από τα ιόντα της ατμόσφαιρας. Επομένως αυτού του είδους ο μηχανισμός εναπόθεσης είναι λιγότερο πιθανός από τους παραπάνω.

1.7.4. Μηχανισμοί απομάκρυνσης σωματιδίων από το Αναπνευστικό Σύστημα

Οι αναπνευστικές οδοί, εκτός από τη μεταφορά του αέρα προς τους πνεύμονες, απομακρύνουν και τα σωματίδια σκόνης που προσκολλώνται στην υγρή εσωτερική επιφάνεια των διάφορων αεραγωγών. Το σώμα διαθέτει δυο μηχανισμούς για την απομάκρυνση των ξένων σωματιδίων από τις αναπνευστικές οδούς. Τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται με το βήχα. Τα μικρά σωματίδια μεταφέρονται προς το στόμα από εκατομμύρια μικρές τρίχες που λέγονται κροσσοί. Κάθε κροσσός έχει μήκος περίπου 0.1mm και 'κυματίζει' απομακρύνοντας τη βλέννα (κινείται με ταχύτητα 1-2cm/min) που περιέχει σκόνη και άλλα μικρά σωματίδια προς τα πάνω στις κύριες αναπνευστικές οδούς (J. Cameron et al., 2002). Θα ήταν σημαντικό να αναφερθεί πως γενικά ο ρυθμός απομάκρυνσης σωματιδίων ποικίλει ανάλογα με τη διάρκεια έκθεσης, το φύλο, την ηλικία, τις ήδη υπάρχουσες ασθένειες του αναπνευστικού αλλά και από τα χαρακτηριστικά των ίδιων των σωματιδίων.

Ο καθαρισμός μιας περιοχής του αναπνευστικού από το υλικό που έχει εναποτεθεί εξαρτάται από το αρχικό σημείο απόθεσης και από τις διαδρομές που τα σωματίδια θα ακολουθήσουν εντός του αναπνευστικού συστήματος. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαίος και ο διαχωρισμός του αναπνευστικού σε διάφορα τμήματα. Ο καθαρισμός περιοχής δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{dR_i(t)}{dt} = -\lambda_i(t) \cdot R_i(t) \quad (14), \text{ όπου:}$$

- ✓ $\lambda_i(t)$: στιγμιαίος ρυθμός καθαρισμού του υλικού από μια περιοχή i
- ✓ $R_i(t)$: ποσότητα του υλικού στην περιοχή μετά από χρόνο t από την έκθεση

1.7.5. Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στην δημόσια υγεία

Τα εισπνεόμενα σωματίδια διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθός τους και επικάθονται σε συγκεκριμένο τμήμα της αναπνευστικής οδού (Dockery κ.ά., 1994). Τα μεγαλύτερα σωματίδια επικάθονται στο άνω τμήμα του αναπνευστικού συστήματος και παραμένουν εκεί για κάποιο χρονικό διάστημα. Τα πιο λεπτά σωματίδια εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους, εισχωρούν πιο βαθιά στις αναπνευστικές οδούς φτάνοντας μέχρι τις κυψελίδες δημιουργώντας έτσι πολλά προβλήματα υγείας (Morawska & Salthammer, 2003).

Πλήθος επιδημιολογικών μελετών συνδέουν την έκθεση σε σωματίδια PM_{10} , $PM_{2.5}$ με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Η έκθεση στη σωματιδιακή ρύπανση είναι δυνατόν να δημιουργήσει ή να επιδεινώσει προβλήματα του αναπνευστικού και καρδιαγγειακού συστήματος, να προκαλέσει βλάβη στους ιστούς των πνευμόνων, καρκινογενέσεις αλλά και πρόωρο θάνατο. Στις πιο ήπιες συνέπειες περιλαμβάνεται ο βήχας, τα φλέματα, οι ζαλάδες και οι αδιαθεσίες. Οι τοξικολογικές έρευνες συνεχίζονται ώστε να καθοριστούν οι αιτίες και οι μηχανισμοί δράσης των αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούν τις αρνητικές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (Godleski et al., 2000). Υπολογίζεται ότι περίπου 20.000 άτομα το χρόνο πεθαίνουν και γύρω στο 1.000.000 εισάγονται στο νοσοκομείο εξαιτίας των αεροζόλ.

1.8. Επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στον περιβάλλον

Η πιο φανερή συνέπεια της αέριας ρύπανσης είναι η μείωση της ορατότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί τα λεπτά κυρίως σωματίδια αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία. Αναλυτικότερα, τα σωματίδια δρουν σαν φίλτρο ως προς την ακτινοβολία με αποτέλεσμα μόνο ένα ποσοστό από αυτή να καταφέρνει να τα διαπεράσει, ενώ η υπόλοιπη διαχέεται, απορροφάται ή ανακλάται από τα σωματίδια. Αυτή λοιπόν η μειωμένη και αλλοιωμένη ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε ελαττωμένη ορατότητα.

Η επίδραση των αερολυμάτων στο κλίμα ποικίλουν και εξαρτώνται άμεσα από τις τοπικές εκπομπές, το χρόνο ζωής και τον τρόπο αλληλεπίδρασης των σωματιδίων αυτών με την ηλιακή ακτινοβολία. Μια άλλη επίπτωση είναι η αύξηση του χρόνου ζωής των συννέφων αλλά και η όξινη βροχή. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθούν οι επιφανειακή αλλοίωση του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος (αλλοιώσεις σε φυτά, δένδρα, υφάσματα, χρωματισμένες επιφάνειες, ηλεκτρονικά κυκλώματα κ.ά.) Οι δυο βασικές κατηγορίες μηχανισμών που εξηγούν τις αλλοιώσεις αυτές είναι η διάβρωση και η επικάθιση.

1.9. Νομοθεσία

Για τη διασφάλιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, έχουν θεσπιστεί από διάφορες χώρες ή οργανισμούς κάποια πρότυπα δηλαδή κάποιες οριακές τιμές(κατευθυντήριες) που δεν πρέπει να ξεπεραστούν για να μην υπάρξουν δυσμενείς συνέπειες στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Όμως δεν υπάρχουν ακριβείς συγκεντρώσεις για τις οποίες δημιουργείται πρόβλημα. Οι τιμές αυτές προκύπτουν κυρίως από μακροχρόνιες παρατηρήσεις των συνεπειών των περιβαλλοντικών ρύπων αλλά και από δεδομένα πειραμάτων σε ζώα ή φυτά κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες τα οποία πρέπει να προσαρμοστούν σε 'ανθρώπινους όρους'.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και η US-EPA (United States Environmental Protection Agency) είναι βασικοί οργανισμοί που εκδίδουν οδηγίες σχετικά με τα όρια των εκπεμπόμενων ρύπων αλλά και θέτουν μελλοντικούς στόχους μείωσης αυτών (EPA, 2002). Στη χώρα μας ισχύουν τα όρια που έχουν θεσπιστεί ή προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα κράτη μέλη με βάση αποτελέσματα σχετικών μελετών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας ή άλλων αναγνωρισμένων ερευνητικών κέντρων.

| | Περίοδος Αναφοράς | PM ₁₀ (μg/m ³) | PM _{2.5} (μg/m ³) |
|-----------------|-------------------|---------------------------------------|--|
| Ευρωπαϊκή Ένωση | 24-ωρη | 50 | - |
| | Ετήσια | 40 | 25 |
| | | | |
| US - EPA | 24-ωρη | 150 | 35 |
| | Ετήσια | 50 | 15 |

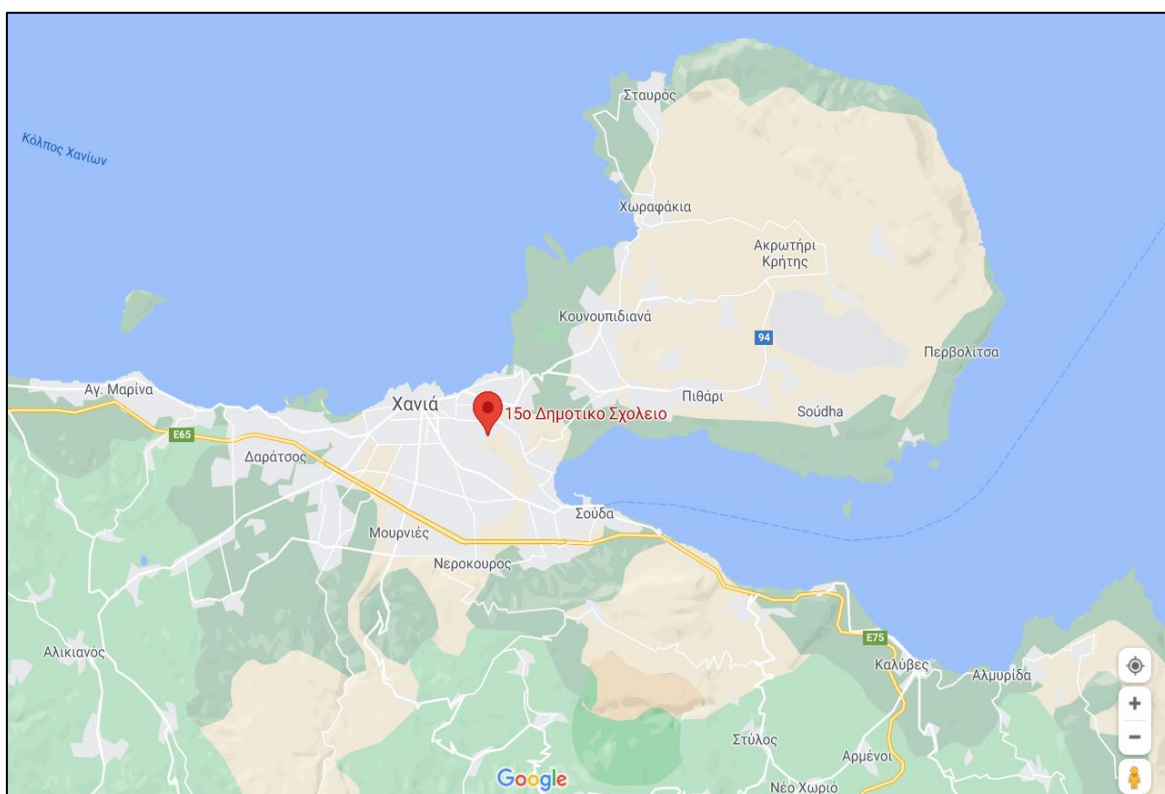
Πίνακας 5. Νομοθετικά όρια για PM₁₀ και PM_{2.5}.

Από τον παραπάνω πίνακα διαφαίνεται ότι αναφορικά με την εικοσιτετράωρη περίοδο αναφοράς για τα PM₁₀ υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά στις τιμές-όρια που θέτει η Ευρώπη σε σχέση με την Αμερική. Για την ετήσια όμως περίοδο, τα όρια είναι πολύ κοντινά. Αναφορικά με τα PM_{2.5} τα όρια είναι πιο αυστηρά συγκριτικά με τα PM₁₀, γιατί τα πρώτα είναι πολύ μικρότερα και συνεπώς πιο εύκολα να εισχωρήσουν στον οργανισμό του ανθρώπου. Τέλος, είναι σημαντικό να τονισθεί πως κάθε έκθεση του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια, επιβαρύνει την υγεία ελάχιστα έως πάρα πολύ.

Κεφάλαιο Δεύτερο: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

2.1. Περιοχή μελέτης

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη Χανίων και πιο συγκεκριμένα στο 38^ο Νηπιαγωγείο Χανίων, το οποίο στεγάζεται σε μία αίθουσα εντός του 15^{ου} Δημοτικού σχολείου. Πρόκειται για μια περιοχή λίγο πιο έξω από το κέντρο των Χανίων που έχει υψόμετρο 80 – 85 μέτρα. Επίσης, πολύ κοντά υπάρχει δασική έκταση αλλά και καλλιεργήσιμα χωράφια.



Εικόνα 10. Χάρτης της ευρύτερης περιοχής των Χανίων. Με κόκκινη πινέζα είναι η τοποθεσία του νηπιαγωγείου

Αναφορικά με το νηπιαγωγείο, πρόκειται για ένα χώρο 40 τετραγωνικών μέτρων, που βρίσκεται στο ισόγειο του σχολείου και ακριβώς δίπλα είναι ο προαύλιος χώρος. Ο χώρος απαρτίζεται από θρανία, καρεκλάκια, βιβλιοθήκη, μερικά παιχνίδια αλλά και κουζίνα μιας και τα παιδιά τρώνε εκεί. Το ανθρώπινο δυναμικό είναι 17 μαθητές και δύο δασκάλες.



Εικόνα 11. Εξωτερική όψη νηπιαγωγείου.



Εικόνα 12. Εσωτερικός χώρος νηπιαγωγείου.

2.2. Οργανολογία

Όργανο Μέτρησης DustTrak

Η συνεχής παρακολούθηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός μετρητή καταγραφής Dusttrak της εταιρίας TSI. Πρόκειται βασικά για ένα φορητό λέιζερ – φωτόμετρο. Δίνει τη δυνατότητα να μετρούνται συγκεντρώσεις μάζας PM_{10} , $PM_{2,5}$ ή PM_1 σωματιδίων, με την προσαρμογή κατάλληλης κεφαλής μέτρησης. Λειτουργεί είτε συνδεδεμένο σε συνεχή τάση είτε με χρήση μπαταρίας. Στο πακέτο του οργάνου περιλαμβάνεται και λογισμικό (Software) με το οποίο μέσω υπολογιστή είναι εφικτό να διαχειριστούν τόσο οι δειγματοληψίες όσο και οι εξαγωγή των δεδομένων ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ελέγχους της ποιότητας εσωτερικών χώρων, χώρων εργασίας και βιομηχανιών αλλά και για μετρήσεις σε απομακρυσμένες περιοχές.

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΟΥ | |
|---|------------------------|
| Βάρος | 1,5 kg |
| Πραγματικό μέγεθος μετρούμενων σωματιδίων | 0,1-10 μm |
| Διακριτικότητα | 0,1% ή 0,001 μm^3 |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ | |
| DUSTTRAK | |
| Μήκος | 150 mm |
| Πλάτος | 221 mm |
| Ύψος | 87 mm |

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά DustTrak.



Εικόνα 13. Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak.

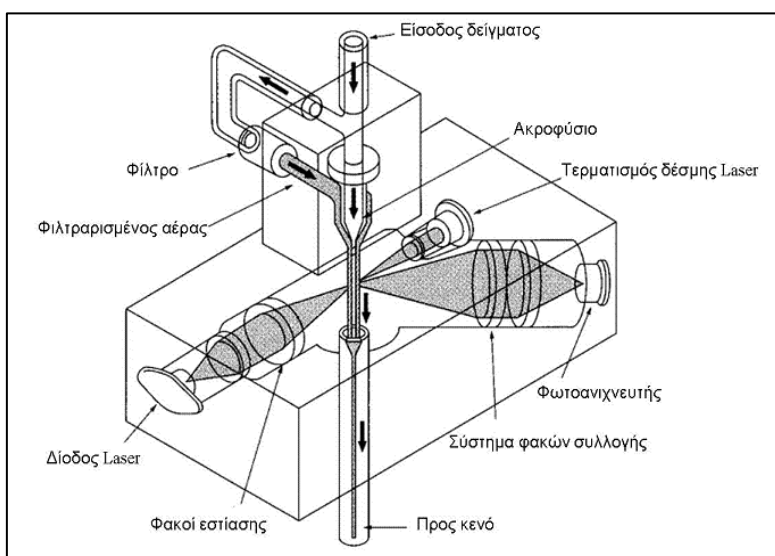
Χρήση οργάνου

Το DustTrak διαθέτει τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας: Survey, LOG1, LOG2, LOG3. Μόλις η συσκευή τεθεί σε λειτουργία θα βρίσκεται σε κατάσταση Survey, η οποία χρησιμοποιείται για να εμφανίζει στην οθόνη real-time ενδείξεις και να προσδιορίζει στατιστικά στοιχεία όπως η μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Η LOG1 καταγράφει δεδομένα για μετέπειτα ανάλυση χρησιμοποιώντας ένα σταθερό πρωτόκολλο, ενώ οι LOG2 και LOG3 λειτουργίες πραγματοποιούν την ίδια διεργασία μέσω ενός πρωτοκόλλου που καθορίζεται από το χρήστη. Το λογισμικό TRAKPRO χρησιμοποιείται για ανάλυση των δεδομένων που αποκτήθηκαν μέσω των LOG modes, αλλά όχι σε δείγματα από την κατάσταση Survey.

Για να χρησιμοποιηθεί το όργανο θα πρέπει πρώτα να βαθμονομηθεί. Η βαθμονόμηση γίνεται πριν από εκτενείς μετρήσεις αλλά και μετά από μια περιβαλλοντική αλλαγή όπως αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Έπειτα γίνεται καθαρισμός και τοποθέτηση της κατάλληλης κεφαλής. Τέλος το όργανο τοποθετείται σε σταθερό σημείο, συνδέεται στην πρίζα και τίθεται σε λειτουργία σε όποιο 'πρόγραμμα' επιλέξει ο χρήστης.

Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία του βασίζεται στη σκέδαση του φωτός από τα σωματίδια. Ένα ρεύμα αέρα μαζί με αιωρούμενα σωματίδια εισέρχεται στο εσωτερικό του οργάνου (Εικόνα 14) και χωρίζεται σε δύο τμήματα.



Εικόνα 14. Αρχή λειτουργίας του DustTrak

Το πρώτο τμήμα περνάει από φίλτρο και καθαρίζεται από τα αιωρούμενα σωματίδια, ενώ το δεύτερο τμήμα εισέρχεται απευθείας στο θάλαμο μέτρησης, όπου ακτινοβολείται από ακτίνα μονοχρωματικού φωτός (Laser). Η ακτίνα αυτή παράγεται από δίοδο laser και εστιάζεται κατάλληλα πάνω στο δείγμα μέσα από ένα σύστημα φακών. Το σκεδαζόμενο

φως κατευθύνεται σε έναν ανιχνευτή αφού πρώτα ανακλαστεί σε φακό επικαλυμμένο με χρυσό. Η τάση του ανιχνευτή είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων στο δείγμα. Η τάση αυτή, πριν αντιστοιχιστεί στη συγκέντρωση, πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά που προκύπτει από την απόκριση του οργάνου σε γνωστή συγκέντρωση συγκεκριμένου δείγματος αιωρούμενων σωματιδίων. Η σταθερά αυτή χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτηση της σκέδασης από το συντελεστή σκέδασης, την κατανομή μεγέθους, το σχήμα και την πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο εξεταζόμενο δείγμα αέρα. Το όργανο παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια για δείγματα αιωρούμενων σωματιδίων που αποτελούνται από ίδιου μεγέθους σωματίδια (monodisperse aerosol). Κατά τη χρήση του σε πραγματικά περιβάλλοντα, συνίσταται η βαθμονόμηση του με βάση τα χαρακτηριστικά των μετρούμενων σωματιδίων.

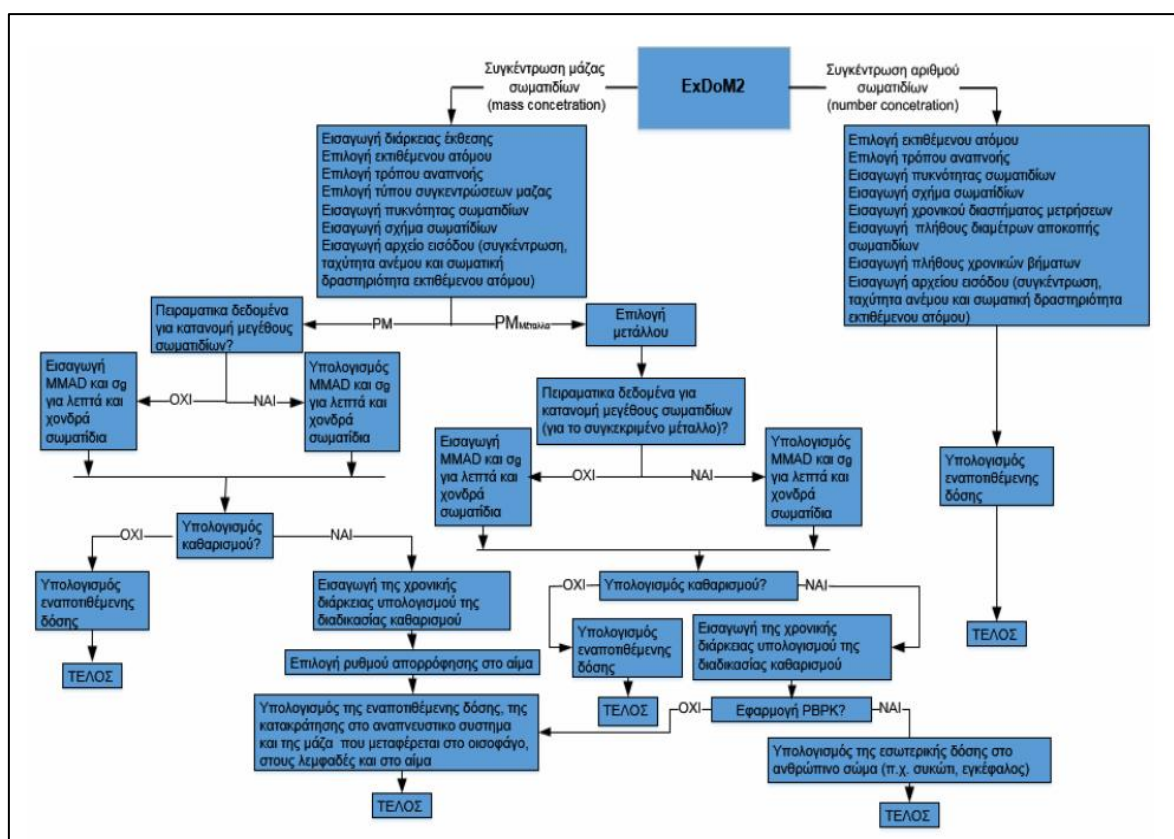
2.3. Περιγραφή του μοντέλου ExDoM2

Ένα μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων εισχωρεί στον οργανισμό μας και εναποτίθεται εντός του αναπνευστικού συστήματος γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει πολλά προβλήματα. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που να υπολογίζουν την εναποτιθέμενη δόση στον άνθρωπο.

Ένα τέτοιο μοντέλο είναι και το ExDoM2. Πρόκειται για ένα ημιεμπειρικό μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι το αναπνευστικό σύστημα αποτελείται από διακριτές περιοχές που λειτουργούν σαν φίλτρα. Με τη βοήθεια μαθηματικών εξισώσεων υπολογίζουν την απόδοση κάθε φίλτρου, αντιμετωπίζοντας «στατιστικά» τη φυσική διαδικασία της εναπόθεσης. Για να εφαρμοστούν χρειάζονται δεδομένα εισόδου που αφορούν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες προέκυψαν τα πειραματικά δεδομένα και για αυτό θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα.

Το μοντέλο ExDoM2 (Chalvatzaki & Lazaridis, 2015) είναι βασισμένο στο προγενέστερο ExDoM (Aleksandropoulou & Lazaridis, 2010). Στο νέο μοντέλο έχουν ενσωματωθεί νέοι μηχανισμοί καθαρισμού από το αναπνευστικό με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από την International Commission on Radiological Protection (ICRP) αλλά και το φαρμακοκινητικό μοντέλο (PBPK: Physiologically based pharmacokinetic modeling) για τη μεταφορά των βαρέων μετάλλων που περιέχουν τα σωματίδια από το αίμα στο σώμα του ανθρώπου.

Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου πραγματοποιείται μέσω μιας πλατφόρμας λογισμικού και επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει τα δεδομένα εισόδου σε γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI, Graphical User Interface) και σε αρχεία Excel.



Εικόνα 15. Διάγραμμα ροής του μοντέλου ExDoM2 (Chalvatzaki, Phd 2016).

Τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται από το χρήστη στο μοντέλο ExDoM2 είναι τα ακόλουθα:

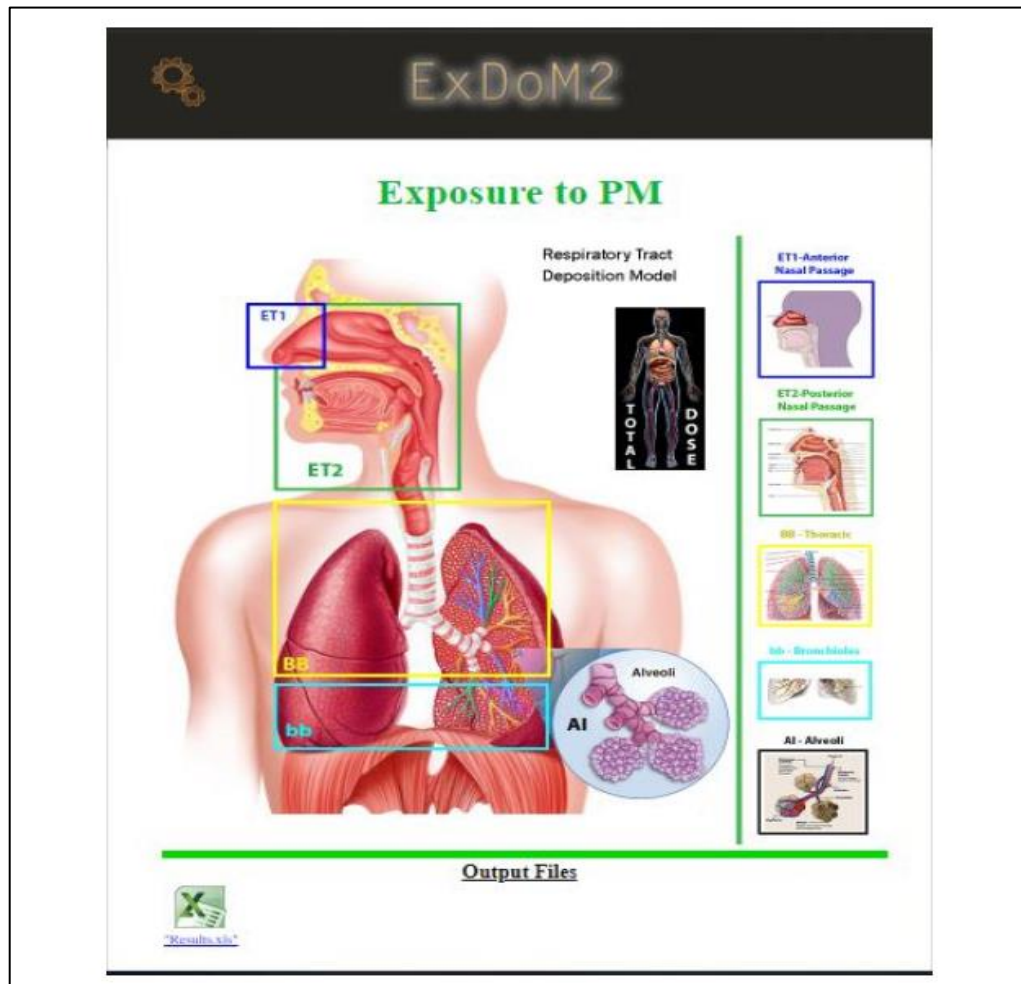
- Επιλογή τύπου συγκέντρωσης ($\frac{\text{σωματίδια}(\#)}{\text{cm}^3}$ ή $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$)
- Διάρκεια έκθεσης ατόμου (σε ώρες ή ημέρες)
- Επιλογή εκτιθέμενου ατόμου (π.χ. ενήλικας άνδρας, κορίτσι 5 ετών)
- Επιλογή του τρόπου αναπνοής του εκτιθέμενου ατόμου (μύτη ή στόμα) (ICRP, 2002)
- Είδος σωματιδίων (PM ή PM_{μέταλλα})
- Επιλογή τύπου δεδομένων συγκεντρώσεων μάζας. Ο χρήστης μπορεί να διαθέτει δεδομένα συνολικής συγκέντρωσης (π.χ. PM₁₀) ή δεδομένα μόνο για λεπτά και χονδρά σωματίδια.
- Η πυκνότητα των σωματιδίων σε g/cm³
- Το σχήμα των σωματιδίων (για σφαιρικά σωματίδια η τιμή ισούται με 1)
- Επιλογή εάν ο χρήστης επιθυμεί να συνεχίσει την εφαρμογή υπολογίζοντας τη δόση στο αναπνευστικό σύστημα μετά τον καθαρισμό.
- Εισαγωγή της χρονικής διάρκειας υπολογισμού της διαδικασίας καθαρισμού.
- Επιλογή ρυθμού απορρόφησης των σωματιδίων στο αίμα (slow, moderate, fast)
- Επιλογή για το αν ο χρήστης διαθέτει δεδομένα για την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων από μετρήσεις με δειγματολήπτη.
- Το πλήθος των σταδίων του δειγματολήπτη
- Εισαγωγή του επιθυμητού ορίου για τον διαχωρισμό σε λεπτά και χονδρά.
- Επιλογή για το αν υπάρχουν διαφορετικές κατανομές μεγέθους ανά ώρα λόγω των διαφορετικών χώρων έκθεσης.
- Εισαγωγή αρχείου εισόδου
- Εισαγωγή πειραματικών δεδομένων κατανομής μεγέθους των σωματιδίων.
- Εισαγωγή πρώτου αρχείου εισόδου excel με δεδομένα: τη συγκέντρωση των σωματιδίων, την ταχύτητα του αέρα και το επίπεδο σωματικής άσκησης. Αναφορικά με το επίπεδο της άσκησης υπάρχουν τέσσερις διαβαθμίσεις όπου 1 = ύπνος, 2 = ανάπαυση, 3 = ελαφρά εργασία και 4 = βαριά εργασία.
- Εισαγωγή δευτέρου αρχείου εισόδου excel με δεδομένο: την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων.

The screenshot displays the ExDoM2 software interface, which is designed for exposure assessment. It features several sections for user input:

- Exposure duration:** A calendar icon labeled "Days" with input fields for days (1) and hours (0).
- Gender & Age:** A dropdown menu set to "Male Adult".
- Breathing Type:** A dropdown menu set to "Nose".
- Total Concentration in the Input File:** A dropdown menu set to "PM10, ...".
- Particle density:** A numeric input field set to "1.5 g/cm³".
- Shape Factor:** A numeric input field set to "1" (1 for spherical particles).
- Calculation for clearance:** A calendar icon labeled "Days" with input fields for days (1) and hours (0) after initial intake.
- Particles:** Radio buttons for "PM" (selected) and "PM Bound-Metal".
- Continue calculating the dose after the Clearance procedure:** A checked checkbox.
- Blood Particle Absorption Behavior:** A circular gauge with "SLOW", "MODERATE", and "FAST" settings, currently set to "Moderate".
- Experimental Data on Mass available:** A checked checkbox.
- Size Distribution:** An icon showing a size distribution graph.
- Different exposure microenvironment?:** Radio buttons for "No" (selected) and "Yes".
- Experimental Data on Mass:** A section with "Browse" buttons for Pathname and Filename, and a "Table line counting from bottom" option.
- Input File:** Radio buttons for "Attach an Input File (xls)" (selected) and "Create a new Input File (xls)".
- Attach the Input File .xls:** A "Browse" button and input fields for Pathname and Filename.
- Impactor Stages:** A numeric input field set to "9".
- Cut-Off point (N1) for fine mode particles:** A numeric input field set to "4".
- Print Variables to Cmd_W:** A button.
- start:** A large "start" button with a green progress bar.
- Press 'Start' to proceed....** A text prompt at the bottom.

Εικόνα 16. Περιβάλλον εργασίας ExDoM2.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται σε περιβάλλον δυναμικής ιστοσελίδας όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 17. Πατώντας πάνω στις περιοχές του αναπνευστικού παρουσιάζεται η δόση που έχει λάβει το εκτιθέμενο άτομο. Επιπλέον, εμφανίζεται αρχείο excel στο οποίο υπάρχουν αναλυτικά όλες οι πληροφορίες συγκεντρωμένες για τις περιοχές εκτός θώρακος (ET1, ET2) αλλά και του θώρακος που διαιρείται σε BB (τραχεία και βρόγχοι), bb (βρογχιόλια) και AI (κυψελιδική περιοχή).



Εικόνα 17. Παρουσίαση αποτελεσμάτων ExDoM2.

2.4. Εκτίμηση οπισθοπορειών αέριων μαζών (Backward Trajectory Analysis)

Η γνώση των τροχιών που ακολουθούν οι αέριες μάζες, πριν προσεγγίσουν ένα συγκεκριμένο σημείο της γης, είναι πολύ σημαντική. Οι εικόνες από τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των φωτοχημικών και σωματιδιακών μοντέλων διασποράς αλλά και για τα θρεπτικά συστατικά που μεταφέρονται σε περιοχές με μεγάλο οικολογικό ενδιαφέρον, όπως αυτή του Αμαζονίου.

Η ανάλυση των οπισθοπορειών γίνεται με τη βοήθεια υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία υπολογίζουν τις τροχιές των αέριων μαζών με σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα λόγω των ελλιπών μετεωρολογικών δεδομένων αλλά και των υποθέσεων που γίνονται σχετικά με την κατακόρυφη μεταφορά (Mahura et al., 1999). Συνεπώς, οι τροχιές που υπολογίζονται είναι μια καλή εκτίμηση της κίνησης της αέριας μάζας συνεκτιμώντας ένα σφάλμα της τάξης 20% (Stohl et al, 1998).

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των τροχιών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του μοντέλου HYSPLIT 4 του National Oceanic and Atmospheric Administration των ΗΠΑ. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τα μετεωρολογικά δεδομένα FNL (Final run) από τη βάση δεδομένων GDAS (Global Data Assimilation System). Για να υπολογισθεί οπισθοτροχιά αέριων μαζών μέχρι το έτος 2006 επιλέγεται FNL ενώ από το 2006 και μετά επιλέγεται GDAS. Για τον υπολογισμό της οπισθοτροχιάς μετά το έτος 2006, επιλέγεται GDAS. Έπειτα, εισάγονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες, η ημερομηνία και ώρα αλλά και ο χρόνος για τον οποίο ο χρήστης ενδιαφέρεται να λάβει πληροφορίες. Τέλος, επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο ο μελετητής θέλει να εμφανίζονται γραφικά τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο Τρίτο: Αποτελέσματα

3.1. Αποτελέσματα μετρήσεων δειγματολήπτη DustTrak

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του νηπιαγωγείου προκειμένου να μελετηθεί η ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια των μαθημάτων. Πρόκειται για μετρήσεις που λαμβάνονται αυτόματα από το δειγματολήπτη ανά 5 λεπτά. Για την καλύτερη μελέτη των αποτελεσμάτων η κάθε ημέρα χωρίστηκε σε τρεις περιόδους. Η πρώτη περίοδος είναι από τα μεσάνυχτα έως τις 07:30 το πρωί, η δεύτερη είναι από 07:30 έως 16:30 δηλαδή οι ώρες λειτουργίας του νηπιαγωγείου και τέλος από 16:30 έως τα μεσάνυχτα.

Το μέγιστο πλήθος 5λεπτων μετρήσεων κάθε περιόδου είναι $N=90$ για την πρώτη και την τρίτη περίοδο και $N=108$ για τη δεύτερη περίοδο. Για κάποιες περιόδους δεν έχουμε όλες τις μετρήσεις ή και καθόλου. Αυτό συνέβη λόγω διακοπών ρεύματος στην ευρύτερη περιοχή του Αγίου Ιωάννη ή λόγω ανάγκης ηλεκτρονικής μεταφοράς των μετρήσεων από το δειγματολήπτη στον υπολογιστή ανά 2 ημέρες περίπου.

Στον παρακάτω πίνακα διαφαίνονται οι μέσες τιμές συγκέντρωσης ανά περίοδο και το πλήθος των μετρήσεων διάρκειας πέντε λεπτών έκαστοι. Με μια πρώτη ματιά παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων είναι τη δεύτερη περίοδο, τις ώρες δηλαδή που το νηπιαγωγείο λειτουργεί. Τις ώρες εκείνες όλοι οι μαθητές είναι εντός του χώρου και κάνουν διάφορες δραστηριότητες επομένως εξηγούνται οι πιο υψηλές συγκεντρώσεις. Οι αμέσως μεγαλύτερες τιμές είναι αυτές της τρίτης περιόδου. Εκείνες τις ώρες στον χώρο δεν υπάρχουν άνθρωποι, παρόλα αυτά τα σωματίδια δεν έχουν εναποτεθεί ακόμα στις επιφάνειες των επίπλων και του πατώματος. Τέλος, οι μικρότερες τιμές είναι της πρώτης περιόδου.

Έχει υπολογισθεί για κάθε περίοδο αλλά και συνολικά η μέση τιμή αλλά και οι τυπική απόκλιση των τιμών των συγκεντρώσεων. Η συνολική μέση συγκέντρωση για όλες τις ημέρες εσωτερικών μετρήσεων βρέθηκε ίση με $34,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και η τυπική απόκλιση $24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ειδικότερα, για την πρώτη περίοδο (00:00-07:30) η μέση τιμή είναι $24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ η τυπική απόκλιση είναι $12,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τη δεύτερη (07:30-16:30) και τρίτη (16:30-00:00) περίοδο η μέση τιμή είναι κατ' αντιστοιχία $47,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $30,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ η τυπική απόκλιση $30,7$ και $15,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι τη δεύτερη περίοδο οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες σε σχέση με τις άλλες δυο περιόδους, γεγονός που εξηγείται αφού τις ώρες εκείνες το σχολείο είναι σε λειτουργία.

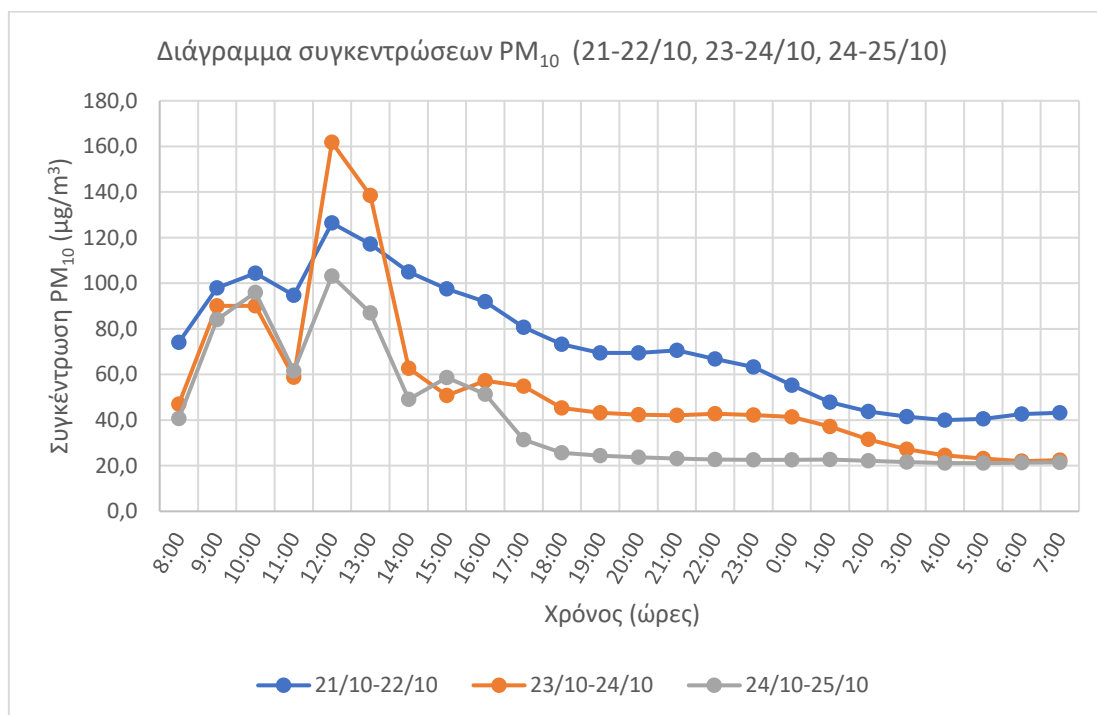
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | 1 ^η Περίοδος (00:00 – 07:30) | | 2 ^η Περίοδος (07:30 – 16:30) | | 3 ^η Περίοδος (16:30 – 24:00) | |
|---|--|--------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | Συγκέντρωση 1 ^{ης} Περίοδου (μg/m ³) | Πλήθος 5λεπτων μετρήσεων | Συγκέντρωση 2 ^{ης} Περίοδου (μg/m ³) | Πλήθος 5λεπτων μετρήσεων | Συγκέντρωση 3 ^{ης} Περίοδου (μg/m ³) | Πλήθος 5λεπτων μετρήσεων |
| 19-Οκτ | | | 18,10 | 108 | 29,54 | 90 |
| 20-Οκτ | 28,53 | 90 | 47,84 | 108 | 64,25 | 90 |
| 21-Οκτ | 59,29 | 90 | 101,10 | 108 | 69,65 | 90 |
| 22-Οκτ | 43,45 | 90 | 71,88 | 63 | 36,62 | 90 |
| 23-Οκτ | 32,58 | 90 | 84,16 | 108 | 44,49 | 90 |
| 24-Οκτ | 27,79 | 90 | 70,12 | 108 | 24,63 | 90 |
| 25-Οκτ | 21,73 | 90 | 29,16 | 86 | 27,25 | 90 |
| 26-Οκτ | 22,04 | 90 | 21,93 | 108 | 26,12 | 90 |
| 27-Οκτ | 25,43 | 90 | 39,93 | 108 | 32,74 | 90 |
| 28-Οκτ | 22,77 | 90 | 25,87 | 108 | 29,43 | 90 |
| 29-Οκτ | 22,82 | 90 | 69,46 | 72 | | |
| 30-Οκτ | | | 46,48 | 29 | 27,94 | 90 |
| 31-Οκτ | 21,36 | 90 | 52,88 | 108 | 16,87 | 39 |
| 1-Νοε | | | 55,17 | 70 | | |
| 4-Νοε | | | 42,57 | 74 | 8,71 | 90 |
| 5-Νοε | 11,41 | 90 | 44,60 | 108 | 27,62 | 90 |
| 6-Νοε | 24,08 | 90 | 59,22 | 94 | | |
| 7-Νοε | | | 51,05 | 6 | 18,13 | 90 |
| 8-Νοε | 12,39 | 90 | 15,78 | 11 | | |
| 12-Νοε | | | 68,90 | 90 | 41,75 | 90 |
| 13-Νοε | 32,85 | 90 | 45,31 | 108 | 15,67 | 90 |
| 14-Νοε | 33,89 | 90 | 56,48 | 108 | 19,64 | 90 |
| 15-Νοε | 6,97 | 90 | 9,05 | 8 | | |
| 18-Νοε | | | 62,47 | 43 | | |
| 22-Νοε | | | 32,51 | 41 | 21,47 | 90 |
| 23-Νοε | 8,72 | 90 | 14,15 | 108 | 19,11 | 90 |
| 24-Νοε | 13,99 | 90 | 13,56 | 108 | 25,26 | 90 |
| 25-Νοε | 14,06 | 90 | 29,37 | 67 | 24,26 | 42 |
| | | | | | | |
| Μέση συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³) | 24,31 ± 12,9 | | 47,40 ± 30,7 | | 30,08 ± 15,8 | |

Πίνακας 7. Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων από το δειγματολήπτη DustTrak.

Κάτωθι, αναπαρίστανται οι ωριαίες συγκεντρώσεις των τριών πρώτων ημερών μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου. Τονίζεται ότι ως μια ημέρα μετρήσεων θεωρείται από 07:30 της μίας έως 07:30 της επόμενης ημέρας. Αυτό γιατί κάθε ημέρα επηρεάζεται από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες της προηγούμενης.

Στο παρακάτω γράφημα παρατηρείται ότι κατά το άνοιγμα του νηπιαγωγείου και τον ερχομό των μαθητών στις 08:00, η συγκέντρωση των PM_{10} ξεκινά και για τις τρεις καθημερινές ημέρες από τιμές μεταξύ 40 και $70\mu g/m^3$, στη συνέχεια ανεβαίνει μέχρι το πρώτο μέγιστο περίπου στις 10:00. Αυτό, πιθανώς οφείλεται στο ότι εκείνη την ώρα πραγματοποιείται το πρώτο διάλειμμα, όπου τα παιδιά βγαίνουν τρέχοντας από την αίθουσα με αποτέλεσμα αρκετή σκόνη επαναιωρείται από το δάπεδο και αντίστοιχα όταν μπαίνουν στην αίθουσα φέρνουν μέσω των παπουτσιών τους επιπλέον σκόνη από τον προαύλιο χώρο. Ακολουθως, υπάρχει μείωση της συγκέντρωσης μέχρι τις 11:30, όπου τότε ξεκινά να αυξάνεται πάρα πολύ έως τις 12:30 όπου είναι και το μέγιστο όλης της ημέρας, με τιμές από 100 έως και $160\mu g/m^3$ για κάθε ημερομηνία που απεικονίζεται στο διάγραμμα. Την ώρα που προκύπτει η μέγιστη τιμή, κάποιες τάξεις του Δημοτικού αλλά και οι μισοί μαθητές του νηπιαγωγείου, σχολάνε. Η αίθουσα του νηπιαγωγείου βρίσκεται ακριβώς δίπλα από την κύρια είσοδο του σχολείου με αποτέλεσμα να μεταφέρονται σωματίδια και εντός του υπό μελέτη χώρου μιας και υπάρχει μεγάλη αλληλεπίδραση εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Έπειτα, υπάρχει αισθητή μείωση της συγκέντρωσης των σωματιδίων μέχρι τις 16:00. Τέλος, με πολύ μικρή κλίση η συγκέντρωση συνεχίζει να μειώνεται έως ότου σταθεροποιηθεί σε χαμηλές τιμές από 20 έως $40\mu g/m^3$.

Συμπερασματικά, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και διακυμάνσεις παρατηρούνται τη δεύτερη χρονική περίοδο της ημέρας (07:30 – 16:30) όπου το νηπιαγωγείο είναι ανοιχτό και εξηγούνται με λογική βάση τα αποτελέσματα αυτά. Αναφορικά με την πρώτη και τρίτη περίοδο, οι συγκεντρώσεις είναι πολύ μικρότερες αφού δεν υπάρχει κάποια άμεση πηγή εκπομπής σωματιδίων εντός του χώρου.



Γράφημα 1. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (21-22,23-24,24-25/10)

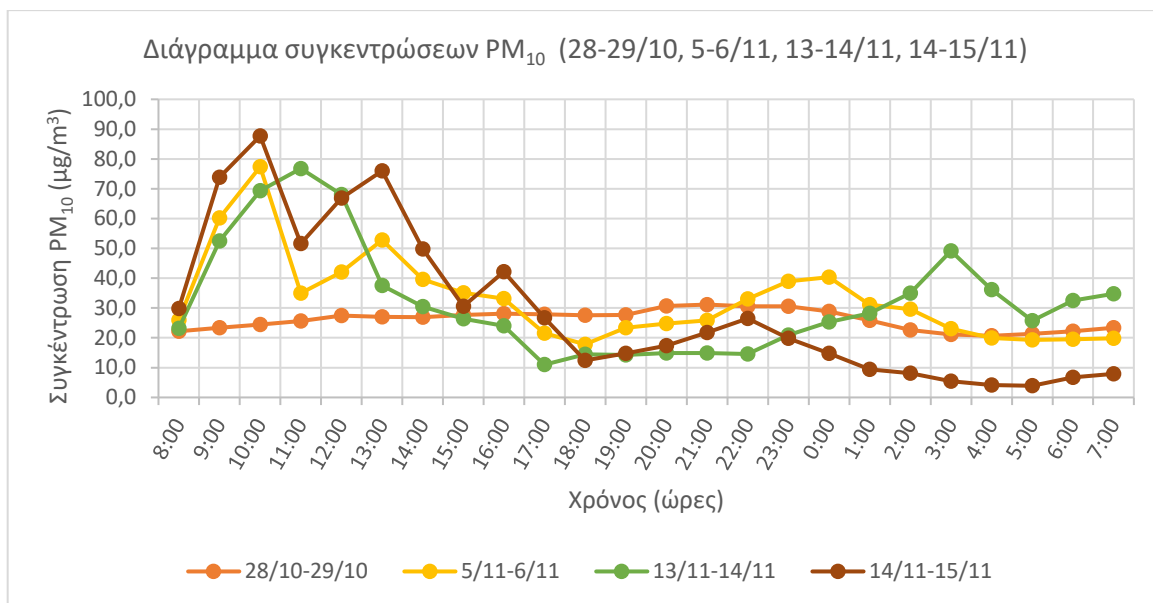
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τις συγκεντρώσεις σωματιδίων για τις ημέρες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο διάγραμμα και επιβεβαιώνουν κάποιες παρατηρήσεις που σχολιάσθηκαν προηγουμένως. Αναφορικά με τη μέση ημερήσια συγκέντρωση, η μεγαλύτερη τιμή παρατηρείται την πρώτη ημέρα, και ακολουθούν, η δεύτερη και η τρίτη μέρα. Η διακύμανση πάλι είναι μεγαλύτερη τη δεύτερη μέρα, δηλαδή οι συγκεντρώσεις έχουν μεγάλες αυξομειώσεις εντός του εικοσιτετραώρου και συνεπώς και το σφάλμα είναι μεγαλύτερο. Ακόμη, την δεύτερη ημέρα παρατηρείται η μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη τιμή σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο ημέρες.

| Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση $PM_{10}(\frac{\mu g}{m^3})$ για τις ωριαίες μετρήσεις | 21-22/10 | 23-24/10 | 24-25/10 |
|--|----------|----------|----------|
| Μέσος | 73,22 | 54,12 | 40,81 |
| Τυπικό σφάλμα | 5,36 | 7,09 | 5,49 |
| Διάμεσος | 70,00 | 42,98 | 24,06 |
| Επικρατούσα τιμή | Δ/Υ | 90,06 | 22,58 |
| Μέση απόκλιση τετραγώνου | 26,24 | 34,74 | 26,88 |
| Διακύμανση | 688,29 | 1207,16 | 722,50 |
| Ελάχιστο | 40,00 | 22,01 | 21,14 |
| Μέγιστο | 126,37 | 161,73 | 103,18 |
| Πλήθος | 24,00 | 24,00 | 24,00 |

Πίνακας 8. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση των PM_{10} (21-22, 23-24, 24-25/10).

Στη συνέχεια, παρατίθεται ένα ακόμη διάγραμμα όπου απεικονίζονται οι ωριαίες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου για άλλες τέσσερις καθημερινές ημέρες. Αρχικά, αναφορικά με την γραμμή που αντιπροσωπεύει την ημερομηνία 28-29 Οκτωβρίου πρέπει να σημειωθεί ότι εκείνη την ημέρα τα παιδιά και οι δασκάλες του νηπιαγωγείου έλλειπαν σε εκπαιδευτική εκδρομή. Για αυτό το λόγο, η συγκέντρωση μένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με μέση τιμή τα $25\mu g/m^3$.

Σχετικά με τις άλλες τρεις ημέρες οι διακυμάνσεις είναι παρόμοιες. Πιο συγκεκριμένα, το πρωί ξεκινούν από την ίδια σχεδόν αρχή που είναι τα $25\mu g/m^3$ και αυξάνονται φτάνοντας στο μέγιστο γύρω στις 10:30 με συγκεντρώσεις από 78 έως $90\mu g/m^3$. Έπειτα, παρατηρείται μια μείωση έως το μεσημέρι στις 13:30 όπου προκύπτει ξανά μέγιστο. Και τα δυο μέγιστα, αφορούν ώρες διαλειμμάτων ή σχολάσματος του δημοτικού ή του νηπιαγωγείου. Στη συνέχεια υπάρχει πτώση της συγκέντρωσης με μια μικρή αύξησή της από τις 21:00 μέχρι και τις 03:00. Πιθανώς, επειδή πρόκειται για ημερομηνίες που αφορούν το μήνα Νοέμβριο, η αύξηση αυτή να οφείλεται σε καμινάδες τζακιών. Τέλος, η συγκέντρωση πέφτει και πλέον κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές περίπου στα $20\mu g/m^3$.



Γράφημα 2. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀ συναρτήσει του χρόνου (28-29/10, 5-6, 13-14, 14-15/11)

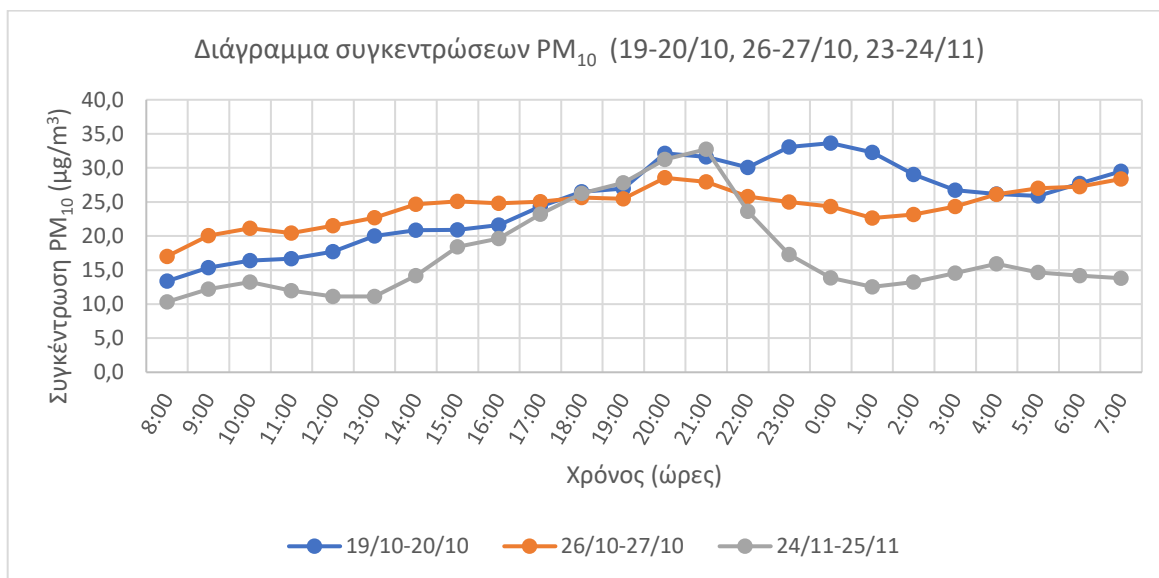
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τις συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ για τις ημέρες που αναλύθηκαν προηγουμένως. Κατ' αρχήν, στις 28-29/10 η μέση τιμή είναι 26,03μg/m³ και η διακύμανση 10,83, δείχνοντας ξεκάθαρα πόσο σταθερές ήταν οι συγκεντρώσεις όλο το εικοσιτετράωρο μια και τη μέρα εκείνη παιδιά και μαθητές έλειπαν από το σχολείο. Για τις υπόλοιπες ημέρες του Νοέμβρη παρατηρείται πως οι μέσες τιμές είναι πολύ κοντινές και κυμαίνονται περίπου στα 31μg/m³. Παρ' όλα αυτά η διακύμανση για τις 14-15/11 είναι τριπλάσια από αυτή στις 5-6/11 και σχεδόν διπλάσια από αυτή στις 13-14/11. Αντίστοιχα, το μεγαλύτερο σφάλμα εμφανίζεται την ημέρα με τη μεγαλύτερη διακύμανση, δηλαδή 14-15/11.

| Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM ₁₀ ($\frac{\mu g}{m^3}$) για τις ωριαίες μετρήσεις | 28-29/10 | 5-6/11 | 13-14/11 | 14-15/11 |
|--|----------|--------|----------|----------|
| Μέσος | 26,03 | 32,86 | 32,49 | 29,49 |
| Τυπικό σφάλμα | 0,67 | 2,94 | 3,76 | 5,17 |
| Διάμεσος | 26,97 | 30,37 | 27,30 | 20,79 |
| Επικρατούσα τιμή | 22,19 | Δ/Υ | Δ/Υ | Δ/Υ |
| Μέση απόκλιση τετραγώνου | 3,29 | 14,41 | 18,44 | 25,33 |
| Διακύμανση | 10,83 | 207,61 | 340,20 | 641,44 |
| Ελάχιστο | 20,67 | 17,81 | 10,99 | 3,91 |
| Μέγιστο | 31,14 | 77,35 | 76,77 | 87,72 |
| Πλήθος | 24,00 | 24,00 | 24,00 | 24,00 |

Πίνακας 9. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM₁₀(28-29/10, 5-6/11, 13-14/11, 14-15/11)

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις κάποιων Σαββάτων του Οκτωβρίου και Νοεμβρίου. Με μια πρώτη ματιά, φαίνεται πως αλλάζει εντελώς η συμπεριφορά των ωριαίων συγκεντρώσεων σε αντίθεση με τις καθημερινές ημέρες, αφού εδώ τα μέγιστα παρατηρούνται τις βραδινές ώρες. Πιο αναλυτικά, το πρωί και για τις τρεις ημέρες οι συγκεντρώσεις ξεκινούν από τα 15μg/m³ και αυξάνονται σταδιακά μέχρι τις 21:00 περίπου όπου μεγιστοποιούνται με τιμές κοντά στα 35μg/m³. Στην περίπτωση αυτή, μια πιθανή αιτία είναι πως πολύ κοντά στο νηπιαγωγείο υπάρχει ένα ψητοπωλείο το οποίο κυρίως δουλεύει τα Σάββατα. Έτσι, τα σωματίδια που βγαίνουν

από την καμινάδα βοηθούν στην αύξηση της σωματιδιακής συγκέντρωσης της γύρω περιοχής. Από το βράδυ στις 22:00 έως και τις 02:00 τα ξημερώματα, παρατηρείται μια διαφορετική συμπεριφορά της γραφικής παράστασης, η οποία δεν ξέρουμε ακριβώς που οφείλεται. Σίγουρα παράγοντες όπως κίνηση αυτοκινήτων, ύπαρξη καμινάδων αλλά και μετεωρολογικές παράμετροι επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις. Από τις 02:00 και μετά σταθεροποιούνται οι τιμές για όλες τις ημέρες.



Γράφημα 3. Διάγραμμα συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (19-20, 26-27/10, 23-24/11)

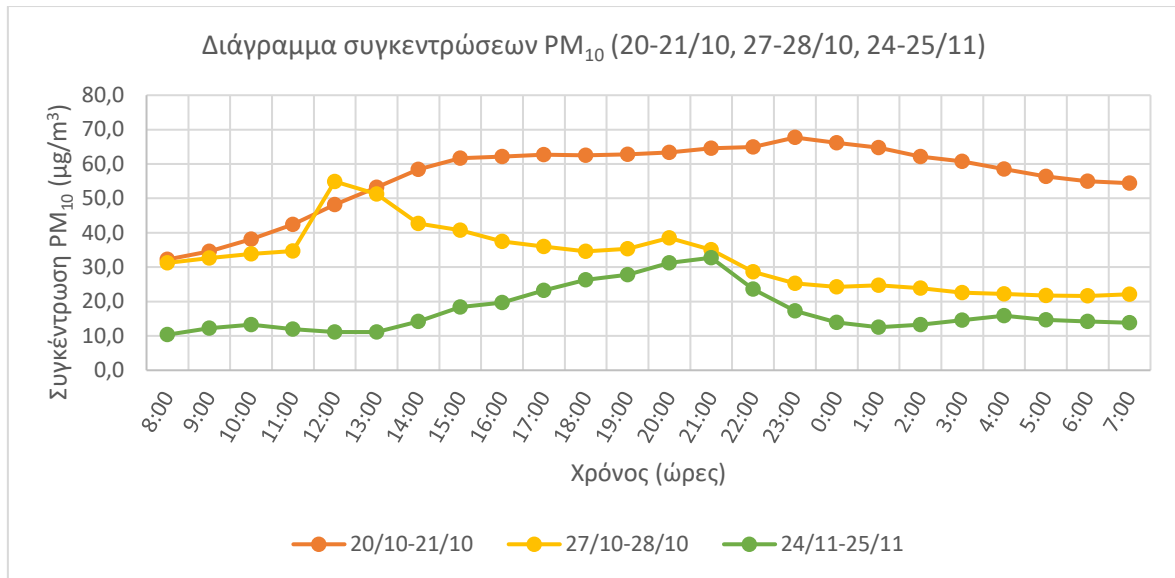
Από την παρακάτω στατιστική ανάλυση, αρχικά φαίνεται πως για τις δύο πρώτες μέρες οι μέσες συγκεντρώσεις έχουν σχεδόν ίδια τιμή ίση με $24\mu g/m^3$. Ακόμη, υπάρχει μεγάλη διακύμανση, με την πρώτη ημέρα να έχει τετραπλάσια διακύμανση από τη δεύτερη, αποτέλεσμα που επιβεβαιώνει το γράφημα 3 όπου φανερά η μεταβολές των συγκεντρώσεων την πρώτη ημέρα είναι μεγαλύτερες από τη δεύτερη. Την τρίτη ημέρα, αν και η μέση συγκέντρωση είναι χαμηλότερη, η διακύμανση είναι μεγαλύτερη από όλες τις μέρες και το ίδιο ισχύει και για το σφάλμα.

| Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση $PM_{10}(\frac{\mu g}{m^3})$ για τις ωριαίες μετρήσεις | 19-20/10 | 26-27/10 | 23-24/11 |
|--|----------|----------|----------|
| Μέσος | 24,94 | 24,34 | 15,65 |
| Τυπικό σφάλμα | 1,25 | 0,58 | 1,30 |
| Διάμεσος | 26,32 | 24,91 | 14,18 |
| Επικρατούσα τιμή | Δ/Υ | Δ/Υ | Δ/Υ |
| Μέση απόκλιση τετραγώνου | 6,13 | 2,84 | 6,35 |
| Διακύμανση | 37,54 | 8,04 | 40,31 |
| Ελάχιστο | 13,37 | 17,02 | 8,49 |
| Μέγιστο | 33,64 | 28,54 | 32,70 |
| Πλήθος | 24,00 | 24,00 | 24,00 |

Πίνακας 10. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM_{10} (19-20/10, 26-27/10, 23-24/11)

Το κάτωθι γράφημα, αναπαριστά τη διακύμανση μερικών Κυριακών του Οκτωβρίου και Νοεμβρίου. Και αυτό το γράφημα απέχει από το αντίστοιχο των καθημερινών ημερών που λειτουργεί το σχολείο. Σε αυτή την περίπτωση το πρωί παρατηρούνται πιο χαμηλές τιμές συγκέντρωσης που

ξεκινούν από τα 10 έως τα 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνεχίζουν να αυξάνονται σταδιακά κατά κύριο λόγο φτάνοντας σε τιμές από 30 έως και 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Παρ' όλα αυτά, βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις κρατούνται σε πιο υψηλό επίπεδο στις 20-21/10 καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, σε αντίθεση με τις άλλες δυο που ναι μεν υπάρχει αύξηση αλλά αφορά πιο μικρές συγκεντρώσεις. Από τις 22:00 και υπάρχει μείωση και για τις τρεις μέρες έως ότου σταθεροποιηθεί η συγκέντρωσή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ακολουθείται απόλυτα κάποιο μοτίβο συμπεριφοράς της συγκέντρωσης αυτές τις ημέρες και αυτό γιατί επειδή αφορά Κυριακές δεν γνωρίζουμε ακριβώς τι δραστηριότητες γίνονται και πόση κίνηση έχει στην περιοχή γύρω από το νηπιαγωγείο.



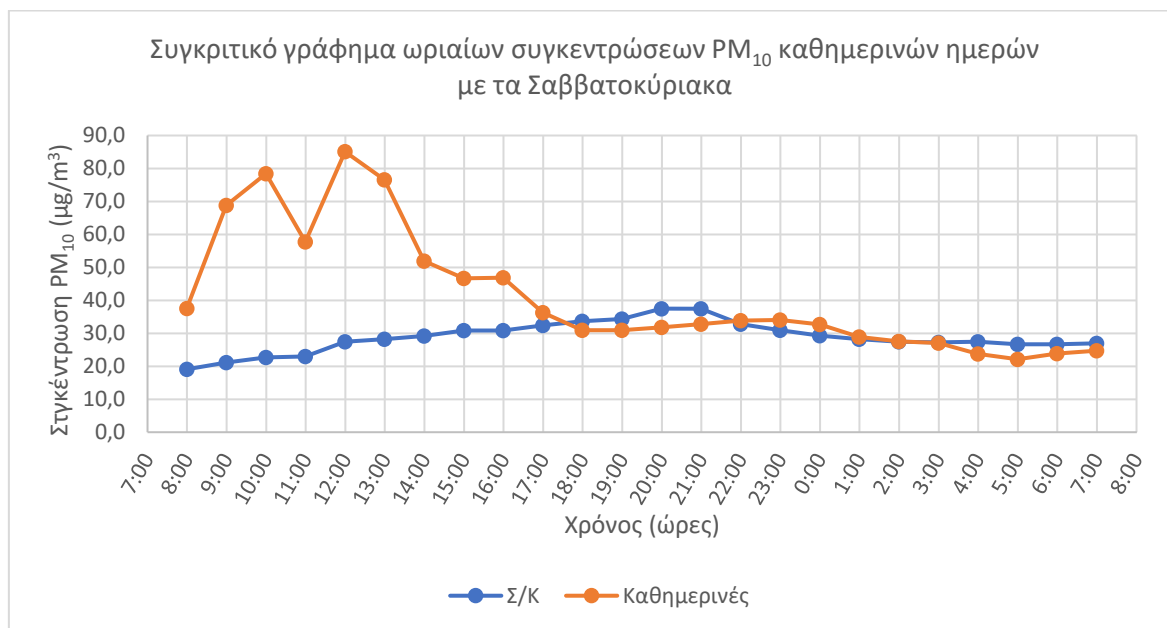
Γράφημα 4. Διάγραμμα συγκεντρώσεων PM_{10} συναρτήσει του χρόνου (20-21, 27-28/10, 24-25/11)

Έπειτα, παρατίθεται ο πίνακας με τη στατιστική ανάλυση των ημερών που συζητήθηκαν στο γράφημα 4. Η μεγαλύτερη ημερήσια συγκέντρωση είναι στις 20-21/10 με τιμή 56,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και αντίστοιχα η διακύμανση και το σφάλμα είναι τα μεγαλύτερα από την σύγκριση αυτή. Ακολουθεί η 27^η – 28^η Οκτωβρίου, όπου παρ' όλη τη μικρή σχετικά συγκέντρωση είναι μεγάλη η διακύμανση, κάτι που καθίσταται ξεκάθαρο και από το γράφημα παραπάνω. Μικρότερη συγκέντρωση και διακύμανση έχει η τελευταία ημέρα που εξετάζεται. Και σε αυτή την περίπτωση όπου δεν πρόκειται για καθημερινές ημέρες που υπάρχει μια προγραμματισμένη κίνηση εντός και εκτός του σχολείου, δεν μπορεί να είναι ξεκάθαροι οι λόγοι που προκαλούν αυτές τις διαφορές στις συγκεντρώσεις.

| Χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση $\text{PM}_{10}(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3})$ για τις ωριαίες μετρήσεις | 20-21/10 | 27-28/10 | 24-25/11 |
|--|----------|----------|----------|
| Μέσος | 56,56 | 32,32 | 17,38 |
| Τυπικό σφάλμα | 2,08 | 1,88 | 1,35 |
| Διάμεσος | 61,20 | 33,22 | 14,38 |
| Επικρατούσα τιμή | Δ/Υ | Δ/Υ | 11,13 |
| Μέση απόκλιση τετραγώνου | 10,20 | 9,19 | 6,59 |
| Διακύμανση | 104,10 | 84,52 | 43,43 |
| Ελάχιστο | 32,23 | 21,61 | 10,34 |
| Μέγιστο | 67,70 | 54,91 | 32,73 |
| Πλήθος | 24,00 | 24,00 | 24,00 |

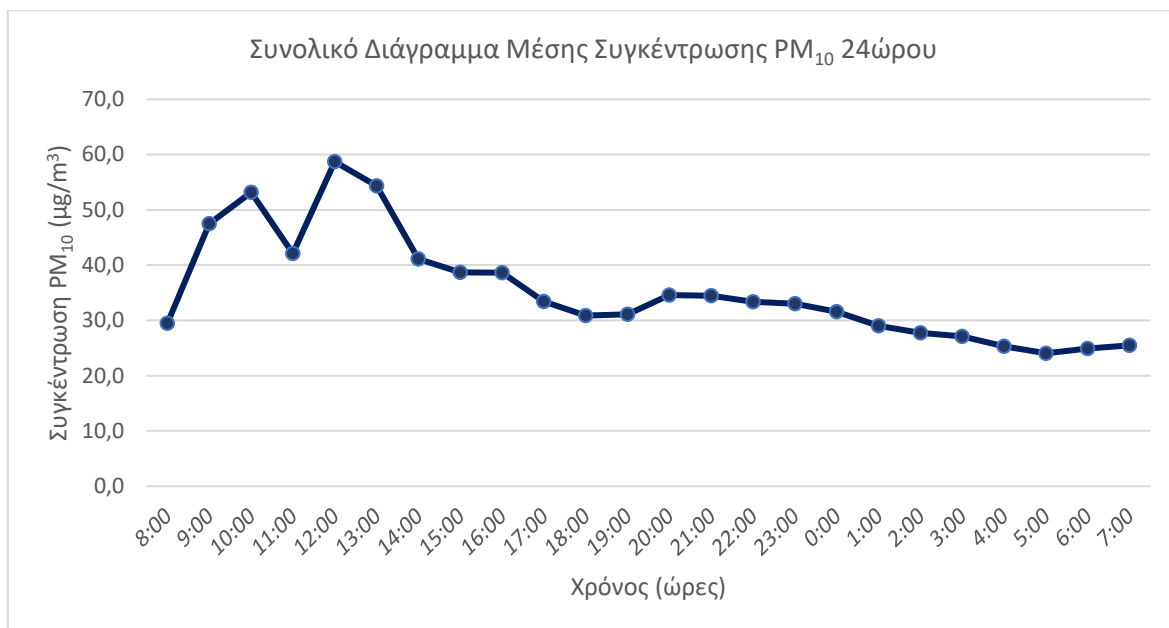
Πίνακας 11. Στατιστικά μεγέθη που αφορούν τη συγκέντρωση PM_{10} (20-21/10, 27-28/10, 24-25/11)

Στο γράφημα 5, αναπαρίστανται συγκεντρωτικά όλες οι μετρήσεις που πάρθηκαν τις καθημερινές ημέρες και τα Σαββατοκύριακα. Ουσιαστικά, έχει βρεθεί ο μέσος όρος ανά ώρα όλων των ημερών. Είναι φανερό πως τις καθημερινές που το σχολείο είναι ανοιχτό, υπάρχουν αρκετές διακυμάνσεις και υψηλές συγκεντρώσεις τις πρωινές ώρες. Πιο αναλυτικά, αναφορικά με τη γραμμή που αφορά τις καθημερινές, υπάρχουν δυο μέγιστα: στις 10:00 με συγκέντρωση $78,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και στις 12:00 με συγκέντρωση $85,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με τις ώρες μεγίστων αντικατοπτρίζουν τα διαλείμματα. Για τη γραμμή που αφορά τα Σαββατοκύριακα υπάρχει μία μικρή αύξηση νωρίς το βράδυ φτάνοντας τα $37,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τις υπόλοιπες ώρες, δηλαδή από τις 21:00 μέχρι το πρωί στις 07:00, οι συγκεντρώσεις και στις δυο περιπτώσεις βρίσκονται μεταξύ 20 - $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ο μέσος όρος όλων των καθημερινών συγκεντρώσεων κυμαίνεται στα $41,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ενώ για τα Σαββατοκύριακα στα $28,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



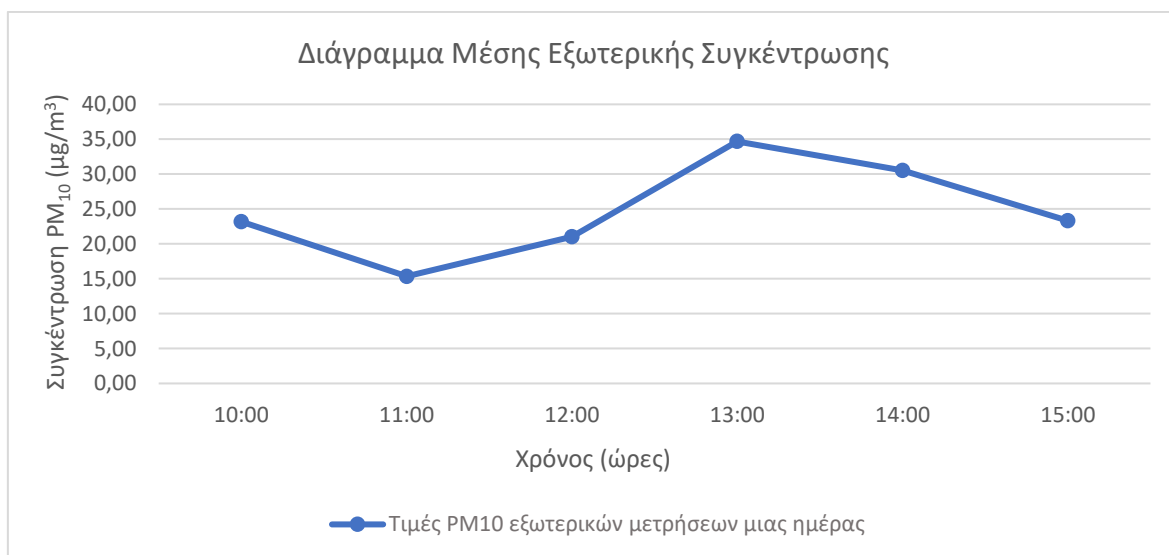
Γράφημα 5. Συγκριτικό διάγραμμα ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} καθημερινών με τα Σαββατοκύριακα.

Ακολουθεί το διάγραμμα με τις ωριαίες μέσες τιμές συγκέντρωσης για όλες τις ημέρες δειγματοληψίας σε συνάρτηση με το χρόνο. Εδώ παρατηρείται ότι, για το σύνολο των μετρήσεων η πολυγωνική γραμμή ακολουθεί το μοτίβο των καθημερινών ημερών αλλά με μικρότερες τιμές συγκεντρώσεων αφού επηρεάζεται και από τις πιο χαμηλές τιμές των Σαββατοκύριακων. Πιο επεξηγηματικά, οι αυξομειώσεις της συγκέντρωσης τις ώρες λειτουργίας του σχολείου είναι αισθητές, ενώ μετά μειώνεται και σταθεροποιείται σε πιο χαμηλές τιμές. Η συνολική μέση συγκέντρωση αναφορικά με τις εσωτερικές μετρήσεις βρέθηκε ίση με $34,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και η τυπική απόκλιση $24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Γράφημα 6. Συνολικό διάγραμμα διακύμανσης της συγκέντρωσης PM₁₀ για όλες τις ημέρες μετρήσεων συναρτήσει του χρόνου.

Εν συνεχεία, παρατίθεται το διάγραμμα που αναπαριστά τις συγκεντρώσεις ακριβώς έξω από την αίθουσα του νηπιαγωγείου όπου ξεκινά ο προαύλιος χώρος. Πρόκειται για ενδεικτικές μετρήσεις ενός εξαώρου του Νοεμβρίου όπου υπολογίσθηκαν οι μέσες ωριαίες τιμές. Σε αυτή την περίπτωση, η συγκέντρωση ξεκινά από τα 25 µg/m³, μειώνεται στα 15 µg/m³ αλλά μετά αυξάνεται συνεχώς έως τα 35 µg/m³ όπου είναι και η μέγιστη τιμή. Χρονικά, η μέγιστη τιμή είναι την ώρα που τα περισσότερα παιδιά σχολάνε επομένως περισσότερη σκόνη επαναιωρείται από το έδαφος. Να σημειωθεί ξανά, πως η αίθουσα του χώρου μελέτης είναι ακριβώς δίπλα από την κύρια είσοδο του σχολείου, άρα υπάρχει συνωστισμός μαθητών και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση των τιμών των PM₁₀.



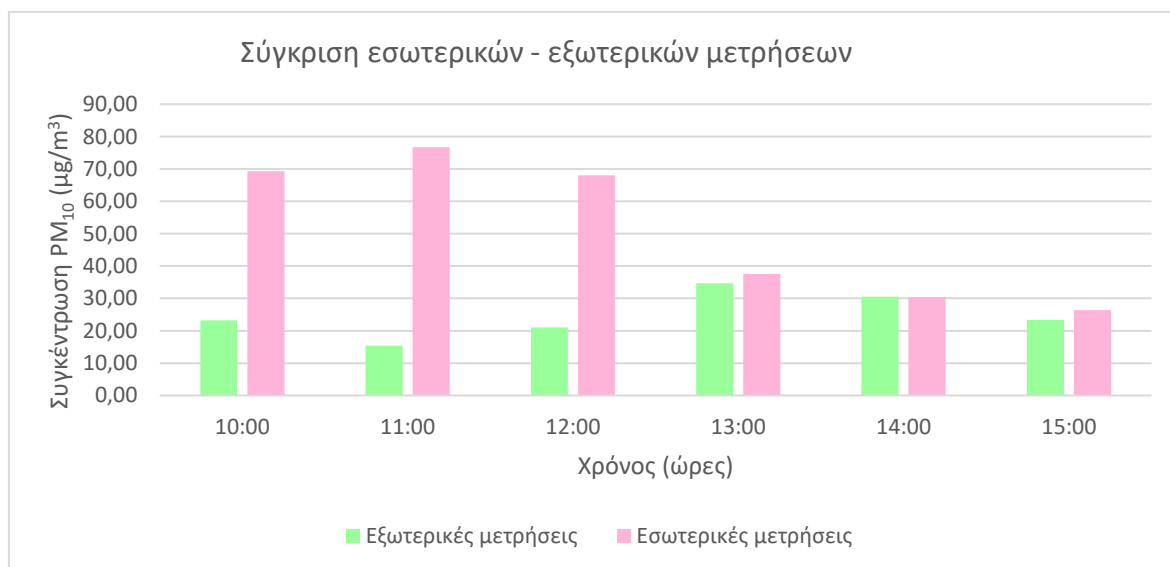
Γράφημα 7. Διάγραμμα συγκέντρωσης εξωτερικού χώρου συναρτήσει του χρόνου.

Ένας ακόμη υπολογισμός που έγινε, είναι η σύγκριση της εσωτερικής με την εξωτερική συγκέντρωση και η εύρεση του λόγου τους. Αρχικά, θα πρέπει να διευκρινιστεί πως επειδή δεν υπήρχε η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης εσωτερικών και εξωτερικών συγκεντρώσεων, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εσωτερική συγκέντρωση ήταν της ακριβώς προηγούμενης ημέρας αφού και οι καιρικές συνθήκες ήταν σχεδόν ίδιες. Όπως φαίνεται και από το ραβδόγραμμα, στις 10:00, 11:00 και 12:00 το πρωί, οι συγκεντρώσεις είναι με μεγάλη διαφορά μεγαλύτερες στον χώρο εντός του νηπιαγωγείου, αφού τα παιδιά βρίσκονται μέσα σε αυτόν. Παρ' όλα αυτά, για τις επόμενες ώρες οι εξωτερικές και εσωτερικές συγκεντρώσεις είναι παραπλήσιες, γεγονός που ίσως οφείλεται ότι στις 13:00 τα μισά παιδιά του νηπιαγωγείου σχολάνε και άρα στην αίθουσα μένουν πολύ λιγότερα άτομα. Ο κάθε άνθρωπος μπορεί να θεωρηθεί πηγή σωματιδίων, επομένως όσο λιγότερα άτομα βρίσκονται σε ένα χώρο τόσο μειώνεται και η συγκέντρωση των σωματιδίων.

Επιπλέον υπολογίσθηκε ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική συγκέντρωση, αφού βρέθηκαν οι μέσες συγκεντρώσεις για κάθε ένα από τα εξάωρα ενδιαφέροντος.

$$\text{Λόγος} = \frac{\text{Εσωτερική συγκέντρωση μάζας PM}_{10}}{\text{Εξωτερική συγκέντρωση μάζας PM}_{10}} = \frac{51,41 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}}{24,69 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}} = 2,08$$

Ο λόγος αυτός προέκυψε να είναι ίσος με 2,08. Αυτό δείχνει πως η εσωτερική συγκέντρωση μάζας σωματιδίων είναι διπλάσια από την εξωτερική. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς πρόκειται για έναν κλειστό χώρο με τόσα παιδιά εντός του που παίζουν, ζωγραφίζουν αλλά και γευματίζουν εντός αυτού. Επιπλέον, πιθανότατα ο αέρας στην αίθουσα να ανανεώνεται ελάχιστα αφού πρόκειται για μετρήσεις που έγιναν τέλη Νοέμβρη επομένως λόγω κρύου καιρού δεν θα μπορούσαν τα παράθυρα και οι πόρτες να είναι ανοιχτά.



Γράφημα 8. Σύγκριση εσωτερικών και εξωτερικών μετρήσεων.

Τέλος, παρουσιάζεται το ραβδόγραμμα στο οποίο φαίνεται η ημερήσια συγκέντρωση μάζας συναρτήσει της ημερομηνίας που αντιστοιχεί (χρονοσειρά). Είναι βασικό να τονισθεί πως έχουν απεικονισθεί μόνο οι μέρες για τις οποίες είναι διαθέσιμες όλες οι μετρήσεις για όλο το εικοσιτετράωρο από 07:30 το πρωί της μιας μέρας έως 07:30 της επόμενης. Αυτό έγινε προκειμένου να είναι σωστά και ακριβή τα αποτελέσματα. Παρατηρείται πως κάθε ημέρα, η συγκέντρωση είναι διαφορετική αλλά και πως το μήνα Νοέμβριο οι συγκεντρώσεις είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερες. Πιθανώς αυτό οφείλεται στις βροχές που παρασύρουν τα σωματίδια στο έδαφος και σταματούν να είναι αιωρούμενα. Επιπλέον, φαίνεται πως για 3 ημέρες του Οκτωβρίου οι τιμές ξεπερνούν τα νομοθετικά όρια που θέτει η Ευρώπη. Επειδή όμως οι μετρήσεις δεν μπορούν να είναι απόλυτα ακριβείς, θα μπορούσαμε να πούμε πως για τις 20/10 και τις 23/10 οι συγκεντρώσεις είναι στο όριο, ενώ για τις 21/10 το ξεπερνούν κατά πολύ! Την ημερομηνία αυτή που η συγκέντρωση είναι υψηλή, βρέθηκε πως από την περιοχή πέρασε μια αέρια μάζα που μεταφέρε σκόνη και άλλα σωματίδια (βλ. κεφάλαιο 3.3).



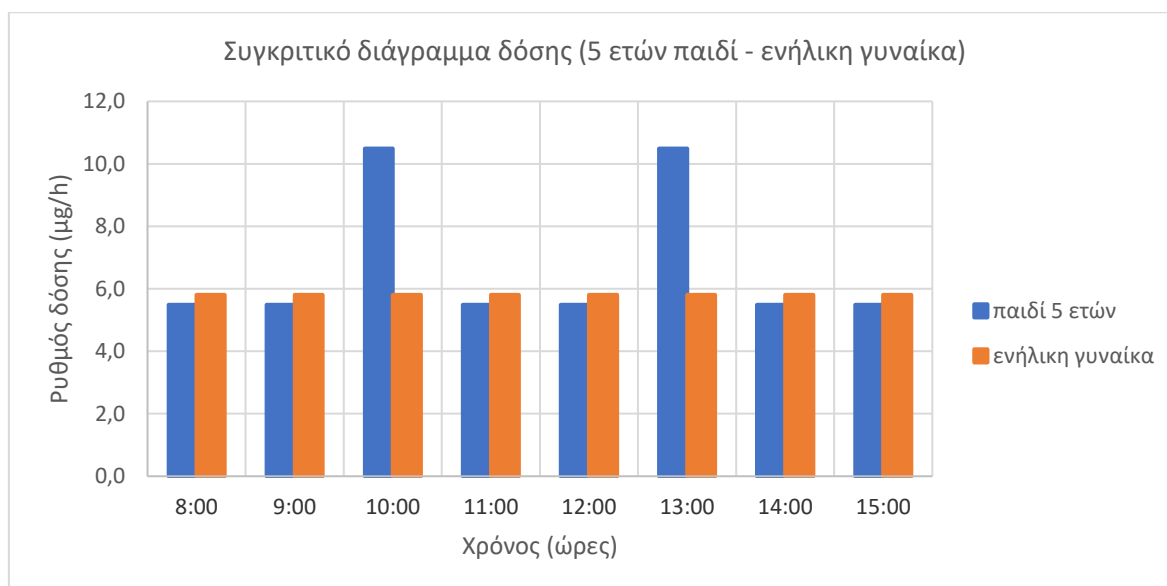
3.2. Αποτελέσματα του μοντέλου ExDoM2

Το μοντέλο υπολογισμού δόσης ExDoM2, χρησιμοποιήθηκε για τα δεδομένα έκθεσης που λήφθηκαν κατά τις δειγματοληψίες. Η δόση υπολογίστηκε για ένα οκτάωρο που είναι η παραμονή ενός μαθητή εντός της αίθουσας του νηπιαγωγείου. Εφαρμόστηκε για διαφορετικά σενάρια. Στα σενάρια αυτά κάθε φορά άλλαζε το φύλο/ηλικία, η συγκέντρωση των σωματιδίων αλλά και το είδος της δραστηριότητας των ατόμων. Σε αυτό το σημείο, είναι καλό να τονισθεί ότι εντός της αίθουσας είναι 2 δασκάλες και παιδιά, επομένως για τα σενάρια έχουν χρησιμοποιηθεί αυτές οι δυο ηλικιακές ομάδες.

1^ο Σενάριο

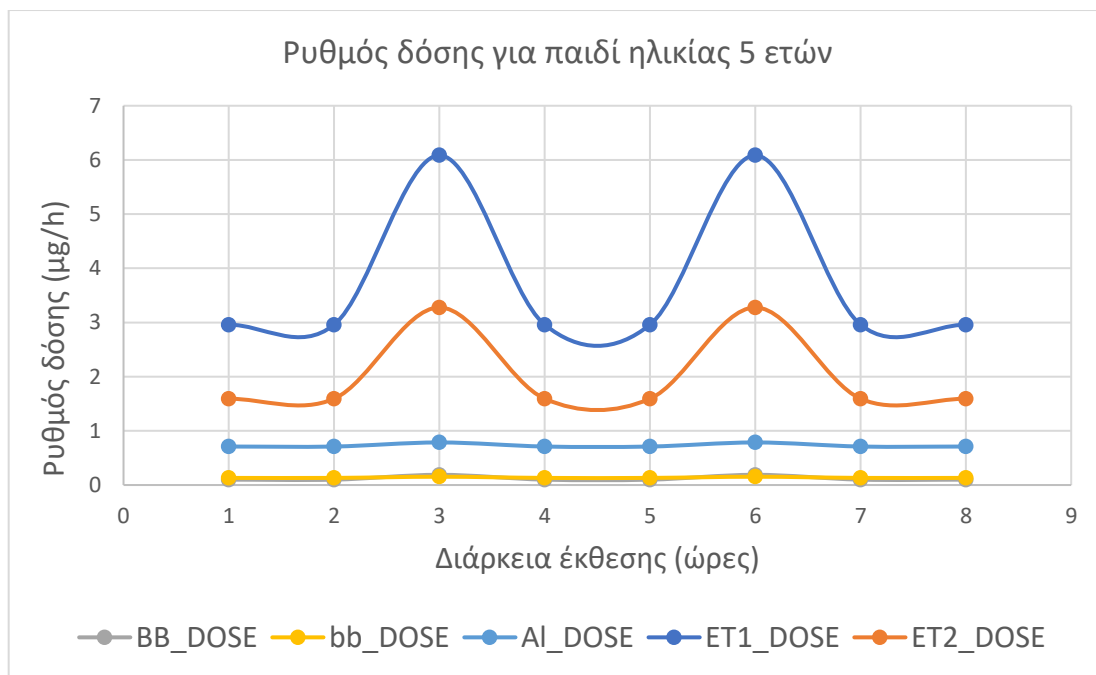
Στο διάγραμμα που ακολουθεί, μελετάται η δόση σωματιδίων που λαμβάνεται από ένα παιδί ηλικίας 5 ετών και μιας ενήλικης γυναίκας. Η συγκέντρωση σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκε σαν όρισμα εισόδου στο μοντέλο είναι και για τις δύο περιπτώσεις $25,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Επίσης, σαν δραστηριότητα για το παιδί έχουν ορισθεί οι τιμές 2(ανάπαυση) και 3(ήπια δραστηριότητα) ενώ για την ενήλικη γυναίκα έχει ορισθεί η τιμή 2, για όλη τη διάρκεια του οκταώρου. Αυτό το σενάριο, επιλέχθηκε ως το πιο ικανό να προσομοιώσει την εικόνα που υπάρχει στο νηπιαγωγείο και αναφορικά με τη συγκέντρωση σωματιδίων αλλά και τη δραστηριότητα της κάθε ηλικιακής ομάδας.

Παρατηρείται ότι για το παιδί ενώ η δόση ξεκινά από χαμηλές τιμές, υπάρχουν δύο σημεία μεγίστου που αντανakλούν τις τιμές που λαμβάνουν κατά τη διάρκεια των διαλειμμάτων όπου η δραστηριότητα χαρακτηρίζεται με την τιμή 3(ήπια δραστηριότητα). Είναι λογικό, όταν αυξάνεται η ένταση της δραστηριότητας να γίνεται πιο γρήγορη η αναπνοή και ως αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο ρυθμός δόσης των σωματιδίων που εισέρχονται στον οργανισμό. Αντίθετα, για την ενήλικη γυναίκα, υπάρχει ένας σταθερός ρυθμός προσλαμβανόμενης δόσης καθ' όλη τη διάρκεια και αυτό γιατί η δραστηριότητα παραμένει 2. Για την εύρεση της συνολικής δόσης έγινε άθροιση των τιμών για κάθε ώρα. Η δόση για το παιδί είναι μεγαλύτερη και ισούται με $53,9 \mu\text{g}$ ενώ για την ενήλικη γυναίκα είναι $46,5 \mu\text{g}$.

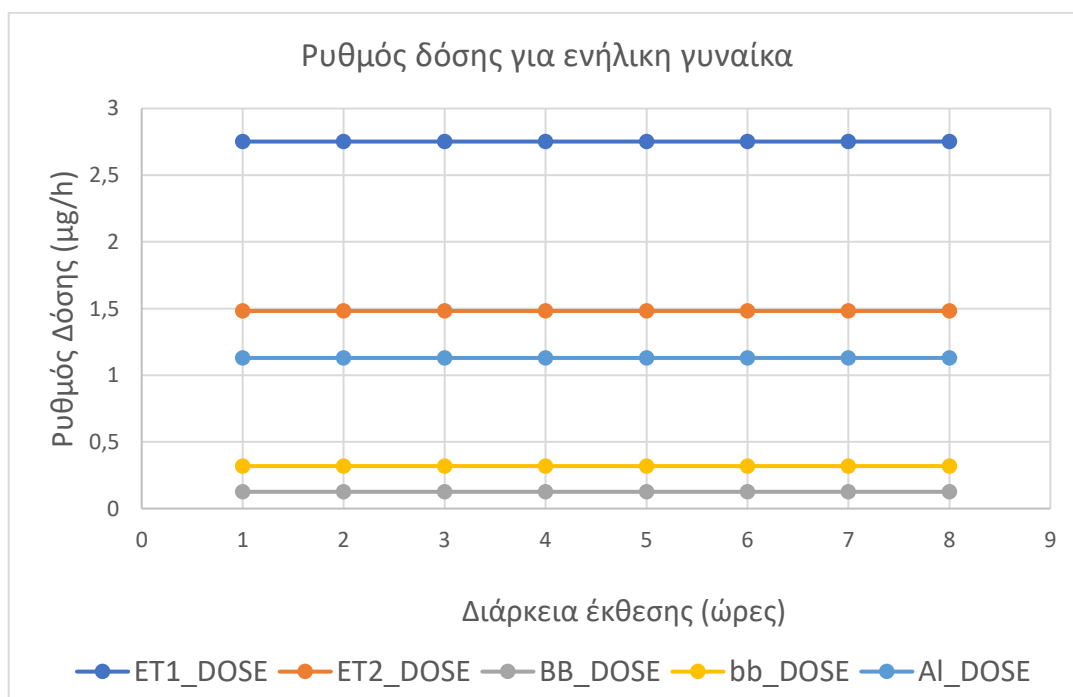


Γράφημα 9. 1^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2).

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται ο ρυθμός εναποτιθέμενης δόσης των σωματιδίων για κάθε περιοχή του αναπνευστικού ξεχωριστά συναρτήσει του χρόνου έκθεσης. Η πρώτη και μεγαλύτερη διαφορά των δυο γραφημάτων έγκειται στην τρίτη και έκτη ώρα έκθεσης στο ρύπο. Τις ώρες εκείνες για τα παιδιά έχει θεωρηθεί σαν σωματική άσκηση η ήπια δραστηριότητα αφού τα παιδιά τότε βγαίνουν διάλειμμα τρέχοντας παύοντας να είναι καθιστά στα θρανία. Σε αντίθεση με τις δασκάλες που παραμένουν εντός της αίθουσας. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο γραφημάτων είναι πως η εναποτιθέμενη δόση είναι μεγαλύτερη στην πρόσθια και ύστερη ρινική κοιλότητα (ET1, ET2) σε σχέση με τις άλλες περιοχές.



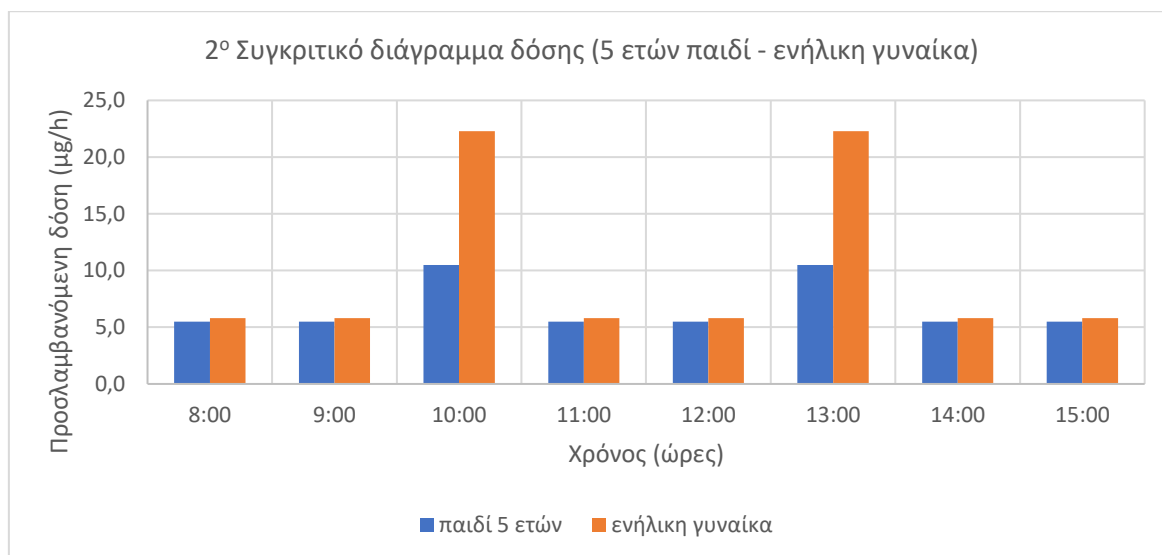
Γράφημα 10. Ρυθμός δόσης σε παιδί ηλικίας 5 ετών (σενάριο 1)



Γράφημα 11. Ρυθμός δόσης για ενήλικη γυναίκα (σενάριο 1)

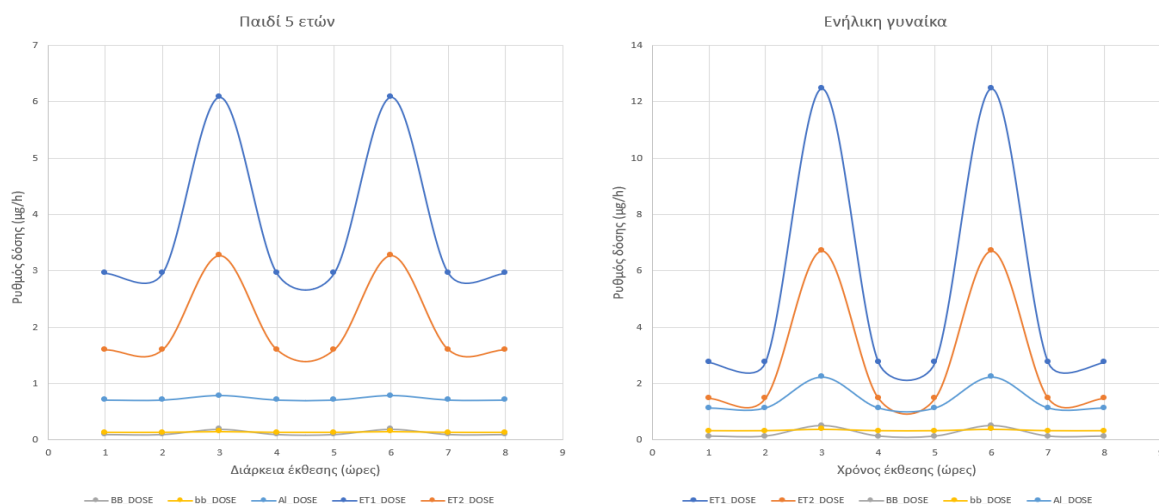
2^ο Σενάριο

Αμέσως μετά, παρατίθεται το ίδιο σενάριο με το προηγούμενο με τη μόνη διαφορά ότι η δραστηριότητα της ενήλικης γυναίκας χαρακτηρίζεται με τις τιμές 2 και 3 τις αντίστοιχες ώρες, όπως του παιδιού. Σε αυτή την περίπτωση, η διαφορά έγκειται στην ηλικιακή ομάδα και στη φυσιολογία της ομάδας αυτής. Όπως φαίνεται και στο γράφημα, τα μέγιστα είναι την ίδια χρονική στιγμή (την ώρα των διαλειμμάτων όπου η δραστηριότητα λαμβάνει την τιμή 3), όμως της ενήλικης γυναίκας η δόση είναι αισθητά μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται σε παράγοντες φυσιολογίας μια και οι πνεύμονες της ενήλικης γυναίκας είναι πολύ μεγαλύτεροι. Η συνολική δόση οκταώρου για το παιδί είναι 53,9μg και για τη γυναίκα 79,4μg.



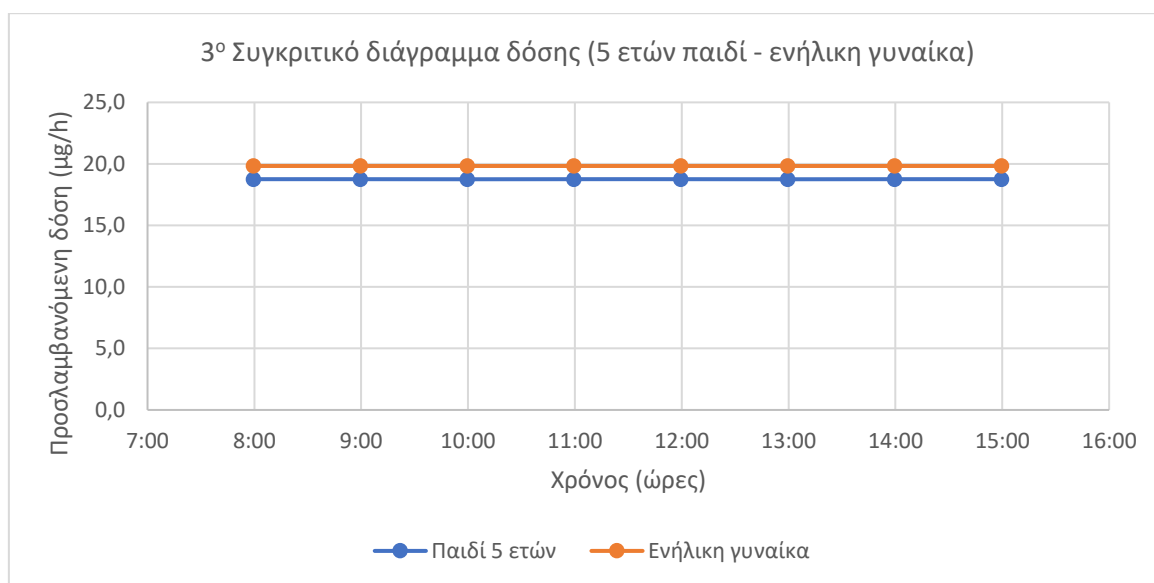
Γράφημα 12. 2^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2).

Έπειτα, φαίνεται αναλυτικά ο ρυθμός εναποτιθέμενης δόσης των σωματιδίων για κάθε περιοχή του αναπνευστικού ξεχωριστά συναρτήσει του χρόνου έκθεσης. Είναι φανερό πως θέτοντας την ίδια δραστηριότητα και για τις δυο ηλικίες ο ρυθμός δόσης αυξάνεται τις ίδιες χρονικές στιγμές δηλαδή την ώρα των διαλειμμάτων που αυξάνεται η δραστηριότητα. Όμως, για τη γυναίκα ο ρυθμός δόσης κατά την αλλαγή της δραστηριότητας σχεδόν διπλασιάζεται σε σχέση με του παιδιού. Πάλι όμως και για τις δυο ηλικιακές ομάδες, η εναποτιθέμενη δόση είναι πολύ μεγαλύτερη στην πρόσθια και ύστερη ρινική κοιλότητα, λογικό αποτέλεσμα αφού είναι οι δύο πρώτες περιοχές εισόδου των σωματιδίων.



3^ο Σενάριο

Τέλος, εξετάσθηκε και άλλη μια περίπτωση όπου η αλλαγή έγινε στη συγκέντρωση σωματιδίων εντός του χώρου του νηπιαγωγείου. Επιλέχθηκε μια ημέρα όπου οι συγκεντρώσεις ήταν αρκετά υψηλές και η μέση τιμή προέκυψε να είναι $87,4\mu\text{g}/\text{m}^3$. Επίσης, θεωρήθηκε ότι και τα παιδιά και οι γυναίκες έχουν την ίδια δραστηριότητα (ήπια δραστηριότητα) με σταθερή τιμή 2 για κάθε ώρα. Όπως είναι φανερό η δόση και για τις δυο ηλικιακές ομάδες είναι σχεδόν ίδια και παραμένει σταθερή όλο το χρονικό διάστημα με τιμή ίση με $20\mu\text{g}/\text{h}$. Αθροίζοντας προκύπτει ότι η συνολική δόση οκταώρου για την ενήλικη γυναίκα είναι $158,6\mu\text{g}$ ενώ για το παιδί $150,2\mu\text{g}$. Η δόση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή όταν η συγκέντρωση ήταν $25,6\mu\text{g}/\text{m}^3$. Επομένως, για μεγάλες αυξήσεις στη συγκέντρωση σωματιδίων στον υπό μελέτη εσωτερικό χώρο, είναι αντίστοιχα πολύ μεγάλη και η δόση που λαμβάνεται εντός του οργανισμού του εκτιθέμενου ανθρώπου.



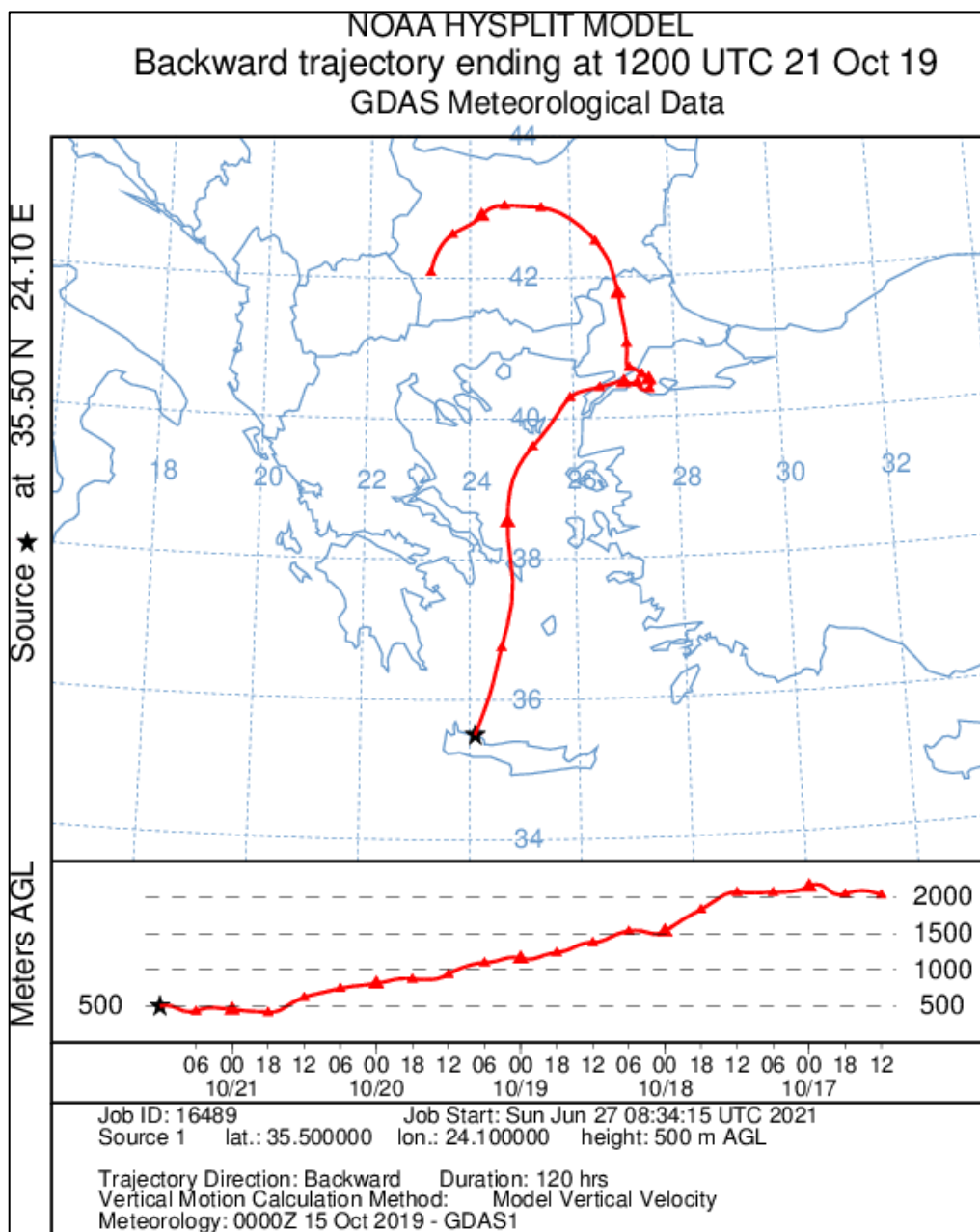
Γράφημα 13. 3^ο Συγκριτικό διάγραμμα δόσης (ExDoM2).

3.3. Αποτελέσματα μοντέλου HYSPLIT

Μετά από επεξεργασία των μετρήσεων που προέκυψαν από τις δειγματοληψίες στο νηπιαγωγείο, παρατηρήθηκε ότι για 2 ημέρες οι ωριαίες συγκεντρώσεις ήταν αρκετά υψηλές. Προκειμένου να εξετασθεί εάν η αιτία αυτής της αύξησης ήταν κάποια αέρια μάζα που πέρασε από την περιοχή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HYSPLIT. Η μεταφορά των αέριων ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο της συγκέντρωσης στην περιοχή αυτή.

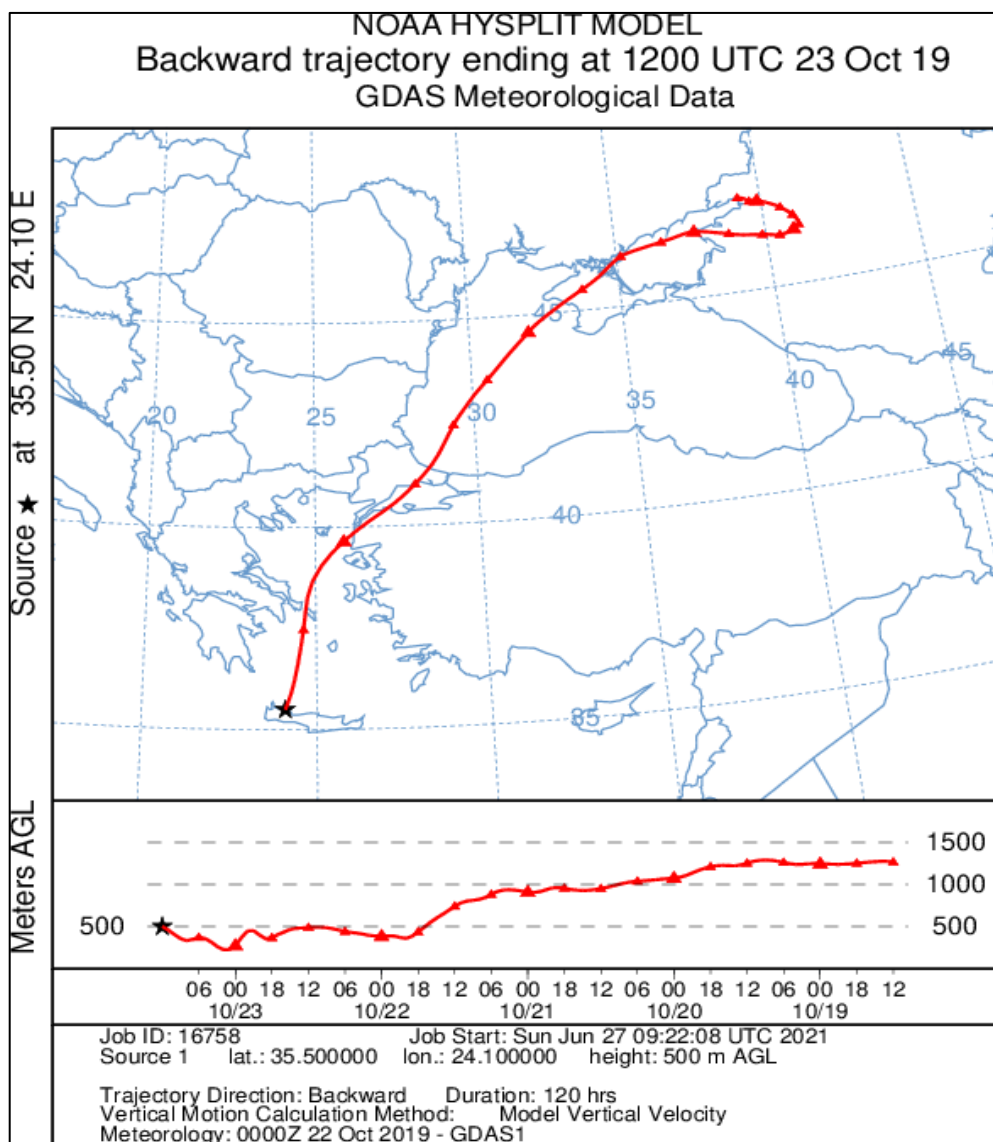
Πιο συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες ωριαίες τιμές συγκέντρωσης από όλες τις ημέρες βρέθηκαν να είναι στις 21 και 23 Οκτωβρίου στις 12:00πμ με τιμές $126,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $161,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Για αυτές τις ημερομηνίες, θα εφαρμοσθεί το μοντέλο δυο φορές. Ως συντεταγμένες ορίσθηκαν 35.50N, 24.10E που είναι αυτές του μετεωρολογικού σταθμού του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έπειτα, επιλέχθηκε ο φάκελος των μετεωρολογικών δεδομένων που αντιστοιχούν στις ημερομηνίες αυτές, η οπισθοτροχιά, η ημερομηνία ενδιαφέροντος και η χρονική διάρκεια της οπισθοπορείας(120h) αλλά και το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους(500m).

Στην αμέσως επόμενη εικόνα φαίνεται η πενθήμερη πορεία της αέριας μάζας μέχρι την 21^η Οκτωβρίου. Ξεκινά από τη Βουλγαρία συνεχίζει στην Ανατολική Τουρκία (Δυτική Θράκη) για λίγο και μετά διασχίζοντας τον εναέριο χώρο του Αιγαίου φθάνει στα Χανιά. Η αέρια αυτή μάζα πέρασε από πολλά αστικά κέντρα και πιθανώς μετέφερε σκόνη και άλλα σωματίδια. Εξηγείται λοιπόν εν μέρει η αύξηση για εκείνη τη μέρα. Σίγουρα μπορεί να επηρέασαν και άλλοι παράγοντες για τους οποίους δεν υπάρχει κάποια γνώση μέχρι στιγμής.



Εικόνα 18. Οπισθοπορεία αέριας μάζας για την 21η Οκτωβρίου.

Αναφορικά με την επόμενη ημερομηνία μελέτης, η οπισθοπορεία της παρουσιάζεται στην κάτω εικόνα. Στην περίπτωση αυτή, η αέρια μάζα ξεκινά από τη Ρωσία, διασχίζει τη Μαύρη Θάλασσα και την Κωνσταντινούπολη και φτάνει στην Κρήτη. Σίγουρα, μεταφέρει σκόνη από τα αστικά κέντρα που περνάει και για αυτό οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες την ημέρα εκείνη.



Εικόνα 19. Οπισθοπορεία αέριας μάζας για την 23η Οκτωβρίου.

Εκτός από τις αέριες μάζες που πιθανότατα βοήθησαν στην αύξηση των συγκεντρώσεων των δυο αυτών ημερών, ένας ακόμα παράγοντας θα μπορούσε να είναι κάποια θερμοκρασιακή αναστροφή. Στη μετεωρολογία ο όρος αναστροφή χρησιμοποιείται για να δηλώσει την απόκλιση από την συνηθισμένη μεταβολή μιας ατμοσφαιρικής μεταβλητής με το ύψος. Παρά το γεγονός ότι ο όρος είναι γενικός, στην πράξη χρησιμοποιείται, σχεδόν πάντοτε, για να δηλώσει μια θερμοκρασιακή αναστροφή, δηλαδή την αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος (Ζερεφός, 2009).

Θερμοκρασιακή αναστροφή μπορεί να υπάρξει με διάφορους τρόπους. Γενικά, οι αναστροφές σχηματίζονται είτε όταν ένα στρώμα αέρα γίνεται ψυχρότερο από το υπερκείμενο στρώμα αέρα είτε όταν ένα στρώμα αέρα γίνεται θερμότερο από το υποκείμενο, όπως για παράδειγμα σε μία

καθαρή νύχτα, όταν το έδαφος ακτινοβολεί θερμότητα με υψηλό ρυθμό. Σε περίπτωση που ο αέρας είναι καθαρός, τότε μπορεί ο αέρας κοντά στο έδαφος να είναι ψυχρότερος από αυτόν σε υψηλότερα στρώματα. Ένας άλλος τύπος αναστροφής, προκαλείται μέσω μιας οριζόντιας εισροής ψυχρού αέρα, όπως για παράδειγμα η θαλασσινή 'αύρα' σε μια παράκτια περιοχή. Γενικότερα, οι μηχανισμοί δημιουργίας των θερμοκρασιακών αναστροφών διαφέρουν σε κάθε περιοχή και χρονική περίοδο του έτους. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ισχυρότερες αναστροφές εμφανίζονται το καλοκαίρι λίγο πριν την ανατολή, λόγω της έντονης ακτινοβολήσης σε ανέφελες συνθήκες. Από την άλλη πλευρά, οι περισσότεροι ασταθείς συνθήκες εμφανίζονται λίγο μετά το μεσημέρι, με μέγιστο την περίοδο του καλοκαιριού.

Επομένως, η κάθε είδους ρύπανση (σωματιδιακή ή μη) συμπεριλαμβανομένης εκείνης που προέρχεται από την οδική κυκλοφορία, παγιδεύεται, με αποτέλεσμα το στρώμα του αέρα που βρίσκεται κοντινότερα στο έδαφος να μολύνεται όλο και περισσότερο. Αυτό συνεχίζεται έως ότου μεταβληθούν οι ισχύουσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Συμπεράσματα

Η εκτίμηση και ο έλεγχος των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας θεωρούνται απαραίτητα στοιχεία για τη διαχείριση της ποιότητας της σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ενώ αποτελούν και ενδείξεις που οδηγούν σε μία καλύτερη ποιότητα ζωής.

Οι δειγματοληψίες έλαβαν χώρα εντός του νηπιαγωγείου για τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο, καθ' όλη τη διάρκεια των ημερών εκτός ορισμένων περιπτώσεων. Σκοπός ήταν η μέτρηση της μέσης συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} προκειμένου να προσδιοριστεί η έκθεση και η δόση των ατόμων που βρίσκονται στο χώρο. Υπολογίσθηκε ότι η μέση συγκέντρωση των σωματιδίων PM_{10} στο νηπιαγωγείο βρέθηκε ίση με $34,9 \pm 24,3 \mu g/m^3$. Μετά από την ανάλυση των δεδομένων παρατηρήθηκε πρωτίστως η αυξημένη συγκέντρωση των σωματιδίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του νηπιαγωγείου. Τις ώρες εκείνες, η παρουσία ατόμων βοηθά στην επαναιώρηση σκόνης από τις επιφάνειες αλλά και στην παραγωγή νέων σωματιδίων από τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται όπως για παράδειγμα η ζωγραφική. Πιο αναλυτικά, η ημέρα χωρίστηκε σε τρεις περιόδους και βρέθηκε η μέση τιμή συγκέντρωσης για κάθε μια από αυτές. Ειδικότερα, για την πρώτη περίοδο (00:00-07:30) η μέση τιμή είναι $24,3 \pm 12,9 \mu g/m^3$. Τη δεύτερη (07:30-16:30) και τρίτη περίοδο (16:30-00:00) η μέση τιμή είναι κατ' αντιστοιχία $47,4 \pm 30,7 \mu g/m^3$ και $30,8 \pm 15,8 \mu g/m^3$.

Επίσης, έγινε σύγκριση των συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν το Σαββατοκύριακο σε σχέση με τις καθημερινές όπου και παρατηρήθηκε με μεγάλη διαφορά να είναι αυξημένες τις καθημερινές όπου το σχολείο είναι ανοιχτό. Συγκεκριμένα, τις καθημερινές η μέση συγκέντρωση είναι $41,3 \pm 18,4 \mu g/m^3$ ενώ τα Σαββατοκύριακα $27,8 \pm 4,6 \mu g/m^3$, που είναι λογικό.

Ακόμη ελήφθησαν και 1 εξάωρο εξωτερικών μετρήσεων για μια ημέρα που το σχολείο ήταν ανοιχτό. Βρέθηκε ότι η μέση συγκέντρωση έξω από την αίθουσα ήταν $24,7 \pm 6,4 \mu g/m^3$.

Έπειτα, μέσω του μοντέλου ExDoM2 μετρήθηκε η εναποτιθέμενη δόση για παιδιά ηλικίας 5 ετών και για ενήλικες γυναίκες. Στα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι για την περίπτωση ανάπαυσης (δραστηριότητα >2), η τιμές της οκτάωρης δόσης είναι πολύ κοντινές και για τις δύο ηλικίες. Ένα ακόμη συμπέρασμα είναι πως για την περίπτωση που ναι μεν η δραστηριότητα είναι η ίδια αλλά εκτός από ανάπαυση υπάρχει και ήπια δραστηριότητα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις τιμές της δόσης, με αυξημένες αυτές των ενηλίκων γυναικών. Ειδικότερα, για τις ενήλικες γυναίκες η δόση είναι $79,9 \mu g$ ενώ για το παιδί $53,9 \mu g$. Επιπλέον, διαπιστώθηκε πως για πολύ αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων στο χώρο, η συνολική δόση οκτάωρου αυξάνεται κατακόρυφα και έτσι για την ενήλικη γυναίκα είναι $158,6 \mu g$ ενώ για το παιδί $150,2 \mu g$. Και για τα τρία προαναφερθέντα σενάρια, η εναποτιθέμενη δόση στην πρόσθια και ύστερη ρινική κοιλότητα ήταν αυξημένη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.

Τέλος, μέσω του μοντέλου HYSPLIT προσδιορίστηκαν οι πορείες των αέριων μαζών που περνούσαν από την περιοχή για τις ημερομηνίες όπου οι συγκεντρώσεις είναι αυξημένες. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες ωριαίες τιμές συγκέντρωσης από όλες τις ημέρες βρέθηκαν να είναι στις 21 και 23 Οκτωβρίου στις 12:00πμ με τιμές $126,4 \mu g/m^3$ και $161,7 \mu g/m^3$ αντίστοιχα. Οι αέριες μάζες και στις δύο περιπτώσεις περνούσαν από αστικά κέντρα επομένως μετέφεραν σκόνη και διάφορα σωματίδια στην περιοχή μελέτης. Εκτός όμως από τις αέριες μάζες, πιθανές θερμοκρασιακές αναστροφές θα μπορούσαν να αιτιολογήσουν τις υψηλές συγκεντρώσεις.

Γενικά συμπεράσματα – Προτάσεις

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονισθεί ότι εντός των εκπαιδευτικών χώρων, επειδή σε αυτούς βρίσκονται και άνθρωποι μικρής ηλικίας, θα πρέπει οι απαιτήσεις υγιεινής να είναι αυξημένες. Οι ρύποι που υπάρχουν στα σχολεία μπορεί να επηρεάσουν τους μαθητές και ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται περιστατικά άσθματος. Ο μεγάλος αριθμός μαθητών, η μεγάλη ηλικία των κτιρίων, ο μη επαρκής αερισμός αλλά και η τοποθεσία των κτιρίων, αποτελούν βασικές παραμέτρους αύξησης σωματιδιακών και μη ρύπων. Για παράδειγμα σε ένα καινούριο σχολείο που βρίσκεται σε προάστιο μια πόλης, πιθανότατα οι ρύποι στους οποίους εκτίθενται οι μαθητές να είναι λιγότεροι σε αριθμό αλλά και σε ποσότητα.

Για περαιτέρω ανάπτυξη του θέματος, θα μπορούσαν να έχουν ληφθεί περισσότερες ημέρες μετρήσεων αλλά και μετρήσεις σε διαφορετικά σχολεία ώστε να γίνει εκτενέστερη ανάλυση στατιστικών δεδομένων. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μηχανήματα που να μετρούν διαφορετικές παραμέτρους ώστε να υπάρχει για πληρέστερη εικόνα της ποιότητας του αέρα. Τέλος, θα ήταν πολύ χρήσιμο να γίνει ανάλυση της χημικής σύστασης των σωματιδίων ώστε υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες για την επικινδυνότητα αλλά και την προέλευσή τους.

Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

1. Chalvatzaki E. and Lazaridis M. (2015). Development and application of a dosimetry model (ExDoM2) for calculating internal dose of specific particle bound metals in the human body. *Inhalation toxicology* 27 (6),308-320.
2. Chen W., D.W. Fryrear, 2001. "Aerodynamic and Geometric Diameters of Airborne Particles", *Journal of Sedimentary Research*, 71, 365-371.
3. EPA, 1992, "Guidelines for Exposure Assessment", Report EPA/600/Z-92/001.
4. EPA, 2002, "Air Quality Criteria for Particulate Matter", Report EPA/600/P-99/002Ac.
5. Eskenazi, Brenda, Marcella Warner, Paolo Brambilla, Stefano Signorini, Jennifer Ames, and Paolo Mocarelli. 2018. "The Seveso Accident: A Look at 40 years of Health Research and Beyond." *Environment International*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.envint.2018.08.051.
6. Hinds, W.C.(1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Journal of Aerosol Science. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(83\)90049-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(83)90049-6).
7. Hodgson Jr T.A., 1970 , "Short-term Effects of Air Pollution on Mortality in New York City", *Environmental Science & Technology* **1970** 4 (7), 589-597.
8. ICRP (1994). *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. Annals of the ICRP, Pergamon Press.
9. https://europa.eu/european-union/topics/environment_el
10. Koutrakis P., Briggs S.L.K., Leaderer B.P., "Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York", *Environmental Science and Technology*, Vol. 26(3), pp. 521-527, 1992.
11. Magliano K.M., Hugues V.M., Chinkin L., Coe D.L., Haste T.L., Kumar N., Lurmann F.W., "Spatial and Temporal Variation in PM10 and PM2.5 Source Contributions and Comparison to Emissions during the 1995 Integrated Monitoring Study", *Atmospheric Environment*, Vol. 33,pp.4757-4773, 1999.
12. Morawska L., Salthammer, T., (Eds.) 2003. "Indoor Environment, Airborne Particles and Settled Dust", Willey-Vch.
13. Nazaroff W.W., Klepeis N.E.,2004,"Environmental Tobacco Smoke Particles, Indoor Environment: Airborne Particles and Settled Dust", Morawska L., Salthammer T. Eds.,pp. 245-274.
14. Ozkanyak H., Xue J., Spengler J., Wallace L., Pellizzari E., Jenkins P., 1996, "Personal Exposure to Airborne Particles and Metals Results from the Particle TEAM Study in Riverside, California", *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol. 6, pp. 57-78.

15. Papineni, R.S., and F.S. Rosenthal. (1997). The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects .J. Aerosol Med. 10: 105-116.
16. Schlesinger, R.B.,1995, "Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: does it support the human experience?", Inhalation Toxicology 7, 99-109.
17. Seinfeld J.H., Pandis S.N., 2006, "Atmospheric Chemistry and Physics", 2nd edition. Willey-Interscience, New York.
18. Stohl, A., Hittenberger, M., Wotawa, G., 1998, "Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data", Atmos. Environ., 32, 4245-4264.
19. Wilkins, E. T. "Air Pollution and the London Fog of December, 1952." Journal of the Royal Sanitary Institute, vol. 74, no. 1, Jan. 1954, pp. 1–21, doi:10.1177/146642405407400101.
20. www.tsi.com

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αλεξανδροπούλου Β., 2010, Διδακτορική διατριβή: «Ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της έκθεσης του ανθρώπου σε ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια και των επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία».
2. Γεντεκάκης Ι., 2^η Έκδοση, 2010, "Ατμοσφαιρική Ρύπανση: επιπτώσεις, έλεγχος και εναλλακτικές τεχνολογίες", Εκδόσεις Κλειδάριθμος., ESNB: 9789604613946.
3. Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2005, "Πρόταση Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου για την Ποιότητα του Ατμοσφαιρικού Αέρα και Καθαρότερου Αέρα για την Ευρώπη", COM(2005) 447 τελικό 2005/0183 (COD) SEC(2005) 1133.
4. Ζερεφός Χ., 2009, " Εισαγωγικά Μαθήματα στη Φυσική της Ατμόσφαιρας", Εκδόσεις Παπασπηρίου, ESNB: 9789607182401.
5. Κοπανάκης Η., 2015, Διδακτορική διατριβή: «Δυναμική των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων και μελέτη του δυναμικού πυρηνοποίησής τους στην Ανατολική Μεσόγειο».
6. Λαζαρίδης Μ., 2015, "Βασικές Αρχές της Επιστήμης των Αεροζόλ", Εκδόσεις Τζιόλα, ESNB: 9789604184767.
7. Λαζαρίδης Μ., 2^η Έκδοση, 2016, "Ατμοσφαιρική Ρύπανση με στοιχεία Μετεωρολογίας", Εκδόσεις Τζιόλα., ESNB: 9789604182466.
8. «Φυσική του ανθρώπινου σώματος», J. CAMERON, J. SKOFRONICK, R. GRANT,2002, Επιστημονικές Εκδόσεις ΠΑΡΙΣΙΑΝΟΥ Α.Ε., ISBN: 9789603941026.
9. Χαλβατζάκη Ε., 2016, Διδακτορική διατριβή: «Έκθεση και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων από αιωρούμενα σωματίδια».