



Πολυτεχνείο Κρήτης

**Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**Μελέτη των Χαρακτηριστικών των Ατμοσφαιρικών
Αιωρούμενων Σωματιδίων και Εναπόθεσή τους στο
Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα στην Περιοχή
Ακρωτηρίου**

Μαλακάση Μαρία-Γαβριέλα

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 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 την 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 Κρήτης.



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μελέτη των Χαρακτηριστικών των Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων
Σωματιδίων και Εναπόθεσή τους στο Ανθρώπινο Αναπνευστικό
Σύστημα στην Περιοχή Ακρωτηρίου»**

Μαλακάση Μαρία-Γαβριέλα

Τριμελής Επιτροπή:

Επιβλέπων Καθηγητής:

Μιχάλης Λαζαρίδης

Μέλη Επιτροπής:

Διονυσία Κολοκοτσά

Αποστόλης Βουλγαράκης

Ευχαριστίες

. . . Το ταξίδι αυτό έφτασε στο τέλος του,

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη και την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας τον Κύριο Μιχάλη Λαζαρίδη, ως επιβλέποντα Καθηγητή.

Ακόμη, ευχαριστώ για την καθοδήγηση και την υποστήριξη της καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, την Κυρία Σορίνα Χατουτσίδου.

Ευχαριστώ την Κυρία Ελευθερία Χαλβατζάκη για την πολύτιμη βοήθεια της, όπως επίσης και όλα τα μέλη του εργαστηρίου για την διεξαγωγή του πειράματος.

Ευχαριστώ πολύ, όλα τα μέλη της επιτροπής για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την εξέταση και την αξιολόγηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω, μέσα από την καρδιά μου, την οικογένειά μου, και όσους με στήριξαν και με εμπιστεύτηκαν όλα αυτά τα χρόνια, για όλα αυτά που ζήσαμε ώστε η διαδρομή αυτή να χαραχτεί μοναδικά . . .

Περίληψη

Τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό περιβάλλον μελετώνται ευρέως καθώς επιδρούν στην υγεία του ανθρώπου και οι επιπτώσεις τους, μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα, είναι σημαντικές. Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων, με αεροδυναμική διάμετρο έως 10 μm , σε έναν άνθρωπο που εκτίθεται σε εξωτερικό περιβάλλον, καθώς και η μελέτη της δόσης που εναποτίθεται στο αναπνευστικό του σύστημα και κατά πώς μεταβάλλεται ανάλογα με την δραστηριότητα στην οποία υποβάλλεται.

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δειγματοληψίες, όπου μετρήθηκε η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στο σταθμό του Ακρωτηρίου (Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά), για χρονικό διάστημα τριών μηνών. Με χρήση του μοντέλου ExDoM2, υπολογίστηκε η εναποτιθέμενη δόση που εισέρχεται στις περιοχές του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος με διαφορετικές συνθήκες έκθεσης για τρεις μήνες.

Με ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι οι ημερήσιες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων ξεκινούν από 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και φτάνουν μέχρι 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, γεγονός που θέτει τις τιμές εντός ευρωπαϊκών νομοθετικών ορίων (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) για PM_{10} . Η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{2,5}$ που καταγράφηκε, ξεκινά από 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ έως 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμές χαμηλότερες των νομοθετικών ορίων (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) για $\text{PM}_{2,5}$. Όσον αφορά τις ωριαίες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, ο Ιούλιος σημειώνει τις υψηλότερες τιμές, με συγκέντρωση 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ακολουθεί ο Μάιος που σημειώνει σχεδόν 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ ο Ιούνιος εμφανίζεται με υψηλότερη συγκέντρωση 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παράλληλα, υπολογίστηκε η ωριαία συνολική εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου με την βοήθεια του μοντέλου ExDoM2, αλλά και ο ρυθμός δόσης για κάθε περιοχή του και για διάφορες κατηγορίες σωματικής άσκησης. Οι κατηγορίες αυτές είναι η έντονη άσκηση, η ελαφριάς μορφής άσκηση, η περίπτωση που ο άνθρωπος κάθεται, δηλαδή δεν ασκείται, και ο ύπνος. Η έντονη άσκηση εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές δόσης και για τους τρεις μήνες, καθώς ο άνθρωπος εισπνέει συχνότερα από κάθε άλλης μορφής δραστηριότητα. Χαρακτηριστικά, η εναποτιθέμενη δόση, παρουσιάστηκε υψηλότερη στις εκτός θώρακα περιοχές του αναπνευστικού συστήματος σε σύγκριση με τις θωρακικές περιοχές.

Τέλος, ένα σενάριο που ακολουθήθηκε για διαφορετικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, αφορά τα φαινόμενα αφρικανικής σκόνης στα οποία εκτίθεται ο άνθρωπος που μελετάται, εκτελώντας ελαφριάς μορφής σωματική άσκηση. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρήθηκε ότι η τιμή της δόσης αιωρούμενων σωματιδίων ξεπερνά τα 60 $\mu\text{g}/\text{h}$, ενώ η συνολική δόση που εναποτίθεται στον οργανισμό σε επεισόδια αφρικανικής σκόνης ξεπερνά τα 1200 μg σε χρονικό διάστημα μίας ημέρας. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει ότι η σκόνη η οποία προέρχεται από την έρημο της Αφρικής και μεταφέρεται μέσω του ανέμου, επιδρά σημαντικά στην δημόσια υγεία καθώς προσκολλώνται σε αυτή και άλλα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία προκαλούν σοβαρότερα αναπνευστικά προβλήματα.

Abstract

The characteristics and the behavior of atmospheric particles, that penetrate into the human respiratory tract from different sources, indoor and outdoor, have been studied because their consequences in human health are very harmful. The main purpose of the present thesis is to study the impact of PM₁₀ particles and the associated deposited dose into the human respiratory tract with variable levels of activity. Outdoor measurements of PM₁₀ during a three months sampling campaign took place at Akrotiri station (Technical University of Crete, Chania). PM₁₀ concentrations were used as input data to estimate the deposited dose to the respiratory tract by using a dosimetry model (ExDoM2).

The analysis of the results showed that daily concentrations of particulate matter ranged between 6 µg/m³ to 45 µg/m³. In addition, hourly concentrations of particulate matter PM₁₀ were up to 32 µg/m³ for July, 16 µg/m³ for June and 20 µg/m³ for May. The concentrations of particulate matters with a maximum aerodynamic diameter 2,5 µm, were about 6 µg/m³ to 17 µg/m³. The activity of the exposed human affects the dose that deposited in the human respiratory tract. Simulations, showed that as the exercise gets harder, the deposited dose increases because the exposed human inhales more particles than in any other activity.

A significant source of PM₁₀ concentrations was Sahara dust events during the studied period. In this situation, the concentrations of particulate matter exceeded the European limits of PM₁₀ which is 50 µg/m³. The particulate matter penetrates into human upper respiratory tract so the deposited dose was higher there.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Εικόνες.....	8
Πίνακες.....	10
Διαγράμματα	11
1. Εισαγωγή	13
1.1 Γενικά	13
1.2 Χαρακτηριστικά Αιωρούμενων Σωματιδίων.....	15
1.2.1 Μέγεθος Αιωρούμενων Σωματιδίων	15
1.3 Ατμοσφαιρικά Αεροζόλ.....	16
1.4 Εκπομπές στο Εξωτερικό Περιβάλλον	18
1.4.1 Νομοθετικά Όρια Ποιότητας Αέρα.....	20
1.5 Αιωρούμενα Σωματίδια Στο Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα	21
1.5.1.Δόση και Έκθεση σε Αιωρούμενα Σωματίδια.....	21
1.5.2.Λειτουργία του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος.....	23
1.5.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία.....	24
2. Πειραματική Διαδικασία	25
2.1 Στοιχεία Μετρήσεων.....	25
2.2 Οργανολογία.....	27
2.2.1 Προσκρουστήρας Διαχωρισμού Andersen C.I. (Andersen Cascade Impactor).....	28
2.2.2 Μετρητής Leckel.....	29
2.2.3 DUSTRAK II	29
2.3 Μεθοδολογία.....	31
2.6 Μοντέλο ExDoM2	34
3. Αποτελέσματα	39
3.1:Ημερήσιες Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων.....	39
3.2: Ωριαίες Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων	40
3.3 Αιωρούμενα Σωματίδια PM _{2.5}	42
3.4: Κατανομές Αιωρούμενων Σωματιδίων	43
4. Αποτελέσματα Μοντέλου.....	46
4.1:Παράμετρος Δραστηριότητα Εκτιθέμενου Ανθρώπου	46
4.1.1: Δραστηριότητα 4: Έντονη Άσκηση.....	47

4.1.2 Δραστηριότητα 3: Ελαφριά Άσκηση.....	48
4.1.3 Δραστηριότητα 2: Χωρίς Άσκηση	50
4.2: Μελέτη Των Περιοχών Του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος	51
4.2.1 Ιούνιος (Ελαφριά Άσκηση).....	52
4.2.2 Ιούλιος (Ελαφριά Άσκηση).....	53
4.3: Επίδραση της Σκόνης Σαχάρα	54
4.3.1 Ολικός Ρυθμός Δόσης Ανά Ώρα	55
4.3.2 Επίδραση της σκόνης Σαχάρα στις περιοχές του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος	56
4.4: Συνολική Δόση.....	58
4.4.1 Συνολική Δόση Για τους μήνες Μάιο – Ιούνιο – Ιούλιο Ανάλογα με την Δραστηριότητα	58
4.4.2 Συνολική Δόση Για την Επίδραση Του Φαινομένου Σαχάρα	59
5. Συμπεράσματα.....	61
Βιβλιογραφία	63
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	66
I. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 ^ο	66
II. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 ^ο	71
III. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 ^ο	79

Εικόνες

EIKONA 1.1: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων [Λαζαρίδης, 2010].....	16
EIKONA 1.2: Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους [Λαζαρίδης, 2010].....	21
EIKONA 1.3: Σχηματική απεικόνιση της σειράς βημάτων που οδηγούν από την εκπομπή αέριων ρύπων σε πιθανές επιπτώσεις τους στην υγεία [Λαζαρίδης, 2010]...	22
EIKONA 1.4: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος [Λαζαρίδης, 2010].....	23
EIKONA 1.5: Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	24
EIKONA 2.1: Χάρτης Πολυτεχνείου Κρήτης και ευρύτερης περιοχής Ακρωτηρίου Χανίων.....	25
EIKONA 2.2: Απεικόνιση των κτιρίων της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.....	26
EIKONA 2.3: Απεικόνιση σταθμού μετρήσεων Πολυτεχνείου Κρήτης.....	26
EIKONA 2.4: Προσκρουστήρας διαχωρισμού Andersen C.I.....	28
EIKONA 2.5: Διάμετρος σωματιδίων σε κάθε στάδιο.....	28
EIKONA 2.6: Μετρητής αερολυμάτων PM _{2,5} Leckel.....	29
EIKONA 2.7: Φορητό εργαστηριακό όργανο DUSTRAK II 8532.....	30
EIKONA 2.8: Φορητό εργαστηριακό όργανο DUSTRAK II 8532, στην έναρξη μιας μέτρησης κατά την διεξαγωγή του πειράματος.....	31
EIKONA 2.9: Ζυγός ακριβείας.....	32
EIKONA 2.10: Τριβλία αποθήκευσης φίλτρων.....	32
EIKONA 2.11: Φίλτρα χαλαζία.....	32
EIKONA 2.12: Τοποθέτηση προσκρουστήρα Andersen σε εξωτερικό περιβάλλον....	34
EIKONA 2.13: Αρχική πλατφόρμα εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου ExDoM2.....	36
EIKONA 2.14: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων του εκτιθέμενου ανθρώπου στο μοντέλο ExDoM2.....	37
EIKONA 2.15: Αρχείο αποτελεσμάτων μοντέλου.....	38
EIKONA 4.1: Μεταφορά αφρικανικής σκόνης προς την Κρήτη.....	54
EIKONA 1: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για 18 Μαΐου 2020.....	66

EIKONA 2: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για 19 Μαΐου 2020.....	67
EIKONA 3: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για 20 Μαΐου 2020.....	67
EIKONA 4: Περιβάλλον υπολογιστικού προγράμματος MATLAB.....	71
EIKONA 5: Αρχική πλατφόρμα του μοντέλου ExDoM2.....	72
EIKONA 6: Συγκέντρωση μάζας ως επιλογή εισόδου για το μοντέλο.....	72
EIKONA 7: Κεντρικό περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου.....	73
EIKONA 8: Ημέρες έκθεσης του ανθρώπου.....	73
EIKONA 9: Φύλο και τρόπος αναπνοής του ανθρώπου.....	74
EIKONA 10: Πυκνότητα και παράγοντας σχήματος εναποτιθέμενου σωματιδίου.....	74
EIKONA 11: Κατηγορία αιωρούμενων σωματιδίων και τρόπος απορρόφησης σωματιδίων από το αίμα.....	75
EIKONA 12: Επιλογή δεδομένων περιβάλλοντος που εκτίθεται ο άνθρωπος.....	75
EIKONA 13: Δεδομένα επεξεργασίας για κατανομή μεγέθους.....	76
EIKONA 14: Δεδομένα επεξεργασίας για συγκεντρώσεις.....	77
EIKONA 15: Έναρξη μοντέλου.....	77

Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων και εκπομπές ατμοσφαιρικών αεροζόλ [Αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999].....	17
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 Κύριοι ατμοσφαιρικοί ρύποι.....	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: Νομοθετικά όρια ποιότητας αέρα θεσπισμένα από την Ευρωπαϊκή Ένωση.....	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Όρια διαμέτρου σωματιδίων στα στάδια του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο 2020.....	44
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ($\mu g/m^3$) για 18 Μαΐου 2020.....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ($\mu g/m^3$) για 19 Μαΐου 2020.....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ($\mu g/m^3$) για 20 Μαΐου 2020.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Πίνακας δεδομένων εισόδου του μοντέλου ExDoM2.....	78

Διαγράμματα

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1: Χρονοσειρά μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM_{10}	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.2: Χρονοσειρά μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10}	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.3: Χρονοσειρά μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} χωρίς την επίδραση σκόνης Σαχάρα.....	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.4: Συγκεντρώσεις $PM_{2,5}$ Ιουνίου – Ιουλίου 2020.....	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.5: Κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} για τον μήνα Ιούνιο 2020.....	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.6: Κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} για τον μήνα Ιούλιο 2020.....	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με έντονη άσκηση για Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο 2020.....	47
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με ελαφριά άσκηση για Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο 2020.....	49
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα χωρίς άσκηση για Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο 2020.....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με ελαφριά άσκηση για τον Ιούνιο 2020.....	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με ελαφριά άσκηση για τον Ιούλιο 2020.....	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με επίδραση σκόνης Σαχάρα.....	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με επίδραση σκόνης Σαχάρα.....	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: Συνολική δόση για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο ανάλογα με την δραστηριότητα του ανθρώπου.....	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9: Συνολική δόση του εκτιθέμενου ανθρώπου με ελαφριά άσκηση με επίδραση της σκόνης Σαχάρα.....	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 9 Ιουνίου 2020.....	79
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 11 Ιουνίου 2020.....	80
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 17 Ιουνίου 2020.....	80
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 18 Ιουνίου 2020.....	81

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 23 Ιουνίου 2020.....	81
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 1 Ιουλίου 2020.....	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 6 Ιουλίου 2020.....	82
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 7 Ιουλίου 2020.....	83
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 20 Ιουλίου 2020.....	83
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 21 Ιουλίου 2020.....	84
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 22 Ιουλίου 2020.....	84

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η σωματιδιακή ρύπανση της ατμόσφαιρας αποτελεί κύριο αντικείμενο μελέτης στις μέρες μας καθώς εγκυμονεί κινδύνους τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Με τον όρο ατμοσφαιρική ρύπανση χαρακτηρίζεται η έντονη παρουσία διαφόρων χημικών ενώσεων που εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα, και οι οποίες σε αυξημένη συγκέντρωση ή διάρκεια προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, στον ανθρώπινο οργανισμό και σε όλους τους ζωντανούς οργανισμούς γενικότερα. Η σωματιδιακή ύλη στην ατμόσφαιρα είναι ένα μίγμα υδροσταγονιδίων τα οποία διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά τους. Τέτοιου είδους σωματίδια προέρχονται από προϊόντα καύσης, από το έδαφος ή και από την θάλασσα. Η παρουσία και η επαφή του ανθρώπου σε περιβάλλον με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων για ορισμένο χρονικό διάστημα ονομάζεται έκθεση [Λαζαρίδης, 2010].

Οι πηγές προέλευσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να είναι είτε ανθρωπογενείς είτε φυσικές, όμως οι εκπομπές που προκαλούνται από ανθρώπινη δραστηριότητα είναι αυτές που επιβαρύνουν κυρίως την ποιότητα της ατμόσφαιρας στο αστικό περιβάλλον [Dockery et al., 1993; Pope, 2007]. Οι πιο βασικές και επιβλαβείς ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης προέρχονται από βιομηχανικές μονάδες, από την παραγωγή και μεταφορά ενέργειας, από την κίνηση αυτοκινήτων αλλά και από την κυκλοφορία κάθε είδους οχήματος και μέσου μεταφοράς, καθώς και από την αποτέφρωση στερεών αποβλήτων [Borsos et al., 2012; Lewadonska 2013]. Ακόμη, ελευθερώνονται ρύποι εξαιτίας της κεντρικής θέρμανσης, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες. Επομένως, κύρια πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελεί κάθε είδους καύσιμο.

Βασικό χαρακτηριστικό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελούν οι διάφοροι ρύποι που εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα. Χαρακτηριστικά αναφέρονται, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, το όζον, τα οξείδια του αζώτου, τα αιωρούμενα σωματίδια καθώς και τα βαρέα μέταλλα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα καθώς τα αέρια που την ρυπαίνουν προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην δημόσια υγεία εξαιτίας της έκθεσης του ανθρώπου σε αυτά. Παράλληλα, η έκλυση μεγάλου ποσοστού ρύπων όπως το όζον, τα αιωρούμενα σωματίδια και το μεθάνιο, στην ατμόσφαιρα αποτελεί σημαντικό παράγοντα της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της κλιματικής αλλαγής [Zhou, 2021; West 1998].

Αιωρούμενα σωματίδια χαρακτηριστικά ονομάζονται ατμοσφαιρικά σωματίδια τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Αποτελούν τον πιο επιβλαβή ρύπο καθώς επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Τα σωματίδια αυτά βρίσκονται σε στερεή ή υγρή φάση και διαχωρίζονται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος τους το οποίο κυμαίνεται από 1nm έως και 100 μm [Hinds, 1999]. Παραδείγματα αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούν η σκόνη, η τέφρα, ο καπνός. Ως αεροζόλ ορίζεται ένα σταθερό αιώρημα είτε υγρών είτε στερεών σωματιδίων σε ένα ρευστό μέσο όπως είναι ο αέρας. Στην έννοια του αεροζόλ συμπεριλαμβάνεται και το ίδιο το μέσο. Συχνά ο όρος αιωρούμενα σωματίδια συγχέεται με τον όρο αεροζόλ.

Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις που προκαλούνται από τα αερολύματα στο οικοσύστημα επηρεάζοντας ιδιαίτερα τις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς αλλοιώνεται η ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που καταλήγει στην επιφάνεια του εδάφους, διότι απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία και αυξάνει την διάχυτη ακτινοβολία. Συνέπεια αυτού αποτελεί η ξηρασία η οποία προκαλείται και έτσι εμφανίζεται επιβράδυνση ή ακόμη και περιορισμός της φωτοσύνθεσης και της εξατμισοδιαπνοής, δύο βασικές λειτουργίες των οικοσυστημάτων [Zhou et al., 2021]. Ακόμη, τα αερολύματα, εμφανίζουν εξίσου σημαντικές επιπτώσεις και στην βλάστηση καθώς έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια των φύλλων των φυτών [West et al., 1998]. Άρα, επιδρούν στα συστατικά τους εφόσον αφομοιώνονται από αυτά.

Μία από τις βασικότερες πηγές ατμοσφαιρικών σωματιδίων σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η σκόνη, η οποία προέρχεται από την αφρικανική έρημο Σαχάρα. Η αερομεταφερόμενη σκόνη Σαχάρα, οδηγεί σε ιδιαίτερα αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} , οι οποίες συνήθως ξεπερνούν τα νομοθετικά όρια που έχουν θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων με έντονη συμβολή σκόνης Σαχάρα, αυξάνουν τον κίνδυνο για αναπνευστικά προβλήματα [Kakavas et al., 2021; Karanasiou et al., 2012]. Ιδιαίτερα, σε ανθρώπους με υποκείμενα νοσήματα αλλά και στην δημόσια υγεία γενικότερα, προκαλώντας δυσλειτουργίες και πλήθος παθήσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού θνησιμότητας εξαιτίας της τοξικότητας των σωματιδίων αυτής της προέλευσης. Επίσης, αποτέλεσμα της συνθήκης αυτής αποτελεί η περιορισμένη ορατότητα που προκαλείται [West et al., 1998].

Η τοξικότητα των ατμοσφαιρικών ρύπων εξαρτάται από την χημική τους σύσταση αλλά και από το μέγεθος τους, δηλαδή όσο μικρότεροι τόσο πιο τοξικοί. Η μεταβολή της χημικής σύστασης των ατμοσφαιρικών ρύπων προκαλεί και μεταβολή της χημικής σύστασης του εδάφους που καθιζάνουν, επομένως η τοξικότητα των ρύπων επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στο έδαφος και κατά συνέπεια στο περιβάλλον.

Ο άνθρωπος αναπνέει αδιάκοπα, εισπνέοντας καθημερινά ένα μεγάλο όγκο ατμοσφαιρικών ρύπων και ιδίως αιωρούμενων σωματιδίων. Το αναπνευστικό σύστημα αποτελεί την κύρια οδό μέσω της οποίας εισέρχονται σωματίδια στον ανθρώπινο οργανισμό [Λαζαρίδης, 2010]. Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου που εκτίθεται σε αυτή, σχετίζονται με την συγκέντρωση που εισέρχεται στον οργανισμό αλλά και την διάρκεια έκθεσης του ανθρώπου στους ρύπους [Oh et al., 2019].

Με την αναπνοή, ο άνθρωπος προσλαμβάνει οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά και εκβάλλει σε αυτόν διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και οτιδήποτε άλλο περιλαμβάνεται σε αυτόν. Στον ατμοσφαιρικό αέρα συμπεριλαμβάνονται και ρύποι όπως τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία έχουν την δυνατότητα να διεισδύσουν στους πνεύμονες και να δημιουργήσουν προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα και κατ' επέκταση να προκληθούν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Χαρακτηριστικά, ασθένειες που πιθανότατα προκαλούνται από την συνεχή έκθεση του οργανισμού, είναι η χρόνια βρογχίτιδα, το άσθμα ή ακόμη και καρκίνος του πνεύμονα [Stober et al., 1995; Oh et al., 2019]. Αναμφίβολα, σε περιοχές με έντονη βιομηχανική

δραστηριότητα ή μεγάλες πόλεις, οι κάτοικοι είναι σαφώς πιο εκτιθέμενοι σε ατμοσφαιρικούς ρύπους άρα ο κίνδυνος είναι μεγαλύτερος.

1.2 Χαρακτηριστικά Αιωρούμενων Σωματιδίων

1.2.1 Μέγεθος Αιωρούμενων Σωματιδίων

Κύρια χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων και αεροζόλ είναι το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητα καθώς και η χημική τους σύσταση αλλά και ο χρόνος παραμονής τους στην ατμόσφαιρα. Βασικότερη παράμετρος για τον χαρακτηρισμό των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί το μέγεθος τους, σύμφωνα με το οποίο προσδιορίζεται η συμπεριφορά και οι ιδιότητες τους. Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από την διάμετρό τους [Hinds, 1999]. Εξαιτίας όμως του σχήματος που έχουν, το οποίο δεν είναι καθόλα σφαιρικό, χρησιμοποιείται η έννοια της αεροδυναμικής διαμέτρου. Ως αεροδυναμική διάμετρος ορίζεται η διάμετρος ενός σωματιδίου με σφαιρικό σχήμα, πυκνότητα 1 g/cm^3 και ίδια ταχύτητα καθίζησης με το σωματίδιο το οποίο μελετάται.

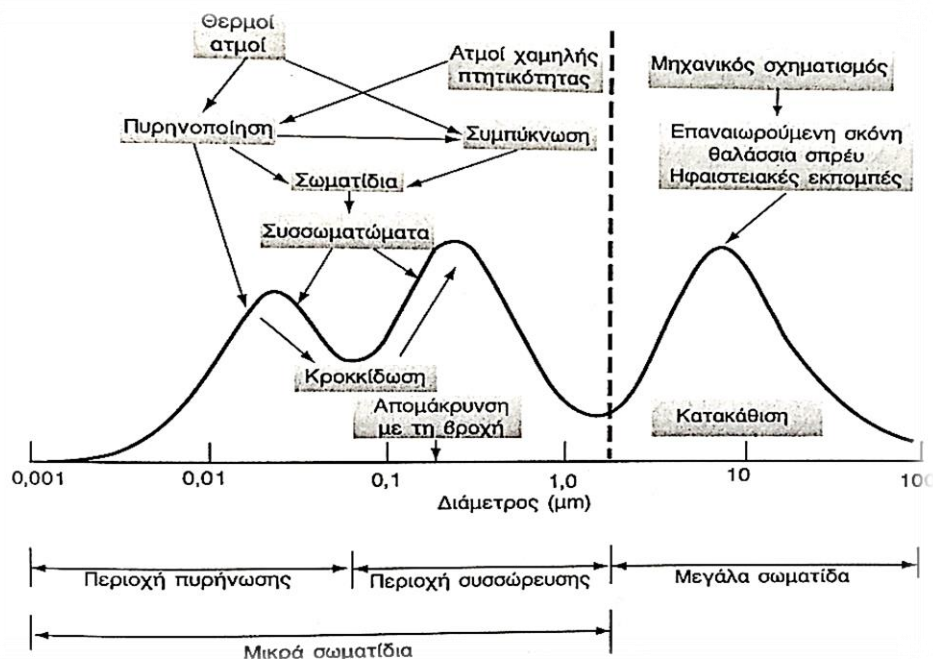
Τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM) διακρίνονται σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ανάλογα με την διάμετρο τους, και εμφανίζουν διαφορές τόσο για τα φυσικά όσο και για τα χημικά τους χαρακτηριστικά. Η διάμετρος των σωματιδίων που είναι μεγαλύτερη από $2,5 \mu\text{m}$ τα χαρακτηρίζει ως χονδρόκοκκα ή χονδρά σωματίδια, ενώ τα σωματίδια που η διάμετρος τους είναι μικρότερη από $2,5 \mu\text{m}$ χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκα ή λεπτά σωματίδια, και έχουν ως υποκατηγορία τα υπέρλεπτα σωματίδια των οποίων η διάμετρος ξεκινάει από $0,02 \mu\text{m}$ έως $0,1 \mu\text{m}$ [Hinds, 1999]. Τα χονδρά σωματίδια προέρχονται κατά κύριο λόγο από φυσικές πηγές κι έχουν υψηλές ταχύτητες καθίζησης, επομένως μπορούν να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις όταν είναι υψηλές οι ταχύτητες του ανέμου [Pandis et al., 1998]. Αντιθέτως, τα λεπτόκοκκα σωματίδια, με αεροδυναμική διάμετρο από $2,5$ έως $10 \mu\text{m}$, καταλήγουν κυρίως μετά από ανθρωπογενείς ενέργειες και είναι πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία καθώς είναι πιο τοξικά λόγω της προέλευσής τους. Επομένως, διαχωρίζονται σε $\text{PM}_{2,5}$ και PM_{10} , με τον δείκτη να προσδιορίζει την διάμετρο του προς μελέτη αιωρούμενου σωματιδίου.

Κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων:

- Χονδρά ή Χονδρόκοκκα Σωματίδια: Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από $2,5 \mu\text{m}$.
- Λεπτά ή Λεπτόκοκκα Σωματίδια: Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μικρότερη από $2,5 \mu\text{m}$.
- Υπέρλεπτα Σωματίδια: Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μικρότερη από $0,1 \mu\text{m}$.

Το συνολικό πλήθος και η συνολική μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων διαχωρίζεται σε επιμέρους μέρη ανάλογα με το μέγεθος τους. Τα λεπτόκοκκα σωματίδια είναι πολύ

περισσότερα συγκριτικά με τα χονδρά, όμως η μάζα τους είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τη μάζα που καταλαμβάνουν τα χονδρόκοκκα σωματίδια στο σύνολο.



EIKONA 1.1: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων [Λαζαρίδης, 2010]

Τα αιωρούμενα σωματίδια χαρακτηρίζονται και από την συγκέντρωσή τους, η οποία εκφράζεται ως συγκέντρωση μάζας (g/m^3) και αντιστοιχεί στην μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων στο ρευστό ή ως αριθμητική συγκέντρωση και αφορά τον αριθμό των αιωρούμενων σωματιδίων στο ρευστό. Το διαφορετικό μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων οδηγεί και στην διαφορετική χημική σύσταση των σωματιδίων, επομένως οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία διαφέρουν, καθώς εξαρτώνται από αυτές τις παραμέτρους.

1.3 Ατμοσφαιρικά Αεροζόλ

Αιωρήματα συγκεκριμένου αριθμού συγκεντρωμένων σωματιδίων στον όγκο ενός αέριου μέσου, όπως είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας, καλούνται αερολύματα. Η ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς καταλαμβάνει πρωτεύοντα ρόλο στην επίδραση τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Η μάζα και το πλήθος των σωματιδίων εκφράζουν την συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι τόσο υψηλές, που πλησιάζουν τα 10^8 σωματίδια/ cm^3 . Τα ατμοσφαιρικά αεροζόλ αποτελούν μέρος της ατμόσφαιρας και προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές [Anderson et al., 2012; Dockery et al., 1993; Pope et al., 2007]. Αποτελούν ένα μίγμα από υγρά και στερεά σωματίδια (υδροσταγονίδια). Ανεξαρτήτως προελεύσεως, τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, τα πρωτογενή σωματίδια εκπέμπονται αδιάκοπα και σχηματίζουν δευτερεύοντα σωματίδια στην ατμόσφαιρα [Hinds, 1999].

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Τα πρωτογενή σωματίδια εκλύονται άμεσα από τις πηγές τις οποίες προέρχονται, και αποτελούν τα μικρότερα σωματίδια, ενώ τα δευτερογενή σχηματίζονται στην ατμόσφαιρά μέσω μετατροπών ήδη υπάρχοντων αερίων, καθώς πρόκειται για συγκεντρωμένα πρωτογενή σωματίδια τα οποία συγκρατούνται με ισχυρούς ομοιοπολικούς και ετεροπολικούς δεσμούς μεταξύ τους.

Η σωματιδιακή μάζα στην ατμόσφαιρα, τόσο φυσικής προελεύσεως όσο και ανθρωπογενούς σχηματίζεται από αέριες εκπομπές. Χαρακτηριστικά, ως φυσικές πηγές αναφέρονται οι ωκεανοί, τα ηφαίστεια, το έδαφος, η έρημος αλλά και η καύση βιομάζας. Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργούνται κατά κύριο λόγο χονδρόκοκκα σωματίδια όπως τα υδροσταγονίδια ή σωματίδια σκόνης. Αντίστοιχα, στις ανθρωπογενείς πηγές προέλευσης εκπομπών αερίων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, από τις οποίες εκπέμπονται κυρίως λεπτά σωματίδια, εντάσσονται οι βιομηχανικές διεργασίες και οι μη βιομηχανικές καύσεις καθώς και πιθανές διαφεύγουσες εκπομπές, όπως επίσης και οι εκπομπές που προέρχονται από τα μέσα μεταφοράς [Lewadonska, 2013; Chat et al., 2019]. Χαρακτηριστικά, τα αστικά αερολύματα τα οποία προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές βρίσκονται στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας πάνω από μεγάλες πόλεις. Οι φυσικές πηγές υπερβαίνουν τις ανθρωπογενείς κατά ένα μεγάλο βαθμό, καθώς οι τελευταίες καταλαμβάνουν λιγότερο από το 50% των παγκόσμιων εκπομπών σωματιδίων [Hinds, 1999]. Γεγονός αποτελεί ότι οι φυσικές πηγές είναι καλά κατανοημένες σε παγκόσμιο επίπεδο με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της συνεισφοράς τους στις αέριες εκπομπές να προέρχεται από πολύ μεγάλες πηγές. Αδιαμφισβήτητα, σε βιομηχανικές περιοχές, η ανθρώπινη συνεισφορά υπερβαίνει των φυσικών πηγών.

Εκτός ατμόσφαιρας, μπορούν να εντοπιστούν αερολύματα κυρίως στην τροπόσφαιρα, σε υψόμετρο χαμηλότερο από 11 χιλιομέτρων, και προέρχονται από τις ερήμους με το μεγαλύτερο ποσοστό τους να εναποτίθεται στο χαμηλότερο στρώμα της. Δευτερευόντως εντοπίζονται στην στρατόσφαιρα σε υψόμετρο μικρότερο των 50 χιλιομέτρων, όπου και συναντώνται συνήθως από πιθανές εκρήξεις ηφαιστειών, και έχουν έντονη επιρροή στο κλίμα, παρότι ο χρόνος ζωής τους δεν ξεπερνά τον έναν χρόνο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων και εκπομπές ατμοσφαιρικών αεροζόλ [Αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999]

		Κατηγορία Σωματιδίων
ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ		
Πρωτογενή Σωματίδια		
	Σκόνη από Έδαφος	Χονδρά Σωματίδια
	Υδροσταγονίδια	Χονδρά Σωματίδια
	Σκόνη από Ηφαίστειο	Χονδρά Σωματίδια
	Βιολογικό Υλικό	Χονδρά Σωματίδια
Δευτερογενή Σωματίδια		
	Θειικά Άλατα από εκπομπές Ηφαιστείου SO ₂	Λεπτά Σωματίδια

	Νιτρικά Άλατα NO _x	Λεπτά Και Χονδρά Σωματίδια
	Οργανικά από Εκπομπές Βιογενών Οργανικών Πτητικών Ενώσεων VOC	Λεπτά Σωματίδια
ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ		
Πρωτογενή Σωματίδια		
	Βιομηχανική Σκόνη	Λεπτά και Χονδρά Σωματίδια
	Εκπομπές από Καύσεις	Λεπτά Σωματίδια
	Εκπομπές από Μεταφορές	Λεπτά Σωματίδια
Δευτερογενή Σωματίδια		
	Θειικά Άλατα από Εκπομπές SO ₂	Λεπτά Σωματίδια
	Νιτρικά Άλατα από NO _x	Χονδρά Σωματίδια
	Καύση Βιομάζας	Λεπτά Σωματίδια
	Οργανικά από Εκπομπές Πτητικών Οργανικών Πτητικών Ενώσεων VOC	Λεπτά Σωματίδια

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζεται άμεσα από την περιοχή από την οποία προέρχονται, αν πρόκειται για θαλάσσια, υπαίθρια ή αστική περιοχή, καθώς διαφέρουν οι πηγές αλλά και οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις. Οι πηγές προέλευσης των αερολυμάτων εξαρτώνται τόσο από την ανθρώπινη δραστηριότητα όσο και από τις συνθήκες του ίδιου του περιβάλλοντος που μελετάται όπως είναι τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και το κλίμα της.

1.4 Εκπομπές στο Εξωτερικό Περιβάλλον

Η επίδραση τόσο των αιωρούμενων σωματιδίων όσο και των υπόλοιπων ατμοσφαιρικών ρύπων στην ποιότητα του αέρα και στο περιβάλλον επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα και σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι εκπομπές τους είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών και φυσικών διεργασιών και προκαλούν τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο περιβάλλον [Λαζαρίδης, 2010].

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2: Κύριοι Ατμοσφαιρικοί Ρύποι

Ατμοσφαιρικοί Ρύποι	
CO₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
CO	Μονοξείδιο του Άνθρακα
NMVOCs	Μη - Μεθανικές Οργανικές Ενώσεις
CH₄	Μεθάνιο
NO_x	Οξείδια του Αζώτου
N₂O	Υπεροξείδιο του Αζώτου

NH₃	Αμμωνία
SO₂	Διοξείδιο του Θείου
PM	Αιωρούμενα Σωματίδια
HM	Βαρέα Μέταλλα
POPs	Παραμένοντες Οργανικοί Ρύποι

Οι ρύποι διακρίνονται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς, ανάλογα με τον τρόπο που εκλύονται στην ατμόσφαιρα, άμεσα ή έμμεσα. Οι πρωτογενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, κυρίως μέσω ανθρώπινων διεργασιών και κίνησης οχημάτων [Borsos et al., 2012; Dockery et al., 1993]. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ρύπων που ελευθερώνονται πηγάζει από φυσικές διεργασίες, όμως για το πιο σημαντικό πρόβλημα στο περιβάλλον ευθύνονται οι ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως σε περιοχές με έντονη βιομηχανική ενασχόληση. Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες περιλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό τοξικών ρύπων που είναι επιβλαβές τόσο για το περιβάλλον όσο και για την δημόσια υγεία. Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τον άνθρωπο θεωρείται ως η σημαντικότερη παράμετρος υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα [Λαζαρίδης, 2010].

Ρύποι όπως το μονοξείδιο άνθρακα και το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, τα οξείδια του αζώτου προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές. Τέτοιες πηγές εκπομπών αποτελούν η βλάστηση, καθώς περιορίζεται άμεσα η φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών, το έδαφος, όπου μέσω της διάβρωσης του εδάφους εκπέμπονται σωματίδια τα οποία μεταφέρονται μέσω του ανέμου. Η μεταφορά αυτή αποτελεί επαναιώρηση σωματιδίων σκόνης, τα οποία προέρχονται από το έδαφος αλλά και από βιομηχανικές διεργασίες ή από την κυκλοφοριακή κίνηση της περιοχής [Lewadonska, 2013; Chat et al., 2019]. Αναμφίβολα χαρακτηριστικό παράδειγμα επαναιώρησης αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί η αφρικανική σκόνη που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα και αφορά κυρίως χονδρόκοκκα σωματίδια. Σημαντικό παράγοντα αποτελούν το μέγεθος των σωματιδίων αλλά και οι συνθήκες της επιφάνειας από όπου εκπέμπονται. Ανάλογα με το πόσο ρυπασμένη είναι η περιοχή εξαρτάται και το πόσο επικίνδυνες θα είναι και οι εκπομπές των ρύπων σε αυτή.

Τα υδροσταγονίδια, τα οποία προέρχονται από θάλασσες, ωκεανούς και υγροτόπους (όπως είναι βάλτοι, έλη κ.α.), συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση των ατμοσφαιρικών ρύπων από φυσικές πηγές. Αποτελούν συνεχή πηγή σωματιδιακού φορτίου με την μορφή σωματιδίων άλατος για την ατμόσφαιρα [Λαζαρίδης, 2010]. Εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων μπορούν να προκληθούν από πυρκαγιές, οι οποίες μπορούν να δημιουργηθούν από ανθρώπινη δραστηριότητα ή ακόμη και από αστραπές. Κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς, υπάρχει έκλυση διοξειδίου του άνθρακα, εξαιτίας της καύσης της βιομάζας. Η ποσότητα των ρύπων που εκπέμπονται από μια έκταση που έχει προηγηθεί πυρκαγιάς είναι υψηλότερη και οι ρύποι αυτοί καταλήγουν στο έδαφος το οποίο είναι πλέον ρυπασμένο [Zhou, 2021].

Οι βασικότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι που προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), τα οποία μπορούν πολύ εύκολα να εισπνευστούν από τον άνθρωπο και να εισέλθουν στο αναπνευστικό του σύστημα δημιουργώντας προβλήματα, Ακολουθώντας, το διοξείδιο του θείου (SO₂), είναι ένα αέριο

το οποίο προέρχεται από βιομηχανικές εκπομπές ή και από οικιακές εκπομπές. Παράλληλα, το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και τα οξείδια του αζώτου (NO) προέρχονται από ίδιες πηγές και δημιουργούν περιορισμένη ορατότητα, κυρίως σε μεγάλες πόλεις. Ένας ακόμη ατμοσφαιρικός ρύπος, που προέρχεται όμως από την γεωργία και την χρήση λιπασμάτων είναι η αμμωνία (NH₃). Τέλος, το μεθάνιο (CH₄) αποτελεί επίσης έναν σημαντικό ατμοσφαιρικό ρύπο, καθώς προέρχεται από εκπομπές που οφείλονται στην γεωργία και από χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.ΤΑ.) και καλείται ως ένα κύριο αέριο του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στην κλιματική αλλαγή, καθώς θεωρείται παράγοντας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

1.4.1 Νομοθετικά Όρια Ποιότητας Αέρα

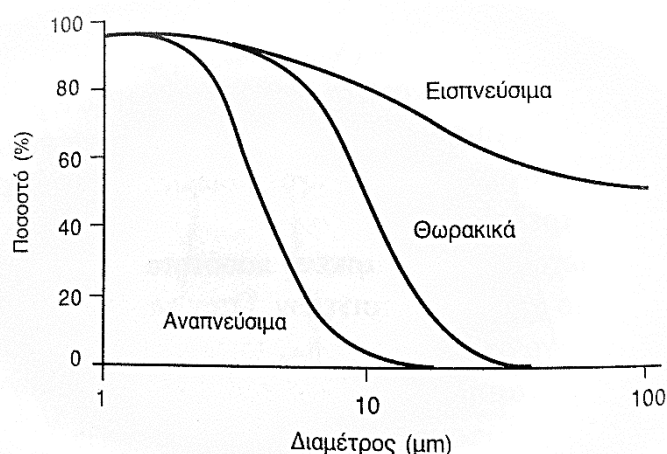
Η ποιότητα του αέρα επηρεάζεται σημαντικά από την ατμοσφαιρική ρύπανση, για αυτό μελετάται ιδιαίτερα, στοχεύοντας στην προστασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία θεσπίζει όρια, με σκοπό την διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Τα αιωρούμενα σωματίδια ανήκουν στους ατμοσφαιρικούς ρύπους για τους οποίους αρχικά διαμορφώθηκαν νομοθετικά όρια, καθώς σε υψηλές συγκεντρώσεις οι επιπτώσεις τους είναι επιβλαβείς, με σημαντικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και ιδιαίτερα σε ανθρώπους με αναπνευστικά προβλήματα, καθώς εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα. Η εκτεταμένη έκθεση ενός ανθρώπου σε ατμοσφαιρικούς ρύπους και οι συνέπειες που προκαλεί οδηγούν την Ευρωπαϊκή Ένωση να προάγει ένα πρότυπο νομοθετικό πλαίσιο για τα επιτρεπτά όρια ποιότητας του αέρα. Με τον τρόπο αυτό, ελέγχεται η τιμή της συγκέντρωσης των ρύπων που καταγράφεται μέσω οργάνων και μοντέλων από έρευνες που διεξάγονται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: Νομοθετικά όρια ποιότητας αέρα θεσπισμένα από την Ευρωπαϊκή Ένωση

Ατμοσφαιρικοί Ρύποι	Συγκέντρωση (g/m ³)	Χρονική Διάρκεια Έκθεσης
Αιωρούμενα Σωματίδια (PM)		
Λεπτά Σωματίδια (PM _{2.5})	25 µg/m ³	1 χρόνος
Χονδρά Σωματίδια (PM ₁₀)	50 µg/m ³	1 ημέρα
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	350 µg/m ³	1 ώρα
	125 µg/m ³	1 ημέρα
Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	200 µg/m ³	1 ώρα
	40 µg/m ³	1 χρόνος
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	10 mg/m ³	8 ώρες
Βαρέα Μέταλλα (HM)		
Μόλυβδος (Pb)	0,5 µg/m ³	1 χρόνος
Κάδμιο (Cd)	5 ng/m ³	1 χρόνος
Αρσενικό (As)	6 ng/m ³	1 χρόνος
Νικέλιο (Ni)	20 ng/m ³	1 χρόνος

1.5 Αιωρούμενα Σωματίδια Στο Ανθρώπινο Αναπνευστικό Σύστημα

Τα αιωρούμενα σωματίδια τα οποία πηγάζουν τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς διεργασίες εισέρχονται και εναποτίθενται στον ανθρώπινο οργανισμό προκαλώντας πολλά προβλήματα. Επομένως, η μελέτη της ρύπανσης εξαιτίας αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα κρίνεται απαραίτητη καθώς η ανθρώπινη έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους εγκυμονεί κινδύνους για την δημόσια υγεία [Pope et al., 2006]. Η είσοδος των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της τροφής αλλά κυρίως μέσω της αναπνοής και της δερματικής επαφής. Η αναπνοή αποτελεί δίοδο ώστε να καταλήξουν σε διάφορες περιοχές του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος [Chalvatzaki et al., 2021].



ΕΙΚΟΝΑ 1.2: Ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα βάσει της διαμέτρου τους [Λαζαρίδης, 2010]

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με την περιοχή στην οποία θα εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα. Χαρακτηριστικά, ως εισπνεύσιμα καλούνται τα αιωρούμενα σωματίδια που εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα για την περιοχή του κεφαλιού ενώ τα θωρακικά απευθύνονται σε περιοχές του λάρυγγα και των πνευμόνων. Παράλληλα, τα αναπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν μέρος των θωρακικών καθώς τα διαχωρίζει η περιοχή που καταλήγουν καθώς οδηγούνται στην περιοχή που πραγματοποιείται η ανταλλαγή των αερίων [Λαζαρίδης, 2010]. Τα σωματίδια που εισβάλλουν τελικά σε έναν ανθρώπινο οργανισμό και προσβάλλουν το αναπνευστικό του σύστημα, έχουν διάμετρο 0,01-12 μm δηλαδή αποτελούνται από όλων των μεγεθών αιρούμενα σωματίδια, χονδρά ή χονδρόκοκκα σωματίδια PM₁₀, PM_{2,5}, λεπτόκοκκα ή λεπτά σωματίδια αλλά και υπέρλεπτα σωματίδια.

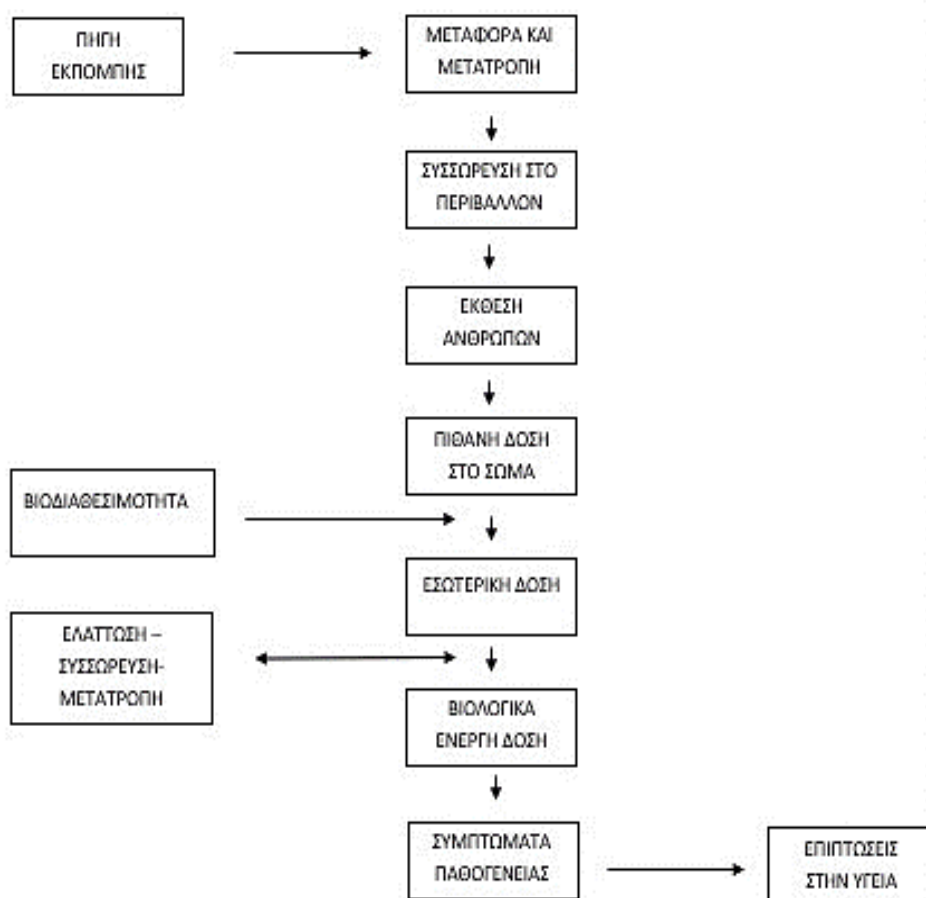
1.5.1. Δόση και Έκθεση σε Αιωρούμενα Σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια ως ατμοσφαιρικοί ρύποι προκαλούν άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό με την είσοδο τους σε αυτόν. Το αναπνευστικό

σύστημα αποτελεί την κύρια οδό εισόδου των σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό [Λαζαρίδης, 2010]. Χαρακτηριστικές παραμέτρους αποτελούν η έννοια της έκθεσης και η έννοια της δόσης.

Ως δόση ορίζεται η ποσότητα αεροζόλ που εναποτίθεται στον ανθρώπινο οργανισμό σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο, και προκαλεί επιπτώσεις στα όργανα του αναπνευστικού συστήματος που έχει προσβάλει καθώς και στην λειτουργία του αναπνευστικού συστήματος γενικότερα. Η δόση ενός ρύπου αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την ανθρώπινη υγεία καθώς ανάλογα με την ποσότητα της δόσης που εναποτίθεται στα όργανα του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος μπορεί να προκληθούν αντίστοιχα σοβαρά προβλήματα ακόμη και δυσλειτουργία σε αυτά. Δηλαδή, η δόση του ρύπου, είναι υπεύθυνη για τυχόν απόκριση του οργανισμού στην ποσότητα που εισέρχεται σε αυτό, και διακρίνεται σε δυνητική, εφαρμοζόμενη και εσωτερική.

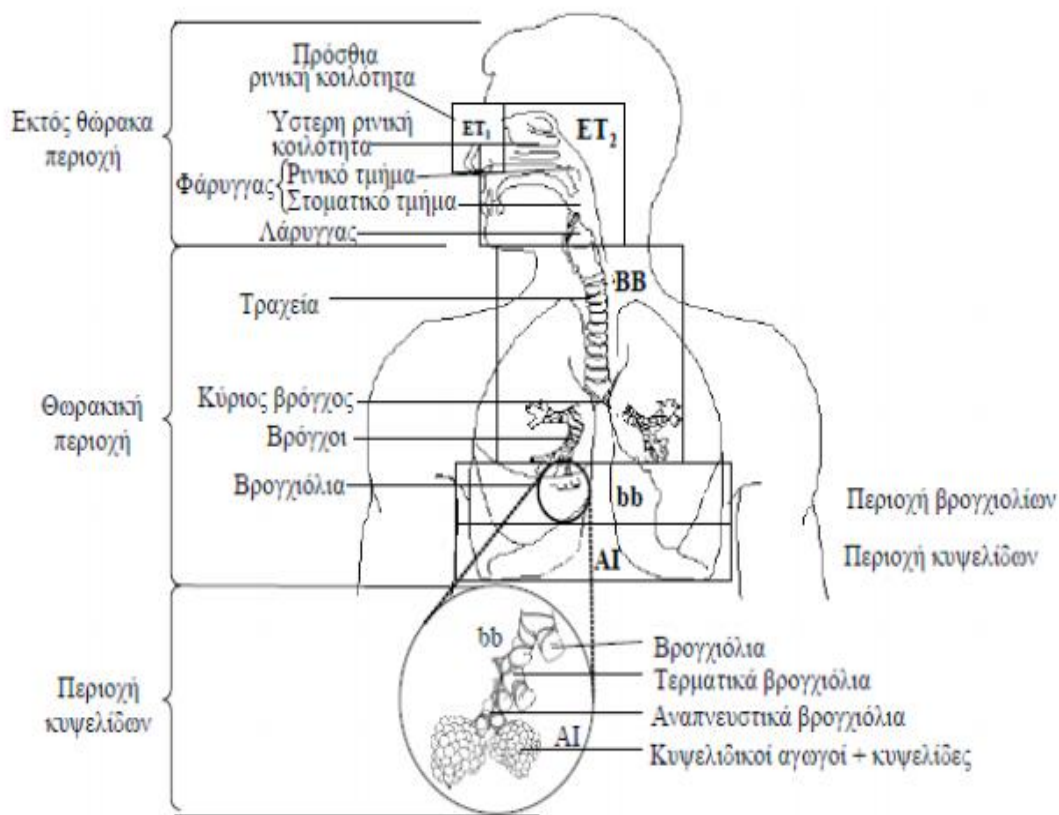
Με την έννοια της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια προσδιορίζεται η συγκέντρωση του ρύπου που έρχεται σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα για ορισμένο διάστημα. Η επαφή αυτή πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο μέσω της αναπνοής, δηλαδή από το στόμα και την μύτη καθώς και μέσω δερματικής επαφής.



ΕΙΚΟΝΑ 1.3: Σχηματική απεικόνιση της σειράς βημάτων που οδηγούν από την εκπομπή αερίων ρύπων σε πιθανές επιπτώσεις τους στην υγεία [Λαζαρίδης, 2010]

1.5.2.Λειτουργία του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος

Η ανατομία του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος διαιρείται σε τρεις περιοχές για την καλύτερη εκτίμηση της δόσης [ICRP, 1994]. Οι περιοχές αυτές είναι το ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τη ρινική κοιλότητα, τον φάρυγγα και τον λάρυγγα, η εκτός θώρακα περιοχή (ΕΤ), η τραχειοβρογχική περιοχή (ΤΒ) στην οποία ανήκουν το κάτω μέρος του λάρυγγα, οι βρόγχοι και οι πνεύμονες και τέλος η κυψελική περιοχή (ΑΙ), στην οποία πραγματοποιείται η ανταλλαγή αερίων, με απώτερο σκοπό την αναπνοή, με τα πολύ μικρά σωματίδια να έχουν καταλήξει ως εκεί και αποτελείται από τις κυψελιδικές καταλήξεις (διακλαδώσεις) των βρόγχων. Η απεικόνιση του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος αναπαρίσταται στην παρακάτω εικόνα:



ΕΙΚΟΝΑ 1.4: Ανατομία αναπνευστικού συστήματος [ICRP, 1994]

Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με βάση την λειτουργία του κάθε τμήματος του αναπνευστικού συστήματος [ICRP, 1994; USEPA, 2004]. Αναλυτικότερα, οι τρεις περιοχές διακρίνονται σε:

Ανώτερο Αναπνευστικό (Εκτός Θώρακα Περιοχή – ΕΤ): η περιοχή αυτή αποτελείται από την πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET₁) και την ύστερη ρινική κοιλότητα, το λάρυγγα, το φάρυγγα και το στόμα (ET₂). Μέσω του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος μεταφέρεται ο αέρας από το περιβάλλον στην περιοχή που πραγματοποιείται η αναπνοή. Βασική του λειτουργία αποτελεί ο καθαρισμός του αέρα, η ρύθμιση της

υγρασίας και της θερμοκρασίας του και η μεταφορά του στην τραχεία και στους πνεύμονες [ICRP, 1994].

Τραχειοβρογχική Περιοχή (TB): η περιοχή αυτή περιλαμβάνει αρχικά την τραχεία και εν συνεχεία τους πρωτεύοντες βρόγχους (BB), τους δευτερεύοντες βρόγχους (διακλαδώσεις) και τους τερματικούς βρόγχους (bb). Στόχος αποτελεί η μεταφορά και ο καθαρισμός του αέρα με εναπόθεση σωματιδίων.

Κυψελιδική Περιοχή (Al): η περιοχή η οποία αποτελείται από τους αναπνευστικούς βρόγχους (βρογχιόλια), τις πνευμονικές κυψελίδες και το συνδετικό ιστό. Ως πνευμονικές κυψελίδες χαρακτηρίζονται οι κυψελιδικοί αεραγωγοί και οι αεροθύλακες. Κύριο μέλημα της περιοχής αυτής είναι η αναπνοή.

1.5.3 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη Υγεία

Η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί κύρια αιτία ρύπανσης του αέρα και το γεγονός αυτό επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό τόσο μακροπρόθεσμα όσο και βραχυπρόθεσμα. Η εκπομπή αλλά και η μεταφορά των ρύπων προκαλούν αρνητικά αποτελέσματα στην δημόσια υγεία. Χαρακτηριστικά, τα σωματίδια προκαλούν άμεσες και χρόνιες επιπτώσεις επιβαρύνοντας τον ανθρώπινο οργανισμό. Η είσοδος των επιβλαβών σωματιδίων στον οργανισμό πραγματοποιείται μέσω της τροφικής αλυσίδας αλλά κατά κύριο λόγο μέσω της αναπνοής και της δερματικής επαφής. Η μελέτη των επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα βρίσκεται στον πυρήνα των ερευνών, καθώς οι συνέπειες είναι σημαντικά επιβλαβείς για το αναπνευστικό σύστημα. Η έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων, οδηγεί στην μεταφορά, κυρίως μικρού μεγέθους, σωματιδίων εντός του ανθρώπινου οργανισμού τα οποία εναποτίθεται σε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος και σε ευαίσθητους ιστούς του οργανισμού προκαλώντας δυσλειτουργίες και οδηγώντας σε διάφορες επιπλοκές και παθήσεις στο αναπνευστικό σύστημα [Stober et al., 1995; Pope et al., 2006]. Αδιαμφισβήτητο παράγοντα αποτελεί ο χρόνος έκθεσης του ανθρώπου στους ατμοσφαιρικούς ρύπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλημάτων σε όλα τα μέρη του αναπνευστικού συστήματος. Αναφορικά, με βραχυπρόθεσμη έκθεση προκαλούνται κρίσεις άσθματος και αναπνευστικές μολύνσεις, ενώ σε μακροχρόνια έκθεση, πιθανώς, ο ανθρώπινος οργανισμός να οδηγηθεί σε χρόνιες παθήσεις όπως χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρόνια βρογχίτιδα και πνευμονία αλλά και επιδεινώνει χρόνια αναπνευστικά νοσήματα ή ακόμη πιο σοβαρά οδηγεί τον ανθρώπινο οργανισμό σε μειωμένη λειτουργία του αναπνευστικού του συστήματος [Chalvatzaki et al., 2021]. Τα γεγονότα αυτά παρατηρούνται κυρίως σε φαινόμενα έντονης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με αποτέλεσμα τα περιστατικά των ασθενών με αναπνευστικά προβλήματα αυξάνονται στα νοσοκομεία.



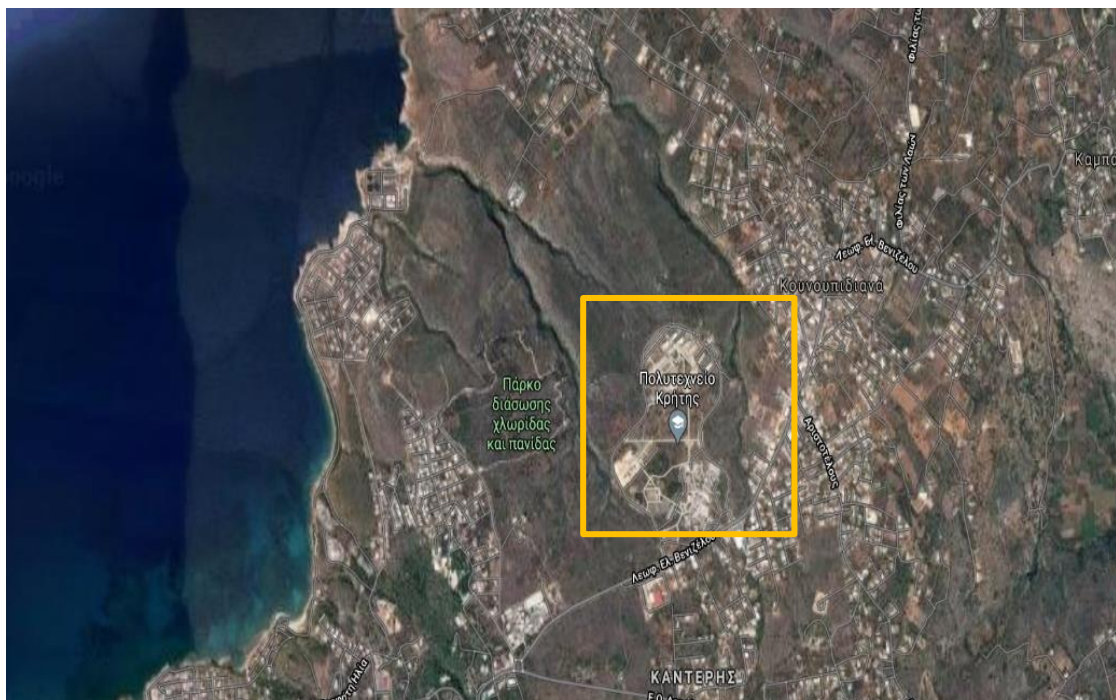
ΕΙΚΟΝΑ 1.5: Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

2. Πειραματική Διαδικασία

Σκοπό της παρούσας πειραματικής εργασίας αποτελεί η μέτρηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων διαφορετικής διαμέτρου (PM_{10} και $PM_{2,5}$) σε εξωτερικό περιβάλλον εντός του Πολυτεχνείου Κρήτης στην περιοχή Ακρωτηρίου, Χανίων. Για την πραγματοποίηση του πειράματος έγινε χρήση διαφορετικών εργαστηριακών οργάνων. Χαρακτηριστικά, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από έναν προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, για την μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου έως 10 μm , από έναν δειγματολήπτη συλλογής αερολυμάτων Leckel, για την καταμέτρηση σωματιδίων $PM_{2,5}$, καθώς και από DUSTRAK II, για την μέτρηση συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων. Για την διεξαγωγή και την ολοκλήρωση του πειράματος, πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες δειγματοληπτικές εξωτερικές μετρήσεις, σε χρονικό πλαίσιο 2 μηνών, και συγκεκριμένα για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο. Στην συνέχεια, με την βοήθεια συγκεκριμένου μοντέλου, προσδιορίζεται η ανθρώπινη έκθεση και δόση αιωρούμενων σωματιδίων.

2.1 Στοιχεία Μετρήσεων

Η διεξαγωγή της συγκεκριμένης πειραματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια μελέτης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων του κτιρίου Κ1 της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων. Χαρακτηριστικά, επισυνάπτονται παρακάτω οι χάρτες της ευρύτερης περιοχής μελέτης του παρόντος πειράματος καθώς και ο χώρος που πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες στον σταθμό του Πολυτεχνείου.



ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Χάρτης Πολυτεχνείου Κρήτης και ευρύτερης περιοχής Ακρωτηρίου Χανίων [ΠΗΓΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ - GOOGLEMAPS, 2021]



ΕΙΚΟΝΑ 2.2: Απεικόνιση κτιρίων σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης [ΠΗΓΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ - GOOGLEMAPS, 2021]



ΕΙΚΟΝΑ 2.3: Απεικόνιση σταθμού μετρήσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης [ΠΗΓΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ - GOOGLEMAPS, 2021]

Για την υλοποίηση όλων των δειγματοληψιών και την ορθή διεξαγωγή του πειράματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που συμμετείχαν στην πειραματική διαδικασία και έλαβαν χώρα ξεχωριστά, τόσο στο εργαστήριο μελέτης των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων του κτιρίου Κ1 που ανήκει στην Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, όσο και στον σταθμό μετρήσεων του Πολυτεχνείου, με την χρήση διαφορετικών οργάνων μέτρησης κάθε φορά. Η προετοιμασία των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος καθώς και πιο συγκεκριμένα, η ξήρανση των φίλτρων πριν και μετά τις μετρήσεις αλλά και οι ζυγίσεις των φίλτρων που χρειάζονται για τα όργανα όπου χρησιμοποιούνται, έλαβαν χώρα στο εργαστήριο ενώ οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το πείραμα, με την χρήση των διαφορετικών οργάνων, έγιναν για κάθε ένα από αυτά, στον σταθμό μετρήσεων. Η περιοχή που βρίσκεται ο σταθμός του Πολυτεχνείου και το κτίριο που βρίσκεται το εργαστήριο, δεν έχουν μεγάλη απόσταση, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποιο πρόβλημα ή σφάλμα κατά την μεταφορά των οργάνων και των φίλτρων.

2.2 Οργανολογία

Η μελέτη της εργασίας αυτής διεξήχθη στο εργαστήριο ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων και στον σταθμό μετρήσεων, με την βοήθεια ενός συγκεκριμένου εξοπλισμού ο οποίος ανήκει στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τα εξής όργανα: έναν μετρητή αερολυμάτων Leckel, έναν προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen (Andersen Cascade Impactor), έναν μετρητή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων DustTrak II. Ακόμη, έγινε χρήση ενός ξηραντήρα, μιας ζυγαριάς ακριβείας καθώς και για τα δύο όργανα που μετρούν μέσω φίλτρων, φίλτρα χαλαζία (Quartz) για τον προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen C.I. και φίλτρα Teflon για τον μετρητή Leckel.



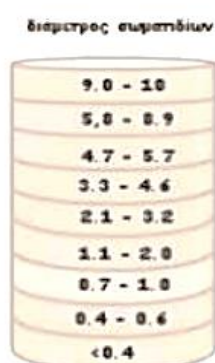
EIKONA 2.4: Προσκρουστήρας διαχωρισμού ANDERSEN C.I. [Εργαστήριο μελέτης ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων, Πολυτεχνειούπολη]

2.2.1 Προσक्रουστήρας Διαχωρισμού Andersen C.I. (Andersen Cascade Impactor)

Η αρχή λειτουργίας του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, βασίζεται στην αρχή της πρόσκρουσης μέσω του αέρα που εισέρχεται στο όργανο με την βοήθεια εξωτερικής αντλίας και διέρχεται από διαδοχικούς προσκρουστήρες. Αρχικά, τα αιωρούμενα σωματίδια περνούν στον προσκρουστήρα και οδηγούνται προς μια επίπεδη επιφάνεια, την επιφάνεια πρόσκρουσης, η οποία μετατοπίζει την κατεύθυνση των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων κατά 90° με αποτέλεσμα τα σωματίδια με μεγάλη εσωτερική ενέργεια να συγκρούονται με την επίπεδη επιφάνεια και τελικά να συγκρατούνται εκεί. Τα σωματίδια που έχουν διαπεράσει, είναι αυτά που έχουν μικρότερη εσωτερική ενέργεια και τελικά δεν κολλάνε στην συγκεκριμένη επιφάνεια αλλά συνεχίζουν και ακολουθούν την ροή. Στην έξοδο τους τοποθετείται ένα φίλτρο ώστε τα εν λόγω σωματίδια να μελετηθούν. Το πόσο βαθύτερα θα εισέλθει ένα σωματίδιο στον προσκρουστήρα εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου αυτού.

Για την διεξαγωγή της παρούσας εργαστηριακής μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ο προσκρουστήρας διαχωρισμού Andersen (Andersen Cascade Impactor), ο οποίος συλλέγει τα ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια σε 9 στάδια, ανάλογα με την αεροδυναμική διάμετρο αυτών των αιωρούμενων σωματιδίων. Επομένως, γίνεται χρήση διαδοχικών προσκρουστήρων, με διαφορετικές επιφάνειες πρόσκρουσης, στην έξοδο του οποίου κάθε φορά τοποθετείται φίλτρο χαλαζία. Στην κορυφή του, υπάρχει η αντλία εισαγωγής και εισροής των σωματιδίων, η οπή της οποίας μειώνεται, άρα μικραίνει και το μέγεθος πρόσκρουσης καθώς αφορά μικρότερης διαμέτρου αιωρούμενα σωματίδια. Φίλτρο συναντάται στο όργανο κάθε φορά που αλλάζει το στάδιο βάσει της αεροδυναμικής διαμέτρου των σωματιδίων που συλλέγονται στο κάθε ένα. Στοχεύοντας στην πιο αξιόπιστη μέτρηση ροής, ανάμεσα στον δειγματολήπτη και στην αντλία, παρεμβάλλεται ένας μετρητής όγκου διερχόμενου αέρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Όρια διαμέτρου σωματιδίων στα στάδια του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen



ΕΙΚΟΝΑ 2.5: Διάμετρος σωματιδίων σε κάθε στάδιο

Στάδιο	Κατώτερο όριο (μm)	Ανώτερο όριο (μm)
0	9	10
1	5,8	9
2	4,7	5,8
3	3,3	4,7
4	2,1	3,3
5	1,1	2,1
6	0,7	1,1
7	0,4	0,7
8	0,01	0,4

2.2.2 Μετρητής Leckel

Ο μετρητής Leckel χρησιμοποιείται για την καταμέτρηση ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων $PM_{2,5}$ και PM_{10} , τόσο σε εξωτερικό όσο και εσωτερικό περιβάλλον με την βοήθεια αντλίας κενού. Η συγκεκριμένη αντλία κενού εισρρέει εξωτερικό αέρα περιβάλλοντος και τον μεταφέρει, συμπεριλαμβανομένου και τα αερομεταφερόμενα λεπτά σωματίδια που εισέρχονται. Στην συνέχεια ο αέρας διαπερνά μέσα από ένα φίλτρο, στο οποίο συγκρατούνται ατμοσφαιρικά αιωρούμενα σωματίδια, και σε τελικό στάδιο ζυγίζεται. Ακόμη, ο μετρητής Leckel μετράει τον ογκομετρικό ρυθμό ροής για δειγματοληψία $PM_{2,5}$, ο οποίος κυμαίνεται στα $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Βασική λειτουργική αρχή αποτελεί η εισαγωγή των ρυθμίσεων στην αρχή της δειγματοληψίας, η οποία εν συνεχεία διεξάγεται αυτόματα, ανάλογα με τις παραμέτρους που έχουν εισαχθεί και τα δεδομένα της καταγράφονται και αποθηκεύονται στην μνήμη του μετρητή. Τα δεδομένα αυτά που καταγράφονται μπορεί να είναι ο σειριακός αριθμός του οργάνου, η ημερομηνία και η ώρα που ξεκινάει και ολοκληρώνεται η δειγματοληψία, η διάρκεια της δειγματοληψίας αλλά και ο όγκος ρυθμού ροής σε m^3/h και σε Nm^3/h .



ΕΙΚΟΝΑ 2.6: Μετρητής αερολυμάτων $PM_{2,5}$ LECKEL

2.2.3 DUSTRAK II

Το DustTrak II, είναι φορητό όργανο και μετράει την συγκέντρωση της μάζας αιωρούμενων σωματιδίων. Με την προσαρμογή της αντίστοιχης κεφαλής διεξάγεται η πειραματική διαδικασία είτε για PM_{10} , αλλά και για $PM_{2,5}$ ακόμα και για την καταμέτρηση PM_{10} . Το όργανο αυτό μετρά τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον, γεγονός που εξυπηρετεί για την διεξαγωγή πειραματικών διεργασιών, όπως επίσης και η χειροκίνητη ρύθμιση προγραμματισμού της διάρκειας καταγραφής δεδομένων,

αλλά και του χρονικού διαστήματος εγγραφής τους, δηλαδή της έναρξης και λήξης που καταγράφονται δεδομένα. Στο παρόν πείραμα που έγινε χρήση του φορητού οργάνου DUSTTRAK II, και ειδικότερα του μοντέλου 8532, με σκοπό την παρακολούθηση της συγκέντρωσης μάζας των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ σε εξωτερικό περιβάλλον. Το όργανο DustTrak II, κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος λειτουργούσε εντός του εργαστηρίου και ήταν συνδεδεμένο με το εξωτερικό περιβάλλον με ένα μικρό μαύρο σωληνάκι, με συνεχή σύνδεση στο ρεύμα, συνεχόμενα για μια εβδομάδα, 7 ημέρες. Τα δεδομένα των μετρήσεων, μέσω του DustTrak II, αποθηκεύονται και μεταφέρονται με την χρήση ενός USB σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου γίνεται η περαιτέρω ανάλυση τους.

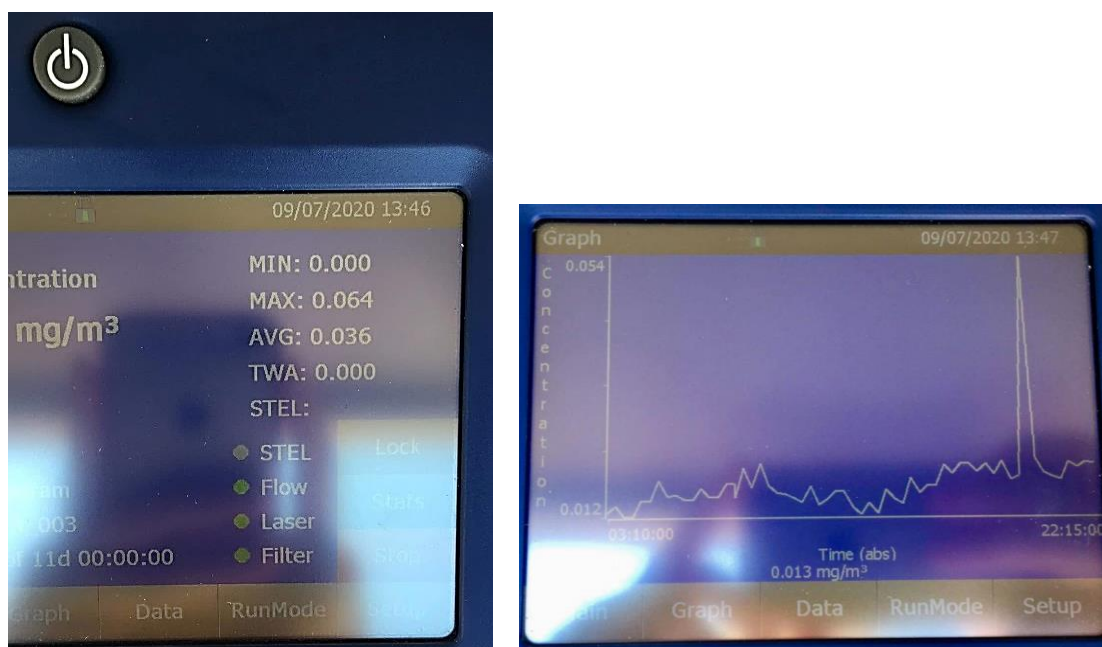
Βασική αρχή λειτουργίας του οργάνου αποτελεί η σκέδαση των σωματιδίων, καθώς ο αέρας που εισέρχεται μέσω της αντίστοιχης κεφαλής, συμπεριλαμβανομένων και των αιωρούμενων σωματιδίων που παρασύρει, ακτινοβολείται από λέιζερ με σκοπό να σκεδαστεί με τα σωματίδια και να διασκορπιστεί προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ποσότητα φωτός που διασκορπίζεται είναι ανάλογη του μεγέθους των σωματιδίων καθώς εξαρτάται άμεσα από αυτό. Χαρακτηριστικά, ένα σωματίδιο διασκορπίζει μία ποσότητα φωτός, ενώ δύο σωματίδια διασκορπίζουν την διπλάσια ποσότητα. Αυτό πραγματοποιείται, καθώς με την βοήθεια ενός φακού, ο οποίος συλλέγει το διασκορπισμένο φως, κατευθύνει το φως σε έναν ανιχνευτή που το μετατρέπει σε τάση, η οποία όπως γίνεται αντιληπτό είναι ανάλογη με το διασκορπισμένο φως. Επομένως, η τάση αυτή του ανιχνευτή αναλογικά αντιστοιχεί στην μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που θα εισέλθουν στο φορητό όργανο DustTrak II κατά την λειτουργία του.



ΕΙΚΟΝΑ 2.7: Φορητό εργαστηριακό όργανο DUSTTRAK II 8532

2.3 Μεθοδολογία

Για την μέτρηση ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων διαμέτρου έως 10 μm έγινε χρήση των εργαστηριακών οργάνων DustTrak II και του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen (C.I.). Το φορητό όργανο DustTrak II 8532, λειτουργούσε με ρύθμιση του χρονικού διαστήματος καταγραφής, δηλαδή της έναρξης και λήξης, για χρονικό πλαίσιο μιας εβδομάδας. Η ρύθμιση επαναλαμβάνεται εκ νέου μετά την αποθήκευση των καταγεγραμμένων δεδομένων, για την επόμενη εβδομάδα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας, δηλαδή μέχρι το τέλος του Ιουλίου. Χαρακτηριστικά, η πρώτη εβδομάδα μέτρησης ξεκινάει 5 Μαΐου 2020, ενώ η τελευταία μέτρηση καταγράφεται στις 30 Ιουλίου 2020. Πριν από την έναρξη κάθε εβδομαδιαίας μέτρησης το όργανο DustTrak II, βαθμονομείται και τοποθετείται η αντίστοιχη κεφαλή για 10 μm , η οποία καθαρίζεται με ειδικό λάδι ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην συνέχεια, τοποθετείται ένα μικρό σωληνάκι, συνδεδεμένο με το όργανο σε εξωτερικό περιβάλλον, καθώς το όργανο βρίσκεται εντός του εργαστηρίου στον σταθμό μετρήσεων, και ξεκινάει η μέτρηση.



ΕΙΚΟΝΑ 2.8: Φορητό εργαστηριακό όργανο DUSTTRAK II 8532, στην έναρξη μιας μέτρησης κατά την διεξαγωγή του πειράματος

Όσον αφορά τον προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, με τα διαφορετικά στάδια, για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων γίνεται χρήση φίλτρων από ίνες χαλαζία, (φίλτρα Quartz - QFF), τα οποία είναι πιο ευαίσθητα αλλά χαρακτηρίζονται ως πιο αποτελεσματικά στην συλλογή ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων. Αρχικά, τα φίλτρα τοποθετούνται σε ξήρανση για ένα 24ωρο, με σκοπό να αποφευχθούν τυχόν επιμολύνσεις μέχρι την ώρα που θα ζυγιστούν, στην συνέχεια ζυγίζονται πριν την τοποθέτησή τους στο όργανο. Τα φίλτρα είναι 10 σε αριθμό, εκ των οποίων τα 9 τοποθετούνται στο όργανο μέτρησης ενώ το ένα χρησιμοποιείται ως τυφλό, με σκοπό να εκτιμηθούν τυχόν ρυπαντικές ουσίες. Όλα τα φίλτρα ζυγίζονται δύο φορές σε ζυγαριά ακριβείας, ώστε να καταγραφεί ο μέσος όρος των ζυγίσεων αν

αυτές οι δύο αποκλίνουν πάνω από 0,02 μg . Αν πάλι, η απόκλιση είναι μεγαλύτερη, ζυγίζονται και τρίτη φορά και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων με την μικρότερη απόκλιση. Η ζύγιση πραγματοποιείται την ημέρα της δειγματοληψίας. Στην συνέχεια, τοποθετούνται τα 9 από αυτά στον προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, ο οποίος αφήνεται για 24 ώρες σε εξωτερικό περιβάλλον, ενώ το φίλτρο που χαρακτηρίζεται ως «τυφλό», παραμένει εντός του εργαστηρίου. Μετά από ένα 24ωρο που ολοκληρώνεται η διαδικασία, αφαιρούνται τα φίλτρα από το όργανο και επανατοποθετούνται και τα δέκα για μία ημέρα στον ξηραντήρα του εργαστηρίου με σκοπό να ζυγιστούν ξανά. Η διαφορά του βάρους των φίλτρων, η οποία προέκυψε μέσω των ζυγίσεων, αποτελεί το αποτέλεσμα της δειγματοληψίας.



ΕΙΚΟΝΑ 2.9: Ζυγός ακριβείας



ΕΙΚΟΝΑ 2.10: Τριβλία αποθήκευσης φίλτρων



ΕΙΚΟΝΑ 2.11: Φίλτρα χαλαζία

Ολοκληρώνοντας, με την πειραματική διαδικασία τα φίλτρα μετά την ζύγιση φυλάσσονται, κλεισμένα αεροστεγώς, σε 10 τριβλία, ένα για το κάθε ένα, και αποθηκεύονται στην κατάψυξη του εργαστηρίου μέχρι να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δειγματοληψίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δόσης των αιωρούμενων σωματιδίων που δέχεται ένας άνθρωπος που εκτίθεται σε αυτές τις συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος.

Ακόμη, καταγράφονται ο όγκος που υπολογίστηκε ότι πέρασε από τον προσκρουστήρα, η υγρασία, η θερμοκρασία και η πίεση κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης σε κάθε στάδιο του οργάνου, γίνεται χρήση του κανονικοποιημένου όγκου αέρα και όχι του όγκου που καταγράφηκε από το όργανο, ο οποίος προκύπτει μέσω μιας μαθηματικής εξίσωσης.

Κανονικοποιημένος όγκος:

$$V_0 = \frac{P \cdot V \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = \frac{P \cdot V \cdot 298}{1013 \cdot T} \quad (1)$$

Όπου,

- V_0 : Ο όγκος του δείγματος μετά την διαδικασία της κανονικοποίησης (m^3). (Κανονικοποιημένος Όγκος)
- P : Η μέση τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης που καταγράφηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων (mbar).
- T : Η μέση τιμή της θερμοκρασίας που καταγράφηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων (K).
- P_0 : Η πρότυπη τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης ($P_0 = 1 \text{ atm} = 1013 \text{ mbar}$).
- T_0 : Η πρότυπη τιμή της θερμοκρασίας ($T_0 = 25^\circ\text{C} = 273 + 25 = 298 \text{ K}$).

Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων σε κάθε στάδιο του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen:

$$C = \frac{\Delta m}{V_0} = \frac{(m_f - m_i) - m_{\text{blank}}}{V_0} \quad (2)$$

Όπου,

- C : Η συγκέντρωση της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων σε κάθε στάδιο (mg/m^3).
- Δm : Η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων σε κάθε στάδιο (mg).
- m_f : Η μέση τιμή των ζυγίσεων μετά την δειγματοληψία.
- m_i : Η μέση τιμή των ζυγίσεων πριν την δειγματοληψία.
- m_{blank} : Η μέση τιμή των ζυγίσεων των τυφλών φίλτρων πριν και μετά την δειγματοληψία.
- V_{total} : Ο κανονικοποιημένος όγκος (m^3).

Παράλληλα, για την ορθή λειτουργία του οργάνου Leckel ακολουθείται εξίσου μια σειρά βημάτων με σκοπό την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας με το συγκεκριμένο όργανο. Αρχικά, η δειγματοληψία μέσω του οργάνου αυτού πραγματοποιείται σε εξωτερικό περιβάλλον και μετρούνται αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2,5}$, μέσω ειδικής κεφαλής που προσαρμόζεται στο όργανο. Η μέτρηση ξεκινάει από τον χώρο του εργαστηρίου καθώς πρώτο στάδιο αποτελεί η ζύγιση του φίλτρου που θα τοποθετηθεί στο όργανο. Σε ζυγό ακριβείας του εργαστηρίου, γίνεται η ζύγιση του ενός φίλτρου Teflon, που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση. Το φίλτρο ζυγίζεται δύο φορές, και η τιμή που καταγράφεται προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών των δύο ζυγίσεων. Στην περίπτωση που υπάρχει απόκλιση πάνω από $0,02 \mu g$, η ζύγιση επαναλαμβάνεται. Στην συνέχεια, τοποθετείται το φίλτρο στην ειδικά διαμορφωμένη κεφαλή, η οποία μετρά αιωρούμενα σωματίδια $PM_{2,5}$, και από την οθόνη των ρυθμίσεων του οργάνου επιλέγεται η έναρξη λειτουργίας του. Το όργανο καταγράφει τιμές για 24 ώρες. Μετά το πέρας του πειράματος, αφαιρείται το φίλτρο και τοποθετείται στην ξήρανση για μία ημέρα. Ακολούθως, το φίλτρο ζυγίζεται δύο φορές, ώστε να ληφθεί ο μέσος όρος των τιμών των ζυγίσεων του μετά την πειραματική διαδικασία, και εν συνεχεία φυλάσσεται στην κατάψυξη ώστε να χρησιμοποιηθεί για πρόσθετη ανάλυση.



ΕΙΚΟΝΑ 2.12: Τοποθέτηση προσκρουστήρα Andersen σε εξωτερικό περιβάλλον

2.6 Μοντέλο ExDoM2

Για τον καθορισμό της προσλαμβάνουσας δόσης αλλά και της έκθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό, και συγκεκριμένα της εναπόθεσης της στο αναπνευστικό του σύστημα, καθώς και της κατακράτησης τους σε αυτό, έγινε χρήση του μοντέλου ExDoM2. Το μοντέλο ExDoM2, αφορά την έκθεση και δόση και ειδικότερα, τον υπολογισμό της εσωτερικής δόσης και εναπόθεσης των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό και πιο

συγκεκριμένα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Το όνομα του προέρχεται από τις λέξεις Exposure - Dose Model, χρησιμοποιώντας τα αρχικά των λέξεων αυτών.

Το παρόν μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί μεταγενέστερη έκδοση του μοντέλου ExDoM, το οποίο δημιουργήθηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης [Alexandropoulou, Chalvatzaki & Lazaridis, 2015] και βασίζεται στο αναθεωρημένο μοντέλο ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (HRTM) της διεθνούς υπηρεσίας προστασίας από ραδιενέργεια (ICRP). Το μοντέλο αυτό λειτουργεί με την βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος MATLAB και της πλατφόρμας λογισμικού GUI, η οποία δέχεται και αναγνωρίζει αρχεία δεδομένων excel. Η πλατφόρμα αυτή, δημιουργήθηκε από τον φοιτητή Παπαγιαννάκη Εμμανουήλ το 2015, και επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων που θα χρησιμοποιεί τελικά το μοντέλο, με απώτερο σκοπό την διεξαγωγή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο ExDoM2, χαρακτηρίζεται ως μοντέλο εναπόθεσης, καθώς υπολογίζει την εναποτιθέμενη δόση των αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού μέσω ημιεμπειρικών εξισώσεων που έχουν προκύψει από πειράματα. Ειδικότερα, για την ορθή λειτουργία του μοντέλου χρησιμοποιούνται δεδομένα εισόδου στο περιβάλλον εργασίας, τα οποία καταγράφουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά του εκτιθέμενου ανθρώπου που μελετάται αλλά και τις συνθήκες έκθεσής του [Chalvatzaki, 2015].

Αναφορικά, οι ημιεμπειρικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του μοντέλου και την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω αυτού παρατίθεται παρακάτω:

Ο ρυθμός της εναποτιθέμενης δόσης [Αλεξανδροπούλου, 2010] :

$$H_j = \sum B \cdot C_i \cdot DE_{i,j} \quad (3)$$

Όπου,

- H_j : Ο ρυθμός εναποτιθέμενης δόσης ($\mu\text{g}/\text{h}$).
- C_i : Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- $DE_{i,j}$: Το ποσοστό εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στην κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.
- B : Ο ρυθμός εισπνοής (m^3/h).
- i : Προσδιορίζει το μέγεθος του σωματιδίου.
- j : Προσδιορίζει την περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.

Ακόμη, υπολογίζεται το ποσοστό εναποτιθέμενης δόσης κατά την εισπνοή και κατά την εκπνοή, σε κάθε μία από τις περιοχές του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος (ET_1 , ET_2 , BB , bb , Al) :

$$DE_{ET1} = DE_1 + DE_9 \quad (4)$$

$$DE_{ET2} = DE_2 + DE_8 \quad (5)$$

$$DE_{BB} = DE_3 + DE_7 \quad (6)$$

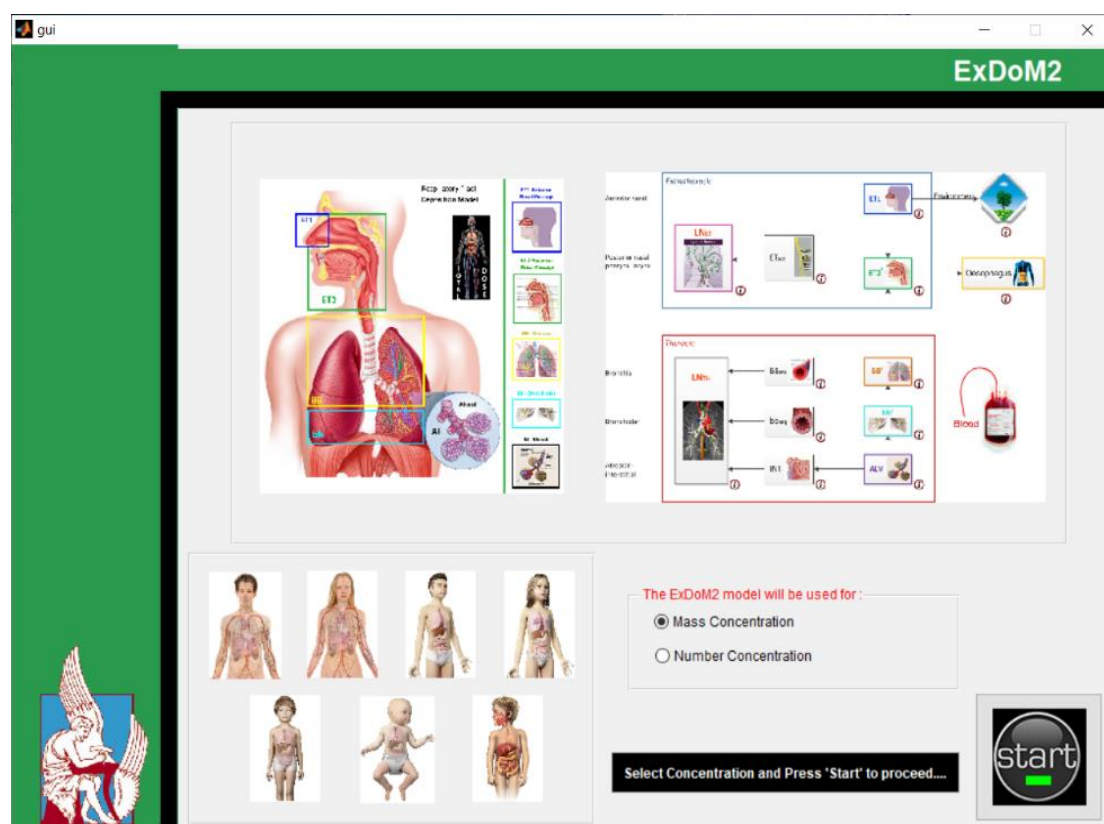
$$DE_{bb} = DE_4 + DE_6 \quad (7)$$

$$DE_{Al} = DE_5 \quad (8)$$

Σκοπό του μοντέλου αποτελεί η μελέτη της εναπόθεσης των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων σε κάθε μία από τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου. Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα διακρίνεται στις πέντε περιοχές τις οποίες μελετώνται και αποτελούνται από τις εκτός θώρακα περιοχές και τις θωρακικές περιοχές. Αναλυτικά, οι εκτός θώρακα περιοχές περιλαμβάνουν την περιοχή της ρινικής κοιλότητας ή αλλιώς ET1 και την περιοχή της στοματικής κοιλότητας του λάρυγγα και του φάρυγγα ή ET2.

Στις εκτός θώρακα περιοχές εναποτίθεται τα χονδρόκοκκα σωματίδια, καθώς αποτελούν την κύρια είσοδο των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό. Αντίθετα, οι θωρακικές περιοχές που αναφέρονται στους πνεύμονες ανήκουν οι περιοχές των βρόγχων (BB) και των βρογχολίων bb, αλλά και η περιοχή των κυψελίδων Al, όπου εναποτίθενται τα λεπτά σωματίδια, τα οποία έχουν μεταφερθεί εκεί μετά από έναν πρωτοβάθμιο καθαρισμό στις εκτός θώρακα περιοχές.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν κατά την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου στο μοντέλο, αναφέρονται στην τιμή της δόσης που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου για την κάθε περιοχή του. Επιπλέον, υπολογίζεται και η συνολική δόση που εναποτίθεται στον οργανισμό, στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα σε ένα χρονικό διάστημα μελέτης.

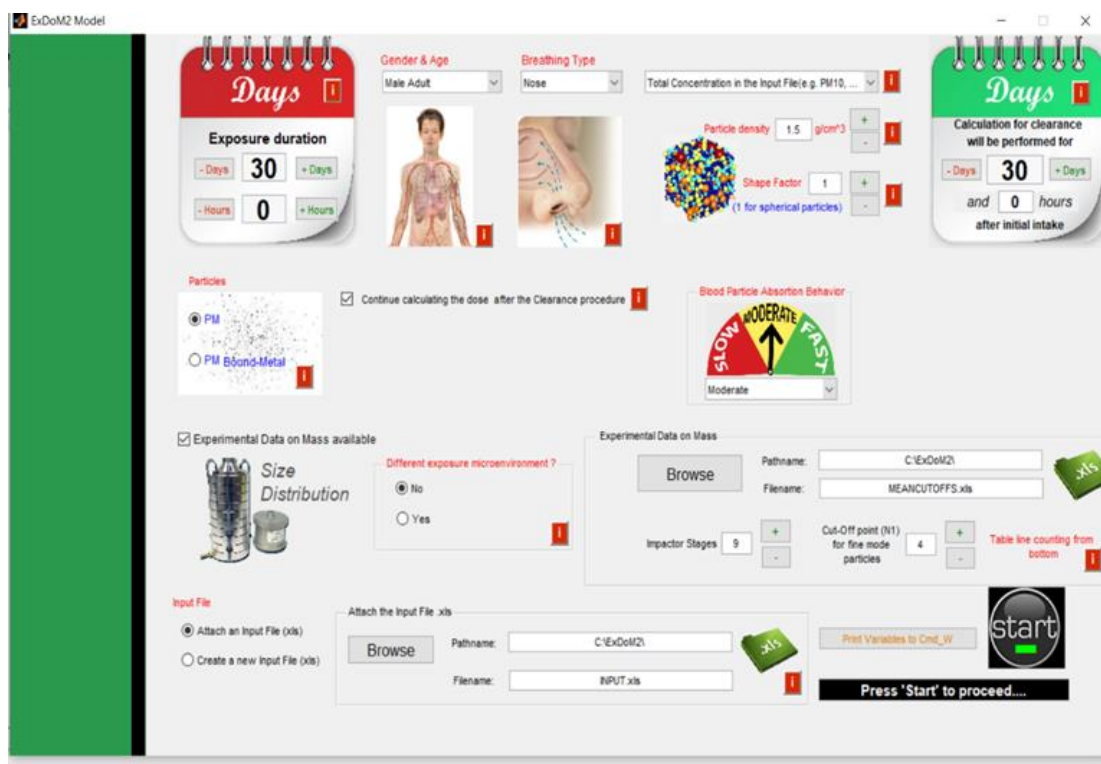


ΕΙΚΟΝΑ 2.13: Αρχική πλατφόρμα εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου ExDoM2

Το γραφικό περιβάλλον εκκίνησης του μοντέλου ExDoM2, παρουσιάζει τις πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού και δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει το είδος της συγκέντρωσης που θα χρησιμοποιήσει το μοντέλο ως δεδομένο εισόδου. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε συγκέντρωση μάζας, (mass concentration), δίνοντας την δυνατότητα στο πρόγραμμα να μοντελοποιήσει δεδομένα συγκέντρωσης μάζας που έχουν προκύψει από το πείραμα που έχει προηγηθεί.

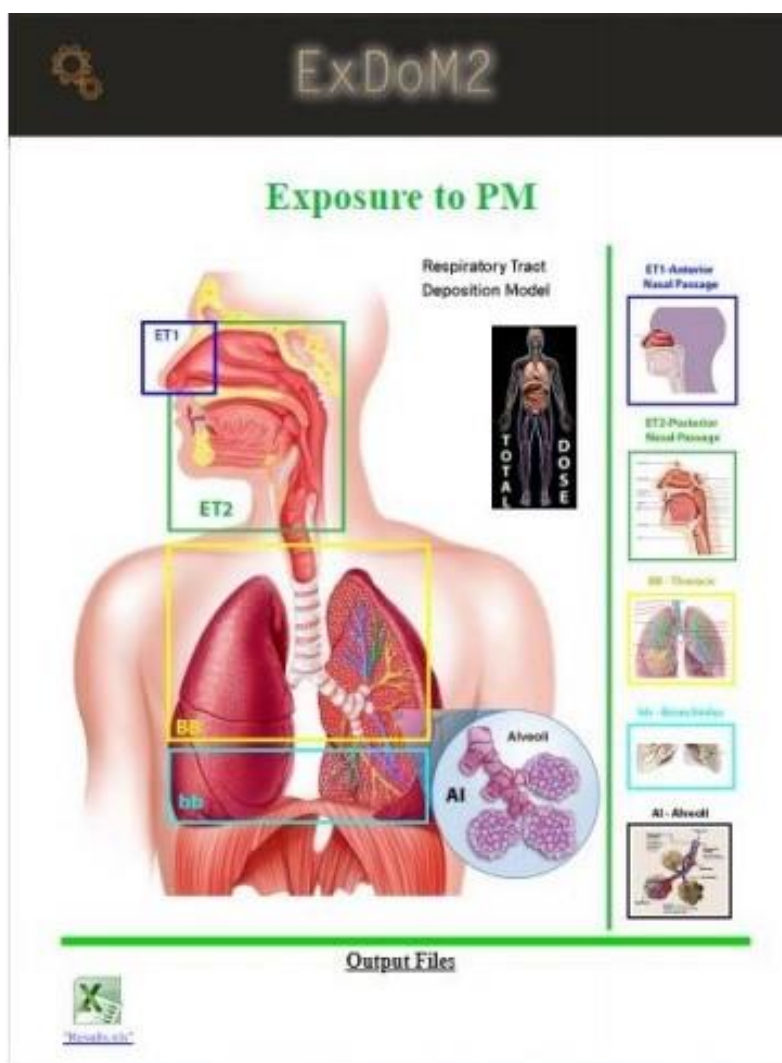
Με την επιλογή αυτή, της επεξεργασίας δεδομένων συγκέντρωσης μάζας, ως δεύτερο βήμα εμφανίζεται στην οθόνη το βασικό περιβάλλον εργασίας και εισαγωγής δεδομένων και των χαρακτηριστικών του εκτιθέμενου ανθρώπου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.14, ώστε να προκύψουν τα ανάλογα αποτελέσματα με την εκτέλεσή του. Αρχικά, επιλέγεται ο αριθμός των ημερών που εκτίθεται ο άνθρωπος που μελετάται, αυξάνοντας την τιμή στην παράμετρο «διάρκεια έκθεσης» (Exposure Duration).

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, το μοντέλο εκτελέστηκε για διαφορετικές χρονικές περιόδους, καθώς σε κάθε περίπτωση αφορούσε έναν ξεχωριστό μήνα, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο. Επομένως, για τον Μάιο οι μετρήσεις ήταν για 27 ημέρες, για τον Ιούνιο 30 ημέρες και για τον Ιούλιο επίσης 30 ημέρες, άρα από αυτό το χρονικό πλαίσιο θεωρήθηκε το χρονικό διάστημα έκθεσης. Στην συνέχεια, επιλέγεται, το φύλο και η ηλικία του εκτιθέμενου ανθρώπου καθώς και ο τρόπος αναπνοής του. Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις, έχει επιλεγεί άνδρας ενήλικας και ως τρόπος αναπνοής, η αναπνοή από την μύτη. Ακολούθως, τα δεδομένα εισαγωγής αφορούν την πυκνότητα των σωματιδίων, όπου επιλέγεται η μέση τιμή πυκνότητας των σωματιδίων η οποία είναι $1,5 \text{ g/cm}^3$ αλλά και η τιμή 1 για το σχήμα των σωματιδίων που αφορά τα σφαιρικά σωματίδια [Aleksandropoulou, Lazaridis, 2013].



ΕΙΚΟΝΑ 2.14: Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων του εκτιθέμενου ανθρώπου στο μοντέλο ExDoM2

Τα δεδομένα που επεξεργάζεται το μοντέλο ExDoM 2, προέρχονται από αρχεία Excel και αφορούν τις συγκεντρώσεις που έχουν καταγραφεί κατά την πειραματική διαδικασία από τα όργανα DustTrak II και τον προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, ο οποίος απαρτίζεται από 9 στάδια, δεδομένο που σημειώνεται στο μοντέλο, καθώς και το 4^ο στάδιο το οποίο είναι το τελευταίο στάδιο που αφορά λεπτά σωματίδια εφόσον συγχρόνως αποτελεί όριο των λεπτών και χονδρών σωματιδίων. Ακόμη, δεδομένα των αρχείων excel αποτελούν η ταχύτητα ανέμου την χρονική περίοδο που μελετάται και η οποία μεταβάλλεται ωριαία αλλά και η δραστηριότητα του εκτιθέμενου ανθρώπου για κάθε έναν από τους τρεις μήνες ανάλογα με την σωματική του άσκηση κάθε στιγμή έκθεσης του. Ανάλογα με την ώρα σημειώνεται και η κατηγορία δραστηριότητας στην οποία εκτίθεται σε εξωτερικό περιβάλλον ο άνθρωπος που μελετάται. Το μοντέλο επεξεργάζεται τα δεδομένα που εισάγονται και εμφανίζει σε μορφή αρχείου excel τα αποτελέσματα. Η ανάλυση των βημάτων που ακολουθούνται κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης παρατίθεται στο παράρτημα II της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

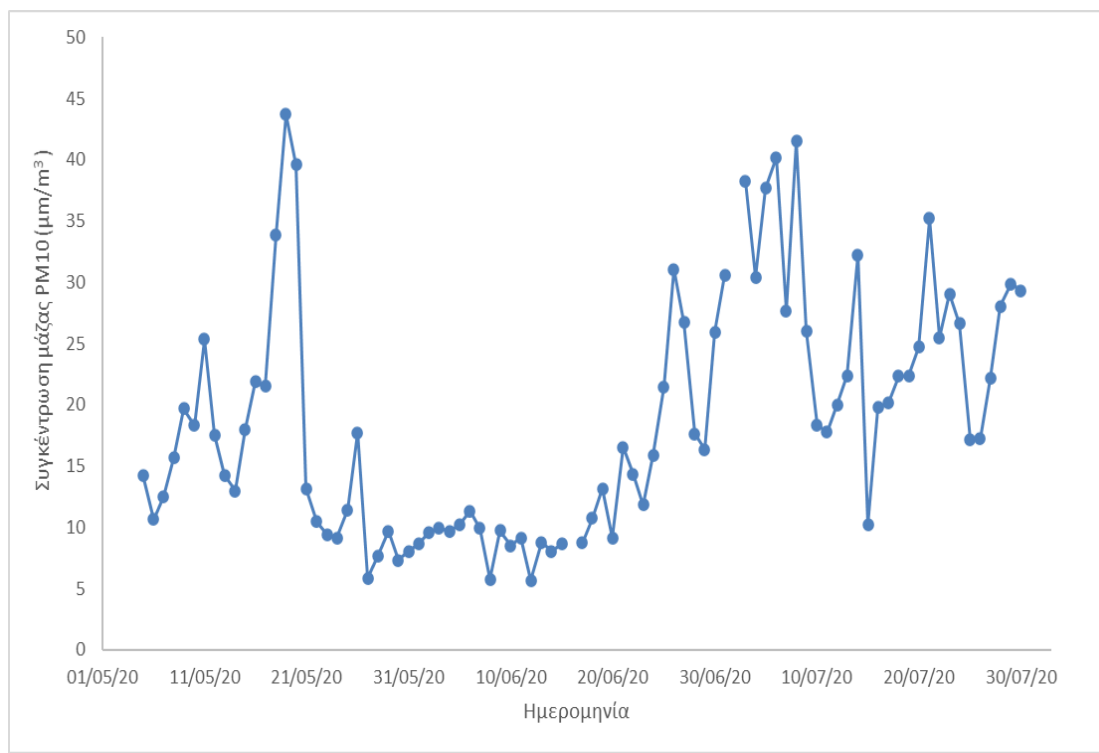


ΕΙΚΟΝΑ 2.15: Αρχείο αποτελεσμάτων μοντέλου

3. Αποτελέσματα

3.1: Ημερήσιες Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων

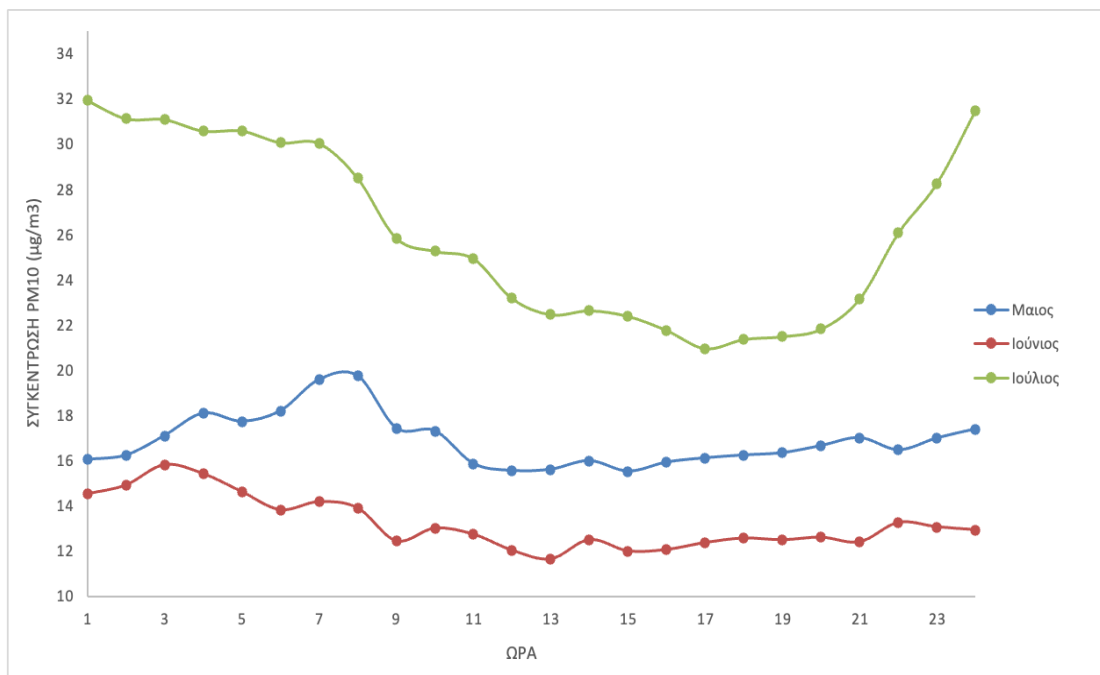
Η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων, που έχει καταγραφεί ημερησίως, παρατίθεται στο διάγραμμα 3.1, και αφορά το χρονικό πλαίσιο μελέτης, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο. Το διάγραμμα 3.1 αναφέρεται στις μέσες ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} που έχουν μετρηθεί με χρήση του οργάνου DustTrak. Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί για τους μήνες από Μάιο έως και Ιούλιο σε εξωτερικό περιβάλλον στην περιοχή Ακρωτηρίου. Παρατηρείται ότι υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών, κύρια πηγή των οποίων είναι, για το συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο, η σκόνη που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα. Ορισμένες από τις ημέρες του Μαΐου αλλά και του Ιουλίου παρουσιάζουν υψηλές τιμές συγκεντρώσεων, επιβεβαιώνοντας και τα δεδομένα του Meteo, και πλησιάζουν τις οριακές τιμές σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά όρια ($50 \mu g/m^3$). Χαρακτηριστικά, στις 19 Μαΐου η τιμή συγκέντρωσης PM_{10} στην περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων ήταν $43,7 \mu g/m^3$ καθώς και την προηγούμενη και επόμενη ημέρα η τιμή της συγκέντρωσης ήταν εξίσου υψηλή με τιμή $39,6 \mu g/m^3$. Ακόμη, παρατηρείται ότι στις αρχές Ιουλίου οι τιμές των συγκεντρώσεων ήταν αρκετά υψηλές με την 6^η ημέρα του Ιουλίου να σημειώνει $40,2 \mu g/m^3$ καθώς και την 8^η ημέρα του Ιουλίου με τιμή $41,5 \mu g/m^3$. Στην συνέχεια, παρατηρείται μία πτώση με την 15^η ημέρα του Ιουλίου να εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή $10,2 \mu g/m^3$ και με σταδιακή αύξηση στις 28 και 29 Ιουλίου σημειώνεται συγκέντρωση χονδρόκοκκων σωματιδίων $28,8 \mu g/m^3$ και $29,3 \mu g/m^3$ αντίστοιχα.



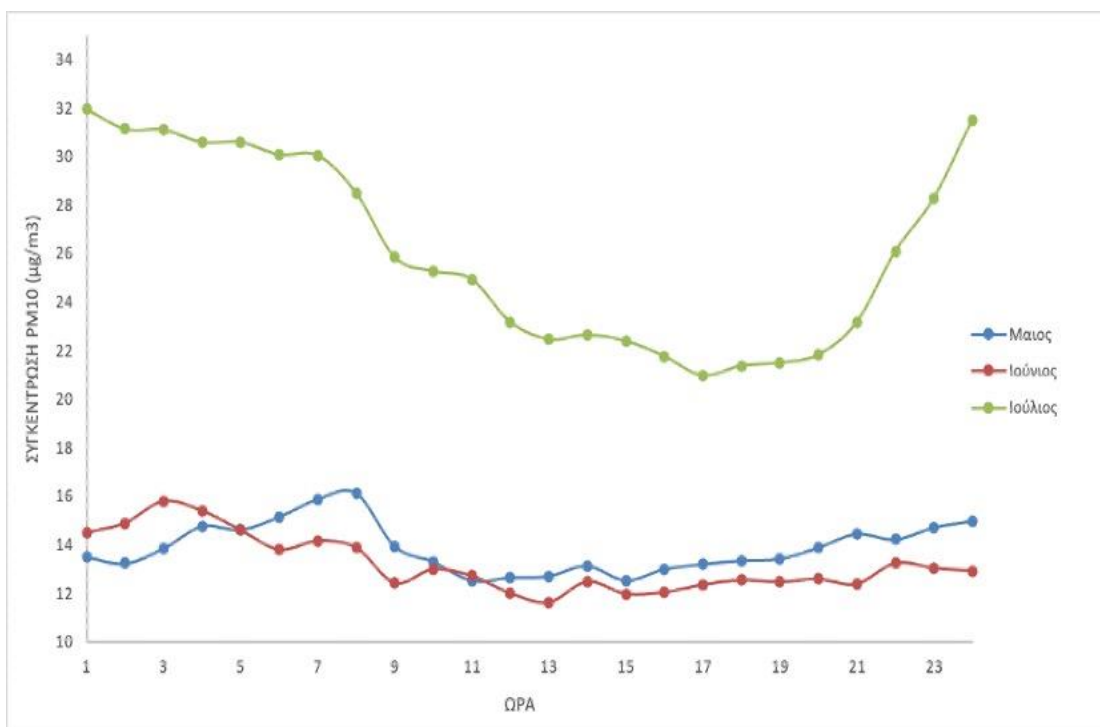
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.1: Χρονοσειρά μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM_{10}

3.2: Ωριαίες Συγκεντρώσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων

Στα διαγράμματα 3.2 και 3.3, παρουσιάζονται οι μέσες ωριαίες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} που έχουν μετρηθεί με την χρήση του οργάνου DustTrak II, και αφορούν το χρονικό πλαίσιο μελέτης των τριών μηνών, Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο, σε εξωτερικό περιβάλλον, με ή χωρίς την επίδραση σκόνης Σαχάρα. Αναλυτικότερα, σημειώνονται και απεικονίζονται υψηλές τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} ανάλογα με τις ώρες αιχμής.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.2: Χρονοσειρά μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10}



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.3: Χρονοσειρά μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{10} χωρίς την επίδραση σκόνης Σαχάρα

Στο διάγραμμα 3.2 απεικονίζονται, οι μέσες τιμές των ωριαίων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων και των τριών μηνών. Αρχικά, για τον Μάιο, έχουν αφαιρεθεί τρεις ημέρες που αφορούν έντονα φαινόμενα σκόνης Σαχάρα, με σκοπό την παρακολούθηση των ωριαίων συγκεντρώσεων που έχουν προκύψει από τοπικές πηγές, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 3.3. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, τον Μάιο παρατηρείται ιδιαίτερη αύξηση τις πρωινές ώρες και αυτό πιθανώς οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως είναι οι εκπομπές από την κίνηση των αυτοκινήτων. Χαρακτηριστικά, από τις 6 έως και τις 8 το πρωί παρατηρείται μία αύξηση των τιμών των συγκεντρώσεων, με την μέγιστη τιμή συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} να σημειώνεται στις 8 π.μ. με τιμή $16,1 \mu g/m^3$, ενώ κατά την διάρκεια της ημέρας μέχρι και το μεσημέρι εμφανίζεται μια σταδιακή πτώση των τιμών των συγκεντρώσεων με χαμηλότερη τιμή να σημειώνεται στις 3 μ.μ. με τιμή $12,5 \mu g/m^3$, στην περίπτωση που δεν συμβάλει η σκόνη Σαχάρα. Από το μεσημέρι μέχρι και το βράδυ, έως τις 12 μ.μ. εντοπίζεται αύξηση που δεν ξεπερνάει την τιμή συγκέντρωσης $15 \mu g/m^3$. Αντίστοιχη καμπύλη ακολουθεί και η περίπτωση που μελετάται η επίδραση της σκόνης Σαχάρα όπου οι τιμές για τον Μάιο εμφανίζονται υψηλότερες. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σημειώνονται από τις 6 π.μ. μέχρι τις 8 π.μ. με μέγιστη συγκέντρωση να εμφανίζεται στις 8 π.μ. και καταγράφεται $19,7 \mu g/m^3$, ενώ η ελάχιστη καταγράφεται στις 3 μ.μ. με τιμή συγκέντρωσης $15,5 \mu g/m^3$.

Παράλληλα, για τον μήνα Ιούνιο εντοπίζονται διακυμάνσεις ανάλογα με την ώρα, γεγονός που οφείλεται στις εκπομπές των αυτοκινήτων τις ώρες αιχμής της κυκλοφορίας, αλλά και στην ανθρώπινη δραστηριότητα γενικότερα. Παρατηρείται ότι τις βραδινές ώρες οι τιμές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι υψηλότερες, ενώ τις μεσημεριανές ώρες οι τιμές είναι χαμηλότερες και αυξάνουν σταδιακά, χωρίς όμως έντονες μεταβολές. Επισημαίνεται, ότι οι συγκεντρώσεις διατηρούνται για ολόκληρο το εικοσιτετράωρο σε σχετικά χαμηλό επίπεδο για τον μήνα Ιούνιο. Οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών σωματιδίων εντοπίζονται κυρίως από την 1 π.μ. έως τις 7 π.μ. με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις τιμές $14,5 \mu g/m^3$ στην 1 π.μ., $14,9 \mu g/m^3$ στις 2 π.μ. και μέγιστη τιμή να καταγράφεται στις 3 π.μ. με $15,8 \mu g/m^3$. Οι χαμηλότερες τιμές σημειώνονται από την 1 μ.μ. έως και τις 4 μ.μ. όπου η συγκέντρωση ξεκινάει από $11,6 \mu g/m^3$ και κορυφώνεται στις 12 μ.μ. με τιμή συγκέντρωσης $12,9 \mu g/m^3$.

Για τον μήνα Ιούλιο οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι αρκετά υψηλότερες από τους προηγούμενους μήνες, γεγονός που θεωρείται λογικό, καθώς τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει εντονότερο το στοιχείο της ανθρώπινης δραστηριότητας επομένως και της κίνησης των αυτοκινήτων. Παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση των τιμών τις βραδινές και τις πρωινές ώρες ενώ χαμηλότερες τιμές τις μεσημεριανές ώρες. Χαρακτηριστικά, από τις 12 μ.μ. μέχρι και τις 7 π.μ. σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} καθώς οι συγκεντρώσεις που καταγράφονται δεν είναι μικρότερες από $30 \mu g/m^3$. Οι τιμές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων που σημειώνονται τις ώρες αυτές είναι στην 1 π.μ. $31,9 \mu g/m^3$, στις 2 π.μ. $31,1 \mu g/m^3$, στις 3 π.μ. $31,1 \mu g/m^3$, ενώ στην συνέχεια μειώνονται εμφανώς μέχρι τις 11 μ.μ. το βράδυ. Με το πέρασμα της ημέρας εντοπίζεται σταδιακή μείωση, με χαμηλότερη τιμή στις 5 μ.μ. όπου σημειώνεται συγκέντρωση $21 \mu g/m^3$ και εν συνεχεία ξανά αύξηση με μέγιστο σημείο στις 12 μ.μ. με $31,5 \mu g/m^3$. Όσον αφορά

τις ημέρες του Ιουλίου παρατηρείται ότι έχουν τις υψηλότερες τιμές και των τριών μηνών που μελετώνται, οι οποίες πλησιάζουν τα Ευρωπαϊκά Όρια ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

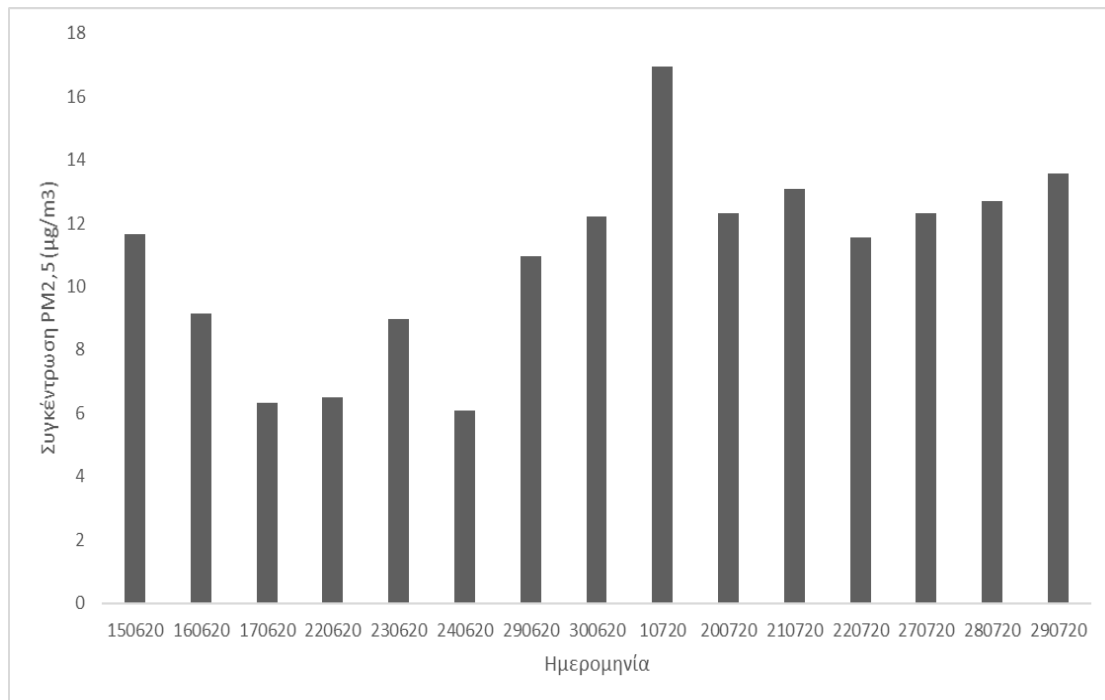
3.3 Αιωρούμενα Σωματίδια $\text{PM}_{2.5}$

Για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις $\text{PM}_{2.5}$ με χρήση του μετρητή Leckel, και καταγράφηκαν οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο έως $2,5 \mu\text{m}$ σε εξωτερικό περιβάλλον. Παρατηρείται έντονα, ότι οι τιμές διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Ειδικότερα, οι συγκεντρώσεις του Ιουνίου, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.3, είναι μικρότερες από του Ιουλίου. Ξεκινούν από $\cong 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για κάποιες ημέρες του Ιουνίου και φτάνουν ως $\cong 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ τις πρώτες ημέρες του Ιουλίου. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζεται μέγιστη τιμή και των δύο μηνών την 1^η ημέρα του Ιουλίου με τιμή συγκέντρωσης $\text{PM}_{2.5}$ $16,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Τον μήνα Ιούνιο η χαμηλότερη τιμή σημειώνεται στις 24 Ιουνίου με τιμή συγκέντρωσης $6,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και στην συνέχεια υπάρχει αύξηση μέχρι και τον Ιούλιο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για τον μήνα Ιούνιο οι τιμές των συγκεντρώσεων ξεκινούν από $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ στις 15 Ιουνίου και σταδιακά μειώνονται μέχρι τις 24 Ιουνίου, ενώ στην συνέχεια αυξάνουν μέχρι τις 30 Ιουνίου όπου η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων που καταγράφεται είναι $12,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Αντίστοιχα, για τον μήνα Ιούλιο, οι τιμές ξεκινούν με την μέγιστη σημειωτέα τιμή συγκέντρωσης που καταγράφεται η οποία είναι $16,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και μέχρι το τέλος του μήνα η συγκέντρωση των σωματιδίων κυμαίνεται σε τιμές $\cong 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, με την τελευταία ημέρα του μήνα να σημειώνει συγκέντρωση ίση με $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Γνωρίζοντας ότι τα νομοθετικά όρια σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση για $\text{PM}_{2.5}$ είναι $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τα οποία έχουν ως κύριο στόχο την προφύλαξη της ανθρώπινης υγείας, επισημαίνεται ότι οι τιμές των παραπάνω συγκεντρώσεων είναι αρκετά μικρότερες από τα όρια αυτά, γεγονός που καθιστά τις συγκεντρώσεις για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο εντός των επιτρεπτών οριακών τιμών.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.4: Συγκεντρώσεις PM_{2,5} Ιουνίου – Ιουλίου 2020

3.4: Κατανομές Αιωρούμενων Σωματιδίων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο, υλοποιήθηκαν με χρήση του προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen, σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος στην περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων, και αφορούσαν συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου έως 10 μm. Σύμφωνα με τα διαγράμματα 3.4 και 3.5, παρατηρείται ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι υψηλότερες για τον μήνα Ιούλιο, σε διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων, ανάλογα με την διάμετρο τους.

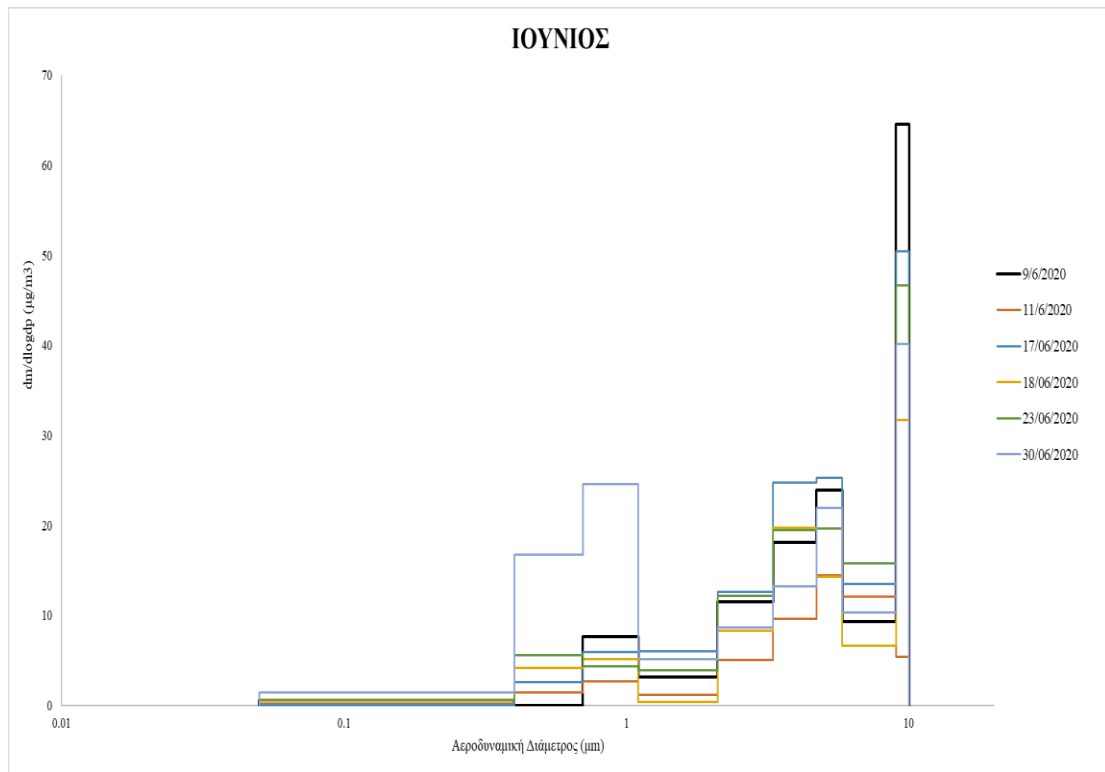
Χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι τα αιωρούμενα σωματίδια PM₁₀ παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων, με ενδεικτική τιμή στις 20 Ιουλίου με συγκέντρωση 68,5 μg/m³, ενώ ακολούθως εμφανίζεται σταδιακή πτώση όπως γίνεται αντιληπτό και από το διάγραμμα 3.5, καθώς τις ημέρες 21 και 22 Ιουλίου οι τιμές των συγκεντρώσεων καταγράφονται 49,5 μg/m³ και 42,7 μg/m³ αντίστοιχα. Τα γεγονότα αυξημένων τιμών συγκέντρωσης οφείλονται συχνά σε φαινόμενα αερομεταφερόμενης σκόνης από της ερήμους της Αφρικής. Ενδεικτικά, μεγάλος αριθμός χονδρόκοκκων σωματιδίων σημειώνεται στις αρχές Ιουλίου, καταγράφοντας συγκέντρωση 52,1 μg/m³ στις 2 Ιουλίου, ενώ μερικές ημέρες μετά, τα επίπεδα PM₁₀ είναι εμφανώς χαμηλότερα, καθώς οι τιμές που εμφανίζονται είναι 27 μg/m³ στις 7 Ιουλίου.

Όσον αφορά τον Ιούνιο, κατά το διάγραμμα 3.5, τα επίπεδα συγκεντρώσεων είναι αρκετά χαμηλότερα για όλες τις διαμέτρους από 0,01 έως και 10 μm. Αναφορικά, στις 9 Ιουνίου καταγράφεται συγκέντρωση PM₁₀ 64,5 μg/m³, ενώ στις 17 Ιουνίου 50,6 μg/m³. Ακολουθεί μεγάλη πτώση χονδρόκοκκων σωματιδίων στις 18 Ιουνίου, καθώς σημειώνεται συγκέντρωση 31,7 μg/m³. Σε εξωτερικό περιβάλλον, οι πηγές που συμβάλλουν στην αύξηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων είναι

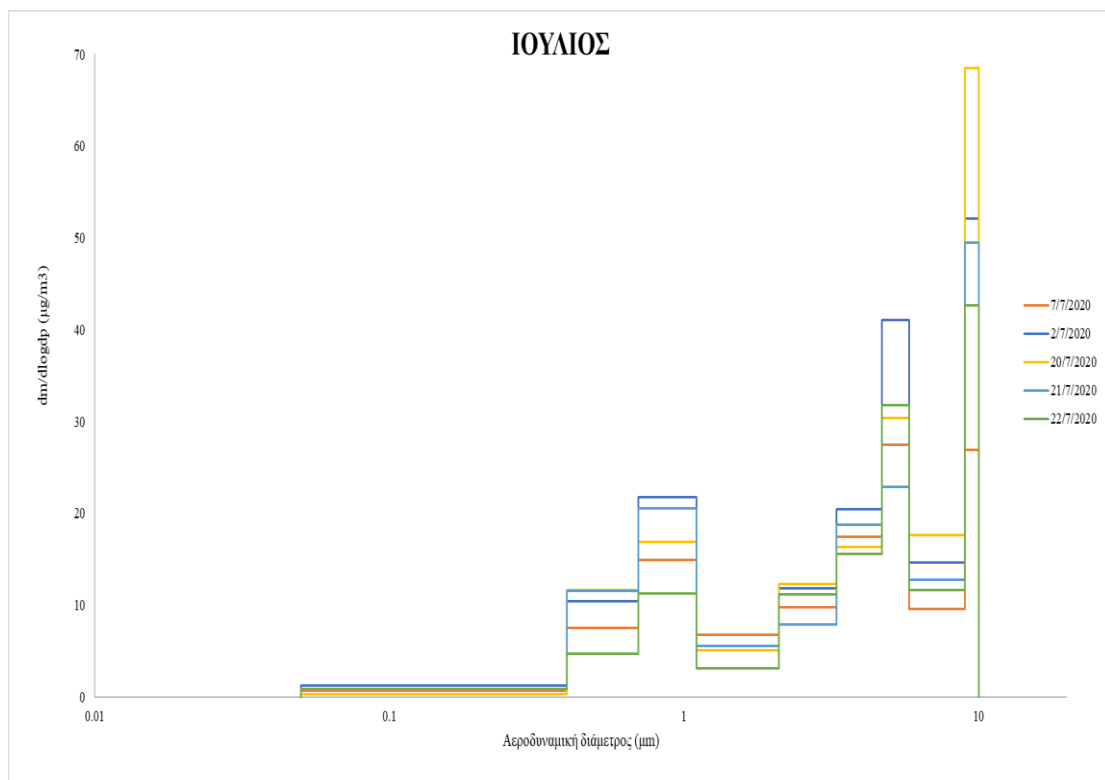
ανθρωπογενείς, όπως εκπομπές προερχόμενες από την κίνηση αυτοκινήτων. Δεν παραλείπετε όμως και η επιρροή των σωματιδίων αφρικανικής σκόνης που εμφανίζεται και αναμφίβολα επιδρά σημαντικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Ημερήσιες τιμές συγκεντρώσεων PM₁₀ για τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο 2020

Ημερομηνία	Συγκέντρωση PM₁₀ (μg/m³)
09.06.2020	15,3
11.06.2020	7,6
16.06.2020	7,5
17.06.2020	16,9
18.06.2020	9,9
23.06.2020	16,6
30.06.2020	22,3
06.07.2020	24,8
07.07.2020	17,9
20.07.2020	22,3
21.07.2020	21,1
22.07.2020	17,2



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.5: Κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} για τον μήνα Ιούνιο 2020



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3.6: Κατανομή μάζας αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} για τον μήνα Ιούλιο 2020

4. Αποτελέσματα Μοντέλου

4.1: Παράμετρος Δραστηριότητα Εκτιθέμενου Ανθρώπου

Για την ορθή κι επιτυχημένη λειτουργία του μοντέλου ExDoM 2, τα δεδομένα εισόδου του, θα πρέπει να είναι τα κατάλληλα, και έχουν προκύψει από τις αντίστοιχες τιμές της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀, όπως διεξήχθη από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση οργάνων του εργαστηρίου. Βασική παράμετρο, για την εξέλιξη της διαδικασίας αυτής αποτελεί η δραστηριότητα του εκτιθέμενου ανθρώπου κατά την διάρκεια της ημέρας. Στην παρούσα εργασία, το χρονικό περιθώριο που μελετήθηκε ήταν τρεις μήνες, Μάιος, Ιούνιος και Ιούλιος. Επομένως, μελετάται ο ρυθμός δόσης ως προς τον εκτιθέμενο άνθρωπο, ως ένα υποθετικό σενάριο ανάλογα με την δραστηριότητα του για κάθε έναν από τους τρεις μήνες.

Η δραστηριότητα του εκτιθέμενου ανθρώπου, ως παράμετρος του μοντέλου ExDoM2, διακρίνεται σε κατηγορίες ανάλογα με την ένταση της δραστηριότητας που εκτελεί σε κάθε περίπτωση και επηρεάζει τον εισπνεόμενο όγκο ανάλογα με την συχνότητα των αναπνοών του.

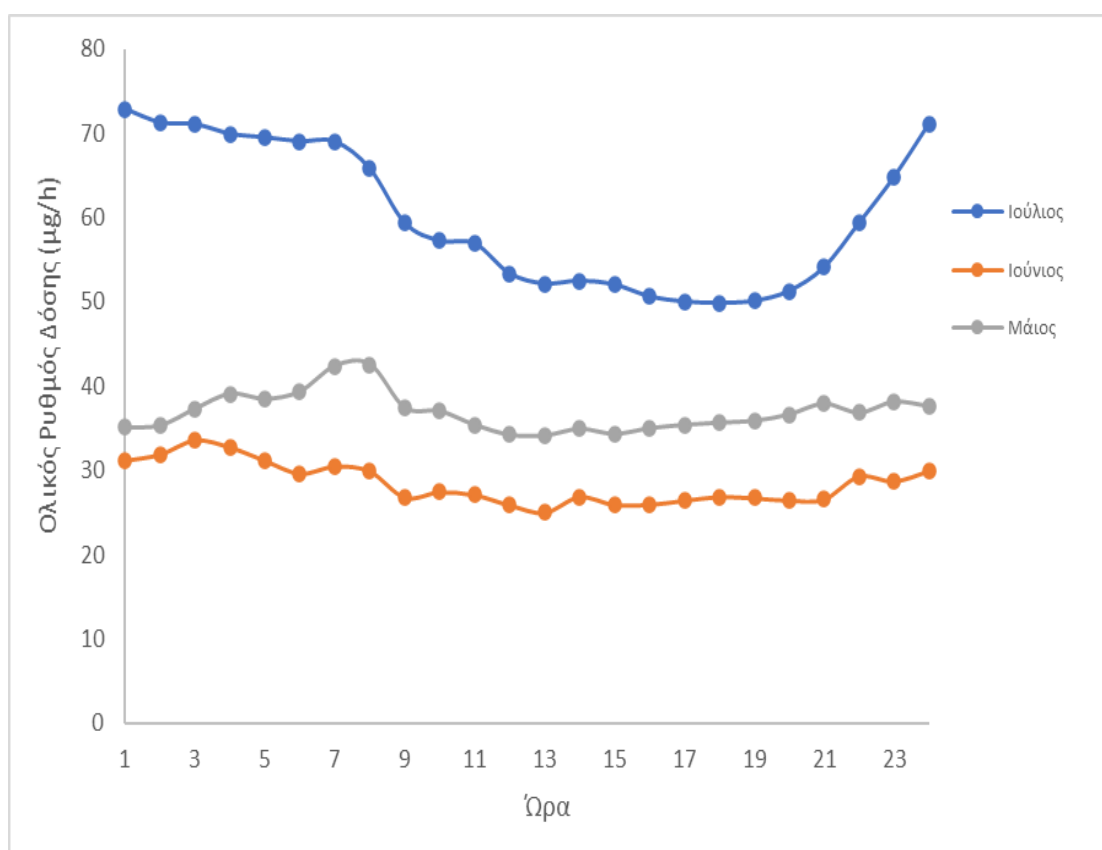
- Κατηγορία 1^η: Ύπνος (Activity 1: Sleep)
- Κατηγορία 2^η: Κάθισμα – Χωρίς Άσκηση (Activity 2: Sitting)
- Κατηγορία 3^η: Ελαφριά Άσκηση (Activity 3: Light Exercise)
- Κατηγορία 4^η: Έντονη Άσκηση (Activity 4: Heavy Exercise)

Οι ωριαίες μεταβολές του ολικού ρυθμού δόσης που παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα, συνδέονται με τις συγκεντρώσεις PM₁₀ που έχουν καταγραφεί για το συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο κατά το οποίο διεξάγεται η μοντελοποίηση. Η κάθε μία από τις υπό μελέτη κατηγορίες δραστηριότητας του εκτιθέμενου ανθρώπου εξάγει και τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την βοήθεια του μοντέλου ExDoM2 και την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Στην περίπτωση που τεθεί ως δραστηριότητα η 4^η κατηγορία που αφορά την έντονη άσκηση του ανθρώπου οι τιμές του ολικού ρυθμού δόσης που θα προκύψουν ανά ώρα για κάθε μήνα θα είναι σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Όσο λιγότερο δραστηριοποιείται ο άνθρωπος, τόσο λιγότερο συχνά αναπνέει, άρα και ο όγκος των σωματιδίων που εναποτίθεται στον οργανισμό μικραίνει, άρα μικραίνει και η δόση που δέχεται. Χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι ο Ιούλιος έχει εμφανώς υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων, επομένως και ο ρυθμός δόσης είναι έντονα αυξημένος όπως φαίνεται και σε κάθε ένα από τα διαγράμματα 4.1, 4.2, 4.3. Οι μήνες Μάιος και Ιούνιος, χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων, με τις συγκεντρώσεις του Μαΐου να ξεπερνούν τις συγκεντρώσεις του Ιουνίου σε όλες τις περιπτώσεις, άρα και η δόση του Ιουνίου είναι πιο μικρή σε σύγκριση με τον Μάιο αλλά καμία δεν ξεπερνά την δόση του Ιουλίου. Χαρακτηριστικά, και στους τρεις μήνες παρατηρείται πτώση στο χρονικό διάστημα από 9-11 π.μ., ενώ

αντίστοιχα και στους τρεις μήνες εντοπίζεται υψηλή συγκέντρωση από 8- 10 π.μ., γεγονός που οφείλεται στις υψηλές τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} .

4.1.1: Δραστηριότητα 4: Έντονη Άσκηση

Η κάθε κατηγορία από τις παραπάνω στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα για τον ρυθμό δόσης που προσλαμβάνει στον οργανισμό του με την βοήθεια του μοντέλου ExDoM2. Στην περίπτωση που ο άνθρωπος που μελετάται δραστηριοποιείται με έντονη άσκηση, ανασαίνει συχνότερα, δηλαδή παίρνει περισσότερες αναπνοές, με αποτέλεσμα ο όγκος των σωματιδίων που εισέρχεται στον οργανισμό του να είναι μεγαλύτερος από ότι στην περίπτωση που δεν ασκείται. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που προσλαμβάνει ανθρώπινος οργανισμός, τόσο πιο αυξημένη είναι και η δόση που δέχεται το αναπνευστικό του σύστημα. Στο παρακάτω διάγραμμα 4.1, παρατίθεται ο ρυθμός δόσης που δέχεται ο οργανισμός του ανθρώπου για κάθε έναν από τους μήνες που μελετώνται όπως έχει προκύψει μετά από την χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου ExDoM2.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με έντονη άσκηση για Μάιο Ιούνιο Ιούλιο 2020

Αναλυτικότερα, για τον μήνα Ιούλιο παρατηρείται πως οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι αρκετά υψηλές, συνεπώς και ο ρυθμός δόσης είναι αυξημένος, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.1, με μέγιστη τιμή στην 1 π.μ. 72,9 $\mu\text{g}/\text{h}$ και ελάχιστη τιμή στις 6 μ.μ. γεγονός ότι καθ' όλη την διάρκεια του 24ωρου τα μέγιστα εντοπίζονται κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και ξαναεμφανίζονται αργά το απόγευμα, οφείλεται στις ώρες αιχμής

όπου η κίνηση των αυτοκινήτων και των μεταφορικών μέσων είναι αυξημένη, και ειδικότερα τον μήνα Ιούλιο που υπάρχει μεγαλύτερη κινητικότητα των ανθρώπων σε σχέση με τους υπόλοιπους μήνες, επομένως οι εκπομπές των καυσαερίων προκαλούν τέτοιου είδους αποτελέσματα. Άρα, συμπεραίνεται ότι ο Ιούλιος ο οποίος έχει σε όλες τις ώρες της ημέρας υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{10} έχει και αυξημένη δόση η οποία εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και τον οδηγεί πιθανώς σε αναπνευστικά προβλήματα τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα.

Ο Μάιος, παρότι εμφανίζει τιμές υψηλότερες από του Ιουνίου, διατηρεί τον ρυθμό δόσης σε σταθερή κλίμακα, καθώς ξεκινά από 35 $\mu g/h$ στις 4 μ.μ. και το μέγιστο που αγγίζει είναι στις 7- 8 π.μ. 42 $\mu g/h$. Ο ολικός ρυθμός δόσης εμφανίζει αύξηση τις πρωινές ώρες που οφείλεται στην αυξημένη κυκλοφορία, όπως επίσης και μετά τις 7 μ.μ. για τον ίδιο λόγο, εφόσον η εκπομπές των καυσαερίων οδηγούν σε υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} τις ώρες αυτές της ημέρας.

Ο μήνας που χαρακτηρίζεται με τον μικρότερο ρυθμό δόσης στον ανθρώπινο οργανισμό, είναι ο Ιούνιος που δεν ξεπερνά τα 33,5 $\mu g/h$, τιμή που καταγράφεται στις 4 π.μ., ενώ κατά την διάρκεια του υπόλοιπου 24ωρου ο ρυθμός δόσης εμφανίζει ελάχιστη τιμή στη 1 μ.μ. 25 $\mu g/h$. Η κατάσταση αυτή, οδηγεί σε συμπεράσματα όπως η μειωμένη κυκλοφορία και συνεπώς χαμηλότερες τιμές εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων προερχόμενα από καυσαέρια. Χαρακτηριστικά, οι υψηλότερες τιμές σημειώνονται τις βραδινές ώρες από τις 10 μ.μ. μέχρι και τις πρωινές ώρες μέχρι τις 7 π.μ. από όπου και μετά αρχίζει και υπάρχει σταδιακή πτώση των τιμών των συγκεντρώσεων PM_{10} οπότε και του ρυθμού δόσης ως προς τον ανθρώπινο οργανισμό.

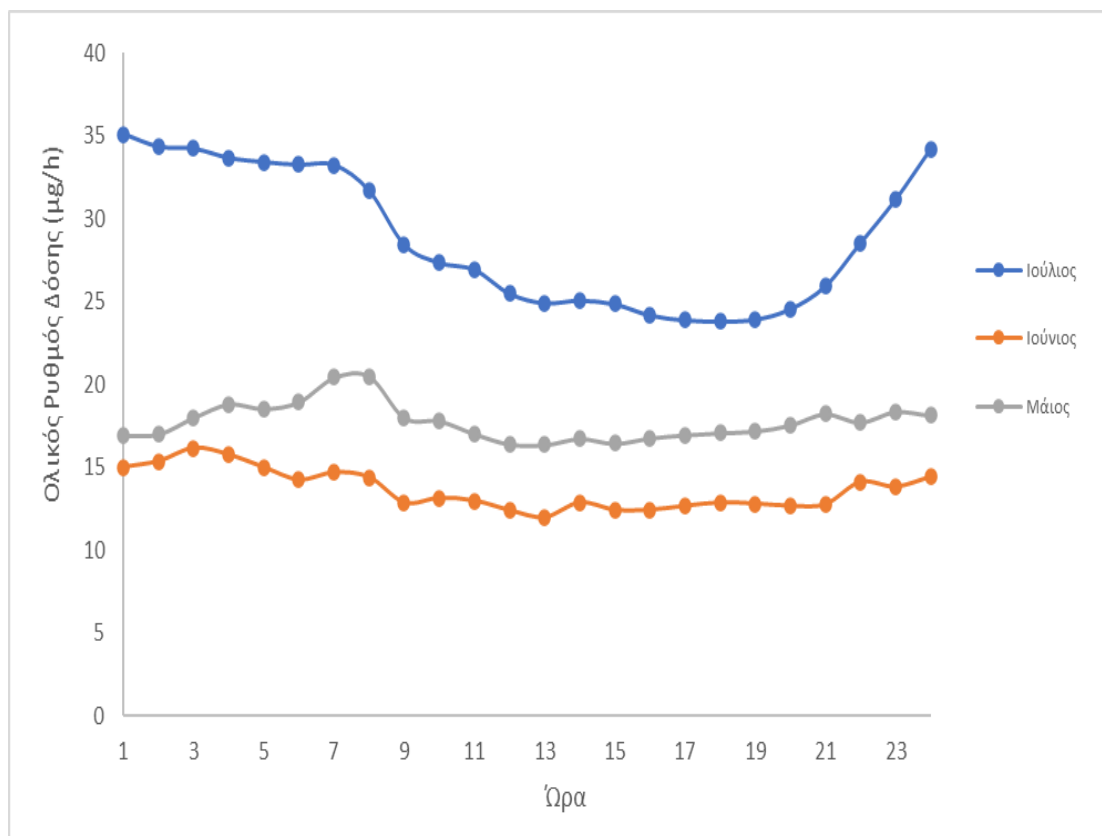
Ο ρυθμός δόσης στο αναπνευστικό σύστημα του εκτιθέμενου ανθρώπου για τους μήνες Ιούνιο και ο Ιούλιο σύμφωνα με το διάγραμμα 4.1, εμφανίζει αυξημένες τιμές από τις 10 μ.μ. – 6 π.μ. ενώ και στις δυο αυτές περιπτώσεις, παρατηρείται πτώση από τις 9 π.μ. και μετά. Το ίδιο φαίνεται να συμβαίνει και τον Ιούλιο με πολύ μεγαλύτερες μεταβολές ανά ώρα καθώς από τις 11 π.μ. μέχρι τις 19 μ.μ. η πτώση είναι αρκετά μεγάλη όπως έντονα παρατηρείται και η αύξηση τις νυχτερινές ώρες.

Ο Ιούλιος εμφανίζεται ως ο πιο επιβαρυνμένος μήνας σε δόση, λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων σε αιωρούμενα σωματίδια που έχουν καταγραφεί. Η δραστηριότητα της έντονης άσκησης επιβαρύνει σημαντικά τον οργανισμό του εκτιθέμενου ανθρώπου. Αδιαμφισβήτητη παράμετρο για αυτές τις αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων αποτελεί η επαναιώρηση σωματιδίων που προέρχονται από το έδαφος, και προκαλείται από τον αέρα ή και από την κίνηση των αυτοκινήτων. Ως επιπρόσθετος παράγοντας δεν μπορεί να παραληφθεί και η σκόνη από την έρημο Σαχάρα που αυξάνει ραγδαία τις τιμές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων και κατά συνέπεια και τον ρυθμό δόσης στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου.

4.1.2 Δραστηριότητα 3: Ελαφριά Άσκηση

Στην περίπτωση που η δραστηριότητα του ενήλικα ανθρώπου που μελετάται μειωθεί από έντονη άσκηση σε ελαφριά άσκηση, εμφανώς παρατηρείται και η μείωση του ολικού ρυθμού δόσης σε όλη την διάρκεια της ημέρας στην χρονική περίοδο και των

τριών μηνών. Αυτό συμβαίνει διότι ο άνθρωπος που εκτελεί ελαφριάς μορφής άσκηση, εισπνέει λιγότερες φορές, και άρα ως αποτέλεσμα τα αιωρούμενα σωματίδια που λαμβάνει είναι λιγότερα. Οι ωριαίες μεταβολές που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι παρόμοιες με τις ωριαίες μεταβολές που έχουν προκύψει για αυξημένη άσκηση, με την διαφορά ότι αφορούν πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, επομένως και πολύ μικρότερο εισπνεόμενο όγκο σωματιδίων κατά την αναπνοή του ανθρώπου με την δραστηριότητα αυτή.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με ελαφριά άσκηση για Μάιο Ιούνιο Ιούλιο 2020

Χαρακτηριστικά, για τον Ιούλιο, τον μήνα που σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές, εμφανίζεται ο μέγιστος ολικός ρυθμός δόσης στην 1π.μ. 35,1 μg/h, ενώ η ελάχιστη τιμή του για τον μήνα αυτό καταγράφεται στις 6 μ.μ. 23,8 μg/h. Και στην περίπτωση της ελαφριάς άσκησης στην περίοδο του Ιουλίου, ο ρυθμός δόσης αυξάνει κατά την διάρκεια της νύχτας, από τις 11 μ.μ. μέχρι και τις 8 π.μ., όπου οι τιμές ξεπερνούν τα 30 μg/h ενώ σταδιακά κατά την διάρκεια της ημέρας υπάρχει πτώση. Έντονη πτώση, σημειώνεται από τις 8-11 π.μ., γεγονός που οφείλεται στις χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων PM₁₀ αυτό το χρονικό διάστημα. Άρα και ο ρυθμός δόσης που αναπνέεται στο αναπνευστικό σύστημα του εκτιθέμενου ανθρώπου είναι αυξημένος κυρίως τις νυχτερινές, ενώ φανερά εντοπίζεται μείωση στις πρωινές ώρες.

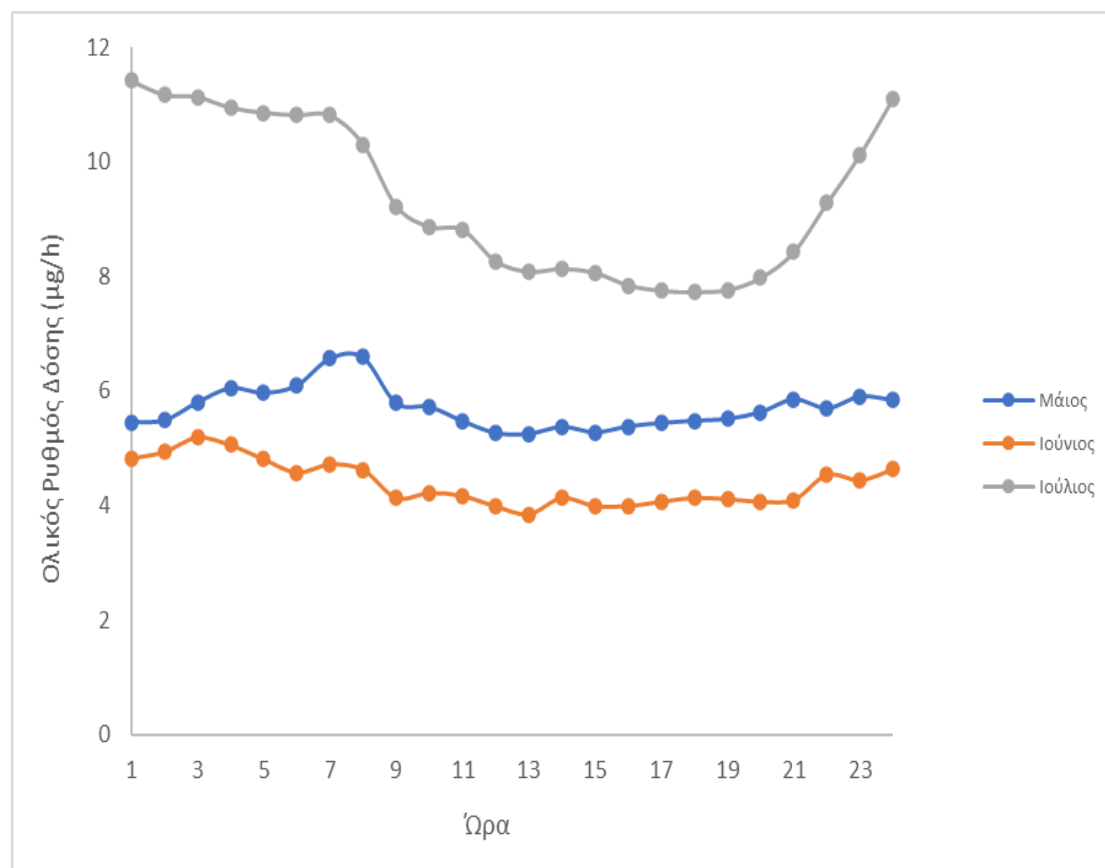
Οι ωριαίες μεταβολές της δόσης όπως αποτυπώνονται στο διάγραμμα 4.2, τόσο για τον Μάιο όσο και για τον Ιούνιο δεν εμφανίζουν έντονες διακυμάνσεις. Αναφορικά, σημειώνεται για τον Μάιο αύξηση από τις 5 π.μ. με τιμή 18,6 μg/h μέχρι τις 8 π.μ., 20,5 μg/h, ενώ στην συνέχεια υπάρχει ραγδαία πτώση μέχρι τις 10 π.μ. όπου σταδιακά σταθεροποιείται στα 16 μg/h με μικρές διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της ημέρας.

Ο Ιούνιος χαρακτηρίζεται ως ο μήνας με τις λιγότερες μεταβολές, καθώς οι τιμές των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ δεν έχουν σημαντικές αποκλίσεις, επομένως και ο ρυθμός δόσης δεν εμφανίζει διακυμάνσεις στην ημέρα. Οι τιμές του ξεκινούν από περίπου 12 μg/h ως ελάχιστο και καταλήγουν σε 15 μg/h με μέγιστη την μοναδική τιμή 16,2 μg/h στις 3 π.μ., γεγονός που οφείλεται σε ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση PM₁₀ την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Ο ρυθμός δόσης που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου που μελετάται, εμφανίζεται εμφανώς αυξημένος τον Ιούλιο, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται ο ανθρώπινος οργανισμός και να δημιουργούνται αναπνευστικά προβλήματα. Με τιμές δόσης που προκύπτουν από το διάγραμμα 4.2 τόσο για τον Μάιο όσο και για τον Ιούνιο, που διατηρούνται σε σταθερά επίπεδα χαμηλών τιμών, προκύπτουν από χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων σωματιδίων PM₁₀, ο ανθρώπινος οργανισμός δεν εισπνέει τόσο μεγάλο αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων.

4.1.3 Δραστηριότητα 2: Χωρίς Άσκηση

Όσο η δραστηριότητα του εκτιθέμενου ανθρώπου μειώνεται τόσο μικρότερος είναι και ο ρυθμός της δόσης που προσλαμβάνει. Στην κατηγορία αυτή, ο ανθρώπινος οργανισμός δεν καταπονείται με κάποιας μορφής άσκηση αλλά κάθετα, συνεπώς ο αριθμός και η συχνότητα των αναπνοών του είναι μειωμένα, άρα και ο όγκος των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχεται στον οργανισμό είναι μικρότερος. Όταν ο άνθρωπος δεν ασκείται, η δόση που θα εναποτεθεί στον οργανισμό του είναι μειωμένη.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα χωρίς άσκηση για Μάιο Ιούνιο Ιούλιο 2020

Με την βοήθεια του μοντέλου ExDoM2 προκύπτουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα, όταν η δραστηριότητα του ανθρώπου μειωθεί και παύει να υπάρχει άσκηση παρά μόνο κάθεται. Επομένως και τα αιωρούμενα σωματίδια που εισπνέει στην περίπτωση αυτή είναι πολύ μικρότερα σε αριθμό. Η δόση λοιπόν που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα είναι αρκετά χαμηλότερη από ότι σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.

Από το διάγραμμα 4.3, εμφανίζεται η αυξημένη δόση που υπάρχει τον Ιούλιο όπου οι τιμές ξεκινούν από περίπου 11 $\mu\text{g}/\text{h}$, και φτάνουν μέχρι 7,8 $\mu\text{g}/\text{h}$. Με έντονη πτώση από τις 7 π.μ. έως τις 10 π.μ. και ραγδαία αύξηση από 8 μ.μ. μέχρι την 1 π.μ. γεγονός που παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις δραστηριοτήτων και οφείλεται στις αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων PM_{10} στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Αντίστοιχα, για τον Μάιο και Ιούνιο οι τιμές που αφορούν τον ρυθμό δόσης, κυμαίνονται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα καθώς ξεκινούν από σχεδόν 4 $\mu\text{g}/\text{h}$ έως 6 $\mu\text{g}/\text{h}$. Χαρακτηριστικά, για τον Ιούνιο όπου οι τιμές είναι οι χαμηλότερες και από τους τρεις μήνες, οι πιο μικρές τιμές εμφανίζονται από τις 12 μ.μ. μέχρι τις 4 μ.μ., ενώ οι υψηλότερες τιμές από τις 3 π.μ. έως τις 5 π.μ. όπου οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν καταγραφεί είναι υψηλές.

Όσον αφορά τον Μάιο, οι συγκεντρώσεις ήταν ελαφρώς υψηλότερες από του Ιουνίου αλλά αρκετά μικρότερες από του Ιουλίου, επομένως και ο ρυθμός δόσης ακολουθεί αυτή την διακύμανση και όπως αποτυπώνεται γραφικά υπάρχει μια πιο έντονη αύξηση από τις 4 π.μ. μέχρι τις 8 π.μ. και ακολουθεί μείωση που ξεκινά από 5,8 $\mu\text{g}/\text{h}$ και η οποία σταθεροποιείται περίπου στα 5,5 $\mu\text{g}/\text{h}$ για όλη την διάρκεια της ημέρας.

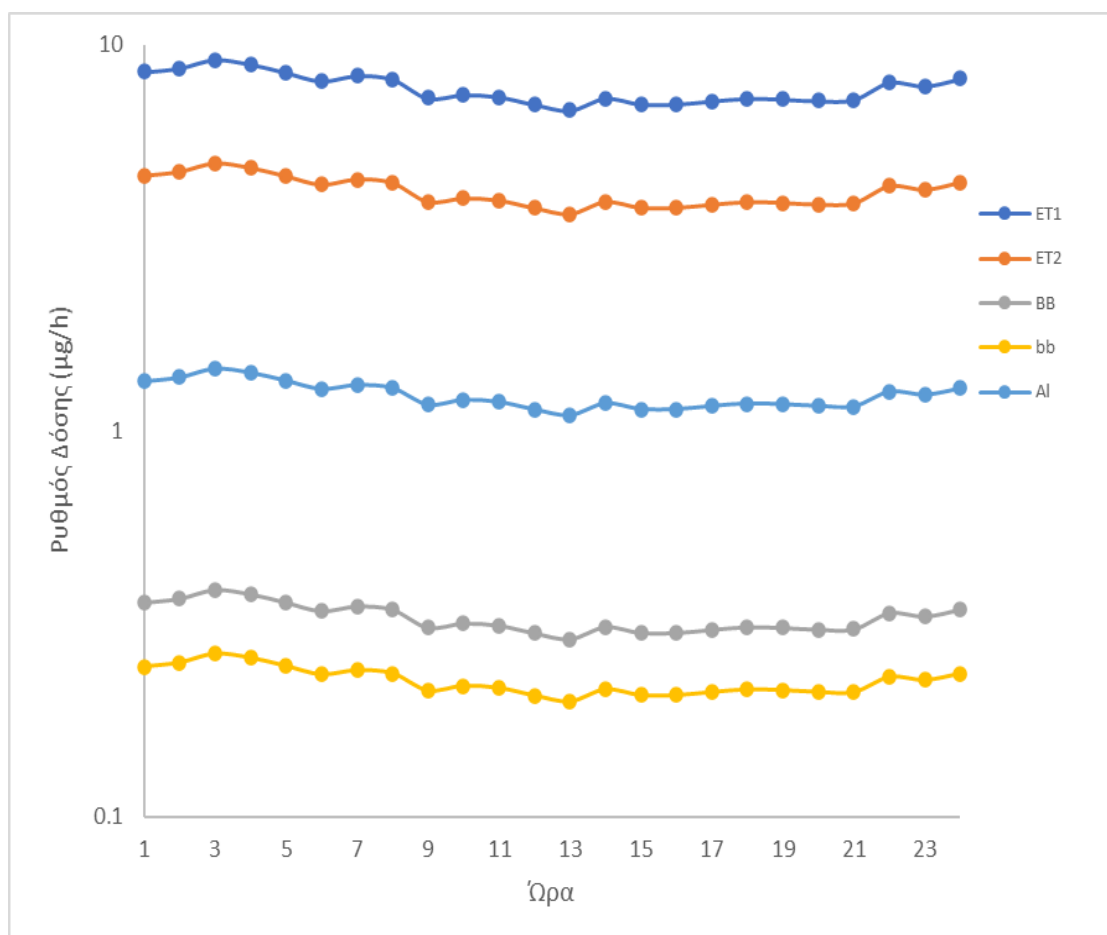
Η κάθε καμπύλη που ακολουθεί το διάγραμμα 4.3 για όλους τους μήνες είναι παρόμοια με τις υπόλοιπες δραστηριότητες με την διαφορά ότι οι τιμές της δόσης που εναποτίθεται στον ανθρώπινο οργανισμό κάθε φορά είναι αρκετά χαμηλότερες ξεκινώντας από τιμές άνω των 70 $\mu\text{g}/\text{h}$ σε έντονης μορφής άσκησης και καταλήγοντας σε τιμές χαμηλότερες από 10 $\mu\text{g}/\text{h}$ στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει άσκηση.

4.2: Μελέτη Των Περιοχών Του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος

Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα διακρίνεται σε 5 περιοχές, τις εκτός θώρακα περιοχές και τις θωρακικές περιοχές. Οι εκτός θώρακα περιοχές περιλαμβάνουν την μύτη (ET1) και το στόμα (ET2), από όπου και εισέρχονται στον οργανισμό τα πιο χονδρά σωματίδια και αποτελούν ένα φίλτρο ώστε να διεισδύσουν τα λεπτά σωματίδια στις εντός θώρακα περιοχές, οι οποίες αποτελούνται από την τραχειοβρογχική περιοχή (BB) και (bb), πριν την μεταφορά και εναπόθεση τους στην κυψελιδική περιοχή (Al). Σε ένα υποθετικό σενάριο, όπου ο εκτιθέμενος άνθρωπος θα εκτελεί ελαφριά άσκηση για τον Ιούνιο και τον Ιούλιο ως δραστηριότητα προκύπτουν τα αποτελέσματα στα ακόλουθα διαγράμματα.

4.2.1 Ιούνιος (Ελαφριά Άσκηση)

Ο Ιούνιος, παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , και αυτό έχει ως ακόλουθο, η δόση που θα εναποτεθεί στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπινου οργανισμού, να είναι μειωμένη συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες. Στην περίπτωση που ο εκτιθέμενος άνθρωπος εκτελεί ελαφριά άσκηση, με φυσιολογικό ρυθμό αναπνοών, η ωριαία μεταβολή του ρυθμού δόσης του αποτυπώνεται στο διάγραμμα 4.4 για κάθε μία από τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος.



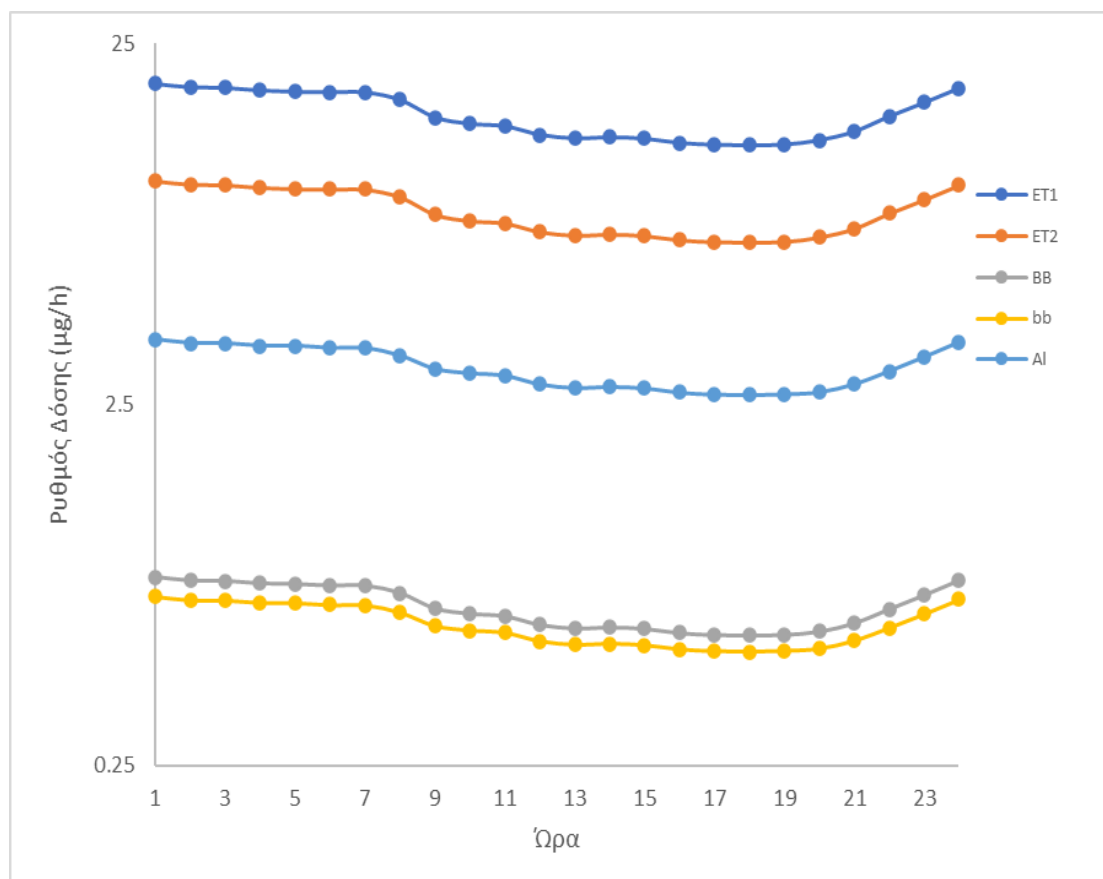
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με ελαφριά άσκηση για τον Ιούνιο 2020

Η περιοχή του αναπνευστικού συστήματος που σημειώνει τις υψηλότερες τιμές είναι οι περιοχές του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, η ρινική κοιλότητα και η περιοχή της μύτης (ET1), και ακολουθεί με ελαφρώς χαμηλότερες τιμές δόσης η περιοχή της στοματικής κοιλότητας (ET2). Οι τιμές της περιοχής ET1 ξεκινούν από 7 $\mu\text{g}/\text{h}$ ενώ η μέγιστη τιμή που φτάνουν είναι περίπου 9 $\mu\text{g}/\text{h}$. Στην περίπτωση της περιοχής ET2 που αφορά την στοματική κοιλότητα, τον φάρυγγα και τον λάρυγγα, οι τιμές της δόσης ξεκινούν από 3,5 $\mu\text{g}/\text{h}$ και φτάνουν μέχρι 5 $\mu\text{g}/\text{h}$.

Οι εκτός θώρακα περιοχές έχουν σαφώς υψηλότερες τιμές δόσης σε αντίθεση με τις θωρακικές περιοχές που κυμαίνονται από 0,2 $\mu\text{g}/\text{h}$ έως 1,5 $\mu\text{g}/\text{h}$. Όσον αφορά τις εντός θώρακα περιοχές η κυψελιδική περιοχή έχει πιο αυξημένες τιμές δόσης σε κλίμακα 1 $\mu\text{g}/\text{h}$ έως 1,5 $\mu\text{g}/\text{h}$, ενώ η τραχειοβρογχική περιοχή σημειώνει τιμές 0,2 $\mu\text{g}/\text{h}$ – 0,4 $\mu\text{g}/\text{h}$.

4.2.2 Ιούλιος (Ελαφριά Άσκηση)

Στην περίπτωση του Ιουλίου οι τιμές των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων είναι υψηλότερες, με αποτέλεσμα η εναποτιθέμενη δόση να είναι υψηλή σε σχέση με τον Ιούνιο, με ίδιο επίπεδο δραστηριότητας του ανθρώπου, την ελαφριά άσκηση, όπου η συχνότητα των αναπνοών διατηρείται σε φυσιολογικό πλαίσιο. Η ωριαία μεταβολή του ρυθμού δόσης και οι διακυμάνσεις της ανάλογα με την περιοχή που αναφέρεται εμφανίζονται στο διάγραμμα 4.5.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με ελαφριά άσκηση για τον Ιούλιο 2020

Σύμφωνα με το διάγραμμα 4.5, παρατηρείται ότι οι εκτός θώρακα περιοχές ET1 και ET2 εμφανίζουν αρκετά υψηλότερες τιμές δόσης συγκριτικά με τις εντός θώρακα περιοχές. Χαρακτηριστικά, στην περιοχή ET1, η οποία αφορά την ρινική κοιλότητα η εναποτιθέμενη δόση ξεκινά από 13 μg/h τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες ενώ το βράδυ η δόση ξεπερνά τα 19 μg/h. Αντίθετα, η περιοχή της στοματικής κοιλότητας ET2, σημειώνει εμφανώς χαμηλότερες τιμές που δεν ξεπερνούν τα 10,5 μg/h, με μέγιστη τιμή 10,4 μg/h στην 1 π.μ. και ελάχιστη στις 6 μ.μ. με 7 μg/h.

Η κυψελιδική περιοχή (AI), ακολουθεί την ίδιας μορφής καμπύλη σε ωριαία μεταβολή, όμως αφορά τιμές που ξεκινούν από 2,5 μg/h και φτάνουν στην 1 π.μ. μέχρι 3,8 μg/h. Στην περίπτωση της τραχειοβρογχικής περιοχής, (BB) και (bb) οι τιμές της δόσης δεν ξεπερνούν το 1 μg/h. Υψηλότερες τιμές σημειώνουν οι πρωτεύοντες βρόγχοι με

μέγιστη τιμή 0,8 $\mu\text{g}/\text{h}$ και ελάχιστη 0,6 $\mu\text{g}/\text{h}$ ενώ οι τερματικοί βρόγχοι ξεκινούν από 0,5 $\mu\text{g}/\text{h}$ και φτάνουν μέχρι 0,7 $\mu\text{g}/\text{h}$ ως μέγιστη τιμή στην 1 π.μ..

Η μεγαλύτερη εναπόθεση στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου που μελετάται γίνεται στις εκτός θώρακα περιοχές και κυρίως στην πρόσθια ρινική κοιλότητα (ET1) όπως αποτυπώνεται στα δύο διαγράμματα 4.4 για τον Ιούνιο και 4.5 για τον Ιούλιο, καθώς αναφέρεται σε PM_{10} , χονδρά σωματίδια τα οποία μέσω αυτής εισέρχονται στον οργανισμό του ανθρώπου και εναποτίθεται στο αναπνευστικό του σύστημα.

4.3: Επίδραση της Σκόνης Σαχάρα

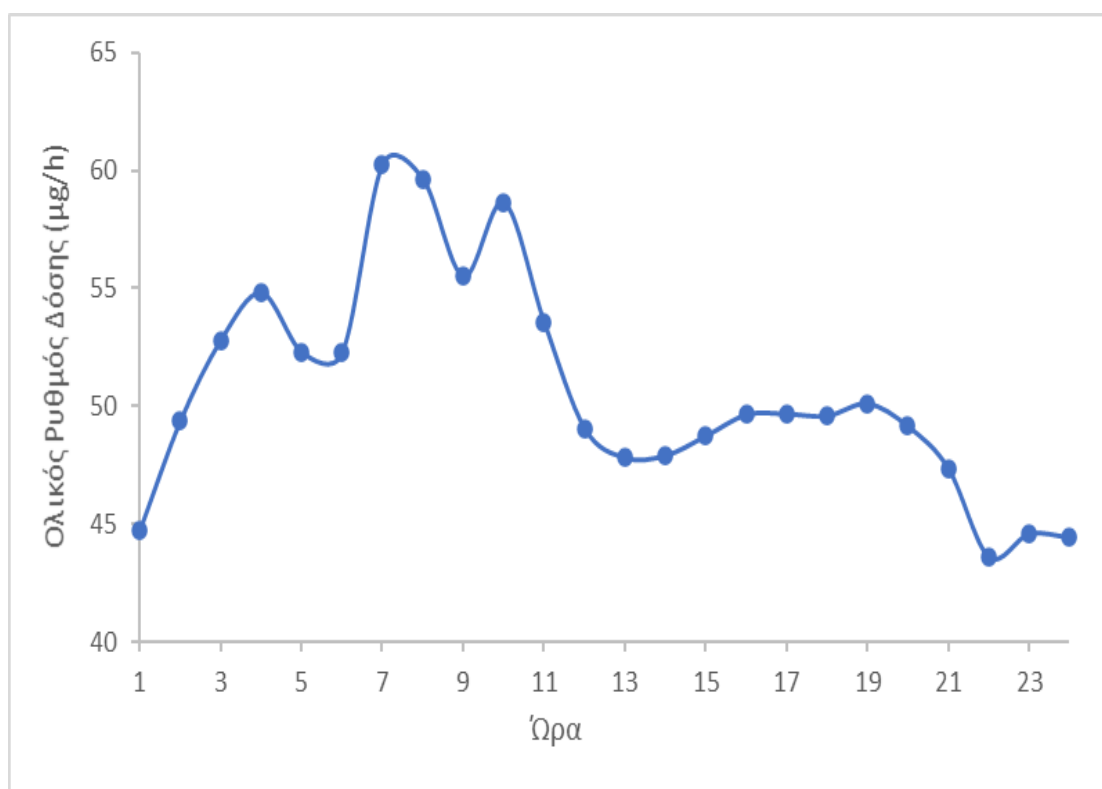
Τα φαινόμενα μεταφοράς μεγάλων χονδροειδών σωματιδίων προέρχονται από την έρημο Σαχάρα της Αφρικής και κατευθύνονται προς την Ευρώπη. Η αφρικανική σκόνη Σαχάρα αποτελεί την μεγαλύτερη πηγή ατμοσφαιρικής σκόνης στην Ευρώπη, η οποία μεταφέρεται με την κίνηση του αέρα. Στην διαδρομή αυτή που ακολουθούν συναντούν αρχικά την Κρήτη, καθώς η γεωγραφική της θέση σχετικά με την υπόλοιπη Ελλάδα έχει την μικρότερη απόσταση από την Βόρεια Αφρική. Σύμφωνα με τους μετεωρολογικούς σταθμούς της χώρας, η Κρήτη αποτελεί μια από τις περιοχές που πλήττεται περισσότερο από αυτό το φαινόμενο αερομεταφοράς σωματιδίων από έρημο. Τα Χανιά ετησίως σημειώνουν ημέρες με έντονα επεισόδια αερομεταφερόμενης σκόνης, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την καθημερινότητα των κατοίκων της πόλης και έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υγεία τους. Τις ημέρες όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα σκόνης οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} είναι αυξημένες, και αυτό έχει ως συνέπεια ακόμη και η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος να είναι μειωμένη, κάνοντας το φαινόμενο αντιληπτό σε όλους κυρίως λόγω του κίτρινου χρώματος που εμφανίζει η ατμόσφαιρα, της περιορισμένης όρασης στο γύρω περιβάλλον αλλά και εξαιτίας της δυσκολίας στην αναπνοή. Για τον λόγο αυτό συστήνεται οι πολίτες με αναπνευστικά προβλήματα να μην εκτίθενται σε τέτοιο περιβάλλον, καθώς επιβαρύνεται η κατάσταση της υγείας τους και προτείνεται κάθε είδους δραστηριότητα να μην πραγματοποιείται σε εξωτερικό περιβάλλον.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Μεταφορά αφρικανικής σκόνης προς την Κρήτη [ΠΗΓΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ – ZOOM EARTH]

4.3.1 Ολικός Ρυθμός Δόσης Ανά Ώρα

Το διάγραμμα 4.6 προσδιορίζει ότι η δόση που εναποτίθεται στον ανθρώπινο οργανισμό, κατά την περίοδο όπου οι τιμές των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} που καταγράφηκαν σε ημέρες του Μαΐου με έντονα φαινόμενα αφρικανικής σκόνης, είναι αδιαμφισβήτητα υψηλότερη από κάθε άλλη περίπτωση. Σε κάθε χρονικό πλαίσιο που εκδηλώνονται τέτοιου είδους επεισόδια αφρικανικής σκόνης, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων που μεταφέρονται αυξάνονται σημαντικά, επομένως και ο εισπνεόμενος όγκος αέρα που θα εισέλθει στον οργανισμό κατά την διαδικασία της αναπνοής είναι υψηλός σε αιωρούμενα σωματίδια προερχόμενα από αφρικανικής σκόνης χονδροειδή σωματίδια. Στο σενάριο αυτό, θεωρείται ότι ο εκτιθέμενος άνθρωπος που μελετάται υπόκειται σε ελαφριά σωματική δραστηριότητα επομένως, ο ρυθμός και η συχνότητα των αναπνοών του δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένος αλλά σε φυσιολογικό επίπεδο άρα και ο όγκος των αιωρούμενων σωματιδίων ακολουθεί την ίδια κλίμακα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6: Ολικός ρυθμός δόσης ανά ώρα με επίδραση σκόνης Σαχάρα

Μια πρώτη σύγκριση ανάμεσα στον ρυθμό δόσης με ίδιας μορφής δραστηριότητα, ελαφριά σωματική άσκηση για τον εκτιθέμενο άνθρωπο, παρατηρείται σύμφωνα με το διάγραμμα 4.6, ότι οι τιμές της δόσης με επεισόδια σκόνης είναι φανερά υψηλότερες. Για τον Μάιο χωρίς φαινόμενο Σαχάρα η δόση άγγιζε τα 20,5 μg/h, ενώ στην περίπτωση που επιδρά η σκόνη, η τιμή της δόσης παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις με ραγδαίες ανόδους και πτώσεις.

Τα έντονα επεισόδια αφρικανικής σκόνης Σαχάρα προκαλούν σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} του περιβάλλοντος. Η ελάχιστη τιμή

που σημειώνει η εναποτιθέμενη δόση είναι 44,5 $\mu\text{g/h}$ στις 11 μ.μ. ενώ οι υψηλότερες είναι 60,3 $\mu\text{g/h}$ στις 7 π.μ. και στις 8 π.μ. αντίστοιχα 59,7 $\mu\text{g/h}$. Ξεκινώντας από περίπου 45 $\mu\text{g/h}$ τις βραδινές ώρες από τις 10 μ.μ. μέχρι και την 1 π.μ. συνεχίζει να αυξάνει ραγδαία όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.6, με μία μικρή πτώση από τις 4 π.μ. μέχρι τις 6 π.μ. όπου φτάνει τα 52 $\mu\text{g/h}$.

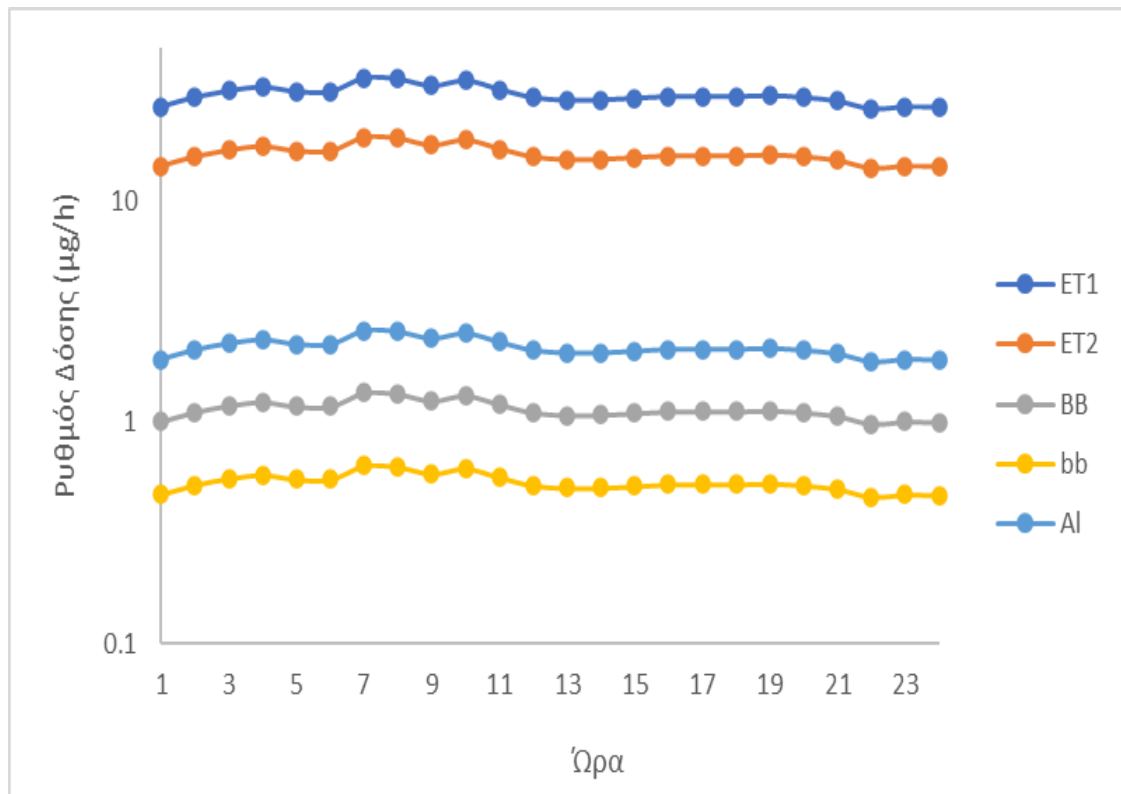
Ακολουθώντας, η απότομη αύξηση που καταγράφεται, σημειώνει και την υψηλότερη τιμή του διαγράμματος φτάνοντας τα 60 $\mu\text{g/h}$ στις 7 π.μ., ενώ στην συνέχεια υπάρχει μια μικρή πτώση μέχρι τις 9 π.μ. στα 55,5 $\mu\text{g/h}$. Στις 10 π.μ. η τιμή της εναποτιθέμενης δόσης ανεβαίνει ξανά στα 58,6 $\mu\text{g/h}$ από όπου ακολουθεί σταδιακή πτώση τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες. Στις 7 μ.μ. παρατηρείται μια μικρή άνοδος της δόσης στα 50 $\mu\text{g/h}$, η οποία πιθανώς να οφείλεται σε αυξημένη τιμή συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και εν συνεχεία μειώνεται μέχρι τις 12 μ.μ. που σημειώνει 44,5 $\mu\text{g/h}$.

4.3.2 Επίδραση της σκόνης Σαχάρα στις περιοχές του Ανθρώπινου Αναπνευστικού Συστήματος

Η επίδραση της αφρικανικής σκόνης, που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα, είναι πολύ έντονη κι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία. Η επιρροή από την σκόνη και η εναπόθεση της δόσης αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχεται σε κάθε μία από τις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος, για έναν άνθρωπο που εκτίθεται σε φαινόμενο σκόνης Σαχάρα, παρατίθεται στο διάγραμμα 4.7. Αποτυπώνεται η ωριαία δόση σε $\mu\text{g/h}$, εφόσον ο ίδιος εκτελεί ως δραστηριότητα, ελαφριάς μορφής σωματική άσκηση, εισπνέοντας σε σταθερούς και φυσιολογικούς ρυθμούς, χωρίς αυξημένη συχνότητα αναπνοής.

Οι καμπύλες που αφορούν τις εκτός θώρακα περιοχές της ρινικής κοιλότητας ET1 και της στοματικής κοιλότητας ET2, σημειώνουν τις υψηλότερες τιμές δόσης, καθώς εισέρχονται και εναποτίθεται σε αυτές τις περιοχές στο αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου τα χονδρά σωματίδια. Ακολουθώντας το διάγραμμα 4.7, παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές εναποτιθέμενης δόσης έχουν καταγραφεί από τις 7 π.μ. μέχρι τις 10 π.μ. με μέγιστη τιμή 36,2 $\mu\text{g/h}$ στις 7 π.μ.. Με το πέρασμα της ημέρας υπάρχει πτώση της τιμής της δόσης από 36 $\mu\text{g/h}$ στα 27 $\mu\text{g/h}$ με ελάχιστη τιμή να σημειώνεται στις 10 μ.μ. με τιμή εναποτιθέμενης δόσης 26,2 $\mu\text{g/h}$.

Στην συνέχεια ακολουθεί, με ελαφρώς μειωμένες τιμές δόσης, η περιοχή της στοματικής κοιλότητας, του λάρυγγα και του φάρυγγα. Η καμπύλη της περιοχής ET2 σημειώνει παρόμοιες διακυμάνσεις με την περιοχή ET1, καταγράφοντας τις μέγιστες τιμές από τις 7 π.μ. μέχρι τις 10 π.μ. όπως επίσης παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση από τις 3 π.μ. με 4 π.μ. με τιμές δόσης 17,1 $\mu\text{g/h}$ και 17,7 $\mu\text{g/h}$ αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή εναποτιθέμενης δόσης σημειώνεται στις 7 π.μ. με 19,5 $\mu\text{g/h}$ ενώ η ελάχιστη στις 10 μ.μ. με 14,1 $\mu\text{g/h}$. Στις περιοχές εκτός θώρακα, οι οποίες περιλαμβάνουν την τραχειοβρογχική περιοχή με τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες βρόγχους αλλά και την κυψελιδική περιοχή, προσλαμβάνουν μικρότερη δόση καθώς στις περιοχές αυτές εισέρχονται πιο λεπτά σωματίδια και εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7: Οι πέντε περιοχές του αναπνευστικού συστήματος με επίδραση σκόνης Σαχάρα

Η καμπύλη που αφορά την κυψελιδική περιοχή, παρουσιάζει ελαφρώς πιο αυξημένες τιμές από τους βρόγχους καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Η μέγιστη τιμή της εναποτιθέμενης δόσης που σημειώνεται στην περιοχή των κυψελίδων είναι 2,6 μg/h στις 7 π.μ. ενώ η ελάχιστη 1,9 μg/h στις 10 μ.μ. όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.7.

Όσον αφορά την τραχειοβρογχική περιοχή, η δόση που εναποτίθεται στον οργανισμό σε συνθήκες αφρικανικής σκόνης, δεν ξεπερνά το 1,5 μg/h για καμία από τις δύο περιοχές. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια μορφή καθώς οι ωριαίες μεταβολές τους έχουν παρόμοιο μοτίβο. Ξεκινώντας από τις μέγιστες τιμές που σημειώνουν οι πρωτεύοντες βρόγχοι, στις 7 π.μ. και 8 π.μ. με τιμή 1,35 μg/h. Από τις 11 π.μ. και μετά υπάρχει πτώση των τιμών της δόσης, γεγονός που οφείλεται σε χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ στο χρονικό αυτό πλαίσιο.

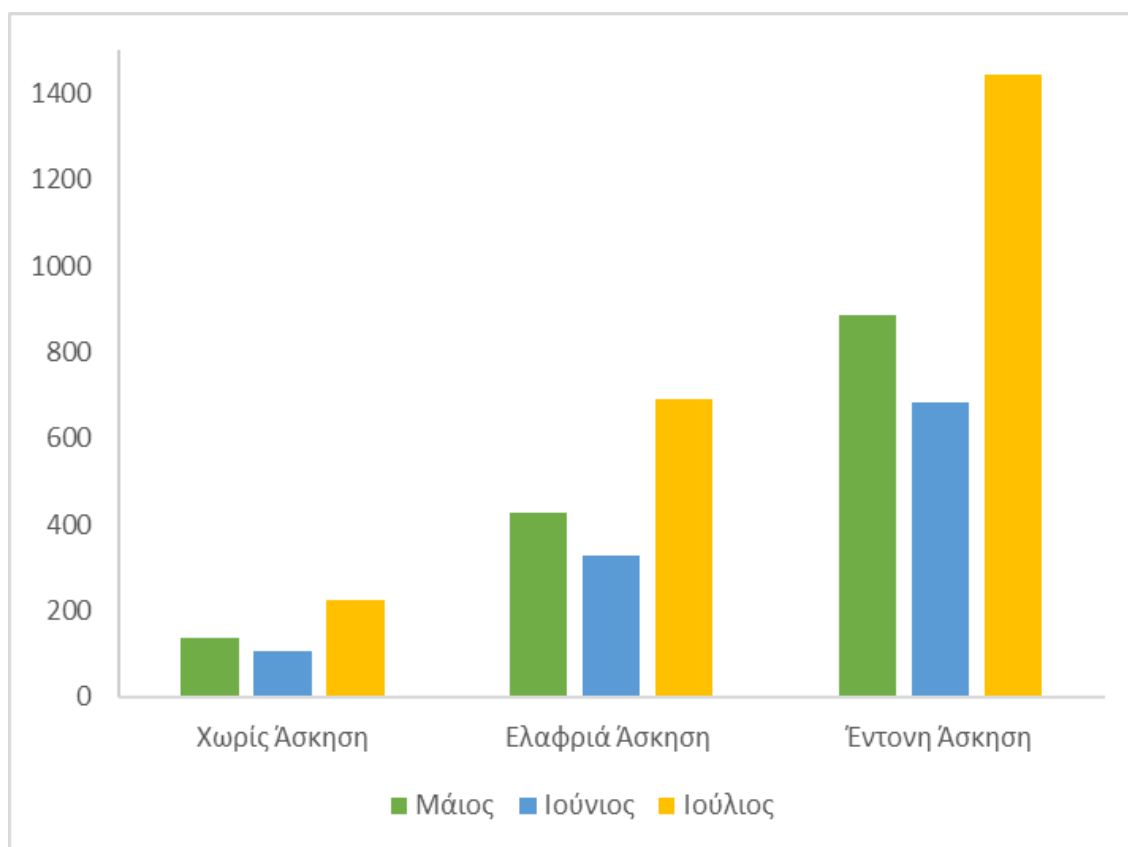
Αντίστοιχα, για τους δευτερεύοντες βρόγχους, οι τιμές της εναποτιθέμενης δόσης στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα δεν ξεπερνούν το 1 μg/h. Σημειώνοντας ελάχιστη τιμή 0,4 στις 10 μ.μ. όπως διαπιστώνεται και από το διάγραμμα 4.7, και μέγιστη τιμή στις 7 και 8 π.μ. με 0,6 μg/h. Οι μεσημεριανές ώρες διατηρούν σταθερά 0,5 μg/h ενώ με το πέρασμα της ημέρας οι τιμές μειώνονται. Αυτό συμβαίνει εφόσον οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν καταγραφεί είναι χαμηλότερες τις ώρες εκείνες.

Όπως έχει προκύψει από το διάγραμμα 4.7 οι ώρες που εμφανίζονται ως ώρες αιχμής με υψηλότερες τιμές εναποτιθέμενης δόσης είναι από τις 7 π.μ. μέχρι τις 10 π.μ. από όπου και μετά οι τιμές σταθεροποιούνται με σταδιακή πτώση, έως ότου καταλήξουν στις 10 μ.μ. στην ελάχιστη τιμή για την κάθε περιοχή.

4.4: Συνολική Δόση

4.4.1 Συνολική Δόση Για τους μήνες Μάιο – Ιούνιο – Ιούλιο Ανάλογα με την Δραστηριότητα

Η δραστηριότητα που απασχολείται ο εκτιθέμενος άνθρωπος κατά την χρονική διάρκεια των τριών μηνών που μελετάται, επηρεάζει άμεσα την δόση την οποία λαμβάνει. Παρατηρείται με βάση το διάγραμμα 4.8, ότι όσο πιο έντονη είναι η άσκηση με την οποία καταπονείται ο ανθρώπινος οργανισμός τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που εισπνέει, καθώς αναπνέει συχνότερα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8: Συνολική δόση για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, ανάλογα με την δραστηριότητα του ανθρώπου

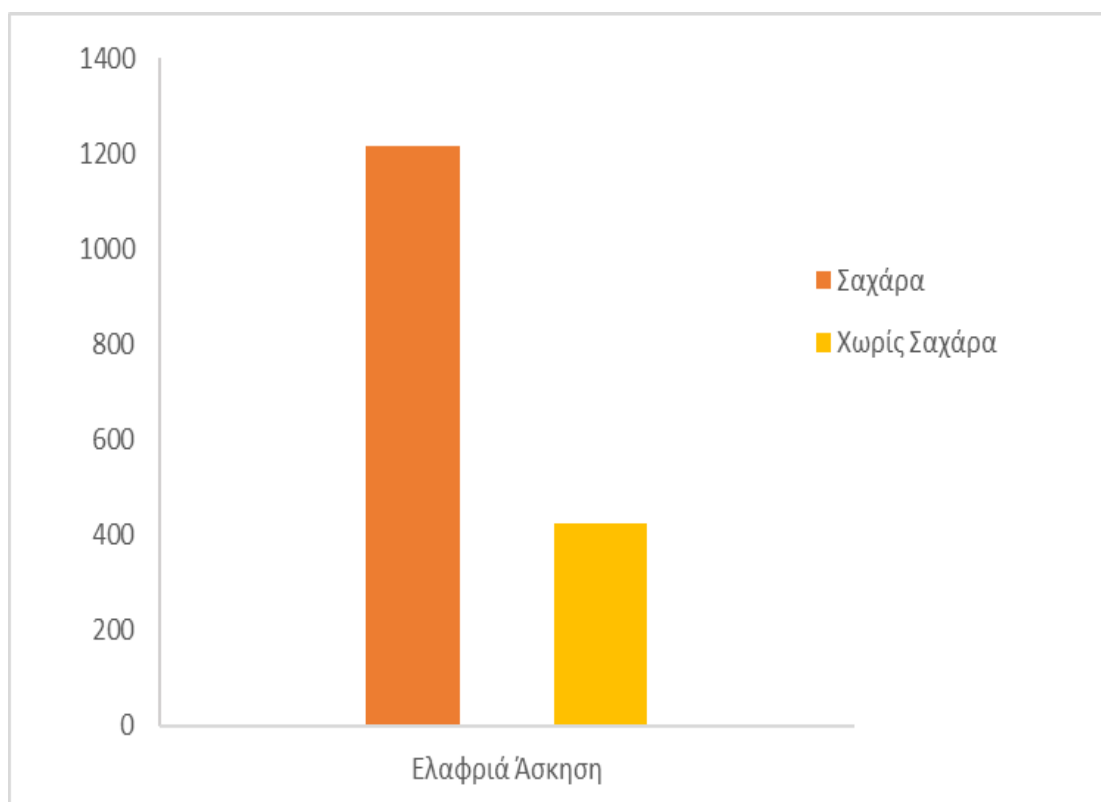
Στην περίπτωση που δεν υπάρχει άσκηση, και ο άνθρωπος αναπνέει με κανονικό ρυθμό, και όχι ταχύτερα, η συνολική δόση που λαμβάνει για το 24ωρο είναι εμφανώς χαμηλότερη. Όταν πρόκειται για ελαφριά άσκηση, οι τιμές που αγγίζει ο ρυθμός δόσης είναι σαφώς χαμηλότερες από την έντονη άσκηση καθώς αναπνέει πιο αργά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συνολικός όγκος των σωματιδίων που προσλαμβάνει να είναι μικρότερος από ότι στην δραστηριότητα 4, που αφορά την έντονη σωματική άσκηση.

Επομένως, η συνολική δόση εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό σωματιδίων που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα συνολικά σε κάθε μία από τις περιπτώσεις. Σύμφωνα με το διάγραμμα εμφανίζεται αύξηση της τιμής όσο αυξάνεται η συχνότητα εισπνοής και άρα τα σωματίδια που εισέρχονται στον οργανισμό για κάθε έναν από τους μήνες που μελετήθηκαν. Άρα, η δραστηριότητα 2 εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές

ξεκινώντας από 105 μg , ακολουθεί η δραστηριότητα 3 όπου οι τιμές για την συνολική δόση φτάνουν μέχρι περίπου 700 μg και τέλος η δραστηριότητα 4 που αφορά την έντονη άσκηση, αγγίζει τιμές της τάξεως των 1500 μg περίπου.

4.4.2 Συνολική Δόση Για την Επίδραση Του Φαινομένου Σαχάρα

Η συμβολή της αερομεταφερόμενης αφρικανικής σκόνης και η εναπόθεση της στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο ποσοστό της επιβλαβούς δόσης σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς συμπαρασύρει και άλλα σωματίδια τα οποία προσκολλώνται στην σκόνη κι προκαλούν σοβαρά προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα. Η περίοδος μελέτης φαινομένων Σαχάρα αφορά την περίοδο της άνοιξης και συγκεκριμένα τον Μάιο, όπου συνήθως τα φαινόμενα αερομεταφερόμενης σκόνης είναι μεγαλύτερα λόγω των ανέμων που επικρατούν [Karanasiou, et al., 2012].



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9: Συνολική δόση του εκτιθέμενου ανθρώπου με ελαφριά άσκηση με επίδραση της σκόνης Σαχάρα

Η μεταφορά αφρικανικής σκόνης από την έρημο Σαχάρα αποτελεί την κυριότερη φυσική πηγή αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} , και η επίδραση της στην ανθρώπινη υγεία συμβάλει σημαντικά, ανάλογα με την συχνότητα τέτοιων φαινομένων. Όταν ένας άνθρωπος, εκτελεί ελαφριάς μορφής σωματική άσκηση, όπως το περπάτημα, η συχνότητα και ο ρυθμός των αναπνοών του διατηρείται σε σταθερά επίπεδα. Επομένως, ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχονται στο αναπνευστικό του σύστημα είναι ελαφρώς αυξημένος σε σχέση με τον φυσιολογικό

ρυθμό αναπνοής. Στην περίπτωση που συμπεριληφθεί ως παράμετρος ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων των σωματιδίων αυτών είναι εμφανώς αυξημένες, εξαιτίας της συμβολής της αφρικανικής σκόνης, η δόση που θα εναποτεθεί στο αναπνευστικό σύστημα του εκτιθέμενου ανθρώπου είναι σαφώς υψηλότερη.

Σε χρονικό διάστημα έκθεσης ενός 24ώρου του Μαΐου, που εμφανίζονται έντονα επεισόδια αφρικανικής σκόνης, σημειώνεται, ότι η συνολική εναποτιθέμενη δόση είναι σχεδόν η τριπλάσια σε φαινόμενα αφρικανικής σκόνης Σαχάρα από ότι αν δεν εμφανίζεται αφρικανική σκόνη. Οι τιμές των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{10}) είναι αρκετά αυξημένες στην περίπτωση που μελετάται η εναποτιθέμενη δόση στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου που έχει εκτεθεί σε επεισόδιο αφρικανικής σκόνης, άρα και η συνολική τιμή της δόσης είναι αρκετά υψηλή. Η τιμή της συνολικής δόσης που εναποτίθεται στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα χωρίς την συμβολή της αφρικανικής σκόνης Σαχάρα δεν ξεπερνά τα 450 μg , ενώ όταν η αφρικανική σκόνη επηρεάζει τις τιμές των συγκεντρώσεων, η συνολική τιμή της εναποτιθέμενης δόσης ξεπερνά τα 1200 μg για το συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο έκθεσης μίας ημέρας του Μαΐου.

5. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, και αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν, κρίνεται ότι η μελέτη της συμπεριφοράς και της επιρροής των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα, ιδίως των αιωρούμενων σωματιδίων, καθίσταται απαραίτητη, καθώς επιδρά σημαντικά στην υγεία των ανθρώπων. Σκοπό της εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια και της εναποτιθέμενης δόσης αυτών στο αναπνευστικό σύστημα για έναν ενήλικα άνθρωπο ο οποίος εκτίθεται σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος για ένα 24ωρο με διαφορετική σωματική άσκηση κάθε φορά.

Για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων, έλαβε χώρα μια σειρά δειγματοληψιών με συγκεκριμένη οργανολογία, για την μέτρηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2.5}$, στην περιοχή Ακρωτηρίου [Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά]. Ακολουθώντας, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των δεδομένων μέσω του μοντέλου ExDoM2, με σκοπό τον υπολογισμό της δόσης που εναποτίθεται στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και αναλυτικότερα τον ρυθμό της δόσης που δέχεται η κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος.

Στο 4^ο κεφάλαιο, που καταγράφονται τα αποτελέσματα τα οποία έχουν προκύψει από την μελέτη, παρατηρείται ότι όσο πιο έντονη είναι η σωματική άσκηση που καλείται ο εκτιθέμενος άνθρωπος να εκτελέσει, τόσο μεγαλύτερη είναι η δόση που προσλαμβάνει. Αυτό συμβαίνει καθώς όσο περισσότερο ασκείται τόσο συχνότερα αναπνέει. Επομένως, ανάλογα με την συχνότητα εισπνοών του εξαρτάται και ο όγκος των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό. Όσο συχνότερα εισπνέει, τόσο μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων εισχωρεί στο αναπνευστικό του σύστημα. Συνεπώς και η συνολική δόση που εναποτίθεται στον ανθρώπινο οργανισμό, ανάλογα με την δραστηριότητα που εκτελεί, αυξάνει όσο αυξάνει και η ένταση της άσκησης στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος. Επιπλέον, για όσο μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων καταγράφονται, και πιο συγκεκριμένα αιωρούμενων σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η προσλαμβανόμενη δόση που θα εναποτεθεί στον οργανισμό.

Ακόμη, η κάθε περιοχή του αναπνευστικού συστήματος, είτε αφορά τις εκτός θώρακα περιοχές είτε τις θωρακικές, λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή εναποτιθέμενης δόσης. Όπως προκύπτει από την συγκεκριμένη μελέτη, οι εκτός θώρακα περιοχές, δηλαδή η μύτη και το στόμα, δέχονται μεγαλύτερη δόση σε σύγκριση με τις θωρακικές περιοχές, όπου οι τιμές της δόσης είναι φανερά μικρότερες. Αυτό συμβαίνει καθώς αποτελούν την περιοχή εναπόθεσης των χονδρόκοκκων σωματιδίων, τα οποία είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος και καταλαμβάνουν μεγαλύτερη μάζα στο σύνολο, άρα και μεγαλύτερη συγκέντρωση. Επομένως, χαρακτηρίζονται ως πιο επιβαρυμένες περιοχές καθώς η εναποτιθέμενη δόση είναι μεγαλύτερη διότι συνδέεται άμεσα με την συγκέντρωση του ρύπου.

Επιπλέον, όπως μελετήθηκε, όταν ο εκτιθέμενος άνθρωπος βρεθεί σε περιβάλλον με έντονα φαινόμενα αφρικανικής σκόνης Σαχάρα, οι τιμές των συγκεντρώσεων που καταγράφονται είναι αρκετά υψηλότερες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δόση που

εναποτίθεται στις περιοχές του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου που εκτίθεται σε αυτές τις συνθήκες να είναι εξίσου υψηλή.

Αδιαμφισβήτητα, σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η ένταση και η κατηγορία της δραστηριότητας με την οποία απασχολείται ο άνθρωπος. Στην περίπτωση αυτή, μελετάται ελαφριάς μορφής άσκηση, όπου η συχνότητα των εισπνοών του εκτιθέμενου ανθρώπου είναι ελαφρώς υψηλότερη από την κανονική, όπως κατά την διάρκεια του περπατήματος. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι σε σύγκριση με την δόση που εναποτίθεται στον οργανισμό χωρίς να εμφανίζονται επεισόδια αφρικανικής σκόνης με την ίδια δραστηριότητα σωματικής άσκησης, η εναποτιθέμενη δόση με φαινόμενα σκόνης Σαχάρα είναι η τριπλάσια.

Συνοψίζοντας, η υψηλότερη δόση αξιολογείται ότι εναποτίθεται στις εκτός θώρακα περιοχές του αναπνευστικού συστήματος του ανθρώπου που εκτίθεται. Κυρίως, οι τιμές της εναποτιθέμενης δόσης εμφανίζονται αυξημένες για έντονη σωματική άσκηση του ανθρώπου που μελετάται, ενώ όσο μειώνεται η άσκηση του, τόσο μειώνεται και ο ρυθμός και η συχνότητα των αναπνοών του, επομένως μειώνεται και ο όγκος των αιωρούμενων σωματιδίων που εισέρχεται στον οργανισμό άρα και η δόση που προσλαμβάνει και τελικά εναποτίθεται στο αναπνευστικό του σύστημα. Παράλληλα, με συνθήκες αφρικανικής σκόνης η τιμές των συγκεντρώσεων αυξάνονται ραγδαία με αποτέλεσμα η δόση που προέρχεται από αυτής της μορφής αιωρούμενα σωματίδια να είναι πιο αυξημένη και επομένως πιο επιβλαβής για την κατάσταση της υγείας του.

Βιβλιογραφία

Borsós, T., Řimnáčová, D., Ždímal, V., Smolík, J., Wagner, Z., Weidinger, T., Salma, I. (2012). Comparison of particulate number concentrations in three central European capital cities.

Chalvatzaki, E., Chatoutsidou, S. E., Kopanakis, I., Melas, D., Parliari, D., Mihalopoulos, N., & Lazaridis, M. (2021). Personal deposited dose and its influencing factors at several greek sites: An analysis in respect to seasonal and diurnal variations. *Environmental Science and Pollution Research*.

Chatoutsidou, S. E., Kopanakis, I., Lagouvardos, K., Mihalopoulos, N., Tørseth, K., & Lazaridis, M. (2019). PM₁₀ levels at urban, suburban, and background locations in the eastern Mediterranean: Local versus regional sources with emphasis on african dust. *Air Quality, Atmosphere and Health*.

Chatoutsidou, S.E., Pantelaki, C., Kopanakis, I. et al. Mass concentration and elemental content of PM₁₀ during painting/sketching activities in a university classroom. *Int. J. Environ. Sci. Technology*.

Chatoutsidou, S.E. (2016), Physical processes of indoor aerosols in modern microenvironments, Doctoral Dissertation, School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece, 2016.

Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Speizer, F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities.

Douwes J., Thorne P., Pearce N., Heederik D. (2003). Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects.

Fushimi, A., Nakajima, D., Furuyama, A., Suzuki, G., Ito, T., Sato, K., Takami, A. (2021). Source contributions to multiple toxic potentials of atmospheric organic aerosols.

Gerasopoulos, E., Kouvarakis, G., Babasakalis, P., Vrekoussis, M., Putaud, J. P., & Mihalopoulos, N. (2006). Origin and variability of particulate matter (PM₁₀) mass concentrations over the Eastern Mediterranean.

Glytsos, T., Ondráček, J., Džumbová, L., Kopanakis, I., & Lazaridis, M. (2010). Characterization of particulate matter concentrations during controlled indoor activities.

González, Y., Rodríguez, S., Guerra García, J. C., Trujillo, J. L., & García, R. (2011). Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions.

Kakavas, S., & Pandis, S. N. (2021). Effects of urban dust emissions on fine and coarse PM levels and composition. *Atmospheric Environment*.

Hinds C.W. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* Second Edition. John Wiley & Sons, New York.

ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66.

Karanasiou, A., Moreno, N., Moreno, T., Viana, M., de Leeuw, F., & Querol, X. (2012). Health effects from Sahara dust episodes in Europe: Literature review and research gaps. *Environment International*.

Kopanakis I., Chatoutsidou S.E., Glytsos T. and Lazaridis M. (2018a) Impact from local sources and variability of fine particle number concentration in a coastal sub-urban site.

Kopanakis, I., Eleftheriadis, K., Mihalopoulos, N., Lydakis-Simantiris, N., Katsivela, E., Pentari, D., Lazaridis, M. (2012). Physico-chemical characteristics of particulate matter in the eastern Mediterranean.

Kopanakis, I., Mammi-Galani, E., Pentari, D., Glytsos, T., & Lazaridis, M. (2018b). Ambient particulate matter concentration levels and their origin during dust event episodes in the eastern Mediterranean. *Aerosol Science and Engineering*.

Lewandowska, A. U., & Falkowska, L. M. (2013). High concentration episodes of PM₁₀ in the air over the urbanized coastal zone of the Baltic Sea (Gdynia - Poland).

Macher, J. M., Douwes, J., Prezant, B., & Reponen, T. (2012). *Bioaerosols. Aerosols handbook: Measurement, dosimetry, and health effects*, second edition

Martins, V., Cruz Minguillón, M., Moreno, Querol, X., de Miguel, E., Capdevila, M., Lazaridis, M. (2015). Deposition of aerosol particles from a subway microenvironment in the human respiratory tract.

Pope, C. A, III, & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect.

Rodríguez-Chávez, T. B., Rine, K. P., Almusawi, R. M., O'Brien-Metzger, R., Ramírez-Andreotta, M., Betterton, E. A., & Sáez, A. E. (2021). Outdoor/Indoor contaminant transport by atmospheric dust and aerosol at an active smelter site.

Stöber, W., Morrow, P. E., & Oberdörster, G. (1995). Pulmonary retention of inhaled anatase (tio₂) aerosols and lung tumor induction in rats simulated by a physiology-oriented model.

Serfozo, N., Chatoutsidou, S. E., & Lazaridis, M. (2014). The effect of particle resuspension during walking activity to PM₁₀ mass and number concentrations in an indoor microenvironment.

Serfozo, N., Ondráček, J., Glytsos, T., & Lazaridis, M. (2018). Evaluation of nanoparticle emissions from a laser printer in an experimental chamber and estimation of the human particle dose.

Tager, I. B. (2012). Health effects of aerosols: Mechanisms and epidemiology. *Aerosols handbook: Measurement, dosimetry, and health effects*, second edition.

U.S. EPA. Air Quality Criteria for Particulate Matter (Final Report, 1996). (U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.).

West, J. J., Pilinis, C., Nenes, A., & Pandis, S. N. (1998). Marginal direct climate forcing by atmospheric aerosols. *Atmospheric Environment*.

Zhou, H., Yue, X., Lei, Y., Tian, C., Ma, Y., & Cao, Y. (2021). Aerosol radiative and climatic effects on ecosystem productivity and evapotranspiration. *Current Opinion in Environmental Science and Health*.

Λαζαρίδης, Μ. (2010). Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2η Έκδοση.

Λαζαρίδης, Μ. (2015). Βασικές Αρχές της Επιστήμης των Αεροζόλ, Εκδόσεις Τζιόλα.

Χαλβατζάκη, Ε (2016). Έκθεση και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων από αιωρούμενα σωματίδια. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Βιβλιοθήκη Πολυτεχνείου Κρήτης.

Standards - Air Quality - Environment - European Commission.
<https://ec.europa.eu>

Κλιματική αλλαγή και ατμοσφαιρικός αέρας — Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος. www.eea.europa.eu

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Ι. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο:

Αεροφωτογραφίες για τις ημέρες με έντονο φαινόμενο σκόνης Σαχάρα.

[ΠΗΓΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ – ZOOM EARTH]

Μάιος 2020

ι. 18 Μαΐου 2020



ΕΙΚΟΝΑ 1: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για τις 18 Μαΐου 2020

ii. 19 Μαΐου 2020



ΕΙΚΟΝΑ 2: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για τις 19 Μαΐου 2020

iii. 20 Μαΐου 2020



ΕΙΚΟΝΑ 3: Μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα για τις 20 Μαΐου 2020

ΠΙΝΑΚΕΣ:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) για 18 Μαΐου 2020

Ωρα	Συγκέντρωση σωματιδίων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	26,3
2	32,0
3	30,6
4	31,5
5	29,3
6	28,4
7	28,6
8	34,7
9	34,6
10	34,5
11	31,9
12	30,2
13	31,3
14	31,5
15	34,8
16	36,3
17	35,7
18	36,5
19	38,4
20	38,0
21	38,5
22	39,2
23	41,4
24	40,2

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) για 19 Μαΐου 2020

Ωρα	Συγκέντρωση σωματιδίων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	39,3
2	43,7
3	49,7
4	48,3
5	48,2
6	47,2
7	61,8
8	51,4
9	48,5
10	53,1
11	49,1
12	45,3
13	42,6
14	41,1
15	39,7
16	40,3
17	39,5
18	37,9
19	36,1
20	36,7
21	37,7
22	38,3
23	37,7
24	37,0

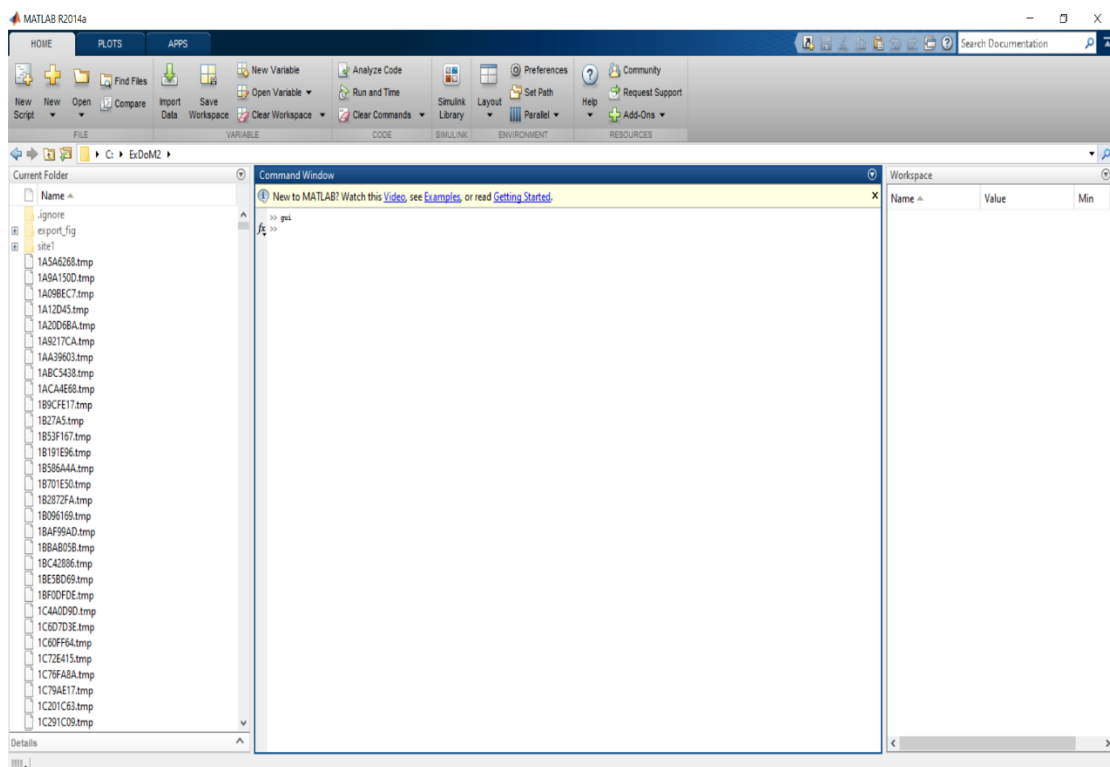
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Μέσες Ωριαίες Συγκεντρώσεις ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) για 20 Μαΐου 2020

Ωρα	Συγκέντρωση σωματιδίων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	38,2
2	38,8
3	42,2
4	47,3
5	43,7
6	45,6
7	49,3
8	52,1
9	45,7
10	48,2
11	42,9
12	37,8
13	36,6
14	37,8
15	37,7
16	38,2
17	39,9
18	40,4
19	41,4
20	38,7
21	33,2
22	23,3
23	24,1
24	25,5

II. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2^ο:

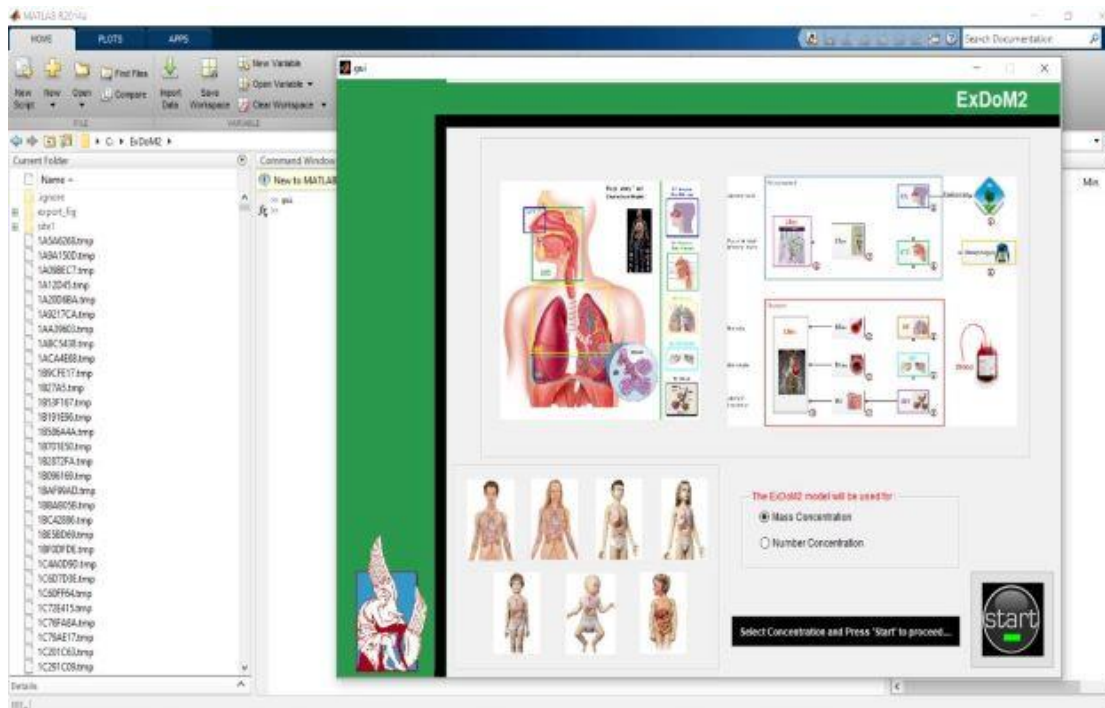
Ανάλυση Ακολουθίας Βημάτων για την Εκτέλεση του Μοντέλου ExDoM2

- i. **Βήμα 1^ο:** Άνοιγμα του προγράμματος MATLAB και της πλατφόρμας GUI για την εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο ExDoM2.



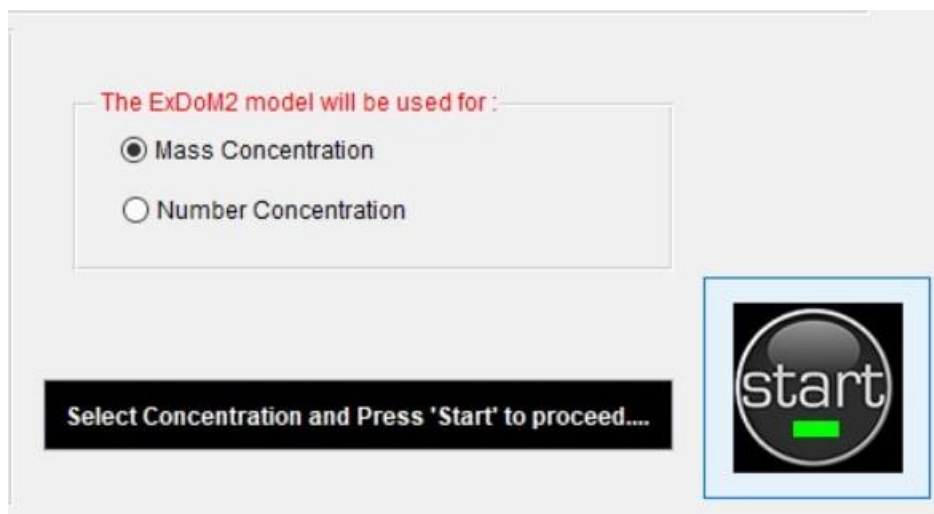
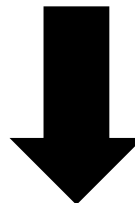
ΕΙΚΟΝΑ 4: Περιβάλλον υπολογιστικού προγράμματος MATLAB

ii. **Βήμα 2^ο:** Άνοιγμα της αρχικής πλατφόρμας του μοντέλου ExDoM2



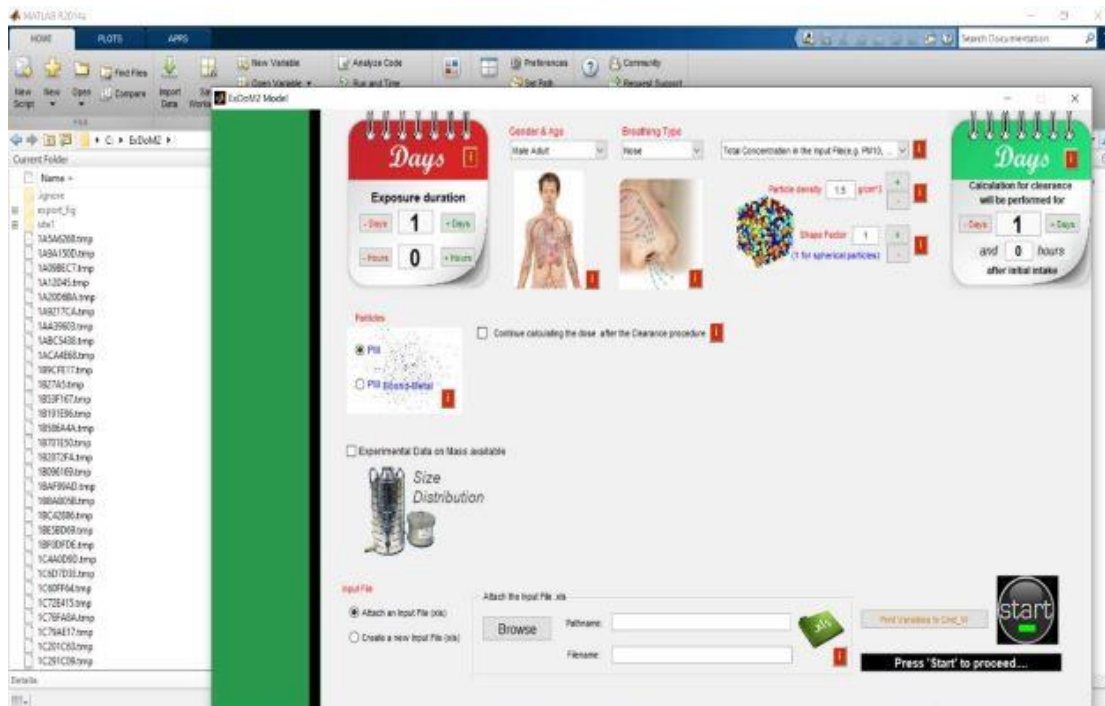
ΕΙΚΟΝΑ 5: Αρχική πλατφόρμα του μοντέλου ExDoM2

Επιλογή εισαγωγής δεδομένων
συγκέντρωσης μάζας



ΕΙΚΟΝΑ 6: Συγκέντρωση μάζας ως επιλογή εισόδου για το μοντέλο

iii. **Βήμα 3^ο:** Είσοδος στο κεντρικό περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου ExDoM2



ΕΙΚΟΝΑ 7: Κεντρικό περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου

iv. **Βήμα 4^ο:** Επιλογή των δεδομένων εισαγωγής

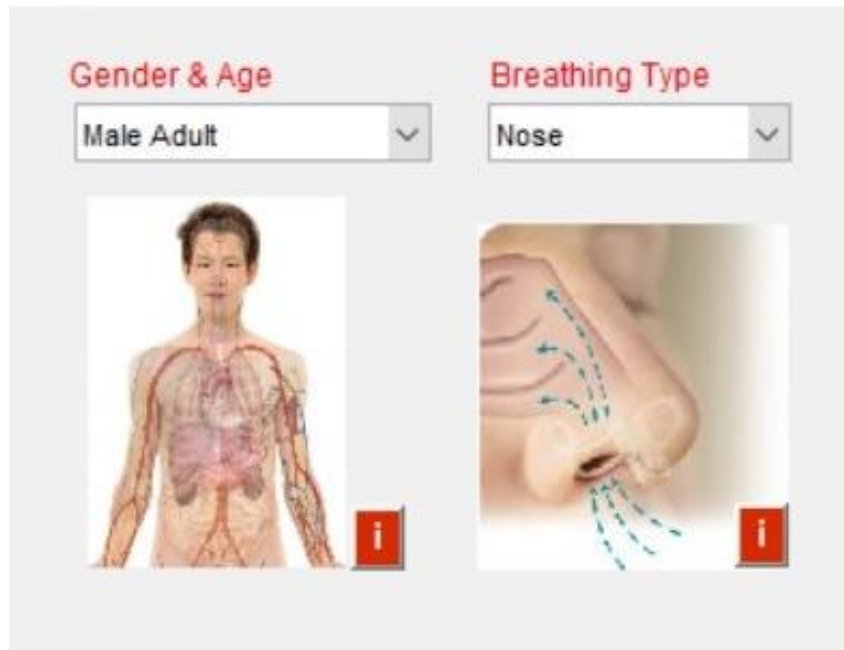
a. **Επιλογή του χρονικού διαστήματος έκθεσης του εκτιθέμενου ανθρώπου**

ExDoM2 Model



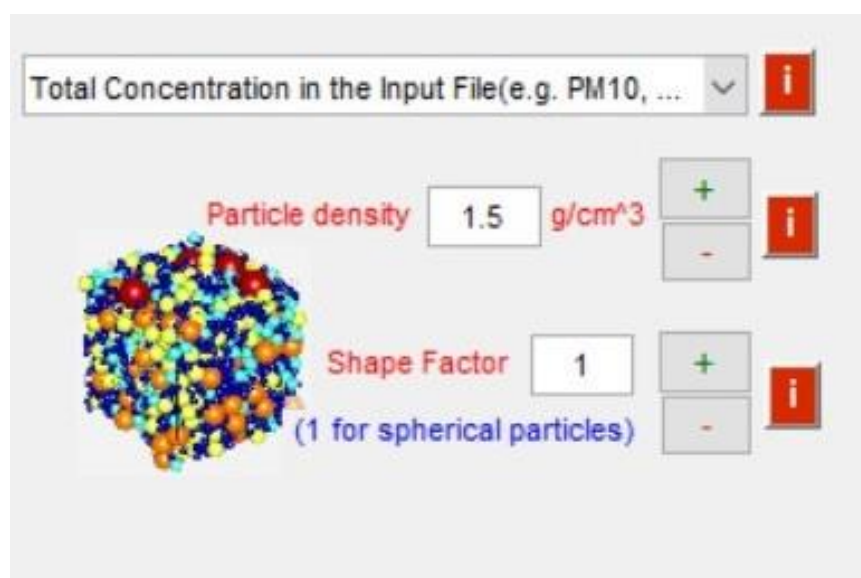
ΕΙΚΟΝΑ 8: Ημέρες έκθεσης του ανθρώπου

- b. Επιλογή των δεδομένων εισαγωγής του φύλου του εκτιθέμενου ανθρώπου και του τρόπου αναπνοής



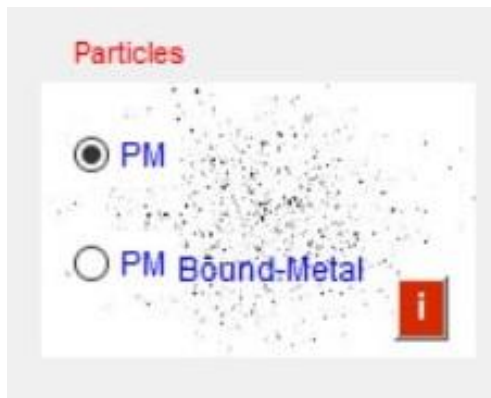
ΕΙΚΟΝΑ 9: Φύλο και τρόπος αναπνοής του ανθρώπου

- c. Επιλογή των δεδομένων εισόδου για την πυκνότητα του εναποτιθέμενου σωματιδίου και τον παράγοντα σχήματος του σωματιδίου (σφαιρικά σωματίδια: 1)



ΕΙΚΟΝΑ 10: Πυκνότητα και παράγοντας σχήματος εναποτιθέμενου σωματιδίου

d. Επιλογή εφαρμογής του μοντέλου για PM (αιωρούμενα σωματίδια) και απορρόφηση μέσω του αίματος



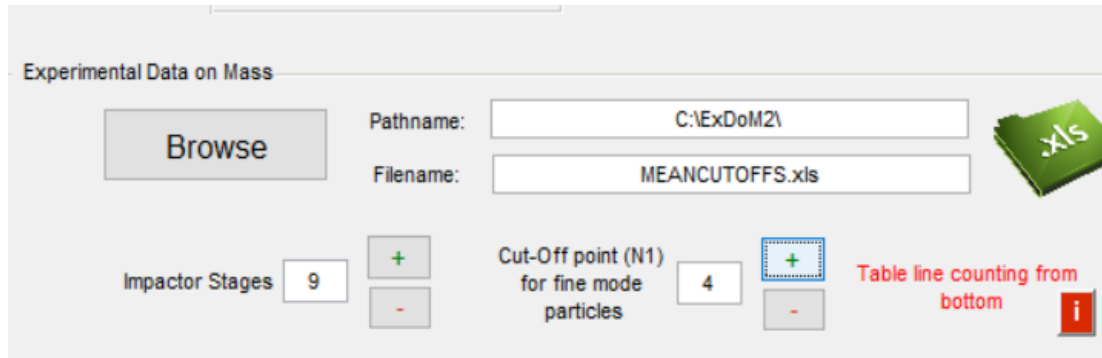
ΕΙΚΟΝΑ 11: Κατηγορία αιωρούμενων σωματιδίων και τρόπος απορρόφησης σωματιδίων από το αίμα

e. Επιλογή παραμονής του εκτιθέμενου ανθρώπου στο ίδιο μικροπεριβάλλον κατά την διάρκεια της μελέτης



ΕΙΚΟΝΑ 12: Επιλογή δεδομένων περιβάλλοντος του ανθρώπου

v. Βήμα 5^ο: Επιλογή δεδομένων επεξεργασίας στο μοντέλο ExDoM2



ΕΙΚΟΝΑ 13: Δεδομένα επεξεργασίας για κατανομή μεγέθους

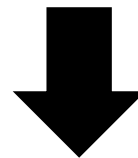
- a. Εισαγωγή του αρχείου Excel που αφορά τα πειραματικά δεδομένα σύμφωνα με την κατανομή μάζας των σωματιδίων, που έχουν προκύψει από τον προσκρουστήρα
- b. **Impactor Stages:** Τα 9 Στάδια του Προσκρουστήρα Διαχωρισμού
- c. **Cut-Off Point:** Το στάδιο 4 του προσκρουστήρα, όπου η διάμετρος 2,1 ανήκει στο όριο και των λεπτών και των χονδρών σωματιδίων

- δ. Εισαγωγή του αρχείου εισόδου Excel που αφορά δεδομένα συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων**



ΕΙΚΟΝΑ 14: Δεδομένα επεξεργασίας για συγκεντρώσεις

- ε. Επιλέγω START ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων**



ΕΙΚΟΝΑ 15: Έναρξη μοντέλου

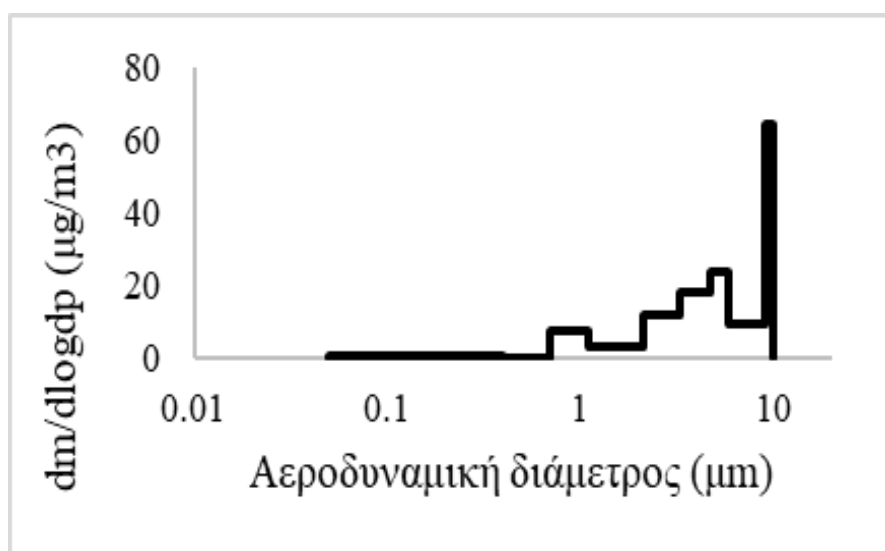
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Πίνακας δεδομένων εισόδου του μοντέλου ExDoM2

Ημέρα	Ωρα	Λεπτά Σωματίδια	Χονδρά Σωματίδια	Ταχύτητα Ανέμου m/s	Δραστηριότητα Εκτιθέμενου Ανθρώπου
1	1	10,2	10,2	4,3	3
1	2	10,6	10,6	4,5	3
1	3	10	10	1,9	3
1	4	10,9	10,9	3,2	3
1	5	9,9	9,9	1,1	3
1	6	10,1	10,1	0	3
1	7	12,7	12,7	0	3
1	8	16,6	16,6	3,2	3
1	9	9,6	9,6	7,5	3
1	10	7,5	7,5	7,2	3
1	11	6,5	6,6	10,5	3
1	12	6,8	6,8	11,6	3
1	13	7,4	7,4	13,2	3
1	14	6	6	14	3
1	15	6	6	19,8	3
1	16	6,4	6,4	17,2	3
1	17	6	6	19,6	3
1	18	6,6	6,6	20,1	3
1	19	7,7	7,7	17,4	3
1	20	7,2	7,2	18,2	3
1	21	7,8	7,8	18,2	3
1	22	8,7	8,7	9,4	3
1	23	8,1	8,1	10,8	3
1	24	7,4	7,4	11	3

III. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3^ο:

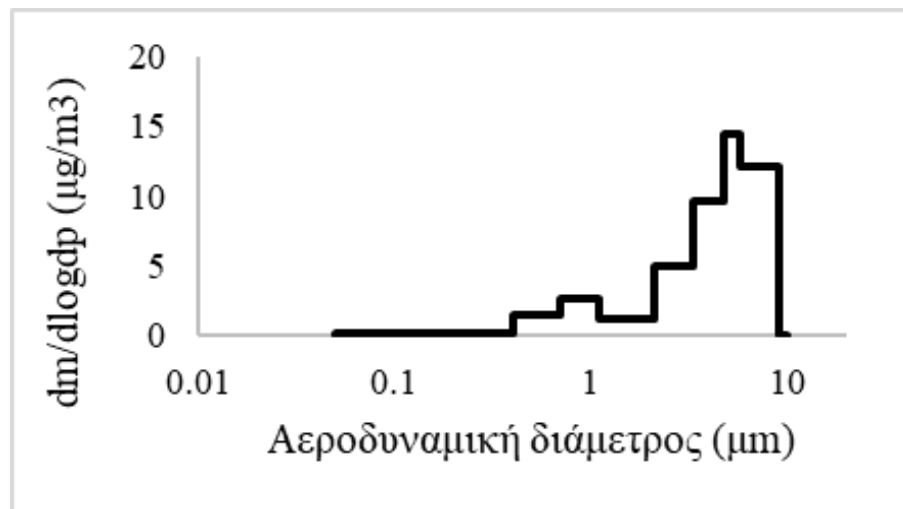
Αναλυτικά οι κατανομές μάζας για κάθε φίλτρο που τοποθετήθηκε ανά ημέρα στον προσκρουστήρα διαχωρισμού Andersen (Andersen Cascade Impactor)

1. (09 Ιουνίου 2020)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 9 Ιουνίου 2020

2. (11 Ιουνίου 2020)



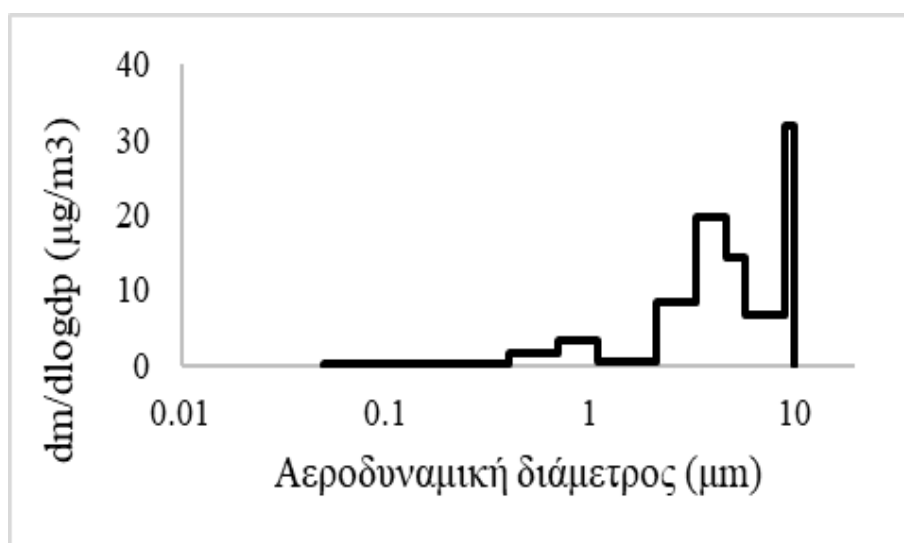
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 11 Ιουνίου 2020

3. (17 Ιουνίου 2020)



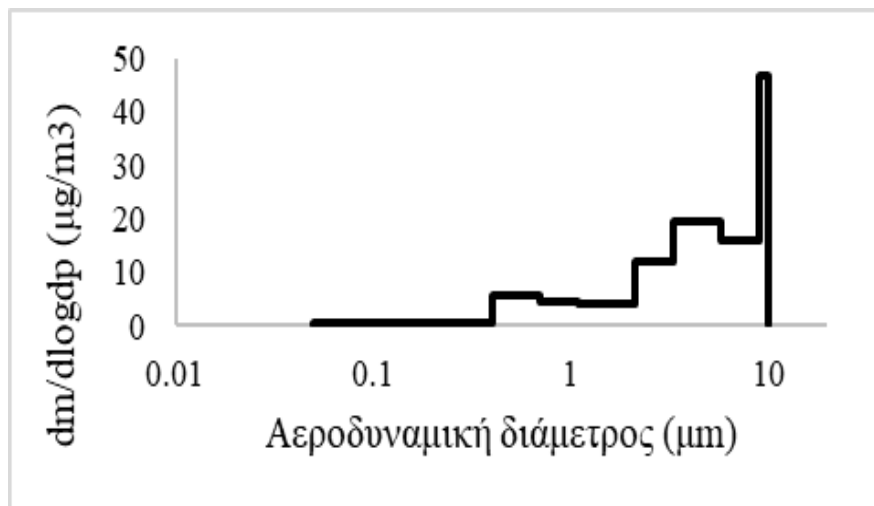
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 17 Ιουνίου 2020

4. (18 Ιουνίου 2020)



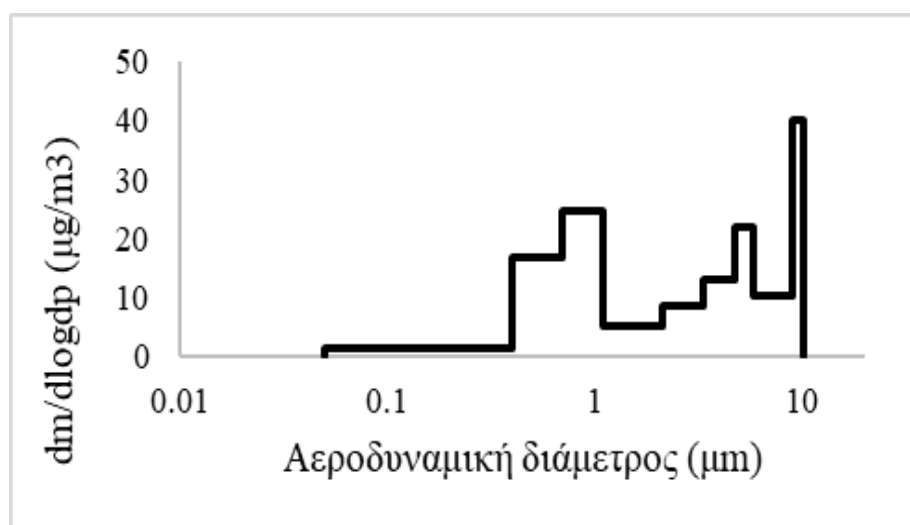
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 18 Ιουνίου 2020

5. (23 Ιουνίου 2020)



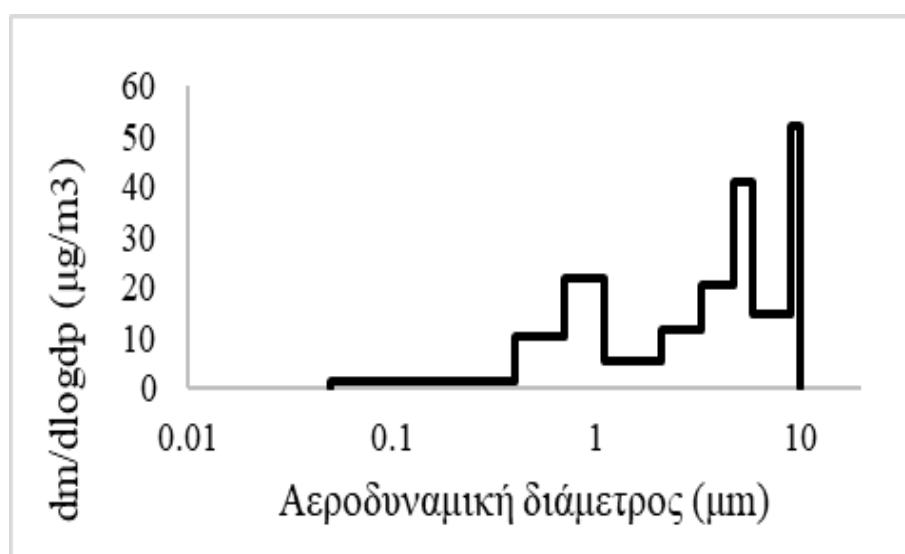
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 23 Ιουνίου 2020

6. (01 Ιουλίου 2020)



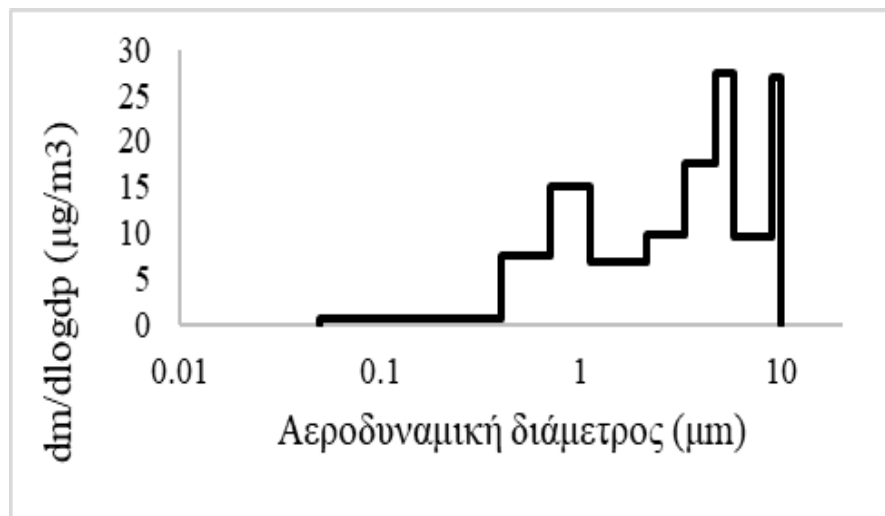
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 1^η Ιουλίου 2020

7. (06 Ιουλίου 2020)



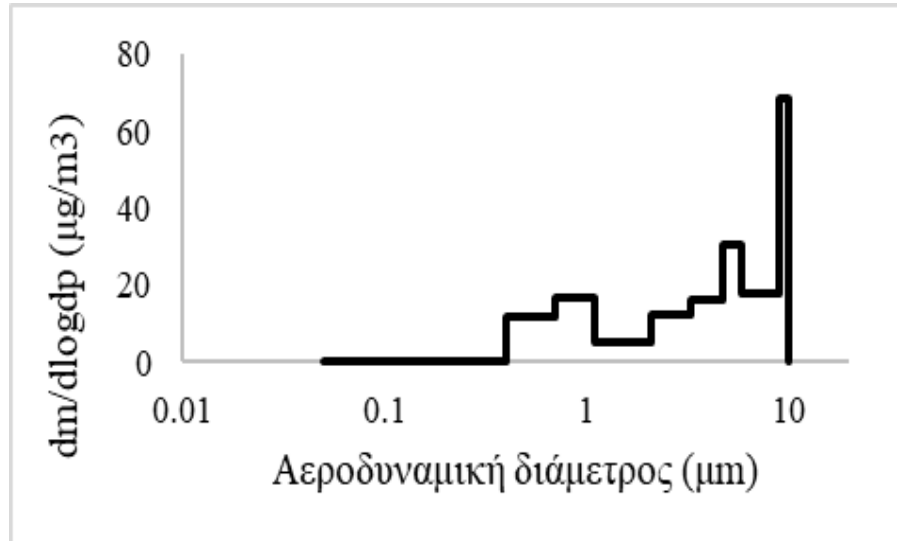
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 6 Ιουλίου 2020

8. (07 Ιουλίου 2020)



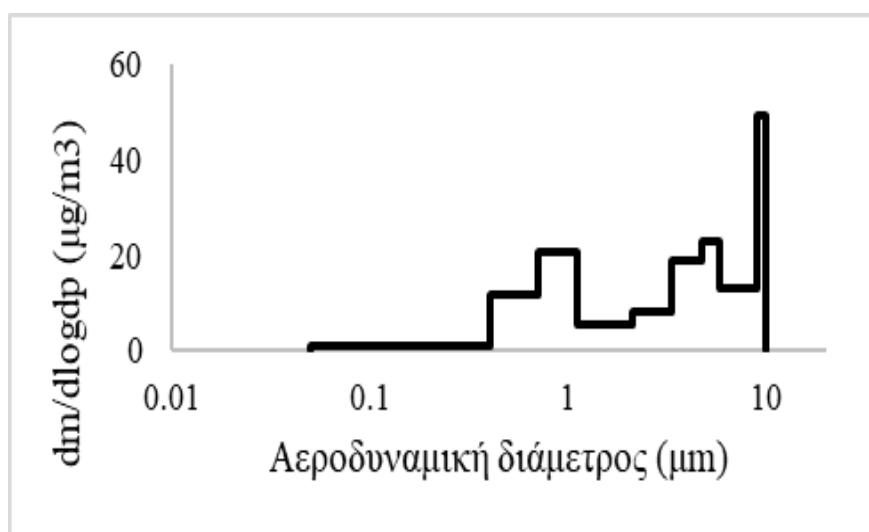
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 7 Ιουλίου 2020

9. (20 Ιουλίου 2020)



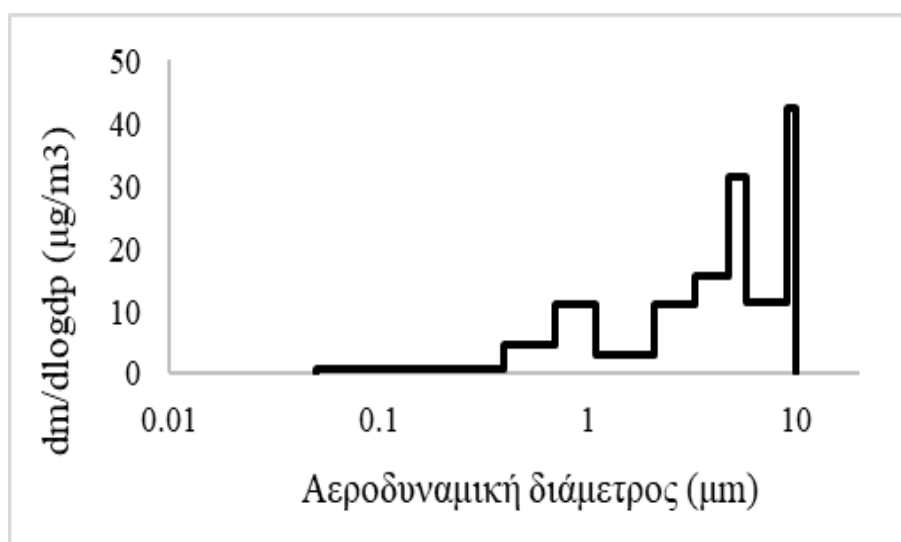
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 20 Ιουλίου 2020

10. (21 Ιουλίου 2020)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 21 Ιουλίου 2020

11. (22 Ιουλίου 2020)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: Κατανομή μάζας σωματιδίων για 22 Ιουλίου 2020