



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Ανάλυση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης των
αιωρούμενων σωματιδίων (AS_{10}) στην περιοχή του Ακρωτηρίου
Χανίων: Μελέτη της Αφρικανικής σκόνης και επίδραση τοπικών και
απομακρυσμένων πηγών»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΡΖΙΔΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Λαζαρίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και για την καθοδήγησή του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω εξίσου στην κ. Σοφία-Ειρήνη Χατουτσίδου για την πολύτιμη υποστήριξή της και τις χρήσιμες συμβουλές της, που με βοήθησαν να εξελίξω την εργασία μου.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που είναι πάντα στο πλευρό μου και πιστεύουν σε εμένα...



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Ανάλυση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης των
αιωρούμενων σωματιδίων (AS_{10}) στην περιοχή του Ακρωτηρίου
Χανίων: Μελέτη της Αφρικανικής σκόνης και επίδραση τοπικών και
απομακρυσμένων πηγών»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΡΖΙΔΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

Τριμελής Επιτροπή

Καθ. Λαζαρίδης Μιχαήλ (επιβλέπων)

Καθ. Βουλγαράκης Απόστολος

Δρ. Χατουτσίδου Σοφία-Ειρήνη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
ABSTRACT.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Αιωρούμενα Σωματίδια	15
1.1 Ορισμός αιωρούμενων σωματιδίων.....	15
1.2 Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων.....	15
1.2.1 Μέγεθος των σωματιδίων.....	15
1.2.2 Σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων.....	21
1.2.3 Πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων.....	23
1.2.4 Συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων	23
1.2.5 Αριθμητική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων	24
1.2.6 Χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων.....	24
1.3 Κατανομές μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων	26
1.4 Κατάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της συμπεριφοράς τους στο αναπνευστικό σύστημα	33
1.4.1 Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα	34
1.5 Βασικές φυσικές διεργασίες των αιωρούμενων σωματιδίων	37
1.5.1 Πυρηνοποίηση	37
1.5.2 Συσσωμάτωση.....	37
1.5.3 Συμπύκνωση-Εξάτμιση.....	38
1.5.4 Επαναίωση.....	39
Κεφάλαιο 2: Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων	41
2.1 Ο ρόλος των ΑΣ ₁₀ στον ανθρώπινο οργανισμό.	41
2.2 Ο ρόλος των ΑΣ ₁₀ στο κλίμα	45
2.3 Ο ρόλος των ΑΣ ₁₀ στην ατμοσφαιρική ρύπανση	48
Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις ΑΣ₁₀ στην περιοχή δειγματοληψίας	51
3.1 Περιοχή μελέτης	51
3.2 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, SHARP MONITOR	52
3.3 Μοντέλο HYSPLIT	55
3.4 Δορυφορικές εικόνες NASA.....	56
3.5 Μετεωρολογικά δεδομένα	56
Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων.....	57
4.1 Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ ₁₀	57
4.2 Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ ₁₀	60
4.3 Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ ₁₀	62

4.4 Μελέτη επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα	64
4.5 Σύγκριση συγκεντρώσεων μάζας AS_{10} των καθημερινών με τα Σαββατοκύριακα	68
4.6 Σύγκριση συγκεντρώσεων του έτους 2022 με το έτος 2023	70
4.7 Σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των AS_{10} και των μετεωρολογικών παραμέτρων	75
4.8 Κατανομή ανέμων κατά διεύθυνση και ταχύτητα (ροδόγραμμα)	77
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	82

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Τυπικές συγκεντρώσεις μάζας εκφρασμένες σε μέρη στο εκατομμύριο για μοναδιαία πυκνότητα σωματιδίων 1 g cm^{-3} ή 1000 kg m^{-3} (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).....	24
Πίνακας 4.1: Στατιστικές παράμετροι των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} για το έτος 2023. Εύρεση της ελάχιστης και της μέγιστης συγκέντρωσης, καθώς και του μέσου όρου των συγκεντρώσεων και ταξινόμηση αυτών σε εκατοστημόρια. Οι συγκεντρώσεις δίνονται σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$	58
Πίνακας 4.2: Ημερομηνίες όπου σημειώθηκαν υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.), δηλαδή μετρήσεις των συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} μεγαλύτερες από $50 \mu\text{g m}^{-3}$ και $45 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα.....	59
Πίνακας 4.3: Συνοπτική μηνιαία παρουσίαση των βασικών στατιστικών παραμέτρων των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} για το έτος 2023. Εύρεση της ελάχιστης και της μέγιστης συγκέντρωσης, καθώς και του μέσου όρου των συγκεντρώσεων και ταξινόμηση αυτών σε εκατοστημόρια. Οι συγκεντρώσεις δίνονται σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$	60
Πίνακας 4.4: Ημέρες με επεισόδια σκόνης και οι αντίστοιχες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των AS_{10} σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$ (με αστερίσκο συμβολίζονται οι ημέρες όπου υπήρξαν υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων βάσει 24ώρου της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ.).....	65
Πίνακας 4.5: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για τα έτη 2022 και 2023.....	71

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων βάσει του μεγέθους τους (Λαζαρίδης, 2010).....	17
Σχήμα 1.2: α) Σχήμα ενός ακανόνιστου σωματιδίου και η μορφοποίηση αυτού σε β) σχήμα σφαίρας με ισοδύναμη διάμετρο Stokes και σε γ) σχήμα σφαίρας με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).....	21
Σχήμα 1.3: Έυρος συγκέντρωσης μάζας αερολυμάτων (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).....	23
Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων και διεργασιών που αφορούν τη χημική σύνθεση των σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2015).....	26

Σχήμα 1.5: Καμπύλη κατανομής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999)	31
Σχήμα 1.6: Αριθμητική κατανομή και κατανομή μάζας σε λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).....	32
Σχήμα 1.7: Κατανομή μάζας χωρίς λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).....	32
Σχήμα 1.8: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας που προκαλεί πιθανές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό μετά την εκπομπή των ατμοσφαιρικών ρύπων (Λαζαρίδης, 2010).....	33
Σχήμα 1.9: Διάκριση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα συναρτήσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αντιστοιχεί στη διείσδυση στην εκάστοτε περιοχή (Λαζαρίδης, 2010).....	35
Σχήμα 1.10: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (καθίζηση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).....	35
Σχήμα 1.11: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (διάχυση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).....	36
Σχήμα 1.12: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (αναχαίτιση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).....	36
Σχήμα 1.13: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ηλεκτροστατική καθίζηση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).....	36
Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας που προκαλεί πιθανές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό μετά την εκπομπή των ατμοσφαιρικών ρύπων (Λαζαρίδης, 2010).....	44
Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στα φαινόμενα των νεφών και κατ'επέκταση στην ακτινοβολία. Οι μικρές μαύρες κουκκίδες απεικονίζουν τα σωματίδια αερολυμάτων, ενώ οι μεγαλύτεροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις σταγόνες νεφών. Οι ευθείες γραμμές απεικονίζουν την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι κυματιστές γραμμές την επίγεια ακτινοβολία. Οι γεμάτοι λευκοί κύκλοι υποδεικνύουν τη συγκέντρωση των σταγονιδίων νεφών (αναπροσαρμοσμένο από Colbeck και Lazaridis, 2014).....	48
Σχήμα 3.1: α) Δορυφορική φωτογραφία της τοποθεσίας του σταθμού (από Google Earth) και β) φωτογραφία του σταθμού στο Πολυτεχνείο Κρήτης.....	51
Σχήμα 3.2: α) Sharp Monitor, Model 5030i (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2018) και β) Sharp Monitor, Model 5030i στον σταθμό του Πολυτεχνείου Χανίων.....	52

Σχήμα 3.3 : Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του SHARP MONITOR (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2018).....54

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις μάζας των AS_{10} κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) και υπόδειξη των υπερβάσεων με βάση τα ημερήσια νομοθετικά όρια της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ. (η πορτοκαλί γραμμή με τιμή $50 \mu g m^{-3}$ αναπαριστά το ημερήσιο νομοθετικό όριο της Ε.Ε., ενώ η πράσινη γραμμή με τιμή $45 \mu g m^{-3}$ το ημερήσιο νομοθετικό όριο του Π.Ο.Υ.) Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.....57

Διάγραμμα 4.2: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} ανά μήνα του έτους 2023. Το πλαίσιο/ενδοτεταρτημόριο (interquartile) αντιπροσωπεύει το 25°, 50° και 75° τεταρτημόριο. Η γραμμή εντός του πλαισίου αντιστοιχεί στη διάμεση τιμή (50° τεταρτημόριο). Οι απολήξεις (whiskers) ποικίλλουν μεταξύ των τιμών που αντιστοιχούν στο 75° τεταρτημόριο συν την επί ενάμιση φορές μεγαλύτερη τιμή του εύρους του πλαισίου (interquartile range) και στο 25° τεταρτημόριο πλην την επί ενάμιση φορές μεγαλύτερη τιμή του εύρους του πλαισίου. Τα τρίγωνα αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές, ενώ τα τετράγωνα τις μέσες τιμές.....61

Διάγραμμα 4.3: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας των AS_{10} ανά μήνα κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) με διαφορετικούς άξονες γ για την καλύτερη απεικόνιση των διακυμάνσεων. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.....62

Διάγραμμα 4.4: Εικόνες της οπισθοπορείας των αέριων μαζών από το μοντέλο HYSPLIT για τις ημέρες α) 6/11 με μέση ημερήσια συγκέντρωση $146,6 \mu g m^{-3}$ και β) 1/3 με μέση ημερήσια συγκέντρωση $53,8 \mu g m^{-3}$ όπου σημειώθηκαν επεισόδια σκόνης και οι αντίστοιχες εικόνες από το δορυφόρο.....66

Διάγραμμα 4.5: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} ανά μήνα για τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023.....67

Διάγραμμα 4.6: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας των AS_{10} των καθημερινών και των Σαββατοκύριακων ανά μήνα κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) με διαφορετικούς άξονες γ για την καλύτερη απεικόνιση των διακυμάνσεων. Από τις μετρήσεις έχουν αφαιρεθεί τα δεδομένα των ημερομηνιών όπου σημειώθηκαν οι υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων, καθώς όλες αντιστοιχούν σε ημέρες με επεισόδια σκόνης. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.....69

Διάγραμμα 4.7: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} ανά μήνα για τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023.....	70
Διάγραμμα 4.8: Ιστόγραμμα των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας AS_{10} για τις μετρούμενες χρονικές περιόδους 2022 και 2023 (δεν απεικονίζονται 5 παρατηρήσεις που σημείωσαν συγκέντρωση μεγαλύτερη από $80 \mu g m^{-3}$).....	72
Διάγραμμα 4.9: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} για τις ημέρες χωρίς σκόνη (Η.Χ.Σ.) για τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023.....	74
Διάγραμμα 4.10: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης α) μεταξύ της συγκέντρωσης των AS_{10} και της σχετικής υγρασίας, β) της ταχύτητας του ανέμου και γ) της θερμοκρασίας.....	75
Διάγραμμα 4.11: Ροδογράμματα για όλους τους μήνες της δειγματοληψίας.....	78

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ανάλυση της μεταβλητότητας της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο έως 10 μm , AS_{10} κατά τη διάρκεια του έτους 2023 (με εξαίρεση τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο) όπως αυτές καταγράφηκαν στον σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων, καθώς και πως επηρεάζεται από τοπικές και απομακρυσμένες πηγές. Ακόμη, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον εντοπισμό και τη μελέτη των ημερών όπου υπήρξε μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα, καθώς και στη συνεισφορά τους στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων AS_{10} .

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των AS_{10} πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικό χρόνο, με καταγραφή μετρήσεων κάθε 15 λεπτά σε όλη τη διάρκεια της δειγματοληπτικής περιόδου, χρησιμοποιώντας το όργανο Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate (SHARP) Monitor. Για να αναγνωριστούν τα επεισόδια σκόνης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HYSPLIT αλλά και εικόνες από δορυφόρο της NASA. Οι μετεωρολογικές παράμετροι στον σταθμό του Ακρωτηρίου καταγράφονταν ανά 10 min, με έναν αισθητήρα ταχύτητας ανέμου 4034BG, έναν αισθητήρα κατεύθυνσης ανέμου 4122BG και έναν συνδυασμένο αισθητήρα θερμοκρασίας/υγρασίας 3030 BG.

Οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των AS_{10} για το έτος 2023 κυμάνθηκαν από 5,8 $\mu\text{g m}^{-3}$ έως 146,6 $\mu\text{g m}^{-3}$. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις σημειώθηκαν τον Νοέμβριο, καθώς τότε καταγράφηκαν τα περισσότερα επεισόδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα, ενώ οι χαμηλότερες καταγράφηκαν τον μήνα Απρίλιο, καθώς τότε δεν υπήρχε η ανάγκη για οικιακή θέρμανση, και δεν είχε ξεκινήσει ακόμα η τουριστική περίοδος. Συνολικά για το έτος 2023 σημειώθηκαν 43 ημέρες με επεισόδια σκόνης, εκ των οποίων μόλις σε 4 ημέρες σημειώθηκε υπέρβαση του 24ώρου νομοθετικού ορίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης και σε 6 ημέρες υπέρβαση του αντίστοιχου ορίου του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας. Δηλαδή, μόνο το 14% των ημερών με σκόνη συνοδεύτηκε με υπέρβαση των νομοθετικών ορίων. Ακόμη, φαίνεται πως σχεδόν για όλους τους μήνες υπήρξε αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης τις πρωινές ώρες λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων, με την συνεισφορά των εκπομπών καυσαερίων που παράγονται από τα οχήματα να είναι πιο έντονη τους καλοκαιρινούς μήνες, διότι τότε υπήρξε αύξηση του τουρισμού. Τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων τις απογευματινές-βραδινές ώρες, λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που συνδέονται με ανάγκη για οικιακή θέρμανση.

Επιπλέον, συγκρίνοντας τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των AS_{10} μεταξύ του έτους 2022 με αυτές του 2023, βρέθηκε ότι το 2022 καταγράφηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με το 2023. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο ετών παρατηρήθηκε τον Απρίλιο, όπου η διάμεση συγκέντρωση

για το 2022 ήταν $28,4 \mu\text{g m}^{-3}$ ενώ για το 2023 ήταν $12,2 \mu\text{g m}^{-3}$. Οι διαφορές που υπήρξαν ανάμεσα στα δύο έτη οφείλονταν κυρίως στην εμφάνιση των επεισοδίων σκόνης.

ABSTRACT

The present thesis examined the variability of PM₁₀ (particulate matter with a diameter of up to 10 µm) concentrations during the year 2023 (excluding August and September), as recorded at the Akrotiri monitoring station which is located at Chania. The objective was to study the influence of local and regional sources to PM₁₀ concentrations. Particular emphasis was given to the identification and study of days with dust transport from the Sahara Desert, and their contribution to PM₁₀ concentrations.

PM₁₀ concentrations were measured online, with data recorded every 15 minutes throughout the sampling period, using the Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate (SHARP) Monitor. To identify dust episodes, the HYSPLIT model was employed, along with satellite images from NASA. Meteorological parameters at the Akrotiri station were recorded every 10 minutes using a 4034BG wind speed sensor, a 4122BG wind direction sensor, and a 3030 BG combined temperature/humidity sensor.

The average daily PM₁₀ concentrations during 2023 ranged from 5.8 µg m⁻³ to 146.6 µg m⁻³. The highest concentrations were recorded in November, as this is when the majority of dust episodes from the Sahara Desert occurred, while the lowest concentrations were recorded in April, since there was no need for domestic heating at that time, and the tourist season had not yet begun. In total, 43 dust days were recognized in 2023, with only 4 days exceeding the European Union 24-hour legislative limit, and 6 days exceeding the corresponding limit of the World Health Organization. Thus, only 14% of the dusty days corresponded to concentrations higher than the regulatory limits. Furthermore, it appears that for almost all months, there was an increase in concentration levels during the morning hours due to vehicle traffic, with the contribution from vehicle emissions becoming more pronounced during the summer months, when tourism increased. During the winter and autumn months, PM₁₀ concentrations increased in the afternoon and evening, due to low temperatures and the corresponding need for domestic heating.

Furthermore, comparison of the average daily PM₁₀ concentrations between 2022 and 2023, has shown that higher concentrations were measured in 2022 compared to 2023. The most significant difference in PM₁₀ levels between the two years corresponded to April, with the median concentration in 2022 being 28.4 µg m⁻³, while in 2023 it was 12.2 µg m⁻³. The differences between the two years were mainly due to the occurrence of dust episodes.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) (particulate matter, PM) συμβάλλουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα περιβαλλοντικά προβλήματα του σύγχρονου κόσμου. Καθώς η ανθρωπότητα εστίαζε μόνο στην ανάπτυξη και την εκβιομηχάνιση, χωρίς να αντιλαμβάνεται τις μακροπρόθεσμες συνέπειες των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον. Τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή στερεών ή υγρών μικροσκοπικών σωματιδίων, προέρχονται από διάφορες φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Φυσικές πηγές όπως η βλάστηση, που απελευθερώνει οργανικά σωματίδια μέσω της διάσπασης των φύλλων και της γύρης, το θαλάσσιο σπρέι που δημιουργεί σωματίδια αλατιού μέσω της εξάτμισης των υδάτων, καθώς και η εδαφική σκόνη, η οποία ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα από τους ανέμους και λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων. Οι ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν τις βιομηχανικές διεργασίες, οι οποίες απελευθερώνουν σωματίδια μέσω της καύσης καυσίμων και της επεξεργασίας μετάλλων, την καύση ορυκτών καυσίμων, τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον τομέα της ενέργειας, την κυκλοφορία των οχημάτων, η οποία απελευθερώνει σωματίδια από την καύση καυσίμων και τη φθορά των φρένων και των ελαστικών, καθώς και τις δραστηριότητες όπως η κατασκευή κτιρίων και οι χωματουργικές εργασίες, που παράγουν σωματίδια σκόνης.

Ωστόσο, οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στη δημόσια υγεία, τόσο οι βραχυπρόθεσμες όσο και οι μακροπρόθεσμες, προέρχονται κατά κύριο λόγο από τις εκπομπές ανθρωπογενών πηγών. Στις βραχυπρόθεσμες αρνητικές επιπτώσεις περιλαμβάνεται η υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα, όπου ανάλογα με το μέγεθος και τη χημική σύνθεση των αιωρούμενων σωματιδίων, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, όπως αναπνευστικά προβλήματα, καρδιαγγειακές παθήσεις, ακόμα και καρκίνο. Στις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις περιλαμβάνεται η αύξηση της οξύτητας των υδάτινων συστημάτων, των λιμνών και των ποταμών, εξαιτίας των όξινων κατακρημνίσεων (όξινη βροχή). Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια συντελούν στην υποβάθμιση των ανθρώπινων κατασκευών, όπως τα κτίρια, λόγω της διάβρωσης των δομικών υλικών, αλλά και στην καταστροφή της στιβάδας του όζοντος στη στρατόσφαιρα, με αποτέλεσμα την αυξημένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Ακόμη, τα αιωρούμενα σωματίδια συνεισφέρουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ προκαλούν σημαντικές κλιματικές και ατμοσφαιρικές μεταβολές μέσω της διασποράς και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παράλληλα, επηρεάζουν τον σχηματισμό των νεφών και εκθέτουν τα οικοσυστήματα σε επικίνδυνες χημικές ουσίες (EMEP/CORINAIR, 2002).

Η καταγραφή των συγκεντρώσεων των αέριων ρύπων (συμπεριλαμβανομένων και των αιωρούμενων σωματιδίων) είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς προσφέρει μια πλήρη εικόνα της ποιότητας του αέρα

και αποτελεί τη βάση για όλα τα προγράμματα διαχείρισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης των αέριων ρύπων, ποσοτικοποιείται η εκπομπή των αέριων ρύπων, προσδιορίζονται οι κύριες πηγές εκπομπής και εντοπίζονται οι περιοχές με σοβαρά προβλήματα ρύπανσης. Επιπλέον, η μελέτη των αέριων ρύπων συνεισφέρει στην ανάπτυξη, επιλογή και εφαρμογή στρατηγικών για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και στη λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την εκτίμηση του κόστους των περιβαλλοντικών πολιτικών (Λαζαρίδης, 2010). Ως αποτέλεσμα, η μελέτη αυτή συμβάλλει στην υιοθέτηση δράσεων για τον περιορισμό των αέριων ρύπων, με την καθιέρωση νομοθετικών ορίων που αποσκοπούν στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και, συνεπώς, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 10 μm , $\text{A}_{\Sigma 10}$ και την αξιολόγηση των τοπικών αλλά και απομακρυσμένων πηγών. Οι μετρήσεις των $\text{A}_{\Sigma 10}$ πραγματοποιήθηκαν στον σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων που βρίσκεται εντός της Πολυτεχνειούπολης και είχαν διάρκεια ενός χρόνου (2023).

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα Αιωρούμενα Σωματίδια

1.1 Ορισμός αιωρούμενων σωματιδίων

Ατμοσφαιρικά αιωρήματα ή αερολύματα (aerosol) ή αλλιώς αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) ονομάζονται όλα τα σταθερά αιωρήματα στερεών ή υγρών ή και συνδυασμός αυτών στον αέρα. Εξ ορισμού τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα είναι συνδυασμός όλων των συμπυκνωμένων συστατικών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, όπως και ο αέρας στον οποίο αυτά περιλαμβάνονται. Ωστόσο, πολλές φορές ο όρος ατμοσφαιρικά αιωρήματα ταυτίζεται μόνο με το σωματιδιακό τμήμα αυτών, όπως και στη παρούσα διπλωματική εργασία. Τα αερολύματα καλύπτουν μια εκτενή ποικιλία φαινομένων όπως είναι η σκόνη, η ομίχλη, η αιθαλομίχλη και ο καπνός (Colbeck και Lazaridis, 2014).

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν προέλευση τόσο από φυσικές πηγές (σκόνη από τον φλοιό της γης, ηφαιστειακή ύλη, θάλασσα) όσο και από ανθρωπογενείς πηγές (εκπομπές αυτοκινήτων, βιομηχανιών, καύση ξύλου και άνθρακα). Ως πρωτογενή αερολύματα (primary aerosol) χαρακτηρίζονται τα αιωρήματα που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα άμεσα από τις πηγές, ενώ ως δευτερογενή αερολύματα (secondary aerosol) χαρακτηρίζονται αυτά που προκύπτουν από χημικές αντιδράσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρωτογενών αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων χημικών ουσιών στην ατμόσφαιρα (Λαζαρίδης, 2010). Τα αιωρούμενα σωματίδια ποικίλλουν σε σχέση με τη συγκέντρωσή τους, τα φυσικοχημικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά τους (Hinds, 1999).

1.2 Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

1.2.1 Μέγεθος των σωματιδίων

Το μέγεθος των σωματιδίων είναι η σημαντικότερη παράμετρος για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των αερολυμάτων, καθώς επηρεάζει τόσο τις ιδιότητές τους όσο και τους φυσικούς νόμους που τις διέπουν. Ορισμένες ιδιότητες, όπως η επιφάνεια επαφής και η διασπορά των σωματιδίων, εξαρτώνται ιδιαίτερα έντονα από το μέγεθός τους. Όταν όλα τα σωματίδια ενός αερολύματος έχουν το ίδιο μέγεθος, τότε ονομάζονται «μονοδιάσπορα». Τα μονοδιάσπορα αερολύματα συνήθως παράγονται στο εργαστήριο, τυπικά με διάμετρο σωματιδίων που διαφέρει κατά λίγο. Αντιθέτως, στην πιο συνηθισμένη περίπτωση έχουν διαφορετικά μεγέθη και ονομάζονται «πολυδιάσπορα».

Ακόμη, όταν σε ένα αερόλυμα όλα τα σωματίδια έχουν πανομοιότυπη χημική σύσταση, τότε καλείται «ομοιογενές» (Baron και Willeke, 2001; Colbeck και Lazaridis, 2014).

Ο καθορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων είναι μια σημαντική παράμετρος για τη χημική σύσταση, τις οπτικές ιδιότητες και τους μηχανισμούς εναπόθεσης των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων. Σύμφωνα με τον Λαζαρίδη (2015), η κατηγοριοποίηση τους ως προς το μέγεθος μπορεί να γίνει:

- (1) Βάσει των παρατηρούμενων κατανομών (modal distribution).
- (2) Βάσει του 50% της διαμέτρου αποκοπής του οργάνου μετρήσεως (cut-off diameter).
- (3) Βάσει δοσιμετρικών ποσοτήτων ή ποσοτήτων σχετιζόμενων με την έκθεση του πληθυσμού στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων.

Η μέθοδος κατηγοριοποίησης (1) των αιωρούμενων σωματιδίων, διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

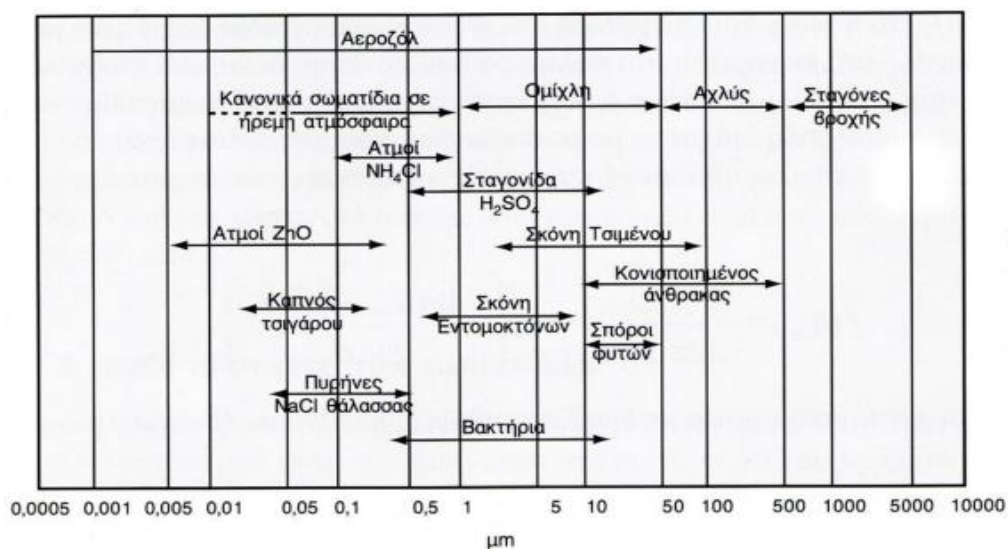
- *Μικροί πυρήνες (nucleation mode)*: Σωματίδια διαμέτρου $3 \text{ nm} < d < 10 \text{ nm}$, τα οποία έχουν δημιουργηθεί μέσω διεργασιών πυρηνοποίησης. Ωστόσο, τα κατώτερα όρια δεν είναι απόλυτα σαφή.
- *Σωματίδια Άιτκεν (Aitkin mode)*: Σωματίδια διαμέτρου $10 \text{ nm} < d < 100 \text{ nm}$, τα οποία προέρχονται από την πυρηνοποίηση αερίων ή από σωματίδια πυρήνων σαν αποτέλεσμα της αύξησης του μεγέθους τους.
- *Σωματίδια στην περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode)*: Σωματίδια διαμέτρου $0,1 \text{ }\mu\text{m} < d < 1 \text{ }\mu\text{m}$, τα οποία δημιουργούνται είτε κατά τη συσσωμάτωση των μικρότερων σωματιδίων, είτε κατά τη συμπύκνωση αερίων συστατικών. Ονομάζονται σωματίδια συσσώρευσης, καθώς οι μηχανισμοί απομάκρυνσης σε τέτοια μεγέθη είναι πολύ αργοί, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται συσσώρευση τους στη περιοχή αυτή.
- *Υπέρλεπτα σωματίδια (ultrafine particles)*: Περιέχει τις κατηγορίες Aitkin mode και nucleation mode.
- *Λεπτά σωματίδια (fine particles)*: Περιέχει τις κατηγορίες πυρηνοποίησης (nucleation), Aitkin και της περιοχής συσσώρευσης (accumulation mode).
- *Χονδρά σωματίδια (coarse particles/mode)*: Σωματίδια διαμέτρων μεγαλύτερων από την ελάχιστη τιμή στην κατανομή των ολικών σωματιδίων. Συνήθως $d > 1\text{-}3 \text{ }\mu\text{m}$.

Η μέθοδος κατηγοριοποίησης (2) των αιωρούμενων σωματιδίων, αναφέρεται στο σημείο όπου ένα όργανο μέτρησης μπορεί να συλλέξει ή να διαχωρίσει τα σωματίδια με συγκεκριμένη ακρίβεια.

Συγκεκριμένα, το «50% cut-off diameter» είναι η διάμετρος στην οποία η απόδοση μέτρησης είναι 50% (Tran κ.ά, 2020). Δηλαδή, είναι η διάμετρος σωματιδίων στην οποία το όργανο συλλέγει ακριβώς το 50% των σωματιδίων αυτού του μεγέθους. Αυτό σημαίνει ότι για σωματίδια μικρότερης διαμέτρου, το ποσοστό συλλογής θα είναι χαμηλότερο από 50%, ενώ για σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου, το ποσοστό συλλογής θα είναι μεγαλύτερο.

Η μέθοδος κατηγοριοποίησης (3) των αιωρούμενων σωματιδίων, συνήθως διαχωρίζεται στις κατηγορίες $AS_{2,5}$ και AS_{10} , όπου ο δείκτης υποδεικνύει τη μέγιστη αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων.

Όσον αφορά τη διάμετρο των αιωρούμενων σωματιδίων, αυτή αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό τους, καθώς καθορίζει το μέγεθος τους. Η διάμετρος κυμαίνεται από τα 0,001 μm σε μικροσκοπική κλίμακα έως και πάνω από 100 μm σε μακροσκοπική κλίμακα (Λαζαρίδης, 2015). Στο Σχήμα 1.1, φαίνονται οι κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, λαμβάνοντας υπόψη την προέλευση και τη σύστασή τους, καθώς και το μέγεθος τους (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων βάσει του μεγέθους τους (Λαζαρίδης, 2010).

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους ενός σφαιρικού σωματιδίου μοναδιαίας πυκνότητας (1 g cm^{-3}) χρησιμοποιείται η γεωμετρική διάμετρος. Ωστόσο, επειδή τα περισσότερα σωματίδια στη φύση ούτε

είναι σφαιρικά, δηλαδή έχουν ακανόνιστη μορφή, αλλά ούτε έχουν μοναδιαία πυκνότητα, χρησιμοποιούνται άλλες παράμετροι για τον προσδιορισμό του μεγέθους τους, οι οποίες είναι:

- **Θερμοδυναμική ισοδύναμη διάμετρος, d_{th}** (thermodynamic equivalent diameter):

Είναι η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει τον ίδιο συντελεστή διάχυσης με το μη σφαιρικό σωματίδιο που εξετάζεται ή αλλιώς που παρουσιάζουν την ίδια αντίσταση στον αέρα όταν κινούνται. Χρησιμοποιείται για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,5 μm (Colbeck και Lazaridis, 2014; Λαζαρίδης 2010).

$$d_{th} = \frac{kTC_c(d_{th})}{3\pi\mu D} \quad (1.1)$$

Όπου T: η απόλυτη θερμοκρασία (310,15 K).

k: η σταθερά του Boltzmann ($0,014 \cdot 10^{-23} \text{ J grad}^{-1}$).

μ : το δυναμικό ιξώδες του αέρα ($1,90 \cdot 10^{-4} \text{ Poise}$).

D: ο συντελεστής διάχυσης του σωματιδίου στο ρευστό ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$).

$C_c(d_{th})$: ο συντελεστής διόρθωσης του Cunningham που δηλώνει την απόκλιση της οπισθέλκουσας δύναμης από τον νόμο του Stokes.

Αναφορικά με τον νόμο του Stokes και τον συντελεστή διόρθωσης Cunningham:

Ο νόμος του Stokes περιγράφει τη δύναμη τριβής που δρα σε ένα σωματίδιο κατά την κίνησή του μέσα σε ένα ρευστό. Ισχύει για ροές με πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds ($Re < 1$), δηλαδή για περιπτώσεις όπου η ροή είναι στρωτή και το σωματίδιο κινείται αργά μέσα στο ρευστό (Drossinos και Housiadas, 2006).

Ο αριθμός Reynolds του σωματιδίου, Re δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{d_p V}{\nu_g} \quad (1.2)$$

Όπου d_p : η διάμετρος του σωματιδίου (m).

V: η μέση ταχύτητα του σωματιδίου σε σχέση με το ρευστό (m s^{-1}).

ν_g : το κινηματικό ιξώδες ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$).

Η δύναμη η οποία ασκείται πάνω στο σωματίδιο προκύπτει από την ολοκλήρωση των κανονικών και εφαπτόμενων δυνάμεων πάνω στην επιφάνεια του. Η συνολική αντίσταση, F_D που δρα σε ένα μικρό σφαιρικό σωματίδιο προκύπτει από τη σχέση (Hinds, 1999):

$$F_D = \frac{3\pi\eta V d_p}{C_c} \quad (1.3)$$

Όπου V : η ταχύτητα του σωματιδίου μέσα στο ρευστό ($m\ s^{-1}$).

d_p : η διάμετρος του σωματιδίου (m).

η : το κινηματικό ιξώδες ($m^2\ s^{-1}$).

C_c : ο συντελεστής διόρθωσης του Cunningham, ο οποίος για τη γεωμετρική διάμετρο ισούται με:

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2.34 + 1.05 \exp \left(-0.39 \frac{d_p}{\lambda} \right) \right] \quad (1.4)$$

Όπου λ : η μέση απόσταση που διανύει ένα μόριο πριν συγκρουστεί με ένα άλλο (Baron και Willeke, 2001). Σε συνθήκες πίεσης 1 atm και θερμοκρασίας 20 °C, όπου ισούται με 0,066 μm (Colbeck και Lazaridis, 2014).

• **Ισοδύναμη διάμετρος όγκου, d_e** (Volume equivalent diameter):

Είναι διάμετρος μιας σφαίρας που έχει τον ίδιο όγκο με του μη σφαιρικού σωματιδίου που εξετάζεται. Μπορεί να ερμηνευτεί και ως η διάμετρος της σφαίρας που θα προέκυπτε, εάν το μη σφαιρικό σωματίδιο έλιωνε για να σχηματίσει ένα σταγονίδιο (Colbeck και Lazaridis, 2014; Hinds, 1999).

$$d_e = \left(\frac{6V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

Όπου V : ο όγκος του σωματιδίου (m^3).

• **Ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος, d_a** (Equivalent aerodynamic diameter):

Είναι η διάμετρος μιας σφαίρας με πυκνότητα 1 $g\ cm^{-3}$ που έχει τον ίδιο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα με του μη σφαιρικού σωματιδίου που εξετάζεται. Χρησιμοποιείται για σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη των 0,5 μm . Αποτελεί μια πολύ χρήσιμη παράμετρο, καθώς συνδέεται όχι μόνο

με τον χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, αλλά και με την απόθεση τους στο αναπνευστικό σύστημα (Colbeck και Lazaridis, 2014; Λαζαρίδης, 2010).

$$d_a = d_e \sqrt{\frac{\rho}{\chi \rho_0} \cdot \frac{C_c(d_e)}{C_c(d_a)}} \quad (1.6)$$

Όπου d_e : η ισοδύναμη διάμετρος όγκου (cm).

ρ : η πυκνότητα του σωματιδίου (g cm^{-3}).

ρ_0 : η μοναδιαία πυκνότητα (1 g cm^{-3}).

χ : ο συντελεστής που σχετίζεται με το σχήμα του σωματιδίου και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 (για σφαίρα) έως 2.

$C(d_e)$, $C(d_a)$: οι συντελεστές διόρθωσης του Cunningham που δηλώνουν την απόκλιση της οπισθέλκουσας δύναμης από τον νόμο του Stokes.

Επιπλέον, η ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο, d_a συνδέεται με θερμοδυναμική ισοδύναμη διάμετρος, d_{th} με τη σχέση:

$$d_{th} = d_a \sqrt{\frac{\chi \rho_0}{\rho} \cdot \frac{C_c(d_a)}{C_c(d_{th})}} \quad (1.7)$$

• **Ισοδύναμη διάμετρος του Stokes, d_{st} (Stokes diameter):**

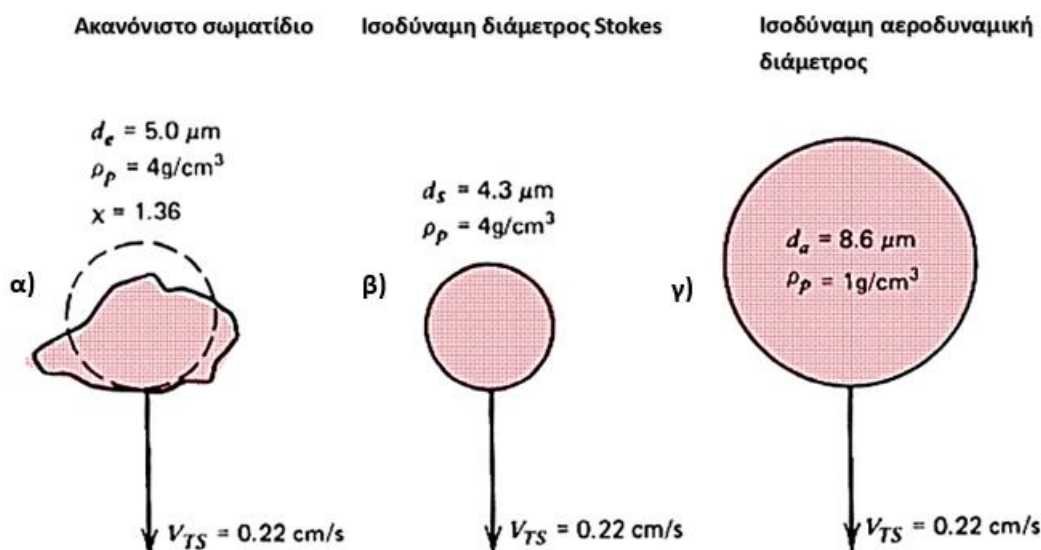
Είναι η διάμετρος μιας σφαίρας που έχει την ίδια πυκνότητα και χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα με του μη σφαιρικού σωματιδίου που εξετάζεται. Παρατηρείται πως η μόνη διαφορά με την αεροδυναμική διάμετρο d_a , είναι πως η διάμετρος του Stokes d_{st} περιλαμβάνει την προϋπόθεση τα σωματίδια να έχουν την ίδια πυκνότητα, ενώ η αεροδυναμική διάμετρος όχι (Colbeck και Lazaridis, 2014). Η ισοδύναμη διάμετρος του Stokes και η αεροδυναμική διάμετρος συνδέονται με την σχέση (Baron και Willeke, 2001):

$$d_{st} = d_a \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (1.8)$$

Όπου d_a : η ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος (cm).

ρ : η πυκνότητα του σωματιδίου (g cm^{-3}).

ρ_0 : η μοναδιαία πυκνότητα (1 g cm^{-3}).



Σχήμα 1.2: α) Σχήμα ενός ακανόνιστου σωματιδίου και η μορφοποίηση αυτού σε β) σχήμα σφαίρας με ισοδύναμη διάμετρο Stokes και σε γ) σχήμα σφαίρας με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).

Τα αιωρούμενα σωματίδια κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος τους σε δύο βασικές κατηγορίες: λεπτόκοκκα (fine particles) και χονδρόκοκκα (coarse particles). Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την ποιότητα του αέρα διακρίνονται στα $PM_{2.5}$ και PM_{10} όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Τα $PM_{2.5}$ θεωρούνται μικρά σωματίδια, στα οποία ανήκουν σωματίδια διαμέτρου έως $2,5 \mu m$. Επιπλέον, τα μικρά σωματίδια διαχωρίζονται σε σωματίδια διαμέτρου πυρήνα ή πολύ μικρά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των $0,2 \mu m$ και σε συσσωματώματα με τη διάμετρο να κυμαίνεται από $0,2$ έως $2,5 \mu m$. Ενώ, τα PM_{10} θεωρούνται μεγάλα σωματίδια, όπου ανήκουν σωματίδια διαμέτρου μεγαλύτερης των $2,5 \mu m$ και έως $10 \mu m$ (Λαζαρίδης, 2010).

1.2.2 Σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων

Το σχήμα των υγρών αιωρούμενων σωματιδίων είναι σχεδόν πάντα σφαιρικό, ενώ των στερεών αιωρούμενων σωματιδίων είναι συνήθως ακανόνιστο.

Τα σωματίδια μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα τους:

- Ισομετρικά: Σωματίδια όπου οι τρεις διαστάσεις τους είναι σχεδόν ίσες όπως είναι τα σφαιρικά σωματίδια.

- Αιμοπετάλια: Σωματίδια όπου έχουν δύο μακριές διαστάσεις και μία μικρή όπως είναι τα φύλλα και οι δίσκοι.
- Ίνες: Σωματίδια όπου έχουν μία μεγάλη διάσταση και δύο πολύ μικρότερες όπως είναι οι βελόνες και ο αμίαντος (Colbeck και Lazaridis, 2014).

Γενικότερα, οι εξισώσεις βασίζονται σε σφαιρικά σωματίδια. Οπότε, προκειμένου να υπάρξει συσχέτιση των ιδιοτήτων των μη-σφαιρικών σωματιδίων με των σφαιρικών, αναπτύχθηκαν οι συντελεστές διόρθωσης σχήματος (Lau και Chau, 2013).

Σύμφωνα με τον Hinds (1999), ο δυναμικός συντελεστής σχήματος (dynamic shape factor) είναι η πιο κατάλληλη παράμετρος για εφαρμογές ροής, καθώς εφαρμόζεται στο νόμο του Stokes για να εξηγήσει την επίδραση του σχήματος στην κίνηση των σωματιδίων και δίνεται από την σχέση:

$$\chi = \frac{F_D}{3\pi\eta V d_e} \quad (1.9)$$

Όπου F_D : η οπισθέλκουσα δύναμη.

η : το ιξώδες.

V : ο όγκος της σφαίρας.

d_e : η ισοδύναμη διάμετρος όγκου.

Επομένως, μέσω αυτού του συντελεστή διόρθωσης, η ταχύτητα καθίζησης των σωματιδίων με ακανόνιστο σχήμα προκύπτει από την σχέση:

$$V_s = \frac{\rho d_e^2 g C_c}{18\eta\chi} \quad (1.10)$$

Όπου ρ : η πυκνότητα του σωματιδίου.

d_e : η ισοδύναμη διάμετρος όγκου.

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας.

C_c : ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης Cunningham.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην υποενότητα 1.2.1, ο δυναμικός συντελεστής σχήματος λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 (για σφαιρικά σωματίδια) έως 2. Εφόσον, τα περισσότερα σωματίδια στην ατμόσφαιρα δεν είναι σφαιρικά, ο δυναμικός συντελεστής σχήματος λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από τη μονάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα μη σφαιρικά σωματίδια να έχουν

μικρότερη ταχύτητα καθίζησης από αυτή των ισοδύναμων σφαιρικών σωματιδίων τους (Colbeck και Lazaridis, 2014).

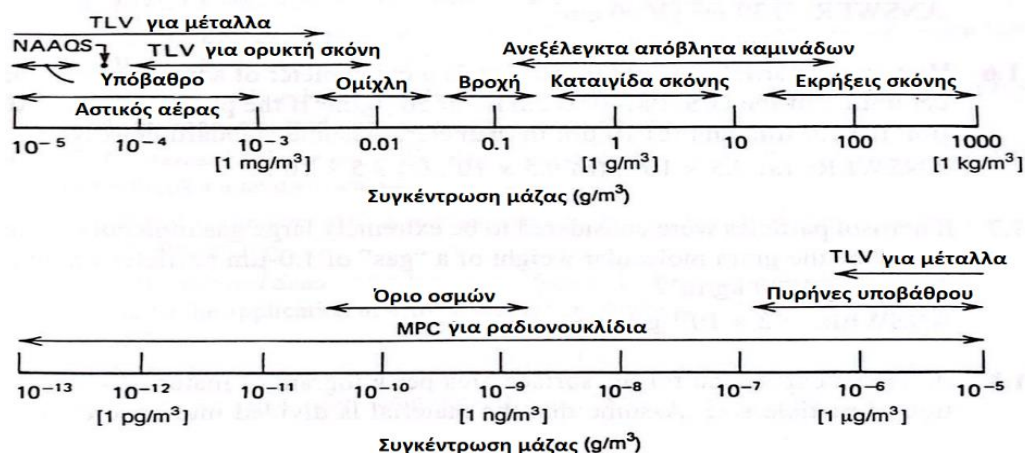
1.2.3 Πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων

Η πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες τους, καθώς επηρεάζει τόσο τη μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα όσο και την εναπόθεσή τους στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα (Peng κ.ά, 2021).

Η πυκνότητα ενός σωματιδίου ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του προς τον όγκο του και δεν πρέπει να συγχέεται με την «πυκνότητα» του αερολύματος, η οποία αναφέρεται ως συγκέντρωση και θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα. Η πυκνότητα μετριέται συνήθως σε μονάδες kg m^{-3} ή g cm^{-3} . Ακόμη, ίση πυκνότητα με αυτή του μητρικού τους υλικού έχουν τα υγρά σωματίδια και τα σωματίδια από συνθλιμμένα ή αλεσμένα στερεά, ενώ μικρότερες πυκνότητες από αυτές που προβλέπονται από τη χημική τους σύνθεση έχουν τα σωματίδια καπνού και ατμών, λόγω του μεγάλου κενού χώρου στην υψηλά συσσωματωμένη δομή τους, η οποία μοιάζει με ένα πυκνό άθροισμα από σταφύλια (Hinds, 1999).

1.2.4 Συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων

Η συγκέντρωση μάζας είναι πιο σημαντική ιδιότητα του αερολύματος για τις επιπτώσεις στην υγεία αλλά και το περιβάλλον και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες g m^{-3} , mg m^{-3} και $\mu\text{g m}^{-3}$. Το Σχήμα 1.3 παρουσιάζει το ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων αερολύματος που κυμαίνεται από 10^{-13} έως 10^3 g m^{-3} .



Σχήμα 1.3: Έυρος συγκεντρώσεων μάζας αερολυμάτων (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).

Σε αντίθεση με τους αέριους ρύπους, η συγκέντρωση των αερολυμάτων δεν μετρείται σε μέρη ανά εκατομμύριο, ppm (parts per million) διότι τα αερολύματα αποτελούνται από δύο φάσεις και οι συγκεντρώσεις τους είναι πολύ χαμηλές όταν εκφράζονται με αυτή τη μονάδα. Ωστόσο, είναι χρήσιμο να γίνονται τέτοιου είδους υπολογισμοί για ορισμένες τυπικές συγκεντρώσεις, όπως δείχνει ο Πίνακας 1.1. Να σημειωθεί ότι ένα πυκνό νέφος καύσης αποτελείται κατά 99,999% από καθαρό αέρα σε όγκο (Hinds, 1999).

Πίνακας 1.1: Τυπικές συγκεντρώσεις μάζας εκφρασμένες σε μέρη στο εκατομμύριο για μοναδιαία πυκνότητα σωματιδίων 1 g cm^{-3} ή 1.000 kg m^{-3} (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).

	Συγκέντρωση μάζας, μάζα/όγκο (mg/m^3)	Μέρη στο εκατομμύριο, όγκος/όγκο (ppm)	Μέρη στο εκατομμύριο, μάζα/μάζα (ppm)
Ετήσιος μέσος όρος $\text{A}_{\Sigma 10}$ (Ηνωμένες Πολιτείες)	0,05	$5 \cdot 10^{-5}$	0,04
Οριακή ελάχιστη τιμή για σκόνες (σωματίδια που δεν ταξινομούνται διαφορετικά)	10	0,01	8
Ανεξέλεγκτα απόβλητα καμινάδων	10.000	10	8.000

1.2.5 Αριθμητική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων

Εκτός από την συγκέντρωση μάζας μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη συγκέντρωση για να εκφράσει τις συγκεντρώσεις των βιοαερολυμάτων και των ινών, είναι η αριθμητική συγκέντρωση (number concentration). Ως αριθμητική συγκέντρωση ορίζεται ο λόγος του αριθμού των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αερολύματος (cm^3 ή m^3). Παλαιότερα εκφραζόταν και ως εκατομμύρια σωματίδια ανά κυβικό πόδι, mppcf (million particles per cubic foot) (Hinds, 1999).

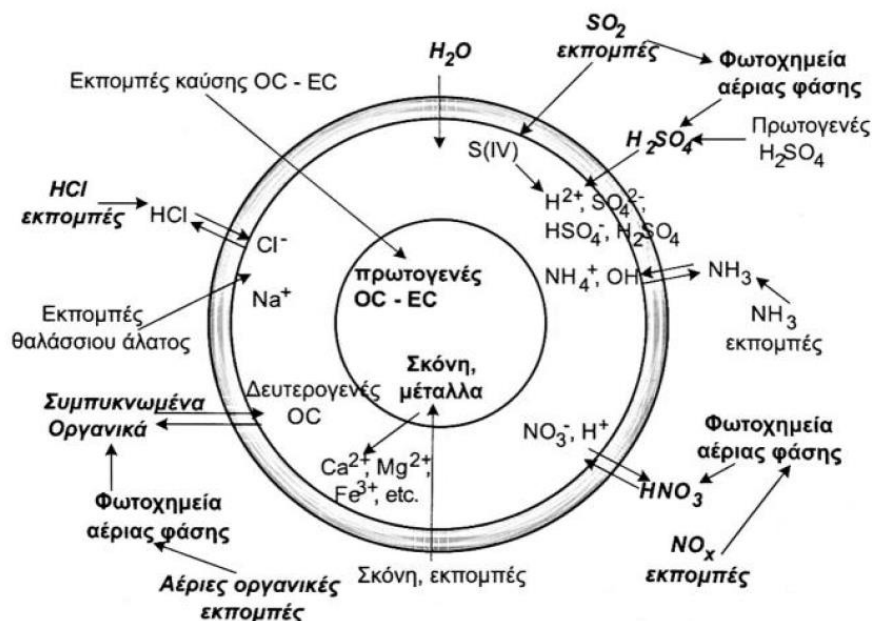
1.2.6 Χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων

Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων, σε σχέση με το μέγεθος και την πηγή προέλευσής τους, είναι η πιο σημαντική ιδιότητά τους που επηρεάζει τη δόση και την αντίδραση του ανθρώπινου οργανισμού. Τα μικρότερα σωματίδια προέρχονται κυρίως από διαδικασίες καύσης, πυρηνοποίησης

και συμπύκνωσης αερίων, και περιλαμβάνουν ενώσεις θείου, αζώτου, υδρογόνου, ιόντα αμμωνίου, ίχνη μετάλλων, νερό, καθώς και στοιχειακό και οργανικό άνθρακα, με τη διάκριση μεταξύ των δύο να είναι συχνά δυσδιάκριτη. Ο στοιχειακός άνθρακας (elemental carbon) είναι μέρος των πρωτογενών αεροζόλ από καύσεις, όπως η αιθάλη, ενώ ο οργανικός άνθρακας (organic carbon) προέρχεται τόσο από προϊόντα καύσης όσο και από βιολογική ύλη, όπως ιοί, βακτήρια και φυτικά ή ζωικά κύτταρα. Ένα μέρος του οργανικού άνθρακα σχηματίζεται δευτερογενώς μέσω αντιδράσεων οξείδωσης οργανικών ενώσεων, όπως οι αρωματικές ενώσεις και οι υδρογονάνθρακες, με όζον (O_3) ή υδροξύλιο (OH) στην ατμόσφαιρα, καθώς και μέσω της οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC).

Τα οχήματα κατά τη χρήση καυσίμων εκπέμπουν αιωρούμενα σωματίδια τα οποία περιέχουν διάφορα χημικά στοιχεία, όπως το βρώμιο (Br), ο μόλυβδος (Pb), το βάριο (Ba), το μαγγάνιο (Mn), το χλώριο (Cl), ο ψευδάργυρος (Zn), το βανάδιο (V), το νικέλιο (Ni), το σελήνιο (Se) και το αρσενικό (As), ενώ από την τριβή των εξαρτημάτων τους εκλύονται ο σίδηρος (Fe), το αλουμίνιο (Al) και ο ψευδάργυρος (Zn). Επιπλέον, από την χρήση καταλυτών μπορεί να εκπεμφθούν αιωρούμενα σωματίδια τα οποία περιλαμβάνουν σπάνια στοιχεία όπως το ρόδιο (Rh), το παλλάδιο (Pd), το ιρίδιο (Ir) και το ρουθένιο (Ru). Σε βιομηχανικές διεργασίες, όπως η παραγωγή ενέργειας από καύση πετρελαίου και γαιάνθρακα, εκπέμπονται αιωρούμενα σωματίδια που απαρτίζονται από στοιχεία όπως το βανάδιο (V), το νικέλιο (Ni), το σελήνιο (Se), το αρσενικό (As), το χρώμιο (Cr), το κοβάλτιο (Co), το χαλκός (Cu), το αλουμίνιο (Al), το θείο (S), ο φωσφόρος (P), το γάλλιο (Ga), ο ψευδάργυρος (Zn), το παλλάδιο (Pd) και το μαγγάνιο (Mn).

Τα περισσότερα αεροζόλ με φυσική πηγή προέλευσης προέρχονται κυρίως από την αιώρηση εδαφικών υλικών, από βιολογικές πηγές (όπως ιοί, βακτήρια, φυτικά και ζωικά κύτταρα) και από θαλάσσιο σπρέι. Τα μεγαλύτερα σωματίδια περιέχουν στοιχεία όπως το μαγνήσιο (Mg), το αλουμίνιο (Al), το κάλιο (K), το σελήνιο (Se), ο σίδηρος (Fe) και το μαγγάνιο (Mn), τα οποία προέρχονται από την αιώρηση εδαφικών υλικών μέσω μηχανικών διεργασιών όπως η εξόρυξη και η άλεση ορυκτών. Ομοίως, η κίνηση των οχημάτων μπορεί να προκαλέσει την επαναιώρηση σωματιδίων που περιέχουν στοιχεία όπως ο στοιχειακός άνθρακας, το αλουμίνιο (Al), το πυρίτιο (Si), το κάλιο (K), το ασβέστιο (Ca), το τιτάνιο (Ti) και το στρόντιο (Sr). Φυσικά φαινόμενα όπως ο άνεμος επαναιωρούν στην ατμόσφαιρα σωματίδια εμπλουτισμένα με στοιχεία όπως το πυρίτιο (Si), το βανάδιο (V), το χρώμιο (Cr), το ασβέστιο (Ca), το τιτάνιο (Ti) και το στρόντιο (Sr). Τέλος, μέσω της επίδρασης του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας, παράγονται θαλάσσια αεροζόλ που αποτελούνται από νάτριο (Na), χλώριο (Cl), θείο (S) και κάλιο (K) (Λαζαρίδης, 2010). Το Σχήμα 1.4 παρουσιάζει τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση των χημικών αντιδράσεων και διεργασιών που αφορούν τη χημική σύνθεση των σωματιδίων (Λαζαρίδης, 2015).

1.3 Κατανομές μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην υποενότητα 1.2.1 τα σωματίδια σε ένα αερόλυμα σπάνια έχουν το ίδιο μέγεθος. Πιο συγκεκριμένα, τόσο τα μονοδιάσπορα όσο και τα πολυδιάσπορα αερολύματα αποτελούνται από σωματίδια, τα οποία έχουν μεγέθη κατανεμημένα σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Συνεπώς, η γραφική απεικόνιση αυτών των μεγεθών συμβάλλει στον υπολογισμό της κατανομής του αριθμού, της μάζας, του όγκου ή της επιφάνειας των αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της διαμέτρου τους. Επομένως, το σύνολο των μεγεθών των σωματιδίων που εμπεριέχονται στο υπό εξέταση αερόλυμα, χωρίζεται σε ένα ορισμένο αριθμό διαδοχικών τμημάτων (τα οποία δεν έχουν το ίδιο εύρος διαμέτρων), ώστε να υπολογιστεί ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε τμήμα. Συνεπώς, για μια καλύτερη οπτική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, τα διάφορα τμήματα κανονικοποιούνται με διαίρεση της συγκέντρωσης με το εύρος διαμέτρων του εκάστοτε τμήματος (Λαζαρίδης, 2015).

Για να προσδιοριστεί η συνάρτηση της κατανομής, χρειάζεται μια παράμετρος που να περιγράφει το εύρος της και μία που να δείχνει το κέντρο της. Για τον προσδιορισμό της κεντρικής διαμέτρου της κατανομής χρησιμοποιούνται η μέση διάμετρος, η διάμεσος, η κορυφή (mode) και η γεωμετρική μέση

διάμετρος. Σε συμμετρικές κατανομές, οι τρεις πρώτες διάμετροι συμπίπτουν, ενώ σε μη συμμετρικές κατανομές ισχύει η ανισότητα:

$$\text{κορυφή} < \text{διάμεσος} < \text{μέση διάμετρο}$$

Η μέση διάμετρος (αριθμητική μέση), \bar{d}_p , είναι το άθροισμα από όλα τα μεγέθη σωματιδίων διαιρεμένη με τον αριθμό των σωματιδίων και για μια ομάδα δεδομένων δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{d}_p = \frac{\sum d}{N} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} = \int_0^{\infty} d_p f(d_p) dd_p \quad (1.11)$$

Όπου $f(d_p)$: η συνάρτηση συχνότητας.

dd_p : το διαφορικό διάστημα από το μέγεθος των σωματιδίων.

n_i : ο αριθμός των σωματιδίων στην ομάδα i που έχουν μέσο μέγεθος d_i (η γεωμετρική ή η αριθμητική μέση διάμετρος).

N : ο ολικός αριθμός σωματιδίων και η άθροιση είναι για όλα τα διαστήματα.

Αριθμητική κατανομή (number distribution):

Αριθμητική κατανομή ονομάζεται η κατανομή της οποίας εξαρτώμενη μεταβλητή (ή αλλιώς τεταγμένη) είναι ο αριθμός των σωματιδίων. Η πιο απλή προσέγγιση για την περιγραφή της κατανομής μεγεθών θα ήταν η χρήση ενός ιστογράμματος που απεικονίζει τον αριθμό των σωματιδίων σε διαδοχικά διαστήματα μεγέθους. Ένας τρόπος για την συλλογή των δεδομένων για το ιστογράμμα αυτό είναι να δειγματοληψτεί το αερόλυμα μέσω ενός κρουστικού κατακρημνιστή και στη συνέχεια μέσω ενός μικροσκοπίου να μετρηθεί ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε διαδοχικό στάδιο. Για την επίτευξη πιο λεπτών διαστημάτων μεγέθους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αεροδυναμικός μετρητής σωματιδίων (Aerosol Particle Sizer, APS), ο οποίος πραγματοποιεί ταχεία και υψηλής ανάλυσης αεροδυναμική μέτρηση αερολυμάτων (Wilson και Liu, 1980; Mazumder και Kirsch, 1977). Στη περίπτωση όπου τα διαστήματα είναι αρκετά μικρά, η κατανομή μπορεί να προσεγγιστεί ως μια διαφορική κατανομή μεγέθους (Baron και Willeke, 2001).

Αν $N(dp)$ είναι ο αριθμός των σωματιδίων στο διάστημα μεγέθους από dp έως $dp + dd_p$, όπου dp είναι η διάμετρος των σωματιδίων, η αριθμητική κατανομή δίνεται από την εξίσωση:

$$dN = N(d_p)dd_p \quad (1.12)$$

Επειδή η διάμετρος των σωματιδίων τυπικά εκτείνεται σε διάφορες τάξεις μεγέθους, είναι βολικό να χρησιμοποιηθεί $d \ln d_p$ για το διάστημα μεγέθους, και η αριθμητική κατανομή παίρνει τη μορφή:

$$dN = N(d_p)d \ln d_p \quad (1.13)$$

Τρεις επιπλέον κατανομές μεγέθους χρησιμοποιούνται συχνά,

• **Κατανομή μεγέθους επιφάνειας**, όπου $S(d_p)$ η συνολική επιφάνεια των σωματιδίων:

$$dS = S(d_p)d \ln d_p \quad (1.14)$$

• **Κατανομή όγκου**, όπου $V(d_p)$ ο συνολικός όγκος των σωματιδίων:

$$dV = V(d_p)d \ln d_p \quad (1.15)$$

• **Κατανομή μάζας**, όπου $M(d_p)$ η συνολική μάζα των σωματιδίων

$$dM = M(d_p)d \ln d_p \quad (1.16)$$

Μετασχηματίζοντας την αριθμητική κατανομή, η κατανομή επιφάνειας, η κατανομή όγκου και μάζας μπορούν να ληφθούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S(d_p) = N(d_p)\pi d_p^2 \quad (1.17)$$

$$V(d_p) = N(d_p)\frac{\pi d_p^3}{6} \quad (1.18)$$

$$M(d_p) = V(d_p)\rho \quad (1.19)$$

Όπου ρ : η πυκνότητα του σωματιδίου.

Λογαριθμική κανονική κατανομή (log-normal distribution):

Η λογαριθμική κανονική συνάρτηση έχει ένα μέγιστο, ένα εύρος κορυφής και, το πιο εντυπωσιακό χαρακτηριστικό της, μια μακριά ουρά για μεγάλες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής, δηλαδή της διαμέτρου των σωματιδίων. Επιπλέον, έχει βρεθεί ότι οι κατανομές μεγέθους αερολυμάτων από πολλές διαφορετικές πηγές ακολουθούν λογαριθμική κανονική κατανομή. Ουσιαστικά, η λογαριθμική κανονική κατανομή προκύπτει από την κανονική συνάρτηση χρησιμοποιώντας λογαριθμικές μεταβλητές. Η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται σπάνια για την περιγραφή των κατανομών μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς οι περισσότερες κατανομές αερολυμάτων παρουσιάζουν έντονη ασυμμετρία (ουρά) προς τα μεγαλύτερα μεγέθη σωματιδίων. Γι' αυτόν τον λόγο, η λογαριθμική κανονική κατανομή είναι προτιμότερη, καθώς περιγράφει καλύτερα την ασυμμετρία των δεδομένων. Η κανονική κατανομή, φυσικά, είναι συμμετρική και μπορεί να εφαρμοστεί σε μονοδιασπαρμένα δοκιμαστικά αερολύματα, σε ορισμένα φυτικά σπόρια και σπορόφυτα, καθώς και σε ειδικά προετοιμασμένες σφαίρες πολυστυρολίου. Η συνάρτηση της αριθμητικής συχνότητας δίνεται από την εξίσωση (Hinds, 1999):

$$d_f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_p - \bar{d}_p)^2}{2\sigma^2}\right) dd_p \quad (1.20)$$

Όπου \bar{d}_p : η αριθμητική μέση διάμετρος.

σ : η τυπική απόκλιση, οριζόμενη για ομαδοποιημένα δεδομένα ως

$$\sigma = \left(\frac{\sum n_i (d_i - \bar{d}_p)^2}{N - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.21)$$

Ένα ακόμα πρόβλημα που εμφανίζεται στην εφαρμογή της κανονικής κατανομής είναι ότι, σε περιπτώσεις όπου η ποσότητα που εξετάζεται μεταβάλλεται σε ευρύ φάσμα, όπως το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, μια τέτοια ευρεία κανονική κατανομή απαιτεί ένα ποσοστό των σωματιδίων να έχουν αρνητικό μέγεθος, κάτι που είναι εκ φύσεως αδύνατο. Συνδυάζοντας το πρόβλημα των αρνητικών μεγεθών με το γεγονός ότι η κατανομή συχνά παρουσιάζει ασύμμετρο σχήμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εφαρμόστηκε λογαριθμικός μετασχηματισμός των δεδομένων μεγέθους για να επιτευχθεί η λογαριθμική κανονική κατανομή.

Η λογαριθμική κανονική κατανομή είναι πιο κατάλληλη για περιπτώσεις όπου η μετρούμενη ποσότητα μπορεί να πάρει μόνο θετικές τιμές και εκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα τιμών. Δηλαδή όπου

ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη τιμή είναι πάνω από 10. Όταν η μετρούμενη ποσότητα εκτείνεται σε ένα μικρό εύρος τιμών, η λογαριθμική κανονική κατανομή προσεγγίζει την κανονική κατανομή.

Η γεωμετρική διάμετρος δίνεται από την εξίσωση:

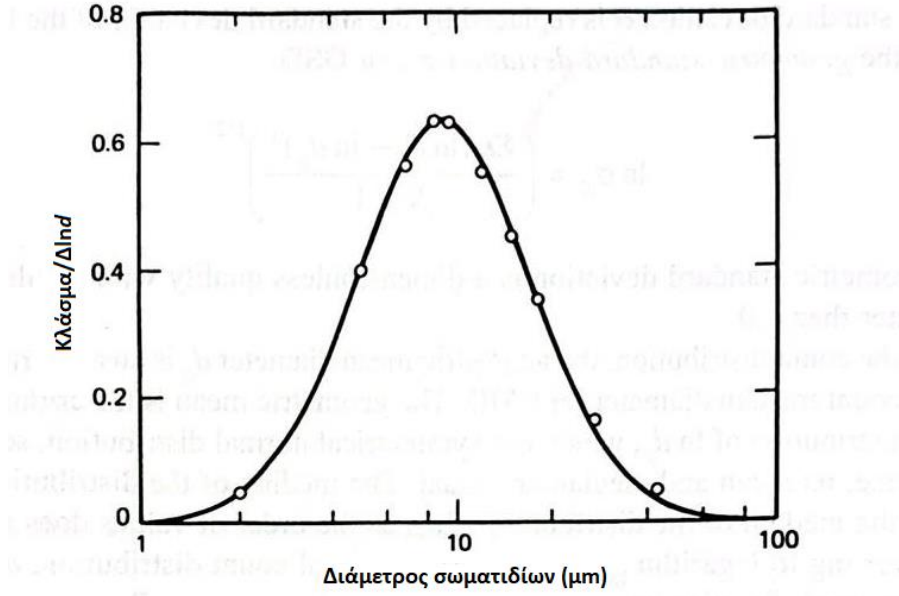
$$\ln d_g = \frac{\sum n_i \ln d_i}{N} \quad (1.22)$$

Η τυπική απόκλιση σ αντικαθίσταται από την τυπική απόκλιση των λογαρίθμων, η οποία ονομάζεται γεωμετρική τυπική απόκλιση σ_g ή GSD (Geometric Standard Deviation). Είναι αδιάστατη και λαμβάνει τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από 1.

$$\ln \sigma_g = \left(\frac{\sum n_i (\ln d_i - \ln d_g)^2}{N - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.23)$$

Για να μετατραπεί η αριθμητική κατανομή σε λογαριθμική αριθμητική κατανομή, η γεωμετρική μέση διάμετρος d_g αντικαθίσταται συνήθως από τη διάμετρο αριθμητικής διαμέσου CMD (Count Median Diameter). Η γεωμετρική μέση τιμή είναι η αριθμητική μέση τιμή της κατανομής του $\ln d_p$, η οποία είναι μια συμμετρική κανονική κατανομή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5, με αποτέλεσμα η μέση τιμή να ισούται με την διάμεσο της. Εφόσον, η σειρά των τιμών δεν αλλάζει κατά τη μετατροπή σε λογαρίθμους, προκύπτει ότι η διάμεσος της κατανομής του $\ln d_p$ είναι επίσης η διάμεσος της κατανομής του d .

Παρόμοια διαδικασία, συμβαίνει και για να μετατραπεί η κατανομή μάζας σε λογαριθμική κατανομή μάζας, όπου σε αυτή τη περίπτωση η γεωμετρική μέση διάμετρος d_g αντικαθίσταται από τη διάμετρο μαζικής διαμέσου MMD (Mass Median Diameter). Η κατανομή της μάζας έχει το ίδιο σχήμα με την αριθμητική κατανομή, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά μήκος του άξονα του μεγέθους κατά μια σταθερή ποσότητα ίση με τον λόγο της διαμέτρου μαζικής διαμέσου προς τη διάμετρο αριθμητικής διαμέσου, ο οποίος υπολογίζεται γνωρίζοντας μόνο τη γεωμετρική τυπική απόκλιση GSD (Hinds, 1999).



Σχήμα 1.5: Καμπύλη κατανομής συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).

Επομένως, η συνάρτηση συχνότητας για λογαρίθμους διαμέτρων που κυμαίνονται από $\ln d_p$ έως $\ln d_p + d(\ln d_p)$ μπορεί να εκφραστεί ως:

$$d_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left(-\frac{(\ln d_p - \ln CMD)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right) d(\ln d_p) \quad (1.24)$$

Ωστόσο, η παραπάνω εξίσωση είναι εύκολο να εκφράζεται σε όρους του μεγέθους των σωματιδίων d_p , παρά του $\ln d_p$. Δεδομένου, ότι ισχύει η ισότητα:

$$d(\ln d_p) = \frac{d(\ln d_p)}{dd_p} \cdot dd_p = \frac{1}{d_p} dd_p \quad (1.25)$$

Η εξίσωση (1.24) γίνεται:

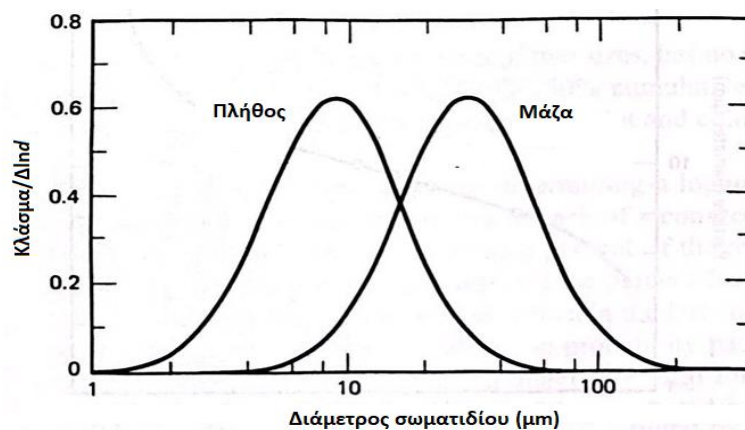
$$d_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d_p \ln \sigma_g} \exp \left(-\frac{(\ln d_p - \ln CMD)^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right) dd_p \quad (1.26)$$

Για την **κανονική κατανομή**, το 95% των σωματιδίων εμπίπτουν σε ένα εύρος μεγέθους που καθορίζεται από το $\bar{d}_p + 2\sigma$, ενώ για τη **λογαριθμική αριθμητική κατανομή**, η κατανομή είναι κανονική

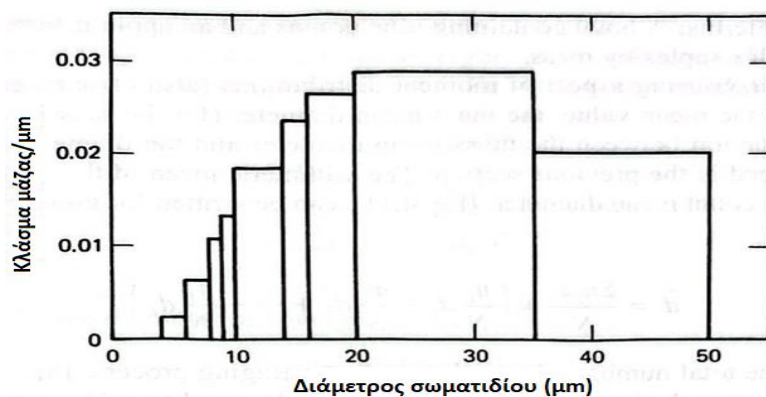
ως προς το $\ln d$, έτσι ώστε το 95% των σωματιδίων εμπίπτουν σε ένα εύρος μεγέθους που ορίζεται από:

$$\exp(\ln CMD \pm 2 \ln \sigma_g) \quad (1.27)$$

Μέσω της λογαριθμικής κατανομής όλες οι κατανομές (αριθμητικές, επιφάνειας, μάζας και όγκου) θα έχουν την ίδια γεωμετρική τυπική απόκλιση, δηλαδή θα έχουν το ίδιο σχήμα όταν αυτές απεικονίζονται σε λογαριθμική κλίμακα. Όπως για παράδειγμα, στο Σχήμα 1.6 απεικονίζεται μέσω της ίδιας λογαριθμικής κλίμακας διαμέτρου η αριθμητική κατανομή και η κατανομή μάζας, ενώ στο Σχήμα 1.7 η κατανομή μάζας χωρίς λογαριθμική κλίμακα.



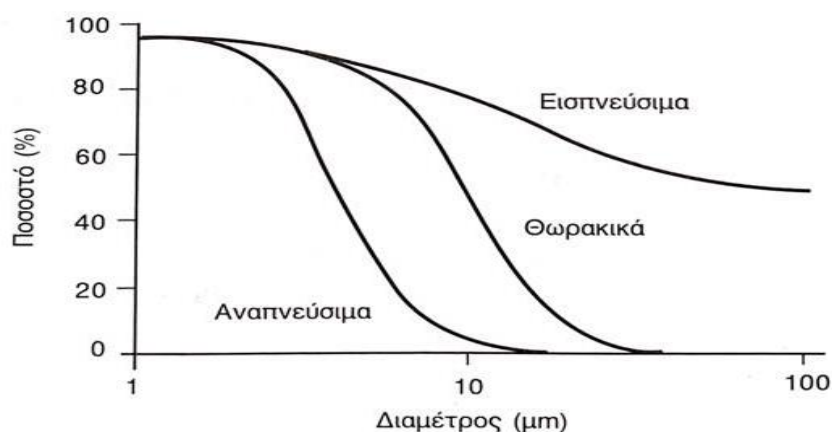
Σχήμα 1.6: Αριθμητική κατανομή και κατανομή μάζας σε λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).



Σχήμα 1.7: Κατανομή μάζας χωρίς λογαριθμική κλίμακα (αναπροσαρμοσμένο από Hinds, 1999).

1.4 Κατάταξη των αιωρούμενων σωματιδίων συναρτήσει της συμπεριφοράς τους στο αναπνευστικό σύστημα

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε **εισπνεύσιμα**, **θωρακικά** και **αναπνεύσιμα**, ανάλογα με το σημείο του αναπνευστικού συστήματος στο οποίο μπορούν να διεισδύσουν. Πιο συγκεκριμένα, ως **εισπνεύσιμα** θεωρούνται τα σωματίδια που μπορούν να εισέλθουν και να αποτίθενται στο ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού συστήματος, δηλαδή στην περιοχή του κεφαλιού. Τα **θωρακικά** σωματίδια είναι εκείνα που καταφέρνουν να περάσουν από τον λάρυγγα και να φτάσουν στους πνεύμονες. Τέλος, τα **αναπνεύσιμα** σωματίδια είναι μια υποκατηγορία των θωρακικών, που φτάνουν έως την περιοχή όπου γίνεται η ανταλλαγή αερίων. Αυτοί οι όροι χρησιμοποιούνται για πρακτικούς σκοπούς, και η αντιστοίχισή τους σε διαμέτρους σωματιδίων, όπως ορίζεται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Διάκριση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εισπνεύσιμα, θωρακικά και αναπνεύσιμα συναρτήσει της διαμέτρου τους. Το ποσοστό αντιστοιχεί στη διείσδυση στην εκάστοτε περιοχή (Λαζαρίδης, 2010).

Όσον αφορά τα AS_{10} , η καμπύλη τους σχεδόν ταυτίζεται με αυτή των θωρακικών, ενώ η καμπύλη για τα $AS_{2,5}$ βρίσκεται πιο αριστερά στο διάγραμμα από την καμπύλη των αναπνεύσιμων. Με βάση τα παραπάνω, ως «εισπνευσσιμότητα» ορίζεται το ποσοστό των σωματιδίων μιας συγκεκριμένης αεροδυναμικής διαμέτρου που είναι δυνατόν να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα μέσω της αναπνοής είτε από τη μύτη, είτε από το στόμα σε σχέση με την ποσότητά τους στον περιβάλλοντα αέρα. Η εισπνευσσιμότητα (η_i) εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων και από την ταχύτητα του

ανέμου (U) και για σωματίδια έως 100 μm και ταχύτητες ανέμου μεταξύ 1 έως 9 m s^{-1} , μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$n_I = 1 - 0,5 \left(1 - [7,6 \cdot 10^{-4} \cdot d_{ae}^{2,8} + 1]^{-1} \right) + 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot U^{2,75} e^{0,055 d_{ae}} \quad (1.28)$$

Σε εξωτερικούς χώρους η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να ξεπεράσει τα 9 m s^{-1} , ενώ σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων δεν είναι μεγαλύτερη από 0,5 m s^{-1} . Αξίζει να αναφερθεί ότι έχει διαπιστωθεί πως το ποσοστό των σωματιδίων που τελικά εισέρχεται στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα είναι μεγαλύτερο όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από 0,1 m s^{-1} , σε σύγκριση με το ποσοστό που παρατηρείται για ταχύτητα ανέμου 1 m s^{-1} . Ωστόσο, η παραπάνω εξίσωση βρίσκει εφαρμογή και σε μηδενικές ταχύτητες ανέμου για λόγους τυποποίησης (ICRP, 1994).

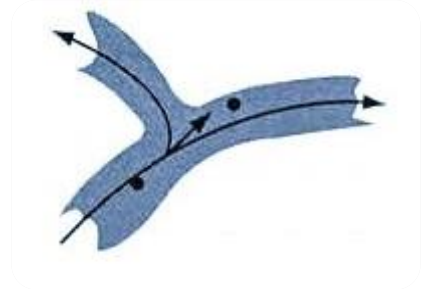
Γενικότερα, τα AS_{10} διεισδύουν σε υψηλό ποσοστό στο αναπνευστικό σύστημα, ενώ τα σωματίδια με μεγαλύτερη διάμετρο φιλτράρονται αποτελεσματικά, με έως και το 50% αυτών να συγκρατείται πριν την είσοδό τους. Ακόμη, ένας παράγοντας που επηρεάζει την εισπνευσσιμότητα, εκτός από την αναπνοή, είναι η διεύθυνση του στόματος σε σχέση με αυτήν του ανέμου (Λαζαρίδης, 2010).

1.4.1 Μηχανισμοί εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα

Η εναπόθεση των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι μια κρίσιμη διαδικασία που επηρεάζει την υγεία των ανθρώπων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ακριβής τοποθεσία όπου τα σωματίδια εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα, καθώς αυτή επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα μεταφερθούν και στη συνέχεια θα απομακρυνθούν από τους αεραγωγούς του. Οι βασικοί μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι οι εξής:

•Πρόσκρουση

Η πρόσκρουση συμβαίνει όταν τα σωματίδια δεν μπορούν να ακολουθήσουν τις γραμμές ροής όταν αυτές αλλάζουν ξαφνικά κατεύθυνση ή ταχύτητα και αποτελεί τον σημαντικότερο μηχανισμό εναπόθεσης στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα για σωματίδια με ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο $d_a > 0,5 \mu\text{m}$. Η πιθανότητα ενός σωματιδίου να εναποτίθεται λόγω πρόσκρουσης εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, το ρυθμό αναπνοής, το μέγεθος και την πυκνότητα του σωματιδίου (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.9: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (πρόσκρουση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

•Καθίζηση

Η καθίζηση οφείλεται στη βαρύτητα. Όταν η δύναμη της βαρύτητας υπερβαίνει την ανύψωση και την αντίσταση του αέρα, τα σωματίδια απομακρύνονται από τις γραμμές ροής και καθιζάνουν με σταθερή ταχύτητα στις επιφάνειες των αναπνευστικών οδών. Όπως η πρόσκρουση, η καθίζηση είναι επίσης σημαντικός μηχανισμός εναπόθεσης για σωματίδια που κινούνται στους μικρότερους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος με αεροδυναμική διάμετρο $d_a > 0,5 \mu\text{m}$. Η πιθανότητα ενός σωματιδίου να εναποθετηθεί λόγω καθίζησης εξαρτάται από τον χρόνο παραμονής στους αεραγωγούς, το μέγεθος και την πυκνότητα του σωματιδίου, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού αναπνοής. Ακόμη, η καθίζηση είναι βασικός μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στην περιοχή εκτός του θώρακα και στους αναπνευστικούς αεραγωγούς της κυψελιδικής περιοχής. Έχει παρατηρηθεί ότι η συνεισφορά της πρόσκρουσης και της καθίζησης στην απόθεση σωματιδίων στις αρχικές διακλαδώσεις των πνευμόνων είναι περίπου ισοδύναμη. Παρ' όλα αυτά, η τοποθεσία απόθεσης διαφέρει, καθώς τα περισσότερα σωματίδια προσκολλώνται στις διακλαδώσεις λόγω πρόσκρουσης, ενώ άλλα καθιζάνουν κατά μήκος των αεραγωγών (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.10: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (καθίζηση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

• Διάχυση (κίνηση Brown)

Η διάχυση συμβαίνει όταν σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,2 μm κινούνται τυχαία λόγω της συνεχούς πρόσκρουσης με μόρια του αέρα. Αυτή η τυχαία κίνηση μπορεί να οδηγήσει τα σωματίδια σε επαφή με τα τοιχώματα των αναπνευστικών οδών, με αποτέλεσμα την εναπόθεσή τους στα σημεία επαφής. Ακόμη, η διάχυση είναι ένας σημαντικός μηχανισμός εναπόθεσης για σωματίδια τόσο στα βρογχιόλια όσο και στην κυψελιδική περιοχή, όπου η ταχύτητα του αέρα είναι πολύ χαμηλή, καθώς και στην περιοχή εκτός του θώρακα, όπου η ροή του αέρα είναι τυρβώδης (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.11: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (διάχυση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

• Αναχαίτιση-ενσφήνωση

Η αναχαίτιση-ενσφήνωση συμβαίνει όταν τα σωματίδια έρχονται σε φυσική επαφή με τα τοιχώματα των αναπνευστικών οδών. Επίσης, εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων και είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα σωματίδια με ινώδη μορφή (Λαζαρίδης, 2010).



Σχήμα 1.12: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (αναχαίτιση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

• Ηλεκτροστατική καθίζηση

Η εναπόθεση των σωματιδίων με ηλεκτρικό φορτίο προκαλείται από την ηλεκτροστατική καθίζηση και είναι αντιστρόφως ανάλογη του μεγέθους των σωματιδίων και της ταχύτητας ροής του αέρα. Τα πρωτογενή σωματίδια συχνά φέρουν ηλεκτρικό φορτίο και όταν εισπνέονται, εμφανίζουν υψηλά ποσοστά εναπόθεσης που δεν μπορούν να εξηγηθούν από τους προηγούμενους μηχανισμούς εναπόθεσης. Ωστόσο, η εισπνοή ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων αποτελεί σπάνια περίπτωση, καθώς το φορτίο των πρωτογενών σωματιδίων σε μικρό χρόνο εξουδετερώνεται από τα



Σχήμα 1.13: Μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα (ηλεκτροστατική καθίζηση) (αναπροσαρμοσμένο από Λαζαρίδης, 2010).

ιόντα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, ο μηχανισμός της ηλεκτροστατικής εναπόθεσης δεν συναντάται τόσο συχνά όσο οι άλλοι μηχανισμοί. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι αποτελεί βασικό μηχανισμό εναπόθεσης των πολύ λεπτών σωματιδίων στην κυψελιδική περιοχή (Λαζαρίδης, 2010).

1.5 Βασικές φυσικές διεργασίες των αιωρούμενων σωματιδίων

1.5.1 Πυρηνοποίηση

Η πυρηνοποίηση είναι μια από τις κύριες διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο σε φαινόμενα όπως η συμπύκνωση, η δημιουργία νέων σωματιδίων και νεφών, η κρυστάλλωση και ο βρασμός. Η πυρηνοποίηση είναι η διαδικασία αλλαγής φάσης, για παράδειγμα, από την αέρια στην υγρή φάση, και συνήθως δεν πραγματοποιείται άμεσα αλλά μέσω της δημιουργίας μικρών συσσωματώσεων μορίων που σχηματίζουν πυρήνες (clusters). Ωστόσο, η απευθείας μετάβαση από την αέρια στην υγρή φάση δεν είναι εύκολη στην ατμόσφαιρα, λόγω της παρουσίας ήδη υπάρχοντων σωματιδίων, με αποτέλεσμα η πυρηνοποίηση να συμβαίνει πάνω στις επιφάνειες αυτών των σωματιδίων. Επομένως, όταν η πυρηνοποίηση συμβαίνει χωρίς την παρουσία προϋπαρχόντων σωματιδίων, ονομάζεται ομογενής πυρηνοποίηση (homogeneous nucleation), ενώ όταν γίνεται με την παρουσία προϋπαρχόντων σωματιδίων, λέγεται ετερογενής πυρηνοποίηση (heterogeneous nucleation). Επίσης, αν στη διαδικασία συμμετέχει μόνο ένα χημικό στοιχείο, ονομάζεται ομομοριακή (homomolecular), ενώ αν συμμετέχουν περισσότερα χημικά στοιχεία, χαρακτηρίζεται ως ετερομοριακή (heteromolecular) (Lazaridis, 2011; Seinfeld και Pandis, 2006).

1.5.2 Συσσωμάτωση

Συσσωμάτωση (coagulation) είναι η διεργασία κατά την οποία ατμοσφαιρικά αιωρήματα συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής τους κίνησης και σχηματίζουν μεγαλύτερα σωματίδια. Οι συγκρούσεις οδηγούν στη μείωση της ποσότητας των σωματιδίων και στην αύξηση του μεγέθους τους (Λαζαρίδης, 2010). Υπάρχουν δύο είδη συσσωμάτωσης ανάλογα με την προέλευση της σχετικής κίνησης των σωματιδίων:

- Θερμική συσσωμάτωση (thermal coagulation) λόγω της κίνησης Brown.
- Κινηματική συσσωμάτωση λόγω υδροδυναμικών, ηλεκτρικών ή βαρυτικών δυνάμεων.

Κίνηση Brown: Η κίνηση Brown ονομάζεται η τυχαία κίνηση που σχετίζεται με μικρά σωματίδια λόγω της πρόσκρουσης από μεμονωμένα μόρια νερού που βρίσκονται εντός των ρευστών (υγρών ή αερίων) και είναι πάντα παρούσα στην ατμόσφαιρα ως μια φυσική δύναμη ανάμιξης. Οι κύριες συνιστώσες που καθορίζουν την κίνηση Brown είναι η συγκέντρωση, η θερμοκρασία, ο αριθμός και το μέγεθος των σωματιδίων, καθώς και η μεταξύ τους απόσταση και το ιξώδες. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερο είναι το σωματίδιο ή το μόριο και όσο πιο μεγάλο το ιξώδες του μέσου διασποράς, τόσο πιο αργή θα είναι η κίνηση Brown σε αντίθεση με τα μικρότερα σωματίδια που «κλωτσούνται» περισσότερο από τα μόρια του διαλύτη και κινούνται πιο γρήγορα (Colbeck και Lazaridis, 2014; Friedlander, 2000).

Van der Waals: Οι δυνάμεις van der Waals είναι ελκτικές δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης που δρουν μεταξύ οποιωνδήποτε δύο ουδέτερων ατόμων ή μορίων που χωρίζονται από μια απόσταση μεγάλη σε σύγκριση με τις δικές τους διαστάσεις. Επίσης, είναι μακράς εμβέλειας και μειώνονται με την απόσταση σύμφωνα με έναν νόμο δύναμης και όχι εκθετικά. Αυτές είναι οι δυνάμεις που ευθύνονται για τα φαινόμενα της επιφανειακής τάσης και για τις αποκλίσεις από τον ιδανικό νόμο των αερίων (Chu, 1967; Dzyaloshinskii κ.ά., 1961).

1.5.3 Συμπύκνωση-Εξάτμιση

Η **συμπύκνωση** (condensation) ή η **εξάτμιση** (evaporation) των σωματιδίων πραγματοποιείται λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ της πίεσης των ατμών στο περιβάλλον και της πίεσης των ατμών στην επιφάνεια του σωματιδίου. Τα σταγονίδια που υπάρχουν στον αέρα μεταβάλλουν συνεχώς το μέγεθος τους, λόγω της **συμπύκνωσης** υδρατμών και άλλων χημικών ενώσεων πάνω στην επιφάνεια τους (αύξηση μεγέθους σωματιδίου) ή λόγω **εξάτμισης** κάποιου συστατικού από την επιφάνεια του σωματιδίου (μείωση μεγέθους σωματιδίου). Οι παραπάνω διεργασίες εξαρτώνται από παράγοντες όπως η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η οποία καθορίζει τη διαθέσιμη συγκέντρωση υδρατμών, το μέγεθος του σωματιδίου, καθώς και το σχετικό μέγεθος του σωματιδίου σε σχέση με το ελεύθερο μήκος λ , το οποίο ορίζεται ως η μέση απόσταση που ένα μόριο αερίου διανύει στον αέρα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές συγκρούσεις. Η κατεύθυνση της καθαρής ροής ατμών (προς εξάτμιση ή συμπύκνωση) καθορίζεται από τη σχετική διαφορά μεταξύ της πίεσης του αερίου και της πίεσης κορεσμού (Λαζαρίδης, 2015).

Για να πραγματοποιηθεί συμπύκνωση ή εξάτμιση, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μεταφορά μάζας μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης. Οι διεργασίες αυτές ευθύνονται για μεταβολές στο μέγεθος, το σχήμα, αλλά και τη χημική σύσταση των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων. Οι μεταβολές

είναι γρηγορότερες για τα μικρά σωματίδια πυρήνων (nuclei) και τα σωματίδια Aitkin, ενώ δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές για σωματίδια διαμέτρου $> 0,6 \mu\text{m}$.

1.5.4 Επαναιώρηση

Ως επαναιώρηση σωματιδίων, ορίζεται η επαναφορά στην ατμόσφαιρα μέσω της τυρβώδους ροής ενός υλικού, που είχε προηγουμένως εναποτεθεί είτε στο έδαφος, είτε σε κάποια επιφάνεια. Η τυρβώδης ροή συμβάλλει στη μεταφορά ενέργειας στα σωματίδια μέσω των τυρβώδων δινών, με αποτέλεσμα όταν στο σωματίδιο έχει συσσωρευτεί αρκετή ενέργεια, η οποία του επιτρέπει να διαφύγει από το δυναμικό, τότε να επαναιωρείται. Τα μοντέλα που υπάρχουν σήμερα για την επαναιώρηση βασίζονται στην ισορροπία των δυνάμεων ή στην ισορροπία της ενέργειας. Στα μοντέλα ισορροπίας δυνάμεων, η επαναιώρηση πραγματοποιείται όταν οι αεροδυναμικές ανυψωτικές δυνάμεις (aerodynamic lift forces) γίνονται μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνοχής (adhesion forces), μη λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά ενέργειας από την τυρβώδη ροή στα σωματίδια τα οποία έχουν εναποθέσει σε επιφάνειες. Ενώ, στο μοντέλο που βασίζεται στην ισορροπία ενέργειας, τα εναποτιθέμενα σωματίδια θεωρείται ότι υπάρχουν στην επιφάνεια κάτω από την επίδραση ενός μη αρμονικού δυναμικού. Η επαναιώρηση σωματιδίων εκφράζεται μέσω του *παράγοντα επαναιώρησης* (K) ή του *ρυθμού επαναιώρησης* (Λ) και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη των αλληλεπιδράσεων της ατμόσφαιρας με διάφορες επιφάνειες, καθώς και σε βιομηχανικές διεργασίες αλλά και συνεισφέρει έντονα στη διάβρωση των εδαφών, κυρίως γύρω από τις όχθες των ποταμών, λιμνών κ.ά.

Παράγοντας επαναιώρησης (resuspension factor)

$$K(m^{-1}) = \frac{\text{Ατμοσφαιρική συγκέντρωση, } C (\mu g m^{-3})}{\text{Καθιζάμενη συγκέντρωση, } S (\mu g m^{-2})} \quad (1.29)$$

Ρυθμός επαναιώρησης (resuspension rate)

$$\Lambda(s^{-1}) = \frac{\text{Ροή επαναιώρησης, } R (\mu g m^{-2} s^{-1})}{\text{Καθιζάμενη συγκέντρωση, } S (\mu g m^{-2})} \quad (1.30)$$

Ωστόσο, και τα δύο παραπάνω μεγέθη παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες. Από τη μία, ο *παράγοντας επαναιώρησης*, K εξαρτάται από το βάθος του επιφανειακού υλικού που εξετάζεται για τον προσδιορισμό της καθιζάμενης συγκέντρωσης και επειδή οι διαδικασίες μεταφοράς υλικών προς την ατμόσφαιρα και το έδαφος δεν είναι καλά κατανοητές, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει ξεκάθαρη βάση για την επιλογή του βάθους δειγματοληψίας. Από την άλλη, ο *ρυθμός επαναιώρησης*, Λ δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα σε πειραματικά πεδία και μπορεί να υπολογιστεί μόνο με την προσαρμογή των αποτελεσμάτων σε ένα αριθμητικό μοντέλο, το οποίο περιγράφει τη διάχυση και την καθίζηση του επαναφερόμενου υλικού στον αέρα. Συνεπώς, ο *ρυθμός επαναιώρησης* είναι κατάλληλος για χρήση σε μοντέλα που προβλέπουν τις αέριες συγκεντρώσεις σε περιοχές με διαφορετικά επίπεδα μόλυνσης, ενώ ο *παράγοντας επαναιώρησης* είναι χρήσιμος μόνο για να εντοπίζει τις περιοχές όπου οι αέριες συγκεντρώσεις φτάνουν σε μέγιστα ή ελάχιστα επίπεδα (K.W Nicholson, 1967; Λαζαρίδης, 2010 και 2015).

Κεφάλαιο 2: Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων

2.1 Ο ρόλος των ΑΣ₁₀ στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής ή και μέσω της επαφής με το δέρμα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις επιπτώσεις της εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα και, κατά συνέπεια, στην ανθρώπινη υγεία, περιλαμβάνουν την περιοχή εναπόθεσης, τη συγκέντρωση, το μέγεθος και τη χημική σύσταση των σωματιδίων. Οι βασικές παράμετροι για την ανάλυση της εναπόθεσης είναι η έκθεση και η δόση (Λαζαρίδης, 2010).

Η **έκθεση** (exposure) αναφέρεται στην ποσότητα των ρύπων που έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου. Η επαφή αυτή συνήθως συμβαίνει στην περιοχή του σώματος που βρίσκεται κοντά στις αναπνευστικές οδούς, όπως το στόμα και η μύτη.

Η ολική έκθεση μεταξύ δύο χρονικών περιόδων t_0 και t_1 και δίνεται από την σχέση:

$$\bar{\epsilon}_i(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} c_i(t) dt \quad (2.1)$$

Όπου $c_i(t)$: η συγκέντρωση που έρχεται σε επαφή με το άτομο i (από ένα πληθυσμό) στο χρόνο t .

Για λόγους πρακτικότητας συνηθίζεται να εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta \bar{\epsilon} = \Delta t \cdot c_i(\Delta t) \quad (2.2)$$

Όπου Δ : το πεπερασμένο διάστημα που υπολογίζεται η έκθεση και ο χρόνος.

Η **δόση** (dose) αναφέρεται στην ποσότητα του ρύπου που εναποτίθεται σε διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος και άλλων τμημάτων του σώματος σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ακόμη, η δόση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο χρόνος εναπόθεσης και η απομάκρυνσή της, δηλαδή ο καθαρισμός (clearance) της από τη συγκεκριμένη περιοχή του σώματος. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη δόση είναι η ανατομία της αναπνευστικής οδού, ο τρόπος αναπνοής

(αν πραγματοποιείται μέσω μύτης ή στόματος, καθώς και ο ρυθμός της αναπνοής), η κατάσταση των ιστών της αναπνευστικής οδού (υγιείς ή ερεθισμένοι ιστοί λόγω ασθένειας, καπνίσματος κ.ά) αλλά και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των σωματιδίων, όπως είναι το μέγεθος, η πυκνότητα, η συγκέντρωση, η υγροσκοπικότητα, η διαλυτότητα κ.ά. Επίσης, η δόση μιας συγκεκριμένης τοξικής ένωσης που λαμβάνει ένα συγκεκριμένο όργανο ή ιστός μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό ή να επηρεάσει τη λειτουργία του. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η διαδικασία μέσω της οποίας οι ατμοσφαιρικοί ρύποι οδηγούνται από την πηγή εκπομπής τους σε επαφή με τον άνθρωπο (Λαζαρίδης, 2010). Τα δεδομένα αποδεικνύουν επίσης ότι η σχέση μεταξύ της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια και των ανθρώπινων ασθενειών είναι εξαρτώμενη από τη δόση, και η απομάκρυνση από περιβάλλοντα με υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης αυτών των ασθενειών.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν άμεσες και μακροχρόνιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι τα σωματίδια συνδέονται με αυξημένη νοσηρότητα και θνησιμότητα (Schlesinger, 1995). Οι πληθυσμοί που εκτίθενται μακροχρόνια σε υψηλά επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένα ποσοστά καρδιαγγειακών επεισοδίων και θανάτων. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας υπάρχουν περίπου 800.000 πρόωροι θάνατοι ετησίως, που οφείλονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια, κατατάσσοντάς την ως τη 13^η κύρια αιτία θνησιμότητας παγκοσμίως

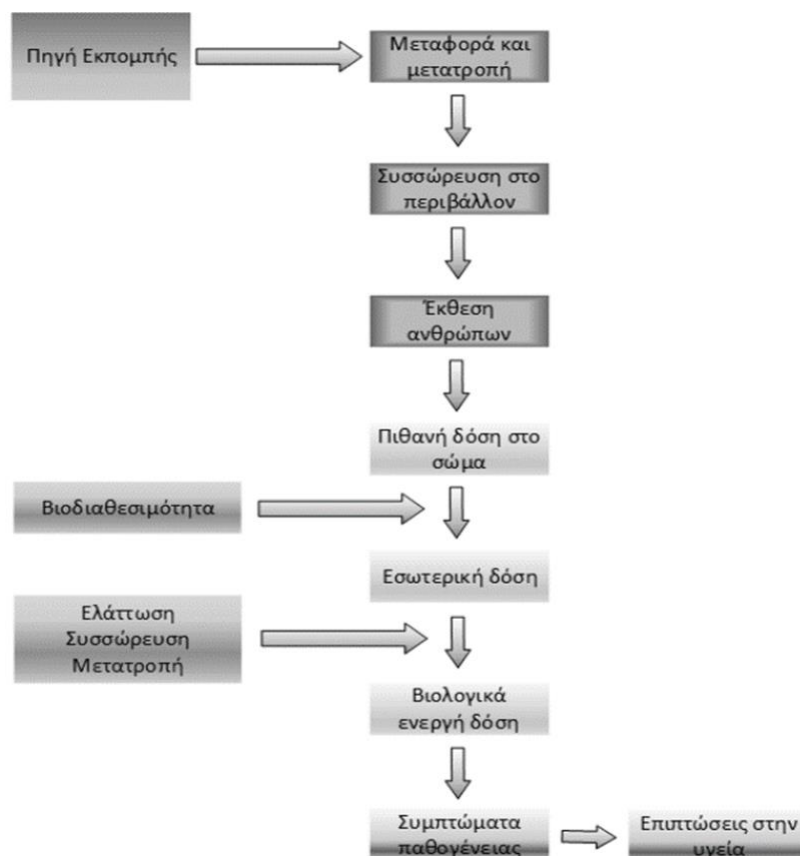
Τα αιωρούμενα σωματίδια ενοχοποιούνται για την εμφάνιση εγκεφαλοαγγειακών και καρδιαγγειακών νοσημάτων όπως είναι το έμφραγμα του μυοκαρδίου, η καρδιακή ανεπάρκεια και οι αρρυθμίες. Επίσης, η μακροχρόνια έκθεση μπορεί να προκαλέσει αθηροσκλήρωση και αυξημένη αρτηριακή πίεση, επηρεάζοντας την καρδιακή λειτουργία. Ακόμη, προκαλούν συστηματική φλεγμονή, ενεργοποιούν τη διαδικασία πήξης άμεσα ή έμμεσα, και μπορούν να εισέλθουν στη συστηματική κυκλοφορία. Η σχέση των αιωρούμενων σωματιδίων με τις καρδιαγγειακές παθήσεις υποστηρίζεται από ισχυρά επιστημονικά δεδομένα. Αν και η σύνδεση με τις εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις δεν είναι τόσο ξεκάθαρη, υπάρχουν ενδείξεις ότι οι μηχανισμοί είναι παρόμοιοι, αλλά με μικρότερη επίδραση στις τελευταίες. Παρόλο που η αρνητική επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στις καρδιαγγειακές, αναπνευστικές και σε μικρότερο βαθμό εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις είναι μικρή, είναι στατιστικά σημαντική και έχει επιβεβαιωθεί από πλήθος μελετών σε διαφορετικούς πληθυσμούς και περιοχές.

Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια επιδεινώνουν αναπνευστικές παθήσεις όπως είναι η βρογχίτιδα, η πνευμονία, το άσθμα αλλά και επιδείνωση χρόνιων αποφρακτικών νόσων του αναπνευστικού (Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD), μειώνοντας έτσι τη λειτουργία των πνευμόνων, αυξάνοντας τη χρήση φαρμάκων και τη συχνότητα επίσκεψης σε παρόχους υγειονομικής περίθαλψης

(Anderson κ.ά., 2011). Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια έχει επίσης συνδεθεί με αυξημένα επίπεδα άγχους και κατάθλιψης. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται ενδέχεται να σχετίζονται με τη φλεγμονή και τις οξειδωτικές διαδικασίες που προκαλούνται από τα σωματίδια. Ακόμη, έχουν βρεθεί συνδέσεις μεταξύ της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια και της εμφάνισης διαταραχής ελλειμματικής προσοχής και υπερκινητικότητας στα παιδιά, του κινδύνου ανάπτυξης αυτισμού και της απώλεια γνωστικής λειτουργίας στους ενήλικες, συμπεριλαμβανομένων των ηλικιωμένων (Losacco και Perillo 2018; Ian Colbeck και Lazaridis, 2014; Λαζαρίδης, 2010).

Ο περιορισμός της έκθεσης στα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης κλιματισμού και φίλτρων αέρα σε εσωτερικούς χώρους, τη μείωση της καύσης για θέρμανση και μαγείρεμα, και τη διακοπή του καπνίσματος. Οι ευάλωτοι πληθυσμοί, όπως οι ηλικιωμένοι και οι ασθματικοί, ενδέχεται να ωφεληθούν από τον περιορισμό της δραστηριότητάς τους σε εξωτερικούς χώρους κατά τις ώρες αιχμής της κυκλοφορίας ή σε ημέρες με αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να προσφέρουν οφέλη τόσο στη βραχυπρόθεσμη αντιμετώπιση των συμπτωμάτων όσο και στην πρόληψη μακροχρόνιων επιπλοκών στις καρδιαγγειακές και αναπνευστικές παθήσεις (Anderson κ.ά., 2011).

Όσο μικρότερα είναι τα αιωρούμενα σωματίδια, τόσο πιο σοβαρές είναι οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία. Τα μεγαλύτερα σωματίδια τείνουν να συγκρατούνται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, ενώ τα λεπτότερα μπορούν να φτάσουν βαθιά στις κυψελίδες των πνευμόνων. Τα εξαιρετικά μικρά σωματίδια έχουν τη δυνατότητα να περάσουν ακόμα και στην κυκλοφορία του αίματος. Πιο αναλυτικά, τα αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm δεν μπορούν να εισέλθουν στις κατώτερες αναπνευστικές οδούς και παραμένουν στους ανώτερους αεραγωγούς, όπως είναι η ρινική και στοματική κοιλότητα, ο φάρυγγας και ο λάρυγγας, μέσω των μηχανισμών εναπόθεσης όπως η πρόσκρουση και η καθίζηση. Τα αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο από 1 έως 10 μm μπορούν να διεισδύσουν στη θωρακική περιοχή, δηλαδή στην τραχεία και τους βρόγχους. Τέλος, τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1 μm διεισδύουν βαθύτερα στους πνεύμονες, μέχρι την κυψελιδική περιοχή, που αποτελείται από τους αναπνευστικούς βρόγχους, τις πνευμονικές κυψελίδες (κυψελιδικοί αεραγωγοί και αεροθυλάκια) και τον συνδετικό ιστό, μέσω των μηχανισμών εναπόθεσης της διάχυσης, της καθίζησης και της διασποράς (Wark κ.ά., 1998; Λαζαρίδης, 2015).



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας που προκαλεί πιθανές επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό μετά την εκπομπή των ατμοσφαιρικών ρύπων (Λαζαρίδης, 2010).

Τα παραπάνω συμπεράσματα έχουν προκύψει ύστερα από ανάλυση παρατηρήσεων σχετικών με εισαγωγές σε νοσοκομεία σε περιόδους επεισοδίων ρύπανσης, ενώ τοξικολογικές μελέτες οδήγησαν στη εξακρίβωση των μηχανισμών επίδρασης. Αναλυτικότερα, οι τοξικολογικές μελέτες πραγματοποιούνται εισάγοντας στο αναπνευστικό σύστημα ζώων (με την αναπνοή ή με απευθείας είσοδο στην τραχεία) σωματίδια συγκεκριμένης κατανομής και σύστασης. Ωστόσο, τα σωματίδια που χορηγούνται στο αναπνευστικό σύστημα των ζώων, βρίσκονται σε συγκεντρώσεις πολύ υψηλότερες από αυτές που συναντώνται στην ατμόσφαιρα με σκοπό την ανίχνευση των άμεσων επιπτώσεων στην υγεία και στην παρατήρηση των μηχανισμών που τις προκαλούν. Λόγω αυτού, είναι αδύνατο να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την τοξικότητα των σωματιδίων για τον ανθρώπινο οργανισμό και να βρεθεί μια σχέση δόσης-απόκρισης. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις πως η τοξικότητα συνδέεται με την περιεκτικότητα των σωματιδίων σε διαλυτά συστατικά, ραδιενεργά μέταλλα και πιθανόν σε οργανικές ενώσεις (όπως PAHs). Επομένως, στις μελέτες τοξικότητας τα αεροζόλ χωρίζονται σε

διάφορες κατηγορίες, όπως οξέα, μέταλλα, βιολογικά αεροζόλ, πολύ μικρά σωματίδια, και άλλα αιωρούμενα σωματίδια όπως η σκόνη και η τέφρα.

2.2 Ο ρόλος των ΑΣ₁₀ στο κλίμα

Το σύστημα Γης/ατμόσφαιρας λαμβάνει συνεχώς ηλιακή ακτινοβολία (σύντομο κύμα και κοντά στο υπέρυθρο). Πιο συγκεκριμένα, ένα μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, αντανακλάται στην επιφάνεια της Γης και εκπέμπεται άμεσα στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό απορροφάται από τη Γη. Επιπλέον, η μακροκυματική (υπέρυθη) ακτινοβολία εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης και διαφεύγει στο διάστημα από την κορυφή της ατμόσφαιρας. Η ισορροπία μεταξύ της ακτινοβολίας που εισέρχεται και της ακτινοβολίας που εξέρχεται από την ατμόσφαιρα, ελέγχει τη θερμοκρασία της Γης και τα απορροφητικά και διασκορπιστικά υλικά (όπως τα αερολύματα) στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν αυτή την ισορροπία (Colbeck και Lazaridis, 2014). Με άλλα λόγια, τα ατμοσφαιρικά αερολύματα επηρεάζουν το κλίμα της Γης, καθώς μεταβάλλουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται και της γήινης μακροκυματικής ακτινοβολίας που παραμένει στο σύστημα της Γης (Mohapatra και Biswal, 2014). Αυτό συμβαίνει μέσω διαφόρων μηχανισμών, οι οποίοι χωρίζονται σε άμεσα και έμμεσα αποτελέσματα.

▪ Έμμεσα αποτελέσματα:

Σε περίπτωση όπου υπάρξει αύξηση της συγκέντρωσης των αερολυμάτων από ανθρωπογενείς πηγές, αυτή οδηγεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις πυρήνων συμπύκνωσης νεφών (Cloud Condensation Nuclei, CCNs), οι οποίες στη συνέχεια δημιουργούν σύννεφα με περισσότερα σταγονίδια μικρότερης ακτίνας, αυξάνοντας την λευκαύγεια των νεφών (πρώτο έμμεσο αποτέλεσμα) και την αποδοτικότητα της βροχόπτωσης, το λεγόμενο φαινόμενο διάρκειας ζωής των νεφών (δεύτερο έμμεσο αποτέλεσμα) και γενικότερα επηρεάζουν τον υδρολογικό κύκλο. Με άλλα λόγια, για σταθερό περιεχόμενο υγρού νερού, μια αύξηση στα αερολύματα οδηγεί σε περισσότερες σταγόνες αλλά μικρότερου μεγέθους, αυξάνοντας το πάχος των νεφών και τη ποσότητα της επιφάνειας των σταγόνων που είναι σε επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα. Από τη συγκέντρωση των αερολυμάτων ανάλογα με το μέγεθος τους, υπολογίζεται η μείωση της ακτινοβολίας, όπως και οι συγκεντρώσεις των πυρήνων συμπύκνωσης νεφών που προκύπτουν από την αύξηση μικρών λεπτών αερολυμάτων της ατμόσφαιρας σε κρίσιμα μεγέθη. Οι έμμεσες κλιματικές επιδράσεις των αερολυμάτων είναι πιο περίπλοκες και πιο δύσκολο να

εκτιμηθούν από τις άμεσες επιδράσεις, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, επειδή εξαρτώνται από μια αλυσίδα φαινομένων που συνδέουν τα επίπεδα αερολυμάτων με τις συγκεντρώσεις των πυρήνων συμπύκνωσης νεφών, τις συγκεντρώσεις των πυρήνων συμπύκνωσης νεφών με τον αριθμό των σταγονιδίων νεφών (και το μέγεθός τους) και αυτά με τη σειρά τους με την λευκαύγεια και τη διάρκεια ζωής των νεφών. Αν και υπάρχει συναίνεση ότι τα αερολύματα έχουν ψυκτικό αποτέλεσμα στο κλίμα της Γης, δηλαδή συμβάλλουν στη μείωση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, στην πραγματικότητα είναι πολύ αβέβαιο το αποτέλεσμά τους στο κλίμα (Colbeck και Lazaridis, 2014; Seinfeld, 2006).

▪ Άμεσα αποτελέσματα:

Στα άμεσα αποτελέσματα των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα ανήκουν η απορρόφηση και η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας.

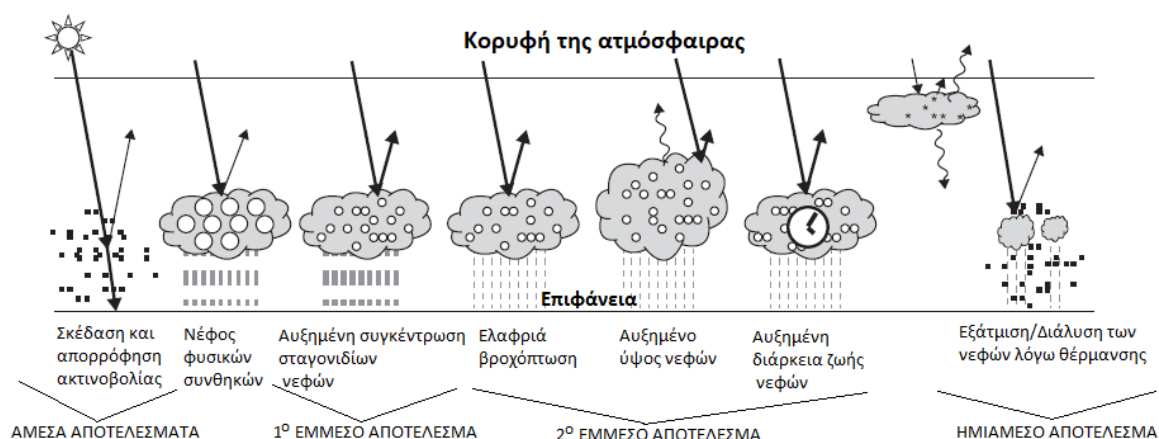
Απορρόφηση:

Τα αιωρούμενα σωματίδια, δημιουργούν ένα στρώμα σκόνης το οποίο απορροφά μικρό αλλά και μεγάλο μήκος κύματος ακτινοβολίας, το οποίο έχει ως συνέπεια να αυξάνεται ο ρυθμός θέρμανσης του στρώματος αυτού. Όσον αφορά τις απορροφητικές ιδιότητές του, αυτές αλλάζουν ανάλογα με την σύσταση του αερολύματος. Δηλαδή, τα μικτά αερολύματα, που αποτελούνται από ορυκτή σκόνη και άλλα σωματίδια όπως η αιθάλη, μπορεί να έχουν υψηλότερες απορροφητικές ιδιότητες, έναντι των αερολυμάτων που αποτελούνται από σκόνη και θειικά (Arimoto κ.ά., 2006; Garcia κ.ά., 2011). Πιο συγκεκριμένα, η συνδυασμένη δράση απορρόφησης και ανάκλασης της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος μειώνει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός θέρμανσης της ατμόσφαιρας κάτω από το στρώμα σκόνης. Από την άλλη, όταν το στρώμα σκόνης παγιδεύει την εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, η θερμική ακτινοβολία της σκόνης στην επιφάνεια παραμένει πάντα θετική (Haywood και Boucher, 2000; Hansell κ.ά., 2010). Αυτό σημαίνει ότι όταν το στρώμα αλληλεπιδρά μόνο με ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, θερμαίνει την επιφάνεια, ιδίως κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Σκέδαση:

Η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελεί την κύρια επίδραση των αερολυμάτων στο κλίμα, μέσω της οποίας αλλάζει η κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, μειώνοντας έτσι την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που διαφεύγει από την κορυφή της ατμόσφαιρας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, δροσίζοντας το κλιματικό σύστημα. Στην ατμόσφαιρα η ακτινοβολία σκεδάζεται από σωματίδια με διαστάσεις που κυμαίνονται από το μέγεθος των μορίων (10^{-4} μm) μέχρι το μέγεθος των υδροσταγονιδίων (10 μm) και το μέγεθος των σταγόνων της βροχής (10^2 - 10^4 μm) (Λαζαρίδης, 2010). Επομένως, τα αερολύματα που σκεδάζουν την ακτινοβολία δημιουργούν ένα αποτέλεσμα αντίθετο από αυτό των αερίων του θερμοκηπίου στη θερμοκρασία της παγκόσμιας ατμόσφαιρας (Foster κ.ά, 2007), επιβραδύνοντας την θέρμανση του κλίματος. Από την άλλη πλευρά, τα αερολύματα που απορροφούν ακτινοβολία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για παράδειγμα όπως ο μαύρος άνθρακας και η σκόνη, θερμαίνουν το ατμοσφαιρικό στρώμα στο οποίο βρίσκονται, αλλάζοντας τη δυναμική σταθερότητα της ατμόσφαιρας

Τα περισσότερα είδη αερολυμάτων είναι σχετικά μικρά, συνήθως συγκρίσιμα σε μέγεθος με το μήκος κύματος του ορατού φωτός ή και μικρότερα. Αερολύματα όπως τα θειικά, τα νιτρικά και το θαλασσινό αλάτι μπορούν να θεωρηθούν καθαρά διασκορπιστικά στα ορατά μήκη κύματος. Επομένως, η επίδραση της σκέδασης που προκαλούν είναι πιο έντονη στο φάσμα των βραχέων κυμάτων, ενώ είναι αμελητέα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από περίπου ένα μικρόμετρο, με εξαίρεση ορισμένα μεγάλα σωματίδια σκόνης. Αυτή η φασματική ιδιότητα διαφέρει από τα περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία απορροφούν κυρίως στην υπέρυθη θερμική περιοχή (Jing Li κ.ά., 2022).



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα της επίδρασης των αιωρούμενων σωματιδίων στα φαινόμενα των νεφών και κατ'επέκταση στην ακτινοβολία. Οι μικρές μαύρες κουκκίδες απεικονίζουν τα σωματίδια αερολυμάτων, ενώ οι μεγαλύτεροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις σταγόνες νεφών. Οι ευθείες γραμμές απεικονίζουν την προσπίπτουσα και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι κυματιστές γραμμές την επίγεια ακτινοβολία. Οι γεμάτοι λευκοί κύκλοι υποδεικνύουν τη συγκέντρωση των σταγονιδίων νεφών (αναπροσαρμοσμένο από Colbeck και Lazaridis, 2014).

2.3 Ο ρόλος των ΑΣ₁₀ στην ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι επιπτώσεις της στην ποιότητα του αέρα και στο περιβάλλον αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα. Οι σημαντικότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO₂, CO), οι μη μεθανικές οργανικές ενώσεις (Non Methane Volatile Organic Compounds, NMVOCs), το μεθάνιο (CH₄), τα οξείδια και το υπεροξείδιο του αζώτου (NO_x, N₂O), η αμμωνία (NH₃), το διοξείδιο του θείου (SO₂), πτητικές ενώσεις (VOC), τα βαρέα μέταλλα (Heavy Metals, HM), οι παραμένοντες οργανικοί ρύποι (Persistent Organic Pollutants, POPs) και τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter, PM). Οι ρύποι αυτοί μπορούν να εκπεμφθούν από διάφορες πηγές όπως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και από τη βιόσφαιρα-γεώσφαιρα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τον άνθρωπο θεωρείται ως η σημαντικότερη παράμετρος υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα. Μέσω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων εκτός από τους συμβατικούς ρύπους, εκπέμπονται και πολλές επικίνδυνες και τοξικές ενώσεις για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, τόσο σε αέρια όσο και σε σωματιδιακή μορφή. Οι σταθμοί παραγωγής και μετατροπής ενέργειας, τα μέσα μεταφοράς, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι καλλιεργούμενες εκτάσεις αποτελούν τις κύριες πηγές αέριων ρύπων. Από τη βιόσφαιρα εκπέμπονται

μεγάλες ποσότητες αέριων και σωματιδιακών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι κύριες πηγές αέριων ρύπων από τη βιόσφαιρα είναι βλάστηση, οι δασικές πυρκαγιές, το έδαφος, οι αστραπές, οι υγρότοποι, οι ωκεανοί, τα ηφαίστεια και η άγρια πανίδα. Αξίζει να σημειωθεί, πως η βιόσφαιρα εκτός από πηγή εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί και καταβόθρα για ορισμένους ρύπους όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το μεθάνιο (CH_4). Οι εκλυόμενες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων από τις φυσικές πηγές σε παγκόσμια κλίμακα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Λαζαρίδης, 2010; Seinfeld και Pandis, 1998; CORINAIR, 2001).

Όσον αφορά τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια, αυτά μπορεί να προέρχονται απευθείας από εκρήξεις ηφαιστειών, θραύσματα μετεωριτών, θαλασσινό αλάτι, από δασικές πυρκαγιές και από επαναιώρηση σκόνης λόγω διάβρωσης από τον άνεμο (πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια), αλλά μπορεί και να σχηματιστούν στην ατμόσφαιρα (δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια) μέσω χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνουν αέρια πρόδρομα (αέρια που συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν δευτερογενή ρύπους) όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO_2), την αμμωνία (NH_3) και τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Ο σχηματισμός τους καθορίζεται κυρίως από τις ποσότητες των προδρόμων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα αλλά και από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη δημιουργία φωτοχημικού νέφους (Nguyen Nhat Ha Chi, 2021). Το φωτοχημικό νέφος είναι ένας μοναδικός τύπος ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ορίζεται ως νέφος που δημιουργείται από αντιδράσεις μεταξύ του ηλιακού φωτός και των ρύπων όπως οι υδρογονάνθρακες και το διοξείδιο του αζώτου και συναντάται σε όλες τις σύγχρονες πόλεις καθιστώντας το ένα πρόβλημα της σύγχρονης βιομηχανοποίησης. Ωστόσο, λόγω τού ότι μεταφέρεται με τον άνεμο, μπορεί να επηρεάσει ακόμα και αραιοκατοικημένες περιοχές (Rani, 2011).

Τα αιωρούμενα σωματίδια, εκτός από τη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους συμβάλλουν και στην εμφάνιση της όξινης βροχής, η οποία αποτελεί πλέον ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό ζήτημα. Οι κύριοι πρόδρομοι της όξινης βροχής είναι οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO_2) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x), αλλά και μια ποικιλία άλλων εκπομπών επηρεάζουν επίσης την οξύτητα, κυρίως υδροχλωρικό οξύ, αμμωνία, πτητικές οργανικές ενώσεις και αλκαλική σκόνη. Αυτά τα είδη έχουν προέλευση από φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς πηγές. Οι φυσικές εκπομπές περιλαμβάνουν βιογενείς εκπομπές από χερσαίες, παλιρροιακές και ωκεάνιες περιοχές πλούσιες σε θρεπτικά συστατικά, οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία επηρεάζοντας την παραγωγή δευτερογενών ρύπων και, κατά συνέπεια, την ποιότητα του αέρα (Λαζαρίδης, 2010). Οι μη βιογενείς εκπομπές δημιουργούνται από φυσικές καύσης, γεωθερμική δραστηριότητα, κεραυνοί, αερομεταφερόμενο έδαφος και νερό αεροζόλ (Irwin και Williams, 1988). Η όξινη βροχή, με pH

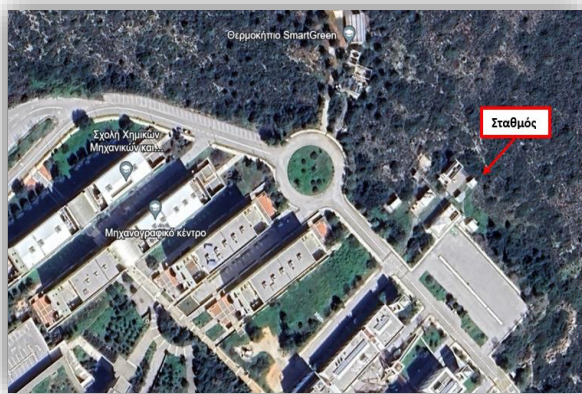
μικρότερο από 5.6, προκύπτει από τη δημιουργία νιτρικού και θειικού οξέος λόγω της αντίδρασης του νερού με συστατικά των καυσαερίων, όπως το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x). Τα οξέα αυτά στη συνέχεια καταλήγουν στο έδαφος μέσω της βροχής, προκαλώντας μια σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως ρύπανση εδάφους και υδάτων, αποψίλωση δασών, καθώς και αρνητικές επιπτώσεις σε καλλιέργειες και κτίρια. Επιπλέον, η όξινη βροχή συμβάλλει στην οξίνιση λιμνών και ρευμάτων, με πιθανές αρνητικές συνέπειες για τη χλωρίδα και την πανίδα των υδρόβιων οικοσυστημάτων (Λαζαρίδης, 2010).

Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις ΑΣ₁₀ στην περιοχή δειγματοληψίας

3.1 Περιοχή μελέτης

Ο σταθμός μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων (σταθμός Ακρωτηρίου) βρίσκεται στη περιοχή των Κουνουπιδιανών και συγκεκριμένα εντός της έκτασης του Πολυτεχνείου Κρήτης, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.1. Τα Κουνουπιδιανά είναι μια κωμόπολη, η οποία ανήκει στη δημοτική ενότητα Ακρωτηρίου της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων της δυτικής Κρήτης σύμφωνα με το νόμο 3852/2011 (Πρόγραμμα Καλλικράτης). Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας του σταθμού, σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87) είναι 35.5N και 24.1E για το γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η Πολυτεχνειούπολη καταλαμβάνει έκταση 2,9 km² και βρίσκεται 7 km βορειοανατολικά της πόλης, ενώ απέχει από τον οικισμό των Κουνουπιδιανών μόλις 400 m. Ακόμη, είναι σε απόσταση 6,5 km από τον Αερολυμένα Χανίων «Ιωάννης Δασκαλογιάννης» και 8,5 km από το λιμάνι της Σούδας. Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ (Ελληνική Στατιστική Αρχή) στην απογραφή του 2021, ο οικισμός των Κουνουπιδιανών βρέθηκε να έχει 9.220 μόνιμους κατοίκους. Ωστόσο, επειδή αποτελεί παραθαλάσσια περιοχή, κατά την διάρκεια των θερινών μηνών παρατηρείται αυξημένη κίνηση στο λιμάνι, στο αεροδρόμιο αλλά και στη περιοχή γενικότερα λόγω της έντονης τουριστικής δραστηριότητας.

α)



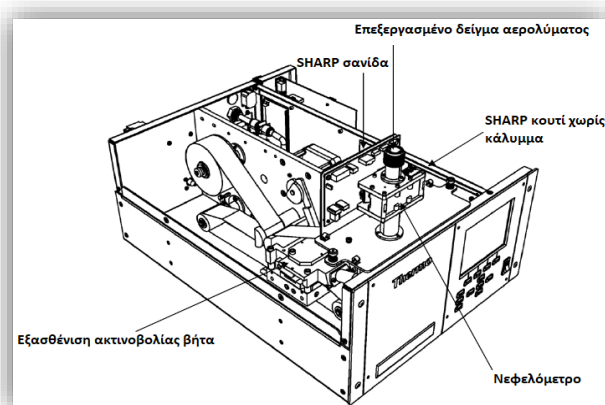
β)



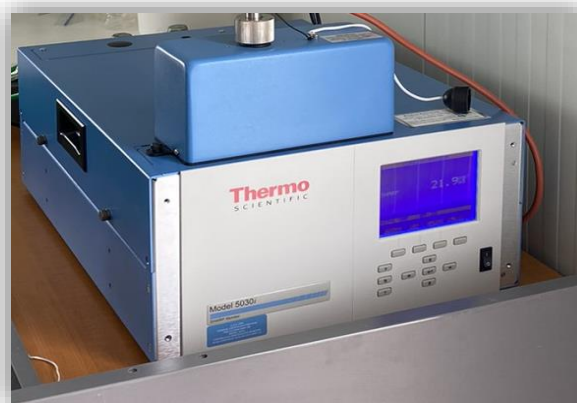
Σχήμα 3.1: α) Δορυφορική φωτογραφία της τοποθεσίας του σταθμού (από Google Earth) και β) φωτογραφία του σταθμού στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

3.2 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, SHARP MONITOR

Το όργανο μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων ονομάζεται Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate (SHARP) Monitor, Model 5030i και παράγεται από την εταιρία Thermo Fisher Scientific. Πρόκειται για έναν υβριδικό νεφελομετρικό/ραδιομετρικό μετρητή συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών αερολυμάτων AS_1 , $AS_{2.5}$ και AS_{10} , ο οποίος δύναται να παρέχει ακριβείς μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Το όργανο συνδυάζει την σκέδαση του φωτός που διαχέεται από τα σωματίδια, καθώς αυτά διέρχονται από μια ακτίνα φωτός με μήκος κύματος 880 nm και τη ραδιομετρική τεχνική της εξασθένησης της ακτινοβολίας βήτα. Το εύρος μέτρησης του Μοντέλου 5030i είναι από 0 έως $10.000 \mu g m^{-3}$. Το μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



α)



β)

Σχήμα 3.2: α) Sharp Monitor, Model 5030i (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2018) και β) Sharp Monitor, Model 5030i στον σταθμό του Πολυτεχνείου Χανίων.

Σε πρώτο στάδιο, το δείγμα αέρα εισάγεται σε είσοδο κυκλώνα με ρυθμό ροής $16,67 L min^{-1}$ και η διατήρησή του επιτυγχάνεται μέσω μιας αναλογικής βαλβίδας. Με σκοπό τη μείωση των επιπτώσεων της υγρασίας στη μέτρηση αλλά και για τον μετριάσμό των πτητικών ενώσεων και των παρεμβολών, είναι τοποθετημένα συστήματα μέτρησης υγρασίας και θέρμανσης του δείγματος. Πιο αναλυτικά, η θερμότητα που εφαρμόζεται στο δείγμα είναι ρυθμιζόμενη είτε σε σταθερή θερμοκρασία, είτε σε πρότυπο όριο για την σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH) στο σημείο του φίλτρου. Το δείγμα θερμαίνεται ούτως ώστε να μειωθεί η ποσότητα του νερού που περιέχεται στα σωματίδια και συνεπώς να μειωθεί η σχετική υγρασία της ροής του δείγματος. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθούν σφάλματα που ενδέχεται να προκύψουν ως αποτέλεσμα της συμπύκνωσης στη ταινία φίλτρου ή των

συνθηκών αυξημένης υγρασίας. Ο θερμαντήρας ελέγχεται από τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit, CPU) και η ισχύς που εφαρμόζεται είναι ανάλογη με τις συνθήκες.

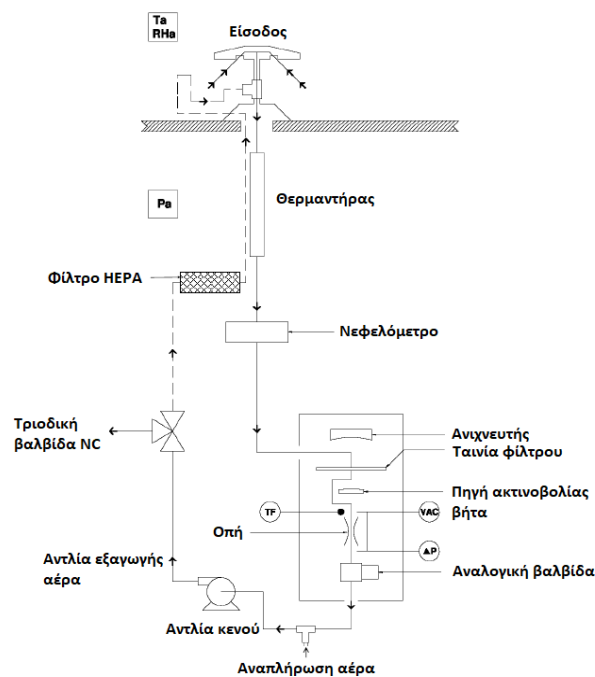
Στη συνέχεια, το επεξεργασμένο δείγμα περνά μέσα από μια οπτική διάταξη που χρησιμοποιεί πηγή φωτός μήκους κύματος 880 nm και από έναν ανιχνευτή με σκοπό να μετρηθεί η σκέδαση φωτός αυτού του δείγματος. Αυτή είναι η αρχή της νεφελομετρίας και η απόκριση του ανιχνευτή είναι γραμμική ως προς τη συγκέντρωση των αερολυμάτων και ανεξάρτητη από το ρυθμό ροής του δείγματος.

Ύστερα από την οπτική διάταξη, το ρεύμα του δείγματος διέρχεται από μια ταινία φίλτρου, η οποία είναι κατασκευασμένη από ίνες γυαλιού και είναι τοποθετημένη μεταξύ της πηγής των σωματιδίων βήτα και του ανιχνευτή. Τα σωματίδια του δείγματος αέρα κατακρατούνται πάνω στο φίλτρο και θα συλλεχθούν πριν από το σημείο κορεσμού της ταινίας, ώστε να αποφευχθεί ο φραγμός του. Τουλάχιστον μία φορά κάθε 24 ώρες, συνήθως τα μεσάνυχτα, γίνεται αυτόματη αλλαγή του φίλτρου στον θάλαμο δειγματοληψίας και ανίχνευσης, εισάγοντας ένα καθαρό φίλτρο. Ωστόσο, για τις δοκιμές που πραγματοποιούνται από τον Τεχνικό Σύλλογο Ελέγχου (Technischer Überwachungs-Verein, TÜV) και την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA) για τα $AS_{2,5}$ και AS_{10} , προτείνεται αλλαγή της ταινίας φίλτρου ανά 8 ώρες. Το διάστημα αλλαγής φίλτρου και η ώρα της ημέρας που θα γίνει αυτό μπορούν να προσαρμοστούν από τον χρήστη. Επιπλέον, γίνεται αυτόματη αλλαγή του φίλτρου αν η μάζα πάνω στο φίλτρο υπερβεί τα 1.500 μg από την τελευταία αλλαγή του ή αν ο ρυθμός ροής μέσω της ταινίας φίλτρου μειωθεί κατά περισσότερο από 5% λόγω πιθανής περιοριστικής εναπόθεσης σωματιδίων. Οι αυτόματες αλλαγές φίλτρου ελέγχονται από το λογισμικό της συσκευής, το οποίο διακόπτει τη λειτουργία της αντλίας, μειώνοντας την πίεση στο θάλαμο κενού και προωθώντας το φίλτρο κατά μία σταθερή απόσταση. Με αυτόν τον τρόπο, επαναφέρεται η πίεση στο θάλαμο κενού, και ξεκινά πάλι η λειτουργία της αντλίας και ο μηδενισμός μάζας του δείγματος. Δηλαδή, ξεκινά ένας νέος κύκλος μετρήσεων.

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, η εξασθένιση της ακτινοβολίας βήτα χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μάζας των σωματιδίων που έχουν συγκεντρωθεί πάνω στα φίλτρα. Συγκεκριμένα, ο ανιχνευτής καταγράφει την ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή βήτα τόσο πριν όσο και μετά τη διαδικασία συλλογής του δείγματος. Καθώς τα σωματίδια απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας, η ένταση της ακτινοβολίας βήτα μειώνεται με την αύξηση της μάζας των σωματιδίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της τελικής έντασης που μετρείται από τον ανιχνευτή. Επομένως, η διαφορά που θα προκύψει ανάμεσα στις δύο μετρήσεις (πριν και μετά την συλλογή του δείγματος) μετατρέπεται σε συγκέντρωση μάζας, η οποία απεικονίζεται σε ψηφιακή μορφή. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως ο θάλαμος εξασθένισης της ακτινοβολίας βήτα μετρά και τις εκπομπές άλφα από το συσσωρευμένο

αερόλυμα, για την ανίχνευση της παρουσίας ραδονίου (Rn) και των θυγατρικών νουκλεϊδίων του, καθώς αυτά παράγουν μικρές εκπομπές βήτα τις οποίες ο ανιχνευτής αντιλαμβάνεται με αποτέλεσμα να προκαλούν ανακριβή αύξηση της μέτρησης μάζας. Συνεπώς, με τη μέτρηση της φυσικής δραστηριότητας άλφα που προκαλείται από το ραδόνιο, η παρεμβολή από τις εκπομπές βήτα των θυγατρικών νουκλεϊδίων αφαιρείται από τον συνολικό ρυθμό καταμέτρησης, παρέχοντας μια πιο ακριβή μέτρηση της μάζας (Sun κ.ά., 2020; Λαζαρίδης, 2010; Thermo Fisher Scientific, 2018).

Στο Σχήμα 3.3 αναπαρίστανται οι γενικές θέσεις των αισθητήρων θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, του δείγματος και του τοίχου του θερμαντήρα, του αισθητήρα σχετικής υγρασίας (RH) του δείγματος στην πάνω πλευρά, των αισθητήρων κενού, διαφορικής πίεσης και βαρομετρικής πίεσης, καθώς και της αντλίας κενού που ελέγχεται από μεταβλητή ταχύτητα.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής της λειτουργίας του SHARP MONITOR (αναπροσαρμοσμένο από Thermo Fisher Scientific, 2018).

Το ρεύμα εξόδου του αναλυτή βασίζεται σε μέσους όρους ενός λεπτού του νεφελομέτρου, πολλαπλασιασμένους με έναν διορθωτικό παράγοντα. Ο διορθωτικός παράγοντας βασίζεται στις δυναμικές συγκεντρώσεις του νεφελομέτρου και της εξασθένισης βήτα ακτινοβολίας:

$$\text{Ρεύμα εξόδου (output)} = N_{ave} \times \frac{B}{N} \quad (3.1)$$

Όπου Ρεύμα εξόδου (output): η συγκέντρωση του οργάνου SHARP Monitor ($\mu\text{g m}^{-3}$).

N_{ave} : ο τρέχων μέσος όρος ενός λεπτού του νεφελόμετρου ($\mu\text{g m}^{-3}$).

B: η δυναμικά φιλτραρισμένη συγκέντρωση της βήτα ακτινοβολίας ($\mu\text{g m}^{-3}$).

N: η δυναμικά φιλτραρισμένη συγκέντρωση του νεφελόμετρου ($\mu\text{g m}^{-3}$).

3.3 Μοντέλο HYSPLIT

Το μοντέλο HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) του Εργαστηρίου Ατμοσφαιρικών Πόρων (Air Resources Laboratory, ARL) της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (National Oceanic και Atmospheric Administration, NOAA) είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα για τον υπολογισμό τόσο απλών διαδρομών αερίων μαζών όσο και σύνθετων προσομοιώσεων διασποράς, χημικών μετασχηματισμών και εναπόθεσης αυτών. Ουσιαστικά, το μοντέλο HYSPLIT προσομοιώνει τη μεταφορά, τη διασπορά και την εναπόθεση των αερίων μαζών καθώς αυτές ταξιδεύουν από τις περιοχές προέλευσης στους δέκτες (οπισθοπορείες). Η NOAA σε συνεργασία με το Γραφείο Μετεωρολογίας της Αυστραλίας (Bureau of Meteorology Australia, BOM) εφάρμοσε στο μοντέλο αλγόριθμους προώθησης, ενημερωμένες εξισώσεις σταθερότητας και διασποράς, ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη και την επιλογή ένδειξης για χημικούς μετασχηματισμούς.

Το μοντέλο έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα προσομοιώσεων που σχετίζονται με τη μεταφορά και διασπορά ρύπων και επικίνδυνων υλικών στην ατμόσφαιρα, καθώς και με την εναπόθεση αυτών των υλικών στην επιφάνεια της Γης. Επίσης, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση και η πρόβλεψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών, ηφαιστειακής τέφρας, καπνού από δασικές πυρκαγιές και ρύπων από διάφορες σταθερές και κινητές πηγές εκπομπών (Stein κ.ά., 2006; Stein κ.ά., 2015).

Στη παρούσα τεχνική έκθεση, πραγματοποιήθηκε χρήση του μοντέλου HYSPLIT με σκοπό να προσδιοριστούν για ποιες ημέρες του έτους 2023 οι αέρες μάζες προήλθαν από την έρημο Σαχάρα, ούτως ώστε αυτές οι ημέρες σε συνδυασμό με τις ημέρες όπου σημειώθηκαν αυξημένα επίπεδα $\text{A}_{\text{S}_{10}}$ και των δορυφορικών εικόνων από τη NASA, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια, να εξεταστούν αν αποτελούν ημέρες με επεισόδια σκόνης. Το μοντέλο για να υπολογίσει την πορεία των αερίων μαζών χρησιμοποίησε ως δεδομένα τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού (35.5N, 24.1E), την ημερομηνία καθώς και την ώρα 12:00 UTC (Coordinated Universal Time) και την κατεύθυνση της

τροχιάς από την πηγή στον δέκτη, δηλαδή την «προς τα πίσω» τροχιά (backward), και συνολικό χρόνο προσομοίωσης 5 ημέρες, δηλαδή 120 ώρες (Chatoutsidou κ. ά., 2019).

3.4 Δορυφορικές εικόνες NASA

Οι δορυφορικές εικόνες της NASA μπορούν να βρεθούν μέσω της ιστοσελίδας <https://zoom.earth/>, οι οποίες απεικονίζονται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, καθώς ενημερώνονται μόλις ανά 10 λεπτά μέσω των γεωστατικών δορυφόρων NOAA GOES και JMA Himawari, ενώ εικόνες από τον δορυφόρο EUMETSAT Meteosat ενημερώνονται ανά 15 λεπτά. Η ιστοσελίδα παρέχει πληθώρα πληροφοριών όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία, η υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, οι τροπικές καταιγίδες, οι τυφώνες αλλά και οι πυρκαγιές. Πιο συγκεκριμένα, σε πραγματικό χρόνο ενημερώνονται οι χάρτες καιρού, ενώ οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (High Definition, HD) ενημερώνονται δύο φορές την ημέρα από τους πολιτικούς δορυφόρους της NASA, Aqua και Terra, χρησιμοποιώντας υπηρεσίες από το Gordon Institute of Business Science (GIBS) που αποτελεί μέρος του Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS).

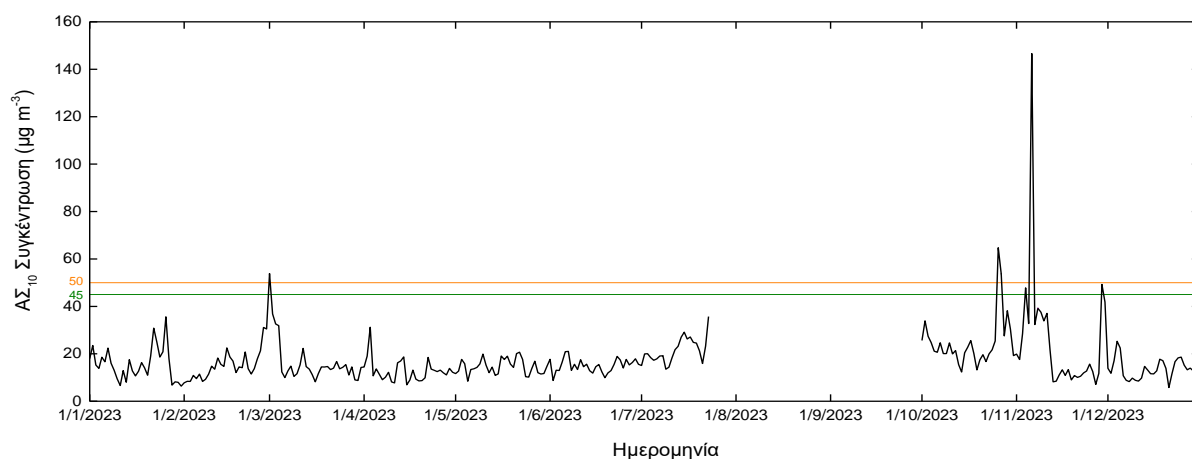
3.5 Μετεωρολογικά δεδομένα

Οι κύριες μετεωρολογικές παράμετροι καταγράφονταν συνεχώς στον σταθμό του Ακρωτηρίου με έναν αισθητήρα ταχύτητας ανέμου 4034BG, έναν αισθητήρα κατεύθυνσης ανέμου 4122BG και έναν συνδυασμένο αισθητήρα θερμοκρασίας/υγρασίας 3030 BG (Theodor Friedrichs και Co., Γερμανία) χρησιμοποιώντας διάστημα καταγραφής 10 λεπτών (Chatoutsidou κ. ά., 2019).

Κεφάλαιο 4: Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων

4.1 Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ₁₀

Από το Διάγραμμα 4.1 παρατηρείται πως το εύρος των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων κυμαίνεται από $5,8 \mu\text{g m}^{-3}$ έως $146,6 \mu\text{g m}^{-3}$. Τον Νοέμβριο υπάρχει μια απότομη αύξηση στη τιμή της μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης, η οποία οφείλεται στην μεταφορά Αφρικανικής σκόνης, όπως θα εξεταστεί παρακάτω στο υποκεφάλαιο 4.4. Η συγκέντρωση βρέθηκε ίση με $146,6 \mu\text{g m}^{-3}$, η οποία αντιστοιχεί όχι μόνο στην υψηλότερη συγκέντρωση του φθινοπώρου αλλά και ολόκληρου του έτους, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η αμέσως επόμενη υψηλότερη συγκέντρωση, σημειώθηκε τέλη Οκτωβρίου με τιμή αρκετά μικρότερη από την προηγούμενη, ίση με $64,7 \mu\text{g m}^{-3}$. Για την άνοιξη, η μεγαλύτερη συγκέντρωση που καταγράφηκε ήταν $53,8 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες ήταν ίση με $35,6 \mu\text{g m}^{-3}$. Επιπλέον, παρατηρείται πως η μέση ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ ως επί το πλείστον είναι μικρότερη των νομοθετικών ορίων που έχουν καθιερωθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) σύμφωνα με την Οδηγία 2008/50/ΕΚ και από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.) σχετικά με τα όρια ποιότητας στην ατμόσφαιρα.



Διάγραμμα 4.1: Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις μάζας των ΑΣ₁₀ κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) και υπόδειξη των υπερβάσεων με βάση τα ημερήσια νομοθετικά όρια της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ. (η πορτοκαλί γραμμή με τιμή $50 \mu\text{g m}^{-3}$ αναπαριστά το ημερήσιο νομοθετικό όριο της Ε.Ε., ενώ η πράσινη γραμμή με τιμή $45 \mu\text{g m}^{-3}$ το ημερήσιο νομοθετικό όριο του Π.Ο.Υ.) Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.

Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε παρατηρείται σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τον Νοέμβριο, σε σημείο που να υπερβαίνουν το ημερήσιο νομοθετικό όριο τόσο του Π.Ο.Υ., όσο και της Ε.Ε. Ακόμη, υπερβάσεις των ορίων σημειώνονται και για τους μήνες Μάρτιο και Οκτώβριο. Σε αντίθεση με τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων του προηγούμενου έτους 2022, όπου οι περισσότερες υπερβάσεις σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια της Άνοιξης και συγκεκριμένα τους μήνες Απρίλιο και Μάιο (Μπαλή, 2022). Στη συνέχεια, στον Πίνακα 4.1 υπολογίστηκαν οι τυπικές στατιστικές παράμετροι για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις όλου του έτους.

Πίνακας 4.1: Στατιστικές παράμετροι των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀ για το έτος 2023. Εύρεση της ελάχιστης και της μέγιστης συγκέντρωσης, καθώς και του μέσου όρου των συγκεντρώσεων και ταξινόμηση αυτών σε εκατοστημόρια. Οι συγκεντρώσεις δίνονται σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$.

	Μέσος όρος	Ελάχιστη	10 ^ο	25 ^ο	50 ^ο	75 ^ο	90 ^ο	Μέγιστη
Συγκέντρωση	17,4	5,8	9,0	11,8	14,7	19,7	27,0	146,6

Από τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει πως η μέση ετήσια συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ βρέθηκε ίση με 17,4 $\mu\text{g m}^{-3}$. Από την ανάλυση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων, συμπεραίνεται πως γενικότερα οι συγκεντρώσεις για το έτος 2023 δεν βρέθηκαν σε υψηλά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πως η συγκέντρωση του 90^{ου} εκατοστημορίου είναι μόλις 27 $\mu\text{g m}^{-3}$. Δηλαδή, το 90% των μετρήσεων ολόκληρου του έτους έχουν τιμή συγκέντρωσης μικρότερη από 27 $\mu\text{g m}^{-3}$ και για αυτό τον λόγο οι συγκεντρώσεις χαρακτηρίζονται γενικότερα ως χαμηλές. Το γεγονός αυτό συνδέεται με το ότι η μέση ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ ως επί το πλείστον είναι μικρότερη των νομοθετικών ορίων όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Στον Πίνακα 4.2 παρατίθεται αναλυτικά ο αριθμός των ημερών που ξεπεράστηκαν τα ημερήσια νομοθετικά όρια για τα ΑΣ₁₀, καθώς και οι ημερομηνίες αυτών. Παρατηρείται ότι οι συνολικές ημέρες υπέρβασης του νομοθετικού ορίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι μόλις 4 ημέρες και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας είναι 6 ημέρες. Ακόμη, γίνεται αντιληπτή η σημαντική μείωση των συνολικών ημερών υπέρβασης των νομοθετικών ορίων σε σχέση με το έτος 2022. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση κατά 73,33% των συνολικών ημερών υπέρβασης των νομοθετικών ορίων της Ε.Ε. και 70% του Π.Ο.Υ. σε σύγκριση με αυτές του έτους 2022, οι οποίες σε όλη τη διάρκεια του έτους ήταν 15 ημέρες

και 20 αντίστοιχα (Μπαλή, 2022). Σύμφωνα με την Οδηγία της Ε.Ε. για την συγκέντρωση των ΑΣ₁₀, ότι δεν πρέπει να ξεπερνά τα 50 μg m⁻³ την ημέρα, πάνω από 35 φορές τον χρόνο, συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει υπέρβαση του ετήσιου ορίου κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας.

Πίνακας 4.2: Ημερομηνίες όπου σημειώθηκαν υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (Π.Ο.Υ.), δηλαδή μετρήσεις των συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀ μεγαλύτερες από 50 μg m⁻³ και 45 μg m⁻³ αντίστοιχα.

Μήνας	Υπέρβαση ορίου Ε.Ε.	Υπέρβαση ορίου Π.Ο.Υ.
Ιανουάριος	-	-
Φεβρουάριος	-	-
Μάρτιος	01	01
Απρίλιος	-	-
Μάιος	-	-
Ιούνιος	-	-
Ιούλιος	-	-
Αύγουστος	-	-
Σεπτέμβριος	-	-
Οκτώβριος	26,27	26,27
Νοέμβριος	6	4,6,29
Δεκέμβριος	-	-
Σύνολο υπερβάσεων	4	6

Κυρίαρχο ρόλο στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης, έχουν οι ημέρες με επεισόδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα που θα εξεταστούν αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 4.4. Ωστόσο, εκτός από την συνεισφορά των ημερών με επεισόδια σκόνης, που αποτελούν μια φυσική πηγή, στην αύξηση των επιπέδων συγκεντρώσεις των ΑΣ₁₀, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο τόσο οι πηγές ανθρωπογενών, όσο και άλλων φυσικών εκπομπών. Συνεπώς, δεδομένου ότι ο σταθμός είναι τοποθετημένος σε μια προαστιακή παραθαλάσσια περιοχή είναι πιθανό οι αυξήσεις των συγκεντρώσεων να οφείλονται και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες της γύρω περιοχής, καθώς σε απόσταση μόλις 400 m από τον σταθμό βρίσκεται ο οικισμός των Κουνουπιδιανών. Αν και ο μικρός πληθυσμός του οικισμού δεν του επιτρέπει να συμβάλλει σημαντικά στις αυξήσεις αυτές, εντούτοις συνεισφέρει κι αυτός με τη σειρά του στην ατμοσφαιρική ρύπανση της περιοχής. Επιπλέον, ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα, με αποτέλεσμα να υπάρχει παραγωγή σωματιδίων θαλασσινού αλατιού, τα οποία είναι πιθανό να συμμετέχουν μέσω του ανέμου στην ενίσχυση των ΑΣ₁₀.

4.2 Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ₁₀

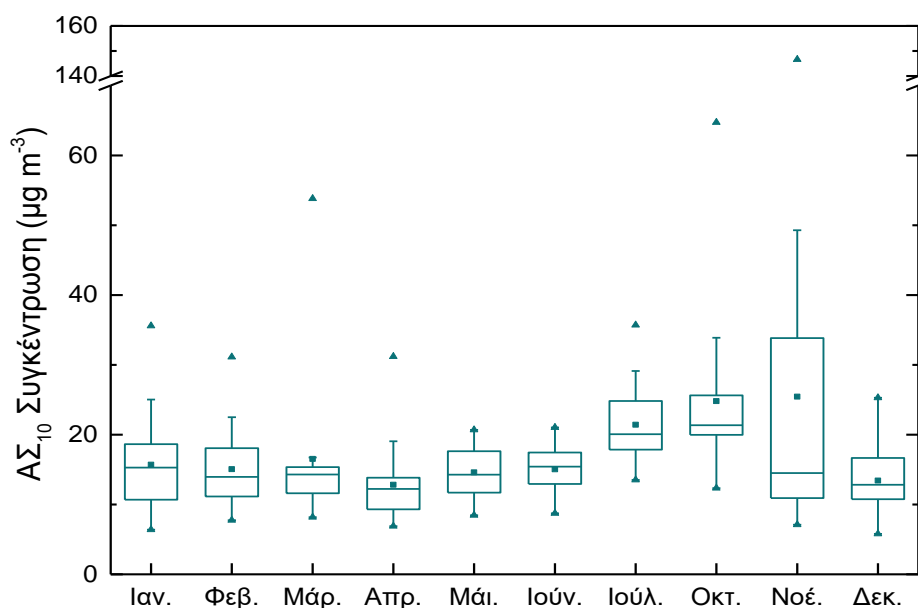
Με σκοπό την άντληση περισσότερων πληροφοριών από τις μετρήσεις των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀, πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των δεδομένων αυτών και η στατιστική τους ανάλυση, για κάθε μήνα ξεχωριστά, μέσω της κατασκευής θηκογραμμάτων, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.2 και στον Πίνακα 4.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3: Συνοπτική μηνιαία παρουσίαση των βασικών στατιστικών παραμέτρων των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀ για το έτος 2023. Εύρεση της ελάχιστης και της μέγιστης συγκέντρωσης, καθώς και του μέσου όρου των συγκεντρώσεων και ταξινόμηση αυτών σε εκατοστημόρια. Οι συγκεντρώσεις δίνονται σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$.

Μήνας	Μέσος όρος	Ελάχιστη	10°	25°	50°	75°	90°	Μέγιστη
Ιανουάριος	15,6	6,4	8,0	10,8	15,3	18,6	23,5	35,6
Φεβρουάριος	15,1	7,8	8,4	11,3	14,0	18,0	21,7	31,1
Μάρτιος	16,5	8,2	10,0	11,6	14,3	15,1	31,9	53,8
Απρίλιος	12,8	6,9	8,5	9,5	12,2	13,8	18,5	31,2
Μάιος	14,6	8,5	10,9	11,9	14,3	17,3	19,1	20,7
Ιούνιος	15,0	8,7	11,9	13,0	15,4	17,2	18,0	21,0
Ιούλιος	21,4	13,5	15,2	18,1	20,1	24,7	27,1	35,7
Αύγουστος	-	-	-	-	-	-	-	-
Σεπτέμβριος	-	-	-	-	-	-	-	-
Οκτώβριος	24,8	12,3	16,7	20,0	21,3	25,6	33,9	64,7
Νοέμβριος	25,4	7,1	8,9	11,0	14,5	33,6	42,4	146,6
Δεκέμβριος	13,4	5,8	8,8	10,8	12,8	15,9	18,3	25,3

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 4.3, η μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση του έτους, η οποία είναι ίση με $146,6 \mu\text{g m}^{-3}$ σημειώθηκε τον μήνα Νοέμβριο, συμπέρασμα που διεξήχθη και προηγουμένως μέσω του Διαγράμματος 4.1. Επίσης, τον ίδιο μήνα σημειώθηκε και η μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση ίση με $25,4 \mu\text{g m}^{-3}$. Η αμέσως προηγούμενη μεγαλύτερη μέση συγκέντρωση, με μικρή απόκλιση από την πρώτη, ίση με $24,8 \mu\text{g m}^{-3}$, παρατηρήθηκε τον Οκτώβριο, όπου καταγράφηκε και η μεγαλύτερη διάμεση συγκέντρωση $21,3 \mu\text{g m}^{-3}$ (50° εκατοστημόριο). Οι ελάχιστες ημερήσιες συγκεντρώσεις του έτους καταγράφηκαν τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο, με την μικρότερη μόλις στα $5,8 \mu\text{g m}^{-3}$ να εμφανίζεται τον Δεκέμβριο. Επιπλέον, παρατηρείται πως για όλους τους μήνες η μέση συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη από τη διάμεση, με εξαίρεση τον μήνα Ιούνιο όπου οι συγκεντρώσεις βρέθηκαν $15,0 \mu\text{g m}^{-3}$ και $15,4 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα.

Ακόμη, συγκρίνοντας τα 75^α εκατοστημόρια όλων των μηνών, καθώς αυτά παρουσιάζονται και στο Διάγραμμα 4.2 που ακολουθεί, συμπεραίνεται πως αθροιστικά οι μικρότερες συγκεντρώσεις του έτους σημειώθηκαν τους μήνες Απρίλιο, Μάρτιο και Δεκέμβριο, με τις πιο χαμηλές να καταγράφονται τον Απρίλιο, καθώς εκεί σημειώθηκε η μικρότερη συγκέντρωση 75^{ου} εκατοστημορίου, ίση με 13,8 $\mu\text{g m}^{-3}$ και οι μεγαλύτερες τους μήνες Νοέμβριο και Οκτώβριο, με τις υψηλότερες να εμφανίζονται τον Νοέμβριο, όπου εκεί η τιμή του 75^{ου} εκατοστημορίου έλαβε συγκέντρωση ίση με 33,6 $\mu\text{g m}^{-3}$.

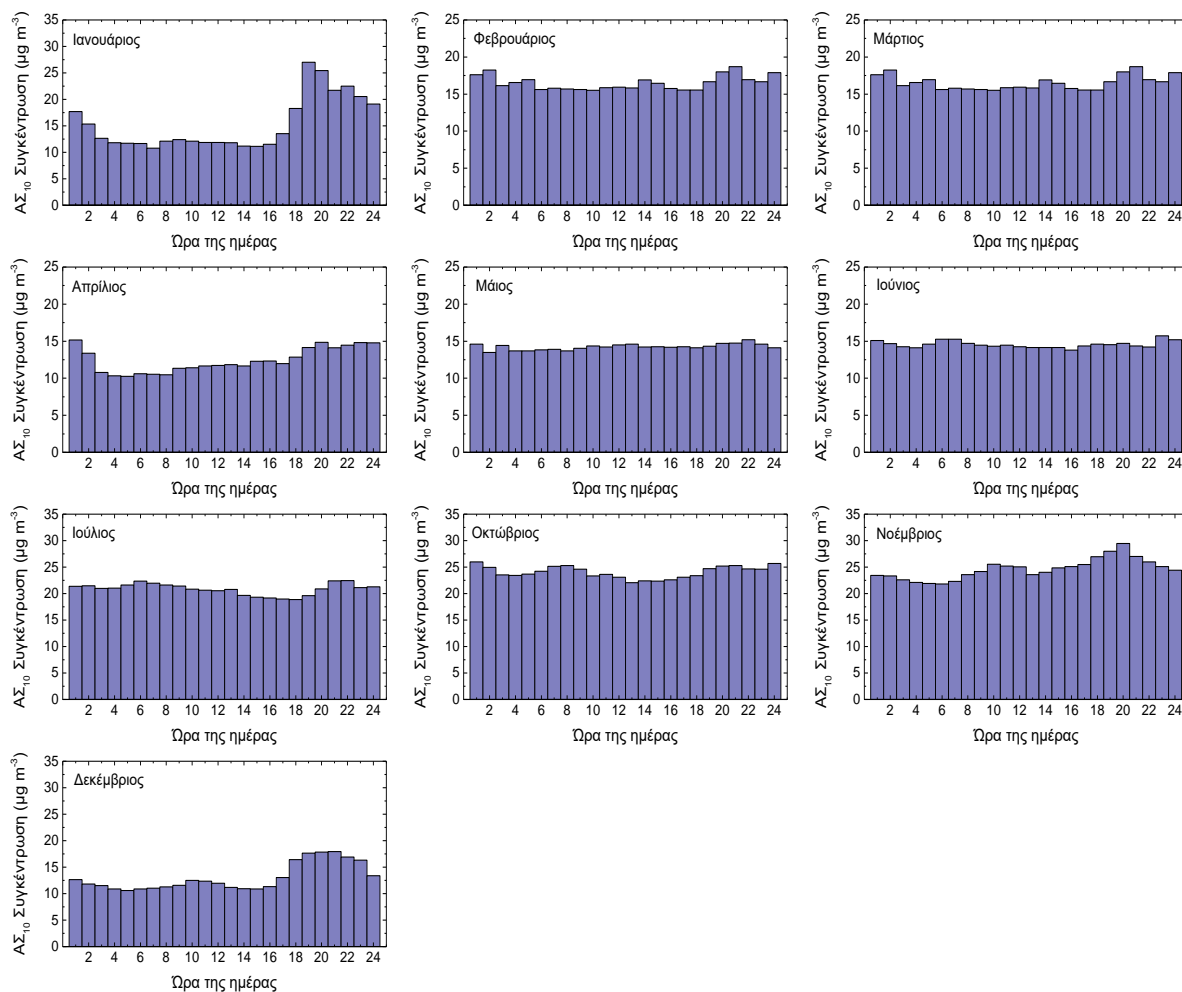


Διάγραμμα 4.2: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀ ανά μήνα του έτους 2023. Το πλαίσιο/ενδοτεταρτημόριο (interquartile) αντιπροσωπεύει το 25°, 50° και 75° τεταρτημόριο. Η γραμμή εντός του πλαισίου αντιστοιχεί στη διάμεση τιμή (50° τεταρτημόριο). Οι απολήξεις (whiskers) ποικίλλουν μεταξύ των τιμών που αντιστοιχούν στο 75° τεταρτημόριο συν την επί ενάμιση φορές μεγαλύτερη τιμή του εύρους του πλαισίου (interquartile range) και στο 25° τεταρτημόριο πλην την επί ενάμιση φορές μεγαλύτερη τιμή του εύρους του πλαισίου. Τα τρίγωνα αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές, ενώ τα τετράγωνα τις μέσες τιμές.

Από το Διάγραμμα 4.2 επαληθεύεται πως τον Νοέμβριο σημειώθηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις και τον Απρίλιο οι χαμηλότερες. Επιπλέον, παρατηρείται πως οι διάμεσες τιμές μεταξύ των μηνών της ίδιας εποχής δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, εκτός από το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, όπου τον Ιούλιο σημειώνεται αύξηση αυτής, ενώ τον Νοέμβριο μείωση.

4.3 Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας ΑΣ₁₀

Στο Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζονται οι μηνιαίες 24ωρες μεταβολές της συγκέντρωσης μάζας των ΑΣ₁₀. Γενικότερα, παρατηρείται πως τους περισσότερους μήνες του έτους υπάρχει μικρή διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με την υψηλότερη ωριαία συγκέντρωση να σημειώνεται τον μήνα Νοέμβριο στις 8 μ.μ. με τιμή 29,45 $\mu\text{g m}^{-3}$, ενώ η μικρότερη τον μήνα Απρίλιο στις 5 π.μ. με τιμή 10,27 $\mu\text{g m}^{-3}$.



Διάγραμμα 4.3: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας των ΑΣ₁₀ ανά μήνα κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) με διαφορετικούς άξονες γ για την καλύτερη απεικόνιση των διακυμάνσεων. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.

Πιο αναλυτικά, τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων μεταξύ των ωρών 6 μ.μ. έως 2 π.μ., δηλαδή το απόγευμα με βράδυ. Η αύξηση των συγκεντρώσεων κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο, ανεξάρτητα από την εποχή. Ένας από τους λόγους που αυξάνονται οι συγκεντρώσεις κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες είναι ότι το απόγευμα και το βράδυ η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους πέφτει ταχύτερα από της ατμόσφαιρας, δημιουργώντας ένα στρώμα ψυχρού αέρα που παγιδεύει τους ρύπους κοντά στο έδαφος. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή και είναι δυναμικά ευσταθές, εμποδίζοντας τον αερισμό των κατώτερων στρωμάτων της τροπόσφαιρας. Έτσι δημιουργούνται συνθήκες εγκλωβισμού των αέριων μαζών κάτω από το στρώμα αναστροφής, που είναι υπεύθυνες για την αύξηση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας (Λαζαρίδης, 2010). Ωστόσο, τον χειμώνα οι αυξήσεις των συγκεντρώσεων κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες είναι πιο έντονες, πιθανότατα λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν, ιδιαίτερα το βράδυ. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν αυξημένη ανάγκη για οικιακή θέρμανση, γεγονός που οδηγεί σε περισσότερες διεργασίες καύσης. Συγκεκριμένα, τον μήνα Οκτώβριο όπου έχουν ξεκινήσει πάλι να πέφτουν οι θερμοκρασίες μετά το καλοκαίρι, παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων σε σύγκριση με τους προηγούμενους μήνες, όπου δεν υπήρχε η ανάγκη για θέρμανση. Ωστόσο, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας δεν παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις.

Ακόμη, παρατηρείται σχεδόν για όλους τους μήνες πως τις πρωινές ώρες μεταξύ 6 π.μ. έως 12 μ.μ. υπάρχει αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης, η οποία οφείλεται κυρίως στο ότι οι πρωινές ώρες συμπίπτουν με τις ώρες αιχμής λόγω κυκλοφοριακής κίνησης, που οδηγούν σε αυξημένη εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων. Η συνεισφορά των εκπομπών των καυσαερίων που παράγονται από τα οχήματα είναι πιο έντονη τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς τότε υπάρχει αύξηση του τουρισμού και επομένως γενικότερη αύξηση της χρήσης των οχημάτων και των μέσων μαζικής μεταφοράς. Για αυτό το λόγο, παρατηρούνται υψηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης τον Ιούλιο σε σύγκριση με τους μήνες της άνοιξης.

4.4 Μελέτη επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα

Οι ημέρες όπου υπήρξε μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα στη περιοχή αναγράφονται στον Πίνακα 4.4, καθώς και οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων AS_{10} τις ημέρες αυτές, ούτως ώστε να εξεταστεί αν τα επεισόδια σκόνης συνέβαλαν στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης και κατ' επέκταση αν οδήγησαν σε υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων.

Συνδυάζοντας τις πληροφορίες του Πίνακα 4.2 και του Πίνακα 4.4, διεξάγεται το συμπέρασμα πως όλες οι υπερβάσεις του έτους (είτε πρόκειται για υπέρβαση του νομοθετικού ορίου της Ε.Ε., είτε του Π.Ο.Υ.) συνέβησαν τις ημέρες όπου υπήρξε μεταφορά σκόνης από τη Βόρεια Αφρική, καθιστώντας τη μεταφορά σκόνης την σημαντικότερη απομακρυσμένη πηγή που προκαλεί αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των AS_{10} . Πιο αναλυτικά, από τις συνολικά 43 ημέρες όπου υπήρξαν επεισόδια σκόνης, μόλις τις 6 σημειώθηκε κάποια υπέρβαση. Δηλαδή, σχεδόν μόνο το 14% των ημερών με σκόνη συνοδεύτηκε με υπέρβαση των νομοθετικών ορίων.

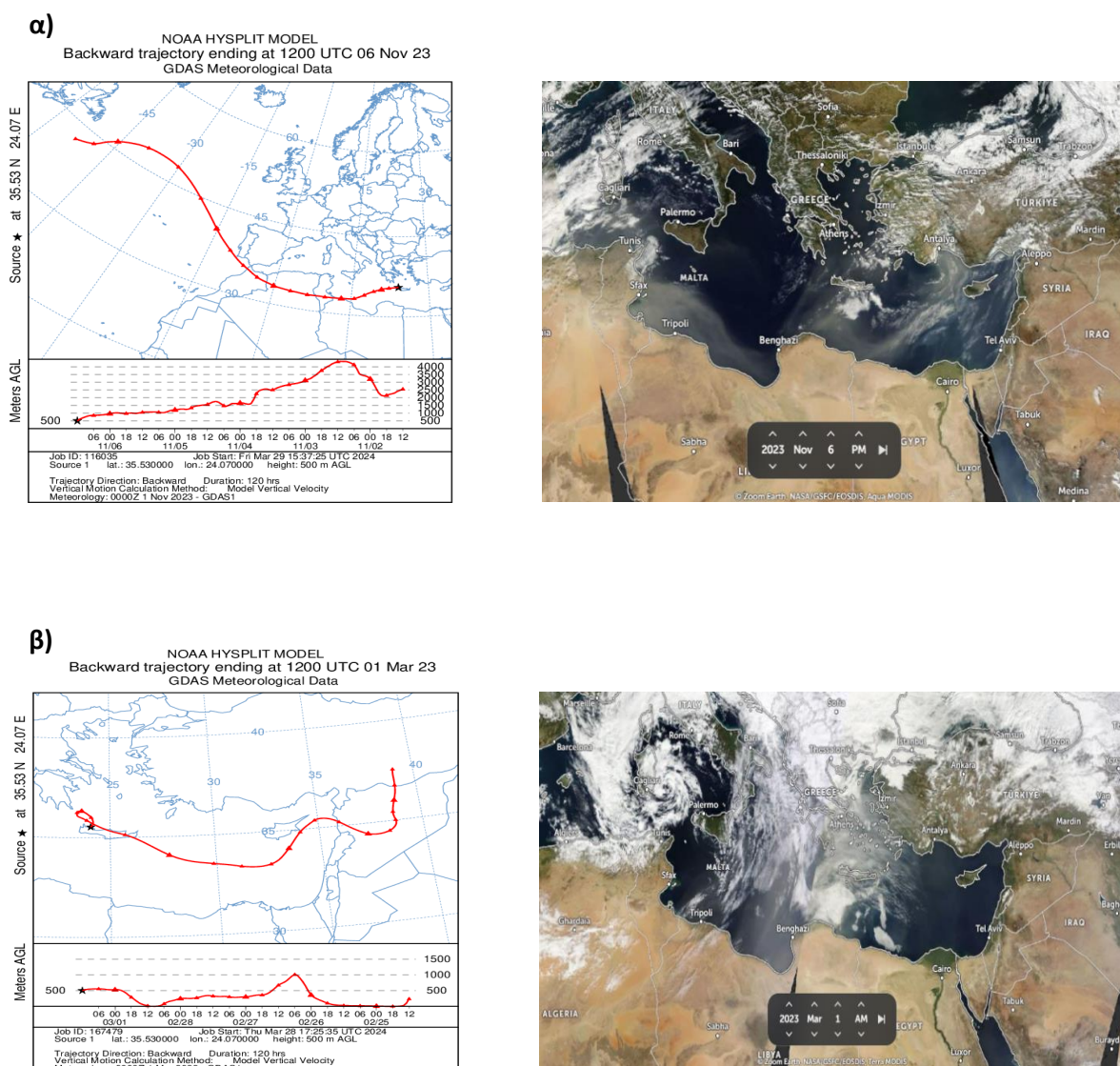
Ωστόσο, αυτό το σχετικά μικρό ποσοστό δεν αναιρεί το γεγονός ότι η συμβολή της σκόνης στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης είναι σημαντική, καθώς μπορεί τις ημέρες με σκόνη οι συγκεντρώσεις να μην ξεπέρασαν τα συγκεκριμένα νομοθετικά όρια, αλλά να προκαλέσαν την αύξηση των συγκεντρώσεων σε σύγκριση με τις ημέρες όπου δεν υπήρξε μεταφορά σκόνης. Επίσης, από τον Πίνακα 4.4 παρατηρείται ότι τα κατά τη διάρκεια όλων των μηνών εμφανίστηκαν επεισόδια σκόνης, με τα περισσότερα να εμφανίζονται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες, πιθανώς λόγω της συχνότερης εμφάνισης χαμηλών βαρομετρικών και κυκλωνικών συστημάτων, τα οποία δημιουργούν ισχυρούς ανέμους που ευνοούν τη μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα προς την περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων. Πιο αναλυτικά, οι ημέρες που καταγράφηκαν τα περισσότερα επεισόδια σκόνης είναι τον Νοέμβριο και τον Οκτώβριο, ενώ τα λιγότερα με μόλις ένα επεισόδιο τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο. Όσον αφορά τη διάρκεια των επεισοδίων, το μεγαλύτερο σε διάρκεια επεισόδιο σκόνης ξεκίνησε τέλη Φεβρουαρίου και συνεχίστηκε για 8 ημέρες και τα επόμενα μεγαλύτερα συνέβησαν τους μήνες Νοέμβριο, Ιανουάριο και Οκτώβριο, τα οποία διήρκεσαν 7 ημέρες για τον πρώτο και 6 ημέρες για τους δύο τελευταίους.

Οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των επεισοδίων σκόνης ήταν εμφανώς υψηλές. Ωστόσο, ορισμένα επεισόδια παρουσίασαν χαμηλότερες συγκεντρώσεις AS_{10} , όπως στις 18 και 19 Ιανουαρίου, όπου οι τιμές ήταν $16,3 \mu\text{g m}^{-3}$ και $14,1 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα, προσεγγίζοντας εκείνες που σημειώθηκαν σε ημέρες χωρίς σκόνη.

Πίνακας 4.4 : Ημέρες με επεισόδια σκόνης και οι αντίστοιχες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των ΑΣ₁₀ σε μονάδες $\mu\text{g m}^{-3}$ (με αστερίσκο συμβολίζονται οι ημέρες όπου υπήρξαν υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων βάσει 24ώρου της Ε.Ε. και του Π.Ο.Υ.)

Μήνας	Ημέρες με επεισόδια σκόνης	Συγκέντρωση ΑΣ ₁₀
Ιανουάριος	18	16,3
	19	14,1
	21	19,1
	22	30,8
	23	25
	24	18,6
	25	20,9
	26	35,6
Φεβρουάριος	25	17,9
	26	21,3
	27	31,1
	28	30,5
Μάρτιος	01*	53,8
	02	36,8
	03	32,6
	04	31,9
Απρίλιος	02	19,1
	03	31,2
	22	18,5
Μάιος	16	19,1
	21	20,1
	22	20,7
Ιούνιος	01	17,7
Ιούλιος	02	20
Οκτώβριος	25	25,4
	26*	64,7
	27*	53,8
	28	27,5
	29	38,2
	30	30,4
Νοέμβριος	03	28,5
	04*	47,7
	05	32,8
	06*	146,6
	07	32,3
	08	39,5
	09	37,5
	11	37,1
	29*	49,3
	30	40,2
Δεκέμβριος	03	17
	04	25,3
	05	22,5

Στη συνέχεια, στο Διάγραμμα 4.4 αναπαρίστανται τα εντονότερα επεισόδια σκόνης για το έτος 2023, τα οποία προκάλεσαν και υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων, τόσο του Π.Ο.Υ. όσο και της Ε.Ε.. Στα δεξιά, απεικονίζεται η μορφή τους, όπως αυτή καταγράφηκε από το δορυφόρο της NASA και στα αριστερά, εμφανίζεται η οπισθοπορεία που διέσχισαν οι αέριες μάζες για συγκεκριμένο υψόμετρο και διάρκεια, όπως αυτή προέκυψε μέσω του μοντέλου HYSPLIT.



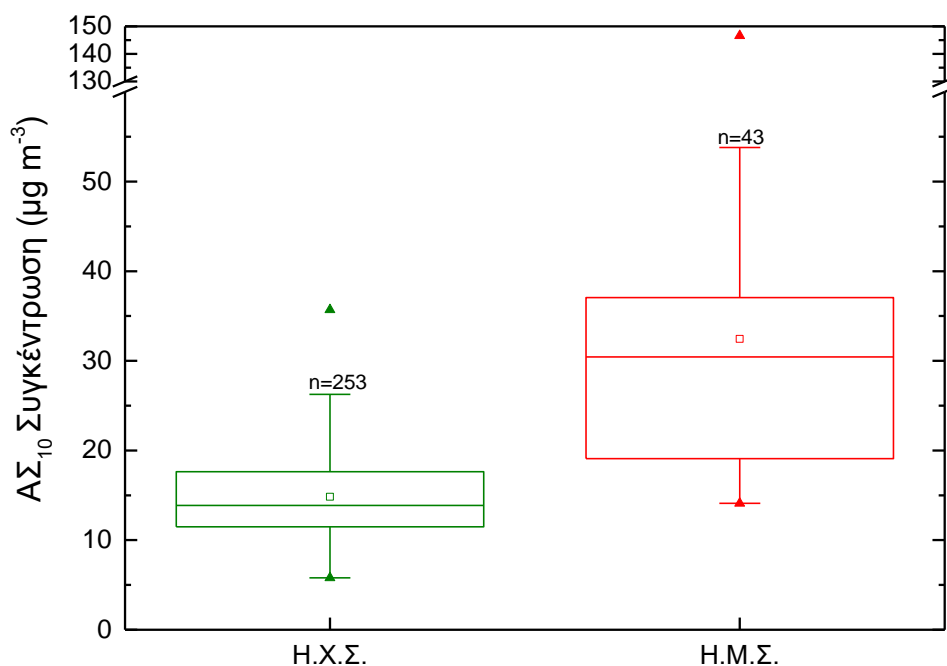
Διάγραμμα 4.4: Εικόνες της οπισθοπορείας των αέριων μαζών από το μοντέλο HYSPLIT για τις ημέρες α) 6/11 με μέση ημερήσια συγκέντρωση $146,6 \mu\text{g m}^{-3}$ και β) 1/3 με μέση ημερήσια συγκέντρωση $53,8 \mu\text{g m}^{-3}$ όπου σημειώθηκαν επεισόδια σκόνης και οι αντίστοιχες εικόνες από το δορυφόρο.

Στη πρώτη περίπτωση, η τροχιά των αέριων μαζών περνά ακριβώς πάνω από την Αφρική και συγκεκριμένα από το Μαρόκο, την Αλγερία και τη Τυνησία και έπειτα κατευθύνεται δυτικά της Κρήτης. Δηλαδή, η μεταφορά των σωματιδίων σκόνης πραγματοποιείται μέσω νότιας πορείας της αέριας

μάζας, συνθήκη η οποία αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα στο νησί της Κρήτης, και γενικότερα στην Ελλάδα.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι αέριες μάζες προέρχονται από αντίθετη κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, η οπισθοπορεία των αέριων μαζών φαίνεται να ξεκινά από τη Τουρκία. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της οπισθοπορείας, και καθώς διασχίζουν τη Μεσόγειο Θάλασσα, περνούν μέσα από το πλούσιο σκόνης, όπως φαίνεται στην εικόνα από το δορυφόρο, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρουν σωματίδια σκόνης. Επομένως, συμπεραίνεται πως για να πραγματοποιηθεί μεταφορά σωματιδίων δεν απαιτείται οι οπισθοπορείες των αέριων μαζών να έχουν υποχρεωτικά προέλευση πάνω από την έρημο της Σαχάρας.

Από το Διάγραμμα 4.5 προκύπτει ότι η διάμεση συγκέντρωση των AS_{10} για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) ισούται με $13,9 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) ισούται με $30,4 \mu\text{g m}^{-3}$. Ακόμη, η μέση συγκέντρωση βρέθηκε ίση $14,8 \mu\text{g m}^{-3}$ και $32,8 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.5: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων AS_{10} για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ.) και για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ.) του έτους 2023. Όπου n συμβολίζεται το πλήθος των μετρήσεων/ημερών.

Επομένως, βάσει των προαναφερθέντων συμπεραίνεται ότι η μεταφορά σκόνης από τη Βόρεια Αφρική συνεισφέρει στην αύξηση των συγκεντρώσεων σε ποσοστό πάνω από 50%, καθώς οι συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις ημέρες με σκόνη είναι κάτι παραπάνω από διπλάσιες των

συγκεντρώσεων που μετρήθηκαν στις ημέρες χωρίς σκόνη. Επίσης, η ελάχιστη και η μέγιστη συγκέντρωση για τις 253 ημέρες που δεν υπήρξε μεταφορά σκόνης, είναι $5,8 \mu\text{g m}^{-3}$ και $35,7 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για τις 43 ημέρες που σημειώθηκε μεταφορά σκόνης είναι $14,1 \mu\text{g m}^{-3}$ και $146,6 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα.

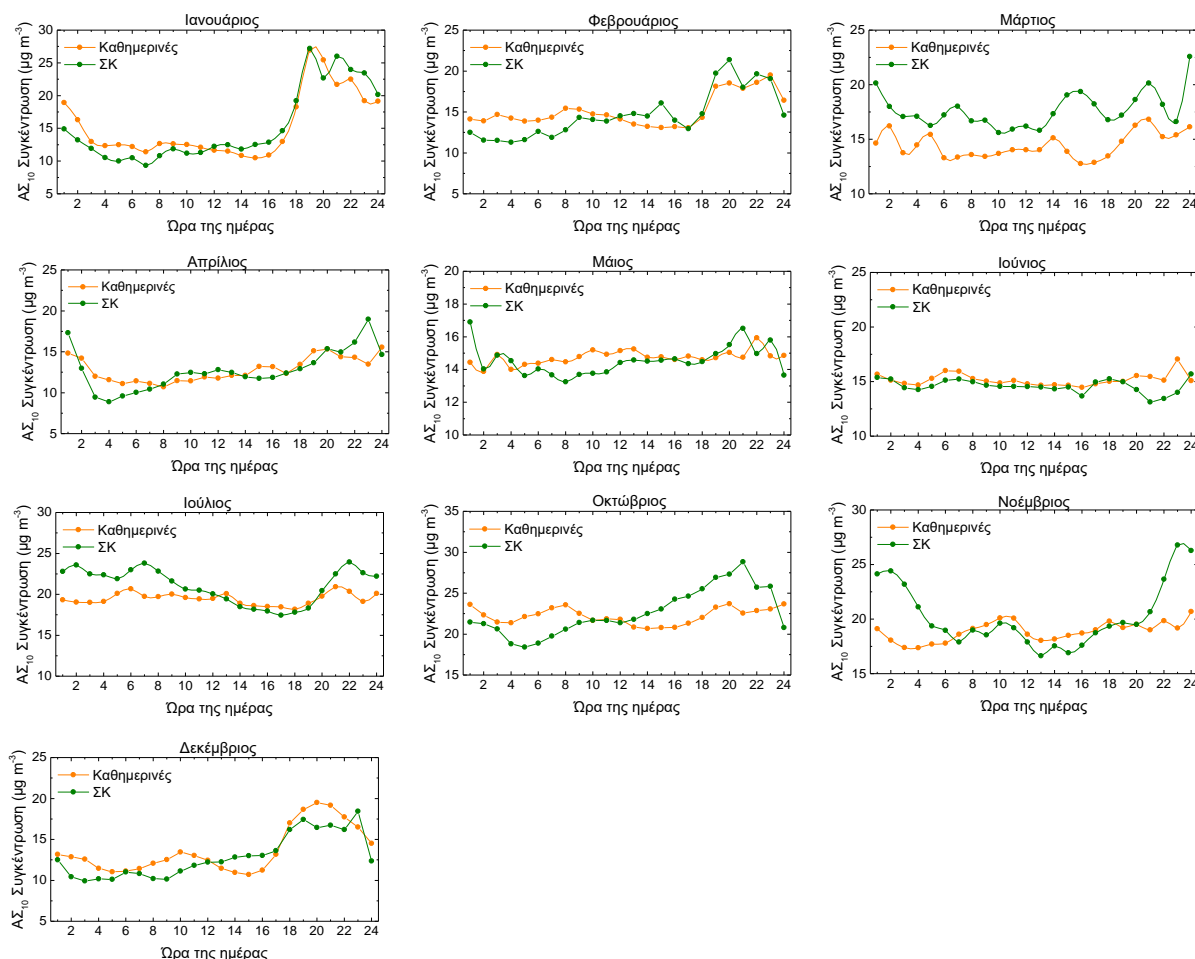
4.5 Σύγκριση συγκεντρώσεων μάζας ΑΣ₁₀ των καθημερινών με τα Σαββατοκύριακα

Στο Διάγραμμα 4.6 παρουσιάζονται οι μηνιαίες 24ωρες μεταβολές της συγκέντρωσης μάζας των ΑΣ₁₀ για το έτος 2023, όπως αυτές μετρήθηκαν τις καθημερινές (εργάσιμες ημέρες) και τα Σαββατοκύριακα. Από το Διάγραμμα 4.6 παρατηρείται ότι, γενικά, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις συγκεντρώσεις μεταξύ των καθημερινών και των Σαββατοκύριακων. Ωστόσο, οι μήνες Μάρτιος, Οκτώβριος και Νοέμβριος αποτελούν εξαίρεση, καθώς σε ορισμένες ώρες της ημέρας οι συγκεντρώσεις διαφέρουν αισθητά. Συγκεκριμένα, οι πιο έντονες διαφορές στις συγκεντρώσεις των ΑΣ₁₀ παρατηρούνται τον Μάρτιο μεταξύ 3 μ.μ. – 5 μ.μ. και 12 μ.μ. – 2 π.μ., τον Οκτώβριο από τις 4 π.μ. – 7 π.μ. και αργότερα από τις 8 μ.μ. – 9 μ.μ., ενώ τον Νοέμβριο οι διαφορές είναι συνεχείς από τις 11 μ.μ. – 3 π.μ.. Αυτές οι διακυμάνσεις πιθανώς οφείλονται σε εκπομπές τοπικών πηγών, δηλαδή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, εφόσον έχουν αφαιρεθεί οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν τις ημέρες με μεταφορά σκόνης προς τον σταθμό.

Ακόμη, παρατηρείται πως για την πλειοψηφία των μηνών οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες τις πρωινές ώρες τις καθημερινές, ενώ τα Σαββατοκύριακα υψηλότερες συγκεντρώσεις σημειώνονται τις απογευματινές-βραδινές ώρες. Αξίζει να σημειωθεί, πως τον μήνα Μάρτιο οι συγκεντρώσεις των Σαββατοκύριακων βρέθηκαν υψηλότερες των καθημερινών καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, καταγράφονται υψηλότερες συγκεντρώσεις τις καθημερινές κατά τις πρωινές ώρες, μεταξύ 7 π.μ. - 10 π.μ., σε σύγκριση με τα αντίστοιχα διαστήματα των Σαββατοκύριακων. Ωστόσο, σε ορισμένους μήνες, όπως τον Απρίλιο, η απόκλιση αυτή είναι σχεδόν αμελητέα. Η αυξημένη συγκέντρωση τις καθημερινές πρωινές ώρες οφείλεται κυρίως στην έντονη κυκλοφοριακή κίνηση κατά τις ώρες αιχμής, λόγω της μετακίνησης προς την εργασία, τις σχολικές δραστηριότητες και άλλες καθημερινές υποχρεώσεις, όπως εξωτερικές δουλειές.

Επίσης, κατά τις απογευματινές-βραδινές ώρες μεταξύ 7 μ.μ. - 12 μ.μ. ως επί το πλείστον φαίνεται τα Σαββατοκύριακα να σημειώνουν υψηλότερες συγκεντρώσεις, έναντι των καθημερινών. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα Σαββατοκύριακα υπάρχει περισσότερος ελεύθερος χρόνος με αποτέλεσμα να

υπάρχει αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση, για σκοπούς αναψυχής, κοινωνικών εκδηλώσεων και ψυχαγωγικών δραστηριοτήτων. Δηλαδή, η μείωση των επαγγελματικών υποχρεώσεων τις ημέρες αυτές επιτρέπει σε περισσότερους ανθρώπους να αφιερώσουν χρόνο σε εξωτερικές δραστηριότητες που συμβάλλει περαιτέρω στην αυξημένη κίνηση.

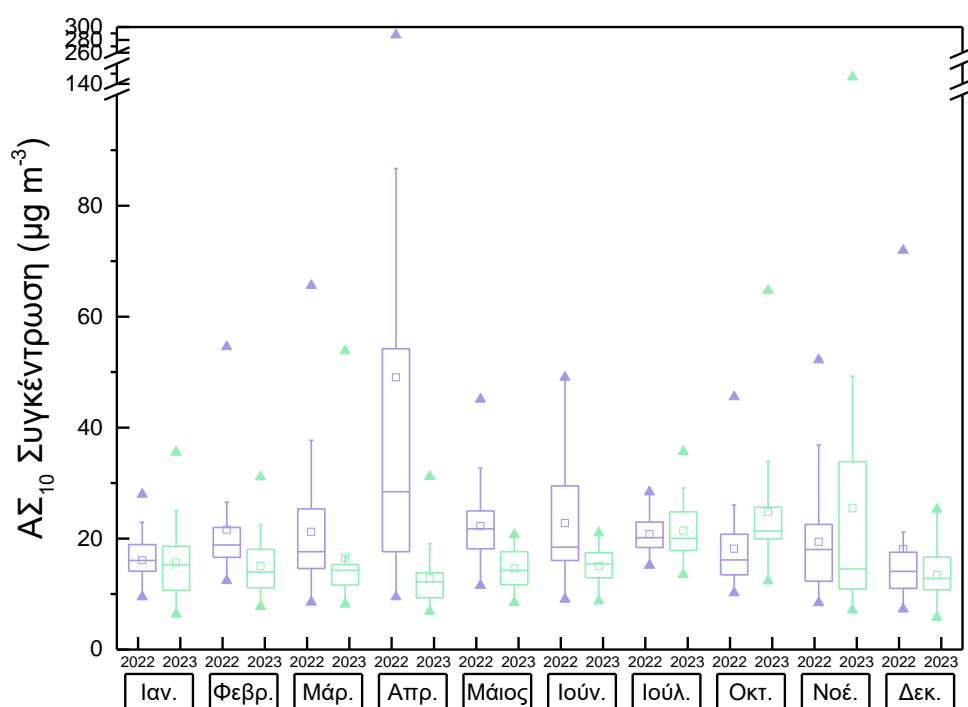


Διάγραμμα 4.6: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις μάζας των ΑΣ₁₀ των καθημερινών και των Σαββατοκύριακων ανά μήνα κατά τη μετρούμενη περίοδο (έτος 2023) με διαφορετικούς άξονες γ για την καλύτερη απεικόνιση των διακυμάνσεων. Από τις μετρήσεις έχουν αφαιρεθεί τα δεδομένα των ημερομηνιών όπου σημειώθηκαν οι υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων, καθώς όλες αντιστοιχούν σε ημέρες με επεισόδια σκόνης. Δεν παρουσιάζονται δεδομένα κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο λόγω τεχνικού προβλήματος του οργάνου.

4.6 Σύγκριση συγκεντρώσεων του έτους 2022 με το έτος 2023

Με σκοπό τη σύγκριση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του έτους 2022 και του έτους 2023 κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 4.7, μέσω του οποίου παρατηρείται πως για τους περισσότερους μήνες καταγράφηκαν υψηλότερες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις το έτος 2022 έναντι του έτους 2023.

Πιο αναλυτικά, φαίνεται πως η πιο μεγάλη διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων των δύο ετών καταγράφηκε τον Απρίλιο, όπου η διάμεση συγκέντρωση για το 2022 βρέθηκε ίση με $28,4 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για το 2023 βρέθηκε ίση με $12,2 \mu\text{g m}^{-3}$. Δηλαδή, τον Απρίλιο του 2022 οι συγκεντρώσεις που σημειώθηκαν ήταν παραπάνω από διπλάσιες αυτών του 2023. Ακόμη, εκτός από τη διάμεση συγκέντρωση, μεγάλη διαφορά υπήρξε και στη μέση συγκέντρωση, καθώς για το 2022 μετρήθηκε στα $49,1 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ το 2023 μετρήθηκε στα $12,8 \mu\text{g m}^{-3}$. Δηλαδή, η μέση συγκέντρωση τον Απρίλιο του 2022 ήταν σχεδόν 4 φορές μεγαλύτερη από αυτή του 2023.



Διάγραμμα 4.7: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} ανά μήνα για τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023.

Αυτή η διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων οφείλεται στο γεγονός ότι τον Απρίλιο του 2022 εμφανίστηκαν 16 επεισόδια σκόνης (Μπαλή, 2022), ενώ τον Απρίλιο του 2023 εμφανίστηκαν μόλις 3. Πιο αναλυτικά, τον Οκτώβριο παρατηρείται ότι όλες οι στατιστικές παράμετροι βρέθηκαν υψηλότερες για το έτος 2023 σε σύγκριση με το 2022. Όπως για παράδειγμα, η διάμεση συγκέντρωση το 2023

βρέθηκε ίση με $21,3 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για το 2022 βρέθηκε ίση με $16,2 \mu\text{g m}^{-3}$ και η συγκέντρωση του $75^{\text{ου}}$ τεταρτημορίου υπολογίστηκε $25,6 \mu\text{g m}^{-3}$ και $20,4 \mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή στις συγκεντρώσεις αποδίδεται στο γεγονός ότι τον Οκτώβριο του 2023 σημειώθηκαν 6 επεισόδια σκόνης, ενώ τον Οκτώβριο του 2022 δεν σημειώθηκε κανένα (Μπάλη, 2022). Φαίνεται, λοιπόν, πως τα επεισόδια σκόνης διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στις διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων μεταξύ των δύο ετών. Ωστόσο, ένας ακόμη παράγοντας που συνέβαλε στη διαφοροποίηση των επιπέδων συγκέντρωσης ήταν η θερμοκρασία. Στον Πίνακα 4.5 αναγράφονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες που σημειώθηκαν το έτος 2022 και 2023.

Πίνακας 4.5: Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για τα έτη 2022 και 2023.

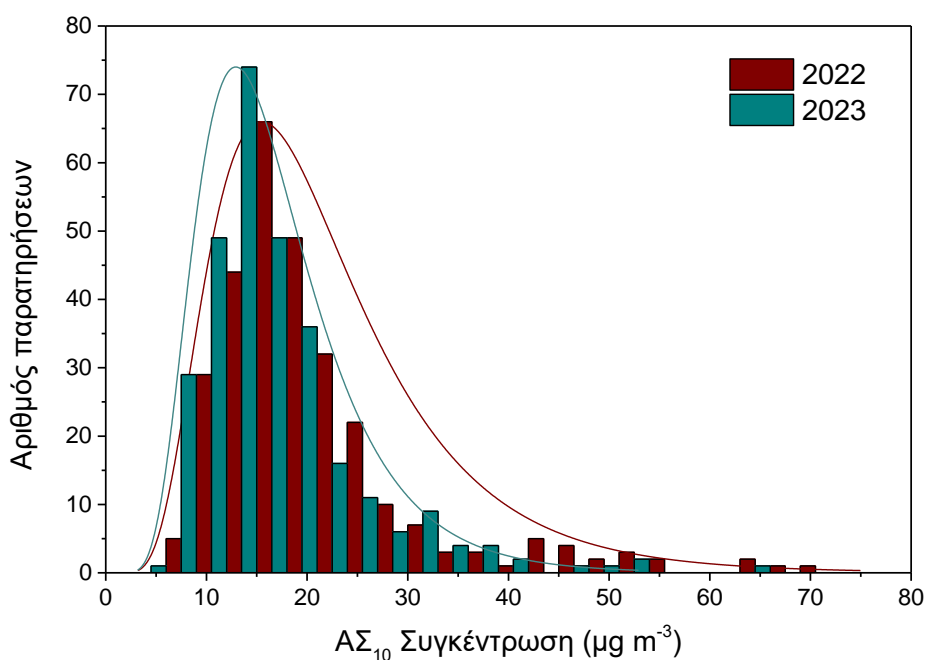
Μήνας	Μέση Θερμοκρασία (°C)	
	2022	2023
Ιανουάριος	10,0	12,3
Φεβρουάριος	11,8	10,9
Μάρτιος	10,2	13,8
Απρίλιος	16,5	15,7
Μάιος	20,1	18,1
Ιούνιος	25,6	22,9
Ιούλιος	26,5	28,7
Οκτώβριος	19,3	20,5
Νοέμβριος	16,5	18,6
Δεκέμβριος	14,6	14,4

Ακόμη, για τον μήνα Μάρτιο παρόλο που οι διάμεσες συγκεντρώσεις απέχουν μεταξύ τους μόλις $3,3 \mu\text{g m}^{-3}$, από την σύγκριση του $25^{\text{ου}}$ και του $75^{\text{ου}}$ τεταρτημορίου παρατηρείται πως υψηλότερες συγκεντρώσεις σημειώθηκαν το έτος 2022 σε σχέση με το 2023. Ένας παράγοντας ο οποίος ευθύνεται για αυτό είναι η θερμοκρασία, καθώς όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.5, η θερμοκρασιακή τους διαφορά ήταν $3,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, αποτελώντας και την μεγαλύτερη ανάμεσα στους μήνες των δύο ετών. Συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία για τον Μάρτιο του 2022 ήταν $10,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ για τον Μάρτιο του 2023 ήταν $13,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Συνεπώς, η ανάγκη για οικιακή θέρμανση κυρίως τις βραδινές ώρες ενδεχομένως να ήταν αυξημένη, με αποτέλεσμα να αυξηθούν και οι διεργασίες καύσεις και με τη σειρά τους τα επίπεδα συγκέντρωσης των AS_{10} . Όσον αφορά τους καλοκαιρινούς μήνες, τον μήνα Ιούλιο οι συγκεντρώσεις φαίνεται να κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, σε αντίθεση με τον Ιούνιο όπου

παρατηρείται πως η συγκέντρωση που αντιστοιχεί στο 75^ο τεταρτημόριο για το 2022 είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή για το 2023 με τιμές 28,4 $\mu\text{g m}^{-3}$ και 17,2 $\mu\text{g m}^{-3}$ αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό, ίσως οφείλεται ότι τον Ιούνιο του 2022 παρουσιάστηκαν 6 επεισόδια σκόνης στη περιοχή (Μπαλή, 2022), ενώ τον Ιούνιο του 2023 παρουσιάστηκε μόλις ένα.

Τον Νοέμβριο παρατηρείται πως αν και οι συγκεντρώσεις των 25^{ων} τεταρτημορίων σχεδόν ταυτίζονται, οι συγκεντρώσεις των 75^{ων} τεταρτημορίων απέχουν αρκετά μεταξύ τους, καθώς για το 2023 η συγκέντρωση του 75^{ου} τεταρτημορίου βρέθηκε ίση με 33,6 $\mu\text{g m}^{-3}$ και για το 2022 βρέθηκε ίση με 22,2 $\mu\text{g m}^{-3}$, καθιστώντας το 2023 το έτος με τις πιο υψηλές συγκεντρώσεις για τον μήνα Νοέμβριο. Αυτό μπορεί να συνέβη διότι το πλήθος των επεισοδίων σκόνης τον Νοέμβριο του 2023 ήταν μεγαλύτερο και συγκεκριμένα διπλάσιο από του Νοέμβριου της προηγούμενης χρονιάς (Μπαλή, 2022). Τέλος, η υψηλότερη συγκέντρωση για το 2022 καταγράφηκε τον Απρίλιο ίση με 287,5 $\mu\text{g m}^{-3}$, ενώ όπως έχει αναφερθεί η υψηλότερη συγκέντρωση του 2023 καταγράφηκε τον Νοέμβριο ίση με 146,6 $\mu\text{g m}^{-3}$, ως άμεσο αποτέλεσμα της μεταφοράς σκόνης από την Σαχάρα που έλαβαν χώρα αυτούς τους μήνες.

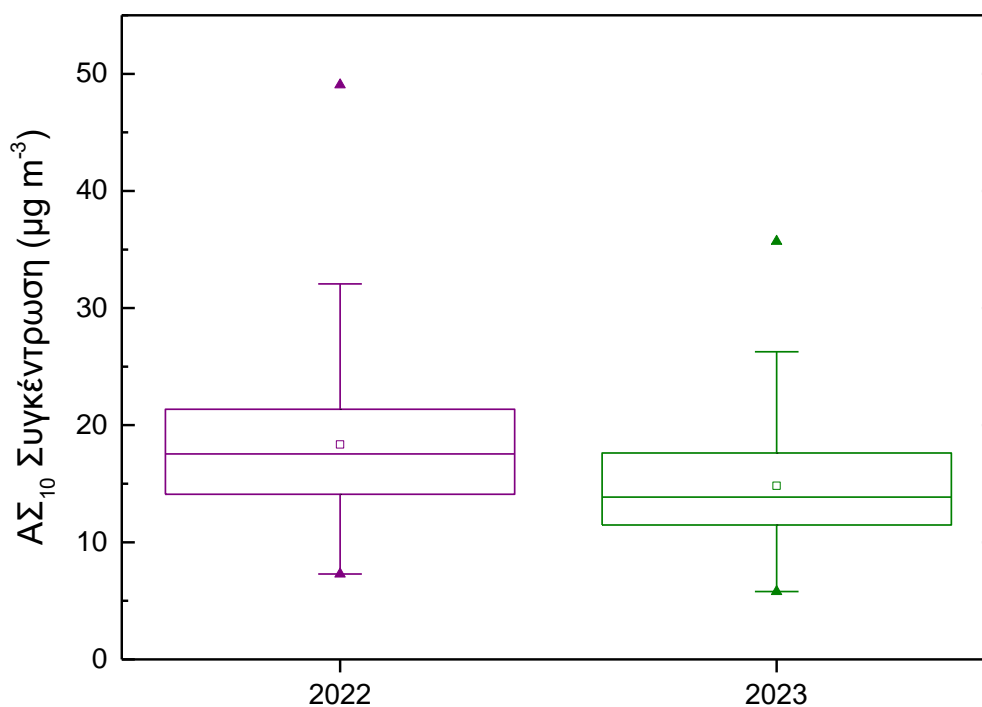
Στη συνέχεια, μέσω της λογαριθμικής κανονικής κατανομής απεικονίστηκαν οι συγκεντρώσεις των AS_{10} για τις περιόδους 2022 και 2023 όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.8.



Διάγραμμα 4.8: Ιστόγραμμα των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας AS_{10} για τις μετρούμενες χρονικές περιόδους 2022 και 2023. Επίσης, παρουσιάζονται οι καμπύλες κατανομής χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση πυκνότητας λογαριθμικής κανονικής κατανομής. Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο έτος 2022 και η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο έτος 2023 (δεν απεικονίζονται 5 παρατηρήσεις που σημείωσαν συγκέντρωση μεγαλύτερη από 80 $\mu\text{g m}^{-3}$).

Από το Διάγραμμα 4.8 παρατηρείται πως για το 2022 ο μεγαλύτερος αριθμός παρατηρήσεων είναι 65 και αντιστοιχεί σε συγκέντρωση γύρω στα $18 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για το 2023 ο μεγαλύτερος αριθμός παρατηρήσεων είναι 75, που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση γύρω στα $15 \mu\text{g m}^{-3}$. Οι τιμές αυτές των συγκεντρώσεων είναι μικρότερες από τα $30 \mu\text{g m}^{-3}$, συγκέντρωση η οποία συνήθως καταγράφεται στην υπό μελέτη περιοχή, εκτός από τις περιπτώσεις που για κάποιο λόγο υπάρχει αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης, όπως για παράδειγμα τις ημέρες που υπάρχει μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Οι κατανομές και των δύο χρονικών περιόδων είναι παρόμοιες, καθώς κυμαίνονται μεταξύ σχεδόν του ίδιου εύρους συγκεντρώσεων. Πιο αναλυτικά, οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν το 2022, κυμαίνονται από περίπου $5 \mu\text{g m}^{-3}$ έως περίπου $75 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ το 2023 κυμαίνονται από περίπου $5 \mu\text{g m}^{-3}$ έως $55 \mu\text{g m}^{-3}$. Ακόμη, το μεγαλύτερο πλήθος παρατηρήσεων και των δύο ετών αντιστοιχεί σε συγκεντρώσεις με πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους, δηλαδή η «κορυφή» των δύο κατανομών βρίσκεται σχεδόν στο ίδιο σημείο. Επιπλέον, παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των AS_{10} , τόσο μειώνεται το πλήθος των παρατηρήσεων που αντιστοιχούν σε αυτές τις συγκεντρώσεις. Συνεπώς, βάσει των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα δύο ιστογράμματα, συμπεραίνεται ότι οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων για τα δύο έτη ακολουθούν μια κανονική λογαριθμική κατανομή, καθώς οι τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής (συγκέντρωση των AS_{10}) είναι θετικές και παρουσιάζουν ένα μέγιστο, ενώ εμφανίζουν ασυμμετρία προς τα δεξιά, δηλαδή μια μακριά ουρά σε υψηλές συγκεντρώσεις.

Στη συνέχεια, με σκοπό τη σύγκριση των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} που καταγράφηκαν τις ημέρες χωρίς σκόνη (Η.Χ.Σ.) κατά τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023, κατασκευάστηκε το Διάγραμμα 4.9



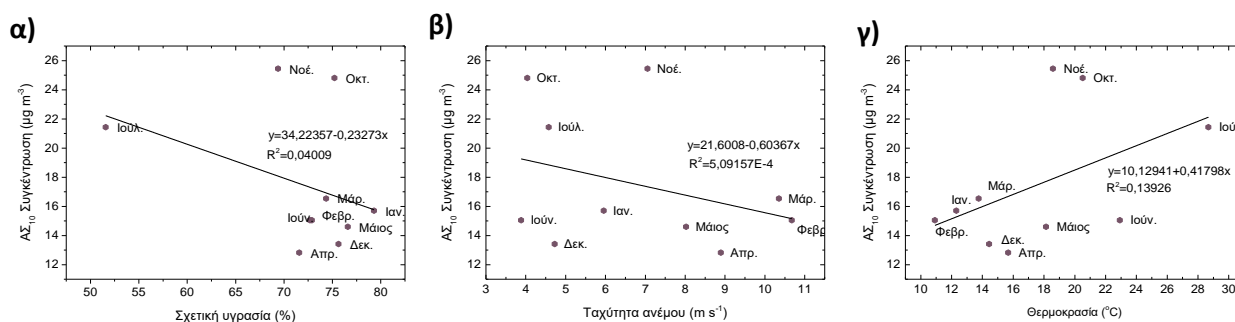
Διάγραμμα 4.9: Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων μάζας των ΑΣ₁₀ για τις ημέρες χωρίς σκόνη (Η.Χ.Σ) για τις χρονικές περιόδους 2022 και 2023.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν τις ημέρες χωρίς σκόνη το έτος 2022 είναι υψηλότερες από εκείνες που σημειώθηκαν τις αντίστοιχες ημέρες το έτος 2023. Πιο συγκεκριμένα, το 2022 η ελάχιστη συγκέντρωση βρέθηκε ίση με $7,3 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ το 2023 βρέθηκε ίση με $5,8 \mu\text{g m}^{-3}$. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις παρουσιάζουν σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο ετών, με απόκλιση ίση με $13,4 \mu\text{g m}^{-3}$. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συγκέντρωση για το 2022 ήταν $49,1 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για το 2023 ήταν $35,7 \mu\text{g m}^{-3}$. Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στο 75^ο εκατοστημόριο και στη διάμεση τιμή, παρατηρείται διαφορά ίση με $3,7 \mu\text{g m}^{-3}$ μεταξύ των δύο ετών. Για το 2022, η συγκέντρωση του 75^{ου} εκατοστημορίου ήταν $21,3 \mu\text{g m}^{-3}$ και η διάμεση συγκέντρωση ήταν $17,5 \mu\text{g m}^{-3}$, ενώ για το 2023 οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις ήταν $17,6 \mu\text{g m}^{-3}$ και $13,9 \mu\text{g m}^{-3}$. Συμπερασματικά, οι διαφορές μεταξύ των δύο ετών δεν οφείλονταν αποκλειστικά στη μεταφορά σκόνης, αλλά πιθανόν και σε άλλες εκπομπές, όπως αυτές από ανθρωπογενείς πηγές.

4.7 Σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀ και των μετεωρολογικών παραμέτρων

Το Διάγραμμα 4.10 παρουσιάζει τη γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀ και των μετεωρολογικών παραμέτρων, με σκοπό να εξεταστεί αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους.

Από τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται ότι η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης στο διάγραμμα που συνδέει τη συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ με τη σχετική υγρασία, καθώς και στο διάγραμμα που συνδέει τη συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ με την ταχύτητα ανέμου, είναι αρνητική. Αντιθέτως, στο διάγραμμα της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀ σε σχέση με τη θερμοκρασία, η κλίση είναι θετική. Αυτό σημαίνει πως, η αύξηση της σχετικής υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου σχετίζεται με τη μείωση της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας σχετίζεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀.



Διάγραμμα 4.10: Διαγράμματα γραμμικής παλινδρόμησης α) μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀ και της σχετικής υγρασίας, β) της ταχύτητας του ανέμου και γ) της θερμοκρασίας.

Ωστόσο, διαπιστώνεται πως και στις τρεις περιπτώσεις υπάρχει μεγάλη διασπορά μεταξύ των συγκρινόμενων μεγεθών. Αυτό υποδηλώνει ότι η γραμμική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ₁₀ και των μετεωρολογικών δεδομένων δεν είναι ισχυρή για τα υπό εξέταση δεδομένα. Το συμπέρασμα αυτό, διεξάγεται και από τους συντελεστές προσδιορισμού R^2 , καθώς και στις τρεις περιπτώσεις λαμβάνει τιμές κοντά στο 0, που σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων των ΑΣ₁₀ και των μετεωρολογικών παραμέτρων δεν είναι ισχυρή.

Οι μετεωρολογικές συνθήκες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων, καθώς δημιουργούν συνθήκες που είτε εμποδίζουν είτε διευκολύνουν την αντίδραση και τη διασπορά των ρύπων στο περιβάλλον (Rowland, 2024). Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο οι μετεωρολογικές συνθήκες επιδρούν στις συγκεντρώσεις ΑΣ₁₀ είναι σύνθετος και εξαρτάται από πολλούς άλλους

παράγοντες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει μια σταθερή γραμμική σχέση σε όλες τις περιπτώσεις.

Στο διάγραμμα που συνδέει τη συγκέντρωση των AS_{10} και την ταχύτητα του ανέμου, όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση τείνει να μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Παρόμοιο συμπέρασμα για την υπό μελέτη περιοχή έχει παρατηρηθεί παλαιότερα (Chatoutsidou κ.ά., 2019), όπου υπήρξε αρνητική συσχέτιση της συγκέντρωσης των AS_{10} με την ταχύτητα του ανέμου για την περιοχή του Ακρωτηρίου. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα φαίνεται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο, να αντιστοιχούν σε χαμηλή ταχύτητα ανέμου. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η υψηλότερη ταχύτητα ανέμου οδηγεί σε καταγραφή χαμηλότερων συγκεντρώσεων AS_{10} στην ατμόσφαιρα λόγω διασποράς. Ωστόσο, ενδέχεται οι υψηλές ταχύτητες να οδηγήσουν και σε καταγραφή υψηλότερων συγκεντρώσεων AS_{10} υπό ορισμένες συνθήκες, κυρίως λόγω της επανειώρησης σωματιδίων από το έδαφος. Το φαινόμενο της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των AS_{10} , παρατηρείται ιδιαίτερα σε περιοχές με βιομηχανικές και άλλες ανθρωπογενείς εκπομπές. Σε αυτές τις περιοχές, οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου ενισχύουν τη διασπορά των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

Στο διάγραμμα που συνδέει τη συγκέντρωση των AS_{10} και τη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνει τη συγκέντρωση των AS_{10} , όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Το χειμώνα, όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, ενδέχεται να παρατηρηθούν υψηλότερες συγκεντρώσεις AS_{10} λόγω των διεργασιών καύσης. Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες συγκεντρώσεις AS_{10} λόγω της ενισχυμένης κυκλοφοριακής κίνησης.

Συμπερασματικά, το φυσικό περιβάλλον αλληλεπιδρά με πολλές πηγές ρύπανσης, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των AS_{10} να επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Η κλίση ή η μορφή των διαγραμμάτων γραμμικής παλινδρόμησης που συνδέουν τις συγκεντρώσεις με τα μετεωρολογικά δεδομένα μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες και τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται, γεγονός που συμβάλλει στην κατανόηση του πολυπαραγοντικού χαρακτήρα των συγκεντρώσεων των AS_{10} .

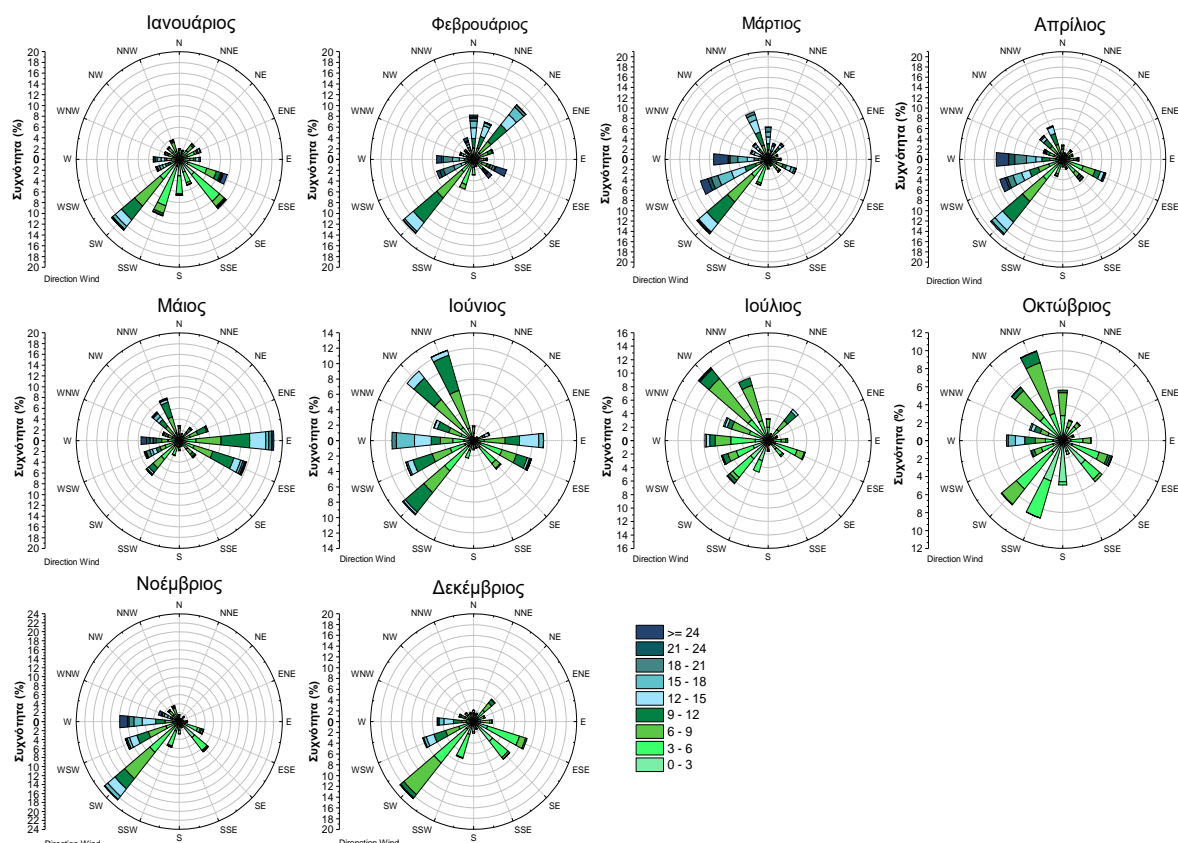
4.8 Κατανομή ανέμων κατά διεύθυνση και ταχύτητα (ροδογράμματα)

Τα ροδογράμματα (wind roses) στο Διάγραμμα 4.11 απεικονίζουν τη διεύθυνση και την ταχύτητα των ανέμων προς την περιοχή μελέτης, δηλαδή τον σταθμό του Ακρωτηρίου. Συμβάλλουν στην ανάλυση των αέριων μαζών που φτάνουν σε αυτόν. Δημιουργήθηκαν δέκα ροδογράμματα, ένα για κάθε μήνα κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της συγκέντρωσης των AS_{10} .

Από το Διάγραμμα 4.11 διαπιστώνεται ότι, για τους περισσότερους μήνες, η πιο συχνή διεύθυνση του ανέμου που καταγράφεται στον σταθμό του Ακρωτηρίου είναι η νοτιοδυτική (SW), σημειώνοντας μάλιστα σε ορισμένους μήνες, όπως τον Ιανουάριο, τον Μάρτιο και τον Απρίλιο, πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου ($>18 \text{ km h}^{-1}$). Για τους μήνες Μάιο, Ιούλιο και Οκτώβριο, η πιο συχνά παρατηρούμενη διεύθυνση ανέμου είναι η ανατολική (E), η βορειοδυτική (NW) και η βόρειο-βορειοδυτική (NNW), αντίστοιχα. Αν και κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων μηνών, συμπεριλαμβανομένου και του Ιουνίου, παρατηρείται γενικότερα ότι οι άνεμοι πνέουν από όλες τις διευθύνσεις με παρόμοιες συχνότητες εμφάνισης.

Οι νοτιοδυτικοί άνεμοι προέρχονται από την πόλη των Χανίων, οι ανατολικοί από την περιοχή των Κουνουπιδιανών και τον Αερολιμένα των Χανίων, οι βορειοδυτικοί από τη θάλασσα και οι νοτιοανατολικοί από το λιμάνι της Σούδας. Επομένως, τα AS_{10} που μεταφέρονται τοπικά προς τον σταθμό μέσω των νοτιοδυτικών και ανατολικών ανέμων έχουν κυρίως προέλευση από ανθρωπογενείς πηγές, όπως βιομηχανικές δραστηριότητες, κατασκευές, καύση ορυκτών καυσίμων και εκπομπές από οχήματα όπως αυτοκίνητα και αεροσκάφη. Τα σωματίδια αυτά είναι πιθανό να περιλαμβάνουν σκόνη, αιθάλη, πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs).

Για παράδειγμα, τον Απρίλιο, όπου η κύρια διεύθυνση του ανέμου ήταν νοτιοδυτική (SW) με πολύ υψηλές ταχύτητες ($>18 \text{ km h}^{-1}$), καταγράφηκαν οι χαμηλότερες μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις AS_{10} , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.10β. Αυτό υποδηλώνει ότι η μεταφορά των ανθρωπογενών πηγών από την πόλη δεν ήταν τόσο σημαντική εκείνη την περίοδο.



Διάγραμμα 4.11: Ροδογράμματα για όλους τους μήνες της δειγματοληψίας.

Ωστόσο, οι βορειοδυτικοί άνεμοι που προέρχονται από τη θάλασσα είναι πιθανό να μεταφέρουν σωματίδια εμπλουτισμένα με θαλασσινό αλάτι, κυρίως χλωριούχο νάτριο (NaCl). Τα σωματίδια με προέλευση από το θαλάσσιο περιβάλλον εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα είτε άμεσα με τη μορφή φυσαλίδων αφρού από τις κορυφογραμμές των κυμάτων, όταν οι ταχύτητες ανέμου είναι μεγάλες, είτε έμμεσα με τη μορφή σταγονιδίων (film drops) και πίδακα (jet drops), που συμβαίνουν όταν τα κύματα προσκρούουν στην επιφάνεια της θάλασσας σε μικρότερες ταχύτητες ανέμου (Λαζαρίδης, 2015). Παρόλο που τα σωματίδια θαλάσσιας προέλευσης είναι λιγότερο επιβλαβή σε σύγκριση με άλλες πηγές αερολυμάτων, μπορούν να συμβάλλουν στη συνολική επιβάρυνση του αέρα και κατ'επέκταση στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης των AS_{10} , σε παράκτιες περιοχές κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων. Τον Ιούλιο, όπου οι επικρατούντες άνεμοι προέρχονταν από τη θάλασσα, οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις των AS_{10} βρέθηκαν αρκετά υψηλές, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται, μεταξύ άλλων, και στην επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των AS_{10} .

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Ο κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η καταγραφή των συγκεντρώσεων των ΑΣ₁₀ στον σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων για το έτος 2023. Μέσω της επεξεργασίας και ανάλυσης των συγκεντρώσεων των ΑΣ₁₀, επιδιώχθηκε η ανίχνευση της προέλευσης και των επιπτώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων στο περιβάλλον, καθώς και η ανάλυση των μεταβολών τους ανάλογα με τη διάρκεια της ημέρας και το αν ήταν καθημερινή ή Σαββατοκύριακο. Επίσης, η εργασία περιέλαβε τη σύγκριση των συγκεντρώσεων με αυτές του 2022.

Η μέση ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ₁₀ για το έτος 2023 ήταν ίση με 17,4 $\mu\text{g m}^{-3}$, με τις συγκεντρώσεις των ΑΣ₁₀ να κυμαίνονται από 5,8 $\mu\text{g m}^{-3}$ έως 146,6 $\mu\text{g m}^{-3}$. Γενικότερα, οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις χαρακτηρίστηκαν ως χαμηλές, καθώς το 90% των μετρήσεων ολόκληρου του έτους είχαν τιμή συγκέντρωσης μικρότερη από 27 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Οι συνολικές ημέρες υπέρβασης του 24ώρου νομοθετικού ορίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης (50 $\mu\text{g m}^{-3}$) ήταν μόλις 4 ημέρες και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (45 $\mu\text{g m}^{-3}$) ήταν 6 ημέρες, ενώ κατά τη διάρκεια του έτους 2022 ήταν 15 ημέρες και 20 αντίστοιχα (Μπαλή, 2022). Επομένως, για το 2023 παρατηρήθηκε μείωση κατά 73,33% των συνολικών ημερών υπέρβασης των νομοθετικών ορίων της Ε.Ε. και 70% του Π.Ο.Υ. σε σύγκριση με αυτές του έτους 2022. Όλες οι υπερβάσεις σημειώθηκαν τις ημέρες όπου υπήρξε μεταφορά σκόνης από τη Βόρεια Αφρική, καθιστώντας τη μεταφορά σκόνης τον καθοριστικό παράγοντα για την αύξηση των ΑΣ₁₀. Ωστόσο, η συνεισφορά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες της περιοχής, όπως οι διεργασίες καύσης, η κυκλοφορία των οχημάτων ή η οικιακή θέρμανση επηρέασαν σημαντικά τις συγκεντρώσεις των ΑΣ₁₀.

Πιο συγκεκριμένα, για το έτος 2023 καταγράφηκαν 43 ημέρες όπου υπήρξαν επεισόδια σκόνης, με μόλις τις 6 από αυτές να σημειώνεται κάποια υπέρβαση ορίου. Δηλαδή, από τις ημέρες με σκόνη μόνο το 14% αυτών συνοδεύτηκε με υπέρβαση των νομοθετικών ορίων. Μπορεί το ποσοστό αυτό να είναι μικρό, αλλά δεν αναιρεί το γεγονός ότι η συμβολή της σκόνης στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσης ήταν σημαντική. Αν και οι συγκεντρώσεις δεν ξεπέρασαν τα νομοθετικά όρια τις συγκεκριμένες ημέρες, παρατηρήθηκε αύξηση σε σύγκριση με τις ημέρες όπου δεν υπήρξε μεταφορά σκόνης. Επιπλέον, παρατηρείται πως κατά τη διάρκεια όλων των μηνών εμφανίστηκαν επεισόδια σκόνης, με τα περισσότερα να καταγράφονται τον Νοέμβριο και τον Οκτώβριο, ενώ τα λιγότερα (ένα επεισόδιο) τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο. Όσον αφορά τη διάρκεια τους, το μικρότερο επεισόδιο διήρκεσε 1 ημέρα, ενώ το μεγαλύτερο 8 ημέρες.

Οι μηνιαίες συγκεντρώσεων των AS_{10} έδειξαν ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις του έτους σημειώθηκαν τον Απρίλιο, ενώ οι υψηλότερες τον Νοέμβριο. Τα αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης τον Νοέμβριο, οφείλονταν στα συχνά επεισόδια σκόνης από την έρημο Σαχάρα.

Η ανάλυση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων έδειξε πως τους περισσότερους μήνες του έτους υπήρξε μικρή διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ωστόσο, τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες υπήρξε αύξηση των συγκεντρώσεων μεταξύ των ωρών 6 μ.μ. έως 2 π.μ., λόγω των εκπομπών καύσης από την οικιακή θέρμανση. Ακόμη, παρατηρήθηκε πως κατά τους περισσότερους μήνες, οι πρωινές ώρες μεταξύ 6 π.μ. και 12 μ.μ. παρουσίασαν αύξηση στα επίπεδα συγκέντρωσης, καθώς αυτές οι ώρες αποτελούν αιχμή της κυκλοφορίας. Τα υψηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν η συνεισφορά των εκπομπών καυσαερίων από τα οχήματα είναι πιο έντονη λόγω της αυξημένης τουριστικής κίνησης.

Η σύγκριση των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων μάζας των AS_{10} μεταξύ καθημερινών και Σαββατοκύριακων, όπως καταγράφηκαν ανά μήνα, έδειξε παρόμοιες μεταβολές σε κάθε μήνα του έτους, οι οποίες σχετίζονται με τις ώρες αιχμής. Δηλαδή, τις καθημερινές παρατηρήθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις των AS_{10} το πρωί και το μεσημέρι, ενώ τα σαββατοκύριακα παρατηρήθηκαν το απόγευμα και βράδυ. Ωστόσο, γενικότερα δεν υπήρξαν έντονες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταξύ των καθημερινών και των Σαββατοκύριακων ανά τους μήνες, με εξαίρεση τους μήνες Μάρτιο, Οκτώβριο και Νοέμβριο, όπου φαίνεται σε κάποιες ώρες της ημέρας οι συγκεντρώσεις να διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Αυτές οι διακυμάνσεις πιθανώς οφείλονταν σε εκπομπές τοπικών πηγών, δηλαδή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, εφόσον είχαν αφαιρεθεί οι συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν τις ημέρες με μεταφορά σκόνης προς τον σταθμό.

Όσον αφορά τη σύγκριση των συγκεντρώσεων για τα έτη 2022 και 2023, προέκυψε το συμπέρασμα πως για τους περισσότερους μήνες του 2022 σημειώθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με το 2023. Οι διαφορές στις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των δύο ετών οφείλονταν κυρίως στην εμφάνιση επεισοδίων σκόνης. Επιπλέον, από την ανάλυση των συγκεντρώσεων που καταγράφηκαν τις ημέρες χωρίς σκόνη, προέκυψε ότι οι συγκεντρώσεις του 2022 ήταν υψηλότερες από τις αντίστοιχες του 2023. Βάσει των παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο ετών δεν οφείλονταν αποκλειστικά στη μεταφορά σκόνης, αλλά πιθανότατα και σε άλλες εκπομπές, όπως αυτές από ανθρωπογενείς πηγές.

Έπειτα από την διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης των AS_{10} και των μετεωρολογικών δεδομένων (σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και θερμοκρασία), προέκυψε το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει απόλυτη γραμμική σχέση που να συνδέει τα μεγέθη, καθώς οι συγκεντρώσεις των AS_{10}

επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, εφόσον οι μετρήσεις αφορούν ένα φυσικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να μην εξαρτώνται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Τέλος, από τα ροδογράμματα ανέμου διαπιστώθηκε ότι οι άνεμοι με την μεγαλύτερη συχνότητα που έφτασαν στον σταθμό του Ακρωτηρίου είναι νοτιοδυτικοί (SW), δηλαδή έχουν προέλευση από την πόλη των Χανίων.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των μεταβολών των συγκεντρώσεων των AS_{10} σε όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς και στην επίδραση τόσο των τοπικών όσο και των απομακρυσμένων πηγών εκπομπής. Ωστόσο, για την περαιτέρω διερεύνηση αυτών των πηγών, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη η στοιχειακή ανάλυση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και ο υπολογισμός του συντελεστή εμπλουτισμού, ώστε να επιτευχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η ταυτοποίηση των πηγών εκπομπής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Λαζαρίδης, Μ. (2010). *Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας* (2η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Λαζαρίδης, Μ. (2015). *Βασικές αρχές της επιστήμης των αεροζόλ* (1η έκδ.). Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Μπαλή, Α. (2022). *Μελέτη της δυναμικής της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων (AS_{10}) στο σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων: Μελέτη εποχικότητας και πηγών προέλευσης* (Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης).

ΞΕΝΗ

- Anderson, J.O., Thundiyil, J.G., & Stolbach, A. (2011). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*.
- Arimoto, R. (2006). Characterization of Asian Dust during ACE-Asia. *Global and Planetary Change*, 23-56. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.013>
- 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 & Health*, 1359–1371. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00750-4>
- Chu, B. (1967). *Molecular forces: Based on the Baker Lectures of Peter J W. Debye*. Interscience Publishers, John Wiley & Sons.
- Colbeck, I., & Lazaridis, M. (Eds.). (2014). *Aerosol Science Technology and Applications*. John Wiley & Sons Ltd.
- Drossinos, Y., & Housiadas, C. (2006). Aerosol flows. In C.T. Crowne (Ed.), *Multiphase Flow Handbook* (pp. 6-1–6-58). CRC Press.
- Dzyaloshinskii, I.E., Lifshitz, E.M., & Pitaevskii, L.P. (1961). The general theory of van der Waals forces. *Advances in Physics*, 165–209. <https://doi.org/10.1080/00018736100101281>
- EMEP/CORINAIR. (2002). *Atmospheric Emission Inventory Guidebook* (3rd ed.). EEA Technical Report No 30.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., et al. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, et al. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Friedlander, S.K. (2000). *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics* (2nd ed.). Oxford University Press, Inc.

Garcia, E.O. (2011). Radiative forcing under mixed aerosol conditions. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2009JD013625>

Hansell, R.A., Tsay, S.C., Ji, Q., Hsu, N.C., Jeong, M.J., Wang, S.H., Reid, J.S., Liou, K.N., & Ou, S.C. (2010). An assessment of the surface longwave direct radiative effect of airborne Saharan dust during the NAMMA field campaign. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1048-1065. <https://doi.org/10.1175/2009JAS3257.1>

Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 513-543. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>

Hinds, C.W. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

ICPR. (1994). *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. *Annals of the ICRP*. Pergamon Press. https://doi.org/10.1177/ANIB_24_1-3

Irwin, J.G., & Williams, M.L. (1988). Acid rain: Chemistry and transport. *Environmental Pollution*, 50(1–2), 29-59. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90184-4](https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90184-4)

Jing Li, Carlson, B.E., Yung, Y.L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J.E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R.A., Zhang, P., Dubovik, O., Ding, A., Lacis, A.A., Zhang, L., & Dong, Y. (2022). Scattering and absorbing aerosols in the climate system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 363-379. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7>

Lau, R., & Chuah, H. (2013). Dynamic shape factor for particles of various shapes in the intermediate settling regime. *Advanced Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2012.08.001>

Lazaridis, M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Springer.

Losacco, C., & Perillo, A. (2018). Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 33901-33910. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3344-9>

Mazumber, M.K. & Kirsch, K.J. (1977). Single particle aerodynamic relaxation time analyzer. *Review of Scientific Instruments*, 622-624 <https://doi.org/10.1063/1.1135094>

Mohapatra, K., & Biswal, S.K. (2014). Effect of particulate matter (PM) on plants, climate, ecosystem, and human health. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 2348-7550. https://ijates.com/images/short_pdf/1404370755_P118-129.pdf

Nguyen Nhat Ha, C., & Nguyen Thi Kim, O. (2021). Photochemical smog modeling of PM_{2.5} for assessment of associated health impacts on crowded urban areas of Southeast Asia. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101541>

Nicholson, K.W. (1967). Atmospheric Environment, 2639–2651. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90433-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90433-7)

Baron, P.A, Willeke, K., (2001). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Peng, L., & Li, Z. (2021). A review of measurement techniques for aerosol effective density. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147822>

Rani, B., Singh, U., Chuhan, A.K., Sharma, D., & Maheshwari, R. (2011). Photochemical smog pollution and its mitigation measures. *Journal of Advanced Scientific Research*. <https://webtran.com/science/smog%20article.pdf>

Rowland, O.E., (2024). Comparative analysis of meteorological parameters and their relationship with NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} and O₃ concentrations at selected urban air quality monitoring stations in Krakow, Paris, and Milan. *Discover Environment*. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00060-2>

Schlesinger, R.B. (1995). Toxicological evidence for health effects from inhaled particulate pollution: Does it support the human experience? *Inhalation Toxicology*, 99-109. <https://doi.org/10.3109/08958379509014274>

Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Stein, A., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

Stein, A., Escudero, M., Draxler, R.R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., & Avila, A. (2006). Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM₁₀ concentrations over

the central Iberian Peninsula using the HYSPLIT model. *Journal of Geophysical Research*.
<https://doi.org/10.1029/2005JD006395>

Sun, S., Cross, G., Bisaga, M., Lin, L., & Fu, L. (2020). Standard operating procedure for measurement of particulate matter by Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate Monitor (5030 & 5030i). *Alberta Government*. <https://open.alberta.ca/publications/sop-measurement-particulatematter-by-sharp-monitor>

Thermo Fisher Scientific. (2014). *Model 5030i SHARP Instruction Manual Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate Monitor*. Available at: www.thermo.com/WEEERoHS

Tran, S., Iida, K., Yashiro, K., Murashima, Y., Sakurai, H., Olfert, J. (2020). Determining the cutoff diameter and counting efficiency of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier and an inkjet aerosol generator. *Aerosol Science and Technology*, 1335-1344.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1777252>

Wark, K., Warner, F.C. and Davis, T.W. (1998). *Air pollution: its origin and control*. 3rd Edition. United States: Addison Wesley Longman.

Wilson, J.C. & Liu, B.Y.H. (1980). Aerodynamic particle size measurement by laser-doppler velocimetry. *Journal of Aerosol Science*, 139-150 [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(80\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0021-8502(80)90030-0)