



## **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση : Μηχανικών Περιβάλλοντος

*«Μελέτη της δυναμικής της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων  
σωματιδίων ( $AS_{10}$ ) στο σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων: μελέτη εποχικότητας  
και πηγών προέλευσης»*

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΑΜΑΛΙΑΣ ΜΠΑΛΗ**



**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023**

*Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.*

*Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.*



## **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση :** Μηχανικών Περιβάλλοντος

*«Μελέτη της δυναμικής της συγκέντρωσης μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων ( $AS_{10}$ ) στο σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων: μελέτη εποχικότητας και πηγών προέλευσης»*

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**ΑΜΑΛΙΑΣ ΜΠΑΛΗ**

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :**

Λαζαρίδης Μιχάλης (Επιβλέπων)

Βουλγαράκης Απόστολος

Χατουτσίδου Σοφία Ειρήνη

**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η σοβαρότητα των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία, στα υλικά, στη χλωρίδα, στην πανίδα και στο κλίμα εξαρτάται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, τη δυναμική και τις πηγές εκπομπής τους.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη των 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{AS}_{10}$ ), στον σταθμό του Ακρωτηρίου των Χανίων, με σκοπό την ανάλυση της μεταβολής τους και τον προσδιορισμό των πηγών προέλευσής τους. Η συγκέντρωση των  $\text{AS}_{10}$  μετρήθηκε χρησιμοποιώντας 2 διαφορετικά όργανα, το SHARP Monitor και το DIGITEL Aerosol Sampler DPA14. Το SHARP Monitor μέτρησε σε πραγματικό χρόνο τη συγκέντρωση των  $\text{AS}_{10}$ , συλλέγοντας δεδομένα για όλο το έτος 2022. Η χρήση του μοντέλου HYSPLIT και των δορυφορικών εικόνων βοήθησε στην εύρεση των ημερών με επεισόδια σκόνης. Παράλληλα, στο όργανο DIGITEL Aerosol Sampler DPA14 τοποθετήθηκαν φίλτρα για την εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων σε αυτά, για 20 ημέρες του Μαΐου του 2022. Η περαιτέρω επεξεργασία των φίλτρων για τη στοιχειακή ανάλυσή τους με φασματοσκοπία φθορισμού ακτινών Χ (X-ray fluorescence, XRF) χρησιμοποιώντας το TRACER 5i (Bruker) οδήγησε στην ανίχνευση των χημικών στοιχείων του κάθε δείγματος και στον ποσοτικό προσδιορισμό τους.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις των  $\text{AS}_{10}$  κυμάνθηκαν από 7,3 έως 287,5  $\mu\text{g m}^{-3}$  με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να αντιστοιχούν στον Απρίλιο, λόγω έντονων επεισοδίων σκόνης ενώ τον Δεκέμβριο οι χαμηλότερες. Συνολικά εντοπίστηκαν 50 ημέρες με επεισόδια σκόνης. Οι υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων των  $\text{AS}_{10}$  οφείλονταν κυρίως σε αυτά τα επεισόδια σκόνης σε ποσοστό 80% και δευτερευόντως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες της περιοχής. Οι παρατηρούμενες αυξημένες συγκεντρώσεις των  $\text{AS}_{10}$  το χειμώνα οφείλονταν στην οικιακή θέρμανση, την άνοιξη στα συχνά και έντονα επεισόδια σκόνης, το καλοκαίρι στις τουριστικές δραστηριότητες και το φθινόπωρο στην κυκλοφορία οχημάτων και την επαναιώρηση σκόνης από το δρόμο. Ακόμα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των  $\text{AS}_{10}$ , που παρατηρήθηκαν το πρωί και το μεσημέρι των καθημερινών και το απόγευμα, βράδυ των σαββατοκύριακων, και συνδέονται με τις ώρες αιχμής.

Από τη στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων παρατηρήθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις του Na, Cl, Si, Ca και Al, δηλαδή των χημικών στοιχείων προερχόμενων από το θαλάσσιο περιβάλλον και τον φλοιό της Γης. Παράλληλα, βρέθηκε ότι το Al αποτελεί καλό δείκτη της μεταφερόμενης σκόνης από τη Βόρεια Αφρική. Συμπληρώνεται ότι οι άνεμοι πνέουν συχνά με κατεύθυνση κυρίως από τη θάλασσα και από την πόλη των Χανίων προς τον σταθμό Ακρωτηρίου.

## ABSTRACT

The study of particulate matter is particularly important, as the severity of their effects on human health, materials, flora, fauna and climate is proportional to their physicochemical characteristics, dynamics and emission sources.

The objective of this thesis was the study of the concentration of particulate matter with an aerodynamic diameter equal to or less than  $10\text{ }\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), at the Akrotiri station of Chania, to analyze their variability and determine the sources of origin. The concentration of  $\text{PM}_{10}$  was measured using 2 different instruments, the SHARP Monitor and the DIGITEL Aerosol Sampler DPA14. The SHARP Monitor measured the concentration of  $\text{PM}_{10}$  on-line, collecting data for the year 2022. Simulations with HYSPLIT model and satellite images helped to identify days with dust episodes. At the same time, filters were placed on the DIGITEL Aerosol Sampler DPA14 instrument whereby 20 samples were collected for 20 days during May 2022. Further processing of the filters for their elemental analysis with an X-Ray Fluorescence analyzer (TRACER 5i, Bruker) led to the identification and quantification of the chemical elements in each sample.

The results showed that the concentrations of  $\text{PM}_{10}$  ranged from  $7.3$  to  $287.5\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$  with highest concentrations found during April, due to intense dust episodes, while the lowest in December. Overall, a total of 50 days with dust events were identified. Exceedances of the legislative limits of  $\text{PM}_{10}$  were mainly due to these dust episodes with a frequency of 80% and secondarily to anthropogenic activities in the area. The observed increased concentrations of  $\text{PM}_{10}$  in winter were due to domestic heating, in spring due to frequent and intense dust episodes, in summer due to touristic activities and in autumn due to vehicular traffic and road dust resuspension. Diurnal analysis demonstrated higher concentrations of  $\text{PM}_{10}$ , during morning and midday on weekdays and during afternoon and evening on weekends, all associated with peak hours.

Elemental analysis of the samples showed increased concentrations of Na, Cl, Si, Ca and Al, elements that primarily originate from the marine environment and the Earth's crust. At the same time, Al was found to be a good indicator of the transported dust from North Africa. It was also found that winds blow quite frequently from the sea and the city of Chania towards the Akrotiri station.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*Αρχικά, ευχαριστώ πολύ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Λαζαρίδη για την εξαιρετική συνεργασία και που μου ανάθεσε ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα για τη διπλωματική μου εργασία, βοηθώντας στη βελτίωση και εξέλιξή της, όπως και ευχαριστώ για την κατανόηση και υπομονή καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.*

*Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στη μεταδιδακτορική ερευνήτρια κ. Χατουτσίδου Σοφία-Ειρήνη για τις χρήσιμες συμβουλές της, για την προσφορά πολύτιμης βοήθειας στις σταθμικές μετρήσεις και την παροχή επιπλέον γνώσεων στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.*

*Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Βουλγαράκη Απόστολο για την αποδοχή του να αποτελέσει μέλος της τριμελούς επιτροπής και να αξιολογήσει την εργασία αυτή.*

*Τέλος, ευχαριστώ πάρα πολύ την οικογένεια μου, τις φίλες και φίλους μου για την υπομονή, την υποστήριξη και την ανεκτίμητη ενθάρρυνσή τους.*

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ .....</b>	<b>13</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>14</b>
<b>Κεφάλαιο 1: Αιωρούμενα Σωματίδια .....</b>	<b>15</b>
1.1 Ορισμός των αιωρούμενων σωματιδίων .....	15
1.2 Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων .....	18
1.2.1 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων.....	18
1.2.2 Σχήμα αιωρούμενων σωματιδίων .....	21
1.2.3 Όγκος αιωρούμενων σωματιδίων .....	21
1.2.4 Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων .....	23
1.3 Κατηγοριοποίηση ως προς το μέγεθος .....	23
1.4 Κατηγοριοποίηση ως προς τις πηγές προέλευσης .....	28
1.5 Κατηγοριοποίηση ως προς τη χημική σύσταση .....	29
1.6 Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων .....	31
<b>Κεφάλαιο 2: Διεργασίες σχηματισμού, μεταφοράς &amp; απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα .....</b>	<b>34</b>
2.1 Δυναμική της ατμόσφαιρας.....	34
2.2 Πυρηνοποίηση .....	35
2.3 Συμπύκνωση και Εξάτμιση.....	36
2.4 Συσσωμάτωση και Συσσώρευση .....	36
2.4.1 Κίνηση Brown.....	37
2.4.2 Δυνάμεις van der Waals .....	38
2.5 Διασπορά αιωρούμενων σωματιδίων .....	39
2.5.1 Μεταφορά αέριων μαζών.....	39
2.5.2 Μοντέλο θυσάνου .....	39
2.5.2 Μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων .....	40
2.5.3 Επαναιώρηση.....	42
2.5.3 Χρόνος παραμονής αιωρούμενων σωματιδίων .....	42
2.6 Τρόποι απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα .....	43
2.6.1 Ξηρή Εναπόθεση .....	43
2.6.2 Υγρή Εναπόθεση .....	43
<b>Κεφάλαιο 3: Εκπομπές και επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων .....</b>	<b>44</b>
3.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	44
3.2 Εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων από φυσικές πηγές.....	46
3.2.1 Εκπομπή θαλασσινού σπρέι.....	46

3.2.2 Εκπομπή σκόνης .....	47
3.3 Εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες .....	47
3.4 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία .....	48
3.5 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στα υλικά .....	51
3.6 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη χλωρίδα και πανίδα .....	51
3.7 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα .....	52
<b>Κεφάλαιο 4: Όργανα μέτρησης .....</b>	<b>54</b>
4.1 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, SHARP Monitor .....	54
4.2 Όργανο μέτρησης μάζας, DIGITEL Aerosol Sampler - DPA14 .....	57
4.3 Φασματόμετρο, TRACER 5i (Bruker) .....	58
<b>Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία - Μεθοδολογία .....</b>	<b>64</b>
5.1 Μεθοδολογία .....	64
5.2 Περιοχή Μελέτης .....	68
5.3 Μοντέλο HYSPLIT .....	70
5.4 Δορυφορικές εικόνες NASA .....	71
5.5 Λογισμικό Artax .....	71
<b>Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων .....</b>	<b>73</b>
6.1 Χρονοσειρά ΑΣ <sub>10</sub> .....	73
6.2 Μηνιαίες Διακυμάνσεις .....	75
6.3 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση .....	77
6.4 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση (Καθημερινές & Σαββατοκύριακα) .....	79
6.5 Ημέρες με σκόνη .....	80
6.6 Σταθμική ανάλυση .....	84
6.7 Στοιχειακή ανάλυση .....	85
6.8 Συντελεστής εμπλουτισμού .....	87
6.9 Λόγοι χημικών στοιχείων .....	88
6.10 Ροές ανέμων (ροδόγραμμα) .....	91
<b>Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα .....</b>	<b>93</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>95</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....</b>	<b>102</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....</b>	<b>108</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1:</b> Ιξώδες και Πυκνότητα του νερού και του καθαρού αέρα ( $T = 293,15\text{ K}$ και $P_a = 101,325\text{ kPa}$ ). .....	22
<b>Πίνακας 1.2:</b> Πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων (αναδιαμορφωμένο από Seinfeld και Pandis, 2016).....	28
<b>Πίνακας 1.3:</b> Η χημική σύσταση των λεπτών και χονδρών σωματιδίων (από Seinfeld και Pandis, 2016). .....	31
<b>Πίνακας 1.4:</b> Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (Ε.Ε.). .....	32
<b>Πίνακας 1.5:</b> Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (WHO). .....	32
<b>Πίνακας 1.6:</b> Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (EPA).....	33
<b>Πίνακας 3.1:</b> Οι δείκτες ποιότητας αέρα (ΔΠΑ) και οι συγκεντρώσεις των $AS_{2,5}$ και $AS_{10}$ (αναδιαμόρφωση από τη σελίδα της NASA ( <a href="https://spacemath.gsfc.nasa.gov/">https://spacemath.gsfc.nasa.gov/</a> )). .....	45
<b>Πίνακας 5.1:</b> Συνθήκες λειτουργίας. ....	66
<b>Πίνακας 5.2:</b> Συντεταγμένες του Μετεωρολογικού Σταθμού.....	68
<b>Πίνακας 6.1:</b> Υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) για τη συγκέντρωση $AS_{10}$ στον σταθμό Ακρωτηρίου το έτος 2022. ....	74
<b>Πίνακας 6.2:</b> Μηνιαία στατιστική ανάλυση του έτους 2022. ....	75
<b>Πίνακας 6.3:</b> Ημέρες που παρατηρούνται επεισόδια σκόνης και οι ημέρες που παρατηρείται η υπέρβαση του νομοθετικού ορίου του ΠΟΥ. ....	81
<b>Πίνακας 6.4:</b> Οι μέσες συγκεντρώσεις των $AS_{10}$ και η τυπική απόκλισή τους για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) και τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) για τον σταθμό Ακρωτηρίου του έτους 2022. ....	83
<b>Πίνακας 6.5:</b> Συγκεντρώσεις μάζας των $AS_{10}$ στα φίλτρα με τη θερμοκρασία και υγρασία της 1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> ζύγισης.....	84
<b>Πίνακας 6.6:</b> Στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων ( $ng\ m^{-3}$ ) των 16 χημικών στοιχείων για την περίοδο δειγματοληψίας. ....	86
<b>Πίνακας 6.7:</b> Οι μέσες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) και τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) για τις 20 ημέρες του Μαΐου.....	89
<b>Πίνακας 6.8:</b> Κύριες κατευθύνσεις ανέμων και η πιθανή προέλευσή τους. ....	91

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Τα μεγέθη των τυπικών αιωρούμενων σωματιδίων (Αναδιαμόρφωση από Cooper και Alley, 2004). .....	19
<b>Σχήμα 1.2:</b> Η ισοδύναμη διάμετρος μιας σφαίρας ενός αρχικά ακανόνιστου σωματιδίου (Αναδιαμόρφωση από Hinds, 1999; Λαζαρίδης, 2015).....	20
<b>Σχήμα 1.3:</b> Ιξώδες και οι επιπτώσεις του α) Το αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες πραγματοποιεί την αντίδραση διαχωρισμού γρηγορότερα από το αερόλυμα με υψηλό ιξώδες. β) Για τον σχηματισμό πάγου μέσω πυρηνοποίησης, το υγρό αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες δε λειτουργεί με ετερογενής πυρηνοποίηση αλλά μόνο με ομογενής πυρηνοποίηση. γ) Η ετερογενής χημεία, όπως και στην αντίδραση διαχωρισμού, συμβαίνει γρηγορότερα στο αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες. δ) Οι επιπτώσεις στο κλίμα, στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία μπορούν να προκύψουν από αερολύματα είτε χαμηλού είτε υψηλού ιξώδους είτε από συνδυασμό και των δύο (Αναδιαμόρφωση από Reid κ. ά., 2018).....	22
<b>Σχήμα 1.4:</b> Τα κατηγοριοποιημένα σωματίδια με βάση το μέγεθος και τις διεργασίες σχηματισμού τους (Αναδιαμόρφωση από Frey, 2019).....	24

<b>Σχήμα 1.5:</b> Οι δικόρυφες κατανομές αριθμού και μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων (από Λαζαρίδης, 2015).	27
<b>Σχήμα 1.6:</b> Τυπικές λογαριθμικές κατανομές (α) αριθμού, (β) επιφάνειας και (γ) όγκου (από John, 2011).	27
<b>Σχήμα 1.7:</b> Η χημική σύσταση των αερολυμάτων και οι διεργασίες σχηματισμού τους με βάση την πηγή προέλευσής τους (από Λαζαρίδης, 2015).	30
<b>Σχήμα 2.1:</b> Ο κύκλος ζωής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (αναδιαμορφωμένο από Röschi, 2005).	34
<b>Σχήμα 2.2:</b> Η διεργασία της πυρηνοποίησης (αναδιαμορφωμένο από Kathmann, κ. ά., 2008).	35
<b>Σχήμα 2.3:</b> Η διεργασία της συσσωμάτωσης (αναδιαμόρφωση από Kathmann, κ. ά., 2008).	37
<b>Σχήμα 2.4:</b> Η ανύψωση του πλουμίου από μια πηγή εκπομπής ζεστών αέριων ρύπων (από Λαζαρίδης, 2010).	40
<b>Σχήμα 2.5:</b> Πρόσκρουση σωματιδίου με το στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).	41
<b>Σχήμα 2.6:</b> Η παρεμπόδιση του σωματιδίου να βρει το στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).	41
<b>Σχήμα 2.7:</b> Η διάχυση του σωματιδίου μέσα στο στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).	41
<b>Σχήμα 2.8:</b> Η κίνηση του σωματιδίου προς το στόχο λόγω θερμοφόρησης με $T_1 > T_2$ (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).	42
<b>Σχήμα 3.1:</b> Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων και οι αντίστοιχες επιπτώσεις τους στον άνθρωπο (αναδιαμόρφωση από Ανδρίτσος, 2015).	49
<b>Σχήμα 3.2:</b> Τα κλάσματα των εισπνεόμενων, θωρακικών και αναπνεύσιμων σωματιδίων, με τις καμπύλες των $AS_{10}$ και $AS_{2,5}$ , ως προς την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων. Το κλάσμα μεγέθους αναφέρεται στο ποσοστό διείσδυσης κάθε περιοχής στο αναπνευστικό σύστημα (αναδιαμόρφωση από Lazaridis και Colbeck, 2010).	50
<b>Σχήμα 3.3:</b> Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα, με τα βέλη χρώματος μπλε να περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το βέλος πορτοκαλί χρώματος να αφορά την επίγεια ακτινοβολία (αναδιαμόρφωση από (Fuzzi κ. ά., 2015)).	52
<b>Σχήμα 4.1:</b> α) SHARP Monitor, Model 5030i στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων β) SHARP Monitor (αναδιαμόρφωση από Thermo Scientific, 2018b).	54
<b>Σχήμα 4.2:</b> Κεφαλή εισόδου $AS_{10}$ (αναδιαμορφωμένη από Thermo Scientific, 2018a).	55
<b>Σχήμα 4.3:</b> Διάγραμμα αρχής λειτουργίας του SHARP Monitor (αναδιαμόρφωση από Thermo Scientific, 2018).	56
<b>Σχήμα 4.4:</b> α) Φωτογραφία του DIGITEL LVS (DPA14) στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων β) Αρχή λειτουργίας DIGITEL Sampler- DPA14.	58
<b>Σχήμα 4.5:</b> Φωτογραφία του Tracer 5i της Bruker σε ειδική βάση.	58
<b>Σχήμα 4.6:</b> Τμήματα του Tracer 5i (αναδιαμόρφωση από Bruker, 2016).	59
<b>Σχήμα 4.7:</b> Αλληλεπιδράσεις ακτίνων Χ με την ύλη (αναδιαμόρφωση από Brouwer, 2003).	60
<b>Σχήμα 4.8:</b> Διάγραμμα ροής φορητού οργάνου ανάλυσης ED-XRF (αναδιαμόρφωση από Tsuji, κ. ά., 2004).	62
<b>Σχήμα 4.9:</b> Λυχνία XRF (αναδιαμορφωμένη από Brouwer, 2003).	62

<b>Σχήμα 5.1:</b> Μεθοδολογία εύρεσης εποχικότητας και προέλευσης των $AS_{10}$ .....	64
<b>Σχήμα 5.2:</b> Μεθοδολογία εύρεσης συγκεντρώσεων των $AS_{10}$ και των χημικών στοιχείων που απαρτίζονται.....	65
<b>Σχήμα 5.3:</b> Ζυγός ακριβείας Sartorius με φίλτρο προερχόμενο από δειγματοληψία με το DPA14....	66
<b>Σχήμα 5.4:</b> Ανάλυση χημικών στοιχείων με κενό αέρα στο εργαστήριο.....	67
<b>Σχήμα 5.5:</b> α) Φωτογραφία του σταθμού Ακρωτηρίου Χανίων β) Δορυφορική φωτογραφία της θέσης του σταθμού, του εργαστηρίου, της στάθμευσης οχημάτων και των στάσεων λεωφορείων (Φωτογραφία από Google Earth). ....	69
<b>Σχήμα 5.6:</b> Δορυφορικός χάρτης της Περιοχή Μελέτης (Φωτογραφία από Google Earth). ....	70

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<b>Διάγραμμα 6.1:</b> Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $AS_{10}$ .....	73
<b>Διάγραμμα 6.2:</b> Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων $AS_{10}$ ανά μήνα για το έτος 2022.....	76
<b>Διάγραμμα 6.3:</b> Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις $AS_{10}$ χωρισμένες ανά εποχή (το κάθε διάγραμμα έχει διαφορετικούς άξονες του γ για την καλύτερη απεικόνιση των 24ωρων μεταβολών). Οι τιμές αντιστοιχούν στη διάμεσο για την κάθε εποχή.....	77
<b>Διάγραμμα 6.4:</b> Η μηνιαία 24ωρη μεταβολή για τις ημέρες της εβδομάδας (διαφορά των συγκεντρώσεων $AS_{10}$ των καθημερινών με των σαββατοκύριακων) του έτους 2022. Οι τιμές αντιστοιχούν στη διάμεσο για κάθε περίπτωση.....	79
<b>Διάγραμμα 6.5:</b> Το ποσοστό ημερών με επεισόδιο σκόνης για την κάθε εποχή του έτους 2022.....	81
<b>Διάγραμμα 6.6:</b> Εικόνες επεισοδίου σκόνης από Hysplit και οι αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες για τις 01/04/2022 και 05/04/2022.....	82
<b>Διάγραμμα 6.7:</b> Θηκόγραμμα των συγκεντρώσεων $AS_{10}$ για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) (non-dusty days) και για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) (Dusty Days) στον σταθμό Ακρωτηρίου του έτους 2022....	83
<b>Διάγραμμα 6.8:</b> Θηκόγραμμα των συγκεντρώσεων των 16 χημικών στοιχείων. ....	85
<b>Διάγραμμα 6.9:</b> Θηκόγραμμα των συντελεστών εμπλουτισμού (EF) για 15 χημικά στοιχεία, εξαιρείται το αλουμίνιο (Al). ....	87
<b>Διάγραμμα 6.10:</b> Οι λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων του κάθε χημικού στοιχείου για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) προς τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ). ....	88
<b>Διάγραμμα 6.11:</b> Η μέση τιμή των λόγων των χημικών στοιχείων για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) και τις ημέρες με χαμηλή ή υψηλή συγκέντρωση σκόνης (ΗΜΣ) για τις 20 ημέρες του Μαΐου του 2022. ....	90
<b>Διάγραμμα 6.12:</b> Ροδόγραμμα ανέμου με κατεύθυνση προς τον σταθμό Ακρωτηρίου στις 18/05/2022. ....	92
<b>Διάγραμμα Α. 1:</b> Επεισόδιο σκόνης του Ιανουαρίου για το 2022.....	102
<b>Διάγραμμα Α.2:</b> Επεισόδια σκόνης του Φεβρουαρίου για το 2022.....	102
<b>Διάγραμμα Α.3:</b> Επεισόδια σκόνης του Μάρτιου για το 2022.....	103
<b>Διάγραμμα Α.4:</b> Επεισόδια σκόνης του Απριλίου για το 2022.....	104
<b>Διάγραμμα Α.5:</b> Επεισόδια σκόνης του Μαΐου για το 2022.....	105
<b>Διάγραμμα Α.6:</b> Επεισόδια σκόνης του Ιουνίου για το 2022. ....	105
<b>Διάγραμμα Α.7:</b> Επεισόδιο σκόνης του Αύγουστου για το 2022. ....	106
<b>Διάγραμμα Α.8:</b> Επεισόδια σκόνης του Σεπτεμβρίου για το 2022.....	106
<b>Διάγραμμα Α.9:</b> Επεισόδια σκόνης του Νοεμβρίου του 2022. ....	107
<b>Διάγραμμα Α.10:</b> Επεισόδια σκόνης του Δεκεμβρίου του 2022. ....	108

<b>Διάγραμμα B.1:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 05/05/22. ....	108
<b>Διάγραμμα B.2:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 06/05/22. ....	108
<b>Διάγραμμα B.3:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 07/05/22. ....	108
<b>Διάγραμμα B.4:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 08/05/22. ....	108
<b>Διάγραμμα B.5:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 09/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.6:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 10/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.7:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 11/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.8:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 12/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.9:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 13/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.10:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 14/05/22. ....	109
<b>Διάγραμμα B.11:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 15/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.12:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 16/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.13:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 17/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.14:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 18/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.15:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 19/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.16:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 20/05/22. ....	110
<b>Διάγραμμα B.17:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 21/05/22. ....	111
<b>Διάγραμμα B.18:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 22/05/22. ....	111
<b>Διάγραμμα B.19:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 23/05/22. ....	111
<b>Διάγραμμα B.20:</b> Ροδόγραμμα ανέμων για τις 24/05/22. ....	111

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

ΑΣ : Αιωρούμενα σωματίδια

ΑΣ<sub>10</sub> : Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μm

ΑΣ<sub>2,5</sub> : Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm

ΔΠΑ : Δείκτης Ποιότητας Αέρα

Ε.Ε. : Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΛΣΤΑΤ : Ελληνική Στατιστική Αρχή

ΕΣΥΕ : Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος

ΗΜΣ : Ημέρες με σκόνη

ΗΧΣ : Ημέρες χωρίς σκόνη

ΠΟΥ : Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας

AQI: Air Quality Index

BC: Black Carbon

CCN: Cloud Condensation Nuclei

EC: Elemental Carbon

EN : European Norm

EPA : Environmental Protection Agency

PM : Particulate Matter

RH : Relative Humidity

SHARP : Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate

SVOCs : Semi Volatile Organic Compounds

VOCs : Volatile Organic Compounds

WHO : World Health Organization

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Τα αερολύματα ή αλλιώς τα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) αποτελούν αντικείμενο εκτενούς έρευνας, όπου η ανάγκη για τη μελέτη τους ξεκίνησε με την ανάπτυξη της περιβαλλοντικής συνείδησης, δηλαδή τη δεκαετία 1980 – 1990. Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε ότι σημαντική συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση προέρχεται κυρίως από τα αερολύματα ή αλλιώς αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία μπορούν να προσβάλλουν το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και να επηρεάσουν το κλίμα σε παγκόσμια κλίμακα. Έτσι, η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τη ρύθμιση της ποιότητας του αέρα και κλίματος παγκοσμίως. Επομένως, η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως και η προσθήκη νομοθετικών μέτρων για τον περιορισμό τους, η μελέτη των διάφορων φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους, του σχηματισμού και μεταφοράς τους και η εύρεση των πηγών εκπομπής τους κρίθηκαν ιδιαιτέρως σημαντικά για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής και προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.

Η εύρεση των μεταβολών της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{AS}_{10}$ ) και η εκτίμηση των πηγών προέλευσής τους για ένα έτος, όπως και η εύρεση της χημικής σύστασής τους σε αυτό το έτος, αποτελούν τον κύριο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται συνολικά από επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζονται, κατηγοριοποιούνται και αναλύονται όλα τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, όπως και τα νομοθετικά όρια τους από διάφορους οργανισμούς. Έπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο αναγράφονται οι φυσικές και χημικές διεργασίες σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως και οι τρόποι μεταφοράς και απομάκρυνσης τους από την ατμόσφαιρα. Ακολούθως, στο τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται το θέμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μαζί με τις κύριες πηγές από τις οποίες εκπέμπονται τα αιωρούμενα σωματίδια και οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία, στα υλικά, στη χλωρίδα και πανίδα και στο κλίμα. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο αναγράφονται οι αρχές λειτουργίας των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν και όλη η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μαζί με την περιοχή μελέτης αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και ο σχολιασμός τους βρίσκονται στο έκτο κεφάλαιο. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν και ορισμένες προτάσεις για νέες ανάλογες μελέτες. Αναφέρεται ότι οι συντομογραφίες και τα αρκτικόλεξα που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή παρατίθενται παραπάνω.

## Κεφάλαιο 1: Αιωρούμενα Σωματίδια

---

### 1.1 Ορισμός των αιωρούμενων σωματιδίων

Ως αερόλυμα (aerosol) χαρακτηρίζεται το αιώρημα στερεών ή υγρών ή μίγμα και των δύο σωματιδίων μέσα σε ένα ρευστό μέσο που συνήθως είναι ο αέρας, έχοντας ένα μεγάλο εύρος φυσικοχημικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν τις ιδιότητές του (Λαζαρίδης, 2015). Το αερόλυμα πρόκειται για ένα διφασικό σύστημα που αποτελείται κυρίως από τη σωματιδιακή ύλη και το αέριο που την περιβάλλει. Με την έννοια σωματιδιακή ύλη (particulate matter, PM) ή **αιωρούμενα σωματίδια** (ΑΣ) γίνεται η αναφορά κυρίως στα στερεά σωματίδια και σταγονίδια (Hinds, 1999; Λαζαρίδης, 2015). Σημειώνεται ότι με τον όρο αερόλυμα πολλές φορές εννοείται μόνο η σωματιδιακή ύλη αυτού και επομένως το αερόλυμα μπορεί να ταυτιστεί με τα αιωρούμενα σωματίδια (Hinds, 1999; Λαζαρίδης, 2010, 2015).

Γενικά, τα **αιωρούμενα σωματίδια** περιλαμβάνουν τα αιωρήματα στερεών ή υγρών σωματιδίων, της ατμόσφαιρας εκτός των αερίων (Γεντεκάκης, 2010) και αποτελούνται κυρίως από ρύπους, βιολογικής, οργανικής ή ανόργανης προέλευσης (Ruzer και Harley, 2012). Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν μεγέθη με διάμετρο που κυμαίνονται από περίπου 0,001  $\mu\text{m}$  έως και περισσότερο από 100  $\mu\text{m}$  (Λαζαρίδης, 2015) και μπορούν να περιλαμβάνουν αναθυμιάσεις, αιθάλη, σωματίδια καπνού, ιπτάμενη τέφρα, αιθαλομίχλη, ομίχλη, σταγόνες βροχής, σπρέι, ιόντα, συμπλέγματα μορίων, σκόνη, γύρη, ιούς, βακτήρια κ.λπ. (Μουσιόπουλος, 1997; Γεντεκάκης, 2010).

Σύμφωνα με τον Μουσιόπουλο (1997), τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να ταξινομηθούν κυρίως με βάση :

- ❖ το μέγεθός τους (κύριο κριτήριο),
- ❖ το σχήμα τους,
- ❖ τη χημική τους σύσταση,
- ❖ την προέλευσή τους, και
- ❖ την άμεση ή έμμεση εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα

Τα αιωρούμενα σωματίδια ταξινομούνται, ανάλογα με τη φυσική μορφή τους (μέγεθος, σχήμα, πυκνότητα) και το τρόπο παραγωγής τους (Hinds, 1999). Συνεπώς, ακολουθεί ο ορισμός των κυριότερων αιωρούμενων σωματιδίων και αερολυμάτων (αιθάλη, αιθαλομίχλη, αναθυμιάσεις, αχλή, βιοαερόλυμα, δρόσος, εκνέφωμα, ιπτάμενη τέφρα, καπνός, ομίχλη, σκόνη και σπρέι) που έχουν διαφορετική φυσική μορφή.

- Η αιθάλη (soot) είναι ένα αερόλυμα στερεών σφαιρικών σωματιδίων, μαύρου χρώματος και πολύ μικρής διαμέτρου, προερχόμενο από τις διεργασίες ατελής καύσης οργανικού υλικού. Η αιθάλη αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και άνθρακα, ο οποίος είναι είτε πτητικός οργανικός άνθρακας (Volatile Organic Compound, VOC) που μπορεί να μετατραπεί μετέπειτα σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) και αλιφατικούς υδρογονάνθρακες (AL) και είτε μη πτητικός μαύρος άνθρακας (Black Carbon, BC) ή στοιχειακός άνθρακας (Elemental Carbon, EC), που μοιάζει με γραφίτη (Haynes και Wagner, 1981; Röschl, 2005; Δάσκαλος, 2008).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι 0,02 έως 0,04  $\mu\text{m}$ .
- Η αιθαλομίχλη (smog) είναι ένας όρος που προήλθε από τις λέξεις αιθάλη (καπνός) και ομίχλη (Hinds, 1999). Η φωτοχημική αιθαλομίχλη είναι ένα αερόλυμα που σχηματίζεται από τις υψηλές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων, οξειδίων του αζώτου και θείου της ατμόσφαιρας σε συνδυασμό με την ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία και απαρτίζεται κυρίως από δευτερογενείς ρύπους (όπως το όζον) (Μουσιόπουλος, 1997; Hinds, 1999).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1 έως 2  $\mu\text{m}$ .
- Οι αναθυμιάσεις ή καπνός (fume) είναι ένα αερόφερτο αερόλυμα στερεών σωματιδίων που παράγεται από τη συμπύκνωση των ατμών ή αέριων των διεργασιών καύσης και πρόκειται κυρίως είτε για μικρούς πυρήνες συσσωμάτωσης (clusters) είτε για αλυσίδες πρωτογενών σωματιδίων, όπως οι ατμοί (αέρια), σκόνες και εκπεμπόμενο καπνό εκλύόμενου από τον χημικό μετασχηματισμό μιας ουσίας (αντίδραση, θέρμανση ή έκρηξη) (Hinds, 1999).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 0,05  $\mu\text{m}$ .
- Η αχλή (ή αχλός) (haze) είναι ένα αερόλυμα στερεών αιωρούμενων σωματιδίων που προκύπτει από τη συσσώρευση μικροσκοπικών κόκκων σκόνης, καπνού, αλατιού, ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, ιόντων ή άλλων ρύπων της ατμόσφαιρας, μειώνοντας την ορατότητα σε λιγότερο από 10 km. (Hinds, 1999; Guo κ. ά., 2020).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1  $\mu\text{m}$ .
- Το βιοαερόλυμα (bioaerosol) είναι ένα αερόλυμα βιολογικής προέλευσης και δραστηριότητας που περιέχει μικροοργανισμούς, δηλαδή μπορεί να περιλαμβάνει ιούς, βακτήρια, σπόρια μυκήτων και γύρη (Cox και Wathes, 1995; Hinds, 1999).
  - Το αεροδυναμικό μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι 0,5 έως 100  $\mu\text{m}$ .
- Η δρόσος (dew) είναι το φυσικό φαινόμενο που σχηματίζεται κατά τη συμπύκνωση των υγρών σωματιδίων της ατμόσφαιρας (σταγονιδίων νερού) πάνω στην επιφάνεια διαφόρων στερεών σωμάτων, π.χ. φυτών, όταν η σχετική υγρασία (RH) φτάσει κοντά στο 100% και η θερμοκρασία είναι πάνω από 0° C σε κορεσμένη ατμόσφαιρα (Beysens κ. ά., 1991; Beysens,



1995). Όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από το 0° C γίνεται αναφορά σε παγωμένη δρόσο (white dew). Σημειώνεται ότι συχνά χρησιμοποιείται στη μετεωρολογία το σημείο δρόσου (dew point),  $T_d$ , και είναι το σημείο της θερμοκρασίας που δημιουργείται η δρόσος, όταν έχει ψυχθεί ο αέρας σε σημείο κορεσμού υπό σταθερή πίεση και υγρασία (Λαζαρίδης, 2010; Καλαμαράς, 2019).

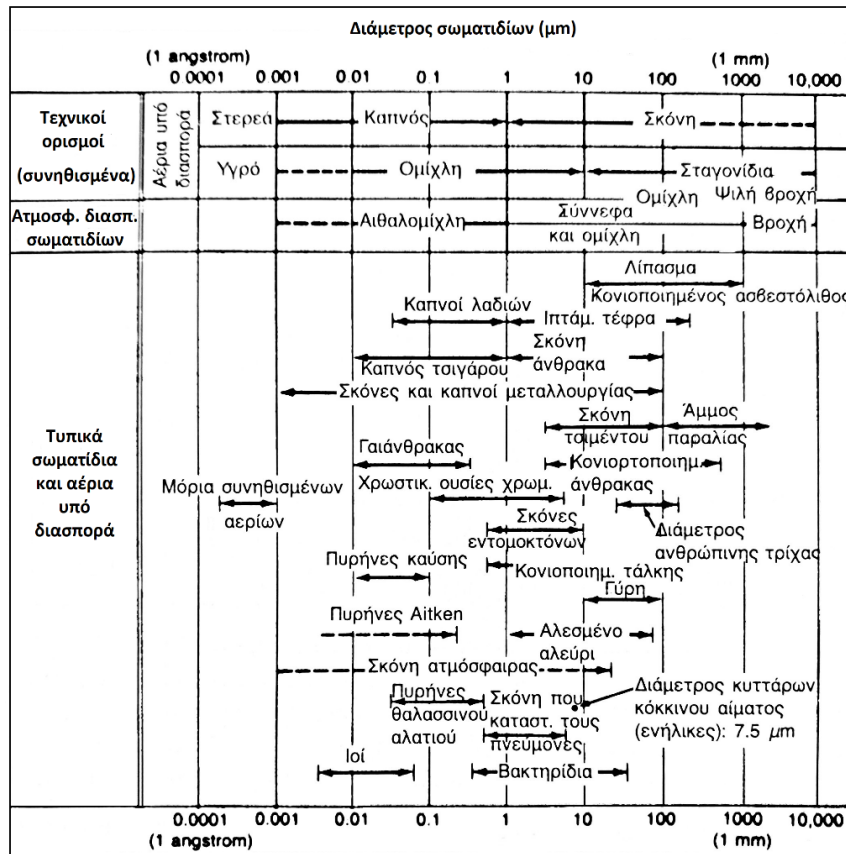
- Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1 έως 200  $\mu\text{m}$ .
- Το εκνέφωμα (mist) είναι ένα υγρό αερόλυμα λεπτών αιωρούμενων σταγονιδίων με την ικανότητα καθίζησης στο έδαφος, το οποίο σε σχέση με την ομίχλη, ενώ έχει ίδιο τρόπο σχηματισμού, είναι πιο διαυγής (ορατότητα από 1 έως 10 km) (Guo κ. ά., 2020).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1 έως 200  $\mu\text{m}$ .
- Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) ή κονιοποιημένη τέφρα καυσίμου (pulverized fuel ash, PFA) είναι σφαιρικά υαλώδη αιωρούμενα σωματίδια που προκύπτουν από την καύση κονιοποιημένου άνθρακα από τις βιομηχανίες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Yuan κ. ά., 2021).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι 1 έως 150  $\mu\text{m}$ .
- Ο καπνός (smoke) είναι ένα ορατό μίγμα στερεών ή υγρών ή και των δύο αιωρούμενων σωματιδίων, που μπορούν και να συσσωματωθούν ως σωματίδια καπνού, και προκύπτουν από τις διεργασίες ατελούς καύσης μιας οργανικής ουσίας, όπως ο άνθρακας, το ξύλο κ.λπ., η οποία μετατρέπεται σε ατμό, όπως διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα (Hinds, 1999).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1  $\mu\text{m}$ .
- Η ομίχλη (fog) είναι ένα αερόλυμα υγρών αιωρούμενων σωματιδίων εμφανιζόμενο στις περιπτώσεις υψηλής υγρασίας και ψύξης του αέρα κοντά στην επιφάνεια της Γης, επηρεάζοντας την ορατότητα. Η ομίχλη αποτελείται από σταγονίδια νερού ή κρυστάλλων πάγου, καθώς σχηματίζεται είτε από τη συμπύκνωση των υδρατμών ή του νερού σε αέρια μορφή που βοηθούν στον σχηματισμό σταγονιδίων είτε από νεφελοποίηση, ψεκασμό ή και φυσαλίδες (Hinds, 1999; Gultepe κ. ά., 2007; Kulkarni, Baron και Willeke, 2011).
  - Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι < 1 έως 200  $\mu\text{m}$ .
- Η σκόνη (dust) είναι ένα ακανόνιστου σχήματος αερόλυμα στερεών σωματιδίων που μπορεί να δημιουργηθεί είτε από τη βιομηχανική μεταλλευτική δραστηριότητα και τη μηχανική αποσύνθεση υλικών, όπως με τη θραύση, τριβή ή και έκρηξη των ορυκτών μεταλλευμάτων, τη φόρτωση και μεταφορά ξηρών υλικών, και είτε από την αποκόλλησή της από το έδαφος, έχοντας τη δυνατότητα μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις ως αέρια μάζα. Σημειώνεται ότι η σκόνη αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή αερολυμάτων σε παγκόσμια κλίμακα (Hinds, 1999; Cooper και Alley, 2004; Τζιάρας, 2010).

- Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι  $< 1$  έως και πάνω από  $100\ \mu\text{m}$ .
- Ο ψεκασμός ή σπρέι (spray) είναι ένα αερόλυμα υγρών αιωρούμενων σωματιδίων και προκύπτει από τον μηχανικό ή ηλεκτροστατικό διασκορπισμό ενός υγρού σε ένα ρεύμα αερίου μεταφέροντας λεπτά σταγονίδια στην ατμόσφαιρα (Hinds, 1999; Kulkarni, Baron και Willeke, 2011; McGraw-Hill, 2017). Ένα είδος σπρέι είναι το θαλάσσιο σπρέι (sea spray) προερχόμενο από τα θαλάσσια υδροσταγονίδια αλατιού.
- Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από μερικά  $\mu\text{m}$ .

## 1.2 Ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων

### 1.2.1 Μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν ένα ευρύ φάσμα μεγεθών, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά τους. Το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων καθορίζεται με βάση τη διάμετρό τους και κυμαίνεται από τη μικροσκοπική κλίμακα των  $0,001\ \mu\text{m}$  ( $10^{-9}\ \text{m} = 1\ \text{nm} = 10\ \text{\AA}$ ) έως τη μακροσκοπική, δηλαδή και περισσότερα από  $100\ \mu\text{m}$  ( $10^{-4}\ \text{m} = 10^6\ \text{\AA}$ ) (Λαζαρίδης, 2015). Στο σχήμα 1.1 απεικονίζονται οι διάφορες φυσικές μορφές των αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων φαινομένων με τις διαμέτρους τους, ενώ στο σχήμα 1.2 φαίνονται τα αιωρούμενα σωματίδια διαφορετικών ειδών διαμέτρων (μεγεθών).

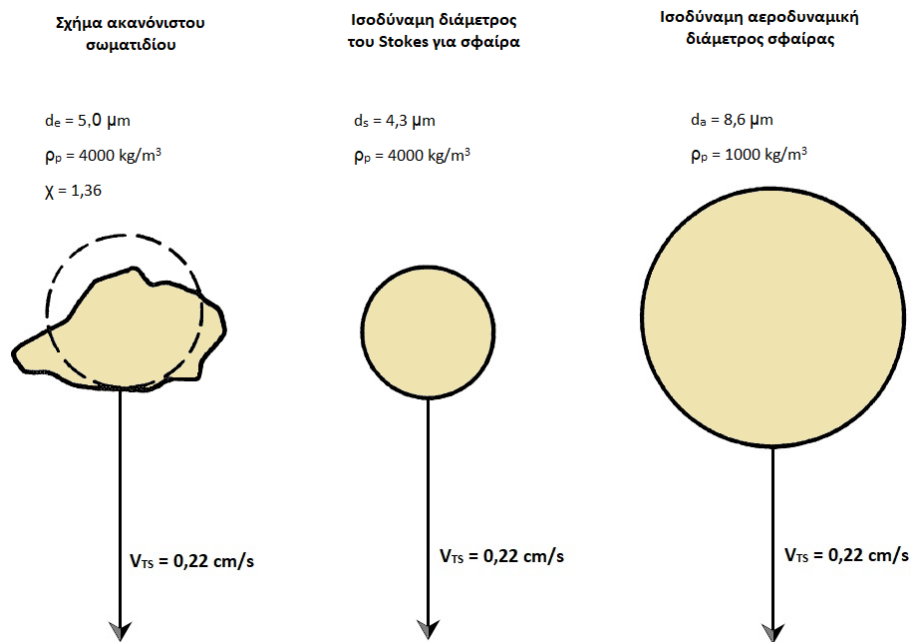


**Σχήμα 1.1:** Τα μεγέθη των τυπικών αιωρούμενων σωματιδίων (Αναδιαμόρφωση από Cooper και Alley, 2004).

Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να χαρακτηριστεί ως :

- **Ισοδύναμη διάμετρος (Equivalent diameter):** η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που με το μετρούμενο ακανόνιστου σχήματος σωματίδιο που εξετάζεται, θα είχε την ίδια φυσική ιδιότητα ή συμπεριφορά και χρησιμοποιείται συχνά για τον χαρακτηρισμό σφαιρικών και μη σωματιδίων (Friedlander, 2000; Kulkarni, Baron και Willeke, 2011).
- **Ισοδύναμη διάμετρος όγκου (Volume equivalent diameter):** η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου του ίδιου όγκου με του μετρούμενου ακανόνιστου σχήματος σωματίδιο που μελετάται, το οποίο θα έχει προηγουμένως υγροποιηθεί για τον σχηματισμό ενός σταγονιδίου (Kulkarni, Baron και Willeke, 2011).
- **Ισοδύναμη διάμετρος του Stokes:** η διάμετρος της σφαίρας που έχει την ίδια πυκνότητα και ταχύτητα εναπόθεσης, δηλαδή έχοντας την ίδια αεροδυναμική ιδιότητα, με του μετρούμενου ακανόνιστου σχήματος σωματίδιο που μελετάται (Hinds, 1999; Kulkarni, Baron και Willeke K., 2011).
- **Ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος:** η διάμετρος μιας μοναδιαίας πυκνότητας ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) σφαίρας που έχει την ίδια ταχύτητα εναπόθεσης με το μετρούμενο ακανόνιστου σχήματος σωματίδιο. Η αεροδυναμική διάμετρος σχετίζεται όχι μόνο με το σχήμα αλλά και την

πυκνότητα και είναι η πιο συχνή ισοδύναμη διάμετρος (Friedlander, 2000; Kulkarni, Baron και Willeke, 2011; Λαζαρίδης, 2015).



**Σχήμα 1.2:** Η ισοδύναμη διάμετρος μιας σφαίρας ενός αρχικά ακανόνιστου σωματιδίου (Αναδιαμόρφωση από Hinds, 1999; Λαζαρίδης, 2015).

Η ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρος,  $d_{ae}$ , μιας σφαίρας μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (Andrea κ. ά., 2012):

$$d_{ae} = d \sqrt{\frac{\rho \cdot f(d)}{\rho_o \cdot f(d_{ae})}} \quad (1.1)$$

όπου,  $d$  : είναι η γεωμετρική διάμετρος μιας σφαίρας,

$\rho$  : είναι η πυκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ ),

$\rho_o$  : είναι η πυκνότητα της σφαίρας ίση με  $1 \text{ g/cm}^3$ ,

$f(d)$  : είναι ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης για τη  $d$ , και

$f(d_{ae})$  : είναι ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης για τη  $d_{ae}$ .

Περισσότερες πληροφορίες, όσων αφορά το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων και την κατηγοριοποίησή τους ως προς αυτό, βρίσκονται στο υποκεφάλαιο 1.3.

### 1.2.2 Σχήμα αιωρούμενων σωματιδίων

Το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι διαφορετικό αν πρόκειται για υγρά ή στερεά αιωρούμενα σωματίδια. Τα υγρά αιωρούμενα σωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα λόγω της επιφανειακής τάσης, ενώ τα στερεά αιωρούμενα σωματίδια έχουν πολύπλοκα σχήματα, όπως τα συσσωματώματα και οι ίνες (Hinds, 1999; Γεντεκάκης, 2010; Kulkarni, Baron και Willeke, 2011), και έτσι, υπάρχουν διάφοροι συντελεστές διόρθωσης για τη συσχέτιση αυτών των μη σφαιρικών σωματιδίων με τη σφαίρα (Lau και Chuah, 2013).

Σύμφωνα με τον Λαζαρίδη (2015) και τον Hinds (1999), ο δυναμικός συντελεστής σχήματος (dynamic shape factor) είναι ένας συντελεστής διόρθωσης για μη σφαιρικά σωματίδια που εφαρμόζεται συχνά πάνω στον νόμο του Stokes και ισχύει η σχέση 1.2 :

$$\chi = \frac{F_D}{3\pi\eta V d_e} \quad (1.2)$$

όπου  $F_D$  : πραγματική δύναμη αντίστασης,

$\eta$  : ιξώδες,

$V$  : όγκος σφαίρας, και

$d_e$  : ισοδύναμη διάμετρος όγκου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όποτε γίνεται αναφορά σε αιωρούμενα σωματίδια θεωρείται ότι το σχήμα τους είναι **σφαιρικό** και τα μεγέθη των αιωρούμενων σωματιδίων αναφέρονται σε **ισοδύναμες αεροδυναμικές διαμέτρους**.

### 1.2.3 Όγκος αιωρούμενων σωματιδίων

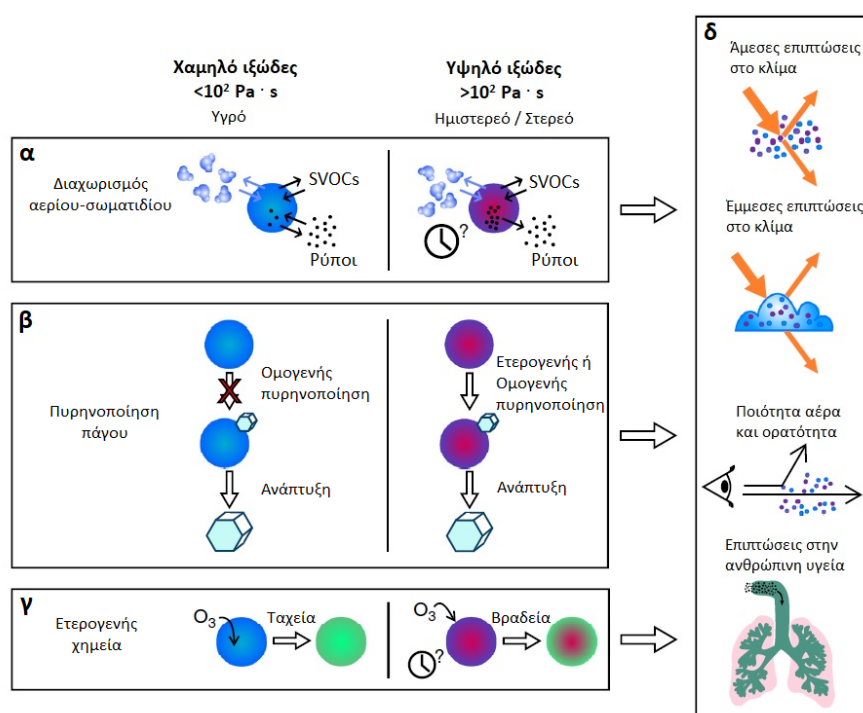
Οι ιδιότητες του όγκου των αιωρούμενων σωματιδίων αφορούν κυρίως το ιξώδες και την πυκνότητα τους, τα οποία δεν είναι ίδια με αυτά του καθαρού αέρα (Hinds, 1999). Το ιξώδες είναι μια παράμετρος που μετρά την αντίσταση ενός ρευστού, που παραμορφώνεται από τις εφελκυστικές ή διατμητικές τάσεις που ασκούνται σε αυτό, και γενικότερα μετράτε αν είναι παχύρρευστο ένα ρευστό (ο αέρας έχει περίπου 50 φορές μικρότερο ιξώδες από το νερό), ενώ η πυκνότητα είναι μια φυσική ιδιότητα που μετράει πόσο κοντινές είναι οι μεταξύ τους αποστάσεις των μορίων μέσα σε ένα ρευστό (ο αέρας έχει περίπου 830 φορές μικρότερη πυκνότητα από το νερό). Στον πίνακα 1.1 φαίνονται οι τιμές του ιξώδους και της πυκνότητας του νερού και του καθαρού αέρα για συγκεκριμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση (Evans, 2015).

**Πίνακας 1.1:** Ιξώδες και Πυκνότητα του νερού και του καθαρού αέρα ( $T = 293,15 \text{ K}$  και  $P_a = 101,325 \text{ kPa}$ ).

Αέριο	$\eta \text{ (} 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s)}$	$\rho_a \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Νερό	100,00	998,20
Καθαρός αέρας	1,82	1,20

## Ιξώδες

Όσο το κλάσμα του όγκου των σωματιδίων αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και το ιξώδες του ρευστού που τα περιβάλλει. Το υψηλότερο ιξώδες δημιουργείται από την επιπλέον αύξηση της αντίστασης του ρευστού καθώς, όσο αυξάνεται το κλάσμα όγκου, απαιτούνται πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις για να ρέει το ρευστό (Shokrollahi, 2016). Επομένως, τα χονδρά σωματίδια έχουν μεγαλύτερο ιξώδες από τα λεπτότερα σωματίδια. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται ότι αναλόγως το ιξώδες του αερολύματος, χαμηλό ή υψηλό, υπάρχουν και οι αντίστοιχες αντιδράσεις, φαινόμενα και επιπτώσεις στο περιβάλλον.



**Σχήμα 1.3:** Ιξώδες και οι επιπτώσεις του α) Το αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες πραγματοποιεί την αντίδραση διαχωρισμού γρηγορότερα από το αερόλυμα με υψηλό ιξώδες. β) Για τον σχηματισμό πάγου μέσω πυρηνοποίησης, το υγρό αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες δε λειτουργεί με ετερογενής πυρηνοποίηση αλλά μόνο με ομογενής πυρηνοποίηση. γ) Η ετερογενής χημεία, όπως και στην αντίδραση διαχωρισμού, συμβαίνει γρηγορότερα στο αερόλυμα με χαμηλό ιξώδες. δ) Οι επιπτώσεις στο κλίμα, στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία μπορούν να προκύψουν από αερολύματα είτε χαμηλού είτε υψηλού ιξώδους είτε από συνδυασμό και των δύο (Αναδιαμόρφωση από Reid κ. ά., 2018).

## Πυκνότητα

Η πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων αναφέρεται στο λόγο της μάζας του σωματιδίου προς τον όγκο του. Η μονάδα μέτρησης για την πυκνότητα είναι  $\text{kg/m}^3$  ή  $\text{g/cm}^3$  (Hinds, 1999).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εφόσον γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν σφαιρικό σχήμα, δηλαδή ισοδύναμη αεροδυναμική διάμετρο, θεωρείται ότι έχουν **τυπική πυκνότητα**  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$  ( $1,0 \text{ g/cm}^3$ ) (Λαζαρίδης, 2010), ίδια με την πυκνότητα του νερού, εκτός αν καθοριστεί διαφορετικά.

#### **1.2.4 Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων**

Με τον όρο συγκέντρωση μάζας εννοείται η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και είναι ισοδύναμη με την πυκνότητα του συνόλου των σωματιδίων αερολύματος στον αέρα.

Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται για τις συγκεντρώσεις μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων είναι  $\text{g/m}^3$ ,  $\text{mg/m}^3$  και συνήθως σε  $\mu\text{g/cm}^3$ . Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων μετράται σε  $\mu\text{g/m}^3$  και όχι σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm), όπως τους υπόλοιπους αέριους ρύπους ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , κ.ά.), καθώς πρόκειται για πολύ μικρότερη συγκριτικά αριθμητική συγκέντρωση (Hinds, 1999). Η συγκέντρωση μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων συνήθως κυμαίνεται από περίπου **20  $\mu\text{g/cm}^3$**  για καθαρό αέρα έως και **200  $\mu\text{g/cm}^3$**  για ρυπασμένο αέρα, καθώς και αυτό μπορεί να ξεπεραστεί για πάρα πολύ ρυπασμένο αέρα (Friedlander, 2000).

Αναφέρεται ότι η συγκέντρωση μάζας των αερολυμάτων είναι μεγαλύτερη στην κατώτερη τροπόσφαιρα κατά 1 έως 2 τάξεις από την ανώτερη τροπόσφαιρα. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην κατώτερη τροπόσφαιρα δικαιολογούνται από το γεγονός ότι οι περισσότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται σε αυτήν και επιπλέον οι χρόνοι παραμονής των αερολυμάτων είναι σχετικά μικροί οπότε δεν προλαβαίνουν χρονικά να μεταφερθούν στην ανώτερη τροπόσφαιρα ή γενικότερα σε πιο υψηλά ύψη (Μελάς, 2007).

### **1.3 Κατηγοριοποίηση ως προς το μέγεθος**

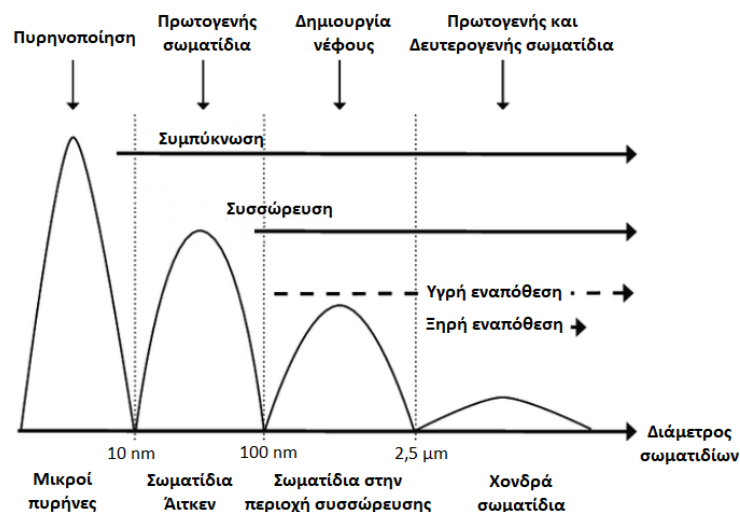
Τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως το μέγεθος, η χημική σύσταση, η πηγή προέλευσης, η συγκέντρωση μάζας, οι οπτικές ιδιότητες κ.ά., επηρεάζουν τη δυναμική σχηματισμού τους στην ατμόσφαιρα και συνεπώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις ατμοσφαιρικές διεργασίες. Ωστόσο, το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό τους, καθώς επηρεάζει όχι μόνο τις διεργασίες σχηματισμού αλλά και τις επιπτώσεις που επιφέρουν, όπως στην ανθρώπινη υγεία και στο κλίμα (Finlayson-Pitts and Pitts, 2000; Λαζαρίδης, 2015). Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται τα διάφορα μεγέθη των αιωρούμενων σωματιδίων με τις διεργασίες σχηματισμού τους.

Η κατηγοριοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων ως προς το μέγεθός τους γίνεται κυρίως βάσει (Λαζαρίδης, 2015):

1. Καμπύλων κατανομών (modal distribution),
2. Της μισής διαμέτρου αποκοπής ενός οργάνου μετρήσεως αερολυμάτων, και
3. Δοσομετρικών ποσοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων βασιζόμενων στην έκθεση και εναπόθεση τους στο αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων (π.χ. σε  $AS_{2,5}$  και  $AS_{10}$ ).

Από τις καμπύλες κατανομών, οι κατηγορίες των σωματιδίων με βάση τη διεργασία σχηματισμού τους είναι οι εξής (Λαζαρίδης, 2015):

- Οι **μικροί πυρήνες** (nucleation mode) είναι τα πρόσφατα σχηματιζόμενα μέσω πυρηνοποίησης σωματίδια.
  - Η διάμετρος των σωματιδίων είναι από περίπου **3 nm** έως **10 nm**.
- Τα **σωματίδια Άιτκεν** (Aitkin mode) είναι τα σωματίδια σχηματιζόμενα μέσω πυρηνοποίησης αερίων ή τα σωματίδια πυρήνων σχηματιζόμενα από την αύξηση του μεγέθους τους.
  - Η διάμετρος των σωματιδίων είναι από περίπου **10 nm** έως **100 nm**.
- Τα **σωματίδια στην περιοχή συσσώρευσης** (accumulation mode) είναι τα σωματίδια που έχουν δημιουργηθεί είτε από συσσώματωση είτε από συμπύκνωση αερίων και λόγω της αργής διαδικασίας απομάκρυνσής τους, συσσωρεύονται σε μια περιοχή.
  - Η διάμετρος των σωματιδίων είναι από περίπου **0,1  $\mu m$**  έως **3  $\mu m$** .
- Τα **χονδρά σωματίδια** (coarse mode) είναι τα σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου από τα σωματίδια της περιοχής συσσώρευσης.
  - Η διάμετρος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από **3  $\mu m$** .



**Σχήμα 1.4:** Τα κατηγοριοποιημένα σωματίδια με βάση το μέγεθος και τις διεργασίες σχηματισμού τους (Αναδιαμόρφωση από Frey, 2019).



Τα σωματίδια λόγω των διάφορων μεγεθών τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και να ερμηνευτούν αναλόγως και των ιδιοτήτων τους. Επομένως, αναλύονται περαιτέρω οι έννοιες που χρησιμοποιούνται συχνά για την περιγραφή συγκεκριμένων αιωρούμενων σωματιδίων. Οι βασικές κατηγορίες μεγέθους των σωματιδίων είναι οι εξής:

❖ **Χονδρά σωματίδια** (coarse particles/mode)

- Η διάμετρος των σωματιδίων είναι  $> 2,5 \mu\text{m}$ .

❖ **Λεπτά σωματίδια** (fine particles)

- Η διάμετρος των σωματιδίων είναι  $< 2,5 \mu\text{m}$ .

❖ **Υπέρλεπτα σωματίδια** (ultrafine particles)

- Η διάμετρος των σωματιδίων είναι  $< 0,1 \mu\text{m}$ .

Ο διαχωρισμός των αερολυμάτων σε λεπτά και χονδρά σωματίδια βοηθά στην ευκολότερο εντοπισμό των υπόλοιπων ιδιοτήτων τους και του τρόπου σχηματισμού τους (Λαζαρίδης, 2015). Ο αναφερόμενος διαχωρισμός βοηθά και στην περαιτέρω ταξινόμηση των αιωρούμενων σωματιδίων με βασικό μέλημα την εναπόθεσή τους στο αναπνευστικό σύστημα και γίνεται σε (Lazaridis, 2011):

- Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των  $2,5 \mu\text{m}$ , συμβολιζόμενα ως **ΑΣ<sub>2,5</sub>** (Particulate Matter with a diameter of  $2.5 \mu\text{m}$  or less,  $\text{PM}_{2.5}$ ).
- Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των  $10 \mu\text{m}$ , συμβολιζόμενα ως **ΑΣ<sub>10</sub>** (Particulate Matter with a diameter of  $10 \mu\text{m}$  or less,  $\text{PM}_{10}$ ).

Αναφέρεται ότι τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης απαρτίζονται κυρίως από  $\text{ΑΣ}_{10}$ , τα οποία προέρχονται από την ένωση της υγρασίας και ατμοσφαιρικών σωματιδίων σκόνης. Παράλληλα, τα σωματίδια σκόνης μπορούν να έχουν μέγεθος διαμέτρου μικρότερη από  $50 \mu\text{m}$  ( $\text{ΑΣ}_{50}$ ) και  $100 \mu\text{m}$  ( $\text{ΑΣ}_{100}$ ), τα οποία καθιζάνουν αρκετά γρήγορα (Chen κ. ά., 2022).

Καμπύλες κατανομής μεγέθους

Τα αερολύματα της ατμόσφαιρας έχουν πολλά διαφορετικά μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων. Επομένως, τα αερολύματα λόγω του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων χωρίζονται σε αερολύματα μονοδιάσπορα και πολυδιάσπορα. Τα **μονοδιάσπορα** αερολύματα (monodisperse or homogeneous aerosol) περιλαμβάνουν ίδιου μεγέθους αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία μπορούν να παραχθούν μόνο σε εργαστήρια, ενώ τα **πολυδιάσπορα** αερολύματα (polydisperse or heterodisperse aerosol) περιλαμβάνουν διαφορετικού μεγέθους αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία συναντώνται στη φύση. Ο ακριβής χαρακτηρισμός της κατανομής μεγέθους των πολυδιάσπορων αερολυμάτων είναι σημαντικός, καθώς τα αιωρούμενα σωματίδια στη φύση έχουν πολλά διαφορετικά μεγέθη.

Εφόσον υπάρχουν τυπικές αποκλίσεις στις κατανομές μεγέθους των σωματιδίων, συχνά περιγράφονται ως μαθηματικές συναρτήσεις. Η επικρατούμενη μαθηματική συνάρτηση είναι η **κανονική λογαριθμική κατανομή**, η οποία έχει αποδειχθεί ότι περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια την κατανομή των αερολυμάτων. Για τον προσδιορισμό των κατανομών μεγέθους συνήθως χρησιμοποιείται η κορυφή, η διάμεσος, η μέση διάμετρος (mean) και η μέση γεωμετρική διάμεσος των αιωρούμενων σωματιδίων, υποθέτοντας ότι έχουν σφαιρικό σχήμα. Η μέση διάμεσος περιγράφεται από την εξίσωση 1.3 :

$$\overline{d_p} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} = \int_0^{\infty} d_p f(d_p) dd_p \quad (1.3)$$

όπου  $\overline{d_p}$  : μέση διάμετρος ή αριθμητική μέση,

$n_i$  : αριθμός σωματιδίων ομάδας  $i$ ,

$d_i$  : μέσο μέγεθος σωματιδίων ομάδας  $i$ ,

$f(d_p)$  : συνάρτηση συχνότητας, και

$dd_p$  : διαφορικό διάστημα του μεγέθους των σωματιδίων.

Συμπληρώνεται ότι ο χαρακτηρισμός της μέσης διαμέτρου μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί από την παραπάνω εξίσωση (1.3) και θα είναι :

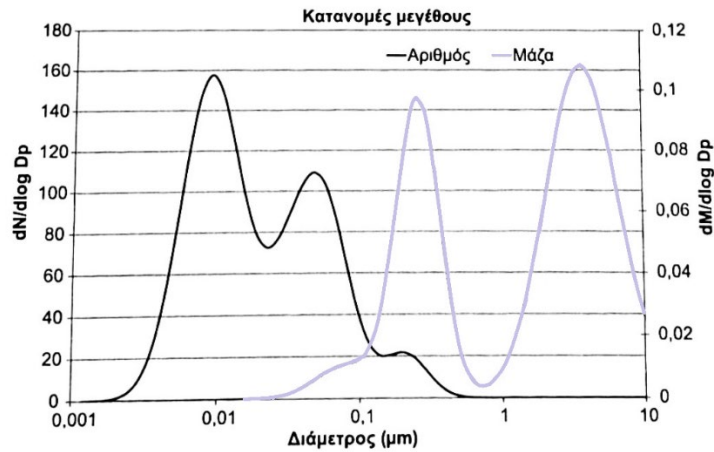
$$\overline{d_{pm}} = \frac{\sum m_i d_i}{\sum m_i} = \int_0^{\infty} d_p m(d_p) dd_p \quad (1.4)$$

όπου  $\overline{d_{pm}}$  : μέση διάμετρος μάζας,

$m_i$  : μάζα σωματιδίων ομάδας  $i$ , και

$m(d_p)$  : συνάρτηση συχνότητας μάζας.

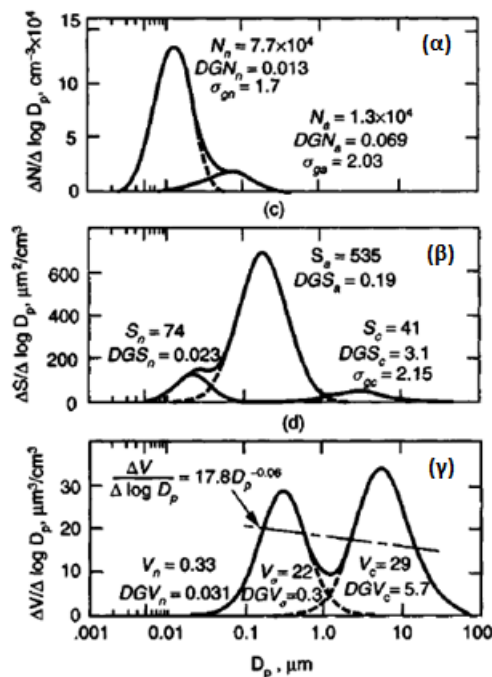
Η δικόρυφη (bimodal) τυπική κατανομή μάζας και η αριθμητική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων φαίνεται στο σχήμα 1.5. Στην αριθμητική κατανομή φαίνονται καθαρά οι μικροί πυρήνες και τα σωματίδια Άιτκεν, ενώ στην κατανομή μάζας φαίνονται περισσότερο τα σωματίδια στην περιοχή συσσώρευσης και τα χονδρά σωματίδια.



**Σχήμα 1.5:** Οι δικόρυφες κατανομές αριθμού και μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων (από Λαζαρίδης, 2015).

Αναφέρεται ότι η κανονική κατανομή μάζας συνδέεται με την κατανομή όγκου και περιγράφεται από τη σχέση 1.5, όπου  $\rho_p$  ίσο με την πυκνότητα του σωματιδίου, (Friedlander, 2000; Λαζαρίδης, 2015):

$$\frac{dm}{d \log d_p} = \rho_p \frac{dV}{d \log d_p} \quad (1.5)$$



**Σχήμα 1.6:** Τυπικές λογαριθμικές κατανομές (α) αριθμού, (β) επιφάνειας και (γ) όγκου (από John, 2011).

Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζονται οι τυπικές αριθμητικές, επιφανειακές και όγκου κατανομές των αιωρούμενων σωματιδίων. Από την αριθμητική κατανομή είναι δυνατό να παρατηρηθεί ότι στην ατμόσφαιρα υπερτερεί ο αριθμός των υπέρλεπτων σωματιδίων, καθώς το μέγιστο της καμπύλης βρίσκεται περίπου στα 0,01 μm. Όμως, ενώ το πλήθος σωματιδίων παρουσιάζει μέγιστο στα υπέρλεπτα σωματίδια, από την επιφανειακή κατανομή φαίνεται ότι τα υπέρλεπτα σωματίδια δε συνεισφέρουν στο σύνολο της επιφάνειας, αφού το μέγιστο της επιφανειακής κατανομής είναι περίπου στα 0,1 μm. Επιπλέον, από τα μέγιστα της δικόρυφης κατανομής όγκου (ή και μάζας σύμφωνα με την εξίσωση 1.5) παρατηρείται ότι τον μεγαλύτερο ατμοσφαιρικό όγκο τον έχουν τα λεπτά και χονδρά σωματίδια.

## 1.4 Κατηγοριοποίηση ως προς τις πηγές προέλευσης

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να χαρακτηριστούν ως προς τις πηγές προέλευσης τους, δηλαδή από τα σημεία που εκπέμπονται. Οι βασικοί διαχωρισμοί ως προς τις πηγές προέλευσης των αερολυμάτων είναι:

- ❖ πρωτογενής και δευτερογενής
- ❖ φυσικές και ανθρωπογενείς

Τα **πρωτογενή** αερολύματα προκύπτουν όταν τα αιωρούμενα σωματίδια εκπέμπονται απευθείας σε σωματιδιακή μορφή από μια πηγή, ενώ τα **δευτερογενή** αερολύματα προκύπτουν όταν τα αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζονται από χημικές αντιδράσεις (Hinds, 1999; Γεντεκάκης, 2010; Λαζαρίδης, 2010).

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εκπέμπονται είτε από τη φύση (**φυσικές** πηγές προέλευσης), π.χ. από σκόνη, άμμο ή από έρημο (Έρημο Σαχάρα), θάλασσα, ηφαίστεια, πυρκαγιές, κλπ., είτε από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (**ανθρωπογενείς** πηγές προέλευσης) π.χ. με τις διεργασίες καύσης, τη βιομηχανική δραστηριότητα (διεργασίες καύσεις και διαφυγές αερίων), τη μεταφορά και την κυκλοφορία οχημάτων (καυσαέρια και αναθυμιάσεις οχημάτων) κλπ. (Μουσιόπουλος, 1997; Λαζαρίδης, 2015). Στον πίνακα 1.2 φαίνονται οι πηγές προέλευσης κατηγοριοποιημένες για τα διάφορα είδη αερολυμάτων.

**Πίνακας 1.2:** Πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων (αναδιαμορφωμένο από Seinfeld και Pandis, 2016).

Πηγή αερολυμάτων	Πρωτογενής	Δευτερογενής
Φυσικές	<ul style="list-style-type: none"><li>♦ Σκόνη &amp; άμμος εδάφους</li><li>♦ Πυρήνες θαλασσινού άλατος</li><li>♦ Ηφαιστειακή στάχτη ή έκρηξη ηφαιστείου</li><li>♦ Οργανικά αερολύματα</li><li>♦ Βιολογική ύλη (ιοί, βακτήρια, γύρη, σπόρια μυκήτων κ.ά.)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>♦ Θεϊκά από βιογενή αέρια</li><li>♦ Θεϊκά από ηφαιστειακό SO<sub>2</sub></li><li>♦ Οργανικές ενώσεις από VOC</li><li>♦ Νιτρικά άλατα από NO<sub>x</sub></li></ul>
Ανθρωπογενείς	<ul style="list-style-type: none"><li>♦ Καύση βιομάζας, αποβλήτων (π.χ. για θέρμανση)</li><li>♦ Μεταφορές (αιθάλη)</li><li>♦ Βιομηχανική δραστηριότητα (βιομηχανική σκόνη)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>♦ Θεϊκά από SO<sub>2</sub></li><li>♦ Καύση βιομάζας</li><li>♦ Οργανικές ενώσεις από VOC</li><li>♦ Νιτρικά άλατα από NO<sub>x</sub></li></ul>

### Πηγές προέλευσης ΑΣ<sub>10</sub> (χονδρά σωματίδια)

Τα ΑΣ<sub>10</sub> μπορεί να είναι πρωτογενή ή δευτερογενή σωματίδια προερχόμενα από σκόνη και άμμο από δρόμους (road dust) και το έδαφος, από πυρήνες θαλασσινού άλατος, ομίχλη, αχλή, γύρη,

θραύσματα φυτών, καπνό (πυρκαγιές ή πετρελαιοκινητήρες), αλουμίνα ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), εξατμίσεις οχημάτων, τη βιομηχανία, τέφρα λιγνίτη ή ιπτάμενη τέφρα από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και βιολογική ύλη (Μουσιόπουλος, 1997; Γεντεκάκης, 2010; Λαζαρίδης, 2010).

Αναφέρεται ότι οι εκλυόμενες ποσότητες  $\text{AS}_{10}$  καθορίζονται άμεσα και από τα χρησιμοποιούμενα συστήματα θέρμανσης ενός κτιρίου, οδηγώντας στη δημιουργία του νέφους αιθαλομίχλης. Με βάση τους δείκτες εκπομπών  $\text{AS}_{10}$  από ένα κτίριο παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη συνεισφορά προέρχεται από τη χρήση τζακιών ανοικτού τύπου, δηλαδή με την καύση βιομάζας, ενώ η μικρότερη προέρχεται από λέβητες που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή πετρέλαιο (Κακαράς κ. ά., 2013).

#### Πηγές προέλευσης $\text{AS}_{2,5}$ (λεπτά σωματίδια)

Τα  $\text{AS}_{2,5}$  είναι κυρίως δευτερογενή σωματίδια προερχόμενα από καύσεις βιομάζας ή από καπνό (πυρκαγιές ή συστήματα θέρμανσης), εξατμίσεις οχημάτων και βιομηχανικές δραστηριότητες (Λαζαρίδης, 2015).

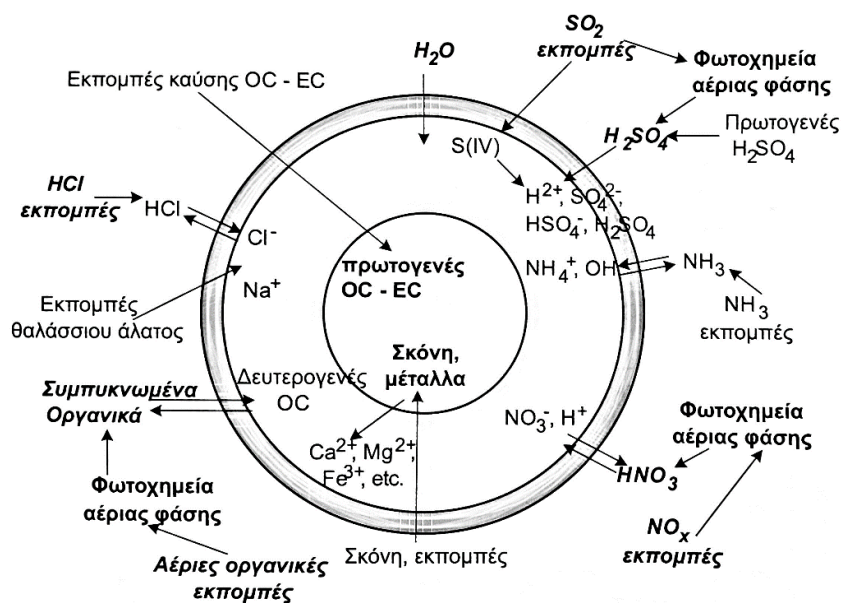
### 1.5 Κατηγοριοποίηση ως προς τη χημική σύσταση

Η χημική σύσταση των σωματιδίων βασίζεται στην πηγή προέλευσης των σωματιδίων και περιγράφεται στο σχήμα 1.7. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται ότι τα σωματίδια μπορούν να προέρχονται από εκπομπές καύσης, στα οποία εμπεριέχεται ο οργανικός άνθρακας (OC), ο οποίος προέρχεται από πρωτογενείς πηγές όπως προϊόντα καύσης, βιολογική ύλη και από δευτερογενείς πηγές, όπως αντιδράσεις οξείδωσης από αρωματικές ενώσεις, υδρογονάνθρακες με όζον ή υδροξύλιο (OH) και οξείδωση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC). Υπάρχει επίσης και ο στοιχειακός άνθρακας (EC), το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ), το υδροχλώριο (HCl), οι πυρήνες θαλασσινού αλάτος (NaCl), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) π.χ. που μπορεί να προέρχεται από χρήση θειούχων ορυκτών καυσίμων, της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ), των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), της σκόνης και άλλων αέριων οργανικών ενώσεων (Λαζαρίδης, 2010, 2015).

Αναλυτικότερα, αναφέρονται τα χημικά στοιχεία των αιωρούμενων σωματιδίων σύμφωνα με τον Λαζαρίδη (2010) έχοντας ως γνώμονα την πηγή προέλευσης τους. Η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων προέρχεται κυρίως από:

- Τα οχήματα που παράγουν τα χημικά στοιχεία Br, Pb, Ba, Mn, Cl, Zn, V, Ni, Se και As από τις εξατμίσεις τους, τα Fe και Al από τα εξαρτήματά τους, το Zn από τη φθορά ελαστικών και τα Rh, Pd, Ir και Ru από τους καταλύτες τους. Επίσης, μπορούν να παράγουν από την κίνηση τους στοιχειακό άνθρακα (Elemental Carbon, EC), Al, Si, K, Ca, Ti, Fe και Zn.

- Τη βιομηχανία που παράγει τα χημικά στοιχεία V, Ni, Se, As, Cr, Co, Cu, Al, S, P, Ga, Zn, Pb και Mn από διεργασίες καύσης. Παράλληλα, από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος παράγεται στοιχειακός άνθρακας (Elemental Carbon, EC), προερχόμενος από την ιπτάμενη τέφρα.
- Την επαναιώρηση εδαφικού υλικού (σκόνης) που μεταφέρει στον ατμοσφαιρικό αέρα Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe και Mn (στοιχεία του φλοιού της Γης).
- Την καύση βιομάζας που μεταφέρει κυρίως K.
- Τα θαλάσσια αιωρούμενα σωματίδια που μεταφέρονται ως Na, Cl, S, K, Mg και Br.
- Τα θαλάσσια αιωρούμενα σωματίδια προερχόμενα από τα λιμάνια με πλοία μεταφέρονται ως V και Ni.
- Τα αιωρούμενα σωματίδια από τους κινητήρες των αεροσκάφων μεταφέρονται κυρίως ως Cr, Fe, Mo, Na, Ca, Al, V, Ba, Co, Cu, Ni, Pb, Mg, Mn, Si και Ti (Abegglen κ. ά., 2016).
- Τα τοξικά αιωρούμενα σωματίδια που είναι τα V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Pb και L.



**Σχήμα 1.7:** Η χημική σύσταση των αερολυμάτων και οι διεργασίες σχηματισμού τους με βάση την πηγή προέλευσής τους (από Λαζαρίδης, 2015).

Στον Πίνακα 1.3 περιγράφεται η χημική σύσταση των κύριων μεγεθών σωματιδίων.

**Πίνακας 1.3:** Η χημική σύσταση των λεπτών και χονδρών σωματιδίων (από Seinfeld και Pandis, 2016).

Λεπτά σωματίδια	Χονδρά σωματίδια
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Άλας αμμωνίου (<math>\text{NH}_4^+</math>)</li> <li>▪ Μέταλλα (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, κ.λπ.)</li> <li>▪ Θειικό άλας (<math>\text{SO}_2^{4-}</math>)</li> <li>▪ Ιόν υδρογόνου (<math>\text{H}^+</math>)</li> <li>▪ Νερό (<math>\text{H}_2\text{O}</math>)</li> <li>▪ Νιτρικό άλας (<math>\text{NO}_3^-</math>)</li> <li>▪ Οργανικές ενώσεις (OC)</li> <li>▪ Στοιχειακός άνθρακας (EC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ανθρακικό ασβέστιο (<math>\text{CaCO}_3</math>)</li> <li>▪ Βιολογική ύλη (π.χ. γύρη, σπόρια μυκήτων, κ.λπ.)</li> <li>▪ Επαναιωρούμενη σκόνη</li> <li>▪ Ιπτάμενη τέφρα άνθρακα και πετρελαίου</li> <li>▪ Οξειδία από τον φλοιό της Γης (Si, Al, Ti, Fe).</li> <li>▪ Πυρήνες θαλασσινού άλατος (NaCl)</li> <li>▪ Υπολείμματα φυτών, ζώων</li> <li>▪ Φθοράς ελαστικών (Zn)</li> </ul>

## 1.6 Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων

Για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων και την προστασία του περιβάλλοντος, η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization, WHO) έθεσαν Οδηγίες και νομοθετικά όρια ώστε να μειωθούν οι δυσμενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι (όπως τα αιωρούμενα σωματίδια ( $\text{AS}_{10}$  και  $\text{AS}_{2.5}$ ), το διοξείδιο του αζώτου και του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα, το βενζόλιο, το μόλυβδο, κ.ά.). Οι προτεινόμενες νομοθετικές τιμές των ατμοσφαιρικών ρύπων, εκ των οποίων δεν έχει παρατηρηθεί διαφορά ή πρόβλημα στο περιβάλλον ή οικοσύστημα και στην υγεία, που έθεσε η Ε.Ε. αναγράφονται στις Οδηγίες ως «οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας». Η τοξικολογία έχει βοηθήσει σημαντικά στην εύρεση των οριακών τιμών των ατμοσφαιρικών ρύπων. Σημειώνεται πως για την εύρεση των τιμών, έγινε η παραδοχή ότι η έκθεση σε έναν ρύπο θα είναι σταθερή και συνεχόμενη, κάτι το οποίο δεν ισχύει στην πραγματικότητα (Μπινιάρης και Μπινιάρης, 2015).

Με βάση τις οδηγίες που καθιέρωσε η Ε.Ε. για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους προέκυψαν τα νομοθετημένα όρια και στόχοι της Ελλάδας. Αναφέρεται ότι έχουν καθιερωθεί και οδηγίες για την περίπτωση συναγερμού και έκτακτης ανάγκης. Οι οδηγίες που καθιέρωσε η Ελλάδα για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους ονομαστικά είναι οι παρακάτω:

- Οδηγία 2008/50/ΕΚ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103, ΦΕΚ 488Β/30.3.11)
- Οδηγία 2004/107/ΕΚ σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα (ΚΥΑ ΗΠ 22306/1075/Ε103, ΦΕΚ 920Β/8.6.07)
- Οδηγία 2015/1480/ΕΚ για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ, οι οποίες

ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα (ΚΥΑ 174505/607, ΦΕΚ 1311Β/13.4.17)

#### Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας για αιωρούμενα σωματίδια (Ε.Ε.)

Στην Οδηγία 2008/50/ΕC για ποιοτικό και καθαρό ατμοσφαιρικό αέρα στην Ευρώπη, του παραρτήματος 11, περιλαμβάνονται τα νομοθετικά όρια που θέτει η Ευρωπαϊκή Κοινότητα και βρίσκονται στον Πίνακα 1.4.

**Πίνακας 1.4:** Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (Ε.Ε.).

Ρύπος	Όριο	Μέσος όρος	Τύπος
ΑΣ <sub>2,5</sub>	20 µg/m <sup>3</sup>	1 χρόνο	Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2020
ΑΣ <sub>10</sub>	50 µg/m <sup>3</sup>	24 ώρες	Να μην ξεπεραστεί πάνω από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος, έχοντας περιθώριο ανοχής 50%.
	40 µg/m <sup>3</sup>	1 χρόνο	Υπάρχει περιθώριο ανοχής 20%.

#### Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας για αιωρούμενα σωματίδια (WHO)

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, WHO, έχει τις αυστηρότερες οριακές τιμές των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας (Air Quality Guidelines, AQG) των αιωρούμενων σωματιδίων αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 1.5 (World Health Organization, 2021) :

**Πίνακας 1.5:** Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (WHO).

Ρύπος	Όριο	Μέσος όρος	Τύπος
ΑΣ <sub>2,5</sub>	5 µg/m <sup>3</sup>	24 ώρες	Ορίζεται ως το 99ο εκατοστημόριο της ετήσιας κατανομής των μέσων συγκεντρώσεων 24 ωρών (που ισοδυναμεί με 3–4 ημέρες υπέρβασης ανά έτος).
	15 µg/m <sup>3</sup>	1 χρόνο	-
ΑΣ <sub>10</sub>	15 µg/m <sup>3</sup>	24 ώρες	Ορίζεται ως το 99ο εκατοστημόριο της ετήσιας κατανομής των μέσων συγκεντρώσεων 24 ωρών (που ισοδυναμεί με 3–4 ημέρες υπέρβασης ανά έτος).
	45 µg/m <sup>3</sup>	1 χρόνο	-



### Οριακές τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας για αιωρούμενα σωματίδια (EPA)

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA) είναι μια υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του οικοσυστήματος ή περιβάλλοντος (<https://www.epa.gov/>). Ο νόμος περί καθαρότητας του αέρα (Clean Air Act, CAA) έχει απαιτήσει από την EPA να θέσει Οδηγίες για τους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους σε ένα πίνακα ονομαζόμενο ως Εθνικά πρότυπα ποιότητας αέρα περιβάλλοντος (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS). Τα νομοθετικά όρια που έχει θέσει η EPA για τα αιωρούμενα σωματίδια βρίσκονται στον Πίνακα 1.6.

Σύμφωνα με την Clean Air Act (<https://www.epa.gov/clean-air-act-overview>) υπάρχουν τα **πρωτογενή** πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που αφορούν την προστασία της δημόσιας ανθρώπινης υγείας και τα **δευτερογενή** πρότυπα που αφορούν την προστασία της δημόσιας κοινωνικής ευημερίας, τα κτίρια, το κλίμα (μείωση ορατότητας), τα ζώα και τη βλάστηση. Στον πίνακα 1.6 περιλαμβάνονται τα νομοθετικά όρια των κύριων μεγεθών αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (ΑΣ<sub>10</sub> και ΑΣ<sub>2,5</sub>) διαχωριζόμενα στα προηγουμένως αναφερόμενα πρότυπα (NAAQS Table / US EPA, 2023).

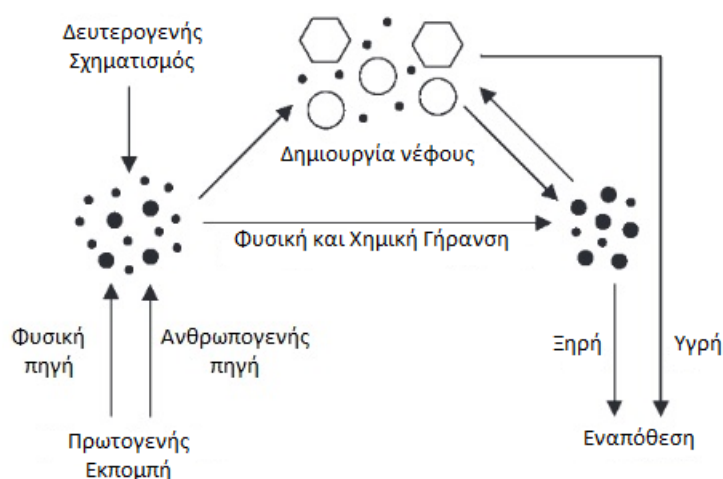
**Πίνακας 1.6:** Νομοθετικά όρια αιωρούμενων σωματιδίων (EPA).

Ρύπος	Πρωτογενής/ Δευτερογενής πρότυπα	Μέσος όρος	Όριο	Τύπος
ΑΣ <sub>2,5</sub>	πρωτογενής	1 χρόνο	12,0 µg/m <sup>3</sup>	Μέση ετήσια οριακή αριθμητική τιμή, για πάνω από 3 χρόνια
	δευτερογενής	1 χρόνο	15,0 µg/m <sup>3</sup>	Μέση ετήσια οριακή αριθμητική τιμή, για πάνω από 3 χρόνια
	πρωτογενής και δευτερογενής	24 ώρες	35 µg/m <sup>3</sup>	η μέση 98 <sup>η</sup> εκατοστιαία τιμή, για πάνω από 3 χρόνια
ΑΣ <sub>10</sub>	πρωτογενής και δευτερογενής	24 ώρες	150 µg/m <sup>3</sup>	Να μην ξεπεραστεί πάνω από μια φορά το χρόνο για πάνω από 3 χρόνια

## Κεφάλαιο 2: Διεργασίες σχηματισμού, μεταφοράς & απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα

### 2.1 Δυναμική της ατμόσφαιρας

Η ατμόσφαιρα είναι ένα δυναμικό σύστημα, στο οποίο συμβαίνουν διάφορες φυσικοχημικές διεργασίες που επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος, τη χημική σύσταση και το σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων. Από την εκπομπή των αιωρούμενων σωματιδίων έως την απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα, συμβαίνουν διάφορες διεργασίες, όπως η πυρηνοποίηση, η συσσωμάτωση, η συσώρευση, η συμπύκνωση, η εξάτμιση, η επαναιώρηση και η εναπόθεση των σωματιδίων, οι οποίες αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια. Ο κύκλος ζωής ενός αιωρούμενου σωματιδίου μπορεί να περιγραφεί και από το Σχήμα 2.1.

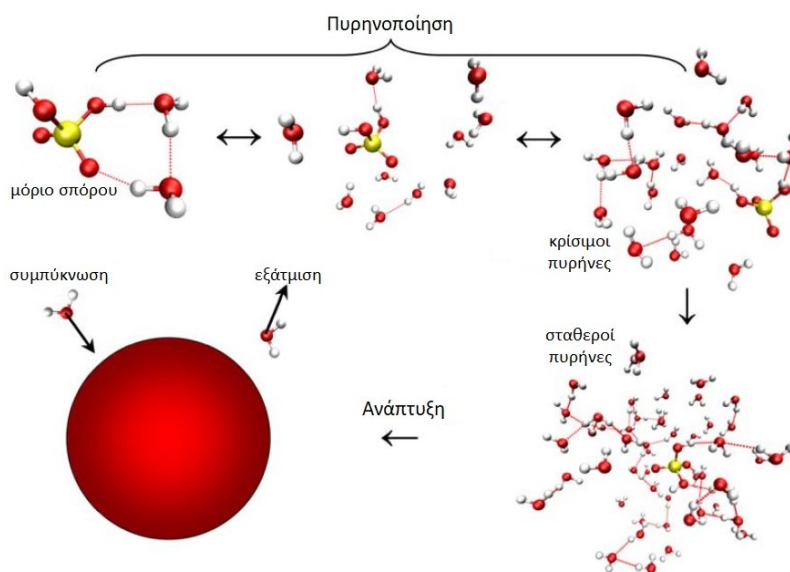


**Σχήμα 2.1:** Ο κύκλος ζωής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (αναδιαμορφωμένο από Pöschl, 2005).

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ότι τα σωματίδια εκπέμπονται από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές και μπορούν να υποστούν έναν δευτερογενή σχηματισμό, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει τις διεργασίες που αναφέρθηκαν. Η πορεία που ακολουθούν τα σωματίδια είναι είτε να δημιουργήσουν νέφη με τους πυρήνες των σωματιδίων για τη συμπύκνωση νεφών (Cloud Condensation Nuclei, CCN) (Cheng, Wang και Chen, 2010) και να εναποτίθενται με ξηρή ή υγρή εναπόθεση, είτε να υποστούν φυσικό και χημικό μετασχηματισμό με τον διασκορπισμό και απορρόφηση της ηλιακής και επίγειας ακτινοβολίας και με διάφορες ετερογενείς χημικές αντιδράσεις και άλλες πολυφασικές διεργασίες που θα τα οδηγήσουν στην ξηρή εναπόθεσή τους (Μουσιόπουλος, 1997; Kathmann, Schenter και Garrett, 2008).

## 2.2 Πυρηνοποίηση

Η πυρηνοποίηση για τα αιωρούμενα σωματίδια είναι η διεργασία που αφορά τη μεταβολή φάσεων τους, κυρίως από την αέρια στην υγρή φάση, το οποίο συμβαίνει με τη δημιουργία μικρών πυρήνων (clusters) αποτελούμενων από συσσωματώσεις μορίων (Λαζαρίδης, 2015). Οι δημιουργούμενοι πυρήνες μπορούν να υποστούν είτε με συμπίκνωση (condensation) είτε με εξάτμιση (evaporation) (Kathmann, κ. ά., 2008). Στο Σχήμα 2.2 περιλαμβάνεται η διεργασία που αναφέρθηκε.



**Σχήμα 2.2:** Η διεργασία της πυρηνοποίησης (αναδιαμορφωμένο από Kathmann, κ. ά., 2008).

Στην ατμόσφαιρα η μετάβαση των σωματιδίων από την αέρια στην υγρή φάση συμβαίνει δύσκολα, καθώς η ατμόσφαιρα συνήθως περιέχει ήδη σωματίδια οπότε η πυρηνοποίηση των σωματιδίων χρειάζεται να γίνεται πάνω στην επιφάνεια των υπάρχων σωματιδίων. Γενικά, η πυρηνοποίηση μπορεί να συμβεί είτε μέσω των ήδη υπαρχόντων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα που ονομάζεται **ετερογενής** πυρηνοποίηση (heterogeneous nucleation) είτε χωρίς προϋπάρχοντα σωματίδια και ονομάζεται **ομογενής** πυρηνοποίηση (homogeneous nucleation). Η διεργασία της ομογενούς πυρηνοποίησης συμβαίνει αρκετά δύσκολα στην ατμόσφαιρα και είναι κυρίως ετερομοριακή διεργασία, επηρεάζοντας σημαντικά την αριθμητική κατανομή μεγέθους, αφού μέσω αυτής δημιουργούνται πολλά νέα σωματίδια. Η **ετερομοριακή** (heteromolecular) διεργασία που αναφέρθηκε είναι η διεργασία της πυρηνοποίησης που συμβαίνει με περισσότερα από ένα χημικά στοιχεία και στην περίπτωση που περιλαμβάνει ένα χημικό στοιχείο ονομάζεται **ομομοριακή** (homomolecular) (Λαζαρίδης, 2015).

## 2.3 Συμπύκνωση και Εξάτμιση

Η **συμπύκνωση** (condensation) και η **εξάτμιση** (evaporation) στα αιωρούμενα σωματίδια συμβαίνουν κατά τη μεταφορά μάζας από ένα ρευστό στην επιφάνεια αυτών των σωματιδίων, λόγω της διαφοράς της μερικής πίεσης του ρευστού με την τάση ισορροπίας του στην ατμόσφαιρα, δηλαδή με τη συγκέντρωσή του και της επιφάνειάς του σωματιδίου. Οι διεργασίες αυτές ευθύνονται για μεταβολές στο μέγεθος, στο σχήμα, αλλά και τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων. Αναφέρεται ότι η συμπύκνωση διάφορων αερίων χαμηλών συγκεντρώσεων μπορεί να συμβεί και κατά την **πολυφασική** πυρηνοποίηση, η οποία είναι μια διεργασία πυρηνοποίησης όπου ένα μείγμα αερίων συμμετέχει και σε κορεσμένες και σε ακόρεστες συνθήκες (Λαζαρίδης, 2015). Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται η συμπύκνωση και η εξάτμιση ενός σωματιδίου στο τέλος της διεργασίας πυρηνοποίησης.

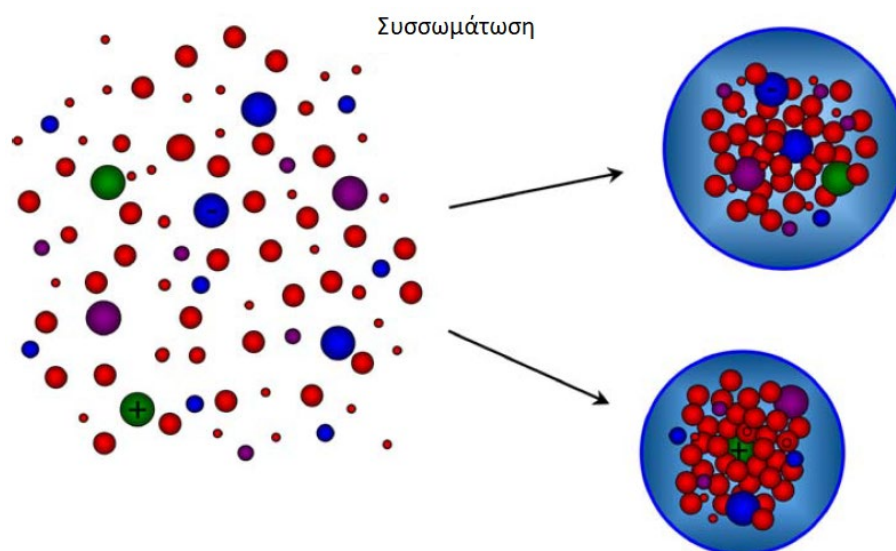
Μια κύρια φυσική διεργασία συμπύκνωσης είναι η συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας. Η συμπύκνωση των υδρατμών συμβαίνει όταν χαμηλώσει η θερμοκρασία των υδρατμών τόσο ώστε να φτάσει τη θερμοκρασία δρόσου μετατρέποντάς τους αέριους υδρατμούς σε νεφροσταγονίδια, τα οποία περιέχουν πυρήνες συμπύκνωσης αιωρούμενων σωματιδίων, όπως οι πυρήνες θαλασσινού άλατος (NaCl), η σκόνη και άλλα ιόντα. Το αντίστροφο της διαδικασίας αυτής είναι η εξάτμιση των υδρατμών. Από ένα σύμπλεγμα νεφροσταγονιδίων μπορεί να αποτελείται η δρόσος, η πάχνη και η ομίχλη. Όμως, στην περίπτωση που η θερμοκρασία δρόσου είναι μικρότερη του μηδενός τότε οι αέριοι υδρατμοί μετατρέπονται σε παγοκρυστάλλους, δηλαδή σε στερεή μορφή. Η άπνοια ή ο αποπνέων άνεμος, η εγγύτητα μιας περιοχής σε ποταμούς, λίμνες ή θάλασσες, ο αίθριος νυχτερινός ουρανός είναι μερικές από τις συνθήκες που ευνοούν τη συμπύκνωση των υδρατμών.

## 2.4 Συσσωμάτωση και Συσσώρευση

Η **συσσωμάτωση** (coagulation) είναι μια διεργασία σχηματισμού μεγάλων σωματιδίων από τη σύγκρουση μικρότερων αιωρούμενων σωματιδίων (Σχήμα 2.3), ενώ η **συσσώρευση** είναι η διεργασία όπου τα αιωρούμενα σωματίδια ενώνονται μεταξύ τους σε ένα μεγάλο καινούργιο σωματίδιο μετά από τη σύγκρουσή τους (Friedlander, 2000; Λαζαρίδης, 2015). Έτσι, φαίνεται ότι το αποτέλεσμα των συγκρούσεων των σωματιδίων οδηγεί στη μείωση του αριθμού τους και στην αύξηση του μεγέθους τους. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που οδηγούν στο φαινόμενο της συσσωμάτωσης, όπως είναι η:

- Θερμική συσσωμάτωση (λόγω της κίνησης Brown)
- Κινηματική συσσωμάτωση (λόγω βαρύτητας, αεροδυναμικών φαινομένων ή ηλεκτρικών δυνάμεων)

Η θερμική συσσωμάτωση (thermal coagulation) δημιουργείται όταν η σχετική κίνηση μεταξύ των σωματιδίων προέρχεται από την κίνηση Brown (υποκεφάλαιο 2.4.1), ενώ η κινηματική συσσωμάτωση δημιουργείται όταν η σχετική κίνηση μεταξύ των σωματιδίων προέρχεται από εξωτερικές δυνάμεις, όπως η βαρύτητα, τα αεροδυναμικά φαινόμενα και οι ηλεκτρικές δυνάμεις (Λαζαρίδης, 2015).



**Σχήμα 2.3:** Η διεργασία της συσσωμάτωσης (αναδιαμόρφωση από Kathmann, κ. ά., 2008).

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται από τη διεργασία συσσωμάτωσης τα μεγάλα σωματίδια που προκύπτουν, τα οποία ονομάζονται συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα περιλαμβάνουν τα μικρότερα αιωρούμενα σωματίδια που συχνά συγκρατούνται μεταξύ τους είτε από τις δυνάμεις Van der Waals (υποκεφάλαιο 2.4.2) είτε από την επιφανειακή τάση.

#### **2.4.1 Κίνηση Brown**

Η κίνηση Brown συμβαίνει όταν δύο ή περισσότερα σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αλλάζουν τυχαία την κατεύθυνση τους. Η κίνηση αυτή μπορεί να υπολογιστεί με κινητικές θεωρίες, καθώς αποτελείται από πολλά ευθύγραμμα τμήματα. Παράλληλα, ο αριθμός, η συγκέντρωση, το μέγεθος και η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων, όπως και το ιξώδες του ρευστού και η θερμοκρασία που επικρατεί, επηρεάζουν σημαντικά την κίνηση Brown. Για παράδειγμα, τα υπέρλεπτα σωματίδια επηρεάζονται περισσότερο από την κίνηση Brown, καθώς τα μεγαλύτερα σωματίδια έχουν δείξει πειραματικά ότι οι συγκρούσεις τους έχουν όρια στην κίνησή τους (Friedlander, 2000).

### **2.4.2 Δυνάμεις van der Waals**

Οι δυνάμεις van der Waals πρόκειται για ελκτικές δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης που θεωρείται ότι ασκούνται στα σωματίδια μετά από την κίνηση Brown δημιουργώντας χαλαρούς δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων και ευθύνονται για την επιφανειακή τάση. Συγκεκριμένα, οι δυνάμεις van der Waals προκύπτουν από στιγμιαία δίπολα μεταξύ ηλεκτρικά ουδέτερων ατόμων ή μορίων, λόγω των διακυμάνσεων των στοιβάδων των ηλεκτρονίων τους, επάγοντας νέα δίπολα με άλλα άτομα ή μόρια που βρίσκονται κοντά. Αναφέρεται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων τόσο μειώνονται οι δυνάμεις van der Waals σύμφωνα με το νόμο ισχύος, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τις βαρυτικές, ηλεκτρικές και θερμοφορητικές δυνάμεις που μπορούν να δρουν σε αρκετά μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με το μέγεθος των σωματιδίων (Dzyaloshinskii, Lifshitz και Pitaevskii, 1961; Friedlander, 2000).

Παράλληλα, σημειώνεται ότι για τα σωματίδια σφαιρικού σχήματος, παρατηρήθηκε από (Hamaker, 1937) ότι οι δυνάμεις van der Waals είναι ελκτικές για σωματίδια παρόμοιας χημικής σύστασης χωρίς προκαθορισμένο προσανατολισμό στα μόρια του ρευστού, ενώ στην περίπτωση που είναι διαφορετικής χημικής σύστασης οι δυνάμεις ενδεχομένως δρουν απωθητικά. Όμως, από τους (Harris και Kennedy, 1988) φαίνεται να αντικρούονται τα συμφραζόμενα του Hamaker (1937) επειδή δεν πήρε υπόψιν του κάποιες επιπλέον παραμέτρους. Από τους Harris και Kennedy (1988) αναφέρεται ότι οι ελκτικές δυνάμεις επηρεάζονται από το μέγεθος των σωματιδίων, δηλαδή όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια τόσο περισσότερο δρουν σε αυτά οι δυνάμεις van der Waals.

## 2.5 Διασπορά αιωρούμενων σωματιδίων

### 2.5.1 Μεταφορά αέριων μαζών

Οι αέριες εκπομπές που προκύπτουν από μια σταθερή ή κινητή πηγή, η οποία μπορεί να είναι σημειακή, γραμμική ή επιφανειακή, μεταφέρονται με τον άνεμο και διασκορπίζονται με την τυρβώδη ροή του ανέμου. Μάλιστα, οι αέριες αυτές εκπομπές έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρονται ως αέριες μάζες σε μεγάλες αποστάσεις. Η επιφανειακή κυκλοφορία των αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται σημαντικά από την τοπογραφία, όπως τη μορφολογία του εδάφους, και τις διάφορες μεταβολές της θερμότητας στην επιφάνεια της Γης. Η κίνηση του ανέμου διαμορφώνεται, πέρα από την άνιση διανομή της θερμοκρασίας στη Γη, και από τη δύναμη της βαροβαθμίδας, τη δύναμη εκτροπής ή κοριόλις (Coriolis), τη δύναμη της τριβής, τη φυγόκεντρο και κεντρομόλο δύναμη (Cooper και Alley, 2004; Λαζαρίδης, 2010).

Οι αέριες μάζες που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα, σύμφωνα με το Μουσιόπουλο (1997), εξαρτώνται κυρίως από:

- ❖ το είδος του ρύπου,
- ❖ την κατεύθυνση του ανέμου,
- ❖ την ευστάθεια της ατμόσφαιρας (θερμοβαθμίδα),
- ❖ την ατμοσφαιρική τύρβη,
- ❖ τις εκπομπές των ρύπων, και
- ❖ τα χαρακτηριστικά των πηγών (ανύψωση πλούμιου, κτλπ).

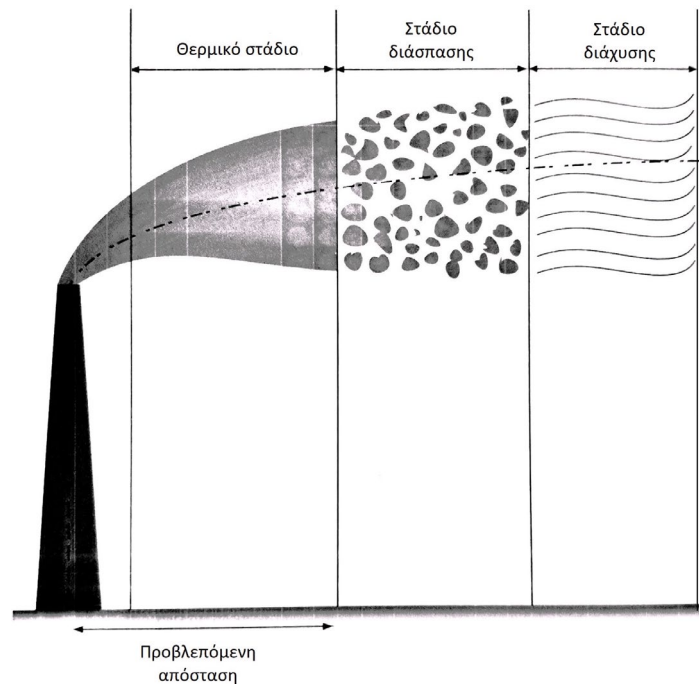
Ακόμα, η αεροδυναμική τραχύτητα των διάφορων επιφανειών του εδάφους συντελεί στη μετατόπιση της ροής του ανέμου (Μουσιόπουλος, 1997).

### 2.5.2 Μοντέλο θυσάνου

Η συνεχή διασπορά των ρύπων της ατμόσφαιρας μπορεί να περιγραφτεί αρκετά ρεαλιστικά από μοντέλα θυσάνου Gauss, στα οποία θεωρείται ότι ισχύει η κανονική κατανομή του Gauss στην εκπομπή των ρύπων από μια πηγή ρύπανσης (Λαζαρίδης, 2010).

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το πλούμιο ζεστών αερίων από μια πηγή εκπομπής ρύπων με την κατεύθυνση του ανέμου από τα αριστερά στα δεξιά. Γενικά, η ανύψωση του πλούμιου καθορίζεται σημαντικά από τη χημική σύσταση, τη συγκέντρωση και την πυκνότητα των αιωρούμενων

σωματιδίων, την ταχύτητα και το ύψος τους στην ατμόσφαιρα, όπως και τη θερμότητα και πίεση που τα περιβάλλουν. Η μορφή του πλουμίου μπορεί να θεωρηθεί και ως συνάρτηση της θερμοβαθμίδας, η οποία επηρεάζει την ευστάθεια του πλουμίου στην ατμόσφαιρα (Μουσιόπουλος, 1997).



**Σχήμα 2.4:** Η ανύψωση του πλουμίου από μια πηγή εκπομπής ζεστών αέριων ρύπων (από Λαζαρίδης, 2010).

Στο θερμικό στάδιο, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, η ανάμειξη των ρύπων (αερίων ή σωματιδίων) συμβαίνει λόγω της τύρβης και εφαρμόζεται το γραμμικό θερμικό μοντέλο με μέτρια ανύψωση τους. Έπειτα, στο στάδιο της διάσπασης κυριαρχεί η ατμοσφαιρική τύρβη και διασπάται το πλούμιο σε μικρά τμήματα. Ακολούθως, στο στάδιο διάχυσης κυριαρχεί η ατμοσφαιρική τυρβώδης διάχυση, με μεγάλη διάχυση των ρύπων και αναπτύσσεται με αργούς ρυθμούς (Λαζαρίδης, 2010).

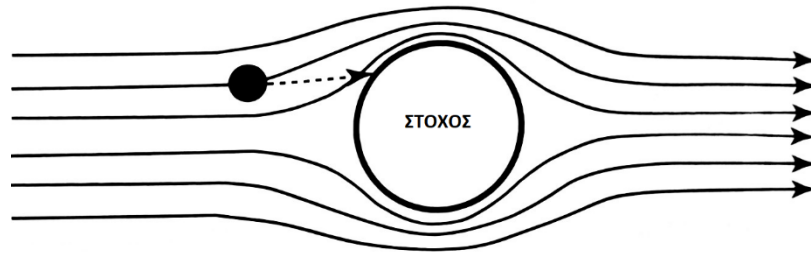
### **2.5.2 Μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων**

Παρατηρώντας τη μεταφορά των αέριων μαζών ως σύνολο γίνεται κατανοητό ότι είναι σημαντική και η μελέτη των μηχανισμών που διέπουν τη μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Οι κύριοι μηχανισμοί που επηρεάζουν τη μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων σε μια συνεχόμενη ροή αέρα και που μπορεί να συμβάλουν σε εναπόθεση των σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα, σύμφωνα με τους Schnelle και Brown (2002), Hinds (1999) και Λαζαρίδης (2015), είναι οι εξής:

- Η πρόσκρουση (impaction) των μεγάλων σωματιδίων σε έναν στόχο γίνεται σε ευθεία γραμμή ανεξάρτητα της γραμμής ροής αέρα που συνήθως κάμπτεται γύρω από έναν στόχο,

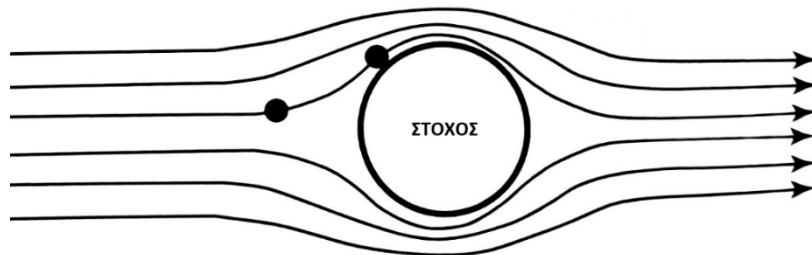


όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Σημειώνεται ότι τα σωματίδια με μεγαλύτερη μάζα έχουν περισσότερες πιθανότητες να μεταφερθούν σε ευθεία γραμμή.



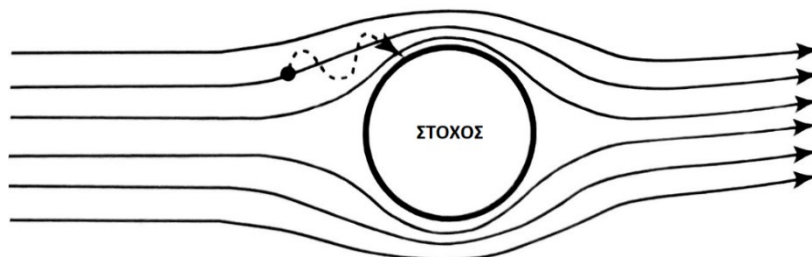
**Σχήμα 2.5:** Πρόσκρουση σωματιδίου με το στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).

- Η παρεμπόδιση (interception) των λεπτών σωματιδίων, μεγέθους 0,1 έως 1  $\mu\text{m}$ , να μεταφερθούν σε ένα στόχο συμβαίνει λόγω της γραμμής ροής αέρα, την οποία ακολουθούν τα ανεπαρκούς αδράνειας σωματίδια (Σχήμα 2.5). Το άγγιγμα του στόχου από τα σωματίδια αυτά μπορεί να συμβεί τυχαία.



**Σχήμα 2.6:** Η παρεμπόδιση του σωματιδίου να βρει το στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).

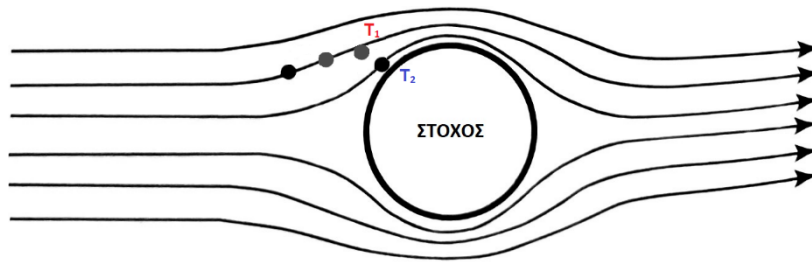
- Η διάχυση (diffusion) των υπέρλεπτων σωματιδίων σε έναν στόχο οφείλεται στην κίνηση Brown που αναφέρεται παραπάνω (υποκεφάλαιο 2.4.1), καθώς η μικρή μάζα των σωματιδίων αυτών και η τυχαία κίνηση οδηγεί στην αναπήδηση τους γύρω από ένα τυχαίο στόχο (Σχήμα 2.6).



**Σχήμα 2.7:** Η διάχυση του σωματιδίου μέσα στο στόχο (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).

- Η ηλεκτροστατική έλξη, όπως οι δυνάμεις van der Waals (υποκεφάλαιο 2.4.2), ωθεί τα σωματίδια, ειδικά των μικρότερων μεγεθών, να ακολουθούν τη ροή του αέρα.

- Η βαρύτητα μπορεί να απομακρύνει ακόμα και μεγάλα σωματίδια από τη ροή του αέρα, οδηγώντας κυρίως τα μεγαλύτερα σωματίδια στην πιθανή καθίζηση τους.
- Η θερμοφόρηση είναι ένα φαινόμενο που οδηγεί στη σύγκρουση των σωματιδίων με τα μόρια του αέρα όταν έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Η μεγαλύτερη ορμή στις υψηλότερες θερμοκρασίες μετακινεί τα σωματίδια προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.8:** Η κίνηση του σωματιδίου προς το στόχο λόγω θερμοφόρησης με  $T_1 > T_2$  (αναδιαμόρφωση από Schnelle και Brown (2002)).

### **2.5.3 Επαναιώρηση**

Η επαναιώρηση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα συμβαίνει λόγω της τυρβώδους ροής των ανέμων και είναι μια διεργασία που εξαρτάται πολύ από το χρόνο. Η ενέργεια, που προσδίδεται στα σωματίδια με την τυρβώδη ροή, ωθεί τα σωματίδια με την πάροδο του χρόνου στην επαναιώρησή τους στην ατμόσφαιρα. Η επαναιώρηση έχει μεγάλη συνεισφορά στη διάβρωση των εδαφών κυρίως γύρω από τις όχθες ποταμών, θάλασσας, κ. ά.

Συνήθως, για τα σωματίδια σκόνης η επαναιώρησή τους στην ατμόσφαιρα από το έδαφος, ερημικών ή αγροτικών εκτάσεων, συμβαίνει λόγω πολλών παραγόντων όπως η ταχύτητα τριβής του ανέμου, η μορφολογία του εδάφους, δηλαδή η σύσταση, φυτοκάλυψη και αεροδυναμική τραχύτητά του, η υγρασία και θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα, κλπ. (Λαζαρίδης, 2010, 2015).

### **2.5.3 Χρόνος παραμονής αιωρούμενων σωματιδίων**

Η δυναμική της ατμόσφαιρας καθορίζει το χρόνο παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων σε αυτήν. Συγκεκριμένα, οι διάφορες διεργασίες που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο επηρεάζουν τη φυσική σύνθεση, τη μορφολογία, τις φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες των σωματιδίων, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που καθορίζουν το χρόνο ζωής των σωματιδίων (Finlayson-Pitts και Pitts, 2000).

Γενικά, τα αέρια έχουν διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα από ένα δευτερόλεπτο μέχρι και πάνω από έναν αιώνα. Όμως, ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην τροπόσφαιρα

κυμαίνεται από μερικές μέρες έως εβδομάδες και εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά εκπομπής, το μέγεθος του σωματιδίου και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Αναφέρεται ότι τα χονδρά αιωρούμενα σωματίδια έχουν χρόνο ζωής έως λίγων ημερών, ενώ τα λεπτά σωματίδια έως λίγων εβδομάδων (Λαζαρίδης, 2010).

## **2.6 Τρόποι απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα**

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων και γενικά των αερολυμάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της συσσωμάτωσης (coagulation) είτε μέσω της εναπόθεσης (deposition). Συγκεκριμένα, η συσσωμάτωση μειώνει τον αριθμό των υπέρλεπτων αιωρούμενων σωματιδίων, κυρίως των σωματιδίων Άιτκεν, ενώ η εναπόθεση μειώνει τον αριθμό αλλά και τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (Kiehl και Rodhe, 1995). Η εναπόθεση ως ο κυριότερος τρόπος απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να γίνει είτε από ξηρές είτε από υγρές διεργασίες (Μουσιόπουλος, 1997). Παρακάτω παραθέτονται οι κύριοι μηχανισμοί εναπόθεσης των σωματιδίων.

### **2.6.1 Ξηρή Εναπόθεση**

Η ξηρή εναπόθεση συμβαίνει κατά την επαφή ενός σωματιδίου με οποιοδήποτε επιφάνεια του φυσικού περιβάλλοντος, όπως το έδαφος, τα επιφανειακά νερά, τα φυτά, τα ζώα, τις ανθρώπινες κατασκευές, με την ταυτόχρονη παραμονή του σε αυτήν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η ξηρή εναπόθεση μπορεί να συμβεί :

- ❖ Με την πρόσκρουση, όπου τα σωματίδια, σε αδρανή κατάσταση, συγκρούονται με μια επιφάνεια.
- ❖ Με τη βαρυτική καθίζηση, η οποία είναι πολύ πιθανή κατά τη σύγκρουση των σωματιδίων μεταξύ τους, καθώς αυτή μπορεί να δημιουργήσει συσσωματώματα αυξάνοντας το βάρος του αερολύματος.

### **2.6.2 Υγρή Εναπόθεση**

Η υγρή εναπόθεση περιλαμβάνει τη μεταφορά ενός ενσωματωμένου σε σταγονίδια νερού σωματιδίου στο έδαφος κατά τον σχηματισμό του υετού, όπως τη βροχή, το χαλάζι, την ομίχλη ή και το χιόνι. Έτσι, οι χρόνοι παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι ανάλογοι με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή (Λαζαρίδης, 2010).

## Κεφάλαιο 3: Εκπομπές και επιπτώσεις αιωρούμενων σωματιδίων

---

### 3.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι υπαίτια για τις διεθνούς κλίμακας επιπτώσεις της στο περιβάλλον υποβαθμίζοντας την ποιότητα του αέρα, εδάφους και νερού του φυσικού περιβάλλοντος. Με τον όρο ατμοσφαιρική ρύπανση γίνεται αναφορά στην είσοδο ρυπογόνων ουσιών (αερίων ή σωματιδίων), ακτινοβολιών κ. ά. που μπορούν να αλλοιώσουν τα χαρακτηριστικά του φυσικού περιβάλλοντος, κυρίως του αέρα που περιβάλλει τη Γη. Η βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη επιρροή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κυρίως στο κλίμα και στην ανθρώπινη υγεία καθορίζεται κυρίως από τη φυσική, ανθρωπογενή ή και μεικτή προέλευσή της και τη δυναμική της ατμόσφαιρας που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Οι πιο σημαντικές φυσικές και ανθρωπογενείς εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα αναλύονται στα επόμενα υποκεφάλαια μαζί με τις σοβαρές επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία, στη χλωρίδα και πανίδα, και τέλος στο κλίμα.

Οι κύριοι ρύποι, που συμβάλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και για τους οποίους υπάρχουν νομοθετικά όρια από την EPA, μπορούν να είναι:

- ❖ Αιωρούμενα σωματίδια,
- ❖ Διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ),
- ❖ Διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ),
- ❖ Μόλυβδος ( $\text{Pb}$ ),
- ❖ Μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ), και
- ❖ Όζον ( $\text{O}_3$ ).

Ακόμα, οι πιο σημαντικοί ρύποι μπορούν να θεωρηθούν οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες και άλλα βαρέα μέταλλα πέρα από το μόλυβδο, τα οποία είναι ιδιαίτερα τοξικά και συμβάλλουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Επομένως, η τοξικότητα βασίζεται στις φυσικοχημικές ιδιότητες και άλλα χαρακτηριστικά των ρύπων της ατμόσφαιρας.

Η μέτρηση των ρύπων, ο προσδιορισμός της πηγής εκπομπής τους και η παρατήρηση των μηχανισμών που σχηματίζονται, μεταφέρονται και τελικά εναποτίθενται στην ατμόσφαιρα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, στη χλωρίδα και πανίδα και στο κλίμα της Γης. Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν να προληφθούν με τη συνεχή καταμέτρηση των ρύπων, την παρακολούθηση μεταφοράς των ρυπογόνων αέριων μαζών μέσω

δορυφορικών εικόνων και μοντέλων αλλά και με τη συχνή ενημέρωση και αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα.

Οι δείκτες ποιότητας αέρα (ΔΠΑ) (Air Quality Index, AQI) βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας αέρα της ατμόσφαιρας και στη λήψη κατάλληλων αποφάσεων για την αντιμετώπιση της τυχόν ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ΔΠΑ μπορούν να υπολογιστούν από τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων των  $AS_{2,5}$ ,  $AS_{10}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$  και  $SO_2$  σε πραγματικό χρόνο από τοπικούς σταθμούς παρακολούθησης. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας 3.1, ο οποίος εμπεριέχει τους δείκτες ποιότητας του αέρα και τα όρια των συγκεντρώσεων των  $AS_{2,5}$  και  $AS_{10}$  για κάθε δείκτη μαζί με την περιγραφή της ποιότητας του αέρα. Από τα δεδομένα του πίνακα και με βάση την εξίσωση (3.1) υπολογίζεται ο ΔΠΑ για τα  $AS_{2,5}$  και  $AS_{10}$ . Σημειώνεται ότι ο ΔΠΑ της περιοχής καθορίζεται από τον ρύπο με το υψηλότερο μετρούμενο δείκτη.

**Πίνακας 3.1:** Οι δείκτες ποιότητας αέρα (ΔΠΑ) και οι συγκεντρώσεις των  $AS_{2,5}$  και  $AS_{10}$  (αναδιαμόρφωση από τη σελίδα της NASA (<https://spacemath.gsfc.nasa.gov/>)).

ΔΠΑ	$AS_{2,5}$ ( $\mu g\ m^{-3}$ ) σημεία καμψής	$AS_{10}$ ( $\mu g\ m^{-3}$ ) σημεία καμψής	Συνθήκη ποιότητας αέρα για την υγεία
0 – 50	0,0 – 15,4	0 – 54	Καλή
51 – 100	15,5 – 40,4	55 – 154	Μέτρια
101 – 150	40,5 – 65,4	155 – 254	Ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες
151 – 200	65,5 – 150,4	255 – 354	Ανθυγιεινή
201 – 300	150,5 – 250,4	355 – 424	Πολύ ανθυγιεινή
301 – 500	250,5 – 350,4	425 – 504	Επικίνδυνη

Ο δείκτης του ρύπου περιγράφεται από την εξίσωση (3.1) (Environmental Protection Agency, 1999):

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (3.1)$$

όπου  $I_p$  : είναι η τιμή του ΔΠΑ,

$I_{Hi}$  : η τιμή του ΔΠΑ που αντιστοιχεί στο  $BP_{Hi}$ ,

$I_{Lo}$  : η τιμή του ΔΠΑ που αντιστοιχεί στο  $BP_{Lo}$ ,

$BP_{Hi}$  : είναι το σημείο καμψής που είναι μεγαλύτερο ή ίσο με  $C_p$ ,

$BP_{Lo}$  : είναι το σημείο καμψής που είναι μικρότερο ή ίσο με  $C_p$ ,

$C_p$  : είναι η μετρούμενη συγκέντρωση του ρύπου.

Για παράδειγμα, αν η μετρούμενη συγκέντρωση των  $AS_{10}$  στην περιοχή των Χανίων είναι  $280\ \mu g\ m^{-3}$ , τότε ο ΔΠΑ υπολογίζεται, από την εξίσωση (3.1) και με βάση τον Πίνακα 3.1, ως εξής:

$$I_p = \frac{200 - 151}{354 - 255} (280 - 255) + 151 \cong 163$$

Επομένως, αν οι υπόλοιποι ρύποι ( $\text{A}\Sigma_{2,5}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  και  $\text{SO}_2$ ) έχουν μικρότερο δείκτη από των  $\text{A}\Sigma_{10}$ , τότε θεωρείται ότι η συνθήκη ποιότητας αέρα για την υγεία είναι ανθυγιεινή λόγω των  $\text{A}\Sigma_{10}$ .

### 3.2 Εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων από φυσικές πηγές

Οι φυσικές πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων συνεισφέρουν περισσότερο στο σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων παγκοσμίως σε σχέση με τις ανθρωπογενείς. Όμως, η συνεισφορά των φυσικών πηγών ρύπανσης στις επιπτώσεις της ανθρώπινης υγείας είναι σημαντικά μικρότερες από τις ανθρωπογενείς, καθώς η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων φυσικής προέλευσης είναι συνήθως λιγότερο επιβλαβή και σε μικρότερες συγκεντρώσεις με μακρινή απόσταση από τις πόλεις, εκτός στις περιπτώσεις σημαντικών γεγονότων ρύπανσης όπως των επεισοδίων σκόνης, δασικών πυρκαγιών, έκρηξη ηφαιστείου κ. ά. (Godish, 1991). Οι εκπομπές από θαλασσινό σπρέι και σκόνη, κυρίως από την έρημο Σαχάρα, αναλύονται παρακάτω, τα οποία έχουν τις μεγαλύτερες συμβολές φυσικής ρύπανσης στην παρούσα διπλωματική εργασία αλλά και σε διεθνές επίπεδο.

#### 3.2.1 Εκπομπή θαλασσινού σπρέι

Από τις θάλασσες και τους ωκεανούς εκπέμπονται κυρίως αιωρούμενα σωματίδια άλατος ( $\text{NaCl}$ ) και θειικής ρίζας. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εκπέμπονται είτε από τη θραύση φυσαλίδων αέρα είτε από την εξάτμιση των υδροσταγονιδίων των κυμάτων είτε από τα κύματα που χτυπούν στην επιφάνεια της θάλασσας ή του ωκεανού στην περίπτωση θαλασσοταραχής. Η μεταφορά των σωματιδίων αυτών στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου, το μέγεθος των σωματιδίων, της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας και ενδεχομένως από την οργανική ύλη, η οποία μπορεί να επηρεάσει τον σχηματισμό και τη θραύση των φυσαλίδων αέρα. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται με αύξηση των εκπομπών θαλάσσιου σπρέι ενώ η αύξηση της σχετικής υγρασίας με μείωση των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω συμπύκνωσης και αύξησης του μεγέθους τους. Αναφέρεται ότι τα μεγάλα σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη των 10  $\mu\text{m}$ , συνήθως εναποτίθενται γρηγορότερα από ότι τα μικρότερα σωματίδια και η καταμέτρησή τους είναι δυσκολότερη (Kiehl και Rodhe, 1995; Λαζαρίδης, 2010, 2015).

### **3.2.2 Εκπομπή σκόνης**

Η εκπομπή της σκόνης οφείλεται κυρίως στην επαναιώρηση της σκόνης από το έδαφος (υποκεφάλαιο 2.5.3) και στη μηχανική καταπόνησή του. Η σκόνη μπορεί να έχει όχι μόνο φυσική αλλά και ανθρωπογενή προέλευση, η οποία περιγράφεται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Η φυσική εκπομπή της σκόνης είναι κυρίως αποτέλεσμα της επαναιώρησης της σε τοπικό επίπεδο, όπως με την κίνηση οχημάτων και του εδάφους, και σε διασυνοριακό, από την έρημο Σαχάρα για παράδειγμα. Η σκόνη της κίνησης των οχημάτων και του εδάφους μπορεί να περιέχει αερολύματα με βαρέα μέταλλα, πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες και αερολύματα βιολογικής προέλευσης, όπως η γύρη (Λαζαρίδης, 2010). Παράλληλα, η χημική σύσταση της σκόνης που προέρχεται από την έρημο Σαχάρα μπορεί να περιέχει ενώσεις όπως το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), το οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), το οξειδίου του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), το οξειδίου του μαγνησίου ( $\text{MgO}$ ), το οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) και το χημικό στοιχείο P σε αδιάλυτη μορφή (Goudie και Middleton, 2001).

Η μεταφορά των σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα επηρεάζεται κυρίως από το μέγεθος, τη συγκέντρωση και τη χημική σύσταση των σωματιδίων, την ταχύτητα του ανέμου, την τραχύτητα και υγρασία του εδάφους. Τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Οι δυνάμεις που ωθούν τα σωματίδια σκόνης να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα είναι το ιξώδες, η οπισθέλκουσα δύναμη και ενδεχομένως η ηλεκτροστατική έλξη, οι οποίες εναντιώνονται στις δυνάμεις που δέχονται τα σωματίδια για την εναπόθεσή τους. Όμως, με την πάροδο του χρόνου, λόγω της ασταθής κατάστασης των σωματιδίων, τα σωματίδια σκόνης θα απομακρυνθούν τελικά από την ατμόσφαιρα (Calvert και Englund, 1984).

Αναφέρεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας και των ισχυρών ανέμων οδηγούν σε αύξηση των εκπομπών σωματιδίων σκόνης, λόγω της ξήρανσης των εδαφών και της θυελλώδους ισχυρής μεταφοράς, ενώ η αύξηση της σχετικής υγρασίας και της βροχόπτωσης οδηγεί στην ανάπτυξη της φυτοκάλυψης και υγρασίας των εδαφών και άρα στη μείωση και απομάκρυνση των εκπομπών σωματιδίων σκόνης (Kiehl και Rodhe, 1995).

### **3.3 Εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που βλάπτει σοβαρά την ανθρώπινη υγεία, τη χλωρίδα και πανίδα, τα κτίρια και το κλίμα, καθώς εκπέμπονται στις περισσότερες των περιπτώσεων επικίνδυνες και τοξικές ουσίες. Τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορεί να είναι από:

- ❖ διεργασίες καύσης από βιομηχανίες, για οικιακή θέρμανση κ.ά.,
- ❖ παραγωγή ενέργειας,
- ❖ μεταφορές, όπως κυκλοφορία οχημάτων, αεροπλάνων, πλοίων, κ. ά.,
- ❖ καλλιέργεια εδαφών
- ❖ κτηνοτροφία, και
- ❖ εξόρυξη ορυκτών καυσίμων.

Η εκπομπή των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να είναι σταθερή ή κινητή. Ως κινητές πηγές θεωρούνται για παράδειγμα τα οχήματα όπως τα αυτοκίνητα, τα αεροπλάνα, ενώ οι βιομηχανίες, τα σπίτια, οι πολυκατοικίες και η καύση βιομάζας θεωρούνται σταθερές πηγές.

Η εκπομπή σκόνης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες συμβαίνει κατά τη μηχανική καταπόνηση του εδάφους, όπως με την κίνηση των οχημάτων, τις κατασκευαστικές δραστηριότητες, τη βόσκηση, τους σωρούς χώματος σε βιομηχανίες, τη μεταφορά υλικών, την καλλιέργεια εδαφικών εκτάσεων κ.ά. Η κίνηση των οχημάτων, όπως αναφέρεται στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, παράγει αιωρούμενα σωματίδια με βαρέα μέταλλα, πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες και αερολύματα βιολογικής προέλευσης, τα οποία στην περίπτωση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων προέρχονται από το φρενάρισμα των αυτοκινήτων, τη φθορά των ελαστικών, τα καυσαέρια κλπ. Παράλληλα, η κτηνοτροφία και η βόσκηση συμβάλλουν στην επαναιώρηση της σκόνης και στη διάβρωση των εδαφών, αλλά και στην παραγωγή του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ), το οποίο πρόκειται για αέριο ρύπο που συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακόμα, η καλλιέργεια των εδαφών από τους ανθρώπους οδηγεί στην επαναιώρηση της σκόνης του εδάφους και στην εκπομπή αλλεργιογόνων βιοαερολυμάτων όπως η γύρη (Λαζαρίδης, 2010).

Αναφέρεται ότι η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται από ανθρωπογενείς πηγές βρίσκονται στο υποκεφάλαιο 1.5, όπου και περιγράφονται αναλυτικά.

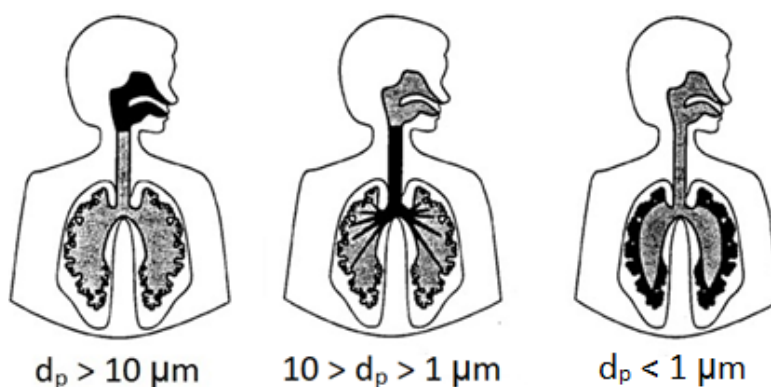
### 3.4 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία

Τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία και ποιότητα ζωής. Συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προσβάλλουν το ανθρώπινο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα προκαλώντας σοβαρές παθήσεις όπως καρδιακή αρρυθμία, θρόμβωση, χρόνια βρογχίτιδα, άσθμα, φλεγμονή των πνευμόνων, πνευμονική ίνωση, εμφύσημα ή ακόμα και καρκίνο του πνεύμονα (Wark, Warner και Davis, 1998; Chalvatzaki κ.ά., 2019). Η προσβολή του ανθρώπινου οργανισμού συμβαίνει μέσω της αναπνοής του, δηλαδή το στόμα και



τη μύτη, και του δέρματός του. Βέβαια, τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προσβάλλουν τον άνθρωπο και με έμμεσο τρόπο π.χ. μέσω της τροφής, όμως ο κύριος τρόπος εισαγωγής τους στον ανθρώπινο οργανισμό είναι μέσω του αναπνευστικού συστήματος (Μουσιόπουλος, 1997).

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και οι μηχανισμοί μεταφοράς και εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων προσδιορίζουν την πιθανή τοξικότητά και καρκινογένεσή τους στον άνθρωπο. Για παράδειγμα, η χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων έχει καθοριστικό ρόλο στην ανθρώπινη υγεία. Τα χημικά στοιχεία As, Cd, Co, Cr (VI), και Ni μπορούν να προκαλέσουν καρκίνο, με τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH) και τα ανιχνευόμενα μέταλλα στα σωματίδια να θεωρούνται ως τα πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία (Chalvatzaki κ. ά., 2019). Παράλληλα, ανάλογα το μέγεθος των σωματιδίων, η είσοδος στο αναπνευστικό σύστημα είναι διαφορετική. Τα μικρότερα σωματίδια έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται πιο βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα και να καθιζάνουν σε αυτό, καθιστώντας την έξοδό τους αρκετά δύσκολη προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στα όργανα του αναπνευστικού, όπως στις κυψελίδες των πνευμόνων κ. ά. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται με έντονο χρωματισμό το σημείο του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος που επηρεάζουν συγκεκριμένα μεγέθη των αιωρούμενων σωματιδίων.



**Σχήμα 3.1:** Η αεροδυναμική διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων και οι αντίστοιχες επιπτώσεις τους στον άνθρωπο (αναδιαμόρφωση από Ανδρίτσος, 2015).

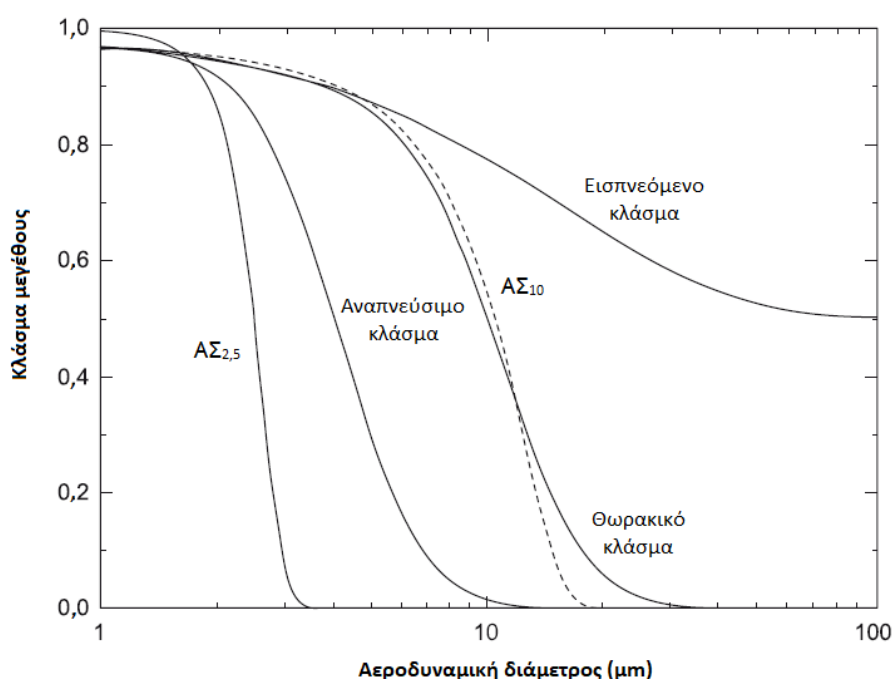
Από το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των  $10 \mu m$  αδυνατούν να εισέλθουν στις αναπνευστικές οδούς και παραμένουν στο ανώτερο αναπνευστικό, δηλαδή στη ρινική και στοματική κοιλότητα, στον φάρυγγα και λάρυγγα, με βάση των μηχανισμών εναπόθεσης όπως η πρόσκρουση ή καθίζηση. Τα αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο από  $1$  έως  $10 \mu m$  εισέρχονται στη θωρακική περιοχή, δηλαδή στην τραχεία και στους βρόγχους. Η εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στους πνεύμονες αυξάνεται όσο μικραίνει η διάμετρός τους. Έτσι, τα λεπτά και υπέρλεπτα σωματίδια (σωματίδια μικρότερα από  $1 \mu m$ ) διεισδύουν ακόμα βαθύτερα στους πνεύμονες, φτάνοντας στην κυψελιδική περιοχή, δηλαδή στους αναπνευστικούς βρόγχους, στις κυψελίδες και στον συνδετικό ιστό, καθώς αυξάνεται η επίδραση της διάχυσης Brown,

της καθίζησης και διασποράς, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η πρόσκρουση των σωματιδίων (Wark, Warner και Davis, 1998; Λαζαρίδης, 2015).

Η συλλογή των λεπτών και υπέρλεπτων σωματιδίων στις κυψελίδες καθιστά τα σωματίδια αυτά ακόμα πιο επικίνδυνα, αφού δεν μπορούν να απομακρυνθούν με τους φυσικούς μηχανισμούς καθαρισμού όπως τα μεγαλύτερα σωματίδια, με διάμετρο μεγαλύτερη του 1  $\mu\text{m}$  (Schnelle and Brown, 2002). Η απομάκρυνση των μικρότερων σωματιδίων από τις κυψελίδες μπορεί να συμβεί με φαγοκυττάρωση από τα μακροφάγα κύτταρα ή και με ενδοκύττωση (Λαζαρίδης, 2015).

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι καμπύλες των  $AS_{10}$  και  $AS_{2,5}$  και τα κλάσματα των εισπνεόμενων, θωρακικών και αναπνεύσιμων σωματιδίων ως προς την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η καμπύλη του κλάσματος των θωρακικών συμπίπτει με αυτή των  $AS_{10}$ , ενώ η καμπύλη των  $AS_{2,5}$  βρίσκεται πιο αριστερά από την καμπύλη του αναπνεύσιμου κλάσματος (Λαζαρίδης, 2010).

Αναφέρεται ότι η εισπνοή των  $AS_{10}$  από τον ανθρώπινο οργανισμό μπορεί να προκαλέσει ευρείες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία όπως βήχα, συμπτώματα στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα, βρογχίτιδα ή και ακόμα θάνατο. Η σοβαρότητα των επιπτώσεων είναι ανάλογη κάποιων βασικών παραμέτρων όπως είναι η διάρκεια της έκθεσης του ανθρώπινου οργανισμού στα  $AS_{10}$ , η δόση και η χημική σύστασή τους, η καταγωγή, το φύλο και η ηλικία του ανθρώπου, κ. ά. (Λαζαρίδης, 2010).



**Σχήμα 3.2:** Τα κλάσματα των εισπνεόμενων, θωρακικών και αναπνεύσιμων σωματιδίων, με τις καμπύλες των  $AS_{10}$  και  $AS_{2,5}$ , ως προς την αεροδυναμική διάμετρο των σωματιδίων. Το κλάσμα μεγέθους αναφέρεται στο ποσοστό διείσδυσης κάθε περιοχής στο αναπνευστικό σύστημα (αναδιαμόρφωση από Lazaridis και Colbeck, 2010).

### 3.5 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στα υλικά

Ανάλογα τη φύση και μορφή των υλικών που εκτείνονται στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, μπορούν να φθαρούν και να καταστραφούν. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων και κυρίως η χημική σύστασή τους επηρεάζουν σημαντικά τα διάφορα υλικά. Τα αιωρούμενα σωματίδια με την εναπόθεση και καθίζησή τους στις επιφάνειες των υλικών μπορούν να τα λερώσουν και να προκαλέσουν χημική ζημιά με τη διάβρωση. Για παράδειγμα, τα μέταλλα μπορούν να διαβρωθούν κατά την παρουσία υγρών αιωρούμενων σωματιδίων. Παράλληλα, όταν τα αιωρούμενα σωματίδια περιέχουν διοξείδιο του θείου, η φθορά στα υλικά ενισχύεται, καθώς το διοξείδιο του θείου πρόκειται για όξινη και απορροφητική ένωση που συμβάλλει και στη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής (Wark, κ. ά., 1998).

### 3.6 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη χλωρίδα και πανίδα

Όλες οι αρνητικές επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη χλωρίδα δεν έχουν κατανοηθεί ακόμα πλήρως. Είναι όμως γνωστό ότι η χλωρίδα επηρεάζεται από τα αιωρούμενα σωματίδια είτε άμεσα, με την απευθείας επαφή των φυτών με τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, είτε έμμεσα, με τη μακροχρόνια έκθεση των φυτών στα αιωρούμενα σωματίδια και με την εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στο έδαφος επηρεάζοντας τις ρίζες των φυτών. Τα αιωρούμενα σωματίδια με διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), με υδροφθόριο (HF) ή με οξείδιο του μαγνησίου ( $\text{CaO}$ ) και γενικά με διάφορα βαρέα μέταλλα μπορούν να βλάψουν σημαντικά τη χλωρίδα, καθυστερώντας την ανάπτυξη και απόδοση των φυτών και καταστρέφοντας το φύλλωμά τους. Παράλληλα, η εναπόθεση της σκόνης της ατμόσφαιρας στις επιφάνειες των φύλλων των φυτών οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους μειώνοντας τη φωτοσύνθεση. Η μείωση της φωτοσύνθεσης προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στη χλωρίδα, όπως τη χλώρωση, την καθυστέρηση της ανάπτυξης τους και στη νέκρωση ολόκληρων ή και τμημάτων των φύλλων (Wark, κ. ά., 1998, Γεντεκάκης, 2010).

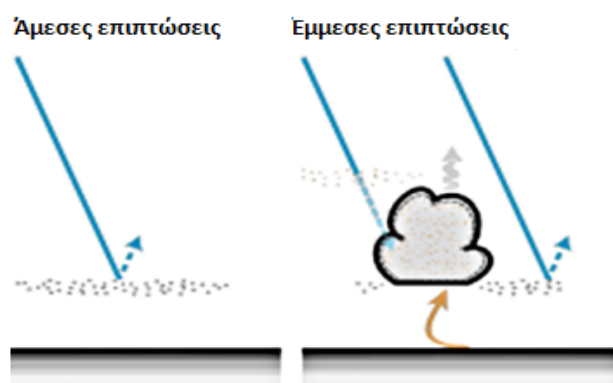
Η πανίδα προσβάλλεται από τα αιωρούμενα σωματίδια είτε άμεσα με την εισπνοή, είτε έμμεσα μέσω της κατάποσης προσβεβλημένης τροφής από τοξικά και επικίνδυνα για την υγεία σωματίδια που έχουν εναποτεθεί στα φυτά. Τα σωματίδια που θεωρούνται ιδιαίτερα τοξικά στην πανίδα, όπως αυτά που περιέχουν αρσενικό (As), κ. ά., μπορούν να δηλητηριάσουν και ακόμα να σκοτώσουν τα ζώα που έχουν προσβληθεί από αυτά (Wark, κ. ά., 1998).

### 3.7 Επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα

Οι κύριες συνέπειες των αιωρούμενων σωματιδίων γενικά στην ατμόσφαιρα μπορούν να είναι:

- ❖ η μεταβολή του κλίματος,
- ❖ η μείωση της ορατότητας και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, και
- ❖ η αύξηση της συχνότητας σχηματισμού ομίχλης και νεφών.

Το κλίμα επηρεάζεται από τα αιωρούμενα σωματίδια είτε άμεσα με τη σκέδαση και την απορρόφηση ακτινοβολίας είτε έμμεσα με τη δημιουργία νεφών από τους πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (CCN) (Σχήμα 3.3). Τα αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους έχουν την ικανότητα είτε να αντανakλούν είτε να απορροφούν μέρη της ηλιακής ακτινοβολίας είτε να δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (υποκεφάλαιο 2.1). Η αντανάκλαση ενός μέρους της ακτινοβολίας από τα αιωρούμενα σωματίδια συνεπάγεται μείωση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης, ενώ η απορρόφηση ενός μέρους της ακτινοβολίας αυξάνει τη μέση θερμοκρασία τροποποιώντας ταυτόχρονα τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας και τον σχηματισμό των νεφών. Τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων που προκαλούν αντανάκλαση και τα αντίστοιχα που προκαλούν απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι ευρέως γνωστά. Όμως, είναι γνωστό ότι τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν στη χημική τους σύσταση θειικά άλατα, οργανικό άνθρακα ή βιομάζα αντανakλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν μαύρο άνθρακα την απορροφούν (Fuzzi κ. ά., 2015; Μπινιάρης και Μπινιάρης, 2015).



**Σχήμα 3.3:** Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλίμα, με τα βέλη χρώματος μπλε να περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το βέλος πορτοκαλί χρώματος να αφορά την επίγεια ακτινοβολία (αναδιαμόρφωση από (Fuzzi κ. ά., 2015)).

Τα αιωρούμενα σωματίδια συμβάλλουν σημαντικά στον σχηματισμό νεφών επηρεάζοντας το κλίμα του πλανήτη. Τα δημιουργούμενα νέφη επηρεάζονται από τις κατανομές μεγέθους των αερολυμάτων, τη συγκέντρωση και τη χημική σύστασή τους και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, τα αιωρούμενα σωματίδια που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να

οδηγήσουν με την αύξηση της θερμοκρασίας στην εξάτμιση των σταγονιδίων των νεφών. Έτσι, με την εξάτμιση των υγρών σωματιδίων, μειώνονται τα σωματίδια στα νέφη και άρα είναι μειωμένη η νεφοκάλυψη της ατμόσφαιρας. Ακόμα, τα μικρότερα σε μέγεθος υγρά σωματίδια μπορούν να καθυστερήσουν και να μειώσουν τη βροχόπτωση, με αποτέλεσμα η υγρή εναπόθεση των σωματιδίων της ατμόσφαιρας να μειώνεται, αυξάνοντας τη συσσώρευση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Fuzzi κ. ά., 2015).

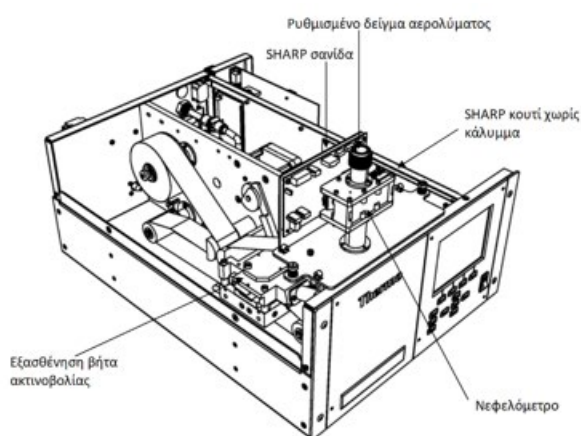
Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι οι επιπτώσεις στο κλίμα επηρεάζονται σημαντικά από τη συγκέντρωση, τη χημική σύσταση και το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Έτσι, η καταμέτρηση των συγκεντρώσεων των σωματιδίων και η εύρεση της χημικής σύστασής τους έχει καθοριστικό ρόλο στον εντοπισμό των πιθανών επιπτώσεων των σωματιδίων στο κλίμα, και γενικά στην ατμόσφαιρα.

## Κεφάλαιο 4: Όργανα μέτρησης

### 4.1 Όργανο μέτρησης συγκέντρωσης, SHARP Monitor

Το Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate (SHARP) Monitor, Model 5030i, της εταιρίας Thermo Fisher Scientific, είναι ένας υβριδικός νεφελομετρητής/ραδιομετρητής (Σχήμα 4.1.β) που καταγράφει αυτόματα και σε πραγματικό χρόνο τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Σημειώνεται ότι στο SHARP Monitor είναι δυνατή η καταγραφή της συγκέντρωσης της μάζας των ΑΣ<sub>10</sub>, ΑΣ<sub>2.5</sub> και ΑΣ<sub>1.0</sub>, ανάλογα της κεφαλής δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται για την είσοδο των σωματιδίων. Ακόμα, πρόκειται για μια δειγματοληπτική συσκευή μικρού όγκου με την παροχή αέρα να είναι 16,67 L/min (1 m<sup>3</sup>/h), η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασίες από 4° έως 50°C.

Η συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> δίνεται σε μg/m<sup>3</sup>, με την ακρίβεια του οργάνου, για το 24ωρο, να είναι ± 2,0 μg/m<sup>3</sup> για συγκεντρώσεις μικρότερες των 80,0 μg/m<sup>3</sup> και ± 5,0 μg/m<sup>3</sup> για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 80,0 μg/m<sup>3</sup>. Στο Σχήμα 4.1.α απεικονίζεται το SHARP Monitor με τα βασικά χαρακτηριστικά του.



(α)



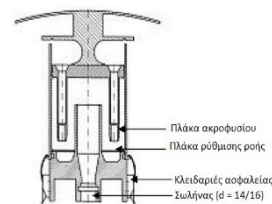
(β)

**Σχήμα 4.1:** α) SHARP Monitor, Model 5030i στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων β) SHARP Monitor (αναδιαμόρφωση από Thermo Scientific, 2018b).

#### Αρχή λειτουργίας του οργάνου

Το SHARP Monitor βασίζεται στη ραδιομετρική αρχή εξασθένισης της ακτινοβολίας βήτα και στην αρχή σκέδασης φωτός του αερολύματος (νεφελομετρία) για την επίτευξη ακριβούς μετρήσεων της περιβάλλουσας συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (Thermo Scientific, 2018).

Αρχικά, το δείγμα αέρα εισέρχεται στην κεφαλή εισόδου (Σχήμα 4.2), τύπου κυκλώνα, όπου ανάλογα την πλάκα ακροφυσίων που έχει τοποθετηθεί, αφήνει τη διέλευση των ανάλογων σωματιδίων (ΑΣ<sub>10</sub>, ΑΣ<sub>2.5</sub> και ΑΣ<sub>1.0</sub>). Τα εισερχόμενα αιωρούμενα σωματίδια, για τον περιορισμό της πιθανής απόκλισης από την ύπαρξη υγρασίας και των απωλειών των πτητικών ενώσεων, περνούν από ένα Σύστημα Δυναμικής Θέρμανσης, εξασφαλίζοντας σταθερή θερμοκρασία ή υγρασία κάτω από συγκεκριμένη τιμή. Η θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος μετρούνται μέσω μιας ασπίδας ακτινοβολίας φυσικής αναρρόφησης και ενός αισθητήρα.



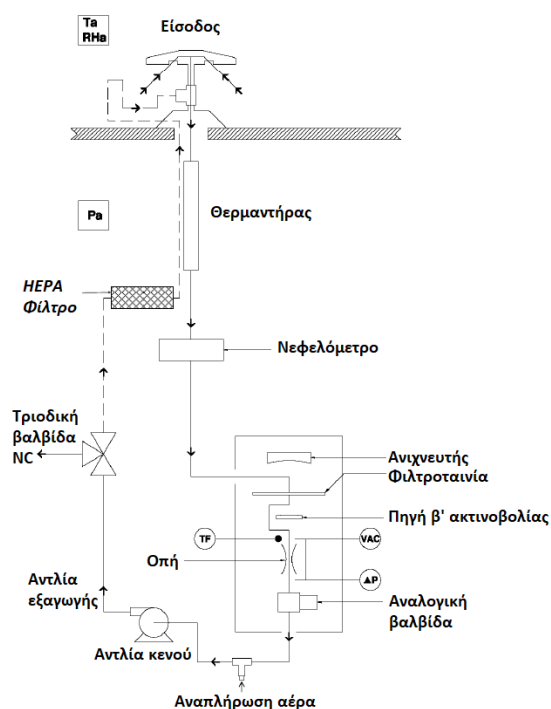
**Σχήμα 4.2:** Κεφαλή εισόδου ΑΣ<sub>10</sub> (αναδιαμορφωμένη από Thermo Scientific, 2018a).

Ακολουθώντας, το εισαγόμενο δείγμα περνάει από οπτικές ίνες, στις οποίες διαχέεται δέσμη φωτός 880 nm, από έναν ανιχνευτή, για τον υπολογισμό της σκέδασης φωτός του δείγματος (αρχή νεφελομετρίας). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογισμό αυτό, θεωρούνται ότι είναι γραμμικά ως προς τη συγκέντρωση του αερολύματος. Αναφέρεται ότι στο νεφελόμετρο περιέχονται ανιχνευτής αναφοράς ελέγχου φωτισμού, υβριδικός φωτοανιχνευτής πυριτίου, αισθητήρα θερμότητας και υγρασίας και μια προγραμματισμένη πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB). Το νεφελόμετρο ενώνεται με τον θάλαμο συλλογής μέσω ενός σωλήνα.

Στο θάλαμο συλλογής, το δείγμα συλλέγεται σε φιλτροταινία από γυάλινες ίνες (διαμέτρου 40mm και μήκους 17m), τοποθετημένη ανάμεσα στον ανιχνευτή και στην πηγή β ακτινοβολίας (Σχήμα 4.3), μέχρι ένα σημείο κορεσμού. Η πηγή β ακτινοβολίας, 14C, εκπέμπει ακτινοβολία που διαπερνάει τη φιλτροταινία και φτάνει στον ανιχνευτή. Τα συλλεγόμενα σωματίδια, που βρίσκονται στη φιλτροταινία, μειώνουν την ένταση της ακτινοβολίας που διέρχεται και ο ανιχνευτής υπολογίζει τη διαφορά της ακτινοβολίας που προκύπτει από τη συλλογή τους στη φιλτροταινία και πριν από αυτήν. Έτσι, υπολογίζεται συνεχώς η μάζα των σωματιδίων, η οποία είναι ταυτόσημη με τη διαφορά που αναφέρθηκε (Λαζαρίδης, 2010). Παράλληλα, ανιχνεύονται οι εκπομπές της άλφα ακτινοβολίας ώστε να μετρηθούν τα θυγατρικά νουκλεΐδια της διάσπασης του ραδονίου (Rn) που δημιουργούν μια επιπλέον εκπομπή βήτα ακτινοβολίας. Ο ανιχνευτής αντιλαμβάνεται την επιπρόσθετη αυτή βήτα ακτινοβολία και φέρει ως αποτέλεσμα την ανακριβή αύξηση της μέτρησης μάζας. Επομένως, τα θυγατρικά νουκλεΐδια αφαιρούνται από τον υπολογισμό, για την επίτευξη ακρίβειας των μετρήσεων μάζας. Από μια βαθμονομημένη οπή μετράται ο όγκος του δείγματος και με την προηγουμένως μέτρηση της μάζας, υπολογίζεται άμεσα η συγκέντρωση του αερολύματος, σύμφωνα από την εξίσωση 4.1:

$$C = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

Όπου C είναι η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, m είναι η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων και V είναι ο όγκος του δείγματος.



**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα αρχής λειτουργίας του SHARP Monitor (αναδιαμόρφωση από Thermo Scientific, 2018).

Συμπληρώνεται ότι περιέχονται τρεις αισθητήρες μέτρησης πίεσης του κενού κάτω από τη φιλτροταινία, της οπής και της βαρομετρικής πίεσης.

Οι αλλαγές των φίλτρων συμβαίνουν κάθε 8 ώρες από το λογισμικό που σταματάει τη λειτουργία της αντλίας και κατεβάζει ταυτόχρονα τη θέση της πλάκας του θαλάμου κενού. Ακολουθως, όταν η φιλτροταινία φτάσει σε ένα σταθερό μήκος, επανυψώνει την πλάκα του θαλάμου κενού και επαναλειτουργεί η αντλία, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ο μηδενισμός της λήψης δείγματος και η εκκίνηση ενός νέου κύκλου μετρήσεων. Κατά την αυτόματη αλλαγή τους, αέρας από το HEPA φίλτρο κατευθύνεται προς το νεφελόμετρο για τον μηδενισμό του.

Η συγκέντρωση του SHARP Monitor προκύπτει από τις συγκεντρώσεις του νεφελόμετρου και της αρχής εξασθένησης βήτα ακτινοβολίας με μια χρονική σταθερά συνάρτησης των συγκεντρώσεων σε πραγματικό χρόνο. Παρουσιάζεται ότι η συγκέντρωση του SHARP αποτελείται από τον πολλαπλασιασμό του νεφελόμετρου με το δυναμικό συντελεστή διόρθωσης, προερχόμενο από τις δυναμικές συγκεντρώσεις του νεφελόμετρου και της εξασθένησης βήτα ακτινοβολίας και ισχύει η σχέση 4.2 (Sun κ. ά., 2020):

$$\text{SHARP} = N_{\text{ave}} \times \frac{B}{N} \quad (4.2)$$

όπου SHARP : είναι η συγκέντρωση του οργάνου SHARP Monitor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$N_{\text{ave}}$  : είναι ο τρέχων μέσος όρος ενός λεπτού του νεφελομετρητή ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

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

$N$  : είναι η δυναμικά φιλτραρισμένη συγκέντρωση νεφελομετρητή ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



## 4.2 Όργανο μέτρησης μάζας, DIGITEL Aerosol Sampler - DPA14

Το DIGITEL Low Volume Aerosol Sampler (LVS) DPA14, της εταιρίας ET enviro technology services, είναι ένα όργανο μέτρησης χαμηλού δειγματοληπτικού όγκου, 5 έως 50 L/min (ή 0,3 έως 3 m<sup>3</sup>/h), που χρησιμοποιεί ένα αυτόματο σύστημα δειγματοληψίας της σκόνης και των αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Η αξιοποίηση του οργάνου γίνεται κυρίως για την αξιολόγηση και ανάλυση της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο, EN12341:2014, για τα ΑΣ<sub>10</sub>. Διαθέτει 24 θήκες φίλτρων, όπου τα φίλτρα αλλάζουν αυτόματα στη θέση ροής σε προκαθορισμένα ρυθμισμένο χρόνο και το όργανο μπορεί να ενσωματωθεί σε συστήματα αυτόματης παρακολούθησης.

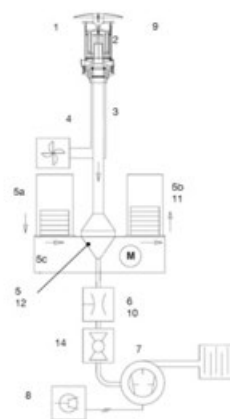
### Αρχή λειτουργίας του οργάνου

Τα αιωρούμενα σωματίδια, όπως TSP, ΑΣ<sub>10</sub>, ΑΣ<sub>2,5</sub> και ΑΣ<sub>1,0</sub>, που, αναλόγως της κεφαλής εισόδου, εισέρχονται στο όργανο μέσω ενός σωλήνα δειγματοληψίας. Για τον περιορισμό των θερμικών επιδράσεων στο σωλήνα δειγματοληψίας, υπάρχει ένας επιπλέον προστατευτικός σωλήνας με έναν εξαεριστή καθαρού φιλτραρισμένου αέρα, ο οποίος παρέχει εξαναγκασμένη ροή αέρα που ρέει με κάθετη κατεύθυνση από πάνω μέχρι κάτω του οργάνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Το ανώτερο τμήμα του θαλάμου ροής, στον οποίο υπάρχουν τα φίλτρα, λειτουργεί σαν διαχύτης, κανονικής διατομής, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη ροή αέρα στα εκτεθειμένα φίλτρα. Η μεταφερόμενη ποσότητα αέρα μετράται με ροόμετρο τύπου Venturi, καθώς υπάρχει μια οπή για τη μέτρηση και έλεγχο της ταχύτητας ροής στο σωλήνα. Ακόμα, χρησιμοποιείται και ένας ανεμιστήρας ελεγχόμενης ταχύτητας για τη διατήρηση της τιμής του σημείου ρύθμισης με την ελάχιστη κατανάλωση ρεύματος. Μετά την τοποθέτηση των καθαρών φίλτρων στις ειδικές θήκες, κατασκευασμένες από αλουμίνιο και επικαλυμμένες με πολύ ανθεκτική στη διάβρωση και λεία επιφάνεια, και στην αριστερή μεριά του οργάνου, με την αυτόματη αλλαγή και τον έλεγχο από μια ενσωματωμένη μονάδα μικροεπεξεργαστή, που προγραμματίζεται χειροκίνητα, πραγματοποιείται η δειγματοληψία σκόνης και αερολύματος. Ο μικροεπεξεργαστής συλλέγει όλα τα δεδομένα, έχοντας ως κύρια πληροφορία τους όγκους δειγματοληψίας, που υπολογίζονται βάσει του χρόνου δειγματοληψίας και του ελεγχόμενου όγκου ροής. Άλλες πληροφορίες που δίνει το όργανο είναι οι τυποποιημένοι μέσοι όροι της πίεσης, θερμοκρασίας, έντασης, της κατάστασης λειτουργίας και αποτυχίας, καθώς γίνεται συνεχή μέτρηση της πίεσης του αέρα και της περιβάλλουσας θερμοκρασίας ανάντη του ροόμετρου από τη μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου σε διάφορα σημεία του οργάνου. Σημειώνεται ότι η ύπαρξη υγρασίας ή η περίπτωση υπερφορτωμένων φίλτρων καθίσταται αδύνατη λόγω της περιορισμένης πτώσης πίεσης στον θάλαμο. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αποθηκευτούν, είτε μέσω

της οθόνης αφής σε μια μονάδα USB είτε μέσω σύνδεσης σε οποιοδήποτε δίκτυο TCP/IP, καθώς το DPA14 διαθέτει Ethernet (Enviro Technology, 2018).



(α)



- 1 Δείγμα αέρα ( $T_a, p_a$ )
- 2 Είσοδος
- 3 Συνδέσεις σωληνώσεων
- 4 Εξαερισμός καθαρού αέρα
- 5 Θήκη φίλτρου
- 5α Άδεια φίλτρα
- 5β Χρησιμοποιούμενα φίλτρα
- 5γ Αυτόματη αλλαγή
- 6 Μετρητής ροής
- 7 Αντλία
- 8 Σύστημα ελέγχου ροής
- 9 Μέτρηση  $T_a, p_a$
- 10 Μέτρηση  $T, p$
- 11 Μέτρηση θερμοκρασίας αποθήκευσης
- 12 Μέτρηση θερμοκρασίας φίλτρου
- 13 Μετατροπείς συχνότητας
- 14 Δοκλειδα μπιλλίας

(β)

**Σχήμα 4.4:** α) Φωτογραφία του DIGITEL LVS (DPA14) στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων β) Αρχή Λειτουργίας DIGITEL Sampler-DPA14.

### 4.3 Φασματόμετρο, TRACER 5i (Bruker)

Το όργανο TRACER 5i (Σχήμα 4.5), της εταιρίας Bruker, χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα από νάτριο Na μέχρι ουράνιο U και λειτουργεί με βάση τη φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (X-Ray Fluorescence, XRF). Συγκεκριμένα, πρόκειται για όργανο διασποράς ενέργειας ακτίνων X (ED-XRF, Energy Dispersive-XRF) με 50 kV-4 W ανόδιο ροδίου (Rh) για τη δημιουργία των ακτίνων και με την ικανότητα ελέγχου της τάσης (6-50 kV) και του ρεύματος (4,5-195  $\mu$ A).



**Σχήμα 4.5:** Φωτογραφία του Tracer 5i της Bruker σε ειδική βάση.

Το δείγμα τοποθετείται πάνω σε ένα παράθυρο Be του οργάνου από όπου έρχεται σε επαφή με μία δέσμη ακτίνων X. Στη συνέχεια η εκπεμπόμενη ακτινοβολία φθορισμού που προέρχεται από το δείγμα, ανιχνεύεται από έναν ανιχνευτή μετατόπισης πυριτίου (Si) 20 mm<sup>2</sup> (SDD) με ενεργειακή ανάλυση περίπου 140 eV FWHM σε Mn-K $\alpha$  (5,89 keV). Υπάρχει μια επιλογή ρύθμισης του μεγέθους του κατευθυντήρα σε 3 mm ή 8 mm, έχοντας 5 επιλογές αυτόματων φίλτρων. Οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε ατμοσφαιρικό αέρα, κενό ή σε ατμόσφαιρα ηλίου (Helium). Συνήθως, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στον αέρα με τη χρήση διαυγούς παραθύρου. Για τα πιο ελαφρά χημικά

στοιχεία, όμως, χρειάζεται αυξημένη ευαισθησία, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ατμόσφαιρας κενού (ή ηλίου)(Bruker, 2016). Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται τα διάφορα τμήματα του οργάνου.

#### Μέθοδος φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων Χ

Η ακτινοβολία αποτελείται από αόρατα κύματα ή σωματίδια ενέργειας και μπορεί να διακριθεί σε ιονίζουσα και μη ιονίζουσα. Η ιονίζουσα ακτινοβολία διαθέτει αρκετή ενέργεια για την αφαίρεση ηλεκτρονίων ( $e^-$ ) από ουδέτερα άτομα, ενώ η μη ιονίζουσα ακτινοβολία δεν έχει την απαραίτητη ενέργεια ιονισμού ενός ατόμου. Η ιονίζουσα ακτινοβολία περιλαμβάνει τα άλφα και βήτα σωματίδια, τις ακτίνες γάμμα και Χ, και τα σωματίδια νετρονίων, με τη μη ιονίζουσα να περιλαμβάνει την υπέρυθρη, ορατή και τμήμα της υπεριώδους ακτινοβολίας (φως), τα ραδιοκύματα και μικροκύματα, τα στατικά και χαμηλής συχνότητας (50 Hz) ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.



**Σχήμα 4.6:** Τμήματα του Tracer 5i (αναδιαμόρφωση από Bruker, 2016).

Οι ακτίνες Χ είναι αόρατα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τα σχετικά μήκη κύματος, 10 nm με 10 pm, ή φωτόνια καθαρής ενέργειας που δεν έχουν μάζα ή ηλεκτρικό φορτίο, οι οποίες παράγονται και εκπέμπονται από τις αλλαγές ενέργειας των ηλεκτρονίων των ατόμων (Brouwer, 2003). Λόγω της έλλειψης φορτίου ή μάζας, οι ακτίνες Χ είναι εξαιρετικά διεισδυτικές, έτσι μπορούν να διανύσουν μακρινές αποστάσεις και η προστασία από αυτές γίνεται με τη χρήση πυκνών υλικών, όπως σκυρόδεμα, μόλυβδος ή χάλυβας. Το μήκος κύματος των ακτίνων Χ είναι αντιστρόφως ανάλογο της ενέργειάς του, σύμφωνα με τη σχέση 4.3:

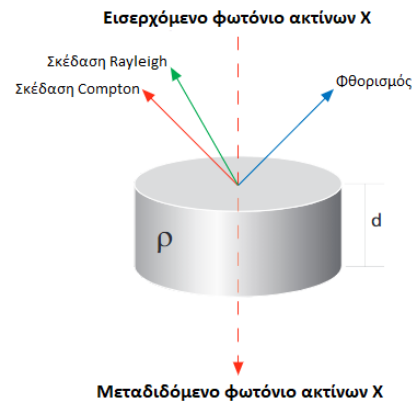
$$E \cdot \lambda = hc \quad (4.3)$$

όπου  $E$  : ενέργεια σε keV,

$\lambda$  : το μήκος κύματος σε nm, και

$hc$  : το γινόμενο της σταθεράς του Planck και της ταχύτητας του φωτός και είναι ίσο με  $1,23985 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}$ .

Η φασματομετρία ακτίνων Χ βασίζεται, όπως όλες οι τεχνικές οπτικής φασματομετρίας, στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας Χ με την ύλη που παρατηρείται ως φαινόμενο εκπομπής, αναρρόφησης, φθορισμού, περίθλασης και σκέδασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι τρεις κύριες αλληλεπιδράσεις των ακτίνων Χ με την ύλη είναι ο φθορισμός, η σκέδαση Compton και η σκέδαση Rayleigh (Σχήμα 4.7). Εάν μια δέσμη φωτονίων ακτίνων Χ κατευθύνεται προς μια πλάκα υλικού, ένα κλάσμα θα μεταδοθεί, ένα κλάσμα απορροφάται (παράγοντας ακτινοβολία φθορισμού) και ένα κλάσμα διασκορπίζεται προς τα πίσω. Η σκέδαση Compton scatter συμβαίνει με απώλεια ενέργειας, ενώ η Rayleigh χωρίς. Ο φθορισμός και η διασπορά εξαρτώνται από το πάχος (d), την πυκνότητα (ρ), τη σύνθεση, φύση του υλικού και από την ενέργεια των ακτίνων Χ.



**Σχήμα 4.7:** Αλληλεπιδράσεις ακτίνων Χ με την ύλη (αναδιαμόρφωση από Brouwer, 2003).

Ο φθορισμός των ακτίνων Χ (X-ray fluorescence, XRF) είναι μια αναλυτική και μη καταστροφική μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για τη στοιχειακή και χημική ανάλυση υλικών (στερεών, υγρών, σκόνη κ.ά.), αλλά και για τον προσδιορισμό του πάχους, της σύνθεσης των στρωμάτων και των επικαλύψεων. Η ανάλυση επέρχεται από την ικανότητα κάθε στοιχείου του δείγματος (υλικού), μετά τη διέγερσή του από ακτίνες Χ υψηλής ενέργειας, να εκπέμπει ένα σύνολο χαρακτηριστικών "δευτερογενών" (ή φθορίζουσων) ακτίνων Χ, οι οποίες είναι μοναδικές για το κάθε στοιχείο («δακτυλικό αποτύπωμα») και έτσι αναγνωρίζεται (ThermoFisher Scientific, 2020). Σημειώνεται ότι η φασματομετρία ακτίνων Χ βασίζεται στον νόμο του Moseley, ο οποίος περιγράφεται από τη σχέση 4.4 (Πετροπούλου Όξενκιουν, 2006):

$$\frac{1}{\lambda} = k(Z - \sigma)^2 \quad (4.4)$$

όπου  $\lambda$  : μήκος κύματος,

$k$  : σταθερά που εξαρτάται από την κάθε σειρά φασματικών γραμμών,

$Z$  : ατομικός αριθμός ενός στοιχείου, και

$\sigma$  : σταθερά προάσπισης ή θωράκισης, που εκφράζει το άθροισμα των συμμετοχών όλων των ηλεκτρονίων στην προάσπιση ενός δεδομένου ηλεκτρονίου και υπολογίζεται με εφαρμογή των κανόνων του Slater.

Η φασματομετρία των ακτίνων Χ (XRF) βασίζεται στην παραγωγή ακτίνων Χ στις τροχιές των ηλεκτρονίων των ατόμων που βρίσκονται σε ένα δείγμα. Αναφέρεται ότι τα ηλεκτρόνια είναι διατεταγμένα σε ομόκεντρες στοιβάδες σε αυξανόμενες αποστάσεις από τον πυρήνα, οι οποίες ονομάζονται K, L, M, N, κ.λπ., με τη στοιβάδα K ως την πιο κοντινή στον πυρήνα. Τα άτομα σε

ισορροπημένη κατάσταση (μη διεγερμένα) έχουν έναν καθορισμένο αριθμό ηλεκτρονίων, ο οποίος είναι 2, 8, 18, 32 ηλεκτρόνια για την κάθε αντίστοιχη στοιβάδα K, L, M και N. Όταν, λοιπόν, ένα στερεό ή υγρό δείγμα ακτινοβολείται με ακτίνες X υψηλής ενέργειας από μια ελεγχόμενη λυχνία ακτίνων X, το άτομο του δείγματος που θα ακτινοβοληθεί, αν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια δέσμησης της στοιβάδας K ή L, θα χάσει ένα ηλεκτρόνιο από τις εσωτερικές τροχιακές στοιβάδες του. Για την επαναφορά της σταθερότητας, το άτομο θα αναπληρώσει το κενό που δημιουργήθηκε, από την απομάκρυνση του ηλεκτρονίου, με ένα άλλο ηλεκτρόνιο που ανήκει σε στοιβάδα υψηλότερης ενέργειας. Έτσι, το ηλεκτρόνιο πέφτει σε κατώτερη ενεργειακή κατάσταση και απελευθερώνει μια φθορίζουσα ακτίνα X, η οποία αναλύεται με έναν ανιχνευτή ακτίνων X. Με τη χρήση ενός κατάλληλου λογισμικού ερμηνεύεται η ανιχνευόμενη ποσότητα των ακτίνων X και δημιουργούνται γραφικές παραστάσεις των κορυφών έντασης ακτίνων X συναρτήσει των ενεργειακών κορυφών. Εφόσον η μετρούμενη ποσότητα ακτίνων X είναι ανάλογη με τον αριθμό των ατόμων συγκεκριμένου στοιχείου ή στοιχείων του δείγματος, προσδιορίζονται το στοιχείο ή στοιχεία, η ένταση κορυφής και τελικά η συγκέντρωση ή συγκεντρώσεις τους. Η μέτρηση της ενέργειας αυτής της ακτίνας X αποτελεί βάση της ανάλυσης XRF. Η συγκέντρωση των στοιχείων στο δείγμα είναι ευθέως ανάλογη με την ένταση των ακτίνων X (μέγεθος των κορυφών του φάσματος), με βάση τη σχέση 4.5 (Bruker, 2010):

$$I = \frac{N}{t} = \frac{k \cdot I_0 \cdot T \cdot C}{H} \quad (4.5)$$

όπου I : ένταση ακτίνων X (counts/s),

N : καθαρός αριθμός (μετά από αφαιρέσεις φόντου και επικάλυψης),

t : χρόνος μέτρησης (s),

k : γεωμετρική σταθερά (γεωμετρία δείγματος αισθητήρα),

I<sub>0</sub> : ισχύς της πηγής (φωτόνια ανά s),

T : διατομή διέγερσης για το εν λόγω στοιχείο,

C : κλάσμα βάρους του στοιχείου και

H : συντελεστής απορρόφησης μήτρας.

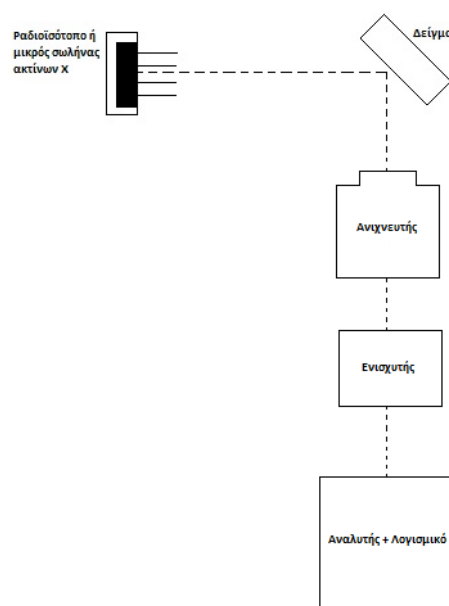
Τα φασματόμετρα ακτίνων Χ μπορούν να χωριστούν σε όργανα διασποράς ενέργειας (ED-XRF, Energy Dispersive-XRF) και όργανα διασποράς μήκους κύματος (WD-XRF, Wavelength Dispersive-XRF), με τα αντίστοιχα στοιχειακά τους εύρη να κυμαίνονται από νάτριο έως ουράνιο (Na έως U) και βηρύλλιο έως ουράνιο (Be έως U).

Τα όργανα EDX (Σχήμα 4.8) αποτελούνται από μια πηγή ακτίνων Χ, η οποία μπορεί να είναι είτε μια λυχνία ακτίνων Χ ή μια ραδιενεργή ουσία, το δείγμα, έναν ανιχνευτή και από διάφορα ηλεκτρονικά τμήματα για την επεξεργασία, όπως κατάλληλα λογισμικά που εμφανίζουν τις φασματικές γραμμές ακτίνων Χ των στοιχείων για την ανίχνευση και προσδιορισμό τους (Tsuji, κ. ά., 2004). Η απουσία κρυστάλλου και ευθυγραμμιστή στα όργανα EDX

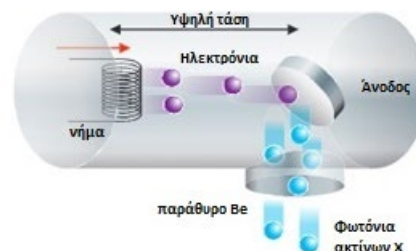
φέρει ως αποτέλεσμα η απόσταση μεταξύ του δείγματος και ανιχνευτή να είναι μικρή και έτσι η ενέργεια που φθάνει στον ανιχνευτή να είναι εκατονταπλάσια. Επομένως, λόγω αυτής της μεγάλης ενέργειας, χρησιμοποιούνται χαμηλής ισχύος πηγές παραγωγής ακτίνων Χ, όπως ραδιενεργά ισότοπα. Επισημαίνεται ότι τα περισσότερα σύγχρονα όργανα χρησιμοποιούν για την ανίχνευση χημικών στοιχείων λυχνία ροδίου (Rh). Ο ανιχνευτής χρησιμοποιείται για την απευθείας επεξεργασία ολόκληρου του εκπεμπόμενου φάσματος ακτίνων Χ και για τη μέτρηση και διαχωρισμό των φωτονίων ακτίνων Χ διαφορετικών ενεργειών σε διαφορετικά κανάλια (Πετροπούλου Όξενκιουν, 2006). Από το λογισμικό, η ταυτόχρονη μέτρηση του φάσματος και του προφίλ κορυφής προσδίδει, σύμφωνα με τη σχέση 4.4, τη συγκέντρωση ενός στοιχείου, αφού από το εμβαδόν μιας ενεργειακής κορυφής δίνεται η ένταση των ακτίνων Χ (Brouwer, 2003).

Σε μία βασική λυχνία ακτίνων Χ (Σχήμα 4.9) περιέχονται δύο μεταλλικά υλικά υψηλού ατομικού αριθμού, ένα νήμα βολφραμίου (κάθοδος) και ένας μεταλλικός στόχος (άνοδος), σε ένα σωλήνα κενού. Από την κάθοδο εκπέμπονται ηλεκτρόνια μέσω της θερμιονικής εκπομπής, η οποία προκύπτει από τη θέρμανση του νήματος με ηλεκτρικό ρεύμα. Στη συνέχεια, με την ταυτόχρονη εφαρμογή υψηλής τάσης (20

με 100 kV) σε όλο το νήμα και τον στόχο, τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια κατευθύνονται ταχύτατα προς την άνοδο. Η επαφή των ηλεκτρονίων με την άνοδο προκαλεί επιβράδυνση της πορείας τους, καθώς τα ηλεκτρόνια ελκύονται από τον θετικό πυρήνα των ατόμων που βρίσκονται στον μεταλλικό στόχο.



**Σχήμα 4.8:** Διάγραμμα ροής φορητού οργάνου ανάλυσης ED-XRF (αναδιαμόρφωση από Tsuji, κ. ά., 2004).



**Σχήμα 4.9:** Λυχνία XRF (αναδιαμορφωμένη από Brouwer, 2003).

Έτσι, τα ηλεκτρόνια χάνουν την κινητική τους ενέργεια και ταυτόχρονα αλλάζουν την κατεύθυνσή τους. Η ενέργεια που χάνεται εκπέμπεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και, ικανοποιώντας την αρχή διατήρησης ενέργειας, μετατρέπεται σε φωτόνια υψηλής ενέργειας, δηλαδή σε ακτίνες Χ. Τελικά, οι ακτίνες Χ που εκπέμπονται, εξέρχονται από ένα λεπτό παράθυρο Be (Brouwer, 2003).

Η διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως, όπου ένα φορτισμένο σωματίδιο (το ηλεκτρόνιο), που κινείται με μεγάλη ταχύτητα, επιβραδύνεται λόγω απωθητικών ή ελκτικών δυνάμεων από ένα άλλο φορτισμένο σωματίδιο (ο πυρήνας του ατόμου του μεταλλικού στόχου), το οποίο χάνει την κινητική του ενέργεια και παράγεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τη διαφορά της ενέργειας, ονομάζεται ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung) (Μισαηλίδης και Νόλη, 2020). Η ακτινοβολία πέδησης στη λυχνία και η επιπλέον εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας, λόγω του ιονισμού των ατόμων της ανόδου, παράγουν τα φωτόνια ακτίνων Χ. Η παρακάτω σχέση 4.6 δείχνει τον λόγο απώλειας ενέργειας με ακτινοβολία πέδησης προς την απώλεια ενέργειας με ιονισμό για τα ηλεκτρόνια (Μισαηλίδης και Νόλη, 2020).

$$\frac{\Delta E_{\text{Bremsstrahlung}}}{\Delta E_{\text{ιονισμό}}} = \frac{E_e Z_{\text{απορροφητή}}}{800} \quad (4.6)$$

όπου  $\Delta E_{\text{Bremsstrahlung}}$  : ρυθμός απώλειας ενέργειας με ακτινοβολία πέδησης

$\Delta E_{\text{ιονισμό}}$  : ρυθμός απώλειας ενέργειας με ιονισμό,

Z : ατομικός αριθμός του υλικού, και

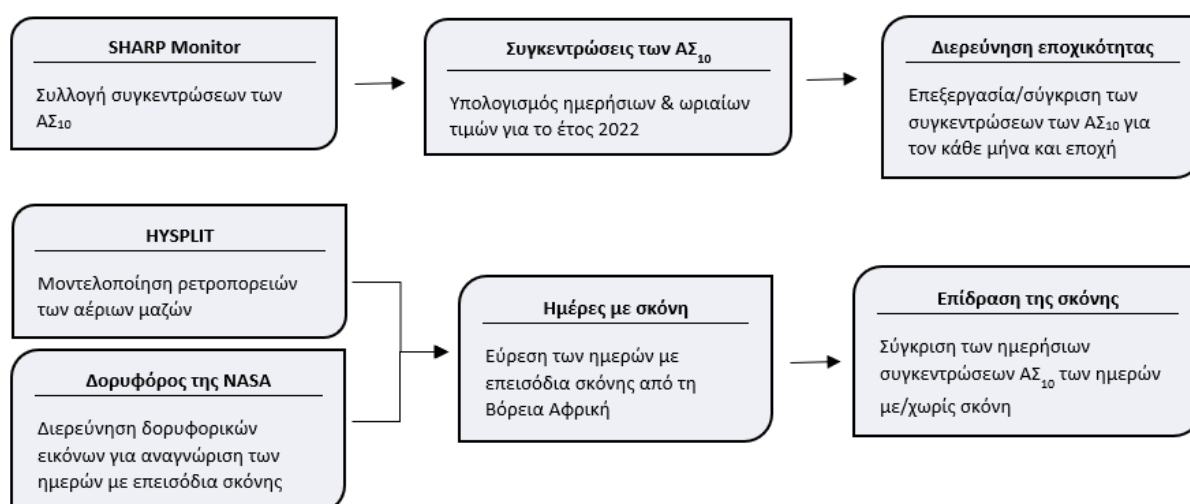
$E_e$  : ενέργεια του ηλεκτρονίου

Αναφέρεται ότι όσο μικρότερη είναι η απόσταση των ηλεκτρονίων από τον πυρήνα, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια κινητικής ενέργειας και επακολούθως, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενέργεια που μετατρέπεται σε φωτόνια υψηλής ενέργειας, δηλαδή ακτίνες Χ.

## Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διαδικασία - Μεθοδολογία

### 5.1 Μεθοδολογία

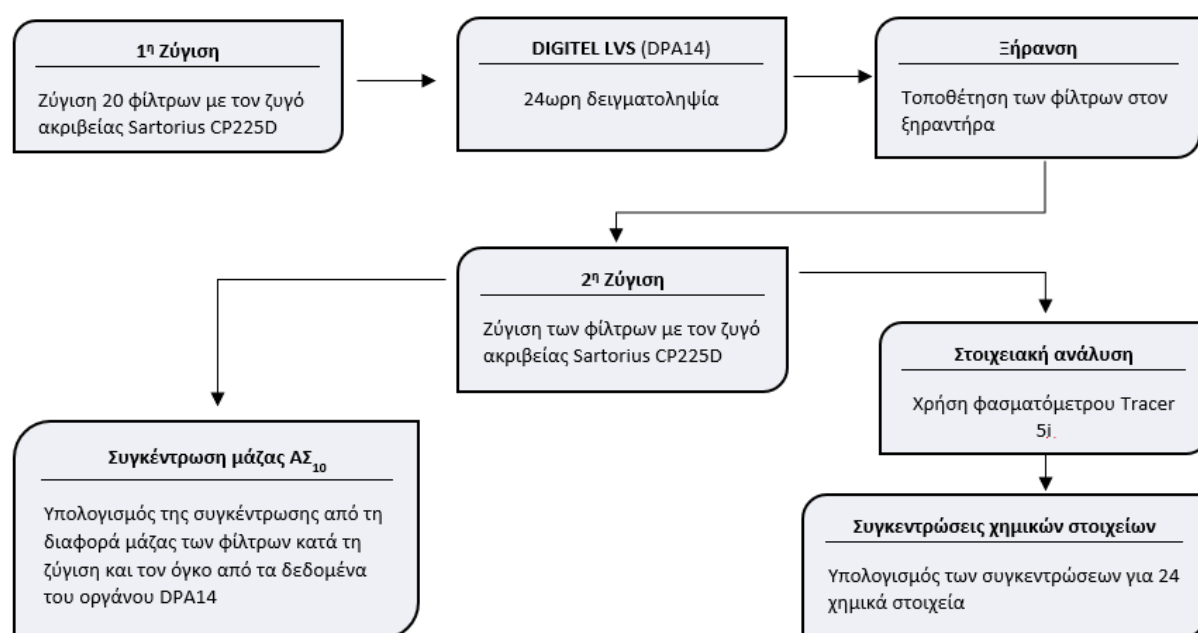
Στην παρούσα διπλωματική εργασία μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  με το όργανο SHARP Monitor (Thermo Scientific, 2018) στον σταθμό του Ακρωτηρίου Χανίων. Το SHARP Monitor (Σχήμα 4.1.β) μετρούσε κάθε 15 λεπτά τη συγκέντρωση της μάζας των  $AS_{10}$  για το χρονικό διάστημα από 01/01/2022 έως και 31/12/2022, δηλαδή για ολόκληρο το έτος 2022. Ο υπολογισμός των ημερήσιων και ωριαίων συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  βοήθησε στη μελέτη της εποχικότητας των  $AS_{10}$  και στην εύρεση των ημερών που υπήρχε υπέρβαση των νομοθετικών ορίων της Ε.Ε. και του ΠΟΥ. Συγχρόνως, για την εύρεση της προέλευσης των αέριων μαζών στον σταθμό, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HYSPLIT (Stein κ. ά., 2015) και δορυφορικές εικόνες από τη NASA (<https://zoom.earth/>). Για την εύρεση των ημερών με σκόνη από την έρημο Σαχάρα, οι ημέρες, όπου στο HYSPLIT οι αέριες μάζες είχαν νοτιοδυτική ή νότια κατεύθυνση και περνούσαν από τη Βόρεια Αφρική πριν προσέλθουν στον σταθμό, διερευνήθηκαν περαιτέρω μέσω των δορυφορικών εικόνων της NASA. Με τις δορυφορικές εικόνες επιβεβαιώθηκαν οι ημέρες στις οποίες υπήρχαν επεισόδια μεταφοράς σκόνης στον σταθμό Ακρωτηρίου. Επιπλέον, συγκρίθηκαν οι ημέρες με σκόνη με τις ημέρες που υπερβλήθηκαν τα νομοθετικά όρια για την κατανόηση της συσχέτισης τους για το έτος 2022. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 5.1) αναφέρεται επιγραμματικά η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 5.1: Μεθοδολογία εύρεσης εποχικότητας και προέλευσης των  $AS_{10}$ .



Ταυτόχρονα με την παραπάνω μεθοδολογία, για την εύρεση της ακριβούς προέλευσης των ΑΣ<sub>10</sub>, πραγματοποιήθηκε στοιχειακή ανάλυση των ΑΣ<sub>10</sub> και με τη βοήθεια των μετεωρολογικών δεδομένων εντοπίστηκαν οι πηγές προέλευσής τους. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία των ΑΣ<sub>10</sub> σε φίλτρα με το όργανο DPA14 (Enviro Technology, 2018). Η δειγματοληψία ΑΣ<sub>10</sub> πραγματοποιήθηκε στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων για 20 ημέρες και συγκεκριμένα από 05/05/2022 έως και 24/05/2022. Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δειγματοληψία ήταν τα PTFE της εταιρίας Pall, μεγέθους πόρων 2 μm και διαμέτρου 47 mm και η αυτόματη αλλαγή τους συνέβαινε κάθε 24 ώρες. Επομένως, για δειγματοληψία 20 ημερών χρησιμοποιήθηκαν 20 φίλτρα. Η στοιχειακή ανάλυση αυτών των φίλτρων έγινε με το φασματόμετρο Tracer 5i (Bruker, 2016) και το λογισμικό Artax, για την εύρεση των συγκεντρώσεων των 24 χημικών στοιχείων (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr και Pb) κάθε φίλτρου. Παρακάτω περιλαμβάνεται το διάγραμμα ροής (Σχήμα 5.2) που ακολουθήθηκε για την εύρεση των συγκεντρώσεων των ΑΣ<sub>10</sub> (σταθμική ανάλυση) και των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων (στοιχειακή ανάλυση). Συμπληρώνεται ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα συνέβαλαν στη δημιουργία ροδογραμμάτων ανέμων για την κάθε ημέρα της δειγματοληψίας, ώστε να βρεθεί η προέλευση των αέριων μαζών πριν φτάσουν στον σταθμό.



**Σχήμα 5.2:** Μεθοδολογία εύρεσης συγκεντρώσεων των ΑΣ<sub>10</sub> και των χημικών στοιχείων που απαρτίζονται.

### Σταθμική ανάλυση

Η εφαρμογή της σταθμικής μεθόδου πραγματοποιήθηκε για την εύρεση των συγκεντρώσεων των ΑΣ<sub>10</sub> που εναποτέθηκαν στα φίλτρα από το όργανο DPA14. Η συγκέντρωση υπολογίστηκε από τη

διαφορά μάζας των φίλτρων πριν και μετά τη δειγματοληψία σκόνης και αερολύματος σε αυτά και από τα δεδομένα όγκου δειγματοληψίας του DPA14 (εξίσωση 4.1).

Αναφέρεται ότι η μάζα των φίλτρων βρέθηκε με τον ζυγό Sartorius CP225D (Σχήμα 5.3) ακρίβειας  $210\text{g} \times 0.01\text{mg}$ , ο οποίος βρίσκεται σε ένα σταθερό έπιπλο. Σε κάθε ζύγιση φίλτρου γινόταν τουλάχιστον 2 φορές μέτρηση της μάζας, μέχρι οι τελευταίες 2 μετρήσεις να έχουν διαφορά ενός ψηφίου. Ο μέσος όρος των τελευταίων αυτών μετρήσεων δίνει τη μέτρηση μάζας του φίλτρου. Η ύπαρξη στατικού ηλεκτρισμού στα φίλτρα εξουδετερώθηκε με την τοποθέτηση του φίλτρου σε ένα έλασμα πριν τη ζύγισή του. Τα φίλτρα τοποθετούνταν σε τρυβλία πέτρι και μεταχειρίζονταν πάντα με ειδικές λαβίδες. Η καταγραφή της περιβάλλουσας θερμοκρασίας ( $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$ ) και υγρασίας ( $45\text{-}60\%$ ) του εργαστηρίου του κτιρίου K1 συνέβαινε κάθε φορά



**Σχήμα 5.3:** Ζυγός ακριβείας Sartorius με φίλτρο προερχόμενο από δειγματοληψία με το DPA14

πριν τη ζύγιση των φίλτρων. Τα φίλτρα ζυγίστηκαν πριν και μετά τη μεταφορά των φίλτρων στον σταθμό και τη δειγματοληψία σκόνης και αερολύματος από το DPA14. Αμέσως μετά τη δειγματοληψία, τα φίλτρα μεταφέρθηκαν προσεκτικά πίσω στο εργαστήριο και τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα κενού με πυρίτιο (silica gel) για 24 ώρες, πριν την τελική ζύγιση τους με την παράλληλη καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών.

#### Στοιχειακή ανάλυση

Το Tracer 5i βρίσκεται στο εργαστήριο αιωρούμενων σωματιδίων τοποθετημένο σε μια ειδική σταθερή βάση (Σχήμα 4.5) και αξιοποιήθηκε για τον πιο ακριβή προσδιορισμό των πηγών προέλευσης των δειγμάτων  $\text{AS}_{10}$ , μετά τη δειγματοληψία σκόνης και αερολύματος στα φίλτρα από το DPA14. Στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν οι 4 επιλογές φίλτρων (Πίνακας 5.1) και επιλέχθηκε κατευθυντήρας διαμέτρου 8 mm, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της ετερογενούς εναπόθεσης στο φίλτρο και να επέλθει ανάλυση της μέγιστης δυνατής περιοχής των δειγμάτων (Chatoutsidou κ. ά., 2022).

**Πίνακας 5.1:** Συνθήκες λειτουργίας.

	Χημικό στοιχείο	Τάση/ Ρεύμα	Φίλτρο	Χρόνος	Ατμόσφαιρα
(1)	Na, Mg	15kV/140μΑ	-	180 s	κενό
(2)	Al - S	30kV/110μΑ	-	180 s	αέρας
(3)	Cl - Ti	30kV/110μΑ	Al	180 s	αέρας
(4)	V - Zn	30kV/110μΑ	TiAl	180 s	αέρας
(5)	Ga - Pb	40kV/90μΑ	Cu75	180 s	αέρας

Η ανάλυση των χημικών στοιχείων των φίλτρων έγινε με τη σύνδεση του οργάνου σε έναν φορητό υπολογιστή, ο οποίος είχε εγκατεστημένο το λογισμικό Artax για την εύρεση των φασμάτων των χημικών στοιχείων και τελικά των συγκεντρώσεών τους. Το Σχήμα 5.4 απεικονίζει τον πάγκο εργασίας του εργαστηρίου για την ανάλυση των χημικών στοιχείων των φίλτρων με κενό αέρα. Οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας που εκχωρήθηκαν στο λογισμικό Artax για την ανάλυση των χημικών στοιχείων των φίλτρων φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Επισημαίνεται ότι η δημιουργία του κενού επιτεύχθηκε με τη χρήση εξωτερικής αντλίας κενού, η οποία μέσω ενός σωλήνα συνδέεται με το όργανο. Με την παράλληλη κατάλληλη εκχώρηση συνθήκης κενού και χρησιμοποιώντας παράθυρο βηρυλλίου (Be), διαμέτρου 8  $\mu\text{m}$ , με πλέγμα για την αύξηση πίεσης αέρα, δημιουργήθηκε κενό στο εσωτερικό του θαλάμου του.



**Σχήμα 5.4:** Ανάλυση χημικών στοιχείων με κενό αέρα στο εργαστήριο.

Με την εύρεση των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων ακολούθησε η εύρεση των συντελεστών εμπλουτισμού τους, οι οποίοι βοηθούν στον εντοπισμό της πηγής προέλευσης των χημικών στοιχείων (ανθρωπογενής ή φυσική) (Lazaridis κ. ά., 2018). Συγκεκριμένα, ο συντελεστής εμπλουτισμού (Enrichment Factor, EF) είναι μια αδιάστατη παράμετρος και ορίζεται ως ο λόγος του μετρούμενου χημικού στοιχείου προς ένα επιλεγμένο χημικό στοιχείο του φλοιού της γης και ισχύει η παρακάτω εξίσωση 5.1 (Chatoutsidou κ. ά., 2021):

$$EF = \frac{\left[\frac{M_i}{M_r}\right]_{PM}}{\left[\frac{M_i}{M_r}\right]_{src}} \quad (5.1)$$

όπου  $M_i$  : η μετρούμενη συγκέντρωση ενός χημικού στοιχείου,  
 $M_r$  : η συγκέντρωση ενός επιλεγμένου χημικού στοιχείου,  
 $PM$  : το μετρούμενο δείγμα, και  
 $src$  : η επιλεγμένη πηγή (source).

Παρακάτω παραθέτονται αναλυτικά η περιοχή μελέτης του σταθμού μέτρησης ΑΣ<sub>10</sub>, το μοντέλο και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν.

## 5.2 Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης, στην οποία βρίσκεται ο σταθμός μέτρησης της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων, ανήκει στη δημοτική ενότητα Ακρωτηρίου του Καλλικρατικού Δήμου Χανίων, ο οποίος εντάσσεται στην Περιφερειακή Ενότητα Χανίων (Περιφέρειας Κρήτης), σύμφωνα με το ν.3852/2011 (Νέα Αρχιτεκτονική της Αυτοδιοίκησης και της Αποκεντρωμένης Διοίκησης - Πρόγραμμα Καλλικράτης). Συγκεκριμένα, ο σταθμός του Ακρωτηρίου Χανίων (Σχήμα 5.5.α), βρίσκεται στο Πολυτεχνείο Κρήτης και είναι ιδιοκτησία του τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες κεντροβαρικά του σταθμού, σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ87) και το Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα 1984 (WGS84) παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Αναφέρεται ότι το εργαστήριο στο οποίο έγινε η ανίχνευση των πηγών προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι το εργαστήριο ατμοσφαιρικών αιωρούμενων σωματιδίων στο κτίριο Κ1 του τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, το οποίο βρίσκεται περίπου 250 m από τον σταθμό.

**Πίνακας 5.2:** Συντεταγμένες του Μετεωρολογικού Σταθμού.

ΕΓΣΑ87	WGS84
X: 537572.933	φ: 35°31'58.26"B
Y: 3907861.585	λ: 24° 4'14.98"A

Η έκταση της Πολυτεχνειούπολης (2,9 km<sup>2</sup>) και της γύρω περιοχής του σταθμού, φαίνεται να περιβάλλεται από φρύγανα (μικρά, θαμνώδης φυτά) και να καλύπτεται από άγονο έδαφος, με βράχια και αραιή βλάστηση μικρότερων ειδών. Το έδαφος και η φυτοκάλυψη ενδέχεται να είναι αποτελέσματα διάβρωσης και ένας συνδυασμός πυρκαγιών και υπερβόσκησης (Tsiourlis, κ. ά., 2001). Ο νομός Χανίων έχει μεσογειακό ξηρό κλίμα με θερμή και ηλιόλουστη θερινή περίοδο και ήπια, με συχνό υετό, χειμερινή περίοδο (Meteoblue, 2014; Nefros κ. ά., 2023). Η είσοδος στο Πολυτεχνείο Κρήτης γίνεται μέσω του κεντρικού δρόμου 'Λεωφόρου Ελευθέριου Βενιζέλου' της περιοχής, από τον οποίο διέρχονται καθημερινά πλήθος οχημάτων, και η κοντινότερη απόστασή του από τον σταθμό είναι τα 490 m. Παράλληλα, περιμετρικά του Πολυτεχνείου υπάρχει δρόμος για την ευκολότερη διέλευση στις εγκαταστάσεις και στα διάφορα κτήρια του από οχήματα και από το αστικό ΚΤΕΛ

Χανίων. Ο συγκεκριμένος δρόμος απέχει 60 m από τον σταθμό, έχοντας σε ορισμένα σημεία εξωτερικούς χώρους στάθμευσης οχημάτων, όπως και σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ακριβώς δίπλα από τον σταθμό, αλλά και στάσεις ΚΤΕΛ με την κοντινότερη μόλις 100 m μακριά, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5.β.



(α)



(β)

**Σχήμα 5.5:** α) Φωτογραφία του σταθμού Ακρωτηρίου Χανίων β) Δορυφορική φωτογραφία της θέσης του σταθμού, του εργαστηρίου, της στάθμευσης οχημάτων και των στάσεων λεωφορείων (Φωτογραφία από Google Earth).

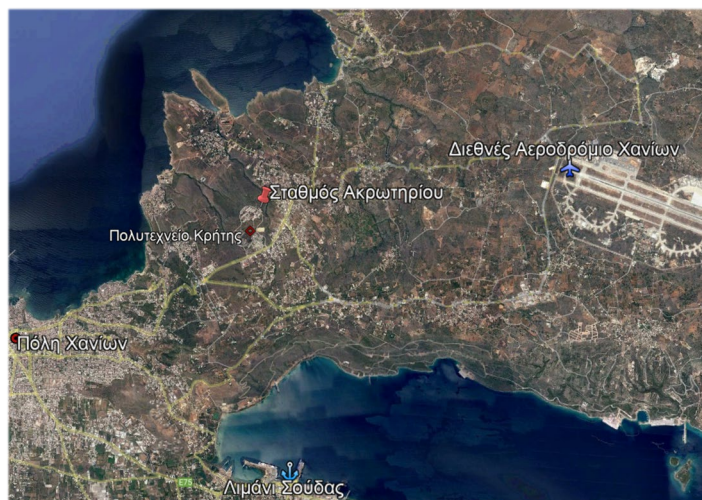
Ο σταθμός βρίσκεται περίπου 5 km βορειοανατολικά από την πόλη Χανίων. Σύμφωνα με την απογραφή του 2021 από το ΕΛΣΤΑΤ (Ελληνική Στατιστική Αρχή), ο Δήμος Χανίων έχει 110.646 κατοίκους με την πόλη των Χανίων, ως έδρα, να συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ποσοστό του δήμου έχοντας γύρω στους 60.000 κατοίκους. Επομένως, ο σταθμός είναι κοντά σε αστική περιοχή. Ταυτόχρονα, εντοπίζεται σε μόλις 400 m από τον σταθμό μια κατοικημένη περιοχή, η τοπική κοινότητα Κουνουπιδιανών, με περίπου 7000 κατοίκους. Λόγω του μικρού αριθμού κατοίκων της περιοχής αυτής, η ρύπανση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες δε θεωρείται έντονη. Στη συνέχεια, είναι δυνατό να παρατηρηθεί ότι σε απόσταση περίπου 5 km νότια από τον σταθμό εντοπίζεται το Λιμάνι της Σούδας, με τα επιβατικά, τουριστικά και εμπορικά πλοία εσωτερικού ή εξωτερικού και κρουαζιερόπλοια, όπως και σημαντικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις (Ναύσταθμος Κρήτης) για το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό και το NATO. Το διεθνές αεροδρόμιο Χανίων 'Ιωάννης Δασκαλογιάννης' και η πολεμική αεροπορία, που συμβάλλουν σημαντικά στην παραγωγή αέριων ρύπων (Amato κ. ά., 2010; Makridis και Lazaridis, 2019) ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες με την αύξηση του τουρισμού (Koranakis κ. ά., 2018), είναι περίπου 6 km βορειοανατολικά του σταθμού Ακρωτηρίου. Ακόμα, συμπληρώνεται ότι η θάλασσα απέχει περίπου 2,1 km βόρεια, 2,1 km δυτικά, 3,3 km νότια και 11,5 km ανατολικά από τον σταθμό, με το υψόμετρο του από αυτήν να ανέρχεται στα 136,5 m.

Διευκρινίζεται ότι η περιοχή που βρίσκεται ο σταθμός δεν εντάσσεται στις Περιοχές Ειδικής Προστασίας (ΠΕΠ), δηλαδή σε υγροβιότοπο, σε δασική και αναδασωτέα έκταση, σε αρχαιολογικό χώρο ή σε αναδασμό/αρδευόμενη γεωργική γη. Παράλληλα, η περιοχή μελέτης βρίσκεται εκτός ορίων περιοχών που ανήκουν στο Εθνικό Σύστημα Προστατευόμενων Περιοχών σύμφωνα με το



Νόμο της Βιοποικιλότητας (Ν. 3937/2011). Η θέση του σταθμού και η ευρύτερη περιοχή βρίσκονται στο Σχήμα 5.6.

Επισημαίνεται ότι εξαιτίας της κοντινής απόστασης του νομού Χανίων, Κρήτης με τη Βόρεια Αφρική, επηρεάζονται σημαντικά τα ΑΣ<sub>10</sub> από επεισόδια σκόνης προερχόμενα από την έρημο Σαχάρα. Επομένως, πρόκειται για περιοχή που προσβάλλεται συχνά από αιωρούμενα σωματίδια, όπως σκόνη, άμμος, τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αύξηση της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub>.



**Σχήμα 5.6:** Δορυφορικός χάρτης της Περιοχή Μελέτης (Φωτογραφία από Google Earth).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η περιοχή του σταθμού μετρήσεων του Ακρωτηρίου, εφόσον δεν πρόκειται για αστική περιοχή, αλλά έχει κοντινή τοποθεσία σε πόλη και κατοικημένη περιοχή, χαρακτηρίζεται ως προαστιακή περιοχή. Επιπλέον, η εγγύτητα στη θάλασσα δίνει τη δυνατότητα να χαρακτηριστεί ως παραθαλάσσια προαστιακή περιοχή. Πρέπει να προστεθεί ότι το Ακρωτήριο Χανίων πρόκειται για πεδινή περιοχή, καθώς, σύμφωνα με την Ε.Σ.Υ.Ε., το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας είναι εμφανώς μικρότερο των 800 m, με μικρές κλίσεις εδάφους.

### 5.3 Μοντέλο HYSPLIT

Το μοντέλο HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) από το Εργαστήριο Αέριων Πόρων (Air Resources Laboratory – ARL) του NOAA (National Oceanic και Atmospheric Administration) είναι ένα σύστημα υπολογισμού της ρетроπορείας των αέριων μαζών, καθώς και προσομοιώσεις ατμοσφαιρικής μεταφοράς, διασποράς, χημικού μετασχηματισμού και εναπόθεσης τους (Stein κ. ά., 2015; Rolph, Stein και Stunder, 2017).

Στον σταθμό Ακρωτηρίου Χανίων, το μοντέλο HYSPLIT χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της προέλευσης των μαζών αέρα. Οι ημέρες που διαπιστώθηκε ότι οι αέριες μάζες πέρασαν από την έρημο Σαχάρα της Βόρειας Αφρικής, θεωρήθηκαν ημέρες με επεισόδιο σκόνης. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο για την προσομοίωση της τρισδιάστατης τροχιάς της προέλευσης των αέριων μαζών ήταν οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού Ακρωτηρίου (35.5N, 24.1E), η επιλογή της ημερομηνίας και η «πίσω» κατεύθυνση της τροχιάς (backward). Η ώρα που επιλέχθηκε ήταν η 12:00 UTC (Coordinated Universal Time), με το συνολικό χρόνο προσομοίωσης να ήταν 120 h, δηλαδή 5 ημέρες (Chatoutsidou κ. ά., 2019; Chatoutsidou και Lazaridis, 2022).

## 5.4 Δορυφορικές εικόνες NASA

Η ιστοσελίδα της NASA (<https://zoom.earth/>) παραθέτει αντιπροσωπευτικές δορυφορικές εικόνες του πλανήτη, οι οποίες ενημερώνονται κάθε 10 λεπτά από τους γεωστατικούς δορυφόρους NOAA GOES και JMA Himawari-8. Κατά την απεικόνιση του πλανήτη, διαθέτει διάφορα μετεωρολογικά δεδομένα, όπως τις καιρικές συνθήκες, ταχύτητα του ανέμου, τη θερμοκρασία, την υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση, τροπικές καταιγίδες, τυφώνες και πυρκαγιές για κάθε μέρα του χρόνου από το 1999 και μετά. Ακόμα, παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης δορυφορικών εικόνων σε πραγματικό χρόνο με ραντάρ βροχοπτώσεων, οι οποίες ενημερώνονται κάθε 15 λεπτά από το EUMETSAT. Οι υψηλής ευκρίνειας δορυφορικές εικόνες HD (High Definition) ενημερώνονται δύο φορές την ημέρα από τους δορυφόρους Suomi-NPP, MODIS Aqua και Terra της NASA-NOAA, χρησιμοποιώντας υπηρεσίες από το GIBS, που είναι μέρος του EOSDIS. Η τοπική ώρα λήψης των εικόνων είναι περίπου για το "AM" στις 10:30 και για "PM" στις 13:30. Οι δορυφορικές εικόνες του Zoom Earth βοηθούν σημαντικά στην επιβεβαίωση των ημερών με επεισόδια σκόνης, αφού παραθέτει αντιπροσωπευτικές εικόνες των μετεωρολογικών γεγονότων της περιοχής.

## 5.5 Λογισμικό Artax

Το λογισμικό Artax είναι ένα λογισμικό φασματικής ανάλυσης και δίνει τη δυνατότητα της απευθείας απεικόνισης και ανάλυσης των χημικών στοιχείων του δείγματος που βρίσκεται στο φασματομετρικό όργανο Tracer 5i, διαθέτοντας ένα σύστημα ελέγχου του. Η ερμηνεία των δεδομένων μπορεί να περιλαμβάνει την ποιοτική ανάλυσή τους, τη διόρθωση των φασμάτων, αλλά και τον υπολογισμό των εντάσεων των φασματικών γραμμών. Το λογισμικό ελέγχει την εκκίνηση και τερματισμό λειτουργίας του οργάνου, όπως και διαθέτει την επιλογή των συνθηκών με των οποίων θα λειτουργήσει. Οι συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων προβάλλονται σε πίνακα Excel, λόγω της

συνεργασίας του λογισμικού με αυτό. Η ανάλυση των φασμάτων βασίζεται σε προχωρημένα μαθηματικά της Bayesian ανάλυσης, η οποία βασίζεται στο, ευρείας εφαρμογής, θεώρημα Bayes (Δάρας Ι. Τ. και Σύψας Θ. Π., 2010). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το Bayesian Deconvolution, το οποίο εμφανίζεται ως φάσμα μπλε χρώματος, για την προσομοίωση του κόκκινου φάσματος, που περιλαμβάνει τα εμπειρικά δεδομένα από τον ιχνηλάτη, το Tracer 5i. Με τη σύγκριση των απεικονιζόμενων κορυφών έντασης του μπλε και κόκκινου φάσματος, εντοπίζονται τα κύρια χημικά στοιχεία που υπάρχουν στο κόκκινο φάσμα. Επισημαίνεται ότι ο άξονας των τετμημένων των οργάνων EDX βαθμονομείται είτε σε αύξοντες αριθμούς διαύλων είτε σε ενέργειες keV, οπότε είναι επακόλουθο τα διαγράμματα των φασμάτων να απεικονίζονται σε counts/s προς ενέργεια (keV).

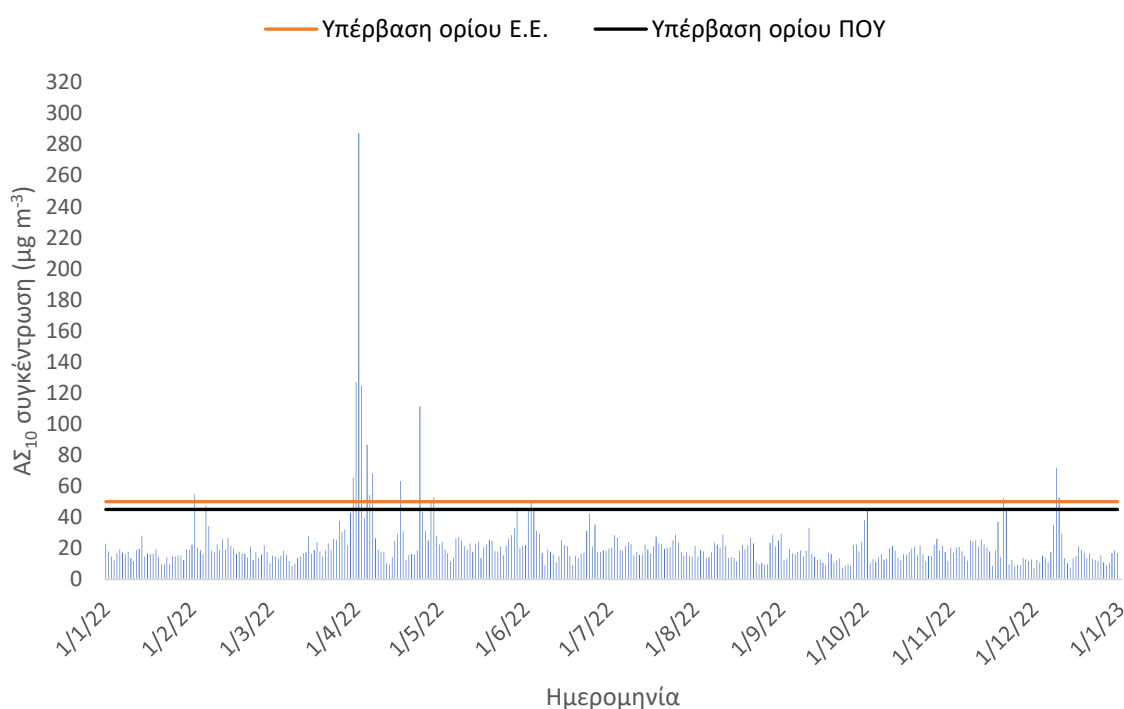
Με το λογισμικό Artax έγινε η επεξεργασία των φασμάτων που προήλθαν από την ανάλυση των φίλτρων με το Tracer 5i. Δημιουργήθηκε ένα νέο «Project» (Εργασία), όπως αναφέρεται στο λογισμικό, στο οποίο αποθηκεύτηκαν όλα τα φάσματα, κόκκινου χρώματος, για την επακόλουθη ανάλυσή τους. Με βάση τον Πίνακα 5.1, τοποθετήθηκαν στον περιοδικό πίνακα του λογισμικού τα χημικά στοιχεία κάθε συνθήκης για όλα τα φάσματα για την εκτίμησή τους με τη χρήση του «Deconvolution». Για τη «διόρθωση» των φασμάτων χρειάστηκε σε ορισμένες περιπτώσεις η προσθήκη, στον περιοδικό πίνακα, του ρόδιου (Rn), καθώς αυτό χρησιμοποιείται από το όργανο Tracer 5i και συνήθως εμφανίζεται στα φάσματα, και του κασσίτερου (Sn) λόγω της πιθανής επιμόλυνσης των φίλτρων με το συγκεκριμένο στοιχείο. Μετά την προσθήκη των χημικών στοιχείων στον περιοδικό πίνακα, αντλήθηκαν τα αποτελέσματα για την περαιτέρω επεξεργασία τους και την τελική εύρεση της συγκέντρωσης κάθε χημικού στοιχείου.



## Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία και Ανάλυση Δεδομένων

### 6.1 Χρονοσειρά ΑΣ<sub>10</sub>

Με τον υπολογισμό των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων, από τα δεδομένα του οργάνου μέτρησης SHARP Monitor στον σταθμό Ακρωτηρίου, βρέθηκε ότι η μέση συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> για όλη τη μετρούμενη χρονική περίοδο (έτος 2022) ήταν 21,9  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Στο Διάγραμμα 6.1 απεικονίζονται οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> που μετρήθηκαν στον σταθμό Ακρωτηρίου σε  $\mu\text{g m}^{-3}$  για όλο το έτος. Από τις χρονικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων παρατηρούνται απότομες ημερήσιες αυξήσεις κυρίως τον Απρίλιο. Η υψηλότερη τιμή της συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub> ανέρχεται περίπου στα 287,5  $\mu\text{g m}^{-3}$ , τιμή σχεδόν εξαπλάσια του ετησίου νομοθετικού ορίου της Ε.Ε., και παρατηρήθηκε στις 3 Απριλίου του 2022. Γενικότερα, οι ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> του έτους 2022 κυμαίνονται από 7,3 έως 287,5  $\mu\text{g m}^{-3}$ .



**Διάγραμμα 6.1:** Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6.1, φαίνεται ότι η μέση ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> γενικότερα είναι μικρότερη των νομοθετικών ορίων που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση στην Οδηγία 2008/50/EC και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) για ποιοτικό και καθαρό ατμοσφαιρικό αέρα στην Ευρώπη, του παραρτήματος 11. Όμως, παρατηρείται σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τον Απρίλιο, σε

σημείο που ξεπερνούν το ημερήσιο όριο της Ε.Ε. και του ΠΟΥ. Στον Πίνακα 6.1 παραθέτονται οι αριθμοί των ημερών, όπως και οι ημερομηνίες, του κάθε μήνα που ξεπεράστηκαν τα ημερήσια νομοθετικά όρια για τα ΑΣ<sub>10</sub>.

**Πίνακας 6.1:** Υπερβάσεις των ημερήσιων νομοθετικών ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) για τη συγκέντρωση ΑΣ<sub>10</sub> στον σταθμό Ακρωτηρίου το έτος 2022.

<i>Μήνας</i>	<i>Ημέρες όπου ΑΣ<sub>10</sub> &gt; 50 μg m<sup>-3</sup> (Ε.Ε.)</i>	<i>Ημερομηνίες υπέρβασης (Ε.Ε.)</i>	<i>Ημέρες όπου ΑΣ<sub>10</sub> &gt; 45 μg m<sup>-3</sup> (ΠΟΥ)</i>	<i>Ημερομηνίες υπέρβασης (ΠΟΥ)</i>
Ιανουάριος	0	-	0	-
Φεβρουάριος	1	02	02	02, 06
Μάρτιος	1	31	01	31
Απρίλιος	10	01, 02, 03, 05, 06, 07, 17, 24, 28, 29	10	01, 02, 03, 05, 06, 07, 17, 24, 28, 29
Μάιος	0	-	1	29
Ιούνιος	0	-	2	02, 03
Ιούλιος	0	-	0	-
Αύγουστος	0	-	0	-
Σεπτέμβριος	0	-	0	-
Οκτώβριος	0	-	1	02
Νοέμβριος	1	20	1	20
Δεκέμβριος	2	09, 10	2	09, 10
<b>Σύνολο</b>	<b>15</b>		<b>20</b>	

Οι συνολικές ημέρες υπέρβασης του νομοθετικού ορίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι 15 ημέρες, ενώ του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας είναι 20 ημέρες. Επομένως, από την αναφορά της οδηγίας της Ε.Ε. ότι η συγκέντρωση ΑΣ<sub>10</sub> δεν πρέπει να ξεπερνάει ημερήσια τα 50 μg m<sup>-3</sup> πάνω από 35 φορές τον χρόνο, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει υπέρβαση του ετήσιου ορίου κατά την περίοδο της δειγματοληψίας. Συμπληρώνεται ότι από Chatoutsidou κ. ά. (2019) φαίνεται ότι το έτος 2019 υπήρχαν 4 επιπλέον υπερβάσεις του νομοθετικού ορίου της Ε.Ε. στον σταθμό Ακρωτηρίου και η πλειοψηφία των υπερβάσεων δεν ήταν τον Απρίλιο, αλλά το Μάρτιο.

Από τις ημέρες υπερβάσεων των νομοθετικών ορίων και σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 6.5, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υπερβάσεων οφείλεται στα επεισόδια σκόνης. Επομένως, η μεταφορά της σκόνης από τις περιοχές της Βόρειας Αφρικής φαίνεται να είναι η πιο σημαντική φυσική πηγή ΑΣ<sub>10</sub>, καθώς οι περισσότερες περιπτώσεις αύξησης της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub> προκύπτουν από τα επεισόδια σκόνης. Ωστόσο, εκτός από τη συμβολή της μεταφοράς σκόνης, οι τοπικές πηγές διαδραματίζουν επίσης κυρίαρχο ρόλο και επηρεάζουν τα επίπεδα συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub>. Έτσι, οι υπόλοιπες υπερβάσεις και άρα αυξήσεις των συγκεντρώσεων των ΑΣ<sub>10</sub> ενδεχομένως οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες της γύρω περιοχής. Το εν λόγω επιχείρημα

δικαιολογείται και από τη γύρω περιοχή του σταθμού, η οποία είναι σχετικά απομακρυσμένη από τους σοβαρούς ρύπους που προκαλούν οι διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

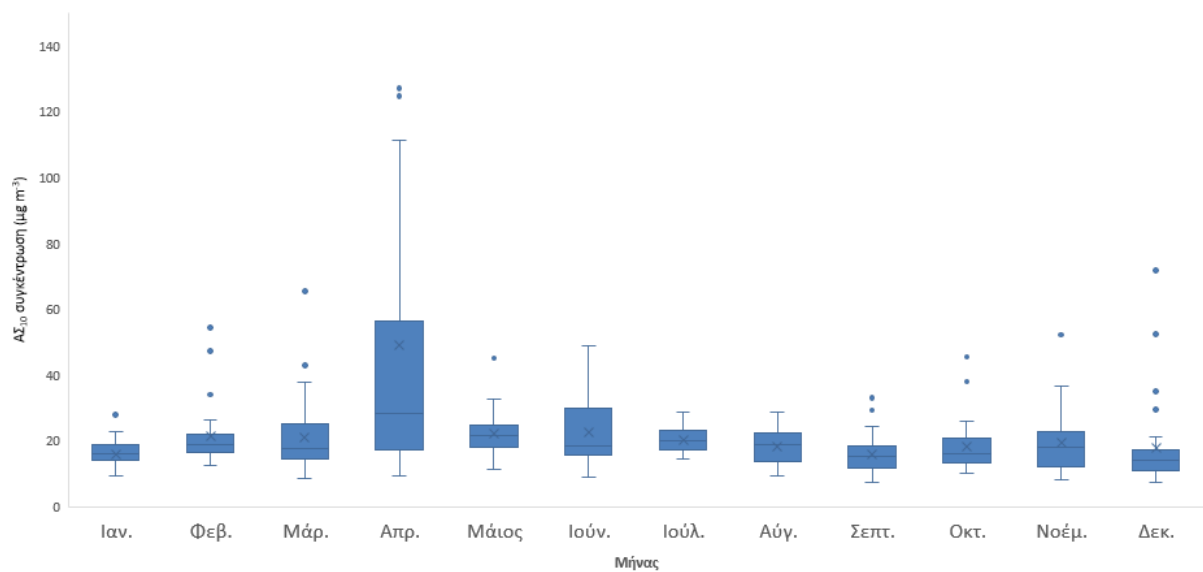
## 6.2 Μηνιαίες Διακυμάνσεις

Για την εύρεση των μηνιαίων μεταβολών του έτους 2022, υπολογίστηκαν οι μέσες (average), οι ελάχιστες (min) και οι μέγιστες (max) ημερήσιες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  του κάθε μήνα σε  $\mu\text{g m}^{-3}$ , όπως και τα 25<sup>α</sup>, 50<sup>α</sup> και 75<sup>α</sup> εκατοστημόρια (percentiles), τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Μηνιαία στατιστική ανάλυση του έτους 2022.

Μήνας	Μέση τιμή ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Ελάχιστη τιμή ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	25 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	50 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο (διάμεσος) ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	75 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Μέγιστη τιμή ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )
Ιανουάριος	16,1	9,5	14,1	16,1	18,4	28,0
Φεβρουάριος	21,6	12,4	16,7	18,9	21,9	54,6
Μάρτιος	21,2	8,5	14,8	17,6	24,7	65,6
Απρίλιος	49,1	9,5	17,7	28,4	53,9	287,5
Μάιος	22,2	11,6	18,6	21,8	24,9	45,1
Ιούνιος	22,8	9,1	16,2	18,5	28,4	49,1
Ιούλιος	20,5	14,5	17,3	20,1	23,1	29,0
Αύγουστος	18,3	9,3	13,9	18,8	22,3	28,7
Σεπτέμβριος	15,9	7,3	12,3	15,3	18,3	33,1
Οκτώβριος	18,2	10,2	13,6	16,2	20,4	45,6
Νοέμβριος	19,4	8,4	12,4	18,0	22,2	52,2
Δεκέμβριος	18,1	7,3	11,5	14,1	17,3	71,9

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η μέγιστη μέση και διάμεση τιμή είναι τον Απρίλιο, όπου η μέση τιμή είναι σχεδόν διπλάσια από τη διάμεση τιμή του Απριλίου, αλλά και από τον μέσο όρο των συγκεντρώσεων ολόκληρου του έτους 2022 που αναφέρθηκε προηγουμένως ( $21,9 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Από την άλλη, ενώ τον Σεπτέμβριο παρατηρείται η μικρότερη μέση τιμή, η μικρότερη διάμεση τιμή είναι τον Δεκέμβριο. Φαίνεται ότι η μέση τιμή είναι γενικά μεγαλύτερη από τη διάμεση τιμή, το οποίο οφείλεται κυρίως σε μεμονωμένες υψηλές συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  του κάθε μήνα που ανεβάζουν σε σημαντικό βαθμό τον μέσο όρο συγκεντρώσεων τους. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η μέγιστη συγκέντρωση  $AS_{10}$  είναι τον Απρίλιο με  $287,5 \mu\text{g m}^{-3}$ , ενώ τον Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο παρατηρούνται οι ελάχιστες τιμές στα  $7,3 \mu\text{g m}^{-3}$ . Ο Σεπτέμβριος και ο Δεκέμβριος, ενώ μέχρι στιγμής φαίνεται να έχουν γενικότερα τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις, από τη σύγκριση των 75<sup>ων</sup> εκατοστημόριων τους άγεται το συμπέρασμα ότι ο Δεκέμβριος έχει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Επομένως, για το έτος 2022, τον Απρίλιο διακρίνονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  και τον Δεκέμβριο οι χαμηλότερες, το οποίο παρατηρείται και από το Διάγραμμα 6.2.

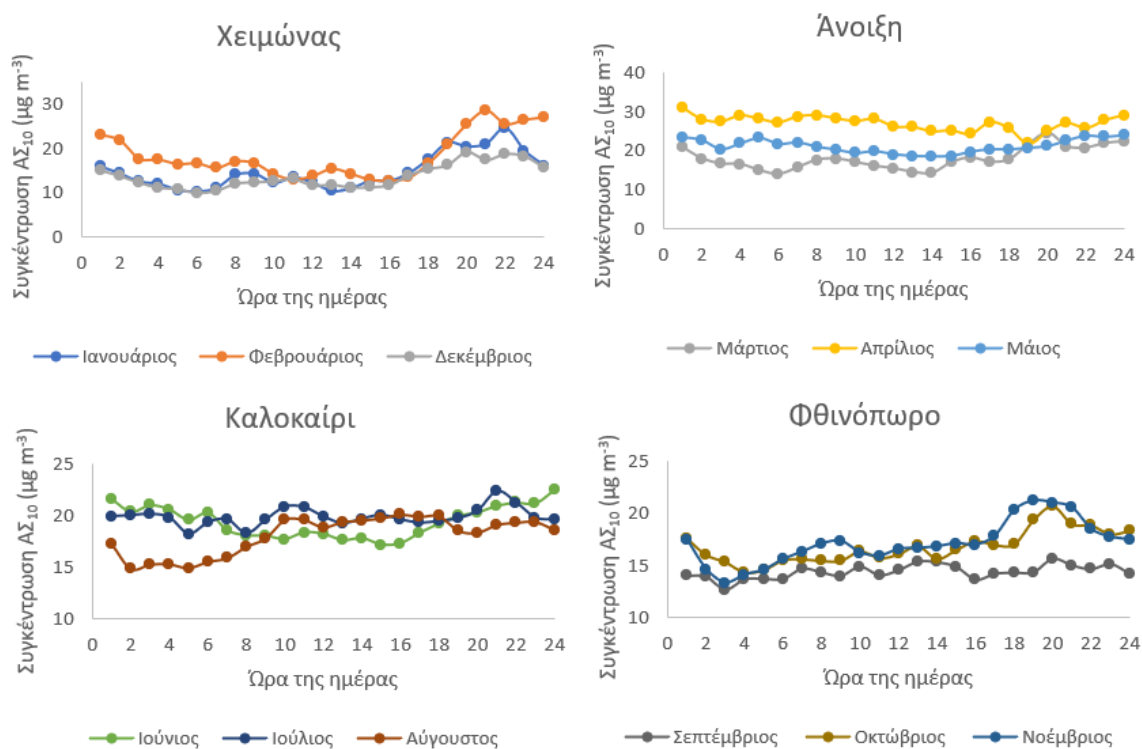


**Διάγραμμα 6.2:** Θηκόγραμμα (box plot) των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> ανά μήνα για το έτος 2022.

Από το παραπάνω θηκόγραμμα (Διάγραμμα 6.2) επιβεβαιώνεται ότι τον Απρίλιο εντοπίζονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> και τον Δεκέμβριο οι χαμηλότερες. Παράλληλα, παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετές σημειακές συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> σε κάποιους μήνες, οι οποίες στις πλείστες των περιπτώσεων υπερβαίνουν τα νομοθετικά όρια. Οι σημειακές αυτές τιμές οφείλονται κυρίως σε επεισόδια σκόνης, τα οποία διευκρινίζονται με περισσότερη λεπτομέρεια στο υποκεφάλαιο 6.5, και δευτερευόντως σε τοπικές πηγές.

### 6.3 Μηνιαία 24ωρη ανάλυση

Στο Διάγραμμα 6.3 φαίνεται η μηνιαία 24ωρη μεταβολή των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ , όπως και η εποχικότητα του έτους. Γενικότερα, υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται, σε φθίνουσα σειρά, την άνοιξη, το καλοκαίρι, του χειμώνα (Φεβρουάριος) και τα τέλη του φθινοπώρου (Νοέμβριος).



**Διάγραμμα 6.3:** Οι μηνιαίες 24ωρες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  χωρισμένες ανά εποχή (το κάθε διάγραμμα έχει διαφορετικούς άξονες του  $y$  για την καλύτερη απεικόνιση των 24ωρων μεταβολών). Οι τιμές αντιστοιχούν στη διάμεσο για την κάθε εποχή.

Τον **χειμώνα** φαίνεται ότι υπάρχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις από τις 4 μμ έως 2 πμ, δηλαδή το απόγευμα με βράδυ. Τον χειμώνα επικρατούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και ειδικότερα το βράδυ, οπότε οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  τις βραδινές ώρες ενδεχομένως να οφείλονται στις διεργασίες καύσης για την οικιακή θέρμανση.

Την **άνοιξη** δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αυξομειώσεις στη διάρκεια της ημέρας, πέρα από τον μήνα Μάρτιο όπου, όπως τον χειμώνα, υπάρχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις τις βραδινές ώρες. Ο πιθανός λόγος των σταθερών συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας την άνοιξη είναι τα επεισόδια μεταφοράς της σκόνης, τα οποία είναι ιδιαίτερα συχνά, με μεγάλη διάρκεια την άνοιξη, κρατώντας τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  υψηλά. Ταυτόχρονα, ο Μάρτιος, ενώ επηρεάζεται και από τα επεισόδια σκόνης, έχει ακόμα χαμηλές θερμοκρασίες και άρα το βράδυ οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  πιθανώς αυξάνονται από τις διεργασίες καύσης για θέρμανση. Παράλληλα,

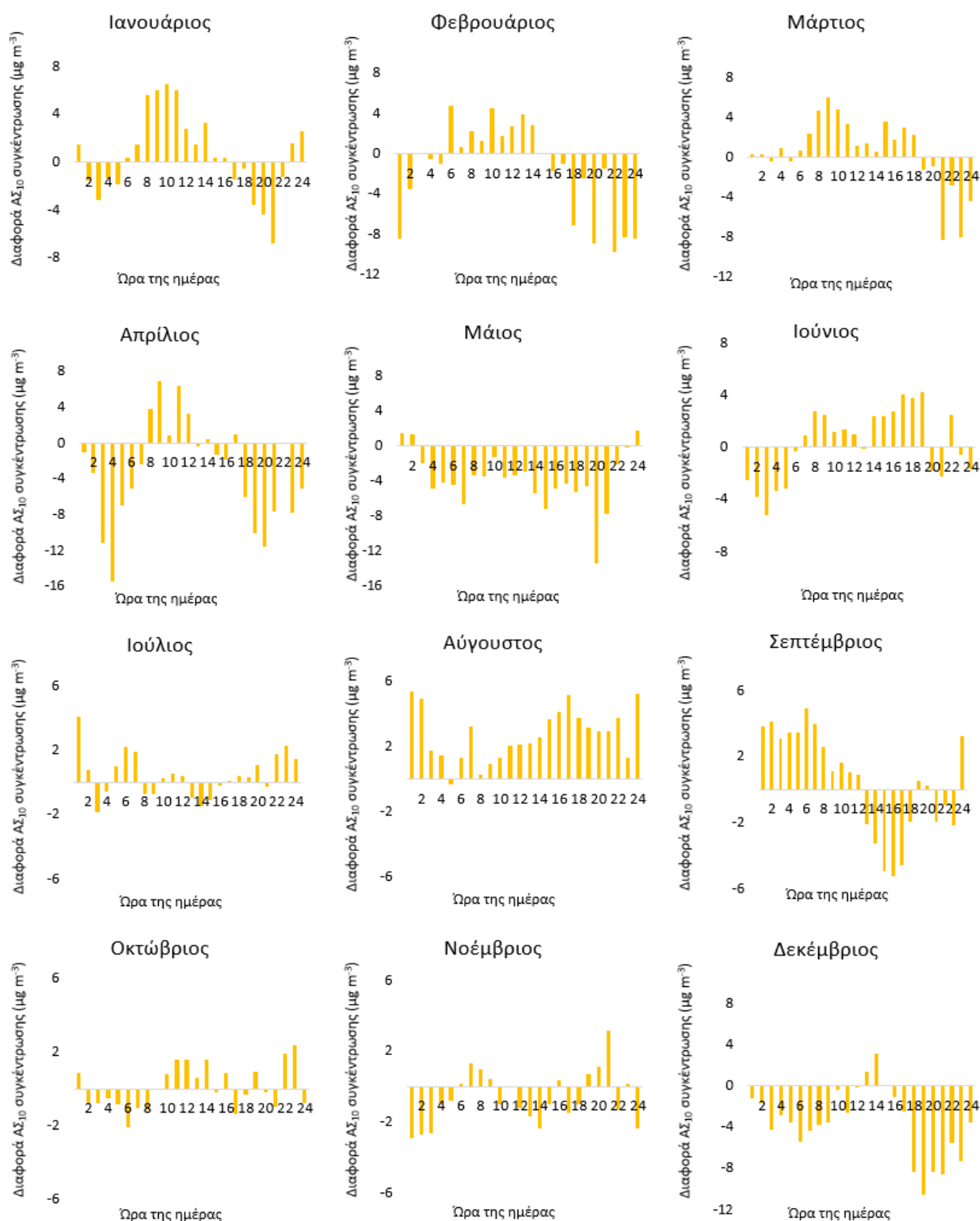
η άνοιξη χαρακτηρίζεται και από  $AS_{10}$  που περιέχουν βιοαερολύματα, όπως γύρη και θραύσματα φυτών, τα οποία αυξάνουν ακόμα περισσότερο κατά τη διάρκεια των επεισοδίων σκόνης και από την εγγύτητα του σταθμού Ακρωτηρίου με φυτά (Boreson, κ.ά., 2004; Hyde και Mahalon, 2020; Zhang κ. ά., 2022).

Το **καλοκαίρι** φαίνεται πως ο κάθε μήνας έχει διαφορετικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τον Ιούνιο οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  αυξάνονται σταδιακά από τις 4 μμ και φτάνουν στο μέγιστο στις 12 πμ, όπου σταδιακά μειώνονται έως τις 8 πμ. Αντιθέτως, τον Αύγουστο παρατηρείται μια σταθερή αυξητική τάση των συγκεντρώσεων από τις 2 πμ έως τις 6 μμ, όπου αρχίζουν ελαφρώς να μειώνονται. Τον Ιούλιο οι συγκεντρώσεις είναι σχετικά σταθερές έχοντας δύο μικρές καμπύλες με τα μέγιστα τους να παρατηρούνται κατά τις 10 πμ και 9 μμ. Το καλοκαίρι, πέρα από τα επεισόδια σκόνης, υπάρχει αύξηση του τουρισμού, με αποτέλεσμα η χρήση των μέσων μεταφοράς και γενικά των οχημάτων είναι αυξημένη άρα και οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  θα είναι αυξημένες τις ώρες αιχμής.

Το **φθινόπωρο** παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  αυξάνονται σταδιακά από περίπου τις 2 πμ έως τις 9 μμ, παρουσιάζοντας μια καμπύλη με μέγιστο στις 7 μμ, κυρίως για τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο. Οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  το φθινόπωρο δεν επηρεάζονται σημαντικά από τα επεισόδια σκόνης, όσο από τις τοπικές πηγές. Παρατηρείται ότι κυρίως από τις 9 πμ έως τις 9 μμ οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες, καθώς οι αναφερόμενες ώρες πρόκειται για ώρες αιχμής με μεγάλη κυκλοφορία οχημάτων. Αναφέρεται ότι τον Σεπτέμβριο οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  είναι χαμηλές, χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα οποία οφείλονται στην έλλειψη επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Βόρεια Αφρική. Συμπληρώνεται ότι το φθινόπωρο αρχίζουν οι θερμοκρασίες να πέφτουν και να αυξάνεται σταδιακά η ανάγκη για οικιακή θέρμανση, γι' αυτό ενδεχομένως παρατηρούνται τις βραδινές ώρες αυξήσεις των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ .

## 6.4 Εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση (Καθημερινές & Σαββατοκύριακα)

Στο Διάγραμμα 6.4 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των ημερήσιων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  μεταξύ των Σαββατοκύριακων και των εργάσιμων ημερών (καθημερινών) για τον κάθε μήνα της δειγματοληψίας.



**Διάγραμμα 6.4:** Η μηνιαία 24ωρη μεταβολή για τις ημέρες της εβδομάδας (διαφορά των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  των καθημερινών με των σαββατοκύριακων) του έτους 2022. Οι τιμές αντιστοιχούν στη διάμεσο για κάθε περίπτωση.

Από το Διάγραμμα 6.4 φαίνεται ότι τα παραπάνω διαγράμματα έχουν περίπου ίδιες μεταβολές εκτός από τους μήνες Μάιος και Αύγουστος. Σε γενικές γραμμές, για όλο το έτος παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> το πρωί και το μεσημέρι είναι υψηλότερες τις καθημερινές (weekdays), ενώ το απόγευμα, βράδυ είναι υψηλότερες τα σαββατοκύριακα (weekends). Τις καθημερινές είναι υψηλότερες οι συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> διότι πρόκειται για ώρες εργασίας, σχολείου και η μεταφορά οχημάτων είναι αυξημένη. Τα σαββατοκύριακα παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> το απόγευμα και το βράδυ, καθώς πρόκειται για ώρες αναψυχής και ξεκούρασης, αυξάνοντας την ανάγκη για έξοδο και άρα της μεταφοράς οχημάτων. Επομένως, η κυκλοφορία είναι η κύρια αιτία αυξήσεων των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, το οποίο παρατηρήθηκε και σε άλλη μελέτη (Koranakis κ. ά., 2018).

Το Μάιο παρατηρείται ότι για όλες τις ώρες της ημέρας τα σαββατοκύριακα έχουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> σε αντίθεση με τον Αύγουστο που παρατηρούνται καθ'όλη τη διάρκεια της ημέρας υψηλότερες συγκεντρώσεις τις καθημερινές. Το Μάιο οι αυξημένες συγκεντρώσεις των σαββατοκύριακων οφείλονται στα επεισόδια σκόνης, καθώς φαίνεται ότι τυχαίνει το 80% (4 στα 5) των δηλωμένων επεισοδίων μεταφοράς σκόνης τον Μάιο να συμβαίνουν τα σαββατοκύριακα. Αντιθέτως, τον Αύγουστο οι αυξημένες συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> των καθημερινών δε συνδέονται με τα επεισόδια σκόνης, αλλά οφείλονται σε τοπικές πηγές, πιθανώς λόγω της εργασίας και του τουρισμού. Η αύξηση του τουρισμού τον Αύγουστο επηρεάζει σημαντικά τις ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, καθώς αυξάνεται η κυκλοφορία των οχημάτων και η χρήση των μέσων μεταφοράς (αεροπλάνων, πλοίων, κλπ).

## 6.5 Ημέρες με σκόνη

Οι ημέρες με αφρικανική σκόνη και τον αριθμό των υπερβάσεων του ορίου της ΕΕ και ΠΟΥ ανά μήνα παραθέτονται στον Πίνακα 6.3. Συνολικά, εντοπίστηκαν 50 ημέρες με επεισόδια μεταφοράς σκόνης στον σταθμό Ακρωτηρίου για το έτος 2022. Από Koranakis κ. ά. (2018) φαίνεται ότι στον σταθμό Ακρωτηρίου το 2008 υπήρχαν ακριβώς 51 ημέρες με επεισόδια σκόνης, παρατηρείται όμως ότι γενικότερα ο αριθμός των ημερών με επεισόδια σκόνης κάθε χρόνο είναι σχεδόν ο μισός, περίπου 25 ημέρες/έτος. Επομένως, το έτος 2008 και 2022 είχαν τις περισσότερες ημέρες επεισοδίων μεταφοράς σκόνης ανά έτος.

Συγκρίνοντας τις ημέρες υπέρβασης του νομοθετικού ορίου του ΠΟΥ με τις ημέρες με τα επεισόδια σκόνης φαίνεται ότι το περίπου 32% (16/50) των επεισοδίων μεταφοράς σκόνης στον σταθμό Ακρωτηρίου συνεπάγεται σε υπέρβαση των ορίων του ΠΟΥ. Επομένως, τα επεισόδια μεταφοράς της

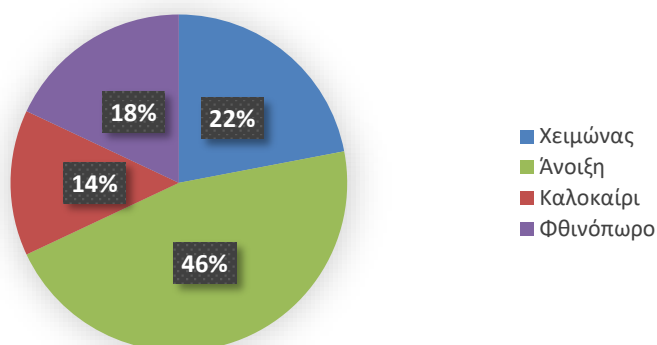


σκόνης δεν ταυτίζονται με υπέρβαση των νομοθετικών ορίων για τα ΑΣ<sub>10</sub>. Όμως, οι υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων στις πλείστες των περιπτώσεων, δηλαδή σε ποσοστό 80% (16 ημέρες στις 20 ημέρες των συνολικών υπερβάσεων), ταυτίζονται με επεισόδια σκόνης από τη Βόρεια Αφρική και κυρίως από την έρημο Σαχάρα.

**Πίνακας 6.3:** Ημέρες που παρατηρούνται επεισόδια σκόνης και οι ημέρες που παρατηρείται η υπέρβαση του νομοθετικού ορίου του ΠΟΥ.

Μήνας	Ημέρες με επεισόδια σκόνης	Ημερομηνίες με επεισόδια σκόνης	Ημέρες υπέρβασης ΑΣ <sub>10</sub> > 45 μg m <sup>-3</sup> (ΠΟΥ)
Ιανουάριος	1	08	0
Φεβρουάριος	6	02, 07, 16, 20, 27, 28	1
Μάρτιος	3	29, 30, 31	1
Απρίλιος	16	01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29	10
Μάιος	4	08, 27, 28, 29	1
Ιούνιος	6	09, 10, 23, 24, 25, 26	0
Ιούλιος	0	-	0
Αύγουστος	1	21	0
Σεπτέμβριος	4	27, 28, 29, 30	0
Οκτώβριος	0	-	0
Νοέμβριος	5	08, 17, 18, 20, 21	1
Δεκέμβριος	4	08, 09, 10, 11	2
<b>Σύνολο</b>	<b>50</b>		<b>16</b>

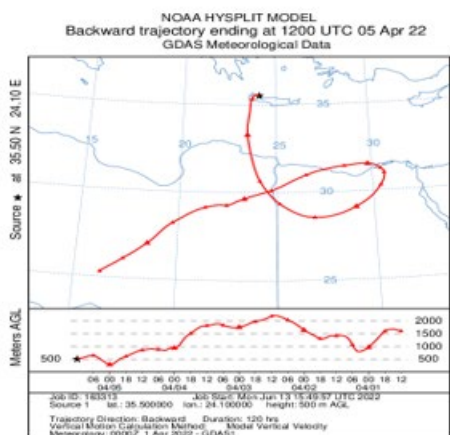
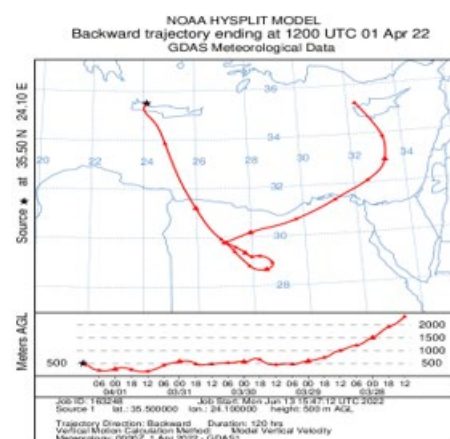
Οι ημέρες που παρατηρούνται τα περισσότερα επεισόδια σκόνης είναι τον Απρίλιο, ενώ τον Ιούλιο, Οκτώβριο δεν παρατηρείται κάποιο. Οι υψηλότερες συχνότητες εμφάνισης των επεισοδίων σκόνης (69%) φαίνονται να είναι από τα τέλη του χειμώνα έως αρχές καλοκαιριού (Φεβρουάριος – Ιούνιος) με τα εντονότερα και μεγάλης διάρκειας επεισόδια να εντοπίζονται την άνοιξη. Από τον παραπάνω πίνακα και το Διάγραμμα 6.5, φαίνεται ότι το καλοκαίρι, το φθινόπωρο και το χειμώνα δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα επεισόδια σκόνης, εκτός από τους μήνες Ιούνιο, Νοέμβριο και Φεβρουάριο της κάθε εποχής αντίστοιχα.



**Διάγραμμα 6.5:** Το ποσοστό ημερών με επεισόδιο σκόνης για τσά έτος 2022.

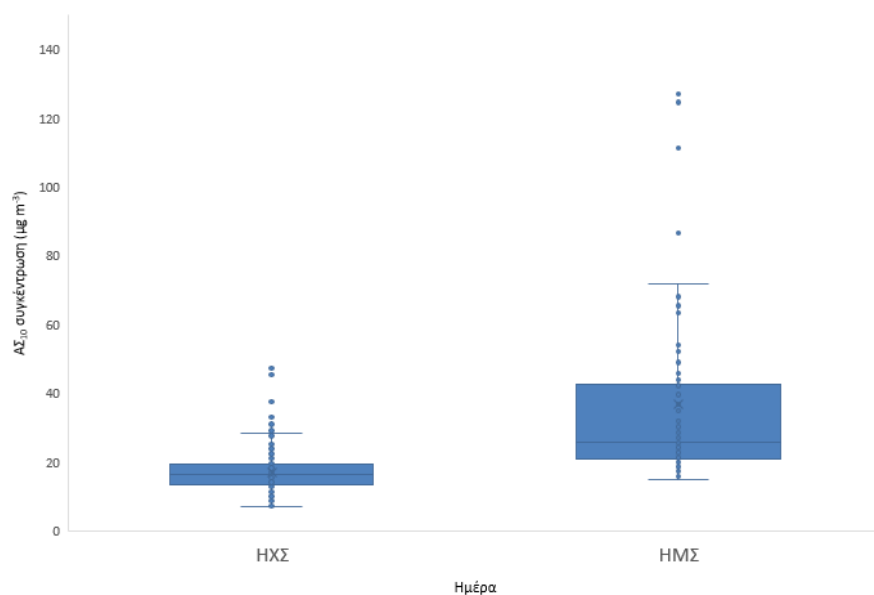
Στο Διάγραμμα 6.5 φαίνεται ότι το ποσοστό των ημερών που παρατηρείται επεισόδιο σκόνης για την κάθε εποχή συνδέεται με την άνοιξη σε ποσοστό 46%, με το χειμώνα 22%, το φθινόπωρο 18% και το καλοκαίρι 14%. Επομένως, η άνοιξη χαρακτηρίζεται ως η εποχή με τα περισσότερα επεισόδια σκόνης και το καλοκαίρι είναι η εποχή με τα λιγότερα επεισόδια σκόνης, το οποίο συμφωνεί με τη μελέτη των Chatoutsidou κ. ά.(2019).

Αναφέρεται ότι το μεγαλύτερο διάστημα που παρατηρήθηκε επεισόδιο σκόνης είναι 10 συνεχόμενες ημέρες (29/03 έως 07/04), ενώ το μικρότερο είναι μερικές ώρες έως 1 ημέρα. Στο Διάγραμμα 6.6 απεικονίζονται οι ημέρες με τα εντονότερα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα. Οι συνολικές ημέρες όπου εντοπίστηκε μεταφορά σκόνης, σύμφωνα με το μοντέλο HYSPLIT, βρίσκονται στο Παράρτημα Α.



**Διάγραμμα 6.6:** Εικόνες επεισοδίου σκόνης από Hysplit και οι αντίστοιχες δορυφορικές εικόνες για τις 01/04/2022 και 05/04/2022.

Το επιχείρημα ότι η συγκέντρωση των  $AS_{10}$  αυξάνεται κατά τη διάρκεια των επεισοδίων σκόνης επιβεβαιώνεται και από το παρακάτω θηκόγραμμα (Διάγραμμα 6.7), στο οποίο διαχωρίζονται οι ημερήσιες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  για τις ημέρες με ή χωρίς μεταφορά σκόνης από τη Βόρεια Αφρική.



**Διάγραμμα 6.7:** Θηκόγραμμα των συγκεντρώσεων  $A\Sigma_{10}$  για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) (non-dusty days) και για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) (Dusty Days) στον σταθμό Ακρωτηρίου του έτους 2022.

Από το θηκόγραμμα υπολογίστηκε ότι η μέση ημερήσια συγκέντρωση  $A\Sigma_{10}$  των ημερών με σκόνη (ΗΜΣ) για το 2022 είναι  $36,6 \mu\text{g m}^{-3}$ , ενώ των ημερών χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) είναι  $17,1 \mu\text{g m}^{-3}$ , τα οποία παρουσιάζονται και στον Πίνακας 6.4 με τις τυπικές αποκλίσεις τους (standard deviation, st. dev.). Έτσι, φαίνεται ότι η διαφορά των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των ΗΜΣ και ΗΧΣ ανέρχεται περίπου στα  $19,5 \mu\text{g m}^{-3}$ . Παράλληλα, η ελάχιστη και μέγιστη τιμή των ΗΜΣ είναι  $47,3 \mu\text{g m}^{-3}$  και  $287,5 \mu\text{g m}^{-3}$ , ενώ των ΗΧΣ είναι  $7,3 \mu\text{g m}^{-3}$  και  $15,2 \mu\text{g m}^{-3}$  αντίστοιχα. Επομένως, άγεται το συμπέρασμα ότι τα επεισόδια σκόνης σχεδόν διπλασιάζουν την ημερήσια συγκέντρωση  $A\Sigma_{10}$  των ΗΧΣ, φτάνοντάς τη σε πολύ υψηλότερες τιμές που υπερβαίνουν τα νομοθετικά όρια που έχουν θεσπίσει η Ε.Ε. και η ΠΟΥ.

**Πίνακας 6.4:** Οι μέσες συγκεντρώσεις των  $A\Sigma_{10}$  και η τυπική απόκλισή τους για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) και τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) για τον σταθμό Ακρωτηρίου του έτους 2022.

Μέση συγκέντρωση $A\Sigma_{10} \pm$ τυπική απόκλιση ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	
ΗΜΣ	$36,6 \pm 43,3$
ΗΧΣ	$17,1 \pm 6,5$

Η μεγάλη τυπική απόκλιση στις ημέρες με σκόνη οφείλεται στις μεγάλες αυξήσεις που παρουσιάζουν ορισμένες ημέρες με πολύ έντονα επεισόδια σκόνης. Οι μέσες συγκεντρώσεις των  $A\Sigma_{10}$  που υπολογίστηκαν για τις ΗΧΣ ήταν μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στη μελέτη του Dimitriou και Kassomenos (2019), ενώ για τις ΗΜΣ παρατηρήθηκε ότι η τυπική απόκλιση που υπολογίστηκε είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες περιοχές που αναφέρονται στη μελέτη και αυτό οφείλεται στην εγγύτητα της περιοχής μελέτης με τη Βόρεια Αφρική και τα επεισόδια σκόνης.

## 6.6 Σταθμική ανάλυση

Από τη σταθμική ανάλυση προέκυψαν οι συγκεντρώσεις μάζας των ΑΣ<sub>10</sub>, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 6.5. Παράλληλα, αναφέρονται οι θερμοκρασίες και η σχετική υγρασία που μετρήθηκαν στη 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> ζύγιση των φίλτρων.

**Πίνακας 6.5:** Συγκεντρώσεις μάζας των ΑΣ<sub>10</sub> στα φίλτρα με τη θερμοκρασία και υγρασία της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ζύγισης.

Ημερομηνία	Συγκέντρωση ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Θερμοκρασία (°C)		Υγρασία	
		1η	2η	1η	2η
05/05/2023	15.1	20	22	64%	58%
06/05/2023	21.7	20	22	64%	58%
07/05/2023	25.0	20	22	64%	58%
08/05/2023	30.7	20	22	64%	58%
09/05/2023	20.9	20	23	64%	58%
10/05/2023	17.6	22	23	62%	55%
11/05/2023	17.6	22	23	62%	55%
12/05/2023	19.8	22	23	62%	55%
13/05/2023	18.0	22	25	45%	51%
14/05/2023	19.8	22	25	45%	51%
15/05/2023	19.6	22	25	45%	51%
16/05/2023	20.4	22	25	45%	51%
17/05/2023	20.9	22	25	45%	51%
18/05/2023	22.3	22	25	45%	51%
19/05/2023	24.9	22	25	45%	51%
20/05/2023	21.8	23	25	49%	51%
21/05/2023	18.6	23	25	49%	51%
22/05/2023	22.6	23	25	49%	51%
23/05/2023	19.0	23	25	49%	51%
24/05/2023	18.1	23	25	49%	51%

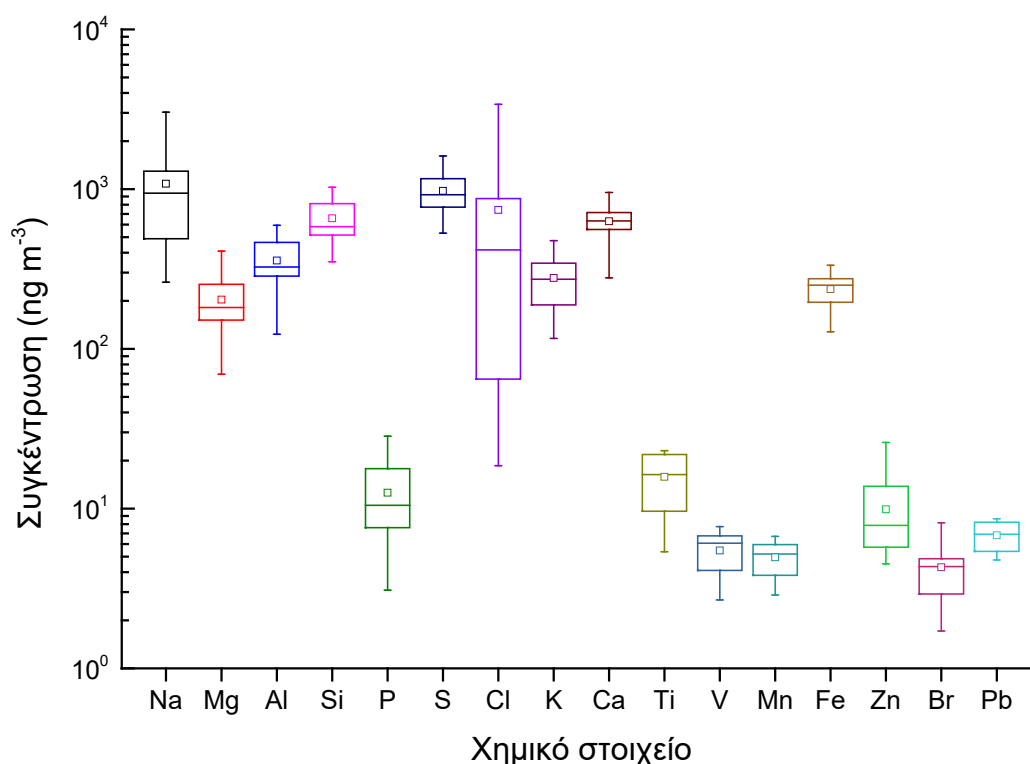
Η συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> για την περίοδο της δειγματοληψίας κυμαίνεται από 15,1 έως 30,7  $\mu\text{g m}^{-3}$ , με τη μέση τιμή να ανέρχεται στα 20,7  $\mu\text{g m}^{-3}$ , η οποία είναι χαμηλότερη από τη μετρούμενη μέση ετήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> για το έτος 2022 (21,9  $\mu\text{g m}^{-3}$ ). Παράλληλα, φαίνεται ότι η θερμοκρασία

κατά τη ζύγιση των φίλτρων στο εργαστήριο κυμαίνεται από 20 έως 25 °C και αντίστοιχα τα ποσοστά υγρασίας από 45% έως 64%.

Από τον Πίνακα 6.4 παρατηρείται ότι η συγκέντρωση των  $AS_{10}$  είναι αυξημένη στις 08/05, το οποίο οφείλεται στη μεταφορά σκόνης από την έρημο Σαχάρα (Πίνακας 6.3). Αναφέρεται ότι τις ημέρες 09, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24 του Μαΐου υπήρχε μια χαμηλή συγκέντρωση σκόνης, που όμως δεν επηρέαζε σημαντικά τη μετρούμενη συνολική συγκέντρωση των  $AS_{10}$ .

## 6.7 Στοιχειακή ανάλυση

Στο Διάγραμμα 6.8 απεικονίζεται το θηκόγραμμα των συγκεντρώσεων 16 χημικών στοιχείων για τις 20 ημέρες της δειγματοληψίας. Οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων 8 χημικών στοιχείων (Cr, Co, Ni, Cu, As, Se, Rb και Sr) δε συμπεριλαμβάνονται στο παρακάτω θηκόγραμμα, καθώς το πλήθος των ημερών που εντοπίστηκε συγκέντρωσή τους στα φίλτρα ήταν  $\leq 2$  ημέρες. Αναφέρεται ότι όλα τα δείγματα δεν εμπεριείχαν καθόλου Co, Cu, As, Se και Rb, ενώ εντοπίζονται στις 08/05 Sr, στις 15 και 18/05 Ni και στις 18/05 Cr.



**Διάγραμμα 6.8:** Θηκόγραμμα των συγκεντρώσεων των 16 χημικών στοιχείων.

Στο παραπάνω θηκόγραμμα εμπεριέχονται οι μέσες (average), οι διάμεσοι (median), οι ελάχιστες (min) και οι μέγιστες (max) συγκεντρώσεις του κάθε χημικού στοιχείου για όλη τη δειγματοληπτική περίοδο σε  $\text{ng m}^{-3}$ , έχοντας ως όρια τα 25<sup>α</sup> και 75<sup>α</sup> εκατοστημόρια (percentiles), των οποίων οι αριθμητικές τιμές φαίνονται στον Πίνακα 6.6.

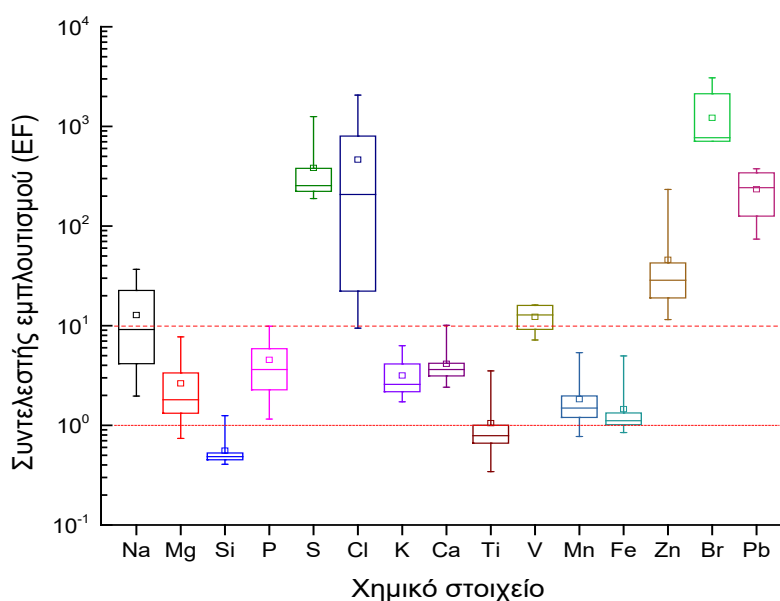
**Πίνακας 6.6:** Στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων ( $\text{ng m}^{-3}$ ) των 16 χημικών στοιχείων για την περίοδο δειγματοληψίας.

Χημικό στοιχείο	Μέση τιμή	Ελάχιστη τιμή	25 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο	50 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο (διάμεσος)	75 <sup>ο</sup> εκατοστημόριο	Μέγιστη τιμή
Na	1081,2	261,5	498,2	944,2	1282,2	3034,2
Mg	203,5	69,4	154,2	181,4	248,4	409,3
Al	357,0	123,7	287,8	325,1	463,7	593,7
Si	656,2	350,8	521,2	582,3	807,1	1028,7
P	12,6	3,1	8,0	10,5	16,2	28,4
S	975,3	530,2	773,3	923,7	1149,7	1614,5
Cl	741,7	18,6	70,4	416,9	867,7	3401,5
K	277,5	116,2	193,1	273,2	337,1	475,6
Ca	628,9	278,6	566,2	632,2	704,5	952,2
Ti	15,8	5,4	9,8	16,3	21,8	23,1
V	5,5	2,7	4,1	6,1	6,8	7,7
Mn	5,0	2,9	3,9	5,2	6,0	6,7
Fe	236,6	127,8	196,3	250,5	271,8	333,5
Zn	9,9	4,5	6,0	7,9	13,6	25,9
Br	4,3	1,7	2,9	4,3	4,8	8,2
Pb	6,8	4,8	5,7	6,9	8,0	8,6

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρώντας τις μέγιστες τιμές φαίνεται ότι τα χημικά στοιχεία Na και Cl φτάνουν σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις συγκριτικά με τα υπόλοιπα χημικά στοιχεία. Ταυτόχρονα, παρατηρείται ότι τα χημικά στοιχεία με τις υψηλότερες μέσες τιμές σε φθίνουσα σειρά είναι τα Na, S, Cl, Si, Ca και Al. Το Na, Cl και το S πρόκειται για χημικά στοιχεία προερχόμενα από τη θάλασσα και άρα οι αυξημένες συγκεντρώσεις τους στα δείγματα οφείλονται στην εγγύτητα της περιοχής μελέτης με τη θάλασσα. Το Si, Ca και Al είναι χημικά στοιχεία προερχόμενα από το έδαφος και συγκεκριμένα από την επαναιώρηση σκόνης, οπότε οι υψηλές συγκεντρώσεις τους οφείλονται σε μεταφορά σκόνης στον σταθμό Ακρωτηρίου. Τα χημικά στοιχεία όπως το V, Mn, Pb, Br και Zn είναι σε πολύ μικρότερες συγκριτικά συγκεντρώσεις, καθώς, λόγω της τοξικότητάς τους, οι υψηλές συγκεντρώσεις τους συνεπάγονται με σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

## 6.8 Συντελεστής εμπλουτισμού

Για τον υπολογισμό του συντελεστή εμπλουτισμού επιλέχθηκε ως στοιχείο αναφοράς το αλουμίνιο (Al) για το κάθε μετρούμενο χημικό στοιχείο όλης της περιόδου δειγματοληψίας, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά ως δείκτης για τον φλοιό της Γης (Lokorai κ. ά., 2021). Στο Διάγραμμα 6.9 παρουσιάζεται το θηκόγραμμα με τους υπολογισμένους συντελεστές εμπλουτισμού κάθε χημικού στοιχείου που το πλήθος των ημερών που εντοπίστηκε συγκέντρωσή του στα φίλτρα ήταν  $\geq 2$  ημέρες. Σημειώνεται ότι το χημικό στοιχείο Al δε συμπεριλαμβάνεται, καθώς ως στοιχείο αναφοράς έχει συντελεστή εμπλουτισμού ίσο με 1.



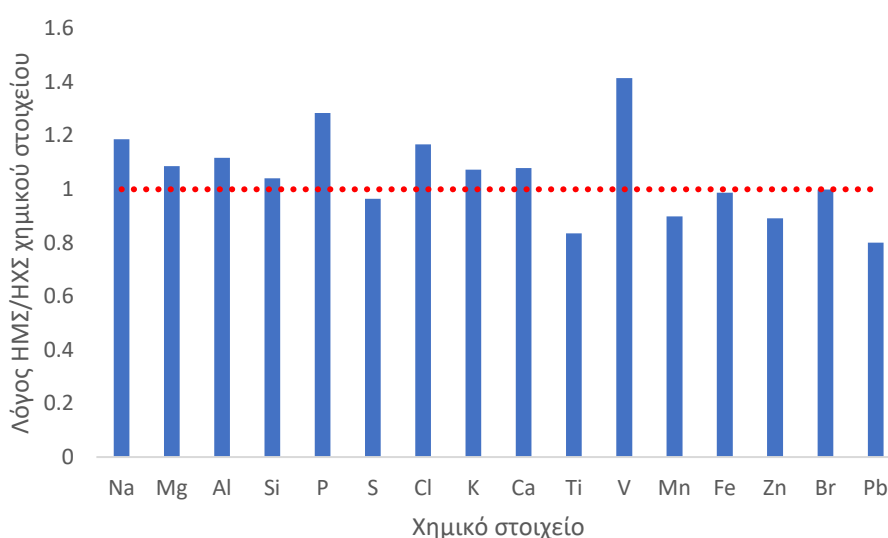
**Διάγραμμα 6.9:** Θηκόγραμμα των συντελεστών εμπλουτισμού (EF) για 15 χημικά στοιχεία, εξαιρείται το αλουμίνιο (Al).

Εφόσον τα χημικά στοιχεία προερχόμενα από ανθρωπογενείς πηγές έχουν συντελεστή εμπλουτισμού  $> 10$ , από το Διάγραμμα 6.9 άγεται το συμπέρασμα ότι το Na, S, Cl, V, Zn, Br και Pb είναι ανθρωπογενής προέλευσης. Όμως, όπως έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 1.5, το Na, Cl και S προέρχονται από φυσική πηγή, τη θάλασσα. Ο υψηλός συντελεστής εμπλουτισμού του Na, Cl και S οφείλεται στη μεγάλη συνεισφορά του θαλάσσιου περιβάλλοντος, ο οποίος είναι πολύ κοντά στον σταθμό και έτσι αυξάνονται σημαντικά οι συγκεντρώσεις των εν λόγω στοιχείων.

Τα χημικά στοιχεία Na, Mg, P, K, Ca, Mn και Fe έχουν συντελεστή εμπλουτισμού από 1 έως 10, οπότε η πηγή προέλευσής τους είναι μεικτή, δηλαδή είναι και φυσική και ανθρωπογενής (το Na όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έχει φυσική προέλευση). Παράλληλα, τα χημικά στοιχεία Si και Ti, με το συντελεστή εμπλουτισμού τους  $< 1$ , έχουν φυσική προέλευση.

## 6.9 Λόγοι χημικών στοιχείων

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της σκόνης στα δείγματα, υπολογίζονται οι λόγοι κάθε χημικού στοιχείου, οι οποίοι προκύπτουν από τις μέσες συγκεντρώσεις του κάθε χημικού στοιχείου για τις ημέρες με σκόνη προς τις μέσες συγκεντρώσεις του για τις ημέρες χωρίς σκόνη. Σημειώνεται ότι στις ημέρες με σκόνη έχουν συμπεριληφθεί οι ημέρες με υψηλές και χαμηλές συγκεντρώσεις σκόνης που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 6.6. Στο Διάγραμμα 6.10 παρουσιάζονται οι λόγοι που υπολογίστηκαν. Αναφέρεται ότι κάθε χημικό στοιχείο με λόγο μεγαλύτερο του 1 δείχνει ότι είναι αυξημένο τις ημέρες όπου παρατηρείται σκόνη.



**Διάγραμμα 6.10:** Οι λόγοι των μέσων συγκεντρώσεων του κάθε χημικού στοιχείου για τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) προς τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ).

Από το Διάγραμμα 6.10 παρατηρείται ότι τα χημικά στοιχεία Na, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca και V είναι υψηλότερα τις ημέρες με σκόνη. Φαίνεται ότι τα περισσότερα χημικά στοιχεία με λόγο  $>1$  για τις ημέρες με σκόνη προέρχονται από τον φλοιό της γης. Το Na και Cl, ενώ πρόκειται για χημικά στοιχεία από το θαλάσσιο περιβάλλον, μπορεί να αναμιγνύθηκαν με τα ιζήματα της μεταφερόμενης σκόνης, καθώς οι υψηλότερες συγκεντρώσεις των ΗΜΣ των χημικών στοιχείων που δεν προέρχονται από τον φλοιό της γης μπορεί να οφείλονται στη μεταφορά τους μαζί με τη σκόνη (Querol κ. ά., 2019). Για παράδειγμα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις του P για τις ΗΜΣ ενδεχομένως οφείλονται σε κοιτάσματα φωσφόρου ή ορυχεία και στην καύση βιομάζας των περιοχών της Βόρειας Αφρικής και να μεταφέρθηκαν μαζί με τη σκόνη (Scheuven κ. ά., 2013).

Για τα κύρια χημικά στοιχεία προερχόμενα από τον φλοιό της Γης, όπως το Mg, Al, Si, Ca, Mn και Fe, εφόσον συνδέονται άμεσα με τη σκόνη που φτάνει στον σταθμό, διερευνάται η μεταξύ τους σχέση,



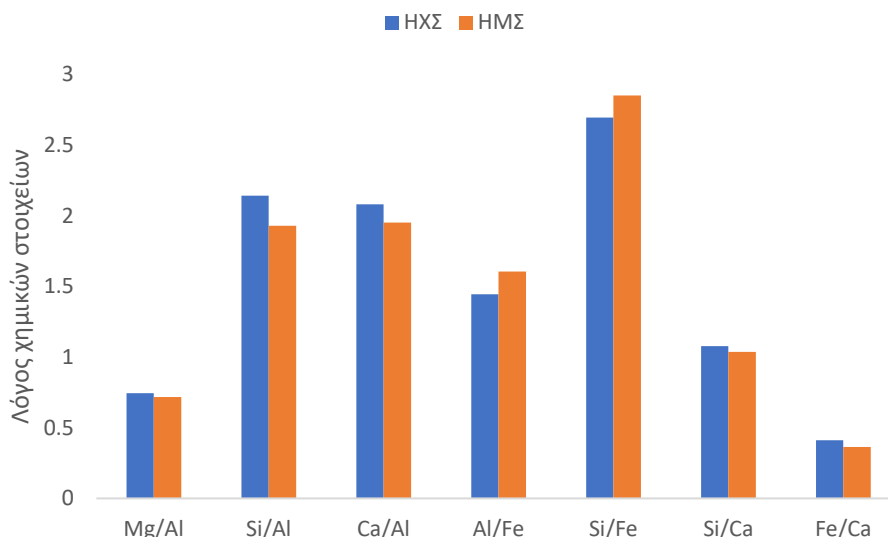
ώστε να βρεθεί η επίδρασή τους για τις ημέρες με ή χωρίς σκόνη. Ο Πίνακας 6.7 παρουσιάζει τις μέσες συγκεντρώσεις μερικών χημικών στοιχείων του φλοιού της Γης για τις 20 ημέρες της δειγματοληψίας (05/05/2022 έως 24/05/2022) χωρισμένες σε ημέρες με και χωρίς σκόνη.

**Πίνακας 6.7:** Οι μέσες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) και τις ημέρες με σκόνη (ΗΜΣ) για τις 20 ημέρες του Μαΐου.

Χημικά στοιχεία	Συγκέντρωση ( $\text{ng m}^{-3}$ ) (ΗΧΣ)	Συγκέντρωση ( $\text{ng m}^{-3}$ ) (ΗΜΣ)
Mg	193,6	210,2
Al	333,6	372,7
Si	640,6	666,5
Ca	600,5	647,9
Mn	17,5	14,6
Fe	238,4	235,5

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρήθηκε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων Mg, Al, Si και Ca του φλοιού της Γης είναι συγκριτικά υψηλότερες τις ημέρες που θεωρήθηκε ότι υπήρχε σκόνη, ενώ τα χημικά στοιχεία Mn και Fe είναι χαμηλότερα τις ημέρες με σκόνη. Επομένως, τα χημικά στοιχεία του φλοιού της Γης με μεγαλύτερη ατομική μάζα έχουν χαμηλότερη συγκέντρωση τις ημέρες με σκόνη. Ταυτόχρονα, οι υπολογισμένες μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις (υποκεφάλαιο 6.6) δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των ημερών με σκόνη και χωρίς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι γενικότερα οι συγκεντρώσεις των ημερών με και χωρίς σκόνη δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, αφού τα δείγματα των ημερών με σκόνη είχαν σχετικά χαμηλή συγκέντρωση σκόνης, εκτός από τη μια ημέρα με υψηλή συγκέντρωση σκόνης (08/05/2022). Βέβαια, υπάρχει περίπτωση η έλλειψη ουσιαστικής διαφοράς μεταξύ των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων Mg, Al, Si, Ca, Mn και Fe για τις ημέρες με και χωρίς σκόνη, να οφείλεται στο γεγονός ότι τις περισσότερες ημέρες χωρίς σκόνη, σύμφωνα με το υποκεφάλαιο 6.10, έπνεαν άνεμοι προερχόμενοι από την πόλη των Χανίων και το λιμάνι Σούδας. Έτσι, τα χημικά στοιχεία Mg, Al, Si, Ca, Mn και Fe μπορεί να αυξήθηκαν για τις ημέρες με σκόνη από τον φλοιό της Γης και για τις ημέρες χωρίς σκόνη από τη κυκλοφορία των οχημάτων ή την επαναιώρηση σκόνης από τους δρόμους.

Για την περαιτέρω παρατήρηση της σχέσης των χημικών στοιχείων του φλοιού με τη μεταφορά της σκόνης στον σταθμό Ακρωτηρίου, δημιουργήθηκε το Διάγραμμα 6.11 όπως στη μελέτη των Chatoutsidou και Lazaridis (2022). Το Διάγραμμα 6.11 απεικονίζει το λόγο των μέσων συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων του φλοιού της Γης για τις ημέρες με/χωρίς σκόνη.



**Διάγραμμα 6.11:** Η μέση τιμή των λόγων των χημικών στοιχείων για τις ημέρες χωρίς σκόνη (ΗΧΣ) και τις ημέρες με χαμηλή ή υψηλή συγκέντρωση σκόνης (ΗΜΣ) για τις 20 ημέρες του Μαΐου του 2022.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 6.11, παρατηρείται ότι οι λόγοι Al/Fe και Si/Fe είναι υψηλότεροι στις περιπτώσεις που υπάρχει σκόνη στα δείγματα, ενώ οι λόγοι Mg/Al, Si/Al, Ca/Al, Si/Ca και Fe/Ca είναι υψηλότεροι στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει καθόλου σκόνη. Αναφέρεται ότι στατιστικά οι λόγοι Si/Al και Ca/Al είναι υψηλότεροι για τις ημέρες χωρίς σκόνη. Η μείωση του λόγου Ca/Al τις ΗΜΣ συνδέεται με μεταφορά σκόνης, όπως έχει παρατηρηθεί και σε άλλη μελέτη (Lokorai κ. ά., 2021).

Στη μελέτη Chatoutsidou και Lazaridis (2022) βρέθηκαν υψηλότεροι και οι λόγοι Si/Al και Si/Ca για τις ημέρες με σκόνη. Η διαφορά των αποτελεσμάτων της προηγούμενης αναφερόμενης μελέτης με την εργασία αυτή είναι ότι στη μελέτη τα ΑΣ<sub>10</sub> μελετήθηκαν το Μάιο του 2020 που υπήρχαν έντονα επεισόδια σκόνης, ενώ στην εργασία αυτή ο Μάιος του 2022, για την περίοδο της δειγματοληψίας, είχε μόνο ένα έντονο επεισόδιο σκόνης διάρκειας μιας ημέρας και οι υπόλοιπες ημέρες που θεωρήθηκαν με σκόνη είχαν χαμηλή συγκέντρωση, οπότε η συνεισφορά της σκόνης είναι μικρότερη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι λόγοι των χημικών στοιχείων δε συμφωνούν σε όλες τις μελέτες (Scheuven κ. ά., 2013; Lokorai κ. ά., 2021).

Τα εξετασθέντα χημικά στοιχεία του φλοιού της Γης δείχνουν ότι οι λόγοι που περιλαμβάνουν το Al είναι καλοί δείκτες για τη σκόνη από τη Βόρεια Αφρική, το οποίο δε συμφωνεί με τα αποτελέσματα της μελέτης της Chatoutsidou κ. ά. (2021), όπου θεωρείται ως καλός δείκτης για τους στοιχειακούς λόγους το Si.

## 6.10 Ροές ανέμων (ροδόγραμμα)

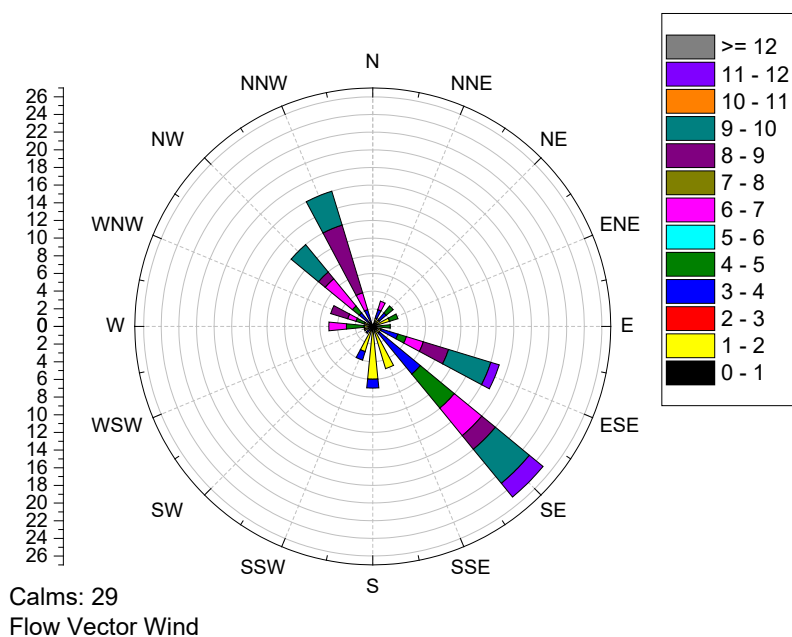
Η διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου (ροές των ανέμων) μπορούν να απεικονιστούν σε διαγράμματα ρόδου των ανέμων ή ροδογράμματα ανέμων (wind roses) προς τον σταθμό Ακρωτηρίου, έτσι ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η τοπική προέλευση των αέριων μαζών ως προς αυτόν, για τις 20 ημέρες της δειγματοληψίας. Αναφέρεται ότι τα διαγράμματα και των 20 ημερών περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β. Από το Σχήμα 5.6 με την περιοχή μελέτης και από τα ροδογράμματα ανέμου των 20 ημερών του Μαΐου, είναι δυνατή η εύρεση της προέλευσης των ΑΣ<sub>10</sub> προς τον σταθμό Ακρωτηρίου. Στον Πίνακα 6.8 περιλαμβάνεται η κύρια κατεύθυνση ανέμου που επικρατεί προς τον σταθμό Ακρωτηρίου και η πιθανή προέλευσή της για κάθε ημέρα της δειγματοληψίας.

**Πίνακας 6.8:** Κύριες κατευθύνσεις ανέμων και η πιθανή προέλευσή τους.

<b>Ημερομηνία</b>	<b>Κατεύθυνση ανέμου</b>	<b>Προέλευση</b>
05/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
06/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
07/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
08/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
09/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
10/05/2023	Βόρεια	Θάλασσα
11/05/2023	Βορειοδυτική & Νοτιοδυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
12/05/2023	Βορειοδυτική & Νότια	Θάλασσα, Λιμάνι Σούδας
13/05/2023	Βορειοδυτική & Νοτιοδυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
14/05/2023	Νοτιοδυτική & Δυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
15/05/2023	Βορειοδυτική	Θάλασσα
16/05/2023	Νοτιοδυτική & Βορειοδυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
17/05/2023	Βορειοδυτική & Νοτιοδυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
18/05/2023	Νοτιοανατολική & Βορειοδυτική	Θάλασσα, Λιμάνι Σούδας
19/05/2023	Βόρεια & Βορειοανατολική	Θάλασσα, Κουνουπιδιανά, Αεροδρόμιο
20/05/2023	Βόρεια & Βορειοδυτική	Θάλασσα
21/05/2023	Νοτιοδυτική & Δυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
22/05/2023	Νοτιοδυτική & Δυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων
23/05/2023	Νοτιοδυτική	Πόλη Χανίων
24/05/2023	Νοτιοδυτική & Δυτική	Θάλασσα, Πόλη Χανίων

Από το Σχήμα 5.6 παρατηρήθηκε ότι τα  $AS_{10}$  προέρχονται από τη θάλασσα (φυσική πηγή προέλευσης) όταν πνέουν κυρίως βόρειοι, βορειοδυτικοί και δυτικοί άνεμοι. Το αναφερόμενο αποδεικνύεται και από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων, καθώς οι ημέρες με θαλάσσια προέλευση είχαν αυξημένες συγκεντρώσεις του Na, Cl και Br. Το θαλάσσιο περιβάλλον συνέβαλε σε ποσοστό 95% (19 στις 20 ημέρες της δειγματοληψίας) των ημερών που μελετήθηκαν. Παράλληλα, φαίνεται ότι οι νοτιοδυτικοί άνεμοι προέρχονται από την πόλη των Χανίων, η οποία συμβάλλει σε ποσοστό 45% (9 στις 20 ημέρες) στη μεταφορά των  $AS_{10}$ , και οι βορειοανατολικοί από τα Κουνουπιδιανά, οπότε η προέλευση των  $AS_{10}$  για αυτές τις κατευθύνσεις ανέμων είναι κυρίως ανθρωπογενής. Ακόμα, οι νότιοι και νοτιοανατολικοί άνεμοι προέρχονται κυρίως από το λιμάνι της Σούδας, το οποίο σημαίνει ότι τα  $AS_{10}$  προέρχονται κυρίως από τις εκπομπές των πλοίων. Συμπληρώνεται ότι οι βορειοανατολικοί άνεμοι μπορούν να προέρχονται και από το διεθνές αεροδρόμιο των Χανίων, στο δείγμα όμως δεν παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις στα χημικά στοιχεία που μπορούν να παραχθούν από τους κινητήρες των αεροσκαφών.

Σημειώνεται ότι στις ημέρες με νότια και νοτιοανατολική κατεύθυνση ανέμου, τα δείγματα εμφάνιζαν συγκεντρώσεις είτε V είτε V και Ni. Επομένως, εφόσον τα χημικά στοιχεία V και Ni προέρχονται από εκπομπές πλοίων, σημαίνει ότι τα δείγματα στις 12 και 18/05 επηρεάστηκαν από τις εκπομπές των πλοίων από το λιμάνι της Σούδας. Στο Διάγραμμα 6.13 απεικονίζεται το ροδόγραμμα ανέμων για τις 18/05, στο οποίο προσδιορίζεται η κατεύθυνση των ανέμων προς τον σταθμό του Ακρωτηρίου.



**Διάγραμμα 6.12:** Ροδόγραμμα ανέμου με κατεύθυνση προς τον σταθμό Ακρωτηρίου στις 18/05/2022.

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

---

Η μέση συγκέντρωση των  $AS_{10}$  που υπολογίστηκε για όλο το έτος 2022 στον σταθμό Ακρωτηρίου ήταν  $21,9 \mu g m^{-3}$ , με τις τιμές των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  να κυμαίνονται από 7,3 έως  $287,5 \mu g m^{-3}$ . Σημειώθηκαν συνολικά 15 και 20 ημέρες υπερβάσεων των ορίων για τα  $AS_{10}$  της Ε.Ε. και της ΠΟΥ αντίστοιχα. Οι υπερβάσεις των νομοθετικών ορίων οφείλονταν κυρίως στα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από την έρημο Σαχάρα και γενικά από τη Βόρεια Αφρική σε ποσοστό 80% και δευτερευόντως σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες της περιοχής, όπως οι διεργασίες καύσης, δηλαδή η οικιακή θέρμανση, και η κυκλοφορία οχημάτων.

Για το έτος 2022, εντοπίστηκαν 50 ημέρες με επεισόδια σκόνης με τη διάρκεια των επεισοδίων να κυμαίνεται από μερικές ώρες έως και 10 συνεχόμενες ημέρες. Τα περισσότερα επεισόδια σκόνης από τη Βόρεια Αφρική έγιναν, σε φθίνουσα σειρά, την άνοιξη, τον χειμώνα, το φθινόπωρο και τέλος, με τα λιγότερα επεισόδια σκόνης, το καλοκαίρι. Το σύνολο των ημερών με επεισόδια σκόνης που συνεπάγονται με υπέρβαση των νομοθετικών ορίων του ΠΟΥ ανέρχεται σε ποσοστό 32%.

Οι μηνιαίες διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  έδειξαν ότι τον μήνα Απρίλιο σημειώθηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του έτους 2022, ενώ τον μήνα Δεκέμβριο οι χαμηλότερες. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του Απριλίου οφείλονταν στα συχνά και έντονα επεισόδια μεταφοράς σκόνης από τη Βόρεια Αφρική, όπως φάνηκε από το μοντέλο HYSPLIT και τις δορυφορικές εικόνες.

Η 24ωρη ανάλυση των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  για το κάθε μήνα του έτους έδειξε τη συνεισφορά της εποχικότητας. Το χειμώνα οι συγκεντρώσεις αυξάνονταν τις ώρες 4 μμ έως 2 πμ, λόγω χρήσης της οικιακής θέρμανσης, ενώ την άνοιξη δε σημειώθηκε κάποια ιδιαίτερη αυξομείωση των  $AS_{10}$ , το οποίο οφείλεται στη μεγάλη διάρκεια των έντονων επεισοδίων σκόνης διατηρώντας τα επίπεδα των  $AS_{10}$  υψηλά. Οι μήνες του καλοκαιριού δεν παρουσίασαν κάποια ομοιομορφία μεταξύ τους στις 24ωρες αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$ , καθώς οι αυξημένες τουριστικές δραστηριότητες επηρεάζουν διαφορετικά τον κάθε μήνα. Το φθινόπωρο παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  από τις 2 πμ έως τις 9 μμ, με μέγιστο στις 7 μμ, επηρεαζόμενες από τις τοπικές πηγές, δηλαδή τη μεγάλη κυκλοφορία οχημάτων και την επαναιώρηση σκόνης του δρόμου.

Η εβδομαδιαία ημερήσια ανάλυση παρουσίασε παρόμοιες μεταβολές για τον κάθε μήνα του χρόνου, οι οποίες συνδέονται με ώρες αιχμής. Συγκεκριμένα, τις καθημερινές παρατηρήθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  το πρωί και το μεσημέρι ενώ τα σαββατοκύριακα το απόγευμα και βράδυ. Αναφέρεται ότι το Μάιο παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  τα σαββατοκύριακα λόγω των επεισοδίων σκόνης ενώ τον Αύγουστο τις καθημερινές λόγω της τουριστικής δραστηριότητας.

Για τη περίοδο δειγματοληψίας μετρήθηκαν συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  που κυμαίνονται από 15,1 έως 30,7  $\mu\text{g m}^{-3}$ , με τη μέση τιμή να ανέρχεται στα 20,7  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Η στοιχειακή ανάλυση των δειγμάτων με  $AS_{10}$  παρουσίασε αυξημένες συγκεντρώσεις του Na, Cl και το S, δηλαδή χημικών στοιχείων προερχόμενων από το θαλάσσιο περιβάλλον. Ακόμα, αυξημένες συγκεντρώσεις είχαν και τα χημικά στοιχεία Si, Ca και Al που προέρχονται από τον φλοιό της Γης. Τα χημικά στοιχεία όπως το V, Mn, Pb, Br και Zn είναι σε πολύ μικρότερες συγκριτικά συγκεντρώσεις. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα των 20 ημερών δεν εμπεριείχαν καθόλου Co, Cu, As, Se και Rb.

Ο συντελεστής εμπλουτισμού των χημικών στοιχείων που υπολογίστηκε με βάση το Al, έδειξε ότι τα χημικά στοιχεία Na, S, Cl, V, Zn, Br και Pb έχουν σημαντική ανθρωπογενής προέλευση, το Na, Mg, P, K, Ca, Mn και Fe είναι και φυσικής και ανθρωπογενής, ενώ το Si και Ti μόνο φυσικής προέλευσης. Ο λόγος για τον υψηλό συντελεστή εμπλουτισμού του Na, Cl και S είναι η εγγύτητα του σταθμού Ακρωτηρίου με τη θάλασσα, καθώς το Na, Cl και S είναι χημικά στοιχεία προερχόμενα από τη φύση. Συμπληρώνεται ότι οι λόγοι των χημικών στοιχείων του φλοιού της Γης έδειξαν ότι οι λόγοι με το Al αποτελούν καλούς δείκτες για τη μεταφερόμενη σκόνη από τη Βόρεια Αφρική.

Τέλος, με τα ροδογράμματα των μετεωρολογικών δεδομένων φάνηκε ότι οι άνεμοι πνέουν συχνά με κατεύθυνση κυρίως από τη θάλασσα και από την πόλη των Χανίων προς τον σταθμό, τα οποία αιτιολογούν τα ευρήματα των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων. Επιπροσθέτως, από το ροδόγραμμα ανέμων και τη χημική ανάλυση των δειγμάτων στις 12/05/22 και 18/05/22 παρατηρήθηκε η συμβολή των εκπομπών των πλοίων στη συγκέντρωση των  $AS_{10}$ .

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των μεταβολών των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  για όλο το έτος, όπως και των πιθανών πηγών προέλευσής τους. Για την περαιτέρω εξέλιξη των αποτελεσμάτων, θεωρείται σημαντική η εύρεση και μελέτη των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων των  $AS_{10}$  ολόκληρου του έτους και όχι μόνο 20 ημερών, έτσι ώστε να διερευνηθούν η εποχικότητα και μεταβολή τους για όλο το χρόνο και ιδίως για τις ημέρες με έντονα επεισόδια σκόνης. Επιπλέον, θα ήταν ενδιαφέρον σαν μελλοντική έρευνα να υπολογιστούν ταυτόχρονα για το ίδιο χρονικό διάστημα οι συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  σε διαφορετικές τοποθεσίες, όπως σε αστική, προαστική και αγροτική περιοχή, με την ταυτόχρονη στοιχειακή και μετεωρολογική ανάλυση των σωματιδίων της κάθε περιοχής, προκειμένου να παρατηρηθούν οι διαφορές των μεταβολών των συγκεντρώσεων της κάθε περιοχής και για τη σύγκριση της επίδρασης των φυσικών και ανθρωπογενείς πηγών στην κάθε περιοχή. Ακόμα, ο ταυτόχρονος υπολογισμός των συγκεντρώσεων των  $AS_{2,5}$  για την ίδια χρονική περίοδο σε διαφορετικές περιοχές, θα μπορούσε να δώσει ενδιαφέρον αποτελέσματα, καθώς η μελέτη των λεπτών σωματιδίων είναι εξίσου σημαντική με σοβαρότερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abegglen, M., Brem, B.T., Ellenrieder, M., Durdina, L., Rindlisbacher, T., Wang, J., Lohmann, U. and Sierau, B. (2016) 'Chemical characterization of freshly emitted particulate matter from aircraft exhaust using single particle mass spectrometry', *Atmospheric Environment*, 134, pp. 181–197. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.051>.
- Amato, F., Moreno, T., Pandolfi, M., Querol, X., Alastuey, A., Delgado, A., Pedrero, M. and Cots, N. (2010) 'Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport', *Journal of Environmental Monitoring*, 12(4), pp. 854–862. Available at: <https://doi.org/10.1039/b925439k>.
- Andrea, H., Harun, P. and Brock, T.H. (2012) 'Aerosols - Dusts, Fumes and Mists [MAK Value Documentation, 1999]', *The MAK-Collection for Occupational Health and Safety*, pp. 272–292. Available at: <https://doi.org/10.1002/3527600418.MB0AEROAERE0012>.
- Beysens, D. (1995) 'The formation of dew', *Atmospheric Research*, 39(1–3), pp. 215–237. Available at: [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(95\)00015-J](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00015-J).
- Beysens, D., Steyer, A., Guenoun, P., Fritter, D. and Knobler, C.M. (1991) 'How Does Dew Form?', *Phase Transitions*, 31(1–4), pp. 219–246. Available at: <https://doi.org/10.1080/01411599108206932>.
- Boreson, J., Dillner, A.M. and Peccia, J. (2004) 'Correlating bioaerosol load with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations: A comparison between natural desert and urban-fringe aerosols', *Atmospheric Environment*, 38(35), pp. 6029–6041. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.06.040>.
- Brouwer, P. (2003) *Theory of XRF : getting acquainted with the principles*. 3rd Edition. PANalytical BV.
- Bruker (2010) *X-Ray Radiation: Safety Manual for Operator Training*.
- Bruker (2016) *S1 TITAN/TRACER 5i User Manual*. Available at: [www.geotechenv.com](http://www.geotechenv.com).
- Calvert, S. and Englund, H.M. (1984) *Handbook of air pollution technology*. United States: Wiley-Interscience.
- Chalvatzaki, E., Chatoutsidou, S.E., Lehtomäki, H., Almeida, S.M., Eleftheriadis, K., Hänninen, O. and Lazaridis, M. (2019) 'Characterization of human health risks from particulate air pollution in selected European cities', *Atmosphere*, 10(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/ATMOS10020096>.
- Chatoutsidou, S.E., Kopanakis, I., Lagouvardos, K., Mihalopoulos, N., Tørseth, K. and Lazaridis, M. (2019) 'PM<sub>10</sub> levels at urban, suburban, and background locations in the eastern Mediterranean: local versus regional sources with emphasis on African dust', *Air Quality, Atmosphere and Health*, 12(11), pp. 1359–1371. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00750-4>.
- Chatoutsidou, S.E. and Lazaridis, M. (2022) 'Mass concentrations and elemental analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in a coastal Mediterranean site: A holistic approach to identify contributing sources and varying factors', *Science of the Total Environment*, 838. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155980>.
- Chatoutsidou, S.E., Pantelaki, C., Kopanakis, I., Andreadakis, D., Petroulakis, S. and Lazaridis, M. (2021) 'Mass concentration and elemental content of PM<sub>10</sub> during painting/sketching activities in a

university classroom', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(5), pp. 1061–1072. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02917-4>.

Chatoutsidou, S.E., Papagiannis, S., Anagnostopoulos, D.F., Eleftheriadis, K., Lazaridis, M. and Karydas, A.G. (2022) 'Application of a handheld X-ray fluorescence analyzer for the quantification of air particulate matter on Teflon filters', *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 196, p. 106517. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106517>.

Chen, W., Wu, S., Liao, D. and Zhang, H. (2022) 'Impact of PM<sub>10</sub> Particles on the Measurement Error of SO<sub>2</sub> Electrochemical Gas Sensor', *Atmosphere*, 13(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13091512>.

Cheng, C.T., Wang, W.C. and Chen, J.P. (2010) 'Simulation of the effects of increasing cloud condensation nuclei on mixed-phase clouds and precipitation of a front system', *Atmospheric Research*, 96(2–3), pp. 461–476. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.02.005>.

Cooper C. D. and Alley C. F. (2004) *Air Pollution Control, A Design Approach*. 3η Έκδοση. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

Cooper, C.D. and Alley, F.C. (2004) Έλεγχος αέριας ρύπανσης-Σχεδιασμός αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Εκδόσεις Τζιόλα.

Cox C.S. and Wathes C.M. (eds) (1995) *Bioaerosols Handbook*. 1η Έκδοση. CRC Press. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781003070023>.

Dimitriou, K. and Kassomenos, P. (2019) 'Estimation of North African dust contribution on PM<sub>10</sub> episodes at four continental Greek cities', *Ecological Indicators*, 106. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105530>.

Dzyaloshinskii, I.E., Lifshitz, E.M. and Pitaevskii, L.P. (1961) 'The general theory of van der Waals forces', *Advances in Physics*, 10(38), pp. 165–209. Available at: <https://doi.org/10.1080/00018736100101281>.

Enviro Technology (2018) *DIGITEL DPA14 Low Volume Aerosol Sampler (LVS)*. Available at: <https://www.et.co.uk/products/air-quality-monitoring/particulate-monitoring/digitel-dpa14-low-volume-aerosol-sampler-lvs> (Accessed: 21 September 2022).

Environmental Protection Agency (1999) *Air Quality Index Reporting; Final Rule*, 40 CFR part 58.

Evans, P. (2015) *Properties of Air at atmospheric pressure*. Available at: <https://theengineeringmindset.com/properties-of-air-at-atmospheric-pressure/> (Accessed: 18 May 2023).

Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts, J.N. (2000) *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*. San Diego, CA: Academic Press. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780122570605> (Accessed: 22 April 2023).

Frey, L. (2019) *Aerosol-cloud-radiation interactions in global climate models*. Stockholm University.

Friedlander, S.K. (2000) *Smoke, dust, and haze: fundamentals of aerosol dynamics*. 2η Έκδοση. New York: Oxford University Press, Inc.

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M.C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M.,



Slowik, J.G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M. and Gilardoni, S. (2015) 'Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs', *Atmospheric Chemistry and Physics*. Copernicus GmbH, pp. 8217–8299. Available at: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>.

Godish, T. (1991) *Air Quality*. 2η Έκδοση. LEWIS PUBLISHERS, INC.

Goudie, A.S. and Middleton, N.J. (2001) *Saharan dust storms: nature and consequences*, *Earth-Science Reviews*. Available at: [www.elsevier.com/locate/earscirev](http://www.elsevier.com/locate/earscirev).

Gultepe I., Tardif R., Michaelides S. C., Cermak J., Bott A., Bendix J., Müller M. D., Pagowski M., Hansen B., Ellrod G., Jacobs W., Toth G. and Cober S. G. (2007) 'Fog research: A review of past achievements and future perspectives', *Pure and Applied Geophysics*, pp. 1121–1159. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>.

Guo, B., Wang, Y., Zhang, X., Che, H., Zhong, J., Chu, Y. and Cheng, L. (2020) 'Temporal and spatial variations of haze and fog and the characteristics of PM<sub>2.5</sub> during heavy pollution episodes in China from 2013 to 2018', *Atmospheric Pollution Research*, 11(10), pp. 1847–1856. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.019>.

Hamaker, H.C. (1937) 'The London-van der Waals attraction between spherical particles', *Physica*, 4(10), pp. 1058–1072. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(37\)80203-7](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(37)80203-7).

Harris, S.J. and Kennedy, I.M. (1988) 'The Coagulation of Soot Particles with van der Waals Forces', *Combustion Science and Technology*, 59(4–6), pp. 443–454. Available at: <https://doi.org/10.1080/00102208808947110>.

Haynes B. S. and Wagner H. Gg (1981) 'Soot formation', *Progress in Energy and Combustion Science*, 7(4), pp. 229–273. Available at: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(81\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0360-1285(81)90001-0).

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

Hyde, P. and Mahalov, A. (2020) 'Contribution of bioaerosols to airborne particulate matter', *Journal of the Air and Waste Management Association*. Taylor and Francis Inc., pp. 71–77. Available at: <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1629360>.

Kathmann, S.M., Schenter, G.K. and Garrett, B.C. (2008) 'The Impact of Molecular Interactions on Atmospheric Aerosol Radiative Forcing', *Advances in Quantum Chemistry*, 55, pp. 429–447. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0065-3276\(07\)00220-1](https://doi.org/10.1016/S0065-3276(07)00220-1).

Kiehl, J.T. and Rodhe, H. (1995) 'Aerosol Forcing of Climate', in R. Charlson and J. Heintzenberg (eds), pp. 281–296. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/245229011>.

Kopanakis, I., Mammi-Galani, Pentari, D., Glytsos, T. and Lazaridis, M. (2018) 'Ambient Particulate Matter Concentration Levels and their Origin During Dust Event Episodes in the Eastern Mediterranean', *Aerosol Science and Engineering*, 2(2), pp. 61–73. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41810-018-0023-7>.

Kopanakis, I., Chatoutsidou, S.E., Glytsos, T. and Lazaridis, M. (2018) 'Impact from local sources and variability of fine particle number concentration in a coastal sub-urban site', *Atmospheric Research*, 213, pp. 136–148. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.002>.

Kulkarni P., Baron P. A. and Willeke K. (eds) (2011) *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 3η Έκδοση, *Aerosol Measurement*. 3η Έκδοση. John Wiley & Sons, Inc. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781118001684.fmatter>.

Lau, R. and Chuah, H.K.L. (2013) 'Dynamic shape factor for particles of various shapes in the intermediate settling regime', *Advanced Powder Technology*, 24(1), pp. 306–310. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2012.08.001>.

Lazaridis M. (2011) *First Principles of Meteorology and Air Pollution*. Available at: [www.springer.com/series/5929](http://www.springer.com/series/5929).

Lazaridis, M. and Colbeck, I. (eds) (2010) *Human Exposure to Pollutants via Dermal Absorption and Inhalation*. Available at: [www.springer.com/series/5929](http://www.springer.com/series/5929).

Lazaridis, M., Katsivela, E., Kopanakis, I., Raisi, L., Mihalopoulos, N. and Panagiaris, G. (2018) 'Characterization of airborne particulate matter and microbes inside cultural heritage collections', *Journal of Cultural Heritage*, 30, pp. 136–146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.018>.

Lokorai, K., Ali-Khodja, H., Khardi, S., Bencharif-Madani, F., Naidja, L. and Bouziane, M. (2021) 'Influence of mineral dust on the concentration and composition of PM10 in the city of Constantine', *Aeolian Research*, 50. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100677>.

Makridis, M. and Lazaridis, M. (2019) 'Dispersion modeling of gaseous and particulate matter emissions from aircraft activity at Chania Airport, Greece', *Air Quality, Atmosphere and Health*, 12(8), pp. 933–943. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00710-y>.

McGraw-Hill (2017) *Dictionary of Engineering*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

Meteoblue (2014) *Προσομοίωση ιστορικών δεδομένων κλίματος και καιρού για Χανιά - meteoblue*. Available at: [https://www.meteoblue.com/el/%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82/historyclimate/climatemodelled/%CE%A7%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%AC\\_%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1\\_260114](https://www.meteoblue.com/el/%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82/historyclimate/climatemodelled/%CE%A7%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%AC_%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1_260114) (Accessed: 22 September 2022).

NAAQS Table | US EPA (2023). Available at: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (Accessed: 18 May 2023).

NASA (no date a) *Air Quality Index and Aerosol Density*. Available at: <https://spacemath.gsfc.nasa.gov/> (Accessed: 13 July 2023).

NASA (no date b) *Zoom Earth | LIVE weather map, storm tracker, rain radar*. Available at: <https://zoom.earth/> (Accessed: 20 September 2022).

Nefros, C., Tsagkas, D.S., Kitsara, G., Loupasakis, C. and Giannakopoulos, C. (2023) 'Landslide Susceptibility Mapping under the Climate Change Impact in the Chania Regional Unit, West Crete, Greece', *Land*, 12(1). Available at: <https://doi.org/10.3390/land12010154>.

*Overview of the Clean Air Act and Air Pollution | US EPA* (no date). Available at: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview> (Accessed: 18 May 2023).

Pöschl, U. (2005) 'Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects', *Angewandte Chemie - International Edition*, pp. 7520–7540. Available at: <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>.

- Querol, X., Tobías, A., Pérez, N., Karanasiou, A., Amato, F., Stafoggia, M., Pérez García-Pando, C., Ginoux, P., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P. and Alastuey, A. (2019) 'Monitoring the impact of desert dust outbreaks for air quality for health studies', *Environment International*. Elsevier Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.061>.
- Reid, J.P., Bertram, A.K., Topping, D.O., Laskin, A., Martin, S.T., Petters, M.D., Pope, F.D. and Rovelli, G. (2018) 'The viscosity of atmospherically relevant organic particles', *Nature Communications*. Nature Publishing Group. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03027-z>.
- Rolph, G., Stein, A. and Stunder, B. (2017) 'Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY', *Environmental Modelling and Software*, 95, pp. 210–228. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.
- Ruzer, L.S. and Harley, N.H. (eds) (2012) *Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects*. CRC Press. Available at: [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Sn0hT9jlj9AC&oi=fnd&pg=PP1&dq=aerosols+handbook&ots=9Ct3KSH51d&sig=vmoZpSD3\\_pP6x5vHMBFDOofh4Ng](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Sn0hT9jlj9AC&oi=fnd&pg=PP1&dq=aerosols+handbook&ots=9Ct3KSH51d&sig=vmoZpSD3_pP6x5vHMBFDOofh4Ng) (Accessed: 6 May 2023).
- Scheuvens, D., Schütz, L., Kandler, K., Ebert, M. and Weinbruch, S. (2013) 'Bulk composition of northern African dust and its source sediments - A compilation', *Earth-Science Reviews*, pp. 170–194. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.005>.
- Schnelle, K.B. and Brown, C.A. (Charles A. (2002) *Air pollution control technology handbook*. CRC Press.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 1η Έκδοση. John Wiley & Sons. Available at: [https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=n\\_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Atmospheric+Chemistry+and+Physics:+From+Air+Pollution+to+Climate+Change+1st+Edition&ots=gSNbBNrcbR&sig=iQxRjteJKOtmYgKrP594E26lhE8](https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=n_RmCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Atmospheric+Chemistry+and+Physics:+From+Air+Pollution+to+Climate+Change+1st+Edition&ots=gSNbBNrcbR&sig=iQxRjteJKOtmYgKrP594E26lhE8) (Accessed: 24 May 2023).
- Shokrollahi, H. (2016) 'The effect of the volume fraction and viscosity on the compression and tension behavior of the cobalt-ferrite magneto-rheological fluids', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1), pp. 604–609. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.011>.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D. and Ngan, F. (2015) 'Noaa's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system', *Bulletin of the American Meteorological Society*. American Meteorological Society, pp. 2059–2077. Available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
- Sun, S., Cross, G., Bisaga, M., Lin, L. and Fu, L. (2020) *Standard Operating Procedure for Measurement of Particulate matter by Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate Monitor (5030 & 5030i)*. Available at: <https://open.alberta.ca/publications/sop-measurement-particulate-matter-by-sharp-monitor>.
- Thermo Scientific (2018) *Model 5030i SHARP Instruction Manual Synchronized Hybrid Ambient Real-time Particulate Monitor*. Available at: [www.thermo.com/WEEERoHS](http://www.thermo.com/WEEERoHS).
- ThermoFisher Scientific (2020) *What is XRF (X-ray fluorescence) and How Does it Work?* Available at: <https://www.thermofisher.com/blog/ask-a-scientist/what-is-xrf-x-ray-fluorescence-and-how-does-it-work/> (Accessed: 23 September 2022).

Tsiourlis G. M., Kasapidis P. and Konstandinidis P. (2001) *Effects of grazing on the structure and dynamics of Mediterranean Ecosystems in Central Crete, Greece*.

Tsuji K., Injuk J. and Grieken Van R. (2004) *X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances*. WILEY.

U.S. Environmental Protection Agency / US EPA (no date). Available at: <https://www.epa.gov/> (Accessed: 18 May 2023).

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

World Health Organization (2021) *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.

Yuan, Q., Liu, Z., Zheng, K. and Ma, C. (2021) 'Portland cement concrete', *Civil Engineering Materials*, pp. 59–204. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00003-9>.

Zhang, L., Liu, T., Zhang, J., Zhu, B., Xiang, D., Zhao, X. and Liu, X. (2022) 'Bioaerosol Seasonal Variation and Contribution to Airborne Particulate Matter in Huangshi City of Central China', *Atmosphere*, 13(6). Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13060909>.

Ανδρίτσος, Ν. (2015) *Σωματιδιακοί Ρύποι*. Τεχνολογία Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας .

Γεντεκάκης, Ι. (2010) *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: επιπτώσεις, έλεγχος & εναλλακτικές τεχνολογίες*. 2η Έκδοση. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Δάρας, Ι.Τ. και Σύψας, Θ.Π. (2010) *Πιθανότητες και Στατιστική: θεωρία & εφαρμογές*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.

Δάσκαλος Ε. (2008) *Μορφολογική ανάλυση σωματιδίων αιθάλης προτύπου αερολύματος με θεωρία fractal*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Δήμος Χανίων (χ. χ.) *Δημοτική Ενότητα Σούδας*. Διαθέσιμο στο: <https://www.chania.gr/municipality/desoudas/de-souda.html> (Πρόσβαση: 22 Σεπτεμβρίου 2022).

Ελληνική Στατιστική Αρχή (χ. χ.) *Ελληνική Στατιστική Αρχή*. Διαθέσιμο στο: <https://www.statistics.gr/> (Πρόσβαση: 22 Σεπτεμβρίου 2022).

Κακαράς, Ε., Καρέλλας, Σ., Βουρλιώτης, Π., Γιαννακόπουλος, Δ., Γραμμέλης, Π., Πάλλης, Π. και Καραμπίνης, Ε. (2013) *Δείκτες εκπομπών ανά τύπο καυσίμου & τεχνολογία θέρμανσης*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης.

Καλαμαράς, Ν. (2019) *Πρόβλεψη μετεωρολογικών χρονοσειρών με τη χρήση μη γραμμικών μεθόδων*. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας. Διαθέσιμο στο: <https://doi.org/10.12681/EADD/46217>.

Λαζαρίδης, Μ. (2010) *Ατμοσφαιρική Ρύπανση με Στοιχεία Μετεωρολογίας*. 2η Έκδοση. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

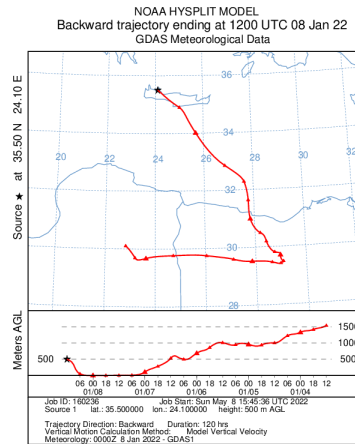
Λαζαρίδης, Μ. (2015) *Βασικές Αρχές της Επιστήμης των Αεροζόλ*. 1η Έκδοση. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Μελάς, Δ. (2007) *Ατμοσφαιρική Διάχυση και Διασπορά*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

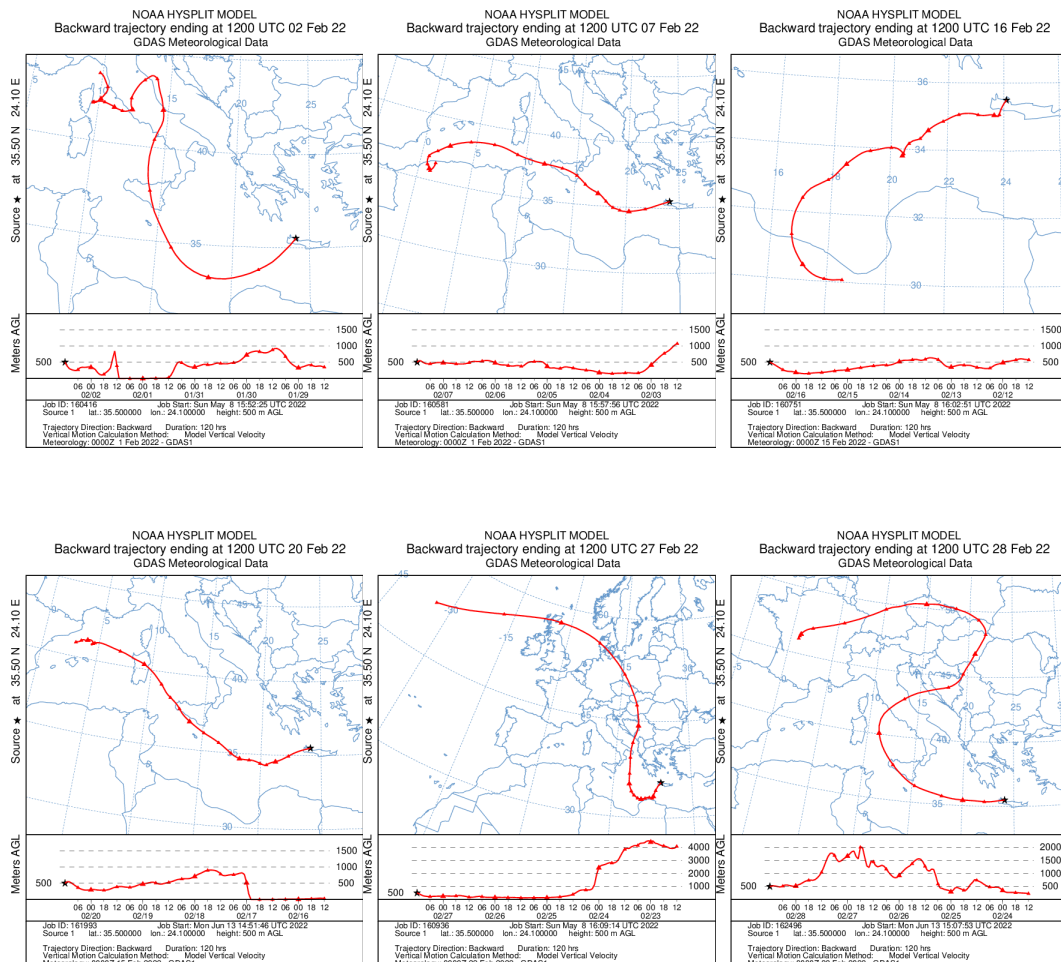
- Μισαηλίδης, Π. και Νόλη, Φ. (2020) *Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία: Βασικές αρχές και Εφαρμογές*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Μουσιόπουλος, Ν.Σ. (1997) *Φαινόμενα Μεταφοράς στην Ατμόσφαιρα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ - ΓΙΑΠΟΥΛΗ Ο.Ε.
- Μπινιάρης Σ. Ε. και Μπινιάρης Μ. Σ. (2015) *Μια ολοκληρωμένη μελέτη για τη ρύπανση και την προστασία του περιβάλλοντος*. 2η Έκδοση. Εκδόσεις Αγγελάκη.
- Πετροπούλου Όξενκιουν Μ. (2006) *ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ*. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- Τζιάρας Θ. (2010) *Μελέτη του οργανικού κλάσματος των πρωτογενών και δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα της ανατολικής Μεσογείου*. Πανεπιστήμιο Κρήτης. Διαθέσιμο στο: <https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/22481?lang=el#page/16/mode/2up> (Πρόσβαση: 1 Μαΐου 2023).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

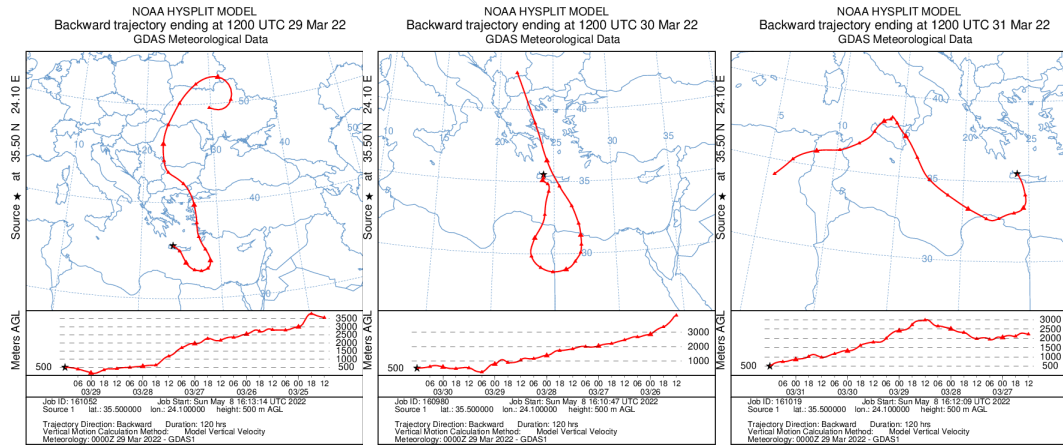
Στο παράρτημα Α φαίνονται όλες οι εικόνες από το μοντέλο Hysplit για τις ημέρες με επεισόδια σκόνης για το κάθε μήνα του έτους 2022.



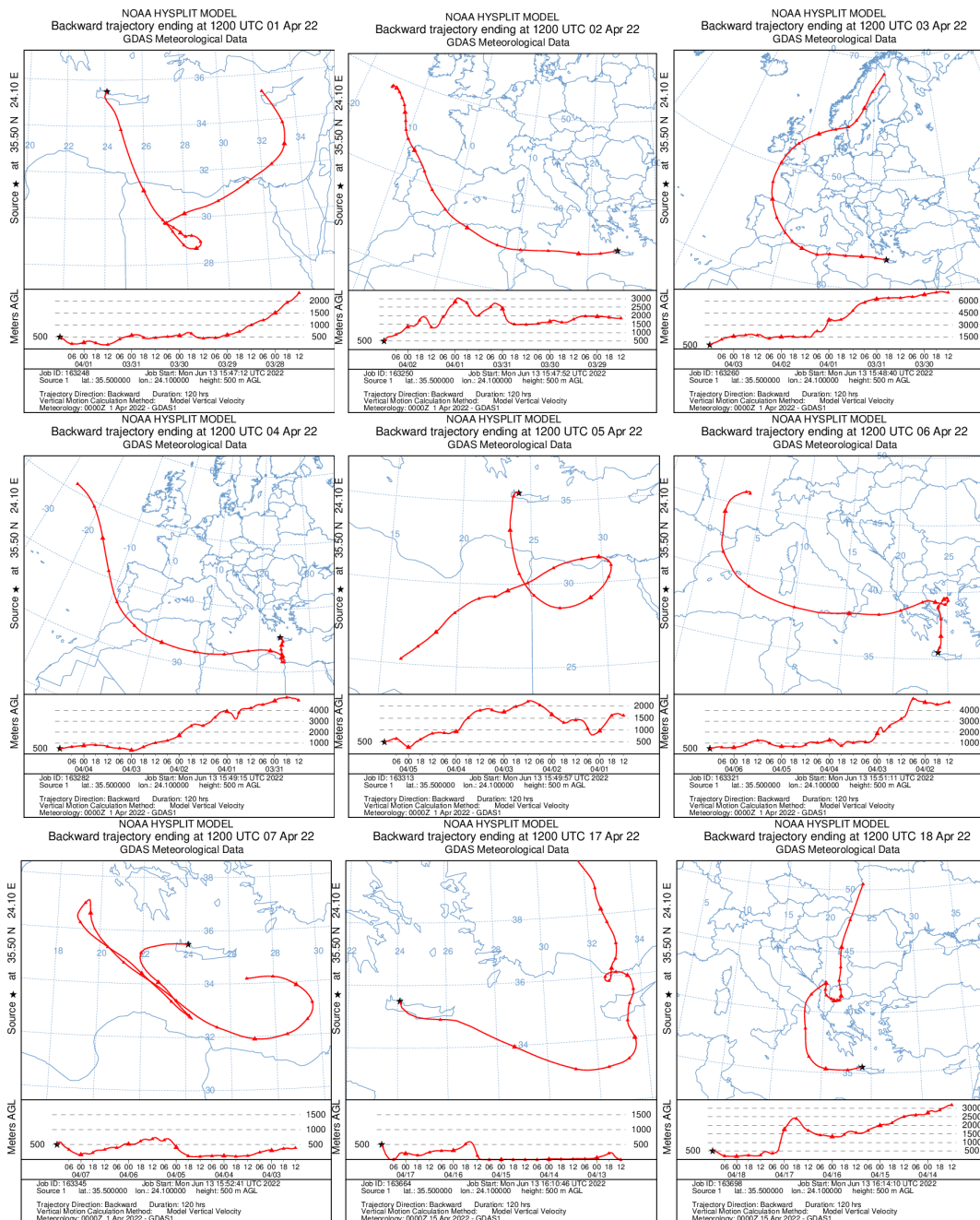
**Διάγραμμα Α. 1:** Επεισόδιο σκόνης του Ιανουαρίου για το 2022.

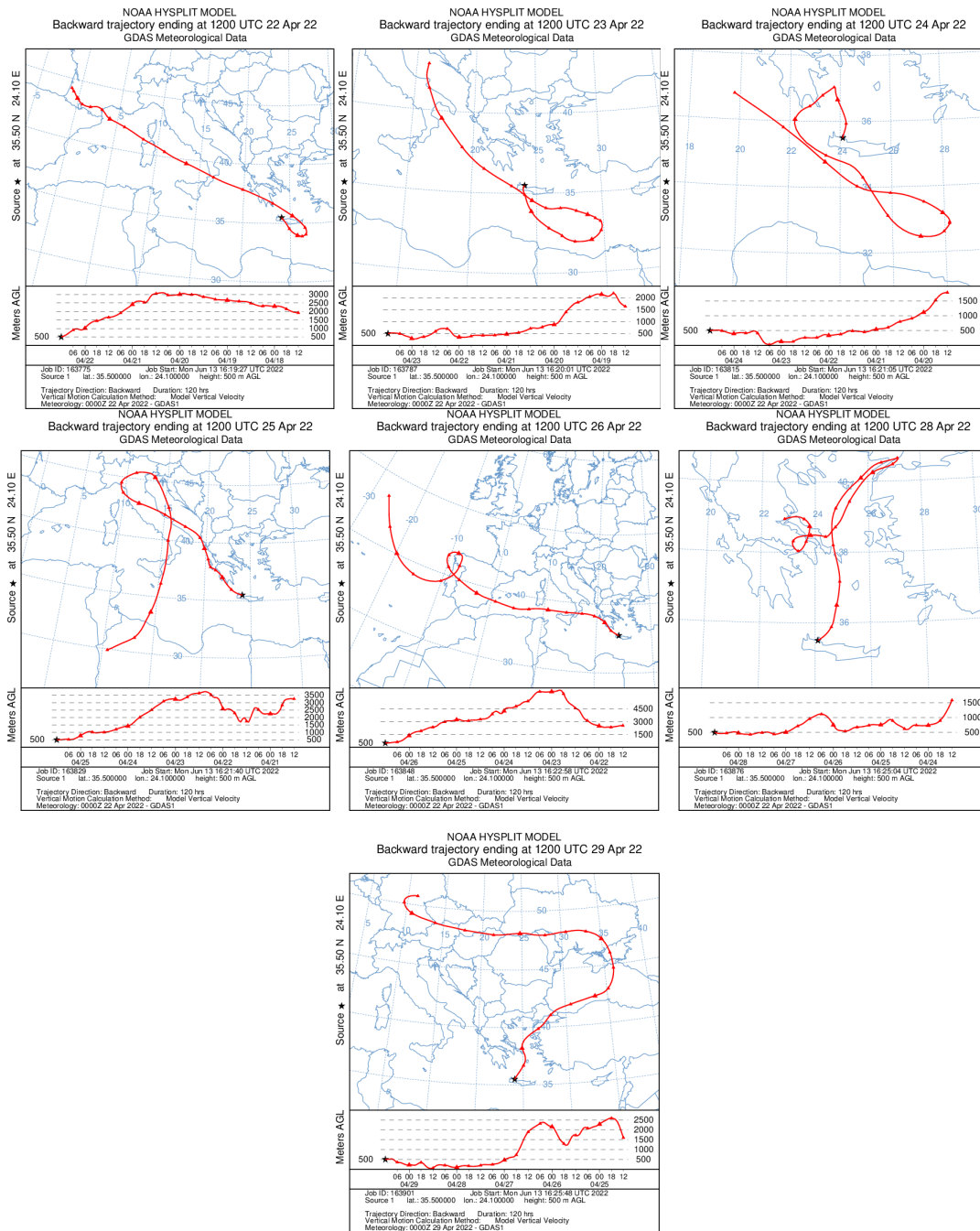


**Διάγραμμα Α.2:** Επεισόδια σκόνης του Φεβρουαρίου για το 2022.

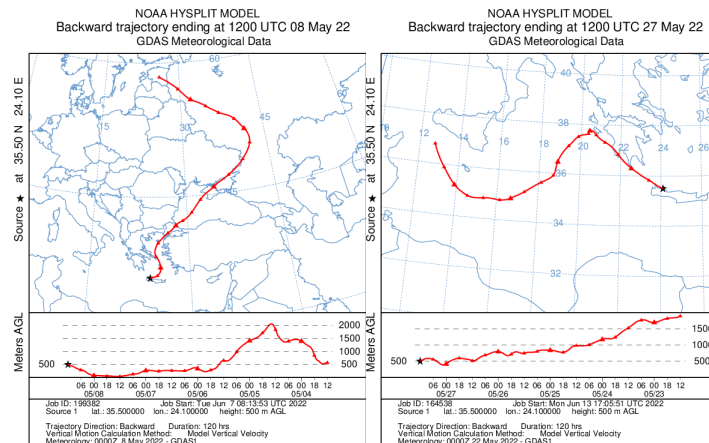


**Διάγραμμα Α.3:** Επεισόδια σκόνης του Μάρτιου για το 2022.

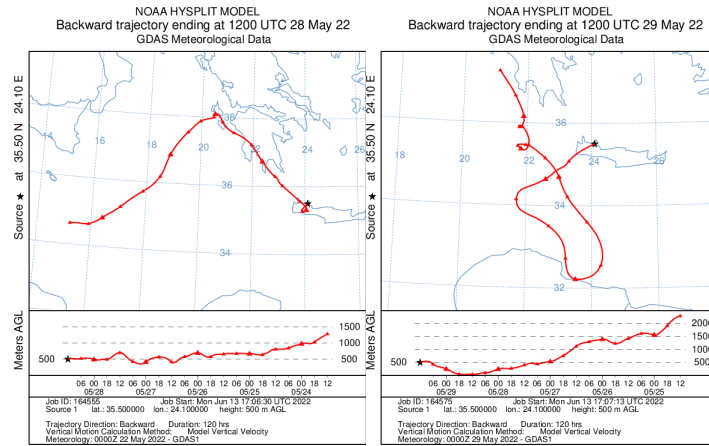




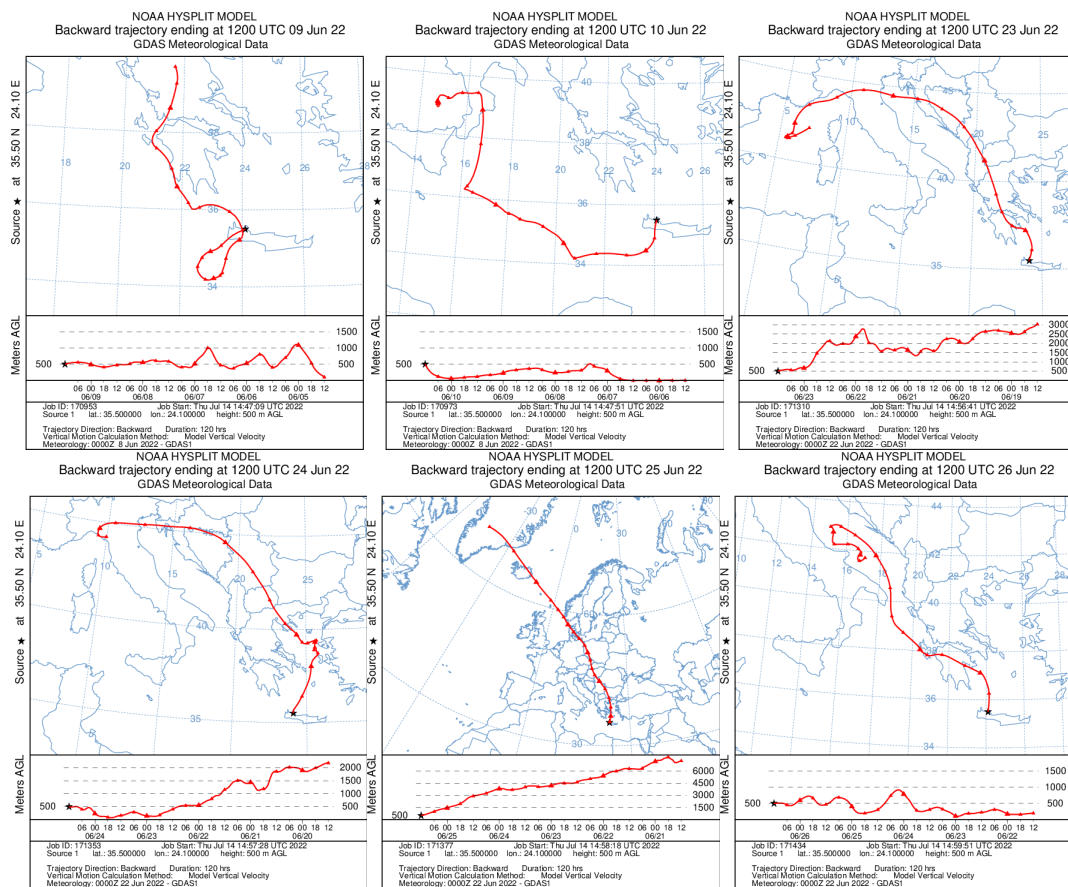
**Διάγραμμα Α.4:** Επεισόδια σκόνης του Απριλίου για το 2022.



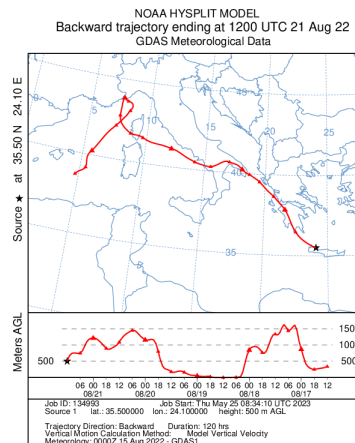




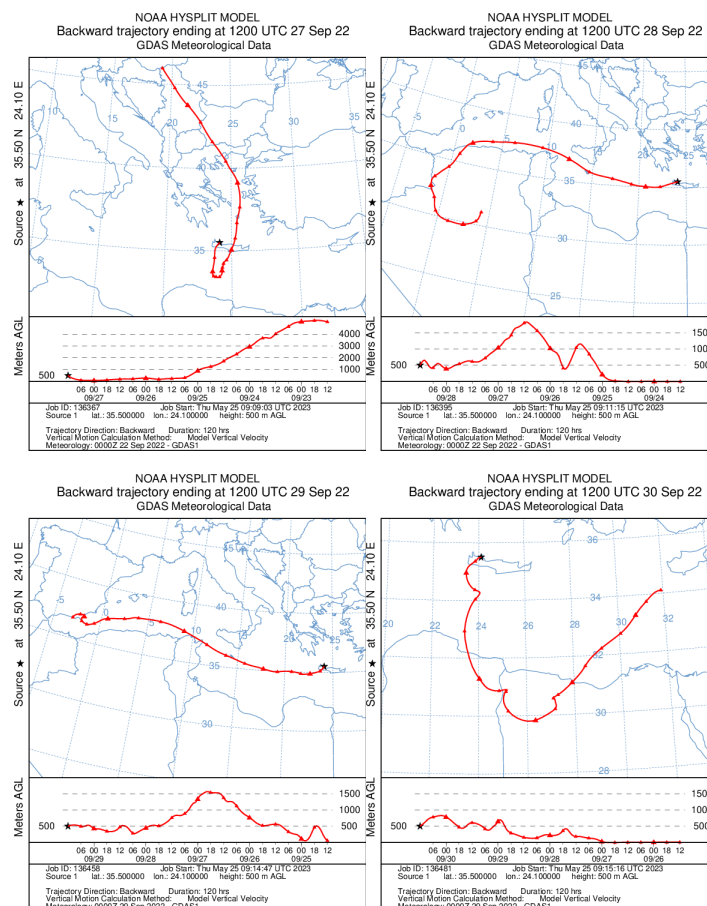
**Διάγραμμα Α.5: Επεισόδια σκόνης του Μαΐου για το 2022.**



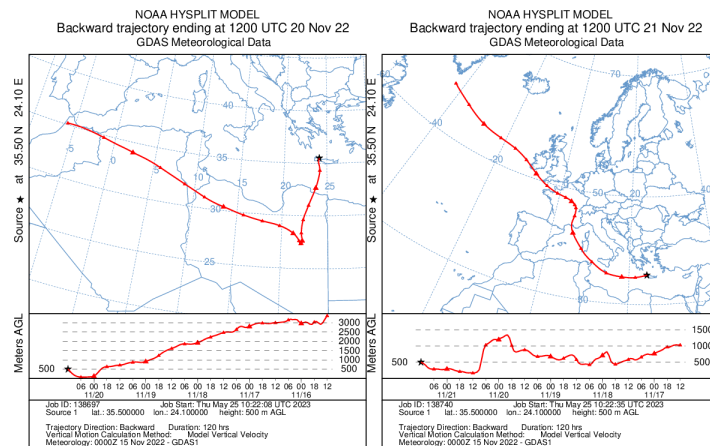
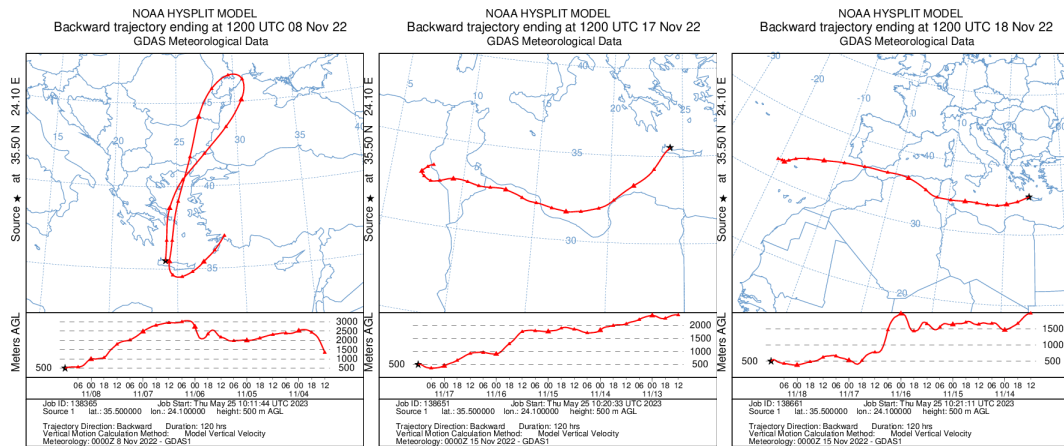
**Διάγραμμα Α.6: Επεισόδια σκόνης του Ιουνίου για το 2022.**



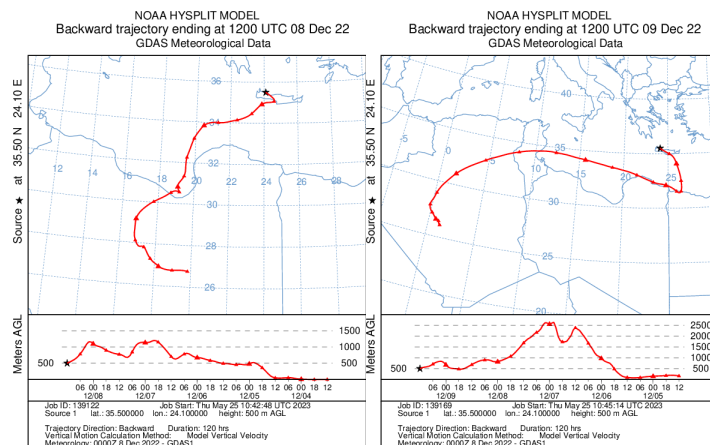
**Διάγραμμα Α.7:** Επεισόδιο σκόνης του Αύγουστου για το 2022.

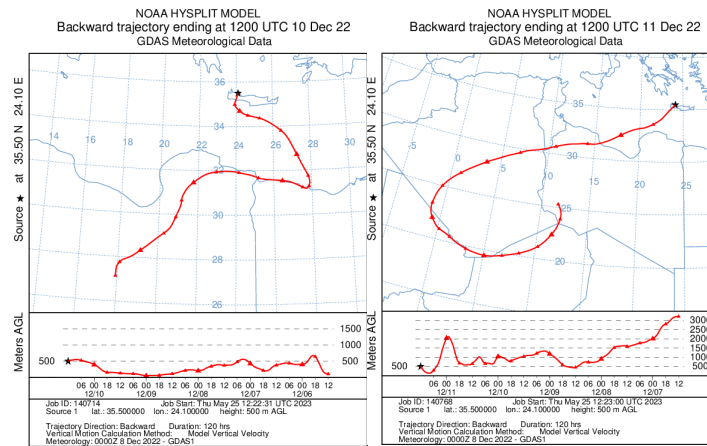


**Διάγραμμα Α.8:** Επεισόδια σκόνης του Σεπτεμβρίου για το 2022.



**Διάγραμμα Α.9:** Επεισόδια σκόνης του Νοεμβρίου του 2022.

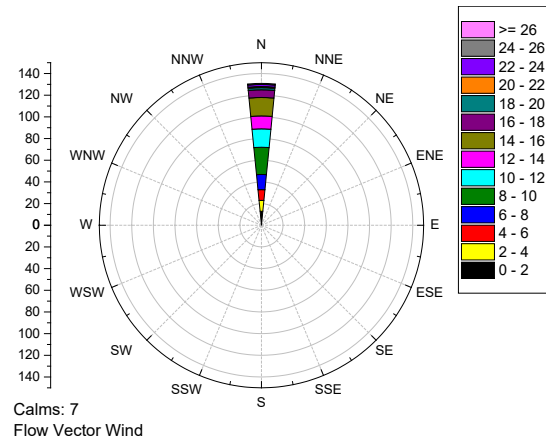
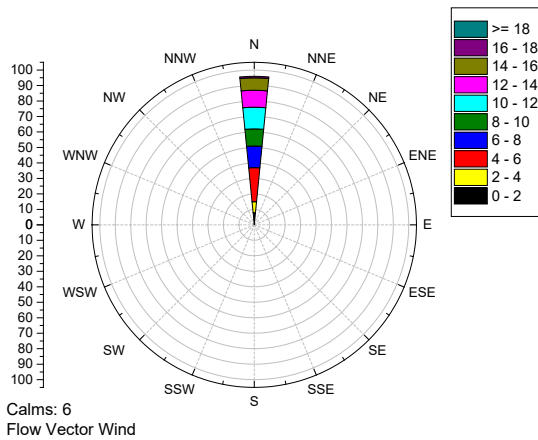




**Διάγραμμα A.10:** Επεισόδια σκόνης του Δεκεμβρίου του 2022.

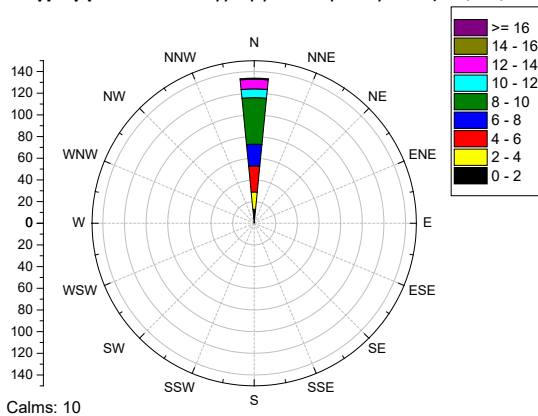
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Το Παράρτημα Β περιέχει τα ροδोगράμματα ανέμων για τις 20 ημέρες δειγματοληψίας, δηλαδή από τις 05/05/2022 έως τις 24/05/2022.

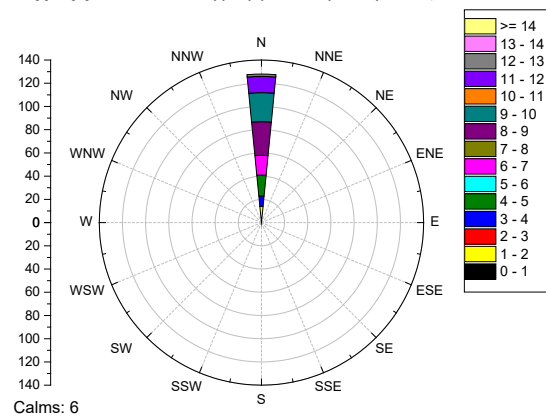


**Διάγραμμα B.1:** Ροδोगράμμα ανέμων για τις 05/05/22.

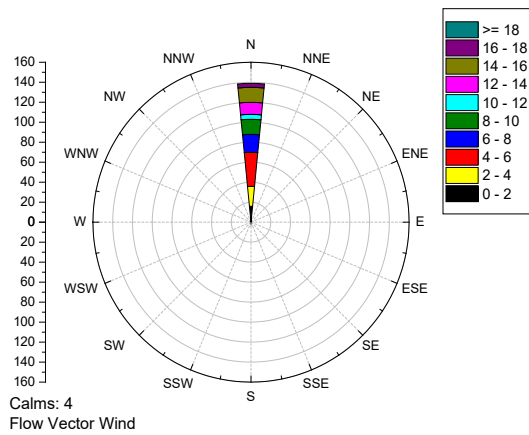
**Διάγραμμα B.2:** Ροδोगράμμα ανέμων για τις 06/05/22.



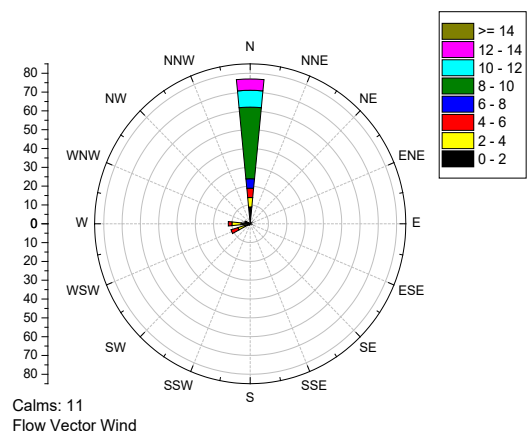
**Διάγραμμα B.3:** Ροδोगράμμα ανέμων για τις 07/05/22.



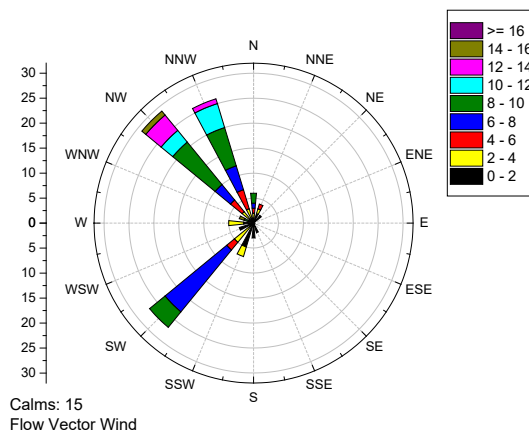
**Διάγραμμα B.4:** Ροδोगράμμα ανέμων για τις 08/05/22.



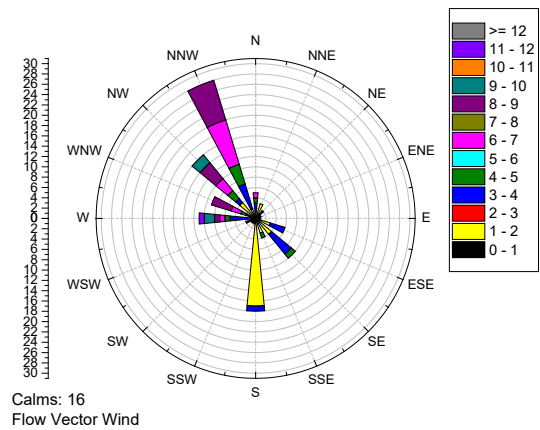
**Διάγραμμα Β.5:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 09/05/22.



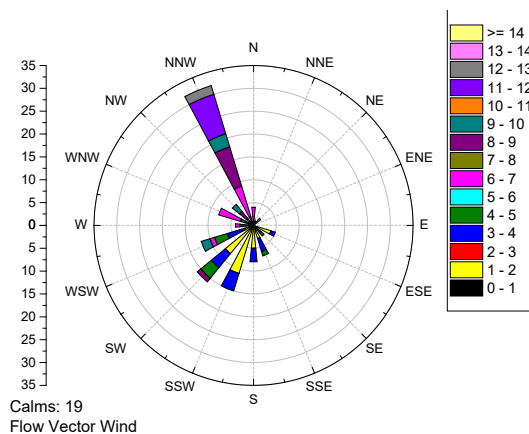
**Διάγραμμα Β.6:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 10/05/22.



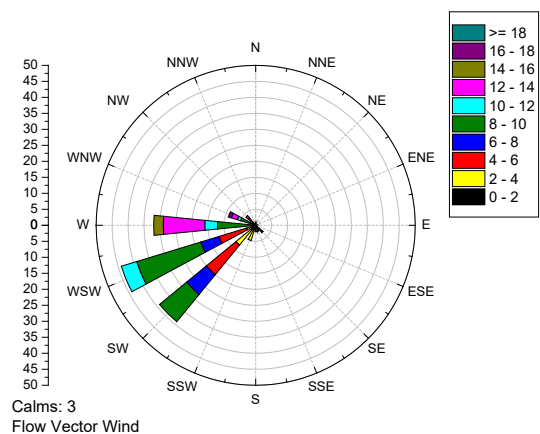
**Διάγραμμα Β.7:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 11/05/22.



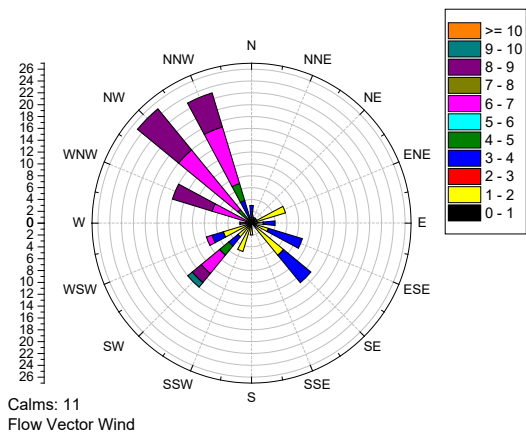
**Διάγραμμα Β.8:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 12/05/22.



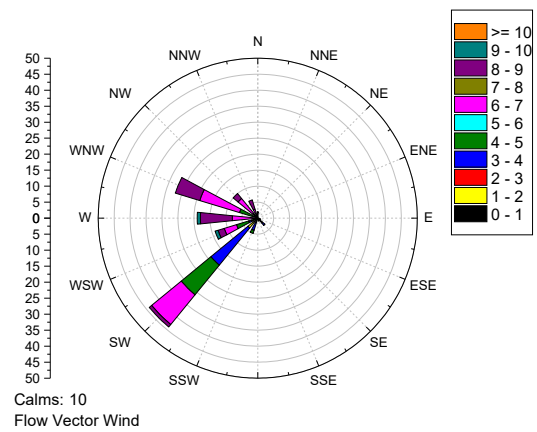
**Διάγραμμα Β.9:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 13/05/22.



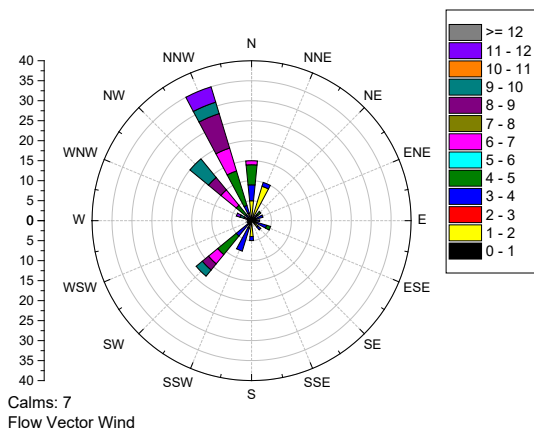
**Διάγραμμα Β.10:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 14/05/22.



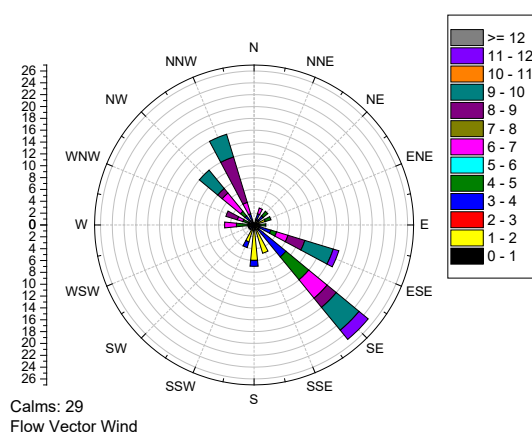
**Διάγραμμα Β.11:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 15/05/22.



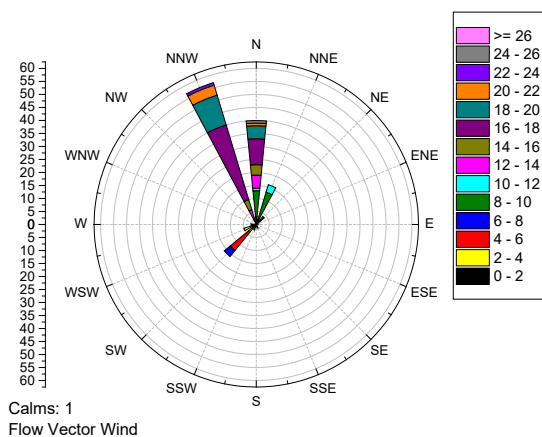
**Διάγραμμα Β.12:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 16/05/22.



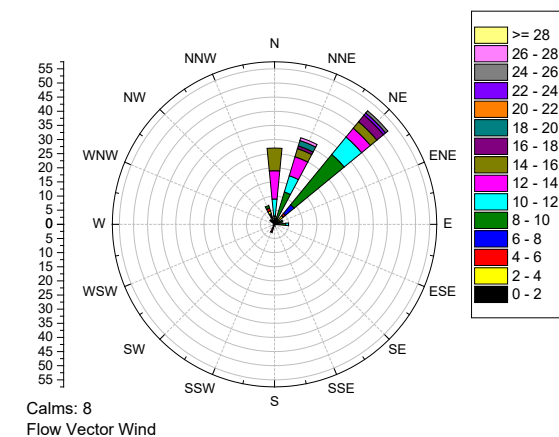
**Διάγραμμα Β.13:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 17/05/22.



**Διάγραμμα Β.14:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 18/05/22.

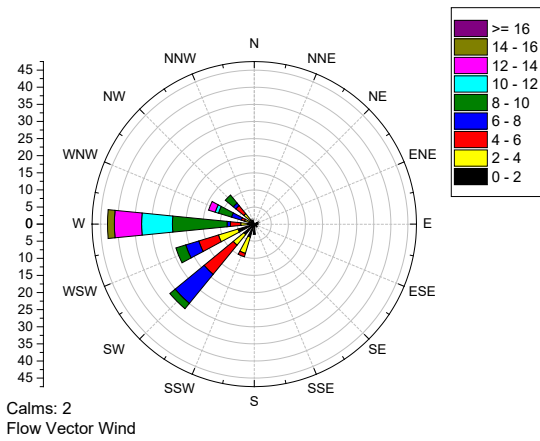


**Διάγραμμα Β.15:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 19/05/22.

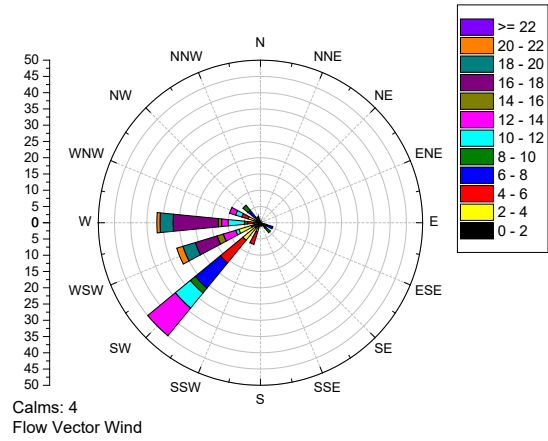


**Διάγραμμα Β.16:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 20/05/22.

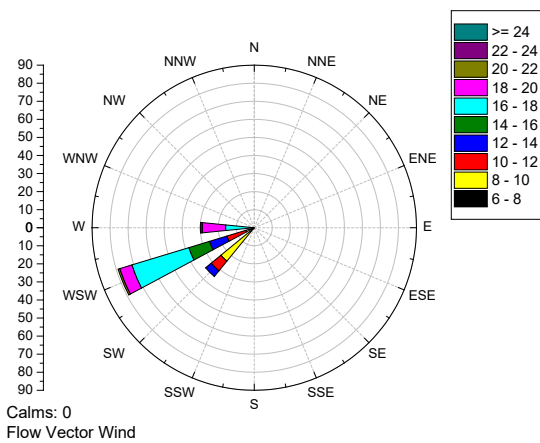




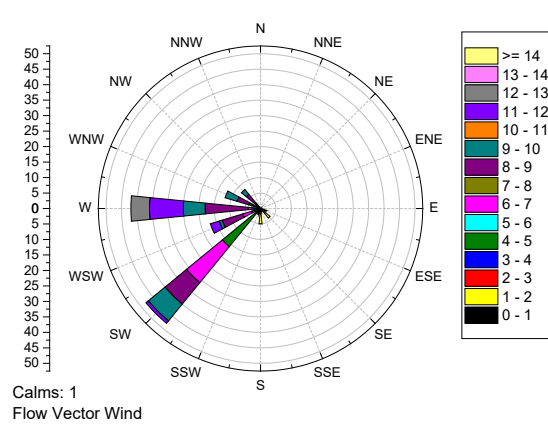
**Διάγραμμα Β.17:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 21/05/22.



**Διάγραμμα Β.18:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 22/05/22.



**Διάγραμμα Β.19:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 23/05/22.



**Διάγραμμα Β.20:** Ροδόγραμμα ανέμων για τις 24/05/22.