

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σχολή Θετικών επιστημών

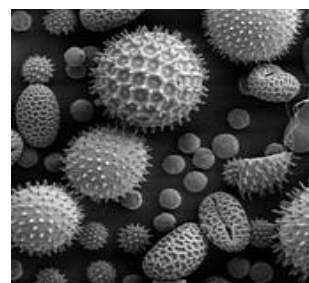
Τμήμα Γεωλογίας

Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ:

**«Μελέτη σωματιδιακής ρύπανσης στην ευρύτερη
περιοχή της Θεσσαλονίκης»**



ΠΟΛΥΞΕΝΗ ΚΟΛΛΙΑ

ΑΕΜ:276



Επιβλέπων καθηγητής : ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2012



*Στους γονείς μου Ντίνο, Σταυρούλα
Και στον αδερφό μου Γιάννη*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Θεόδωρο Καρακώστα για τις σημαντικές γνώσεις που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του και να ασχοληθώ με τη σωματιδιακή ρύπανση στην περιοχή από όπου κατάγομαι. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη όχι μόνο για την πρόθυμη παροχή γνώσεων αλλά και για την ηθική συμπαράσταση και το φιλικό κλίμα συνεργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, την κα. Κωνσταντία Τολίκα και τον κ. Πρόδρομο Ζάνη, για τις πολύτιμες υποδείξεις τους και τις διορθώσεις τους πάνω στο κείμενο.

Ιδιαίτερως θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Πρόδρομο Ζάνη για τον χρόνο που μου διέθεσε, για την υποστηρικτική παρουσία του και καθοδήγησή του κάθε φορά που χρειαζόμουν τη βοήθειά του, καθώς και για την εμπιστοσύνη και τη στήριξή του, η οποία δεν περιορίζεται μόνο στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους αγαπημένους φίλους και συμφοιτητές μου Βαγγελιώ Ζούγρου και Κώστα Τυμπανίδη για τα ενθαρρυντικά τους λόγια και την ψυχολογική υποστήριξη, καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς αυτής, καθώς και τον αγαπημένο μου φίλο Κίμωνα Ζαγκούρη, ο οποίος πρόθυμα μου προσέφερε τις γνώσεις του πάνω στους Η/Υ.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράστασή σε κάθε τομέα της ζωής μου. Χωρίς αυτούς και την απέραντη αγάπη τους δεν θα είχα φτάσει πουθενά.

Πολυξένη Κόλλια

Θεσσαλονίκη, Φεβρουάριος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής ειδίκευσης είναι η μελέτη της ρύπανσης που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Η διατριβή επικεντρώνεται στην μελέτη των PM10 σωματιδίων, δηλαδή σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο κάτω των 10 μικρομέτρων. Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δυο μέρη. Το πρώτο αφορά το θεωρητικό σκέλος και απαρτίζεται από τα κεφάλαια 1 και 2, ενώ τα κεφάλαια 3, 4 και 5 περιλαμβάνουν την επεξεργασία των μετρήσεων και την διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο 1^ο κεφάλαιο, παρατίθενται κάποιες βασικές έννοιες των αιωρούμενων σωματιδίων. Αυτές περιλαμβάνουν την κατανομή του μεγέθους τους, τις μορφές των αερολυμάτων, τη χημική τους σύσταση, τις πηγές παραγωγής τους και τους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους. Αναφέρονται επίσης ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και οι επιπτώσεις τους στο κλίμα, στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου.

Τα μορφολογικά και κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής της Θεσσαλονίκης αναφέρονται στο 2^ο κεφάλαιο. Στη συνέχεια περιγράφονται τα όργανα και οι μέθοδοι μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων και παρουσιάζονται αναλυτικά οι σταθμοί μέτρησης και καταγραφής συγκεντρώσεων PM10. Επίσης παρουσιάζεται το θεσμικό πλαίσιο που έχει θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα.

Στο 3^ο κεφαλαίο, παρουσιάζεται η στατιστική μελέτη της ετήσιας, μηνιαίας και ωριαίας διακύμανσης της σωματιδιακής ρύπανσης, ενώ μελετάται και η συχνότητα εμφάνισης των συγκεντρώσεων των PM10. Στη συνέχεια εντοπίζονται και μελετώνται οι περιπτώσεις υπερβάσεων των ορίων που έχουν θεσπιστεί από την Ε.Ε.

Η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στα επίπεδα των συγκεντρώσεων των PM10 μελετάται στο 4^ο κεφάλαιο. Μελετάται η επίδραση του ανέμου και της βροχής στην κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ πραγματοποιείται συσχέτιση του ύψους του οριακού στρώματος και του συντελεστή εξαερισμού με τις συγκεντρώσεις των PM10. Τέλος πραγματοποιείται στατιστική συσχέτιση των συγκεντρώσεων των αστικών και των περιαστικών σταθμών.

Στο 5^ο κεφάλαιο, παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

The aim of this Master's Thesis is to study the pollution caused by particulate matter in the greater region of Thessaloniki. We focus on the study of PM10 particulates (particulate matter), which is particulates with aerodynamic diameter less than 10 micrometers. This paper is divided into two sections. In the first section (chapters 1 and 2), we describe the theory concerning the PM10 particulates, while In section 2 (chapters 3, 4 and 5) we include the processing of the measurements and the conclusions.

In the first chapter we present some basic concepts of particulate matter. These include the distribution of their size, types of aerosols, their chemical composition, production sources and mechanisms of removal. We also present the residence time of aerosols in the atmosphere and their impact on climate, environment and human health.

The morphological and climatic conditions of the Thessaloniki area are presented in Chapter 2. We also describe the instruments and methods of measurements of airborne particulates and present the recording stations. Finally we present the institutional framework established by the European Union to manage air quality.

In the third chapter we present the statistical analysis of annual, monthly and hourly variation of particulate matter pollution. We analyze the frequency of concentrations of PM10. We also identify and analyze the cases of excess of the limits, which have been established by the EU.

The influence of meteorological parameters in the levels of PM10 concentrations is discussed in the fourth chapter. The analysis includes the influence of wind and rain on the distribution of concentrations of particulate matter, and a correlation of the boundary layer and the ventilation coefficient, with the concentrations of PM10 is made. Finally we present a correlation of concentrations of urban with suburban stations.

The fifth chapter includes the main conclusions arising from our analysis of the PM10 particulates measurements.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

15

Αιωρούμενα σωματίδια

15

1.1 Γενικά.....	15
1.2 Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων	16
1.3 Μορφές αιωρούμενων σωματιδίων	19
1.4 Χημική σύσταση και πηγές παραγωγής των PM10	21
1.5 Χρόνος παραμονής σωματιδίων στην ατμόσφαιρα	24
1.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων	28
1.7 Μονάδες μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων	31
1.8 Επιπτώσεις αερολυμάτων στο κλίμα και στο περιβάλλον	32
1.9 Επιπτώσεις αερολυμάτων στην υγεία του ανθρώπου	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

37

Περιοχή μελέτης - Συλλογή δεδομένων

37

2.1 Η περιοχή της Θεσσαλονίκης	37
2.1.1 Μορφολογία της περιοχής	37
2.1.2 Κλιματολογικά και Μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής	38
2.2 Όργανα και μέθοδοι μέτρησης σωματιδιακής ρύπανσης	41
2.2.1 Συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων	41
2.2.2 Ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων	43

2.3	Σταθμοί μέτρησης σωματιδιακής ρύπανσης	46
2.3.1	Σταθμοί μέτρησης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας	46
2.3.2	Σταθμοί μέτρησης του Δήμου Θεσσαλονίκης.....	49
2.4	Νομοθεσία ποιότητας αέρα	50
2.5	Σωματιδιακή ρύπανση στη περιοχή της Θεσσαλονίκης	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

57

Χρονική διακύμανση της σωματιδιακής ρύπανσης

57

3.1	Διαχρονική μεταβολή μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων PM10	57
3.2	Μέση μηνιαία μεταβολή συγκεντρώσεων PM10	60
3.3	Μέση ωριαία μεταβολή συγκεντρώσεων PM10	66
3.4	Συχνότητα εμφάνισης συγκεντρώσεων PM10.....	74
3.5	Μελέτη υπερβάσεων των ορίων σωματιδιακής ρύπανσης	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

89

Επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη σωματιδιακή ρύπανση

89

4.1	Μελέτη της επίδρασης του ανέμου στην κατανομή των PM10.....	89
4.1.1	Επίδραση του ανέμου στην μηνιαία κατανομή των PM10	92
4.1.2	Επίδραση του ανέμου στην ωριαία κατανομή των PM10	96
4.2	Συσχέτιση του ύψους του οριακού στρώματος (BLH) με τις συγκεντρώσεις των PM10.....	104
4.3	Συσχέτιση του συντελεστή εξαερισμού f_v με τις συγκεντρώσεις των PM10.....	108
4.4	Μελέτη της επίδρασης της βροχής στην κατανομή των PM10	112
4.5	Στατιστική συσχέτιση αστικών και περιαστικών σταθμών.....	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	129
<u>Συμπεράσματα - προτάσεις</u>	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	135
Υπολογισμός ειδικής υγρασίας.....	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Αιωρούμενα σωματίδια

1.1 Γενικά

Με τον όρο **αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter)** εννοούμε κάθε συστατικό, εκτός από το καθαρό νερό, που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε υγρή ή στερεή μορφή, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και έχει μέγεθος της τάξης των μικρομέτρων (μm) ή και μικρότερο, αλλά μεγαλύτερο από την μοριακή διάσταση (περίπου 2\AA) (Καραθανάσης, 2006).

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν μέρος της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα. **Ατμοσφαιρική ρύπανση** ονομάζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου ή ακτινοβολίας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια τέτοια ώστε να είναι δυνατόν να προκληθούν αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα (Μελάς, 2004)

Η σημασία των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων¹ είναι μεγάλη διότι:

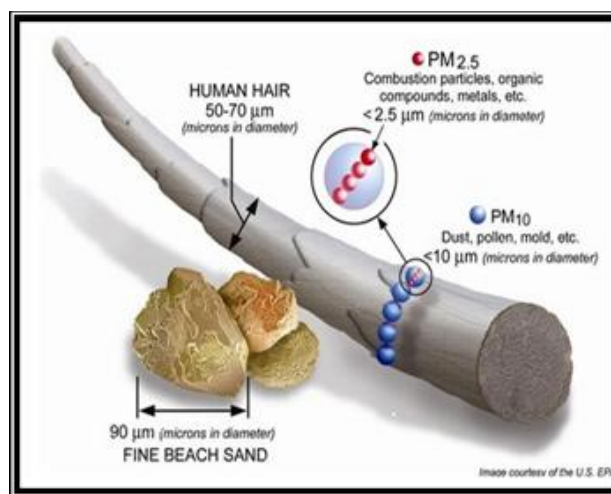
- Αποτελούν βασικό παράγοντα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- Χρησιμεύουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (Cloud Condensation Nuclei) για τη δημιουργία νεφοσταγονιδίων και κατ' επέκταση νεφών
- Απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Έχουν σημαντικό ρόλο σε χημικές αντιδράσεις και ηλεκτρικά φαινόμενα

¹ Οι όροι ατμοσφαιρικά αιωρήματα, αιωρούμενα σωματίδια, αερολύματα, αεροσόλς και PM

- Σε υψηλές συγκεντρώσεις αποτελούν ένα σημαντικό κίνδυνο για την υγεία του αναπνευστικού των ανθρώπων και το περιβάλλον. (Μελάς, 2004)

1.2 Κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν τυπικά διάμετρο από 0,01 έως 10μm. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται το μέγεθος μιας τρίχας και ενός κόκκου άμμου ως μέτρο σύγκρισης για το μέγεθος των αεροζόλ με διάμετρο 10 και 2,5μm.



Σχήμα 1.1: Συγκριτικά μεγέθη αιωρούμενων σωματιδίων.
(Πηγή: www.healthylairnow.org)

Επειδή τα αερολύματα δεν είναι πάντοτε σφαιρικά έχει καθιερωθεί να χρησιμοποιείται ως διάμετρος η αεροδυναμική διάμετρος των σωματιδίων και όχι η γεωμετρική τους διάμετρος.

Αεροδυναμική διάμετρος ονομάζεται η διάμετρος σφαιρικού σώματος πυκνότητας 1 gr/cm^3 που παρουσιάζει την ίδια αντίσταση στον αέρα κατά την κίνησή του με το υπό εξέταση σωματίδιο (Λαζαρίδης, 2005).

Ένας διαφορετικός τρόπος καθορισμού της διαμέτρου των αιωρούμενων σωματιδίων είναι από τη διάμετρο της προβολής σε δύο διαστάσεις του περιγράμματος των σωματιδίων. Έτσι διακρίνονται οι εξής διαμέτροι:

- **Διάμετρος Martin:** καθορίζεται ως το μήκος της γραμμής που χωρίζει το σωματίδιο σε δύο ίσα μέρη.
- **Διάμετρος Feret:** καθορίζεται ως η μέγιστη απόσταση από την μία άκρη του σωματιδίου ως την άλλη.
- **Διάμετρος προβαλλόμενης επιφανείας:** καθορίζεται ως η διάμετρος ενός σφαιρικού σωματιδίου που έχει προβολή ίσου εμβαδού με το εν λόγω σωματίδιο (Μπάης, 2005).

Από όλες τις ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων [(αριθμητική συγκέντρωση, συγκέντρωση μάζας ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), διάμετρος (μέγεθος), χημική σύσταση, μορφολογία, βιοδιαθεσιμότητα (διαλυτότητα)], η διάμετρος θεωρείται η πιο σημαντική για τις επιπτώσεις στην υγεία, λόγω του μηχανισμού εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα. Επίσης το μέγεθος των σωματιδίων είναι αυτό που καθορίζει το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (Πετρακάκης, 2009).

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες μεγεθών σωματιδίων (Ασσαέλ, 2009)

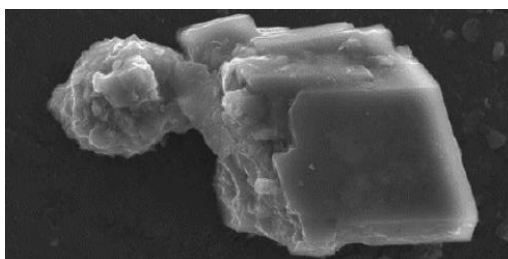
- **TSP :** Ολικά αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη των 100 μικρομέτρων ($D < 100 \mu\text{m}$) (**T**otal **S**uspended **P**articulate matter)
- **PM10 :** Αιωρούμενα σωματίδια – γνωστά και ως PM (**P**articulate **M**atter) με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα (εισπνεύσιμα)
- **PM2.5 :** Αιωρούμενα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα (αναπνεύσιμα)

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους αέριους ρύπους καθώς προκαλούν ποικίλα προβλήματα, κυρίως σε ευπαθείς ομάδες πληθυσμού, όπως οι ηλικιωμένοι, οι ασθενείς και τα παιδιά.

Τα σωματίδια PM10 και PM2,5 χαρακτηρίζονται ρύποι-κριτήρια. Ρύποι κριτήρια θεωρούνται οι ρύποι, για τους οποίους έχουν θεσμοθετηθεί όρια βασισμένα στην υγεία του γενικού πληθυσμού από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, την Ευρωπαϊκή Ένωση και την EPA (Υπηρεσία Περιβάλλοντος των ΗΠΑ). Για

τους ρύπους PM10 και PM2,5 καθιερώθηκαν για πρώτη φορά από την Ε.Ε. ανώτατες οριακές τιμές τα έτη 2000 και 2008 αντίστοιχα. Πριν το έτος 2000, ως ρύπος κριτήριο για τις χώρες μέλη της Ε.Ε. εθεωρούντο τα ολικά αιωρούμενα σωματίδια TSP (Πετρακάκης, 2009).

Η διάκριση μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών σωματιδίων, που αναφέρονται παραπάνω, είναι καθοριστική, διότι διαφέρουν ως προς την προέλευσή τους, τη χημική σύσταση, τις διαδικασίες απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα και γενικότερα τις επιδράσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Πρόκειται ουσιαστικά για διαφορετικούς τύπους ρύπων, γεγονός που επιβάλλει διαφορετικό σύστημα δειγματοληψίας και ελέγχου, καθώς και εξειδικευμένη μελέτη και θέσπιση διαφορετικών κριτηρίων για την προστασία του πληθυσμού και των οικοσυστημάτων.



Σχήμα 1.2 : Ηλεκτρονική μεγέθυνση σωματιδίου σκόνης
(Πηγή: <http://www.surprising-science.de>)

Ένας πιο περιγραφικός διαχωρισμός του μεγέθους των σωματιδίων (Mather, et al. 2003) είναι ο εξής :

1. **Σωματίδια που βρίσκονται σε κατάσταση πυρηνοποίησης (nucleation mode)** ($D < 0,1\mu\text{m}$): Τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας προκύπτουν από συμπυκνώσεις αέριων ρύπων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και έχουν διάμετρο μικρότερη των $0,1\mu\text{m}$. Αέριοι ρύποι που εκλύονται στην ατμόσφαιρα πυρηνοποιούνται και μετατρέπονται σε σωματίδια, κάτω από υψηλές θερμοκρασίες.

2. **Σωματίδια που βρίσκονται σε κατάσταση προσαύξησης** (accumulation mode) ($0,1\mu\text{m} < D < 2\mu\text{m}$): Τα σωματίδια αυτής της κατηγορίας προκύπτουν από σωματίδια που βρίσκονται σε κατάσταση πυρηνοποίησης, όταν πάνω σ' αυτά συμπυκνώνονται υδρατμοί, ή όταν αυτά συσσωματώνονται. Έτσι αυξάνει το μέγεθός τους και γι' αυτό ονομάζονται και προσαυξημένα σωματίδια.
3. **Σωματίδια που βρίσκονται σε τραχιά κατάσταση** (coarse mode) ($>2\mu\text{m}$) : τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται κυρίως από μηχανικές διεργασίες, π.χ. σωματίδια εδαφικής σκόνης από δυνατούς ανέμους (χονδρόκοκκα σωματίδια).

Το μέγεθος και η σύσταση των σωματιδίων στον αέρα μπορεί να μετατραπεί λόγω:

- ▶ Συμπύκνωσης ατμών διαφόρων ουσιών
- ▶ Εξάτμισης ατμών
- ▶ Συσσωμάτωσης με άλλα σωματίδια
- ▶ Χημικής αντίδρασης
- ▶ Δημιουργία ομίχλης ή νεφοσταγονιδίων

1.3 Μορφές αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα με τις παρακάτω μορφές (Μπάης, 2005).

- **ΣΚΟΝΗ** (dust): Σχηματίζεται από διάβρωση ή κατακερματισμό στερεών υλικών και είναι στερεά σωματίδια μεγάλου σχετικά μεγέθους ($D_p > 1\mu\text{m}$).
- **ΟΜΙΧΛΗ** (fog): Ορατά υδροσταγονίδια σε διασπορά στην ατμόσφαιρα, συνήθως κοντά στο έδαφος.
- **ΚΑΠΝΑ** (fume): Σωματίδια που προκύπτουν από συμπύκνωση ατμών, κυρίως από πτητικές ουσίες, ή ως αποτέλεσμα οξειδωτικών αντιδράσεων ($D_p < 1\mu\text{m}$).

- **ΑΧΛΥΣ** (haze): Μικρά σωματίδια ($D_p < 1\mu\text{m}$), μείγμα υδροσταγονιδίων, ρύπων και σκόνης. Μειώνουν την ορατότητα
- **ΝΕΦΟΣ** (smog): Συνδυασμός ομίχλης και καπνού
- **ΚΑΠΝΟΣ** (smoke): Μικρά ($D_p > 0.01\mu\text{m}$) σωματίδια που προέρχονται από ατελή καύση κυρίως άνθρακα ή άλλων καυσίμων, σε ικανή συγκέντρωση ώστε να είναι ορατά.
- **ΑΙΘΑΛΗ** (soot): Συσσώρευση σωματιδίων άνθρακα που δημιουργούνται από την ατελή καύση ανθρακικών ενώσεων.
- **ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΤΑ** (fly ash): Λεπτόκοκκα σωματίδια τέφρας στερεών καυσίμων που παρασύρονται με τα καυσαέρια

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται εικόνες που δείχνουν αιωρούμενα σωματίδια με την μορφή σκόνης, ομίχλης, αχλύς, αιθαλομίχλης και κάπνας.



Σχήμα 1.3 : α) Σύννεφο σκόνης στην πόλη Khartoum του Σουδάν (Αύγουστος 2011), β) Ομίχλη, γ) Αχλύς και νέφος αιθαλομίχλης στην πόλη του Los Angeles, δ) Κάπνα και νέφος αιθαλομίχλης

(Πηγές α) <http://www.mymodernmet.com> β) <http://www.weatherquestions.co>, γ) και δ) <http://chemwiki.ucdavis.edu>)

1.4 Χημική σύσταση και πηγές παραγωγής των PM10

Η χημική σύσταση των αερολυμάτων αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό τους εξαιτίας:

- Της επίδρασης των ρυπαντών στην ανθρώπινη υγεία αναλογικά με τη χημική τους συμπεριφορά και ιδιότητες
- Της αναγνώρισης της πηγής των αερολυμάτων από τη χημική τους σύσταση.

Τα κυριότερα συστατικά του ατμοσφαιρικού αερολύματος είναι τα ακόλουθα (Μελάς, 2004):

1. Ορυκτογενή μέταλλα από επαναιώρηση σκόνης
2. Καθαρός άνθρακας από διαδικασίες καύσης
3. Οργανικές ενώσεις από προϊόντα ημιτελών καύσεων
4. Άλατα του αμμωνίου, προϊόντα εξουδετέρωσης όξινων ουσιών στην ατμόσφαιρα από την αμμωνία
5. Άλατα από θαλασσινό νερό
6. Άλατα του ασβεστίου από οικοδομικά υλικά και σκόνη
7. Θεϊκά άλατα, προϊόντα αντιδράσεων του διοξειδίου του θείου
8. Νιτρικά άλατα, προϊόντα αντιδράσεων των οξειδίων του αζώτου.

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι τόσο πρωτογενούς όσο και δευτερογενούς προέλευσης και προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές. Πρωτογενείς ρύποι είναι αυτοί που εκλύονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, ενώ οι δευτερογενείς ρύποι είναι αυτοί που αποτελούν προϊόντα αντίδρασης ρύπων, είτε με τα συστατικά της ατμόσφαιρας, είτε μεταξύ τους. Οι κύριες πηγές παραγωγής, καθώς και η διαδικασία παραγωγής ατμοσφαιρικών σωματιδίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.1 και 1.2, ως Φυσικές πηγές και Ανθρωπογενείς πηγές, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι φυσικές πηγές είναι υπεύθυνες για το 70-90% του συνόλου των αιωρούμενων σωματιδίων (Μελάς, 2004).

Πίνακας 1.1 : Φυσικές πηγές και διαδικασία παραγωγής ατμοσφαιρικών σωματιδίων
(Μελάς, 2004)

Φυσικές πηγές	Διαδικασία παραγωγής αεροσόλ
Πετρώματα και έδαφος	Από την μηχανική δράση του ανέμου πάνω στην επιφάνεια της Γής εκλύεται σκόνη
Πυρκαγιές δασών	Η καύση της βιομάζας εκπέμπει στην ατμόσφαιρα αιωρούμενα σωματίδια
Ηφαιστεια	Οι εκρήξεις των ηφαιστειών τροφοδοτούν την ανώτερη τροπόσφαιρα και στρατόσφαιρα με σωματίδια που περιέχουν στοιχεία του μανδύα της Γής
Θάλασσες	Από την μηχανική δράση του ανέμου στην επιφάνεια των θαλασσών εκλύεται NaCl (αλάτι)
Μετατροπή αερίων σε σωματίδια	<p>Κυρίως συμπύκνωση πρόδρομων αερίων.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Πολύ σημαντικός πρόδρομος ρύπος είναι το H_2SO_4 που παράγεται από την οξείδωση του SO_2, συμπυκνώνεται και σχηματίζει υδάτινα θειικά άλατα • Ο οργανικός άνθρακας είναι ένας απ' τους συχνότερους ρύπους αεροζόλ και προκύπτει από την συμπύκνωση υδρογονανθράκων • Η αιθάλη παράγεται από συμπύκνωση αερίων κατά την διάρκεια της καύσης
Βλάστηση	Γύρη και σπόροι καταλήγουν στην ατμόσφαιρα έπειτα από μηχανική δράση του ανέμου
Φωτοχημική μετατροπή αερίων σε σωματίδια	Αεροζόλ προκύπτουν όταν χημικές ουσίες (πχ O_3) εμπλέκονται σε σταδιακές αντιδράσεις με ρίζες (πχ OH^{\cdot} , NO_3^{\cdot}).

Πίνακας 1.2 : Ανθρωπογενείς πηγές και διαδικασία παραγωγής ατμοσφαιρικών σωματιδίων (Μελάς, 2004)

Ανθρωπογενείς πηγές	Διαδικασία παραγωγής αεροσόλ
<p>Εκπομπές σωματιδίων από:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας • Βιομηχανικές μονάδες • Κεντρική θέρμανση • Κυκλοφορία οχημάτων • Κατασκευές • Γεωργία • Διεργασίες λείανσης και θρυμματισμού υλικών 	<p>Εκπομπές από την καύση οργανικής ύλης (λιγνίτη, πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Τυπικό παράδειγμα αποτελούν τα εργοστάσια της ΔΕΗ</p> <p>Διαφεύγουσες εκπομπές από Μεταλλουργία, τσιμεντοβιομηχανία, χαλυβουργία, κτλ.</p> <p>Εκπομπές από καυστήρες πετρελαίου ή θερμάστρες που λειτουργούν με ξύλα.</p> <p>Από την ανάφλεξη των καυσίμων στους κινητήρες των οχημάτων και την τριβή των ελαστικών στην άσφαλτο</p> <p>Ανοικοδόμηση/ κατεδαφίσεις</p> <p>Αγροτική εκμετάλλευση της Γής</p> <p>Λατομεία</p>
<p>Μετατροπή αερίων σε σωματίδια</p>	<p>Δευτερογενείς σωματιδιακοί ρύποι προκύπτουν από την εκπομπή SO₂, NO_x και οργανικών ενώσεων, με την διαδικασία της πυρήνωσης ή της συμπύκνωσης υπέρκορων ατμών. (πχ θειικά άλατα, νιτρικά άλατα, οργανικές ενώσεις VOC's)</p>
<p>Φωτοχημική μετατροπή αερίων σε σωματίδια</p>	<p>Αιωρούμενα σωματίδια προκύπτουν όταν χημικές ουσίες (πχ O₃) εμπλέκονται σε σταδιακές αντιδράσεις με ρίζες (πχ OH[·], NO₃⁻). Φωτοχημεία υφίστανται τα NO_x με την παρουσία αέριων ρύπων (πχ SO₂) προς σχηματισμό αεροσόλ.</p>

Πριν από την εμφάνιση των ανθρώπων και την συμμετοχή τους στην ρύπανση του περιβάλλοντος, υπήρχαν στην ατμόσφαιρα αιωρούμενα σωματίδια ως αποκλειστικό αποτέλεσμα των φυσικών πηγών εκπομπής (Πίνακας 1.1). Τα σωματίδια αυτά αποτελούν τη **φυσική συγκέντρωση υποβάθρου**. Με την εμφάνιση των ανθρώπων αυξήθηκε η σωματιδιακή ρύπανση στην ατμόσφαιρα με τις πολλαπλές ανθρώπινες δραστηριότητες και διεργασίες (Πίνακας 1.2).

Η πραγματική φυσική συγκέντρωση υποβάθρου δεν θα είναι ποτέ γνωστή. Αφενός, γιατί όταν η ατμόσφαιρα επιβαρύνθηκε αποκλειστικά και μόνο από φυσικούς σωματιδιακούς ρύπους, δεν υπήρχαν άνθρωποι για να τους μετρήσουν, και αφετέρου γιατί όταν οι άνθρωποι άρχισαν να μετράνε τα επίπεδα των PM είχαν ήδη ρυπάνει την ατμόσφαιρα με σωματίδια. Για τον λόγο αυτό γίνεται η παραδοχή ότι τα επίπεδα των σωματιδίων σε απομακρυσμένες περιοχές, προσεγγίζουν την πραγματική συγκέντρωση υποβάθρου. Τέτοιες περιοχές είναι η μέση στάθμη της θάλασσας, οι πόλοι και οι βουνοκορφές.

Η καύση ορυκτών καυσίμων είναι ίσως η σημαντικότερη ανθρωπογενής πηγή αιωρούμενων σωματιδίων απ' την οποία δημιουργείται κατά κύριο λόγο το πρόβλημα της αστικής ρύπανσης. Από αυτήν την άποψη, σημαντικότερα ορυκτά καύσιμα είναι το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το diesel (Μελάς, 2004). Η καύση της βενζίνης εκπέμπει μικρές μόνο ποσότητες σωματιδίων. Η ραγδαία επιδείνωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από αεροζόλ οφείλεται κυρίως στην κυκλοφορία των πετρελαιοκίνητων οχημάτων (λεωφορεία, ταξί, φορτηγά), στην βιομηχανία και στην κεντρική θέρμανση των πολυκατοικιών (Αργυροπουλος κ.ά., 2007). Το πρόβλημα διογκώνεται με την νοθεία των καυσίμων και τους κακοσυντηρημένους καταλύτες των αυτοκινήτων.

1.5 Χρόνος παραμονής σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Κάθε αέριος ρύπος χαρακτηρίζεται από τον χρόνο παραμονής του στην ατμόσφαιρα ή από την ημιπερίοδο ζωής του, η οποία εξαρτάται από τον ρυθμό παραγωγής ή καταστροφής του και την συνολική του μάζα (κατά μέσο όρο) στην ατμόσφαιρα.

Η βασική αρχή που καθορίζει τη συμπεριφορά κάποιου ρύπου στην ατμόσφαιρα είναι η αρχή διατήρησης της μάζας. Σύμφωνα με αυτήν, σε κάθε κυβικό χώρο όπου υπάρχει αέρας, για κάθε ρύπο θα πρέπει να ισχύει η σχέση (1): (Μπάης, 2005)

$$\frac{dQ}{dt} = F_{in} - F_{out} + P - R \quad (1)$$

Όπου:

- Q = Η ολική μάζα του συστατικού στον συγκεκριμένο όγκο αέρα
- $\frac{dQ}{dt}$ = Ο ρυθμός συσσώρευσης
- F_{in} = Ρυθμός εισροής
- F_{out} = Ρυθμός εκροής
- P = Ρυθμός εκπομπής
- R = Ρυθμός απομάκρυνσης

Αν η μάζα Q του ρύπου είναι χρονικά αμετάβλητη ($\frac{dQ}{dt} = 0$) τότε ισχύει:

$$F_{in} + P = F_{out} + R \quad (2)$$

Ο χρόνος παραμονής του ρύπου στην ατμόσφαιρα είναι:

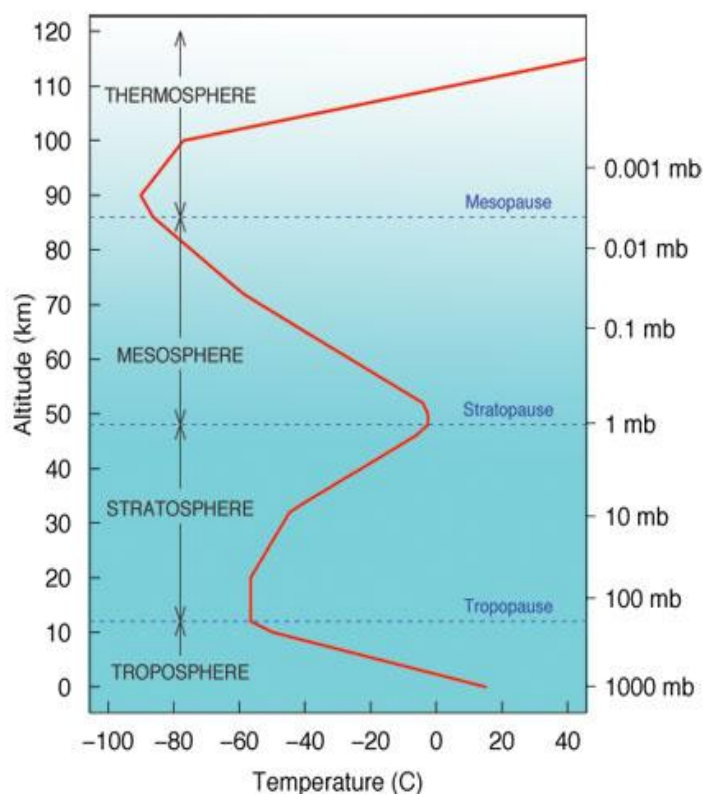
$$\tau = \frac{Q}{F_{in} + P} = \frac{Q}{F_{out} + R} \quad (3)$$

Αν ο χώρος μελέτης είναι όλη η ατμόσφαιρα ($F_{in} = F_{out}$), τότε ο χρόνος παραμονής του ρύπου στην ατμόσφαιρα δίνεται απ την σχέση (4).

$$\tau = \frac{Q}{P} = \frac{Q}{R} \quad (4)$$

Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από το μέγεθός τους, από τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, καθώς και από το ατμοσφαιρικό στρώμα στο οποίο βρίσκονται. Ο μέσος χρόνος ζωής τους στην κατώτερη τροπόσφαιρα είναι πέντε ημέρες, ενώ στην ανώτερη τροπόσφαιρα φτάνει τον ένα μήνα. Αν τα σωματίδια βρεθούν στη στρατόσφαιρα (πχ. λόγω έκρηξης

ηφαιστείου), τότε ο χρόνος παραμονής τους φτάνει τα 2 – 3 χρόνια. Αυτό οφείλεται και στη θερμοκρασιακή δομή της ατμόσφαιρας, που προκαλεί συνθήκες ευστάθειας. (Μελάς, 2004) Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται η δομή της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 1.4 : Δομή της ατμόσφαιρας της Γής
(Πηγή: <http://www.learner.org>)

Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των αερολυμάτων βρίσκεται στην κατώτερη τροπόσφαιρα όπου οι συγκεντρώσεις τους είναι 1-2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται κοντά στο έδαφος. Τα αερολύματα έχουν κατά μέσο όρο μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα και έτσι δεν προλαβαίνουν να φτάσουν σε μεγαλύτερα ύψη. Αυτός είναι και ο λόγος που βελτιώνεται σημαντικά η ορατότητα μετά τα πρώτα 1 – 2 χιλιόμετρα από την επιφάνεια του εδάφους. Στον Πίνακα 1.3 φαίνεται ο χρόνος καθόδου ενός

σωματιδίου κατά ένα χιλιόμετρο στην ατμόσφαιρα, σε σχέση με τη διάμετρο του σωματιδίου.

Πίνακας 1.3 : Χρόνος που απαιτείται για την κάθοδο ενός σωματιδίου κατά ένα χιλιόμετρο στην ατμόσφαιρα, συναρτήσει της διαμέτρου του (Μελάς, 2004)

Διάμετρος σωματιδίου (μm)	Χρόνος καθόδου 1 Km
0.02	228 χρόνια
0.1	36 χρόνια
1.0	328 ημέρες
10.0	3.6 ημέρες
100.0	1.1 ώρα
1000.0	4 λεπτά

Η ταχύτητα καθίζησης ενός σωματιδίου μπορεί να περιγραφεί από την οριακή ταχύτητα v_{op} που προκύπτει από τον νόμο του Stokes (Ζερεφός, 2001).

$$v_{op} = \frac{2}{9} g r^2 \left(\frac{\rho_{\sigma} - \rho_{\alpha}}{\eta} \right) \left(1 + \frac{B}{rP} \right) \quad (5)$$

Όπου:

- v_{op} = οριακή ταχύτητα σωματιδίου
- ρ_{σ} = πυκνότητα σωματιδίου
- ρ_{α} = πυκνότητα του περιβάλλοντα αέρα
- η = δυναμικό ιξώδες του περιβάλλοντα αέρα
- r = ακτίνα σωματιδίου
- g = επιτάχυνση της βαρύτητας
- P = ατμοσφαιρική πίεση
- Σταθερά $B=0.0084$ στους 23°C αν η πίεση δίνεται σε mb

Από τη σχέση (5) προκύπτει ότι ένα σωματίδιο διαμέτρου $D=1\mu\text{m}$ αποκτά οριακή ταχύτητα περίπου $u_{op}= 10^{-4} \text{ m/s}$. Αν ένα τέτοιο σωματίδιο ελευθερωθεί χωρίς αρχική ταχύτητα και απουσία ανέμου από μια καμινάδα ύψους $h=50\text{m}$, θα φτάσει στο έδαφος μετά από χρόνο $t = h/ u_{op} = 5 \times 10^5 \text{ sec}$, δηλαδή μετά από περίπου 13 ώρες (με την υπόθεση ότι αμέσως μετά την έξοδό του αποκτά την οριακή του ταχύτητα).

Στη στρατόσφαιρα υπάρχει ένα σημαντικό στρώμα (στρώμα του Junge) αερολυμάτων $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ στο ύψος των 15 – 25 Km, το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη χημεία του όζοντος. Το στρώμα αυτό προέρχεται από την οξείδωση του σουλφιδίου του καρβονιλίου (COS). Πρόκειται για ένα αέριο βιογενούς προέλευσης, που μπορεί να εισχωρήσει στη στρατόσφαιρα λόγω του μεγάλου χρόνου παραμονής του στην ατμόσφαιρα. Η εισχώρηση γίνεται με τις ισχυρές ανοδικές κινήσεις στο κύτταρο Hadley των τροπικών, με τις διεργασίες μεταφοράς και διαχύσεως από τους ατμοσφαιρικούς στροβίλους, ή με ισχυρές ηφαιστειακές εκρήξεις (Ζερεφόσ, 2001).

1.6 Μηχανισμοί απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων

Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζονται από τεσσάρων ειδών διεργασίες (Σχήμα 1.5):

- Εκπομπές PM από πηγές ρύπανσης
- Χημικοί μετασχηματισμοί
- Διασπορά αιωρούμενων σωματιδίων
- Απόθεση αιωρούμενων σωματιδίων

Οι δύο τελευταίες διεργασίες αποτελούν μηχανισμούς απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Οι χημικοί μετασχηματισμοί μπορούν να οδηγήσουν, τόσο στην απομάκρυνση ρύπων, όσο και στο σχηματισμό τους. Αυτοί οι τρεις μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά, το

μετασχηματισμό και την απομάκρυνση των σωματιδιακών ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα και περιγράφονται στη συνέχεια αναλυτικά (Μελάς, 2005).

Χημικοί μετασχηματισμοί

Κατά το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, οι σωματιδιακοί ρύποι υφίστανται διάφορους χημικούς μετασχηματισμούς. Οι καινούργιες ουσίες προκύπτουν από την αντίδραση αερίων, υγρών και σωματιδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Τα προϊόντα των αντιδράσεων μπορεί και να είναι νέοι ρύποι (δευτερογενείς ρύποι), ή να μην είναι ρύποι. Στην περίπτωση που δεν προκύπτει ρύπος ως προϊόν της αντίδρασης, ο χημικός μετασχηματισμός αποτελεί μηχανισμό απομάκρυνσης του αρχικού σωματιδιακού ρύπου.

Διασπορά αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αιωρούμενα σωματίδια μεταφέρονται από τον άνεμο μακριά από την πηγή εκπομπής τους. Ο άνεμος μεταφέρει τα σωματίδια τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

- **Οριζόντια μεταφορά:** Αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραίωσης των ρύπων. Τα αιωρούμενα σωματίδια μεταφέρονται μακριά από την πηγή εκπομπής τους από τον μέσο άνεμο. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την περιοχή προς την οποία θα κατευθυνθούν, ενώ η ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζει τον ρυθμό αραίωσής τους.
- **Κατακόρυφη μεταφορά:** Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα είναι υπεύθυνες για την κατακόρυφη μεταφορά (διάχυση) των αιωρούμενων σωματιδίων, με τελικό αποτέλεσμα την αραίωσή τους. Η κλίμακα και η ένταση της αραίωσης εξαρτάται από το βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας, δηλαδή από την ισχύ που έχουν οι τυρβώδεις στρόβιλοι.

- Σε συνθήκες ευστάθειας, όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά.
- Σε συνθήκες αστάθειας, οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη.

Η διάχυση των σωματιδίων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της Γής, το οποίο ονομάζεται ύψος ανάμιξης. Το στρώμα που περιέχεται ανάμεσα στο ύψος ανάμιξης και την επιφάνεια της Γής ονομάζεται οριακό στρώμα. Το ύψος του οριακού στρώματος δεν είναι πάντοτε σταθερό, αλλά εξαρτάται τόσο από το ανάγλυφο όσο και από την κινητικότητα της ατμοσφαιρικής μάζας.

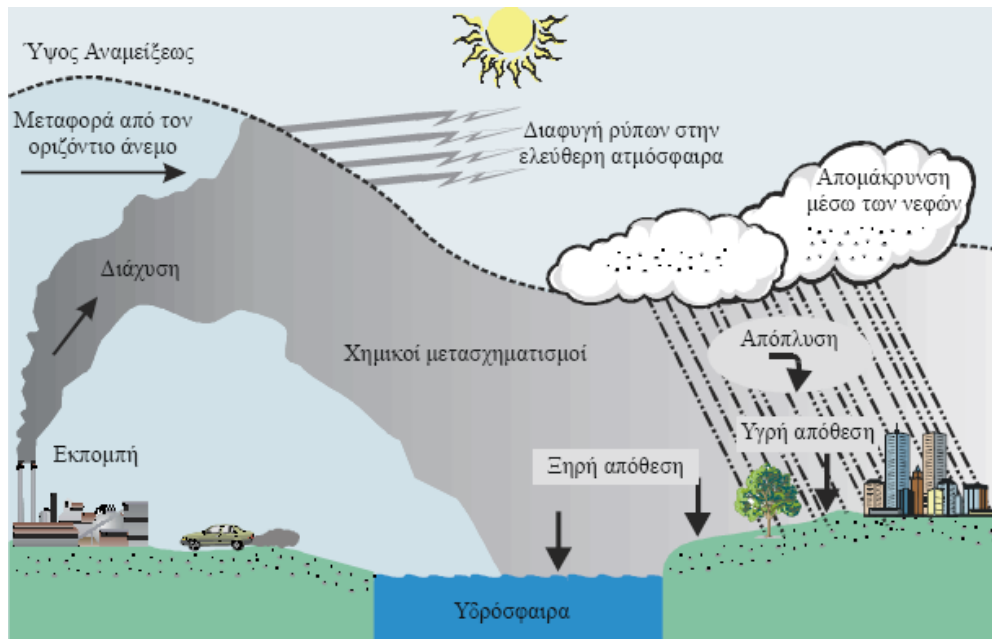
Η διασπορά των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να γίνει και με τη μοριακή διάχυση που οφείλεται στις μοριακές άτακτες κινήσεις του αέρα (θερμική κίνηση Brown). Όμως ο μηχανισμός αυτός έχει πολύ μικρή συνεισφορά στις ατμοσφαιρικές διεργασίες (Μελάς, 2005).

Απόθεση

Τα αιωρήματα εναποτίθενται τελικά στην επιφάνεια της Γής με τη μορφή της ξηρής απόθεσης, της υγρής απόθεσης και της βαρυτικής καθίζησης. Ο ρυθμός διαφυγής τους στο διάστημα θεωρείται αμελητέος.

- **Ξηρή απόθεση** υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριοι ρύποι τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και κατακρατούνται, όταν έρθουν σε επαφή, από την υποκείμενη επιφάνεια.
- **Υγρή απόθεση** λαμβάνει χώρα σε περίπτωση υετού οπότε μπορεί να συμβεί κάποιο από τα παρακάτω ενδεχόμενα: Είτε σάρωση των ρύπων οι οποίοι βρίσκονται στην ατμόσφαιρα από τη βροχή ή το χιόνι (*απόπλυση*), είτε πρόσληψη των ρύπων σε ένα προηγούμενο στάδιο από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής.

- **Βαρυτική καθίζηση** ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων. Η καθίζηση απομακρύνει τα μεγάλα σωματίδια από την ατμόσφαιρα σε σχετικά μικρές αποστάσεις από την πηγή εκπομπής τους.



Σχήμα 1.5 : Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επηρεάζουν τη διασπορά των σωματιδιακών ρύπων. (Πηγή: Μελάς, 2005)

1.7 Μονάδες μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων

Στην ατμοσφαιρική χημεία οι συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων εκφράζονται συχνά σε μονάδες:

- Μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Μέρη ανά εκατομμύριο (ppm)

Συγκέντρωση 1 ppm σημαίνει μία μονάδα του ρύπου σε κάθε 10^6 μονάδες αέρα. Η μονάδα μπορεί να αναφερθεί σε πυρήνες, όγκο, μόρια κτλ, εκφράζει αναλογία. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και η μονάδα ppb (πχ μέρη όγκου ρύπου ανά

δισεκατομμύριο όγκου αέρα). Η μετατροπή των συγκεντρώσεων από τη μία στην άλλη μονάδα μέτρησης, δίνεται από την σχέση (6) (Μελάς, 2005).

$$C_i (\mu\text{g}/\text{m}^3) = C_i (\text{ppm}) * \frac{100 * P * M_i}{8.314 * T} \quad (6)$$

Όπου:

- $C_i (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ = συγκέντρωση του στοιχείου i σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- $C_i (\text{ppm})$ = συγκέντρωση του στοιχείου i σε ppm
- P = πίεση του αέρα
- M_i = μοριακό βάρος του στοιχείου i
- T = θερμοκρασία του αέρα σε Kelvin

Στην παρούσα εργασία, οι συγκεντρώσεις των σωματιδιακών ρύπων μετρώνται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

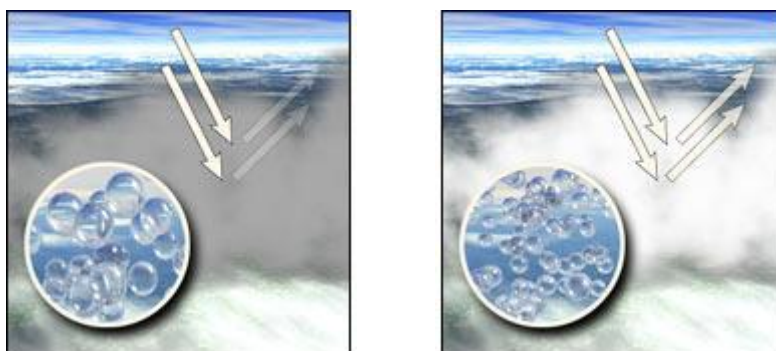
1.8 Επιπτώσεις αερολυμάτων στο κλίμα και στο περιβάλλον

Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα με άμεσο και έμμεσο τρόπο. Απορροφούν, σκεδάζουν και ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία έχοντας άμεση επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας, καθώς και μεταβάλλουν με έμμεσο τρόπο τις οπτικές ιδιότητες και τη διάρκεια ζωής των νεφών. Το αποτέλεσμα είναι, άλλοτε η αύξηση και άλλοτε η μείωση της θερμοκρασίας, κάτι που εξαρτάται από το μέγεθος και την χημική τους σύσταση. (Σαχινίδης κ.ά., 2009)

Η άμεση επίδραση των σωματιδίων στο κλίμα έγκειται στην αλληλεπίδρασή τους με το φώς. Λιγότερο σκούρα σωματίδια μεγάλης συγκέντρωσης (πχ. προϊόντα ατελής καύσης οργανικού άνθρακα) ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία και προκαλούν ψύξη της ατμόσφαιρας. Αντιθέτως, σωματίδια μαύρου άνθρακα και αιθάλης απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνουν την ατμόσφαιρα.

Πολλές φορές η έμμεση επίδραση προκαλεί μεγαλύτερες μεταβολές στην ατμόσφαιρα σε σχέση με την άμεση. Τα έμμεσα αποτελέσματα βασίζονται στη

δυνατότητα που έχουν ορισμένα αερολύματα να δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης (cloud condensation nuclei, CCN) (Καρακώστας, 2010). Αυτό συνεπάγεται αύξηση της συγκέντρωσης του πλήθους των σταγονιδίων στο νέφος, καθώς και μείωση της κατανομής του μεγέθους των σταγονιδίων, στοιχεία που καθορίζουν σημαντικά το ρυθμό κατακρήμνισής τους. Σε μια ρυπασμένη ατμόσφαιρα, σχηματίζονται μέσα στο νέφος υδροσταγονίδια μικρότερου μεγέθους και μεγάλης συγκέντρωσης, αφού οι υδρατμοί βρίσκουν πολλούς πυρήνες για να συμπυκνωθούν. Η διαδικασία αυτή αυξάνει τη λαμπρότητα του νέφους και παρατείνει τον χρόνο ζωής του. Αυτό οδηγεί σε ψύξη της ατμόσφαιρας λόγω της μεγάλης ανακλαστικότητας (Σχήμα1.6).



Σχήμα 1.6 : Στην αριστερή εικόνα το νέφος είναι καθαρό με λίγα αεροσόλ, ενώ στην δεξιά εικόνα το νέφος είναι ρυπασμένο, με αποτέλεσμα να αυξάνει η λαμπρότητα και ο χρόνος ζωής του. (Πηγή: <http://earthobservatory.nasa.gov>)

Μια ημιάμεση συνέπεια των αεροζόλ στο κλίμα είναι η ελάττωση των βροχοπτώσεων. Η αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας που οφείλεται στην απορρόφηση ακτινοβολίας από τα σωματίδια, εμποδίζει τη συμπύκνωση των υδρατμών και κατ' επέκταση ελαττώνει το σχηματισμό νεφών, με μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα την ελάττωση των βροχοπτώσεων.

Τέλος, τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνουν την ορατότητα μέσα στην ατμόσφαιρα, λόγω της απορρόφησης και σκέδασης του φωτός. Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια, με μέγεθος ανάλογο αυτό του μήκους κύματος της ηλιακής

ακτινοβολίας, προκαλούν περίθλαση του ορατού φώς. Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος «σκιάζουν» το ορατό φάσμα με τελικό αποτέλεσμα τη μειωμένη ορατότητα.

Να σημειωθεί ότι όταν συμβαίνουν μεγάλες ηφαιστειακές εκρήξεις σε διάρκεια και ένταση, η επίδραση των αερολυμάτων στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι σημαντική. Οι ηφαιστειακές εκρήξεις στέλνουν μόρια τέφρας στη στρατόσφαιρα, τα οποία εμποδίζουν το φως του ήλιου να φτάσει στην Γη, συμβάλλοντας έτσι στην ψύξη του πλανήτη.

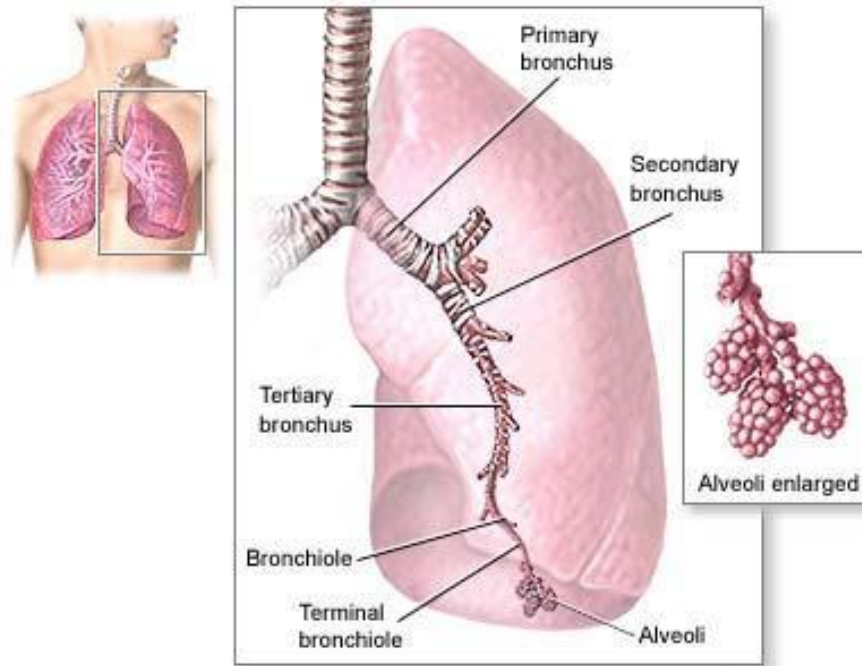
1.9 Επιπτώσεις αερολυμάτων στην υγεία του ανθρώπου

Ένας ενήλικας αναπνέει περίπου 10.000 λίτρα αέρα κάθε μέρα. Η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία και στην ποιότητα της ζωής. Η ατμοσφαιρική ρύπανση στις πόλεις διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υγεία των ανθρώπων, ειδικά για αυτούς που ζουν στα αστικά κέντρα.

Τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό με την αναπνοή. Η διαπερατότητα των σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα είναι συνάρτηση της αεροδυναμικής τους διαμέτρου. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες σωματιδίων:

- **Αναπνεύσιμα:** $10 < D < 200$ μm , Διαπερνούν τον ρινοφάρυγγα και την τραχεία,.
- **Θωρακικά:** $4 < D < 10$ μm , Διαπερνούν τον θώρακα
- **Εισπνεύσιμα:** $D < 4$ μm , Φτάνουν μέχρι τις κυψελίδες των πνευμόνων

Όσο πιο μικρά είναι τα σωματίδια, τόσο πιο πολύ αυξάνει η πιθανότητα εισχώρησή τους στην αναπνευστική περιοχή των πνευμόνων, όπου εναποτίθενται κυρίως στις κυψελίδες των πνευμόνων (Σχήμα 1.7) και με την πάροδο του χρόνου επιφέρουν σοβαρές βλάβες στην υγεία των ανθρώπων (Σαχινίδης κ.ά., 2009)



*Σχήμα 1.7 : Το ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα
(Πηγή: <http://www.beltina.org/health-dictionar>)*

Η χημική σύσταση είναι εκείνη που καθορίζει κατά κύριο λόγο το πως θα αντιδράσει ο ανθρώπινος οργανισμός όταν έρθει σε επαφή με τα σωματίδια. Αυτά είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση άσθματος, αναπνευστικών και πνευμονικών προβλημάτων, αλλεργικών αντιδράσεων, ερεθισμό των ματιών, μεταλλάξεων ή καρκινογένεσεων. Οι πνεύμονες που εμφανίζουν φλεγμονή εξαιτίας της σωματιδιακής ρύπανσης εκκρίνουν ιντερλευκίνη-6, μία ουσία του ανοσοποιητικού συστήματος, η οποία έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε θρόμβωση του αίματος. Τα αιωρούμενα σωματίδια μέσω των πνευμόνων μπορούν να φτάσουν μέσα στο κυκλοφορικό σύστημα, όπου καταστρέφουν τα μακροφάγα. Τα μακροφάγα αποτελούν το βασικό δομικό υλικό των αθηρωματικών πλακών στα τοιχώματα των αρτηριών. Η συγκέντρωση τέτοιων στρωμάτων παρεμποδίζει τη φυσιολογική ροή του αίματος, ενώ η ρήξη τους προκαλεί τη δημιουργία θρόμβων, που μπορεί να πυροδοτήσουν καρδιακή προσβολή, ή εγκεφαλικό επεισόδιο.

Το χρονικό όριο των 24 ωρών είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι κλινικές μελέτες σε ανθρώπους έχουν δείξει ότι σε μέρες που η ρύπανση ξεπερνάει τα όρια ασφαλείας παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση των εμφραγμάτων. Πρόσφατες επιδημιολογικές μελέτες δείχνουν ότι μια πιθανή αύξηση στη συγκέντρωση των εισπνεύσιμων σωματιδίων κατά $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ θα προκαλέσει 1% αύξηση στην πρόωρη παιδική θνησιμότητα (Σαχινίδης κ.ά., 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Περιοχή μελέτης - Συλλογή δεδομένων

2.1 Η περιοχή της Θεσσαλονίκης

2.1.1 Μορφολογία της περιοχής

Η αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης με γεωγραφική θέση $40^{\circ} 38'N$, $22^{\circ} 57'E$, είναι μια από τις πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις της Ελλάδας. Ο πληθυσμός του πολεοδομικού συγκροτήματός της, φτάνει τους 790.824 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ενώ ο πληθυσμός ολόκληρου του νομού ανέρχεται τους 1.104.460 κατοίκους. Η πόλη χαρακτηρίζεται από πυκνή δόμηση, με υψηλά κτήρια, στενούς δρόμους και έλλειψη ακάλυπτων χώρων πρασίνου και πάρκων.



Σχήμα 2.1 : Χάρτης της περιοχής της Θεσσαλονίκης (ψηφιακά δεδομένα Δήμου Θεσσαλονίκης-τμήμα περιβάλλοντος)

Η Θεσσαλονίκη αναπτύσσεται κατά μήκος της βορειοανατολικής ακτής του Θερμαϊκού κόλπου και καλύπτει μία έκταση 650.000 στρεμμάτων (Σχήμα 2.1). Στα ανατολικά της πόλης υπάρχει η οροσειρά του Χορτιάτη με μέγιστο ύψος τα 1200μ. Προέκταση του Χορτιάτη, στα βορειοανατολικά της πόλης, είναι το όρος Προφήτης Ηλίας (ύψος 738μ) στις κοινότητες Ασβεστοχωρίου και Εξοχής. Η παρουσία αυτού του ενιαίου ορεινού όγκου, σε συνδυασμό με την κλειστή, ρηχή και θερμή θάλασσα του Θερμαϊκού κόλπου, οδηγεί στην εμφάνιση υψηλών επιπέδων υγρασίας, κύριο χαρακτηριστικό του μικροκλίματος της πόλης (Πετρακάκης 2008). Βορειοδυτικά του πολεοδομικού συγκροτήματος, στις εκβολές των ποταμών Γαλλικού – Αξιού - Αλιάκμονα εκτείνεται πεδιάδα, στην οποία εδρεύει ένα μεγάλο βιομηχανικό σύμπλεγμα.

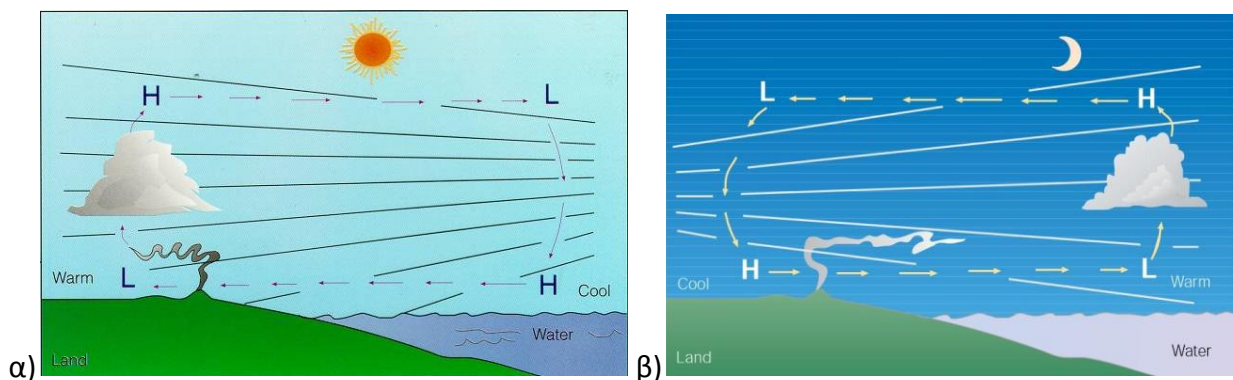
2.1.2 Κλιματολογικά και Μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής

Η Θεσσαλονίκη έχει κλίμα Μεσογειακό σύμφωνα με την κατάταξη Köppen Csa. Χαρακτηρίζεται από θερμά – ξηρά καλοκαίρια και κρύους – υγρούς χειμώνες που μπορεί να είναι και πολύ δριμείς όταν εισβάλουν απότομα ψυχρές αέριες μάζες. Σύμφωνα με τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου για την περίοδο 1958 - 2000, η μέση θερμοκρασία του αέρα είναι περίπου 15,9 °C και το ύψος βροχής φθάνει ετησίως τα 445,7 mm. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, ενώ το μεγαλύτερο ύψος βροχής παρατηρείται το Νοέμβριο και το Δεκέμβριο.

Καιρικά φαινόμενα όπως η θαλάσσια αύρα και οι τοπικές ομίχλες χαρακτηρίζουν την περιοχή και οφείλονται στην άμεση επίδραση της θάλασσας στο μικροκλίμα της πόλης. Η πόλη είναι ευπρόσβλητη σε απότομες καιρικές μεταβολές που εμφανίζονται σε βορειότερες περιοχές και όταν φτάνουν σε αυτήν έχουν ιδιαίτερη βιαιότητα (πχ ψυχρές και θερμές εισβολές (Βαρφή, 2009)). Η Θεσσαλονίκη επηρεάζεται από μικρής, ή και μεγαλύτερης κλίμακας ανέμους. Οι άνεμοι αυτοί, για τους οποίους ακολουθεί σύντομη περιγραφή, είναι η θαλάσσια και απόγειος αύρα, η αύρα βουνού και κοιλάδας, ο Βαρδάρης και ο Χορτιάτης.

Θαλάσσια και απόγειος αύρα

Η θαλάσσια αύρα² δημιουργείται στις παράκτιες περιοχές, συνήθως με αίθριο καιρό και απουσία ισχυρών ανέμων. Οφείλεται στην έντονη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας που η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη, παρατηρείται έντονη θέρμανση του εδάφους αλλά μικρότερη θέρμανση του νερού λόγω της μεγάλης του θερμοχωρητικότητας (τετραπλάσια θερμοχωρητικότητα από αυτή του εδάφους). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αέρας πάνω από την ξηρά να είναι θερμότερος από το γειτονικό του θαλασσινό αέρα. Ο θερμός αέρας του εδάφους ανεβαίνει προς τα επάνω και το κενό που αφήνει έρχεται να αναπληρώσει δροσερός αέρας από τη θάλασσα, σχηματίζοντας ένα κλειστό δακτύλιο κυκλοφορίας (Σχήμα 2.2 α).



Σχήμα 2.2 : α) Θαλάσσια αύρα και β) απόγειος αύρα
(Πηγή: <http://www.aviamet.gr>)

Κατά τη διάρκεια της νύχτας παρατηρείται το αντίστροφο φαινόμενο από αυτό που περιγράφηκε ήδη, γνωστό και ως απόγειος αύρα. Ο μηχανισμός είναι ο ίδιος με τη διαφορά ότι ο θερμός αέρας βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα. Όλη η θερμότητα που απορροφήθηκε από το νερό κατά την διάρκεια της μέρας επανεκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της νύχτας. Ο αέρας πάνω από τη θάλασσα είναι

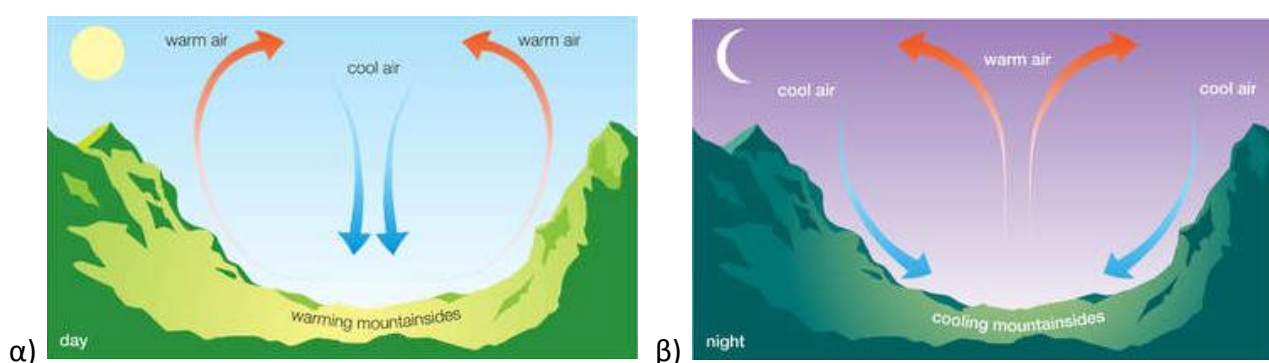
² Η θαλάσσια αύρα είναι γνωστή και ως «μπάτης» ή «μπουκαδούρα»

θερμότερος σε σχέση με τον αέρα της ξηράς, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανέμου που πνέει από την ξηρά προς την θάλασσα (Σχήμα 2.2 β).

Η θαλάσσια αύρα μπορεί να έχει έκταση μέχρι 30 km και τυπικές ταχύτητες από 2 – 5 m/s (Κοντογιάννη, 2008). Η απόγειος αύρα έχει μικρότερες διαστάσεις και ταχύτητες που δεν υπερβαίνουν τα 2 m/s. Τα τοπικά αυτά συστήματα έχουν σημασία σε προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης γιατί τροποποιούν την κατακόρυφη δομή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και δυσχεραίνουν σημαντικά τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας, μέσω των μηχανισμών της διάχυσης και διασποράς (Ζερεφός, 2001).

Αύρα βουνού και κοιλάδας

Η αύρα κοιλάδας είναι άνεμος που πνέει κατά την διάρκεια της ημέρας, από τα χαμηλότερα προς τα υψηλότερα σημεία επικλινών εδαφών. Οφείλεται στη διαφορετική θέρμανση του αέρα πάνω από τις πλαγιές της κοιλάδας, σε σχέση με εκείνου που βρίσκεται πάνω από τον κεντρικό άξονα της (Μελάς, 2004). Ο θερμός αέρας πάνω από τις πλαγιές του βουνού γίνεται ελαφρότερος και ανεβαίνει προς τις κορυφές. Σύμφωνα με την αρχή της συνέχειας των ατμοσφαιρικών μαζών, νέος αέρας, σχετικά ψυχρότερος, κατεβαίνει στο μέσο της κοιλάδας και αναπληρώνει τα προηγούμενα κενά ροής (Σχήμα 2.3 α).



Σχήμα 2.2 : α) Αύρα κοιλάδας και β) Αύρα βουνού
(Πηγή: <http://www.aviamet.gr>)

Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι πλαγιές των βουνών ψύχονται, οπότε ο άνεμος πνέει αντίθετα, από τα υψηλότερα προς τα χαμηλότερα σημεία, σχηματίζοντας καταβατικό άνεμο, γνωστό ως αύρα βουνού (Σχήμα 2.3 β).

Βαρδάρης

Ο άνεμος αυτός αρχίζει από το υψίπεδο της περιοχής των Σκοπίων, ακολουθεί την κοιλάδα του Αξιού και εισέρχεται στην Ελληνική περιοχή από το άνοιγμα μεταξύ του Πάικου και του Μπέλες. Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης φθάνει ως Βόρειος – Βορειοδυτικός σφοδρός και ξηρός άνεμος, με μέση ταχύτητα 10 m/s περίπου. Η ταχύτητά του μπορεί να φτάσει τα 20 – 25 m/s που σημαίνει άνεμος της βαθμίδας θύελλας για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Προκαλεί αίθριο καιρό με χαρακτηριστική πτώση της θερμοκρασίας, πτώση της υγρασίας και άνοδο του ποσοστού εξάτμισης και ηλιοφάνειας. Κατά την εμφάνιση αυτού του ανέμου παρατηρείται νεφοδιάλυση, μεταφορά και διασπορά των αερολυμάτων. Η συχνότητα εμφάνισής του είναι περίπου 40 μέρες το χρόνο. Η επικράτησή του διαρκεί 1-2 μέρες και, μετά από μια διακοπή, είναι δυνατή η επανάληψή του (Φλόκας, 1997).

Χορτιάτης

Πρόκειται για τοπικό καταβατικό άνεμο που πνέει στην περιοχή της Θεσσαλονίκης από ανατολικές διευθύνσεις. Μπορεί να φτάσει στο βαθμό θύελλας όταν συμβαίνει να επικρατούν βαθιές υφέσεις στην Κεντρική Μεσόγειο.

2.2 Όργανα και μέθοδοι μέτρησης σωματιδιακής ρύπανσης

2.2.1 Συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων

Προκειμένου να εκτιμηθούν τα επίπεδα της σωματιδιακής ρύπανσης, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που στοχεύουν στην ορθή ταυτοποίηση και ποσοτικό

προσδιορισμό των σωματιδιακών ρύπων. Μια ποικιλία τεχνολογικών οργάνων, εγγυάται την αποτελεσματική μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι μετρήσεις γίνονται:

- Με δειγματοληπτικό τρόπο και ανάλυση στο εργαστήριο
- Με συνεχή επιτόπου μέτρηση και καταγραφή
- Με παρατήρηση από μακριά (τηλεπαρατήρηση)

Με τις δύο πρώτες μεθόδους συλλέγεται ποσότητα αέρα σε κάποιο φίλτρο. Η απλούστερη συσκευή λειτουργεί με τη μέθοδο της διήθησης. Με τη βοήθεια μίας αντλίας μεγάλης ισχύος, ο ατμοσφαιρικός αέρας αναγκάζεται να περάσει μέσα από ένα σύστημα μικροσκοπικών οπών (φίλτρα). Οι σωματιδιακοί ρύποι κατακρατούνται και υποβάλλονται σε περαιτέρω ανάλυση. Το φίλτρο μπορεί να αποτελείται από επικαλυπτόμενες ίνες (φίλτρα ινών υάλου ή κυτταρίνης), από οργανικές μεμβράνες με καθορισμένο μέγεθος πόρων, από κόκκους ή πορώδες γυαλί (Μπάης, κ.ά., 2005). Μία λίγο διαφορετική συσκευή που λειτουργεί με τη μέθοδο της πρόσκρουσης φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Αρχικά, το δείγμα διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες μεγεθών. Τα σωματίδια με

αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη των 10 μ m, εξαναγκάζονται να περάσουν μέσα από ένα κωνικό ακροφύσιο. Εκεί κατακρατούνται με διαδοχικές προσκρούσεις σε ειδικές για τον σκοπό αυτό κυψελίδες. Τα μεγαλύτερα σωματίδια συλλέγονται στην πρώτη επιφάνεια πρόσκρουσης, ενώ στις επόμενες συλλέγονται σωματίδια με διαδοχικά μικρότερο μέγεθος. Τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερης των 10 μ m συλλέγονται από φίλτρο υαλονυμάτων (Μπάης, 2005).



Σχήμα 2.3 : Δειγματολήπτης αιωρούμενων σωματιδίων με κεφαλή PM10

2.2.2 Ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων

Οι σωματιδιακοί ρύποι του περιβάλλοντος χαρακτηρίζονται από τη συγκέντρωσή τους, την κατανομή μεγέθους τους και τη χημική τους σύσταση. Για κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους έχει αναπτυχθεί αντίστοιχη μέθοδος προσδιορισμού. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 : Βασικά χαρακτηριστικά μεθόδων προσδιορισμού σωματιδιακής μάζας, κατανομής μεγέθους και χημικής σύστασης. (US-EPA, 1983)

1) Τεχνικές προσδιορισμού της σωματιδιακής μάζας	
❖ Σταθμικός προσδιορισμός	Στηρίζεται στη ζύγιση του φίλτρου πριν και μετά τη δειγματοληψία.
❖ Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας	Στηρίζεται στη μέτρηση της απορρόφησης της β- ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία ραδιενεργό πηγή, κατά τη διέλευση της μέσα από τη σωματιδιακή ύλη .
❖ Μέθοδος Ταλάντωσης Χορδής TEOM (Tapering Element Oscillating Microbalance)	Βασίζεται στη μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης μιας γυάλινης μεμβράνης. Η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτάται από την μάζα των σωματιδίων που παραβρέθηκαν εντός της συσκευής.
❖ Πιεζοηλεκτρική ταλάντωση	Βασίζεται στην μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, λόγω της εναπόθεσης αιωρούμενων σωματιδίων πάνω σε αυτόν

2) Τεχνικές προσδιορισμού της κατανομής μεγέθους

<ul style="list-style-type: none">❖ Πολλαπλά κόσκινα ❖ Μέθοδος σκεδασμού του φωτός ❖ Μέθοδος Ηλεκτροκίνητου διαχωρισμού	<p>Τα πολλαπλά κόσκινα αποτελούνται από πολλά επίπεδα, το κάθε επίπεδο των οποίων αφαιρεί σωματίδια με σταδιακά μικρότερη διάμετρο.</p> <p>Μεμονωμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν με μια ακτίνα φωτός και σκεδάζουν το φως υπό γωνία. Η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός, είναι ανάλογη με το μέγεθος των σωματιδίων</p> <p>Η μέθοδος απαιτεί μονοπολική φόρτιση των σωματιδίων. Ο διαχωρισμός τους γίνεται με το πέρασμα δια μέσου ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αυξάνοντας την ισχύ του ηλεκτρικού πεδίου, εκτρέπονται μεγαλύτερα φορτισμένα σωματίδια από το ρεύμα αέρα.</p>
---	--

3) Τεχνικές προσδιορισμού της χημικής σύστασης

<ul style="list-style-type: none">❖ Φασματοσκοπία φθορισμού με ακτίνες – X (XRF) ❖ Ενεργοποίηση με βομβαρδισμό νετρονίων (Neutron Activation Analysis, NAA)	<p>Η μέθοδος βασίζεται σε δείγμα αέρα που βομβαρδίζεται με ακτίνες-Χ. Τα ηλεκτρόνια του εσωτερικού φλοιού διεγείρονται σε υψηλότερα ενεργειακά επίπεδα. Κατά την αυτοδιέγερσή τους εκπέμπεται ενέργεια με κυματαρίθμους χαρακτηριστικούς του κάθε στοιχείου που είναι παρόν στο δείγμα. Τα φωτόνια ανιχνεύονται και αναλύονται, για να δώσουν τον τύπο και την ποσότητα των στοιχείων στο δείγμα</p> <p>Η NNA αφορά το βομβαρδισμό ενός δείγματος με νετρόνια, τα οποία αλληλεπιδρούν με το δείγμα για να δημιουργήσουν διαφορετικά ισότοπα των στοιχείων στο δείγμα. Πολλά από αυτά τα ισότοπα είναι ραδιενεργά και μπορούν να ανακαλυφθούν συγκρίνοντας την ραδιενέργειά τους με πρότυπα</p>
--	--

4) Τηλεπισκόπηση

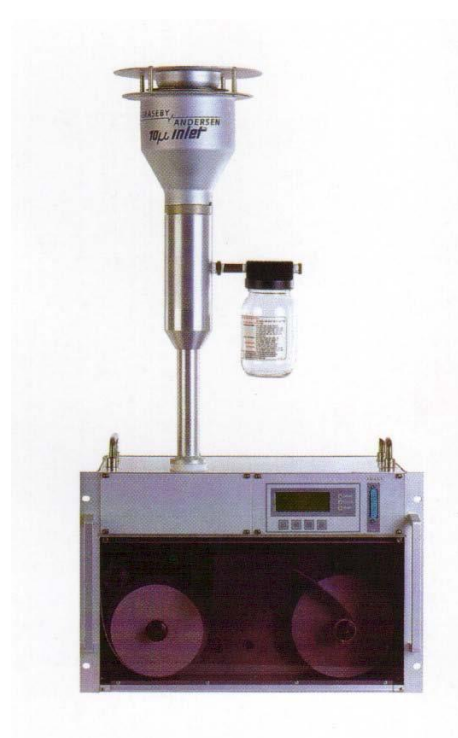
❖ Μέθοδος της ενεργούς τηλεπισκόπησης Lidar

Βασίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας λέιζερ και της ατμόσφαιρας, και έπειτα στην ακόλουθη λήψη και ανάλυση της οπισθοσκεδαζόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, οι οποίες καθορίστηκαν με τη μέθοδο της απορρόφησης β-ακτινοβολίας, από τους διάφορους σταθμούς μέτρησης. Για το λόγο αυτό γίνεται μια ποιο εκτενής αναφορά στη μέθοδο αυτή (US-EPA, 1983).

Μέθοδος απορρόφησης β-ακτινοβολίας

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στη μέτρηση της απορρόφησης της β-ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία ραδιενεργό πηγή, κατά τη διέλευσή της μέσα από τη σωματιδιακή ύλη που έχει συλλεχθεί σε ένα φίλτρο. Ο ατμοσφαιρικός αέρας εξαναγκάζεται να διέλθει από την κεφαλή PM, η οποία αποτελείται από μία σειρά από προσκρουστήρες προκειμένου να διαχωριστούν κατά μέγεθος τα αιωρούμενα σωματίδια. Τα PM εναποτίθενται σε φίλτρο που είναι φτιαγμένο από υαλονήματα και σε μορφή ταινίας (glass fiber filter tape). Μία ραδιενεργός πηγή, συνήθως αέριο Kr-85, εκπέμπει β-ακτινοβολία προς δύο θαλάμους ιονισμού, το θάλαμο μέτρησης και το θάλαμο αναφοράς. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης η ραδιενεργός πηγή εκπέμπει β-



Σχήμα 2.4 : Μετρητής μάζας αιωρούμενων σωματιδίων με απορρόφηση β-ακτινοβολίας

ακτινοβολία χαμηλής έντασης προς τους δύο θαλάμους ιονισμού. Στο θάλαμο μέτρησης η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη εξαιτίας των αιωρούμενων σωματιδίων που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο. Η διαφορά δυναμικού που παρατηρείται μεταξύ των δύο θαλάμων είναι ανάλογη της μάζας των PM10 πάνω στο φίλτρο και το σήμα μετατρέπεται μέσω υπολογιστή σε συγκέντρωση PM10 στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ένα τέτοιο όργανο μέτρησης μάζας αιωρούμενων σωματιδίων φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

2.3 Σταθμοί μέτρησης σωματιδιακής ρύπανσης

Στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης λειτουργούν τρία δίκτυα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα:

- Το δίκτυο που λειτουργεί υπό την ευθύνη και εποπτεία της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος και χωροταξίας της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, ως μέρος του επίσημου εθνικού δικτύου του ΥΠΕΧΟΔΕ.
- Το δίκτυο σταθμών που λειτουργεί υπό την ευθύνη και εποπτεία του τμήματος περιβάλλοντος, του Δήμου Θεσσαλονίκης.
- Το δίκτυο σταθμών που λειτουργεί ο Δήμος Εχεδώρου, τα στοιχεία του οποίου δημοσιοποιούνται μόνο μέσω ετήσιων εκθέσεων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα σωματιδιακής ρύπανσης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και του Δήμου Θεσσαλονίκης.

2.3.1 Σταθμοί μέτρησης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας

Το 1990 λειτούργησαν για πρώτη φορά σταθμοί μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κάτω από την εποπτεία του Υπουργείου Μακεδονίας Θράκης (Υ.ΜΑ.Θ.). Σήμερα η Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωροταξίας της Περιφέρειας Κεντρικής

Μακεδονίας είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία του δικτύου ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης (ΠΣΘ) από το 2001. Το δίκτυο μετρήσεων ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελείται από 8 σταθμούς, τέσσερις από τους οποίους διαθέτουν σύστημα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων. Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται οι σταθμοί μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας και ο χαρακτηρισμός της θέσης τους (Τουλούμη, κ.ά., 2006).

Πίνακας 2.1: Σταθμοί μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και χαρακτηρισμός της θέσης τους (<http://rcm.damt.gov.g>)

Σταθμός Περιφέρειας	Χαρακτηρισμός σταθμού
Σίνδου	Αγροτικός - Βιομηχανικός
Πανοράματος	Περιαστικός
Ελευθέριου - Κορδελιού	Αστικός - Βιομηχανικός
πλατεία Αγ. Σοφίας	Αστικός

Η μέθοδος μέτρησης των σωματιδίων και στους τέσσερις σταθμούς είναι η μέθοδος με απορρόφηση β – ακτινοβολίας, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 2.2.2. Όλοι οι αναλυτές που διαθέτουν οι σταθμοί μέτρησης είναι συνεχούς λειτουργίας και καταγράφουν μία τιμή κάθε λεπτό. Με τη βοήθεια ενός επεξεργαστή υπολογίζονται οι μέσες ωριαίες τιμές, οι οποίες μεταβιβάζονται στον κεντρικό υπολογιστή της Υπηρεσίας. Μετεωρολογικά δεδομένα (ταχύτητα /διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία και υγρασία) καταγράφονται από όλους τους σταθμούς, εκτός του σταθμού της Πλ. Αγίας Σοφίας (Τουλούμη, κ.ά., 2006). Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται οι σταθμοί μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται χάρτης με τις θέσεις τους.



Σχήμα 2.5: Δίκτυο μετρητικών σταθμών αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας κεντρικής Μακεδονίας α) Σίνδος, β) Πανόραμα, γ) Ελευθέριο Κορδελιό, δ) Πλατεία Αγ. Σοφίας (www.airthess.gr).



Σχήμα 2.5 : Δίκτυο μετρητικών σταθμών αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας κεντρικής Μακεδονίας και του Δήμου Θεσσαλονίκης.

2.3.2 Σταθμοί μέτρησης του Δήμου Θεσσαλονίκης

Η συνεχής καταγραφή των ρύπων και η παρακολούθηση της διαχρονικής εξέλιξης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οδήγησε το Δήμο Θεσσαλονίκης στη δημιουργία ενός Δημοτικού Δικτύου Σταθμών Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Ο πρώτος σταθμός (Σταθμός του Δημαρχείου) λειτούργησε στο κέντρο της πόλης, το Νοέμβριο του 1988. Σήμερα, το Δημοτικό Δίκτυο περιλαμβάνει πέντε σταθμούς μέτρησης συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι σταθμοί μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων του Δήμου και ο χαρακτηρισμός της θέσης τους ενώ στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται χάρτης με τις θέσεις τους. Κάθε ένας από τους σταθμούς διαθέτει κατάλληλο μετεωρολογικό εξοπλισμό για τη μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου και βροχόπτωση) (www.envdimosthes.gr).

Πίνακας 2.2 : Σταθμοί μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων του Δήμου Θεσσαλονίκης και χαρακτηρισμός της θέσης τους (Πετρακάκης et al, 2005).

Σταθμός Δήμου	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο (m) - MSL	Χαρακτηρισμός Σταθμού
Εγνατίας –Βενιζέλου (Σταθμός Δημαρχείου)	22°56'30''	40°38'15''	11.6	Κυκλοφορίας
25ης Μαρτίου	22°57'38''	40°36'05''	12.4	Κυκλοφορίας
Λαγκαδά	22°56'06''	40°39'12''	18.3	Κυκλοφορίας
Επταπυργίου	22°57'38''	40°38'34''	171.3	Αστικού υποβάθρου
Τούμπας	22°59'29''	40°36'43''	89.3	Αστικού υποβάθρου

Οι Σταθμοί Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης είναι εξοπλισμένοι με αυτόματους αναλυτές, που λειτουργούν σε εικοσιτετράωρη βάση και βαθμονομούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα (δύο φορές την εβδομάδα). Η μέθοδος μέτρησης των σωματιδίων σε όλους τους σταθμούς του Δήμου είναι η μέθοδος με απορρόφηση β – ακτινοβολίας.

Κάθε Σταθμός διαθέτει έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή που λειτουργεί ως καταγραφικό. Ο Η/Υ δέχεται τα αναλογικά σήματα από την έξοδο των αναλυτών, τα οποία μετατρέπονται σε ψηφιακά και αποθηκεύονται στο σκληρό δίσκο του Η/Υ (www.envdimosthes.gr). Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που βρίσκεται στην συμβολή των οδών Εγνατίας – Βενιζέλου.



Σχήμα 2.6 : Σταθμός μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης στην περιοχή Εγνατίας –Βενιζέλου (Σταθμός Δημαρχείου).

2.4 Νομοθεσία ποιότητας αέρα

Κατά την προσπάθεια ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει σημαντικό αριθμό κανονισμών και Οδηγιών προς τα κράτη-μέλη, τις οποίες είναι υποχρεωμένη να ακολουθήσει και η Ελλάδα. Η πρώτη

οδηγία για τις οριακές τιμές των αιωρούμενων σωματιδίων εκδόθηκε τον Απρίλιο του 1999 (Οδηγία 1999/30/ΕΚ). Στην οδηγία αυτή θεσπίζονται διαφόρων ειδών όρια για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και των οικοσυστημάτων.

- **Οριακή τιμή:** Είναι ένα επίπεδο που καθορίζεται βάσει επιστημονικών γνώσεων, με σκοπό να αποφεύγονται, να προλαμβάνονται, ή να μειώνονται οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία ή/και στο σύνολο του περιβάλλοντος και θα πρέπει να επιτευχθεί εντός δεδομένης προθεσμίας χωρίς στη συνέχεια να παρατηρούνται υπερβάσεις.
- **Περιθώριο ανοχής:** Είναι το ποσοστό της οριακής τιμής κατά το οποίο επιτρέπεται να γίνει υπέρβασή της, σύμφωνα με τους όρους της οδηγίας 96/62/ΕΚ.
- **Όριο προειδοποίησης:** Είναι το επίπεδο πέραν του οποίου η βραχύχρονη έκθεση εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία των ιδιαίτερα ευαίσθητων ομάδων του πληθυσμού, όπως οι ηλικιωμένοι και τα μικρά παιδιά. Σε περίπτωση υπέρβασής του απαιτείται η παροχή στο κοινό κατάλληλων πληροφοριών.
- **Όριο συναγερμού:** Είναι το επίπεδο πέραν του οποίου υπάρχει κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία ακόμα κι αν η έκθεση είναι βραχύχρονη. Όταν η συγκέντρωση του ρύπου φτάσει αυτό το επίπεδο, η αρμόδια αρχή λαμβάνει άμεσα τα μέτρα που προβλέπει η οδηγία 96/62/ΕΚ.

Το θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα μπορεί να χωριστεί σε πέντε μεγάλες ενότητες :

- Νομοθεσία για την ατμοσφαιρική ρύπανση
- Νομοθεσία για τα πρότυπα ποιότητας αέρα
- Νομοθεσία για τα πρότυπα εκπομπών
- Νομοθεσία για την αντιμετώπιση ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- Νομοθεσία για την πρόσβαση των πολιτών στην περιβαλλοντική πληροφορία.

Όλες οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν ενσωματωθεί στο Ελληνικό Δίκαιο με υπουργικές αποφάσεις. Για τα αιωρούμενα σωματίδια αεροδυναμικής διαμέτρου μικρότερης των 10 μm (PM10), η νομοθεσία ορίζει το περιεχόμενο του Πίνακα 2.3 (οδηγία 1999/30/ΕΚ).

Πίνακας 2.3 : Επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων PM10

Πρότυπα Ποιότητας για Αέρα Περιβάλλοντος	Περίοδος αναφοράς για τον υπολογισμό του μέσου όρου	Οριακή Τιμή	Περιθώριο Ανοχής	Προθεσμία συμμόρφωσης προς την οριακή τιμή
24ωρη οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	24 ώρες	50 μg/m ³ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος	50% κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0% την 1/1/2005	1η Ιανουαρίου 2005
Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	Ημερολογιακό έτος	40 μg/m ³	20% κατά την έναρξη ισχύος της παρούσας οδηγίας, μειούμενο από 1/1/2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0% την 1/1/2005	1η Ιανουαρίου 2005
24ωρη οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	24 ώρες	50 μg/m ³ των οποίων δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 7 φορές ανά ημερολογιακό έτος	Θα υπολογιστεί βάσει δεδομένων και θα είναι ισοδύναμο με την οριακή τιμή του Σταδίου 1	1η Ιανουαρίου 2010
Ετήσια οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας	Ημερολογιακό έτος	20 μg/m ³	50% την 1/1/2005 μειούμενο κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φθάσει το 0% την 1/1/2010	1η Ιανουαρίου 2010

Με βάση τις οδηγίες αυτές, για κάθε ρύπο ορίζεται μια **οριακή τιμή** για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, με το αντίστοιχο έτος έναρξης ισχύος της. Παράλληλα δίνεται και ένα **περιθώριο ανοχής**, το οποίο αθροίζεται στην οριακή τιμή, δίνοντας έτσι την ενδεικτική οριακή τιμή, η οποία ισχύει στο μεσοδιάστημα έως τη θέση σε ισχύ της οριακής τιμής. Το περιθώριο ανοχής κάθε χρόνο μειώνεται, έτσι ώστε στην ημερομηνία ισχύος του νέου ορίου να μηδενιστεί.

Σύμφωνα με την Κοινοτική Οδηγία, ο στόχος κάθε ευρωπαϊκής πόλης ήταν, την 1η Ιανουαρίου 2005, η συγκέντρωση των PM10 να μην ξεπερνάει το $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ περισσότερες από 35 ημέρες ανά ημερολογιακό έτος. Επειδή η οδηγία αυτή ξεκίνησε να ισχύει μετά τα μέσα Αυγούστου του 1999, δίνεται ένα περιθώριο ανοχής 50% κατά την έναρξη αυτής, μειούμενο από την 1η Ιανουαρίου 2001, και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φτάσει το 0% την 1η Ιανουαρίου το 2005. Συνεπώς κατά την 1/1/2000, θα έπρεπε να έχουμε 24ωρη οριακή τιμή PM10

$$50 \mu\text{g}/\text{m}^3 + (50\% * 50 \mu\text{g}/\text{m}^3) = 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ένας λογικός στόχος θα ήταν η επιδίωξη μείωσης της συγκέντρωσης των σωματιδίων κατά $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά έτος. Όσον αφορά στη μέση ετήσια συγκέντρωση των PM10, αυτή δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σε κάθε σταθμό μέτρησης. Το περιθώριο ανοχής ήταν 20% κατά την έναρξη αυτής, μειούμενο από την 1η Ιανουαρίου 2001, και κατόπιν κάθε 12 μήνες, κατά ίσο ετήσιο ποσοστό, ώστε να φτάσει το 0% την 1η Ιανουαρίου το 2005. Συνεπώς, κατά την 1/1/2000, θα έπρεπε να έχουμε ετήσια οριακή τιμή PM10

$$40 \mu\text{g}/\text{m}^3 + (20\% * 40 \mu\text{g}/\text{m}^3) = 48 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Ένας λογικός στόχος θα ήταν η επιδίωξη μείωσης της συγκέντρωσης των σωματιδίων κατά $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ανά έτος.

Οι ενδεικτικές οριακές τιμές (ετήσιες και 24ώρου) για την περίοδο 2000 – 2005 παραθέτονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακα 2.4: Οι ενδεικτικές οριακές τιμές (ετήσιες και 24ώρου) για την περίοδο 2000 – 2005

Έτος	Οριακή τιμή 24ώρου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (περιθώριο ανοχής)	Οριακή τιμή ημερολογιακού έτους ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (περιθώριο ανοχής)
2000	75	48
2001	70	46.4
2002	65	44.8
2003	60	43.2
2004	55	41.6
2005	50	40

Στην ιστοσελίδα του τμήματος Περιβάλλοντος του Δήμου Θεσσαλονίκης (<http://www.envidimosthes.gr>), έχουν δημοσιοποιηθεί τα όρια επιφυλακής και συναγερωμού των υπηρεσιών του Δήμου Θεσσαλονίκης. Τα όρια αναφέρονται σε μέσες ημερήσιες τιμές. Το όριο επιφυλακής ή αλλιώς όριο προειδοποίησης, είναι $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ το όριο συναγερωμού, κατά το οποίο επιβάλλονται έκτακτα μέτρα από τον Δήμο, είναι $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.5 Σωματιδιακή ρύπανση στη περιοχή της Θεσσαλονίκης

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν σήμερα ένα από τα σημαντικότερα πρόβλημα για το ατμοσφαιρικό περιβάλλον της Θεσσαλονίκης. Η παρούσα κατάσταση έχει δημιουργηθεί κυρίως από τη βιομηχανική δραστηριότητα που είναι αρκετά αναπτυγμένη στην περιοχή, την κυκλοφορία των οχημάτων και τη λειτουργία

καυστήρων κεντρικής θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου παρατηρούνται υψηλότερες τιμές σωματιδιακής ρύπανσης στην περιοχή, λόγω των δραστηριοτήτων της πόλης. Σε ημερήσια βάση, οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται από τις 7:00 - 11:00 και από τις 19:00 - 23:00, όπως φαίνεται από τις ετήσιες εκθέσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης. Οι ώρες αυτές συμπίπτουν αρκετά καλά με τις ώρες της κυκλοφοριακής αιχμής και τις ώρες λειτουργίας της κεντρικής θέρμανσης, κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους.

Σύμφωνα με στοιχεία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΕΕ) της Κεντρικής Μακεδονίας για τα τελευταία 20 χρόνια, εμφανίζεται πτωτική τάση στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, σε όλους τους σταθμούς του δημοτικού δικτύου. Η μείωση των συγκεντρώσεων αποδίδεται:

- 1) στην τεχνολογική αναβάθμιση του στόλου των οχημάτων (Ι.Χ.-Δ.Χ), (Σήμερα το 60% των οχημάτων είναι νέας καταλυτικής τεχνολογίας),
- 2) στη βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων (κατάργηση της βενζίνης τύπου «Super», δηλαδή βενζίνη που περιέχει μόλυβδο),
- 3) στην εφαρμογή του μέτρου της κάρτας ελέγχου καυσαερίων (ΚΕΚ),
- 4) στη θέσπιση τεχνικού ελέγχου για όλα τα οχήματα (ΚΤΕΟ - καλύτερη συντήρηση),
- 5) στη λειτουργία και επέκταση των εγκαταστάσεων αποθείωσης στα διυλιστήρια των Ελληνικών πετρελαίων (ΕΛΠΕ),
- 6) στη σταδιακή αντικατάσταση των καυστήρων πετρελαίου με καυστήρες φυσικού αερίου και
- 7) στη συρρίκνωση της βιομηχανικής δραστηριότητας στην περιοχή.

Ωστόσο, αν η περίοδος που λαμβάνεται υπόψη περιοριστεί στην πενταετία 2004-2008, τότε παρατηρείται αύξηση συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων στο κέντρο της πόλης, κυρίως λόγω των έργων του μετρό (Πετρακάκης Μ. , 2009). Η κατασκευή του μετρό ξεκίνησε το 2006 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2015.

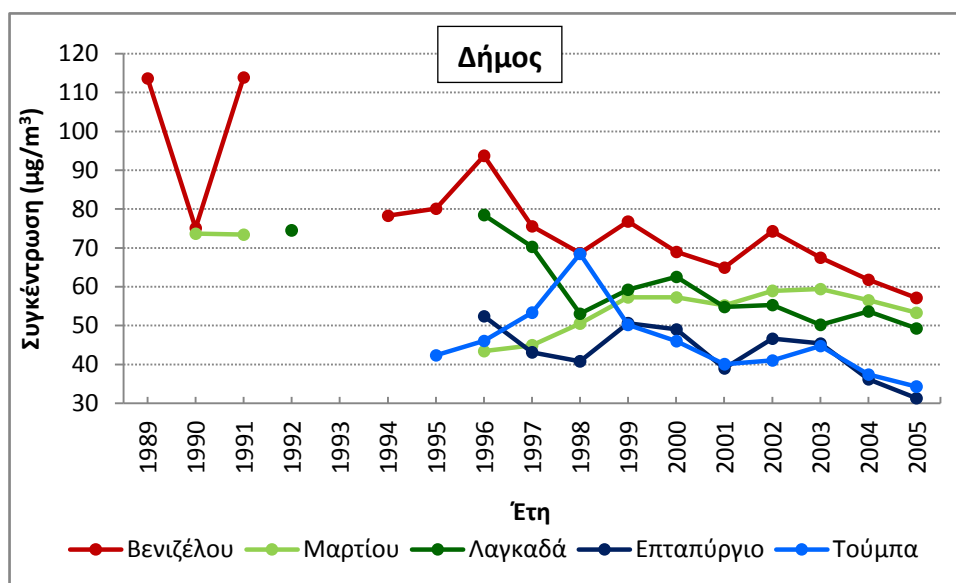
Πολλά προβλήματα ρύπανσης εμφανίζονται και λόγω του πολεοδομικού σχεδιασμού της πόλης. Οι στενοί δρόμοι, τα ψηλά κτήρια και η πυκνοκατοικημένη δόμηση, δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες για τη διασπορά και απομάκρυνση των αέριων ρύπων. Ο μεγάλος όγκος κτηρίων κατά μήκος της παραλιακής οδού εμποδίζει τη θαλάσσια αύρα να εισχωρήσει στα ενδότερα της πόλης και να απομακρύνει την αέρια ρύπανση. Τέλος η λανθασμένη επιλογή της θέσης της βιομηχανικής περιοχής στα δυτικά της πόλης, επιβαρύνει σημαντικά τον αέρα της Θεσσαλονίκης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο άνεμος ακολουθεί την περιστροφή της Γής και πνέει συνήθως από τα δυτικά, όταν δεν εμφανίζονται άλλα συνοπτικά συστήματα στην περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Χρονική διακύμανση της σωματιδιακής ρύπανσης

3.1 Διαχρονική μεταβολή μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων PM10

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών του Δήμου. Ο σταθμός της Βενιζέλου άρχισε να καταγράφει συγκεντρώσεις από το 1989. Η συστηματική καταγραφή των σωματιδιακών ρύπων έγινε στους περισσότερους σταθμούς μετά το 1996.



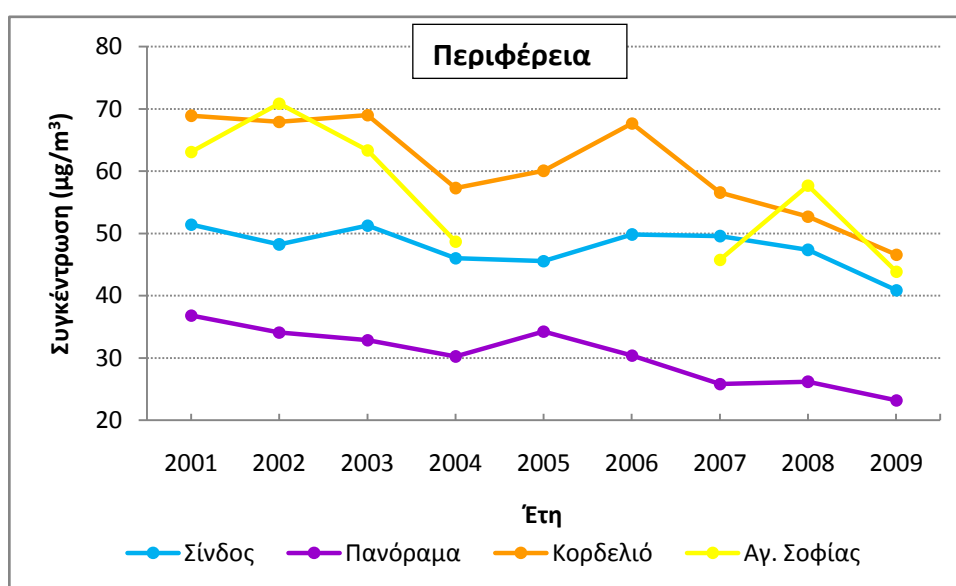
Σχήμα 3.1: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM10 για τους σταθμούς μέτρησης του Δήμου Θεσσαλονίκης.

Οι μεγαλύτερες ετήσιες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζονται στο σταθμό της Βενιζέλου, που είναι και ο πιο κεντρικός σταθμός από όλους. Ο σταθμός της Μαρτίου εμφανίζει μικρές διαφορές στις ετήσιες

συγκεντρώσεις με το σταθμό του Λαγκαδά από το 1998 ως το 2001. Οι χαμηλότερες ετήσιες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο σταθμό του Επταπυργίου. Ο σταθμός του Επταπυργίου βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος από τους υπόλοιπους σταθμούς του Δημοτικού Δικτύου (174m από την επιφάνεια της θάλασσας), οπότε και επηρεάζεται λιγότερο από το έντονο ανάγλυφο της πόλης και τις χαμηλές θερμοκρασιακές αναστροφές, που παγιδεύουν τα αιωρούμενα σωματίδια στους άλλους σταθμούς κατά τη διάρκεια της νύχτας. Χαμηλές είναι και οι τιμές του σταθμού της Τούμπας, με εξαίρεση το έτος 1998.

Όλοι οι σταθμοί υπερβαίνουν την οριακή τιμή των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση από το 1999. Οι ετήσιες συγκεντρώσεις υπερβαίνουν και το μέγιστο περιθώριο ανοχής που ήταν τα $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Πίνακας 2.4). Εξαίρεση σε αυτό αποτελούν οι σταθμοί της Τούμπας και του Επταπυργίου, που εμφάνισαν τιμές κοντά στην οριακή τιμή και μέσα στα περιθώρια ανοχής, μετά το 1999. Όλοι οι σταθμοί παρουσιάζουν πτωτική τάση στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Δεν διαπιστώθηκε αν οι τάσεις είναι στατιστικά σημαντικές λόγω των μεγάλων κενών στις χρονοσειρές. Ωστόσο οι πτωτικές τάσεις δείχνουν ότι ίσως να υπήρξαν παρεμβάσεις από το Δήμο για τη μείωση των σωματιδιακών εκπομπών.

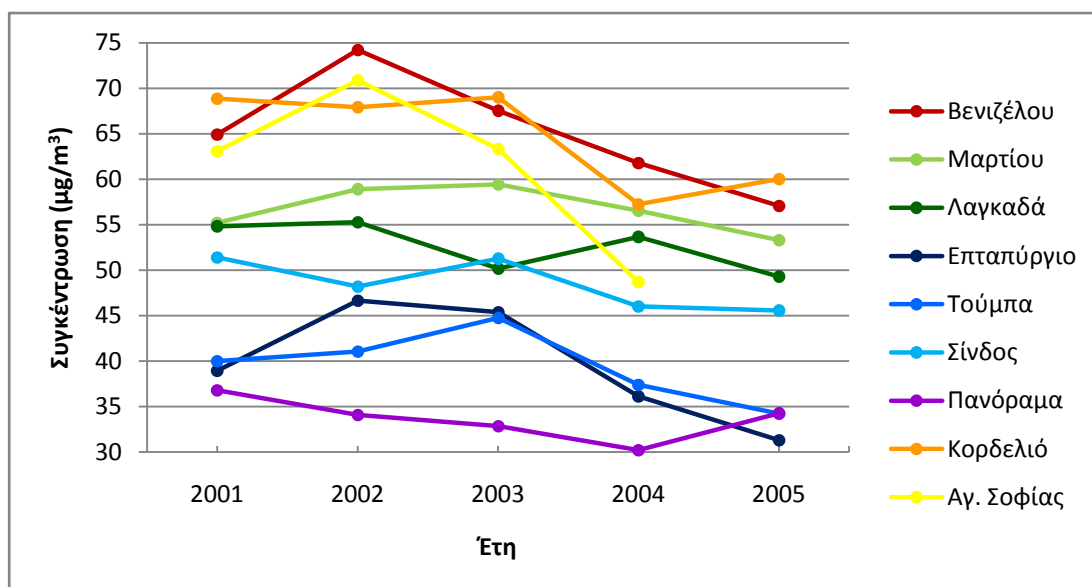
Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της Περιφέρειας. Οι χρονοσειρές αναφέρονται στην περίοδο 2001 – 2009.



Σχήμα 3.2: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM10 για τους σταθμούς της Περιφέρειας.

Οι μεγαλύτερες ετήσιες συγκεντρώσεις των σταθμών της περιφέρειας εμφανίζονται στο σταθμό του Κορδελιού, σταθμός αστικός κοντά σε βιομηχανική περιοχή. Παραπλήσιες με τις συγκεντρώσεις του Κορδελιού εμφανίζονται να είναι και οι συγκεντρώσεις του σταθμού της Αγ. Σοφίας, μέχρι το 2004. Οι χαμηλότερες ετήσιες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο σταθμό του Πανοράματος, που βρίσκεται έξω από την πόλη σε μεγαλύτερο υψόμετρο από τους υπολοίπους. Μόνο στο σταθμό του Πανοράματος τα PM10 δεν υπερβαίνουν την οριακή τιμή των 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η χρονική περίοδος 2001 – 2005 είναι μια κοινή περίοδος, όπου υπάρχουν δεδομένα συγκέντρωσης σωματιδιακής ρύπανσης από όλους τους σταθμούς μελέτης (Δήμου και Περιφέρειας), με εξαίρεση των σταθμό της Αγ. Σοφίας που διαθέτει δεδομένα την περίοδο 2001-2004. Ο σταθμός της Αγ. Σοφίας συμπεριλαμβάνεται στην μελέτη της κοινής περιόδου 2001-2005 παρότι δεν διαθέτει δεδομένα για το 2005, λόγω του ότι είναι από τους πιο κεντρικούς σταθμούς της πόλης και κρίνεται αναγκαίο να συμπεριληφθεί στη μελέτη. Οι μέσες ετήσιες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των PM10 για όλους τους σταθμούς μελέτης, την κοινή περίοδο 2001 – 2005, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM10 για όλους τους σταθμούς μέτρησης του Δήμου και της Περιφέρειας, την περίοδο 2001 – 2005.

Για την κοινή περίοδο 2001 – 2005, ο σταθμός της Βενιζέλου είναι αυτός που εμφανίζει τις μεγαλύτερες ετήσιες συγκεντρώσεις. Ο σταθμός του Κορδελιού εμφανίζει υψηλότερες συγκεντρώσεις από τον σταθμό της Αγ. Σοφίας. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι ο σταθμός του Κορδελιού, βρίσκεται κοντά σε βιομηχανική περιοχή και στην εσωτερική περιφερειακή οδό (Τουλούμη, κ.ά., 2006). Την περίοδο 2001 – 2003 οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις στον σταθμό της Αγ. Σοφίας ήταν αρκετά υψηλές, ενώ για το έτος 2005 δεν υπάρχουν δεδομένα σωματιδιακής ρύπανσης για το σταθμό αυτό. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο σταθμός της Αγ. Σοφίας βρίσκεται μέσα σε αστική χαράδρα που δημιουργείται από τα ψηλά κτίρια. Αυτό ευνοεί σημαντικά την συσσώρευση των σωματιδίων. Ο σταθμός της Σίνδου εμφανίζει χαμηλότερες μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις από το σταθμό του Λαγκαδά και της Μαρτίου. Γενικά οι πιο απομακρυσμένοι σταθμοί, από το κέντρο της πόλης, καταγράφουν μικρότερες συγκεντρώσεις αεροζόλ. Να σημειωθεί ότι μόνο ο σταθμός του Πανοράματος δεν υπερβαίνει το όριο $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου 2001 – 2005.

Ένας από τους λόγους που εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις στους περισσότερους σταθμούς είναι πιθανότατα και η μειωμένη ικανότητα των σωματιδιακών ρύπων να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις με τη βοήθεια του ανέμου. Τα αιωρούμενα σωματίδια εγκλωβίζονται πάνω από την πόλη, αλλά και από τον Θερμαϊκό κόλπο της Θεσσαλονίκης και με τη συμβολή της θαλάσσιας και απόγειας αύρας, πραγματοποιείται μια ανακύκλωση των ρυπασμένων αέριων μαζών.

3.2 Μέση μηνιαία μεταβολή συγκεντρώσεων PM10

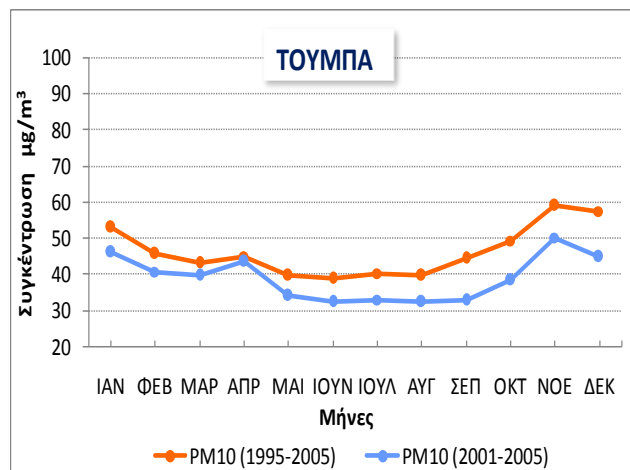
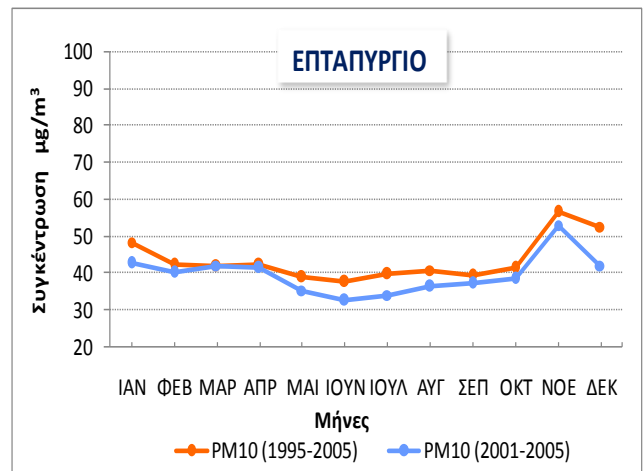
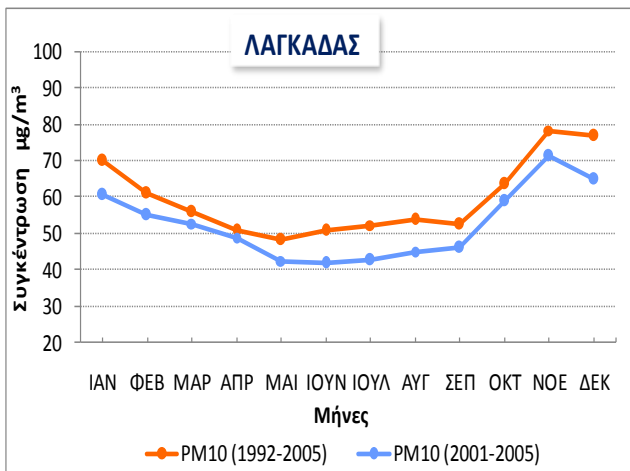
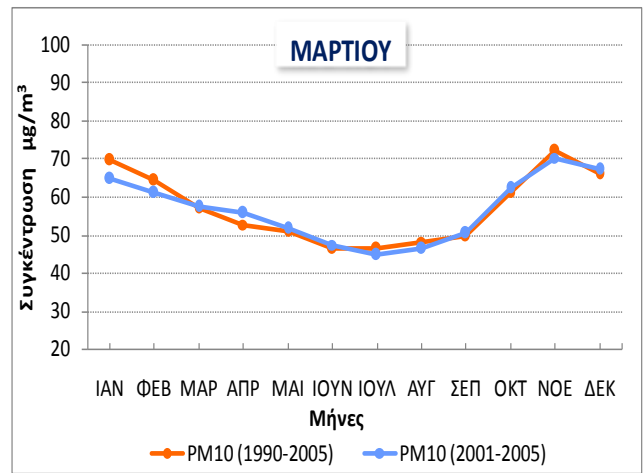
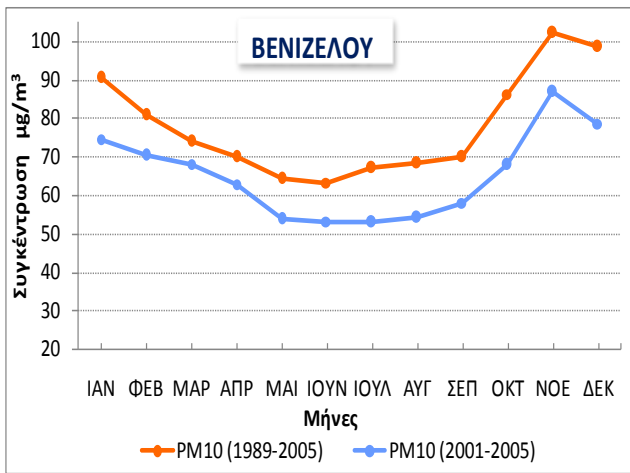
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των εποχιακών συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων σε όλους τους σταθμούς καταγραφής. Η μελέτη πραγματοποιείται για την περίοδο 2001 – 2005, που είναι κοινή για όλους τους σταθμούς και για τις ευρύτερες χρονικές περιόδους, όπου υπάρχουν δεδομένα σωματιδιακής ρύπανσης για τον κάθε σταθμό (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Σταθμοί καταγραφής σωματιδιακής ρύπανσης Δήμου και Περιφέρειας με τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους όπου υπήρχαν καταγεγραμμένα δεδομένα ρύπανσης.

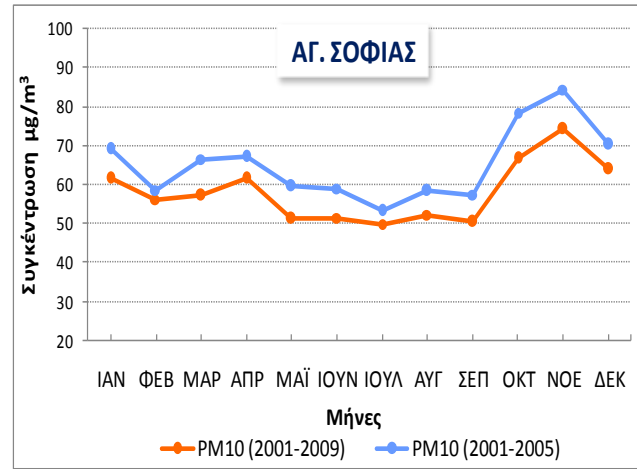
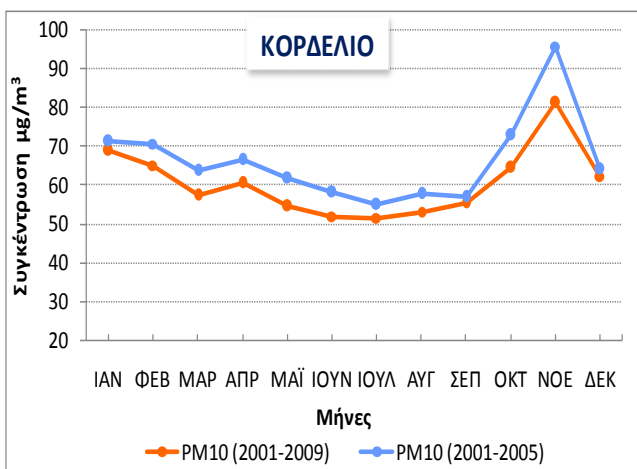
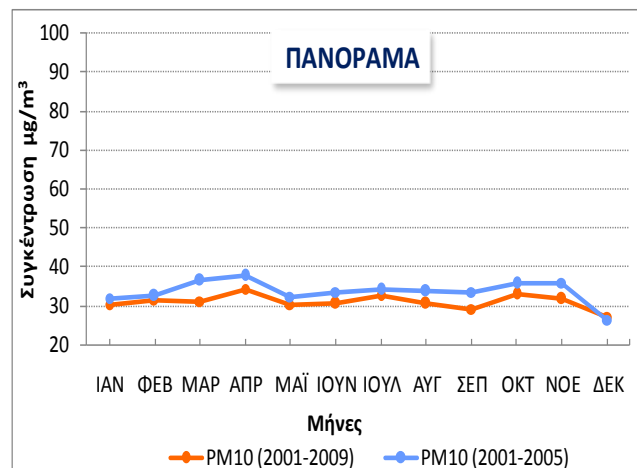
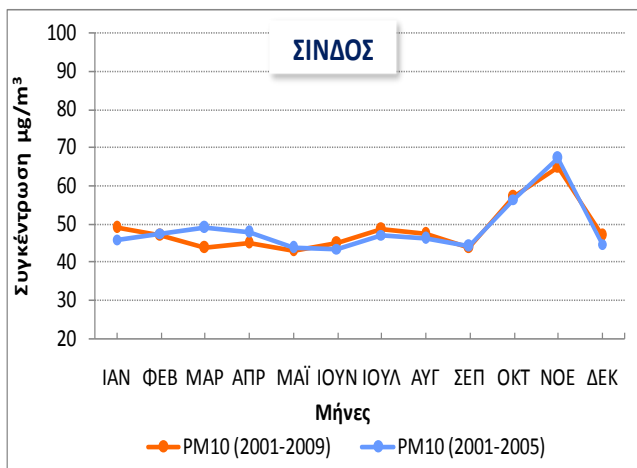
	Σταθμός	Χρονική περίοδος όπου υπάρχουν δεδομένα
Δήμος	Βενιζέλου	(1989 – 1991), (1994-2005)
	Μαρτίου	(1990 – 1991), (1996-2005)
	Λαγκαδάς	(1992), (1996 – 2005)
	Επταπύργιο	(1996 – 2005)
	Τούμπας	(1995 – 2005)
Περιφέρεια	Σίνδος	(2001 – 2009)
	Πανόραμα	(2001 – 2009)
	Κορδελιό	(2001 – 2009)
	Αγ. Σοφίας	(2001 – 2004), (2007-2009)

Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών του Δήμου και της Περιφέρειας. Οι συγκεντρώσεις αναφέρονται στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους, όπου κάθε σταθμός διαθέτει δεδομένα και στην κοινή περίοδο 2001-2005. Όλα τα διαγράμματα έχουν την ίδια κλίμακα στον γ-άξονα (από 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για λόγους ευκρίνειας μέχρι τα 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ώστε να γίνεται ευκολότερα η σύγκριση της σωματιδιακής ρύπανσης μεταξύ των σταθμών.

Μια πρώτη εντύπωση από τη μελέτη των διαγραμμάτων είναι ότι όλοι οι σταθμοί του Δήμου (Σχήμα 3.4) παρουσιάζουν μικρότερες συγκεντρώσεις την περίοδο 2001-2005 από ότι παρουσιάζουν κατά τις ευρύτερες χρονικές περιόδους. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα και στους σταθμούς της Περιφέρειας (Σχήμα 3.5), όπου εμφανίζονται μικρότερες συγκεντρώσεις την περίοδο 2001-2009 από ότι την περίοδο 2001-2005. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι έγιναν προσπάθειες περιορισμού της σωματιδιακής ρύπανσης από το 2000 και μετά. Το έτος αυτό ήταν το έτος έναρξης της ισχύος της πρώτης Ευρωπαϊκής οδηγίας για τον έλεγχο της σωματιδιακής ρύπανσης.



Σχήμα 3.4 : Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών του Δήμου για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους όπου κάθε σταθμός διαθέτει δεδομένα και για την κοινή περίοδο 2001-2005.



Σχήμα 3.5 : Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της περιφέρειας για τις χρονικές περιόδους 2001-2009 και 2001-2005.

Ο σταθμός της Βενιζέλου που διαθέτει τη μεγαλύτερη χρονοσειρά συγκεντρώσεων PM10, εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών (12,8 µg/m³ κατά μέσο όρο). Η μηνιαία μεταβολή της περιόδου 1989-2001 παρουσιάζει μέγιστο το Νοέμβριο με τιμή συγκέντρωσης 102 µg/m³ και ελάχιστο τον Ιούνιο με τιμή 63 µg/m³, τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από το όριο των 50 µg/m³. Η μικρότερη απόκλιση μεταξύ των καμπυλών παρατηρείται στο σταθμό της Σίνδου, όπου οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται (0,2 µg/m³ κατά μέσο όρο). Πολύ μικρή απόκλιση παρατηρείται και στους σταθμούς της Μαρτίου και του Πανοράματος (0,4 µg/m³ και 2,6 µg/m³ κατά μέσο όρο αντίστοιχα).

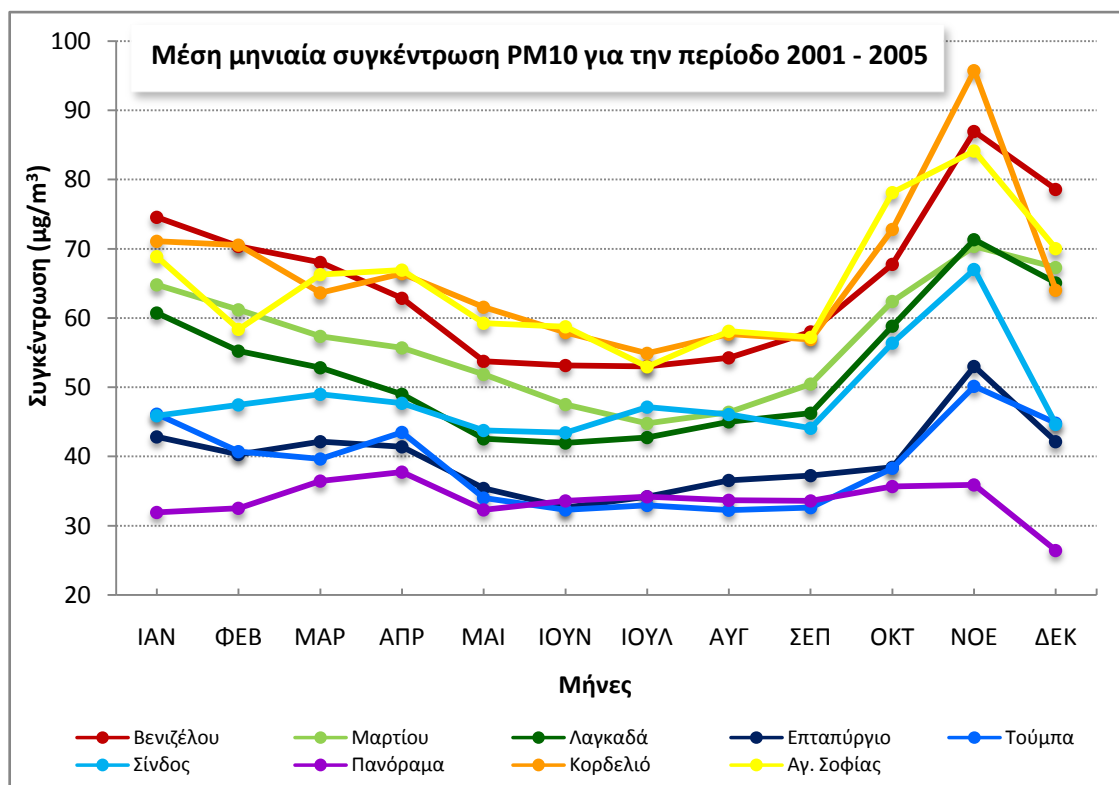
Όλοι οι σταθμοί, εκτός από το σταθμό του Πανοράματος, εμφανίζουν αυξητική τάση των συγκεντρώσεών τους κατά τους φθινοπωρινούς μήνες του έτους. Η αυξητική αυτή τάση κορυφώνεται το Νοέμβριο, όπου σημειώνεται η μέγιστη συγκέντρωση του έτους. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται αφενός από τις υψηλές συγκεντρώσεις PM10 λόγω της κίνησης των αυτοκινήτων και της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων, και αφετέρου από το ότι το Νοέμβριο η θαλάσσια αύρα έχει αποδυναμωθεί και οι χειμερινοί άνεμοι των βόρειων διευθύνσεων δεν έχουν ακόμα ενισχυθεί. Όλοι οι σταθμοί, εκτός από αυτούς του Πανοράματος και της Σίνδου, παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις την ψυχρή περίοδο του έτους. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη δράση της έντονης κυκλοφοριακής κίνησης, με τη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης και τη συμβολή δυσμενών τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών, όπως η άπνοια και οι θερμοκρασιακές αναστροφές, που ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων. Σε όλους τους σταθμούς η ελάχιστη μέση μηνιαία συγκέντρωση παρατηρείται την καλοκαιρινή περίοδο (Ιούνιο-Ιούλιο), όπου δεν λειτουργούν οι κεντρικές θερμάνσεις. Αν εξαιρεθούν οι σταθμοί της Σίνδου, του Πανοράματος και του Επταπυργίου, όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν σταδιακή πτώση των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεών τους, από την αρχή του έτους μέχρι και τον Ιούνιο-Ιούλιο. Στο τέλος της θερινής περιόδου - και μέχρι τον Νοέμβριο - οι συγκεντρώσεις αυξάνουν, με το Νοέμβρη να παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές.

Ο σταθμός του Πανοράματος δείχνει μεγάλη σταθερότητα στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Για την περίοδο 2001-2009, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που σημειώθηκε ήταν $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα, διαφορά μόλις $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Σχεδόν ίδια είναι και η διακύμανση την περίοδο 2001-2005 με μέγιστη και ελάχιστη τιμή $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι στην περιοχή του Πανοράματος οι μηνιαίες συγκεντρώσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές σε όλη την διάρκεια του έτους. Στην περιοχή αυτή δεν εκπέμπονται σημαντικές ποσότητες σωματιδίων από ανθρωπογενείς πηγές. Η ρύπανση οφείλεται κατά κύριο λόγο, είτε σε φυσικές πηγές, είτε στη μεταφορά σωματιδίων από άλλες περιοχές.

Στο σταθμό της Σίνδου επικρατεί τάση σταθεροποίησης των συγκεντρώσεων από το Δεκέμβρη μέχρι και το Σεπτέμβρη, όπου οι συγκεντρώσεις είναι κάτω από το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Τον Οκτώβρη και τον Νοέμβρη οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται υψηλότερες. Αυτό ίσως να οφείλεται σε μετεωρολογικούς παράγοντες, γιατί τα εργοστάσια στην, βιομηχανική περιοχή της Σίνδου λειτουργούν όλο το χρόνο.

Ο σταθμός του Επταπυργίου παρουσιάζει παρόμοια διακύμανση με το σταθμό της Τούμπας. Οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται μεγαλύτερες κατά την ψυχρή περίοδο από ότι τη θερμή περίοδο του έτους και στους δύο σταθμούς, χωρίς όμως η διαφορά των συγκεντρώσεων ψυχρής-θερμής περιόδου να είναι έντονη.

Για την καλύτερη εποπτεία των μέσων μηνιαίων συγκεντρώσεων όλων των σταθμών, κατά την κοινή περίοδο μελέτης 2001-2005, κατασκευάστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 3.6 (μέση μηνιαία συγκέντρωση όλων των σταθμών).

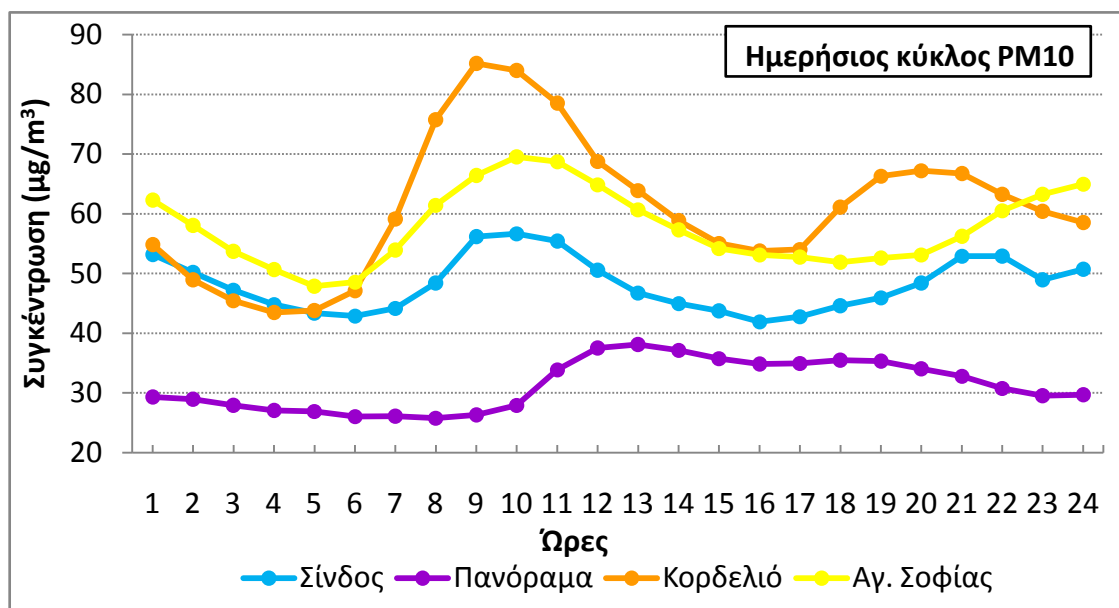


Σχήμα 3.6: Μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών του Δήμου και της Περιφέρειας για την κοινή περίοδο 2001-2005.

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.6 φαίνεται ότι για την περίοδο 2001-2005, ο σταθμός του Κορδελιού εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις από όλους τους σταθμούς. Η ελάχιστη συγκέντρωση PM10 σε αυτόν το σταθμό παρατηρείται τον Ιούλιο ($55 \mu\text{g}/\text{m}^3$) και η μέγιστη το Νοέμβριο ($96 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Και οι δύο τιμές είναι πάνω από το επιτρεπόμενο όριο, για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Στα ίδια υψηλά επίπεδα κυμαίνονται και οι συγκεντρώσεις των σταθμών της Βενιζέλου και της Αγ. Σοφίας, που υπερβαίνουν το όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ όλο τον χρόνο. Μάλιστα, ο σταθμός της Αγ. Σοφίας εμφανίζει το μήνα Οκτώβρη τη μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης από όλους τους σταθμούς ($78,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Οι σταθμοί αστικού υποβάθρου της Τούμπας και του Επταπυργίου, καθώς και ο περιαστικός σταθμός του Πανοράματος, παρουσίασαν τις χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις του έτους, οι οποίες κυμάνθηκαν μέσα στα φυσιολογικά επίπεδα. Ο σταθμός της Σίνδου υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο μόνο τον Οκτώβρη και το Νοέμβρη με τιμές $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα.

3.3 Μέση ωριαία μεταβολή συγκεντρώσεων PM10

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μέρας. Για τη μελέτη αυτού του φαινομένου χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα σωματιδιακής ρύπανσης από τους σταθμούς της Περιφέρειας. Οι σταθμοί της Περιφέρειας είναι οι μόνοι που καταγράφουν τη μέση συγκέντρωση των PM10 κάθε ώρα του 24ώρου. Με τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν οι μέσες συγκεντρώσεις για κάθε ώρα της ημέρας, για ολόκληρη την περίοδο 2001-2009. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 : Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της περιφέρειας για την περίοδο 2001-2009

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες του Σχήματος 3.7, η συγκέντρωση των σωματιδίων παρουσιάζει στη διάρκεια ενός 24ώρου δύο τοπικά μέγιστα και δύο τοπικά ελάχιστα. Αυτή η παρατήρηση δίνει την αίσθηση ότι η συνολική μεταβολή προσεγγίζεται από μια περιοδική συνάρτηση.

Ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται η συγκέντρωση των PM10 στη διάρκεια της μέρας, θα μπορούσαν να χωριστούν οι περιοχές των σταθμών σε δύο κατηγορίες.

- ▶ Στην 1^η κατηγορία ανήκουν οι σταθμοί που εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις, μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τοπικών μεγίστων και ελαχίστων και μια σχετική ομοιομορφία ως προς τις περιόδους που εμφανίζονται τα ακρότατα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι σταθμοί του Κορδελιού, της Αγ. Σοφίας και της Σίνδου.
- ▶ Στην 2^η κατηγορία ανήκουν οι σταθμοί με χαμηλότερες συγκεντρώσεις, οι οποίες μεταβάλλονται περισσότερο ομαλά στη διάρκεια της ημέρας. Στη κατηγορία αυτή ανήκει μόνο ο σταθμός του Πανοράματος.

Πίνακας 3.2: Τοπικά μέγιστα και ελάχιστα της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των PM10 ανά σταθμό.

Σταθμός	Πρωτεύον μέγιστο		Δευτερεύον μέγιστο	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	9.00	85.21	20.00	67.25
Αγ. Σοφίας	10.00	69.54	24.00	64.99
Σίνδος	10.00	56.69	21.00	52.94
Πανόραμα	13.00	38.12	18.00	35.47

Σταθμός	Πρωτεύον ελάχιστο		Δευτερεύον ελάχιστο	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	4.00	43.48	16.00	53.75
Αγ. Σοφίας	5.00	47.89	18.00	51.91
Σίνδος	6.00	42.90	16.00	41.94
Πανόραμα	8.00	25.80	16.00	34.83

Στον Πίνακα 3.2 δίνονται συγκεντρωτικά τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων μαζί με τις ώρες που αυτά παρατηρήθηκαν. Από τη μελέτη του Σχήματος 3.7 και τις πληροφορίες που δίνονται στον Πίνακα 3.2 προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις.

Ο σταθμός του Κορδελιού είναι αυτός που παρουσίασε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις με μέγιστη τιμή 85.21 μg/m³, ενώ οι μικρότερες συγκεντρώσεις καταγράφηκαν στο σταθμό του Πανοράματος. Οι σταθμοί της 1^{ης} κατηγορίας (Κορδελιό, Αγ. Σοφίας, Σίνδος) εμφανίζουν το πρώτο μέγιστο τις ημέρας 9:00-10:00 το πρωί, όπου η κυκλοφορία των αυτοκινήτων είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Τις ώρες αυτές και λίγο νωρίτερα (8:00-9:00 το πρωί) ξεκινάει το ωράριο των καταστημάτων και των περισσότερων δημόσιων υπηρεσιών. Οι εκπομπές των αυτοκινήτων σε συνδυασμό με το χαμηλό ύψος του οριακού στρώματος που παρατηρείται νωρίς το πρωί, έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλές συγκεντρώσεις των PM10. Η θέρμανση των

κατοικιών τις πρωινές ώρες, για την ψυχρή περίοδο του έτους, γίνεται σε μικρότερη κλίμακα, λόγω εργασίας.

Παρόλο που η κίνηση των αυτοκινήτων είναι πολύ έντονη τις μεσημεριανές ώρες, μετά το κλείσιμο των καταστημάτων, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, όπως φαίνεται από τις καμπύλες των τριών σταθμών της 1^{ης} κατηγορίας. Αυτό οφείλεται στις συνθήκες μεγάλης αστάθειας που εμποδίζουν τη συσσώρευση των ρύπων. Το μεσημέρι το ύψος αναμίξεως παίρνει τη μέγιστη τιμή του (1-2 Km) και οι τυρβώδεις στρόβιλοι ευνοούν την ταχεία διάχυση των σωματιδίων προς μεγαλύτερα ύψη.

Ο σταθμός του Πανοράματος που ανήκει στη 2^η κατηγορία, εμφανίζει το πρώτο του μέγιστο στη μία το μεσημέρι. Η τρίωρη αυτή χρονική καθυστέρηση ίσως να σημαίνει πως ο σταθμός αυτός που είναι περιαστικός, καταγράφει κυρίως δευτερογενή σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά, χρειάζονται ένα χρονικό διάστημα μέχρι να σχηματιστούν και στη συνέχεια να μεταφερθούν με τον άνεμο στις περιφερειακές περιοχές. Όπως προέκυψε και από τη μελέτη της μέσης μηνιαίας μεταβολής των συγκεντρώσεων, η περιοχή του Πανοράματος είναι μια περιοχή που καταγράφει το αστικό υπόβαθρο ρύπανσης.

Ο κάθε σταθμός της 1^{ης} κατηγορίας εμφανίζει το δευτερεύον μέγιστο της ημέρας το βράδυ, από τις 20:00 μέχρι τις 24:00. Οι υψηλές αυτές συγκεντρώσεις οφείλονται στη συνδυαστική δράση τριών παραγόντων. Στην έντονη κυκλοφορία των αυτοκινήτων λόγω της λήξης του ωραρίου των καταστημάτων, στη λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων των κατοικιών και στην εμφάνιση θερμοκρασιακών αναστροφών. Τις πρώτες απογευματινές ώρες αρχίζουν να εμφανίζονται θερμοκρασιακές αναστροφές στην ατμόσφαιρα. Το ύψος του οριακού στρώματος χαμηλώνει και οι τυρβώδεις στρόβιλοι εξασθενούν με αποτέλεσμα να εγκλωβίζονται οι σωματιδιακοί ρύποι σε χαμηλά ύψη.

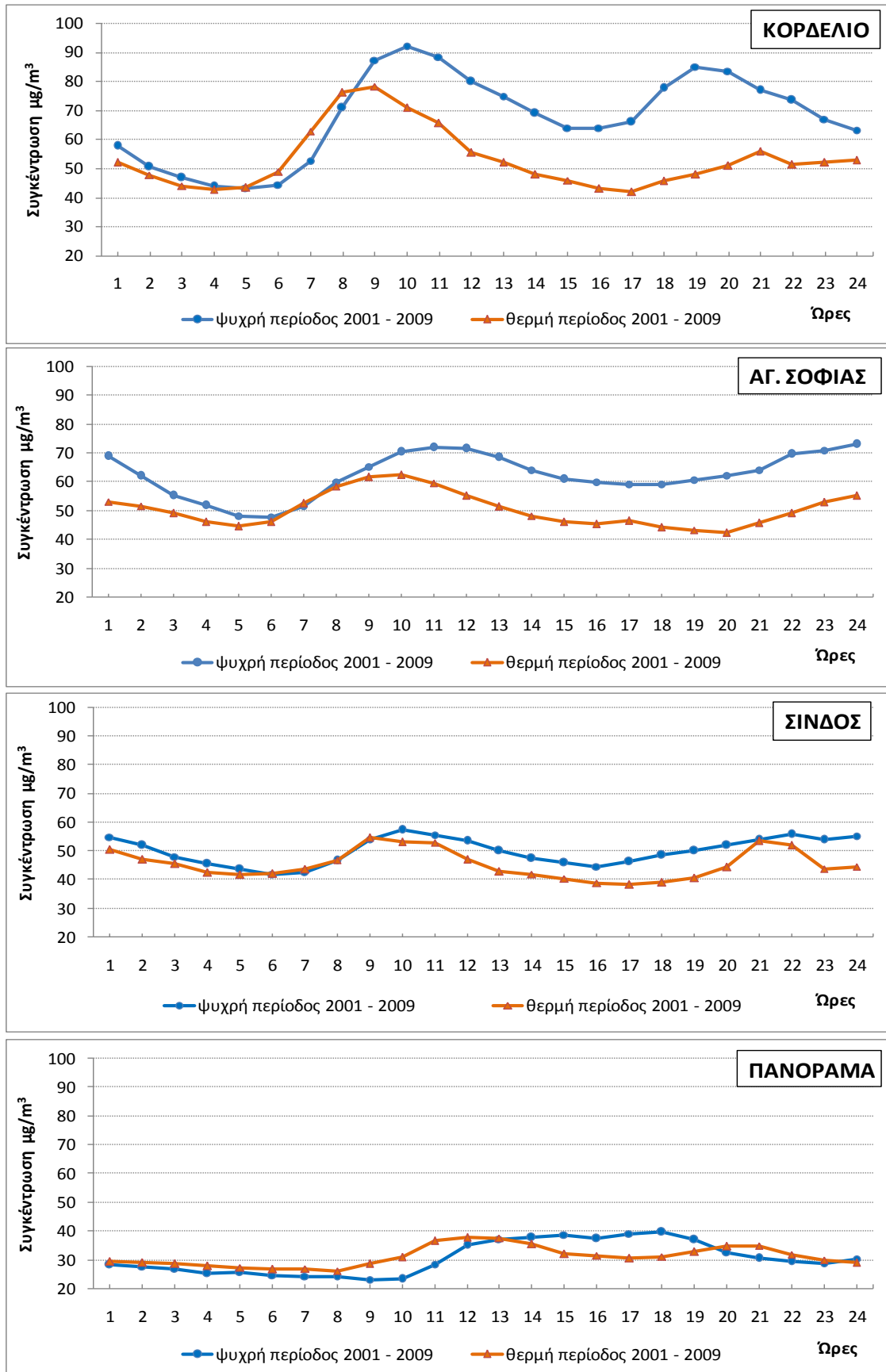
Στο σταθμό του Πανοράματος, το δευτερεύον μέγιστο (35.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) παρατηρείται στις 18:00 το απόγευμα και είναι ελάχιστα μικρότερο από το πρωτεύον μέγιστο (38.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Το συμπέρασμα που προκύπτει για αυτόν το

σταθμό είναι ότι καταγράφει κυρίως δευτερογενή σωματίδια, η διακύμανση των οποίων καθορίζεται από μετεωρολογικούς παράγοντες.

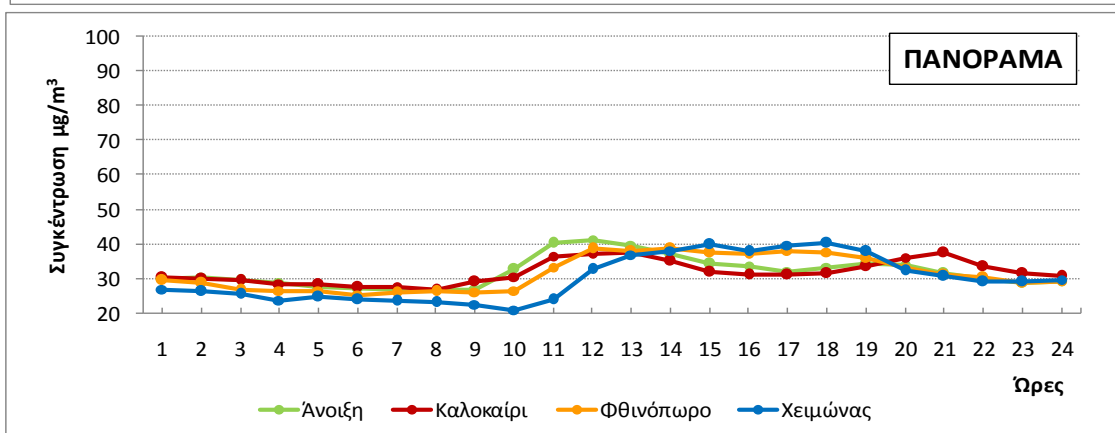
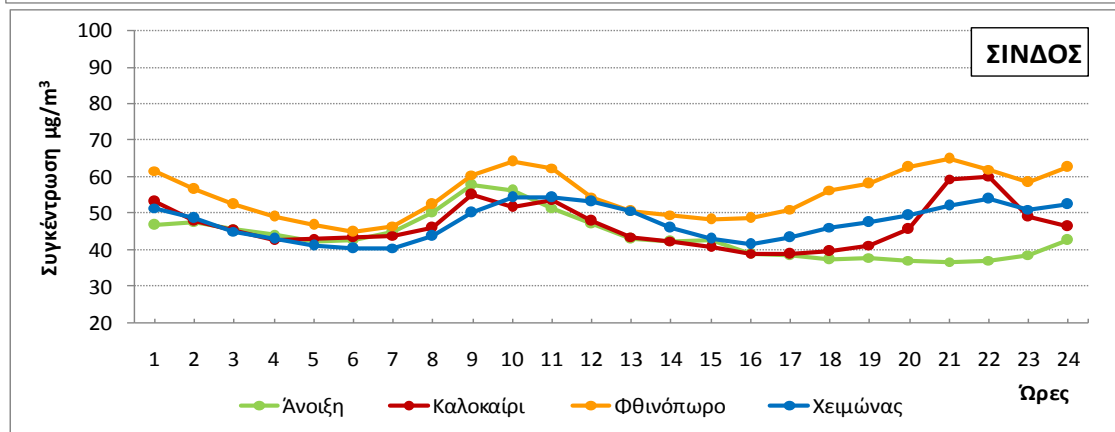
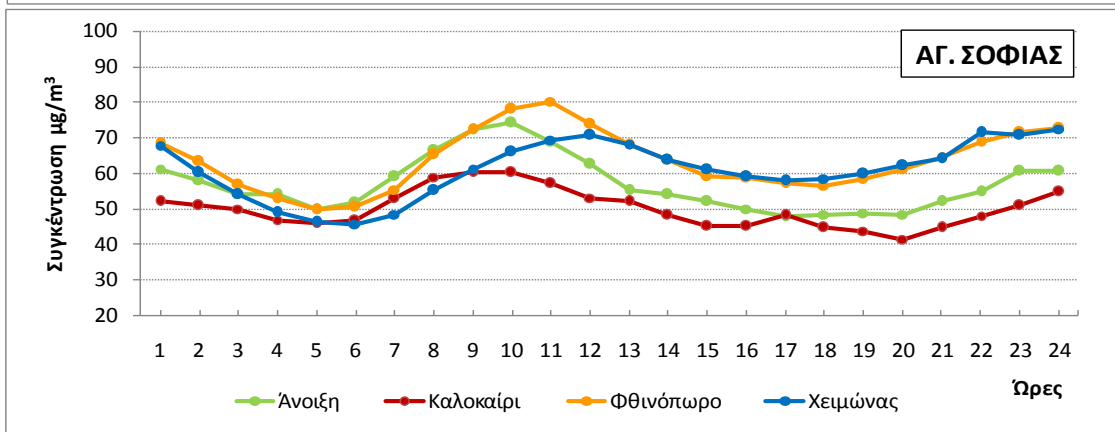
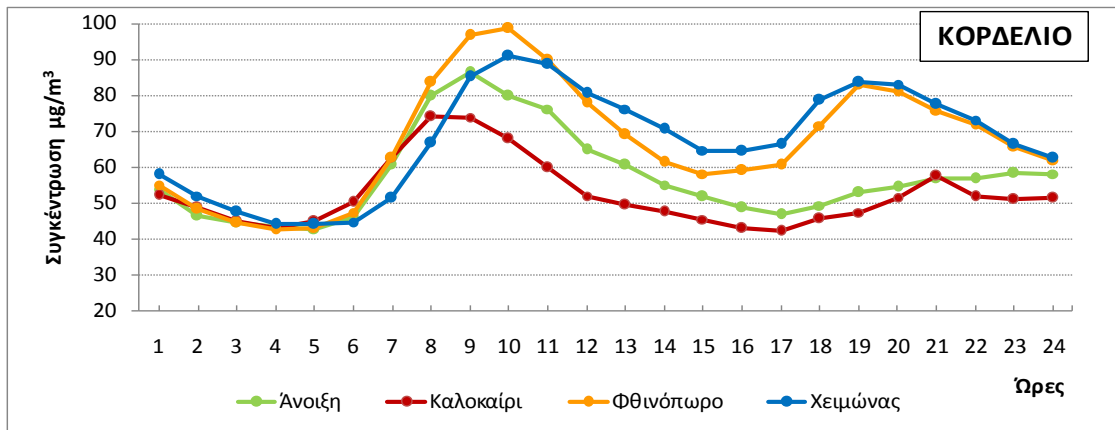
Στη συνέχεια μελετήθηκε ο ημερήσιος κύκλος της συγκέντρωσης των PM10 για τις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009, καθώς και ο ημερήσιος κύκλος συγκέντρωσης της ψυχρής και της θερμής περιόδου 2001-2009, κάθε σταθμού. Η ψυχρή περίοδος ορίζεται ως η περίοδος από το Νοέμβριο ως το Μάρτιο, όπου λειτουργούν οι κεντρικές θερμάνσεις των κατοικιών, ενώ ως θερμή περίοδος ορίζεται η περίοδος από το Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβρη. Οι μήνες Οκτώβριος και Απρίλιος δεν συμπεριλαμβάνονται σε αυτές τις περιόδους γιατί θεωρούνται μεταβατικοί μήνες. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα Σχήματα 3.8 και 3.9. Τα διαγράμματα των σχημάτων 3.8 και 3.9 έρχονται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα της μέχρι τώρα μελέτης του ημερήσιου κύκλου των αιωρούμενων σωματιδίων. Συμπληρωματικά έρχονται να προστεθούν οι παρακάτω διαπιστώσεις.

Όλοι οι σταθμοί παρουσιάζουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις την ψυχρή περίοδο λόγω της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ ψυχρής και θερμής περιόδου εμφανίζεται στο σταθμό του Κορδελιού με μέγιστη τιμή διαφοράς $5.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, που σημειώθηκε στις 19:00 το απόγευμα. Για τη θερμή περίοδο των σταθμών Κορδελιού και Αγ. Σοφίας, σημειώθηκαν υπερβάσεις του ορίου των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, από τις 7:00 το πρωί μέχρι τις 12:00 το μεσημέρι και για τους δύο σταθμούς, ενώ για την ψυχρή περίοδο σημειώνονται υπερβάσεις σχεδόν όλο το 24ωρο. Η Σίνδος και το Πανόραμα εμφανίζουν μικρή απόκλιση μεταξύ ψυχρής και θερμής περιόδου με μέγιστη τιμή διαφοράς $10.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $8.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντίστοιχα. Οι ώρες που σημειώθηκαν αυτές οι διαφορές ήταν για τη Σίνδο η 24:00 τα μεσάνυχτα και για το Πανόραμα η 18:00 το απόγευμα. Υπερβάσεις στο σταθμό της Σίνδου σημειώνονται μόνο κατά τις ώρες που εμφανίζονται τα τοπικά μέγιστα στις καμπύλες και για τις δύο περιόδους (ψυχρή – θερμή).

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων, που αναφέρονται στις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009, μαζί με τις ώρες που αυτά παρατηρήθηκαν.



Σχήμα 3.8 : Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της περιφέρειας, για την ψυχρή και θερμή περίοδο 2001-2009.



Σχήμα 3.9 : Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της περιφέρειας, για τις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009

Πίνακας 3.3: Τοπικά μέγιστα και ελάχιστα της μέσης ωριαίας συγκέντρωσης των PM10 ανά εποχή της περιόδου 2001-2009 και ανά σταθμό.

Σταθμός	Πρωτεύον μέγιστο							
	Άνοιξη		Καλοκαίρι		Φθινόπωρο		Χειμώνας	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	9	86.29	8	74.19	10	98.6	10	90.9
Αγ. Σοφίας	10	74.03	10	60.16	11	80.16	12	70.75
Σίνδος	9	57.8	9	55.03	10	64.11	10	54.41
Πανόραμα	12	41.3	13	37.69	14	38.6	14	27.05
Σταθμός	Δευτερεύον μέγιστο							
	Άνοιξη		Καλοκαίρι		Φθινόπωρο		Χειμώνας	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	23	58.37	21	57.6	19	82.89	19	83.63
Αγ. Σοφίας	24	60.73	24	54.74	24	72.77	24	72.44
Σίνδος	24	42.6	22	60.15	21	64.87	22	53.97
Πανόραμα	19	34.53	21	37.5	17	37.87	18	40.34
Σταθμός	Πρωτεύον ελάχιστο							
	Άνοιξη		Καλοκαίρι		Φθινόπωρο		Χειμώνας	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	5	42.86	4	43.19	4	42.76	5	44.25
Αγ. Σοφίας	5	49.97	5	45.92	5	49.83	6	45.62
Σίνδος	5	42.28	4	42.84	6	44.96	6	40.44
Πανόραμα	9	26.88	8	26.62	6	25.3	10	20.93
Σταθμός	Δευτερεύον ελάχιστο							
	Άνοιξη		Καλοκαίρι		Φθινόπωρο		Χειμώνας	
	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³	ώρα	μg/m ³
Κορδελιό	17	46.95	17	42.31	15	58.24	16	64.41
Αγ. Σοφίας	17	48	20	41.43	18	56.56	17	57.93
Σίνδος	21	36.81	17	38.92	15	48.28	16	41.48
Πανόραμα	23	28.63	24	30.69	23	28.7	23	38.12

Από τη μελέτη του Σχήματος 3.8 και τις πληροφορίες που δίνονται στον Πίνακα 3.3 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Σε όλους τους σταθμούς το πρώτο μέγιστο της ημέρας εμφανίζεται πιο νωρίς το πρωί την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού από ότι εμφανίζεται κατά το φθινόπωρο και το χειμώνα. Αυτό ίσως να οφείλεται αφενός στην παρουσία δευτερογενών σωματιδίων που

σχηματίζονται από πρωτογενείς φωτοχημικούς ρύπους³ και αφετέρου στη διαφορά της ώρας. Άρα η έντονη κυκλοφορία των αυτοκινήτων λόγω του ωραρίου των καταστημάτων εμφανίζεται νωρίτερα τη θερμή περίοδο, σε σχέση με την ψυχρή περίοδο του έτους.

Σε όλους τους σταθμούς, το βραδινό ελάχιστο εμφανίζεται πιο αργά την περίοδο της άνοιξης και του καλοκαιριού από ότι εμφανίζεται το χειμώνα. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και λόγω της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, το ύψος του οριακού στρώματος αργεί να χαμηλώσει και έτσι διαρκεί περισσότερο η προς τα πάνω διάχυση των σωματιδίων.

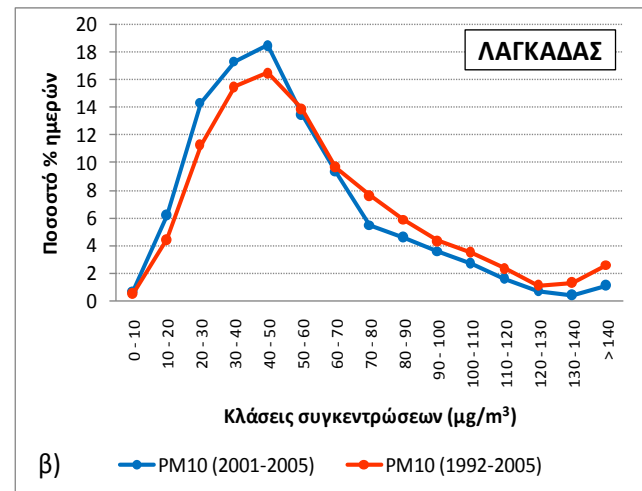
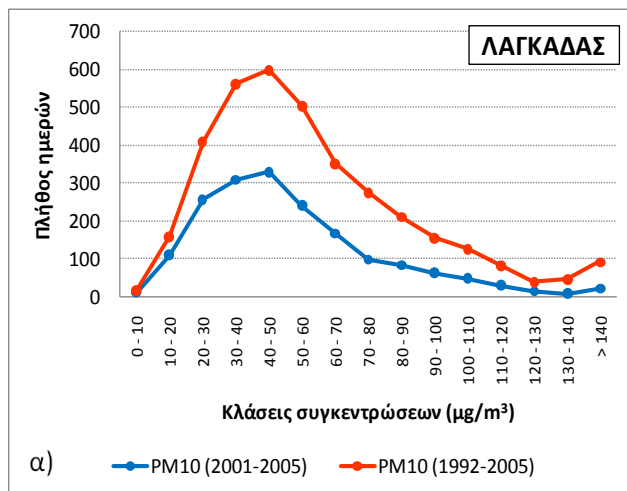
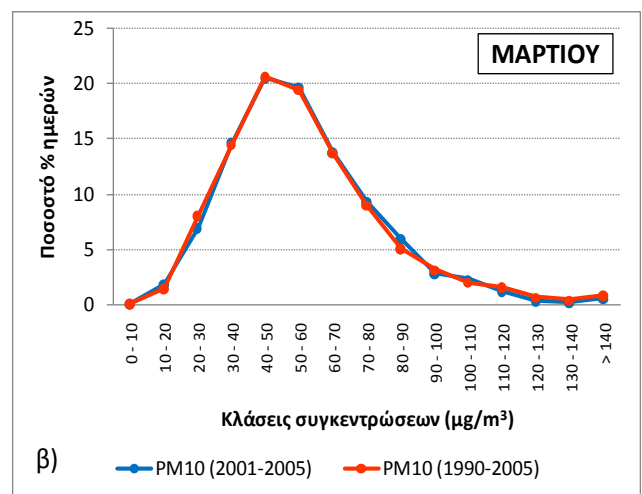
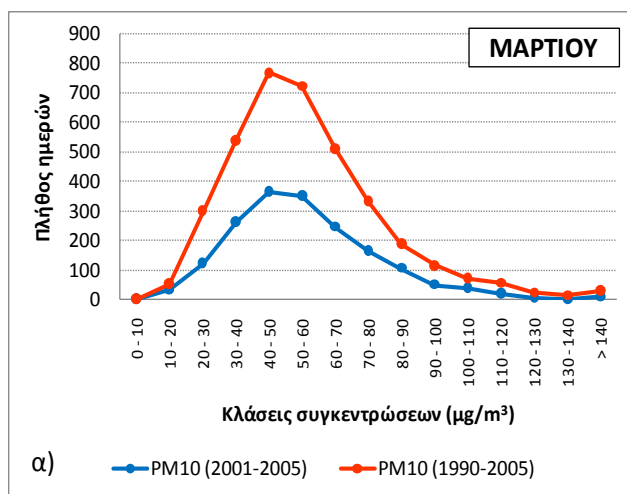
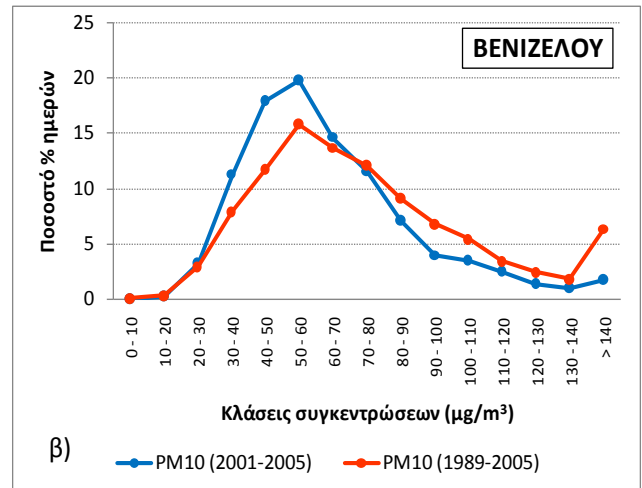
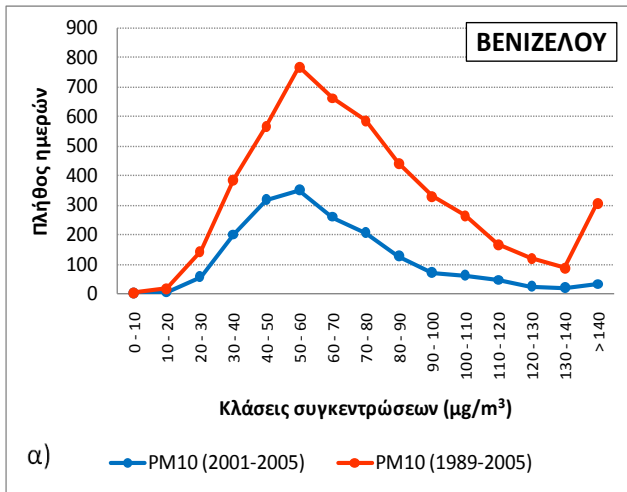
Ο σταθμός του Κορδελιού είναι αυτός που εμφανίζει την πιο έντονη εποχικότητα στον ημερήσιο κύκλο των συγκεντρώσεων PM10. Ακολουθούν οι σταθμοί της Αγ. Σοφίας, της Σίνδου και τέλος του Πανοράματος.

3.4 Συχνότητα εμφάνισης συγκεντρώσεων PM10

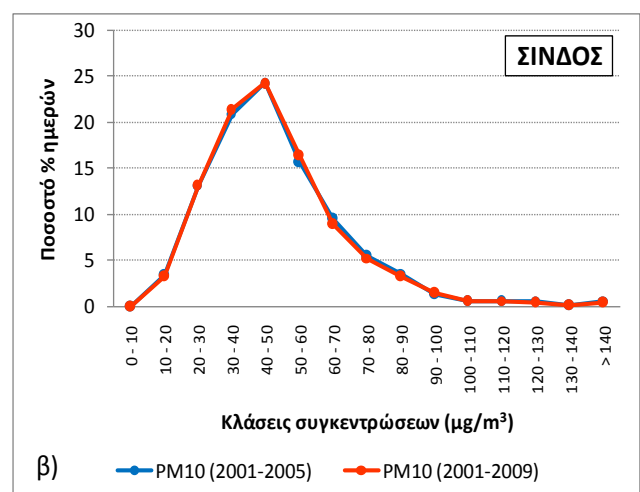
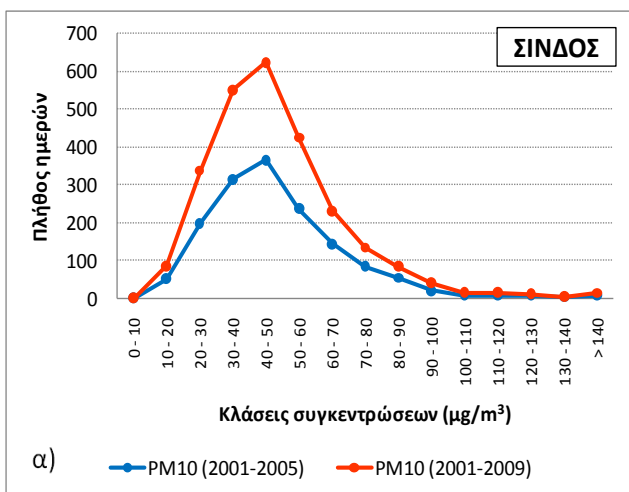
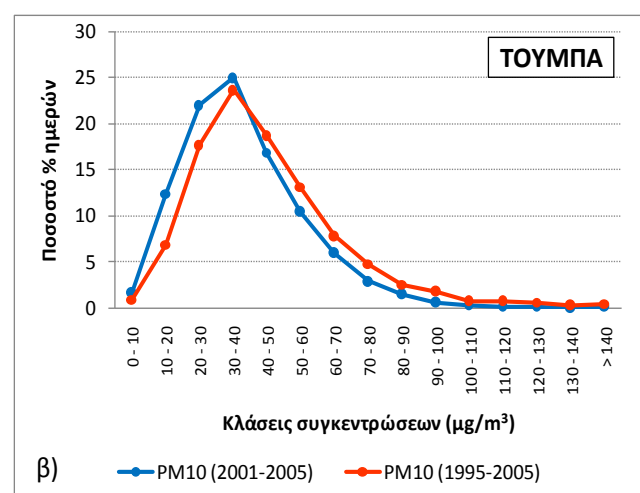
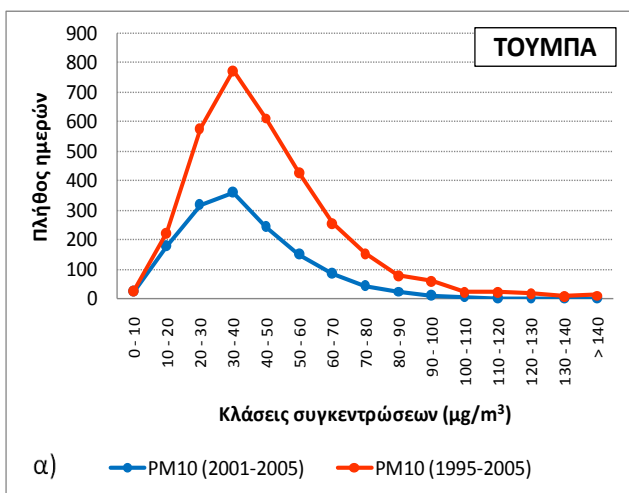
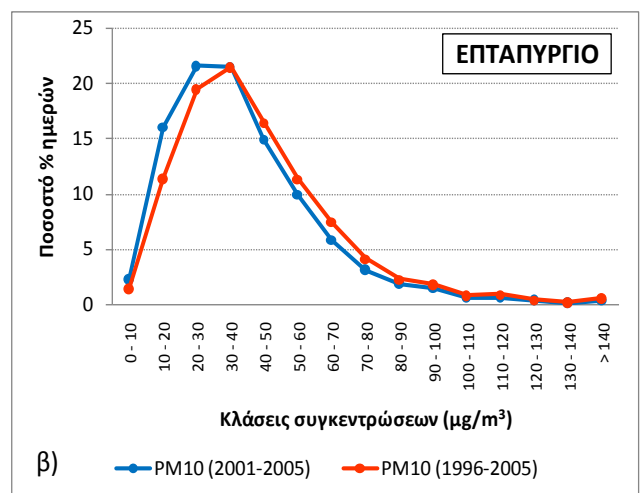
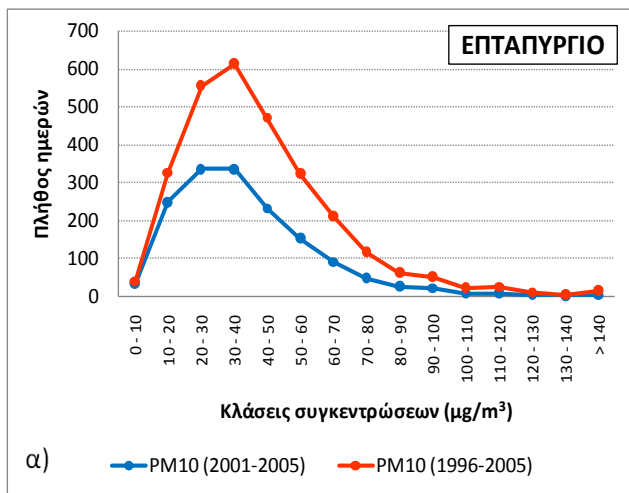
Στην παράγραφο αυτή μελετάται η συχνότητα εμφάνισης των κλάσεων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, με εύρος 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συχνότητες καταγραφής των συγκεντρώσεων των PM10 για κάθε σταθμό ξεχωριστά. Η μελέτη πραγματοποιείται για την περίοδο 2001 – 2005, που είναι κοινή για όλους τους σταθμούς και για τις ευρύτερες χρονικές περιόδους, όπου κάθε σταθμός διαθέτει δεδομένα.

Στα Σχήματα 3.10 – 3.12 παρουσιάζονται δύο ειδών διαγράμματα. Στα μισά από αυτά (διαγράμματα α) εμφανίζεται η συχνότητα καταγραφής μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10 για κάθε σταθμό χωριστά. Στα υπόλοιπα μισά (διαγράμματα β) εμφανίζεται η συχνότητα καταγραφής PM10 σε ποσοστό επί του συνόλου των μετρήσεων, για κάθε σταθμό.

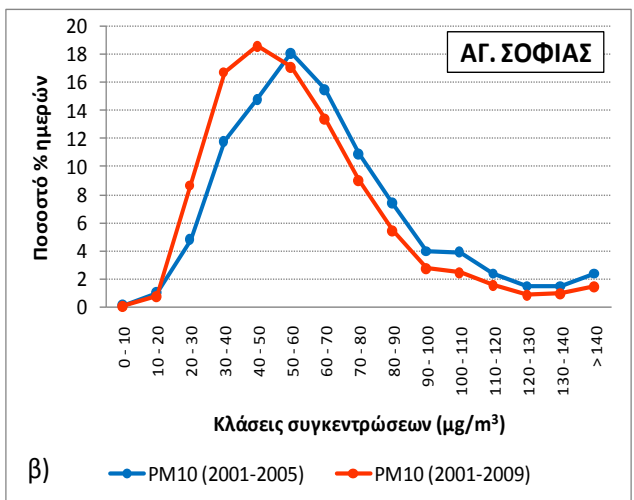
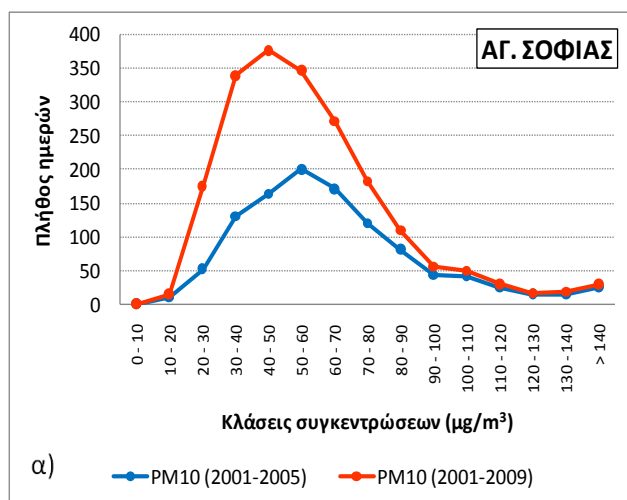
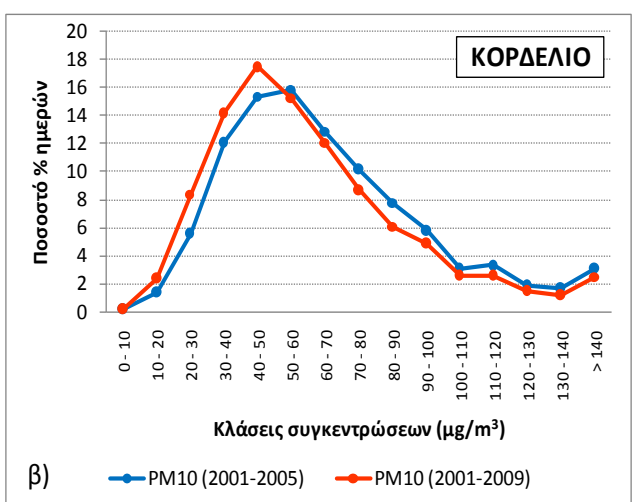
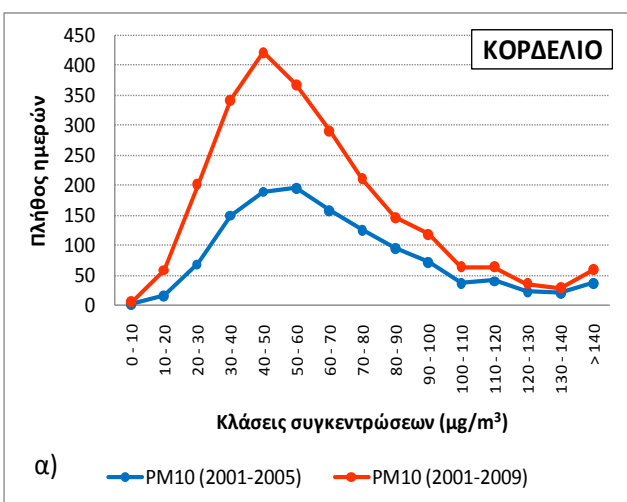
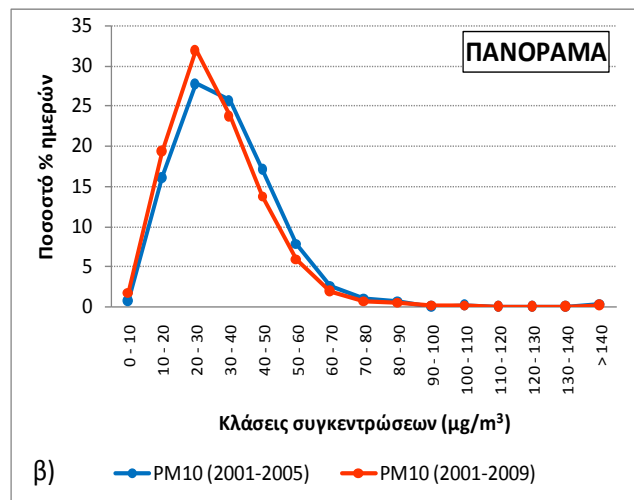
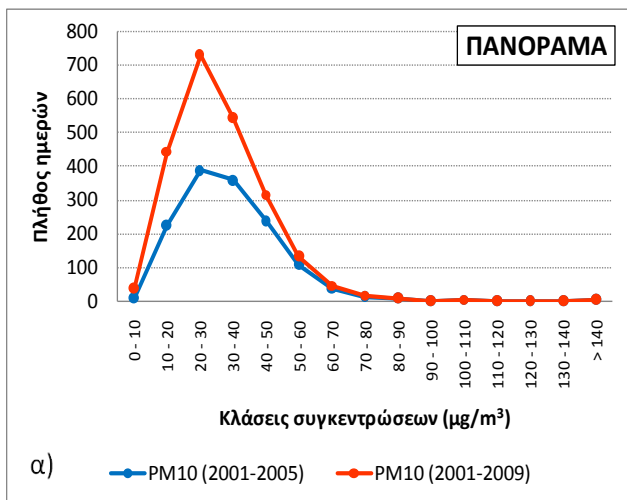
³ Παράδειγμα αποτελεί το όζον (O_3), το οποίο σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα και συμβάλει σημαντικά στη δημιουργία δευτερογενών σωματιδίων.



Σχήμα 3.10: Συχνотικά διαγράμματα μέσωη ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10 των σταθμών Βενιζέλου, Μαρτίου και Λαγκαδά, α) Συχνότητα καταγραφής μέσωη ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10, β) συχνότητα καταγραφής PM10 σε ποσοστό επί του συνόλου των μετρήσεων.



Σχήμα 3.11: Συχνοτικά διαγράμματα μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10 των σταθμών Επταπυργίου, Τούμπας και Σίνδου, α) Συχνότητα καταγραφής μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10, β) συχνότητα καταγραφής PM10 σε ποσοστό επί του συνόλου των μετρήσεων.



Σχήμα 3.12: Συχνοτικά διαγράμματα μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10 των σταθμών Πανοράματος, Κορδελιού και Αγ. Σοφίας, α) Συχνότητα καταγραφής μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10, β) συχνότητα καταγραφής PM10 σε ποσοστό επί του συνόλου των μετρήσεων.

Στον Πίνακα 3.4 παρατίθενται στατιστικές πληροφορίες των διαγραμμάτων καταγραφής συχνότητας συγκεντρώσεων. Οι πληροφορίες αναφέρονται στις συχνότερες τιμές εμφάνισης των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (μέγιστες τιμές των καμπυλών), στα αντίστοιχα ποσοστά εμφάνισης των συγκεντρώσεων και στο σύνολο των ημερών που εμφάνισαν συγκεντρώσεις πάνω και κάτω από το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Πίνακας 3.4 : Στατιστικές πληροφορίες που αφορούν τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων PM10, ανά σταθμό.

Σταθμός	Περίοδος αναφοράς	Μέγιστο πλήθος ημερών	Κλάση εμφάνισης του μεγίστου πλήθους ημερών	Ποσοστό μεγίστου πλήθους ημερών	Σύνολο ημερών με συγκεντρώσεις κάτω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Σύνολο ημερών με συγκεντρώσεις άνω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ποσοστιαίο σύνολο ημερών με συγκεντρώσεις άνω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Βενιζέλου	1989-2005	767	50 - 60	16%	1113	3732	77%
Μαρτίου	1990-2005	768	40 - 50	21%	1660	2066	55%
Λαγκαδάς	1992-2005	598	40 - 50	16%	1745	1886	52%
Επταπύργιο	1996-2005	614	30 - 40	21%	2006	852	30%
Τούμπα	1995-2005	773	30 - 40	24%	2209	1057	32%
Σίνδος	2001-2009	622	40 - 50	24%	1593	969	38%
Πανόραμα	2001-2009	731	20 - 30	32%	2068	213	9%
Κορδελιό	2001-2009	421	40 - 50	17%	1026	1381	57%
Αγ.Σοφίας	2001-2009	377	40 - 50	19%	909	1115	55%
Βενιζέλου	2001-2005	352	50 - 60	20%	582	1194	67%
Μαρτίου	2001-2005	366	40 - 50	21%	785	997	56%
Λαγκαδάς	2001-2005	329	40 - 50	18%	1014	765	43%
Επταπύργιο	2001-2005	336	30 - 40	22%	1187	369	24%
Τούμπα	2001-2005	361	30 - 40	25%	1123	320	22%
Σίνδος	2001-2005	366	40 - 50	24%	931	574	38%
Πανόραμα	2001-2005	390	20 - 30	28%	1227	176	13%
Κορδελιό	2001-2005	196	50 - 60	16%	428	810	65%
Αγ.Σοφίας	2001-2005	201	50 - 60	18%	360	747	67%

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων και τις πληροφορίες του Πίνακα 3.4 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα για την χρονική περίοδο 2001-2005 και τις ευρύτερες χρονικές περιόδους καταγραφής δεδομένων του κάθε σταθμού.

Χρονική περίοδος 2001-2005

Κατά τη χρονική περίοδο 2001-2005 οι συχνότερες τιμές συγκεντρώσεων των σταθμών Μαρτίου, Λαγκαδά και Σίνδου είναι μεταξύ των 40 και 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Στην περιοχή αυτή σημειώθηκε το 21% των μέσων ημερήσιων τιμών για το σταθμό της Μαρτίου, ενώ ο Λαγκαδάς και η Σίνδος εμφάνισαν ποσοστά 18% και 24%, αντίστοιχα. Στο σταθμό της Μαρτίου, 785 ημέρες σημείωσαν συγκεντρώσεις κάτω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που αντιστοιχεί στο 44% όλων των μετρήσεων της υπό μελέτη περιόδου. Κάτω από το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ήταν οι συγκεντρώσεις 1014 ημερών για τον σταθμό του Λαγκαδά και 931 ημερών για το σταθμό της Σίνδου, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 57% και 62% αντίστοιχα.

Οι σταθμοί Βενιζέλου, Κορδελιού και Αγ. Σοφίας εμφάνισαν συχνότερες τιμές συγκεντρώσεων στην περιοχή 50-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η περιοχή αυτή αποτελεί τη μεγαλύτερη κλάση συγκεντρώσεων που παρουσίασε μέγιστο πλήθος ημερών. Ο σταθμός της Βενιζέλου ήταν αυτός που εμφάνισε το μεγαλύτερο ποσοστό ημερών στην περιοχή 50-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ποσοστό που έφτασε το 20%. Το ποσοστό επί του συνόλου των μετρήσεων για το Κορδελιό είναι 16% και για τον σταθμό της Αγ. Σοφίας 18%.

Οι σταθμοί του Επταπυργίου και της Τούμπας παρουσίασαν πολύ υψηλά ποσοστά ημερών με συγκεντρώσεις κάτω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (76% και 78%, αντίστοιχα). Η κλάση εμφάνισης συγκέντρωσης του μέγιστου αριθμού ημερών ήταν η κλάση των 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ο σταθμός του Πανοράματος ήταν αυτός που εμφάνισε το μέγιστο πλήθος ημερών στη μικρότερη κλάση (20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Το 87% των ημερών του Πανοράματος εμφάνισαν συγκεντρώσεις κάτω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ευρύτερες χρονικές περίοδοι κάθε σταθμού

Οι ευρύτερες χρονικές περίοδοι κάθε σταθμού παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.4. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, οι καμπύλες κατανομής συγκεντρώσεων για τις ευρύτερες χρονικές περιόδους δεν διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό από αυτές που αναφέρονται στην περίοδο 2001-2005. Οι σταθμοί Βενιζέλου και Λαγκαδά εμφάνισαν υψηλά ποσοστά ημερών στην κλάση των 100-110

μg/m³. Το ποσοστό αυτό για το σταθμό της Βενιζέλου ήταν 5%, που αντιστοιχεί σε 264 μέρες, ενώ για τον Λαγκαδά ήταν 4%, που αντιστοιχεί σε 127 ημέρες. Να σημειωθεί ότι το όριο των 110 μg/m³, είναι το όριο συναγερμού κατά το οποίο επιβάλλονται έκτακτα μέτρα από το Δήμο. Για το λόγο αυτό, ένα ποσοστό της τάξης του 5% στην κλάση αυτή θεωρείται υψηλό. Ο σταθμός της Σίνδου είναι ο μόνος που εμφανίζει όμοια κατανομή στα ποσοστά των ημερών επί του συνόλου των μετρήσεων και για τις δύο χρονικές περιόδους, 2001-2005 και 2001-2009. Αξιοσημείωτο είναι ότι στους σταθμούς του Κορδελιού και της Αγ. Σοφίας παρατηρούνται πιο αυξημένα ποσοστά ημερών στις μεγάλες κλάσεις συγκεντρώσεων για την περίοδο 2001-2005 από ότι σημειώθηκαν στην ευρύτερη χρονική περίοδο 2001-2009. Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών λόξωσης και κύρτωσης όλων των σταθμών, για κάθε χρονική περίοδο.

Πίνακας 3.5: Συντελεστής λόξωσης και κύρτωσης για τις κατανομές των συγκεντρώσεων όλων των σταθμών του Δήμου και της Περιφέρειας.

Σταθμός	χρονική περίοδος	Λόξωση	Κύρτωση	χρονική περίοδος	Λόξωση	Κύρτωση
Βενιζέλου	1989-2005	0.40	-0.95	2001-2005	0.90	-0.58
Μαρτίου	1990-2005	0.94	-0.51	2001-2005	0.93	-0.55
Λαγκαδάς	1992-2005	0.69	-0.91	2001-2005	0.83	-0.78
Επταπύργιο	1996-2005	0.97	-0.51	2001-2005	1.03	-0.51
Τούμπας	1995-2005	1.13	-0.04	2001-2005	1.18	0.08
Σίνδος	2001-2009	1.19	0.09	2001-2005	1.17	0.12
Πανόραμα	2001-2009	1.54	1.22	2001-2005	1.33	0.32
Κορδελιό	2001-2009	0.73	-0.87	2001-2005	0.59	-1.13
Αγ. Σοφίας	2001-2009	0.78	-1.04	2001-2005	0.76	-0.91

Όλες οι κατανομές εμφανίζουν θετική λόξωση για όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Τη μεγαλύτερη θετική λόξωση την εμφανίζει ο σταθμός του Πανοράματος.

Αυτό δείχνει ότι κατά το μεγαλύτερο ποσοστό των ημερών στο Πανόραμα καταγράφηκαν μικρότερες συγκεντρώσεις από τους άλλους σταθμούς, μεταξύ των 20 και 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Τη μεγαλύτερη θετική κύρτωση (αιχμηρή κατανομή) την παρουσιάζει και πάλι η κατανομή συγκεντρώσεων του σταθμού του Πανοράματος. Αυτό επαληθεύει τη σταθερότητα στις συγκεντρώσεις αυτού του σταθμού (σταθμός υποβάθρου).

3.5 Μελέτη υπερβάσεων των ορίων σωματιδιακής ρύπανσης

Στην παράγραφο αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στις μέρες κατά τις οποίες σημειώθηκαν υπερβάσεις των ορίων σωματιδιακής ρύπανσης. Οι πληροφορίες αναφέρονται αναλυτικά σε δύο χρονικές περιόδους. Στην περίοδο 2001-2005 που είναι η κοινή περίοδος όλων των σταθμών και στην περίοδο 2001-2009 που είναι η περίοδος μελέτης των σταθμών της Περιφέρειας. Πριν το 2000 δεν υπήρχε ισχύουσα νομοθεσία, γι' αυτό και δεν υπολογίζονται υπερβάσεις για τις ευρύτερες χρονικές περιόδους των σταθμών του Δήμου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η 24ωρη οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας είναι τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές το χρόνο, βάση της νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Από το 2001 μέχρι το 2004 δόθηκε ένα περιθώριο ανοχής, το οποίο αθροίζεται στην οριακή τιμή, δίνοντας έτσι την ενδεικτική οριακή τιμή. Έτσι, για κάθε έτος από το 2001 έως το 2004 η ενδεικτική τιμή ήταν 70, 65, 60 και 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Από το 2005 και μετά η 24ωρη οριακή τιμή είναι τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Στους Πίνακες 3.4 – 3.5 που ακολουθούν, παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία για τις καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις κάθε σταθμού. Τα στατιστικά στοιχεία αναφέρονται στις μέγιστες συγκεντρώσεις, στις ετήσιες συγκεντρώσεις και στις μέρες που σημειώθηκαν υπερβάσεις της οριακής τιμής και της ενδεικτικής τιμής κατά τις διάφορες χρονικές περιόδους.

Πίνακας 3.4: Στατιστικά στοιχεία των σταθμών του Δήμου

Σταθμός	Έτος ή χρονική περίοδος	Μέγιστη τιμή (μg/m ³)	Μέση ετήσια τιμή (μg/m ³)	Ημέρες υπερβάσεων ημερήσιου ορίου	Ημέρες με διαθέσιμες μετρήσεις	Ποσοστό (%) υπερβάσεων επί ημερών με διαθέσιμες μετρήσεις	Πληρότητα μετρήσεων (%)
Βενιζέλου	2001	225.0	64.9	105	347	30	95
	2002	201.0	74.2	179	341	52	93
	2003	213.0	67.5	201	361	56	99
	2004	208.0	61.8	185	362	51	99
	2005	144.0	57.1	186	365	51	100
	2001-2005	225.0	65.1	856	1776	48	97
	1989-2005	384.0	78.0	-	4845	-	78
Μαρτίου	2001	139.0	55.2	72	341	21	93
	2002	115.0	58.9	105	347	30	95
	2003	217.0	59.4	161	364	44	100
	2004	152.0	56.6	163	365	45	100
	2005	146.0	53.3	173	365	47	100
	2001-2005	217.0	56.7	674	1782	38	98
	1990-2005	217.0	57.0	-	3726	-	64
Λαγκαδάς	2001	205.0	54.8	71	319	21	87
	2002	181.0	55.3	100	365	29	100
	2003	221.0	50.2	99	365	29	100
	2004	195.0	53.6	141	365	41	100
	2005	170.0	49.3	143	365	42	100
	2001-2005	221.0	52.6	554	1779	31	97
	1992-2005	322.0	60.1	-	3631	-	71
Επταπύργιο	2001	122.0	38.9	18	273	7	75
	2002	222.0	46.7	49	236	21	65
	2003	240.0	45.4	59	317	19	87
	2004	124.0	36.2	54	365	15	100
	2005	117.0	31.3	51	365	14	100
	2001-2005	240.0	39.7	231	1556	15	85
	1996-2005	254.0	43.4	-	2858	-	78
Τούμπα	2001	93.0	40.0	15	333	5	91
	2002	101.0	41.1	16	153	10	42
	2003	204.0	44.8	41	227	18	62
	2004	124.0	37.4	60	365	16	100
	2005	122.0	34.2	57	365	16	100
	2001-2005	204.0	39.5	189	1443	13	79
	1995-2005	204.0	45.8	-	3266	-	81

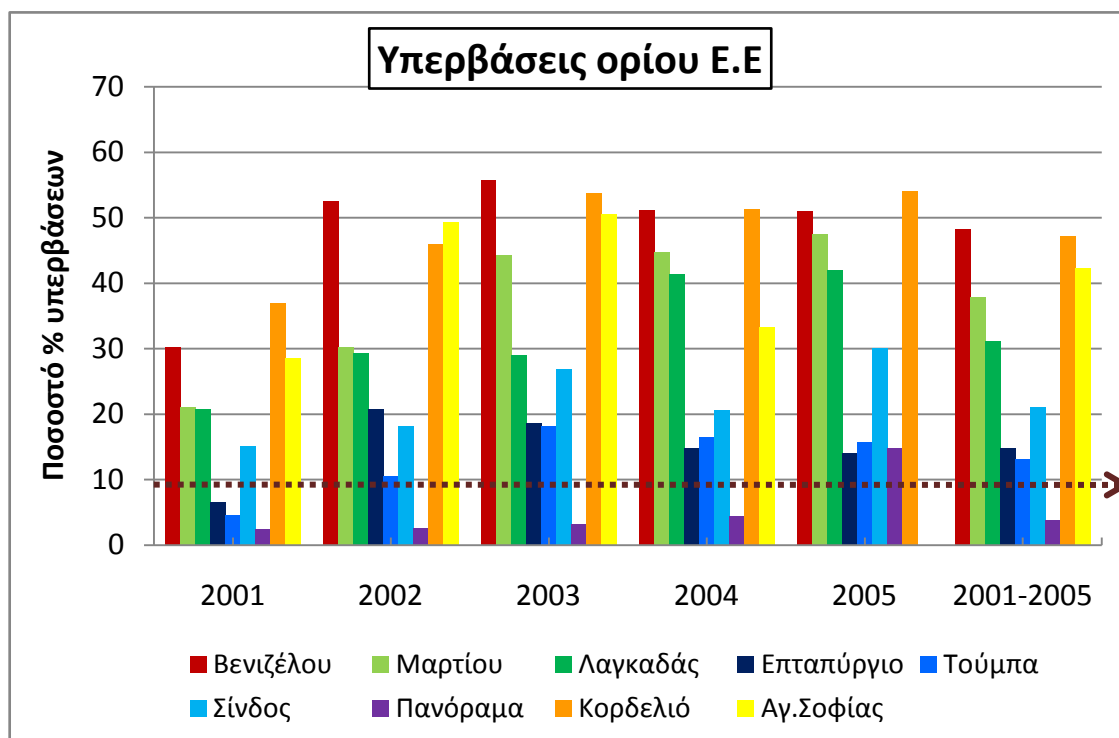
Πίνακας 3.5: Στατιστικά στοιχεία των σταθμών της Περιφέρειας. Το σύμβολο # εκφράζει έλλειψη δεδομένων.

Σταθμός	Έτος ή χρονική περίοδος	Μέγιστη τιμή (μg/m ³)	Μέση ετήσια τιμή (μg/m ³)	Ημέρες υπερβάσεων ημερήσιου ορίου	Ημέρες με διαθέσιμες μετρήσεις	Ποσοστό (%) υπερβάσεων επί ημερών με διαθέσιμες μετρήσεις	Πληρότητα μετρήσεων (%)
Σίνδος	2001	173.8	51.5	55	365	15	100
	2002	130.3	48.1	66	363	18	99
	2003	205.4	51.2	92	343	27	94
	2004	163.1	43.4	60	291	21	80
	2005	175.0	44.9	43	143	30	39
	2006	171.7	49.9	101	261	39	72
	2007	176.8	49.6	146	358	41	98
	2008	111.6	47.4	123	309	40	84
	2009	96.8	40.7	25	129	19	35
		2001-2005	205.0	48.5	316	1505	21
	2001-2009	205.4	48.6	711	2562	28	78
Πανόραμα	2001	99.5	36.8	9	365	2	100
	2002	84.6	34.1	9	355	3	97
	2003	200.4	32.9	9	282	3	77
	2004	89.5	30.2	14	320	4	87
	2005	191.0	34.3	12	81	15	22
	2006	128.8	30.4	28	328	9	90
	2007	91.4	25.8	6	347	2	95
	2008	48.0	26.2	0	32	0	9
	2009	59.3	23.2	3	171	2	47
		2001-2005	200.4	33.7	53	1403	4
	2001-2009	200.4	30.4	90	2281	4	69
Κορδελιό	2001	212.7	68.9	112	303	37	83
	2002	191.9	67.9	164	357	46	98
	2003	227.1	69.0	140	261	54	72
	2004	166.8	57.2	62	121	51	33
	2005	170.6	60.0	106	196	54	54
	2006	197.6	67.7	170	267	64	73
	2007	168.1	56.5	159	322	49	88
	2008	139.8	52.7	157	317	50	87
	2009	124.6	46.6	85	263	32	72
		2001-2005	227.0	64.6	584	1238	47
	2001-2009	227.1	60.7	1155	2407	48	73

Αγ.Σοφίας	2001	298.8	63.1	102	358	28	98
	2002	243.6	70.9	179	363	49	99
	2003	253.0	63.4	169	334	51	92
	2004	124.0	48.7	18	54	33	15
	2005	#	#	#	#	#	#
	2006	#	#	#	#	#	#
	2007	140.5	45.8	107	328	33	90
	2008	184.0	57.7	188	331	57	91
	2009	91.7	43.8	71	256	28	70
	2001-2005	299.0	61.5	468	1109	42	76
	2001-2009	298.8	56.2	834	2024	41	62

Από τις πληροφορίες που παρέχονται στους πίνακες 3.4 και 3.5, για την περίοδο 2001-2005 κατασκευάστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 3.13. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται γραφικά τα ποσοστά υπερβάσεων όλων των σταθμών για το κάθε ένα έτος αυτής της χρονικής περιόδου. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το περιθώριο ανοχής των 35 ημερών, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 9.6%.

Βάση της νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι υπερβάσεις είναι δικαιολογημένες όταν εμφανίζονται μέχρι 35 φορές το χρόνο. Αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό 9.6% ($100 \cdot 35 / 365 \approx 9.6\%$) όταν ο σταθμός διαθέτει πλήρη δεδομένα. Όταν το πλήθος των ημερών με καταγεγραμμένες μετρήσεις, είναι μικρότερο των 365 ημερών, θα πρέπει να γίνει αναγωγή των 35 ημερών που είναι το ετήσιο όριο της Ε.Ε., στον αριθμό των ημερών όπου υπάρχουν καταγεγραμμένες μετρήσεις. Για παράδειγμα, το 2004 στον σταθμό του Κορδελιού καταγράφηκαν μετρήσεις από 121 ημέρες. Το όριο των 35 ημερών, αντιστοιχεί για αυτό τον σταθμό κατά το έτος 2004, σε 12 ημέρες ($35 \cdot 121 / 365 \approx 11,6$). Οι 12 ημέρες αντιστοιχούν σε ποσοστό υπερβάσεων 9.5% ($100 \cdot 11,6 / 121 \approx 9.5\%$). Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται η προσέγγιση ότι το όριο των 35 ημερών είναι περίπου ίσο με 9.6% για όλους τους σταθμούς και όλα τα έτη.



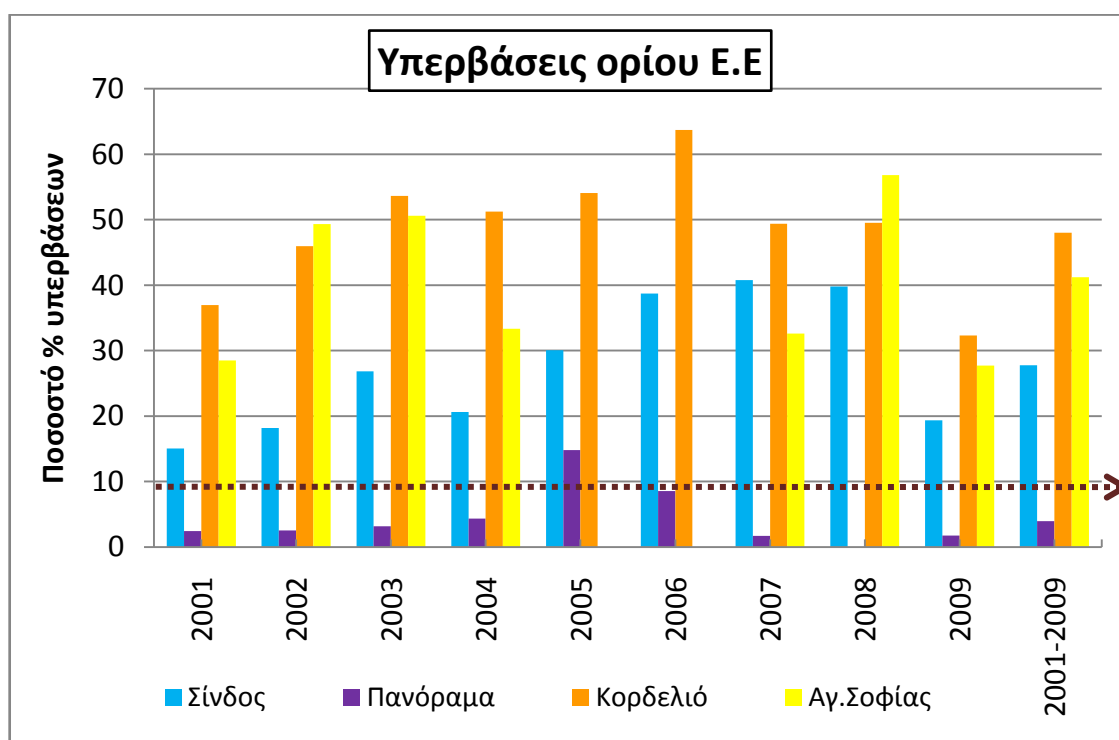
Σχήμα 3.13: Ποσοστό % των ημερών που υπήρξε υπέρβαση της οριακής τιμής σε όλους τους σταθμούς, την κοινή περίοδο 2001-2005. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το περιθώριο ανοχής των 35 ημερών που αντιστοιχεί σε ποσοστό 9.6%.

Χρονική περίοδος 2001-2005

Τα επεισόδια υπερβάσεων στις περιοχές Βενιζέλου, Κορδελιού και Αγ. Σοφίας είναι σαφώς περισσότερα από αυτά των υπολοίπων σταθμών. Στην περιοχή της Βενιζέλου, το 48% των ημερών σημείωσε συγκεντρώσεις πάνω από το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν οι μισές μέρες αυτής της χρονικής περιόδου ήταν πάνω από το όριο. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στην περιοχή του Κορδελιού με ποσοστό υπερβάσεων 47%, ενώ στον σταθμό της Αγ. Σοφίας οι υπερβάσεις έφτασαν το 42%. Το έτος 2003, στο σταθμό της Βενιζέλου, σημειώθηκε ποσοστό υπερβάσεων 56%, το μεγαλύτερο που καταγράφηκε σε αυτήν τη χρονική περίοδο. Ο σταθμός του Πανοράματος είναι ο μόνος σταθμός όπου με ποσοστό υπερβάσεων 4% βρίσκεται μέσα στα φυσιολογικά όρια εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων.

Οι σταθμοί με τα χαμηλότερα ποσοστά υπερβάσεων ήταν οι σταθμοί της Τούμπας και του Επταπυργίου που εμφάνισαν ποσοστά 13% και 15%, αντίστοιχα. Στην περιοχή της Τούμπας οι υπερβάσεις σημειώθηκαν τα έτη 2003, 2004 και 2005, ενώ στο σταθμό του Επταπυργίου μόνο το 2001 δεν σημειώθηκαν υπερβάσεις. Οι σταθμοί Μαρτίου, Λαγκαδά και Σίνδου σημειώνουν επίσης υψηλά ποσοστά υπερβάσεων που κυμαίνονται από 21% - 38%.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3.14 εμφανίζονται τα ποσοστά υπερβάσεων των σταθμών της Περιφέρειας για την περίοδο 2001-2009 και για το κάθε ένα έτος αυτής. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το περιθώριο ανοχής του 9,6% (περιθώριο των 35 ημερών).



Σχήμα 3.14 : Ποσοστό % των ημερών που υπήρξε υπέρβαση της οριακής τιμής στους σταθμούς της Περιφέρειας, την περίοδο 2001-2009. Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το περιθώριο ανοχής των 35 ημερών που αντιστοιχεί σε ποσοστό 9,6%.

Χρονική περίοδος 2001-2009

Τα υψηλά ποσοστά υπερβάσεων συνεχίζονται και μετά το 2005 στους σταθμούς του Κορδελιού και της Αγ. Σοφίας. Το 2006 σημειώθηκε ρεκόρ υπερβάσεων στο σταθμό του Κορδελιού, με ποσοστό που έφτασε το 64%. Μετά το 2005 αυξάνουν κατά πολύ τα ποσοστά υπερβάσεων στο σταθμό της Σίνδου, με εξαίρεση το 2009, κατά το οποίο εμφανίζεται ποσοστό 19 %.

Το 2005 τα δεδομένα του σταθμού του Πανοράματος περιορίζονται σε 81 καταγεγραμμένες μετρήσεις εκ των οποίων στις 12 σημειώθηκαν υπερβάσεις. Τα λιγιστά αυτά δεδομένα δεν επιτρέπουν ασφαλή συμπεράσματα. Ο αέρας στην περιοχή του Πανοράματος φαίνεται να είναι ελάχιστα επιβαρυσμένος με αιωρούμενα σωματίδια, με συγκεντρώσεις που δεν υπερβαίνουν τα όρια της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλους τους σταθμούς υπήρξαν μέρες όπου ξεπεράστηκε το όριο των $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$, όριο κατά το οποίο επιβάλλονται έκτακτα μέτρα από το Δήμο Θεσσαλονίκης. Ιδιαίτερα ανησυχητικές είναι οι μέγιστες συγκεντρώσεις που καταγράφηκαν στους περισσότερους σταθμούς του Δήμου και της Περιφέρειας. Για παράδειγμα, το 2001 στον σταθμό της Αγ. Σοφίας καταγράφηκε μέση ημερήσια συγκέντρωση ίση με $298,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Είναι φανερό ότι το ενδεικτικό όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης των $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, που υποτίθεται ότι θα πρέπει να επιτευχθεί έως το έτος 2010, δεν αποτελεί ρεαλιστικό και προσεγγίσιμο στόχο, με βάση την παρούσα κατάσταση. Ο στόχος αυτός δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί στο άμεσο μέλλον σε κανένα σταθμό του Δημοτικού δικτύου και της Περιφέρειας, παρά μόνο στο σταθμό του Πανοράματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη σωματιδιακή ρύπανση

Καταλυτικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων παίζουν οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που επιδρούν στη διαμόρφωση της σωματιδιακής ρύπανσης είναι ο άνεμος, η βροχόπτωση, η συνθήκες ευστάθειας της αέριας μάζας στην περιοχή, η ηλιοφάνεια όταν πρόκειται για φωτοχημικούς ρύπους, η σχετική υγρασία και έμμεσα η θερμοκρασία.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η μεταβολή της συγκέντρωσης των σωματιδίων σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου και την βροχόπτωση. Οι παράμετροι αυτοί (άνεμος, βροχόπτωση) επιλέχθηκαν λόγω της άμεσης επίδρασής τους στη σωματιδιακή ρύπανση και κατ' επέκταση στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας. Παράλληλα μελετάται ο συντελεστής συσχέτισης των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, με το ύψος του οριακού στρώματος και τον συντελεστή εξαερισμού. Το ύψος του οριακού στρώματος και ο συντελεστής εξαερισμού, εξαρτώνται από την ηλιοφάνεια και τις συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν στην ατμόσφαιρα της υπό μελέτη περιοχής. Επιλέχθηκαν να μελετηθούν γιατί συνδέονται άμεσα με την κατακόρυφη προς τα πάνω διάχυση των σωματιδιακών ρύπων.

4.1 Μελέτη της επίδρασης του ανέμου στην κατανομή των PM10

Για να μελετηθεί η επίδραση του ανέμου στην κατανομή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία. Κάθε

σταθμός διαθέτει μια χρονοσειρά δεδομένων ταχύτητας ανέμου και σωματιδιακής ρύπανσης. Από τις χρονοσειρές των ταχυτήτων του ανέμου κάθε σταθμού, βρέθηκε το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο της κάθε χρονοσειράς.

- ▶ Το πρώτο τεταρτημόριο Q_1 αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου που είναι μεγαλύτερη ή ίση από το 25% των καταγεγραμμένων ταχυτήτων της χρονοσειράς του κάθε σταθμού και αποτελεί το κατώφλι των χαμηλών ταχυτήτων.
- ▶ Το τρίτο τεταρτημόριο Q_3 αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου που είναι μεγαλύτερη ή ίση από το 75% των καταγεγραμμένων ταχυτήτων της χρονοσειράς του κάθε σταθμού και αποτελεί το κατώφλι των υψηλών ταχυτήτων.

Οι ταχύτητες του ανέμου που είναι μικρότερες ή ίσες από το Q_1 θεωρούνται χαμηλές ταχύτητες ανέμου για την κάθε χρονοσειρά, ενώ αυτές που είναι μεγαλύτερες ή ίσες του Q_3 θεωρούνται υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν εκείνες οι ημέρες που είχαν ταχύτητες ανέμου μικρότερες από το Q_1 (κατώφλι χαμηλών ταχυτήτων) και εκείνες οι ημέρες που είχαν ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες του Q_3 (κατώφλι υψηλών ταχυτήτων). Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, αυτών των ημερών, διαμόρφωσαν τις κατανομές σωματιδιακής ρύπανσης για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων.

Δεδομένα ταχυτήτων ανέμου ήταν διαθέσιμα από πέντε σταθμούς, δύο σταθμούς του Δήμου (Βενιζέλου, Επταπύργιο) και τρεις της περιφέρειας (Σίνδος, Πανόραμα, Κορδελιό). Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές του πρώτου και του τρίτου τεταρτημρίου του κάθε σταθμού, καθώς και η διαφορά τους, για τη χρονική περίοδο όπου υπάρχουν δεδομένα και την κοινή περίοδο 2001-2005.

Πίνακας 4.1: Στατιστικές πληροφορίες με έμφαση στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο της κατανομής ταχυτήτων κάθε σταθμού για τις αντίστοιχες χρονικές περιόδους.

(WS: ταχύτητα ανέμου)

	χρονική περίοδος	Q_1 (m/s)	Q_3 (m/s)	Q_3-Q_1 (m/s)	Αριθμός ημερών με διαθέσιμες μετρήσεις WS	Πληρότητα μετρήσεων WS (%)
Βενιζέλου	2001-2005	0.9	1.7	0.8	1675	92
Επταπύργιο	2001-2005	1.1	2.8	1.7	1683	92
Σίνδος	2001-2005	1.45	2.62	1.17	1720	94
Πανόραμα	2001-2005	0.84	1.59	0.75	1693	93
Κορδελιό	2001-2005	0.95	1.46	0.51	1622	89
Βενιζέλου	1989-2005	0.9	1.6	0.7	4415	71
Επταπύργιο	1995-2005	1	2.4	1.4	3221	80
Σίνδος	2001-2009	1.36	2.48	1.12	2943	90
Πανόραμα	2001-2009	0.76	1.48	0.72	3074	94
Κορδελιό	2001-2009	0.9	1.41	0.51	2986	91

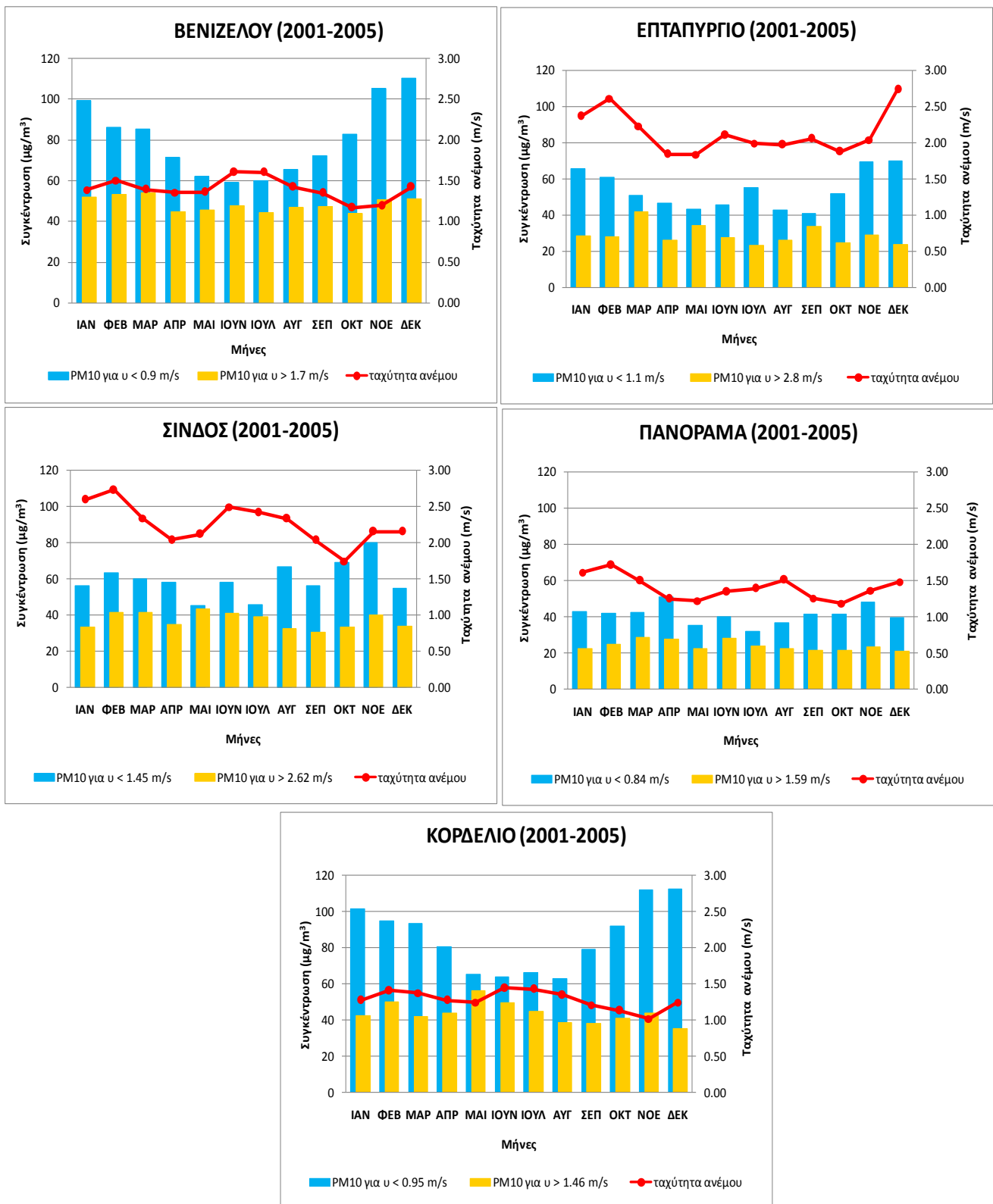
Από τις πληροφορίες που παρέχονται στον Πίνακα 4.1 γίνεται αντιληπτό ότι ο σταθμός του Επταπυργίου εμφανίζει τη μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στη χαμηλή ταχύτητα Q_1 και την υψηλή ταχύτητα Q_3 , σε σχέση με τους άλλους σταθμούς. Αυτό δείχνει ότι ο άνεμος στο Επταπύργιο εμφανίζει τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα, συγκριτικά με τους άλλους σταθμούς. Στο σταθμό της Σίνδου, το 25% των ταχυτήτων του ανέμου είχε τιμή πάνω από 2.62 m/s για την περίοδο 2001-2005. Οι πιο ασθενείς άνεμοι παρατηρήθηκαν στο σταθμό του Κορδελιού, που εμφάνισε την πιο μικρή ταχύτητα Q_1 (0.9 m/s) και την πιο μικρή διαφορά ανάμεσα στις ταχύτητες Q_1 και Q_3 (0.51 m/s).

4.1.1 Επίδραση του ανέμου στην μηνιαία κατανομή των PM10

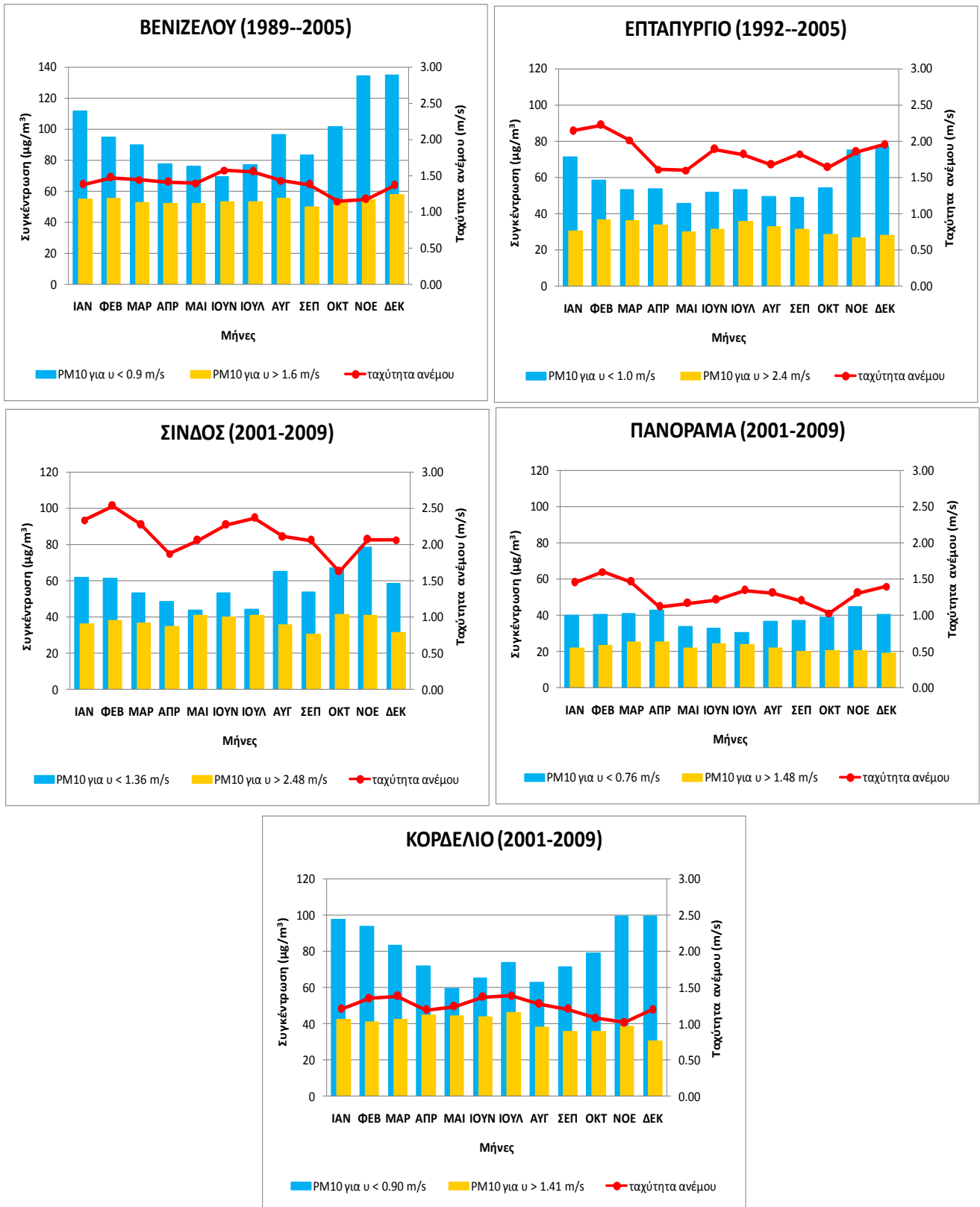
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων κάθε σταθμού, μαζί με την μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, την περίοδο 2001-2005. Για τις ευρύτερες χρονικές περιόδους, τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2. Από την εξέταση των διαγραμμάτων προέκυψαν οι παρακάτω διαπιστώσεις.

Σε όλους τους σταθμούς οι μέγιστες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζονται όταν πνέει άνεμος χαμηλής έντασης. Η χαμηλή μέση ταχύτητα του ανέμου συντελεί στο μικρό βαθμό απομάκρυνσης των PM10 και κατά συνέπεια, στη δημιουργία συνθηκών συσσώρευσης σωματιδιακών ρύπων πάνω από την πόλη. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σωματιδίων, κατά τις μέρες με χαμηλή ένταση ανέμου, σημειώθηκαν στους σταθμούς Βενιζέλου και Κορδελιού, που φαίνεται να είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένοι όλες τις χρονικές περιόδους μελέτης. Ο σταθμός της Σίνδου, παρόλο που βρίσκεται σε βιομηχανική περιοχή στην οποία εκπέμπονται σημαντικές ποσότητες σωματιδιακών ρύπων, παρουσιάζει χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με τους άλλους σταθμούς, τις μέρες με ταχύτητες ανέμου κάτω της τιμής του $Q_1=1.45$ m/s. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στους ανέμους μεγαλύτερης έντασης που πνέουν στην περιοχή, σε σχέση με τους αστικούς σταθμούς της Βενιζέλου ($Q_1=0.9$ m/s) και του Κορδελιού ($Q_1=0.95$ m/s), που εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις.

Τις μέρες που σημειώνονται υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι συγκεντρώσεις των PM10 παρουσιάζουν μικρή μεταβολή με τάση σταθεροποίησης. Οι σωματιδιακοί ρύποι παρασύρονται από το μέσο άνεμο, μεταφέρονται σε πιο απομακρυσμένες περιοχές με τελικό αποτέλεσμα την αραιώσή τους. Την περίοδο 2001-2009 ο σταθμός του Πανοράματος εμφάνισε σχεδόν σταθερές συγκεντρώσεις, κοντά στα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τις μέρες που ο άνεμος είχε ταχύτητα μεγαλύτερη από 1.48 m/s. Η τιμή αυτή των $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ αντιπροσωπεύει το αστικό υπόβαθρο σωματιδιακής ρύπανσης, ως κύριο αποτέλεσμα των φυσικών πηγών εκπομπής.



Σχήμα 4.1: Μέση μηνιαία συγκέντρωση PM10 για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων όλων των σταθμών, μαζί με την μέση μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, την περίοδο 2001-2005.



Σχήμα 4.2: Μέση μηνιαία συγκέντρωση PM10 για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων όλων των σταθμών, μαζί με την μέση μηνιαία μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, κατά τις χρονικές περιόδους όπου ο κάθε σταθμός διαθέτει δεδομένα.

Σε όλους τους σταθμούς εκτός του Πανοράματος, οι συγκεντρώσεις των PM10 κατά τις μέρες που επικρατούσαν χαμηλές ταχύτητες ανέμου, φαίνεται να παρουσιάζουν έντονη εποχικότητα. Οι συγκεντρώσεις έχουν πτωτική τάση από τις αρχές του έτους μέχρι το Μάιο-Ιούνιο, όπου εμφανίζεται ελάχιστο. Από τότε και μέχρι το Νοέμβριο εμφανίζονται διακυμάνσεις που σε γενικές γραμμές έχουν αυξητική τάση. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι τις μέρες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, τα αιωρούμενα σωματίδια συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα της περιοχής. Η συσσώρευση αυτή γίνεται εντονότερη από τον Οκτώβρη μέχρι και τον Μάρτιο όπου εμφανίζονται περισσότερες εκπομπές σωματιδίων λόγω της θέρμανσης των κατοικιών και της αυξημένης κίνησης των αυτοκινήτων. Ποιο έντονη εποχικότητα στις συγκεντρώσεις κατά τις μέρες με ασθενείς ανέμους παρουσιάζουν οι σταθμοί της Βενιζέλου και του Κορδελιού. Οι σταθμοί αυτοί εμφανίζουν μεγάλες συγκεντρώσεις κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο (πάνω από 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και μικρές συγκεντρώσεις από τον Μάιο μέχρι και τον Αύγουστο (περίπου 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Όλοι οι σταθμοί εμφανίζουν μέγιστες συγκεντρώσεις το Νοέμβριο, κατά τις μέρες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Αυτό είναι αποτέλεσμα όχι μόνο των εκπομπών (αυτοκίνητα, κεντρικές θερμάνσεις) αλλά και των δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών διασποράς, που εμποδίζουν την απομάκρυνση των ρύπων. Το Νοέμβριο, ο άνεμος είναι γενικά ασθενής, όπως φαίνεται από την μέση εποχιακή κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, σε όλους τους σταθμούς. Επιπλέον το ύψος του οριακού στρώματος είναι ιδιαίτερα χαμηλό κατά το μήνα αυτόν (Σχήμα 4.7).

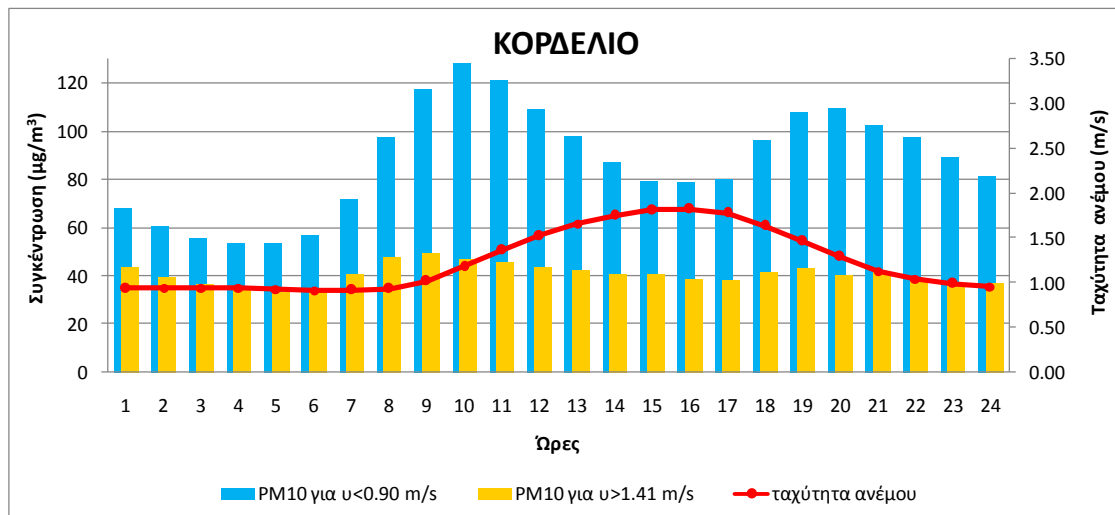
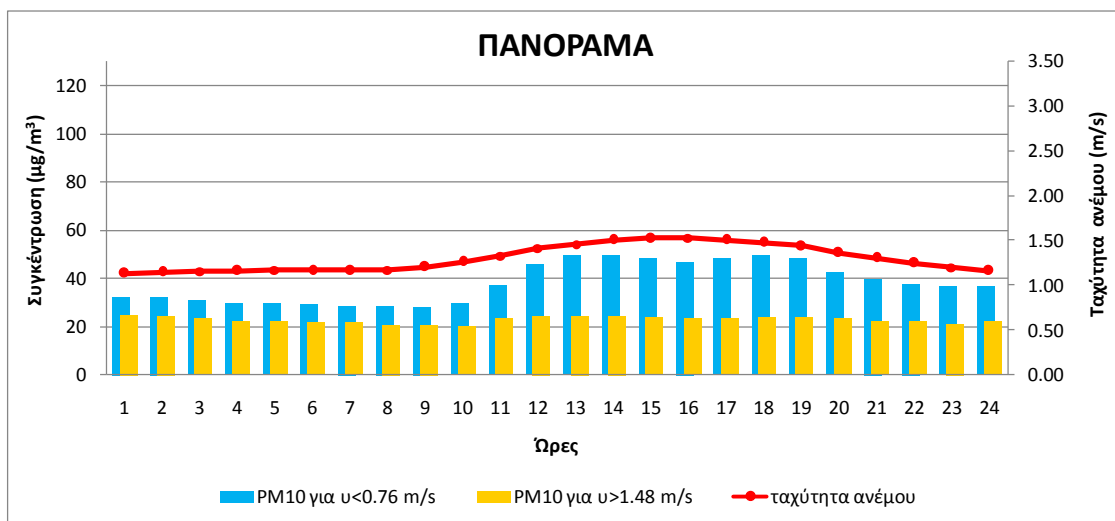
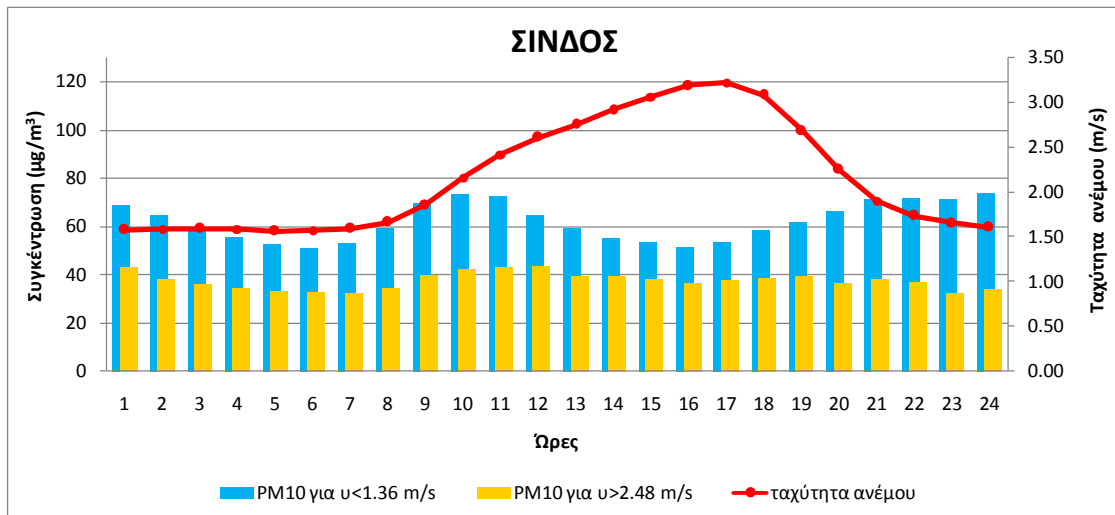
Ο σταθμός του Πανοράματος δεν φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερη εποχικότητα στις συγκεντρώσεις PM10 καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ τις ημέρες που πνέει δυνατός άνεμος, μέχρι 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ τις μέρες με σχεδόν άπνοια (ταχύτητες κάτω του 0.8 m/s). Αυτό δείχνει ότι στην σωματιδιακή ρύπανση της περιοχής συμβάλει κυρίως η διάχυτη περιφερειακή ρύπανση, παρά οι τοπικές πηγές εκπομπής.

4.1.2 Επίδραση του ανέμου στην ωριαία κατανομή των PM10

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι μέσες ωριαίες κατανομές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, εκείνες τις μέρες της περιόδου 2001-2009 που σημειώθηκαν χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου, μαζί με τη μέση ωριαία κατανομή της ταχύτητας του ανέμου κάθε σταθμού. Οι σταθμοί που παρέχουν ωριαία δεδομένα PM10 και ταχυτήτων ανέμου είναι οι σταθμοί της Σίνδου, του Πανοράματος και του Κορδελιού. Από την εξέταση των διαγραμμάτων του Σχήματος 4.3 προέκυψαν οι παρακάτω διαπιστώσεις.

Κατά τις μέρες που πνέει άνεμος χαμηλής έντασης όλοι οι σταθμοί εμφανίζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τη διάρκεια της μέρας, με πιο έντονη μεταβλητότητα, δηλαδή μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των τοπικών μεγίστων και ελαχίστων. Η πιο έντονη μεταβλητότητα παρατηρείται στο σταθμό του Κορδελιού που εμφανίζει απόκλιση $74.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ μεταξύ μέγιστης και ελαχίστης τιμής. Ο σταθμός της Σίνδου και του Πανοράματος εμφανίζουν παρόμοιες αποκλίσεις με τιμές $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $21.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους σταθμούς του Κορδελιού και της Σίνδου, οι ελάχιστες συγκεντρώσεις για το κατώφλι των χαμηλών ταχυτήτων είναι πάνω από το όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Αυτό δείχνει ότι τις μέρες με άπνοια η ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης είναι ιδιαίτερα επιβαρυμένη από αιωρούμενα σωματίδια κυρίως τις πρωινές ώρες λόγω κυκλοφορίες των αυτοκινήτων και τις απογευματινές λόγω θερμοκρασιακών αναστροφών. Στο Κορδελιό, οι συγκεντρώσεις φαίνεται να ξεπερνούν το όριο συναγερμού των $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ κατά το οποίο θα πρέπει να επιβάλλονται έκτακτα μέτρα από το Δήμο, από τις 9:00 μέχρι τις 12:00 το πρωί.

Τις μέρες όπου εμφανίζονται υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι συγκεντρώσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν γύρω από μια τιμή κατά τη διάρκεια της μέρας. Στη Σίνδο και στο Κορδελιό οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται γύρω από τα $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στο Πανόραμα κυμαίνονται γύρω από τα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



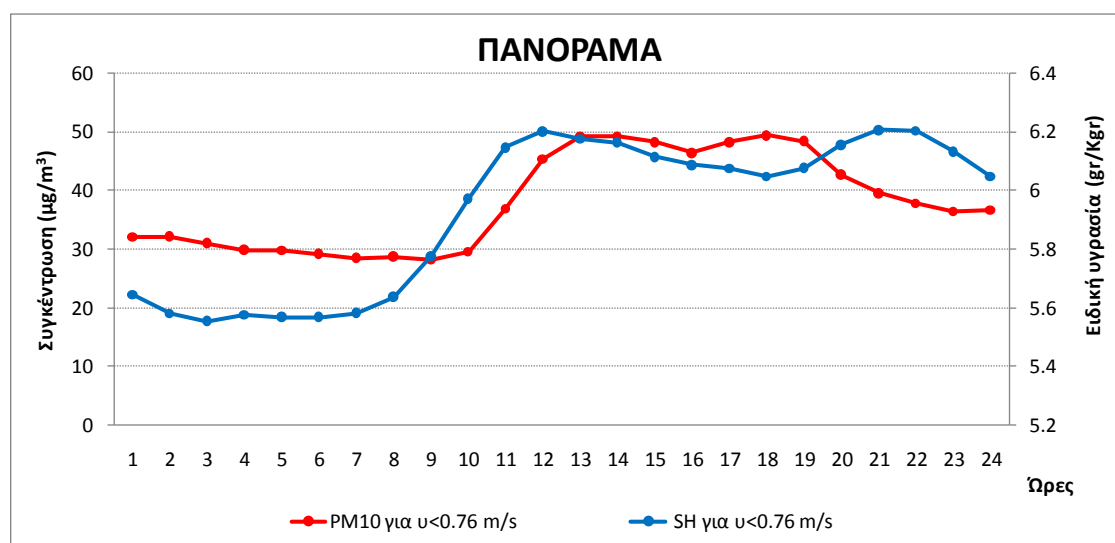
Σχήμα 4.3: Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της περιφέρειας, τις μέρες κατά τις οποίες επικρατούσαν χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμων, κατά την περίοδο 2001-2009, μαζί με τη μέση ωριαία κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.

Ο σταθμός του Πανοράματος εμφανίζει μια ιδιαιτερότητα όσον αφορά τον ημερήσιο κύκλο των συγκεντρώσεων των PM10. Οι συγκεντρώσεις είναι μικρότερες από τους άλλους σταθμούς και μεταβάλλονται ομαλά στη διάρκεια της ημέρας. Δεν διακρίνονται ευκρινώς τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα και το πρωτεύων μέγιστο εμφανίζεται με μια χρονική καθυστέρηση συγκριτικά με τους άλλους σταθμούς. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περιοχή του Πανοράματος δεν επιβαρύνεται σε μεγάλο βαθμό από τοπικές πηγές, αλλά καταγράφει κυρίως δευτερογενή σωματίδια που μεταφέρονται από πιο ρυπασμένες απομακρυσμένες περιοχές. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη του ημερήσιου κύκλου της ειδικής υγρασίας SH, στην αμέσως επόμενη παράγραφο.

Η ειδική υγρασία (**S**pecific **H**umidity) είναι ένας δείκτης που προκύπτει από το λόγο της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του υγρού αέρα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως «ιχνιθέτης», λόγω της ιδιότητας των υδρατμών να συμπυκνώνονται πάνω στα σωματίδια. Συνδέεται με τη σχετική υγρασία RH μέσω μιας σχέσης μετασχηματισμού, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α (Σαχσαμάνογλου και Μακρογιάννης, 1998). Από τα δεδομένα της σχετικής υγρασίας RH και της θερμοκρασίας του αέρα που καταγράφηκαν στο σταθμό του Πανοράματος για την περίοδο 2001-2009, κατασκευάστηκε η χρονοσειρά της ειδικής υγρασίας SH. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ο ημερήσιος κύκλος της ειδικής υγρασίας παράλληλα με τον ημερήσιο κύκλο των συγκεντρώσεων PM10 του σταθμού του Πανοράματος, για όλες τις μέρες της περιόδου 2001-2009 που ο άνεμος εμφάνισε χαμηλή ταχύτητα.

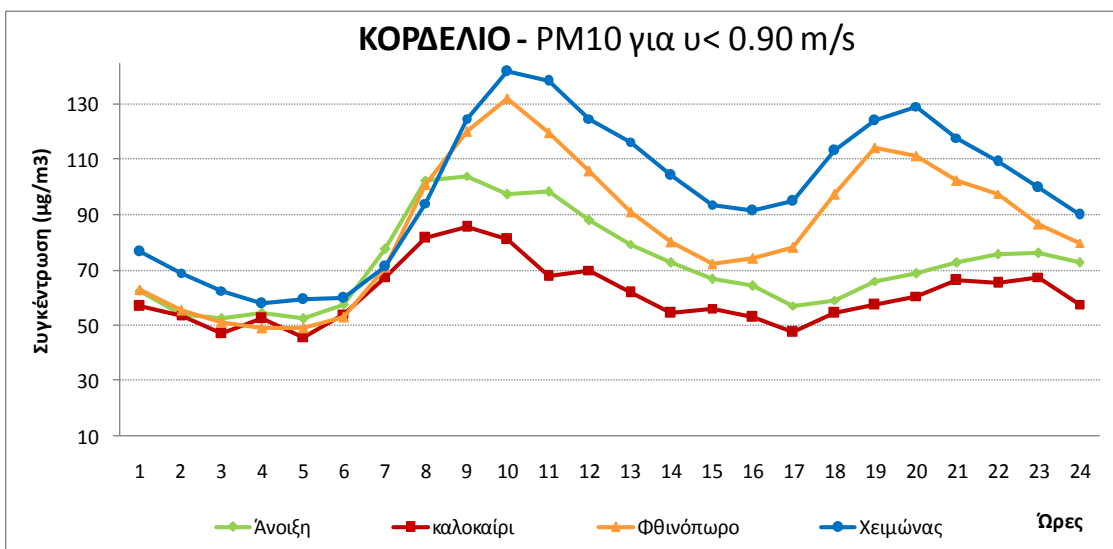
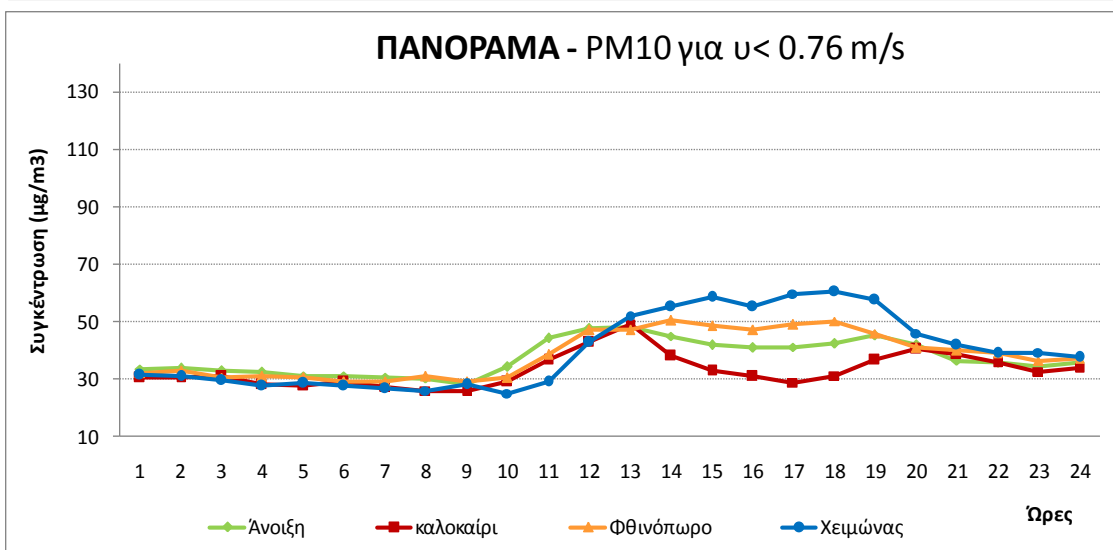
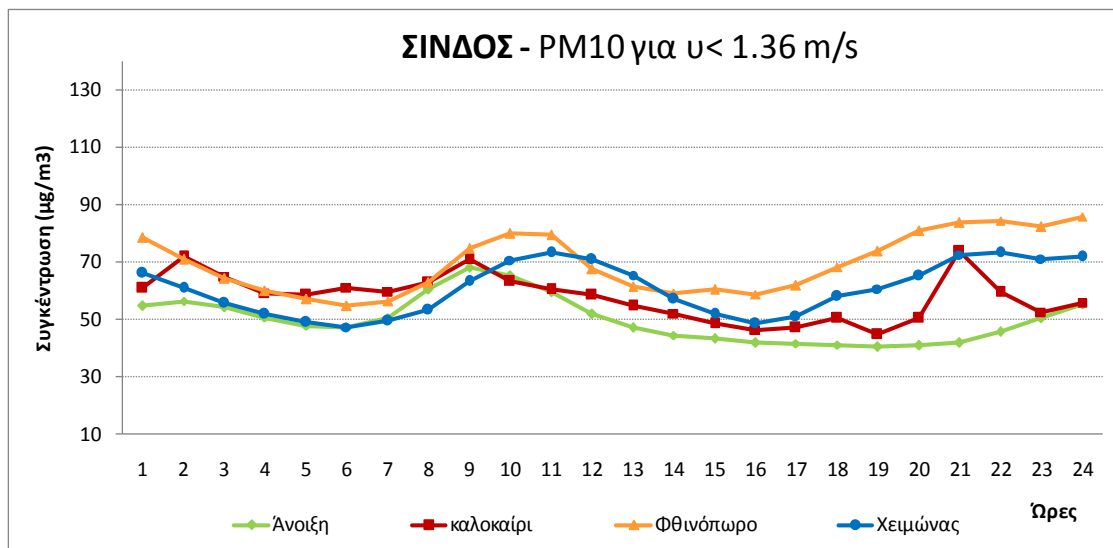
Είναι εμφανές ότι οι δύο παράμετροι του Σχήματος 4.4 συνμεταβάλλονται για το μεγαλύτερο μέρος του 24ώρου. Από τις 06:00 το πρωί, αρχίζει να αυξάνει η ειδική υγρασία, λόγω της σταδιακής αύξησης της θερμοκρασίας και της εξάτμισης. Στις 12:00 το μεσημέρι, η ειδική υγρασία παίρνει την μέγιστη τιμή της (6.2 gr/Kgr), ενώ μία ώρα μετά, στις 13:00, οι συγκεντρώσεις των PM10 εμφανίζουν μέγιστο. Είναι πιθανό να μεταφέρεται ρυπασμένος αέρας από το κέντρο της Θεσσαλονίκης προς την περιοχή του Πανοράματος, περιοχή με μεγαλύτερο υψόμετρο συγκριτικά με το κέντρο της πόλης. Ο αέρας που κινείται από τα χαμηλά στρώματα προς τα υψηλότερα, μεταφέρει υγρασία και αιωρούμενα σωματίδια στην περιοχή. Από τις

12:00 μέχρι της 18:00 το απόγευμα οι ανοδικές κινήσεις ενισχύονται, με αποτέλεσμα να αυξάνει η προς τα πάνω διάχυση των υδρατμών και των αιωρούμενων σωματιδίων. Κατά τις απογευματινές ώρες (μετά τη 19^η ώρα) οι ανοδικές κινήσεις ελαττώνονται σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο η θερμοκρασία του αέρα είναι ακόμα υψηλή, με αποτέλεσμα η διαδικασία της εξάτμισης να συνεχίζεται. Έτσι εξηγούνται οι υψηλές τιμές ειδικής υγρασίας στις 21:00 το βράδυ. Τις βραδινές ώρες, παρόλο που η υγρασία είναι αυξημένη, οι συγκεντρώσεις των PM10 είναι χαμηλές.

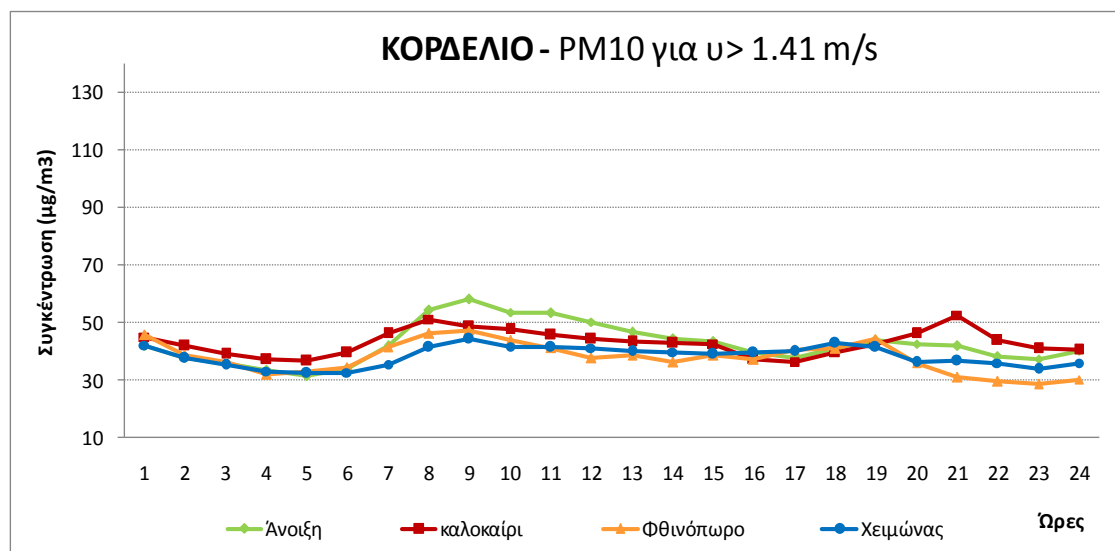
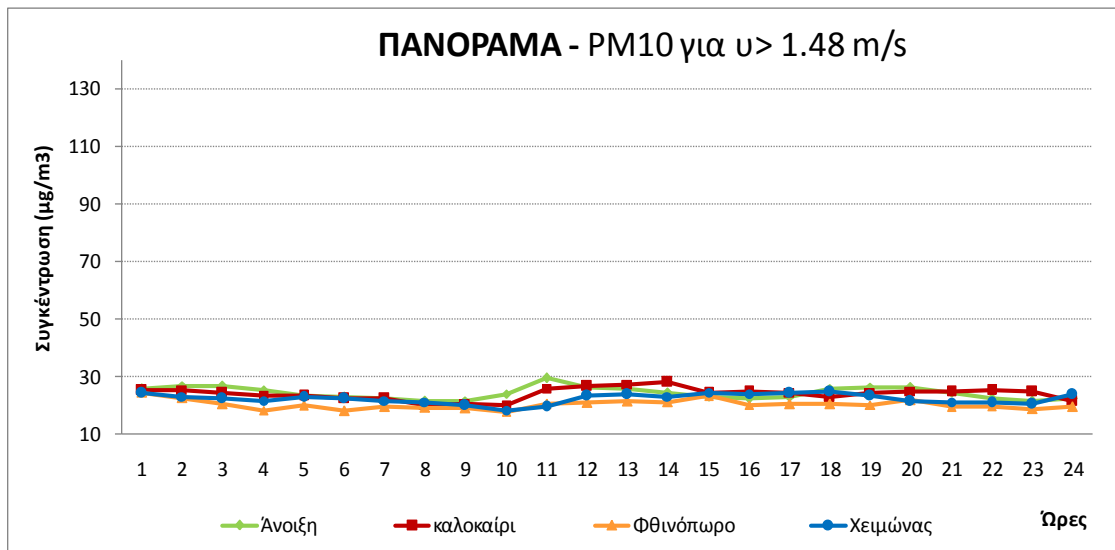
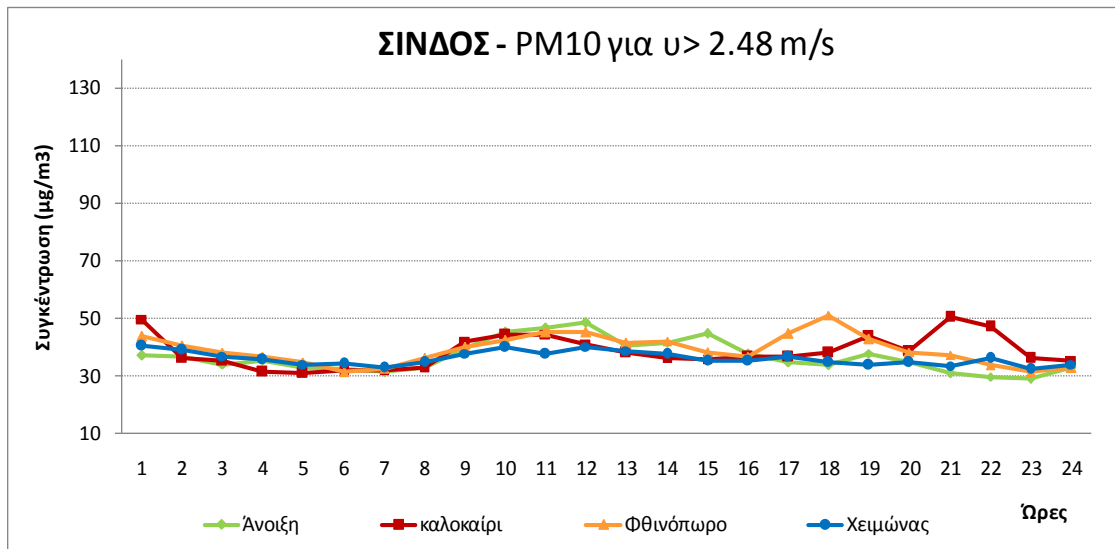


Σχήμα 4.4: Μέσος ημερήσιος κύκλος συγκέντρωσης PM10 και ειδικής υγρασίας SH, για το κατώφλι των χαμηλών ταχυτήτων του σταθμού του Πανοράματος, την περίοδο 2001-2009.

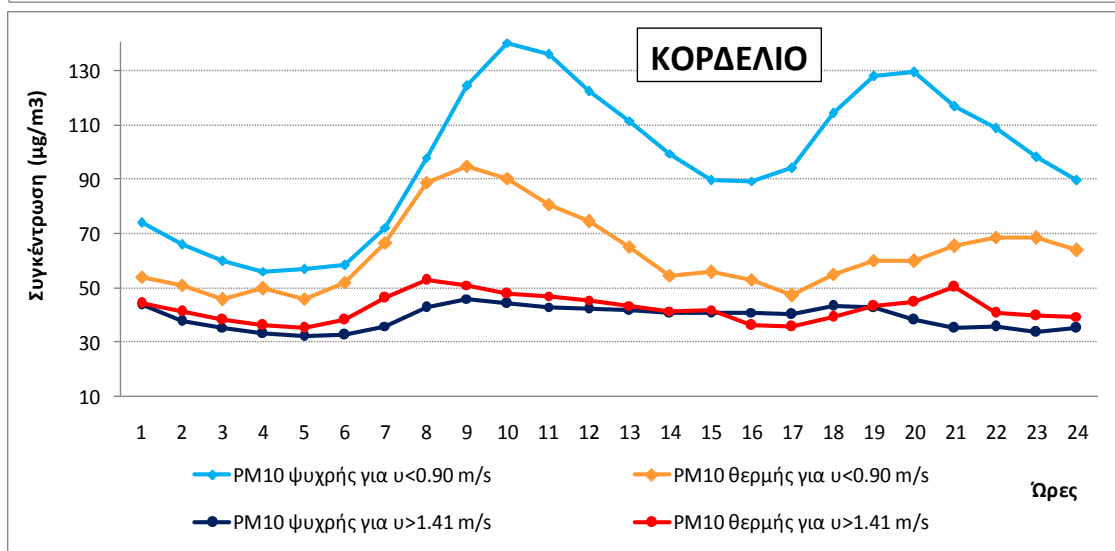
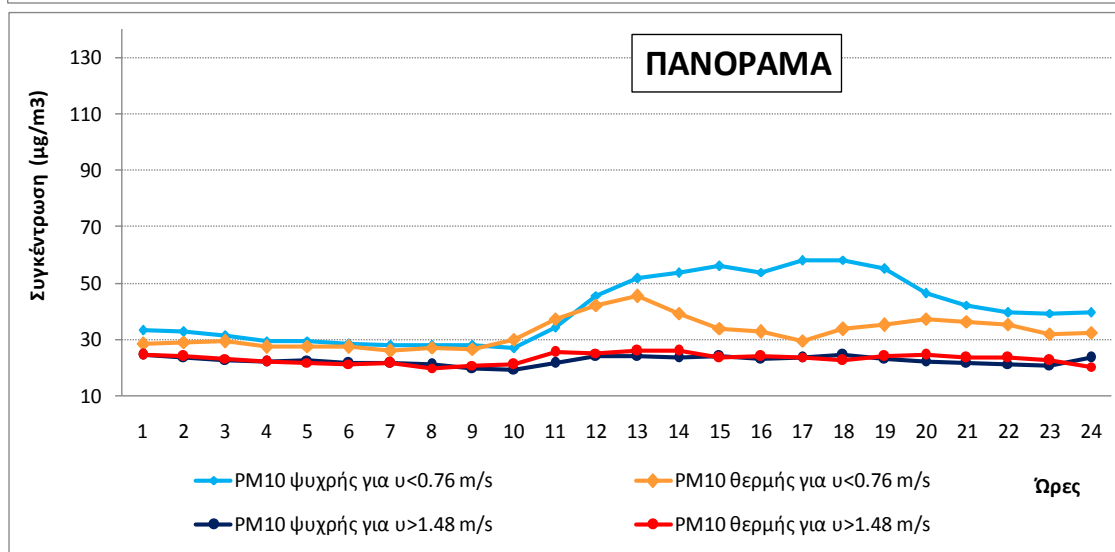
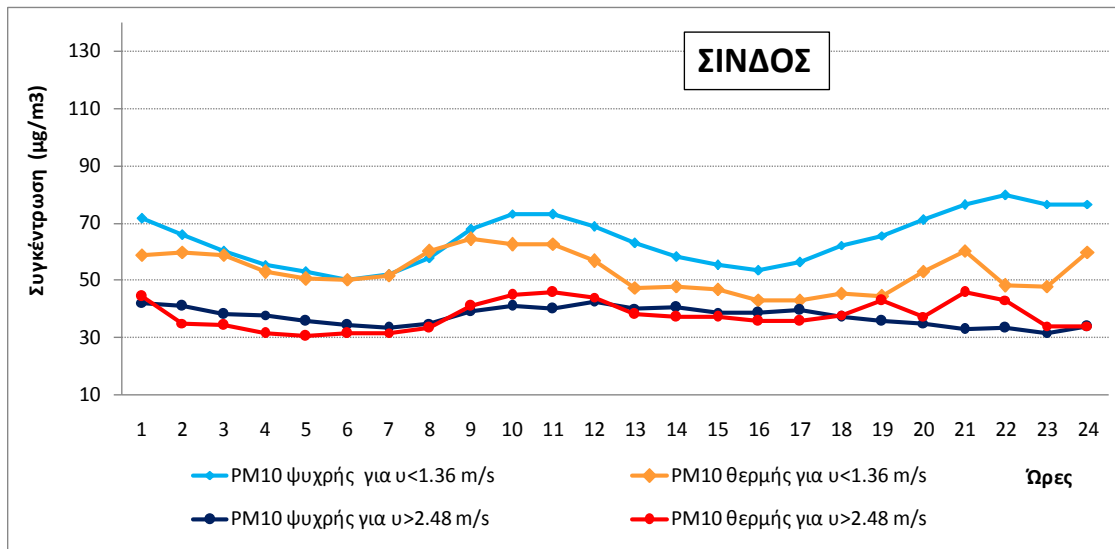
Στη συνέχεια μελετήθηκε ο ημερήσιος κύκλος της συγκέντρωσης των PM10, για τις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009, τις μέρες κατά τις οποίες ο άνεμος σημείωσε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στα Σχήματα 4.5 και 4.6. Ο ημερήσιος κύκλος των συγκεντρώσεων κατά την ψυχρή και θερμή περίοδο του έτους για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.5: Μέσος ημερήσιος κύκλος συγκέντρωσης PM10, για το κατώφλι των χαμηλών ταχυτήτων κάθε σταθμού, για κάθε μία από τις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009.



Σχήμα 4.6: Μέσος ημερήσιος κύκλος συγκέντρωσης PM10, για το κατώφλι των υψηλών ταχυτήτων κάθε σταθμού, για κάθε μία από τις τέσσερις εποχές της περιόδου 2001-2009.



Σχήμα 4.7: Μέσος ημερήσιος κύκλος συγκέντρωσης PM10, για το κατώφλι των χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων, κατά τη θερμή και ψυχρή περίοδο της χρονοσειράς 2001 – 2009.

Από τη μελέτη των Σχημάτων 4.5 , 4.6 και 4.7 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Κατά τις μέρες που πνέουν χαμηλής έντασης άνεμοι, παρατηρείται στους σταθμούς Κορδελιού και Πανοράματος η εξής σταδιακή εποχική διακύμανση στις συγκεντρώσεις PM10:

$$PM10_{\text{χειμώνα}} > PM10_{\text{φθινόπωρο}} > PM10_{\text{άνοιξη}} > PM10_{\text{καλοκαίρι}}$$

Η σειρά αυτή δεν ισχύει και για τον σταθμό της Σίνδου, που παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις το φθινόπωρο από ότι το χειμώνα, και χαμηλότερες συγκεντρώσεις την άνοιξη από ότι το καλοκαίρι. Όλοι οι σταθμοί εκτός του Πανοράματος, παραβιάζουν το όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ όλες τις εποχές του χρόνου και όλο το 24ωρο, όταν ο άνεμος πνέει με χαμηλή ένταση. Εξαιρέση σε αυτό αποτελεί ο σταθμός της Σίνδου την άνοιξη, όπου οι συγκεντρώσεις των PM10 είναι κάτω του ορίου από τις 12 το μεσημέρι μέχρι αργά το βράδυ. Στο σταθμό του Πανοράματος, υπερβάσεις του ορίου των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σημειώνονται μόνο την εποχή του χειμώνα, από τις 2 το μεσημέρι μέχρι τις 7 το απόγευμα.

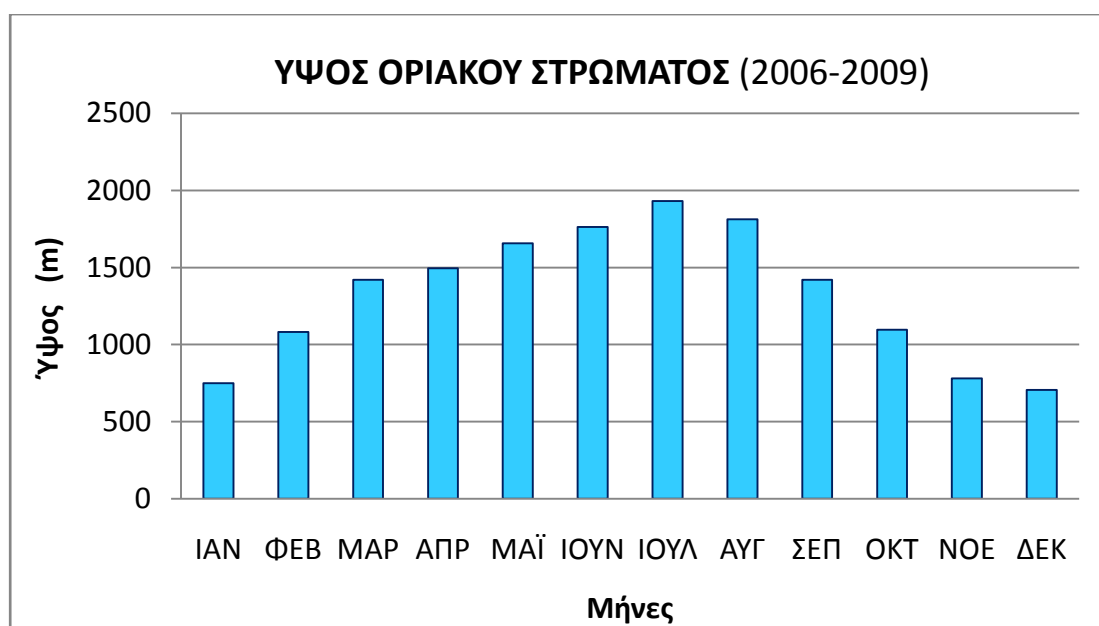
Τις μέρες κατά τις οποίες εμφανίζονται υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι συγκεντρώσεις δεν παρουσιάζουν έντονη διακύμανση. Στο σταθμό του Πανοράματος τείνουν να σταθεροποιηθούν γύρω από τα $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ο σταθμός της Σίνδου εμφανίζει συγκεντρώσεις κάτω από το όριο για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, όλες τις εποχές του έτους. Οι συγκεντρώσεις στο σταθμό του Κορδελιού κυμαίνονται κοντά στην τιμή των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και μόνο την εποχή της άνοιξης υπερβαίνουν αυτήν τη τιμή τις πρωινές ώρες 8 – 12 το μεσημέρι.

Από τα διαγράμματα του Σχήματος 4.6 φαίνεται καθαρά πως οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζονται την ψυχρή περίοδο του έτους, τις μέρες με ασθενείς ανέμους, σε όλους τους σταθμούς. Τις μέρες με υψηλές ταχύτητες ανέμου δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στις συγκεντρώσεις της ψυχρής και θερμής περιόδου όλης της χρονιάς. Φαίνεται πως ο άνεμος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός μηχανισμός στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τους σωματιδιακούς ρύπους.

4.2 Συσχέτιση του ύψους του οριακού στρώματος (BLH) με τις συγκεντρώσεις των PM10

Στη διαμόρφωση της ημερήσιας πορείας των αιωρούμενων σωματιδίων στη Θεσσαλονίκη, σημαντική είναι η συμβολή των μετεωρολογικών παραμέτρων, που ακολουθούν ένα συγκεκριμένο ημερήσιο κύκλο, όπως το μετεωρολογικό ύψος ανάμειξης. Το ύψος του οριακού στρώματος (**B**oundary **L**ayer **H**eight) ευνοεί τη διασπορά των αιωρούμενων σωματιδίων τις πρώτες απογευματινές ώρες και τη συσσώρευση νωρίς το πρωί και αργά το βράδυ.

Το Σχήμα 4.8 δείχνει την μηνιαία διακύμανση του οριακού στρώματος, για την περίοδο 2006-2009. Τα δεδομένα προέρχονται από το Ευρωπαϊκό μοντέλο ECMWF (ανάλυση $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), για κάθε ημέρα στις 12 UTC και παραχωρήθηκαν ευγενικά από το αεροδρόμιο Μακεδονία.



Σχήμα 4.8: Μέση μηνιαία διακύμανση του οριακού στρώματος για τη Θεσσαλονίκη την περίοδο 2006-2009.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, το οριακό στρώμα παρατηρείται σε όλο και μεγαλύτερα ύψη, από τις αρχές του έτους μέχρι τον Ιούλιο. Φτάνει στο μέγιστο ύψος κατά την περίοδο του καλοκαιριού, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ έντονη και ευνοεί την ανάπτυξη στροβίλων. Με το τέλος της θερινής περιόδου το οριακό στρώμα σταδιακά χαμηλώνει μέχρι το Δεκέμβρη που αποκτά ελάχιστη τιμή (706 m).

Επειδή η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και το ύψος του οριακού στρώματος ακολουθούν κανονική κατανομή, υπολογίστηκε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r κατά Pearson, μεταξύ των δύο παραμέτρων. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.2. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για επίπεδο σημαντικότητας 0.05. Στον Πίνακα 4.2 οι έντονα κόκκινες τιμές αντιστοιχούν σε στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης r .

Πίνακας 4.2: Συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson, του ύψους του οριακού στρώματος με τις συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της Περιφέρειας, για κάθε μήνα της περιόδου 2006-2009. Οι έντονα κόκκινες τιμές αντιστοιχούν σε στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης, για το επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

	Σίνδος	Πανόραμα	Κορδελιό	Αγ. Σοφίας
Ιανουάριος	-0.37	-0.33	-0.47	-0.32
Φεβρουάριος	-0.48	-0.45	-0.50	-0.47
Μάρτιος	-0.11	-0.33	-0.17	-0.09
Απρίλιος	-0.05	-0.24	-0.17	-0.36
Μάιος	-0.09	0.14	0.05	-0.06
Ιούνιος	0.07	-0.07	0.04	0.06
Ιούλιος	0.44	0.31	0.26	0.22
Αύγουστος	0.17	-0.23	0.25	0.16
Σεπτέμβριος	-0.16	-0.22	-0.03	-0.10
Οκτώβριος	-0.15	-0.29	-0.27	-0.31
Νοέμβριος	-0.16	-0.44	-0.45	-0.04
Δεκέμβριος	-0.44	-0.44	-0.51	-0.47

Σύμφωνα με τους νόμους της στατιστικής ισχύει ότι:

- Αν $-0,3 \leq r < 0,3$ **δεν υπάρχει γραμμική** συσχέτιση⁴.
- Αν $-0,5 < r \leq -0,3$ ή $0,3 \leq r < 0,5$ υπάρχει **ασθενής γραμμική** συσχέτιση.
- Αν $-0,7 < r \leq -0,5$ ή $0,5 \leq r < 0,7$ υπάρχει **μέση γραμμική** συσχέτιση.
- Αν $-0,8 < r \leq -0,7$ ή $0,7 \leq r < 0,8$ υπάρχει **ισχυρή γραμμική** συσχέτιση.
- Αν $-1 < r \leq -0,8$ ή $0,8 \leq r < 1$ υπάρχει **πολύ ισχυρή γραμμική** συσχέτιση.
- Αν $r = \pm 1$ υπάρχει **τέλεια γραμμική** συσχέτιση

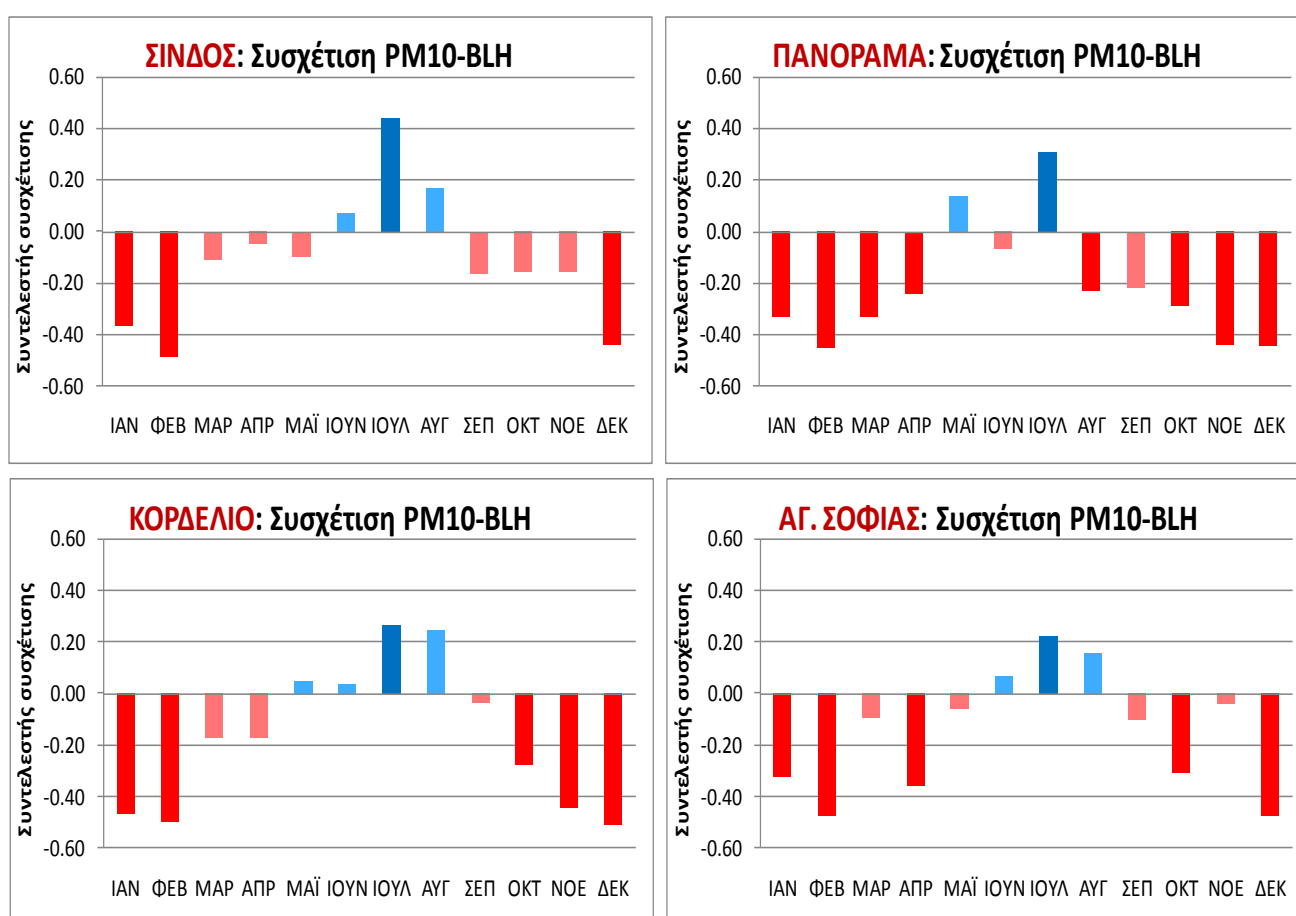
Από τη μελέτη των τιμών του Πίνακα 4.2 προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις. Τη χειμερινή περίοδο, οι συγκεντρώσεις PM10 όλων των σταθμών της Περιφέρειας εμφανίζουν ασθενή γραμμική συσχέτιση με τα ύψη του οριακού στρώματος. Ο συντελεστής συσχέτισης r παίρνει αρνητικές τιμές, γεγονός που φανερώνει ότι τα δύο μεγέθη αντιμεταβάλλονται. Δηλαδή, όσο μειώνεται το ύψος του οριακού στρώματος, τόσο αυξάνουν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι μεγαλύτερες τιμές συντελεστών συσχέτισης σημειώνονται το Δεκέμβριο και το Φεβρουάριο σε όλους τους σταθμούς μελέτης.

Ο σταθμός του Πανοράματος είναι αυτός που εμφανίζει τις περισσότερες στατιστικά σημαντικές τιμές του δείκτη r . Εκτός από τη χειμερινή περίοδο όπου εμφανίζεται ασθενής συσχέτιση μεταξύ του BLH και των PM10, σε όλους τους σταθμούς παρατηρείται και μία θετική γραμμική συσχέτιση τον Ιούλιο, με μέγιστη τιμή στον, σταθμό της Σίνδου ($r=0.44$). Όσο αυξάνει το ύψος του οριακού στρώματος φαίνεται να αυξάνουν και οι τιμές των PM10. Από τη μελέτη του μέσου εποχιακού κύκλου των συγκεντρώσεων των PM10 που πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 3.2, φάνηκε ότι το μήνα Ιούλιο οι συγκεντρώσεις των PM10 παίρνουν ελάχιστη τιμή. Το αποτέλεσμα της θετικής συσχέτισης ίσως να οφείλεται στους δευτερογενείς σωματιδιακούς ρύπους που σχηματίζονται από πρωτογενείς ρύπους με τη συμβολή

⁴ Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει άλλου είδους συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών

της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι υπόλοιποι σταθμοί δεν εμφανίζουν κάποια συσχέτιση τον Ιούλιο γιατί ο συντελεστής r παίρνει τιμές μικρότερες του 0.3 .

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.2 κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα του Σχήματος 4.9. Στα τέσσερα αυτά διαγράμματα παρουσιάζεται εποχιακός κύκλος του συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson, μεταξύ του ύψους του οριακού στρώματος BLH και της συγκέντρωσης των PM10 όλων των σταθμών της Περιφέρειας, την περίοδο 2006-2009.



Σχήμα 4.9: Μηνιαία μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson, μεταξύ του ύψους του οριακού στρώματος και της συγκέντρωσης των PM10 όλων των σταθμών της Περιφέρειας, την περίοδο 2006-2009. Τα έντονα χρώματα υποδηλώνουν στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης.

4.3 Συσχέτιση του συντελεστή εξαερισμού f_v με τις συγκεντρώσεις των PM10

Ο συντελεστής εξαερισμού f_v (ventilation coefficient) ορίζεται από το γινόμενο της ταχύτητας του ανέμου και του ύψους του οριακού στρώματος. Είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την ικανότητα της ατμόσφαιρας να διασκορπίζει τους ατμοσφαιρικούς ρύπου (Μελάς, 2004) και δίνεται από την εξίσωση:

$$f_v = V \cdot z_i$$

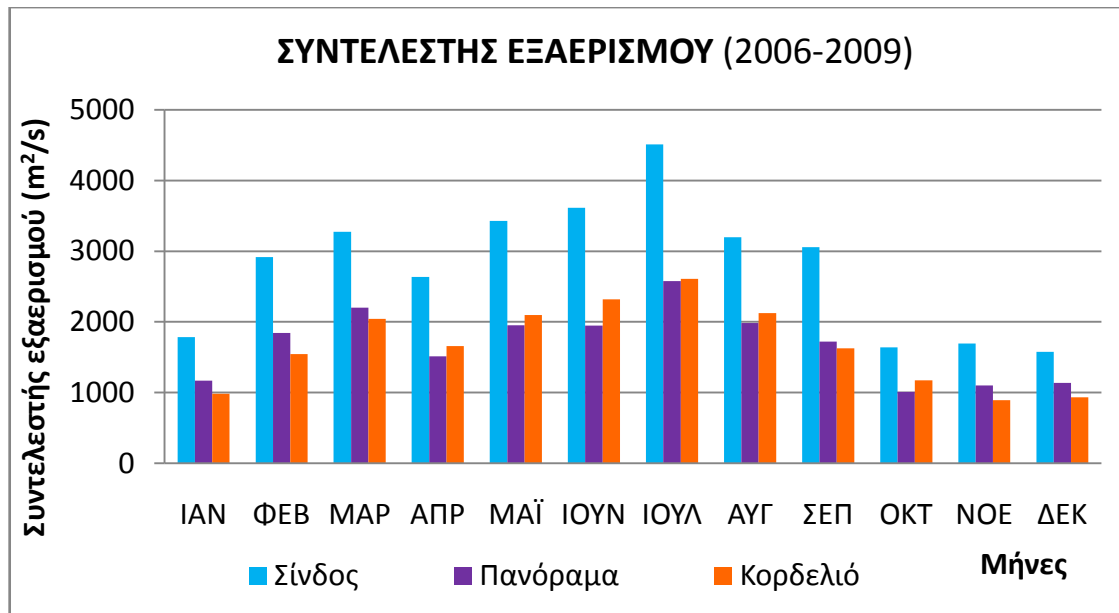
όπου V = ταχύτητα του ανέμου

z_i = ύψος του οριακού στρώματος

Οι συγκεντρώσεις των σωματιδιακών ρύπων μεταβάλλονται αντιστρόφως ανάλογα με το συντελεστή εξαερισμού. Μεγάλες τιμές του συντελεστή f_v φανερώνουν συνθήκες που ευνοούν την αραιώση των ρύπων με συνέπεια μικρές συγκεντρώσεις PM10. Αντιθέτως, μικρές τιμές του συντελεστή f_v υποδηλώνουν δυσμενείς συνθήκες διασποράς και κατ' επέκταση μεγάλες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων.

Το Σχήμα 4.10 δείχνει την μηνιαία διακύμανση του συντελεστή εξαερισμού, για τους σταθμούς Σίνδου, Πανοράματος και Κορδελιού, την περίοδο 2006-2009. Οι τρεις αυτοί σταθμοί είναι οι μόνοι που διαθέτουν δεδομένα ταχύτητας ανέμου την περίοδο 2006-2009, περίοδο κατά την οποία διατίθενται από το αεροδρόμιο Μακεδονία δεδομένα ύψους του οριακού στρώματος.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.10 ο συντελεστής f_v παίρνει την ελάχιστη τιμή του το μήνα Νοέμβρη και στους τρεις σταθμούς μελέτης. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις μέγιστες συγκεντρώσεις PM10 που παρατηρήθηκαν το Νοέμβριο στους σταθμούς της Σίνδου και του Κορδελιού. Ο συντελεστής f_v θα μπορούσε να δικαιολογήσει τις υψηλές ή χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε μια επιβαρυμένη περιοχή από αιωρούμενα σωματίδια, άρα όχι στην περιοχή του Πανοράματος όπου καταγράφεται κυρίως το αστικό υπόβαθρο ρύπανσης.



Σχήμα 4.10: Μέση μηνιαία διακύμανση του συντελεστή εξαερισμού στους σταθμούς της Σίνδου, του Πανοράματος και του Κορδελιού, την περίοδο 2006-2009.

Ο Ιούλιος είναι ο μήνας όπου εμφανίζεται μέγιστη τιμή στο συντελεστή εξαερισμού και στους τρεις σταθμούς μελέτης, γεγονός που συμβαδίζει με τις χαμηλές συγκεντρώσεις PM10 που παρατηρήθηκαν στους σταθμούς κατά τη θερινή περίοδο του έτους (παράγραφος 3.2).

Ο σταθμός της Σίνδου παρουσιάζει μεγαλύτερο συντελεστή f_v από ότι ο σταθμός του Κορδελιού, λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων ανέμου που σημειώνονται στην περιοχή. Η Σίνδος, παρότι είναι βιομηχανική περιοχή, εμφανίζει χαμηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων από ότι το κέντρο της πόλης. Αυτό οφείλεται αφενός στις χαμηλότερες συγκεντρώσεις που σημειώνονται στην περιοχή και αφετέρου στις καλύτερες συνθήκες εξαερισμού που οδηγούν στην καλύτερη κυκλοφορία του αέρα.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης r κατά Pearson, μεταξύ των συγκεντρώσεων PM10 των τριών σταθμών της Περιφέρειας και του συντελεστή εξαερισμού f_v . Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.3, όπου οι έντονα κόκκινες τιμές αντιστοιχούν σε στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

Πίνακας 4.3: Συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson, του συντελεστή εξαερισμού f_v με τις συγκεντρώσεις PM10 των σταθμών της Περιφέρειας, για κάθε μήνα της περιόδου 2006-2009. Οι έντονα κόκκινες τιμές αντιστοιχούν σε στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης, για το επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

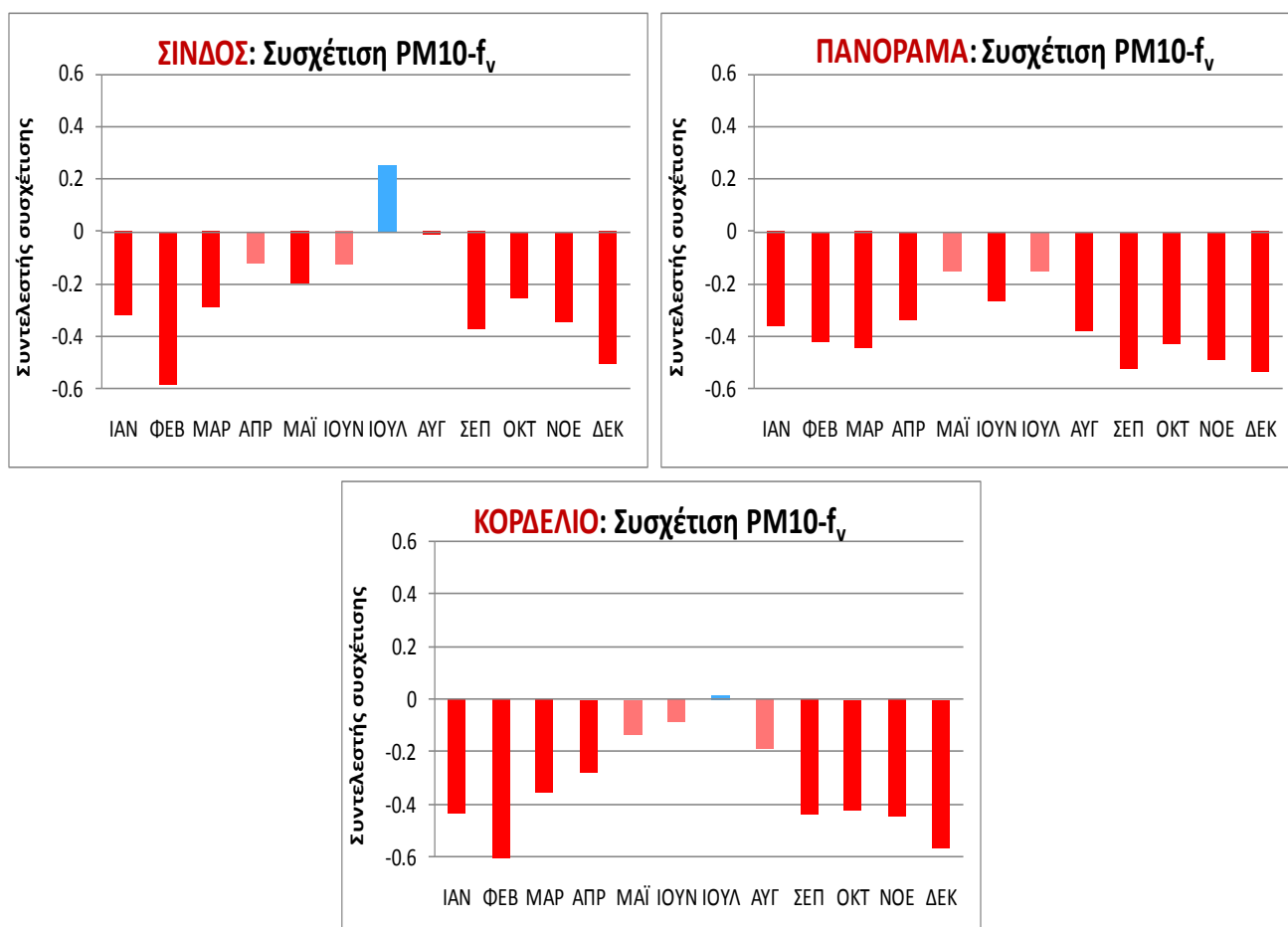
	Σίνδος	Πανόραμα	Κορδελιό
Ιανουάριος	-0.32	-0.36	-0.43
Φεβρουάριος	-0.58	-0.42	-0.61
Μάρτιος	-0.29	-0.44	-0.35
Απρίλιος	-0.12	-0.33	-0.28
Μάιος	-0.20	-0.15	-0.14
Ιούνιος	-0.12	-0.26	-0.09
Ιούλιος	0.25	-0.15	0.01
Αύγουστος	-0.01	-0.38	-0.19
Σεπτέμβριος	-0.37	-0.52	-0.44
Οκτώβριος	-0.25	-0.43	-0.42
Νοέμβριος	-0.34	-0.49	-0.45
Δεκέμβριος	-0.50	-0.53	-0.57

Από την μελέτη των τιμών του Πίνακα 4.3 προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις. Όλοι οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συσχέτισης μεταξύ του συντελεστή εξαερισμού f_v και των PM10 είναι αρνητικοί, γεγονός που φανερώνει ότι τα δύο μεγέθη αντιμεταβάλλονται. Όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή εξαερισμού αυξάνουν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, κάτι που οφείλεται σε δυσμενείς συνθήκες διασποράς. Η μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση παρατηρείται το Φεβρουάριο στον σταθμό του Κορδελιού ($r = -0.61$).

Την ψυχρή περίοδο του έτους, από τον Σεπτέμβρη μέχρι τον Φεβρουάριο, παρατηρείται μια μικρή ως μέση συσχέτιση σε όλους τους σταθμούς μελέτης, ενώ τη θερμή περίοδο η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι ασθενής έως ανύπαρκτη ($r < 0,3$). Αυτό δείχνει ότι την ψυχρή περίοδο όπου σημειώνονται χαμηλές τιμές στον συντελεστή εξαερισμού αναμένονται υψηλές συγκεντρώσεις PM10, κάτι που

πράγματι συμβαίνει. Τη θερμή περίοδο η συσχέτιση είναι πιο ασθενής σε σχέση με την ψυχρή περίοδο. Ο συντελεστής εξαερισμού παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές τη θερμή περίοδο και οι συγκεντρώσεις των PM10 αναμένονται χαμηλές όταν η συσχέτιση είναι ασθενής. Δεν αξιολογούνται αποτελέσματα που δεν παρουσιάζουν συσχέτιση ή δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.3 κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα του Σχήματος 4.11, στα οποία παρουσιάζονται ο εποχιακός κύκλος του συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson μεταξύ του συντελεστή εξαερισμού f_v και των συγκεντρώσεων των PM10 των σταθμών της Περιφέρειας.



Σχήμα 4.11: Εποχιακός κύκλος του συντελεστή συσχέτισης κατά Pearson, μεταξύ του συντελεστή εξαερισμού f_v και της συγκέντρωσης των PM10 όλων των σταθμών της Περιφέρειας, την περίοδο 2006-2009. Το έντονο κόκκινο χρώμα υποδηλώνει στατιστικά σημαντικούς συντελεστές συσχέτισης.

4.4 Μελέτη της επίδρασης της βροχής στην κατανομή των PM10

Η βροχή αποτελεί έναν από τους μηχανισμούς απομάκρυνσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα, καθώς προκαλεί τη δέσμευση και την κατακρήμνιση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Η αποτελεσματικότητά της στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας εξαρτάται από την ένταση και τη διάρκεια του φαινομένου. Η ποσότητα της βροχής που φτάνει στο έδαφος μετράται σε χιλιοστά (mm) ύψους του υδάτινου στρώματος το οποίο σχηματίζεται.

Στην παρούσα εργασία μελετάται το κατά πόσο επιδρά η βροχή στη μείωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων. Δυστυχώς οι σταθμοί του Δήμου και της Περιφέρειας δεν διέθεταν δεδομένα βροχόπτωσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Τομέα Μετεωρολογίας και κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 2001-2005, με την παραδοχή ότι αντιπροσωπεύουν όλους τους σταθμούς του Δήμου και της Περιφέρειας τουλάχιστον για την ψυχρή περίοδο του έτους (Οκτώβριο – Μάρτιο). Οι σταθμοί που βρίσκονται πιο κοντά στον μετεωρολογικό σταθμό του Α.Π.Θ. θα μπορούσαν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα και για τη θερμή περίοδο του έτους (Απρίλιο – Σεπτέμβριο). Τέτοιοι κοντινοί σταθμοί είναι ο σταθμός του Επταπυργίου, της Βενιζέλου και της Αγ. Σοφίας.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με αυτή που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.1. Αρχικά επιλέχθηκαν εκείνες οι μέρες της περιόδου 2001-2005 όπου σημειώθηκε έστω και λίγη βροχή με ύψος $h \geq 0.1$ mm (458 ημέρες). Από αυτές τις μέρες υπολογίστηκαν το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο της χρονοσειράς της βροχόπτωσης και βρέθηκαν ίσα με $Q_1 = 0.6$ mm και $Q_3 = 6.1$ mm αντίστοιχα. Τα ύψη βροχής που είναι μικρότερα ή ίσα από το Q_1 θεωρούνται μικρά ύψη βροχής, ενώ τα ύψη βροχής που είναι μεγαλύτερα ή ίσα από το Q_3 θεωρούνται μεγάλα ύψη βροχής. Από τη χρονοσειρά της βροχόπτωσης επιλέχθηκαν εκείνες οι ημέρες που είχαν ύψη βροχής μεταξύ του διαστήματος $0.1 \leq h < 0.6$ mm (121 ημέρες) (κατώφλι για μικρά ύψη βροχής) και εκείνες οι ημέρες που είχαν ύψη βροχής μεγαλύτερα των 6.1 mm

(115 ημέρες) (κατώφλι για μεγάλα ύψη βροχής). Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, αυτών των ημερών, διαμόρφωσαν τις κατανομές σωματιδιακής ρύπανσης κατά τις μέρες που σημειώθηκαν μικρά και μεγάλα ύψη βροχής. Το στατιστικό δείγμα μελέτης ήταν μικρό. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται ο αριθμός των ημερών κάθε μήνα της περιόδου 2001-2005, όπου εμφανίστηκαν μικρά και μεγάλα ύψη βροχής

Πίνακας 4.4: Αριθμός ημερών όπου εμφανίστηκαν μεγάλα και μικρά ύψη βροχής, κατά την περίοδο 2001-2005.

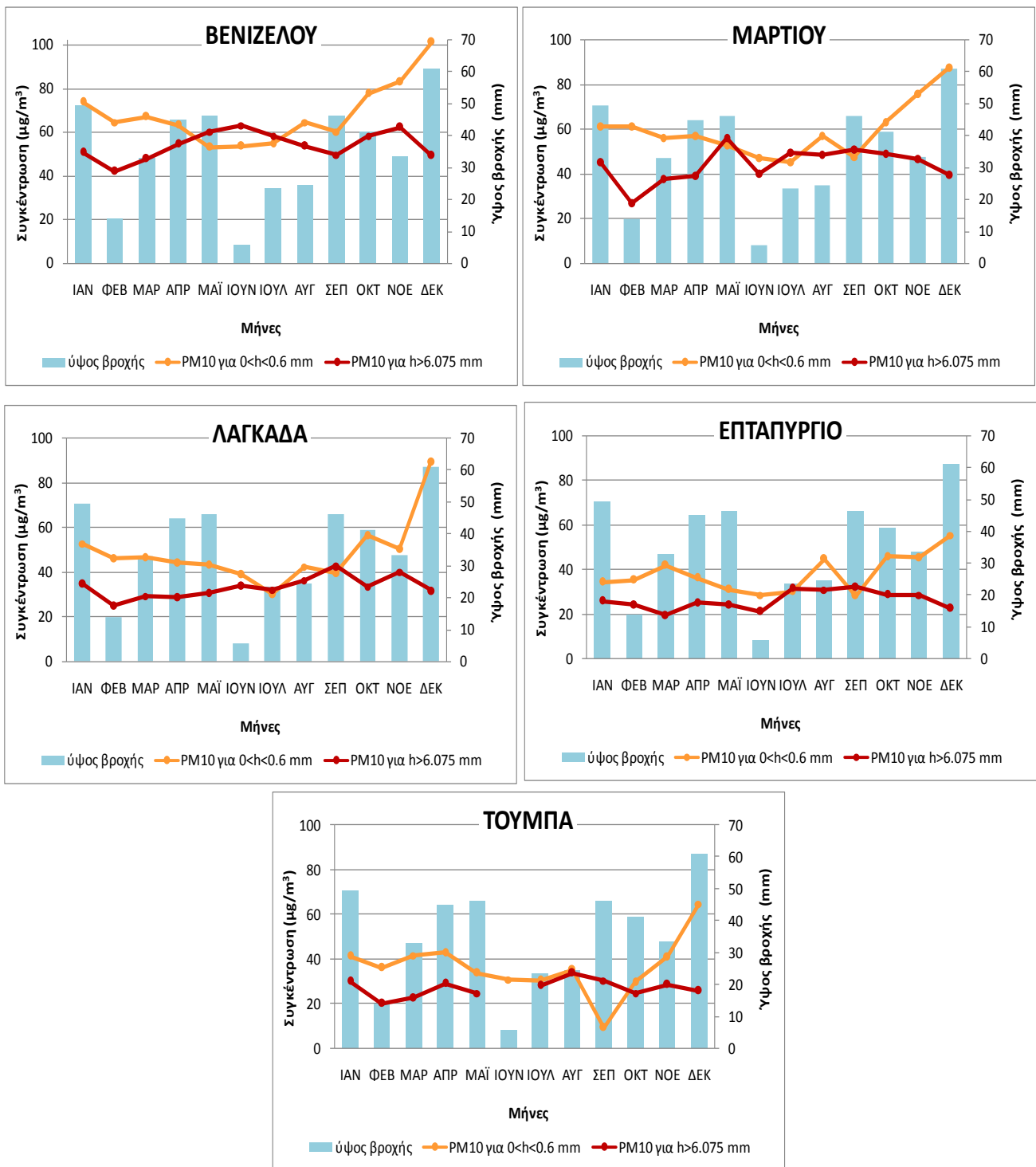
	Αριθμός ημερών με ύψη βροχής $h < 0.6mm$	Αριθμός ημερών με ύψη βροχής $h > 6.1mm$
Ιανουάριος	14	12
Φεβρουάριος	7	1
Μάρτιος	17	6
Απρίλιος	14	14
Μάιος	7	11
Ιούνιος	18	1
Ιούλιος	8	7
Αύγουστος	3	7
Σεπτέμβριος	4	10
Οκτώβριος	8	12
Νοέμβριος	9	13
Δεκέμβριος	12	21
Σύνολο	121	115

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μέσης εποχιακής συγκέντρωση PM10 των σταθμών του Δήμου, για τις μέρες με μικρά και μεγάλα ύψη βροχής κατά την περίοδο 2001–2005. Στο ίδιο διάγραμμα κάθε σταθμού παρουσιάζεται και η εποχιακή κατανομή της βροχόπτωσης του μετεωρολογικού σταθμού Α.Π.Θ. κατά την ίδια περίοδο. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους σταθμούς της Περιφέρειας παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.12.

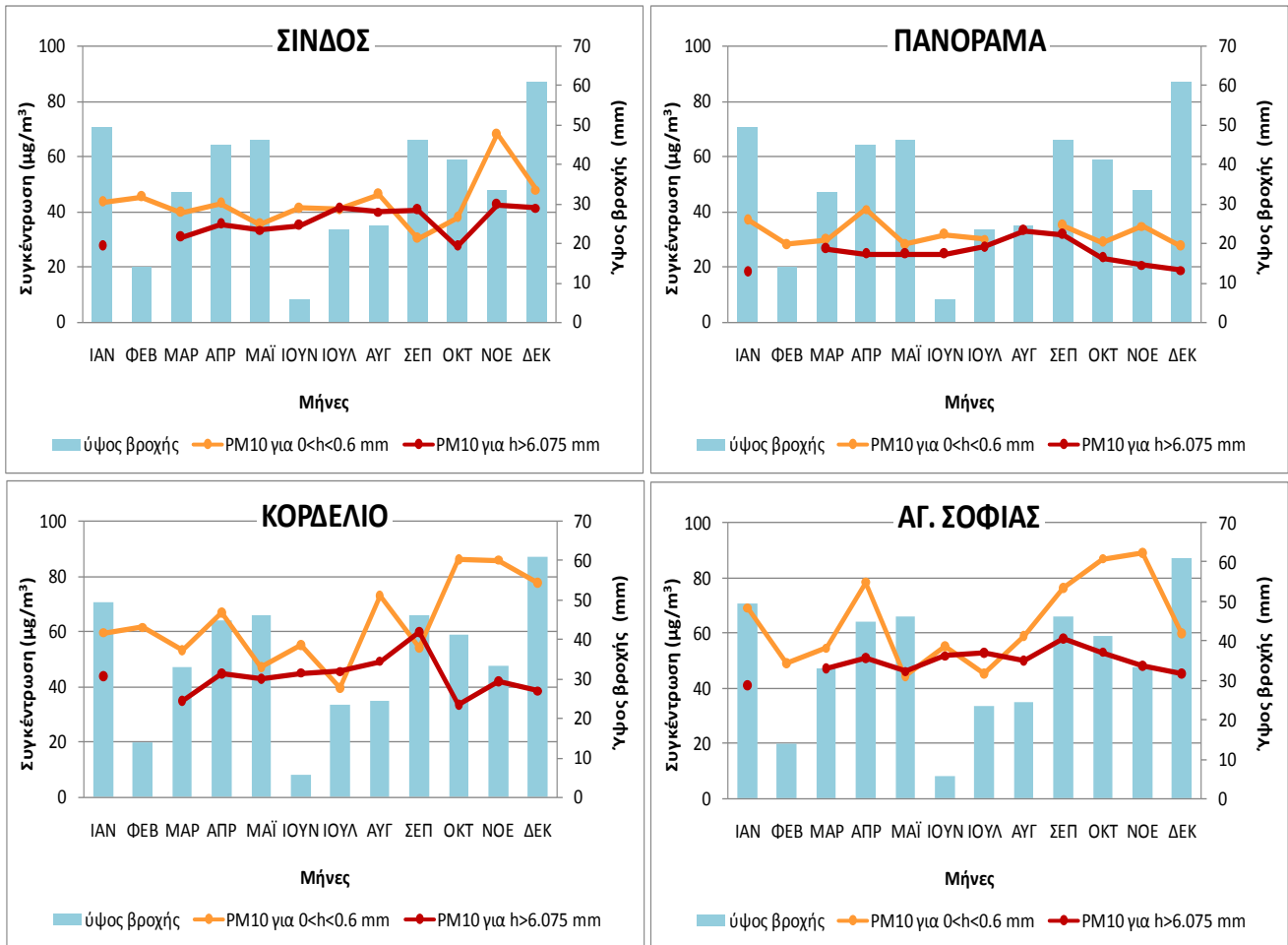
Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο, παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς του Δήμου και της Περιφέρειας μία πτώση των συγκεντρώσεων των PM10, τις μέρες που τα ύψη βροχής ήταν πάνω από 6.1 mm. Η πτώση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική το Νοέμβριο, όπου εμφανίζονται μέγιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων σε όλους τους σταθμούς (όπως φάνηκε στην παράγραφο 3.2). Εκτός από το σταθμό της Βενιζέλου που εμφανίζει μέση συγκέντρωση PM10 Νοεμβρίου $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί εμφανίζουν συγκεντρώσεις κάτω από το όριο των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τις μέρες με μεγάλα ύψη βροχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Δεκέμβριο οι συγκεντρώσεις PM10 είναι αρκετά χαμηλές, τις μέρες με υψηλό κατώφλι βροχής, σε όλους τους σταθμούς. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι το μήνα αυτό παρατηρούνται τα περισσότερα χιλιοστά βροχόπτωσης (61.1 mm) στη Θεσσαλονίκη, για την περίοδο 2001-2005.

Οι σταθμοί της Βενιζέλου, του Επταπυργίου και της Αγ. Σοφίας είναι οι πιο κοντινοί σταθμοί στον μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου. Οι συγκεντρώσεις αυτών των σταθμών δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται ιδιαίτερα τη θερμή περίοδο, κατά τις μέρες με υψηλά και χαμηλά χιλιοστά βροχόπτωσης. Εξάιρεση σε αυτό αποτελούν οι συγκεντρώσεις του Απριλίου και του Σεπτεμβρίου στο σταθμό της Αγ. Σοφίας.

Τις μέρες που σημειώνονται χαμηλά χιλιοστά βροχόπτωσης, οι συγκεντρώσεις των PM10 εμφανίζονται υψηλές και παρουσιάζουν μέγιστο τη περίοδο Νοέμβρη-Δεκέμβρη. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρείται στο σταθμό της Βενιζέλου ($101 \mu\text{g}/\text{m}^3$) τον Δεκέμβριο. Δεύτερος σε σειρά έρχεται ο σταθμός του Κορδελιού που σημειώνει τον ίδιο μήνα συγκέντρωση $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

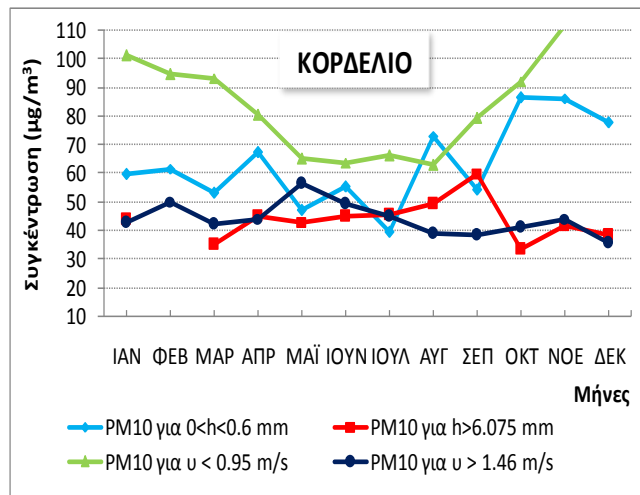
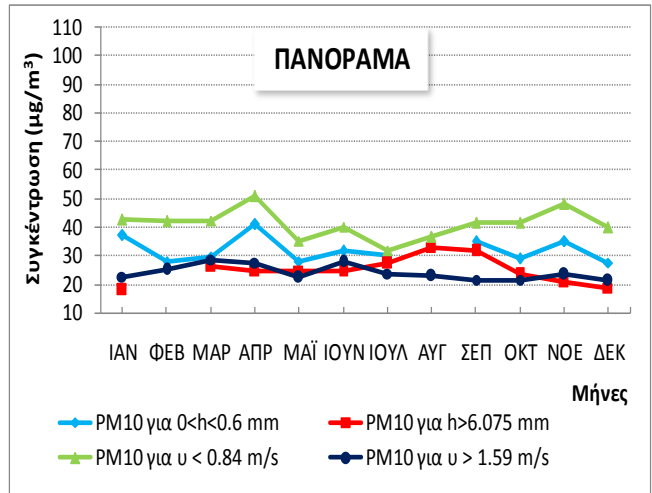
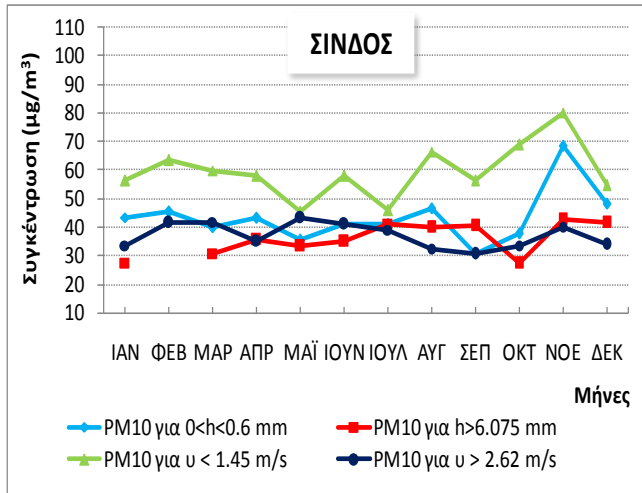
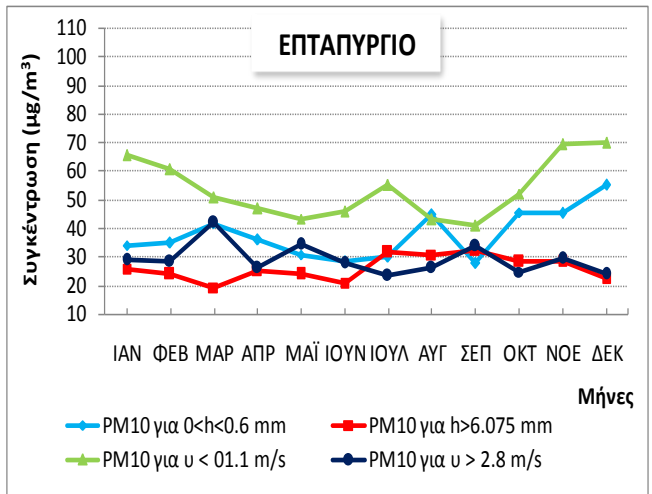
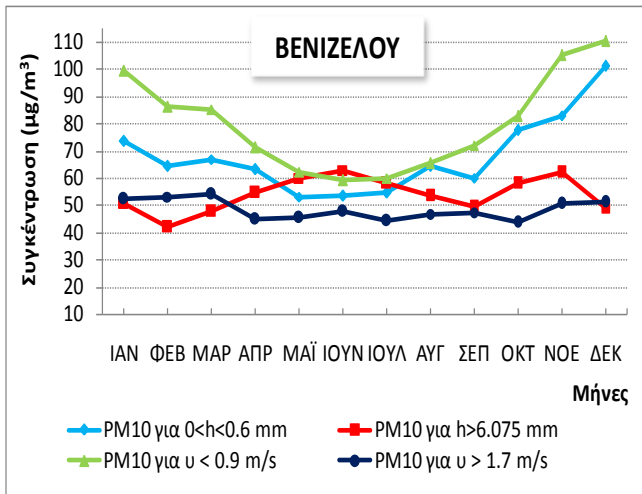


Σχήμα 4.12: Μέση μηνιαία συγκέντρωση PM10 των σταθμών του Δήμου, για τις μέρες με μικρά και μεγάλα ύψη βροχής κατά την περίοδο 2001 – 2005, μαζί με την μηνιαία κατανομή της βροχόπτωσης του μετεωρολογικού σταθμού Α.Π.Θ. ίδιας περιόδου.



Σχήμα 4.13: Μέση μηνιαία συγκέντρωση PM10 των σταθμών της Περιφέρειας, για τις μέρες με μικρά και μεγάλα ύψη βροχής κατά την περίοδο 2001 – 2005, μαζί με την μηνιαία κατανομή της βροχόπτωσης του μετεωρολογικού σταθμού Α.Π.Θ. ίδιας περιόδου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα της μέσης εποχιακής συγκέντρωσης PM10, κατά τις μέρες που σημειώθηκαν χαμηλές ταχύτητες ανέμου, υψηλές ταχύτητες ανέμου, μικρά ύψη βροχής και μεγάλα ύψη βροχής, την περίοδο 2001 – 2005 (Σχήμα 4.14). Στόχος είναι να διαπιστωθεί ποιος παράγοντας, ανάμεσα στον άνεμο και στη βροχή, επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στον καθαρισμό της ατμόσφαιρα.



Σχήμα 4.14: Συγκεντρωτικά διαγράμματα μέσης μηνιαίας συγκέντρωσης PM10, κατά τις μέρες που σημειώθηκαν χαμηλές ταχύτητες ανέμου, υψηλές ταχύτητες ανέμου, μικρά ύψη βροχής και μεγάλα ύψη βροχής, την περίοδο 2001 – 2005.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων του Σχήματος 4.14 προκύπτει ότι οι συγκεντρώσεις των PM10 τις μέρες με υψηλές ταχύτητες ανέμου και τις μέρες με υψηλά χιλιοστά βροχόπτωσης κατά την ψυχρή περίοδο 2001-2005, κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Οι συγκεντρώσεις των PM10 τις μέρες με χαμηλή βροχόπτωση είναι μικρότερες από ότι τις μέρες με χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Αυτό φανερώνει την αποτελεσματικότητα της βροχής στην αποσυμφόρηση της ατμόσφαιρας από τα σωματίδια, που παρασύρονται από τις βροχοσταγόνες και καταλήγουν στο έδαφος.

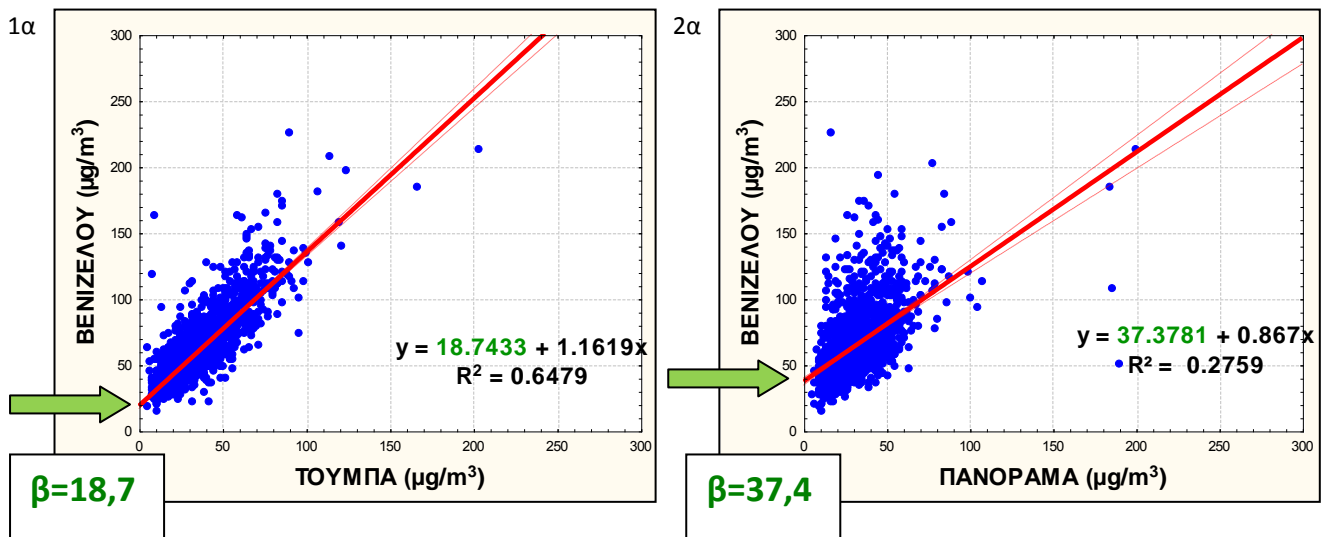
Συνοψίζοντας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο άνεμος και η βροχή συνεισφέρουν περίπου το ίδιο στη μείωση των συγκεντρώσεων και κατ' επέκταση στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας από τα αιωρούμενα σωματίδια. Το αποτέλεσμα αυτό δεν οφείλεται μόνο στη δραστηριότητα της κάθε παραμέτρου, αλλά και στη συχνότητα εμφάνισής της. Η βροχόπτωση, που είναι πολύ αποτελεσματική στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας ακόμα και με μικρά ύψη βροχής, έχει μικρότερη συχνότητα εμφάνισης από ότι ο άνεμος κατά τη διάρκεια του έτους. Αντιθέτως, ο άνεμος που είναι αποτελεσματικός κυρίως σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, συνεισφέρει σημαντικά στην απομάκρυνση των αεροζόλ γιατί έχει μεγάλη συχνότητα εμφάνισης.

4.5 Στατιστική συσχέτιση αστικών και περιαστικών σταθμών

Στην παράγραφο αυτή διερευνάται η συσχέτιση ανάμεσα στις συγκεντρώσεις PM10 των αστικών και των περιαστικών σταθμών, μέσω μιας γραμμικής σχέσης παλινδρόμησης. Στόχος είναι να εκτιμηθεί η συνεισφορά των τοπικών πηγών ρύπανσης στα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης κάθε σταθμού. Περιαστικοί σταθμοί θεωρούνται οι σταθμοί Επταπυργίου, Τούμπας και Πανοράματος. Οι συγκεντρώσεις αυτών των σταθμών συσχετίζονται με τις συγκεντρώσεις των υπολοίπων σταθμών για την περίοδο 2001-2005. Στην πραγματικότητα, μόνο ο σταθμός του Πανοράματος είναι περιαστικός, βρίσκεται δηλαδή έξω από την πόλη με συγκεντρώσεις που εκφράζουν το αστικό υπόβαθρο ρύπανσης. Επειδή όμως οι

σταθμοί Επταπυργίου και Τούμπας χαρακτηρίζονται από το Δήμο ως σταθμοί αστικού υποβάθρου, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθούν ως περιαστικοί, για να μελετηθεί το κατά πόσο οι συγκεντρώσεις τους εκφράζουν το αστικό υπόβαθρο ρύπανσης.

Η μελέτη ξεκινάει με ένα διάγραμμα διασποράς των συγκεντρώσεων των αστικών και των περιαστικών σταθμών. Οι συγκεντρώσεις PM10 των αστικών σταθμών αντιπροσωπεύουν την εξαρτημένη μεταβλητή y ενώ οι συγκεντρώσεις των περιαστικών σταθμών αντιπροσωπεύουν την ανεξάρτητη μεταβλητή x . Ένα παράδειγμα δίνεται στο πρότυπο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.15), όπου παρουσιάζεται η συσχέτιση του αστικού σταθμού της Βενιζέλου (y -μεταβλητή) με τους περιαστικούς σταθμούς της Τούμπας και του Πανοράματος (x -μεταβλητή). Το πράσινο βέλος του σχήματος εστιάζει στην ένδειξη της τομής της ευθείας παλινδρόμησης $y = ax + \beta$, με τον άξονα y . Η ένδειξη αυτή αποτελεί τη σταθερά β (intercept). Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά β , τόσο «καθαρότερος» είναι ο περιαστικός σταθμός σε σχέση με τον αστικό. Η τιμή της σταθεράς β εκφράζει τα $\mu\text{g}/\text{m}^3$ σωματιδιακής ρύπανσης του αστικού σταθμού που οφείλονται σε τοπικές πηγές εκπομπής.



Σχήμα 4.15. Πρότυπο σχήμα όπου απεικονίζεται η συσχέτιση του αστικού σταθμού της Βενιζέλου με τους περιαστικούς σταθμούς της Τούμπας και του Πανοράματος. Το πράσινο βέλος εστιάζει στην τιμή της σταθεράς β , η οποία εκφράζει τα $\mu\text{g}/\text{m}^3$ σωματιδιακής ρύπανσης του αστικού σταθμού που οφείλονται σε τοπικές πηγές εκπομπής.

Από το συσχετισμό των συγκεντρώσεων των δύο σταθμών (αστικού - περιαστικού) προκύπτει η ευθεία παλινδρόμησης με μορφή $y = \alpha x + \beta$. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση α αυτής της ευθείας τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση των δύο μεταβλητών, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά β τόσο «καθαρότερος» είναι ο περιαστικός σταθμός σε σχέση με τον αστικό.

Μαζί με την προσεγγιστική ευθεία της γραμμικής παλινδρόμησης υπολογίζονται και κάποιοι ακόμα στατιστικοί δείκτες για τους διάφορους συνδυασμούς αστικών και περιαστικών σταθμών.

- Ο **συντελεστής συσχέτισης R** δείχνει πόσο έντονα μια αλλαγή στη μια μεταβλητή επηρεάζει την άλλη. Ένας μικρός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά μεταξύ των παρατηρήσεων.
- Ο **συντελεστής καθορισμού R^2** περιγράφει το ποσό της διασποράς που μπορεί να εξηγήσει η ευθεία παλινδρόμησης. Εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής y που εξηγείται από τη μεταβλητή x . Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του R^2 στην μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των δύο μεταβλητών.
- Το **τυπικό σφάλμα εκτιμήσεως** εκφράζει το μέτρο διασποράς των ζευγών (x,y) εκατέρωθεν της ευθείας παλινδρόμησης.
- Το **κριτήριο t-κατανομής του student** δείχνει εάν υπάρχει στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Στον Πίνακα 4.5 προβάλλονται όλοι οι στατιστικοί δείκτες που φανερώνουν την εξάρτηση των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν, στη γραμμική συσχέτιση, για όλες τις μέρες της περιόδου 2001-2005. Στους Πίνακες 4.6 και 4.7 προβάλλονται οι στατιστικοί δείκτες που αναφέρονται στην ψυχρή και θερμή περίοδο αντίστοιχα. Ψυχρή περίοδος θεωρείται η περίοδος από το Νοέμβριο μέχρι το Μάρτιο, ενώ θερμή από το Μάιο μέχρι το Σεπτέμβριο. Στη μελέτη δεν χρησιμοποιούνται οι μήνες Οκτώβριος και Απρίλιος, ως μεταβατικοί μήνες.

Πίνακας 4.5: Στατιστικοί δείκτες που φανερώνουν την γραμμική εξάρτηση των συγκεντρώσεων των αστικών σταθμών από τις συγκεντρώσεις των περιαστικών σταθμών, για την περίοδο 2001-2005.

Σταθμοί	Διαθέσιμες μετρήσεις συσχέτισης αστικού και περιαστικού σταθμού					
	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
Βενιζέλου	1528		1414		1353	
Μαρτίου	1540		1432		1359	
Λαγκαδάς	1525		1418		1356	
Σίνδος	1238		1127		1303	
Κορδελιό	970		908		1065	
Αγ. Σοφίας	842		729		1036	
Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης $y = \alpha x + \beta$						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	α	β	α	β	α	β
Βενιζέλου	1.024	24.22	1.161	18.74	0.867	37.37
Μαρτίου	0.832	24.33	1.027	16.79	0.755	32.11
Λαγκαδάς	1.048	11.52	1.215	5.19	1.006	19.3
Σίνδος	0.663	21.47	0.775	17.74	1.010	14.04
Κορδελιό	1.107	20.19	1.363	12.63	1.138	28.83
Αγ. Σοφίας	1.042	18.05	1.196	14.62	1.269	22.24
Συντελεστής συσχέτισης R Συντελεστής καθορισμού R ²						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Βενιζέλου	0.854	0.729	0.805	0.648	0.526	0.276
Μαρτίου	0.788	0.621	0.838	0.701	0.553	0.306
Λαγκαδάς	0.850	0.723	0.815	0.663	0.588	0.345
Σίνδος	0.742	0.550	0.677	0.458	0.716	0.512
Κορδελιό	0.837	0.700	0.788	0.621	0.606	0.366
Αγ. Σοφίας	0.837	0.700	0.728	0.529	0.663	0.439
Τυπικό σφάλμα εκτιμήσεως (Standard error of estimate) κριτήριο t-student ($t(\infty)=1.96$, $p=0.05$)						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	SE	t	SE	t	SE	t
Βενιζέλου	13.93	33.8	15.95	19.2	23.41	25.9
Μαρτίου	14.28	32.8	12.58	21.9	18.93	27.4
Λαγκαδάς	14.65	15.3	16.30	5.2	23.01	13.5
Σίνδος	13.42	27.5	15.05	16.4	15.32	13.7
Κορδελιό	17.02	18.4	19.86	8.1	26.02	16.3
Αγ. Σοφίας	16.54	15.3	21.18	7.6	23.35	13.1

Πίνακας 4.6: Στατιστικοί δείκτες που φανερώνουν την γραμμική εξάρτηση των συγκεντρώσεων των αστικών σταθμών από τις συγκεντρώσεις των περιαστικών σταθμών, για την ψυχρή περίοδο 2001-2005 (Νοέμβριος-Μάρτιος).

Σταθμοί	Διαθέσιμες μετρήσεις συσχέτισης αστικού και περιαστικού σταθμού για την ψυχρή περίοδο					
	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
Βενιζέλου	614		615		580	
Μαρτίου	628		631		592	
Λαγκαδάς	624		626		590	
Σίνδος	420		420		524	
Κορδελιό	383		399		485	
Αγ. Σοφίας	381		382		490	
Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης $y = \alpha x + \beta$						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	α	β	α	β	α	β
Βενιζέλου	1.054	29.54	1.252	20.38	0.914	47.10
Μαρτίου	0.783	31.59	0.714	18.17	0.713	41.92
Λαγκαδάς	1.081	14.92	1.308	4.25	1.037	27.12
Σίνδος	0.574	25.01	0.729	18.29	0.967	18.42
Κορδελιό	1.113	23.51	1.511	6.51	1.123	37.40
Αγ. Σοφίας	1.043	19.62	1.247	11.87	1.450	21.89
Συντελεστής συσχέτισης R Συντελεστής καθορισμού R ²						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Βενιζέλου	0.881	0.777	0.815	0.664	0.514	0.263
Μαρτίου	0.788	0.621	0.845	0.714	0.525	0.274
Λαγκαδάς	0.869	0.755	0.814	0.662	0.550	0.302
Σίνδος	0.735	0.539	0.662	0.438	0.673	0.452
Κορδελιό	0.819	0.670	0.774	0.599	0.530	0.280
Αγ. Σοφίας	0.869	0.754	0.733	0.536	0.630	0.395
Τυπικό σφάλμα εκτιμήσεως (Standard error of estimate) κριτήριο t-student ($t(\infty)=1.96$, $p=0.05$)						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	SE	t	SE	t	SE	t
Βενιζέλου	15.11	25.5	18.51	11.8	27.80	19.7
Μαρτίου	15.82	25.7	14.00	14.0	20.91	23.3
Λαγκαδάς	16.55	11.8	19.58	2.3	28.50	11.0
Σίνδος	14.68	17.9	16.14	9.1	16.39	10.8
Κορδελιό	21.98	10.9	24.44	2.1	33.34	12.1
Αγ. Σοφίας	16.84	11.8	22.58	4.0	27.00	7.5

Πίνακας 4.7: Στατιστικοί δείκτες που φανερώνουν την γραμμική εξάρτηση των συγκεντρώσεων των αστικών σταθμών από τις συγκεντρώσεις των περιαστικών σταθμών, για την θερμή περίοδο 2001-2005 (Μάιος-Σεπτέμβριος).

Σταθμοί Διαθέσιμες μετρήσεις συσχέτισης αστικού και περιαστικού σταθμού για την θερμή περίοδο						
	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
Βενιζέλου	670		579		549	
Μαρτίου	668		581		547	
Λαγκαδάς	659		574		544	
Σίνδος	629		541		546	
Κορδελιό	439		354		403	
Αγ. Σοφίας	339		249		368	
Εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης $y = \alpha x + \beta$						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	α	β	α	β	α	β
Βενιζέλου	0.831	25.42	0.831	25.25	0.869	26.08
Μαρτίου	0.700	23.79	0.871	20.04	0.769	22.25
Λαγκαδάς	0.812	15.78	0.918	12.80	0.929	13.11
Σίνδος	0.752	18.98	0.826	17.22	0.963	12.01
Κορδελιό	1.068	18.78	1.186	17.80	1.302	14.14
Αγ. Σοφίας	0.887	21.90	0.951	23.11	1.042	21.73
Συντελεστής συσχέτισης R Συντελεστής καθορισμού R ²						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	R	R ²	R	R ²	R	R ²
Βενιζέλου	0.782	0.619	0.700	0.470	0.665	0.441
Μαρτίου	0.718	0.514	0.738	0.544	0.642	0.411
Λαγκαδάς	0.741	0.549	0.710	0.504	0.678	0.458
Σίνδος	0.660	0.435	0.611	0.371	0.677	0.457
Κορδελιό	0.818	0.668	0.752	0.565	0.784	0.614
Αγ. Σοφίας	0.589	0.346	0.501	0.248	0.600	0.359
Τυπικό σφάλμα εκτιμήσεως (Standard error of estimate) κριτήριο t-student ($t(\infty)=1.96$, $p=0.05$)						
Σταθμοί	Επταπύργιο		Τούμπα		Πανόραμα	
	SE	t	SE	t	SE	t
Βενιζέλου	9.49	26.8	10.41	20.4	11.45	17.4
Μαρτίου	9.94	24.0	9.84	17.3	10.73	15.7
Λαγκαδάς	10.82	14.6	11.28	9.5	11.71	8.4
Σίνδος	12.39	14.5	13.09	10.6	12.07	7.5
Κορδελιό	11.29	13.3	12.65	9.1	11.85	7.6
Αγ. Σοφίας	17.10	7.8	19.10	6.0	16.21	8.2

Στα Σχήματα 4.16 – 4.18 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς μεταξύ των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων των αστικών σταθμών και των μέσων ημερήσιων συγκεντρώσεων του σταθμού του Επταπυργίου. Σε κάθε διάγραμμα εμφανίζεται η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης. Τα διαγράμματα διασποράς των αστικών σταθμών με τους άλλους δύο περιφερειακούς σταθμούς, της Τούμπας και του Πανοράματος, παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

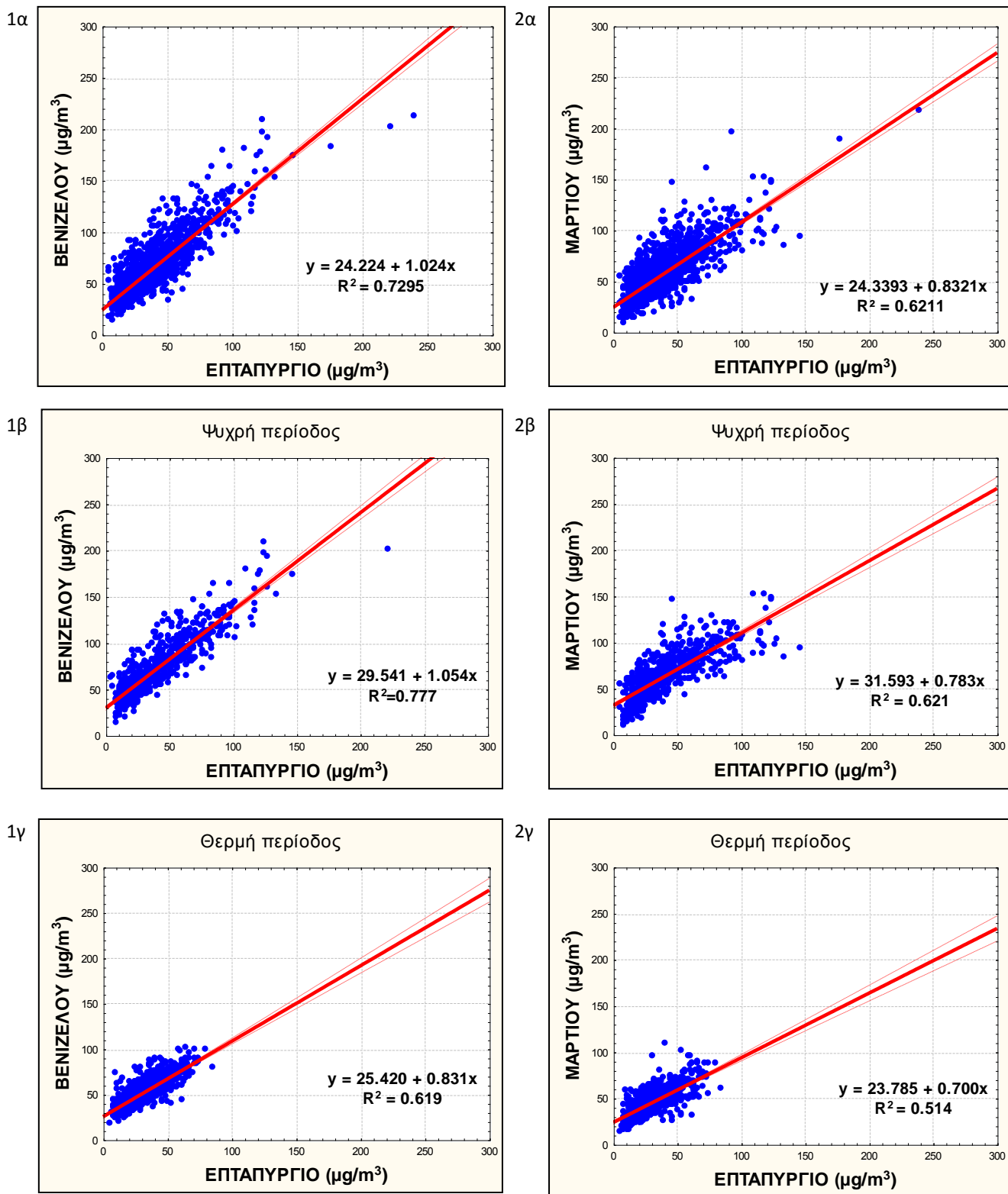
Μια προσέγγιση της σωματιδιακής ρύπανσης, που οφείλονται στις τοπικές δραστηριότητες της πόλης, θα μπορούσε να γίνει από την παρακολούθηση των αντίστοιχων εξισώσεων παλινδρόμησης. Ο σταθμός του Πανοράματος φαίνεται να είναι λιγότερο ρυπασμένος από αιωρούμενα σωματίδια, συγκριτικά με τους άλλους σταθμούς, γιατί εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές στην σταθερά β. Κατά τη συσχέτιση των σταθμών Βενιζέλου-Πανοράματος προέκυψε η τιμή $\beta=37.37$. Αυτό δείχνει ότι για το σταθμό της Βενιζέλου τα $37.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ οφείλονται σε κοντινές αστικές πηγές εκπομπής. Το περιθώριο σφάλματος αυτής της συγκέντρωσης είναι $23.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και είναι αρκετά μεγάλο (ένδειξη SE). Η συσχέτιση των δύο σταθμών δεν είναι έντονη, κάτι που φαίνεται και από τις χαμηλές τιμές των R και R^2 ($R^2=0.276$). Η συσχέτιση των ίδιων σταθμών εμφανίζει ακόμα μεγαλύτερη τιμή στη σταθερά β κατά την ψυχρή περίοδο του έτους ($\beta=47.10$) αλλά όχι ισχυρή συσχέτιση ($R^2=0.263$). Αυτό φανερώνει ότι την ψυχρή περίοδο οι εκπομπές που οφείλονται σε τοπικές πηγές ρύπανσης είναι ακόμα μεγαλύτερες. Αντιθέτως, την θερμή περίοδο η σταθερά β κατά τη συσχέτιση των σταθμών Βενιζέλου – Πανοράματος παίρνει την τιμή $\beta=26.08$, κάτι που φανερώνει χαμηλότερες εκπομπές από τοπικές πηγές.

Από τη μελέτη των στατιστικών δεικτών που παρατίθενται στους Πίνακες 4.5-4.7 φαίνεται ότι ο σταθμός του Επταπυργίου είναι αυτός που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα συσχέτισης στους περισσότερους αστικούς σταθμούς την περίοδο 2001-2005, γιατί εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές στο συντελεστή καθορισμού R^2 . Η συσχέτιση μεταξύ των σταθμών Βενιζέλου-Επταπυργίου έδειξε ότι για το σταθμό της Βενιζέλου, τα $24.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ σωματιδιακής ρύπανσης οφείλονται σε τοπικές αστικές πηγές εκπομπής με περιθώριο σφάλματος $13.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Η σωματιδιακή ρύπανση όλων των αστικών σταθμών καταγραφής, που οφείλεται σε κοντινές τοπικές πηγές

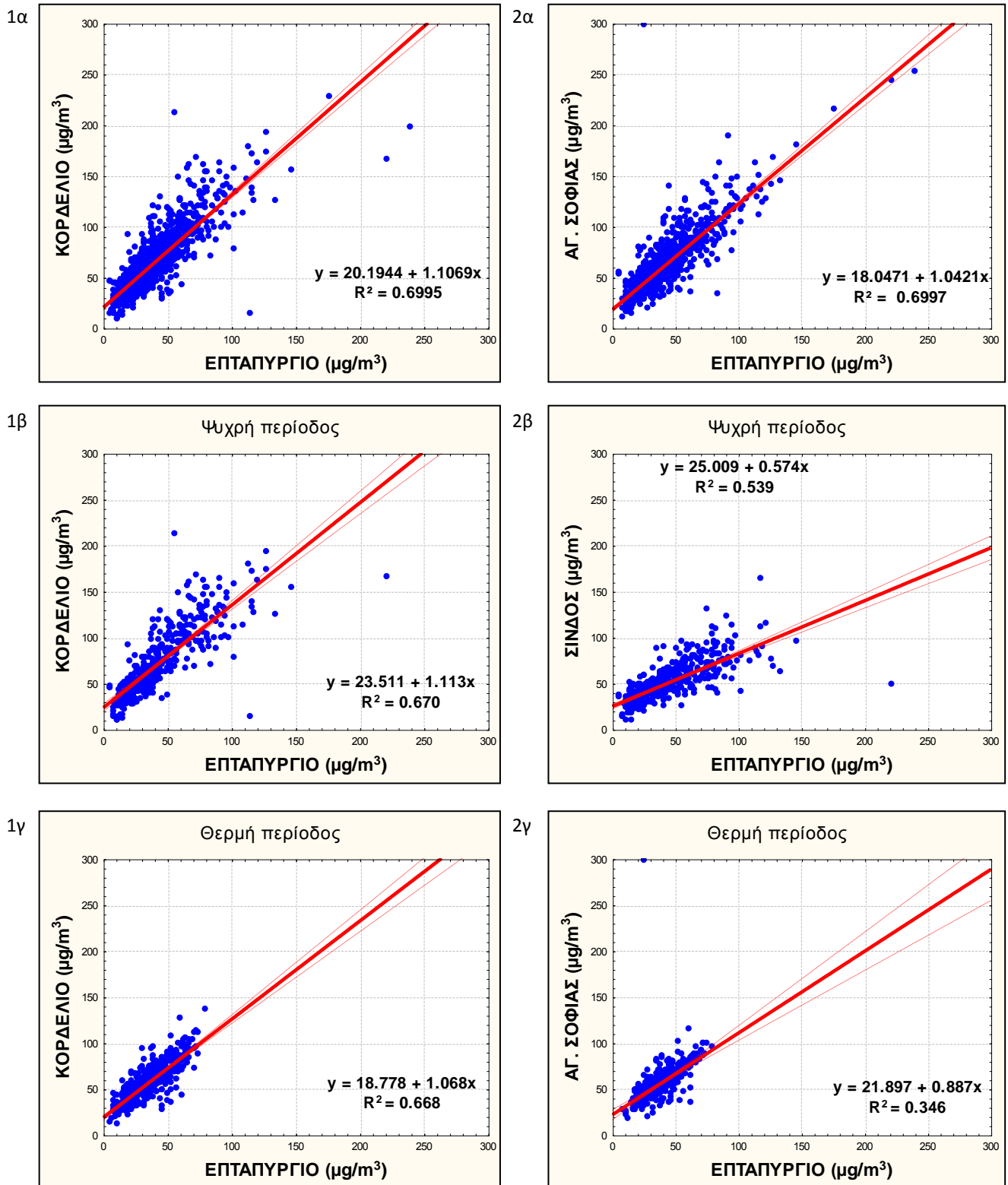
εκπομπής, κυμαίνεται από 11.52 - 24.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η συσχέτιση του Επταπυργίου με τους αστικούς σταθμούς της πόλης είναι ακόμα πιο έντονη την ψυχρή περίοδο του έτους, κυρίως με το σταθμό της Βενιζέλου ($R^2 = 0.777$). Η υψηλή αυτή συσχέτιση θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι δύο σταθμοί βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Οι τιμές της σταθεράς β του Επταπυργίου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του Πανοράματος. Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι ο σταθμός του Επταπυργίου είναι περισσότερο ρυπασμένος από σωματιδιακούς ρύπους σε σχέση με το Πανόραμα και επηρεάζεται περισσότερο από τις τοπικές εκπομπές της πόλης.

Ο σταθμός της Τούμπας φαίνεται να είναι ιδιαίτερα επιβαρημένος από αιωρούμενα σωματίδια, κάτι που επιβεβαιώνουν οι χαμηλές τιμές της σταθεράς β στην εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης. Η συσχέτιση των συγκεντρώσεων του σταθμού αυτού με τις συγκεντρώσεις των σταθμών της Σίνδου και της Αγ. Σοφίας δεν φαίνεται να είναι καλή, αλλά δείχνει να είναι ισχυρή με τις συγκεντρώσεις των υπολοίπων αστικών σταθμών. Επίσης, η επίδραση των τοπικών πηγών σωματιδιακής ρύπανσης στις συγκεντρώσεις των PM10 των αστικών περιοχών της Θεσσαλονίκης, φαίνεται να είναι ισχυρότερη στο σταθμό της Τούμπας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς οι κλίσεις των ευθειών παλινδρόμησης αυτής της περιόδου, αυτού του σταθμού, παίρνουν τη μεγαλύτερη τιμή και υπερβαίνουν τη μονάδα.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων διασποράς φαίνεται ότι η μεγαλύτερη διασπορά σημείων παρουσιάζεται στο διάγραμμα Κορδελιό-Πανόραμα κατά την ψυχρή περίοδο, με τυπικό σφάλμα εκτίμησης στην ευθεία παλινδρόμησης, $SE=33,34$. Σε γενικές γραμμές τα διαγράμματα συσχέτισης του σταθμού του Πανοράματος με τους αστικούς σταθμούς εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σημείων. Η μικρότερη διασπορά σημείων κατά την περίοδο μελέτης όλων των ημερών της περιόδου 2001-2005, παρατηρείται στο διάγραμμα συσχέτισης Σίνδου-Επταπυργίου ($SE=13,42$). Ακόμα μικρότερη διασπορά σημείων παρατηρείται στο διάγραμμα συσχέτισης Βενιζέλου-Επταπύργιο για τη θερμή περίοδο ($SE=9,49$). Η καλύτερη εκτίμηση των τοπικών πηγών σωματιδιακής ρύπανσης με βάση τη συσχέτιση, πραγματοποιείται από τη συσχέτιση των αστικών σταθμών με το σταθμό του Επταπυργίου.



Σχήμα 4.16: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Βενιζέλου-Επταύργιο (1^η στήλη) και Μαρτίου-Επταύργιο (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.



Σχήμα 4.18: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Κορδελιό-Επταπύργιο (1^η στήλη) και Αγ. Σοφίας-Επταπύργιο (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα - προτάσεις

Από τη μελέτη της σωματιδιακής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Διαχρονικά, παρατηρείται **πτωτική τάση** των συγκεντρώσεων των PM10 σε όλους τους σταθμούς του Δημοτικού και Περιφερειακού δικτύου. Αυτό δείχνει ότι ίσως να υπήρξαν παρεμβάσεις από το Δήμο για τη μείωση των σωματιδιακών εκπομπών και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.
- 2) Οι σταθμοί Βενιζέλου, Κορδελιού και Αγ. Σοφίας φαίνεται να είναι οι πιο επιβαρημένοι από αιωρούμενα σωματίδια. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται στο **κέντρο της πόλης**, όπου η κυκλοφορία των αυτοκινήτων είναι έντονη και η απομάκρυνση των σωματιδιακών ρύπων εμποδίζεται εξαιτίας της πυκνής δόμησης.
- 3) Οι σταθμοί που είναι πιο **απομακρυσμένοι από το κέντρο** της πόλης, όπως ο σταθμός της Σίνδου και του Πανοράματος, εμφανίζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ο σταθμός του Επταπυργίου, παρόλο που βρίσκεται στο κέντρο της πόλης, εμφανίζει χαμηλές συγκεντρώσεις λόγω του μεγάλου του υψομέτρου.
- 4) Κατά την **ψυχρή περίοδο** του έτους οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες γιατί εμφανίζεται ο επιπρόσθετος παράγοντας της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων των κατοικιών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη δράση της έντονης κυκλοφοριακής κίνησης, της λειτουργίας της κεντρικής θέρμανσης και της συμβολής δυσμενών τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών, όπως η άπνοια και οι θερμοκρασιακές αναστροφές.

- 5) Ο **Νοέμβριος** είναι ο μήνας του έτους όπου εμφανίζονται μέγιστες συγκεντρώσεις σε όλους τους σταθμούς. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται, αφενός από τις υψηλές συγκεντρώσεις PM10 λόγω της κίνησης των αυτοκινήτων και της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων, και αφετέρου από το ότι το Νοέμβριο το ύψος του οριακού στρώματος είναι ιδιαίτερα χαμηλό, η θαλάσσια αύρα έχει αποδυναμωθεί και οι χειμερινοί άνεμοι των βόρειων διευθύνσεων δεν έχουν ακόμα ενισχυθεί.
- 6) Στη **διάρκεια της ημέρας** εμφανίζονται υψηλές συγκεντρώσεις PM10 κατά τις πρωινές (9:00-11:00) και βραδινές (20:00-24:00) ώρες. Οι υψηλές αυτές συγκεντρώσεις σχετίζονται με τις κυκλοφοριακές αιχμές και το χαμηλό ύψος του οριακού στρώματος που παρατηρείται νωρίς το πρωί και αργά το βράδυ.
- 7) Στην περιοχή του Πανοράματος οι συγκεντρώσεις PM10 παραμένουν σχεδόν σταθερές σε όλη τη διάρκεια του έτους (οι τιμές να κυμαίνονται από 23-37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Η ρύπανση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στο **αστικό υπόβαθρο** ρύπανσης, δηλαδή σωματιδιακή ρύπανση που προέρχεται από φυσικές πηγές εκπομπής και μεταφορά δευτερογενών σωματιδίων από άλλες περιοχές.
- 8) Τα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης στη Θεσσαλονίκη είναι πολύ υψηλά με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σημαντικές **παραβιάσεις** των νομοθετημένων ορίων. Οι συγκεντρώσεις των PM10 στους περισσότερους σταθμούς είναι κατά πολύ πάνω από τα επιτρεπτά όρια. Το ενδεικτικό ετήσιο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που υποτίθεται ότι θα έπρεπε να επιτευχθεί έως το έτος 2010, δεν αποτελεί ρεαλιστικό και προσεγγίσιμο στόχο, με βάση την παρούσα κατάσταση. Η επίτευξη αυτού του στόχου βρίσκεται προφανώς σε άμεση σχέση με τη μείωση της ρύπανσης υποβάθρου. Ο σταθμός του Πανοράματος είναι ο μόνος σταθμός που δεν υπερβαίνει τα θεσμοθετημένα όρια.

- 9) Σε όλους τους σταθμούς οι μέγιστες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζονται όταν πνέει **άνεμος χαμηλής έντασης**, ενώ τις μέρες που σημειώνονται **υψηλές ταχύτητες ανέμου** οι συγκεντρώσεις των PM10 είναι χαμηλότερες και παρουσιάζουν μικρή μεταβολή με τάση σταθεροποίησης. Άνεμος με χαμηλή μέση ταχύτητα, συντελεί στο μικρό βαθμό απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων. Αντίθετα, υψηλές ταχύτητες ανέμου παρασύρουν τους σωματιδιακούς ρύπους, οι οποίοι μεταφέρονται σε πιο απομακρυσμένες περιοχές, με τελικό αποτέλεσμα την αραίωσή τους. Τις μέρες όπου σημειώθηκαν υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι συγκεντρώσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν γύρω από μια τιμή κατά τη διάρκεια της μέρας. Στη Σίνδο και στο Κορδελιό οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται γύρω από τα 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στο Πανόραμα κυμαίνονται γύρω από τα 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- 10) Όλοι οι σταθμοί εκτός του Πανοράματος, παραβιάζουν το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ όλες τις εποχές του χρόνου και όλο το 24ωρο, όταν ο άνεμος πνέει με χαμηλή ένταση.
- 11) Η βροχή φάνηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας, αν και το στατιστικό δείγμα ήταν μικρό. Κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο, παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς του Δήμου και της περιφέρειας μία πτώση των συγκεντρώσεων των PM10, τις μέρες που τα **ύψη βροχής ήταν πάνω από 6.1 mm**.
- 12) Κατά τη μελέτη της συσχέτισης του **ύψους του οριακού στρώματος** με τις συγκεντρώσεις των PM10 βρέθηκε ότι η συσχέτιση είναι μεγαλύτερη την ψυχρή περίοδο του έτους και παίρνει αρνητικές τιμές, γεγονός που φανερώνει ότι τα δύο μεγέθη αντιμεταβάλλονται. Δηλαδή, όσο μειώνεται το ύψος του οριακού στρώματος, αυξάνουν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Ωστόσο, παρατηρείται και μία θετική γραμμική συσχέτιση των

Ιούλιο, κάτι που ίσως οφείλεται στους δευτερογενείς σωματιδιακούς ρύπους που σχηματίζονται από πρωτογενείς με τη συμβολή της ηλιακής ακτινοβολίας.

- 13) Ο **συντελεστής εξαερισμού** παίρνει ελάχιστη τιμή το Νοέμβριο σε όλους τους σταθμούς. Κατά τη μελέτη της συσχέτισης του συντελεστή εξαερισμού f_v και των συγκεντρώσεων των PM10 προέκυψε ότι όλοι οι στατιστικά σημαντικοί συντελεστές συσχέτισης είναι αρνητικοί, γεγονός που φανερώνει ότι τα δύο μεγέθη αντιμεταβάλλονται. Όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή εξαερισμού αυξάνουν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων, κάτι που οφείλεται σε δυσμενείς συνθήκες διασποράς. Μεγαλύτερη συσχέτιση παρατηρείται την ψυχρή περίοδο του έτους.
- 14) Τέλος, έγινε μια προσπάθεια εκτίμησης των συγκεντρώσεων που προέρχονται από τοπικές πηγές εκπομπής με βάση τη συσχέτιση των συγκεντρώσεων PM10 ενός **αστικού και ενός περιαστικού σταθμού**. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από τη συσχέτιση των αστικών σταθμών με το σταθμό του Επταπυργίου. Η σωματιδιακή ρύπανση όλων των αστικών σταθμών καταγραφής, που οφείλεται σε κοντινές τοπικές πηγές εκπομπής, βρέθηκε να κυμαίνεται από 12 - 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ με περιθώριο σφάλματος από 13 – 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Η σωματιδιακή ρύπανση λόγω των τοπικών πηγών εκπομπής ήταν μεγαλύτερη κατά την ψυχρή περίοδο του έτους, με τιμές που κυμαίνονται από 15 – 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Όπως έχει δειχθεί, τα αιωρούμενα σωματίδια σε υψηλές συγκεντρώσεις προκαλούν σοβαρά προβλήματα υγείας στον άνθρωπο και επομένως είναι άμεση η ανάγκη να ληφθούν ουσιαστικά μέτρα αντιμετώπισης και μείωσης των συγκεντρώσεων. Η αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτεί συνολική και ολοκληρωμένη παρέμβαση, η οποία θα περιλαμβάνει βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα **μέτρα αντιμετώπισης**, κάποια από αυτά θα μπορούσαν να είναι τα εξής:

- Έλεγχος ποιότητας καυσίμων
- Ανανέωση των καυστήρων των κατοικιών
- Χρήση φυσικού αερίου στις βιομηχανίες και στις κατοικίες
- Χρήση βελτιωμένων φίλτρων στις βιομηχανίες
- Βελτίωση τεχνολογίας οχημάτων
- Συχνότερος έλεγχος των εκπομπών των σωματιδιακών ρύπων
- Γρήγορη υλοποίηση του μετρώ
- Ενημέρωση των πολιτών για την επικινδυνότητα των σωματιδιακών ρύπων και παρότρυνση για την χρήση μέσων μαζικής μεταφοράς.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Υπολογισμός ειδικής υγρασίας

Ειδική υγρασία **SH** (Specific Humidity) του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται το πηλίκο της μάζας m_v των υδρατμών, προς τη μάζα m_a του υγρού αέρα που περιέχει τους υδρατμούς. Υγρός αέρας ονομάζεται το άθροισμα της μάζας των υδρατμών και της μάζας του ξηρού αέρα ($m_a = m_v + m_d$). Μονάδα μέτρησης της ειδικής υγρασίας είναι τα γραμμάρια των υδρατμών που περιέχονται σε ένα γραμμάριο ή χιλιόγραμμο υγρού αέρα (Σαχσαμάνογλου και Μακρογιάννης, 1998).

Από τον ορισμό ισχύει ότι:

$$SH = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (1)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$SH = \frac{1}{1 + \frac{m_d}{m_v}} \quad (2)$$

Με την παραδοχή ότι οι υδρατμοί και ο ξηρός αέρας υπακούουν στην καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, θα ισχύει:

$$e \cdot V = \frac{m_v}{18} \cdot R \cdot T \quad (\text{για τον υδρατμό}) \quad (3)$$

$$(p - e) \cdot V = \frac{m_d}{29} \cdot R \cdot T \quad (\text{για τον ξηρό αέρα}) \quad (4)$$

Διαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις κατά μέλη, προκύπτει:

$$\frac{m_d}{m_v} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{p - e}{e} \quad (5)$$

Όπου $\varepsilon = 18/19 = 0.622$

Με βάση το αποτέλεσμα αυτό η σχέση ορισμού της ειδικής υγρασίας μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$SH = \frac{1}{1 + \frac{p - e}{\varepsilon \cdot e}} \quad (6)$$

Μετά από πράξεις προκύπτει ότι:

$$SH = 0.622 \cdot \frac{e}{p - 0.378 \cdot e} \quad (7)$$

Επειδή η τάση των υδρατμών e είναι πολύ μικρότερη της ολικής πίεσης p του ατμοσφαιρικού αέρα ($e \ll p$), η τελευταία σχέση γράφεται στην προσεγγιστική μορφή:

$$SH \approx 0.622 \cdot \frac{e}{p} \quad (8)$$

Για την κατάσταση κόρου θα ισχύουν ανάλογες σχέσης:

$$SH_s \approx 0.622 \cdot \frac{e_s}{p} \quad (9)$$

Σχετική υγρασίας **RH** (Relative Humidity) του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται το πηλίκο της τάσης των υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα προς τη μέγιστη τάση των υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα, στην ίδια θερμοκρασία (Σαχσαμάνογλου και Μακρογιάννης, 1998).

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, η σχετική υγρασία σε ποσοστό %, δίνεται από τη σχέση:

$$RH = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (10)$$

Από το συνδυασμό των σχέσεων (8), (9) και (10) προκύπτει η σχέση:

$$SH = \frac{0.622 \cdot e_s}{p} \cdot \frac{RH}{100} \quad (11)$$

Η μέγιστη τάση των υδρατμών e_s εξαρτάται από τη θερμοκρασία T και υπολογίζεται από τη σχέση των Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L_v}{R_v} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (12)$$

Όπου:

e_s = Μέγιστη τάση των υδρατμών σε θερμοκρασία T

L_v = Λανθάνουσα θερμότητα υδρατμών που είναι σε ισορροπία με το νερό

R_v = Ειδική σταθερά των υδρατμών

T = Θερμοκρασία αέριας μάζας

Από την ολοκλήρωση της σχέσης (12) προκύπτει η μέγιστη τάση των υδρατμών για τη θερμοκρασία της αέριας μάζας T, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$e_s(T) = c \cdot \exp\left(-\frac{L_v}{R_v \cdot T}\right) \quad (13)$$

Όπου c = σταθερά που δίνεται από τη σχέση:

$$c = 6.11 \cdot \exp\left(-\frac{L_v}{R_v \cdot 273}\right) \quad (14)$$

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (13) και (14) προκύπτει η σχέση:

$$e_s(T) = 6.11 \cdot \exp\left[\frac{L_v}{R_v} \cdot \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (15)$$

Τέλος από το συνδυασμό των σχέσεων (11) και (15) προκύπτει η εξίσωση (16)

$$SH = \frac{0.622 \cdot 6.11}{p} \cdot \exp\left[\frac{L_v}{R_v} \cdot \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T}\right)\right] \cdot \frac{RH}{100} \quad (16)$$

Στη σχέση (16) η ειδική υγρασία μετράται σε χιλιόγραμμα υδρατμών ανά χιλιόγραμμο υγρού αέρα. Το δεύτερο μέλος της εξίσωσης (16) πολλαπλασιάστηκε με το 1000 ώστε το αποτέλεσμα να είναι σε γραμμάρια υδρατμών ανά χιλιόγραμμο

υγρού αέρα. Έτσι προκύπτει η σχέση (17), η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ειδικής υγρασίας των δεδομένων του σταθμού του Πανοράματος (παράγραφος 4.1.2).

$$SH = 1000 \cdot \frac{0.622 \cdot 6.11}{p} \cdot \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \cdot \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T} \right) \right] \cdot \frac{RH}{100} \quad (17)$$

Όπου

SH = σχετική υγρασία σε gr/Kgr

p = πίεση του αέρα, θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 1000 hPa

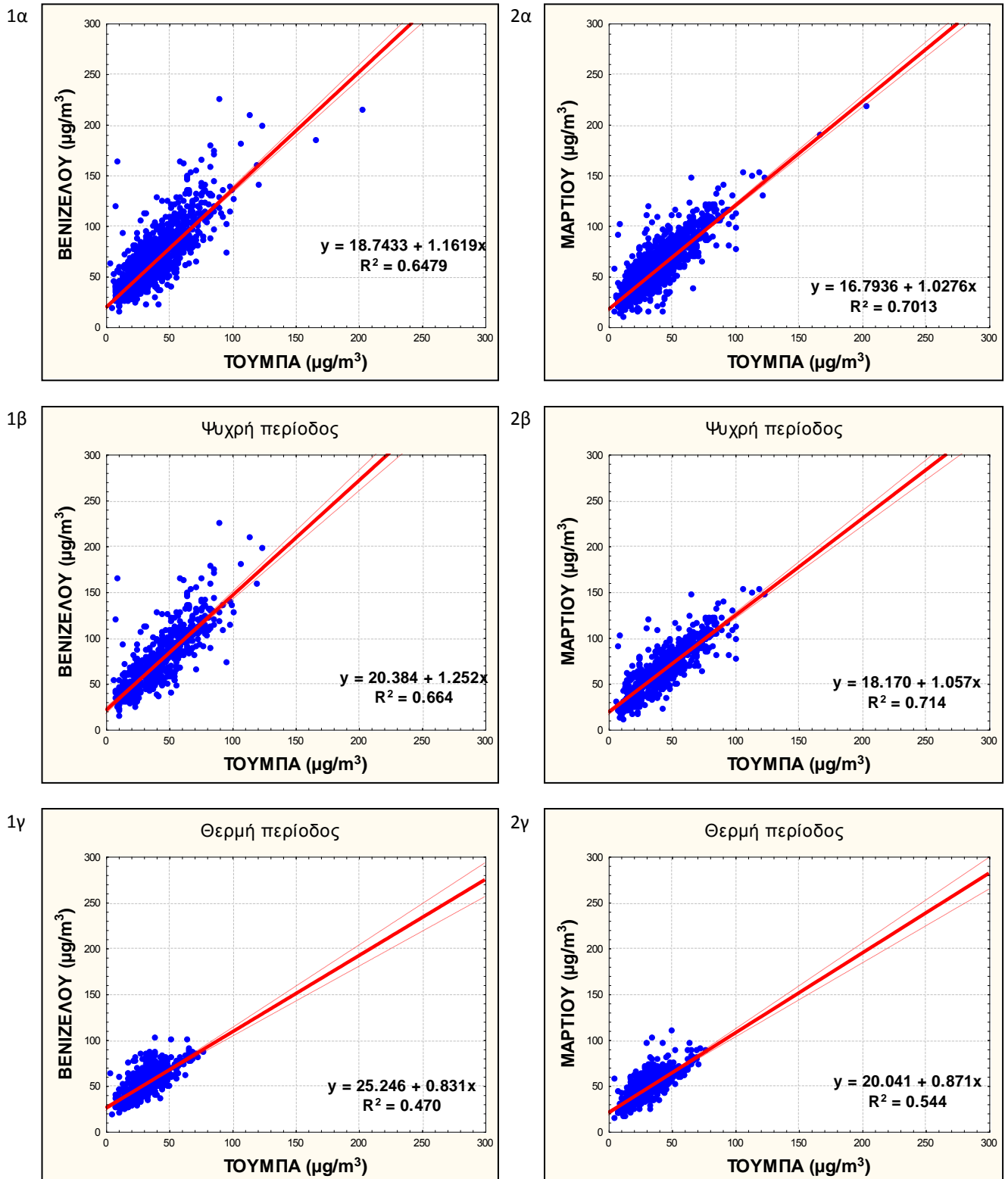
$L_v = 2.5 \cdot 10^6 \text{ J/Kgr} \cdot \text{grad}$, Λανθάνουσα θερμότητα

$R_v = 462 \text{ J/Kgr} \cdot \text{grad}$, Ειδική σταθερά των υδρατμών

T = Θερμοκρασία του αέρα

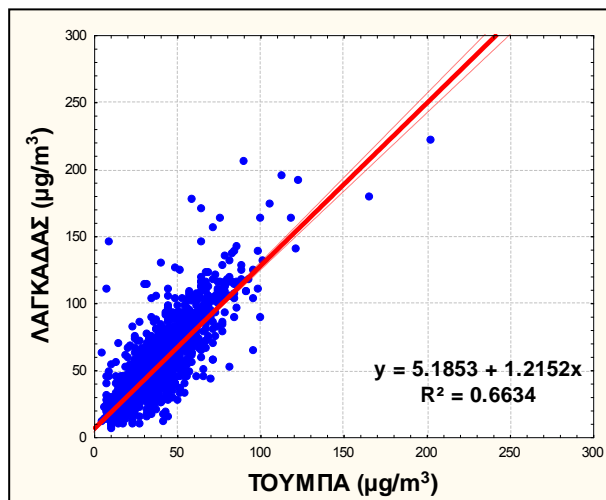
RH = Σχετική υγρασία

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

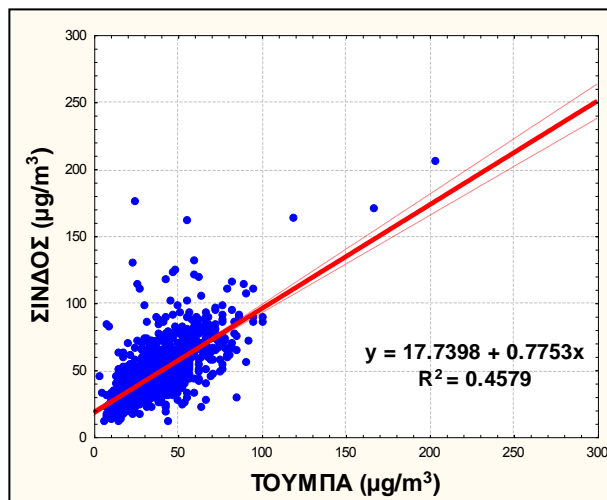


Σχήμα 4.19: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Βενιζέλου-Τούμπα (1^η στήλη) και Μαρτίου-Τούμπα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.

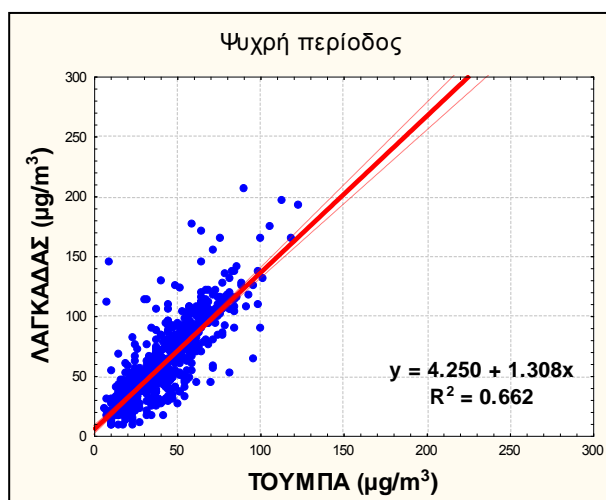
1α



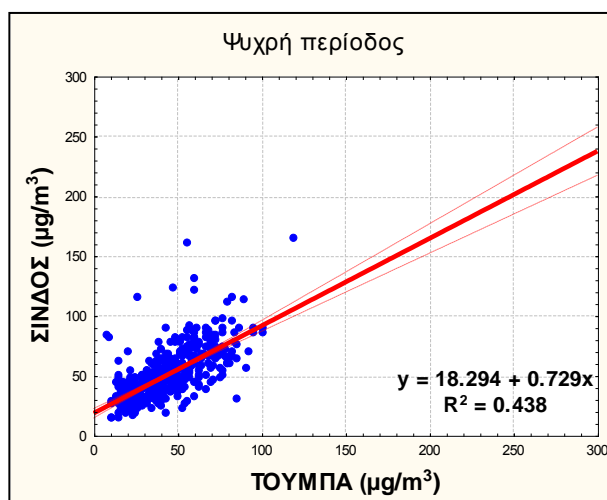
2α



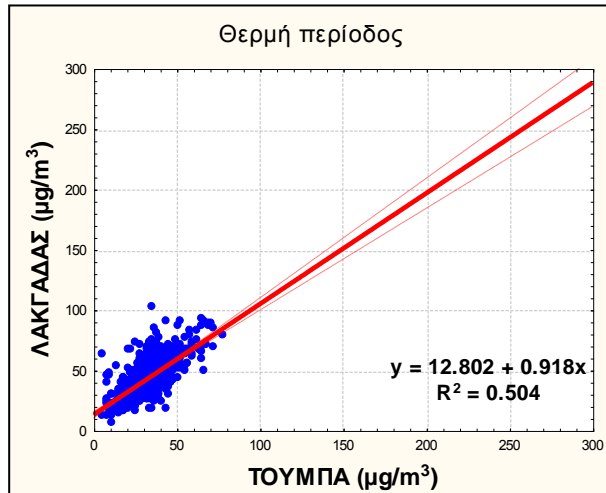
1β



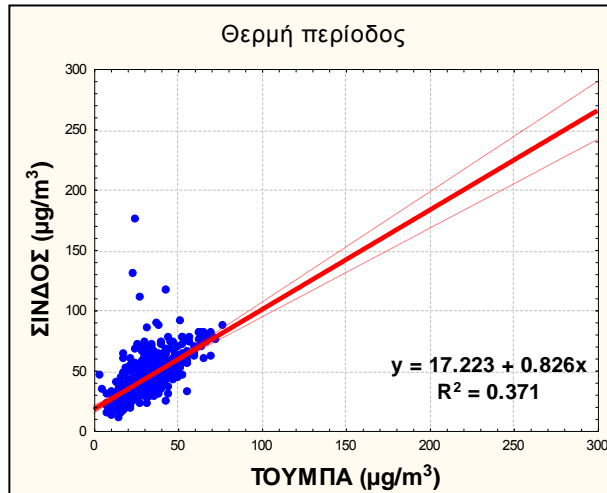
2β



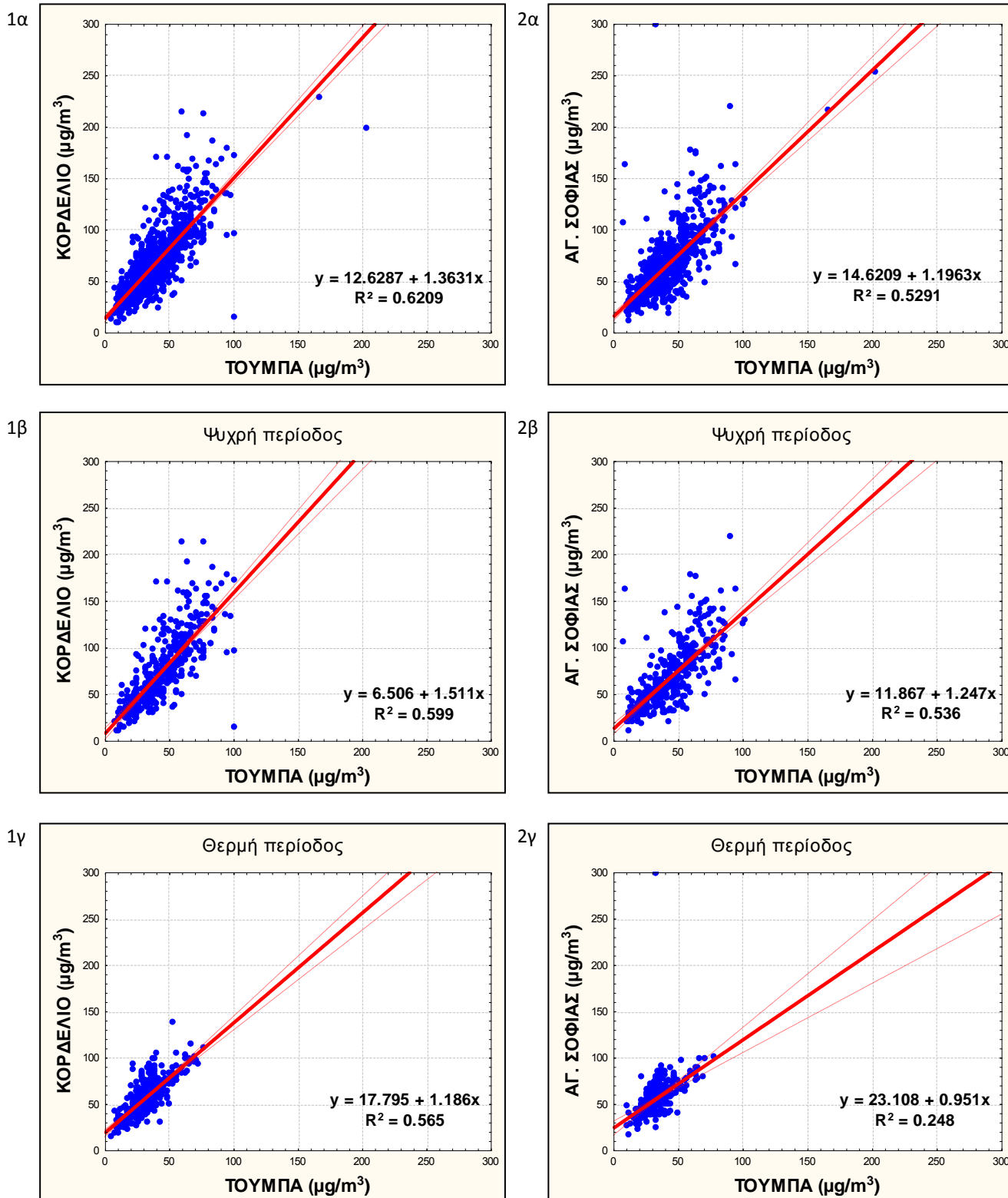
1γ



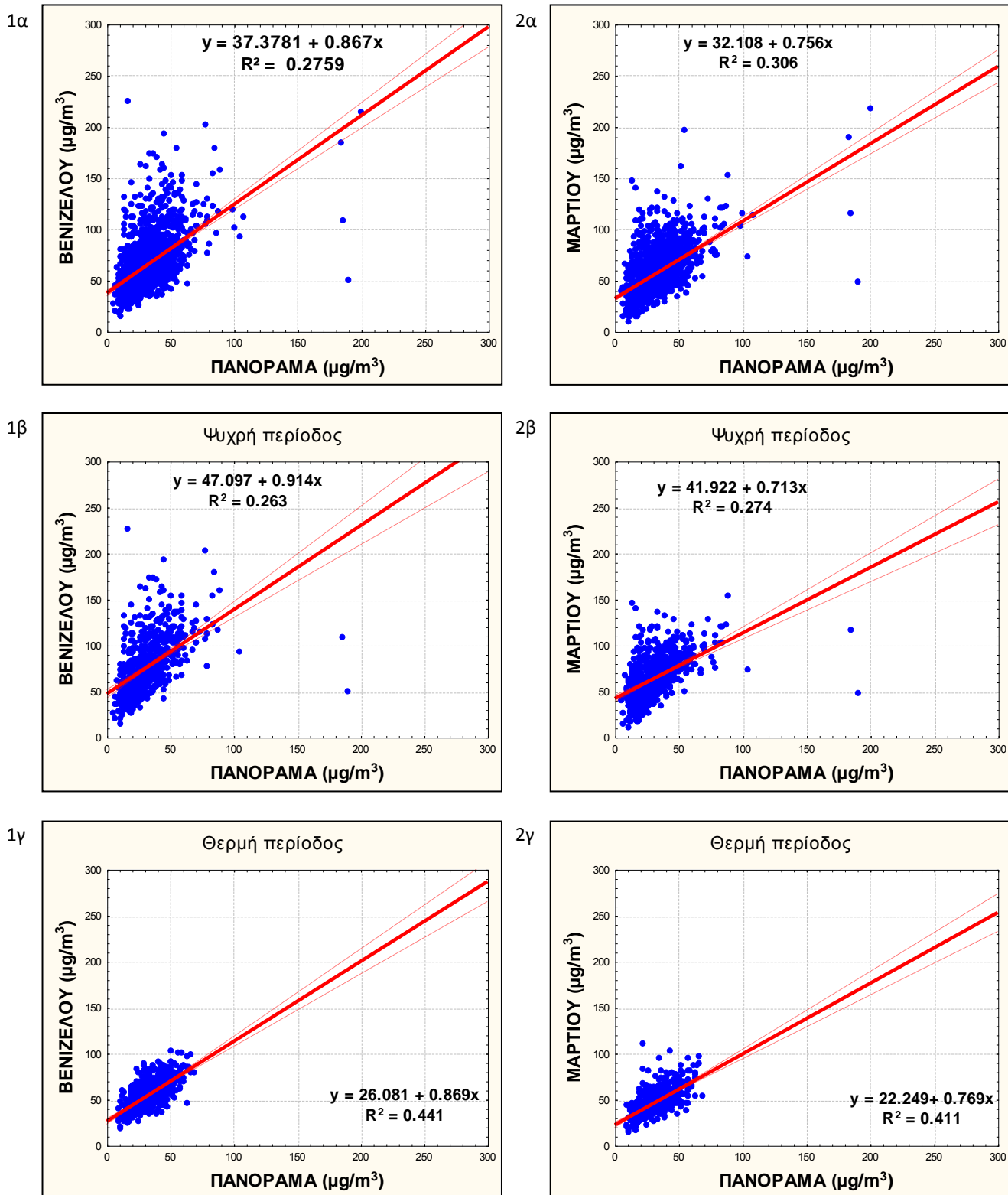
2γ



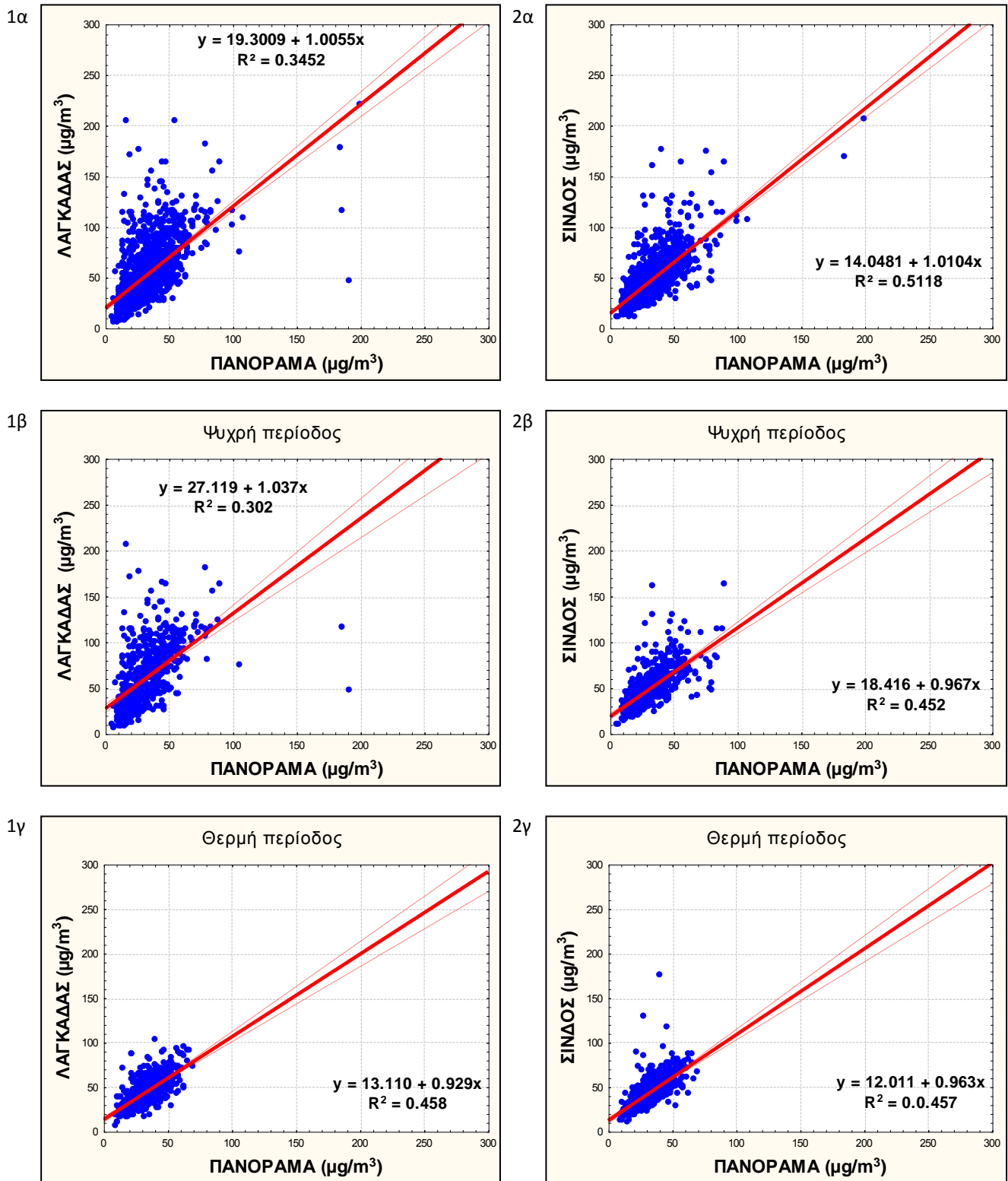
Σχήμα 4.20: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Λαγκαδάς-Τούμπα (1^η στήλη) και Σίνδος-Τούμπα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.



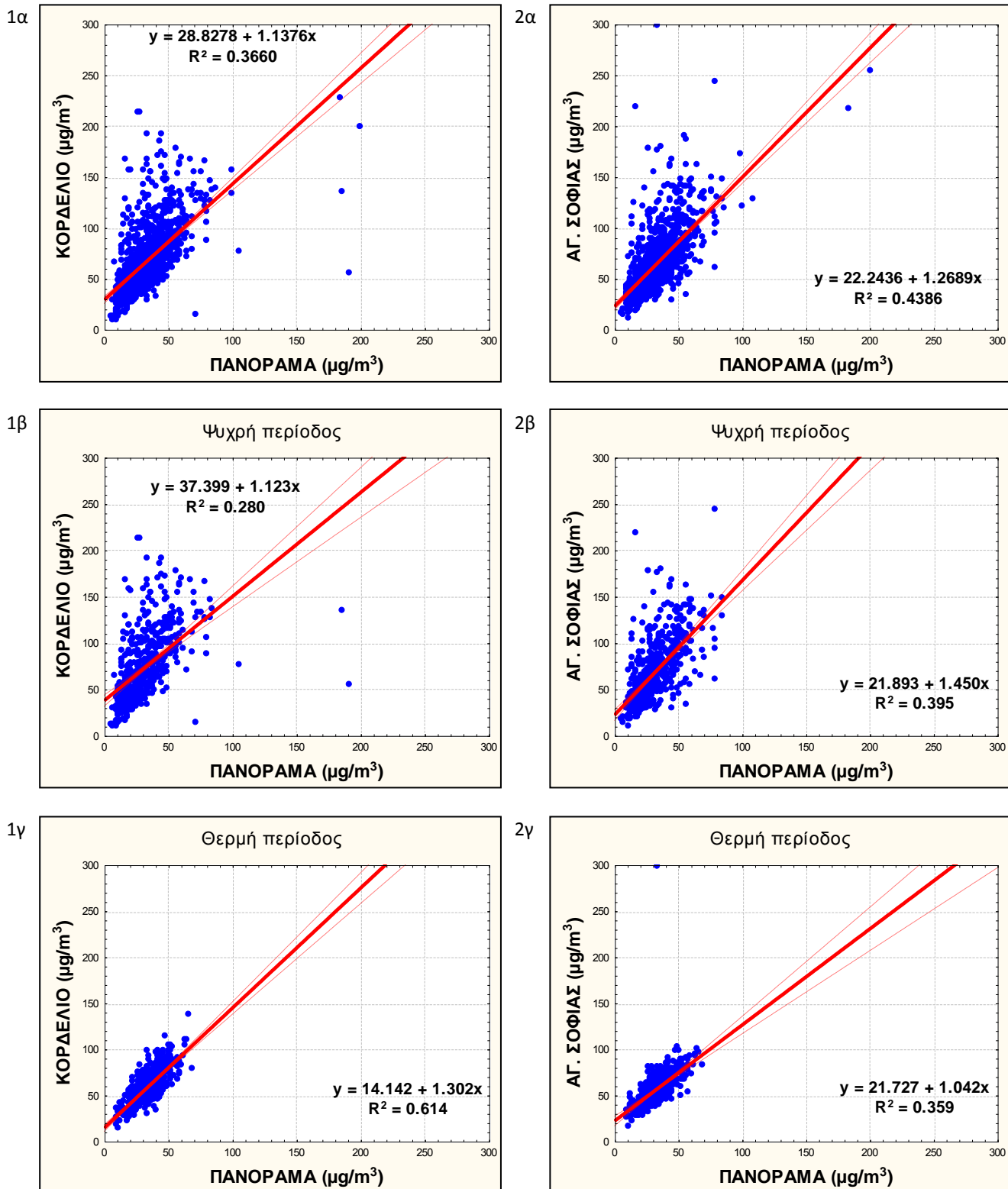
Σχήμα 4.21: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Κορδελιό-Τούμπα (1^η στήλη) και Αγ. Σοφίας-Τούμπα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.



Σχήμα 4.22: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Βενιζέλου-Πανόραμα (1^η στήλη) και Μαρτίου-Πανόραμα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.



Σχήμα 4.23: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Λαγκαδάς-Πανόραμα (1^η στήλη) και Σίνδος-Πανόραμα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.



Σχήμα 4.24: Στατιστική συσχέτιση μέσω ημερήσιων συγκεντρώσεων των σταθμών Κορδελιό-Πανόραμα (1^η στήλη) και Αγ. Σοφίας-Πανόραμα (2^η στήλη), για την περίοδο 2001-2005, (α) για όλες τις τιμές, (β) για την ψυχρή περίοδο και (γ) για τη θερμή περίοδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years – From local to global. *Atmospheric Environment*, 43, 13-22.
- 2) Flocas, H., Kelessis, A., Helmis, C., Petrakakis, M., Zoumakis, M., and Pappas, K. (2008). Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. *Theor. App. Climatol.*, 95, 265-277.
- 3) Kalabokas. (2004). A climatological study of rural surface ozone in central Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 1139–1147.
- 4) Kalabokas, P., Adamopoulos, A., and Viras, L. (2010). Atmospheric PM10 particle concentration measurements at central and peripheral urban sites in Athens and Thessaloniki, Greece. *Global NEST Journal*, 12, 71-83.
- 5) Kaliampakos, D., and Domigos, D. (2003). *Civil Works and Fine Particulate Matter Emissions: A Case Study*. Tech. Chron. Sci. J. TCG, V, No 1-2.
- 6) Katragkou, E., Kazadzis, S., Amiridis, V., Papaioannou, V., Karathanasis, S., and Melas, D. (2008). PM10 regional transport pathways in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 43, 1079-1085.
- 7) Mather, T., Pyle, D., and Oppenheimer, C. (2003). *Tropospheric Volcanic Aerosol*. German. *Geophysical Monograph*, 139, 10.1029/139GM12.
- 8) Rao, T., Yeong Ku, J., Berman, S., Zhang, K., and Mao, H. (2003). Summertime Characteristics of the Atmospheric Boundary Layer and Relationships to Ozone Levels over the Eastern United States. German. *Pure and Applied Geophysics* 160, 21-35.
- 9) Sfetsos, A., and Vlachogiannis, D. (2010). A new approach to discovering the causal relationship between meteorological patterns and PM10 exceedances. *Environmental Research Laboratory, Institute of Nuclear Technology-Radiation Protection, atmospheric Research*, 98, 500-511.
- 10) US-EPA. (1983). chapter 5: Methodologies and instrumentation for Particulate Matter Sampling. *Atmospheric sampling course* (σ. APTI 435, 1-75). U.S.A.: Air Pollution Training Institute.

- 11) Αργυροπουλος, Γ., Σαμαρα, Κ., και Νικολάου, Κ. (2007). *Προσδιορισμός της συνεισφοράς πηγών στα αιωρούμενα σωματίδια PM10 της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης*. Έκθεση του Τμήματος Χημείας Α.Π.Θ.
- 12) Ασσαέλ, Μ., Μελάς, Δ., Καρατζάς, Κ., Αχιλλάς, Χ., και Κακοσίμος, Κ. (2008). *Καταγραφή και μελέτη αιωρούμενων σωματιδίων στο Πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης*. Πόρισμα ομάδας εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ, Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- 13) Βαρφή, Μ. (2009). *Συνοπτική και δυναμική μελέτη των θερμών και ψυχρών εισβολών στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο*. Διδακτορική διατριβή, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Α.Π.Θ.
- 14) Ζάνης, Π. (2010). *Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα γεωλογίας, Α.Π.Θ., 54 σελ..
- 15) Ζάνης, Π. (2008). *Σημειώσεις για τη ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας*. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 116 σελ..
- 16) Ζερεφός, Χ. (2001). *Μαθήματα φυσικής της ατμόσφαιρας και φυσικής του περιβάλλοντος*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, 400 σελ..
- 17) Ζώγου, Ο. (2006). *Έλεγχος της επίδρασης των παραγόντων: ώρα της ημέρας, μήνας, θερμοκρασία αέρα, διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου και σχετική υγρασία στις εκπομπές PM10*. Βόλος: Τεχνική έκθεση, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Αρ. Εργασίας LTTE#05/2006.
- 18) Καλαμπόκας, Π., Σιδεράς, Γ., Χριστόλης, Μ., και Μαρκάτος, Ν. (2005). *Ανάλυση μετρήσεων ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα στο βόλο*. Αθήνα: Σχολή Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, Heleco 05, ΤΕΕ, 3-6 Φεβρουαρίου 2005 .
- 19) Καραθανάσης, Σ. (2006). *Ατμοσφαιρική ρύπανση*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 651 σελ..
- 20) Καρακώστας, Θ. (2010). *Φυσική νεφών και τροποποίηση καιρού*. Διδακτικές Σημειώσεις, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 103 σελ..
- 21) Κοντογιάννη, Π. (2008). *Μελέτη της θαλάσσιας αύρας στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης με την χρήση αριθμητικού μοντέλου μέσης κλίμακας*.

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

- 22) Λαζαρίδης, Μ. (2005). *Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 639 σελ..
- 23) Μακρογιάννης, Τ. και Σαχσαμάνογλου, Χ. (2004). *Μαθήματα γενικής μετεωρολογίας*. "ΧΑΡΙΣ Ε.Π.Ε." Εκδόσεις ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΕΣ, 414 σελ..
- 24) Μαχαίρας, Π. και Μπαλαφούτης, Χ. (1997). *Γενική κλιματολογία με στοιχεία μετεωρολογίας*. Εκδόσεις UNIVERSITY STUDIO PRESS, Θεσσαλονίκη, 338 σελ..
- 25) Μελάς, Δ. (2005). *Ατμοσφαιρική διάχυση και διασπορά*. Διδακτικές Σημειώσεις, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα φυσικής, Α.Π.Θ., 63 σελ..
- 26) Μελάς, Δ. (2009). *Συμβολή στα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης της Θεσσαλονίκης*. Ημερίδα 26/11/2009, ΤΕΕ/ΚΜ και Τμήμα Χημικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- 27) Μελάς, Δ. (2004). *Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος*. Διδακτικές Σημειώσεις, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα φυσικής Α.Π.Θ., 62 σελ..
- 28) Μελάς, Δ., Μιχαηλίδης, Η., και Κατράγκου, Ε. (2009). *Ολοκληρωμένη αποτίμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο Δήμο Δημητρίου Υψηλάντη από υφιστάμενες και μελλοντικές πηγές ρύπανσης*. Πρώτη έκθεση, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
- 29) Μπάης, Α. (2005). *Φυσική της ατμόσφαιρας, μέρος II, ατμοσφαιρική σύσταση, παγκόσμιοι κύκλοι, χρόνοι ζωής και αιωρούμενα σωματίδια*. Διδακτικές Σημειώσεις, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ., 188 σελ..
- 30) Μπάης, Α., Μελάς, Δ., και Μπαλής, Δ. (2005). *Ατμοσφαιρική τεχνολογία*. Διδακτικές Σημειώσεις, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ., 131 σελ..
- 31) Ντουμανάκης, Ε., και Νικολάου, Κ. *Διακύμανση ατμοσφαιρικών ρύπων σε συνάρτηση με την κυκλοφοριακή κίνηση και τις μετεωρολογικές συνθήκες στην πόλη της Θεσσαλονίκης*. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης.
- 32) *Οδηγία (1999/30/ΕΚ) του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης - 22 Απριλίου 1999*.

- 33) Οδηγία (2008/50/ΕΚ) του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για την Ευρώπη - 2 Ιουλίου 2009.
- 34) Οδηγία 96/62/ΕΚ του Συμβουλίου για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος - 27 Σεπτεμβρίου 1996.
- 35) Παπαστεριάδης, Γ., και Δερμιτζάκης, Ι. (2002). *Μετρήσεις Αιωρούμενων Σωματιδίων PM10 στην Αθήνα (2001-2002)*. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2, 29-39.
- 36) Παρώνης, Δ., Ρετάλης, Α., Τύμβιος, Φ., και Μιχαηλίδης, Σ. (2009). *Σύστημα παρακολούθησης αεροσωματιδιακής ρύπανσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο*. ΙΠΕ.
- 37) Πετρακάκης, Κελέσης, Μ., Τζουμάκα, Α., Κασσωμένος, Π., Κανελοπούλου, Ζ., Τσακνιά, Α., και συν. (2009). *Το βενζόλιο και τα αιωρούμενα σωματίδια PM2,5 στην περιοχή της Θεσσαλονίκης*. Δήμος Θεσσαλονίκης, Τμήμα Περιβάλλοντος.
- 38) Πετρακάκης, Μ. (2009). *Αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης. Υπάρχει πρόβλημα;*. Ημερίδα 26/11/2009, ΤΕΕ/ΚΜ και Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- 39) Πετρακάκης, Μ., Κελέσης, Α., Τζουμάκα, Π., και Τσούγκας, Μ. (2005). *Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων των εισπνεύσιμων αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) στη Θεσσαλονίκη*. Θεσσαλονίκη.
- 40) Πετρακάκης, Μ., Τζουμάκα, Π., Κελέσης, Α., και Παπαγιαννόπουλος, Ν. (14-17 Μαρτίου 2008). *Αξιολόγηση της διαχρονικής εξέλιξης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης*. 3ο περιβαλλοντικό συνέδριο Μακεδονίας-Θεσσαλονίκη.
- 41) Σαχινίδης, Σ., Ζεμπεκάκης, Π., και Κεμετζή, Α. (2009). *Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας και του όζοντος στη διαμόρφωση του κλίματος. Οι επιπτώσεις τους στην υγεία του ανθρώπου*. Συνέδριο 29/3/2009 - Ηράκλειο Κρήτης.
- 42) Σαχσαμάνογλου, Χ., και Μακρογιάννης, Τ. (1998). *Γενική μετεωρολογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 367 σελ..
- 43) Σαχσαμάνογλου, Χ., και Μπλούτσος, Α. (1998). *Φυσική κλιματολογία*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 302 σελ..
- 44) Τουλούμη, Ε., Βαβατζανίδης, Α., Ευθυμιάδης, Ε., και Καραθανάσης, Σ. (2006). *Η ατμοσφαιρική ρύπανση στο πολεοδομικό συγκρότημα Θεσσαλονίκης*. Εκθέσεις τιμών Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης Θεσσαλονίκης, Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Διεύθυνση Περιβάλλοντος και Χωροταξίας.

Ηλεκτρονικές σελίδες

1. <http://www.envidimosthes.gr> (Δήμος Θεσσαλονίκης – Τμήμα Περιβάλλοντος)
2. <http://rcm.damt.gov.gr> (Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας)
3. <http://www.airthess.gr>
4. <http://www.yreka.gr> (Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής αλλαγής)

