

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**«Καταγραφή & Μελέτη αιωρουμένων σωματιδίων στο Πολεοδομικό
Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης»**

Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ, όπως εγκρίθηκε με την υπ' αριθμ.
Α261α/Σ20/09 απόφαση της Διοικούσας Επιτροπής.

Μέλη Ομάδας Εργασίας:

Μάρκος Ασσαέλ, Χημικός Μηχανικός (καθηγητής ΑΠΘ)

Δημήτρης Μελάς, Φυσικός (αναπλ. καθηγητής ΑΠΘ)

Κωνσταντίνος Καρατζάς, Μηχανολόγος Μηχανικός (επίκ. καθηγητής ΑΠΘ)

Χαρίσιος Αχιλλάς, Μηχανολόγος Μηχανικός

Κωνσταντίνος Κακοσίμος, Χημικός Μηχανικός

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΣΤΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

Φάση Α΄

ΤΕΕ - ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ:

Μάρκος Ασσαέλ – Καθηγητής, Χημικός Μηχανικός

Δημήτριος Μελάς – Αν. Καθηγητής, Φυσικός

Κωνσταντίνος Καρατζάς – Επ. Καθηγητής, Μηχανολόγος Μηχανικός

Χαρίσιος Αχίλλας – Μηχανολόγος Μηχανικός

Κωνσταντίνος Κακοσίμος – Χημικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	2
1. Διερεύνηση τρέχουσας κατάστασης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης	4
1.1. Γεωγραφική κατανομή των ρύπων	6
1.2. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά μήνα	7
1.3. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά ημέρα εβδομάδας	8
1.4. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά ώρα	10
1.5. Καταγραφή αριθμού υπερβάσεων	11
1.6. Συγκεντρωτικά στατιστικά μεγέθη για τα έτη 2001 - 2006	13
1.7. Προέλευση Αιωρούμενων Σωματιδίων στη Θεσσαλονίκη	15
2. Μελέτη χωροθέτησης των νέων διατάξεων	16
2.1. Χωροθέτηση των παθητικών συλλεκτών σωματιδίων	16
3. Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης μέτρησης Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Αιωρούμενων Σωματιδίων	21
3.1. Απαιτούμενα χαρακτηριστικά μετρητικής διάταξης	21
3.1.1. Καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας	22
3.1.2. Παθητικός συλλέκτης αιωρούμενων σωματιδίων	22
3.2. Περιγραφή των δόκιμων διατάξεων	24
3.3. Αξιολόγηση των δυνατοτήτων μέτρησης κάθε διάταξης	26
3.3.1. Περιγραφή του εικονικού προβλήματος αξιολόγησης των δόκιμων διατάξεων	26
3.3.2. Συγκριτική αξιολόγηση διατάξεων	38
3.3. Κατασκευή επιλεγμένης διάταξης	39
4. Συμπεράσματα	40

Εισαγωγή

Στην ατμόσφαιρα αιωρούνται σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους τα οποία δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Δυστυχώς όμως βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα, ευθύνονται για ένα πλήθος αναπνευστικών και καρδιακών ασθενειών όπως επιδείνωση του άσθματος, αύξηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων (π.χ. βήχας και πόνοι στην αναπνοή), επιδείνωση καρδιολογικών προβλημάτων, βρογχίτιδα, όπως και προβλήματα στην όραση. Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια βλάπτουν λόγω της ίδιας της σύστασής τους, γιατί μπορούν να περιέχουν βαριά μέταλλα και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις.

Ανάλογα με το μέγεθος τους, τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ως εξής:

- TSP : Ολικά αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 100 μικρομέτρων.
- PM₁₀: Αιωρούμενα σωματίδια – ή πιο γνωστά ως PM (Particulate Matter) - με διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα (εισπνεύσιμα).
- PM_{2,5}: Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα (αναπνεύσιμα).

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

Κυριότερες πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η κυκλοφοριακή κίνηση, η βιομηχανία και η κεντρική θέρμανση των κτιρίων. Παράλληλα, αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να προέλθουν επίσης και από χημικές διεργασίες στην ατμόσφαιρα.

Στην παρούσα έκθεση, η Ομάδα Εργασίας που συστάθηκε με πρωτοβουλία της Μόνιμης Επιτροπής Περιβάλλοντος του ΤΕΕ/ΤΚΜ ασχολείται με τη μελέτη των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, καθώς και τους μηχανισμούς διασυννοριακής μεταφοράς τους. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της καλύτερης καταγραφής των επιπέδων αιωρούμενων σωματιδίων, προβλέπεται να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στους δρόμους που ζούμε, με στόχο τον προσδιορισμό της επιβάρυνσης των κατοίκων του αστικού κέντρου (στο επίπεδο του δρόμου), όπως αυτή διαμορφώνεται μέσα από τις καθημερινές δραστηριότητές τους. Οι μετρήσεις, οι οποίες προβλέπονται να λάβουν χώρα κατά τη Β' Φάση εργασιών της συσταθείσας Ομάδας Εργασίας, πρόκειται να πραγματοποιηθούν με τη χρήση μετρητικής διάταξης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τους σκοπούς του έργου. Προς την κατεύθυνση αυτή, σκοπός της Φάσης Α' αποτέλεσε ο σχεδιασμός και η κατασκευή της

κατάλληλης διάταξης μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και αιωρούμενων σωματιδίων, η αξιολόγηση των δυνατοτήτων μέτρησης κάθε διάταξης, καθώς επίσης και η προκαταρκτική μελέτη της χωροθέτησης των διατάξεων με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη αποτύπωση της κατάστασης στη Θεσσαλονίκη.

1. Διερεύνηση τρέχουσας κατάστασης στο Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην προσπάθειά της για τον περιορισμό και την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μέσω των οδηγιών της για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, έχει θεσπίσει τιμές όρια (οριακές τιμές) και τιμές στόχους για όλες τις ρυπογόνες ουσίες, μεταξύ των οποίων και τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι οριακές τιμές αναφέρονται σε επίπεδα συγκεντρώσεων πάνω από τα οποία είναι επιστημονικά τεκμηριωμένο ότι είναι δυνατή η συσχέτιση εμφάνισης επιβλαβών επιπτώσεων στον ανθρώπινο πληθυσμό και το περιβάλλον, ενώ οι τιμές στόχοι αναφέρονται σε επιθυμητά επίπεδα με σκοπό τη μακροπρόθεσμη αποφυγή επιβλαβών επιδράσεων. Ειδικά για τα εισπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀) που αποτελούν και στόχευση της παρούσας εργασίας, η ισχύουσα Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (Κοινοτική Οδηγία 2008/50/EK) προβλέπει να μην υπερβαίνεται το όριο των 50 μg/m³ περισσότερες από 35 φορές ανά έτος (ημερήσιες υπερβάσεις), ενώ ο ετήσιος μέσος όρος θα πρέπει να κυμαίνεται σε επίπεδα χαμηλότερα από 40 μg/m³. Η Κοινοτική Οδηγία 2008/50/EK που τέθηκε σε εφαρμογή πρόσφατα (21 Μαΐου 2008) μετά από μακροχρόνια διαβούλευση αποτελεί φυσική συνέχεια της αντίστοιχης Κοινοτικής Οδηγίας 1999/30/EK, με μοναδική διαφοροποίηση ως προς τα αιωρούμενα σωματίδια, τη θέσπιση οριακών τιμών και για τα PM_{2,5} για τα οποία δεν υπήρχε μνεία στο παρελθόν.

Για την αποτύπωση της παρούσας κατάστασης αναφορικά με τα αιωρούμενα σωματίδια στη Θεσσαλονίκη, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι μετρήσεις του Δικτύου Καταγραφής Αέριας Ρύπανσης της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, (ΠΚΜ)). Σημειώνεται ότι στην Ευρύτερη Περιοχή Θεσσαλονίκης λειτουργούν τρία δίκτυα παρακολούθησης ποιότητας αέρα:

- το δίκτυο που λειτουργεί υπό την ευθύνη και εποπτεία της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος & Χωροταξίας της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, ως μέρος του επίσημου Εθνικού Δικτύου του ΥΠΕΧΩΔΕ. Στη βάση των μετρήσεων αυτών, εκδίδεται κάθε χρόνο σχετική έκθεση, ενώ ταυτόχρονα τα στοιχεία αυτά αποστέλλονται μέσω του ΥΠΕΧΩΔΕ στον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, από όπου και είναι διαθέσιμα για κάθε ενδιαφερόμενο, σε εφαρμογή των σχετικών Εθνικών και Ευρωπαϊκών Νομοθετημάτων¹. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία αυτά, σε αναλυτική μορφή (ωριαίες τιμές), θα καθίστανται και καθημερινά διαθέσιμα στους ενδιαφερόμενους, μέσω διαδικτύου, σύμφωνα με την συνήθη ευρωπαϊκή πρακτική, ως αποτέλεσμα σχετικού προγράμματος εφαρμοσμένης έρευνας.

¹ Βάση δεδομένων Airbase του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (http://air-climate.eionet.europa.eu/databases/airbase/index_html)

- Το δίκτυο σταθμών που λειτουργεί υπό την ευθύνη και εποπτεία του Δήμου Θεσσαλονίκης εντός των ορίων του. Τα στοιχεία αυτά δημοσιοποιούνται μέσω του διαδικτυακού τόπου <http://www.envdimosthes.gr/>, όπου όμως δημοσιεύονται μόνο οι μέγιστες και όχι η ωριαίες τιμές κάθε ρύπου. Επιπρόσθετα, ο Δήμος Θεσσαλονίκης έχει πάψει να εκδίδει την ετήσια σχετική έκθεση από το έτος 2000.
- Το δίκτυο σταθμών που λειτουργεί ο Δήμος Εχεδώρου, ο οποίος δημοσιοποιεί τα στοιχεία αυτά μόνο μέσω των αντίστοιχων ετήσιων εκθέσεων.

Συνολικά, η Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας καταγράφει αέριους ρύπους σε 9 σταθμούς μέτρησης (Σχήμα 1), 4 από τους οποίους διαθέτουν σύστημα μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} (Σίνδου, Κορδελιού, Αγ. Σοφίας, Πανοράματος).



Σχήμα 1: Δίκτυο μετρητικών σταθμών αιωρούμενων σωματιδίων Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και Δήμου Θεσσαλονίκης

Με δεδομένη τη σημαντικότητα του προβλήματος, οι καταγραφές των συγκεντρώσεων των ολικών (TSP) εισπνεύσιμων (PM_{10}) και αναπνεύσιμων ($PM_{2.5}$) αιωρούμενων σωματιδίων στην πόλη της Θεσσαλονίκης θεωρούνται, σε γενικές γραμμές, ανεπαρκείς και περιορισμένες, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε πολλούς από τους διαθέσιμους σταθμούς και για αρκετά μεγάλες περιόδους δεν έχουν πραγματοποιηθεί αντίστοιχες μετρήσεις. Επιπλέον, η παρακολούθηση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης περιορίζεται σε μετρήσεις που αναφέρονται μόνο στην ογκομετρική τους σύσταση, ενώ οι προσπάθειες κοκκομετρικής και χημικής ανάλυσης των σωματιδίων αυτών είναι περιορισμένες.

1.1. Γεωγραφική κατανομή των ρύπων

Οι συγκεντρώσεις των ρύπων στην κεντρική περιοχή του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης εμφανίζονται συνήθως υψηλότερες σε σύγκριση με την δυτική και ανατολική περιοχή. Εξαιρέση αποτελεί το όζον, που εξαιτίας της γνωστής φωτοχημικής του συμπεριφοράς, παρουσιάζει υψηλότερες τιμές στην περιαστική περιοχή σε σχέση με το πολεοδομικό συγκρότημα.

Πιο αναλυτικά η εικόνα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανά περιοχή έχει ως εξής (Lemoni & Nikolaou, 2006):

Κορδελιό : Παρουσιάζει παρόμοια επίπεδα συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου και μονοξειδίου του άνθρακα με την ανατολική Θεσσαλονίκη και χαμηλότερα επίπεδα συγκεντρώσεων σχεδόν σε όλους τους ρύπους από το κέντρο. Αισθητή είναι η παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων, διοξειδίου του αζώτου και όζοντος στην περιοχή.

Νεάπολη : Τα αιωρούμενα σωματίδια βρίσκονται στα ίδια επίπεδα με το Κορδελιό, αλλά το διοξείδιο του αζώτου παρουσιάζει υψηλότερες συγκεντρώσεις.

Κέντρο Θεσσαλονίκης: Παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα αέριων ρύπων σε όλη την πόλη (διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του αζώτου).

Καλαμαριά : Παρουσιάζει υψηλά επίπεδα όζοντος, με πτωτική πορεία και μονοξειδίου του θείου σε ανοδική τροχιά.

Χαριλάου : Καταγράφονται υψηλότερα ποσοστά όζοντος, από αυτά που σημειώνονται στο Κορδελιό και στην Καλαμαριά και διοξειδίου του αζώτου από αυτά της Καλαμαριάς. Επίσης, παρουσιάζει ανοδική τάση τα τελευταία χρόνια στα αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του αζώτου και όζον.

Περιαστικές περιοχές (Πανόραμα-Ωραιόκαστρο): Στις δύο αυτές περιοχές, παρατηρούνται παρόμοια επίπεδα όζοντος, που είναι και τα υψηλότερα στη Θεσσαλονίκη.

Ακολούθως θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τα αιωρούμενα σωματίδια PM_{10} .

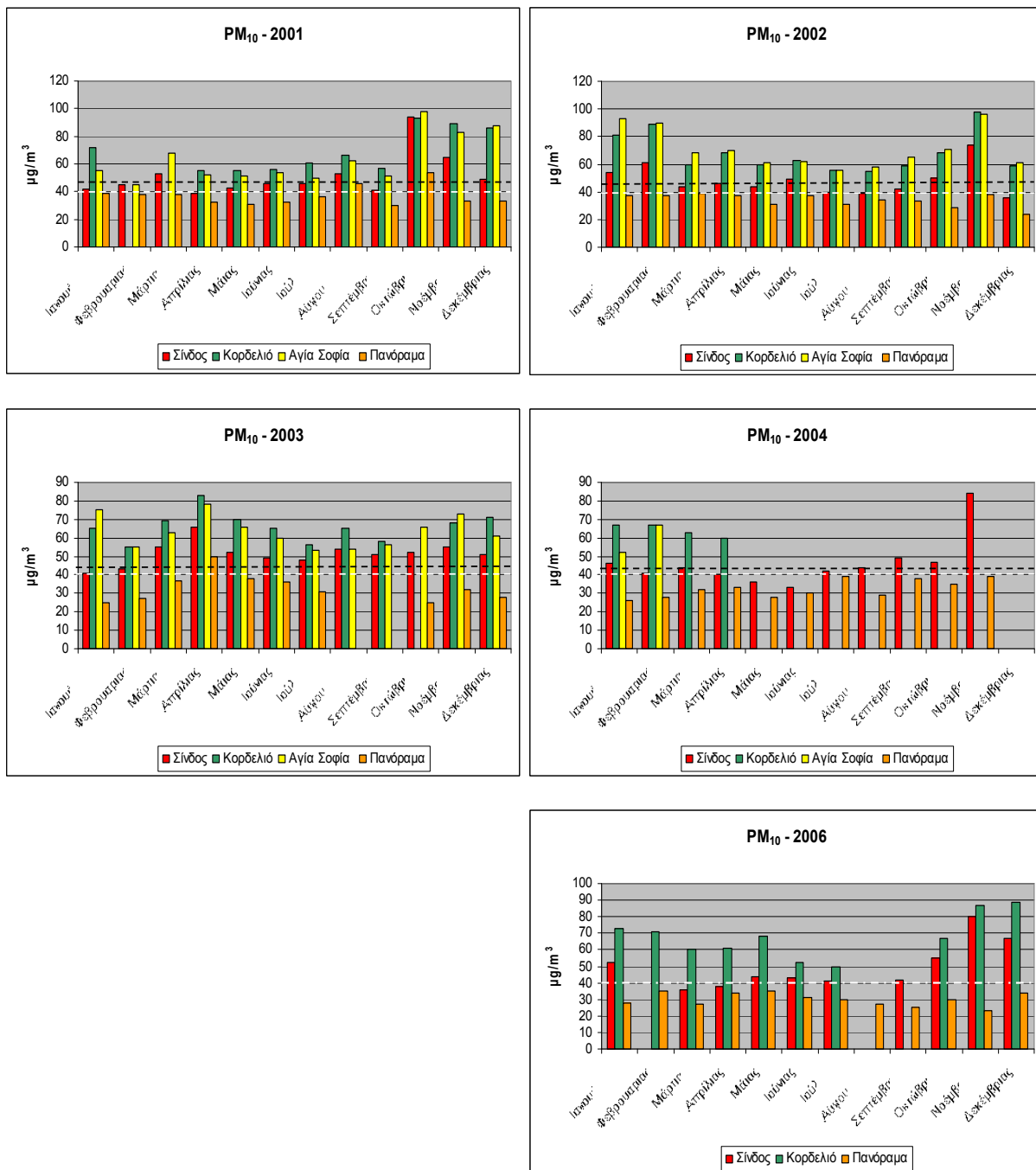
1.2. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά μήνα

Με βάση την εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων των PM_{10} , τα παρατηρούμενα επίπεδα είναι αυξημένα κατά το χειμερινό εξάμηνο (η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 35%), κατά το οποίο παρατηρείται και η μεγαλύτερη διακύμανση των τιμών. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιόδων του έτους μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο δυναμικό των πηγών κατά την ψυχρή περίοδο, καθώς και στην επικράτηση βορείων και βορειοδυτικών ανέμων, οι οποίοι μεταφέρουν φυσικής και βιομηχανικής προελεύσεως σωματίδια προς το κέντρο της πόλης. Ως αποτέλεσμα, οι μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις PM_{10} κατά τους χειμερινούς μήνες ξεπερνούν κατά πολύ το όριο των ημερήσιων επεμβάσεων, ιδιαιτέρως στους σταθμούς της Αγ. Σοφίας, της Σίνδου και του Κορδελιού. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση των τιμών PM_{10} για την περίοδο 2001 – 2006, από την οποία γίνονται εμφανή όλα τα παραπάνω. Με τη λευκή διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται το όριο της ετήσιας μέσης τιμής που έπρεπε να είχε επιτευχθεί μέχρι το 2005 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ με την μαύρη διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται το όριο της ετήσιας μέσης τιμής του κάθε έτους. Σημειώνεται ότι για το 2005 δε δίνονται στατιστικά στοιχεία για το λόγο ότι λειτούργησαν μόλις οι δύο από τους τέσσερις συνολικά αναλυτές των αιωρούμενων σωματιδίων, για χρονικό διάστημα μόνο έξι μήνες.

Για όλα τα έτη και για σχεδόν όλους τους σταθμούς οι τιμές των συγκεντρώσεων βρίσκονται πάνω από τα όρια που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Είναι χαρακτηριστικό ότι για τα έτη 2001 και 2002, κατά τους χειμερινούς μήνες και για όλους σχεδόν τους σταθμούς, οι μέσες μηνιαίες συγκεντρώσεις PM_{10} είναι κατά προσέγγιση 50% πάνω από το όριο του 2005, ενώ ξεπερνούν κατά πολύ επίσης τα ετήσια όρια.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η συγκέντρωση των PM_{10} κατά τη διάρκεια του χειμώνα εμφανίζεται αυξημένη, κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς κατά το διάστημα αυτό είναι γενικά αυξημένες οι διεργασίες καύσης οι οποίες και αποτελούν την κύρια πηγή εκπομπών PM_{10} . Χαρακτηριστικά, η μέση συγκέντρωση των PM_{10} κατά τη χειμερινή περίοδο των ετών 2001-2006 είναι $54,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, όταν η αντίστοιχη μέση συγκέντρωση των PM_{10} για την περίοδο 2001-2006 είναι $49,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

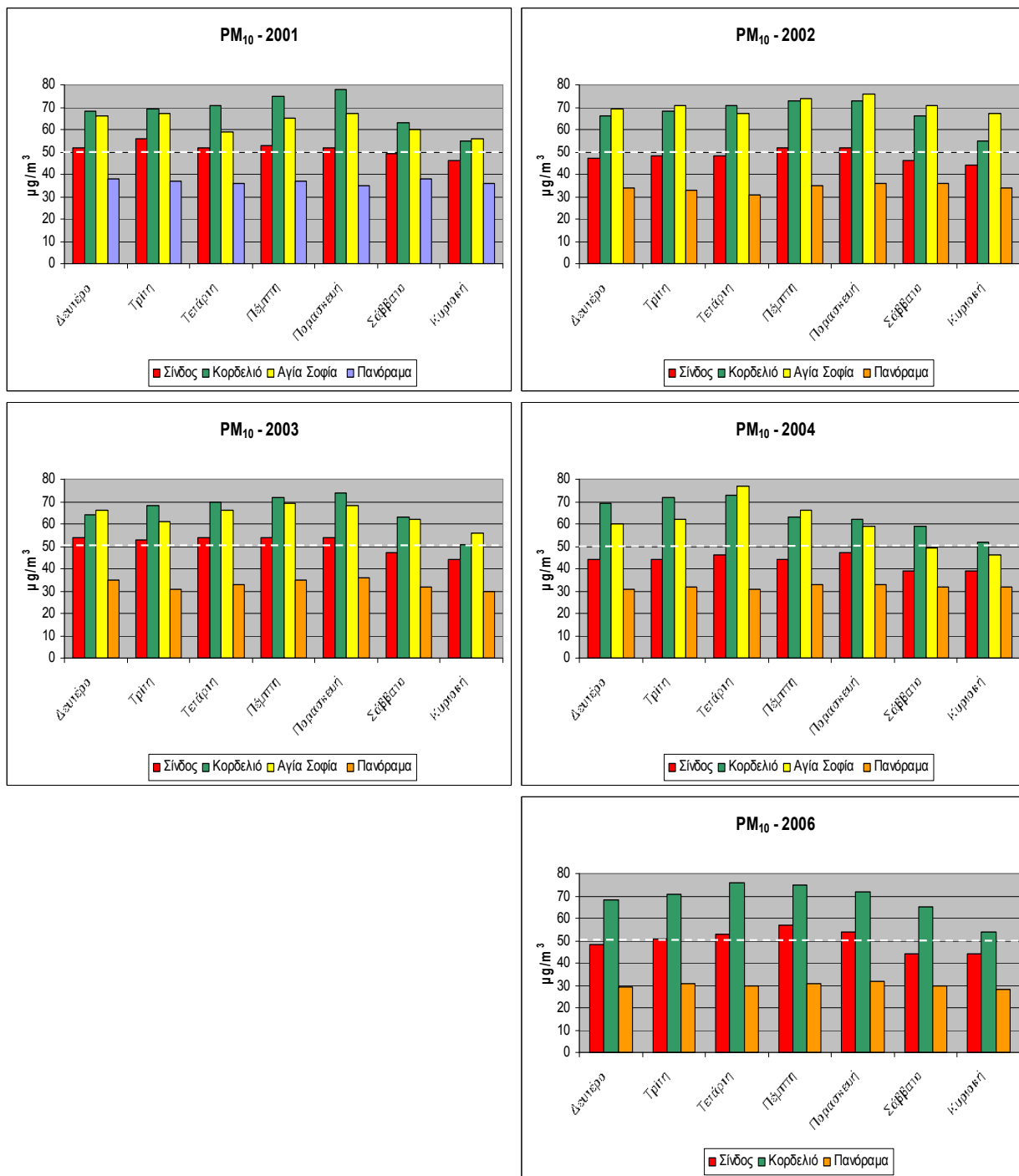
Από τη στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι ο Νοέμβριος είναι ο μήνας στον οποίο παρατηρείται η μέγιστη μέση τιμή των συγκεντρώσεων PM_{10} . Στον σταθμό του Κορδελιού, η μέση μηνιαία τιμή το Νοέμβριο του 2001 ήταν $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ η αντίστοιχη για το 2006 ήταν $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 2: Μηνιαία διακύμανση ανά έτος των τιμών PM₁₀

1.3. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά ημέρα εβδομάδας

Στο Σχήμα 3 αποτυπώνεται η αντίστοιχη εβδομαδιαία διακύμανση των μέσων ημερήσιων τιμών συγκεντρώσεων PM₁₀ για τα έτη 2001 – 2006. Γίνεται αντιληπτό ότι τις καθημερινές υπάρχει μια αισθητή αύξηση των συγκεντρώσεων σε σχέση με τα σαββατοκύριακα, γεγονός που οφείλεται αφενός στην παύση λειτουργίας των περισσότερων βιομηχανικών μονάδων τις

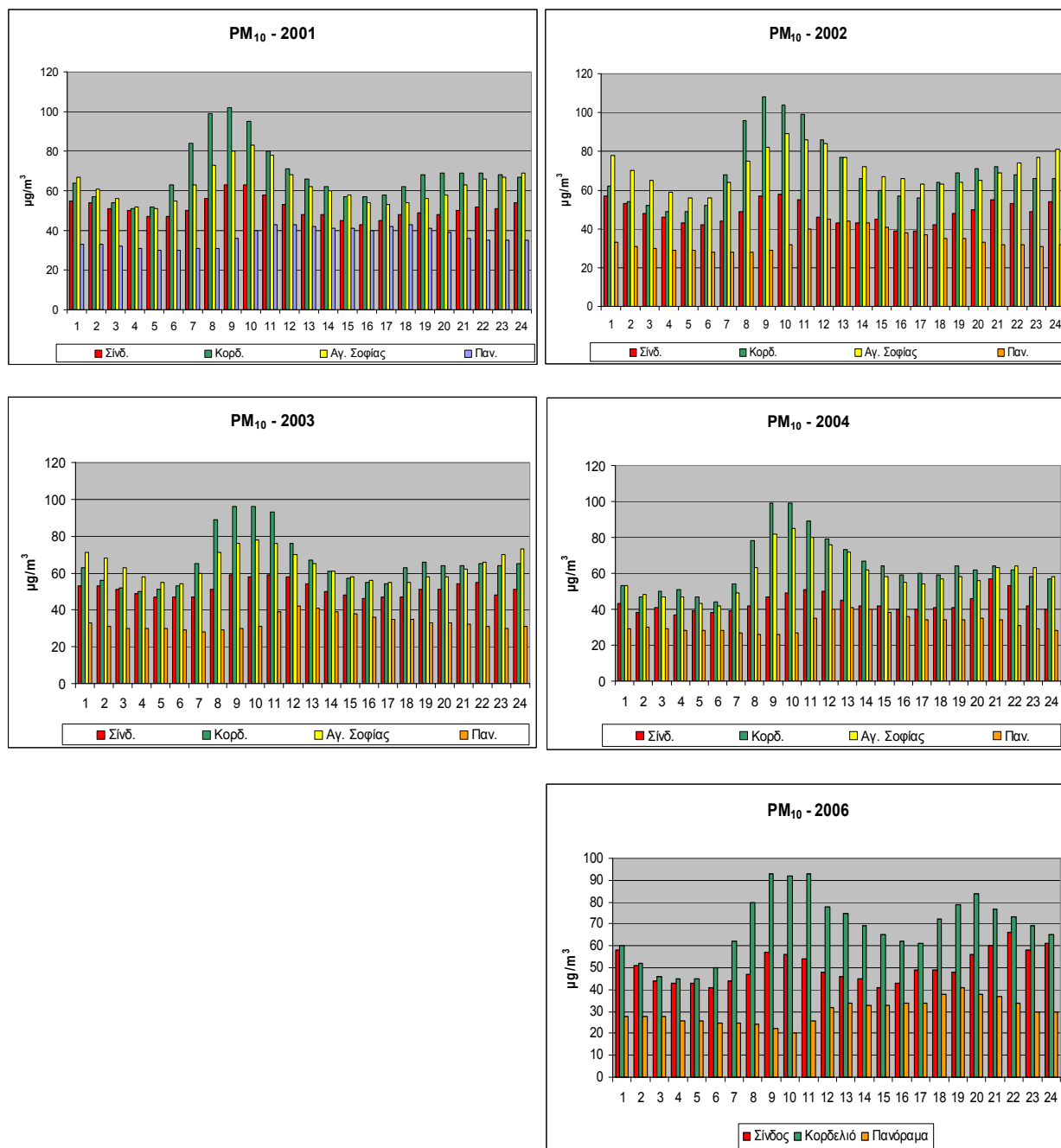


Σχήμα 3: Εβδομαδιαία διακύμανση μέσω ημερήσιων τιμών συγκεντρώσεων PM₁₀

ημέρες αυτές, αφετέρου στην ελάττωση του κυκλοφοριακού φορτίου. Διαχρονικά, η ημέρα με τις υψηλότερες μέσες τιμές συγκεντρώσεων εμφανίζεται να είναι η Παρασκευή, με μέση συγκέντρωση για τα έτη 2001-2006 τα 55,6μg/m³. Αντίθετα, η ημέρα με την μικρότερη μέση ημερήσια συγκέντρωση είναι η Κυριακή, με μέση συγκέντρωση για τα έτη 2001-2006 τα 45,5μg/m³.

1.4. Στατιστική ανάλυση μετρήσεων ανά ώρα

Από τα αντίστοιχα διαγράμματα των ημερήσιων μέσων ωριαίων τιμών (Σχήμα 4) είναι εμφανές ότι και κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις στα επίπεδα συγκεντρώσεων PM_{10} .



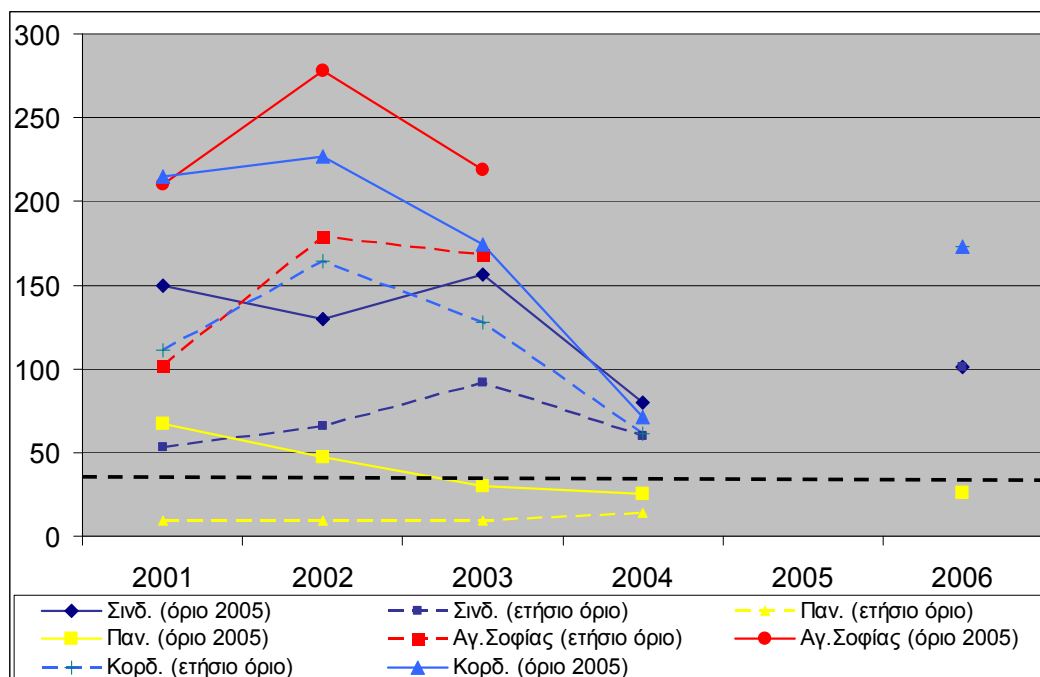
Σχήμα 4: Ημερήσια διακύμανση μέσων ωριαίων τιμών PM_{10}

Συνοπτικά, παρουσιάζονται δυο μέγιστα, ένα κατά τις πρωινές και ένα κατά τις βραδινές ώρες, τα οποία αντιστοιχούν στις αιχμές του κυκλοφοριακού φορτίου εξαιτίας είτε της

εργασίας, είτε της διασκέδασης. Οι ώρες αιχμής γενικά οριοθετούνται το πρωί από τις 9.00 π.μ. έως τις 11.00 π.μ. και το βράδυ από τις 21.00 έως τις 23.00 μ.μ.

1.5. Καταγραφή αριθμού υπερβάσεων

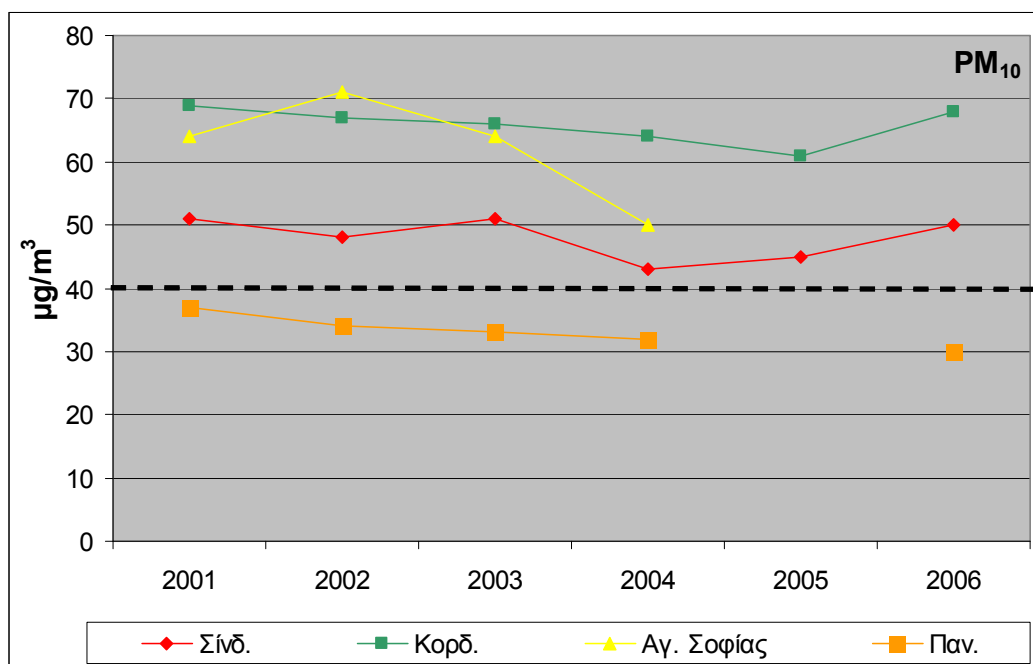
Παράλληλα, ο αριθμός υπερβάσεων που καταγράφηκε στο κέντρο της πόλης κατά τη διάρκεια των ετών 2001-2006, παρουσιάζεται επίσης υψηλός. Η θεσμοθετημένη από την Ευρωπαϊκή Ένωση ημερήσια οριακή τιμή για τα PM_{10} σχετίζεται με τη μέση ημερήσια συγκέντρωση, η οποία - όπως ήδη αναφέρθηκε - δεν πρέπει να υπερβαίνει περισσότερες από 35 φορές το χρόνο τα $50 \mu g/m^3$. Ο ελάχιστος αριθμός υπερβάσεων παρατηρείται, όπως είναι αναμενόμενο, στο Πανόραμα, που αποτελεί περιφερειακό σταθμό μέτρησης. Αντίθετα, στους σταθμούς της Σίνδου, του Κορδελιού και της Αγ. Σοφίας, οι συγκεντρώσεις PM_{10} ξεπερνούν κατά πολύ τα επίπεδα του προαναφερθέντος ορίου. Πιο συγκεκριμένα, ο ελάχιστος αριθμός υπερβάσεων (εμφανίζεται στο Πανόραμα) είναι 14 ημέρες για το έτος 2004. Αντίθετα, ο μέγιστος αριθμός υπερβάσεων παρατηρείται στο σταθμό της Αγ. Σοφίας το 2002, όπου καταγράφηκαν συνολικά 179 υπερβάσεις με βάση το ισχύον όριο για το έτος ($65 \mu g/m^3$). Στην περίπτωση που ίσχυε η τιμή-στόχος για το 2005, οι υπερβάσεις θα ανέρχονταν σε 278 ($50 \mu g/m^3$). Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι και κατά το έτος 2001, αν ίσχυε το όριο που τέθηκε σε ισχύ την 1/1/2005 ($50 \mu g/m^3$) και όχι το όριο των $70 \mu g/m^3$ που ίσχυε τότε, στο Κορδελιό οι υπερβάσεις θα ήταν διπλάσιες σε αριθμό, δηλαδή 215 αντί για 111.



Σχήμα 5: Ημερήσιες υπερβάσεις ορίων PM_{10}

Ομοίως, στην Αγ. Σοφία θα ήταν 210 αντί για 102 και στη Σίνδο 150 αντί για 53. Επιπλέον, μεγάλες διαφοροποιήσεις προς υψηλότερους αριθμούς υπερβάσεων θα εμφανίζονταν και στα ακόλουθα του 2001 έτη, σε μικρότερο βαθμό, βέβαια, λόγω της σταδιακής ετήσιας μείωσης του ορίου ανοχής. Το εν λόγω «χάσμα σύγκλισης» αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της ετήσιας συγκέντρωσης των PM_{10} για το διάστημα 2001-2006. Η τάση σταθεροποίησης των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων PM_{10} σε επίπεδα πάνω από το όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης ($40\mu g/m^3$) στους σταθμούς της Σίνδου, του Κορδελιού και της Αγ. Σοφίας είναι φανερή, ενώ ακόμη και για τον σταθμό του Πανοράματος, ο οποίος είναι περιαστικός σταθμός με σχετικά χαμηλό φόρτο κυκλοφοριακής κίνησης, τα επίπεδα PM_{10} εμφανίζονται πολύ κοντά στο όριο που τίθεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, και ειδικότερα εντός του αστικού ιστού, υφίσταται ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα όσον αφορά στις συγκεντρώσεις PM_{10} , το οποίο χρίζει όσο το δυνατόν αμεσότερης αντιμετώπισης.



Σχήμα 6: Διαχρονική μεταβολή ετήσιας συγκέντρωσης των PM_{10}

1.6. Συγκεντρωτικά στατιστικά μεγέθη για τα έτη 2001 - 2006

Στον Πίνακα 1 αποτυπώνονται αναλυτικά η μέση τιμή συγκεντρώσεων PM_{10} για τη διάρκεια του έτους, η μέγιστη ωριαία τιμή που παρατηρήθηκε, το 98% εκατοστημόριο, η πληρότητα των μετρήσεων, καθώς και οι υπερβάσεις των ορίων για τα PM_{10} για τα έτη 2001-2006 στους σταθμούς μέτρησης του Κορδελιού, Πανοράματος, Αγ. Σοφίας και Σίνδου.

Συμπερασματικά, η παρούσα κατάσταση σε σχέση με τα εισπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10}) κρίνεται ιδιαίτερα ανησυχητική καθώς κατά τα τελευταία χρόνια υπάρχει διαρκής παραβίαση των ορίων. Γενικά η κατάσταση εμφανίζεται προβληματική σε όλους τους σταθμούς, εκτός του Πανοράματος για τα έτη 2003, 2004 και 2006. Ειδικά στους σταθμούς Αγ. Σοφίας και Κορδελιού γίνονται διαρκώς παραβιάσεις των ορίων και είναι απαραίτητο να ληφθούν άμεσα μέτρα. Χαρακτηριστικά, στο σταθμό της Αγ. Σοφίας το 2003 παρατηρήθηκε παραβίαση του ορίου 278 ημέρες του έτους, ενώ σε πολύ λίγες περιπτώσεις οι παραβιάσεις ανά έτος έπεσαν κάτω από τις 100 ημέρες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθούν οι σημαντικότερες ελλείψεις στην καταγραφή των συγκεντρώσεων όλων των κατηγοριών των αιωρούμενων σωματιδίων στην πόλη της Θεσσαλονίκης, αφού σε πολλούς από τους διαθέσιμους σταθμούς και για αρκετά μεγάλες περιόδους δεν έχουν πραγματοποιηθεί αντίστοιχες μετρήσεις. Ως παράδειγμα αναφέρεται ότι ο σταθμός της Αγ. Σοφίας δεν αναφέρει καμία μέτρηση στο επίσημο ιστοχώρο της ΕΕΑ από το 2004.. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα περισσότερο κρίσιμο για την αδυναμία μέτρησης των επιπέδων συγκεντρώσεων αναπνεύσιμων αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα ($PM_{2,5}$), τα οποία θεωρούνται βάση της διεθνούς βιβλιογραφίας τα πλέον επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία από το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων καθώς μπορούν να διεισδύσουν βαθύτερα στο αναπνευστικό σύστημα και συνεπώς να προκαλέσουν μεγαλύτερες βλάβες.

Πίνακας 1: Μέση τιμή, μέγιστη τιμή, 98% εκατοστημόριο, πληρότητα μετρήσεων και υπερβάσεις ορίων PM₁₀

		2001	2002	2003	2004	2005	2006
ΚΟΡΔΕΛΙΟ	Μέση Τιμή (μg/m ³)	69	67	65.5	64	61	68
	Μέγιστη Ωριαία Τιμή (μg/m ³)	588	512	444	437	454	441
	98% Εκατοστημόριο	163.5	159.5	127.5	148.5	209	211
	Πληρότητα Μετρήσεων(%)	82	97	68	32.5	52.6	71,8
	Ημέρες με ημ. συγκ.>50 μg/m ³	215	227	174	71	110	173
	Ημέρες με ημ. συγκ. >ετήσιο όριο μg/m ³ *	111	164	128	61	110	173
ΠΑΝΟΡΑΜΑ	Μέση Τιμή (μg/m ³)	37	34	33	32	-	30
	Μέγιστη Ωριαία Τιμή (μg/m ³)	416	309	393	257	-	522
	98% Εκατοστημόριο	76	64.5	65.5	63	-	88
	Πληρότητα Μετρήσεων(%)	99	95.5	76.5	87	-	69
	Ημέρες με ημ. συγκ.>50 μg/m ³	67	47	30	25	-	26
	Ημέρες με ημ. συγκ. >ετήσιο όριο μg/m ³ *	9	9	9	14	-	26
ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ	Μέση Τιμή (μg/m ³)	64	71	64	49.5	-	-
	Μέγιστη Ωριαία Τιμή (μg/m ³)	503	431	414	302	-	-
	98% Εκατοστημόριο	155	146.5	129.5	99.5	-	-
	Πληρότητα Μετρήσεων(%)	92.5	98	89	14.5	-	-
	Ημέρες με ημ. συγκ.>50 μg/m ³	210	278	219	28	-	-
	Ημέρες με ημ. συγκ. >ετήσιο όριο μg/m ³ *	102	179	168	27	-	-
ΣΙΝΔΟΣ	Μέση Τιμή (μg/m ³)	51.5	48	51.5	43.5	44	50
	Μέγιστη Ωριαία Τιμή (μg/m ³)	717	434	347	639	797	575
	98% Εκατοστημόριο	123	99	65.5	87.5	196	167
	Πληρότητα Μετρήσεων(%)	99	97	91	78.5	38.3	69
	Ημέρες με ημ. συγκ.>50 μg/m ³	150	130	156	80	43	101
	Ημέρες με ημ. συγκ. >ετήσιο όριο μg/m ³ *	53	66	92	60	43	101

- : Δεν λειτούργησε το δίκτυο καταγραφής ρύπων

* : Η μέση ημερήσια τιμή να μην υπερβαίνεται πάνω από 35 φορές ανά έτος από 50 μg/m³ με περιθώριο ανοχής 50% κατά την έναρξη ισχύος, μειούμενο από 1/1/2001 και κατόπιν κάθε 12 μήνες κατά ίσο ετήσιο ποσοστό ώστε να φθάσει το 0% την 1/1/2005. Δηλαδή οι τιμές είναι 70, 65, 60, 55, 50 μg/m³, για τα έτη 2001-2005 αντίστοιχα.

1.7. Προέλευση Αιωρούμενων Σωματιδίων στη Θεσσαλονίκη

Οι υψηλές συγκεντρώσεις PM_{10} στην περιοχή της Θεσσαλονίκης προέρχονται από την συνδυασμένη δράση φυσικών και ανθρωπογενών πηγών. Ο διαχωρισμός αυτός, αντιστοιχεί στα επίπεδα συγκεντρώσεων της υπόβαθρης ρύπανσης, και τα επιπρόσθετα επίπεδα, τα οποία αθροίζονται στα συνολικά επίπεδα συγκεντρώσεων PM_{10} στην περιοχή. Η διακύμανση των τιμών συγκεντρώσεων εξαρτάται από μετεωρολογικές συνθήκες (που επηρεάζουν όμοια τις τιμές υπόβαθρης και επιπρόσθετης ρύπανσης), αλλά και από την προέλευση των αντίστοιχων εκπομπών. Είναι λοιπόν κεντρικό ζητούμενο η εξακρίβωση της προέλευσης των εκπομπών PM_{10} , και ως τέτοια νοείται ο εντοπισμός των πηγών, η αποτύπωση της διασποράς τους στο χώρο και της δραστηριότητάς τους στο χρόνο, και ο υπολογισμός της σχετικής συμμετοχής τους στη διαμόρφωση των τελικών εκπομπών.

Για την περιοχή της Θεσσαλονίκης έχουν γίνει στο παρελθόν ή είναι σε εξέλιξη σχετικές μελέτες², οι οποίες επικεντρώνονται

α) στην κυρίαρχη συνεισφορά της κυκλοφορίας, ιδιαίτερα εντός του πυκνού σκέλους του αστικού ιστού και

β) στις υψηλές τιμές υποβάθρου που επηρεάζουν τα συνολικά επίπεδα PM_{10} στην περιοχή

Παρά το γεγονός πως έχει επιτελεστεί μεγάλη πρόοδος στο θέμα του εντοπισμού των εκπομπών σε σχέση με το παρελθόν, φαίνεται πως δεν είναι ακόμη εφικτή η ολοκληρωμένη εκτίμηση αυτών, και ότι το ποσοστό αβεβαιότητας είναι σχετικά υψηλό.

² - Assael M.J., Delaki M., and Kakosimos K., “Applying the OSPM Model in the Calculation of PM_{10} Concentration Levels in the City of Thessaloniki”, Atmospheric Environment 42:65-77 (2008)

- Lemoni N, Nikolaou K “Assessment of the air quality influence on the house market values in Thessaloniki”, Fresenius Environmental Bulletin 15 (8): 950-958 (2006)

- E. Manoli, D. Voutsas and C. Samara, Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, Atmospheric Environment 36:949-961 (2002)

- Πετρακάκης, Παπαγιαννόπουλος, Κελέσης, Τζουμάκα κλπ (2008), Αξιολόγηση διαχρονικής εξέλιξης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, Πρακτικά 3^{ου} Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη (επιμέλεια Κ. Νικολάου)

- Νικολάου Κ., Ατμοσφαιρική ρύπανση στη Θεσσαλονίκη και σχεδιασμός αντιμετώπισής της, Περιβαλλοντικός σχεδιασμός και πληροφόρηση για την ατμοσφαιρική ρύπανση στη Θεσσαλονίκη: το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα APNEE-TU (pages 63-78), Οργανισμός Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος Θεσ/νίκης, 2005

- Σαμαρά – Κωνσταντίνου Κ., Αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης: Προέλευση – Επικινδυνότητα, <http://www.ecocity.gr/uploaded/files/static/Samara.doc>

2. Μελέτη χωροθέτησης των νέων διατάξεων

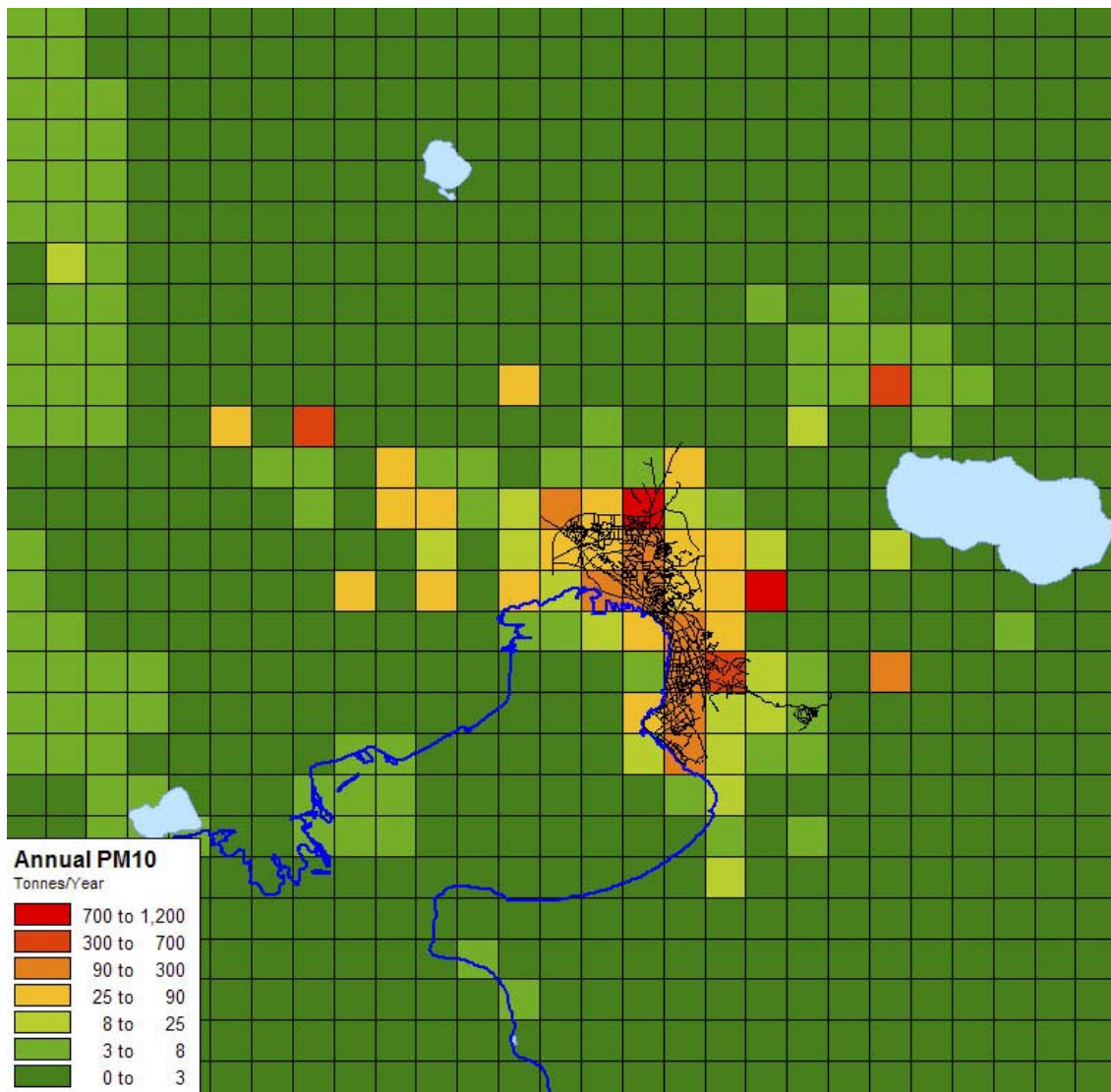
Η Ενότητα 1 έδειξε την ανάγκη προσεκτικής μελέτης των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης και συνεπώς τη σημασία του προτεινόμενου δικτύου παρακολούθησης αιωρούμενων σωματιδίων. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα προσδιορίζεται από τους αντικειμενικούς στόχους της παρακολούθησης. Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (EEA, 1999³) ένα δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα μπορεί να εξυπηρετεί έναν ή περισσότερους από τους παρακάτω στόχους:

1. Παρακολούθηση για τη συμμόρφωση στην υφιστάμενη νομοθεσία η οποία καθορίζει τα όρια ποιότητας του αέρα.
2. Παρακολούθηση για την αντιπροσωπευτική αποτίμηση της ποιότητας του αέρα σε μία περιοχή.
3. Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση.
4. Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κοντά σε μεγάλες πηγές εκπομπών ώστε να αποφεύγεται η μεγάλη επιβάρυνση γειτονικών περιοχών.
5. Παρακολούθηση για την καταγραφή/πρόγνωση επεισοδίων ρύπανσης, ώστε να υπάρχει προειδοποίηση στον πληθυσμό, και την λήψη εκτάκτων, βραχυπρόθεσμων μέτρων για τον περιορισμό των υψηλών συγκεντρώσεων.
6. Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την υποστήριξη ερευνητικών προσπαθειών.

2.1. Χωροθέτηση των παθητικών συλλεκτών σωματιδίων

Οι στόχοι του νέου δικτύου των παθητικών συλλεκτών σωματιδίων είναι διαφορετικοί και δεν υπάρχει σημαντική επικάλυψη με τους στόχους των υφισταμένων δικτύων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα στην Ευρύτερη Περιοχή Θεσσαλονίκης (ΕΠΘ). Τα υφιστάμενα δίκτυα εξυπηρετούν κυρίως ρυθμιστικούς σκοπούς με έμφαση τη συμμόρφωση στην υφιστάμενη νομοθεσία ενώ το νέο δίκτυο θα υποστηρίξει κυρίως ερευνητικές προσπάθειες, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα για την αντιπροσωπευτική αποτίμηση των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανση στην ΕΠΘ.

³ EEA (1999), Criteria for EUROAIRNET, The EEA Air Quality Monitoring and Information Network. Technical Report No. 12

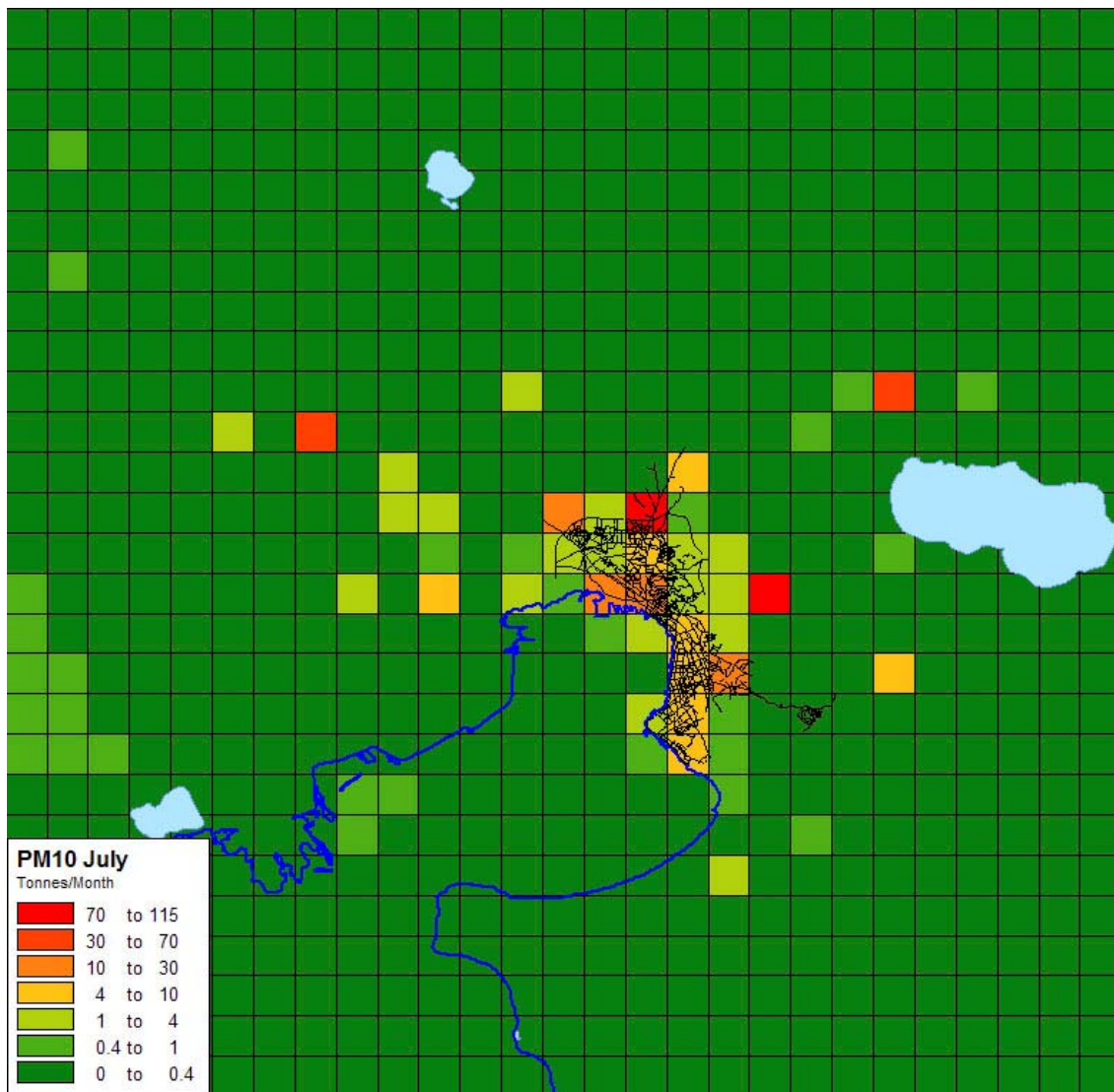


Σχήμα 7. Ετήσιες εκπομπές σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 10 m στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης⁴.

Τα κριτήρια για την ανάπτυξη του δικτύου περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

1. Επιλογή των περιοχών στις οποίες θα παρακολουθούνται τα επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης. Ο σχεδιασμός ενός δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές των ρύπων στην περιοχή ενδιαφέροντος καθώς και τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπως αυτά καταγράφονται από υφιστάμενους σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και από αποτελέσματα προσομοιώσεων με τη βοήθεια αριθμητικών μοντέλων. Ακόμη σημαντικό κριτήριο για τη χωροθέτηση σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα είναι και η έκθεση των ανθρώπων στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

⁴ Markakis K., Poupkou A and Melas D., "Compilation of a spatially and temporally disaggregated anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece", Science of the Total Environment (υπο δημοσίευση).



Σχήμα 8. Εκπομπές σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 10 m τον μήνα Ιούλιο στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης⁵.

2. Κατηγοριοποίηση των περιοχών παρακολούθησης. Προκειμένου να διευκολυνθεί η ανταλλαγή πληροφοριών εφαρμόζεται ένα σύστημα ταξινόμησης των σταθμών ποιότητας του αέρα (Πίνακας 2).
3. Περιοχή αντιπροσωπευτικότητας των σταθμών. Η περιοχή μέσα στην οποία δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές στα επίπεδα ρύπανσης ονομάζεται περιοχή αντιπροσωπευτικότητας του σταθμού. Ο προσδιορισμός της αντιπροσωπευτικότητας του σταθμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στην περίπτωση που τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού καθώς και στην περίπτωση που τα δεδομένα του σταθμού χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση μοντέλων διασποράς.

⁵ Markakis K., Poupkou A and Melas D., "Compilation of a spatially and temporally disaggregated anthropogenic PM₁₀ emission inventory for Greece", Science of the Total Environment (υπο δημοσίευση).

Πίνακας 2. Σύστημα ταξινόμησης των σταθμών ποιότητας του αέρα.

Type of station	Type of zone	Characterisation of zone
Traffic (T)	Urban (U)	Residential (R)
Industrial (I)	Suburban (S)	Commercial (C)
Background (B)	Rural (R)	Industrial (I)
		Agricultural (A)
		Natural (N)
		Res/Com (RC)
		Com/Ind (CI)
		Ind/Res (IR)
		Res/Com/Ind (RCI)
		Agri/Natural (AN)

4. Έλεγχος/διασφάλιση ποιότητας των μετρήσεων. Προκειμένου να σχεδιασθεί ένα σύστημα ελέγχου/διασφάλισης της ποιότητας των μετρήσεων θα πρέπει πρώτα να προσδιορισθούν οι αντικειμενικοί στόχοι της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Η ακρίβεια των μετρήσεων σχετίζεται άμεσα με τη χρήση για την οποία προορίζονται. Για το παρόν έργο σημαντικά κριτήρια για την ποιότητα των δεδομένων αποτελούν τα παρακάτω:

- Τα δεδομένα θα πρέπει να επιτρέπουν τη σύγκριση των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανσης σε ολόκληρη την ΕΠΘ.
- Οι σταθμοί θα πρέπει να είναι σε θέση να αποτυπώσουν τις μεγάλες χωρικές διαφορές οι οποίες μπορεί να εμφανίζονται σε μικρές σχετικά περιοχές (κυρίως το κέντρο της πόλης).
- Τα δεδομένα θα πρέπει να επιτρέψουν τη μελέτη της έκθεσης του πληθυσμού.

Η χωροθέτηση των σταθμών βασίσθηκε στα προαναφερθέντα κριτήρια καθώς και σε δεδομένα εκπομπών και ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ΕΠΘ. Στα Σχήματα 7 και 8 εμφανίζονται οι συνολικές ετήσιες καθώς και οι εκπομπές τον μήνα Ιούλιο στην ΕΠΘ. Οι σημαντικές διαφορές που εμφανίζονται ανάμεσα στα δύο σχήματα οφείλονται κατά κύριο λόγο στην λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι οποίες αποτελούν μια σημαντική πηγή αιωρούμένων σωματιδίων. Οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι οποίες συγκεντρώνονται κυρίως δυτικά-βορειοδυτικά της πόλης, αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή σωματιδίων στην ΕΠΘ. Υψηλές είναι επίσης οι εκπομπές από τη μεταφορά, κυρίως στο κέντρο της πόλης. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υφισταμένου δικτύου οδήγησαν στην χωροθέτηση των σταθμών η οποία εμφανίζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Προτεινόμενες περιοχές εγκατάστασης
είκοσι (20) παθητικών συλλεκτών σωματιδίων

Κέντρο της πόλης

1. Πλατεία Δημοκρατίας
2. Συμβολή Εγνατίας και Βενιζέλου
3. Συμβολή Εγνατίας και Αγίας Σοφίας
4. Πλατεία Συντριβανίου
5. Συμβολή Ερμού και Αριστοτέλους
6. Συμβολή Τσιμισκή και Σαλαμίνας
7. Συμβολή Νίκης και Αγίας Σοφίας
8. Συμβολή Αγίου Δημητρίου και Αγίας Σοφίας
9. Πλατεία Διοικητηρίου

Δυτικές συνοικίες

10. Νέα Ευκαρπία (Κοινότητα)
11. Άνω Ηλιούπολη (Πλατεία Ελευθερίας)
12. Εύοσμος (Καραολή Δημητρίου και Μεγάλου Αλεξάνδρου)
13. Ελευθέριο Κορδελιό
14. Μενεμένη ή Αμπελόκηποι (Μοναστηρίου)
15. Νεάπολη
16. Διαβατά (Δημοτικό Διαμέρισμα)
17. Σίνδος (ΤΕΙ)

Ανατολικές συνοικίες

18. Πυλαία ή Χαριλάου (Μαρασλή & Παπαναστασίου)
 19. Θέρμη
 20. Καλαμαριά (Πεζόδρομο & Εκκλησία)
-

3. Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης μέτρησης Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Αιωρούμενων Σωματιδίων

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, και επιπλέον της μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, κρίθηκε απαραίτητη η μέτρηση και η καταγραφή της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Η μέτρηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος είναι μια σχετικά εύκολη διαδικασία, απαιτείται ειδική διάταξη η οποία είναι σε θέση να μετατρέπει τη μεταβολή των δύο αυτών μεγεθών σε ηλεκτρικές μεταβολές και στη συνέχεια την καταγραφή τους. Αντίθετα, η μέτρηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι αρκετά πιο πολύπλοκη διαδικασία, ενώ πραγματοποιείται

- α) κυρίως με την καταμέτρηση των σωματιδίων (πλήθους ή μάζας) που αναρροφούνται (ενεργητική διαδικασία) ή
- β) επικάθονται (παθητική διαδικασία).

Η πρώτη μέθοδος απαιτεί εξειδικευμένες συσκευές, στις οποίες η καταμέτρηση γίνεται αυτόματα, αλλά είναι συνήθως πολύ υψηλού κόστους, ενώ η δεύτερη μέθοδος είναι σχετικά πιο απλή, χαμηλού κόστους, όμως απαιτείται να γίνει μια σειρά προσεκτικών βαθμονομήσεων για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Λόγω του μεγάλου αριθμού συσκευών που απαιτούνται ώστε να υπάρχει μία ολοκληρωμένη εικόνα των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων σε όλο το πολεοδομικό συγκρότημα, επιλέχτηκε η χρήση των παθητικών συσκευών. Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά της ολοκληρωμένης μετρητικής διάταξης για τα ανωτέρω τρία μεγέθη και οι προτεινόμενες μορφές αυτής.

3.1. Απαιτούμενα χαρακτηριστικά μετρητικής διάταξης

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή των επιπέδων της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην μητροπολιτική Θεσσαλονίκη. Συνεπώς απαιτείται ένας σημαντικός αριθμός μετρητικών διατάξεων για την υλοποίηση του στόχου αυτού. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρεί η προτεινόμενη μετρητική διάταξη είναι:

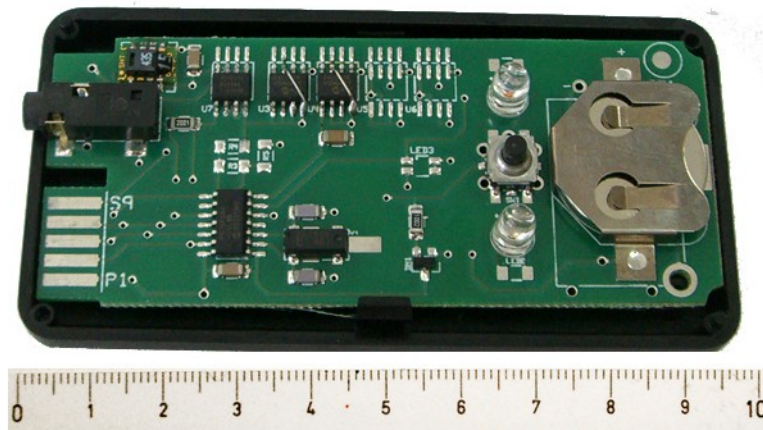
- Χαμηλό κόστος υλικού και κατασκευής.
- Να έχει τη δυνατότητα να καταγράφει επικουρικά τη θερμοκρασία και την υγρασία τουλάχιστον σε ωριαία βάση, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.
- Η επεξεργασία των μετρήσεων να μην απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και συσκευές, ώστε να διατηρείται το συνολικό κόστος σε χαμηλά επίπεδα.

- Διακριτική εμφάνιση, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία εντός του αστικού ιστού χωρίς να μεταβάλλουν αισθητικά και λειτουργικά τον περιβάλλοντα χώρο
- Εύκολη τοποθέτηση και ανάκτηση των μετρήσεων, λαμβάνοντας υπόψη το προαπαιτούμενο χαμηλό κόστος είναι αναγκαίο η συλλογή των δεδομένων να γίνεται με επιτόπια επίσκεψη.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω αλλά και ένα πλήθος δευτερευόντων παραγόντων έγινε αντίστοιχη έρευνα αγοράς για την επιλογή των καταλληλότερων καταγραφικών θερμοκρασίας/ υγρασίας καθώς και μετρητικών αιωρούμενων σωματιδίων.

3.1.1. Καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας

Μετά από έρευνα στο διαδίκτυο, για τη χρονική καταγραφή της θερμοκρασίας και της υγρασίας επιλέχθηκε ένα μετρητικό ευρωπαϊκής προέλευσης και χαμηλού κόστους (Σχήμα 9). Η συσκευή χρησιμοποιεί έναν ημιαγωγό για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με ακρίβεια $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και για τη μέτρηση της υγρασίας με ακρίβεια $\pm 3.5\text{ \%RH}$. Επιπρόσθετα μπορεί να καταγράψει μέχρι 8,000 μετρήσεις σε εσωτερικά διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο. Η συσκευή διατίθεται με πιστοποιητικό βαθμονόμησης.



Σχήμα 9. Μετρητική συσκευή θερμοκρασίας και υγρασίας.

3.1.2. Παθητικός συλλέκτης αιωρούμενων σωματιδίων

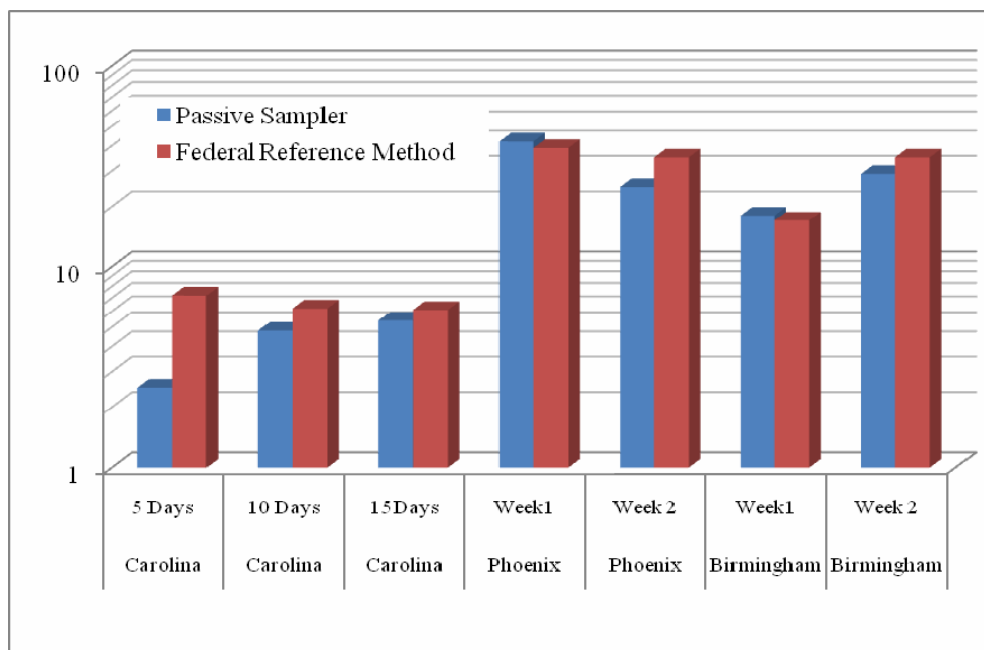
Όπως προαναφέρθηκε, αναφορικά με τη μέτρηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων επιλέχθηκε η αναζήτηση ενός παθητικού συλλέκτη σωματιδίων αντί ενός ενεργητικού, με γνώμονα το χαμηλό κόστος του δεύτερου. Έπειτα από σχετική έρευνα επιλέχθηκε ο παθητικός συλλέκτης σωματιδίων που φαίνεται στο Σχήμα 10. Πρόκειται για έναν μικρό συλλέκτη διαμέτρου μόλις 1.5 cm πλατύ και βάρους 1.7 g.



Σχήμα 10. Παθητικός συλλέκτης αιωρούμενων σωματιδίων (διάμετρος 1.5 cm).

Δεν απαιτείται η χρήση ηλεκτρικής παροχής ενώ μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Στο παρελθόν, αντίστοιχος συλλέκτης, έχει χρησιμοποιηθεί και αξιολογηθεί σε μια πληθώρα ερευνητικών εργασιών. Η απόκλιση των μετρήσεων του, έναντι των ενεργητικών μεθόδων, κυμαίνεται από $\pm 50\%$ για διάστημα εφαρμογής μερικών ημερών, ως $\pm 15\%$ για διάστημα εφαρμογής 2 ή και περισσότερων εβδομάδων. Στο Σχήμα 11, παρουσιάζει ενδεικτικά μια από τις αξιολογήσεις του παθητικού συλλέκτη. Είναι προφανές ότι ο προτεινόμενος παθητικός συλλέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή χρήσιμων όχι μόνον ποιοτικών αλλά και ποσοτικών συμπερασμάτων για τα επίπεδα συγκέντρωσης στην μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Το βασικό πρόβλημα των παθητικών συλλεκτών είναι ότι απαιτούν μία πολύ προσεκτική και επίπονη βαθμονόμηση έτσι ώστε η οπτική χρονική καταμέτρηση των σωματιδίων που επικάθονται να μετατραπεί σε συγκέντρωση σωματιδίων στον αέρα. Η διαδικασία αυτή για το συγκεκριμένο αισθητήρα έχει ολοκληρωθεί στο Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων.

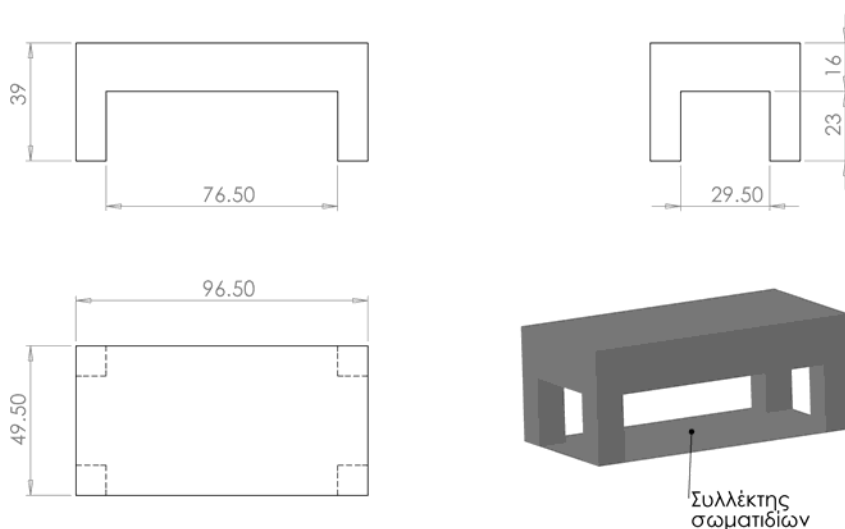


Σχήμα 11. Σύγκριση των μετρήσεων ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) του παθητικού συλλέκτη έναντι της προτεινόμενης μεθόδου μέτρησης (EPA US), για 3 διαφορετικές περιοχές και διαφορετικά χρονικά διαστήματα.

3.2. Περιγραφή των δόκιμων διατάξεων

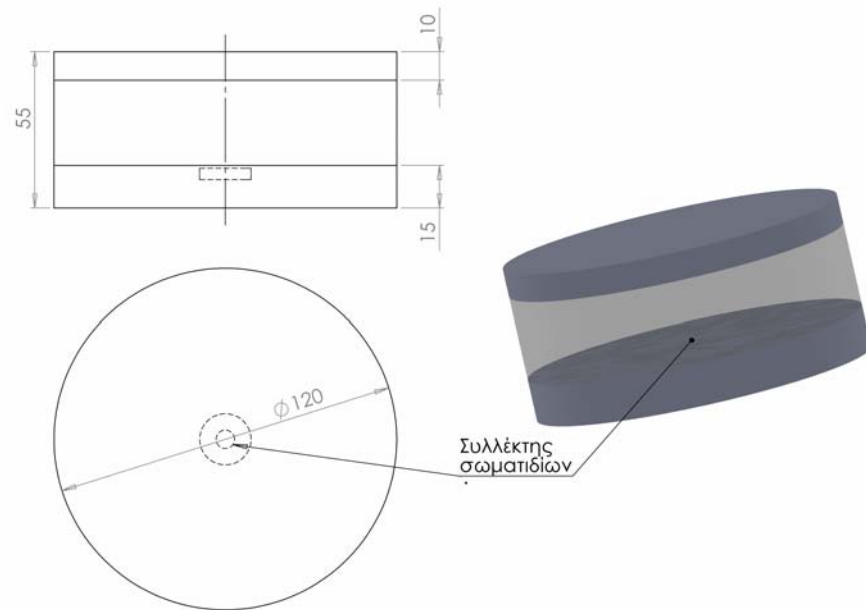
Τόσο το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας όσο ο παθητικός συλλέκτης αιωρούμενων σωματιδίων θα πρέπει να εκτεθούν για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να σχεδιαστεί μια κατάλληλη διάταξη η οποία θα περιέχει και τις δύο αυτές συσκευές. Η διάταξη αυτή θα πρέπει επίσης να πληρεί τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο και επιπλέον θα πρέπει να προστατεύει τις συσκευές κυρίως από τη βροχή και την άμεση έκθεση στην ακτινοβολία του ήλιου. Προτάθηκαν σταδιακά 4 διατάξεις (3 κύριες και μία παραλλαγή). Αυτές είναι:

- **Δόκιμη διάταξη 1** (Σχήμα 12), αποτελείται από ένα παραλληλεπίπεδο στο εσωτερικό δάπεδο του οποίου τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης, στην εσωτερική οροφή το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα πλαϊνά τοιχώματα έχουν αφαιρεθεί, πλην των τεσσάρων τετραγωνικών στηριγμάτων, και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα.



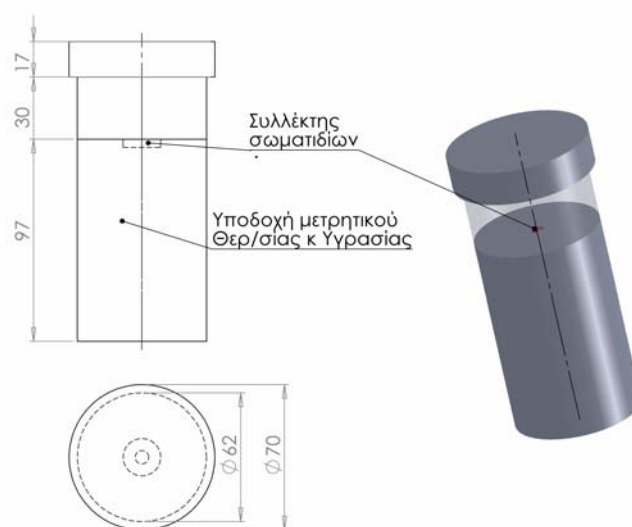
Σχήμα 12. Περιγραφή δόκιμης διάταξης 1, παραλληλεπίπεδο (διαστάσεις σε mm)

- **Δόκιμη διάταξη 2** (Σχήμα 13), αποτελείται από ένα μεγάλο κύλινδρο στο εσωτερικό δάπεδο του οποίου τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης. Κάτω από το δάπεδο και τον συλλέκτη τοποθετείται το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα πλαϊνά τοιχώματα έχουν αφαιρεθεί, και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα.



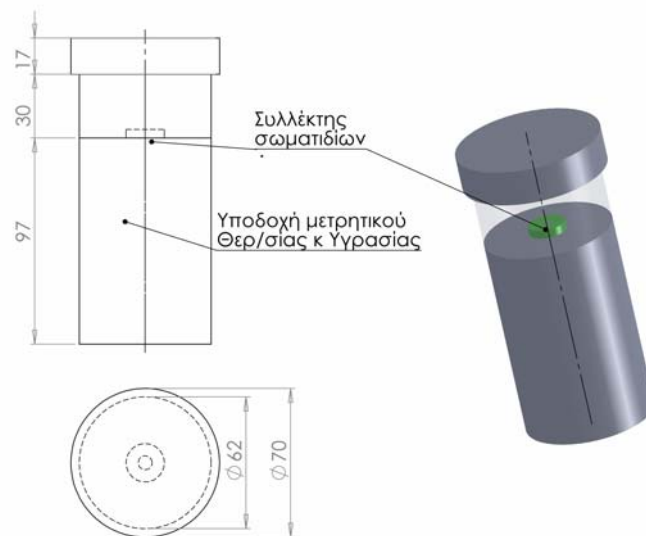
Σχήμα 13: Περιγραφή δόκιμης διάταξης 2, μεγάλος κύλινδρος (διαστάσεις σε mm)

- **Δόκιμη διάταξη 3** (Σχήμα 14), αποτελείται από ένα μικρό κύλινδρο χωρισμένο σε δύο διαφορετικά τμήματα. Στο κάτω μέρος του άνω τμήματος τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης. Ενώ στο εσωτερικό του κάτω τμήματος και με κατακόρυφο προσανατολισμό τοποθετείται το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Το μεγαλύτερο μέρος των πλαϊνών τοιχωμάτων του άνω τμήματος έχει αφαιρεθεί και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα. Αντίστοιχα αφαιρείται και το δάπεδο του κάτω τμήματος (αντικαθίσταται με πλέγμα) ώστε το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας να έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.



Σχήμα 14. Περιγραφή δόκιμης διάταξης 3, μικρός κύλινδρος (διαστάσεις σε mm)

- **Δόκιμη διάταξη 4** (Σχήμα 15), είναι ίδια με την δόκιμη διάταξη 3, όμως ο παθητικός συλλέκτης βρίσκεται ελαφρά ανυψωμένος σε σχέση με το δάπεδο του άνω τμήματος της διάταξης.



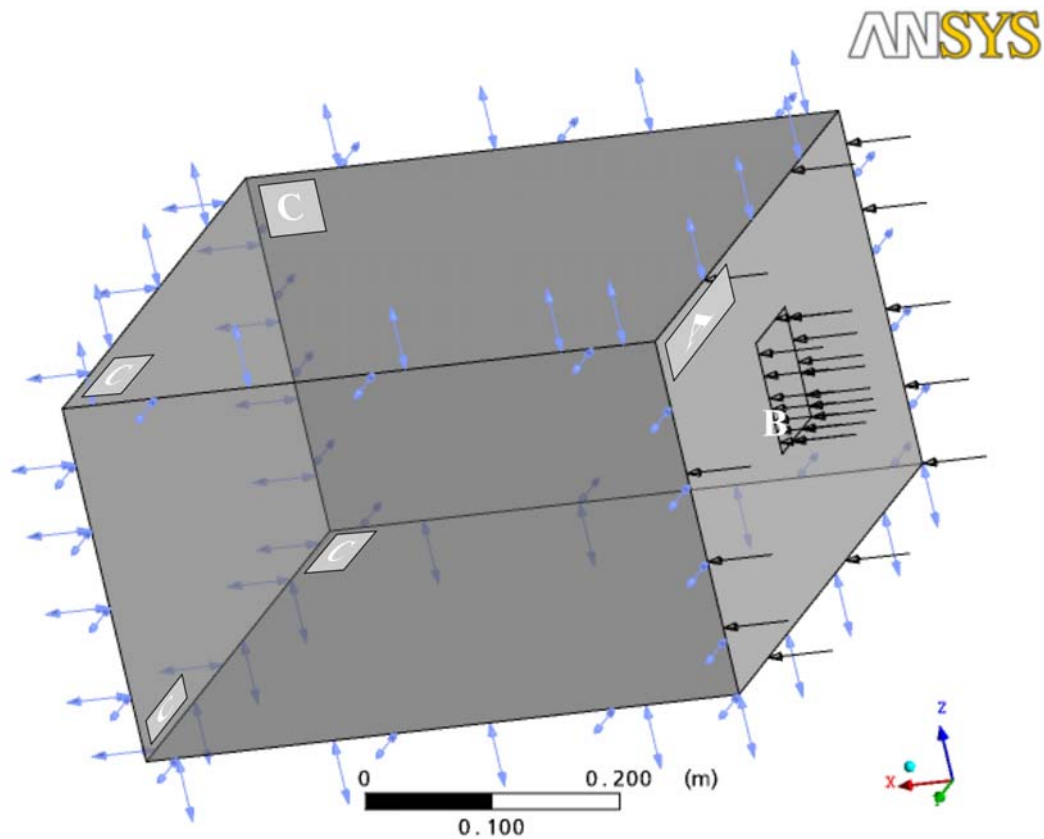
Σχήμα 15: Αναπαράσταση της δόκιμης διάταξης 4 (διαστάσεις σε mm)

3.3. Αξιολόγηση των δυνατοτήτων μέτρησης κάθε διάταξης

Για την αξιολόγηση της κάθε δόκιμης διάταξης, μελετήθηκε η επίδραση αυτής στην απόδοση του παθητικού συλλέκτη σε σχέση με τον «ελεύθερο συλλέκτη». Σύγχρονα εργαλεία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (ANSYS CFX) χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση μιας σειράς από προσομοιώσεις.

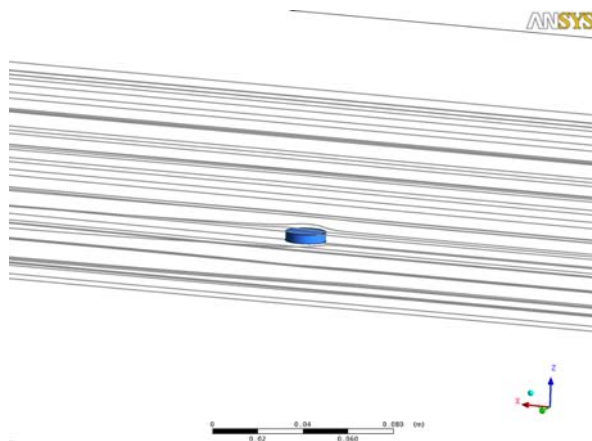
3.3.1. Περιγραφή του εικονικού προβλήματος αξιολόγησης των δόκιμων διατάξεων

Το εικονικό πρόβλημα που χρησιμοποιήθηκε εμφανίζεται στο Σχήμα 16. Αποτελείται από μια απλή γεωμετρία (έναν τρισδιάστατο χώρο) από τη μία πλευρά (A) του οποίου εισέρχεται αέρας 25 °C, με ταχύτητας αναφοράς 0.3 m/s (ή 1 m/s εναλλακτικά). Στην ίδια πλευρά και από ένα άνοιγμα (B) εισέρχονται αιωρούμενα σωματίδια (διαμέτρου από 0.1 μm έως 10 μm) με την ίδια ταχύτητα όπως και το ρέυμα αέρα. Από όλες τις υπόλοιπες πλευρές (C), ο αέρας εξέρχεται ελεύθερα. Η κατανομή τους πλήθους των σωματιδίων σε συνάρτηση με την διάμετρο τους επιλέχθηκε να είναι ίση με αυτή που μετρήθηκε σε παλαιότερη ερευνητική εργασία (Σαμαρά, 2005) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης.

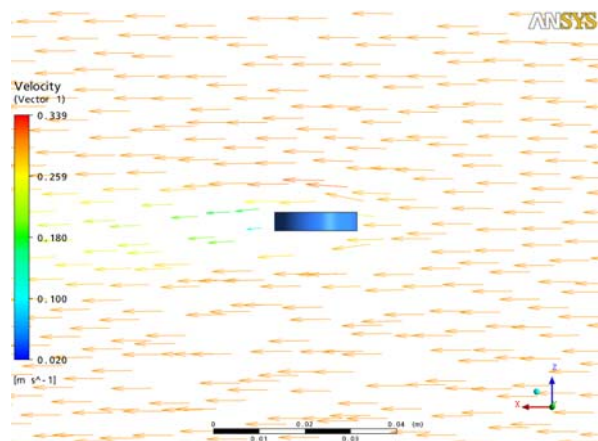


Σχήμα 16: Περιγραφή εικονικού προβλήματος για την αξιολόγηση των δόκιμων μετρητικών διατάξεων.

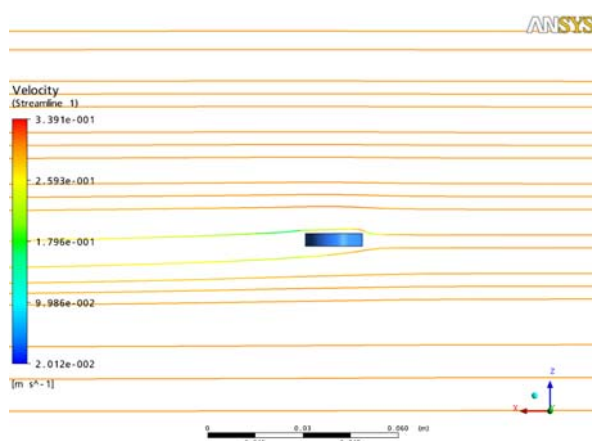
Στο κέντρο της γεωμετρίας βρίσκεται μια απλοποιημένη μορφή της εκάστοτε διάταξης με τον παθητικό συλλέκτη αιωρούμενων σωματιδίων. Για κάθε δόκιμη διάταξη και για τις δύο ταχύτητες που εξετάστηκαν (0.3 m/s και 1 m/s) παρουσιάζονται σε αντίστοιχα σχήματα α) οι τροχιές των αιωρούμενων σωματιδίων, β) οι ταχύτητες του πεδίου ροής του αέρα, γ) οι ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής και δ) η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων που προσπίπτει στην επιφάνεια της διάταξης.



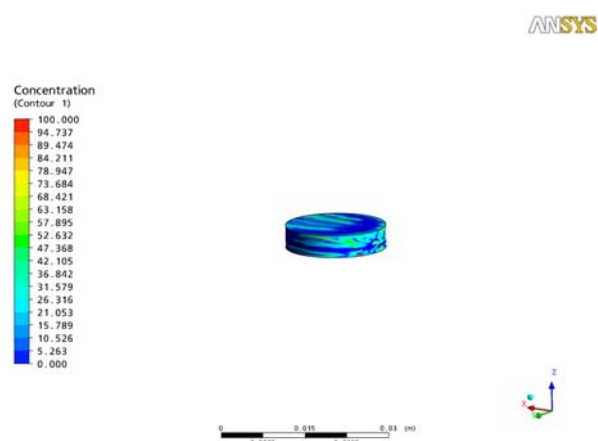
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



γ) Ροϊκές γραμμές

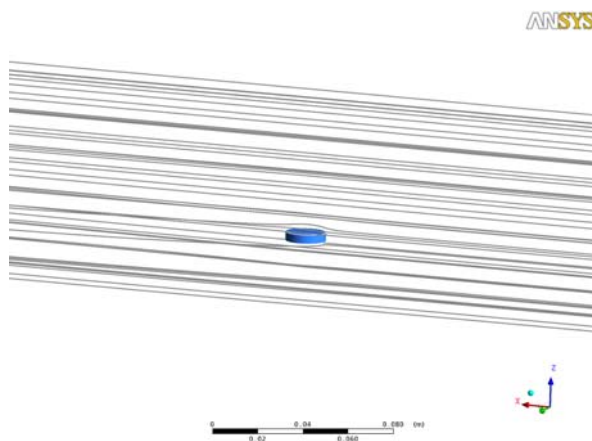


δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

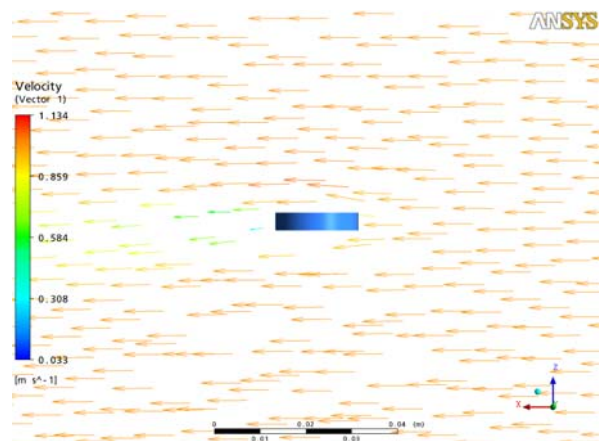
Σχήμα 17. Διάταξη αναφοράς - Ελεύθερος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η ροή γύρω από τον παθητικό συλλέκτη αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς και η πορεία των σωματιδίων όπως τον προσεγγίζουν. Η χρωματική απεικόνιση της συγκέντρωσης των σωματιδίων που επικάθονται πάνω στο συλλέκτη, φαίνεται στη Σχήμα 17δ, όταν η ταχύτητα αναφοράς είναι 0.3 m/s.

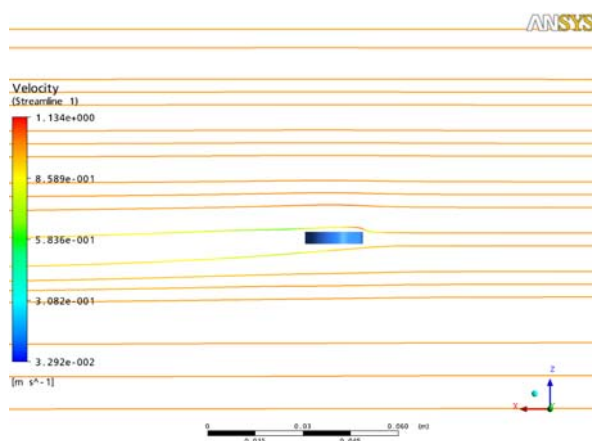
Αυτή η διάταξη χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις δόκιμες διατάξεις που ακολουθούν.



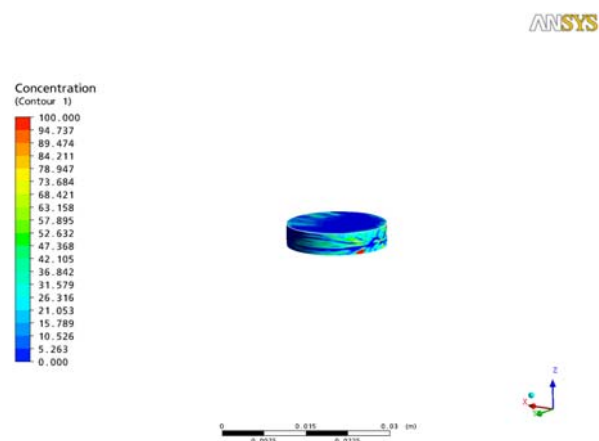
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



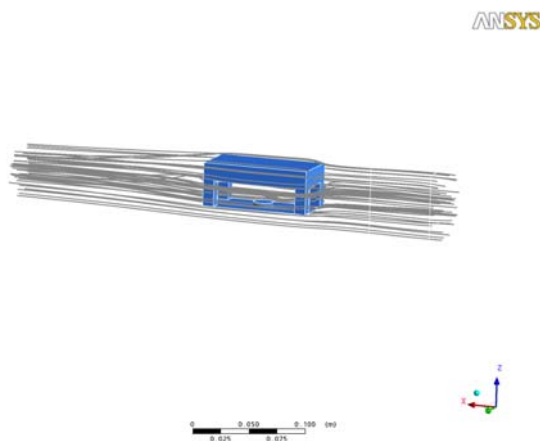
γ) Ροϊκές γραμμές



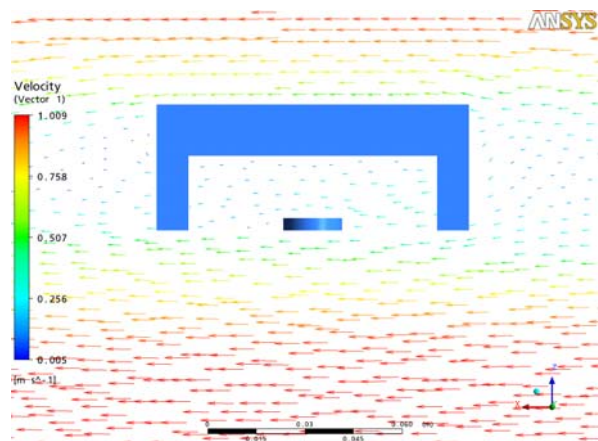
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 18. Διάταξη αναφοράς - Ελεύθερος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 1 m/s

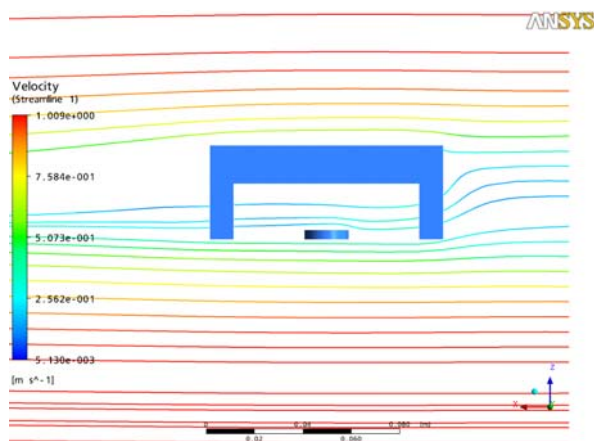
Αντίστοιχα με το Σχήμα 17, στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ίδια διάταξη αλλά ταχύτητα αναφοράς 1 m/s. Όπως αναμενόταν, ο ρυθμός των σωματιδίων που προσπίπτουν στο συλλέκτη έχει αισθητά μειωθεί.



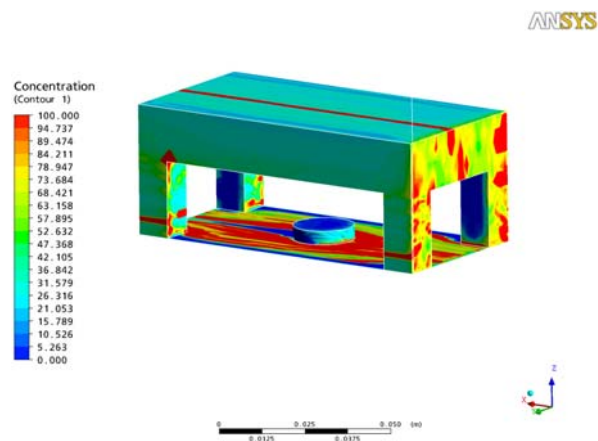
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



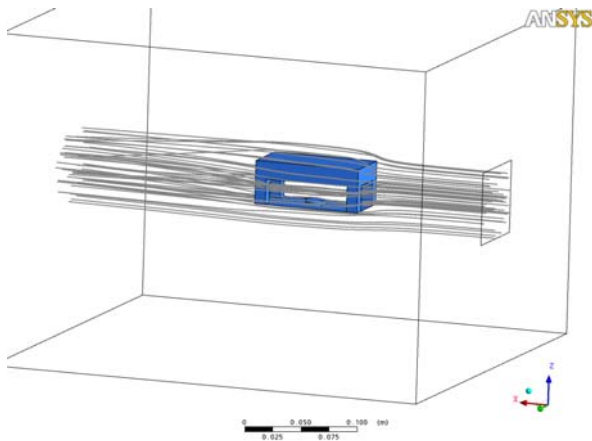
γ) Ροϊκές γραμμές



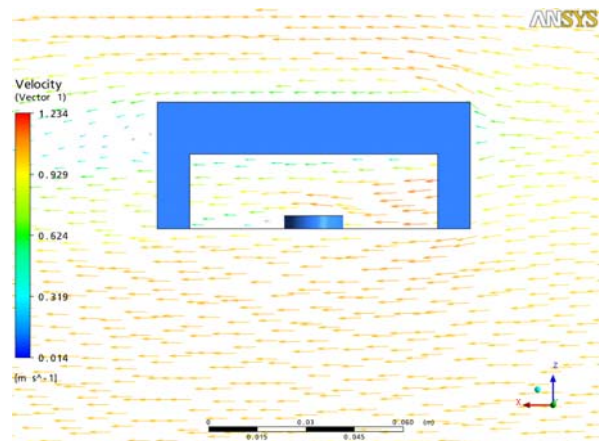
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 19. Δόκιμη διάταξη 1 – Παραλληλεπίπεδο και ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s

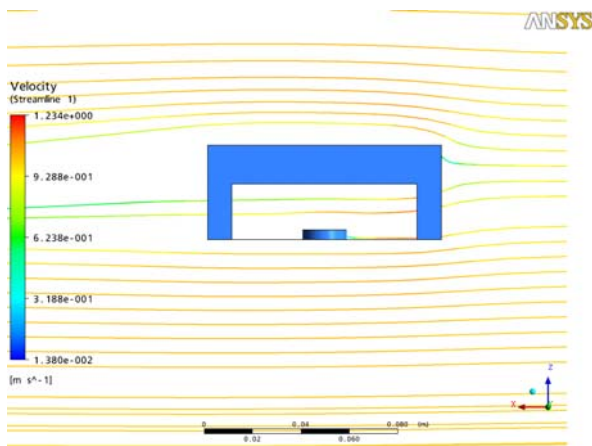
Η Δόκιμη Διάταξη 1, αποτελεί την πρώτη διάταξη που δοκιμάστηκε, και ήταν ένα παραλληλεπίπεδο από το οποίο έχουν αφαιρεθεί οι πλευρές του ώστε να επιτρέπεται ελεύθερα η είσοδος του αέρα. Παρόλο αυτό, και όπως φαίνεται, τα κάθετα τμήματα που παρέμειναν για λόγους στήριξης, παρεμποδίζουν ουσιαστικά την ελεύθερη ροή των αιωρούμενων σωματιδίων προς το συλλέκτη.



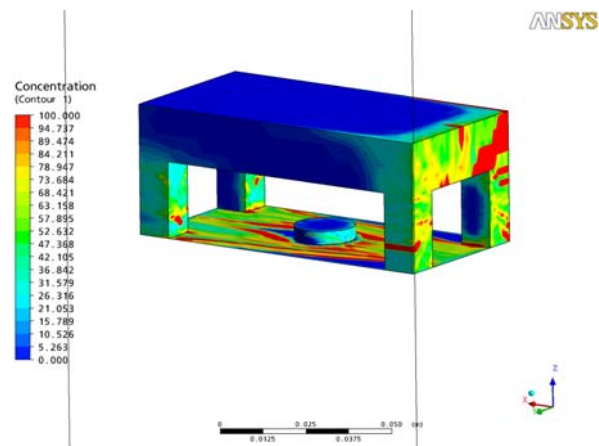
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



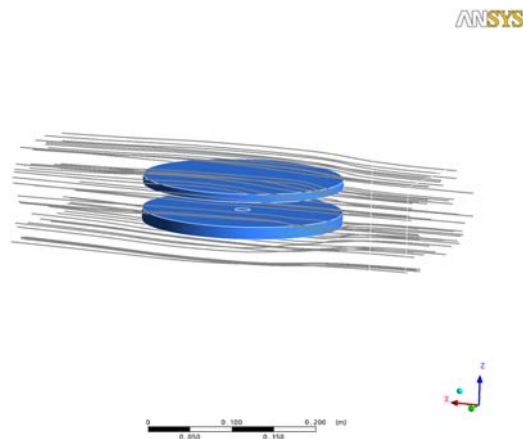
γ) Ροϊκές γραμμές



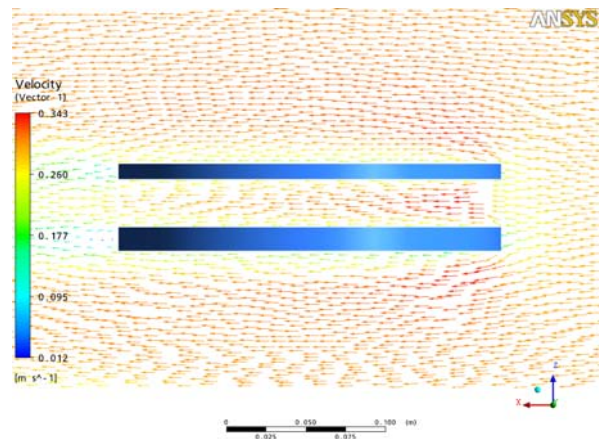
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 20. Δόκιμη διάταξη 1 – Παραλληλεπίπεδο και ταχύτητα αναφοράς 1 m/s

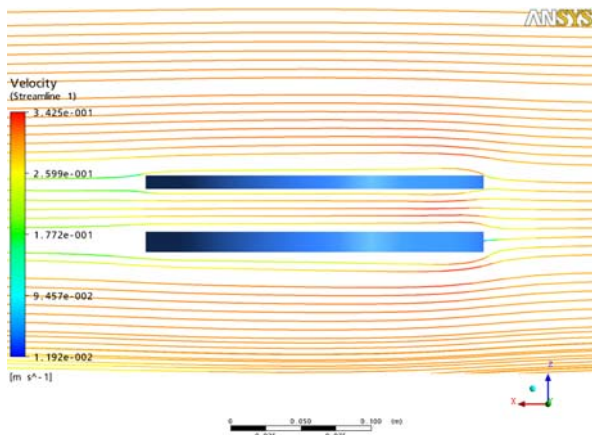
Αντίστοιχα με το Σχήμα 19, στο Σχήμα 20 το φαινόμενο της παρεμπόδισης είναι ακόμα μεγαλύτερο καθώς η ταχύτητα αυξάνεται από 0.3 m/s στο 1 m/s.



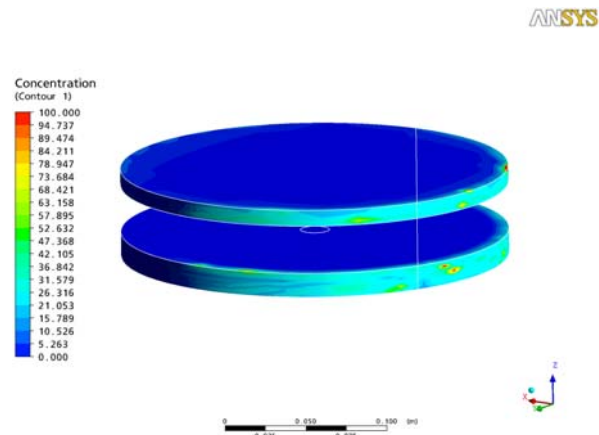
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



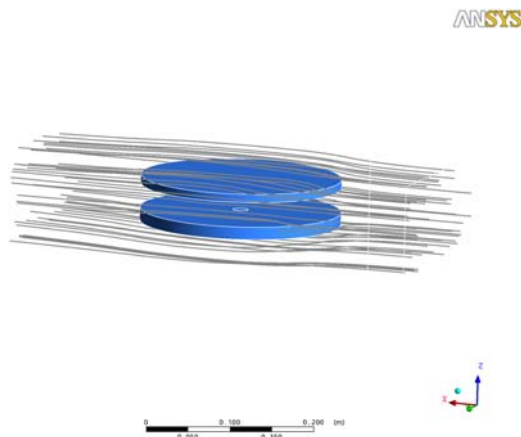
γ) Ροϊκές γραμμές



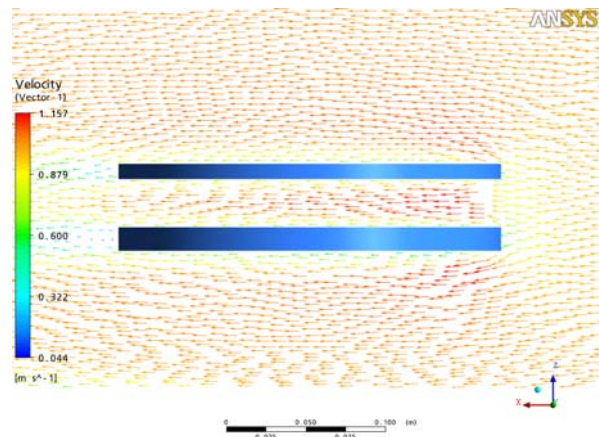
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 21. Δόκιμη διάταξη 2 – Μεγάλος κύλινδρος και ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s

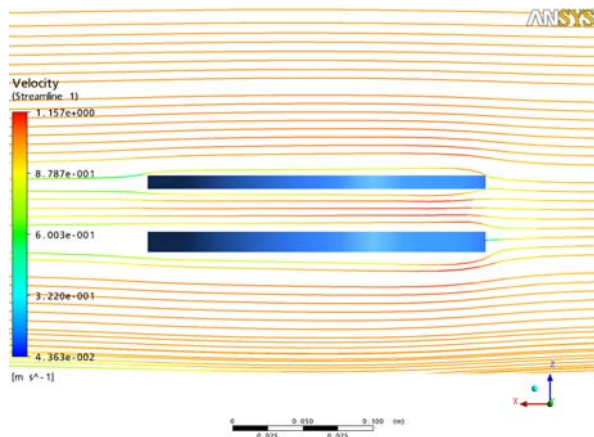
Οι παρατηρήσεις στη διάταξη του παραλληλεπιπέδου οδήγησαν σε κυλινδρικές διατάξεις που παρουσιάζουν το επιπλέον πλεονέκτημα επίτευξης επιθυμητής συμμετρίας. Στη Δόκιμη Διάταξη 2 επιλέχθηκε ένας μεγάλος κύλινδρος διαμέτρου 13 cm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 21. Η μεγάλη διάμετρος του κυλίνδρου φαίνεται να δημιουργεί μια πλήρως αναπτυγμένη ροή στο εσωτερικό του, γεγονός που περιορίζει τον αριθμό των σωματιδίων που συλλέγονται.



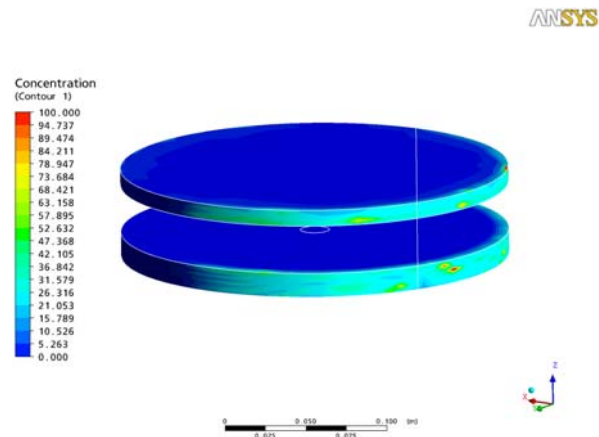
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



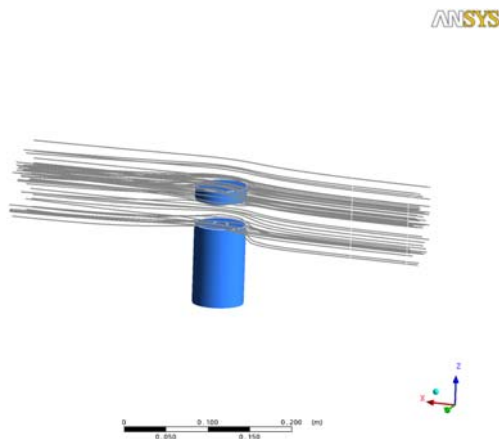
γ) Ροϊκές γραμμές



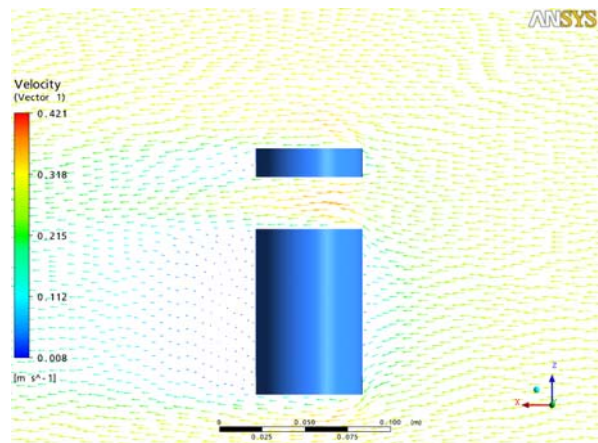
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 22. Δόκιμη διάταξη 2 – Μεγάλος κύλινδρος και ταχύτητα αναφοράς 1 m/s

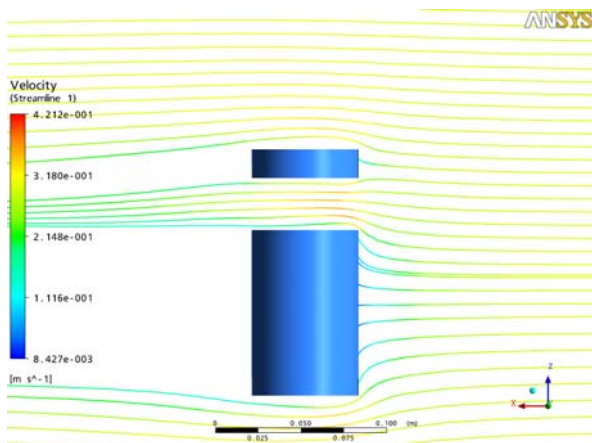
Οι παρατηρήσεις για τη διάταξη του Σχήματος 21, ισχύουν και για την ανωτέρω περίπτωση που η ταχύτητα αυξάνεται από 0.3 m/s σε 1 m/s.



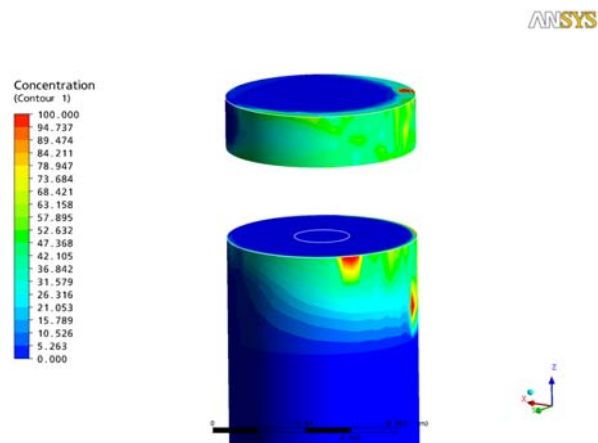
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



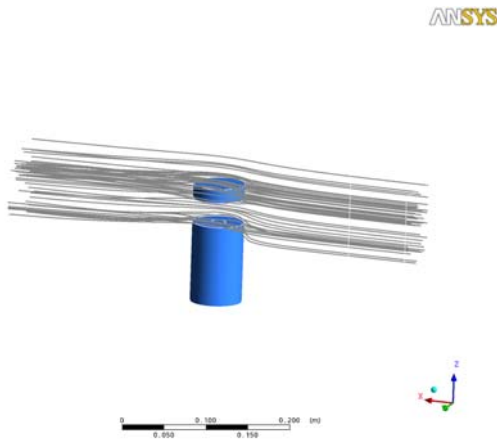
γ) Ροϊκές γραμμές



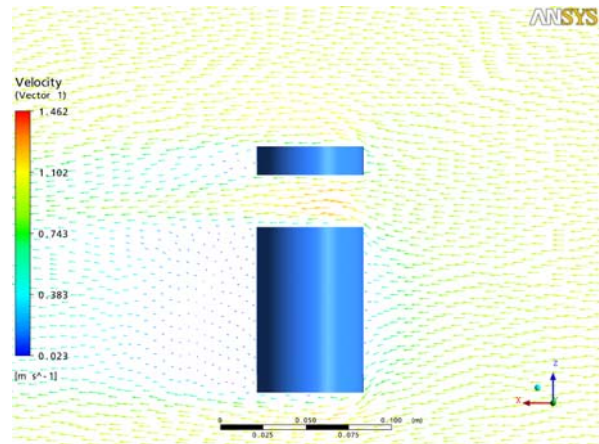
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 23. Δόκιμη διάταξη 3 – Μικρός κύλινδρος, βυθισμένος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s

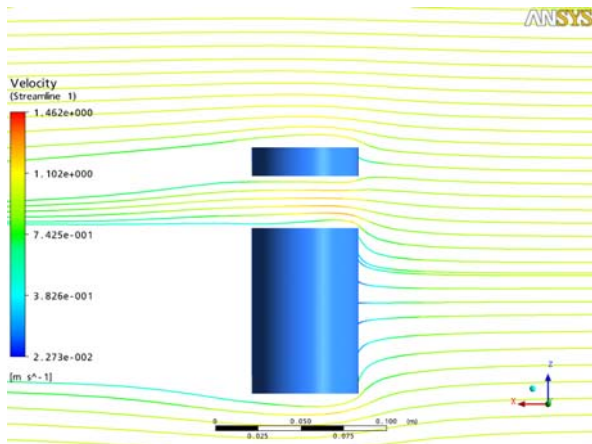
Οι παρατηρήσεις στη Δόκιμη Διάταξη 2, οδήγησαν στη Δόκιμη Διάταξη 3, όπου επιλέχθηκε ένας κύλινδρος διαμέτρου 5 cm, που είναι σημαντικά μικρότερος από τον προηγούμενο. Στο κάτω τμήμα του κυλίνδρου θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο μετρητής θερμοκρασίας/υγρασίας. Ο μεγάλος όγκος της διάταξης όμως, φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το πεδίο ροής και προκαλεί μία ανοδική κίνηση του αέρα, οποίος οδηγεί τα σωματίδια προς το επάνω τμήμα.



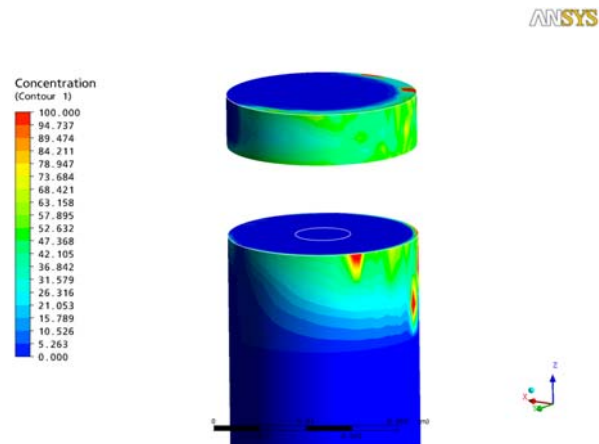
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



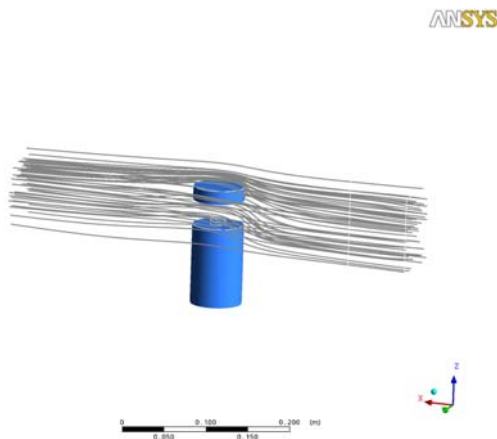
γ) Ροϊκές γραμμές



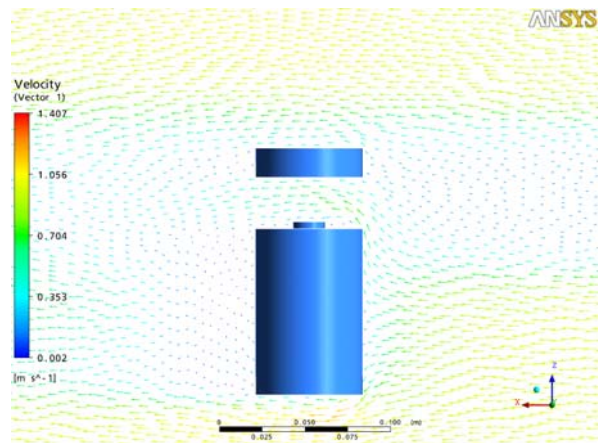
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 24. Δόκιμη διάταξη 3 – Μικρός κύλινδρος, βυθισμένος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 1 m/s

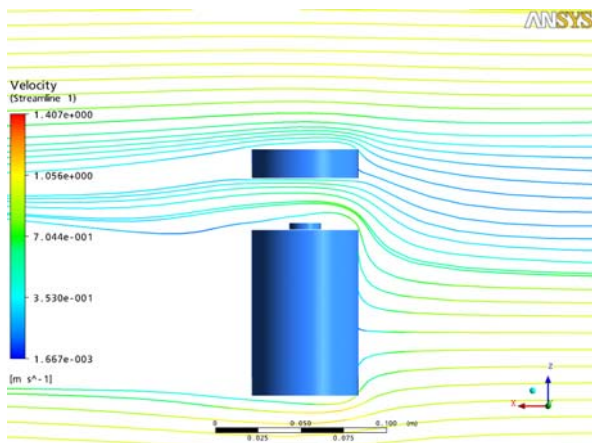
Τα φαινόμενα ενισχύονται με την αύξηση της ταχύτητας αναφοράς από 0.3 m/s σε 1 m/s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 24.



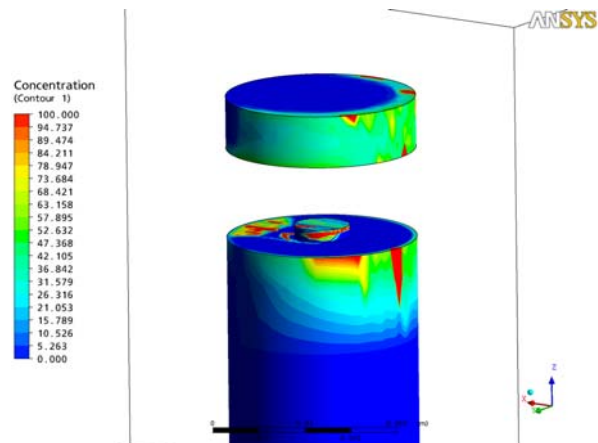
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



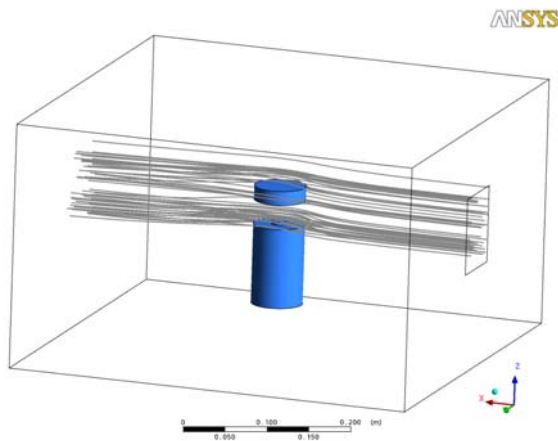
γ) Ροϊκές γραμμές



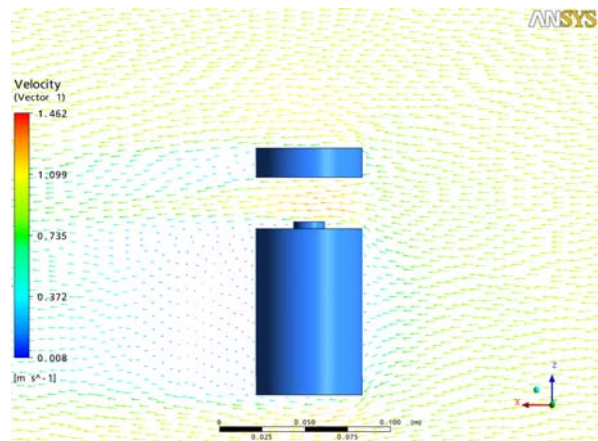
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 25. Δόκιμη διάταξη 4 – Μικρός κύλινδρος, υψωμένος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s

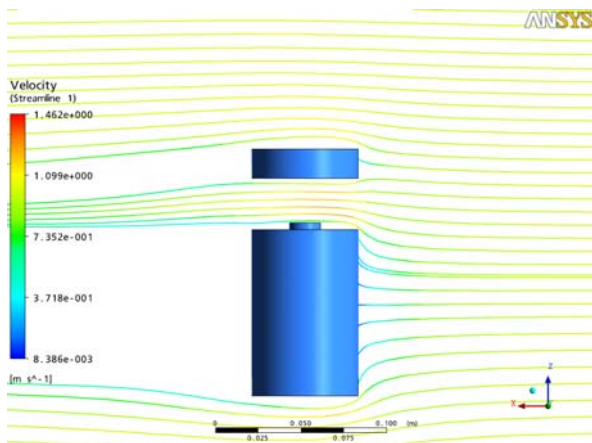
Στην τελευταία διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 25, ο παθητικός συλλέκτης έχει ανυψωθεί με σκοπό τη δημιουργία ευνοϊκότερων δομών στην κίνηση και τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων. Το αποτέλεσμα είναι ουσιαστικά βελτιωμένο από την προηγούμενη διάταξη..



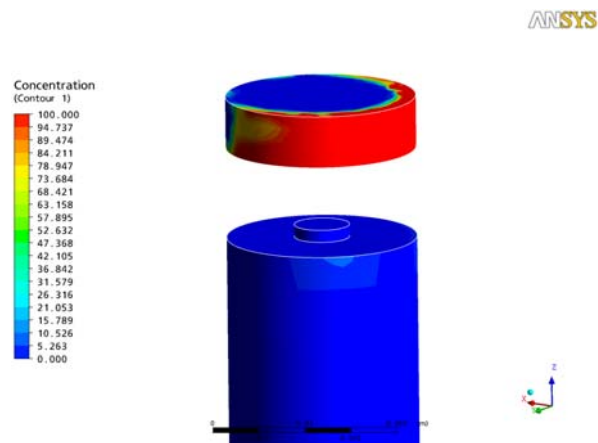
α) Τροχιές αιωρούμενων σωματιδίων



β) Πεδίο ροής



γ) Ροϊκές γραμμές



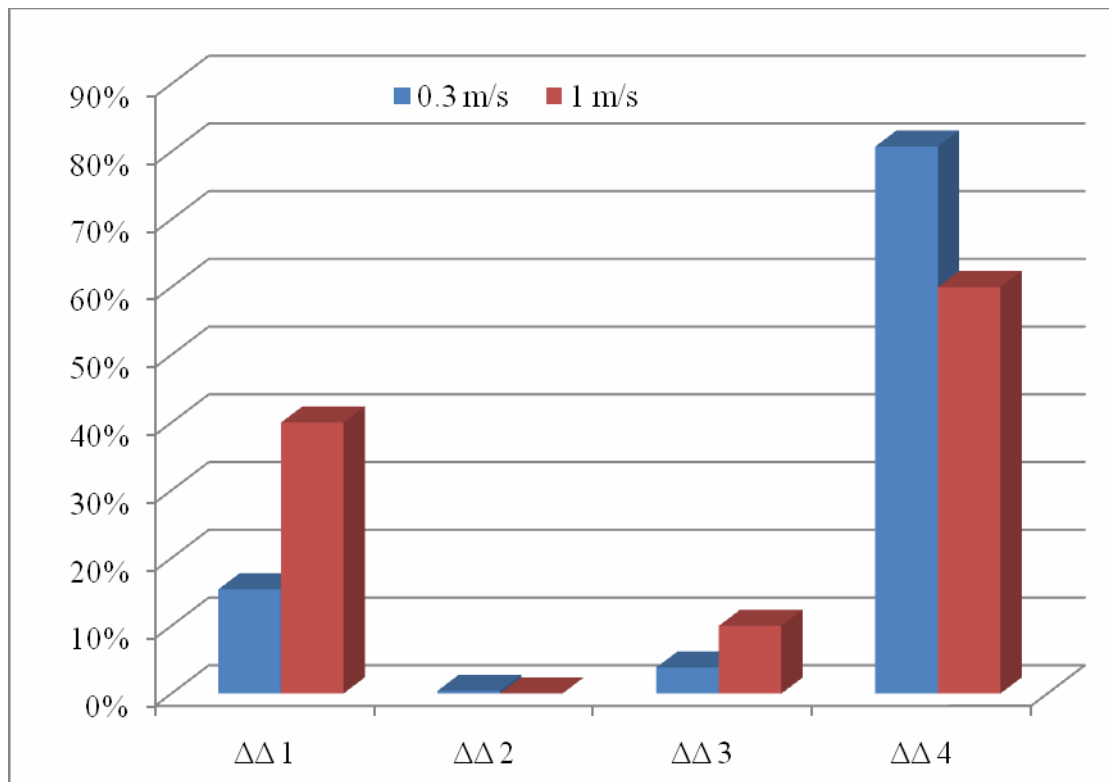
δ) Συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων

Σχήμα 26. Δόκιμη διάταξη 4 – Μικρός κύλινδρος, υψωμένος συλλέκτης και ταχύτητα αναφοράς 1 m/s

Τα φαινόμενα του Σχήματος 25 εμφανίζονται και εδώ για ταχύτητα αναφοράς 1 m/s. Η συλλογή σωματιδίων είναι μικρότερη από αυτή στο Σχήμα 25δ, αλλά σίγουρα μεγαλύτερη από όλες τις προηγούμενες διατάξεις.

3.3.2. Συγκριτική αξιολόγηση διατάξεων

Το κριτήριο που εξετάζεται κατά τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών διατάξεων είναι η απόλυτη σύγκλιση στην ικανότητα συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων του παθητικού συλλέκτη σε σχέση με την περίπτωση που αυτός βρίσκεται ελεύθερος στον ίδιο χώρο.



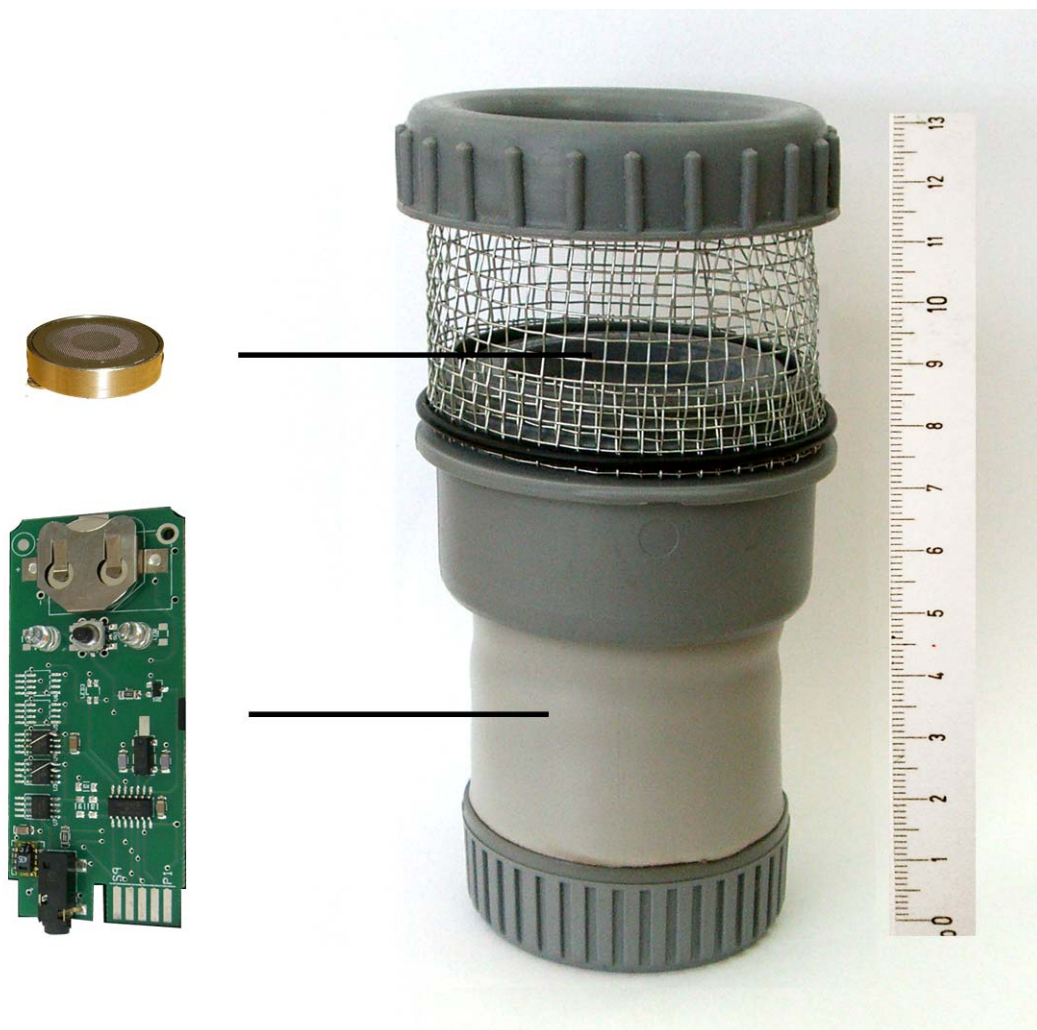
Σχήμα 27. Απόλυτη σύγκριση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για κάθε δόκιμη διάταξη και ταχύτητα σε σχέση με τον ελεύθερο συλλέκτη.

Από το Σχήμα 27 γίνεται εμφανές ότι η αποδοτικότερη διάταξη είναι η 4^η. Η διάταξη παρουσιάζει πολλά επιπλέον προτερήματα έναντι των υπολοίπων:

- Δεν παρουσιάζει προβλήματα ασυμμετρίας όπως η ΔΔ1.
- Κατασκευάζεται αλλά και αποσυναρμολογείται πιο εύκολα από τη διάταξη ΔΔ2.
- Το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας είναι προστατευμένο από την βροχή καλύτερα από όλες τις διατάξεις
- Έχει σημαντικά μικρό μέγεθος και παρουσιάζει ευκολίες στην τοποθέτηση του.

3.3. Κατασκευή επιλεγμένης διάταξης

Η προσομοίωση που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα ουσιαστικά κατεύθυνε και οδήγησε στο σχεδιασμό της διάταξης. Η διάταξη που κατασκευάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 28. Στο κάτω μέρος της βρίσκεται το κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας. Στο πάνω μέρος τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης, ο οποίος προστατεύεται από ένα πολύ αραιό μεταλλικό πλέγμα. Η διάταξη είναι πολύ χαμηλού κόστους και συναρμολογείται πολύ εύκολα.



Σχήμα 28. Τελική διάταξη με παθητικό συλλέκτη σωματιδίων και μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας.

4. Συμπεράσματα

Στην Φάση Α της μελέτης αυτής, πραγματοποιήθηκαν με απόλυτη επιτυχία όλοι οι προκαθορισμένοι στόχοι. Δηλαδή,

- Μία αναλυτική μελέτη έδειξε καθαρά ότι τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν υπαρκτό πρόβλημα για τη Θεσσαλονίκη.
- Η προσομοίωση των μετεωρολογικών συνθηκών στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης σε συνδυασμό με τις υψηλές συγκεντρώσεις αιωρουμένων σωματιδίων, πρότειναν 20 πιθανές τοποθεσίες μέτρησης συγκέντρωσης σωματιδίων με σκοπό την καλύτερη εικόνα του προβλήματος σε όλη την περιοχή.
- Με βάση την πλήρη προσομοίωση της παθητικής μετρητικής διάταξης αιωρουμένων σωματιδίων, επιλέχθηκε και σχεδιάστηκε μία διάταξη χαμηλού κόστους, η οποία θα αποτυπώνει τα επίπεδα της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων αλλά και τη θερμοκρασία και υγρασία στις ανωτέρω 20 πιθανές τοποθεσίες. Η βαθμονόμηση της διάταξης έγινε με απόλυτη επιτυχία.

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ
ΣΤΟ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

Φάση Β΄

ΤΕΕ - ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

Μάρκος Ασσαέλ – Καθηγητής, Χημικός Μηχανικός

Δημήτριος Μελάς – Αν. Καθηγητής, Φυσικός

Κωνσταντίνος Καρατζάς – Επ. Καθηγητής, Μηχανολόγος Μηχανικός

Χαρίσιος Αχίλλας – Μηχανολόγος Μηχανικός

Κωνσταντίνος Κακοσίμος – Δρ. Χημικός Μηχανικός

Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	2
1 Διασυνორιακή μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων.....	4
1.1 Γενικά	4
1.2 Εκτιμήσεις EMEP	6
1.3 Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα.....	7
1.3.1 Γενικά	7
1.3.2 Το μοντέλο μεταφοράς σκόνης	9
1.3.3 Μεταφορά σκόνης στη Μακεδονία.....	10
2 Μέτρηση επιπέδων συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων με χρήση διάταξης παθητικής συλλογής.....	12
2.1 Μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων	12
2.2 Παθητικοί συλλέκτες αιωρούμενων σωματιδίων.....	15
2.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	15
2.2.2 Μικροσκοπική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων.....	18
2.2.3 Ταχύτητα ανέμου στα σημεία μέτρησης	19
2.3 Ανάπτυξη διάταξης εξωτερικής εφαρμογής του παθητικού συλλέκτη.....	21
2.3.1 Περιγραφή δόκιμων διατάξεων.....	21
2.3.2 Συγκριτική αξιολόγηση των δόκιμων διατάξεων.....	23
2.3.3 Διάταξη εξωτερικής εφαρμογής.....	24
3 Πιλοτική εφαρμογή των διατάξεων παθητικής συλλογής.....	27
3.1 Μελέτη χωροθέτησης.....	27
3.2 Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογής.....	27
4 Συμπεράσματα	30
Ευχαριστίες.....	30
Βιβλιογραφία	31
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	34

Εισαγωγή

Στην ατμόσφαιρα αιωρούνται σωματίδια πολύ μικρού μεγέθους τα οποία δεν είναι ορατά από το ανθρώπινο μάτι. Δυστυχώς όμως βλάπτουν σημαντικά το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ειδικότερα, ευθύνονται για ένα πλήθος αναπνευστικών και καρδιακών ασθενειών όπως επιδείνωση του άσθματος, αύξηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων (π.χ. βήχας και πόνοι στην αναπνοή), επιδείνωση καρδιολογικών προβλημάτων, βρογχίτιδα, όπως και προβλήματα στην όραση. Επιπλέον, τα αιωρούμενα σωματίδια βλάπτουν λόγω της ίδιας της σύστασής τους, γιατί μπορούν να περιέχουν βαριά μέταλλα και άλλες τοξικές οργανικές ενώσεις.

Ανάλογα με το μέγεθος τους, τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, ως εξής:

TSP : Ολικά αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 100 μικρομέτρων.

PM₁₀ : Αιωρούμενα σωματίδια – ή πιο γνωστά ως PM (Particulate Matter) - με διάμετρο μικρότερη από 10 μικρόμετρα (εισπνεύσιμα).

PM_{2,5} : Αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μικρόμετρα (αναπνεύσιμα).

Επιδημιολογικές μελέτες έχουν συνδέσει την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε ατμοσφαιρικές επιβαρημένες με αιωρούμενα σωματίδια, με την εμφάνιση μακρό- και βραχυ-προθέσμων ασθενειών. Μελέτες σε πόλεις των ΗΠΑ [Dockery, Schwartz, & Spengler, 1992; Pope, 2007] κατέληξαν ότι αύξηση μόλις κατά 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση κατά 6-7% της θνησιμότητας. Αντίστοιχες μελέτες στον ελλαδικό χώρο [Sichletidis *et al.*, 2005] συσχετίζουν την εμφάνιση αναπνευστικών ασθενειών όπως της παθολογικής φλεγμονώδης αντίδρασης του πνεύμονα (COPD) και της ρινίτιδας με τις υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Ο ακριβής μηχανισμός των συσχετίσεων αυτών δεν είναι ξεκάθαρος λόγω των ελλιπών δεδομένων έκθεσης των ανθρώπων στους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια.

Στην παρούσα έκθεση, η Ομάδα Εργασίας που συστάθηκε με πρωτοβουλία της Μόνιμης Επιτροπής Περιβάλλοντος του ΤΕΕ/TKM ασχολείται με τη μελέτη των επιπέδων συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, καθώς και τους μηχανισμούς διασυννοριακής μεταφοράς τους. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της καλύτερης καταγραφής των επιπέδων συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στους δρόμους που ζούμε, με στόχο τον προσδιορισμό της επιβάρυνσης των κατοίκων του αστικού κέντρου (στο επίπεδο του δρόμου), όπως αυτή διαμορφώνεται μέσα από τις καθημερινές δραστηριότητές τους. Οι μετρήσεις, οι οποίες έλαβαν χώρα κατά τη Β' Φάση εργασιών της συσταθείσας Ομάδας Εργασίας πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση μετρητικής διάταξης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τους σκοπούς του έργου (Φάση Α'). Προς την κατεύθυνση αυτή,

σκοπός της Φάσης Β' αποτέλεσε η αξιολόγηση των δυνατοτήτων μέτρησης κάθε διάταξης και η πιλοτική εφαρμογή της σε 20 σημεία της ευρύτερης Θεσσαλονίκης έπειτα από τη μελέτη χωροθέτησης που προηγήθηκε. Επίσης στα πλαίσια της ίδιας Φάσης εξετάσθηκε η επίδραση της διασυνοριακής μεταφοράς αιωρούμενων σωματιδίων (πχ, έρημος Σαχάρα) με τη χρήση σύγχρονων υπολογιστικών μοντέλων.

1 Διασυννοριακή μεταφορά αιωρούμενων σωματιδίων

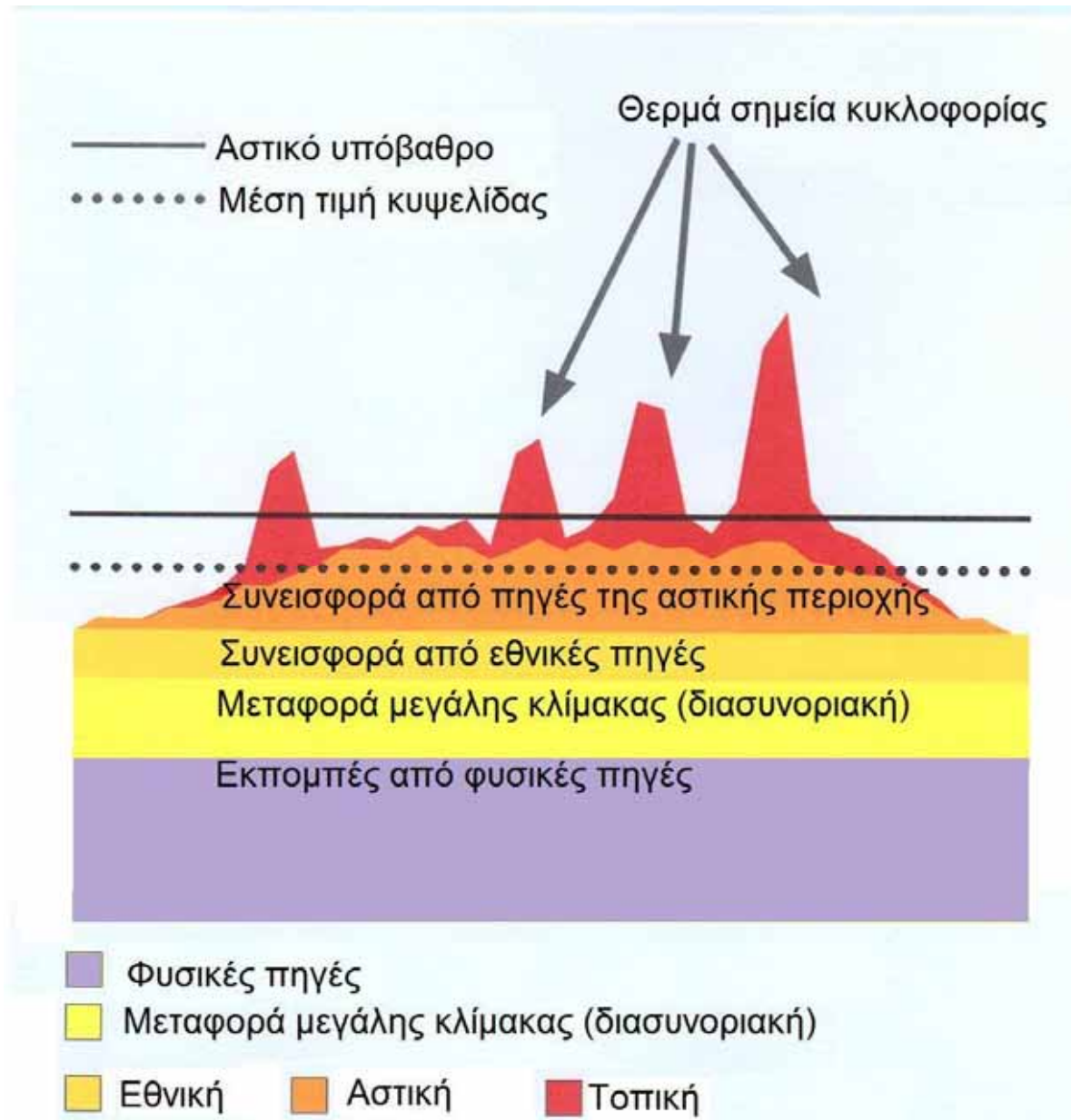
1.1 Γενικά

Παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει σε διάφορες χώρες για την μείωση των εκπομπών των ρύπων, η ποιότητα του αέρα σε πολλές Ευρωπαϊκές περιοχές απέχει πολύ από τις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας αλλά, σε πολλές περιπτώσεις, και από τα όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας προσδιορίζεται από μία δυναμική ισορροπία η οποία οφείλεται σε μία πολύπλοκη αλληλουχία φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος δημιουργεί εμπόδια στον σχεδιασμό αποτελεσματικών και οικονομικά εφικτών στρατηγικών ελέγχου της ρύπανσης.

Πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις τους να περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο. Κατά συνέπεια, μέχρι πριν λίγες δεκαετίες, η έρευνα σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης εστιαζόταν σε προβλήματα τοπικής κλίμακας, όπου εμφανίζονται και οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Παρ' όλα αυτά, πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφορά τους για μεγάλες αποστάσεις. Το πρόβλημα φαίνεται να είναι ιδιαίτερα οξύμενο στις Μεσογειακές χώρες, όπου η μεγάλη ηλιοφάνεια διευκολύνει την παραγωγή δευτερογενών φωτοχημικών ρύπων, όπως είναι το όζον. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια κερδίζει συνεχώς έδαφος η άποψη ότι αποτελεσματικές στρατηγικές μείωσης της περιβαλλοντικής βλάβης, που προκαλείται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, θα πρέπει να ενσωματώνουν την περιβαλλοντική επιβάρυνση από την μεγάλης κλίμακας μεταφορά αέριων ρύπων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η έρευνα και η διεθνής συνεργασία σε θέματα περιφερειακής ρύπανσης (συμπεριλαμβανομένης και της διακρατικής μεταφοράς) έχει τα τελευταία χρόνια εντατικοποιηθεί τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο και αναμένεται να αποτελέσει πεδίο αιχμής και τα επόμενα χρόνια.

Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος και τη χημική τους σύστασή. Για παράδειγμα, τα μεγαλύτερα σωματίδια, με διάμετρο 2.5 – 10 μm (PM_{coarse}) έχουν σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα και η μεταφορά τους περιορίζεται συνήθως σε μικρές ή μεσαίες κλίμακες. Εξαίρεση αποτελούν οι αμμοθύελλες οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν σκόνη από τις ερημικές περιοχές σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1000 km. Από την άλλη πλευρά, τα μικρά σωματίδια διαμέτρου 0.1 – 1 μm μπορούν να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για εβδομάδες και να μεταφερθούν σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων. Τυπικά, τα δευτερογενή οργανικά μπορούν να μεταφερθούν σε αποστάσεις 3000-4000 km, τα πρωτογενή μικρά σωματίδια σε αποστάσεις 2000-3000 km ενώ τα μεγάλα πρωτογενή σωματίδια περιορίζονται σε αποστάσεις μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων από την πηγή τους.

Πρόσφατες μελέτες έχουν επίσης δείξει ότι παρόλο που οι μέγιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων εμφανίζονται σε θερμά σημεία κυκλοφορίας στις αστικές περιοχές, σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίζονται και σε περιοχές υποβάθρου και η διασυνοριακή μεταφορά είναι μεγάλη (Σχήμα 1).



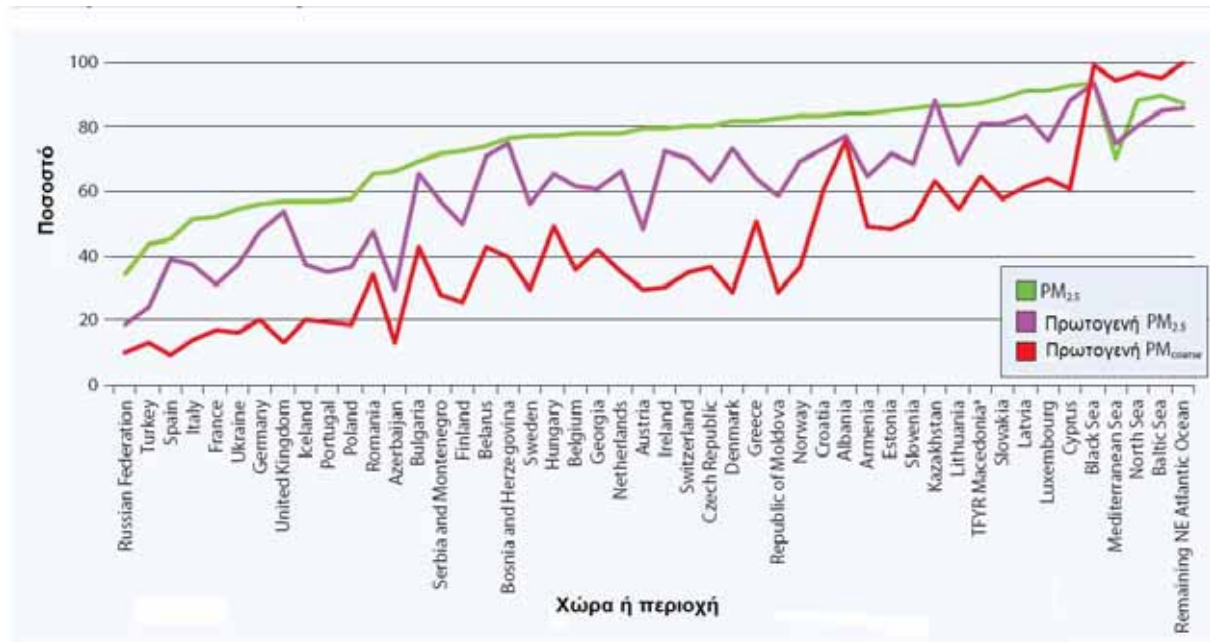
Σχήμα 1. Σχηματική παρουσίαση της συνεισφοράς των διαφορετικών πηγών στα επίπεδα PM10 σε μια αστική περιοχή (προσαρμοσμένο από WHO, 2006). Η διάσπαστη γραμμή παρουσιάζει την μέση τιμή της κυψελίδας η οποία θα αναμενόταν από την εφαρμογή ενός περιφερειακού μοντέλου ποιότητας του αέρα.

1.2 Εκτιμήσεις EMEP

Η συνθήκη για τη Μεγάλης-Κλίμακας Διασυνοριακής Αέριας Ρύπανσης (γνωστής με τα αρχικά LRTAP) υπογράφηκε το 1979 και αποτέλεσε ένα σημαντικό μέσο για την προστασία του περιβάλλοντος. Η συνθήκη αποτελεί ένα ευρύ πλαίσιο για τη συνεργατική δράση για τη μείωση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και συνέβαλε μέσα από τα πρωτόκολλα που ακολούθησαν στην μείωση των εκπομπών των αέριων ρύπων. Το πρόγραμμα συνεργασίας για την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της μεγάλης κλίμακας μεταφοράς των αέριων ρύπων στην Ευρώπη (γνωστό με τα αρχικά EMEP) δημιουργήθηκε από την Οικονομική Επιτροπή για την Ευρώπη (UNECE), τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) και το Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το περιβάλλον (UNEP) το 1977. Το 1983 το EMEP εντάχθηκε στο LRTAP. Ο κύριος στόχος του EMEP είναι να παρέχει στις κυβερνήσεις έγκυρες επιστημονικές πληροφορίες για την υποστήριξη της ανάπτυξης και της αξιολόγησης των διεθνών πρωτοκόλλων περιορισμού των εκπομπών. Τριάντα τρεις χώρες και η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι σήμερα μέλη του EMEP. Το EMEP έχει τρεις βασικές συνιστώσες: τη συλλογή στοιχείων για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, τη μέτρηση της ποιότητας του αέρα και του υετού και τον υπολογισμό με τη βοήθεια μοντέλων της ατμοσφαιρικής διασποράς.

Η μεταφορά αέριας ρύπανσης πάνω από την Ευρώπη καθώς και η διασυνοριακή ρύπανση είναι αντικείμενο μελέτης του EMEP και οι εκτιμήσεις δημοσιεύονται σε ετήσιες τεχνικές εκθέσεις (URL: <http://www.nilu.no/projects/ccc/reports.html>). Οι υπολογισμοί του μοντέλου γίνονται με οριζόντια πλεγματική διακριτότητα $50 \times 50 \text{ km}^2$ (EMEP 2008a και b). Παρόμοιες αποτιμήσεις για την Βαλκανική Χερσόνησο έγιναν μέσα στο πλαίσιο προγραμμάτων συνεργασίας (Syarakon et al., 2002, Zerefos et al., 2004). Παρ' όλα αυτά, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι οι διεργασίες μέσης κλίμακας (~10 km) μπορεί να έχουν μεγάλη επίπτωση στους υπολογισμούς (Thunis, 2001).

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου του EMEP, οι οποίοι εμφανίζονται στο Σχήμα 2, το περιφερειακό υπόβαθρο των ανθρωπογενών σωματιδίων έχει μια πολύ σημαντική διασυνοριακή συνιστώσα η οποία για τα PM_{2.5} φθάνει κατά μέσο όρο το ~60% (30% για τις μεγαλύτερες ευρωπαϊκές χώρες και μέχρι 90% για τις μικρότερες χώρες). Ακόμη και για τα πρωτογενή μεγαλύτερα σωματίδια η συνεισφορά της διασυνοριακής ρύπανσης είναι σημαντική (~45% για την Ελλάδα). Το μέγεθος μιας χώρας, η γεωγραφική της θέση αλλά και το μέγεθος των εκπομπών στις γειτονικές της χώρες προσδιορίζουν το βαθμό της συμμετοχής της διασυνοριακής μεταφοράς στα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 2. Ποσοστιαία συμμετοχή της διασυνοριακά μεταφερόμενης ρύπανσης στα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και περιοχές (WHO, 2006)

1.3 Μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα

1.3.1 Γενικά

Η ανόργανη σκόνη είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές των ατμοσφαιρικών αιωρημάτων από φυσικές πηγές καθώς, οι ετήσιες εκπομπές των 2150 Tg αποτελούν περίπου το 37% των συνολικών σωματιδίων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες μαζί.

Οι έρημοι του πλανήτη είναι οι κυριότερες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα και σε αυτές αποδίδεται το 35% των πρωτογενών εκπομπών αυτών. Το μισό του ποσοστού αυτού υπολογίζεται ότι οφείλεται στην έρημο Σαχάρα. Οι εκπομπές της Σαχάρας επηρεάζουν το συνολικό φόρτο αιωρούμενων σωματιδίων (aerosol) της ατμόσφαιρας της Αφρικής, του Ατλαντικού ωκεανού, της νότιας Αμερικής, της ανατολικής ακτής των ΗΠΑ και τέλος της Ευρώπης. Είναι προφανές ότι οι χώρες της Μεσογείου που είναι και οι εγγύτερες στη Σαχάρα είναι κι αυτές που δέχονται το μεγαλύτερο φόρτο aerosol.

Με τη βοήθεια δορυφορικών παρατηρήσεων αναγνωρίστηκαν τρεις κύριες καταστάσεις που ευθύνονται για την μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα πάνω από τη Μεσόγειο:

- Την άνοιξη υπάρχουν οι κυκλώνες Σαράφ (Sharav) οι οποίοι μετακινούνται ανατολικά, κατά μήκος της βόρειας αφρικανικής ακτογραμμής και μεταφέρουν μαζί τους σκόνη στην ανατολική Μεσόγειο.

- Το καλοκαίρι οι υψηλές πιέσεις πάνω από τη Λιβύη εμποδίζουν την περαιτέρω ανατολική διάδοση των κυκλώνων αυτών και η μεταφορά συντελείται στην κεντρική Μεσόγειο.
- Στο τέλος του καλοκαιριού οι χαμηλές πιέσεις κοντά στις Βαlearίδες νήσους έχουν ως αποτέλεσμα η μεταφορά σκόνης να γίνεται κυρίως στην δυτική Μεσόγειο.

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα μπορεί να είναι υπεύθυνη για το 10-20% των επεισοδίων σωματιδιακής ρύπανσης σε Μεσογειακές χώρες (Goudie and Middleton, 2006). Κατά τη διάρκεια μάλιστα επεισοδίων μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα, η συμμετοχή της μεταφερόμενης σκόνης στα επίπεδα των PM₁₀ σε Μεσογειακές χώρες μπορεί να ξεπεράσει και το 60%.

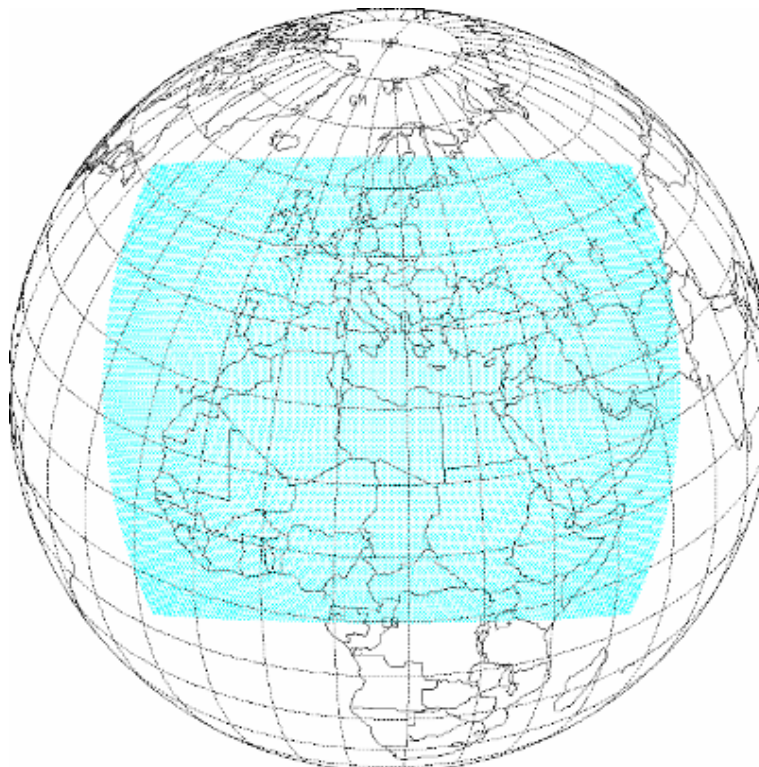


Σχήμα 3. Επεισόδιο μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα στις 17 Απριλίου 2005 όπως αποτυπώθηκε από τον MODIS

1.3.2 Το μοντέλο μεταφοράς σκόνης

Στην παρούσα εργασία για την εκτίμηση της μεταφοράς σκόνης από τη Σαχάρα χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου DREAM (Dust REgional Atmospheric Model) το οποίο προσομοιώνει την ατμοσφαιρική κυκλοφορία της σκόνης της ερήμου. Το μοντέλο είναι βασισμένο στο πρότυπο Euler (Eulerian) και επιλύει μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της ροής μάζας της σκόνης. Δημιουργήθηκε από τους Nickovic και Dobricic (1996).

Είναι ολοκληρωμένο μοντέλο και αναπτύχθηκε με σκοπό να περιγράψει τον κύκλο της σκόνης στην ατμόσφαιρα. Βασίζεται στα ατμοσφαιρικά μοντέλα SKIRON/Eta και Eta/NCEP. Η καινοτομία αυτού του μοντέλου είναι ότι παραμετροποιεί και λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς όλες τις κύριες φάσεις του κύκλου ζωής της σκόνης στην ατμόσφαιρα, δηλαδή την παραγωγή, διάχυση, διασπορά και απομάκρυνση.



Σχήμα 4 Περιοχή ανάλυσης του μοντέλου DREAM (www.bsc.es)

Ο μηχανισμός παραγωγής της σκόνης είναι βασισμένος σε ένα πολύπλοκο σύστημα με υψηλής ανάλυσης δεδομένα εδάφους όπως είναι το υψόμετρο, ο τύπος εδάφους και ο τύπος βλάστησης. Το όλο σύστημα είναι εύκολο να μεταφερθεί και να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε σημείο της γης και είναι ικανό να καλύψει μεγάλες εκτάσεις εδάφους. Η οριζόντια ανάλυσή του μπορεί να φτάσει από 100 έως 4 km. Η ικανότητα του μοντέλου έχει δοκιμαστεί σε διάφορα επεισόδια μεταφοράς σκόνης σε διάφορες περιοχές του πλανήτη και

με διαφορετικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας για αρχικές και οριακές συνθήκες αποτελέσματα από παγκόσμια μοντέλα (ECMWF, NCEP). Το μοντέλο DREAM λειτουργεί και δίνει προγνωστικά αποτελέσματα για την περιοχή της Μεσογείου (Σχήμα 4).

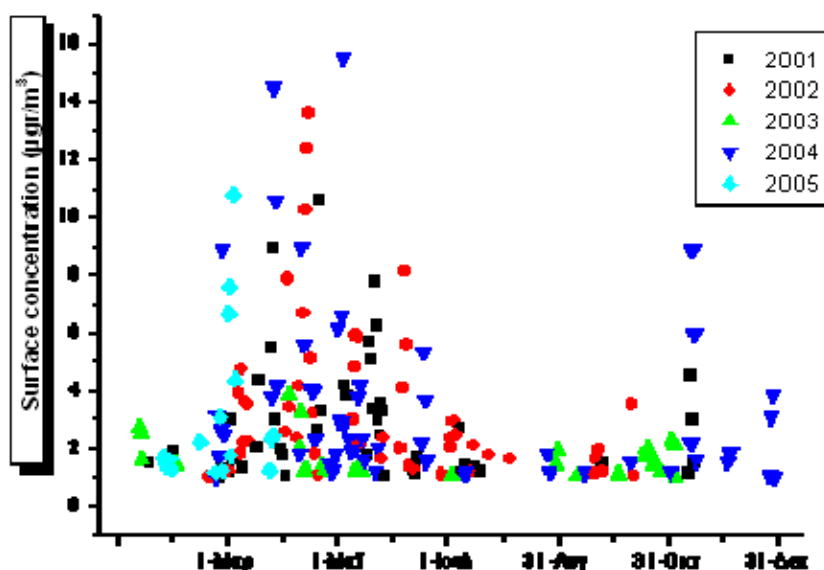
Τα πλεγματικά σημεία του DREAM που λειτουργούν ως πηγές εκπομπής σκόνης από ερήμους καθορίζονται με βάση το χαρακτηρισμό τους ως άνυδρες ή ημιάνυδρες περιοχές. Ο χαρακτηρισμός αυτός γίνεται με χρήση της παγκόσμιας βάσης δεδομένων τύπου βλάστησης (βάσεις δεδομένων: Staub and Rosenzweig Zobler near – surface soil texture και UNEP/GRID gridded FAO/UNESCO soil units).

Το μοντέλο DREAM λειτουργεί και υποστηρίζεται από το Barcelona Supercomputing Center (BSC). Το BSC εκτελεί διάφορες εργασίες μοντελοποίησης της διασποράς σκόνης σε διάφορες περιοχές του πλανήτη αλλά κι άλλες περιβαλλοντικές δραστηριότητες. Τα δεδομένα του τα διαθέτει στο κοινό μέσω του διαδικτύου στη σελίδα www.bsc.es. Ειδικά για τα δεδομένα μεταφοράς σκόνης της Σαχάρα, αυτά είναι διαθέσιμα στη σελίδα:

<http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM/>

1.3.3 Μεταφορά σκόνης στη Μακεδονία

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου DREAM, δείχνει ότι μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα εμφανίζεται στην περιοχή, σε επιφανειακή συγκέντρωση μεγαλύτερη από $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, το ~12% τον ημερών του έτους (Μιχαηλίδης, 2008). Η μεταφορά σκόνης στην περιοχή εμφανίζει σημαντική εποχιακή διακύμανση (Σχήμα 5). Η περίοδος της άνοιξης εμφανίζει μεγάλα επεισόδια μεταφοράς σκόνης με τα περισσότερα επεισόδια μεταφοράς να εμφανίζονται κατά τους μήνες Απρίλιο και Μάιο. Κατά τους υπόλοιπους μήνες δεν εμφανίζεται σημαντική μεταφορά, με εξαίρεση το Νοέμβριο. Οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης σκόνης στην επιφάνεια, υπολογίστηκαν από το DREAM στα $15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Σχήμα 5. Εποχιακή διακύμανση της μεταφοράς σκόνης της Σαχάρα στη Μακεδονία

Στο παράρτημα Α εμφανίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου DREAM για την περίοδο των μετρήσεων (25.10 - 14.11.2008). Όπως προαναφέρθηκε τα μεγαλύτερα επεισόδια μεταφορά σκόνης λαμβάνουν χώρα κατά την περίοδο της άνοιξης ενώ εμφανίζονται μεμονωμένα επεισόδια και το Νοέμβριο. Το γενικό αυτό συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε την περίοδο των μετρήσεων οπότε δεν έλαβε χώρα σημαντική μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα με εξαίρεση ένα αξιόλογο επεισόδιο το οποίο εμφανίσθηκε την περίοδο 30 Οκτωβρίου – 3 Νοεμβρίου.

2 Μέτρηση επιπέδων συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων με χρήση διάταξης παθητικής συλλογής.

Οι σύγχρονες Ευρωπαϊκές πόλεις εμφανίζουν υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων σε αιωρούμενα σωματίδια. Δυστυχώς το πλήθος των σταθμών καταγραφής της αέριας ρύπανσης, ειδικά για τα αιωρούμενα σωματίδια, δεν επαρκεί για την πλήρη αποτύπωση του προβλήματος. Κύρια αιτία για το παραπάνω είναι το υψηλό πάγιο και λειτουργικό κόστος των συσκευών μέτρησης. Η αύξηση του πλήθους των σημείων μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση φθηνών παθητικών συλλεκτών, των οποίων τόσο το πάγιο όσο και το λειτουργικό κόστος είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερο από τις αντίστοιχες ενεργητικές συσκευές. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν σε εικονικό περιβάλλον διάφορες δόκιμες διατάξεις και αναπτύχθηκε μία πρότυπη διάταξη παθητικής συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων. Αρχικά η παθητική διάταξη αξιολογήθηκε με μετρήσεις που προέρχονται από τα υφιστάμενα δίκτυα (ΥΠΕΧΩΔΕ και δήμων) μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της Θεσσαλονίκης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν είκοσι τέτοιες διατάξεις και χρησιμοποιούνται πιλοτικά στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης, ενώ τα αποτελέσματα συνεχώς συγκρίνονται με αυτά των υπάρχοντων δικτύων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται συνοπτικά (για λεπτομέρειες βλ. αναφορά Φάσης Α') η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό της διάταξης εξωτερικής εφαρμογής του παθητικού συλλέκτη. Η αρχή λειτουργίας της διάταξης περιγράφεται με λεπτομέρεια στη συνέχεια, ενώ στο τέλος παρατίθενται και τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους πρώτους μήνες εφαρμογής της.

2.1 Μέτρηση αιωρούμενων σωματιδίων

Η συγκέντρωση, η κατανομή του μεγέθους και η σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) είναι τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της έκθεσης ενός ατόμου και το χαρακτηρισμό της επικινδυνότητας τους. Από τα παραπάνω συνήθως η συγκέντρωση των PM είναι το μέγεθος το οποίο μετράται και στο οποίο αναφέρονται τα κριτήρια επικινδυνότητας, δηλαδή τα μέγιστα όρια έκθεσης των ανθρώπων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συγκέντρωσης PM διακρίνονται κυρίως σε ενεργητικές και παθητικές ανάλογα με τη διαδικασία με την οποία “συλλέγονται” τα PM. Οι ενεργητικές μέθοδοι είναι οι πιο καθιερωμένες καθώς παρέχουν αποτελέσματα σε πραγματικούς χρόνους και σε ικανοποιητική ακρίβεια. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην αναρρόφηση καθορισμένης ποσότητας αέρα και στον υπολογισμό των PM σε αυτόν. Ορισμένες από τις ενεργητικές μεθόδους είναι η βαρομετρική (σταθμική), η μέθοδος απορρόφησης ακτινοβολίας β, η μέθοδος δονούμενου στοιχείου και η μέθοδος σκεδασμού φωτός. Αυτές αποτελούν τις αναγνωρισμένες μεθόδους μέτρησης PM από τους επίσημους οργανισμούς European Environmental Agency (Leeuw, 2005) και Environmental Protection

Agency (NARSTO, 2006). Η βαρομετρική μέθοδος είναι η μόνη που λαμβάνεται ως μέθοδος αναφοράς.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ενεργητικών μεθόδων είναι το πάγιο και λειτουργικό κόστος των μετρητικών διατάξεων και η απαίτηση για συνεχή παροχή ενέργειας. Αντίθετα οι παθητικές μέθοδοι είναι πολύ χαμηλού κόστους και δεν απαιτούν παροχή ενέργειας, καθώς βασίζονται στη συλλογή των PM σε ειδικές επιφάνειες χωρίς τη χρήση αντλίας αναρρόφησης. Εξαιτίας αυτής της αρχής οι παθητικές μέθοδοι παρέχουν μέση συγκέντρωση για το χρονικό διάστημα που εφαρμόζονται, ενώ η ακρίβεια τους είναι μικρότερη από αυτή των ενεργών.

Πίνακας 1. Σημεία μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (βλ Σχήμα 6).

01. Πλατεία Δημοκρατίας	02. Βενιζέλου & Εγνατία
03. Αγ Σοφίας & Εγνατία	04. πλατεία Συντριβανίου
05. Ερμού & Αριστοτέλους	06. Σαλαμίνος & Πολυτεχνείου
07. Νίκης & Αγ. Σοφίας	08. Αγ. Σοφίας & Διοικητηρίου
09. πλατεία Διοικητηρίου	10. Δημαρχείο Ευκαρπίας
11. πλατεία Ελευθερίας	12. Καραολή & Μ Αλεξάνδρου
13. Κορδελιό	14 Μενεμένη
15. Νεάπολη	16. Διαβατά
17 Σίνδος	18. Μαρτίου
19. Θέρμη	20. Καλαμαριά



Σχήμα 6. Δίκτυο σταθμών μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, του Δήμου Θεσσαλονίκης και της παρούσας εργασίας (βλ. Πίνακα 1).

2.2 Παθητικοί συλλέκτες αιωρούμενων σωματιδίων

Τα επίσημα δίκτυα καταγραφής των επιπέδων συγκέντρωσης PM αποτελούνται από διατάξεις που χρησιμοποιούν μία από τις ενεργητικές μεθόδους υπολογισμού της. Η χωρική διακύμανση της συγκέντρωσης των PM στις σύγχρονες μητροπόλεις εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, τη γεωγραφία της περιοχής και τη γεωγραφική θέση των πηγών. Εξαιτίας των παραπάνω είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού μετρητικών σταθμών για την αντιπροσωπευτική αποτύπωση της συγκέντρωσης των PM. Δυστυχώς όμως κάτι τέτοιο είναι απαγορευτικό λόγω του πολύ υψηλού κόστους των ενεργητικών διατάξεων. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η εφαρμογή μιας παθητικής μεθόδου για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των PM. Οι παθητικοί συλλέκτες είναι πολύ χαμηλού κόστους και μπορούν να τοποθετηθούν σε πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από ότι οι ενεργητικές διατάξεις.

2.2.1 Αρχή λειτουργίας

Παρόλο που υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παθητικών μεθόδων για αέριους ατμοσφαιρικούς ρύπους, για τα PM αναφέρονται μόνο τέσσερις στη διεθνή βιβλιογραφία (Brown *et al.*, 1995; Vinzents, 1996; Yamamoto, 2006). Η μέθοδος του Brown (Brown *et al.*; Thorpe, Hemingway, & Brown) στηρίζεται στο ηλεκτροστατικό φορτίο για τον διαχωρισμό των PM από τον αέρα. Το μειονέκτημά της είναι ότι πρέπει να είναι γνωστές οι ηλεκτρικές ιδιότητες των σωματιδίων και των υλικών του συλλέκτη. Η μέθοδος του Vinzents βασίζεται στην συγκράτηση των PM πάνω σε ειδικές επιφάνειες εμποτισμένες με μια κολλώδη ουσία. Το μειονέκτημά της είναι η μεγάλη επιφάνεια του συλλέκτη και η τεχνική υπολογισμού της συγκέντρωσης. Οι μέθοδοι των Wagner (Wagner & Leith; Leith, Sommerlatt, & Boundy) και Yamamoto (Yamamoto *et al.*; Yamamoto, Matsuki, & Yanagisawa) είναι παρόμοιες και βασίζονται στην καθίζηση των PM και την μικροσκοπική (οπτική, ηλεκτρονική) ανάλυση αυτών. Οι τελευταίες επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στην παρούσα εργασία κυρίως λόγω της απλότητας τους τόσο στον σχεδιασμό της διάταξης εξωτερικής χρήσης όσο και στην εφαρμογή της.

Σύμφωνα με την επιλεγμένη μέθοδο μία επιφάνεια από διαφανές υλικό εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και τα PM που κατακάθονται σε αυτή μετρώνται και διαστατοποιούνται με χρήση οπτικού μικροσκοπίου (σε περίπτωση χρήσης ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM) χρησιμοποιείται επιφάνεια αλουμινίου ή άνθρακα). Η επιφάνεια συλλογής βρίσκεται προστατευμένη μέσα σε ένα μεταλλικό κυλινδρικό κέλυφος στην επάνω πλευρά του οποίου είναι τοποθετημένη μια διάτρητη επιφάνεια, ώστε να αποφευχθεί η συλλογή των μεγάλων και ανεπιθύμητων PM. Η αναγωγή της μάζας των συλλεγμένων σωματιδίων σε συγκέντρωση στον αέρα γίνεται με τη χρήση ενός μοντέλου καθίζησης (Schneider, Bohgard, &

Gudmundsson; Schneider *et al.*, 2002) που λαμβάνει υπόψη του το μέγεθος των σωματιδίων και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής.

Το μοντέλο απόθεσης (Schneider, Bohgard, & Gudmundsson) που εφαρμόζεται, λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα διάχυσης, αδράνειας και βαρυτικής καθίζησης ενώ θεωρεί αμελητέες τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τη φορετική κίνηση. Η βασική εξίσωση Εξ.(1) συνδέει τη συγκέντρωση των PM, C ($\mu\text{g m}^{-3}$), στην ατμόσφαιρα με τη ροή σωματιδίων στην επιφάνεια, F ($\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) και την ταχύτητα καθίζησης u_{dep} (m s^{-1}), ως

$$C = \frac{F}{u_{dep}} = \frac{F}{u_{amb}\gamma_m}, \quad (1)$$

όπου γ_m (-) είναι ένας αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης (Wagner & Leith) αναφορικά με την ύπαρξη του προστατευτικού πλέγματος καθώς και των υπολοίπων μηχανικών τμημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ της επιφάνειας συλλογής και της ατμόσφαιρας. u_{amb} (m s^{-1}) είναι η “ρεαλιστική” ταχύτητα καθίζησης ενός σωματιδίου όπως προτάθηκε από τον Wagner (Wagner & Leith)

$$u_{amb} = - \frac{u_t}{\left[\left[\left(1 - 0.67\tau^{0.49} u_*^{-0.02} \nu^{-0.49} u_t \right) e^{-u_t I} \right] - 1 \right]}. \quad (2)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, ν ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) είναι το κινηματικό ιξώδες και u_* (m s^{-1}) η ταχύτητα τριβής η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθο λογαριθμικό νόμο, αν δεν υπάρχει άλλος τρόπος υπολογισμού της

$$u_* = \frac{u_z}{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}, \quad (3)$$

$$\text{με } u_t = \tau g \text{ και } \tau = \frac{\rho_p d_a^2 C_c}{18\mu},$$

όπου u_z (m s^{-1}) είναι η ταχύτητα στο ύψος z (m) και z_o (m) το ύψος τραχύτητας. Στην Εξ.(2) u_t (m s^{-1}) είναι η οριακή ταχύτητα του σωματιδίου, ρ_p (kg m^{-3}) η πυκνότητα των σωματιδίων, μ ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) το μοριακό ιξώδες του αέρα, d_a (m) η αεροδυναμική διάμετρος και C_c (-) ο

συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης κατά Cunningham. Ο εκθέτης I ($s\ m^{-1}$) στην Εξ.(2) έχει υπολογιστεί από τον Wood (Wood) και δίνεται από την εξίσωση,

$$I = \frac{I^+}{u_*}, \quad (4)$$

$$\text{με } I^+ = \left[\frac{3\sqrt{3}}{29\pi} Sc^{-2/3} + 6.2 \times 10^{-4} (\tau^+)^2 \right]^{-1} \quad \text{και} \quad \tau^+ = \frac{\tau u_*^2}{\nu},$$

όπου Sc είναι ο αριθμός Schmidt. Έχει αποδειχτεί (Wagner & Leith) ότι όταν u_* είναι μικρότερη από $0.4\ m\ s^{-1}$ τότε η Εξ.(2) μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά, έτσι ώστε $u_{amb} \cong u_t$. Ο συντελεστής διόρθωσης γ_m έχει υπολογιστεί εμπειρικά (Wagner & Leith) ως συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων:

$$\gamma_m = \begin{cases} 1, & d_a < 1.63\mu m \\ (5.95 \times 10^{-3} Re_p^{-0.439}), & d_a \geq 1.63\mu m \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{όπου } Re_p = \frac{d_a u_t}{\nu}$$

Έχοντας υπολογίσει την ταχύτητα u_{amb} , η ροή, F , των σωματιδίων στην επιφάνεια συλλογής υπολογίζεται με την μέτρηση του πλήθους και του μεγέθους των σωματιδίων. Η συνεισφορά του κάθε σωματιδίου, i , και η συνολική ροή μάζας δίνονται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$m_i = \frac{3\pi\mu S_d}{\gamma_m g S_v C_{c,dev}} d_{pa,i} \quad \text{και} \quad (6a)$$

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{At}, \quad (6b)$$

όπου d_{pa} (m) είναι η διάμετρος του σωματιδίου που μετράται, S_d (-) και S_v (-) είναι ο συντελεστής μορφής και ο συντελεστής μορφής όγκου αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης dev αντιστοιχεί στην ισοδύναμη (για όγκο) διάμετρο σφαίρας. N (-) είναι το πλήθος των σωματιδίων, A (m^2) είναι το εμβαδό της επιφάνειας συλλογής (ή της επιφάνειας που αναλύεται μικροσκοπικά) και t (s) είναι το χρονικό διάστημα έκθεσης του συλλέκτη.

Η αεροδυναμική διάμετρος d_a η οποία απαιτείται σε πρωτότερο στάδιο, υπολογίζεται με χρήση των παραπάνω συντελεστών μορφής από την Εξ.(7). Οι συντελεστές μορφής δίνονται βιβλιογραφικά για διάφορα ήδη σωματιδίων, όμως μπορούν να υπολογιστούν και με μικροσκοπική ανάλυση. Το πλήθος και η διάμετρος των σωματιδίων υπολογίζεται με χρήση οπτικού μικροσκοπίου

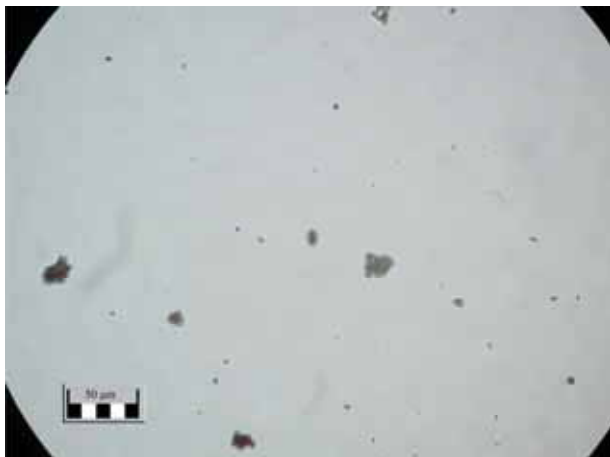
$$d_a = d_{ev} \left(\frac{\rho_p C_{c,dev}}{\rho_{air} C_{c,da}} \frac{1}{S_d} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$$\text{όπου } d_{ev} = \frac{d_{pa}}{S_v}$$

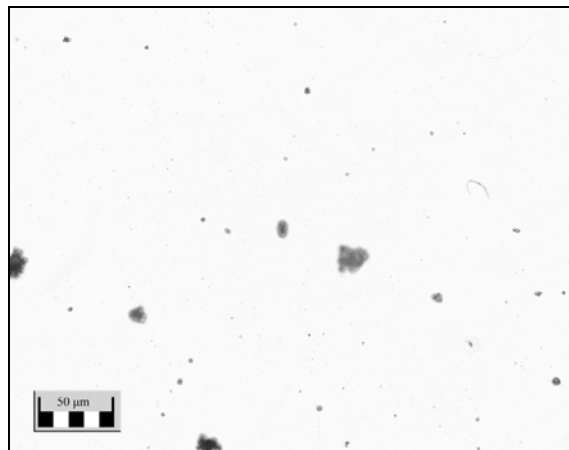
2.2.2 Μικροσκοπική ανάλυση αιωρούμενων σωματιδίων

Έπειτα από την έκθεση του συλλέκτη στην ατμόσφαιρα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αυτός μεταφέρεται σε ειδική αεροστεγή συσκευασία για ανάλυση. Για κάθε επιφάνεια λαμβάνεται ένα πλήθος ψηφιακών φωτογραφιών με χρήση 20x αντικειμενικού φακού. Η συνολική μεγέθυνση που εφαρμόζεται είναι 200x, ενώ το πλήθος των φωτογραφιών στην παρούσα εργασία ήταν 25 για επιφάνεια συλλογής διαμέτρου ~5 mm. Η κατανομή των λαμβανόμενων φωτογραφιών δεν είναι τυχαία αλλά ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδοχή ώστε να καλυφθεί σχεδόν το σύνολο της επιφάνειας συλλογής.

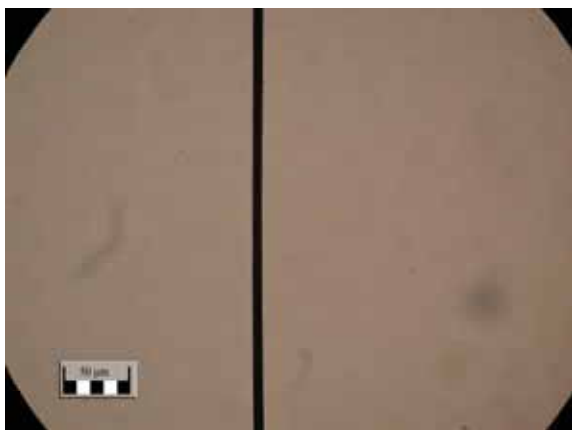
Πριν τη διαστατοποίηση των σωματιδίων των φωτογραφιών εφαρμόζεται σε αυτές ειδική επεξεργασία για την απαλοιφή του θορύβου και άλλων ανωμαλιών (βλ. Σχήμα 7α, β). Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει την απαλοιφή του θορύβου του μικροσκοπίου με την ψηφιακή αφαίρεση του υπόβαθρου χρησιμοποιώντας μια κενή φωτογραφία (χωρίς σωματίδια). Στη συνέχεια οι φωτογραφίες μετατρέπονται σε δυαδικές, δηλαδή σε άσπρο-μαύρο ώστε να μπορούν να διακριθούν ευκρινώς τα σωματίδια και να μετρηθούν. Πριν από κάθε φωτογράφιση λαμβάνεται μία φωτογραφία αναφοράς για τη βαθμονόμηση του λογισμικού. Η φωτογραφία αναφοράς (βλ. Σχήμα 7γ, δ) περιέχει 2 σύρματα τιτανίου 7.5 και 25 μm των οποίων η διάμετρος είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια.



α) Αρχική φωτογραφία



β) Επεξεργασμένη φωτογραφία



γ) 1^η Γεωμετρία βαθμονόμησης μεγέθους



δ) 2^η Γεωμετρία βαθμονόμησης μεγέθους

Σχήμα 7. Ενδεικτικές φωτογραφίες (α, β) μέτρησης των αιωρούμενων σωματιδίων στην επιφάνεια συλλογής και (γ, δ) βαθμονόμησης για το μεγέθος των σωματιδίων.

2.2.3 Ταχύτητα ανέμου στα σημεία μέτρησης

Το μοντέλο καθίζησης των αιωρούμενων σωματιδίων που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.1 χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ανέμου στο σημείο συλλογής (βλ. Εξ.(1-3)) για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης τους στην ατμόσφαιρα. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε όλα τα σημεία συλλογής παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα όπως η ανάγκη για επιπλέον τεχνικό εξοπλισμό, δηλαδή επιπλέον πάγιο κόστος. Για την αποφυγή του επιπλέον κόστους επιλέχθηκε ο έμμεσος υπολογισμός της ταχύτητας στα επιλεγμένα σημεία, μέσω του ανεπίσημου δικτύου μετεωρολογικών σταθμών *Hellas Weather*. Στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης λειτουργούν περίπου 14 ιδιωτικοί μετεωρολογικοί σταθμοί (Σχήμα 8), των

οποίων οι μετρήσεις καταγράφονται σε διεθνής και εθνικές βάσεις δεδομένων (πχ. Weather Underground).

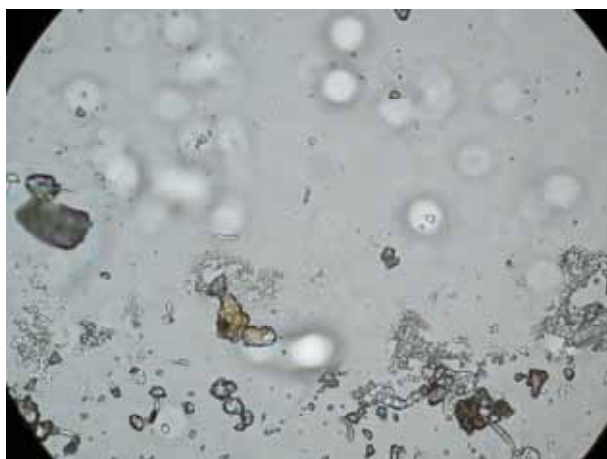


Σχήμα 8. Δίκτυο παθητικών συλλεκτών μέτρησης αιωρούμενων συγκεντρώσεων και ιδιωτικών μετεωρολογικών σταθμών..

Για το καθορισμό της ταχύτητας σε κάθε σημείο τοποθέτησης των παθητικών συλλεκτών χρησιμοποιούνται χωρικά σταθμισμένες μέσες χρονικές τιμές για την εκάστοτε περίοδο μέτρησης. Για παράδειγμα ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας στο ιστορικό κέντρο της Θεσσαλονίκης βασίστηκε στους 4 σταθμούς που βρίσκονται εντός και περιμετρικά αυτού (Σχήμα 8).

2.3 Ανάπτυξη διάταξης εξωτερικής εφαρμογής του παθητικού συλλέκτη

Όπως αναφέρθηκε η επιφάνεια συλλογής PM προστατεύεται από τα μεγάλου μεγέθους αιωρούμενα σωματίδια με χρήση ενός προστατευτικού πλέγματος, όμως αυτό δεν παρέχει προστασία από τα φυσικά φαινόμενα όπως η βροχή. Πιθανή διαβροχή της επιφάνειας συλλογής θα είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη καταστροφή της διαδικασίας υπολογισμού (Σχήμα 9). Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ειδική διάταξη για την προστασία και εξωτερική εφαρμογή του συλλέκτη PM. Η διάταξη αυτή πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις: i) παρέχει πλήρη προστασία της επιφάνειας συλλογής από τη βροχή, ii) επηρεάζει το δυνατόν λιγότερο τη διαδικασία συλλογής, iii) περιλαμβάνει αποθηκευτικό χώρο για ένα μετρητικό θερμοκρασίας και υγρασίας τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή επιπλέον δεδομένων και iv) έχει μικρό μέγεθος και είναι διακριτική ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε κοινή θέα.



Σχήμα 9. Φωτογραφία από παθητικό συλλέκτη του οποίου η επιφάνεια συλλογής βράχθηκε έπειτα από έντονα καιρικά φαινόμενα.

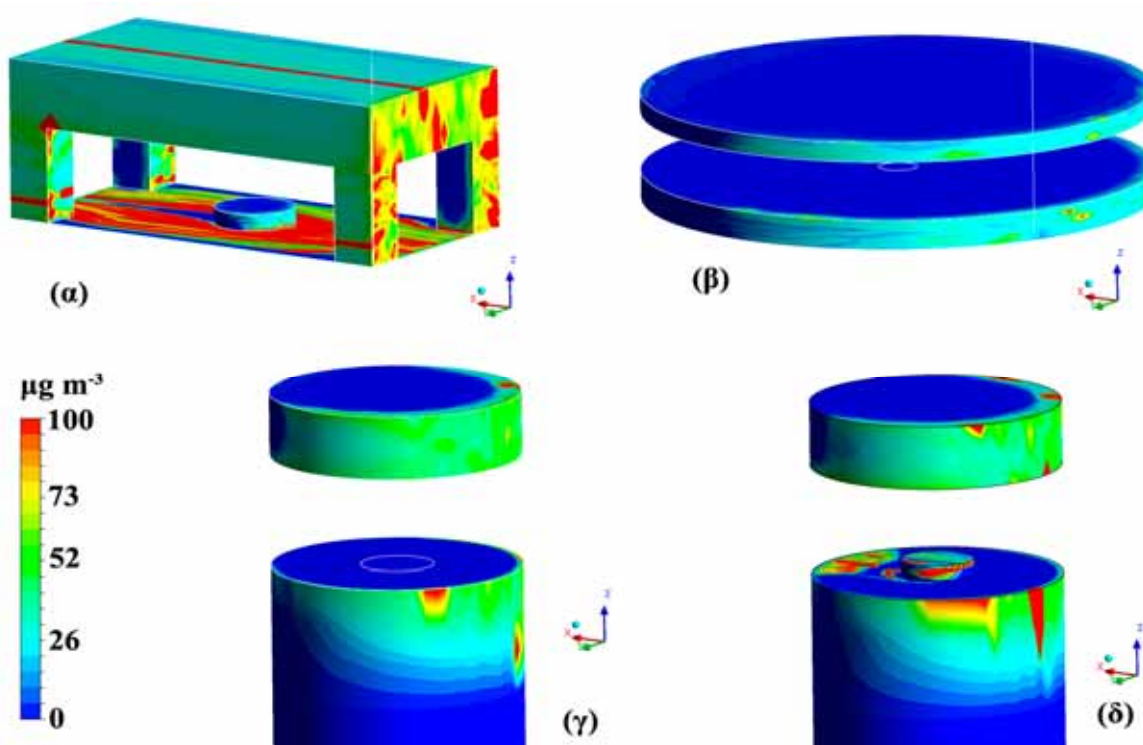
2.3.1 Περιγραφή δόκιμων διατάξεων

Προτάθηκαν σταδιακά 4 δόκιμες διατάξεις εξωτερικής εφαρμογής του παθητικού συλλέκτη (3 κύριες και μία παραλλαγή). Αυτές είναι:

- Δόκιμη διάταξη 1, αποτελείται από ένα παραλληλεπίπεδο στο εσωτερικό δάπεδο του οποίου τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης και στην εσωτερική οροφή το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα πλαϊνά τοιχώματα έχουν αφαιρεθεί, πλην τεσσάρων γωνιακών στηριγμάτων, και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα.
- Δόκιμη διάταξη 2, αποτελείται από ένα μεγάλο κύλινδρο στο εσωτερικό δάπεδο του οποίου τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης. Κάτω από το δάπεδο και τον συλλέκτη

τοποθετείται το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα πλαϊνά τοιχώματα έχουν αφαιρεθεί, και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα.

- Δόκιμη διάταξη 3, αποτελείται από ένα μικρό κύλινδρο χωρισμένο σε δύο διαφορετικά τμήματα. Στο κάτω μέρος του άνω τμήματος τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης. Ενώ στο εσωτερικό του κάτω τμήματος και με κατακόρυφο προσανατολισμό τοποθετείται το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας. Το μεγαλύτερο μέρος των πλαϊνών τοιχωμάτων του άνω τμήματος έχει αφαιρεθεί και στη θέση τους τοποθετείται προστατευτικό πλέγμα. Αντίστοιχα αφαιρείται και το δάπεδο του κάτω τμήματος (αντικαθίσταται με πλέγμα) ώστε το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας να έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Δόκιμη διάταξη 4, είναι ίδια με την δόκιμη διάταξη 3, όμως ο παθητικός συλλέκτης βρίσκεται ελαφρά ανυψωμένος σε σχέση με το δάπεδο του άνω τμήματος της διάταξης.



Σχήμα 10. Η συγκέντρωση των σωματιδίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια συλλογής για τις τέσσερις Δόκιμες Διατάξεις

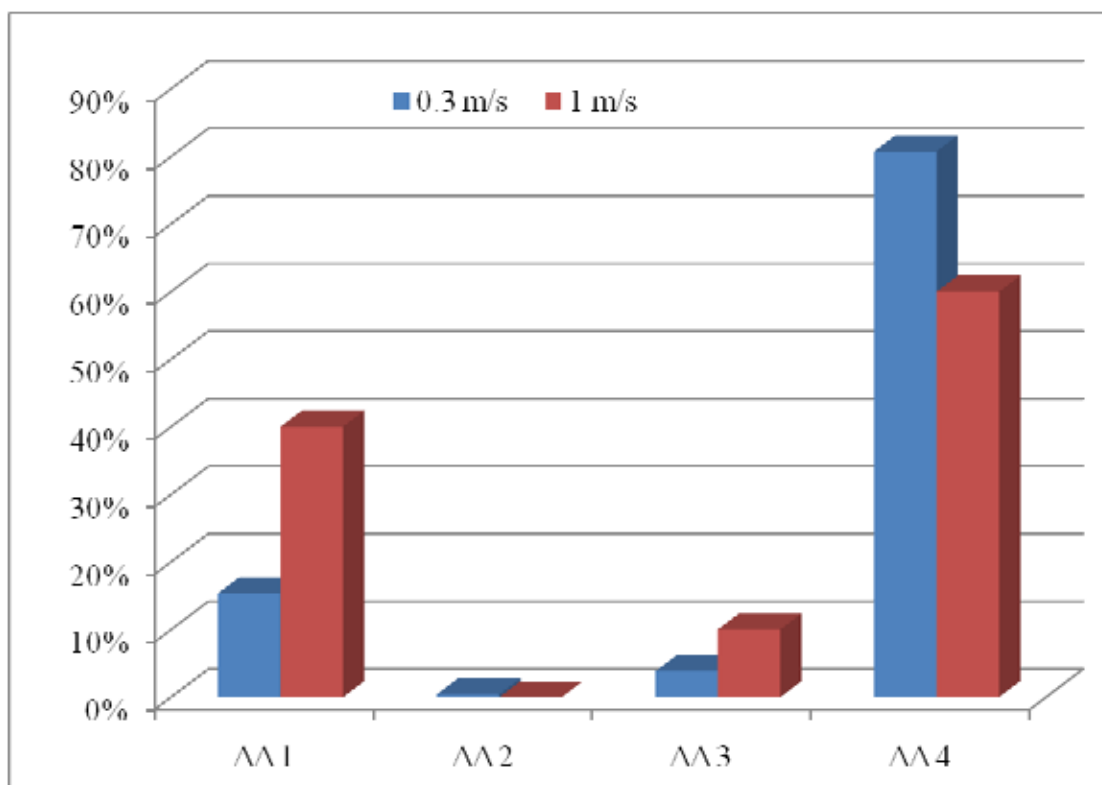
2.3.2 Συγκριτική αξιολόγηση των δόκιμων διατάξεων

Η αξιολόγηση των δόκιμων διατάξεων έγινε σε εικονικό περιβάλλον με τη χρήση ειδικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Κατά την αξιολόγηση εξετάστηκε η επίδραση της εξωτερικής διάταξης στο πλήθος των σωματιδίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια συλλογής. Η εικονική γεωμετρία αποτελείται από ένα απλό δωμάτιο (ένα τρισδιάστατο χώρο) από τη μία πλευρά του οποίου εισέρχεται αέρας 25 °C, με ταχύτητα αναφοράς 0.3 m/s (ή 1 m/s εναλλακτικά). Στην ίδια πλευρά και από ένα άνοιγμα εισέρχονται αιωρούμενα σωματίδια (διαμέτρου από 0.1 μm έως 10 μm) με την ίδια ταχύτητα όπως και το ρεύμα αέρα. Από όλες τις υπόλοιπες πλευρές ο αέρας εξέρχεται ελεύθερα. Η κατανομή του πλήθους των σωματιδίων σε συνάρτηση με την διάμετρο τους επιλέχθηκε να είναι ίση με αυτή που μετρήθηκε σε παλαιότερη ερευνητική εργασία (Samara, 2005) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στο κέντρο της γεωμετρίας βρίσκεται μια απλοποιημένη μορφή της εκάστοτε διάταξης με τον παθητικό συλλέκτη αιωρούμενων σωματιδίων. Για κάθε δόκιμη διάταξη και για τις δύο ταχύτητες που εξετάστηκαν (0.3 m/s και 1 m/s) υπολογίστηκαν σε αντίστοιχα εικονικά πειράματα α) οι τροχιές των αιωρούμενων σωματιδίων, β) οι ταχύτητες του πεδίου ροής του αέρα, γ) οι ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής και δ) η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων που προσπίπτει στην επιφάνεια της διάταξης.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των σωματιδίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια συλλογής. Ως πείραμα αναφοράς χρησιμοποιείται η αντίστοιχη εικονική γεωμετρία με τη διαφορά ότι ο συλλέκτης βρίσκεται ελεύθερος χωρίς προστατευτική διάταξη. Για τη Δόκιμη Διάταξη 1 (Σχήμα 10α) τα κάθετα τμήματα που παρέμειναν για λόγους στήριξης, παρεμποδίζουν ουσιαστικά την ελεύθερη ροή των αιωρούμενων σωματιδίων προς το συλλέκτη. Οι παρατηρήσεις στη διάταξη του παραλληλεπιπέδου οδήγησαν σε κυλινδρικές διατάξεις που παρουσιάζουν το επιπλέον πλεονέκτημα επίτευξης επιθυμητής συμμετρίας. Στη Δόκιμη Διάταξη 2 (Σχήμα 10β) επιλέχθηκε ένας μεγάλος κύλινδρος διαμέτρου 13 cm. Η μεγάλη διάμετρος του κυλίνδρου φαίνεται ότι περιορίζει τον αριθμό των σωματιδίων που συλλέγονται.

Οι παρατηρήσεις στη Δόκιμη Διάταξη 2, οδήγησαν στη Δόκιμη Διάταξη 3 (Σχήμα 10γ), όπου επιλέχθηκε ένας κύλινδρος διαμέτρου 5 cm, που είναι σημαντικά μικρότερος από τον προηγούμενο. Στο κάτω τμήμα του κυλίνδρου θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο μετρητής θερμοκρασίας/υγρασίας. Ο μεγάλος όγκος της διάταξης όμως, φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το πεδίο ροής και προκαλεί μία ανοδική κίνηση του αέρα, οποίος οδηγεί τα σωματίδια προς το επάνω τμήμα. Στην τελευταία διάταξη που φαίνεται στο (Σχήμα 10δ), ο παθητικός συλλέκτης έχει ανυψωθεί με σκοπό τη δημιουργία ευνοϊκότερων δομών στην κίνηση και τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων. Το κριτήριο που εξετάζεται (Σχήμα 11) κατά τη συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών διατάξεων είναι η ικανότητα συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων του παθητικού συλλέκτη σε σχέση με την περίπτωση (100%) που αυτός βρίσκεται ελεύθερος στον ίδιο εικονικό χώρο. Από το Σχήμα 11 γίνεται

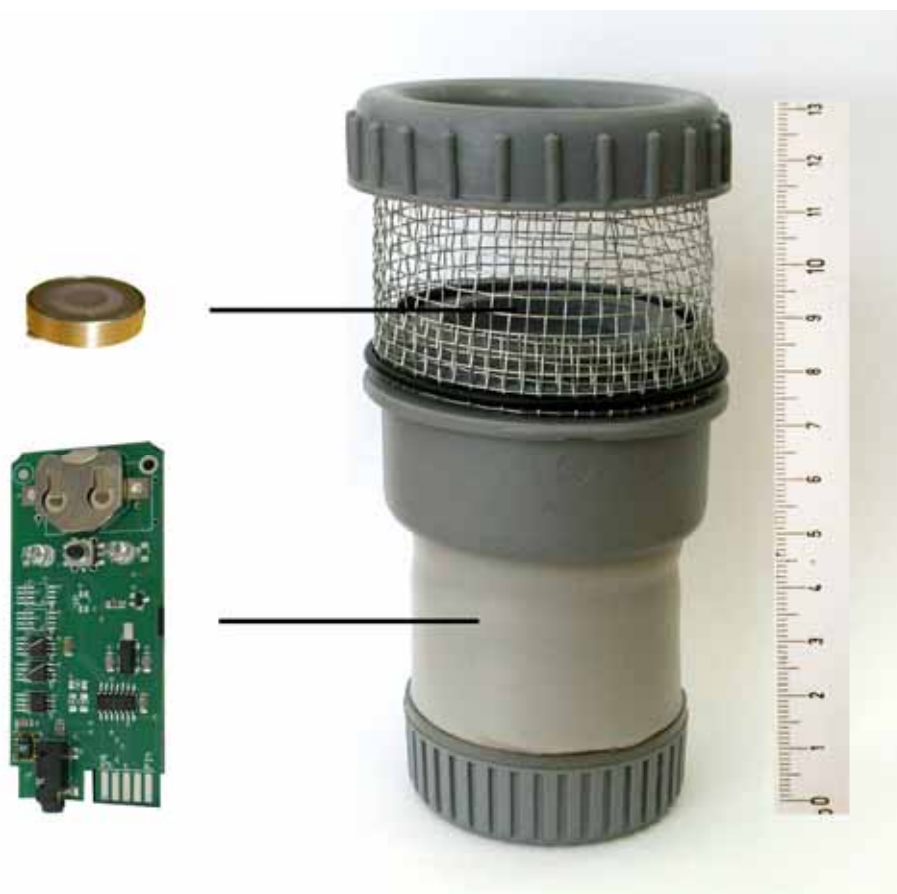
εμφανές ότι η αποδοτικότερη διάταξη είναι η 4^η. Η διάταξη παρουσιάζει πολλά επιπλέον προτερήματα έναντι των υπολοίπων: i) Δεν παρουσιάζει προβλήματα ασυμμετρίας όπως η ΔΔ1, ii) κατασκευάζεται αλλά και αποσυναρμολογείται πιο εύκολα από τη διάταξη ΔΔ2, iii) το καταγραφικό θερμοκρασίας και υγρασίας είναι προστατευμένο από την βροχή καλύτερα από όλες τις διατάξεις, iv) έχει σημαντικά μικρό μέγεθος και παρουσιάζει ευκολίες στην τοποθέτηση του.



Σχήμα 11. Σύγκριση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για κάθε δοκιμη διάταξη (ΔΔ1-4) και ταχύτητα σε σχέση με τον ελεύθερο συλλέκτη.

2.3.3 Διάταξη εξωτερικής εφαρμογής

Η προσομοίωση της προηγούμενης ενότητας ουσιαστικά οδήγησε στο σχεδιασμό της διάταξης (Σχήμα 13). Στο κάτω μέρος της βρίσκεται το κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας και υγρασίας, ενώ στο πάνω μέρος τοποθετείται ο παθητικός συλλέκτης, που προστατεύεται από ένα αραιό μεταλλικό πλέγμα. Η διάταξη που κατασκευάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 12, η οποία είναι πολύ χαμηλού κόστους και επίσης συναρμολογείται πολύ εύκολα.

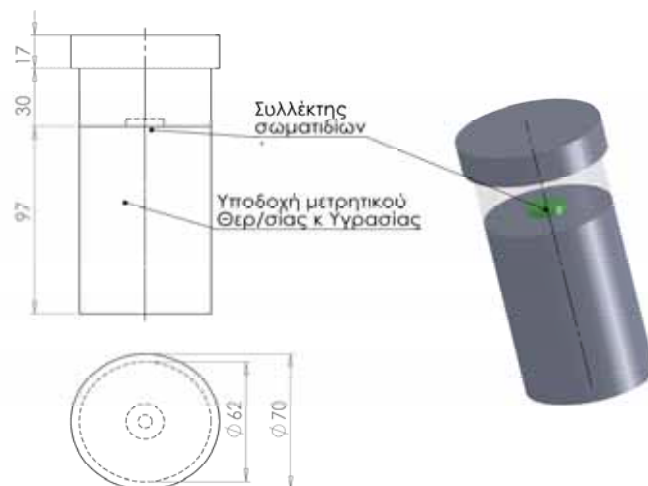


(α)



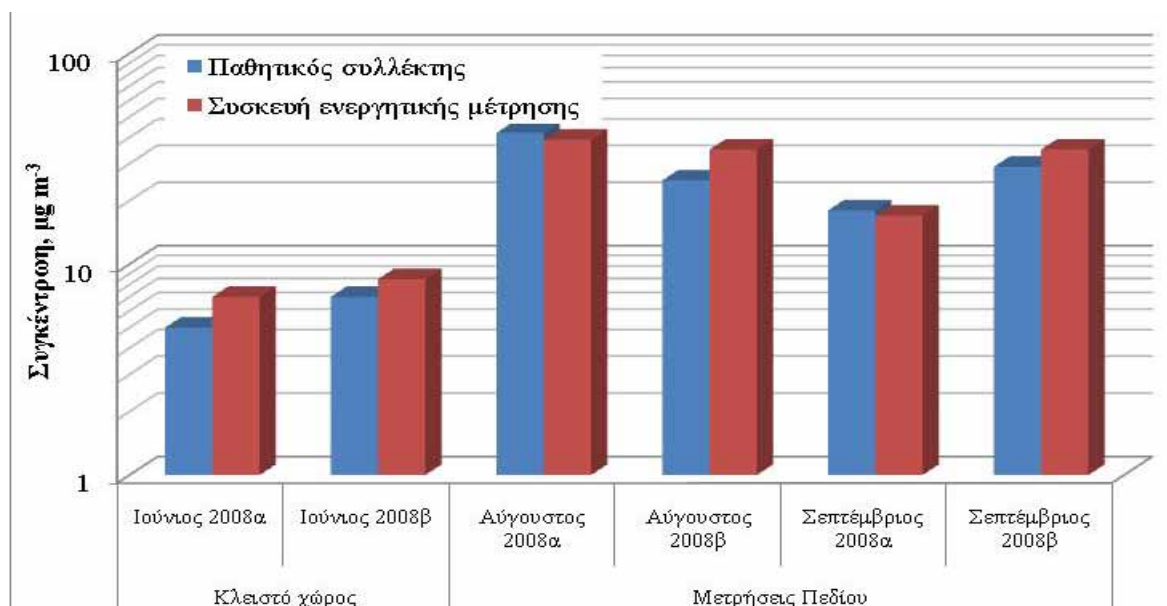
(β)

Σχήμα 12. Διάταξη με παθητικό συλλέκτη σωματιδίων και μετρητή θερμοκρασίας και υγρασίας.



Σχήμα 13. Σκαρίφημα της επιλεγμένης διάταξης εξωτερικής εφαρμογής (Δόκιμη Διάταξη 4).

Το βασικό πρόβλημα των παθητικών συλλεκτών είναι ότι απαιτούν μία πολύ προσεκτική και επίπονη βαθμονόμηση (Σχήμα 14) έτσι ώστε η οπτική χρονική καταμέτρηση των σωματιδίων που επικάθονται να μετατραπεί σε συγκέντρωση σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Η διαδικασία αυτή για το συγκεκριμένο αισθητήρα ολοκληρώθηκε στο Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων του ΑΠΘ σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο (Ιούνιος 2008) θα αποτελέσματα ελεγχθήκαν σε κλειστό χώρο και σε αντιπαραβολή με μια φορητή συσκευή μέτρησης PM. Στο δεύτερο στάδιο υλοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου των παθητικών διατάξεων και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες των σταθμών μέτρησης του ΥΠΕΧΩΔΕ



Σχήμα 14. Σύγκριση των μετρήσεων του παθητικού συλλέκτη έναντι ενεργητικών συσκευών (Δοκιμές κλειστού χώρου) και σταθμών μέτρησης του ΥΠΕΧΩΔΕ (μετρήσεις πεδίου).

3 Πιλοτική εφαρμογή των διατάξεων παθητικής συλλογής.

Η διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε επιλέχθηκε να εφαρμοστεί πιλοτικά στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, η οποία παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις PM. Πριν την εφαρμογή των παθητικών συλλεκτών εκπονήθηκε μελέτη χωροθέτησης (για λεπτομέρειες βλ. Αναφορά Φάσης Α') με σκοπό να επιλεγθούν τα σημεία τοποθέτησης τους.

3.1 Μελέτη χωροθέτησης

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα προσδιορίζεται από τους αντικειμενικούς στόχους της παρακολούθησης, όπως καθορίζονται στην τεχνική έκθεση της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (EEA, 1999). Το νέο δίκτυο των παθητικών συλλεκτών σωματιδίων θα υποστηρίξει κυρίως ερευνητικές προσπάθειες, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα για την αντιπροσωπευτική αποτίμηση των επιπέδων σωματιδιακής ρύπανση στην ΕΠΘ. Η χωροθέτηση των σταθμών του νέου δικτύου βασίσθηκε σε δεδομένα εκπομπών και προσομοιώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ΕΠΘ. Οι βιομηχανικές δραστηριότητες, οι οποίες συγκεντρώνονται κυρίως δυτικά-βορειοδυτικά της πόλης, αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή σωματιδίων στην ΕΠΘ. Υψηλές είναι επίσης οι εκπομπές από τη μεταφορά και τα συστήματα θέρμανσης, κυρίως στο κέντρο της πόλης. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του υφισταμένου δικτύου οδήγησαν στην χωροθέτηση των σταθμών η οποία εμφανίζεται στο Σχήμα 6 και στον Πίνακα 1.

3.2 Αποτελέσματα πιλοτικής εφαρμογής

Η πιλοτική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είχε διάρκεια δύο μηνών κατά το οποίο οι διατάξεις των παθητικών συλλεκτών (ΔΠΣ) τοποθετήθηκαν πλησίον των σταθμών του επίσημου δικτύου της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και του Δήμου Θεσσαλονίκης. Σκοπός του σταδίου αυτού ήταν η τροποποίηση του συντελεστή γ_m , Εξ.(7), ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της συνολικής διάταξης στη διαδικασία συλλογής των PM. Το δεύτερο στάδιο είχε και αυτό διάρκεια δύο μήνες και περιλάμβανε την τοποθέτηση ΔΠΣ στα 20 σημεία που προέβλεπε η μελέτη χωροθέτησης (βλ. Σχήμα 8 και Σχήμα 15). Σκοπός του δεύτερου σταδίου ήταν ο περαιτέρω έλεγχος των αποτελεσμάτων της ΔΠΣ με το επίσημο δίκτυο της περιφέρειας και η καταγραφή των επιπέδων συγκέντρωσης στα υπόλοιπα σημεία της ΕΠΘ, κάτι το οποίο ίσως συμβαίνει για πρώτη φορά σε αυτές τις περιοχές. Το Σχήμα 16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές στο σύνολο των σημείων που ανέδειξε η μελέτη χωροθέτησης. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα εμφανίζονται οι μετρήσεις των σταθμών, πλησίον των σημείων τοποθέτησης των παθητικών συλλεκτών, που λειτουργούν υπό την αιγίδα του ΥΠΕΧΩΔΕ ή των Δήμων.

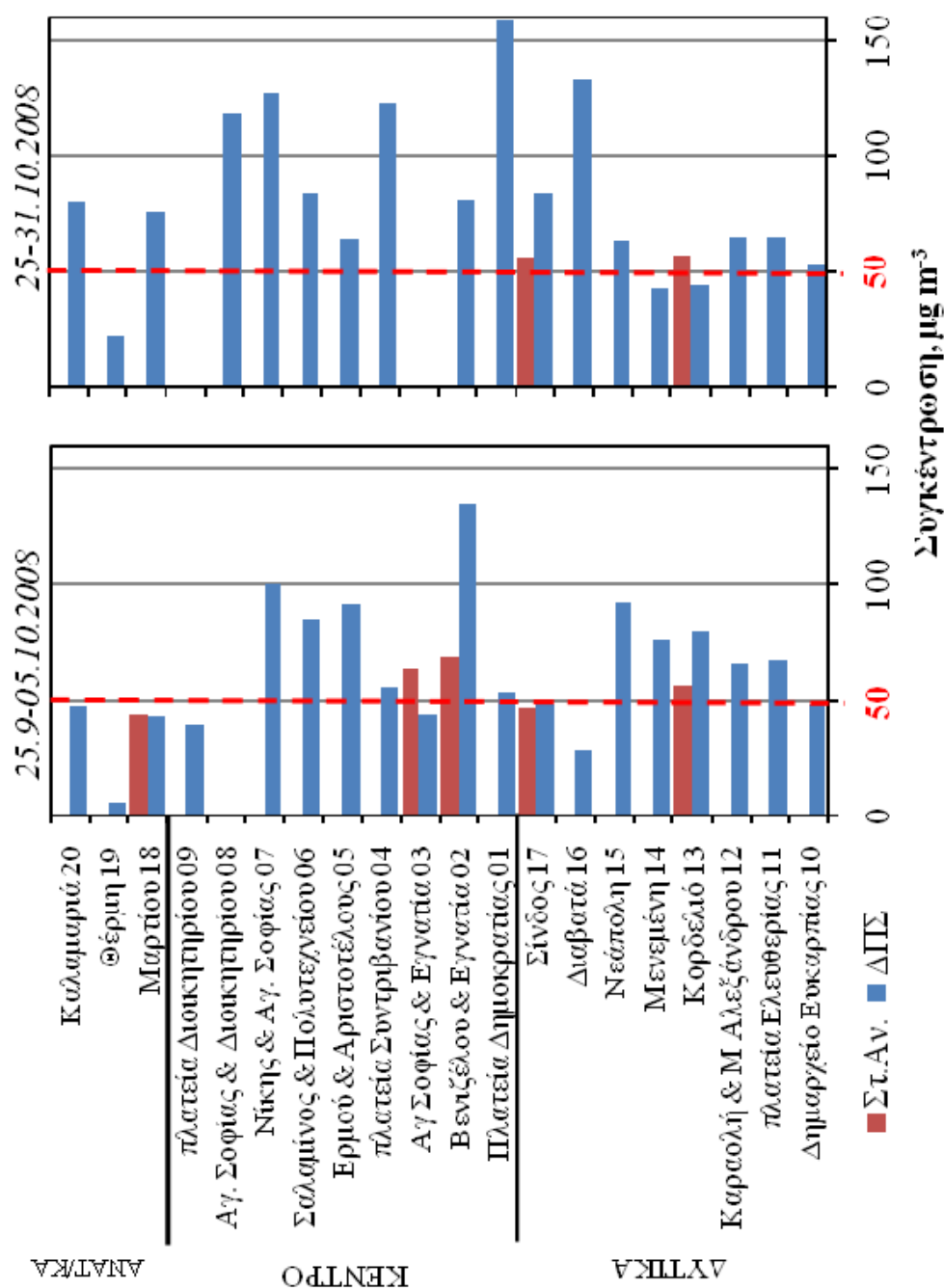


(α)



(β)

Σχήμα 15. Διάταξη με παθητικό συλλέκτη σωματιδίων τοποθετημένη σε δημοτικό στύλο φωτισμού έπειτα από συνεννόηση με τις κατά τόπους δημοτικές αρχές
(α) Πλατεία Δημοκρατίας και (β) Εύοσμος..



Σχήμα 16. Μέση εβδομαδιαία συγκέντρωση ΔΠΣ στην ΕΠΘ σε σχέση με σταθμούς αναφοράς (Στ.Αν.) για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους (50 µg m⁻³, όριο μέσης ημερήσιας συγκέντρωσης [EC, 2008]).

4 Συμπεράσματα

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι παρόλο που οι μέγιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων εμφανίζονται σε θερμά σημεία κυκλοφορίας στις αστικές περιοχές, σημαντικές συγκεντρώσεις εμφανίζονται και σε περιοχές υποβάθρου και η διασυνοριακή μεταφορά είναι μεγάλη. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του μοντέλου του EMEP το περιφερειακό υπόβαθρο των ανθρωπογενών σωματιδίων στην Ελλάδα έχει μια πολύ σημαντική διασυνοριακή συνιστώσα η οποία για τα PM_{2.5} φθάνει το ~80%. Ακόμη και για τα πρωτογενή μεγαλύτερα σωματίδια η συνεισφορά της διασυνοριακής ρύπανσης είναι σημαντική (~45% για την Ελλάδα).

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε μια διάταξη παθητικής συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων. Η διάταξη αυτή βασίζεται σε αντίστοιχους συλλέκτες που αναπτύχθηκαν για εφαρμογή σε κλειστούς χώρους. Τα PM που συλλέγονται, σε ειδική επιφάνεια, μελετώνται με χρήση οπτικού μικροσκοπίου και ανάγονται σε μέση συγκέντρωση για το χρονικό διάστημα εφαρμογής. Η διάταξη επιλέχθηκε να εφαρμοστεί πιλοτικά στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης λόγω των υψηλών επιπέδων συγκέντρωσης που παρουσιάζει. Η προσομοίωση των μετεωρολογικών συνθηκών στην περιοχή σε συνδυασμό με την μελέτη των παρελθόντων επιπέδων συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, πρότειναν 20 σημεία τοποθέτησης των διατάξεων με σκοπό την καλύτερη αποτύπωση του υπαρκτού προβλήματος σε όλη τη Θεσσαλονίκη. Τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής έδειξαν ότι αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τα υπάρχοντα δίκτυα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και του Δήμου Θεσσαλονίκης. Επιπλέον, αυτή επαλήθευσε τις “υποψίες” ότι τα επίπεδα συγκέντρωσης των PM είναι σημαντικά σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε έντονες βιομηχανικές δραστηριότητες, ενώ ανέδειξε ότι το πρόβλημα είναι σημαντικότερο στο ιστορικό κέντρο της Θεσσαλονίκης. Στο τελευταίο συμβάλει και το γεγονός ότι βρίσκονται σε εξέλιξη τα έργα του Μετρό Θεσσαλονίκης. Τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα αλλά και η σημαντική επίδραση των PM στην ανθρώπινη υγεία αποτέλεσαν τα κίνητρα για την ενεργή διατήρηση του δικτύου των παθητικών διατάξεων μέχρι και σήμερα.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς της παρούσας εργασίας ευχαριστούν ιδιαίτερα τους κους Βαβατζανίδη και Α.Γ. Κελέση από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και το Δήμο Θεσσαλονίκης αντίστοιχα για τα δεδομένα που διέθεσαν για τον έλεγχο των μετρήσεων της διάταξης παθητικής συλλογής. Η δε συνεργασία με την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας συνεχίζεται ακόμη και σήμερα.

Βιβλιογραφία

- Brown, R. C., Hemingway, M. A., Wake, D., & Thompson, J., 1995, "Field trials of an electret-based passive dust sampler in metal-processing industries", *Annals of Occupational Hygiene*, 39(5): 603-622.
- Dockery, D. W., Schwartz, J., & Spengler, J. D., 1992, "Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols", *Environmental Research*, 59(2): 362-373.
- EC, 2008, "Council Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe", *Official Journal of the European Communities*, L(152): 1-44.
- EEA. (1999). Criteria for EUROAIRNET, The EEA Air Quality Monitoring and Information Network. (No. Technical Report No. 12).
- EMEP (2008a) "Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe in 2006". Joint MSC-W & CCC & CEIP Report.
- EMEP (2008b) Transboundary Particulate Matter in Europe: Status Report 2008" Joint CCC & MSC-W & CEIP Report.
- EMEP Programme. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (http://www.emep.int/emep_description.html).
- Goudie, A. S. and Middleton, N. J. (2006) Desert Dust in the Global System. Springer Berlin
- Leeuw, F. d. (2005). *PM10 measurement methods and correction factors in AIRBASE 2004 status report* (No. Technical Paper 2005/6): European Topic Centre on Air and Climate Change.
- Leith, D., Sommerlath, D., & Boundy, M. G., 2007, "Passive sampler for PM10-2.5 aerosol", *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(3): 332-336.
- NARSTO. (2006). *Measurement Methods Compendium: Particulate Matter Methods*, 2009, from <http://narsto.ornl.gov/Compendium/methods/pm.shtml>
- Nickovic, S., and S. Dobricic, 1996: A model for long-range transport of desert dust. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2537-2544.
- Pope, C. A., 2007, "Mortality Effects of Longer Term Exposures to Fine Particulate Air Pollution: Review of Recent Epidemiological Evidence", *Inhalation Toxicology*, 19(1 supp 1): 33 - 38.
- Samara, C., 2005, "Chemical mass balance source apportionment of TSP in a lignite-burning area of Western Macedonia, Greece", *Atmospheric Environment*, 39(34): 6430-6443.

- Schneider, T., Bohgard, M., & Gudmundsson, A., 1994, "A semiempirical model for particle deposition onto facial skin and eyes. Role of air currents and electric fields", *Journal of Aerosol Science*, 25(3): 583-593.
- Schneider, T., Schlunssen, V., Vinzents, P. S., & Kildes, J., 2002, "Passive sampler used for simultaneous measurement of breathing zone size distribution, inhalable dust concentration and other size fractions involving large particles", *Annals of Occupational Hygiene*, 46(2): 187-195.
- Sichletidis, L., Tsiotsios, I., Gavrilidis, A., Chloros, D., Kottakis, I., Daskalopoulou, E., et al., 2005, "Prevalence of chronic obstructive pulmonary disease and rhinitis in northern Greece", *Respiration*, 72(3): 270-277.
- Syrakov D., Prodanova M. Ganey K. Zerefos C. Vasaras A. (2002) Exchange of sulfur pollution between Bulgaria and Greece. Environmental science and pollution research international 2002;9(5):321-6.
- Thorpe, A., Hemingway, M. A., & Brown, R. C., 1999, "Monitoring of urban particulate using an electret-based passive sampler", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 14(11): 750-758.
- Thunis Philippe, 2001 : The influence of scale on modelled ground level O₃ concentrations. Norwegian Meteorological Institute, Research report no. 57, EMEP/MSC-W, Oslo.
- Vinzents, P. S., 1996, "A passive personal dust monitor", *Annals of Occupational Hygiene*, 40(3): 261-280.
- Wagner, J., & Leith, D., 2001a, "Field tests of a passive aerosol sampler", *Journal of Aerosol Science*, 32(1): 33-48.
- Wagner, J., & Leith, D., 2001b, "Passive aerosol sampler. Part I: Principle of operation", *Aerosol Science and Technology*, 34(2): 186-192.
- WHO/ Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. (2006). "Health Risks of Particulate Matter from Long-Range Transboundary Air Pollution". <http://www.webcitation.org/5ML1oBpdn>.
- Wood, N., 1981, "A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces", *Journal of Aerosol Science*, 12(3): 275-290.
- Yamamoto, N. (2006). "Microscopic method for airborne coarse particles: Application to a passive sampler". The University of Tokyo, Tokyo.
- Yamamoto, N., Hikono, M., Koyama, H., Kumagai, K., Fujii, M., & Yanagisawa, Y., 2006, "A passive sampler for airborne coarse particles", *Journal of Aerosol Science*, 37(11): 1442-1454.

- Yamamoto, N., Matsuki, H., & Yanagisawa, Y., 2007, "Application of the personal aeroallergen sampler to assess personal exposures to Japanese cedar and cypress pollens", *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 17(7): 637-643.
- Zerefos C., D. Syrakov, K. Ganey, A. Vasaras, K. Kourtidis, M. Tzortziou, M. Prodanova, R. Dimitrova, E. Georgieva, D. Yordanov and N. Miloshev, Study of the pollution exchange between Bulgaria and Northern Greece, *Int. J. Environment and Pollution*, 22, 1/2, 163-185, 2004
- Μιχαηλίδης Η. (2008) Επίδραση Σκόνης Της Σαχάρα Στα Επίπεδα Σωματιδιακής Ρύπανσης Της Λεκάνης Της Πτολεμαΐδας. Διπλωματική εργασία του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Φυσική Περιβάλλοντος», Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αποτελέσματα του DREAM για την περίοδο των μετρήσεων (25/10 – 14/11 2008). Τα παρακάτω σχήματα εμφανίζουν την επιφανειακή συγκέντρωση της μεταφερόμενης σκόνης στις 12 UTC.

