Η Χρήση Νέων Παθητικών Συλλεκτών στη Μέτρηση Αιωρουμένων Σωματιδίων στην Ατμόσφαιρα

Μ.Ι. Ασσαέλ, Κ.Ε. Κακοσίμος

Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων & Περιβαλλοντικών Διεργασιών,
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 54124
kkakosim@cheng.auth.gr

Περίληψη

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. Είκοσι τέτοιες διατάξεις βαθμονομήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν πιλοτικά στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης ενώ όπου ήταν δυνατό τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των υπαρχόντων δικτύων.

Abstract

Modern European cities are characterized by high particulate matter concentrations. Unfortunately, the number of the stations monitoring air pollution, especially particulate matter, is not sufficient for the whole representation of the problem. The main reason for this is the quite high fixed and operational cost of the measuring devices. The rise in the number of measurement points of air pollution can be achieved by using low-cost passive samplers, of which both the fixed and operational cost are orders of magnitude lower than the corresponding active devices. In the present work, the design of several devices was studied in a virtual environment, and a final selectorr was developed for the recording of particulate matter. Twenty such devices were calibrated and employed in the Greater Thessaloniki Area, while the results are continuously compared with those of existing networks.

1. Εισαγωγή

Επιδημιολογικές μελέτες έχουν συνδέσει την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού σε ατμόσφαιρες επιβαρημένες με αιωρούμενα σωματίδια, με την εμφάνιση μακρό- και βραχυ-προθέσμων ασθενειών. Μελέτες σε πόλεις των ΗΠΑ (Dockery et al. 1992, Pope 2007) κατέληξαν ότι αύξηση μόλις κατά 10 $\mu g \cdot m^{-3}$ 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 με τις υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων. Ο ακριβής μηχανισμός των συσχετίσεων αυτών δεν είναι ξεκάθαρος λόγω των ελλιπή δεδομένων έκθεσης των ανθρώπων στους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως τα αιωρούμενα σωματίδια. 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 (Sichletidis et al. 2005) και Environmental Protection Agency (Sichletidis et al. 2005). Η βαρομετρική μέθοδος είναι η μόνη που λαμβάνεται ως μέθοδος αναφοράς.

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 πάγιου και λειτουργικού κόστους των ενεργητικών διατάξεων. Αντίθετα, οι παθητικοί συλλέκτες είναι πολύ χαμηλού κόστους και μπορούν να τοποθετηθούν σε πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από ότι οι ενεργητικές διατάξεις. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η εφαρμογή μιας παθητικής μεθόδου για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των PM και 20 πρότυπες διατάξεις βαθμονομήθηκαν και τοποθετήθηκαν για ένα έτος στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παθητικές μέθοδοι παρέχουν μέση συγκέντρωση για το χρονικό διάστημα που εφαρμόζονται, ενώ η ακρίβεια τους είναι μικρότερη από αυτή των ενεργών.

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 1 Δίκτυο σταθμών μέτρησης της συγκέντρωσης αιωρουμένων σωματιδίων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, του Δήμου Θεσσαλονίκης (σταθμοί αναφοράς) και της παρούσας εργασίας.

Στην Ευρύτερη Περιοχή της Θεσσαλονίκης (ΕΠΘ) βρίσκονται εγκατεστημένοι 9 σταθμοί μέτρησης αέριων ρύπων της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας, οι οποίοι ανήκουν στο επίσημο δίκτυο του ΥΠ.ΕΧΩ.ΔΕ. Από αυτούς τους σταθμούς 4 είναι σε θέση να καταγράψουν τη συγκέντρωση των PM. Επιπλέον του επίσημου δικτύου λειτουργεί ένας αριθμός άλλων σταθμών όπως αυτοί του Δήμου Θεσσαλονίκης. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει τους σταθμούς που χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση στην παρούσα εργασία και τις θέσεις που τοποθετήθηκαν οι παθητικοί συλλέκτες.

2. Παθητικοί Συλλέκτες Αιωρούμενων Σωματιδίων

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 (Leeuw 2005). Η μέθοδος του Brown (NARSTO 2006) 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 (Brown et al. 1995) 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 (Brown et al. 1995) και Yamamoto (1996) 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 ώστε να καθοριστεί η δομή τους, 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 (Wagner and Leith 2001b) που λαμβάνει υπόψη του το μέγεθος των σωματιδίων και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της ροής.

Το μοντέλο απόθεσης (2006, 2007) 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 (μg m^{-3}), στην ατμόσφαιρα με τη ροή σωματιδίων στην επιφάνεια, F (μg m^{-2} s^{-1}) και την ταχύτητα καθίζησης u_{dep} (m s^{-1}), ως

$$C = F \big/ u_{\mathrm{dep}} = F \big/ u_{\mathrm{amb}} \gamma_{\mathrm{m}} , \qquad (1)$$

όπου γ_m (-) είναι ένας αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης (Schneider et al. 1994) που σχετίζεται 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 (Schneider et al. 1994)

$$u_{\mathrm{amb}} = -u_t \Big/ \left[\left[\left(1 - 0.67 \tau^{0.49} u_*^{-0.02} \nu^{-0.49} u_{\mathrm{t}} \right) e^{-u_{\mathrm{t}} I} \right] - 1 \right]. \qquad (2)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση, ν (m^2 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

$$u_* = u_z \Big/ \ln\left(\frac{z}{z_o} \right), \quad \text{όπου} \quad u_{\mathrm{t}} = \tau g \quad \text{και} \quad \tau = \frac{\rho_{\mathrm{p}} d_{\mathrm{a}}^2 C_c}{18\mu} , \qquad (3)$$

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 (kg m^{-1} 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 (Wagner and Leith 2001a, b) και δίνεται από την εξίσωση,

$$I = \frac{I^+}{u_*}, \quad \text{όπου} \quad I^+ = \left[\frac{3\sqrt{3}}{29\pi}\mathrm{Sc}^{-2/3} + 6.2\times10^{-4}\left(\tau^+\right)^2\right]^{-1} \quad \text{και} \quad \tau^+ = \frac{\tau u_*^2}{\nu} \qquad (4)$$

και Sc είναι ο αριθμός Schmidt. Έχει αποδειχτεί (Wagner and Leith 2001a) 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 (1981) ως συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων:

$$\gamma_\mathrm{m} = \begin{cases} 1, & d_\mathrm{a} < 1.63\mu\mathrm{m} \\ (5.95\times10^{-3}\,\mathrm{Re_p}^{-0.439}, & d_\mathrm{a} \geq 1.63\mu\mathrm{m} \end{cases}, \quad \text{όπου} \ \mathrm{Re_p} = d_\mathrm{a} u_\mathrm{t}/\nu \qquad (5)$$

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:

$$m_i = \frac{3\pi\mu S_\mathrm{d}}{\gamma_\mathrm{m} g S_\mathrm{v} C_{c,\mathrm{dev}}} d_{\mathrm{pa},i} \quad \text{και} \quad F = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i}{At}, \qquad (6)$$

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 εμβαδόν 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 πρωτύτερο 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.

$$d_\mathrm{a} = d_\mathrm{ev}\left(\frac{\rho_p C_{c,\mathrm{dev}}}{\rho_\mathrm{air} C_{c,\mathrm{da}}}\frac{1}{S_\mathrm{d}}\right)^{1/2}, \quad \text{όπου} \quad d_\mathrm{ev} = \frac{d_\mathrm{pa}}{S_\mathrm{v}} \qquad (7)$$

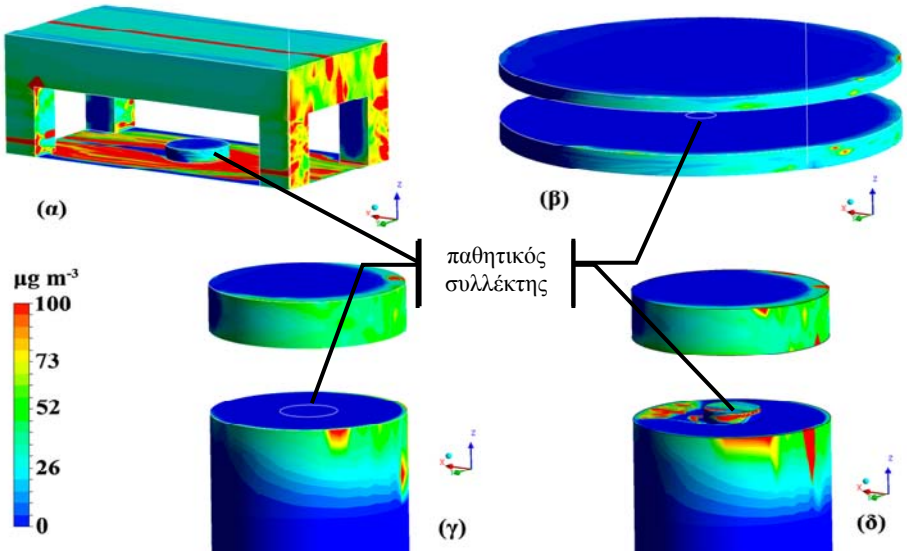
2.2 Μικροσκοπική Ανάλυση Αιωρούμενων Σωματιδίων

Έπειτα από την έκθεση του συλλέκτη στην ατμόσφαιρα για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αυτός μεταφέρεται σε ειδική αεροστεγή συσκευασία για ανάλυση. Για κάθε επιφάνεια λαμβάνονται 49 ψηφιακές φωτογραφίες με χρήση 40x αντικειμενικού φακού. Η συνολική μεγέθυνση που εφαρμόζεται είναι 400x για επιφάνεια συλλογής διαμέτρου ~5 mm. Η κατανομή των λαμβανόμενων φωτογραφιών δεν είναι τυχαία αλλά ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδοχή ώστε να καλυφθεί αντιπροσωπευτικά 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. 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 φωτογράφηση λαμβάνεται μία φωτογραφία αναφοράς για τη βαθμονόμηση του λογισμικούς με 2 σύρματα τιτανίου 7.5 μm και 25 μm των οποίων η διάμετρος είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια.

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. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ειδική διάταξη για την προστασία και εξωτερική εφαρμογή του συλλέκτη PM. Η διάταξη αυτή θα πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις: i) να παρέχει πλήρη προστασία της επιφάνειας συλλογής από τη βροχή, ii) να επηρεάζει το δυνατόν λιγότερο τη διαδικασία συλλογής, iii) να περιλαμβάνει αποθηκευτικό χώρο για ένα μετρητικό θερμοκρασίας και υγρασίας τα οποία χρησιμοποιούνται για την καταγραφή επιπλέον δεδομένων και iv) να έχει μικρό μέγεθος και να είναι διακριτική ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε κοινή θέα. Προτάθηκαν σταδιακά 4 δόκιμες διατάξεις (3 κύριες και μία παραλλαγή), οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

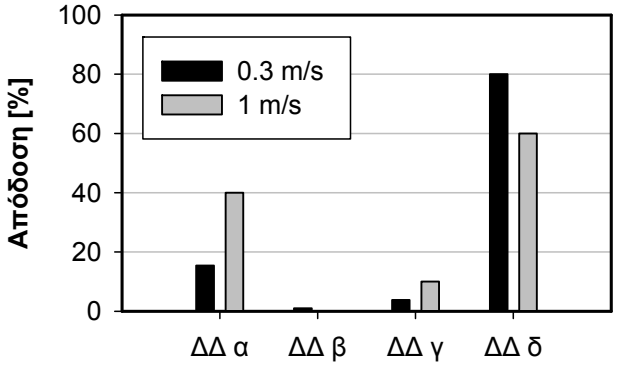


Σχήμα 2 Η συγκέντρωση των σωματιδίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια συλλογής για τις τέσσερις Δόκιμες Διατάξεις

3.1 Συγκριτική Αξιολόγηση των Διατάξεων

Η αξιολόγηση των διατάξεων έγινε σε εικονικό περιβάλλον με τη χρήση ειδικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, κατά την οποία εξετάστηκε η επίδραση της εξωτερικής διάταξης στο πλήθος των σωματιδίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια συλλογής. Η εικονική γεωμετρία αποτελείται από ένα απλό δωμάτιο (έναν τρισδιάστατο χώρο) από τη μία πλευρά του οποίου εισέρχεται αέρας 25 ºC, 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 (Wagner and Leith 2001a) 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 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 2 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 α (Σχήμα 2α) 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 β (Σχήμα 2β) επιλέχθηκε ένας μεγάλος κύλινδρος διαμέτρου 13 cm. Η μεγάλη διάμετρος του κυλίνδρου φαίνεται ότι περιορίζει τον αριθμό των σωματιδίων που συλλέγονται.



Σχήμα 3 Σύγκριση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για κάθε δόκιμη διάταξη (ΔΔα-δ Σχήμα 2) και ταχύτητα σε σχέση με τον ελεύθερο συλλέκτη.

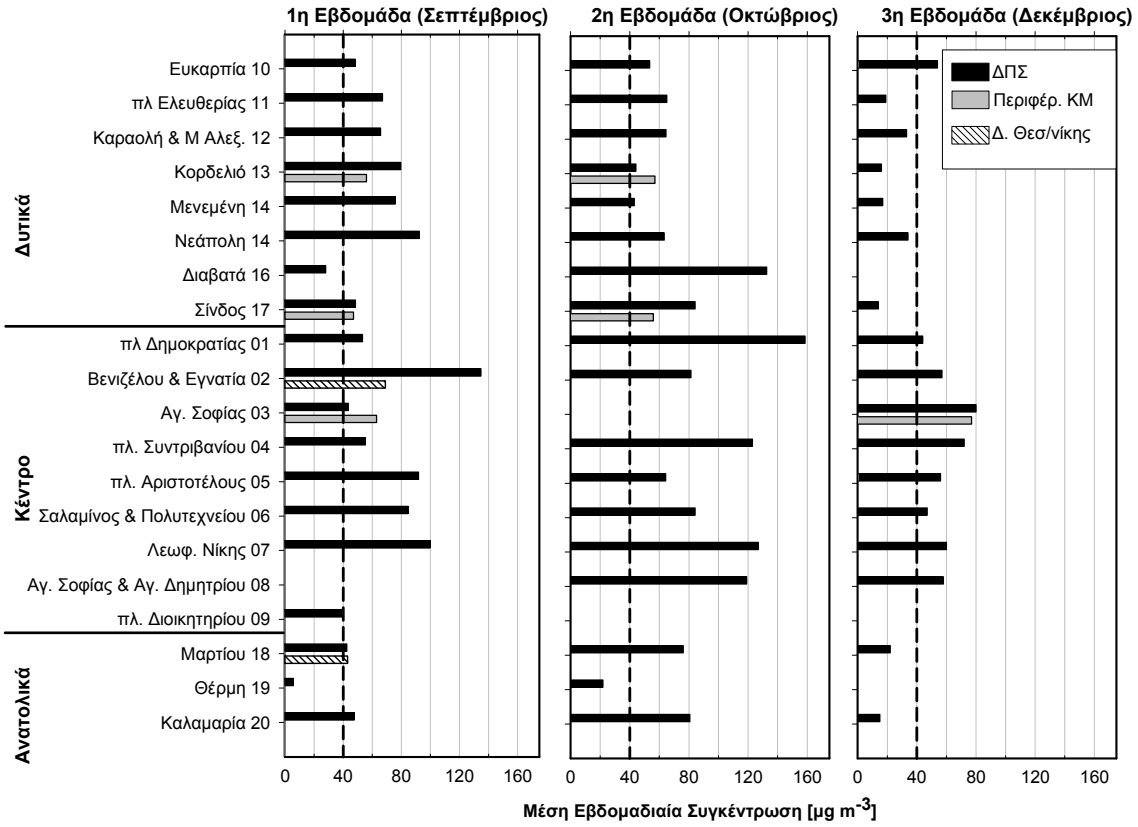
Οι παρατηρήσεις στη Δόκιμη Διάταξη β, οδήγησαν στη Δόκιμη Διάταξη γ (Σχήμα 2γ), όπου επιλέχθηκε ένας κύλινδρος διαμέτρου 5 cm, που είναι σημαντικά μικρότερος από τον προηγούμενο. Ο μεγάλος όγκος της διάταξης όμως, φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το πεδίο ροής και προκαλεί μία ανοδική κίνηση του αέρα, οποίος οδηγεί τα σωματίδια προς το επάνω τμήμα. Στην τελευταία διάταξη που φαίνεται στο (Σχήμα 2δ), ο παθητικός συλλέκτης έχει ανυψωθεί με σκοπό τη δημιουργία ευνοϊκότερων δομών στην κίνηση και τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων. Το κριτήριο που εξετάζεται (Σχήμα 3) 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 3 γίνεται εμφανές ότι η αποδοτικότερη διάταξη είναι η δ. Η διάταξη παρουσιάζει πολλά επιπλέον προτερήματα έναντι των υπολοίπων: i) Δεν παρουσιάζει προβλήματα ασυμμετρίας όπως η ΔΔα, ii) κατασκευάζεται αλλά και αποσυναρμολογείται πιο εύκολα από τη διάταξη ΔΔβ, 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. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην επιλογή της Δόκιμης Διάταξης δ.

4. Αποτελέσματα Πιλοτικής Εφαρμογή των Παθητικών Συλλεκτών

Η διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε επιλέχθηκε να εφαρμοστεί πιλοτικά στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, η οποία παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις PM (Wagner and Leith 2001a). Για την επιλογή της θέσης των παθητικών συλλεκτών εκπονήθηκε μελέτη χωροθέτησης. Η θέση των επιλεγμένων σημείων εμφαίνεται στο Σχήμα 1.

Η πιλοτική εφαρμογή χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση υλοποιήθηκε σε διάρκεια τριών μηνών κατά την οποία οι διατάξεις των παθητικών συλλεκτών (ΔΠΣ) τοποθετήθηκαν πλησίον των σταθμών του επίσημου δικτύου της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας και του Δήμου Θεσσαλονίκης. Σκοπός της φάσης αυτής ήταν η τροποποίηση του συντελεστή γ_m , Εξ.(7), ώστε

να ληφθεί υπόψη η επίδραση της συνολικής διάταξης. Η δεύτερη φάση είχε και αυτή διάρκεια τριών μηνών και περιλάμβανε την τοποθέτηση ΔΠΣ στα 20 σημεία που προβλέπει η μελέτη χωροθέτησης. Σκοποί της φάσης 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 4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής σε τρείς διαφορετικές χρονικές στιγμές στο σύνολο των σημείων που ανέδειξε η μελέτη χωροθέτησης.



Σχήμα 4 Μέση εβδομαδιαία συγκέντρωση ΔΠΣ στην ΕΠΘ σε σχέση με σταθμούς αναφοράς (Περιφέρεια Κ.Μακεδονίας και Δήμος Θεσσαλονίκης) για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (40 μg m^{-3}, όριο μέσης ετήσιας συγκέντρωσης, directive 2008/50/EC).

5. Συμπεράσματα

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 σε 20 σημεία της Ευρύτερης Περιοχής της Θεσσαλονίκης λόγω των υψηλών επιπέδων συγκέντρωσης που παρουσιάζει. 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 Α. Βαβατζανίδη και Α.Γ. Κελέση από την Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας και το Δήμο Θεσσαλονίκης αντίστοιχα για τα δεδομένα που διέθεσαν. Επίσης ευχαριστούμε ιδιαίτερα τον Αν. Καθηγητή κ. Δ. Μελά, τον Επ. Καθηγητή κ. Κ. Καρατζά και τον κ Χ. Αχίλλα ως μέλη της Ομάδας Εργασίας για την Ατμοσφαιρική Ρύπανση καθώς και τον Αν. Καθηγητή Π. Σαμαρά Πρόεδρο της Μόνιμης Επιτροπή για το Περιβάλλον του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.

Βιβλιογραφία

Brown R.C., Hemingway M.A., Wake D. and Thompson J., "Field trials of an electret-based passive dust sampler in metal-processing industries", Annals of Occupational Hygiene, 39, (1995) 603.

Dockery D.W., Schwartz J. and Spengler J.D., "Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols", Environmental Research, 59, (1992) 362.

Leeuw F.d., PM10 measurement methods and correction factors in AIRBASE 2004 status report, European Topic Centre on Air and Climate Change 2005.

NARSTO, Measurement Methods Compendium: Particulate Matter Methods, NARSTO U.S. DOE / ORNL 2006.

Pope C.A., "Mortality Effects of Longer Term Exposures to Fine Particulate Air Pollution: Review of Recent Epidemiological Evidence", Inhalation Toxicology, 19, (2007) 33.

Schneider T., Bohgard M. and Gudmundsson A., "A semiempirical model for particle deposition onto facial skin and eyes. Role of air currents and electric fields", Journal of Aerosol Science, 25, (1994) 583.

Sichletidis L., Tsiotsios I., Gavriilidis A., Chloros D., Kottakis I., Daskalopoulou E. and Konstantinidis T., "Prevalence of chronic obstructive pulmonary disease and rhinitis in northern Greece", Respiration, 72, (2005) 270.

Vinzents P.S., "A passive personal dust monitor", Annals of Occupational Hygiene, 40, (1996) 261.

Wagner J. and Leith D., "Field tests of a passive aerosol sampler", Journal of Aerosol Science, 32, (2001a) 33.

Wagner J. and Leith D., "Passive aerosol sampler. Part I: Principle of operation", Aerosol Science and Technology, 34, (2001b) 186.

Wood N., "A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces", Journal of Aerosol Science, 12, (1981) 275.

Yamamoto N., Hikono M., Koyama H., Kumagai K., Fujii M. and Yanagisawa Y., "A passive sampler for airborne coarse particles", Journal of Aerosol Science, 37, (2006) 1442.

Yamamoto N., Matsuki H. and Yanagisawa Y., "Application of the personal aeroallergen sampler to assess personal exposures to Japanese cedar and cypress pollens", Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 17, (2007) 637.