

Υπολογισμός Επιπέδων Συγκέντρωσης Σωματιδίων PM₁₀ στο Ιστορικό Κέντρο της Θεσσαλονίκης

Μ. Ασσαέλ, Κ. Κακοσίμος

*Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών.
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη*

Περίληψη

Στην εργασία αυτή υπολογίζονται για πρώτη φορά οι συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ στις κυριότερες οδούς του ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης. Για τον υπολογισμό αυτόν χρησιμοποιήθηκε το πακέτο OSPM, μετρήσεις του υπόβαθρου συγκέντρωσης σε προαστιακό σταθμό καθώς και υπάρχουσες μετρήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀ σε συγκεκριμένα σημεία στο ιστορικό κέντρο. Λόγω μερικής έλλειψης δεδομένων για τη χρήση του OSPM, χρειάστηκε να γίνουν επιπλέον παραδοχές, η αξιοπιστία των οποίων καθώς και ολόκληρης της μεθοδολογίας, επιβεβαιώθηκε χρησιμοποιώντας επιπλέον μετρήσεις των ρύπων NO_x και NO₂. Τα πολύ υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης είναι χαρακτηριστικά της σημερινής εικόνας της πόλης.

Applying the OSPM Model to the Calculation of PM₁₀ Concentration Levels in the Historical City of Thessaloniki

M. Assael, K. Kakosimos

*Thermophysical Properties Laboratory, Chemical Engineering Department,
Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece*

Abstract

In this paper, PM₁₀ concentration levels in most of the streets in the historical centre of the city of Thessaloniki (Greece) are calculated. For this calculation, the OSPM package, background concentration measurements at suburban stations, and a few measurements of PM₁₀ concentrations at particular areas inside the historical city centre, were employed. As there was a lack of input data to implement OSPM, further assumptions had to be made. These assumptions and the whole approach, were successfully validated by employing NO_x and NO₂ measurements, in addition to data for PM₁₀. The very high PM₁₀ concentration levels obtained in almost all streets are indicative of the city's situation today.

1. Εισαγωγή

Η σπουδαιότητα που απέκτησε τα τελευταία 20 χρόνια η μελέτη της ποιότητας του αέρα, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός μεγάλου αριθμού εμπειρικών μοντέλων διασποράς ατμοσφαιρικών ρύπων. Στη βιβλιογραφία διακρίνονται πολλά άρθρα ανασκόπησης σχετικά με τη διασπορά σε μακρο-κλίμακα (Caruto et al., 2003), τη διασπορά αερίων ρύπων σε οδικά κανάλια (Vardoulakis et al., 2003 και Dixon et al., 2006) και γενικότερα, με τη διασπορά σωματιδίων (Holmes, 2006). Οι εμπειρικοί παράμετροι αυτών των μοντέλων συνήθως επιλέγονται από αντίστοιχες επιλύσεις των βασικών εξισώσεων ροής και διασποράς.

Συγχρόνως με την αύξηση των εμπειρικών μοντέλων, η ραγδαία εξέλιξη της υπολογιστικής δύναμης διευκόλυνε τη χρήση προχωρημένων αριθμητικών μοντέλων CFD (Computational Fluid Dynamics) στη μελέτη της διασποράς αερίων ρύπων. Μοντέλα όπως το MISKAM (Ketznel et al., 2000), το micro-CALGRID (Stern and Yamartino, 2001) ή το ADREA-HF (Neofytou et al., 2006), έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί και η αξιοπιστία τους έχει επιβεβαιωθεί έναντι μετρήσεων. Παρόλα αυτά, τα μοντέλα CFD εξακολουθούν να είναι πολύ πολύπλοκα για πραγματικές εφαρμογές. Μία μέση λύση αποτελούν σήμερα τα ημι-εμπειρικά μοντέλα των οποίων η χρήση έχει ελεγχθεί εκτεταμένα.

Το Operational Street Pollution Model, OSPM, (Hertel et al., 1989; Berkowicz et al., 1996; Berkowicz, 2000), δημιουργήθηκε ως ένα χρήσιμο λογισμικό για τον υπολογισμό διασποράς σε οδούς, από το National Environmental Research Institute, Department of Atmospheric Environment, της Δανίας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μία απλοποιημένη παραμετροποίηση των συνθηκών οδικού καναλιού, που επηρεάζεται από τη ροή του ανέμου και τη διασπορά των ρύπων. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων υπολογίζονται με τη συνδυασμένη χρήση ενός μοντέλου Gauss (για την απευθείας συνεισφορά) και ενός μοντέλου κουτιού (για την επανακυκλοφορία στο οδικό κανάλι). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τελευταία έκδοση του OSPM (WinOSPM/2003) περιέχει ένα πλήρως διαμορφωμένο μοντέλο εκπομπών που χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά της κίνησης στις οδούς, όπως η τεχνολογία του στόλου των οχημάτων, η μέση ταχύτητα και ο αριθμός των οχημάτων, για να υπολογίσει ωριαίες εκπομπές λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων (Ntziachristos and Samaras, 2002)

Το OSPM έχει ελεγχθεί σε βάθος έναντι άλλων μοντέλων και μετρήσεων (Kukkonen et al., 2000, 2001 and 2003; Aquilina, 2004; Vardoulakis et al., 2005; Gokhale, 2005) και η ευαισθησία του ως προς τα δεδομένα εισόδου έχει αναλυθεί εκτενέστατα (Vardoulakis et al., 2002). Από όσο γνωρίζουμε, το λογισμικό OSPM δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό στην πρόβλεψη συγκεντρώσεων PM₁₀, έχει όμως δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα σε προκαταρκτικές μελέτες (Mensink et al., 2006).

Η Θεσσαλονίκη θεωρείται σήμερα ως μία από τις πιο επιβαρημένες πόλεις όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι κύριες πηγές τους (Manoli et al., 2002), για μικρά σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 3 μm, είναι η κυκλοφοριακή κίνηση οχημάτων (~38% w/w) ενώ ακολουθεί η σκόνη των δρόμων (~28% w/w). Προηγούμενες προσπάθειες πρόβλεψης σημερινών και μελλοντικών συγκεντρώσεων σωματιδίων σε ολόκληρη πόλη με τη χρήση στοχαστικών μοντέλων, βασιζόμενες σε υπάρχουσες μετρήσεις και μετεωρολογικά δεδομένα, έδειξαν ότι οι προβλέψεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στα δεδομένα όλων των παραμέτρων (Slini, 2006).

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται μία πιο τοπική, οδό-με-οδό, προσέγγιση διότι υπάρχουν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα ώστε να είμαστε απολύτως σίγουροι για τη χρήση του λογισμικού σ' αυτές τις περιπτώσεις. Δεδομένα που υπάρχουν είναι οι μετρήσεις υπόβαθρου συγκεντρώσεων σε προαστιακές περιοχές, μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφηκαν στο επίπεδο του δώματος κτιρίου στο κέντρο της περιοχής και ο κυκλοφοριακός φόρτος. Δυστυχώς όλα αυτά τα δεδομένα δεν καλύπτουν την απαιτούμενη χρονική περίοδο και για το λόγο αυτό πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές. Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των παραδοχών αυτών, επιπλέον των μετρήσεων συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀, χρησιμοποιούνται επίσης μετρήσεις ρύπων NO_x και NO₂. Έχοντας επιβεβαιώσει την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας, το λογισμικό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM₁₀ στους κύριους δρόμους του ιστορικού κέντρου της πόλης.

2. Περιοχή υπό εξέταση

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το ιστορικό κέντρο της πόλης. Οι μαυρισμένοι οδοί είναι αυτοί που αναφέρονται στο λογισμικό, ενώ οι αριθμημένες οδοί είναι αυτές στις οποίες εστιάζεται η παρούσα εργασία. (η αρίθμηση των οδών ακολουθεί την κωδικοποίηση της Διεύθυνσης Δημοσίων Έργων Θεσσαλονίκης). Η περιοχή μέσα στο γκρι κύκλο είναι η περιοχή μέτρησης συγκεντρώσεων (Σταθμός Airbase GR0018A) σωματιδίων PM₁₀ και ρύπων NO_x. Σχεδόν όλο το ιστορικό κέντρο αποτελείται από συνεχόμενες οκταόροφες οικοδομές και πολύ στενές οδούς. Επιπλέον όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, υπάρχουν πολύ λίγα πάρκα ή μεγάλες πλατείες, με μοναδική εξαίρεση την πλατεία Αριστοτέλους.

Γύρω από την πόλη της Θεσσαλονίκης υπάρχουν ουσιαστικά 3 βιομηχανικές περιοχές. Στα δυτικά υπάρχει η κύρια βιομηχανική περιοχή με διυλιστήριο και πολλές χημικές βιομηχανίες. Στα νότια υπάρχει βιομηχανική μονάδα κατεργασίας αμύλου ενώ στα βορειοδυτικά της πόλης υπάρχει μία μεγάλη τσιμεντοβιομηχανία, λατομεία και άγονη γη. Επίσης θα πρέπει να τονίσουμε την ύπαρξη δύο μετρητικών σταθμών συγκέντρωσης εκτός πόλης, στα βόρεια ο σταθμός Νεοχωρούδας (Airbase

GR0045A) και στα ανατολικά ο σταθμός του Πανοράματος (Airbase GR0047A). Οι δύο αυτοί σταθμοί παρέχουν το υπόβαθρο συγκεντρώσεων για τα σωματίδια PM₁₀ αλλά και των άλλων ρύπων.



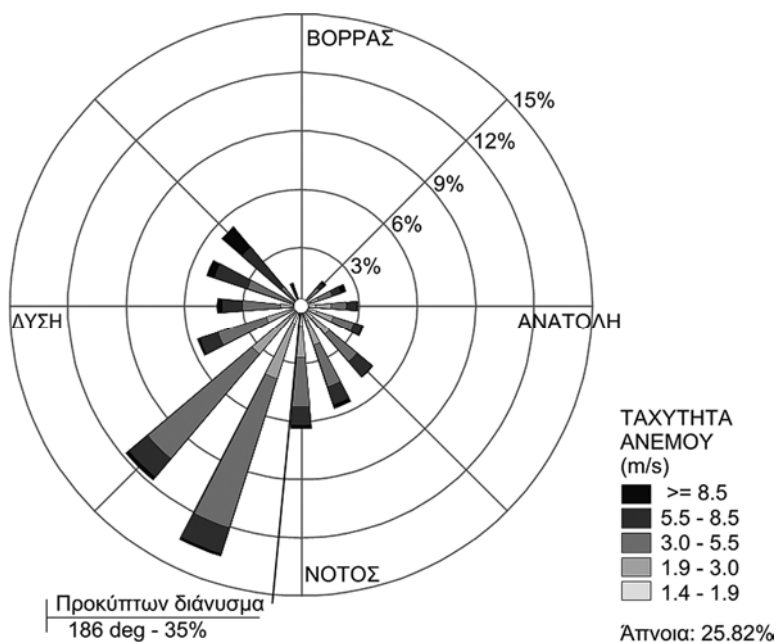
Σχήμα 1. Το ιστορικό κέντρο της πόλης και η κωδικοποίηση των οδών από την Διεύθυνση Δημοσίων Έργων.

Οι κύριοι λόγοι για την πολύ επιβαρυσμένη ατμόσφαιρα της Θεσσαλονίκης είναι

- Η ταχύτητα των ανέμων στη πόλη είναι γενικά πολύ χαμηλή. Το 2004 στις μισές μέρες η ταχύτητα του ανέμου ήταν μικρότερη από 3 m/s (στα 25 m ύψος). Επιπλέον η πολύπλοκη διαμόρφωση των υψηλών κτιρίων έχει ως αποτέλεσμα τη περαιτέρω μείωση της ταχύτητας του ανέμου στο επίπεδο της οδού.
- Η υψηλή μέση υγρασία, περίπου 50% το 2004, αυξάνει τη μάζα των σωματιδίων και δυσχεραίνει τη διασπορά τους στην ατμόσφαιρα
- Οι ισχυρότεροι άνεμοι στη Θεσσαλονίκη είναι βορειοδυτικοί, αλλά οι πιο συνηθισμένοι είναι νοτιοδυτικοί (θαλάσσια αύρα). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η κατανομή των ανέμων για το 2004. Λαμβάνοντας υπόψη επομένως τη θέση της πόλης και τις γύρω βιομηχανίες, είναι φανερό ότι ο άνεμος μεταφέρει τη ρύπανση από τις βιομηχανικές περιοχές μέσα στη πόλη, αντί να καθαρίζει την ατμόσφαιρα της πόλης.
- Επιπλέον, οι κύριοι οδικοί άξονες του ιστορικού κέντρου έχουν κατεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά με παράλληλα ψηλά κτίρια, τα οποία αποτελούν μεγάλα

κάθετα εμπόδια στους ανέμους (είτε βόρειοι είτε νότιοι). Αυτοί οι οδοί αποτελούν επομένως το χειρότερο είδος οδικών καναλιών.

- Επιπλέον, οι κύριοι οδικοί άξονες του ιστορικού κέντρου έχουν κατεύθυνση από ανατολικά προς δυτικά με παράλληλα ψηλά κτίρια, τα οποία αποτελούν μεγάλα κάθετα εμπόδια στους ανέμους (είτε βόρειοι είτε νότιοι). Αυτοί οι οδοί αποτελούν επομένως το χειρότερο είδος οδικών καναλιών.
- Τέλος ακόμα και όταν δεν υπάρχουν βόρειοι άνεμοι, τα ψηλά κτίρια που υπάρχουν κατά μήκος της παραλίας, αποτελούν εμπόδιο στην εξάπλωση της θαλάσσιας αύρας μέσα στην πόλη.



Σχήμα 2. Ανεμοδιάγραμμα για το έτος 2004

3. Δεδομένα εισόδου

Για τη χρήση του λογισμικού OSPM απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

1) Γεωμετρική διαμόρφωση οδών

Η γεωμετρική διαμόρφωση των οδών αναφέρεται στο πλάτος και μήκος τους και στο ύψος των κτιρίων. Το πλάτος είναι διαθέσιμο στη βιβλιογραφία (Γενική μελέτη με-

ταφορών και κυκλοφορίας για το πολεοδομικό συγκρότημα και την περιαστική ζώνη Θεσσαλονίκης, 1999; Tsohatzopoulou, 2005), ενώ το πλάτος μετρήθηκε από τους συγγραφείς από υπάρχοντες χάρτες ακριβείας. Το ύψος των κτιρίων υπολογίστηκε προσεγγιστικά ως μέσο ύψος, καθότι τα περισσότερα κτίρια είναι οκταόροφες οικοδομές. Ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε από τους συγγραφείς, έδειξε ότι από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδών, το πλάτος παίζει κυρίαρχο ρόλο - ανάλογο αποτέλεσμα υπάρχει και στη βιβλιογραφία (Vardoulakis, 2002). Για το λόγο αυτό, το πλάτος των οδών ξαναμετρήθηκε επί τόπου.

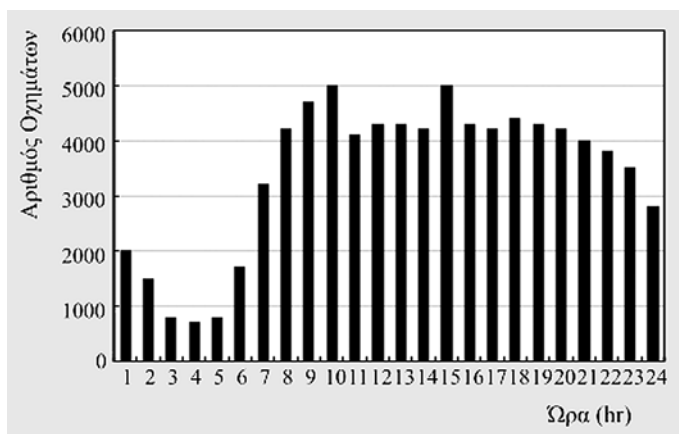
2) Μετεωρολογικά δεδομένα (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου και κατεύθυνση)

Υπάρχει πληθώρα μετεωρολογικών δεδομένων τα οποία και παρέχονται από ένα τοπικό σταθμό (Σταθμός SV2BBO, 2004). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε ωριαία βάση και ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στην υπό εξέταση περιοχή και σε ύψος 25 m. Τα δεδομένα συλλέγονται από έναν ενθουσιώδη ερασιτέχνη, και υπάρχουν μικρές χρονικές στιγμές διακοπής της λειτουργίας του. Παρόλα αυτά ο Σταθμός SV2BBO, είναι ένας αυτοματοποιημένος σταθμός (HUGER WMR 918H) που πληρεί τις προδιαγραφές του World Meteorological Organisation's (WMO) αν και δε λειτουργεί κάτω από ένα επίσημο πλαίσιο. Ο σταθμός αυτός επιλέχθηκε επειδή οι επίσημοι μετεωρολογικοί σταθμοί βρίσκονται ή πολύ μακριά ή δεν αντιπροσωπεύουν την χωρική διαμόρφωση της υπό εξέτασης περιοχή.

3) Κυκλοφοριακός φόρτος και τεχνολογία οχημάτων

Ο κυκλοφοριακός φόρτος για κάθε οδό είναι, δυστυχώς, διαθέσιμος για μία ή δύο μέρες για κάθε χρόνο. Για όλους τους υπολογισμούς σ' αυτή την εργασία, υιοθετήθηκε ο κυκλοφοριακός φόρτος της *Τετάρτης 5 Μαΐου 2004*. Αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη της ποιότητας της ατμόσφαιρας ενός μηνός ή έτους, βασίζεται στις μετρήσεις αυτής της ημέρας. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος δεν αλλάζει σημαντικά κατά τη διάρκεια των ετών, που σημαίνει ότι έχει φτάσει το όριο του. Επίσης, επειδή ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι συνήθως χαμηλότερος τα σαββατοκύριακα και αντίστοιχα και η ατμοσφαιρική ρύπανση θα είναι μικρότερη, δε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο μας για προβλέψεις συγκεντρώσεων τα σαββατοκύριακα.

Στο Σχήμα 3, παρουσιάζεται ως παράδειγμα, ο ωριαίος αριθμός οχημάτων για την οδό 36. Ο αριθμός οχημάτων εκφράζεται ανάλογα με το χώρο που καταλαμβάνουν, δηλαδή τα επιβατηγά οχήματα με συντελεστή 1, λεωφορεία με συντελεστή 3, φορτηγά με συντελεστή 2 και μοτοσικλές με συντελεστή 0.5. Είναι ενδιαφέρον ότι εκτός από τις δύο αναμενόμενες κορυφές στις 10 το πρωί και στις 3 το μεσημέρι, η κυκλοφοριακή κίνηση παραμένει σε υψηλά επίπεδα ως τα μεσάνυχτα, χαρακτηριστικό του ελληνικού τρόπου ζωής.



Σχήμα 3. Ωριαίος αριθμός οχημάτων (οδός 36, 5 Μαΐου 2004)

Ο αριθμός των οχημάτων, σύμφωνα με την κατανάλωσή τους και την τεχνολογία ανά EURO, καθώς και τη μέση διανυόμενη διαδρομή τους, υπολογίζεται από το λογισμικό TRENDS (Transport and Environmental Database System) (Giannouli et al., 2005) και είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία (Assael et al, 2007). Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν από το 1970 ως το 2020, όλη τη χώρα γενικά. Η υπόθεση ότι αυτά θα ισχύουν και για τη Θεσσαλονίκη που είναι η δεύτερη σε μέγεθος πόλη, είναι επομένως σωστή. Η μέση ωριαία ταχύτητα των οχημάτων δεν είναι γνωστή, αλλά υπολογίστηκε με βάση την απλή υπόθεση ότι θα εξαρτάται άμεσα από τον κυκλοφοριακό φόρτο κάθε οδού.

4) Υπόβαθρο συγκεντρώσεων κάθε ρύπου

Το υπόβαθρο συγκεντρώσεων προφανώς επηρεάζει άμεσα τη συνολική συγκέντρωση. Το λογισμικό OSPM χρειάζεται τη γνώση του υπόβαθρου συγκέντρωσης πολύ κοντά στο οδικό κανάλι. Στην περίπτωση μας όμως, που αναφερόμαστε σε πολλαπλά οδικά κανάλια σε μεγάλη περιοχή, προτιμήθηκε να ληφθεί το υπόβαθρο συγκέντρωσης από προαστιακούς σταθμούς μέτρησης ώστε να αποφευχθεί η επιρροή γειτονικών οδών. Ο δύο υπάρχοντες σταθμοί (AirBase EIONET), ο ένας στο Πανόραμα και ο άλλος στη Νεοχωρούδα, παρέχουν όλα τα δεδομένα υπόβαθρου συγκεντρώσεων που χρειάζονται. Επίσης σημειώνεται ότι υπάρχουν πλήρη δεδομένα για την Τετάρτη 5 Μαΐου 2004 που είναι η ημέρα που υπάρχει διαθέσιμος ο κυκλοφοριακός φόρτος.

4. Επιβεβαίωση αξιοπιστίας προσέγγισης

Όπως ήδη συζητήθηκε όλα τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου υπάρχουν για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων σωματιδίων PM_{10} για όλες τις οδούς του ιστορικού κέντρου για την Τετάρτη 5 Μαΐου 2004. Δυστυχώς για την ημέρα αυτή δεν υπάρχουν μετρήσεις. Επομένως, για να επιβεβαιώσουμε την αξιοπιστία της προσέγγισής μας χρησιμοποιήσαμε δύο διαφορετικές μεθόδους:

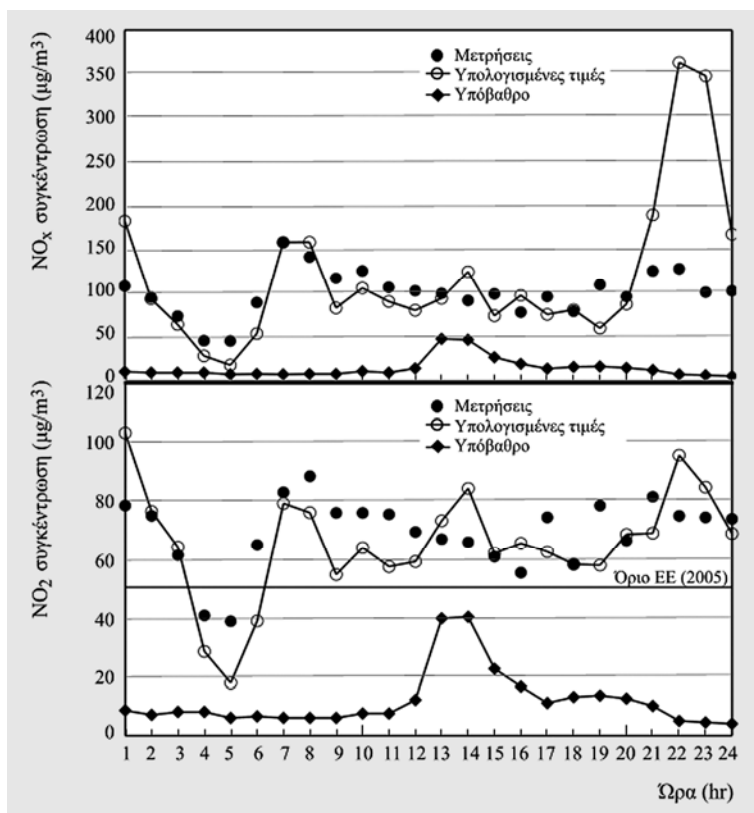
α) Καταρχάς για την Τετάρτη 5 Μαΐου υπάρχουν μετρήσεις συγκέντρωσης για τους ρύπους NO_x και NO_2 . Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να συγκριθούν άμεσα με προβλεπόμενες τιμές από το OSPM ώστε να επιβεβαιωθούν οι υποθέσεις και η προσέγγισή μας. Αυτή η σύγκριση θεωρείται μία ιδιαίτερα αυστηρή σύγκριση καθότι οι μετρήσεις συγκρίνονται απευθείας με ωριαίες συγκεντρώσεις μιας ημέρας και όχι με μέσους όρους ημέρας ή μηνός όπως γίνεται συνήθως. Οι προβλεπόμενες συγκεντρώσεις προκύπτουν ως 'τροποποιημένοι' στατιστικοί μέσοι όροι τριών οδών (35, 55 και 56 στο Σχήμα 1) οι οποίοι περικλείουν το σταθμό μέτρησης (Airbase GR0018A). Ο όρος 'τροποποιημένοι' αναφέρεται στην υπόθεση ότι η κάθε οδός επηρεάζει τα υπολογιζόμενα όρια συγκέντρωσης σύμφωνα με την κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Τα ακόλουθα σημεία μπορούν να παρατηρηθούν:

- Στο Σχήμα 4 φαίνεται η σχετικά πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων συγκέντρωσης και των υπολογισμένων τιμών από το OSPM, για τους ρύπους NO_x και NO_2 αντίστοιχα. Η έντονη απόκλιση κατά τις νυκτερινές ώρες, πιο έντονη στην περίπτωση του NO_x , πιθανώς οφείλεται σε σύντομες ριπές ανέμου. Αυτές οι ριπές παρατηρήθηκαν στα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα και ήταν τέτοιας διεύθυνσης ώστε να δημιουργούν τη χειρότερη κατάσταση οδικού καναλιού.
- Για σχεδόν ολόκληρη την ημέρα, οι συγκεντρώσεις NO_2 ήταν πάνω από $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που είναι και το όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2005 - ετήσια μέση συγκέντρωση) (European Environmental Agency, 1999).

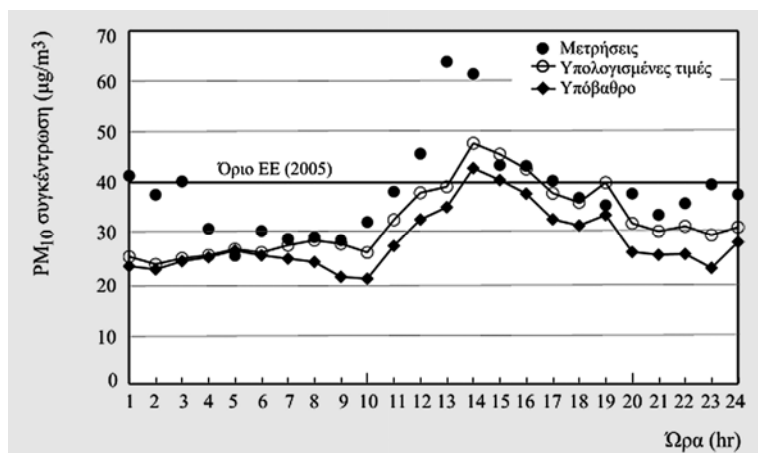
β) Μετρήσεις συγκέντρωσης σωματιδίων PM_{10} υπάρχουν (Airbase GR0018A) για την γκρίζα περιοχή του Σχήματος 1, για το ίδιο έτος αλλά για το μήνα Φεβρουάριο. Αν υποθεθεί ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος κατά το μήνα Φεβρουάριο θα είναι παραπλήσιος με αυτόν του Μαΐου, τότε μπορεί να γίνει σύγκριση μετρήσεων με προβλεπόμενες τιμές από το OSPM.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} που καταγράφηκαν τις καθημερινές ημέρες του Φεβρουαρίου, μαζί με τις υπολογισμένες τιμές από το OSPM (τροποποιημένες μέσες ωριαίες τιμές οδών 35, 55 και 56). Τα ακόλουθα σημεία αξίζει να προσεχτούν:

- Η συμφωνία μεταξύ μετρήσεων και υπολογισμένων τιμών είναι αρκετά καλή. Οι μικρές διαφορές (υπο-εκτιμώμενες συγκεντρώσεις από το OSPM) πιθανότατα



Σχήμα 4. Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμένων τιμών για την 5^η Μαΐου 2004



Σχήμα 5. Σύγκριση μετρήσεων και υπολογισμένων τιμών για το Φεβρουάριο 2004

οφείλονται στο ότι το Μάιο έχει πιο ζέστη και ο κόσμος χρησιμοποιεί περισσότερο τα μέσα μαζικής επικοινωνίας το μεσημέρι, και συνεπώς ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι υψηλότερος το Φεβρουάριο από το Μάιο. Η διαφορά στις πολύ πρωινές ώρες οφείλεται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις που εμφανίζονται τις Τρίτες. Το γεγονός που συνείσφερε σ' αυτή την ανωμαλία δεν είναι γνωστό.

- Μέρος της διαφοράς μεταξύ μετρήσεων και προβλεπόμενων τιμών για τα σωματίδια PM_{10} , μπορεί να οφείλεται σε επανααιωρούμενη σκόνη των οδών (Manoli, 2002). Αυτή η πηγή σκόνης δεν περιλαμβάνεται στα χαρακτηριστικά του OSPM.
- Στο ίδιο Σχήμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων PM_{10} , τον περισσότερο χρόνο υψηλότερες των $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ που είναι το όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2005 - μέση ετήσια συγκέντρωση) (European Environmental Agency, 1999).

Επίσης παρατηρούμε το πολύ υψηλό υπόβαθρο συγκεντρώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτό καθαρά σημαίνει ότι ένα μεγάλο μέρος του προβλήματος προέρχεται από τη βιομηχανία, τα λατομεία και την άγονη γη γύρω από τη Θεσσαλονίκη, και συνιστά τις περιοχές στις οποίες οι Δημοτικές Αρχές της πόλης θα πρέπει να επικεντρώσουν τις ενέργειες τους.

γ) Για την περαιτέρω επαλήθευση της ανωτέρω υπόθεσης εξετάστηκαν οι ρύποι NO_x . Για αυτό το ρύπο υπάρχουν μετρήσεις το Φεβρουάριο. Η σύγκριση τους με τις προβλεπόμενες τιμές στην περίπτωση αυτή, ήταν άριστη (Assael, 2007).

Συμπερασματικά αναφέρουμε, ότι όπως προκύπτει από την ανωτέρω ανάλυση, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων των σωματιδίων PM_{10} .

5. Αποτελέσματα και συζήτηση

Έχοντας επιβεβαιώσει επιτυχώς την προτεινόμενη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} , το λογισμικό εφαρμόστηκε στους κύριους δρόμους του ιστορικού κέντρου της Θεσσαλονίκης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ο κωδικός και η τοποθεσία της κάθε οδού, ενώ στον Πίνακα 1 δείχνεται ο κωδικός, το όνομα της οδού και η μέση ωριαία συγκέντρωση για το μήνα Φεβρουάριο 2004 που υπολογίστηκε από το OSPM.

Η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι οι συγκεντρώσεις είναι πάρα πολύ υψηλές. Σχεδόν όλοι οι οδοί φθάνουν το Ευρωπαϊκό όριο $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές είναι πολύ υψηλότερες. Η οδός με τις υψηλότερες

Πίνακας 1. Μέσες ωριαίες συγκεντρώσεις στις οδούς του ιστορικού κέντρου.

	Οδός	Συγκέντρωση PM10 [μg/m ³]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
22	Εγνατία-Πλατεία Δημοκρατίας								
22α	Καραόλη Δημ.- Πλ.Δημοκρατίας								
23	Δωδεκανήσου-Εγνατία								
24	Δωδεκανήσου-Ι. Τσιμισκή								
25	Ι. Τσιμισκή-Δωδεκανήσου								
27	Ίωνος Δραγούμη-Ι. Τσιμισκή								
28	Ίωνος Δραγούμη-Εγνατία (Άνω)								
31	Ελ. Βενιζέλου-Εγνατία								
32	Ελ. Βενιζέλου-Μητροπόλεως								
33	Μητροπόλεως-Ελ. Βενιζέλου								
34	Λεωφ. Νίκης-Ελ. Βενιζέλου								
35	Ερμού-Αγίας Θεωδώρας								
36	Εγνατία-Ι.Ν. Παναγίας Χαλκέων								
37	Ι. Τσιμισκή-Αριστοτέλους								
48	Πλάτωνος-Εγνατία								
55	Αγίας Σοφίας-Εγνατία								
56	Αγίας Σοφίας-Ι. Τσιμισκή (Άνω)								
57	Αγίας Σοφίας-Ι.Τσιμισκή (Κάτω)								
58	Π.Π. Γερμανού-Τσιμισκή								
59	Π.Π. Γερμανού-Εγνατία								
60	Εγνατία (Συντριβάνι)								
61	Παύλου Μελά-Ι.Ν. Αγίας Σοφίας								
62	Παύλου Μελά-Μητροπόλεως								
63	Παύλου Μελά-Λεωφ. Νίκης								
64	Αλεξ. Σβώλου-Ι.Ν. Αγίας Σοφίας								
65	Αλεξ. Σβώλου-Αγγελάκη								
66	Εθνικής Αμύνης (Συντριβάνι)								
67	Εθνικής Αμύνης-Άσυλο								
68	Εθνικής Αμύνης-Λευκός Πύργος								
70	Λεωφ. Νίκης-Παύλου Μελά								
70α	Νικολάου Γερμανού (Χ.Α.Ν.Θ.)								
71	Ι. Τσιμισκή (Χ.Α.Ν.Θ.)								
72	Μητροπόλεως-Παύλου Μελά								
73	Αγγελάκη-Ι. Τσιμισκή								
74	Αγγελάκη (Συντριβάνι)								
76	Λεωφ. Στρατού (Αρχ. Μουσείο)								
78	Εγνατία (προέκταση)-Συντριβάνι								

συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ είναι η Εγνατία (κωδικοί 22, 36, 60), η οποία είναι μία από τις κυριότερες οδικές αρτηρίες της πόλης, με πολύ κίνηση (6 λωρίδες), διεύθυνση ανατολικά προς δυτικά (χειρότερη κατάσταση) και με υψηλά κτίρια που εμποδίζουν τη διασπορά των σωματιδίων.

Ένα άλλο σημείο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι ότι το υπόβαθρο συγκέντρωσης σωματιδίων PM₁₀, ήταν ήδη πολύ υψηλό (στον προαστιακό σταθμό), το οποίο σημαίνει ότι ανεξάρτητα από τη σημαντική επίδραση του κυκλοφοριακού φόρτου, το γύρω περιβάλλον της πόλης παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της ατμόσφαιράς της.

Επιπλέον θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι αστικοί σταθμοί μέτρησης στη Θεσσαλονίκη, είναι όλοι τοποθετημένοι σε κεντρικές αλλά πολύ ανοικτές τοποθεσίες. Αυτό το γεγονός σίγουρα παραπλανεί σε άγνωστο βαθμό, τις τοπικές δημοτικές αρχές σχετικά με το μέγεθος της αέριας ρύπανσης καθότι η ακριβής θέση του σταθμού μέτρησης είναι σημαντικότερη σε πολύπλοκες περιοχές όπως οι πόλεις (Neofytou et al., 2006).

6. Συμπεράσματα

Σ' αυτή την εργασία προτάθηκε μία μεθοδολογία για τη χρήση του λογισμικού OSPM στον υπολογισμό των συγκεντρώσεων ρύπων σε πόλεις, όπου δεν είναι διαθέσιμα όλα τα δεδομένα εισόδου, για τη συνηθισμένη χρήση του. Η επιτυχής εφαρμογή της μεθοδολογίας επιβεβαιώθηκε με σύγκριση με μετρήσεις συγκέντρωσης. Τέλος υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις σωματιδίων PM₁₀ στις κυριότερες οδούς του ιστορικού κέντρου της πόλης της Θεσσαλονίκης.

Μελλοντικές εργασίες θα πρέπει να στοχεύουν στη χρήση αριθμητικών μοντέλων για τη μελέτη της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε τοπικό επίπεδο σε κρίσιμες περιοχές της πόλης κοντά σε δημόσια κτίρια) αλλά και για τη τοποθέτηση σταθμών μέτρησης. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μοντέλων μακροκλίμακας σε συνδυασμό με το χημικό χαρακτηρισμό των σωματιδίων, ώστε να αναγνωριστούν οι γύρω από τη Θεσσαλονίκη ρυπογόνες πηγές (βιομηχανία, λατομεία, άγονη γη, κ.λπ.).

Θα πρέπει επίσης να μελετηθούν μελλοντικά σενάρια για την αλλαγή τεχνολογίας ή είδους καυσίμου στα οχήματα, καθώς επίσης και να μελετηθεί η επίδραση της κατασκευής του μετρό που πραγματοποιείται τώρα στην πόλη, και δεν έχει ληφθεί πουθενά υπόψη.

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε ιδιαίτερα την καθηγήτρια κα Μ. Πιτσιάβα, τους καθηγητές κκ. Δ. Μελά και Σ. Μπάσμπα (ΑΠΘ), τον κ. Α. Μήλιο και την κα Μ. Ζαλίδα (Διεύθυνση Δημοσίων Έργων), και τον κ. Ι. Συλλιγνάκη (Μετεωρολογικός Σταθμός SV2BBO).

Βιβλιογραφία

1. Γενική μελέτη μεταφορών και κυκλοφορίας για το πολεοδομικό συγκρότημα και την περιαστική ζώνη Θεσσαλονίκης. Φάση 2, Τεύχος 6, Τμήμα 1., *Επεξεργασία και ανάλυση στοιχείων απογραφής υποδομής και οργάνωσης του οδικού δικτύου*, Οργανισμός Ρυθμιστικού Σχεδίου και Προστασίας Περιβάλλοντος Θεσσαλονίκης, Ιούνιος 1999.
2. AirBase, European Topic Centre on Air and Climate Change, EIONET, European Environment Agency, <http://air-climate.eionet.europa.eu/databases/airbase/>
3. Aquilina, N. and Micallef, A., 2004. *Evaluation of the operational street pollution model using data from European cities*. Environmental Monitoring and Assessment, 95: 75-96.
4. Assael, M.J., Delaki, M. and Kakosimos, K.E., 2007. *Applying the OSPM model to the calculation of PM₁₀ concentration levels in the historical centre of the city of Thessaloniki*. Atmospheric Environment (in press).
5. Berkowicz, R., Palmgren, F., Hertel, O. and Vignati, E., 1996. *Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality - Meteorological analysis and model calculations*. Science of the Total Environment, 190: 259-265.
6. Berkowicz, R., 2000. *OSPM - A parameterised street pollution model*. Environmental Monitoring and Assessment, 65: 323-331.
7. Caputo, M., Gimenez, M. and Schlamp, M., 2003. *Intercomparison of atmospheric dispersion models*. Atmospheric Environment, 37: 2435-2449.
8. Dixon, N.S., Boddy, J.W.D., Smalley, R.J. and Tomlin, A.S., 2006. *Evaluation of a turbulent flow and dispersion model in a typical street canyon in York, UK*. Atmospheric Environment, 40: 958-972.
9. European Environmental Agency, 1999. *Limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air*. Council Directive 1999/30/EC
10. European Environmental Agency, 2005. *Impact Assessment of the Thematic Strategy on Air Pollution and the Directive on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*. SEC(2005)1133, Brussels 21.09.2005.
11. Giannouli, M., Samaras, Z., Keller, M., de Haan, P., Kallivoda, M., Sorenson, S. and Georgakaki, A., 2005. *TRENDS. Development of database system for the calculation of indicators of environmental pressure caused by transport*. Science of the Total Environment, 357: 247-270.

12. Gokhale, S.B., Rebours, A. and Pavageau M., 2005. *The performance evaluation of WinOSPM model for urban street canyons of Nantes in France*. Environmental Monitoring and Assessment, 100: 153-176.
13. Gusten, H., Heinrich, G., Monnich, E., Weppner, J., Cvitas, T., Klasinc, L., Varotsos, C.A. and Asimakopoulos, D.N., 1997. *Thessaloniki '91 field measurement campaign. 2. Ozone formation in the Greater Thessaloniki Area*. Atmospheric Environment, 31: 1115-1126.
14. Hertel, O. and Berkowicz R., 1989. *Modelling pollution from traffic in a street canyon. Evaluation of data and model development*. DMU Luft A-129, 77.
15. Holmes, N.S. and Morawska L., 2006. *A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available*. Atmospheric Environment, 40: 5902-5928.
16. Jensen, S.S., 1998. *Mapping human exposure to traffic air pollution using CIS*. Journal of Hazardous Materials, 61: 385-392.
17. Jensen, S.S., Berkowicz, R., Hansen, H.S. and Hertel, O., 2001. *A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures*. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 6: 229-241.
18. Ketzel, M., Berkowicz, R. and Lohmeyer, A., 2000. *Comparison of numerical street dispersion models with results from wind tunnel and field measurements*. Environmental Monitoring and Assessment, 65: 363-370.
19. Kukkonen, J., Valkonen, E., Walden, J., Koskentalo, T., Karppinen, A., Berkowicz R. and Kartastenpaa, R., 2000. *Measurements and modelling of air pollution in a street canyon in Helsinki*. Environmental Monitoring and Assessment, 65: 371-379.
20. Kukkonen, J., Valkonen, E., Walden, J., Koskentalo, T., Aarnio, P., Karppinen, A., Berkowicz, R. and Kartastenpaa, R., 2001. *A measurement campaign in a street canyon in Helsinki and comparison of results with predictions of the OSPM model*. Atmospheric Environment, 35: 231-243.
21. Kukkonen, J., Partanen, L., Karppinen, A., Walden, J., Kartastenpaa, R., Aarnio, P., Koskentalo, T. and Berkowicz, R., 2003. *Evaluation of the OSPM model combined with an urban background model against the data measured in 1997 in Runeberg Street, Helsinki*. Atmospheric Environment, 37: 1101-1112.
22. Manoli, E., Voutsas, D. and Samara, C., 2002. *Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece*. Atmospheric Environment, 36: 949-961.
23. Mensink, C., Lefebvre, F., Janssen, L. and Cornelis, J., 2006. *A comparison of three street canyon models with measurements at an urban station in Antwerp, Belgium*. Environmental Modelling & Software, 21: 514-519.
24. Neofytou, P., Venetsanos, A.G., Rafailidis, S. and Bartzis, J., 2006. *Numerical investigation of the pollution dispersion in an urban street canyon*. Environmental Modelling & Software, 21: 525-531.

25. Ntziachristos, L. and Samaras, Z., 2002. *COPERT III. Computer program to calculate emissions from road transport*. Technical Report No 49. European Environmental Agency.
26. Slini, T., Kaprara, A., Karatzas, K. and Moussiopoulos, N., 2006. *PM10 forecasting for Thessaloniki, Greece*. *Environmental Modelling & Software*, 21: 559-565.
27. Station SV2BBO, www.iama.gr/weather/index.html
28. Stern, R. and Yamartino, R.J., 2001. *Development and first evaluation of microcalgrid: a 3-D, urban-canopy-scale photochemical model*. *Atmospheric Environment*, 35: S149-S165.
29. Tsohatzopoulou, I.S., 2005. *Contribution to the development of empirical models for the evaluation of noise pollution due to traffic*. PhD Thesis, Aristotle University, Greece.
30. Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Gonzalez-Flesca, N. and Pericleous, K., 2002. *Model sensitivity and uncertainty analysis using roadside air quality measurements*. *Atmospheric Environment*, 36: 2121-2134.
31. Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K. and Gonzalez-Flesca, N., 2003. *Modeling air quality in street canyons: a review*. *Atmospheric Environment*, 37: 155-182.
32. Vardoulakis, S., Gonzalez-Flesca, N., Fisher, B.E.A. and Pericleous, K., 2005. *Spatial variability of air pollution in the vicinity of a permanent monitoring station in central Paris*. *Atmospheric Environment*, 39: 2725-2736.