



ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 4
Προσδιορισμός της δόσης (έκθεσης) του πληθυσμού της
Αθήνας στα αιωρούμενα σωματίδια

Τίτλος Έργου : “Αξιολόγηση Φωτοχημικών Μοντέλων των Αιωρούμενων Σωματιδίων και του Όζοντος στο Λεκανοπέδιο Αθηνών με χρήση αισθητήρων DOAS και τεχνικής LIDAR και συσχέτισή τους με δείκτες υγείας”

Κωδικός Έργου :	05B-NON-EU-349 [ΟΠΣ: 96δ]
Ανάδοχος :	ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ II
Επιστημονικός Υπεύθυνος :	Δρ. Ιωάννης ΖΙΩΜΑΣ Καθηγητής
Δράση :	«Συνεργασίες με E&T οργανισμούς χωρών εκτός Ευρώπης - 2005» (Φάση Β)
Θεματικός Τομέας :	Περιβαλλοντικές και Διαστημικές Τεχνολογίες
Αρμόδια Διεύθυνση ΓΓΕΤ :	Διεύθυνση Διεθνούς E&T Συνεργασίας Τμήμα Διακρατικών Σχέσεων
Αρμόδιος Χειριστής ΓΓΕΤ :	B. ΚΕΡΑΣΙΩΤΗ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2008

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 4: Προσδιορισμός της δόσης (έκθεσης) του πληθυσμού της Αθήνας στα αιωρούμενα σωματίδια

Συντονιστής: ΕΚΕΦΕ «Δ» (80%), Συνεργάτες: ΕΜΠ (10%), ΕΚΠΑ (10%)

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια του 5^{ου} Σταδίου του έργου πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί δοσιμετρίας για τους κατοίκους της Αθήνας, από έκθεση στο αστικό αερόλυμα της πόλης. Οι υπολογισμοί της εσωτερικής δόσης αιωρούμενων σωματιδίων στον πνεύμονα του ανθρώπου έγιναν με τη βοήθεια ενός μηχανιστικού μοντέλου δοσιμετρίας λόγω εισπνοής που βασίζεται στην προσέγγιση κατά Euler. Το παρόν μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις φυσικές διαδικασίες στις οποίες υπόκεινται τα σωματίδια. Κατά τη διάρκεια του έργου το μοντέλο αναπτύχθηκε περαιτέρω και επαληθεύθηκε. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν οι κυρίως υπολογισμοί χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα των μετρήσεων της κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων. Παράλληλα, για λόγους σύγκρισης, έγιναν υπολογισμοί και για κατοίκους άλλων ευρωπαϊκών πόλεων, με χρήση δεδομένων που έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία. Τα συμπεράσματα του Παραδοτέου 4 περιλαμβάνουν την προδιαγραφή των χαρακτηριστικών των μετρήσεων παρακολούθησης αστικού αερολύματος, όπως θα απαιτείται στην πράξη, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός προσδιορισμός της έκθεσης-δόσης για τον αστικό πληθυσμό.

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 4: Προσδιορισμός της δόσης (έκθεσης) του πληθυσμού της Αθήνας στα αιωρούμενα σωματίδια

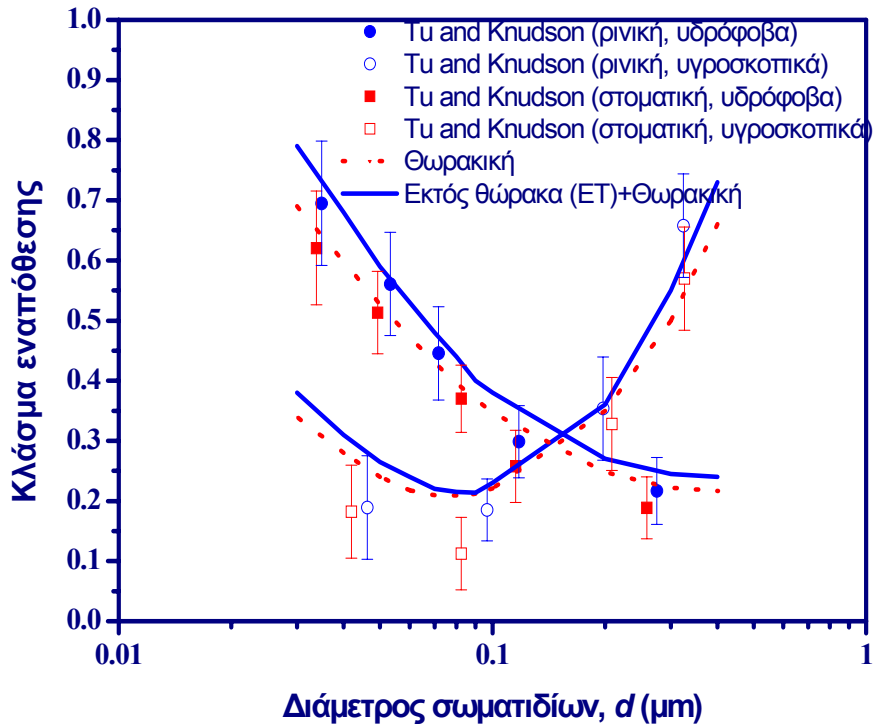
Περιγραφή του μοντέλου

Κατά τη διάρκεια του ερευνητικού αυτού έργου συνεχίστηκε η ανάπτυξη και τελειοποίηση του μοντέλου, του οποίου η ανάπτυξη είχε ήδη αρχίσει στο Εργαστήριο στα πλαίσια προηγούμενων ερευνητών έργων (*Mitsakou et al.*, 2005). Στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη όλοι οι σημαντικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τις διαδικασίες δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων στον πνεύμονα.

Πιο συγκεκριμένα, οι διαδικασίες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. μεταφορά (convection) του αερολύματος κατά μήκος των αεραγωγών του πνεύμονα.
2. αξονική διάχυση (axial diffusion) των σωματιδίων κατά τη διαδρομή του αερολύματος.
3. υγροσκοπική ανάπτυξη (hygroscopic growth) εξαιτίας ετερογενούς συμπύκνωσης υδρατμών.
4. συσσωμάτωση των σωματιδίων (coagulation).
5. οι διάφοροι μηχανισμοί εναπόθεσης (deposition). Συγκεκριμένα, η εναπόθεση θεωρείται ότι προέρχεται λόγω καθίζησης (sedimentation), πρόσκρουσης (impaction) και μοριακής διάχυσης (Brownian diffusion).

Το μοντέλο αξιολογήθηκε συγκρίνοντας με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας. Η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα έδειξε ότι το μοντέλο αναπαράγει ικανοποιητικά την εναπόθεση τόσο στην εκτός θώρακα περιοχή, όσο και στην εντός θώρακα περιοχή του αναπνευστικού συστήματος, και κυρίως αναπαράγει την επίδραση της παροχής του εισπνεόμενου αέρα και της υγροσκοπικής διόγκωσης των εισνεόμενων σωματιδίων. Σαν παράδειγμα παρουσιάζουμε στην Εικόνα 4.1 τη σύγκριση μεταξύ των αριθμητικών προβλέψεων και διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων για υγροσκοπικό ή υδρόφοβο αερόλυμα. Όπως φαίνεται από την Εικόνα αυτή, η σύγκριση είναι αρκετά ικανοποιητική. Εξίσου ικανοποιητικές συγκρίσεις διαπιστώθηκαν με πλήθος διαθέσιμων δεδομένων της βιβλιογραφίας. Επίσης, τα αποτελέσματα των υπολογισμών του μοντέλου συγκρίθηκαν με αντίστοιχους υπολογισμούς του εμπειρικού μοντέλου δοσιμετρίας που χρησιμοποιείται ως πρότυπο από τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας ICRP (International Commission of Radiological Protection). Οι παραπάνω συγκρίσεις αποτελεσμάτων επέτρεψαν την πιστοποίηση του μοντέλου.



Εικόνα 4.1 Εναπόθεση στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου υδρόφοβων και υγροσκοπικών σωματιδίων κατ'αριθμό ως συνάρτηση της αρχικής τους διαμέτρου, όπως μετρήθηκαν πειραματικά από τους *Tu and Knutson* (1984) και υπολογίστηκαν από το παρόν μοντέλο.

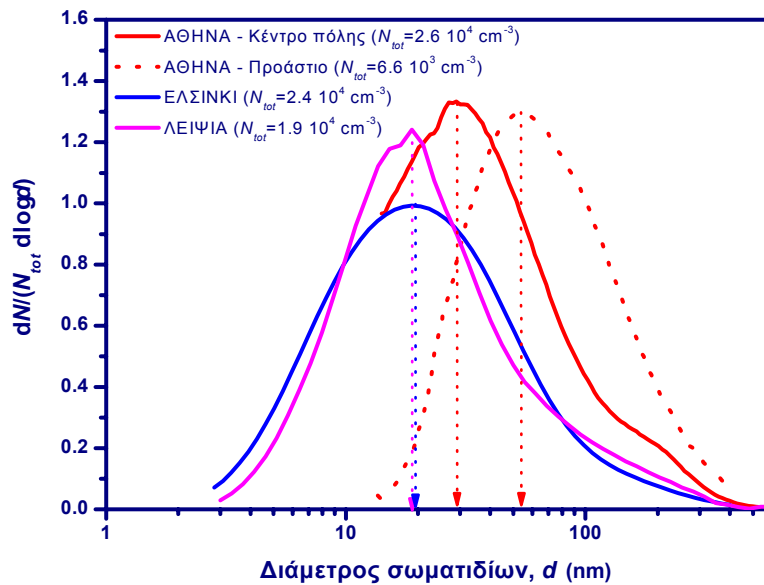
Υπολογισμοί δοσιμετρίας

Έχοντας επαληθεύσει προσεκτικά τις προβλέψεις του μοντέλου, το εφαρμόσαμε στο πλαίσιο της φάσης αυτής του παρόντος έργου, πραγματοποιώντας υπολογισμούς δοσιμετρίας για τους κατοίκους της Αθήνας. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι τυπικές τιμές των παραμέτρων φυσιολογίας της ανθρώπινης αναπνοής (όγκος αέρα ανά αναπνοή=1000 ml, συχνότητα αναπνοής=15 min⁻¹). Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα εισόδου του μοντέλου τις κατανομές μεγέθους των σωματιδίων, όπως μετρήθηκαν από το Ερευνητικό Κέντρο ΕΚΕΦΕ-«Δημόκριτος». Παράλληλα, για λόγους σύγκρισης, έγιναν υπολογισμοί και για κατοίκους άλλων ευρωπαϊκών πόλεων, χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα εισόδου δεδομένα μετρήσεων που έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι κατανομές μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων σε διαφορετικές αστικές περιοχές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, λόγω των διαφορετικών πηγών σε κάθε περιοχή, ακόμα και μέσα στην ίδια πόλη, όπως έχει επισημανθεί στη βιβλιογραφία (*Salma et al.*, 2002). Συνεπώς, η δοσιμετρία αναμένεται να παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις και ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά ανάμεσα σε διαφορετικές πόλεις ή περιοχές. Ο στόχος των πραγματοποιηθέντων υπολογισμών ήταν ο προσδιορισμός της δοσιμετρίας για τους κατοίκους σε διαφορετικές περιοχές της Αθήνας, και η σύγκριση με άλλες, πόλεις της Ευρώπης, εντελώς διαφορετικές από την Αθήνα, που απέχουν πολύ, και από την Αθήνα και μεταξύ τους, και που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά (κλίμα, πηγές αιωρούμενων σωματιδίων). Πιο συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση των δόσεων στον πνεύμονα (αριθμός εναποτιθέμενων σωματιδίων ανά αναπνοή) ενός ενήλικου άνδρα, κάτοικου της Αθήνας, του Ελσίνκι (Φιλανδία) και της Λειψίας (Γερμανία). Σαν δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της κατά αριθμό συγκέντρωσης των σωματιδίων, που αντιστοιχούν στο αστικό υπόβαθρο των τριών αυτών πόλεων. Οι μετρήσεις της Αθήνας (κέντρο και Αγία Παρασκευή) πραγματοποιήθηκαν από το ΕΚΕΦΕ-«Δημόκριτο». Τα πειραματικά δεδομένα για το Ελσίνκι και τη Λειψία ελήφθησαν από δημοσιευμένες εργασίες που διαπραγματεύονται το χαρακτηρισμό του αστικού περιβάλλοντος αυτών των πόλεων (Hussein et al., 2004; Tuch et al., 2003).

Στην Εικόνα 4.2 παριστάνονται γραφικά οι μέσες κατανομές μεγέθους των σωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι ολικές συγκεντρώσεις στις τρεις αστικές περιοχές (Αθήνα, Ελσίνκι και Λειψία) και σε προάστιο της Αθήνας (Αγία Παρασκευή – Δημόκριτος).



Εικόνα 4.2 Κατανομή συγκέντρωσης ανηγμένη προς τον ολικό αριθμό N_{tot} ανά διάστημα μεγέθους των σωματιδίων, $dN/(N_{tot} d \log d)$, για την Αθήνα (κέντρο και Αγία Παρασκευή-Δημόκριτος), το Ελσίνκι και τη Λειψία.

Οι κατανομές συγκεντρώσεων του Ελσίνκι και της Λειψίας παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με μέγιστο περίπου στα 20 nm, ενώ το μέγιστο της κατανομής στην Αθήνα εμφανίζεται σε ελαφρώς μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων. Η κατανομή των αερολυμάτων που αντιστοιχεί στην Αγία Παρασκευή είναι μετατοπισμένη σε μεγαλύτερες διαμέτρους σωματιδίων, συγκρινόμενη με εκείνη που αντιστοιχεί στο κέντρο της πόλης. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη στο προάστιο είναι πιο «γηρασμένη (aged)» από αυτήν του κέντρου. Η ολική συγκέντρωση κατά αριθμό είναι της ίδιας τάξης μεγέθους για τις τρεις πόλεις (τάξεως 10^4 cm^{-3}), πάντως είναι υψηλότερη στην Αθήνα – κέντρο, ενώ στο προάστιο είναι αρκετά χαμηλότερη.

Ο Πίνακας 4.1 δείχνει το κλάσμα της κατ'αριθμό εναπόθεσης (ανά αναπνοή) στις τρεις περιοχές του πνεύμονα (εκτός θώρακα – ET, τραχειοβρογχική – TB, κυψελιδική – AI) και αθροιστικά σε όλο το αναπνευστικό σύστημα για την κάθε πόλη. Το κλάσμα εναπόθεσης στην ευαίσθητη κυψελιδική περιοχή είναι παρόμοιο και στις τρεις πόλεις. Το ολικό κλάσμα εναπόθεσης, όμως, είναι χαμηλότερο για την Αθήνα – κέντρο συγκρίνοντας με το Ελσίνκι και τη Λειψία. Αντίθετα, ο αριθμός εναποτιθέμενων σωματιδίων, τόσο συνολικά όσο και στην κυψελιδική περιοχή, προκύπτει υψηλότερος για την Αθήνα – κέντρο, καθώς τα επίπεδα συγκεντρώσεων είναι υψηλότερα. Στην προαστιακή περιοχή της Αγ. Παρασκευής το κλάσμα της κατ'αριθμό εναπόθεσης είναι μικρότερο, καθώς το αερόλυμα στην περιοχή είναι πιο γηρασμένο (μεγαλύτερα σωματίδια) από το κέντρο της πόλης, όπως προαναφέρθηκε.

Γενικά, ο μηχανισμός της υγροσκοπικής διόγκωσης βρέθηκε να έχει σημαντικότερη επίδραση στα αποτελέσματα της έκθεσης (δόσης) στα αιωρούμενα σωματίδια. Η αύξηση του μεγέθους των μικρών σωματιδίων (τελική διάμετρος ισορροπίας) οδηγεί αφενός σε εξασθένηση του μηχανισμού της διάχυσης Brown που είναι ο κύριος μηχανισμός αναπνευστικής εναπόθεσης των λεπτόκοκκων σωματιδίων, αφετέρου σε αύξηση της εναπόθεσης λόγω ενίσχυσης του μηχανισμού της αδρανειακής πρόσκρουσης που επιδρά κυρίως στα χονδροκόκκα σωματίδια. Οι διαφορές μεταξύ των πόλεων οφείλονται, εκτός από τα διαφορετικά φάσματα μεγέθους, κυρίως στις διαφορές στον βαθμό υδατοδιαλυτότητας του αερολύματος στην κάθε περίπτωση (όπως προσεγγίστηκε, με βάση δημοσιευμένες παρατηρήσεις).

Πίνακας 4.1 Κλάσμα κατ'αριθμό εναπόθεσης στον πνεύμονα ανά αναπνοή για κατοίκους τεσσάρων περιοχών (Αθήνα-κέντρο, Αγ. Παρασκευή-Δημόκριτος, Ελσίνκι, Λειψία).

	Αθήνα	Αγ. Παρασκευή	Ελσίνκι	Λειψία
ET	0.06	0.04	0.13	0.12
TB	0.11	0.07	0.19	0.18
AI	0.56	0.46	0.53	0.54
Ολικό	0.73	0.57	0.85	0.85

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, από τη μοντελοποίηση και τα αποτελέσματα των υπολογισμών δοσιμετρίας που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Παραδοτέου 4, προκύπτουν τελικά τα παρακάτω δύο πρακτικά συμπεράσματα σχετικά με την παρακολούθηση του αστικού αερολύματος:

- Η γνώση, έστω προσεγγιστική, της κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων στην αστική ατμόσφαιρα είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της δοσιμετρίας των κατοίκων της πόλης, καθώς το φάσμα μεγέθους των σωματιδίων καθορίζει αποφασιστικά τα χαρακτηριστικά της εναπόθεσης του εισπνεόμενου αερολύματος.
- Μόνο η γνώση των επιπέδων συγκέντρωσης δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη συνεπαγόμενη δόση.
- Η υδατοδιαλυτότητα του αερολύματος της πόλης μεταβάλλει την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων στο εσωτερικό του ανθρώπινου αναπνευστικού συστήματος, συνεπώς αποτελεί ένα δεύτερο αποφασιστικό παράγοντα στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ έκθεσης – δόσης.

Βιβλιογραφία

1. Hussein, T., Puustinen, A., Aalto, P. P., Mäkelä, J. M., Hämeri, K., and Kulmala, M. (2004) Urban aerosol number size distributions. *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 391-411.
2. Mitsakou, C., Helmis, C., Housiadas, C. (2005) Eulerian modelling of lung deposition with sectional representation of aerosol dynamics, *J. Aerosol Sci.*, 36, 75-94.

3. Salma, I., Balásházy, I., Winkler-Heil, R., Hofmann, W., and Zárny, G. (2002) Effect of particle mass size distribution on the deposition of aerosols in the human respiratory tract. *J. Aerosol Sci.*, 33, 119-132.
4. Tu, K. W. and Knutson, E. O. (1984) Total deposition of ultrafine hydrophobic and hygroscopic aerosols in the human respiratory system. *Aerosol Sci. Technol.* 3, 453-465.
5. Tuch, Th. M., Wehner, B., Pitz, M., Cyrus, J., Heinrich, J., Kreyling, W. G., Wichmann, H. E., and Wiedensohler, A. (2003) Long-term measurements of size-segregated ambient aerosol in two German cities located 100 km apart. *Atmos. Environ.*, 37, 4687-4700.

Βεβαιώνεται η εκτέλεση του παραπάνω έργου

Ημερομηνία: 10/03/2008

Ο Επιστημονικός Υπεύθυνος

Δρ. Ιωάννης ΖΙΩΜΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.