

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους με χρήση μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων»

ΓΛΥΤΣΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΦΥΣΙΚΟΣ, ΜSc

<u>Επιβλέπων μέλος ΔΕΠ</u> Μ. Λαζαρίδης, Αναπλ. Καθηγητής

<u>Εξεταστική επιτροπή</u> Ε. Γιδαράκος, Καθηγητής Χ. Ζερεφός, Καθηγητής Γ. Καρατζάς, Καθηγητής Ν. Καλογεράκης, Καθηγητής Ν. Νικολαίδης, Καθηγητής Ε. Παλαιολόγος, Αναπλ. Καθηγητής

XANIA 2010

Στους γονείς μου, στην αδερφή μου

και στην Κωνσταντίνα

i

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε, στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Έλεγχος Ποιότητας και Διαχείριση Περιβάλλοντος, στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών και Αιωρούμενων Σωματιδίων υπό την επίβλεψη του Αναπλ. Καθηγητή Μιχαήλ Λαζαρίδη. Η διατριβή υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ – ΗΡΑΚΛΕΙΤΟΣ, ΥΠΟΤΡΟΦΙΕΣ ΈΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ - (ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ). Τίτλος υποέργου: Χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους, με χρήση μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν ευχαριστώ τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή Μιχάλη Λαζαρίδη για την σημαντική βοήθεια του και τη συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης τον ευχαριστώ για την οικονομική στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια και την άψογη συνεργασία που έχουμε.

Ευχαριστώ τα μέλη της επταμελούς επιτροπής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, τον Καθηγητή κ. Ε. Γιδαράκο, τον Καθηγητή κ. Γ. Καρατζά, τον Καθηγητή κ. Ν. Καλογεράκη, τον Καθηγητή κ. Ν. Νικολαϊδη, και τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Ε. Παλαιολόγο, για την ευγενική διάθεση τους να μελετήσουν και να αξιολογήσουν την εργασία αυτή. Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Χ. Ζερεφό, για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου του στη διόρθωση της παρούσης εργασίας.

Ακόμα ευχαριστώ όλο το προσωπικό που εργάζεται ή εργάστηκε στο Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών και Αιωρούμενων Σωματιδίων για την απεριόριστα καλή συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τη Lucie Dzumbova, τον Jacub Ondracek, τον Tarek Hussein, τον Ηλία Κοπανάκη, τη Βικτωρία Αλεξανδροπούλου, τον Αποστόλη Βουλγαράκη και την Αθηνά Σπυριδάκη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τη σύζυγο μου Κωνσταντίνα που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σύγχρονος άνθρωπος είναι αναγκασμένος να περνάει ένα μεγάλο μέρος του καθημερινού του χρόνου σε εσωτερικούς χώρους (σπίτι, γραφείο, αυτοκίνητο ή μέσα μαζικής μεταφοράς). Επομένως είναι σημαντικό να εξεταστεί η επιβάρυνση της υγείας του από ρύπους που εκπέμπονται ή εισέρχονται στο εσωτερικό περιβάλλον. Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα σημαντικό ατμοσφαιρικό ρυπαντή με ποικίλες επιδράσεις στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό είτε μέσω της αναπνευστικής οδού, είτε μέσω της κατάπωσης τους από το στόμα (εναπόθεση στις τροφές) και να προκαλέσουν επιδράσεις στην υγεία από απλό βήχα μέχρι καρκίνο των πνευμόνων ανάλογα με το μέγεθος και τη χημική τους σύσταση.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο που περιγράφει τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση της συγκέντρωσης μάζας ή αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων. Το μοντέλο αξιολογήθηκε με πειραματικά δεδομένα από εσωτερικούς χώρους τριών Ευρωπαϊκών πόλεων και πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν στο εργαστήριο κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Στη συνέχεια σε συνδυασμό με υπάρχων εργαλείο εύρεσης χαρακτηριστικών φασματικής κατανομής πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων (φασματική κατανομή μεγέθους, συγκέντρωση σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος). Επίσης πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της ποσοτικής επίδρασης της εξωτερικής συγκέντρωσης και των εκπομπών από εσωτερικές πηγές στη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων εσωτερικού χώρου. Επιπλέον υπολογίστηκαν χρονικά μεταβαλλόμενοι ρυθμοί εκπομπής από πηγές εσωτερικού χώρου και αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα μέσω συνδυασμού πειραματικών μετρήσεων και μοντελοποίησης των δεδομένων. Τέλος το μοντέλο εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της επικινδυνότητας των εκπομπών σε χώρους χημικής βιομηχανίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑ	AIO 1	1
ΕΙΣΑΓΩΙ	ΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	1
ΚΕΦΑΛΑ	AIO 2	4
ΒΙΒΛΙΟΓ	ῬΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	4
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	8
2.2.1	Σχήμα Αιωρούμενων Σωματιδίων	8
2.2.2	Μέγεθος Αιωρούμενων Σωματιδίων	11
2.2.3	Χημική σύσταση Αιωρούμενων Σωματιδίων	12
2.2.4	Πυκνότητα Αιωρούμενων Σωματιδίων	15
2.2.5	Έκφραση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων	15
2.2.6	Κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων	16
2.3	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	20
2.3.1	Έκθεση σε σωματίδια και επιπτώσεις στην υγεία σε εσωτερικούς χώρους	22
2.4.	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	23
2.4.1	Διείσδυση στο εσωτερικό περιβάλλον	23
2.4.2	Εναπόθεση σε σεωτερικές επιφάνειες	30
2.4.3	Επαναιώρηση	38
2.4.4	Συσσωμάτωση	39
2.4.5	Παραγωγή νέων σωματιδίων - Αλλαγή φάσης	44
2.4.6	Ανάμιξη	46
2.4.7	7 Περιγραφή της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων με εξισώσεις διατήρησης μα 47	άζας
ΒΙΒΛΙ	ΟΓΡΑΦΙΑ	50
ΚΕΦΑΛΑ	AIO 3	61
ΠΕΡΙΓΡΑ	ΦΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	61
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	61

3.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	66
3.2.1	Εναπόθεση σε επιφάνειες	68
3.2.2	Συσσωμάτωση	74
3.2.3	Διείσδυση από το εξωτερικό περιβάλλον	76
3.2.4	Ανταλλαγή αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον	78
3.2.5	Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων	81
3.2.5	Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων	82
3.2.6	Πηγές εσωτερικού χώρου	83
3.2.7	Επαναιώρηση	83
3.2.8	Συμπύκνωση ατμών σε σωματίδια	83
3.2.9	Εξίσωση διατήρησης της μάζας με όλες τις διεργασίες	84
3.3	ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	84
ΒΙΒΛΙ	ΟΓΡΑΦΙΑ	86
ΚΕΦΑΛΑ	JO 4	90
ΜΕΛΕΤΗ	Ι ΠΗΓΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕ	ΣΣΕ
ΕΛΕΓΧΟ	ΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΈΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	90
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	90
4.2	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	91
4.2.1	Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων	92
4.2.2	Όργανα μέτρησης	93
4.3.3	Πηγές εσωτερικών χώρων	94
4.3 ΦΑΣΜ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ - Α ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	96
4.4	ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΑΖΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ	124
4.4.1	Υπολογισμός του συντελεστή απομάκρυνσης	125
4.4.2	Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής	128
4.5	ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ	137
4.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	146
ΒΙΒΛΙ	ΟΓΡΑΦΙΑ	149
ΚΕΦΑΛΑ	IO 5	154
ΜΕΛΕΤΗ	Ι ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ	
ΣΩΜΑΤΙ	ΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ	154

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	154
5.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΣΛΟ	155
5.2.1	Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων	155
5.2.2	Ανάλυση μετρήσεων συγκέντρωσης μάζας στο Όσλο	163
5.2.3	Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών	171
5.2.4	Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στο Όσλο	177
5.2.5	Χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων από πηγές εσωτερικού χώρου	187
5.2.6	Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών	196
5.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΓΑ	200
5.3.1	Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων	200
5.3.2	Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στην Πράγα	203
5.3.3	Χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων από πηγές εσωτερικού χώρου	206
5.3.4	Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών	214
5-4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΙΛΑΝΟ	218
5.4.1	Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων	218
5.4.2	Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στο Μιλάνο	219
5.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	223
ΒΙΒΛΙΟ	ΟΓΡΑΦΙΑ	226
ΚΕΦΑΛΑ	IO 6	232
ЕФАРМС ХНМІКН	ΓΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ Σ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	232
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	232
6.2	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	233
6.3	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΜΑΖΑΣ ΛΕΠΤΩΝ ΚΑΙ ΧΟΝΔΡΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	235
6.4	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	239
6.4.1	Υπολογισμός του συντελεστή συνολικής απομάκρυνσης σωματιδίων (λ _{ιοι})	241
6.4.2	Υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής	242
6.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	248
ΒΙΒΛΙΟ	ΟΓΡΑΦΙΑ	249
ΚΕΦΑΛΑ	IO 7	251
ΣΥΜΠΕΡ	ΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	251

7.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	251
7.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	252
7.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	253
7.4 ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ	253
7.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	254
ПАРАРТНМА 1	255
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	255
 Αναλυτής μάζας DustTrack (TSI, Inc., USA) 	255
2. Αναλυτής συγκέντρωσης αριθμού υπέρλεπτων σωματιδίων P-Track (TSI, Inc., USA)	256
3. Αναλυτής διαφορικής κινητικότητας	257
4. Αναλυτής αεροδυναμικής κινητικότητας	259
5. Μέθοδος ισοσταθμισμένων ταλαντώσεων (Vibration Microbalance Methods)	260
6. Σύγκριση των μετρήσεων οργάνων P-Track και αναλυτή διαφορικής κινητικότητας Grimm	263
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	267
ПАРАРТНМА 2	268
ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ MONTEΛΟΥ AMANpsd	268
Π.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	268
Π.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ AMANpsd	269
Π.2.2.1 Ενοποίηση του φάσματος μεγεθών από διαφορετικά όργανα μέτρησης	269
Π.2.2.1 Εύρεση χαρακτηριστικών κανονικής λογαριθμικής κατανομής	270
ΒΙΒΙΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	274

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πίνακας 2-1 Σημαντικότεροι ρύποι σε εσωτε	ρικούς χώρους και πηγέα	ς εκπομπής τους	(Πηγή: Spengler
каl Sexton, 1983)			6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πίνακας 4-7: Ρυθμοί εκπομπής διαφόρων πηγών όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία......136

Πίνακας 5-1: Τιμές ρυθμού ανταλλαγής αέρα κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων στο Όσλο.
Πίνακας 5-2: Μέσες τιμές εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης παρουσία και απουσία προσωπικού και κατά τη διάρκεια προσομοίωσης πηγών
Πίνακας 5-3: Μέγιστες τιμές συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων PM ₁₀ κατά την προσομοίωση των διαφόρων πηγών
Πίνακας 5-4: Ρυθμοί εκπομπής των δραστηριοτήτων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή
Πίνακας 5-5: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 10 - 429 nm που μετρήθηκαν με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS). Η «παρουσία προσωπικού» αναφέρεται σε ημέρες που δεν έγιναν προσομοιώσεις πηγών, ενώ οι «ενεργές πηγές» σε ημέρες με προσομοιώσεις πηγών, όπου συμπεριελήφθησαν και τα χρονικά διαστήματα μετά την αποχώρηση του προσωπικού και μέχρι η συγκέντρωση να επιστρέψει στην τιμή υποβάθρου
Πίνακας 5-6: % ποσοστό των σωματιδίων κάθε κλάσης ως προς τα ολικά σωματίδια
Πίνακας 5-7: % ποσοστό μονοκόρυφων, δικόρυφων τα, τρικόρυφων και τετρακόρυφων κατανομών. Το υπόβαθρο αναφέρεται σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες και αφού η συγκέντρωση είχε επιστρέψει στην τιμή που είχε πριν την ενεργοποίηση της πηγής ή την έλευση του προσωπικού. Η παρουσία προσωπικού αναφέρεται σε χρονικά διαστήματα που δεν υπήρχε επίδραση από εκπομπές λόγω προσομοίωσης εσωτερικών πηγών.
Πίνακας 5-8: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους τη στιγμή που καταγράφηκε η μέγιστη συγκέντρωση ολικών σωματιδίων
Πίνακας 5-9: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 10-552 nm που μετρήθηκαν με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS) σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές. Η «νύχτα» περιλαμβάνει τα χρονικά διαστήματα από 23:00 έως 06:00, ενώ η «ημέρα» τα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα
Πίνακας 5-10: Διάμεσοι τιμές των GMDs για τις κορυφές όλων των
Πίνακας 5-11: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 14 - 532 nm που μετρήθηκαν221
Πίνακας 5-12: % Ποσοστά και τιμές της μέσης γεωμετρικής διαμέτρου για τις
Πίνακας 5-13: Συγκέντρωση σωματιδίων για τις κατανομές στο

Πίνακας 6- 1: Μέσες τιμές σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και $PM_{10-2.5}$ στις δύο βάρδιες εργασίας (1 ^η	βάρδια:
06:00-14:00 και 2 ^η βάρδια: 14:00-22:00).	239
Πίνακας 6-2: Ρυθμοί εκπομπής λεπτών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας	244
Πίνακας 6-3: Ρυθμοί εκπομπής χονδρών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας	244
Πίνακας 6-4: Σύγκριση των μέσων ημερήσιων τιμών (εργάσιμες ημέρες) των πειραματικών μετ	ρήσεων
και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα λεπτά σωματίδια	247
Πίνακας 6- 5: Σύγκριση των μέσων ημερήσιων τιμών (εργάσιμες ημέρες) των πειραματικών μετ	ρήσεων
και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα χονδρά σωματίδια	247

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2-2: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας......14

Σχήμα 2-3: Κατανομές τυπικών αιωρουμένων σωματιδίων σε αστικές περιοχές, (α) κατανομή αρ	σιθμού,
(β) κατανομή επιφάνειας, (γ) κατανομή όγκου. Η κατανομή μάζας έχει την ίδια μορφή με την κατ όγκου. (Πηγή Seinfeld και Pandis, 2006).	τανομή 20
Σχήμα 2-4: Ιδανικές μορφές σχισμών που συναντώνται σε κτίρια	25
Σχήμα 2-5: Συντελεστής διείσδυσης σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων, του ύψο σχισμής και της διαφοράς πίεσης για σχισμή μήκους z=3 cm. Πηγή: Liu και Nazaroff, (2001)	ους της 30
Σχήμα 2- 6: Ταχύτητα εναπόθεσης με βάση το μοντέλο των Lai και Nazaroff (2000). Πηγή Hus al., 2008	ssein et
Σχήμα 2-7: Σύγκριση πειραματικά υπολογισμένων τιμών του συντελεστή απομάκρυνσης (λ _d) μοντέλο των Lai και Nazaroff (2000). Πηγή Hussein et al., 2008	με το 38
Σχήμα 2- 8: Σχηματική παράσταση των διεργασιών που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των αιωροί	ύμενων
σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους (πηγή: Λαζαρίδης, 2008)	49

Σχήμα 3-1: Σύγκριση μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD μοντέλα) και μοντέλων ισοζυγίου
μάζας64
Σχήμα 3-2: Ταχύτητα εναπόθεσης σε κατακόρυφη επιφάνεια (α), επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα
πάνω (β) και επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα κάτω (γ) για ταχύτητες τριβής 0,3 cm/s, 1 cm/s και 3
cm/s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σχήμα 4-4: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο......107

Σχήμα 4-6: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο......110

Σχήμα 4-7: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος. Οι τιμές που αντιστοιχούν σε σωματίδια μεγαλύτερα από 50 nm παρουσιάζονται στον δευτερεύοντα άξονα στα δεξιά.

Σχήμα 4-11: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους σωματιδίων κατά τη χρήση σεσουάρ. Οι εκπομπές ξεκίνησαν τη χρονική στιγμή t=0 και ολοκληρώθηκαν τη χρονική στιγμή t=10 min......117

Σχήμα 4-15: Μεταβολή της GMD της φασματικής κατανομής μεγεθών στα πειράματα με τσιγάρο.....121

Σχήμα 4-16: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια πειράματος με αρωματικό ξυλάκι... 122

Σχήμα 4-17: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο......123

Σχήμα 4-18: Μεταβολή της GMD της φασματικής κατανομής μεγεθών στα πειράματα με αρωματικά ξυλάκια.

Σχήμα 4-23: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραματικών τιμών για τη χρήση σπρέι. Παρατηρείται η γρήγορη απομάκρυνση των εκπεμπόμενων σωματιδίων λόγω βαρυτικής καθίζησης...135

Σχήμα 4-24: Ολικοί ρυθμοί απομάκρυνσης σε σχέση με τη διάμετρο για διάφορες πηγές και σύγκριση με την απομάκρυνση λόγω ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον (λ=0,1 h⁻¹) και λόγω εναπόθεσης. 139

Σχήμα 4-26: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων για τη μείωση του ολικού αριθμού σωματιδίων μετά την απενεργοποίηση της πηγής. Η ταχύτητα τριβής λήφθηκε ίση με 1 cm/s και ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ίσος με 0,1 h⁻¹.140

Σχήμα 5-1: Απεικόνιση στο χάρτη της θέσης των δύο σπιτιών όπου πραγματοποιήθηκα μετρήσεις στην πόλη του Όσλο (Νορβηγία)	ν πειραματικές 156
Σχήμα 5-2: Φωτογραφία του σπιτιού στην οδό Steinborgveien	157
Σχήμα 5- 3: Κάτοψη του σπιτιού στην οδό Steinborgveien.	
Σχήμα 5- 4: Φωτογραφία του σπιτιού στην οδό Collettsgate 55B. Το διαμέρισμα βρία όροφο.	3κεται στον 1° 160
Σχήμα 5- 5: Κάτοψη του σπιτιού στην οδό Collettsgate 55B	

Σχήμα 5-15: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο για τις 7/6 (Τηγάνισμα με χρήση απορροφητήρα). Η κατανομή υποβάθρου αναφέρεται σε χρόνο 5 λεπτά πριν την

Σχήμα 5-23: Ρυθμοί εκπομπής από εσωτερικές πηγές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο Όσλο...... 199

Σχήμα 5-26: Τιμές του λόγου Ι/Ο για την κουζίνα και το καθιστικό σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές. 205

Σχήμα 5-27: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων για το χρονικό διάστημα 17/11/02 (06:00) έως 19/11/02 (06:00) στην κουζίνα, στο καθιστικό και στον εξωτερικό χώρο. Όλες οι εκπομπές προέρχονται από μαγείρεμα που πραγματοποιήθηκε στον χώρο τις κουζίνας. Οι ενδιάμεσες πόρτες ανάμεσα στην κουζίνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σχήμα 6-1. Θέση της χημικής βιομηχανίας όπου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις.......233

Σχήμα 6-7: Μεταβολή του λόγου - $ln(\frac{C_{m,max}}{C_m})$ σαν συνάρτηση του χρόνου. Η κλίση της ευθείας
αντιστοιχεί στην τιμή του συντελεστή λ_{tot}
Σχήμα 6-8: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις για τα λεπτά σωματίδια
Σχήμα 6-9: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις για τα χονδρά σωματίδια

ПАРАРТНМА 1

Σχήμα Π 1-1: Σχηματική αναπαράσταση του αναλυτή μάζας DustTrack (Πηγή Morawska και Salthammer, 2003)
Σχήμα Π 1-2: Αρχή λειτουργίας αναλυτή συγκέντρωσης αριθμού υπέρλεπτων σωματιδίων P-Track (Πηγή Morawska και Salthammer, 2003)257
Σχήμα Π 1-3: Σχηματική παράσταση αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (Πηγή: Friedlander, 2000)259
Σχήμα Π 1-4: Αρχή λειτουργίας αναλυτή αεροδυναμικής κινητικότητας (Πηγή: Morawska και Salthammer, 2003)
Σχήμα Π 1-5: Αρχή λειτουργίας του οργάνου των ισοσταθμισμένων ταλαντώσεων (Πηγή: Morawska και Salthammer, 2003)
Σχήμα Π 1-6: Σύγκριση χρονοσειρών των μετρήσεων των οργάνων P-Track και Grimm
Σχήμα Π 1-7: Σύγκριση τιμών των οργάνων P-Track και Grimm.για περιόδους χωρίς δραστηριότητες.265
Σχήμα Π 1-8: Σύγκριση τιμών των οργάνων P-Track και Grimm.για περιόδους με ενεργές πηγές266

ПАРАРТНМА 2

Σχήμα	П	2-1:	Σύγκριση	πειραματικών	δεδομένων	και	αποτελεσμάτων	μοντέλου	για	μονοκόρυφη
κατανομή που προέκυψε κατά την καύση τσιγάρου										
Σχήμα Π 2-2: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τρικόρυφη κατανομή										
/0 11					•		• •			

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η συνεχόμενη συσσώρευση ατόμων στα μεγάλα αστικά κέντρα οδηγεί σε διαρκή επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με αέριους ρύπους και σωματιδιακή ύλη. Παρουσιάζεται η ανάγκη πραγματοποίησης ερευνών που θα δείξουν κατά πόσο οι χημικές αυτές ενώσεις μπορούν να γίνουν επικίνδυνες για τον ανθρώπινο οργανισμό και να προκαλέσουν σοβαρές ασθένειες.

Τα τελευταία χρόνια, γίνονται εκτεταμένες έρευνες για τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στην έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στη σωματιδιακή ύλη καθώς και για τις πιθανές επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία. Στοιχεία από επιδημιολογικές και τοξικολογικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία, δείχνουν ότι η εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων σωματιδιακής ύλης οδηγεί σε αυξημένη συχνότητα εμφάνισης ασθενειών, αλλά και σε αυξημένη θνησιμότητα. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα των παραπάνω προσπαθειών είναι ότι η ανάλυση της έκθεσης του ανθρώπου στη σωματιδιακή ύλη και οι προβλέψεις της επίδρασης της στην ανθρώπινη υγεία βασίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε

Έτσι γεννάται το ερώτημα πόσο αντιπροσωπεύτηκες είναι οι παραπάνω αναλύσεις, από τη στιγμή που δεν λαμβάνονται πάντα υπόψη στοιχεία που θα αναφέρονται στη συγκέντρωση, αλλά και τις ιδιότητες της σωματιδιακής ύλης σε εσωτερικούς χώρους. Ο άνθρωπος που ζει σε αστικά κέντρα περνάει περίπου το 80% του χρόνου του σε εσωτερικούς χώρους (σπίτια, γραφεία κλπ.), και επομένως δέχεται την επίδραση σωματιδιακής ύλης και τόσο από εξωτερικές πηγές (λόγω της εισροής του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον), όσο και από εσωτερικές πηγές (κάπνισμα, μαγείρεμα, κλπ).

Η σωματιδιακή ύλη που προέρχεται από εσωτερικές πηγές είναι δυνατό να παρουσιάζει διαφορές ως προς τις χημικές ιδιότητες, τη χημική σύσταση, τη δυναμική και την τοξικότητα σε σχέση με σωματίδια που εκπέμπονται και παραμένουν σε εξωτερικούς χώρους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι φυσικές διεργασίες που οδηγούν σε αλλαγή του όγκου και του

μεγέθους των σωματιδίων, καθώς το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί την κρίσιμη ιδιότητα που καθορίζει ποια σωματίδια μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω του αναπνευστικού συστήματος. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να μελετηθεί η πραγματική έκθεση του ανθρώπου στη σωματιδιακή ύλη στους χώρους όπου ζει και εργάζεται.

Για να αρθεί η αβεβαιότητα, όσον αφορά την πραγματική έκθεση του ανθρώπου στη σωματιδιακή ύλη σε εσωτερικούς χώρους είναι απαραίτητη μια συνδυασμένη έρευνα που θα περιλαμβάνει πειραματικές μετρήσεις και ανάπτυξη κατάλληλων μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων, με σκοπό την απόκτηση λεπτομερούς γνώσης των φυσικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι πειραματικές μετρήσεις πρέπει να συνοδεύονται από μοντελοποίηση, η οποία θα κινηθεί στην κατεύθυνση της μαθηματικής περιγραφής των φυσικών διεργασιών που καθορίζουν τη συμπεριφορά της σωματιδιακής ύλης σε εσωτερικούς χώρους.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι δημιουργία μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου για τη μελέτη των μηχανισμών που μεταβάλλουν τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Το μοντέλο στηρίζεται στην εξίσωση διατήρησης της μάζας και μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας ή αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων, αλλά και τη μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων που παραμένουν αιωρούμενα στον εσωτερικό χώρο.

Η σπουδαιότητα της διατριβής έγκειται στην ανάπτυξη και στη συνέχεια στην εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου σε συνδυασμό με εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις για την εύρεση σημαντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της επικινδυνότητας των εσωτερικών πηγών και τη λήψη των κατάλληλων μέτρων για την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

Πιο συγκεκριμένα οι στόχοι της διδακτορικής διατριβής είναι:

 Ανάπτυξη μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου που περιγράφει τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους.

- Ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων που διεξήχθησαν σε εσωτερικούς χώρους σε τρεις Ευρωπαϊκές πόλεις για την αξιολόγηση των διεργασιών που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Να συνδυαστεί το μοντέλο με υπάρχον εργαλείο εύρεσης χαρακτηριστικών φασματικής κατανομής για να πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Οργάνωση και πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων υπό ελεγχόμενες συνθήκες.
 Προσδιορισμός της ποσοτικής επίδρασης της εξωτερικής συγκέντρωσης και των εκπομπών από εσωτερικές πηγές στη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων εσωτερικού χώρου. Αξιολόγηση και στη συνέχεια εφαρμογή του μοντέλου για την ανάπτυξη μεθοδολογίας υπολογισμού των ρυθμών εκπομπής από εσωτερικές πηγές.
- Δημιουργία βάσης δεδομένων για τους ρυθμούς εκπομπής συνηθισμένων καθημερινών δραστηριοτήτων και σύγκριση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.
- Αξιολόγηση του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα από τις τρεις Ευρωπαϊκές πόλεις και εύρεση των χαρακτηριστικών των εσωτερικών χώρων που επηρεάζουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων.
- Εφαρμογή του μοντέλου σε χημική βιομηχανία και εύρεση των ρυθμών εκπομπής σωματιδιακής ύλης με απώτερο σκοπό τη λήψη μέτρων για την προστασία των εργαζομένων.

Η καινοτομία της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους με ενσωμάτωση μηχανισμών που οδηγούν στη μεταβολή του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων και η εφαρμογή του σε μετρήσεις εσωτερικών χώρων. Επίσης καινοτομία αποτελεί η χρήση του μοντέλου για τον προσδιορισμό χρονικά μεταβαλλόμενων ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους λαμβάνοντας υπόψη τη διεργασία της συσσωμάτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέχρι πρόσφατα η μελέτη της ποιότητας του αέρα, αναφερόταν σχεδόν αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά του αέρα που περιβάλλει τον άνθρωπο κατά την παραμονή του σε κάποιο εξωτερικό χώρο, καθώς και στην επίδραση που είχε ο αέρας αυτός στην ανθρώπινη υγεία. Στην πραγματικότητα, ο όρος «περιβάλλον» ήταν συνυφασμένος με το εξωτερικό περιβάλλον και ελάχιστες επιστημονικές εργασίες είχαν ασχοληθεί με τις ιδιότητες του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα μέχρι το 1970, οι μελέτες που αφορούσαν την έκθεση των ανθρώπων σε ρύπους σε κλειστούς χώρους εστιαζόταν σε μεγάλο ποσοστό στο εσωτερικό βιομηχανικών εγκαταστάσεων (Jones, 1999), ενώ ελάχιστη προσοχή είχε δοθεί στην ποιότητα του αέρα σε άλλους εσωτερικούς χώρους (οικίες, σχολεία, γραφεία κλπ.). Εσωτερικός χώρος ή εσωτερικό περιβάλλον ονομάζεται κάθε περιορισμένο με φυσικά όρια μικροπεριβάλλον στο οποίο μπορεί να βρεθεί ο άνθρωπος. Έτσι, στο εσωτερικό περιβάλλον περιλαμβάνονται οι χώροι διαμονής (οικίες), εργασίας (γραφεία), εκπαίδευσης (σχολεία), νοσηλείας (νοσοκομεία), αναψυχής (εστιατόρια, κέντρα διασκεδάσεως), αλλά και το εσωτερικό των αυτοκίνητων και των μέσων μεταφοράς (λεωφορεία, αεροπλάνα, πλοία) (Λαζαρίδης, 2008).

Ο άνθρωπος, στην καθημερινή του ζωή, εκτίθεται σε πολλές τοξικές χημικές ενώσεις, οι οποίες, κάτω υπό προϋποθέσεις μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό. Πρόσφατες μελέτες (Steinemann, 2004), έδειξαν πως σε μεγάλο ποσοστό η έκθεση, δεν προέρχεται από πηγές όπως εργοστάσια ή χώροι απόρριψης αποβλήτων. Αντίθετα, οι εκπομπές ρύπων που συνεισφέρουν σημαντικά στην ανθρώπινη έκθεση οφείλονται στη χρήση συσκευών σε εσωτερικούς χώρους ή προέρχονται από υλικά του εσωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, ρύποι που εκπέμφθηκαν σε εξωτερικό χώρο μπορούν να διεισδύουν στο εσωτερικό περιβάλλον και να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Έκθεση σε κάποιο ρύπο μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον ο ρύπος έρχεται σε επαφή με τον άνθρωπο (Zartarian et al., 1997). Ο πληθυσμός που ζει και εργάζεται σε αστικά κέντρα περνάει την πλειονότητα του χρόνου σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο μέσος κάτοικος βρίσκεται μέσα σε κάποιο κτίριο το 88% του ημερήσιου χρόνου του και σε κάποιο μέσο μεταφοράς το 7% (Robinson και Nelson, 1995). Για το μέσο Ευρωπαίο τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 87% και 3% (Λαζαρίδης, 2008). Είναι επομένως απόλυτα φυσιολογικό, οι ρύποι οι οποίοι εισέρχονται ή εκπέμπονται σε εσωτερικούς χώρους να αποτελούν σημαντικούς παράγοντες κινδύνου για την ανθρώπινη υγεία. Υπάρχουν περιπτώσεις ρυπαντών, όπως η φορμαλδεΰδη, το στυρένιο και το χλωροφόρμιο που οι συγκεντρώσεις τους σε εσωτερικούς χώρους είναι δύο έως πενήντα φορές μεγαλύτερες από τις συγκεντρώσεις σε εξωτερικούς χώρους (Hoskins, 2003). Επίσης, η έκθεση σε κάποιους ρύπους, όπως ο καπνός του τσιγάρου και το ραδόνιο, λαμβάνει χώρα κυρίως σε εσωτερικό περιβάλλον.

Η επιβάρυνση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους από την παρουσία ποικίλλων ρύπων χρονολογείται από την προϊστορική εποχή. Σημάδια καπνού σε σπηλιές αποδεικνύουν τα υψηλά επίπεδα ρύπανσης που οφείλονταν στον ανεπαρκή εξαερισμό του χώρου. Μέχρι το μεσαίωνα, τα περισσότερα σπίτια θερμαίνονταν με τη χρήση εστίας φωτιάς, στο κέντρο του σπιτιού, πάνω από την οποία υπήρχε άνοιγμα για να διοχετεύονται τα καυσαέρια στον εξωτερικό χώρο. Οι πρώτες καμινάδες και τα τζάκια που ήταν προσαρμοσμένα στον τοίχο άρχισαν να χρησιμοποιούνται μαζικά κατά τη διάρκεια του 16^{ου} αιώνα (Brimblecombe, 1987). Η σημασία του σωστού αερισμού ενός χώρου ήταν γνωστή από τους αρχαιοελληνικούς και ρωμαϊκούς χρόνους. Σε πολλές μελέτες μέχρι τον εικοστό αιώνα, μέτρο της ποιότητας του αέρα αποτελούσε η συγκέντρωση του CO₂, χωρίς να δίνεται η απαιτούμενη προσοχή σε άλλους ρύπους (Sundell, 2004). Η κατάσταση αυτή δεν έχει μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό σε πολλές περιοχές στις αναπτυσσόμενες χώρες. Για την παροχή ενέργειας χρησιμοποιείται η καύση βιομάζας, χωρίς να λαμβάνονται ακόμα και οι απαραίτητες στοιχειώδεις προφυλάξεις, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία (Bruce et al., 2000).

Από την άλλη μεριά, ο τρόπος που κατασκευάζονται τα κτίρια στις αναπτυγμένες χώρες έχει αλλάξει σημαντικά. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονταν κυρίως στην ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας, λόγω του αυξημένου κόστους των καυσίμων. Τα σύγχρονα σπίτια και γραφεία έχουν καλύτερη μόνωση από ότι στο παρελθόν, η οποία επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση

νέων συνθετικών υλικών. Αυτές οι αλλαγές κατέστησαν τους εσωτερικούς χώρους πιο άνετους, αλλά παράλληλα δημιούργησαν ένα περιβάλλον όπου αέριοι ρύποι μπορούν να εκπεμφθούν και να φτάσουν σε αρκετά υψηλότερες συγκεντρώσεις σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον (Jones, 1999). Οι αέριοι ρύποι προέρχονται από διάφορες πηγές, οι οποίες περιλαμβάνουν εκπομπές από υλικά κατασκευής, βιολογικές δραστηριότητες, εκπομπές από συσκευές καύσης και θέρμανσης, αλλά και καθημερινές ανθρώπινες δραστηριότητες. Για πολλούς ρύπους σημαντική πηγή αποτελεί και η διείσδυση τους από το εξωτερικό περιβάλλον. Οι σημαντικότεροι ρύποι, καθώς και οι πηγές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1 (Spengler και Sexton, 1983).

Ρύπος	Πηγές εκπομπής							
Αλλεργιογόνα	Σκόνη σπιτιών, κατοικίδια ζώα, έντομα							
Αμίαντος	Υλικά επιβράδυνσης πυρκαγιάς, μόνωση							
Διοξείδιο του άνθρακα	Διεργασίες μεταβολισμού, καύση, αυτοκινούμενα οχήματα σε γκαράζ							
Μονοξείδιο του άνθρακα	Διεργασίες καύσης, λέβητες, εστίες θέρμανσης, σύστημα θέρμανσης με αέριο ή κηροζίνη, καπνός τσιγάρου							
Φορμαλδεΰδη	Νοβοπάν, μόνωση, επίπλωση							
Μικροοργανισμοί	Άνθρωποι, ζώα, φυτά, κλιματιστικά μηχανήματα							
Διοξείδιο του αζώτου	Αέρας εξωτερικού περιβάλλοντος, καύση, αυτοκινούμενα οχήματα σε γκαράζ							
Οργανικές ουσίες	Συγκολλητικές ουσίες, διαλύτες, οικοδομικά υλικά, εξάτμιση, καύση, χρώματα, καπνός τσιγάρου							
Όζον	Φωτοχημικές αντιδράσεις							
Σωματίδια	Επαναιώρηση, καπνός τσιγάρου, προϊόντα καύσης							
Πολυκυκλικοί								
αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Καύση, καπνός τσιγάρου							
Γύρη	Αέρας εξωτερικού περιβάλλοντος, δέντρα, γρασίδι, αγριόχορτα, φυτά							
Ραδόνιο	Έδαφος, υλικά κατασκευής οικοδομών (τσιμέντο, πέτρες)							
Μύκητες	Έδαφος, φυτά, είδη διατροφής, εσωτερικές επιφάνειες							

Πίνακας 2-1 Σημαντικότεροι ρύποι σε εσωτερικούς χώρους και πηγές εκπομπής τους (Πηγή: Spengler και Sexton, 1983).

Διοξείδιο του θείου

Αέρας εξωτερικού περιβάλλοντος, καύση

Η συγκέντρωση ενός ρύπου σε κάποιο εσωτερικό χώρο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Στην περίπτωση που ο ρύπος εκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο, ο ρυθμός εκπομπής της πηγής είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Η συμπεριφορά του ρύπου μετά την εκπομπή του (εναπόθεση του σε επιφάνειες, μετασχηματισμός του σε άλλες μορφές λόγω χημικών αντιδράσεων) επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση του. Ιδιαίτερη σημασία έχει και ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον, που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, τη γεωγραφική θέση του κτιρίου και τις κλιματολογικές συνθήκες (Li και Jones, 2000). Επομένως, αν ο ρύπος προέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, η παρουσία στον εσωτερικό χώρο εξαρτάται από το ρυθμό ανταλλαγής αέρα και την εξωτερική συγκέντρωση του.

Όσον αφορά τις επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία, η πλειοψηφία των αέριων ρύπων επηρεάζει άμεσα την καλή λειτουργία του αναπνευστικού και του καρδιαγγειακού συστήματος και η σοβαρότητα των επιδράσεων εξαρτάται από τη ένταση της πηγής, τη διάρκεια της έκθεσης και την κατάσταση της υγείας του πληθυσμού που δέχεται την επίδραση (Hoskins, 2003). Ορισμένες ομάδες του πληθυσμού διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο είτε επειδή περνούν περισσότερο χρόνο σε εσωτερικούς χώρους (ηλικιωμένοι και μικρά παιδιά), είτε επειδή έχουν ήδη προβλήματα υγείας (άτομα με άσθμα ή καρδιακά προβλήματα). Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιοι ρύποι μπορεί να προκαλέσουν και μη αναστρέψιμες βλάβες στην υγεία, όπως μεταλλάξεις του DNA και καρκίνο. Τέτοιοι ρύποι είναι οργανικές ενώσεις, (π.χ βενζο[α]πυρένιο, βενζόλιο) ή αέριοι ρύποι όπως το ραδόνιο (Maroni et al., 1995).

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν ένα σημαντικό ατμοσφαιρικό ρύπο με ποικίλες επιδράσεις στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό είτε μέσω της αναπνευστικής οδού, είτε μέσω της κατάπωσης τους από το στόμα (εναπόθεση στις τροφές) και να προκαλέσουν επιδράσεις στην υγεία από απλό βήχα μέχρι καρκίνο των πνευμόνων ανάλογα με το μέγεθος και τη χημική τους σύσταση (US EPA, 2004). Η εναπόθεση τους στο δέρμα ή στα μάτια μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό ή αλλεργίες, ενώ τέλος δεν πρέπει να υποτιμάται το γεγονός ότι αποτελούν ενόχληση που επηρεάζει την ψυχολογία και

δυσκολεύει συνηθισμένες καθημερινές δραστηριότητες. Για παράδειγμα, αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε εξωτερικούς χώρους οδηγούν σε σημαντική μείωση της ορατότητας, ενώ σε εσωτερικούς χώρους τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν εναποτεθεί σε επιφάνειες (σκόνη) είναι ανεπιθύμητα από αισθητικής πλευράς.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα αιωρούμενα σωματίδια (αερολύματα, αεροζόλ) ορίζονται ως τα σταθερά αιωρήματα στερεών ή υγρών σωματιδίων στον αέρα (Seinfeld και Pandis, 2006). Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό στα αιωρούμενα σωματίδια περιλαμβάνονται όλα τα συμπυκνωμένα συστατικά καθώς και το μέσο που τα περιέχει. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις στη βιβλιογραφία ο όρος αναφέρεται μόνο στα σωματίδια και όχι στο μέσο. Τα αιωρούμενα σωματίδια συναντώνται στην ατμόσφαιρα σε πολλά διαφορετικά σχήματα και μεγέθη, ενώ διαφέρουν σημαντικά και ως προς τα χημικά, φυσικά και βιολογικά τους χαρακτηριστικά. Σε πολλές περιπτώσεις σωματίδια που εκπέμπονται από την ίδια πηγή διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους. Μετά την εκπομπή τους από την πηγή, τα αιωρούμενα σωματίδια υπόκεινται σε διεργασίες που μπορούν να μεταβάλλουν το σχήμα, το μέγεθος, τη χημική τους σύσταση ή την περιεκτικότητα τους σε νερό. Οι μεταβολές αυτές συμβαίνουν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες ανάλογα με το είδος των σωματιδίων, με αποτέλεσμα η περιγραφή της δυναμικής τους να καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων, ο διαχωρισμός τους σε κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά και οι τρόποι απεικόνισης του πληθυσμού τους στην ατμόσφαιρα.

2.2.1 Σχήμα Αιωρούμενων Σωματιδίων

Σημαντικές διαφορές εντοπίζονται στο σχήμα των αιωρούμενων σωματιδίων, με τα περισσότερα από τα πιθανά σχήματα να είναι εξαιρετικά πολύπλοκα. Στο σχήμα 2-1 παρουσιάζονται εικόνες από μικροσκόπιο σωματιδίων που έχουν συλλεχθεί στο εσωτερικό οικίας στην πόλη Brisbane (Αυστραλία). Γενικά ασύμμετρα σχήματα παρουσιάζουν σωματίδια που δημιουργούνται εξαιτίας συσσωμάτωσης (π.χ. σωματίδια που προέρχονται από διεργασίες καύσης). Παρόμοια σχήματα έχουν και τα σωματίδια που προκύπτουν από μηχανικές διεργασίες. Αντίθετα σωματίδια που περιέχουν μεγάλη ποσότητα νερού είναι συνήθως σφαιρικά.



Σχήμα 2-1: Σωματίδια που συλλέχθηκαν σε οικίες στην πόλη Brisbane (Αυστραλία) και μελετήθηκαν με αναλυτή σκέδασης x-ray που ήταν συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο: (α) Τρεις τύποι σωματιδίων: ένα τετράγωνο σωματίδιο (κρύσταλλος NaCl), πολλά μεγάλα ινώδη σωματίδια (κύρια στοιχεία Mg, Cl, S, O) και πολλά λεπτά ινώδη σωματίδια (κύρια στοιχεία Ca, S). (β) Σωματίδια ίδιου τύπου με κύρια συστατικά: Mg, Cl, S, K, Na. (γ) Μικρά σωματίδια (κρύσταλλοι) NaCl και ένα μεγάλο σε μήκος σωματίδιο με κύρια στοιχεία: C, O, Ca, Mg, S, P (πιθανόν ένα θραύσμα από ένα έντομο ή ένα φυτό. (δ) Ξηρή σταγόνα. Τα κύρια στοιχεία από τα μικρότερα σωματίδια είναι: Mg, K, Cl, S, O, Na, Si. Πηγή: Morawska και Salthammer, 2003.

Τα σωματίδια με ποικιλόμορφα σχήματα μπορούν να περιγραφούν με βάση αρκετές παραμέτρους, αλλά για λόγους ευκολίας συνήθως χρησιμοποιείται η διάμετρος τους, ή το μήκος και το πλάτος τους όταν η αναφορά γίνεται σε σωματίδια με ινώδη μορφή. Η διάμετρος είναι χαρακτηριστικό των σφαιρικών σωματιδίων, αλλά όπως έχει αναφερθεί πολύ μικρό τμήμα των συνολικών αιωρούμενων σωματιδίων έχουν σφαιρικό σχήμα. Για το λόγο αυτό έχει εισαχθεί η έννοια της ισοδύναμης διαμέτρου (equivalent diameter). Η ισοδύναμη διάμετρος ορίζεται ως η διάμετρος μίας σφαίρας που έχει την ίδια τιμή μίας φυσικής ιδιότητας με το μη σφαιρικό σωματίδιο. Ορισμένες από τις ιδιότητες που χρησιμοποιούνται είναι η αδράνεια, η ηλεκτρική ή μαγνητική κινητικότητα, η σκέδαση του φωτός, η κίνηση Brown, η χημική σύσταση και η αναλογία επιφάνειας-όγκου. Οι διάφορες μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων θεωρούν τα σωματίδια σφαιρικά και στηρίζονται για τον υπολογισμό τους σε κάποια από τις παραπάνω φυσικές ιδιότητες. Επομένως για την ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων πρέπει να λαμβάνεται κάθε φορά υπόψη ο τρόπος υπολογισμού της ισοδύναμης διαμέτρου.

Οι πιο συνηθισμένες ισοδύναμοι διάμετροι που χρησιμοποιούνται είναι η αεροδυναμική διάμετρος (aerodynamic diameter) και η διάμετρος κινητικότητας (mobility diameter). Ορίζονται ως εξής:

Αεροδυναμική διάμετρος (d_a) ονομάζεται η διάμετρος μίας σφαίρας μοναδιαίας πυκνότητας που έχει την ίδια βαρυτική ταχύτητα καθίζησης με το εξεταζόμενο σωματίδιο.

Διάμετρος κινητικότητας (d_p) ονομάζεται διάμετρος μίας σφαίρας μοναδιαίας πυκνότητας που δέχεται την ίδια δύναμη τριβής με το εξεταζόμενο σωματίδιο.

Οι δύο παραπάνω διάμετροι συνδέονται με τη σχέση: $d_p = d_\alpha \sqrt{\chi \frac{C_p(d_\alpha) \rho_p}{C_p(d_p) \rho}}$

όπου C_S ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης του Cunnigham, χ ο συντελεστής σχήματος, ρ η πυκνότητα του σωματιδίου και ρ₀ η πυκνότητα αναφοράς (1g/cm³).

2.2.2 Μέγεθος Αιωρούμενων Σωματιδίων

Στη φύση τα αιωρούμενα σωματίδια συναντώνται σε διάφορα μεγέθη που ξεκινούν από μερικά vavóμετρα (nm) έως 400 μικρόμετρα (μm) δηλαδή διαφορά 5 τάξεων μεγέθους. Τα μικρότερα σωματίδια προσεγγίζουν το μέγεθος των μορίων και σαν συνέπεια παρουσιάζουν πολλές από τις ιδιότητες τους. Αντίθετα, τα μεγαλύτερα σωματίδια, με μέγεθος της τάξης των μm, ακολουθούν τους νόμους της κλασσικής Νευτώνειας μηχανικής με την οποία περιγράφεται η κίνηση και η συμπεριφορά μεγαλύτερων σωμάτων.

Διάφορες κατηγοριοποιήσεις έχουν προταθεί σχετικά με το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο συνηθέστερος διαχωρισμός είναι σε λεπτά και χονδρά σωματίδια (Whitby, 1978). Τα λεπτά σωματίδια είναι τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm ενώ τα χονδρά σωματίδια είναι τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 μm. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί και άλλες τιμές διαμέτρου για το διαχωρισμό των λεπτών και των χονδρών σωματιδίων που κυμαίνονται από 1-3 μm (Friedlander, 1977; Hinds, 1982; Baron και Willeke, 2001). Ο διαχωρισμός αυτός είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος, καθώς τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια προέρχονται από διαφορετικές πηγές, έχουν διαφορετική χημική σύσταση, διαφορετικές οπτικές ιδιότητες και απομακρύνονται με διαφορετικούς μηχανισμούς από την ατμόσφαιρα (Seinfeld και Pandis, 2006). Ένας αναλυτικότερος διαχωρισμός μπορεί να γίνει με βάση το μέγεθος, τον τρόπο παραγωγής αλλά και τις παρατηρούμενες κατανομές των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (Whitby, 1978). Πιο συγκεκριμένα έχουμε τις εξής κατηγορίες:

- Μικροί πυρήνες (nucleation mode): Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 10 nm. Τα σωματίδια αυτά σχηματίζονται από πυρηνοποίηση ατμοσφαιρικών αερίων σε υπερκορεσμένη ατμόσφαιρα.
- Σωματίδια Άιτκεν (Aitken mode): Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 10-100 nm.
 Προέρχονται από την πυρηνοποίηση ατμοσφαιρικών αερίων, ή από σωματίδια μικρών πυρήνων λόγω αύξησης του μεγέθους τους.
- Σωματίδια περιοχής συσσώρευσης (accumulation mode): Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 0,1-2,5 μm. Δημιουργούνται κατά τη συσσωμάτωση μικρότερων σωματιδίων ή αέριων συστατικών. Το μέγεθος τους αυξάνει με πολύ αργό ρυθμό λόγω συσσωμάτωσης και

έτσι δεν μεταβαίνουν σε σημαντικό ποσοστό στην επόμενη κατηγορία. Στην περιοχή διαμετρών των σωματιδίων συσσώρευσης, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι ασθενείς με αποτέλεσμα τα σωματίδια να συσσωρεύονται σε αυτή την κατανομή, όπως υποδηλώνει και το όνομα τους.

- Υπέρλεπτα σωματίδια (ultrafine mode): Περιλαμβάνονται οι μικροί πυρήνες και τα σωματίδια Άιτκεν και επομένως είναι τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρος μικρότερη από 100 nm. Τα σωματίδια αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά γιατί απαντώνται σε μεγάλες συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων κοντά σε πηγές και γιατί μπορούν να εισέλθουν σε μεγάλο ποσοστό μέσω του αναπνευστικού συστήματος στον ανθρώπινο οργανισμό και να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία. Σε πολλές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως ξεχωριστή κατηγορία και τα νανο-σωματίδια (Friedlander, 1977), που είναι τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 50 nm.
- Λεπτά σωματίδια (Fine mode): Περιλαμβάνονται οι μικροί πυρήνες, τα σωματίδια Άιτκεν και τα σωματίδια της περιοχής συσσώρευσης.
- Χονδρά σωματίδια (Coarse mode): Σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 μm. Σε εξωτερικούς χώρους, τα σωματίδια αυτά παράγονται από ανθρωπογενείς πηγές (αγροτικές εργασίες, οικοδομικές εργασίες, εργασίες σε ορυχεία) ή αποτελούνται από σωματίδια σκόνης που επαναιωρούνται και μεγάλα σωματίδια από θαλασσινό αλάτι.

Στο σχήμα 1-2 παρουσιάζεται η κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθος τους, καθώς και οι διαδικασίες παραγωγής και εκπομπής τους στην ατμόσφαιρα.

2.2.3 Χημική σύσταση Αιωρούμενων Σωματιδίων

Όσον αφορά τη χημική σύσταση έχει διαπιστωθεί ότι τα σωματίδια μπορούν να περιέχουν διαφορετικούς συνδυασμούς εκατοντάδων χημικών ενώσεων, ενώ παράλληλα η χημική σύσταση μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά μέσω χημικών αντιδράσεων διαφόρων συστατικών ή μέσω διεργασιών, όπως η εξάτμιση, η συμπύκνωση και η συσσωμάτωση. Επίσης η χημική σύσταση μπορεί να αλλάξει λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως

για παράδειγμα κατά τη διείσδυση των σωματιδίων από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον (Morawska και Salthammer, 2003; Smolik et al., 2008)

Όταν τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν όλα την ίδια χημική σύσταση χαρακτηρίζονται ως ομογενή, ενώ αν έχουν διαφορετική χημική σύσταση ως ετερογενή (Hinds, 1999). Στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και οι όροι internally mixed και externally mixed για τα ομογενή και ετερογενή αιωρούμενα σωματίδια αντίστοιχα (Friedlander, 1977).

Τα αιωρούμενα σωματίδια της τροπόσφαιρας περιέχουν θειικά, νιτρικά, αμμωνιακά, νάτριο, χλώριο, ιχνοστοιχεία, ανθρακούχες ενώσεις, γήινα θραύσματα και νερό. Το ανθρακούχο τους τμήμα αποτελείται από στοιχειακό και οργανικό άνθρακα. Ο στοιχειακός άνθρακας εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα από διεργασίες καύσης. Ο οργανικός άνθρακας εκπέμπεται απευθείας ή παράγεται κατά τη συμπύκνωση οργανικών αερίων χαμηλής πτητικότητας. Όσον αφορά τα ανόργανα στοιχεία, στις ανθρωπογενείς εκπομπές κυριαρχούν τα θειούχα σωματίδια, ενώ παρατηρούνται και υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων αμμωνίου και νιτρικών. Σε παραθαλάσσιες περιοχές παρουσιάζονται αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων χλωριούχου νατρίου, ενώ σε περιοχές χωρίς έντονη βλάστηση ή σε γειτνίαση ερημοποιημένων περιοχών κυριαρχούν σωματίδια που περιέχουν γήινα θραύσματα. Τέλος σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται ανάμεσα στις αστικές περιοχές, ανάλογα με τις πηγές ρύπανσης και ειδικότερα αν η ρύπανση σχετίζεται με καπνομίχλη ή φωτοχημική αιθαλομίχλη.



Σχήμα 2-2: Στατιστική κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας.

Τα αιωρούμενα σωματίδια διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Πρωτογενή είναι τα σωματίδια που έχουν την ίδια χημική σύσταση με τη χημική σύσταση που είχαν κατά την εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα δευτερογενή ονομάζονται τα σωματίδια που δημιουργούνται από χημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα.

Τα πρωτογενή χονδρά σωματίδια εκπέμπονται κυρίως από μηχανικές δραστηριότητες. Τα πρωτογενή λεπτά σωματίδια εκπέμπονται είτε απευθείας ως σωματίδια, είτε ως ατμοί οι οποίοι συμπυκνώνονται γρήγορα για να δημιουργήσουν υπέρλεπτα σωματίδια. Οι πηγές τους περιλαμβάνουν κινητήρες Ντίζελ και άλλες πηγές καύσης. Η συγκέντρωση των πρωτογενών σωματιδίων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το ρυθμό εκπομπής τους από την πηγή, αλλά εξαρτάται επίσης από το ρυθμό εναπόθεσης τους και τις διεργασίες διασποράς και μεταφοράς στην ατμόσφαιρα.

Τα περισσότερα δευτερογενή λεπτά σωματίδια δημιουργούνται από συμπύκνωση ατμών που προήλθαν από χημικές αντιδράσεις πρόδρομων αέριων ενώσεων. Η διαδικασία αυτή είτε οδηγεί στη δημιουργία νέων σωματιδίων, είτε στην προσθήκη σωματιδιακής μάζας σε προϋπάρχοντα σωματίδια. Η συγκέντρωση τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η συγκέντρωση των πρόδρομων αερίων, η συγκέντρωση χημικά ενεργών συστατικών, όπως το όζον και η ρίζα του υδροξυλίου, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία και η συγκέντρωση των υπολοίπων σωματιδίων.

2.2.4 Πυκνότητα Αιωρούμενων Σωματιδίων

Η πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων αναφέρεται στη μάζα ανά μονάδα όγκου του ίδιου του σωματιδίου, αγνοώντας το μέσο στο οποίο αιωρείται. Στην περίπτωση που εξετάζεται η μάζα των σωματιδίων στο συνολικό όγκο του αέρα και των σωματιδίων αναφερόμαστε στη συγκέντρωση μάζας. Τα υγρά σωματίδια και τα σωματίδια του εδάφους έχουν πυκνότητα ίση με την πυκνότητα του υλικού από το οποίο προέρχονται. Τα σωματίδια του καπνού ή των καυσαερίων σε πολλές περιπτώσεις έχουν πυκνότητα μικρότερη από αυτή που υπολογίζεται με βάση τη χημική τους σύσταση. Αυτό οφείλεται στο ότι έχουν προελθεί από συσσωμάτωση με αποτέλεσμα να υπάρχει αρκετός κενός χώρος ανάμεσα στα σωματίδια που έχουν την πυκνότητα αναφοράς $ρ_0$ (1g/cm³), που είναι η πυκνότητα του νερού.

2.2.5 Έκφραση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η συγκέντρωση μάζας, που αντιστοιχεί στο πηλίκο της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων στη μονάδα του όγκου. Ο όγκος αναφέρεται στο συνολικό όγκο των σωματιδίων και του μέσου που τα περιέχει. Ιδιαίτερα συνηθισμένος σε επιστημονικές εργασίες είναι ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων PM_{10} , (σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm) και PM_1 (σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 1 μm).
Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων που αναφέρεται στον αριθμό σωματιδίων στη μονάδα του όγκου. Η χρήση της βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή στην περίπτωση των μικρών σωματιδίων, καθώς αυτά παρόλο που αντιπροσωπεύουν πολύ μικρό κομμάτι της συνολικής μάζας, εμφανίζονται σε μεγάλους αριθμούς, ιδιαίτερα κοντά στις πηγές εκπομπής. Η μελέτη των μικρών σωματιδίων είναι πολύ σημαντική καθώς μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό και να εναποτεθούν σε διάφορες περιοχές του αναπνευστικού συστήματος. Τέλος σε αντίθεση με αέριους ρύπους, οι αναλογίες όγκου ή μάζας σε μέρη στο εκατομμύριο (ppm) δεν χρησιμοποιούνται συχνά καθώς οι τιμές της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πολύ μικρές αριθμητικά, όταν εκφράζονται με αυτό τον τρόπο. Δεν υπάρχουν απλές σχέσεις που να συνδέουν τις συγκεντρώσεις μάζας με τις συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων, εκτός αν θεωρηθεί ότι τα σωματίδια έχουν όλα το ίδιο σχήμα (συνήθως σφαιρικό) και την ίδια πυκνότητα.

2.2.6 Κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων

Τα αερολύματα που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα αποτελούνται από σωματίδια πολλών διαφορετικών μεγεθών (polydisperse aerosol). Αερολύματα με σωματίδια ίδιας διαμέτρου μπορούν να δημιουργηθούν κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστήριο (monodisperse aerosol) και δεν συναντώνται στη φύση. Παρουσιάζει επομένως ενδιαφέρον η απεικόνιση και ο υπολογισμός της κατανομής του αριθμού, της μάζας του όγκου ή της επιφάνειας των αιωρούμενων σωματιδίων σαν συνάρτηση της διαμέτρου τους. Για το σκοπό αυτό το σύνολο των μεγεθών των σωματιδίων χωρίζεται σε ένα ορισμένο αριθμό διαδοχικών τμημάτων και υπολογίζεται ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε τμήμα. Τα διάφορα τμήματα δεν έχουν συνήθως το ίδιο «πλάτος» (δεν αντιστοιχούν στο ίδιο εύρος διαμέτρων). Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων τα διάφορα τμήματος. Στην περίπτωση αυτή το εμβαδόν κάθε τμήματος είναι ανάλογο του αριθμού των σωματιδίων στο τμήμα χε κάθε τμήματος είναι ο τιμήματος των διαμέτρων του κάθε τμήματος. Στην περίπτωση αυτή το εμβαδόν κάθε τμήματος είναι ο συνήμα τος ή η γεωμετρική μέση τιμή, δηλαδή η ρίζα του γινομένου του

κατώτερου και του ανώτερου ορίου του τμήματος. Για να προσδιοριστεί η συνάρτηση της κατανομής απαιτούνται δύο παράμετροι: μία που να χαρακτηρίζει που βρίσκεται το κέντρο της κατανομής και μία που να χαρακτηρίζει το πλάτος της κατανομής. Για τον χαρακτηρισμό της διαμέτρου του κέντρου της κατανομής χρησιμοποιείται ο μέση διάμετρος (mean), η διάμεσος (median), η κορυφή (mode) και η γεωμετρική μέση διάμετρος (geometric mean). Σε περίπτωση συμμετρικής κατανομής, οι τρεις πρώτες ταυτίζονται, ενώ διαφορετικά ισχύει:

κορυφή < διάμεσος < μέση διάμετρος

Η γεωμετρική μέση διάμετρος ορίζεται ως εξής: Αν υποθέσουμε ότι έχουμε Ν διακριτά τμήματα, n_i είναι ο αριθμός των σωματιδίων και d_i η γεωμετρική μέση διάμετρος του τμήματος i, έχουμε ότι:

$$d_g = exp\left(\frac{\sum n_l ln(d_l)}{N}\right) \tag{2-1}$$

Η κανονική λογαριθμική κατανομή

Μια μετρούμενη κατανομή μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί ως μία λίστα με τιμές κατανομών για δεκάδες διαμέτρους. Η απεικόνιση αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύκολη και γρήγορη επεξεργασία δεδομένων και για την εύκολη κατανόηση του φάσματος των σωματιδίων. Για τους παραπάνω λόγους έχουν προταθεί διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις που περιγράφουν την κατανομή των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Οι συναρτήσεις αυτές είναι ημιεμπειρικές και επιλέχθηκαν γιατί ταυτίζονταν με ικανοποιητική ακρίβεια με το σχήμα των κατανομών των αιωρούμενων σωματιδίων που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα. Από τις διάφορες αυτές μαθηματικές συναρτήσεις, αυτή που έχει επικρατήσει είναι η κανονική κατανομή. Άλλες κατανομές που χρησιμοποιούνται σε μικρότερη κλίμακα για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές εφαρμογές είναι η κατανομή Rosin-Rammler, η κατανομή Nukiyama-Tanasawa, η κατανομή δύναμης, η εκθετική κατανομή και η κατανομή Khrgian-Mazin (Hinds, 1999). Η λογαριθμική κατανομή μίας ποσότητας u (- $\infty < u < \infty$) δίδεται από τη σχέση:

$$n(u) = \frac{N}{(2\pi)^{1/2} \sigma_u} exp\left(-\frac{(u-\pi)^2}{2\sigma_u^2}\right)$$
(2-2)

όπου \bar{u} η μέση τιμή της κατανομής και σ_u^2 η διακύμανση. Ισχύει επίσης ότι:

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} n(u) du \tag{2-3}$$

Η κανονική κατανομή έχει τη χαρακτηριστική μορφή «καμπάνας» με μέγιστο στην τιμή \bar{u} . Η τυπική απόκλιση σ_u καθορίζει το πλάτος της κατανομής και 68% της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη της κατανομής είναι στο εύρος $\bar{u} \pm \sigma_u$.

Μία ποσότητα u παρουσιάζει κανονική λογαριθμική κατανομή αν ο λογάριθμος της (νεπέριος ή δεκαδικός) παρουσιάζει κανονική κατανομή. Η κανονική λογαριθμική κατανομή ενός πληθυσμού αιωρούμενων σωματιδίων είναι:

$$n_N(\log d_p) = \frac{dN}{d\log d_p} = \frac{N}{(2\pi)^{\frac{d}{2}\log \sigma_g}} \exp\left(-\frac{(\log d_p - \log d_g)^2}{2\log^2 \sigma_g}\right)$$
(2-4)

όπου N η ολική συγκέντρωση αριθμού των σωματιδίων, d_g η γεωμετρική μέση διάμετρος και σ_g η γεωμετρική τυπική απόκλιση. Με βάση την παραπάνω κατανομή, θεωρώντας τα σωματίδια σφαιρικά και με την ίδια πυκνότητα μπορούμε να υπολογίσουμε τις λογαριθμικές κανονικές κατανομές επιφάνειας και όγκου, οι οποίες δίδονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$n_{s}(logd_{p}) = \frac{dS}{dlogd_{p}} = \frac{\pi d_{p}^{2}N}{(2\pi)^{1/2}log\sigma_{g}} \exp\left(-\frac{\left(log\,d_{p}-log\,d_{g}\right)^{2}}{2log^{2}\sigma_{g}}\right)$$
(2-5)
$$n_{V}(logd_{p}) = \frac{dV}{dlogd_{p}} = \frac{\pi d_{p}^{2}N}{6(2\pi)^{1/2}log\sigma_{g}} \exp\left(-\frac{\left(log\,d_{p}-log\,d_{g}\right)^{2}}{2log^{2}\sigma_{g}}\right)$$
(2-6)

Η γεωμετρική μέση διάμετρος επιφάνειας και η γεωμετρική μέση διάμετρος όγκου συνδέονται με τη γεωμετρική μέση διάμετρο με τις σχέσεις:

$$\log d_{gs} = \log d_g + 2\log^2 \sigma_g \tag{2-7}$$

$$\log d_{gV} = \log d_g + 3\log^2 \sigma_g \tag{2-8}$$

Η κανονική λογαριθμική κατανομή μάζας μπορεί να υπολογιστεί από την κανονική λογαριθμική κατανομή όγκου:

$$n_m (logd_p) = \frac{dm}{dlogd_p} = \rho \frac{dV}{dlogd_p}$$
(2-9)

όπου η γεωμετρική μέση διάμετρος όγκου ταυτίζεται με τη γεωμετρική μέση διάμετρο μάζας.

Στο σχήμα 2-3 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές κατανομές αριθμού, επιφάνειες και όγκου αιωρούμενων σωματιδίων σε αστική περιοχή. Παρατηρούμε ότι όσον αφορά την κατανομή αριθμού, το μέγιστο βρίσκεται στην περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά πιθανότατα προέρχονται από ανθρωπογενείς εκπομπές. Παρά το μεγάλο αριθμό τους σε σχέση με τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους, δεν συνεισφέρουν σημαντικά στη συνολική επιφάνεια, με αποτέλεσμα το μέγιστο της κατανομής επιφανείας να βρίσκεται σε μεγαλύτερη διάμετρο. Ακόμα μικρότερη είναι η συνεισφορά των υπέρλεπτων σωματιδίων στο συνολικό όγκο (επομένως και στη συνολική μάζα) και οι αντίστοιχες κατανομή καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 nm. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συνεισφορά των σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm στο συνολικό όγκο, παρά τη μικρή συγκέντρωση αριθμού που παρουσιάζουν.



Σχήμα 2-3: Κατανομές τυπικών αιωρουμένων σωματιδίων σε αστικές περιοχές, (α) κατανομή αριθμού, (β) κατανομή επιφάνειας, (γ) κατανομή όγκου. Η κατανομή μάζας έχει την ίδια μορφή με την κατανομή όγκου. (Πηγή Seinfeld και Pandis, 2006).

2.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος, το σχήμα, τη χημική σύσταση αλλά και από το χρόνο έκθεσης των ανθρώπων σε αυτά (Burnett et al., 1997). Οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν ερεθισμό των ματιών και αλλεργίες, αλλά εστιάζονται κυρίως σε επιδράσεις στο αναπνευστικό σύστημα και την καρδιά. Οι επιπτώσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα αύξηση της νοσηρότητας, που εκφράζεται με αυξημένο αριθμό εισαγωγών σε νοσοκομεία (Lipmann et al., 2000; Sammet et al., 2000a,b)

αλλά και αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας σε συγκεκριμένες ομάδες του πληθυσμού (Anderson, 2009; Katsouyanni, 2001; Mar et al., 2000; Neuberger et al., 2007; Ostro et al., 2000). Οι βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα ξεκινούν από απλό ερεθισμό και βήχα, και μπορούν να καταλήξουν σε χρόνιες βλάβες (χρόνιες αποφρακτικές νόσοι του αναπνευστικού συστήματος, επιδείνωση ασθματικών καταστάσεων, εξασθένηση του ανοσοποιητικού συστήματος των πνευμόνων και κατά συνέπεια αυξημένη ευαισθησία σε αναπνευστικές μολύνσεις) και σε ορισμένες περιπτώσεις καρκίνο των πνευμόνων (Pope, 2002). Οι επιπτώσεις στην καρδιά σχετίζονται με χρόνιες καρδιαγγειακές παθήσεις, καρδιακές αρρυθμίες και ισχαιμικά καρδιακά επεισόδια (Barnett, 2006; Chan, 2006). Οι επιδράσεις στην καρδιά θεωρούνται σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες το ίδιο ή και περισσότερο σοβαρές με τις επιδράσεις στο αναπνευστικό σύστημα (US EPA, 2004).

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν διαφορετική επίδραση στην υγεία ανάλογα με το μέγεθος τους. Έτσι, όσον αφορά τα λεπτά σωματίδια, πρόσφατες επιδημιολογικές μελέτες επιβεβαιώνουν τη συσχέτιση της βραχείας και μακράς έκθεσης σε λεπτά σωματίδια με αυξημένη θνησιμότητα και νοσηρότητα (κυρίως αναπνευστικές ή καρδιαγγειακές παθήσεις), (Borja-Aburto et al., 1998; Osunsanya et al., 2001; Samet et al., 2000c; Schwartz και Neas, 2000). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται από μελέτες που δείχνουν συσχέτιση των υπέρλεπτων σωματιδίων ή συστατικών των λεπτών σωματιδίων (π.χ. θειικά) ή των πηγών που εκπέμπουν κυρίως λεπτά σωματίδια (μηχανές αυτοκινήτων, πηγές καύσης με χρήση πετρελαίου ή κάρβουνου κλπ) με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (Laden, 2000).

Τα χονδρά σωματίδια κάτω από καθορισμένες συνθήκες και σε ειδικές περιπτώσεις σχετίζονται με αυξημένη νοσηρότητα (αναπνευστικά προβλήματα) και σε μικρότερο βαθμό με αυξημένη θνησιμότητα (Gauvin et al., 1999). Ορισμένα από τα συστατικά που περιέχονται στα χονδρά σωματίδια επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Μελέτες που έχουν γίνει σε διάφορες πόλεις δεν καταλήγουν στα ίδια συμπεράσματα (US EPA, 2004). Παρόλο που οι διαφορές αυτές δεν έχουν γίνει ακόμα πλήρως κατανοητές διαπιστώθηκε ότι οι σημαντικότερες επιδράσεις στην υγεία παρατηρήθηκαν σε περιοχές με ξηρό κλίμα λόγω των υψηλότερων επιπέδων οργανικών σωματιδίων από βιογενείς διεργασίες (ενδοτοξίνες, fungi κλπ) κατά τη διάρκεια των θερμών

μηνών. Τα σωματίδια που προερχόνται από γήινα θραύσματα δεν προκαλούν αξιοσημείωτα προβλήματα στην υγεία, εκτός αν έχουν επιμολυνθεί με μέταλλα, εκπεμπόμενα αρχικά ως λεπτά σωματίδια, αλλά εναποτιθέμενα για πολλά χρόνια στο έδαφος γύρω από ορυχεία και εγκαταστάσεις εξόρυξης.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι οι επιδράσεις των αιωρούμενων σωματιδίων σχετίζονται και με την ταυτόχρονη παρουσία άλλων ρύπων στην ατμόσφαιρα, όπως O₃, NO₂, SO₂, και CO (Delfino et al., 1998; Moon, 2001).

2.3.1 Έκθεση σε σωματίδια και επιπτώσεις στην υγεία σε εσωτερικούς χώρους

Οι σημαντικότερες πηγές έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια σε εσωτερικούς χώρους είναι το μαγείρεμα και ειδικότερα το τηγάνισμα, η χρήση συσκευών θέρμανσης (σόμπες, τζάκια) και ο καπνός του τσιγάρου (Gundel και Sextro, 2005). Οι επιδράσεις των σωματιδίων αυτών στην υγεία εντοπίζονται σε προβλήματα του καρδιαναπνευστικού συστήματος, ενώ ειδικότερα ο καπνός του τσιγάρου μπορεί να προκαλέσει επιπλέον ερεθισμό στα μάτια ή στη μύτη (Maroni et al., 1985). Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι στα σωματίδια που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος ή της καύσης κεριών περιέχονται ενώσεις επικίνδυνες για την υγεία. Οι Lee και Wang (2006) υπολόγισαν υψηλές συγκεντρώσεις φορμαλδεΰδης και ακεταλδεΰδης σε σωματίδια από εκπομπές κεριών, ενώ οι Chang et al. (2007) βρήκαν αυξημένες συγκεντρώσεις Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων (ΠΑΥ) σε σωματίδια από αρωματικά ξυλάκια. Οι See και Balasubramanian (2006) αναφέρουν υψηλή έκθεση σε υπέρλεπτα σωματίδια κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος. Οι Liao et al. (2006) μελέτησαν την έκθεση σε σωματιδιακή ύλη λόγω καθημερινών δραστηριοτήτων (καθάρισμα, καύση κεριών, μαγείρεμα, κλπ) και υπολόγισαν υψηλές τιμές εναπόθεσης σωματιδίων σε διάφορα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος. Οι To et al. (2007) διαπίστωσαν ότι στους ατμούς από το μαγείρεμα περιέχονται πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, (ΠΑΥ), λιπαρά οξέα, και αρωματικές αμίνες, που μπορούν να προσροφηθούν στα μικρά σωματίδια που εκπέμπονται και να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό. Ειδικά οι ΠΑΥ παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, γιατί ορισμένοι επηρεάζουν το καρδιαναπνευστικό σύστημα και μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και καρκίνο (Maroni et al., 1995). Πρόσφατες μελέτες (Kagi et al., 2007; Lee et al., 2007) έδειξαν ότι οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται σε σπίτια ή γραφεία εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες υπέρλεπτων σωματιδίων.

2.4. ΔΥΝΑΜΙΚΉ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

Μετά την εκπομπή τους, το σχηματισμό τους ή τη διείσδυση τους σε κάποιο εσωτερικό χώρο, τα αιωρούμενα σωματίδια υπόκεινται σε φυσικές και χημικές διεργασίες, οι οποίες μπορούν να μεταβάλλουν τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους, αλλά και τη συγκέντρωση τους στον αέρα. Το χρονικό διάστημα που τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα εξαρτάται από τη φύση τους και από τις διαδικασίες στις οποίες λαμβάνουν μέρος. Για παράδειγμα, τα προϊόντα της καύσης αποτελούν ένα δυναμικό μείγμα σωματιδίων και αερίων υψηλών θερμοκρασιών που υφίσταται πολύ γρήγορες μεταβολές. Έτσι, η πειραματική μέτρηση των χαρακτηριστικών τους και του αριθμού τους θα δώσει τελείως διαφορετικά αποτελέσματα αν γίνει αμέσως μετά την εκπομπή ή μετά τη διέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος. Σωματίδια που επαναιωρούνται σε εσωτερικό περιβάλλον παρουσιάζουν ελάχιστες μεταβολές στα φυσικά τους χαρακτηριστικά και συνήθως απομακρύνονται γρήγορα λόγω βαρυτικής καθίζησης.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι σημαντικότερες από τις διεργασίες που επηρεάζουν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους.

2.4.1 Διείσδυση στο εσωτερικό περιβάλλον

Ποσότητες αέρα εισέρχονται από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον μέσω μικρών σχισμών ή κενών που υπάρχουν στο φάκελο του κτιρίου. Τα σωματίδια που κινούνται μαζί με αυτές τις αέριες μάζες δεν εισέρχονται στο σύνολο τους στο εσωτερικό περιβάλλον. Κάποια από αυτά εναποτίθενται στις επιφάνειες των σχισμών ή των κενών. Μέτρο της ικανότητας των

σωματιδίων να εισέλθουν στον εσωτερικό χώρο αποτελεί ο συντελεστής διείσδυσης Ρ. Η παράμετρος Ρ είναι αδιάστατη και δηλώνει το κλάσμα των σωματιδίων που εισέρχονται στο εσωτερικό περιβάλλον (δεν απομακρύνονται από τον αέρα καθώς αυτός εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον) και σχετίζεται με τη ροή του αέρα που εισέρχεται (Wallace 1996). Στην περίπτωση που σε κάποιο χώρο υπάρχουν ανοιχτά παράθυρα ή πόρτες, ο αέρας εισέρχεται κυρίως μέσω αυτών στο εσωτερικό περιβάλλον και η διαδικασία της διείσδυσης από σχισμές ή οπές καθίσταται μη σημαντική. Στις περιπτώσεις αυτές ο συντελεστής διείσδυσης ισούται με τη μονάδα. Η περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές ρυθμού ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον.

Σημαντικές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία είκοσι χρόνια με στόχο να βελτιώσουν τις γνώσεις που έχουμε για τη διείσδυση των σωματιδίων στο εσωτερικό των κτιρίων και κυρίως να καθορίσουν κατά πόσο ο συντελεστής διείσδυσης εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων. Στα πλαίσια αυτών των ερευνών πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε κτίρια (Ozkaynak et al., 1996; Thatcher et al., 2003; Thatcher et al., 1995; Tung et al., 1999), πειράματα στο εργαστήριο (Liu και Nazaroff, 2003; Mosley et al., 2001), χρήση μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή ιδανικών σχισμών (Jeng et al., 2003; Thornburg et al., 2001) και προσπάθειες προσδιορισμού της μεταβλητής P μέσω ανάλυσης του λόγου της εσωτερικής προς την εξωτερική συγκέντρωση (Long et al., 2001). Οι παραπάνω προσπάθειες έχουν καταφέρει να ρίζουν φως σε ορισμένες από τις ιδιότητες του συντελεστή διείσδυσης, αλλά δεν έχουν δώσει απάντηση σε όλα τα ερωτήματα που αφορούν τις ιδιότητες του συντελεστή αυτού. Οι λόγοι είναι ότι τα πειράματα σε κτίρια οδηγούν σε πολύπλοκα αποτελέσματα που είναι δύσκολο να ερμηνευτούν, ενώ τα πειράματα σε εργαστήρια και η μοντελοποίηση εξετάζουν ιδανικές περιπτώσεις που συναντάμε δύσκολα στην πραγματικότητα.

Οι πρώτες μελέτες των Thatcher et al. (1995) και Ozkaynak et al. (1996) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο συντελεστής διείσδυσης έχει τιμή κοντά στη μονάδα για όλα τα μεγέθη σωματιδίων και επομένως μπορούσε να θεωρηθεί ως μη σημαντική παράμετρος. Στις μελέτες αυτές δεν είχε ληφθεί υπόψη η ιδιαιτερότητα των χαρακτηριστικών των κτιρίων (Morawska και Salthammer, 2003) και η άμεση συσχέτιση του συντελεστή διείσδυσης με το συντελεστή

απομάκρυνσης (Bennet και Koutrakis 2006; Thornburg et al., 2001). Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν αργότερα έδειξαν ότι ο συντελεστής διείσδυσης εξαρτάται από το είδος των σχισμών και των οπών του κτιρίου, τη ροή του αέρα αλλά και το μέγεθος των σωματιδίων (Jeng et al., 2003). Παρουσιάζονται στη συνέχεια τα σημαντικότερα αποτελέσματα των ερευνών σχετικά με τη συμπεριφορά των σωματιδίων κατά τη διείσδυση τους από το εξωτερικό περιβάλλον.

2.4.1.1 Σχισμές σε κτίρια.

Θεωρούμε τρεις διαφορετικούς ιδανικούς σχηματισμούς για τις σχισμές που μπορούν να απαντηθούν σε διάφορα κτίρια. Οι τρεις αυτοί σχηματισμοί παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα και είναι: α) Απευθείας σχισμή (straight through crack) β) σχήματος L σχισμή (L-shaped crack) γ) διπλής καμπής σχισμή (double-bend crack) (Liu και Nazaroff 2001).



Σχήμα 2-4: Ιδανικές μορφές σχισμών που συναντώνται σε κτίρια.

Η μικρότερη διάσταση μίας σχισμής ονομάζεται ύψος της σχισμής και συμβολίζεται με "d". Η διάσταση της σχισμής που είναι παράλληλη με τη ροή του αέρα ονομάζεται μήκος της σχισμής και συμβολίζεται με το γράμμα "z". Θεωρούμε ότι η γεωμετρία της σχισμής είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του διαδρόμου που ρέει ο αέρας και ότι η επιφάνεια της σχισμής είναι απολύτως λεία. Θεωρούμε επίσης ότι η ροή του αέρα διατηρείται σταθερή σε όλο το μήκος της σχισμής. Η

τρίτη διάσταση της σχισμής (πλάτος, "w") θεωρείται πολύ μεγαλύτερη από το ύψος και έτσι η ροή του αέρα μέσα από τη σχισμή μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο διαστάσεις.

2.4.1.2 Χαρακτηριστικά της ροής του αέρα μέσα από σχισμές.

Η ροή του αέρα μέσα από μία σχισμή οφείλεται στη μικρή διαφορά πίεσης που υπάρχει στα δύο άκρα της σχισμής και που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από 10 Pa. Η ροή του αέρα μπορεί να ενισχυθεί από την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, τη διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος, ή με τη χρήση μηχανικών μέσων (π.χ ανεμιστήρες). Η σχέση ανάμεσα στη ροή του αέρα και στη διαφορά πίεσης περιγράφεται από την ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση (Baker et al, 1987):

$$\Delta P = \frac{12\mu z}{wd^3}Q + \frac{\rho C}{2d^2 w^2}Q^2 \qquad (2.10)$$

όπου μ είναι το ιξώδες του αέρα και ρ η πυκνότητα του αέρα. Η παράμετρος C δίδεται από τη σχέση $C = 1,5 + n_b$, όπου n_b είναι ο αριθμός των δεξιόστροφων καμπών της σχισμής. Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση όταν η σχισμή είναι μεγάλη σε μήκος και παράλληλα αρκετά στενή, η ιξώδης αντίσταση του ρευστού κυριαρχεί και η ροή είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης (ΔP). Για σχισμές με μεγάλο ύψος, αλλά μικρό μήκος η αδράνεια που σχετίζεται με την πυκνότητα του αέρα κυριαρχεί και η ροή είναι ανάλογη του $\Delta P^{0.5}$. Η ταχύτητα του αέρα μέσα από τις σχισμές βρέθηκε ότι εξαρτάται από το ύψος της σχισμής (d), το μήκος της σχισμής (z) και τη διαφορά πίεσης, αλλά είναι ανεξάρτητη από τη διαμόρφωση της σχισμής. Για τυπικές σχισμές που συναντώνται στην πλειοψηφία των κτιρίων, η ροή του αέρα είναι γραμμική (Jeng et al., 2003; Liu και Nazaroff, 2001).

2.4.1.3 Χαρακτηριστικές διαστάσεις των σχισμών

Οι διαστάσεις των σχισμών που εμφανίζονται σε διάφορα κτίρια δεν έχουν ακόμη πλήρως αναλυθεί και κατηγοριοποιηθεί. Μελέτες που αφορούν τη διείσδυση του αέρα από ρωγμές που εμφανίζονται στα πλαίσια των παραθύρων αναφέρουν ότι το ύψος των σχισμών δεν ξεπερνάει στις περιπτώσεις αυτές τα 2,5 mm (Thomas και Dick, 1953). Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι το ύψος των σχισμών σε κτίρια κυμαίνεται μεταξύ 0,5-7,5 mm (Hopkins και Hansford, 1974).

Η προσπάθεια μοντελοποίησης της διείσδυσης ρύπων από το εξωτερικό περιβάλλον, περιορίζεται από την έλλειψη επαρκών στοιχειών για την κατανομή των μεγεθών των σχισμών στα διάφορα κτίρια. Στις περισσότερες περιπτώσεις προσδιορίζεται μόνο η «ενεργός επιφάνεια διαρροών», η οποία αναφέρεται στο αθροιστικό αποτέλεσμα που έχουν όλες οι σχισμές και ρωγμές στη διείσδυση του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον, χωρίς να καθορίζονται πλήρως οι διαστάσεις των σχισμών. Η διείσδυση όμως των ρύπων εξαρτάται σημαντικά από μία ελάχιστη διάσταση σχισμής, η οποία καθορίζει αν ο συγκεκριμένος ρύπος μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό περιβάλλον και η τιμή της οποίας εξαρτάται από το είδος του ρύπου. Επομένως σε όλες τις προσπάθειες μοντελοποίησης γίνονται υποθέσεις και απλουστεύσεις που διαφοροποιούν το τελικό αποτέλεσμα από την πραγματική κατάσταση που επικρατεί στα κτίρια.

2.4.1.4 Διείσδυση σωματιδίων από τις σχισμές

Η διείσδυση των σωματιδίων από τις σχισμές εξετάζεται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση τριών βασικών μηχανισμών εναπόθεσης στις επιφάνειες των σχισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η βαρυτική καθίζηση, η πρόσκρουση στις επιφάνειες και η διάχυση Brown. Τα σωματίδια θεωρούνται σφαιρικά, ίδια πυκνότητας και με διαστάσεις μεταξύ 0,001-100 μm. Θεωρούμε επίσης ότι η ροή του αέρα μέσα από τη σχισμή είναι ομοιόμορφη και σταθερή και ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων στην είσοδο της σχισμής είναι ίση με τη συγκέντρωση στον αέρα που κινείται προς τη σχισμή. Η διείσδυση των σωματιδίων λόγω μόνο βαρυτικής καθίζησης προσδιορίζεται από τον αντίστοιχο συντελεστή διείσδυσης P_g , ο οποίος δίδεται από τη σχέση (Fucks 1964):

$$P_g = 1 - \frac{V_S z}{dU} \tag{2-11}$$

όπου V_S η ταχύτητα καθίζησης του σωματιδίου και U η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα μέσα στη σχισμή. Στην περίπτωση που $V_S z >> dU$ έχουμε ότι $P_g=0$ και δεν υπάρχει διείσδυση των σωματιδίων.

Τα μικρά σωματίδια διαχέονται στα τοιχώματα της σχισμής και προσκολλούνται σε αυτά λόγω δυνάμεων Van der Waals. Ο συντελεστής διείσδυσης (P_d), λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη διάχυση λόγω κίνησης Brown, μπορεί να δοθεί προσεγγιστικά από τη σχέση (De Marcus και Thomas, 1952):

$$P_d = 0.915 \exp(-1.885\phi) + 0.0592 \exp(-22.3\phi) + 0.026 \exp(-152\phi)$$
(2-12)

όπου $\phi = \frac{4Dz}{d^2U}$ και D ο συντελεστής διάχυσης. Η παραπάνω εξίσωση αναπτύχθηκε σε πιο απλοποιημένη μορφή από τους Lee και Gieseke (1980):

$$P_d = \exp(-1.967\phi)$$
 (2-13)

Οι παραπάνω συντελεστές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα για υπολογισμό της διείσδυσης από σχισμές καθορισμένων διαστάσεων από τους Liu και Nazaroff (2001) και Mosley et al,. (2001), αντίστοιχα.

Θεωρώντας ότι ο κάθε μηχανισμός δρα ανεξάρτητα από τον άλλο, ο συνολικός συντελεστής διείσδυσης δίδεται από τη σχέση:

$$P = P_g \times P_d \tag{2-14}$$

Η συνεισφορά της πρόσκρουσης στον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης βρέθηκε ότι είναι αμελητέα, καθώς κάθε σωματίδιο που έχει αρκετή αδράνεια για να προσκολληθεί σε μία επιφάνεια λόγω κρούσης εμφανίζει την ίδια πιθανότητα να παραμείνει μέσα στη σχισμή λόγω βαρυτικής καθίζησης.

2.4.1.5 Αποτελέσματα μοντελοποίησης της διείσδυσης

Στο σχήμα 2-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μοντελοποίησης (Liu και Nazaroff, 2001) για τον συντελεστή διείσδυσης σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων. Η μοντελοποίηση έγινε θεωρώντας σχισμή με z=3 cm, για διαφορές πίεσης 4,7 και 10 Pa και για διάφορα ύψη σχισμών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα σωματίδια της περιοχής συσσώρευσης (διαμέτρου 0,1-1 μm) παρουσιάζουν τον υψηλότερο συντελεστή διείσδυσης. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα μεγαλύτερα και τα μικρότερα σωματίδια απομακρύνονται λόγω διάχυσης και καθίζησης αντίστοιχα στα τοιχώματα των σχισμών. Σύμφωνα με το μοντέλο, ο συντελεστής διείσδυσης έχει τιμή σχεδόν ίση με τη μονάδα για την περιοχή συσσώρευσης και για ύψος σχισμής $d \ge 0,25$ mm.

Για σχισμή ύψους d = 1 mm η διείσδυση των σωματιδίων με διαμέτρους 0,01-7 mm στο εσωτερικό περιβάλλον φτάνει το 90%. Όταν το ύψος είναι μικρότερο από 1 mm, ο συντελεστής διείσδυσης ποικίλλει σημαντικά Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι για ύψος σχισμής 0,1 mm περίπου τα μισά σωματίδια διαμέτρου 0,3 μm περνάνε τελικά μέσα από τη σχισμή. Η διείσδυση γίνεται αμελητέα όταν το ύψος της σχισμής είναι μικρότερο από 0,05 μm.

Η παραπάνω συσχέτιση του συντελεστή διείσδυσης με το είδος των σχισμών και το μέγεθος των σωματιδίων, επιβεβαιώθηκε πειραματικά με τις εργασίες των Mosley et al. (2001) και Jeng et al. (2003), οι οποίοι διεξήγαγαν πειράματα σε θαλάμους υπό πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι σε πραγματικές συνθήκες μετρήσεων σε κτίρια είναι πολύ δύσκολος ο πειραματικός προσδιορισμός όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν το συντελεστή διείσδυσης και η χρήση των παραπάνω μοντέλων οδηγεί σε προσεγγίσεις οι οποίες πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή.



Σχήμα 2-5: Συντελεστής διείσδυσης σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων, του ύψους της σχισμής και της διαφοράς πίεσης για σχισμή μήκους z=3 cm. Πηγή: Liu και Nazaroff, (2001).

2.4.2 Εναπόθεση σε σεωτερικές επιφάνειες

Η εναπόθεση των σωματιδίων στις επιφάνειες καθορίζεται από δύο μηχανισμούς που σχετίζονται με το μέγεθος των σωματιδίων. Τα μικρά σωματίδια εναποτίθενται λόγω διάχυσης στις επιφάνειες, ενώ τα μεγάλα σωματίδια απομακρύνονται μέσω βαρυτικής καθίζησης. Ο συντελεστής διάχυσης λόγω κίνησης Brown μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση του Einstein (Friedlander, 1977):

$$D_i = \frac{kTC_c}{3d\pi\mu} \qquad (2-15)$$

όπου μ το ιξώδες του αέρα, Τ η θερμοκρασία του αέρα, k η σταθερά Boltzmann d η διάμετρος του σωματιδίου και C_c ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης (slip correction factor). Στην περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων ο συντελεστής αυτός έχει τιμή ίση με μονάδα.

Αντίστοιχα η ταχύτητα βαρυτικής καθίζησης υπολογίζεται με την εφαρμογή του νόμου του Stokes (Friedlander, 1977):

$$V_S = \frac{l}{l8} \frac{d^2 \rho g C_C}{\mu}$$
(2-16)

όπου ρ η πυκνότητα των σωματιδίων μ το ιξώδες του αέρα και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η χρήση μηχανικών μέσων ανάμιξης του αέρα (ανεμιστήρες) ή η ύπαρξη φυσικής τυρβώδους ροής μπορούν να αυξήσουν τη μετακίνηση των σωματιδίων προς την επιφάνεια και επομένως και την εναπόθεση (Hussein et al., 2009a,b; Lai και Nazaroff, 2000). Επιπλέον η εναπόθεση εξαρτάται από το είδος και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (Abadie et al., 2001; Afshari και Reinhold, 2008). Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα να εναποτεθούν σε αυτή τα σωματίδια. Επομένως η εναπόθεση των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη σε επιπλωμένους χώρους (Thatcher et al., 2002). Η εναπόθεση επηρεάζεται από τη βαθμίδα της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια και από τις ιδιότητες του λεπτού στρώματος ανάμιξης που είναι σε επαφή με την επιφάνεια. Με βάση όλα τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι ο υπολογισμός και η μοντελοποίηση της εναπόθεσης είναι μία δύσκολη διαδικασία, καθώς απαιτείται ο προσδιορισμός μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Για την περιγραφή της εναπόθεσης χρησιμοποιείται και η ταχύτητα εναπόθεσης V_d, η οποία περιγράφει ποσοτικά την εναπόθεση των σωματιδίων σε μία επιφάνεια. Η ταχύτητα εναπόθεσης ορίζεται από τη σχέση:

$$V_d = \frac{J}{C_{\infty}} \tag{2-17}$$

όπου J είναι η συνολική ροή των σωματιδίων στην επιφάνεια (μάζα ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου), κανονικοποιημένη με μία χαρακτηριστική συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων C_{∞} (μάζα ανά μονάδα όγκου). Η συγκέντρωση αυτή σε εσωτερικούς χώρους λαμβάνεται στις περισσότερες περιπτώσεις ίση με τη συγκέντρωση στο κέντρο του χώρου. Αυτή η κανονικοποιημένη ροή εκφράζεται σε μονάδες μήκους ανά μονάδα χρόνου και αυτός είναι ο λόγος που χαρακτηρίζεται ως ταχύτητα, παρόλο που δεν αντιπροσωπεύει ένα πραγματικό ρυθμό εναπόθεσης. Μία άλλη παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι ο συντελεστής απομάκρυνσης

(λ_d), που ορίζεται ως ο αριθμός σωματιδίων που εναποτίθενται στο σύνολο της επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε μονάδες αντίστροφου χρόνου (h⁻¹ ή s⁻¹). Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από τη γεωμετρία του υπό μελέτη εσωτερικού περιβάλλοντος.

Οι βασικές αρχές της θεωρίας της εναπόθεσης έχουν παρουσιαστεί από τον Hinds (1999). Η συγκέντρωση των σωματιδίων θεωρείται ότι είναι σταθερή και ομοιόμορφη στο κέντρο του υπό εξέταση χώρου. Αν στο χώρο επικρατεί κατάσταση ισορροπίας, η συγκέντρωση των σωματιδίων στο οριακό στρώμα κοντά στις επιφάνειες του χώρου μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$\nabla J = 0 \qquad (2-18)$$

όπου J είναι η ροή των σωματιδίων εξαιτίας διαφόρων διεργασιών, και συγκεκριμένα της διασποράς (J_c), της διάχυσης (J_d), της θερμοφόρεσης (J_t) και εξωτερικών δυνάμεων (J_e), όπως βαρυτική καθίζηση ή ηλεκτροστατική έλξη. Οι παραπάνω συνιστώσες μπορούν να εκφραστούν από τις σχέσεις

$$J_{d} = (D + \varepsilon_{p})\nabla C \quad (2-19)$$
$$J_{t} = V_{t}C \quad (2-20)$$
$$J_{e} = V_{e}C \quad (2-21)$$

όπου D είναι ο συντελεστής διάχυσης λόγω κίνησης Brown του σωματιδίου, $ε_p$ είναι ο συντελεστής διάχυσης λόγω αναταράξεων (eddy diffusivity) του σωματιδίου, V_e η ταχύτητα λόγω της επίδρασης εξωτερικών δυνάμεων (π.χ βαρυτική καθίζηση) και V_t η ταχύτητα λόγω θερμοφόρεσης.

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει η εξίσωση:

$$\nabla \left(\left(D + \varepsilon_p \right) \nabla C \right) + V_t C + V_e C \tag{2-22}$$

Θεωρώντας ότι η βαρύτητα είναι η μόνη εξωτερική δύναμη, η εξίσωση απλοποιείται και παίρνει τη μορφή:

$$\nabla \left(\left(D + \varepsilon_p \right) \nabla C - C V_s \cos(\theta) \right) = 0 \qquad (2-23)$$

όπου V_s είναι βαρυτική ταχύτητα καθίζησης, θ είναι η γωνία ανάμεσα στο διάνυσμα της επιφάνειας και στην κατεύθυνση της δύναμης της βαρύτητας, η οποία μπορεί να λάβει τιμές 0, $\pi/2$ και π για την οροφή, τους κάθετους τοίχους και το πάτωμα του χώρου αντίστοιχα. Η διάχυση λόγω αναταράξεων (eddy diffusivity) εξαρτάται από την ισχύ των αναταράξεων του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να επιλυθεί αν δεν είναι γνωστές λεπτομέρειες για τη μορφή της ροής στο εσωτερικό του χώρου. Για την επίλυση της σχέσης 2-23 έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις, όμως η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σε εφαρμογές σε εσωτερικούς χώρους είναι αυτή των Lai και Nazaroff (2000). Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται μόνο μία παράμετρος, η ταχύτητα τριβής u^{*} (friction velocity) για να περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους εναπόθεσης.

Η χρήση της ταχύτητας u^{*} είναι πολύ συνηθισμένη στην εναπόθεση σωματιδίων σε επιφάνειες σωλήνων ή αγωγών (Guha, 1997; Wood 1981). Αποτελεί ένα μέτρο της διατμητικής τάσης (shearing stress) του τοίχου που ασκείται στις επιφάνειες από το κινούμενο ρευστό και μπορεί να προσδιοριστεί από τον υπολογισμό της βαθμίδας της ταχύτητας στον τοίχο. Ωστόσο για να υπολογιστεί η ταχύτητα τριβής είναι απαραίτητη η μέτρηση της ταχύτητας ροής κοντά στην επιφάνεια (Lai και Nazaroff 2000). Λόγω της μικρής ταχύτητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους δεν είναι τόσο εύκολο να μετρηθεί φάσμα της ταχύτητας κοντά σε μία επιφάνεια. Οι κλασσικοί ανιχνευτές θερμού σύρματος δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς για ταχύτητες μικρότερες από 5-10 cm/s. Μειώνοντας την εφαρμοζόμενη τάση κατά μήκος του σύρματος οι Zhang et al. (1995) βελτίωσαν την ευαισθησία του ανιχνευτή. Η ταχυμετρία Doppler με χρήση laser, με την οποία μπορούν να μετρηθούν πολύ μικρές ταχύτητες με μεγάλη ακρίβεια και πολύ καλή χωρική και θερμοκρασιακή ευκρίνεια, εμφανίζεται ως μία καλή μέθοδος για την μέτρηση της ταχύτητας τριβής σε εσωτερικούς χώρους.

Σύμφωνα με το μοντέλο των Lai και Nazaroff (2000), οι συντελεστές της ταχύτητας εναπόθεσης για κάθετη επιφάνεια, επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα πάνω και επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα κάτω είναι:

$$V_{dw} = \frac{u^*}{I} \qquad (2-24)$$

$$V_{du} = \frac{V_s}{I - exp\left(-\frac{V_s I}{u^*}\right)} \qquad (2-25)$$

$$V_{dd} = \frac{V_s}{exp\left(-\frac{V_s I}{u^*}\right) - I} \qquad (2-26)$$

όπου V_s η βαρυτική ταχύτητα καθίζησης και Ι μία παράμετρος που εξαρτάται από το συντελεστή ιξώδους του αέρα, το συντελεστή διάχυσης, και τη διάμετρο του σωματιδίου. Παρατηρούμε από τη παραπάνω σχέση ότι δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της θερμοφόρεσης. Το φαινόμενο αυτό είναι σημαντικό για σωματίδια με μεγάλη ορμή (σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 5 μm) (Hussein et al., 2009a). Οι Zhao και Wu (2006a,b) βασιζόμενοι στο μοντέλο των Lai και Nazaroff πρότειναν ένα μοντέλο που περιλαμβάνει και ταχύτητα εναπόθεσης λόγω θερμοφόρεσης. Στο σχήμα 2-6 παρουσιάζεται η θεωρητικά υπολογισμένη ταχύτητα εναπόθεσης (Lai και Nazaroff, 2000) σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων.

Παρατηρούμε ότι τα σωματίδια που βρίσκονται στην περιοχή συσσώρευσης, δηλαδή έχουν διάμετρο μεταξύ 0,1 και 1 μm δεν επηρεάζονται έντονα από τους παραπάνω μηχανισμούς απομάκρυνσης. Για το λόγο αυτό είναι και τα πιο επικίνδυνα σωματίδια για την ανθρώπινη υγεία, καθώς εμφανίζουν μεγάλο χρόνο παραμονής στον αέρα (συνήθως μερικές ώρες).



Σχήμα 2-6: Ταχύτητα εναπόθεσης με βάση το μοντέλο των Lai και Nazaroff (2000). Πηγή Hussein et al., 2008.

2.4.2.1 Πειραματικός υπολογισμός των $λ_d$ και V_d .

Η συγκέντρωση ενός ρύπου που εκπέμπεται σε εσωτερικό περιβάλλον όπου ο αέρας είναι καλά αναμεμειγμένος μειώνεται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου μετά το τέλος της εκπομπής σύμφωνα με τη σχέση:

$$C(t) = C_o e^{-(\lambda_d + \lambda)t}$$
(2-27)

όπου C₀ είναι η αρχική συγκέντρωση λ ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον και λ_d ο συντελεστής απομάκρυνσης σωματιδίων (Hussein et al., 2006; Long et al., 2001; Thatcher και Layton, 1995;). Ο συντελεστής αυτός περιγράφει όλες τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του χώρου που μελετάται και οδηγούν στην απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων. Στις διαδικασίες αυτές περιλαμβάνονται οι απώλειες λόγω διάχυσης, βαρυτικής εναπόθεσης καθώς και διαδικασίες απομάκρυνσης που οφείλονται σε εξωτερικά πεδία δυνάμεων (π.χ ηλεκτροστατικές δυνάμεις).

Στον συντελεστή αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η διαδικασία της συσσωμάτωσης η οποία οδηγεί σε αλλαγή του αριθμού των σωματιδίων, αλλά δεν επηρεάζει τη συνολική τους μάζα. Επίσης δεν περιλαμβάνονται οι διαδικασίες της εξάτμισης και συμπύκνωσης των σωματιδίων.

Ο υπολογισμός του συντελεστή απομάκρυνσης είναι σχετικά απλός, καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί με καταγραφή της μείωσης της συγκέντρωσης των σωματιδίων με την πάροδο του χρόνου. Στην περίπτωση αυτή δεν παίζει ιδιαίτερη σημασία αν ο πληθυσμός των σωματιδίων αποτελείται από σωματίδια ενός μόνο ή περισσοτέρων μεγεθών. Από την τιμή του συντελεστή απομάκρυνσης μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα εναπόθεσης στις διάφορες επιφάνειες χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\lambda_d = \frac{V_{dw}A_w + V_{du}A_u + V_{dd}A_d}{V}$$
(2-28)

όπου A_w , A_u , και A_d είναι η συνολική επιφάνεια των κάθετων τοίχων, των επιφανειών με διάνυσμα επιφάνειας με φορά προς τα πάνω και των επιφανειών με διάνυσμα επιφάνειας με φορά προς τα κάτω αντίστοιχα. Οι ταχύτητες V_{dw} , V_{du} , και V_{dd} αντιστοιχούν στις ταχύτητες εναπόθεσης των κάθετων τοίχων, των επιφανειών με διάνυσμα επιφάνειας με φορά προς τα πάνω και των επιφανειών με διάνυσμα επιφάνειας με φορά προς τα κάτω.

Καθώς η τιμή του λ_d εξαρτάται από τη γεωμετρία του υπό μελέτη χώρου και την αναλογία της επιφάνειας του χώρου προς τον όγκο του χώρου είναι δύσκολο να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από εφαρμογές σε διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους. Απαιτείται ένας μετασχηματισμός των αποτελεσμάτων ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και να υπολογιστούν οι ταχύτητες εναπόθεσης στις επιφάνειες με διαφορετικό προσανατολισμό. Ωστόσο σε πολλές μελέτες δεν μετρήθηκε ξεχωριστά η ταχύτητα εναπόθεσης σε κάθε διαφορετικού προσανατολισμού επιφάνεια. Το πρόβλημα μπορεί εν μέρει να λυθεί εισάγοντας μία μέση ταχύτητα εναπόθεσης κανονικοποιημένη ως προς τη συνολική επιφάνεια, V_d, η οποία συνδυάζεται με το συντελεστή απομάκρυνσης λ_d μέσω της σχέσης:

$$\overline{V_d} = \lambda_d \, \frac{V}{\sum A} \tag{2-29}$$

όπου $\sum A$ είναι η συνολική επιφάνεια που μπορεί να υπάρξει εναπόθεση αιωρούμενων σωματιδίων. Πρέπει να τονιστεί η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στις ταχύτητες V_d και $\overline{V_d}$. Για πολύ μικρά σωματίδια (<0,01 μm), και οι δύο ταχύτητες εναπόθεσης έχουν παρόμοιες τιμές. Για μεγάλα σωματίδια η $\overline{V_d}$ μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές εξαιτίας της επικράτησης της βαρυτικής καθίζησης σε σχέση με την διάχυση και τους άλλους μηχανισμούς απομάκρυνσης.

Σημαντικός αριθμός εργασιών που συνδυάζουν πειραματικές μετρήσεις με μοντελοποίηση έχει πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή απομάκρυνσης και της ταχύτητας εναπόθεσης. Επιλεγμένα αποτελέσματα σε σύγκριση με τις προβλέψεις του μοντέλου των Lai και Nazaroff (2000) παρουσιάζονται στο σχήμα 2-7. Σε όλες τις περιπτώσεις, η καμπύλη που περιγράφει το συντελεστή απομάκρυνσης έχει το σχήμα ενός U (ή V). Η μορφή αυτή είναι αναμενόμενη καθώς για πολύ μικρά σωματίδια (<0,1 μm), η διάχυση Brown και η τυρβώδης διάχυση κυριαρχούν, ενώ για μεγάλα σωματίδια (>1 μm) κυριαρχεί η βαρυτική καθίζηση.

Οι διάφορες μελέτες πειραματικού υπολογισμού του συντελεστή απομάκρυνσης κατορθώνουν να δώσουν καμπύλες τιμών που ακολουθούν τη μορφή που προβλέπεται από τη θεωρία, αλλά παρουσιάζουν διαφορές ως προς τιμές που σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνούν τις δύο τάξεις μεγέθους (Morawska και Salthammer 2003). Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται:

Στους διαφορετικούς μηχανισμούς ανάμιξης του αέρα που υπήρχαν ή εφαρμόστηκαν στους διάφορους χώρους μέτρησης. Σε κάποιες περιπτώσεις η ανάμιξη γινόταν με φυσικό τρόπο, αλλά σε άλλες περιπτώσεις η ανάμιξη επιβάλλονταν με τη χρήση κάποιου μηχανικού μέσου (π.χ. ανεμιστήρας).

Σε διαφορετικές ταχύτητες του αέρα στους εσωτερικούς χώρους.

Σε διαφορές στην γεωμετρία, τη συνολική επιφάνεια, το συνολικό όγκο και την επίπλωση.



Σχήμα 2-7: Σύγκριση πειραματικά υπολογισμένων τιμών του συντελεστή απομάκρυνσης (λ_d) με το μοντέλο των Lai και Nazaroff (2000). Πηγή Hussein et al., 2008.

2.4.3 Επαναιώρηση

Σωματίδια που έχουν εναποτεθεί σε επιφάνεια μπορούν να ξαναβρεθούν στον αέρα μέσω της διαδικασία της επαναιώρησης. Αυτή είναι μία διαδικασία που ευνοεί την παρουσία αλλεργιογόνων και ημιπτητικών ειδών στον αέρα των εσωτερικών χώρων (Wallace, 2004). Για να επαναιωρηθεί ένα σωματίδιο, πρέπει να του ασκηθεί μία δύναμη που θα του επιτρέψει να αποκολληθεί από την επιφάνεια. Σύμφωνα με τη θεωρία των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων (Willeke και Baron, 2001), παρόλο που οι περισσότερες δυνάμεις προσκόλλησης των σωματιδίων μεταβάλλονται γραμμικά με τη διάμετρο του σωματιδίου, οι δυνάμεις αποκόλλησης είναι ανάλογες με τη διάμετρο σε δύναμη μεγαλύτερη της μονάδας. Για παράδειγμα η αποκόλληση μέσω ρεύματος αέρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του σωματιδίου. Οι διαφορές ανάμεσα στις δυνάμεις προσκόλλησης και αποκόλλησης ευνοούν την ευκολότερη αποκόλληση των μεγάλων σωματιδίων από μία επιφάνεια (Morawska και Salthammer, 2003).

Συνηθισμένες δραστηριότητες που λαμβάνουν ώρα σε κάποιο εσωτερικό περιβάλλον, όπως το περπάτημα ή το καθάρισμα του σπιτιού, μπορούν να προκαλέσουν επαναιώρηση σωματιδίων. Τέτοιες δραστηριότητες μπορεί να οδηγήσουν και στη δημιουργία νέων σωματιδίων μέσω της φθοράς της επίστρωσης που υπάρχει στους τοίχους. Υπάρχουν πολύ λίγες μελέτες που έχουν ερευνήσει διεξοδικά το φαινόμενο της επαναιώρησης χωρίς όμως να έχει γίνει πλήρως κατανοητός ο μηχανισμός λειτουργίας της (Kildeso et al., 1999; Lazaridis και Drosinos, 1998). Επιπλέον έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες υπολογισμού ρυθμών επαναιώρησης μέσω πειραματικών μετρήσεων. Οι Thatcher και Layton (1995) παρατήρησαν αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης σωματιδίων μεγαλύτερων από 1 μm κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων σε ένα σπίτι. Οι Ferro et al. (2004) ποσοτικοποίησαν τους ρυθμούς εκπομπής μάζας των PM_{2,5} και των PM₅ σε σχέση με δραστηριότητες, όπως το δίπλωμα κουβερτών και ρούχων, στεγνό ξεσκόνισμα του σπιτιού, στρώσιμο του κρεβατιού, σκούπισμα με ηλεκτρική σκούπα και περπάτημα. Τέλος οι Kildeso et al. (1999) ανέπτυξαν μία πειραματική τεχνική για τη μέτρηση της πιθανής επαναιωρούμενης σκόνης από τα χαλιά.

2.4.4 Συσσωμάτωση

Όταν τα σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους τείνουν να προσκολλούνται το ένα στο άλλο. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως συσσωμάτωση και δεν προκαλεί αλλαγή στη συνολική σωματιδιακή μάζα. Ωστόσο μετατοπίζει την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων προς μεγαλύτερα μεγέθη με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού αριθμού των σωματιδίων. Η συσσωμάτωση είναι ένα δεύτερης τάξης φαινόμενο, υπό την έννοια ότι ο ρυθμός που πραγματοποιείται η διαδικασία εξαρτάται από το τετράγωνο της συγκέντρωσης των σωματιδίων. Οι περισσότερες άλλες διεργασίες που είναι σημαντικές σε εσωτερικούς χώρους είναι πρώτης τάξης. Η συσσωμάτωση γίνεται ιδιαίτερα σημαντική όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης. Πρόσφατη μελέτη των Hussein et al. (2009a) έδειξε ότι η συσσωμάτωση σε εσωτερικούς χώρους μπορεί να αγνοηθεί για συγκεντρώσεις σωματιδίων μικρότερες από 10³ #/cm³.

Ο πιο σημαντικός μηχανισμός που οδηγεί σε συσσωμάτωση σε εσωτερικούς χώρους είναι η κίνηση Brown των σωματιδίων. Στην περίπτωση αυτή η συσσωμάτωση αναφέρεται και ως θερμική συσσωμάτωση. Κίνηση Brown ονομάζεται η τυχαία κίνηση των σωματιδίων λόγω των συγκρούσεων τους με τα παρακείμενα μόρια του αέρα. Αυτής της μορφής η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα διαρκώς, όποτε υπάρχει παρουσία αιωρούμενων σωματιδίων. Η κίνηση Brown είναι περισσότερο αποτελεσματική σαν μηχανισμός μεταφοράς σωματιδίων όσο ελαττώνεται το μέγεθος των σωματιδίων. Συνήθως, η μεγαλύτερη συγκέντρωση σωματιδίων σε εσωτερικό περιβάλλον παρατηρείται για τα υπέρλεπτα σωματίδια, σε περιπτώσεις που υπάρχουν ενεργές πηγές (Afshari et al., 2005; Wallace και Howard-Reed, 2002). Επομένως, ειδικά για τα πολύ μικρά σωματίδια, η συσσωμάτωση αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό μηχανισμό, όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι πολύ υψηλές. Τα σωματίδια αυτά συγκρούονται μεταξύ τους προκαλώντας μόνο μικρή αλλαγή στο φάσμα της κατανομής μεγέθους. Συγκρούονται όμως και με μεγαλύτερα σωματίδια προκαλώντας μετακίνηση σωματιδιακής μάζας από την περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων στην περιοχή συσσώρευσης. Τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους χρόνους παραμονής στο εσωτερικό περιβάλλον και μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία.

Αν η σχετική κίνηση των σωματιδίων προέρχεται από την επίδραση κάποιου εξωτερικού πεδίου δυνάμεων (όπως το βαρυτικό πεδίο ή κάποιο ηλεκτρικό πεδίο) ή προέρχεται από αεροδυναμικά φαινόμενα, η συσσωμάτωση που προκύπτει ονομάζεται κινηματική συσσωμάτωση. Το φαινόμενο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στις περισσότερες προσπάθειες μοντελοποίησης των φυσικών διεργασιών των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς η ισχύ του είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ της θερμικής συσσωμάτωσης.

2.4.4.1 Βασικές αρχές της θεωρίας της συσσωμάτωσης.

Ας υποθέσουμε ότι σε κάποιο χώρο υπάρχουν δύο ειδών σωματίδια με διαμέτρους d₁ και d₂ αντίστοιχα, τα οποία όταν συγκρούονται δημιουργούν ένα νέο σωματίδιο (θεωρούμε μηδενική την πιθανότητα να εξοστρακιστούν και ίση με μονάδα την πιθανότητα να ενωθούν). Ο ρυθμός συγκρούσεων στην περίπτωση αυτή δίδεται από τη σχέση:

$$J_{12} = K_{12} N_1 N_2 \qquad (2-30)$$

όπου K₁₂ ο συντελεστής συσσωμάτωσης και N₁, N₂ η συγκέντρωση των δύο ειδών σωματιδίων αντίστοιχα. Ο συντελεστής συσσωμάτωσης δίδεται από τη σχέση:

$$K_{12} = 2\pi (d_1 + d_2)(D_1 + D_2) \quad (2-31)$$

όπου D_1 και D_2 οι συντελεστές διάχυσης Brown για τα δύο ειδών σωματίδια. Οι συντελεστές αυτοί δίδονται από την εξίσωση Stokes-Einstein:

$$D_i = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_i} \tag{2-32}$$

όπου μ το ιξώδες του αέρα, Τ η θερμοκρασία του αέρα, k η σταθερά Boltzmann και C_c ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης (slip correction factor) και d_i η διάμετρος του σωματιδίου. Στην περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων ο συντελεστής αυτός έχει τιμή ίση με μονάδα. Ο συντελεστής διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της διαμέτρου του σωματιδίου και επομένως η διάχυση είναι ταχύτερη για τα μικρότερα σωματίδια. Χρησιμοποιώντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής συσσωμάτωσης:

$$K_{12} = \frac{2kT}{3\mu} \frac{(d_1 + d_2)^2}{d_1 d_2}$$
(2-33)

Όταν το μέσο ελεύθερο μήκος των σωματιδίων που διαχέονται είναι συγκρίσιμο με την ακτίνα τους, ο συντελεστής συσσωμάτωσης διορθώνεται κατά ένα παράγοντα β, και παίρνει τη μορφή:

$$K_{f12} = \frac{2kT}{3\mu} \frac{(d_1 + d_2)^2}{d_1 d_2} \beta \qquad (2-34)$$

Ο συντελεστής διόρθωσης β κυμαίνεται από 0,0014 για σωματίδια διαμέτρου 0,001 μm μέχρι την τιμή 1 για σωματίδια διαμέτρου 1 μm. Επομένως η διόρθωση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1 μm. Σε μοντέλα εσωτερικών χώρων χρησιμοποιούνται οι σχέσεις για τον υπολογισμό του συντελεστή β που έχουν προταθεί από τους Fucks (1964) και Dahneke (1983). Η διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών δεν ξεπερνάει το 4%. Η σχέση του Dahneke για το συντελεστή β είναι:

$$\beta = \frac{l + Kn_D}{l + 2Kn_D(l + Kn_D)} \qquad (2-35)$$

όπου:

$$Kn_D = \frac{2(d_1 + d_2)}{\overline{c_{12}R}} \qquad (2-36)$$

και R η ακτίνα του σωματιδίου και c ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη μάζα των σωματιδίων και τη θερμοκρασία.

Η μικρότερη τιμή του συντελεστή συσσωμάτωσης προκύπτει όταν τα σωματίδια έχουν το ίδιο μέγεθος. Η τιμή του συντελεστή συσσωμάτωσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος των διαμέτρων των σωματιδίων. Αυτό οφείλεται στη συνδυασμένη δράση των δύο σωματιδίων. Ένα μεγάλο σωματίδιο μπορεί να μην επηρεάζεται σημαντικά από την κίνηση Brown, αλλά εμφανίζει μεγάλη επιφάνεια δημιουργώντας έτσι ένα ιδανικό «στόχο» για τα μικρότερα και αρκετά πιο γρήγορα κινούμενα σωματίδια. Οι συγκρούσεις ανάμεσα σε μεγάλα σωματίδια γίνονται με αργό ρυθμό γιατί τα μεγάλα σωματίδια κινούνται αργά. Από την άλλη μεριά παρόλο που τα μικρά σωματίδια κινούνται πολύ γρήγορα, πολλές φορές δεν μπορούν να έρθουν σε επαφή λόγω των πολύ μικρών ενεργών επιφανειών, που παρουσιάζουν. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ενεργός επιφάνεια είναι ανάλογη του d², ενώ η διάχυση Brown είναι ανάλογη του d.

2.4.4.2 Προσδιορισμός της εξίσωσης συσσωμάτωσης για πληθυσμό αιωρούμενων σωματιδίων με διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων.

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφερθήκαμε στον υπολογισμό του ρυθμού συσσωμάτωσης στην περίπτωση που έχουμε δύο είδη σωματιδίων με διαφορετικά μεγέθη. Στην πραγματικότητα ο πληθυσμός των αιωρούμενων σωματιδίων που συναντώνται τόσο σε εσωτερικό όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον αποτελείται από σωματίδια που παρουσιάζουν ένα ευρύτατο φάσμα μεγεθών, ανάλογα με το είδος του περιβάλλοντος και τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι το φάσμα της κατανομής μεγέθους χωρίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό συνεχόμενων τμημάτων, όπου σε κάθε τμήμα ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων κατανέμεται ομοιόμορφα σε σχέση με το λογάριθμο της διαμέτρου των σωματιδίων. Η απεικόνιση αυτή είναι χρησιμότερη στις προσπάθειες μοντελοποίησης της διεργασίας της συσσωμάτωσης, καθώς η εξίσωση που προκύπτει μπορεί να επιλυθεί με διάφορες αριθμητικές μεθόδους. Αντίθετα η συνεχής κατανομή του αριθμού των σωματιδίων, παρόλο που αντιπροσωπεύει πιο σωστά το φάσμα της κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σώηγεί σε μία συνεχή εξίσωση για τη συσσωμάτωση που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα. Η αναλυτική λύση της εξίσωση αυτής προκύπτει ύστερα από σημαντικές παραδοχές και απλουστεύσεις, οδηγώντας έτσι σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Θεωρούμε ένα πληθυσμό αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούμενο από διάφορα μεγέθη σωματιδίων. Θεωρούμε ότι ο πληθυσμός αυτός μπορεί να χωριστεί σε k διαφορετικά τμήματα και περιγράφεται από τη συνάρτηση του αριθμού των σωματιδίων σε κάθε τμήμα σε σχέση με το χρόνο $N_k(t)$. Ένα σωματίδιο του k τμήματος δημιουργείται μέσω της σύγκρουσης ενός σωματιδίου του τμήματος j με ένα σωματίδιο του τμήματος (k-j). Ο συνολικός ρυθμός παραγωγής των k-σωματιδίων θα δίδεται από τη σχέση:

$$J_{fk} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} K_{k-j,j} N_{k-j}(t) N_j(t)$$
(2-37)

όπου ο συντελεστής 1/2 χρησιμοποιείται για να μην μετρώνται οι συγκρούσεις των σωματιδίων 2 φορές. Αντίστοιχα ο ρυθμός που χάνονται σωματίδια από ένα τμήμα δίδεται από τη σχέση:

$$J_{dk} = N_k(t) \sum_{j=1}^k K_{kj} N_j(t)$$
 (2-38)

Ο συντελεστής 1/2 στην περίπτωση που j=k αναιρείται από το γεγονός ότι κάθε σύγκρουση αφαιρεί δύο σωματίδια.

Αν συνδυαστούν ο ρυθμός παραγωγής με τον ρυθμό απομάκρυνσης σωματιδίων από κάθε τμήμα του φάσματος λόγω της συσσωμάτωσης προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{dN_k(t)}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} K_{k-j,j} N_{k-j}(t) N_j(t) - N_k(t) \sum_{j=1}^k K_{k,j} N_j(t) \qquad k \ge 2 \quad (2-39)$$

Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται εύκολα αν υπολογιστούν οι συντελεστές συσσωμάτωσης.

Οι Lee και Chen (1984) υπολόγισαν μία μέση τιμή του συντελεστή συσσωμάτωσης \overline{K} , για λογαριθμική κατανομή με μέση αριθμητική διάμετρο μεγαλύτερη από το μέσο ελεύθερο μήκος.

$$\overline{K} = \frac{2kT}{3\mu} \left(1 + \exp\left(\ln^2 \sigma_g\right) + \frac{2,49\lambda}{GMD} \left[\exp\left(0,5\ln^2 \sigma_g\right) + \exp\left(2,5\ln^2 \sigma_g\right) \right] \right) \quad (2-40)$$

όπου λ, GMD και σ_g είναι το μέσο ελεύθερο μήκος, η γεωμετρική μέση διάμετρος και η γεωμετρική τυπική απόκλιση. Στην περίπτωση αιωρούμενων σωματιδίων πολλών διαφορετικών μεγεθών η συσσωμάτωση πραγματοποιείται ως και έξι φορές ταχύτερα από στην περίπτωση σωματιδίων μίας μόνο διαμέτρου με την ίδια αριθμητική μέση διάμετρο.

2.4.5 Παραγωγή νέων σωματιδίων - Αλλαγή φάσης

Η σωματιδιακή ύλη που βρίσκεται σε εσωτερικούς χώρους μπορεί να αλλοιωθεί εξαιτίας διεργασιών που οδηγούν σε αλλαγές φάσης, κατά τη διάρκεια των οποίων χημικές ενώσεις περνάνε από την αέρια στην συμπυκνωμένη φάση ή αντίστροφα. Οι σημαντικότερες διεργασίες είναι:

2.4.5.1 Πυρηνοποίηση

Πυρηνοποίηση είναι η διαδικασία σχηματισμού σωματιδίων από πρόδρομες αέριες ενώσεις. Η ομογενής πυρηνοποίηση ξεκινάει όταν ο αέρας καθίσταται υπερκορεσμένος με μόρια αερίων, τα οποία συγκρούονται μεταξύ τους. Η διαδικασία πραγματοποιείται ακόμα και αν δεν υπάρχουν σωματίδια στο χώρο. Μετά από αρκετές συγκρούσεις τα μοριακά θραύσματα αυξάνουν αρκετά το μέγεθος και όταν η διάμετρος τους ξεπεράσει την τιμή μίας «κρίσιμης» διαμέτρου, σχηματίζονται σταθερά σωματίδια (νανο-σωματίδια). Η τιμή της κρίσιμης διαμέτρου εξαρτάται από τον υπερκορεσμό και τις ιδιότητες των μορίων του αερίου. Η ομογενής πυρηνοποίηση απαιτεί αναλογίες πραγματικής πίεσης προς την πίεση ισορροπίας 2-10 (Gundel και Sextro, 2005). Τα σωματίδια συνεχίζουν να μεγαλώνουν λόγω συμπύκνωσης, όσο διατηρούνται στο χώρο οι συνθήκες υπερκορεσμού. Η ετερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλότερες συνθήκες υπερκορεσμού. Η ετερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλότερες συνθήκες υπερκορεσμού πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλότερες συνθήκες υπερογενής πυρηνοποίηση πραγματοποιείται σε χαμηλότερες συνθήκες υπερκορεσμού σε σχέση με την ομογενή πυρηνοποίηση.

2.4.5.2 Προσρόφηση-Εκρόφηση

Η προσρόφηση αερίων σε σωματίδια εξαρτάται πέρα από το βαθμό του υπερκορεσμού και από τη διαθέσιμη σωματιδιακή επιφάνεια. Οι δύο αυτές διαδικασίες επηρεάζουν τη μάζα και το μέγεθος των σωματιδίων των περιοχών μικρών πυρήνων και συσσώρευσης. Μελέτες των Naumova et al., (2003), Pankow e al., (1994), και Weschler (2003) αναφέρονται στην προσρόφηση ημιπτητικών οργανικών ενώσεων σε σωματίδια εσωτερικών χώρων. Οι Lunden et al., (2003) αναφέρθηκαν στην αποσύνθεση σωματιδίων νιτρικού αμμωνίου στα αέρια συστατικά τους (νιτρικό οξύ και αμμωνία) κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες όταν εισέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Αυτή η διεργασία προκαλεί σημαντική ελάττωση της σωματιδιακής μάζας.

2.4.5.3 Χημικές αντιδράσεις

Οι σημαντικότερες χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην παραγωγή νέων σωματιδίων είναι οι αντιδράσεις ανάμεσα σε όζον και τερπένια (Fan et al., 2003; Sarwar et al., 2003; Wainman et al., 2000). Οι Weschler and Shields (1999) ανίχνευσαν αυξημένο αριθμό λεπτών σωματιδίων σε ένα εσωτερικό χώρο που νωρίτερα είχαν απελευθερώσει ποσότητες βιογενών τερπενίων (d-limonene). Η ένωση αυτή συναντάται σε πολλά προϊόντα καθαρισμού.

2.4.6 Ανάμιξη

Οι εκπομπές από πηγές εσωτερικών χώρων, στην πλειοψηφία τους, είναι μη συνεχείς, τοπικές και σε πολλές περιπτώσεις στιγμιαίες. Επομένως οι επιδράσεις από τις εκπομπές στην φθορά των υλικών και στην έκθεση των ανθρώπων σε ρυπογόνες ουσίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο καλά είναι αναμεμειγμένος ο χώρος όπου πραγματοποιούνται οι εκπομπές. Η ανάμειξη του αέρα σε ένα χώρο προκαλείται από τη συνολική μεταφορική ροή του αέρα σε συνδυασμό με τυρβώδεις διακυμάνσεις γύρω από τη μέση ροή. Η κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό ενός χώρου μπορεί να ενισχυθεί με τη βοήθεια μηχανικών μέσων, με το άνοιγμα ενός παραθύρου ή ακόμα και από την παρουσία ανθρώπων στο χώρο. Ανοδικές κινήσεις του αέρα σε μεμονωμένα πακέτα αερίων μαζών, οι οποίες τελικά ενισχύουν την ανάμιξη του χώρου.

Πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση αέριων ιχνηθετών για να εξεταστεί η ανάμειξη του αέρα σε θάλαμο που έχει διαστάσεις ενός τυπικού υπνοδωματίου (Baughman et al., 1994). Το αέριο ελευθερώθηκε στιγμιαία σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου και η συγκέντρωση του μετρήθηκε σε διάφορες χρονικές στιγμές και σε διάφορα σημεία του χώρου. Ο χρόνος πλήρους ανάμιξης ορίστηκε ως ο χρόνος μετά την απελευθέρωση του αερίου που απαιτείται για να ελαττωθεί η χωρική μεταβλητότητα της συγκέντρωσης λιγότερο από 10%. Κάτω από φυσικές συνθήκες ροής, με σημαντικό ενεργειακό περιεχόμενο κοντά στο έδαφος (≈ 500W) ο χρόνος ανάμιξης ήταν περίπου 10 λεπτά. Αν η ροή του αέρα ενισχύονταν με τη χρήση ανεμιστήρων ο χρόνος ανάμιξης κυμαινόταν μεταξύ 3-20 λεπτά και μεταβαλλόταν αντιστρόφως ανάλογα με τον

κύβο του ρυθμού παροχής ενέργειας στη ροή. Τα πειράματα αυτά προσομοιώθηκαν ικανοποιητικά και με τη χρήση κώδικα CFD.

2.4.6.1 Μεταφορά αέρα μεταξύ διαφορετικών εσωτερικών χώρων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαζωνική μεταφορά είναι η διαφορά πίεσης που εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, η διαφορά θερμοκρασίας και η χρήση ανεμιστήρων. Τυχόν σχισμές στα τοιχώματα των δωματίων επιτρέπουν περιορισμένη ροή αέρα από το ένα δωμάτιο στο άλλο. Ωστόσο εμπειρικά δεδομένα που είναι σήμερα διαθέσιμα δεν είναι αρκετά για να εκτιμηθούν οοι τυπικές τιμές της ροής και η μεταβλητότητα που παρουσιάζουν.

Ειδικότερα για τη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων υπάρχουν πολύ λίγες μελέτες στις οποίες μελετήθηκαν οι διαφορές που παρουσιάζονται στις συγκεντρώσεις σε διαφορετικά δωμάτια και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι οι Ju και Spengler (1981) μέτρησαν μέσες 24ώρες συγκεντρώσεις σε διάφορα δωμάτια σε τέσσερα διαφορετικά σπίτια και βρήκαν πολύ μικρές διαφορές ανάμεσα στις διάφορες συγκεντρώσεις. Από την άλλη μεριά εργαστηριακά πειράματα (Miller και Nazaroff, 2001) έδειξαν ότι η ροή του αέρα μειώνεται από 60 m³/h σε 1 m³/h με το κλείσιμο μίας πόρτας που συνδέει δύο δωμάτια. Επίσης πειραμάτα με ενεργές πηγές (Hussein et al., 2006; Miller και Nazaroff, 2001) έδειξαν ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων του καπνού έπαιρνε πολύ γρήγορα ομοιόμορφες τιμές σε δύο χώρους που επικοινωνούσαν μέσω μίας πόρτας όταν η πόρτα ήταν ανοιχτή.

2.4.7 Περιγραφή της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων με εξισώσεις διατήρησης μάζας

Οι διεργασίες που καθορίζουν τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους παρουσιάζονται στο σχήμα 2-8.

Η δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων περιγράφεται με την εξίσωση διατήρησης της μάζας (Nazaroff, 2004). Αέρας από το εξωτερικό περιβάλλον που περιέχει σωματίδια με συγκέντρωση C_o (μg/m³) εισέρχεται στο εσωτερικό περιβάλλον μέσα από τρεις διαφορετικές διαδρομές: μηχανική τροφοδοσία με ρυθμό ροής Q_{S} (m³/h), φυσικό αερισμό με ρυθμό ροής Q_{N} (m³/h), και μέσω σχισμών ανάμεσα στα υλικά κατασκευής (διείσδυση) με ρυθμό ροής Q_L (m³/h). Τα σωματίδια μέσω των τριών παραπάνω οδών εισέρχονται στο εσωτερικό περιβάλλον σε διαφορετικές ποσότητες. Μέσω της μηχανικής τροφοδοσίας θεωρείται ότι ο αέρας περνάει από ένα ή περισσότερα φίλτρα που παρουσιάζουν συνολική ικανότητα κατακράτησης σωματιδίων n_s (αδιάστατη ποσότητα). Μέσω του αερισμού εισέρχονται όλα τα σωματίδια που βρίσκονται στο εξωτερικό περιβάλλον, καθώς δεν υπάρχει καμία διαδικασία που να απομακρύνει κάποια από αυτά. Τέλος μόνο ένα μέρος των σωματιδίων μπορούν να εισέλθουν μέσω διείσδυσης. Τα σωματίδια αυτά ελέγχονται μέσω του συντελεστή διείσδυσης Ρ. Από το εσωτερικό περιβάλλον εξέρχεται αέρας προς το εξωτερικό περιβάλλον με συνολική ροή Qs+QN+QL. Υπάρχει και η δυνατότητα ο εσωτερικός αέρας να εξέρχεται μέσω μίας ελεγχόμενης ροής Q_F (m³/h) και να περνάει από φίλτρα με ικανότητα κατακράτησης n_F (αδιάστατη ποσότητα). Μέσα στο εσωτερικό περιβάλλον μπορούν να υπάρχουν πηγές αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπουν σωματίδια με ρυθμό E (μg/s). Τα σωματίδια απομακρύνονται από το εσωτερικό περιβάλλον κυρίως μέσω μεταφοράς στο εξωτερικό περιβάλλον ή μέσω εναπόθεσης στις επιφάνειες του εσωτερικού χώρου. Αυτή η διαδικασία περιγράφεται μέσω της ταχύτητας εναπόθεσης V_{d,j} (m/s) στην επιφάνεια Α_i. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τη διάμετρο των σωματιδίων και τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Σε περίπτωση που ο χώρος επικοινωνεί με άλλους εσωτερικούς χώρους, υπάρχει ροή αέρα από και προς αυτούς (Q_{j,I} και Q_{i,j} αντίστοιχα). Ορισμένα σωματίδια, που έχουν εναποτεθεί, είναι δυνατό να επαναιωρηθούν κάτω από ορισμένες συνθήκες. Ο συντελεστής R (µg/s) δηλώνει το ρυθμό επαναιώρησης σωματιδίων και εξαρτάται από τη διάμετρο των σωματιδίων. Τέλος οι μεταβολές της μάζας που οφείλονται σε διαδικασίες παραγωγής νέων σωματιδίων (πυρηνοποίηση, χημικές αντιδράσεις) και στην αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων (συμπύκνωση, συσσωμάτωση) περιγράφονται με το συντελεστή Τ $(\mu g/s)$.



Σχήμα 2- 8: Σχηματική παράσταση των διεργασιών που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους (πηγή: Λαζαρίδης, 2008)

Αν θεωρήσουμε ότι η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η ίδια σε όλα τα σημεία του χώρου, η διατήρηση της μάζας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$V\frac{dC_{i}(d_{p})}{dt} = E(d_{p}) + C_{o}(d_{p})[Q_{S}(1-n_{S}) + Q_{N} + Q_{L}P(d_{p})] - C_{i}[Q_{F}n_{F} + (Q_{S} + Q_{N} + Q_{L})] - C_{i}(d_{p})\sum_{j}V_{d,j}(d_{p})A_{j} + \sum_{j}(Q_{j,i}C_{j} - Q_{i,j}C_{i}) + R(d_{p}) + T(d_{p})$$
(2-41)

Η εξίσωση 2-41 μπορεί να μετασχηματιστεί κατάλληλα και να περιγράψει τη μεταβολή του αριθμού των σωματιδίων. Η περιγραφή της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων με την εξίσωση διατήρησης της μάζας έχει εφαρμοστεί σε πολλές μελέτες σε εσωτερικούς χώρους (Alzona et al., 1979; Koutrakis et al., 1992; Lum and Graedel, 1973; Nazaroff and Cass, 1989; Schneider et al.; 1999).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abadie, M., Limam, K., Allard, F., 2001. Indoor particle pollution: effect of wall textures on particle deposition. Building and Environment 36, 821–827.

Afshari, A., Matson, U., and Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. Indoor Air 15:141–150.

Afshari, A., Reinhold, C., 2008. Deposition of fine and ultrafine particles on indoor surface materials. Indoor Built Environment 17, 247–251.

Alzona, J., Cohen, B.L., Rudolph, H., Jow, H.N., Frohliger, J.O., 1979. Indoor-outdoor relationships for airborne particulate matter of outdoor origin, Atmospheric Environment, 13, 55–60.

Anderson, H.R., 2009. Air pollution and mortality: A history. Atmospheric Environment 43, 142–152

Baker, P. H., Saharples, S., and Ward, I.C. (1987). Airflow Through Cracks, Building Environment, 22, 293-304.

Barnett, A.G., Williams, G.M., Schwartz, J., Best, T.L., Neller, A.H., Petroeschevsky, A.L., et al., 2006. The effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular disease in elderly people in Australian and New Zealand cities. Environmental Health Perspectives 114, 1018–1023.

Baron, P.A., Willeke, K., (Eds.), 2001. Aerosol Measurement: Principles, Technics and Applications, 2nd edition. Willey-Interscience, New York

Baughman, A.V., Gadgil, A.J., Nazaroff, W.W., 1994. Mixing of a point source pollutant by natural convenction flow within a room. Indoor Air, 4, 114-122.

Bennett, D.H., Koutrakis, P., 2006. Determining the infiltration of outdoor particles in the indoor environment using a dynamic model. Aerosol Science 37, 766–785.

Borja-Aburto, V. H.; Castillejos, M.; Gold, D. R.; Bierzwinski, S.; Loomis, D. (1998) Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. Environmental. Health Perspectives, 106, 849-855.

Brimblecombe, P., 1987. The Big Smoke: a History of Air Pollution in London Since Medieval Times. Routledge, London.

Bruce, N., Perez-Padilla, R., Albalak, R., 2000. Indoor air pollution in developing countries. Bulletin of the World Health Organization, 78(9), 1078-1092.

Burnett, R. T.; Cakmak, S.; Brook, J. R.; Krewski, D, 1997. The role of particulate size and chemistry in theassociation between summertime ambient air pollution and hospitalization for cardiorespiratory diseases. Environmental Health Perspectives, 105, 614-620.

Chan, C.C., Chuang, K.J., Chien, L.C., Chen, W.J., Chang, W.T., 2006. Urban air pollution and emergency admissions for cerebrovascular diseases in Taipei, Taiwan. European Heart Journal 27, 1238–1244.

Dahneke, 1983. Measurement of suspended particles by quasi-elastic light scattering. Wiley & Sons. New York.

De Marcus, W., Thomas, J.W., 1952. Theory of a diffusion battery. US Atomic Energy Commission, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.

Delfino, R. J.; Murphy-Moulton, A. M.; Becklake, M. R, 1998. Emergency room visits for respiratory illnesses among the elderly in Montreal: association with low level ozone exposure. Environmental. Research, 76: 67-77.

Fan, Z.H., Lioy, P., Weschler, C., Fiedler, N., Kipen, H. and Zhang, J.F., 2003. Ozone-initiated reactions with mixtures of volatile organic compounds under simulated indoor conditions, Environmental Science and Technology, 37, 1811–1821.
Ferro, A.R., Kopperud, R.J. and Hildemann, L.M., 2004 Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter, Environmental Science and Technology, 38, 1759–1764.

Friedlander, S.K., 1977. Smoke, Dust and Haze: Fundamental of Aerosol Behavior. John Wiley & Sons New York,.

Fuchs, C.N., 1964. The Mechanics of Aerosols. Pergamon Press, Oxford.

Fuchs, C.N., 1964. The Mechanics of Aerosols. Pergamon Press, Oxford.

Gauvin, S.; Zmirou, D.; Pin, I.; Quentin, J.; Balducci, F.; Boudet, C.; Poizeau, D.; Brambilla, C., 1999 Short-term effect of exposure to suspended particulate matter (PM₁₀) on the respiratory function of urban asthmatic and control adults. Journal of Environmental Medicine 1, 71-79.

Guha, A., 1997. A unified Eulerian theory of turbulent deposition to smooth and rough surfaces, Journal of Aerosol Science, 28, 1517–1537.

Gundel and Sextro, 2005. Aerosol chemistry and physics: Indoor perspective. In Ruzen and Harley (Eds). Aerosols Handbook, Measurement, Dosimerty and health effects. CRC Press.

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology. John Wiley & Sons, New York.

Hopkins, L.P., Hansford, B., 1974. Air flow through cracks. Building Services Engineer 42, 123–131.

Hoskins, J.A., 2003. Health Effects due to Indoor Air Pollution. Indoor Built Environment, 12, 427–433

Hussein, T., Kulmala, M., 2008. Indoor aerosol modeling: basic principles and practical applications. Water Air Soil Pollution: Focus, 8, 23–34.

Hussein, T., Glytsos, T., Ondráček, J., Ždímal, V., Hämeri, K., Lazaridis, M., Smolik, J., Kulmala, M., 2006. Particle Size Characterization and Emission Rates during Indoor Activities in a House. Atmospheric Environment 40: 4285–4307.

Hussein, T., Hruška, A., Dohányosová, P., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M., Smolok, J., 2009a. Evaluation of deposition rates of aerosol particles on smooth surfaces inside a test chamber. Atmospheric Environment 43, 905–914.

Hussein, T., Kubincová, L., Dohányosová, P., Hruška, A., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M., and Smolik, J., 2009b. Deposition of aerosol particles on rough surfaces inside a test chamber. Building and. Environment 44, 2056–2063.

Jeng, J.C., Kindzierski, W.B., Smith, D.W., 2003. Modeling entry of micron-sized and submicron-sized particles into the indoor environment. Aerosol Science and Technology, 37, 753-769.

Jones, A.P., 1999. Indoor air quality and health. Atmospheric Environment 33, 4535-4564.

Ju, C., Spengler, J.D., 1981. Room to room variations in concentration of respirable particles in residences, Environmental Science and Technology, 15, 592–596.

Kagi, N., Fujii, S.,Horiba, Y., Namiki, N., Ohtani, Y., Emi, H., Tamura, H., Kim, Y.S., 2007. Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers. Building and Environment 42, 1949–1954.

Katsouyanni, K., Touloumi, G., Samoli, E., Gryparis, A., Le Tertre, A., Monopolis, Y., et al., 2001. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. Epidemiology 12, 521–531.

Kildeso, J., Vinzents, P., Schneider, T. and Kloch, N.P., 1999. A simple method for measuring the potential resuspension of dust from carpets in the indoor environment, Textile Research Journ, 69, 169–175.

Koutrakis, P., Briggs, S.L.K., Leaderer, B.P., 1992. Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York, Environmental Science and Technology, 26, 521–527.

L. Wallace, 1996. Indoor particles: A review, Journal of Air & Waste Management Association, 46, 98–126.

Laden, F.; Neas, L. M.; Dockery, D. W.; Schwartz, J. (2000) Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. Environmental. Health Perspectives, 108, 941-947.

Lai, A.C.K. and Nazaroff, W.W., 2000. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces, J. Aerosol Sci., 31, 463–476.

Lazaridis, M., Drossinos, Y., 1998. Multilayer resuspension of small identical particles by turbulent flow. Aerosol Science and Technology 28, 548–560.

Lee, C-W., Hsu, D-J., 2007. Measurements of fine and ultrafine particles formation in photocopy centers in Taiwan. Atmospheric Environment 41, 6598–6609

Lee, K. W., and Gieseke, J. A. (1980). Simplified Calculation of Aerosol Penetration Through Channels and Tubes, *Atmos. Environ.* 14:1089–1094.

Lee, K.W., Chen, H., 1984. Coagulation rate of polydisperse particles, Aerosol Science and Technology, 3, 327–334.

Lee, S.C., Wang, B., 2006. Characteristics of emissions of air pollutants from mosquito coils and candles burning in a large environmental chamber. Atmospheric Environment, 40, 2128-2138.

Li AG, Jones PJ: Developments in strategies used for natural and mechanical ventilation in China. Indoor Built Environ 2000;9:65–74.

Liao, C-M., Chen, S-C., Chen, J-W., Liang H-M., 2006. Contributions of Chinese-style cooking and incense burning to personal exposure and residential PM concentrations in Taiwan region. Science of the Total Environment 358, 72–84

Lippmann, M.; Ito, K.; Nádas, A.; Burnett, R. T., 2000. Association of particulate matter components with daily mortality and morbidity in urban populations. Cambridge, MA: Health Effects Institute; research report no. 95.

Liu, D. L., and Nazaroff, W.W., 2001. Modeling pollutant penetration across building envelopes. Atmospheric Environment 35, 4451-4462.

Liu, D.L. and Nazaroff, W.W. 2003 Particle penetration through building cracks, Aerosol Science and Technology, 37, 565–573.

Long, C.M., Suh, H.H., Catalano, P.J. and Koutrakis, P., 2001. Using time- and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior, Environmental Science and Technology, 35, 2089–2099.

Lum, R.M. and Graedel, T.E., 1973. Measurements and models of indoor aerosol size spectra, Atmospheric Environment, 7, 827–842.

Mar, T. F.; Norris, G. A.; Koenig, J. Q.; Larson, T. V., 2000. Associations between air pollution and mortality in Phoenix, 1995-1997. Environmental. Health Perspectives, 108, 347-353.

Maroni, M., Seifert, B., Lindvall, T., 1995. Indoor Air Quality. Air quality monographs, Elsevier.

Miller, S. L., and Nazaroff, W. W., 2001. Environmental tobacco smoke particles in multizone indoor environments, Atmospheric Environment 35, 2053–2067.

Morawska L., Salthammer, T., (Eds.) 2003. Indoor Environment, Airborne Particles and Settled Dust. Wiley-Vch.

Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R., Whitfield, C., 2001 Penetration of ambient fine particles into the indoor environment, Aerosol Science and Technology, 34, 2001.

Naumova, Y.Y., Offenberg, J.H., Eisenreich, S.J., Meng, Q.Y., Polidori, A., Turpin, B.J., Weisel, C.P., Morandi, M.T., Colome, S.D., Stock, T.H., Winer, A.M., Alimokhtari, S., Kwon, J.,

Maberti, S., Shendell, D., Jones, J. and Farrar, C., 2003 Gas/particle distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in coupled outdoor/indoor atmospheres, Atmospheric Environment, 37, 2003.

Nazaroff, W. W., 2004. Indoor particle dynamics. Indoor Air 14 (7), 175-183.

Nazaroff, W. W., and Cass, G. R., 1989. Mathematical Modeling of Indoor Aerosol Dynamics. Environmental Science and Technology 23, 157–166.

Neuberger, M., Rabczenko, D., Moshammer, H., 2007. Extended effects of air pollution on cardiopulmonary mortality in Vienna. Atmospheric Environment 41, 8549–8556

Ostro, B. D.; Broadwin, R.; Lipsett, M. J., 2000. Coarse and fine particles and daily mortality in the CoachellaValley, CA: a follow-up study. *Journal* of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 10, 412-419.

Osunsanya, T.; Prescott, G.; Seaton, A., 2001. Acute respiratory effects of particles: mass or number? Occupational & Environmental Medicine, 58, 154-159.

Ozkaynak, H., Xue, J., Spengler, D., Wallace, L., Pellizzari, E.D., Jenkins, P. 1996. Personal exposure to airborne particles and metals: Results from the particle Team study in Riverside, CA. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 6, 57-78.

Pankow, J.F., Isabelle, L.M., Buchholz, D.A., Luo, W.T. and Reeves, B.D., 1994. Gas-particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons and alkanes to environmental tobacco smoke, Environmental Science and Technology, 28, 363–365.

Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., et al., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association 287, 1132–1141.

Robinson, J., Nelson, W.C., 1995. National Human Activity Pattern Survey Data Base. United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

Samet, J. M.; Dominici, F.; Curriero, F. C.; Coursac, I.; Zeger, S. L. (2000c) Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities, 1987-1994. New *England Journal* of Medicine, 343, 1742-1749.

Samet, J. M.; Dominici, F.; Zeger, S. L.; Schwartz, J.; Dockery, D. W., 2000b. National morbidity, mortality, and air pollution study. Part I: methods and methodologic issues. Cambridge, MA: Health Effects Institute; research report no. 94.

Samet, J. M.; Zeger, S. L.; Dominici, F.; Curriero, F.; Coursac, I.; Dockery, D. W.; Schwartz, J.; Zanobetti, A., 2000a. The national morbidity, mortality, and air pollution study. Part II: morbidity, mortality, and air pollution in the United States. Cambridge, MA: Health Effects Institute; research report no. 94.

Sarwar, G., Corsi, R., Allen, D. and Weschler, C., 2003. The significance of secondary organic aerosol formation and growth in buildings: Experimental and computational evidence, Atmospheric Environment, 37, 1365–1381.

Schneider, T., Kildeso, J., Breum, N.O., 1999. A two compartment model for determining the contribution of sources surface deposition and resuspension to air and surface dust concentration levels in occupied rooms. Building and Environment Journal, 34, 583-595.

Schwartz, J.; Neas, L. M. (2000) Fine particles are more strongly associated than coarse particles with acute respiratory health effects in schoolchildren. Epidemiology, 11, 6-10.

See, S.W., Balasubramanian, R., 2006. Risk assessment of exposure to indoor aerosols associated with Chinese cooking. Environmental Research 102, 197–204.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd edition. Willey-Interscience, New York

Smolík, J., Dohányosová, P., Schwarz, J., Ždímal, V., Lazaridis, M., 2008. Characterization of Indoor and Outdoor Aerosols in a Suburban Area of Prague. Water Air & Soil Pollution: Focus, 8, 35–47 Spengler, J.D., Sexton, K., 1983. Indoor air pollution: a public health perspective. Science 221, 9-17.

Steinemann, A., 2004. Human exposure, health hazards, and environmental regulations. Environmental Impact Assessment Review 24, 695–710.

Sundell, J., 2004. On the history of indoor air quality and health. Indoor Air, 14 (Suppl 7), 51-58

Thatcher, T.L. and Layton, D.W. (1995) Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, Atmospheric Environment, 29, 1487–1497.

Thatcher, T.L. and Layton, D.W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence, Atmospheric Environment, 29, 1487–1497.

Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G. and Nazaroff, W.W., 2002. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors, Atmospheric Environment, 36, 1811–1819.

Thatcher, T.L., Lunden, M.M., Revzan, K.L., Sextro, R.G. and Brown, N.J. (2003) A concentration rebound method for measuring particle penetration and deposition in the indoor environment, Aerosological Science and Technology, 37, 847–864.

Thomas, D.A., Dick, B.A., 1953. Air infiltration through gaps around windows. Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers 21, 85–97.

Thornburg, J., Ensor, D.S., Rodes, C. E., Lawless, P. A., Sparks, L. E., Mosley, R. B., 2001. Penetration of particles into buildings and associated physical factors. part I: model development and computer simulations. Aerosol Science and Technology, 34: 284–296.

To, W.M., Lau, Y.K., Yeung, L.L., 2007. Emission of Carcinogenic Components from Commercial Kitchens in Hong Kong. Indoor and Built Environment, 16, 1:29–37

Tung, T. C. W., Chao, C. Y. H., and Burnett, J. (1999). A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell. Atmos. Environ. 33: 881–893.

US Environmental Protection Agency (US EPA), 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC

Wainman, T., Zhang, J.F., Weschler, C.J. and Lioy, P.J. (2000) Ozone and limonene in indoor air: a source of submicron particle exposure, Environmental Health Perspectives, 108, 1139–1145.

Wallace, L., Howard-Reed, C. 2002. Continuous monitoring of ultrafine, fine and coarse particles in a residence for 18 months in 1999–2000. Journal of Air and Waste Management Association 52, 828-844.

Weschler, C.J., 2003 Indoor/outdoor connections exemplified by processes that depend on an organic compounds saturation vapor pressure, Atmospheric Environment, 37, 5455–5465.

Weschler, C.J., Shields, H.C., 1999. Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles. Atmospheric Environment, 33, 2301-2312.

Whitby, K.T., 1978. The physical characteristics of sulfate aerosols. Atmospheric Environment 12, 135–159.

Willeke and Baron, 2001. Air Sampling Instruments, 9th edition . American Industrial Hygiene Association, U.S.

Wood, N.B., 1981. A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces, J. Aerosol Sci., 12, 275–290.

Yang, C-R., Lin, T-C., Chang, F-H., 2007. Particle size distribution and PAH concentration of incense smoke in a combustion chamber. Environmental Pollution, 145, 606-615.

Zartarian, V.G., Ott, W.R., Duan N.A., 1997. Quantitative Definition of Exposure and Related Concepts. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 7, 411 – 438.

Zhang, J.S., Shaw, C.Y., Nguyen-Thi, L.C., MacDonlad, R.A. and Kerr, G., 1995 Field measurements of boundary layer flows in ventilated rooms, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Engineers, 102, 116–124.

Zhao B., and Wu J., 2006b. Modeling particle deposition onto rough walls in ventilation duct. Atmospheric Environment 40, 6918-6927.

Zhao, B., and Wu J., 2006a. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct. Atmospheric Environment 40, 457-466.

Λαζαρίδης, Μ., 2008. Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Εκδόσεις Τζιόλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα στη μελέτη της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους με τη βοήθεια μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων (Guo, 2002; Hussein και Kulmala, 2008). Οι αέριοι ρυπαντές στους εσωτερικούς χώρους προέρχονται τόσο από το εξωτερικό περιβάλλον, όσο και από πηγές που υπάρχουν στον εσωτερικό χώρο. Η ποιότητα του αέρα μπορεί να εκτιμηθεί με απευθείας μετρήσεις της συγκέντρωσης των αέριων ρυπαντών. Η συνεχής όμως παρακολούθηση του εσωτερικού χώρου μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να είναι πολύ δύσκολη (π.χ. πραγματοποίηση συνεχών μετρήσεων σε οικίες με μόνιμους κατοίκους) ή σε άλλες περιπτώσεις ιδιαίτερη δαπανηρή. Η χρήση μικροπεριβαλλοντικών μοντέλων που θα καθιστούν τους εσωτερικούς χώρους ασφαλέστερους για την ανθρώπινη υγεία.

Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, έχουν επικρατήσει δύο διαφορετικές μεθοδολογίες για τη μελέτη της δυναμικής τους σε εσωτερικούς χώρους: α) με μοντέλα που βασίζονται στην υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics, CFD) και β) με μοντέλα που βασίζονται στη διατήρηση της μάζας (Μοντέλα ισοζυγίου μάζας). Οι δύο αυτές μεθοδολογίες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, καθώς στηρίζονται σε διαφορετικές παραδοχές για τον υπό εξέταση χώρο και συνήθως χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές εφαρμογές.

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική είναι μία μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών, η οποία βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής (εξισώσεις *Navier-Stokes*) σε συνδυασμό με τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας, σε γεωμετρία που ορίζεται από το χρήστη. Αποτελεί ένα αποτελεσματικό και εύχρηστο εργαλείο προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ρευστών. Τα σωματίδια θεωρείται ότι κινούνται μέσα στο ρευστό και η μεταφορική τους κίνηση οφείλεται στη διαφορά της ταχύτητας τους από την ταχύτητα του παρακείμενου αέρα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις δυνάμεις της τριβής και της βαρύτητας. Η κίνηση των σωματιδίων μελετάται με μία νέα ομάδα εξισώσεων που προστίθενται στο μοντέλο (drift flux models). Οι Zhao et al. (2009) ανέπτυξαν κώδικα για τη μελέτη της συμπεριφοράς των υπέρλεπτων σωματιδίων σε διάφορα εσωτερικά περιβάλλοντα και κάτω από διαφορετικές συνθήκες εξαερισμού του χώρου. Οι Lai και Chen (2007) εξέτασαν τη διασπορά των σωματιδίων που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας φαγητού. Οι Chang και Hu (2008) ανέλυσαν τη μεταφορά σωματιδίων μεταξύ διαφορετικών δωματίων, ενώ οι Zhao et al. (2006) και Chen et al. (2006) εξέτασαν την εναπόθεση των σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους με μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Με τα μοντέλα αυτά μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση σε διαφορετικά σημεία του εσωτερικού χώρου, ενώ παράλληλα μπορούν να αντιμετωπιστούν με ευκολία προβλήματα που αφορούν τη μελέτη περισσοτέρων από ένα εσωτερικά περιβάλλοντα που επικοινωνούν μεταξύ τους. Βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι απαιτούν πολλά δεδομένα από το χρήστη που αφορούν τις βαθμίδες της θερμοκρασίας και την ταχύτητας του αέρα, καθώς και την αρχική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε πολλά διαφορετικά σημεία. Η συλλογή των παραπάνω αρχικών δεδομένων απαιτεί, σε πολλές περιπτώσεις, εξειδικευμένα όργανα μέτρησης που δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα ή έχουν μεγάλο κόστος απόκτησης και λειτουργίας. Επίσης, οι περισσότεροι κώδικες που έχουν αναπτυχθεί στηρίζονται σε κάποιο ήδη έτοιμο εμπορικό πακέτο το οποίο θα πρέπει ο χρήστης να έχει στην κατοχή του. Τυχόν τροποποιήσεις που πιθανόν να απαιτούνται για διαφορετικές εφαρμογές απαιτούν από το χρήστη μεγάλη εμπειρία και σημαντικές γνώσεις προγραμματισμού. Τέλος απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ και αρκετό χρόνο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Το πρόβλημα αυτό φαίνεται τα λύνεται τα τελευταία χρόνια με τη χρήση ισχυρότερων υπολογιστικών συστημάτων.

Τα μοντέλα ισοζυγίου μάζας στηρίζονται στην αρχή ότι η μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπεται στο εσωτερικό περιβάλλον ή εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον πρέπει να διατηρηθεί, δηλαδή είτε να παραμείνει αιωρούμενη, είτε να εναποτεθεί σε επιφάνειες, είτε να μεταφερθεί στο εξωτερικό περιβάλλον ή σε άλλους εσωτερικούς χώρους. Η βασική παραδοχή αυτών των μοντέλων είναι ότι ο αέρας στο εσωτερικό περιβάλλον είναι καλά αναμεμειγμένος λόγω τύρβης και επομένως η συγκέντρωση είναι η ίδια σε όλα τα σημεία του χώρου κάποια δεδομένη χρονική στιγμή. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο (Nazaroff, 2004). Πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε εσωτερικούς χώρους, έδειξαν ότι υπό προϋποθέσεις ο αέρας σε ένα εσωτερικό περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί καλά αναμεμειγμένος (Ott et al., 2003; Miller και Nazaroff, 2001; Richmond-Bryant et al., 2006). Στην περίπτωση που ο αέρας σε ένα χώρο δεν είναι καλά αναμεμειγμένος, μπορεί να θεωρηθεί ότι το εσωτερικό περιβάλλον αποτελείται από μικρότερους χώρους (μικροπεριβάλλοντα) που επικοινωνούν μεταξύ τους με γνωστούς ρυθμούς ανταλλαγής αέρα. Φυσικά στην περίπτωση αυτή υπάρχει το πρόβλημα του προσδιορισμού των ρυθμών αυτών. Ο συνηθέστερος τρόπος υπολογισμού του ρυθμού ανταλλαγής αέρα είναι με την παρακολούθηση της μείωσης της συγκέντρωσης ενός αδρανούς αερίου (Riffat, 1991), που είναι όμως μία ιδιαίτερα δαπανηρή διαδικασία. Δεν συνιστάται η χρήση αυτών των μοντέλων όταν οι περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται γρήγορα και τοπικά στον εσωτερικό χώρο ή όταν απαιτείται ο προσδιορισμός με ακρίβεια της συγκέντρωσης σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο του εσωτερικού περιβάλλοντος. Το βασικό πλεονέκτημα των μοντέλων ισοζυγίου μάζας είναι ότι απαιτούν σαν αρχικά δεδομένα μόνο τις αρχικές συγκεντρώσεις στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο, τους ρυθμούς εκπομπής των εσωτερικών πηγών και τους ρυθμούς ανταλλαγής αέρα ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό περιβάλλον και ανάμεσα στα εσωτερικά περιβάλλοντα. Επίσης λόγω του απλούστερου κώδικα που χρησιμοποιούν μπορούν να τροποποιηθούν ευκολότερα από τον χρήστη και να προσαρμοστούν στις ανάγκες του προβλήματος που καλείται να μελετήσει. Απαιτούν μικρότερη υπολογιστική ισχύ από τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και συνήθως χρειάζονται λιγότερο χρόνο για την εκτέλεση τους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευκολότερα σε περιπτώσεις που εξετάζεται η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων και όχι η συγκέντρωση μάζας, καθώς μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτά ευκολότερα ομάδες εξισώσεων που περιγράφουν την αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων χωρίς όμως να μεταβάλλεται η συνολική τους μάζα. Τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο διαφορετικών μεθόδων μοντελοποίησης της συγκέντρωσης της σωματιδιακής ύλης σε κάποιο εσωτερικό χώρο παρουσιάζονται στο σχήμα 3-1.



Σχήμα 3-1: Σύγκριση μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD μοντέλα) και μοντέλων ισοζυγίου μάζας.

Μοντέλα ισοζυγίου μάζας έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές για την εκτίμηση της μεταβολής της συγκέντρωσης μάζας ή αριθμού σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Οι Hussein et al. (2005) τροποποίησαν ένα μοντέλο που είχε αναπτυχθεί για εξωτερικούς χώρους (UHMA, Korhonen et al., 2004) και υπολόγισαν τη συγκέντρωση αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων σε σπίτι στη Φιλανδία. Οι Dimitropoulou et al. (2006) ανέπτυξαν μοντέλο εσωτερικών χώρων (INDAIR) με το οποίο μελέτησαν τη συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{2,5} και PM₁₀ σε σπίτια στη Μεγάλη Βρετανία. Οι Nazaroff και Cass (1989) ανέπτυξαν το μοντέλο ΜΙΑQ το οποίο περιελάμβανε και διαδικασίες αλλαγής του μεγέθους των σωματιδίων (συσσωμάτωση και συμπύκνωση). Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και για τη μελέτη της επίδρασης του καπνού του τσιγάρου στην ποιότητα του αέρα (Miller και Nazaroff, 2001). Οι Sohn et al. (2007) συνδύασαν το μοντέλο ΜΙΑQ με μοντέλο που προσομοιώνει τη ροή του αέρα σε εσωτερικούς χώρους και υπολόγισαν τη συγκέντρωση μάζας σε τριώροφο κτίριο. Οι Ott et al. (1996) και Kleipis et al. (1996) ανέπτυξαν μοντέλα ισοζυγίου μάζας για τον υπολογισμό της μεταβολής της συγκέντρωσης του καραιδούς τως συσολογισμό της μεταβολής της συγκέντρωση μάζας σε αεροδρόμια και εστιατόρια αντίστοιχα. Στα μοντέλα αυτά

θεωρήθηκε ότι τα σωματίδια που εκπέμπονται δεν μεταβάλλουν το αρχικό τους μέγεθος. Το μοντέλο των Ott et al. βελτιώθηκε αργότερα για χρήση σε πολλαπλά εσωτερικά μικροπεριβάλλοντα (Ott et al., 2003) και αξιολογήθηκε με ελεγχόμενες μετρήσεις σε σπίτια στις ΗΠΑ. Οι Schneider et al. (1999) ανέπτυξαν ένα ημιεμπειρικό μοντέλο που στηρίζεται πειραματικά δεδομένα για τον υπολογισμό των παραμέτρων που περιγράφουν τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων. Στο μοντέλο αυτό οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να προβλεφθεί η συγκέντρωση των σωματιδίων που εισέρχονται από τον εξωτερικό χώρο σε ένα ακατοίκητο διαμέρισμα (Schneider et al., 2004). Ο Matson (2005) χρησιμοποίησε την εξίσωση διατήρησης της μάζας για να μελετήσει την επίδραση της ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον στη μείωση της εσωτερικής συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων. Στους χώρους που εξέτασε δεν υπήρχαν ισχυρές εσωτερικές πηγές και δεν περιέλαβε στο μοντέλο του τη διαδικασία της συσσωμάτωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις στα μοντέλα έχει προταθεί η ενσωμάτωση υποπρογράμματων που περιλαμβάνουν χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε αλλαγές στη σωματιδιακή μάζα μέσω μετατροπών από την αέρια στη στερεή φάση και το αντίστροφο (Carslaw, 2006; Kulmala et al., 1999; Weschler και Shields, 1999). Σε ελάχιστες όμως περιπτώσεις έχουν αξιολογηθεί τα μοντέλα αυτά με πειραματικά δεδομένα (Lunden et al., 2003).

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μοντέλο ισοζυγίου μάζας για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης μάζας και αριθμού σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερα από ένα μικροπεριβάλλοντα που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω γνωστών ρυθμών ανταλλαγής αέρα. Στο μοντέλο περιλαμβάνονται οι διαδικασίες της συσσωμάτωσης και της συμπύκνωσης, που είναι οι σημαντικότερες διεργασίες αλλαγής του μεγέθους των σωματιδίων. Το μοντέλο με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τον υπολογισμό, μέσω διαδικασίας ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ πειραματικών τιμών και αποτελεσμάτων του μοντέλου, σημαντικών παραμέτρων του εσωτερικού χώρου, όπως οι ρυθμοί εκπομπής των εσωτερικών πηγών, τα χαρακτηριστικά των σχισμών από τις οποίες γίνεται η διείσδυση των σωματιδίων και οι ταχύτητας εναπόθεσης στο χαρακτηριστικών της φασματικής κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων, καθώς

και με μοντέλο υπολογισμού της έκθεσης ενός ατόμου σε αιωρούμενα σωματίδια. Με τους παραπάνω συνδυασμούς μοντέλων επιτυγχάνεται πληρέστερη μελέτη της μεταβολής τόσο της συγκέντρωσης, όσο και του μεγέθους των σωματιδίων αλλά ταυτόχρονα και εκτίμηση της επίδρασης τους στην ανθρώπινη υγεία.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Αν θεωρήσουμε ένα εσωτερικό χώρο, όπου ο αέρας είναι καλά αναμεμειγμένος, οι μεταβολές στην ολική συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων θα οφείλονται στη μεταφορά, σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο ή σε άλλους εσωτερικούς χώρους, στην εναπόθεση των σωματιδίων στις επιφάνειες, στις εκπομπές σωματιδίων από εσωτερικές πηγές και στην επαναιώρηση σωματιδίων που έχουν ήδη εναποτεθεί στον εσωτερικό χώρο. Επομένως η εξίσωση μάζας μπορεί να γραφεί με τη γενική μορφή:

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{C}_{\mathbf{i}}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \mathbf{S}_{\mathbf{i}} - \mathbf{L}_{\mathbf{i}}\mathbf{C}_{\mathbf{i}} \tag{3-1}$$

όπου C_i η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο i, S_i το άθροισμα όλων των διεργασιών που αυξάνουν τη συγκέντρωση στο χώρο i και L_i το άθροισμα όλων των διεργασιών που μειώνουν τη συγκέντρωση στο χώρο i. Η συγκέντρωση C_i μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε συγκέντρωση μάζας, είτε σε συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων. Στην περίπτωση του αριθμού σωματιδίων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συσσωμάτωση που μειώνει το συνολικό αριθμό, αλλά όχι τη συνολική μάζα. Πολλές από τις διεργασίες που οδηγούν στη μεταβολή της συγκέντρωσης εξαρτώνται από το μέγεθος των σωματιδίων. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί της εναπόθεσης των σωματιδίων είναι διαφορετικοί για τα λεπτά σωματίδια (διάχυση στις επιφάνειες) και για τα χονδρά σωματίδια (βαρυτική καθίζηση). Επομένως η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να προσαρμοστεί έτσι ώστε να περιγράφει τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση μια χαρακτηριστική παράμετρο του μεγέθους τους. Η παράμετρος που επιλέχθηκε ήταν η διάμετρος κινητικότητας (βλέπε κεφάλαιο 2, παράγραφο 2.1.1). Όλα τα σωματίδια θεωρήθηκε ότι είναι σφαιρικά και έχουν την ίδια πυκνότητα. Με βάση την διάμετρο κινητικότητας, το συνεχές φάσμα μεγεθών των σωματιδίων χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα με καθορισμένα όρια. Τα σωματίδια σε κάθε τμήμα χαρακτηρίζονται από τις ίδιες φυσικοχημικές ιδιότητες. Κάθε τμήμα χαρακτηρίζεται από τη γεωμετρική μέση διάμετρο, που είναι η ρίζα του γινομένου της ανώτερης και της κατώτερης τιμής διαμέτρου. Επομένως η εξίσωση 3-1 μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{C}_{i,j}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = S_{i,j} - L_{i,j}C_{i,j} \tag{3-2}$$

όπου ο δείκτης j αναφέρεται στον αριθμό ή τη μάζα των σωματιδίων που βρίσκονται στο j τμήμα διαμέτρων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αριθμό ίσο με τον αριθμό των τμημάτων στα οποία χωρίστηκε το συνεχές φάσμα μεγεθών.

Οι διεργασίες που επηρεάζουν τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: 1) αυτές που προσθέτουν ή αφαιρούν μάζα σωματιδίων από κάποιο τμήμα μεγεθών μεταβάλλοντας και τη συνολική μάζα του φάσματος 2) σε αυτές που μεταφέρουν μάζα από ένα τμήμα σε κάποιο άλλο, λόγω αλλαγής του μεγέθους των σωματιδίων χωρίς όμως να μεταβάλλεται η συνολική μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων. Στη δεύτερη περίπτωση πρέπει να σημειωθεί ότι αντίθετα με τη μάζα μεταβάλλεται ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων.

Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, στο μοντέλο περιλαμβάνονται οι διεργασίες της εναπόθεσης στις επιφάνειες και της διείσδυσης από τον εξωτερικό χώρο μέσω σχισμών ή οπών στο σκελετό του κτιρίου. Οι διεργασίες αυτές εξαρτώνται σημαντικά από το μέγεθος των σωματιδίων. Περιλαμβάνονται επίσης οι εκπομπές από πηγές εσωτερικού χώρου, η διείσδυση στον εσωτερικό χώρο μέσω συστημάτων μηχανικού εξαερισμού με φίλτρα και η μεταφορά στο εξωτερικό περιβάλλον ή σε άλλους εσωτερικούς χώρους. Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι διεργασίες της συσσωμάτωσης και της συμπύκνωσης ατμών πάνω στα σωματίδια. Η διαδικασία της πυρηνοποίησης δεν έχει ενσωματωθεί στο μοντέλο καθώς δεν έχουν αποσαφηνιστεί ακόμα πλήρως οι μηχανισμοί που οδηγούν στη δημιουργία νέων σωματιδίων από ατμούς πρόδρομων αέριων ενώσεων. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι διεργασίες που ενσωματώνονται στο μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο.

3.2.1 Εναπόθεση σε επιφάνειες

Η εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων περιγράφεται με την εξίσωση:

$$I_{d,dp,t} = -\frac{1}{V_t} \sum_{j} A_{t,j} v_{dp,t,j} C_{dp,t}$$
(3-3)

όπου V_i ο όγκος του εσωτερικού χώρου i, A_{i,j} η j επιφάνεια του εσωτερικού χώρου i, v_{dp,i,j} η ταχύτητα εναπόθεσης των σωματιδίων με διάμετρο d_p στην επιφάνεια j του εσωτερικού χώρου i και C_{dp,i} η συγκέντρωση των σωματιδίων με διάμετρο d_p στον εσωτερικό χώρο i. Η ταχύτητα εναπόθεσης έχει διαφορετική τιμή ανάλογα με τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Για την περιγραφή της ταχύτητας εναπόθεσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Lai και Nazaroff (2000) στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η εναπόθεση λόγω διάχυσης (τυρβώδους διάχυσης και διάχυσης Brown) στις επιφάνειες και λόγω βαρυτικής καθίζησης. Δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοφόρεση, καθώς είναι σημαντική για σωματίδια μεγαλύτερα από 5 μm, που δεν συναντώνται συχνά στο εσωτερικό περιβάλλον. Σύμφωνα με τις εξισώσεις αυτές η ταχύτητα εναπόθεσης για κάθετη επιφάνεια (v_{dw}), για επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα πάνω (v_{du}) και για επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα κάτω (v_{dd}) είναι:

$$v_{dw} = \frac{u^*}{I} \tag{3-4}$$

$$v_{du} = \frac{v_s}{1 - exp\left(-\frac{v_s I}{u^*}\right)}$$
(3-5)

$$v_{dd} = \frac{v_s}{exp\left(-\frac{v_s I}{u^*}\right) - I}$$
(3-6)

όπου u^* η ταχύτητα τριβής (βλέπε κεφάλαιο 2, παράγραφο 2.3.2), v_s η βαρυτική ταχύτητα καθίζησης και Ι μία παράμετρος που εξαρτάται από το συντελεστή ιξώδους του αέρα, το συντελεστή διάχυσης, και τη διάμετρο του σωματιδίου. Πιο συγκεκριμένα η παράμετρος Ι για σωματίδια μεγαλύτερα από 10 nm δίδεται από τη σχέση:

$$I = \begin{bmatrix} 3,64 \ Sc^{2/3}(a-b) + 39 \end{bmatrix}$$
(3-7)
$$a = \frac{1}{2} ln \left[\frac{\left(10,92 \ Sc^{-1/3} + 4,3\right)^3}{Sc^{-1} + 0,0609} \right] + \sqrt{3} tan^{-1} \left[\frac{8,6 - 10,92 \ Sc^{-1/3}}{\sqrt{3} \ 10,92 \ Sc^{-1/3}} \right]$$
(3-8)
$$b = \frac{1}{2} ln \left[\frac{\left(10,92 \ Sc^{-\frac{1}{3}} + 4,3\right)^3}{Sc^{-1} + 7,669 \times 10^4 (r^+)^3} \right] + \sqrt{3} tan^{-1} \left[\frac{2r^4 - 10,92 \ Sc^{-\frac{1}{3}}}{\sqrt{3} \ 10,92 \ Sc^{-\frac{1}{3}}} \right]$$

Στις παραπάνω εξισώσεις Sc είναι ο αριθμός Schmidt, που ισούται με

 $Sc = vD^{-1} \qquad (3-10)$

όπου υ το κινηματικό ιξώδες του αέρα και D ο συντελεστής διάχυσης λόγω κίνησης Brown (βλέπε κεφάλαιο 2, παράγραφο 2.3.2). Για το κινηματικό ιξώδες έχουμε ότι:

$$v = \frac{\mu}{\rho_{atr}}$$

(3-10)

(3-9)

όπου μ το ιξώδες του αέρα (1,72 × 10⁻⁵ Kg/cm s) και ρ_{air} η πυκνότητα του αέρα (1,2 Kg/m³). Η παράμετρος r⁺ δίδεται από τη σχέση:

$$r^{+} = d_{p}u^{*}(2v)^{-1}$$
(3-11)

όπου d_p η διάμετρος του σωματιδίου.

Η παράμετρος Ι για σωματίδια μικρότερα από 10 nm δεν μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 3-7, καθώς έχει θεωρηθεί ότι η διάχυση Brown είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη τυρβώδη διάχυση. Για τα πολύ μικρά σωματίδια χρησιμοποιείται στο μοντέλο ο πίνακας 3-1 (Lai και Nazaroff, 2000):

d _p (nm)	Ι
1	29,1
2	49,1
3	71
4	120,3
5	174,9
6	234,2
7	364
8	432,7
9	504,5
10	579,3

Πίνακας 3-1: Διόρθωση του συντελεστή Ι για πολύ μικρά σωματίδια

Η ταχύτητα ν
s λόγω βαρυτικής καθίζησης δίδεται από τη σχέση:

$$v_{s} = \frac{I}{I8} \frac{d_{p}^{2} \rho g C_{C}}{\mu}$$
 (3-12)

όπου d_p η διάμετρος του σωματιδίου, ρ η πυκνότητα των σωματιδίων μ το ιξώδες του αέρα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και C_c ο συντελεστής διόρθωσης μετατόπισης (slip correction factor).

Ο συντελεστής αυτός έχει τιμή που προσεγγίζει τη μονάδα στην περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων όπου η βαρυτική καθίζηση είναι σημαντική και δίδεται από τη σχέση:

$$C_{o} = \mathbf{1} + \frac{2\lambda}{d_{p}} \left[1,257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1,1d_{p}}{2\lambda}\right) \right]$$

(3-13)

όπου λ το μέσο ελεύθερο μήκος των σωματιδίων (0,066 × 10^{-6} m). Παρατηρούμε ότι μέσω του συντελεστή διάχυσης Brown και της ταχύτητας λόγω βαρυτικής καθίζησης, η ταχύτητα εναπόθεσης σε μία επιφάνεια εξαρτάται από το μέγεθος του σωματιδίου. Η μοναδική παράμετρος που καλείται να εισάγει ο χρήστης για τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης είναι η ταχύτητα τριβής. Επομένως θα πρέπει να υπάρχει μία εκτίμηση της ταχύτητας τριβής για τον εσωτερικό χώρο που εξετάζεται. Τυπικές τιμές της ταχύτητας τριβής για εσωτερικούς χώρους με φυσικό αερισμό είναι μεταξύ 0,3 cm/s και 3 cm/s (Lai και Nazaroff, 2000). Η χρήση συστημάτων εξαερισμού ή ανεμιστήρα αυξάνει τις τιμές της ταχύτητας τριβής (Hussein et al., 2009). Στα σχήματα 3-2 α,β,γ παρουσιάζονται οι ταχύτητας τριβής. Η αύξηση της ταχύτητας τριβής, που ισοδυναμεί με την αύξηση της έντασης της τυρβώδους διάχυσης, αυξάνει και τις τιμές τις ταχύτητας εναπόθεσης. Η καθίζηση λόγω βαρύτητας γίνεται σημαντική για σωματίδια μεγαλύτερα από 500 nm και για εναπόθεση σε επιφάνειες με προσανατολισμό πους τα πάνω.

Αφού υπολογιστούν οι ταχύτητες εναπόθεσης για κάθε είδος επιφάνειας του εσωτερικού χώρου ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων, το μοντέλο υπολογίζει το συντελεστή απομάκρυνσης λόγω εναπόθεσης β:

$$\beta = \frac{v_{dw}A_{w,t} + v_{du}A_{u,t} + v_{dd}A_{d,t}}{V_t}$$

(3-14)

όπου $A_{w,i}$ το συνολικό εμβαδόν των κάθετων επιφανειών, $A_{u,i}$ το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών με φορά προς τα πάνω, $A_{d,i}$ το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών με φορά προς τα

κάτω και V_i ο όγκος του εσωτερικού χώρου i. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στον διαθέσιμο όγκο για τα σωματίδια και προκύπτει από την αφαίρεση του όγκου των αντικειμένων που υπάρχουν στο χώρο από το συνολικό όγκο που υπολογίζεται με βάση τις διαστάσεις του χώρου.

Οι παράμετροι που παρέχει ο χρήστης του μοντέλου για τον υπολογισμό της εναπόθεσης εκτός της ταχύτητας τριβής είναι ο διαθέσιμος όγκος του χώρου τα εμβαδά των επιφανειών ανάλογα με τον προσανατολισμό τους. Στο σχήμα 3-3 παρουσιάζεται ο συντελεστής απομάκρυνσης λόγω εναπόθεσης για τυπικό δωμάτιο με διαστάσεις 3 m × 4 m × 3 m.





Σχήμα 3-2: Ταχύτητα εναπόθεσης σε κατακόρυφη επιφάνεια (α), επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα πάνω (β) και επιφάνεια με προσανατολισμό προς τα κάτω (γ) για ταχύτητες τριβής 0,3 cm/s, 1 cm/s και 3 cm/s.



Σχήμα 3-3: Συντελεστής απομάκρυνσης λόγω εναπόθεσης σε δωμάτιο με διαστάσεις (3 m × 4 m × 3 m). Η ταχύτητα τριβής λαμβάνεται ίση με 1 cm/s.

3.2.2 Συσσωμάτωση

Για να περιγραφεί η συσσωμάτωση, το φάσμα μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων χωρίζεται σε k τμήματα, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από τη μέση γεωμετρική διάμετρο d_p. Η συσσωμάτωση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_{coag,dp,t} = \frac{dC_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} K_{k-j,j} C_{k-j} C_j - C_k \sum_{j=1}^k K_{k,j} C_j$$
(3-15)

όπου K οι συντελεστές συσσωμάτωσης, των οποίων ο υπολογισμός (λαμβάνοντας υπόψη και τη διόρθωση κατά Dahneke) παρατίθεται στο κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.3.4.1). Στην παραπάνω εξίσωση, ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος αντιστοιχεί στην αύξηση της συγκέντρωσης στο τμήμα k λόγω λόγω συσσωμάτωσης, ενώ με τον δεύτερο όρο υπολογίζεται αντίστοιχα η μείωση της συγκέντρωσης.

Αρχικά ο αλγόριθμος του μοντέλου πραγματοποιεί έλεγχο σχετικά με το τμήμα μεγέθους που καταλήγει ένα σωματίδιο εξαιτίας της σύγκρουσης δύο άλλων σωματιδίων. Όταν συγκρουστούν δύο σωματίδια με διαμέτρους d_i και d_i προκύπτει ένα σωματίδιο με διάμετρο d_k:

$$d_k = \sqrt[s]{d_i^2 + d_j^2} \tag{3-16}$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα αθροίσματα στην εξίσωση 3-15. Για κάθε σωματίδιο διαμέτρου d_p (ξεκινώντας από τη μικρότερη διάμετρο και συνεχίζοντας αυξητικά) ελέγχεται το αποτέλεσμα της σύγκρουσης του με τα υπόλοιπα σωματίδια και ανάλογα με το αποτέλεσμα αυξάνεται η συγκέντρωση στο αντίστοιχο τμήμα μεγέθους. Παράλληλα μειώνεται η συγκέντρωση στα τμήματα των σωματιδίων που συγκρούονται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με χρονικό βήμα το οποίο καθορίζεται από το χρήστη (η προκαθορισμένη τιμή είναι 1 s). Έτσι μετά το τέλος του χρονικού βήματος δημιουργείται ένα νέο φάσμα κατανομής μεγεθών λόγω συσσωμάτωσης.

Στο σχήμα 3-4 παρουσιάζεται με μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγεθών εξαιτίας της συσσωμάτωσης. Η κατανομή τη χρονική στιγμή t=0 αντιστοιχεί σε πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη καύση τσιγάρου (τα πειράματα παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4). Η ολική αρχική συγκέντρωση ήταν 1,5 × 10⁶ #/cm³. Παρατηρούμε ότι μετά τα 150 min (συγκέντρωση ολικών σωματιδίων 0,6 × 10⁶ #/cm³) η διαδικασία της συσσωμάτωσης δεν μεταβάλλει σημαντικά την κατανομή του φάσματος, αλλά εξακολουθεί να ελαττώνεται ο συνολικός αριθμός σωματιδίων. Σε διάφορες μελέτες αναφέρεται ότι η συσσωμάτωση είναι σημαντική για συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 10⁶ #/cm³ (Hinds, 1999; Seinfeld και Pandis, 1998). Οι παραπάνω εργασίες αναφέρονταν σε αρχική συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων ενός μόνο μεγέθους. Νεότερες μελέτες για κατανομές σωματιδίων με διάφορα μεγέθη έδειξαν ότι η τιμή πρέπει να μειωθεί σε συγκέντρωση 10⁴ #/cm³ (Hussein et al., 2009). Γενικά το φαινόμενο εξασθενεί όσο μειώνεται ο συνολικός αριθμός των μικρών σωματιδίων.



Σχήμα 3-4: Μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους λόγω συσσωμάτωσης.

3.2.3 Διείσδυση από το εξωτερικό περιβάλλον

Ο συντελεστής διείσδυσης είναι μία αδιάστατη ποσότητα που ισούται με το κλάσμα των σωματιδίων του εξωτερικού περιβάλλοντος που μπορούν να εισέλθουν στον εσωτερικό χώρο μέσω σχισμών και ρωγμών στο σκελετό του κτιρίου. Είναι συνάρτηση του μεγέθους των σωματιδίων καθώς τα πολύ μικρά σωματίδια δυσκολεύονται να εισέλθουν λόγω διάχυσης, ενώ τα πολύ μεγάλα σωματίδια λόγω αδράνειας και βαρυτικής καθίζησης στο εσωτερικό των σχισμών (Jeng et al.; 2003; Mosley et al., 2001). Μπορεί να λάβει τιμές από μηδέν έως μονάδα (τιμή ίση με τη μονάδα λαμβάνεται σε περίπτωση που υπάρχουν ανοιχτά παράθυρα σε χώρους με φυσικό αερισμό).

Ο συντελεστής διείσδυσης στο μοντέλο περιγράφεται από τη σχέση:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{a}} \times \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{d}} \tag{3-17}$$

όπου P_g ο συντελεστής διείσδυσης λόγω βαρυτικής καθίζησης και P_d ο συντελεστής διείσδυσης λόγω διάχυσης εξαιτίας της κίνησης Brown. Οι παραπάνω επιμέρους συντελεστές δίδονται από

τις σχέσεις 2-11 και 2-14 που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν διαφορετική επίδραση στα διάφορα μεγέθη σωματιδίων. Η διάχυση στις επιφάνειες των σχισμών λόγω κίνησης Brown είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός εναπόθεσης σωματιδίων, για σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 100 nm και η επίδραση του μηχανισμού μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της διαμέτρου των σωματιδίων. Αντίθετα τα χονδρά σωματίδια εναποτίθενται αποκλειστικά λόγω βαρυτικής καθίζησης. Στο σχήμα 3-5 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή διείσδυσης σαν συνάρτησης του μεγέθους των σωματιδίων με ταυτόχρονη απεικόνιση της επίδρασης κάθε μηχανισμού.

Ο χρήστης του μοντέλου καλείται να δώσει τις χαρακτηριστικές μέσες τιμές των διαστάσεων των σχισμών του κτιρίου (μήκος και ύψος), καθώς και τη ροή του αέρα μέσα στη σχισμή. Επειδή οι παράμετροι αυτοί είναι δύσκολο να υπολογιστούν μπορεί ο χρήστης να εισάγει απευθείας τιμές για το συντελεστή ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Η προκαθορισμένη από το μοντέλο τιμή είναι μονάδα για όλα τα μεγέθη σωματιδίων. Στο σχήμα 3-6 παρουσιάζεται η απεικόνιση του συντελεστή διείσδυσης για σχισμή ύψους d=0,1 mm, μήκους z=3 cm και για ταχύτητα αέρα μέσα στη σχισμή U=10 cm/s. Παρατηρούμε ότι τα σωματίδια με διαμέτρους μεταξύ 200 nm και 500 nm εισέρχονται ευκολότερα από το εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 3-5: Επίδραση των μηχανισμών διάχυσης και βαρυτικής καθίζησης στη διείσδυση των σωματιδίων μέσω σχισμών στο σκελετό των κτιρίων.



Σχήμα 3-6: Τιμές του συντελεστή διείσδυσης για σχισμή με χαρακτηριστικά: ;ύψος d=0,1 mm, μήκος z=3 cm και ταχύτητα αέρα U=10 cm/s.

3.2.4 Ανταλλαγή αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον

Η μεταβολή της συγκέντρωσης λόγω ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να περιγραφεί με την εξίσωση:

$$I_{out,t,dp} = \frac{1}{V_t} Q_t P_{t,dp} C_{out,dp} - \frac{1}{V_t} Q_t C_{tn,t,dp}$$
3-18

όπου Q_i ο ρυθμός εισροής αέρα στο χώρο i από το εξωτερικό περιβάλλον μέσω του οποίου εισέρχονται σωματίδια στον εσωτερικό χώρο (m³/s) , V_i ο όγκος του χώρου i (m³), P_{i,dp} ο συντελεστής διείσδυσης για σωματίδια διαμέτρου d_p, C_{in,i,dp} η εσωτερική συγκέντρωση των σωματιδίων με διάμετρο d_p (#/cm³) και C_{out,dp} η εξωτερική συγκέντρωση των σωματιδίων με διάμετρο d_p (#/cm³) και C_{out,dp} η εξωτερική συγκέντρωση των σωματιδίων με διάμετρο d_p (#/cm³). Η ανταλλαγή αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον περιγράφεται συνήθως με την παράμετρο λ που ισούται με το πηλίκο της ροής του αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον

$$\lambda_t = \frac{Q_t}{V_t}$$

3-19

Ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα λ είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας όσον αφορά τη μεταβολή της συγκέντρωσης σε κάποιο εσωτερικό χώρο. Σε περίπτωση εκπομπών από εσωτερικές πηγές, υψηλές τιμές του λ οδηγούν σε γρήγορη απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων στο εξωτερικό περιβάλλον και αντίστοιχα σε γρήγορη μείωση της εσωτερικής συγκέντρωσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των τριών βασικών μηχανισμών απομάκρυνσης δηλαδή της εναπόθεσης στις επιφάνειες, της συσσωμάτωσης και την μεταφοράς στο εξωτερικό περιβάλλον. Πραγματοποιήθηκε εκτέλεση του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου για τρεις διαφορετικούς ρυθμούς ανταλλαγής αέρα (0 h⁻¹, 0,3 h⁻¹ και 1 h⁻¹). Θεωρήθηκε εσωτερικός χώρος με διαστάσεις 3 m × 4 m × 3 m. Η εξωτερική συγκέντρωση θεωρήθηκε ίση με μηδέν, ενώ σαν αρχική εσωτερική συγκέντρωση λήφθηκε η μέγιστη συγκέντρωση που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια πειράματος μελέτης εκπομπών από καύση τσιγάρου. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3-7, ο κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η μεταφορά τους προς το εξωτερικό περιβάλλον. Η αύξηση του ρυθμού

ανταλλαγής αέρα αυξάνει σημαντικά το ρυθμό μείωσης της εσωτερικής συγκέντρωσης. Το άνοιγμα των παραθύρων έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του ρυθμού ανταλλαγής αέρα και επομένως ο τακτικός αερισμός προτείνεται σαν μέτρο για τη μείωση της εσωτερικής συγκέντρωσης σε περιοχές με χαμηλές εξωτερικές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 3-7: Μεταβολή του λόγου της τελικής προς την αρχική συγκέντρωση αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων για τρεις τιμές του ρυθμού ανταλλαγής αέρα. Οι διαδικασίες της εναπόθεσης και της συσσωμάτωσης περιλαμβάνονται στους μηχανισμούς απομάκρυνσης. Για την περιγραφή της εναπόθεσης έχει ληφθεί ταχύτητα τριβής u*=1 cm/s.

Θεωρώντας μηδενικό ρυθμό ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον, διαπιστώνουμε ότι η συσσωμάτωση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε περιπτώσεις που έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων, ιδιαίτερα αν πρόκειται για μικρού μεγέθους σωματίδια (Σχήμα 3-7). Επειδή κάθε σύγκρουση παράγει ένα σωματίδιο και αφαιρεί δύο, εκτός από τη μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγεθών, έχουμε γρηγορότερη μείωση της συγκέντρωσης των ολικών σωματιδίων. Το φαινόμενο εξασθενεί με τη μείωση του ολικού αριθμού σωματιδίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-8.

3.2.5 Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων

Η μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων εξαρτάται από το ρυθμό ανταλλαγής αέρα μεταξύ των χώρων αυτών, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από τις βαθμίδες της πίεσης και της θερμοκρασίας και από τη ενίσχυση της ροής λόγω μηχανικών μέσων (π.χ. χρήση ανεμιστήρα). Η μεταβολή στη συγκέντρωση περιγράφεται από τη σχέση:

$$J_{exch,t,dp} = \frac{1}{V_t} \sum_{j} (Q_{j,t} C_{tn,dp,j} - Q_{t,j} C_{tn,dp,t})$$

(3-20)

όπου $Q_{j,i}$ και $Q_{i,j}$ οι τιμές της ροής αέρα μεταξύ των χώρων j,i και i,j αντίστοιχα (m³/s), V_i ο όγκος του χώρου i (m³) και $C_{in,dp,i}$, $C_{in,dp,j}$ οι συγκεντρώσεις σωματιδίων με διάμετρο d_p στους χώρους i και j αντίστοιχα. Γενικά η ροή αέρα από και προς ένα εσωτερικό χώρο δεν είναι πάντοτε η ίδια (Hussein et al., 2005). Οι τιμές της ροής αέρα εισάγονται από το χρήστη.



Σχήμα 3-8: Μεταβολή της ολικής συγκέντρωσης σωματιδίων λόγω εναπόθεσης και λόγω παράλληλης δράσης εναπόθεσης και συσσωμάτωσης. Η ταχύτητα τριβής έχει ληφθεί ίση με u*=1 cm/s.

3.2.5 Μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων

Η μεταφορά σωματιδίων μεταξύ εσωτερικών χώρων εξαρτάται από το ρυθμό ανταλλαγής αέρα μεταξύ των χώρων αυτών, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από τις βαθμίδες της πίεσης και της θερμοκρασίας και από τη ενίσχυση της ροής λόγω μηχανικών μέσων (π.χ. χρήση ανεμιστήρα). Η μεταβολή στη συγκέντρωση περιγράφεται από τη σχέση:

$$I_{exch,t,dp} = \frac{1}{V_t} \sum_{j} (Q_{j,t}C_{tn,dp,j} - Q_{t,j}C_{tn,dp,t})$$

(3-20)

όπου $Q_{j,i}$ και $Q_{i,j}$ οι τιμές της ροής αέρα μεταξύ των χώρων j,i και i,j αντίστοιχα (m³/s), V_i ο όγκος του χώρου i (m³) και $C_{in,dp,i}$, $C_{in,dp,j}$ οι συγκεντρώσεις σωματιδίων με διάμετρο d_p στους

χώρους i και j αντίστοιχα. Γενικά η ροή αέρα από και προς ένα εσωτερικό χώρο δεν είναι πάντοτε η ίδια (Hussein et al., 2005). Οι τιμές της ροής αέρα εισάγονται από το χρήστη.

3.2.6 Πηγές εσωτερικού χώρου

Ο χρήστης καλείται να εισάγει χρονικά μεταβαλλόμενους ρυθμούς εκπομπής ανάλογα με τα μέγεθος των σωματιδίων για κάθε εσωτερικό χώρο (S_{i,dp}). Οι ρυθμοί εκπομπής μπορεί να έχουν μονάδες μάζας προς χρόνο ή αριθμού σωματιδίων προς χρόνο.

3.2.7 Επαναιώρηση

Η διεργασία της επαναιώρησης δεν περιγράφεται αναλυτικά καθώς δεν έχουν αποσαφηνιστεί ακόμα πλήρως οι μηχανισμοί που οδηγούν στην επαναφορά στον αέρα ενός σωματιδίου που έχει εναποτεθεί πρωτύτερα σε κάποια επιφάνεια. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει χρονικά μεταβαλλόμενους ρυθμούς εκπομπής ανάλογα με τη διάμετρο των σωματιδίων (R_{dp}) και η επαναιώρηση αντιμετωπίζεται ως μία επιπλέον εσωτερική πηγή. Η προκαθορισμένη τιμή για τους ρυθμούς εκπομπής λόγω επαναιώρησης είναι μηδέν.

3.2.8 Συμπύκνωση ατμών σε σωματίδια

Η μεταβολή στη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω συμπύκνωσης ατμών στην επιφάνεια τους περιγράφεται από τη σχέση:

$$I_{cond,dp,t} = \frac{v_{dp}^{*}}{v_{dp} - v_{dpt}} C_{tn,dp^{t},t} - \frac{v_{dp}^{*}}{v_{dptt} - v_{dp}} C_{tn,dp^{t},t}$$
(3-21)

όπου v_{dp} ο όγκος του σωματιδίου με διάμετρο d_p και $v_{dp'}$, $v_{dp''}$ οι όγκοι των σωματιδίων στο προηγούμενο και στο επόμενο τμήμα μεγεθών του φάσματος. Η μεταβολή στον όγκο ενός

σφαιρικού σωματιδίου εξαιτίας της συμπύκνωσης ατμών στην επιφάνεια του υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_{dp} = 2\pi \beta_w v_w (D_{dp} + D_w) (d_p + d_w) (C_w - C_{w,eq} K_e)$$

(3-22)

όπου D_{dp} και D_w οι συντελεστές διάχυσης του σωματιδίου και του μορίου του ατμού αντίστοιχα, d_p και d_w οι διάμετροι του σωματιδίου και του μορίου του ατμού αντίστοιχα, v_w ο όγκος του μορίου του ατμού, K_e ο συντελεστής διόρθωσης λόγω του φαινομένου Kelvin (Hinds 1999), C_w η συγκέντρωση του ατμού και C_{w,eq}. η συγκέντρωση ισορροπίας του ατμού. Η χρήση της διαδικασίας της συμπύκνωσης είναι προς το παρόν περιορισμένη, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για ατμούς νερού και σωματίδια που αποτελούνται από μία χημική ένωση και έχουν ίδια πυκνότητα για όλα τα μεγέθη. Το φάσμα κατανομής μεγεθών των σωματιδίων μεταβάλλεται λόγω της συμπύκνωσης και οι εξισώσεις επιλύονται λαμβάνοντας τη νέα μορφή του φάσματος κατανομής μεγεθών.

3.2.9 Εξίσωση διατήρησης της μάζας με όλες τις διεργασίες

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση διατήρησης της μάζας παίρνει τη μορφή:

$$\frac{dC_{tn,dp,t}}{dt} = J_{d,dp,t} + J_{coag,dp,t} + J_{out,t,dp} + J_{exch,t,dp} + J_{cond,dp,t} + S_{t,dp} + R_{t,dp}$$
(3-23)

3.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο χρήστης καλείται να εισάγει τα αρχικά δεδομένα για την εφαρμογή του μοντέλου. Τα δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων ή μεταβάλλονται χρονικά εισάγονται μέσω αρχείων excel. Αρχικά υπολογίζονται οι συντελεστές που είναι απαραίτητοι για

την επίλυση των εξισώσεων (ταχύτητα εναπόθεσης, συντελεστής διείσδυσης, συντελεστές συσσωμάτωσης). Στη συνέχεια επαναπροσδιορίζεται το φάσμα κατανομής μεγεθών των σωματιδίων λόγω συσσωμάτωσης και συμπύκνωσης με χρονικό βήμα που καθορίζεται από το χρήστη. Έπειτα επιλύεται αριθμητικά η εξίσωση της διατήρησης μάζας με αριθμητική μέθοδο (μέθοδος Runge-Kutta). Τα αποτελέσματα εξάγονται σε αρχεία excel, ενώ παρέχονται και διαγράμματα της μεταβολής της συγκέντρωσης ανάλογα με τη διάμετρο των σωματιδίων και το χρόνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chang, T.J., Hu, T.S., Transport mechanisms of airborne particulate matters in partitioned indoor environment. Building and Environment, 43, 886–895.

Chen, F., Yu, S.C.M., Lai, A.C.K., 2006. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. Atmospheric Environment, 40, 357–367.

Guo, Z., 2002. Review of indoor emission source models. Part 1. Overview. Environmental Pollution, 120, 533–549.

Dimitroulopoulou, C., Ashmore, M.R., Hill, M.T.R, Byrne, M.A., Kinnersley, R., 2006. INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes. Atmospheric Environment, 40, 6362–6379.

Hinds, W. C. (1999). Aerosol technology. 2nd ed. John Wiley & Sons, New Yrok.

Hussein, T., Korhonen, H., Herrmann, E., Hämeri, K., Lehtinen, K., Kulmala, M., 2005. Emission Rates Due to Indoor Activities: Indoor Aerosol Model Development, Evaluation, and Applications. Aerosol Sciemce and Technology, 39, 1111–1127.

Hussein, T., Kulmala, M., 2008. Indoor aerosol modeling: basic principles and practical applications. Water Air Soil Pollution: Focus, 8, 23–34.

Hussein, T., Hruška, A., Dohányosová, P., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M., Smolok, J., 2009a. Evaluation of deposition rates of aerosol particles on smooth surfaces inside a test chamber. Atmospheric Environment 43, 905–914.

Jeng, J.C., Kindzierski, W.B., Smith, D.W., 2003. Modeling entry of micron-sized and submicron-sized particles into the indoor environment. Aerosol Science and Technology, 37, 753-769.

Kleipis, N.E., Ott, W.R., Switzer, P., 1996. A multiple smoker model for predicting indoor air quality in public lounges. Environmental Science and Technology 30, 2813-2820.

Korhonen, H., Lehtinen, K. E. J., and Kulmala, M., 2004. Aerosol dynamic model UHMA: Model development and validation. Atmospheric Chemistry and Physics, 4, 757–771.

Kulmala, M., Asmi, A., and Pirjola, L. (1999). Indoor air aerosol model: the effect of outdoor air, filtration and ventilation on indoor concentrations. Atmospheric Environment, 33, 2133–2144.

Lai, A.C.K., Chen, F.Z., 2007. Modeling of cooking-emitted particle dispersion and deposition in a residential flat: A real room application. Building and Environment, 42, 3253–3260.

Lai, A.C.K. and Nazaroff, W.W., 2000. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces, J. Aerosol Sci., 31, 463–476.

Lunden, M.M., Revzan, K.L., Fischer, M.L., Thatcher, T.L., Littlejohn, D., Hering, S.V. and Brown, N.J., 2003. The transformation of outdoor ammonium nitrate aerosols in the indoor environment, Atmospheric Environment, 37, 5633–5644.

Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R., Whitfield, C., 2001 Penetration of ambient fine particles into the indoor environment, Aerosol Science and Technology, 34, 2001.

Matson, U., 2005. Comparison of the modelling and the experimental results on concentrations of ultra-fine particles indoors. Building and Environment, 40, 996–1002

Miller, S. L., and Nazaroff, W. W., 2001. Environmental tobacco smoke particles in multizone indoor environments, Atmospheric Environment 35, 2053–2067.

Nazaroff, W. W., and Cass, G. R., 1989. Mathematical Modeling of Indoor Aerosol Dynamics. Environmental Science Technology, 23, 157–166.

Nazaroff, W. W., 2004. Indoor particle dynamics. Indoor Air 14 (7), 175-183.
Ott, W., Switzer, P., Robinson, J., 1996. Particle concentrations inside a tavern before and after the prohibition of smoking: Evaluation and performance of an indoor air quality model. Journal of Air & Waste Management Association, 46, 1120-1134.

Ott, W.R., Klepeis, N.E., Switzer, P., 2003. Analytical solutions to compartmental indoor air quality models with application to environmental tobacco smoke concentrations measured in a house. Journal of the Air and Waste Management Association 53, 918-936.

Richmond-Bryant, J., Eisner, A.D., Brixey, L.A., Wiener, R.W., 2006. Short-term dispersion of indoor aerosols: can it be assumed the room is well mixed? Building and Environment, 41, 156–163.

Riffat, S. B., 1991. The influence of tracer gases on the accuracy of interzonal airflow measurements. Applied Energy, 38, 67-77.

Schneider, T., Kildeso, J., Breum, N.O., 1999. A two compartment model for determining the contribution of sources surface deposition and resuspension to air and surface dust concentration levels in occupied rooms. Building and Environment Journal, 34, 583-595.

Schneider, T., Jensen, K.A., Clausen P.A., Afshari, A., Gunnarsen, L., Wahlin, P., Glasius, M., Palmgren, F., Nielsen, O.J., Fogh, C.L., 2004. Prediction of indoor concentration of 0.5-4 μ m particles of outdoor origin in an uninhabited apartment. Atmospheric Environment, 38, 6349-6359.

Seinfeld, H. S., and Pandis, S. N. (1998). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2nd ed. John Wiley & Sons. New York.

Sohn, M. D., Apte, M.G., Sextro, R. G., Lai, A.C.K., 2007. Predicting size-resolved particle behavior in multizone buildings. Atmospheric Environment, 41, 1473–1482.

Weschler, C.J., Shields, H.C., 1999. Indoor ozone/terpene reactions as a source of indoor particles. Atmospheric Environment, 33, 2301-2312.

Zhao B., Li, X., Zhang, Z., 2006. Numerical Study of Particle Deposition in Two Differently Ventilated Rooms. Indoor and Built Environment, 13, 443–451.

Zhao, B., Chen, C., Tan, Z., 2009. Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model. Aerosol Science, 40, 29-43.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΠΗΓΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους μεταβάλλονται σημαντικά λόγω των εκπομπών σωματιδίων από πηγές που βρίσκονται στο εσωτερικό περιβάλλον. Σε πολλές περιπτώσεις οι εσωτερικές πηγές οδηγούν σε αυξημένες τιμές συγκέντρωσης σωματιδιακής ύλης (αύξηση πάνω από δέκα φορές σε σχέση με τη συγκέντρωση χωρίς πηγές) για μικρά ή μεγάλα χρονικά διαστήματα (Thatcher και Layton, 1995; Wallace, 2006). Ο προσδιορισμός του μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων είναι σημαντικός για τον υπολογισμό της πραγματικής δόσης που εισέρχεται και εναποτίθεται στα διάφορα σημεία του αναπνευστικού συστήματος και στη συνέχεια των επιδράσεων που έχουν τα σωματίδια στην ανθρώπινη υγεία (Mitsakou et al., 2007).

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη περιβάλλοντος, όπως η γεωμετρία του, η ύπαρξη επίπλωσης ή αντικειμένων, ο εξαερισμός και η επικοινωνία του με άλλους εσωτερικούς χώρους (Lee και Awbi, 2003; Guo et al., 2008; Thatcher et al., 2002). Για να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν η επίδραση των παραπάνω παραγόντων, οι εκπομπές από εσωτερικές πηγές μελετήθηκαν σε σφραγισμένους θαλάμους ή σε εργαστηριακούς χώρους. Οι Afshari et al. (2005) μελέτησαν τις εκπομπές από διάφορες πηγές όπως, χρήση σπρέι, τηγάνισμα, χρήση ηλεκτρικής σκούπας και τσιγάρο σε ένα πλήρους μεγέθους θάλαμο. Οι Lee και Wang (2006) εξέτασαν τις εκπομπές αέριων ρυπαντών από κεριά, οι οποίες περιελάμβαναν μεταξύ άλλων αιωρούμενα σωματίδια, VOCs, NMHC, NO_x, ενώ οι Pagels et al. (2009)

μελέτησαν σε ένα ανοξείδωτο μεταλλικό θάλαμο τα χημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων που εκπέμπονται από την καύση κεριών. Οι Buonanno et al. (2009) υπολόγισαν ρυθμούς εκπομπής σωματιδίων κατά τη διάρκεια διαφόρων τύπων μαγειρέματος, με τα πειράματα να πραγματοποιούνται στον περιορισμένο χώρο ενός εργαστηρίου. Οι Yang et al. (2007) μελέτησαν 9 διαφορετικούς τύπους από αρωματικά ξυλάκια, η καύση των οποίων πραγματοποιήθηκε μέσα σε θάλαμοτο για να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των PAHs που περιέχονται στον εκπεμπόμενο καπνό. Οι Lee et al. (2001) χρησιμοποίησαν θάλαμο για να μελετήσουν τις εκπομπές κατά τη χρήση εξοπλισμού γραφείου, ενώ τέλος οι Kinsey et al. (2009) χρησιμοποίησαν εργαστηριακούς χώρους για να εξετάσουν τις εκπομπές και τα φυσικά χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων λόγω συνηθισμένων καθημερινών δραστηριοτήτων κάτω από ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

4.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων στο εργαστήριο Αιωρούμενων Σωματιδίων του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με στόχο την μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών και της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία εκπέμπονται κατά τη διάρκεια καθημερινών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους. Για να πραγματοποιηθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια ο προσδιορισμός των ρυθμών εκπομπής πηγών αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους, επιλέχθηκε να γίνει προσομοίωση των πηγών στον περιορισμένο χώρο του εργαστηρίου. Στο χώρο αυτό, σε αντίθεση με την πραγματοποίηση μετρήσεων που έγινε σε σπίτια ή γραφεία στα πλαίσια του προγράμματος URBAN-AEROSOL (Lazaridis et al., 2008; Smolik et al., 2004) μπορούσε να ελεγχθεί καλύτερα η επίδραση άλλων παραγόντων (εξωτερικό περιβάλλον, παρουσία ατόμων, άλλες εσωτερικές πηγές) στις εκπομπές από τις επιλεγμένες πηγές. Επιπλέον υπήρχε η δυνατότητα της παρακολούθησης, μέσω του συστήματος κλιματισμού, των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας που επικρατούσαν στον χώρο.

4.2.1 Μεθοδολογία πειραματικών μετρήσεων

Το εργαστήριο που επιλέχθηκε για την μελέτη των πηγών βρίσκεται στο ισόγειο του κτιρίου του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έχει διαστάσεις 3,37 m × 6,12 m × 2,90 m (μήκος, πλάτος ,ύψος αντίστοιχα) και συνολικό όγκο περίπου 60 m³. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε το χρονικό διάστημα 11/9/2006 έως 14/10/2006 και διήρκησε συνολικά 36 ημέρες. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση πηγών τις 29 ημέρες, ενώ τις υπόλοιπες ημέρες οι μετρήσεις αφορούσαν υπολογισμό συγκεντρώσεων υποβάθρου ή χρονικά διαλλείματα για να «καθαριστεί» ο αέρας του εργαστήριου από τα εκπεμπόμενα σωματίδια. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το εργαστήριο δεν χρησιμοποιήθηκε για κάποιο άλλο σκοπό. Κάθε ημέρα πραγματοποιούνταν μόνο δύο πειράματα, και για τις 26 από τις 29 ημέρες αφορούσαν την προσομοίωση της ίδια πηγής, ώστε να καθοριστούν με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται από κάθε πηγή. Δεν επιτρεπόταν η είσοδος σε άτομα πέρα από τους υπεύθυνους για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την παρακολούθηση της καλής λειτουργίας των οργάνων μέτρησης, οι οποίοι παρέμεναν στο χώρο μόνο όταν ήταν απολύτως απαραίτητο.

Το εργαστήριο επικοινωνεί με το υπόλοιπο κτίριο με πόρτα μήκους 1,25 m και με το εξωτερικό περιβάλλον με παράθυρο μήκους 1 m και ύψους 1,7 m. Τόσο το παράθυρο, όσο και η πόρτα παρέμεναν κλειστά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Κάποιες ημέρες που δεν πραγματοποιήθηκαν πειράματα το παράθυρο έμεινε ανοιχτό για να γίνει ανανέωση του αέρα του εργαστηρίου. Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν εκπομπές από πηγές (τσιγάρο, χρήση σεσουάρ, χρήση σπρέι, κεριά και αρωματικά ξυλάκια) έξω από την πόρτα για να διαπιστωθεί η επίδραση τους στη συγκέντρωση μέσα στο εργαστήριο. Σε καμία περίπτωση δεν υπήρξαν σημαντικές μεταβολές τόσο στη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων όσο και στη συγκέντρωση μάζας. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τις ώρες εργασίας και διαπιστώθηκε ότι ούτε η ύπαρξη ατόμων έξω από το εργαστήριο συμβάλλει στη μεταβολή της συγκέντρωσης μέσα σε αυτό. Τέλος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου για να εκτιμηθεί η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Διαπιστώθηκε ότι οι μεταβολές της εξωτερικής συγκέντρωσης δεν οδηγούσαν σε ανάλογη μεταβολή της συγκέντρωσης εντός του εργαστηρίου.

Η αύξηση της συνολικής επιφάνειας σε εσωτερικό χώρο οδηγεί στην αύξηση της εναπόθεσης των αιωρούμενων σωματιδίων και στη γρηγορότερη μείωση της συγκέντρωσης τους (Lai, 2004). Για να περιοριστεί η διαθέσιμη επιφάνεια, αλλά και για να είναι όσο το δυνατόν ίδιες οι συνθήκες κατά την προσομοίωση των διαφόρων πηγών, όλος ο εργαστηριακός εξοπλισμός που δεν ήταν απαραίτητος στις μετρήσεις τοποθετήθηκε σε κλειστά ντουλάπια.

4.2.2 Όργανα μέτρησης

Η μέτρηση της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων PM_{2,5} πραγματοποιήθηκε με τον αναλυτή μάζας DustTrak Aerosol Monitor (TSI, μοντέλο 8520, ρυθμός ροής αέρα 1,7 l/min) ενώ μια προσεγγιστική τιμή της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων PM₁ μετρήθηκε με τον αναλυτή P-Trak Ultrafine Particle Counter (TSI, μοντέλο 8525, ρυθμός ροής αέρα 0,8 l/min). Ένα δεύτερο DustTrack μέτραγε τη συγκέντρωση στον εξωτερικό χώρο. Η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων μετρήθηκε με αναλυτή διαφορικής κινητικότητας GRIMM SMPS+C (GRIMM, CPC, μοντέλο 5.403 και LONG Vienna DMA). Ο αναλυτής ήταν προγραμματισμένος να μετράει σωματίδια με μέγεθος 11,1 έως 1083,3 nm σε 44 κανάλια. Ο χρόνος κάθε κύκλου μέτρησης ήταν 7 λεπτά και 34 δευτερόλεπτα (συμπεριλαμβανομένου του χρόνου καθαρισμού των σωλήνων). Η ροή αέρα στην είσοδο του οργάνου ήταν 0,3 l/min ενώ η ροή αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα του DMA ήταν 3 l/min. Όλα τα όργανα λειτουργούσαν συνέχεια σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων με εξαίρεση το P-Track πρέπει να εφοδιάζεται με αιθυλική αλκοόλη κάθε περίπου 8 ώρες. Έτσι το P-Track προγραμματιζόταν να εκκινεί 2-3 ώρες πριν την προσομοίωση κάθε πηγής.

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία μετρήθηκαν με τους καταγραφείς Tinytag data loggers (Gemini Ltd). Η θερμοκρασία στη διάρκεια των πειραμάτων κυμάνθηκε μεταξύ 23,7 και 29,4 °C, ενώ η σχετική υγρασία μεταξύ 46 και 70%.

4.3.3 Πηγές εσωτερικών χώρων

Οι πηγές που επιλέχθηκαν για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των εκπεμπόμενων σωματιδίων, αλλά και την ποσοτικοποίηση των εκπομπών τους αναφέρονται σε καθημερινές δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε να εξεταστούν οι εκπομπές από: 1) κεριά, 2) θερμές επιφάνειες (εστίες) ηλεκτρικής κουζίνας 3) βρασμό νερού, 4) τηγάνισμα, 5) χρήση ηλεκτρικής σκούπας 6) χρήση σεσουάρ μαλλιών, 7) χρήση σπρέι, 8) τσιγάρο, 9) αρωματικά ξυλάκια. Για την πραγματοποιήθηκε η ίδια ηλεκτρική κουζίνα. Πιο συγκεκριμένα ακολουθήθηκε η παρακάτω μεθοδολογία για την εκπόνηση κάθε πειράματος.

1) Κεριά

Ένας τύπος κεριού που χρησιμοποιείται για τη διασπορά του καπνού του τσιγάρου χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα πειράματα. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά δέκα πειράματα. Σε όλες τις περιπτώσεις το άναμμα του κεριού έγινε με αναπτήρα ενώ το σβήσιμο πραγματοποιήθηκε είτε φυσώντας με το στόμα (οκτώ πειράματα) είτε με επαφή με βρεγμένα δάχτυλα (δύο πειράματα). Η διάρκεια της καύσης του κεριού ήταν τριάντα λεπτά στις περισσότερες περιπτώσεις (πέντε πειράματα), ενώ στα υπόλοιπα πειράματα κυμάνθηκε από δέκα έως εξήντα λεπτά. Για να εξεταστεί η ανάμιξη του αέρα στον εσωτερικό χώρο, το κερί τοποθετήθηκε σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από τα όργανα μέτρησης, 70-90 cm (τρία πειράματα) και 220-300 cm (επτά πειράματα).

2) Θερμές επιφάνειες (εστίες)

Εξετάστηκαν οι εκπομπές από εστία μικρής σε μέγεθος ηλεκτρικής κουζίνας με τρεις εστίες και συνολική ισχύ 3800 Watt. Επιλέχθηκε η μεσαία σε ισχύ εστία, η οποία λειτουργούσε στη μέγιστη ένταση σε όλα τα πειράματα. Η διάρκεια λειτουργίας ήταν είκοσι επτά λεπτά (τέσσερα

πειράματα) ή εξήντα λεπτά (δύο πειράματα) Μετά την εκτέλεση των δύο πρώτων πειραμάτων μετρήθηκαν πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις σωματιδίων που προερχόταν από σωματίδια σκόνης που βρισκόταν πάνω στη εστία. Για το λόγο αυτό πριν την εκτέλεση των υπολοίπων πειραμάτων πραγματοποιήθηκε καθαρισμός της εστίας με βρεγμένο πανί και καθαριστική ουσία.

3) Βρασμός νερού.

Ο βρασμός πραγματοποιήθηκε σε μικρό μαγειρικό σκεύος (κατσαρόλα) και η διάρκεια όλων των πειραμάτων (τέσσερα πειράματα) ήταν είκοσι επτά λεπτά. Το σκεύος τοποθετήθηκε στη μεσαία εστία της κουζίνας, η οποία λειτούργησε στη μέγιστη ένταση. Ο βρασμός διαρκούσε περίπου είκοσι λεπτά σε όλα τα πειράματα. Μετά το τέλος του βρασμού το σκεύος απομακρυνόταν από την εστία και το νερό χυνόταν σε μικρό νεροχύτη μέσα στο εργαστήριο.

4) Τηγάνισμα

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο ίδιο μαγειρικό σκεύος και στη ίδια εστία που χρησιμοποιήθηκαν τα πειράματα με το βρασμό. Αρχικά τοποθετήθηκαν στο σκεύος 15 ml ελαιόλαδο, το οποίο θερμάνθηκε στη μέγιστη ένταση για τέσσερα λεπτά. Στη συνέχεια μία φλοίδα κρεμμυδιού τεμαχίστηκε σε μικρά κομμάτια (μεγέθους περίπου 0,5 cm) και τοποθετήθηκαν στο καυτό λάδι. Το κρεμμύδι τηγανίστηκε (πραγματοποιούνταν συνεχής ανάδευση) για 10 λεπτά. Έπειτα το σκεύος με το κρεμμύδι μεταφερόταν εκτός του εργαστηρίου.

5) Χρήση ηλεκτρικής σκούπας

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε τρεις φορές στο δάπεδο του εργαστηρίου το όποίο είναι καλυμμένο με PVC. Η ηλεκτρική σκούπα (μοντέλο Philips, Universe) λειτουργούσε στη μέγιστη ισχύ (1600 Watt).

6) Χρήση σεσουάρ μαλλιών

Το σεσουάρ (μοντέλο Philips, Profile curls 1600) τέθηκε σε λειτουργία για δέκα λεπτά σε όλα τα πειράματα. Τα πέντε πρώτα πειράματα έγιναν με το σεσουάρ να λειτουργεί στη θέση ζεστού αέρα, ενώ το τελευταίο με λειτουργία στη θέση μέτρια ζεστού αέρα.

7) Χρήση σπρέι

Κάθε ψεκασμός στο κέντρο του εργαστηρίου διαρκούσε περίπου 1 δευτερόλεπτο. Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα με οκτώ ψεκασμούς και τρία πειράματα με είκοσι ψεκασμούς.

8) Τσιγάρο

Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα. Το άναμμα και το σβήσιμο του τσιγάρου (Classic Papastratos, Nicotine: 0,6 mg, Tar: 7 mg, CO: 8 mg) έγινε με αναπτήρα μέσα στο εργαστήριο.

9) Αρωματικά ζυλάκια

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα. Σε κάθε πείραμα έγινε άναμμα και απευθείας σβήσιμο με αναπτήρα για το κάθε ξυλάκι, ώστε αυτό να παράγει μόνο καπνό. Το κάθε ξυλάκι αφέθηκε να καεί ολοκληρωτικά, με το χρόνο καύσης να ποικίλει μεταξύ είκοσι και είκοσι έξι λεπτών.

4.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ - ΦΑΣΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τα πειράματα έδειξε ότι υπάρχει σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων υποβάθρου λόγω των εκπομπών σωματιδίων από τις εξεταζόμενες πηγές. Η αύξηση αφορά τις περισσότερες περιπτώσεις τόσο τη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων, όσο και τη συγκέντρωση μάζας. Οι συγκεντρώσεις παραμένουν σε υψηλά επίπεδα και μετά την απενεργοποίηση των πηγών, ενώ στην περίπτωση των κεριών οι εκπομπές συνεχίστηκαν και μετά το σβήσιμο τους. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων υποβάθρου αυξήθηκε κατά μέσο όρο 102, 34, 59 και 36,5 φορές κατά τη διάρκεια των εκπομπών από τα κεριά, τα αρωματικά ξυλάκια, το τσιγάρο και το τηγάνισμα αντίστοιχα. Η αύξηση στη συγκέντρωση μάζας PM_{2,5} για τις παραπάνω πηγές ήταν 11, 18, 36, και 8,5 φορές την τιμή υποβάθρου. Οι διαφορές στην αύξηση της συγκέντρωσης μάζας και στην αύξηση της συγκέντρωσης αριθμού σωματίδια που

εκπέμπονται από κάθε πηγή. Οι εκπομπές μικρού μεγέθους σωματιδίων συντελούν στη αύξηση του αριθμού τους, ενώ οι εκπομπές μεγαλύτερων σωματιδίων αυξάνουν σημαντικά τη συνολική μάζα. Ενδεικτική είναι η περίπτωση της χρήσης σπρέι όπου η συγκέντρωση μάζας PM_{2,5} αυξήθηκε 22 φορές ενώ η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων αυξήθηκε μόλις 1,8 φορές, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση σπρέι εκπέμπονται σωματίδια μεγάλου μεγέθους και συγκεκριμένα μεγαλύτερα από 1 μm (το μέγιστο μέγεθος σωματιδίων που ανιχνεύονται με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας είναι 1,083 μm).

Στον πίνακα 4-1 παρουσιάζονται οι μέσες μέγιστες τιμές συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων και συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων PM_{2,5} καθώς και η σχετική αύξηση της συγκέντρωσης σε σχέση με τις τιμές υποβάθρου για τις διάφορες πηγές που προσομοιώθηκαν στο εργαστήριο. Οι τιμές υποβάθρου αναφέρονται στις μέσες τιμές των συγκεντρώσεων για τις περιόδους χωρίς δραστηριότητες.

Πίνακας 4-1: Μέσες μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων αριθμού σωματιδίων και μάζας σωματιδίων
ΡΜ2,5 για τις διάφορες πηγές. Οι δύο τελευταίες στήλες αναφέρονται στη σχετική αύξηση της
συγκέντρωσης σε σχέση με την τιμή της πριν της έναρξη των πειραμάτων. Η πηγή «Θερμή
εστία» αναφέρεται στα πειράματα μετά τον καθαρισμό της εστίας.

Πηγή	Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων (× 10 ⁴ #/cm ³)	Συγκέντρωση μάζας ΡΜ _{2,5} (μg/m ³)	Σχετική αύξηση αριθμού (φορές)	Σχετική αύξηση μάζας (φορές)
Κερί	32 ± 20	376 ± 156	102	10,7
Αρωματικά ξυλ.	$10,7 \pm 2,3$	$641 \pm 0,035$	34	18,3
Τσιγάρο	$18,5 \pm 2,4$	1251 ± 202	58,7	36
Τηγάνισμα	$11,5 \pm 2,5$	296 ± 310	36,5	8,5
Σπρέι	$0,\!56\pm0,\!08$	793 ± 225	1,8	22
Σεσουάρ	$19,4 \pm 25$	Αμελητέα	61,7	Αμελητέα
Ηλ. σκούπα	$0,8 \pm 0,3$	Αμελητέα	2,5	Αμελητέα
Βρασμός νερού	Αμελητέα	Αμελητέα	Αμελητέα	Αμελητέα
Θερμή εστία	2,6 ± 2	Αμελητέα	8,5	Αμελητέα

Στον πίνακα 4-1 παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του σεσουάρ (συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων), του κεριού, του τηγανίσματος (συγκέντρωση μάζας) και της θερμής εστίας εμφανίζονται πολύ υψηλές τιμές για τη σχετική απόκλιση. Στην περίπτωση του σεσουάρ η υψηλή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι στο πρώτο πείραμα παρατηρήθηκε πολύ υψηλή συγκέντρωση λόγω της καύσης των σωματιδίων που βρισκόταν μέσα στο σεσουάρ από τις προηγούμενες χρήσεις του. Στα υπόλοιπα πειράματα η μέγιστη μετρούμενη συγκέντρωση μειώθηκε σημαντικά. Το πρώτο πείραμα επιλέχθηκε να μελετηθεί μαζί με όλα τα υπόλοιπα καθώς αναφέρεται στην πραγματική χρήση του σεσουάρ σε καθημερινές συνθήκες.

Όσον αφορά τις εκπομπές από το κερί, διαπιστώθηκε ότι παρόλο που σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κερί, οι μετρούμενες συγκεντρώσεις εμφάνισαν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Οι διαφορές αυτές δεν σχετίζονταν άμεσα με το χρόνο καύσης, καθώς σε πειράματα μικρότερης χρονικής διάρκειας παρατηρήθηκαν υψηλότερες μέγιστες συγκεντρώσεις. Όμως η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, όπως επίσης και η αναλογία των πολύ μικρών σωματιδίων (νάνο-σωματιδίων και υπέρλεπτων σωματιδίων) σε σχέση με τα ολικά μετρούμενα σωματίδια ήταν η ίδια για όλα τα πειράματα εκπομπών από κερί.

Στην περίπτωση του τηγανίσματος, σε δύο από τα πειράματα οι συγκεντρώσεις μάζας ήταν 10 φορές μικρότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα άλλα δύο πειράματα. Η ανάλυση των μετρήσεων από τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας έδειξε ότι υπήρξε σημαντική διαφορά στα σωματίδια στην περιοχή 200-1083 nm ανάμεσα στις δύο ομάδες πειραμάτων. Στα πρώτα δύο πειράματα τα σωματίδια αυτά είχαν τιμές μεγαλύτερες από 2500 #/cm³, ενώ στα άλλα δύο μικρότερες από 1000 #/cm³. Επομένως στις δύο πρώτες περιπτώσεις, είχαμε και εκπομπή μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων από κάποιο χρονικό διάστημα και μετά. Οι συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων δεν επηρεάστηκαν, αφού τα σωματίδια αυτά συνεισφέρουν ελάχιστα στον συνολικό αριθμό σωματιδίων.

Τέλος, οι εκπομπές από θερμή εστία εξαρτώνται από την ποσότητα της σκόνης που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια της εστίας. Η ποσότητα αυτή ήταν διαφορετική για κάθε πείραμα, με αποτέλεσμα διαφοροποιήσεις και στις αντίστοιχες εκπομπές.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το μέγεθος των σωματιδίων κατά τη διάρκεια των μέγιστων συγκεντρώσεων από τις εκπομπές των μελετώμενων πηγών. Τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν ευκολότερα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου και να προκαλέσουν βλάβες στην υγεία του (Oberdorster, 2001; Seaton et al., 1995). Στον πίνακα 4-2 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων για τα σωματίδια με μέγεθος 0-500, 500-100, 100-200 και 200-1083 nm τη στιγμή όπου καταγράφηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις.

Στον πίνακα 4-2 φαίνεται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός νάνο-σωματιδίων (<50 nm) εμφανίστηκε στις περιπτώσεις της καύσης του κεριού και του σεσουάρ, όπου σχεδόν όλα τα εκπεμπόμενα σωματίδια βρίσκονταν σε αυτή την περιοχή μεγέθους. Υψηλές συγκεντρώσεις υπέρλεπτων σωματιδίων (<100 nm) παρουσιάστηκαν στα πειράματα με αρωματικά ξυλάκια, τσιγάρο και τηγάνισμα. Για τα αρωματικά ξυλάκια και το τσιγάρο είχαμε υψηλές συγκεντρώσεις και για τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 100 nm. Ειδικά στην περίπτωση του τσιγάρου εμφανίστηκαν αρκετά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 200 nm, κάτι που δικαιολογεί και τις υψηλές τιμές συγκέντρωσης μάζας που παρατηρήθηκαν.

Πηγή	11-50 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	50-100 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	100-200 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	200-1083 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)
Κερί	$20,9 \pm 19,9$	0,87 ± 0,11	0,7 ± 0,4	0,7 ± 0,6
Αρωματικά	$2,\!29 \pm 0,\!75$	$4 \pm 0,\!98$	$3,75 \pm 0,65$	$0,57 \pm 0,06$
ξυλάκια				
Τσιγάρο	$5,33 \pm 0,81$	$6{,}69\pm0{,}93$	$5,33 \pm 0,75$	$1,11 \pm 0,06$
Τηγάνισμα	$9,39 \pm 2,12$	$1,26 \pm 0,78$	$0,\!63 \pm 0,\!44$	$0,\!19 \pm 0,\!15$
Σπρέι	$0,081 \pm 0,027$	$0,14 \pm 0,012$	$0,2 \pm 0,046$	$0,14 \pm 0,031$
Σεσουάρ	19 ± 25	$0,11 \pm 0,028$	$0,15 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,16$

Πίνακας 4-2: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης. Η πηγή «Θερμή εστία» αναφέρεται στα πειράματα μετά τον καθαρισμό της εστίας.

Ηλ. σκούπα	$0,\!66 \pm 0,\!27$	$0,07 \pm 0,03$	$0,\!05\pm0,\!04$	$0,\!02\pm0,\!01$
Βρασμός νερού	Αμελητέα	Αμελητέα	Αμελητέα	Αμελητέα
Θερμή εστία	$1,28 \pm 0,68$	$0,85 \pm 0,84$	$0,\!48 \pm 0,\!48$	$0,05 \pm 0,03$

Στον πίνακα 4-2 φαίνεται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός νάνο-σωματιδίων (<50 nm) εμφανίστηκε στις περιπτώσεις της καύσης του κεριού και του σεσουάρ, όπου σχεδόν όλα τα εκπεμπόμενα σωματίδια βρίσκονταν σε αυτή την περιοχή μεγέθους. Υψηλές συγκεντρώσεις υπέρλεπτων σωματιδίων (<100 nm) παρουσιάστηκαν στα πειράματα με αρωματικά ξυλάκια, τσιγάρο και τηγάνισμα. Για τα αρωματικά ξυλάκια και το τσιγάρο είχαμε υψηλές συγκεντρώσεις και για τα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 100 nm. Ειδικά στην περίπτωση του τσιγάρου εμφανίστηκαν αρκετά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 200 nm, κάτι που δικαιολογεί και τις υψηλές τιμές συγκέντρωσης μάζας που παρατηρήθηκαν.

Οι εκπομπές από τις πηγές μέσα στο εργαστήριο είχαν σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μεταβολή του φάσματος της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων. Οι διαφορές αυτές εντοπίστηκαν με την επεξεργασία των μετρήσεων από τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας με τον αλγόριθμό AMANpsd. Για κάθε πειραματική μέτρηση υπολογίστηκε το είδος της κατανομής εκείνη τη χρονική στιγμή (μονοκόρυφη, δικόρυφη ή τρικόρυφη) καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της κάθε κορυφής (γεωμετρική μέση διάμετρος (GMD) και γεωμετρική τυπική απόκλιση (σ_g)). Με τον τρόπο αυτό διαπιστώθηκε και πως μεταβάλλεται το φάσμα της κατανομής μεγεθών με το χρόνο αλλά και την επίδραση που είχαν διεργασίες που οδηγούν σε αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων (συσσωμάτωση, συμπύκνωση) στην αλλαγή της φασματικής κατανομής μεγεθών. Στον πίνακα 4-3 παρουσιάζεται το ποσοστό των μονοκόρυφων, δικόρυφων και τρικόρυφών κατανομών για περιόδους με και χωρίς πηγές. Παρατηρούμε ότι η επίδραση των πηγών είχε σαν συνέπεια την εμφάνιση σε ποσοστό 50% μονοκόρυφων κατανομών. Σε συνθήκες υποβάθρου, το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 25%.

Η επίδραση των πηγών οδήγησε και σε κατανομές με μικρότερη γεωμετρική μέση διάμετρο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-1. Το 50% των συνολικών κατανομών σε περιόδους με ενεργές πηγές εμφάνισαν GMD μικρότερη από 50 nm, κάτι που υποδεικνύει ότι τα πολύ μικρά σωματίδια κυριαρχούσαν στο χώρο. Επίσης εμφανίζεται μεγάλο ποσοστό μονοκόρυφων κατανομών στην περιοχή των νάνο-σωματιδίων, κάτι που σημαίνει ότι αρκετές από τις μελετώμενες πηγές εκπέμπουν σε αυτή την περιοχή. Η μετατόπιση του φάσματος σε κατανομές μεγαλυτέρων μεγεθών είναι εμφανής στο διάγραμμα για τις χρονικές περιόδους μετά την απενεργοποίηση των πηγών. Τέλος σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες παρατηρήθηκαν κατανομές κυρίως στην περιοχή συσσώρευσης (accumulation mode), κάτι που είναι φυσιολογικό, αφού τα σωματίδια αυτού του μεγέθους παρουσιάζουν τη μικρότερη εναπόθεση στις επιφάνειες και παραμένουν αιωρούμενα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 4-3: Ποσοστό μονοκόρυφων, δικόρυφων και τρικόρυφων κατανομών για χρονικές περιόδους όπου υπήρχε ή όχι επίδραση των εκπομπών των πηγών. Οι περίοδοι «Απενεργοποίηση πηγών» αναφέρονται στα χρονικά διαστήματα από την απενεργοποίηση των πηγών και μέχρι να επιστρέψει η ολική συγκέντρωση στις τιμές υποβάθρου.

Περίοδος	Μονοκόρυφη	Δικόρυφη	Τρικόρυφη
	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)
Ενεργές Πηγές	48,85	41,38	9,77
Απενεργοποίηση πηγών	47,61	46,08	6,31
Υπόβαθρο	25,21	58,04	16,75





Σχήμα 4-1: Ποσοστά κορυφών σε σχέση με τη γεωμετρική μέση διάμετρο (GMD). Οι μπάρες αναφέρονται στο συνολικό αριθμό των κορυφών (π.χ για τρικόρυφη κατανομή έχουμε τρεις κορυφές), ενώ οι γραμμές στις GMD των κορυφών από μονοκόρυφες (unimodal), δικόρυφες (bimodal) ή τρικόρυφες (trimodal) κατανομές. Το πρώτο διάγραμμα (α) αναφέρεται σε περιόδους με ενεργές πηγές, το δεύτερο (β) στα χρονικά διαστήματα μέχρι να επιστρέψει η συγκέντρωση στις τιμές υποβάθρου και το τρίτο (γ) σε περιόδους χωρίς πηγές.

Η επίδραση των πηγών στην αύξηση της συγκέντρωσης στον εσωτερικό χώρο αλλά και στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του φάσματος κατανομής παρουσιάζεται στο σχήμα 4-2. Πηγές όπως το τηγάνισμα, το τσιγάρο, τα αρωματικά ξυλάκια, αλλά και η θερμή εστία παρουσίασαν υψηλές εκπομπές σωματιδίων. Ειδικά στην περίπτωση του τσιγάρου και των αρωματικών ξυλακιών παρατηρούμε ότι τα σωματίδια παραμένουν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με άλλες πηγές. Με τη χρήση σεσουάρ και ηλεκτρικής σκούπας εκπέμπονται κυρίως μικρού μεγέθους σωματίδια. Για το τσιγάρο και τα αρωματικά ξυλάκια οι κατανομές ήταν μονοκόρυφες κατά τη διάρκεια των εκπομπών και σταδιακά μετατράπηκαν σε δικόρυφες μετά την απενεργοποίηση των πηγών. Τέλος το άνοιγμα του παραθύρου οδηγεί σε αλλαγή του φάσματος της κατανομής μέσα στο εργαστήριο.



(α)

(β)





(γ)

Σχήμα 4-2: Φάσμα κατανομής αριθμού σωματιδίων (dN/dlogD_p) για τις περιόδους 25-30 Σεπτεμβρίου (α), 9-12 Οκτωβρίου (β) και 12-14 Οκτωβρίου (γ). Οι τελείες αντιστοιχούν στις GMD των κατανομών κάθε χρονική στιγμή, όπως υπολογίστηκαν με τον αλγόριθμό AMANpsd.

Παρουσιάζεται στη συνέχεια η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων για κάθε πηγή ξεχωριστά.

Καύση Κεριού

Κατά την καύση του κεριού εμφανίστηκαν οι μέγιστες συγκεντρώσεις αριθμού σωματιδίων σε σχέση με όλες τις πηγές, των οποίων η μέση τιμή για τα 10 πειράματα που διεξήχθηκαν ήταν $3,2 \times 10^5 \pm 2,02 \times 10^5 \text{ #/cm}^3$. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν πριν το τέλος της καύσης σε αντίθεση με τις υπόλοιπες πηγές που εξετάστηκαν, όπου οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίστηκαν με την απενεργοποίηση της πηγής. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις οφείλονται στην έντονη παραγωγή υπέρλεπτων σωματιδίων, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 85% των

σωματιδίων στα πρώτα λεπτά της καύσης. Η παραγωγή υπέρλεπτων σωματιδίων συνεχίστηκε σε όλη τη διάρκεια της καύσης του κεριού, αλλά το ποσοστό τους σε σχέση με τα συνολικά σωματίδια μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα τα υπέρλεπτα σωματίδια να αντιπροσωπεύουν το 50 - 60% των συνολικών σωματιδίων στο τέλος της καύσης του κεριού. Τα μεγαλύτερα σωματίδια που εμφανίζονται δεν παράγονται από την καύση, αλλά δημιουργούνται λόγω συσσωμάτωσης των μικρότερων σε μέγεθος σωματιδίων. Η ανάλυση των μετρήσεων του αναλυτή διαφορικής κινητικότητας με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι στην αρχή της καύσης η φασματική κατανομή των σωματιδίων είναι μονοκόρυφη με GMD μικρότερη από 20 nm. Η έντονη συσσωμάτωση είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση και μίας δεύτερης κατανομής με GMD μεταξύ 130 και 230 nm. Τυπική μεταβολή της GMD και η εμφάνιση της δεύτερης κατανομής σε ένα από τα πειράματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3: Μεταβολή της GMD κατά τη διάρκεια της καύσης του κεριού.

Η μεταβολή της του φάσματος κατανομής μεγέθους σωματιδίων είναι εμφανής και στο σχήμα 4-4 όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της φασματικής κατανομής με το χρόνο.

Η μέση μέγιστη τιμή συγκέντρωσης μάζας $PM_{2,5}$ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν 376 ± 176 μg/m³. Οι Lee και Wang (2006) πραγματοποίησαν πειράματα με 5 διαφορετικά είδη κεριών και κατέγραψαν μέγιστες συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων $PM_{2,5}$ μεταξύ 210 και 440 μg/m³. Η τιμή της συγκέντρωσης μάζας αυξάνονταν συνέχεια σε αντίθεση με τη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων που αυξάνονταν γρήγορα με την έναρξη της εκπομπής και σταθεροποιούνταν κοντά στη μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 4-4: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο.

Το σβήσιμο του κεριού με το στόμα είχε σαν αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (το κερί συνέχισε να σιγοκαίει εκπέμποντας λευκό καπνό). Η φάση αυτή της εκπομπής αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως "smoldering" (Fine et al., 1999; Zai et al., 2006). Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε όταν το σβήσιμο του κεριού έγινε με βρεγμένα δάχτυλα. Η

εκπομπή των μεγάλων σωματιδίων μετά το σβήσιμο του κεριού με το στόμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4-5. Στο διάγραμμα παρατίθενται οι μετρήσεις του οργάνου P-Track όσον αφορά τον αριθμό των σωματιδίων. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί το P-Track κατέγραφε τη συγκέντρωση ανά λεπτό, όπως ακριβώς και το όργανο DustTrack με το οποίο έγιναν οι μετρήσεις μάζας PM_{2,5}. Η εκπομπή κυρίως μεγάλων σωματιδίων μετά το σβήσιμο επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι η αύξηση της μάζας δεν ακολουθήθηκε από μία αντίστοιχη αύξηση στον αριθμό των σωματιδίων.



Σχήμα 4-5: Μεταβολή της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων και μάζας PM2.5 σαν συνάρτηση του χρόνου.

Θερμές επιφάνειες

Η εκπομπή σωματιδίων εξαιτίας της θέρμανσης μίας επιφάνειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα της σκόνης που έχει εναποτεθεί στην επιφάνεια (Pedersen et al., 2001). Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας επιβεβαίωσαν το παραπάνω

συμπέρασμα, καθώς ο καθαρισμός της εστίας μετά τα πρώτα δύο πειράματα οδήγησε σε σημαντική μείωση των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων. Στα δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν πριν τον καθαρισμό (η εστία λειτουργούσε και στις δύο περιπτώσεις για 27 λεπτά) οι μέγιστες συγκεντρώσεις σωματιδίων ήταν $9,22 \times 10^5$ και $1,24 \times 10^5$ #/cm³ αντίστοιχα. Στη συνέχεια η εστία καθαρίστηκε με νερό αναμεμειγμένο με καθαριστική ουσία και πραγματοποιήθηκαν άλλα 4 πειράματα. Στα δύο πρώτα η εστία λειτουργούσε για 27 λεπτά και καταγράφηκε μέγιστη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων $1,38 \times 10^4$ #/cm³, ενώ στα επόμενα δύο πειράματα που διήρκησαν 60 λεπτά η μέγιστη τιμή αριθμού σωματιδίων ήταν $3,95 \times 10^4$ #/cm³. Σε όλα τα πειράματα η συγκέντρωση ξεκίνησε να αυξάνεται περίπου 10 λεπτά μετά την έναρξη λειτουργίας της εστίας και η αύξηση της συνεχίστηκε μέχρι τον τερματισμό της λειτουργίας.

Η υψηλότερη συσσώρευση σκόνης πάνω στην επιφάνεια της εστίας είχε ως αποτέλεσμα την εκπομπή μικρότερου μεγέθους σωματιδίων, καθώς στα πρώτα δύο πειράματα το 90% των σωματιδίων που εκπέμπονταν είχαν διάμετρο μικρότερη από 50 nm. Το ποσοστό αυτό μειώθηκε μεταξύ 45% και 65% στα επόμενα πειράματα. Η κατανομή μεγέθους κατά τη διάρκεια λειτουργίας της εστίας στα πειράματα μετά τον καθαρισμό ήταν δικόρυφη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-6. Η τιμή της GMD και στις δύο επιμέρους κατανομές αυξανόταν κατά τη διάρκεια των εκπομπών.



Σχήμα 4-6: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο.

Μετά το τερματισμό της λειτουργίας της εστίας η κατανομή έγινε σταδιακά μονοκόρυφη. Η αύξηση της τιμής της GMD με την πάροδο του χρόνου παρατηρήθηκε και στα πρώτα δύο πειράματα, αλλά στις περιπτώσεις αυτές η κατανομή ήταν εξαρχής μονοκόρυφη. Η συγκέντρωση μάζας σωματιδίων $PM_{2,5}$ δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τη λειτουργία της πηγής, καθώς τα σωματίδια που εκπέμπονταν είχαν μικρό μέγεθος και δεν συνεισέφεραν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της συνολικής μάζα. Η μέγιστη τιμή για τα πρώτα δύο πειράματα ήταν 34 μg/m³. Οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας ήταν 10 μg/m³ (για τα πειράματα διάρκειας 27 λεπτών) και 32 μg/m³ (για τα πειράματα διάρκειας 60 λεπτών).

Βρασμός νερού

Κατά τη διάρκεια του βρασμού του νερού δεν παρατηρήθηκε αύξηση ούτε στο αριθμό, ούτε στη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι See και Balasubramanian (2006) κατέγραψαν συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων 4,3 ± 2,9 #/cm³ κατά το βρασμό νερού σε κουζίνα αερίου. Οι Dennekamp et al. (2001) πραγματοποίησε πειράματα βρασμού σε ηλεκτρική κουζίνα και σε κουζίνα αερίου. Με χρήση της κουζίνας αερίου παρατήρησε αύξηση της συγκέντρωσης

υποβάθρου και η μέγιστη τιμή που κατέγραψε ήταν 13,1 ± 10⁴ #/cm³. Αντίθετα ο βρασμός σε ηλεκτρική κουζίνα δεν οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης, κάτι που είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Η αύξηση της συγκέντρωσης με χρήση κουζίνας αερίου οφείλεται στη δημιουργία νέων σωματιδίων εξαιτίας της καύσης του αερίου.

Τηγάνισμα

Πειράματα προσομοίωσης τηγανίσματος έχουν διεξαχθεί τόσο σε εργαστηριακούς χώρους, όσο και σε οικιακές κουζίνες (Dennekamp et al., 2001; Li et al., 1993; See και Balasubramanian 2006; Yeung και To, 2008). Τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η αριθμητική συγκέντρωση και η κατανομή μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων εξαρτώνται σημαντικά από διάφορες παραμέτρους όπως είναι ο τρόπος τηγανίσματος (Dennekamp et al., 2001; See και Balasubramanian 2006), το είδος του φαγητού που χρησιμοποιήται (Li et al., 1993) και η θερμοκρασία τηγανίσματος (Yeung και To, 2008). Στην παρούσα εργασία η μέγιστη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κυμάνθηκε μεταξύ 9 $\times 10^4$ και 15×10^4 #/cm³. Οι αντίστοιχες μέγιστες συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων PM_{2.5} κυμάνθηκαν μεταξύ 70 και 600 μ g/m³. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τα πειράματα έδειξε ότι κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος, τα υπέρλεπτα σωματίδια αντιπροσώπευαν πάνω από το 80% των συνολικών σωματιδίων. Παράλληλα παρατηρήθηκε και έντονη συσσωμάτωση, καθώς τα υπέρλεπτα σωματίδια εμφάνισαν τη μέγιστη συγκέντρωση πριν από τα υπόλοιπα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους (σχήμα 4-7). Κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων ήταν μονοκόρυφη και η GMD είχε τιμές μικρότερες από 20 nm. Τριάντα λεπτά μετά την απενεργοποίηση της πηγής το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων ήταν μικρότερο από 70%.



Σχήμα 4-7: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος. Οι τιμές που αντιστοιχούν σε σωματίδια μεγαλύτερα από 50 nm παρουσιάζονται στον δευτερεύοντα άξονα στα δεξιά.

Παρόμοια συμπεράσματα έχουν καταγραφεί και στην υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ο Wallace (2006) μέτρησε συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων για 37 συνεχείς μήνες σε κατοικημένα σπίτια και ανέφερε ότι κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος σε κουζίνα αερίου τα υπέρλεπτα σωματίδια αντιπροσώπευαν πάνω από το 80% των συνολικών σωματιδίων και η κατανομή παρουσίαζε διάμετρο με τιμές μεταξύ 36 και 40 nm. Οι Li et al. (1993) ανέφεραν σε εργασία τους ότι η διάμετρος των εκπεμπόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια τηγανίσματος σε κουζίνα αερίου τα υπέρλεπτα σωματίδια αυτιπροσώπευαν πάνω από το 80% των συνολικών σωματιδίων και η κατανομή παρουσίαζε διάμετρο με τιμές μεταξύ 36 και 40 nm. Οι Li et al. (1993) ανέφεραν σε εργασία τους ότι η διάμετρος των εκπεμπόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια τηγανίσματος ήταν 60 nm και τα υπέρλεπτα σωματίδια αποτελούσαν το 70-80% των συνολικών σωματιδίων. Οι See και Balasubramanian (2006) διεξήγαγαν πειράματα τηγανίσματος σε εργαστήριο και ανέφεραν ότι η συγκέντρωση των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁴ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος, ενώ το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁴ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος, ενώ το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁴ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος ενώ το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁴ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος ενώ το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁴ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος του του τηγανίσματος δυματιδίων κυμάνθηκε μεταξύ 6,4 × 10⁶ και 8,6 × 10⁴ #/cm³ ανάλογα με τον τύπο του τηγανίσματος του τηγονίσματος στα πειράματα της παρούσας εργασίας. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία η αύξηση της

ποσότητας του λαδιού που χρησιμοποιείται στο τηγάνισμα οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές τόσο για τα ολικά, όσο και για τα υπέρλεπτα σωματίδια (See και Balasubramanian 2006;Yeung και To, 2008).

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι για διάστημα δύο ωρών μετά το τέλος του τηγανίσματος η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων είτε παρέμεινε μονοκόρυφη, (η GMD αυξήθηκε στα 70 nm) είτε μετατράπηκε σε δικόρυφη. Οι GMD των δύο κατανομών ήταν 20 nm και 80 nm αντίστοιχα (σχήματα 4-8 και 4-9).



Σχήμα 4-8: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο. Η εκπομπή ξεκίνησε τη χρονική στιγμή t=0.



Σχήμα 4-9: Μεταβολή της GMD του φάσματος κατανομής μεγέθους σωματιδίων με το χρόνο στην περίπτωση τηγανίσματος.

Η αύξηση της GMD οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζεται σημαντικά από τη συσσωμάτωση. Το συμπέρασμα αυτό αναφέρθηκε και στην εργασία των Dennekamp et al. (2001).

Χρήση ηλεκτρικής σκούπας

Στο σχήμα 4-10 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια και μετά τη χρήση της ηλεκτρικής σκούπας. Παρατηρούμε ότι παρουσιάστηκε αύξηση μόνο στη συγκέντρωση των νάνο-σωματιδίων σωματιδίων και η μέση μέγιστη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων για όλα τα πειράματα ήταν 6 × 10³ #/cm³. Η εκπομπή των σωματιδίων αυτών οφείλονταν στη λειτουργία του μηχανισμού της ηλεκτρικής σκούπας. Τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους δεν παρουσίασαν μεταβολή στη συγκέντρωση τους. Δεν παρατηρήθηκε



επίσης αύξηση της μάζας των σωματιδίων PM_{2,5}. Η συγκέντρωση των υπέρλεπτων σωματιδίων επέστρεψε στην τιμή υποβάθρου μέσα σε 20 λεπτά από τη λήξη λειτουργίας της σκούπας.

Σχήμα 4-10: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια χρήσης ηλεκτρικής σκούπας. Η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στην απενεργοποίηση της πηγής.

Σύμφωνα με προηγούμενες εργασίες (Corsi et al., 2008; Ferro et al., 2004) η χρήση ηλεκτρικής σκούπας οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των χονδρών σωματιδίων εξαιτίας της επαναιώρησης τους από τις επιφάνειες, πάνω από τις οποίες διέρχεται η σκούπα. Στις ίδιες εργασίες διαπιστώθηκε ότι οι ρυθμοί επαναιώρησης σωματιδίων μικρότερων από 3 μm είναι σημαντικά μικρότεροι από τους ρυθμούς επαναιώρησης μεγαλύτερων σωματιδίων. Το γεγονός ότι στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή δεν παρατηρήθηκε αύξηση στη συγκέντρωση μάζας οφείλεται στο ότι μετρήθηκε η μάζα των σωματιδίων PM_{2,5} και στο ότι οι επιφάνειες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε η σκούπα ήταν ελάχιστα επιβαρημένες με σκόνη. Το εργαστήριο είχε καθαριστεί πριν την έναρξη των πειραμάτων και κατά τη διάρκεια αυτών

παρέμενε στο χώρο μόνο το απολύτως απαραίτητο προσωπικό για τη λειτουργία των πηγών και των οργάνων.

Χρήση σεσουάρ μαλλιών

Η μέγιστη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων $(5,7 \times 10^5 \text{ #/cm}^3)$ καταγράφηκε στο πρώτο από τα 6 πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Το 98% των σωματιδίων που εκπέμφθηκαν ήταν υπέρλεπτα σωματίδια. Μικρότερη αύξηση στη συγκέντρωση παρατηρήθηκε σε όλα τα πειράματα που το σεσουάρ λειτουργούσε ελευθερώνοντας ζεστό αέρα και το ποσοστό των υπέρλεπτων σωματιδίων ήταν σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερο από 90%. Η μέγιστη συγκέντρωση μειώθηκε στο δεύτερο πείραμα 4,5 φορές και στο τρίτο πείραμα 5,6 σε σχέση με το δεύτερο. Η συγκέντρωση μάζας των σωματιδίων PM_{2,5} δεν αυξήθηκε σε κανένα από τα πειράματα. Οι He et al. (2004) αναφέρουν μέγιστη συγκέντρωση 9,5 × 10³ #/cm³ κατά τη χρήση σεσουάρ στα πλαίσια των καθημερινών δραστηριοτήτων σε σπίτια, ενώ οι Hussein et al. (2006) δεν παρατήρησαν κάτω από παρόμοιες πειραματικές συνθήκες αντίστοιχη μεταβολή της συγκέντρωσης υποβάθρου.

Στα πειράματα αυτής της εργασίας η συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων επέστρεφε στις τιμές πριν την έναρξη της λειτουργίας του σεσουάρ μέσα σε μία ώρα μετά το τέλος της λειτουργίας του. Παρατηρήθηκε συσσωμάτωση των εκπεμπόμενων σωματιδίων, καθώς η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σταδιακή μετατόπιση του φάσματος της κατανομής σε μεγαλύτερες διαμέτρους. Η κατανομή των σωματιδίων ήταν μονοκόρυφη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του σεσουάρ και έγινε σταδιακά δικόρυφη μετά τον τερματισμό της λειτουργίας του. Οι τιμές της GMD ήταν μεταξύ 15 και 20 nm για τις μονοκόρυφες κατανομές. Στις δικόρυφες κατανομές η πρώτη κατανομή είχε GMD στην περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων, ενώ η GMD στη δεύτερη κατανομή αυξανόταν σταδιακά και έφτασε να έχει τιμές μεταξύ 102 και 148 nm, 30 λεπτά μετά το τέλος της λειτουργίας της πηγής. Στο σχήμα 4-11 παρουσιάζεται το φάσμα της κατανομής των σωματιδίων κατά τη διάρκεια του πρώτου πειράματος (οπότε καταγράφηκε και η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης), ενώ στο σχήμα 4-12 παρουσιάζονται τα φάσματα κατανομής στη μέγιστη συγκέντρωσης στα 4 πρώτα πειράματα. Η μείωση των εκπομπών οφείλεται στο μικρότερο αριθμό σωματιδίων που υπήρχαν μέσα στο σεσουάρ. Το σεσουάρ πριν το πρώτο πείραμα χρησιμοποιούνταν κανονικά για το στέγνωμα των μαλλιών. Στο εργαστήριο αφέθηκε απλά να λειτουργεί ελευθερώνοντας αέρα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες δεν είχαμε τη συσσώρευση επιπλέον σωματιδίων μέσα σε αυτό. Άρα οι εκπομπές των υπέρλεπτων σωματιδίων προέρχονται από την καύση σωματιδίων που εισέρχονται μέσα σε αυτό κατά τη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες.



Σχήμα 4-11: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους σωματιδίων κατά τη χρήση σεσουάρ. Οι εκπομπές ξεκίνησαν τη χρονική στιγμή t=0 και ολοκληρώθηκαν τη χρονική στιγμή t=10 min.

Χρήση σπρέι

Με τη χρήση σπρέι εκπέμφθηκαν κυρίως σωματίδια μεγαλύτερα από 1 μm. Η μέση αύξηση στη συγκέντρωση του αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν 1,8 φορές σε σχέση με τις τιμές υποβάθρου. Αντίθετα η συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{2,5} αυξήθηκε κατά μέσο όρο 22 φορές. Η αύξηση αυτή οφείλονταν σε εκπομπές σωματιδίων με μεγέθη μεταξύ 1 και 2,5 μm (ο διαφορικός αναλυτής μετράει σωματίδια μέχρι 1,083 μm και το

DustTrack μέχρι 2,5 μm). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις εκπομπές που προέρχονται από διάφορες μηχανικές διεργασίες. Η μέγιστη συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{2.5} κυμάνθηκε μεταξύ 580 και 1033 μg/m³. Στο σχήμα 4-13 παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων PM_{2.5} κατά τη διάρκεια του πειράματος όπου καταγράφηκε η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης.



Σχήμα 4-12: Φάσμα κατανομής μεγέθους σωματιδίων στα 4 πειράματα χρήσης σεσουάρ τη χρονική στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης για κάθε πείραμα. Οι τιμές για το 1° πείραμα εμφανίζονται στον πρωτεύοντα αριστερό άξονα, ενώ για τα υπόλοιπα 3 πειράματα στο δευτερεύοντα δεξιό άξονα.



Σχήμα 4-13: Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{2.5} κατά τη χρήση σπρέι. Η εκπομπή διήρκησε 20 δευτερόλεπτα.

Τσιγάρο

Η μέση μέγιστη συγκέντρωση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εκπομπών από τσιγάρο ήταν $1.8 \times 10^5 \pm 0.24 \times 10^5 \text{ #/cm}^3$, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη μέση συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{2,5} ήταν $1251 \pm 202 \text{ µg/m}^3$. Τα σωματίδια που εκπέμφθηκαν από το τσιγάρο παρέμειναν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τα σωματίδια που προέκυψαν από εκπομπές από τις υπόλοιπες πηγές. Στην περίπτωση του τσιγάρου η συγκέντρωση στο εργαστήριο επέστρεψε στις τιμές που είχε πριν από την έναρξη του πειράματος σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από 5 ώρες από τη λήξη των εκπομπών (σβήσιμο του τσιγάρου).

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι η φασματική κατανομή μεγεθών των σωματιδίων ήταν μονοκόρυφη όση ώρα η πηγή ήταν ενεργή και παρέμεινε μονοκόρυφη και μετά την απενεργοποίηση της. Τα σωματίδια όλων των μεγεθών απέκτησαν ταυτόχρονα τη μέγιστη συγκέντρωση, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4-14.



Σχήμα 4-14: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια και μετά τη λήξη των εκπομπών από τσιγάρο.

Η GMD των σωματιδίων του τσιγάρου αυξάνονταν τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά το πέρας των εκπομπών και έφτασε στην τιμή 113 nm δύο ώρες μετά το σβήσιμο του τσιγάρου. (σχήμα 4-15). Η αύξηση αυτή υποδεικνύει την ύπαρξη μηχανισμών αύξησης του μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων (συσσωμάτωση, συμπύκνωση).

Αυτή η διαπίστωση έρχεται σε συμφωνία με προγενέστερες εργασίες (Afshari et al., 2005; Morawska et al., 1997; Ning et al., 2006). Οι Robinson και Yu (1999) μελέτησαν τη συσσωμάτωση των σωματιδίων του καπνού του τσιγάρου και ανέφεραν ότι η διαδικασία της συσσωμάτωσης επιδρά σημαντικά στην φασματική κατανομή μεγεθών για συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν την τιμή 10⁹ #/cm³. Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε μετατόπιση της φασματικής κατανομής σε μεγαλύτερα μεγέθη για τιμές συγκέντρωσης της τάξης 10⁴ #/cm³. Καταλήγουμε επομένως στα συμπέρασμα ότι η διεργασία της συσσωμάτωσης είναι σημαντική και για χαμηλότερες συγκεντρώσεις, ενώ πρέπει να μελετηθεί και η επίδραση της συμπύκνωσης στη μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων του καπνού του τσιγάρου.



Σχήμα 4-15: Μεταβολή της GMD της φασματικής κατανομής μεγεθών στα πειράματα με τσιγάρο.

Αρωματικά ξυλάκια.

Οι μέγιστες τιμές της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων, εξαιτίας των εκπομπών από την καύση των αρωματικών ξύλων κυμάνθηκαν μεταξύ $8,3 \times 10^4$ και $13,6 \times 10^4$ #/cm³. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων PM_{2,5} κυμάνθηκαν μεταξύ 600 και 700 μg/m³. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία κυμαίνονται μεταξύ 10^4 και 10^7 #/cm³ ανάλογα με το είδος του ξυλακιού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία και υγρασία) και τις διαστάσεις του χώρου όπου πραγματοποιήθηκαν οι εκπομπές (Chang et al., 2007; Cheng et al., 1995; Mannix et al., 1996; See et al., 2007). Τα σωματίδια όλων των μεγεθών παρουσίασαν ταυτόχρονα τη μέγιστη συγκέντρωση όπως φαίνεται στο σχήμα 4-16. Η καύση σε όλα τα πειράματα ολοκληρώθηκε σε 20-26 λεπτά και οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης καταγράφηκαν με τη λήξη της καύσης.



Σχήμα 4-16: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων κατά τη διάρκεια πειράματος με αρωματικό ξυλάκι.

Στην αρχή της καύσης (5-7 λεπτά από τη στιγμή που ξεκίνησαν οι εκπομπές) τα υπέρλεπτα σωματίδια αντιπροσώπευαν πάνω από το 45% των συνολικών σωματιδίων (σε ένα από τα πειράματα το ποσοστό έφτασε στο 68%) ενώ στη λήξη της καύσης το ποσοστό είχε πέσει στο 20%. Η φασματική κατανομή μεγεθών για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ήταν μονοκόρυφη. Δικόρυφες και τρικόρυφες κατανομές εμφανίστηκαν μόνο στην αρχή του πειράματος (άναμμα το αρωματικού ξύλου). Η φασματική κατανομή των σωματιδίων σε διάφορες χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές παρουσιάζεται στο σχήμα 4-17. Οι Chang et al. (2007) και οι See et al. (2007) ανέφεραν σε εργασίες τους μέση αριθμητική διάμετρο για τα εκπεμπόμενα σωματίδια με τιμές που κυμαίνονταν μεταξύ 90 και 130 nm. Παράλληλα σε άλλες εργασίες (Kao και Wang 2002; Yang et al., 2007) αναφέρθηκε ότι η συσσωμάτωση επιδρά σημαντικά στην αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων του καπνού από τα ξυλάκια. Στην παρούσα εργασία διαπιστώθηκε αύξηση της GMD της κατανομής τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά τη λήξη της καύσης (σχήμα 4-17).



Σχήμα 4-17: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο.

Στην αρχή της καύσης η GMD είχε τιμές μεταξύ 78 και 82 nm, με τη λήξη της καύσης οι τιμές της ήταν μεταξύ 93 και 102 nm και τελικά δύο ώρες μετά τη λήξη της καύσης οι τιμές ήταν μεγαλύτερες από 110 nm. Εξαίρεση παρουσίασε το πρώτο από τα πειράματα, όπου εμφανίστηκε δικόρυφη κατανομή (σχήμα 4-18).


Σχήμα 4-18: Μεταβολή της GMD της φασματικής κατανομής μεγεθών στα πειράματα με αρωματικά ξυλάκια.

4.4 ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΑΖΑΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ

Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής των πηγών που προσομοιώθηκαν στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο συγκέντρωσης μάζας που βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = a C_{out} - b C_{in} + \frac{S}{V}$$
(4-1)

όπου C_{in} η συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο (μ g/m³), C_{out} η συγκέντρωση στον εξωτερικό χώρο (μ g/m³), a ο συντελεστής διείσδυσης από το εξωτερικό περιβάλλον (min⁻¹), b ο συντελεστής απομάκρυνσης (min⁻¹), S ο ρυθμός εκπομπής της πηγής (μ g/min) και V ο όγκος του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ο συντελεστής b εκφράζει κυρίως την εναπόθεση στις επιφάνειες, καθώς η ανταλλαγή αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ήταν περιορισμένη (η πόρτα και το παράθυρο του εργαστηρίου ήταν κλειστά κατά τη διάρκεια της μελέτης των εκπομπών). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, οπότε η εξίσωση 4-1 παίρνει την απλουστευμένη μορφή:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = -bC_{in} + \frac{S}{V}$$
(4-2)

4.4.1 Υπολογισμός του συντελεστή απομάκρυνσης

Αρχικά για κάθε πηγή υπολογίστηκε ο συντελεστής b, από την εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά το τέλος των εκπομπών. Οι πηγές που εξετάστηκαν ήταν τα κεριά και τα αρωματικά ξυλάκια, το τσιγάρο, το τηγάνισμα, και η χρήση σπρέι, καθώς σε αυτές παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης της σωματιδιακής μάζας PM_{2,5}. Χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές για 30 λεπτά μετά την απενεργοποίηση της πηγής (30 τιμές αφού το DustTrack κατέγραφε συγκέντρωση μάζας ανά λεπτό), με εξαίρεση μία περίπτωση καύσης κεριού (14 τιμές) και όλες τις περιπτώσεις χρήσης σπρέι (12 τιμές) όπου η συγκέντρωση επέστρεψε νωρίτερα στις τιμές πριν την ενεργοποίηση της πηγής. Ο υπολογισμός του συντελεστή b έγινε με προσαρμογή μοντέλου που αναπτύχθηκε σε γλώσσα Matlab στα πειραματικά δεδομένα και στηρίζεται στη εξίσωση:

$$C_{in} = C_o e^{-bt} \tag{4-3}$$

όπου C₀ η συγκέντρωση στη λήξη της εκπομπής. Στις περιπτώσεις που είχαμε σβήσιμο του κεριού με το στόμα, η σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης λόγω εκπομπής, μεγάλου μεγέθους σωματιδίων, είχε σαν αποτέλεσμα η εκθετική μείωση λίγα λεπτά μετά την απενεργοποίηση της πηγής να πραγματοποιείται με υψηλότερο ρυθμό (έντονη βαρυτική καθίζηση μεγάλων σωματιδίων). Το μοντέλο εφαρμόστηκε και για αυτό το μικρό χρονικό διάστημα (Σχήμα 4-19) δίνοντας σημαντικά υψηλότερες τιμές για το συντελεστή απομάκρυνσης, σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα μέχρι η συγκέντρωση να επιστρέψει στην τιμή υποβάθρου.

Παρόμοια αποτελέσματα είχαμε και για τσιγάρο (Σχήμα 4-20) και το τηγάνισμα. Επιπλέον για τη χρήση σπρέι, η μείωση της συγκέντρωσης στα πρώτα 5 λεπτά μετά τη λήξη της εκπομπής κυμαίνονταν μεταξύ 45% και 60%. Επομένως στην περίπτωση αυτής της πηγής εκπέμπονται

σχεδόν αποκλειστικά μεγάλα σωματίδια που απομακρύνονται πολύ γρήγορα με εναπόθεση στις επιφάνειες.



Σχήμα 4-19: Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά το σβήσιμο του κεριού. Το μοντέλο εφαρμόστηκε μετά τη μέτρηση μέγιστης συγκέντρωσης (4 λεπτά μετά το σβήσιμο με το στόμα του κεριού). Στα πρώτα 3 λεπτά ο συντελεστής απομάκρυνσης έχει 4 φορές μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την υπόλοιπη περίοδο.



Σχήμα 4-20: Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά το σβήσιμο του τσιγάρου. Αρχικά η συγκέντρωση μειώνεται με 3,25 φορές μεγαλύτερο ρυθμό.

Στον πίνακα 4-4 παρουσιάζονται οι συντελεστές απομάκρυνσης που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μεθοδολογία για τις διάφορες δραστηριότητες. Για τα αρωματικά ξυλάκια που η λήξη των εκπομπών έγινε χωρίς παρέμβαση (αφέθηκαν να καούν και να σβήσουν αυτόνομα) δεν παρατηρήθηκε γρηγορότερη μείωση. Η υψηλότερη τιμή αμέσως μετά τη λήξη της εκπομπής παρατηρείται για τη χρήση σπρέι λόγω των μεγάλων σωματιδίων που εκπέμπονται. Εξετάζοντας το χρονικό διάστημα χωρίς να μελετηθούν τα πρώτα λεπτά μετά τη λήξη της εκπομπής διαπιστώνεται ότι οι συντελεστές παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές με εξαίρεση το τσιγάρο. Τα σωματίδια που εκπέμπονται στην περίπτωση αυτή παραμένουν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε μελέτες έκθεσης του πληθυσμού σε σωματιδιακή ύλη. Υπό προϋποθέσεις όμως μπορεί να μεγάλο σύνολο πηγών.

Πίνακας 4-4: Μέσες τιμές του συντελεστή απομάκρυνσης (b) για τις δραστηριότητες που εμφανίστηκε σημαντική αύξηση της σωματιδιακής μάζας PM_{2,5}. Οι στήλες 4 και 5 αναφέρονται στις τιμές αμέσως μετά την απενεργοποίηση της πηγής και για χρονικό διάστημα 3-5 λεπτά.

Πηγή	Συντελεστής απομάκρυνσης (min ⁻¹)	Τυπική απόκλιση (min ⁻¹)	Συντελεστής απομάκρυνσης αμέσως μετά τη λήξη εκπομπή (min ⁻¹)	Τυπική απόκλιση (min ⁻¹)
Κερί	0,028	0,011	0,130	0,067
Αρωματικά ξυλάκια	0,028	0,014		
Τσιγάρο	0,018	0,002	0,118	0,073
Σπρέι	0,022	0,007	0,390	0,199
Τηγάνισμα	0,026	0,006	0,068	0,059

4.4.2 Υπολογισμός του ρυθμού εκπομπής

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής μάζας σωματιδίων PM_{2,5} χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 4-2. Εφαρμόστηκε μοντέλο με το οποίο υπολογίζονται, με βάση την εξίσωση αυτή, οι τιμές της συγκέντρωσης για διάφορους ρυθμούς εκπομπής μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και στις πειραματικές τιμές. Τα όρια για τις τιμές των ρυθμών εκπομπής που εξετάζονται επιλέχθηκαν από τους χρήστες του μοντέλου με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Η ελαχιστοποίηση των διαφορών έγινε με τη μέθοδο Nelder-Mead. Οι υπολογίστηκαν χρονικά μεταβαλλόμενοι ρυθμοί εκπομπής για το χρονικό διάστημα που ήταν ενεργή η πηγή. Στη συνέχεια επιλύθηκε αριθμητικά η εξίσωση 4-2 (μέθοδος Runge-Kutta) με τους ρυθμούς εκπομπής που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Τα αποτελέσματα γινόταν αποδεκτά αν:

 Η κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης (slope) ανάμεσα στα πειραματικά και στα αποτελέσματα του μοντέλου είχε τιμή μεταξύ 0,75 και 1,25.

2) Η τεταγμένη επί την αρχή της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης (intercept) είχε μικρότερη τιμή από την τιμή που αντιστοιχούσε στο 25% της μέσης τιμής των πειραματικών μετρήσεων.

 Το κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (normalized mean square error, NMSE) ήταν μικρότερο από 0,25.

4) Ο συντελεστής συμφωνίας (Index of agreement, IA) ήταν μεγαλύτερος από 0,9.

5) Ο συντελεστής προσδιορισμού (r^2) ήταν μεγαλύτερος από 0,9.

6) Η μεροληψία (BIAS) είχε τιμή κοντά στο μηδέν.

Στα σχήματα 4-21α, β, γ παρουσιάζονται αποτελέσματα της διαδικασίας μοντελοποίησης σε σύγκριση με τις πειραματικές τιμές για το τσιγάρο, τα αρωματικά ξυλάκια και το κερί. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα του μοντέλου διατήρησης μάζας. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε με τη χρήση των ρυθμών εκπομπής που υπολογίστηκαν με τη διαδικασία της ελαχιστοποίησης των διαφορών. Παρόλο που οι ρυθμοί εκπομπής υπολογίστηκαν ξεχωριστά για κάθε χρονικό βήμα, οι διαφορές μεταξύ τους ήταν πολύ μικρές και έτσι χρησιμοποιήθηκε ένας μέσος ρυθμός εκπομπής, με τον οποίο λαμβάνονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε εκπομπές σωματιδιακής μάζας με σταθερό ρυθμό για τις παραπάνω πηγές. Εξαίρεση αποτελούν οι εκπομπές του κεριού αμέσως μετά το σβήσιμο του επειδή διαφοροποιήθηκε το είδος των σωματιδίων που εκπέμπονται (μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια σε σχέση με πριν το σβήσιμο). Επομένως ο ρυθμός εκπομπής άλλαξε και για τη μοντελοποίηση δεν χρησιμοποιήθηκε ο μέσος ρυθμός εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα ενώ ο μέσος ρυθμός εκπομπής όσο χρονικό διάστημα ήταν ενεργή η πηγή είχε τιμή 560 μg/m³.







Σχήμα 4-21: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης και πειραματικών τιμών για τις πηγές: τσιγάρο (α), αρωματικά ξυλάκια (β), κερί (γ).

Η ορθότητα της διαδικασίας υπολογισμού των ρυθμών εκπομπής επιβεβαιώνεται και από τις στατιστικές παραμέτρους έλεγχου του μοντέλου που παρουσιάζονται στον πίνακα 4-5. Τα αποτελέσματα αφορούν χαρακτηριστικές περιπτώσεις για τις πηγές τσιγάρο, κεριά και αρωματικά ξυλάκια. Σε όλες όμως τις προσομοιώσεις τα αποτελέσματα του μοντέλου πληρούσαν τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για ορισμένες πηγές, η χρήση μεταβλητών ρυθμών εκπομπής είναι επιβεβλημένη, καθώς οι εκπομπές μεταβάλλονται σημαντικά. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του τηγανίσματος. Πριν προστεθούν τα κομμάτια κρεμμυδιού και για όσο χρόνο ζεσταινόταν το λάδι παρατηρήθηκαν μικρές εκπομπές μάζας (πιθανότατα σωματίδια μικρού μεγέθους). Η προσθήκη του φαγητού αύξησε σημαντικά τις εκπομπές, ενώ περίπου στα 10 λεπτά είχαμε μία δεύτερη σημαντική αύξηση. Στα δύο από τα τέσσερα πειράματα, το σκεύος απομακρύνθηκε από τη φωτιά πριν την αύξηση αυτή με αποτέλεσμα η μέγιστη συγκέντρωση να παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερες τιμές (βλέπε παράγραφο 4-3, τηγάνισμα). Στην περίπτωση του τηγανίσματος, η χρήση ενός μέσου ρυθμού εκπομπής δεν ενδείκνυται (Σχήμα 4-22α), καθώς ο μεταβαλλόμενος χρονικά ρυθμός εκπομπής παρείχε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα (Σχήμα 4-22β).

Πίνακας 4-5: Στατιστικές παράμετροι για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας της διαδικασίας μοντελοποίησης. Οι υπολογισμοί που παρατίθενται αφορούν συγκεκριμένα πειράματα των αναφερόμενων πηγών. Σε όλα όμως τα πειράματα πληρούνταν τα στατιστικά κριτήρια που είχαν τεθεί για την αποδοχή των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Πηγή	Στατιστική Παράμετρος	Υπολογιζόμενη τιμή	Προτεινόμενη τιμή
Τσιγάρο	Κλίση	0,93	0,75 έως 1,25
	Τεταγμένη επί της αρχής	46	< 172
	NMSE	0,003598	< 0,25
	r^2	0,95	> 0,9
	BIAS	-0,00384	Κοντά στο μηδέν
	IA	0,99	> 0,9
Αρωματικά ζυλάκια	Κλίση	1,06	0,75 έως 1,25
	Τεταγμένη επί της	2,46	<80
	αρχής		
	NMSE	0,012552	< 0,25
	r^2	0,96	> 0,9
	BIAS	-0.07103	Κοντά στο μηδέν
	IA	0,98	> 0,9
Κερί	Κλίση	0,9	0,75 έως 1,25
	Τεταγμένη επί της	23	< 67
	αρχής		
	NMSE	0,00554	< 0,25
	r^2	0,96	> 0,9
	BIAS	-0,00532	Κοντά στο μηδέν
	IA	0,99	> 0,9

Στον πίνακα 4-6 παρουσιάζονται οι ρυθμοί εκπομπής που υπολογίστηκαν για τις πηγές που παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της μάζας των σωματιδίων PM_{2,5}. Για το τηγάνισμα και την καύση των κεριών οι ρυθμοί που παρατίθενται είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι.

Η χρήση σπρέι είχε σαν αποτέλεσμα πολύ υψηλές εκπομπές σωματιδιακής μάζας που αντιστοιχούν σε μεγάλου μεγέθους σωματίδια. Το μέγεθος των σωματιδίων επιβεβαιώνεται και από τη γρήγορη απομάκρυνση τους λόγω βαρυτικής καθίζησης μετά το τέλος της εκπομπής (Σχήμα 4-23). Σημαντικές εκπομπές είχαμε επίσης λόγω του τσιγάρου καθώς και μετά το σβήσιμο του κεριού. Επιπλέον, θα πρέπει να εξεταστούν αναλυτικότερα οι εκπομπές από το τηγάνισμα, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού ή του φαγητού ίσως να οδηγεί στην εκπομπή μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων. Τέλος από τα αρωματικά ξυλάκια υπολογίστηκαν σταθερές χρονικά εκπομπές μικρού μεγέθους σωματιδίων (μικρής συνολικής μάζας).

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, δεν υπάρχουν πολλές εργασίες στις οποίες να υπολογίζονται ρυθμοί εκπομπής σωματιδιακής μάζας, παρά το γεγονός ότι η μελέτη των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των πηγών σε εσωτερικούς χώρους είναι αρκετά συνηθισμένη (Afshari et al., 2005; Genin et al., 2008). Οι υπάρχουσες τιμές ρυθμών εκπομπής της βιβλιογραφίας για τις ίδιες πηγές που μελετήθηκαν στην παρούσα διδακτορική παρουσιάζονται στον πίνακα 4-7. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι Kleipis et al. (2003), Zai et al. (2006) και Pagels et al. (2009) χρησιμοποίησαν παρόμοιες μεθοδολογίες με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην υπάρχουσα διατριβή και ανέπτυξαν κώδικες με τους οποίους υπολογιζόταν οι ρυθμοί εκπομπής μέσω της προσαρμογής των αποτελεσμάτων μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα. Πάντοτε όμως οι ρυθμοί εκπομπής που επιλέγονταν μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας μεταξύ συγκεκριμένων ακραίων τιμών ήταν σταθεροί για όλη τη διάρκεια της εκπομπής. Οι Lee και Wang (2004,2006) και οι Lung και Ηu (2003) υπολόγισαν ρυθμούς εκπομπής από την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης (regression line) των πειραματικών τιμών σε σχέση με το χρόνο. Τέλος οι He et al. (2004) θεώρησαν επίσης σταθερούς χρονικά ρυθμούς εκπομπής που είναι ίσοι με τη διαφορά της αρχικής από τη μέγιστη συγκέντρωση προς τον ολικό χρόνο εκπομπής.





Σχήμα 4-22: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραματικών τιμών για: σταθερό ρυθμό εκπομπής (α) και χρονικά μεταβαλλόμενο ρυθμό εκπομπής (β).

Πίνακας 4-6: Ρυθμοί εκπομπής πηγών που εξετάστηκαν σε πειράματα στο εργαστήριο. Σε περιπτώσεις που υπήρχε σημαντική μεταβολή του ρυθμού με το χρόνο παρατίθενται οι διαφορετικές τιμές.

Πηγή	Ρυθμός εκπομπής (μg/min)	Τυπική απόκλιση (μg/min)
Τηγάνισμα (0-5 min)	191	79
Τηγάνισμα (5-9 min)	736	521
Τηγάνισμα (9-11 min)	10206	1408
Τσιγάρο	5738	928
Αρωματικά ξυλάκια	1063	219
Σπρέι	27254	7729
Κεριά (καύση)	484	129
Κεριά (μετά το σβήσιμο)	2961	2164



Σχήμα 4-23: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου και πειραματικών τιμών για τη χρήση σπρέι. Παρατηρείται η γρήγορη απομάκρυνση των εκπεμπόμενων σωματιδίων λόγω βαρυτικής καθίζησης.

Αναφορά	Πηγή	Είδος σωματιδ ίων	Ρυθμός εκπομπής (μg/min)	Τυπική απόκλιση (μg/min)
Lee and Wang, 2006	Κεριά (διάφορα είδη)	PM _{2,5}	723 έως 1830	
Lee and Wang, 2006	Κεριά (διάφορα είδη)	PM_{10}	533 έως 1866	
Pagels et al., 2009	Κεριά (διάφορα είδη, σταθερή καύση)	PM _{2,5}	14,5 έως 40	1,6 έως 2,3
Pagels et al., 2009	Κεριά (διάφορα είδη, μετά το σβήσιμο)	PM _{2,5}	148 έως 421	0,3 έως 6,6
Zai et al., 2006	Κεριά (ένα είδος, σταθερή καύση)	0,1 - 10 μm	5,5	0,41
Zai et al., 2006	Κεριά (ένα είδος, ασταθής καύση)	0,1-10 μm	126	37,5
Zai et al., 2006	Κεριά (ένα είδος, μετά το σβήσιμο)	0,1-10 μm	4	1,2
Lung and Hu, 2003	Αρωματικά ξυλάκια (διάφορα είδη)	PM _{2,5}	573 έως 595	
Lung and Hu, 2003	Αρωματικά ξυλάκια (διάφορα είδη)	PM_{10}	550 έως 744	
Lee and Wang, 2004	Αρωματικά ξυλάκια (διάφορα είδη)	PM _{2,5}	163 έως 36000	
Lee and Wang, 2004	Αρωματικά ξυλάκια (διάφορα είδη)	PM_{10}	180 έως 42000	
Kleipis et al., 2003	Τσιγάρο (διάφορα είδη)	0,1 - 2 μm	270 έως 1790	
He et al., 2004	Τσιγάρο	PM _{2,5}	1760	990
He et al., 2004	Τηγάνισμα	PM _{2,5}	2680	2180

Πίνακας 4-7: Ρυθμοί εκπομπής διαφόρων πηγών όπως εμφανίζονται στη βιβλιογραφία.

Στον πίνακα 4-7φαίνεται ότι οι ρυθμοί εκπομπής παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών ακόμα και για την ίδια πηγή. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα των αποτελεσμάτων Lee και Wang για τα αρωματικά ξυλάκια. Στην εργασία τους μελετήθηκαν 10 διαφορετικά είδη (ως προς τη συνολική μάζα και τη χημική σύσταση) και οι ρυθμοί εκπομπής διέφεραν μέχρι 2 τάξεις μεγέθους. Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής είναι κοντά στις τιμές της βιβλιογραφίας, με εξαίρεση το τσιγάρο, όπου ο ρυθμός εκπομπής που υπολογίστηκε είναι πολύ μεγαλύτερος. Στο πείραμα των Kleipes et al. (2003) χρησιμοποιήθηκε μηχανή καπνίσματος που ίσως οδηγεί σε διαφορετικές εκπομπές όσον αφορά τα σωματίδια που περιέχονται στον καπνό που εξέρχεται από τον ανθρώπινο οργανισμό. Επίσης τα πειράματα των He et al. (2004) διεξήχθησαν σε οικία, όπου οι κάτοικοι ακολουθούσαν τις κανονικές τους καθημερινές δραστηριότητες. Αυτό σημαίνει πως πολλές φορές πραγματοποιούνταν στον χώρο παραπάνω από μία δραστηριότητες ταυτόχρονα, ενώ δεν υπήρχαν ελεγχόμενες συνθήκες εξαερισμού.

4.5 ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ

Οι πηγές εκπομπής που μελετήθηκαν ήταν η καύση κεριών, το τηγάνισμα, η καύση αρωματικών ξύλων και το κάπνισμα καθώς αυτές οι πηγές παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αύξηση στη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων.

Η ταχύτητα τριβής αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τον υπολογισμό της ταχύτητας εναπόθεσης. Το μοντέλο εφαρμόσθηκε χωρίς τον αλγόριθμο της συσσωμάτωσης, για την ελάττωση του αριθμού των σωματιδίων μετά τη λήξη της πηγής και όταν ο ολικός αριθμός συγκέντρωσης ήταν μικρότερος από 10^4 #/cm³. Η επίδραση της συσσωμάτωσης μπορεί να παραληφθεί για αυτά τα επίπεδα συγκέντρωσης (Hussein et al., 2009). Χρησιμοποιήθηκε μία επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της ταχύτητας τριβής, υποθέτοντας ρυθμούς ανταλλαγής αέρα μεταξύ 0,05 h⁻¹ και 0,5 h⁻¹. Οι ρυθμοί ανταλλαγής αέρα δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτεροι από την τιμή των 0,5 h⁻¹, αφού τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κλειστό εργαστήριο και ειδικές προφυλάξεις είχαν ληφθεί για την ελαχιστοποίηση των εισροών αέρα από τα κενά των παραθύρων και της πόρτας. Η διαδικασία τερματιζόταν όταν οι τιμές του μοντέλου ερχόταν σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Οι τιμές της

ταχύτητας τριβής που υπολογίσθηκαν, κυμαινόταν από 0,6 έως 1 cm s⁻¹, που ήταν αναμενόμενες για ένα δωμάτιο με αναλογία επιφάνειας προς όγκο 2 και μικρή ταχύτητα αέρα στον εσωτερικό χώρο (Lai και Nazaroff, 2000). Για τις πηγές που εξετάστηκαν, η διαδικασία της συσσωμάτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική στη μείωση του αριθμού των σωματιδίων, αμέσως μετά την απενεργοποίηση της πηγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-24, όπου παρουσιάζονται οι ολικοί ρυθμοί απομάκρυνσης σε σύγκριση με την απομάκρυνση λόγω μεταφοράς στο εξωτερικό περιβάλλον και λόγω εναπόθεσης στις επιφάνειες. Οι διαφορές που εμφανίστηκαν οφείλονται κυρίως στην έντονη συσσωμάτωση των μικρότερων σωματιδίων. Οι ολικοί ρυθμοί απομάκρυνσης υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας εκθετική προσαρμογή στα δεδομένα της μείωση των σωματιδίων θεωρώντας ως αρχική συγκέντρωση τη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων στο τέλος της εφαρμογής της πηγής.

Η σύγκριση των ολικών ρυθμών απομάκρυνσης έδειξε ότι τα νάνο-σωματίδια που προέρχονται από το κάπνισμα και την καύση κεριού μειωνόταν ταχύτερα από αυτά που προέρχονται από το τηγάνισμα και τη καύση αρωματικών ξύλων. Το κάπνισμα εκπέμπει μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια ενώ τα μικρότερα σωματίδια απομακρύνονται γρήγορα λόγω της διεργασίας της συσσωμάτωσης και της διάχυσης στις επιφάνειες. Η καύση των κεριών εκπέμπει περισσότερο νάνο-σωματίδια και αυτό το γεγονός ενισχύει τη διεργασία της συσσωμάτωσης.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου με όλες τις διεργασίες για τα δεδομένα για μια περίοδο 30 λεπτών μετά από την απενεργοποίηση της πηγής. Ο σκοπός ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί το μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο να περιγράψει τη δυναμική των αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται από τις πηγές που εξετάστηκαν. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της σύγκρισης του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα σχήματα 4-25 έως 4-27. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε για ταχύτητα τριβής ίση με 1 cm/s. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με χρονικό βήμα ενός δευτερολέπτου και για χρονική περίοδο 456 δευτερολέπτων για να υπάρξει συμφωνία με το όργανο SMPS.

138



Σχήμα 4-24: Ολικοί ρυθμοί απομάκρυνσης σε σχέση με τη διάμετρο για διάφορες πηγές και σύγκριση με την απομάκρυνση λόγω ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον (λ =0,1 h⁻¹) και λόγω εναπόθεσης.



Σχήμα 4-25: Σύγκριση των φασματικών κατανομών μεγέθους που υπολογίστηκαν με το μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο με τα πειραματικά αποτελέσματα για τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε 30 λεπτά μετά το τέλος των εκπομπών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα του μοντέλου, τόσο για τον ολικό αριθμό σωματιδίων (σχήμα 4-26), όσο και για τη φασματική κατανομή των σωματιδίων (σχήματα 4-27 και 4-28). Επομένως διαπιστώνεται ότι η συσσωμάτωση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός αλλαγής της φασματικής κατανομής μεγέθους, ενώ επηρεάζει σημαντικά μαζί με την εναπόθεση στις επιφάνειες και την μείωση του ολικού αριθμού σωματιδίων. Τονίζεται ότι ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ήταν μικρός. Παρόμοιες συνθήκες είναι δύσκολο να επιτευχθούν σε χώρους με φυσικό αερισμό. Για τον υπολογισμό των συντελεστών συσσωμάτωσης λήφθηκε υπόψη μόνο η διόρθωση του Fuchs. Οι συντελεστές συσσωμάτωσης, λαμβάνοντας υπ' όψη μόνο την διόρθωση του Fuchs είναι αξιόπιστοι μόνο για σωματίδια μεγαλύτερα από 10 nm. Η εργασία των Wallace et al. (2008) μελέτησε τη συσσωμάτωση των σωματιδίων που εκπέμπονται από φούρνους με γκάζι και με ηλεκτρικό και ανέφερε ότι απαιτείται διόρθωση των συντελεστώς συσσωμάτωσης για σωματίδια μικρότερα των 10 nm. Για μεγαλύτερα σωματίδια οι συντελεστές συσσωμάτωσης με τη διόρθωση Fuchs, συμφωνούν με τους πειραματικά προσδιοριζόμενους συντελεστές και αρκούν για την περιγραφή της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων.



Σχήμα 4-26: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων για τη μείωση του ολικού αριθμού σωματιδίων μετά την απενεργοποίηση της πηγής. Η ταχύτητα τριβής λήφθηκε ίση με 1 cm/s και ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ίσος με 0,1 h⁻¹.

Το επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων από τις πηγές. Αναπτύχθηκε αλγόριθμός σε γλώσσα Matlab με το οποίο μέσω επαναληπτικής διαδικασίας δοκιμάζονταν ρυθμοί εκπομπής με στόχο την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ των αποτελεσμάτων του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων. Για την διαδικασία της ελαχιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Nelder-Mead. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για κάθε τμήμα του φάσματος μεγεθών, με αποτέλεσμα να υπολογιστούν οι ρυθμοί εκπομπής σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων. Καθώς λαμβάνεται υπόψη η συσσωμάτωση, οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί εκπομπής αφορούν τα πραγματικά σωματίδια που εκπέμπονται από κάθε πηγή και δεν επηρεάζονται από τα νέα σωματίδια που προκύπτουν λόγω συγκρούσεων των ήδη υπαρχόντων σωματιδίων. Η αυξημένη παραγωγή μικρών σωματιδίων (κάτω από 20 nm) επιταχύνει τη διεργασία της συσσωμάτωσης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων σωματιδίων που δεν είχαν αρχικά εμφανιστεί κατά την εκπομπή από την πηγή. Επιπρόσθετα, αυτά τα σωματίδια δρουν ως καταβόθρες για τα μικρότερα σωματίδια, έχοντας ως τελικό αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων, παρόλο που οι πηγές εξακολουθούσαν να εκπέμπουν μικρού μεγέθους σωματίδια. Προσπάθειες υπολογισμού του ρυθμού εκπομπής εσωτερικών πηγών λαμβάνοντας υπόψη τη συσσωμάτωση των σωματιδίων αμέσως μετά την εκπομπή έχουν πραγματοποιηθεί μόνο από τους Zai et al. (2006). Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παραπάνω εργασία εξετάστηκαν αποκλειστικά οι εκπομπές από κεριά.

Η καύση του κεριού έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή κυρίως νάνο-σωματιδίων, η οποία συνεχίζεται μέχρι το σβήσιμο του κεριού. Η σταθεροποίηση της συγκέντρωσης οφείλεται στην έντονη συσσωμάτωση των παραγόμενων μικρών σωματιδίων και όχι στη μείωση των εκπομπών. Η γραφική παράσταση της φασματικής κατανομής μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων (Σχήμα 4-29) έδειξε ότι εκπέμπονται και σωματίδια μικρότερα από 10 nm. Τα σωματίδια αυτά δεν μπορούν να υπολογιστούν στην παρούσα εργασία, καθώς ο αναλυτής διαφορικής κινητικότητας κατέγραφε σωματίδια μεγαλύτερα από 10 nm και δεν υπήρχαν τα απαραίτητα πειραματικά δεδομένα για τη διαδικασία της ελαχιστοποίησης των διαφορών. Το μέγιστο όμως της φασματικής κατανομής μεγέθους του ρυθμού εκπομπής είναι μικρότερο από 10 nm.

Απαιτείται επομένως περαιτέρω μελέτη της εκπομπής από τα κεριά στην περιοχή των σωματιδίων με μέγεθος μικρότερο από 10 nm.



Σχήμα 4-27: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων για τη φασματική κατανομή των σωματιδίων που εκπέμπονταν από την καύση του κεριού για τις χρονικές στιγμές t=7,5 min, t=15 min (Σχήμα α) και t=30 min, t=45 min (Σχήμα β). Η χρονική στιγμή t=0 λαμβάνεται στην απενεργοποίηση της πηγής.

Ο ρυθμός εκπομπής εξαιτίας του τηγανίσματος δεν παραμένει σταθερός σε όλη τη διάρκεια της εκπομπής. Αρχικά, που υπάρχει μόνο το λάδι στο τηγάνι εκπέμπονται κυρίως υπέρλεπτα σωματίδια, ενώ με την προσθήκη του φαγητού στο ζεστό λάδι ξεκινάει η εκπομπή και μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων (Σχήμα 4-28).



Σχήμα 4-28: Φασματική κατανομή μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος

Τα εκπεμπόμενα σωματίδια που περιέχονται στον καπνό του τσιγάρου βρίσκονται στην πλειοψηφία τους στην περιοχή μεταξύ 70 nm και 250 nm, με το μέγιστο της κατανομής να βρίσκεται κοντά στα 100 nm (Σχήμα 4-30). Επομένως λόγω του τσιγάρου εκπέμπονται μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια σε σχέση με το τηγάνισμα και το κερί.



Σχήμα 4-29: Φασματική κατανομή μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια της καύσης του κεριού



Σχήμα 4- 30: Φασματική κατανομή μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων κατά τη διάρκεια της καύσης του τσιγάρου

Τέλος κατά την καύση των αρωματικών ξύλων παράγονται σωματίδια μεγαλύτερα από 50 nm στην πλειοψηφία τους. Το μέγιστο της φασματικής κατανομής του ρυθμού εκπομπής εμφανίζεται κοντά στα 100 nm.



Στον πίνακα 4-8 παρουσιάζεται ο συνολικός ρυθμός εκπομπής για τα ολικά και για υπέρλεπτα σωματίδια. Συγκρίνοντας όλες τις πηγές, παρατηρούμε ότι η καύση του κεριού παρήγαγε τον μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων που ήταν σχεδόν αποκλειστικά υπέρλεπτα σωματίδια. Μεγάλος αριθμός υπέρλεπτων σωματιδίων παράγεται και κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος (η τιμή στον πίνακα αναφέρεται στη μέση τιμή σε όλη τη διάρκεια που ήταν ενεργή η πηγή).

Η εργασία των Zai et al. (2006) αναφέρει ρυθμούς εκπομπής από καύση κεριού 4 x 10^{11} # cm⁻³, ενώ η εργασία των See et al. (2007) καταγράφει ρυθμούς εκπομπής, από καύση διαφορετικών αρωματικών ξύλων, που κυμαίνονται από 61 x 10^{10} # min⁻¹ έως και 2 x 10^{11} # min⁻¹. Η εργασία των He et al. (2004) κατέγραψε συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων σε δεκατέσσερις οικίες και υπολόγισε ρυθμούς εκπομπής 4,75 x 10^{11} # min⁻¹ για τηγάνισμα, και 1,61 x 10^{11} # min⁻¹ για το κάπνισμα. Η εργασία των Buonanno et al. (2009) υπολογίζει ρυθμούς εκπομπή για το τηγάνισμα

μεταξύ 2,9 x 10^{11} # min⁻¹ και 1,3 x 10^{12} # min⁻¹, που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του ηλεκτρικού φούρνου και το είδος της τροφής. Τέλος η μελέτη των Afshari et al. (2005) υπολογίζει ρυθμούς εκπομπής υπέρλεπτων σωματιδίων με τη χρήση του οργάνου P-Track, 3,65 x 10^{11} # min⁻¹, 3,76 x 10^{11} # min⁻¹, και 8,27 x 10^{11} # min⁻¹για καύση κεριού, για κάπνισμα και για τηγάνισμα, αντίστοιχα.

Πίνακας 4-8: Ρυθμοί εκπομπής ολικών σωματιδίων και υπέρλεπτων σωματιδίων από τις ακόλουθες πηγές: Τηγάνισμα, καύση κεριού, καύση αρωματικών ξύλων και τσιγάρο.

Πηγή	Ρυθμός εκπομπής (Ολικά σωματίδια ×10 ¹¹ #/min)	Std.	Ρυθμός εκπομπής (Υπέρλεπτα σωματίδια ×10 ¹¹ #/min)	Std.
Τηγάνισμα	8,02	2,42	7,66	2,51
Καύση κεριού	23,4	16,3	22,9	16,3
Τσιγάρο	8,83	6,1	1,23	0,93
Καύση αρωματικών ξύλων	3,35	0,95	2,17	0,72

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι εκπομπές σωματιδίων και σωματιδιακής μάζας (PM_{2,5}) από διάφορες καθημερινές δραστηριότητες μελετήθηκαν κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστηριακό χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στόχος ήταν να μελετηθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων και να προσδιοριστούν οι ρυθμοί εκπομπής αριθμού σωματιδίων και σωματιδιακής μάζας. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με τον αλγόριθμό AMANpsd για τον υπολογισμό της μέσης γεωμετρικής διαμέτρου (GMD) και της γεωμετρικής τυπικής απόκλισης

(σg) των κατανομών της φασματικής κατανομής μεγέθους των σωματιδίων. Παράλληλα υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής μέσω της διαδικασίας ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ των πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων μοντέλου διατήρησης της μάζας.

Διαπιστώθηκε ότι η επίδραση των πηγών στην ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο για τη συγκέντρωση αριθμού και μάζας σωματιδίων, όσο και για τη φασματική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων αυξήθηκε μέχρι και 102 φορές (καύση κεριού), ενώ η συγκέντρωση μάζας PM_{2.5} μέχρι 36 φορές (τσιγάρο). Η ανάλυση με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι το χρονικό διάστημα που ήταν ενεργές οι πηγές οι κατανομές μεγέθους παρουσίαζαν σε ποσοστό κοντά στο 50% GMD μικρότερες από 50 nm. Η μέγιστη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων καταγράφηκε στα πειράματα με κεριά, ενώ σημαντικές πηγές σωματιδίων ήταν και τα αρωματικά ξυλάκια, το τσιγάρο και το τηγάνισμα. Οι εκπομπές λεπτών σωματιδίων από τις θερμές επιφάνειες εξαρτώνται από την εναποτιθέμενη ποσότητα σκόνης και μειώθηκαν σημαντικά μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας. Η διαδικασία της συσσωμάτωσης είχε σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση της GMD των κατανομών σε μεγαλύτερες τιμές και το φαινόμενο ήταν ιδιαίτερα έντονο για τα κεριά, τα αρωματικά ξυλάκια, το τηγάνισμα και το τσιγάρο. Στην περίπτωση των κεριών και του τηγανίσματος η κατανομή μετατράπηκε από μονοκόρυφη σε δικόρυφη μετά την απενεργοποίηση των πηγών. Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής μάζας παρατηρήθηκαν κατά την καύση του τσιγάρου και κατά τη χρήση σπρέι, που ισοδυναμούν με την εκπομπή μεγάλου μεγέθους σωματιδίων (> 1μm) κατά τις διεργασίες αυτές. Επίσης, μετά το σβήσιμο του κεριού καταγράφηκαν υψηλές εκπομπές σωματιδιακής μάζας. Η χρήση σεσουάρ, ο βρασμός νερού και η χρήση ηλεκτρικής σκούπας δεν επηρέασαν σημαντικά τις συγκεντρώσεις αριθμού και μάζας σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο.

Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί εκπομπής σωματιδιακής μάζας υπολογίστηκαν για τη χρήση σπρέι. Τα σωματίδια που εκπέμπονται απομακρύνονται γρήγορα λόγω βαρυτικής καθίζησης. Υψηλές εκπομπές τόσο μάζας, όσο και αριθμού σωματιδίων διαπιστώθηκαν και κατά το κάπνισμα, ενώ τα σωματίδια που εκπέμπονται παραμένουν αιωρούμενα για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τα σωματίδια των εκπομπών από τις υπόλοιπες πηγές (εξαιρουμένης της χρήσης

σπρέι). Στη διάρκεια του τηγανίσματος, αλλά κυρίως κατά την καύση των κεριών παράγεται μεγάλος αριθμός υπέρλεπτων σωματιδίων, όπως φαίνεται από τους υπολογιζόμενους ρυθμούς εκπομπής. Στην περίπτωση της καύσης των κεριών, το μέγιστο της φασματικής κατανομής μεγέθους του ρυθμού εκπομπής βρίσκεται κάτω από τα 10 nm. Κατά το τηγάνισμα, οι εκπομπές μεταβάλλονταν με το χρόνο και η χρήση μεταβλητού ρυθμού εκπομπής παρείχε καλύτερα αποτελέσματα. Αύξηση του ρυθμού εκπομπής παρατηρήθηκε και μετά το σβήσιμο του τσιγάρου, επιβεβαιώνοντας την εκπομπή σωματιδίων μεγαλύτερων από 1 μm.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Afshari, A., Matson, U., Ekberg L., E., 2005. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. Indoor Air 15, 141-150.

Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L., 2009. Particle emission factors during cooking activities. Atmospheric Environment 43, 3235-3242.

Chang Y-C., Lee, H-W., Tseng, H-H., 2007. The formation of incense smoke. Journal of Aerosol Science 38, 39-51.

Cheng, Y.S., Bechtold, W.E., Yu, C.C., Hung, I.F., 1995. Incense smoke: characterization and dynamics in indoor environments. Aerosol Science and Technology 23, 271-281.

Corsi; R.L., Siegel, J.A., Chiang, C., 2008. Particle resuspension during the use of vacuum cleaners on residential carpet. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 5, 232 – 238.

Dennekamp, M., Howarth, S., Dick, C.A.J., Cherrie, J.W., Donaldson, K., Seaton, A. 2001. Ultrafine particles and nitrogen oxides generated by gas and electric cooking. Occupational Environmental Medicine, 58, 511-516.

Ferro, A.R., Kopperud, R.J., Hildemann, L.N., 2004. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. Environmental Science and Technology 38, 1759-1764.

Fine, P.M., Cass, G.R., Simoneit, B.R., 1999. Characterization of fine particle emissions from burning church candles. Environmental Science and Technology 33, 2352-2362.

Guo, H., Morawska, L., He, C., Gilbert, D., 2008. Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. Atmospheric Environment, 42, 757-768.

He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert D., 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. Atmospheric Environment 38, 3405–3415

Hussein, T., **Glytsos**, T., Ondráček, J., Dohányosová, P., Ždímal, V., Hämeri, K., Lazaridis, M., Smolík, J., Kulmala, M., 2006. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. Atmospheric Environment 40, 4285-4307.

Hussein, T., Hruška, A., Dohányosová, P., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M., Smolok, J., 2009. Evaluation of deposition rates of aerosol particles on smooth surfaces inside a test chamber. Atmospheric Environment 43, 905–914.

Kao, M-C., Wang, C-S., 2002. Reactive oxygen species in incense smoke. Aerosol and Air Quality Research 2, 61-69.

Klepeis, N.E., Apte, M.G., Gundel, L.A., Sextro, R.G., Nazaroff, W.W. 2003. Determining sizespecific emission factors for environmental tobacco smoke particles. Aerosol Science and Technology, 37: 780–790.

Kinsey, J.S., Kariher, P.H., Dong, Y., 2009. Evaluation of methods for the physical characterization of the fine particle emissions from two residential wood combustion appliances, Atmospheric Environment, 43, 4959-4967.

Lai, A. C. K., and Nazaroff, W. W. 2000. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces. Journal of Aerosol Science 31, 463–476.

Lai, A. C. K., 2004. Particle deposition indoors: a review. Indoor Air, 12, 211-214.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Hanssen, J.E., Dye, C., Eletheriadis, K., Katsivela, E., 2008. Inorganic and Carbonaceous Components in Indoor/Outdoor Particulate Matter in Two Residential Houses in Oslo, Norway, Journal of the Air & Waste Management Association, 58, 346-356.

Lee, S.C., Lam, S., Fai, H.K., 2001. Characterization of VOCs, ozone, and PM₁₀ emissions from office equipment in an environmental chamber. Building and Environment, 36, 837-842.

Lee; H., Awbi, H.B., 2003. Effect of internal partitioning on indoor air quality of rooms with mixing ventilation—basic study. Building and Environment, 39, 127-141.

Lee, S.C., Wang, B., 2006. Characteristics of emissions of air pollutants from mosquito coils and candles burning in a large environmental chamber. Atmospheric Environment 40, 2128-2138.

Li, C-S., Lin, W-H., Jenq, F-T., 1993. Size distribution of submicrometer aerosol from cooking. Environmental International 19, 146-154.

Mannix, R.C., Khanh, N.P., Eric, T.W., Esther, H.E., Phalen, F.R., 1996. Physical characterization of incense aerosols. The Science of the Total Environment 193, 149-158.

Mitsakou, C., Housiadas, C., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Helmis, C., Asimakopoulos, D., 2007. Lung deposition of fine and ultrafine particles outdoors and indoors during a cooking event and no activity periods. Indoor Air 17, 143-152.

Morawska, L., Jamriska, M., Bofinger, N.D., 1997. Size characteristics and ageing of the environmental tobacco smoke. Science of the Total Environment, 196, 43-55.

Ning, Z., Cheung, C.S., Fu, J., Liu, M.A., Schnell, M.A., 2006. Experimental study of environmental tobacco smoke particles under actual indoor environment. Science of the Total Environment 367, 822-830.

Oberdorster, G., 2001. Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. Int. Arch. Occup. Environ. Health 74, 1–8.

Pagels, J., Wierzbicka, A., Nilsson, E., Isaxon, C., Dahl, A., Gudmunndsson, E., Bohgard, M., 2009. Chemical compositionans mass emission factors of candle smoke particles. Journal of Aerosol Science 40, 193-208.

Pedersen, E.K., Bjorseth, O., Syversen, T., Mathiessen, M., 2001. Physical changes of indoor dust caused by hot surface contact. Atmospheric Environment 35, 4149-4157.

Robinson, R.J., Yu, C.P., 1999. Coagulation of cigarette smoke particles. Journal of Aerosol Science 30, 533-548.

Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K., Godden, D., 1995. Particulate air pollution and acute health effects Lancet 345, 176-178.

See, W.S., Balasubramanian, R., 2006. Physical characteristics of ultrafine emitted particles from different gas cooking methods. Aerosol and Air Quality Research 6, 82-92.

See, W.S., Balasubramanian, R., Joshi, U.M., 2007. Physical characteristics of nanoparticles emitted from incense smoke. Science and Technology of Advanced Materials 8, 25-32.

Smolik, J., Lazaridis, M., Moravec, P., Schwarz, J., Zaripov, S.K., Zdimal, V., 2005. Indoor aerosol particle deposition in an empty office. Water, Air & Soil Pollution, 165, 301-312.

Thatcher, T.L., Layton, D.W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. Atmospheric Environment 29, 1487-1497.

Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G., Nazaroff, W.W., 2002. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. Atmospheric Environment, 36, 1811-1819.

Wallace, L., 2006. Sources of ultrafine and accumulation mode particles: Size distributions, size-resolved concentrations and source strengths. Aerosol Science and Technology 40, 348-360.

Wallace, L., Wang, F., Howard-Reed, C., Persily, A., 2008. Contribution of gas and electric stoves to residential ultrafine particle concentrations between 2 and 64 nm: Size distributions and emission and coagulation rates. Environmental Science and Technology, 42, 8641-8647.

Yang, C-R., Lin, T-C., Chang, F-H., 2007. Particle size distribution and PAH concentration of incense smoke in a combustion chamber. Environmental Pollution 145, 606-615.

Yeung, L.L., To, W.M., 2008. Size distributions of the aerosol emitted from commercial cooking processes. Indoor and Built Environment 17, 220-229.

Zai, S., Zhen, H., Jia-song W., 2006. Studies on the size distribution, number and mass emission factors of candle particles characterized by modes of burning. Journal of Aerosol Science 37, 1484-1496.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πληθυσμός των μεγάλων πόλεων εκτίθεται κατά τη διάρκεια των καθημερινών του δραστηριοτήτων σε υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης, οι οποίες σχετίζονται με επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία (Jones, 1999; Pope and Dockery, 1999; Schwartz, 1994). Ειδικά όσον αφορά τα σωματίδια που μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό, μέσω του αναπνευστικού συστήματος, και να φτάσουν μέχρι τους πνεύμονες (PM₁) υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις ότι αυξημένες συγκεντρώσεις τους μπορούν να προκαλέσουν καρδιαγγειακές και αναπνευστικές παθήσεις (Osunsanya et al., 2000; Seaton et al., 1995). Οι περισσότερες μελέτες που αφορούν τη συσχέτιση της επιβάρυνσης της ανθρώπινης υγείας με τις συγκεντρώσεις σε εξωτερικούς χώρους. Όμως σήμερα οι άνθρωποι που ζουν και εργάζονται σε μεγάλα αστικά κέντρα περνούν πάνω από το 80% του χρόνου τους σε εσωτερικούς χώρους, όπως το σπίτι, το γραφείο, τα μέσα μαζικών μεταφορών, κλπ., (Robinson και Nelson, 1995). Έτσι τίθεται το ερώτημα κατά πόσο οι μετρήσεις που πραγματισποιούνται σε εξωτερικούς χώρους έίναι αντπροσωπευτικές για την πραγματική έκθεση σε σωματιδιακή ύλη.

Για να αρθεί η παραπάνω αβεβαιότητα πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια ταυτόχρονες μετρήσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούσαν στη σύγκριση των τιμών μάζας και αριθμού σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους και εξωτερικούς χώρους (Diapouli et al., 2007; Hoek et al., 2008; Jo και Lee., 2006; Long και Sarnat 2004; Matson 2005a; Morawska et al., 2001, 2003; Tippayawong et al., 2008), στον προσδιορισμό της επίδρασης του εξωτερικού περιβάλλοντος στις συγκεντρώσεις σωματιδίων σε εσωτερικούς

χώρους (BeruBe et al., 2004; Branis et al., 2005; Koponen et al., 2001; Massey et al., 2009), καθώς και στη μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης λόγω της επίδρασης εσωτερικών πηγών (Abt et al., 2000; Halios et al., 2008; He et al., 2004; Monkkonen et al., 2005; Wallace, 2004a). Άλλες μελέτες επικεντρώθηκαν στην ανάλυση των φυσικών χαρακτηριστικών και της χημικής σύστασης των σωματιδίων και πως στο πως αυτά μεταβάλλονται μετά τη διείσδυση των σωματιδίων από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον (Gemenetzis et al., 2006; Lazaridis et al., 2006; Lunden et al., 2003; Shilton et al., 2002). Οι παράλληλες μετρήσεις σε εσωτερικό και εξωτερικό που συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως ο συντελεστής απομάκρυνσης (Smolik et al., 2005; Thatcher και Layton, 1995, Wallace et al., 2004b) ή/και ο συντελεστής διείσδυσης (Chao et al., 2003; Hanninen et al., 2004; Zhu et al., 2005). Λίγες όμως προσπάθειες έχουν γίνει για να χρησιμοποιηθούν οι ταυτόχρονες μετρήσεις σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με σκοπό των προσδιορισμό των ρυθμών εκπομπής από εσωτερικός πηγές κάτω από πραγματικές συνθήκες (π.χ. Hussein et al., 2005; Matson et al., 2005b).

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναλύθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε τρεις μεγάλες Ευρωπαϊκές πόλεις (Όσλο, Πράγα και Μιλάνο) με στόχο να εξεταστούν τα φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων που συναντώνται σε εσωτερικό περιβάλλον σε με τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια με την εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου εκτιμήθηκε η συνεισφορά του εξωτερικού περιβάλλοντος στην συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο και προσδιορίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής των ενεργών εσωτερικών πηγών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΟΣΛΟ

5.2.1 Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους και συγκεκριμένα 3/6/2002 έως 17/6/2002 (1^η περίοδος), 26/8/2002 έως 9/9/2002 (2^η περίοδος) και 13/1/2003 έως 27/1/2003 (3^η περίοδος). Για τις μετρήσεις επιλέχθηκαν δύο σπίτια με διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής τους αλλά και την τοποθεσία τους. Τα δύο σπίτια βρισκόταν εντός των ορίων της πόλης του Όσλο. Το πρώτο βρίσκονταν στα προάστια του Όσλο, στην οδό Steinborgveien και το δεύτερο βρισκόταν στο κέντρο του Όσλο στην οδό Collettsgate 55B. (Σχήμα 5-1). Στο σπίτι στην οδό Steinborgveien πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της 1^{ης} περιόδου ενώ στο διαμέρισμα στην οδό Collettsgate οι μετρήσεις των δύο επόμενων περιόδων.



Σχήμα 5-1: Απεικόνιση στο χάρτη της θέσης των δύο σπιτιών όπου πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στην πόλη του Όσλο (Νορβηγία).

Στην οδό Steinborgveien βρισκόταν ένα διώροφο ξύλινο σπίτι, το οποίο στην βορειοανατολική του πλευρά ήταν σε επαφή με άλλο σπίτι (Σχήμα 5-2). Η κάτοψη του ισογείου παρουσιάζεται στο σχήμα 5-3. Στο ισόγειο του σπιτιού υπήρχαν τρεις χώροι (κουζίνα, καθιστικό και κελάρι), καθώς και ένας μεγάλος διάδρομος, στο τέρμα του οποίου υπήρχε σκάλα που συνέδεε το ισόγειο με τον πάνω όροφο. Στον διάδρομο αυτό υπήρχαν δύο πόρτες, οι οποίες παρέμεναν κλειστές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως επίσης και η πόρτα του κελαριού, απομονώνοντας έτσι το χώρο της κουζίνας και του καθιστικού με το υπόλοιπο σπίτι. Στο ισόγειο υπήρχαν τρία παράθυρα τα οποία άνοιγαν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα για να ανανεωθεί ο αέρας στο χώρο. Τα όργανα μέτρησης ήταν τοποθετημένα στο καθιστικό και μέσω ενός συστήματος με βαλβίδα μετρούσαν συγκεντρώσεις μάζας και αριθμού σωματιδίων μέσα και έξω από το σπίτι.



Σχήμα 5-2: Φωτογραφία του σπιτιού στην οδό Steinborgveien.

Το δεύτερο σπίτι ήταν ένα διαμέρισμα που βρισκόταν στο κέντρο του Όσλο στην οδό Collettsgate 55B. Το διαμέρισμα ήταν κατασκευασμένο από τσιμέντο και τούβλα και αποτελούνταν από τέσσερις χώρους, καθιστικό, υπνοδωμάτιο, κουζίνα και μπάνιο που χωρίζονταν με πόρτες. Σε κάθε χώρο υπήρχε ένα παράθυρο. Η φωτογραφία του διαμερίσματος και η κάτοψη του παρουσιάζονται στα σχήματα 5-4 και 5-5 αντίστοιχα. Τα όργανα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν τοποθετημένα στο υπνοδωμάτιο, αλλά μετρούσαν συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο καθιστικό. Τα ακροφύσια για τη συλλογή των σωματιδίων περνούσαν μέσω ειδικά κατασκευασμένης οπής από την πόρτα του υπνοδωματίου στο καθιστικό. Τα όργανα τοποθετήθηκαν σε διαφορετικό χώρο από τον χώρο των μετρήσεων για να αποφευχθεί η επίδραση των αντλιών που χρησιμοποιούνταν για τη λειτουργία τους στη συγκέντρωση των σωματιδίων. Στο διαμέρισμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τη 2^η και την 3^η περίοδο.



Σχήμα 5-3: Κάτοψη του σπιτιού στην οδό Steinborgveien.

Κατά τη διάρκεια της 2^{ης} περιόδου (Αύγουστος-Σεπτέμβριος) όταν δεν υπήρχε κανένας στο διαμέρισμα στην οδό Collettsgate 55B, η πόρτα του καθιστικού ήταν κλειστή απομονώνοντας έτσι το χώρο αυτό από το υπόλοιπο σπίτι. Κατά τη διάρκεια της νύχτας τα παράθυρα παρέμεναν ανοιχτά, για να αποφευχθεί υπερθέρμανση των οργάνων. Στη διάρκεια της παρουσίας του προσωπικού η πόρτα του καθιστικού ήταν ανοιχτή γιατί διάφορες δραστηριότητες πραγματοποιούνταν στην κουζίνα και μελετήθηκε η επίδραση τους στη συγκέντρωση στο καθιστικό. Κατά τη διάρκεια της 3^{ης} περιόδου η πόρτα του καθιστικού ήταν συνέχεια ανοιχτή. Γενικά σε αντίθεση με το πρώτο σπίτι, στο διαμέρισμα στο κέντρο του Όσλο, ο αέρας στο χώρο των μετρήσεων δεν μπορούσε να θεωρηθεί καλά αναμεμειγμένος, αφού υπήρχε ανταλλαγή αέρα
μεταξύ των δωματίων του σπιτιού. Τέλος ο αερισμός του χώρου γινόταν μέσω των παραθύρων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 5-4: Φωτογραφία του σπιτιού στην οδό Collettsgate 55B. Το διαμέρισμα βρίσκεται στον 1° όροφο.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και στις τρεις περιόδους οι μόνιμοι κάτοικοι των σπιτιών απουσίαζαν και μόνο το προσωπικό που ήταν υπεύθυνο για τη διεξαγωγή των πειραμάτων εισέρχονταν στο χώρο. Όλες οι δραστηριότητες του προσωπικού καταγράφονταν σε αναλυτικά ημερολόγια. Γενικά το προσωπικό βρισκόταν στα σπίτια από περίπου τις 09:00 το πρωί μέχρι το μεσημέρι, όπου φρόντιζε για την παρακολούθηση και συντήρηση των οργάνων και προσομοίωνε καθημερινές δραστηριότητες που οδηγούν σε εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Τις υπόλοιπες ώρες τις ημέρας τα σπίτια ήταν τελείως άδεια και η εσωτερική συγκέντρωση επηρεαζόταν μόνο από το εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 5-5: Κάτοψη του σπιτιού στην οδό Collettsgate 55B.

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία εντός και εκτός τω δύο σπιτιών καταγράφονταν ανά 5 λεπτά. Επίσης γινόταν καταγραφή και της ταχύτητας του ανέμου στον εξωτερικό χώρο. Μετρήσεις μάζας σωματιδίων PM₁₀ πραγματοποιήθηκαν και στα δύο σπίτια με τη χρήση αναλυτών μάζας με τη μέθοδο της ταλάντωσης (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM, 1400a, Rupprecht & Patashnic, Co., Inc., Albany, NY, USA). Χρησιμοποιήθηκαν δύο όργανα τα οποία κατέγραφαν ταυτόχρονα μετρήσεις μέσα και έξω από τα σπίτια ανά 5 λεπτά. Για να εκτιμηθεί η προέλευση των σωματιδίων, οι εξωτερικές μετρήσεις συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις μάζας σωματιδίων PM₁₀ από δύο κεντρικούς σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα μέσα στη μητροπολιτική περιοχή του Όσλο (σταθμοί Kirkeveien και Loren). Οι μετρήσεις αυτές έγιναν επίσης με όργανα ΤΕΟΜ (καταγραφή μετρήσεων ανά 1 ώρα) και τα δεδομένα παραχωρήθηκαν από τον Νορβηγικό Οργανισμό Δημόσιων Δρόμων του Όσλο (Norwegian Public Roads Administration department of Oslo). Ο σταθμός Kirkeveien βρίσκονταν στο κέντρο της πόλης σε πολυσύχναστο δρόμο με ψηλά κτίρια, κοντά στο διαμέρισμα Colletsgate ενώ ο σταθμός Loren ήταν ένας τυπικός σταθμός υποβάθρου, τοποθετημένος κοντά σε αυτοκινητόδρομο (Highway Ring 3).

Στην όδο Steinborgveien πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων με αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (Scanning mobility particle sizer, SMPS, 3934C, TSI Inc., USA) και με αναλυτή αεροδυναμικής κινητικότητας (Aerodynamic particle sizer, APS, 3320, TSI, Inc., USA). Το SMPS κατέγραφε τη συγκέντρωση σωματιδίων με κινητική διάμετρο 9,82-461 nm σε 108 κανάλια με εξαίρεση την πρώτη μέρα των μετρήσεων όποτε το όργανο είχε ρυθμιστεί να λειτουργεί στην περιοχή διαμέτρων 12,2-594 nm σε 109 κανάλια. Το APS κατέγραφε σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο 542-18430 nm σε 50 κανάλια. Τα δύο όργανα κατέγραφαν διαδοχικά μετρήσεις μέσα και έξω από το σπίτι. Κάθε μέτρηση διαρκούσε 5 λεπτά και πραγματοποιούνταν 3 μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο και στη συνέχεια 3 μετρήσεις στον εσωτερικό χώρο. Η εναλλαγή γινόταν με ένα σύστημα βαλβίδων συνδεδεμένο με την τάση λειτουργίας του SMPS. Σε κάθε μέτρηση η τάση στο SMPS αυξάνονταν από 10 σε 10000 V σε τρία λεπτά και στη συνέχεια σε 1 λεπτό μειωνόταν κα πάλι στα 10 V. Στη συνέχεια σε διάστημα 1 λεπτού καθαρίζονταν οι σωλήνες δειγματοληψίας. Οι μετρήσεις και των δύο οργάνων διορθώθηκαν με χρήση ειδικού λογισμικού για απώλειες σωματιδίων λόγω εναπόθεσης τους στους σωλήνες δειγματοληψίας κατά τη διέλευση του αέριου δείγματος.

Για να προσδιοριστεί ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με αέριο SF₆. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη (Chao et al., 2003; Long et al., 2000; Long και Sarnat, 2004; Morawska et al., 2003; Thatcher και Layton 1995; Wallace 2006; Zhu et al., 2005) και στηρίζεται στην απελευθέρωση στο χώρο ενός αδρανούς αερίου (Riffat, 1991; Sherman, 1990). Καθώς το αέριο αυτό δεν εναποτίθεται στις επιφάνειες, η μείωση της συγκέντρωσης του οφείλεται μόνο στη μεταφορά του στο εξωτερικό περιβάλλον.

Για να εκτιμηθεί πόσο καλά αερίζεται ένας χώρος υπολογίζεται πόσες φορές σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 1 ώρα) αντικαθίσταται όλος ο αέρας του εσωτερικού χώρου με αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον. Ο χρόνος τ για μία ανταλλαγή αέρα δίδεται από το πηλίκο της ροής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον (Q, m³/h) προς τον όγκο του χώρου (V, m³). Ο χρόνος αυτός μπορεί να υπολογιστεί παρακολουθώντας τη μείωση της συγκέντρωσης ενός αδρανούς αερίου που απελευθερώνεται στο χώρο (στην συγκεκριμένη περίπτωση SF₆). Στις πειραματικές μετρήσεις στο Όσλο η συγκέντρωση του SF₆ καταγράφονταν με ένα φορητό χρωματογράφο μάζας ανά 10 λεπτά.

Η εξίσωση που περιγράφει την αλλαγή της συγκέντρωσης του SF_6 είναι:

$$C(t) = C_0 e^{-Qt/V} = C_0 e^{-t/\tau}$$
(5-1)

όπου C_0 η αρχική συγκέντρωση τη στιγμή της απελευθέρωσης του αερίου. Ο χρόνος τ, είναι ο χρόνος για να μειωθεί η συγκέντρωση στο 1/ε της αρχικής τιμής. Με την παραπάνω μεθοδολογία υπολογίστηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5-1. Επειδή σε κάποιες περιπτώσεις οι μετρούμενες τιμές παρουσίαζαν σημαντική διαφορά από τη μέση τιμή, χρησιμοποιήθηκαν στην μοντελοποίηση για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης οι τιμές κάθε ημέρας και όχι οι μέσες τιμές.

Πίνακας 5-1: Τιμές ρυθμού ανταλλαγής αέρα κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων στο Όσλο.

Περίοδος μετρήσεων	Εύρος τιμών (h ⁻¹)	Μέση τιμή (h ⁻¹)	Τυπική απόκλιση (h ⁻¹)
1 ^η περίοδος (Steinborgveien)	0,79 - 1,97	1,15	0,34
2 ^η περίοδος (Collttsgate 55B)	0,29 - 2,36	1,10	0,75
3^{η} περίοδος (Collttsgate 55B)	0, 2- 1,25	0,86	0,2

5.2.2 Ανάλυση μετρήσεων συγκέντρωσης μάζας στο Όσλο

Στο σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η διακύμανση της εσωτερικής και της εξωτερικής συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια των τριών περιόδων μετρήσεων στο Όσλο. Οι τιμές στα διαγράμματα αφορούν τους μέσους όρους ανά 30 λεπτά. Η πραγματοποίηση καθημερινών δραστηριοτήτων είχε σαν αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης σε σχέση με την τιμή της πριν από την έναρξη της δραστηριότητας. Στις περιπτώσεις αυτές η εσωτερική συγκέντρωση υπερέβη την εξωτερική μέχρι και 50 φορές στην οδό Steinborgveien και μέχρι 130 φορές στο διαμέρισμα της οδού Collettsgate. Σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες, η εξωτερική συγκέντρωση ήταν στα μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεγαλύτερη από την εσωτερική όσον αφορά την 1^{η} και την 3^{η} περίοδο μετρήσεων. Στις μετρήσεις της 2^{ης} περιόδου στο διαμέρισμα της οδού Collettsgate η εσωτερική συγκέντρωση είχε τιμές πολύ κοντά στην εξωτερική και σε πολλές περιπτώσεις ήταν υψηλότερη. Κατά το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας για όλες τις περιόδους μετρήσεων, δεν υπήρχαν άτομα στους χώρους μετρήσεων και επομένως η μοναδική πηγή σωματιδίων ήταν η διείσδυση από το εξωτερικό περιβάλλον. Η συσχέτιση ανάμεσα στην εσωτερική και την εξωτερική συγκέντρωση ήταν χαμηλή, με τον συντελεστή r² να παρουσιάζει τιμές 0,2, 0,1 και 0,4 για τις περιόδους του Ιουνίου, του Αυγούστου-Σεπτεμβρίου και του Ιανουαρίου αντίστοιχα. Οι γαμηλές αυτές τιμές δείγνουν ότι:

α) Μόνο σωματίδια ορισμένων μεγεθών εισέρχονται σε μεγάλο βαθμό από το εξωτερικό στο εσωτερικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀ να αντιπροσωπεύει διαφορετικό είδος σωματιδίων εντός και εκτός του εσωτερικού περιβάλλοντος. Τα ακριβή μεγέθη των σωματιδίων που εισέρχονται δεν μπορούν να προσδιοριστούν με βάση τη συγκέντρωση μάζας PM₁₀ καθώς αυτή αντιπροσωπεύει σχεδόν το σύνολο των σωματιδίων.

β) Η εναπόθεση των σωματιδίων στο εσωτερικό χώρο γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς με αποτέλεσμα τα σωματίδια που εισέρχονται να παραμένουν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι στο εξωτερικό περιβάλλον.

Η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος αλλά και των εσωτερικών πηγών στη συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο μπορεί να εκτιμηθεί από το λόγο της εσωτερικής συγκέντρωσης προς την εξωτερική συγκέντρωση (θα αναφέρεται ως λόγος Ι/Ο στο υπόλοιπο κομμάτι της διατριβής). Ο λόγος αυτός εξαρτάται από το είδος των σωματιδίων που εξετάζονται, τα χαρακτηριστικά των

κτιρίων, την εξωτερική συγκέντρωση, τις μετεωρολογικές συνθήκες και την ισχύ των εσωτερικών πηγών (Branis et al., 2005; Liu et al., 2004; Weichenthal et al., 2007;). Σε χρονικές περιόδους χωρίς έντονες εσωτερικές δραστηριότητες, ο λόγος Ι/Ο παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε χώρους με φυσικό αερισμό, καθώς μέσω του μηχανικού αερισμού φιλτράρεται ο αέρας που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον (Ni Riain et al., 2003;). Όσον αφορά τη μάζα των σωματιδίων PM₁₀, έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία τιμές που κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος, κάτι που υποδεικνύει την εξάρτηση του λόγου από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε χώρου μελέτης. Οι Morawska et al. (2003) διεξήγαγαν μετρήσεις σε σπίτια και υπολόγισαν μέσες τιμές του λόγου Ι/Ο 1,06 για περιόδους χωρίς δραστηριότητες και 1,71 για περιόδους με καθημερινές δραστηριότητες. Η εξάρτηση του λόγου από το είδος των σωματιδίων δείχνει και τη διαφορετική ικανότητα διείσδυσης των σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθος τους. Οι Hougeiri και Fadel (2004) υπολόγισαν τιμές του λόγου Ι/Ο για κτίρια με μηχανικό εξαερισμό 0,8 σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες και 2 για περιόδους με δραστηριότητες (κυρίως κάπνισμα). Οι Gemenetzis et al., (2006) πραγματοποίησαν μετρήσεις μάζας σωματιδίων PM₁₀ σε διάφορους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στις εγκαταστάσεις του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου στη Θεσσαλονίκη καν ανέφεραν τιμές λογού I/O 2,13 \pm 0,76 και 1,45 \pm 0,57 σε χώρους καπνιστών και μη καπνιστών αντίστοιγα. Οι μετρήσεις πραγματοποιηθήκαν τη γειμερινή περίοδο (τα παράθυρα ήταν το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κλειστά) και οι τιμές του λόγου Ι/Ο δείχνουν την ύπαρξη σημαντικών εσωτερικών πηγών.







Σχήμα 5-6: Συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM₁₀ στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια των τριών περιόδων μετρήσεων: (α) 1^η περίοδος (Steinborgveien), (β) 2^η περίοδος (Collettsgate 55B), (γ) 3^η περίοδος (Collettsgate 55B). Οι τιμές που απεικονίζονται στα διαγράμματα αφορούν μέσους όρους ανά 30 λεπτά των πειραματικά μετρούμενων τιμών. Παρουσιάζονται επίσης και οι δραστηριότητες που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε περίοδο μετρήσεων.

Στον πίνακα 5-2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης και ο λόγος Ι/Ο. Στο διαμέρισμα της οδού Collettsgate η εξωτερική συγκέντρωση τον Ιανουάριο ήταν υψηλότερη λόγω της αυξημένης κυκλοφοράς αυτοκινήτων. Η σύγκριση των τιμών της εξωτερικής συγκέντρωσης με τις μετρήσεις των σταθμών Kirkeveien και Loren έδωσε χαμηλούς συντελεστές συσχέτισης για το σπίτι στην οδό Steinborgveien ($r^2=0,14$ για το σταθμό Loren και $r^2=0,18$ για το σταθμό Kirkeveien). Τιμές συντελεστή r^2 μικρότερες από 0,13 υπολογίστηκαν και για το διαμέρισμα της οδού Collettsgate για την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου. Την περίοδο του Ιανουαρίου η τιμή του r^2 ήταν 0,42 για το σταθμό Loren, ο οποίος βρισκόταν κοντά στο διαμέρισμα. Οι τιμές συγκέντρωσης που μετρήθηκαν στο σταθμό αυτό επηρεάζονταν σημαντικά από την κυκλοφορία των αυτοκινήτων που ήταν αυξημένη την περίοδο του Ιανουαρίου. Η υψηλότερη συσχέτιση σε σχέση με την περίοδο του Αυγούστου-Σεπτεμβρίου δείχνει ότι πιθανή πηγή ρύπανσης για το διαμέρισμα της οδού Collettsgate αποτελούσαν οι εκπομπές από τα αυτοκίνητα.

Συνθήκες	Μέση εσωτερική συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³)	Τυπική απόκλιση	Μέση εξωτερική συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³)	Τυπική απόκλιση	Αναλο γία Ι/Ο	Τυπική απόκλιση
Ιούνιος 2002 (Steinborgveien)						
Απουσία προσωπικού	5,95	2,08	8,05	3,29	0,81	0,33
Παρουσία προσωπικού	12,08	2,24	12,81	2,42	0,96	0,14
Πηγές	69,38	26,18	11,94	3,72	6,62	3,99
Αύγουστος- Σεπτεμβριος 2002 (Collettsgate 55B)						
Απουσία προσωπικού	6,45	3,74	6,50	2,02	1,08	0,77
Παρουσία προσωπικού	6,95	2,43	6,86	0,64	1,04	0,41
Πηγές	43,29	14,41	6,32	1,04	6,82	1,76
Ιανουάριος 2003 (Colelttsgate 55B)						
Απουσία προσωπικού	8,51	3,57	10,89	5,96	0,89	0,39
Παρουσία προσωπικού	17,06	4,36	10,89	3,01	1,82	0,93
Πηγές	54,81	19,54	8,48	2,55	7,34	3,56

Πίνακας 5-2: Μέσες τιμές εσωτερικής και εξωτερικής συγκέντρωσης παρουσία και απουσία προσωπικού και κατά τη διάρκεια προσομοίωσης πηγών.

Απουσία προσωπικού, η εξωτερική συγκέντρωση ήταν μεγαλύτερη από την εσωτερική. Την περίοδο του Αυγούστου-Σεπτεμβρίου οι δύο συγκεντρώσεις παρουσίασαν μικρή διαφορά, με αποτέλεσμα ο λόγος Ι/Ο (υπολογίζεται από το μέσο όρο όλων των λόγων για κάθε μέτρηση και όχι μόνο από τις μέσες τιμές) να εμφανίζει τιμή κοντά στη μονάδα. Τα σωματίδια που εισέρχονταν από τον εξωτερικό χώρο παρέμεναν αιωρούμενα για μεγάλο χρονικό διάστημα και η εσωτερική συγκέντρωση μειωνόταν με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με τις άλλες περιόδους. Επίσης, την περίοδο αυτή, τα παράθυρα κατά τη διάρκεια της νύχτας παρέμεναν ανοιχτά, ευνοώντας έτσι υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης στον εσωτερικό χώρο. Η παρουσία προσωπικού είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης και ο λόγος Ι/Ο ήταν πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας. Οι προσομοιώσεις εσωτερικών πηγών οδήγησαν σε σημαντική αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης και κατά συνέπεια και του λόγου Ι/Ο ο οποίος αυξήθηκε πάνω από 7 φορές σε σχέση με την απουσία προσωπικού. Οι καθημερινές δραστηριότητες αποτελούν τους κυρίαρχους μηχανισμούς παραγωγής σωματιδιακής ύλης στο εσωτερικό περιβάλλον σε περιοχές χωρίς υψηλά επίπεδα εξωτερικής ρύπανσης. Στον πίνακα 5-3 παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων PM_{10} για τις δραστηριότητες που εκτελέστηκαν τις περιόδους των μετρήσεων. Δραστηριότητες, όπως το τηγάνισμα ή το κάπνισμα αναφέρονται ξεχωριστά γιατί δεν επαναλαμβάνονταν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο (ίδιες ποσότητες υλικών και ίδιες θερμοκρασίες στο τηγάνισμα και ίδιος χρόνος καύσης του τσιγάρου στο κάπνισμα). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην ενδείκνυται η παρουσίαση μέσων τιμών για αυτές τις δραστηριότητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το τηγάνισμα και στα δύο σπίτια πραγματοποιούνταν στην κουζίνα, ενώ τα όργανα μέτρησης βρισκόταν στο καθιστικό. Στην περίπτωση της οδού Steinborgveien ο χώρος μπορεί να θεωρηθεί ομογενής, κάτι που δεν ισχύει για το διαμέρισμα της οδού Collettsgate. Ουσιαστικά στην περίπτωση αυτή, η συγκέντρωση που μετρήθηκε αφορά την σωματιδιακή μάζα που μεταφέρθηκε από κάποιο άλλο εσωτερικό χώρο και δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν τιμή συγκέντρωσης που προκύπτει από την επίδραση της συγκεκριμένης πηγής σε κάποιο εσωτερικό χώρο. Οι υπόλοιπες διεργασίες πραγματοποιήθηκαν στο καθιστικό, όπου ήταν και τα όργανα μέτρησης.

Ιούνιος 2002 (Steinborgveien)	Πηγή	Μέγιστη συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m³)
	Τηγάνισμα (απορροφητήρας)	205,60
	Τηγάνισμα +κεριά	506,30
	Τηγάνισμα	425,30
	Κάπνισμα (τσιγάρο)	260,50
Αύγουστος- Σεπτεμβριος 2002 (Collettsgate 55B)	Πηγή	Μέγιστη συγκέντρωση $PM_{10} (\mu g/m^3)$
	Τηγάνισμα	152,00
	Τηγάνισμα	145,10
	Τηγάνισμα + κεριά + +ηλεκτρική σκούπα	217,89
	Τηγάνισμα +κεριά	173,30
	Τηγάνισμα	192,50
	Κάπνισμα (τσιγάρο)	248,77
Ιανουάριος 2003 (Collettsgate 55B)	Πηγή	Μέγιστη συγκέντρωση PM ₁₀ (μg/m ³)
	Τηγάνισμα	170,4
	Τηγάνισμα	154,10
	Τηγάνισμα + κεριά + +ηλεκτρική σκούπα	281,80
	Τηγάνισμα +κεριά	87,70
	Τηγάνισμα	202,10
	Κάπνισμα (πούρο)	347,90

Πίνακας 5-3: Μέγιστες τιμές συγκέντρωσης μάζας σωματιδίων PM₁₀ κατά την προσομοίωση των διαφόρων πηγών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίδραση του τηγανίσματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, το είδος των υλικών, η θερμοκρασία της εστίας και ο χρόνος καθορίζουν και τις εκπομπές σωματιδίων κατά τη διάρκεια

της διεργασίας. Η χαμηλότερη τιμή στο Steinborgveien παρατηρήθηκε με τη χρήση απορροφητήρα. Σε άλλες δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε τηγάνισμα με χρήση απορροφητήρα, χωρίς όμως να παρατηρηθεί αύξηση της συγκέντρωσης μάζας. Οδηγούμαστε επομένως στο συμπέρασμα ότι ο απορροφητήρας απομακρύνει σε σημαντικό ποσοστό τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους. Ο συνδυασμός δραστηριοτήτων οδηγεί γενικά σε αυξημένες συγκεντρώσεις. Η ταυτόχρονη χρήση ηλεκτρικής σκούπας αυξάνει σημαντικά την παρατηρούμενη μέγιστη τιμή και επομένως συντελεί στην εκπομπή μεγάλου μεγέθους σωματιδίων λόγω της διαδικασίας της επαναιώρησης (Thatcher και Layton, 1995).

5.2.3 Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών

Για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = a C_{out} - b C_{in} + \frac{S}{V}$$
(5-2)

όπου C_{in} η συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο (μ g/m³), C_{out} η συγκέντρωση στον εξωτερικό χώρο (μ g/m³), a ο συντελεστής διείσδυσης από το εξωτερικό περιβάλλον (min⁻¹), b ο συντελεστής απομάκρυνσης (min⁻¹), S ο ρυθμός εκπομπής της πηγής (μ g/min) και V ο όγκος του εσωτερικού περιβάλλοντος. Ο συντελεστής b εκφράζει τη μείωση της συγκέντρωσης λόγω της στις επιφάνειες εναπόθεσης και της μεταφοράς στον εξωτερικό χώρο ή σε άλλους εσωτερικούς χώρους. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος θεωρήθηκε αμελητέα καθώς η εσωτερική συγκέντρωση στις περιόδους με πηγές ήταν πολύ υψηλότερη από την εξωτερική συγκέντρωση. Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση 5-2 παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\mathrm{dC}_{\mathrm{in}}}{\mathrm{dt}} = -b\,\mathrm{C}_{\mathrm{in}} + \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{V}} \tag{5-3}$$

Μετά τη λήξη της εκπομπής, η εσωτερική συγκέντρωση μειώνονταν εκθετικά με το χρόνο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$C_{in} = C_o e^{-bt}$$
(5-4)

όπου C₀ η συγκέντρωση στη λήξη της εκπομπής. Με βάση τις πειραματικές τιμές για το χρονικό διάστημα 30 λεπτών μετά τη λήξη της εκπομπής υπολογίστηκε ο συντελεστής b. Για τον υπολογισμό αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab που προσαρμόζει καμπύλη λογαριθμικής μείωσης στα πειραματικά δεδομένα. Ο συντελεστής της καμπύλης αυτής ταυτίζεται με το συντελεστή απομάκρυνσης b. Στο σχήμα 5-7 παρουσιάζεται η εκθετική μείωση της συγκέντρωσης με βάση τα πειραματικά δεδομένα και με την καμπύλη μείωσης που προέκυψε από τους υπολογισμούς. Για όλες τις πηγές, ο συντελεστής r² ανάμεσα στις πειραματικές και τις τιμές του μοντέλου ήταν πάντοτε μεγαλύτερος από 0,9.



Σχήμα 5-7: Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μάζας PM₁₀ μετά την απενεργοποίηση της πηγής και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 24/01/2003 και η πηγή ήταν το κάπνισμα.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab για τον υπολογισμό του ρυθμού εκπομπής με την ελαχιστοποίηση των διαφορών ανάμεσα στις υπολογιζόμενες από το μοντέλο τιμές και στα πειραματικά δεδομένα (Μέθοδος Neadler-Mead). Οι υπολογισμοί γινόταν σε

χρονικό βήμα 5 λεπτών καθώς οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιούνταν ανά πεντάλεπτο. Οι υπολογιζόμενοι ρυθμοί εκπομπής μεταβάλλονταν με το χρόνο, κάτι που είναι φυσιολογικό σε διαδικασίες καύσης (κεριά, τσιγάρο) ή στο τηγάνισμα όπου εκπέμπονται άλλου είδους σωματίδια κατά τη διάρκεια του. Οι ρυθμοί εκπομπής από το τηγάνισμα στην δεύτερη και στην τρίτη περίοδο (διαμέρισμα Collettsgate) αναφέρονται στα σωματίδια που τελικά εισέρχονται από το γειτονικό δωμάτιο της κουζίνας και επομένως αντιστοιχούν σε χαμηλότερες από τις πραγματικές τιμές. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων έγινε με την εφαρμογή μοντέλου όπου επιλύεται με αριθμητική μέθοδο (μέθοδος Runge-Kutta) η εξίσωση 5-2. Σε όλες τις περιπτώσεις υπήρχε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών τιμών. Σε κάθε εφαρμογή υπολογιζόταν ο συντελεστής r² και ο δείκτης συμφωνίας (Index of agreement, IA) μεταξύ των πειραματικών και των τιμών του μοντέλου. Οι παραπάνω συντελεστές παρουσίασαν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές μεγαλύτερες από 0,9. Αποτελέσματα του μοντέλου με τους συντελεστές εκπομπής που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 5-8. Σε περιπτώσεις, όπου υπήρχαν δύο συνεχόμενες πηγές, έγινε εφαρμογή του μοντέλου για την πρώτη πηγή και οι συγκεντρώσεις που υπολογίστηκαν αφαιρέθηκαν από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις. Οι διαφορές που προέκυψαν αποτελούν τις εκπομπές από τη δεύτερη πηγή, για την οποία υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής (σχήματα 5-10α,β). Οι συντελεστές εκπομπής για όλες τις πηγές παρουσιάζονται στον πίνακα 5-4. Όταν δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία για να διαχωριστούν οι πηγές ή οι δραστηριότητες πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα, υπολογίστηκαν συνολικοί ρυθμοί εκπομπής σωματιδιακής μάζας.



Σχήμα 5-8: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τις 24/01/2003 (ενεργός πηγή: κάπνισμα)





Σχήμα 5-9: Εύρεση ρυθμών εκπομπής συνεχόμενων πηγών. Αρχικά υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής της πρώτης χρονικά πηγής και υπολογίστηκε η μεταβολή της συγκέντρωσης λόγω της δεύτερης πηγής (Σχήμα 5-10α). Στη συνέχεια, από τη διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου μόνο για μία πηγή και των πειραματικών δεδομένων υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής της δεύτερης πηγής (Σχήμα 5-10β). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 13/06/2002.

Ο μέσος ρυθμός εκπομπής για το τηγάνισμα στην οδό Steinborgveien μειώθηκε σημαντικά με τη χρήση απορροφητήρα, ενώ αναφέρεται ότι σε δύο ακόμα περιπτώσεις που είχαμε ενεργό τον απορροφητήρα δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση. Ο συνδυασμός της διαδικασίας του τηγανίσματος με την καύση κεριών έδωσε αυξημένους ρυθμούς εκπομπής, παρόλο που κατά την καύση παράγονται κυρίως σωματίδια μικρής διαμέτρου και κατά συνέπεια μικρής μάζας. Στην περίπτωση του τηγανίσματος παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις ανάμεσα στη μέγιστη και στην ελάχιστη τιμή, κάτι που δείχνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθεροί ρυθμοί εκπομπής, όπως προτείνεται συνήθως στη βιβλιογραφία (Fan και Zhang, 2001; Fine et al., 1999; He et al., 2004; Liao et al., 2006). Οι ρυθμοί εκπομπής αυξάνονταν λίγο μετά την έναρξη της διαδικασίας (πιθανόν κατά την προσθήκη του φαγητού στο ζεστό λάδι) και μειώνονταν ελαφρά προς το τέλος της δραστηριότητας.

Ιούνιος 2002 (Steinborgveien)	Πηγή	Πηγή Μέση τιμή (μg/min)		Ελάχιστη τιμή (μg/min)
	Τηγάνισμα (απορροφητήρας)	438	814	77
	Ι ηγανισμα + κερια	1/5/	3941	81
	Τηγάνισμα	823	1737	55
	Κάπνισμα (τσιγάρο)	931	1270	592
Αύγουστος- Σεπτεμβριος 2002 (Collettsgate 55B)	Πηγή	Μέση τιμή (μg/min)	Μέγιστη τιμή (μg/ min)	Ελάχιστη τιμή (μg/min)
	Τηγάνισμα	378	504	241
	Τηγάνισμα	177	378	72
	Τηγάνισμα + κεριά + ηλ. σκούπα ηλεκτρική σκούπα	415	784	46
	Τηγάνισμα +κεριά	511	675	173
	Τηγάνισμα	255	458	141
	Κάπνισμα (τσιγάρο)	499	576	368
	Κάπνισμα (τσιγάρο)	600	675	524
Ιανουάριος 2003 (Collettsgate 55B)	Πηγή	Μέση τιμή (μg/ min)	Μέγιστη τιμή (μg/ min)	Ελάχιστη τιμή (μg/min)
	Τηγάνισμα	365	552	133
	Τηγάνισμα	311	337	107
	Τηγάνισμα + ηλ. σκούπα	1413	3170	65
	Τηγάνισμα	87	125	41
	Κεριά	136	206	22
	Τηγάνισμα	74	151	20
	Κεριά	286	421	168
	Κάπνισμα (πούρο)	681	1255	141

Πίνακας 5-4: Ρυθμοί εκπομπής των δραστηριοτήτων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του Όσλο.

Οι χαμηλότεροι ρυθμοί εκπομπής για το διαμέρισμα της οδού Collettsgate οφείλονται στο ότι αντιπροσωπεύουν το ρυθμό εισροής σωματιδίων από την κουζίνα, αφού το διαμέρισμα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν ένας ομογενής χώρος. Οι μικρότερες διακυμάνσεις μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής παρατηρήθηκαν για το κάπνισμα (τσιγάρο). Αντίθετα η χρήση πούρου αύξησε σημαντικά τις εκπομπές, οι οποίες παρουσίασαν επιπλέον και σημαντική διακύμανση.

Οι He et al. (2004) διεξήγαγαν μετρήσεις σε σπίτια στην Αυστραλία, καταγράφοντας τις καθημερινές συνήθειες των κατοίκων τους. Υπολόγισαν μέσους ρυθμούς εκπομπής μάζας σωματιδίων PM_{2,5} για το τηγάνισμα 2680 ± 2180 μg/min και για το κάπνισμα 990 ± 810 μg/min. Για άλλους τρόπους μαγειρέματος (χρήση φούρνου, φούρνος μικροκυμάτων, τοστιέρα κλπ) οι ρυθμοί εκπομπής μάζας σωματιδίων PM_{2,5} κυμάνθηκαν μεταξύ 110 και 2779 μg/min.

5.2.4 Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στο Όσλο

Οι μετρήσεις αριθμού σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν με δύο διαφορετικά όργανα (αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS) και αναλυτή αεροδυναμικής κινητικότητας (APS)). Το όργανο APS κατατάσσει τα σωματίδια με βάση την αεροδυναμική τους διάμετρο και για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μετατροπή της αεροδυναμικής σε κινητική διάμετρο (βλέπε Κεφάλαιο 2, παράγραφος 2.1.1), ώστε τα αποτελέσματα των δύο οργάνων να αναφέρονται στην ίδια ταξινόμηση σωματιδίων. Για την μετατροπή αγνοήθηκε ο συντελεστής διόρθωσης ολίσθησης του Cunnigham, καθώς έχει τιμές κοντά στη μονάδα για σωματίδια μεγαλύτερα από 500 nm (Hinds, 1999). Η πυκνότητα των σωματιδίων τέθηκε ίση με 1,5 g/cm³. Με την παραπάνω διόρθωση, το APS κατέγραφε σωματίδια με κινητική διάμετρο μεταξύ 476 και 9095 nm. Επίσης τα δύο όργανα κατέγραφαν τιμές εναλλάξ από τον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο. Πραγματοποιήθηκε αναγωγή των εσωτερικών και εξωτερικών τιμών σε κοινό χρόνο με εξομάλυνση των χρονοσειρών με χρήση κυβικών πολυωνύμων (splines). Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με ανάπτυξη προγράμματος σε γλώσσα Matlab και χρήση έτοιμων βιβλιοθηκών της έκδοσης 7.0.1 Στον πίνακα 5-5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του οργάνου SMPS. Τα σωματίδια ταξινομήθηκαν σε 3 κλάσεις (10-100 nm, 100-200 nm και 200-429 nm) ενώ παρουσιάζονται επίσης τα συνολικά σωματίδια και τα νάνο-σωματίδια (<50 nm). Στον πίνακα 5-6 παρουσιάζεται το % ποσοστό της κάθε κλάσης σωματιδίων ως προς τα ολικά σωματίδια. Οι εκπομπές από τις πηγές είχαν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης συγκέντρωσης πάνω από 9 φορές σε σχέση με τη μέση συγκέντρωση παρουσία προσωπικού. Επομένως οι συγκεκριμένες δραστηριότητες που πραγματοποιήθηκαν (τηγάνισμα, κεριά και τσιγάρο) αποτελούν παράγοντες αύξησης του αριθμού των μικρών σωματιδίων (<500 nm). Οι εργασίες που πραγματοποιόσε το προσωπικό κατά την παραμονή στο σπίτι οδήγησαν σε εκπομπές σωματιδίων μεγαλύτερων από 100 nm καθώς το ποσοστό των σωματιδίων με διάμετρο μεταξύ 100 και 200 nm αυξήθηκε κατά 9% και 13% σε σχέση με τις περιόδους χωρίς δραστηριότητες. Παρατηρήθηκε επίσης και υπερδιπλασιασμός της συγκέντρωσης των σωματιδίων μεγαλύτερων από 200 nm. Οι υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας οφείλονται σε αυξημένη συγκέντρωση των εξωτερικών υπέρλεπτων σωματιδίων, τα οποία εισέρχονταν στο εσωτερικό περιβάλλον.

Τυπική διακύμανση της εσωτερικής συγκέντρωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5-10 για 3 ημέρες: 2 με προσομοιώσεις πηγών (12/6 και 13/6) και 1 μόνο με παρουσία προσωπικού (11/6). Απουσία πηγών, η εσωτερική συγκέντρωση ακολουθούσε τις μεταβολές της εξωτερικής συγκέντρωσης και ήταν χαμηλότερη από αυτήν τόσο για τα ολικά, όσο και για τα υπέρλεπτα σωματίδια. Η είσοδος του προσωπικού και το άνοιγμα των παραθύρων για τον αερισμό του χώρου (γύρω στις 09:00 κάθε πρωί) οδηγούσε σε εξίσωση της εσωτερικής με την εξωτερική συγκέντρωση και με το κλείσιμο των παραθύρων οι δύο συγκεντρώσεις διαχωρίζονταν και πάλι. Τα υπέρλεπτα σωματίδια αποτελούσαν το μεγαλύτερο τμήμα των ολικών σωματιδίων σε περιόδους απουσίας προσωπικού. Κατά το τηγάνισμα εκπέμπονται κυρίως υπέρλεπτα σωματίδια, ενώ κατά το κάπνισμα εκπέμπονται και μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία παραμένουν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 5-5: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 10 - 429 nm που μετρήθηκαν με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS). Η «παρουσία προσωπικού» αναφέρεται σε ημέρες που δεν έγιναν προσομοιώσεις πηγών, ενώ οι «ενεργές πηγές» σε ημέρες με προσομοιώσεις πηγών, όπου συμπεριελήφθησαν και τα χρονικά διαστήματα μετά την αποχώρηση του προσωπικού και μέχρι η συγκέντρωση να επιστρέψει στην τιμή υποβάθρου.

	Ολικά σωματίδια (× 10 ³ #/cm ³)	10-50 nm (× 10^3 #/cm^3)	10-100 nm (× 10^3 #/cm^3)	100-200 nm (× 10^3 #/cm^3)	200-429 nm $(\times 10^3 \text{#/cm}^3)$
Νύχτα (χωρίς δραστηριότητες)	$2,39 \pm 0,78$	$1,29 \pm 0,48$	1,91 ± 0,66	$0,35 \pm 0,11$	$0,12 \pm 0,07$
Ημέρα (χωρίς δραστηριότητες)	$1,93 \pm 0,66$	1 ± 0,44	$1,45 \pm 0,57$	$0,35 \pm 0,13$	$0,13 \pm 0,07$
Παρουσία ποοσωπικού	$2,04 \pm 0,07$	$0,77 \pm 0,06$	$1,21 \pm 0,05$	$0,56 \pm 0,03$	$0,28 \pm 0,06$
Ενεργές πηγές	$19,42 \pm 14,19$	$6,02 \pm 3,21$	$12,\!98 \pm 7,\!45$	$5,01 \pm 5,69$	$1,44 \pm 1,71$

Πίνακας 5-6: % ποσοστό των σωματιδίων κάθε κλάσης ως προς τα ολικά σωματίδια.

	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)	Ποσοστό (%)
	10-50 nm	10-100 nm	100-200 nm	200-429 nm
Νύχτα (χωρίς	53 ± 6	79 ± 6	15 ± 4	5 ± 3
δραστηριότητες)				
Ημέρα (χωρίς	51 ± 10	74 ± 7	19 ± 4	7 ± 3
δραστηριότητες)				
Παρουσία	37 ± 2	59 ± 3	28 ± 1	14 ± 3
προσωπικού				
Ενεργές πηγές	39 ± 22	71 ± 14	22 ± 11	7 ± 4



Σχήμα 5-10: Συγκέντρωση σωματιδίων για το χρονικό διάστημα 11/6/2002 (06:00) έως 14/6/2002 (06:00). Παρουσιάζονται τα ολικά σωματίδια (10-429 nm) στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο και τα υπέρλεπτα σωματίδια (10-100 nm) στον εσωτερικό χώρο.

Όσον αφορά τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 476 nm, η συγκέντρωση αριθμού τους στον εσωτερικό αλλά και στον εξωτερικό χώρο ήταν μικρή. Πιο συγκεκριμένα η μέση τιμή στον εσωτερικό χώρο για περιόδους χωρίς δραστηριότητες και απουσία προσωπικού ήταν 1,18 ± 0,8 $\#/\text{cm}^3$ και η μέση τιμή στον εξωτερικό χώρο ήταν 2,1 ± 1,3 $\#/\text{cm}^3$. Η παρουσία προσωπικού είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης συγκέντρωσης στην τιμή 5,1 ± 4 $\#/\text{cm}^3$, σαν αποτέλεσμα της εκπομπής μεγάλων σωματιδίων λόγω επαναιώρησης. Οι μέσες τιμές για τις περιόδους όπου υπήρχε παρουσία προσωπικού και παράλληλα πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πηγών κυμάνθηκαν μεταξύ 4,48 $\#/\text{cm}^3$ και τα χρονικά διαστήματα μετά τη λήξη της εκπομπής και μέχρι η συγκέντρωση να επιστρέψει στην τιμή πριν από την ενεργοποίηση της πηγής.

Η ανάλυση των τιμών που παρουσίασε η αναλογία της εσωτερικής προς την εξωτερική συγκέντρωση (λόγος Ι/Ο) έδειξε τη σημαντική επίδραση των εσωτερικών πηγών στην αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης. Για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων, ο λόγος Ι/Ο ήταν μικρότερος της μονάδας για όλα τα μεγέθη σωματιδίων (Σχήμα 5-11). Οι Morawska et al. (2001) μελέτησαν την εσωτερική και εξωτερική συγκέντρωση σε σπίτια στο Brisbane (Αυστραλία) και ανέφεραν μέση τιμή για το λόγο Ι/Ο ίση με 1,07. Η αυξημένη τιμή οφείλεται στην πραγματοποίηση δραστηριοτήτων που οδηγούν σε εκπομπές σε όλη τη διάρκεια της ημέρας και όχι μόνο τις πρωινές ώρες όπως συνέβαινε στα πειράματα στο Όσλο. Οι Tippayawong et al. (2009) πραγματοποίησαν μετρήσεις σε σχολικές τάξεις και υπολόγισαν λόγο Ι/Ο 0,74 για σωματίδια μικρότερα από 1 μm. Μετρήσεις υπέρλεπτων σωματιδίων (Matson, 2005) σε διαμερίσματα και γραφεία στη Σουηδία και στη Δανία έδωσαν τιμές για το λόγο Ι/Ο μεταξύ 0,5 και 0,8. Απουσία προσωπικού οι τιμές του λόγου ήταν ελαφρά μικρότερες και παρουσίασαν τις μικρότερες τιμές για σωματίδια μικρότερα από 50 nm. Οι μικρές αυτές τιμές δείχνουν μικρή διείσδυση των σωματιδίων αυτών από το εξωτερικό περιβάλλον. Σε παρόμοιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Zhu et al. (2005) πραγματοποιώντας μετρήσεις σε διαμέρισμα στο Los Angeles.

Η παρουσία προσωπικού είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του λόγου Ι/Ο κοντά στη μονάδα. Η αύξηση οφείλεται στις εσωτερικές εκπομπές λόγω των εργασιών του προσωπικού. Οι πηγές αυξάνουν σημαντικά την εσωτερική συγκέντρωση και ο λόγος κυμαίνεται από 1,08 (σωματίδια με μέγεθος 10-50 nm) έως 1,85 (σωματίδια με μέγεθος 50-100 nm). Για το χρονικό διάστημα που οι πηγές ήταν ενεργές, ο λόγος ξεπερνούσε για τα υπέρλεπτα σωματίδια την τιμή 100.

Τυπική διακύμανση του λόγου I/O παρουσιάζεται στο σχήμα 5-12. Η είσοδος του προσωπικού και ο αερισμός (09:00) είχαν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου, ο οποίος άρχισε να μειώνεται με το κλείσιμο των παραθύρων. Το προσωπικό παρέμεινε μέχρι τις 12:00 και στη συνέχεια ο λόγος συνέχισε να μειώνεται. Η αύξηση που καταγράφηκε στις 14:00 οφείλονταν σε αύξηση της εξωτερικής συγκέντρωσης και εισροή σωματιδίων. Η επαναφορά στη συγκέντρωση

υποβάθρου πραγματοποιήθηκε πιο αργά για το εσωτερικό σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων με τον αλγόριθμο AMANpsd για την εύρεση των κατανομών του φάσματος των αιωρούμενων σωματιδίων έδειξε τη διαφοροποίηση που προκαλείται στα φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο από τις εκπομπές των πηγών. Στον πίνακα 5-7 παρουσιάζονται τα ποσοστά των μονοκόρυφων, δικόρυφων, τρικόρυφων και τετρακόρυφων κατανομών στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο. Στον εσωτερικό χώρο, τα δεδομένα έχουν επιπλέον ταξινομηθεί ανάλογα με την πραγματοποίηση ή όχι δραστηριοτήτων.



Σχήμα 5-11: Τιμές του λόγου Ι/Ο για τα διάφορα μεγέθη σωματιδίων. Στα χρονικά διαστήματα με πηγές περιλαμβάνεται και χρόνος για να επιστρέψει η συγκέντρωση στην τιμή υποβάθρου.



Σχήμα 5-12: Αναλογία εσωτερικής προς εξωτερική συγκέντρωση για τις 11/6/2002.

Πίνακας 5-7: % ποσοστό μονοκόρυφων, δικόρυφων τα, τρικόρυφων και τετρακόρυφων κατανομών. Το υπόβαθρο αναφέρεται σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες και αφού η συγκέντρωση είχε επιστρέψει στην τιμή που είχε πριν την ενεργοποίηση της πηγής ή την έλευση του προσωπικού. Η παρουσία προσωπικού αναφέρεται σε χρονικά διαστήματα που δεν υπήρχε επίδραση από εκπομπές λόγω προσομοίωσης εσωτερικών πηγών.

	Μονοκόρυφη (%)	Δικόρυφη (%)	Τρικόρυφη (%)	Τετρακόρυφη (%)
Εξωτερικό	6	63	30	1
Ενεργές πηγές	32	36	23	9
1 h μετά την εκπομπή	30	48	17	5
2 h μετά την εκπομπή	10	56	27	7
Αερισμός	5	39	40	15
Παρουσία				
προσωπικού	3	36	41	20
Υπόβαθρο	5	44	39	12

Στον εξωτερικό χώρο εμφανίστηκαν κυρίως δικόρυφες και τρικόρυφες κατανομές. Κατά τον αερισμό (ανοιχτά παράθυρα) αλλά και σε συνθήκες απουσίας δραστηριοτήτων παρουσιάστηκαν στο εσωτερικό παρόμοιες συνθήκες με το εξωτερικό περιβάλλον. Η παρουσία προσωπικού διαφοροποίησε την κατάσταση, η οποία μεταβλήθηκε σημαντικά λόγω των εκπομπών εσωτερικών πηγών. Εμφανίστηκε αυξημένο ποσοστό μονοκόρυφων κατανομών (εκπομπές σε περιορισμένα μεγέθη σωματιδίων). Οι κατανομές μετά την απενεργοποίηση των πηγών έγιναν σταδιακά δικόρυφες λόγω διεργασιών (κυρίως συσσωμάτωση) που μεταβάλλουν το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στα σχήματα 5-13 (α-δ) παρουσιάζονται τα επί τοις εκατό ποσοστά των τιμών των GMD στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο. Απουσία δραστηριοτήτων, ο εσωτερικός και ο εξωτερικός χώρος εμφάνισαν αρκετές ομοιότητες. Στον εσωτερικό χώρο παρατηρήθηκε μεγαλύτερο συνολικό ποσοστό κατανομών με GMD μικρότερη από 100 nm. Οι δικόρυφες κατανομές, που αποτελούσαν και το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών κατανομών (Πίνακας 5-7) παρουσίασαν σχεδόν το ίδιο ποσοστό GMD στις περιοχές 0-50 nm, 50-100nm και 100-200 nm. Επομένως η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων σε συνθήκες φυσικού αερισμού του εσωτερικού χώρου. Η ενεργοποίηση των πηγών είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση των συνολικών μονοκόρυφων κατανομών, οι οποίες εμφάνισαν σε συνολικό ποσοστό 80% GMDs μικρότερες από 100 nm. Διαπιστώθηκε ότι καθημερινές δραστηριότητες (μαγείρεμα, κάπνισμα, καύση κεριών) οδηγούν σε σημαντικές εκπομπές υπέρλεπτων σωματιδίων, που είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα, καθώς μπορούν να εισέλθουν ευκολότερα στον ανθρώπινο οργανισμό σε σχέση με μεγαλύτερα σωματίδια. Μετά την απενεργοποίηση των πηγών και για χρονικό διάστημα μίας ώρας, μειώνεται το συνολικό ποσοστό των κατανομών στην περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων και αυξάνεται ελαφρά το ποσοστό των κατανομών με GMD μεγαλύτερες από 200 nm. Η διαδικασία της συσσωμάτωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην αλλαγή του φάσματος κατανομής μεγεθών στην περίπτωση εκπομπής μεγάλου αριθμού μικρών σωματιδίων (Hussein et al., 2009). Όμως στο χρονικό ορίζοντα της μίας ώρας για τις συγκεκριμένες συνθήκες του χώρου που εξετάστηκε δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι το μέγεθος των σωματιδίων αυξήθηκε τόσο ώστε να μειωθεί σημαντικά ο κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία.

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστες περιπτώσεις αναλυτικής εξέτασης της φασματικής κατανομής των αιωρούμενων σωματιδίων σε κάποιο εσωτερικό χώρο. Οι Hussein et al. (2005) πραγματοποίησαν πειραματικές μετρήσεις σε σπίτι με φυσικό αερισμό στην πόλη Espoo (Φινλανδία) και διαπίστωσαν ότι σε περιόδους χωρίς δραστηριότητες η φασματική κατανομή στον εσωτερικό χώρο παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη κατανομή στον εξωτερικό χώρο. Οι Long et al. (2000) και He et al. (2004) έδειξαν ότι οι εσωτερικές πηγές μεταβάλλουν τη GMD της κατανομής σε σχέση με τις συνθήκες υποβάθρου. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στις δύο τελευταίες μελέτες δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος αλγόριθμος για τον προσδιορισμό της GMD, αλλά θεωρήθηκε ότι συμπίπτει με το μέγιστο της κατανομής, όπως αυτή προέκυψε απευθείας από τα πειραματικά δεδομένα. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα μόνο για μονοκόρυφες κατανομές ή για κατανομές που παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων σε μία στενή περιοχή μεγεθών.



(α)





Σχήμα 5-13: Ποσοστά κορυφών σε σχέση με τη γεωμετρική μέση διάμετρο (GMD). Οι μπάρες αναφέρονται στο συνολικό αριθμό των κορυφών (π.χ για τρικόρυφη κατανομή έχουμε τρεις κορυφές), ενώ οι γραμμές στα ποσοστά των κορυφών από μονοκόρυφες (unimodal), δικόρυφες (bimodal), τρικόρυφες (trimodal) ή τετρακόρυφες (tetramodal) κατανομές. Το πρώτο διάγραμμα (α) αναφέρεται στον εξωτερικό χώρο και τα υπόλοιπα στον εσωτερικό χώρο και πιο συγκεκριμένα: το δεύτερο (β) σε περιόδους χωρίς πηγές, το τρίτο (γ) σε περιόδους με ενεργές πηγές και το τέταρτο (δ) στα χρονικά διαστήματα μέχρι να επιστρέψει η συγκέντρωση στις τιμές υποβάθρου.

5.2.5 Χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων από πηγές εσωτερικού χώρου

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων στο Όσλο προσομοιώθηκαν κάποιες καθημερινές δραστηριότητες για να εξεταστεί η επίδραση τους στη μεταβολή της εσωτερικής συγκέντρωσης αλλά και της φασματικής κατανομής μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων. Οι δραστηριότητες που επιλέχθηκαν ήταν το τηγάνισμα (6/6, 7/6, 8/6, 12/6 και 13/6), η καύση 2 κεριών (8/6 και 12/6), η χρήση ηλεκτρικής σκούπας (8/6) και το κάπνισμα τσιγάρου (13/6). Στην περίπτωση του τηγανίσματος δεν χρησιμοποιούνταν κάθε φορά τα ίδια ακριβώς υλικά και τα πειράματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους. Επιπλέον στα 3 πρώτα χρονολογικά πειράματα ήταν ανοιχτός ο απορροφητήρας της κουζίνας όση ώρα διαρκούσαν οι εκπομπές. Η

διαδικασία του τηγανίσματος διαρκούσε από 15 - 25 λεπτά. Η καύση των κεριών ξεκινούσε ταυτόχρονα με το τηγάνισμα και διαρκούσε μία ώρα. Η χρήση της ηλεκτρικής σκούπας πραγματοποιήθηκε για 10 λεπτά, παράλληλα με την καύση των κεριών. Τέλος το κάπνισμα πραγματοποιήθηκε μία ώρα μετά την παύση του τηγανίσματος και διήρκησε 5 λεπτά. Στον πίνακα 5-8 παρουσιάζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις ολικών σωματιδίων, καθώς και οι συγκεντρώσεις στις περιοχές 10-50 nm (νάνο-σωματίδια), 10-100 nm (υπέρλεπτα σωματίδια), 100-200 nm και >200 nm, κατά τη διάρκεια των εκπομπών από τις πηγές.

Πίνακας 5-8: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους τη στιγμή που καταγράφηκε η μέγιστη συγκέντρωση ολικών σωματιδίων.

Πηγή	Ολικά (× 10 ⁴ #/cm ³)	10-50 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	50-100 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	100-200 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)	>200 nm (× 10 ⁴ #/cm ³)
Τηγάνισμα (6/6)	2,16	1,94	2,09	0,05	0,02
(απορροφητήρας)					
Τηγάνισμα (7/6)	8,70	1,87	5,73	2,50	0,63
(απορροφητήρας)					
Τηγάνισμα + κεριά	4,01	3,56	3,86	0,13	0,02
+ ηλ σκούπα (8/6)					
(απορροφητήρας)					
Τηγάνισμα +κεριά	16,63	9,14	13,01	2,77	0,64
(12/6)					
Τηγάνισμα (13/6)	17,74	2,94	10,81	5,68	1,32
Τσιγάρο (13/6)	9,43	1,77	5,21	3,10	1,12

Η μέγιστη συγκέντρωση των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 100 nm παρατηρήθηκε 5 λεπτά πριν τη μέγιστη συγκέντρωση των ολικών σωματιδίων στην περίπτωση του τηγανίσματος, ανεξάρτητα με τη χρήση απορροφητήρα. Επομένως, λάμβανε χώρα συσσωμάτωση των εκπεμπόμενων μικρών σωματιδίων που οδηγούσε στη δημιουργία σωματιδίων μεγαλύτερων μεγεθών, μειώνοντας παράλληλα τον αριθμό τους. Η χρήση απορροφητήρα κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος ελάττωσε τη συνολική συγκέντρωση των σωματιδίων, ενώ σχεδόν «εξαφάνισε» σε δύο από τα τρία πειράματα τα σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 nm. Για το λόγο αυτό δεν παρατηρήθηκε αύξηση στις δύο αυτές περιπτώσεις της σωματιδιακής μάζας PM₁₀ (βλέπε παράγραφο 5.3). Διαπιστώνεται επίσης ότι η χρήση διαφορετικών υλικών επηρεάζει και τις εκπομπές. Η ταυτόχρονη καύση κεριών αυξάνει τη συγκέντρωση των νάνοσωματιδίων, τα οποία αντιπροσωπεύουν ποσοστό 89% για τις 8/6 (απορροφητήρας) και 54% για τις 12/6. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τις 7/6 (απορροφητήρας) και 13/6 ήταν 22% και 17%. Στις 6/6 το ποσοστό των νάνο σωματιδίων ήταν 90%, αλλά η συνολική συγκέντρωση ήταν η μικρότερη που είχε καταγραφεί σε όλα τα πειράματα. Η μικρότερη συγκέντρωση νάνοσωματιδίων παρατηρήθηκε για το κάπνισμα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το κάπνισμα πραγματοποιήθηκε μία ώρα μετά το τηγάνισμα, χρόνος που δεν ήταν αρκετός για να επιστρέψει η συγκέντρωση στην τιμή υποβάθρου σε καμία από τις εξεταζόμενες κατηγορίες μεγεθών.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι στην περίπτωση του τηγανίσματος η χρήση απορροφητήρα μειώνει σημαντικά την επίδραση του φαινομένου της συσσωμάτωσης, διατηρώντας την τιμή της GMD σταθερή τόσο κατά τη διάρκεια, όσο και μετά τη λήξη της εκπομπής. Με τον απορροφητήρα απομακρύνονταν σε μεγάλο ποσοστό τα μεγάλου μεγέθους σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά λόγου του όγκου τους λειτουργούν σαν καταβόθρες των μικρότερων σωματιδίων (Seinfeld και Pandis, 2006). Στις 6/6 οι κατανομές κατά τη διάρκεια της εκπομπής ήταν δικόρυφες, με τη GMD της πρώτης κορυφής να αυξάνεται γρήγορα από τα 15 nm στην αρχή της εκπομπής , στα 30 nm στο τέλος της εκπομπής. Η δεύτερη κορυφή ήταν στα 150 nm. Μετά την απενεργοποίηση της πηγής, η GMD της πρώτης κατανομής συνέχισε να αυξάνεται, μέχρι τα 45 nm, όταν η ολική συγκέντρωση επέστρεψε στην τιμή υποβάθρου (Σχήμα 5-14). Σχεδόν το σύνολο των σωματιδίων βρίσκονταν στην πρώτη κατανομή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τη στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης ο αριθμός σωματιδίων στις δύο κατανομές ήταν 20500 #/cm³ και 800 #/cm³, ενώ 30 λεπτά μετά οι αντίστοιχοι αριθμοί ήταν 10600 #/cm³ και 680 #/cm³.



Σχήμα 5-14: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο για τις 6/6 (Τηγάνισμα με χρήση απορροφητήρα). Η κατανομή υποβάθρου αναφέρεται σε χρόνο 5 λεπτά πριν την έναρξη της εκπομπής, ενώ η χρονική στιγμή t=0 λαμβάνεται τη στιγμή της ενεργοποίησης της πηγής. Η εκπομπή ολοκληρώθηκε για t=20 min.

Στις 7/6 η κατανομή κατά τη διάρκεια της εκπομπής ήταν μονοκόρυφη με GMD στα 80 nm. Η κατανομή παρέμενε μονοκόρυφη και μετά το τέλος του τηγανίσματος και η GMD αυξάνονταν ελαφρά μέχρι τα 90 nm (Σχήμα 5-15). Δεύτερη κατανομή εμφανίστηκε σε λίγες περιπτώσεις, μόνο για μικρού μεγέθους σωματίδια, τα οποία πιθανότατα προέρχονταν από το εξωτερικό περιβάλλον, και όχι από το τηγάνισμα. Η επίδραση της συσσωμάτωσης ήταν μικρή, καθώς εκπέμπονταν πολύ λίγα νάνο-σωματίδια, και τα μεγάλα σωματίδια που είτε παράγονταν, είτε δημιουργούνταν, απομακρύνονταν με τον απορροφητήρα. Στις 13/6 πραγματοποιήθηκε η μοναδική προσομοίωση τηγανίσματος χωρίς χρήση απορροφητήρα και χωρίς ταυτόχρονη επίδραση άλλης πηγής. Κατά τη διάρκεια της εκπομπής η κατανομή ήταν μονοκόρυφη και η GMD αυξήθηκε από τα 70 nm στα 90 nm. Η αύξηση συνεχίστηκε μέχρι τα 110 nm ενώ παράλληλα άρχισε να εμφανίζεται και δεύτερη κορυφή στα 150 nm. Τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν για το τηγάνισμα μόνο για μία ώρα μετά τη λήξη της εκπομπής, καθώς τότε ξεκίνησε να εκπέμπει μία δεύτερη πηγή (τσιγάρο).



Σχήμα 5-15: Μεταβολή του φάσματος κατανομής μεγέθους των σωματιδίων με το χρόνο για τις 7/6 (Τηγάνισμα με χρήση απορροφητήρα). Η κατανομή υποβάθρου αναφέρεται σε χρόνο 5 λεπτά πριν την έναρξη της εκπομπής, ενώ η χρονική στιγμή t=0 λαμβάνεται τη στιγμή της ενεργοποίησης της πηγής. Η εκπομπή ολοκληρώθηκε για t=25 min.

Η καύση των κεριών οδήγησε στην εκπομπή σωματιδίων μικρότερων από 50 nm. Για 20-25 λεπτά, και στις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν οι εκπομπές από κεριά γινόταν παράλληλα με το τηγάνισμα. Στη συνέχεια τα κεριά εξέπεμπαν μόνα τους για 30-40 λεπτά. Στις 8/6 που ήταν ανοιχτός ο απορροφητήρας, σχεδόν το σύνολο των σωματιδίων ήταν μικρότερα από 100 nm, ενώ μέχρι το σβήσιμο των κεριών ήταν σε ποσοστό άνω του 75% μικρότερα από 50 nm (Σχήμα 5-16). Η μείωση του αριθμού των σωματιδίων οφείλονταν στην έντονη συσσωμάτωση, που μείωνε τα μικρά σωματίδια, αλλά αύξανε σε μικρότερο αριθμό τα μεγαλύτερα (για κάθε δύο σωματίδια που συγκρούονταν, παράγονταν ένα σωματίδιο). Οι κατανομές ήταν δικόρυφες ή τρικόρυφες (Σχήμα 5-17). Η μία κορυφή (για τις μονοκόρυφες) και οι δύο για τις τρικόρυφες είχαν GMDs μικρότερες από 15 nm. Η άλλη κορυφή είχε GMD που αυξάνονταν μέχρι τα 60 nm μέχρι το σβήσιμο των κεριών και μέχρι τα 85 nm δύο ώρες μετά τη λήξη των εκπομπών. Η σύγκριση των φασματικών κατανομών για τις 8/6, με τις κατανομές για τηγάνισμα, με ή χωρίς

τη χρήση απορροφητήρα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή στα φυσικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στα κεριά, καθώς ο απορροφητήρας απομάκρυνε τα σωματίδια που εκπέμπονταν από το τηγάνισμα.



Σχήμα 5-16: Μεταβολή του αριθμού των σωματιδίων με το χρόνο για τις 8/6. Τη χρονική στιγμή t=0, άρχισε ταυτόχρονα η εκπομπή σωματιδίων λόγω τηγανίσματος και καύσης κεριών. Το τηγάνισμα ολοκληρώθηκε για t=20 min, και η καύση των κεριών για t=60 min.

Στις 12/6 (κλειστός απορροφητήρας) η επίδραση του τηγανίσματος είναι εντονότερη. Τα νάνοσωματίδια αντιπροσώπευαν αρχικά το 60% των ολικών σωματιδίων, και το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 40% με το σβήσιμο των κεριών (Σχήμα 5-18). Η μέγιστη συγκέντρωση παρατηρήθηκε με τη λήξη του τηγανίσματος, κάτι που δεν συνέβηκε στις 8/6. Το φάσμα μεταβάλλονταν συνεχώς, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-19. Αρχικά (στα πρώτα 15 λεπτά από την έναρξη των εκπομπών) εμφανίστηκαν GMDs μικρότερες από 15 nm και οι κατανομές ήταν τρικόρυφες. Στη συνέχεια οι GMDs αυξάνονταν από τα 40 nm έως τα 60 nm μέχρι το σβήσιμο των κεριών και μέχρι τα 75 nm δύο ώρες μετά. Παράλληλα εμφανίστηκαν και κορυφές με GMDs μεγαλύτερες από 150 nm. Τα σωματίδια αυτά προέρχονταν κυρίως από συσσωμάτωση.



Σχήμα 5-17: Μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους των σωματιδίων για τις 8/6. Τη χρονική στιγμή t=0, άρχισε ταυτόχρονα η εκπομπή σωματιδίων λόγω τηγανίσματος και καύσης κεριών. Το τηγάνισμα ολοκληρώθηκε για t=20 min, και η καύση των κεριών για t=60 min.



Σχήμα 5-18: Μεταβολή του αριθμού των σωματιδίων με το χρόνο για τις 12/6. Τη χρονική στιγμή t=0, άρχισε ταυτόχρονα η εκπομπή σωματιδίων λόγω τηγανίσματος και καύσης κεριών. Το τηγάνισμα ολοκληρώθηκε για t=20 min, και η καύση των κεριών για t=60 min.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων μετά το άναμμα του τσιγάρου έδειξε μονοκόρυφες κατανομές. Η διαδικασία του καπνίσματος διήρκησε 15 λεπτά και η GMD της κατανομής αυξήθηκε από τα 95 nm στα 115 nm 2 ώρες μετά το σβήσιμο του τσιγάρου (Σχήμα 5-20). Τα σωματίδια που εκπέμφθηκαν παρέμειναν αιωρούμενα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις εκπομπές από τις άλλες πηγές. Η ολική συγκέντρωση σωματιδίων επέστρεψε στην τιμή πριν την έναρξη της εκπομπής μετά από 270 λεπτά. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι κατά το έναρξη της πηγής υπήρχαν ακόμα στο χώρο σωματίδια προερχόμενα από το τηγάνισμα που προηγήθηκε πριν από 60 λεπτά.



Σχήμα 5-19: Μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους των σωματιδίων για τις 12/6. Τη χρονική στιγμή t=0, άρχισε ταυτόχρονα η εκπομπή σωματιδίων λόγω τηγανίσματος και καύσης κεριών. Το τηγάνισμα ολοκληρώθηκε για t=20 min, και η καύση των κεριών για t=60 min.

Στο σχήμα 5-21 παρουσιάζονται οι φασματικές κατανομές όλων των πηγών τη χρονική στιγμή της μέγιστης εκπομπής. Ανάλογα με το είδος της πηγής ή με το συνδυασμό των πηγών, η φασματική κατανομή παρουσίασε έντονες διαφοροποιήσεις. Η χρήση απορροφητήρα μείωσε σημαντικά τα εκπεμπόμενα σωματίδια, ενώ η καύση των κεριών μετατόπισε το μέγιστο της κατανομής σε μικρότερες τιμές διαμέτρους. Σε όλες όμως τις περιπτώσεις, η GMD ήταν μικρότερη από 100 nm και τα σωματίδια που βρίσκονταν στο εσωτερικό περιβάλλον ανήκαν στην επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία περιοχή μεγεθών.



Σχήμα 5-20: Μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους των σωματιδίων για τις 13/6 (κάπνισμα). Τη χρονική στιγμή t=0, άρχισε ταυτόχρονα η εκπομπή σωματιδίων λόγω του τσιγάρου και ολοκληρώθηκε για t=15 min.


Σχήμα 5-21: Φασματική κατανομή μεγεθών των σωματιδίων που εκπέμφθηκαν από κάθε πηγή τη χρονική στιγμή που καταγράφηκε μέγιστη συγκέντρωση αριθμού ολικών σωματιδίων.

5.2.6 Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών

Για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα των ημερών 11/6 και 12/6 όπου κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος δεν ήταν ανοιχτός ο απορροφητήρας στην κουζίνα. Η χρήση του αποροφητήρα αλλοιώνει σημαντικά τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων απορροφώντας, όπως φάνηκε από την ανάλυση των φασματικών κατανομών μεγέθους στην προηγούμενη παράγραφο, κυρίως τα μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια. Αρχικά υπολογίστηκε από την εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά την απενεργοποίηση της πηγής για τιμές της συγκέντρωσης που η συσσωμάτωση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον ήταν γνωστός (από τις μετρήσεις με αέριο SF₆) και έτσι υπολογίστηκε ο συντελεστής απομάκρυνσης λόγω εναπόθεσης σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων. Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου σε όλη τη διάρκεια της εκθετικής μείωσης της συγκέντρωσης, με όλες τις διεργασίες ενεργές και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στα πειραματικά δεδομένα.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής διείσδυσης από τα πειραματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε είχε αποχωρήσει το προσωπικό και δεν υπήρχαν ενεργές πηγές. Χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμός με τον οποίο πραγματοποιήθηκε ελαχιστοποίηση των διαφορών υπό περιορισμούς ανάμεσα στα αποτελέσματα του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου και στα πειραματικά δεδομένα. Η ελαχιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με το μέθοδο Nelder-Mead και οι περιορισμοί τέθηκαν με βάση τις τιμές του λόγου Ι/Ο. Το μοντέλο εκτελέστηκε θεωρώντας μηδενικούς ρυθμούς εκπομπής για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα με τους συντελεστές που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα βήματα. Υπήρξε ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στα πειραματικά δεδομένα. Το επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός των διαφορών ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στις πειραματικές τιμές για τις περιόδους με ενεργές πηγές. Οι διαφορές αυτές θεωρήθηκε ότι οφείλονται αποκλειστικά στις εκπομπής από τις εσωτερικές πηγές. Πραγματοποιήθηκε διαδικασία ελαχιστοποίησης των διαφορών έχοντας σαν παράμετρο τους ρυθμούς εκπομπής από τις εσωτερικές πηγές. Στις 13/6 όπου υπήρχαν συνεχόμενες πηγές η διαδικασία πραγματοποιήθηκε δύο φορές και υπολογίστηκαν διαδοχικά οι ρυθμοί εκπομπής από τις δύο πηγές (Σχήμα 5-22).



(α)



(β)



Σχήμα 5-22: Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής για τις 13/6. Αρχικά έγινε εκτέλεση του μοντέλου θεωρώντας μηδενικές εκπομπές. (Σχήμα (α)). Στη συνέχεια υπολογίστηκε από τις διαφορές ο ρυθμός εκπομπής για την πρώτη πηγή (Τηγάνισμα, σχήμα (β)) και τέλος ο ρυθμός εκπομπής της δεύτερης πηγής (Κάπνισμα, σχήμα (γ)).

Οι ρυθμοί εκπομπής σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων παρουσιάζονται στο σχήμα 5-23. Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος είχαμε τους μεγαλύτερους ρυθμούς εκπομπής. Η χρήση διαφορετικού είδους υλικών είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορετικών μέγιστων τιμών, χωρίς όμως μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Εκπέμπονται κυρίως υπέρλεπτα σωματίδια, με το μέγιστο της κατανομής κοντά στα 100 nm. Κατά την καύση του κεριού εκπέμπονται νάνο-σωματίδια τα οποία στο μεγαλύτερο ποσοστό τους είναι μικρότερα από 30 nm. Αντίθετα τα μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια εκπέμπονται κατά την καύση του τσιγάρου, με το μέγιστο της κατανομής να παρουσιάζεται για διάμετρο μεγαλύτερη από 100 nm. Πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί αναγωγή ως προς τον όγκο, καθώς οι πηγές βρισκόταν σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 5-23: Ρυθμοί εκπομπής από εσωτερικές πηγές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο Όσλο

5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΓΑ

5.3.1 Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το χρονικό διάστημα 16-29 Νοεμβρίου 2002. Ο χώρος που επιλέχθηκε για τις μετρήσεις ήταν ένα διαμέρισμα στα προάστια της Πράγας, περίπου 6 km από το κέντρο της πόλης. Σε απόσταση 800 m από το διαμέρισμα υπήρχε δρόμος χαμηλής σχετικά κυκλοφορίας (περίπου 8600 αυτοκίνητα/ημέρα). Στην περιοχή δεν υπήρχαν άλλες πηγές σωματιδίων εκτός από το αεροδρόμιο της Πράγας που βρισκόταν σε απόσταση 9 km από το διαμέρισμα.

Το διαμέρισμα βρισκόταν στον 1° όροφο ενός διωρόφου κτιρίου, κατασκευασμένου από τσιμέντο και τούβλα. Τα δύο διαμερίσματα του κτιρίου δεν επικοινωνούσαν μεταξύ τους, ενώ είχαν και διαφορετική κεντρική είσοδο. Η εξωτερική είσοδος είχε σκελετό κατασκευασμένο από μέταλλο και δύο μεγάλα γυάλινα φύλλα. Όλες οι εσωτερικές πόρτες του διαμερίσματος ήταν κατασκευασμένες από ξύλο, όπως και τα κουφώματα των παραθύρων (4 συνολικά παράθυρα). Στο διαμέρισμα υπήρχαν δύο υπνοδωμάτια, κουζίνα, καθιστικό και μπάνιο, ενώ υπήρχαν δύο διάλρομοι που συνέδεαν τους χώρους μεταξύ τους (σχήμα 5-24). Τα όργανα ήταν τοποθετημένα στο υπνοδωμάτιο ανάμεσα στο καθιστικό και την κουζίνα.

Οι μετρήσεις γινόταν στον εξωτερικό χώρο, το καθιστικό, και την κουζίνα, ενώ η πόρτα του υπνοδωματίου όπου βρισκόταν τα όργανα ήταν συνεχώς κλειστή. Επίσης κλειστές ήταν και όλες οι υπόλοιπες πόρτες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, εκτός από αυτές του καθιστικού και της κουζίνας. Τα κενά κάτω από τις πόρτες είχαν σφραγιστεί με μονωτικές ταινίες για να υπάρχουν όσο το δυνατό λιγότερες απώλειες σωματιδίων προς άλλους χώρους. Το διαμέρισμα ήταν πλήρως επιπλωμένο και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έμενε ένα ζευγάρι, το οποίο κατέγραφε αναλυτικά όλες τις καθημερινές του δραστηριότητες.

Οι μετρήσεις περιελάμβαναν καταγραφή της πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας ανά ένα λεπτό στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του διαμερίσματος. Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της συγκέντρωσης αριθμού με τη χρήση αναλυτή διαφορικής

κινητικότητας (SMPS 3934, TSI Inc., USA). Το όργανο κατέγραφε τη συγκέντρωση των σωματιδίων με κινητική διάμετρο 20,9-552 nm σε 92 κανάλια. Κάθε κύκλος μέτρησης διαρκούσε 5 λεπτά. Η τάση του οργάνου αυξανόταν από τα 10 στα 1000 V μέσα σε τρία λεπτά και στη συνέχεια μειωνόταν σε ένα λεπτό ξανά στα 10 V. Ο κύκλος ολοκληρωνόταν με καθαρισμό των σωλήνων δειγματοληψίας (1 λεπτό). Με ένα σύστημα βαλβίδων γινόταν εναλλαγή του εισερχόμενου αέρα στο όργανο μεταξύ της κουζίνας, του καθιστικού και του εξωτερικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνονταν δύο μετρήσεις στην κουζίνα, στη συνέχεια δύο μετρήσεις στο καθιστικό και τέλος δύο μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο με εξαίρεση το χρονικό διάστημα 22-25 Νοεμβρίου όπου ο κύκλος ήταν δύο μετρήσεις στον εξωτερικό χώρο, μία στην κουζίνα, δύο στο καθιστικό και τέλος μία στην κουζίνα. Το σύστημα των βαλβίδων ανίχνευε την τάση στο όργανο και πραγματοποιούσε ανάλογα την εναλλαγή της ροής από εσωτερικό ή το εξωτερικό του σπιτιού. Η ροή του αέρα στην είσοδο του οργάνου ήταν 0,3 l/min, ενώ η ροή του αέρα στον διαχωριστή των σωματιδίων (DMA) ήταν 3 l/min. Το όργανο είχε βαθμονομηθεί πριν από την έναρξη των μετρήσεων με τη διαδικασία που προτείνεται από τη εταιρεία παραγωγής του TSI. Οι σωλήνες δειγματοληψίας ήταν τοποθετημένοι σε ύψος 1,5 m από το έδαφος και ήταν κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο ατσάλι. Τα αποτελέσματα του οργάνου διορθώθηκαν ως προς τις απώλειες σωματιδίων κατά τη διαδρομή του αέριου δείγματος μέσα στους σωλήνες. Η διόρθωση έγινε με χρήση ειδικού λογισμικού που έχει κατασκευαστεί στο Ινστιτούτο Βασικών Χημικών Διεργασιών (Institute of Chemical Process Fundamentals) της Πράγας.

Το διαμέρισμα αεριζόταν με φυσικό τρόπο, μέσω των παραθύρων. Για την εκτίμηση του ρυθμού ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε ραδόνιο, καθώς δεν ήταν δυνατή η χρήση κάποιου αδρανούς αερίου (SF₆ ή N₂O). Το ραδόνιο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, και για το λόγο αυτό υπήρξε φροντίδα, η συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο να μην ξεπερνάει τα όρια που έχουν θεσπιστεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization, WHO). Η συσκευή με την οποία απελευθερωνόταν μείγμα ραδονίου με αέρα (ρυθμός εκπομπής 3,6 Bq/s και ροή 12 l/min) βρισκόταν στο ίδιο δωμάτιο με τα όργανα. Η απελευθέρωση γινόταν με ειδικό σωλήνα στο καθιστικό και η συγκέντρωση μετριόταν με ειδικό όργανο ανά 30 λεπτά (Radim 3). Με τον τρόπο αυτό έγινε εκτίμηση του ρυθμού ανταλλαγής, ο οποίος είχε μέση τιμή 0,39 h⁻¹ όταν η πόρτα του καθιστικού ήταν κλειστή και 0,44 h⁻¹ για ανοιχτή πόρτα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή δεν είναι το ίδιο αξιόπιστη με τη χρήση αδρανούς αερίου (SF₆ ή N₂O).

Παράλληλα με τις μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκεκριμένα της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου στον εξωτερικό χώρο, της πίεσης, της θερμοκρασίας και της υγρασίας στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο. Η μέση ταχύτητα του ανέμου ήταν 0,5 m/s (κυμάνθηκε μεταξύ 0,2-2 m/s) και η προεξάρχουσα διεύθυνση του ήταν η βορειοδυτική. Η μέση θερμοκρασία στον εσωτερικό χώρο ήταν 25,8 °C (κυμάνθηκε μεταξύ 23,9 °C -27,4 °C) και στον εξωτερικό χώρο ήταν 7,5 °C (κυμάνθηκε μεταξύ 4,3 °C -11,1 °C). Αντίστοιχα, οι μέσες σχετικές υγρασίες στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο ήταν 27,7% (κυμάνθηκε μεταξύ 24,7% και 33,1%) και 85,9% (κυμάνθηκε μεταξύ 69,7 % κα 93,1%).



Σχήμα 5-24: Κάτοψη του διαμερίσματος όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις στην Πράγα.

5.3.2 Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στην Πράγα

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων διέμεναν μόνιμα στο διαμέρισμα 2 άτομα, από τα οποία ζητήθηκε να πραγματοποιούν τις καθημερινές τους δραστηριότητες χωρίς αλλαγές. Το ζευγάρι κρατούσε ημερολόγιο στο οποίο κατέγραφαν όλες τις πιθανές πηγές σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο. Σημείωναν επίσης στο ημερολόγιο τα χρονικά διαστήματα στα οποία οι πόρτες της κουζίνας και του καθιστικού, όπου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις, ήταν ανοιχτές ή κλειστές. Οι υπόλοιπες πόρτες του διαμερίσματος (η πόρτα του δωματίου με τα όργανα, η πόρτα του μπάνιου, η πόρτα του υπνοδωματίου και η εξωτερική πόρτα) παρέμεναν ανοιχτές μόνο όταν ήταν απολύτως απαραίτητο και επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν υπήρχε μεταφορά σωματιδίων προς τους χώρους αυτούς. Το ζευγάρι ξυπνούσε γύρω στις 06:00 το πρωί και πήγαινε για ύπνο λίγο μετά τα μεσάνυχτα. Στην κουζίνα πραγματοποιούνταν η προετοιμασία του φαγητού, ενώ στο καθιστικό πραγματοποιήθηκαν άλλες δραστηριότητες και συγκεκριμένα χρήση αρωματικής λάμπας (3 φορές), καύση κεριών (1 φορά) και χρήση σεσουάρ μαλλιών (4 φορές).

Στις χρονικές περιόδους όπου δεν υπήρχαν ενεργές πηγές η εξωτερική συγκέντρωση ήταν μεγαλύτερη από την εσωτερική και στους δύο χώρους μετρήσεων. Η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων στην κουζίνα ήταν στα ίδια επίπεδα με αυτή στο καθιστικό όταν οι μεταξύ τους πόρτες ήταν ανοιχτές, ενώ παρουσίασαν αμελητέες διαφορές για κλειστές πόρτες. Στο σχήμα 5-25 παρουσιάζεται η διακύμανση της συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, όπου το ζευγάρι βρισκόταν στο σπίτι για αρκετό χρόνο, αλλά δεν πραγματοποίησε διεργασίες εκπομπής σωματιδίων. Οι πόρτες της κουζίνας και του καθιστικού ήταν κλειστές από τις 23:00 έως τις 06:00. Η συγκέντρωση, τόσο για τα ολικά, όσο και για τα υπέρλεπτα σωματίδια ήταν η ίδια και στους δύο χώρους. Η εσωτερική συγκέντρωση ακολουθούσε τις διακυμάνσεις της εξωτερικής με κάποια χρονική διαφορά, κάτι που δείχνει πως υπήρχε σημαντική εισροή σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον.

Στον πίνακα 5-9 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των σωματιδίων, ανάλογα με το μέγεθος τους για περιόδους χωρίς ενεργές πηγές. Τα υπέρλεπτα σωματίδια αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό

των ολικών σωματιδίων. Οι συγκεντρώσεις ήταν μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης στο εξωτερικό περιβάλλον.



Σχήμα 5-25: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων (ολικά σωματίδια και υπέρλεπτα σωματίδια) για το χρονικό διάστημα 23/11/02 (06:00) έως 24/11/02 (06:00) στην κουζίνα, στο καθιστικό και στον εξωτερικό χώρο.

Πίνακας 5-9: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 10-552 nm που μετρήθηκαν με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS) σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές. Η «νύχτα» περιλαμβάνει τα χρονικά διαστήματα από 23:00 έως 06:00, ενώ η «ημέρα» τα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα.

	Ολικά σωματίδια	10-50 nm (× 10^3 #/cm^3)	10-100 nm (× 10^3 #/cm^3)	100-200 nm (× 10^3 #/cm^3)	200-552 nm (× $10^3 $ #/cm ³)
	$(\times 10^3 \text{#/cm}^3)$				
Νύχτα (κουζίνα)	$1,80 \pm 1,25$	$0,30 \pm 0,29$	$1 \pm 0,76$	$0,52 \pm 0,41$	$0,26 \pm 0,19$
Ημέρα (κουζίνα)	$2,14 \pm 1,38$	$0,\!67 \pm 0,\!52$	$1,25 \pm 0,76$	$0,55 \pm 0,44$	$0,32 \pm 0,31$
Νύχτα (καθιστικό)	$1,91 \pm 1,87$	$0,34 \pm 0,40$	$0,95 \pm 1$	$0,\!63 \pm 0,\!55$	$0,32 \pm 0,29$
Ημέρα (καθιστικό)	$2,32 \pm 1,79$	$0,78 \pm 1,1$	$1,38 \pm 1,36$	$0,58 \pm 0,43$	$0,35 \pm 0,34$
Νύχτα (εξωτερικό)	$1,99 \pm 2,16$	$0,\!49 \pm 0,\!59$	$1,08 \pm 1,21$	$0,57 \pm 0,63$	$0,33 \pm 0,33$
Ημέρα (εξωτερικό)	$3,\!43 \pm 2,\!85$	$1,15 \pm 0,96$	$2,11 \pm 1,68$	$0,83 \pm 0,78$	$0,\!48 \pm 0,\!49$

Ο λόγος Ι/Ο για τις περιόδους χωρίς ενεργές πηγές παρουσίασε τιμές μικρότερες της μονάδας για όλα τα μεγέθη σωματιδίων (Σχήμα 5-24). Οι χαμηλότερες τιμές εμφανίστηκαν για τα νάνοσωματίδια, ενώ για τα υπόλοιπα σωματίδια οι διαφορές ήταν πολύ μικρές. Η συμπεριφορά των σωματιδίων ήταν η ίδια και στους δύο χώρους μετρήσεων, ενώ οι τιμές του λόγου ήταν ελαφρά αυξημένες κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 5-26: Τιμές του λόγου Ι/Ο για την κουζίνα και το καθιστικό σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές.

Η ανάλυση των δεδομένων με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι στο εξωτερικό περιβάλλον εμφανίστηκαν κυρίως τρικόρυφες και δικόρυφες κατανομές σε ποσοστά 53% και 43% αντίστοιχα. Αντίθετα στο εσωτερικό περιβάλλον παρουσιάστηκαν αυξημένα ποσοστά μονοκόρυφων κατανομών (12,5% στην κουζίνα και 14% στο καθιστικό), οι οποίες προήλθαν κατά κύριο λόγω από τις εκπομπές σωματιδίων λόγω των εσωτερικών πηγών. Σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές τα χαρακτηριστικά του εσωτερικού χώρου ήταν παρόμοια με αυτά του εξωτερικού χώρου, όπως φαίνεται στον πίνακα 5-10. Η διάμεσος των GMDs για κάθε κορυφή

παρουσίασε σχεδόν την ίδια τιμή και στους 3 χώρους (κουζίνα, καθιστικό και εξωτερικό περιβάλλον).

	1 ^η κορυφή	2 ^η κορυφή	3 ^η κορυφή
Εξωτερικός χώρος	35,3	115,8	268,3
Κουζίνα	37,8	118,2	251,2
Καθιστικό	37,6	118,2	251,2

Πίνακας 5-10: Διάμεσοι τιμές των GMDs για τις κορυφές όλων των κατανομών (μονοκόρυφες, δικόρυφες και τρικόρυφες κατανομές)

Η επίδραση των εσωτερικών πηγών φαίνεται ξεκάθαρα αν εξετάσουμε αποκλειστικά τις μονοκόρυφες κατανομές στο εσωτερικό περιβάλλον σε περιόδους χωρίς ενεργές πηγές και σε περιόδους με πηγές. Όταν ο αέρας προέρχονταν από το εξωτερικό περιβάλλον η διάμεσος της GMD ήταν 123,6 nm τόσο για την κουζίνα, όσο και για το καθιστικό. Αντίθετα όταν είχαμε εκπομπές σωματιδίων (συμπεριλαμβανομένων και των χρονικών διαστημάτων μέχρι η συγκέντρωση να επιστρέψει στην τιμή υποβάθρου) οι αντίστοιχες τιμές για την κουζίνα και το καθιστικό ήταν 73 nm και 98,2 nm.

5.3.3 Χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων από πηγές εσωτερικού χώρου

Οι υψηλότερες εκπομπές σωματιδίων από εσωτερικές πηγές καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων που πραγματοποιήθηκαν στην κουζίνα (μαγείρεμα φαγητού). Δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στη συγκέντρωση λόγω της χρήσης του σεσουάρ των μαλλιών ενώ η χρήση αρωματικής λάμπας είχε μικρή επίδραση στη συγκέντρωση. Η δεύτερη σημαντικότερη πηγή μετά το μαγείρεμα ήταν το κάπνισμα. Η καύση κεριών στο χώρο του καθιστικού πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονα με χρήση των ηλεκτρικών εστιών στην κουζίνα. Η

αύξηση στη συγκέντρωση των νανο-σωματιδίων, όπως ήταν αναμενόμενο (βλέπε Κεφάλαιο 4, παράγραφος 4-3).

Η προετοιμασία του φαγητού περιελάμβανε τηγάνισμα και τη χρήση ηλεκτρικής κουζίνας ή ηλεκτρικού φούρνου. Συνολικά καταγράφηκαν στο ημερολόγιο από τους ένοικους του σπιτιού 15 περιπτώσεις, από τις οποίες στις 12 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο. Στο χρονικό διάστημα 16/11-20/11 (6 περιπτώσεις) υπήρξε αναφορά για το είδος της πηγής (εστίες, φούρνος ή εκπομπές από τηγάνισμα) και η μέση μέγιστη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων στην κουζίνα είχε τιμή $17.6 \times 10^4 \pm 9.11 \times 10^4$ #/cm³. Η συγκέντρωση επέστρεψε στις τιμές που είχε πριν από την έναρξη της εκπομπής σε χρόνο μεγαλύτερο από 150 min, ενώ σε δύο περιπτώσεις ο χρόνος αυτός έφτασε τα 300 min. Οι πόρτες της κουζίνας και του καθιστικού ήταν ανοιχτές και σαν συνέπεια εμφανίστηκε αύξηση της συγκέντρωσης και στο σαλόνι με μέση μέγιστη τιμή συγκέντρωση
ς 7,73 \times 10^4 \pm 3,47 \times
 10^4 #/cm³, δηλαδή περίπου 2,3 μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην κουζίνα. Η έναρξη της αύξησης των εκπομπών στο καθιστικό παρατηρήθηκε με χρονική καθυστέρηση 10-20 min, ενώ η χρονική καθυστέρηση για την εμφάνιση της μέγιστης συγκέντρωσης κυμάνθηκε μεταξύ 15 και 40 min (Σχήμα 5-27). Στις υπόλοιπες 6 περιπτώσεις, για το χρονικό διάστημα 20/11-27/11 δεν υπήρξαν λεπτομέρειες για τη διαδικασία που ακολουθήθηκε. Πιθανολογείται ότι υπήρξε παρασκευή γρήγορου φαγητού με χρήση λιγότερων υλικών καθώς η μέγιστη μέση συγκέντρωση στην κουζίνα ήταν μικρότερη $(4.51 \times 10^4 \pm 3.15 \times 10^4 \text{ #/cm}^3)$. Ο χρόνος που τα εκπεμπόμενα σωματίδια παρέμειναν αιωρούμενα δεν ξεπέρασε σε καμία περίπτωση τα 150 min. Αντίστοιχη μείωση της μέσης μέγιστης συγκέντρωσης παρατηρήθηκε και στο καθιστικό για τις 5 περιπτώσεις που οι πόρτες των δύο δωματίων ήταν ανοιχτές. Στην περίπτωση που οι πόρτες ήταν κλειστές παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση της συγκέντρωσης κατά 1,5 φορές σε σχέση με την τιμή υποβάθρου, η οποία συνοδεύτηκε από επιστροφή στην αρχική τιμή σε χρονικό διάστημα 15 λεπτών.



Σχήμα 5-27: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων για το χρονικό διάστημα 17/11/02 (06:00) έως 19/11/02 (06:00) στην κουζίνα, στο καθιστικό και στον εξωτερικό χώρο. Όλες οι εκπομπές προέρχονται από μαγείρεμα που πραγματοποιήθηκε στον χώρο τις κουζίνας. Οι ενδιάμεσες πόρτες ανάμεσα στην κουζίνα και το καθιστικό ήταν ανοιχτές εκτός από το χρονικό διάστημα 00:00-06:30, όπου δεν πραγματοποιούνταν καμία δραστηριότητα.

Η μελέτη των χαρακτηριστικών των αιωρούμενων σωματιδίων επικεντρώθηκε στις 6 πρώτες περιπτώσεις. Πρέπει να σημειωθεί, ότι στο ημερολόγιο δεν αναφέρονταν η ακριβής ώρα έναρξης της εκπομπής, καθώς η κάθε ημέρα είχε χωριστεί σε διαστήματα των 15 λεπτών και με βάση αυτά καταγράφονταν οι δραστηριότητες. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι μία πηγή σημειώθηκε ότι ξεκίνησε να λειτουργεί στο διάστημα μεταξύ 15:00 και 15:15. Επομένως θεωρήθηκε σαν έναρξη της διαδικασίας η στιγμή που ξεκίνησε η αύξηση της συγκέντρωσης και σαν λήξη η στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης. Επίσης δεν υπήρξαν αναλυτικές πληροφορίες για την ποσότητα και το είδος των υλικών, καθώς και για τη θερμοκρασία που λειτουργούσαν οι πηγές, τα οποία είναι στοιχεία που επηρεάζουν σημαντικά τις εκπομπές (Buonnano et al., 2009; See και Balasubramanian, 2006). Σε 2 περιπτώσεις υπήρξε τηγάνισμα, σε άλλες 2 υπήρξε χρήση των εστιών της ηλεκτρικής κουζίνας, σε μια περίπτωση υπήρξε χρήση ηλεκτρικού φούρνου και εστιών της ηλεκτρικής κουζίνας.

Η χρήση του ηλεκτρικού φούρνου είχε σαν αποτέλεσμα την εκπομπή νάνο-σωματιδίων με την έναρξη της λειτουργίας του. Αρχικά τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 50 nm αντιπροσώπευαν το 75% των ολικών σωματιδίων. Οι κατανομές που παρατηρήθηκαν στην κουζίνα ήταν δικόρυφες και οι GMDs είγαν τιμές από 33-39 nm και 80-90 nm με τον μεγαλύτερο αριθμό σωματιδίων να ανήκει στην πρώτη κατανομή. Η κατανομή έγινε στη συνέχεια μονοκόρυφη και η GMD αυξήθηκε στα 55 nm τη στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης. Η αύξηση της GMD συνεχίστηκε και μετά την απενεργοποίηση της πηγής και έφτασε στην τιμή 130 nm 3 ώρες μετά την καταγραφή της μέγιστης συγκέντρωσης. Το ποσοστό των νάνοσωματιδίων μειώνονταν συνέχεια και 3 ώρες μετά τη λήξη της εκπομπής ήταν μόλις 2%. Εκείνη τη στιγμή τα σωματίδια με διαμέτρους στην περιοχή 100-200 nm αντιστοιχούσαν σε ποσοστό μεγαλύτερο από 50%. Τα σωματίδια αυτά προήλθαν κυρίως από τη συσσωμάτωση των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Στο καθιστικό δεν παρατηρήθηκαν νάνο-σωματίδια και όταν η συγκέντρωση αυξήθηκε σημαντικά, το 30-40% των σωματιδίων ήταν μεγαλύτερα από 100 nm. Επομένως μεταφέρθηκαν από την κουζίνα τα σωματίδια που ήδη είχαν αλλάξει μέγεθος λόγω της συσσωμάτωσης. Οι GMDs ήταν μεγαλύτερες από 90 nm με αποτέλεσμα η φασματική κατανομή στους δύο χώρους να παρουσιάζει διαφορές, όπως φαίνεται στα σχήματα 5-28α και 5-28β. Η κατανομή της μέγιστης συγκέντρωσης παρατηρήθηκε με γρονική καθυστέρηση 15 min. Μετά το 90 min οι κατανομές εμφάνιζαν ίδιες GMDs.



Σχήμα 5-28: Φασματική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που εκπέμφθηκαν από τη χρήση ηλεκτρικού φούρνου στο χώρο της κουζίνας (α) και του καθιστικού (β). Η εκπομπή ξεκίνησε για t=0 min και ολοκληρώθηκε για t=45 min.

100

Διάμετρος (nm)

1000

(β)

10

Η χρήση των εστιών της ηλεκτρικής κουζίνας οδήγησε σε εκπομπές υπέρλεπτων σωματιδίων, καθώς τόσο κατά τη διάρκεια που λειτουργούσε η πηγή, όσο και μετά από 1 h αποτελούσαν το 80% των ολικών σωματιδίων στο χώρο της κουζίνας. Τα νάνο-σωματίδια ήταν αρχικά το 50% των ολικών και το ποσοστό τους μειωνόταν σταδιακά. Δύο ώρες μετά τη λήξη της εκπομπής τα ποσοστά των υπέρλεπτων και των νάνο-σωματιδίων ήταν 75% και 35%. Οι φασματικές κατανομές μεγέθους GMD ήταν μονοκόρυφες στην κουζίνα και η GMD αυξήθηκε από τα 40 nm στα τα 60 nm 2 h μετά την απενεργοπίηση της πηγής. Στο καθιστικό παρατηρήθηκαν επίσης μονοκόρυφες κατανομές με GMD μεγαλύτερες από 50 nm.

Κατά τη διάρκεια του τηγανίσματος εκπέμπονταν κυρίως νάνο-σωματίδια, καθώς αντιπροσώπευαν στην κουζίνα το 75% των ολικών σωματιδίων. Το ποσοστό τους στο καθιστικό ήταν 60%, κάτι που σημαίνει ότι τα σωματίδια άλλαζαν μέγεθος κατά τη μεταφορά τους. Οι κατανομές ήταν κυρίως μονοκόρυφες, τόσο στην κουζίνα (Σχήμα 5-29), όσο και στο καθιστικό. Στις δικόρυφες κατανομές που εμφανίστηκαν, υπήρχε μικρός αριθμός σωματιδίων στη δεύτερη κορυφή.



Σχήμα 5-29: Φασματική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που εκπέμφθηκαν από τη χρήση ηλεκτρικού φούρνου στο χώρο της κουζίνας. Η εκπομπή ξεκίνησε για t=0 min και ολοκληρώθηκε για t=20 min.

Στην κουζίνα, οι GMDs ήταν μικρότερες από 40 nm κατά τη διάρκεια της εκπομπής και αυξήθηκαν στα 60 nm δύο ώρες μετά. Παρόμοια αύξηση παρατηρήθηκε και στο καθιστικό με τις αρχικές κορυφές να είναι μεγαλύτερες από 40 nm (Σχήμα 5-30).



Σχήμα 5-30: Μεταβολή της GMD με το χρόνο κατά τη διάρκεια και μετά τη λήξη τηγανίσματος, στην κουζίνα και στο καθιστικό. Οι τιμές για t=0 min και t=5 min για το καθιστικό αναφέρονται σε σωματίδια που προϋπήρχαν στο χώρο, καθώς δεν είχε παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης λόγω της πηγής στην κουζίνα.

Πραγματοποιήθηκε κάπνισμα δύο φορές από τους ενοίκους του διαμερίσματος στο χώρο του καθιστικού. Την πρώτη φορά οι ένοικοι κάπνισαν συνεχόμενα δύο τσιγάρα, ενώ τη δεύτερη ένα τσιγάρο. Η συγκέντρωση αυξήθηκε λόγω των εκπομπών από τα τσιγάρα 30 φορές στην πρώτη περίπτωση και 20 φορές στη δεύτερη περίπτωση. Οι μέγιστες τιμές ήταν 4,31 × 10^4 #/cm³ και 2,91 × 10^4 #/cm³ αντίστοιχα. Τα υπέρλεπτα σωματίδια αποτελούσαν, όσο τα τσιγάρα ήταν αναμμένα, ποσοστό μεταξύ 40% και 50% των ολικών σωματιδίων. Το ποσοστό αυτό μειωνόταν σταδιακά και έφτασε στο 25% δύο ώρες μετά τη λήξη των εκπομπών. Αρχικά εκπέμπονταν σωματίδια με GMD στα 75 nm, η οποία αυξάνονταν μετά το σβήσιμο του τσιγάρου (Σχήμα 5-

31). Η κατανομή μετά από 1 h είχε κορυφή στα 175 nm και μετά από 2 h στα 180 nm στην περίπτωση της καύσης δύο τσιγάρων. Όταν χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα τσιγάρο οι αντίστοιχες τιμές της GMD ήταν 131 nm και 153 nm. Λόγω της κλειστής πόρτας στο καθιστικό κατά τη διάρκεια του καπνίσματος, δεν παρατηρήθηκε μεταβολή στη συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων στην κουζίνα.



Σχήμα 5-31: Μεταβολή της φασματικής κατανομής μεγέθους λόγω της καύσης δύο τσιγάρων. Οι εκπομπές ξεκίνησαν για t=0 min και ολοκληρώθηκαν για t=25 min.

Η χρήση αρωματικής λάμπας είχε σαν αποτέλεσμα μικρή αύξηση στη συγκέντρωση υποβάθρου, λόγω της εκπομπής νάνο-σωματιδίων. Η πηγή ενεργοποιήθηκε 3 φορές στο καθιστικό, αλλά μόνο τις δυο ήταν διακριτή η επίδραση της, καθώς την άλλη πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα χρήση φούρνου στην κουζίνα που είχε σαν αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερες εκπομπές. Η συγκέντρωση παρουσίαζε αυξομειώσεις, λόγω των μεταβαλλόμενων εκπομπών από την εξάτμιση του λαδιού από ευκάλυπτο που περιείχε η λάμπα. Η μέση μέγιστη συγκέντρωση στο καθιστικό ήταν 4,31 × $10^4 \pm 0,14 \times 10^4$ #/cm³. Η συγκέντρωση στην κουζίνα δεν παρουσίασε αξιοσημείωτη αύξηση. Οι φασματικές κατανομές μεγεθών των σωματιδίων ήταν δικόρυφες, με την πρώτη κορυφή να παρουσιάζει GMD μικρότερη από 30 nm και τη δεύτερη κορυφή να έχει GMD μεταξύ 100 και 130 nm.

5.3.4 Υπολογισμός ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών

Για να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής από τις πηγές εσωτερικού χώρου, πρέπει να πρωτύτερα να πραγματοποιηθεί εκτίμηση για τις παραμέτρους που επηρεάζουν τις εκπομπές και συγκεκριμένα για το συντελεστή διείσδυσης, την ταχύτητα τριβής και τους ρυθμούς ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και ανάμεσα στους διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους. Για την απλοποίηση των υπολογισμών θεωρήθηκε ότι υπάρχουν μόνο δύο εσωτερικοί χώροι και συγκεκριμένα οι δύο χώροι των μετρήσεων (κουζίνα και καθιστικό). Ο διάδρομος που ενώνει τους δύο χώρους θεωρήθηκε ότι χρησιμεύει μόνο για τη ροή αέρα από τον ένα χώρο στον άλλο και δεν πραγματοποιείται εναπόθεση σωματιδίων στις επιφάνειες του διαδρόμου. Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε αρχικά ότι η κουζίνα και το καθιστικό δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ανταλλαγής αέρα. Επίσης θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χώρων αυτών και των υπολοίπων δωματίων, κάτι που είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα λόγω της διαδικασίας απομόνωσης των χώρων των μετρήσεων που ακολουθήθηκε και περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.1.

Αρχικά υπολογίστηκε ο ολικός συντελεστής απομάκρυνσης με βάση την εκθετική μείωση της συγκέντρωσης μετά το τέλος των εκπομπών. Χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα σε γλώσσα Matlab με το οποίο πραγματοποιήθηκε προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Εξετάστηκαν οι πηγές που υπήρχαν στην κουζίνα και συγκεκριμένα οι πηγές σε χρονικές στιγμές που η πόρτα της κουζίνας ήταν κλειστή. Θεωρήθηκε επίσης ότι η εξωτερική συγκέντρωση δεν επηρεάζει το εσωτερικό περιβάλλον. Για τιμές της συγκέντρωσης μικρότερες από 10⁴ #/cm³ μπορούμε να αγνοήσουμε τη συσσωμάτωση. Χρησιμοποιώντας τον ολικό συντελεστή απομάκρυνσης πραγματοποιήθηκε εύρεση του ρυθμού ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον και της ταχύτητας τριβής με διαδικασία ελαχιστοποίησης των διαφορών υπό περιορισμούς (μέθοδος

Nelder-Mead) μεταξύ πειραματικών δεδομένων και των τιμών του μοντέλου. Τα όρια που χρησιμοποιήθηκαν για την ταχύτητα τριβής ήταν μεταξύ 5 cm/s και 100 cm/s και τα αντίστοιχα όρια για το ρυθμό ανταλλαγής αέρα ήταν μεταξύ 0,15 h⁻¹ και 3 h⁻¹. Οι βέλτιστες τιμές για την ταχύτητα τριβής ήταν μεταξύ 10 cm/s και 30 cm/s ενώ για το ρυθμό ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον οι βέλτιστες τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 0,6 h⁻¹ και 1,2 h⁻¹.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα κατά τη διάρκεια της νύχτας (οι πόρτες της κουζίνας και του καθιστικού ήταν κλειστές) για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης. Χρησιμοποιήθηκε διαδικασία ελαχιστοποίησης των διαφορών υπό περιορισμούς (μέθοδος Nelder-Mead) μεταξύ πειραματικών δεδομένων και των τιμών του μοντέλου και τα όρια λήφθηκαν με βάση τις τιμές του λόγου Ι/Ο.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ανταλλαγής αέρα χρησιμοποιήθηκε η χρονική διαφορά για την εμφάνισης της μέγιστης συγκέντρωσης στην κουζίνα και στο καθιστικό. Ελέγχθηκαν οι πηγές της κουζίνας και η προσομοίωση ξεκίνησε με τη λήξη της εκπομπής. Με επαναληπτική διαδικασία και χρήση της μεθόδου Nelder-Mead υπολογίστηκε ροή αέρα ανάμεσα στους δύο χώρους που κυμάνθηκε μεταξύ 0,0097 m³/s και 0,0150 m³/s.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτέλεση του μοντέλου για τις περιόδους χωρίς πηγές και διαπιστώθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των τιμών του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων. Το μοντέλο εκτελέστηκε και για τις περιόδους με ενεργές πηγές (τόσο για την κουζίνα, όσο και για το καθιστικό) και υπολογίστηκαν οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές του μοντέλου και την πραγματική συγκέντρωση. Οι διαφορές αυτές θεωρήθηκε ότι οφείλονται αποκλειστικά στις εσωτερικές πηγές. Πραγματοποιήθηκε χρήση του μοντέλου σε συνδυασμό με διαδικασία ελαχιστοποίησης διαφορών υπό περιορισμούς για τον υπολογιστηκαν και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα δίνοντας πολύ καλή συμφωνία (Σχήμα 5-32). Οι μεγαλύτερες εκπομπές υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος και είχαν μέση τιμή 6 10^{11} #/min. Οι εκπομπές κατά το κάπνισμα ήταν 0,84 10^{11} #/min και κατά την καύση αρωματικών ξύλων 0,23 10^{11} #/min.



Σχήμα 5-32: Φασματική κατανομή μεγέθους των σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο (Σχήματα Α,Β), στην κουζίνα (Σχήμα D) και στο καθιστικό (Σχήμα Ε). Στα σχήματα G και Η παρουσιάζονται οι ρυθμοί εκπομπής σαν συνάρτηση της διαμέτρου των σωματιδίων, ενώ στα σχήματα I και J οι συνολικοί ρυθμοί εκπομπής για τα υπέρλεπτα

σωματίδια. Τέλος στα σχήματα K και L παρουσιάζονται οι φασματικές κατανομές μεγέθους με τους υπολογισθέντες ρυθμούς εκπομπής για την κουζίνα και το καθιστικό αντίστοιχα.

5-4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΙΛΑΝΟ

5.4.1 Οργάνωση πειραματικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις στο Μιλάνο πραγματοποιήθηκαν το χρονικό διάστημα 11-21 Οκτωβρίου 2002. Επιλέχθηκε ένα γραφείο στο ένατο όροφο κτιρίου στο κέντρο του Μιλάνου. Ο χώρος των μετρήσεων ήταν πλήρως επιπλωμένος και αεριζόταν με φυσικό τρόπο. Στο γραφείο υπήρχαν δύο παράθυρα με μεταλλικό σκελετό και ξύλινη πόρτα που οδηγούσε σε διάδρομο με άλλα γραφεία. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπήρξε επιπλέον μόνωση των σκελετών των παραθύρων και της πόρτας για να ελαχιστοποιηθεί η ροή αέρα με τους υπόλοιπους εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον. Τα όργανα μέτρησης τοποθετήθηκαν σε γειτονικό γραφείο και οι σωλήνες δειγματοληψίας διέρχονταν μέσω ειδικής κατασκευής από τη γυψοσανίδα που συνέδεε τα δύο γραφεία. Ο έλεγχος των μετεωρολογικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε με στοιχεία που καταγράφονταν σε τοπικό μετεωρολογικό σταθμό, τοποθετημένο στην πλατεία μπροστά από το κτίριο που βρισκόταν το γραφείο. Η μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν 17,4°C (κυμάνθηκε μεταξύ 11,9 °C και 22,9 °C). Αντίστοιχα η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας ήταν 64,7 % (κυμάνθηκε μεταξύ 16,8 % και 97,4 %) και η μέση τιμή της ατμοσφαιρική πίεσης ήταν 99,7 kPa (κυμάνθηκε μεταξύ 98,4 kPa και 100,7 kPa).

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων μετρήθηκε με αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS 3934C, TSI Inc, USA). Το όργανο κατέγραφε τη συγκέντρωση σωματιδίων με κινητική διάμετρο 14,1-764 nm. Για διαμέτρους μεγαλύτερες από 552 nm το όργανο κατέγραφε μηδενικές τιμές, καθώς η αρχή λειτουργίας του δεν επιτρέπει αξιόπιστα αποτελέσματα σε αυτή την περιοχή μεγεθών σωματιδίων (βλέπε παράρτημα 2). Επομένως χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μέχρι τα 552 nm για 103 συνολικά διαφορετικά τμήματα μεγεθών. Κάθε κύκλος μέτρησης διαρκούσε 5 λεπτά και ολοκληρωνόταν με καθαρισμό των σωλήνων δειγματοληψίας (1 λεπτό). Με ένα σύστημα βαλβίδων γινόταν εναλλαγή του εισερχόμενου αέρα στο όργανο μεταξύ εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνονταν 4 μετρήσεις από τον εξωτερικό χώρο και στη συνέχεια 3 μετρήσεις από τον εσωτερικό χώρο. Η ροή του αέρα στην είσοδο του οργάνου ήταν 0,3 l/min, ενώ η ροή του αέρα στον διαχωριστή των σωματιδίων (DMA) ήταν 3 l/min. Το όργανο είχε βαθμονομηθεί πριν από την έναρξη των μετρήσεων με τη διαδικασία που προτείνεται από τη εταιρεία παραγωγής του TSI. Τα αποτελέσματα του οργάνου διορθώθηκαν ως προς τις απώλειες σωματιδίων κατά τη διαδρομή του αέριου δείγματος μέσα στους σωλήνες με χρήση ειδικού λογισμικού.

Ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον υπολογίστηκε μέσω της εκθετικής μείωσης της συγκέντρωσης αέριου SF₆ που απελευθερωνόταν στο χώρο. Η συγκέντρωση καταγράφονταν με δύο φορητούς χρωματογράφους μάζας σε δύο σημεία του εσωτερικού χώρου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για δύο ημέρες (11 και 12 Οκτωβρίου) και υπολογίστηκαν τιμές ρυθμού ανταλλαγής αέρα μεταξύ 0,45 ± 0,12 h⁻¹ και 2,01 ± 0,02 h⁻¹. Οι αυξημένες τιμές αντιστοιχούσαν σε υψηλότερες τιμές ταχύτητας ανέμου.

5.4.2 Ανάλυση μετρήσεων αριθμού σωματιδίων στο Μιλάνο

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν παρόντες στο γραφείο μόνο τα άτομα που ήταν υπεύθυνα για την παρακολούθηση των οργάνων και τη διεξαγωγή των μετρήσεων με SF₆. Εξαίρεση αποτέλεσε η παρουσία 12 ατόμων στο χώρο για 15 λεπτά στις 14 Οκτωβρίου. Η παρουσία των ατόμων δεν οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από 500 nm που καταγράφονται από το όργανο, υποδεικνύοντας ότι πιθανή επαναιώρηση σωματιδίων λόγω της παρουσίας των ατόμων συμβαίνει για μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια. Τα παράθυρα παρέμεναν κλειστά για το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας και το ίδιο συνέβαινε και για την πόρτα του γραφείου, η οποία άνοιγε για μικρά χρονικά διαστήματα μόνο κατά τις εργάσιμες ώρες. Δεν υπήρχαν πηγές σωματιδίων στον εσωτερικό χώρο με εξαίρεση το κάπνισμα δύο τσιγάρων στις 19 Οκτωβρίου. Για να είναι άμεσα συγκρίσιμες οι μετρήσεις στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο πραγματοποιήθηκε αναγωγή των εσωτερικών και εξωτερικών τιμών σε κοινό χρόνο με εξομάλυνση των χρονοσειρών με χρήση κυβικών πολυωνύμων (splines). Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με ανάπτυξη προγράμματος σε γλώσσα Matlab και χρήση έτοιμων βιβλιοθηκών της έκδοσης 7.0.1. Είχε προηγηθεί στατιστική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων για την απαλοιφή ακραίων τιμών που αντιστοιχούν σε σφάλματα του οργάνου (Σχήμα 5-33).



Σχήμα 5-33: Αναγωγή συγκέντρωσης εσωτερικού και εξωτερικού χώρου σε κοινό χρόνο. Η ακραία τιμή (>40000 #/cm³) έχει απαλείφει από τις χρησιμοποιούμενες τιμές.

Στον πίνακα 5-11 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των σωματιδίων ανάλογες με το μέγεθος τους. Ο όρος «ημέρα» αναφέρεται στο χρονικό διάστημα 07:00 – 19:00. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι τιμές στον εξωτερικό χώρο ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στον εσωτερικό, με τις διαφορές να είναι μεγαλύτερες για τα υπέρλεπτα σωματίδια. Οι αυξημένες τιμές στον εσωτερικό χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας οφείλονται σε αυξημένες εξωτερικές συγκεντρώσεις για τα υπέρλεπτα σωματίδια και αποδίδονται στην παρουσία του προσωπικού και στη μεταφορά από άλλους εσωτερικούς χώρους για τα μεγαλύτερα σωματίδια.

Η μεγαλύτερη διείσδυση των σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 nm φαίνεται και από τις τιμές του λόγου της εσωτερικής προς την εξωτερική συγκέντρωση (λόγος Ι/Ο). Ο λόγος αυτός έχει τιμές για τα σωματίδια αυτά μεγαλύτερες από 0,75, τόσο κατά την ημέρα, όσο και κατά τη νύχτα.

	14-50 nm (× 10^3 #/cm^3)	50-100 nm (× $10^3 $ #/cm ³)	100-200 nm (× 10^3 #/cm^3)	200-532 nm (× 10 ³ #/cm ³)
Νύχτα (εσωτερικό)	$2,7 \pm 0,04$	$2,5 \pm 0,04$	$0,25 \pm 0,04$	$0,76 \pm 0,01$
Νύχτα (εξωτερικό)	$7,1 \pm 0,2$	$4 \pm 0,09$	$0,36 \pm 0,07$	$1,08 \pm 0,02$
Ημέρα (εσωτερικό)	$4,2 \pm 0,08$	$3,4 \pm 0,26$	$0,32 \pm 0,32$	$1,08 \pm 0,06$
Ημέρα (εξωτερικό)	$9,8 \pm 0,3$	$4,34 \pm 0,12$	$0,36 \pm 0,09$	$1,03 \pm 0,02$

Πίνακας 5-11: Μέσες τιμές των σωματιδίων με διάμετρο 14 - 532 nm που μετρήθηκαν με τον αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (SMPS).



Σχήμα 5-34: Τιμές του λόγου Ι/Ο για τα διάφορα μεγέθη σωματιδίων.

Τα πειραματικά δεδομένα αναλύθηκαν με τον αλγόριθμο AMANpsd για την εύρεση των χαρακτηριστικών της φασματικής κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 5-12α και 5-12β. Παρατηρούμε ότι το φάσμα κατανομής μεγεθών του εσωτερικού χώρου παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με το αντίστοιχο φάσμα του εξωτερικού χώρου. Οι ομοιότητες οφείλονται στο φυσικό αερισμό του χώρου και στην έλλειψη ισχυρών εσωτερικών πηγών σωματιδίων μικρότερων από 500 nm.

Εξετάζοντας τα χαρακτηριστικά των μονοκόρυφων και δικόρυφων κατανομών, οι οποίες αντιπροσωπεύουν αθροιστικά το 77% και 82% για τον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι όσον αφορά τα υπέρλεπτα σωματίδια, οι GMDs του εσωτερικού χώρου είχαν μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες του εξωτερικού χώρου. Επομένων τα μικρότερα σωματίδια στην περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων δεν μπορούν να εισέλθουν εύκολα στον εσωτερικό χώρο μέσω του σκελετού του κτιρίου. Αντίθετα για τα μεγαλύτερα σωματίδια οι GMDs έχουν παραπλήσιες τιμές (121 nm και 128 nm) και αντιστοιχούν σε σχεδόν ίδιους αριθμούς σωματιδίων, επιβεβαιώνοντας ότι τα σωματίδια αυτά εισέρχονται ευκολότερα από το εξωτερικό περιβάλλον.

Εσωτερικός	Ποσοστό (%)	GMD 1	GMD 2	GMD 3	GMD 4
χώρος		(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
Μονοκόρυφη	22	72	0	0	0
Δικόρυφη	56	40	128	0	0
Τρικόρυφη	19	19	53	173	0
Τετρακόρυφη	3	13	42	114	416
				((n)
				(u)
Εξωτερικός	Ποσοστό (%)	GMD 1	GMD 2	GMD 3	GMD 4
Εξωτερικός χώρος	Ποσοστό (%)	GMD 1 (nm)	GMD 2 (nm)	GMD 3 (nm)	GMD 4 (nm)
Εξωτερικός χώρος Μονοκόρυφη	Ποσοστό (%) 24	GMD 1 (nm) 47	GMD 2 (nm) 0	GMD 3 (nm) 0	$\frac{GMD 4}{(nm)}$
Εξωτερικός χώρος Μονοκόρυφη Δικόρυφη	Побобто́ (%) 24 60	GMD 1 (nm) 47 33	GMD 2 (nm) 0 121	GMD 3 (nm) 0 0	GMD 4 (nm) 0 0
Εξωτερικός χώρος Μονοκόρυφη Δικόρυφη Τρικόρυφη	Ποσοστό (%) 24 60 16	GMD 1 (nm) 47 33 18	GMD 2 (nm) 0 121 45	GMD 3 (nm) 0 0 141	GMD 4 (nm) 0 0 0
Εξωτερικός χώρος Μονοκόρυφη Δικόρυφη Τρικόρυφη Τετρακόρυφη	Ποσοστό (%) 24 60 16 1	GMD 1 (nm) 47 33 18 18 18	GMD 2 (nm) 0 121 45 44	GMD 3 (nm) 0 0 141 109	GMD 4 (nm) 0 0 0 317

Πίνακας 5-12: % Ποσοστά και τιμές της μέσης γεωμετρικής διαμέτρου για τις κατανομές στο εσωτερικό (α) και στο εξωτερικό περιβάλλον (β).

Σε παρόμοια συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε με βάση τον αριθμό των σωματιδίων που αντιστοιχεί σε κάθε κορυφή για τις μονοκόρυφες και τις δικόρυφες κατανομές (Πίνακες 5-

13α και 5-13β). Τα σωματίδια της 2^{ης} κορυφής στις δικόρυφες κατανομές είχαν την ίδια συγκέντρωση στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο, κάτι που δεν ίσχυε για τα μικρότερα σωματίδια των πρώτων κορυφών.

Η καύση των δύο τσιγάρων οδήγησε σε αύξηση της ολικής συγκέντρωσης σωματιδίων κατά 23 φορές. Οι μέγιστες συγκέντρωσεις ολικών και υπέρλεπτων σωματιδίων ήταν 2,16 × 10⁵ και 1,18 × 10⁵ αντίστοιχα. Τα υπέρλεπτα σωματίδια μέχρι το σβήσιμο των τσιγάρων αντιπροσώπευαν το 50%-60% των ολικών σωματιδίων και το ποσοστό αυτό μειώνονταν μετά τη λήξη των εκπομπών. Η κατανομή μεγεθών ήταν μονοκόρυφη και η GMD τη στιγμή της μέγιστης συγκέντρωσης είχε τιμή 93 nm. Η τιμή της GMD αυξανόταν μετά τη λήξη των εκπεμπόμενων σωματιδίων.

Εσωτερικός	N1	N2	N3	N4	
χώρος	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	
Μονοκόρυφη	7826	0	0	0	
Δικόρυφη	4540	5059	0	0	
Τρικόρυφη	1813	4210	1308	0	
Τετρακόρυφη	965	3999	3163	252	
					(
Εξωτερικός	N1	N2	N3	N4	
χώρος	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	$(\#/cm^3)$	
Μονοκόρυφη	17487	0	0	0	
Δικόρυφη	9354	5898	0	0	
Τρικόρυφη	3561	5082	3656	0	
Τετρακόρυφη	1728	5363	3152	529	

Πίνακας 5-13: Συγκέντρωση σωματιδίων για τις κατανομές στο

εσωτερικό (α) και στο εξωτερικό περιβάλλον (β).

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους μελετήθηκαν με την πραγματοποίηση πειραματικών μετρήσεων σε τρεις Ευρωπαϊκές πόλεις (Οσλο, Πράγα και Μιλάνο). Μετρήθηκε η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων και στις τρεις πόλεις και η συγκέντρωση μάζας σωματιδίων στην πόλη του Όσλο. Διαπιστώθηκε ότι σε χώρους με φυσικό αερισμό, η συγκέντρωση στον εσωτερικό χώρο είναι μικρότερη από το εξωτερικό περιβάλλον και ακολουθεί τις μεταβολές της εξωτερικής συγκέντρωσης. Ο λόγος της εσωτερικής προς την εξωτερική συγκέντρωση (λόγος Ι/Ο) αυξάνεται κατά την παρουσία ατόμων στον εσωτερικό χώρο, αλλά εξακολουθεί να παρουσιάζει τιμές μικρότερες της μονάδας. Η ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι η φασματική κατανομή μεγέθους στον εσωτερικό χώρο, απουσία εσωτερικών πηγών, έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη κατανομή του εξωτερικού περιβάλλοντος, με τις διαφορές να εντοπίζονται κυρίως στην περιοχή των νάνο-σωματιδίων. Επομένως τα σωματίδια αυτά εισέρχονται σε μικρότερο ποσοστό στον εσωτερικό χώρο από το εξωτερικό περιβάλλον.

Η ενεργοποίηση εσωτερικών πηγών (πραγματοποίηση καθημερινών δραστηριοτήτων όπως κάπνισμα, μαγείρεμα, καύση κεριών κλπ) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης τόσο όσον αφορά τον αριθμό, όσο και τη μάζα των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο λόγος Ι/Ο παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες τις μονάδας το χρονικό διάστημα που οι πηγές είναι ενεργές. Η επίδραση των πηγών παραμένει για αρκετό χρονικό διάστημα μετά το πέρας των εκπομπών, με τα σωματίδια που εκπέμπονται κατά την καύση του τσιγάρου να παραμένουν αιωρούμενα για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παράλληλα μεταβάλλονται σημαντικά τα χαρακτηριστικά της φασματικής κατανομής μεγέθους με την μετατόπιση των μεγίστων των επιμέρους κορυφών σε μικρότερες τιμές διαμέτρου και την εμφάνιση μεγαλύτερου ποσοστού μονοκόρυφων κατανομών. Παρατηρείται επίσης ότι σε εσωτερικούς χώρους με περισσότερα δωμάτια, η συγκέντρωση παρουσιάζει παρόμοιες τιμές στους διάφορους χώρους σε συνθήκες χωρίς εκπομπές. Η αύξηση της συγκέντρωσης σε κάποιο χώρο λόγω εσωτερικών πηγών, εμφανίζεται και στους υπόλοιπους χώρους με χρονική διαφορά που εξαρτάται από ρυθμό ανταλλαγής αέρα ανάμεσα στα εσωτερικά μικροπεριβάλλοντα.

Η μεγαλύτερη αύξηση της συγκέντρωσης παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας φαγητού. Οι τιμές της συγκέντρωσης, καθώς και οι φασματικές κατανομές μεγεθών των εκπεμπόμενων σωματιδίων μεταβάλλονταν ανάλογα με την ποσότητα του φαγητού, τη

θερμοκρασία του μαγειρέματος και το είδος της συσκευής που χρησιμοποιούνταν, υποδεικνύοντας έτσι την εξάρτηση των εκπομπών από τις παραπάνω παραμέτρους. Το μαγείρεμα οδηγεί στην εκπομπή ως επί το πλείστον υπέρλεπτων σωματιδίων. Η καύση των κεριών έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της συγκέντρωσης των νάνο-σωματιδίων, ενώ παράλληλα παρατηρείται έντονη συσσωμάτωση των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Οι εκπομπές από το τσιγάρο αυξάνουν σημαντικά τη συγκέντρωση τόσο του αριθμού, όσο και της μάζας των εκπεμπόμενων σωματιδίων. Άλλες πηγές, όπως η χρήση αρωματικής λάμπας ή η καύση αρωματικών ξύλων οδηγούν σε μικρότερη αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης σε σχέση με τις παραπάνω πηγές.

Με χρήση του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου που αναπτύχθηκε σε συνδυασμό με αλγόριθμο ελαχιστοποίησης των διαφορών υπό περιορισμούς μεταξύ των τιμών του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων υπολογίστηκαν οι ρυθμοί εκπομπής αριθμού σωματιδίων και σωματιδιακής μάζας από τις εσωτερικές πηγές. Το μοντέλο εκτελέστηκε με τους υπολογιζόμενους ρυθμούς εκπομπής, παρέχοντας σε όλες τις περιπτώσεις ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στις πειραματικές τιμές. Οι πηγές εσωτερικού χώρου που εξετάστηκαν εκπέμπουν κυρίως υπέρλεπτα σωματίδια. Η καύση των κεριών οδηγεί σε εκπομπή νάνο-σωματιδίων, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια εκπέμπονται στη διάρκεια του καπνίσματος. Τέλος οι ρυθμοί εκπομπής από την προετοιμασία φαγητού

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M., 2005. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, and PM_1 in a classroom. Environmental Research, 99, 143–149.

BeruBe, K.A., Sexton, K.J., Jones, T.P., Moreno, T., Anderson, S., Richards, R.J., 2004. The spatial and temporal variations in PM_{10} mass from six UK homes. Science of the Total Environment 324, 41–53

Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L., 2009. Particle emission factors during cooking activities. Atmospheric Environment 43, 3235-3242.

Diapouli E., Chaloulakou A., Spyrellis, N., 2007. Indoor and Outdoor Particulate Matter Concentrations at Schools in the Athens Area. Indoor and Built Environment, 16, 55-61.

El-Hougeiri, N., El Fadei, M., 2004. Correlation of Indoor-Outdoor Air Quality in Urban Areas. Indoor and Built Environment, 13, 421–431

Fan, C. W., and Zhang, J. J. (2001). Characterization of emissions from portable household combustion devices: particle size distributions, emission rates and factors, and potential exposures, Atmos. Environ. 35: 1281–1290.

Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. 1999. Characterization of fine particle emissions from burning church candles. Environmental Science and Technolology 33, 2352-2362.

Gemenetzis, P., Moussas, P., Arditsoglou, A., Samara, C., 2006. Mass concentration and elemental composition of indoor PM2.5 and PM10 in University rooms in Thessaloniki, northern Greece. Atmospheric Environment, 40, 3195-3206.

Halios, C., Santamouris, M., Helmi, A., Kapsalaki, M., Saliari, M., Spanou, A., Tsakos, D., 2009. Exposure to fine particulate matter in ten night clubs in Athens Greece: Studying the effect

of ventilation, cigarette smoking and resuspension. Science of the Total Environment, 407, 4894-4901.

Hanninen, O.O., Lebret, E., Ilacqua, V., Katsouyanni, K., Kunzli, N., Sram, R.J., Jantunen, M., 2004. Infiltration of ambient PM2.5 and levels of indoor generated non-ETS PM2.5 in residences of four European cities. Atmospheric Environment, 38, 6411–6423.

He, C., Morawska, L., Hitchins, J., Gilbert, D., 2004. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. Atmospheric Environment, 38, 3405-3415.

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology. John Wiley & Sons, New York.

Hoek, G., Kos, G., Harrison, R., De Hartog, J., Meliefste, K., Ten Brin, H., Katsouyanni, K., Karakatsani, A., Lianou, M., Kotronarou, A., Kavouras, I., Pekkanen, J., Vallius, M., Kulmala, M., Puustinen, A., Thomas, S., Meddings, C., Ayres, J., Van Wijnen, J., Hameri, K., 2008. Indoor–outdoor relationships of particle number and mass in four European cities. Atmospheric Environment, 42, 156-169.

Hussein, T., Hämeri, K., Heikkinen M., Kulmala, M., 2005. Indoor and outdoor particle size characterization at a family house in Espoo-Finland. Atmospheric Environment 39, 3697-3709.

Hussein, T., Hruška, A., Dohányosová, P., Džumbová, L., Hemerka, J., Kulmala, M., Smolik J., 2009. Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber. Atmospheric Environment 43, 905–914.

Jo., W-K., Lee, J-Y., 2006. Indoor and outdoor levels of respirable particulates (PM10) and Carbon Monoxide (CO) in high-rise apartment buildings. Atmospheric Environment 40, 6067-6076.

Jones, A.P., 1999. Indoor air quality and health. Atmospheric Environment 33, 4535-4564.

Koponen, I.K., Asmi, A., Keronen, P., Puhto, K., Kulmala, M., 2001. Indoor air measurement campaign in Helsinki, Finland 1999 – the effect of outdoor air pollution on indoor air. Atmospheric Environment, 35, 1465-1477.

Lazaridis, M., Aleksandropoulou, V., Smolik, J., Hansen, J.E., Glytsos, T., Kalogerakis, N., Dahlin, E., 2006. Physico-chemical characterization of indoor/outdoor particulate matter in two residential houses in Oslo, Norway: measurements overview and physical properties - URBAN-AEROSOL Project. Indoor Air, 16, 282-295.

Liao, C-M., Chen, S-C., Chen, J-W., Liang H-M., 2006. Contributions of Chinese-style cooking and incense burning to personal exposure and residential PM concentrations in Taiwan region. Science of the Total Environment 358, 72–84

Liu, Y., Chen, R., Shen, X., Mao, X., 2004. Wintertime indoor air levels of PM10, PM2.5 and PM1 at public places and their contributions to TSP. Environment International, 30, 189–197

Long, C.M., Suh, H.H., Koutrakis, P., 2000. Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. Journal of Air and Waste Management Association, 50, 1236-1250.

Long, C.M., Sarnat, J.A., 2004. Indoor-outdoor relationships and infiltration behavior of elemental components of outdoor PM2.5 for Boston-area homes Aerosol Science and Technology, 38, 91–104.

Lunden, M.M, Thatcher, T.L., Hering, S.V., Brown, N.J., 2003. The use of time- and chemicallyresolved particulate data to characterize the infiltration of outdoor PM-2.5 into a residence in the San Joaquin valley. Environmental Science and Technology, 37, 4724-4732.

Massey, D., Masih, J., Kulshrestha, A., Habil, M., Taneja, A., 2009. Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 mm (PM2.5) in residential homes locations in central Indian region. Building and Environment, 44, 2037-2045.

Matson, U., 2005a. Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas. Science of the Total Environment 343, 169–176.

Matson, U., 2005b. Comparison of the modelling and the experimental results on concentrations of ultra-fine particles indoors. Building and Environment, 40 996–1002.

Morawska, L., He, C., Hitchins, J., Gilbert, D., Parappukkaran, S., 2001. The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment. Atmospheric Environment, 35, 3463-3473.

Morawska, L., He, C., Hitchins, J., Mengersen, K., Gilbert, D., 2003. Characteristics of particle number and mass concentrations in residential houses in Brisbane, Australia. Atmospheric Environment, 37, 4195-4203.

Monkkonen, P., Pai, P., Maynard, A., Lehtinen K.E.J., Hameri, K., Rechkemmerd, P., Ramachandran, G., Prasad, B., Kulmala, M.,2005. Fine particle number and mass concentration measurements in urban Indian households. Science of the Total Environment, 347, 131–147.

Ni Riain, C.M., Mark, D., Davies, M., Harrison, R.M., Byrne, M.A., 2003. Averaging periods for indoor–outdoor ratios of pollution in naturally ventilated non-domestic buildings near a busy road Atmospheric Environment, 37, 4121–4132

Osunsanya, T., Prescott, G., Seaton, A., 2000. Acute respiratory effects of particles: mass or number ? Occupational Environmental Medicine 58, 154-159.

Pope, C.A., Dockery, D.W., 1999. Epidimiology of particle effects. In: Holgate S.T., Samet, J.M., Koren, H.S., Maynard, R.L. (Eds.), Air Pollution and Health. Academic Press, San Diego, CA.

Riffat, S. B., 1991. The influence of tracer gases on the accuracy of interzonal airflow measurements. Applied Energy, 38, 67-77.

Robinson, J., Nelson, W.C., 1995. National Human Activity Pattern Survey Data Base. United States Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd edition. Willey-Interscience, New York

Schwartz, J., 1994. What are people dying of an air pollution days. Fundamental and Applied Toxicology, 64, 26-35.

Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K., Godden, D., 1995. Particulate air pollution and acute health effects Lancet 345, 176-178.

See, W.S., Balasubramanian, R., 2006. Physical characteristics of ultrafine emitted particles from different gas cooking methods. Aerosol and Air Quality Research 6, 82-92.

Sherman, M. H., 1990. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. Building and Environment, 25, 365-374.

Shilton V., Giess P., Mitchell D., Williamsughan C., 2002. The Relationships between Indoor and Outdoor Respirable Particulate Matter: Meteorology, Chemistry and Personal Exposure. Indoor and Built Environment, 2002, 11, 266-274.

Smolik, J., Lazaridis, M., Moravec, P., Schwarz, J., Zaripov, S.K., Zdimal, V., 2005. Indoor aerosol particle deposition in an empty office. Water, Air, and Soil Pollution, 165, 301–312.

Thatcher, T.L., Layton, D.W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. Atmospheric Environment 29, 1487-1497.

Tippayawong, N., Khuntong, P., Nitatwichit, C., Khunatorn, Y., Tantakitti, C., 2009. Indoor/outdoor relationships of size-resolved particle concentrations in naturally ventilated school environments. Building and Environment, 44, 188-197.

Wallace, L.A., Emmerich, S.J., Howard- Reed, C., 2004a. Source Strengths of Ultrafine and Fine Particles Due to Cooking with a Gas Stove. Environmental Science and Technology, 38, 2304–2311.

Wallace, L.A., Emmerich, S.J., Howard- Reed, C., 2004b. Effect of central fans and in-duct filters on deposition rates of ultrafine and fine particles in an occupied townhouse. Atmospheric Environment, 38, 405-413.

Wallace, L., 2006. Sources of ultrafine and accumulation mode particles: Size distributions, size-resolved concentrations and source strengths. Aerosol Science and Technology 40, 348-360.

Weichenthal, S., Dufresne, A., Infante-Rivard, C., Joseph, L., 2008. Characterizing and predicting ultrafine particle counts in Canadian classrooms during the winter months: Model development and evaluation. Environmental Research, 106, 349–360

Zhu, Y., Hinds, W.C., Krudysz, M., Kuhn, T., Froines, J., Sioutas, C., 2005. Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments. Aerosol Science, 36, 303–322.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της εφαρμογής του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους μελετήθηκαν οι συνθήκες που επικρατούν στους χώρους χημικής βιομηχανίας που δραστηριοποιείται στον τομέα της παραγωγής και διακίνησης απορρυπαντικών και προϊόντων καθαρισμού. Οι εργάτες σε βιομηχανίες εκτίθενται σε αιωρούμενα σωματίδια, (Liden et al., 2000) τα οποία ανάλογα με τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία (Rudel και Perovich, 2009). Ειδικότερα στις χημικές βιομηχανίες παρασκευής απορρυπαντικών οι εργαζόμενοι εκτίθενται σε σωματίδια των οποίων η χημική σύσταση περιλαμβάνει και διάφορα ένζυμα τα οποία βελτιώνουν τη δυνατότητα καθαρισμού των απορρυπαντικών (Ahmadian και Ghandri, 2007; Cathcart et al., 1997; Liu et al., 2009). Τα ένζυμα αυτά μπορούν να προκαλέσουν αλλεργίες, ρινίτιδα και άσθμα στα άτομα που εκτίθενται σε αυτά (Coate et al., 1978; Kuchuk, 1994; Poulsen et al., 2000; Schweigert et al., 2000).

Οι εγκαταστάσεις της υπό μελέτη μονάδας βρίσκονται σε βιομηχανική περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής. Για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα πραγματοποιήθηκε σειρά πειραματικών μετρήσεων που περιελάμβαναν τόσο συνεχείς μετρήσεις δειγματοληψίας πραγματικού χρόνου της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων όσο και μετρήσεις παθητικής δειγματοληψίας με χρήση κρουστικών διαχωριστών (Vratolis et al., 2006). Επίσης, πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση των δειγμάτων που συλλέχθηκαν στα φίλτρα των κρουστικών διαχωριστών για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των σωματιδίων και σε επέκταση της επικινδυνότητάς τους για το προσωπικό της βιομηχανίας (Karanasiou et al., 2006). Στην εργασία αυτή αναλύθηκαν οι μετρήσεις ενεργούς δειγματοληψίας, που αφορούσαν την καταγραφή της μάζας των σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5}.



Χημική Βιομηχανία

Σχήμα 6-1. Θέση της χημικής βιομηχανίας όπου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις.

6.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι μετρήσεις διεξήχθησαν το Δεκέμβριο του 2006 και διήρκησαν μία εβδομάδα. Η μέτρηση της συγκέντρωσης μάζας των σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2,5} έγινε με τη χρήση δύο οργάνων DustTrack, η αρχή λειτουργίας των οποίων στηρίζεται στη διάχυση του φωτός από τα εισερχόμενα σωματίδια στο εσωτερικό του οργάνου.

Τα δύο όργανα είχαν τοποθετηθεί στο χώρο που βρισκόταν οι μηχανές συσκευασίας του παραγόμενου απορρυπαντικού. Η διαδικασία της συσκευασίας περιελάμβανε την ανάμιξη πρώτων υλών που είχαν παραχθεί νωρίτερα και θεωρείται ως μία από τις σημαντικότερες πηγές αιωρούμενων σωματιδίων στο χώρο της βιομηχανίας. Επιπλέον η μεταφορά του συσκευασμένου προϊόντος με αυτοκινούμενους μηχανικούς φορτωτές εκτός του χώρου συσκευασίας οδηγούσε στην εκπομπή χονδρών σωματιδίων. Στο χώρο συσκευασίας εργάζονταν ένας σημαντικός αριθμός ατόμων. Η βιομηχανία λειτουργούσε καθημερινά (εκτός από τα Σαββατοκύριακα) για 16 ώρες και το προσωπικό εργαζόταν σε δύο βάρδιες των 8 ωρών. Η πρώτη βάρδια ξεκινούσε στις 6 το πρωί και η δεύτερη στις 2 το μεσημέρι. Η μεταφορά του συσκευασμένου προϊόντος λάμβανε χώρα κυρίως στη διάρκεια της πρώτης βάρδιας.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, τα όργανα τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο κοντά στις μηχανές συσκευασίας, σε εξέδρα ύψους 1,20 m. Το ένα όργανο μετρούσε κατά προσέγγιση τη συγκέντρωση των λεπτών σωματιδίων (PM_{2,5}) και το άλλο τη συγκέντρωση των PM₁₀ σωματιδίων. Τα δύο όργανα κατέγραφαν ταυτόχρονα τις μετρήσεις ανά 5 λεπτά.

Για να ελεγχθεί η συμφωνία οργάνων όσον αφορά τις καταγραφόμενες τιμές, τα δύο όργανα (DustTrack) μετρούσαν για 10 ημέρες ταυτόχρονα συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{10} . Η συμφωνία των δύο οργάνων κρίθηκε ικανοποιητική, καθώς σε σύνολο 2881 μετρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης είχε τιμή μεγαλύτερη από 0,9 (σχήμα 6-2).



Σχήμα 6-2: Σύγκριση των μετρήσεων συγκέντρωσης μάζας PM₁₀ των δύο οργάνων DustTrack που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή των πειραματικών τιμών. Η σύγκριση αφορά περίοδο 10 ημερών και συνολικά 2881 τιμές. Τα δύο όργανα κατέγραφαν τιμές ανά 3 λεπτά.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων έξω από το χώρο συσκευασίας για να εκτιμηθεί η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος στη συγκέντρωση των εσωτερικών χώρων. Διαπιστώθηκε ότι τις ώρες λειτουργίας της βιομηχανίας η εξωτερική συγκέντρωση ήταν πολύ μικρότερη από την εσωτερική και οι διακυμάνσεις της δεν οδηγούσαν σε αντίστοιχες μεταβολές της εσωτερικής συγκέντρωσης. Ενδεικτικά αποτελέσματα των ταυτόχρονων μετρήσεων εντός και εκτός του χώρου συσκευασίας παρουσιάζονται στο σχήμα 6-3.



Σχήμα 6-3: Σύγκριση των μετρήσεων συγκέντρωσης μάζας PM₁₀ εντός και εκτός του χώρου συσκευασίας. Οι μετρήσεις αφορούν εργάσιμη ημέρα και χρονικό διάστημα 23 ωρών (06:00 έως 05:00 το επόμενο πρωί).

6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΜΑΖΑΣ ΛΕΠΤΩΝ ΚΑΙ ΧΟΝΔΡΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι κατά τις ώρες λειτουργίας της χημικής βιομηχανίας, η συγκέντρωση μάζας τόσο των σωματιδίων PM_{2,5}, όσο και των σωματιδίων PM₁₀, παρουσιάζει αυξημένες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τις ώρες εκτός λειτουργίας. Η αύξηση αυτή φαίνεται στο σχήμα 6-4, όπου παρουσιάζεται η τυπική συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀ κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας σε σύγκριση με τη συγκέντρωση κατά τη διάρκεια αργίας

(Κυριακή). Οι μέσες τιμές των σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$ για τις εργάσιμες ημέρες ήταν $160 \pm 72 \text{ µg/m}^3$ και $113 \pm 41 \text{ µg/m}^3$, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το Σαββατοκύριακο ήταν $85 \pm 28 \text{ µg/m}^3$ και $52 \pm 24 \text{ µg/m}^3$. Παρατηρούμε ότι η λειτουργία της βιομηχανίας οδηγεί σε διπλασιασμό των μέσων τιμών συγκέντρωσης σωματιδιακής μάζας στους εσωτερικούς της χώρους.

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των λεπτών και των χονδρών σωματιδίων υπολογίστηκε η διαφορά της συγκέντρωσης των σωματιδίων PM_{10} και $PM_{2,5}$. Τα σωματίδια αυτά θα δηλώνονται στο εξής ως $PM_{10-2,5}$ και θα αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στα χονδρά σωματίδια. Η μέση τιμή των σωματιδίων αυτών τις εργάσιμες ημέρες ήταν $85 \pm 15 \ \mu g/m^3$, ενώ το Σαββατοκύριακο ήταν $33 \pm 13 \ \mu g/m^3$.



Σχήμα 6-4: Σύγκριση των τιμών συγκέντρωσης μάζας PM₁₀ μεταξύ μίας αργίας (Κυριακή) και μίας εργάσιμης ημέρας. Οι μετρήσεις αφορούν χρονικό διάστημα 23 ωρών (06:00 έως 05:00 το επόμενο πρωί).

Στο σχήμα 6-5 παρουσιάζεται η διακύμανση των σωματιδίων κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας. Παρατηρούμε ότι μέχρι τις 14:00 που τελειώνει η πρώτη βάρδια είχαμε υψηλές τιμές σωματιδίων PM₁₀, οι οποίες παρουσίαζαν έντονες διακυμάνσεις. Στη διάρκεια της δεύτερης βάρδιας οι τιμές των σωματιδίων αυτών μειώνονταν αισθητά, και η μείωση αυτή συνοδεύονταν και από αντίστοιχη μείωση των χονδρών σωματιδίων. Αντίθετα τα λεπτά σωματίδια εμφάνισαν την ίδια συμπεριφορά και στις δύο βάρδιες. Είχαμε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης τους με την έναρξη της πρώτης βάρδιας, ενώ η αντίστοιχη αύξηση παρατηρούνταν στη δεύτερη βάρδια περίπου 3 ώρες μετά την έναρξη της. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι παραγωγή χονδρών σωματιδίων είχαμε κατά τη διάρκεια της πρώτης βάρδιες και οφείλονταν κυρίως στη μεταφορά του συσκευασμένου απορρυπαντικού εκτός της βιομηχανίας. Η παραγωγή λεπτών σωματιδίων πραγματοποιούνταν και στις δύο βάρδιες και οφείλονταν στην ίδια τη διαδικασία της συσκευασίας. Στη διάρκεια της αλλαγής ανάμεσα στις βάρδιες οι συγκεντρώσεις όλων των σωματιδίων μειώνονταν σημαντικά. Τέλος κατά τη διάρκεια της νύχτας οι τιμές των σωματιδίων PM_{2,5} παρέμεναν υψηλές και καθορίζονταν από τις μέγιστες συγκεντρώσεις που είχαν παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια της δεύτερης βάρδιας.



Σχήμα 6-5: Τυπική συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και $PM_{10-2.5}$ κατά τη διάρκεια εργάσιμης ημέρας. Οι μετρήσεις αφορούν χρονικό διάστημα 24 ωρών (05:00 έως 05:00 το επόμενο πρωί).

Στον πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων PM_{10} , $PM_{2,5}$ και $PM_{10-2,5}$ στις δύο βάρδιες κατά τη διάρκεια των εργάσιμων ημερών. Και στις τρεις περιπτώσεις, οι συγκεντρώσεις όλων των σωματιδίων εμφάνισαν μικρότερες τιμές στη δεύτερη βάρδια.

Για να προσδιοριστεί η μείωση της συγκέντρωσης ανάμεσα στις δύο βάρδιες υπολογίστηκε το ποσοστό της μείωσης των σωματιδίων από τη σχέση:

$$\Pi\% = \frac{C_{PM2} - C_{PM1}}{C_{PM1}} \times 100\%$$

όπου C_{PM1} , C_{PM2} είναι οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων στην πρώτη και τη δεύτερη βάρδια αντίστοιχα. Ο λόγος υπολογίστηκε για τα σωματίδια $PM_{2,5}$ και $PM_{10-2,5}$ και βρέθηκε ότι τα λεπτά σωματίδια μειώνονται σε ποσοστό 38%, ενώ τα χονδρά σε ποσοστό 62%, κάτι που ενισχύει το συμπέρασμα ότι η παραγωγή χονδρών σωματιδίων λάμβανε χώρα κυρίως εξαιτίας των εργασιών μεταφοράς των παραγόμενων προϊόντων.

Πίνακας 6- 1: Μέσες τιμές σωματιδίων PM_{10} , $PM_{2.5}$ και $PM_{10-2.5}$ στις δύο βάρδιες εργασίας (1^η βάρδια: 06:00-14:00 και 2^η βάρδια: 14:00-22:00).

Βάρδια	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM _{10-2.5} (μg/m ³)
1 ^η Βάρδια	279 ± 24	161 ± 28	119 ± 52
2 ^η Βάρδια	145 ± 2	100 ± 27	45 ± 30

6.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής σωματιδίων εξαιτίας των διαδικασιών συσκευασίας και μεταφοράς των παραγόμενων απορρυπαντικών και προϊόντων καθαρισμού. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου που έχει αναπτυχθεί για τα σωματίδια PM_{2,5} και PM_{10-2,5}.

Επειδή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6-5, οι διακυμάνσεις, ειδικά των χονδρών σωματιδίων ήταν ιδιαίτερα έντονες, επιλέχθηκε να υπολογιστούν οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων ανά 30 λεπτά, και οι υπολογισμοί να πραγματοποιηθούν με βάση αυτές τις τιμές.

Στο σχήμα 6-6 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ανά 30 λεπτά των λεπτών και των χονδρών σωματιδίων για όλη την υπό εξέταση περίοδο (εργάσιμες ημέρες). Η ημερήσια περιοδικότητα στις τιμές της συγκέντρωσης των λεπτών σωματιδίων είναι εμφανής. Η συγκέντρωση τους ξεκινούσε να αυξάνεται με την έναρξη της πρωινής βάρδιας, μειωνόταν με τη λήξη της και άρχιζε πάλι να αυξάνεται λίγες ώρες μετά την έναρξη της δεύτερης βάρδιας. Παρατηρούμε επίσης ότι μόνο κατά τη διάρκεια της πρώτης βάρδιας είχαμε αυξημένες τιμές των χονδρών σωματιδίων.



Σχήμα 6-6: Μεταβολή της μέσης τιμής (ανά 30 λεπτά) της συγκέντρωσης μάζας των λεπτών και των χονδρών σωματιδίων για τις εργάσιμες ημέρες της υπό εξέταση περιόδου.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του μοντέλου που βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης της συνολικής μάζας των σωματιδίων. Η εξίσωση αυτή έχει τη μορφή:

$$\frac{dC_{m}}{dt} = \lambda PC_{m,out} - (\lambda + \lambda_{loss})C_{m} + \frac{E_{m}}{V} \quad (6-1)$$

όπου C_m και C_{m,out} είναι οι συγκεντρώσεις μάζας των σωματιδίων στον εσωτερικό και τον εξωτερικό χώρο (μg/m³), V είναι ο όγκος του εσωτερικού περιβάλλοντος (m³), P είναι ο συντελεστής διείσδυσης των σωματιδίων από τον εξωτερικό χώρο, λ είναι ο ρυθμός ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον (s⁻¹), λ_{loss} είναι ο συντελεστής απομάκρυνσης των σωματιδίων εξαιτίας όλων των πιθανών διεργασιών απομάκρυνσης τους και E_m είναι ο ρυθμός εκπομπής λόγω των εσωτερικών πηγών (μg/s). Ο συντελεστής απομάκρυνσης διαφέρει για τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια. Η κύρια διεργασία απομάκρυνσης όλων των σωματιδίων είναι η εναπόθεση τους στις επιφάνειες του εσωτερικού χώρου. Για τα λεπτά σωματίδια ο κύριος μηχανισμός εναπόθεσης είναι η διάχυση στις επιφάνειες, ενώ για τα χονδρά σωματίδια η βαρυτική καθίζηση (Hinds, 1982).

Στην παρούσα εφαρμογή του μοντέλου αγνοήθηκε η επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς στη διάρκεια των ωρών λειτουργίας της, η συγκέντρωση των σωματιδίων στον εξωτερικό χώρο ήταν πολύ μικρότερη από τη συγκέντρωση τους εντός της βιομηχανίας.

6.4.1 Υπολογισμός του συντελεστή συνολικής απομάκρυνσης σωματιδίων (λ_{tot}).

Το πρώτο βήμα της εφαρμογής του μοντέλου ήταν ο υπολογισμός του συντελεστή απομάκρυνσης και του ρυθμού ανταλλαγής αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον. Καθώς δεν υπήρχαν πειραματικές μετρήσεις της ανταλλαγής αέρα με τους εξωτερικούς χώρους, οι δύο παραπάνω συντελεστές υπολογίστηκαν συνολικά και το άθροισμα τους (λ+λ_{loss}) θα αναφέρεται ως συντελεστής συνολικής απομάκρυνσης σωματιδίων (λ_{tot}). Ο συντελεστής αυτός εκφράζει την συνολική απομάκρυνση των σωματιδίων λόγω εναπόθεσης στις επιφάνειες και λόγω μεταφοράς στο εξωτερικό περιβάλλον.

Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι στο τέλος της πρώτης βάρδιας η συγκέντρωση των χονδρών σωματιδίων μειωνόταν με το χρόνο μέχρι που σταθεροποιούνταν σε μέσες τιμές ανά 30 λεπτά κάτω από τα 50 μg/m³, παρουσιάζοντας μικρές αυξομειώσεις. Επομένως στο χρονικό αυτό διάστημα αμέσως μετά το τέλος της πρώτης βάρδιας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είχαμε μια παύση της παραγωγής χονδρών σωματιδίων και επομένως δεν υπήρχαν ενεργές εσωτερικές πηγές για αυτά τα σωματίδια $\left(\frac{E}{V}=0\right)$. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση 1 παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} = -\lambda_{\mathrm{tot}} C_{\mathrm{m}} \qquad (6-2)$$

και στη συνέχεια επιλύνοντας ως προς λ_{tot} έχουμε:

$$\lambda_{\text{tot}} = -\frac{\ln(\frac{C_{\text{m,max}}}{C_{\text{m}}})}{\Delta t} \qquad (6-3)$$

όπου $C_{m,max}$ είναι η μέγιστη συγκέντρωση στο τέλος της 1^{ης} βάρδιας και C_m είναι η μετρούμενη συγκέντρωση. Η κλίση στην ευθεία της εξίσωσης 6-3 αντιστοιχεί στον συντελεστή λ_{tot} . Η αντίστοιχη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τα λεπτά σωματίδια για το χρονικό διάστημα μετά το τέλος της 2^{ης} βάρδιας, όποτε σταματούσαν οι εργασίες συσκευασίας και το προσωπικό αποχωρούσε από τη βιομηχανία, και μέχρι τη σταθεροποίηση της τιμής της συγκέντρωσης των λεπτών σωματιδίων. Στο σχήμα 6-7 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου $-\ln(\frac{C_{m,max}}{C_m})$ σαν συνάρτηση του χρόνου. Οι τιμές του συντελεστή λ_{tot} που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μεθοδολογία ήταν 7.61×10⁻⁵ ± 4.61×10⁻⁵ sec⁻¹ για τα λεπτά σωματίδια και 2×10⁻⁴ ± 5.05 ×10⁻⁵ sec⁻¹ για τα χονδρά σωματίδια, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω προβλήματος των μηχανών συσκευασίας οι εργασίες διακόπηκαν για περίπου 3 ώρες το απόγευμα μιας ημέρας και συντελεστή λ_{tot} πραγματοποιήθηκαν εκείνη την ημέρα για το εναπομείναν χρονικό διάστημα μέχρι την έναρξη της πρωινής βάρδιας της επόμενης ημέρας.

6.4.2 Υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής

Με βάση διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dC_m}{dt} = -\lambda_{tot} C_m + \frac{E}{V} \qquad (6-4)$$

υπολογίζεται με τη χρήση των πειραματικών δεδομένων η τιμή του ρυθμού εκπομπής μέσω της μεθόδου Nelder-Mead Simplex (Lagarias, 1998). Με την τιμή που υπολογίστηκε επιλύεται στη συνέχεια με αριθμητικές μεθόδους (μέθοδος Runge-Kutta) η διαφορική εξίσωση 6-4 και υπολογίζονται οι τιμές της συγκέντρωσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές κριθεί απαραίτητο, μέχρι να υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και τα στις πειραματικές τιμές.



Σχήμα 6-7: Μεταβολή του λόγου - $ln(\frac{C_{m,max}}{C_m})$ σαν συνάρτηση του χρόνου. Η κλίση της ευθείας αντιστοιχεί στην τιμή του συντελεστή λ_{tot} .

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι ρυθμοί εκπομπής μεταβάλλονταν κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε συνάρτηση με το φόρτο των εργασιών που επιτελούνταν τις δεδομένες χρονικές στιγμές. Γενικά, όσον αφορά τα χονδρά σωματίδια, το 24ωρο (ξεκινώντας από τις 6:00 το πρωί μέχρι την ίδια ώρα το επόμενο πρωί) χωρίστηκε σε 4 χρονικά διαστήματα σχετικά με τις τιμές που υπολογίστηκαν για τους ρυθμούς εκπομπής των εσωτερικών πηγών. Το ίδιο πραγματοποιήθηκε αντίστοιχα για τα λεπτά σωματίδια για 5 όμως χρονικά διαστήματα. Στους πίνακες 6-2 και 6-3 παρουσιάζονται οι ρυθμοί εκπομπής κατά τη διάρκεια της ημέρας για τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια, αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι όσον αφορά τα λεπτά σωματίδια, είχαμε ισχυρές εκπομπές τις πρώτες πρωινές ώρες και το απόγευμα από τις 18:00 και μέχρι το τέλος της βάρδιας. Μετά το τέλος της πρώτης βάρδιας και για 3 ώρες δεν εκπέμπονταν λεπτά σωματίδια και μάλλον υπήρχε κάποια παύση στη

διαδικασία της συσκευασίας των απορρυπαντικών. Επίσης είχαμε μηδενικές εκπομπές κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα χονδρά σωματίδια εκπέμπονταν κυρίως κατά τη διάρκεια της 1^{ης} βάρδιας, όπου λάμβανε χώρα και η μεταφορά των προϊόντων. Οι εκπομπές τις απογευματινές ώρες οφείλονται στην παρουσία του προσωπικού στους χώρους της βιομηχανίας. Η παρουσία ατόμων σε εσωτερικούς χώρους οδηγεί σε εκπομπές μεγάλου μεγέθους σωματιδίων λόγω επαναιώρησης της σκόνης που έχει εναποτεθεί στις διάφορες επιφάνειες (Branis et al., 2005; Halios, 2009). Η παρουσία χονδρών σωματιδίων κατά τη διάρκεια της νύχτας οφείλονταν σε επαναιώρηση λόγω ρευμάτων αέρα (κάποια από τα παράθυρα του χώρου παρέμεναν ανοιχτά στη διάρκεια της νύχτας) ή σε εισροή σωματιδίων από το εξωτερικό περιβάλλον.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε στη συνέχεια για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης με βάση τους ρυθμούς εκπομπής που υπολογίστηκαν παραπάνω. Κατά τη διάρκεια της ημέρας που υπήρξε παύση της διαδικασίας λόγω βλάβης των μηχανών, οι ώρες των ρυθμών εκπομπής τροποποιήθηκαν ανάλογα με τις ώρες που πραγματοποιήθηκαν και οι εργασίες παραγωγής στη βιομηχανία. Στα σχήματα 6-8 και 6-9 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια, αντίστοιχα.

Πίνακας 6-2: Ρυθμοί εκπομπής λεπτών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.

Χρονικό Διάστημα	06:00-10:00	10:00-15:00	15:00-18:00	18:00-23:00	23:00-06:00
Ρυθμός εκπομπής (μg/s)	1126 ± 325	343 ± 90	0	1226 ± 258	0

Πίνακας 6-3: Ρυθμοί εκπομπής χονδρών σωματιδίων κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.

Χρονικό Διάστημα (ώρες)	06:00-10:00	10:00-15:00	15:00-23:00	23:00-06:00
Ρυθμός εκπομπής (μg/s)	1765 ± 187	1963 ± 467	687 ± 246	322 ± 2



Σχήμα 6-8: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις για τα λεπτά σωματίδια.



Σχήμα 6-9: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις πειραματικές μετρήσεις για τα χονδρά σωματίδια.

Παρατηρούμε πως υπήρξε και στις δύο περιπτώσεις ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πειραματικών τιμών. Η συμφωνία ήταν μεγαλύτερη για τα λεπτά σωματίδια, καθώς τα σωματίδια αυτά παρουσίαζαν μεγαλύτερη περιοδικότητα στη συμπεριφορά τους. Οι έντονες διακυμάνσεις των χονδρών σωματιδίων δεν ήταν δυνατό να προσομοιωθούν με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε. Οι γρήγορες αυτές μεταβολές δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά τη λήψη μέτρων για την προστασία των εργαζομένων. Αντίθετα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα του μοντέλου βρέθηκαν πολύ κοντά στις πειραματικές τιμές, όπως φαίνεται στους πίνακες 6-4 και 6-5.

Πίνακας 6-4: Σύγκριση των μέσων ημερήσιων τιμών (εργάσιμες ημέρες) των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα λεπτά σωματίδια.

Ημερομηνία	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12
Πειραματικές τιμές (μg/m ³)	129	114	112	100	114
Αποτελέσματα μοντέλου (μg/m ³)	119	99	103	96	110

Πίνακας 6- 5: Σύγκριση των μέσων ημερήσιων τιμών (εργάσιμες ημέρες) των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα χονδρά σωματίδια.

Ημερομηνία	4/12	5/12	6/12	7/12	8/12
Πειραματικές τιμές (μg/m³)	61	64	62	45	59
Αποτελέσματα μοντέλου (μg/m ³)	67	72	62	46	67

Για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης (r²) και ο δείκτης συμφωνίας (Index of Agreement, IA) των πειραματικών τιμών και των αποτελεσμάτων του μοντέλου, τόσο για τα λεπτά όσο και για τα χονδρά σωματίδια. Οι τιμές τους ήταν (r² και IA αντίστοιχα) 0,74 και 0,86 για τα χονδρά σωματίδια και 0,88 και 0,95 για τα λεπτά σωματίδια. Επομένως, το μοντέλο με τους ρυθμούς εκπομπής που υπολογίστηκαν προσομοιώνει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα.

6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του μικροπεριβαλλοντικού μοντέλου για τον υπολογισμό των εκπομπών λεπτών και χονδρών σωματιδίων στο χώρο συσκευασίας απορρυπαντικών και καθαριστικών χημικής βιομηχανίας που εδρεύει στο λεκανοπέδιο Αττικής. Ο υπολογισμός των ρυθμών εκπομπής πραγματοποιήθηκε με χρήση πειραματικών μετρήσεων σωματιδίων PM₁₀ και PM_{2.5} που διεξήχθησαν στις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας για μία εβδομάδα.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών (1^η βάρδια) υπήρξε αυξημένη συγκέντρωση χονδρών σωματιδίων σε σχέση με τις τιμές υποβάθρου (συγκέντρωση τις ώρες που δεν λειτουργούσε η βιομηχανία). Οι εκπομπές των σωματιδίων αυτών οφείλονταν στη διαδικασία μεταφοράς των συσκευασμένων προϊόντων, η οποία λάμβανε χώρα κυρίως στη διάρκεια της πρώτης βάρδιας. Τα λεπτά σωματίδια παρουσίασαν αυξημένες τιμές και στις δύο βάρδιες και οι εκπομπές τους σχετίστηκαν με τη διαδικασία της συσκευασίας που πραγματοποιούνταν και στις δύο βάρδιες. Οι ρυθμοί εκπομπής που υπολογίστηκαν με το μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο ξεπερνούσαν τα 1000 μg/s για τα χονδρά σωματίδια στη πρώτη βάρδια ενώ τιμές μεγαλύτερες από 1000 μg/s υπολογίστηκαν και για τα λεπτά σωματίδια για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και στις δύο βάρδιες. Το μοντέλο εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τους ρυθμούς εκπομπής που υπολογίστηκαν και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τις πειραματικές τιμές υπήρξε ικανοποιητική. Επομένως, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ποιότητας του αέρα σε χώρους βιομηχανιών και για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων που θα οδηγήσουν στη λήψη των κατάλληλων μέτρων βελτίωσης των συνθηκών εργασίας του προσωπικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahmadian, H., Ghadiri, M., 2007. Analysis of enzyme dust formation in detergent manufacturing plants. Advanced Powder Technology, 18, 53-67.

Branis, M., Rezacova, P, Domasova, M., 2005. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM_{10} , $PM_{2,5}$, and PM_1 in a classroom. Environmental Research, 99, 143-149.

Cathcart, M., Nicolson, P., Roberts, D., Bazley, M., Juniper, C., Murray, P., Randell, M., 1997. Enzyme exposure, smoking and lung function in employees in detergent industry over 20 years. Occupational Medicine, 47, 473-478.

Coate, W.B., Busey, W.M., Schoenfisch, W.H., Brown, N.M., Newmann, E.A., 1978. Respiratory toxicity of enzyme detergent dust. Toxicology and Applied Pharmacology, 45, 477-496.

Halios, C, Santamouris, M., Helmi, A., Kapsalaki, M., Saliari, M., Spanou, A., Tsakos, D., 2009. Exposure to fine particulate matter in ten night clubs in Athens Greece: Studying the effect of ventilation, cigarette smoking and resuspension. Science of the Total Environment, 407, 4894-4901.

Hinds, W.C., 1982. Aerosol Technology. Wiley, New York.

Karanasiou, A., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Zarbas, P., Mihalopoulos, N., Mistakou, S., Housiadas, C., Lazaridis, M., Ondracek, J., Dzumbova, L., 2008. Size distribution of inorganic species and their inhaled dose in a detergent industrial workplace. Water, Air & Soil Pollution: Focus, 8, 71-76.

Kuchuk, A.A., 1994. Proteolytic activity of industrial enzymes as the main reason for the development of inflammatory and allergic work-related lung diseases. American Journal of Industrial Medicine, 25, 53-55.

Lagarias, J.C., Reeds, J. A., Wright, M. H., Wright, P. E., 1998. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, SIAM Journal of Optimization, 9, 112-147.

Liden, G., Juringe, L., Gudmundsson, A., 2000. Workplace validation of a laboratory evaluation test of samplers for unhalable and "total" dust. Journal of Aerosol Science, 31, 199-219.

Liu, J., Wang, M., Xu, B., Zhu, Y., 2009. An experimental method to determine enzyme particle emission rate in workplace. Building and Environment, 44, 2327-2334.

Poulsen, L.K., Claussen, S.K., Glue, C., Millner, A., Nielsen, G.D., Jinquan, T., 2000. Toxicology, 152, 79-85.

Rudel, R.A., Perovich, L.J., 2009. Endocrine disrupting chemicals in indoor and outdoor air. Atmospheric Environment, 43, 170-181.

Schweigert MK, Mackenzie DP, Sarlo K., 2000. Occupational asthma and allergy associated with the use of enzymes in the detergent industry-a review of the epidemiology, toxicology and methods of prevention. Clin. Exp. Allergy 30, 1511–1518.

Vratolis, S., Mitsakou, C., Eleftheriadis, K., Karanasiou, A., Housiadas, C., Lazaridis, M., 2006. Gravimetric and optical PM_{10} Measurements in an Industrial workplace and the impact of the measurement uncertainty on the calculated inhaled dose, Proc. Int. Conf. Protection and Restoration of the Environment VIII, Chania, Greece, 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο σε υπολογιστική γλώσσα Matlab για τη μελέτη της δυναμικής των αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς χώρους. Το μοντέλο βασίζεται στη εξίσωση διατήρησης της μάζας, η οποία λύνεται αριθμητικά με τη μέθοδο Runge-Kutta. Μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερα από ένα μικροπεριβάλλοντα που επικοινωνούν μεταξύ τους με ανταλλαγή αέρα. Το μοντέλο περιλαμβάνει τις διεργασίες της εναπόθεσης σε επιφάνειες, της διείσδυσης από το εξωτερικό περιβάλλον, της συσσωμάτωσης και της συμπύκνωσης ατμών πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων. Οι διεργασίες της εναπόθεσης και της διείσδυσης από το εξωτερικό περιγράφονται από ημιεμπειρικές εξισώσεις στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων. Για την συσσωμάτωση και την συμπύκνωση αναπτύχθηκαν ρουτίνες που στηρίζονται στην υπάρχουσα θεωρία που περιγράφει το μηχανισμό τους. Οι διεργασίες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη μεταβολή του μεγέθους των σωματιδίων και δεν εξετάζονται ξεχωριστά στα περισσότερα από τα υπάρχοντα μοντέλα σε σχέση με τους υπόλοιπους μηχανισμούς απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων συγκεκριμένου μεγέθους.

Το μοντέλο αξιολογήθηκε με πειραματικά δεδομένα από πειράματα σε ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες στο εργαστήριο και με πειραματικά δεδομένα από πειράματα σε οικίες και γραφεία σε πραγματικές συνθήκες. Σε όλες τις περιπτώσεις υπήρξε ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Παράλληλα αναπτύχθηκε μεθοδολογία βασισμένη στο μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο για τον υπολογισμό των ρυθμών εκπομπής εσωτερικών πηγών. Οι πηγές εκπομπής σωματιδίων που εξετάστηκαν ήταν: καύση κεριών και αρωματικών ξύλων, τσιγάρο, μαγείρεμα (χρήση φούρνου,

ηλεκτρικής κουζίνας και τηγάνισμα), χρήση σπρέι, χρήση σεσουάρ μαλλιών και χρήση ηλεκτρικής σκούπας. Αναπτύχθηκε αλγόριθμός που μεταβάλλει τους ρυθμούς εκπομπής εντός καθορισμένος ορίων μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τους συγκεκριμένους ρυθμούς εκπομπής και των πειραματικών δεδομένων. Η ελαχιστοποίηση των διαφορών γίνεται με τη μέθοδο Nelder–Mead και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλη τη διάρκεια των εκπομπών με χρονικό βήμα που επιλέγει ο χρήστης. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται κατά πόσο ο ρυθμός εκπομπής μεταβάλλεται με το χρόνο. Σε προηγούμενες εργασίες που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία οι ρυθμοί εκπομπής θεωρούνται σταθεροί για όλο το χρονικό διάστημα της εκπομπής. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μεγέθους των σωματιδίων που εκπέμπονται αφού δεν εξετάζονταν σε βάθος οι διεργασίες που οδηγούν στην αλλαγή του μεγέθους κατά τη διάρκεια των εκπομπών.

7.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΣΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων σε οικίες και γραφεία κατέδειξε τη σημασία των εκπομπών από πηγές εσωτερικού χώρου στην αύξηση της συγκέντρωσης τόσο του αριθμού όσο και της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων. Στα χρονικά διαστήματα χωρίς ενεργές πηγές, σε χώρους με φυσικό αερισμό, η εσωτερική συγκέντρωση είναι συνήθως μικρότερη από την εξωτερική και ακολουθεί τις μεταβολές της εξωτερικής συγκέντρωσης. Οι φασματικές κατανομές στον εσωτερικό και στον εξωτερικό χώρο παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά, με τις διαφορές να οφείλονται στην περιορισμένη δυνατότητα διείσδυσης σωματιδίων συγκεκριμένων μεγεθών (υπέρλεπτα σωματίδια και σωματίδια μεγαλύτερα από 400 nm) από το εξωτερικό περιβάλλον. Οι εκπομπές κατά τη διάρκεια συνηθισμένων καθημερινών δραστηριοτήτων (π.χ. μαγείρεμα φαγητού, κάπνισμα, καύση κεριών) έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις αυξήθηκε πάνω από 100 φορές. Η αύξηση είναι μεγαλύτερη για τα σωματίδια μικρότερων μεγεθών, που είναι και τα πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον οι μετρήσεις στους εσωτερικούς χώρους χημικής

βιομηχανίας έδειξαν ότι πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών σωματιδιακής μάζας και για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

7.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

Η εύρεση των χαρακτηριστικών των φασματικών κατανομών με τον αλγόριθμο AMANpsd έδειξε ότι οι γεωμετρικές μέσοι διάμετροι (GMD) των σωματιδίων που εκπέμπονται από την καύση κεριών βρίσκονται στην περιοχή των νάνο-σωματιδίων. Τα έντονα φαινόμενα συσσωμάτωσης έχουν σαν αποτέλεσμα την μετατροπή της κατανομής σε δικόρυφη με τη GMD της δεύτερης κορυφής να βρίσκεται κοντά στα 200 nm. Η συσσωμάτωση συνεχίστηκε και μετά τη λήξη των εκπομπών. Οι κατανομές από την καύση του τσιγάρου είναι μονοκόρυφες και η GMD έχει τιμή μεγαλύτερη από 90 nm. Μετά τη λήξη της εκπομπής η GMD μετατοπίζεται σε μεγαλύτερα μεγέθη λόγω συσσωμάτωσης. Επομένως η διεργασία αυτή δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά τη μελέτη της φασματικής κατανομής μεγεθών των σωματιδίων αυτών όπως έχει προταθεί σε μελέτες στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι GMD κατά τη διάρκεια προετοιμασίας φαγητού εξαρτώνται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, την ποσότητα τους και το είδος της συσκευής. Οι μικρότερες τιμές GMD (στην περιοχή των υπέρλεπτων σωματιδίων) καταγράφηκαν κατά το τηγάνισμα. Τέλος η εναπόθεση σκόνης πάνω σε εστίες ηλεκτρικής κουζίνας οδηγεί στην εκπομπή σωματιδίων με GMD μικρότερες από 10 nm.

7.4 ΡΥΘΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΠΗΓΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ

Η καύση των κεριών έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή μεγάλου αριθμού νάνο-σωματιδίων. Δεν υπάρχουν ισχυρές εκπομπές μεγαλύτερων σωματιδίων και η εμφάνιση τους οφείλεται στα έντονα φαινόμενα συσσωμάτωσης, που ευνοούνται από την παρουσία των μικρών σωματιδίων σε υψηλές συγκεντρώσεις. Το μικρό μέγεθος των σωματιδίων οδηγεί σε μικρότερες εκπομπές μάζας σε σχέση με άλλες δραστηριότητες. Μετά το σβήσιμο του κεριού έχουμε και την εκπομπή μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων, κάτι που αυξάνει και τους ρυθμούς εκπομπής μάζας. Οι

υψηλότερες εκπομπές μάζας παρατηρούνται κατά τη καύση του τσιγάρου. Οι παραπάνω πηγές μπορούν να περιγραφούν με σταθερούς ρυθμούς εκπομπής. Αντίθετα κατά το μαγείρεμα έχουμε αρχικά την εκπομπή νανο-σωματιδίων και στη συνέχεια την εκπομπή μεγαλύτερων σωματιδίων. Επομένως συνίσταται η χρήση μεταβλητών χρονικά ρυθμών εκπομπής. Οι εκπομπές κατά το μαγείρεμα παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις και εξαρτώνται από το είδος των υλικών και το είδος των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Τέλος η χρήση σπρέι οδηγεί σε εκπομπές σωματιδίων μεγαλύτερων από 1 μm.

7.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Το μικροπεριβαλλοντικό μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διεργασιών των οποίων δεν έχουν γίνει πλήρως κατανοητοί οι μηχανισμοί, όπως η πυρηνοποίηση και η επαναιώρηση. Επίσης μπορούν να ενσωματωθούν μηχανισμοί που περιγράφουν χημικές αντιδράσεις.

Το μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί και να εφαρμοστεί για τη μελέτη της συγκέντρωσης αέριων ρύπων. Τέλος μπορεί να συνδυαστεί με υπάρχοντα μοντέλα υπολογισμού της έκθεσης του ανθρώπου σε αιωρούμενα σωματίδια παρέχοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την εκτίμηση του κινδύνου της ανθρώπινης υγείας.

ПАРАРТНМА 1.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

1. Αναλυτής μάζας DustTrack (TSI, Inc., USA)

To DustTrack είναι ένας αναλυτής μάζας που μετράει συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανίχνευση του σκεδαζόμενου φωτός από τα σωματίδια (Morawska και Salthammer, 2003; Λαζαρίδης, 2008). Το ρεύμα αέρα με τα αιωρούμενα σωματίδια εισέρχεται στο εσωτερικό του οργάνου (Σχήμα Π1-1) και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το ένα τμήμα περνάει από φίλτρο και καθαρίζεται από τα αιωρούμενα σωματίδια, ενώ το άλλο τμήμα εισέρχεται απευθείας στο θάλαμο μέτρησης, όπου και ακτινοβολείται από ακτίνα μονοχρωματικού φωτός (Laser). Η ακτίνα αυτή παράγεται από δίοδο laser και εστιάζεται κατάλληλα πάνω στο δείγμα μέσα από ένα σύστημα φακών. Το σκεδαζόμενο φως κατευθύνεται σε έναν ανιχνευτή αφού πρώτα ανακλαστεί σε φακό επικαλυμμένο με χρυσό. Η τάση του ανιχνευτή είναι ανάλογη της μάζας των σωματιδίων στο δείγμα. Η τάση αυτή, πριν αντιστοιχιστεί στη συγκέντρωση, πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά που προκύπτει από την απόκριση του οργάνου σε γνωστή συγκέντρωση συγκεκριμένου δείγματος αιωρούμενων σωματιδίων (Arizona Test Dust, A1). Η σταθερά αυτή χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτηση της σκέδασης από το συντελεστή σκέδασης, την κατανομή μεγέθους, το σχήμα και την πυκνότητα των αιωρούμενων σωματιδίων στο εξεταζόμενο δείγμα αέρα.

Για να διατηρούνται καθαρά τα οπτικά στο εσωτερικό του οργάνου, το δείγμα αέρα που έχει περάσει από φίλτρο διοχετεύεται και αυτό στο θάλαμο μέτρησης, με τέτοιο τρόπο ώστε να περιβάλλει το εξεταζόμενο δείγμα. Έτσι μειώνεται το πλάτος του δείγματος, αποφεύγεται η επαφή των σωματιδίων με τους φακούς και μειώνεται ο χρόνος απόκρισης του οργάνου. Τέλος τοποθετώντας κατάλληλα φίλτρα στην είσοδο του οργάνου μπορεί να μετρηθεί η συγκέντρωση σωματιδίων PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ και ολικών σωματιδίων (Total suspended particles, TSP).



Σχήμα Π 1-1: Σχηματική αναπαράσταση του αναλυτή μάζας DustTrack (Πηγή Morawska και Salthammer, 2003)

2. Αναλυτής συγκέντρωσης αριθμού υπέρλεπτων σωματιδίων P-Track (TSI, Inc., USA)

Το όργανο αυτό μετράει σε πραγματικό χρόνου συγκέντρωση αριθμού υπέρλεπτων (PM₁) αιωρούμενων σωματιδίων. Τα σωματίδια, με χρήση ενσωματωμένης στο όργανο αντλίας, εισέρχονται και κατευθύνονται σε χώρο, όπου αναμειγνύονται με ατμούς αλκοόλης (Σχήμα Π1-2). Το μείγμα στη συνέχεια περνάει από θάλαμο συμπύκνωσης και η αλκοόλη συμπυκνώνεται πάνω στα σωματίδια, δημιουργώντας έτσι μεγάλες σταγόνες. Οι σταγόνες αυτές ακτινοβολούνται από δέσμη laser που έχει εστιαστεί με κατάλληλο σύστημα φακών πάνω στο δείγμα και το σκεδαζόμενο φως κατευθύνεται στη συνέχεια σε φωτοανιχνευτή. Η μεγέθυνση των σωματιδίων είναι απαραίτητη για να παραχθεί επαρκές σκεδαζόμενο φως που να μπορεί να μετρηθεί από τον φωτοανιχνευτή (Morawska και Salthammer, 2003; Λαζαρίδης, 2008).



Σχήμα Π 1-2: Αρχή λειτουργίας αναλυτή συγκέντρωσης αριθμού υπέρλεπτων σωματιδίων P-Track (Πηγή Morawska και Salthammer, 2003).

3. Αναλυτής διαφορικής κινητικότητας

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν αναλυτές διαφορικής κινητικότητας από δύο διαφορετικές εταιρείες (SMPS+C system, Grimm, Germany, και SMPS, TSI, Inc., USA). Η αρχή λειτουργίας τους είναι η ίδια, και έτσι δεν θα περιγραφούν ξεχωριστά (Σχήμα Π1-3). Με τα όργανα αυτά μπορεί να μετρηθεί η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε μία μικρή περιοχή μεγεθών (διαμέτρων), υπολογίζοντας έτσι τη φασματική κατανομή μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων (Friedlander, 2000; Hinds, 1999).

Το δείγμα αέρα, πριν εισέλθει στο όργανο, περνάει από προσκρούστη διαχωρισμού για να αποκοπούν τα μεγάλα σωματίδια που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην επεξεργασία

των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια διέρχεται από ένα διπολικό ηλεκτρικό φορτιστή που δημιουργεί θετικά και αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Τα φορτισμένα μαζί με τα ουδέτερα σωματίδια οδηγούνται με ένα ρεύμα καθαρού από σωματίδια αέρα στον διαχωριστή, που αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλινδρικούς μεταλλικούς σωλήνες/ηλεκτρόδια (το δείγμα κινείται στο χώρο ανάμεσα στους σωλήνες). Ο εξωτερικός κύλινδρος λειτουργεί ως γείωση, ενώ ο εσωτερικός φορτίζεται σε αρνητική τάση δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στους κυλίνδρους. Τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια του δείγματος εναποτίθενται στον εξωτερικό κύλινδρο, ενώ τα ουδέτερα δεν αποκλίνουν από την τροχιά τους και εξέρχονται από τον διαχωριστή. Τα θετικά φορτισμένα σωματίδια κινούνται με το ρεύμα αέρα προς το εσωτερικό ηλεκτρόδιο. Μόνο ορισμένα σωματίδια ανάλογα με την κινητική τους διάμετρο μπορούν να έχουν την κατάλληλη πορεία ώστε να διέλθουν από μικρή σχισμή στο κάτω μέρος των κυλίνδρων. Ανάλογα με την τάση περνούν από τη σχισμή διαφορετικού μεγέθους σωματίδια.

Μεταβάλλοντας την τάση επιλέγονται κάθε φορά διαφορετικού μεγέθους σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά στη συνέχεια εισέρχονται σε χώρο όπου αναμειγνύονται με ατμούς βουτανόλης. Έπειτα περνάνε από θάλαμο συμπύκνωσης, όπου η βουτανόλη συμπυκνώνεται πάνω στα σωματίδια αυξάνοντας το συνολικό μέγεθος τους. Οι σταγόνες αυτές ανιχνεύονται με φωτοανιχνευτή, που ανιχνεύει το σκεδαζόμενο πάνω στα σωματίδια φώς από δέσμη laser. Το σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό και έτσι μετριέται κάθε σωματίδιο ξεχωριστά.



Σχήμα Π 1-3: Σχηματική παράσταση αναλυτή διαφορικής κινητικότητας (Πηγή: Friedlander, 2000).

4. Αναλυτής αεροδυναμικής κινητικότητας

Το όργανο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της φασματικής κατανομής μεγέθους σωματιδίων με αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 500 nm σε πραγματικό χρόνο (Hinds, 1999; Morawska και Salthammer, 2003). Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στη μέτρηση του χρόνου κίνησης (time of flight, TOF) κάθε σωματιδίου διαφορετικής διαμέτρου (Σχήμα Π1-4). Το δείγμα αέρα με τα αιωρούμενα σωματίδια επιταχύνεται κατά τη διέλευση του από ειδικά διαμορφωμένο ακροφύσιο. Όσο αυξάνει το μέγεθος των σωματιδίων, τόσο μειώνεται η επιτάχυνση που αποκτούν. Στη συνέχεια τα σωματίδια περνάνε από 2 ακτίνες laser, που είναι τοποθετημένες σε απόσταση περίπου 100 μm μεταξύ τους. Το σκεδαζόμενο φως από τις δύο ακτίνες κατευθύνεται με τη βοήθεια ελλειπτικού καθρέπτη σε φωτοανιχνευτή. Ο ανιχνευτής είναι τοποθετημένος σε γωνία 90° σε σχέση με τον άξονα των δεσμών laser. Το σήμα στον ανιχνευτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό παλμό και σε κάθε σωματίδιο αντιστοιχούν δύο ηλεκτρικοί παλμοί από τις δύο δέσμες laser. Η χρονική διαφορά με την οποία φτάνουν οι δύο σωματιδίου και στη συνέχεια της αεροδυναμικής διαμέτρου του. Τα μικρά σωματίδια (μικρότερα από 300 nm) αποκτούν όλα περίπου την ίδια ταχύτητα και δεν μπορούν εύκολα να διαχωριστούν. Για το λόγο αυτό αθροίζονται ξεχωριστά ως σύνολο και δεν αναλύεται το φάσμα τους. Στη συγκεκριμένη έκδοση του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται όλα τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 523 nm. Σφάλματα στις μετρήσεις μπορούν να προκύψουν λόγω μη σφαιρικού σχήματος και διαφορετικής πυκνότητας των σωματιδίων. Τα σφάλματα αυτά αντιμετωπίζονται με διόρθωση των αποτελεσμάτων με ειδικό λογισμικό.

5. Μέθοδος ισοσταθμισμένων ταλαντώσεων (Vibration Microbalance Methods)

Η αρχή λειτουργίας του οργάνου στηρίζεται στην εναπόθεση λόγω σύγκρουσης ή ηλεκτροστατική κατακρήμνισης των σωματιδίων πάνω στην επιφάνεια ενός ταλαντευόμενου πιεζοηλεκτρικού κρυσταλλικού δίσκου από χαλαζία (Morawska και Salthammer, 2003). Ένα ηλεκτρόδιο είναι προσκολλημένο στο κέντρο και των δύο πλευρών του κρυσταλλικού δίσκου. Ένας πιεζοηλεκτρικός κρυσταλλικός δίσκος από χαλαζία έχει μια τυπική συχνότητα ταλάντωσης της τάξης αρκετών MHz όταν διεγείρεται με ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό σήμα. Εάν τα αιωρούμενα σωματίδια μάζας Δm εναποτίθενται σε τέτοιο κρύσταλλο, η συχνότητα ταλάντωσης αλλάζει σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta f = K_q \times Q \times t \times c_m$$

Όπου f η συχνότητα, K_q ο συντελεστής ευαισθησίας του οργάνου, c_m η συγκέντρωση μάζας, t ο χρόνος και Q η ροή του αέρα στο όργανο.



Σχήμα Π 1-4: Αρχή λειτουργίας αναλυτή αεροδυναμικής κινητικότητας (Πηγή: Morawska και Salthammer, 2003)

Η μεταβολή της συχνότητας του κρυστάλλου συγκρίνεται ηλεκτρονικά με αυτή ενός καθαρού κρυστάλλου αναφοράς. Έτσι δημιουργείται ένα σήμα ανάλογο της μεταβολής της συχνότητας και κατ' επέκταση ανάλογο της συλλεγόμενης μάζας. Η ευαισθησία των κρυστάλλων χαλαζία (K_q) είναι της τάξης των αρκετών εκατοντάδων hertz ανά μικρογραμμάριο. Με αυτήν την ευαισθησία, για τη συλλογή αρκετής σωματιδιακής ύλης ώστε να μετρηθεί συγκέντρωση μάζας 10 μg m⁻³, ο χρόνος δειγματοληψίας που απαιτείται είναι της τάξης λεπτών (minute). Συνεπώς το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η γρήγορη απόκριση του οργάνου. Ένα από τα σοβαρότερα μειονεκτήματα του οργάνου, είναι η μεταβολή στην ευαισθησία με τη φόρτιση της επιφάνειας με μάζα σωματιδιακού υλικού όταν περισσότερες από μία επιστρώσεις σωματιδίων έχουν συλλεχθεί.

Στις μετρήσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους χρησιμοποιήθηκε μια αναβαθμισμένη έκδοση του παραπάνω οργάνου (Tapered Element Oscillating Microbalance Mass Detector, TEOM) που ταλαντώνεται σε πολύ μικρότερες συχνότητες (Λαζαρίδης, 2005). Το Σχήμα Π1-5 δείχνει τα κύρια μέρη του συστήματος. Το δείγμα των αιωρούμενων σωματιδίων συλλέγεται σε ένα φίλτρο που στηρίζεται στο λεπτό άκρο ενός κωνικού ταλαντευόμενου κούφιου στοιχείου. Αυτό το στοιχείο διεγείρεται ηλεκτρικά και ταλαντώνεται στην ιδιοσυχνότητα του, που μειώνεται με την αύξηση της μάζας στο φίλτρο. Η αλλαγή στην ιδιοσυχνότητα ανιχνεύεται ηλεκτρονικά και μετατρέπεται σε μάζα. Η αύξηση της συλλεγόμενης μάζας, Δm, σχετίζεται με την αρχική συχνότητα f_i και την τελική συχνότητα f_f με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta m = K_0 (\frac{1}{f_f^2} - \frac{1}{f_i^2}).$$

Σε αυτήν την εξίσωση, K₀ είναι η σταθερά βαθμονόμησης, που είναι συγκεκριμένη για κάθε στοιχείο και δίδεται από τον κατασκευαστή του οργάνου, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί από τη φόρτιση του φίλτρου με γνωστή μάζα. Με χρήση κατάλληλου φίλτρου στην είσοδο του δείγματος μπορεί να μετρηθεί η συγκέντρωση μάζας σωματιδίων PM_{10} ή $PM_{2,5}$ ή ακόμα και PM_1 . Ο αέρας στην είσοδο θερμαίνεται στους 30 ή 50 °C για να διατηρηθεί η υγρασία σε μορφή ατμού.



Σχήμα Π 1-5: Αρχή λειτουργίας του οργάνου των ισοσταθμισμένων ταλαντώσεων (Πηγή: Morawska και Salthammer, 2003)

6. Σύγκριση των μετρήσεων οργάνων P-Track και αναλυτή διαφορικής κινητικότητας Grimm.

Οι συγκρίσεις που αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία (Chan et al., 2004; Zhu et al., 2006) των μετρήσεων του οργάνου P-Track με τους αναλυτές διαφορικής κινητικότητας της εταιρίας TSI έδειξαν ότι οι τιμές του P-Track είναι κατά κανόνα μικρότερες από τις τιμές του αναλυτή διαφορικής κινητικότητας της εταιρείας TSI. Το P-Track είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται ευρέως σε μετρήσεις εσωτερικών χώρων και παρουσιάζει ενδιαφέρον η εκτίμηση της απόδοσης του σε σύγκριση με ένα αξιόπιστο όργανο αναφοράς, όπως είναι ο αναλυτής διαφορικής κινητικότητας της εταιρείας Grimm (το όργανο αυτό θα αναφέρεται στο εξής ως Grimm). Για να συγκριθούν οι τιμές που καταγράφονται από τα δύο όργανα χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις μετρήσεις στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης διαφόρων εσωτερικών πηγών. Τα δεδομένα αυτά κατηγοριοποιήθηκαν με βάση αν υπήρχε ή όχι κάποια δραστηριότητα στο εργαστήριο. Έτσι είχαμε τις τιμές συγκέντρωσης υποβάθρου (χωρίς δραστηριότητες) και τις τιμές συγκέντρωσης λόγω της επίδρασης εσωτερικών πηγών. Το όργανο P-Track κατέγραφε τιμές ανά λεπτό, ενώ το όργανο Grimm ανά 7 λεπτά. Για να συγκριθούν οι τιμές τους υπολογίστηκε ο μέσος όρος ανά 7 λεπτά των τιμών του P-Track. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το P-Track καταγράφει μικρότερες τιμές συγκέντρωσης, τόσο στις περιόδους με δραστηριότητες, όσο και στις περιόδους χωρίς δραστηριότητες. Μόνη εξαίρεση αποτέλεσε η χρήση σπρέι, όπου εκπέμπονταν σωματίδια μεγαλύτερα από 1 μm. Τυπικές χρονοσειρές των μετρήσεων των δύο οργάνων για περιόδους χωρίς δραστηριότητες παρουσιάζονται στο Σχήμα Π1-6.



Σχήμα Π 1-6: Σύγκριση χρονοσειρών των μετρήσεων των οργάνων P-Track και Grimm.

Οι τιμές του P-Track ήταν χαμηλότερες κατά 37 ± 0,07%, αλλά ακολουθούσαν τις διακυμάνσεις των τιμών του οργάνου της Grimm. Η σύγκριση των τιμών των οργάνων για περιόδους χωρίς δραστηριότητες παρουσιάζεται στο Σχήμα Π1-7. Κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων (τηγάνισμα και καύση αρωματικών ξύλων) σε εσωτερικό χώρο (εργαστήριο) η τιμή του συντελεστή r^2 παρέμεινε υψηλή, αλλά η διαφορά στις μετρήσεις των δύο οργάνων σε σχέση με τις περιόδους χωρίς χωρίς δραστηριότητες αυξήθηκε στο 45 ± 0,05%. (Σχήμα Π1-8). Η αύξηση της διαφοράς μπορεί να εξηγηθεί με βάση το εύρος των σωματιδίων που μπορεί να μετρήσει το κάθε όργανο. Το P-Track ανιχνεύει σωματίδια με μέγεθος μεταξύ 20 και 1000 nm, ενώ το Grimm μεταξύ 5 και 1000 nm. Οι παραπάνω δραστηριότητες εκπέμπουν μεγάλο αριθμό υπέρλεπτων σωματιδίων, σημαντικό ποσοστό των οποίων είναι πρακτικά 'αόρατο' για το P-Track. Επομένως το P-Track μπορεί να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη, ιδιαίτερα για πηγές που εκπέμπουν μικρού μεγέθους σωματίδια.



Σχήμα Π 1-7: Σύγκριση τιμών των οργάνων P-Track και Grimm. για περιόδους χωρίς δραστηριότητες.



Σχήμα Π 1-8: Σύγκριση τιμών των οργάνων P-Track και Grimm.για περιόδους με ενεργές πηγές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chan, C.C., Chang, K.J., Shiao, G.M., Lin, L.Y. (2004). Personal exposure to submicrometer particles and heart rate variability in human subjects. Environmental. Health Perspectives. 112, 1063–1067.

Friedlander, S.K., 1977. Smoke, Dust and Haze: Fundamental of Aerosol Behavior. John Wiley & Sons New York.

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology. John Wiley & Sons, New York.

Morawska L., Salthammer, T., (Eds.) 2003. Indoor Environment, Airborne Particles and Settled Dust. Wiley-Vch.

Zhu, Y., Kuhn, T., Hinds, W.C., 2006. Field comparison of P-Track and condensation particle counters. Aerosol Science and Technology 40, 422-430.

Λαζαρίδης, Μ., 2005. Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας. Εκδόσεις Τζιόλα.

Λαζαρίδης, Μ., 2008. Ποιότητα αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Εκδόσεις Τζιόλα.
ПАРАРТНМА 2

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ MONTEΛΟΥ AMANpsd

Π.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φασματική κατανομή μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελεί μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τη μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης και των φυσικών χαρακτηριστικών τους και κατ' επέκταση για το προσδιορισμό της επικινδυνότητας τους για την ανθρώπινη υγεία. Η ικανότητα διείσδυσης των αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω του αναπνευστικού συστήματος είναι συνάρτηση της διαμέτρου τους (Morawska και Salthammer, 2003). Η μαθηματική συνάρτηση που έχει επικρατήσει για την περιγραφή της κατανομής μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η κανονική λογαριθμική κατανομή (Seinfeld και Pandis, 2006). Το συνεχές φάσμα μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων χωρίζεται σε συνεχόμενα τμήματα που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα εύρη διαμέτρων και χαρακτηρίζονται από τη γεωμετρική μέση διάμετρο, δηλαδή τη ρίζα του γινομένου του κατώτερου και του ανώτερου ορίου του τμήματος. Η λογαριθμική κατανομή που προκύπτει μπορεί να έχει παραπάνω από μία κορυφές που χαρακτηρίζονται από τη γεωμετρική τυπική απόκλιση (σ_g). Η περιγραφή της κατανομής μεγεθών στηρίζεται στη γνώση του αριθμού των κορυφών και των χαρακτηριστικών της κάθε κορυφής.

Ο προσδιορισμός των παραπάνω χαρακτηριστικών στηρίζεται σε πειραματικές μετρήσεις. Για να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος διαμέτρων αιωρούμενων σωματιδίων χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις όργανα που στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Το μοντέλο που περιγράφεται (Ondrácek, et al., 2009) δημιουργήθηκε λόγω της ανάγκης συγχώνευσης των δεδομένων της κατανομής μεγέθους σωματιδίων από πολλαπλά όργανα σε μια κατανομή μεγέθους σωματιδίων και στη συνέχεια της εύρεσης των χαρακτηριστικών της ενιαίας κατανομής. Ο κώδικας του μοντέλου αποτελεί συνέχεια προηγούμενων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω στο θέμα αυτό (Fiebig et al. 2005).

Π.2.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ MONTEΛΟΥ AMANpsd

Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου AMANpsd είναι:

 Ο αλγόριθμος συνδυάζει τα δεδομένα από διαφορετικά όργανα που μετράνε σε διαφορετική κλίμακα μεγέθους σωματιδίων και επιπλέον μπορεί να βασίζονται σε διαφορετικές αρχές μέτρησης.

2. Ο αλγόριθμος υποθέτει ότι η κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων είναι κανονική.

3. Ο αλγόριθμος επιτρέπει την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα και παρέχει τη δυνατότητα άμεσης προβολής των αποτελεσμάτων.

4. Για τη λειτουργία του αλγορίθμου δεν υπάρχουν απαιτήσεις υψηλής υπολογιστικής ισχύος.

5. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις παραμέτρους (βασιζόμενος στα φυσικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων) που περιγράφουν την συγχωνευμένη τελική κατανομή.

Για να ξεκινήσει η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων απαιτείται η εισαγωγή κάποιων παραμέτρων από το χρήστη και πιο συγκεκριμένα ο μέγιστος αριθμός κορυφών σε κάθε κατανομή, η πυκνότητα των σωματιδίων, ο συντελεστής σχήματος των σωματιδίων και το είδος των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις. Ο μέγιστος αριθμός των κορυφών εξαρτάται από το χώρο των μετρήσεων (εσωτερικός ή εξωτερικός χώρος, αστική ή βιομηχανική περιοχή, κλπ).

Π.2.2.1 Ενοποίηση του φάσματος μεγεθών από διαφορετικά όργανα μέτρησης

Ανάλογα με το είδος των οργάνων και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων γίνεται μετατροπή της διαμέτρου πάνω στην οποία βασίστηκε η λειτουργία του κάθε οργάνου σε διάμετρο

κινητικότητας. Στην παρούσα έκδοση υπάρχει υπορουτίνα για τη μετατροπή της αεροδυναμικής διαμέτρου σε κινητική και συνδυασμό μετρήσεων από αναλυτές διαφορικής κινητικότητας και αναλυτές αεροδυναμικής κινητικότητας. Σε νεότερη έκδοση θα προστεθεί και η δυνατότητα μετατροπής οπτικής διαμέτρου σε κινητική, επιτρέποντας έτσι και την αξιοποίηση μετρήσεων από οπτικούς αναλυτές.

Στην συνέχεια, τα δεδομένα από όλα τα όργανα μετατρέπονται στην μορφή dN/dlog(Dp). Κατόπιν, υπολογίζεται για κάθε όργανο η τιμή για την οποία το 5% των μετρήσεων είναι μικρότερο από την τιμή αυτή (βαθμός αξιοπιστίας 5%). Οι τιμές που αντιστοιχούν στο 5% αυτό αφαιρούνται από τα δεδομένα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για το βαθμό αξιοπιστίας 95%. Με τον τρόπο αυτό απομακρύνονται οι ακραίες τιμές που έχουν και τη μεγαλύτερη πιθανότητα να οφείλονται σε σφάλματα των οργάνων. Αφαιρούνται βέβαια και κάποιες τιμές που δεν οφείλονται σε σφάλματα, αλλά αυτό δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα αφού θα προστεθούν ξανά μόλις βρεθούν οι παράμετροι της κανονικής κατανομής στην οποία ανήκουν. Το επόμενο βήμα αφορά την επεξεργασία των δεδομένων που ανήκουν στις περιοχές αλληλοεπικάλυψης των διαφορετικών οργάνων. Στις περιοχές αυτές υπάρχουν δύο τιμές συγκέντρωσης που αντιστοιχούν στην ίδια τιμή διαμέτρου. Συνήθως οι τιμές αυτές διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους αφού ανήκουν στα ανώτερα και στα κατώτερα όρια μέτρησης των οργάνων όπου τα αποτελέσματα δεν είναι πάντα αξιόπιστα. Λόγω αυτού του γεγονότος, ο αλγόριθμος περιέχει μια διαδικασία που πραγματεύεται αυτές τις τιμές. Ο αλγόριθμος υπολογίζει το σταθμισμένο αριθμητικό μέσο των δύο τιμών και απορρίπτει τις αρχικές τιμές. Κάθε φορά δίδεται προτεραιότητα στην τιμή που απέχει περισσότερο από το από τα όρια της περιοχής μέτρησης του κάθε οργάνου. Μετά από την παραπάνω επεξεργασία τα δεδομένα παρουσιάζουν πιο ομαλή κατανομή χωρίς να έχουν χαθεί σημαντικές πληροφορίες.

Π.2.2.1 Εύρεση χαρακτηριστικών κανονικής λογαριθμικής κατανομής

Η περιγραφή του φάσματος μεγεθών των αιωρούμενων σωματιδίων γίνεται με το μοντέλο πολλαπλών λογαριθμικών κατανομών (Hussein 2005, Makela et al., 2000; Whitby 1978). Εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

 $\frac{dN}{d(\log(D_p) - \log(\overline{D}_{pg,i}))^2} = \sum_{ij=1}^{n} \frac{N_i}{\sqrt{2^{2i}} \overline{\phi}} \frac{N_i}{(\log(D_p) - \log(\overline{D}_{pg,i}))^2} exp \left[-\frac{(\log(D_p) - \log(\overline{D}_{pg,i}))^2}{2^{2i}} \right]$ όπου n είναν δαρίθμος τιμγ κορύφών, τη ενγκέντρωση αρίθμο σε ωματιδίων σε κάθε κορυφή, D_p η διάμετρος του σωματιδίου, D_{pg,i} η γεωμετρική μέση διάμετρος κάθε κορυφής (GMD), και σ_{g,i} γεωμετρική μέση τυπική αποκλιση κάθε κορυφής.

Το μοντέλο πολλαπλών λογαριθμικών κατανομών χρησιμοποιείται για τη προσαρμογή (fitting) των αρχικών πειραματικών δεδομένων (όχι αυτών που προέκυψαν από τη διαδικασία της ελαχιστοποίησης για την απόκτηση των αρχικών συνθηκών), κάνοντας χρήση μιας μεθόδου ελαχιστοποίησης υπό περιορισμούς.

Αρχικά για κάθε κατανομή, γίνεται μία εκτίμηση για τον αριθμό των κορυφών της κατανομής εξετάζοντας τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών. Αν το πρόσημο της διαφοράς γίνει από θετικό σε αρνητικό, η διάμετρος σημειώνεται ως πιθανή κορυφή. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι ελάχιστες τιμές. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για τη διαδικασία ελαχιστοποίησης των διαφορών των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου με τις πειραματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα το άθροισμα της συγκέντρωσης των σωματιδίων μεταξύ δύο διαδοχικών τυν αποτελεσμάτων του αλγορίθμου με τις πειραματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα το άθροισμα της συγκέντρωσης των σωματιδίων μεταξύ δύο διαδοχικών ελάχιστων τιμών αντιστοιχεί στην αρχική τιμή της συγκέντρωσης για κάθε μία από τις κορυφές ενώ οι γεωμετρικές μέσοι διάμετροι (GMDs) των κορυφών ισούνται με τις τιμές των μέγιστων. Οι αρχικές τιμές των γεωμετρικών τυπικών αποκλίσεων (GSDs) έχουν οριστεί ως 1,6. Επίσης, ο κώδικας θέτει τις οριακές συνθήκες για όλες τις παραμέτρους του μοντέλου που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία ελαχιστοποίησης ως περιορισμοί. Οι οριακές συνθήκες για τη μέση γεωμετρική διάμετρο κυμαίνονται από 1 nm έως 20 nm. Η συγκέντρωση αριθμού σωματιδίου περιορίζεται σε μη αρνητικούς αριθμούς (και κυμαίνεται από μηδέν στο άπειρο). Η γεωμετρική τυπική απόκλιση περιορίζεται σε διαστήματα από 1,2 έως 2,5. Η ελαχιστοποίηση των διαφορών γίνεται με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης υπό περιορισμούς Nelder–Mead (Lagarias

et al., 1998). Οι αρχικές συνθήκες μεταβάλλονται εντός των οριακών συνθηκών μέχρι να υπάρξει ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και στην πειραματικές τιμές.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται έλεγχος των παραμέτρων που αποκτήθηκαν τη διαδικασία ελαχιστοποίησης. Εάν οι παράμετροι δεν ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα φυσικά κριτήρια, η διαδικασία ελαχιστοποίησης ξεκινάει από την αρχή παίρνοντας τις παραμέτρους από τον προηγούμενο κύκλο ελαχιστοποίησης ως νέες αρχικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα ελέγχεται η απόσταση των GMDs δύο διαδοχικών κορυφών. Αν βρίσκονται πολύ κοντά, η κορυφή με τη μικρότερη συγκέντρωση απορρίπτεται και η εναπομένουσα κορυφή θεωρείται ότι αντιστοιχεί στη συνολική συγκέντρωση των δύο κορυφών. Η GMD και η συγκέντρωση της κορυφής αυτής αποτελούν νέες αρχικές συνθήκες για τον επόμενο κύκλο ελαχιστοποίησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να πληρούνται όλες οι προϋποθέσεις που έχουν τεθεί ως περιορισμοί και στη συνέχεια ο αλγόριθμός εξετάζει την επόμενη χρονικά κατανομή των υπαρχόντων πειραματικών δεδομένων. Αφού ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων για όλες τις μονοκόρυφων. Υπολογίζονται οι βαθμοί αξιοπιστίας 25%, 50% και 75% για τις συγκεντρώσεις GMDs και τις σ_g όλων των κατανομών. Επίσης οι παραπάνω βαθμοί αξιοπιστίας υπολογίζονται ξεχωριστά και για όλες τις μονοκόρυφες, δικόρυφες, τρικόρυφες και τετρακόρυφες κατανομές.

Το μοντέλο έχει αξιολογηθεί με πειραματικά δεδομένα που έχουν προκύψει από μετρήσεις σε τρεις Ευρωπαϊκές πόλεις (Ondrácek, et al., 2009). Παράλληλα πραγματοποιήθηκε και αξιολόγηση με τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήριο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη μελέτη των χαρακτηριστικών των πηγών εσωτερικού χώρου. Υπήρξε συμφωνία ανάμεσα στα πειραματικά δεδομένα και στα αποτελέσματα του μοντέλου, ειδικά σε περιπτώσεις ενεργών πηγών. Παρουσιάζονται στα σχήματα Π2-1 και Π2-2 χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα για μονοκόρυφη κατανομή κατά την καύση τσιγάρου και τρικόρυφη κατανομή κατά την καύση κεριού.



Σχήμα Π 2-1: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων μοντέλου για μονοκόρυφη κατανομή που προέκυψε κατά την καύση τσιγάρου.



Σχήμα Π 2-2: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων μοντέλου για τρικόρυφη κατανομή που προέκυψε κατά την καύση κεριού.

ΒΙΒΙΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fiebig, M., Stein, C., Schröder, F., Feldpausch, P., & Petzold, A. (2005). Inversion of data containing information on the aerosol particle size distribution using multiple instruments. Journal of Aerosol Science, 36, 1353–1372.

Hinds, W. C. (1999). Aerosol technology: Properties, behavior and measurements of airborne particles (2nd ed.). New York: Wiley.

Hussein, T. (2005). Indoor and outdoor aerosol particle size characterization in Helsinki. Academic dissertation, No 74, Faculty of Science of the University of Helsinki, Finland

Khlystov, A., Stanier, C., & Pandis, S. N. (2004). An algorithm for combining electrical mobility and aerodynamic size distributions data when measuring ambient aerosol. Aerosol Science and Technology, 38(S1), 229–238.

Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. SIAM Journal of Optimization, 9(1), 112–147.

Makela, J. M., Koponen, I. K., Aalto, P., & Kulmala, M. (2000). One-year data of submicron size modes of tropospheric background aerosols in southern Finland. Journal of Aerosol Science, 31, 596–611.

Morawska L., Salthammer, T., (Eds.) 2003. Indoor Environment, Airborne Particles and Settled Dust. Wiley-Vch.

Ondrácek J., Zdímal, V., Smolík, J. and Lazaridis, M. (2009). A Merging Algorithm for Aerosol Size Distribution from Multiple Instruments. Water Air Soil Pollution, 199, 219–233.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd edition. Willey-Interscience, New York Whitby, K. H. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. Atmospheric Environment, 12, 135–159.