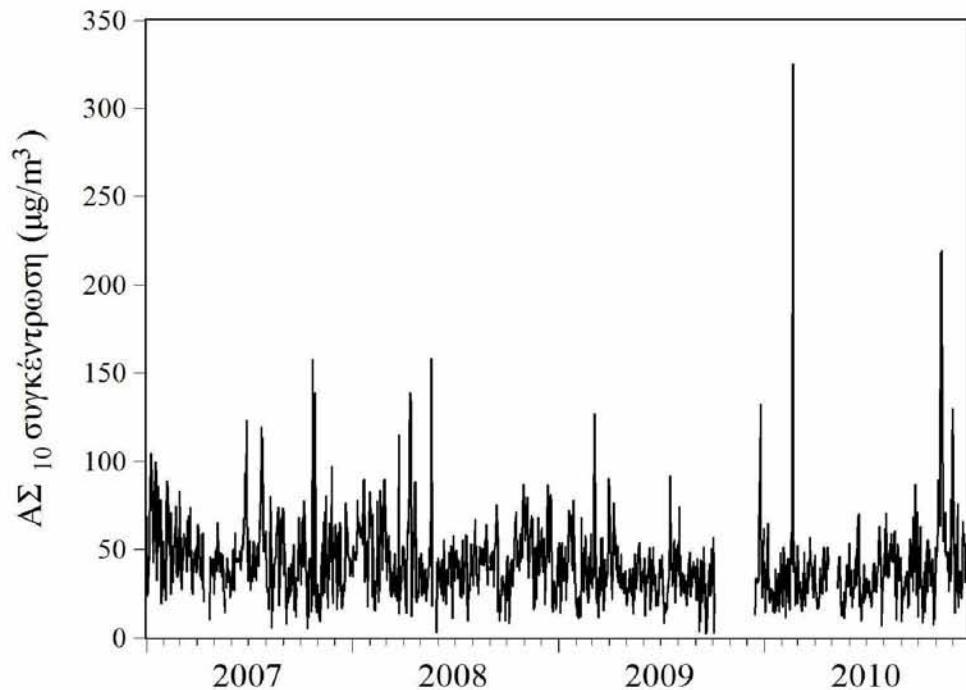


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ  
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



**Σχήμα:** Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> στην αστική περιοχή του Βόλου,  
[ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (ΑΣ<sub>10</sub>)  
ΣΤΗΝ ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ, ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ  
ΠΡΟΒΛΕΨΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥΣ**

ΝΑΣΙΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΥΤΚΟΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν σύνθετο ρύπο της ατμόσφαιρας που προκαλεί προβλήματα τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων  $ΑΣ_{10}$  στην πόλη του Βόλου, βάσει χρονοσειρών δεδομένων για την περίοδο 2007-2010 προκειμένου να διερευνηθεί η χρονική συμπεριφορά και οι μετεωρολογικές τους εξαρτήσεις, ενώ προσπάθεια έγινε επίσης να προβλεφθεί η εξέλιξή τους. Τα ερευνητικά αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα: α) το μοντέλο ARIMA (autoregressive integrated moving average) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει τη συγκέντρωση των  $ΑΣ_{10}$  της επόμενης ημέρας με υψηλή ακρίβεια, β) οι μετεωρολογικές παράμετροι θερμοκρασία και ταχύτητα ανέμου αποτελούν καλές ενδείξεις της συμπεριφοράς των συγκεντρώσεων των  $ΑΣ_{10}$ , γ) οι ωριαίες και ημερήσιες συγκεντρώσεις των  $ΑΣ_{10}$  ακολουθούν τυπική περιοδική συμπεριφορά, ενώ αντίθετα οι εποχικές (θερμή-ψυχρή περίοδος) και οι ετήσιες (2007-2010) συγκεντρώσεις των  $ΑΣ_{10}$  δεν διαφέρουν σημαντικά και δ) η περίοδος 2007-2010 είναι περίοδος συνεχούς παραβίασης της νομοθεσίας περί συγκεντρώσεων των  $ΑΣ_{10}$ . Βάσει των ερευνητικών αποτελεσμάτων είναι επιτακτική η υιοθέτηση μέτρων μείωσης των συγκεντρώσεων των  $ΑΣ_{10}$  στο Βόλο ώστε να διασφαλιστεί η ανθρώπινη υγεία.

**Λέξεις κλειδιά:** ατμοσφαιρική ρύπανση, Βόλος,  $ΑΣ_{10}$ , χρονοσειρές, χρονική συμπεριφορά, μετεωρολογικές εξαρτήσεις, μοντέλο ARIMA (autoregressive integrated moving average).

## ABSTRACT

Airborne particles are a complex air pollutant that causes problems to both human health and environment. The present diploma thesis focused on statistical analysis of the  $PM_{10}$  concentrations in the city of Volos based on time series data for the period 2007-2010 in order to investigate their temporal behavior and meteorological dependencies while an effort was made also to predict their evolution. The research results were the following: a) the ARIMA (autoregressive integrated moving average) model can be used to predict the  $PM_{10}$  concentration of the next day with high accuracy, b) the meteorological parameters of temperature and wind speed are good indications of the behavior of  $PM_{10}$  concentrations, c) the hourly and daily  $PM_{10}$  concentrations follow typical periodic behavior, while the seasonal (warm-cold period) and annual (2007-2010)  $PM_{10}$  concentrations don't differ significantly and d) the period 2007-2010 is a period of continuous violations of legislation for  $PM_{10}$  concentrations. Based on the research results, it is imperative to adopt reduction measures for  $PM_{10}$  concentrations in Volos in order to ensure human health.

**Keywords:** air pollution, Volos,  $PM_{10}$ , time series, temporal behavior, meteorological dependencies, ARIMA (autoregressive integrated moving average) model.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>6</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ .....</b>	<b>8</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>9</b>
 <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	 <b>10</b>
 <b>Α' ΜΕΡΟΣ.....</b>	 <b>12</b>
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ.....</b>	 <b>13</b>
1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση .....	13
1.1.1 Ορισμός και διαστάσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	13
1.1.2 Κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι .....	13
1.1.2.1 Οξείδια του αζώτου (NO <sub>x</sub> ) .....	14
1.1.2.2 Οξείδια του θείου (SO <sub>x</sub> ) .....	14
1.1.2.3 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).....	15
1.1.2.4 Υδρογονάνθρακες (HC).....	16
1.1.2.5 Αιωρούμενα σωματίδια .....	16
1.2 Αιωρούμενα σωματίδια .....	17
1.2.1 Ορισμός των αιωρούμενων σωματιδίων.....	17
1.2.2 Μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων .....	17
1.2.3 Πηγές προέλευσης και μηχανισμοί σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων .....	21
1.2.4 Χημικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων .....	23
1.2.5 Χρόνοι παραμονής στην ατμόσφαιρα και μηχανισμοί απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων .....	24
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....</b>	 <b>25</b>
2.1 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία .....	25
2.1.1 Επιπτώσεις βραχυχρόνιας έκθεσης και θνησιμότητα .....	25
2.1.1.1 Επιπτώσεις βραχυχρόνιας έκθεσης στο αναπνευστικό σύστημα .....	25
2.1.1.2 Επιπτώσεις βραχυχρόνιας έκθεσης στο καρδιαγγειακό σύστημα .....	25
2.1.1.3 Θνησιμότητα λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης .....	26

2.1.2 Επιπτώσεις μακροχρόνιας έκθεσης και θνησιμότητα.....	26
2.1.2.1 Επιπτώσεις μακροχρόνιας έκθεσης στο αναπνευστικό σύστημα .....	26
2.1.2.2 Επιπτώσεις μακροχρόνιας έκθεσης στο καρδιαγγειακό σύστημα .....	27
2.1.2.3 Θνησιμότητα λόγω μακροχρόνιας έκθεσης.....	27
2.1.3 Συμπεράσματα επιπτώσεων βραχυχρόνιας και μακροχρόνιας έκθεσης και θνησιμότητας .....	28
2.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον .....	28
2.2.1 Επιπτώσεις στη βλάστηση .....	28
2.2.1.1 Άμεσες επιπτώσεις στη βλάστηση.....	28
2.2.1.2 Έμμεσες επιπτώσεις στη βλάστηση .....	31
2.2.2 Επιπτώσεις στα υλικά .....	35
2.2.3 Επιπτώσεις στην ορατότητα .....	37
2.2.4 Επιπτώσεις στο κλίμα .....	40
<b>Β' ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>45</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΟΛΟΣ: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ .....</b>	<b>46</b>
3.1 Γενικά .....	46
3.2 Ατμοσφαιρική ρύπανση στο Βόλο .....	47
3.2.1 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) .....	47
3.2.2 Διοξείδιο του θείου (SO <sub>2</sub> ) .....	47
3.2.3 Διοξείδιο του αζώτου (NO <sub>2</sub> ).....	48
3.2.4 Όζον (O <sub>3</sub> ).....	49
3.2.5 Αιωρούμενα σωματίδια .....	50
3.3 Πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο .....	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΒΟΛΟ .....</b>	<b>54</b>
4.1 Απόκτηση δεδομένων .....	54
4.2 Στατιστική ανάλυση.....	55
4.2.1 Ανάλυση σε επίπεδο ωρών .....	55
4.2.2 Κατασκευή μοντέλου πρόβλεψης για τη συγκέντρωση ΑΣ <sub>10</sub> της επόμενης ημέρας – Ανάλυση σε επίπεδο ημερών .....	57
4.2.2.1 Τα οφέλη κατασκευής ενός μοντέλου πρόβλεψης και οι ενυπαρχουσες δυσκολίες .....	57

4.2.2.2 Η μεθοδολογία ARIMA των Box και Jenkins.....	59
4.2.2.3 Κατασκευή μοντέλου ARIMA για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης ΑΣ <sub>10</sub> της επόμενης ημέρας .....	63
4.2.2.4 Ανάλυση σε επίπεδο ημερών .....	74
4.2.3 Ανάλυση της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων στην ημερήσια συγκέντρωση ΑΣ <sub>10</sub> .....	79
4.2.4 Ανάλυση σε επίπεδο εποχικών περιόδων.....	85
4.2.5 Ανάλυση σε επίπεδο ετών.....	87
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΒΟΛΟ.....</b>	<b>90</b>
5.1 Γενικά .....	90
5.2 Μελλοντικές εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων .....	91
5.3 Δράσεις περί της κυκλοφορίας των οχημάτων .....	92
5.3.1 Έκπλυση της σκόνης από τους βασικούς δρόμους της πόλης.....	92
5.3.2 Δενδροφύτευση κατάλληλων φυτικών ειδών .....	93
5.3.3 Προώθηση των μέσων μαζικής μεταφοράς και των εναλλακτικών μορφών μετακίνησης .....	95
5.4 Άλλες δράσεις.....	96
5.4.1 Διαρκής έλεγχος των περιβαλλοντικών όρων της τσιμεντοβιομηχανίας ΑΓΕΤ .....	96
5.4.2 Ενημέρωση και αστυνόμευση για αποτροπή ανεξέλεγκτης κάυσης απορριμμάτων .....	97
<b>Γ' ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>98</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>99</b>
6.1 Συμπεράσματα .....	99
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	101
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>102</b>

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

<b>Πίνακας 4.1</b> Έλεγχος Box-Ljung για τον εντοπισμό αυτοσυσχέτισης των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	70
<b>Πίνακας 4.2</b> Παραβίαση του νομικού πλαισίου για τις ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> κατά την περίοδο 2007-2010, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	76
<b>Πίνακας 4.3</b> ANOVA για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> μέσα στην εβδομάδα, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	77
<b>Πίνακας 4.4</b> Σύγκριση Bonferroni για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> μέσα στην εβδομάδα, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	78
<b>Πίνακας 4.5</b> ANOVA για τις μέσες εποχικές συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	86
<b>Πίνακας 4.6</b> Παραβίαση του νομικού πλαισίου για τις ετήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> κατά την περίοδο 2007-2010, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	88
<b>Πίνακας 4.7</b> ANOVA για τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	89

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 1.1</b> Θεωρητικές κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση το μέγεθός τους και τους μηχανισμούς σχηματισμού τους, [ΠΗΓΗ: U.S. EPA, 2004] .....	18
<b>Σχήμα 2.1</b> Προσκολλημένα αιωρούμενα σωματίδια σε τμήμα φύλλου, [ΠΗΓΗ: Ottele et al., 2010] .....	29
<b>Σχήμα 2.2</b> Διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας ψευδαργύρου σε 80% σχετική υγρασία (μήκος σημαδιού = 25 $\mu\text{m}$ ): (Αριστερά) Μη ρυπασμένη επιφάνεια, (Δεξιά) Ρυπασμένη επιφάνεια από ιπτάμενη τέφρα, [ΠΗΓΗ: Askey et al., 1993].....	36
<b>Σχήμα 2.3</b> Μείωση ορατότητας για διάφορες τιμές συγκέντρωσης λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων: (a) 7,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (b) 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (c) 21,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , (d) 65,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , [ΠΗΓΗ: Malm, 1999] .....	38
<b>Σχήμα 2.4</b> Μέση αντανάκλαση ηλιακής ακτινοβολίας από τα νέφη της ατμόσφαιρας κατά την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου 1997, [ΠΗΓΗ: Kaufman et al., 2002].....	44
<b>Σχήμα 4.1</b> Ωριαία κατανομή των συγκεντρώσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ] .....	56
<b>Σχήμα 4.2</b> Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ] .....	63
<b>Σχήμα 4.3</b> Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις $\text{A}\Sigma_{10}$ (Με συμπλήρωση κενών τιμών), [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ] .....	64
<b>Σχήμα 4.4</b> Εύρεση του κατάλληλου $\lambda$ για τον μετασχηματισμό των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο πρόβλεψης, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ].....	65
<b>Σχήμα 4.5</b> Μετασχηματισμένες ημερήσιες συγκεντρώσεις $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ]. ....	65
<b>Σχήμα 4.6</b> Αυτοσυσχέτιση των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ] .....	66
<b>Σχήμα 4.7</b> Μερική αυτοσυσχέτιση των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ] .....	67
<b>Σχήμα 4.8</b> Αυτοσυσχέτιση (Πρώτες διαφορές) των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ]. ....	68
<b>Σχήμα 4.9</b> Μερική αυτοσυσχέτιση (Πρώτες διαφορές) των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ]. ....	69
<b>Σχήμα 4.10</b> Αυτοσυσχέτιση των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων $\text{A}\Sigma_{10}$ της ΔΕΥΑΜΒ].....	70

<b>Σχήμα 4.11</b> Ιστόγραμμα των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].....	71
<b>Σχήμα 4.12</b> Έλεγχος διακύμανσης των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].....	71
<b>Σχήμα 4.13</b> Εκτίμηση της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> για τις μετασχηματισμένες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	72
<b>Σχήμα 4.14</b> Εκτίμηση της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> για τις ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	73
<b>Σχήμα 4.15</b> Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	75
<b>Σχήμα 4.16</b> Ημερήσια κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	76
<b>Σχήμα 4.17</b> Μέση ημερήσια θερμοκρασία, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].....	80
<b>Σχήμα 4.18</b> Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].....	80
<b>Σχήμα 4.19</b> Ημερήσια βροχόπτωση, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].....	81
<b>Σχήμα 4.20</b> Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> και των ημερήσιων υπολοίπων θερμοκρασίας ARIMA (1,1,2), [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].....	82
<b>Σχήμα 4.21</b> Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων ταχύτητας ανέμου ARIMA (2,1,1) και των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].....	83
<b>Σχήμα 4.22</b> Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων βροχόπτωσης ARIMA (1,0,0) και των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)x(1,0,0) <sub>7</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών] .....	84
<b>Σχήμα 4.23</b> Εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	85
<b>Σχήμα 4.24</b> Ετήσια κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ <sub>10</sub> , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ <sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ] .....	88



**ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ**

**AIC:** Akaike information criterion

**ANOVA:** Analysis of variance

**ARIMA:** Autoregressive integrated moving average

**ΑΣ:** Αιωρούμενα σωματίδια

**ΔΕΥΑΜΒ:** Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου

**PM<sub>10</sub> – ΑΣ<sub>10</sub>:** Particulate Matter <sub>10</sub> – Αιωρούμενα Σωματίδια <sub>10</sub>, Τα αιωρούμενα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου κατά μέγεθος διαλογής το οποίο συγκρατεί το 50% των αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10μm.

**PM<sub>2,5</sub> – ΑΣ<sub>2,5</sub>:** Particulate Matter <sub>2,5</sub> – Αιωρούμενα Σωματίδια <sub>2,5</sub>, Τα αιωρούμενα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου κατά μέγεθος διαλογής το οποίο συγκρατεί το 50% των αιωρούμενων σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2,5 μm.

**SBIC:** Schwartz Bayesian information criterion

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Κούγκολου Αθανάσιου, Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τρέχοντος Προέδρου του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, προς τον οποίο εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες για την ανάθεση του πολύ ενδιαφέροντος από ερευνητικής σκοπιάς θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους: α) Τσιρίδη Βασίλειο, Χημικό Μηχανικό και μέλος του ερευνητικού προσωπικού του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης για την παροχή βοήθειας κατά την έναρξη της συγγραφής του ερευνητικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας και β) Πρώϊα Γεώργιο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και μέλος της Γραμματείας του Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης για την παροχή συμβουλών και βιβλιογραφικής βοήθειας κατά την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδονται στον Κανταρτζή Στέφανο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και υπεύθυνο για την λειτουργία του σταθμού ελέγχου ποιότητας ατμόσφαιρας της ΔΕΥΑΜΒ (Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου) για την εχέμυθη παροχή των διαθέσιμων στοιχείων του σταθμού για τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> της περιόδου 2007-2010 χωρίς τις οποίες θα ήταν αδύνατη η συγγραφή του ερευνητικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου Αλέξανδρο και Μαρία που για ένα εξάμηνο με στήριξαν ηθικά προκειμένου να διεκπεραιωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία με τις καλύτερες προοπτικές.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν βασικό ατμοσφαιρικό ρύπο που υποβαθμίζει την ποιότητα της ατμόσφαιρας πολλών αστικών περιοχών. Αυτό ακριβώς το φαινόμενο παρατηρείται και στην περίπτωση του Βόλου, όπου τα όρια ποιότητας ατμόσφαιρας συνεχώς παραβιάζονται λόγω των αυξημένων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων, γεγονός που συνιστά κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά κατά βάση τις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων  $AS_{10}$  στο Βόλο και σκοπός της είναι η στατιστική ανάλυση των χρονοσειρών αυτών, προκειμένου να διερευνηθεί η χρονική τους συμπεριφορά και οι μετεωρολογικές τους εξαρτήσεις και να προβλεφθεί η εξέλιξή τους. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  από τον σταθμό της ΔΕΥΑΜΒ (Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου) για τη περίοδο 2007-2010. Η διερεύνηση της χρονικής συμπεριφοράς επιδιώκεται όπου είναι εφικτό με έλεγχο στατιστικών υποθέσεων (ANOVA) ώστε τα πορίσματα να έχουν υψηλό επιστημονικό ενδιαφέρον. Στο πλαίσιο της χρονικής συμπεριφοράς διερευνάται και η υπέρβαση ή μη των ορίων ποιότητας της ατμόσφαιρας κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2007-2010, ενώ όσον αφορά τις μετεωρολογικές εξαρτήσεις, διερευνάται μεταξύ άλλων η χρονική υστέρηση που πιθανώς ενυπάρχει στην αύξηση ή μείωση της συγκέντρωσης των  $AS_{10}$  λόγω αλλαγής της συμπεριφοράς της εκάστοτε εξεταζόμενης μετεωρολογικής παραμέτρου. Τέλος, το ερέθισμα για κατασκευή μοντέλου πρόβλεψης της συγκέντρωσης των  $AS_{10}$  μέσω της μεθοδολογίας ARIMA δόθηκε έπειτα από: α) τις θετικές εντυπώσεις από τη βιβλιογραφία για τη δύναμη του μοντέλου ARIMA να προβλέπει βραχυπρόθεσμα την ατμοσφαιρική ρύπανση, β) την ιδιότητα που έχει οι υπολειμματικές του τιμές να είναι ανεξάρτητες πράγμα που σημαίνει ότι η ANOVA είναι πλέον εφαρμόσιμη σε χρονολογικές σειρές όπως είναι αυτή των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  στο Βόλο και γ) τη δυνατότητα που δίνει η μεθοδολογία ARIMA να προετοιμάζει το έδαφος για τη διενέργεια ετεροσυσχετίσεων στη παρούσα περίπτωση μεταξύ της εκάστοτε μετεωρολογικής παραμέτρου και της συγκέντρωσης των  $AS_{10}$ .

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από τρία μέρη. Το Α' μέρος αποτελείται από το θεωρητικό υπόβαθρο περί των αιωρούμενων σωματιδίων. Ειδικότερα:

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται αρχικά αναφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στους κυριότερους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Το κεφάλαιο στη συνέχεια εξειδικεύεται στα αιωρούμενα σωματίδια και συγκεκριμένα στις πηγές προέλευσής τους, στους

μηχανισμούς σχηματισμού τους, στο χημικό προφίλ τους, στο χρόνο παραμονής και στους μηχανισμούς απομάκρυνσής τους από την ατμόσφαιρα.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** αναφέρονται οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα όσον αφορά στην ανθρώπινη υγεία γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις τόσο έπειτα από βραχυχρόνια όσο έπειτα και από μακροχρόνια έκθεση, ενώ όσον αφορά στο περιβάλλον γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις στη βλάστηση, στα υλικά, στην ορατότητα και στο κλιματικό σύστημα.

Το Β' μέρος ασχολείται με τα αιωρούμενα σωματίδια στο Βόλο. Ειδικότερα:

Στο **τρίτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η κατάσταση της ποιότητας της ατμόσφαιρας του Βόλου, όπου και διαπιστώνεται το κυρίαρχο πρόβλημα επιβάρυνσης από τα αιωρούμενα σωματίδια ενώ γίνεται αναφορά και στις πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων, όπως αυτές προέκυψαν από το ερευνητικό έργο των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008).

Το **τέταρτο κεφάλαιο** αποτελεί τον κορμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχοντας καθαρά ερευνητικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα εξυπηρετεί τον προαναφερθέντα σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας και διαρθρώνεται ανάλογα προς αυτόν. Γίνεται ανάλυση των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  σε επίπεδο ωρών, ημερών, εποχικών περιόδων και ετών, ενώ ταυτόχρονα διερευνάται η υπέρβαση ή μη των ορίων ποιότητας της ατμόσφαιρας κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2007-2010. Επιπροσθέτως, γίνεται ετεροσυσχέτιση των μετεωρολογικών παραμέτρων με τις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  για χρονική εξέταση της επίδρασης της εξεταζόμενης μετεωρολογικής παραμέτρου στη συγκέντρωση των  $AS_{10}$  και γίνεται εκτενής αναφορά στη διαδικασία κατασκευής του μοντέλου πρόβλεψης ARIMA για τη συγκέντρωση των  $AS_{10}$  της επόμενης ημέρας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναφέρονται ενδεικτικές δράσεις μείωσης των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  στο Βόλο, οι οποίες βασίζονται εν πολλοίς στο ερευνητικό έργο των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) και αφορούν κατά προτεραιότητα α) στην κυκλοφορία των οχημάτων (έκπλυση της σκόνης από τους βασικούς δρόμους της πόλης, δενδροφύτευση κατάλληλων φυτικών ειδών και στήριξη των μέσων μαζικής μεταφοράς και των εναλλακτικών μορφών μετακίνησης), β) στον έλεγχο των περιβαλλοντικών όρων της τσιμεντοβιομηχανίας ΑΓΕΤ και γ) στην αποτροπή της ανοικτής καύσης των απορριμμάτων.

Το Γ' μέρος αποτελείται από το **έκτο κεφάλαιο**, που συνοψίζει τις διαπιστώσεις του Β' Μέρους και κυρίως του ερευνητικού τμήματος αυτού και περιλαμβάνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα των αιωρούμενων σωματιδίων του Βόλου.

## **Α' ΜΕΡΟΣ**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ**

### 1.1 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

#### *1.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ*

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αφορά την κατάσταση εκείνη κατά την οποία στην ατμόσφαιρα υπάρχουν ουσίες σε συγκεντρώσεις αρκετά υψηλότερες από τα φυσιολογικά επίπεδα του περιβάλλοντος, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν μετρήσιμα αποτελέσματα στον άνθρωπο, στα ζώα, στη βλάστηση ή και στα υλικά. Ο όρος ουσίες αφορά κάθε φυσική ή ανθρωπογενή χημική ένωση ή χημικό στοιχείο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα σε αέρια, υγρή ή στερεά μορφή (Καραθανάσης, 2006).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν είναι ένα φαινόμενο που αφορά μόνο τις περιοχές από τις οποίες κυρίως προκαλείται, αλλά είναι σε θέση να επηρεάζει δυσμενώς και ευρύτερες γεωγραφικές ενότητες. Κατά τον Κούγκολο (2007), οι χωρικές διαστάσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ως εξής:

- Φαινόμενα με παγκόσμια διάσταση. Τέτοια φαινόμενα αποτελούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η τρύπα του όζοντος.
- Φαινόμενα με διεθνείς - διακρατικές διαστάσεις. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι η όξινη βροχή.
- Φαινόμενα με τοπικές – περιφερειακές διαστάσεις. Χαρακτηριστικά τέτοια φαινόμενα αποτελούν οι καπνομίχλες. Συνηθίζεται τα φαινόμενα που έχουν ακτίνα επιρροής έως 5 km να χαρακτηρίζονται τοπικής κλίμακας, έως 50 km να χαρακτηρίζονται αστικής κλίμακας, ενώ όταν οι διαστάσεις είναι μεγαλύτερες χαρακτηρίζονται περιφερειακής κλίμακας.
- Ρύπανση εργασιακού χώρου (συνήθως του εσωτερικού εργασιακού χώρου).
- Ρύπανση οικιακού χώρου.

#### *1.1.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ*

Σύμφωνα με τον Κούγκολο (2007), οι ουσίες που βρίσκονται σε υπερβολική συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα, έτσι ώστε να καθίστανται τοξικές, καλούνται αέριοι ρύποι, με τους κυριότερους από αυτούς να είναι:

- Οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ).
- Οξείδια του θείου ( $\text{SO}_x$ ).

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO).
- Υδρογονάνθρακες (HC).
- Αιωρούμενα σωματίδια.

#### 1.1.2.1 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ( $\text{NO}_x$ )

Τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), αναφέρονται γενικά σε όλα τα οξείδιά του, ωστόσο στην περίπτωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αυτά που είναι τα πλέον ενδιαφέροντα είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ), καθότι αποτελούν από μόνα τους αέριους ρύπους, αλλά και γιατί συμβάλλουν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους. Το μονοξείδιο του αζώτου (NO), που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, προέρχεται κυρίως από τις καύσεις σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι οι καύσεις που συμβαίνουν στις μηχανές των αυτοκινήτων, ενώ το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, προέρχεται κυρίως δευτερογενώς, από την οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO). Οι μηχανισμοί απομάκρυνσής των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) από την ατμόσφαιρα, αφορούν κυρίως στην ξηρή εναπόθεσή τους, αλλά και στην υγρή εναπόθεσή τους, π.χ. μέσω της όξινης βροχής, την οποία και δημιουργούν (Καραθανάσης, 2006).

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι αέριο άχρωμο και άοσμο, ενώ το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) είναι ερυθροκάστανο αέριο με δριμεία οσμή. Και τα δυο αέρια είναι τοξικά και επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, με το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) να είναι πιο τοξικό και σε συγκεντρώσεις πάνω από 150 ppm προκαλεί το θάνατο (Κούγκολος, 2007).

#### 1.1.2.2 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ ( $\text{SO}_x$ )

Από τα οξείδια του θείου ( $\text{SO}_x$ ), ο πλέον κυρίαρχος ατμοσφαιρικός ρύπος είναι το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ). Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) προέρχεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από φυσικές πηγές, π.χ. ηφαίστεια, όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, με χαρακτηριστική την καύση άνθρακα, καθώς ο άνθρακας περιέχει θείο σε ποσοστό 0,2 - 7% . Θεωρητικά, το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) παράγεται από κάθε καύση μέσου που περιέχει θείο (Perez-Bendito and Rubio, 1999).

Η απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) από την ατμόσφαιρα γίνεται με τους παρακάτω τρόπους (Κούγκολος, 2007):

- Διάλυση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στο νερό της βροχής.
- Φωτοοξείδωση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ).
- Απευθείας απόθεση του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στο έδαφος, ή προσρόφησή του από το έδαφος και τα φύλλα των φυτών, ή απόθεσή του στο έδαφος μέσω πρόσμιξής του σε αιωρούμενα σωματίδια.

Επισημαίνεται ότι πλέον των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), δημιουργεί την όξινη βροχή.

Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) είναι ένα ερεθιστικό και τοξικό αέριο. Σε συγκεντρώσεις των 3 ppm, η οσμή του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) γίνεται εύκολα αντιληπτή. Σε συγκεντρώσεις άνω των 8 ppm το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) ερεθίζει τα μάτια και τον λαιμό και προκαλεί βήχα. Ακόμη και μικρή έκθεση σε συγκεντρώσεις άνω των 400 ppm μπορεί να είναι θανατηφόρα (Shakhashiri, 1989).

#### 1.1.2.3 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ( $\text{CO}$ )

Το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) της ατμόσφαιρας, προέρχεται κατά βάση από φυσικές πηγές και λιγότερο από ανθρωπογενείς πηγές. Συγκεκριμένα το 90% προέρχεται από φυσικές πηγές με κυρίαρχη την οξείδωση του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) λόγω αποσύνθεσης οργανικών ενώσεων σε βάλτους, ορυζώνες και τροπικές περιοχές και το υπόλοιπο 10% προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές και κυρίως από τα αυτοκίνητα. Εντούτοις, οι ανθρωπογενείς πηγές παρά τη μικρή συνεισφορά τους στη ρύπανση από μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) στην ατμόσφαιρα, ουσιαστικά είναι πιο κρίσιμες, διότι ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) που προέρχεται από τις φυσικές πηγές διαχέεται παγκοσμίως, το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) που προέρχεται από τις ανθρωπογενείς πηγές, συγκεντρώνεται σε μικρές περιοχές, όπου η συγκέντρωση είναι 50 – 100 φορές μεγαλύτερη από τα τυπικά παγκόσμια επίπεδα (Perez-Bendito and Rubio, 1999).

Η απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα γίνεται με τρόπους όπως (Κούγκολος, 2007):

- Οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) σε διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) τόσο από άτομα του οξυγόνου όσο και από το όζον ( $\text{O}_3$ ) και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ).
- Δέσμευση του μονοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) από μικροοργανισμούς του εδάφους.



Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι άχρωμο, άγευστο και άοσμο. Σε συγκέντρωση μεγαλύτερη των 100 ppm είναι θανατηφόρο. Η τοξική του επίδραση οφείλεται στο ότι περιορίζει την οξυγόνωση των κυττάρων προκαλώντας ανοξαιμία, η οποία αν παραταθεί επιφέρει το θάνατο (Κούγκολος, 2007).

#### 1.1.2.4 ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (HC)

Κατά τον Robinson (1978), οι υδρογονάνθρακες (HC) προέρχονται κυρίως από φυσικές πηγές, με το βασικό ρόλο να τον διαδραματίζει η βλάστηση, αλλά εκλύονται και από ανθρωπογενείς πηγές, όπου βασικό ρόλο διαδραματίζουν η διύλιση του πετρελαίου, οι καύσεις πετρελαίου, λιγνίτη, κ.ά. Όπως αναφέρει ο ίδιος, αν και η συμμετοχή των ανθρωπογενών πηγών στους υδρογονάνθρακες (HC) της ατμόσφαιρας είναι περιορισμένη, σε ορισμένες περιοχές σε σχέση με τα παγκόσμια επίπεδα είναι κατά πολύ συγκρίσιμη.

Σύμφωνα με τον Κούγκολο (2007), οι υδρογονάνθρακες (HC) συμμετέχουν σε φωτοχημικές αντιδράσεις, ενώ μερικοί από αυτούς, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι προέρχονται από τη βιομηχανία πετρελαίου, τη βιομηχανία άνθρακα, την καύση απορριμμάτων κ.ά., είναι πολύ επικίνδυνοι, αφού έχουν μεταλλαξιογόνες και καρκινογόνες ιδιότητες.

Κατά τον Webber (1986), από τους ενεργούς μηχανισμούς απομάκρυνσης των υδρογονανθράκων (HC) από την ατμόσφαιρα, είναι η ξηρή και η υγρή εναπόθεση. Ωστόσο, όπως αναφέρει ο ίδιος, η απομάκρυνση μέσω της ξηρής εναπόθεσης είναι η κύρια οδός τουλάχιστον όσον αφορά στην απομάκρυνση υδρογονανθράκων (HC) με υψηλό μοριακό βάρος.

#### 1.1.2.5 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν και αυτά έναν από τους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους και μάλιστα μπορεί να ισχυριστεί κάποιος ότι είναι ο πλέον σύνθετος ρύπος, αφού μπορεί να περιέχει συστατικά που να είναι ακόμη και αποτελέσματα αντιδράσεων των άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι ιδιότητές τους παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

## 1.2 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

### *1.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ*

Τα αιωρούμενα σωματίδια αφορούν υγρά και στερεά σωματίδια, τα οποία βρίσκονται σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα. Πολλές φορές ο όρος αιωρούμενα σωματίδια συμπίπτει στη βιβλιογραφία με τον όρο αερολύματα, ωστόσο μεταξύ των δυο υπάρχει μια σημαντική διαφορά. Τα αερολύματα περιλαμβάνουν πλέον των αιωρούμενων σωματιδίων και το μέσο στο οποίο τα σωματίδια αιωρούνται, δηλαδή τον αέρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν μέγεθος το οποίο ποικίλει από 0,001  $\mu\text{m}$  έως 100  $\mu\text{m}$  και συνεπώς το μέγεθός τους ξεκινά σχεδόν κοντά στα μοριακά μεγέθη και φτάνει έως σχεδόν τα μακροσκοπικά μεγέθη. Τα σωματίδια που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο των 100  $\mu\text{m}$  δεν μένουν για αρκετό χρόνο στην ατμόσφαιρα έτσι ώστε να χαρακτηριστούν ως αιωρούμενα σωματίδια (Lazaridis, 2011).

### *1.2.2 ΜΕΤΕΘΟΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ*

Οι διάφοροι τρόποι προσέγγισης των κατηγοριών των αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι εξής (U.S. EPA, 2004):

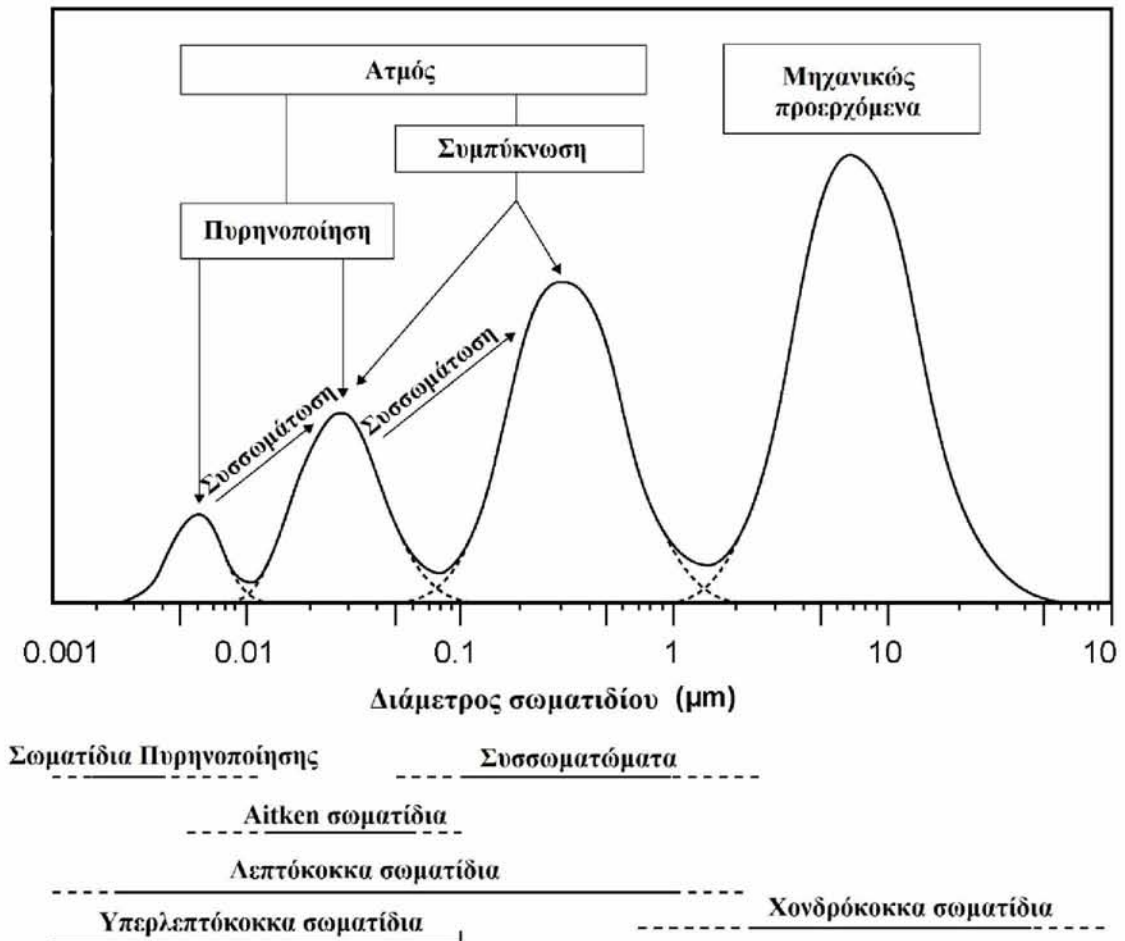
- Βάσει των παρατηρούμενων κατανομών μεγεθών και των μηχανισμών σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων.
- Βάσει της εισόδου των αιωρούμενων σωματιδίων στα διάφορα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος.
- Βάσει του τρόπου μέτρησης της συσκευής των αιωρούμενων σωματιδίων.

Σχετικά με τις παρατηρούμενες κατανομές μεγεθών και τους μηχανισμούς σχηματισμού των αιωρούμενων σωματιδίων, υπάρχουν οι εξής κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.1 (U.S. EPA, 2004, Lazaridis, 2011):

- Λεπτόκοκκα σωματίδια. Είναι τα σωματίδια με μέγεθος  $0,001 \mu\text{m} < d < 1 - 3 \mu\text{m}$ . Τέτοια σωματίδια είναι τα: α) Σωματίδια πυρηνοποίησης. Είναι σωματίδια με μέγεθος  $0,001 \mu\text{m} < d < 0,01 \mu\text{m}$  και τα οποία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω διαδικασιών πυρηνοποίησης, β) Aitken σωματίδια. Είναι σωματίδια με μέγεθος  $0,01 \mu\text{m} < d < 0,1 \mu\text{m}$ . Σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω διαδικασιών πυρηνοποίησης και συμπύκνωσης, αλλά και

μέσω διαδικασιών συσσωμάτωσης μικρότερων σωματιδίων, γ) Συσσωματώματα. Είναι σωματίδια με μέγεθος  $0,1 \mu\text{m} < d < 1 - 3 \mu\text{m}$ . Τα σωματίδια σ' αυτή την κατηγορία σχηματίζονται με βάση διαδικασίες συμπίκνωσης αλλά και μέσω διαδικασιών συσσωμάτωσης μικρότερων σωματιδίων. Σημαντικό είναι πως οι μηχανισμοί απομάκρυνσης των συσσωματωμάτων είναι πολύ αργοί πράγμα που οδηγεί στην συσσώρευσή τους στην ατμόσφαιρα. Επισημαίνεται πως τα α) Σωματίδια πυρηνοποίησης και τα β) Αϊτκεν σωματίδια, αποκαλούνται και υπερλεπτόκοκκα σωματίδια.

- Χονδρόκοκκα σωματίδια. Είναι τα σωματίδια με μέγεθος  $1 - 3 \mu\text{m} < d < 100 \mu\text{m}$ .



**Σχήμα 1.1** Θεωρητικές κατηγορίες των αιωρούμενων σωματιδίων με βάση το μέγεθός τους και τους μηχανισμούς σχηματισμού τους, [ΠΗΓΗ: U.S. EPA, 2004].

Σχετικά με την είσοδο των αιωρούμενων σωματιδίων στα διάφορα τμήματα του αναπνευστικού συστήματος, υπάρχουν οι εξής κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων (U.S. EPA, 2004):

- Εισπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια. Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που μέσω του στόματος και της μύτης μπορούν και εισέρχονται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα.
- Θωρακικά αιωρούμενα σωματίδια. Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που μέσω του στόματος και της μύτης, μπορούν στη συνέχεια να περάσουν τον λάρυγγα και ενδεχομένως να φτάσουν στους πνεύμονες.
- Αναπνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια. Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που μέσω του στόματος και της μύτης, μπορούν στη συνέχεια να περάσουν τον λάρυγγα και είναι τα πλέον πιθανά να φτάσουν στους πνεύμονες.

Σχετικά με τον τρόπο μέτρησης της συσκευής των αιωρούμενων σωματιδίων, υπάρχουν οι εξής κατηγορίες αιωρούμενων σωματιδίων (Wilson et al., 2002, U.S. EPA, 2004):

- ΑΣ<sub>10</sub> (PM<sub>10</sub>). Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που συλλέγονται από συσκευή μέτρησης η οποία συλλέγει το 50% των σωματιδίων με μέγεθος 10 μm. Επισημαίνεται ότι η συσκευή συλλέγει στην περίπτωση των ΑΣ<sub>10</sub> και σωματίδια με μικρότερο αλλά και μεγαλύτερο μέγεθος από τα 10 μm. Συγκεκριμένα βάσει θεωρητικών καμπυλών συλλογής, όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος των σωματιδίων από τα 10 μm τόσο αυξάνεται το ποσοστό συλλογής των σωματιδίων αυτών από τη συσκευή (>50%). Ωστόσο, η συσκευή συλλέγει και σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους από τα 10 μm, αλλά στη περίπτωση αυτή όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος των σωματιδίων από τα 10 μm, τόσο μειώνεται το ποσοστό συλλογής των σωματιδίων αυτών από τη συσκευή (<50%). Έτσι προκύπτει ότι συλλέγονται μερικά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 10 μm, ότι συλλέγεται το 50% των σωματιδίων με μέγεθος 10 μm και ότι δεν συλλέγονται όλα τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο των 10 μm.
- ΑΣ<sub>2,5</sub> (PM<sub>2,5</sub>). Είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που συλλέγονται από συσκευή μέτρησης η οποία συλλέγει το 50% των σωματιδίων με μέγεθος 2,5 μm. Επισημαίνεται ότι η συσκευή συλλέγει στην περίπτωση των ΑΣ<sub>2,5</sub> και σωματίδια με μικρότερο αλλά και μεγαλύτερο μέγεθος από τα 2,5 μm.

Συγκεκριμένα βάσει θεωρητικών καμπυλών συλλογής, όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος των σωματιδίων από τα 2,5  $\mu\text{m}$ , τόσο αυξάνεται το ποσοστό συλλογής των σωματιδίων αυτών από τη συσκευή (>50%). Ωστόσο, η συσκευή συλλέγει και σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους από τα 2,5  $\mu\text{m}$ , αλλά στη περίπτωση αυτή, όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος των σωματιδίων από τα 2,5  $\mu\text{m}$ , τόσο μειώνεται το ποσοστό συλλογής των σωματιδίων αυτών από τη συσκευή (<50%). Έτσι προκύπτει ότι συλλέγονται μερικά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο των 2,5  $\mu\text{m}$ , ότι συλλέγεται το 50% των σωματιδίων με μέγεθος 2,5  $\mu\text{m}$  και ότι δεν συλλέγονται όλα τα σωματίδια με μέγεθος μικρότερο των 2,5  $\mu\text{m}$ .

Στην περίπτωση της Ελλάδας, οι ορισμοί που δίνονται στην πράξη του Υπουργικού Συμβουλίου (ΠΥΣ) 34/2002, ΦΕΚ 125Α/05-06-2002, «Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου» για τα ΑΣ<sub>10</sub> και ΑΣ<sub>2,5</sub> συμφωνούν με τους άνω ορισμούς.

Κατά συνέπεια, επεξηγήσεις του τύπου τα ΑΣ<sub>10</sub> ή ΑΣ<sub>2,5</sub> αποτελούν αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος  $\leq 10 \mu\text{m}$  ή αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος  $\leq 2,5 \mu\text{m}$  αντίστοιχα, παρότι είναι ευκολότεροι, είναι λανθασμένοι και παραπλανητικοί καθώς εννοούν ότι δεν συλλέγονται σωματίδια μεγαλύτερα των 10  $\mu\text{m}$  ή 2,5  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα, ότι συλλέγεται το 100% των σωματιδίων με μέγεθος 10  $\mu\text{m}$  ή 2,5  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα και ότι συλλέγονται όλα τα σωματίδια που είναι μικρότερα των 10  $\mu\text{m}$  ή 2,5  $\mu\text{m}$  αντίστοιχα (Wilson et al., 2002, U.S. EPA, 2004).

Σχετικά με τις αλληλοεπικαλύψεις μεταξύ των τριών τρόπων προσέγγισης των κατηγοριών των αιωρούμενων σωματιδίων, μπορούν να αναφερθούν τα εξής (Wilson et al., 2002, U.S. EPA, 2004):

- Τα ΑΣ<sub>2,5</sub> αποτελούν ένδειξη των λεπτόκοκκων σωματιδίων, ωστόσο δεν συμπίπτουν απολύτως με αυτά, καθότι στα ΑΣ<sub>2,5</sub> περιλαμβάνονται και μερικά χονδρόκοκκα σωματίδια λόγω των ποσοστών συλλογής της συσκευής.
- Τα ΑΣ<sub>10</sub> αποτελούν ένδειξη των θωρακικών αιωρούμενων σωματιδίων, ωστόσο δεν συμπίπτουν απολύτως με αυτά, καθότι στα θωρακικά αιωρούμενα σωματίδια συμπεριλαμβάνονται σωματίδια μέχρι και 30  $\mu\text{m}$ , τα οποία δεν περιλαμβάνονται στα ΑΣ<sub>10</sub> λόγω των ποσοστών συλλογής της συσκευής.

### 1.2.3 ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, οι οποίες εξειδικεύονται ως εξής (Καραθανάσης, 2006):

- Φυσικές πηγές. Αφορούν πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων όπως είναι η διάβρωση του εδάφους και των βράχων, οι πυρκαγιές των δασών, τα σταγονίδια από τη θάλασσα, η δράση των ηφαιστείων, κ.ά.
- Ανθρωπογενείς πηγές. Αφορούν πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων όπως είναι η καύση καυσίμων, οι εκπομπές των βιομηχανικών δραστηριοτήτων, οι εκπομπές μη βιομηχανικών δραστηριοτήτων και οι μεταφορές.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να χωριστούν σε πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια και σε δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια. Τα πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται άμεσα στην ατμόσφαιρα τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, ενώ τα δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα από την οξείδωση και τις μετέπειτα αντιδράσεις του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ), των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) (Alves et al., 2007).

Όπως προκύπτει από τον Καραθανάση (2006), αν και τα πρωτογενή αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να έχουν ποικίλα μεγέθη, δηλαδή μπορεί να είναι χονδρόκοκκα ή λεπτόκοκκα, τα δευτερογενή αιωρούμενα σωματίδια έχουν μέγεθος μικρότερο του 1  $\mu\text{m}$  και οπότε είναι λεπτόκοκκα.

Τα πρωτογενή, χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια γενικά είναι μηχανικώς προερχόμενα και αφορούν π.χ. την εδαφική σκόνη, το θαλάσσιο αερόλυμα κ.ά. Στον αντίποδα, τα πρωτογενή, λεπτόκοκκα σωματίδια προέρχονται από καύσεις και διεργασίες όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (U.S. EPA, 2004).

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι βασικότατο ρόλο στον σχηματισμό των δευτερογενών, λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων διαδραματίζουν οι διαδικασίες της πυρηνοποίησης, της συμπίκνωσης και της συσσωμάτωσης.

Σε αδρές γραμμές, οι διαδικασίες της πυρηνοποίησης, της συμπίκνωσης και της συσσωμάτωσης σε σχέση με τον σχηματισμό των αιωρούμενων σωματιδίων αφορούν στα κάτωθι (WHO Regional Office for Europe, 2003, Lazaridis, 2011):

- **Πυρηνοποίηση.** Είναι ένας από τους θεμελιώδεις μηχανισμούς της ατμόσφαιρας και αποτελεί ουσιαστικά συμπύκνωση, δηλαδή μετάβαση από την αέρια στην υγρή φάση. Η πυρηνοποίηση οδηγεί σε σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων με μέγεθος μικρότερο του 0,1  $\mu\text{m}$ . Η φάση μετάβασης δεν γίνεται αμέσως, αλλά μέσω του σχηματισμού συσσωρεύσεων μικρών μορίων σε μορφή συστάδων. Οι συνθήκες για το σχηματισμό νέων αιωρούμενων σωματιδίων άμεσα από την κατάσταση των ατμών δεν γίνεται εύκολα στην ατμόσφαιρα λόγω της χαμηλής πίεσης στην οποία βρίσκονται τα αέρια και λόγω της ύπαρξης προϋπαρχόντων αιωρούμενων σωματιδίων. Η πυρηνοποίηση έτσι μπορεί να αφορά στην πυρηνοποίηση μιγμάτων αερίων π.χ. υδρατμών και θειικού οξέως ή γίνεται στην επιφάνεια προϋπαρχόντων αιωρούμενων σωματιδίων.
- **Συμπύκνωση.** Η συμπύκνωση όπως προαναφέρθηκε είναι η μετάβαση από την αέρια στην υγρή φάση και στην περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων αφορά στην συμπύκνωση αερίων που γίνεται στην επιφάνεια προϋπαρχόντων αιωρούμενων σωματιδίων. Μέσω π.χ. της συμπύκνωσης υδρατμών, τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα μπορούν και αυξάνουν το μέγεθός τους. Ο ρυθμός αύξησης του μεγέθους των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από παραμέτρους όπως είναι η σχετική υγρασία και το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.
- **Συσσωμάτωση.** Είναι η διαδικασία κατά την οποία τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας συγκρούονται μεταξύ τους λόγω της σχετικής τους κίνησης και σχηματίζουν μεγαλύτερα αιωρούμενα σωματίδια. Αποτέλεσμα της διαδικασίας συσσωμάτωσης είναι ότι πέρα από το ότι αυξάνεται το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, μειώνεται έτσι και ο αριθμός των αιωρούμενων σωματιδίων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Η σχετική κίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να οφείλεται σε παραμέτρους όπως η βαρύτητα, τα αεροδυναμικά φαινόμενα και οι ηλεκτρικές δυνάμεις.

Η συμπύκνωση και η συσσωμάτωση είναι αποδοτικές, σχηματίζοντας αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος έως 1  $\mu\text{m}$  (WHO Regional Office for Europe, 2003).

#### 1.2.4 ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται κυρίως από διάφορα οργανικά στοιχεία, θειικά και νιτρικά άλατα, αμμώνιο, εδαφική σκόνη και από το θαλάσσιο αερόλυμα, ωστόσο μπορεί να περιέχουν και μικροποσότητες στοιχείων όπως As, Cd, Cr, Cu, Ni, P, Pb, V ή Zn (Rodriguez et al., 2007).

Κατά την Lollar (2005), τα λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια είναι συνήθως όξινα και γρήγορα διαλύονται στο νερό, ενώ κατά την ίδια, αποτελούνται από τα κάτωθι βασικά συστατικά στοιχεία:

- Θειικά άλατα, τα οποία παράγονται φωτοχημικά από το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ).
- Οργανική ύλη, η οποία παράγεται χημικά τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).
- Αιθάλη, η οποία προέρχεται απευθείας από τη βιομηχανία και τις μετακινήσεις.
- Νιτρικά άλατα, τα οποία σχηματίζονται από τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ).

Τα θειικά άλατα και η οργανική ύλη είναι συνήθως τα βασικά συστατικά των λεπτόκοκκων σωματιδίων στις βιομηχανικές και αστικές περιοχές. Σε αστικές περιοχές όπου βρίσκονται σε κοντινή απόσταση αγροτικές δραστηριότητες, συνήθως σχηματίζονται λεπτόκοκκα σωματίδια που περιέχουν νιτρικό αμμώνιο ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Ο σχηματισμός του νιτρικού αμμωνίου ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), οφείλεται στα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) από τις αστικές περιοχές, τα οποία συνδυάζονται με την αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) από τις αγροτικές δραστηριότητες (Lollar, 2005).

Σημαντικότατο γεγονός αποτελεί το ότι στα λεπτόκοκκα σωματίδια και συγκεκριμένα στα σωματίδια με μέγεθος  $\leq 1 \mu\text{m}$ , τείνει να είναι προσροφημένη η πλειονότητα των τοξικών μετάλλων που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, όπως Cu, Pb, Zn, κ.ά. (Fang et al., 1999).

Στον αντίποδα σύμφωνα με την Lollar (2005), τα χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια είναι συνήθως μη όξινα και υδρόφοβα, ενώ βάσει των Barrie (1985) και U.S. EPA (2004), γενικά περιλαμβάνουν μηχανικώς προερχόμενο θαλάσσιο αερόλυμα (Na, Cl, Mg), αερόφερτη σκόνη (Al, Si, Fe, Ti) και ιπτάμενη τέφρα από την ανεξέλεγκτη καύση άνθρακα, πετρελαίου και ξύλου, ενώ η παρουσία τοξικών μετάλλων σ' αυτά είναι περιορισμένη.



### 1.2.5 ΧΡΟΝΟΙ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η υγρή και η ξηρή εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούν τους τελικούς μηχανισμούς απομάκρυνσης τους από την ατμόσφαιρα και της μεταφοράς τους στην επιφάνεια της γης (Καραθανάσης, 2007).

Η διαδικασία μεταφοράς των αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης μέσω του υετού ονομάζεται υγρή εναπόθεση. Πραγματοποιείται μέσω των σταγόνων της βροχής, των νιφάδων του χιονιού και το χαλάζι. Η ξηρή εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι η διαδικασία μεταφοράς τους, απουσία υετού, από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης (που μπορεί να είναι το έδαφος, το νερό της θάλασσας, των λιμνών ή περιοχές με βλάστηση) όπου και δεσμεύονται (Καραθανάσης, 2007).

Σημαντικότερο ρόλο στον χρόνο παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα διαδραματίζει το μέγεθός τους. Τα σωματίδια πυρηνοποίησης έχουν μικρό χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα (περίπου ώρες ή και λιγότερο), αφού αυξάνουν το μέγεθός τους με τις διαδικασίες της συσσωμάτωσης, καταλήγοντας στο να αποτελούν πλέον συσσωματώματα. Τα συσσωματώματα έχουν χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα που κυμαίνεται από ημέρες έως μια εβδομάδα ή ακόμα και περισσότερο και επομένως μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις στην ατμόσφαιρα. Ο κυρίαρχος μηχανισμός απομάκρυνσης των συσσωματωμάτων από την ατμόσφαιρα είναι μέσω της υγρής εναπόθεσης (Oliver, 2005).

Τα χονδρόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια συνήθως έχουν χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα που κυμαίνεται από μερικές ώρες έως μια ημέρα ή και δυο ημέρες, με το χρόνο παραμονής τους στην ατμόσφαιρα να μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθός τους. Η ξηρή εναπόθεση είναι σημαντικός μηχανισμός για την απομάκρυνση των χονδρόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα και μάλιστα όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθός τους τόσο πιο σημαντικός γίνεται ο μηχανισμός της ξηρής εναπόθεσης (Oliver, 2005).

Σε ορισμένες περιπτώσεις χονδρόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων όπως είναι η σκόνη από τη Σαχάρα, αυτά μπορούν να μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα σε μεγάλες αποστάσεις (>5000 km) εξαιτίας παραμέτρων όπως είναι οι μεγάλες ποσότητες εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων και η απελευθέρωση των αιωρούμενων σωματιδίων σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου η μεταφορά τους ευνοείται (CAFE Working Group on Particulate Matter, 2004).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

### **2.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ**

#### ***2.1.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑ***

##### **2.1.1.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Τα στοιχεία των επιδημιολογικών μελετών συγκλίνουν στην ύπαρξη θετικής σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub>, των αναπνευστικών συμπτωμάτων και της χρήσης φαρμάκων σε ασθματικά παιδιά. Ομοίως, στοιχεία από νοσοκομειακά περιστατικά, υποστηρίζουν τη θετική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub>, των αναπνευστικών συμπτωμάτων και της χρήσης φαρμάκων σε ηλικιωμένα άτομα (U.S. EPA, 2008).

Σχετικά με το ρόλο της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>2,5</sub>, η κατάσταση είναι όμοια, με τα ασθματικά παιδιά και τα ηλικιωμένα άτομα να έχουν αυξημένα αναπνευστικά συμπτώματα και αυξημένη χρήση φαρμάκων, υποκείμενα σε αυξημένες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>2,5</sub>. Πέραν τούτου, βάσει κλινικών μελετών, η έκθεση ανθρώπων σε ΑΣ<sub>2,5</sub> που προέρχονται από εξατμίσεις πετρελαιοκίνητων οχημάτων, οδηγεί σε πνευμονικές φλεγμονές, οξειδωτικές αντιδράσεις και αλλεργική ευαισθητοποίηση. Όλα αυτά επιβεβαιώνονται και από πολυάριθμες τοξικολογικές μελέτες, που υποστηρίζουν την αυξημένη αναπνευστική νοσηρότητα λόγω αυξημένης συγκέντρωσης ΑΣ<sub>2,5</sub> (U.S. EPA, 2008).

##### **2.1.1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΡΔΙΑΓΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**

Βάσει των πρόσφατων στοιχείων και μελετών, προκύπτει πως οι επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης σε αυξημένες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> συνδέονται κυρίως με καρδιακή ανεπάρκεια και ισχαιμία του μυοκαρδίου, λόγοι που οδηγούν σε αυξημένες εισαγωγές στο νοσοκομείο (U.S. EPA, 2008).

Σε μελέτη των Lartieu et al. (2007), που διεξήχθη σε 8 Γαλλικές πόλεις κατά την περίοδο 1998-2003, βασισμένη σε ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub> και εισαγωγών στο νοσοκομείο λόγω καρδιαγγειακών νοσημάτων και που αφορούσε τόσο το γενικό πληθυσμό όσο και τα ηλικιωμένα άτομα, προέκυψε ότι για κάθε αύξηση 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  της συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub> ο κίνδυνος εισαγωγής στο νοσοκομείο λόγω ισχαιμίας του

μυοκαρδίου αυξάνεται για τον γενικό πληθυσμό κατά 1,9%. Η σχέση αυτή ήταν ακόμα πιο ισχυρή για τα ηλικιωμένα άτομα, σύμφωνα με την οποία για κάθε αύξηση  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  της συγκέντρωσης  $\text{ΑΣ}_{10}$ , ο κίνδυνος εισαγωγής στο νοσοκομείο λόγω ισχαιμίας του μυοκαρδίου αυξάνεται κατά 2,9%.

Οι επιπτώσεις της βραχυχρόνιας έκθεσης σε αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{ΑΣ}_{2,5}$  σχετίζονται κυρίως με μειωμένη ροή αίματος του μυοκαρδίου, ακολουθούμενη από ισχαιμία, αλλαγές στην αγγειακή αντιδραστικότητα και μορφολογία και αυξημένο καρδιακό οξειδωτικό στρες (U.S. EPA, 2008).

### 2.1.1.3 ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

Από την εξέταση των διαφόρων μελετών, προκύπτει ότι για τα επίπεδα συγκέντρωσης  $\text{ΑΣ}_{10}$ , ο εκτιμώμενος κίνδυνος θνησιμότητας για τον γενικό πληθυσμό λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης, κυμαίνεται από 0,12% έως 0,53% για κάθε  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αύξηση της συγκέντρωσης  $\text{ΑΣ}_{10}$ . Αντίθετα, για τα  $\text{ΑΣ}_{2,5}$ , ο εκτιμώμενος κίνδυνος θνησιμότητας για τον γενικό πληθυσμό λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης, κυμαίνεται από 0,29% έως 1,21% για κάθε  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αύξηση της συγκέντρωσης  $\text{ΑΣ}_{2,5}$ . Επιπροσθέτως, όσον αφορά τη θνησιμότητα λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης σε αυξημένα επίπεδα  $\text{ΑΣ}_{2,5}$ , κυρίαρχο αίτιο θανάτου είναι τα προκύπτοντα αναπνευστικά προβλήματα (U.S. EPA, 2008).

### 2.1.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑ

#### 2.1.2.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ ΑΝΑΠΝΕΥΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Πρόσφατες μελέτες υποστηρίζουν τη σχέση μεταξύ αναπνευστικών συμπτωμάτων και μακροχρόνιας έκθεσης σε αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{ΑΣ}_{10}$ . Επιδημιολογικές μελέτες παρέχουν στοιχεία που συγκλίνουν όσον αφορά στη μείωση της πνευμονικής λειτουργίας έπειτα από μακροχρόνια έκθεση σε αυξημένες συγκεντρώσεις  $\text{ΑΣ}_{10}$  (U.S. EPA, 2008).

Παραδείγματος χάρη, σε μελέτη των Ackermann-Liebrich et al. (1997), που διεξήχθη σε διάφορες πόλεις της Ελβετίας κατά την περίοδο 1991-1993 και που αφορούσε περίπου 10000 άτομα ηλικίας από 18 έως και 60 ετών, διαπιστώθηκε σαφής και στατιστικά σημαντική μείωση στις παραμέτρους πνευμονικής λειτουργίας (3,4%) ανά  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  αύξηση της ετήσιας συγκέντρωσης  $\text{ΑΣ}_{10}$ .

Για τις συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>2,5</sub>, νέες επιδημιολογικές μελέτες υποστηρίζουν την εμφάνιση αναπνευστικών συμπτωμάτων και μείωσης της πνευμονικής λειτουργίας, ενώ με βάση τοξικολογικές μελέτες, υπάρχουν στοιχεία για αυξημένες φλεγμονές, οξειδωτικές αντιδράσεις και καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος έπειτα από μακροχρόνια έκθεση στην αστική σκόνη και τα σωματίδια από τις εξατμίσεις των πετρελαιοκίνητων οχημάτων. Επίσης από πειράματα σε ποντίκια τα οποία εκτίθονταν σε αυξημένα επίπεδα ΑΣ<sub>2,5</sub> κατά την περίοδο πριν και μετά την γέννα, προέκυψε στατιστικά σημαντική μείωση της ανάπτυξης των πνευμόνων τους (U.S. EPA, 2008).

#### 2.1.2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΡΔΙΑΓΓΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η αλήθεια είναι πως για τις επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα λόγω της μακροχρόνιας έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια, τα ΑΣ<sub>2,5</sub> είναι αυτά που έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον των νέων ερευνών και όχι τα ΑΣ<sub>10</sub>. Έτσι η υπάρχουσα βιβλιογραφία είναι σχετικά λιγοστή και από τα πορίσματα των μελετών, τα στοιχεία άλλοτε δεν είναι συγκλίνοντα και άλλοτε αποτυγχάνουν να εντοπίσουν επιπτώσεις από μακροχρόνια έκθεση των ΑΣ<sub>10</sub> στο καρδιαγγειακό σύστημα (U.S. EPA, 2008).

Σχετικά με τα ΑΣ<sub>2,5</sub>, οι υπάρχουσες μελέτες συγκλίνουν όσον αφορά στην πρόκληση αθηροσκλήρωσης λόγω μακροχρόνιας έκθεσης σε αυξημένα επίπεδα ΑΣ<sub>2,5</sub>. Ακόμη, στοιχεία από τις επιπτώσεις της βραχυχρόνιας έκθεσης στο καρδιαγγειακό σύστημα που εντοπίζονται σε ένα μεγάλο αριθμό μελετών, υποστηρίζουν τον ρόλο της μακροχρόνιας έκθεσης σε αυξημένα επίπεδα ΑΣ<sub>2,5</sub> στα καρδιαγγειακά νοσήματα (U.S. EPA, 2008).

#### 2.1.2.3 ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ

Τα πρόσφατα στοιχεία συγκλίνουν με τις παλαιότερες μελέτες, υποστηρίζοντας περαιτέρω τη σχέση μεταξύ της μακροχρόνιας έκθεσης σε αυξημένα επίπεδα ΑΣ<sub>2,5</sub> και στον αυξημένο κίνδυνο ανθρώπινης θνησιμότητας. Επιπροσθέτως, τα ίδια ισχύουν και για τα χονδρόκοκκα σωματίδια ΑΣ<sub>10</sub> με την σχέση αυτή να είναι πιο ισχυρή ιδίως στις γυναίκες (U.S. EPA, 2008).

Σύμφωνα με μελέτη των Chen et al. (2005) η οποία λάμβανε υπόψη της, μηνιαίες τιμές των ΑΣ<sub>2,5</sub> και ΑΣ<sub>10</sub> και αφορούσε περίπου 3000 υγιείς ενήλικες, οι οποίοι βρίσκονταν σε συνεχή παρακολούθηση επί 22 χρόνια, έχοντας επίγνωση και του

τρόπου ζωής τους, προέκυψε αυξημένος κίνδυνος θνησιμότητας κυρίως λόγω των αυξημένων επιπέδων ΑΣ<sub>2,5</sub>.

Όσον αφορά τον παράγοντα αίτιο θανάτου από μακροχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, σύμφωνα με μελέτη των Pope et al. (2004), προκύπτει ότι το αίτιο είναι ισχυρά συνυφασμένο με καρδιαγγειακά προβλήματα, π.χ. ισχαιμία του μυοκαρδίου, καρδιακή ανακοπή, έμφραγμα και όχι με αναπνευστικά προβλήματα όπου η σχέση είναι ασθενής.

### *2.1.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΒΡΑΧΥΧΡΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ*

Από τα προαναφερθέντα στοιχεία για την έκθεση των ανθρώπων σε αιωρούμενα σωματίδια, προκύπτει ότι τόσο τα ΑΣ<sub>10</sub> όσο και τα ΑΣ<sub>2,5</sub> δημιουργούν κατά βάση προβλήματα στο αναπνευστικό και καρδιαγγειακό σύστημα. Συγκεκριμένα, τα ΑΣ<sub>2,5</sub> αποδεικνύονται πολύ πιο επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, οδηγώντας σε πολύ πιο αυξημένο κίνδυνο θνησιμότητας τόσο λόγω βραχυχρόνιας έκθεσης όσο και μακροχρόνιας έκθεσης. Ενδιαφέρον επίσης είναι το συμπέρασμα ότι το κυρίαρχο αίτιο θανάτου από βραχυχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια είναι τα αναπνευστικά προβλήματα, ενώ το κυρίαρχο αίτιο θανάτου από μακροχρόνια έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια είναι τα καρδιαγγειακά προβλήματα.

## 2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

### *2.2.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ*

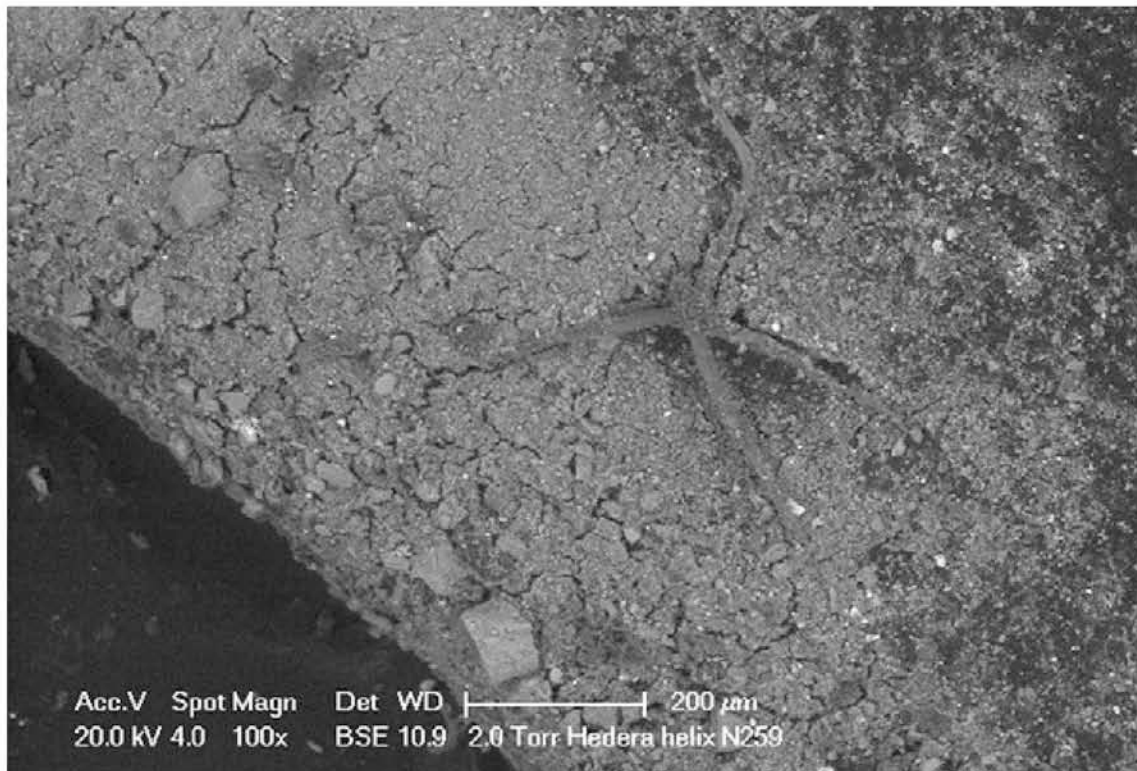
#### *2.2.1.1. ΑΜΕΣΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ*

Τα αιωρούμενα σωματίδια έπειτα από την απομάκρυνσή τους από την ατμόσφαιρα μπορούν μέσω ξηρής εναπόθεσης π.χ. καθίζησης, να εναποτεθούν στα επιφανειακά μέρη των φυτών και να προκαλέσουν σ' αυτά φυσικές ή χημικές επιπτώσεις ή συνδυασμό και των δυο. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό δεν συναντάται παρά μόνο συνήθως γύρω από σημαντικά ρυπασμένες περιοχές, όπως λατομεία, τσιμεντοβιομηχανίες, κ.ά. (Grantz et al., 2003).

Τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν εναποτεθεί στα επιφανειακά μέρη των φυτών μπορεί: α) να παραμείνουν προσκολλημένα σ' αυτά για αρκετό χρονικό διάστημα, β) να απορροφηθούν διαμέσου της επιφάνειας των φύλλων ή γ) να απομακρυνθούν από το

φυτό μέσω επαναιώρησης στην ατμόσφαιρα, καθαρισμού μέσω βροχόπτωσης ή και πτώσης στο έδαφος (Grantz et al., 2003).

Κατά τους Ottele et al. (2010), παρόλο το ότι η βλάστηση δέχεται αρνητικές επιπτώσεις από την ατμοσφαιρική ρύπανση, φαίνεται παράλληλα να παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας από αιωρούμενα σωματίδια, καθώς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, τα αιωρούμενα σωματίδια προσκολλούνται στα φύλλα έπειτα από την εναπόθεσή τους και μεγάλο μέρος αυτών δεν τίθεται σε επαναιώρηση στην ατμόσφαιρα, μειώνοντας έτσι τις επικίνδυνες συγκεντρώσεις για την ανθρώπινη υγεία. Συγκεκριμένα κατά τους ίδιους ερευνητές, ύστερα από μέτρηση του αριθμού των αιωρούμενων σωματιδίων που συγκρατούνται από το πάνω και κάτω μέρος των φύλλων, βρέθηκε πως το πάνω μέρος συγκρατεί αδρώς διπλάσιο αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων από το κάτω μέρος. Επιπροσθέτως, βρέθηκε πως η ικανότητα προσκόλλησης και ενδεχόμενης απορρόφησης από τα φύλλα ισχύει τόσο για τα ΑΣ<sub>10</sub> όσο και για τα ΑΣ<sub>2,5</sub>, με τα ΑΣ<sub>2,5</sub> πάντως να μπορούν να απορροφηθούν καλύτερα λόγω του μικρού μεγέθους τους.



**Σχήμα 2.1** Προσκολλημένα αιωρούμενα σωματίδια σε τμήμα φύλλου, [ΠΗΓΗ: Ottele et al., 2010].

Σύμφωνα με τους Hirano et al. (1995), η χημικώς αδρανής σκόνη που συσσωρεύεται στα φύλλα επηρεάζει μεταξύ άλλων τη θερμοκρασία των φύλλων και τη φωτοσυνθετική ικανότητα. Ειδικότερα, οι ίδιοι ερευνητές καταλήγουν στα εξής συμπεράσματα γι' αυτές τις δυο παραμέτρους:

- Σχετικά με τη φωτοσυνθετική ικανότητα, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης μειώνεται από την προσκόλληση όλο και περισσότερης σκόνης στα φύλλα, με τη μείωση αυτή είναι εντονότερη σε περίπτωση προσκόλλησης λεπτόκοκκων και υπερλεπτόκοκκων σωματιδίων.
- Η θερμοκρασία των φύλλων αυξάνεται και μάλιστα εξαρτάται από το χρώμα της σκόνης, με τη σκουρόχρωμη σκόνη να προκαλεί εντονότερη αύξηση της θερμοκρασίας των φύλλων.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στα φυτά από χημικώς επιβαρυμένες σκόνες, όπως η σκόνη από τσιμέντο, έχει φανεί ότι αυτή διαθέτει μεγάλη αλκαλικότητα, όπως εντόπισαν μεταξύ άλλων οι Arslan και Boybay (1990) σε αιωρούμενα σωματίδια από τσιμεντοβιομηχανία της Τουρκίας. Οι επιπτώσεις της εναπόθεσης της σκόνης από τσιμέντο στα επιφανειακά μέρη των φυτών, οδηγεί σε μείωση στο ύψος, στη φυτομάζα, στην καθαρή παραγωγικότητα και στο περιεχόμενο χλωροφύλλης. Επίσης, παρατηρείται μείωση στον αριθμό των ανθών που τελικά επηρεάζει την απόδοση των φυτών (Prasad and Inamdar, 1990).

Τέλος, το θαλάσσιο αερόλυμα αποτελούμενο και αυτό από αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να προξενήσει προβλήματα στην παράκτια βλάστηση, ύστερα από εναπόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων στα επιφανειακά μέρη των φυτών, διαδικασία που γίνεται σε αδρές γραμμές σύμφωνα με τον Boyce (1954) ως εξής:

- Η κύρια πηγή εισόδου του ιόντων χλωρίου, από το οποίο αποτελείται το θαλάσσιο αερόλυμα, στα εσωτερικά μέρη των παράκτιων φυτών, δημιουργείται έπειτα από την μηχανική τριβή που υπόκεινται τα φύλλα και τα κλαδιά λόγω των υψηλών ταχυτήτων του ανέμου.
- Μετά την είσοδο των ιόντων χλωρίου στα παράκτια φυτά, τα ιόντα χλωρίου συσσωρεύονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, ικανές να προξενήσουν βλάβες όπως νέκρωση των φύλλων και κλαδιών.
- Οι βλάβες αυτές οδηγούν αναλόγως των σημείων που επηρεάζουν, σε ασύμμετρη ανάπτυξη των παράκτιων φυτών, ενώ περιστασιακά μπορεί να οδηγήσουν και στην πλήρη νέκρωσή τους.

### 2.2.1.2. ΈΜΜΕΣΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν τη βλάστηση εκτός από τον άμεσο τρόπο, δηλαδή με την εναπόθεσή τους στα επιφανειακά μέρη των φυτών, και με έμμεσο τρόπο, δηλαδή είτε με την εναπόθεσή τους στο έδαφος αλλάζοντας τις χημικές ιδιότητές του, είτε επιδρώντας στην ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Οι έμμεσες επιπτώσεις ωστόσο, και μάλιστα αυτές που αφορούν την αλλαγή της χημείας του εδάφους, είναι οι πλέον κυρίαρχες για τη βλάστηση καθώς μπορούν και αλλάζουν τους κύκλους των θρεπτικών συστατικών και την πρόσληψη αυτών από τα φυτά (U.S. EPA, 2004).

Η όξινη βροχή ή πιο σωστά η όξινη εναπόθεση, αποτελείται κυρίως από θειικά και νιτρικά οξέα καθώς και από αμμώνιο, τα οποία όταν εναποτίθενται σε ευαίσθητα οικοσυστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε οξίνιση του εδάφους, προκαλώντας μια σειρά οικολογικών αλλαγών (Driscoll et al., 2003).

Ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων στο σχηματισμό της όξινης εναπόθεσης είναι ενεργός, αφού τα θειικά και νιτρικά αερολύματα αποτελούν προδρόμους της όξινης εναπόθεσης. Τα αερολύματα αυτά είναι υγροσκοπικά και μικρά σε μέγεθος, τα οποία εύκολα μπορούν να μεταφερθούν στο ύψος των νεφών και να συμμετάσχουν σε διαδικασίες πυρηνοποίησης και συμπύκνωσης (Maarouf and Smith, 1997).

Η όξινη εναπόθεση μπορεί να επηρεάσει τα εδάφη μέσω διαδικασιών όπως: α) εξάντληση του ασβεστίου και άλλων συστατικών από τα εδάφη, β) κινητοποίηση του ανόργανου αλουμινίου των εδαφών και γ) αύξηση της συσσώρευσης του αζώτου και του θείου στα εδάφη. Τέτοιες αλλαγές μπορούν να έχουν ανεπιθύμητες και τοξικές επιδράσεις στα φυτικά είδη (Driscoll et al., 2003).

Η εξάντληση του ασβεστίου και άλλων συστατικών, συμβαίνει όταν κατιόντα θρεπτικών αντικαθίστανται από το έδαφος με συστατικά των όξινων εναποθέσεων με ρυθμό ταχύτερο από αυτόν που τα θρεπτικά μπορούν να επανέρθουν σε ισορροπία, μέσω π.χ. εναπόθεσης κατιόντων θρεπτικών από την ατμόσφαιρα. Αυτή η εξάντληση των κατιόντων θρεπτικών αλλάζει θεμελιωδώς τις διαδικασίες του εδάφους, θέτει σε συμβιβασμό τη θρέψη μερικών φυτών και παρεμποδίζει την ικανότητα που έχουν τα ευαίσθητα εδάφη να επανέλθουν από τις όξινες εναποθέσεις (Driscoll et al., 2003).

Βάσει των Grantz et al. (2003), η κινητοποίηση αυτή του αλουμινίου στα εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε τοξικότητα των φυτικών ειδών. Όπως αναφέρεται από τους ίδιους, η διαθεσιμότητα του απαραίτητου ασβεστίου στα φυτά μειώνεται, ενώ η



διαθεσιμότητα του αλουμινίου αυξάνεται, με αποτέλεσμα ο λόγος ασβεστίου προς αλουμίνιο να αποτελεί μια πολύ καλή ένδειξη για την κατάσταση των εδαφών έπειτα από όξινες εναποθέσεις.

Σχετικά με την αύξηση της συσσώρευσης του αζώτου στα εδάφη, κατά τους Grantz et al. (2003), αυτό έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές συνέπειες. Έτσι για παράδειγμα σε περιοχές όπου υπάρχει σαφής έλλειψη αζώτου στα εδάφη, ενδεχόμενες αυξημένες εναποθέσεις αζώτου στο έδαφος, θα έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στα φυτά, αφού θα αυξήσουν την ανάπτυξή τους, δεδομένου ότι το άζωτο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη φωτοσύνθεση. Ωστόσο, όπως οι ίδιοι αναγνωρίζουν, η κατάσταση αυτή μπορεί να έχει μακροπρόθεσμα βλαβερές συνέπειες στα φυτά, γεγονός το οποίο συμβαίνει και σε άλλες περιπτώσεις, όπου δεν χρειάζεται επιπλέον άζωτο στο έδαφος.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά στις παρατηρούμενες αλλαγές που υφίστανται τα εδάφη από την αυξημένη εναπόθεση αζώτου οι Bobbink et al. (1998), αναφέρουν τα εξής :

- Η σοβαρότητα των επιπτώσεων εξαρτάται από τους αβιοτικούς παράγοντες (π.χ. κατάσταση θρεπτικών εδάφους, παράγοντες του εδάφους που επηρεάζουν τη δυναμικότητα της νιτροποίησης, κ.ά.) του κάθε δεδομένου οικοσυστήματος.
- Μερικές επιπτώσεις λόγω της εναπόθεσης του αζώτου είναι: α) η συσσώρευση συστατικών αζώτου, καταλήγοντας σε αυξημένη διαθεσιμότητα νιτρικών ή αμμωνίου και β) η αυξημένη ευαισθησία των φυτικών ειδών σε δευτερογενείς επιβαρυντικούς παράγοντες, όπως στον παγετό και στη ξηρασία.
- Η εναπόθεση αζώτου στο έδαφος, οδηγεί σε αλλαγές του pH, οδηγώντας σε αντικατάσταση των υπαρχόντων ειδών από είδη που είναι ανθεκτικά στις νέες τιμές του pH.
- Η μακροχρόνια αφθονία του αζώτου στο έδαφος αυξάνει τη διαθεσιμότητά του στα φυτικά είδη, οδηγώντας σε αντικατάσταση των υπαρχόντων ειδών από είδη που ωφελούνται από την παρουσία του αζώτου.

Όπως αναφέρεται και από τους Xiankai et al. (2008), η συνεχής εναπόθεση αζώτου από την ατμόσφαιρα στο έδαφος, οδηγεί στη μείωση της βιοποικιλότητας μέσω της εξαφάνισης των ειδών και από ότι υποστηρίζουν οι ίδιοι, θα είναι ο τρίτος κατά σειρά

παράγοντας μείωσης της βιοποικιλότητας σε παγκόσμιο επίπεδο κατά τον 21ο αιώνα, μετά την αλλαγή χρήσεων γης και την κλιματική αλλαγή.

Σχετικά με την αύξηση του θείου στα εδάφη, σύμφωνα με τους Hawkesford και De Kok (2007), το θείο αποτελεί ένα απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ οι απαιτήσεις των φυτών σε θείο είναι στενά συνδεδεμένες με τη διαθεσιμότητα του αζώτου. Σε κάθε περίπτωση, τα φυτά διαθέτουν ειδικούς μηχανισμούς που βελτιστοποιούν τη παροχή και τη ζήτηση του θείου και που κυμαίνονται από τη ρύθμιση της πρόσληψης και αφομοίωσης, μέχρι τη διαφοροποίηση του τρόπου ανάπτυξής τους.

Όπως αναφέρουν οι Grantz et al. (2003), το θείο και μάλιστα υπό την μορφή του οργανικού θείου, συναντάται σε σημαντικές ποσότητες στα εδάφη και είναι σπάνια τοξικό για τα φυτά. Ωστόσο, κατά τους ίδιους, δεδομένου ότι οι πηγές του θείου μέσω των εναποθέσεων της ατμόσφαιρας τείνουν να μειώνονται, αφού τείνουν να μειώνονται και οι ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου του θείου, στο μέλλον τα φυσικά οικοσυστήματα θα έχουν μεγαλύτερες ανάγκες σε θείο.

Πέραν της αλλαγής της χημείας του εδάφους από τις όξινες εναποθέσεις που επηρεάζουν έμμεσα τα φυτά και η αλλαγή της χημείας του εδάφους λόγω των εναποθέσεων βαρέων μετάλλων σ' αυτό, αποτελεί ένα ακόμη πρόβλημα που συνδέεται με έμμεσες επιπτώσεις στα φυτά.

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, προκύπτει πως οι εναποθέσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο έδαφος, των οποίων η σύσταση περιέχει βαριά μέταλλα, είναι σύνηθες φαινόμενο στη περίπτωση της ιπτάμενης τέφρας από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καίνε ως πρώτη ύλη άνθρακα. Για παράδειγμα, στην Ινδία οι Singh et al. (2010), εξετάζοντας τη χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας που απέρριπτε εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ειδικό χώρο απόθεσης, εντόπισαν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες των μετάλλων Cd, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, Mn και Fe, τόσο στο έδαφος όσο και στα φυτά, σε σχέση με μη επιβαρυμένες από την τέφρα περιοχές.

Σχετικά με την τοξικότητα των βαρέων μετάλλων στα φυτά, διάφοροι ερευνητές έχουν εντοπίσει δυσμενείς επιδράσεις, μεταξύ άλλων οι Athar και Ahmad (2002), οι οποίοι ερευνώντας την τοξικότητα των βαρέων μετάλλων στο σιτάρι, βρήκαν ότι τα βαριά μέταλλα οδηγούσαν σε μειωμένη ανάπτυξη και απόδοση του σιταριού. Συγκεκριμένα τα βαριά μέταλλα με τη μεγαλύτερη τοξική επίδραση, ακολουθούσαν την εξής σειρά:  $Cd > Cu > Ni > Zn > Pb > Cr$ . Όπως υποστήριζαν οι ίδιοι, το πλέον

κυρίαρχο τοξικό βαρύ μέταλλο για το σιτάρι ήταν το κάδμιο, το οποίο σύμφωνα με τους ίδιους, φαίνεται να επαληθεύεται και για άλλα είδη φυτών.

Όπως προαναφέρθηκε, τα αιωρούμενα σωματίδια, μπορεί να έχουν έμμεσες επιπτώσεις στη βλάστηση με τους δυο προαναφερθέντες τρόπους, δηλαδή μέσω της όξινης εναπόθεσης και μέσω των βαρέων μετάλλων, που αλλάζουν τη χημεία του εδάφους, αλλά και μέσω της αλλαγής που προκαλούν στην ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης.

Συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια και ειδικά η αιθάλη, ως προϊόν της ατελούς καύσης, έχουν την ικανότητα να μειώνουν τη συνολική ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, δημιουργώντας έτσι έμμεσα επιδράσεις στα φυτά, που σχετίζονται με την αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης. Μάλιστα η μείωση αυτή της ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων, εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας των αιωρούμενων σωματιδίων στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (U.S. EPA, 2004).

Έτσι λοιπόν κατά τους Steffen et al. (2005), για τις επιδράσεις στη φωτοσυνθετική ικανότητα από τη διαφοροποίηση της ακτινοβολίας λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων, μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Η παραγωγικότητα της βλάστησης είναι άμεσα εξαρτημένη από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και δεδομένου ότι όλες οι άλλες παράμετροι της φωτοσύνθεσης των φυτών, π.χ. θρεπτικά του εδάφους είναι οι ίδιες, οι μειώσεις στην ηλιακή ακτινοβολία οδηγούν σε συνακόλουθες μειώσεις στην παραγωγικότητα των φυτών. Είναι χαρακτηριστική για τους Steffen et al. (2005), η περίπτωση της Κίνας, όπου σε κάποιες περιοχές, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει μειωθεί μέχρι και 30% και που σαφώς συνοδεύεται από σημαντική μείωση στην παραγωγή τροφής.
- Παρόλα αυτά, όπως αναφέρουν οι ίδιοι, υπάρχουν έρευνες που έχουν εντοπίσει ακριβώς την αντίθετη επίδραση στην παραγωγικότητα των φυτών. Αυτό φαίνεται να αποδίδεται στην αυξημένη διάχυση της ακτινοβολίας που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στα φυτά. Η διαχεόμενη ακτινοβολία επιτρέπει στις κατώτερες φυλλώδεις περιοχές των φυτών που σκιάζονται από την άμεση ακτινοβολία να φωτοσυνθέσουν και έτσι τελικά να αυξήσουν την παραγωγικότητα των φυτών.

### 2.2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ

Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στα υλικά συνδέονται τόσο με την φυσική βλάβη όσο και με την αισθητική αλλοίωση που υπόκεινται τα υλικά. Σύμφωνα με μελέτες τα αιωρούμενα σωματίδια προκαλούν διάβρωση στα μέταλλα, βλάβες στην πολιτιστική κληρονομιά και διάφορες οπτικές επιδράσεις, όπως αποχρωματισμούς υλικών (U.S. EPA, 2004).

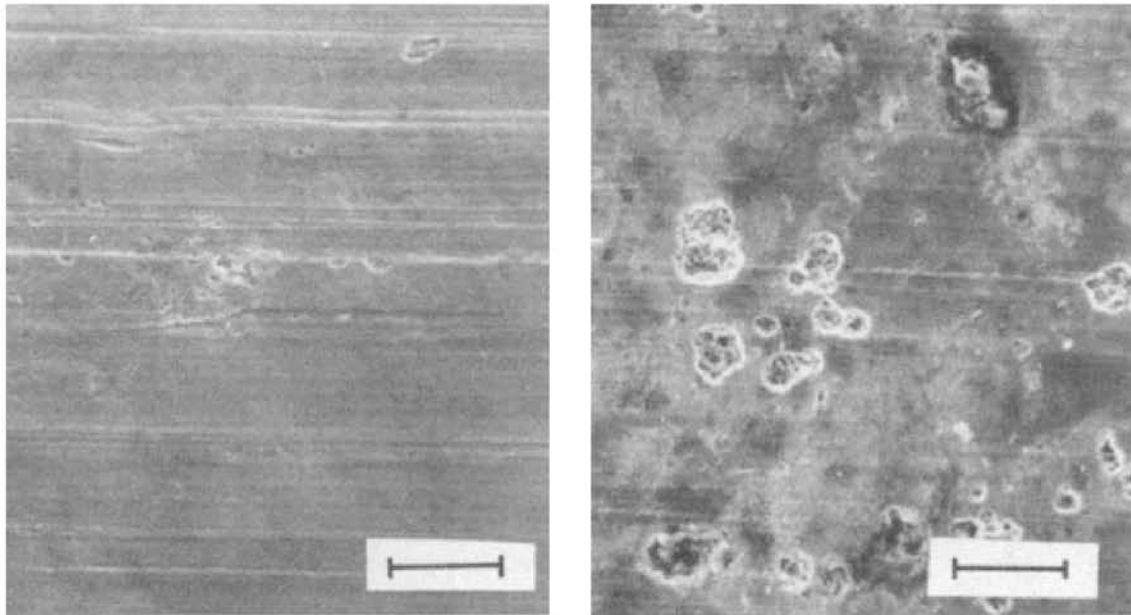
Σχετικά με την διάβρωση των μετάλλων, κατά τους Askey et al. (1993), αυτή επιταχύνεται από την παρουσία πάνω σ' αυτά των αιωρούμενων σωματιδίων με έναν ή και περισσότερους από τους εξής τρόπους:

- Δημιουργώντας διαφοροποιημένες συνθήκες αερισμού, οι οποίες αφορούν ακόμη και τα χημικώς αδρανή αιωρούμενα σωματίδια. Αυτό συμβαίνει όταν τα αιωρούμενα σωματίδια επικάθονται στα μεταλλικά μέρη εγκλωβίζοντας την υγρασία, μειώνοντας την εξάτμιση και αυξάνοντας το χρόνο της τοπικής υδαρότητας των μεταλλικών μερών.
- Αυξάνοντας την αγωγιμότητα της τοπικής υγρασίας στην επιφάνεια των μεταλλικών μερών μέσω της διάλυσης ανιόντων (θεικών και χλωρίου), που αποτελούν μέρος της χημικής σύστασης ορισμένων αιωρούμενων σωματιδίων.
- Προωθώντας την οξείδωση του διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ, με τη βοήθεια της καταλυτικής δράσης των οξειδίων μετάλλου, που συνδέονται με τη σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, κάθε μέταλλο έχει τις δικές του αντοχές στην διάβρωση και η αντοχή του αυτή εξαρτάται στενά και από τη σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων στα οποία εκτίθεται. Για παράδειγμα, οι Samie et al. (2007), εξετάζοντας την αντοχή τριών μετάλλων (χαλκού, ψευδαργύρου και χάλυβα) στην ατμοσφαιρική διάβρωση από νιτρικό οξύ και σε ελεγχόμενες τιμές σχετικής υγρασίας, κατέληξαν ότι το πλέον ανθεκτικό μέταλλο από αυτά τα τρία σε έκθεση σε νιτρικό οξύ είναι ο χάλυβας, ακολουθούμενος από το χαλκό και με το ψευδάργυρο να είναι το πιο ευάλωτο μέταλλο στη διάβρωση από το νιτρικό οξύ.

Ένα παράδειγμα διάβρωσης μεταλλικής επιφάνειας ψευδαργύρου από την ατμοσφαιρική εναπόθεση ιπτάμενης τέφρας και σε συνθήκες 80% σχετικής υγρασίας φαίνεται στο Σχήμα. 2.2. Όπως γίνεται αντιληπτό υπάρχουν αρκετές κοιλότητες της

τάξης των μερικών  $\mu\text{m}$ , που αποδίδονται στο μικρό μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων.



**Σχήμα 2.2** Διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας ψευδαργύρου σε 80% σχετική υγρασία (μήκος σημαδιού = 25  $\mu\text{m}$ ): (Αριστερά) Μη ρυπασμένη επιφάνεια, (Δεξιά) Ρυπασμένη επιφάνεια από ιπτάμενη τέφρα, [ΠΗΓΗ: Askey et al., 1993].

Ανάλογες καταστροφικές βλάβες προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια στην πολιτιστική κληρονομιά, αφού επιδρούν στα μάρμαρα και στους ασβεστόλιθους μέσω των όξινων εναποθέσεων. Κατά τον Κούγκολο (2007), η λογική και οι μηχανισμοί που συνδέονται με αυτές τις καταστροφικές βλάβες αποτυπώνονται ως εξής:

- Καταρχάς, τα θειικά ιόντα που υπάρχουν στην όξινη εναπόθεση έχουν την ικανότητα να προσβάλουν το ανθρακικό ασβέστιο των μαρμάρων και του ασβεστόλιθου  $\text{CaCO}_3$ .
- Έτσι υπό την επίδραση των θεικών ιόντων που υπάρχουν στην όξινη εναπόθεση το ανθρακικό ασβέστιο των μαρμάρων ή του ασβεστόλιθου μετατρέπεται σε θεικό ασβέστιο  $\text{CaSO}_4$  (γύψο), με το τελευταίο να εισέρχεται στο κρυσταλλικό πλέγμα του ανθρακικού ασβεστίου.
- Δεδομένου ότι ο μοριακός όγκος του θειικού ασβεστίου είναι μεγαλύτερος από τον μοριακό όγκο του ανθρακικού ασβεστίου, δημιουργούνται παραμορφωτικές τάσεις οι οποίες διαβρώνουν και τελικά θρυμματίζουν το μάρμαρο ή αντίστοιχα τον ασβεστόλιθο.

Ιδιαίτερες επισημάνσεις στα παραπάνω αποτελούν σύμφωνα με τον Κούγκολο (2007), ότι το θεικό ασβέστιο έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα στο νερό της βροχής από ότι το ανθρακικό ασβέστιο και έτσι αυτό το καθιστά εύκολα παρασυρόμενο από τη

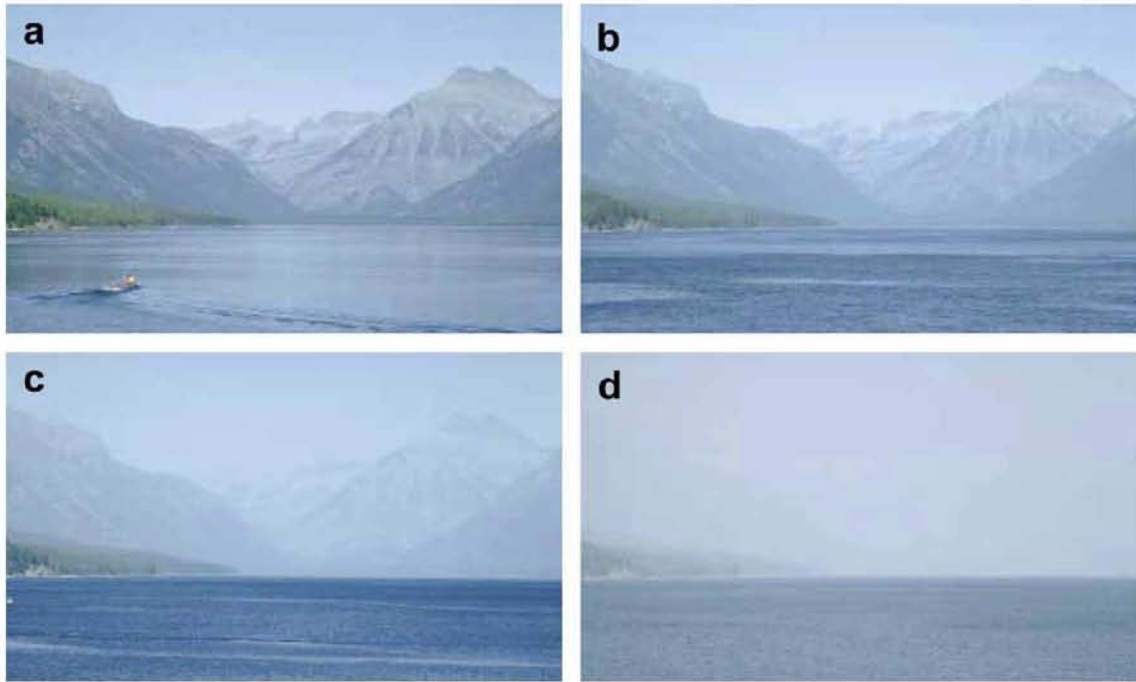
βροχή, όπως επίσης και το ότι, όπως αναφέρει ο ίδιος, ο ασβεστόλιθος είναι πολύ πιο ευάλωτος στην όξινη εναπόθεση απ' ό,τι το μάρμαρο, καθότι έχει μεγαλύτερο πορώδες.

Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν επίσης να έχουν και σημαντικές οπτικές επιδράσεις στα υλικά, οι οποίες να αφορούν στην απώλεια χρωματισμού ή στην περίπτωση διαφανών υλικών, στη μείωση περατότητας του φωτός. Έτσι οι επιδράσεις αυτές δημιουργούν επιπλέον ανάγκες για τακτικό χρωματισμό των υλικών, π.χ. των εξωτερικών τοίχων ή καθαριότητας των τζαμιών των παραθύρων, ενώ μερικές φορές οδηγούν και στη μείωση της ζωής των υλικών αυτών. Ειδικά τα αιωρούμενα σωματίδια που περιέχουν άνθρακα μπορούν επίσης να δράσουν καταλυτικά στις χημικές αντιδράσεις που συμβάλλουν στην υποβάθμιση των υλικών αυτών (U.S. EPA, 2004).

### 2.2.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ

Ως ορατότητα εννοούμε την ευκρίνεια που συναντούμε στην ατμόσφαιρα, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με την ικανότητα να βλέπουμε μακρινά αντικείμενα. Παράμετρος αλληλένδετη με την ευκρίνεια που συναντάται στην ατμόσφαιρα είναι το νέφος-ομίχλη, που αναπτύσσεται στην ατμόσφαιρα λόγω της συγκέντρωσης λεπτόκοκκων και υπερλεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων, το οποίο δίνει στην ατμόσφαιρα ιριδίζουσα εμφάνιση και σαφώς δυσχεραίνει την ορατότητα. Η ιριδίζουσα εμφάνιση αναφέρεται στην απώλεια αντίθεσης σε ένα οπτικό τοπίο, που σημαίνει απώλεια της ικανότητας να διακρίνονται τα φυσικά αντικείμενα, το βάθος και η υφή. Η ορατότητα αντικειμένων σε μακρινή απόσταση αποτελεί έναν εύκολο και απλό τρόπο εκτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε σχέση με την ρύπανση που αυτή υφίσταται. Το μήκος της απόστασης μέχρι το οποίο μπορούμε να δούμε κάποιο οπτικό τοπίο, είναι μεταβαλλόμενο αναλόγως της υγρασίας και της συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Σε μια καθαρή ημέρα όταν οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων είναι χαμηλές, ο ουρανός έχει ένα βαθύ γαλάζιο χρώμα. Αντίθετα σε μια μέρα με αυξημένη σωματιδιακή ρύπανση, ο ουρανός εμφανίζεται ανοιχτός μπλε, λευκός ή γκρι, αναλόγως της συγκέντρωσης των σωματιδίων (Hyslop, 2009).

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα επίδρασης των διαφόρων τιμών συγκέντρωσης των λεπτόκοκκων σωματιδίων στην ορατότητα, φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3** Μείωση ορατότητας για διάφορες τιμές συγκέντρωσης λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων: (a)  $7,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (b)  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (c)  $21,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (d)  $65,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , [ΠΗΓΗ: Malm, 1999].

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν σχέση τόσο με την σκέδαση του φωτός, δηλαδή με τον διασκορπισμό του, όσο και με την απορρόφησή του. Η ορατότητα ενός αντικειμένου, δυσχεραίνεται στην περίπτωση που η σκέδαση του φωτός από τα αιωρούμενα σωματίδια, ανάμεσα στον παρατηρητή και στο αντικείμενο, είναι τόσο σημαντική και κυρίαρχη, που η ανάκλαση του φωτός από το αντικείμενο, καθίσταται ασήμαντη. Το γεγονός ότι το φως διασκορπίζεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις, εξαρτάται από το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Η γωνιακή σχέση μεταξύ του ήλιου και ενός παρατηρητή, σε συνδυασμό με το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, καθορίζει το φως που τελικά φτάνει στα μάτια του παρατηρητή (Malm, 1999).

Η επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ορατότητα, είναι αρκετά πολύπλοκη, καθότι αναλόγως του μεγέθους τους έχουν και διαφορετική αποδοτικότητα στον διασκορπισμό του φωτός. Τα πολύ μικρά σωματίδια και μόρια είναι πολύ αναποτελεσματικά στο να διασκορπίζουν το φως. Καθώς τα σωματίδια αυξάνονται σε μέγεθος, γίνονται πιο αποδοτικά στον διασκορπισμό του φωτός, μέχρι ως ένα σημείο που αποκτούν μέγεθος περίπου όμοιο με το μήκος κύματος του ορατού τμήματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και όπου έχουν αποδοτικότητα σκέδασης όσο θα είχε ένα σωματίδιο αν ήταν πέντε φορές το μέγεθός του. Από αυτό το κρίσιμο μέγεθος και πάνω, δηλαδή προς τα χονδρόκοκκα σωματίδια, η αποδοτικότητα σκέδασης του φωτός

που έχουν μειώνεται και είναι τόση όση θα είχε ένα σωματίδιο αν ήταν δυο φορές το μέγεθός του. Γι' αυτό τα λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια και όχι τα χονδρόκοκκα είναι τα πλέον ενδιαφέροντα και υπεύθυνα για το πρόβλημα που δημιουργούν στην ορατότητα (Malm, 1999).

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την σκέδαση του φωτός από τα αιωρούμενα σωματίδια είναι η υγρασία, καθότι μια αύξηση στην σχετική υγρασία έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το περιεχόμενο του νερού των αιωρούμενων σωματιδίων και κατά συνέπεια το μέγεθός τους. Έτσι τα πλέον μικροσκοπικά σωματίδια γίνονται πιο ικανά στην σκέδαση του φωτός, ειδικά όταν αυτά εμπίπτουν λόγω του νέου μεγέθους τους στο μήκος κύματος του ορατού φωτός (U.S. EPA, 1996).

Η απορρόφηση του φωτός από τα αιωρούμενα σωματίδια είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος πέρα από τη σκέδαση.

Όταν το φως φτάνει σε ένα αντικείμενο, συγκεκριμένα μήκη κύματος, δηλαδή χρώματα, απορροφώνται από αυτό και κάποιο ή κάποια σκεδάζονται. Το χρώμα λοιπόν ενός αντικειμένου που εμείς βλέπουμε, δεν είναι τίποτα άλλο από το χρώμα που αυτό ανακλά. Για παράδειγμα, η χλωροφύλλη στα φύλλα των φυτών, απορροφά την κόκκινη και μπλε ακτινοβολία και ανακλά την πράσινη, εμφανίζοντας έτσι τα φύλλα στα μάτια μας πράσινα. Στη περίπτωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, για παράδειγμα το διοξείδιο του αζώτου ως προϊόν που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από πηγές καύσης, απορροφά τη μπλε ακτινοβολία και έτσι εμφανίζεται στα μάτια μας κοκκινωπό καφέ (Malm, 1999).

Σε αντίθεση με την σκέδαση του φωτός, η απορρόφηση του φωτός, οδηγεί σε απώλεια του φωτός που φτάνει στα μάτια μας, καθώς το φως που απορροφάται μετατρέπεται σε ενέργεια με μεγαλύτερο μήκος κύματος – θερμότητα. Σε όρους ορατότητας, η απορρόφηση του φωτός, προκαλεί τόσο σκοτεινίασμα όσο και αποχρωματισμό του φωτός. Τα αιωρούμενα σωματίδια διαφέρουν σε χρώμα, αλλά τα περισσότερα είναι ελαφρώς χρωματισμένα, εκτός από την αιθάλη η οποία έχει σημαντική σχέση με την απορρόφηση του φωτός. Ειδικότερα, η αιθάλη όταν εντοπίζεται στην ατμόσφαιρα, απορροφά όλα τα μήκη κύματος του φωτός και έτσι αυτό την καθιστά κυρίαρχο παράγοντα απορρόφησης του φωτός. Αντίθετα, ο οργανικός άνθρακας και η σκόνη εδάφους απορροφούν αδύναμα φως (Hyslop, 2009).

Συνοψίζοντας, έχοντας εξετάσει τόσο τη σκέδαση όσο και την απορρόφηση του φωτός, κατά τον Malm (1999), το χρώμα των συγκεντρώσεων αιωρούμενων



σωματιδίων που σχηματίζουν ένα νέφος, το οποίο βλέπουμε στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται στενά από το μέγεθος των σωματιδίων και συγκεκριμένα έχει ως εξής:

- Στην περίπτωση μικροσκοπικών αιωρούμενων σωματιδίων, η μπλε, κόκκινη και πράσινη ακτινοβολία του φωτός φτάνει στα σωματίδια, ωστόσο μόνο η μπλε σκεδάζεται, καθώς η σκέδαση είναι βέλτιστη μόνο κοντά στη αναλογία 1:1 του μήκους κύματος του ορατού φωτός προς το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων. Έτσι οι άλλες δυο ακτινοβολίες πράσινη και κόκκινη, απλά διαπερνούν τα σωματίδια. Ένας παρατηρητής λοιπόν που παρατηρεί το νέφος από απόσταση, θα το βλέπει ως μπλε.
- Στην περίπτωση που τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν το πλέον βέλτιστο μέγεθος, δηλαδή κοντά στην αναλογία 1:1 του μήκους κύματος του ορατού φωτός προς το μέγεθος των αιωρούμενων σωματιδίων, η σκέδαση βελτιστοποιείται και οι τρεις ακτινοβολίες μπλε, πράσινη και κόκκινη, σκεδάζονται εξίσου, με αποτέλεσμα το νέφος αιωρούμενων σωματιδίων να εμφανίζεται στον παρατηρητή άσπρο ή γκρι.

#### 2.2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΛΙΜΑ

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι στενά συνδεδεμένα με το κλιματικό σύστημα της Γης, αλλά και με τον υδρολογικό κύκλο της, που επηρεάζει το κλιματικό σύστημα. Έτσι τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν άμεσες επιπτώσεις στο κλιματικό σύστημα, αλλά και έμμεσες επιπτώσεις σ' αυτό, μέσω της επίδρασής τους στον υδρολογικό κύκλο. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν και αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ μπορούν επίσης να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα, όπως η αιθάλη. Επίσης σχετικά με τον υδρολογικό κύκλο, μέσω της συμμετοχής των αιωρούμενων σωματιδίων στις διαδικασίες πυρηνοποίησης και συμπύκνωσης των νεφών, τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν επίπτωση στην κάλυψη των νεφών, στις ιδιότητές τους και στη βροχόπτωση που με τη σειρά τους επηρεάζουν το κλιματικό σύστημα. Σε κάθε περίπτωση οι άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις, συνδέονται με τη γενικότερη ψύξη του κλιματικού συστήματος. Προκειμένου να μετρηθούν αυτές οι επιδράσεις, η διαδικασία είναι αρκετά δύσκολη, καθότι τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν ιδιάζοντα χαρακτηριστικά και μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο (Kaufman et al., 2002).

Επειδή ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι περιορισμένος και οι πηγές εκπομπής τους είναι χωρικά εξαρτημένες, η συγκέντρωση τους δεν είναι ομοιόμορφη. Είναι αναγκαίο να προσδιορίζονται οι ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Η μελέτη της διαχρονικής μεταβολής των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων απαιτείται λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των αιωρούμενων σωματιδίων και των μηχανισμών απομάκρυνσής τους, που εξαρτώνται από τις χρονικές διακυμάνσεις, π.χ. εποχικές. Η οριζόντια χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων είναι σημαντική, μεταξύ άλλων, λόγω των ιδιοτήτων των νεφών, των μηχανισμών απομάκρυνσης και των ιδιοτήτων αντανάκλασης. Η κάθετη χωρική διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων είναι εξίσου σημαντική, καθώς τόσο η αντανάκλαση όσο και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και οι ιδιότητες των νεφών, εξαρτώνται από το ύψος. Από τη στιγμή που είναι γνωστές τόσο οι χρονικές όσο και οι χωρικές ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, τότε μπορούν να ενσωματωθούν σε δυναμικά μοντέλα της ατμόσφαιρας, προκειμένου να εκτιμηθεί ο ποσοτικός τους χαρακτήρας στην κλιματική αλλαγή (Charlson et al., 1992).

Τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν αντισταθμίσει τις επιδράσεις των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου τον προηγούμενο αιώνα, μέσω της ψύξης που προκαλούν στην επιφάνεια της Γης. Αυτό δεν έχει οδηγήσει μόνο στην ύπαρξη ενός βαθμού προστασίας από την θέρμανση του πλανήτη, αλλά και έχει αποτρέψει το φαινόμενο του θερμοκηπίου από το να γίνει προφανές. Συγκεκριμένα, μάλλον τα αιωρούμενα σωματίδια έχουν οδηγήσει στο να υποεκτιμάται η σημασία των αερίων του θερμοκηπίου στην κλιματική αλλαγή. Κατά την διάρκεια του παρόντος αιώνα, ο ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων στην ψύξη της επιφάνειας της γης, αναμένεται να μειωθεί, καθώς υπάρχουν διάφοροι ισχυροί λόγοι πολιτικής, π.χ. για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, που προωθούν την μείωση των εκπομπών, ενώ πρέπει να συνυπολογίζεται και ο περιορισμένος χρόνος παραμονής των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, σε σχέση με αυτόν των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου, που επιτείνει το πρόβλημα. Το τέλος της σημαντικής προστασίας που προσφέρουν τα αιωρούμενα σωματίδια στην επιφάνεια της Γης από την υπερθέρμανση, καθιστά κατεπείγουσες τις πολιτικές μείωσης των αερίων εκπομπών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και κυρίως του CO<sub>2</sub> (Andreae, 2007).

Όσον αφορά τις άμεσες επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλιματικό σύστημα, η αντανάκλαση και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα αιωρούμενα σωματίδια, σχετίζονται στενά με τη χημική σύστασή τους.

Τα αιωρούμενα σωματίδια που φαίνεται να ασκούν μεγάλη επιρροή στο κλιματικό σύστημα και που ψύχουν την επιφάνεια της Γης, είναι αυτά που περιέχουν θειικά ως αποτέλεσμα των εκπομπών διοξειδίου του θείου από την καύση ορυκτών καυσίμων και αυτά που περιέχουν οργανικό άνθρακα ως αποτέλεσμα της καύσης βιομάζας. Τα αιωρούμενα σωματίδια με αυτή τη χημική σύσταση, έχουν αποσπάσει την προσοχή των ερευνών, κυρίως επειδή σχετίζονται και με άλλα σημαντικά φαινόμενα, όπως είναι η όξινη εναπόθεση και η μείωση της ορατότητας. Στην πραγματικότητα, η λογική στην οποία στηρίζεται η άμεση επίπτωσή τους στο κλιματικό σύστημα, είναι παρόμοια με αυτήν που στηρίζεται στην επίπτωσή τους στην ορατότητα. Στην περίπτωση της άμεσης επίπτωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλιματικό σύστημα, η ανάκλαση αφορά στη σκέδαση μόνο προς τα έξω, δηλαδή μόνο προς το διάστημα και όχι προς τις άλλες κατευθύνσεις, μειώνοντας έτσι την ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης και ψύχοντάς την (Schwartz, 1996).

Από την μελέτη της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι η αιθάλη που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων αποτελεί την εξαίρεση στον κανόνα της ψύξης που προκαλούν τα αιωρούμενα σωματίδια, καθώς απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, αυτό δεν αλλάζει τη γενικότερη ψυκτική ικανότητα που έχουν τα αιωρούμενα σωματίδια στο κλιματικό σύστημα και η ιδιάζουσα, αντίθετη συμπεριφορά της αιθάλης που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, αναφέρεται εδώ για λόγους πληρότητας.

Από τη μελέτη του Jacobson (2001), συμπεραίνεται πως η αιθάλη που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, φαίνεται να διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, γεγονός το οποίο στο παρελθόν μάλλον είχε υποεκτιμηθεί. Συγκεκριμένα, δεδομένων των αερίων  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  και αιθάλης που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, προκύπτει πως αυτά τα αέρια σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου με την εξής φθίνουσα σειρά σπουδαιότητας:  $\text{CO}_2 > \text{Αιθάλη από την καύση ορυκτών καυσίμων} > \text{CH}_4$ .

Όπως προαναφέρθηκε, πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο κλιματικό σύστημα μέσω της απορρόφησης και αντανάκλασης της ακτινοβολίας, υπάρχουν και οι έμμεσες επιπτώσεις στο κλιματικό σύστημα μέσω της ενεργής συμμετοχής των αιωρούμενων σωματιδίων στο σχηματισμό των νεφών.

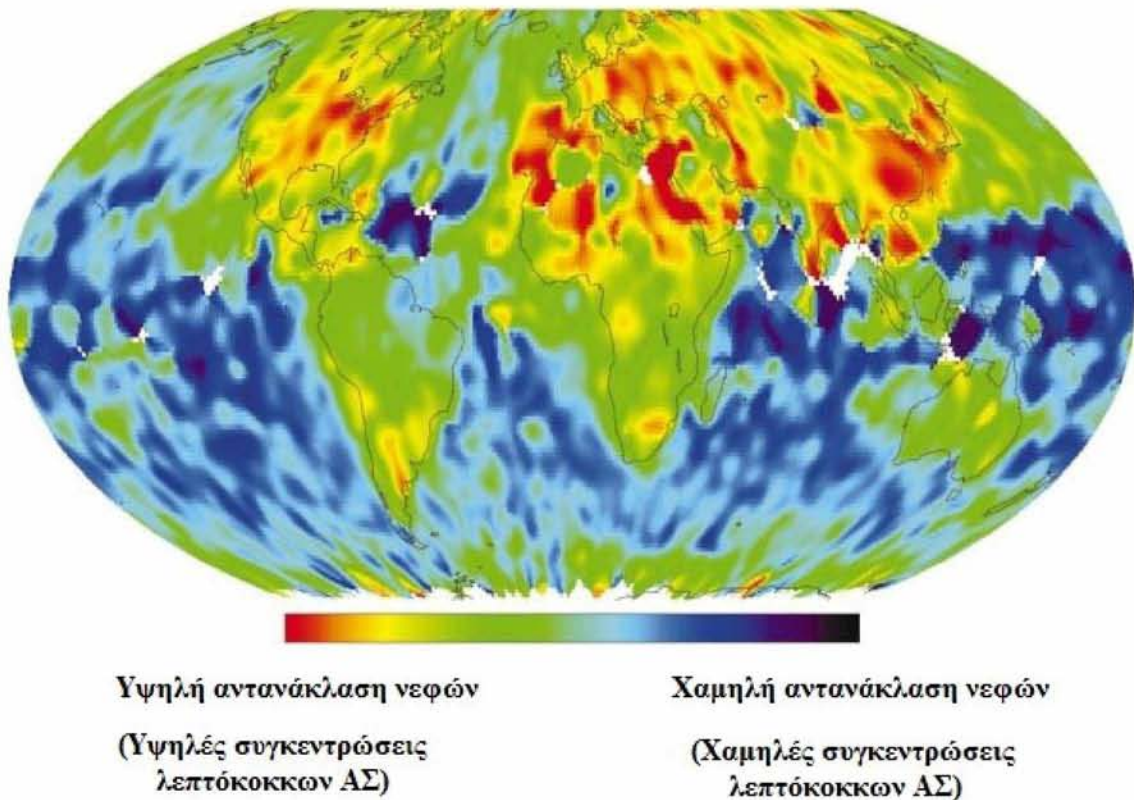
Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν σημαντικότερο παράγοντα των ιδιοτήτων των νεφών, καθώς είναι απαραίτητα για το σχηματισμό των σταγονιδίων των νεφών μέσω της διαδικασίας της συμπύκνωσης. Τα αιωρούμενα σωματίδια ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιο θα προσλάβει τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας, συνθέτοντας έτσι τα σταγονίδια των νεφών. Αν τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα είναι πολλά σε αριθμό, τότε τα προκύπτοντα σταγονίδια των νεφών είναι και αυτά πολλά σε αριθμό και δεν μεγαλώνουν σε μέγεθος όσο θα έπρεπε. Για την ίδια ποσότητα νερού, τα πολλά, μικρά σταγονίδια των νεφών, οδηγούν σε μεγαλύτερη επιφάνεια των νεφών από ότι αν υπήρχαν λίγα, μεγάλα σταγονίδια νεφών. Έτσι μια περιοχή αρκετά ρυπασμένη σε αιωρούμενα σωματίδια, οδηγεί στο σχηματισμό νεφών που έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια και επομένως μεγαλύτερη ικανότητα αντανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα και επομένως έχουν μεγαλύτερη ψυκτική ικανότητα στο κλιματικό σύστημα. Επιπροσθέτως, ένα ακόμη αποτέλεσμα είναι ότι τα πολλά, μικρά σταγονίδια των νεφών, συγκρούονται λιγότερο αποδοτικά το ένα με το άλλο, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα της βροχόπτωσης και τη συχνότητα εμφάνισής της και αυξάνοντας το χρόνο παραμονής των νεφών στην ατμόσφαιρα. Το δεύτερο αυτό αποτέλεσμα, δηλαδή της αύξησης του χρόνου παραμονής των νεφών στην ατμόσφαιρα, σημαίνει σαφώς και αύξηση του χρόνου αντανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας πίσω στο διάστημα, συμβάλλοντας πάλι όπως και η αυξημένη επιφάνεια των νεφών, σε αυξημένη ψύξη της επιφάνειας της Γης (Lohmann, 2006).

Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι απαραίτητα για το σχηματισμό των σταγονιδίων των νεφών, ωστόσο, αναλόγως της χημικής τους σύστασης, έχουν και διαφορετική ικανότητα πρόσμιξης, δηλαδή διάλυσης με τους υδρατμούς και επομένως έχουν και διαφορετική αποτελεσματικότητα στο να αποτελέσουν ικανούς προγόνους των σταγονιδίων των νεφών μέσω της συμπύκνωσης. Έτσι υπάρχουν αιωρούμενα σωματίδια που είναι υδρόφοβα (δηλαδή δεν θα αποτελέσουν προγόνους του σχηματισμού των νεφών σε καμία περίπτωση), αδιάλυτα στο νερό, αλλά που να διαθέτουν υδρόφιλα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν στο να υγρανθούν και να αποτελέσουν προγόνους του σχηματισμού των νεφών σε περιπτώσεις υψηλού κορεσμού και τέλος αιωρούμενα σωματίδια που έχουν κάποιο υδατοδιαλυτό συστατικό και μπορούν να αποτελέσουν ικανούς προγόνους του σχηματισμού των νεφών σε περιπτώσεις χαμηλού κορεσμού δοθέντος και του απαραίτητου χρόνου προκειμένου να επιτύχουν το κρίσιμο μέγεθος των σταγονιδίων των νεφών. Προκύπτει λοιπόν, πως μόνο τα αιωρούμενα σωματίδια που έχουν κάποιο υδρόφιλο, υδατοδιαλυτό χαρακτήρα

μπορούν να αποτελέσουν προδρόμους του σχηματισμού των νεφών και όχι όλα όσα υπάρχουν στην ατμόσφαιρα (Houghton et al., 2001).

Έτσι, συγκεκριμένα αιωρούμενα σωματίδια, όπως αυτά που περιέχουν θειικά και άλλα υδατοδιαλυτά και ανόργανα οξέα, όπως επίσης και το θαλάσσιο αερόλυμα, αποτελούν ισχυρούς υποψηφίους για το σχηματισμό των νεφών και επομένως συμβάλλουν στη ψύξη του κλιματικού συστήματος, έμμεσα, μέσω της επίδρασής τους στον υδρογεωλογικό κύκλο (Houghton et al., 2001).

Μια ενδεικτική εικόνα της αντανάκλασης που δημιουργούν τα νέφη, τόσο λόγω της αυξημένης επιφάνειά τους, όσο και του αυξημένου χρόνου παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (αποτελέσματα της αυξημένης συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα), δίδεται στο Σχήμα 2.4. Από το Σχήμα 2.4, φαίνεται πως τα νέφη των περιοχών της Ευρώπης, της Ασίας, και της Β. Αμερικής παρουσιάζουν υψηλή αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, μιας και οι περιοχές αυτές φαίνεται να έχουν αυξημένα επίπεδα συγκεντρώσεων λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων.



**Σχήμα 2.4** Μέση αντανάκλαση ηλιακής ακτινοβολίας από τα νέφη της ατμόσφαιρας κατά την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου 1997, [ΠΗΓΗ: Kaufman et al., 2002].

## **Β' ΜΕΡΟΣ**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΟΛΟΣ: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ**

#### **3.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Ο Βόλος αποτελεί παραλιακή πόλη της Θεσσαλίας, η οποία κατοικείται από περίπου 120.000 κατοίκους και η ατμοσφαιρική ρύπανση της οποίας προκύπτει από τις τοπικές ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ενώ συμβάλλουν σ' αυτή και μερικές φυσικές πηγές, όπως είναι το θαλάσσιο αερόλυμα λόγω γειτνίασης με τη θάλασσα και κατά καιρούς η μεταφορά σκόνης από τη Σαχάρα. Οι ανθρωπογενείς πηγές αφορούν σημαντικούς επιβαρυντικούς παράγοντες της ποιότητας της ατμόσφαιρας, από τους οποίους οι κυριότεροι είναι η αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση λόγω του σχετικά μεγάλου μεγέθους της πόλης, η λειτουργία βιοτεχνιών και βιομηχανιών (π.χ. οι δυο βιομηχανικές περιοχές ΒΔ της πόλης και η τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ ανατολικά της πόλης), η λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο και οι διάφορες καύσεις υλικών (βιομάζας, απορριμμάτων), οι οποίες κατά καιρούς γίνονται κοντά στην πόλη.

Σημαντικότατο ρόλο στην ατμοσφαιρική ρύπανση του Βόλου, διαδραματίζουν οι μετεωρολογικές συνθήκες αφού αυτές είναι που καθορίζουν την απομάκρυνση των ρύπων από την ατμόσφαιρα. Δεδομένου ότι οι ταχύτητες των ανέμων κατά τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) είναι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους σχεδόν μηδαμινοί (τα 2/3 των ημερών επικρατεί άπνοια), η συσσώρευση των ρύπων στην ατμόσφαιρα του Βόλου ευνοείται και μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στο Βόλο τουλάχιστον όσον αφορά την προστασία της ανθρώπινης υγείας, αφορά κατά βάση στο πρόβλημα που δημιουργούν τα αιωρούμενα σωματίδια. Αυτό επιβεβαιώνεται από αρκετές μελέτες που έχουν γίνει κατά καιρούς και το οποίο επαληθεύεται και από πρόσφατα ευρήματα των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008).

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζεται ο ρόλος βασικών ατμοσφαιρικών ρύπων στην ποιότητα ατμόσφαιρας του Βόλου και οι πηγές προέλευσής τους, δίνοντας έμφαση και εμβαθύνοντας στα αιωρούμενα σωματίδια και κυρίως στις πηγές προέλευσής τους.

### 3.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΣΤΟ ΒΟΛΟ

#### *3.2.1 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)*

Σύμφωνα με τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, οι οποίες προέρχονται κυρίως από τα παλαιάς τεχνολογίας βενζινοκίνητα ΙΧ, βρίσκονται σε επίπεδα κάτω από τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας και αυτό αποδίδεται κυρίως στην ανανέωση των παλαιών συμβατικών ΙΧ αυτοκινήτων με νέα καταλυτικής τεχνολογίας. Η διαπίστωση αυτή περί των χαμηλών επιπέδων μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, φαίνεται να επαληθεύεται και από άλλους ερευνητές, όπως π.χ. από τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005).

Οι συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα του Βόλου σε επίπεδο ωρών, φαίνεται να ακολουθεί δυο μέγιστες τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, η πρώτη μέγιστη τιμή αφορά τις πρωινές ώρες και η δεύτερη μέγιστη τιμή αφορά τις απογευματινές ώρες, γεγονός που αποδίδεται στις εξάρσεις των αστικών δραστηριοτήτων κατά τις ίδιες ώρες (Riga-Karandinos and Saitanis, 2005).

Η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα του Βόλου είναι μεγαλύτερη κατά τη χειμερινή περίοδο από ότι κατά τη θερμή περίοδο, γεγονός το οποίο οφείλεται στις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς κατά τη χειμερινή περίοδο και ειδικά στις χαμηλές επικρατούσες ταχύτητες των ανέμων κατά τη χειμερινή περίοδο στο Βόλο (Καλαμπόκας κ.ά., 2005).

Σχετικά με τον ρόλο των κατευθύνσεων του ανέμου στις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, κατά τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005), δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ ΒΔ και ΝΑ κατευθύνσεων ανέμου, υποδεικνύοντας το κέντρο της πόλης ως βασική πηγή ρύπανσης της ατμόσφαιρας.

#### *3.2.2 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SO<sub>2</sub>)*

Κατά τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, οι οποίες προέρχονται κυρίως από τα πετρελαιοκίνητα οχήματα, τους καυστήρες θέρμανσης και τη βιομηχανική δραστηριότητα, βρίσκονται κάτω από τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας. Κατά τους ίδιους, το γεγονός αυτό αποδίδεται στη διαχρονική βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τα οχήματα, τη θέρμανση και τη βιομηχανία



καθώς μειώνεται διαχρονικά η περιεκτικότητά τους σε θείο, αλλά και στη σταδιακή εισαγωγή και χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου στη βιομηχανία και στη θέρμανση των κτιρίων. Η διαπίστωση αυτή περί των χαμηλών επιπέδων διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στην ατμόσφαιρα του Βόλου σε σχέση με τα όρια ποιότητας, εντοπίζεται και από άλλους ερευνητές όπως π.χ. από τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005) και Papaioannou et al. (2010).

Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στην ατμόσφαιρα του Βόλου σε επίπεδο ωρών, φαίνεται να παρουσιάζουν δυο μέγιστες τιμές κατά την διάρκεια της ημέρας, με την πρώτη μέγιστη τιμή να αφορά τις πρωινές ώρες και τη δεύτερη μέγιστη τιμή να αφορά τις απογευματινές ώρες, γεγονός που αποδίδεται στις εξάρσεις των αστικών δραστηριοτήτων κατά τις ίδιες ώρες (Riga-Karandinos and Saitanis, 2005, Papaioannou et al., 2010).

Βάσει των Καλαμπόκας κ.ά. (2005), τα επίπεδα συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στο Βόλο τείνουν να είναι υψηλότερα κατά τη χειμερινή περίοδο, το οποίο φαίνεται να αποδίδεται στη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο όπως επίσης και στις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς κατά την ίδια περίοδο. Οι δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς έχουν να κάνουν με τις χαμηλές γενικά ταχύτητες των ανέμων κατά τη χειμερινή περίοδο, που φυσικά ευνοούν την συσσώρευση των ρύπων.

Τέλος, όπως επισημαίνεται από τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005), σχετικά με το ρόλο της κατεύθυνσης του ανέμου στα επίπεδα συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στο Βόλο, προκύπτει πως τα επίπεδα συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, δεν φαίνεται να διαφοροποιούνται πολύ μεταξύ ΒΔ και ΝΑ κατευθύνσεων, γεγονός το οποίο δείχνει πως η κύρια πηγή ρύπανσης της ατμόσφαιρας από διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) είναι οι λειτουργίες της πόλης.

### 3.2.3 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ ( $\text{NO}_2$ )

Κατά τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, οι οποίες προέρχονται κυρίως από την κυκλοφορία των οχημάτων αλλά και από την κεντρική θέρμανση και τη βιομηχανική δραστηριότητα, βρίσκονται πολύ κοντά ώστε μελλοντικά να αποτελέσουν αφορμή για υπερβάσεις των ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας. Η διαπίστωση αυτή περί αυξημένων επιπέδων διοξειδίου του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) στην ατμόσφαιρα του Βόλου φαίνεται να επαληθεύεται και από άλλους ερευνητές όπως π.χ. από τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005).

Όπως στις περιπτώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), έτσι και στην περίπτωση του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) κατά τους Riga-Karandinos και Saitanis (2005) και Papaioannou et al. (2010), οι συγκεντρώσεις του στην ατμόσφαιρα του Βόλου σε επίπεδο ωρών, φαίνεται να παρουσιάζουν δυο μέγιστες τιμές κατά την διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα η πρώτη μέγιστη τιμή αφορά τις πρωινές ώρες και η δεύτερη μέγιστη τιμή αφορά τις απογευματινές ώρες, γεγονός που αποδίδεται στις εξάρσεις των αστικών δραστηριοτήτων κατά τις ίδιες ώρες.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) σε επίπεδο ημερών, οι Riga-Karandinos και Saitanis (2005), παρατήρησαν μια σημαντική μείωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO) και κατ' επέκταση των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) στην ατμόσφαιρα του Βόλου κατά την διάρκεια των Σαββατοκύριακων, την οποία και αποδίδουν στη μειωμένη κίνηση των οχημάτων κατά τα Σαββατοκύριακα.

Με βάση τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005), τα επίπεδα συγκεντρώσεων του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) στο Βόλο τείνουν να είναι υψηλότερα κατά τη χειμερινή περίοδο, το οποίο αποδίδεται στη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο όπως επίσης και στις δυσμενέστερες συνθήκες διασποράς κατά την ίδια περίοδο που έχουν να κάνουν με τις χαμηλές ταχύτητες των ανέμων.

Τέλος, όπως αναφέρουν οι Καλαμπόκας κ.ά. (2005), οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) στο Βόλο για ΝΑ κατευθύνσεις ανέμων, είναι ελαφρά μεγαλύτερες από αυτές των ΒΔ κατευθύνσεων, γεγονός που αποδίδεται στην επίδραση του κέντρου και του λιμανιού, καθώς επίσης και στην πιθανή επαναπροώθηση ρύπων από τη θάλασσα, λόγω της κυκλοφορίας του θαλάσσιου αερολύματος.

#### 3.2.4 OZON (O<sub>3</sub>)

Σύμφωνα με τις διαπιστώσεις των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) και Καλαμπόκας κ.ά. (2005), οι συγκεντρώσεις του όζοντος (O<sub>3</sub>) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, οι οποίες οφείλονται σε φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα από πρωτογενείς ρύπους, βρίσκονται κάτω από τα όρια ποιότητας, αλλά κοντά στο να αποτελέσουν αφορμή για υπερβάσεις των ορίων. Συγκεκριμένα, οι Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), αναφέρονται με επιφύλαξη στις συγκεντρώσεις του όζοντος (O<sub>3</sub>) στην ατμόσφαιρα του Βόλου, καθώς όπως αναφέρουν οι ίδιοι, το όζον (O<sub>3</sub>) έχει πολύπλοκη φυσικοχημική συμπεριφορά και μεταφέρεται από τα κέντρα των πόλεων στις περιαστικές περιοχές όπου και παρατηρούνται μεγαλύτερες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις. Κατά τους Saitanis et al (2004), οι συγκεντρώσεις του όζοντος (O<sub>3</sub>)

στο Βόλο, έχουν ευρύτερη χωρική επίδραση στην περιοχή του Παγασητικού και στο όρος Πήλιο και κινούνται σε επίπεδα που προκαλούν φυτοτοξικότητα σε ευαίσθητα φυτικά είδη.

Σχετικά με την συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων του όζοντος ( $O_3$ ) κατά την διάρκεια της ημέρας στο Βόλο, τα στοιχεία με βάση τις διαπιστώσεις των Saitanis et al. (2004) και Papanastasiou και Melas (2009b), συγκλίνουν στο ότι το όζον ( $O_3$ ) παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του κατά το απόγευμα, περίπου στις 16:00 - 17:00, λόγω της αυξημένης έντασης του ηλιακού φωτός που ευνοεί το σχηματισμό του.

Οι συγκεντρώσεις του όζοντος ( $O_3$ ) κατά την διάρκεια της εβδομάδας στο Βόλο παρουσιάζουν σύμφωνα με τους Riga-Karandinos και Saitanis (2005), υψηλότερες τιμές κατά τα Σαββατοκύριακα. Αυτό κατά τους ίδιους, αποδίδεται στις περιορισμένες εκπομπές των οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ ) και των περιορισμένων εκπομπών των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) που επικρατούν στο Βόλο κατά τα Σαββατοκύριακα.

Σύμφωνα με τους Saitanis et al. (2004), τα επίπεδα συγκεντρώσεων του όζοντος ( $O_3$ ) στο Βόλο, τείνουν να είναι υψηλότερα κατά τη θερμή περίοδο, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην αυξημένη ένταση του ηλιακού φωτός κατά την ίδια περίοδο.

Τέλος, όπως αναφέρουν οι Καλαμπόκας κ.ά. (2005), οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του όζοντος ( $O_3$ ) στο Βόλο σε σχέση με τις επικρατούσες κατευθύνσεις των ανέμων, δείχνουν πως για ΝΑ κατευθύνσεις ανέμων, οι συγκεντρώσεις του όζοντος ( $O_3$ ) είναι ελαφρά υψηλότερες από ότι για ΒΔ κατευθύνσεις, γεγονός το οποίο αποδίδεται στη μεταφορά του θαλάσσιου αερολύματος.

### 3.2.5 ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα του Βόλου, αποτελούν το σημαντικότερο πρόβλημα, αφού συνοδεύονται από συνεχείς κατά την πάροδο των ετών παραβιάσεις των ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας, γεγονός το οποίο επαληθεύεται από τα ευρήματα πολλών ερευνητών, π.χ. από τους Καλαμπόκας κ.ά. (2005), Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), Proias et al. (2009) και Papanastasiou και Melas (2009b).

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, γίνεται αναλυτική αναφορά στις πηγές των αιωρούμενων σωματιδίων  $AS_{10}$  στο Βόλο, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερειακή στατιστική ανάλυση όπου αναδεικνύονται οι διακυμάνσεις των αιωρούμενων σωματιδίων  $AS_{10}$  στο Βόλο και εξετάζεται η επίδραση μερικών βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων στις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$ .

### 3.3 ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΒΟΛΟ

Οι Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), ασχολήθηκαν με τη χημική ανάλυση των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> του Βόλου κατά τα έτη 2007 και 2008, έπειτα από την επιθυμία της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Μαγνησίας (Ν.Α.Μ.) να βρεθούν οι πηγές που συμβάλλουν στις υψηλές συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές εξέτασαν το χημικό προφίλ των αιωρούμενων σωματιδίων σε τρεις θέσεις της πόλης του Βόλου: α) Κέντρο (εμπορικό κέντρο της πόλης), β) Ν. Ιωνία (στο δυτικό τομέα της πόλης και γ) Ν. Δημητριάδα (στον ανατολικό τομέα της πόλης) και κατέληξαν στα εξής:

- Οι τρεις θέσεις παρουσιάζουν παρόμοιες συγκεντρώσεις για τα περισσότερα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub>. Στατιστικά σημαντικές διαφορές ( $P < 0,05$ ) μεταξύ των θέσεων προέκυψαν για κάποια συστατικά των ΑΣ<sub>10</sub> όπως Ca (Κέντρο > Ν. Ιωνία), Cu (Κέντρο > Ν. Ιωνία και Ν. Δημητριάδα), Te (Ν. Ιωνία > Κέντρο και Ν. Δημητριάδα), Ba (Ν. Ιωνία > Κέντρο).
- Οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> και ορισμένων χημικών συστατικών (Cl, Zn, As, Br) ήταν σημαντικά υψηλότερες κατά τη χειμερινή περίοδο. Αντιθέτως, χημικά στοιχεία όπως Mg, Al, Si στη Ν. Ιωνία, Se σε όλες τις θέσεις, Cd στη Ν. Δημητριάδα, Ba στη Ν. Δημητριάδα και τη Ν. Ιωνία έδειξαν σημαντικά υψηλότερη συγκέντρωση κατά τη θερινή περίοδο.

Οι Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), προκειμένου να ταυτοποιήσουν τις πηγές εκπομπής σωματιδίων και κατά πόσο αυτές συμβάλλουν στη ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια στο Βόλο, εφήρμοσαν το μοντέλο ισοστάθμισης χημικής μάζας (Chemical Mass Balance, CMB 8.2). Στο μοντέλο οι ίδιοι εισήγαγαν τα χημικά προφίλ 19 τοπικών πηγών και 2 βιβλιογραφικών και κατέληξαν ότι ο συνδυασμός που δίνει την καλύτερη προσαρμογή στο μοντέλο περιλαμβάνει τις κάτωθι 10 πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων για την πόλη του Βόλου:

1. Καταλυτικά αυτοκίνητα
2. Πετρελαιοκίνητα οχήματα
3. Σκόνη δρόμου
4. Πετρέλαιο θέρμανσης
5. Καύση Βιομάζας (αγροτικές καύσεις, καύση ξύλου, δασικές πυρκαγιές)

6. Καύση απορριμμάτων
7. Δευτερογενή θειικά
8. Θαλάσσιο αερόλυμα
9. Τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ
10. Χαλυβουργία Ελλάδος

Οι Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), λαμβάνοντας υπόψη τις 10 προαναφερθείσες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων για την πόλη του Βόλου, κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα σχετικά με τα ποσοστά συμμετοχής κάθε μιας πηγής στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> και για τις τρεις θέσεις (Κέντρο, Ν. Ιωνία και Ν. Δημητριάδα):

- Η σημαντικότερη πηγή των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> και στις τρεις θέσεις είναι η κυκλοφορία πετρελαιοκίνητων οχημάτων με μέσα ποσοστά συμμετοχής 39,8% στο Κέντρο, 27,8% στη Ν. Ιωνία και 32,4% στη Ν. Δημητριάδα. Η ποσοστιαία συνεισφορά των καταλυτικών αυτοκινήτων ήταν μικρότερη (9,2% στο Κέντρο, 9,4% στη Ν. Ιωνία και 4,5% στη Ν. Δημητριάδα), ενώ τα υπόλοιπα είδη κυκλοφορίας δεν έδειξαν ποσοτικοποιήσιμη συνεισφορά.
- Η επαναιώρηση της σκόνης του δρόμου έδειξε συμμετοχή 8,7% στο Κέντρο, 12,2% στη Ν. Ιωνία και 2,6% στη Ν. Δημητριάδα.
- Η ποσοστιαία συνεισφορά της καύσης βιομάζας ήταν 10,6% στο Κέντρο, 4,9% στη Ν. Ιωνία και 11,4% στη Ν. Δημητριάδα.
- Η καύση του πετρελαίου έδειξε συνεισφορά 7,1% στο Κέντρο, 4,0% στη Ν. Ιωνία και 16,4% στη Ν. Δημητριάδα.
- Η καύση των απορριμμάτων έδειξε ποσοστιαία συμμετοχή σε όλες τις θέσεις και συγκεκριμένα 17,1% στη Ν. Ιωνία, 11,1% στο Κέντρο και 3,2% στη Ν. Δημητριάδα.
- Σχετικά με τις 2 βιομηχανικές πηγές που εξετάστηκαν (τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ και Χαλυβουργία Ελλάδος), βρέθηκαν: α) για την τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ, ποσοστά συμμετοχής 8,4% στο Κέντρο, 13,9% στη Ν. Ιωνία και 22,2% στη Ν. Δημητριάδα, β) για τη Χαλυβουργία Ελλάδος, ποσοστά συμμετοχής 0,2% στο Κέντρο, 1,2% στη Ν. Ιωνία και 0,9% στη Ν. Δημητριάδα.

- Τα δευτερογενή θειικά συμμετέχουν με ποσοστά που κυμαίνονται από 1,8% (Ν. Δημητριάδα) έως 9,0% (Ν. Ιωνία), ενώ το θαλάσσιο αερόλυμα συμμετέχει με ποσοστά που κυμαίνονται από 0,4% (Ν. Ιωνία) έως 1,8% (Κέντρο και Ν. Δημητριάδα).

Τέλος, οι Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), συνοψίζοντας το ερευνητικό τους έργο περί προσδιορισμού των πηγών προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> για την περιοχή του Βόλου, καταλήγουν στα εξής:

- Η κυκλοφορία των οχημάτων (κυρίως τα πετρελαιοκίνητα οχήματα αλλά και τα βενζινοκίνητα οχήματα και η επαναιώρηση της σκόνης του δρόμου) έχει το σημαντικότερο ποσοστό συμμετοχής στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο και ειδικότερα κατέχει το 57,7% στο Κέντρο, 49,4% στη Ν. Ιωνία και 39,5% στη Ν. Δημητριάδα.
- Επόμενες σημαντικές πηγές είναι η τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ κυρίως στη Ν. Δημητριάδα με 22,2%, η καύση απορριμμάτων κυρίως στη Ν. Ιωνία με 17,1% και η καύση πετρελαίου (ιδίως στη θέρμανση) κυρίως στη Ν. Δημητριάδα με 16,4%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΒΟΛΟ

### 4.1 ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η προσέγγιση των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας του Βόλου, γίνεται με τη βοήθεια των ωριαίων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> για την τετραετία 2007-2010 (32106 έγκυρες ωριαίες τιμές), όπως αυτές προέκυψαν από τον σταθμό μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ) και διατέθηκαν από την ΔΕΥΑΜΒ για το σκοπό της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ο σταθμός μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ) χωροθετείται στην συνοικία των Παλαιών και μάλιστα σε κεντρικό σημείο επί της Λεωφόρου Λαμπράκη, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί πως είναι αντιπροσωπευτικό της κατάστασης που επικρατεί και στους άλλους κεντρικούς δρόμους της πόλης από πλευράς κίνησης οχημάτων.

Ο εν λόγω σταθμός μέτρησης περιλαμβάνει το μοντέλο MP101M, το οποίο συμφωνεί με τον τρόπο μέτρησης της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub> όπως έχει οριστεί από την US EPA και τον οποίο χρησιμοποιεί και η χώρα μας. Ειδικότερα, η μέτρηση της συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub> από το μηχανήμα, γίνεται μέσω της μέτρησης της ποσότητας ακτινοβολίας βήτα, η οποία απορροφάται από τα συγκρατούντα αιωρούμενα σωματίδια.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πλέον των ωριαίων συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> για την περίοδο 2007-2010, οι οποίες προέρχονται από τα στοιχεία του σταθμού μέτρησης αιωρούμενων σωματιδίων της ΔΕΥΑΜΒ, χρησιμοποιούνται και οι ημερήσιες μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ανέμου για την ίδια περίοδο 2007-2010, οι οποίες προέρχονται από τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού που διατηρεί στο κέντρο της πόλης του Βόλου το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και τα οποία είναι προσβάσιμα μέσω της διαδικτυακής διεύθυνσης <http://penteli.meteo.gr/meteosearch/default.asp>. Η επιλογή χρησιμοποίησης δεδομένων και για μετεωρολογικές παραμέτρους, γίνεται για λόγους αναζήτησης επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων στις ημερήσιες συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> για την περίπτωση του Βόλου, θέμα το οποίο πραγματεύεται μεταξύ άλλων το παρόν κεφάλαιο.

## 4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΩΡΩΝ

Τα αιωρούμενα σωματίδια του Βόλου για την περίοδο 2007-2010, βάσει 32106 έγκυρων ωριαίων τιμών, παρουσιάζουν το εξής βασικό στατιστικό προφίλ σε ωριαίο επίπεδο:

- Μέση τιμή ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ :  $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Διάμεση τιμή ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ :  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Μέγιστη τιμή ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ :  $512 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Ελάχιστη τιμή ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ :  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Τυπική απόκλιση ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$ :  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Από αυτό το βασικό στατιστικό προφίλ, η κεντρική τάση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  για την περίοδο 2007-2010, βάσει της μέσης τιμής αλλά και της διαμέσου, που ως γνωστόν δεν επηρεάζεται από ακραίες τιμές, φαίνεται να κινείται γύρω στα  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αξιοσημείωτη είναι η μέγιστη τιμή των  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , που παρατηρήθηκε κατά το διάστημα 2007-2010 και που σαφώς είναι πάρα πολύ υψηλή και ακραία.

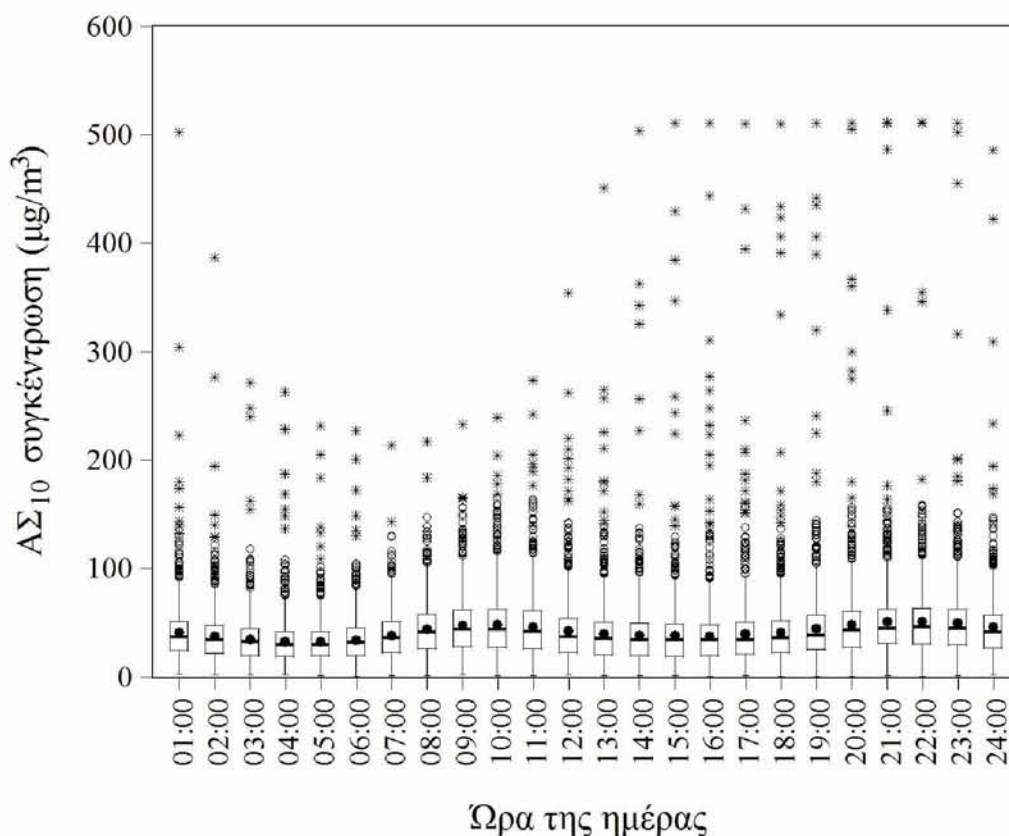
Το Σχήμα 4.1 αποτελεί ουσιαστικά μια σειρά από θηκογράμματα (boxplots), κάθε ένα από τα οποία εμφανίζει την κατανομή των ωριαίων συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  κάθε δεδομένης ώρας της ημέρας π.χ. 1:00, 2:00, κ.ά. Κάθε θηκόγραμμα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά όπως είναι η μέση τιμή, η διάμεσος, το ενδοτεταρτομοριακό πλάτος και οι ακραίες τιμές της κατανομής. Ουσιαστικά αποκαλύπτει την χρονική διακύμανση των ωριαίων συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά πέρα από αυτό αποκαλύπτει και τις ακραίες τιμές συγκεντρώσεων που τυχόν υπάρχουν.

Από το Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι η ωριαία συγκέντρωση στο Βόλο κατά τη διάρκεια της ημέρας ακολουθεί δυο μοτίβα.

Πρώτα μελετώντας τόσο την μέση τιμή όσο και την διάμεση τιμή, φαίνεται ότι η ωριαία συγκέντρωση  $AS_{10}$  ακολουθεί μια κυματοειδή μορφή παρουσιάζοντας δυο τοπικά μέγιστα και συγκεκριμένα στις ώρες 10:00 και 22:00. Ειδικά: α) από τις 22:00 το βράδυ έως τις 4:00 το πρωί, υπάρχει μια πτώση στην συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, λόγω λογικά της πτώσης του κυκλοφοριακού φόρτου που συνδέεται με την βραδινή ξεκούραση και β) από τις 4:00 έως τις 10:00 το πρωί καθώς και από τις 16:00 έως τις 22:00 το βράδυ, υπάρχει μια ανοδική τάση λόγω λογικά της ανόδου του κυκλοφοριακού φόρτου που συνδέεται με τις ημερήσιες δραστηριότητες των ανθρώπων



όπως εργασία, κατανάλωση, κ.ά. Όπως φαίνεται λοιπόν, το πρώτο αυτό μοτίβο συμφωνεί με την διαπίστωση των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) περί της απόδοσης των πηγών εκπομπής των αιωρούμενων σωματιδίων κατά βάση στα οχήματα και συνεπώς στον κυκλοφοριακό φόρτο.



**Σχήμα 4.1** Ωριαία κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Το δεύτερο μοτίβο που αποκαλύπτεται είναι ότι φαίνεται να υπάρχουν πολλές ακραίες ωριαίες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> κατά τις απογευματινές ώρες. Είναι εμφανείς στο Σχήμα 4.1 τιμές που ξεπερνούν τα 300 μg/m<sup>3</sup> και σε κάποιες περιπτώσεις φτάνουν τα 500 μg/m<sup>3</sup>. Αυτό το φαινόμενο φαίνεται να αποδίδεται τουλάχιστον κατά ένα βαθμό μάλλον στην συνεργιστική επίδραση που έχει στη συγκέντρωση των χονδρόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων το θαλάσσιο αερόλυμα σε συνδυασμό με τις καταστάσεις χαμηλών ταχυτήτων ανέμου. Οι Papanastasiou και Melas (2009a), οι οποίοι εξέτασαν την επίδραση του θαλάσσιου αερολύματος στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων κατά την περίοδο 2001-2005 στο Βόλο, κατέληξαν στα εξής όσον αφορά το ωριαίο επίπεδο:

- Το θαλάσσιο αερόλυμα κάνει την εμφάνισή του κυρίως κατά τις ώρες 9:00 με 11:00, ενώ παύει κατά τις ώρες 20:00 με 22:00.
- Η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων επηρεάζεται από την παρουσία του θαλάσσιου αερολύματος, το οποίο μάλιστα συνοδεύεται και από χαμηλές ταχύτητες ανέμων που τείνουν να επικρατούν κατά την παρουσία του και που σαφώς οδηγούν σε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα του Βόλου.

Έτσι λοιπόν λογικό είναι οι ακραίες τιμές που εμφανίζονται στο Σχήμα 4.1 κατά τις απογευματινές ώρες να αποδοθούν τουλάχιστον κατά ένα βαθμό στην συνεργιστική επίδραση του θαλάσσιου αερολύματος σε συνδυασμό με τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Κατά συνέπεια το δεύτερο αυτό μοτίβο φαίνεται να συμφωνεί με την διαπίστωση των Papanastasiou και Melas (2009a), που σχετίζει την συνεργιστική επίδραση του θαλάσσιου αερολύματος και των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου με την αυξημένη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα του Βόλου κατά τις ώρες όπου το θαλάσσιο αερόλυμα είναι παρόν.

#### 4.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ $AS_{10}$ ΤΗΣ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΗΜΕΡΩΝ

##### 4.2.2.1 ΤΑ ΟΦΕΛΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΝΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΝΥΠΙΑΡΧΟΥΣΕΣ ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ

Το πρόβλημα της αέριας ρύπανσης στην περιοχή του Βόλου, αλλά και γενικά σε οποιαδήποτε περιοχή αντιμετωπίζει πρόβλημα αέριας ρύπανσης, αποτελεί μια καλή πρόκληση για κατασκευή μοντέλου πρόβλεψης, το οποίο θα δύναται να δίνει μια καλή εκτίμηση με ένα σεβαστό περιθώριο λάθους για την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων που αναμένεται να υπάρξει είτε την επόμενη ώρα, είτε την επόμενη ημέρα, κ.ά. Τα οφέλη από μια τέτοια κατασκευή μοντέλου συνδέονται περισσότερο με την κατανόηση του φαινομένου της ρύπανσης και με την λήψη προληπτικών μέτρων από τις διοικούσες αρχές, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ανθρώπινη υγεία, που όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση των αιωρούμενων σωματιδίων, κινδυνεύει ακόμη και από την βραχυχρόνια έκθεση σε αυξημένες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων μέσω των προβλημάτων που δημιουργούν στο αναπνευστικό σύστημα.

Ωστόσο, η κατασκευή ενός μοντέλου πρόβλεψης των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, συνοδεύεται από την παρουσία προβλημάτων που απαιτούν

τις ανάλογες προσεγγίσεις. Το βασικό πρόβλημα που συναντάται στην προσπάθειά προσέγγισης του φαινομένου της αέριας ρύπανσης είναι ότι αυτό δεν συνοδεύεται από απλά δεδομένα με την έννοια του ότι αυτά είναι τυχαία, αλλά από δεδομένα που λειτουργούν και χαρακτηρίζονται ως χρονολογικές σειρές δεδομένων. Ως χρονολογική σειρά φυσικά εννοείται ότι κάθε μέτρηση γίνεται ανά τακτά και καθορισμένα χρονικά διαστήματα π.χ. ανά ώρα, ανά ημέρα, ανά μήνα, κ.ά. Αυτό ακριβώς εισάγει το πρόβλημα του χρόνου στα δεδομένα, το οποίο στη περίπτωση της αέριας ρύπανσης είναι αναπόφευκτα συνδεδεμένο με την επανάληψη ή αλλιώς τη μνήμη των συγκεντρώσεων των ρύπων. Με άλλα λόγια, αν συνηθίζεται όπως προαναφέρθηκε στις 10:00 το πρωί η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο να είναι αυξημένη, τότε λογικά αυτό θα τείνει να επαναλαμβάνεται στο χρόνο, τουλάχιστον στο βραχυπρόθεσμο χρόνο. Αυτό φυσικά καταστρατηγεί την ανεξαρτησία των παρατηρήσεων και είναι αυτό που ακριβώς καθιστά εφικτή την κατασκευή ενός μοντέλου πρόβλεψης της αέριας ρύπανσης.

Αναδεικνύεται λοιπόν ο τρόπος προσέγγισης της κατασκευής του μοντέλου πρόβλεψης για την περίπτωση του Βόλου, ο οποίος στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στην μνήμη, δηλαδή στην ιστορία των μετρήσεων των αιωρούμενων σωματιδίων που έχουν καταγραφεί και φυσικά αυτός ο τρόπος θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του μοντέλου.

Επισημαίνεται, ότι κατά την Norusis (2005), η συνηθισμένη προσέγγιση του μοντέλου πρόβλεψης μέσω απλής ή και πολλαπλής παλινδρόμησης σε περίπτωση χρονολογικών σειρών όπως είναι αυτή που αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια στο Βόλο, αποκλείεται καθότι παραβιάζεται η αρχή της ανεξαρτησίας των παρατηρήσεων.

Η υιοθέτηση ενός τέτοιου μοντέλου πρόβλεψης για τα αιωρούμενα σωματίδια που να στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στην ιστορία των συγκεντρώσεων προέκυψε μεταξύ άλλων αφενός από την αναγκαιότητα για εναλλακτική επιλογή πέρα από την παλινδρόμηση και αφετέρου από την εξέταση της βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα προσέγγισης της πρόβλεψης της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από άλλους ερευνητές παγκοσμίως οι οποίοι τα τελευταία χρόνια τείνουν να ακολουθούν νέες μεθοδολογίες.

## 4.2.2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ARIMA ΤΩΝ BOX ΚΑΙ JENKINS

Η προταθείσα προσέγγιση βασίζεται στο μοντέλο ARIMA των Box και Jenkins, που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης στην οικονομετρία προκειμένου να καταστεί εφικτή η πρόβλεψη σε βραχυχρόνιο επίπεδο χρονολογικών σειρών. Στην περίπτωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το μοντέλο ARIMA έχει χρησιμοποιηθεί με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα από πληθώρα ερευνητών μεταξύ άλλων, από τους Kumar et al. (2004), Katsoulis και Pnevmatikos (2009), Sharma et al. (2009), Ibrahim et al. (2009). Μελετώντας την μεθοδολογία των Box και Jenkins (1976) μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Το μοντέλο ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) αποτελεί ουσιαστικά ένα μοντέλο, το οποίο προβλέπει την εξέλιξη μιας χρονολογικής σειράς δεδομένων μέσω δυο τρόπων α) μέσω των ήδη γνωστών τελευταίων παρατηρήσεων του παρελθόντος (τμήμα AR του μοντέλου) και β) μέσω των ήδη γνωστών τελευταίων σφαλμάτων πρόβλεψης (τμήμα MA του μοντέλου). Συγκεκριμένα, αν στο μοντέλο χρησιμοποιούνται  $p$  τελευταίες γνωστές παρατηρήσεις για την πρόβλεψη π.χ. της επόμενης ημέρας και  $q$  τελευταία σφάλματα πρόβλεψης, δηλαδή διαφορές παρατηρούμενης τιμής από την προβλεπόμενη τιμή, τότε έχουμε ένα μοντέλο ARIMA  $(p,0,q)$ .
- Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή του μοντέλου ARIMA, είναι ότι θα πρέπει η χρονολογική σειρά να έχει εξαρχής καταστεί στάσιμη, δηλαδή με λίγα λόγια κυρίως να έχει σταθερή μέση τιμή και διακύμανση στην πορεία του χρόνου. Αυτό, συνήθως επιτυγχάνεται με το τμήμα I του μοντέλου, που αφορά τις διαφορές  $d$  που πρέπει να πάρει κάποιος, ώστε να καταστήσει την χρονολογική σειρά στάσιμη και οι οποίες συνήθως είναι μια ή δυο.
- Κατά συνέπεια η γενική μορφή του μοντέλου ARIMA είναι ARIMA  $(p,d,q)$ .

Το τμήμα λοιπόν I του μοντέλου ARIMA, αφορά τις διαφορές οι οποίες λαμβάνονται από μια χρονολογική σειρά με τρόπο ως εξής: Αν π.χ. έχουμε μια χρονολογική σειρά  $X$  με παρατηρήσεις  $X_1=2$ ,  $X_2=4$ ,  $X_3=6$ ,  $X_4=8$  και  $X_5=10$  τότε οι πρώτες διαφορές δίνουν τις εξής νέες τιμές  $X_2-X_1=2$ ,  $X_3-X_2=2$ ,  $X_4-X_3=2$  και  $X_5-X_4=2$ . Έτσι η αρχική μη στάσιμη χρονολογική σειρά 2,4,6,8,10, που σαφώς φαίνεται να μην

έχει σταθερή μέση τιμή καθώς ανεβαίνει με την πάροδο του χρόνου, μετατρέπεται με τις πρώτες διαφορές στην νέα χρονολογική σειρά 2,2,2,2 που είναι πλέον στάσιμη καθώς έχει σταθερή πλέον μέση τιμή. Ανάλογα μπορούμε να λάβουμε αν απαιτείται και τις δεύτερες διαφορές. Γίνεται σαφές, πως με τις πρώτες διαφορές, προκύπτει χρονολογική σειρά που έχει μια τιμή λιγότερη, ενώ στην περίπτωση των δεύτερων διαφορών, προφανώς προκύπτει χρονολογική σειρά που έχει μια επιπλέον λιγότερη τιμή, δηλαδή 2 λιγότερες τιμές σε σχέση με την αρχική χρονολογική σειρά. Τελικά μια χρονολογική σειρά που έχει υποστεί τις πρώτες διαφορές για να γίνει στάσιμη και που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, θα παρουσιάζεται με την μορφή ARIMA (p,1,q).

Οι Box και Jenkins (1976), ανέπτυξαν πέρα από την προαναφερθείσα μορφή του μοντέλου ARIMA (p,d,q) που είναι μη εποχικό και την εποχική μορφή του μοντέλου ARIMA (p,d,q) x (P,D,Q)<sub>s</sub>. Τα P, D και Q έχουν ακριβώς την ίδια σημασία όπως τα p,d,q, με την μόνη διαφορά να έγκειται στο γεγονός ότι τα P, D και Q αφορούν συγκεκριμένες παρατηρήσεις της χρονολογικής σειράς που είναι παρατηρήσεις ανά περίοδο S. Σχετικά με το νόημα της περιόδου S, αν υποτεθεί ότι έχουμε μηνιαίες μετρήσεις ενός ρύπου π.χ. του CO, η περίοδος S ισούται με 12, ενώ αν έχουμε π.χ. ωριαίες μετρήσεις, τότε σαφώς το S είναι 24. Στο πλαίσιο αυτό, αν έχουμε π.χ. τις μηνιαίες μετρήσεις του CO και θέλουμε να προβλέψουμε την επόμενη μηνιαία τιμή έστω του Ιουλίου, τότε στην περίπτωση του (P,0,0) θα χρησιμοποιήσουμε τις P τελευταίες τιμές για τον Ιούλιο (τις τιμές CO). Παρόμοια λειτουργεί και το Q για τα τελευταία σφάλματα πρόβλεψης ανά περίοδο S, ενώ το D είναι οι γνωστές διαφορές που στην περίπτωση του εποχικού μοντέλου λαμβάνονται από τις παρατηρήσεις ανά περίοδο S. Προφανώς αν τα P, D και Q είναι 0, τότε έχουμε το απλό, μη εποχικό ARIMA (p,d,q).

Κατά τους Montgomery et al. (2008), μια χρονολογική σειρά που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, συνήθως χωρίζεται αυθαίρετα σε δυο τμήματα: Το πρώτο τμήμα χρησιμεύει ως είσοδος στο μοντέλο για την κατασκευή του, ενώ το δεύτερο τμήμα που συνήθως περιέχει λιγότερες παρατηρήσεις, χρησιμεύει για την διαπίστωση της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου. Οι ίδιοι αναφέρουν πως πρέπει να υπάρχει επαρκής αριθμός παρατηρήσεων (τουλάχιστον 50 παρατηρήσεις) κατά την κατασκευή του μοντέλου, προκειμένου το μοντέλο που θα προκύψει να είναι αξιόπιστο.

Τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την κατασκευή ενός μοντέλου ARIMA πριν αυτό χρησιμοποιηθεί για να γίνουν προβλέψεις, είναι τα κάτωθι (Box and Jenkins 1976):

- Αναγνώριση του μοντέλου
- Υπολογισμός παραμέτρων
- Διαγνωστικός έλεγχος

Κατά τους Box και Jenkins (1976) η αναγνώριση του μοντέλου έχει να κάνει με την αναγνώριση της δυναμικής της χρονολογικής σειράς και έτσι στην περίπτωση του απλού ARIMA (p,d,q) με τον αρχικό προσδιορισμό των p, d, q. Αυτό γίνεται αρχικά με την γραφική αναπαράσταση της χρονολογικής σειράς, όπου δίνει μια πρώτη εικόνα κάποιας τάσης, εποχικότητας, κ.ά. που πιθανώς συνοδεύει τα δεδομένα, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται δυο βασικά ακόμη γραφήματα, το γράφημα της αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation Function-ACF) και το γράφημα της μερικής αυτοσυσχέτισης (Partial Autocorrelation Function-PACF).

Μια σημαντικότερη έννοια που πρέπει να αναφερθεί είναι η χρονική υστέρηση (lag). Για lag=0 ισχύει ότι εξετάζεται η σημερινή τιμή, ενώ π.χ. για lag=1 εξετάζεται ακριβώς η αμέσως προηγούμενη τιμή, κλπ. Η αυτοσυσχέτιση έχει να κάνει με την μη ανεξαρτησία των δεδομένων και τη μνήμη της χρονολογικής σειράς, γι' αυτό άλλωστε λέγεται και αυτοσυσχέτιση καθώς συσχετίζεται μια τιμή με τις παρελθούσες τιμές. Για lag=0, εξ' ορισμού, η αυτοσυσχέτιση παίρνει την τιμή 1. Για lag=1 κάθε παρατήρηση της χρονολογικής σειράς συσχετίζεται με την αμέσως προηγούμενή της π.χ. δεδομένης της σειράς 3,7,2,6 έχουμε τη συσχέτιση 7 με 3, τη συσχέτιση 2 με 7 και τη συσχέτιση 6 με 2. Προφανώς κατά τον υπολογισμό δεν λαμβάνεται υπόψη μια παρατήρηση. Ανάλογα για lag=2, θα έχουμε την συσχέτιση κάθε παρατήρησης με την δεύτερη παρελθούσα παρατήρηση, δηλαδή στο παράδειγμά μας έχουμε την συσχέτιση 2 με 3, και τη συσχέτιση 6 με 7. Για lag=2 δεν λαμβάνονται υπόψη δυο παρατηρήσεις, ενώ παρόμοια υπολογίζονται τα lag=3, κ.ά. με την αντίστοιχη παράλειψη παρατηρήσεων. Η αυτοσυσχέτιση είναι σημαντική γιατί αναδεικνύει κατά πόσο μια χρονολογική σειρά μπορεί να προβλεφθεί από τις παρελθούσες τιμές της. Έτσι αν εντοπίζεται για lag=1 σημαντική σχέση, ενώ για τα άλλα lags δεν ισχύει κάτι τέτοιο, τότε μια τιμή της χρονολογικής σειράς μπορεί να προβλεφθεί από την προηγούμενή της. Η μερική αυτοσυσχέτιση είναι ένα ακόμη εργαλείο που απλά συσχετίζει τις τιμές της χρονολογικής σειράς με τις προηγούμενές της για τα διάφορα lags, χωρίς όμως να υπολογίζει το ρόλο των ενδιάμεσων παρατηρήσεων. Προφανώς για lag=0, η μερική

αυτοσυσχέτιση δίνει 1 και για  $\text{lag}=1$  η μερική αυτοσυσχέτιση ισούται με την αυτοσυσχέτιση, αφού δεν υπάρχουν ενδιάμεσες παρατηρήσεις.

Κατά τον Brooks (2008), η αλήθεια είναι ότι η κρίση των γραφημάτων αυτοσυσχέτισης και αυτοσυσχέτισης δεν είναι και ο πλέον εύκολος τρόπος για την αναγνώριση των  $p$  και  $q$  με εξαίρεση του  $d$  που συνήθως στην περίπτωση μη στάσιμης χρονολογικής σειράς το γράφημα της αυτοσυσχέτισης παρουσιάζει υψηλές τιμές για αρκετά lags. Για τα  $p$  και  $q$ , απαιτείται μεγάλη εμπειρία από τον ερευνητή και στις μέρες μας η επιλογή τους γίνεται μέσω διαφόρων κριτηρίων όπως είναι το AIC και το SBIC, τα οποία αξιολογούν τους διάφορους συνδυασμούς  $p$  και  $q$  και έτσι ο ερευνητής αναλόγως της τιμής τους διαλέγει αυτό που δίνει την λιγότερη τιμή. Ειδικά το SBIC είναι πολύ πιο αυστηρό από το AIC, αφού διαλέγει το μοντέλο εκείνο όπου είναι ταυτόχρονα ικανοποιητικό και έχει τα λιγότερα  $p$  και  $q$ .

Κατά τους Box και Jenkins (1976), ο υπολογισμός των παραμέτρων έχει να κάνει μεταξύ άλλων και με την σημαντικότητα των παραμέτρων, δηλαδή κατά πόσο αυτοί είναι διαφορετικοί από το μηδέν, αλλά και με κάποιους σαφώς καθορισμένους κανόνες που αφορούν τα τμήματα AR και MA και έτσι τη βασιμότητα του μοντέλου ARIMA.

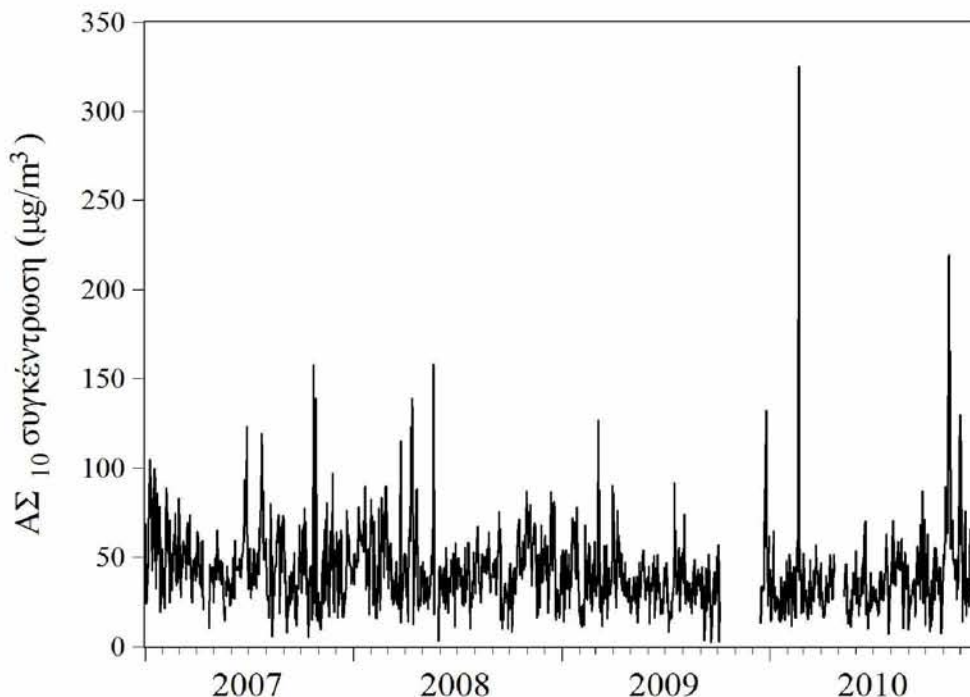
Το στάδιο του διαγνωστικού ελέγχου είναι το πλέον καθοριστικό, αφού σε περίπτωση που το μοντέλο δεν ικανοποιεί τις απαραίτητες προϋποθέσεις, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη και θα πρέπει ο ερευνητής να το αναπροσαρμόσει και να το επανελέγξει.

Σ' αυτό το στάδιο διαγνωστικού ελέγχου, κατά τους Hipel et al. (1977), ελέγχεται το κατά πόσο οι υπολειμματικές τιμές είναι ανεξάρτητες, όπως επίσης η κανονικότητα των υπολειμματικών τιμών και η σταθερή τους διακύμανση. Από αυτές τις υποθέσεις η πλέον θεμελιώδης είναι η ανεξαρτησία των υπολειμματικών τιμών. Σε περίπτωση παραβίασης, δηλαδή μη ανεξαρτησίας των υπολειμματικών τιμών, συμπεραίνεται πως το μοντέλο δεν έχει λάβει υπόψη του σωστά την ενυπάρχουσα δυναμική της χρονολογικής σειράς και τις πιθανές συσχετίσεις της. Οι άλλες δυο υποθέσεις είναι πιο επιεικείς, ωστόσο σε περίπτωση μη τήρησής τους απαιτείται να μετασχηματιστεί η αρχική χρονολογική σειρά π.χ. με τον μετασχηματισμό Box-Cox που και αυτός μπορεί να καταστήσει την χρονολογική σειρά στάσιμη τουλάχιστον κατά την διακύμανσή της. Αν υποτεθεί ότι έχουμε την χρονολογική σειρά  $X$  της οποίας οι παρατηρήσεις πρέπει να είναι θετικές, τότε ο μετασχηματισμός Box-Cox δίνει την νέα σειρά αναλόγως του  $\lambda$  που ορίζουμε ως εξής: Για  $\lambda=0$  λαμβάνουμε τον λογάριθμο  $\ln X$  κάθε παρατήρησης, ενώ για  $\lambda \neq 0$  λαμβάνουμε το  $(X^\lambda - 1) / \lambda$  κάθε παρατήρησης.



#### 4.2.2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ARIMA ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΣ<sub>10</sub> ΤΗΣ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΗΜΕΡΑΣ

Στο πλαίσιο της κατασκευής του μοντέλου πρόβλεψης, από την αρχική χρονολογική σειρά των ωριαίων τιμών συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για το διάστημα 2007-2010, λαμβάνονται οι μέσες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης (1338 έγκυρες) για το ίδιο διάστημα, οι οποίες και φαίνονται στο Σχήμα 4.2. Λόγω της απουσίας δεδομένων για κάποιες περιόδους, κρίθηκε σωστό να ληφθεί ένας τρόπος πλήρωσης των κενών. Οι Norazian et al. (2008), έχοντας επίγνωση της αναγκαιότητας πλήρωσης των κενών σε μια χρονολογική σειρά που αφορά σε δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συνέκριναν διάφορους απλούς τρόπους πλήρωσης των κενών τους οποίους και εκτίμησαν ως προς την απόδοσή τους. Κατά τους ίδιους, η μέθοδος ‘mean-before-after’ δίνει την καλύτερη απόδοση. Η μέθοδος αυτή αφορά στην πλήρωση για κάθε ένα ξεχωριστά κενό με το μέσο όρο των δυο αμέσως εκατέρωθεν παρατηρήσεων του (μία πριν και μία μετά). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στα δεδομένα των ημερήσιων τιμών, το αποτέλεσμα της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

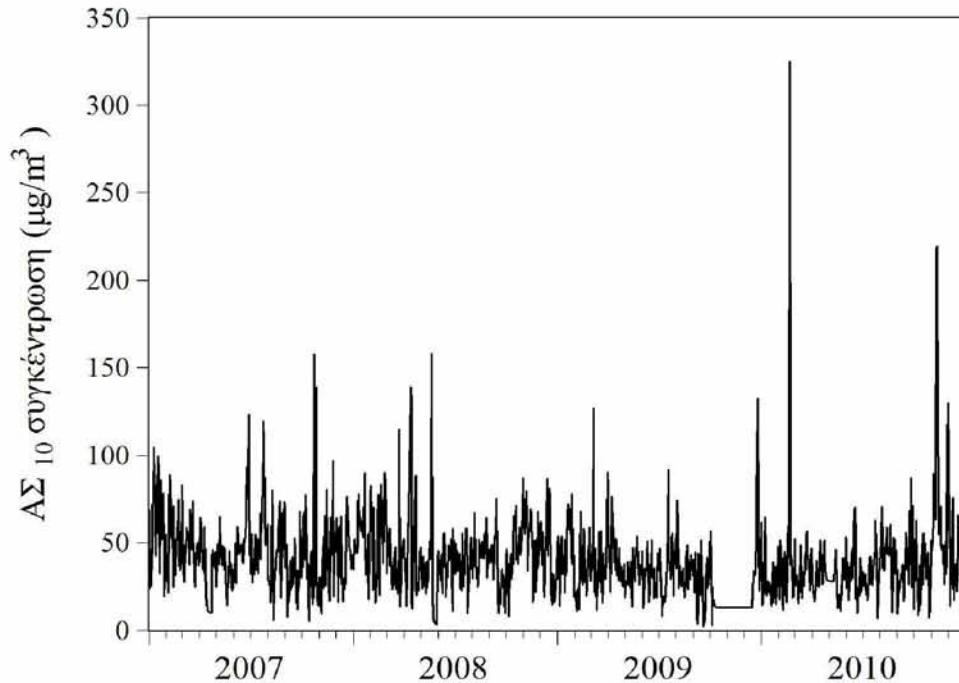


**Σχήμα 4.2** Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Αν και σκοπός εδώ είναι η κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης, δεν μπορεί να αμελήσει κάποιος ότι με μια πρώτη ματιά στο Σχήμα 4.2, η κατάσταση των



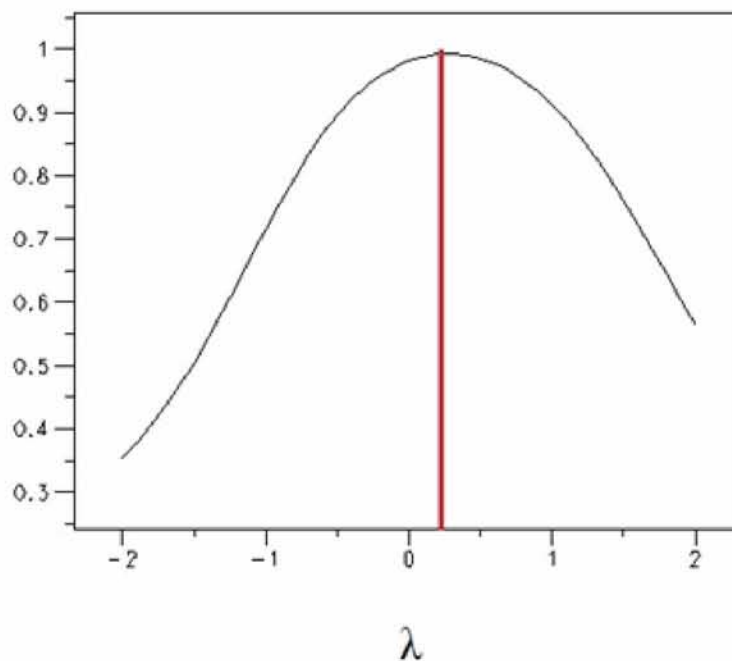
αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο για το διάστημα 2007-2010, δεν φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις με την πάροδο των ετών. Φυσικά παρακάτω θα γίνει αναλυτική αναφορά και θα εξαχθούν πιο βάσιμα συμπεράσματα.



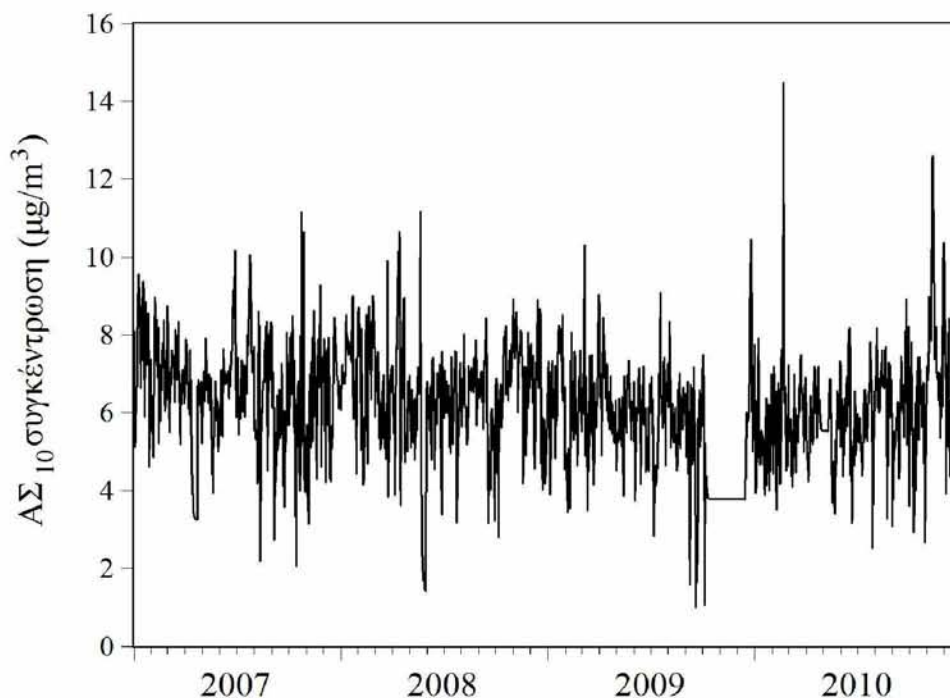
**Σχήμα 4.3** Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> (Με συμπλήρωση κενών τιμών), [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Από το Σχήμα 4.3 φαίνεται πως υπάρχουν αρκετές ακραίες τιμές οι οποίες και διατηρούνται στην κατασκευή του μοντέλου και ότι η διακύμανση τείνει λίγο πολύ να μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό προκειμένου να κατασταθεί στάσιμη η χρονολογική σειρά τουλάχιστον προς τη διακύμανση για τις ανάγκες της ARIMA, στρεφόμαστε σε έναν μετασχηματισμό Box-Cox ο οποίος δεν θα γίνει τυχαία αλλά με βάση το Σχήμα 4.4 το οποίο και υποδεικνύει ότι για τιμή  $\lambda=0,28$  η χρονολογική σειρά τείνει στην κανονική κατανομή.

Μετά από το μετασχηματισμό των δεδομένων η κατάσταση περί της διακύμανσης των τιμών λίγο πολύ ομαλοποιείται, γεγονός το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Ωστόσο, μέσω του μετασχηματισμού το μοντέλο πλέον κινείται σε άλλη κλίμακα μετρήσεων, αφού κάθε αρχική ημερήσια παρατήρηση  $X$  γίνεται πλέον  $(X^{0,28} - 1) / 0,28$ .



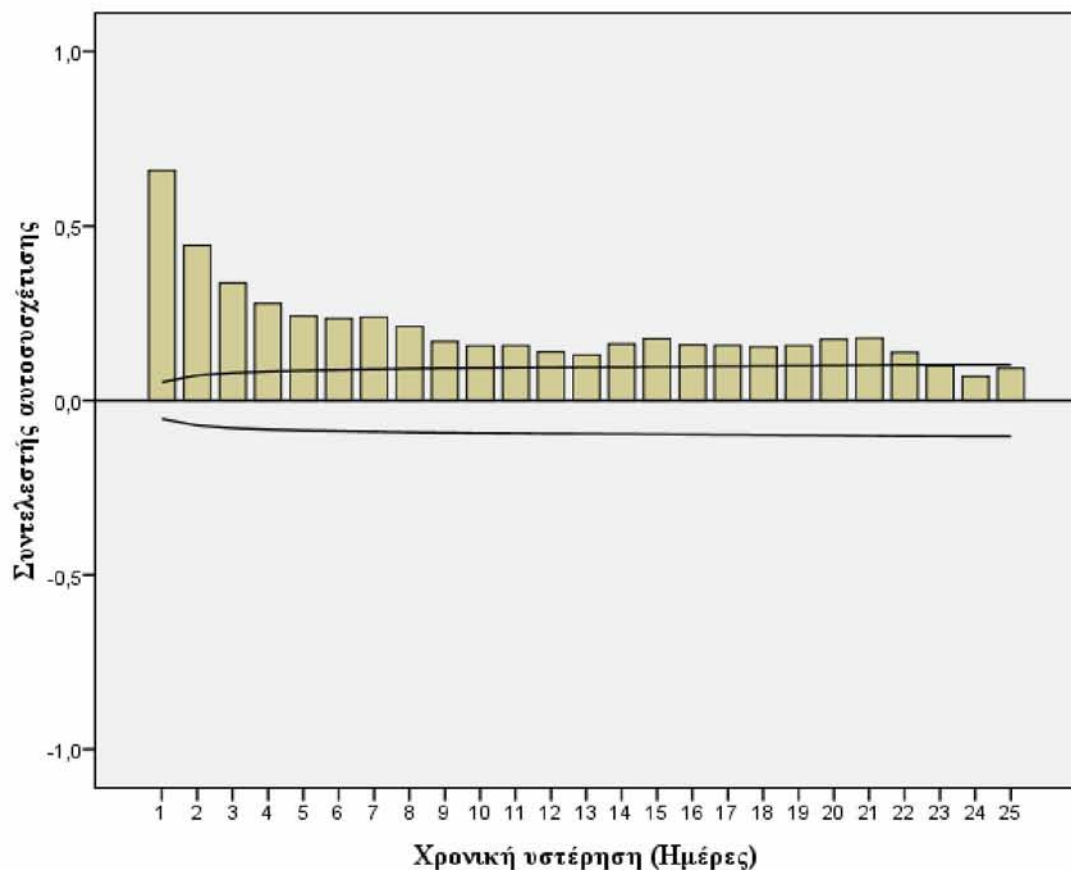
**Σχήμα 4.4** Εύρεση του κατάλληλου  $\lambda$  για τον μετασχηματισμό των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο πρόβλεψης, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].



**Σχήμα 4.5** Μετασχηματισμένες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Επιλέγεται η χρονολογική σειρά των ημερήσιων τιμών να χωριστεί σε δυο τμήματα, το πρώτο για την κατασκευή του μοντέλου και το δεύτερο, κατά πολύ μικρότερο, για την εκτίμηση της δύναμης πρόβλεψής του. Συγκεκριμένα στο πρώτο τμήμα χρησιμοποιούνται όλες οι ημερήσιες τιμές του διαστήματος 2007-2010 εκτός από τις τελευταίες 20 παρατηρήσεις (ήτοι οι ημερήσιες τιμές από την 12/12/2010 έως και την 31/12/2010) οι οποίες αφήνονται στο δεύτερο τμήμα.

Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής του μοντέλου πρόβλεψης, δηλαδή σ' αυτό της αναγνώρισης του μοντέλου, θα πρέπει να προσδιοριστούν τα  $p$ ,  $d$  και  $q$ . Προφανώς για να γίνει αυτό απαιτείται η αποκάλυψη της ενυπάρχουσας δυναμικής των δεδομένων. Έτσι κατασκευάζονται τα γραφήματα της αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 4.6) και της μερικής αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 4.7) προκειμένου να δοθεί μια πρώτη εικόνα.

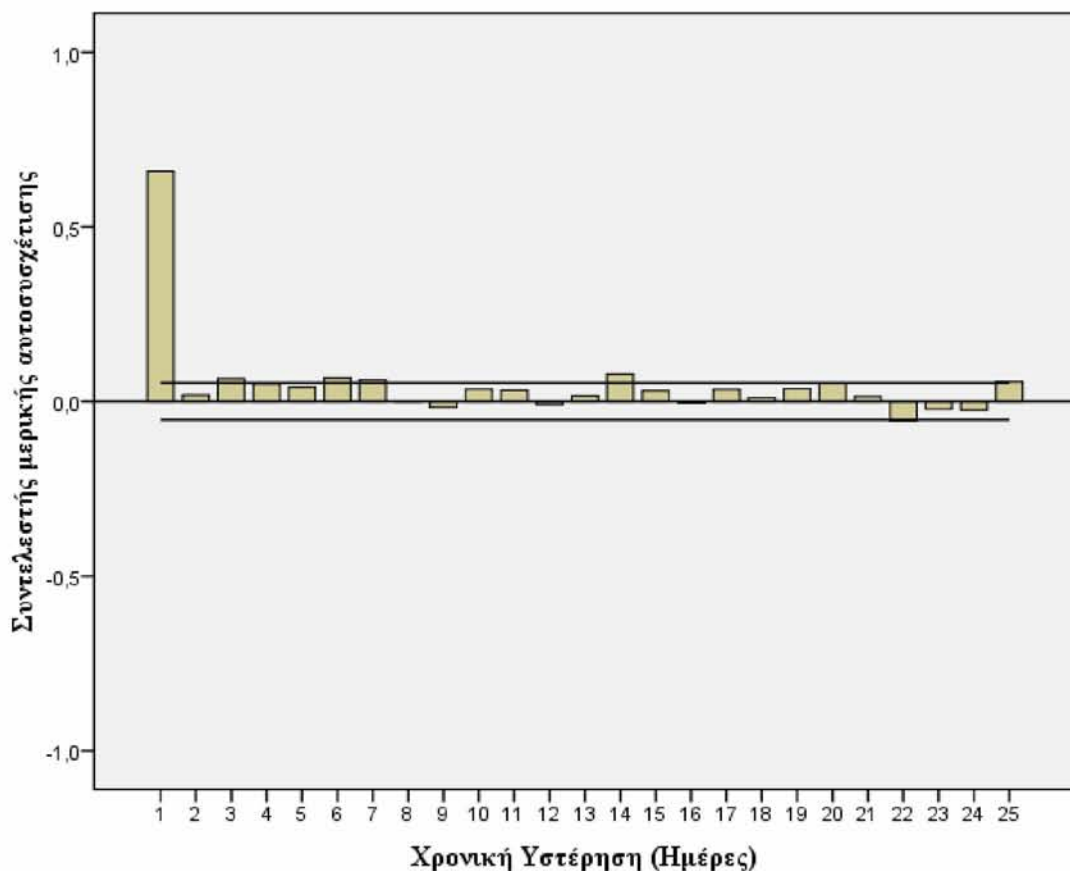


**Σχήμα 4.6** Αυτοσυσχέτιση των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Κατά τους Box και Jenkins (1976), η εικόνα που παρουσιάζει η συνάρτηση της αυτοσυσχέτισης στο Σχήμα 4.6 είναι η τυπική περίπτωση χρονολογικής σειράς η οποία δεν είναι στάσιμη, καθότι για τις πρώτες περίπου 20 χρονικές υστερήσεις (lags), η αυτοσυσχέτιση παρουσιάζει συνεχώς στατιστικά σημαντικές θετικές τιμές σε αντίθεση

με μια υποθετική χρονολογική σειρά που ‘κόβει’ έπειτα από λίγες χρονικές υστερήσεις. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την χρησιμοποίηση των διαφορών των παρατηρήσεων προκειμένου η χρονολογική σειρά να καταστεί στάσιμη.

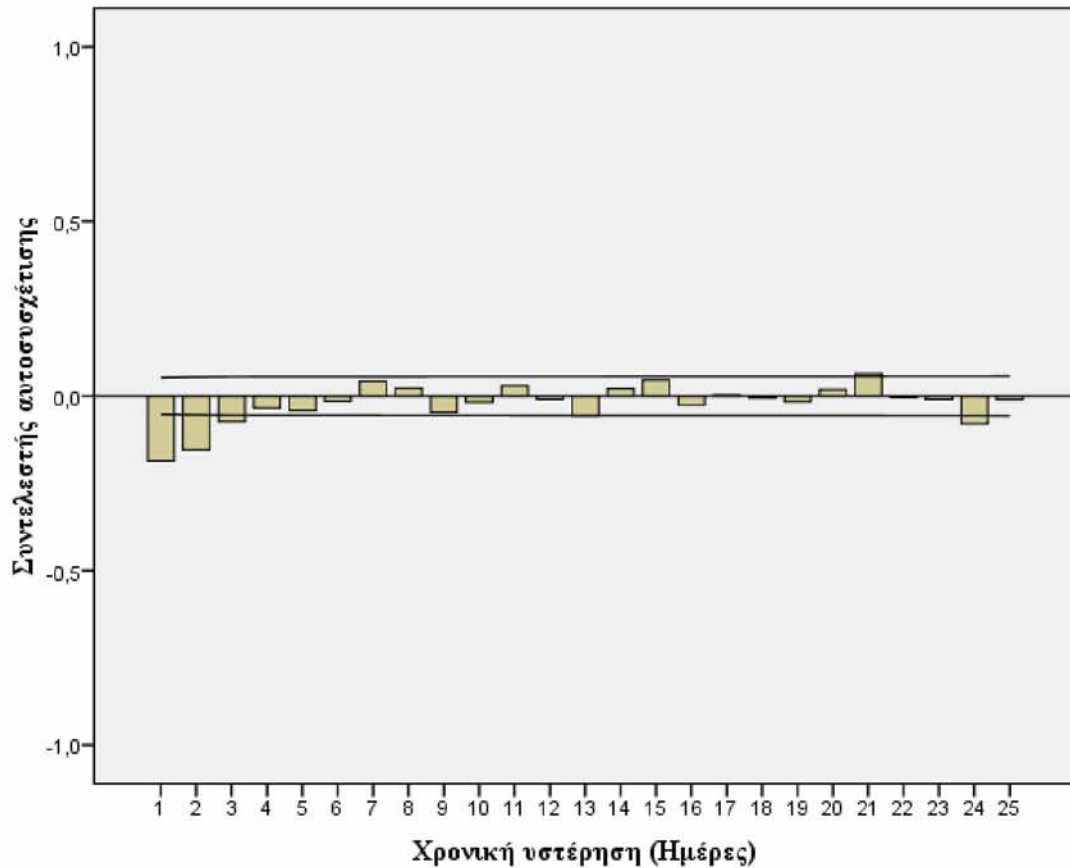
Το Σχήμα 4.7 δείχνει τη συνάρτηση της μερικής αυτοσυσχέτισης, από την οποία γενικώς ξεχωρίζει η μεγάλη τιμή της μερικής αυτοσυσχέτισης για  $\text{lag}=1$ . Επισημαίνεται ότι το γράφημα της μερικής αυτοσυσχέτισης στην παρούσα περίπτωση δεν διαδραματίζει κανένα κρίσιμο ρόλο στον προσδιορισμό του μοντέλου, μιας και η χρονολογική σειρά δεν είναι στάσιμη και έτσι παρατίθεται απλά για λόγους πληρότητας.



**Σχήμα 4.7** Μερική αυτοσυσχέτιση των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $ΑΣ_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων  $ΑΣ_{10}$  της ΔΕΥΑΜΒ].

Λαμβάνοντας τις πρώτες διαφορές από τις παρατηρήσεις, προκειμένου να καταστήσουμε τη χρονολογική σειρά στάσιμη, προκύπτει το Σχήμα 4.8, που είναι το γράφημα της αυτοσυσχέτισης με τις πρώτες διαφορές. Όπως είναι ξεκάθαρο, πλέον η χρονολογική σειρά καθίσταται στάσιμη και πέραν τούτου οι διαφορές φαίνεται πως εισήγαγαν και αρνητικές τιμές. Προφανώς δεν απαιτείται να ληφθούν και δεύτερες διαφορές αφού ο στόχος της στασιμότητας επετεύχθη.



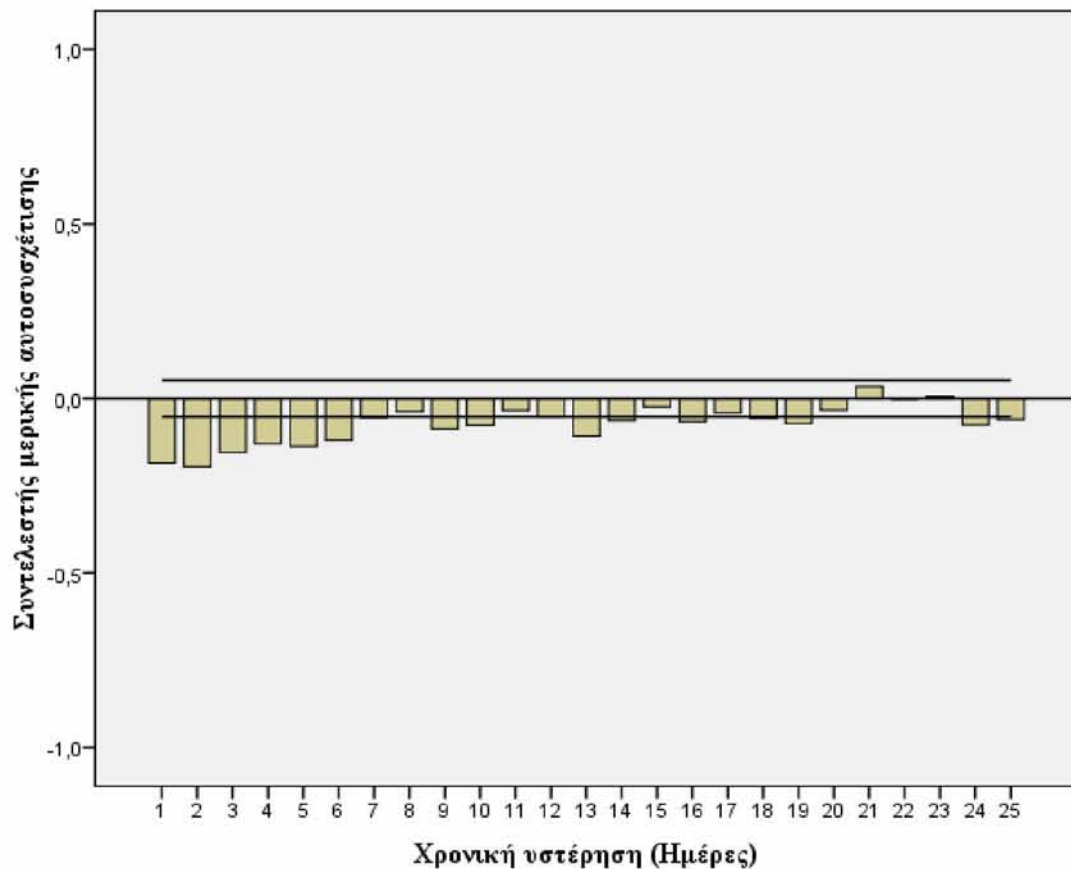


**Σχήμα 4.8** Αυτοσυσχέτιση (Πρώτες διαφορές) των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων  $ΑΣ_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων  $ΑΣ_{10}$  της ΔΕΥΑΜΒ].

Αφού η στασιμότητα είναι πλέον δεδομένη, τα γραφήματα της αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 4.8) και μερικής αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 4.9), γίνονται τα οπτικά εργαλεία για τον εντοπισμό του μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι  $d=1$  αφού έχουν ληφθεί οι πρώτες διαφορές. Επιπλέον, επειδή μελετώνται οι ημέρες, η περίοδος είναι  $S=7$  (κύκλος εβδομάδας) και στην περίπτωση του παρόντος μοντέλου συνυπολογίζεται. Συνεπώς συνυπολογίζονται πλέον των  $p$ ,  $d$  και  $q$  και οι παράμετροι  $P$ ,  $D$  και  $Q$ . Από το Σχήμα 4.8 ανά τα περιοδικά lags (ανά 7 ή κοντά στο 7), δεν φαίνεται να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές θετικές τιμές που αργούν να ‘πέσουν’ και συνεπώς δεν απαιτούνται εποχικές διαφορές, δηλαδή  $D=0$ .

Σχετικά με τον προσδιορισμό των  $p$ ,  $q$  και  $P$ ,  $Q$ , κατά τους Box και Jenkins (1976), το γράφημα της αυτοσυσχέτισης προσδιορίζει το  $q$  και το γράφημα της μερικής αυτοσυσχέτισης προσδιορίζει το  $p$ . Οι ίδιοι δίνουν τυπικές εικόνες των δυο γραφημάτων για διάφορες τιμές των  $p$ ,  $q$  και  $P$ ,  $Q$ , ωστόσο από αυτές τις θεωρητικές εικόνες δεν είναι εύκολο να καταλήξουμε σε κάποια απόφαση για τα  $p$ ,  $q$  και  $P$ ,  $Q$ . Γι’

αυτό και χρησιμοποιούνται όπως προτείνει ο Brooks (2008), τα αντικειμενικά κριτήρια AIC και SBIC.

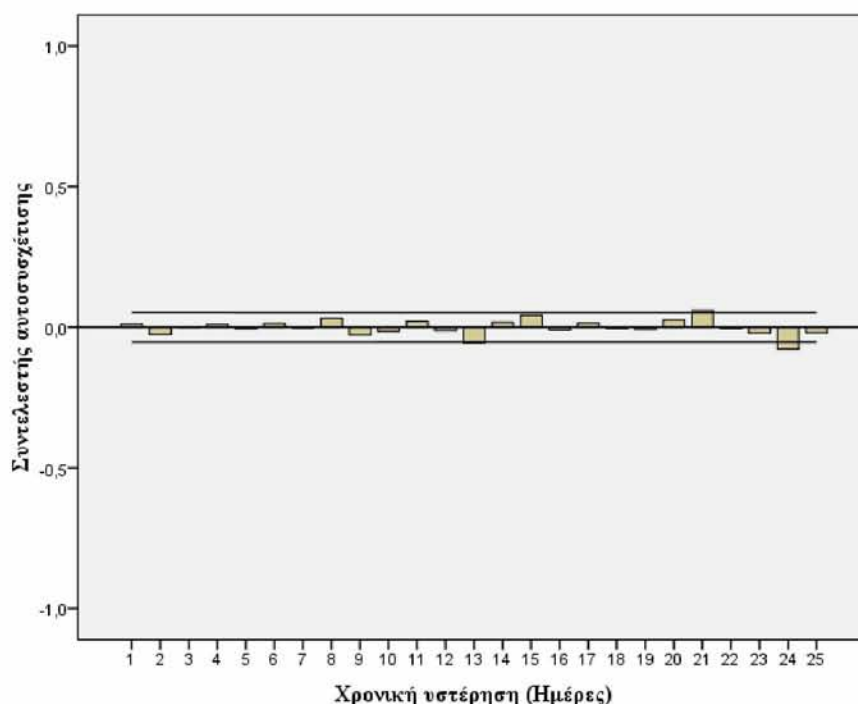


**Σχήμα 4.9** Μερική αυτοσυσχέτιση (Πρώτες διαφορές) των μετασχηματισμένων ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Δοθέντων των  $d=1$  και  $D=0$ , η σύγκριση των διάφορων εναλλακτικών μοντέλων μέσω των κριτηρίων AIC και SBIC δίνει ως βέλτιστη επιλογή το μοντέλο ARIMA  $(1,1,1) \times (1,0,0)_7$ . Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση αυτού του μοντέλου οι παράμετροι έχουν στατιστικό νόημα:  $AR(1)=0,598$  &  $P=0,000$ ,  $MA(1)=0,982$  &  $P=0,000$ , εποχικό  $AR(1)=0,061$  &  $P=0,021$ .

Ο διαγνωστικός έλεγχος αφορά στον έλεγχο των υπολειμματικών τιμών και συγκεκριμένα στην ανεξαρτησία τους, στην κανονικότητα και στη σταθερή τους διακύμανση.

Από το Σχήμα 4.10 και τον Πίνακα 4.1, όπου το στατιστικό Box-Ljung δεν είναι σημαντικό για κανένα lag, φαίνεται πως η αυτοσυσχέτιση πλέον εκλείπει και άρα το μοντέλο έχει λάβει υπόψη του επαρκώς την ενυπάρχουσα δυναμική της χρονολογικής σειράς.

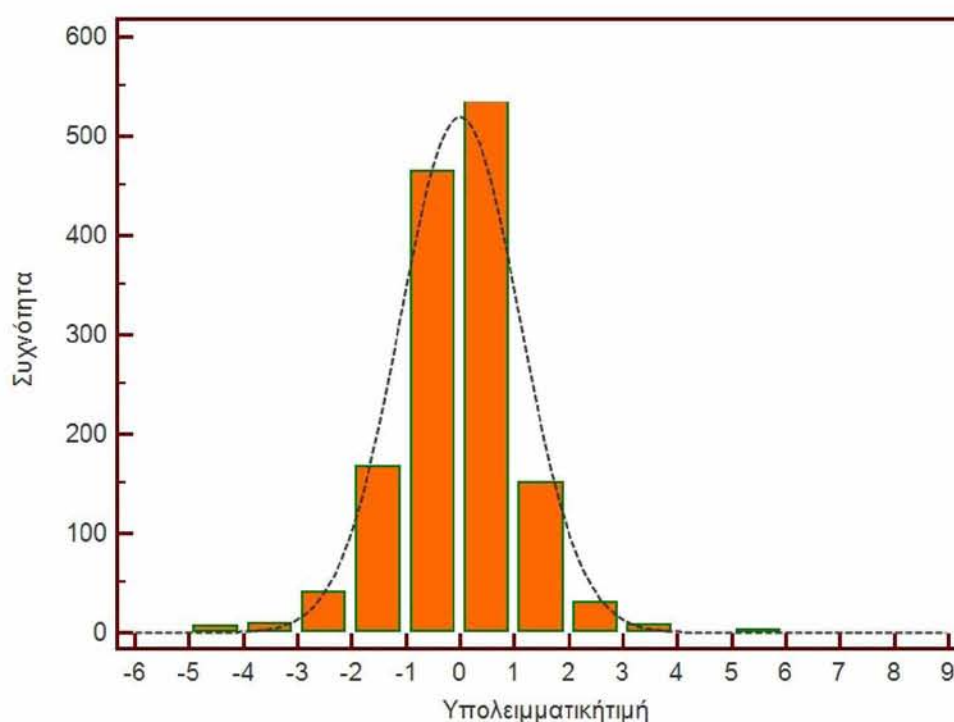


**Σχήμα 4.10** Αυτοσυσχέτιση των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

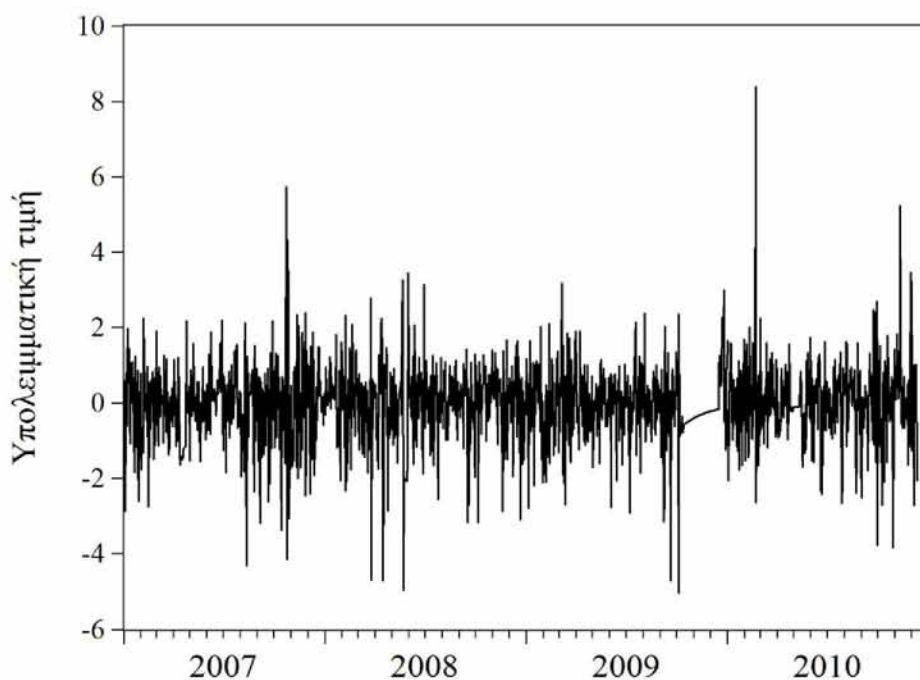
**Πίνακας 4.1** Έλεγχος Box-Ljung για τον εντοπισμό αυτοσυσχέτισης των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1)x(1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Χρονική υστέρηση (Ημέρες)	Αυτοσυσχέτιση	Τυπ. σφάλμα	Box-Ljung Statistic		
			Τιμή	β.ε.	Σημαντ.
1	,013	,026	,235	1	,628
2	-,023	,026	1,013	2	,602
3	-,002	,026	1,021	3	,796
4	,012	,026	1,237	4	,872
5	-,003	,026	1,250	5	,940
6	,014	,026	1,516	6	,958
7	,000	,026	1,516	7	,982
8	,033	,026	3,080	8	,929
9	-,028	,026	4,243	9	,895
10	-,016	,026	4,596	10	,916
11	,024	,026	5,396	11	,910
12	-,011	,026	5,556	12	,937
13	-,056	,026	10,036	13	,691
14	,019	,026	10,563	14	,720
15	,044	,026	13,425	15	,570
16	-,012	,026	13,643	16	,625
17	,012	,026	13,855	17	,677
18	-,002	,026	13,861	18	,738
19	-,006	,026	13,908	19	,789
20	,026	,026	14,871	20	,784
21	,057	,026	19,544	21	,550
22	-,004	,026	19,570	22	,610
23	-,018	,026	20,039	23	,640
24	-,082	,026	29,761	24	,193
25	-,022	,026	30,488	25	,207

Επιπροσθέτως από το Σχήμα 4.11, δεν φαίνεται κάποια σοβαρή απόκλιση των υπολειμματικών τιμών από την κανονικότητα και από το Σχήμα 4.12 οι υπολειμματικές τιμές έχουν σταθερή διακύμανση.



**Σχήμα 4.11** Ιστόγραμμα των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1) x (1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

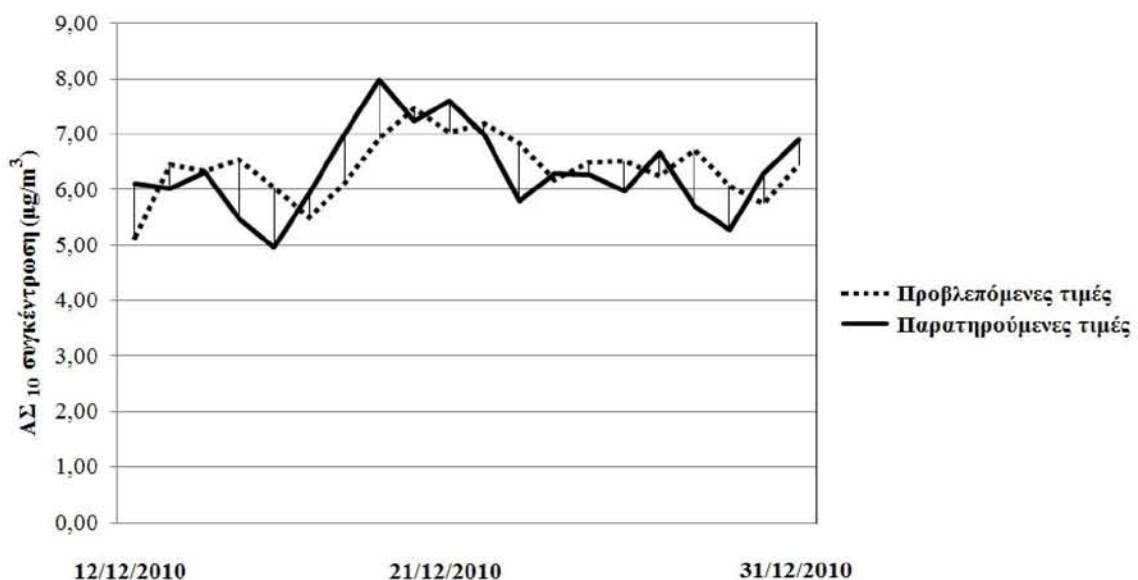


**Σχήμα 4.12** Έλεγχος διακύμανσης των υπολειμματικών τιμών του μοντέλου ARIMA (1,1,1) x (1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].



Κατά συνέπεια, αφού το μοντέλο ικανοποιεί επιτυχώς τον διαγνωστικό έλεγχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, γεγονός το οποίο θα γίνει με βάση τις τελευταίες 20 παρατηρήσεις του διαστήματος 2007-2010, που έχουν κρατηθεί για το σκοπό αυτό.

Το Σχήμα 4.13, δείχνει τις παρατηρούμενες και τις προβλεπόμενες τιμές από το μοντέλο. Γίνεται ξεκάθαρο ότι η πρόβλεψη αφορά την πρόβλεψη για την αμέσως επόμενη ημέρα και έτσι το μοντέλο κάθε φορά ενσωματώνει την ημέρα για την οποία κάνει πρόβλεψη και στη συνέχεια προβλέπει με τα νέα δεδομένα για την επόμενη ημέρα. Φυσικά η κλίμακα μέτρησης δεν είναι η πραγματική, αλλά αφορά στον μετασχηματισμό που έχει γίνει. Η πραγματική κλίμακα μέτρησης των συγκεντρώσεων φαίνεται στο Σχήμα 4.14, όπου και γίνεται αντιληπτό ότι σε αδρές γραμμές η πρόβλεψη που δίνει το μοντέλο έχει μια απόκλιση από την παρατηρούμενη τιμή κατά  $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



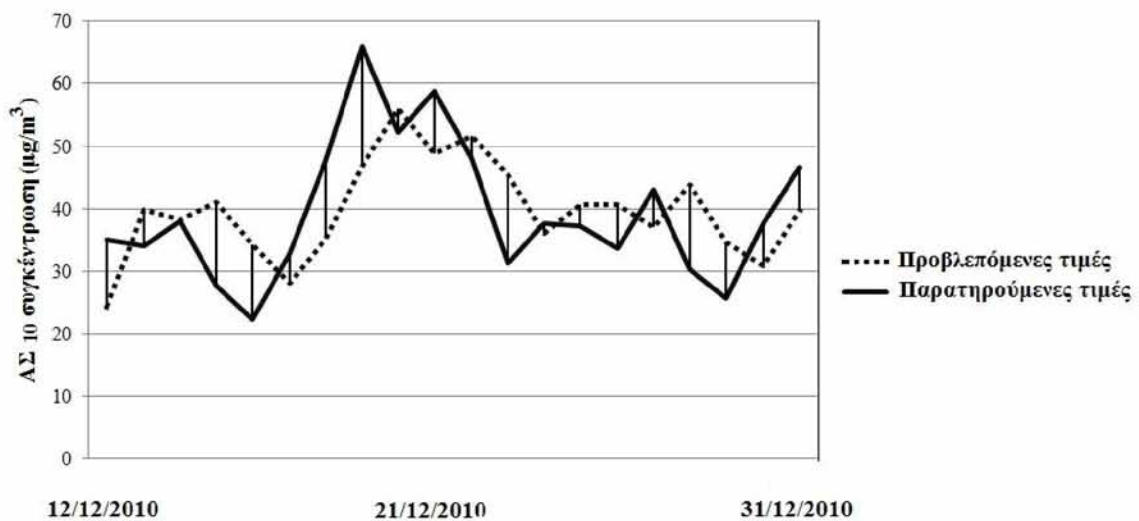
**Σχήμα 4.13** Εκτίμηση της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου ARIMA (1,1,1) $\times$ (1,0,0)<sub>7</sub> για τις μετασχηματισμένες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Πέρα από τη γραφική μέθοδο προσέγγισης της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου, σε ποσοτικούς στατιστικούς όρους, το μοντέλο επιτυγχάνει με την πρόβλεψη των 20 αυτών παρατηρήσεων, MAPE (Mean Absolute Percentage Error) = 9,812 %. Γενικά όσο πιο μικρό είναι το MAPE, τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο πρόβλεψης.

Ως μέτρο σύγκρισης αναφέρεται η κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης για τους ρύπους O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> και CO από τους Kumar και Jain (2010), οι οποίοι ερευνώντας τη δύναμη πρόβλεψης των μοντέλων τους για 20 παρατηρήσεις, κατέληξαν στα εξής

αντίστοιχα ποσοστά MAPE: α)  $O_3$  - MAPE = 24,1 %, β)  $NO$  - MAPE = 21,8 %, γ)  $NO_2$  - MAPE = 12,1 % και δ)  $CO$  - MAPE = 11,4 %.

Κατά συνέπεια, το παρόν μοντέλο ARIMA συμφωνεί αρκετά καλά με τα ποσοστά επιδόσεων παρόμοιων μοντέλων για την ρύπανση της ατμόσφαιρας και λόγω του χαμηλού MAPE, μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική εκτίμηση του φαινομένου της ρύπανσης από τα αιωρούμενα σωματίδια για την περιοχή του Βόλου, έστω σε ημερήσιο επίπεδο.



**Σχήμα 4.14** Εκτίμηση της δύναμης πρόβλεψης του μοντέλου  $ARIMA(1,1,1) \times (1,0,0)_7$  για τις ημερήσιες συγκεντρώσεις  $ΑΣ_{10}$ , [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων  $ΑΣ_{10}$  της ΔΕΥΑΜΒ].

Το μοντέλο πρόβλεψης  $ARIMA(1,1,1) \times (1,0,0)_7$  κατά τους Montgomery et al. (2008), μεταφράζεται μέσω των παραμέτρων που έχουν αναφερθεί προηγουμένως, στην εξίσωση:  $X_t = 1,598X_{t-1} - 0,598X_{t-2} + 0,061X_{t-7} - 0,097X_{t-8} + 0,036X_{t-9} + Z_t - 0,982Z_{t-1}$ , όπου:

- $X_t$  η προβλεπόμενη από το μοντέλο μετασχηματισμένη ημερήσια συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων της επόμενης ημέρας.
- $X_{t-1}$ ,  $X_{t-2}$ , κ.ά., οι γνωστές παρελθούσες μετασχηματισμένες ημερήσιες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων.
- $Z_t$  η μεταβλητή των υπολειμματικών τιμών της  $ARIMA$ , που παίρνει τιμές στο διάστημα  $\sim (0,1)$ , ακολουθώντας κατά προσέγγιση κανονική κατανομή και αποτελώντας ουσιαστικά το σφάλμα των προβλέψεων.

Αγνοώντας κάποιος την μεταβλητή  $Z_t$ , μπορεί πάλι να πάρει μια εκτίμηση για τη συγκέντρωση της επόμενης ημέρας, έστω σε αδρές γραμμές, αν φυσικά γνωρίζει τις συγκεντρώσεις για τις ημέρες  $t-1$ ,  $t-2$ ,  $t-7$ ,  $t-8$  και  $t-9$ .

Το μοντέλο ARIMA που αναπτύχθηκε, χρησιμεύει πάρα πολύ όταν αποτελεί τμήμα μιας ηλεκτρονικής βάσης δεδομένων όπου ενημερώνεται καθημερινά και δίνει προβλέψεις για τη συγκέντρωση της επόμενης ημέρας. Σαφώς όπως αναφέρθηκε, η χρήση του μοντέλου ισχύει μόνο για τα μετασχηματισμένα δεδομένα που έχουν προκύψει από τον τύπο  $(X^{0,28} - 1) / 0,28$ . Συνεπώς για να μπορέσει κάποιος να αξιοποιήσει το μοντέλο θα πρέπει:

- Αρχικά να μετασχηματίσει τις συγκεντρώσεις που βρίσκονται σε μορφή X και που απαιτούνται από το μοντέλο ως είσοδος, π.χ. τις συγκεντρώσεις της προηγούμενης ημέρας, της πάρα προηγούμενης ημέρας, κλπ. με τον τύπο  $(X^{0,28} - 1) / 0,28$  ώστε να πάρει τις συγκεντρώσεις σε μορφή Y.
- Να υπολογίσει την τιμή της πρόβλεψης για την επόμενη ημέρα μέσω του μοντέλου.
- Τέλος, την πρόβλεψη που θα του δώσει το μοντέλο σε μορφή Y θα πρέπει να την μετασχηματίσει αντίστροφα πλέον μέσω του τύπου  $(1 + 0,28Y)^{3,57}$  για να πάρει την πρόβλεψη στην ζητούμενη χρήσιμη μορφή X.

#### 4.2.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΗΜΕΡΩΝ

Οι 1338 έγκυρες ημερήσιες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο για το διάστημα 2007-2010, που προκύπτουν από το μέσο όρο των ωριαίων τιμών για το ίδιο διάστημα, παρουσιάζουν το εξής βασικό στατιστικό προφίλ:

- Μέση τιμή ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>: 42 μg/m<sup>3</sup>
- Διάμεση τιμή ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>: 38 μg/m<sup>3</sup>
- Μέγιστη τιμή ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>: 325 μg/m<sup>3</sup>
- Ελάχιστη τιμή ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>: 2 μg/m<sup>3</sup>
- Τυπική απόκλιση ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>: 22 μg/m<sup>3</sup>

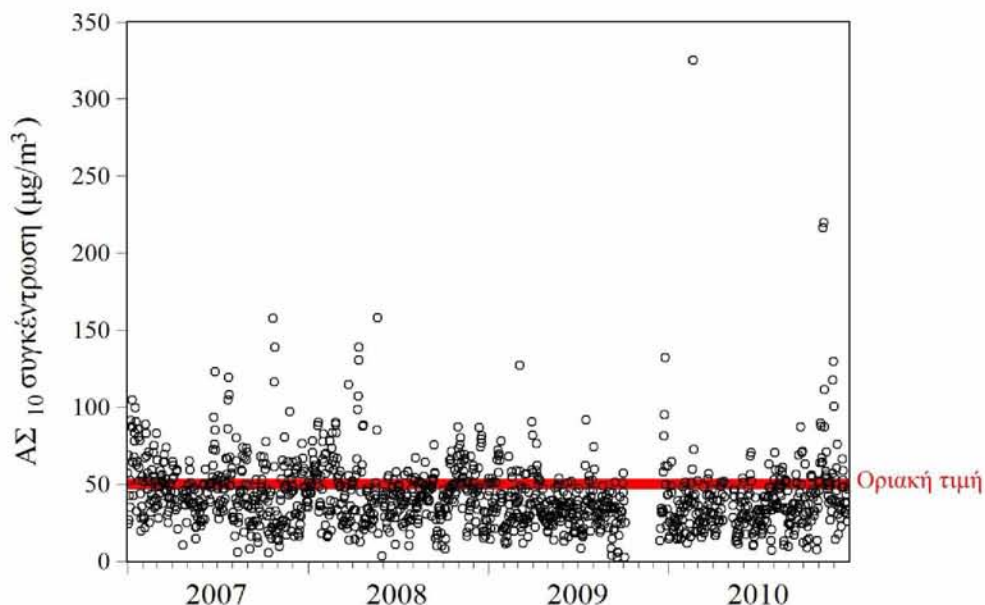
Σχολιάζοντας το βασικό αυτό στατιστικό προφίλ, προκύπτει ότι οι ημερήσιες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο για το διάστημα 2007-2010, έχουν παρόμοια μέτρα κεντρικής τάσης, δηλαδή μέση τιμή και διάμεσο με τις ωριαίες συγκεντρώσεις για το ίδιο διάστημα. Αξιοσημείωτη είναι και η μέγιστη ημερήσια τιμή των 325 μg/m<sup>3</sup>, που είναι αρκετά υψηλή.

Για το επίπεδο των ημερήσιων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων και το πότε αυτό θεωρείται επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, υπάρχει στη χώρα μας ειδικό νομικό πλαίσιο που υιοθετεί το αντίστοιχο νομικό πλαίσιο που εκπονείται στην

Ευρωπαϊκή Ένωση με τη μορφή οδηγιών. Συγκεκριμένα, με βάση την Πράξη του Υπουργικού Συμβουλίου (ΠΥΣ) 34/2002, ΦΕΚ 125Α/05-06-2002, «Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου» για το εξεταζόμενο διάστημα 2007-2010 και σχετικά με την μέση επιτρεπτή ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> ισχύουν τα εξής:

- 2005-2009: Η μέση ημερήσια τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για περισσότερες από 35 ημέρες το χρόνο.
- 2010: Η μέση ημερήσια τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  για περισσότερες από 7 ημέρες το χρόνο. Επισημαίνεται πως ο κανόνας αυτός είναι και ο πλέον ισχύων εν έτη 2011.

Η κατάσταση των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο για το διάστημα 2007-2010 όσον αφορά στις ημερήσιες συγκεντρώσεις, φαίνεται στο Σχήμα 4.15, στο οποίο φαίνεται επίσης και η τιμή των 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  με κόκκινο χρώμα. Εκ πρώτης όψεως, φαίνεται να υπάρχουν αρκετές τιμές που ξεπερνούν το όριο των 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  κυρίως στα έτη 2007 και 2008. Η άποψη αυτή φαίνεται να επιβεβαιώνεται και από τον Πίνακα 4.2 .



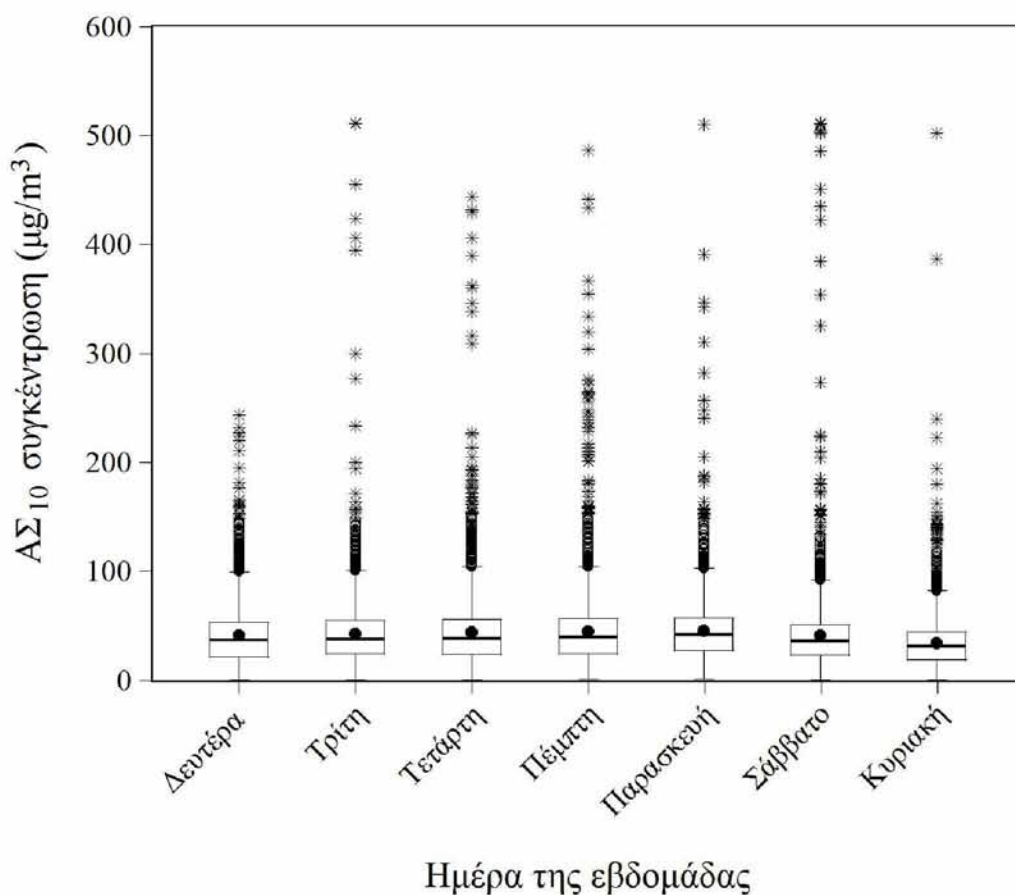
**Σχήμα 4.15** Μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].



**Πίνακας 4.2** Παραβίαση του νομικού πλαισίου για τις ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> κατά την περίοδο 2007-2010, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Έτος	Επιτρεπόμενος αριθμός ημερών με ΑΣ <sub>10</sub> συγκέντρωση άνω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Παρατηρούμενος αριθμός ημερών με ΑΣ <sub>10</sub> συγκέντρωση άνω των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Παραβίαση κανόνα (Ημέρες)
2007	35	124	89
2008	35	113	78
2009	35	49	14
2010	7	64	57

Το Σχήμα 4.16 έχει προκύψει από τις 32106 διαθέσιμες έγκυρες ωριαίες τιμές συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, για την περίοδο 2007-2010. Επειδή η εικόνα δεν είναι και πολύ ξεκάθαρη, προβαίνουμε σε ποσοτικές συγκρίσεις.



**Σχήμα 4.16** Ημερήσια κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ANOVA, προκειμένου να διαφανεί κατά πόσο οι διαφορές στις μέσες τιμές είναι στατιστικά σημαντικές. Ωστόσο, η χρήση της ANOVA απαιτεί την τήρηση εκ των προτέρων κάποιων υποθέσεων έτσι ώστε τα αποτελέσματά της να είναι αξιόπιστα και βάσιμα. Ο Johnson (1993), ερευνώντας το βαθμό παραβίασης των υποθέσεων της ANOVA και τον αντίστοιχο βαθμό αναξιοπιστίας των αποτελεσμάτων κατέληξε στα εξής:

- Δεδομένου ότι εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των παρατηρήσεων, η πλέον καθοριστική – θεμελιώδης ανάγκη η οποία πρέπει να τηρείται, είναι αυτή του ίδιου αριθμού των παρατηρήσεων για κάθε ομάδα. Μάλιστα αν αυτή η ανάγκη δεν μπορεί να ικανοποιηθεί, ο ερευνητής απαιτείται να χρησιμοποιήσει άλλη στατιστική μέθοδο σύγκρισης.
- Εφόσον οι παρατηρήσεις είναι ανεξάρτητες και οι ομάδες έχουν τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων, το μόνο επιπλέον που απαιτείται για να είναι αξιόπιστη η ANOVA είναι ο λόγος της μεγαλύτερης διακύμανσης προς την μικρότερη διακύμανση των ομάδων να είναι μικρότερος του 3.

Στην περίπτωση μας, οι παρατηρήσεις (ωριαίες τιμές) δεν είναι ανεξάρτητες. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθούν οι υπολειμματικές τιμές του μοντέλου ARIMA που κατασκευάστηκε προηγουμένως για τις ημερήσιες τιμές, η υπόθεση της ανεξαρτησίας πλέον τηρείται. Φυσικά πλέον υπολογίζουμε κατά πόσο είναι στατιστικά σημαντικές οι μέσες τιμές των ημερών (Δευτέρα, Τρίτη, κλπ) μέσω των ημερήσιων τιμών (μερικές από τις οποίες έχουν συμπληρωθεί και λόγω κενών) και όχι των ωριαίων τιμών, αλλά το συμπέρασμα που θα προκύψει θα είναι βάσιμο σε κάθε περίπτωση.

Η δεύτερη υπόθεση της ισότητας των παρατηρήσεων μεταξύ των ομάδων αν και αρχικά δεν ισχύει για τα υπόλοιπα του μοντέλου ARIMA, με μια μικρή εξίσου αφαίρεση ημερήσιων τιμών από κάθε ημέρα (Δευτέρα, Τρίτη, κλπ) τελικά δίνει ισότητα των παρατηρήσεων. Όσον αφορά το λόγο της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διακύμανση των ομάδων είναι μικρότερος του 3. Συνεπώς, η χρήση της ANOVA είναι εφικτή και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.3** ANOVA για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> μέσα στην εβδομάδα, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

	Άθροισμα τετραγώνων	β.ε.	Τετράγωνο μέσης τιμής	F	Σημαντ.
Μεταξύ των ομάδων	64,709	6	10,785	9,117	,000
Εντός των ομάδων	1689,247	1428	1,183		
Σύνολο	1753,956	1434			

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.3 η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται δηλαδή οι μέσες τιμές συγκέντρωσης στατιστικά διαφέρουν. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η Δευτέρα, η Τρίτη, κλπ. δεν έχουν τις ίδιες στατιστικά σημαντικές μέσες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>. Για την αναζήτηση των ημερών που διαφέρουν σημαντικά από τις άλλες χρησιμοποιείται η πολλαπλή σύγκριση Bonferroni που φαίνεται στον Πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4** Σύγκριση Bonferroni για τις μέσες ημερήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> μέσα στην εβδομάδα, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

(I) Ημέρα	(J) Ημέρα	Διαφορά μέσης τιμής (I-J)	Τυπ. σφάλμα	Σημαντ.	95% διάστημα εμπιστοσύνης	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Δευτέρα	Τρίτη	-,648*	,107	,000	-,97	-,32
	Τετάρτη	-,537*	,107	,000	-,86	-,21
	Πέμπτη	-,544*	,107	,000	-,87	-,22
	Παρασκευή	-,529*	,107	,000	-,86	-,20
	Σάββατο	-,578*	,107	,000	-,90	-,25
	Κυριακή	-,262	,107	,313	-,59	,07
Τρίτη	Δευτέρα	,648*	,107	,000	,32	,97
	Τετάρτη	,111	,107	1,000	-,22	,44
	Πέμπτη	,104	,107	1,000	-,22	,43
	Παρασκευή	,119	,107	1,000	-,21	,45
	Σάββατο	,070	,107	1,000	-,26	,40
	Κυριακή	,386*	,107	,007	,06	,71
Τετάρτη	Δευτέρα	,537*	,107	,000	,21	,86
	Τρίτη	-,111	,107	1,000	-,44	,22
	Πέμπτη	-,006	,107	1,000	-,33	,32
	Παρασκευή	,009	,107	1,000	-,32	,34
	Σάββατο	-,040	,107	1,000	-,37	,29
	Κυριακή	,276	,107	,219	-,05	,60
Πέμπτη	Δευτέρα	,544*	,107	,000	,22	,87
	Τρίτη	-,104	,107	1,000	-,43	,22
	Τετάρτη	,006	,107	1,000	-,32	,33
	Παρασκευή	,015	,107	1,000	-,31	,34
	Σάββατο	-,034	,107	1,000	-,36	,29
	Κυριακή	,282	,107	,184	-,04	,61
Παρασκευή	Δευτέρα	,529*	,107	,000	,20	,86
	Τρίτη	-,119	,107	1,000	-,45	,21
	Τετάρτη	-,009	,107	1,000	-,34	,32
	Πέμπτη	-,015	,107	1,000	-,34	,31
	Σάββατο	-,049	,107	1,000	-,38	,28
	Κυριακή	,267	,107	,275	-,06	,59
Σάββατο	Δευτέρα	,578*	,107	,000	,25	,90
	Τρίτη	-,070	,107	1,000	-,40	,26
	Τετάρτη	,040	,107	1,000	-,29	,37
	Πέμπτη	,034	,107	1,000	-,29	,36
	Παρασκευή	,049	,107	1,000	-,28	,38
	Κυριακή	,316	,107	,070	-,01	,64
Κυριακή	Δευτέρα	,262	,107	,313	-,07	,59
	Τρίτη	-,386*	,107	,007	-,71	-,06
	Τετάρτη	-,276	,107	,219	-,60	,05
	Πέμπτη	-,282	,107	,184	-,61	,04
	Παρασκευή	-,267	,107	,275	-,59	,06
	Σάββατο	-,316	,107	,070	-,64	,01

\*. Η διαφορά των μέσων τιμών είναι σημαντική στο 0,05 επίπεδο.

Από τον Πίνακα 4.4 αναδεικνύεται το εξής συμπέρασμα: Σε αδρές γραμμές, ενώ όλες οι ημέρες της εβδομάδας έχουν συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων που στατιστικά λίγο πολύ είναι όμοιες με τις συγκεντρώσεις των άλλων ημερών της εβδομάδας, η Δευτέρα διαφέρει σημαντικά με σχεδόν όλες τις άλλες ημέρες (η διαφορά είναι σημαντική για όλες τις άλλες ημέρες πλην της Κυριακής). Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι το πρόσημο των διαφορών στην περίπτωση της Δευτέρας είναι αρνητικό, *μπορεί να ειπωθεί ότι η Δευτέρα είναι η πλέον λιγότερο επιβαρυνόμενη σε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, ημέρα της εβδομάδας*. Μια λογική εξήγηση στο συμπέρασμα αυτό είναι ότι η Δευτέρα ακολουθεί το Σαββατοκύριακο που οι αστικές δραστηριότητες κατανάλωση και εργασία μειώνονται δραστικά και επομένως μέσω της μείωσης του κυκλοφοριακού φόρτου συμβάλλουν στη μειωμένη συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> της Δευτέρας.

#### 4.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΑΣ<sub>10</sub>

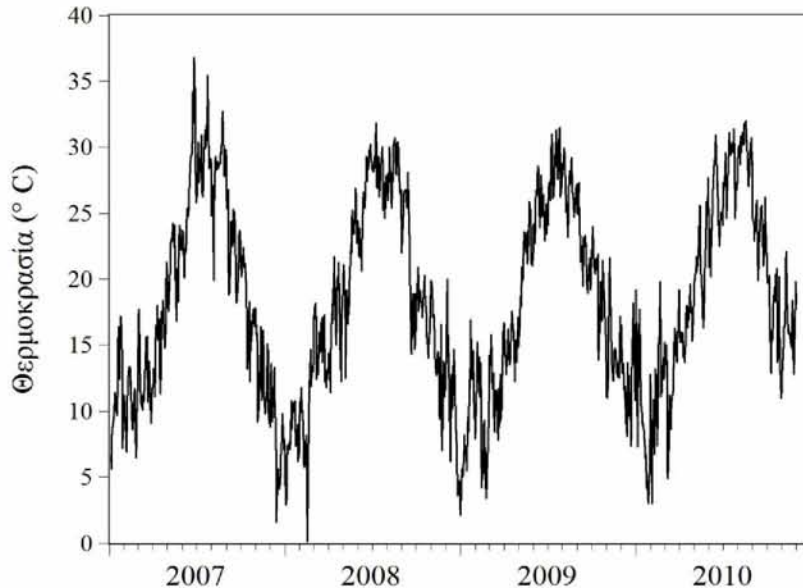
Η εξέταση του ρόλου των μετεωρολογικών παραμέτρων στην ημερήσια συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, γίνεται στη συνέχεια με τη βοήθεια της ετεροσυσχέτισης. Η ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) αφορά στη συσχέτιση δυο χρονολογικών σειρών. Στην παρούσα περίπτωση, αφορά στη συσχέτιση της χρονολογικής σειράς της εκάστοτε μετεωρολογικής παραμέτρου και της χρονολογικής σειράς των ημερήσιων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>. Η ετεροσυσχέτιση εξετάζει τη συσχέτιση των δυο χρονολογικών σειρών σε διάφορα lags (χρονικές υστερήσεις) και συνεπώς είναι σε θέση να αποκαλύπτει τη σχέση των χρονολογικών σειρών όχι μόνο στον ίδιο χρόνο, αλλά και με υστέρηση της μιας από την άλλη, π.χ. είναι σε θέση μεταξύ άλλων να αποκαλύπτει αν μια χρονολογική σειρά αποτελεί ένδειξη για την μεταβολή μιας άλλης.

Ωστόσο, για να χρησιμοποιηθεί η ετεροσυσχέτιση απαιτείται όπως αναφέρεται από τον Haugh (1976), οι δυο χρονολογικές σειρές να είναι απαλλαγμένες από πιθανή αυτοσυσχέτιση που τις διακρίνει. Αυτό γιατί σε περίπτωση που υπάρχει αυτοσυσχέτιση μπορεί να προκύψουν στατιστικά σημαντικές τιμές της ετεροσυσχέτισης σε διάφορα lags, οι οποίες φυσικά δεν οφείλονται στην πραγματική σχέση μεταξύ των χρονολογικών σειρών, αλλά στην αυτοσυσχέτισή τους. Κατά τον ίδιο, η μεθοδολογία ARIMA, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις χρονολογικές σειρές που έχουν αυτοσυσχέτιση προκειμένου να προκύψουν οι υπολειμματικές τιμές, που θα είναι πλέον ανεξάρτητες

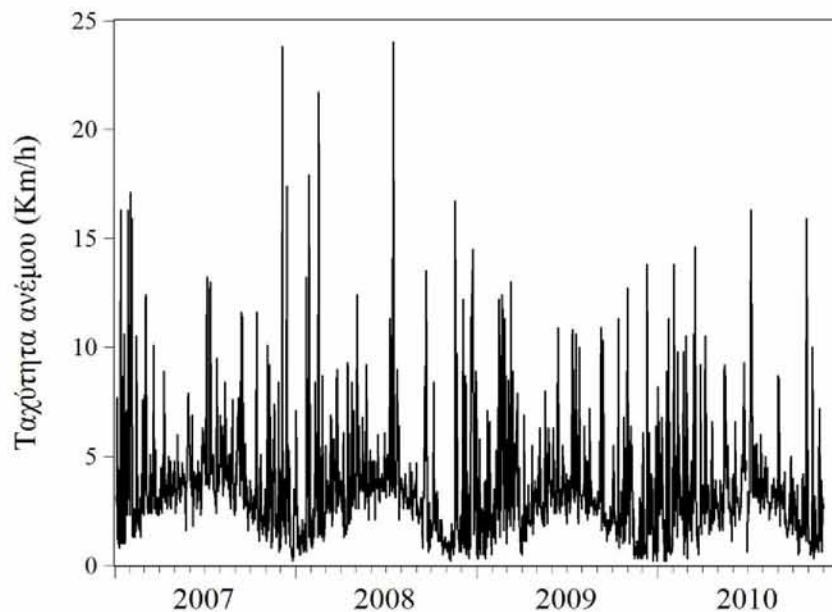


και απαλλαγμένες από την αυτοσυσχέτιση. Έτσι πλέον η ετεροσυσχέτιση μπορεί να γίνει μέσω των υπολειμματικών τιμών των δυο χρονολογικών σειρών, στις οποίες έχει εφαρμοστεί η μεθοδολογία ARIMA.

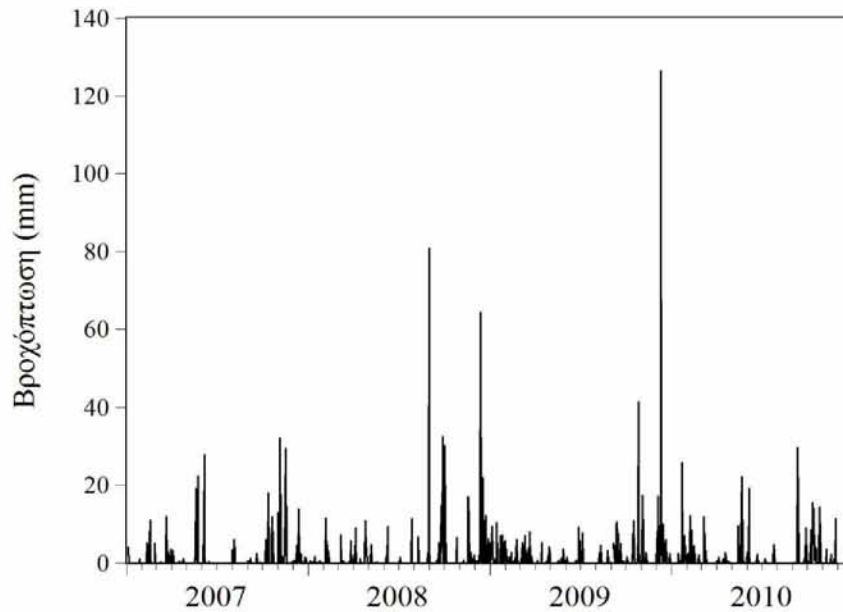
Οι εξεταζόμενες μετεωρολογικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία (Σχήμα 4.17), η ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 4.18) και η βροχόπτωση (Σχήμα 4.19).



**Σχήμα 4.17** Μέση ημερήσια θερμοκρασία, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].



**Σχήμα 4.18** Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].



**Σχήμα 4.19** Ημερήσια βροχόπτωση, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].

Αρχικά για κάθε μετεωρολογική παράμετρο θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα κατάλληλο μοντέλο ARIMA, έτσι ώστε οι υπολειμματικές του τιμές να απαλλαχθούν από την αυτοσυσχέτιση. Για λόγους οικονομίας χώρου, αλλά και διότι δεν ενδιαφέρει στην παρούσα φάση το πώς κατασκευάζεται ένα μοντέλο ARIMA, υπολογίστηκαν τα κατάλληλα μοντέλα για τις τρεις αυτές μετεωρολογικές παραμέτρους και είναι τα εξής:

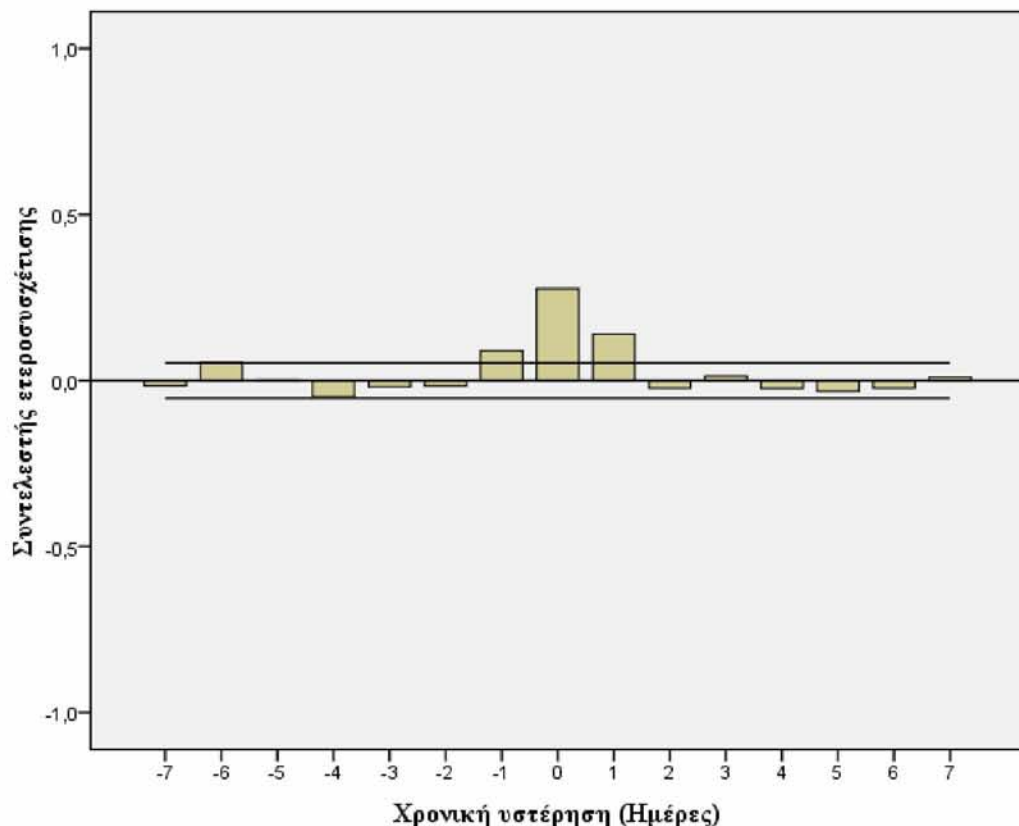
- Για τη θερμοκρασία, εφαρμόστηκε το μοντέλο ARIMA (1,1,2).
- Για την ταχύτητα του ανέμου, εφαρμόστηκε το μοντέλο ARIMA (2,1,1).
- Για τη βροχόπτωση, εφαρμόστηκε το μοντέλο ARIMA (1,0,0).

Φυσικά, για τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, χρησιμοποιείται το μοντέλο που κατασκευάστηκε προηγουμένως για λόγους πρόβλεψης και είναι το ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub>. Υπενθυμίζεται ότι όλα αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν ημερήσιες τιμές.

Έχοντας πλέον τα μοντέλα ARIMA, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ετεροσυσχέτιση μεταξύ των υπολειμματικών τιμών τους, προκειμένου να αναδειχθούν οι πραγματικές σχέσεις μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων και της ημερήσιας συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων για την περίπτωση του Βόλου.

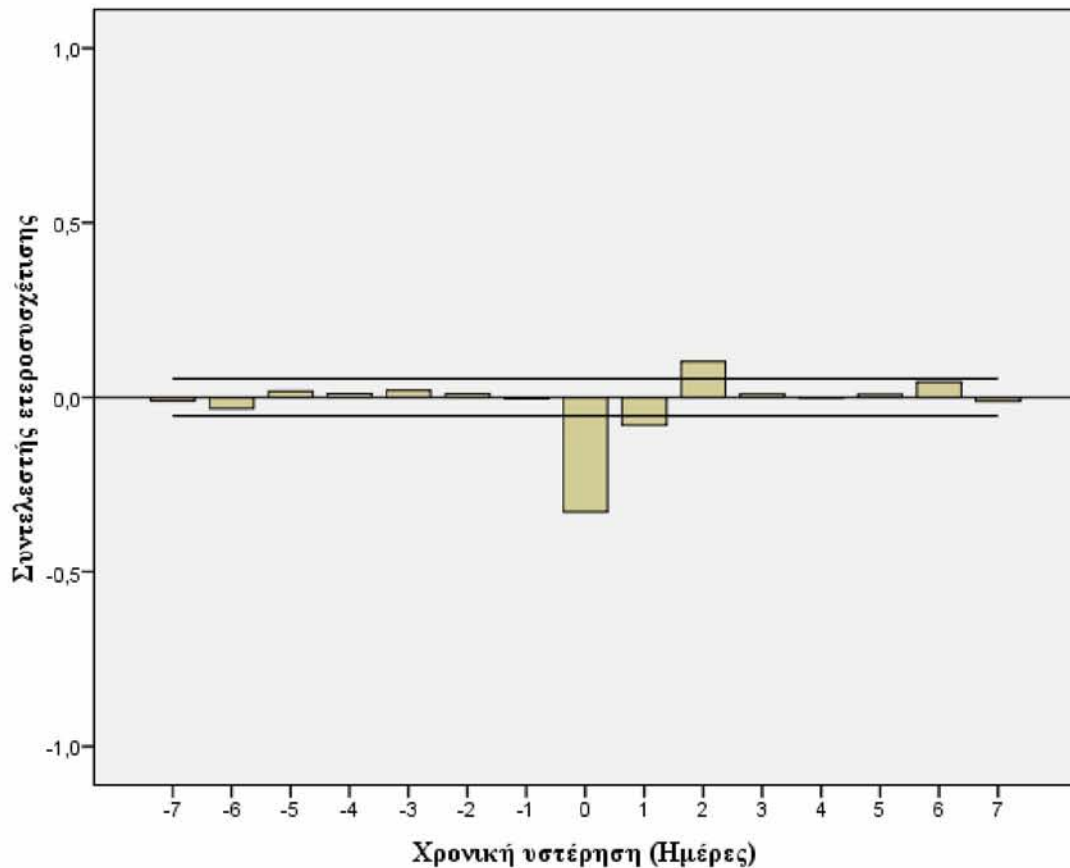
Από το Σχήμα 4.20 φαίνεται ότι η ημερήσια θερμοκρασία έχει στατιστικά σημαντική θετική σχέση με την ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο. Δηλαδή η υψηλή θερμοκρασία μιας ημέρας συνήθως συνοδεύεται από υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων για την ίδια ημέρα. Επίσης από την εξέταση των lags, η υψηλή θερμοκρασία μιας ημέρας συνήθως συνοδεύεται και από υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων της επόμενης ημέρας, αλλά και το αντίστροφο δηλαδή η υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων μιας ημέρας συνήθως συνοδεύεται από υψηλή θερμοκρασία της επόμενης ημέρας.

Η διαπίστωση αυτή του αμφίδρομου ρόλου της θερμοκρασίας στην συγκέντρωση ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, φαίνεται να συμφωνεί με τη διαπίστωση των Papanastasiou et al. (2010), οι οποίοι αναλύοντας τα φαινόμενα καύσωνα και τη σχέση τους με τις συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> για το καλοκαίρι του 2007 στην περιοχή του Βόλου, κατέληξαν πως οι ημέρες καύσωνα στο Βόλο τείνουν να συνοδεύονται από υψηλές ημερήσιες συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub>, γεγονός το οποίο αποδίδουν, στο ότι η υψηλή θερμοκρασία ευνοεί τον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.



**Σχήμα 4.20** Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub> και των ημερήσιων υπολοίπων θερμοκρασίας ARIMA (1,1,2), [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].

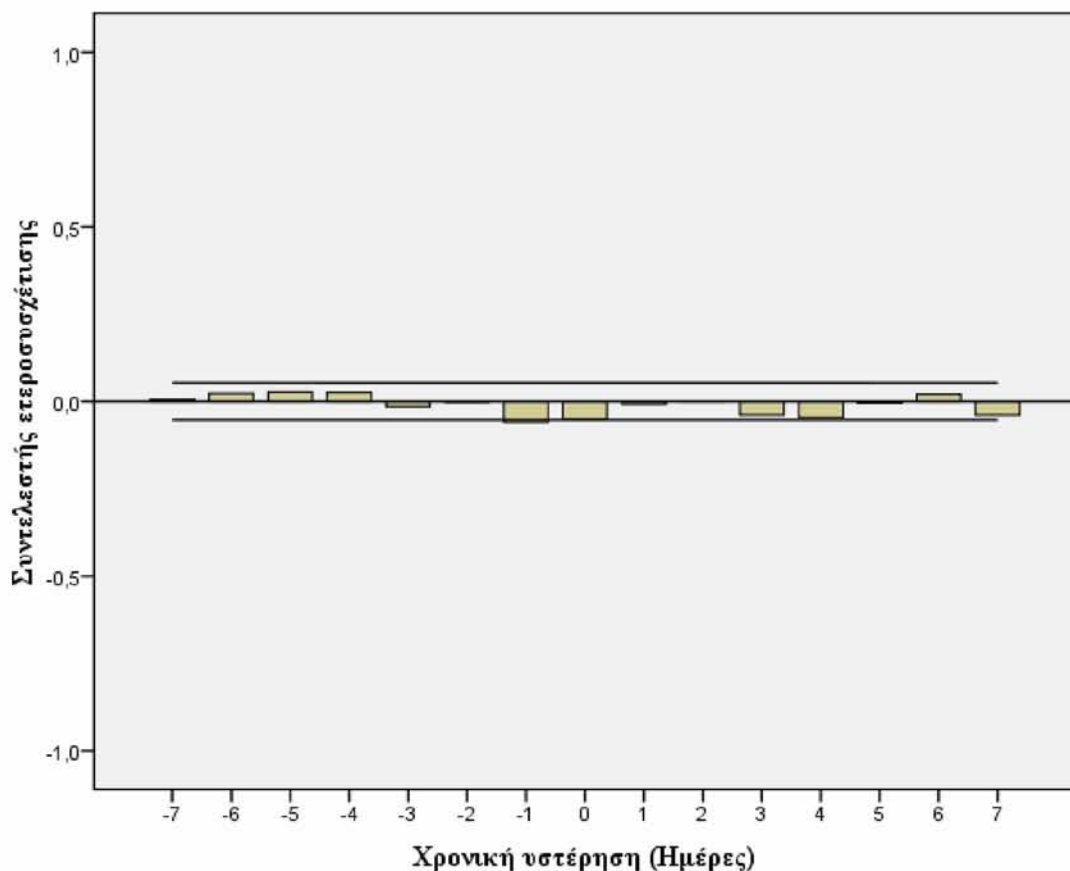
Σχετικά με την επίδραση της ημερήσιας ταχύτητας του ανέμου στην ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.21, η σχέση των δυο χρονολογικών σειρών αποδεικνύεται αρνητική. Αυτό φυσικά συμφωνεί με τη λογική του ότι όσο πιο δυνατός είναι ο άνεμος, τόσο πιο εύκολη είναι η διασπορά και απομάκρυνση των ρύπων της ατμόσφαιρας και συνεπώς τόσο πιο χαμηλή είναι η συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub>. Από το Σχήμα 4.21, επίσης προκύπτει ότι σε περίπτωση π.χ. ενός ισχυρού ανέμου, ενώ για την ίδια ημέρα και την επόμενη ημέρα πρόκειται συνήθως να υπάρχουν γενικώς χαμηλές συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, αυτό δεν ισχύει για τη μεθεπόμενη ημέρα, όπου η σχέση είναι θετική (lag 2), γεγονός που μάλλον σημαίνει ότι η τάση που έχει η ημερήσια ταχύτητα του ανέμου να μειώνει την ημερήσια συγκέντρωση ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, περιορίζεται μόνο στην ίδια και στην επόμενη ημέρα.



**Σχήμα 4.21** Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων ταχύτητας ανέμου ARIMA (2,1,1) και των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].



Σχετικά με την περίπτωση της βροχόπτωσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.22, η ημερήσια βροχόπτωση έχει αρνητική σχέση με την ημερήσια συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, ωστόσο η σχέση αυτή έστω και οριακά δεν είναι στατιστικά σημαντική. Έτσι σε αντίθεση με την ημερήσια ταχύτητα του ανέμου, η ημερήσια βροχόπτωση δεν φαίνεται να αποτελεί ισχυρό παράγοντα απομάκρυνσης των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> από την ατμόσφαιρα του Βόλου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η βροχόπτωση είναι υγρή εναπόθεση και όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά κυρίως τα λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια και όχι τα χονδρόκοκκα τα οποία απομακρύνονται μέσω κυρίως της ξηρής εναπόθεσης.



**Σχήμα 4.22** Ετεροσυσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων υπολοίπων βροχόπτωσης ARIMA (1,0,0) και των ημερήσιων υπολοίπων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ και μετεωρολογικών παραμέτρων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών].

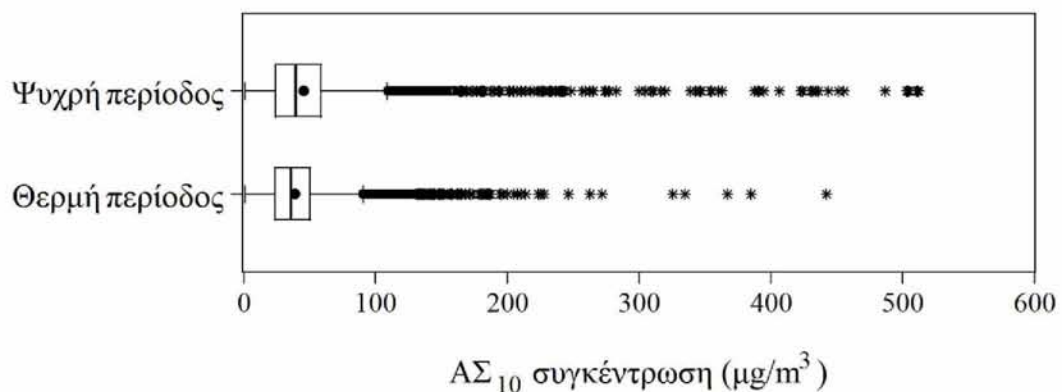
Τέλος, σχετικά με την κατεύθυνση του ανέμου και το ρόλο της στη συγκέντρωση των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, κατά τους Papanastasiou και Melas (2009b), οι οποίοι ανέλυσαν δεδομένα των ΑΣ<sub>10</sub> για την περίοδο 2001-2003, κατέληξαν στο ότι σε σχέση με όλες τις κατευθύνσεις του ανέμου, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων συνήθως εμφανίζονται όταν ο άνεμος φυσάει από Βόρειες και

Βορειοδυτικές κατευθύνσεις, μεταφέροντας ουσιαστικά τις εκπομπές των ρύπων της ευρύτερης βιομηχανικής περιοχής του Βόλου στο αστικό τμήμα, επιβαρύνοντας έτσι περαιτέρω την ατμόσφαιρα του Βόλου.

#### 4.2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΠΟΧΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ

Στο πλαίσιο της ανάλυσης σε επίπεδο εποχικών περιόδων, επιλέχθηκε η χρονολογική σειρά των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> του Βόλου, να ενταχθεί σε δυο εξαμηνιαία τμήματα: αυτό της ψυχρής περιόδου (Οκτώβριος-Μάρτιος) και αυτό της θερμής περιόδου (Απρίλιος-Σεπτέμβριος).

Το Σχήμα 4.23, αποτελεί μια πρώτη εικόνα για το κατά πόσο διαφέρουν οι δυο περίοδοι με βάση τις ωριαίες μετρήσεις (32106 έγκυρες). Από ότι φαίνεται οι περισσότερες ακραίες τιμές ωριαίων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> τείνουν να εμφανίζονται κατά τη ψυχρή περίοδο. Προκειμένου και σ' αυτή τη περίπτωση να εξετασθεί κατά πόσο οι μέσες τιμές των δυο περιόδων στατιστικά διαφέρουν, χρησιμοποιείται ANOVA όχι όμως επί των ωριαίων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, αλλά όπως και προηγουμένως επί των ημερήσιων υπολοίπων ΑΣ<sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub>. Όπως και πριν έχουμε πλέον ανεξάρτητες παρατηρήσεις, αφαιρούμε μερικές ημερήσιες τιμές των υπολοίπων για να εξασφαλίσουμε ίδιο αριθμό παρατηρήσεων ανά ομάδα και τέλος υπολογίζουμε τον λόγο της μεγαλύτερης διακύμανσης προς την μικρότερη διακύμανση των ομάδων ο οποίος είναι μικρότερος του 3. Συνεπώς η ANOVA είναι εφικτή και τα αποτελέσματά της πρέπει να θεωρούνται αξιόπιστα.



**Σχήμα 4.23** Εποχική κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

**Πίνακας 4.5** ANOVA για τις μέσες εποχικές συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

	Άθροισμα τετραγώνων	β.ε.	Τετράγωνο μέσης τιμής	F	Σημαντ.
Μεταξύ των ομάδων	,854	1	,854	,698	,404
Εντός των ομάδων	1730,395	1414	1,224		
Σύνολο	1731,249	1415			

Από τον Πίνακα 4.5 η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται και *συνεπώς οι μέσες εποχικές συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> (ψυχρής και θερμής περιόδου) στο Βόλο, δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους*. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η εξής:

1. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17 και στο Σχήμα 4.18, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου τείνουν να είναι αυξημένες ακριβώς τις ίδιες εποχικές περιόδους. Ωστόσο, όπως περιγράφηκε στην ανάλυση των μετεωρολογικών παραμέτρων, η αυξημένη θερμοκρασία τείνει να αυξάνει τις συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο και η ταχύτητα του ανέμου τείνει να τις μειώνει. Συνεπώς κατά τη ψυχρή περίοδο που η θερμοκρασία είναι χαμηλή, συνήθως ο άνεμος είναι αδύναμος, οπότε η συγκέντρωση ισορροπεί. Κατά τη θερμή περίοδο που η θερμοκρασία είναι υψηλή, ο άνεμος είναι ισχυρός οπότε η συγκέντρωση ισορροπεί.
2. Επίσης μια ακόμη εξήγηση για τη στατιστική ομοιότητα των μέσων τιμών των εποχικών περιόδων, είναι βάσει των Papanastasiou και Melas (2009a), το γεγονός ότι το θαλάσσιο αερόλυμα είναι περισσότερο παρόν κατά τη θερμή περίοδο, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο κατά την ίδια περίοδο, ωστόσο κατά τη ψυχρή περίοδο είναι παρούσα η χρήση καυστήρων για λόγους θέρμανσης των κατοικιών, κλπ., οπότε αυξάνεται η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων κατά την ίδια περίοδο.
3. Από τον συνδυασμό των 2. και 3., φαίνεται να προωθείται το γεγονός ότι οι μέσες τιμές συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub> της ψυχρής και θερμής περιόδου για την περίπτωση του Βόλου δεν διαφέρουν σημαντικά. Φυσικά δεν αμφισβητείται το γεγονός ότι εντούτοις οι ακραίες τιμές συγκέντρωσης ΑΣ<sub>10</sub> τείνουν να εμφανίζονται κατά τη ψυχρή περίοδο.

Η διαπίστωση περί των αυξημένων ακραίων τιμών ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο κατά τη ψυχρή περίοδο, φαίνεται να συμφωνεί και με τα συμπεράσματα άλλων ερευνητών. Συγκεκριμένα οι Πρώϊας κ.ά. (2010), αναλύοντας την ποιότητα της ατμόσφαιρας στον Βόλο κατά το διάστημα 2001-2008, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση της

ποιότητας του αέρα είναι ιδιαίτερα υποβαθμισμένη κατά τη ψυχρή περίοδο, κατά την οποία εμφανίζονται ακραίες τιμές (αιχμές) συγκεντρώσεων των ΑΣ<sub>10</sub>.

#### 4.2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΤΩΝ

Η πράξη του Υπουργικού Συμβουλίου (ΠΥΣ) 34/2002, ΦΕΚ 125Α/05-06-2002, «Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου» πέρα από τη θέσπιση ορίων για τις ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub>, θεσπίζει όρια και για τις ετήσιες τιμές συγκέντρωσης των ΑΣ<sub>10</sub>. Συγκεκριμένα, για το διάστημα μελέτης 2007-2010 ισχύουν τα εξής:

- 2005-2009: Η μέση ετήσια τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- 2010: Η μέση ετήσια τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Επισημαίνεται πως ο κανόνας αυτός είναι και ο πλέον ισχύων εν έτη 2011.

Στον Πίνακα 4.6, φαίνεται ακριβώς η κατάσταση που επικράτησε στο Βόλο κατά το διάστημα 2007-2010. Είναι εμφανές ότι μόνο το 2009, δεν υπήρξε παραβίαση του κανόνα σε ετήσιο επίπεδο. Ωστόσο, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης και σε επίπεδο ημερών που προηγήθηκε και συγκεκριμένα συμπεριλαμβανομένου του Πίνακα 4.2, μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Κατά το διάστημα 2005-2009 στο Βόλο, οι παραβιάσεις του νομικού πλαισίου που αφορά στις συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub>, είναι δεδομένες αν και τείνουν να μειώνονται από έτος σε έτος λαμβάνοντας υπόψη τα ημερήσια και ετήσια όρια.
- Με τα νέα αυστηρότερα όρια που ισχύουν από το 2010, ο Βόλος βρίσκεται ανέτοιμος να μπορέσει να ανταπεξέλθει στην τήρηση αυτών, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται από τις υπερβάσεις του 2010.
- Κατά συνέπεια, το διάστημα 2007-2010 για το Βόλο, είναι ένα διάστημα συνεχών παραβιάσεων του νομικού πλαισίου για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, το οποίο χαρακτηρίζεται από μια διαχρονική μείωση του αριθμού των παραβιάσεων για το διάστημα 2007-2009, αλλά με τη θέσπιση των νέων ορίων από το 2010, η κατάσταση γίνεται ακόμα πιο δύσκολη.

Από το Σχήμα 4.24, φαίνεται πως κατά το εξεταζόμενο διάστημα 2007-2010, έτη όπως το 2007 και το 2010, εμφανίζουν πολλές ακραίες ωριαίες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>. Όπως προηγουμένως έτσι και σ' αυτή την περίπτωση, θα χρησιμοποιηθεί η ANOVA

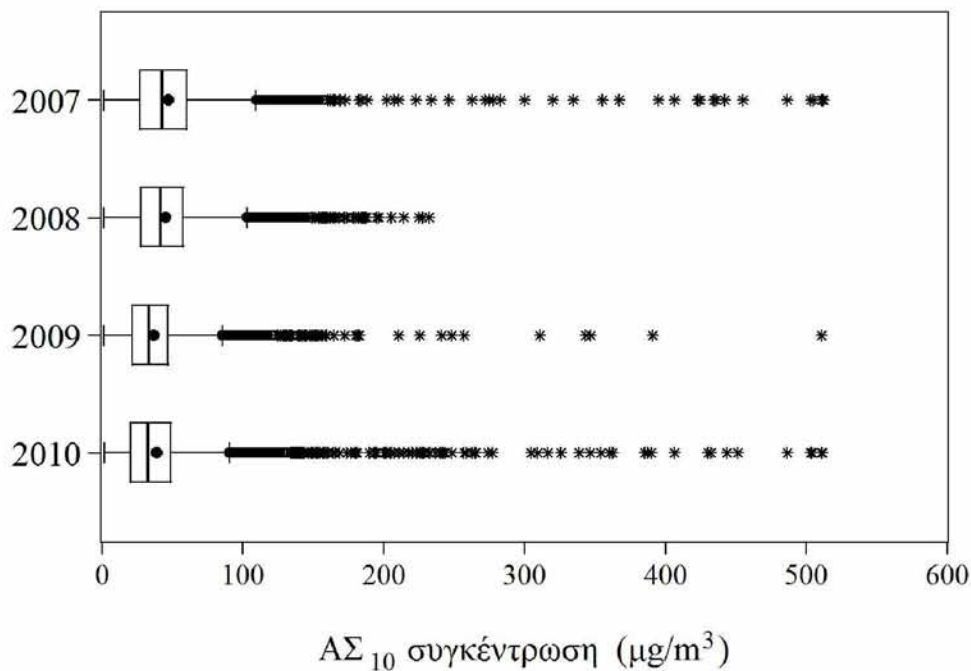


για να εξετασθεί αν οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> των ετών διαφέρουν σημαντικά ή όχι μεταξύ τους.

**Πίνακας 4.6** Παραβίαση του νομικού πλαισίου για τις ετήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> κατά την περίοδο 2007-2010, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

Έτος	ΑΣ <sub>10</sub> συγκέντρωση (μg/m <sup>3</sup> )	Οριακή τιμή (μg/m <sup>3</sup> )	Παραβίαση κανόνα (μg/m <sup>3</sup> )
2007	46,5	40	6,5
2008	44,6	40	4,6
2009	36,3	40	-
2010	38,8	20	18,8

Φυσικά η ANOVA θα πραγματοποιηθεί σε επίπεδο των υπολοίπων ΑΣ<sub>10</sub> ARIMA (1,1,1)×(1,0,0)<sub>7</sub>, έτσι ώστε οι παρατηρήσεις να είναι ανεξάρτητες. Επίσης, αφαιρούνται μερικές τιμές προκειμένου όλα τα έτη να έχουν τον ίδιο αριθμό παρατηρήσεων. Όσον αφορά το λόγο της μεγαλύτερης διακύμανσης προς τη μικρότερη διακύμανση των ομάδων αυτός είναι μικρότερος του 3. Συνεπώς πληρούνται οι υποθέσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ANOVA να είναι αξιόπιστα.



**Σχήμα 4.24** Ετήσια κατανομή των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

**Πίνακας 4.7** ANOVA για τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub>, [ΠΗΓΗ: Ιδία επεξεργασία μετρήσεων ΑΣ<sub>10</sub> της ΔΕΥΑΜΒ].

	Άθροισμα τετραγώνων	β.ε.	Τετράγωνο μέσης τιμής	F	Σημαντ.
Μεταξύ των ομάδων	8,262	3	2,754	2,255	,080
Εντός των ομάδων	1680,491	1376	1,221		
Σύνολο	1688,753	1379			

Στον Πίνακα 4.7, φαίνεται το αποτέλεσμα της ANOVA, με βάση το οποίο η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να απορριφθεί και επομένως οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις ΑΣ<sub>10</sub> των ετών 2007-2010 στο Βόλο, δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Φυσικά αυτό σημαίνει πως δεδομένων των παραβιάσεων κατά το διάστημα 2007-2010 η κατάσταση στο Βόλο όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια απαιτεί την άμεση λήψη μέτρων για τον περιορισμό των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>, ώστε να διασφαλιστεί η ανθρώπινη υγεία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΒΟΛΟ.

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Από τα προηγούμενα κεφάλαια αναδεικνύεται ότι ο Βόλος έχει σοβαρό πρόβλημα παραβίασης της νομοθεσίας περί των επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub>. Συγκεκριμένα από την στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο για το χρονικό διάστημα 2007-2010, προκύπτει ότι οι ετήσιες συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και συνεπώς η κατάσταση παραμένει η ίδια με την πάροδο των ετών, παρά την αναγκαιότητα από την νομοθεσία για δραστική μείωση των συγκεντρώσεων ΑΣ<sub>10</sub> από το 2010 και έπειτα.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, μέσω παράθεσης ενδεικτικών δράσεων που μπορούν να ληφθούν από την Τοπική Αυτοδιοίκηση. Σημειώνεται ότι μερικές από τις δράσεις αυτές έχουν θετικό αντίκτυπο και στον περιορισμό των άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων και συνεπώς συμβάλλουν στην γενικότερη καλυτέρευση της ποιότητας της ατμόσφαιρας του Βόλου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σύμφωνα με το ερευνητικό έργο των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), το πρόβλημα των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο οφείλεται κατά βάση στην κυκλοφορία των οχημάτων και συγκεκριμένα κυρίως στα πετρελαιοκίνητα οχήματα, αλλά και στα βενζινοκίνητα οχήματα, ενώ σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζει και η επαναιώρηση της σκόνης, η οποία συνδέεται με την κυκλοφορία των οχημάτων. Σε δεύτερη μοίρα έρχεται η συμμετοχή της τσιμεντοβιομηχανίας ΑΓΕΤ, η καύση απορριμμάτων και η καύση πετρελαίου ιδίως στη θέρμανση.

Κατά συνέπεια, λόγω της δεσπόζουσας θέσης που κατέχει η κυκλοφορία των οχημάτων στις συγκεντρώσεις των ΑΣ<sub>10</sub> στο Βόλο, οι δράσεις που μπορούν να παρατεθούν, περιστρέφονται κυρίως γύρω από την κυκλοφορία των οχημάτων, ενώ για λόγους πληρότητας γίνεται αναφορά και σε δράσεις που στοχεύουν στις υπόλοιπες πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων, όπως είναι η τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ και η καύση απορριμμάτων.

## 5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Κατά τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), η κυκλοφορία των οχημάτων αποτελεί όπως έχει ήδη αναφερθεί, την σημαντικότερη πηγή εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο. Όπως διαπιστώνεται από τους ίδιους, από τα κυκλοφορούντα οχήματα, τα πλέον ρυπογόνα ως προς τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι τα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Σ' αυτό το πλαίσιο είναι λοιπόν χρήσιμο να γνωρίζει κάποιος τις μελλοντικές τάσεις που συνδέονται με τις εκπομπές των οχημάτων, προκειμένου να υπάρχει μια εικόνα για την εξέλιξη του σημαντικού αυτού παράγοντα στην ατμόσφαιρα του Βόλου.

Οι Kousoulidou et al. (2008), ενδιαφερόμενοι για την εξέλιξη της ποιότητας της ατμόσφαιρας στο αστικό περιβάλλον της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κατέληξαν στα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα ως προς το ρόλο που θα έχει το 2020 η κυκλοφορία των οχημάτων στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων:

- Έχοντας ως έτος αρχή το 2000 και βάσει των τρεχουσών νομοθετικών ρυθμίσεων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προβλέπεται λόγω ανανέωσης της τεχνολογίας και του στόλου των οχημάτων, μείωση εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων κατά 65% για τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα και 69% για τα φορτηγά οχήματα.
- Στο πλαίσιο αυτό, η σχετική συνεισφορά των αιωρούμενων σωματιδίων που δεν προέρχονται από την εξάτμιση αλλά από την φθορά των ελαστικών και των φρένων, αυξάνεται. Μάλιστα το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθότι ήδη περισσότερο από το 80% των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από τα βενζινοκίνητα οχήματα, οφείλεται σε αιωρούμενα σωματίδια που δεν προέρχονται από την εξάτμιση. Συνεπώς ο αυξημένος αυτός ρόλος των αιωρούμενων σωματιδίων που δεν προέρχονται από την εξάτμιση των οχημάτων, αλλά από τα φρένα και τα ελαστικά, μπορεί να αποτελεί ικανό αίτιο στο μέλλον για παραβίαση των ορίων ποιότητας της ατμόσφαιρας και που σαφώς δεν μπορεί πλέον να αντιμετωπιστεί με ελέγχους καυσαερίων.

### 5.3 ΔΡΑΣΕΙΣ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

#### *5.3.1 ΕΚΠΛΥΣΗ ΤΗΣ ΣΚΟΝΗΣ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΒΑΣΙΚΟΥΣ ΔΡΟΜΟΥΣ ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ*

Η σημασία της επαναιώρησης της σκόνης στον καθορισμό των επιπέδων των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, αλλά και η διερεύνηση διαφόρων τεχνικών απομάκρυνσής της από τους δρόμους, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον ορισμένων ερευνητών μεταξύ των οποίων και των Amato et al. (2009).

Οι Amato et al. (2009), αναφέρουν ότι η γνώση γύρω από την ποσοτική σημασία των τεχνικών απομάκρυνσης της σκόνης, στη μείωση των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων, είναι ακόμη ελλιπής. Στο πλαίσιο αυτό, οι συγκεκριμένοι ερευνητές ασχολήθηκαν με μελέτη περίπτωσης στην περιοχή της Βαρκελώνης, η οποία υποφέρει από ατμοσφαιρική ρύπανση, τόσο λόγω της αυξημένης κυκλοφορίας των οχημάτων, όσο και της σπανιότητας των βροχοπτώσεων. Οι ερευνητές ασχολούμενοι με έναν από τους πιο κεντρικούς δρόμους της πόλης, εφήρμοσαν τεχνικές έκπλυσης των λωρίδων αυτού καθώς και των εκατέρωθεν πεζοδρομίων σε καθημερινή βάση, προκειμένου να αναδειχθεί το κατά πόσο μπορεί μια τέτοια δράση να προκαλέσει σημαντική μείωση στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα ευρήματα των ερευνητών είναι ενθαρρυντικά καθώς λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη μεταβλητότητα των μετεωρολογικών παραμέτρων όσο και τη χημική σύσταση των αιωρούμενων σωματιδίων για επαλήθευση των πηγών προέλευσης τους, κατέληξαν στο ότι η συνεχής έκπλυση της σκόνης του δρόμου σε καθημερινή βάση, έδειξε ικανοποιητική ποσοτικοποιήσιμη μείωση στις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  και οπότε μια τέτοια ενέργεια κρίνεται αρκετά χρήσιμη και αποδοτική για βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Λαμβάνοντας υπόψη: α) τις διαπιστώσεις των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), περί της σημαντικότητας συμμετοχής της επαναιώρησης της σκόνης λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, β) τις διαπιστώσεις των Kousoulidou et al. (2008) περί της αυξημένης μελλοντικής συνεισφοράς των αιωρούμενων σωματιδίων που δεν προέρχονται από την εξάτμιση των οχημάτων αλλά από τα φρένα και τα ελαστικά τους και γ) τις διαπιστώσεις των Amato et al. (2009) περί της ωφέλειας χρησιμοποίησης τεχνικών έκπλυσης της σκόνης των δρόμων, κρίνεται αρμόζουσα η χρησιμοποίηση τέτοιων τεχνικών έκπλυσης και στην πόλη του Βόλου για την βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας από αιωρούμενα σωματίδια.

Στο πλαίσιο λοιπόν αυτό, η έκπλυση της σκόνης των δρόμων στη πόλη του Βόλου οφείλει να συνδέεται με βασικούς κεντρικούς δρόμους του Βόλου, όπου καθημερινά διέρχονται πολυάριθμα οχήματα, όπως είναι οι οδοί Λαρίσης, Λαμπράκη, Δημητριάδος, Ιάσονος, Ιωλκού, Καρτάλη, Αναλήψεως, Παγασών και 2ας Νοεμβρίου. Η ακολουθούμενη τεχνική αφορά σε καθημερινή έκπλυση της σκόνης κατά τις πρωινές ώρες, τόσο των δρόμων, όσο και των εκατέρωθεν πεζοδρομίων, προκειμένου η σκόνη που έχει κατακαθίσει στις επιφάνειες αυτές, να απομακρύνεται μέσω του νερού και έτσι να μην τίθεται σε επαναιώρηση από τα διερχόμενα οχήματα, βοηθώντας στην αποτροπή επικίνδυνων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>10</sub> στη πόλη του Βόλου.

Επισημαίνεται ότι ο Δήμος Βόλου ασχολείται με την απομάκρυνση της σκόνης από τους βασικούς δρόμους, αφού διαθέτει οχήματα καθαρισμού των δρόμων, γεγονός το οποίο δείχνει σαφώς πως κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση, ειδικά με την αυξημένη σημασία που θα έχει στο μέλλον η επαναιώρηση της σκόνης. Καθίσταται προφανές, ότι η όλη προσπάθεια πρέπει να περιστρέφεται γύρω από την απρόσκοπτη συστηματική έκπλυση των δρόμων και των παρακείμενων πεζοδρομίων.

Σημειώνεται ότι η έκπλυση της σκόνης των δρόμων του Βόλου, προτείνεται και από τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), οι οποίοι αναφέρουν ότι η έκπλυση της σκόνης από τους δρόμους συνοδεύεται και από οφέλη και για το αποχετευτικό σύστημα της πόλης, το οποίο θα επιβαρύνεται σαφώς λιγότερο. Όπως οι ίδιοι επισημαίνουν, η εφαρμογή σχετικού προγράμματος στο Δήμο Ελευθερίου-Κορδελιού στη Θεσσαλονίκη οδήγησε σε σημαντικά αποτελέσματα.

### 5.3.2 ΔΕΝΔΡΟΦΥΤΕΥΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ

Το αστικό πράσινο αποτελεί κύριο στοιχείο του αστικού περιβάλλοντος, καθότι μπορεί και καλύπτει τις ανάγκες των ανθρώπων για αναψυχή, διαμορφώνει συνθήκες μικροκλίματος τοπικής εμβέλειας, ενώ επίσης βοηθάει και στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας των πόλεων, καθώς συμβάλλει στον περιορισμό των επικίνδυνων για την ανθρώπινη υγεία συγκεντρώσεων διαφόρων ρύπων της ατμόσφαιρας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, όπου παρατέθηκαν οι διαπιστώσεις των Ottele et al. (2010), η βλάστηση και συνεπώς και τα δέντρα, είναι ικανοί αποδέκτες των αιωρούμενων σωματιδίων ΑΣ<sub>2,5</sub> και ΑΣ<sub>10</sub> της ατμόσφαιρας, αφού αυτά κατακάθονται στην επιφάνεια των φυλλωμάτων τους, στην οποία και συνήθως

προσκολλούνται, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος αυτών να μην τίθεται σε επαναιώρηση στην ατμόσφαιρα.

Διάφοροι ερευνητές μεταξύ των οποίων και οι Beckett et al. (2000), έχουν ασχοληθεί με την επιλογή των κατάλληλων φυτικών ειδών που μπορούν να φυτευτούν στο αστικό περιβάλλον και τα οποία θα είναι ικανά να συγκρατούν όσο το δυνατόν περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια στα φυλλώματά τους.

Οι Beckett et al. (2000), διερευνώντας τη δυνατότητα συγκράτησης αιωρούμενων σωματιδίων πέντε διαφορετικών φυτικών ειδών, που μπορούν να επιζήσουν στο ρυπογόνο αστικό περιβάλλον και στα οποία συμπεριλαμβάνονται κωνοφόρα και πλατύφυλλα, κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα:

- Τα διάφορα φυτικά είδη δέντρων μπορούν να εγκλωβίσουν σημαντικές ποσότητες των αιωρούμενων σωματιδίων, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα της ατμόσφαιρας.
- Μεταξύ των ειδών ωστόσο υπάρχουν διαφορές ως προς την ικανότητά τους να συγκρατούν αιωρούμενα σωματίδια. Συγκεκριμένα τα κωνοφόρα είδη φαίνεται να αποτελούν την πλέον βέλτιστη επιλογή φυτικού είδους για τον έλεγχο της ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια, αφού είναι σε θέση να συγκρατούν μεγάλο αριθμό αιωρούμενων σωματιδίων και έχουν το πρόσθετο πλεονέκτημα να διατηρούν τα φύλλα τους κατά τον χειμώνα, που συνήθως η ρύπανση είναι υψηλότερη. Από τα εξεταζόμενα κωνοφόρα είδη, τα πεύκα είναι σε θέση να συγκρατούν περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια από ότι τα κυπαρίσσια.
- Σε δεύτερη μοίρα μετά τα κωνοφόρα, έρχονται τα πλατύφυλλα, τα οποία έχουν λιγότερη ικανότητα συγκράτησης αιωρούμενων σωματιδίων. Από τα εξεταζόμενα πλατύφυλλα είδη, τα πιο χρήσιμα για συγκράτηση αιωρούμενων σωματιδίων είναι αυτά που διαθέτουν σκληρές επιφάνειες φύλλων.

Όπως λοιπόν προκύπτει από τις διαπιστώσεις των Beckett et al. (2000), η δράση που προτείνεται στην περίπτωση της πόλης του Βόλου, είναι η στοχευμένη πλέον φύτευση φυτικών ειδών, η οποία κατά τους ίδιους ερευνητές θα πρέπει: α) να γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στους επιβαρυσμένους με κίνηση δρόμους της πόλης για άμεσο εγκλωβισμό των εκπεμπόμενων σωματιδίων και β) να αφορά ανθεκτικά είδη κυρίως κωνοφόρων, έπειτα και από συζήτηση με ειδικούς επιστήμονες π.χ. γεωπόνους.

### 5.3.3 ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΑΖΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ

Δεδομένου του προβλήματος των αιωρούμενων σωματιδίων που αντιμετωπίζει ο Βόλος λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων, είναι επιτακτική ανάγκη, να περιοριστεί η χρησιμοποίηση των οχημάτων ιδιωτικής χρήσεως, γεγονός το οποίο μπορεί να γίνει με στήριξη των μέσων μαζικής μεταφοράς και των εναλλακτικών μορφών μετακίνησης, κυρίως της πεζής μετακίνησης και της χρησιμοποίησης ποδηλάτου.

Η σημασία της χρησιμοποίησης των μέσων μαζικής μεταφοράς στην καλυτέρευση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, μπορεί να διαφανεί μεταξύ άλλων και από τα πορίσματα της έρευνας των Meinardi et al. (2008). Οι Meinardi et al. (2008), εξέτασαν κατά τον χειμώνα του 2004 στο Μιλάνο της Ιταλίας, την επίδραση που είχε η απεργία των μέσων μαζικής μεταφοράς στην ποιότητα της ατμόσφαιρας της πόλης. Από την εν λόγω έρευνα μπορούν να επισημανθούν τα εξής (Meinardi et al., 2008):

- Κατά την περίοδο της απεργίας των μέσων μαζικής μεταφοράς, αυξήθηκε η χρησιμοποίηση των οχημάτων ιδιωτικής χρήσης και συνεπώς ο κυκλοφοριακός φόρτος.
- Η αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου επέφερε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, μεταξύ άλλων, λόγω των αυξημένων υδρογονανθράκων και των αυξημένων επιπέδων όζοντος, του οποίου οι μέγιστες τιμές αυξήθηκαν κατά 21%.
- Όπως συμπεραίνουν οι ίδιοι οι ερευνητές, αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς, η ποιότητα της ατμόσφαιρας των πόλεων έχει την δυνατότητα να βελτιωθεί σε σημαντικό βαθμό.

Συνεπώς, είναι ανάγκη να δοθεί προτεραιότητα στην λειτουργικότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς στο Βόλο, μέσω π.χ. λεωφορειολωρίδων και σωστής σχεδίασης των δρομολογίων του αστικού ΚΤΕΛ Βόλου, ώστε να υπάρχει ευρεία γεωγραφική κάλυψη. Πέραν τούτου, είναι χρήσιμη και η κατασκευή τραμ, η οποία δικαιολογείται με βάση το μέγεθος της πόλης.

Επιπροσθέτως, είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση εναλλακτικών μορφών μετακίνησης μέσω της δημιουργίας πεζοδρόμων, ώστε να ενθαρρύνεται η πεζή μετακίνηση και μέσω της δημιουργίας ποδηλατοδρόμων, ώστε να ενθαρρύνεται η χρησιμοποίηση ποδηλάτου.

Ο Δήμος Βόλου τα τελευταία χρόνια δίνει ιδιαίτερη σημασία στην κατασκευή ποδηλατοδρόμων, ωστόσο υπάρχουν αρκετά παράπονα από τους πολίτες διότι ο



σχεδιασμός τους, πολλές φορές είναι λανθασμένος, εγκυμονώντας κινδύνους για τους ποδηλάτες και επειδή πολλές φορές χρησιμοποιούνται παράτυπα ως χώροι στάθμευσης π.χ. μοτοποδηλάτων.

Όπως προκύπτει από τους Hertel et al. (2008), είναι ανάγκη κατά τον σχεδιασμό των διαδρομών, να δίνεται προσοχή στην έκθεση των αναβατών στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Όπως οι ίδιοι επισημαίνουν, η έκθεση των αναβατών δεν είναι η ελάχιστη κατά την επιλογή μιας διαδρομής που είναι η συντομότερη δυνατή, αλλά όταν η διαδρομή αφορά τους λιγότερο επιβαρυνμένους δρόμους της πόλης, όπου μπορεί να παρατηρηθεί μείωση της έκθεσης των αναβατών μέχρι και 30% σε ρύπους όπως τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και το μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ).

Σημειώνεται ότι η παρούσα δράση αποτελεί και προτεινόμενη δράση των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008).

#### 5.4. ΑΛΛΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

##### *5.4.1 ΔΙΑΡΚΗΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΟΡΩΝ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΑΓΕΤ*

Βάσει των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), πέραν του κυρίαρχου προβλήματος των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα του Βόλου που δημιουργείται από την κυκλοφορία των οχημάτων και η τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ αποτελεί παράγοντα υποβάθμισης, αν και με μικρότερο ποσοστό συμμετοχής. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη, η εν λόγω βιομηχανία να βρίσκεται υπό τον διαρκή έλεγχο της πολιτείας, κυρίως μέσω των Περιβαλλοντικών Όρων.

Η εν λόγω δράση προτείνεται και από τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008). Ειδικότερα όπως οι ίδιοι επισημαίνουν, η Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) είναι υποχρέωση της πολιτείας και βάσει της κείμενης νομοθεσίας, απαιτείται κάθε φορά που λήγει χρονικά η Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) να συντάσσεται νέα Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ), η οποία θα πρέπει να ελέγχεται διεξοδικά από τη πολιτεία, έτσι ώστε να αποκαλύπτεται κατά πόσο αυτή βασίζεται σε περιβαλλοντικά φιλικές ενέργειες, όπως είναι η χρησιμοποίηση στην παραγωγική διαδικασία της Βέλτιστης Διαθέσιμης Τεχνολογίας (ΒΔΤ). Τέλος, όπως σημειώνουν οι ίδιοι, η διενέργεια ελέγχων από κλιμάκια σε ανύποπτο χρόνο αποτελεί ακόμη ένα μέσο μετέπειτα ελέγχου της τήρησης των Περιβαλλοντικών Όρων.

#### 5.4.2 ΕΝΗΜΕΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΣΤΥΝΟΜΕΥΣΗ ΓΙΑ ΑΠΟΤΡΟΠΗ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τους Lemieux et al. (2004), η ανοικτή καύση των απορριμμάτων επιβαρύνει κατά πολύ περισσότερο την ποιότητα της ατμόσφαιρας από τη καύση απορριμμάτων υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Όπως επισημαίνουν οι ίδιοι, μέσω της ανοικτής καύσης των απορριμμάτων παράγονται διάφορα προϊόντα όπως είναι αιωρούμενα σωματίδια που είναι ορατά ως νέφος καπνού, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογονάνθρακες (HC), μεταξύ των οποίων πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs). Επιπροσθέτως κατά τους ίδιους, αναλόγως της φύσης των απορριμμάτων μπορούν και εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα διάφορες ποσότητες τοξικών μετάλλων, όπως είναι ο μόλυβδος (Pb) και ο υδράργυρος (Hg), ενώ σύνηθες είναι να εκπέμπονται πολυχλωρο-διβενζο-π-διοξίνες (PCDDs) και πολυχλωρο-διβενζο-φουράνια (PCDFs).

Σημαντικότατο επιβαρυντικό ρόλο για την ανθρώπινη υγεία φαίνεται να διαδραματίζουν οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι πολυχλωρο-διβενζο-π-διοξίνες (PCDDs) και τα πολυχλωρο-διβενζο-φουράνια (PCDFs), καθώς κατά τον Κούγκολο (2007), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) χαρακτηρίζονται από μεταλλαξιογόνες και καρκινογόνες ιδιότητες και οι πολυχλωρο-διβενζο-π-διοξίνες (PCDDs) και τα πολυχλωρο-διβενζο-φουράνια (PCDFs) χαρακτηρίζονται από ισχυρά τοξικές ιδιότητες.

Ειδικότερα, σχετικά με την καύση των διαφόρων ειδών πλαστικών, όπως είναι η καύση του πολυβινυλοχλωριδίου (PVC), οι Lee et al. (1995) εξέτασαν τη μεταλλαξιογόνο δράση από τη καύση καθενός από αυτά και κατέληξαν στην εξής φθίνουσα σειρά μεταλλαξιογόνου δράσης: πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) > πολυστυρένιο (PS) > πολυτερεφθαλικός αιθυλεστέρας (PET) > πολυαιθυλένιο (PE).

Επομένως, έπειτα και από τη διαπίστωση των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) περί σημαντικής συμμετοχής της καύσης των απορριμμάτων στα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, είναι επιτακτική ανάγκη να υπάρχει ενημέρωση, ειδικά των αθίγγανων της περιοχής Αλιβέρι της Ν. Ιωνίας, προκειμένου να αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη καύση απορριμμάτων και ιδίως των πλαστικών ειδών, ώστε να διαφυλαχθεί η ανθρώπινη υγεία. Παράλληλα, απαιτείται συστηματική αστυνόμευση των ύποπτων περιοχών, ώστε να αποτρέπεται η οποιαδήποτε πρόθεση ανοικτής καύσης απορριμμάτων. Σημειώνεται ότι η δράση αυτή αποτελεί και προτεινόμενη δράση των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008).

## **Γ' ΜΕΡΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα πορίσματα διαφόρων ερευνητών μεταξύ των οποίων και των Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), η ποιότητα ατμόσφαιρας του Βόλου είναι ιδιαίτερα επιβαρυνόμενη από αιωρούμενα σωματίδια, ενώ κίνδυνος υπέρβασης των ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας υπάρχει στο μέλλον και για το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ) και το όζον ( $\text{O}_3$ ). Σχετικά με τις πηγές προέλευσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, σύμφωνα με τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008), η κυκλοφορία των οχημάτων (κυρίως τα πετρελαιοκίνητα οχήματα αλλά και τα βενζινοκίνητα οχήματα και η επαναιώρηση της σκόνης του δρόμου) έχει το σημαντικότερο ποσοστό συμμετοχής στις συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων  $\text{AS}_{10}$ , με επόμενες σημαντικές πηγές να είναι η τσιμεντοβιομηχανία ΑΓΕΤ, η καύση απορριμμάτων και η καύση πετρελαίου (ιδίως στη θέρμανση).

Στο πλαίσιο του ερευνητικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το οποίο αφορά στη διερεύνηση της χρονικής συμπεριφοράς, των μετεωρολογικών εξαρτήσεων και της προβλεψιμότητας των χρονοσειρών συγκεντρώσεων  $\text{AS}_{10}$  στην αστική περιοχή του Βόλου, εξήχθησαν τα κάτωθι ερευνητικά συμπεράσματα:

- Από την ανάλυση των συγκεντρώσεων των  $\text{AS}_{10}$  σε επίπεδο ωρών προέκυψαν: α) η μέγιστη ωριαία συγκέντρωση των  $\text{AS}_{10}$  που καταγράφηκε κατά το διάστημα 2007-2010, ήταν πολύ υψηλή, της τάξης των  $512 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , β) η ωριαία συγκέντρωση  $\text{AS}_{10}$  στο Βόλο ακολουθεί μια κυματοειδή μορφή παρουσιάζοντας δυο τοπικά μέγιστα και συγκεκριμένα στις ώρες 10:00 και 22:00, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με τους Σαμαρά-Κωνσταντίνου κ.ά. (2008) στη συμπεριφορά του κυκλοφοριακού φόρτου και γ) υπάρχουν πολλές ακραίες ωριαίες συγκεντρώσεις  $\text{AS}_{10}$  στο Βόλο κατά τις απογευματινές ώρες, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με τους Papanastasiou και Melas (2009a) στην συνεργιστική επίδραση του θαλάσσιου αερολύματος και της παρουσίας χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου κατά τις απογευματινές ώρες.
- Η κατασκευή μοντέλου πρόβλεψης μέσω της μεθοδολογίας ARIMA για τη συγκέντρωση των  $\text{AS}_{10}$  της επόμενης ημέρας, κατέληξε στο μοντέλο με μορφή ARIMA (1,1,1)x(1,0,0)<sub>7</sub>, το οποίο επιτυγχάνει υψηλό βαθμό

ακρίβειας και επιτρέπει τη πρόβλεψη της συγκέντρωσης  $AS_{10}$  της (t) ημέρας, βάσει των συγκεντρώσεων  $AS_{10}$  των (t-1, t-2, t-7, t-8 και t-9) ημερών.

- Από την ανάλυση των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  σε επίπεδο ημερών προέκυψαν: α) η μέγιστη ημερήσια συγκέντρωση των  $AS_{10}$  που καταγράφηκε κατά το διάστημα 2007-2010, ήταν πολύ υψηλή, της τάξης των  $325 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και β) η Δευτέρα είναι η πλέον λιγότερο επιβαρυμένη, σε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, ημέρα της εβδομάδας, λόγω λογικά της ανάπαυλας των δραστηριοτήτων κατά το Σαββατοκύριακο.
- Σχετικά με την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  στο Βόλο, προέκυψαν: α) η ημερήσια θερμοκρασία έχει σημαντική θετική σχέση με την ημερήσια συγκέντρωση των  $AS_{10}$  (γεγονός το οποίο αποδίδεται κατά τους Papanastasiou et al. (2010) στο σχηματισμό δευτερογενών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα σε περιόδους καύσωνα) και μάλιστα η υψηλή θερμοκρασία μιας ημέρας συνήθως συνοδεύεται και από υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων της επόμενης ημέρας, αλλά και το αντίστροφο, δηλαδή η υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων μιας ημέρας συνήθως συνοδεύεται από υψηλή θερμοκρασία της επόμενης ημέρας, β) η ημερήσια ταχύτητα του ανέμου τείνει να μειώνει την ημερήσια συγκέντρωση  $AS_{10}$  στο Βόλο, ενέργεια που φαίνεται να επεκτείνεται και στη συγκέντρωση  $AS_{10}$  της επόμενης ημέρας και γ) η ημερήσια βροχόπτωση έχει αρνητική σχέση με την ημερήσια συγκέντρωση των  $AS_{10}$ , ωστόσο η σχέση αυτή έστω και οριακά δεν είναι σημαντική, γεγονός που αποδίδεται στο ότι ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης των χονδρόκοκκων σωματιδίων είναι αυτός της ξηρής εναπόθεσης.
- Από την ανάλυση των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  σε επίπεδο εποχικών περιόδων προέκυψε ότι οι μέσες εποχικές συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  (ψυχρής και θερμής περιόδου) στο Βόλο δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Η ισορροπία μεταξύ ψυχρής και θερμής περιόδου αποδίδεται κυρίως στη θερμοκρασία και στη ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες παρουσιάζουν ταυτόχρονα υψηλές τιμές (θερμή περίοδος) ή χαμηλές τιμές (ψυχρή περίοδος) και εξαιτίας της αντίθετης συμπεριφοράς που έχουν στη συγκέντρωση των  $AS_{10}$ , προκαλούν σχετική ισορροπία της συγκέντρωσης

των  $AS_{10}$ . Επίσης η ισορροπία επέρχεται και λόγω της παρουσίας του θαλάσσιου αερολύματος που επιβαρύνει τις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  κατά τη θερμή περίοδο (Papanastasiou and Melas 2009a) και της λειτουργίας των καυστήρων που επιβαρύνει τις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$  κατά τη ψυχρή περίοδο.

- Από την ανάλυση των συγκεντρώσεων των  $AS_{10}$  σε επίπεδο ετών προέκυψαν: α) οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις  $AS_{10}$  των ετών 2007-2010 δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και β) το διάστημα 2007-2010 αποτελεί για το Βόλο ένα ακόμη διάστημα κατά το οποίο υπήρξε συνεχής παραβίαση των ορίων ποιότητας ατμόσφαιρας.

Στο πλαίσιο αυτό, είναι απαραίτητη η υιοθέτηση δράσεων στο Βόλο που να μειώνουν τις συγκεντρώσεις των  $AS_{10}$ , αφορώντας ουσιαστικά κυρίως στην κυκλοφορία των οχημάτων (έκπλυση της σκόνης των βασικών δρόμων, δενδροφύτευση κατάλληλων φυτικών ειδών που να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων και χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς και των εναλλακτικών μορφών μετακίνησης). Επίσης, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της τσιμεντοβιομηχανίας ΑΓΕΤ για τη τήρηση των περιβαλλοντικών όρων, όπως και η αποτροπή της ανοικτής καύσης των απορριμμάτων, που εγκυμονεί κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.

## 6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Ενδεικτικές προτάσεις για έρευνα των αιωρούμενων σωματιδίων στο Βόλο, είναι οι ακόλουθες:

- Ο χημικός προσδιορισμός και η στατιστική ανάλυση (συμπεριλαμβανομένης της ετεροσυσχέτισης με μετεωρολογικές παραμέτρους και κατασκευής μοντέλου πρόβλεψης) για τα  $AS_{2.5}$ . Επισημαίνεται ότι άλλη είναι η φυσιογνωμία και η συμπεριφορά των χονδρόκοκκων και άλλη των λεπτόκοκκων αιωρούμενων σωματιδίων.
- Η ετεροσυσχέτιση της συγκέντρωσης των  $AS_{10}$  και των  $AS_{2.5}$  με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που συμμετέχουν στο σχηματισμό δευτερογενών αιωρούμενων σωματιδίων, όπως είναι το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) και το διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ). Έτσι θα διαφανούν οι ενυπάρχουσες χρονικές υστερήσεις στον σχηματισμό των  $AS_{10}$  και  $AS_{2.5}$  από τους ρύπους αυτούς.

**BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καλαμπόκας Π.Δ., Σιδερής Γ., Χριστόλης Μ.Ν., Μαρκάτος Ν.Χ. (2005). 'Ανάλυση μετρήσεων ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα στο Βόλο', Πρακτικά Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου.
2. Καραθανάσης Σ. (2006). *Ατμοσφαιρική ρύπανση: Ορισμός, Επιπτώσεις, Πηγές από Βιομηχανικές και Βιοτεχνικές Δραστηριότητες, Τεχνολογία Αντιμετώπισης, Νομοθεσία*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, ISBN 960-418-096-7.
3. Καραθανάσης Σ. (2007). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Φωτοχημικά Μοντέλα Ποιότητας του Αέρα*, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 978-960-418-119-3.
4. Κούγκολος Α. (2007). *Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική*, Εκδόσεις Τζιόλα, ISBN 978-960-418-077-6.
5. Norusis M. (2005). *Οδηγός Ανάλυσης Δεδομένων με το SPSS 12.0*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, ISBN 960-209-887-2.
6. Πράξη του Υπουργικού Συμβουλίου (ΠΥΣ) 34/2002, ΦΕΚ 125Α/05-06-2002, «Οριακές και κατευθυντήριες τιμές ποιότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου και οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου».
7. Πρώϊας Γ.Θ., Μουστρής Κ.Π., Λαρίσση Ι.Κ., Παλιατσός Α.Γ. (2010). 'Ποιότητα ατμόσφαιρας στην περιοχή του Βόλου', Πρακτικά του 10ου Διεθνούς Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Πάτρα, 23-28 Μαΐου, σελ. 1048-1055.
8. Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ., Κουϊμτζής Θ., Βουτσά Δ., Κούρας Α., Μανώλη Ε., Αργυρόπουλος Γ., Νικολάου Κ., Σταμπουντζής Ε., Κουμπαρέλος Γ. (2008). *Προσδιορισμός της Συμβολής Πηγών στην Ατμοσφαιρική Ρύπανση του Βόλου και Σχεδιασμός Ιεραρχημένης Περιβαλλοντικής Πολιτικής για την Αναβάθμιση της Ποιότητας της Ατμόσφαιρας (Φάση II-Τελική Έκθεση)*, Ερευνητικό Έργο, Εργαστήριο Ελέγχου Ρύπανσης Περιβάλλοντος του Τμήματος Χημείας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

9. Ackermann-Liebrich U., Leuenberger P., Schwartz J., Schindler C., Monn C., Bolognini G., Bongard JP., Brandli O., Domenighetti G., Elsasser S., Grize L., Karrer W., Keller R., Keller-Wossidlo H., Kunzli N., Martin BW., Medici TC., Perruchoud AP., Schoni MH., Tschopp JM., Villiger B., Wuthrich B., Zellweger JP., Zemp E. (1997). 'Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland. Study on Air Pollution and Lung Diseases in Adults (SAPALDIA) Team', *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **155**: 122-129.

10. Alves C., Oliveira T., Pio C., Silvestre A.J.D., Fialho P., Barata F., Legrand M. (2007). 'Characterisation of carbonaceous aerosols from the Azorean Island of Terceira', *Atmospheric Environment*, **41**: 1359-1373.
11. Amato F., Querol X., Alastuey A., Pandolfi M., Moreno T., Gracia J., Rodriguez P. (2009). 'Evaluating urban PM<sub>10</sub> pollution benefit induced by street cleaning activities', *Atmospheric Environment*, **43**: 4472-4480.
12. Andreae M. (2007). 'Atmospheric aerosols versus greenhouse gases in the twenty-first century' *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **365**: 1915-1923.
13. Arslan M., Boybay M. (1990). 'A study on the characterization of dustfall', *Atmospheric Environment*, **24A**: 2667-2671.
14. Askey A., Lyon S.B., Thompson G.E., Johnson J.B., Wood G.C., Sage P.W., Cooke M.J. (1993). 'The effect of fly-ash particulates on the atmospheric corrosion of zinc and mild steel', *Corrosion Science*, **34**: 1055-1081.
15. Athar R., Ahmad M. (2002). 'Heavy metal toxicity: Effect on plant growth and metal uptake by wheat, and on free living azotobacter', *Water, Air, and Soil Pollution*, **138**: 165-180.
16. Barrie L.A. (1985). 'Atmospheric particles: Their physical and chemical characteristics, and deposition processes relevant to the chemical composition of glaciers', *Annals of Glaciology*, **7**: 100-108.
17. Beckett K.P., Freer-Smith P., Taylor G. (2000). 'Effective tree species for local air quality management', *Journal of Arboriculture*, **26**: 12-19.
18. Bobbink R., Hornung M., Roelofs J.G.M. (1998). 'The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation', *Journal of Ecology*, **86**: 717-738.
19. Box G., Jenkins G. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control (Revised Edition)*, Holden-Day, ISBN 0-8162-1104-3.
20. Boyce S. G. (1954). 'The salt spray community', *Ecological Monographs*, **24**: 29-67.
21. Brooks C. (2008). *Introductory Econometrics for Finance (Second Edition)*, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-87306-2.
22. CAFE Working Group on Particulate Matter (2004). *Second Position Paper on Particulate Matter (Final draft)*.
23. Charlson R.J., Schwartz S.E., Hales J.M., Cess R.D., Coakley J.A., Hansen J.E., Hoffman D.J. (1992). 'Climate forcing by anthropogenic aerosols', *Science*, **255**: 423-430.



24. Chen LH., Knutsen SF., Shavlik D., Beeson WL., Petersen F., Ghamsary M., Abbey D. (2005). 'The association between fatal coronary heart disease and ambient particulate air pollution: Are females at greater risk?', *Environmental Health Perspectives*, **113**: 1723-1729.
25. Driscoll C., Driscoll K., Mitchell M., Raynal D. (2003). 'Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State', *Environmental Pollution*, **123**: 327-336.
26. Fang G.C., Chang C.N., Wu Y.S., Fu P.P., Yang D.G., Chu C.C. (1999). 'Characterization of chemical species in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan', *The Science of the Total Environment*, **234**: 203-212.
27. Grantz D.A., Garner J.H.B., Johnson D.W. (2003). 'Ecological effects of particulate matter', *Environment International*, **29**: 213-239.
28. Haugh L. (1976). 'Checking the independence of two covariance-stationary time series: A univariate residual cross-correlation approach', *Journal of the American Statistical Association*, **71**: 378-385.
29. Hawkesford M., De Kok L. (2007). *Sulfur in Plants: An Ecological Perspective*, Springer Netherlands, ISBN 978-1-4020-5886-8.
30. Hertel O., Hvidberg M., Ketzel M., Storm L., Stausgaard L. (2008). 'A proper choice of route significantly reduces air pollution exposure - A study on bicycle and bus trips in urban streets', *Science of the Total Environment*, **389**: 58-70.
31. Hipel K., McLeod A., Lennox W. (1977). 'Advances in Box-Jenkins modeling 1. Model construction', *Water Resources Research*, **13**: 567-575.
32. Hirano T., Kiyota M., Aiga I. (1995). 'Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants', *Environmental Pollution*, **89**: 255-261.
33. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-80767-0.
34. Hyslop NP. (2009). 'Impaired visibility: the air pollution people see', *Atmospheric Environment*, **43**: 182-195.
35. Ibrahim M.Z., Zailan R., Ismail M., Lola M.S. (2009). 'Forecasting and time series analysis of air pollutants in several area of Malaysia', *American Journal of Environmental Sciences*, **5**: 625-632.
36. Jacobson M. (2001). 'Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols', *Nature*, **409**: 695-697.
37. Johnson, C.C. (1993). 'The Effects of Violation of Data Set Assumptions When Using the One-way, Fixed Effects Analysis of Variance and the One Concomitant Analysis of Covariance Statistical Procedures', Paper presented at the Annual

- Meeting of Mid-South Educational Research Association, New Orleans, Louisiana, 10-12 November (ERIC Document Reproduction Service No. ED 365 720).
38. Katsoulis B.D., Pnevmatikos J.D. (2009). 'Statistical analysis of urban air-pollution data in the Athens basin area, Greece', *International Journal of Environment and Pollution*, **36**: 30-43.
39. Kaufman Y., Tanre D., Boucher O. (2002). 'A satellite view of aerosols in the climate system', *Nature*, **419**: 215-223.
40. Kousoulidou M., Ntziachristos L., Mellios G., Samaras Z. (2008). 'Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments', *Atmospheric Environment*, **42**: 7465-7475.
41. Kumar K., Yadav A.K., Singh M.P., Hassan H., Jain V.K. (2004). 'Forecasting daily maximum surface ozone concentrations in Brunei Darussalam-An ARIMA modeling approach', *Journal of the Air & Waste Management Association*, **54**: 809-814.
42. Kumar U., Jain V.K. (2010). 'ARIMA forecasting of ambient air pollutants (O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> and CO)', *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **24**: 751-760.
43. Larrieu S., Jusot JF., Blanchard M., Prouvost H., Declercq C., Fabre P., Pascal L., Tertre AL., Wagner V., Riviere S., Chardon B., Borrelli D., Cassadou S., Eilstein D., Lefranc A. (2007). 'Short term effects of air pollution on hospitalizations for cardiovascular diseases in eight French cities: the PSAS program', *The Science of the Total Environment*, **387**: 105-112.
44. Lazaridis M. (2011). *First Principles of Meteorology and Air Pollution*, Springer Science+Business Media B.V., ISBN 978-94-007-0161-8.
45. Lee H., Wang L., Shih J.F. (1995). 'Mutagenicity of particulates from the laboratory combustion of plastics', *Mutation Research*, **346**: 135-144.
46. Lemieux P.M., Lutes C.C., Santoianni D.A. (2004). 'Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review', *Progress in Energy and Combustion Science*, **30**: 1-32.
47. Lohmann U. (2006). 'Aerosol effects on clouds and climate', *Space Science Reviews*, **125**: 129-137.
48. Lollar B. (2005). *Environmental Geochemistry*, Elsevier, ISBN 978-0-08-044643-1.
49. Maarouf A., Smith J. (1997). 'Interactions amongst policies designed to resolve individual air issues', *Environmental Monitoring and Assessment*, **46**: 5-21.
50. Malm W.C. (1999). *Introduction to Visibility*, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Fort Collins, CO.

51. Meinardi S., Nissensohn P., Barletta B., Dabdub D., Rowland F.S., Blake D.R. (2008). 'Influence of the public transportation system on the air quality of a major urban center. A case study: Milan, Italy', *Atmospheric Environment*, **42**: 7915-7923.
52. Montgomery D., Jennings C., Kulahci M. (2008). *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*, John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-65397-4.
53. Norazian MN., Shukri YA., Azam RN., Al Bakri AMM. (2008). 'Estimation of missing values in air pollution data using single imputation techniques', *Science Asia*, **34**: 341-345.
54. Oliver J.E. (2005). *Encyclopedia of World Climatology*, Springer, ISBN 1-4020-3264-1.
55. Ottele M., Van Bohemen H., Fraaij A. (2010). 'Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls', *Ecological Engineering*, **36**: 154-162.
56. Papaioannou A.B., Viras L.G., Nastos P.T., Paliatsos A.G. (2010). 'Temporal evolution of sulfur dioxide and nitrogen oxides in the city of Volos, Greece', *Environmental Monitoring and Assessment*, **161**: 485-494.
57. Papanastasiou D.K., Melas D. (2009a). 'Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment', *International Journal of Climatology*, **29**: 305-315.
58. Papanastasiou D.K., Melas D. (2009b). 'Statistical characteristics of ozone and PM<sub>10</sub> levels in a medium-sized Mediterranean city', *International Journal of Environment and Pollution*, **36**: 127-138.
59. Papanastasiou D.K., Melas D., Bartzanas T., Kittas C. (2010). 'Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze', *International Journal of Biometeorology*, **54**: 307-317.
60. Perez-Bendito D., Rubio S. (1999). *Comprehensive Analytical Chemistry, Volume 32*, Elsevier Science B.V., ISBN 0-444-82205-4.
61. Pope CA., Burnett RT., Thurston GD., Thun MJ., Calle EE., Krewski D., Godleski JJ. (2004). 'Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of Disease', *Circulation*, **109**: 71-77.
62. Prasad M.S.V., Inamdar J.A. (1990). 'Effect of cement kiln dust pollution on black gram (*Vigna mungo* (L.) Hepper)', *Proceedings: Plant sciences*, **100**: 435-443.
63. Proias G.T., Kaldellis I.K., Paliatsos A.G. (2009). 'Statistical analysis of PM<sub>10</sub> data in urban region of Volos, Greece', Proceedings of the 2nd International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) & SECOTOX Conference, Mykonos, June 21-26.



64. Riga-Karandinos A.N., Saitanis C. (2005). 'Comparative assessment of ambient air quality in two typical Mediterranean coastal cities in Greece', *Chemosphere*, **59**: 1125-1136.
65. Robinson E. (1978). 'Hydrocarbons in the atmosphere', *Pageoph*, **116**: 372-384.
66. Rodriguez S., Querol X., Alastuey A., De La Rosa J. (2007). 'Atmospheric particulate matter and air quality in the Mediterranean: a review', *Environmental Chemistry Letters*, **5**: 1-7.
67. Saitanis C.J., Katsaras D.H., Riga-Karandinos A.N., Lekkas D.B., Arapis G. (2004). 'Evaluation of ozone phytotoxicity in the greater area of a typical Mediterranean small city (Volos) and in the nearby forest (Pelion mt.), central Greece', *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **72**: 1268-1277.
68. Samie F., Tidblad J., Kucera V., Leygraf C. (2007). 'Atmospheric corrosion effects of HNO<sub>3</sub> - Comparison of laboratory-exposed copper, zinc and carbon steel', *Atmospheric Environment*, **41**: 4888-4896.
69. Schwartz S. (1996). 'The whitehouse effect - Shortwave radiative forcing of climate by anthropogenic aerosols: an overview', *Journal of Aerosol Science*, **27**: 359-382.
70. Shakhshiri B.Z. (1989). *Chemical Demonstrations: A Handbook for Teachers of Chemistry, Volume 3*, University of Wisconsin Press, ISBN 0-299-11950-5.
71. Sharma P., Chandra A., Kaushik S.C. (2009). 'Forecasts using Box-Jenkins models for the ambient air quality data of Delhi City', *Environmental Monitoring and Assessment*, **157**: 105-112.
72. Singh R., Singh D.P., Kumar N., Bhargava S.K., Barman S.C. (2010). 'Accumulation and translocation of heavy metals in soil and plants from fly ash contaminated area', *Journal of Environmental Biology*, **31**: 421-430.
73. Steffen W., Sanderson A., Tyson P., Jager J., Matson P., Moore B., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber J., Turner B.L., Wasson R. (2005). *Global Change and the Earth System*, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-26607-5.
74. U.S. EPA (1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume II*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA 600/P-95/001bF.
75. U.S. EPA (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/P-99/002aF.
76. U.S. EPA (2008). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter (First External Review Draft)*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/139.
77. Webber D. (1986). 'Dryfall: An important constituent of atmospheric hydrocarbon deposition', *Organic Geochemistry*, **9**: 57-62.

78. WHO Regional Office for Europe (2003). *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*, Bonn, Germany.
79. Wilson W.E., Chow J.C., Claiborn C., Fusheng W., Engelbrecht J., Watson J.G. (2002). 'Monitoring of particulate matter outdoors', *Chemosphere*, **49**: 1009-1043.
80. Xiankai L., Jiangming M., Shaofeng D. (2008). 'Effects of nitrogen deposition on forest biodiversity', *Acta Ecologica Sinica*, **28**: 5532-5548.

#### ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Μείζονος Βόλου (ΔΕΥΑΜΒ). Διαθέσιμες μετρήσεις ΑΣ<sub>10</sub> της περιόδου 2007-2010 για την αστική περιοχή του Βόλου.

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Διαθέσιμες μετρήσεις μετεωρολογικών παραμέτρων της περιόδου 2007-2010 για την αστική περιοχή του Βόλου. Αποκτηθείσες από την ηλεκτρονική διεύθυνση <http://penteli.meteo.gr/meteosearch/default.asp>.