

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΕΡΙΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΒΕΛΟΥΔΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ (Α.Μ. 5348)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: 1) ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΥΡΙΔΗΣ
2) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ, ΜΑΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην Θεωρητική Μελέτη Αερίων Λυμάτων.

Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στους παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα της Γης, όπου σημαντικό ρόλο κατέχουν τα αιωρούμενα σωματίδια. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στα είδη των αερίων λυμάτων και διαχωρισμός των πηγών εκπομπής τους, σε φυσικές και ανθρωπογενείς.

Έπειτα παρουσιάζεται εν συντομία η φυσική και χημική ανάλυση των μορφών των αερίων λυμάτων και των μηχανισμών απομάκρυνσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα αλλά και η επίδρασή τους στο οικοσύστημα.

Στην συνέχεια, γίνεται σύντομη αναφορά βασική ορολογία γύρω από τα νανοσωματίδια, την επίδραση τους στα αεροζόλ και πιο συγκεκριμένα στην επίδραση τους στην δημιουργία ραδιενεργών αεροζόλ στην ατμόσφαιρα καθώς και στην μοντελοποίηση της διάχυσης των αερίων ρύπων και τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στα μοντέλα υπολογισμού.

Ωστόσο, αναφέρονται αναλυτικά οι επιδράσεις των αερίων λυμάτων σε Φυσικούς όρους, Δημόσια Υγεία, Αγροτική παραγωγή, Υλικά και Οικοσύστημα (χλωρίδα, πανίδα) και τα μέτρα που έχουν ληφθεί ή πρόκειται να ληφθούν για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Τέλος, γίνεται εκτενής αναφορά στο Νομοθετικό πλαίσιο, Ελληνικό και Ευρωπαϊκό που διέπει τα όρια ποιότητας αέρα για τους εκπεμπόμενους ρύπους καθώς παρατίθενται και στοιχεία εκπομπών για την Ελλάδα από επίσημες πηγές πληροφόρησης.

Ευχαριστώ θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μου κ. Κωνσταντίνο Μαυρίδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, και τον κ. Ιωάννη Γιαννάκη, Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα.

Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ

ΒΕΛΟΥΔΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται στην Θεωρητική Μελέτη Αερίων Λυμάτων. Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε 8 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά των παραγόντων και παραμέτρων που καθορίζουν το κλίμα, σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η ευρύτερη κίνηση της Γης στο σύμπαν, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, η δημιουργία ανέμων και τα υδατικά κατακρημνίσματα ενώ δευτερογενώς είναι η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων και η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα είδη των αερίων λυμάτων και διαχωρισμός των πηγών εκπομπής τους, σε φυσικές και ανθρωπογενείς.

Το τρίτο Κεφάλαιο διαπραγματεύεται την φυσική και χημική ανάλυση των μορφών των αερίων λυμάτων δηλαδή τις φυσικές και χημικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων καθώς και την σύσταση ανόργανων και οργανικών σωματιδίων. Ωστόσο γίνεται και μια σύντομη αναφορά στους μηχανισμούς απομάκρυνσης των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα αλλά και στην επίδρασή τους στο οικοσύστημα (αναλυτικά για τις επιδράσεις των αερίων λυμάτων αναφέρονται στο 6^ο κεφάλαιο).

Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική ορολογία γύρω από τα νανοσωματίδια, η επίδραση τους στα αεροζόλ και πιο συγκεκριμένα η επίδραση τους στην δημιουργία ραδιενεργών αεροζόλ στην ατμόσφαιρα.

Το πέμπτο Κεφάλαιο ασχολείται με την μοντελοποίηση της διάχυσης των αερίων ρύπων και τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στα μοντέλα υπολογισμού. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα είδη των μοντέλων υπολογισμού [Εμπειρικά μοντέλα (Γκαουσιανά μοντέλα συνεχούς έκλυσης και μοντέλα κουτιού (box models) για στιγμιαία έκλυση), Ουίλεριανά μοντέλα και Λαγκραντζιανά μοντέλα] και γίνεται πλήρης ανάλυση σε 3 από τα πιο ευρέως χρησιμοποιημένα μοντέλα στην Ευρώπη και στην Αμερική.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι επιδράσεις των αερίων λυμάτων σε :

- Φυσικούς όρους
- Δημόσια Υγεία
- Αγροτική παραγωγή
- Υλικά
- Οικοσύστημα (χλωρίδα, πανίδα)

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ώστε να αποτυπωθούν τα μέτρα που έχουν ληφθεί ή πρόκειται να ληφθούν για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται σύντομα το Νομοθετικό πλαίσιο, Ελληνικό και Ευρωπαϊκό που διέπει τα όρια ποιότητας αέρα για τους εκπεμπόμενους ρύπους καθώς παρατίθενται και στοιχεία εκπομπών για την Ελλάδα στοιχεία από επίσημες πηγές πληροφόρησης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	7
2.1 Τύποι και πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	7
2.2 Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	7
2.2.1 Φυσικές Πηγές.....	8
2.2.2 Ανθρωπογενείς Πηγές.....	8
2.3 Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι πηγές τους	12
2.4 Το όζον και η σωματιδιακή ύλη.....	12
2.4.1 Το όζον.....	12
2.4.2 Η σωματιδιακή ύλη.....	13
2.5 Ο ρόλος των αερολυμάτων στους βιογεωχημικούς κύκλους των στοιχείων.....	13
2.6 Ο ρόλος των αερολυμάτων στη διαμόρφωση του κλίματος.....	14
2.7 Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην υγεία.....	16
2.8 Τρόποι ταξινόμησης των σωματιδίων	17
2.9 Η ατμοσφαιρική ρύπανση και η κλιματική αλλαγή.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΡΦΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ.....	21
3.1 Φυσικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων	21
3.2 Χημικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων	21
3.3 Μηχανισμοί μετατροπών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.....	21
3.3.1 Η οξείδωση του αέριου διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα.....	22
3.3.2 Αντιδράσεις φωτοχημικής οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων	23
3.4 Σύσταση των ατμοσφαιρικών σωματιδίων	24
3.4.1 Σύσταση ανόργανων σωματιδίων.....	24
3.4.2 Σύσταση οργανικών σωματιδίων.....	25
3.5.1 Ξηρή κατακρήμνιση (Dry deposition)	26
3.5.2 Υγρή κατακρήμνιση (wet deposition).....	29
3.6 Σύσταση υγρών κατακρημνίσεων – Συνέπειες για τα οικοσυστήματα	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΒΙΟΑΕΡΟΖΟΛ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΕΡΟΖΟΛ.....	32
4.1 Ο ορισμός των νανοσωματιδίων	32
4.2 Η φυσική ραδιενέργεια στον αέρα	33

4.3 Δειγματοληψία ραδιενεργού αεροζόλ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΙΩΝ ..	35
5.1 Βασική ορολογία	35
5.2 Μηχανισμοί κίνησης σωματιδίων	35
5.3 Διάχυση σωματιδίων	35
5.4 Ροή αεροζόλ - Μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων	36
5.4.1 Γενική Δυναμική Εξίσωση –GDE (General Dynamic Equation) – για συνεχή κατανομή μεγέθους ως προς τον αριθμό	36
5.5 Διάταξη Μοντέλου Διασποράς	37
5.6 Μοντέλα υπολογισμού διασποράς αερίων ρυπαντών	38
5.6.1 Εμπειρικά μοντέλα Γκαουσιανού τύπου.....	38
5.6.2 Ουλεριανά μοντέλα.....	38
5.6.3 Λαγκραντζιανά μοντέλα	39
5.6.4 Διασπορά ρυπαντών σε τοπική κλίμακα - Industrial Source Complex Short-term Model.....	40
5.6.5 Διασπορά ρυπαντών σε περιφερειακή κλίμακα - Windrose Trajectory Model	41
5.6.6 Μοντέλο σχηματισμού όζοντος σε περιφερειακή κλίμακα – Source-Receptor.....	43
Ozone Model.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	45
6.1 Εκτίμηση επιπτώσεων σε φυσικούς όρους	45
6.2 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στη δημόσια υγεία.....	46
6.3 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στην αγροτική παραγωγή	52
6.4 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στα υλικά	54
6.5 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στο οικοσύστημα	58
6.5.1 Επιδράσεις στη Χλωρίδα	58
6.5.2 Επιδράσεις στην Πανίδα	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΙΩΝ.....	60
7.1 Αστική Ρύπανση.....	61
7.1.1 Προτεινόμενα μέτρα για την αστική ρύπανση	63
7.2 Βιομηχανική Ρύπανση	65
7.2 Έλεγχος των εκπομπών από τις βιομηχανίες	66
7.3 Σχέδια και προοπτικές αντιμετώπισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης	67
7.4 Τεχνολογίες αντιμετώπισης επίδρασης αερίων ρύπων.....	68

7.4.1 Σχεδιασμός της διεργασίας.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	70
8.1 Ελληνικό Πρότυπο Ποιότητας Αέρα.....	70
8.2 Στοιχεία εκπομπών για την Ελλάδα	71
8.3 Αναφορά στην Οδηγία 2008/1/ΕΚ.....	72
8.4 Προβλήματα Εφαρμογής	73
8.5 Αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης	74
8.6 Τα επερχόμενα.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	75
Ιστοσελίδες	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ατμόσφαιρα της γης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη ζωή στον πλανήτη. Κατά τη διάρκεια των εκατομμυρίων χρόνων που υπάρχει η Γη το κλίμα έχει αλλάξει αρκετές φορές. Ο όρος κλίμα αναφέρεται τόσο στη γενικότερη έννοια που αφορά όλο τον πλανήτη, όσο, ειδικότερα στο κλίμα κάθε τόπου.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός παραγόντων και παραμέτρων που καθορίζουν το κλίμα που επικρατεί. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη, η ευρύτερη κίνηση της Γης στο σύμπαν, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, η δημιουργία ανέμων και τα υδατικά κατακρημνίσματα.

Δευτερογενώς, το κλίμα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων και η χημική σύσταση της ατμόσφαιρας. Όσον αφορά τους τελευταίους, ο άνθρωπος παίζει σημαντικό ρόλο και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το εύρος της επίδρασης.

Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν το κλίμα με διαφορετικό τρόπο. Έτσι, μπορούν να αυξάνουν την θερμοκρασία της ατμόσφαιρας λόγω απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας ή να τη μειώνουν λόγω σκέδασης και απομάκρυνσης αυτής στο εξωτερικό σύμπαν. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης για τη δημιουργία νεφών. Τα σωματίδια υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και προέρχονται είτε από φυσικές πηγές όπως σκόνη, επιφάνεια θάλασσας, φυτά είτε από ανθρώπινες πηγές όπως εκπομπές αυτοκινήτων, βιομηχανίας και όλων των ειδών των καύσεων. Αμέσως, γίνεται αντιληπτό ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις εκπομπές των σωματιδίων κατέχουν οι ανθρωπογενείς παράγοντες. Βέβαια, αυτό ισχύει

Η έννοια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αναφέρεται στην παρουσία αυξημένων ρύπων (σωματίδια, θόρυβος, ακτινοβολία) στην ατμόσφαιρα, τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με όλους τους ζωντανούς οργανισμούς προκαλώντας επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον. Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν με το γύρω περιβάλλον τους. Με τον τρόπο αυτό μετέχουν σε φαινόμενα τόσο φυσικά όσο και χημικά. Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά αυτών όπως το μέγεθος, η χημική σύσταση, το σχήμα, η πυκνότητα, η συγκέντρωση και η πηγή προέλευσης καθορίζουν το είδος των φαινομένων που θα λάβουν χώρα και άρα τον τρόπο με τον οποίο θα επιδράσουν στον περιβάλλοντα χώρο.

Οι αρνητικές επιδράσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, του επιτάσσουν τον περιορισμό των εκπομπών των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα μοντέλα υπολογισμού ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελούν σήμερα εύχρηστα και αποτελεσματικά εργαλεία για μια ολοκληρωμένη αποτίμηση τόσο των βραχυπρόθεσμων, όσο και των μακροπρόθεσμων επεμβάσεων με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πεδίων εφαρμογής είναι οι μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση επιπέδων ρύπανσης, η πληροφόρηση των πολιτών και η επιστημονική έρευνα.

Έτσι, λοιπόν, η σπουδαιότητα των ατμοσφαιρικών σωματιδίων έγκειται στον πολλαπλό ρόλο που αυτά έχουν στην ατμόσφαιρα. Για όλους του παραπάνω λόγους κρίνεται απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΔΗ ΑΕΡΙΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

2.1 Τύποι και πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Ατμοσφαιρική ρύπανση ονομάζεται η παρουσία στην ατμόσφαιρα ρύπων, δηλαδή κάθε είδους ουσιών, θορύβου ή ακτινοβολίας σε ποσότητα, συγκέντρωση ή διάρκεια τέτοια ώστε να είναι δυνατόν να προκληθούν αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα.

Για να εκφράσουμε τα επίπεδα ρύπανσης χρησιμοποιούμε συνήθως δύο μονάδες συγκέντρωσης, είτε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ είτε *μέρη ανά εκατομμύριο όγκου* ή απλά *μέρη ανά εκατομμύριο* (πολλές φορές δανειζόμαστε από την αγγλική βιβλιογραφία την σύντμηση $\text{ppmv} = \text{Parts Per Million by Volume}$ ή απλά ppm). Συγκέντρωση 1 μέρος ανά εκατομμύριο όγκου σημαίνει ότι αντιστοιχεί μία μονάδα όγκου του ρύπου σε κάθε 10⁶ μονάδες όγκου αέρα. Παρ' όλο που συγκέντρωση ίση με 1 ppm ακούγεται μικρή, για πολλούς αέριους ρύπους υπερβαίνει κατά πολύ τις συνηθισμένες τιμές που συναντώνται στην ατμόσφαιρα. Γι αυτό τον λόγο σε πολλές περιπτώσεις οι συγκεντρώσεις ενός ρύπου μετρώνται σε *μέρη ανά δισεκατομμύριο όγκου* (ή ppb). Οι συγκεντρώσεις των σωματιδιακών ρύπων, αλλά και των αερίων ρύπων μετρώνται σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ευμετάβλητη και υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί ρύποι που την επηρεάζουν. Από τη στιγμή που οι ρύποι αποδεσμεύονται στον αέρα, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον με περίπλοκους τρόπους ανάλογα με τη θερμοκρασία, την υγρασία και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους.

Οι αέριοι ρύποι είναι δυνατόν να διακριθούν σε 2 ομάδες:

1. **Τους πρωτογενείς ρύπους**, οι οποίοι προέρχονται από ανθρώπινες διεργασίες
2. **Τους δευτερογενείς ρύπους**, οι οποίοι προέρχονται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ρύπων με την ατμόσφαιρα

2.2 Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Αντίθετα με την κοινή αντίληψη, το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων αερίων ρύπων προέρχεται από καθαρά φυσικές πηγές.

Με τον όρο φυσικές πηγές αναφερόμαστε στις πηγές εκπομπών αερίων ρύπων που δεν οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Παρ' όλα αυτά οι ανθρωπογενείς εκπομπές είναι κυρίως υπεύθυνες για τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα που εμφανίσθηκαν. Αυτό οφείλεται βεβαίως στην ανατροπή της φυσικής ισορροπίας αλλά επίσης και στην μεγάλη πυκνότητα των εκπομπών από ανθρωπογενείς εκπομπές οι οποίες συγκεντρώνονται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές (κυρίως αστικές περιοχές και βιομηχανικές ζώνες). Αντίθετα, η καλή διασπορά των φυσικών πηγών ανά την υφήλιο προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης ανάμιξης των ρύπων με τον καθαρό αέρα. Κατά συνέπεια, με κάποιες μικρές εξαιρέσεις, οι εκπομπές αερίων ρύπων από φυσικές πηγές από μόνες τους δεν οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις.

2.2.1 Φυσικές Πηγές

Η χλωρίδα της γης αποτελεί την μεγαλύτερη φυσική πηγή εκπομπής αερίων ρύπων. Τα δέντρα και τα φυτά, παρά την συμβολή τους στην μετατροπή, μέσω της φωτοσύνθεσης, του διοξειδίου του άνθρακος της ατμόσφαιρας σε οξυγόνο, αποτελούν τα ίδια τη μεγαλύτερη πηγή υδρογονανθράκων του πλανήτη.

Οι ωκεανοί αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη πηγή «φυσικών» ρύπων. Η δράση των βενθικών και φυτοπλαγκτονικών οργανισμών οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων θειούχων ενώσεων. Επιπλέον, η μηχανική δράση των κυμάτων προκαλεί τη διάβρωση των πετρωμάτων και την παραγωγή σωματιδίων με μέγεθος ικανό ώστε να είναι δυνατή η αιώρησή τους στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, ο άνεμος συμπαρασύρει υδροσταγονίδια που περιέχουν άλατα αποτελώντας, έτσι, συνεχή πηγή ατμοσφαιρικών αιωρημάτων (αεροζόλ). Ατμοσφαιρικά αιωρήματα δημιουργούνται ωστόσο και από την επίδραση του ανέμου στο έδαφος και τα στοιχεία που βρίσκονται στην επιφάνειά του. Σε κάποιες περιπτώσεις, τα αιωρούμενα σωματίδια είναι δυνατό να φτάσουν ή και να ξεπεράσουν τα θεσπισμένα όρια προστασίας. Αποτέλεσμα των υψηλών συγκεντρώσεων αποτελεί η μείωση της ορατότητας της ατμόσφαιρας.

Μια άλλη σημαντική πηγή φυσικών ρύπων αποτελεί και η καύση της βιομάζας. Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στις εκτεταμένες πυρκαγιές που λαμβάνουν χώρα σε δάση και λειβαδικές εκτάσεις και που δεν οφείλονται στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τέτοιες πυρκαγιές συναντάμε συχνά κατά τις θερινές περιόδους του έτους, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που σημειώνονται, είτε μετά από ισχυρές καταιγίδες, λόγω των κεραυνών.

Τέλος, μιλώντας για φυσικές πηγές, δε θα μπορούσαμε να παραλείψουμε τα ηφαίστεια. Η έκρηξη ενός ηφαιστείου παράγει μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων σωματιδίων αλλά και αερίων όπως διοξείδιο του θείου, μεθάνιο και υδρόθειο. Τα σύννεφα που σχηματίζονται από τα σωματίδια και τα αέρια εκτοξεύονται σε μεγάλο ύψος και μπορεί να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

2.2.2 Ανθρωπογενείς Πηγές

Οι κυριότερες κατηγορίες ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης είναι:

1. οι βιομηχανικές δραστηριότητες (συμπεριλαμβανομένου και του τομέα παραγωγής ενέργειας)
2. οι οδικές μεταφορές
3. οι κεντρικές θερμάνσεις
4. άλλες πηγές (χρήση ενέργειας στις κατοικίες, γεωργία κτλ.)

Με άλλα λόγια, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι η βασική πηγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

1. Η βιομηχανική δραστηριότητα

Η βιομηχανία αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή αερίων ρύπων καθώς το μεγαλύτερο μέρος της αποτελείται από σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Οι μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται οδηγούν στην παραγωγή εξίσου μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου. Επίσης, είναι η κυριότερη πηγή βαρέων μετάλλων σε ποσοστό που πλησιάζει το 100%. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα είδη των ρύπων που παράγονται από τις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες.

Εικόνα 2.1: Εκπομπές αερίων από την βιομηχανική δραστηριότητα



Στην Ελλάδα είναι χαρακτηριστική η υπερσυγκέντρωση των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στην περιοχή των μεγάλων αστικών κέντρων της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Ωστόσο, ειδικά για την Αθήνα, η συμμετοχή της στο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πόλη είναι μικρής κλίμακας. Η χωροθέτησή της σε σχέση με το αστικό συγκρότημα σε συνδυασμό με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη συχνή μεταφορά ρύπων προς το κέντρο της πόλης. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι από τις αντίστοιχες δραστηριότητες.

Πίνακας 2.1: Εκπεμπόμενοι ρύποι από τις διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες

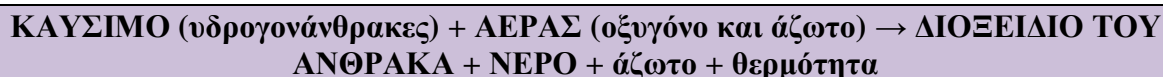
Ρύπος	Σταθμοί παραγωγής ενέργειας	Διυλιστήρια Πετρελαίου	Χημικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες	Επεξεργασία μετάλλων
Σωματίδια	✓			✓
CO	✓			
CO ₂	✓			
SO ₂	✓	✓		
NO _x	✓	✓		
VOC	✓	✓	✓	
Μόλυβδος				✓
Υδράργυρος	✓		✓	✓
Χαλκός				✓
Κάδμιο			✓	✓

(Πηγή: MastersG.M., 1991)

2. Οδικές μεταφορές

Μέσα στην πληθώρα των ρυπογόνων δραστηριοτήτων μιας σύγχρονης πόλης, η χρήση του ιδιωτικού αυτοκινήτου αποτελεί την σημαντικότερη συνεισφορά του πολίτη στην ρύπανση της περιοχής. Παρά την μικρή, σχετικά, συνεισφορά κάθε μεμονωμένου αυτοκινήτου, η ρύπανση από τον μεγάλο αριθμό τους προστίθεται για να αποτελέσει την μεγαλύτερη απειλή για την ποιότητα του αέρα στις μεγαλουπόλεις.

Η ισχύς που είναι απαραίτητη για την κίνηση του αυτοκινήτου προέρχεται από την καύση του καυσίμου σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Η ρύπανση προέρχεται τόσο από τα προϊόντα της καύσης (τυπικά από την εξάτμιση του αυτοκινήτου) όσο και από την εξάτμιση του καυσίμου. Η βενζίνη και το ντίζελ είναι μίγματα υδρογονανθράκων, ενώσεις που περιέχουν άτομα υδρογόνου και άνθρακα. Κατά την διάρκεια της καύσης σε μια τέλεια μηχανή, το οξυγόνο του αέρα θα μετέτρεπε το υδρογόνο σε νερό και τον άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα. Το άζωτο του αέρα δεν θα επηρεαζόταν. Σχηματικά αυτό θα μπορούσαμε να το παρουσιάσουμε ως εξής:



Σε πραγματικές συνθήκες όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά. Η καύση στη μηχανή του αυτοκινήτου δεν είναι τέλεια με αποτέλεσμα να εκπέμπονται ρύποι από την εξάτμιση του αυτοκινήτου (κυρίως υδρογονάνθρακες και μονοξείδιο του άνθρακα). Επιπρόσθετα, λόγω των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στην μηχανή το οξυγόνο και το άζωτο του αέρα αντιδρούν σχηματίζοντας οξείδια του αζώτου. Σε μια τυπική περίπτωση έχουμε:

ΚΑΥΣΙΜΟ (υδρογονάνθρακες) + ΑΕΡΑΣ (οξυγόνο και άζωτο) → ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ + νερό + ΑΚΑΥΣΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ + ΟΞΕΙΔΙΑ ΑΖΩΤΟΥ + ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ + θερμότητα

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η καύση στις μηχανές Diesel είναι πιο πλήρης απ' ό τι στους βενζινοκινητήρες οπότε και οι εκπομπές υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα είναι μικρότερες. Αντίθετα οι κινητήρες Diesel έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στην εκπομπή των σωματιδίων και στις οσμές.

Εκτός των προϊόντων της καύσης, σημαντικές εκπομπές ρύπων προέρχονται και από την εξάτμιση των υδρογονανθράκων. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη την πρόοδο που έχει γίνει στην μείωση των εκπομπών από την εξάτμιση του αυτοκινήτου, οι απώλειες υδρογονανθράκων λόγω εξάτμισης είναι υπεύθυνες για την πλειονότητα των εκπομπών αυτών των ρύπων στην ατμόσφαιρα, ιδιαίτερα κατά την διάρκεια ζεστών ημερών. Η εξάτμιση του καύσιμου γίνεται με πολλούς τρόπους:

- *Ημερήσια:* Σχετίζεται με την ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και προκαλείται με την συστολή-διαστολή των ατμών του καυσίμου στο ρεζερβουάρ.

- *Κίνησης:* Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του, τόσο ο κινητήρας όσο και η εξάτμιση θερμαίνονται με αποτέλεσμα να εξατμίζεται το καύσιμο.

- *Ακινητοποίησης:* Μετά την ακινητοποίηση του αυτοκινήτου και ενώ τα διάφορα μέρη παραμένουν θερμά, υπάρχει εξάτμιση καυσίμου από το ρεζερβουάρ και το καρμπυρατέρ.

- *Ανεφοδιασμού:* Οι ατμοί που υπάρχουν πάντοτε στο ρεζερβουάρ οδηγούνται έξω όταν το αυτοκίνητο ανεφοδιάζεται με βενζίνη.

Οι υδρογονάνθρακες και τα οξείδια του αζώτου που εκπέμπονται από τα αυτοκίνητα, με την παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, σχηματίζουν το όζον, ίσως το πιο επικίνδυνο συστατικό του φωτοχημικού νέφους των πόλεων. Συμπληρωματικά, το διοξείδιο του άνθρακα, αν και ακίνδυνο για την υγεία είναι το σημαντικότερο θερμοκηπικό αέριο με μεγάλη συνεισφορά στην παγκόσμια μεταβολή του κλίματος.

3. Θέρμανση

Η συνεισφορά της θέρμανσης στα προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχει καθαρά εποχικό χαρακτήρα και έγκειται στην παραγωγή καπνού, διοξειδίου του θείου και, σε μικρότερο ποσοστό, οξειδίων του αζώτου.

Αν και οι ρύποι, που παράγονται σε ετήσια βάση από τις κεντρικές θερμάνσεις, αποτελούν ένα μικρό ποσοστό σε σχέση με την παραγωγή των ίδιων ρύπων από τις άλλες δύο πηγές, το διοξείδιο του θείου αποτελεί, στις αστικές περιοχές, ρύπο - δείκτη για τη λειτουργία της κεντρικής θέρμανσης.

Ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι οι πολύ χαμηλές καμινάδες που χρησιμοποιούνται οι οποίες αδυνατούν να διασπείρουν τους ρύπους στην ευρύτερη περιοχή με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σε πολλές περιπτώσεις αυξημένα τοπικά προβλήματα. Το πρόβλημα πάντως δείχνει μια σταθερή πορεία βελτίωσης λόγω της χρήσης καυσίμων καλύτερης ποιότητας (κυρίως χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο) αλλά και της επέκτασης της τηλεθέρμανσης (η οποία στην χώρα μας λειτουργεί ακόμα πιλοτικά).

Οι αιχμές, στις τιμές των ρύπων, παρουσιάζονται τις πρώτες πρωινές και τις πρώτες βραδινές ώρες. Αν κατά τις ώρες της μέγιστης παραγωγής επικρατούν δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες (π.χ. άπνοια και θερμοκρασιακή αναστροφή), τότε προκαλείται συσσώρευση του εκπεμπόμενου διοξειδίου του θείου και οδηγούμαστε στο σχηματισμό καπνομίχλης.

4. Άλλες πηγές

Οι δασικές πυρκαγιές και η καύση βιομάζας (υλικό που παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς όπως το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, κ.λπ. και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας), αποτελούν μια επιπλέον μείζονα πηγή εκπομπής ρύπων.

2.3 Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι πηγές τους

Πίνακας 2.2: Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι και οι πηγές προέλευσής τους

Ρύποι	Προέλευση
Πρωτογενείς	
Οξείδια του Θείου / Διοξείδιο του Θείου	Καύση γαιάνθρακα και πετρελαίου
Οξείδια του Αζώτου / Διοξείδιο του Αζώτου	Καύση υγρών καυσίμων στην αυτοκίνηση και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες
Μονοξείδιο του Άνθρακα	Διαδικασίες καύσης με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, καύση ξύλων, γαιάνθρακα, υγρών καυσίμων (αυτοκίνηση)
Διοξείδιο του Άνθρακα	Ηφαιστειακή δραστηριότητα και θερμές πηγές, διαδικασίες καύσης, αυτοκίνηση, εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
Πτητική Οργανική Ένωση	Εξάτμιση πηγών όπως εξατμίσεις οχημάτων, προϊόντα καθαρισμού, βερνίκια επίπλων και μαλακτικά ρούχων
Σωματιδιακή Ύλη	Μικρά σωματίδια από φυσική διάβρωση και ανθρώπινες δραστηριότητες όπως καύση ορυκτών καυσίμων
Αμμωνία	Χρήση για την λίπανση καλλιεργειών και παραγωγή από την γεωργική διαδικασία και εκτροφή ζώων
Μόλυβδος	Φυσικό στοιχείο που παράγεται από μεταλλουργία μολύβδου και περιέχεται σε παλαιές βαφές και εγκαταστάσεις ύδρευσης
Ανθεκτικοί Οργανικοί Ρύποι (POP)	Βιομηχανικές διαδικασίες και αποτέφρωση μηχανημάτων
Δευτερογενείς Ρύποι	
Σωματιδιακή Ύλη (από θειούχες και αζωτούχες ενώσεις) Οζόν	Μικρά σωματίδια είτε φυσικής είτε τεχνητής (ανθρώπινης) προέλευσης Χημική αντίδραση του ηλιακού φωτός με τον αέρα

(Πηγή: <http://www.gr.european-lung-foundation.org>)

2.4 Το όζον και η σωματιδιακή ύλη

2.4.1 Το όζον

Το όζον είναι άοσμο, άχρωμο αέριο που εμφανίζεται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας της γης (στρατόσφαιρα), αλλά και στο επίπεδο του εδάφους (τροπόσφαιρα). Το όζον που εντοπίζεται στην τροπόσφαιρα αποτελεί μείζον πρόβλημα για τη δημόσια υγεία. Οι συγκεντρώσεις του όζοντος είναι υψηλότερες τη θερινή περίοδο και τις απογευματινές ώρες, καθώς σχηματίζεται όσο υπάρχει ηλιακό φως. Οι υψηλότερες ημερήσιες τιμές κατά κανόνα προκύπτουν τις θερμές και ξηρές περιόδους του καλοκαιριού.

2.4.2 Η σωματιδιακή ύλη

Ως *σωματιδιακή ύλη* στην ατμόσφαιρα ορίζεται ύλη στερεή ή υγρή που βρίσκεται σε διασπορά στον αέρα και αποτελείται από διακριτά σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από αυτό των μικρών μορίων δηλαδή διαμέτρου περίπου 0,0002 μm, και μικρότερο από 500 μm.

Η σωματιδιακή ύλη είναι ένα μείγμα στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων που αιωρούνται στον αέρα και περιλαμβάνει σωματίδια από σκόνη, χώμα, υλικά από το οδόστρωμα, τη γεωργία, την εξόρυξη, θύελλες ή ηφαίστεια, λατομεία, καθώς και θαλάσσια άλατα, γύρη, μούχλα, σπόρια και άλλο βιολογικό υλικό.

Τα μικρά σωματίδια είναι υπο-ομάδα της σωματιδιακής ύλης και προέρχονται από άμεση εκπομπή από διαδικασίες καύσης, όπως η χρήση βενζίνης και πετρελαίου ντίζελ σε οχήματα, η καύση ξύλων, η καύση γαιάνθρακα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και βιομηχανικές διαδικασίες, όπως σε μεταλλουργεία, τσιμεντοβιομηχανίες, χαρτοβιομηχανίες και χαλυβουργεία. Όλοι οι τύποι σωματιδιακής ύλης συνδέονται με υποβάθμιση της ποιότητας της υγείας.

Αερολύματα (aerosols) είναι ο όρος που συνήθως χρησιμοποιείται στις επιστήμες της ατμόσφαιρας για τα αιωρήματα των στερεών ή υγρών σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται οι κυριότεροι όροι που χρησιμοποιούνται στις επιστήμες της ατμόσφαιρας για την περιγραφή των ατμοσφαιρικών σωματιδίων:

Πίνακας 2.3: Κυριότεροι όροι που περιγράφουν ατμοσφαιρικά σωματίδια.

Όρος	Έννοια
Αερολύματα (aerosols)	Σωματίδια μικρού μεγέθους στερεά ή σταγονίδια
Αερολύματα από συμπύκνωση (Condensation aerosols)	Σωματίδια που σχηματίζονται από συμπύκνωση ατμών ή αντιδράσεις αερίων
Αερολύματα από διασπορά (Dispersion aerosols)	Σωματίδια που σχηματίζονται από άλεση στερεών ή διασπορά σκόνης
Ομίχλη (Fog)	Σταγονίδια νερού στην ατμόσφαιρα σε μεγάλη συγκέντρωση
Αραιά Ομίχλη (Haze)	Υποδηλώνει μειωμένη ορατότητα οφειλόμενη στην παρουσία σωματιδίων
Καπνός (Smoke), Αιθάλη (soot carbon)	Σωματίδια που προέρχονται από ατελή καύση

(Πηγή: Ρεμοντάκη Ε., 2012)

Ο ρόλος των σωματιδίων και η σημασία της παρουσίας τους στην ατμόσφαιρα μπορεί να παρουσιαστεί από τρεις διαφορετικές απόψεις:

1. Τον ρόλο των σωματιδίων στους βιογεωχημικούς κύκλους των στοιχείων στη φύση.
2. Τον ρόλο των σωματιδίων στη διαμόρφωση του κλίματος.
3. Τις επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία

2.5 Ο ρόλος των αερολυμάτων στους βιογεωχημικούς κύκλους των στοιχείων

Τα αερολύματα παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανομή της ύλης στο χώρο καθώς ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το μέσον το οποίο μπορεί να μεταφέρει, μέσω των σωματιδίων, ύλη σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θα μπορούσε να διανύσει η ύλη αυτή κινούμενη μέσω των νερών και των εδαφών. Η απομάκρυνση των σωματιδίων από τον αέρα μέσω υγρής και ξηρής κατακρήμνισης, έχει ως αποτέλεσμα την τροφοδοσία χερσαίων και

υδάτινων οικοσυστημάτων με τα συστατικά των αερολυμάτων. Μεγάλες ποσότητες σωματιδίων στην ατμόσφαιρα προέρχονται από την αιολική διάβρωση των εδαφών. Οι κυριότερες πηγές αυτών των σωματιδίων είναι οι ερημικές περιοχές του πλανήτη. Η διάμετρος των σωματιδίων αυτών κυμαίνεται από 1 μm έως 100 μm περίπου. Τα μεγαλύτερα σωματίδια κατακρημνίζονται σύντομα κοντά στον τόπο παραγωγής τους. Τα μικρότερα, όμως, μπορεί να μεταφερθούν σε αποστάσεις χιλιάδων χιλιομέτρων από τις ερημικές περιοχές.

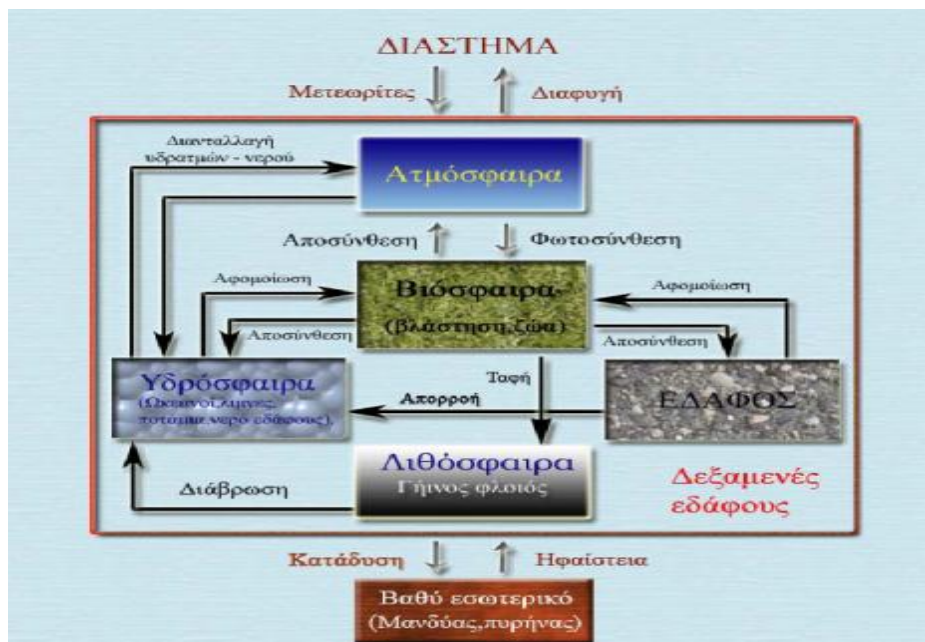
Μέταλλα σε ίχνη, όπως ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg), ο χαλκός (Cu), ο κασσίτερος (Sn), το κάδμιο (Cd), περιέχονται σε ατμοσφαιρικά σωματίδια που χαρακτηρίζονται από μικρές διαμέτρους, συνήθως μικρότερες του 1 μm, και μεταφέρονται από τις αέριες μάζες σε μεγάλες αποστάσεις από τις πηγές εκπομπής τους.

Επομένως είναι αναμενόμενη η επίδραση της διαβίωσης των υδρόβιων οργανισμών να επηρεάζεται άμεσα από την τροφοδοσία της στοιβάδας αυτής μέσω της ατμόσφαιρας με διάφορα στοιχεία και χημικές ενώσεις. Μπορούμε να φανταστούμε ότι θα έχουμε θετικές επιδράσεις σε περίπτωση που αυτά αποτελούν θρεπτικά στοιχεία για τους οργανισμούς όπως π.χ. ο φώσφορος σε μία oligότροφη (πτωχή σε θρεπτικά συστατικά) θαλάσσια περιοχή.

Αντίθετα, αν τα στοιχεία ή οι χημικές ενώσεις είναι τοξικά για τους οργανισμούς, όπως π.χ. ορισμένα βαρέα μέταλλα, τότε θα έχουμε αρνητικές επιπτώσεις σ' αυτούς.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο τα αερολύματα επηρεάζουν τη χωρική κατανομή στοιχείων και χημικών ενώσεων με διαφορετικούς περιβαλλοντικούς ρόλους.

Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση των βιογεωχημικών κύκλων



2.6 Ο ρόλος των αερολυμάτων στη διαμόρφωση του κλίματος

Τα αερολύματα στο κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας, την τροπόσφαιρα, επηρεάζουν το κλίμα με δύο τρόπους :

1. άμεσα μέσω της ανάκλασης και της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας
2. έμμεσα μεταβάλλοντας τη διάρκεια ζωής και τις οπτικές ιδιότητες των νεφών

Ορισμένα αερολύματα ανακλούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο επιστρέφει στο διάστημα από το σύστημα πλανήτη-ατμόσφαιρα (λευκαύγεια albedo). Άρα, όταν υπάρχουν στην ατμόσφαιρα τέτοια σωματίδια σε μεγάλες συγκεντρώσεις, φθάνει στην επιφάνεια της γης λιγότερη ακτινοβολία και επομένως, αναμένονται μικρότερες θερμοκρασίες στην ατμόσφαιρα. Αυτός είναι ο άμεσος τρόπος με τον οποίο τα σωματίδια μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα.

Τα σωματίδια, ιδιαίτερα αυτά που είναι υγροσκοπικά και έχουν αυξημένη διαλυτότητα στο νερό,

όπως για παράδειγμα αυτά που περιέχουν ανόργανα άλατα όπως χλωριούχο νάτριο, θειικό νάτριο, χλωριούχο μαγνήσιο κλπ, χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης στη δημιουργία των νεφών. Αυξημένες συγκεντρώσεις τέτοιων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα οδηγούν σε αυξημένη νεφοκάλυψη. Η αυξημένη συγκέντρωση πυρήνων συμπύκνωσης σημαίνει αυξημένο αριθμό σταγονιδίων στα νέφη με αποτέλεσμα, το μέγεθος των σταγονιδίων να μειώνεται και επομένως να καθυστερεί η εκδήλωση βροχόπτωσης και να παρατείνεται ο χρόνος ζωής των νεφών στην ατμόσφαιρα. Τα νέφη ανακλούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας (αυξημένη λευκαύγεια (albedo)) συνεισφέροντας και αυτά σε μείωση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Αυτός είναι ο έμμεσος τρόπος με τον οποίο τα αερολύματα είναι δυνατόν να επηρεάσουν το κλίμα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο μπορεί να επηρεάσουν τα αερολύματα το κλίμα αποτελούν αυτά που περιέχουν θειικά ιόντα. Τα θειικά αερολύματα είναι δυνατόν να συναντώνται σε μεγάλες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα. Προέρχονται από τα αέρια οξείδια του θείου τα οποία αντιδρούν με τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα και παράγουν θειικά ιόντα με αποτέλεσμα είτε να συναντώνται με τη μορφή σταγονιδίων θειικού οξέος είτε με τη μορφή σωματιδίων που περιέχουν θειικά ιόντα. Τα σωματίδια αυτά χαρακτηρίζονται από πολύ μικρά μεγέθη της τάξης του 0,1 μm. Τα οξείδια του θείου στην ατμόσφαιρα εκπέμπονται από δύο κύριες πηγές :

1. τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες
2. τις ηφαιστειακές εκρήξεις

Σχετικά με τα θειικά αερολύματα που προέρχονται από τις ηφαιστειακές εκρήξεις, αυτά έχουν το χαρακτηριστικό ότι μπορούν να φτάσουν σε μεγάλα ύψη μέσα στην ατμόσφαιρα. Μεγάλες ποσότητες από αυτά μπορεί να φθάσουν στη στρατόσφαιρα.

Τα αερολύματα στη στρατόσφαιρα έχουν μεγάλους χρόνους παραμονής. Αυτό ευνοείται από το μικρό μέγεθος των σωματιδίων (περίπου 0,1 μm), τη σταθερότητα της στρατόσφαιρας και την απουσία κατακρημνίσεων. Έτσι, παραμένουν σε αιώρηση στη στρατόσφαιρα επί μήνες ή και χρόνια πριν από την τελική κατακρήμνισή τους στην επιφάνεια της γης. Τα αερολύματα στη στρατόσφαιρα αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από τα σωματίδια προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας στη στρατόσφαιρα και μείωση του ποσού ακτινοβολίας το οποίο είναι διαθέσιμο για την τροπόσφαιρα. Επί πλέον, τα αερολύματα αντανακλούν μέρος της ακτινοβολίας στο διάστημα, συνεισφέροντας στη μείωση της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι το αποτέλεσμα της παρουσίας των θειικών αερολυμάτων τόσο στην τροπόσφαιρα όσο και στη στρατόσφαιρα είναι η μείωση της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα. Θα πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι αυτό το αποτέλεσμα είναι αντίθετο από την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από τα αέρια του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας στην περιοχή του υπερύθρου από τα μόριά τους.

Ένα επί πλέον συμπέρασμα, είναι ότι από πηγές σωματιδίων λιγότερο σημαντικές από μία ηφαιστειακή αναμένουμε σωματίδια στην τροπόσφαιρα με μικρότερους χρόνους παραμονής. Τα αποτελέσματα στο κλίμα, στις περιπτώσεις αυτές, εκδηλώνονται σε μικρότερες χωρικές κλίμακες, πχ σε τοπική ή κλίμακα μίας περιοχής και είναι δυσκολότερο να διαφοροποιηθούν

από τους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό, για εκπομπές θεικών αερολυμάτων μικρότερης κλίμακας από αυτές των ηφαιστειακών εκρήξεων, η μελέτη της επίδρασής τους στο κλίμα μίας περιοχής είναι πολύ πιο δύσκολη. Εξ άλλου, τα αερολύματα μπορούν επίσης να απορροφούν ακτινοβολία σε μεγάλα μήκη κύματος, δηλαδή στην περιοχή του υπέρυθρου, όπως γίνεται με τα αέρια του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα CO₂, μεθάνιο CH₄, όζον O₃). Επομένως, η παρουσία τέτοιων αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα έχει το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό της παρουσίας των αερίων του θερμοκηπίου.

Η πλειοψηφία των σωματιδίων ανθρωπογενούς προέλευσης οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα. Ο ρόλος τους ως προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας στον πλανήτη είναι αντίθετος από αυτόν των αερίων του θερμοκηπίου. Η έρευνα στην κατεύθυνση της πλήρους διαλεύκανσης του ρόλου των αερολυμάτων ως προς την αλληλεπίδρασή τους με την ηλιακή ακτινοβολία και της ποσοτικής εκτίμησης των αποτελεσμάτων από την αλληλεπίδραση αυτή είναι σήμερα σε εξέλιξη. Λόγω της πολυπλοκότητας των φαινομένων και της ταυτόχρονης επίδρασης πολλών και διαφορετικών παραγόντων, δεν είμαστε σε θέση σήμερα να περιγράψουμε με ακρίβεια τις αλληλεπιδράσεις αυτές και να ποσοτικοποιήσουμε τα αποτελέσματά τους.

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους η εκτίμηση της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με την ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύπλοκη είναι οι εξής:

1. Τόσο ο άμεσος όσο και ο έμμεσος τρόπος με τους οποίους τα αερολύματα μπορεί να επηρεάζουν το κλίμα εξαρτώνται από τη χημική σύσταση και το μέγεθος των σωματιδίων και δεν μπορούν να συσχετιστούν μόνο με τις εκπομπές τους με απλό τρόπο. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τα σωματίδια εξαρτάται τόσο από τη χημική τους σύσταση όσο και από το μέγεθός τους. Αναφέραμε παραπάνω ότι υδροσκοπικά σωματίδια, αποτελούμενα από ευδιάλυτα στο νερό άλατα, χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης στη δημιουργία των νεφών. Από αυτό φαίνεται ότι η χημική σύσταση των σωματιδίων επηρεάζει σημαντικά το ρόλο τους αυτό. Τα σωματίδια τα οποία ευρίσκονται στο ύψος των νεφών και χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης έχουν συνήθως μικρά μεγέθη που τους επιτρέπουν να μείνουν σε αιώρηση στον ατμοσφαιρικό αέρα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα απ' ό,τι τα μεγαλύτερα σωματίδια.

2. Ο έμμεσος τρόπος εξαρτάται από πολύπλοκες διεργασίες οι οποίες σχετίζονται με τα σωματίδια. Εξαρτάται επίσης από τη διεργασία της συμπύκνωσης των υδρατμών μέσω πυρήνων συμπύκνωσης και τη διεργασία της αύξησης του μεγέθους των σταγόνων της βροχής.

3. Τα αερολύματα στην τροπόσφαιρα έχουν μικρούς χρόνους παραμονής (κατά μέσον όρο μίας εβδομάδας περίπου) και, επομένως, η κατανομή τους στο χώρο είναι ανομοιογενής και απόλυτα εξαρτώμενη από την κατανομή των πηγών τους στο χώρο.

Για τους παραπάνω λόγους, τόσο η ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης των σωματιδίων στις μεταβολές του κλίματος σε πλανητική κλίμακα όσο και η εκτίμηση της συνεισφοράς της αύξησης των εκπομπών των σωματιδίων μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση στις κλιματικές μεταβολές είναι πιο δύσκολη από αυτήν που αντιστοιχεί στα αέρια συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα πχ τα αέρια του θερμοκηπίου.

2.7 Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην υγεία

Οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στην υγεία αφορούν κυρίως το αναπνευστικό σύστημα. Η ικανότητα του αναπνευστικού συστήματος να προστατεύεται από τη σωματιδιακή ύλη καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος των σωματιδίων. Τα μεγαλύτερα σωματίδια που εισέρχονται στο αναπνευστικό σύστημα παγιδεύονται με τη βοήθεια των τριχών και του βλεννογόνου της μύτης. Μπορούν στη συνέχεια να αποβληθούν εύκολα πχ με

το βήχα ή το φτέρνισμα. Μικρότερα σωματίδια μπορούν να δεσμευτούν από το βλεννογόνο στην τραχεία και να αποβληθούν από το λαιμό επίσης με βήχα. Τα σωματίδια που είναι μεγαλύτερα από 10 μm αποβάλλονται αρκετά αποτελεσματικά από το ανώτερο μέρος του αναπνευστικού συστήματος. Τα περισσότερα από τα σωματίδια με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 μm και περίπου 60-80% από τα σωματίδια με διάμετρο 5-10 μm παγιδεύονται στην περιοχή της μύτης και του φάρυγγα. Τα μικρότερα σωματίδια, όμως, συχνά έχουν τη δυνατότητα να διασχίσουν το ανώτερο τμήμα του αναπνευστικού, χωρίς να παγιδευτούν από το βλεννογόνο στο τμήμα αυτό του αναπνευστικού συστήματος. Αυτά τα σωματίδια μπορούν να φθάσουν τους πνεύμονες, αλλά και πάλι, ανάλογα με το μέγεθός τους, μπορεί να αποτεθούν ή όχι σ' αυτούς. Μερικά από αυτά, είναι τόσο μικρά που τείνουν να ακολουθήσουν τον αέρα που εισέρχεται στους πνεύμονες, αλλά και να αποβληθούν πάλι με την εκπνοή. Τα σωματίδια με μέγεθος μεταξύ 0,5- 10 μm μπορεί να είναι αρκετά μικρά ώστε να φθάσουν στους πνεύμονες και αρκετά μεγάλα ώστε να αποτεθούν σε αυτούς. Η απόθεση στους πνεύμονες είναι πολύ αποτελεσματική γι' αυτά που έχουν μέγεθος μεταξύ 2 και 4 μm. Τα σωματίδια τα οποία είναι μικρότερα από 2,5 μm εισπνέονται και φθάνουν στους πνεύμονες και επομένως είναι αναμενόμενο να είναι πιο επικίνδυνα για την υγεία από μεγαλύτερα σωματίδια. Τα σωματίδια αυτού του μεγέθους περιέχουν στοιχεία ή χημικές ενώσεις, όπως π.χ. βαρέα μέταλλα (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn) με αυξημένη τοξικότητα και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH), που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στην υγεία. Υψηλές συγκεντρώσεις σωματιδίων στην ατμόσφαιρα σε συνδυασμό με υψηλές συγκεντρώσεις θεικών αερολυμάτων συνδέονται με αύξηση του αριθμού των εισαγομένων στα νοσοκομεία για λοιμώξεις του αναπνευστικού, βρογχίτιδες, άσθμα, πνευμονία κλπ. Στην περίπτωση αυτή, μιλάμε για συνεργιστικό ρόλο των θεικών ιόντων στη βλάβη που ήδη προκαλεί στο αναπνευστικό η εισπνοή πολύ μικρών σωματιδίων.

2.8 Τρόποι ταξινόμησης των σωματιδίων

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει μία τεράστια ποικιλία σωματιδίων τόσο από την άποψη της προέλευσης όσο και από την άποψη των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, με κυριότερους εκπροσώπους τη σύσταση και το μέγεθος. Προκειμένου να μελετηθούν τα ατμοσφαιρικά σωματίδια, είναι απαραίτητο να ταξινομηθούν σε κατηγορίες. Δημιουργήθηκαν έτσι διάφοροι τρόποι ταξινόμησης των σωματιδίων οι κυριότεροι από τους οποίους βασίζονται:

1. Στην προέλευση. Τα σωματίδια κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν οι πηγές εκπομπής τους είναι φυσικές (π.χ. αιολική διάβρωση εδαφών, επίδραση ανέμων στην επιφάνεια των ωκεανών, ηφαιστειακές εκρήξεις κλπ) ή ανθρωπογενείς (διάφορες καύσεις, βιομηχανικές δραστηριότητες κλπ).

2. Στον τρόπο σχηματισμού τους. Τα σωματίδια κατατάσσονται σε πρωτογενή και δευτερογενή.

Τα σωματίδια που συναντώνται στην ατμόσφαιρα με την ίδια μορφή που είχαν κατά την εκπομπή τους ονομάζονται πρωτογενή.

Τα σωματίδια που σχηματίζονται από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, κυρίως όπως αυτές των μετατροπών αερίων σε σωματίδια, ονομάζονται δευτερογενή. Υπάρχει πιθανότητα, ακόμα και αν έχουμε λάβει όλα τα μέτρα προκειμένου να μην επιβαρύνουμε τον αέρα με σωματίδια, να εμφανιστούν σωματίδια τα οποία προέρχονται από αέριες εκπομπές πχ υδρογονάνθρακες, οξείδια αζώτου και θείου κλπ.

3. Στη σύστασή τους. Τα σωματίδια κατατάσσονται σε ανόργανα και οργανικά. Η διάκριση αυτή σχετίζεται με τα κυριότερα συστατικά των σωματιδίων που υπάρχει περίπτωση να είναι ανόργανα (πχ οξείδια μετάλλων, θεικές ρίζες, νιτρικές ρίζες κλπ) ή οργανικά (πχ διάφοροι

υδρογονάνθρακες). Οι δύο αυτές κυριότερες κατηγορίες από πλευράς χημικής σύστασης έχουν βασικές διαφορές ως προς τη φυσικοχημική τους συμπεριφορά, αλλά και τις επιπτώσεις. Είναι όμως πολύ πιθανόν να υπάρχουν και σωματίδια μικτής σύστασης.

4. Στις επιπτώσεις τους στην υγεία. Κατατάσσονται έτσι σε *εισπνεύσιμα και μη*. Η κατηγοριοποίηση αυτή υπάγεται στην ευρύτερη κατάταξη των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους. Οι διάφορες επιπτώσεις που σχετίζονται με το μέγεθος των σωματιδίων έχουν αναφερθεί παραπάνω, περί επιπτώσεων στην υγεία. Το μέγεθος αλλά και η σύσταση των σωματιδίων σχετίζονται άμεσα με την προέλευση και ειδικότερα με το μηχανισμό γένεσής τους. Επομένως, οι διάφοροι τρόποι ταξινόμησης, πολύ συχνά υπονοούν ή και εμπεριέχουν άλλους τρόπους ή κατηγορίες. Για παράδειγμα, ορισμένα σωματίδια ανθρωπογενούς προέλευσης προέρχονται κυρίως από διάφορες διαδικασίες καύσης είναι συχνά δευτερογενή, χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό μέγεθος (<1μm) και είναι εσπνεύσιμα.

2.9 Η ατμοσφαιρική ρύπανση και η κλιματική αλλαγή

Ένας αριθμός διεργασιών που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, συμβάλλουν επίσης και στην υπερβολική αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον, γεγονός που προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη. Με τη μείωση της ποσότητας ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούμε διεθνώς, θα μπορούσαμε να συμβάλλουμε στην αντιμετώπιση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

2.10 Πηγές σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Οι κυριότερες φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές αερολυμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Οι κυριότερες πηγές αερολυμάτων

<i>Πηγές Προέλευσης</i>	<i>Κατηγορίες Εκπομπών</i>
Φυσικές Πηγές	
Επιφάνεια ωκεανών	Σταγονίδια που περιέχουν διάφορα άλατα από την επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας
Επιφάνεια εδαφών	Σκόνη
Ηφαιστειακές εκρήξεις	Περιλαμβάνονται πρωτογενή και δευτερογενή αερολύματα
Βιογενής ύλη	Περιλαμβάνονται πρωτογενή σωματίδια και δευτερογενή από συμπύκνωση οργανικών ενώσεων που εκπέμπονται από φυτά
Καύση βιογενούς ύλης	Αιθάλη
Προϊόντα φυσικής μετατροπής αερίου σε σωματίδιο	Θειικά από ενώσεις του θείου που εκπέμπονται από την επιφάνεια των ωκεανών
Ανθρωπογενείς Πηγές	
Εκπομπές πρωτογενούς σωματιδιακής ύλης από ανθρώπινες δραστηριότητες	Αιθάλη, σκόνη
Δευτερογενή αερολύματα τα οποία είναι προϊόντα αέριων ανθρωπογενών εκπομπών από καύσεις ορυκτών καυσίμων	θειικά SO_4^{2-} και νιτρικά NO_3^- την οξείδωση αερίων SO_2 , NO_2 αντίστοιχα

(Πηγή: Ρεμοντάκη Ε., 2012)

Οι εκτιμώμενες ετήσιες εκπομπές αερολυμάτων στην τροπόσφαιρα και τη στρατόσφαιρα από τις κυριότερες πηγές εκπομπής τους συνοψίζονται στον Πίνακα 5. (Δεδομένα για την δεκαετία του 1980).

Η γεωγραφική κατανομή των εκπομπών είναι αρκετά ανομοιογενής, λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων που παρουσιάζει η γεωγραφική κατανομή των πηγών αλλά και λόγω των διακυμάνσεων του χρόνου παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα. Κατά συνέπεια, η σχετική σπουδαιότητα της συνεισφοράς των πηγών, που φαίνεται στον Πίνακα 5, παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στα διάφορα σημεία του πλανήτη. Παρά τις αβεβαιότητες που αναφέραμε, από τον Πίνακα 5, φαίνεται ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες συνεισφέρουν σημαντικά στη συνολική ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων που συναντώνται στην ατμόσφαιρα.

Άλλο κύριο συμπέρασμα που εξάγουμε από τον Πίνακα 2.5 είναι ότι σχεδόν το σύνολο των δευτερογενώς παραγομένων σωματιδίων τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των μικρών σωματιδίων. Αντίθετα, τα πρωτογενώς παραγόμενα σωματίδια από φυσικές πηγές και κυρίως αυτά που παράγονται με μηχανικό τρόπο, ανήκουν στην κατηγορία των μεγάλων σωματιδίων. Οι εκπομπές ανόργανης σκόνης από τα εδάφη συγκαταλέγονται στις φυσικές πηγές παρ' ότι στις εκπομπές αυτές υπάρχει η επίδραση από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως είναι για παράδειγμα οι αγροτικές. Η καύση επίσης της φυτικής βιομάζας δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν αμιγής ανθρωπογενής πηγή.

Πίνακας 2.5: Εκτιμήσεις συνολικών εκπομπών αερολυμάτων τη δεκαετία του 1980.

Πηγές	Εκτιμώμενη ροή			Κατηγορία μεγέθους σωματιδίων	
	Χαμηλή	Υψηλή	Καλύτερη	Μεγάλα > 1μm	Μικρά < 1μm
Φυσικές					
<i>Πρωτογενή αερολύματα</i>					
Σκόνη εδαφών	1.000	3.000	1.500	κυρίως μεγάλα	
Θαλάσσια άλατα	1.000	10.000	1.300	μεγάλα	
Ηφαιστ. σκόνη	4	10.000	33	μεγάλα	
Πρωτογενή οργανικά	26	80	50	μεγάλα	
<i>Δευτερογενή αερολύματα</i>					
Θειικά από βιογενή αέρια ++	60	110	90		μικρά
Θειικά από ηφαιστ. SO ₂	4	45	12		μικρά
Οργ. Υλη από βιογ. VOC	40	200	55		μικρά
Νιτρικά από NO _x				κυρίως μεγάλα	
Σύνολο Φυσικών Πηγών	2.134	23.435	3.040		
Ανθρωπογενείς Πηγές					
<i>Πρωτογενή αερολύματα</i>					
Βιομηχανική σκόνη	40	130	100	μεγάλα	μικρά
Αιθάλη	5	25	10		μικρά
Καύση βιομάζας* (πλην αιθ.)	50	140	80		μικρά
<i>Δευτερογενή αερολύματα</i>					
Θειικά από SO ₂	120	180	140		μικρά
Νιτρικά από NO _x	20	50	40	κυρίως μεγάλα	
Οργ. ύλη από βιογενή VOC*	5	25	10		μικρά
Σύνολο Ανθρωπογενών Πηγών	240	550	380		
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	2.384	23.985	3.420		

(Πηγή: P. R. Jonas, R. J. Charlson, H. Rodhe, CLIMATE CHANGE 1994, IPCC, Cambridge University Press, 1995).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΡΦΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ

3.1 Φυσικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων

Όπως ήδη αναφέραμε, στην προηγούμενη παράγραφο, τα αιωρούμενα ανόργανα σωματίδια της σκόνης προέρχονται κυρίως από μηχανισμούς θραύσης μεγαλύτερων σωματιδίων, φυσικής και χημικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων και από την επίδραση των ανέμων στην επιφάνεια της γης. Τα παραπάνω είναι τυπικά παραδείγματα φυσικών διεργασιών σχηματισμού αερολυμάτων. Επί πλέον, μεγάλο φάσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων περιλαμβάνουν τη θραύση υλικών η οποία συνεπάγεται απελευθέρωση σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Τέτοια δραστηριότητα είναι, για παράδειγμα, η εξόρυξη και θραύση υλικών σε λατομεία. Η εντατική αγροτική δραστηριότητα αποτελεί επίσης μία έμμεση πηγή εκπομπής σωματιδίων από τα εδάφη τα οποία γίνονται πιο ευαίσθητα στην αιολική διάβρωση. Τα σωματίδια που προκύπτουν μέσω των φυσικών διεργασιών έχουν μεγέθη συνήθως μεγαλύτερα του 1 μm.

3.2 Χημικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων

Οι περισσότερες χημικές διεργασίες σχηματισμού σωματιδίων προέρχονται από διεργασίες καύσης. Σε αυτές περιλαμβάνονται σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, οικιακές καύσεις (συστήματα κεντρικής θέρμανσης), βιομηχανικές καύσεις, καύσεις φυτικής βιομάζας, ηφαιστειακές εκπομπές. Τα σωματίδια που προκύπτουν από πηγές καύσεων έχουν μεγέθη μικρότερα του 1 μm. Όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο, αυτά τα σωματίδια αποτελούν απειλή για την υγεία διότι μεταφέρονται εύκολα στις πνευμονικές κυψελίδες. Τα σωματίδια αυτά μπορεί επίσης να είναι εμπλουτισμένα σε επικίνδυνα τοξικά συστατικά, όπως βαρέα μέταλλα και μεταλλοειδή πχ αρσενικό. Από τα παραπάνω, μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι οι φυσικές – μηχανικές διεργασίες οδηγούν σε σχηματισμό σωματιδίων μεγέθους μεγαλύτερου του 1 μm, ενώ οι χημικές διεργασίες οδηγούν σε σχηματισμό σωματιδίων μεγέθους μικρότερου του 1 μm. Αυτό εξηγείται εύκολα αν κανείς σκεφθεί ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη θραύση ενός υλικού σε πολύ μικρά σωματίδια είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται (ή και εκλύεται) κατά τον σχηματισμό ενός σωματιδίου μέσω χημικής σύνθεσης ή συσσωμάτωσης μικρότερων σωματιδίων. Άρα, τα σωματίδια που προκύπτουν από φυσικές – μηχανικές διεργασίες έχουν κατά κανόνα μεγαλύτερο μέγεθος από αυτά που προκύπτουν μέσω χημικών διεργασιών.

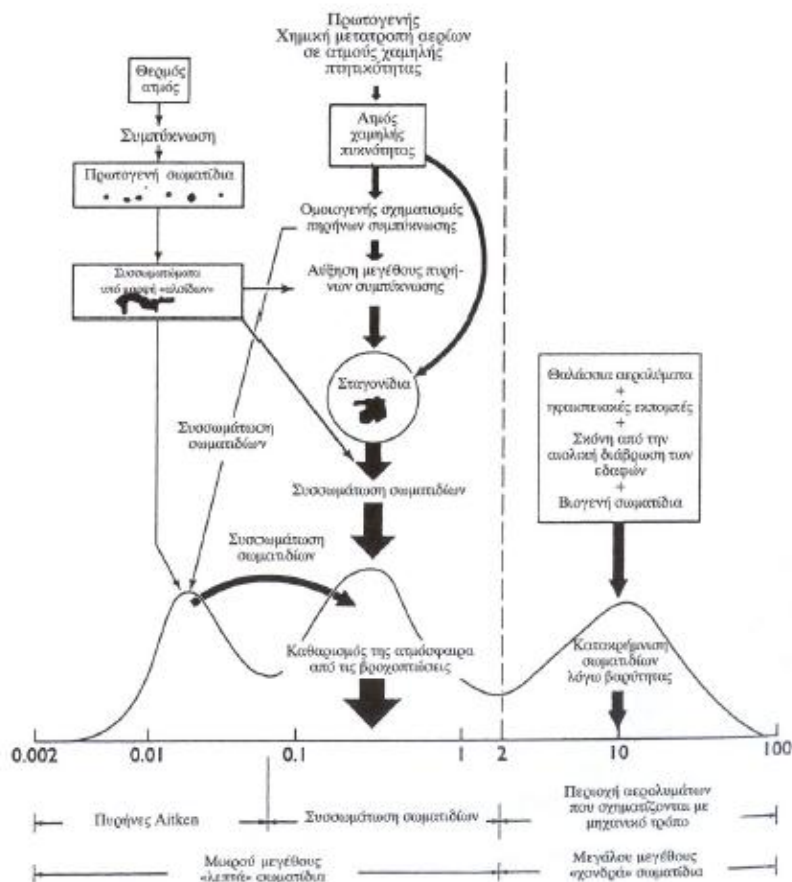
3.3 Μηχανισμοί μετατροπών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα

Οι κυριότερες διεργασίες στις οποίες εμπλέκονται τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Στο κάτω μέρος του σχήματος συσχετίζεται ο μηχανισμός γένεσης των σωματιδίων με την μέση διάμετρό τους. Στο δεξιό τμήμα του σχήματος, παρουσιάζονται κυρίως πρωτογενώς εκπεμπόμενα σωματίδια τα οποία σχηματίστηκαν με μηχανικό τρόπο και αντιστοιχούν κυρίως σε φυσικές πηγές εκπομπής. Παρατηρούμε ότι τα σωματίδια αυτά ανήκουν σε κατανομές μεγέθους με μέση διάμετρο 10 μm.

Το πάνω αριστερά τμήμα του σχήματος αναφέρεται στο μηχανισμό που οδηγεί σε σχηματισμό σωματιδίων στην ατμόσφαιρα από τη συμπύκνωση θερμών απαερίων. Τα απαέρια που προκύπτουν από διεργασίες σε υψηλή θερμοκρασία (π.χ. μεταλλουργικές ή καύσεις καυσίμων), ψύχονται στη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Στην περίπτωση αυτή είτε έχουμε διεργασία μετατροπής αερίου σε σωματίδιο είτε συμπύκνωση των ατμών πάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια στην ατμόσφαιρα.

Στο μεσαίο τμήμα του σχήματος παρουσιάζεται μία κατηγορία σωματιδίων που προκύπτουν από χημική μετατροπή αερίων σε ατμούς χαμηλής πτητικότητας. Κύριοι εκπρόσωποι τέτοιων σωματιδίων προκύπτουν από διαδικασίες οξείδωσης αερίων στην ατμόσφαιρα είτε φυσικής είτε ανθρωπογενούς προέλευσης. Διεργασίες οξείδωσης αερίων μπορεί να λάβουν χώρα είτε στην αέρια φάση είτε στην υγρή φάση, δηλαδή σε ατμοσφαιρικά σταγονίδια. Στην αέρια φάση οι διεργασίες οξείδωσης αρχίζουν από ρίζες υδροξυλίου ή άλλες ελεύθερες ρίζες. Τα προϊόντα της οξείδωσης είναι συνήθως ενώσεις χαμηλής πτητικότητας οι οποίες είτε συμπυκνώνονται πάνω σε ήδη υπάρχοντα σωματίδια ή σταγονίδια είτε σχηματίζουν νέα σωματίδια. Τα σωματίδια που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο είναι συνήθως πολύ μικρού μεγέθους (μέσης διαμέτρου 0,01 μm). Θα δώσουμε παρακάτω δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα χημικής μετατροπής αερίων σε σωματίδια μέσω οξείδωσης στην αέρια φάση.

Σχήμα 3.1 : Σχηματική παράσταση σχηματισμού, συσσωμάτωσης και τρόπων απόθεσης ατμοσφαιρικών σωματιδίων – συσχετισμός με το μέγεθός τους.

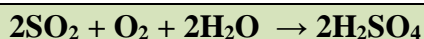


3.3.1 Η οξείδωση του αερίου διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα

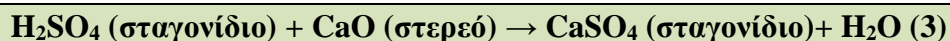
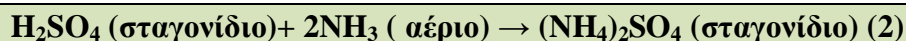
Το προϊόν που προκύπτει από την οξείδωση του αερίου διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα είναι θειικό οξύ το οποίο είναι υγροσκοπικό και συσσωρεύει υδρατμούς από την

ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα αυτού του μηχανισμού είναι ο σχηματισμός σταγονιδίων θειικού οξέος.

Αυτή η διεργασία περιγράφεται από την αντίδραση (1) :



Η οξείδωση του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα γίνεται επίσης και μέσω ελευθέρων ριζών. Για παράδειγμα, οι ελεύθερες ρίζες που παράγονται από τη φωτοχημική οξείδωση των υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα αντιδρούν με το διοξείδιο του θείου στην αέρια φάση. Ελεύθερες ρίζες όπως OH και HO₂ οξειδώνουν το διοξείδιο του θείου προς δραστικά ενδιάμεσα προϊόντα όπως το τριοξείδιο του θείου (SO₃). Αυτά τα ενδιάμεσα προϊόντα συνδέονται γρήγορα με τους υδατμούς στην ατμόσφαιρα με τελικό προϊόν αερολύματα θειικού οξέος. Σε αστικές περιοχές με προβλήματα εμφάνισης φωτοχημικής ρύπανσης, η οξείδωση του διοξειδίου του θείου στην αέρια φάση από ελεύθερες ρίζες υπερισχύει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει αλκαλικά συστατικά όπως αμμωνία ή οξείδιο του ασβεστίου, το θειικό οξύ αντιδρά με αυτά και δίνει άλατα σύμφωνα με τις αντιδράσεις (2) και (3):



Όταν στην ατμόσφαιρα η υγρασία είναι χαμηλή, το νερό εξατμίζεται από αυτά τα σταγονίδια και απομένει ένα αερολύμα στερεών σωματιδίων.

3.3.2 Αντιδράσεις φωτοχημικής οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων

Οι αντιδράσεις φωτοχημικής οξείδωσης πτητικών οργανικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα (Volatile Organic Compounds, VOC) οδηγούν στο σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων. Η ατμοσφαιρική οξείδωση των οργανικών αυτών μορίων, τα οποία βρίσκονται σε αέρια μορφή, από ελεύθερες ρίζες και άλλα μόρια, όπως OH και O₃ αντίστοιχα, παράγουν προϊόντα χαμηλής τάσης ατμών τα οποία μπορεί να συμπυκνωθούν στον αέρα και να δώσουν αερολύματα. Οι μηχανισμοί που περιγράφουν αυτές τις μετατροπές με τη βοήθεια ελευθέρων ριζών είναι πολύπλοκοι. Η πλειοψηφία των οργανικών ενώσεων μικρού μοριακού βάρους δεν παράγει συμπυκνώσιμα προϊόντα φωτοχημικής οξείδωσης. Φυσικοί υδρογονάνθρακες και κυρίως τα τερπένια παράγουν μεγάλες ποσότητες αερολυμάτων μέσω αντιδράσεων φωτοχημικής οξείδωσης με O₃, NO₃ και OH. Τέτοιας βιογενούς προέλευσης αερολύματα κυριαρχούν σε περιοχές με μεγάλη φυτοκάλυψη.

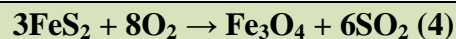
Από το σχήμα 2 παρατηρούμε ότι τόσο τα σωματίδια που προέρχονται από συμπύκνωση ατμών όσο και αυτά που προέρχονται από χημική μετατροπή αερίων σε αμούς χαμηλής πτητικότητας ανήκουν στην κατανομή μεγεθών με μέση διάμετρο μεταξύ 0,01 και 0,1 μm. Τα συσσωματώματα αυτών των σωματιδίων οδηγούν σε νέα σωματίδια των οποίων η διάμετρος δεν ξεπερνά το 1 μm. Τα σωματίδια των αερολυμάτων μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ως προς τη σύστασή τους: σε ανόργανα και σε οργανικά. Αυτός ο διαχωρισμός εξυπηρετεί και διευκολύνει κυρίως τη μελέτη των ιδιοτήτων τους διότι, σε πολλές περιπτώσεις, συναντώνται σωματίδια μικτής σύστασης τα οποία περιλαμβάνουν ένα ανόργανο μέρος και ένα οργανικό.

3.4 Σύσταση των ατμοσφαιρικών σωματιδίων

3.4.1 Σύσταση ανόργανων σωματιδίων

Η χημική σύσταση της σωματιδιακής ύλης στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία. Συναντώνται άλατα, οξείδια, ενώσεις του αζώτου και του θείου, διάφορα μέταλλα καθώς και ραδιενεργά ισότοπα στοιχείων. Η στοιχειακή σύσταση των σωματιδίων αντανακλά την πηγή προέλευσής τους. Για παράδειγμα, υψηλές συγκεντρώσεις αργιλίου, πυριτίου και ασβεστίου ανιχνεύονται σε δείγματα αερολυμάτων όταν οι αέριες μάζες στην ατμόσφαιρα της Μεσογείου προέρχονται από τις ερημικές περιοχές της Β. Αφρικής, δηλαδή, τη Σαχάρα. Ενώ όταν οι αέριες μάζες που φθάνουν στη Μεσόγειο προέρχονται από τις βιομηχανικές περιοχές της Δυτικής Ευρώπης τα αερολύματα είναι εμπλουτισμένα σε θείο και βαρέα μέταλλα, όπως πχ μόλυβδο, ψευδάργυρο κλπ.

Μία σημαντική κατηγορία ανόργανων σωματιδίων είναι αυτά που περιέχουν *μεταλλικά οξείδια* και σχηματίζονται κατά την καύση καυσίμων που περιέχουν μέταλλα. Για παράδειγμα, το οξείδιο του σιδήρου σχηματίζεται σε σωματιδιακή μορφή όταν καίγονται γαιάνθρακες που περιέχουν πυρίτες σύμφωνα με την αντίδραση (4) :



Στην προηγούμενη ενότητα δώσαμε ήδη το παράδειγμα οξείδωσης του διοξειδίου του θείου με τελικό σχηματισμό θεικών αερολυμάτων.

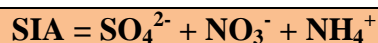
Οι οργανικές ενώσεις του βαναδίου σε υγρά καύσιμα μετατρέπονται κατά την καύση σε οξείδιο του βαναδίου το οποίο είναι σε στερεή σωματιδιακή μορφή.

Ο σωματιδιακός άνθρακας με τη μορφή αιθάλης (soot carbon), προέρχεται από καυσαέρια των οχημάτων, εστίες θέρμανσης, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελεί έναν από τους ορατούς σωματιδιακούς ρύπους στην ατμόσφαιρα. Ο άνθρακας έχει ισχυρή ροφητική ικανότητα και έτσι μπορεί να αποτελέσει υπόστρωμα μεταφοράς αέριων και σωματιδιακών ρύπων. Ο σωματιδιακός άνθρακας μπορεί να χρησιμεύσει και ως καταλύτης σε ετερογενείς ατμοσφαιρικές αντιδράσεις όπως είναι το παράδειγμα που ήδη δώσαμε της μετατροπής του αέριου διοξειδίου του θείου σε θειικά.

Μία σημαντική κατηγορία ανόργανων αερολυμάτων αποτελούν *οι ιπτάμενες τέφρες* που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Τέτοιο παράδειγμα είναι οι λιγνίτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην χώρα μας ως το κύριο καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα μεγαλύτερα ποσοστά της ιπτάμενης τέφρας δεσμεύονται από ειδικά συστήματα αντιρρύπανσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα). Παρ' όλα αυτά, ένα ποσοστό ιπτάμενης τέφρας διαφεύγει από τις καμινάδες στην ατμόσφαιρα. Η σύσταση της ιπτάμενης τέφρας ποικίλλει ανάλογα με το καύσιμο. Τα κυριότερα συστατικά είναι οξείδια του αργιλίου, ασβεστίου, σιδήρου και πυριτίου. Άλλα στοιχεία είναι το μαγνήσιο, το θείο, το τιτάνιο, ο φώσφορος, το κάλιο και το νάτριο. Σημαντικό συστατικό των ιπτάμενων τεφρών είναι και ο στοιχειακός άνθρακας.

Σημαντικό μέρος του ανόργανου κλάσματος των ατμοσφαιρικών σωματιδίων αποτελεί το *ιοντικό κλάσμα* δηλαδή το άθροισμα των διαλυτών στο νερό ανιόντων και κατιόντων. Από αυτά, το σπουδαιότερο είναι το ανόργανο δευτερογενώς παραγόμενο αερόλυμα (Secondary Inorganic Aerosol, SIA) το οποίο αποτελείται από το άθροισμα:



και είναι ένας δείκτης της επιβάρυνσης των σωματιδίων από πηγές ανθρωπογενών εκπομπών καθώς και δείκτης της οξύτητας των σωματιδίων επειδή περιλαμβάνει τα θειικά και νιτρικά ιόντα, υπεύθυνα για την οξύτητα των σωματιδίων αλλά και των όξινων κατακρημνισμάτων π.χ. βροχών.

Οι ίνες αμιάντου (*asbestos*) θεωρούνται τέλος, σημαντική κατηγορία ανόργανων αερολυμάτων με σύσταση που δίνεται κατά προσέγγιση από τον τύπο $Mg_3P(Si_2O_5)(OH)_4$. Ο αμιάντος χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα διεθνώς σε οικοδομικά υλικά, κατασκευή σωληνώσεων, ως μονωτικό υλικό κλπ λόγω κάποιων εξαιρετικών ιδιοτήτων του, όπως η μηχανική αντοχή, η ελαστικότητα και η μη αναφλεξιμότητά του. Η χρήση του τείνει όμως να καταργηθεί διεθνώς διότι οι ίνες του εισπνεόμενες προκαλούν αποδεδειγμένα καρκίνο των πνευμόνων.

Αξίζει να σημειώσουμε τη διαφοροποίηση μεταξύ πρωτογενώς παραγόμενου ανόργανου αερολύματος με μηχανικό τρόπο, όπως αυτά που προκύπτουν από την αιολική διάβρωση των εδαφών, με χαρακτηριστικό το μεγάλο σχετικά μέγεθος των σωματιδίων, και δευτερογενώς παραγόμενου αερολύματος μέσω χημικών αντιδράσεων (θειικά αερολύματα), με χαρακτηριστικό το μικρό μέγεθος των σωματιδίων.

3.4.2 Σύσταση οργανικών σωματιδίων

Σωματίδια στην ατμόσφαιρα που περιέχουν άνθρακα μπορεί να είναι πρωτογενή ή δευτερογενή, και αυτό, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, εξαρτάται από τις πηγές τους και τους μηχανισμούς σχηματισμού τους. Πρωτογενώς παραγόμενα σωματίδια που περιέχουν άνθρακα προέρχονται από τις καύσεις και είναι γνωστά υπό τον γενικό όρο αιθάλη (*soot carbon*). Η αιθάλη ως προς τη σύστασή της, αποτελείται από δύο τμήματα:

1. Ένα τμήμα το οποίο είναι αδιάλυτο στους οργανικούς διαλύτες και αντιστέκεται στην οξείδωση σε θερμοκρασίες κάτω από τους $400^{\circ}C$. Αυτό το τμήμα λέγεται «στοιχειακός», ή «μαύρος» άνθρακας ή γραφίτης και αποτελεί το ανόργανο τμήμα της αιθάλης. Ο όρος γραφίτης επισημαίνει την παρουσία μικροκρυσταλλικών δομών που μοιάζουν με αυτές του γραφίτη, όπως έχει διαπιστωθεί από φασματοσκοπικές μεθόδους (φασματοσκοπία Raman). Ο όρος μαύρος άνθρακας χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ότι αυτό το τμήμα της αιθάλης είναι υπεύθυνο για την απορρόφηση ακτινοβολίας στην περιοχή του ορατού.
2. Ένα οργανικό τμήμα το οποίο συνίσταται από ένα μεγάλο αριθμό οργανικών ενώσεων. Οι περισσότερες από τις ενώσεις αυτές είναι διαλυτές στους οργανικούς διαλύτες.

Η οργανική ύλη στα ατμοσφαιρικά αερολύματα, εκτός από το πρωτογενώς παραγόμενο αυτό τμήμα, συνίσταται από ένα δευτερογενώς παραγόμενο τμήμα μέσω διεργασιών μετατροπής αερίου σε σωματίδιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σχηματισμού οργανικών ενώσεων σωματιδιακής φάσης είναι τα δευτερογενή αερολύματα που σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα μέσω φωτοχημικής οξείδωσης πτητικών υδρογονανθράκων.

Συνοψίζοντας όσο αναφέραμε, οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές οργανικής ύλης (και μαύρου άνθρακα) είναι οι ατελείς καύσεις ορυκτών καυσίμων και βιομάζας.

Οι κυριότερες φυσικές πηγές οργανικής ύλης είναι οι εκπομπές από τη βλάστηση (οργανικός άνθρακας) και οι φυσικές πυρκαγιές (οργανικός και μαύρος άνθρακας).

Οι διεργασίες σχηματισμού των οργανικών ενώσεων κατά τη διαδικασία της καύσης είναι πολύπλοκες και οδηγούν σε σχηματισμό οξειδωμένων πολυμερών υδρογονανθράκων καθώς και σε οργανικές ενώσεις αζώτου. Αναφερόμαστε σε μια μεγάλη ποικιλία ενώσεων η οποία αντιπροσωπεύεται από πολλές τάξεις οργανικών ενώσεων όπως είναι τα κανονικά αλκάνια, τα μη αρωματικά οξέα, οι βενζαλδεΐδες, τα αρωματικά οξέα, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οι οξυγονωμένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες, τα τριτερπάνια, τα

στεράνια (οι δύο τελευταίες τάξεις ενώσεων είναι πολυκυκλικές ενώσεις που υπάρχουν στο πετρέλαιο και εισέρχονται στα καυσαέρια από τα λιπαντικά λάδια).

Κύριοι εκπρόσωποι των οργανικών σωματιδίων θεωρούνται οι *Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες – ΠΑΥ (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH)*. Το συνηθέστερα αναφερόμενο παράδειγμα πολυκυκλικού αρωματικού υδρογονάνθρακα είναι το βενζο(α)πυρένιο. Η ένωση αυτή μεταβολίζεται από τον ανθρώπινο οργανισμό και θεωρείται καρκινογόνος.

Οι ΠΑΥ συντίθενται από κεκορεσμένους υδρογονάνθρακες κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Πρόδρομες ενώσεις για το σχηματισμό των ΠΑΥ μπορούν να είναι υδρογονάνθρακες με μικρή μοριακή μάζα, ακόμα και μεθάνιο. Οι υδρογονάνθρακες χαμηλού μοριακού βάρους σχηματίζουν ΠΑΥ μέσω διεργασιών πυροσύνθεσης. Αυτές οι διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500 °C στις οποίες δεσμοί μεταξύ ατόμων άνθρακα και δεσμοί μεταξύ άνθρακα και υδρογόνου θραύονται με αποτέλεσμα το σχηματισμό ελευθέρων ριζών. Οι ελεύθερες ρίζες υφίστανται αφυδρογόνωση, χάνουν δηλαδή ένα άτομο υδρογόνου, και συνδέονται χημικά προς σχηματισμό αρωματικών δακτυλίων, οι οποίοι είναι ανθεκτικοί στη θερμική διάσπαση.

Οι ακόρεστες ενώσεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε αντιδράσεις προσθήκης που έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ΠΑΥ.

ΠΑΥ μπορούν ακόμη να σχηματιστούν από μεγάλο μοριακού βάρους αλκάνια τα οποία υπάρχουν στα καύσιμα και σε φυτικής προέλευσης ύλες μέσω διεργασιών πυρόλυσης. Οι διεργασίες πυρόλυσης περιλαμβάνουν θραύση των οργανικών ενώσεων και σχηματισμό μικρότερων και λιγότερο σταθερών μορίων και ελευθέρων ριζών τα οποία στη συνέχεια δίνουν ΠΑΥ.

3.5 Αποχωρισμός σωματιδίων από την ατμόσφαιρα – ξηρή και υγρή κατακρήμνιση

Ο αποχωρισμός των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες:

1. τη συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα
2. το συντελεστή μεταφοράς των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα προς ένα άλλο μέσον π.χ. έδαφος, νερό κλπ.

Ως προς το συντελεστή μεταφοράς, αυτός εκφράζει τον τρόπο ή το μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρονται τα σωματίδια από την ατμόσφαιρα προς ένα άλλο μέσον. Η μεταφορά των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα προς τη χέρσο ή τη θάλασσα γίνεται με δύο τρόπους:

1. *Μέσω ξηρής κατακρήμνισης.* Χαρακτηρίζουμε έτσι τον αποχωρισμό των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα ο οποίος λαμβάνει χώρα χωρίς τη μεσολάβηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων δηλαδή των βροχών και του χιονιού.
2. *Μέσω υγρών κατακρημνίσεων,* δηλαδή μετά από ενσωμάτωση των σωματιδίων στις σταγόνες ή τους κρυστάλλους των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.

3.5.1 Ξηρή κατακρήμνιση (Dry deposition)

Η ξηρή κατακρήμνιση μίας ποσότητας σωματιδίων εκφράζεται από το γινόμενο της ατμοσφαιρικής τους συγκέντρωσης και της ταχύτητας πτώσης των σωματιδίων. Το γινόμενο αυτό εκφράζεται από τη σχέση (1):

$$F_{dry} = C * V \quad (1)$$

Όπου C : η ατμοσφαιρική συγκέντρωση των σωματιδίων ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

και V : η ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$). Το μέγεθος F_{dry} έχει μονάδες ποσότητας ύλης ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Αυτό σημαίνει ότι εκφράζει την ατμοσφαιρική ροή του θεωρούμενου στοιχείου ή της ένωσης που περιέχεται σε ατμοσφαιρικά σωματίδια προς μία επιφάνεια όπως για παράδειγμα, η επιφάνεια του εδάφους ή μία υδάτινη επιφάνεια. Η σχέση (1) μας πληροφορεί ότι για να υπολογίσουμε την ξηρή κατακρήμνιση αρκεί να γνωρίζουμε δύο παραμέτρους: τη συγκέντρωση και την ταχύτητα κατακρήμνισης των σωματιδίων.

Η σχέση (1) ισχύει επίσης στην περίπτωση που αντί για τη συγκέντρωση των σωματιδίων έχουμε μετρήσεις συγκεντρώσεων ενώσεων ή στοιχείων που τα αποτελούν ή είναι συνδεδεμένα σε αυτά. Τότε, αν έχουμε προσδιορίσει σε μία ποσότητα σωματιδιακής ύλης που έχουμε συλλέξει μία σειρά από ενώσεις ή στοιχεία, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την ατμοσφαιρική ροή, με βάση Η σχέση (1), για κάθε ένωση ή στοιχείο ξεχωριστά τα οποία περιέχονται στο ίδιο δείγμα σωματιδίων.

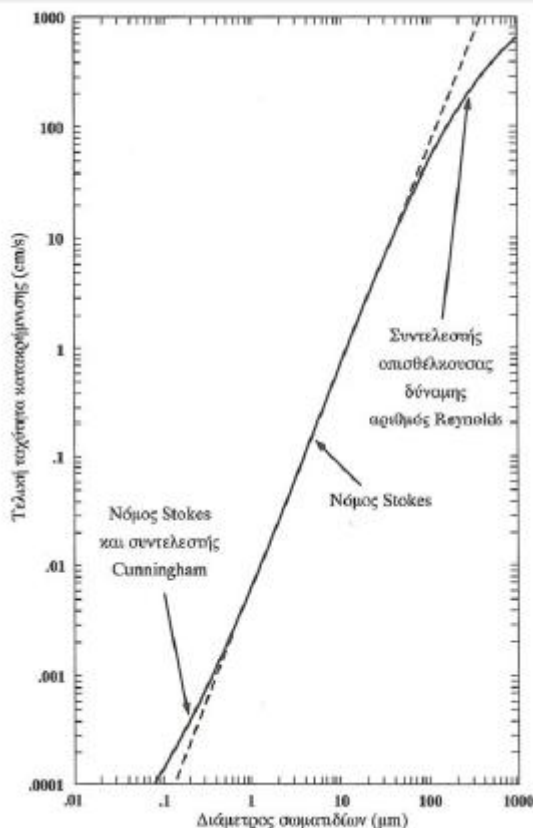
Διαθέτουμε πλέον τα μέσα προσδιορισμού των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων στοιχείων και ενώσεων οι οποίες συνδέονται με τη σωματιδιακή ύλη στην ατμόσφαιρα. Άρα, ο προσδιορισμός του παράγοντα C στη σχέση (1) είναι εφικτός μέσω πειραματικών διαδικασιών.

Σχετικά με την ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων, αυτή εξαρτάται από το μέγεθός τους. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η σχέση της ταχύτητας κατακρήμνισης των σωματιδίων σε σχέση με το μέγεθός τους σύμφωνα με το Νόμο του Stokes. Παρατηρείστε ότι για σωματίδια $<10 \mu\text{m}$, η ταχύτητα είναι $<0.1 \text{ cm/sec}$.

Η έκφραση της ταχύτητας πτώσης των σωματιδίων σύμφωνα με το Νόμο του Stokes ισχύει κάτω από ιδανικές συνθήκες όταν υπάρχει απόλυτη νηνεμία στην ατμοσφαιρική στήλη. Στην πραγματικότητα, οι συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα είναι πιο πολύπλοκες καθώς ο ατμοσφαιρικός αέρας βρίσκεται σε διαρκή κίνηση. Επομένως, για να υπολογιστεί η ταχύτητα πρόσπτωσης των σωματιδίων σε οποιαδήποτε επιφάνεια θα πρέπει να ληφθούν υπ όψιν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το μηχανισμό αποχωρισμού των σωματιδίων από την ατμόσφαιρα, μέσω ξηρής κατακρήμνισης, όπως:

1. η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την επιφάνεια πρόσπτωσης των σωματιδίων
2. τα χαρακτηριστικά των στοιβάδων της ατμόσφαιρας που διανύουν τα σωματίδια μέχρι να φθάσουν στην επιφάνεια πρόσπτωσής τους
3. τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας πρόσπτωσης
4. άλλες φυσικο-χημικές ιδιότητες των σωματιδίων που συνδέονται με πιθανές μεταβολές του μεγέθους τους όπως η υγροσκοπικότητά τους και η ικανότητα δημιουργίας συσσωματωμάτων

Σχήμα 3.2: Τελικές ταχύτητες κατακρήμνισης σφαιρικών σωματιδίων στον αέρα πυκνότητας $2 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ υπό κανονικές συνθήκες



Στον προσδιορισμό των παραπάνω παραγόντων και στη μαθηματική τους έκφραση διαπιστώνεται και η δυσκολία του προσδιορισμού της ταχύτητας της ξηρής κατακρήμνισης των ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά ομοιώματα τα οποία λαμβάνουν υπ όψιν όλους τους παραπάνω παράγοντες. Τα ομοιώματα βάσης είναι αυτά των Slinn και Slinn (1980) και του R.M. Williams (1982).

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες προσδιορισμού των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα μαθηματικά ομοιώματα, αλλά και για να επαληθευτούν τα ομοιώματα με πειραματικά στοιχεία, πολλές φορές υιοθετήθηκε μία άλλη μεθοδολογική προσέγγιση για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ροής σωματιδιακής ύλης από την ατμόσφαιρα προς ένα άλλο μέσον: η *απευθείας μέτρηση της ροής της σωματιδιακής ύλης*. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μίας τεχνητής επιφάνειας συλλογής των σωματιδίων, έκθεσης της επιφάνειας στην ατμόσφαιρα για ορισμένο χρονικό διάστημα, παραλαβής της σωματιδιακής ύλης ποσοτικά από την επιφάνεια. Όσον αφορά τον προσδιορισμό των στοιχείων ή των ενώσεων που μας ενδιαφέρουν στη σωματιδιακή ύλη αυτός γίνεται μέσω χημικής ανάλυσης.

Επομένως, η ατμοσφαιρική ροή κάθε στοιχείου ή ενώσεως προσδιορίζεται πειραματικά, αν διαιρέσουμε την ποσότητά του (μg) με το χρόνο που διήρκεσε η συλλογή της σωματιδιακής ύλης πχ σε ημέρες και με το εμβαδόν της επιφάνειας συλλογής (cm^2).

Αν επί πλέον της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιηθεί και παράλληλη δειγματοληψία στην ατμόσφαιρα για τον προσδιορισμό της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης των στοιχείων ή των ενώσεων που μας ενδιαφέρουν, τότε από τη σχέση (1) μπορούμε να προσδιορίσουμε πειραματικά τη μέση ταχύτητα πτώσης των σωματιδίων. Τα πειραματικά στοιχεία που προκύπτουν με την παραπάνω μέθοδο, θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα με αυτά που προκύπτουν από τα μαθηματικά ομοιώματα. Οι δυσκολίες που

αντιμετωπίζονται οφείλονται κυρίως στο ότι η ακρίβεια των μαθηματικών ομοιωμάτων δεν μπορεί να επαληθευτεί από τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό συμβαίνει διότι και τα πειραματικά δεδομένα που παράγονται δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια, κυρίως σε ότι αφορά τα μικρά σωματίδια.

Για παράδειγμα, μία δυσκολία προσέγγισης της πραγματικότητας μέσω της πειραματικής διαδικασίας, είναι ότι τα χαρακτηριστικά της τεχνητής επιφάνειας συλλογής των σωματιδίων είναι πολύ διαφορετικά από αυτά μίας φυσικής επιφάνειας πχ νερού.

3.5.2 Υγρή κατακρήμνιση (wet deposition)

Ο μηχανισμός αποχωρισμού των σωματιδίων μέσω υγρής κατακρήμνισης, χαρακτηρίζεται από δύο κύριες διεργασίες:

1. την ενσωμάτωση των σωματιδίων στα νέφη,
2. την ενσωμάτωση των σωματιδίων στις σταγόνες ή τους κρυστάλλους των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων κατά τη διάρκεια των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων.

Η πρώτη διεργασία θεωρείται ότι συμμετέχει κύρια στη φόρτιση των κατακρημνίσεων με ατμοσφαιρικά σωματίδια ενώ η συνεισφορά της δεύτερης θεωρείται λιγότερο σημαντική. Η υγρή κατακρήμνιση μίας ποσότητας σωματιδιακής ύλης εκφράζεται από το γινόμενο της συγκέντρωσής της στην υγρή κατακρήμνιση δηλαδή στην υδατική φάση και της ταχύτητας της βροχόπτωσης. Το γινόμενο αυτό εκφράζεται από τη σχέση 2:

$$F_{\text{wet}} = K \times P \quad (2)$$

Όπου K: η συγκέντρωση της σωματιδιακής ύλης στο νερό της ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ή $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Το K μπορεί επίσης να εκφράζει τη συγκέντρωση στοιχείου ή ένωσης που προέρχονται από τη σωματιδιακή ύλη και μπορούν να προσδιοριστούν στο νερό της βροχόπτωσης.

P: ο ρυθμός ή η ταχύτητα της βροχόπτωσης ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$).

Παρατηρούμε ότι η υγρή κατακρήμνιση F_{wet} , εκφράζεται και αυτή σε μονάδες ροής ύλης προς μία θεωρούμενη επιφάνεια δηλαδή, σε $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Ο προσδιορισμός του K είναι σχετικά εύκολος και γίνεται με χημική ανάλυση του νερού της βροχής. Ο προσδιορισμός του P είναι επίσης εφικτός αρκεί να προσδιορίσουμε το ύψος της βροχόπτωσης και τη διάρκειά της που συνήθως είναι και τα δύο διαθέσιμα από μετεωρολογικά δεδομένα. Επομένως, ο προσδιορισμός της υγρής κατακρήμνισης ενός στοιχείου ή ενώσεως που περιέχεται στη σωματιδιακή ύλη είναι πιο εύκολος και πιο ακριβής από αυτόν της ξηρής κατακρήμνισης.

Εάν θεωρήσουμε ότι C είναι η συγκέντρωση του στοιχείου ή της ένωσης που μας ενδιαφέρει στον αέρα (πχ σε $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), ορίζουμε για κάθε βροχόπτωση ή γενικότερα υγρή κατακρήμνιση το συντελεστή W μεταφοράς της σωματιδιακής ύλης από την αέρια στην υγρή φάση ο οποίος δίνεται από τη σχέση 3:

$$W = \frac{K \times \rho_{\text{air}}}{C} \quad (3)$$

Όπου $\rho_{\text{air}} = 1200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ η πυκνότητα του αέρα.

Ο συντελεστής W συναντάται στη βιβλιογραφία με τον όρο scavenging ratio. Λαμβάνοντας υπ όψιν τις σχέσεις (2) και (3), μπορούμε να γράψουμε για την υγρή κατακρήμνιση τη σχέση (4):

$$F_w = W \times C \times P_{\text{air}} \quad (4)$$

Η σχέση (4) μας πληροφορεί ότι η υγρή κατακρήμνιση για ένα στοιχείο ή ένωση που περιέχεται στη σωματιδιακή ύλη εξαρτάται από τη συγκέντρωση του στοιχείου ή της ένωσης (της σωματιδιακής ύλης) στον αέρα, το ρυθμό ή την ταχύτητα βροχόπτωσης, και από το συντελεστή W.

Η τιμή του συντελεστή W εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των νεφών και της βροχόπτωσης αλλά και με τα χαρακτηριστικά της σωματιδιακής ύλης όπως, το μέγεθος και η χημική της σύσταση. Υπάρχουν και για τις παραμέτρους αυτές μαθηματικά ομοιώματα που μπορούν να προβλέψουν τις τιμές του W.

Η σχετική συνεισφορά των ροών σωματιδιακής ύλης, μέσω ξηρής ή υγρής κατακρήμνισης, από την ατμόσφαιρα προς ένα άλλο μέσον εξαρτάται από την περιοχή στην οποία μελετάται αυτή η ροή. Για παράδειγμα, σε μία περιοχή όπου οι βροχοπτώσεις είναι πολύ συχνές, το μεγαλύτερο ποσοστό της ροής της σωματιδιακής ύλης από την ατμόσφαιρα προς ένα άλλο μέσον πραγματοποιείται μέσω υγρών κατακρημνίσεων. Αν όμως οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις της σωματιδιακής ύλης είναι μεγάλες ή/και τα μεγέθη των σωματιδίων είναι επίσης σημαντικά τότε, η ξηρή κατακρήμνιση αποτελεί σημαντικό τμήμα της ροής της σωματιδιακής ύλης από την ατμόσφαιρα στο θεωρούμενο μέσον.

3.6 Σύσταση υγρών κατακρημνίσεων – Συνέπειες για τα οικοσυστήματα

Ανακεφαλαιώνοντας, συμπεραίνουμε πως η ατμόσφαιρα είναι το μέσον το οποίο έχει τη δυνατότητα να διακινεί τη σωματιδιακή ύλη σε μεγάλες αποστάσεις. Τελικά, η σωματιδιακή ύλη, μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, αποτίθεται στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα του πλανήτη.

Η σύσταση των εδαφών, των εσωτερικών υδάτων και των ωκεανών επηρεάζεται από αυτή την ατμοσφαιρική συνεισφορά της ύλης. Το πιο γνωστό παράδειγμα του τρόπου με τον οποίον οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις επηρεάζουν υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα είναι οι όξινες βροχές. Οι μεταβολές στο pH των υδάτινων οικοσυστημάτων και των εδαφών σε διάφορα μέρη του κόσμου, όπως για παράδειγμα στη Βόρεια Ευρώπη και ιδιαίτερα στις Σκανδιναβικές χώρες, στον Καναδά και στις Ηνωμένες Πολιτείες, είναι σαφείς και έχουν μελετηθεί εκτενώς. Οι μεταβολές αυτές αποδίδονται στον όξινο χαρακτήρα των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων σαν αποτέλεσμα των εκπομπών στην ατμόσφαιρα όξινων ενώσεων από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Νιτρικά και θειικά ιόντα υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σαν συστατικά των ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Η ενσωμάτωσή τους στις σταγόνες του νερού και τους κρυστάλλους του πάγου των νεφών έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση των τιμών του pH των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι η οξύτητα ενός υδατικού διαλύματος εκφράζεται από την κλίμακα του pH το οποίο είναι ο αρνητικός λογάριθμός της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου σε ένα διάλυμα ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$). Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας διαλύεται στις σταγόνες της βροχής και σχηματίζει ανθρακικό οξύ. Λόγω αυτού του μηχανισμού, και στη θερμοκρασία των 20°C , το νερό της βροχής έχει pH ελαφρά όξινο και παίρνει την τιμή 5,6 η οποία θεωρείται ως το pH της «καθαρής» βροχής. Με αυτή την τιμή μπορεί να συγκριθεί το pH κάθε βροχής στην οποία έχουν ενσωματωθεί άλλα αέρια και σωματίδια. Για παράδειγμα, αν στη βροχή ενσωματωθούν προϊόντα οξειδωσίας των αερίων οξειδίων του θείου και του αζώτου, που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από διεργασίες καύσεων, παράγεται νιτρικό (HNO_3) και θειικό οξύ (H_2SO_4) αντίστοιχα. Αυτά τα ισχυρά οξέα δίστανται στο νερό της βροχής και απελευθερώνουν ιόντα υδρογόνου τα οποία είναι υπεύθυνα για τις μειωμένες τιμές του pH (4-5 ή και σπάνια μικρότερο του 4) στις όξινες βροχές.

Έχουμε ήδη συναντήσει σε προηγούμενες παραγράφους το σχηματισμό των νεφών μέσω πυρήνων συμπύκνωσης από ατμοσφαιρικά αερολύματα. Με αυτή τη διεργασία το θειικό οξύ ενσωματώνεται στις σταγόνες της βροχής.

Το έδαφος, οι καλυμμένες από βλάστηση περιοχές και τα φυσικά νερά είναι οι επιφάνειες στις οποίες αποτίθεται η όξινη βροχή. Στα εδάφη, η οξύτητα αυτή μπορεί να εξουδετερωθεί από τα αλκαλικά συστατικά τους αλλά και να «κινητοποιήσει» ή να διαλυτοποιήσει άλλα στοιχεία των εδαφών τα οποία πρακτικά, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, παραμένουν αδιάλυτα στο νερό. Τέτοια στοιχεία είναι το αργίλιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο, το κάλιο και το νάτριο τα οποία, αν το pH της βροχής έχει χαμηλή τιμή, αποχωρίζονται από τα εδάφη και περνούν, μέσω των αποπλύσεων, στα επιφανειακά νερά. Η ικανότητα του εδάφους να ανεχθεί την οξύτητα που εισάγεται μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων εξαρτάται από την αλκαλικότητα των εδαφών δηλαδή, από την ικανότητα του εδάφους να εξουδετερώσει αυτή την οξύτητα. Έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία περιπτώσεις δημιουργίας τοξικών συνθηκών για τους υδρόβιους οργανισμούς από τη διαλυτοποίηση αργιλίου και την ταυτόχρονη μείωση του pH σε υδάτινα οικοσυστήματα πχ σε λίμνες στην Β. Αμερική. Όταν το pH σε λιμναία οικοσυστήματα πέσει σε τιμές γύρω στο 5, η επιβίωση και αναπαραγωγή για πολλά είδη ψαριών γίνεται αδύνατη. Εξαφάνιση των πληθυσμών των ψαριών, λόγω της οξύτητας των νερών των λιμνών, έχει αναφερθεί για πολλές λίμνες στη Σουηδία. Υδάτινα οικοσυστήματα σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από συχνές χιονοπτώσεις απειλούνται από μία πιθανή μείωση του pH των νερών τους. Η οξύτητα ακινητοποιείται στο χιόνι και προς την άνοιξη που τα χιόνια λειώνουν, νερά χαμηλής οξύτητας ρέουν σε λίμνες και ποτάμια προκαλώντας απότομη μείωση του pH αυτών των νερών. Άλλη σοβαρή συνέπεια των μεταβολών που εισάγει η οξύτητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι η μείωση της ανάπτυξης των δένδρων στα δάση. Όταν διαλυτοποιούνται με ταχύτερους ρυθμούς τα συστατικά του εδάφους από τα νερά της βροχής, το έδαφος αποχωρίζεται σε μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα ορισμένα από τα διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά του. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μεταβολή της σύστασης του εδάφους η οποία μεταφράζεται είτε σε μείωση του ρυθμού ανάπτυξης των φυτικών ειδών είτε στην εξαφάνιση των πιο ευαίσθητων φυτικών ειδών σε αυτή τη μεταβολή.

Υπάρχουν όμως και παράγοντες οι οποίοι αντισταθμίζουν την οξύτητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Σωματίδια με προέλευση από την αιολική διάβρωση των εδαφών περιέχουν αλκαλικά συστατικά όπως πχ ασβεστίτη δηλαδή ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Αν τέτοια σωματίδια ενσωματωθούν στις σταγόνες της βροχής, εξουδετερώνουν την οξύτητα και μετατοπίζουν την τιμή του pH προς μεγαλύτερες τιμές. Άλλη πηγή αλκαλικότητας στη βροχή είναι η ύπαρξη αέριας αμμωνίας (NH_3) στην ατμόσφαιρα η οποία δεσμεύει τα ιόντα του υδρογόνου που περιέχονται στις σταγόνες της βροχής, παράγει αμμωνιακά ιόντα (NH_4^+) και με αυτό τον τρόπο εξουδετερώνει τη οξύτητα των βροχών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΑ ΚΑΙ ΒΙΟΑΕΡΟΖΟΛ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΕΡΟΖΟΛ

4.1 Ο ορισμός των νανοσωματιδίων

Τα νανοσωματίδια ανήκουν και αυτά στην κατηγορία των αεροζόλ και έχουν διάμετρο 1nm – 100 nm, ενώ τα υλικά που έχουν δομικά συστατικά μικρότερα από ένα μικρό σε τουλάχιστον μία διάσταση, λέγονται νανοϋλικά.

Το πρόθεμα νανο- που μπαίνει σε λέξεις που χρησιμοποιούνται πλέον καθημερινά, σημαίνει την διάσταση 1nm=10⁻⁹m. Νανοτεχνολογία επομένως είναι ο σχεδιασμός, η σύνθεση και η εφαρμογή υλικών και συστημάτων των οποίων το μέγεθος και το σχήμα έχουν επεξεργασθεί στην νανοκλίμακα (μεγέθη μερικών νανομέτρων, σε μία διάσταση τουλάχιστον). Η νανοτεχνολογία εκμεταλλεύεται τις ιδιαίτερες φυσικές, χημικές, μηχανικές, ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες των υλικών αυτών για να κάνει την καθημερινή ζωή μας ανετότερη.

Νανοτοξικολογία, είναι ένας σχετικά νέος κλάδος της Τοξικολογίας, που εξετάζει τα βλαπτικά-με την απαραίτητη κλιμάκωση- αποτελέσματα που έχουν τα νανοσωματίδια στη Δημόσια Υγεία. Η κλιμάκωση των βλαπτικών αποτελεσμάτων των νανοσωματιδίων, γίνεται με βάση τον Δείκτη Ποιότητας Αέρα(Air Quality Index, AQI), μια παράμετρο που υπολογίζεται με βάση στατιστικές μετρήσεις για ένα ρύπο σε μια περιοχή, και έχει εισαχθεί από την EPA(Environmental Protection Agency).Ο AQI υπολογίζεται για κάθε ρύπο ξεχωριστά και η βλαπτική επίδραση του ρύπου στο περιβάλλον είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερη είναι η αντίστοιχη τιμή του AQI.

Ένα παράδειγμα τέτοιων εκτιμήσεων, που δίνει την τελική επίδραση, με βάση τον AQI, προκειμένου για αιωρούμενα σωματίδια, δίνεται στον πίνακα 6.

Πίνακας 4.1: Εκτίμηση επιδράσεων αιωρούμενων σωματιδίων

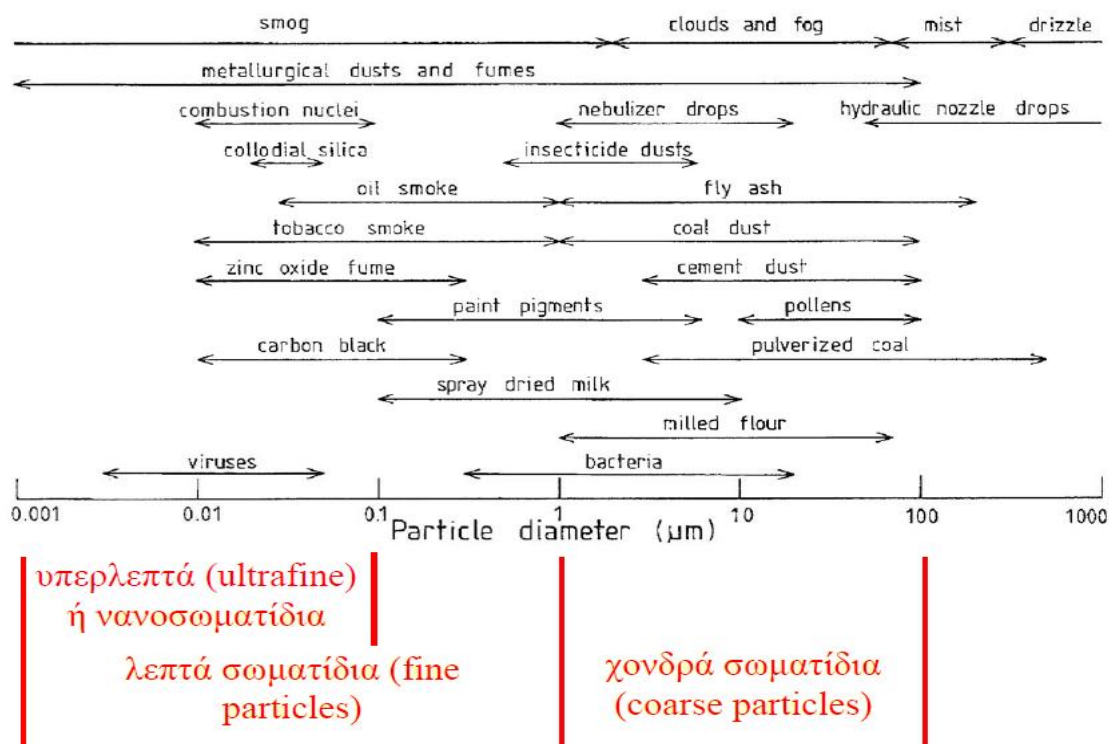
AQI	MP _{2.5} (μg/m ³)	MP ₁₀ (μg/m ³)	Περιγραφή
0-50	0.0-15.4	0.54	Καλή
51-100	15.5-40.4	55-154	Μέτρια
101-150	40.5-65.4	155-254	Βλαπτική για ευαίσθητες ομάδες πληθυσμού
151-200	65.5-150.4	255-354	Βλαπτική γενικά
201-300	150.5-250.4	355-452	Τοξική

Όπου: MP_{2.5}= Σωματίδια με διάμετρο <2,5μm

MP₁₀= Σωματίδια με διάμετρο < 10 μm

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται το εύρος διακύμανσης των σωματιδίων συγκριτικά με τη διάμετρο τους.

Σχήμα 4.1: Διακόμανση των σωματιδίων συγκριτικά με το εύρος της διαμέτρου τους



Νανοσωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 100nm υπάρχουν μέσα στα ατμοσφαιρικά αεροζόλ σε μεγάλη συνήθως αναλογία, σε ποσότητες που κυμαίνονται τυπικά μεταξύ των 5.000-10.000 σωματίδια/ml ενώ σε περιπτώσεις επεισοδίων ρύπανσης φθάνουν τα 3.106 σωματίδια/ ml.

4.2 Η φυσική ραδιενέργεια στον αέρα

Η φυσική ραδιενέργεια στον αέρα οφείλεται κυρίως στα ισότοπα του ραδονίου (^{222}Rn και ^{220}Rn), καθώς και τα θυγατρικά τους ραδιενεργά ισότοπα (^{214}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb κ.α.). Οι συγκεντρώσεις τους στον αέρα παρουσιάζουν σημαντική κύμανση, οφειλόμενη στη συγκέντρωση στο χώμα των αντίστοιχων ισωτόπων του ραδίου (^{226}Ra , ^{224}Ra), την απόσταση από το έδαφος, το είδος και το πορώδες του χώματος, τη θερμοκρασία και την υγρασία, του αέρα, διάφορα καιρικά φαινόμενα κλπ.

Ένα άλλο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο το οποίο ανιχνεύεται στον αέρα είναι το ^7Be . Το ^7Be είναι ισότοπο κοσμικής προέλευσης, παράγεται στην στρατόσφαιρα και την τροπόσφαιρα και μεταφέρεται στο έδαφος λόγω βαρύτητας και λόγω των υγρών κατακρημνίσεων (πχ. βροχή). Το ^7Be δεν έχει ραδιοβιολογική σημασία, αλλά η μελέτη της συγκέντρωσής του στον αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μελέτη ατμοσφαιρικών μετακινήσεων. Η συγκέντρωσή του ^7Be στον αέρα κυμαίνεται ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες, το ύψος, τις μετεωρολογικές συνθήκες, την ηλιακή ακτινοβολία κλπ.

Τέλος, στον αέρα είναι δυνατόν να ανιχνεύονται και ραδιενεργά ισότοπα λόγω αιωρούμενης σκόνης, προερχόμενης από επαναιώρηση από το έδαφος, ηφαιστειακή δραστηριότητα, διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (πχ. βιομηχανία), δασικές πυρκαγιές κλπ.

4.3 Δειγματοληψία ραδιενεργού αεροζόλ

Η συγκέντρωση ραδιενεργών σωματιδίων στον αέρα προσδιορίζεται με φίλτρα τα οποία συλλέγουν όλα τα αιωρούμενα σωματίδια (όχι μόνο τα ραδιενεργά) και εν συνεχεία μέτρηση της ραδιενέργειας στα φίλτρα αυτά. Η ακρίβεια της μέτρησης θα πρέπει να προσδιορισθεί για τη δεδομένη πηγή, φίλτρο και γεωμετρία του ανιχνευτή. Τα φίλτρα συσκευάζονται σε συγκεκριμένη γεωμετρία πριν τοποθετηθούν στον ανιχνευτή η οποία θα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη βαθμονόμηση του ανιχνευτικού συστήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις αντί για φίλτρα χρησιμοποιούνται μεταλλικές επιφάνειες συλλογής (πχ. από Al) που μας δίνουν το πλεονέκτημα της πολλαπλής χρήσης, δεδομένου ότι καθαρίζονται ενδελεχώς μετά από κάθε χρήση, με τους ίδιους, ωστόσο, περιορισμούς αναφορικά με τη γεωμετρία του δείγματος.

Το φιλτράρισμα είναι η πιο διαδεδομένη διαδικασία δειγματοληψίας αεροζόλ. Συνδυάζει χαμηλό κόστος και απλότητα στην εκτέλεση. Κατά τις δειγματοληψίες αεροζόλ με φίλτρα, ο αέρας διέρχεται μέσα από το φίλτρο, ενώ τα σωματίδια του αεροζόλ κατακρατούνται πάνω στο φίλτρο.

Τα φίλτρα μπορούν να εξεταστούν για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρυπαντών, είτε άμεσα μετά τη δειγματοληψία είτε να φυλαχτούν καταλαμβάνοντας μικρό όγκο, για μεταγενέστερη ανάλυση. Η επιλογή κατάλληλης αντλίας, μέσου φιλτραρίσματος και μεγέθους του φίλτρου δίνει πολύ μεγάλη ευελιξία τόσο στην ποσότητα δείγματος που τελικά θα συλλεχθεί όσο και στη δειγματοληψία.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την είσοδο ή όχι των σωματιδίων στο συσκευή της δειγματοληψίας μπορούν να είναι το μέγεθος, η αδράνεια των σωματιδίων, η βαρύτητα, η συνεκτικότητα της ροής και οι συνθήκες ανέμου που επικρατούν στην περιοχή δειγματοληψίας. Η ομοιόμορφη κατανομή της ροής είναι ιδιαίτερα επιθυμητή όταν οι αναλύσεις γίνονται απευθείας πάνω στο φίλτρο ή όταν αναλύεται τμήμα μόνο του φίλτρου.

Η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας της ροής και της διάρκειας δειγματοληψίας είναι εξίσου σημαντική με τη μέτρηση της ποσότητας δείγματος. Η συγκέντρωση του αεροζόλ προσδιορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας δείγματος (αεροζόλ που έχει κατακρατηθεί από τα φίλτρα) προς το συνολικό όγκο αέρα που αναρροφήθηκε.

Η συνολική μάζα του δείγματος που συλλέγεται από το φίλτρο προκύπτει από τη ζύγιση του φίλτρου, πριν και μετά τη δειγματοληψία και ισούται με τη διαφορά μάζας που προκύπτει

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

5.1 Βασική ορολογία

Οι πιο συνήθεις κατηγορίες αεροζόλ είναι :

1. Μονοδιάσπαρτο αεροζόλ (monodisperse aerosol): σωματίδια ενός μεγέθους
2. Πολυδιάσπαρτο αεροζόλ (polydisperse aerosol): ευρύ φάσμα μεγέθους σωματιδίων
3. Πρωτογενές σωματίδιο (primary particle): εισάγεται στο αέριο μέσο σε υγρή ή στερεά μορφή
4. Δευτερογενές σωματίδιο (secondary particle): σχηματίζεται με μετατροπή ατμώδους φάσης σε σωματιδιακή (gas to particle conversion)

5.2 Μηχανισμοί κίνησης σωματιδίων

Για την εκτίμηση της ρύπανσης σε μια περιοχή, οι γίνεται χρήση διαφόρων μαθηματικών μοντέλων. Ένα μαθηματικό μοντέλο είναι προϊόν της Υπολογιστικής Μηχανικής και αποτελείται από ένα σύστημα μαθηματικών εξισώσεων, που εκτός των άλλων λαμβάνει υπόψη και τον μηχανισμό κίνησης των σωματιδίων. Αναφορικά κάποιοι μηχανισμοί κίνησης σωματιδίων είναι οι εξής:

1. Διάχυση
2. Αδρανειακή κίνηση – πρόσκρουση
3. Άλλοι μηχανισμοί κίνησης:
4. Κίνηση εντός ηλεκτρικού πεδίου
5. Φορετική κίνηση (π.χ. θερμοφόρηση, φωτοφόρηση κλπ.)

5.3 Διάχυση σωματιδίων

Τα σωματίδια βομβαρδιζόμενα συνεχώς από τα μόρια του αερίου εκτελούν τυχαία κίνηση (κίνηση Brown). Το μακροσκοπικό αποτέλεσμα αυτού του «βομβαρδισμού» είναι η κίνηση αντίθετα από την κλίση της συγκέντρωσης και αποτελεί σημαντικό μηχανισμό για λεπτά σωματίδια (< 1 μm).

Νόμος του Fick – Εξίσωση Stokes-Einstein

$$\mathbf{J}_p = -D \nabla n_p \quad \text{πχ. κατά } x: \quad J_{px} = -D \frac{\partial n_p}{\partial x}$$

$$D = \frac{kT_g C}{3\pi\mu_g d_p} \quad (\text{m}^2 \text{ s}^{-1}) \quad \text{Εξίσωση Stokes-Einstein}$$

Μέση τετραγωνική μετατόπιση: $x_{rms} = \sqrt{2Dt}$

5.4 Ροή αεροζόλ - Μεταφορά και εναπόθεση σωματιδίων

1. Συμμεταφορά (convection)
2. Διάχυση, αδρανειακή πρόσκρουση, βαρυτική καθίζηση, αναχαίτιση (interception), κλπ. (άλλα εξωτερικά πεδία)

5.4.1 Γενική Δυναμική Εξίσωση –GDE (General Dynamic Equation) – για συνεχή κατανομή μεγέθους ως προς τον αριθμό

- Ανεξάρτητες μεταβλητές: dp ή v, r, t
- Εξαρτημένη μεταβλητή: $n(v; r, t)$

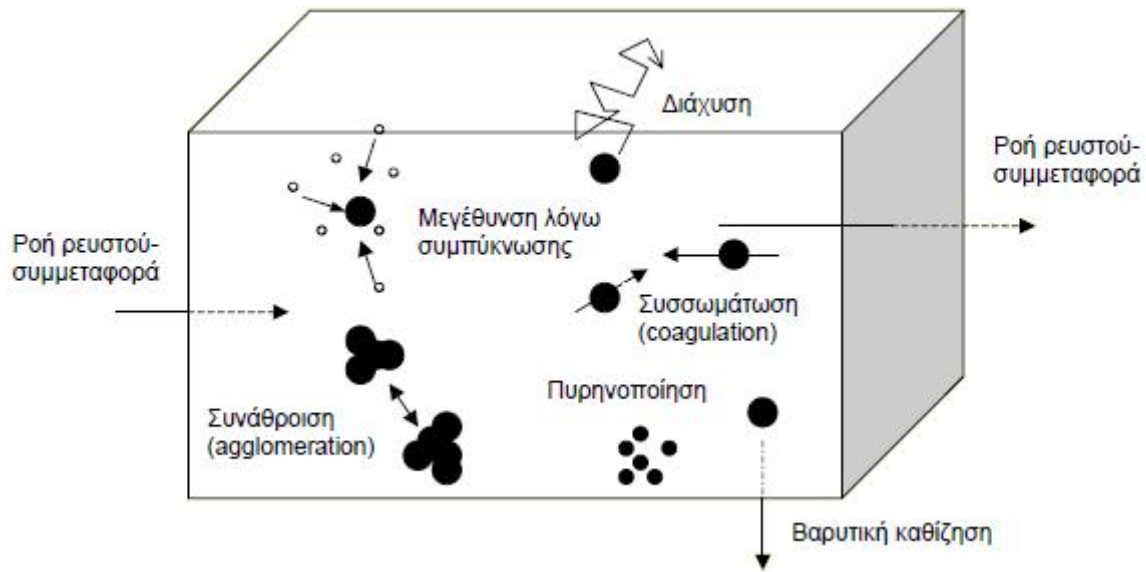
$$\frac{\partial n(v; \mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{u}) = \nabla \cdot D\nabla n + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{g-p}} + \left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{coag}}$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{g-p}} = J_{\text{nuc}} \delta(v - v^*) - \frac{\partial}{\partial v} \left(n \frac{dv}{dt} \right)$$

$$\left. \frac{\partial n}{\partial t} \right|_{\text{coag}} = \frac{1}{2} \int_0^v d\tilde{v} K(\tilde{v}, v - \tilde{v}) n(\tilde{v}) n(v - \tilde{v}) - n(v) \int_0^\infty d\tilde{v} K(v, \tilde{v}) n(\tilde{v})$$

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η Γενική Δυναμική Εξίσωση –GDE (General Dynamic Equation)– που περιγράφει την κατανομή των σωματιδίων.

Σχήμα 5.1: Γενική Δυναμική Εξίσωση –GDE (General Dynamic Equation)



5.5 Διάταξη Μοντέλου Διασποράς

Τα μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου μετεωρολογικές μεταβλητές όπως ταχύτητα, διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία, κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας, ύψος στρώματος ανάμειξης κ.ά. Τα πιο λεπτομερή μοντέλα διασποράς, χρειάζονται, τρισδιάστατα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου.

Τα μοντέλα ποιότητας αέρα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση διάφορα κριτήρια, όπως για παράδειγμα:

- τη χωρική κλίμακα (τοπική, τοπική έως περιφερειακή, περιφερειακή έως ηπειρωτική, παγκόσμια)
- τη χρονική κλίμακα (μοντέλα επεισοδίων, στατιστικά μοντέλα για μακροχρόνιες περιόδους)
- τη μαθηματική προσέγγιση (εμπειρικά, Ουλεριανά και Λαγκραντζιανά μοντέλα)
- τη μεταχείριση διαφόρων διεργασιών (χημικός μετασχηματισμός, υγρή και ξηρή εναπόθεση) και
- τη πολυπλοκότητα της προσέγγισης (Γκαουσιανός τύπος, ημιεμπειρικός, μοντέλα καννάβου)

Οι δυνατότητες πρακτικής χρήσης των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας προσδιορίζονται από το είδος των συμπερασμάτων που μπορούν να εξαχθούν από την εφαρμογή τους (ποιοτική σκοπιά) και από την ακρίβεια αυτών των συμπερασμάτων (ποσοτική προσδιορισμός).

Για την ποιοτική προσέγγιση δεν απαιτείται τίποτε παραπάνω από την κατανόηση των χαρακτηριστικών και των ορίων εφαρμογής του μοντέλου. Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του μοντέλου απαιτείται επιπρόσθετα η γνώση:

- της ακρίβειας των δεδομένων εισόδου και του κατά πόσον αυτή επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου
- της αβεβαιότητας στις προσεγγίσεις και στις παραμετροποιήσεις του μοντέλου και
- των μεθοδολογιών αποτίμησης του κατά πόσο τα αποτελέσματα του μοντέλου αναπαριστούν την πραγματικότητα

5.6 Μοντέλα υπολογισμού διασποράς αερίων ρυπαντών

Τα μοντέλα διασποράς ρύπων μπορούν να διακριθούν και με βάση το είδος της μαθηματικής προσέγγισης που χρησιμοποιούν για τη διεξαγωγή των υπολογισμών. Έτσι, οι διάφοροι τύποι μοντέλων που χρησιμοποιούνται σήμερα αναλόγως των απαιτήσεων της κάθε εφαρμογής είναι:

- Εμπειρικά μοντέλα, τα οποία διακρίνονται σε *Γκαουσιανά μοντέλα* συνεχούς έκλυσης και *μοντέλα κουτιού* (box models) για στιγμιαία έκλυση
- Ουλεριανά μοντέλα και
- Λαγκραντζιανά μοντέλα.

Από τους τύπους των μοντέλων αυτών, ο εμπειρικός και ο Λαγκραντζιανός συνήθως χρησιμοποιούνται για υπολογισμούς διασποράς αδρανών ρύπων ενώ τα Ουλεριανά μοντέλα είναι σε θέση να προσομοιάσουν και χημικούς μετασχηματισμούς και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό επιπέδων χημικά ενεργών ρύπων όπως είναι για παράδειγμα το όζον.

5.6.1 Εμπειρικά μοντέλα Γκαουσιανού τύπου

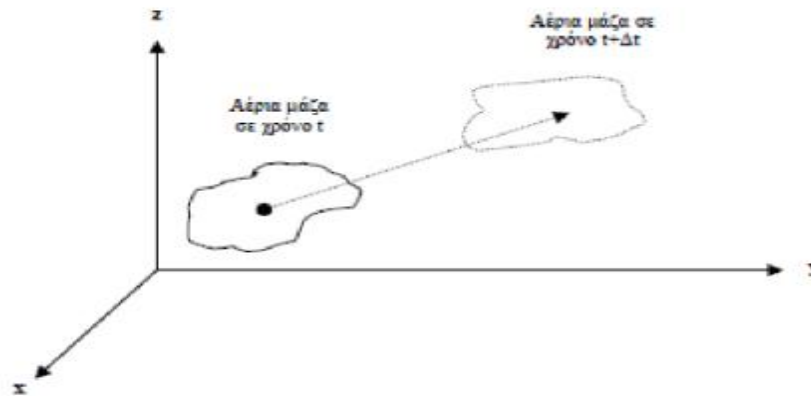
Η μαθηματική μορφή των Γκαουσιανών μοντέλων ξεκινάει από την μαθηματική λύση του θεωρητικού προβλήματος σημειακής πηγής συνεχούς έκλυσης σε ένα άπειρο ιδεατό μέσο σταθεράς διάχυσης. Οι διάφοροι συντελεστές μετατρέπονται σε εμπειρικές παραμέτρους και γίνονται διορθώσεις για φαινόμενα εναπόθεσης, απωλειών κλπ. Υπάρχει πληθώρα μοντέλων αυτού του τύπου. Το μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι η απλότητα τους και οι ελάχιστοι χρόνοι υπολογισμού. Θεωρούνται κατάλληλα σε εφαρμογές με απλές ατμοσφαιρικές συνθήκες με επαρκή συνοπτικό άνεμο, ομαλή τοπογραφία και ομοιόμορφη χρήση γης αλλά είναι ακατάλληλα για πιο σύνθετες εφαρμογές όπως οι περιπτώσεις ανομοιογενούς τοπογραφίας και σύνθετων μετεωρολογικών συνθηκών.

5.6.2 Ουλεριανά μοντέλα

Στην κατηγορία των Ουλεριανών μοντέλων η μαθηματική προσέγγιση γίνεται με τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς συνεχούς μέσου ολοκληρωμένες στην κλίμακα χρόνου της τύρβης (Reynolds). Υπάρχουν πολλές παραλλαγές των παραπάνω εξισώσεων στην βιβλιογραφία πιο σύνθετες ή πιο απλές ανάλογα με την φύση της πηγής, την παρουσία υγρής ατμόσφαιρας, τις χημικές αντιδράσεις, τις αλλαγές φάσεων στον ρυπό και την ατμόσφαιρα κλπ.

Τα Ουλεριανά μοντέλα εφαρμόζονται όταν υπάρχουν ταυτόχρονα πολλές πηγές ρυπαντών ή όταν πρέπει να υπολογιστούν συγκεντρώσεις ρύπων για μια περιοχή και όχι μόνο σημείο συγκεκριμένο. Επίσης, εφαρμόζονται όταν συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ρύπων της ατμόσφαιρας. Τα Ουλεριανά μοντέλα έχουν την ευχέρεια να χειρίζονται προβλήματα όπου τα φαινόμενα της ατμόσφαιρας και επίλυσης ρύπων είναι σύνθετα (τρισδιάστατες ροές, ανωστικά φαινόμενα, αλλαγές φάσεων) και η τοπογραφία είναι πολύπλοκη.

Σχήμα 5.2: Σύστημα αναφοράς Ουλεριανού μοντέλου



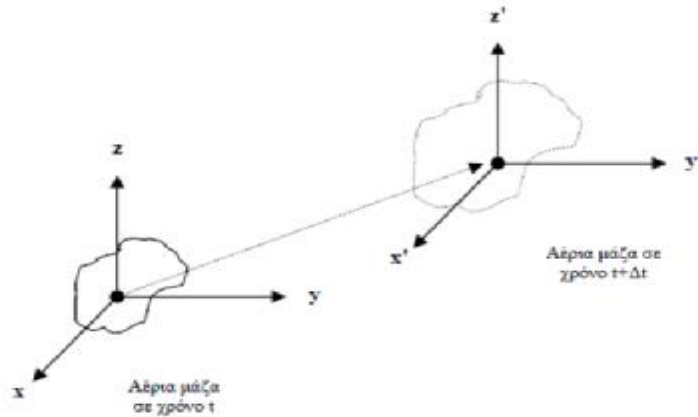
5.6.3 Λαγκραντζιανά μοντέλα

Τα Λαγκραντζιανά μοντέλα εφαρμόζονται στην προσομοίωση της μεταφοράς ρυπαντών σε μεγάλες αποστάσεις ή για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου σε ένα σημείο συγκεκριμένο αποδέκτη.

Τα Λαγκραντζιανά μοντέλα αποτελούνται από ένα σύνολο αλγορίθμων για την δημιουργία ρεαλιστικών τροχιών υποθετικών (“υπολογιστικών”) σωματιδίων, των οποίων την κίνηση παρακολουθούν κατά μήκος της ατμοσφαιρικής ροής και μέσω των οποίων προσομοιώνεται η δυναμική της ατμόσφαιρας. Σε κάθε σωματίδιο “προσδίδεται” μία μάζα δεδομένου ρύπου, η οποία μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε χρονικά μεταβαλλόμενη, ώστε να περιγράφονται απώλειες λόγω εναπόθεσης ή λόγω χημικών αντιδράσεων. Έτσι, η κατανομή της μάζας των σωματιδίων στην περιοχή προσομοίωσης επιτρέπει τον υπολογισμό τρισδιάστατων πεδίων συγκεντρώσεων μάζας κάτω από δεδομένες υπολογιστικές παραδοχές.

Λαγκραντζιανά μοντέλα σωματιδίων δεν ενδείκνυνται ωστόσο για την περιγραφή μη γραμμικών φυσικών διεργασιών, όπως είναι πρακτικά όλοι οι μηχανισμοί χημικών αντιδράσεων, και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται κυρίως στην περίπτωση των αδρανών ρύπων. Άλλο μειονέκτημα των συγκεκριμένων μοντέλων είναι η δυσκολία που έχουν στο να λάβουν υπόψη φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε ιδιαίτερες ανομοιογενείς μετεωρολογικές γκαταστάσεις, όπως διαδικασίες ανταλλαγής μεταξύ των αερίων πακέτων αλλά και την διάτμηση του αέρα.

Σχήμα 5.3: Σύστημα αναφοράς Λαγκρανζιανού μοντέλου



Παρακάτω θα αναλύσουμε μερικά από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα υπολογισμού αέριας ρύπανσης που εφαρμόζονται σε Ευρώπη και Αμερική.

1. Το *Industrial Source Complex Short-term Model (ISCST2)*, το οποίο αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US-EPA), είναι τύπου Gauss και χρησιμοποιείται για τη διασπορά πρωτογενών ρύπων (SO₂B, NO_BxB, σωματίδια, κλπ.) σε τοπικό επίπεδο και σε αποστάσεις περίπου μέχρι 50 km από την πηγή.
2. Το *Windrose Trajectory Model (WTM)*, το οποίο αναπτύχθηκε στο Harwell Laboratory της Μεγάλης Βρετανίας, και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διάχυσης πρωτογενών και δευτερογενών ρυπαντών σε περιφερειακό επίπεδο, καλύπτοντας το σύνολο της Ευρώπης, αλλά και μέρος της Δυτικής Ασίας.
3. Το *Source – Receptor Ozone Model (SROM)*, το οποίο είναι ένα εκτιμητικό μοντέλο σχηματισμού όζοντος σε περιφερειακή κλίμακα που καλύπτει το σύνολο της Ευρώπης.

5.6.4 Διασπορά ρυπαντών σε τοπική κλίμακα - Industrial Source Complex Short-term

Model

Το μοντέλο ISCST2 (Brode and Wang, 1992) χρησιμοποιείται προκειμένου να προσομοιωθεί η διασπορά πρωτογενών αέριων ρυπαντών (SO₂, NO_x, CO, σωματίδια, κλπ.) σε αποστάσεις μέχρι περίπου 50 km από την πηγή. Γίνεται η παραδοχή ότι σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα έχουν μικρή επίδραση στις συγκεντρώσεις των πρωτογενών αέριων ρυπαντών, εκφράζοντας τις συγκεντρώσεις NO και NO₂ ως NO_x (European Commission, 2005). Αντιθέτως, το μοντέλο δέχεται ότι οι συγκεντρώσεις των πρωτογενών ρυπαντών στο έδαφος και σε αποστάσεις κοντινές από την καμινάδα που εκλύονται, εξαρτώνται σημαντικά από τη διάχυση και μίξη των καυσαερίων στον κατακόρυφο άξονα, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας και από την ύπαρξη και το ύψος επιπέδων αναστροφής. Με βάση τις παραδοχές αυτές το μοντέλο χρησιμοποιεί μια μέθοδο διασποράς των ρυπαντών κατά Gauss, η οποία περιγράφεται από τη βασική εξίσωση:

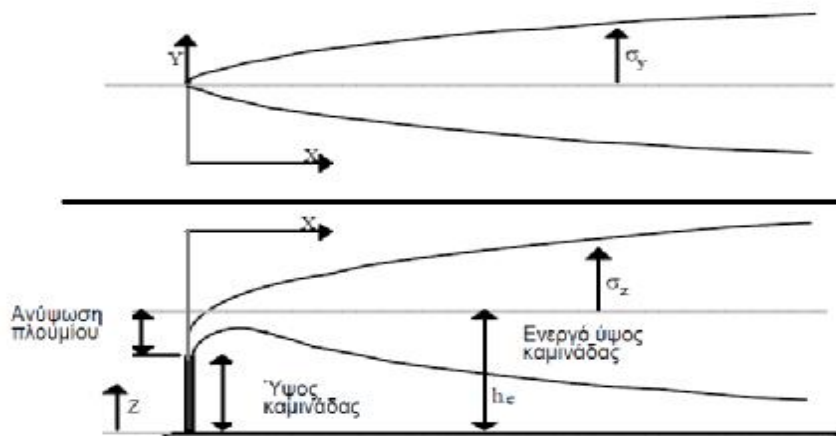
$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot u \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z - h_e)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + h_e)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right] \right\}$$

όπου $c(x,y,z)$ είναι η συγκέντρωση του ρυπαντή στη θέση με συντεταγμένες (x,y,z) , Q ο ρυθμός εκπομπής του ρυπαντή (μάζα στη μονάδα του χρόνου), u η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της εκπομπής, σ_y η τυπική απόκλιση της εγκάρσιας διασποράς σε απόσταση x από την πηγή, σ_z η τυπική απόκλιση της κάθετης διασποράς σε απόσταση x από την πηγή, και h_e το ενεργό ύψος εκπομπής. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή θεωρεί την ύπαρξη ιδανικών καταστάσεων όσον αφορά στο έδαφος και στις μετεωρολογικές συνθήκες, έτσι ώστε το πλούμιο να μεταφέρεται με τον άνεμο σε ευθεία γραμμή, ενώ δυναμικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη διασπορά, όπως για παράδειγμα η επίδραση του ανέμου στον κατακόρυφο άξονα, αγνοούνται (Σχήμα 5.4).

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει ωριαίες συγκεντρώσεις SO_2 , NO_x , CO , σωματιδίων, κλπ., για ένα έτος στο κέντρο κάθε κελιού διαστάσεων 10×10 km κανάβου 100×100 km, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι έχει τοποθετηθεί η πηγή εκπομπής. Οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις των ρυπαντών που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ετήσια βάση προκύπτουν ως η μέση τιμή των εκτιμώμενων ωριαίων τιμών. Το μοντέλο τροφοδοτείται με μετεωρολογικό αρχείο, χαρακτηριστικό της περιοχής ενδιαφέροντος, που περιέχει αναλυτικές μετεωρολογικές πληροφορίες σε ωριαία βάση και για διάρκεια ενός έτους. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν κατεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου, μέση θερμοκρασία ατμόσφαιρας, κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας και ύψος ανάμιξης, και τιμή εκθέτη της εκθετικής συνάρτησης αύξησης της έντασης ανέμου με το ύψος

Εκτός από τη διάχυση σε τοπική κλίμακα των πρωτογενών ρυπαντών που εκλύονται από καμινάδα, το μοντέλο ISCST2 χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης και για τη διασπορά των διάχυτων εκπομπών.

Σχήμα 5.4: Διασπορά πλουμίου κατά Gauss



5.6.5 Διασπορά ρυπαντών σε περιφερειακή κλίμακα - Windrose Trajectory Model

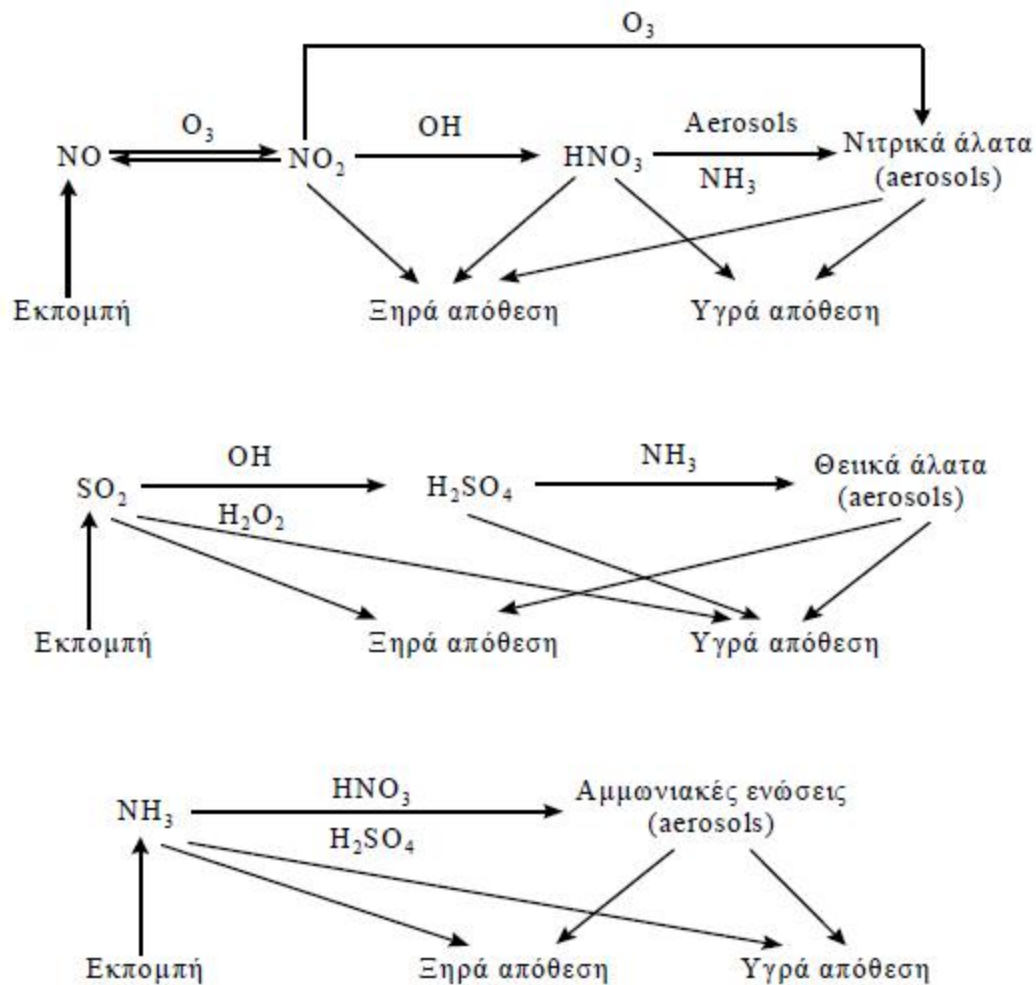
Οι αέριοι ρυπαντές που εκπέμπονται στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον λαμβάνουν μέρος σε χημικές αντιδράσεις και έχουν σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό χημικών ενώσεων (θεικών και νιτρικών αλάτων καθώς και άλλων ενώσεων που περιέχουν S και N υπεύθυνων για την όξινη απόθεση γνωστά ως aerosols) καθώς και όζοντος. Από πρόσφατες έρευνες για τις επιπτώσεις της ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα προκύπτει ότι οι δευτερογενώς παραγόμενοι στην ατμόσφαιρα ρυπαντές είναι δυνατόν να προκαλέσουν

σημαντικές διαταραχές και επομένως δεν θα πρέπει να αγνοούνται σε μια διαδικασία εκτίμησης του μεγέθους τους σε φυσικούς ή/και χρηματικούς όρους.

Με την αύξηση της απόστασης από την πηγή εκπομπής το πλούμιο των εκπομπών διαχέεται τόσο στον οριζόντιο όσο και στον κατακόρυφο άξονα. Έτσι, έξω από την τοπική κλίμακα (δηλαδή σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 km από την καμινάδα) μπορεί να θεωρηθεί ότι οι αέριοι ρυπαντές έχουν διαχυθεί και αναμιχθεί πλήρως κατά τον κατακόρυφο άξονα, σε όλο το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα. Ταυτόχρονα, εξαιτίας και του χρονικού διαστήματος που έχει μεσολαβήσει ώστε το πλούμιο των εκπομπών να μεταφερθεί πέρα της τοπικής κλίμακας, οι χημικές μετατροπές δεν μπορούν πλέον να αγνοηθούν. Με βάση τα παραπάνω για την εκτίμηση της ρύπανσης σε περιφερειακή κλίμακα χρησιμοποιούνται συνήθως μοντέλα που προσομοιάζουν με απλουστευμένο τρόπο τη μεταφορά των ρυπαντών, ενώ αναπαριστούν με σημαντικό βαθμό λεπτομέρειας τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Για την εκτίμηση σε περιφερειακή κλίμακα των συγκεντρώσεων και της εναπόθεσης όξινων συστατικών που παράγονται στην ατμόσφαιρα λόγω της εκπομπής αερίων ρυπαντών από βιομηχανικές δραστηριότητες, χρησιμοποιείται το Windrose Trajectory Model (WTM), το οποίο είναι τύπου Langrange και υιοθετεί μια σχετικά απλή μέθοδο διάχυσης των ρυπαντών στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον αλλά μια λεπτομερή προσομοίωση των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα, οι οποίες και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6 (Derwent and Nodop 1986, Derwent et al 1988). Βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι οι ρυπαντές σε μεγάλες αποστάσεις έχουν αναμιχθεί κατά τον κατακόρυφο άξονα του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος. Επιπρόσθετα, το μοντέλο προσομοιάζει την κίνηση αερίων μαζών (air parcels) σε ένα σταθερό ύψος ανάμιξης (~800 m) οι οποίες κινούνται με μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ανέμου. Για τον υπολογισμό σε κάθε γεωγραφική θέση των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων των ρυπαντικών φορτίων λαμβάνονται υπόψη ανεμολογικά δεδομένα εμφάνισης και έντασης ανέμου από 24 διαφορετικές κατευθύνσεις καθώς και άλλα μετεωρολογικά δεδομένα στη θέση του αποδέκτη, τα οποία προέρχονται από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Μετεωρολογίας (Nordeng 1986).

Το WTM έχει ενσωματωθεί στην υπολογιστική πλατφόρμα Ecosense (IER, 2004) και η ανάλυση των επιπτώσεων της αέριας ρύπανσης εκτείνεται σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων από την πηγή, καλύπτοντας ολόκληρη την Ευρωπαϊκή ήπειρο καθώς και περιοχές της Ασίας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5. Χρησιμοποιείται η κλίμακα του EMEP 50 όπου κάθε κελί έχει διαστάσεις 50x50 km ενώ οι συγκεντρώσεις των ρυπαντικών φορτίων υπολογίζονται στο κέντρο του κάθε κελιού της κλίμακας. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης με το μοντέλο WTM εξετάστηκαν οι επιπτώσεις σε περιφερειακή κλίμακα, και συγκεκριμένα στη δημόσια υγεία, στην αγροτική παραγωγή και στα υλικά των PM₁₀, SO₂, NO_x, aerosols (θειικά και νιτρικά), και διαφόρων όξινων συστατικών.

Σχήμα 5.5: Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και εμπεριέχονται στο WTM (Derwent et al 1988).



5.6.6 Μοντέλο σχηματισμού όζοντος σε περιφερειακή κλίμακα – Source-Receptor

Ozone Model

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων του όζοντος στους φυσικούς αποδέκτες έχει ενσωματωθεί στην υπολογιστική πλατφόρμα Ecosense το μοντέλο Source-Receptor Ozone Model (SROM) (IER, 2004), το οποίο με βάση τις ετήσιες εκπομπές NO_x υπολογίζει τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις O_3 στο περιβάλλον αναφοράς, που αποδίδονται στη λειτουργία μιας βιομηχανικής μονάδας, καθώς και διάφορους δείκτες συγκέντρωσης (π.χ. συνολική συγκέντρωση όζοντος πάνω από 40 ppbV ή πάνω από 60 ppbV). Το εν λόγω μοντέλο βασίζεται στα αποτελέσματα του μοντέλου EMEP MSC-W (Simpson et al 1997) το οποίο είναι ένα αναλυτικό μοντέλο όζοντος τύπου Langrange και έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση της μείωσης των εκπομπών NO_x και VOC από κάθε χώρα της Ευρώπης στα επίπεδα συγκέντρωσης O_3 των λοιπών χωρών της Ευρώπης (European Commission, 2005). Το επίπεδο χωρικής ανάλυσης περιορίζεται από την ανάλυση του μοντέλου EMEP MSC-W, το οποίο χρησιμοποιεί την κλίμακα EMEP 150 η οποία είναι ίδιου

προσανατολισμού με την κανάβο EMEP 50, κάθε κελί όμως έχει διαστάσεις 150 x 150 km. Με άλλα λόγια κάθε κελί της κανάβου EMEP 150 εμπεριέχει 9 κελιά της κανάβου EMEP 50.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

6.1 Εκτίμηση επιπτώσεων σε φυσικούς όρους

Η επίδραση των αυξημένων συγκεντρώσεων των εκπεμπόμενων φορτίων στους φυσικούς αποδέκτες εκτιμάται, με τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης (dose-response functions) οι οποίες αναπτύσσονται από διάφορους επιστημονικούς κλάδους με τη χρήση κατάλληλων στατιστικών μεθόδων. Για παράδειγμα, οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στη δημόσια υγεία εκτιμώνται με την αξιοποίηση κατάλληλων επιδημιολογικών μελετών, οι οποίες συσχετίζουν μαθηματικά και για διάφορες πληθυσμιακές ομάδες, παραμέτρους της ανθρώπινης υγείας με τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα οποία εκτίθενται. Με παρόμοιο τρόπο οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στη γεωργία και στα κτίρια εκτιμώνται με βάση συναρτήσεις έκθεσης-απόκρισης που συσχετίζουν την αγροτική παραγωγή ή την απώλεια μάζας των υλικών με τα επίπεδα ρύπανσης, κλπ.

Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονισθεί ότι λόγω της συνέργιας μιας πληθώρας παραμέτρων, η συσχέτιση μεταξύ αυξημένων συγκεντρώσεων ρυπαντικών φορτίων και εκτιμώμενων επιπτώσεων δεν γίνεται εύκολα αποδεκτή ως σχέση αιτίου-αιτιατού και εμπεριέχει σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας. Γενικότερα, η υλοποίηση τέτοιου είδους μελετών και η εξαγωγή συγκεκριμένων συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης επιτυγχάνεται με τη μελέτη της συμπεριφοράς μικρών ή μεγαλύτερων ομάδων αποδεκτών υπό την επίδραση του υπό θεώρηση φορτίου κάτω από συγκεκριμένες κλιματολογικές και ιστορικές συνθήκες. Η μεταφορά επομένως των αποτελεσμάτων αυτών και η χρησιμοποίησή τους σε παρεμφερείς ομάδες αποδεκτών που ζουν κάτω από διαφορετικές συνθήκες είναι αρκετά προβληματική και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας αβεβαιότητας από τη χρησιμοποίηση συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης αποτελεί το γεγονός ότι θα πρέπει τα αποτελέσματα των διεξαχθέντων επιδημιολογικών μελετών, που συνήθως αφορούν μεγάλες μεταβολές των υπό θεώρηση φορτίων, να προεκταθούν έτσι ώστε να καλύπτουν και πολύ μικρές μεταβολές των φορτίων αυτών που συνήθως αναμένονται από τη λειτουργία μιας συγκεκριμένης βιομηχανικής μονάδας.

Μαθηματικά οι συναρτήσεις έκθεσης-απόκρισης είναι εξισώσεις που συσχετίζουν τη μεταβολή Y που υφίσταται ένας αποδέκτης από την έκθεσή του σε ένα φορτίο X που εκπέμπεται από μια δραστηριότητα:

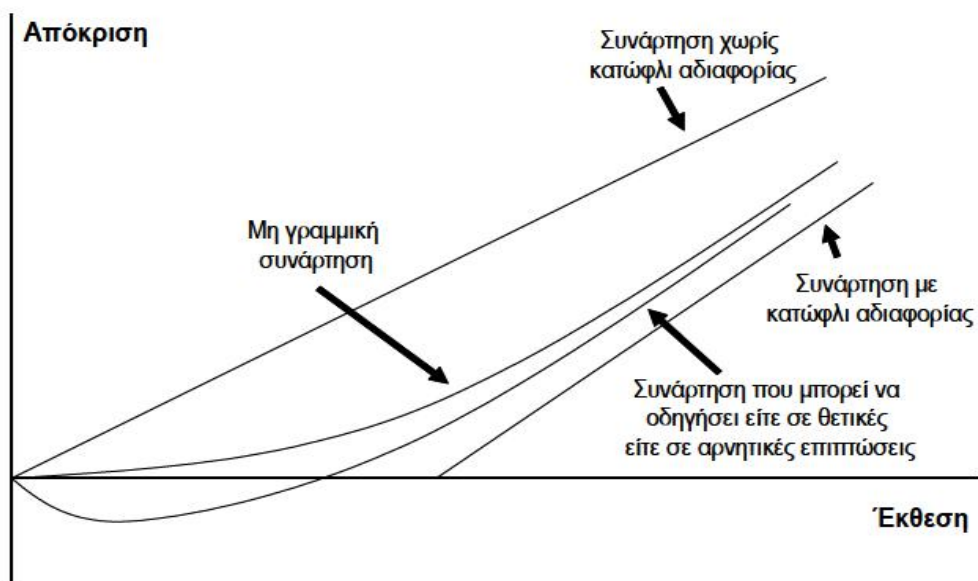
$$Y = f(X)$$

Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να ακολουθούν διάφορους μαθηματικούς τύπους (European Commission, 1995). Έτσι, μπορεί να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές εξισώσεις, να εμπεριέχουν ή όχι κατώφλι αδιαφορίας, κλπ. Οι συναρτήσεις έκθεσης-απόκρισης για ορισμένες τουλάχιστον κατηγορίες επιπτώσεων είναι δυνατόν να λάβουν ιδιαίτερα περίπλοκη μορφή και να οδηγούν ανάλογα με την τιμή του εκπεμπόμενου φορτίου είτε σε θετικές είτε σε αρνητικές επιπτώσεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης είναι εκείνες που προσομοιάζουν τις επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στην αποδοτικότητα των καλλιεργειών όπου μικρές συγκεντρώσεις SO_2 λειτουργούν ως λιπαντικά στοιχεία και αυξάνουν την αγροτική παραγωγή ενώ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις SO_2 δρουν ως ρυπαντικά φορτία που μειώνουν την αποδοτικότητα των

καλλιέργειών (European Commission, 1995).

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των συναρτήσεων έκθεσης – απόκρισης που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης που συνοδεύει τη βιομηχανική δραστηριότητα στη δημόσια υγεία, στη γεωργία και στα υλικά. Οι επιπτώσεις αυτές μαζί με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, συνιστούν τις σημαντικότερες διαταραχές που σχετίζονται με την εκλύμενη αέρια ρύπανση από βιομηχανικές δραστηριότητες. Εντούτοις, μια ολοκληρωμένη αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του συνεπαγόμενου εξωτερικού κόστους από τη βιομηχανία θα πρέπει να συμπεριλάβει και μια σειρά άλλων επιπτώσεων που σχετίζονται με υγρά και στερεά απόβλητα, θόρυβο, κλπ., οι οποίες δεν αναλύονται περαιτέρω στο πλαίσιο του παρόντος έργου. Πάντως με βάση και την εμπειρία από άλλες σχετικές εργασίες που έχουν υλοποιηθεί διεθνώς τα τελευταία χρόνια, το μεγαλύτερο μέγεθος εξωτερικών οικονομιών που σχετίζονται με βιομηχανικές δραστηριότητες προκαλούνται από τους αέριους ρυπαντές και τα αέρια του θερμοκηπίου ενώ οι λοιπές επιπτώσεις για την πλειονότητα των περιπτώσεων αποτελούν μικρό μόνο μέρος του συνολικού εξωτερικού κόστους.

Σχήμα 6.1: Πιθανοί τύποι συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης για την εκτίμηση των επιπτώσεων της διάχυσης ρυπαντικών φορτίων σε διάφορες κατηγορίες αποδεκτών.



6.2 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στη δημόσια υγεία

Στην επιστημονική κοινότητα είναι σήμερα γενικά αποδεκτό ότι η αέρια ρύπανση επιδρά στη δημόσια υγεία αυξάνοντας τη συχνότητα εμφάνισης ασθενειών (κυρίως καρδιαγγειακές παθήσεις και παθήσεις του αναπνευστικού) και συμβάλλοντας σε μερικές περιπτώσεις στην πρόωγη θνησιμότητα. Εντούτοις, είναι αρκετά πιο δύσκολο να προσδιορισθεί πώς κάθε ρύπος χωριστά επιδρά στη δημόσια υγεία, δεδομένου ότι μια πληθυσμιακή ομάδα που ζει σε μια γεωγραφική περιοχή εκτίθεται σε ένα μίγμα αέριων ρυπαντών. Κοινός τόπος των πλέον πρόσφατων επιδημιολογικών μελετών που έχουν δημοσιευθεί είναι ότι τα σωματίδια αποτελούν έναν από τους πλέον επιβλαβείς ρύπους για τη δημόσια υγεία προκαλώντας επεισόδια θνησιμότητας, εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις, χρόνιες βρογχίτιδες, κλπ. Το

δευτερογενώς σχηματιζόμενο στην ατμόσφαιρα όζον είναι επίσης ένας σημαντικός ρύπος που επιδρά στη δημόσια υγεία. Σημαντικός βαθμός βεβαιότητας υπάρχει και για τις άμεσα προκαλούμενες επιπτώσεις στη δημόσια υγεία από τις εκλυόμενες ποσότητες SO₂ που μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές, ενώ σαφώς μικρότερος βαθμός εμπιστοσύνης υπάρχει για τις προκαλούμενες επιπτώσεις από τις εκπομπές NO_x, δηλαδή εκπομπές NO και NO₂. Επιπρόσθετα, οι δευτερογενώς παραγόμενες στην ατμόσφαιρα χημικές ενώσεις που περιέχουν S και N (aerosols) αποτελούν σημαντικό ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων και επομένως είναι υπεύθυνες σε μεγάλο βαθμό για την υποβάθμιση της δημόσιας υγείας. Όμως συνήθως δεν είναι διαθέσιμα αναλυτικά στοιχεία σχετικά με την τοξικότητά τους, με αποτέλεσμα στις περισσότερες επιδημιολογικές μελέτες να εκλαμβάνονται ως απλά σωματίδια. Τέλος, τα βαρέα μέταλλα είναι υπεύθυνα κυρίως για την εμφάνιση καρκίνων και δευτερευόντως για άλλες ασθένειες. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται συνοπτικά πώς οι διάφοροι αέριοι ρύποι που εκλύονται από βιομηχανικές δραστηριότητες επιδρούν στη δημόσια υγεία (European Commission, 2005). Αν και οι μηχανισμοί μέσω των οποίων οι μεταβολές συγκεντρώσεων των αέριων ρυπαντών στην ατμόσφαιρα επιδρούν στην υγεία του πληθυσμού και μεταβάλλουν τα επίπεδα θνησιμότητας και νοσηρότητας είναι αρκετά περίπλοκοι, εντούτοις, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός επιδημιολογικών μελετών με αποτέλεσμα τη διατύπωση αντίστοιχων συναρτήσεων έκθεσης-απόκρισης. Από τις συναρτήσεις αυτές ταυτοποιείται μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων ρύπανσης και της κατάστασης της υγείας του πληθυσμού. Παρά τις σημαντικές απλοποιήσεις που υιοθετούνται για την εξαγωγή των συναρτήσεων αυτών και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει πάντα τέτοιες θεωρήσεις, εκτιμάται ότι δίνουν ικανοποιητικά ένα μέτρο των επιπτώσεων της ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία.

Πίνακας 6.1: παρουσίαση των επιπτώσεων που προκαλούν διάφοροι αέριοι ρυπαντές στη δημόσια υγεία.

Πρωτογενείς ρύποι	Δευτερογενείς ρύποι	Επιπτώσεις στη δημόσια υγεία
Σωματίδια (PM ₁₀ , PM _{2.5} , καπνός)		Θνησιμότητα Καρδιο-πνευμονικές ασθένειες (εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις, συμφορητική καρδιοπάθεια, χρόνιες βρογχίτιδες, χρόνιος βήχας σε παιδιά, συμπτώματα του κατώτερου αναπνευστικού, συμπτώματα βήχα σε ασθματικούς)
SO ₂		Θνησιμότητα Καρδιο-πνευμονικές ασθένειες (διαταραχές που απαιτούν επίσκεψη στο νοσοκομείο ή/και στο γιατρό, κρίσεις άσθματος, διαταραχές που οδηγούν σε ημέρες με μειωμένη δραστηριότητα)
SO ₂	Ενώσεις S (aerosols)	Όμοια με σωματίδια (σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας)
NO _x		Εμφάνιση ασθενειών (σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας)
NO _x	Ενώσεις N (aerosols)	Όμοια με σωματίδια (σημαντικός βαθμός αβεβαιότητας)
NO _x + VOC	O ₃	Θνησιμότητα Εμφάνιση ασθενειών (συμπτώματα του κατώτερου αναπνευστικού, διαταραχές που οδηγούν σε ημέρες με μειωμένη δραστηριότητα, επεισόδια άσθματος, ημέρες με ενεργό συμπτωματολογία)
CO		Θνησιμότητα (κυρίως από επεισόδια συμφορητικής καρδιοπάθειας) Καρδιο-αγγειακές ασθένειες
PAH		Εμφάνιση καρκίνων
As, Cd, Cr, Ni		Εμφάνιση καρκίνων και άλλων ασθενειών
Hg, Pb		Εμφάνιση διαφόρων ασθενειών

(Πηγή: European Commission, 2005)

Οι περισσότερες επιδημιολογικές μελέτες επικεντρώνονται στην εκτίμηση των άμεσων

επιπτώσεων της αέριας ρύπανσης στη δημόσια υγεία, δηλαδή σε ασθένειες / διαταραχές τα συμπτώματα των οποίων εκδηλώνονται το πολύ 5 ημέρες μετά το επεισόδιο ρύπανσης. Στις περιπτώσεις αυτές η επίδραση των ρυπαντών στη δημόσια υγεία είναι πιο εύκολο να τεκμηριωθεί, και για το σκοπό αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται αναλύσεις παλινδρόμησης προκειμένου να συσχετισθεί ο αριθμός των άμεσων επεισοδίων / διαταραχών με τις διακυμάνσεις της ημερήσιας συγκέντρωσης του εξεταζόμενου ρύπου. Αντιθέτως, πολύ πιο περιορισμένος είναι ο αριθμός των ερευνητικών εργασιών που εκτιμούν τις επιπτώσεις στη δημόσια υγεία από τη χρόνια έκθεση του πληθυσμού σε αυξημένες συγκεντρώσεις αερίων ρυπαντών. Αυτό κυρίως οφείλεται στην πολυπλοκότητα του προβλήματος αφού η χρόνια θνησιμότητα / νοσηρότητα επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των προϋπαρχουσών επιπέδων ρύπανσης, της πληθυσμιακής σύνθεσης, της γενικότερης κατάστασης υγείας του πληθυσμού, των συνηθειών διαβίωσης, κλπ. Οι συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης για τις χρόνιες επιπτώσεις διαμορφώνονται στη βάση πολλαπλών μελετών περίπτωσης όπου η κατάσταση της υγείας πληθυσμιακών ομάδων που είναι εκτεθειμένες σε διαφορετικά επίπεδα ρύπανσης και είναι εγκατεστημένες σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές αναλύεται συγκριτικά σε βάθος χρόνου.

Για παράδειγμα στην εργασία των Pope et al (1995), που αποτελεί ακόμη και σήμερα την πλέον τεκμηριωμένη μελέτη συσχέτισης της αέριας ρύπανσης με τη χρόνια θνησιμότητα, περίπου 550000 άνθρωποι από 151 μητροπολιτικές περιοχές των ΗΠΑ παρακολούθηθηκαν συστηματικά ως προς την κατάσταση της υγείας τους για διάστημα 7 χρόνων.

Με βάση τις διαθέσιμες επιδημιολογικές μελέτες, οι συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης που συσχετίζουν τις συγκεντρώσεις αερίων ρυπαντών με τον αριθμό επεισοδίων θνησιμότητας / νοσηρότητας είναι γραμμικές χωρίς την ύπαρξη κάποιου κατωφλίου αδιαφορίας, κάτω του οποίου η επίδραση της ρύπανσης στη δημόσια υγεία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Με άλλα λόγια οι συναρτήσεις αυτές έχουν τη μορφή:

$$\Delta I = f_{er} \times \Delta c$$

όπου ΔI είναι ο αριθμός των επιπλέον επεισοδίων νοσηρότητας / θνησιμότητας ανά άτομο το έτος λόγω μεταβολής της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα ενός ρυπαντή και

Δc και f_{er} η κλίση της συνάρτησης έκθεσης – απόκρισης. Άρα σε μια γεωγραφική περιοχή με γνωστά πληθυσμιακά δεδομένα αρκεί να είναι γνωστή η αύξηση της συγκέντρωσης ενός ρυπαντή λόγω της λειτουργίας μιας βιομηχανικής ή άλλης δραστηριότητας προκειμένου να υπολογισθούν τα πρόσθετα επεισόδια νοσηρότητας / θνησιμότητας που αποδίδονται στη δραστηριότητα αυτή. Ειδικότερα, οι επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στη θνησιμότητα ποσοτικοποιούνται στη βάση της μείωσης του προσδόκιμου χρόνου ζωής, η οποία εκφράζεται ως ο συνολικός αριθμός ετών ζωής που χάνονται εξαιτίας της έκθεσης μιας πληθυσμιακής ομάδας σε αυξημένες συγκεντρώσεις ρυπαντών. Η προσέγγιση αυτή προτιμάται από μια προσέγγιση που προσμετρά τις επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης στη θνησιμότητα με βάση τον αριθμό των θανάτων, γιατί ενσωματώνει καλύτερα μια σειρά από παραμέτρους που υπεισέρχονται στη διαμόρφωση του προβλήματος (π.χ. προηγούμενη κατάσταση της υγείας του πληθυσμού, χρόνια έκθεση, κλπ.). Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι επιλεγόμενες συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης αναφέρονται ανά πληθυσμιακών ομάδων (π.χ. σύνολο πληθυσμού, παιδιά, πάσχοντες από άσθμα, κλπ.).

Πίνακας 6.2: Συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης των πληθυσμιακών ομάδων

Αποδέκτης	Επίπτωση / Διαταραχή	Αναφορά	Ρύπος	f _{ex} *
Ενήλικες πάσχοντες από άσθμα	Χρήση βρογχοδιασταλτικών	Dusseldorp et al 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.163 0.081 0.163
	Συμπτώματα βήχα	Dusseldorp et al 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.335 0.168 0.335
	Συμπτώματα κατώτερου αναπνευστικού	Dusseldorp et al 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.061 0.030 0.061
Παιδιά πάσχοντα από άσθμα	Χρήση βρογχοδιασταλτικών	Roemer et al 1993	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.078 0.039 0.078
	Συμπτώματα βήχα	Pope and Dockery 1992	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.267 0.133 0.267
	Συμπτώματα κατώτερου αναπνευστικού	Roemer et al 1993	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.103 0.052 0.103
Σύνολο πληθυσμού με προβλήματα άσθματος	Επεισόδια άσθματος	Whittemore and Korn 1980	O ₃	6.01E-3
Ενήλικες άνω των 65 ετών	Συμφορητική καρδιοπάθεια	Schwartz and Morris 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates CO	1.85E-5 9.25E-6 1.85E-5 5.64E-7
Παιδιά	Χρόνιος βήχας	Dockery et al 1989	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	2.07E-3 1.04E-3 2.07E-3
Ενήλικες	Ημέρα με μειωμένη δραστηριότητα	Ostro 1987	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	0.025 0.013 0.025
	Ημέρα με ελαφρά μειωμένη δραστηριότητα	Ostro and Rothschild 1987	O ₃	9.76E-3
	Χρόνιος βρογχίτιδες	Abbey et al 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	4.90E-5 2.45E-5 4.90E-5
Σύνολο πληθυσμού	Χρόνια θνησιμότητα (σε έτη απώλειας ζωής)	Pope et al 1995	PM ₁₀ Nitrates Sulfates	3.90E-4 1.95E-4 3.90E-4
	Άμεση θνησιμότητα (σε έτη απώλειας ζωής)	Anderson et al / Touloumi et al 1996 Sunyer et al 1996	SO ₂ CO O ₃	5.34E-6 1.08E-7 6.13E-6
	Αναπνευστικά προβλήματα – επίσκεψη στο νοσοκομείο	Dab et al 1996 Ponce de Leon et al 1996	PM ₁₀ Nitrates Sulfates SO ₂ O ₃	2.07E-6 1.04E-6 2.07E-6 2.04E-6 4.96E-6
	Εγκεφαλοαγγειακές παθήσεις	Wordley et al 1997	PM ₁₀ Nitrates	5.04E-6 2.52E-6

(Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Η επίδραση που έχει στην ανθρώπινη υγεία η έκθεση στη σωματιδιακή ρύπανση καθορίζεται από το μέγεθος, τη συγκέντρωση και τη χημική σύσταση των σωματιδίων. Συνοπτικά λοιπόν, τα συμπτώματα που μπορούμε να εντοπίσουμε είναι κυρίως:

1. Επιπτώσεις στην υγεία του αναπνευστικού. Τα ατμοσφαιρικά σωματίδια όταν έχουν το κατάλληλο μέγεθος, είναι ικανά να εισέλθουν στο αναπνευστικό σύστημα επιδρώντας στον μηχανισμό αυτοκαθαρισμού του σώματος από ξένα σωματίδια, προκαλώντας ταυτόχρονα βλάβες στους πνεύμονες, πνευμονικά οιδήματα, χρόνια και αλλεργική βρογχίτιδα, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και καρκινογενέσεις αλλά και πρόωρο θάνατο. Επιπλέον, η έκθεση σε περιβάλλον υψηλής σωματιδιακής συγκέντρωσης μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία του αναπνευστικού σε βακτηρίδια ή σε ιογενείς παθήσεις, προκαλώντας στη συνέχεια ακόμη και πνευμονία. Επιπροσθέτως, τα ενδιάμεσα σωματίδια που ελευθερώνονται μέσα στον οργανισμό κατά τη διάρκεια μίας φλεγμονώδους αντίδρασης είναι ύποπτα για να αυξήσουν τον κίνδυνο μίας συμφόρησης του κυκλοφοριακού και εν συνεχεία μίας καρδιακής

προσβολής. Τα PM_{10} και ιδιαίτερα τα $PM_{2,5}$ είναι συνδεδεμένα με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Τα συμπτώματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι πολλά. Αναφέρουμε τα συνηθέστερα: μπορούν να προκαλέσουν ή να επιδεινώσουν προβλήματα του αναπνευστικού συστήματος και καρδιαγγειακές παθήσεις, να επιδράσουν στον μηχανισμό αυτοκαθαρισμού του σώματος από ξένα σωματίδια, να προκαλέσουν βλάβη στους ιστούς των πνευμόνων, καρκινογενέσεις και πρόωρο θάνατο. Στις συνέπειες συγκαταλέγονται ακόμη και κάποιες λιγότερο επώδυνες, όπως επίμονος βήχας, φλέγματα, ζαλάδες και αδιαθεσία. Είναι γενικά παραδεκτό ότι η μακροχρόνια έκθεση του ανθρώπου σε υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων μπορεί να μειώσει τη διάρκεια της ζωής από 1 έως 2 χρόνια κατά μέσο όρο. Ακόμα, υπάρχουν μελέτες που δείχνουν ότι τα σωματίδια δρουν επιβαρυντικά για την υγεία ακόμη και σε συγκεντρώσεις κατά πολύ μικρότερες από τα προβλεπόμενα ανώτατα επιτρεπτά όρια.

Οι ενήλικες που εκτίθενται σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρουσιάζουν αυξημένη συχνότητα χρόνιου βήχα, παραγωγής πτυέλων και δύσπνοιας, συμπτώματα που συνδυάζονται με την ανάπτυξη βρογχικού άσθματος, χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας, αλλεργικής ρινίτιδας και λοιμώξεων του κατώτερου αναπνευστικού συστήματος. Μάλιστα, έχει υπολογιστεί ότι ακόμη και οι αλλεργικές αντιδράσεις στο αναπνευστικό σύστημα αυξάνουν στα άτομα που βρίσκονται σε μολυσμένο περιβάλλον. Επίσης, έχει παρατηρηθεί αυξημένη συχνότητα πνευμονιών, ιδιαίτερα σε άτομα τρίτης ηλικίας, τα οποία αναπνέουν μολυσμένο αέρα. Τέλος, ο αναπνεόμενος αέρας σε πυκνοκατοικημένες πόλεις με αυξημένα επίπεδα μόλυνσης περιέχει μια πλειάδα γνωστών καρκινογόνων ουσιών, περιλαμβανομένων των βενζολοπυρενίων, του αρσενικού, του χρωμίου και των ραδιονουκλεοτιδίων. Αυτές οι ουσίες αυξάνουν τα ποσοστά εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα.

2. *Επιπτώσεις στην υγεία του καρδιαγγειακού συστήματος.* Το κυριότερο σύστημα που προσβάλλεται στον ανθρώπινο οργανισμό είναι το αναπνευστικό και το καρδιαγγειακό. Περισσότερο ευάλωτα είναι τα υπερήλικα άτομα και μάλιστα εκείνα που πάσχουν από πνευμονικά και καρδιακά νοσήματα. Αλλά οι αρνητικές επιπτώσεις του μολυσμένου αέρα στους ενήλικες δεν περιορίζονται μόνο στο αναπνευστικό. Επεκτείνονται στο καρδιαγγειακό σύστημα, προκαλώντας νοσήματα, όπως είναι η στεφανιαία νόσος και το οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου.

3. *Επιπτώσεις στην βρεφική –παιδική ηλικία.* Ιδιαίτερη επίπτωση παρουσιάζεται στις παιδικές ηλικίες για δύο λόγους (α) τα παιδιά παρουσιάζουν αυξημένη μεταβολική δραστηριότητα και (β) το νευρικό, το αναπνευστικό και το αναπαραγωγικό σύστημα των παιδιών, δεν είναι πλήρως αναπτυγμένα.

Η ανάπτυξη των πνευμόνων χωρίζεται σε 2 στάδια, το πρώτο έως την ηλικία των 3 ετών της ζωής, όπου οι πνεύμονες αναπτύσσονται, δημιουργώντας νέες κυψελίδες και το επόμενο στάδιο, μετά το 3ο έτος της ζωής, όπου η ανάπτυξη των πνευμόνων γίνεται κυρίως με την απλή επέκτασή τους στο θώρακα. Επομένως, οι βλάβες που συμβαίνουν κατά την πρώιμη περιβαλλοντική έκθεση σε ρύπους είναι πολύ σημαντικότερες από αυτές που συμβαίνουν από την έκθεση στους ρύπους σε μετέπειτα στάδια της ζωής. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι οι κυριότεροι ρύποι με καταστρεπτικές επιπτώσεις στο βρεφικό πνεύμονα είναι, κατά σειρά επικινδυνότητας: το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και το διοξείδιο του αζώτου. Όλοι οι παραπάνω ρύποι αυξάνουν την πιθανότητα να εμφανιστεί βρογχικό άσθμα στο βρέφος.

Τα παιδιά φαίνεται ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις συνέπειες της αέριας ρύπανσης και αυτό για πολλούς λόγους:

- Ο αριθμός των κυψελίδων στους πνεύμονες αυξάνει από τα 24 εκατομμύρια κατά τη γέννηση στα 267 εκατομμύρια στην ηλικία των 4 ετών και στα 600 εκατομμύρια στην

ενήλικη ζωή. Πολλά εισπνεόμενα χημικά εμπλέκονται στους μηχανισμούς ανάπτυξης των κυψελίδων, εμποδίζοντας έτσι τη σωστή τους ανάπτυξη.

- Συγκρινόμενα με τους ενήλικες, τα παιδιά έχουν μειωμένους μηχανισμούς άμυνας για τα αιωρούμενα σωματίδια του περιβάλλοντος.
- Τα παιδιά παρουσιάζουν αυξημένα επίπεδα δραστηριότητας σε σχέση με τους ενήλικες (124 λεπτά έναντι 21 λεπτών την ημέρα, αντίστοιχα). Επομένως, η είσοδος αέρα στους παιδικούς πνεύμονες είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τους ενήλικες.
- Τα παιδιά ξοδεύουν περισσότερο χρόνο παίζοντας σε εξωτερικούς χώρους, ιδιαίτερα τα καλοκαίρια και τα απογεύματα. Παίζουν συνήθως σε δραστηριότητες που αυξάνουν την αναπνευστική λειτουργία, άρα και τη συνολική ποσότητα του αέρα που αναπνέεται. Επομένως και η συνολική ποσότητα των αέριων ρύπων που εισέρχονται στο αναπνευστικό είναι μεγαλύτερη.

Τα παιδιά που ζουν σε σπίτια ή σπουδάζουν κοντά σε δρόμους με επιβαρυσμένη κυκλοφορία, ιδιαίτερα από πετρελαιοκίνητα οχήματα, παρουσιάζουν αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης άσθματος, αλλεργικής ρινίτιδας ή άλλων αναπνευστικών νοσημάτων. Τα παιδιά που ήδη έχουν άσθμα, παρουσιάζουν επιδείνωσή του, όταν τα επίπεδα των αέριων ρύπων είναι υψηλά. Επιπλέον, μελέτες, που διήρκεσαν 8 χρόνια, αποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη των πνευμόνων σε παιδιά που ζουν σε μολυσμένο περιβάλλον υπολείπεται σε σχέση με την ανάπτυξη των πνευμόνων παιδιών που ζουν σε καθαρό περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για το περιβάλλον και την υγεία στην Ευρώπη:

- ένα στα επτά παιδιά προσβάλλεται από άσθμα
- το άσθμα προσβάλλει περισσότερο τα παιδιά της δυτικής Ευρώπης συγκριτικά με εκείνα της Ανατολικής Ευρώπης (δεκαπλάσια επίπτωση)
- άσθμα – αλλεργίες και άλλα αναπνευστικά νοσήματα αυξάνουν ολόένα και περισσότερο και αποτελούν ένα από τα κυριότερα αίτια εισαγωγής στα νοσοκομεία
- οι διάφοροι ρύποι του περιβάλλοντος ευθύνονται πολλές φορές για αποβολές εμβρύων, συγγενείς διαμαρτίες, σωματικές και διανοητικές αναπηρίες και διαταραχές της αναπαραγωγικής ικανότητας των ανθρώπων
- οι επιπτώσεις του παθητικού καπνίσματος προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα αλλά και αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου των πνευμόνων σε μη καπνιστές κατά 20-30%

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε μια ακόμη σημαντική αιτία ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τον θόρυβο, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει μείωση της ακοής. Εκτιμάται ότι 10.000.000 άνθρωποι στην Ευρώπη είναι εκτεθειμένοι σε υψηλές στάθμες θορύβου.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ευαισθητοποιημένη από τον κινδύνους που διατρέχει η υγεία μας εξαιτίας της μόλυνσης του περιβάλλοντος, έχει εξαγγείλει στρατηγική οι κυριότεροι στόχοι της οποίας είναι : η βελτίωση της νομοθεσίας σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, η θέσπιση μέγιστων ορίων επικινδυνότητας για τους διάφορους ρύπους και η παρακολούθησή τους, η σταδιακή δραστική μείωση των ρύπων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί τα αμέσως επόμενα χρόνια η νοσηρότητα και η θνησιμότητα συνεπεία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

6.3 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στην αγροτική παραγωγή

Η αέρια ρύπανση επιδρά στα φυτά μέσω δύο βασικών μηχανισμών. Ο πρώτος αφορά στην απόθεση των αέριων ρυπαντών στα φυλλώματα ενώ ο δεύτερος σχετίζεται με την όξινη απόθεση στο έδαφος. Και οι δύο αυτοί μηχανισμοί είναι δυνατόν να επηρεάσουν τα φυτά είτε άμεσα μεταβάλλοντας την παραγωγική ικανότητά τους είτε έμμεσα επιδρώντας στη δυνατότητα αντίστασής τους σε παράσιτα κλπ., ή στην ικανότητα ανταγωνισμού τους με άλλα είδη. Είναι επομένως φανερό ότι η αέρια ρύπανση που συνοδεύει διάφορες δραστηριότητες (βιομηχανικές κ.α.) προκαλεί μια σειρά από επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή, στα δάση, στα φυσικά οικοσυστήματα, κλπ., μια αναλυτική περιγραφή των οποίων δίνεται στο European Commission (1999a). Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης επικεντρωνόμαστε στις επιπτώσεις που προκαλούν οι αέριοι ρυπαντές στην αγροτική παραγωγή, αφενός γιατί το επίπεδο αναλυτικής γνώσης και η εμπιστοσύνη των χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων έκθεσης – απόκρισης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλους τομείς (π.χ. δάση) και αφετέρου γιατί η οικονομική αποτίμηση των υπολογιζόμενων επιπτώσεων είναι ευκολότερη και μπορεί να γίνει με μικρότερες αβεβαιότητες. Αυτό, σε καμία περίπτωση δεν σημαίνει ότι οι επιπτώσεις της αέρια ρύπανσης στα δάση και τα οικοσυστήματα είναι αμελητέες. Αντίθετα είναι δυνατόν να είναι ιδιαίτερα σημαντικές, ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής, και θα πρέπει να αποτελέσουν στο μέλλον αντικείμενο συστηματικότερης διερεύνησης στην κατεύθυνση μιας ολοκληρωμένης αποτίμησης των εξωτερικών οικονομιών από τη βιομηχανική δραστηριότητα.

Οι σημαντικότεροι αέριοι ρυπαντές που επιδρούν στην αγροτική παραγωγή είναι το SO₂ και το O₃, και σε μικρότερο βαθμό τα NO_x και η NH₃. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης εξετάζονται κατά κύριο λόγο οι επιπτώσεις των δύο πρώτων, δεδομένου ότι για τους ρυπαντές αυτούς είναι θεμελιωμένες αρκετά αξιόπιστες συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης που συσχετίζουν τα επίπεδα συγκεντρώσεων των αντίστοιχων ρυπαντών με τη μεταβολή της παραγωγικότητας διαφόρων καλλιεργειών. Ακόμη, διερευνάται κατά πόσο η όξινη απόθεση και η απόθεση αζώτου που συνδέονται με τη διάχυση των αέριων ρυπαντών επηρεάζει την ποιότητα των καλλιεργούμενων εδαφών και επομένως είτε απαιτούνται εργασίες αποκατάστασης είτε προκύπτουν οφέλη. Στη συνέχεια αυτής της παραγράφου γίνεται μια αναλυτικότερη παρουσίαση των συναρτήσεων έκθεσης – απόκρισης που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση.

Για την ποσοτικοποίηση των άμεσων επιπτώσεων του SO₂ στις αγροτικές καλλιέργειες χρησιμοποιείται η συνάρτηση έκθεσης – απόκρισης που προτάθηκε από τον Baker et al (1986), η οποία προσομοιάζει τις μεταβολές στην παραγωγή σιταριού, κριθαριού, βρώμης, πατάτας και ζαχαρότευτλων από την έκθεση των καλλιεργειών αυτών σε συγκεντρώσεις SO₂. Η συνάρτηση αυτή προτείνει ότι η καρποφορία των εν λόγω καλλιεργειών αυξάνει όταν εκτίθενται σε συγκεντρώσεις SO₂ μέχρι 6,9 ppb (και άρα προκύπτουν θετικές εξωτερικές οικονομίες) ενώ μειώνεται για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις SO₂:

$y = 0.74(SO_2) - 0.55$	για $0 < [SO_2] < 13.6$ ppb
$y = -0.69 \times [SO_2] + 9.35$	για $[SO_2] > 13.6$ ppb

όπου y η σχετική μεταβολή στην ποσότητα παραγωγής των υπό θεώρηση γεωργικών προϊόντων και $[SO_2]$ η συγκέντρωση SO₂ στην οποία εκτίθενται οι καλλιέργειες σε ppb.

Είναι προφανές ότι για την εκτίμηση των επιπτώσεων που προκαλεί η λειτουργία μιας βιομηχανικής μονάδας ή ενός κλάδου που ευθύνεται για την έκλυση SO₂ στις αγροτικές καλλιέργειες μιας περιοχής, δεν αρκεί μόνο να προσδιορισθούν (όπως στην περίπτωση της

δημόσιας υγείας) οι επιπλέον συγκεντρώσεις SO₂ στο περιβάλλον αναφοράς εξαιτίας της λειτουργίας της μονάδας, αλλά απαιτείται και η γνώση των προϋπαρχουσών συγκεντρώσεων SO₂ στην εν λόγω περιοχή.

Η εκτίμηση των επιπτώσεων που προκαλεί το O₃ σε διάφορες αγροτικές καλλιέργειες γίνεται μέσω μιας γραμμικής σχέσης που συσχετίζει την παραγόμενη ποσότητα αγροτικών προϊόντων από τις εν λόγω καλλιέργειες με τη συνολική συγκέντρωση όζοντος πάνω από ένα κατώφλι αδιαφορίας ίσο με 40ppbV (AOT₄₀) στο οποίο εκτίθενται οι καλλιέργειες κατά την περίοδο ανάπτυξης των φυτών (Μάιος – Ιούνιος). Η συνάρτηση αυτή προτάθηκε από τους Fuhrer (1996) και Mills et al (2003) και έχει τη μορφή:

$$y = 99.7 - \alpha \times AOT_{40}$$

όπου y η σχετική μεταβολή στην παραγόμενη ποσότητα των υπό εξέταση γεωργικών προϊόντων, α ένας συντελεστής ευαισθησίας ο οποίος διαφοροποιείται ανά καλλιέργεια (Πίνακας 6.3) και AOT₄₀ η συνολική συγκέντρωση όζοντος πάνω από 40 ppb στη γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος.

Όπως και προηγούμενα η εκτίμηση των επιπτώσεων που προκαλεί το O₃ στις αγροτικές καλλιέργειες απαιτεί τη γνώση και της προϋπάρχουσας συγκέντρωσης του εν λόγω ρυπαντή.

Πίνακας 6.3: Τιμές του συντελεστή ευαισθησίας α που υπεισέρχεται στη συνάρτηση έκθεσης – απόκρισης για τον υπολογισμό των επιπτώσεων του O₃ στην αγροτική παραγωγή για διάφορες καλλιέργειες.

Κατηγορία αγροτικού προϊόντος	Συντελεστής ευαισθησίας α
Ρύζι	0.4
Καπνός	0.5
Ζαχαρότευτλα	0.6
Πατάτα	0.6
Σπόροι ηλιοτρόπιου	1.2
Σιτάρι	1.7

Η εκτίμηση των επιπτώσεων που προκαλεί η όξινη απόθεση που συνδέεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση στην υποβάθμιση των γεωργικών εδαφών, γίνεται στη βάση της πρόσθετης ποσότητας ασβέστη που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εξουδετερωθεί η αυξημένη οξύτητα του εδάφους που προκαλείται σε σχέση με μια κατάσταση αναφοράς.

Δεδομένης της αλκαλικότητας των εδαφών στην Ελλάδα το πρόβλημα της οξίνισης των εδαφών λόγω της αέριας ρύπανσης δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Σε κάθε περίπτωση, η πρόσθετη ποσότητα ασβέστη που απάτητε για την εξουδετέρωση της οξίνισης του εδάφους που προκύπτει από την έκλυση ρυπαντών λόγω μιας συγκεκριμένης δραστηριότητας υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης:

$$\Delta L = 50 \times A \times \Delta D_A$$

όπου ΔL η υπολογιζόμενη πρόσθετη ποσότητα ασβέστη (σε kg/year), A η επιφάνεια του εδάφους που επηρεάζεται (σε ha) και ΔD_A η μεταβολή της ετήσιας όξινης απόθεσης στην υπό θεώρηση γεωγραφική περιοχή (σε meq/m²/year).

Τέλος, το N είναι ένα από τα σημαντικότερα θρεπτικά συστατικά των φυτών, και συχνά χρησιμοποιείται από τους αγρότες στις καλλιέργειές τους ως λίπασμα. Έτσι, η απόθεση N στα γεωργικά εδάφη ως αποτέλεσμα της διάχυσης των αερίων ρυπαντών και των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, αναμένεται ότι θα προκαλέσει ωφέλειες στα καλλιεργούμενα εδάφη. Τα οφέλη αυτά εκτιμώνται στη βάση της συνολικής ποσότητας λιπάσματος που οι γεωργοί αποφεύγουν να χρησιμοποιήσουν και υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης:

$$\Delta F = 14.0067 \times A \times \Delta D_A$$

όπου ΔF η ποσότητα λιπάσματος που εξοικονομείται από τους γεωργούς (σε kg/year), A η επιφάνεια του εδάφους που επηρεάζεται (σε ha) και ΔD_A η μεταβολή της όξινης απόθεσης σε ετήσια βάση στην υπό θεώρηση γεωγραφική περιοχή (σε meq/m²/year).

6.4 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στα υλικά

Η διάβρωση και καταστροφή των υλικών θεωρούνται σήμερα από τις πλέον σημαντικές επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις εκείνες που τα υλικά εκτίθενται σε αυξημένες συγκεντρώσεις ρυπαντών για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα (π.χ. αστικό περιβάλλον). Τα υλικά που κυρίως επηρεάζονται βρίσκονται συνήθως στις εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων ή άλλων κατασκευών και έργων υποδομής.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να διαβρώσει τα υλικά και να καταστρέψει ιστορικά αλλά και σύγχρονα κτίρια και μνημεία. Κύρια υπεύθυνη για αυτές τις καταστροφές είναι η όξινη βροχή, η οποία οφείλεται στην οξίνιση του νερού της βροχής λόγω διάλυσης στις σταγόνες ενώσεων του θείου και το αζώτου. Και η φυσική βροχή είναι ελαφρά όξινη λόγω του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα αλλά η παρουσία των προαναφερθέντων ρύπων επιδεινώνει την κατάσταση.

Τα περισσότερα μέταλλα αντιδρούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και με άλλα συστατικά ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα μέταλλα και τα κεραμικά αποσυντίθεται καταστροφικά, τα πολυμερή μπορούν να γίνουν ψαθυρά. Τα μέταλλα μπορούν να καταναλωθούν ομοιογενώς ή εκλεκτικά ή μπορούν να παρουσιάσουν ρωγμές οδηγώντας σε πρόωρη αστοχία.

Τα σωματίδια μπορεί να είναι εκ φύσεως είτε χημικά αδρανή, είτε χημικά ενεργά. Συνεπώς, ανάλογα με τη χημική τους σύσταση και τις φυσικές τους ιδιότητες τα σωματίδια μπορούν να καταστρέψουν τα μεταλλικά υλικά πάνω στα οποία επικάθονται. Είναι δυνατόν, να προκαλέσουν άμεση χημική καταστροφή, είτε με κατευθείαν διαβρωτική δράση των ιδίων, είτε με τη δράση διαβρωτικών χημικών ουσιών, οι οποίες προσροφούνται σε αδρανή σωματίδια. Υπό κανονικές συνθήκες, τα μέταλλα δύνανται να αντισταθούν στη διάβρωση είτε από τον καθαρό και ξηρό αέρα, είτε από τον καθαρό και υγρό αέρα. Εντούτοις, τα υδροσκοπικά σωματίδια τα οποία βρίσκονται συνήθως στην ατμόσφαιρα μπορούν να προσβάλλουν τις μεταλλικές επιφάνειες παρουσία άλλων ρύπων, όπως είναι SO₂, αλλά και ανεξάρτητα αυτών. Είναι χαρακτηριστικά τα παραδείγματα της διάβρωσης μεταλλικών επιφανειών εξαιτίας της έκθεσής τους στα ατμοσφαιρικά σωματίδια, όπως η διάβρωση επιφανειών από χάλυβα και ψευδάργυρο σε συγκεντρώσεις TSP άνω των 60 μg/m³. Υλικά

κατασκευής κτηρίων (μέταλλα, πέτρες, τσιμέντο και μιογιές), υφίστανται φυσική φθορά λόγω της μακροχρόνιας έκθεσής τους στο περιβάλλον και στα διάφορα περιβαλλοντικά φαινόμενα (αέρας, υγρασία, έντονες θερμοκρασιακές μεταπτώσεις, ηλιακή ακτινοβολία κοκ.). Οι μεταλλικές επιφάνειες σχηματίζουν ένα προστατευτικό φιλμ, ενάντια στη διάβρωση από περιβαλλοντικά αίτια. Η φυσική διάβρωση των μετάλλων κατά την έκθεσή τους στο περιβάλλον συνδέεται με την έκθεση αυτών σε ανθρωπογενείς ρύπους και ιδιαίτερος στο SO₂ το οποίο καταστρέφει σταδιακά το προστατευτικό φιλμ. Ένα άμεσο αποτέλεσμα των σωματιδίων πάνω στις επιφάνειες είναι η επικάθεισή τους πάνω σε αυτές δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα χρώματος. Η διαδικασία αυτή της επιχωμάτωσης αλλάζει την ανάκλαση που παθαίνει το ορατό φως όταν προσπίπτει σε ένα αδιαφανές υλικό και μειώνει τη μετάδοση του φωτός μέσα από διαφανή υλικά. Η επιχωμάτωση είναι μία διαδικασία η οποία αντιμετωπίζεται με συχνό καθαρισμό και ίσως και βάνιμο της επιφάνειας.

Το όλο φυσικό φαινόμενο είναι αρκετά περίπλοκο και σε μια προσπάθεια ερμηνείας και μοντελοποίησής του θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μια σειρά πρόσθετων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, η υγρασία, ο άνεμος κλπ. Η έκθεση των υλικών σε αυξημένα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι δυνατό να προκαλέσει επιπτώσεις, οι οποίες να διαφέρουν τόσο ως προς τη φύση τους όσο και ως προς τη σοβαρότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, οι κυριότερες από τις διαταραχές αυτές, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

1. *Αλλοίωση του χρώματος και της όψης των κτιρίων*, κύρια λόγω της επικάθισης σωματιδίων στην εξωτερική επιφάνειά τους.
2. *Διάβρωση των υλικών των κτιρίων / υποδομών*, σαν αποτέλεσμα των χημικών, φυσικών και βιολογικών διεργασιών που αναπτύσσονται στην επιφάνειά τους.
3. *Δομικές καταστροφές*. Οι επιπτώσεις αυτές αν και σπάνιες είναι δυνατόν να προκληθούν από την παρατεταμένη έκθεση των υλικών σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης και ταυτόχρονη παράλειψη υλοποίησης βασικών εργασιών συντήρησης.

Αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης αποτελούν κυρίως οι δύο πρώτες κατηγορίες επιπτώσεων, δεδομένου ότι η πρόκληση δομικών καταστροφών είναι αφενός σπάνια και αφετέρου συνοδεύεται από συστηματική έλλειψη εργασιών συντήρησης / αποκατάστασης των κτιρίων ή υποδομών που τις υφίστανται.

Διαβρωτικά φαινόμενα στις εξωτερικές επιφάνειες των υλικών αναπτύσσονται υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, εντούτοις σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι η ύπαρξη στην ατμόσφαιρα αερίων ρυπαντών επιτείνει τα φαινόμενα αυτά. Το SO₂, τα NO_x, το O₃, οι δευτερογενώς παραγόμενες στην ατμόσφαιρα ενώσεις S και N (aerosols), καθώς και τα σωματίδια συνιστούν τους πλέον σημαντικούς ρυπαντές που επιδρούν στη διάβρωση των υλικών.

Η διάβρωση εξελίσσεται μέσω δύο παράλληλων και συμπληρωματικών μηχανισμών:

- Της υγρής απόθεσης ρυπαντικών φορτίων στις επιφάνειες των υλικών που γίνεται μέσω της βροχόπτωσης. Ταυτόχρονα όμως η βροχόπτωση λειτουργεί και επιβραδυντικά στη εξέλιξη του όλου φαινομένου, συμβάλλοντας στην απομάκρυνση από την επιφάνεια των υλικών ρυπαντών που είχαν επικαθήσει σε προηγούμενη φάση.
- Της ξηράς απόθεσης, όπου ρυπαντικά φορτία (κυρίως SO₂ αλλά και NO_x, κλπ.) μεταφέρονται με τον αέρα και επικαθόνται στις επιφάνειες των υλικών.

Και στις δύο περιπτώσεις η επίδραση των κλιματικών συνθηκών (βροχή, υγρασία, άνεμος, διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, κλπ.) είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη και εξέλιξη των διαβρωτικών φαινομένων. Η εκτίμηση της διάβρωσης που υφίστανται τα υλικά εξαιτίας της έκθεσής τους στην αέρια ρύπανση γίνεται μέσω συναρτήσεων έκθεσης – απόκρισης, οι οποίες είναι διαθέσιμες για τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στις

εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων και υποδομών. Οι συναρτήσεις αυτές συνήθως συσχετίζουν το επίπεδο συγκεντρώσεων ενός ρύπου ή/και τα επίπεδα όξινης απόθεσης στα οποία εκτίθεται η επιφάνεια ενός υλικού με το ρυθμό διάβρωσης που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του εν λόγω υλικού, εκφραζόμενη ως απώλεια μάζας ή πάχους.

Συνήθως οι συναρτήσεις αυτές αποτελούνται από δύο τμήματα:

- ένα που ως ανεξάρτητες μεταβλητές ενσωματώνει τις συγκεντρώσεις SO_2 (τον θεωρούμενο από πολλές επιστημονικές εργασίες ως βασικό ρύπο πρόκλησης φαινομένων διάβρωσης), τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία και αναφέρεται στην ξηρά απόθεση και
- ένα που ως ανεξάρτητες μεταβλητές ενσωματώνει τη βροχόπτωση και την οξύτητά της και αναφέρεται στην υγρά απόθεση. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή υπεισέρχεται και ο χρόνος έκθεσης, ώστε με βάση ένα προκαθορισμένο κρίσιμο επίπεδο απώλειας / διάβρωσης του υπό θεώρηση υλικού, να προσδιορίζεται τελικά η συχνότητα των απαιτούμενων εργασιών αντικατάστασης / συντήρησης, που απαιτούν τη βάση υπολογισμού των προκαλούμενων εξωτερικών οικονομιών.

Οι βασικές συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης που προτείνονται για την εκτίμηση των διαβρωτικών φαινομένων της αέριας ρύπανσης ανά κατηγορία υλικού, παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.4: Συναρτήσεις εκτίμησης των διαβρωτικών φαινομένων της αέριας ρύπανσης

Υλικό διάβρωσης	Συνάρτηση έκθεσης - απόκρισης
Ασβεστόλιθος	$R = (2.7 \cdot [SO_2]^{0.48} \cdot e^{-0.018 \cdot T} + 0.019 \cdot Rain [H^+]) \cdot t^{0.96}$
Αμμόλιθος Φυσική πέτρα Ασβεστοκονίαματα Επιχρίσματα	$R = (2.0 \cdot [SO_2]^{0.52} \cdot e^{f(T)} + 0.028 \cdot Rain [H^+]) \cdot t^{0.91}$ $f(T) = \begin{cases} 0 & T < 10^\circ C \\ -0.013 \cdot (T - 10) & T > 10^\circ C \end{cases}$
Ψευδάργυρος και Ατσάλι	$ML = 1.4 \cdot [SO_2]^{0.22} \cdot e^{0.018 \cdot RH} \cdot e^{f(T)} \cdot t^{0.85} + 0.029 \cdot Rain [H^+] \cdot t$ $f(T) = \begin{cases} 0.062 \cdot (T - 10) & T < 10^\circ C \\ -0.021 \cdot (T - 10) & T > 10^\circ C \end{cases}$
Χρώματα σε χάλυβα	$(10 - ASTM) = (0.033 \cdot [SO_2] + 0.013 \cdot RH + f(T) + 0.0013 \cdot Rain \cdot [H^+]) \cdot t^{0.41}$ $f(T) = \begin{cases} 0.015 \cdot (T - 11) & T < 11^\circ C \\ -0.15 \cdot (T - 11) & T > 11^\circ C \end{cases}$
Χρώματα σε ατσάλι	$(10 - ASTM) = (0.0084 \cdot [SO_2] + 0.015 \cdot RH + f(T) + 0.00082 \cdot Rain \cdot [H^+]) \cdot t^{0.43}$ $f(T) = \begin{cases} 0.015 \cdot (T - 11) & T < 11^\circ C \\ -0.15 \cdot (T - 11) & T > 11^\circ C \end{cases}$

$$R = \left(0.12 \cdot \left(1 - e^{-0.121 \cdot RH / (100 - RH)} \right) \cdot [SO_2] + 0.0174 \cdot Rain \cdot [H^+] \right) \cdot t$$

Όσον αφορά στην *αλλοίωση του χρώματος και της όψης των κτιρίων* λόγω της επικάλυψης στην επιφάνειά τους σωματιδίων, είναι ένα φαινόμενο που παρουσιάζεται εντονότερο στις μεγάλες πόλεις όπου και τα επίπεδα συγκέντρωσης σωματιδίων αλλά και άλλων ρυπαντών είναι σχετικά υψηλότερα. Το μέγεθος των σωματιδίων αλλά και ο προσανατολισμός των επιφανειών των υλικών αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη του φαινομένου. Στη διεθνή βιβλιογραφία είναι διαθέσιμες συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης οι οποίες υπολογίζουν τη μεταβολή στην αντανάκλασιμότητα των επιφανειών χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή συγκεντρώσεις σωματιδίων. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί δύο βασικά μοντέλα για τις εν λόγω συναρτήσεις έκθεσης – απόκρισης:

Το εκθετικό μοντέλο υπολογίζει το βαθμό αντανάκλασης μιας επιφάνειας R μέσω της εξίσωσης:

$$R = R_0 \times e^{-(k_e \times c \times t)}$$

όπου R_0 είναι η αντανάκλασιμότητα μιας επιφάνειας που δεν εκτίθεται στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον (συνήθως τίθεται $R_0=100\%$), k_e είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από το είδος του υλικού, c η συγκέντρωση των σωματιδίων (σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και t ο χρόνος έκθεσης της επιφάνειας εκφρασμένος σε έτη.

Αντίστοιχα το μοντέλο:

$$R = R_0 - k_s (c \cdot t)^{1/2}$$

βασίζεται κυρίως σε αναλύσεις πεδίου προκειμένου να υπολογισθεί ο βαθμός αντανάκλασης R μιας επιφάνειας σε σχέση με μια αρχική κατάσταση αναφοράς (R_0), της σταθεράς k_s που εξαρτάται από το είδος του υλικού, της συγκέντρωσης των σωματιδίων c , και του χρόνου έκθεσης t .

Σύμφωνα με τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα η αντανάκλασιμότητα R των επιφανειών μειώνεται με το χρόνο έκθεσης, ενώ όταν φθάσει ένα κρίσιμο επίπεδο R_{crit} (περίπου 70%) απαιτείται η διενέργεια εργασιών καθαρισμού και αποκατάστασης. Η συχνότητα και το κόστος των εργασιών αυτών αποτελούν μέτρο των εξωτερικών οικονομιών που προκαλεί η αέρια ρύπανση στα υλικά.

Η συνολική εκτίμηση των επιπτώσεων της αέριας ρύπανσης στα υλικά απαιτεί την ταυτόχρονη και συνδυασμένη θεώρηση των διαβρωτικών φαινομένων και της μείωσης της αντανάκλασιμότητας των υλικών. Εντούτοις, η υλοποίηση δράσεων αποκατάστασης σε μια δεδομένη επιφάνεια εξαιτίας της φθοράς που αποδίδεται σε έναν από τους δύο μηχανισμούς που περιγράφησαν προηγουμένως, επιδρά και στη συχνότητα των εργασιών αποκατάστασης της φθοράς μέσω του δεύτερου μηχανισμού (συνήθως επιμηκύνεται το απαιτούμενο διάστημα διενέργειας των εργασιών συντήρησης / αποκατάστασης). Η συνδυασμένη λοιπόν εκτίμηση των επιπτώσεων λόγω των δύο αυτών μηχανισμών είναι αρκετά περίπλοκη.

6.5 Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης στο οικοσύστημα

6.5.1 Επιδράσεις στη Χλωρίδα

Τα φυτά εκτίθενται στη σωματιδιακή μόλυνση είτε μέσω του φυλλώματος τους, είτε μέσω της αναρρόφησης από τις ρίζες τους. Τα υδρόφιλα σωματίδια διαλύονται στο νερό και είναι ευκολότερη η απορρόφησή τους από το φυτό. Ο συνδυασμός των σωματιδίων με άλλους ρύπους όπως είναι το SO₂ ενισχύει την προσβολή τους από βαρέα μέταλλα. Τα χονδρόκοκκα σωματίδια αποτίθενται στα φύλλα των φυτών, μειώνοντας την ανταλλαγή ζωτικών, για το φυτό, αερίων, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας και επιβραδύνοντας τη φωτοσύνθεση, οπότε τα φύλλα του κιτρινίζουν (χλωρίωση). Στον Πίνακα 6.5 παρουσιάζονται οι επιδράσεις στην βλάστηση και οι συνέπειες στο οικοσύστημα αναλόγως της συγκέντρωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Υψηλή, Μέση, Χαμηλή).

Πίνακας 6.5: Συσχέτιση συγκέντρωσης ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τις επιδράσεις σε χλωρίδα / οικοσύστημα

Ατμοσφαιρική ρύπανση	Επιδράσεις σε Πανίδα	Επιδράσεις στο Οικοσύστημα
Υψηλή	1.Βαρέα νοσηρότητα 2.Θνησιμότητα	1.Απλοποίηση, αυξημένη ικανότητα (erodability) διάβρωσης φθορά θρεπτικών στοιχείων, αλλαγμένο μικροκλίμα και υδρολογία 2.Μειωμένη σταθερότητα
Μέση	1.Μειωμένη ανάπτυξη (growth) α) Μειωμένη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών ι)Μείωση ρυθμού αποσύνθεσης οργανικών υπολειμμάτων ιι) Απόπλυση με όξινη βροχή β) Ελάττωση φωτοσύνθεσης, ενίσχυση αναπνοής 2.Μειωμένη αναπαραγωγή α) Παρέμβαση στη γονιμοποίηση β) Ακανονιστία στην (δημιουργία) ανάπτυξη της γύρης, άνθους, σπόρου ή φυταρίου 3.Αυξημένη νοσηρότητα α) Προδιάθεση σε εντομολογικά ή μικροβιακά στρες β) Ευθέως πρόκληση νόσου	1.Μειωμένη παραγωγικότητα, (μειωμένη) ελαττωμένη βιομάζα 2.Αλλαγμένη σύνθεση ειδών 3.Αυξημένη έκρηξη εντόμων, επιδημιών μείωση ρόμης
Χαμηλή	1.Δρά ως καταβόθρα για τους ρύπους 2.Χωρίς ή ελάχιστες φυσιολογικές αλλαγές	1.Οι ρύποι μετατρέπονται από ατμοσφαιρικούς σε οργανικούς ή διαθέσιμους θαλάμους θρεπτικών ουσιών 2.Μη δυνάμενη να αποκαλυφθεί η επίδραση, λιπασματικό αποτέλεσμα.

(Πηγή: Smith, 1974)

6.5.2 Επιδράσεις στην Πανίδα

Επιπλέον, φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά και η υγεία των ζώων. Ύστερα από πειράματα που έχουν γίνει πάνω στα ζώα σε εργαστηριακή κλίμακα, φαίνεται ότι οι επιπτώσεις των σωματιδίων πάνω τους είναι ανάλογες με αυτές που υφίσταται ο άνθρωπος (π.χ. καρκίνος, λοιμώξεις των πνευμόνων και θάνατος ακόμη και στα νεογέννητα ζώα). Η επιρροή όμως, στα ζώα είναι και έμμεση μέσω της διατροφής τους με φυτά, των οποίων οι ιστοί έχουν επηρεαστεί από τα σωματίδια και από τοξική ύλη. Η τοξική αυτή ύλη είναι δυνατόν να

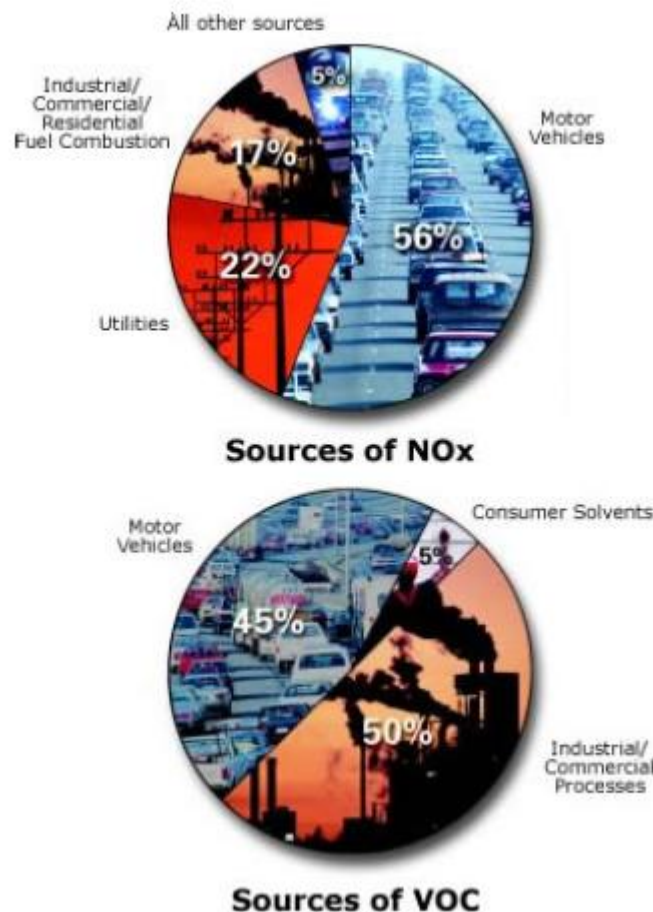
απορροφηθεί και από τους ιστούς των ζώων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι προσπάθειες για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης επικεντρώνονται κυρίως στις πολιτικές αποφάσεις σε κεντρικό ή περιφερειακό επίπεδο. Μία απόπειρα έγινε με το Πρωτόκολλο του Κιότο σε διεθνές επίπεδο και με άλλες δραστηριότητες του ΟΗΕ.

Σύμφωνα με στοιχεία της την U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), 14 56% των NO_x και 45% των VOCs αποδίδεται στην κίνηση των οχημάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.

Σχήμα 7.1: Ανθρωπογενείς πηγές των NO_x και των VOCs σύμφωνα με την U.S. EPA



Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής ένωσης καθιερώθηκε ο καταλύτης στα αυτοκίνητα και ο ιονισμός στις καμινάδες των εργοστασίων. Οι καταλύτες αποτρέπουν την εκπομπή των άκαυστων αερίων και οξειδίων που παράγουν οι μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ ο ιονισμός στις καμινάδες μειώνει την εκπομπή των βλαβερών αερίων κατά 90%.

Επιπλέον στην αντιμετώπιση της ρύπανσης συμβάλλει και η στροφή στις καθαρές πηγές ενέργειας.

Ο τεχνικοοικονομικά αριστοποιημένος έλεγχος των κλασικών ατμοσφαιρικών ρύπων (διοξειδίου του θείου (SO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), οργανικών πτητικών ενώσεων

(VOC_s) και σωματιδίων (συμπεριλαμβανομένων των βαρέων μετάλλων) από τις (μεγάλες) βιομηχανικές εγκαταστάσεις, ιδίως του ενεργειακού τομέα, έμμεσα μπορεί να περιορίσει τη συμβολή των εγκαταστάσεων στις εκπομπές αερίων του ρύπων.

1. Με τη βελτίωση της εν γένει ενεργειακής απόδοσης των εγκαταστάσεων και της συνακόλουθης εξοικονόμησης καυσίμων
2. Με την κατανάλωση καυσίμων φιλικότερων προς το περιβάλλον, που πρακτικά σημαίνει κατανάλωση φυσικού αερίου/υγραερίου, αντί ντίζελ, αντί μαζούτ, αντί στερεών καυσίμων
3. Με τη αξιοποίηση και χρήση εξελιγμένων παραγωγικών διαδικασιών που από τη φύση τους περιορίζουν τις εκπομπές ρύπων.

Ουσιαστικά τα προαναφερόμενα αποτελούν τις δυνατότητες που προσφέρονται για τις μικρότερου μεγέθους δραστηριότητες που γενικά δυσκολεύονται να διαθέσουν σημαντικά κονδύλια για την εγκατάσταση αποδοτικού, αλλά και χρηματικά δαπανηρού, αντιρρυπαντικού εξοπλισμού (εξαιρέση αποτελεί η εγκατάσταση εξοπλισμού χαμηλής απόδοσης (ενδεικτικά, κυκλώνες)).

Για τις εγκαταστάσεις μεγαλύτερου μεγέθους ο περιορισμός των εκπομπών ρύπων μπορεί να επιτευχθεί και με τη χρήση αντιρρυπαντικής τεχνολογίας στο ρεύμα των απαερίων/καυσαερίων (ψεκάσμος υγρού ή στερεού χημικού αντιδραστηρίου, χρήση απορροφητικών υλικών (ενδεικτικά, ενεργός άνθρακας), μετακαυστήρες, πλυντρίδες, (πολυ)κυκλώνες, σακκόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα), αν και σε αυτή την περίπτωση προκαλείται (μικρή) αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου λόγω της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία του αντιρρυπαντικού εξοπλισμού.

Σε γενικές γραμμές, τα προβλήματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορούν να διαχωριστούν σε προβλήματα βιομηχανικής και αστικής ρύπανσης.

7.1 Αστική Ρύπανση

Το είδος αυτό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αφορά στις δομημένες περιοχές και κυρίως όσες από αυτές είναι πυκνοκατοικημένες. Οι πηγές ρύπανσης εδώ είναι κατά κύριο λόγο τα οχήματα και κατά δεύτερο λόγο η θέρμανση. Οι πηγές αυτές αναπτύχθηκαν και αναπτύσσονται ραγδαία ακολουθώντας την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της χώρας. Επειδή τόσο η χρήση των αυτοκινήτων όσο και η χρήση της θέρμανσης μπορούν να θεωρηθούν σε πρώτη προσέγγιση ανάλογες του πληθυσμού τα προβλήματα αστικής ρύπανσης διαβαθμίζονται κατ' αυξητική έννοια από τις μικρές προς τις μεγάλες πόλεις. Τα προβλήματα αυτά επιδεινώνονται λόγω της κακής ρυμοτομίας των περισσότερων ελληνικών πόλεων, που χαρακτηρίζεται από την έλλειψη ανοικτών χώρων και την ύπαρξη υψηλών κτιρίων σε δρόμους μικρού πλάτους.

Η κυριότερη αιτία ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις αστικές περιοχές οφείλεται στον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό των πάσης φύσεως οχημάτων που κυκλοφορούν, στον υψηλό μέσο όρο της ηλικίας των οχημάτων αυτών και τα κυκλοφοριακά προβλήματα.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση υπήρξε έντονη ήδη από τη δεκαετία του '70, βελτιώθηκε ως προς ορισμένους ρύπους και επιδεινώθηκε ως προς άλλους κατά τη δεκαετία του '80 και μειώθηκε σημαντικά κατά τη δεκαετία του '90, κυρίως χάρη στο μέτρο της απόσυρσης των παλαιών βενζινοκίνητων αυτοκινήτων με παράλληλη επιδότηση νέων καταλυτικών οχημάτων.

Από το 1994 εφαρμόζεται ειδικό πρόγραμμα (ΑΤΤΙΚΗ SOS), το οποίο περιλαμβάνει σειρά μέτρων, όπως: έλεγχοι σταθερών και κινητών πηγών ρύπανσης, έλεγχοι ποιότητας καυσίμων, κάρτα ελέγχου καυσαερίων, προληπτικά έκτακτα μέτρα, κλιμακωτό ωράριο, λειτουργία λεωφορειοδρόμων κλπ.

Η παρατηρούμενη πτώση στις τιμές των ρύπων για το έτος 1998 αποδίδεται κυρίως στη σταδιακή αντικατάσταση των παλαιών βενζινοκίνητων αυτοκινήτων με αυτοκίνητα νέα τεχνολογίας με καταλύτες και δευτερευόντως, στη χρήση καυσίμων με καλύτερες τεχνικές προδιαγραφές (κυρίως μείωση της περιεκτικότητας σε θείο), στη σημαντική της βιομηχανικής δραστηριότητας στην Αττική, στην εφαρμογή της κάρτας ελέγχου καυσαερίων και στα μέτρα ελέγχου εκπομπής ρύπων από διάφορες πηγές.

Χαρακτηριστικά είναι τα στοιχεία για τη γρήγορη αύξηση του ποσοστού των καταλυτικών αυτοκινήτων το διάστημα 1989-1997, όπως παρουσιάζονται στον διπλανό πίνακα. «Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέσος όρος των ΙΧ αυτοκινήτων και ελαφρών φορτηγών αγγίζει τα 12 έτη και των βαρέων οχημάτων ξεπερνά τα 17 έτη.»

Πίνακας 7.1: Ποσοστό καταλυτικών αυτοκινήτων το χρονικό διάστημα 1989-1997.

Έτος	Ποσοστό
1989	1‰
1990	3‰
1991	130‰
1992	240‰
1993	300‰
1994	340‰
1995	380‰
1996	420‰
1997	460‰

Τα προβλήματα που σχετίζονται με αστική ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελούν γενεσιουργές αιτίες περιβαλλοντικών πιέσεων και εντοπίζονται σε αρκετά επίπεδα.

1. Στρατηγικό επίπεδο

- a) Θέματα στρατηγικής για την οργάνωση του συστήματος μεταφορών σε επίπεδο πόλης και θέματα πολιτικής για την κυκλοφορία και τη στάθμευση των οχημάτων, αλλά και την κυκλοφορία των πεζών. Αυτό οδηγεί σε αποσπασματική μελέτη των κυκλοφοριακών θεμάτων με αντίστοιχη αποσπασματικότητα στην εφαρμογή των κάθε είδους μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων.
- b) Θέματα συντονισμού χωροταξικού/πολεοδομικού και συγκοινωνιακού σχεδιασμού. Δεν συντονίζονται πάντα όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με την κυκλοφορία και στάθμευση των οχημάτων (πολεοδομικός σχεδιασμός – χρήσεις γης, συγκοινωνιακά στοιχεία, περιβαλλοντικές παράμετροι, οικονομικά στοιχεία, πληθυσμιακά στοιχεία).

2. Επίπεδο υποδομής

- a) Έλλειψη χώρων στάθμευσης για μετεπιβίβαση, αλλά και χώρων στάθμευσης μικρής διάρκειας. Η έλλειψη των χώρων αυτών έχει σαν επακόλουθο την παράνομη στάθμευση και τελικό αποτέλεσμα την δυσλειτουργία στην κυκλοφοριακή ροή.
- b) Έλλειψη κατάλληλων χώρων υποδοχής εμπορευμάτων.

3. Λειτουργικό επίπεδο

- a) Θέματα σχεδιασμού στη δρομολόγηση των μεταφορικών μέσων.

- b) Θέματα αξιοπιστίας στα δρομολόγια.
- c) Θέματα συστηματικής και συνεχούς επιτήρησης των κανόνων κυκλοφορίας και στάθμευσης.
- d) Μη τακτική παρακολούθηση των κυκλοφοριακών στοιχείων και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των κυκλοφοριακών παρεμβάσεων.

4. Θεσμικό-οικονομικό επίπεδο

- a) Θέματα οργάνωσης και στελέχωσης των Ο.Τ.Α. σε συγκοινωνιακά θέματα.
- b) Αλληλοεπικάλυψη αρμοδιοτήτων μεταξύ των αρμόδιων φορέων και θέματα συντονισμού μεταξύ τους.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα προβλήματα αυτά δεν περιορίζονται μόνο στις μεγάλες πόλεις αλλά και σε πόλεις μεσαίου, μικρού ή πολύ μικρού πληθυσμού. Προφανώς, το είδος και το μέγεθος των προβλημάτων διαφέρουν μεταξύ τους.

Τα αισιόδοξα σενάρια για την ατμοσφαιρική ρύπανση είναι αβέβαια και δοκιμάζονται στην καθημερινή πραγματικότητα, η οποία συνολικά επιδεινώνεται. Τα θετικά αποτελέσματα, δηλαδή η μείωση των υψηλότερων τιμών ορισμένων ρύπων και της ανάγκης λήψης έκτακτων μέτρων επί μερικά χρόνια, συνδέονται με προγράμματα που έφεραν αποτελέσματα, αλλά έχουν πλέον εξαντλήσει τις δυνατότητές τους.

Ο σχεδιασμός αντιμετώπισης του προβλήματος από τις αρμόδιες υπηρεσίες βασίστηκε κυρίως στην κατασκευή έργων, τα οποία αναμένεται να βελτιώσουν την κυκλοφορία των αυτοκινήτων και τις μεταφορές όπως: Εθνική οδός, υπόγειοι και ανισόπεδοι κόμβοι, επέκταση του μετρό, προαστιακός σιδηρόδρομος, τραμ στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας, ανανέωση των μέσων μαζικής μεταφοράς.

7.1.1 Προτεινόμενα μέτρα για την αστική ρύπανση

Μέτρα για την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης άρχισαν ουσιαστικά να εφαρμόζονται από το 1978 και είχαν τότε ως στόχο τη μείωση των τιμών του διοξειδίου του θείου και του μολύβδου, δύο ρύπων ιδιαίτερα επιβαρυντικών στην ανθρώπινη υγεία που εμφανίζονταν σε υψηλές τιμές.

Η αντιμετώπιση του διοξειδίου του θείου έγινε αρχικά με την απαγόρευση της χρήσης μαζούτ στις κεντρικές θερμάνσεις και στη συνέχεια με συνεχείς μειώσεις της περιεκτικότητας σε θείο τόσο του μαζούτ όσο και του πετρελαίου. Τα αποτελέσματα ήταν θεαματικά και συνετέλεσαν ώστε σήμερα το πρόβλημα του διοξειδίου του θείου να ελέγχεται πλήρως.

Η αντιμετώπιση του μολύβδου έγινε με συνεχείς μειώσεις της περιεκτικότητας του μολύβδου στη βενζίνη μέχρι της τελικής κατάργησης από 1/1/2002 της μολυβδωμένης βενζίνης που είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει σήμερα πρόβλημα από τον ρύπο αυτό.

Τα προτεινόμενα μέτρα αποσκοπούν στη σημαντική μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με έμφαση τα αστικά κέντρα. Η κατάρτιση των μέτρων στηρίχθηκε στα εξής:

- Η απόδοση των όποιων μέτρων προβλέπεται να είναι μακροχρόνια και απαιτεί την συμβολή των πολιτών
- Η ευθύνη του εθνικού σχεδιασμού είναι του ΥΠΕΧΩΔΕ, όμως ο τοπικός σχεδιασμός, η εφαρμογή και η παρακολούθηση της απόδοσης των μέτρων πρέπει να γίνεται σε αποκεντρωμένη βάση από τις Περιφέρειες, τις Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις και τους Δήμους.

ü Τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση των αστικών κέντρων έχουν οι εκπεμπόμενοι ρύποι από τα πάσης φύσεως οχήματα των οδικών μεταφορών. Το ποσοστό αυτό ξεπερνά σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις το 70%. Είναι προφανές λοιπόν ότι ο κύριος κορμός των μέτρων θα πρέπει να αφορά τις οδικές μεταφορές.

1. Μέτρα για τον έλεγχο των εκπομπών από τις οδικές μεταφορές

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει πρακτικά σύνδεση της περιβαλλοντικής επίδοσης του κάθε οχήματος με τις οικονομικές υποχρεώσεις του κατόχου προς την πολιτεία (τέλη κυκλοφορίας, κλπ), ούτε με τα δικαιώματα κίνησης και στάθμευσης του οχήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σε συνάρτηση και με τη διαμορφωμένη αγορά των μεταφορικών μέσων, τη συνεχή γήρανση του στόλου των οχημάτων και κατά συνέπεια την αναίρεση της μείωσης των αντίστοιχων εκπομπών ρύπων που επιτυγχάνεται από τα οχήματα νέας τεχνολογίας. Κύριος λοιπόν στόχος των μέτρων που ακολουθούν είναι η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα κύρια και δευτερεύοντα αστικά κέντρα μέσω του γρήγορου εκσυγχρονισμού του στόλου των οχημάτων και με βάση την αρχή «ο ρυπαίνων» πληρώνει».

2. Περιβαλλοντικά Τέλη Κυκλοφορίας

Αλλαγή του τρόπου υπολογισμού των τελών κυκλοφορίας, που σήμερα γίνεται με βάση τον κυβισμό του κινητήρα, με κλιμάκωση της χρέωσης των τελών κυκλοφορίας ανάλογα με την περιβαλλοντική επιβάρυνση του κινητήρα των οχημάτων. Η προμήθεια του σήματος των «περιβαλλοντικών» πλέον τελών κυκλοφορίας θα πραγματοποιείται όπως και σήμερα στο τέλος κάθε ημερολογιακού έτους από πιστοποιημένα σημεία συναλλαγής (π.χ. τράπεζες) με απαραίτητη προϋπόθεση την προσκόμιση της κάρτας ελέγχου καυσαερίων του οχήματος. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται ταυτόχρονα και ο θεσμός της κάρτας καυσαερίων ο οποίος έχει ατονήσει αφού περίπου τα μισά οχήματα δεν εκδίδουν κάρτα.

Τα περιβαλλοντικά τέλη κυκλοφορίας θα ισχύουν για όλες τις κατηγορίες οχημάτων (Ι.Χ., δίκυκλα, φορτηγά κτλ.) καθώς και για όλες τις εθνικότητες οχημάτων (για τα οχήματα με ξένες πινακίδες).

3. Περιβαλλοντική Χρέωση Κυκλοφορίας

Εισαγωγή περιβαλλοντικών χρεώσεων στην κυκλοφορία είτε ως προσαύξηση των υφιστάμενων χρεώσεων είτε ως νέα χρέωση:

- a) Εισαγωγή μεταβλητών διοδίων στους αστικούς αυτοκινητόδρομους ανάλογα με την περιβαλλοντική επιβάρυνση του κινητήρα του οχήματος
- b) Κλιμάκωση του τέλους της ελεγχόμενης στάθμευσης, ανάλογα με την περιβαλλοντική επιβάρυνση του κινητήρα του οχήματος
- c) Επιβολή συστήματος χρέωσης εισόδου των οχημάτων σε κεντρικές περιοχές των Δήμων της χώρας (σε όσους Δήμους το επιθυμούν) ανάλογα με την περιβαλλοντική επιβάρυνση του κινητήρα του οχήματος

4. Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί Κυκλοφορίας (Πράσινος Δακτύλιος)

Εισαγωγή συστήματος περιορισμού εισόδου των οχημάτων σε κεντρικές περιοχές των Δήμων της χώρας (σε όσους Δήμους το επιθυμούν) ανάλογα με την κατηγορία του κινητήρα τους.

5. Μέτρα για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

- a) Δημιουργία πλήρους δικτύου παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το οποίο να καλύπτει όλα τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα αστικά κέντρα.
- b) Την ευθύνη λειτουργίας και συντήρησης των σταθμών θα έχουν οι περιφέρειες. Τα δεδομένα των μετρήσεων θα συλλέγονται από το ΥΠΕΧΩΔΕ που θα έχει και την ευθύνη πληροφόρησης του κοινού. Βασικός στόχος είναι η αποκεντρωμένη λειτουργία του δικτύου.
- c) Δημιουργία σύγχρονου εργαστηρίου διαβαθμονόμησης του ειδικού εξοπλισμού των σταθμών μέτρησης.

6. Σύστημα αξιολόγησης της απόδοσης των μέτρων

- a) Νομοθετική ρύθμιση για την υποχρεωτική υποβολή από διάφορους δημόσιους φορείς, στο Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης, στοιχείων και δεδομένων, απαραίτητων για τη συστηματική αξιολόγηση της απόδοσης των ανωτέρω μέτρων και όσων μέτρων θα θεσμοθετηθούν στο μέλλον.
- b) Σύνταξη από το Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης έκθεσης αξιολόγησης της απόδοσης των μέτρων ανά διετία.

7.2 Βιομηχανική Ρύπανση

Το είδος αυτό της ρύπανσης αφορά κυρίως:

1. Τις περιοχές όπου λειτουργούν θερμοηλεκτρικοί σταθμοί για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το μέγεθος των προβλημάτων ατμοσφαιρικής όπου λειτουργούν θερμοηλεκτρικοί σταθμοί εξαρτάται από το μέγεθος της παραγωγής, από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο (λιγνίτη, πετρέλαιο) και από τις επικρατούσες κατά περίπτωση μετεωρολογικές συνθήκες. Τα κύρια προβλήματα εντοπίζονται στις λιγωτικές μονάδες της ΔΕΗ που λειτουργούν στους νομούς Φλώρινας, Κοζάνης και Αρκαδίας.
2. Τις περιοχές όπου λειτουργούν μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Η έννοια «μεγάλες βιομηχανικές μονάδες» περιλαμβάνει είτε τις πλέον ενεργότερες είτε αυτές που το είδος και η ποσότητα παραγωγής τους καθώς και η διακίνηση πρώτων υλών και προϊόντων δημιουργούν εκτεταμένα προβλήματα. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα διυλιστήρια, οι τσιμεντοβιομηχανίες, τα εργοστάσια παραγωγής λιπασμάτων, οι χαλυβουργίες και οι μονάδες εξόρυξης και επεξεργασίας μετάλλων. Γενικά οι μονάδες αυτές αφορούν την Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Βόλο, Καβάλα και Χαλκίδα.
3. Τις περιοχές όπου υπάρχει συσσώρευση πολλών έστω και μικρών βιομηχανιών και κυρίως τις περιοχές εκείνες όπου υπάρχει άμεση γειτνίαση με κατοικημένες

περιοχές όπως παράδειγμα συμβαίνει στην Ελευσίνα, Ασπρόπυργο, Δυτική Θεσσαλονίκη, Οινόφυτα (Βοιωτίας).

7.2 Έλεγχος των εκπομπών από τις βιομηχανίες

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των βιομηχανικών διεργασιών οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των εκπομπών της ρύπανσης, που προέρχεται από βιομηχανικές μονάδες, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αναγκών. Στις περισσότερες μονάδες μάλιστα, για τον αποτελεσματικότερο έλεγχο των εκπομπών, χρησιμοποιούνται συνδυασμοί των τεχνικών αυτών.

Για τον περιορισμό των βιομηχανικών εκπομπών υπάρχουν τρεις γενικές προσεγγίσεις:

1. Αλλαγή ή βελτίωση του καυσίμου.

Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται η χρήση καυσίμου με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο (π.χ. χρήση diesel αντί για μαζούτ), η επεξεργασία του κάρβουνου για την απομάκρυνση μέρους του θείου, η χρήση φυσικού αερίου αντί πετρελαίου ή κάρβουνου κ.τ.λ. Η αλλαγή του καυσίμου μπορεί να μειώσει τις εκπομπές των ενώσεων του θείου κατά 30-90%.

2. Έλεγχος των εκπομπών κατά το στάδιο της καύσης.

Παράδειγμα τεχνικής που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των εκπομπών των οξειδίων του θείου αποτελεί η καύση σε ρευστοποιημένα στρώματα. Οι βιομηχανικοί καυστήρες αυτής της μορφής λειτουργούν με ένα διαφορετικό τρόπο από τους συνηθισμένους. Αέρας με υψηλές ταχύτητες διαπερνά το στρώμα που περιέχει, εκτός των άλλων, το καύσιμο που πρέπει να αποθειωθεί και τον ασβεστόλιθο που θα απορροφήσει το θείο. Το σύστημα συμπεριφέρεται σαν υγρό που βράζει, καθώς φυσαλίδες ανεβαίνουν διαπερνώντας το στρώμα. Το διοξείδιο του θείου αντιδρά με τον ασβεστόλιθο και δίνει θειικά άλατα.

Η χαμηλότερη παραγωγή NOx μπορεί να επιτευχθεί με τροποποίηση είτε της αναλογίας αέρα-καυσίμου είτε της θερμοκρασίας καύσης. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών αποτελούν ο συγχρονισμός μίξης καυσίμου-αέρα, η επανακυκλοφορία των αερίων της καύσης, ο διαρκής έλεγχος του διαθέσιμου για καύση οξυγόνου, ο ψεκασμός νερού ή εισαγωγή ατμού στον καυστήρα κλπ.

3. Έλεγχος εκπομπών μετά την καύση.

Σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός από συσκευές συλλογής των σωματιδίων και συσκευών αποθείωσης. Για παράδειγμα ο έλεγχος των σωματιδίων μπορεί να επιτευχθεί είτε με την χρήση *κυκλωνικών συλλεκτών* (φυγόκεντρες διατάξεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα αποδοτικές για μεγάλα σωματίδια) είτε με *ηλεκτροστατική κατακρήμνιση* (τα σωματίδια ηλεκτρίζονται και συλλέγονται σε αντίθετα φορτισμένες πλάκες). Επίσης, μια από τις πιο αξιόπιστες και αποδοτικές μεθόδους συλλογής σωματιδίων μικρής διαμέτρου είναι τα *φίλτρα*.

Μερικές εκατοντάδες ή και μερικές χιλιάδες φίλτρα, βρίσκονται συγκεντρωμένα σε μια μεγάλη «σακούλα». Τα σωματίδια κινούνται ανάμεσα στα φίλτρα και προσκολλούνται σ' αυτά. Τα φίλτρα είναι πολύ αποδοτικά, έχουν όμως ορισμένα μειονεκτήματα, όπως υψηλό κόστος, κίνδυνο ανάφλεξης για ορισμένους τύπους σκόνης, υψηλές απαιτήσεις σε διαθέσιμο χώρο και περιορισμούς όσον αφορά τη θερμοκρασία (όχι πάνω 285°C). Ο μέσος χρόνος ζωής ενός τέτοιου συστήματος είναι περίπου 18 μήνες.

Τέλος για την αποθείωση των βιομηχανικών αερολυμάτων χρησιμοποιούνται τόσο υγρές όσο και ξηρές τεχνικές, ανάλογα με την φάση στην οποία γίνεται η κύρια αντίδραση. Σε μερικά συστήματα χρησιμοποιούνται δαπανηρά υλικά τα οποία επαναχρησιμοποιούνται με κατάλληλη επεξεργασία ενώ τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν οικονομικότερα υλικά μιας χρήσης (π.χ. ασβεστόλιθο). Μειονέκτημα της δεύτερης μεθόδου αποτελεί η ανάγκη για διάθεση των αποβλήτων που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες.

7.3 Σχέδια και προοπτικές αντιμετώπισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτεί λύσεις ουσιαστικής υποδομής που θα διευκολύνουν την αραίωση των δημιουργούμενων αιωρούμενων σωματιδίων και θα αποτρέψουν τη δημιουργία συνθηκών θερμοκρασιακής αναστροφής. Η ατμοσφαιρική αναστροφή είναι κυρίως θέμα θερμικών ισορροπιών στην ατμόσφαιρα πάνω από την ατμόσφαιρα και για την αντιμετώπισή της απαιτούνται μαζικά εξισορροπητικά στοιχεία, όπως θα ήταν το εκτεταμένο πράσινο, τα δάση, οι υδάτινοι όγκοι κ.τ.λ.

Η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής χημικής ρύπανσης με μετρήσεις γίνεται αξιοποιείται κυρίως για να πιστοποιείται ότι οι τιμές δεν έχουν υπερβεί τα όρια που θεσπίζονται από την υπάρχουσα νομοθεσία και για να λαμβάνονται έκτακτα μέτρα ανάγκης όπου παραστεί ανάγκη. Όμως η ρύπανση είναι συνεχώς παρούσα, με μέτριες ή χαμηλές συγκεντρώσεις, τις περισσότερες μέρες, σε πάρα πολλά σημεία και τα αποτελέσματά της είναι συσσωρευτικά.

Οι προοπτικές αντιμετώπισης του προβλήματος συναρτώνται με:

1. Την υπάρχουσα κατάσταση
2. Την αναμενόμενη αύξηση των εκπομπών
3. Την επεκτεινόμενη δόμηση που συντελεί βαθμιαία στην πτώση του ανέμου και πιθανώς στην εμφάνιση ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων που επιδεινώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση
4. Τα μέτρα που θα ληφθούν, ιδιαίτερα σε σχέση με τα αυτοκίνητα και τα μέσα μαζικής μεταφοράς και τις ενδεχόμενες τεχνολογικές εξελίξεις στους κινητήρες των αυτοκινήτων
5. Συμπληρωματικά υπολογίζεται να συμβάλλουν έργα και μέτρα όπως:
 - η σύνδεση του αστικού και περιφερειακού πρασίνου
 - οι διευθετήσεις στο εμπορικό τρίγωνο
 - η εξοικονόμηση ενέργειας σε κτίρια, η προώθηση της χρήσης του φυσικού αερίου
 - η μείωση του μέσου όρου ηλικίας των αυτοκινήτων
 - η βελτίωση της υποδομής για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με πρόγραμμα καταγραφής εκπομπών και δημιουργία επιχειρησιακού κέντρου παρακολούθησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης και επιβολής εκτάκτων μέτρων
6. Η δημιουργία υποδομής ελέγχου για την τήρηση περιβαλλοντικών όρων, με μελέτες για την ανάπτυξη βέλτιστων διαθέσιμων τεχνολογιών αντιρρύπανσης στις βιομηχανίες και με τη δημιουργία ελεγκτικού μηχανισμού
7. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος για την περιβαλλοντική διαχείριση της κυκλοφορίας και των μεταφορών, με στόχο τη λήψη αποφάσεων για

κυκλοφοριακές παρεμβάσεις για την αποφυγή κυκλοφοριακών συμφορήσεων και το σχεδιασμό έγκαιρης λήψης μέτρων διαχείρισης της κυκλοφορίας και των μεταφορών.

7.4 Τεχνολογίες αντιμετώπισης επίδρασης αερίων ρύπων

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες αντιμετώπισης της ρύπανσης από σωματίδια και αέριες εκπομπές που εφαρμόζονται σε διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και για διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες.

Σε γενικές γραμμές, οι εφαρμοζόμενες τεχνολογίες αντιρρύπανσης για τα αιωρούμενα σωματίδια επιτρέπουν την ανάκτηση του «απομακρυσμένου ρύπου» - πρακτική που συχνά ακολουθείται από τη βιομηχανία. Αντίθετα, σε ό,τι αφορά τις αέριες εκπομπές, οργανικές ή ανόργανες, η συνήθης πρακτική είναι η εφαρμογή μέτρων για τη μείωση εκπομπών στην πηγή με κατάλληλες βελτιστοποιήσεις στην παραγωγική διαδικασία, καθώς η ανάκτηση ουσιών μετά την εφαρμογή της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας είναι είτε δύσκολη είτε αδύνατη, καθώς ο ρύπος μπορεί να έχει υποστεί διάσπαση ή χημική μετατροπή σε άλλα βλαβερά για το περιβάλλον, συστατικά. Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικές τεχνολογίες ελέγχου αέριας ρύπανσης.

Πίνακας 7.2: Τεχνολογίες ελέγχου αέριας ρύπανσης

❖ Συστήματα απομάκρυνσης σωματιδίων	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Στατικοί διαχωριστές ή θάλαμοι καθίζησης (αποκονίωσης) με βαρύτητα ◆ Κυκλώνες ◆ Διαχωριστές πρόσκρουσης (ή συλλέκτες αχλύος) ◆ Φίλτρα στρώματος ή κλίνης διηθητικού υλικού ◆ Σακκόφιλτρα ◆ Ηλεκτρόφιλτρα ◆ Πλυντρίδες
❖ Συστήματα απομάκρυνσης αερίων ρύπων	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Πλυντρίδες ◆ Συστήματα απορρόφησης ◆ Συστήματα προσρόφησης (π.χ. κλίνη ενεργού άνθρακα) ◆ Συμπυκνωτήρες ◆ Πυρσός ◆ Συστήματα καύσης - καταλυτικοί μετατροπείς

(Πηγή: Cooper C.D. & Alley F.C. (2004))

7.4.1 Σχεδιασμός της διεργασίας

Τα σημαντικότερα βήματα στην αλληλουχία σχεδιασμού είναι ο προκαταρκτικός προσδιορισμός του προβλήματος και μια σειρά από σημεία λήψης αποφάσεων τα οποία αποτελούνται από τις εναλλακτικές λύσεις και τα σχετιζόμενα με αυτά τα επιμέρους προβλήματα.

Σε κάθε στάδιο λήψης απόφασης, πρέπει να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές λύσεις και να επιλεγεί αυτή η οποία είναι η πιο εφικτή τεχνικά και οικονομικά. Η λεπτομερής αξιολόγηση της κάθε εναλλακτικής λύσης σε κάθε σημείο λήψης απόφαση απαιτεί την επίλυση όλων των επιμέρους προβλημάτων που σχετίζονται με αυτή την εναλλακτική λύση.

Πριν τον σχεδιασμό οποιαδήποτε συσκευής απομάκρυνσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πληροφορίες σχετικά με τα αιωρούμενα σωματίδια, το ρεύμα του αερίου και τις συνθήκες της διεργασίας.

Τα χαρακτηριστικά εκείνα των αερίων σωματιδίων που αφορούν είναι:

1. Μέγεθος
2. Κατανομή μεγέθους
3. Σχήμα
4. Πυκνότητα
5. Κολλώδες υφή
6. Διαβρωτική ικανότητα
7. Αντιδραστικότητα
8. Τοξικότητα

Τα χαρακτηριστικά του αερίου ρεύματος είναι:

1. Πίεση
2. Θερμοκρασία
3. Ιξώδες
4. Υγρασία,
5. Χημική σύσταση
6. Ευφλεκτότητα

Στις συνθήκες της διεργασίας, συνήθως περιλαμβάνονται:

1. Παροχή αερίου
2. Φόρτιση σε σωματίδια
3. Απαιτήσεις για την απόδοση απομάκρυνσης
4. Επιτρεπόμενη πτώση πίεσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

8.1 Ελληνικό Πρότυπο Ποιότητας Αέρα

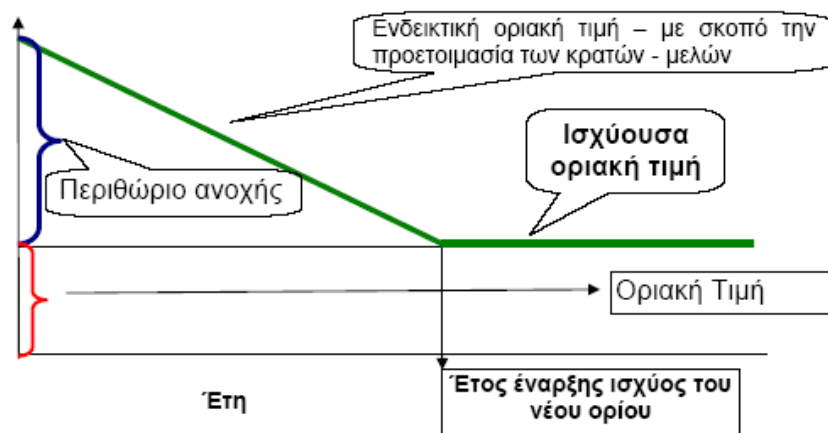
Η Ελλάδα ως μέλος της Ε.Ε υιοθέτησε την Οδηγία της Ε.Ε. 2008/50/Ε.Ε για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, με την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 14122/549/Ε.103/2011 (ΦΕΚ. 488/Β/30.03.11). Η Νομοθεσία θέτει όρια ποιότητας του αέρα για NO_x , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, Βενζόλιο, Pb, O_3 , και CO, τα πρότυπα της οποίας τέθηκαν σε ισχύ από την 1η Ιανουαρίου 2010.

Οδηγία	Πλαίσιο αναφοράς
Κ.Υ.Α 11824/1993	Σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όρια εκτάκτων μέτρων για τον περιορισμό της ρύπανσης σε περιπτώσεις που κυρίως λόγω εξαιρετικά δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών, αναμένεται αύξηση των τιμών ρύπανσης. Τα μέτρα λαμβάνονται όταν οι μετρούμενες τιμές υπερβούν ή προσεγγίσουν τα όρια εκτάκτων μέτρων (συναγερμού) και ταυτόχρονα υπάρχει πρόβλεψη για συνθήκες που ευνοούν την διατήρηση ή αύξηση των τιμών ρύπανσης τις επόμενες ή την επόμενη μέρα.
Οδηγία 1996/62/ΕΚ	Εκτίμηση και διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος - Ενσωμάτωση στο Ελληνικό Δίκαιο με την ΚΥΑ 3277/209/2000, ΦΕΚ 180/Β/17-2-2000
Οδηγία 1999/30ΕΚ	Οριακές τιμές διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου, σωματιδίων και μολύβδου, στον αέρα του περιβάλλοντος - Ενσωμάτωση στο Ελληνικό Δίκαιο με την ΠΥΣ 34/30-5-2002, ΦΕΚ 125/Α/5-6-2002
Οδηγία 2000/69/ΕΚ	Όζον και ατμοσφαιρικός αέρας - Ενσωμάτωση στο Ελληνικό Δίκαιο με την ΚΥΑ 38638/2016, ΦΕΚ 1334/Β/21-9-2005
Οδηγία 2002/3/ΕΚ	Θέσπιση ορίων για τις τιμές του όζοντος
Οδηγία 2004/107/ΕΚ	Αρσενικό, Κάδμιο, Υδράργυρος, Νικέλιο και Πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα

* Για τα αιωρούμενα σωματίδια ($\text{A}\Sigma_{10}$) δεν προβλέπεται από την κείμενη νομοθεσία τόσο την Ευρωπαϊκή όσο και την Ελληνική όριο συναγερμού.

Με τις οδηγίες αυτές για κάθε ρύπο ορίζεται μία οριακή τιμή για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, με το αντίστοιχο έτος έναρξης ισχύος της. Παράλληλα δίνεται και ένα περιθώριο ανοχής, το οποίο αθροίζεται στην οριακή τιμή, δίνοντας έτσι την ενδεικτική οριακή τιμή, η οποία ισχύει στο μεσοδιάστημα έως τη θέση σε ισχύ της οριακής τιμής. Το περιθώριο ανοχής κάθε χρόνο μειώνεται, έτσι ώστε στην ημερομηνία ισχύος του νέου ορίου να μηδενιστεί. Επιπρόσθετα, τα κράτη μέλη πρέπει να εκπονούν και να υλοποιούν σχέδια δράσης για την προετοιμασία τους όσον αφορά στην επίτευξη και τήρηση των ορίων. Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται μια επεξήγηση της τιμής στόχου και της οριακής τιμής, όπως αυτές ορίζονται στις οδηγίες της Ε.Ε.

Σχήμα 8.1: Επεξήγηση της εφαρμογής της τιμής στόχου και οριακής τιμής με βάση τις οδηγίες της Ε.Ε.



8.2 Στοιχεία εκπομπών για την Ελλάδα

Με βάση και τα εθνικά στοιχεία για το 2004 της Εκθεσης EPER-2 του 2006 και της απογραφής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (www.eionet.europa.eu/cdr) οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις με τη σημαντικότερη, αθροιστικά, συμβολή στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) της χώρας (συνολικά 104,6 εκατομμύρια τόνοι για το 2004, οι 74,4 από τον βιομηχανικό τομέα) ουσιαστικά ανήκουν στους κλάδους της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (51,1%), της παραγωγής τσιμέντου και μη μεταλλικών ορυκτών (10,6%), των διυλιστηρίων (3,2%) και της μεταλλουργίας (1,9%).

Ιδιαίτερα για τις εκπομπές CO₂ από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που εντάσσονται στο Εθνικό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου, οι κλάδοι με τις αναλογικά μεγαλύτερες εκπομπές (με βάση τα κατανομημένα δικαιώματα εκπομπών για την περίοδο 2005-07, ανερχόμενα σε 71,3 εκατομμύρια τόνους) είναι αυτοί της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (73,1% του συνόλου), της παραγωγής τσιμέντου (15,5%), των διυλιστηρίων (4,8%), της παραγωγής μη μεταλλικών ορυκτών (2,4%) και της μεταλλουργίας (2,3%).

Αναφορικά με τους κλασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους και τις εγκαταστάσεις που εμπίπτουν στις διατάξεις της Οδηγίας 2008/1/EK (IPPCD για τον ολοκληρωμένο έλεγχο και την πρόληψη της βιομηχανικής ρύπανσης), οι κλάδοι με τις αναλογικά μεγαλύτερες εκπομπές που υπερβαίνουν τον κατά ρύπο ουδό (Απόφαση 2000/479/EK) είναι:

- για το SO₂ (συνολικά 548,3 χιλιάδες τόνοι για το 2004) αυτοί της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (71,1% των εθνικών εκπομπών), των διυλιστηρίων (4,9%) και της μεταλλουργίας (3,1%)
- για τα NO_x (συνολικά 359,4 χιλιάδες τόνοι για το 2004) αυτοί της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (32,6%), της παραγωγής τσιμέντου και μη μεταλλικών ορυκτών (7,2%) και των διυλιστηρίων (1,2%)
- για τα VOCs (συνολικά 327,9 χιλιάδες τόνοι για το 2004) αυτός των διυλιστηρίων (2,5%)
- για τα σωματίδια είναι αυτοί της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (38.900 τόνοι για το 2004), της παραγωγής τσιμέντου και μη μεταλλικών ορυκτών (1.900 τόνοι) και της μεταλλουργίας (700 τόνοι).

Από τα προαναφερθέντα προκύπτει ότι ο κλάδος με τις αναλογικά μεγαλύτερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα είναι αυτός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (λογικά αναμενόμενο

δεδομένης και της μη χρήσης πυρηνικής ενέργειας στη χώρα) και συνεπώς αποτελεί, κατ' αρχήν, αυτόν στον οποίο πρέπει να επικεντρωθούν οι προσπάθειες περιορισμού των εκπομπών, ιδίως του SO₂ και των σωματιδίων.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '90 ξεκίνησε στη χώρα μας η χρήση του φυσικού αερίου στον άξονα Θεσσαλονίκη-Αθήνα με προεκτάσεις προς τη Θράκη και με την προοπτική επέκτασης του έως την Πελοπόννησο, ενώ εξαγγέλθηκε και η χρήση του αερίου και στη νήσο Κρήτη.

Πρόκειται για εξελίξεις που παράλληλα με την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οδηγούν και σε δραστική μείωση των εκπομπών σωματιδίων και SO₂ από τις εγκαταστάσεις που υποκαθιστούν άλλα καύσιμα (στερεά, υγρά) με φυσικό αέριο.

8.3 Αναφορά στην Οδηγία 2008/1/EK

Η Οδηγία 2008/1/EK (κωδικοποίηση της Οδηγίας 96/61/EK) για τον ολοκληρωμένο έλεγχο και την πρόληψη της ρύπανσης, γνωστή και ως IPPCD, θέτει το πλαίσιο της περιβαλλοντικής αδειοδότησης (πρβλ. έκδοση Απόφασης έγκρισης περιβαλλοντικών όρων) εγκαταστάσεων που ανήκουν στους σημαντικότερους κλάδους (παραγωγή ενέργειας, τροφίμων, ορυκτών και χημικών προϊόντων, μεταλλουργία, διαχείριση αποβλήτων κ.ά.) και, κατά κανόνα, υπερβαίνουν μια, συγκεκριμένη κατά περίπτωση, δυναμικότητα. Προβλέπει διαδικασίες και προϋποθέσεις για την αδειοδότηση, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες που κάλλιστα μπορούν να αποτελέσουν θετικά στοιχεία μιας περιβαλλοντικής πολιτικής για τον έλεγχο των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από τη βιομηχανία:

- Η προστασία του περιβάλλοντος πρέπει κατ' αρχήν να έχει προληπτικό χαρακτήρα και να πραγματοποιείται με ολοκληρωμένο τρόπο,
- για μια σειρά ατμοσφαιρικών ρύπων επιβάλλονται οριακές τιμές εκπομπής, χωρίς να προσδιορίζονται συγκεκριμένες τεχνικές αντιρρύπανσης
- οι επιβαλλόμενες από τις αρμόδιες Αρχές οριακές τιμές εκπομπής βασίζονται στις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (ΒΔΤ), που επιτυγχάνουν σημαντικές μειώσεις των εκπομπών, λαμβανομένων υπόψη και τεχνικοοικονομικών στοιχείων
- επιβάλλονται μέτρα προστασίας και αποκατάστασης του περιβάλλοντος για μετά την οριστική παύση λειτουργίας των εγκαταστάσεων και
- επιβάλλεται η καταγραφή των εκπομπών μιας σειράς ατμοσφαιρικών ρύπων, όταν υπερβαίνονται συγκεκριμένα επίπεδα εκφρασμένα σε kg/έτος. Τα στοιχεία καταχωρούνται σε σχετικό Μητρώο Εκπομπών προσπελάσιμο μέσω του Διαδικτύου.

Η Οδηγία αποτελεί βασικό κοινοτικό νομοθέτημα και

- επηρεάζει σημαντικά το κύκλωμα της περιβαλλοντικής αδειοδότησης, αλλά και τον τρόπο σκέψης και δράσης της Διοίκησης και των επιχειρήσεων
- υποχρεώνει τις εγκαταστάσεις να προσαρμοσθούν σε ένα σαφώς πιο περιοριστικό και δαπανηρότερο πλαίσιο, όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιδόσεις τους και
- ωθεί τις επιχειρήσεις να ενσωματώσουν στην πολιτική τους και την έννοια της, με καθαρά οικονομικά κριτήρια, μη ανταποδοτικής δαπάνης περιβαλλοντικού χαρακτήρα

Στην ιστοσελίδα του Ευρωπαϊκού γραφείου για την Οδηγία IPPC (<http://eippcb.jrc.es>) είναι αναρτημένα τα πλέον των 30 κείμενα αναφοράς (BREFs) για όλους τους κλάδους που εμπίπτουν στις διατάξεις της Οδηγίας 2008/1/EK καθώς και τα λεγόμενα οριζόντια που αφορούν περισσότερους κλάδους (για τη ψύξη και την παρακολούθηση των εγκαταστάσεων (monitoring)).

8.4 Προβλήματα Εφαρμογής

Όμως, πέρα από την θεωρία και τις αγαθές προθέσεις μπορεί να προκύψουν προβλήματα εφαρμογής, όπως, ενδεικτικά, τα ακόλουθα:

Θεωρητικά, τα λεγόμενα BREFs (BAT References) μπορεί να αποτελούν ένα χρήσιμο “εγχειρίδιο” για την επιλογή τεχνικών αντιρρύπανσης, όμως το ενδιαφέρον εστιάζεται στον καθορισμό των οριακών τιμών εκπομπής διαφόρων κατά περίπτωση ρύπων (ειδικά για τις εκπομπές βαρέων μετάλλων, συνήθως οι εκπομπές τους μειώνονται μέσω της μείωσης των εκπομπών σωματιδίων, στα οποία βρίσκονται εγκλωβισμένα). Για να χαρακτηρισθούν οι διάφορες τεχνικές ως Βέλτιστες Διαθέσιμες προϋποθέτουν την επίτευξη “χαμηλών επιπέδων εκπομπών”, διατύπωση σχετικά νεφελώδης. Οι κλαδικές εργασίες προσδιορίζουν, όχι με εξαντλητικό τρόπο, τις ΒΔΤ, χωρίς όμως να προτείνουν συγκεκριμένες κατά περίπτωση οριακές τιμές εκπομπών, αλλά εύρος τιμών.

Με δεδομένο ότι ο καθορισμός των οριακών τιμών εκπομπών εναπόκειται τελικά στις αρμόδιες Αρχές αυτή η εξέλιξη, φαινομενικά ευνοϊκότερη, μπορεί να αποτελέσει σημείο τριβής, ιδίως στην περίπτωση μη αποδοχής της Απόφασης της Διοίκησης από την τοπική κοινωνία.

Πηγή προβληματισμού μπορεί να αποτελεί η κατάρτιση των λεγομένων ισοδύναμου αποτελέσματος εθνικών σχεδίων για τον έλεγχο εκπομπών που επιτρέπουν χαλαρότερη αντιμετώπιση ορισμένων εγκαταστάσεων με αντιστάθμισμα αυστηρότερη αντιμετώπιση ορισμένων άλλων (Οδηγία 2001/80/ΕΚ για τις Μεγάλες Εγκαταστάσεις Καύσης και Οδηγία 2008/1/ΕΚ (IPPC)).

Αν για τις νέες εγκαταστάσεις οι κανόνες του παιχνιδιού, γνωστοί εκ των προτέρων, μπορούν να επηρεάσουν τις όποιες επιχειρηματικές επιλογές εν τη γεννέσει τους, ο καθορισμός των οριακών τιμών εκπομπών μπορεί να επηρεάσει ακόμη και τη βιωσιμότητα μιας υφιστάμενης εγκατάστασης στην περίπτωση του εκσυγχρονισμού ή/ και της προσαρμογής της. Είναι ένα πιθανότατο σημείο τριβών Διοίκησης, επιχειρήσεων και της τοπικής και μη τοπικής κοινωνίας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά συγκεκριμένης εγκατάστασης, η γεωγραφική θέση και οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες που θα μπορούσαν να λαμβάνονται υπόψη για τον καθορισμό των οριακών τιμών εκπομπής προσφέρονται για το ενδεχόμενο ποικιλίας απόψεων των ενδιαφερομένων.

Σε κάθε περίπτωση, τίθενται θέματα αυξημένων απαιτήσεων των υποβαλλόμενων μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αριθμητικής επάρκειας και εξειδίκευσης του προσωπικού των Υπηρεσιών που απασχολούνται με την αδειοδότηση, ώστε αυτή να ολοκληρώνεται εγκαίρως.

Επιπλέον, είναι απαραίτητος ο συντονισμός των Κεντρικών και των Περιφερειακών Υπηρεσιών, ιδίως σε θέματα ερμηνείας των νομοθετικών διατάξεων και επιλογής, των κατά περίπτωση, βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών αντιρρύπανσης.

Οι αρμόδιες Υπηρεσίες ελέγχου των εγκαταστάσεων θα πρέπει να διαθέτουν επαρκές πλήθος εξειδικευμένων ατόμων και κατάλληλο εξοπλισμό, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις για ελέγχους, περιοδικούς (με βάση τον εθνικό/ περιφερειακό σχεδιασμό) ή εκτάκτους, και να συμβάλλουν ουσιαστικά στον περιορισμό της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, να μην καταντούν τυποποιημένες εξετάσεις γραφειοκρατικού χαρακτήρα.

Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση η λειτουργία των εγκαταστάσεων να καλύπτεται από αδειοδοτικά έγγραφα (Απόφαση έγκρισης περιβαλλοντικών όρων) σε ισχύ, ώστε να είναι εφικτός και ο έλεγχος της περιβαλλοντικής επίδοσης των εγκαταστάσεων και ο εντοπισμός αποκλίσεων περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος.

Η εφαρμογή εθελοντικού χαρακτήρα συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης (ενδεικτικά, EN ISO 14001) μπορεί να συμβάλει στην περιβαλλοντικά ορθότερη λειτουργία των εγκαταστάσεων, χωρίς βεβαίως αυτό να σημαίνει ότι αυτές δεν πρέπει να ελέγχονται.

8.5 Αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Με την Κ.Υ.Α 11824/1993 θεσμοθετείται σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τίθενται “όρια εκτάκτων μέτρων” για τον περιορισμό της ρύπανσης σε περιπτώσεις που κυρίως λόγω εξαιρετικά δυσμενών μετεωρολογικών συνθηκών, αναμένεται αύξηση των τιμών ρύπανσης.

Τα μέτρα λαμβάνονται όταν οι μετρούμενες τιμές υπερβούν ή προσεγγίσουν τα όρια εκτάκτων μέτρων (συναγερμού) και ταυτόχρονα υπάρχει πρόβλεψη για συνθήκες που ευνοούν τη διατήρηση ή αύξηση των τιμών ρύπανσης για τις επόμενες ή την επόμενη ημέρα.

Τα αρχικά όρια για η λήψη εκτάκτων μέτρων, που αναφέρονται στην παραπάνω ΚΥΑ, τροποποιήθηκαν για τους ρύπους NO₂, SO₂ και O₃ με την εφαρμογή των Οδηγιών 1999/30/EK (ενσωμάτωση στο Εθνικό Δίκαιο με την Π.Υ.Σ. 34/30.5.2002) και 2002/3/EK.

8.6 Τα επερχόμενα

Έχοντας εντοπίσει διάφορα προβλήματα κατά την εφαρμογή της η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προτείνει την αναθεώρηση της Οδηγίας 2008/1/EK με βασικό σκοπό την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης και των επιπτώσεών της που οφείλονται στις βιομηχανικές δραστηριότητες, ώστε να επιτευχθεί ένα υψηλό επίπεδο προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος με τον πλέον οικονομικό και αποδοτικό τρόπο.

Επί μέρους στόχοι της πρότασης (και πηγή έμπνευσης) είναι:

- η επαρκέστερη εφαρμογή των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών (θα είναι δεσμευτικές οι προτεινόμενες από τα BREFs τιμές εκπομπής ρύπων;)
- η επαρκέστερη εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας (ενίσχυση του περιβαλλοντικού ελέγχου, των εκθέσεων συμμόρφωσης και της αναθεώρησης της περιβαλλοντικής άδειας) και ενίσχυση της τεχνολογικής καινοτομίας - ο περιορισμός περιττών διοικητικών διαδικασιών και η απλοποίηση της ισχύουσας νομοθεσίας (ενσωματώνονται στην Οδηγία 6 ισχύουσες κλαδικές Οδηγίες)
- η διευκόλυνση της πιθανής μελλοντικής χρήσης συστημάτων, όπως της εμπορίας εκπομπών SO₂ και NO_x, κατ’ αναλογία αυτού για το CO₂

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βαρδάκα Σ., «Ένα παρατηρητήριο ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τον Υμηττό: Πρόταση Περιβαλλοντικής Διαχείρισης ενός περιαστικού ορεινού όγκου στο μέλλον μιας βιώσιμης ανάπτυξης της Αθήνας», Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, 2005
2. Cooper C.D. & Alley F.C. « Έλεγχος Αέριας Ρύπανσης : Σχεδιασμού Αντιρρυπαντικής Τεχνολογίας», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2004
3. Ζιώμας Ι., «Περιβαλλοντική Διαχείριση της Κυκλοφορίας», Κινητικότητα στον αστικό χώρο. Πράσινη Βίβλος και ελληνική πραγματικότητα, ΤΕΕ, Αθήνα, 2008
4. Λυμπεροπούλου Κ., «Χρήση Νευρωνικών Δικτύων για την πρόγνωση της συγκέντρωσης τροποσφαιρικού όζοντος σε αστικό περιβάλλον», Πανεπιστήμιο Πατρών, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στις Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πάτρα, 2009
5. Μελάς Δ., «Διασπορά Αερίων Ρύπων», Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Μυτιλήνη, 1997
6. Μπίσκος Γ., «Αεροζόλ, Κλιματική Αλλαγή, Δημόσια Υγεία και Ναυοτεχνολογία», Αθήνα, 2009
7. Παπαχατζής Π., «Ατμοσφαιρική Ρύπανση και Ελληνική Ακτοπλοΐα», Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών, 2010
8. Ρεμουντάκη Ε., «Μηχανισμοί κινητικότητας ρύπων», Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνολογίας Προστασίας Περιβάλλοντος στη Μεταλλουργία και Τεχνολογία Υλικών
9. Τσεβρένης Γ., «Ανάπτυξη Λογισμικού για τον σχεδιασμό ατιρρυπαντικών τεχνολογιών ελέγχου αέριας ρύπανσης», Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μακεδονίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Κοζάνη, 2010
10. Χατζηδάκης Δ., «Ατμοσφαιρική ρύπανση από βιομηχανικές δραστηριότητες – Τεχνολογίες Αντιρρύπανσης», 1ο Ελληνοκινεζικό φόρουμ για το περιβάλλον, ΤΕΕ, Αθήνα, 2009
11. Χατουτσίδου Σ., «Κατανομή Αιωρούμενων Σωματιδίων στην Ανατολική Μεσόγειο: Σχηματισμός νέων σωματιδίων και δυναμική τους», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Ατμοσφαιρικών Αιωρούμενων Σωματιδίων», Χανιά, 2010
12. Χουσιάδας Χ., «Φυσική και Δυναμική των Αιωρούμενων Σωματιδίων», Θερινό Σχολείο «Δημοκρίτου», 2005

Ιστοσελίδες

1. Ιστοσελίδες του ΥΠΕΧΩΔΕ σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση.
 - a) *Εθνικά όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας*
<http://www.minenv.gr/1/12/122/12205/g1220509.html>
 - b) *Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Αθήνα*
<http://www.minenv.gr/1/12/122/12205/g1220501.html>
 - c) *Μέτρα της πολιτείας για την ελάττωση της ρύπανσης από κεντρική θέρμανση και άλλες πηγές*
<http://www.minenv.gr/1/12/122/12203/g1220303.html>
 - d) *Τι μπορούμε να κάνουμε για να βοηθήσουμε στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης*

<http://www.minenv.gr/1/12/122/12203/g1220304.html>

2. Ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος (EEA) - Περιβαλλοντικά Θέματα:

Πηγές Αέριας Ρύπανσης

<http://themes.eea.eu.int:80/showpage.php?pg=39344>

3. Ευρωπαϊκό Κέντρο για τις Αέριες Εκπομπές - CORINAIR 90 Δεδομένα Εκπομπών.

<http://www.aeat.co.uk/netcen/corinair/corinair.html>

4. Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο Ποιότητας Αέρα (European Topic Centre on Air Quality)

<http://www.etcaq.rivm.nl/>

5. Ιστοσελίδες της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA –Office of Air and Radiation) με λεπτομερειακό υλικό για την αέρια ρύπανση.

<http://www.epa.gov/oar/aqtrnd95/sixpoll.html>

<http://www.epa.gov/acidrain/effects/envben.html>

<http://www.epa.gov/iaq/pubs/insidest.html>

http://www.epa.gov/oar/oaqps/peg_caa/pegcaain.html

<http://www.epa.gov/Region2/health/humanhlth.htm>

<http://www.epa.gov/children/air.htm>

<http://www.epa.gov/epaoswer/osw/hazwaste.htm>