

## 2

# Ατμοσφαιρικοί ρύποι και κλίμακες διασποράς

Από τις ανθρώπινες δραστηριότητες εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ένας μεγάλος αριθμός ρύπων. Ανάλογα με την προέλευσή τους οι ρύποι χωρίζονται στις παρακάτω ευρείς κατηγορίες:

1. Πρωτογενείς ρύποι οι οποίοι εκπέμπονται άμεσα από τις πηγές ρύπανσης. Παραδείγματα πρωτογενών ρύπων αποτελούν το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του αζώτου. Οι πρωτογενείς ρύποι που συμμετέχουν στη φωτοχημική δημιουργία του όζοντος ονομάζονται πρόδρομοι ρύποι.
2. Οι δευτερογενείς ρύποι σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων μεταξύ πρωτογενών ρύπων. Τυπικό παράδειγμα δευτερογενούς ρύπου αποτελεί το όζον.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που κατά κύριο λόγο απασχολούν τις ανά τον κόσμο υπηρεσίες προστασίας του περιβάλλοντος είναι οι παρακάτω: το διοξείδιο του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου (κυρίως το διοξείδιο του αζώτου), οι υδρογονάνθρακες (κυρίως το βενζόλιο), το όζον, και τα αιωρούμενα σωματίδια (κυρίως τα PM10 και τα PM2.5) και ο μόλυβδος. Ο προηγούμενος κατάλογος δεν εξαντλεί τις επιβλαβείς ουσίες που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα αλλά δεν θα γίνει εδώ αναφορά στις υπόλοιπες διότι είτε οι συγκεντρώσεις τους είναι χαμηλές είτε παρουσιάζουν καθαρά τοπικό χαρακτήρα.

## **2.1 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)**

### **A. Εισαγωγή**

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα δηλητηριώδες αέριο που γενικότερα εκλύεται κατά τις ατελείς καύσεις. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι εκπομπές από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων έτσι ώστε σε κλειστούς χώρους στάθμευσης τα επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα μπορεί να φτάσουν ακόμη και σε θανατηφόρα επίπεδα. Ο καπνός του τσιγάρου και η έντονη κυκλοφοριακή κίνηση είναι κυρίως υπεύθυνα για την έκθεση του ανθρώπου σ' αυτήν την ουσία. Το μονοξείδιο του άνθρακα ευθύνεται για τις περισσότερες χημικές δηλητηριάσεις σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο, κυρίως λόγω της λανθασμένης χρήσης οικιακών συσκευών σε εσωτερικούς χώρους, όπως για παράδειγμα η χρήση κουζίνας υγραερίου για θέρμανση.

### **B. Φυσικές και χημικές ιδιότητες**

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι μη ερεθιστικό, άχρωμο, άγευστο και άοσμο αέριο. Προκαλεί βλάβες που οφείλονται ουσιαστικά στη στέρηση του οργανισμού από το οξυγόνο. Όταν εισπνέεται, δεσμεύει την αιμοσφαιρίνη (hemoglobin) του αίματος, εκτοπίζοντας (υποκαθιστώντας) το οξυγόνο. Το όνομα του συμπλόκου που δημιουργείται από το μονοξείδιο του άνθρακα και την αιμοσφαιρίνη ονομάζεται καρβοξυαιμοσφαιρίνη (Carboxyhemoglobin). Το ποσοστό της καρβοξυαιμοσφαιρίνης στο αίμα είναι ο καλύτερος δείκτης της έκθεσης στο μονοξείδιο του άνθρακα.

### **Γ. Πηγές**

Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά την ατελή καύση οργανικής ύλης (βενζίνη, ξύλο, καπνός) και ελευθερώνεται από τις εξατμίσεις, τις καμινάδες καθώς επίσης και τις θερμάστρες που χρησιμοποιούν το ξύλο ως καύσιμη ύλη. Το μονοξείδιο του άνθρακα δεν είναι αέριο του θερμοκηπίου, οξειδώνεται όμως σε διοξείδιο του άνθρακα επηρεάζοντας έμμεσα το παγκόσμιο κλίμα. Σε διεθνή κλίμακα, οι μεταφορές αποτελούν το 77% των εκπομπών εξωτερικών χώρων και ακολουθούνται από τις βιομηχανικές διαδικασίες (επιφανειακές πηγές, 7%), τις καύσεις ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (5%) και άλλες πηγές (11%).

### **Δ. Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση**

Η μεγαλύτερη έκθεση του ανθρώπου στο μονοξείδιο του άνθρακα προέρχεται από τον καπνό του τσιγάρου. Η περιεκτικότητα της καρβοξυαιμοσφαιρίνης σε έναν μη καπνιστή είναι περίπου 0.5%, ενώ σε έναν καπνιστή είναι έως δέκα φορές

μεγαλύτερη (περίπου 5%, αν και έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις έως 12%). Ακόμη και στο πιο επιβαρυσμένο περιβάλλον, η περιεκτικότητα σε καρβοξυαιμοσφαιρίνη για μη καπνιστές σπάνια ξεπερνά το 2%. Η έκθεση στο μονοξειδίο του άνθρακα είναι συνήθως μεγαλύτερη τον χειμώνα από ότι το καλοκαίρι λόγω των μεγάλων ποσοτήτων καυσίμων που καίγονται για την θέρμανση των κτιρίων καθώς επίσης και επειδή περνάμε περισσότερο χρόνο σε εσωτερικούς χώρους (το μονοξειδίο του άνθρακα είναι σημαντικό συστατικό της ρύπανσης εσωτερικών χώρων).

Το μονοξειδίο του άνθρακα υπάρχει οπουδήποτε λαμβάνουν χώρα σημαντικές καύσεις. Για παράδειγμα, οι πυρκαγιές δασών παράγουν τεράστιες ποσότητες, αλλά επειδή οι φωτιές είναι ακανόνιστες στην κατανομή, τα αέρια διαλύονται από τους ανέμους που επικρατούν. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στις οποίες οι άνθρωποι συνήθως εκτίθενται (εκτός από το κάπνισμα) παρατηρούνται σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Ο αέρας μέσα αλλά και γύρω από τους δρόμους της πόλης και τους αυτοκινητόδρομους περιέχει υψηλά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα ειδικά τις ώρες κυκλοφοριακής αιχμής. Το κάπνισμα σε κλειστό αυτοκίνητο σε ώρα κυκλοφοριακής αιχμής μπορεί να προκαλέσει επίπεδα συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα διπλάσια από εκείνο του ορίου ασφαλείας για την προστασία την ανθρώπινης υγείας. Εσωτερικός, μη αεριζόμενος χώρος στάθμευσης, κτίρια κατά μήκος αστικών δρόμων και τούνελ με έντονη κυκλοφορία περιέχουν τα υψηλότερα επίπεδα όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Δεκάδες εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε χώρες όπου η ποιότητα του αέρα απειλεί την υγεία. Μεγαλύτερα προβλήματα λόγω της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα αντιμετωπίζουν οι πόλεις με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση και κακό εξαερισμό.

**Πίνακας 2.1** Αναλογία μίγματος μονοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες περιοχές

<b>Τοποθεσία</b>	<b>Συγκέντρωση CO (ppm)</b>
Αστική λεωφόρος, μποτιλιαρισμένη κυκλοφορία	> 44
Καπνός τσιγάρου σε εσωτερικό κλειστού αυτοκινήτου	> 87
Εσωτερικός, μη αεριζόμενος χώρος στάθμευσης	> 100
Τούνελ με έντονη κυκλοφορία	> 200 (μέγιστη ωριαία)
Περιοχή χωρίς καπνό τσιγάρου	< 20 – 50
Ορισμένα επαγγέλματα	> 100

## **E. Επιπτώσεις στην υγεία**

Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης λόγω της έκθεσης στο μονοξείδιο του άνθρακα μπορούν να παρατηρηθούν σε οδηγούς εν ώρα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τέτοια είναι μεταξύ άλλων ο πονοκέφαλος, η ζάλη, η υπνηλία και η ναυτία. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερης έκθεσης, μπορεί να προκληθεί εμετός, λιποθυμία, κώμα ή ακόμα και θάνατος, ανάλογα με τον βαθμό έλλειψης οξυγόνου. Η λειτουργία αυτοκινήτου σε μη αεριζόμενο (κλειστό) χώρο στάθμευσης, από ατύχημα ή από πρόθεση, μπορεί να προκαλέσει ακόμη και θάνατο. Η χρήση κακοσυντηρημένης συσκευής καύσης εσωτερικών χώρων μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση του κεντρικού νευρικού συστήματος στο βαθμό που σταματάει η αναπνοή (respiratory arrest).

Τα μέρη του σώματος που επηρεάζονται περισσότερο είναι εκείνα που εξαρτώνται από τη σταθερή παροχή οξυγόνου: ο εγκέφαλος, η καρδιά και το αναπτυσσόμενο έμβρυο στις έγκυες γυναίκες. Οι άνθρωποι που είναι εγγενώς ευάλωτοι στην δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα είναι εκείνοι με καρδιακές και πνευμονικές δυσλειτουργίες, όπως οι ηλικιωμένοι που υποφέρουν συνήθως από κάποιου βαθμού στένωση αρτηριών. Άλλες ευπαθείς ομάδες είναι τα έμβρυα και τα νήπια, που βρίσκονται σε κρίσιμο στάδιο ανάπτυξης του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος. Άτομα με χρόνια βρογχίτιδα και εμφύσημα, που αναπνέουν συχνότερα και με δυσκολία για να αντισταθμίσουν το μειωμένο οξυγόνο του αίματος καθώς και άλλοι με διάφορες δυσλειτουργίες στο αίμα, όπως η αναιμία. Πάνω από 40 εκατομμύρια άνθρωποι ανήκουν σ'αυτές τις ευπαθείς ομάδες.

Πρόσφατη βιοϊατρική έρευνα έχει αποδείξει ότι η έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα, χαρακτηριστικό του ρυπασμένου αστικού αέρα, οδηγεί σε συχνότερα και παρατεταμένα επεισόδια στηθάγχης σε ανθρώπους με προβλήματα καρδιάς, προκαλεί μείωση της ικανότητας της εργασίας και των αθλητικών επιδόσεων, και μπορεί να προκαλέσει καρδιακά επεισόδια μειώνοντας την παροχή οξυγόνου στην καρδιά. Για τις τελευταίες περιπτώσεις, σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος, η έκθεση στο μονοξείδιο του άνθρακα ίσως να μην είναι ο κατ' εξοχήν υπεύθυνος παράγοντας, επηρεάζει όμως σημαντικά την υγεία με αποτέλεσμα να προκληθούν τα παραπάνω συμπτώματα.

Άλλες επιπτώσεις από μέτρια έκθεση σε μονοξείδιο του άνθρακα είναι οι επιδράσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα με αποτέλεσμα την αδυναμία προσοχής και συγκέντρωσης (π.χ. ικανότητα μάθησης) καθώς επίσης και δυσκολία πραγματοποίησης σύνθετων νευρολογικών δραστηριοτήτων (π.χ. οδήγηση). Οδηγοί σε αυτοκινητιστικά ατυχήματα συχνά έχουν αυξημένα όρια καρβοξαιμοσφαιρίνης. Ένα πρόβλημα με την μέχρι σήμερα έρευνα στην νευρολογία, είναι ότι μόνο σχετικά υψηλά όρια καρβοξαιμοσφαιρίνης (πάνω από 5%) έχουν μελετηθεί. Δεν έχει ακόμη διερευνηθεί τι προβλήματα δημιουργούν τα ελαφρώς αυξημένα επίπεδα λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μη καπνιστές. Ένα δεύτερο πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι έχουν μελετηθεί μόνο περιπτώσεις νεαρών και υγείων ενήλικων. Είναι

προς το παρόν άγνωστο ποιες θα μπορούσαν να είναι οι συνέπειες σε ομάδες πιο ευαίσθητες, όπως εκείνες με προϋπάρχουσες ασθένειες νευρικών συστημάτων (π.χ. γεροντική άνοια) ή με μειωμένη ικανότητα μεταφοράς οξυγόνου (π.χ. αναιμικοί).

Οι βλαβερές συνέπειες στην ανάπτυξη των εμβρύων και των νεαρών παιδιών είναι ένα ακόμα ανοικτό θέμα. Νεογέννητα από μητέρες που καπνίζουν, που υποβάλλουν δηλαδή τα αγέννητα παιδιά τους σε μειωμένα επίπεδα οξυγόνου στο αίμα, είναι συνήθως ελλιπποβαρή, με βραδύτερη ανάπτυξη και μεγαλύτερες πιθανότητες να εμφανίσουν το σύνδρομο αιφνίδιου βρεφικού θανάτου (SIDS). Πάντως επειδή υπάρχουν και διάφορες άλλες τοξικές ουσίες στον καπνό του τσιγάρου, είναι δύσκολο να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το μονοξειδίο του άνθρακα είναι το πλέον υπεύθυνο για όλα αυτά τα προβλήματα.

### **ΣΤ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Το είδος που φαίνεται να έχει τη μέγιστη έκθεση αλλά και τη μέγιστη ευασθησία στα τυπικά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα είναι ο άνθρωπος.

## **2.2 Οξειδία του αζώτου (NO<sub>2</sub>, NO)**

### **A. Εισαγωγή**

Τα οξειδία του αζώτου είναι ένα σύνολο αέριων ρύπων που παράγονται κατά την ανάφλεξη καύσιμης ύλης καθώς και σε φωτοχημικές αντιδράσεις στην ατμόσφαιρα. Τα δύο κύρια οξειδία του αζώτου είναι το διοξειδίο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και το μονοξειδίο του αζώτου (NO). Αυτά συχνά αναφέρονται ως NO<sub>x</sub>. Προσβάλλουν άμεσα την υγεία και υποβαθμίζουν το περιβάλλον, υποκινώντας παράλληλα την δημιουργία του όζοντος στην επιφάνεια της γης προκαλώντας περαιτέρω βλάβες. Το διοξειδίο του αζώτου, διαλυμένο στο νερό, την ομίχλη, τη βροχή και το χιόνι, μετατρέπεται σε νιτρικό οξύ προκαλώντας οικολογική βλάβη με τη μορφή όξινης βροχής.

### **B. Φυσικές και χημικές ιδιότητες**

Το μονοξειδίο του αζώτου είναι ένα άχρωμο αέριο. Είναι πρόδρομος του τροποσφαιρικού όζοντος και του νιτρικού οξέος. Δεν επηρεάζει άμεσα την όξινη βροχή.

Το διοξειδίο του αζώτου είναι ένα κιτρινωπό-καφέ αέριο που δίνει στην αιθαλομίχλη (αστικό νέφος) το χαρακτηριστικό της καφέ χρώμα. Είναι ένα πολύ

δραστικό χημικό συστατικό που ανήκει στην κατηγορία των *οξειδωτικών* (έχει την ικανότητα να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα μόρια). Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον, καθιστά το διοξείδιο του αζώτου βιολογικά επιβλαβές. Δεύτερον, δρα ως καταλύτης για την παραγωγή όζοντος από πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs), παρουσία ηλιακού φωτός. Το διοξείδιο του αζώτου αντιδρά με τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα και με άλλες ουσίες παράγοντας νιτρικό οξύ και όξινα σωματίδια (acid particulates).

### **Γ. Πηγές**

Το μονοξείδιο του αζώτου εκπέμπεται από τα μικρόβια στο χώμα και τα φυτά με τη διαδικασία της απονιτροποίησης ενώ παράγεται επίσης κατά τις καύσεις ορυκτών καυσίμων (αεροπλάνα, αυτοκίνητα, διύλιστήρια, κλπ) και βιομαζών και τις φωτοχημικές αντιδράσεις.

Η κύρια πηγή διοξειδίου του αζώτου είναι η οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου. Δευτερεύουσες πηγές αποτελούν οι καύσεις ορυκτών καυσίμων και βιομαζών. Πηγές διοξειδίου του αζώτου εσωτερικών χώρων αποτελούν οι συσκευές που λειτουργούν με αέριο, οι θερμάστρες κηροζίνης, οι θερμάστρες που λειτουργούν με καύση ξύλων (ξυλόσομπες) και τα τσιγάρα.

Οι κυριότερες πηγές οξειδίων του αζώτου είναι η καύση ορυκτών καυσίμων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εργοστάσια (45%) καθώς και τα μεταφορικά μέσα (49%).

### **Δ. Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση**

Η μέγιστη έκθεση στα οξειδία του αζώτου σε εξωτερικό χώρο λαμβάνει χώρα στον επιβαρυμένο αστικό αέρα. Η συγκέντρωση αυξάνει κατά τη διάρκεια των πρωϊνών ωρών, από τις 6:00 έως τις 9:00 περίπου, λόγω της μεγιστοποίησης του αριθμού των αυτοκινήτων και της παρουσίας του ηλιακού φωτός για την πραγματοποίηση των φωτοχημικών αντιδράσεων. Τις ώρες αυτές επικρατούν επίσης συχνά δυσμενείς συνθήκες διασποράς λόγω πολύ χαμηλών ανέμων και της συχνής παρουσίας αναστροφών. Τα μέγιστα επίπεδα συγκέντρωσης σε αστικές περιοχές είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερα σε σχέση με (καθαρές) εξοχικές περιοχές, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.2.

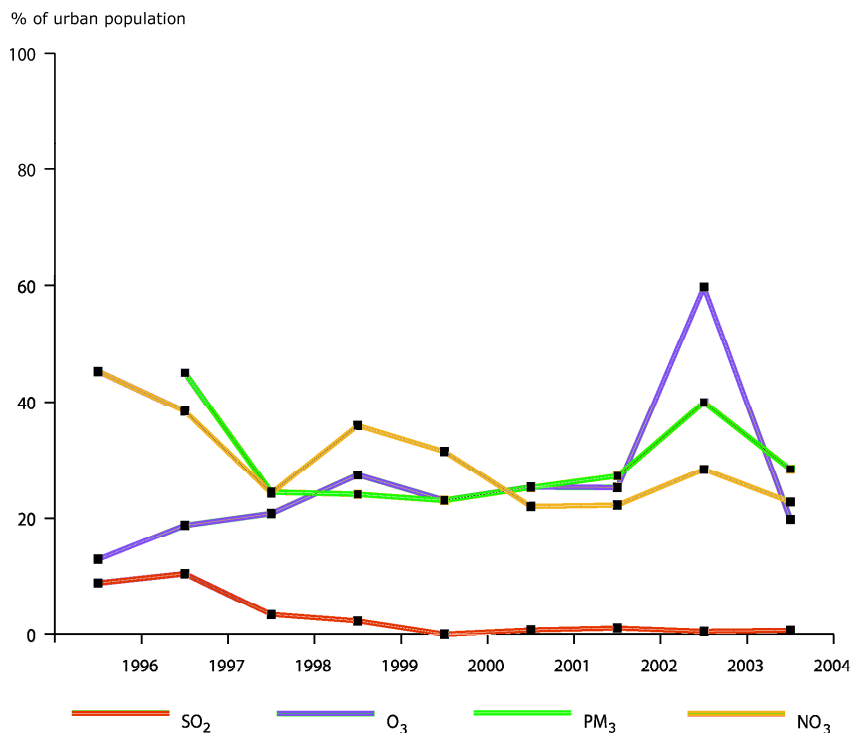
**Πίνακας 2.2** Αναλογία μίγματος οξειδίων του αζώτου σε διάφορες περιοχές

Τοποθεσία	Συγκέντρωση NOX (ppm)
Απόμερη περιοχή	0.001
Κατοικημένη απόκεντρη περιοχή	0.01
Ετήσιος μέσος όρος (Αστικές περιοχές)	0.029
Ωριαίες Τιμές (Αστικές περιοχές)	0.06-0.5

Ακόμη και σε περιοχές που τηρούν τους ισχύοντες κανονισμούς για την αέρια ρύπανση σύμφωνα με τους ετήσιους μέσους όρους, οι βραχυχρόνιες συγκεντρώσεις (ωριαίες τιμές) των οξειδίων του αζώτου μπορεί περιστασιακά να φθάσουν σε πολύ υψηλά επίπεδα σε κάποιες μέρες του χρόνου. Αυτές οι τιμές που ανταποκρίνονται σε μικρά χρονικά διαστήματα είναι πολύ σημαντικές καθώς νέα έρευνα δείχνει ότι η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις για μικρά χρονικά διαστήματα, είναι πιο επικίνδυνη από την μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις που όμως παραμένουν σταθερές. Η μέγιστη συγκέντρωση των οξειδίων αζώτου εμφανίζεται κατά τη διάρκεια περιόδων με κακό εξαερισμό (χαμηλοί άνεμοι και παρουσία ατμοσφαιρικών αναστροφών) όπου οι ρύποι παγιδεύονται σε ευσταθή στρώματα αέρα.

Την περίοδο 1996-2004, το 22-45% του αστικού πληθυσμού ήταν εκτεθειμένο σε συγκεντρώσεις διοξειδίου του αζώτου υψηλότερες του Ευρωπαϊκού ορίου προστασίας της ανθρώπινης υγείας ( $40 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_2$  – μέση ετήσια τιμή). Την ίδια περίοδο, μία ελαφρώς κατιούσα τάση έλαβε χώρα (Σχήμα 2.1).

Η ρύπανση εσωτερικών χώρων αποτελεί επίσης σημαντική πηγή έκθεσης στο διοξείδιο του αζώτου. Στα σπίτια με εγκαταστάσεις αερίου παρουσιάζονται υψηλότερες συγκεντρώσεις από ότι σε σπίτια εξοπλισμένα με ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Αντίστοιχα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στα σπίτια με συσκευές θέρμανσης που δε στηρίζονται στην κυκλοφορία του αέρα όπως η θερμάστρα κηροζίνης. Ο αέρας των εσωτερικών χώρων περιέχει περισσότερους ρύπους τον χειμώνα από ότι το καλοκαίρι λόγω της θέρμανσης του χώρου, αλλά και επειδή οι πόρτες και τα παράθυρα είναι κλειστά, με αποτέλεσμα ο χώρος να μην αερίζεται.



**Σχήμα 2.1** Διαχρονική εξέλιξη του ποσοστού του αστικού πληθυσμού ο οποίος ζει σε περιοχές με συγκεντρώσεις υψηλότερες των οριακών τιμών (32 χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος) κατά την περίοδο 1996-2004.

### **E. Επιπτώσεις στην υγεία**

Το διοξείδιο του αζώτου, το πιο τοξικό οξείδιο του αζώτου, ερεθίζει τους πνεύμονες προκαλώντας βλάβη στα ευαίσθητα κύτταρα που τους περιβάλλουν. Σε αντίθεση με ουσίες που προσβάλλουν κυρίως το ανώτερο αναπνευστικό (όπως η αμμωνία), με βασικό χαρακτηριστικό της παρουσίας τους την πρόκληση βήχα και βλενωδούς συμφόρησης, το διοξείδιο του αζώτου προκαλεί ιδιαίτερα συμπτώματα μόνο όταν συναντάται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ο σημαντικός κίνδυνος εμφανίζεται περίπου 5 με 72 ώρες αργότερα, όταν είναι σε εξέλιξη η φλεγμονή που μπορεί να οδηγήσει σε πνευματικό οίδημα, αλλά ακόμη και στο θάνατο. Οι συγκεντρώσεις στον περιβάλλοντα αέρα εξαιρετικά σπάνια φτάνουν σε εκείνα τα όρια ώστε να προκληθούν τέτοια ακραία αποτελέσματα, όμως η έκθεση σε τέτοιες τιμές πραγματοποιείται σε μερικά επαγγέλματα. Οι αγρότες για παράδειγμα εκτίθενται στα επίπεδα που υπάρχουν στα σιλό του σιταριού (silos fillers' disease).

Μελέτες σε ζώα έχουν δείξει ότι η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στη δομή των πνευμόνων αλλά και στη λειτουργία τους προκαλώντας εμφύσημα και χρόνια βρογχίτιδα. Τα παιδιά που ζουν σε σπίτια που χρησιμοποιούν σόμπες αερίου παρουσιάζουν αναπνευστικές



λοιμώξεις (κοινά κρυολογήματα) και μειωμένες λειτουργίες στους πνεύμονες, σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τα παιδιά που ζουν σε σπίτια όπου χρησιμοποιούνται αντίστοιχα ηλεκτρικές συσκευές. Το μεγαλύτερο ποσοστό των λοιμώξεων φαίνεται να οφείλεται τόσο στη μειωμένη δυνατότητα των κυττάρων που έχουν υποστεί βλάβη να καθαρίσουν τα εισπνεόμενα βακτηρίδια και τους ιούς, όσο και σε βλάβη στα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος που καταπολεμούν τη λοίμωξη. Οι ασθματικοί και οι άνθρωποι που πάσχουν από χρόνια βρογχίτιδα ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι όταν εκτίθενται συχνά στις υψηλές συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στον αστικό αέρα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται μερικές από τις επιπτώσεις που προκαλεί το διοξείδιο του αζώτου και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις οποίες παρατηρούνται.

**Πίνακας 2.3** Επιπτώσεις στην υγεία για διαφορετικά επίπεδα οξειδίων του αζώτου

<b>Ενδεικτικές επιπτώσεις στην υγεία λόγω του διοξειδίου του αζώτου</b>	<b>Συγκέντρωση (ppm)</b>
Αύξηση της αντίστασης εναέριων οδών στην χρόνια βρογχίτιδα	1.6 (έκθεση 3 λεπτών)
Συμπτώματα σε ασθματικούς (ρινική απαλλαγή, πονοκέφαλοι, ζαλάδες, δυσκολία στην αναπνοή)	0.5 (έκθεση 2 ωρών)
Λοιμώξεις σε μικρά παιδιά	0.15 - 0.30 (συχνή έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις)

### **ΣΤ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Τα οξείδια του αζώτου έχουν σοβαρές οικολογικές συνέπειες. Οι χειρότερες από αυτές φαίνεται να οφείλονται στο νιτρικό οξύ, το τελευταίο προϊόν της χημικής αντίδρασης του διοξειδίου του αζώτου στον αέρα. Ο μετασχηματισμός των οξειδίων του αζώτου λαμβάνει χώρα σε σχετικά μικρές χρονικές κλίμακες οπότε οι επιπτώσεις εμφανίζονται σε μικρές ως μεσαίες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής.

Η οξίνιση των υδάτων έχει αρνητικές συνέπειες στο πληθυσμό των ψαριών και των άλλων ειδών. Η όξινη βροχή σε συνδυασμό με τις πιέσεις από το όζον, τη ζέστη και την ανομβρία οδηγούν στην μείωση των δασικών εκτάσεων σε διάφορες περιοχές. Σε ευαίσθητες εκβολές και παραθαλάσσιες περιοχές, η αζωτούχα μόλυνση από την απορροή των λιπασμάτων, τα λύματα και την ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορούν να προκαλέσουν την παραγωγή ανεπιθύμητων φυτών και οργανισμών. Μακροπρόθεσμα, οι επιπτώσεις από τέτοιες αλλαγές, δεν είναι γνωστές.

## 2.3 Όζον

### **A. Εισαγωγή**

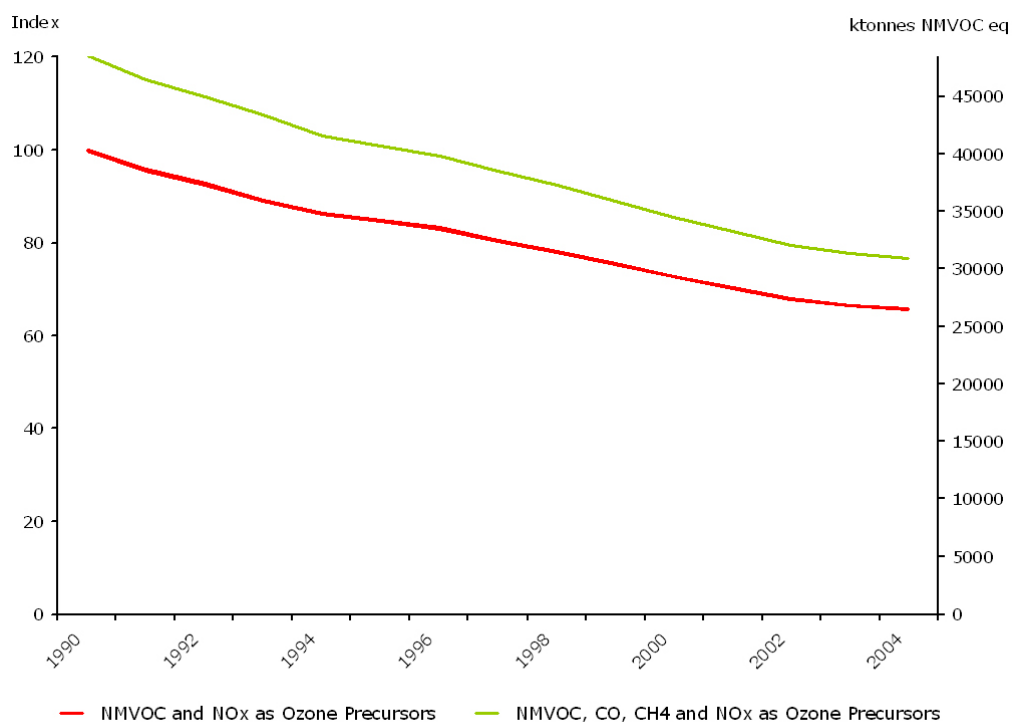
Το όζον, το κύριο συστατικό της αιθαλομίχλης (αστικό νέφος), είναι υπεύθυνο για μερικά από τα χειρότερα επεισόδια αέριας ρύπανσης. Στην ανώτερη ατμόσφαιρα, το όζον απορροφά την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία, προστατεύοντας τους ανθρώπους από τον καρκίνο του δέρματος. Η μείωσή του στη στρατόσφαιρα οφείλεται σε ανθρωπίνες δραστηριότητες που ενδέχεται να οδηγήσουν σε αύξηση των καρκίνων του δέρματος. Στην κατώτερη ατμόσφαιρα, εκεί όπου αναπνέουν οι άνθρωποι και αναπτύσσονται τα φυτά, το όζον έχει πολύ βλαβερές συνέπειες στη υγεία και παράλληλα προκαλεί σημαντικές βλάβες στα δάση και στις καλλιέργειες.

### **B. Φυσικές και χημικές ιδιότητες**

Το όζον δεν εκλύεται άμεσα στον αέρα. Σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από τη χημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου, παρουσία ηλιακού φωτός. Επειδή απαιτείται ηλιακό φως, η αντίδραση ονομάζεται *φωτοχημική αντίδραση* και το προϊόν αυτής φωτοχημική αέρια ρύπανση, φωτοχημική αιθαλομίχλη ή απλά αιθαλομίχλη. Οι υψηλές θερμοκρασίες διεγείρουν την αντίδραση, γι αυτό το καλοκαίρι τα επίπεδα του όζοντος είναι υψηλότερα. Το κιτρινωπό-καφέ χρώμα της αιθαλομίχλης οφείλεται στο διοξείδιο του αζώτου.

Το κοινό οξυγόνο περιέχει δύο άτομα οξυγόνου ( $O_2$ ) ενώ το όζον αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου ( $O_3$ ). Είναι *οξειδωτικό* και προκαλεί τοξικά αποτελέσματα διότι έχει την ικανότητα να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα μόρια (οξειδωση), ξεκινώντας αλυσιδωτές αντιδράσεις και διαταράσσοντας βασικές δομές στα κύτταρα.

Κατά την διάρκεια των φωτοχημικών αντιδράσεων που παράγουν το όζον, παράγονται επίσης και άλλα οξειδωτικά. Παρόλο που εμφανίζονται σε μικρότερη αναλογία στο μίγμα της αιθαλομίχλης, αρκετά από αυτά προκαλούν πιο έντονους ερεθισμούς από ότι το όζον, όπως ερεθισμούς στα μάτια και στη μύτη (κατά τη διάρκεια περιόδων με έντονη αιθαλομίχλη). Τα πιο σημαντικά από αυτά τα οξειδωτικά είναι το περοξυακετυλικό άζωτο (PAN), το διοξείδιο του αζώτου, το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το νιτρικό και το νιτρώδες οξύ και το μυρμηκικό οξύ. Επειδή οι συγκεντρώσεις όλων αυτών των οξειδωτικών μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο (έχουν μεγάλη συσχέτιση), ως ένδειξη της ολικής συγκέντρωσης οξειδωτικών αναφέρονται μόνο τα επίπεδα του όζοντος.



**Σχήμα 2.2** Διαχρονική εξέλιξη των εκπομπών των προδρόμων του όζοντος στην ΕΕ-15 κατά την περίοδο 1990-2004.

### Γ. Πηγές

Το όζον δεν εκπέμπεται πρωτογενώς από κάποια πηγή. Παράγεται στην ατμόσφαιρα από τη χημική αντίδραση του μονατομικού οξυγόνου (O) με το δυατομικό οξυγόνο (O<sub>2</sub>).

Το όζον παράγεται δευτερογενώς κατά τη φωτοχημική αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) με το διοξείδιο του αζώτου. Οι εκπομπές των ενώσεων που δημιουργούν το όζον στην τροπόσφαιρα ελαττώθηκαν κατά 36% στην ΕΕ-15 μεταξύ του 1990 και του 2004, ως απόρροια κυρίως της εισαγωγής καταλυτικών μετατροπέων στα αυτοκίνητα (Σχήμα 2.2).

### Δ. Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση

Γενικά, τα χαμηλότερα επίπεδα του όζοντος παρατηρούνται την ανατολή. Η εκπομπή των πρόδρομων ενώσεων (NO<sub>x</sub>, VOC) από την πρωινή οδική κυκλοφορία σε συνδυασμό με την ανατολή του ήλιου και την άνοδο της θερμοκρασίας οδηγεί σταδιακά σε αύξηση των επιπέδων του όζοντος. Οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων παρατηρούνται το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα. Επειδή οι οξειδωτικές ουσίες δεν εκπέμπονται άμεσα αλλά χρειάζονται κάποιες ώρες για να

σχηματιστούν, οι πρόδρομες ενώσεις έχουν τον χρόνο να μετακινηθούν από τους ανέμους που επικρατούν. Ως αποτέλεσμα, συχνά τα επίπεδα των οξειδωτικών ενώσεων είναι υψηλότερα στις περιαστικές περιοχές στα υπήνεμα των αστικών κέντρων όπου λαμβάνουν χώρα οι εκπομπές των προδρόμων ενώσεων.

Το όζον είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα. Εκατοντάδες εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε χώρες όπου παραβιάζονται τα όρια του όζοντος για την προστασία της ανθρώπινης υγείας. Οι περιοχές με τις χειρότερες συνθήκες είναι εκείνες που χαρακτηρίζονται από τεράστιες εκπομπές προδρόμων ενώσεων και παράλληλα έχουν ζεστό και ηλιόλουστο κλίμα.

Οι εκπομπές των προδρόμων ενώσεων προέρχονται από αρκετές διαφορετικές πηγές, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολο τον έλεγχό τους. Τα VOCs ελευθερώνονται από τα αυτοκίνητα, τους σταθμούς αερίου, τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα στεγνοκαθαριστήρια, τα καταστήματα χρωμάτων, τις χημικές βιομηχανίες, τα διυλιστήρια πετρελαίου και άλλες επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν διαλύτες. Τα οξείδια του αζώτου ελευθερώνονται από τα αυτοκίνητα και τις στάσιμες πηγές καύσης (εργοστάσια και εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας). Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αναλογία των προδρόμων εκπομπών από διάφορες πηγές.

**Πίνακας 2.4** Πηγές Οξειδωτικών Προδρόμων

<b>Πηγές</b>	<b>Ποσοστό Εκπομπών Πρόδρομων Ενώσεων</b>
Μεταφορικά μέσα	39
Στάσιμες πηγές καύσης	32
Βιομηχανικές δραστηριότητες	22
Μη βιομηχανική χρήση οργανικών διαλυτών	4
Άλλες πηγές	3

Την περίοδο 1996-2004, το 13-60% του αστικού πληθυσμού στην Ευρώπη ήταν εκτεθειμένο σε συγκεντρώσεις όζοντος υψηλότερες του Ευρωπαϊκού ορίου προστασίας της ανθρώπινης υγείας ( $120 \text{ mg/m}^3 \text{ O}_3$  – μέγιστη τιμή οκτώρου, όχι περισσότερες από 25 υπερβάσεις το χρόνο). Το μέγιστο πληθυσμιακό ποσοστό (60%) παρατηρήθηκε το 2003. Δεν υπάρχει σαφής τάση για το συγκεκριμένο διάστημα (Σχήμα 2.1).

## **Ε. Επιπτώσεις στην υγεία**

Τα συμπτώματα από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα όζοντος περιλαμβάνουν πόνο στο στήθος, βήχα, άσθμα, πνευμονική και ρινική συμφόρηση, ερεθισμό στα μάτια και τη μύτη. Αυτά τα συμπτώματα εμφανίζονται σε επίπεδα όζοντος ελαφρώς πάνω από το όριο για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, ένα όριο που πολλές περιοχές το πλησιάζουν αρκετά. Πειραματικές μελέτες σε εθελοντές δείχνουν ότι η τυπική έκθεση στο όζον σε συνδυασμό με διαλείπουσα άσκηση, επηρεάζει αρνητικά την λειτουργία των πνευμόνων τόσο σε ενήλικες όσο και σε παιδιά, εμποδίζοντας τους να πάρουν βαθιά αναπνοή.

Το κύριο ερώτημα είναι αν αυτές οι επιδράσεις στην αναπνοή είναι αναστρέψιμες όταν διακοπεί η έκθεση σε όζον, ή αν παραμένουν προκαλώντας μόνιμη βλάβη. Μελέτη σε παιδιά που εκτέθηκαν σε τυπικά επίπεδα όζοντος που παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες, έδειξαν ότι οι αλλαγές που προκλήθηκαν στους πνεύμονες επέμειναν για αρκετές μέρες μετά το τέλος του επεισοδίου όζοντος. Μελέτες σε πειραματόζωα έδειξαν ότι προκαλούνται μόνιμες βλάβες στους πνεύμονες από επίπεδα όζοντος σε συνθήκες αιθαλομίχλης, αν η έκθεση διαρκέσει κάποιες εβδομάδες. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται φλεγμονή που προκαλεί τον τραυματισμό των κυττάρων που βρίσκονται επί της αναπνευστικής οδού, μια διαδικασία που περιγράφεται ως πρόωμη γήρανση των πνευμόνων. Άλλες επιπτώσεις στην υγεία που έχουν αναφερθεί είναι η αύξηση των κρουσμάτων άσθματος, η καρδιακή δυσλειτουργία, η μείωση της αεροβικής ικανότητας καθώς επίσης και η διαταραχή στο κεντρικό νευρικό σύστημα, στο συκώτι, στο αίμα και στο ενδοκρινικό σύστημα.

Ομάδες υψηλού κινδύνου είναι όσοι έχουν ήδη αναπνευστικά προβλήματα ή χρόνια πνευμονική πάθηση. Υπολογίζεται ότι εκατοντάδες εκατομμύρια τέτοιοι άνθρωποι ζουν σε αστικές περιοχές όπου τα επίπεδα όζοντος είναι τουλάχιστον 25% πάνω από το επιτρεπτό όριο.

## **ΣΤ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Το όζον και τα άλλα οξειδωτικά προκαλούν σημαντικές ζημιές στις καλλιέργειες και τα δάση. Η κύρια ζημιά στα φυτά είναι στο φύλλωμά τους ενώ δευτερευόντως βλάπτει την ανάπτυξή τους και κατ' επέκταση τη συνολική σοδειά. Οι απώλειες στη σοδειά βασικών καλλιεργειών όπως η σόγια, τα φιστίκια, το καλαμπόκι και το σιτάρι, συχνά ξεπερνούν το 10% ενώ οι απώλειες στις ντομάτες και τα φασόλια είναι μεγαλύτερες από 20%. Οι οικονομικές απώλειες εκτιμώνται σε μερικά δισεκατομμύρια δολάρια τον χρόνο.

Οι ζημιές που έχουν παρατηρηθεί στα δέντρα του δάσους από τις τρέχουσες συγκεντρώσεις υποβάθρου του όζοντος περιλαμβάνουν τραυματισμό και πρόωρη πτώση των φύλλων, μειωμένη ικανότητα φωτοσύνθεσης, περιορισμένη ανάπτυξη καθώς και αύξηση της προσβολής τους από σκαθάρια. Επίσης επηρεάζονται άλλες

λειτουργίες οργανισμών και οικοσυστημάτων όπως οι λειχήνες και η θρεπτική ανακύκλωση.

Τα οξειδωτικά προκαλούν επίσης βλάβες σε υλικά και σε είδη που χρειαζόμαστε στην καθημερινότητα. Προκαλούν ράγισμα των πλαστικών και του λάστιχου (όπως στις ρόδες), υποβάθμιση και εξασθένηση των υφαντικών ινών και των χρωστικών ουσιών.

## **2.4 Αιωρούμενα σωματίδια**

### **A. Εισαγωγή**

Ο όρος αιωρούμενα σωματίδια χρησιμοποιείται για να περιγράψει διάφορες ουσίες που υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα σαν διάκριτα σωματίδια άλλοτε σε υγρή και άλλοτε σε στερεή μορφή. Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι από τους πιο επικίνδυνους αέριους ρύπους διότι περιέχουν καρκινογόνες ουσίες όπως ο αμίαντος (asbestos) και ο καπνός (tobacco smoke) και παράλληλα επιδεινώνουν τις βλαβερές συνέπειες άλλων αέριων ρύπων (όπως το διοξειδίου του θείου).

Αξίζει να γίνει ξεχωριστή αναφορά στον μόλυβδο ο οποίος προστίθεται ως αντικροτικό στα καύσιμα. Με τη αλλαγή της σύστασης του στόλου των αυτοκινήτων και με τη χρήση της αμόλυβδης βενζίνης παρουσιάζεται σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις του. Πλην των αυτοκινήτων, άλλες πηγές μολύβδου αποτελούν η χρήση γαιανθράκων, οι βαριές βιομηχανίες, τα χυτήρια μεταλλευμάτων, τα εργοστάσια μπαταριών και η καύση των απορριμμάτων.

Το μεγαλύτερο μέρος της μάζας των αερολυμάτων βρίσκεται στην κατώτερη τροπόσφαιρα όπου οι συγκεντρώσεις τους είναι 1-2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην ανώτερη τροπόσφαιρα. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι οι σημαντικότερες πηγές εκπομπής βρίσκονται κοντά στο έδαφος οπότε οι μικροί, σχετικά, χρόνοι παραμονής των αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα δεν αφήνουν μεγάλα χρονικά περιθώρια για την μεταφοράς τους σε μεγάλα ύψη. Αυτό έχει σαν συνέπεια να βελτιώνεται δραματικά η ορατότητα όταν ξεπεράσουμε τα χαμηλότερα 1-2 χιλιόμετρα της ατμόσφαιρας.

### **B. Φυσικές και χημικές ιδιότητες**

Οι ιδιότητες των αιωρούμενων σωματιδίων είναι δύσκολο να γενικευτούν διότι περιλαμβάνουν διάφορα σωματίδια που προκύπτουν από ένα πολύ μεγάλο εύρος δραστηριοτήτων. Η επικινδυνότητα των σωματιδίων εξαρτάται μεταξύ άλλων από τη διάμετρό τους και η πρόσφατη νομοθεσία διαφοροποιεί τα εισπνεύσιμα σωματίδια με

διάμετρο μικρότερη από 10 μικρά (PM10) και τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2.5 μικρά (PM2.5). Τα PM2.5 προκύπτουν από τις πηγές καύσης και από τον χημικό μετασχηματισμό αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Το αέριο διοξείδιο του θείου για παράδειγμα γρήγορα μετατρέπεται σε μικρά σωματίδια θείου μετά την απελευθέρωση του από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και τα χυτήρια. Τα μικρότερα σωματίδια είναι συνήθως πιο επικίνδυνα από τα μεγαλύτερα διότι εισπνέονται πιο βαθιά στους πνεύμονες, όπου εγκαθίστανται και προκαλούν βλάβες στους ευαίσθητους ιστούς που εμπλέκονται στην ανταλλαγή του αέρα. Τα μικρότερα σωματίδια παρέχουν επίσης μεγαλύτερη συνολικά επιφάνεια (για συγκεκριμένο βάρος σωματιδίων) για την πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων, κάνοντας ευκολότερη την προσκόλληση σε αυτά τοξικών ουσιών (όπως τα ίχνη μετάλλου). Τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να παραμείνουν στον αέρα για εβδομάδες ή μήνες και επομένως μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή τους.

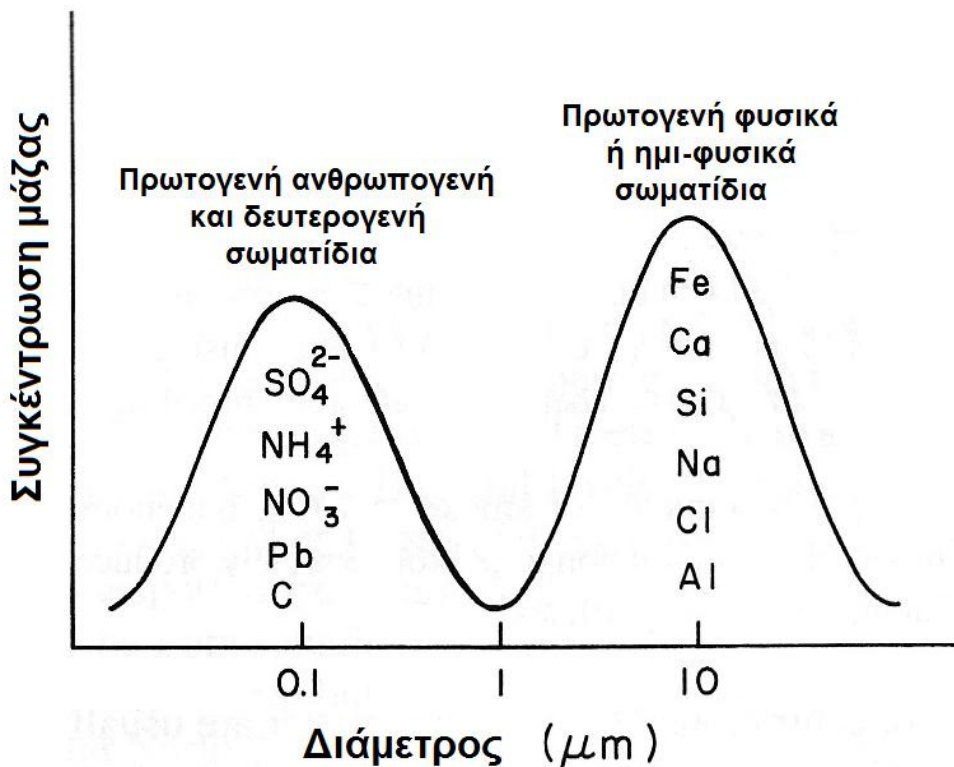
Τα μεγαλύτερα σωματίδια κυρίως προέρχονται από τα μεταλλεύματα, τις κατασκευαστικές δραστηριότητες, τις πυρκαγιές και την ατμοσφαιρική σκόνη. Εναποτίθενται γρηγορότερα από τα μικρά σωματίδια και επομένως αποτελούν κίνδυνο κυρίως κοντά στην πηγή τους.

Μια άλλη ορολογία η οποία χρησιμοποιείται είναι επίσης τα «ολικά αιωρούμενα σωματίδια» (total suspended particulates) (TSP). Σε αυτή την περίπτωση τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση τους συλλέγουν όλα τα σωματίδια που αιωρούνται χωρίς διάκριση μεγέθους. Για την αναγνώριση των πιο επικίνδυνων μικρών σωματιδίων, οι καινούργιες συσκευές βοηθούν στη συλλογή μικρότερων σωματιδίων δίνοντας ακριβέστερη εκτίμηση της αναλογίας εκείνων που θεωρούνται περισσότερο επικίνδυνα.

Η χημική σύσταση των αιωρουμένων σωματιδίων αποτελεί επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό τους εξαιτίας:

- της επίδρασης των ρυπαντών στην ανθρώπινη υγεία ανάλογα με τη χημική τους συμπεριφορά και ιδιότητες, και
- της αναγνώρισης της πηγής των αερολυμάτων από τη χημική τους σύσταση.

Η κατανομή μάζας των κυριοτέρων συστατικών των αιωρουμένων σωματιδίων εμφανίζονται στο σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.3** Σχηματική κατανομή της μάζας των αιωρούμενων σωματιδίων η οποία εμφανίζει ένα τυπικό καταμερισμό των χημικών ειδών σε μικρά και μεγάλα σωματίδια.

### Γ. Πηγές

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατανομή των εκπομπών των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων ανά κύρια πηγή εκπομπής.

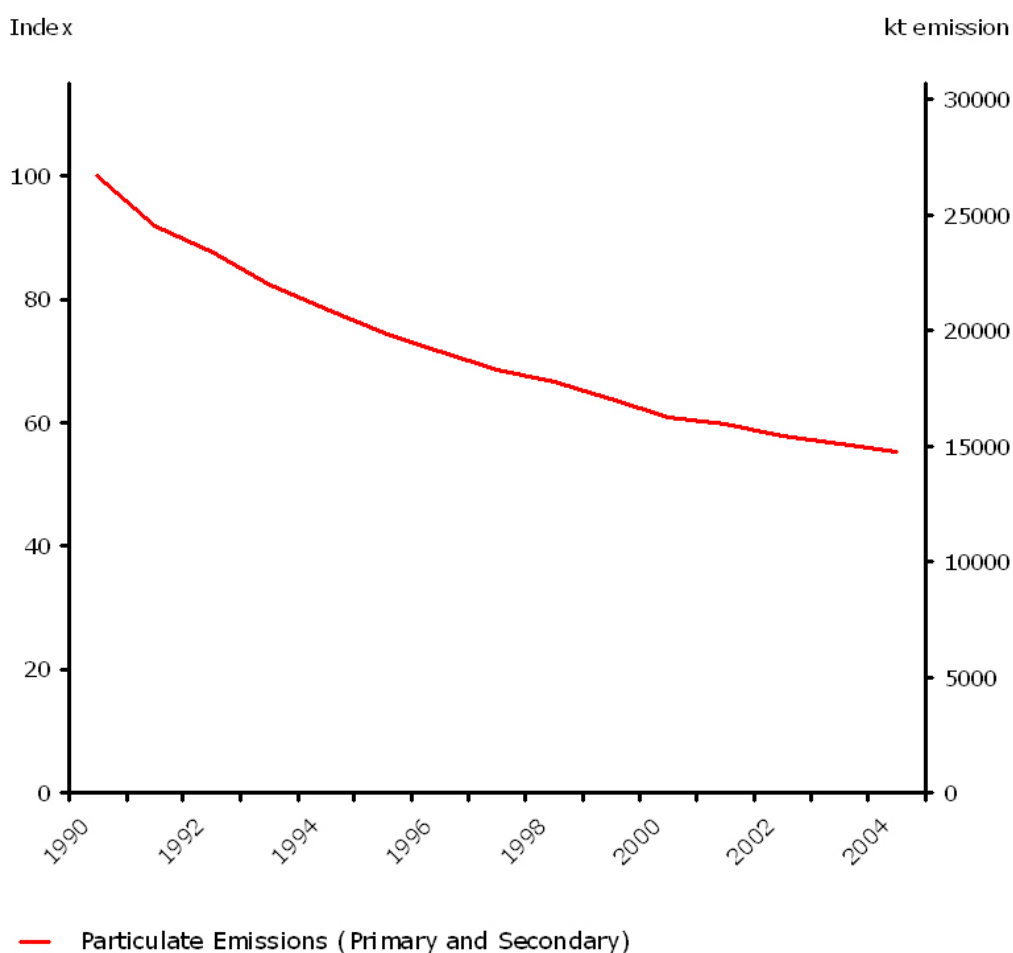
**Πίνακας 2.5** Πηγές εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων

Πηγές	Ποσοστό στις συνολικές εκπομπές
Βιομηχανικές δραστηριότητες	38
Στάσιμες πηγές καύσης	25
Μέσα μεταφοράς	20
Άλλες πηγές	17



Η αξιολόγηση αυτών των ποσοστών καλό είναι να γίνεται με προσοχή διότι βασίζονται σε παλαιότερες μεθόδους μέτρησης και επειδή οι βιομηχανικές εκπομπές συνήθως είναι σε περιοχές σχετικά καθαρές. Στα μέσα μεταφοράς το ποσοστό οφείλεται ενδεχομένως στη μεγάλη αναλογία λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων που εισπνέονται από το μεγαλύτερο ποσοστό πληθυσμού και που είναι πάνω από το επιτρεπτό όριο.

Οι συνολικές εκπομπές των μικροσκοπικών σωματιδίων στην ΕΕ-15 μειώθηκαν κατά 45% μεταξύ του 1990 και του 2004. Οφείλεται κυρίως στη μείωση των εκπομπών των δευτερογενών προδρόμων των σωματιδίων αλλά και στη μείωση των πρωτογενών εκπομπών των PM10 από την ενεργειακή βιομηχανία. Οι συνολικές εκπομπές των μικροσκοπικών σωματιδίων στην ΕΕ-10 μειώθηκαν κατά 55% μεταξύ του 1990 και του 2004 (Σχήμα 2.4).



**Σχήμα 2.4** Διαχρονική μεταβολή των εκπομπών πρωτογενών και δευτερογενών μικροσκοπικών σωματιδίων στην ΕΕ-15 κατά την περίοδο 1990-2004.

#### **Δ. Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση**

Τα παιδιά είναι η πιο ευαίσθητη ομάδα του πληθυσμού. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι τα παιδιά σε σχέση με τους ενήλικες εισπνέουν βαθύτερα στους πνεύμονες τους αιωρούμενα σωματίδια. Τα παιδιά περνούν επίσης περισσότερο χρόνο σε εξωτερικούς χώρους όπου η ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να είναι υψηλότερη σε σχέση με τους εσωτερικούς χώρους (αυτό δεν ισχύει σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν καπνιστές σε εσωτερικούς χώρους), εκεί κινούνται πιο έντονα και επομένως οι αναπνοές γίνονται πιο γρήγορες και πιο βαθιές. Όπως συμβαίνει και με άλλους τύπους αέριας ρύπανσης, η μεγαλύτερη έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια είναι στις αστικές περιοχές και γύρω από σημειακές πηγές ρύπανσης (όπως εργοστάσια, εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και χυτήρια). Παρ' όλα αυτά, παραβιάσεις των ορίων ασφαλείας παρατηρούνται σε όλες τις περιοχές του πλανήτη.

Την περίοδο 1997-2004, το 23-45% του αστικού πληθυσμού στην Ευρώπη ήταν εκτεθειμένο σε συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM10) υψηλότερες του Ευρωπαϊκού ορίου προστασίας της ανθρώπινης υγείας (50 mg/m<sup>3</sup> PM10 – μέση ημερήσια τιμή, όχι περισσότερες από 35 υπερβάσεις το χρόνο). Δεν υπάρχει σαφής τάση για το συγκεκριμένο διάστημα (Σχήμα 2.1).

#### **Ε. Επιπτώσεις στην υγεία**

Οι επιπτώσεις στην υγεία λόγω των αιωρούμενων σωματιδίων περιλαμβάνουν επιδείνωση της βρογχίτιδας σε ενήλικες και παιδιά με προϋπάρχοντα αναπνευστικά προβλήματα, μικρές αλλά σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία των πνευμόνων σε μικρά παιδιά αλλά μπορεί να φτάσουν ακόμη και σε αιφνίδιο θάνατο σε ηλικιωμένους με προϋπάρχοντα προβλήματα στην καρδιά και στους πνεύμονες, αν τα όρια συγκέντρωσης είναι πολύ υψηλά. Προβλήματα μπορεί να εμφανιστούν σε ασθματικούς και σε ανθρώπους με αλλεργίες ειδικά στα θειικά σωματίδια. Στα σημερινά επίπεδα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματιδίων, η ποικιλία και η συχνότητα των συμπτωμάτων (βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα) αυξάνουν με την αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων.

Μακροπρόθεσμα, η έκθεση στα αιωρούμενα σωματίδια μπορεί να προκαλέσει ζημιά στους πνευμονικούς ιστούς οδηγώντας σε χρόνια αναπνευστική πάθηση, καρκίνο, πρόωρη ασθένεια και θάνατο. Τα παιδιά που ζουν σε περιοχές με υψηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων εμφανίζουν συχνότερα κρυολογήματα, βήχα και άλλα συμπτώματα που δεν εμφανίζουν παιδιά που ζουν σε περιοχές με μικρότερη ρύπανση. Αιωρούμενα σωματίδια από βιομηχανικές πηγές, κυρίως κοντά σε χυτήρια, συνεισφέρουν στον υψηλό ρυθμό εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα. Τα συμπτώματα χρόνιας πνευμονικής πάθησης συσχετίζονται με τα επίπεδα των αιωρούμενων σωματιδίων ενώ οι συχνότητες των θανάτων σχετίζονται με την ρύπανση από θειικά και αιωρούμενα σωματίδια.

## **ΣΤ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Εκτός από τον κίνδυνο για την υγεία του αναπνευστικού, τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα έχουν επίσης πολύ σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες.

- Απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και συμβάλλοντας αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης για την δημιουργία νεφών.
- Έχουν σημαντικό ρόλο σε χημικές αντιδράσεις.
- Τα σωματίδια ρυπαίνουν (λερώνουν) τα υφάσματα, τα κτίρια και τα αγάλματα, και προκαλούν ζημιές στα κτίρια και τα υλικά.
- Μερικές από τις πιο σοβαρές οικολογικές επιπτώσεις οφείλονται στη μετατροπή των αέριων εκπομπών του διοξειδίου του θείου και του μονοξειδίου του αζώτου σε όξινα σωματίδια, τα οποία ακολούθως πέφτουν στη Γη μέσω υγρής (όξινη βροχή, χιόνι) ή ξηρής (σωματίδια) εναπόθεσης. Τα όξινα σωματίδια, αλλάζουν την χημεία των γλυκών νερών, αφαιρούν μέταλλα από το έδαφος τα οποία ξεπλύνονται αργότερα σε χείμαρρους και σε συνδυασμό με το όζον συνεισφέρουν στην καταστροφή των δασών.

### **2.5 Διοξείδιο του θείου, σουλφίδια**

#### **A. Εισαγωγή**

Το διοξείδιο του θείου και μερικά από τα προϊόντα των χημικών του αντιδράσεων, όπως το θειικό άλας, είναι υπεύθυνα για αρκετά από τα χειρότερα επεισόδια αέριας ρύπανσης στον αιώνα μας. Η γνωστή ομίχλη του Λονδίνου το 1950, περιείχε μίγμα από διοξείδιο του θείου και καπνό. Χιλιάδες άνθρωποι πέθαναν κατά τη διάρκεια τέτοιων καταστάσεων και αρκετοί νοσηλεύτηκαν με αναπνευστικά προβλήματα. Η λέξη αιθαλομίχλη επινοήθηκε για να περιγράψει το μίγμα καπνού και ομίχλης, ένας συνδυασμός διοξειδίου του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων προσκολλημένων σε υδάτινες σταγόνες.

Το διοξείδιο του θείου εδώ και χιλιάδες χρόνια χρησιμοποιείται ως απολυμαντικό για τα σταφύλια και τα βαρέλια του κρασιού αλλά και ως συντηρητικό, αποχρωματιστικό και εμποτιστικό σταφυλιών, βερίκοκων και άλλων φρούτων και λαχανικών. Ανήκει στην ομάδα των συντηρητικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στα τρόφιμα και είναι το δραστικό συστατικό που ευθύνεται για την αλλεργική αντίδραση όσων καταναλώνουν τέτοιες τροφές.

## **Β. Φυσικές και χημικές ιδιότητες**

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα άχρωμο αέριο. Σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει έντονη ερεθιστική οσμή. Στην ατμόσφαιρα αντιδρά εύκολα με οξειδωτικά ή σωματίδια, σχηματίζοντας σουλφίδια και όξινα σωματίδια του θείου, τα οποία είναι πιο επικίνδυνα από το αρχικό διοξείδιο του θείου (με εξαίρεση τους ασθματικούς). Τα όξινα σωματίδια του θείου είναι τα κύρια συστατικά της όξινης βροχής, που προκαλεί εκτενή περιβαλλοντολογική καταστροφή.

## **Γ. Πηγές**

Οι κυριότερες πηγές διοξειδίου του θείου είναι οι καύσεις ορυκτών καυσίμων και η επεξεργασία ορυκτών μεταλλευμάτων. Άλλες πηγές περιλαμβάνουν την οξείδωση των διμεθυλοσουλφιδίων, τις ηφαιστιακές εκπομπές και τις εκπομπές της χημικής βιομηχανίας. Επίσης, το SO<sub>2</sub> ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης ανάμεσα στα (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S και H<sub>2</sub>S.

Συγκεντρωτικά, οι καύσεις είναι υπεύθυνες για το 85% των εκπομπών ενώ μόλις 7% οφείλεται στα μέσα μεταφοράς.

## **Δ. Επίπεδα συγκέντρωσης - Έκθεση**

Η μεγαλύτερη έκθεση στο διοξείδιο του θείου πραγματοποιείται στη γειτονιά των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που καίνε λιγνίτη ή μαζούτ και των εργοστασίων επεξεργασίας μεταλλευμάτων εκτός από σίδηρο (μη σιδηρούχα χυτήρια). Οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες στις παλιές εγκαταστάσεις που δεν έχουν σύστημα ελέγχου της αέριας ρύπανσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από την καπνοδόχο, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο μετασχηματισμός του SO<sub>2</sub> σε επικίνδυνες μορφές θειικών αλάτων. Ο θύσανος της ρύπανσης τείνει να διασκορπίζεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από την πηγή κι επομένως η σημαντική απόσταση για την ανθρώπινη έκθεση αντιστοιχεί περίπου μέχρι τα 25 χιλιόμετρα από την εγκατάσταση ή από το εργοστάσιο.

Οι εκπομπές του διοξειδίου του θείου έχουν μειωθεί τις τελευταίες δεκαετίες ως αποτέλεσμα της εγκατάστασης συστήματος αποθείωσης των απαερίων στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κάρβουνο και της μείωσης της περιεκτικότητας του θείου στα καύσιμα.

Στις αστικές περιοχές, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του θείου είναι δεκαπλάσιες από εκείνες στις απομακρυσμένες περιοχές. Επίσης κοντά σε βιομηχανικές πηγές, με ανεπαρκείς ελέγχους, τα όρια μπορεί να είναι και 1000 φορές μεγαλύτερα (μέση ωριαία τιμή), όπως φαίνεται στον πίνακα 2.6.

Την περίοδο 1996-2004, το ποσοστό του αστικού πληθυσμού στην Ευρώπη που ήταν εκτεθειμένο σε συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου υψηλότερες του

Ευρωπαϊκού ορίου προστασίας της ανθρώπινης υγείας ( $125 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$  – μέση ημερήσια τιμή, όχι περισσότερες από 3 υπερβάσεις το χρόνο) μειώθηκε κάτω του 1% (Σχήμα 2.1).

**Πίνακας 2.6** Αναλογία μίγματος διοξειδίου του θείου σε διάφορες περιοχές

Τοποθεσία	Συγκέντρωση (ppm)
Απομακρυσμένες περιοχές	<0.004
Αστικές περιοχές με ρύπανση	>0.03
Κοντά σε μεγάλες βιομηχανικές πηγές (ημερήσια μ.τ.)	0.40
Κοντά σε μεγάλες βιομηχανικές πηγές (τρίωρη μ.τ.)	1.4
Κοντά σε μεγάλες βιομηχανικές πηγές (ωριαία μ.τ.)	2.3

### **E. Επιπτώσεις στην υγεία**

Η βραχυπρόθεσμη έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί συστολή των αναπνευστικών αγγείων στους ασθματικούς αλλά και σε όσους έχουν ευαισθησία. Οι πιο πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι μία έκθεση διάρκειας 5 με 10 λεπτών, στις μεγάλες συγκεντρώσεις που εμφανίζονται κοντά στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, αρκεί για να προκληθούν ασθματικά επεισόδια.

Η χρόνια έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί στένωση στην τραχεία, παρόμοια με την χρόνια βρογχίτιδα. Έρευνα σε παιδιά από περιοχές με περισσότερους ρύπους κατέδειξε περισσότερα περιστατικά με βήχα, βρογχίτιδα και λοιμώξεις του κατώτερου αναπνευστικού σε σχέση με παιδιά από περιοχές με λιγότερη ρύπανση. Παράλληλα, τα σωματίδια και το διοξείδιο του θείου αντιδρούν προς τον σχηματισμό πιο επικίνδυνων όξινων θειϊκών σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά εισπνέονται βαθύτερα στους πνεύμονες από ότι το αέριο διοξείδιο του θείου και εγκαθίστανται εκεί. Το φαινόμενο ενισχύεται στα παιδιά και τους ενήλικους που αθλούνται, που καθότι βρίσκονται σε μεγαλύτερη κίνηση, αναπνέουν από το στόμα τους παρακάμπτοντας τους μηχανισμούς φιλτραρίσματος που βρίσκονται στις ρινικές διόδους. Συχνότητες θανάτου έχουν επίσης συσχετιστεί με επίπεδα συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου και σωματιδίων.

Η ομίχλη παρακινεί την μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε όξινα θειικά αερολύματα (acid sulfate aerosols) τα οποία όπως και τα σωματίδια εισπνέονται βαθύτερα και είναι πιο επικίνδυνα από το αέριο διοξείδιο του θείου. Οι επιπτώσεις

στην υγεία λόγω της έκθεσης σε διοξειδίο του θείου φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 2.7** Επιπτώσεις στην υγεία για διαφορετικά επίπεδα διοξειδίου του θείου

<b>Επιπτώσεις</b>	<b>Συγκέντρωση (ppm)</b>
Αλλαγές στις λειτουργίες των πνευμόνων σε ασθματικούς.	1 – 2
Αλλαγές στις λειτουργίες των πνευμόνων σε ασθματικούς σε μέτρια άσκηση.	0.6 – 0.75
Αλλαγές στις λειτουργίες των πνευμόνων σε ασθματικούς με μέτρια έως έντονη άσκηση.	0.4 – 0.6
Χωρίς επιπτώσεις σε ασθματικούς σε μέτρια άσκηση και ασήμαντες επιπτώσεις σε μη-ασθματικούς σε μέτρια άσκηση.	0.1 – 0.3

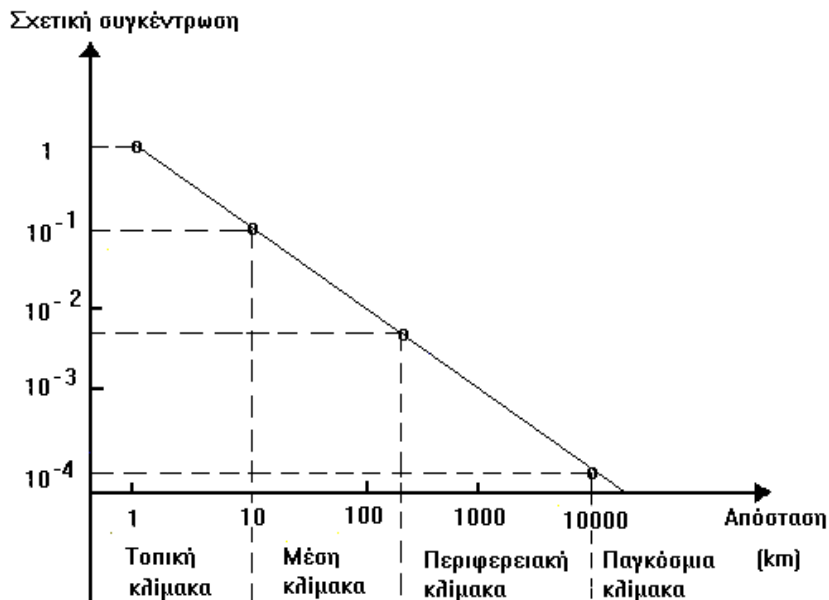
### **ΣΤ. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις**

Το διοξειδίο του θείου προκαλεί αποχρωματισμό των φυτών και ζημιές στο φύλλωμά τους. Οι λειχήνες και τα βρύα είναι ιδιαίτερα τρωτά. Οι πιο σοβαρές ζημιές οφείλονται στην μετατροπή του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα σε θειικό οξύ και την επακόλουθη εναπόθεσή του ως όξινη βροχή, χιόνι και όξινα σωματίδια. Ο μετασχηματισμός των οξειδίων του θείου σε θειικό οξύ λαμβάνει χώρα σε διάστημα μερικών ημερών. Σε αυτό το διάστημα η αέρια μάζα μπορεί να μεταφερθεί ακόμη και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από την πηγή εκπομπής και η όξινη βροχή να πλήξει περιοχές οι οποίες δεν βρίσκονται κοντά σε μεγάλες πηγές ρύπανσης. Το νερό αρκετές λίμνες γίνεται ολοένα και πιο όξινο εξαιτίας της όξινης βροχής. Αρκετές δασικές περιοχές κινδυνεύουν σημαντικά υπό την πίεση της οξύτητας, της ρύπανσης από το όζον, της ζέστης και της ανομβρίας. Τέτοιες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα μπορούν ενδεχομένως να επηρεάσουν το ισοζύγιο στο έδαφος (π.χ. διάβρωση), να αλλάξουν τη σύσταση της ατμόσφαιρας, να μεταβάλλουν το τοπικό κλίμα και να επηρεάσουν την ισορροπία της χλωρίδας και της πανίδας. Το θειικό οξύ πιστεύεται ότι ευθύνεται για το 60% του οξέος στην εναπόθεση οξέος.

Το διοξειδίο του θείου έχει συσχετιστεί με την διάβρωση του χάλυβα και άλλων μετάλλων, την υποβάθμιση (διάσπαση) του ψευδάργυρου και άλλων προστατευτικών επιστρωμάτων, την φθορά των οικοδομικών υλικών (σκυρόδεμα και ασβεστόλιθος) όπως επίσης και την υποβάθμιση της ποιότητας του χαρτιού, των δερμάτινων ειδών, και των έργων και μνημείων ιστορικού ενδιαφέροντος.

## 2.6 Χωρικές και χρονικές κλίμακες διασποράς ατμοσφαιρικής διασποράς

Προκειμένου να μελετήσουμε την διασπορά των αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα έχει μεγάλη σημασία να προσδιορίσουμε τις χρονικές και χωρικές κλίμακες στις οποίες θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας. Ο λόγος είναι διπλός: κατ' αρχή, οι συγκεντρώσεις των αερίων ρύπων μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή ενώ, κατά δεύτερο, η σχετική σημασία των διαφορετικών παραγόντων που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή είναι επίσης συνάρτηση της απόστασης από την πηγή.



**Σχήμα 2.5** Σχηματική παρουσίαση της μείωσης των συγκεντρώσεων σαν συνάρτηση της απόστασης από μία μεγάλη πηγή.

Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται με πολύ σχηματικό τρόπο οι μεταβολές της συγκέντρωσης των ρύπων σαν συνάρτηση της απόστασης από μία μεγάλη πηγή. Η συγκέντρωση εκφράζεται σε σχετικές μονάδες ενώ αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι και οι δύο άξονες είναι λογαριθμικοί οπότε η συγκέντρωση μεταβάλλεται περίπου γραμμικά με την απόσταση.

Μέχρι τα τέλη περίπου της δεκαετίας του 60 το ενδιαφέρον εστιαζόταν σχεδόν αποκλειστικά στην **τοπική κλίμακα (local scale)**, δηλαδή σε αποστάσεις της τάξης των λίγων χιλιομέτρων από την πηγή. Ο λόγος γι' αυτή την προτίμηση είναι απλός: Ο

κόσμος γνώριζε καλύτερα τις άμεσες συνέπειες της ρύπανσης μέσω π.χ. της αναπνοής ή της όρασης και γι' αυτό το λόγο θεωρείτο ότι οι ρύποι ήταν σχετικά ακίνδunami όταν οι συγκεντρώσεις έπεφταν στα χαμηλά επίπεδα που παρατηρούνταν σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 χιλιομέτρων. Η αλλαγή αυτής της αντίληψης έγινε περίπου το 1968 όταν ένας Σουηδός ερευνητής, ο Svante Oden, παρουσίασε μία τεχνική έκθεση στην οποία επιστά την προσοχή στην συνεχώς αυξανόμενη οξίνιση του νερού, γεγονός το οποίο ο εν λόγω ερευνητής απέδιδε στις εκπομπές ρύπων στην κεντρική Ευρώπη και την Μεγάλη Βρετανία (το οξύμωρο είναι ότι αυτή η πρώτη τεχνική έκθεση η οποία αφορούσε ένα σοβαρό διεθνές πρόβλημα ήταν γραμμένη στα Σουηδικά). Ο Oden παρουσίαζε ακόμη μια σειρά υποθέσεων για το πώς θα επηρεάζονταν τα οικοσυστήματα από αυτή την οξίνιση, υποθέσεις οι οποίες συνάντησαν κατ' αρχή μεγάλες αντιδράσεις από τις χώρες που κατονομάζονταν σαν "χώρες πηγών", οι οποίες όμως αργότερα αποδείχτηκαν αληθινές: καταστροφές δασών, εξαφάνιση ορισμένων ψαριών από λίμνες κτλ. Αυτές οι οικολογικές επιδράσεις προκαλούνται από την ξηρά και την υγρή εναπόθεση των θειούχων ενώσεων. Στα αποτελέσματα της οξίνισης έχουν ακόμα συνεισφορά και οι ενώσεις του αζώτου.

Η διασπορά των ρύπων σε τοπική κλίμακα (0 - 10 χιλιόμετρα) προσδιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία της διάχυσης λόγω των αναταρακτικών κινήσεων. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις εδάφους πρωτογενών ρύπων λόγω των εκπομπών από κάποια υπερυψωμένη πηγή εμφανίζονται συνήθως σ' αυτή την κλίμακα. Λόγω των σχετικά μικρών αποστάσεων, ο άνεμος θεωρείται ομοιογενής, τουλάχιστον σε περιοχές χωρίς έντονο ανάγλυφο. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι σε μελέτες διασποράς ρύπων σε τοπική κλίμακα να χρησιμοποιείται ο άνεμος ο οποίος μετρείται σε ένα σημείο στην υπό μελέτη περιοχή. Ο άνεμος αυτός μεταβάλλεται με τον χρόνο αλλά θεωρείται ότι δεν αλλάζει για διαφορετικά σημεία της περιοχής. Οι χημικοί μετασχηματισμοί θεωρείται ότι έχουν μικρότερη σημασία σε τοπική κλίμακα (με μερικές εξαιρέσεις όμως, κυριότερη των οποίων είναι τα οξειδία του αζώτου). Πολύ μεγάλη σημασία έχουν επίσης διάφορα φαινόμενα που έχουν να κάνουν με την ίδια την πηγή όπως η ανύψωση του θυσάνου. Αν και η απόθεση μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να είναι σημαντική, κατά κανόνα όμως η μεγαλύτερη ποσότητα των ρύπων βρίσκεται ακόμα στην ατμόσφαιρα. Σε αποστάσεις μικρότερες του 1 χιλιομέτρου κυριαρχούν τα τεχνικά στοιχεία όπως π.χ. το κατώρευμα (**downwash**) λόγω της αεροδυναμικής των κτιρίων.

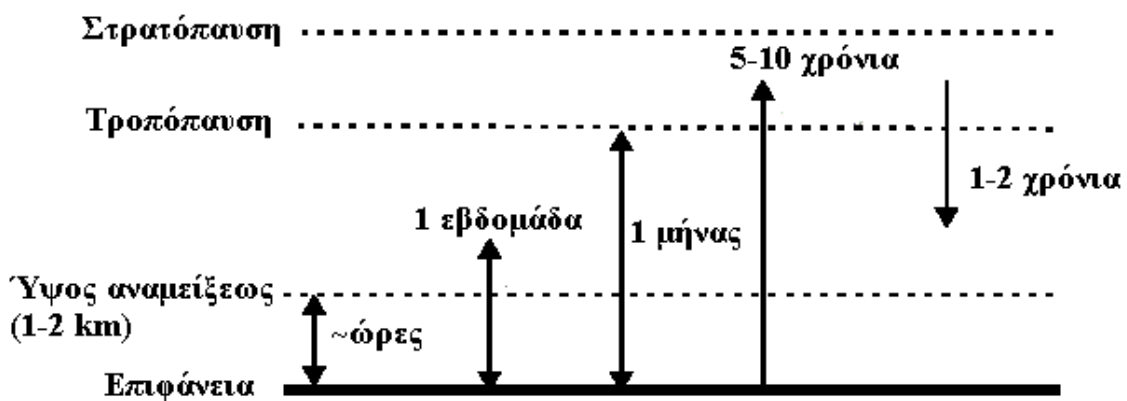
Στην **μέση κλίμακα (mesoscale)** (10 - μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα) η τυρβώδης διάχυση παραμένει σημαντική αλλά το πεδίο ανέμου δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ομοιογενές ή στάσιμο. Ο άνεμος μπορεί να διαφέρει από το ένα σημείο στο άλλο και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο για τον υπολογισμό του τρισδιάστατου πεδίου ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή. Σε συνθήκες αστάθειας μπορεί κανείς να υποθέσει ότι οι ρύποι είναι καλά αναμειγμένοι μέσα στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας. Οι χημικοί μετασχηματισμοί και η απόθεση παίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο.

Στην **περιφερειακή κλίμακα (regional scale)** (μερικές εκατοντάδες - μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα) η διάχυση των ρύπων γίνεται πια από συνοπτικά συστήματα



καιρού. Οι χημικοί μετασχηματισμοί και η απόθεση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες ενώ το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς λαμβάνει ακόμα χώρα μέσα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Σε συνδυασμό με μετωπικές δραστηριότητες καθώς με αναταρακτικές κινήσεις μέσα σε σύννεφα cumulus μεταφέρονται ποσότητες ρύπων στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Αν οι ρύποι βρίσκονται σε κατάλληλη μορφή, η διαδικασία της απόπλυσης απομακρύνει το μεγαλύτερο μέρος τους από την ατμόσφαιρα γιατί οι διαδικασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω συχνά συνοδεύονται από βροχή.

Μερικές από τις εκπεμπόμενες ενώσεις, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, έχουν μεγάλο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα και προλαβαίνουν να αναμειχθούν σε όλη την τροπόσφαιρα και ακόμη να εισέλθουν στην στρατόσφαιρα. Ο κύκλος της διασποράς σε αυτή την περίπτωση γίνεται σε **παγκόσμια κλίμακα (global scale)**. Ο ρυθμός εκπομπής αυτών των ενώσεων είναι μεγαλύτερος από την απόθεσή τους πράγμα το οποίο οδηγεί σε μία συσσώρευσή τους στην ατμόσφαιρα. Αυτή η συσσώρευση αναμένεται να οδηγήσει σε κλιματικές αλλαγές.



**Σχήμα 2.6** Χαρακτηριστικές χρονικές κλίμακες για την κατακόρυφη μεταφορά των ρύπων.