

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

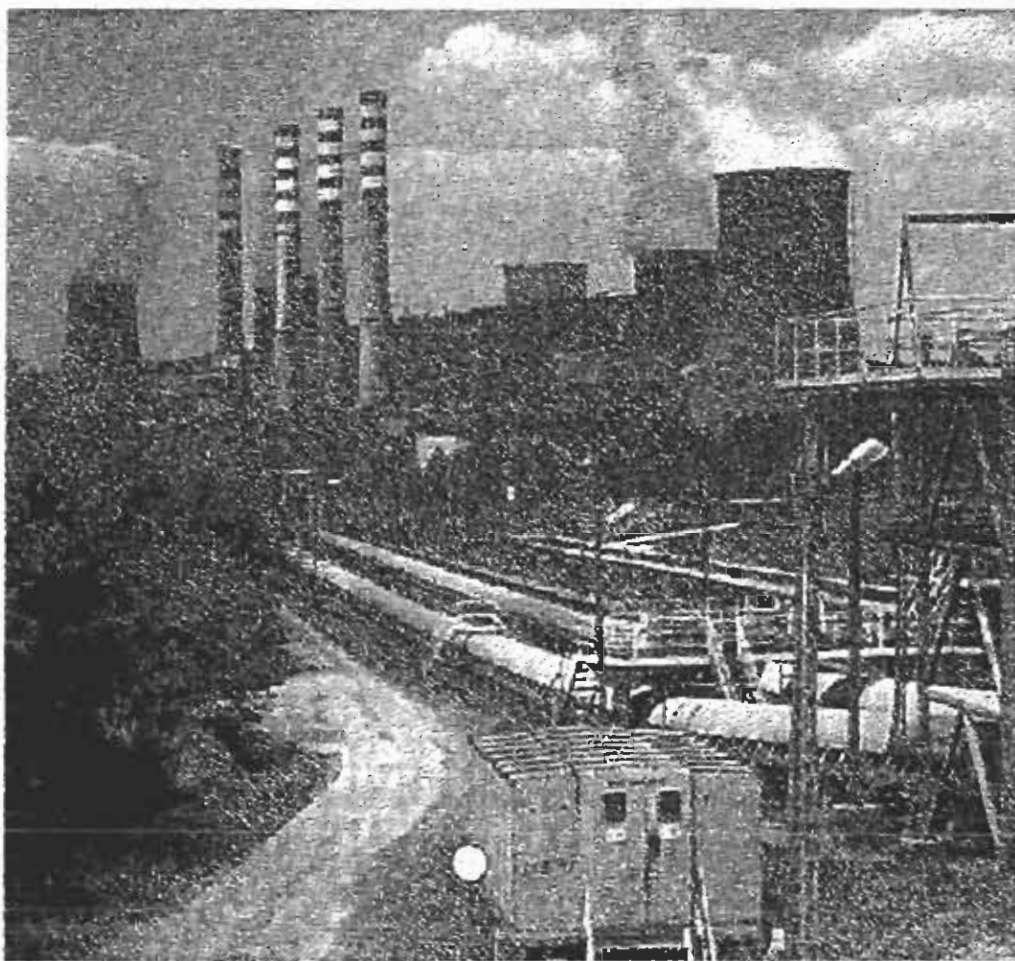
16  
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕ ΘΕΜΑ

"ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ  
ΔΙΑΧΥΣΗ ΡΥΠΩΝ, ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ"



ΟΙ ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ :

ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΓΟΥΔΑΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ ΓΙΑΝΝΑ

ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ : Χ. Σταμούτσος  
Δρ. Ν. Νανούσης



ΠΑΤΡΑ 2000

ΕΠΙΘΕΤΟΣ ΣΟΜΑΡΑ /	3143
----------------------	------

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας και γενικά του περιβάλλοντος, αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα σύγχρονα προβλήματα. Ο άνθρωπος με τις πολυάριθμες δραστηριότητες του, καταστρέφει καθημερινά τον πλανήτη. Πολλά είναι τα παραδείγματα μόλυνσης του φυσικού μας πλούτου, σε όλο τον κόσμο.

Στο βιβλίο αυτό επιχειρείται μια προσέγγιση στο συγκεκριμένο θέμα, εξετάζοντας τον ατμοσφαιρικό αέρα και το νερό της γης, τους ρύπους που προκαλούν τις καταστροφές (Πηγές, δειγματοληψία, διάχυση ) και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον (χλωρίδα, πανίδα, οικονομικές). Τέλος παραθέτουμε ορισμένα παραδείγματα ατμοσφαιρικής και υδάτινης ρύπανσης (τρύπα του όζοντος, ατύχημα τσέρνομπιλ, Θαλάσσια μόλυνση σε περιοχή της Ιαπωνίας κλπ).

Με την εκπόνηση της πτυχιακής αυτής εργασίας εμπλουτίσαμε τις γνώσεις μας σχετικά με το θέμα και οξύναμε τη σκέψη και τη δημιουργικότητα, καθώς και τη συνεργασία.

Ευχαριστούμε θερμά τους εισηγητές της εργασίας, Σταμούτσο Χρήστος και Νανούση Νανούση για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

### Οι σπουδαστές:

**Ασημακόπουλος Αθανάσιος**  
**Γούδας Στυλιανός**  
**Παπαγιάννη Ιωάννα**

Πάτρα 2000

Κεφάλαιο		σελίδα
1	<b>ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ</b>	10
1.1	Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας	11
1.2	Διασπορά και φωτοχημικές αντιδράσεις αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα	13
2	<b>ΟΙ ΟΞΙΝΕΣ ΒΡΟΧΕΣ</b>	16
3	<b>Η ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ</b>	20
3.1	Η ενοχοποίηση των CFC για την αραιώση του στρώματος του όζοντος από θεωρητικής απόψεως.	20
3.1.2	Η εμπειρική απόδειξη της αραιώσης του στρώματος του όζοντος	24
3.2	Η εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου	30
3.3	Οι κλιματικές αλλαγές	35
3.31	Οι υπεύθυνοι της εντατικοποίησης του φαινομένου του θερμοκηπίου	39
4	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</b>	44
4.1	Εισαγωγή	44
4.2	Μηχανισμός της δράσης των ρύπων του αέρα	45
4.3	Επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου	47
4.3.1	Επιπτώσεις ραδιενεργών διαρροών	47
4.3.2	Έρευνα των επιπτώσεων των αέριων ρύπων	48
4.4	Συγκεκριμένοι ρύποι	49
4.4.1	Διοξείδιο του θείου	49
4.4.2	Μονοξείδιο του άνθρακα	49
4.4.3	Οξειδία του αζώτου	50

Κεφάλαιο	σελίδα
4.4.4 Υδροθείο και θειική αλκοόλη	50
4.4.5 Όζον	50
4.4.6 Φθόρια	51
4.4.7 Μόλυβδος	51
4.4.8 Ατμοί υδρογονάνθρακα	51
4.5 Καρκινογενείς παράγοντες	51
4.5.1 Εντομοκτόνα	52
4.5.2 Ραδιενεργά Ισότοπα	52
4.6 Αλλεργικοί παράγοντες	52
4.7 Επίδραση της μόλυνσης του αέρα στα ζώα	54
4.7.2.1 Εισαγωγή	54
4.7.2 Επίδρασεις της μόλυνσης του αέρα στα ζώα του αγρού	55
4.7.3 Φθόριο	55
4.7.4 Αρσενικό	57
4.7.5 Μόλυβδος	58
4.8 Τα κατοικίδια και η μόλυνση	59
4.9 Έκθεση σε ιονισμένη ακτινοβολία	59
4.10 Επίδρασεις της ρύπανσης του αέρα στα φυτά	60
4.11 Επίδραση του περιβάλλοντος στα φυτά	60
4.11.1 Αέριοι ρύποι που επηρεάζουν τα φυτά	61
4.12 Δομή ενός συνηθισμένου φύλλου	62
4.13 Μορφές βλάβης στα φύλλα	62
4.14 Είδη βλαβών των φυτών	63
4.15 Επίδραση των αερίων ρύπων στα φυτά	64
4.16 Οικονομικές συνέπειες της ρύπανσης του αέρα	64
4.16.1 Εισαγωγή	64
4.16.2 Μηχανισμός φθοράς σε μολυσμένες ατμόσφαιρες	65

Κεφάλαιο	σελίδα	
4.16.3	Παράγοντες που επιδρούν στην ατμοσφαιρική επιδείνωση	66
4.17	Οικονομικές απώλειες (υλικό κόστος)	66
4.17.1	Υλικά κτιρίων	67
4.17.2	Μπογιές	68
4.17.3	Υφάσματα	68
4.17.4	Ελαστικά	68
4.17.5	Δέρμα	69
4.17.6	Χαρτί	69
4.17.7	Γυαλικά και κεραμικά	70
4.17.8	Βιομηχανία ηλεκτρονικών	70
4.17.9	Πλύσιμο και στέγνωμα	70
4.17.10	Βλάστηση	71
4.17.11	Απροσδιόριστη ζημιά	71
4.18	Άλλες οικονομικές ζημιές	71
4.19	Επιδράσεις στα έργα τέχνης	72
4.19.1	Επιδράσεις στα έργα τέχνης σε διάφορες χώρες του κόσμου	73
4.20	Εκτίμηση ζημιών	73
4.20.1	Αποτίμηση ζημιών βάση του υπολογισμού	74
<b>5</b>	<b>ΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΤΟΥΣ</b>	<b>75</b>
5.1	Μετασχηματισμός μεταξύ συγκέντρωσης κατά βάρος και συγκέντρωσης κατ'όγκο.	77
5.2	Ταξινόμηση των ρύπων	79
5.2.1	Φυσικοί ρύποι	80
5.2.2	Στερεά σωματίδια αιωρούμενα στον αέρα	80
5.2.3	Αέρια	83
5.7	Κύριοι και δευτερεύοντες ατμοσφαιρικοί ρύποι	83

Κεφάλαιο		σελίδα
6	<b>ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ</b>	86
6.1	Αιθαλομίχλη	88
6.2	Θείο	88
6.3	Μείωση του SO <sub>2</sub>	90
6.4	Τριοξειδίο του θείου	92
6.5	Οξειδία του αζώτου	93
6.6	Σχηματισμός διοξειδίου του αζώτου	94
6.7	Μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου	95
6.8	Αμμωνία	97
6.8	Νιτρώδες οξείδιο (N <sub>2</sub> O)	98
6.10	Μεθάνιο	99
6.11	Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)	100
6.12	Όζον (O <sub>3</sub> )	101
6.13	Προσδιορισμός υδρογονανθράκων (HC)	102
6.14	Προσδιορισμός υπεροξυ-ακετυλο-νιτριδίου (PAN)	103
6.15	Προσδιορισμός σωματιδιακής ύλης (PM)	103
6.16	Βαρέα μέταλλα	104
6.17	Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	105
6.18	Όξινα συστατικά	105
7	<b>ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕ ΤΑ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ</b>	106
7.1	Η ιστορία της ρύθμισης της μόλυνσης του αέρα των μηχανοκίνητων οχημάτων	107
7.2	Σχηματισμός ρύπων	108
7.3	Ο όγκος και η σύνθεση των προϊόντων καύσης	108

7.4	Μονοξειδίο του άνθρακα (CO)	110
7.5	Λόγος αέρα-καυσίμου, ισοδύναμος λόγος	112
7.6	Υδρογονάνθρακες (HC)	112
7.6	Οξειδία του αζώτου (NO <sub>x</sub> )	113
7.7	Εκπομπές αποθήκευσης και μεταφοράς	113
7.8	Πτητικά οργανικά συστατικά (Π.Ο.Σ.)	114
7.9	Εναλλακτικοί έλεγχοι	115
7.10	Απώλειες γεμίματος – εξαερισμού και αδειάσματος	116
<b>8</b>	<b>ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ – ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ</b>	<b>120</b>
8.1	Δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα	120
8.2	Μετεωρολογικοί παράγοντες	121
8.3	Τοπογραφικοί παράγοντες	121
8.4	Διάρκεια - συχνότητα δειγματοληψίας	122
8.5	Μορφή των ρύπων της ατμόσφαιρας	124
8.6	Συσκευές δειγματοληψίας	128
8.7	Δειγματοληψία από πηγές εκπομπής	129
8.7.1	Δειγματοληψία από σταθερές πηγές εκπομπής	130
8.7.2	Δειγματοληψία από κινητές πηγές εκπομπής	132
8.8	Συστήματα δειγματοληψίας ρύπων της ατμόσφαιρας	133
8.9	Αντλίες κενού	134
8.8.2	Μετρητές όγκου	134
8.8.3	Μετρητές πίεσης – θερμοκρασίας	135



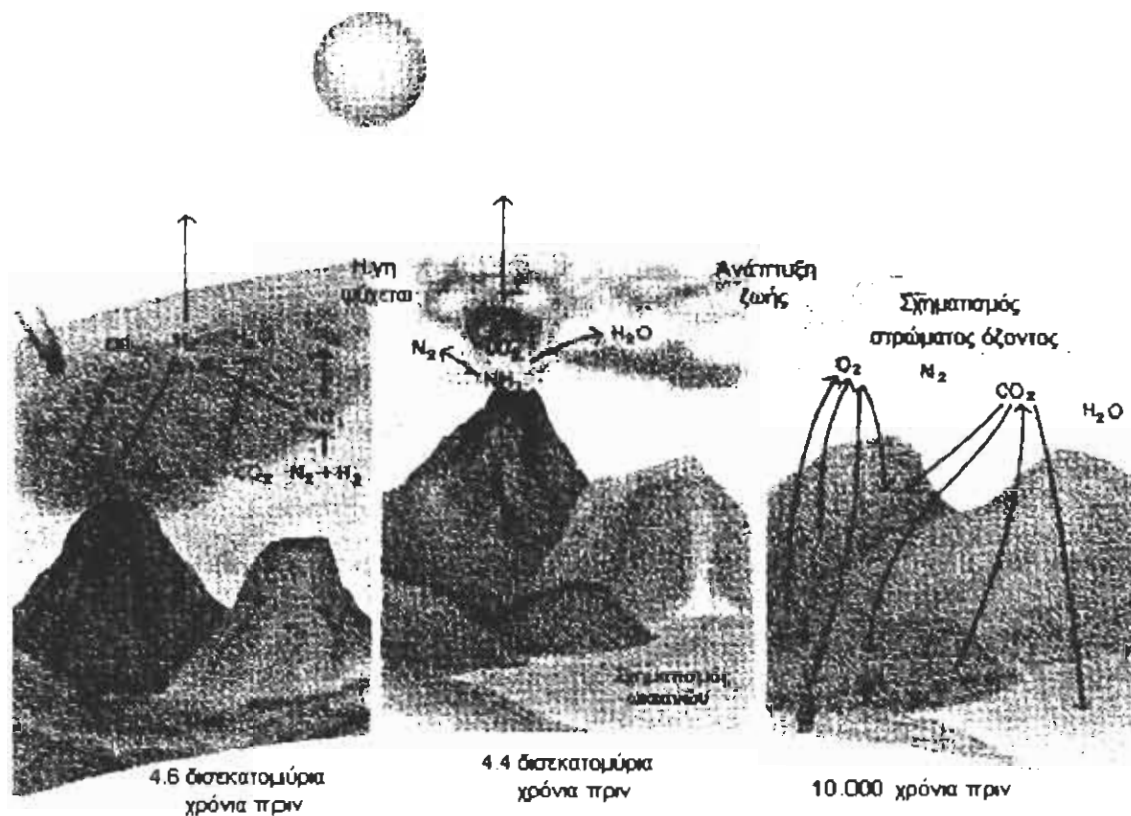
Κεφάλαιο	σελίδα	
8.9	Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από την ατμόσφαιρα και από πηγές εκπομπής	136
8.9.1	Μέθοδοι δειγματοληψίας αερίων ρύπων από την ατμόσφαιρα	136
8.9.2	Προσρόφηση	137
8.9.3	Απορρόφηση	139
8.9.4	Συμπύκνωση (Condensation, cryogenic trapping)	141
8.9.5	Δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα (στιγμαία δειγματοληψία)	144
8.10	Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων από την ατμόσφαιρα	147
8.10.1	Διήθηση	147
8.10.2	Ικανότητα συλλογής σωματιδίων	147
8.10.3	Χημική σύσταση φίλτρων	148
8.10.4	Προβλήματα δειγματοληψίας σωματιδίων με διήθηση	149
8.10.5	Πρόσκρουση	152
8.10.6	Διάχυση	155
8.10.7	Φυγοκέντρηση	157
8.10.8	Κατακάθιση λόγω βαρύτητας	158
8.11	Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από καμινάδες	160
8.12	Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων από καμινάδες	161
8.13	Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από εξατμίσεις αυτοκινήτων	162
8.14	Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων από εξατμίσεις αυτοκινήτων	162
9	<b>ΔΙΑΧΥΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ</b>	<b>164</b>
9.1	Ανύψωση πλουμίου	164
9.1.1	Εισαγωγή	164
9.2	Οι εξισώσεις του κλιμακωτού πρότυπου (Top-Hat)	164
9.2.1	Ορισμοί	164

Κεφάλαιο	σελίδα	
9.2.2	Το σύστημα των εξισώσεων για κατακόρυφο πλούμιο	167
9.2.3	Ομάδα εξισώσεων για καμπύλο πλούμιο	167
9.3	Τροχιά του πλουμίου κοντά στην πηγή	168
9.3.1	Κατακόρυφα πλούμια	168
9.3.2	Καμπύλα πλούμια	168
9.4	Άνοδος πλουμίου περιοριζόμενη από την ευστάθεια περιβάλλοντος	169
9.4.1	Κατακόρυφα πλούμια	170
9.4.2	Καμπύλα πλούμια	170
9.5	Εισχώρηση πλουμίου σε ανυψωμένη αναστροφή	171
9.6	Ανύψωση πλουμίου ελεγχόμενη από την τύρβη του περιβάλλοντος	173
9.6.1	Σχεδόν ουδέτερες συνθήκες	173
9.6.2	Συνθήκες μεταγωγής	174
9.7	Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος με το πρότυπο διάσπασης	175
9.8	Πολλαπλές πηγές	176
9.9	Επιδράσεις πηγών	177
9.9.1	Σύνοψη	177
9.9.2	Αεροδυναμικό φαινόμενο καπνοδόχου	177
9.9.3	Η δομή της ροής γύρω από κτίρια	178
9.10	Υπολογισμοί διάχυσης γύρω από κτίρια	181
9.10.1	Μονωμένες πηγές ανάντι κτιρίων	182
9.10.2	Πηγές κοντά στα κτίρια	182
9.11	Πρότυπο πλουμίου Gauss για συνεχείς πηγές	187
9.11.1	Γιατί χρησιμοποιείται το πρότυπο Gauss	187
9.11.2	Μορφή του προτύπου Gauss	187
9.11.3	Τρόποι καθορισμού ευστάθειας	189
9.12	Εκλογή των $\sigma_y$ και $\sigma_z$	192
9.12.1	Μέθοδοι κατηγορίας ευστάθειας	192
9.12.2	Η μέθοδος των $\sigma_\theta$ και $\sigma_\phi$	193

Κεφάλαιο		σελίδα
9.13	Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος	195
9.14	Μέγιστη εδαφική συγκέντρωση και καπνισμός	196
9.15	Χρόνοι μέσου όρου και λόγοι μέγιστης προς μέση προσέγγιση	198
9.16	Το πρότυπο τομέα για μεγάλους χρόνους δειγματοσμού	201
9.17	Στατιστικά πρότυπα διάχυσης από συνεχείς σημειακές πηγές	201
9.17.1	Εισαγωγή	201
9.17.2	Θεώρημα του Taylor	202
9.17.3	Η επίδραση του μεγέθους δίνης στον $\sigma_y$	207
9.17.4	Σχέσεις LAGRANGE - EULER	209
9.17.5	Μοντέλα τροχιών σωματιδίων Monte Carlo	210
9.18	Διάχυση νέφους	212
9.18.1	Εισαγωγή	212
9.18.2	Στατιστική αντιμετώπιση	214
9.18.3	Προσέγγιση ομοιότητας	215
9.19	Εφαρμογές	217
10	<b>ΝΕΡΟ ΚΑΙ Η ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΟΥ</b>	<b>219</b>
10.1	Σημειακές και μη σημειακές πηγές	220
10.2	Μόλυνση από θρεπτικά συστατικά και ευτροφικότητα	221
10.3	Μόλυνση υπόγειων υδάτων	223
10.4	Θαλάσσια ρύπανση	225
10.4.1	Ρύπανση από πετρέλαιο	225
10.4.2	Ρύπανση από πλαστικά	226
10.5	Χημικά απόβλητα και ακαθαρσίες υπονόμων	226
10.6	Υδάτινοι δρόμοι	227

<u>Κεφάλαιο</u>		σελίδα
10.7	Ποτάμια	227
10.8	Πλημμύρες	228
10.9	Φράγματα	228
11	<b>ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ( CASE STUDIES )</b>	230
11.1	Το πρόβλημα με το προστατευτικό στρώμα του όζοντος	230
11.2	Η ασθένεια της Μιναμάτα	232
11.3	Η μόλυνση από ΜΡΤΡ και η ασθένεια του Πάρκινσον	233
11.4	Η πόλη του Μπάνγκαλορ	235
11.5	Το ατύχημα του Τσέρνομπιλ	238
12	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	242
	Παραδείγματα σχετικά με τα προβλήματα των μηχανοκίνητων οχημάτων	
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	256

# 1. ΦΥΣΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ



Εικόνα 1.1

Πριν μιλήσουμε για τους ρύπους που συναντάμε στην ατμόσφαιρα, θα πρέπει να γνωρίζουμε τη σύσταση κατ' όγκο του καθαρού αέρα. Ο τελευταίος αποτελείται από διάφορα αέρια τα οποία έχουν σχεδόν σταθερή αναλογία για όλη τη γήινη ατμόσφαιρα. Τα αέρια από τα οποία αποτελείται ο αέρας φαίνονται στον πίνακα 1.1.

Το MB του ξηρού αέρα είναι 28.97. Οι αναλογίες των συστατικών του αέρα δεν παρέμειναν ίδιες από την αρχή της δημιουργίας της γης. Αρχικά, άζωτο, νερό και διοξείδιο του άνθρακα διέρρεαν από το εσωτερικό της γης για δισεκατομμύρια χρόνια. Το νερό συγχωνεύθηκε με ανθρακικά πετρώματα και το άζωτο έμεινε ως το κύριο συστατικό της ατμόσφαιρας.

Στην παραπάνω εικόνα 1.1 βλέπουμε πώς η γη απέκτησε την ατμόσφαιρά της: στα αριστερά η αρχέγονη ατμόσφαιρα σχεδόν 5 τρισεκατομμύρια πριν, στη μέση ο σχηματισμός του νερού καθώς η γη ψυχόταν, στα δεξιά οι αλλαγές που προκλήθηκαν από ζωντανούς μικροοργανισμούς.

Σταδιακά οι φυτικοί οργανισμοί μέσω της φωτοσύνθεσης συνετέλεσαν στην αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου και έτσι φτάσαμε στις μέρες μας να έχουμε τις αναλογίες του πίνακα 1.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1

Στοιχείο	Σύμβολο	Αναλογία κατ' όγκο
Αζωτο	N <sub>2</sub>	78.1%
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	20.9%
Αργό	Ar	0.93%
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	360 ppm
Νέο	Ne	18 ppm
Ήλιο	He	5 ppm
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	1.7 ppm

## 1.1 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

**Τροπόσφαιρα** είναι το στρώμα πάνω από την επιφάνεια της γης με ύψος 12 Km και χαρακτηρίζεται έτσι γιατί μπορεί να διαιρεθεί σε δύο διαφορετικά στρώματα. Το πρώτο βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια της γης και θερμαίνεται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το έδαφος. Το στρώμα αυτό είναι θερμό και το ύψος είναι περίπου 100 m τη νύχτα και 1.000 m την ημέρα, με διακυμάνσεις ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Ο θερμός αέρας ανέρχεται και επειδή η πίεση ελαττώνεται με το ύψος, εκτονώνεται αδιαβατικά. Έτσι η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται κατά το ποσό της θερμότητας που αντιστοιχεί στο έργο που παράγεται.

Για ιδανικές συνθήκες η θερμοκρασία ελαττώνεται κατά 9,8 °K για κάθε χιλιόμετρο (σχέση :  $gM/C_p$ , όπου  $g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας,  $M$  = μοριακό βάρος αερίου και  $C_p$  = μοριακή θερμοχωρητικότητα).

Στην τροπόσφαιρα οι υπάρχοντες υδρατμοί συμπυκνώνονται όταν εκτονώνεται ο αέρας και ελευθερώνουν ενέργεια. Έτσι η πραγματική ελάττωση της θερμοκρασίας είναι περίπου -6°K/km. Η ελάττωση αυτή συνεχίζεται μέχρι την τροπόπαυση όπου φθάνει τους -55 °C.

**Η στρατόσφαιρα** αρχίζει από την τροπόπαυση και έχει ύψος 50 Km. Στα πρώτα χιλιόμετρα πάνω από την τροπόπαυση η θερμοκρασία είναι σταθερή, ενώ μετά αυξάνει και φθάνει στους 0°C στην στρατόπαυση. Στη στρατόσφαιρα υπάρχει αρκετή σταθερότητα σε σχέση με την τροπόσφαιρα και η ανάμιξη των αερίων είναι αργή. Έτσι τα υλικά που μεταφέρονται στη στρατόσφαιρα μένουν εκεί για πολλά χρόνια.

Η αύξηση της θερμοκρασίας στη στρατόσφαιρα οφείλεται στην παρουσία στρώματος O<sub>3</sub> που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία. Η συγκέντρωση του O<sub>3</sub> είναι μέγιστη σε ύψος 25-30 Km και φθάνει τα 10 ppm. Το στρώμα αυτό απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία και προστατεύει τους ζωντανούς οργανισμούς.

Μετά τη στρατόπαυση βρίσκεται η **μεσόσφαιρα** όπου παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας μέχρι τα 85 Km απο την επιφάνεια της γης. Η ζώνη αυτή είναι η πιο ψυχρή λόγω της κατακόρυφης μεταφοράς αερίων μαζών, όπως και στην τροπόσφαιρα και στη μικρή συγκέντρωση συστατικών που απορροφούν ακτινοβολία ενέργεια.

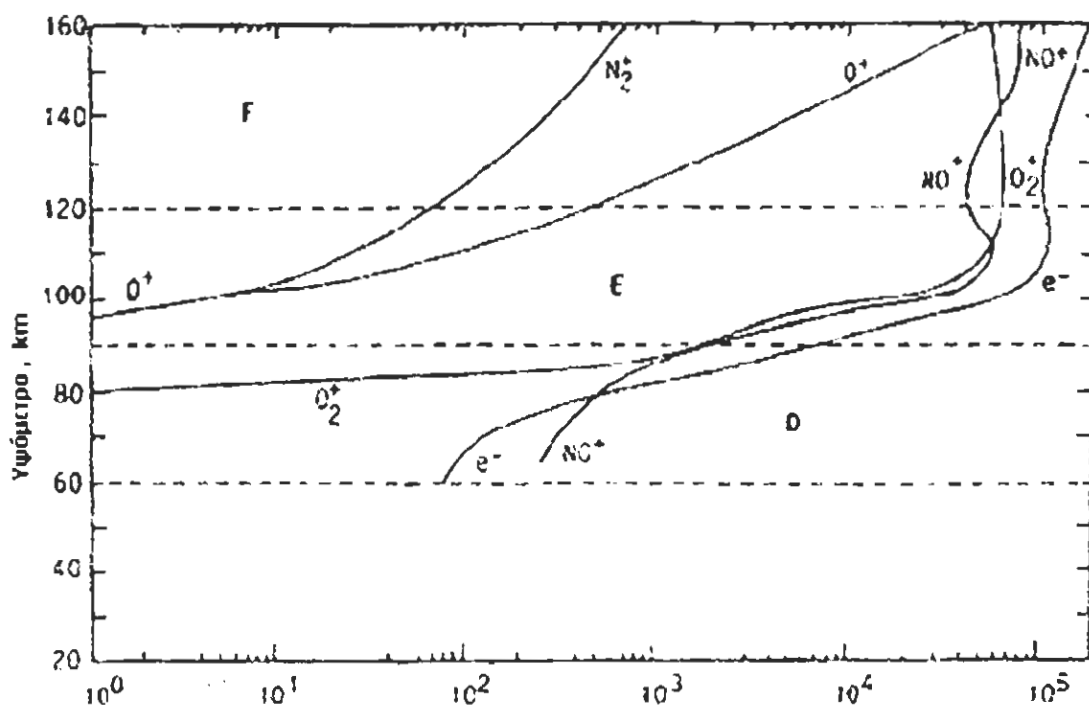
Μετά τη μεσόπαυση εκτείνεται η **θερμόσφαιρα** όπου η θερμοκρασία αρχίζει πάλι να αυξάνει. Η αύξηση αυτή φθάνει μέχρι το ύψος των 400 Km (θερμόπαυση) όπου επικρατούν θερμοκρασίες 1000°C και μεγαλύτερες ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα.

**Ιονόσφαιρα.** Σε ύψος πάνω απο τα 60 Km παρατηρείται ιονισμός των συστατικών της ατμόσφαιρας. Η ιονόσφαιρα χωρίζεται σε τρία στρώματα (σχήμα 1.1.1) :

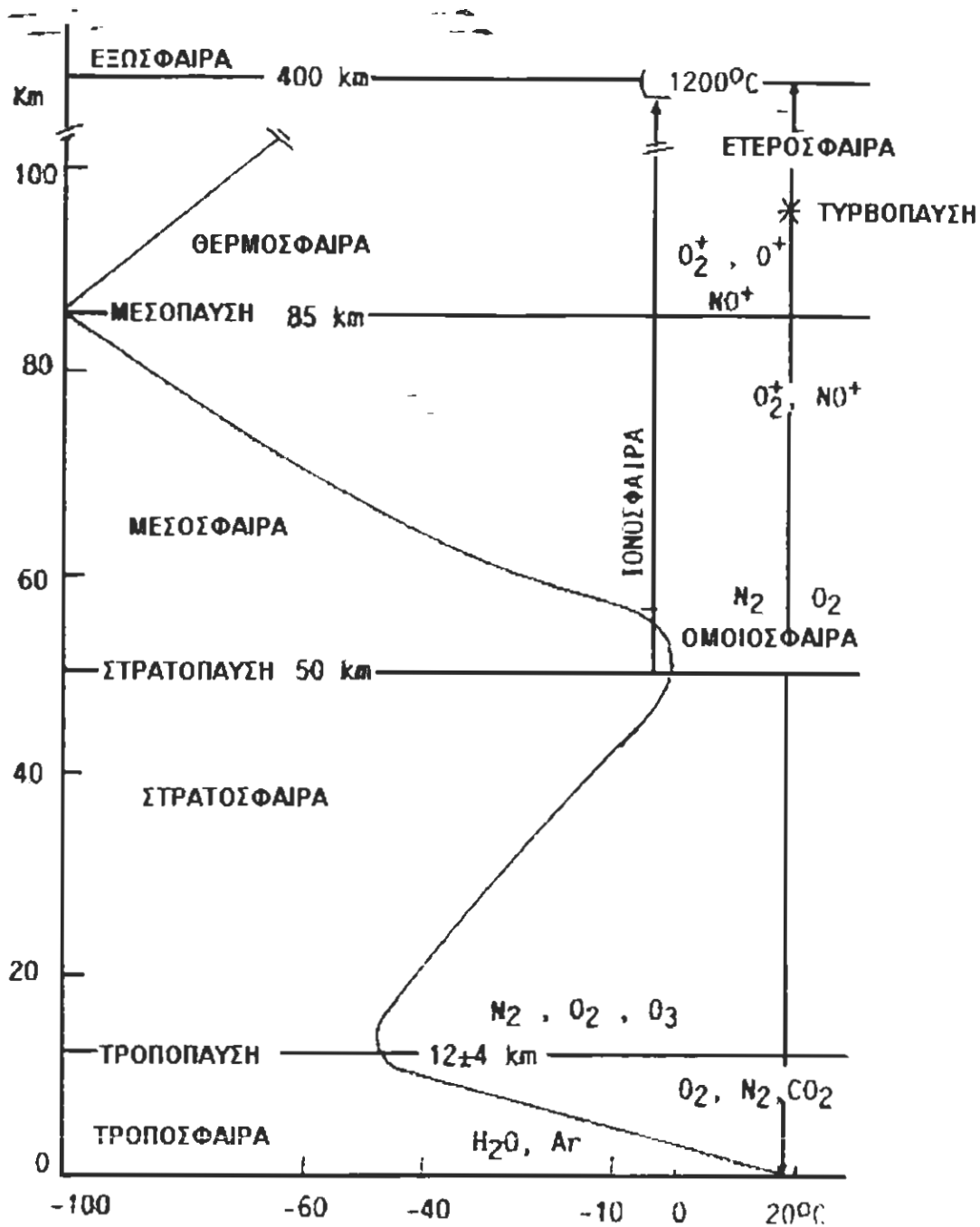
α) Στρώμα D είναι η περιοχή 60-90 Km, όπου παρατηρείται φωτοϊονισμός του NO.

β) Στρώμα E είναι η περιοχή 90-120 Km, όπου παρατηρείται φωτοϊονισμός του O<sub>2</sub>.

γ) Στρώμα F είναι η περιοχή πάνω απο τα 120 Km όπου φωτοϊονίζονται τα O, O<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>.



Σχήμα 1.1.1 Στρώματα της ιονόσφαιρας και τυπικές συγκεντρώσεις των κυριότερων ιόντων



Σχήμα 1.1.2 Δομή και σύσταση της ατμόσφαιρας

## 1.2 Διασπορά και φωτοχημικές αντιδράσεις αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα

Διασπορά αερίων ρύπων: οι αέριοι ρύποι διασκορπίζονται στην ατμόσφαιρα ανάλογα με τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις οι οποίες διασκορπίζουν και παρασύρουν τους ρύπους. Η τυρβώδης ροή του αέρα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διασπορά των αερολυμάτων και οφείλεται σε μηχανικής προέλευσης στροβιλισμούς κυρίως για θερμικούς λόγους. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διεύθυνση, την



ταχύτητα και την τυρβώδη ροή του αέρα είναι: η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας, η τριβή με το έδαφος, η τοπογραφία και τα διάφορα κτίσματα.

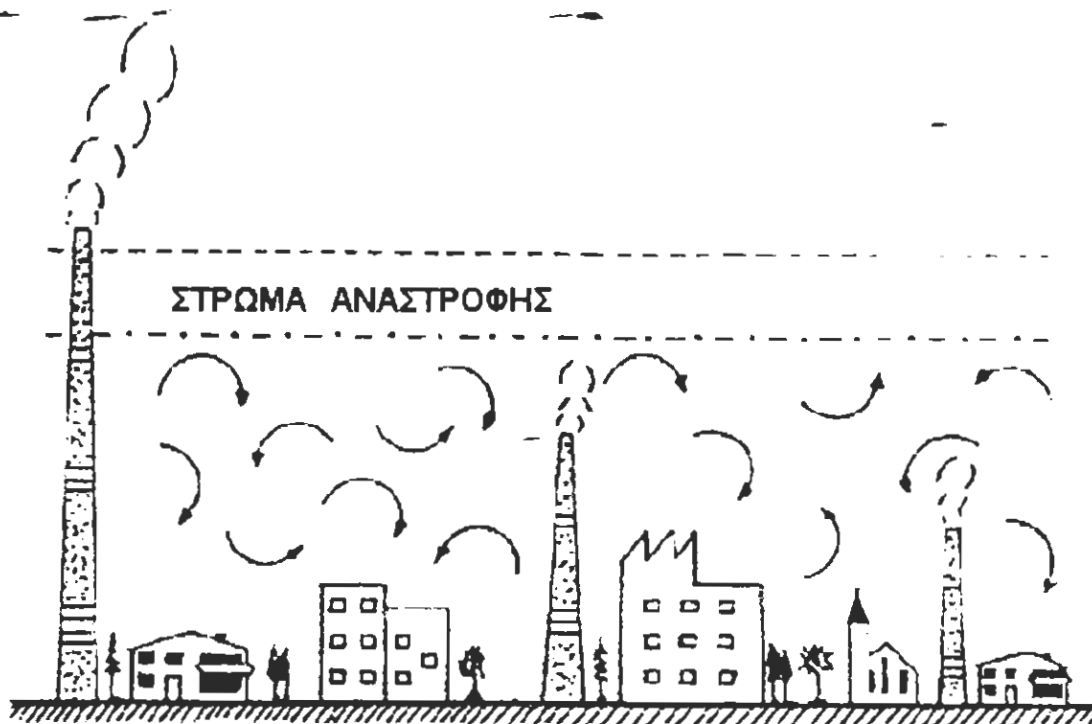
Η ελάττωση της θερμοκρασίας του αέρα με το ύψος από το έδαφος, που ονομάζεται αρνητική θερμοβαθμίδα, προκαλεί ανοδικά ρεύματα αέρα. Το κατακόρυφο ύψος μέχρι το οποίο μεταφέρονται οι ρύποι από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις ονομάζεται μετεωρολογικό ύψος ανάμειξης (mixing height). Το στρώμα του αέρα από το έδαφος μέχρι το ύψος ανάμειξης ονομάζεται στρώμα ανάμειξης. Το ύψος αυτό δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες, την εποχή του έτους, την ώρα και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ελάχιστη τιμή του συναντάται κατά τη διάρκεια της νύχτας και περιορίζεται σε μερικά μέτρα.

Με την ανατολή του ηλίου, η ανάμειξη αυξάνει βαθμιαία και παίρνει τη μέγιστη τιμή κατά τις πρώτες μεσημβρινές ώρες. Το μέγιστο ύψος κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι και 2 km. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος, τόσο πιο εύκολα και γρήγορα διασκορπίζονται οι αέριοι ρύποι.

Αρκετές φορές όμως είναι δυνατό να παρατηρηθεί και θετική θερμοβαθμίδα, δηλαδή η θερμοκρασία του αέρα να αυξάνει με το ύψος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή (temperature inversion). Στην περίπτωση αυτή το στρώμα του αέρα που είναι σε επαφή με το έδαφος, είναι ψυχρότερο από τα ανώτερα στρώματα. Το ψυχρό στρώμα παραμένει παγιδευμένο στο έδαφος, όσο διαρκεί το φαινόμενο και οι διάφοροι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται παγιδεύονται και συσσωρεύονται συνεχώς (σχήμα 1.2.1).

Οι κυριότερες αιτίες που προκαλούν τις θερμοκρασιακές αναστροφές είναι:

α) Αναστροφή της ακτινοβολίας (radiation inversion). Σε περιόδους σταθερών ατμοσφαιρικών συνθηκών με άπνοια και καθαρό ουρανό, το έδαφος ακτινοβολεί στη διάρκεια της νύχτας και ψύχεται. Το στρώμα του αέρα πάνω στο έδαφος τότε ψύχεται πιο γρήγορα από τα ανώτερα στρώματα. Έτσι δημιουργείται θερμοκρασιακή αναστροφή που διαρκεί μόνο τις πρωινές ώρες. Όταν το έδαφος αρχίσει να θερμαίνεται, η θερμοβαθμίδα αποκτά και πάλι την κανονική τιμή της. Αν οι καιρικές συνθήκες διατηρούνται οι ίδιες, η αναστροφή αυτή επαναλαμβάνεται και στις επόμενες ημέρες.



Σχήμα 1.2.1 Συσσώρευση αερίων ρύπων σε περίοδο θερμοκρασιακής αναστροφής

β) Αναστροφή μετά απο κάθοδο αερίων μαζών (subsidence inversion). Όσες φορές παρατηρείται κάθοδος αερίων μαζών προς το έδαφος, αυτές συμπιέζονται και η θερμοκρασία τους αυξάνει σε σχέση με τα στρώματα που είναι σε επαφή με το έδαφος. Το στρώμα της αναστροφής στις περιπτώσεις αυτές βρίσκεται συνήθως σε ύψος 200 – 1500 m. Η αναστροφή αυτή είναι συνεχόμενη, διαρκεί πολλές μέρες και για το λόγο αυτό θεωρείται επικίνδυνη.

γ) Οριζόντια μετακίνηση αέρα. Θερμοκρασιακή αναστροφή παρατηρείται σε περιοχές όπου συναντώνται ψυχρά και θερμά ρεύματα. Όταν ένα ψυχρό ρεύμα καλυφθεί από ένα θερμό τότε έχουμε αναστροφή και κατά συνέπεια συνθήκες κατάλληλες για συσσώρευση των αερίων ρύπων.

## 2. ΟΙ ΟΞΙΝΕΣ ΒΡΟΧΕΣ

Με το φαινόμενο των όξινων βροχών δεν βρισκόμαστε ασφαλώς μπροστά σε μια μορφή πραγματικής καθολικής ρύπανσης του πλανήτη, με την έννοια ότι δεν συνεπάγονται αυτές καμιά μεταβολή του τρόπου λειτουργίας του οικοσυστήματος της Γης στο σύνολό του. Ωστόσο η σημερινή έκταση των περιοχών που έχουν προσβληθεί από τις όξινες βροχές (η οποία καλύπτει όλη τη βορειοανατολική Ευρώπη, ένα σημαντικό τμήμα των ανατολικών ΗΠΑ και του Καναδά, το Μεξικό, το βόρειο τμήμα των Άνδεων, πολλές δασικές ζώνες της Αφρικής νότια της Σαχάρας, ένα μεγάλο τμήμα της Ινδικής Χερσονήσου και ένα τμήμα της Κίνας), το γεγονός ότι οι ίδιες συνθήκες βιομηχανικής ανάπτυξης ενοχοποιούνται για τις επιπτώσεις τους, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του φαινομένου του θερμοκηπίου (βιομηχανίες παραγωγής ενέργειας, ρύπανση από τα καυσαέρια των αυτοκινήτων), προσδίδουν στις όξινες βροχές ένα χαρακτήρα ενδιάμεσο μεταξύ της καθολικής ρύπανσης του πλανήτη και της τοπικής ή περιφερειακής ρύπανσης.

Ο όρος "όξινη βροχή" (acid rain) με την αυστηρή έννοιά του, υποδηλώνει την όξυνση της ατμόσφαιρας που οφείλεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες και προκαλείται από την αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και οξειδίων του αζώτου  $\text{NO}_x$  (πιο συγκεκριμένα  $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$ ).

Αυτές οι ενώσεις προέρχονται κυρίως από ορυκτά καύσιμα (γαιάνθρακα, πετρέλαιο και σε μικρότερο ποσοστό από φυσικό αέριο) που χρησιμοποιούνται για την κίνηση διαφόρων μεταφορικών μέσων (αυτοκινήτων, αεροπλάνων, κτλ.), στις εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης (για οικιακή και βιομηχανική χρήση), στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς στα διυλιστήρια πετρελαίου, και σε ορισμένες βιομηχανίες που λειτουργούν με κάμινους (κατεργασία ορυκτών, σιδηρουργία, τσιμεντοβιομηχανία).

Η χρήση ορυκτών καυσίμων με περισσότερη ή λιγότερη περιεκτικότητα σε θείο συνεπάγεται έκλυση  $\text{SO}_2$  που οξειδώνεται στην ατμόσφαιρα σε θειικό ανυδρίτη, ο οποίος ερχόμενος σε επαφή με το νερό, σχηματίζει ένα ισχυρό οξύ, το θειικό οξύ  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

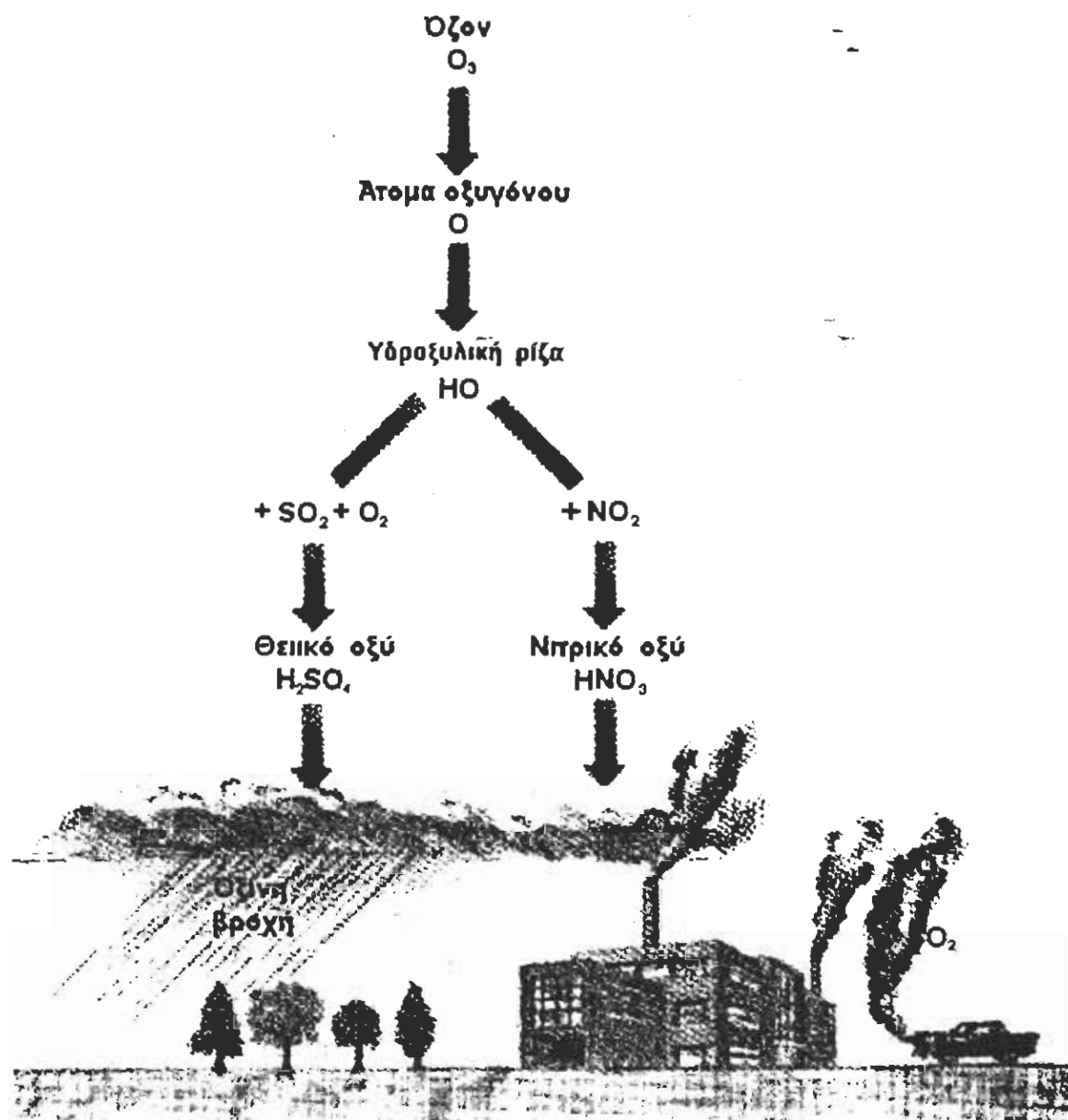
Αυτή η όξυνση της ατμόσφαιρας φορτίζει το νερό της βροχής με θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ή με νιτρικό οξύ ( $\text{HNO}_3$ ) τα οποία στη συνέχεια αποτίθενται στο έδαφος και στα φυτά με τη βροχή. Στην περίπτωση των νεφών, λόγω της ταχείας μετακίνησής τους, οι αποθέσεις μπορεί να λάβουν χώρα σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την πηγή εκπομπής των ρύπων: πρόκειται λοιπόν στην περίπτωση αυτή για μια ρύπανση από μεγάλη απόσταση ή για διακρατική ρύπανση (υπερωριακή).

Ο όρος "όξινη βροχή" που καθιερώθηκε εξαιτίας της χρήσης του τόσο στη Γαλλία όσο και στις αγγλοσαξονικές χώρες, ανατρέχει όπως φαίνεται σε ένα έργο του Άγγλου χημικού R.A. Smith που δημοσιεύθηκε το 1872. Στην πράξη ωστόσο, η διαπίστωση του φαινομένου είναι πολύ μεταγενέστερη. Ένας από τους λόγους ήταν και το γεγονός ότι μόνο στη δεκαετία του '40 άρχισαν να εφαρμόζονται συστήματα μέτρησης της χημικής σύστασης της ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα στη Σουηδία, χώρα στην οποία οι βλαβερές συνέπειες των όξινων βροχών ήταν εκτεταμένες λόγω της αυξημένης όξυνσης των επιφανειακών υδάτων της και ιδιαίτερα των πολυάριθμων λιμνών της που υπάρχουν στην ενδοχώρα.

Το 1968 ο Σουηδός S. Oden απέδειξε ότι οι όξινες ουσίες που δέχθηκαν σε μεγάλη ποσότητα οι Σκανδιναβικές χώρες, προέρχονταν κατ' ουσίαν από περιοχές της βαριάς βιομηχανίας της Μεγάλης Βρετανίας και της Κεντρικής Ευρώπης. Με βάση τα προγράμματα μελετών που καταστρώθηκαν κυρίως υπό την αιγίδα του Ο.Ο.Σ.Α υπογράφηκε στην Γενεύη το 1979 μια Διεθνής Σύμβαση για τη διακρατική ρύπανση από μεγάλες αποστάσεις, που τέθηκε σε ισχύ το 1983.

Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα οι επιστήμονες επέμεναν ότι για την όξυνση των υδάτων ευθύνεται κυρίως το SO<sub>2</sub>. Αυτή από καιρό, αποδίδεται στην αυξημένη βιομηχανική δραστηριότητα και λαμβάνει χώρα δια της οδού της ρύπανσης από μεγάλη απόσταση. Παρόλα αυτά, μια μελέτη που έγινε το Μάιο του 1990 για τις λίμνες των Adirondacks Mountains (Πολιτεία της Νέας Υόρκης, ΗΠΑ) όπου γινόταν αναφορά σε 48 λίμνες, απέδειξε ότι οι ζημιές που οφείλονταν στην όξινη βροχή ήταν λιγότερο σημαντικές από ό,τι προβλεπόταν, αφενός διότι οι λίμνες είχαν μεγαλύτερη δυνατότητα να εξουδετερώνουν τις συνέπειες της όξινης βροχής και αφετέρου διότι 7 από τις 48 λίμνες είχαν ήδη υποστεί όξυνση κατά την προβιομηχανική περίοδο λόγω φυσικών φαινομένων.

Οι επιδράσεις της όξυνσης στα δάση - που έγιναν από τις αρχές της δεκαετίας του '80, το βασικό στοιχείο του Walds-terben (θανάτου των δασών), όρου με τον οποίον χαρακτηρίζεται το φαινόμενο στη Γερμανία (υπογραμμίζοντας έτσι το αποτέλεσμα παρά την αιτία) - δεν ήταν μέχρι εκείνη την εποχή εύκολο να διαπιστωθούν.



*Εικόνα 2.1 Σχηματισμός νιτρικού και θειικού οξέως, τα οποία θα διαλυθούν στο νερό, που θα πέσει ως όξινη βροχή.*

Στις αρχές της δεκαετίας του ' 80 το σκηνικό αλλάζει απότομα στη Γερμανία ύστερα από δημοσιεύσεις επιστημόνων, οι οποίες στάθηκαν και αφορμή να επέλθει μια γενικότερη συνειδητοποίηση του προβλήματος, με κατάληξη τη δημιουργία του φαινομένου του Waldsterben ως αντικειμένου αντιπαραθέσεων.

Ανάμεσα στους επιστήμονες αυτούς οι καθηγητές Peter Schutt του Μονάχου και Bernhard Ulrich, του Gottingen, οι απόψεις των οποίων εισακούονταν με ιδιαίτερη προσοχή (διότι οι ίδιοι δεν συνδέονταν άμεσα με το οικολογικό κίνημα) διακηρύσσουν ότι το γερμανικό δάσος ασθενεί και ότι κατά κύριο λόγο η ασθένεια αυτή οφείλεται στην

ατμοσφαιρική ρύπανση, ενώ και οι δύο αυτοί επιστήμονες συμφωνούν μεταξύ τους ως προς τα αίτια, η οποία κατ' αυτούς είναι οι "όξινες αποθέσεις". Οι απόψεις τους παρόλα αυτά δίστανται σε ό,τι αφορά τον τρόπο δράσης του φαινομένου, εάν δηλαδή εκδηλώνεται μέσω του εδάφους (κατά τον B. Ulrich, ειδικό εδαφολόγο δασικών εδαφών) ή μέσω των φύλλων (κατά τον P. Schutt). Σε κάθε περίπτωση οι "όξινες αποθέσεις" οφείλονται κατά την άποψή τους κατά κύριο λόγο στο SO<sub>2</sub> και κατά δεύτερο λόγο μόνο στα NO<sub>x</sub>.

Το 1981 τίθεται σε εφαρμογή ένα πρόγραμμα συστηματικών παρατηρήσεων των δασών που επιβεβαιώνει μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα τις απόψεις των επιστημόνων και τότε αποκαλύπτεται πόσο ραγδαία είναι η επιδείνωση του φαινομένου: στο ομόσπονδο κρατίδιο της Βάδης - Βυρτεμβέργης λ.χ., το 6% των συστάδων ερυθρελάτης έχει προσβληθεί το 1981 από την ασθένεια, ενώ το 1983 το σύνολο των προσβληθέντων συστάδων ανέρχεται στο 94%.

### **3. Η ΑΡΑΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ**

Οι διαμάχες που συντάραξαν και συνταράσσουν ακόμη την επιστημονική κοινότητα σε ό,τι αφορά την αραίωση του στρώματος του όζοντος, διεξήχθησαν για πολλά χρόνια σε επίπεδο αποκλειστικά θεωρητικό προτού μεταφερθούν στο επίπεδο της εμπειρικής αξιολόγησης των διαφόρων όψεων αυτής της υποβάθμισης. Ας θυμίσουμε ότι το στρατοσφαιρικό όζον παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο επειδή απορροφά τις εξαιρετικά βλαβερές για τους ζωντανούς οργανισμούς της γης, υπεριώδεις ακτινοβολίες των περιοχών Β και C του ηλιακού φάσματος.

#### **3.1 Η ενοχοποίηση των CFC για την αραίωση του στρώματος του όζοντος από θεωρητικής άποψης.**

Η υπόθεση του όζοντος αρχίζει στην πραγματικότητα το 1974, όταν δύο αμερικανοί επιστήμονες οι Molina και Rowland δημοσίευσαν στο περιοδικό Nature ένα άρθρο στο οποίο διατύπωναν την άποψη ότι οι χλωροφθοράνθρακες (CFC), χημικές ουσίες παραγόμενες αποκλειστικά από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, είναι ικανές να καταστρέψουν το όζον της στρατόσφαιρας. Ήδη, το 1979, με την είσοδο των υπερηχητικών αεροπλάνων στην υπηρεσία της πολιτικής αεροπορίας, κυρίως του Concorde, αισθάνθηκαν οι αμερικανοί ερευνητές την ανάγκη να στρέψουν την προσοχή τους στις πιθανότητες καταστροφής του στρατοσφαιρικού όζοντος από τα καυσαέρια των αεριωθούμενων αεροσκαφών.

Βέβαια η μετέπειτα πορεία των γεγονότων δεν θα τους δικαιώσει διότι αφενός οι πτήσεις των υπερηχητικών σκαφών για εμπορικούς σκοπούς δεν θα γνωρίσουν, για λόγους καθαρά οικονομικούς, την ανάπτυξη που αναμενόταν και θα παραμείνουν εντελώς στο περιθώριο και αφετέρου η επιστημονική ερμηνεία του φαινομένου θα αποδείξει ότι τα υπερηχητικά αεροπλάνα δημιουργούν περισσότερο όζον απ' ό,τι καταστρέφουν.

Παρόλα αυτά το πρώτο αυτό επεισόδιο είχε δύο συνέπειες που συνδέονται ωστόσο μεταξύ τους: α) τη διάνοιξη ενός πεδίου επιστημονικής έρευνας σχετικά με την εύθραυστη ισορροπία της στρατόσφαιρας, β) την αποκάλυψη ότι δεν λείπουν και οι οικονομικές και οι πολιτικές σκοπιμότητες από το ενδιαφέρον που επιδεικνύεται κατά καιρούς από τις κυβερνήσεις για το όζον, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση με την

βούληση των Η.Π.Α. να παρεμβάλουν εμπόδια στην ανάπτυξη της ευρωπαϊκής αεροναυτικής βιομηχανίας.

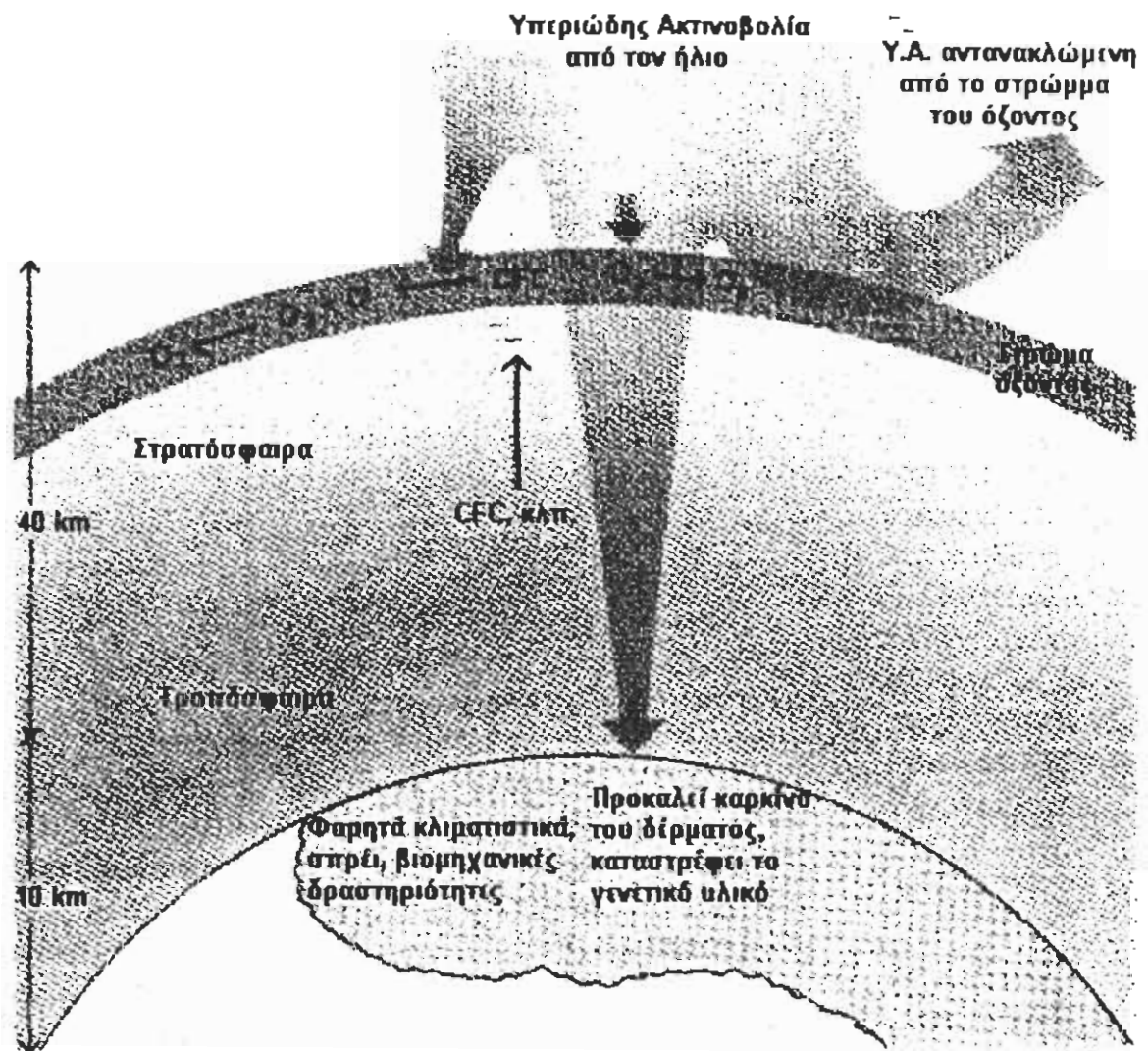
Το άρθρο αυτό στο οποίο οι Molina και Rowland υπογράμμιζαν τις μεταβολές που επέρχονται στην ανώτερη ατμόσφαιρα εξαιτίας των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, έγινε αφορμή να ξεσπάσει μια πολυετής και πολύμορφη επιστημονική διαμάχη. Αυτή εστιάστηκε αφενός στην υπέρβαση των πρώτων θεωρητικών διαπιστώσεων που έγιναν από τους δύο συγγραφείς του άρθρου σχετικά με τον τρόπο επίδρασης των CFC πάνω στο όζον, συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη κατανόηση των φαινομένων της ανώτερης ατμόσφαιρας, αλλά και στην αναζήτηση των πρώτων εμπειρικών αποδείξεων για την αραίωση του όζοντος.

Στο θεωρητικό επίπεδο πρώτος ο Charman εξήγησε την απουσία του όζοντος στην ανώτερη ατμόσφαιρα και τη φυσική του ισορροπία, προτείνοντας ένα σύστημα φυτοχημικών αντιδράσεων που φέρουν και το όνομά του: ο μηχανισμός δημιουργίας του όζοντος αρχίζει με τη χημική διάσπαση των μορίων του οξυγόνου ( $O_2$ ) υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα άτομα του οξυγόνου που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό συγκρούονται, παρουσία του αζώτου, με το μοριακό οξυγόνο ( $O_2$ ) και σχηματίζουν το όζον ( $O_3$ ). Το ίδιο αυτό μόριο όζοντος είναι δυνατό να διασταθεί (φωτοδιάσπαση) και να μας δώσει εκ νέου ατομικό οξυγόνο ( $O$ ) και μοριακό οξυγόνο ( $O_2$ ). Η αλληλεπίδραση του όζοντος ( $O_3$ ) με το ατομικό οξυγόνο ( $O$ ) δίνει πάλι την δυνατότητα σχηματισμού μορίων οξυγόνου ( $O_2$ ). Με την αντίδραση αυτή λοιπόν κλείνει και ο σχετικός κύκλος.

Ενώ αυτός ο καθαρά φωτοχημικός μηχανισμός παρέχει πράγματι τη δυνατότητα καθορισμού κάποιας ποσοτικής ισορροπίας του όζοντος στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να εξηγήσει την καθ' ύψος κατανομή του αλλά ούτε και τις μεταβολές που επέρχονται στη συγκέντρωσή του. Στην πραγματικότητα η θεωρία του Charman ισχύει κυρίως για ύψη πάνω από 50 km, στα οποία επικρατούν οι φωτοχημικοί μηχανισμοί και όπου η εναλλαγή ημέρας-νύχτας προκαλεί έντονες ημερήσιες μεταβολές. Αντιθέτως κάτω από τα 30 Km είναι η δυναμική των αερίων μαζών εκείνη που κατά κύριο λόγο επηρεάζει την κατανομή του όζοντος. Τέλος, στο μεσοδιάστημα των 30-50 Km, η κατάσταση είναι περισσότερο πολύπλοκη και αποτελεί αντικείμενο διαμάχης μεταξύ χημικών (οπαδών της φωτοχημικής θεωρίας) και μετεωρολόγων (οπαδών της δυναμικής θεωρίας).

Αυτή τη ρήξη μεταξύ χημικών και μετεωρολόγων την ξανασυναντάμε εξάλλου και στην αξιολόγηση των επιπτώσεων των μεταβολών της ατμόσφαιρας που προκαλούνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.





Εικόνα 3.1 Πως σχηματίζεται και καταστρέφεται το όζον

Η ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της καταστροφής του όζοντος δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο με τη βοήθεια της θεωρίας του Chapman. Η θεωρία αυτή παρέχει πράγματι κάποια εξήγηση για την καταστροφή του 15-20% μόνο του παραγόμενου όζοντος. Για μια περισσότερο ικανοποιητική εξήγηση πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα άλλα συστατικά που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε πολύ μικρές ποσότητες (της τάξης μερικών εκατομμυριστών), όπως είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), το διαζωτοξείδιο ( $\text{N}_2\text{O}$ ), οι υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ή το μοριακό υδρογόνο  $\text{H}_2$ . Αυτά τα υδρογονούχα αζωτούχα συστατικά οξειδώνονται στο ύψος των 20-40 Km, υπό τη μορφή της ρίζας OH ή του μονοξειδίου του αζώτου (NO). Οι καταλυτικοί κύκλοι αντιδράσεων που παρεμβάλλονται προκαλώντας την καταστροφή του όζοντος από το OH ή το NO, οξειδώνουν συγχρόνως τη ρίζα OH σε  $\text{EO}_2$  ή το μονοξείδιο του αζώτου (NO) σε  $\text{NO}_2$  αντίστοιχα. Τα

προϊόντα των αντιδράσεων αυτών ανάγονται στη συνέχεια αμέσως από το ατομικό οξυγόνο (O) σε ρίζα OH ή σε μονοξειδίο του αζώτου (NO). Επιτυγχάνεται κατά συνέπεια με τον τρόπο αυτό ένα ισοζύγιο του όζοντος, του οποίου η συγκέντρωση εξισορροπείται δια της φυσικής οδού ανάμεσα στην παραγωγή του, μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και στην καταστροφή του από διάφορες πηγές. Ωστόσο σε ύψη μεταξύ 35 και 45 Km, η καταστροφή του όζοντος παραμένει ανεξήγητη σε ποσοστό 10-25%. Στο σημείο αυτό είναι ακριβώς που παρεμβαίνουν τα χλωριούχα συστατικά της ατμόσφαιρας σε συγκεντρώσεις πολύ μικρότερες των προηγούμενων, της τάξης των 2 μερών (και λιγότερο) ανά δισεκατομμύριο. Κατά τη φωτοδιάστασή τους από την ηλιακή ακτινοβολία ελευθερώνονται ενεργά άτομα χλωρίου τα οποία οξειδώνονται ταχύτατα από το όζον προκαλώντας έκλυση μονοξειδίου του χλωρίου (ClO). Τα ελεύθερα άτομα οξυγόνου διασπούν το μονοξειδίο του χλωρίου και επανασχηματίζουν ενεργά άτομα χλωρίου που με τη σειρά τους είναι σε θέση να προκαλέσουν νέα καταστροφή του όζοντος. Έχουμε έτσι ένα νέο καταλυτικό κύκλο καταστροφής του όζοντος ικανό να καταστρέψει το όζον με ταχύτητα πέντε φορές μεγαλύτερη από εκείνη που χρειάζονται οι αντίστοιχοι καταλυτικοί κύκλοι των αζωτούχων ενώσεων που αναφέραμε προηγουμένως.

Ορισμένες από αυτές τις χλωριούχες ενώσεις είναι εν μέρει φυσικής προέλευσης (οι ωκεανοί μας παρέχουν 200 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμων χλωρίου και τα ηφαίστεια 10 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμων χλωρίου ετησίως). Λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής τους, όπως στην περίπτωση των χλωριούχων ουσιών των προερχόμενων απευθείας από τους ωκεανούς και του ασυνεχούς χαρακτήρα αυτών που δημιουργούνται από τις εκρήξεις των ηφαιστειών, ο ρόλος τους είναι ήσσονος σημασίας στα πλαίσια του καθορισμού της φυσικής ισορροπίας του όζοντος στη στρατόσφαιρα. Η μόνη σημαντική φυσική πηγή του χλωρίου της στρατόσφαιρας είναι η θαλάσσια βιόσφαιρα που αποτελείται από χλωριούχο μεθύλιο προερχόμενο από το φυτοπλαγκτόν και τα φύκια (5 εκατομμύρια τόνοι ετησίως - δηλαδή μια συγκέντρωση 0,6 ανά δισεκατομμύριο). Σε όλα αυτά ήρθε να προστεθεί πριν από πενήντα χρόνια περίπου, η βιομηχανική παραγωγή μιας ξεχωριστής κατηγορίας χλωριούχων ενώσεων, των χλωροφθορανθράκων (CFC). Αυτά τα παράγωγα με μακρά διάρκεια ζωής (58 χρόνια για τον CFC 11 μέχρι 520 χρόνια για τον CFC 115) έχουν τη δυνατότητα εξαιτίας του λόγου αυτού, να φθάσουν στη στρατόσφαιρα χωρίς να υποστούν διάσπαση και αφού φωτοδιασπασθούν από την ηλιακή ακτινοβολία, να καταστρέψουν το στρατοσφαιρικό όζον, σύμφωνα με το διάγραμμα καταστροφής του καταλυτικού κύκλου αντιδράσεων που είναι χαρακτηριστικός για τις χλωριωμένες ενώσεις. Η περιεκτικότητα

ανέρχεται συνολικά σε 3 δισεκατομμυριοστά ισοδύναμων χλωρίου, δηλαδή σε ποσοστό πενταπλάσιο από εκείνο της προβιομηχανικής εποχής.

Από τη στιγμή που επιβεβαιώνεται η αρχή, σύμφωνα με την οποία οι ανθρωπογενείς μεταβολές που επέρχονται στην ατμόσφαιρα κυρίως λόγω της επιδράσεως των CFC είναι δυνατόν να καταστρέψουν το στρώμα του όζοντος, δεν απομένει παρά να προσκομισθούν οι εμπειρικές αποδείξεις μιας τέτοιας αραιώσης του όζοντος.

### 3.1.1 Η εμπειρική απόδειξη της αραιώσης του στρώματος του όζοντος

Όπως είδαμε η ισορροπία του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος καθορίζεται από πολλούς παράγοντες: από την ηλιακή ακτινοβολία, από τη δυναμική των αερίων μαζών, από την παρουσία συστατικών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, με αποτέλεσμα να έχουμε μια χωροχρονική κατανομή του όζοντος η οποία, εδώ και πολλά χρόνια, καταβάλλεται προσπάθεια να προσδιορισθεί με μετρήσεις, είτε πρόκειται με τη βοήθεια επίγειων παρατηρήσεων είτε με αερόστατα ή αεροπλάνα ή ακόμη και με δορυφόρους. Αυτές οι μετρήσεις εμφανίζουν πληθώρα φυσικών διακυμάνσεων στη συγκέντρωση του όζοντος, που οφείλονται μεταξύ άλλων στην επαλληλία πολλών κυκλικών κινήσεων με διαφορετικές περιόδους είτε ηλιακής προέλευσης (ενδεκαετής ηλιακός κύκλος, εποχιακός κύκλος, ημερήσιος κύκλος) είτε μετεωρολογικής προέλευσης (η μεσημβρινή μεταφορά που συνδέεται με τον εποχιακό κύκλο, η σχεδόν διεθνής κύμανση της στρατόσφαιρας, περίοδου εικοσιοχτώ μηνών).

Στις φυσικές αυτές αιτίες, προσθέτει ο άνθρωπος και τη δική του συμβολή. Είναι ανάγκη λοιπόν να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή αυτή των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και να κατανοηθούν οι επιπτώσεις που έχουν αυτές στην ισορροπία της ατμόσφαιρας. Η δυσκολία έγκειται συνεπώς στην αποκάλυψη αυτών των ανθρωπογενών επιδράσεων στα πλαίσια της φυσιολογικής και σε πολύ μεγάλη κλίμακα, μεταβλητότητας της συγκέντρωσης του όζοντος που έχει διαπιστωθεί. Εξάλλου η βαθμιαία αυξανόμενη συσσώρευση ορισμένων χημικών ουσιών, συγκεκριμένα των CFC, καθώς και η χρονική υστέρηση που επακολουθεί έως ότου γίνουν εμφανείς οι επιδράσεις, επιβάλλουν την προσφυγή στη δημιουργία υποδειγμάτων, τα οποία μας επιτρέπουν την προσομοίωση των σημερινών και μελλοντικών καταστάσεων της ατμόσφαιρας, επειδή τα ίδια τα δεδομένα των παρατηρήσεων παρέχουν την ευχέρεια καλύτερης εκτίμησης των

αποτελεσμάτων των θεωρητικών υποδειγμάτων και συγχρόνως της ταχύτερης δυνατής επισήμανσης, κάθε τυχόν νέας σημαντικής μεταβολής της συγκέντρωσης στο στρώμα του όζοντος.

Οι πρώτες εμπειρικές αποδείξεις για τις διαταραχές του στρατοσφαιρικού όζοντος χρονολογούνται από το 1985. Τη χρονιά αυτή, οι Forman, Gardiner και Shanklin δημοσιεύουν στο περιοδικό Nature ένα άρθρο στο οποίο αποκαλύπτεται η εποχιακή πτώση της συγκέντρωσης του όζοντος πάνω από την ανταρκτική ήπειρο κατά το μήνα Οκτώβριο. Πράγματι, από το 1980 Βρετανοί και Ιάπωνες επιστήμονες έχουν διαπιστώσει ότι σε σχέση με τις μέσες μηνιαίες τιμές της ποσότητας του όζοντος που κυμαινόταν από 250-300 Dobson, οι τιμές κατά το μήνα Οκτώβριο είναι κατά 40-50 Dobson μικρότερες από τις αντίστοιχες των προηγούμενων δεκαετιών. Το 1982 η εποχιακή αυτή πτώση αυξάνει φθάνοντας στα 70-90 Dobson. Το ίδιο συμβαίνει και κατά τα επόμενα χρόνια: το 1987 λ.χ. η μέση μηνιαία τιμή της συνολικής ποσότητας του όζοντος κατά το μήνα Οκτώβριο, δεν υπερβαίνει τα 150 Dobson. Στις 15 Οκτωβρίου 1987 στο Halley Bay, η στήλη του όζοντος κατέρχεται περαιτέρω και φθάνει στην εξαιρετικά χαμηλή τιμή των 105 Dobson. Καθ' ύψος το έλλειμμα είναι ακόμη μεγαλύτερο: σε ύψη μεταξύ 16 και 20 Km δεν απομένει παρά μόνο το 5% του όζοντος που υπήρχε κατά το μήνα Αύγουστο.

Οι Ιάπωνες είχαν στην πραγματικότητα προηγηθεί των Βρετανών στην ανακάλυψη του φαινομένου, που είναι γνωστό με την ονομασία “τρύπα του όζοντος”, αλλά στις εργασίες τους που δημοσιεύτηκαν σε ιαπωνικό περιοδικό, ελάχιστα γνωστό διεθνώς, δεν δόθηκε η δέουσα προσοχή. Το άρθρο στο περιοδικό Nature προκάλεσε πολύ μεγάλη έκπληξη, τοσούτων μάλλον, καθώς καμιά θεωρία και κανένα υπόδειγμα δεν άφηνε περιθώρια πρόβλεψης ενός τέτοιου φαινομένου.

Ύστερα από διάφορες προσπάθειες ερμηνείας του φαινομένου δεν απομένουν σήμερα παρά μόνο οι χημικές θεωρίες που βασίζονται στην ύπαρξη καταλυτικών κύκλων καταστροφής του όζοντος, συνυφασμένων με την παρουσία οξειδίων του χλωρίου στους οποίους ήδη αναφερθήκαμε. Το πρόβλημα σε ο,τι αφορά την “τρύπα” έγκειται στο γεγονός ότι αυτές οι θεωρίες θα πρέπει να είναι σε θέση να ερμηνεύσουν το ρυθμό καταστροφής του όζοντος ο οποίος δεν εμφανίζει κανένα κοινό μέτρο σύγκρισης με τον αντίστοιχο που προκύπτει από το συνήθη μηχανισμό των χημικών αυτών αντιδράσεων. Σε χρονικό διάστημα μικρότερο του ενός μηνός, το ήμισυ σχεδόν του “στρώματος” του όζοντος θα έπρεπε να έχει καταστραφεί, ενώ με βάση τα θεωρητικά υποδείγματα που στηρίζονται στους φωτοχημικούς νόμους, συνάγεται το συμπέρασμα ότι μετά από παρέλευση πολλών δεκαετιών το όζον θα ελαττωθεί μόνο κατά 10-15%. Η

λύση του προβλήματος ερμηνείας του φαινομένου συνίσταται στη συνεκτίμηση του ρόλου που παίζει η παρουσία πολικών στρατοσφαιρικών νεφών πάνω από τον πόλο. Τα νέφη αυτά που αποτελούνται από παγοκρυστάλλους εμφανίζονται από τη στιγμή που η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους  $-80^{\circ}\text{C}$ . Στην επιφάνεια των παγοκρυστάλλων είναι δυνατό να λάβουν χώρα ετερογενείς χημικές αντιδράσεις (δηλαδή αντιδράσεις όπου τα αντιδρώντα σώματα είναι και αέρια και στερεά) κάτω από συνθήκες που ευνοούν την ύπαρξη πολύ υψηλών συγκεντρώσεων  $\text{C}_{10}$  και κατά συνέπεια εξηγούν και τους λόγους της ταχείας καταστροφής του όζοντος.

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να κατανοηθεί ότι ενώ η επικρατούσα σήμερα θεωρία που στόχο της έχει την ερμηνεία της "τρύπας του όζοντος" είναι πρωτίστως μια "χημική" θεωρία, προϋποθέτει παρ' όλα αυτά την ύπαρξη ιδιαίτερα ευνοϊκών συνθηκών για την έναρξη των σχετικών χημικών αντιδράσεων (όπως πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και σχηματισμός στρατοσφαιρικών νεφών στους πόλους) οι οποίες εξαρτώνται προφανώς από δυναμικές μετεωρολογικές διεργασίες.

Τα πορίσματα της Βρετανικής Αποστολής για την Επισκόπηση της Ανταρκτικής που επιβεβαιώθηκαν το 1984 από ένα μετεωρολογικό σταθμό της Αργεντινής, βρίσκονται σε αντίφαση με τα στοιχεία που είχε συλλέξει η NASA (Goddard Space Flight Center = Κέντρο διαστημικών πτήσεων του Goddard) μέσω του δορυφόρου Nimbus 7. Ο δορυφόρος αυτός που εκτοξεύτηκε το 1978 διαθέτει δύο πολύ χρήσιμα όργανα, το Φασματοφωτόμετρο Χαρτογράφησης Ολικού Όζοντος (Total Ozone Mapping Spectrometer = TOMS) και το Μετρητή Επανασκεδαζόμενης υπεριώδους ηλιακής Ακτινοβολίας (Solar Backscatter Ultra-Violet Measurer = SBUV), ικανά να μετρήσουν όχι μόνο τις συγκεντρώσεις του όζοντος αλλά και την αύξηση της υπεριώδους ακτινοβολίας. Ορισμένα όμως δεδομένα που είχαν ληφθεί μέσω αυτών των οργάνων και αφορούσαν το όζον της Ανταρκτικής, παραλείφθηκαν κατά την επεξεργασία του προγράμματος αξιολόγησης των υπολογιστών επειδή θεωρήθηκαν ως "μη κανονικά", δηλαδή ως ευρισκόμενα πέραν των συνήθων ορίων της διακύμανσης ( $\pm 10\%$ ), γεγονός το οποίο προφανώς στάθηκε εμπόδιο για τους επιστήμονες του διαστημικού κέντρου του Goddard στις προσπάθειές τους να ανακαλύψουν την "τρύπα". Η μεταγενέστερη επανάκτηση των αρχικών δεδομένων επιβεβαιώνει την ανακάλυψη των Βρετανών.

Στα επόμενα χρόνια όχι μόνο τα δεδομένα των δορυφόρων αλλά και πολλές εξερευνητικές αποστολές στην εν λόγω περιοχή που είχαν στη διάθεσή τους συγκεκριμένα στρατοσφαιρικά αεροπλάνα, επιβεβαιώνουν την ύπαρξη της "τρύπας" και την επέκτασή της σε όλη την ήπειρο. Επέρχεται συνεπώς, παρά πάσα προσδοκία, στην

διάρκεια κάθε εαρινής περιόδου του νοτίου ημισφαιρίου μια ταχεία και σε σημαντικό βαθμό αραίωση του όζοντος της Ανταρκτικής.

Τα συμπεράσματα των επιστημόνων αποδεικνύουν, πέρα από κάθε αμφισβήτηση, ότι οι χλωριούχες και βρωμιούχες ενώσεις, οι συγκεντρώσεις των οποίων την άνοιξη είναι κατά 50%-100% μεγαλύτερες από τις άλλες εποχές του έτους, θεωρούνται υπεύθυνες σε πολύ μεγάλο ποσοστό, κυμαινόμενο ανάλογα με την περίπτωση, από 60% μέχρι και 100% για την ταχεία καταστροφή του όζοντος που επέρχεται κατά την επανεμφάνιση του ηλίου ύστερα από τη μακρά νύχτα του νοτίου ημισφαιρίου. Τη νύχτα λαμβάνουν χώρα αντιδράσεις στην επιφάνεια των παγοκρυστάλλων, στο εσωτερικό των στρατοσφαιρικών νεφών των πόλων, οι παρατηρήσεις των οποίων μέσω δορυφόρου επιβεβαιώνουν τη συχνότητα αυτών των αντιδράσεων. Η διαμόρφωση της "τρύπας" και οι επιπτώσεις της εξαρτώνται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και κυρίως από τη σταθερότητα του πολικού στροβίλου (ενός στροβίλου που απομονώνει τις πολικές αέριες μάζες από την υπόλοιπη ατμόσφαιρα) και από το εύρος της μείωσης της θερμοκρασίας που προκαλείται εντός αυτής. Μια ορισμένη ετήσια αυξομείωση των επιπτώσεων της "τρύπας" φαίνεται πως συνδέεται με τη σχεδόν διετή κύμανση, ένα κυκλικό φαινόμενο που αφορά μεταξύ άλλων τους ισημερινούς ανέμους της στρατόσφαιρας. Υπό την επίδραση του φαινομένου αυτού η "τρύπα" θα είχε την τάση να μεγαλώνει κατά τα μονά έτη (1985, 1987 και 1989) και να μικραίνει κατά τα ζυγά έτη (λ.χ. το 1988).

Ένα πρόβλημα δευτερεύουσας σημασίας είναι προφανώς και η δυνατότητα ύπαρξης μιας παρόμοιας αραίωσης του όζοντος στην Αρκτική Ζώνη. Μετρήσεις που διενεργήθηκαν από διάφορες επιστημονικές αποστολές τα τελευταία αυτά χρόνια, μας επιτρέπουν να επισημάνουμε την ύπαρξη ανάλογων αποκλίσεων στη χημική σύσταση, όπως εκείνες που διαπιστώθηκαν στην Ανταρκτική, δηλαδή μια αισθητή αύξηση της παρουσίας του ενεργού χλωρίου σε συνδυασμό με τα πολικά στρατοσφαιρικά νέφη. Περιπτώσεις απωλειών σε όζον που θα είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πραγματικής "τρύπας" δεν θα ήταν δυνατό να εμφανισθούν σε αυτή την περιοχή παρά μόνον εάν η περιεκτικότητα σε χλώριο εξακολουθούσε να αυξάνει επί αρκετά μακρά χρονική περίοδο μέσα σε ένα περιβάλλον ψυχρών αερίων μαζών που θα ήταν όμως εκτεθειμένες στον ήλιο. Αλλά η σχετική αστάθεια του πολικού στροβίλου της Αρκτικής (σε σύγκριση με τη σταθερότητα του αντίστοιχου της Ανταρκτικής) έχει γενικά ως επακόλουθο να μην πληρούνται όλες αυτές οι προϋπόθεσης συγχρόνως και πιο συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας ή του πολικού αέρα (δηλαδή η διάλυση του στροβίλου) να λαμβάνει χώρα πριν από την έλευση του ηλίου. Η προσκόμιση

εμπειρικών αποδείξεων για την αραιώση του όζοντος ήταν πολύ πιο δύσκολο εγχείρημα στην περίπτωση του ολικού όζοντος του πλανήτη.

Τα δεδομένα που αφορούν το όζον προέρχονται όντως κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από ένα επίγειο δίκτυο φασματοφωτομέτρων Dobson, η αξιοπιστία και η κατανομή των οποίων σε όλη την υδρόγειο είναι κάθε άλλο παρά η επιθυμητή. Το 1988 μια επιτροπή από επιστήμονες, η Διεθνής Επιτροπή Μελέτης των Τάσεων του Όζοντος (International Ozone Trends Panel), επανετίμησε τα δεδομένα του παραπάνω επίγειου δικτύου, τα συνέκρινε με τα αντίστοιχα δεδομένα των δορυφόρων και επεδίωξε να αναλύσει τις φυσιολογικές και τις ανθρωπογενείς συνιστώσες τους. Η ανάλυση αυτή απέδειξε ότι η μέση μηνιαία μείωση ήταν της τάξης του 2,3% έως 6,2% σε περιοχές βόρειου γεωγραφικού πλάτους μεταξύ 30° και 64° κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών (Δεκέμβριος- Μάρτιος) στην περίοδο 1969-1986, ενώ οι μεγαλύτερες μειώσεις εμφανίζονταν σε περιοχές μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους. Είναι η πρώτη φορά που μια τάση ελάττωσης του ολικού όζοντος εμφανίζεται ως σημαντική. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έγιναν με τη βοήθεια υποδειγμάτων σε ό,τι αφορά τις απώλειες σε όζον που οφείλονται στην παρουσία του χλωρίου, συμφωνούν σε γενικές γραμμές με τις σχετικές μειώσεις που παρατηρήθηκαν, οι παρατηρηθείσες όμως τιμές είναι κατά 2% ή 3% μικρότερες από τις αντίστοιχες υπολογισθείσες. Μεταγενέστερες αναλύσεις των ίδιων αυτών δεδομένων παρουσίασαν ένα μέσο "εύρος διακύμανσης" της χειμερινής μείωσης του ολικού όζοντος της τάξης του 3,2% έως 4% στη διάρκεια των παραπάνω 17 ετών.

Διαφαίνονταν επομένως η ελπίδα ότι στη διάρκεια των τελευταίων ετών, συγκεκριμένα το 1990, οι επιστήμονες θα ενδιαφέρονταν περισσότερο για την "τρύπα" του όζοντος της Ανταρκτικής παρά για την αραιώση του ολικού όζοντος του πλανήτη εφ' όσον η πρώτη αποδεικνύεται τελικά πως είναι το μέσο δια του οποίου επιτελείται η δεύτερη. Η εποχιακή απώλεια σε όζον είναι πράγματι τόσο σημαντική που επηρεάζει αναμφισβήτητα τη συνολική περιεκτικότητα σε όζον του νοτίου ημισφαιρίου και ίσως ακόμη και την περιεκτικότητα όλου του πλανήτη. Η ύπαρξη κάποιας σχέσης μεταξύ των απωλειών σε όζον στους πόλους και της αραιώσης του ολικού όζοντος του πλανήτη θεωρείται πράγματι πιθανή. Οι σχέσεις τις οποίες επισήμαναν οι Rowland και Molina το 1974 δεν φαίνεται να είναι ικανές μόνες τους να προκαλέσουν τίποτε άλλο παρά μια βραδεία αραιώση του στρατοσφαιρικού όζοντος και αυτή σε ύψη διαφορετικά από εκείνα των πόλων όπου υπήρξαν απώλειες σε όζον. Οι απώλειες στους πόλους, παρόλο που είναι εξακριβωμένος ο ρόλος τον οποίο παίζουν τα στρατοσφαιρικά νέφη των πόλων, παραμένουν εν μέρει ανεξήγητες, συγκεκριμένα στο επίπεδο των σχέσεων



μεταξύ περιεκτικότητας σε χλώριο και αραίωσης του όζοντος. Αυτό το γεγονός είχε επιπτώσεις στον προσδιορισμό των κριτηρίων που θα βοηθούσαν στην αποτίμηση του ρόλου τον οποίο παίζουν οι CFC στις διεργασίες αραίωσης του όζοντος.

Η αποκάλυψη της ύπαρξης ενός καταλυτικού κύκλου αντιδράσεων που συντελούν στην καταστροφή του όζοντος από τους Rowland και Molina είχε ως αποτέλεσμα να καθιερωθεί η έννοια του Δυναμικού Καταστροφής του Όζοντος (ODP: Ozone Deleting Potential) που συνδύαζε τη διάρκεια ζωής των CFC με τον αριθμό των ατόμων χλωρίου που αυτοί εμπειρείχαν, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καταδεικνύεται συνθετικά η “βλαπτικότητα” του κάθε CFC για το όζον.

Λόγω του γεγονότος ότι η σχετική έρευνα εστιάστηκε στην περιεκτικότητα σε χλώριο των CFC, από όπου προέρχεται στην πραγματικότητα και η ολική φόρτιση της ατμόσφαιρας με χλώριο, όπως επίσης και των γνώσεών μας σχετικά με τη μεγάλη ταχύτητα των ετερογενών χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια των στρατοσφαιρικών νεφών των πόλων, η διάρκεια ζωής των CFC δεν αποτελεί πλέον παράγοντα τόσης αποφασιστικής σημασίας όπως ήταν στο παρελθόν και η περιεκτικότητά τους σε χλώριο τείνει μόνο να υποκαταστήσει το ODP.

Αυτό προφανώς δεν υφίσταται χωρίς συνέπειες για την όλη διαδικασία των διαπραγματεύσεων που γίνονται για το πρόβλημα του όζοντος. Παραδείγματος χάρη, τα όρια που καθορίστηκαν στο Μόντρεαλ είχαν σαν ODP των διαφόρων CFC. Έτσι το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ παρέβλεψε και δεν έλαβε υπόψη τον υδροχλωροφθοράνθρακα 22 (HCFC 22) εξαιτίας του χαμηλού του ODP.

Αλλά τώρα πολλοί επιστήμονες επανέφεραν προς συζήτηση την περιεκτικότητα σε χλώριο αυτής της ένωσης και ζήτησαν να συμπεριληφθεί στο αναθεωρημένο Πρωτόκολλο. Γενικότερα, λαμβάνεται υπόψη ωσαύτως και η περιεκτικότητα σε χλώριο των υποκατάστατων όπως είναι οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC) που περιέχουν χλώριο και φυσικά όχι των υδροφθορανθράκων που δεν περιέχουν χλώριο.

Ενώ η σχέση που υπάρχει μεταξύ της περιεκτικότητας σε χλώριο και της αραίωσης του όζοντος έχει πλήρως αποδειχθεί, η ακριβής φύση της σχέσεως αυτής ωστόσο -που δεν είναι κατά πάσα πιθανότητα εκείνη που προτάθηκε από τους Rowland και Molina- παραμένει ακόμη άγνωστη. Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε χλώριο, που στην προβιομηχανική περίοδο ήταν της τάξεως του 0,6 ppm, ανήλθε σταδιακά στα 2 ppm, χωρίς να είμαστε σε θέση να προσκομίσουμε εμπειρικά στοιχεία για να αποδειχθεί ότι κάτι μεσολάβησε, ώστε να επέλθει αυτή η αύξηση, για να μας φτάσει τελικά στα 3 ppm και να εμφανισθεί η “τρύπα” του όζοντος. Η σημερινή συγκέντρωση ανέρχεται στα 3,4 ppm. Τίποτε όμως δεν μας επιτρέπει στην πραγματικότητα να προβλέψουμε σε ποιά



ποιες θα είναι οι βλάβες που θα προκαλέσουν στο όζον συγκεντρώσεις πολύ υψηλότερες (λ.χ. 5 PPM).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1.1**

Οι χλωροφθοράνθρακες και τα υποκατάστατά τους

Ουσίες που υπόκεινται στις κανονιστικές ρυθμίσεις του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ ( 1987 )	ODP (CFC11 = 1)	GWP (CFC12 = 1)
CFC11	1,0	0,34
CFC12	1,0	1,0
CFC113	0,8	0,49
CFC114	1,0	1,5
CFC115	0,6	2,28
Halon1211	3	-
Halon1301	10	-

Υποκατάστατα των CFC	ODP (CFC11 = 1)	GWP (CFC12 = 1)
HCFC22	0.05	0.098
HCFC123	0.02	0.064
HCFC124	0.02	0.10
HCFC141b	1.10	0.029
HCFC142b	0.06	0.11
HCFC134a	0	0.039
HCFC192a	0	0.0091

### 3.2 Η εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου

Το πρόβλημα της μελλοντικής εξέλιξης των κλιματικών παραγόντων του πλανήτη ανησυχεί εδώ και πολλά χρόνια τους επιστήμονες. Αυτό τροφοδότησε και τη διαμάχη που ξέσπασε μεταξύ αυτών που προέβλεπαν την ελεύση μιας νέας παγετώδους εποχής και εκείνων που προειδοποιούσαν για τον επερχόμενο κίνδυνο μιας κλιματικής αλλαγής με αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Όλα αυτά πολύ πριν καταπιαστούν τα Μ.Μ.Ε. (Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης) με αυτό το θέμα σαν προέκταση της "υπόθεσης του όζοντος".

Το 1956 σε ένα άρθρο δημοσιευμένο στο περιοδικό Tellus, ο Gilbert Plass του πανεπιστημίου John Hopkins επισημαίνει ότι το CO<sub>2</sub> ελέγχει πράγματι το κλίμα του πλανήτη μας και ότι η αυξανόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων από τον άνθρωπο έχει ήδη συμβάλει στην αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα με επακόλουθο το κλίμα να γίνει πιο θερμό εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Κατά το Γάλλο μαθηματικό Jean-Baptiste Fourier, που είχε εισάγει πρώτος την έννοια του φαινομένου του θερμοκηπίου, το CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα παίζει τον ίδιο ρόλο με εκείνο των γυάλινων τοιχωμάτων ενός θερμοκηπίου. Ο Σουηδός Svante Arrhenius που τον απασχολούσε το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου από θεωρητικής άποψης, προειδοποιεί ήδη από το 1896 για τον κίνδυνο να προκληθεί, λόγω της συνεχούς και ανεξέλεγκτης καύσης των ορυκτών καυσίμων με πηγή τον άνθρακα, γενική άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Εκείνη την εποχή η άποψη ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες θα μπορούσαν να έχουν οποιαδήποτε επίπτωση σε ολόκληρο τον πλανήτη, φαινόταν αστεία και γι' αυτό οι προειδοποιήσεις του Arrhenius σύντομα ξεχάστηκαν. Συστηματικές μετρήσεις του CO<sub>2</sub> - όπως και των άλλων συστατικών της ατμόσφαιρας- αρχίζουν το 1957 στο ηφαίστειο Mauna Loa της Χαβάης και στις ακτές της Αλάσκας. Οι μετρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν την ύπαρξη μιας τάσεως ανόδου της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> η οποία υπολογίζεται ότι από τα 275 ppm στα τέλη του 19ου αιώνα, έφθασε στα 311 ppm στην εποχή μας.

Οι Syukuro Manabe και Richard Wetherald επανελθόντες στις διορατικές προβλέψεις του Arrhenius και του Plass, υπολόγισαν το 1967 με βάση τις ήδη γνωστές μετρήσεις της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub>, ότι ο διπλασιασμός αυτής της συγκέντρωσης που θα επερχόταν στις αρχές του επόμενου αιώνα, θα μπορούσε να προκαλέσει άνοδο της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη της τάξης του +2,5°C. Η τελευταία αυτή τιμή δεν προξένησε μεγάλη εντύπωση στα Μ.Μ.Ε. ούτε στην κοινή γνώμη. Οι κλιματολόγοι γνώριζαν ότι οι θερμοκρασιακές διαφορές που διέκριναν τις παγετώδεις εποχές από τις μεσοπαγετώδεις δεν ξεπερνούσαν τους 6-7°C. Κατά τη διάρκεια ενός συμποσίου που έλαβε χώρα το 1968 στο Dallas, το ακροατήριο εμφανίστηκε διχασμένο ανάμεσα σε αυτούς που υποστήριζαν την άποψη της ανόδου της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω του CO<sub>2</sub> και στους άλλους που υποστήριζαν την άποψη της ελεύσεως μιας νέας παγετώδους εποχής. Οι τελευταίοι θεωρούσαν ότι η ρύπανση που προκαλείται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες συνεπάγεται και τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων κονιορτού με επακόλουθο το δεύτερο αυτό φαινόμενο να είναι επικρατέστερο εκείνου του CO<sub>2</sub> και να έχει ως κατάληξη τελικά την ψύξη του κλίματος. Ήταν φανερό εξάλλου

ότι οι αναμενόμενες μεταβολές της θερμοκρασίας εξ αιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου δεν θα ξεπερνούσαν τη φυσιολογική μεταβλητότητα του κλίματος.

Έχουν παρέλθει πάνω από είκοσι χρόνια και οι αβεβαιότητες στον επιστημονικό τομέα δεν έχουν ακόμη εκλείψει. Ακόμη και το Μάιο του 1989 σε μια συνάντηση επιστημόνων φάνηκε η απομόνωση στην οποία έχουν περιέλθει εκείνοι, όπως ο James Hansen της NASA, που υποστηρίζουν ότι οι υψηλές θερμοκρασίες των τελευταίων αυτών ετών (και συγκεκριμένα το θέρος) οφείλονται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Ούτε και τα δεδομένα (στοιχεία) του παρελθόντος μας επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων ικανών να διαφωτίσουν το παρόν και το μέλλον. Εάν εξετάσουμε από κοινού τις συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> από το 1760 και τις θερμοκρασίες από το 1875 και εντεύθεν, προκύπτουν πολλά ουσιώδη χαρακτηριστικά στοιχεία: κατ' αρχήν η επιβεβαίωση ότι οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> λίγα χρόνια πριν από τη βιομηχανική επανάσταση ανέρχονταν στα 275 ppm, στη συνέχεια το γεγονός ότι η μέση θερμοκρασία κάθε άλλο παρά σταθερή ήταν αφού τα υπάρχοντα στοιχεία αποδεικνύουν την ύπαρξη αυξομειώσεων στα πλαίσια θερμοκρασιακών μεταβολών μικρότερων από 1°C, ενώ από το 1875 μέχρι το 1940 διαπιστώνεται η ύπαρξη ενός πολύ ικανοποιητικού συσχετισμού μεταξύ ανόδου της θερμοκρασίας και αύξησης της περιεκτικότητας της ατμόσφαιρας σε CO<sub>2</sub>. Από το 1940 και μετά όμως, παρά το γεγονός της συνεχούς -και με επιταχυνόμενο ρυθμό- αύξησης του CO<sub>2</sub>, παρατηρείται μια μείωση της θερμοκρασίας μέχρι το 1960 οπότε στη συνέχεια αρχίζει πάλι να αυξάνει. Ωστόσο τα δεδομένα αυτά κάθε άλλο παρά απεικονίζουν την πραγματική κατάσταση σε ολόκληρο τον πλανήτη μια και ενδιαφέρονται σχεδόν αποκλειστικά και μόνο για το βόρειο ημισφαίριο, για το πιο αναπτυγμένο δηλαδή τμήμα του πλανήτη, όπου η καταγραφή των στοιχείων γίνεται από μακρού.

Εάν ανατρέξουμε ακόμη περισσότερο στο παρελθόν διαπιστώνουμε και άλλες παρόμοιες αυξομειώσεις: είναι γνωστές οι προωθήσεις των παγετώνων μεταξύ του 12ου και του 13ου αιώνα και κυρίως στη διάρκεια της περιόδου που αποκλήθηκε "η μικρή παγετώδης εποχή" (1550-1850) που εναλλάσσονται με περιόδους εύκρατου κλίματος.

Για να κάνουμε μια αναδρομή στο απώτερο παρελθόν θα πρέπει να αναζητήσουμε τα αποδεικτικά στοιχεία στους πάγους της Ανταρκτικής: οι πάγοι συσσωρεύτηκαν πράγματι εκεί στη διάρκεια των χιλιετιών και μας επιτρέπουν, με τη μέθοδο της ανάλυσης των φυσαλίδων αέρα που περικλείουν, να διαπιστώσουμε ποιά ήταν η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> 150.000 χρόνια πριν, μέχρι και σήμερα. Ενώ στο χρονικό αυτό διάστημα η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> μεταβλήθηκε, όπως θα ανέμενε κανείς, σε πολύ

μεγάλο βαθμό, σχεδόν κατά 80%, η ελάχιστη τιμή των 200 ppm τοποθετείται χρονικά στη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους εποχής πριν από 18.000 χρόνια και η μέγιστη τιμή ουδέποτε υπερέβη τα 280 ppm, δηλαδή περίπου την τιμή που είχε η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> λίγα χρόνια πριν από τη βιομηχανική επανάσταση.

Εάν με τη σημερινή τιμή των 345 ppm βρισκόμαστε ήδη πέραν των ορίων των ιστορικών δεδομένων, τι να πει κανείς για την τιμή των 600 ppm στην οποία προβλέπεται από ορισμένα υποδείγματα ότι θα φθάσει η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> κατά τα τέλη του αιώνα μας; Μεταβολές της θερμοκρασίας από -6 μέχρι -7°C κατά τις περιόδους των παγετώνων αντιστοιχούν στα ελάχιστα των τιμών του CO<sub>2</sub>, ενώ τα μέγιστα αντιστοιχούν στις πιο θερμές περιόδους. Υπάρχει λοιπόν ένας συσχετισμός μεταξύ των μεταβολών της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε CO<sub>2</sub>, ο συσχετισμός όμως αυτός δεν μας λέει τίποτε εκ των προτέρων για τη φορά αιτιότητας: Είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας που συνεπάγεται μεταβολές του CO<sub>2</sub> ή συμβαίνει το αντίστροφο;

Εάν τώρα επιχειρήσουμε να κάνουμε έναν απολογισμό του τι πραγματικά γνωρίζουμε κατά το έτος 1990, τα στοιχεία για τα οποία έχουμε σαφή αντίληψη είναι τα εξής: Η ενέργεια, η απαραίτητη για τη δυναμική των μετεωρολογικών φαινομένων, για τις εποχές του έτους και για τους κλιματικούς παράγοντες προέρχεται από τον Ήλιο. Η Γη είναι δέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας: το ένα τρίτο περίπου αυτής ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται από τις διάφορες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος (ατμόσφαιρα, ωκεανοί, πάγοι, ήπειροι και βιόσφαιρα). Στη διάρκεια μιας μακράς περιόδου η απορροφηθείσα ενέργεια θα πρέπει κατ' ανάγκη να ισοσκελιστεί από την ακτινοβολία που εκπέμπουν η Γη και η ατμόσφαιρα (πρόκειται για ακτινοβολίες μεγάλων μηκών κύματος που βρίσκονται στην περιοχή του υπέρυθρου). Δεδομένου ότι η εκπεμπόμενη από τη Γη ακτινοβολία καθορίζεται από τη θερμοκρασία της επιφάνειάς της, η θερμοκρασία αυτή αυτορυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εκπέμπει η Γη εκείνη ακριβώς την ποσότητα ακτινοβολίας που θα είναι σε θέση να εξισορροπήσει την αντίστοιχη που προέρχεται από τον Ήλιο.

Αυτή η απαραίτητη ισορροπία - απόρροια των κλιματικών αλλαγών που προκλήθηκαν από τη διατάραξη του ισοζυγίου ακτινοβολιών - μπορεί να μεταβληθεί από διάφορους παράγοντες. Ο περισσότερο εμφανής είναι βεβαίως η μεταβολή της ποσότητας ή της εποχιακής κατανομής των ηλιακών ακτινοβολιών που φθάνουν στη Γη. Αυτός ευθύνεται πιθανώς για την εμφάνιση των παγετωδών εποχών. Μια αστρονομική θεωρία που βασίζεται στις μεταβολές της θέσης ή της κλίσης της Γης σε σχέση με τον Ήλιο, διατυπώθηκε από τον Milutin Milankovitch μεταξύ των ετών 1920 και 1941.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι προφανώς το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ενώ οι ακτινοβολίες μικρών μηκών κύματος διέρχονται διαμέσου της ατμόσφαιρας χωρίς να εξασθενίζουν αισθητά (είδαμε ειδικά για τις UV-B και τις UV-C ότι απορροφούνται από το όζον), οι ακτινοβολίες μεγάλων μηκών κύματος (υπέριθρες) που εκπέμπονται από τη Γη απορροφούνται εν μέρει και επανεκπέμπονται προς την επιφάνεια της Γης μέσω ορισμένου αριθμού αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα σε ελάχιστες ποσότητες (ίχνη). Αυτά τα θερμοσκοπικά αέρια (που είναι υπεύθυνα για την δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου) δεν είναι στην πραγματικότητα τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας (το άζωτο και το οξυγόνο), αλλά είναι οι υδρατμοί (ο σημαντικότερος των συντελεστών) το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, τα οξείδια του αζώτου, το τροποσφαιρικό όζον και τα τελευταία χρόνια οι χλωροφθοράνθρακες (CFC).

Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία της Γης είναι κατά 33°C περίπου υψηλότερη από ό,τι θα ήταν αν δεν υπήρχαν τα θερμοσκοπικά αυτά αέρια (κυρίως το CO<sub>2</sub> και οι υδρατμοί) που είναι και υπεύθυνα για τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν με τη βοήθεια δορυφόρου, επιβεβαίωσαν εξάλλου την απορρόφηση από τα αέρια, των εκπεμπόμενων από τη Γη ακτινοβολιών. Οι θερμοκρασίες της επιφάνειας των άλλων πλανητών, όπως της Αφροδίτης ή του Άρη είναι εναρμονισμένες με τη σύσταση της ατμόσφαιράς τους και με τη θεωρία του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Από τα παραπάνω συνάγεται η ανάγκη να διευκρινισθεί ότι αυτό που μας προβληματίζει είναι η εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή ενός φαινομένου θερμοκηπίου του οποίου οι διαστάσεις και οι επιπτώσεις είναι πολύ σοβαρότερες από εκείνες ενός συνήθους τέτοιου φαινομένου που οφείλεται στις φυσιολογικές συγκεντρώσεις των θερμοσκοπικών αερίων. Αυτή όμως η διευκρίνιση συχνά παραλείπεται χάριν ευκολίας.

Η επίδραση των θερμοσκοπικών αερίων (του CO<sub>2</sub> και των άλλων αερίων) στην επιτάχυνση των κλιματικών αλλαγών του πλανήτη εξαρτάται ουσιαστικά από τρεις παράγοντες: 1) από την ικανότητα των αερίων αυτών να απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία. Από την άποψη αυτή, το μεθάνιο είναι 21 φορές πιο "αποτελεσματικό" ανά μόριο από το CO<sub>2</sub>, και ο CFC 11 είναι 12.000 φορές, 2) από τη σημερινή και μελλοντική συγκέντρωσή τους, 3) από το χρόνο ζωής τους. Και ενώ το CO<sub>2</sub>, οι CFC και τα NO<sub>x</sub> έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, τα υποκατάστατα των CFC (HCFC) και το μεθάνιο έχουν αντίθετα βραχύ χρόνο ζωής.

Η έννοια του δυναμικού παγκόσμιας θέρμανσης (Global Warming Potential ή GWP) που απορρέει από τα παραπάνω, καθιερώθηκε κατ' αναλογία προς το ODP των CFC

για να μπορέσουν να ληφθούν υπόψη αυτοί οι παράγοντες. Το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης αναφέρεται στη μείωση στον παρόντα χρόνο  $t$  μιας μονάδας μάζας (1 Kg) ενός δεδομένου αερίου, εντός δεδομένου χρόνου σε σχέση με το CO<sub>2</sub> που λαμβάνεται ως πρότυπο αναφοράς.

Σενάρια που απεικονίζουν την προοπτική των εκπομπών των θερμοσκοπικών αερίων στη διάρκεια των προσεχών δεκαετιών, έχει καταστρώσει η Διακυβερνητική Επιτροπή για τις κλιματικές αλλαγές. Τον Απρίλιο του 1990, τα τέσσερα επικρατέστερα σενάρια ήταν τα ακόλουθα: 1) ο διπλασιασμός σε ισοδύναμο-CO<sub>2</sub> των επιπέδων της προβιομηχανικής εποχής για το έτος 2030 (“υψηλό” σενάριο), 2) ο διπλασιασμός σε ισοδύναμο-CO<sub>2</sub> των επιπέδων της προβιομηχανικής εποχής για το έτος 2060 (“χαμηλό” σενάριο), 3) ο διπλασιασμός σε ισοδύναμο-CO<sub>2</sub> των επιπέδων της προβιομηχανικής εποχής για το έτος 2090 που θα τον ακολουθήσει η σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων, 4) Η σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων σε ένα επίπεδο κατώτερο του διπλασίου σε ισοδύναμο-CO<sub>2</sub> των προβιομηχανικών επιπέδων (τα δύο τελευταία σενάρια συνεπάγονται τη λήψη περιοριστικών μέτρων που λίγο πολύ θα μειώσουν τις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου).

Με τα καθαρά υποθετικά αυτά σενάρια αντιπάρεβαλε η IPCC στοιχεία (δεδομένα) που προέρχονταν από πολλές χώρες και αφορούσαν τις μελλοντικές εκπομπές στη διάρκεια των προσεχών δεκαετιών (το 2025 συγκεκριμένα) στην υποθετική περίπτωση που καμιά προσπάθεια μείωσης των αερίων αυτών δεν θα είχε υλοποιηθεί στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα. (Αυτές οι εκτιμήσεις συνιστούν κατά την IPCC “τις περιπτώσεις αναφοράς” όπως τις αποκαλεί). Από την αποτίμηση αυτή των υποτιθέμενων τάσεων συνάγεται ότι το ποσοστό των εκπομπών CO<sub>2</sub> θα είναι κατά 20% περίπου μεγαλύτερο σε σχέση με εκείνο του “υψηλού” σεναρίου. Τέτοιου είδους εκτιμήσεις όμως επιδέχονται σοβαρές επιφυλάξεις και γεννούν αμφιβολίες ως προς την ορθότητά τους.

### 3.3 Οι κλιματικές αλλαγές

Υπολογισμοί που έγιναν με τη βοήθεια μοντέλων μας επέτρεψαν να προβούμε σε προσομοιώσεις των αναμενόμενων κλιματικών αλλαγών.

Σύμφωνα με το “υψηλό” σενάριο εκπομπής των αερίων θερμοκηπίου που εκπονήθηκε από την ομάδα εργασίας III της IPCC, μπορούμε να υπολογίσουμε την αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω των ανθρωπογενών

εκπομπών αυτών των αερίων κατά το έτος 2020 η οποία θα είναι της τάξης του  $1,8^{\circ}\text{C}$ , με εύρος διακύμανσης από  $1,3^{\circ}$  μέχρι  $2,5^{\circ}$ . Το 2070 η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι  $3,5^{\circ}\text{C}$  (εύρος διακύμανσης  $2,4^{\circ}$ - $5,1^{\circ}\text{C}$ ). Το 2100 η άνοδος θα φτάσει στους  $4,5^{\circ}\text{C}$  (εύρος διακύμανσης  $3^{\circ}$ - $6,5^{\circ}$ ). Η καθολική αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη θα μπορούσε να οδηγήσει και σε αύξηση ιζημάτων και της εξάτμισης κατά 3% το 2020 και κατά 7% το 2070. Απόρροια της μεταβολής των κλιματικών συνθηκών θα ήταν και ο περιορισμός των εκτάσεων που καλύπτονται από τους πάγους της θάλασσας και τα χιόνια.

Οι αλλαγές όμως του μέσου κλίματος του πλανήτη σε ό,τι αφορά τη θερμοκρασία και τις βροχοπτώσεις, δεν ενέχουν ιδιαίτερη σημασία για όσους θα ήθελαν να προβούν σε προβλέψεις για τα χαρακτηριστικά του μελλοντικού κλίματος μιας δεδομένης γεωγραφικής ζώνης προκειμένου λ.χ. να προσδιοριστούν οι μεταβολές που θα ήταν δυνατό να επέλθουν στη γεωργία. Πράγματι, οι αλλαγές που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα του κλίματος καθώς και η συχνότητα των εξαιρετικών επεισοδίων (τυφώνες, κυκλώνες, κτλ.), ενδέχεται να έχουν πολύ περισσότερες αρνητικές επιπτώσεις σε μια δεδομένη περιοχή παρά οι αλλαγές του μέσου κλίματος. Αλλά κανένα ασφαλές συμπέρασμα δεν μπορεί να συναχθεί από τη μεταβλητότητα του κλίματος ακόμη κι αν υποθεθεί ότι ο αριθμός των ιδιαίτερα θερμών και ιδιαίτερα ψυχρών ημερών θα μπορούσε να μεταβληθεί. Σε ό,τι αφορά τις θύελλες, θα μπορούσαν να επέλθουν μεταβολές στο καθεστώς τους: οι τροπικοί κυκλώνες λ.χ. δεν αναπτύσσονται παρά μόνο αν η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας είναι μεγαλύτερη από  $26^{\circ}\text{C}$ . Κάθε άνοδος της θερμοκρασίας στην τροπική ζώνη θα μπορούσε να έχει ως συνέπεια τη διεύρυνση της επιφάνειας που είναι η γενεσιουργός αιτία δημιουργίας τέτοιων φαινομένων, αλλά αυτό το ίδιο το επακόλουθο θα μπορούσε να αποσβεσθεί λόγω συνεπακόλουθων μεταβολών της κατακόρυφης δομής της ατμόσφαιρας.

Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη αντίθετως λ.χ. στο βόρειο Ατλαντικό, αν οι θερμοκρασιακές διαφορές βορρά - νότου μειώνονταν, η συχνότητα των θυελλών θα ελαττωνόταν, ενώ ένα πλεόνασμα υδρατμών θα μπορούσε να τους προσδώσει μεγαλύτερη ενέργεια.

Η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας που οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, θα διακυμανθεί με αφετηρία το "υψηλό" σενάριο εκπομπών της IPCC, μεταξύ  $0,10\mu$ - $0,32\mu$ , με πιθανότερη τιμή τα  $0,20\mu$  κατά το έτος 2030 (από τα οποία η θερμική διαστολή των ωκεανών είναι υπεύθυνη για τα  $0,12\mu$  και το λιώσιμο των χερσαίων πάγων για τα  $0,08\mu$  ενώ μια θετική επίπτωση  $0,01\mu$  που οφείλεται στην έναρξη της τήξης του παγετωνικού καλύμματος της

Γροιλανδίας αντισταθμίζεται πλήρως από μια αρνητική επίπτωση  $-0,01\mu$ , που είναι απόρροια της επαύξησης του στρώματος του χιονιού και των πάγων στην Ανταρκτική λόγω μεγαλύτερης αφθονίας των χιονοπτώσεων). Για το 2070, η αναμενόμενη ανύψωση της στάθμης της θάλασσας θα ανέλθει από  $0,33\mu$  ως  $0,75\mu$ , με πιθανότερη τιμή τα  $0,45\mu$ .

Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι ακόμα κι αν οι συγκεντρώσεις των, υπαίτιων για τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, αερίων είχαν σταθεροποιηθεί το έτος 2030, η στάθμη της θάλασσας θα εξακολουθούσε να ανέρχεται κατά  $0,23\mu$  επιπλέον επί πολλές δεκαετίες, ακόμη και επί αρκετούς αιώνες εξαιτίας της αδράνειας που χαρακτηρίζει το κλίμα, τους ωκεανούς και τους πάγους. Με μια προοπτική ακόμη πιο μακροπρόθεσμη, εάν λ.χ. η άνοδος της θερμοκρασίας κατά  $4^{\circ}\text{C}$  συνεχίζονταν, τότε το μεγαλύτερο μέρος του παγετωνικού καλύμματος της Γροιλανδίας θα εξαφανιζόταν (για να γίνει αυτό θα χρειαζόταν να περάσουν αρκετές χιλιάδες χρόνια) και δεν θα ξανασηματιζόταν ακόμα κι αν επανερχόταν ο πλανήτης μας στις σημερινές κλιματικές συνθήκες. Σε ό,τι αφορά το παγετωνικό κάλυμμα προς δυσμάς της Ανταρκτικής, αυτό βεβαίως εμπεριέχει έναν όγκο πάγου, ισοδύναμου με έναν όγκο ύψους  $5\mu$  πάνω από την στάθμη των θαλασσών όλης της Γης, δεν αναμένεται όμως πλήρης τήξη του προκαλύμματος σαν επακόλουθο μιας αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά τον 21ο αιώνα. Τέλος ας υπενθυμίσουμε ότι το ενδεχόμενο της τήξης πάγων της θάλασσας δεν έχει ληφθεί υπόψη στα πλαίσια μιας πιθανολογούμενης ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας, εφόσον ο πάγος αυτός επιπλέει "όπως ένα παγάκι μέσα σε ένα ποτήρι ουίσκι" και η τήξη του δεν μεταβάλλει τη συνολική ποσότητα νερού και πάγου.

Περισσότερο ακόμη και από την περίπτωση του όζοντος, οι αβεβαιότητες παραμένουν και επικεντρώνονται στο ρυθμό της εξέλιξης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι λόγοι γι' αυτό είναι πολλοί. Κατ' αρχήν τα προτεινόμενα κλιματικά σενάρια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα σενάρια εκπομπών που και αυτά τα ίδια απορρέουν προφανώς από κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Ακολούθως οι πηγές και ιδίως τα αποθέματα των κυριότερων αερίων θερμοκηπίων δεν είναι πλήρως γνωστές ούτε σε ό,τι αφορά τον εντοπισμό τους αλλά ούτε και ως προς τη σπουδαιότητά τους. Τέλος οι γνώσεις μας σε ό,τι αφορά τις επιπτώσεις που προαγγέλλονται από την ανάδραση των κλιματικών αλλαγών στις πηγές και τα αποθέματα, είναι εξίσου ελλιπής και ενδεχομένως εσφαλμένες. Θα μπορούσε λ.χ. κάποιος να ισχυρισθεί ότι αναμένεται αύξηση των εκλύσεων φυσικού μεθανίου λόγω της



ανόδου της θερμοκρασίας που θα είχε ως επακόλουθο το λιώσιμο των πάγων, μερικών τελμάτων και ελών ή ακόμη και των μόνιμα παγωμένων εδαφών της Σιβηρίας.

Και άλλοι παράγοντες, εκτός της επιτάχυνσης των κλιματικών μεταβολών που προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου, μπορούν να επηρεάσουν το κλίμα και είναι δύσκολο να τους κατατάξουμε α ριγοί σε μια τάξη μεγέθους και να συγκρίνουμε αυτή με την αντίστοιχη του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μπορούμε ωστόσο να φανταστούμε, έχοντας ως χρονική κλίμακα τον επόμενο αιώνα, ότι τα αποτελέσματα της φυσιολογικής μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, των ηφαιστειακών εκρήξεων μεγάλης εκτάσεως και των αερολυμάτων (σωματίδια) της τροπόσφαιρας που οφείλονται σε ανθρωπογενείς εκπομπές θειούχων αερίων, θα είναι λιγότερο δυσμενείς από εκείνες που προκαλούνται από τα θερμοσκοπικά αέρια του φαινομένου τού θερμοκηπίου.

Τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται για τις προβλέψεις έχουν πολλές ατέλειες: μια από τις σημαντικότερες αφορά το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη την ανάδραση (feedback) της επαύξεσης της νέφωσης, την οποία καθιστά πιθανή η προβλεπόμενη αύξηση της υγρασίας χωρίς ωστόσο να είμαστε σε θέση να ποσοτικοποιήσουμε το φαινόμενο. Το ίδιο ισχύει και για την αλληλεπίδραση ατμόσφαιρας-ωκεανού που κάθε άλλο παρά σαφώς κατανοητή είναι. Εξίσου ελλιπείς είναι οι γνώσεις μας και για τις αντιδράσεις στο κλίμα από τις μεταβολές που θα επέλθουν στη βιολογική δραστηριότητα στις ηπείρους και στους ωκεανούς. Τέλος πρέπει να μην ξεχνάμε και να έχουμε υπόψη μας ότι προβλήματα καινούρια μπορούν πάντοτε να ανακύψουν. Υπενθυμίσουμε ότι κανένα υπόδειγμα δεν είχε προβλέψει την “τρύπα του όζοντος” στην Ανταρκτική.

Η επίτευξη του στόχου για τη βαθμιαία εξάλειψη των αβεβαιοτήτων θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τις έρευνες που διεξάγονται στα διάφορα γνωστικά πεδία. Μια τέτοια προσπάθεια θα μπορούσε να ακολουθήσει κατά προσέγγιση το παρακάτω χρονοδιάγραμμα: 1) στα επόμενα δέκα χρόνια (1990-2000) θα παραστούμε μάρτυρες μιας βελτίωσης στις προβλέψεις για τη βαρύτητα των κλιματικών αλλαγών (χάρη στη χρησιμοποίηση υποδειγμάτων αλληλεπίδρασης ωκεανού-ατμόσφαιρας). 2) Στην περίοδο 1995-2005 θα υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης των προβλέψεων για τις κλιματικές αλλαγές σε τοπική κλίμακα (συγκεκριμένα χάρη στην απόκτηση βελτιωμένων γνώσεων για τον υδρολογικό κύκλο). 3) Τέλος, στη διάρκεια των ετών 1997-2007 θα καταστεί δυνατή η βελτίωση της αξιοπιστίας αυτών των προβλέψεων (επακόλουθο της χρήσης υποδειγμάτων που θα αντιπροσωπεύουν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα νέφη, τους ωκεανούς, τα παγετωνικά καλύμματα κτλ.).

Τα υπάρχοντα κενά στις επιστημονικές γνώσεις σε ό,τι αφορά τα προβλήματα της καθολικής ρύπανσης όπως είναι π.χ. οι ασάφειες που δυσχεραίνουν την κατανόηση των αλληλεπιδράσεων ατμόσφαιρας – ωκεανού – βιόσφαιρας, η μεταξύ των οποίων διεργασία ανταλλαγών πολύ απέχει από το να είναι πλήρως γνωστή, αποτελούν πρόσχημα για να αρνηθούμε να καταμερίσουμε με σαφήνεια τις ευθύνες.

### 3.3.1 Οι υπεύθυνοι της εντατικοποίησης του φαινομένου του θερμοκηπίου

- Τα **θερμοσκοπικά αέρια** : Εδώ και πολλές δεκαετίες είναι γνωστό ότι οι συγκεντρώσεις των θερμοσκοπικών αερίων (δηλαδή των υπαίτιων για τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου) αυξάνονται κανονικά σε συνάρτηση με την ανάπτυξη των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Τα εν λόγω αέρια κατά σειρά φθίνουσας σπουδαιότητας είναι: το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) 50%-60% του συνόλου, οι CFC 15% - 20% του συνόλου, το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) 15% - 20% του συνόλου, ομοίως το διαζωτοξείδιο ( $\text{N}_2\text{O}$ ) σε απειροελάχιστο ποσοστό.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που είχαν ως αποτέλεσμα την αποβολή στην ατμόσφαιρα ουσιών που δεν ενυπήρχαν στη φύση, όπως είναι οι CFC ή οι υδρογονάνθρακες, προκάλεσαν την αύξηση των εκπομπών των ουσιών εκείνων που προϋπήρχαν σε φυσική κατάσταση ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ).

Οι εκπομπές του  $\text{CO}_2$  αυξομειώνονται βεβαίως ετησίως σε συνάρτηση με τη φυσιολογική βιολογική δραστηριότητα, αλλά τα ανθρωπογενή αέρια απόβλητα είναι υπεύθυνα για τη συνεχή αύξησή τους με την πάροδο του χρόνου. Το 80% αυτής της αύξησης προέρχεται από τον ενεργειακό τομέα, το υπόλοιπο οφείλεται στην αποξήλωση των δασών και στην αύξηση των καλλιεργήσιμων γεωργικών εκτάσεων.

Οι εκπομπές μεθανίου είναι κατά ένα ελάχιστο ποσοστό φυσιολογικής προέλευσης (έλη, τούνδρα, τερμίτες, ωκεανοί, λίμνες, φυτοφάγα άγρια ζώα). Η εκθετική αύξηση των συγκεντρώσεων του μεθανίου που παρατηρείται στη διάρκεια των τελευταίων τριών αιώνων, δεν μπορεί παρά να προέρχεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες: για το 35% των εκπομπών μεθανίου ενοχοποιείται ο ενεργειακός παράγοντας (απώλεια φυσικού αερίου κατά την εκμετάλλευσή του, καύση της βιομάζας οφειλόμενη στις γεωργικές πρακτικές). Οι γεωργικές δραστηριότητες είναι υπεύθυνες για το 50% που κατανέμεται ισομερώς στις ρυζοκαλλιέργειες και στην εκτροφή ζώων και το υπόλοιπο προέρχεται από τη ζύμωση των αποβλήτων (15%).

Το διαζωτοξείδιο φυσιολογικής προέλευσης προέρχεται κυρίως από μικροοργανισμούς του εδάφους και των υδάτων (ήτοι το 60% του συνόλου των εκπομπών). Για τις εκπομπές από ανθρώπινες δραστηριότητες ευθύνονται τα λιπάσματα κατά 15% και ο ενεργειακός τομέας κατά το υπόλοιπο 25%.

Τέλος τα χλωριωμένα συστατικά προέρχονται (αν εξαιρέσουμε το χλωρομεθάνιο που παράγεται από τους ωκεανούς) από βιομηχανικές δραστηριότητες. Πρόκειται για την περίπτωση των CFC και του τετραχλωριούχου άνθρακα.

Οι προοπτικές για το χρονικό διάστημα των επόμενων 50-100 ετών πρέπει να διερευνηθούν με σύνεση γιατί είναι συνυφασμένες με πληθώρα ασαφειών και αβεβαιοτήτων. Σύμφωνα με τις προοπτικές αυτές: α) Οι συγκεντρώσεις των ουσιών με μικρή διάρκεια ζωής ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) θα φθάσουν γρήγορα σε ένα επίπεδο ισορροπίας ανάλογο με το ρυθμό εκπομπής τους β) οι ουσίες με μεγάλη διάρκεια ζωής (CFC,  $\text{N}_2\text{O}$ ) θα συσσωρεύονται διαρκώς και έτσι οι συγκεντρώσεις τους, αυξανόμενες, θα υπερβούν το ρυθμό της μελλοντικής εκπομπής τους γ) το ποσοστό των άλλων αερίων εκτός του  $\text{CO}_2$  θα αυξάνεται σταθερά.

Ένας άμεσος συσχετισμός μεταξύ των εκπομπών του  $\text{CO}_2$  και της οικονομικής αύξησης, μας παρέχει τη δυνατότητα να κάνουμε την απλή σκέψη ότι όσο ο ρυθμός της οικονομικής αύξησης θα ανέρχεται τόσο ταχύτερος θα γίνεται και ο ρυθμός εκπομπής του  $\text{CO}_2$ . Έτσι τα σενάρια που εκπονήθηκαν για την Παγκόσμια Συνδιάσκεψη για την Ενέργεια στο Μόντρεαλ το Σεπτέμβριο του 1989, αποκαλύπτουν ενδεικτικά παρακάτω το πως θα διαμορφωθεί αυτός στο μέλλον (ως αφετηρία ελήφθη μια παρέκταση των παρελθόντων τάσεων) : 1) μια περιορισμένη οικονομική αύξηση κατά τη χρονική περίοδο 1985-2020 με ετήσιο ρυθμό αύξησης +1,8% θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών  $\text{CO}_2$  κατά +20% το 2000 και κατά +41% το 2020 σε σχέση με το 1985, 2) μια μέτρια οικονομική αύξηση κατά την περίοδο 1985-2020 με ετήσιο ρυθμό αύξησης +3.3% θα συνεπάγεται μια επαύξηση των εκπομπών  $\text{CO}_2$  κατά +31% το 2000 και κατά +70% το 2020, σε σχέση πάντα με το 1985.

- Οι **ενεργειακές πηγές** : Οι ενεργειακές δραστηριότητες παίζουν λοιπόν για διάφορους λόγους, καθοριστικό ρόλο στις εκπομπές των θερμοσκοπικών αερίων. Αν περιοριστούμε στα πιο σημαντικά από τα αέρια αυτά -δηλαδή στο  $\text{CO}_2$ - τα ποσοστά ευθύνης των διαφόρων πηγών ενέργειας για τις βιομηχανικές εκπομπές έχουν ως εξής: ενώ το πετρέλαιο τα τελευταία εκατό χρόνια συνέβαλε περισσότερο από κάθε άλλη πηγή ενέργειας στην αύξηση των συγκεντρώσεων του  $\text{CO}_2$ , το μέρος της ευθύνης του σήμερα σε ποσοστά προσεγγίζει το

αντίστοιχο του άνθρακα (42% το καθένα) και είναι υπερδιπλάσιο του αντίστοιχου ποσοστού του φυσικού αερίου (16%). Η συμβολή του άνθρακα θα αυξάνεται και θα φθάσει στα 50% το 2025. Αλλά και η συμβολή του φυσικού αερίου θα μπορούσε να αποβεί εξίσου σημαντική. Αυτοί οι αριθμοί δεν αντιπροσωπεύουν παρά μόνο τις παγκόσμιες μέσες τιμές και οι αποκλίσεις που παρατηρούνται ανάμεσα στις διάφορες χώρες μπορεί να είναι μεγάλες. Έτσι στην Κίνα ο άνθρακας συμβάλλει κατά 80% στις εκπομπές του CO<sub>2</sub> ενώ στη Γαλλία η συμβολή του είναι μικρότερη του 20%.

Ας υπενθυμίσουμε εξάλλου ότι η συμβολή των ορυκτών μορφών ενέργειας στην κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών υπερβαίνει σήμερα το 80%, ενώ τόσο η πυρηνική ενέργεια όσο και η υδραυλική ενέργεια - και οι δύο ενεργειακές μορφές μη εκπέμπουσες αέρια θερμοκηπίου - δεν καλύπτουν από κοινού περισσότερο από το 9% των παγκόσμιων αναγκών σε ενέργεια. Ωστόσο αυτές οι παγκόσμιες μέσες τιμές εμπεριέχουν ανάλογα με την κάθε χώρα και περιπτώσεις όπου οι ενεργειακές συνθήκες είναι εκ διαμέτρου αντίθετες.

- Οι **βιομηχανικοί κλάδοι** : Οι κυριότεροι κλάδοι που ενέχονται είναι οι χερσαίες και αεροπορικές μεταφορές, οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι βιοτεχνίες, εν γένει ο τομέας της κατοικίας και η γεωργία. Και εκεί ακόμα οι ανομοιοότητες σε ό,τι αφορά τις πηγές των εκπομπών ανάμεσα στα διάφορα κράτη είναι σημαντικές (βλέπε πίνακα 3.3.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.1

<u>Τομέας</u>	<u>Χώρες</u>		
	Η.Π.Α.	Κίνα	Γαλλία
Μεταφορές	30%	7%	39%
Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί	35%	6%	11%
Βιομηχανία	24%	60%	19%
Κατοικία και γεωργία	11%	27%	31%

Συμβολή των διαφόρων ενεργειών δραστηριότητας στις εκπομπές CO<sub>2</sub> το 1985 (Εμπορεύσιμες ενεργειακές μορφές)

Πηγή: J. Theys , Υπουργείο Περιβάλλοντος

Αν συγκρίνουμε το πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου με εκείνο του όζοντος, το πρόβλημα του δεύτερου δεν αποτελεί παρά μια αμυδρή απεικόνιση των συγκρούσεων των οικονομικών συμφερόντων που διαπλέκονται με τις ρυθμίσεις που προτείνονται για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων απειλών για το περιβάλλον. Πράγματι η βούληση για περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> υποδηλώνει συνάμα ότι υπάρχει η πρόθεση και το θάρρος να καταφερθεί κάποιος εναντίον της όλης οικονομίας των ενεργειακών συστημάτων καθώς και εναντίον εκείνων των μεταφορών, αλλά και του συνόλου της χημικής βιομηχανίας και της αντίστοιχης των υλικών και όχι εναντίον ενός και μόνο συγκεκριμένου βιομηχανικού κλάδου με περιορισμένη εμβέλεια.

Η εξέλιξη στις επόμενες δεκαετίες θα χαρακτηρίζεται από μια αυξανόμενη τάση προσφυγής στον ηλεκτρισμό και στην εξοικονόμηση ενέργειας στις κατοικίες και στη βιομηχανία που θα μειώσει αισθητά τη συμβολή αυτών των δύο τομέων στην αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Η μελλοντική συμβολή των μεταφορών στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα ή μη χρήσης πηγών μη ρυπογόνων, υπό την έννοια ότι δεν θα εκπέμπουν CO<sub>2</sub> (πυρηνική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια) κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού. Χώρες όπως η Γαλλία ή η Ιαπωνία έχουν ήδη προβεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και συγχρόνως έχουν αντικαταστήσει ρυπογόνες πηγές ενέργειας που εκπέμπουν CO<sub>2</sub> με άλλες που δεν εκπέμπουν. Επακόλουθο των παραπάνω ενεργειών θα είναι να αυξηθεί το ποσοστό της συμβολής του τομέα των μεταφορών στις εκπομπές CO<sub>2</sub> εκτός αν έχουν διατεθεί στην αγορά οχήματα που δεν χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

- **Οι κυριότερες χώρες :** Οι ευθύνες για την εκπομπή του CO<sub>2</sub> κατανέμονται πολύ ανισομερώς μεταξύ των χωρών. Τρεις χώρες (οι ΗΠΑ, η πρώην ΕΣΣΔ και η Κίνα) ευθύνονται για πάνω από το μισό των εκπομπών CO<sub>2</sub> και με άλλες δώδεκα χώρες μαζί θεωρούνται συνυπεύθυνες για το 80% περίπου του συνόλου των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Οι αναπτυσσόμενες χώρες όλου του κόσμου που αντιπροσωπεύουν τα τρία τέταρτα του παγκόσμιου πληθυσμού, καταναλίσκουν ενέργεια που δεν υπερβαίνει το 25% της συνολικής παγκόσμιας ενέργειας.

Τρεις παράγοντες μπορούν να επεξηγήσουν αυτά τα αποτελέσματα: το ύψος του κατά κεφαλήν εισοδήματος, ο σημαντικός ρόλος του πληθυσμιακού παράγοντα και η αναποτελεσματικότητα στην παραγωγή της ενέργειας.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των διαφόρων χωρών σε ό,τι αφορά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κάτοικο (εκφρασμένες σε

άνθρακα ετησίως και ανά κάτοικο): 5 τόνοι για τις ΗΠΑ και τη Λαϊκή Δημοκρατία της Γερμανίας, 3,3 για την πρώην ΕΣΣΔ, 3,2 για την Ομοσπονδιακή Δημοκρατία της Γερμανίας, 3,1 για τη Δανία και την Ολλανδία, 2,8 για το Ηνωμένο Βασίλειο, 1,9 για τη Γαλλία, την Ιαπωνία και την Ιταλία, 0,5 για την Κίνα και τη Βραζιλία και 0,1 για τις Ινδίες.

Οι αντίστοιχες ευθύνες των ανεπτυγμένων χωρών καθώς και των αναπτυσσόμενων, μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Ενώ οι πρώτες έχουν μια ιστορική ευθύνη, εφόσον αποτέλεσαν την αφετηρία όπου σιγά σιγά συσσωρεύτηκε το 80% και πάνω του CO<sub>2</sub>, η συμβολή τους σήμερα στις εκπομπές περιορίζεται στο 50%, με προοπτική το 2050 να κατέλθει στο 40%. Αντιστρόφως το ποσοστό της συμβολής των δευτέρων στην ίδια χρονική περίοδο, θα ανέλθει από το 20% στο 40% και το αντίστοιχο ποσοστό των χωρών της Ανατολικής Ευρώπης θα σταθεροποιηθεί κάπου γύρω στο 20%-25%.

Η περίπτωση της Γαλλίας στο θέμα αυτό παρουσιάζει μια ιδιαιτερότητα σημαντική. Εκπέμπει 100 εκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ισοδύναμων άνθρακα ετησίως, δηλαδή το 2% των εκπομπών σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ η παραγωγή της υπερβαίνει το 5% του παγκόσμιου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος. Οι εκπομπές της σε CO<sub>2</sub> ανά κάτοικο (κατά κεφαλήν) είναι όπως είδαμε 1,9 τόνοι ισοδύναμου άνθρακα ετησίως, γεγονός που την κατατάσσει πάνω από τον παγκόσμιο μέσο όρο που ισούται με τον 1 τόνο, αλλά κάτω από εκείνο της ΕΟΚ που ανέρχεται σε 2,3 τόνους. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στη Γαλλία μειώθηκαν σχεδόν κατά 40% μεταξύ των ετών 1980 και 1988, ενώ στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες παρέμειναν στάσιμες ή ακόμη και αυξήθηκαν.

Οι λόγοι αυτής της κατάστασης οφείλονται στο γεγονός ότι η Γαλλία, όπως και η Ιαπωνία, μη διαθέτοντας στο υπέδαφός τους υπολογίσιμες πηγές ορυκτής ενέργειας, ανέπτυξαν μια πολιτική βασισμένη στην αναζήτηση τρόπων εξοικονόμησης ενέργειας και στην ανάπτυξη πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Αυτή η πολιτική είχε ως αποτέλεσμα να καταστεί η Γαλλία (σε ισοτιμία με την Ιαπωνία) χώρα βιομηχανική, της οποίας ο λόγος εκπομπών CO<sub>2</sub> / ΑΕΠ (ακαθάριστο εθνικό προϊόν) είναι ο πιο μικρός. Μπορούμε να υπολογίσουμε ότι το ένα τρίτο της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> που αναφέραμε παραπάνω, μπορεί να αποδοθεί στην εξοικονόμηση ενέργειας και το υπόλοιπο στην πυρηνική ενέργεια που δεν σημαίνει τίποτε άλλο παρά την υποκατάσταση μιας περιβαλλοντικής απειλής από μια άλλη.

## 4. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Η μόλυνση του αέρα είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα. Ο αέρας που αναπνέουμε δεν έχει μόνο ιδιότητες υποστήριξης της ζωής, αλλά και καταστροφής της. Κάτω από ιδανικές συνθήκες ο αέρας που εισπνέουμε έχει ποιοτική και ποσοτική ισορροπία η οποία διατηρεί την ευημερία του ανθρώπου. Αλλά όταν η ισορροπία ανάμεσα στα συστατικά διαταραχθεί ή με άλλα λόγια μολυνθεί, μπορεί να επηρεάσει την ανθρώπινη υγεία.

Ένας μέσος άνθρωπος αναπνέει 22.000 φορές την ημέρα και παίρνει 16 κιλά αέρα. Υπερβαίνει κατά πολύ τις καταναλώσεις φαγητού και νερού. Έχει υπολογιστεί ότι ένας άνθρωπος μπορεί να ζήσει για πέντε εβδομάδες χωρίς φαγητό και πέντε ημέρες χωρίς νερό, αλλά μόνο για πέντε λεπτά χωρίς αέρα.

Όλες οι ακαθαρσίες του αέρα που εισπνέουμε δεν προκαλούν απαραίτητα βλάβες. Ανάλογα με τη χημική σύσταση των ρύπων, ορισμένα μπορεί να είναι βλαβερά όταν βρίσκονται στον αέρα σε μικρές ποσότητες και άλλα όταν βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες. Η διάρκεια της έκθεσης του σώματος στο μολυσμένο αέρα είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας. Γι' αυτό οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία του ανθρώπου είναι :

1. Η φύση των ρύπων
2. Η συγκέντρωση των ρύπων
3. Η διάρκεια της έκθεσης
4. Η κατάσταση της υγείας του δέκτη
5. Η ηλικία του δέκτη

Μιλώντας γενικά, η ευαισθησία των επιδράσεων της μόλυνσης του αέρα είναι μεγάλη ανάμεσα στα νήπια, στους ηλικιωμένους και στους αδύναμους οργανισμούς. Αυτοί που έχουν χρόνιες ασθένειες στους πνεύμονες ή στην καρδιά, θεωρείται ότι διατρέχουν το μεγαλύτερο κίνδυνο. Προσχολικά και μεγαλύτερα παιδιά, εμφανίζουν ευαισθησία και συγκεκριμένα αντιδρούν στις επιπτώσεις της υγείας από τη μόλυνση του αέρα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία είναι χειρότερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν το μέγεθος της μόλυνσης κορυφώνεται.

Μια δυσάρεστη μυρωδιά, μείωση της όρασης ή καταστροφή της βλάστησης είναι χρήσιμες ενδείξεις για την πιθανότητα ή σοβαρότητα των επιπτώσεων στην υγεία.

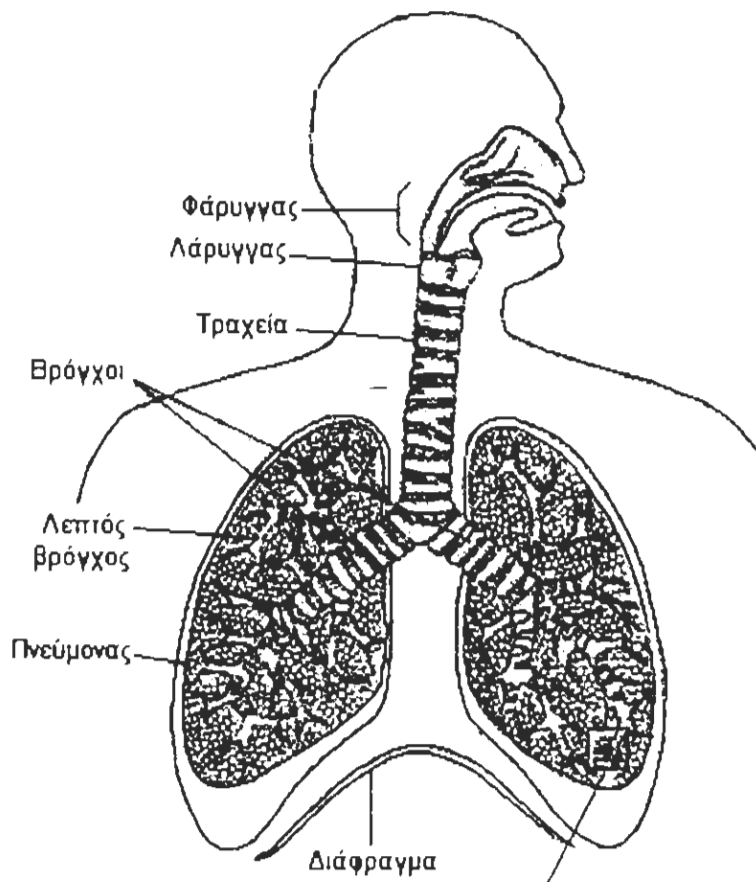
Ένα γκρίζο νέφος πάνω από την πόλη ή σε μια βιομηχανική περιοχή, μπορεί να έχει ένα καταθλιπτικό αποτέλεσμα και να χαλάσει την απόλαυση της ζωής. Ωστόσο δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η επιτακτικότητα με την οποία λαμβάνονται τα μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα θα εξαρτηθεί πάρα πολύ από το πόσο σοβαρό θεωρείται ότι είναι το ρίσκο της προσβολής της υγείας από τη μόλυνση του αέρα .

#### **4.2 Μηχανισμός της δράσης των ρύπων του αέρα**

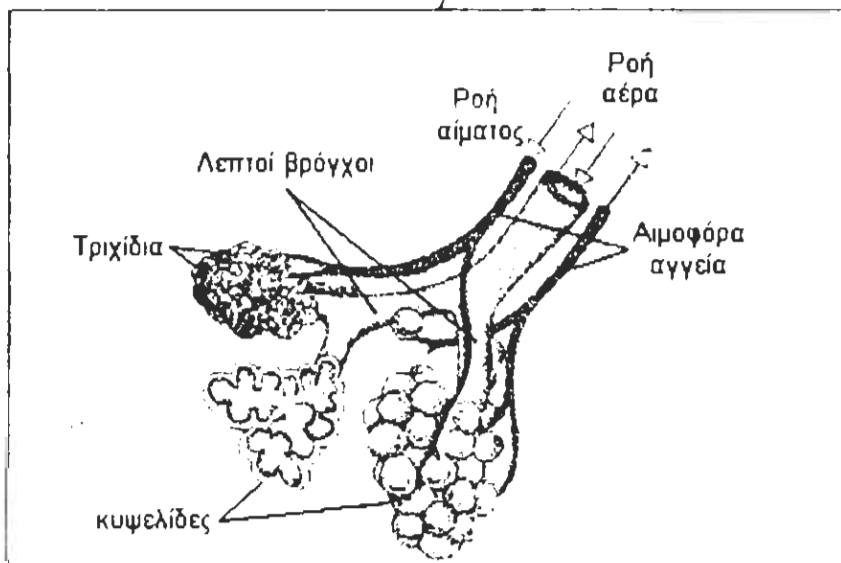
Οι επιπτώσεις των ρύπων του αέρα στην ανθρώπινη υγεία γενικά συμβαίνει ως αποτέλεσμα της επαφής μεταξύ των ρύπων και του σώματος. Συνήθως η σωματική επαφή λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του δέρματος και στις εκτεθειμένες μεμβράνες.

Η επαφή με τις επιφάνειες των εκτεθειμένων μεμβρανών είναι μέγιστης σημασίας λόγω της υψηλής απορροφητικής τους ικανότητας, σε σύγκριση με αυτή του δέρματος. Τα αέρια, οι ατμοί, οι καπνοί, η ομίχλη και η σκόνη μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμούς των μεμβρανών των ματιών, της μύτης, της φωνής, του λάρυγγα, του τραχειοβρογχικού δένδρου και των πνευμόνων. Μερικοί ερεθισμοί φτάνουν ακόμα και την βλεννώδη μεμβράνη του πεπτικού συστήματος .





**Ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα**



**Αναπνευστικές επιφάνειες και η τροφοδοσία τους με αίμα**

**Εικόνα 4.2.1 Αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου**

### 4.3 Επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου

1. Ερεθισμός ματιών.
2. Ερεθισμός μύτης και λάρυγγα .
3. Ερεθισμός του αναπνευστικού συστήματος .
4. Αέρια όπως η αμμωνία, το υδρόθειο και άλλα, προκαλούν ενοχλητικές οσμές ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις.
5. Αύξηση θνησιμότητας και νοσηρότητας.
6. Μια ποικιλία ξεχωριστών σωματιδίων, ειδικά η γύρη, ξεκινούν την προσβολή με άσθμα.
7. Χρόνιες πνευμονικές ασθένειες όπως βρογχίτιδα και άσθμα, επιβαρύνονται από μεγάλες συγκεντρώσεις SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, με ύλη σωματιδίων και φωτοχημική ομίχλη.
8. Το μονοξείδιο του άνθρακα μαζί με την αιμοσφαιρίνη στο αίμα, αυξάνει το άγχος σε αυτούς που υποφέρουν από καρδιαγγειακές και πνευμονικές ασθένειες.
9. Το υδροφθόριο προκαλεί ασθένειες των οστών (φθορίωση) και κηλίδωση των δοντιών.
10. Καρκινογενείς παράγοντες προκαλούν καρκίνο.
11. Σωματίδια σκόνης προκαλούν αναπνευστικές ασθένειες όπως πνευμονοκονίαση από αμίαντο, αποτέλεσμα συγκεκριμένων σκονών.
12. Ορισμένα βαριά μέταλλα όπως ο μόλυβδος μπορούν να εισέλθουν στο σώμα μέσω των πνευμόνων και να προκαλέσουν δηλητηρίαση .

#### 4.3.1 Επιπτώσεις ραδιενεργών διαρροών

Οι βιολογικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας μπορεί να είναι σωματικές ή γεννητικές βλάβες. Στις σωματικές, η έκθεση επηρεάζει το άτομο ενώ στις γεννητικές, καταστρέφονται οι μελλοντικές γενιές οι οποίες γίνονται τα θύματα.

Η ραδιενεργή σκόνη από τις πυρηνικές δοκιμές προκαλεί:

- (α) Καρκίνο
- (β) Συντόμευση της διάρκειας ζωής
- (γ) Γεννητικές επιδράσεις ή μεταλλαγές

Ένα συγκεκριμένο σημείο που πρέπει να επισημάνουμε σχετικά με την επίδραση των ραδιενεργών διαρροών είναι ότι προκαλούν μεγάλες αλλαγές επηρεάζοντας το μέλλον της ανθρωπότητας και ως εκ τούτου το μέλλον του πολιτισμού μας .

#### **4.3.2 Έρευνα των επιπτώσεων των αέριων ρύπων**

Τρεις μέθοδοι είναι διαθέσιμοι για τον καθορισμό των επιπτώσεων των διάφορων ρύπων στους ανθρώπους . Αυτοί είναι :

1. Πειραματική έκθεση ανθρώπων και ζώων
2. Κλινικές έρευνες
3. Επιδημιολογία

Η πειραματική έκθεση διάφορων ειδών ζώων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε διάφορες συγκεντρώσεις και δόσεις από αέριους ρύπους μπορεί να δώσει διάφορες πληροφορίες όσον αφορά τον τύπο της δράσης ενός ρύπου και τα αποτελέσματά του. Φυσικά τα αποτελέσματα θα πρέπει να ταξινομηθούν σε ακριβή στατιστική ανάλυση, αλλά το κύριο πρόβλημα εδώ είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων από τις επιπτώσεις στον ανθρώπινο πληθυσμό.

Οι πειραματικές εκθέσεις σε ανθρώπους θα πρέπει να είναι περιορισμένης συγκέντρωσης και δόσης ρύπων ώστε να μην προκαλούν σοβαρές ασθένειες. Οι τύποι των επιδράσεων που παρατηρήθηκαν και μετρήθηκαν συμπεριλαμβανομένων και των ανιχνεύσεων της οσμής, ερεθισμό των ματιών, μύτης και λάρυγγα, αλλάζουν το ρυθμό του καρδιακού παλμού, τη συχνότητα της αναπνοής, προκαλούν τη μείωση της φυσικής δραστηριότητας και πολλές άλλες ψυχολογικές αντιδράσεις.

Οι κλινικές έρευνες κυρίως περιλαμβάνουν παρατηρήσεις που έγιναν σε θέματα που σχετίζονται με την έκθεση στους ατμοσφαιρικούς ρύπους κάτω από ανεξέλεγκτες συνθήκες. Μελέτες σε οδηγούς φορητών, τροχονόμους, εργάτες εργοστασίων και άλλες επαγγελματικές κατηγορίες μπορεί να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες. Ακόμα ασθενείς επισκέπτονται φυσικούς για να παραπνευθούν για συμπτώματα που υποτίθεται ότι προκλήθηκαν ζώντας σε μολυσμένες περιοχές. Αυτό μπορεί να ξεγελάσει τα υπό παρακολούθηση κλινικά αρχεία μεγάλης σπουδαιότητας. Περαιτέρω πληροφορίες έχουν συλλεχθεί από παρακολούθηση έντονων επεισοδίων μόλυνσης του αέρα. Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν δείχνουν μια σχέση μεταξύ μόλυνσης του αέρα και ασθενειών, ειδικά πνευμονικών ασθενειών .

Σε επιδημιολογικές μελέτες οι σχέσεις μεταξύ της διανομής συγκεκριμένων ασθενειών σε ανθρώπινο πληθυσμό και των παραγόντων που καθόρισαν τη διανομή έχουν ανακαλυφθεί. Για παράδειγμα κάποιος μπορεί να συγκρίνει αρχεία νοσηρότητας και θνησιμότητας, νοσοκομειακές παροχές και άλλα σχετικά με την υγεία αρχεία, από διάφορες γεωγραφικές περιοχές με επίπεδα μόλυνσης του αέρα σε αυτές, για να προσδιορίσουν κάποιο συσχετισμό, αν υπάρχει. Για να αποφευχθεί η παρερμηνεία, ο υπό εξέταση πληθυσμός πρέπει να είναι κάτω από προσεκτική παρακολούθηση όσον αφορά το κάπνισμα, επαγγελματικές εκθέσεις και οποιονδήποτε άλλο παράγοντα που μπορεί να ζημιώσει τα αποτελέσματα της μελέτης.

#### **4.4 Συγκεκριμένοι ρύποι**

##### **4.4.1 Διοξείδιο του θείου**

Το διοξείδιο του θείου είναι ένα ερεθιστικό αέριο το οποίο επηρεάζει τις βλεννώδεις μεμβράνες όταν εισπνέεται. Κάτω από ορισμένες συνθήκες ορισμένο αερόβιο διοξείδιο του θείου οξειδώνεται σε τριοξείδιο του θείου. Κάθε ένα από αυτά τα δύο αέρια, στην παρουσία υδρατμών ή νερού, σχηματίζει θειικό οξύ αντίστοιχα. Το τριοξείδιο του θείου είναι πολύ ισχυρό ερεθιστικό, πολύ πιο δυνατό από το διοξείδιο του θείου, προκαλώντας μερικούς βρογχοσπασμούς σε σχετικά μικρές τιμές συγκέντρωσης.

##### **4.4.2 Μονοξείδιο του άνθρακα**

Το μονοξείδιο του άνθρακα έχει δυνατή έλξη για να συνδυαστεί με την αιμοσφαιρίνη του αίματος για το σχηματισμό ανθρακοαιμοσφαιρίνης (COHb). Αυτό μειώνει την ικανότητα της αιμοσφαιρίνης να μεταφέρει οξυγόνο στους ιστούς του σώματος. Το CO έχει περίπου δισκόσιες φορές την ελκτικότητα του οξυγόνου για την προσκόλληση του ίδιου με την αιμοσφαιρίνη και έτσι χαμηλές τιμές CO μπορούν ακόμα και να προκαλέσουν μεγάλες τιμές από COHb. Το μονοξείδιο του άνθρακα επίσης επηρεάζει το κεντρικό νευρικό σύστημα και είναι υπεύθυνο για καρδιακές προσβολές και υψηλό βαθμό θνησιμότητας.

### 4.4.3 Οξειδία του αζώτου

Από τα επτά οξειδία που είναι γνωστό ότι υπάρχουν στον περιβάλλοντα αέρα, μόνο δύο θεωρούνται ότι επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Αυτά είναι το οξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Καθώς υπάρχουν κάποιες απορίες σχετικά με την αιμοσφαιρίνη σε αντιδράσεις με τα οξειδία του αζώτου, δεν υπάρχει θετικό στοιχείο ότι η έκθεση σε οξειδία του αζώτου είναι βλαβερή στην υγεία σε συνεργασία με την κοινωνική μόλυνση του αέρα.

Τα οξειδία του αζώτου είναι γνωστό ότι προκαλούν επαγγελματικές ασθένειες. Ανάμεσα στα επαγγέλματα με επιβλαβές NO<sub>2</sub>, είναι οι κατασκευαστές αζωτούχων οξέων, οι γεωργοί που εκτίθενται σε σιλό ζωοτροφών τα οποία έχουν υψηλή συγκέντρωση σε αζωτούχα λιπάσματα, οι ηλεκτροσυγκολλητές και η ορυκτή εκμετάλλευση του αζώτου ως εκρηκτικό συστατικό. Έχει υπολογιστεί ότι ο ρινικός και ο οφθαλμικός ερεθισμός γίνεται αντιληπτός μετά από έκθεση σε περίπου 15 ppm και οι πνευμονικές ενοχλήσεις μετά από σύντομη έκθεση σε 25 ppm σε διοξείδιο του αζώτου.

### 4.4.4 Υδρόθειο και θειική αλκοόλη

Το υδρόθειο είναι ένα αέριο με δυσάρεστη οσμή. Είναι πολύ γνωστό για την μυρωδιά του κλούβιου αυγού που έχει. Εκθέσεις στο υδρόθειο για μικρές περιόδους μπορεί να προκαλέσουν κούραση της αίσθησης της οσμής.

Ένα άλλο θειούχο συστατικό που μας ενδιαφέρει για τη μόλυνση του αέρα, κυρίως για τις δυνατές του οσμές, είναι η μεθυλική θειική αλκοόλη C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>SH. Όμως έχει αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις οι οποίες έχουν δυσάρεστη οσμή δεν έχουν άλλες επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Στην πραγματικότητα θειικές αλκοόλες συχνά προστίθενται στις προμήθειες παραγόμενου αερίου έτσι ώστε οι διαρροές αερίου να επισημάνονται.

### 4.4.5 Οζον

Το όζον είναι ένα αέριο που έχει ερεθιστική δράση στην αναπνευστική τραχεία φτάνοντας πολύ βαθύτερα στους πνεύμονες από τα οξειδία του θείου.

#### 4.4.6 Φθόρια

Η παρουσία φθορίου στον αέρα ποικίλει από αυτά που είναι υπερβολικά ερεθιστικά και διαβρωτικά όπως το υδροφθόριο, σε σχετικά μη αντιδραστικά συστατικά. Άλλο φθόριο είναι ένα εκκεντρικό δηλητήριο ακόμα κάτω από συνθήκες παρατεταμένης έκθεσης και σε υπόξινες συγκεντρώσεις.

#### 4.4.7 Μόλυβδος

Κύρια πηγή του μολύβδου στις αστικές ατμόσφαιρες είναι τα αυτοκίνητα. Δημιουργεί αστική συγκέντρωση από ανόργανο μόλυβδο με περίπου 1-3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με μεγάλες τιμές σε περιοχές με πάρα πολύ κίνηση. Ο ανόργανος μόλυβδος συμπεριφέρεται ως μέσο που προκαλεί μια ποικιλία από ανθρώπινες σωματικές δυσλειτουργίες. Οι επιδράσεις συμπεριλαμβάνουν γαστρεντερική κάκωση, καταστροφή ήπατος και νεφρού, επιπλοκές στην εγκυμοσύνη και επηρεασμό της πνευματικής ανάπτυξης των παιδιών .

#### 4.4.8 Ατμοί υδρογονάνθρακα

Μερικοί από τους ατμούς υδρογονάνθρακα στην ατμόσφαιρα έχουν επιπτώσεις στην υγεία (η επίδραση της φορμαλδεΰδης είναι κυρίως ερεθιστική). Συμβάλλει κυρίως στον ερεθισμό των ματιών και του αναπνευστικού που προκαλείται από τη φωτοχημική ομίχλη.

### 4.5 Καρκινογενείς παράγοντες

Οι καρκινογενείς παράγοντες είναι υπεύθυνοι για τον καρκίνο, όπως για παράδειγμα το πολυκυκλικό οργανικό συστατικό 3,4-βενζόλιο. Η προέλευση αυτών των συστατικών είναι στην ημιτελή καύση υδρογονανθράκων, άλλων ανθρακούχων υλικών και στην εξάτμιση των Μ.Ε.Κ. Επιπρόσθετα στα οργανικά πολυκυκλικά συστατικά έχει βρεθεί ότι μερικοί αλιφατικοί υδρογονάνθρακες είναι επίσης καρκινογενείς.

#### 4.5.1 Εντομοκτόνα

Τα εντομοκτόνα δεν είναι μόνο επικίνδυνα για τα έντομα, αλλά και δηλητηριώδη για τον άνθρωπο, π.χ. D.D.T (Διχλωρο-διφαινυλο-τριχλωρο-μεθάνιο ). Μπορούν να επηρεάσουν το κεντρικό νευρικό σύστημα και να επιδράσουν και σε άλλα ζωτικά όργανα. Στην πραγματικότητα το D.D.T. έχει βρεθεί στο μητρικό γάλα στις δυτικές χώρες και ως εκ τούτου η χρήση του D.D.T. έχει υποστηρικτές στις Η.Π.Α. Το περιβαλλοντολογικό πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (U.N.E.P.) έχει προειδοποιήσει για τη χειρότερη πλευρά των επιδράσεων του ψεκάσματος D.D.T. σε εσωτερικούς χώρους. Ακόμα έχει αναφερθεί ότι ο ψεκασμός σε εσωτερικούς χώρους επηρεάζει τα ζώα κλειστής φάρμας.

#### 4.5.2 Ραδιενεργά Ισότοπα

Τα σημαντικά ραδιενεργά ισότοπα που μπορεί να φθάσουν στον αέρα του περιβάλλοντος είναι τα παρακάτω : Ιώδιο 131, Φώσφορος 32, Κοβάλτιο 60, Στρόντιο 90, Ράδιο 226, Άνθρακας 14, Θείο 35, Ασβέστιο 45 και Ουράνιο. Οι κυριότερες πηγές ραδιενεργών ατμοσφαιρικών ρύπων είναι:

- (α) Πυρηνικοί αντιδραστήρες
- (β) Πειραματικοί επιταχυντές
- (γ) Επιστημονική και ιατρική χρήση των ραδιενεργών ισοτόπων
- (δ) Γεωργική και βιομηχανική χρήση των ραδιενεργών ισοτόπων σαν ανιχνευτές
- (ε) Πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα

Οι σοβαρές επιδράσεις στην υγεία είναι αναιμία, λευχαιμία και καρκίνος. Τα ραδιενεργά ισότοπα ακόμα προκαλούν γενετικές ανωμαλίες και στειρότητα, όπως επίσης ανωμαλίες του εμβρύου και εκ γενετής δυσμορφίες. Επίσης μικραίνει τη διάρκεια ζωής ενός ατόμου.

#### 4.6 Αλλεργικοί παράγοντες

Είναι γενικά αναγνωρισμένο από το ιατρικό προσωπικό ότι ο αέρας που αναπνέουμε είναι ο φυσικός μεταφορέας πολλών μικροσκοπικών οργανικών υλικών που μπορεί να δράσουν σαν αλλεργικά. Οι αντιδράσεις του σώματός μας σε τέτοια

αλλεργικά απαντώνται κυρίως στο δέρμα και στο νευρικό σύστημα. Τα οργανικά αλλεργικά έχουν την προελευσή τους στους ζωντανούς οργανισμούς όπως στα φυτά (γύρη λουλουδιών), στη ζύμη ή στη μούχλα, στις τρίχες των ζώων, στις γούνες ή στις φτερούγες.

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση σε αυτή την άποψη, είναι η πόλη Μπάνγκαλορ. Η κηπούπολη του Μπάνγκαλορ, γνωστή για το εξαιρετικό της κλίμα, είναι επίσης γνωστή σαν ο τόπος του άσθματος για πολλούς ανθρώπους. Τα κρούσματα βρογχικού άσθματος είναι ιδιαίτερα υψηλά σε αυτή την πόλη. Έχουν αναφερθεί παραδείγματα όπου άνθρωποι που ποτέ δεν είχαν παρουσιάσει τάσεις νωρίτερα, ερχόμενοι στο Μπάνγκαλορ, προσβλήθηκαν από άσθμα. Ακόμα, εκείνοι που είχαν μόνο ήπιες κρίσεις αλλού, βίωσαν ισχυρές εδώ. Επίσης έχει καταγραφεί ότι το ποσοστό των ασθματικών που ανέφεραν ανακούφιση όταν έφυγαν από το Μπάνγκαλορ είναι 37.6%.

Μια συστηματική έρευνα της αναλογίας της γύρης των λουλουδιών της ατμόσφαιρας στο Μπάνγκαλορ αναλήφθηκε για πρώτη φορά από τον Ιούλιο του 1976 μέχρι τον Ιούλιο του 1978 από την Εταιρία Έρευνας Άσθματος. Η έρευνα κατέληξε στην αναγνώριση 75 τύπων αεροπαραγόμενης γύρης και 120 τύπων σπόρου. Το ημερολόγιο για το διάστημα 1976-78 από 10 διαφορετικούς δειγματοληπτικούς σταθμούς γύρω από το Μπάνγκαλορ, έδειξε ότι η γύρη των λουλουδιών παρουσιάστηκε όλο το χρόνο τριγύρω στην ατμόσφαιρα της πόλης. Όλοι οι αναγνωρισμένοι τύποι γύρης ήταν χαρακτηριστικό γνώρισμα των φυτών της περιοχής. Σύμφωνα με την έρευνα, η γύρη του παρθενίου ήταν η μεγαλύτερη σε ποσότητα (41%), ακολουθούμενη από τη γύρη του γρασιδιού (28.8%). Το είδος *Cassia* καταλαμβάνει την επόμενη θέση.

Η αξιολόγηση αποκάλυψε ότι οι σπιτονοικοκυρές (37.01%) και οι υπάλληλοι γραφείου (40.31%) είναι πιο επιρρεπείς σε κρίσεις άσθματος από τους βιομηχανικούς εργάτες (7.11%) και τους συνταξιούχους (11.29%). Αυτό υπονοεί ότι οι βιομηχανικοί ρύποι μπορούν σχεδόν να αποκλειστούν σαν αιτιολογικοί παράγοντες για το άσθμα και ότι η προσοχή πρέπει να εστιαστεί στη γύρη, στους σπόρους και στα σωματίδια σκόνης.

Παρόλο που το άσθμα δεν είναι μεταδοτική ασθένεια, το 32.27% των κληρονομικών περιπτώσεων έρχονται στο φως κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης. Αλλά σύμφωνα με το Γραφείο της Εταιρείας Έρευνας Άσθματος, έστω κι αν δύο παράγοντες έχουν αναλυθεί για δύο χρόνια, τελικά συμπεράσματα δεν έχουν βγει επειδή κλινικοανοσιολογικές μελέτες δεν έχουν γίνει σε ασθματικούς. Για αυτό το λόγο απαιτούνται επιπλέον έρευνες και κλινικές μελέτες για να βρεθεί η πραγματική αιτία για τα πολλά κρούσματα άσθματος μεταξύ των ανθρώπων της πόλης του Μπάνγκαλορ.



Επίσης μερικές βιομηχανικές εργασίες μπορούν να προστεθούν σε αυτούς που προκαλούν αλλεργίες. Βιομηχανικές εργασίες όπως επεξεργασία βαμβακερού υφάσματος, κατεργασία γούνας, επεξεργασία μαλλιού, επεξεργασία φτερών, άλεσμα αλευριού, επεξεργασία του φυτού *corchorus olitorius*, κατεργασία δέρματος, εργασία με ξύλα και επεξεργασία φύλλων καπνού μπορούν να συμπεριληφθούν σε αυτή την κατηγορία.

Αν και οι βιομηχανικές εργασίες συμβάλλουν στο πρόβλημα των αεροπαραγόμενων αλλεργικών, είναι μικρής επίδρασης εξαιτίας μιας φυσικής πηγής. Ορισμένα άτομα έχουν βρεθεί να είναι αλλεργικά στο διοξείδιο του θείου. Το κοβάλτιο και το βηρύλλιο, χωρισμένα με ακρίβεια στη μορφή των μιγμάτων τους, έχουν βρεθεί επίσης ότι είναι αλλεργικά. Και τα δύο προκαλούν πνευμονική ασθένεια. Η εμπορική βαφή γούνας, παραφενιλοδιαμίνη, είναι ένα αλλεργικό αίτιο, ικανό να προκαλέσει δερματίτιδα μαζί με βρογχικό άσθμα.

Εργοστάσια επεξεργασίας δηλητηριώδους καρπού για την εξαγωγή λαδιού, εκλύουν ένα υλικό με μορφή σκόνης στον αέρα, που είναι ένα ισχυρό αλλεργικό. Αυτό το υλικό υπήρξε η αιτία για το βρογχικό άσθμα σε ανθρώπους που μένουν κοντά σε αυτά τα εργοστάσια.

## **4.7 Επίδραση της μόλυνσης του αέρα στα ζώα**

### **4.7.1 Εισαγωγή**

Το ενδιαφέρον για τις επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στα ζώα γενικά έχει εκδηλωθεί σαν αποτέλεσμα της ανησυχίας σχετικά με την επιρροή στην ανθρώπινη υγεία. Τα περισσότερα νέα που αφορούν τη φυσική έκθεση των ζώων στο μολυσμένο αέρα, περιλαμβάνονται στις αναφορές μερικών πολύ σημαντικών μολύνσεων του αέρα π.χ., Ντονόρα, Λονδίνο, Πόζα Ρίκα. Πρόσφατα, αξιοσημείωτες πληροφορίες έχουν αναφερθεί από ιατρικά ερευνητικά εργαστήρια, οι οποίες περιγράφουν τα αποτελέσματα πειραματικών εκθέσεων μικρών ζώων σε διάφορους αέριους ρύπους. Τα ζώα που χρησιμοποιήθηκαν για την εργαστηριακή έρευνα ήταν ποντίκια, κουνέλια, αρουραίοι, ινδικά χοιρίδια και μαιμούδες.

#### 4.7.2 Επιδράσεις της μόλυνσης του αέρα στα ζώα του αγρού

Η διαδικασία με την οποία τα ζώα του αγρού δηλητηριάζονται είναι εντελώς διαφορετική από αυτή με την οποία τα ανθρώπινα όντα, εκτιθέμενα σε μολυσμένες ατμόσφαιρες, δηλητηριάζονται. Στην περίπτωση των ζώων του αγρού, έχουμε μια διαδικασία δύο βημάτων:

1. Συγκέντρωση του αεροπαραγόμενου ρύπου στη βλάστηση και στη ζωοτροφή.
2. Διαδοχική δηλητηρίαση των ζώων όταν καταναλώσουν τη μολυσμένη βλάστηση.

Στην περίπτωση των ανθρώπων που εργάζονται σε μολυσμένες ατμόσφαιρες σε εργοστάσια, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις βλαβερές ουσίες που εισπνέονται άμεσα, παρόλο που στην περίπτωση των ζώων του αγρού, ο κίνδυνος προφανώς δεν είναι στην εισπνοή του μολυσμένου αέρα, αλλά μάλλον στην απορρόφηση της ζωοτροφής που έχει μολυνθεί από ρύπους, όπως φθόριο, από τον αέρα.

Οι τρεις ρύποι οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μεγαλύτερη ζημιά των ζώων του αγρού είναι το φθόριο, το αρσενικό και ο μόλυβδος. Αυτοί οι ρύποι προέρχονται από βιομηχανικές πηγές ή από ξεσκόνισμα και ψεκασμό.

#### 4.7.3 Φθόριο

Από όλα τα ζώα του αγρού, τα βόδια και τα πρόβατα είναι τα πιο ευαίσθητα στη δηλητηρίαση με φθόριο. Τα άλογα δείχνουν να είναι σχεδόν τελείως ανθεκτικά στη δηλητηρίαση αυτή. Τα πουλερικά πιθανόν είναι τα πιο ανθεκτικά στο φθόριο από όλα τα ζώα του αγρού.

##### **Συμπτώματα έντονης δηλητηρίασης από φθόριο**

Έλλειψη όρεξης, γρήγορο χάσιμο βάρους, εξασθένηση της υγείας και της ενεργητικότητας, ανεπάρκεια, περιοδική διάρροια, μυϊκή αδυναμία και θάνατος, χαρακτηρίζουν την έντονη μορφή της δηλητηρίασης από φθόριο. Μπορεί επίσης να καταλήξει σε αξιοσημείωτη αύξηση της φθορίωσης των οστών. Αλλά η έντονη δηλητηρίαση εξαιτίας των φθοριώσεων, είναι απίθανη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.

## **Συμπτώματα χρόνιας δηλητηρίασης από φθόριο**

Το φθόριο είναι ένα συσσωρευτικό δηλητήριο υπό συνθήκες συνεχούς έκθεσης σε έντονες δόσεις. Το φθόριο είναι επίσης ένα πρωτοπλασματικό δηλητήριο.

Έχει μια αξιολογώσιμη σχέση με το ασβέστιο και παρεμβαίνει με κανονική ασβεστοποίηση. Τα ζώα έχουν παρουσιαστεί να είναι περισσότερο ανθεκτικά από τους ανθρώπους σε οδοντικά κουκιδιάσματα. Τα βόδια και τα πρόβατα είναι τα ζώα που προσβάλλονται πιο συχνά. Τα δόντια στη διαδικασία του σχηματισμού προσβάλλονται εύκολα. Για αυτό το λόγο τα συμπτώματα των δοντιών είναι ένα ευαίσθητο και μοναδικό κριτήριο της χρόνιας φθορίωσης. Η υπερβολική φθορά των κοπτήρων και τα τριμμένα δόντια μπορούν να υπάρξουν σε μεγάλα επίπεδα εισαγωγής φθορίου.

Οι βλάβες στα οστά μπορεί να εμφανιστούν σε οποιαδήποτε ηλικία. Μια υπερανάπτυξη οστών μπορεί να παρατηρηθεί στα οστά των ποδιών, του σαγονιού και στα οστά των πλευρών. Η εμφάνισή τους υποδηλώνει ότι έχει γίνει μεγάλη εισαγωγή φθορίωσης για μια μεγάλη περίοδο. Η ανεπάρκεια μπορεί να εμφανιστεί σαν ένα αποτέλεσμα υπερανάπτυξης στα οστά των ποδιών. Αυτό μπορεί να ακολουθηθεί από δυσκαμψία των αρθρώσεων. Επιδράσεις των φθοριωτικών στις κατασκευές των σκελετών είναι συνήθως μόνιμης φύσης.

Τα συμπτώματα προχωρημένης φθορίωσης εμπεριέχουν έλλειψη όρεξης, γενική κακοθυμία εξαιτίας του υποσιτισμού, μειωμένη γονιμότητα, ελαττωμένη παραγωγή γάλακτος και ανεπτυγμένη καθυστέρηση. Τα συμπτώματα που εμφανίζονται σε άλλα είδη όπως κουνέλια, άλογα και πουλερικά είναι παρόμοια με εκείνα στα βόδια και στα πρόβατα, δηλαδή κουκίδες, στίγματα και φθορά των δοντιών, υπερανάπτυξη των οστών του σκελετού, δυσκαμψία και λήθαργος και γενική κακοθυμία από υποσιτισμό και λιμοκτονία.

Ενώσω γίνεται η διάγνωση της χρόνιας δηλητηρίασης από φθόριο, πρέπει να είμαστε προσεκτικοί. Κι αυτό γιατί μπορεί να γίνει πόση αποθεμάτων νερού που ίσως περιέχουν υπερβολικά υψηλά επίπεδα φθοριωτικών. Επίσης μεταλλικά συμπληρώματα μπορούν να συμβάλλουν στην εκτίμηση της ποσότητας του φθορίου στη διατροφή. Για αυτό το λόγο ένας έλεγχος όλων των πιθανών πηγών πρέπει να γίνει όταν ερευνούμε τη φθορίωση.

#### **4.7.4 Αρσενικό**

Το αρσενικό απαντάται σαν ακαθαρσία σε πολλά μεταλλεύματα και στο κάρβουνο. Έχει ειπωθεί ότι προκαλεί δηλητηρίαση στα ζώα της φάρμας κοντά σε διάφορες βιομηχανικές επεξεργασίες και στα χυτήρια. Ακριβώς όπως οι περισσότεροι αέριοι βιομηχανικοί ρύποι, το αρσενικό μπορεί να εξαπλωθεί σε μια αξιοσημείωτη έκταση από μια αρχική πηγή. Το αρσενικό σε σκόνες ή σε ραντίσματα στα φυτά, μπορεί να οδηγήσει σε δηλητηρίαση των βοδιών.

#### ***Συμπτώματα έντονης δηλητηρίασης από αρσενικό***

Σε έντονες περιπτώσεις τα συμπτώματα είναι εκροή σάλιου μεγάλου βαθμού, δίψα, εμετός, ανησυχία, εξασθένηση, ακανόνιστοι σφυγμοί και αναπνοή. Το ζώο κτυπά τα πόδια του, κάθεται κάτω και σηκώνεται. Υπάρχει διάρροια και τα περιττώματα έχουν μυρωδιά σκόρδου και μερικές φορές είναι ματωμένα. Τα αυτιά παγώνουν, το σώμα τρέμει και αναπτύσσει ασυνήθιστη θερμοκρασία και αναταραχή. Ο θάνατος μπορεί να επέλθει σε λίγες ώρες ή μέρες.

#### ***Συμπτώματα χρόνιας δηλητηρίασης από αρσενικό***

Το αρσενικό εμφανίζεται να έχει αποκαρδιωτική επίδραση στο κεντρικό νευρικό σύστημα. Το ζώο γίνεται νωθρό και παρουσιάζει απώλεια όρεξης, μαζί με αποτελεσματικό χάσιμο βάρους. Επίσης μπορεί να υπάρξει χρόνιος βήχας και να συμβαίνει διάρροια συνεχώς. Μπορεί να υπάρξει πύκνωση του δέρματος, αναιμία και άμβλωση ή στείρωση. Χρόνια δηλητηρίαση μπορεί να καταλήξει σε ενδεχόμενη παράλυση και θάνατο.

#### ***Όρια αντοχής***

Το αρσενικό όπως και τα περιεχόμενα των διαλυμάτων του, είναι εξαιρετικά δηλητηριώδη. Έχει διαπιστωθεί ότι τα πρόβατα έχουν δηλητηριαστεί με 0.25-0.50 γραμμάρια αρσενικού ημερησίως, ενώ τα βόδια και τα άλογα μπορούν να ανεχθούν 1.3-1.9 γραμμάρια ημερησίως. Έχει επίσης διαπιστωθεί από εργαστηριακά πειράματα ότι 10 mg αρσενικού ανά κιλό σωματικού βάρους και ανά ημέρα, έχει δημιουργήσει χρόνια δηλητηρίαση από αρσενικό στα ινδικά χοιρίδια. Μια λεπτομερής έρευνα των επιδράσεων της δηλητηρίασης από αρσενικό στα ζώα του αγρού είναι απαραίτητη για να επαληθεύσει τα επίπεδα των ορίων αντοχής.

#### **4.7.5 Μόλυβδος**

Η μόλυνση της ατμόσφαιρας από μόλυβδο απαντάται εξαπτίας των διάφορων βιομηχανικών πηγών όπως χυτήρια, κλίβανοι κοκ και άλλες επεξεργασίες καύσης του κάρβουνου. Ο μόλυβδος χρησιμοποιείται επίσης στο ξεσκόνισμα και σε σπρέι που περιέχουν αρσενιούχο μόλυβδο.

##### ***Συμπτώματα έντονης μολυβδίασης***

Σε περίπτωση έντονης δηλητηρίασης, το ξεκίνημα είναι ξαφνικό και η πορεία σχετικά σύντομη. Απόλυτη σωματική εξάντληση, ζαλάδα και αδυναμία ανύψωσης, είναι μερικά χαρακτηριστικά συμπτώματα. Ο σφυγμός είναι πάντα γρήγορος αλλά αδύναμος. Μερικά ζώα μπορεί να πέσουν ξαφνικά, να έχουν ακαμψία στα πόδια και σπασμούς. Υπάρχει απόλυτη ανορεξία, παράλυση του πεπτικού συστήματος και διάρροια. Άλλα νευρικά συμπτώματα στα βόδια είναι φθορά των δοντιών και γρήγορο μάσημα της τροφής.

Στην περίπτωση των αλόγων, μπορεί να καταλήξει σε πλήρη ανορεξία, νευρική κατάπτωση, λήθαργο και θάνατο.

##### ***Συμπτώματα χρόνιας μολυβδίασης***

Η χρόνια μολυβδίαση έχει παρατηρηθεί συχνά σε άλογα που βόσκουν την τροφή τους κοντά σε χυτήρια, μεταλλωρυχεία και κοντά σε οπωροφόρα δέντρα που έχουν ψεκαστεί. Η παράλυση των μυών του λάρυγγα και η δυσκολία στην αναπνοή είναι τα κύρια συμπτώματα. Οι σπασμοί μπορούν να επέλθουν από την παράλυση του λάρυγγα και η δυσκολία στην αναπνοή μπορεί να είναι ασυνήθιστα σοβαρή και συνεχής, κατά τη διάρκεια και μετά την άσκηση.

##### ***Όρια αντοχής***

Ο μόλυβδος είναι ένα συσσωρευτικό δηλητήριο. Συνεπώς η συνεχής απορρόφηση ακόμα και πολύ μικρών δόσεων ημερησίως, μπορεί τελικά να είναι τόσο δραστική όσο μια τοξική δόση. Γι' αυτό σε περίπτωση μικρής μόλυνσης ο θάνατος μπορεί να επέλθει μετά από πολλούς μήνες, ενώ σε περίπτωση σοβαρής μόλυνσης ο θάνατος μπορεί να επέλθει μέσα σε 24 ώρες.

Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι το ανεπαρκές ασβέστιο στη διατροφή, αυξάνει την κατακράτηση μολύβδου στο σώμα του ζώου. Οι διατροφές χαμηλού ασβεστίου μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα την αποθήκευση μολύβδου πέντε φορές περισσότερο από αυτό που βρέθηκε στα ζώα που λαμβάνουν αρκετές ποσότητες ασβεστίου. Ωστόσο, επιπλέον ποσότητες ασβεστίου παραπάνω από την αρκετά σοβαρή ποσότητα δεν θα προσφέρουν περισσότερη προστασία από τη δηλητηρίαση.

#### **4.8 Τα κατοικίδια και η μόλυνση**

Έχει διαπιστωθεί ότι η μόλυνση αρχίζει να επηρεάζει τα κατοικίδια ζώα στο Τόκιο και σε άλλες πόλεις με πρόβλημα νέφους. Πολλά σκυλιά υποφέρουν από βρογχίτιδα, άσθμα και ανορεξία. Επίσης υποφέρουν από βήχα, ασθένειες της μύτης και του λάρυγγα, εξαιτίας της αυξανόμενης μόλυνσης του αέρα. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι ο μέσος όρος ζωής των κατοικίδιων στην Ιαπωνία είναι επτά με οκτώ χρόνια, ενώ στις ανεπτυγμένες χώρες είναι δώδεκα με δεκατρία χρόνια. Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι ορισμένα χημικά εργαστήρια σε πανεπιστήμια στην Ιαπωνία και ορισμένοι βιομηχανικοί εμπορικοί οίκοι, έχουν καναρίνια για να προειδοποιούν το προσωπικό για δηλητηριώδη αέρια. Όταν τα καναρίνια παύουν να κελαηδούν, τότε οι άνθρωποι ξέρουν ότι κάτι κακό συμβαίνει.

#### **4.9 Έκθεση σε ιονισμένη ακτινοβολία**

Τα ραδιενεργά σωματίδια της ατμόσφαιρας από τις δοκιμές πυρηνικών βομβών, καταλήγουν σε ιονισμένη ακτινοβολία η οποία έχει βιολογικές επιδράσεις. Οι επιδράσεις της ακτινοβολίας στα ζώα είναι ποιοτικά παρόμοιες με εκείνες στους ανθρώπους και μπορεί να είναι είτε έντονη επίδραση ακτινοβολίας ή καθυστερημένη μακροπρόθεσμη επίδραση.

Τα συμπτώματα έντονου τραυματισμού από ακτινοβολία αναπτύσσονται μέσα σε μια περίοδο ωρών έως εβδομάδων οι οποίες έπονται της έκθεσης. Μόνο τα σωματίδια της ατμόσφαιρας που λαμβάνουν χώρα σε τοποθεσίες όπου γίνονται πειράματα με πυρηνικές βόμβες μπορούν να δημιουργήσουν έντονα δραστικές ακτινοβολίες, εξαιτίας του υψηλού βαθμού ακτινοβολίας που ελήφθη από το σώμα του ζώου.

Οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις είναι:

1. Καρκίνος (συμπεριλαμβανόμενης της λευχαιμίας)
2. Συντόμευση της διάρκειας ζωής
3. Γενετική ή μεταβολική επίδραση

Για την εκδήλωση αυτών των επιδράσεων περνούν αρκετά χρόνια, ακόμα και γενιές, στην περίπτωση των γενετικών αλλαγών.

#### **4.10 Επιδράσεις της ρύπανσης του αέρα στα φυτά**

Η ρύπανση του αέρα είναι γνωστό από καιρό ότι έχει μια εχθρική επίδραση στα φυτά. Αρχικά μόνο το διοξείδιο του θείου θεωρούταν ένας επικίνδυνος ρύπος. Τώρα με την έλευση διάφορων μικροβιοκτόνων και νέων βιομηχανικών εξελίξεων, η κλίμακα των βλαβερών ρύπων έχει πολλαπλασιαστεί τρομερά. Μερικές φορές, βλάστηση πάνω από 150 χλμ μακριά από την πηγή του ρύπου έχει βρεθεί να είναι επηρεασμένη. Η βιομηχανική ρύπανση, ιδιαίτερα από τα χυτήρια, έχει προκαλέσει πλήρη καταστροφή της βλάστησης σε ορισμένες περιπτώσεις π.χ. στο Ντάκταουν, στο Τένεσι. Το νέφος του Λος Άντζελες έχει προκαλέσει εκτεταμένη ζημιά σε ορισμένες φυτείες και δάση στη Νότια Καλιφόρνια. Στην πραγματικότητα, πολλά βιβλία και αναφορές έχουν δημοσιευτεί στις ΗΠΑ σχετικά με τη ζημιά που προκαλεί η ρύπανση του αέρα στη βλάστηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η οικονομική επίπτωση της βλάβης που προκλήθηκε στις φυτείες και στα φυτά, έχει εκτιμηθεί. Αποζημίωση που ανέρχεται σε χιλιάδες δολαρίων έχει πληρωθεί για ζημιές που έχουν γίνει στις φυτείες. Στη χώρα μας υπάρχουν πολλές αναφορές της επίδρασης των ρύπων, όπως τσιμεντόσκονη, στα φυτά.

#### **4.11 Επίδραση του περιβάλλοντος στα φυτά**

Ο βασικός παράγοντας που ελέγχει την απορρόφηση αερίων από τα φυτά είναι ο βαθμός ανοίγματος των ανοιγμάτων του φύλλου. Όταν τα ανοίγματα είναι τελείως ανοικτά, η απορρόφηση είναι μέγιστη και αντίστροφα. Συνεπώς οι ίδιες συνθήκες που επηρεάζουν την απορρόφηση του αερίου (διοξείδιο του άνθρακα για τη φωτοσύνθεση), προδιαθέτουν το φυτό σε βλάβη (απορροφώντας ένα μολύνον αέριο όπως το διοξείδιο

του θείου). Οι συνθήκες που προκαλούν το άνοιγμα αυτών των ανοιγμάτων είναι υψηλή ευαισθησία στο φως (ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες), υψηλή σχετική υγρασία, αρκετά αποθέματα υγρασίας στις ρίζες του φυτού και μέτριες θερμοκρασίες.

Τα περισσότερα φυτά κλείνουν τα ανοίγματά τους τη νύχτα και συνεπώς είναι πολύ πιο ανθεκτικά τη νύχτα από την ημέρα. Αλλά ορισμένα φυτά όπως η πατάτα, τα οποία δεν κλείνουν τα ανοίγματά τους τη νύχτα, είναι το ίδιο ευαίσθητα στο σκοτάδι και στο φως.

#### **4.11.1 Αέριοι ρύποι που επηρεάζουν τα φυτά**

1. Διοξειδίο του θείου
2. Φθοριούχα μίγματα (όπως το υδροφθόριο)
3. Οζον
4. Χλώριο
5. Υδροχλώριο
6. Οξειδία του αζώτου (μονοξειδίο, διοξειδίο κλπ)
7. Αμμωνία
8. Υδρόθειο
9. Υδροκυάνιο
10. Υδράργυρος
11. Αιθυλένιο
12. Ακετυλονιτρικό υπεροξύ
13. Βοτανίσματα (σπρέι ζιζανιοκτόνων)
14. Νέφος

Οι παραπάνω ρύποι παρεμβαίνουν στην ανάπτυξη του φυτού και στο φαινόμενο της φωτοσύνθεσης. Το νέφος, η σκόνη κλπ, μειώνουν την ποσότητα φωτός που φθάνει στο φύλλο και ακόμα με το φράξιμο των ανοιγμάτων μπορεί να μειωθεί η εισαγωγή διοξειδίου του άνθρακα σε ορισμένο βαθμό και έτσι να παρέμβουν στη φωτοσύνθεση.



#### 4.12 Δομή ενός συνηθισμένου φύλλου

Μια γνώση της δομής ενός φύλλου θα μας βοηθήσει να καταλάβουμε γιατί η βλάβη απαντάται στα φυτά εξαιτίας των αέριων ρύπων. Αν εξετάσουμε ένα φύλλο, φυσιολογικά θα δούμε ένα δίκτυο πυκνών συνθέσεων, τα νεύρα, όλα αλληλοσυνδεδεμένα με τη βάση ή το κοτσάνι του φύλλου. Τα νεύρα του φύλλου δρουν σαν το μεταφορικό σύστημα για νερό και τροφή, ακριβώς όπως τα αιμοφόρα αγγεία στα ζώα. Ο ιστός του φύλλου είναι σε στρώματα με ένα δέρμα ή επιδερμικά στρώματα επάνω και κάτω και τα φωτοσυνθετικά κύτταρα ανάμεσα. Τα ανοίγματα του φύλλου είναι οι είσοδοι στο κάτω μέρος του φύλλου (και σε μερικά φύλλα στο επάνω μέρος) μέσα από τις οποίες το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται για να παίξει το ρόλο του στη φωτοσύνθεση. Αυτά τα ανοίγματα προστατεύονται από ζευγάρια ειδικών προστατευτικών κυττάρων, τα οποία ανοίγουν και κλείνουν για να επιτρέψουν στα αέρια να εισέλθουν ή να διαφύγουν από το φύλλο. Αέρια με τέτοια συμπεριφορά, περιλαμβάνουν ρύπους όπως το διοξείδιο του θείου.

#### 4.13 Μορφές βλάβης στα φύλλα

Η βλάβη στα φύλλα παίρνει αρκετές μορφές :

1. Νέκρωση: Η νέκρωση είναι η θανάτωση ή κατάρρευση του ιστού.
2. Χλώρωση: Η χλώρωση είναι η απώλεια ή μείωση του πράσινου χρώματος του φυτού, της χλωροφύλλης. Η απώλεια της χλωροφύλλης συνήθως έχει σαν αποτέλεσμα ένα ξεθωριασμένο ή κίτρινο δείγμα. Η χλώρωση γενικά υποδηλώνει την έλλειψη ορισμένων τροφών που απαιτούνται από το φυτό. Κατά πολλές εκτιμήσεις είναι ανάλογη της αναιμίας στα ζώα.
3. Αποκοπή: Η αποκοπή του φύλλου είναι το πέσιμο των φύλλων.
4. Κύρτωμα: Το κύρτωμα του φύλλου είναι μια καμπύλωση προς τα κάτω εξαιτίας του μεγαλύτερου βαθμού ανάπτυξης στην άνω επιφάνεια.

*Σημειώσεις: 1. Ιστοί που τραυματίζονται σοβαρά από αέριους ρύπους έχουν συνήθως ένα χαρακτηριστικό χρώμα. Το άσπρισμα συνδέεται με το διοξείδιο του θείου, το κίτρινο με την αμμωνία, το καφετί χρώμα με το θείο. Μια τάση προς το ασημί ή το μπρούτζινο χρώμα στην κάτω επιφάνεια ορισμένων φύλλων συσχετίζεται με τη βλάβη από ακετυλονιτρικό υπεροξύ.*

*2. Φυτοτοξικό είναι το όνομα που δίνεται στο φυτό που βλάπτει τα περιεχόμενα.*

## 4.14 Είδη βλαβών των φυτών

### **Έντονη βλάβη**

Απορρέει από βραχυχρόνια έκθεση σε σχετικά μεγάλες συγκεντρώσεις που μπορούν να απαντηθούν σε καταστάσεις θειαφισμού. Οι επιδράσεις παρατηρούνται μέσα σε μερικές ώρες έως μερικές ημέρες και μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα εμφανή σημάδια στα φύλλα, εξαιτίας μιας κατάρρευσης και θανάτου των κυττάρων. Αυτό οδηγεί σε νεκρωτικά δείγματα π.χ. περιοχές νεκρού ιστού.

### **Χρόνια βλάβη**

Απορρέει από μακροπρόθεσμη, χαμηλού επιπέδου, έκθεση και συνήθως προκαλεί χλώρωση ή αποκοπή του φύλλου.

### **Καθυστέρηση ανάπτυξης ή απόδοσης**

Εδώ η βλάβη είναι με τη μορφή επίδρασης στην ανάπτυξη χωρίς εμφανή σημάδια (αόρατη βλάβη). Συνήθως απαντάται μια καταστολή της ανάπτυξης ή της απόδοσης. Ενόσω το φυτό υποφέρει, καθώς αποφασίζουμε σχετικά με τη μορφή της βλάβης, κάποιος πρέπει να διακρίνει προσεκτικά τις εχθρικές επιδράσεις που προκαλούνται από τη ρύπανση του αέρα, από αυτές που προέρχονται από άλλους παράγοντες. Οι ασθένειες των φυτών μπορεί να δείξουν συμπτώματα τα οποία είναι παρόμοια με εκείνα που προκαλούνται από τη ρύπανση του αέρα. Υψηλές θερμοκρασίες, ελλιπής φροντίδα των φυτών, μείωση των τροφών και του νερού, μπορεί επίσης να προκαλέσει μια εμφάνιση η οποία είναι παρόμοια με αυτή ενός φυτού που έχει βλαφτεί από τη ρύπανση του αέρα. Μπορεί επίσης να είναι εξαιτίας ζημιάς από έντομο. Επομένως, καθόσω γίνεται διάγνωση των επιδράσεων της ρύπανσης του αέρα, κάποιος πρέπει να μελετήσει παράγοντες όπως ασθένεια του φυτού, ιστορικό διατροφής, ζημιά από τον καιρό, ζημιά από έντομο και τη φύση των ρύπων στην περιοχή.

#### 4.15 Επίδραση των αερίων ρύπων στα φυτά

Η επίδραση διάφορων ρύπων όπως διοξείδιο του θείου, όζον, φθωριωτικά κλπ, φαίνονται στον πίνακα 4.15.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.15.1

<u>Ρύπος</u>	<u>Δόση</u>	<u>Επίδραση</u>
1. Διοξείδιο του θείου	Μικρή Μεγάλη	Ολοκληρωτικό χλωρωτικό άσπρισμα στα νεύρα των φύλλων Νέκρωση στα νεύρα των φύλλων και σκελετωμένα φύλλα
2. Όζον	Μικρή Μεγάλη	Σημάδια στις άνω επιφάνειες, πρόωρη γήρανση και παρεμποδιζόμενη ανάπτυξη Κατάρρευση του φύλλου, νέκρωση και Άσπρισμα
3. Φθοριώσεις	Αθροιστική	Νέκρωση στην άκρη του φύλλου
4. Διοξείδιο του αζώτου	Μικρή	Παρεμποδιζόμενη ανάπτυξη, άσπρισμα φύλλων
5. Αιθυλένιο	Μικρή	Κύρτωμα, πτώση φύλλων
6. Ακετυλονιτρικό υπεροξύ	Μικρή	Απόχρωση μπρούτζου της κατώτερης επιφάνειας του φύλλου (άνω επιφάνεια φυσιολογική), παρεμποδιζόμενη ανάπτυξη. Νέα φύλλα πιο ευαίσθητα

#### 4.16 Οικονομικές συνέπειες της ρύπανσης του αέρα

##### 4.16.1 Εισαγωγή

Η ζημιά της ρύπανσης του αέρα σε ιδιοκτησία είναι μια πολύ σημαντική οικονομική πλευρά της ρύπανσης. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, στη Μεγάλη Βρετανία, στη Γαλλία και σε πολλές άλλες ευρωπαϊκές χώρες, αυτό το πρόβλημα έχει διερευνηθεί με λεπτομέρεια και επιτυχημένες προσπάθειες έχουν γίνει για να μετασχηματίσουν την αξιοσημείωτη βλάβη από τη ρύπανση του αέρα σε όρους οικονομικού αντίκτυπου. Η ζημιά της ρύπανσης του αέρα σε ιδιοκτησία καλύπτει ένα πλατύ φάσμα: διάβρωση των μετάλλων, φθορά των επιφανειών των κτιρίων, ξεθώριασμα βαμμένων υλικών,

διάσπαση ελαστικού, καταστροφή της βλάστησης, επιδράσεις στα ζώα καθώς επίσης και ανάμειξη με την παραγωγή και τη συντήρηση. Μια άλλη σημαντική οικονομική επίδραση είναι η επιδείνωση των έργων τέχνης. Στη χώρα μας σήμερα είναι επιτακτική ανάγκη να διερευνηθεί και να μελετηθεί αυτό το πρόβλημα λεπτομερώς και να εκφραστεί η ζημιά σε ιδιοκτησία με οικονομικούς όρους, καθώς πολύ μικρή δουλειά έχει γίνει σε αυτή την κατεύθυνση μέχρι τώρα.

#### 4.16.2 Μηχανισμός φθοράς σε μολυσμένες ατμόσφαιρες

Οι αέριοι ρύποι προκαλούν βλάβη σε υλικά με πέντε μηχανισμούς:

1. Γδάριμο: Στερεά σωματίδια επαρκούς μεγέθους που ταξιδεύουν με μεγάλες ταχύτητες μπορούν να έχουν αποξεστική λειτουργία. Επίσης μεγάλα, με κοφτερή κόψη, σωματίδια που βρίσκονται στα υφάσματα μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά.
2. Κατακάθιση και αφαίρεση: Στερεά και υγρά σωματίδια που έχουν κατακαθίσει σε μια επιφάνεια, μπορεί να μη βλάψουν το υλικό αυτό καθεαυτό, αλλά μπορεί να καταστρέψουν την επιφάνειά του. Ωστόσο η αφαίρεση αυτών των σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει φθορά. Παρόλο που ένα απλό πλύσιμο ή καθάρισμα μπορεί να μην προκαλέσει αξιοπρόσεκτη φθορά, το συχνό πλύσιμο τελικά προκαλεί.
3. Άμεση χημική προσβολή: Ορισμένοι αέριοι ρύποι αντιδρούν αμέσως με υλικά για να προκαλέσουν φθορά. Για παράδειγμα το άσπρισμα των μαρμάρων από το διοξείδιο του θείου, το μαύρισμα του ασημιού από το υδρόθειο και η εγχάραξη μιας μεταλλικής επιφάνειας από μια όξινη ομίχλη.
4. Έμμεση χημική προσβολή: Κάποια υλικά απορροφούν ορισμένους ρύπους και βλάπτονται όταν οι ρύποι υφίστανται χημικές αλλαγές. Για παράδειγμα το διοξείδιο του θείου που απορροφάται από το δέρμα, μετατρέπεται σε θειικό οξύ, το οποίο επιδεινώνει την κατάσταση του δέρματος.
5. Διάβρωση: Η ατμοσφαιρική επιδείνωση των σιδηρούχων μετάλλων γίνεται με μια ηλεκτροχημική διαδικασία π.χ. διάβρωση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της δράσης των αερίων ρύπων οι οποίοι διευκολύνονται από την παρουσία της υγρασίας.

#### 4.16.3 Παράγοντες που επιδρούν στην ατμοσφαιρική επιδείνωση

Υπάρχουν τρεις κύριοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το βαθμό προσβολής των βλαβερών ρύπων. Αυτοί είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, το ηλιακό φως και η κίνηση του αέρα.

1. **Υγρασία:** Η παρουσία της υγρασίας στην ατμόσφαιρα βοηθά σημαντικά την εξέλιξη της διάβρωσης. Χωρίς υγρασία στην ατμόσφαιρα θα υπήρχε μικρή ατμοσφαιρική διάβρωση, ακόμα και στο πιο μολυσμένο περιβάλλον. Στην περίπτωση του διοξειδίου του θείου και διαφόρων συνδυασμών σωματιδίων, έρευνες έχουν δείξει ότι ο βαθμός διάβρωσης των μετάλλων αυξάνεται όσο η σχετική υγρασία στον αέρα αυξάνει.
2. **Θερμοκρασία:** Η θερμοκρασία επηρεάζει το βαθμό της χημικής αντίδρασης και συνεπώς επηρεάζει το βαθμό επιδείνωσης.
3. **Ηλιακό φως:** Εκτός από την παραγωγή βλαβερών παραγόντων όπως το όζον, μέσα από μια σειρά πολύπλοκων φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα, το ηλιακό φως μπορεί να προκαλέσει άμεση επιδείνωση ιδιαίτερων υλικών. Αλλά στις περιπτώσεις της φθοράς ιδιαίτερων βαφών ή διάσπασης ελαστικών, η βλάβη εξαιτίας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί πάντα να είναι διαφορετική από αυτή που προκαλείται από το όζον.
4. **Κίνηση αέρα:** Η κατεύθυνση του ανέμου είναι ένας σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη σε μέρη όπου η επιδείνωση προκαλείται από ρύπους που ελευθερώνονται από κοντινά εργοστάσια. Για παράδειγμα ζημιά στις γεωργικές σοδειές στις γύρω περιοχές των εργοστασίων. Ομοίως η ταχύτητα του ανέμου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον προσδιορισμό της επιρροής των αέριων ρύπων στις προσβαλλόμενες επιφάνειες. Οι ρύποι που υπάρχουν στον αέρα και κινούνται με μεγάλες ταχύτητες έχουν αποξεστικές επιδράσεις και μπορούν να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις. Σε βιβλιοθήκες όπου αποθηκεύονται τα δεμένα με δέρμα βιβλία, η κίνηση του αέρα είναι ένας αποφασιστικός παράγοντας όταν ο αέρας έχει μολυνθεί από το διοξείδιο του θείου.

#### 4.17 Οικονομικές απώλειες (υλικό κόστος)

Διάφορες οικονομικές απώλειες συμβαίνουν εξαιτίας των υλικών ζημιών που οφείλονται στους αέριους ρύπους. Η ρύπανση του αέρα βλάπτει τα υλικά κυρίως με

διάβρωση των μετάλλων. Ο κύριος αέριος ρύπος που είναι υπεύθυνος για τη μεταλλική διάβρωση είναι το διοξείδιο του θείου. Με την παρουσία του οξυγόνου, το διοξείδιο του θείου μετατρέπεται αργά σε τριοξείδιο του θείου, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να αντιδράσει με την υγρασία στον αέρα και να δημιουργήσει θειικό οξύ. Η κατακάθιση αυτού του οξέος στα μεταλλικά μέρη των στεγών των σπιτιών, των μαρκιζών και άλλων μεταλλικών εξοπλισμών, έχει σαν αποτέλεσμα αξιοσημείωτη απώλεια από ατμοσφαιρική διάβρωση στις περισσότερες αστικές κοινωνίες. Οι απώλειες από ατμοσφαιρική διάβρωση στη Νέα Υόρκη εκτιμήθηκαν το 1955 σε 6 εκατομμύρια δολάρια το χρόνο.

Η αιθάλη άνθρακα επιταχύνει τη διαδικασία της διάβρωσης, πιθανόν εξαιτίας της απορρόφησης ή προσρόφησης των αέριων ρύπων στην ύλη των σωματιδίων. Άλλες σημαντικές μεταβλητές είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία.

Στα μέταλλα τα οποία επηρεάζονται περιλαμβάνεται ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο σίδηρος. Η οικονομική απώλεια εξαιτίας της διάβρωσης που προκαλείται από το μολυσμένο αέρα πρέπει να μας κάνει να λάβουμε υπόψη τη φθορά σε αντικείμενα όπως χαλύβδινες ράγες, χαλύβδινες γραμμές του τραμ, υπερυψωμένα σύρματα, μεταλλικά μέρη γεφυρών, ηλεκτρικές συνδέσεις κλπ. Τέτοια κόστη μπορούν μόνο να εκτιμηθούν και δεν μπορούν να γίνουν σαφείς υπολογισμοί. Επίσης επιπρόσθετα κόστη βαψίματος, αντικατάστασης και αλλαγής πρέπει να μελετηθούν στην εκτίμηση των συνολικών οικονομικών απωλειών που οφείλεται στη διάβρωση εξαιτίας των άμεσων ή έμμεσων επιδράσεων. Οι διάφορες οικονομικές απώλειες εξαιτίας της ρύπανσης του αέρα είναι οι ακόλουθες.

#### 4.17.1 Υλικά κτιρίων

Τα υλικά των κτιρίων είναι διαβρωμένα και παραμορφωμένα από τους αέριους ρύπους με πολλούς τρόπους σχετιζόμενους με τη συνηθισμένη διαδικασία οξειδωσης. Ο καπνός και τα σωματίδια προσκολλούν στην πέτρα, στα τούβλα και σε άλλες επιφάνειες των κτιρίων και παράγουν άσχημα επικαλυπτικά στρώματα.

Το βάψιμο της πέτρας του κτιρίου με θειικά συνθετικά και διάφορα σωματίδια, απαιτεί επιπρόσθετα έξοδα καθαρισμού. Ο βαθμός των οικονομικών επιπτώσεων της μόλυνσης, οι απώλειες εξαιτίας του κόστους συντήρησης στο εσωτερικό και στο εξωτερικό των σπιτιών και των άλλων κτιρίων καθώς επίσης και η υποτίμηση των αντικειμένων πρέπει να μελετηθούν και να εκτιμηθούν κατάλληλα.

#### 4.17.2 Μπογιές

Η μπογιά επίσης επηρεάζεται από τους αέριους ρύπους. Περιοχές μεγάλης μόλυνσης απαιτούν πιο συχνό βάψιμο. Οι μπογιές περιέχουν βαφικές ύλες και ένα φορέα. Οι βαφικές ύλες εξασφαλίζουν το χρώμα και την αντοχή. Ο φορέας κρατά τη βαφική ύλη στην επιφάνεια. Μαζί βελτιώνουν την ποιότητα της επιφάνειας και προστατεύουν το εσωτερικό υλικό από τη διάβρωση ή την οξείδωση. Οι αέριοι ρύποι μπορούν να περιορίσουν και τις δύο αυτές λειτουργίες βλάπτοντας το προστατευτικό επικαλυπτικό στρώμα και εκθέτοντας την εσωτερική επιφάνεια σε προσβολή.

#### 4.17.3 Υφάσματα

Τα θειικά οξείδια προκαλούν φθορά στις φυσικές και σε ορισμένες συνθετικές υφασμάτινες ίνες. Για παράδειγμα το βαμβάκι, το οποίο είναι μια κυτταρική ίνα, εξασθενίζει με το διοξείδιο του θείου. Η πιο συνηθισμένη μορφή μόνιμης ζημιάς στα υφάσματα είναι η φθορά των νάιλον κοντών παντελονιών. Αυτό συνήθως παρατηρείται σε ομίχλη θειικού οξέος.

Οι κουρτίνες υποφέρουν άσχημα σε μολυσμένες περιοχές επειδή κρέμονται σε ανοικτά παράθυρα και σε ορισμένο βαθμό χρησιμεύουν σαν φίλτρα για τη σκόνη, την αιθάλη και τις όξινες σταγόνες.

Το ξεθώριασμα της βαφής των υφασμάτων από τους αέριους ρύπους, κυρίως οξείδια του αζώτου και του όζοντος, είναι ένα πρόβλημα στη βιομηχανία υφασμάτων. Έχει αναφερθεί ότι ο συνδυασμός όζοντος και υψηλής υγρασίας προκαλεί σημαντικό ξεθώριασμα κάποιων βαφών στα βαμβακερά και στα τεχνητού μεταξιού υφάσματα.

#### 4.17.4 Ελαστικά

Μια άλλη μορφή ζημιάς ιδιοκτησίας η οποία γίνεται όλο και περισσότερο συνηθισμένη στις ΗΠΑ και στις υπόλοιπες χώρες είναι το σπάσιμο των ελαστικών. Οι περιοχές που επηρεάζονται περισσότερο είναι τα πλαϊνά τοιχώματα των ελαστικών και διάφοροι τύποι ηλεκτρικών μονώσεων. Αυτού του είδους η ζημιά προξενείται από το όζον. Περισσότερο γρήγορη αποτυχία της ελαστικής μόνωσης σε ατμόσφαιρες με

μεγάλη περιεκτικότητα όζοντος έχει παρατηρηθεί επίσης στους υποσταθμούς μετάδοσης ισχύος και σε τηλεφωνικά κέντρα.

#### 4.17.5 Δέρμα

Το διοξείδιο του θείου κάνει το δέρμα να χάνει αρκετή από τη δύναμή του και τελικά να αποσυντίθεται. Η αποθηκευμένη ποσότητα των δεμένων με δέρμα βιβλίων στις βιβλιοθήκες μπορεί να δημιουργήσει ένα σοβαρό πρόβλημα. Οι βιβλιοδεσίες των βιβλίων που βρίσκονται εκτεθειμένα σε ανοικτό χώρο δωματίων με μολυσμένο αέρα, έχουν βρεθεί φθαρμένες πολύ πιο γρήγορα από εκείνες που βρίσκονται σε περιορισμένο χώρο ή σε γυάλινες θήκες. Αρχικά η χημική αποσύνθεση της βιβλιοδεσίας του βιβλίου μπορεί να παρατηρηθεί από τις ρωγμές που λαμβάνει χώρα στους επάνω εσωτερικούς αρμούς του βιβλίου. Οι ρωγμές γενικά απλώνονται ξεχωριστά και όσο εκτίθεται περισσότερο υλικό, το δέρμα χάνει την ανθεκτικότητά του και αποσυντίθεται σε μια κοκκινοκαφετιά σκόνη. Μετά από κάποιο καιρό όλο το βιβλίο μπορεί να αποσυντεθεί.

#### 4.17.6 Χαρτί

Χαρτί που φτιάχτηκε περίπου πριν από το 1750 δεν έχει βλαφτεί σημαντικά από το διοξείδιο του θείου. Αυτό συμβαίνει γιατί ιστορικά, από αυτή την ημερομηνία και μπροστά εισήχθησαν οι χημικές μέθοδοι για την κατασκευή του χαρτιού. Προφανώς οι μικρές ποσότητες μεταλλικών ακαθαρσιών στο «σύγχρονο» χαρτί επιταχύνουν τη μετατροπή του απορροφούμενου διοξειδίου του θείου σε θειικό οξύ, με την παρουσία υγρασίας. Η αναλογία θειικού οξέος ορισμένων χαρτιών έχει βρεθεί ότι είναι ένα τοις εκατό, το οποίο κάνει το χαρτί εξαιρετικά εύθραυστο. Έχει βρεθεί ότι έκθεση βιβλίων και χαρτιού γραφής στο διοξείδιο του θείου σε συγκεντρώσεις 2-9 ppm για 10 ημέρες τα έκανε εύθραυστα και μείωσε την αντοχή σε τσάκιση.



#### **4.17.7 Γυαλικά και κεραμικά**

Παρόλο που τα γυαλικά και το σμάλτο είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στη χημική δράση των αέριων ρύπων, έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια μιας μακράς έκθεσης τριών χρόνων το σμάλτο έδειξε μια αλλαγή στην εμφάνιση της επιφάνειάς του. Η υγρασία και η ατμοσφαιρική ρύπανση με όξινο περιεχόμενο δείχνουν να έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στη φθορά της επιφάνειας.

Τα φθοριωτικά και ειδικά το υδρόθειο είναι ικανά να προσβάλλουν μια μεγάλη γκάμα κεραμικών υλικών και γυαλικών εξαιτίας της δυνατότητας που έχουν να αντιδρούν με ενώσεις σιλικόνης. Από εδώ και πέρα η βλάβη των φθοριωτικών στα υλικά εμφανίζεται να είναι μια ασήμαντη οικονομική επίπτωση.

#### **4.17.8 Βιομηχανία ηλεκτρονικών**

Η σωματιδιακή ύλη και οι αέριοι ρύποι είναι μόνιμες πηγές προβλημάτων για τη βιομηχανία ηλεκτρονικών. Πολλά είδη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και εξοπλισμών έχουν πάθει ζημιά. Ηλεκτρικές συνδέσεις χαμηλότερης ισχύος (μιλιβόλτ, μικροαμπέρ), που χρησιμοποιούνται σε πολλές ηλεκτρικές συσκευές, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα εξαρτήματα. Οι αέριοι ρύποι δημιουργούν λεπτό μονωτικό κάλυμμα που εμφανίζεται σε συνδέσεις και έχει σαν αποτέλεσμα τη βλάβη των εξοπλισμών.

#### **4.17.9 Πλύσιμο και στέγνωμα**

Προσωρινή ζημιά ιδιοκτησίας προκύπτει από τη μόλυνση των επιφανειών από αέριους ρύπους. Εδώ οι οικονομικές συνέπειες είναι το κόστος καθαρισμού. Ζημιές περισσότερο κοινά αντιμετωπιζόμενες είναι το επιπρόσθετο κόστος πλυσίματος και στεγνώματος φορεμάτων και άλλων υφασμάτων. Οι περισσότερες από αυτές τις ζημιές προξενούνται από τον καπνό, την αιθάλη και την πτώση σκόνης.

#### **4.17.10 Βλάστηση**

Η ζημιά στη βλάστηση σαν συνέπεια της ρύπανσης του αέρα είναι μια πολύ σημαντική περίπτωση οικονομικής ζημιάς εξαιτίας της μόλυνσης του αέρα. Περισσότερα έχουν εξηγηθεί στις επιδράσεις των αέριων ρύπων στα φυτά.

#### **4.17.11 Απροσδιόριστη ζημιά**

Μια άλλη πολύ σημαντική οικονομική επίπτωση της ρύπανσης του αέρα είναι η απροσδιόριστες απώλειες εξαιτίας μεγάλων ζημιών σε αντικείμενα τέχνης σε όλο τον κόσμο. Για παράδειγμα επιδράσεις στο Ταζ Μαχάλ ( Άγρα ) και στον Παρθενώνα (Αθήνα ).

#### **4.18 Άλλες οικονομικές ζημιές**

Υπάρχουν πολλές άλλες οικονομικές ζημιές εξαιτίας της αέριας ρύπανσης που πρέπει να μελετηθούν. Αυτές είναι οι παρακάτω:

1. Ζημιά εξαιτίας της επίδρασης της ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία.
2. Ζημιά εξαιτίας της επίδρασης της ρύπανσης στα ζώα του αγρού.
3. Αυξημένο κόστος μεταφοράς σε περιόδους αιθαλομίχλης.
4. Ζημιά εξαιτίας της μείωσης του τουρισμού, η οποία οφείλεται στην επίδραση της ρύπανσης στα έργα τέχνης και στα τουριστικά κέντρα.
5. Έξοδα που προκύπτουν από την υιοθεσία τεχνικών μετρήσεων για τη μείωση του καπνού ή εκπομπές από εργοστάσια.
6. Αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ισχύος εξαιτίας της μετακίνησης σκόνης και άλλων χρήσεων του καπνού από ηλεκτροπαραγωγικούς ή πυρηνικούς σταθμούς.
7. Ζημιές εξαιτίας των άκαυστων υπολειμμάτων στις καμινάδες, στους κινητήρες και σε διάφορες μηχανές, τα οποία συμβάλλουν στη γενική μόλυνση.
8. Έξοδα στη σύνδεση με το διοικητικό οργανισμό έλεγχου ρύπανσης.
9. Κόστος ιατρικής, γεωργικής, χημικής και φυσικοχημικής έρευνας που σκοπό έχει να μελετήσει λεπτομερώς τεχνικές για τη μέτρηση και των έλεγχο της αέριας ρύπανσης.

Δυστυχώς δεν είναι δυνατόν να ερμηνεύσουμε αμέσως όλες τις επιδράσεις της ρύπανσης του αέρα με οικονομικούς όρους. Οι οσμές για παράδειγμα, αποτελούν μεγάλη ενόχληση για τα άτομα, αλλά είναι δύσκολο να εκτιμηθεί στατιστικά. Ομοίως ο βλαβερός καπνός που προσβάλλει την υγεία μπορεί να εκφραστεί σαν μια «απώλεια» στο θέμα της αύξησης του κόστους, για φροντίδα και θεραπεία. Αλλά δεν είναι εύκολο να εκφραστεί τις φυσικές και φυσιολογικές επιπτώσεις με χρηματικούς όρους.

Ο πίνακας 4.18.1 παρουσιάζει μια γενική εικόνα των ζημιών που προκαλεί η αέρια ρύπανση σε διάφορα υλικά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.18.1**

<u>Υλικά</u>	<u>Κύριοι αέριοι ρύποι</u>	<u>Επιπτώσεις</u>
Μέταλλα	SO <sub>2</sub> , καυστικά αέρια	Διάβρωση, φθορά της επιφάνειας, απώλεια μεταλλικότητας
Υλικά οικοδομών	SO <sub>2</sub> , καυστικά αέρια Σωματίδια	Αποχρωματισμός
Μπογιά	SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, σωματίδια	Αποχρωματισμός
Υφάσματα και βαφές υφασμάτων	SO <sub>2</sub> , καυστικά αέρια και NO <sub>2</sub> , όζον	Φθορά και μειωμένη ανθεκτικότητα
Ελαστικά	Οξειδωτικά, όζον	Σπάσιμο, εξασθένηση
Δέρμα	SO <sub>2</sub> , καυστικά αέρια	Αποσύνθεση, κονιορτοποιημένη επιφάνεια
Χαρτί	SO <sub>2</sub> , καυστικά αέρια	Ευθραυστότητα
Κεραμικά	Καυστικά αέρια	Αλλαγή εμφάνισης της επιφάνειας

#### 4.19 Επιδράσεις στα έργα τέχνης

Οι αέριοι ρύποι έχουν προξενήσει μεγάλες ζημιές σε αντικείμενα τέχνης σε όλο το βιομηχανοποιημένο κόσμο. Ορισμένα θαυμάσια μνημεία της αρχαιότητας έχουν φθαρεί με τον καιρό από τους ρύπους. Αυτό μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό σε πολλά έργα τέχνης όπως γλυπτά και ανάγλυφα σε ιστορικά κτίρια και σε καθεδρικούς ναούς. Μερικά παραδείγματα τέτοιων έργων τέχνης τα οποία έχουν προσβληθεί από τη ρύπανση του αέρα περιγράφονται παρακάτω.

#### 4.19.1 Επιδράσεις στα έργα τέχνης σε διάφορες χώρες του κόσμου

Ο Παρθενώνας στην Αθήνα έχει βλαφτεί τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της αέριας ρύπανσης. Η βελόνα της Κλεοπάτρας, ο μεγάλος πέτρινος οβελίσκος που μεταφέρθηκε από την Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου στο Λονδίνο, υπέστη περισσότερη φθορά στην υγρή, γεμάτη καπνούς, όξινη ατμόσφαιρα του Λονδίνου τα τελευταία 90 χρόνια από ότι τα προηγούμενα 3000 ή περισσότερα χρόνια της ιστορίας του. Ένας άλλος αιγυπτιακός οβελίσκος στη Νέα Υόρκη δείχνει παρόμοια φθορά.

Παρόμοιες περιπτώσεις έχουν αναφερθεί και από άλλα μέρη του κόσμου. Το Κολοσσαίο στη Ρώμη και η Βασιλική του Αγίου Μάρκου στη Βενετία της Ιταλίας δείχνουν σημάδια φθοράς, πιθανόν εξαιτίας της αέριας ρύπανσης. Στη Γαλλία έχει αναφερθεί ότι περιβαλλοντολόγοι έχουν απομακρύνει αγάλματα από τους εξωτερικούς χώρους των καθεδρικών ναών και τα έχουν αντικαταστήσει με αντίγραφα. Ομοίως αρχαίοι ναοί και κτίρια σε βιομηχανικές περιοχές της Ιαπωνίας αντιμετωπίζουν τους κινδύνους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μπογιές, βιβλία, υφάσματα, αρχαίες ενδυμασίες και άλλα αντικείμενα τέχνης έχουν υποστεί φθορές.

Φυσικά είναι αδύνατο να γίνει επαρκής αντικατάσταση ή αναπλήρωση των ζημιών που έχουν υποστεί τα έργα τέχνης. Είναι οριστικές και μη αναστρέψιμες απώλειες. Είναι αδύνατο να εκτιμήσουμε τις απώλειες με οικονομικούς όρους για αυτές τις απροσδιόριστες περιουσίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να τις συντηρήσουμε χρησιμοποιώντας ειδικά συντηρητικά. Αλλά δεν είναι πάντα επιτυχημένο αυτό. Ευαίσθητα αντικείμενα τέχνης που είναι εκτεθειμένα μέσα σε κτίρια, μπορούν να τοποθετηθούν σε ερμητικά σφραγισμένα κιβώτια. Ο κλιματισμός μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν προστατευτικό μέτρο.

#### 4.20 Εκτίμηση ζημιών

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το κόστος της αέριας ρύπανσης με εκτίμηση των επιζήμιων επιδράσεών της. Κύριες απώλειες, όπως ζημιές στη γεωργία, έχουν εκτιμηθεί αλλά πολλές από τις οικονομικές επιπτώσεις της μόλυνσης είναι έμμεσες ή κρυμμένες και έτσι είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Για παράδειγμα επιπρόσθετα κόστη καθαρισμού εξαιτίας των λερωμένων ρούχων, ιατρικά έξοδα των ανθρώπων που έχουν βλαφτεί και ζημιές στα έργα τέχνης. Παρά τις δυσκολίες αυτές, έχουν γίνει κάποιες εκτιμήσεις ειδικά σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., η

Μεγάλη Βρετανία και η Γαλλία. Εκτιμάται ότι ζημιά που αναλογεί σε 3 εκατομμύρια δολάρια γίνεται σε καλλιέργειες στην περιοχή του Λος Άντζελες\_ κάθε χρόνο από το 1953.

#### **4.20.1 Αποτίμηση ζημιών βάση του υπολογισμού**

Η ζημιά σε υλικά εξαιτίας της αέριας ρύπανσης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με:

- (1) Τον τύπο του αντικειμένου που έχει προσβληθεί (φυτά, προϊόντα μετάλλων κλπ)
- (2) Το μέγεθος ζημιάς (μερική ή ολική)

Ο τύπος του ρύπου που προκαλεί ζημιά πρέπει επίσης να μελετηθεί.

## 5. ΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΤΟΥΣ

Η μόλυνση ορίζεται ως η εισαγωγή άμεσα ή έμμεσα από τον άνθρωπο στο περιβάλλον, ουσιών ή προϊόντων ενεργειακών διεργασιών, που προκαλούν βλάβες στην ανθρώπινη υγεία, ζημιά στο φυσικό πλούτο και διατάραξη της δομής και της ισορροπίας του οικοσυστήματος.

Η βιολογία ορίζει τη μόλυνση του περιβάλλοντος ως ανεπιθύμητη αλλαγή στα φυσικά, χημικά ή βιολογικά χαρακτηριστικά ενός οικοσυστήματος. Ο παραπάνω ορισμός περιλαμβάνει πολλές μορφές μόλυνσης του περιβάλλοντος ( νερό, έδαφος κ.λ.π ), από τις οποίες εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με τη μόλυνση του αέρα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να κάνουμε τον εξής διαχωρισμό. Οι χημικές ουσίες όπως το διοξείδιο του θείου, που προέρχεται από τα ηφαίστεια ή το μεθάνιο που προέρχεται από την αποσύνθεση των φυτικών οργανισμών, θεωρούνται ότι δεν προκαλούν μόλυνση, ενώ αντίθετα το διοξείδιο του θείου που εκλύεται από την καύση του κάρβουνου ή το μεθάνιο που προέρχεται από την καλλιέργεια ρυζιού, θεωρείται ότι προκαλούν μόλυνση.

Για παράδειγμα το ραδόνιο, ένα ραδιενεργό αέριο το οποίο είναι εξαιρετικά επιβλαβές για το οικοσύστημα, θεωρείται ότι δεν συμβάλει στο πρόβλημα μόλυνσης, αφού δεν προέρχεται από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι διαχωριστικές γραμμές γίνονται πιο δυσδιάκριτες όταν έχουμε να κάνουμε με βιογενείς εκπομπές οι οποίες επηρεάζονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, π.χ υπάρχουν απόλυτα φυσικές βιογενείς εκπομπές τερπενίου από τα δάση, που με τις ανθρώπινες δραστηριότητες μέσα σε αυτά έχουμε έναν έμμεσο επηρεασμό των βιογενών αυτών εκπομπών.

Η μόλυνση με την οποία θα ασχοληθούμε παρακάτω έχει να κάνει με τις υγρές, στερεές ή αέριες ουσίες που εκπέμπονται στον αέρα από σταθερές ή κινητές πηγές και κινούνται διαδοχικά μέσω αερίων δρόμων και ίσως συμμετέχουν σε χημικούς ή φυσικούς μετασχηματισμούς πριν τελικά καταλήξουν πάλι στην επιφάνεια. Οι ουσίες αυτές πρέπει να αλληλεπιδράσουν με κάτι άλλο πριν έχουν αντίκτυπο στο περιβάλλον. Η αλληλεπίδραση αυτή για παράδειγμα μπορεί να γίνει με άλλα μόρια της ατμόσφαιρας (φωτοχημικός μετασχηματισμός όζοντος, υδρογονάνθρακες) με υγρό νερό (σχηματισμός όξινης βροχής από  $SO_2$ ), με βλάστηση (άμεση επίδραση στο όζον). Η μόλυνση από τις ανθρώπινες δραστηριότητες ονομάζεται ανθρωπογενής ενώ από τα φυτά ή ζώα βιογενής.

Η ατμοσφαιρική μόλυνση δεν είναι ένα καινούργιο φαινόμενο. Στο μεσαίωνα, καπνός που προέρχονταν από καύση κάρβουνου, προκάλεσε σοβαρά προβλήματα και

ο βασιλιάς Εδουάρδος Ι απαγόρευσε την καύση στα καμίνια άσβεστου, στους ξηραντήρες στο Λονδίνο.

Πιο πρόσφατα, το 1952, αιθαλομίχλη που είχε καλύψει το Λονδίνο για μια εβδομάδα, είχε συνέπεια τον θάνατο 4.000 ανθρώπων.

Στις Η.Π.Α. το 1948, στην πόλη Donora της πολιτείας της Πενσυλβάνια, 20 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους σε ένα τετραήμερο, λόγω ατμοσφαιρικής μόλυνσης και άλλοι 6.000 αρρώστησαν σε σύνολο 14.000 κατοίκων, δηλαδή είχαμε το υψηλότερο ποσοστό θανάτων ανά κάτοικο που έχει σημειωθεί μέχρι σήμερα.

Τα παραπάνω επεισόδια ήταν αποτέλεσμα των εξαιρετικά υψηλών συγκεντρώσεων οξειδίων του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων, συστατικών που αποτελούν τη βιομηχανική αιθαλομίχλη ή τη θειική αιθαλομίχλη. Η τελευταία προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από την καύση φυσικών καυσίμων και ιδιαίτερα του άνθρακα που χρησιμοποιείται κυρίως σε σταθμούς παραγωγής ρεύματος και σε χυτήρια. Η μόλυνση της ατμόσφαιρας σε πολλές πόλεις προέρχεται από την εκπομπή CO, οξειδίων του αζώτου και διαφόρων ασταθών οργανικών ενώσεων που αναμειγνύονται μεταξύ τους και με την επίδραση του φωτός και έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτοχημικού νέφους. Το φωτοχημικό νέφος σχετίζεται κατά κύριο λόγο με τα οχήματα και πιο συγκεκριμένα με τις μηχανές εσωτερικής καύσης για τις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει μια προσπάθεια για περιορισμό της μόλυνσης επικεντρώνοντας τις προσπάθειες κυρίως στους ρύπους οι οποίοι προκαλούν θειικό και φωτοχημικό νέφος, χωρίς να αγνοούμε παράλληλα κάποιες άλλες ουσίες όπως χλωροφθοράνθρακες, αμμωνία ή διοξείδιο του άνθρακα, οι οποίες έχουν πιο γενικές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Τις ουσίες αυτές και τις πηγές τους θα μελετήσουμε παρακάτω :

Πριν προχωρήσουμε είναι αναγκαίο να εισάγουμε και να εξηγήσουμε τις μονάδες στις οποίες θα εκφράζονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων.

Δύο είδη μονάδων συγκέντρωσης χρησιμοποιούνται στην πράξη, ογκομετρικές (κατά όγκο) και κατά βάρος.

Αν όλα τα μόρια ενός αερίου ρύπου μπορούν να απομονωθούν από ένα δεδομένο όγκο αέρα και να κρατηθούν στην αρχική πίεση και θερμοκρασία, ο αέριος ρύπος καταλαμβάνει ένα συγκεκριμένο όγκο. Οι ογκομετρικές μονάδες καθορίζουν το κλάσμα μεταξύ όγκου και ρύπου και του αρχικού όγκου του αέρα ή άλλως το κλάσμα με αριθμητή τον αριθμό των μορίων του ρύπου και παρονομαστή το συνολικό αριθμό των

μορίων του αέρα. Στην πράξη συναντούμε τρεις διαφορετικούς τρόπους για την έκφραση της συγκέντρωσης :

- Ο πρώτος είναι εκφρασμένος σε μέρη αερίου ανά εκατομμύρια μέρη αέρα – parts of gas per million parts of air – που συντομογραφικά γράφεται p.p.m.
- Ο δεύτερος σε μικρόλιτρα αερίου ανά λίτρα αέρα
- Ο τρίτος στο σύστημα SI σε  $\mu\text{mol} \times \text{mol}^{-1}$

Οι κατά βάρος συγκεντρώσεις εκφράζουν τη μάζα της ουσίας ανά μονάδα όγκου του αέρα. Αυτός ο τρόπος της συγκέντρωσης είναι κατάλληλος και για στερεά και για αέρια, αντίθετα με το ογκομετρικό. Στον παρακάτω πίνακα 5.1 φαίνονται συνοπτικά οι πιο συνηθισμένες μονάδες συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

		Κατ' όγκο		Κατά Βάρος		
Μέρη εκατομμύριο	ανά	$10^{-6}$	Ppm	$\mu\text{l l}^{-1}$	$\text{Mmol mol}^{-1}$	$\text{mg m}^{-3}$
Μέρη δισεκατομμύριο	ανά	$10^{-9}$	Ppb	$\text{nl l}^{-1}$	$\text{Nmol mol}^{-1}$	$\text{Mg m}^{-3}$
Μέρη τρισεκατομμύριο	ανά	$10^{-12}$	Ppt	$\text{pl l}^{-1}$	$\text{Pmol mol}^{-1}$	$\text{Ng m}^{-3}$

### 5.1 Μετασχηματισμός μεταξύ συγκέντρωσης κατά βάρος και συγκέντρωσης κατ'όγκο.

Αφού για την έκφραση της συγκέντρωσης χρησιμοποιούμε και τους δύο τρόπους, θα πρέπει να γνωρίζουμε πως θα μεταβαίνουμε από τον ένα στον άλλο. Το βασικό που πρέπει να γνωρίζουμε είναι ότι 1 mole αερίου έχει σε Κ.Σ.  $6,02 \times 10^{23}$  μόρια και ζυγίζει  $M \text{ kg}$  όπου το  $M$  είναι το μοριακό βάρος και καταλαμβάνει όγκο  $0,0224 \text{ m}^3$  σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση ( $0^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}$ ).

Για παράδειγμα το  $\text{SO}_2$  έχει μοριακό βάρος :  $\text{MB}=32+(2 \times 16)=64 \text{ gr}$

Η πυκνότητά του είναι :

$$\frac{\text{μάζα}}{\text{όγκο}} = \frac{64 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{0,0224 \text{ m}^3} = 2,86 \text{ kg/m}^3$$

Όμως για το  $\text{SO}_2$  ισχύει εξ ορισμού :



$$10^6 \text{ ppm} = 2,86 \text{ kgr}/\text{m}^3$$

$$1 \text{ ppm} = 2,86 \times 10^{-6} \text{ kgr}/\text{m}^3 = 2,86 \text{ mg}/\text{m}^3$$

και

$$1 \text{ ppb} = 2,86 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$$

Έτσι μπορούμε να μετατρέψουμε τις συγκεντρώσεις κατ' όγκο σε συγκεντρώσεις κατά βάρος σε Κ.Σ.

Σε περίπτωση που δεν έχουμε ιδανικές συνθήκες τότε χρησιμοποιούμε την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Όπου  $P_1, V_1, T_1$  η αρχική πίεση, ο αρχικός όγκος και η αρχική απόλυτη θερμοκρασία και  $P_2, V_2, T_2$  είναι η τελική πίεση, ο όγκος και η απόλυτη θερμοκρασία.

Για τις περιπτώσεις που μελετάμε θα έχουμε :  $P_1 = 1 \text{ atm}$ ,  $V_1 = 1 \text{ m}^3$ ,  $T_1 = 273 \text{ K}$ .

Έστω ότι ψάχνουμε τον όγκο  $V_2$ . Έχουμε :

$$V_2 = \frac{T_2}{P_2} \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{T_2}{273 P_2}$$

Στην πράξη η μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι γύρω στους  $50^\circ \text{C}$  και η μικρότερη πίεση  $950 \text{ mbar}$ . Δηλαδή :

$$T_2 = 273 + 50 = 323 \text{ K}$$

$$P_2 = \frac{950}{1013} = 0,938 \text{ atm}$$

$$V_2 = \frac{323}{273 \times 0,938} = 1,26 \text{ m}^3$$

Ο αρχικός όγκος ( $1 \text{ m}^3$ ) έχει γίνει  $1,26 \text{ m}^3$ . Αυτό είναι απόλυτα λογικό διότι και οι δύο μεταβολές (αύξηση  $T$ , μείωση  $P$ ) αυξάνουν τον όγκο διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των μορίων. Ο νέος όγκος θα περιέχει τον ίδιο αριθμό μορίων και κατά συνέπεια την ίδια μάζα, πχ.  $1 \text{ ppm SO}_2$  τώρα θα ισούται με  $2,86 \text{ mg}/\text{m}^3$  ή  $2,27 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Για τους πιο κοινούς ρύπους ο πίνακας 5.1.1 δίνει το συντελεστή μετατροπής από ppb σε  $\text{mg}/\text{m}^3$  και αντίστροφα στους  $0^\circ \text{C}$  και  $20^\circ \text{C}$ .

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1.1

Ρύπτοι	Μοριακό βάρος	Για μετατροπή			
		Ρρb σε mg/m <sup>3</sup>		mg/m <sup>3</sup> σε ρρb	
		0°C	20°C	0°C	20°C
SO <sub>2</sub>	64	2,86	2,66	0,35	0,38
NO <sub>2</sub>	46	2,05	1,91	0,49	0,52
NO	30	1,34	1,25	0,75	0,80
O <sub>3</sub>	48	2,14	2,00	0,47	0,50
NH <sub>3</sub>	17	0,76	0,71	1,32	1,43
CO	28	1,25	1,16	0,80	0,86

## 5.2 Ταξινόμηση των ρύπων

Οι αέριοι ρύπτοι μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

**Φυσικοί ρύπτοι**, π.χ. φυσική ομίχλη, κόκκοι γύρης, βακτήρια και προϊόντα ηφαιστειακών εκρήξεων.

**Στερεά σωματίδια αιωρούμενα στον αέρα**, π.χ. σκόνη, καπνός, ομίχλη και ατμοί.

**Αέρια και ατμοί.**

Τα διάφορα αέρια και οι ατμοί που είναι σημαντικοί αέριοι ρύπτοι, δίνονται στον πίνακα 5.2.1. Εκτός από τα παραπάνω, μελέτες από διάφορους ερευνητές έχουν δείξει ότι ορισμένοι από αυτούς τους ρύπους υφίστανται χημικές αντιδράσεις όταν εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα τελικά προϊόντα που διαμορφώνονται να είναι περισσότερο βλαβερά από τους αρχικούς ρύπους. Για παράδειγμα έχει αναφερθεί ότι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες αντιδρούν με διοξείδιο του αζώτου στο ηλιακό φως και δημιουργούν ομίχλη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2.1

α/α	Ομάδα	Παραδείγματα
1.	Θειούχες ενώσεις	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, R-SH
2.	Αζωτούχες ενώσεις	NO, NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub>
3.	Οξυγονούχες ενώσεις	O <sub>3</sub> , CO, CO <sub>2</sub>
4.	Ενώσεις Αλογόνου	HF, HCl
5.	Οργανικές ενώσεις	Αλδεύδες, υδρογονάνθρακες
6.	Ραδιενεργές ενώσεις	Ραδιενεργά αέρια

### 5.2.1 Φυσικοί ρύποι

Μεταξύ των φυσικών ρύπων η γύρη είναι σημαντική εξαιτίας των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων της που εγείρουν ορισμένες ιδιαιτερότητες. Οι κόκκοι γύρης είναι τα αρσενικά γαμετόφυτα των γυμνοσπέρμων και των αγγειόσπερμων και διαχέονται στην ατμόσφαιρα από τα αγριόχορτα, το γρασίδι και τα δέντρα. Εξαιτίας της αέριας γονιμοποίησης, χιλιάδες κόκκοι γύρης απελευθερώνονται. Ενόσω οι μεταφερόμενοι, μέσω αέρα, κόκκοι γύρης κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 10 και 50  $\mu$  (εκατομμυριοστά του μέτρου) σε μέγεθος, ορισμένοι έχουν βρεθεί να είναι τόσο μικροί όσο 5  $\mu$  και τόσο μεγάλοι όσο 100  $\mu$  σε διάμετρο. Από άποψη μόλυνσης οι αεροπαραγόμενοι ρύποι είναι σημαντικοί εξαιτίας των αλλεργικών αντιδράσεων που δημιουργούνται σε ευαίσθητα άτομα (πολλοί άνθρωποι υποφέρουν από άσθμα ή αλλεργικό κατάρρου). Ενόσω τα περισσότερα θύματα έχουν έναν απλό τύπο αλλεργικού κατάρρου στον οποίο τα συμπτώματα εξαφανίζονται στο τέλος της εποχής της γύρης, ορισμένοι προσβάλλονται από βρογχίτιδα, βρογχικό άσθμα και δερματίτιδα.

### 5.2.2 Στερεά σωματίδια αιωρούμενα στον αέρα

Σχετίζονται με τη διασπορά στερεών και υγρών σωματιδίων μικροσκοπικού μεγέθους σε αέρια μέσα όπως η σκόνη, ο καπνός ή η ομίχλη.

Ένα τέτοιο αιωρούμενο σωματίδιο μπορεί επίσης να προσδιοριστεί σαν ένα κολλοειδές σύστημα στο οποίο το μέσο διασποράς είναι αέριο και η διασπαρμένη φάση είναι στερεά ή υγρή.

Ο όρος «αιωρούμενα σωματίδια» χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του χρόνου που αιωρούνται στον αέρα. Αφού κατακαθίσει είτε από το βάρος του, με συσσώρευση, είτε με ενσφήνωμα σε στερεή ή υγρή επιφάνεια, ο όρος δεν ισχύει πλέον. Έτσι το σωματιδιακό υλικό είναι ένας αέριος ρύπος μόνο όταν είναι αιωρούμενο σωματίδιο. Ωστόσο είναι ενόχληση και σαν αιωρούμενο σωματίδιο (μείωση ορατότητας) και σαν κατακαθιζόμενη ουσία (φθορά επιφανειών, διαβρώσεις).

Τα αιωρούμενα σωματίδια διαφέρουν κατά πολύ όσον αφορά τις μοριακές διαστάσεις, τη μοριακή πυκνότητα και τη σπυρδαλιότητά τους σαν ρύποι. Οι διάμετροί τους γενικά κυμαίνονται από 0.01  $\mu$  ή λιγότερο μέχρι περίπου 100  $\mu$ . Τα παρακάτω είναι διάφορα αιωρούμενα σωματίδια.

## **Σκόνη**

Η σκόνη αποτελείται από στερεά σωματίδια σαφώς μεγαλύτερα από εκείνα που υπάρχουν στα κολλοειδή και είναι ικανά για προσωρινή αιώρηση στον αέρα ή σε άλλα αέρια. Δεν τείνουν να συναθροιστούν σε μπλεγμένη μάζα εκτός από την περίπτωση που βρίσκονται υπό ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Επίσης δεν διαχέονται αλλά κατακάθονται υπό την επίδραση του βάρους.

Η σκόνη δημιουργείται από τη συντριβή, το λιώσιμο κλπ, των οργανικών και ανόργανων υλικών. Γενικά είναι διαμέτρου πάνω από 20  $\mu$ , παρόλο που ορισμένα είναι μικρότερα. Η αιωρούμενη στάχτη από τις καμινάδες ποικίλει από 80 έως 3  $\mu$ . Το τσιμέντο από 150 έως 10 και η σκόνη χυτηρίου από 200 έως 1  $\mu$ . Τα περισσότερα από τα σωματίδια της σκόνης κατακάθονται στο έδαφος καθώς αυτή πέφτει, αλλά σωματίδια 5  $\mu$  ή μικρότερα τείνουν να σχηματίσουν σταθερές αιωρήσεις.

## **Καπνός**

Ο καπνός αποτελείται από διαιρεμένα με ακρίβεια σωματίδια που παράγονται από ατελή καύση. Αποτελείται κυρίως από σωματίδια άνθρακα και άλλα καύσιμα υλικά. Γενικά το μέγεθος των σωματιδίων είναι μικρότερο από 1  $\mu$ . Το μέγεθος των σωματιδίων του καπνού από κάρβουνα κυμαίνεται από 0.2 έως 0.01  $\mu$  και αυτών από πετρέλαιο από 0.1 έως 0.03  $\mu$ .

## **Θολούρες**

Αυτός ο όρος αναφέρεται σε μικρής συγκέντρωσης διασπορά υγρών σωματιδίων μεγάλου μεγέθους. Στη μετεωρολογία σημαίνει μια ελαφριά διασπορά σταγονιδίων νερού αιωρούμενων στην ατμόσφαιρα. Τα φυσικά σωματίδια ομίχλης που δημιουργούνται από υδρατμούς στην ατμόσφαιρα είναι μάλλον μεγάλα, κυμαινόμενα από 500 έως 40  $\mu$  σε μέγεθος. Τα σωματίδια μπορεί να ενωθούν.

## Ομίχλη

Η ομίχλη αναφέρεται σε ορατά αιωρούμενα σωματίδια στα οποία η διασπαρμένη φάση είναι υγρή. Συνήθως αυτό συνεπάγεται σχηματισμό από συμπύκνωση. Στη μετεωρολογία σχετίζεται με διασπορά νερού ή πάγου στην ατμόσφαιρα κοντά στην επιφάνεια της γης μειώνοντας την ορατότητα σε λιγότερο από μισό χιλιόμετρο. Στη φυσική ομίχλη το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται από 40 έως 1 μ.

## Ατμοί

Είναι στερεά σωματίδια που δημιουργούνται με συμπύκνωση από την αέρια κατάσταση, γενικά μετά την εξάτμιση από την κατάσταση τήξης και συχνά αυτό συνοδεύεται από χημική αντίδραση όπως οξειδωση. Οι ατμοί συναθροίζονται σε μπλεγμένη μάζα και ορισμένες φορές ενώνονται.

Ο πίνακας 5.2.2 δείχνει τις κυριότερες πηγές ατμοσφαιρικής σκόνης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2.2

A/a	Πηγές	Παραδείγματα
1	Καύση	Καιγόμενα καύσιμα (κάρβουνο, ξύλο, πετρέλαιο) Αποτέφρωση (οικιακά ή δημοτικά σκουπίδια) Άλλα (πυρκαγιές, κάπνισμα φύλλων καπνού)
2	Υλικά χειρισμού και επεξεργασίας	Φόρτωμα και ξεφόρτωμα (άμμος, χαλίκια, κάρβουνο, ορυκτά, ασβέστης, τσιμέντο) Σύνθλιψη και λιώσιμο (ορυκτά, πέτρα, τσιμέντο, χημικά) Ανάμειξη και πακετάρισμα (χημικά, λιπάσματα) Επεξεργασία τροφίμων (αλεύρι, κόκκοι αμύλου) Κόψιμο και διαμόρφωση (πριονοκορδέλες, σανίδες τοίχου, πλαστικά) Μεταλλουργικά (χυτήρια) Βιομηχανικά (χαρτί, κατασκευή υφασμάτων)
3	Εργασίες μετακίνησης Χωμάτων	Κατασκευή (δρόμοι, κτίρια, φράγματα, τοποθεσίες καθαρισμού) Μετάλλευση (έκρηξη) Γεωργία (γέμισμα χώματος, προετοιμασία εδάφους) Άνεμοι
4	Διάφορα	Καθαρισμός σπιτιού Καθαρισμός λασπωμένων δρόμων Ψεκασμός καλλιεργειών Τάισμα πουλερικών Καυσαέρια μηχανών

### 5.2.3 Αέρια

#### **Χλώριο και υδροχλώριο**

Το χλώριο συναντάται σε μολυσμένες ατμόσφαιρες σαν στοιχείο αυτό καθαυτό, σαν υδροχλώριο, σαν χλώριο το οποίο περιέχει οργανικές ενώσεις όπως υπερχλωροαιθυλαίνιο και σαν ανόργανα χλωριούχα. Οι τελευταίες αναφερόμενες ενώσεις είναι στερεά και γι' αυτό το λόγο έχουν βρεθεί σε ιδιαίτερη μορφή. Τα άλλα υλικά που έχουν αναφερθεί παρουσιάζονται σαν αέρια.

Οι πιο συνηθισμένες πηγές χλωρίου στην ατμόσφαιρα απαντώνται σε λειτουργίες στις οποίες κατασκευάζεται ή χρησιμοποιείται για παραγωγή άλλων χημικών. Επίσης καθώς το χλώριο χρησιμοποιείται σε εργοστάσια καθαρισμού του νερού, σε φυτά ακάθαρτων νερών και σε πισίνες, η ανεπάρκεια εξοπλισμού ορισμένες φορές οδηγεί σε διαρροή χλωρίου στην ατμόσφαιρα.

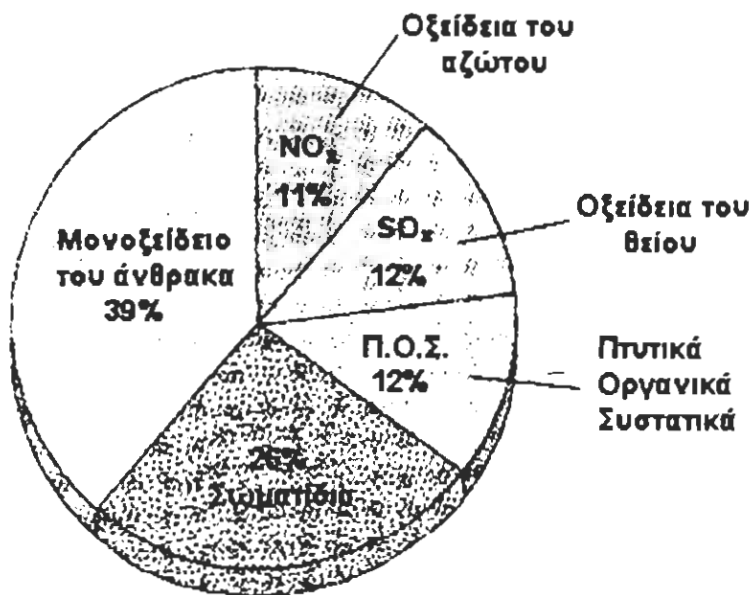
Οι κυριότερες επιδράσεις του χλωρίου και των ενώσεών του είναι : αναπνευστικός ερεθισμός από χλώριο, διάβρωση από υδροχλώριο και ζημιά στη βλάστηση από χλώριο και υδροχλώριο.

### 5.3 Κύριοι και δευτερεύοντες ατμοσφαιρικοί ρύποι

Οι ρύποι που μολύνουν την ατμόσφαιρα διακρίνονται σε κύριους και δευτερεύοντες.

α) **Κύριοι ρύποι** είναι εκείνοι που δεν μεταβάλλονται μέσα στην ατμόσφαιρα. Αυτοί εκπέμπονται κατευθείαν από αναγνωρίσιμες πηγές. Έτσι είναι εύκολη η ανεύρεση των εστιών προέλευσής τους, κυριότερες από τις οποίες είναι η καύση του άνθρακα και οι βιομηχανίες πρωτογενών μετάλλων, τροφίμων, χαρτιού, χημικών προϊόντων, πετρελαίου και υλικών κατασκευής. Επίσης σημαντική ρύπανση προκαλείται και από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

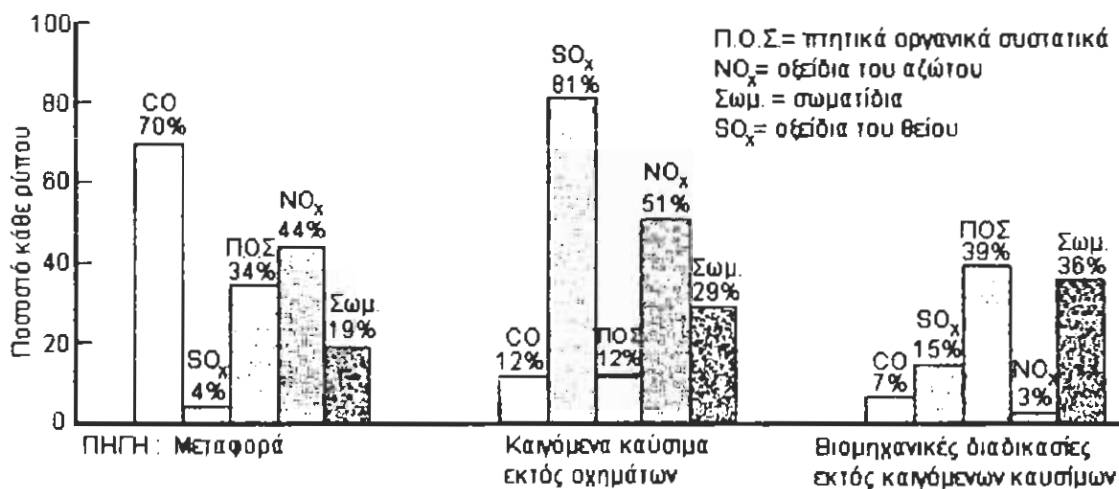
Οι ουσίες αυτές σκιάζουν τις ηλιακές ακτίνες, μειώνουν την ορατότητα, προκαλούν φθορές στα κτίρια και τα άλλα υλικά, προκαλούν σκούριασμα των μετάλλων και επιδρούν στις διάφορες ζωικές λειτουργίες.



Σχήμα 5.3.1 Κύριοι βασικοί ρύποι.

Παραδείγματα κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων είναι :

1. Μικρομόρια με διάμετρο μικρότερη από 100 μ.μ
2. Μεγαλομόρια με διάμετρο μεγαλύτερη από 100 μ.μ
3. Οξείδια του αζώτου (N<sub>x</sub>O<sub>x</sub>) -
4. Ενώσεις του θείου (SO<sub>x</sub>)
5. Μονοξείδια του άνθρακα
6. Ενώσεις αλογόνων
7. Οργανικές ενώσεις
8. Ραδιενεργές ενώσεις
9. Αιωρούμενα σωματίδια (μικρά κομμάτια μετάλλων, άνθρακα, πίσσας, ρητινών, γύρης, βακτήρια που περιέχονται μέσα σε αέριες μάζες).



Σχήμα 5.3.2 Οι κύριοι βασικοί ρύποι % και οι πηγές τους. Απο αριστερά : μεταφορές, καυόμενα καύσιμα εκτός των αυτοκινήτων, βιομηχανικές κατεργασίες διαφορετικές από την καύση καυσίμων

β) **Δευτερεύοντες ρύποι.** Αυτοί δεν προέρχονται άμεσα από τις βιομηχανικές, κρατικές, δημόσιες ή οικιακές εστίες, αλλά έμμεσα από τις φωτοχημικές ή φυσικοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των κύριων ρύπων μέσα στην ατμόσφαιρα, είναι δε δυσκολότερος ο εντοπισμός τους μολονότι είναι πιο επιβλαβείς για την υγεία.

Μια από τις χειρότερες μορφές δευτερεύοντος ρύπου είναι αυτή που προκαλείται από την οξειδωση υδρογονανθράκων που βρίσκονται στα καυσαέρια που παράγονται από την ατελή καύση. Έτσι το αυτοκίνητο στις αστικές περιοχές αναδεικνύεται στον υπ' αριθμόν ένα παράγοντα μόλυνσης του περιβάλλοντος, δεδομένου ότι οι ουσίες που παράγονται από μηχανές εσωτερικής καύσης, είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε φωτοχημικές αντιδράσεις που συντελούνται κυρίως με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας ( κάθε γαλόνι βενζίνης καιγόμενο παράγει τρεις λίμπρες CO). Έτσι αν υποθέσουμε ότι 600.000 αυτοκίνητα κυκλοφορούν καθημερινά στην Αθήνα, τότε ρυπαίνεται ο αέρας της πόλης με 1800 τόνους CO, αφού το λιγότερο που καταναλώνεται είναι 1.200.000 γαλόνια βενζίνης.

Παραδείγματα δευτερευόντων ρύπων είναι τα εξής :

1. Οζον (  $O_3$  )
2. Φορμαλδεΰδη PAN (Peroxy acetyl nitrate)
3. Φωτοχημική αιθαλομίχλη
4. Σχηματισμός όξινης ομίχλης (  $H_2SO_4$  ) οφειλόμενης στην αντίδραση διοξειδίου του θείου και διαλυμένου οξυγόνου, όταν είναι παρούσες σταγόνες νερού στην ατμόσφαιρα.

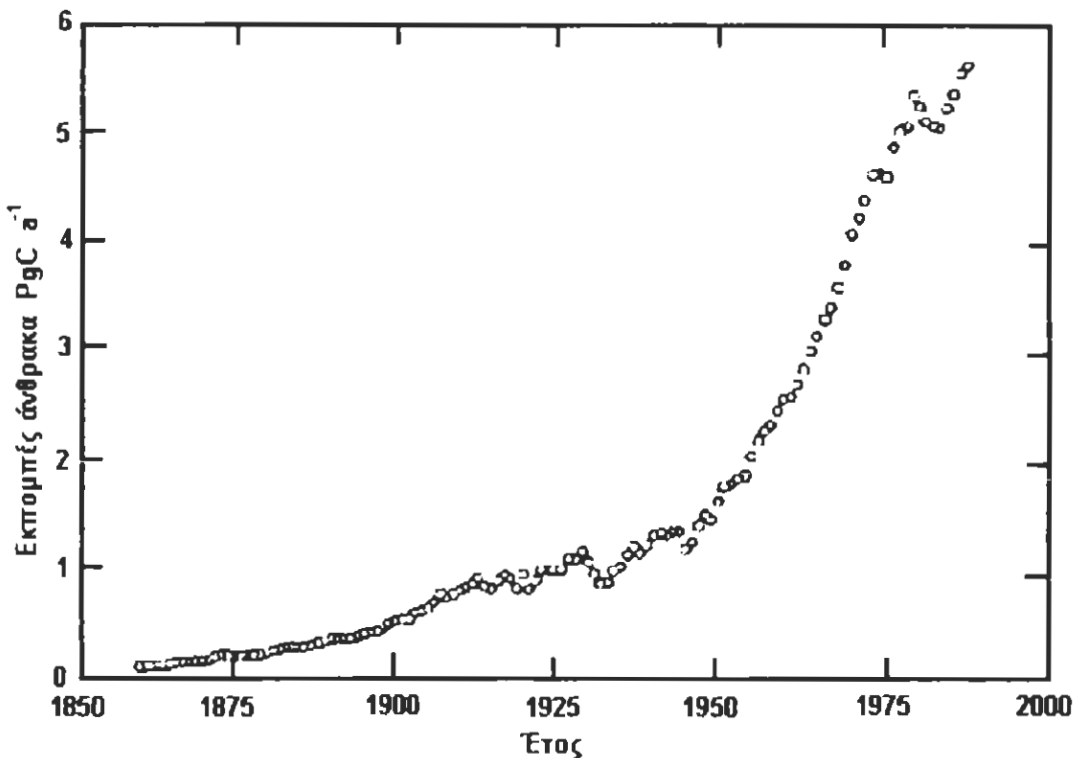


## 6. ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Οι τρεις κύριες κατηγορίες αερίων ρύπων κατά ιστορική σημασία, συγκέντρωση και συνολικές επιπτώσεις σε φυτά και ζώα ( συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπων ) είναι το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), οξειδία του αζώτου (  $\text{NO}_x$  :  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  ) και το όζον ( $\text{O}_3$ ). Το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του αζώτου (  $\text{NO}$  ) είναι κύριοι ρύποι αφού εκπέμπονται κατευθείαν από τις πηγές.

Το όζον με τη σειρά του, θεωρείται ως δευτερεύον ρύπος επειδή σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από πρωτογενείς ρύπους, ενώ παράλληλα οι εκπομπές όζοντος είναι αμελητέες.

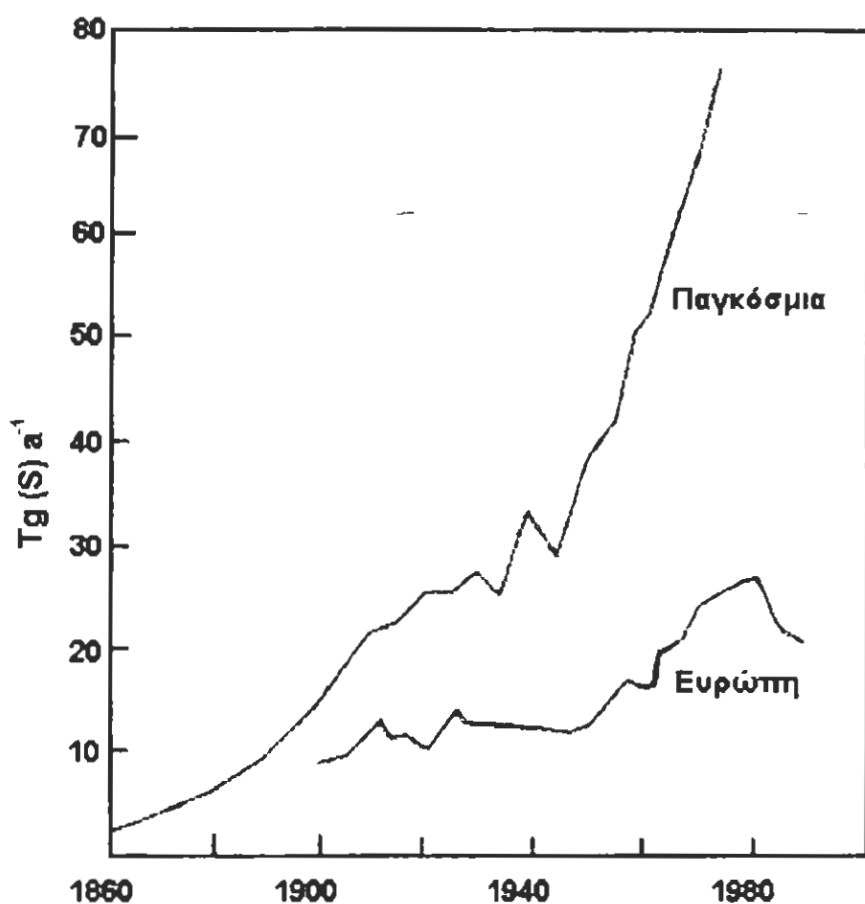
Το διοξείδιο του αζώτου είναι ταυτόχρονα και κύριος και δευτερεύον ρύπος αφού κάποιο μέρος οφείλεται σε καύση και το υπόλοιπο σε χημικές αντιδράσεις που γίνονται στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 6.1 Η αύξηση της παγκόσμιας εκπομπής άνθρακα κατά την περίοδο 1850 – 1985

Γνωρίζουμε ότι η εκπομπή των ρύπων οφείλεται σε ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι φυσικό λοιπόν όσο αυξάνεται ο πληθυσμός να διογκώνεται και το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Κατά το πέρασμα των αιώνων ο πληθυσμός της γης αυξανόταν με πολύ χαμηλούς ρυθμούς. Είναι ενδεικτικό ότι το 1 μ.Χ ο πληθυσμός της γης ήταν 200 εκατομμύρια, το 1.000 μ.Χ 250.000.000 ενώ το 1600 μ.Χ 450.000.000.

Από το 17<sup>ο</sup> αιώνα και μετά η επιστήμη έκανε μεγάλα άλματα προόδου και ο μέσος όρος ζωής αυξήθηκε με αποτέλεσμα την πληθυσμιακή έκρηξη.



Σχήμα 6.2 Παγκόσμια και ευρωπαϊκή εκπομπή θείου την περίοδο 1860 – 1985.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αρχικά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χρησιμοποιήθηκε κάρβουνο και στη συνέχεια πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Η καύση αυτών των ουσιών μετατρέπει τον άνθρακα που περιέχουν σε διοξείδιο του άνθρακα ο οποίος ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Στο σχήμα 6.1 φαίνεται η παράλληλη αύξηση της έκλυσης του άνθρακα στο 19<sup>ο</sup> και 20<sup>ο</sup> αιώνα. Όλα τα φυσικά καύσιμα περιέχουν επίσης θείο, το οποίο κατά την καύση ελευθερώνεται σαν SO<sub>2</sub>. Τα καύσιμα και ο αέρας που χρειάζεται για την καύση τους περιέχουν άζωτο το οποίο ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Η εκπομπή διοξειδίου του θείου παγκοσμίως υπολογίζεται ότι έχει αυξηθεί από 4 Mt το 1860 σε 160 Mt το 1980 (σχήμα 6.2).

## 6.1 Αιθαλομίχλη

Αποτελείται από τις λέξεις αιθάλη και ομίχλη και μπορεί να είναι δύο τύπων :

- α. Φωτοχημική
- β. Προκαλούμενη από κάρβουνο

Η φωτοχημική αιθαλομίχλη περιορίζεται σε υψηλά μηχανοκινούμενες μεγαλουπόλεις, π.χ. Los Angeles . Οφείλεται σε αντίξοες μετεωρολογικές συνθήκες όταν η κίνηση των αερίων μαζών είναι περιορισμένη. Η αιθαλομίχλη προκαλείται από την αλληλεπίδραση ορισμένων υδρογονανθράκων και οξειδωτικών μέσων κάτω από την επίδραση ακτινοβολίας, προκαλώντας αύξηση σε υπεροξυ-ακετυλο-νιτρίδια (PAN).

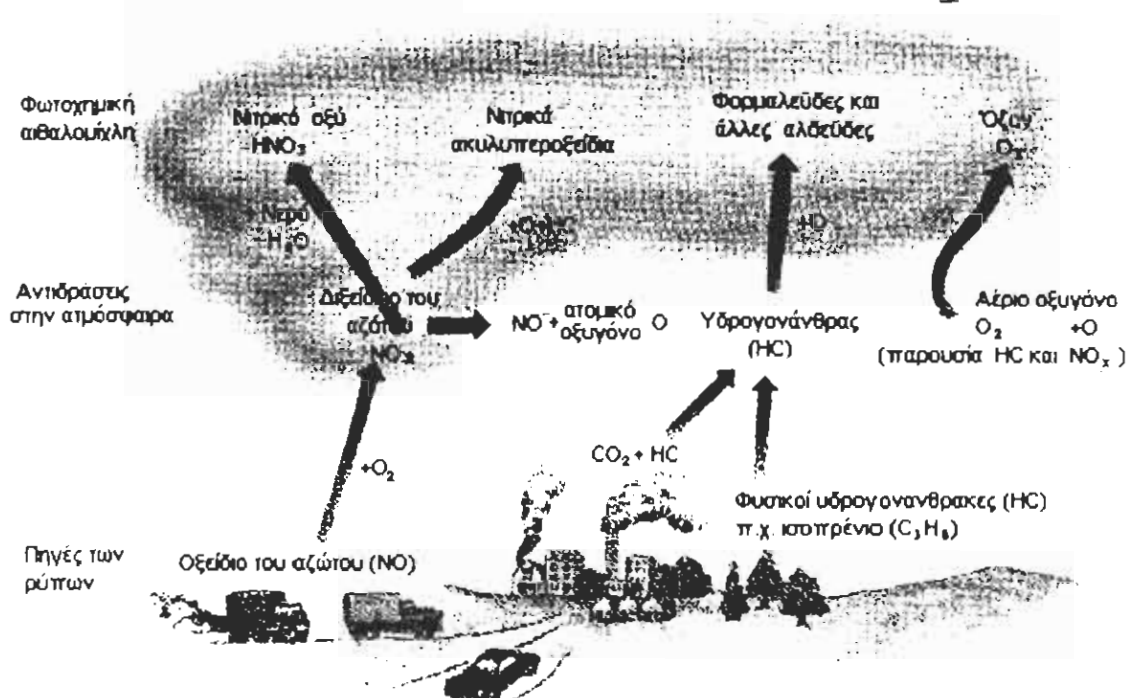
Τα κύρια συστατικά της είναι οξείδια του αζώτου, PAN και υδρογονάνθρακες. Το μονοοξείδιο του άνθρακα και το όζον προκαλούν μείωση της ορατότητας, ερεθισμό των ματιών, βλάβες στα φυτά κ.α.

Η ομίχλη από καύση κάρβουνου καλύπτει αστικές περιοχές τις νύχτες ή τις κρύες ημέρες, όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από τους  $10^{\circ}\text{C}$  και όταν επικρατούν ήρεμες μετεωρολογικές συνθήκες. Αυτή η ομίχλη αποτελείται από καπνό, ενώσεις του θείου και αιωρούμενη στάχτη. Παρατεταμένη έκθεση σε αιθαλομίχλη έχει σαν αποτέλεσμα υψηλή θνησιμότητα, ιδιαίτερα ανάμεσα σε ηλικιωμένους και σε άτομα με χρόνια καρδιοαναπνευστικά προβλήματα.

## 6.2 Θείο

Οι κύριες φυσικές πηγές εκπομπής θείου είναι το διμεθύλιο του θείου (dimethyl sulphide (DMS)) το οποίο παράγεται από το θαλάσσιο φυτοπλαγκτόν και οξειδώνεται σε  $\text{SO}_2$  στην ατμόσφαιρα. Επίσης το υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ) από διαδικασίες αποσύνθεσης φυτικών οργανισμών και το  $\text{SO}_2$  από τα ηφαίστεια. Όλες οι παραπάνω εκπομπές έχουν στις ημέρες μας παραγκωνισθεί από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και κυρίως την καύση φυσικών καυσίμων ( βλέπε πίνακα 6.2.1) .

Στον παρακάτω πίνακα η εκπομπή δίνεται σαν μάζα του θείου και όχι του  $\text{SO}_2$ . Σε μερικές από τις φυσικές πηγές εκπομπής θείου όπως π.χ. τα ηφαίστεια, μπορεί η εκπομπή θείου να μεταβληθεί δραματικά, ακόμα και αν μιλάμε για παγκόσμια κλίμακα. Είναι ενδεικτικό ότι η εκπομπή θείου το 1990 ήταν 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του 1985.



Εικόνα 6.2.1 Ο σχηματισμός της φωτοχημικής ομίχλης

Η συμβολή του ανθρώπου στην εκπομπή ενώσεων του θείου έχει να κάνει σχεδόν αποκλειστικά με την καύση φυσικών καυσίμων των οποίων η περιεκτικότητα σε θείο διαφέρει ανάλογα με το είδος τους.

Για παράδειγμα :

- Το πετρέλαιο και τα υποπροϊόντα του περιέχουν θείο σε ποσοστό που κυμαίνεται από 0,1% (για την παραφίνη) έως 3% (για τα βαριά κλάσματα του πετρελαίου). Η βενζίνη περιέχει πολύ μικρή ποσότητα θείου σε σχέση με την ολικά εκπεμπόμενη στο περιβάλλον. Παρόλα αυτά μπορεί να υπάρξει πρόβλημα δυσάρεστης οσμής από τη μετατροπή σε  $\text{H}_2\text{S}$  στους καταλυτικούς κινητήρες.
- Το κάρβουνο περιέχει 0,1-4% θείο, κυρίως σε μορφή νιφάδων ( $\text{FeS}_2$ ). Η μέση περιεκτικότητα σε θείο του αγγλικού κάρβουνο είναι 1,7%.
- Το φυσικό αέριο (κυρίως μεθάνιο) μπορεί να φτάσει το 40% σε  $\text{H}_2\text{S}$  όταν παράγεται από την πετρελαιοπηγή. Το θείο απομονώνεται αποτελεσματικά μέσω μιας ειδικής χημικής επεξεργασίας, οπότε διανέμεται για χρήση χωρίς αυτό στη σύστασή του.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.1

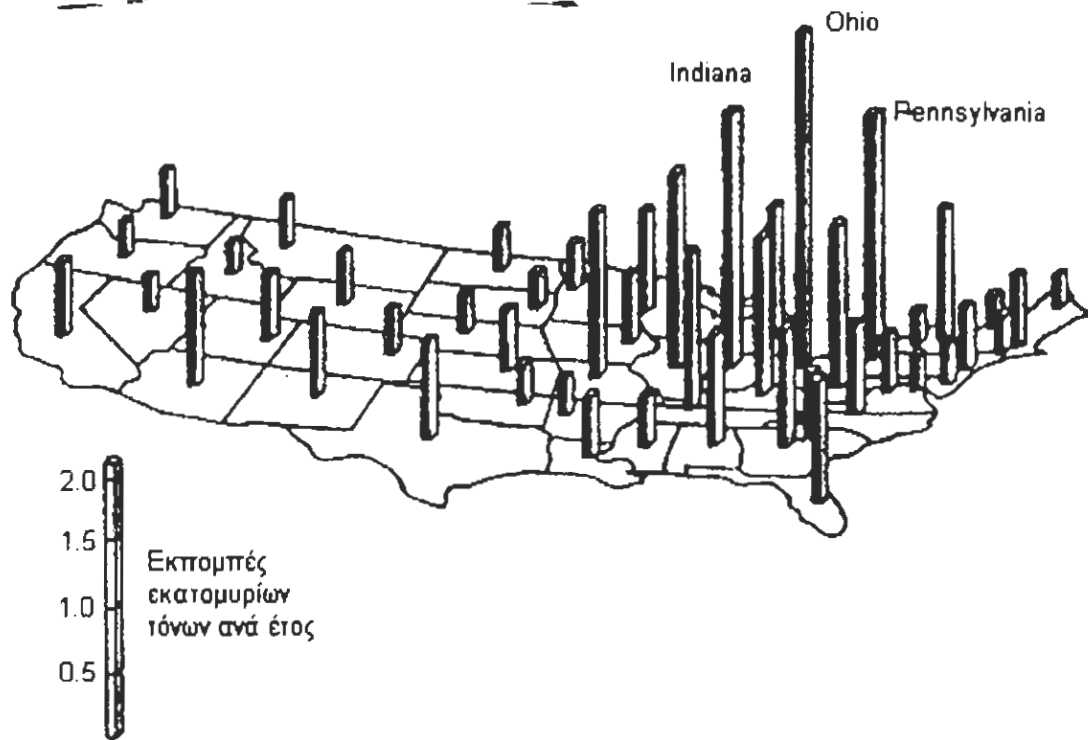
Πηγές	Παγκόσμιες εκπομπές(MtSa-1)
<b>Φυσικές:</b>	
DMS	16
Έδαφος και βλάστης	2
Ηφαίστια	8
Σύνολο φυσικών	26
<b>Ανθρωπογενείς:</b>	
Καιόμενη βιομάζα	3
Κάυση φυσικών καυσίμων	70
Σύνολο ανθρωπογενών	73
Γενικό σύνολο	99

Το 70% της εκπομπής του θείου προέρχεται από τις υψηλές καμινάδες σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα ένας σταθμός παραγωγής ρεύματος με ισχύ 2000 MW χρειάζεται περίπου 10.000 τόνους κάρβουνου την ημέρα, οπότε παράγονται 500-1000 τόνοι SO<sub>2</sub>. Ο πίνακας 6.2.2 δείχνει τις πηγές εκπομπής SO<sub>2</sub>, το 1991, για τη δυτική Ευρώπη.

Οι ρύποι δεν είναι απαραίτητο να εξαπλώνονται ομοιόμορφα μέσα σε μια χώρα. Το σχήμα 6.2.1 είναι χαρακτηριστικό και δείχνει την κατανομή του SO<sub>2</sub> στις Η.Π.Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2.2

Πηγή	εκπομπή σε Kt SO <sub>2</sub> το 1991	% του συνόλου
Εγχώρια	133	4
Εμπορική	83	2
Σταθμοί ενέργειας	2534	71
Διυλιστήρια	115	3
Γεωργία	8	-
Άλλες βιομηχανίες	569	16
Σιδηρόδρομοι	3	-
Οδικές μεταφορές	58	2
Αεροπλάνα	2	-
Πλοία	61	2
Σύνολο	3565	100



Σχήμα 6.2.1 Η κατανομή εκπομπών SO<sub>2</sub> στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

### 6.3 Μείωση του SO<sub>2</sub>

Η μείωση επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους :

- Καίγοντας λιγότερο καύσιμο :

Είναι αυτονόητο ότι μπορούμε να μειώσουμε την εκπομπή ρύπων καίγοντας λιγότερα καύσιμα. Εδώ και εκατοντάδες χρόνια το αυξανόμενο βιοτικό επίπεδο των ανεπτυγμένων χωρών έχει βασιστεί στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από τα φυσικά καύσιμα. Νομοθετικά δεν έχουν γίνει κάποια σημαντικά βήματα για οικονομία ενέργειας.

Κάποιες κινήσεις όπως καλύτερη θερμομόνωση των σπιτιών, θα εξοικονομούσαν ένα σεβαστό ποσό ενέργειας άρα και μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων. Ένας άλλος τρόπος κάπως πιο επώδυνος θα ήταν η αύξηση της τιμής των καυσίμων, κάτι που θα ανάγκαζε τους ανθρώπους να κάνουν οικονομία ενέργειας στα σπίτια τους και να χρησιμοποιούν περισσότερο τα μέσα μαζικής μεταφοράς.

- Με αντικατάσταση καυσίμου :

Αυτό περιλαμβάνει την αντικατάσταση των καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, όπως π.χ. κάρβουνο, πετρέλαιο κ.α, από άλλα με πολύ μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο, όπως π.χ. φυσικό αέριο. Αυτό μπορεί να έχει μεγάλο κόστος οικονομικό και όχι

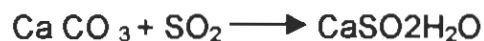
μόνο. Όταν στην Αγγλία, η οποία έχει μεγάλη παραγωγή κάρβουνου με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο τα ανθρακωρυχεία της κατέρρευσαν κάτω από το βάρος οικονομικών και πολιτικών πιέσεων, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος εισήγαγαν κάρβουνο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και προσαρμόζονται ακόμα ώστε να καίνε φυσικό αέριο το οποίο είναι λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον .

- Με τον καθαρισμό του καυσίμου :

Για τον καθαρισμό του κάρβουνου χρησιμοποιείται η εξής μέθοδος. Το κάρβουνο αλέθεται και γίνεται λεπτή σκόνη και στη συνέχεια εισάγεται σε σωλήνες όπου και αναμιγνύεται με αέρα πριν από την καύση του. Αφού λοιπόν τα πυρίτια που περιέχουν το θείο έχουν διαφορετικό βάρος από τη σκόνη του καθαρού κάρβουνου, μπορούν μέσα από επεξεργασία να διαχωριστούν και να απομονωθούν. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί και μείωση του θείου έως και 40%, όμως η χρησιμοποίηση αυτής της μεθόδου έχει στη πράξη καταργηθεί.

- Με αποθείωση μέσα στην καπνοδόχο (Flue Gas Desulphurization FGD):

Υπάρχει τρόπος ώστε το διοξείδιο του θείου που δημιουργείται μετά την καύση να δεσμεύεται πριν ακόμα βγει στην ατμόσφαιρα. Πολλοί μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί πάνω σε αυτή τη διαδικασία και ο πιο δημοφιλής είναι αυτός κατά τον οποίο ένα ομοιογενές διάλυμα ασβεστόλιθου ψεκάζεται στα αέρια της καπνοδόχου. Το ανθρακικό ασβέστιο του ασβεστόλιθου αντιδρά με το SO<sub>2</sub> και παράγεται ένυδρο θειικό ασβέστιο (γύψος) το οποίο χρησιμοποιείται σε οικοδομικές εργασίες.



#### 6.4 Τριοξείδιο του θείου

Μία μικρή μερίδα από το θείο που προέρχεται από τα καύσιμα μπορεί να οξειδωθεί σε τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>). Αυτό έχει τρεις βασικές συνέπειες:

- Εκπέμπεται μπλε ομίχλη από σταγονίδια θειικού οξέος που προέρχονται από τους καυστήρες.
- Υδρατμοί και SO<sub>3</sub> ενώνονται με αποτέλεσμα την εναπόθεση θειικού οξέος στα ψυχρά μέρη των σωλήνων με συνέπεια την επιτάχυνση της διάβρωσης τους (τα σημεία αυτά των επιφανειών είναι κολλώδη).

- Σωματίδια καπνού συσσωρεύονται στις κολλώδεις αυτές περιοχές των αγωγών, με συνέπεια τη δημιουργία κόκκων που όταν, μαζί με τη βοήθεια των καυσαερίων, παρασυρθούν στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσουν φθορές σε ευαίσθητες επιφάνειες όπως ρούχα και χρώματα αυτοκινήτων.

Η μετατροπή των προϊόντων του θείου σε  $\text{SO}_3$  επιταχύνεται με την επίδραση βαναδίου με αποτέλεσμα μερικά καύσιμα που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε βανάδιο να μετατρέπουν το 20-30% της αρχικής ποσότητας θείου σε  $\text{SO}_3$ . Κάποια χημικά βελτιωτικά βοηθάνε στον έλεγχο αυτού του προβλήματος.

## 6.5 Οξειδία του αζώτου

Τα δυο βασικά οξειδία του αζώτου είναι το μονοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$ ) και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}_2$ ). Ο γενικευμένος τύπος για τα οξειδία του αζώτου είναι ( $\text{NO}_x$ ). Παρά τις διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις τους, αντιμετωπίζονται από κοινού και τα δύο. Η καύση έχει πάντα ως αποτέλεσμα την παραγωγή μίγματος  $\text{NO}_2$  και  $\text{NO}$ , με το  $\text{NO}$  να κατέχει ένα ποσοστό της τάξης του 90%.

Το οξειδίο του αζώτου σχηματίζεται με δύο ξεχωριστούς τρόπους :

- Θερμικό  $\text{NO}$ , σχηματίζεται από την αντίδραση του αζώτου και του οξυγόνου του αέρα. Μπορούμε να περιγράψουμε την αντίδραση με το μηχανισμό του Zeldovitch



Η παραπάνω αντίδραση είναι ισχυρά ενδόθερμη και έτσι η θερμική παραγωγή  $\text{NO}$  παίρνει τη μέγιστη τιμή της στις περιοχές του θαλάμου καύσης όπου η θερμοκρασία είναι πιο υψηλή.

- Σχηματισμός  $\text{NO}$  από καύσιμα. Τα καύσιμα όπως το κάρβουνο και το πετρέλαιο περιέχουν περίπου 0,5-1,5% άζωτο, ενώ τα αέρια καύσιμα λιγότερο. Ο παρακάτω πίνακας δίνει λεπτομερώς τις εκπομπές  $\text{NO}_x$  από καύση φυσικών καυσίμων. Πρέπει να επισημάνουμε ότι η εκπομπή  $\text{NO}_x$  δίνεται σε  $\text{NO}_2$ , πράγμα που σημαίνει ότι η μάζα του  $\text{N}$  από το  $\text{NO}$  προστίθεται στη μάζα του  $\text{N}$  από το  $\text{NO}_2$  και το σύνολο εκφράζεται σε μάζα  $\text{NO}_2$ .

Το ετήσιο άθροισμα είναι λίγο μικρότερο από το διοξείδιο του θείου, ενώ διαφέρουν αρκετά όσον αφορά τις πηγές εκπομπής τους. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος συμβάλλουν κατά το ένα τέταρτο στην εκπομπή του  $\text{NO}_2$  ενώ οι οδικές



συγκοινωνίες αντίθετα με το SO<sub>2</sub> όπου συμβάλλουν πολύ λίγο στην εκπομπή του στην ατμόσφαιρα, καταλαμβάνουν ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι παρόλη την ακρίβεια των μεθόδων μέτρησης, το λάθος στον παραπάνω πίνακα μπορεί να φτάσει και το 15-20%. Σε σύνολο 150 Mt η Ευρώπη ευθύνεται για τους 20 Mt. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές ευθύνονται για το 70% της εκπομπής του αζώτου στην ατμόσφαιρα ή για να το θέσουμε διαφορετικά, εκπέμπουμε δυο φορές περισσότερο άζωτο από ότι ολόκληρος ο πλανήτης. Πρέπει επίσης να γνωρίζουμε ότι η κατανομή των οξειδίων του αζώτου δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την ατμόσφαιρα, π.χ στη Γερμανία την Ολλανδία και τη Μ.Βρετανία, είναι πολύ μεγαλύτερη η συγκέντρωση από ότι σε κάποιες άλλες χώρες, όπως οι σκανδιναβικές.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5.1**

Κατηγορία πηγής	Δυναμικότητα πηγής (kt NO <sub>2</sub> year <sup>-1</sup> )	Ποσοστό επί του συνόλου
Επιφανειακές πηγές		
Καύση κάρβουνου	21000	13,7
Καύση πετρελαίου	10200	6,6
Καύση αερίου	7600	4,9
Μεταφορές	26300	17,1
Βιομηχανίες	4000	2,6
Έδαφος	18100	11,8
Καιγόμενη βιομάζα		
Σαβάνα	10200	6,6
Αποδάσωση	6900	4,5
Καύση ξύλου	6600	4,3
Αγροτικά απορρίμματα	13100	8,5
Ατμοσφαιρικές πηγές		
Οξειδωση NH <sub>3</sub>	10200	6,6
Αστραπές	16400	10,7
Αεροσκάφη	1000	0,7
NO <sub>x</sub> από την στρατόσφαιρα	2000	1,4
Συνολική εκπομπή	153600	100%

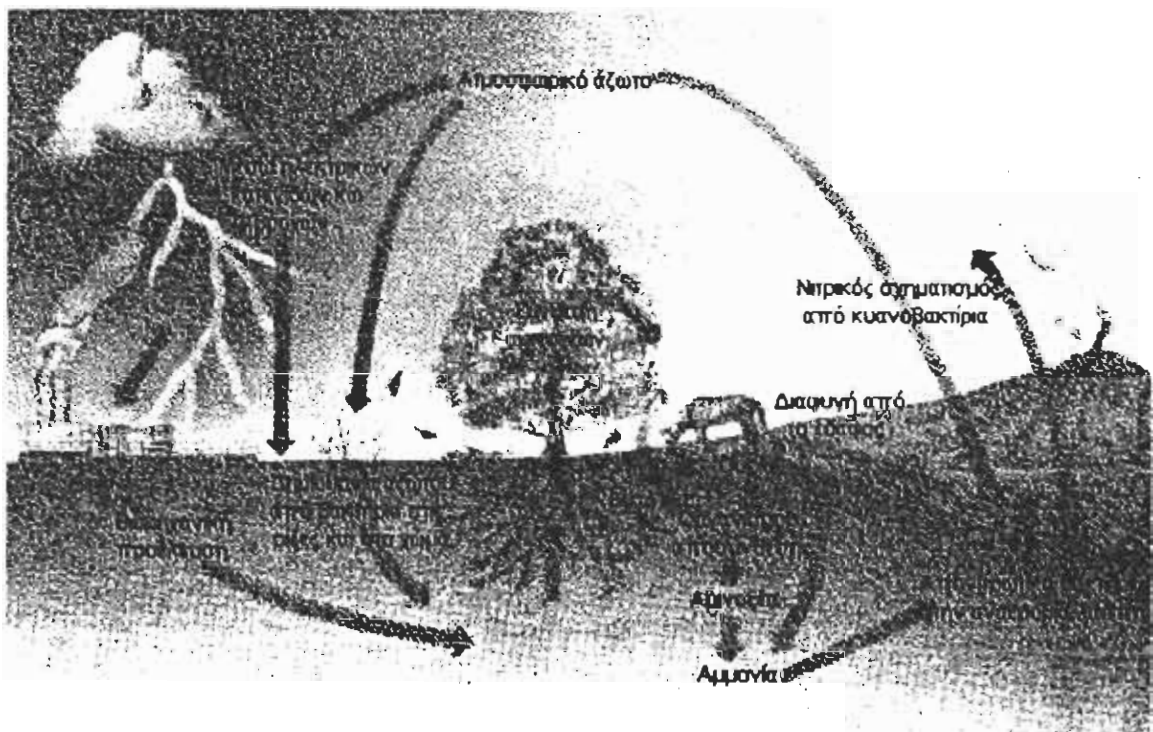
## 6.6 Σχηματισμός διοξειδίου του αζώτου

Όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, μόνο ένα μικρό ποσό από το NO<sub>2</sub> που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ελευθερώνεται αρχικά με αυτή τη μορφή στην ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο δημιουργείται στην ατμόσφαιρα σαν μέρος της ίδιας φωτοχημικής αντίδρασης

που ευθύνεται και για το σχηματισμό του όζοντος. Το οξειδίο του αζώτου που προέρχεται από την καύση, αντιδρά με το όζον και πραγματοποιείται η παρακάτω αντίδραση:

$$\text{NO} + \text{O}_3 \longrightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$$

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το  $\text{NO}_2$  απορροφά κυανή και UV ακτινοβολία μικρότερη από 420 nm και αποσυντίθεται δίνοντας πάλι  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$  με αποτέλεσμα να έχουμε μία φωτοχημική ισορροπία μεταξύ των τεσσάρων αερίων. Σε αγροτικές περιοχές μακριά από τις πηγές εκπομπής  $\text{NO}$ , η συγκέντρωση  $\text{NO}_2$  είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του  $\text{NO}$ . Στις αστικές περιοχές όπου το όζον μειώνεται, η ισορροπία μετακινείται προς χάρη του  $\text{NO}$ .



Εικόνα 6.6.1 Ο κύκλος του αζώτου.

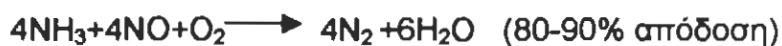
## 6.7 Μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου

- Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και για τα οξειδία του θείου, δηλαδή λιγότερα αυτοκίνητα, μικρότερες μηχανές, ευρύτερη χρήση των μέσων μαζικής μεταφοράς, καλύτερη θερμομόνωση των σπιτιών κτλ.
- Αν χρησιμοποιήσουμε καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άζωτο δεν έχουμε μεγάλο όφελος αφού έχουν λίγο πολύ την ίδια περιεκτικότητα σε άζωτο. Επίσης κατά παράδοξο τρόπο και βάσει της θερμοδυναμικής, τα καύσιμα με χαμηλότερη

περιεκτικότητα σε άζωτο μετατρέπουν πιο αποτελεσματικά το άζωτό τους σε NO από ότι τα καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο, πράγμα που αντισταθμίζει το κέρδος από τη χαμηλή περιεκτικότητα.

- Μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας. Η ενδόθερμη φύση της θερμικής παραγωγής NO σημαίνει ότι, μειώνοντας τη μέγιστη θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο καύσης μειώνουμε και την παραγωγή NO. Είναι προτιμότερο λοιπόν να έχουμε ομοιόμορφη κατανομή μιας μέσης θερμοκρασίας παρά να έχουμε πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο. Μία τεχνική η οποία καλείται F.G.R. (Flue Gas Circulation) χρησιμοποιείται ως εξής. Ένα μικρό ποσοστό αερίων του σωλήνα (τα οποία είναι αδρανή επειδή το οξυγόνο τους έχει χρησιμοποιηθεί) επιστρέφουν στο θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα την αραιώση του μίγματος αέρα-καυσίμου πριν την καύση και τη μείωση της φλόγας.
- Μπορούμε να μειώσουμε την εκπομπή NO μειώνοντας την αναλογία αέρα-καυσίμου, κάτι τέτοιο όμως έχει αρνητικές επιπτώσεις στη θερμική απόδοση της καύσης πράγμα που καθιστά αυτή τη μέθοδο ανενεργή ιδιαίτερα για περιπτώσεις γεννητριών ηλεκτρισμού (όπου θα χρειαζόταν περισσότερη ποσότητα καυσίμου).
- Ένας άλλος τομέας που μπορούμε να βελτιώσουμε ώστε να έχουμε μικρότερη εκπομπή ρύπων και ιδιαίτερα οξειδίων του αζώτου, είναι η βελτίωση της αεροδυναμικής και του σχεδιασμού του θαλάμου καύσης. Η επέμβαση σε αυτόν τον τομέα έχει σαν αποτέλεσμα να επιβραδύνεται ο ρυθμός με τον οποίο το μίγμα αέρα-καυσίμου αναμιγνύεται και καίγεται, δίνοντας ιδανικότερη φλόγα και λιγότερα ανομοιόμορφα σημεία (όσον αφορά τη θερμοκρασία). Με τη μέθοδο αυτή παράγεται μεν άζωτο, αλλά με τη μορφή N<sub>2</sub>, αντί για NO, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα. Καυστήρες χαμηλής εκπομπής NO μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ήδη υπάρχοντα εργοστάσια, με τις κατάλληλες βέβαια τροποποιήσεις και τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά (μείωση έως και 40% της εκπομπής NO). Η Ευρωπαϊκή ένωση με τις νέες περιοριστικές διατάξεις της, έθεσε κάποια όρια για τα καινούργια εργοστάσια. Για τα ήδη υπάρχοντα δε, θα έπρεπε οι εκπομπές κάθε κράτους, για εργοστάσια συνολικής θερμικής ισχύος 50 MW, να είναι μειωμένες κατά 15% το 1993 και κατά 30% το 1998, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του 1980. Κάποιες χώρες όπως η Μ. Βρετανία, για να εναρμονιστούν με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής ένωσης, χρησιμοποίησαν τους καινούργιους αυτούς καυστήρες σε 12 εργοστάσια στην Αγγλία και την Ουαλία, ποσό που αντιστοιχεί σε ποσοστό 70% του συνόλου των εργοστασίων που καίνε κάρβουνο στη Μ. Βρετανία.

- Απονιτροποίηση καυσαερίων. Είναι κάτι αντίστοιχο με αυτό που συναντήσαμε στην αποθείωση. Αμμωνία ή ουρία ψεκάζεται στα καυσαέρια με την παρουσία καταλύτη πεντοξειδίου του βαναδίου ή τριοξειδίου του βολφραμίου σε υψηλή θερμοκρασία (350°C) :



Αυτή η διαδικασία είναι δαπανηρή και συνολικά έχει εφαρμοστεί σε 150 εργοστάσια στη Γερμανία, την Ιαπωνία και τις Η.Π.Α (στη Μ. Βρετανία δεν έχει εφαρμοστεί).

## 6.8 Αμμωνία

Μία ακόμα ομάδα ρύπων συμβολίζεται με  $\text{NH}_x$  και με αυτό εννοούμε το άθροισμα της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) και του αμμωνίου ( $\text{NH}_4$ ). Οι τρεις κυριότερες πηγές αμμωνίας είναι:

- φάρμες με ζώα
- αγροτικές εργασίες
- ζωικά απόβλητα

Η εκπομπή αμμωνίας οφείλεται κυρίως στην αποσύνθεση της ουρίας και του ουρικού οξέος που περιέχονται στα απόβλητα των ζώων. Η εκπομπή αμμωνίας έχει αυξηθεί λόγω της εντατικοποίησης της γεωργίας, η οποία έχει οδηγήσει και στη συγκέντρωση των εκπομπών σε πολύ μικρές περιοχές. Οι εκπομπές από οικίες και κατοικίδια ζώα παραμένουν σχετικά σταθερές σε σχέση με το χρόνο και το χώρο, αντίθετα με τις εκπομπές από τα λιπάσματα και τα άλλα χημικά που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια της γης. Ποσοτικά η εκπομπή αμμωνίας από τα απόβλητα των ζώων είναι περίπου όσο από όλες τις άλλες πηγές μαζί, όπως άλλωστε φαίνεται και στον πίνακα 6.8.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8.1

Πηγή	Παγκόσμια εκπομπή ( $\text{Mt N a}^{-1}$ )
Βλάστηση	5
Ωκεανοί	7
Καιγόμενη βιομάζα	2
Λιπάσματα	6
Φάρμες ζώων	25
Σύνολο	45

Στη Μ. Βρετανία για μερικές μέρες μετά από εναπόθεση περιττωμάτων στα χωράφια, έχουμε αύξηση της αμμωνίας που εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Ο παρακάτω πίνακας δίνει με λεπτομερείς υπολογισμούς τις κυριότερες πηγές εκπομπής αμμωνίας για τη Μ. Βρετανία. Η εκπομπή αμμωνίας που οφείλεται σε αγελάδες, πρόβατα και χοίρους είναι περίπου 88 kt για τη Γερμανία, 94 kt για την Ολλανδία και 83 kt για την Ιαπωνία. Για ολόκληρη την Ευρώπη η εκπομπή  $\text{NH}_3$  είναι περίπου 7 Mt το χρόνο, με το 80 % του συνόλου να προέρχεται από την κοπριά των ζώων που εκτρέφονται στις φάρμες.

Η αμμωνία, αντίθετα με το  $\text{NO}$  και το  $\text{SO}_2$ , συναντάται περισσότερο σε αγροτικές περιοχές στις οποίες υπάρχουν φάρμες όπως συγκεκριμένα στην Ολλανδία, στη βόρεια Γερμανία, βόρεια Γαλλία, νοτιοδυτική και βορειοδυτική Αγγλία, Ουαλία και Ιρλανδία. Η αμμωνία εκπέμπεται με μικρές αρχικές συγκεντρώσεις, σε μεγάλες εκτάσεις (λιβάδια, βοσκοτόπια κτλ), αντίθετα με τους υπόλοιπους ρύπους οι οποίοι εκπέμπονται από σημειακές πηγές και έχουν μεγάλη αρχική συγκέντρωση. Η αύξηση της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα συνδέεται άμεσα και με την αλματώδη αύξηση της χρήσης λιπασμάτων ιδιαίτερα κατά το 2<sup>ο</sup> μισό του αιώνα μας (από 200 kt αζώτου το 1950 σε 1500 kt το 1990). Η κατάσταση περιπλέκεται ακόμη περισσότερο αν λάβουμε υπόψη ότι στους φυτικούς ιστούς υπάρχει αμμώνιο το οποίο εκπέμπεται προς το περιβάλλον εάν η ατμοσφαιρική συγκέντρωση σε άζωτο βρίσκεται κάτω από μία κρίσιμη τιμή. Αντίθετα γίνεται συγκράτηση αμμωνίας αν η συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα βρίσκεται κάτω από την τιμή αυτή. Βλέπουμε λοιπόν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή αμμωνίας είναι πολλοί (κλίμα, βλάστηση, συγκέντρωση αζώτου στην ατμόσφαιρα κ.α). Ο κύκλος της εκπομπής αμμωνίας μπορεί να είναι ημερήσιος ή ετήσιος, γεγονός όμως παραμένει ότι η συγκέντρωση αμμωνίας στην ατμόσφαιρα αυξάνεται κατά την περίοδο λίπανσης των αγρών.

## 6.9 Νιτρώδες οξείδιο ( $\text{N}_2\text{O}$ )

Το νιτρώδες οξείδιο ( $\text{N}_2\text{O}$ ) εκπέμπεται από τη θάλασσα και το έδαφος. Ενώ δεν είναι τοξικό σε φυσιολογικές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, παρόλα αυτά συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στις κλιματολογικές αλλαγές. Τα συστατικά του εδάφους από τα οποία έχουμε εκπομπή  $\text{N}_2\text{O}$  προέρχονται από αναερόβιες διαδικασίες (απονιτροποίηση, νιτροποίηση με τη βοήθεια μικροοργανισμών). Η εκπομπή είναι πιο

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5

Πηγή	δυναμικότητα πηγής (kt NH <sub>3</sub> α <sup>-1</sup> )	ποσοστό επί Τοις εκατό
Γεωργία		
Αγελάδες	200	48
Πρόβατα	70	17
Γουρούνια	30	7,3
Πουλερικά	24	5,8
Άλογα	2	0,5
Χρήση λιπασμάτων	40	9,9
Λοιπές πηγές		
παραγωγή λιπασμάτων και αμμωνίας	8	1,9
ανθρώπινος ιδρώτας και αναπνοή	10	2,1
εργοστάσια επεξεργασίας λυμάτων	5	1,1
Λάσπη που μένει μετά την επεξεργασία	5	1,1
οικιακή καύση κάρβουνου	5	1,1
Οχήματα	1	0,2
κατοικίδια ζώα	12	2,2
Σύνολο	412	100%

έντονη όταν προσθέσουμε αζωτούχα λιπάσματα σε γεωργικές εκτάσεις. Επίσης έχουμε αύξηση της εκπομπής σε περιπτώσεις εκδάσωσης, αποχετεύσεων και καλλιεργειών. Επειδή έχουμε μεγάλες μεταβολές από σημείο σε σημείο, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιήσουμε τις εκπομπές ανά περιοχή. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι παγκόσμιες εκπομπές.

Το 80% των εκπομπών βλέπουμε ότι είναι από φυσικές πηγές και μόνο οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις αποτελούν σημαντικό ανθρωπογενή παράγοντα εκπομπών N<sub>2</sub>O.

## 6.10 Μεθάνιο

Το αέριο μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) ελευθερώνεται μέσα στην ατμόσφαιρα από την εξαγωγή κατά τη διαδικασία και καύση απολιθωμένων καυσίμων και από την πεπτική διαδικασία μηρυκαστικών ζώων σε φάρμες.

## 6.11 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

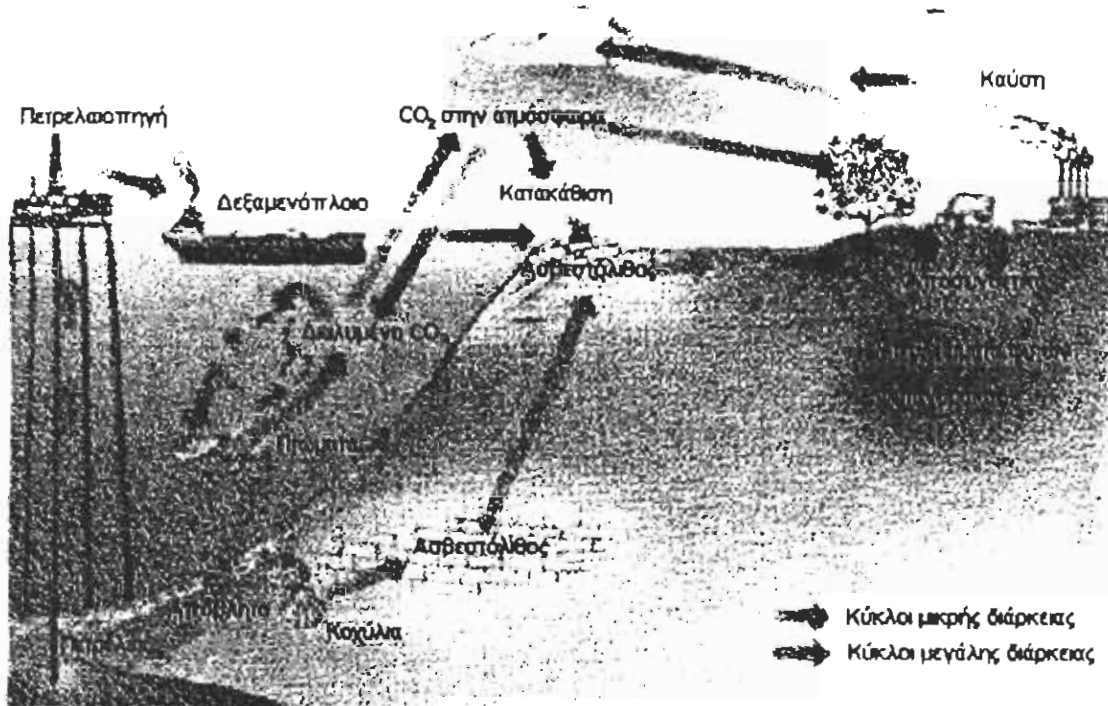
Η τέλεια καύση κάθε καυσίμου που περιέχει άνθρακα θα οδηγούσε στην παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Πάντα υπάρχει μια συσχετιζόμενη παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα το οποίο είναι ένα τοξικό αέριο που επηρεάζει τη μεταφορά του οξυγόνου στη ροή του αίματος. Στην εκτεταμένη (ευρεία) ατμόσφαιρα οι συγκεντρώσεις είναι σε αμελητέα ποσότητα. Κάτω όμως από περιορισμένες συνθήκες εξαερισμού, βρίσκονται στις πόλεις συγκεντρώσεις που μπορούν να είναι ένας σημαντικός κίνδυνος για την υγεία. Η παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα προέρχεται κυρίως από μια κατηγορία πηγής, τα βενζινοκίνητα οχήματα, όπου καταλυτικοί μετατροπείς μειώνουν τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) γύρω στο 90%. Έτσι όσο η χρήση τους αυξάνεται θα υπάρχει μια μείωση στις εκπομπές.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6

Πηγές	Εκπομπές (Mt N α <sup>-1</sup> )
Φυσικές:	
Ωκεανοί	1,4-2,6
τροπικά εδάφη	
υγρά δάση	2,2-3,7
Ξηρές σαβάνες	0,5-2,0
εύκρατα εδάφη	
Δάση	0,05-2,0
χορτοεκτάσεις	?
Ανθρωπογενείς:	
καλλιεργήσιμα εδάφη	0,03-3,0
καιγόμενη βιομάζα	0,2-1,0
Σταθερές πηγές καύσης	0,1-0,3
κινητές πηγές	0,2-0,6
παραγωγή αδιπτικού οξέος	0,4-0,6
Παραγωγή νιτρικού οξέος	0,1-0,3
Σύνολο	5,2-16,1

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ  
ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

**Εικόνα 6.3** Ένας απλοποιημένος κύκλος του άνθρακα, δείχνοντας πως αυτός κινείται μέσα από διάφορα οικοσυστήματα.

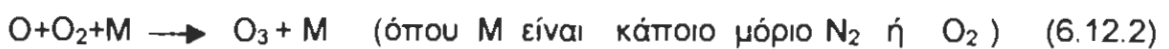


### 6.12 Όζον (O<sub>3</sub>)

Το όζον (O<sub>3</sub>) είναι ο κυριότερος δευτερογενής ρύπος που σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα φωτοχημικών αντιδράσεων και το σημαντικότερο από τα φωτοχημικά οξειδωτικά της ατμόσφαιρας.

Το φυσικό όζον κυρίως περιέχεται στη στρατόσφαιρα και σε ύψος που κυμαίνεται μεταξύ 15 και 50 km. Σχηματίζεται από τη δράση της ακτινοβολίας UV με μήκος κύματος μικρότερο από 242 nm, πάνω στα μόρια του οξυγόνου.

Το φυσικό όζον επίσης παρουσιάζεται στην τροπόσφαιρα και έχει συγκέντρωση 10-20 ppb. Το υπόλοιπο σχηματίζεται φωτοχημικά από τη δράση των ακτινών UV στα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), σύμφωνα με τις αντιδράσεις :

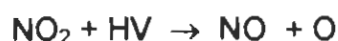
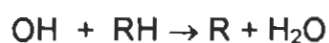


Αυτός ο κύκλος των αντιδράσεων δημιουργεί μια μικρή συνεισφορά στη συγκέντρωση του όζοντος.



Σε μη μολυσμένη ατμόσφαιρα η ισορροπία μεταξύ των παραπάνω τριών αντιδράσεων δίνει χαμηλές και σταθερές συγκεντρώσεις O<sub>3</sub>. Το πρόσθετο όζον μπορεί να σχηματίζεται στην τροπόσφαιρα σαν δευτερεύον παράγοντας μόλυνσης. Το 1950 διαπιστώθηκε πρόβλημα μόλυνσης του αέρα στην περιοχή του Los Angeles στην California. Υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος σχηματίστηκαν στον αέρα προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, ερεθισμούς στα μάτια και ορατές ζημιές στη βλάστηση. Ο ακριβής μηχανισμός σχηματισμού του αποδείχθηκε αρκετά πολύπλοκος, εμπλέκοντας αντιδράσεις μεταξύ εκατοντάδων διαφορετικών υδρογονανθράκων, NO και NO<sub>2</sub>. Ουσιαστικά κάθε υδρογονάνθρακας μπορεί να διαβαστεί από ρίζα υδροξυλίου (OH<sup>•</sup>) και να σχηματίσει υπεροξειδίο (RO<sub>2</sub>) το οποίο μπορεί εύκολα να αντιδράσει με NO σχηματίζοντας NO<sub>2</sub>. Μειώνοντας το NO από τη σχέση 6.12.3 και μετατοπίζοντας την ισορροπία, παράγεται το O<sub>3</sub>.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι :



### 6.13 Προσδιορισμός υδρογονανθράκων (HC)

Στην ατμόσφαιρα των κατοικημένων περιοχών εκπέμπονται διάφοροι υδρογονάνθρακες (κορεσμένοι, ακόρεστοι, κυκλικοί, αρωματικοί, αλδεύδες, κετόνες κ.α.). Άλλες από τις ενώσεις αυτές βρίσκονται με αέρια μορφή (αλκάνια, αλκένια, αλδεύδες, κ.α.), ενώ άλλες προσροφώνται στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (π.χ. πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες).

Τα πρότυπα ποιότητας της ατμόσφαιρας κατοικημένων περιοχών που αφορούν τους υδρογονάνθρακες, αναφέρονται στο σύνολο των «εκτός μεθανίου» υδρογονανθράκων (non-methane hydrocarbons, NMHC). Οι υδρογονάνθρακες αυτοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία φωτοχημικής ρύπανσης επειδή συμμετέχουν σε διάφορες φωτοχημικές αντιδράσεις προς σχηματισμό όζοντος και άλλων οξειδωτικών, με ερεθιστικές και φυτοτοξικές ιδιότητες. Επιπλέον προϊόντα των φωτοχημικών αντιδράσεων των υδρογονανθράκων είναι και διάφορα οργανικά σωματίδια, τα οποία προκαλούν μείωση της ορατότητας.

Οι περισσότεροι NMHC είναι ενώσεις δραστικές, με χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα λίγες μόνο ώρες. Αντίθετα, το CH<sub>4</sub> θεωρείται φωτοχημικά αδρανές (ο χρόνος παραμονής του είναι 16 χρόνια περίπου).

Εκτός από τους NMHC, σημαντικό ρόλο στη ρύπανση της ατμόσφαιρας παίζουν και άλλες πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως αλδεΐδες, κετόνες, φαινόλες, χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες κ.α. Για τις ενώσεις αυτές χρησιμοποιείται ο γενικός όρος **πτητικές οργανικές ενώσεις** (volatile organic compounds, VOC).

#### 6.14 Προσδιορισμός υπεροξυ-ακετυλο-νιτριδίου (PAN)

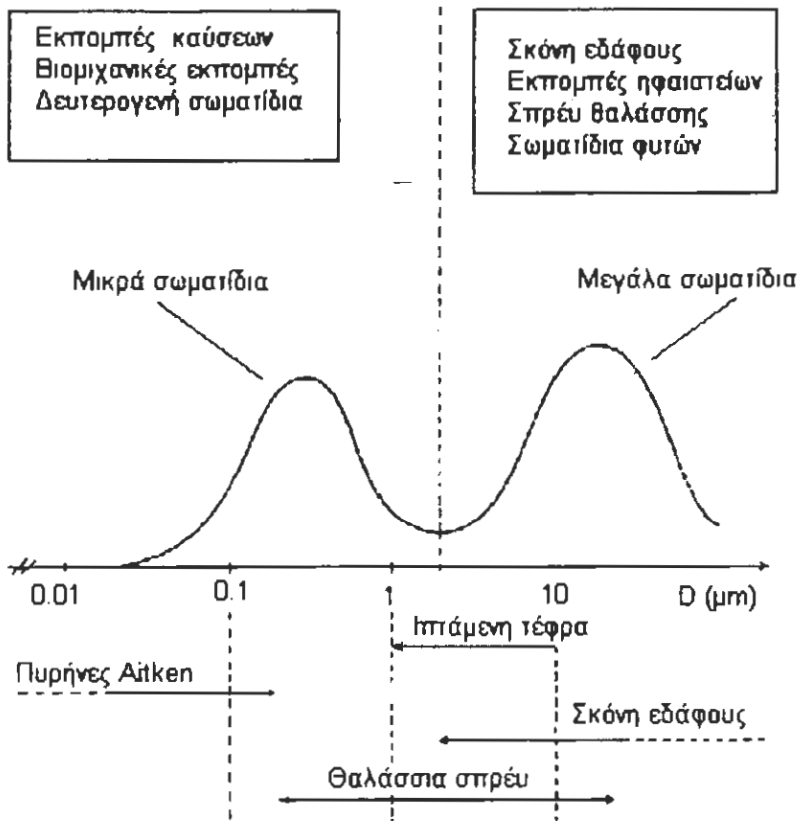
Το υπεροξυ-ακετυλο-νιτρίδιο (PAN) είναι το σπουδαιότερο από μία σειρά ομολόγων υπεροξυ-ακυλίων (ομόλογα ανώτερα του PAN είναι το νιτρικό υπεροξυ-προπιονύλιο, PPN και το νιτρικό υπεροξυ-βουτύλιο, BPN), τα οποία σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα σε περιπτώσεις φωτοχημικής ρύπανσης.

Ο προσδιορισμός του PAN γίνεται με φασματοσκοπία I.R., κυρίως όμως με αέρια χρωματογραφία. Χημικός προσδιορισμός (με απορρόφηση σε υδατικό διάλυμα NaOH όπου υδρολύεται και δίνει NO<sub>2</sub>) μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για έλεγχο μιγμάτων PAN σε υψηλές συγκεντρώσεις και δεν έχει πρακτική εφαρμογή σε ατμοσφαιρικές μετρήσεις λόγω των σημαντικών παρεμποδίσεων από το NO<sub>2</sub>.

#### 6.15 Προσδιορισμός σωματιδιακής ύλης (PM)

Η σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter, M) αποτελείται από σωματίδια που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από μια μεγάλη ποικιλία πηγών, σταθερών και κινητών. Επιπλέον στην ατμόσφαιρα σχηματίζονται σωματίδια σαν αποτέλεσμα διαφόρων χημικών και φυσικών μετατροπών αέριων συστατικών φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης. Στο σχήμα 6.15.1 δίνεται η κατανομή της μάζας των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους. Τα σωματίδια που εκπέμπονται ή σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα διαφέρουν σημαντικά ως προς τη χημική τους σύσταση και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μεγεθών από 0.1 μm μέχρι 100 μm. Σαν αποτέλεσμα του μεγέθους τους, ορισμένα σωματίδια βρίσκονται σε αιώρηση στην ατμόσφαιρα, ενώ άλλα κατακάθονται λόγω βαρύτητας. Έτσι διακρίνουμε τα **αιωρούμενα σωματίδια** (Suspended Particulates, SP) και την **ξηρή απόθεση ή πίπτουσα σκόνη** (Dry Deposition, Dustfall). Τα αιωρούμενα

σωματίδια επιπλέον διακρίνονται σε **ολικά αιωρούμενα σωματίδια** (Total Suspended Particles, TSP), **αναπνεύσιμα σωματίδια** (Inhalable Particles, IP), **μαύρο καπνό** (Smoke), **μικρά σωματίδια** (Fine Particles, FP) και **μεγάλα σωματίδια** (Coarse Particles, CP).



**Σχήμα 6.15.1** Σχηματικό διάγραμμα κατανομής της μάζας της σωματιδιακής ύλης, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων

## 6.16 Βαρέα μέταλλα

Τα μέταλλα εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από διάφορες ανθρωπογενείς πηγές, όπως καύση υγρών και στερεών καυσίμων, τήξη μετάλλων και κραμάτων, παραγωγή τσιμέντου, αποτέφρωση απορριμμάτων κ.α. Η κυριότερη φυσική πηγή εκπομπής μετάλλων στην ατμόσφαιρα είναι το έδαφος.

Τα μέταλλα και οι ενώσεις τους κατά κανόνα βρίσκονται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή στερεών σωματιδίων ή σταγονιδίων (αχλύς). Υπάρχουν όμως και ορισμένα μεταλλικά στοιχεία και ενώσεις που έχουν σημαντική πτητικότητα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και βρίσκονται στην ατμόσφαιρα με μορφή ατμών (π.χ. καρβονύλια μετάλλων, τετρααιθυλιούχος μόλυβδος, υδράργυρος κ.ά.).

## 6.17 Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες

Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH) εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από διάφορες πηγές, φυσικές και ανθρωπογενείς. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές περιλαμβάνουν την καύση υγρών και στερεών καυσίμων, τη διύλιση του πετρελαίου, την πυρόλυση του πετρελαίου, την παραγωγή ασφάλτου και κώκ, την αποτέφρωση απορριμμάτων κ.α.

Το 75% των PAH που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα είναι προσροφημένο στα μικρά σωματίδια (<2.5 μm). Με μορφή ατμών βρίσκονται κυρίως PAH με 3 ή 4 δακτυλίους (μέχρι και το πυρένιο), ενώ οι PAH με μεγαλύτερο μοριακό βάρος βρίσκονται κατά κύριο λόγο στη στερεή φάση. Η κατανομή των ενώσεων αυτών ανάμεσα στην αέρια και σωματιδιακή φάση, εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (π.χ. στους 25°C μόνο 2-3% του φλουορανθενίου και πυρενίου είναι στη σωματιδιακή φάση, ενώ στους 0°C το ποσοστό ανέρχεται σε 40-45%).

## 6.18 Ώξινα συστατικά

Με τον όρο «όξινα συστατικά» της σωματιδιακής ύλης εννοούμε κυρίως τα σωματίδια θειικών και νιτρικών αλάτων, τα οποία εκπέμπονται από διάφορες πηγές ή σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα με ετερογενή οξειδωση των αντίστοιχων οξειδίων SO<sub>2</sub> και NO<sub>2</sub>.

Η κύρια φυσική πηγή σωματιδίων θείου στην ατμόσφαιρα είναι η οξειδωση του H<sub>2</sub>S. Ακόμη εκπέμπονται με τα θαλάσσια σπρέι και τη διάβρωση των πετρωμάτων. Ανθρωπογενείς πηγές είναι διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες, κυρίως όμως η ετερογενής οξειδωση του ανθρωπογενούς SO<sub>2</sub>. Γενικά οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων θείου στις αστικές / βιομηχανικές περιοχές είναι σημαντικά υψηλότερες από εκείνες των αγροτικών περιοχών.

Τα σωματίδια θείου αποτελούν ένα από τα κυριότερα συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων μικρού μεγέθους και σε αυτά οφείλεται κυρίως η ισχυρή οξύτητά τους. Ένα μεγάλο μέρος τους είναι με μορφή (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, σαν αποτέλεσμα εξουδετέρωσης με ατμοσφαιρική αμμωνία, ενώ ένα μικρότερο μέρος είναι με μορφή NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> (ισχυρό οξύ) ή H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Τέλος η αντίδραση σωματιδίων CaCO<sub>3</sub> με αέριο SO<sub>2</sub> προς σχηματισμό CaSO<sub>4</sub> θεωρείται πολύ πιθανή, ιδίως σε περιοχές όπου υπάρχουν υψηλές

συγκεντρώσεις σωματιδιακών ενώσεων του ασβεστίου στην ατμόσφαιρα (σκόνη εδάφους, οικοδομικές δραστηριότητες κ.ά.)

Τα νιτρικά σωματίδια σχηματίζονται σχεδόν αποκλειστικά από την οξειδωση του  $\text{NO}_2$  στην ατμόσφαιρα. Η οξειδωση αυτή επιτυγχάνεται στην οξειδωτική ατμόσφαιρα του φωτοχημικού νέφους. Η κυριότερη σωματιδιακή νιτρική ένωση στην ατμόσφαιρα είναι το  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , το οποίο σχηματίζεται από την εξουδετέρωση όξινων νιτρικών ενώσεων με αέρια αμμωνία. Το  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  βρίσκεται σε ισορροπία με την  $\text{NH}_3$  και το  $\text{HNO}_3$  και μπορεί να εξαχνωθεί με θέρμανση ή να σχηματιστεί από τα αέρια συστατικά αν το ρεύμα του αέρα ψυχθεί, σύμφωνα με την αντίδραση:



Η εξάρτηση της παραπάνω ισορροπίας από τη θερμοκρασία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη δειγματοληψία, η οποία πρέπει να γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ελάχιστη υγροπίεση.

## 7. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕ ΤΑ ΜΗΧΑΝΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Το όχημα με μηχανή έγινε διαθέσιμο σε μεγάλους αριθμούς μόνον αυτό τον αιώνα. Τα πρώτα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα εμφανίστηκαν το 1886 μέχρι το 1900. Η παγκόσμια παραγωγή ήταν περίπου μόνο 20.000 οχήματα τη χρονιά σε σύγκριση με τα περίπου 30.000.000 το 1990. Το προσωπικό αυτοκίνητο έχει δώσει στους ιδιοκτήτες του ατομική ευκινησία και ελευθερία που θα ήταν αδιανόητη πριν από δύο αιώνες αν και ένα αυτοκίνητο καταναλώνει λίγα καύσιμα και εκπέμπει μικρά ποσά ρύπων μαζί με τα περίπου 300.000.000 από αυτά στον κόσμο που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες από καύσιμα και εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες ρύπων. Η αυτοκινητοβιομηχανία ευρέως αποτελεί παραπάνω από το 10 % από τη συνολική βιομηχανία των βιομηχανικών χωρών, των οποίων η υγεία των οικονομικών τους βελτιώνεται η επιδεινώνεται μαζί με την υγεία των αυτοκινητοβιομηχανιών. Παραπάνω από ένας πόλεμος έχει γίνει για να προμηθευτούν αυτές με ορυκτά.

### 7.1 Η ιστορία της ρύθμισης της μόλυνσης του αέρα των μηχανοκίνητων οχημάτων

Τα μηχανοκίνητα οχήματα δεν προξένησαν μεγάλη προσοχή ως πηγές μόλυνσης του αέρα μέχρι περίπου το 1950. Πριν από εκείνη τη στιγμή υπήρχαν πολύ μεγάλες ανεξέλεγκτες εκπομπές ρύπων από τη βιομηχανία και οι εκπομπές από την καύση του άνθρακα ήταν οι πιο μεγάλοι συντελεστές για τη ρύπανση του αέρα στις περισσότερες πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, καθώς αυτές οι πηγές ελέγχθηκαν και το φυσικό αέριο αντικατέστησε τον άνθρακα ως κύριο αστικό καύσιμο θέρμανσης στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ένα νέο είδος μόλυνσης ανακαλύφθηκε στο Los Angeles αν και οι καπνογόνες βιομηχανίες ήταν λίγες. Παρόλα αυτά ένα νέο είδος ρύπου που ερέθιζε τα μάτια και τη μύτη εμφανίστηκε και αργότερα ονομάστηκε " αιθαλομίχλη ". Ο καθηγητής A.J Haagen – Smit απέδειξε ότι υλικά που ερεθίζουν τα μάτια σχηματίζονταν σε μεγάλες ποσότητες από τα καυσαέρια των οχημάτων. Αρχικά οι κατασκευαστές οχημάτων το αρνήθηκαν, αλλά τελικά τα επιστημονικά στοιχεία ήταν πολύ μεγάλα για να ανατραπούν.

Με την πάροδο του χρόνου οι επιτρεπόμενοι ρύποι έχουν σταδιακά μειωθεί ( βλέπε πίνακα 7.1.1). Ένα αυτοκίνητο που πληροί τις προδιαγραφές των ρύπων για το 1993 εκπέμπει περίπου 3% HC, 4% CO και 11% NO<sub>x</sub>, από ότι ένα αυτοκίνητο το 1960.

Παρά το τεχνολογικό αυτό κατόρθωμα δεν έχουμε φθάσει τους στόχους μας στην ποιότητα του αέρα.

## 7.2 Σχηματισμός ρύπων

Οι βασικοί ρύποι που εκπέμπονται από μία απλή βενζινοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) είναι μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογονάνθρακες (HC) και οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Όλοι αυτοί σχηματίζονται και σε όλες τις άλλες διαδικασίες καύσης π.χ φωτιές κατασκήνωσης, ψησταριές, φούρνοι, εργοστάσια φυσικών καυσίμων παραγωγής ενέργειας. Οι μηχανές αυτοκινήτων παράγουν περισσότερους από αυτές ανά καιγόμενη μονάδα καυσίμου αρχικά για τους παρακάτω λόγους:

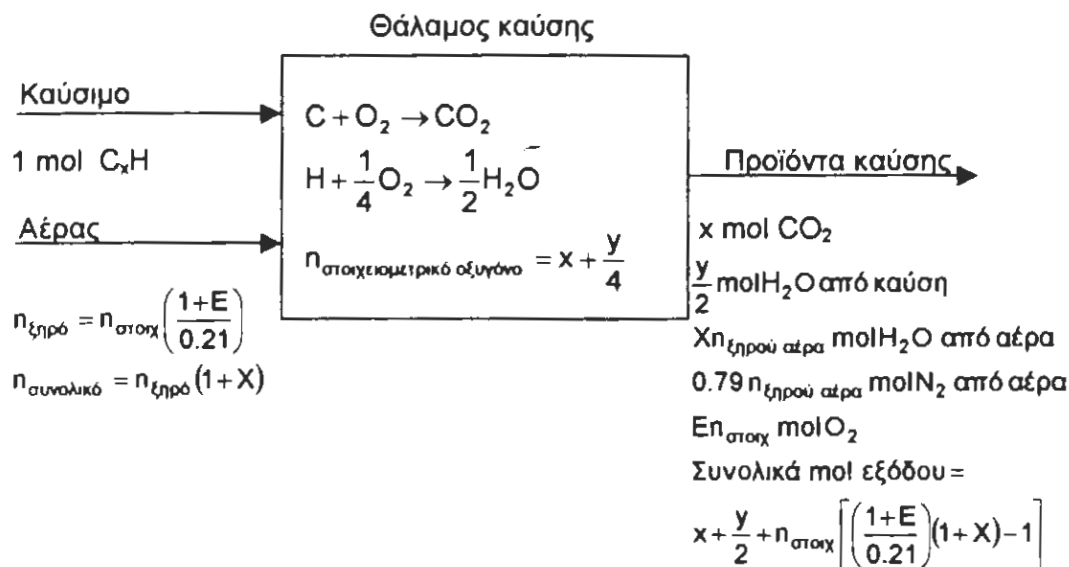
1. Οι μηχανές αυτοκινήτων έχουν συχνά καύση ατελή και ανεπαρκή σε οξυγόνο, πράγμα που τα περισσότερα άλλα συστήματα καύσης δεν έχουν.
2. Οι μηχανές αυτοκινήτων προθερμαίνουν το μίγμα αέρα-καυσίμου, ενώ τα περισσότερα συστήματα καύσης δεν το κάνουν.
3. Οι μηχανές αυτοκινήτων έχουν ασταθή καύση στην οποία η κάθε φλόγα διαρκεί 0,0025 sec. Σχεδόν όλα τα άλλα συστήματα έχουν σταθερές φλόγες οι οποίες μένουν ακίνητες καθώς τα υλικά που καίγονται περνούν μέσα από αυτές.
4. Οι μηχανές αυτοκινήτων έχουν φλόγες που έρχονται απευθείας σε επαφή με ψυχόμενες επιφάνειες πράγμα που δεν συνηθίζεται σε άλλα συστήματα καύσης.

## 7.3 Ο όγκος και η σύνθεση των προϊόντων καύσης

Οι περισσότερες επεξεργασμένες ροές αερίων στον έλεγχο της μόλυνσης του αέρα είναι τα προϊόντα καύσης. Εδώ ως γενικό πρόβλημα έχουμε το πως να υπολογίζουμε τον όγκο και τη σύνθεση των αερίων που προκύπτουν από την καύση οποιουδήποτε καυσίμου. Το υπολογιστικό περίγραμμα είναι συνοπτικά στο σχήμα 7.3.1. Ο υπολογισμός είναι πιο εύκολος για τους υδρογονάνθρακες, για τους οποίους μπορούμε να γράψουμε ένα μοριακό τύπο π.χ. C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> ή C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>. Αυτά μπορούν να γραφούν και ως C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> όπου για μεθάνιο χ=1, y=4, κ.λ.π. Για τέτοια καύσιμα αν το καύσιμο τροφοδοτείται στον καυστήρα στο σχήμα 7.1 είναι 1 mol, τότε υποθέτοντας πλήρη καύση, το καυσαέριο θα περιέχει χ mol από CO<sub>2</sub> και 4/2 mol από H<sub>2</sub>O.

Σε αντίθεση θα περιέχει άζωτο και υδρατμούς που ήρθαν μαζί με τον αέρα καύσης. Το στοιχειομετρικό οξυγόνο που απαιτείται είναι:

$$n_{\text{στοιχειομετρικό οξυγόνο}} = x + \frac{y}{4} \quad (7.3.1)$$



**Σχήμα 7.3.1** Επεξήγηση της διαδικασίας υπολογισμού του όγκου και της σύστασης του αερίου από την καύση ενός απλού υδρογονάνθρακα  $C_xH_y$ . Υποθέτουμε τέλεια καύση με περίσσεια αέρα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1.1**

Επιτρεπόμενες εκπομπές σε γραμμίλι

Χρονιά	Εκπομπές εξάτμισης			Άλλες εκπομπές HC	
	CO	NO <sub>x</sub>	HC	στροφαλοθαλάμου	εξατμίσεις
Πριν τον έλεγχο πχ 1960	87	3,6	8,8	3	4
1970	23	---	2,2	0	4
1971	---	---	---	0	0,8
1972	39	---	3,4	0	0,27
1973	---	3	---	---	---
1975	15	3,1	1,5	---	---
1978	---	2,0	---	0	0,8
1980	7	---	0,41	---	---
1981	3,4	1,0	---	0	0,27
1993	---	0,4	0,25	---	---
αυτοκίνητα καθαρού καυσίμου 1996	---	0,4	0,125	---	---
αυτοκίνητα καθαρού καυσίμου 2001	---	0,2	0,075	---	---

Εν συντομία  $n_{\text{στοιχ}}$  (εδώ έχουμε  $y/4$  γιατί κάθε H άτομο απαιτεί  $1/4$  mol  $O_2$ , αλλά παράγει  $1/2$  mol  $H_2O$ ). Η ξηρά ροή του αέρα προς τον καυστήρα δίνεται στη σχέση



7.3.2, όπου το 0,21 εξηγείται από το γεγονός ότι ο αέρας είναι μόνο 21 % οξυγόνο και E είναι κλάσμα της περίσσειας του αέρα που εισάγεται στον καυστήρα.

$$\eta_{\sigma\tau\epsilon\gamma\omega} = \eta_{\sigma\tau\omicron\iota\chi} \left( \frac{1+E}{0,21} \right) \quad (7.3.2)$$

Το συνολικό ποσό του αέρα που παράχθηκε είναι :

$$\eta_{\sigma\upsilon\nu\omicron\lambda\iota\kappa\acute{o}} = \eta_{\sigma\tau\epsilon\gamma\omega} (1+x) = \eta_{\sigma\tau\omicron\iota\chi} \left( \frac{1+E}{0,21} \right) (1+x) \quad (7.3.3)$$

όπου x είναι η υγρασία εκφραζόμενη ως mol H<sub>2</sub>O (mol ξηρού αέρα). Προσθέτοντας όλες τις εκροές βρίσκουμε ότι (σχέση 7.3.4) :

$$\eta_{\sigma\upsilon\nu\omicron\lambda\omicron \epsilon\acute{\kappa}\rho\omicron\upsilon} = x + \frac{y}{2} + \eta_{\sigma\tau\omicron\iota\chi} \left[ \left( \frac{1+E}{0,21} \right) (1+x) - 1 \right] \quad (7.3.4)$$

\*\* Σχεδόν όλες οι συσκευές καύσης παρουσιάζουν παραπάνω από το στοιχειομετρικό ποσό του αέρα, για να σιγουρευτούμε ότι υπάρχει αρκετό οξυγόνο για πλήρη καύση. Το ποσό του αέρα του στοιχειομετρικού που απαιτείται καλείται περίσσεια αέρα. Μια τυπική τιμή είναι 20%

#### 7.4 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι παρόν στα αέρια καύσης περισσότερο από οποιοδήποτε ανθρακούχο καύσιμο – βενζίνη, φυσικό αέριο, κάρβουνο, ξύλο, φωτιές δασών, σκουπιδιών. Το ποσό CO που είναι παρόν εξαρτάται αρχικά από την κατανομή αέρα - καυσίμου και δεύτερον από το βαθμό της μείξης, την ψύξη των τοιχωμάτων κτλ.

Στις μηχανές των αυτοκινήτων έχουμε συχνά λιγότερο το στοιχειομετρικό αέρα. Θα μπορούσαμε να αποδώσουμε όλους τους υπολογισμούς καύσης σε αυτή την παράγραφο χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της παραπάνω παραγράφου και το E να πάρει αρνητικές τιμές. Παρόλα αυτά είναι πιο εύκολο να ξαναγράψουμε αυτές τις εξισώσεις σε σχέση με το ελλιπές οξυγόνο z.

Από την παραπάνω παράγραφο ξέρουμε για υδρογονανθρακούχα καύσιμα ότι για τον τύπο C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>

$$\eta_{\sigma\tau\omicron\iota\chi\omicron\mu\epsilon\tau\omicron\upsilon\kappa\omicron \omicron\acute{\kappa}\sigma\gamma\omicron\nu\omicron} = x + \frac{y}{4} \quad (7.4.1)$$

και με περισσότερο αέρα θα πολλαπλασιάσουμε αυτήν την εξίσωση με (1+E). Αν είναι λιγότερος από το στοιχειομετρικό αέρα μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση :

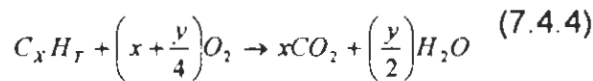
$$n_{\omicron\acute{\kappa}\sigma\gamma\omicron\nu\omicron} = x + \frac{y}{4} - z = n_{\sigma\tau\omicron\iota\chi \omicron\acute{\kappa}\sigma\gamma\omicron\nu\omicron} - z = n_{\sigma\tau\omicron\iota\chi \omicron\acute{\kappa}\sigma\gamma\omicron\nu\omicron} (1+E) \quad (7.4.2)$$

από την οποία προκύπτει ότι :

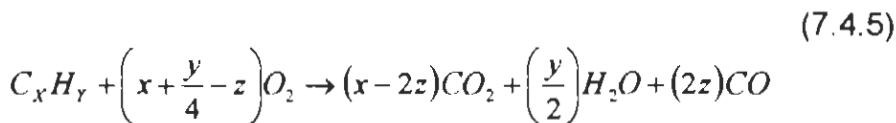
$$z = -n_{\text{στοιχ. οξυγόνου}} E \quad (7.4.3)$$

Θα μπορούσαμε να μετατρέψουμε όλες αυτές τις εξισώσεις με τις ισότητες της παραπάνω παραγράφου αντικαθιστώντας το ελλειπές οξυγόνο  $z$  με την τιμή της σχέσης (7.4.3). Έτσι κάνουμε την παρακάτω επεξεργασία, μπορούμε να αγνοήσουμε την υγρασία του αέρα καύσης η οποία είναι ίση, θέτοντας  $x=0$  στις εξισώσεις της παραπάνω παραγράφου.

Όλες οι βενζίνες είναι μείγματα από πολλά συστατικά, αλλά μπορούν να χαρακτηριστούν πως έχουν προσεγγιστικό μέσο όρο τον τύπο  $C_xH_y$  όταν για μια τυπική βενζίνη το  $x$  είναι περίπου 8 και το  $y$  περίπου 17. Οι κατασκευαστές βενζίνης αλλάζουν αυτές τις τιμές από μία περιοχή στην άλλη και με τις εποχές του χρόνου. Έτσι έχουμε μικρότερες τιμές για το χειμώνα και για ψυχρά κλίματα σε σχέση με το καλοκαίρι και τα ζεστά κλίματα. Για την πλήρη καύση (στοιχειομετρικός λόγος αέρα – καύσιμου  $E=z=0$ ) αυτού του καυσίμου η εξίσωση είναι :



Αν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να συμπληρωθεί η αντίδραση, τα προϊόντα καύσης θα περιέχουν  $CO$ ,  $H_2$  και άκαυστους υδρογονάνθρακες. Γι' αυτές τις θερμοκρασίες καύσης το πιο κοινό προϊόν ατελών καύσεων είναι το  $CO$ , λόγω του ότι είναι πιο δύσκολο να καεί από τους υπόλοιπους υδρογονάνθρακες. Αν υποθέσουμε ότι η τροφοδότηση οξυγόνου είναι μικρότερη της στοιχειομετρικής με ελλειπή οξυγόνο με  $z$  mol ανά mol καυσίμου και αν όλο το ελλειπές οξυγόνο προκαλεί το σχηματισμό  $CO$ , μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση 7.4.4 ως εξής :



Κάθε mol οξυγόνου από τον αέρα φέρνει μαζί του  $(0,79/0,21=3,76)$  mol αζώτου της καύσης. Έτσι θα είναι :

$$n_{\text{συνολικό αζώτου}} = 3,76 \left(x + \frac{y}{4} - z\right) + (x - 2z) + \left(\frac{y}{2}\right) + (2z) \quad (7.4.6)$$

Και το κλάσμα του mol του  $CO$  θα είναι :

$$y_{CO} = \frac{2z}{3,76 \left[x + (y/4) - z\right] + x + (y/2)} \quad (7.4.7)$$

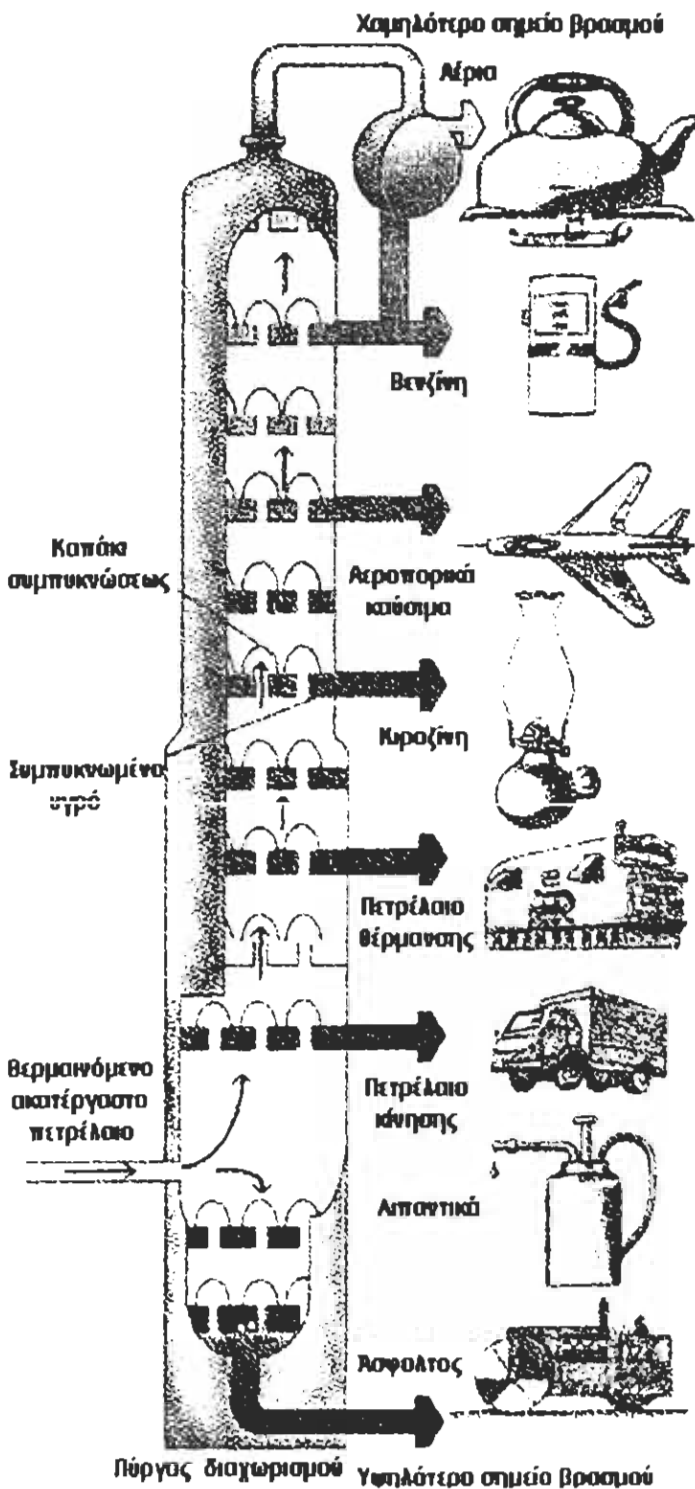
## 7.5 Λόγος αέρα-καυσίμου, ισοδύναμος λόγος

Πάντα συζητάμε για αυτού του τύπου προβλήματα σε όρους του αέρα-καυσίμου (Α/Κ) ή ισοδύναμο λόγο  $\Phi$ .

## 7.6 Υδρογονάνθρακες (HC)

Σε όλες τις τιμές του  $\Phi$  μετράμε άκαυστους υδρογονάνθρακες στα καυσαέρια των Μ. Ε. Κ. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι το αποτέλεσμα της απόσβεσης της φλόγας. Οι Μ.Ε.Κ. πρέπει να έχουν κάποιο είδος λίπανσης όπου το έμβολο γλιστράει πάνω- κάτω στον κύλινδρο. Στις μηχανές αυτοκινήτου αυτό γίνεται με το λάδι της μηχανής το οποίο αντλείται από την ελαιολεκάνη στον πάτο του στροφαλοφόρου άξονα μέσα από τρύπες σε όλα τα μέρη της μηχανής. Τα ελατήρια του εμβόλου είναι στην ουσία η επιφάνεια ολίσθησης μεταξύ εμβόλου και κυλίνδρου τα οποία γλιστράνε στο λεπτό στρώμα λαδιού. Λειτουργώντας τη μηχανή χωρίς λάδι προκαλείται εμπλοκή και καταστροφή της μηχανής σε λίγα λεπτά.

Τα κανονικά υδρογονανθρακούχα λιπαντικά δεν αντέχουν σε θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες των 121 - 149 °C για μεγάλες περιόδους.



Εικόνα 7.6.1 Διύλιση πετρελαίου

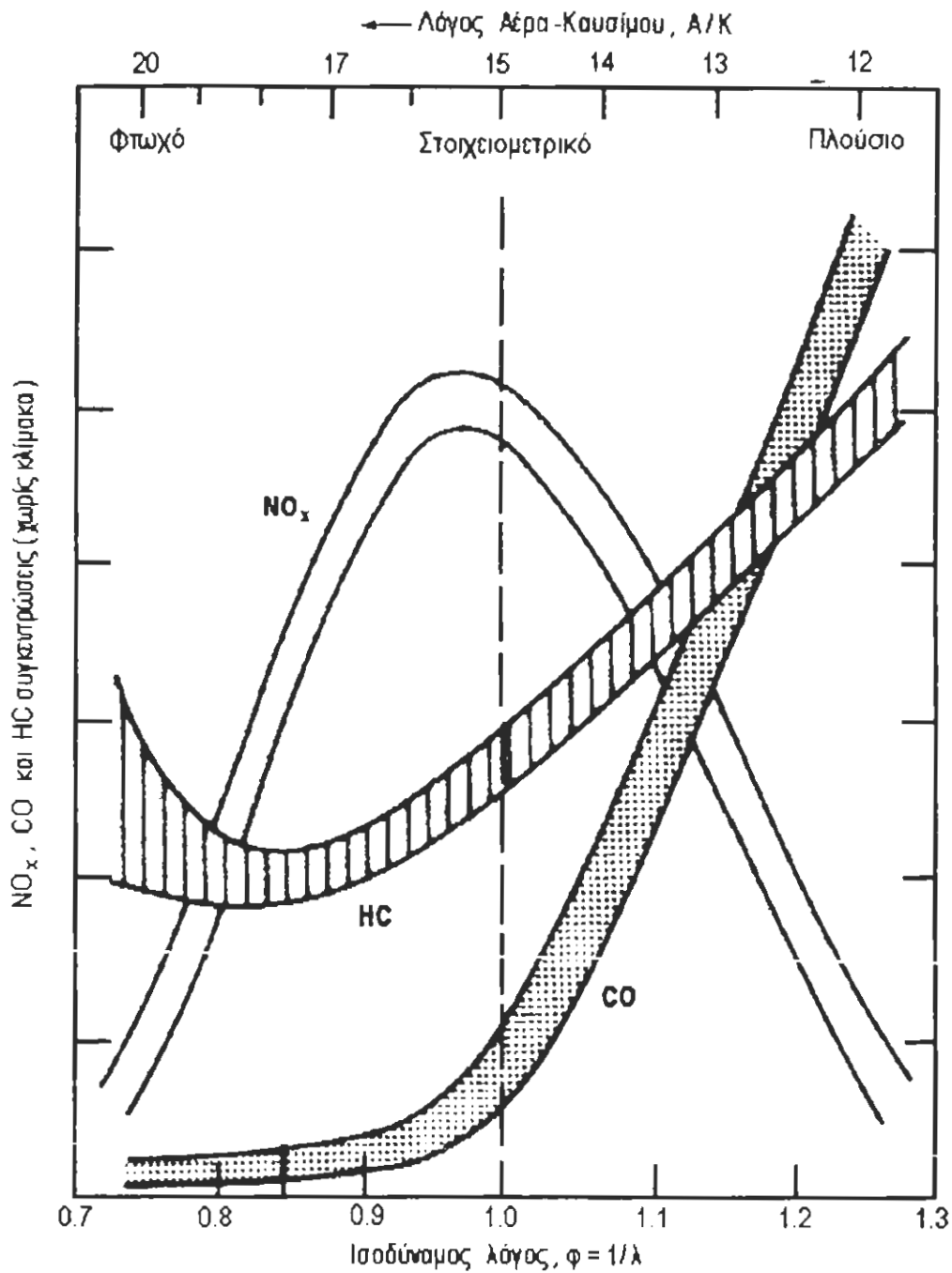
Ο αρχικός σκοπός του συστήματος ψύξης μιας μηχανής αυτοκινήτου είναι να διατηρεί τη θερμοκρασία του λεπτού λιπαντικού στρώματος μεταξύ των ελατηρίων του εμβόλου και τα τοιχώματα του κυλίνδρου σε αυτή ή σε χαμηλότερη θερμοκρασία. (Οι βαριά φορτωμένες μηχανές σε φορτηγά ή μηχανήματα έχουν ξεχωριστό ψυγείο λαδιού). Αν η θερμοκρασία γίνει σημαντικά υψηλότερη από αυτή, τα λιπαντικά διασπώνται αφήνοντας πίσω τους στερεά κατάλοιπα που προκαλούν στη μηχανή εμπλοκή. Μια μηχανή λειτουργώντας χωρίς το σύστημα ψύξης, θα καταστραφεί μέσα σε μερικά λεπτά. Εργαστηριακές μηχανές που έχουν κατασκευαστεί, χρησιμοποιούν στερεά λιπαντικά ( $MO_2S_2$ ) τα οποία μπορούν να αντέξουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτές οι μηχανές δεν έχουν σύστημα ψύξης και λειτουργούν σε θερμοκρασίες συγκρινόμενες με το σημείο τήξης του χάλυβα. Αυτές έχουν εξαιρετική οικονομία καυσίμου αλλά πολύ μεγάλα υλικά - μηχανολογικά προβλήματα. Η ψύξη των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και των κεφαλών τις κάνει κρύες αρκετά ώστε σε μια στενή αποσβεστική ζώνη προσκείμενη σε αυτές, η φλόγα να σβήνει και οι υδρογονάνθρακες, οι οποίοι είναι μέρος του μείγματος αέρα - καυσίμου, να μην καίγονται.

## 7.7 Οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ )

Το  $NO_x$  σχηματίζεται από το  $N_2$  και  $O_2$  σε φλόγες υψηλής θερμοκρασίας παρόμοιες με αυτές των μηχανών αυτοκινήτου. Οι μέγιστες θερμοκρασίες είναι της τάξης των 2430 °C. Το σχήμα 7.7.1 δείχνει την υπολογιζόμενη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση  $NO$  για μια τυπική καύση σε μια Μ.Ε.Κ.

## 7.8 Εκπομπές αποθήκευσης και μεταφοράς

Μια συστηματική προσέγγιση στο πρόβλημα των μηχανοκίνητων οχημάτων δείχνει ότι χρειάζεται να λάβουμε υπόψη τι συμβαίνει από τη στιγμή που το ορυκτό λάδι βγαίνει από το έδαφος μέχρι να καεί. Υπάρχουν εκπομπές στην παραγωγή, στη μεταφορά, στη διύλιση, στην αποθήκευση βενζίνης, στη μεταφορά της στο βενζινάδικο, στη μεταφορά στο αυτοκίνητο του πελάτη και στη χρήση του αυτοκινήτου.



Σχήμα 7.7.1 Γενική σχέση διαφόρων εκπομπών του  $\Phi$  (ή του  $A/K$ , παρίστανται στην αντίθετη κατεύθυνση στο πάνω μέρος του διαγράμματος) για βενζινομηχανή Ε.Κ. Οι ρύποι δεν παρίστανται σε κοινή κλίμακα, η κλίμακα για το  $CO$  είναι 500 φορές μεγαλύτερη από των  $HC$ .

### 7.9 Πτητικά οργανικά συστατικά (Π.Ο.Σ.)

Τα Π.Ο.Σ. είναι οργανικά υγρά ή στερεά των οποίων η πίεση εξάτμισης στη θερμοκρασία δωματίου είναι μεγαλύτερη από  $0,01 \text{ psia} = 0,0007 \text{ atm}$  και των οποίων τα

ατμοσφαιρικά σημεία βρασμού είναι μέχρι  $500^{\circ}\text{F} = 260^{\circ}\text{C}$  , πράγμα που σημαίνει ότι τα περισσότερα οργανικά στοιχεία έχουν λιγότερα από 12 άτομα άνθρακα.

Οι όροι Π.Ο.Σ και υδρογονάνθρακες, δεν είναι όμοιοι αλλά συχνά πρακτικά ταυτίζονται. Τα Π.Ο.Σ. συνεισφέρουν στο πρόβλημα των φωτοχημικών οξειδίων (αιθαλομίχλη , όζον ), των οποίων η γενική περιγραφή είναι :

Π.Ο.Σ. (κυρίως υδρογονάνθρακες) + οξειδία του αζώτου + ηλιακή ακτινοβολία  $\longrightarrow$  όζον  
(7.9.1)

Μερικά Π.Ο.Σ. είναι επίσης ισχυροί απορροφητές υπερύθρων ακτινών και έτσι συνεισφέρουν στο πρόβλημα του θερμοκηπίου . Μερικοί είναι γνωστό ότι είναι τοξικοί ή καρκινογενείς. Τα Π.Ο.Σ. είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα ως υγρά καύσιμα (προπάνιο , βενζίνη, πετρέλαιο, κηροζίνη) , διαλύτες ή χημικοί καταλύτες (π.χ. χλωριούχο βινύλιο ως το βασικό ρευστό για πολυβινυλοχλωρίδιο - PVC - ένα από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα πλαστικά). Η εκπομπή τους συνεισφέρει στο πρόβλημα του νέφους , του θερμοκηπίου και πιθανόν στην τοξικότητα του αέρα.

## 7.10 Εναλλακτικοί έλεγχοι

Αν εκπέμπουμε Π.Ο.Σ. και θέλουμε να μειώσουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε αυτές τις εκπομπές, ποιες είναι οι εναλλακτικές μας λύσεις;

1. Να τα αντικαταστήσουμε με άλλο μη-Π.Ο.Σ υλικό.
2. Να αποτρέψουμε διαρροές των Π.Ο.Σ. από τα δοχεία, καπάκια κλπ .
3. Να απορροφήσουμε τα Π.Ο.Σ. από τη ροή του αέρα που τα περιέχει μέσα σε στερεό απορροφητή και είτε να πεταχτούν από τον απορροφητή βρίσκοντας μέρος εναπόθεσης ( πράγμα που γίνεται όλο και πιο δύσκολο με τον καιρό) ή να αναπαράγουμε τα απορροφημένα και να επαναφέρουμε τα Π.Ο.Σ. σε ημιτελή μορφή για επαναχρησιμοποίηση ή καταστροφή.
4. Να κάψουμε τα Π.Ο.Σ. παράγοντας πολύ βλαβερά υλικά και να τα εναποθέσουμε στην ατμόσφαιρα.
5. Να συμπιέσουμε τα Π.Ο.Σ. έξω από τη ροή των αερίων επαναφέροντάς τα για επαναχρησιμοποίηση ή καταστροφή.
6. Να τροποποιήσουμε τη διαδικασία για να μειώσουμε ή να ελαχιστοποιήσουμε την απελευθέρωση Π.Ο.Σ.

## 7.11 Απώλειες γεμίματος – εξαερισμού και αδειάσματος

Δεξαμενές που περιέχουν υγρά Π.Ο.Σ. μπορούν να εκπέμψουν ατμούς Π.Ο.Σ. εξαιτίας των δραστηριοτήτων γεμίματος και αδειάσματος καθώς και των αλλαγών θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης. Το σχήμα 7.11.1 δείχνει μια απλή δεξαμενή να γεμίζεται με υγρό από μια σωλήνα. Καθώς το υγρό εισέρχεται στη δεξαμενή και η στάθμη του υγρού ανεβαίνει, ο χώρος των ατμών πάνω από τη δεξαμενή μειώνεται σε όγκο. Συνήθως αυτός ο χώρος είναι συνδεδεμένος με μια οπή αερισμού με την ατμόσφαιρα έτσι ώστε ο ατμός, ο οποίος είναι κυρίως αέρας, να αποβάλλεται. Όταν το υγρό αποτραβηχτεί από τη δεξαμενή, αέρας θα ρεύσει μέσα από την οπή αερισμού για να γεμίσει το διαθέσιμο χώρο από την πτώση της στάθμης του υγρού. Αν η δεξαμενή δεν αερίζονταν, αλλάζοντας τη στάθμη του υγρού, θα προκαλούσαμε υπερπίεση κατά τη διάρκεια της πλήρωσης ή κενό κατά τη διάρκεια της εκκένωσης με αποτέλεσμα ακόμα και την καταστροφή της δεξαμενής!

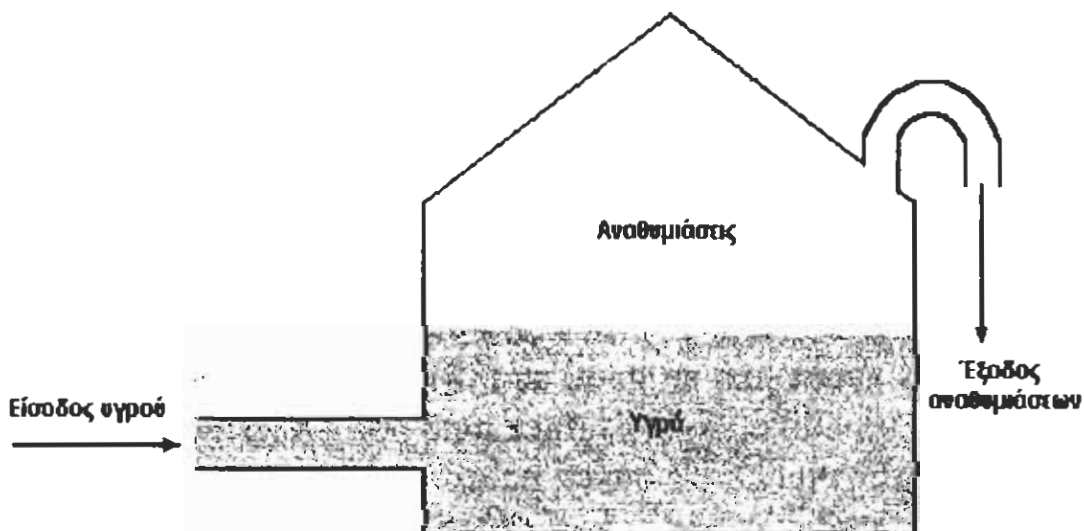
Και για τα τρία είδη απωλειών μπορούμε να γράψουμε :

$$\text{ΠΟΣ εκπομπές} = \left( \begin{array}{l} \text{όγκος μίγματος αέρα - ΠΟΣ} \\ \text{εκτοπισμένο από τη δεξαμενή} \end{array} \right) \left( \begin{array}{l} \text{συγκέντρωση ΠΟΣ} \\ \text{σε αυτό το μίγμα} \end{array} \right)$$

$$m_i = \Delta VC_i \quad (7.11.1)$$

Όπου  $m_i$  = εκπεμπόμενη μάζα συστατικού  $i$

$C_i$  = συγκέντρωση ( $\text{lb/ft}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) στο μεταβιβαζόμενο αέριο



**Σχήμα 7.11.1** Απώλειες μετατόπισης συμβαίνουν όταν μια εξαεριζόμενη δεξαμενή γεμίζεται με υγρό, με αποτέλεσμα να εκτοπίζει τις αναθυμιάσεις από τον κύριο χώρο της δεξαμενής. Τα τοιχώματα της δεξαμενής στηρίζουν τις οροφές των μικρών δεξαμενών με κωνικές οροφές. Οι μεγάλες δεξαμενές έχουν εσωτερικά στηρίγματα. Όλες έχουν κάποιο είδος εξαερισμού στην οροφή.

Η συγκέντρωση  $c_i$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$c_i = \frac{y_i M_i}{V_{\text{διαλυμένου αερίου}}} \quad (7.11.2)$$

Αντικαθιστώντας τα κλασματικά mol από το νόμο του Raoult

$$y_i = x_i \frac{P_i}{P} \quad (7.11.3)$$

με τον όγκο από το νόμο του τέλειου αερίου, στην εξίσωση 7.11.1 βρίσκουμε :

$$\frac{m_i}{\Delta V} = \frac{x_i P_i M_i}{P} \cdot \frac{P}{RT} = \frac{x_i P_i M_i}{RT} \quad (7.11.4)$$

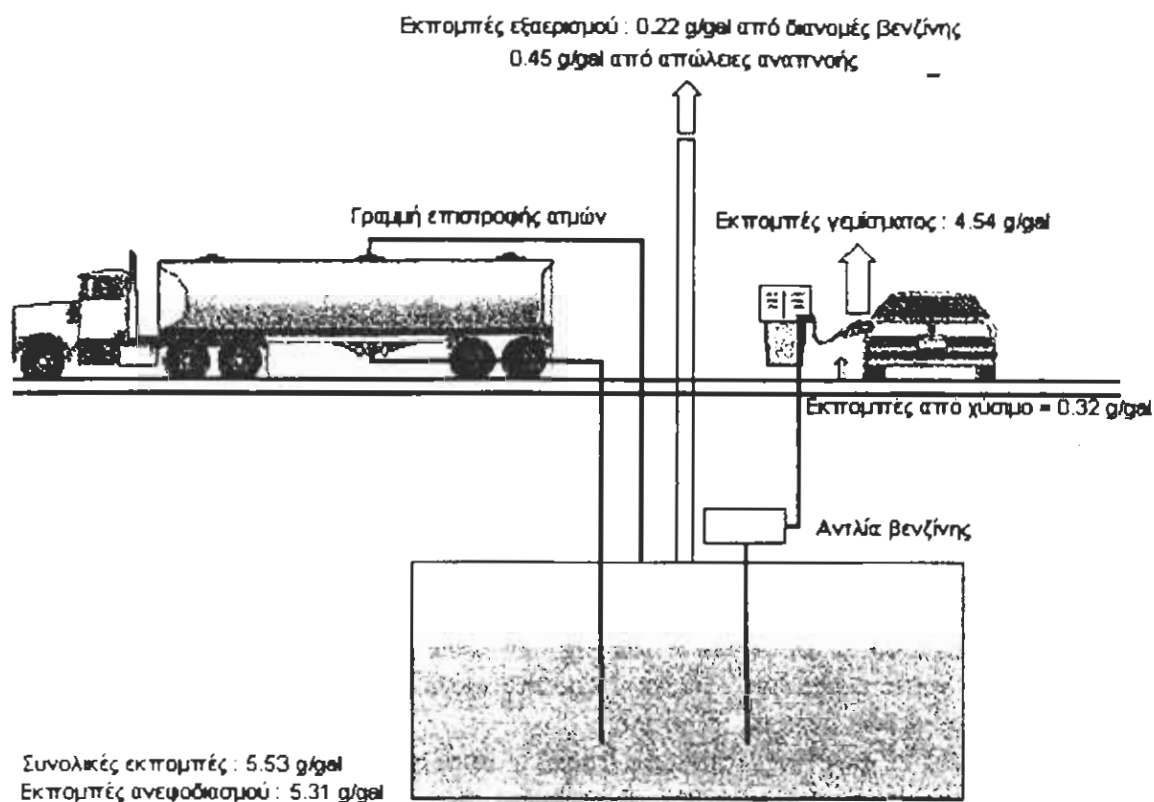
Οι απώλειες αναπνοής, πλήρωσης και εκκένωσης ελαχιστοποιούνται προσκολλώντας στον αερισμό της δεξαμενής στο σχήμα 7.11.1 ( και οποιασδήποτε άλλης δεξαμενής ) μια " βαλβίδα πίεσης - κενού ", αλλιώς αποκαλούμενη " βαλβίδα συντήρησης ατμού ". Αυτές οι βαλβίδες παραμένουν κλειστές όταν η διαφορά πίεσης πέραν από αυτές είναι τυπικά μικρή, 0,5 psi θετική πίεση και 0,062 psi αρνητική. Αυτές ανοίγουν για συγκεκριμένες ροές ατμών μέσα και έξω, οι οποίοι προκαλούνται γεμίζοντας και εκκενώνοντας, αλλά και από μεγάλες αλλαγές θερμοκρασίας και πίεσης.

Για τη μεταφορά της βενζίνης από τα βυτία στις υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, στα βενζινάδικα, χρησιμοποιείται η εγκατάσταση του σχήματος 7.11.2. Σε αυτό το σύστημα ο ατμός που μετατοπίστηκε από τη δεξαμενή που γέμισε, μεταφέρθηκε πίσω στο βυτίο που εκκενώθηκε.

Αποσύροντας υγρό από το βυτίο δημιουργείται κενό το οποίο ρουφάει τους ατμούς από την υπόγεια δεξαμενή μέσα στο βυτίο. Οι ατμοί από την υπόγεια δεξαμενή έτσι, πηγαίνουν πίσω στο διυλιστήριο ή σε ογκώδη τερματικά βενζίνης, όπου εκεί επεξεργάζονται με διάφορους τρόπους.

Η γραμμή αερισμού του σχήματος 7.11.2 παραμένει ανοικτή συνέχεια για να αποφευχθεί όποια υπερβολική πίεση ή κενό στο σύστημα . Αυτό το σύστημα ανακτά το 95% των ατμών από το γέμισμα της δεξαμενής, ενώ το υπόλοιπο 5% (0,22 gr/gal στο σχήμα 7.11.2) εκλύεται από τον αερισμό της δεξαμενής.

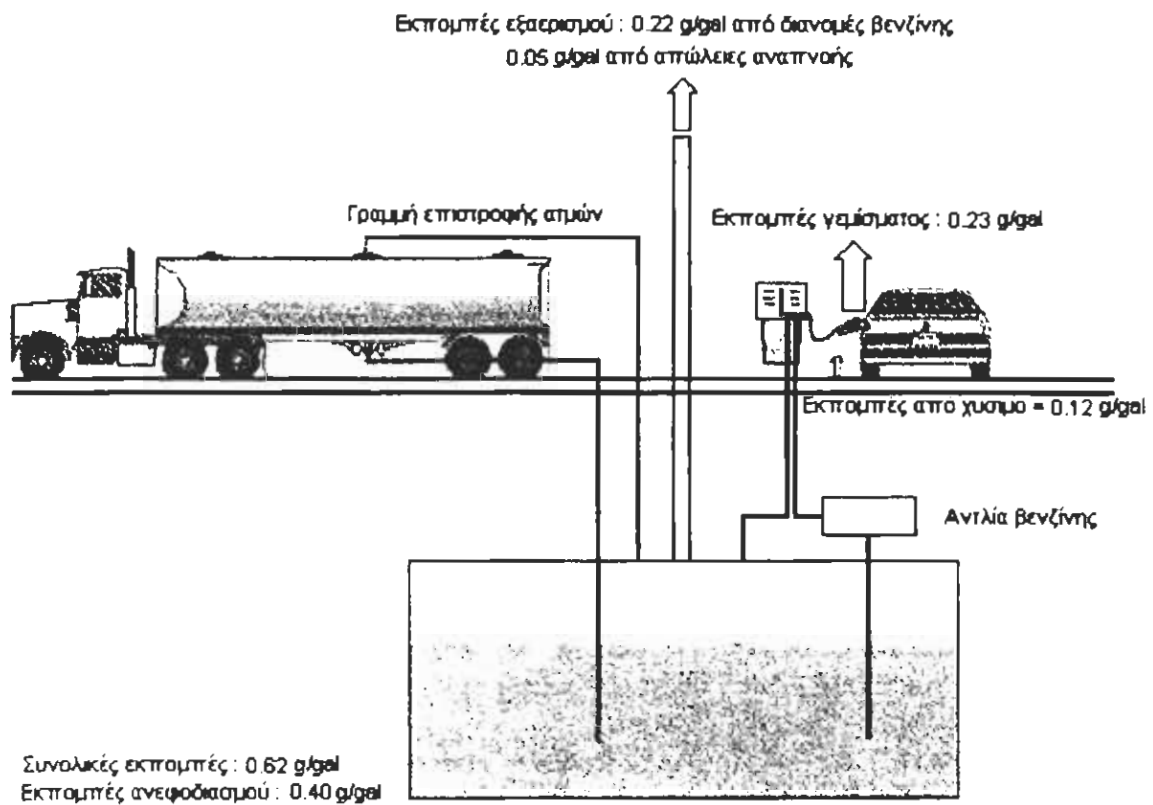




**Σχήμα 7.11.2** Εφοδιασμός ενός πρατηρίου βενζίνης με υπόγεια δεξαμενή η οποία έχει σύστημα επιστροφής ατμών. Αυτό το σύνολο του εξοπλισμού κοινώς ονομάζεται στάδιο ελέγχου 1. Οι εκπομπές που παρουσιάζονται είναι ένα μίγμα από υπολογισμένες και πειραματικές τιμές.

Σε μερικές παραλλαγές του συστήματος ο ατμός από το ρεζερβουάρ του πελάτη ωθείται πίσω στη δεξαμενή όπως φαίνεται στο σχήμα 7.11.3. Αυτό το σύστημα μειώνει τις απώλειες μετατόπισης κατά 95% και τις απώλειες χυσίματος κατά 62%. Οι απώλειες αναπνοής μειώνονται και αυτές λόγω του ότι πολύ λιγότερος αέρας εισέρχεται στη δεξαμενή.

Ακόμα όμως και με αυτά τα συστήματα επανάκτησης το ποσό της βενζίνης που εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα είναι μεγάλο.



**Σχήμα 7.11.3** Εφοδιασμός με βενζίνη από ένα πρατήριο με υπόγεια δεξαμενή, ενός οχήματος χρησιμοποιώντας ένα σύστημα επιστροφής ατμών. Αυτό το σύνολο εξοπλισμού κοινώς καλείται στάδιο έλεγχου 2. Οι εκπομπές που παρουσιάζονται είναι ένα μίγμα από υπολογισμένες και πειραματικές τιμές.

## 8. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ – ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ

### 8.1 Δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα

Η δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα περιλαμβάνει τη συλλογή ατμοσφαιρικών ρύπων ή ατμοσφαιρικού αέρα από μια περιοχή. Ο σκοπός μιας τέτοιας δειγματοληψίας μπορεί να είναι:

- α) Παρακολούθηση (monitoring) της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής και προσδιορισμός της ποιότητας της ατμόσφαιρας, ιδιαίτερα των κατοικημένων περιοχών.
- β) Προσδιορισμός της επίδρασης διαφόρων πηγών εκπομπής στην ποιότητα της ατμόσφαιρας μιας περιοχής: διάκριση φυσικών και ανθρωπογενών πηγών, ταυτοποίηση και ποσοστοποίηση των πηγών εκπομπής.
- γ) Μελέτη των μηχανισμών αντίδρασης, σχηματισμού και διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα.
- δ) Συλλογή στοιχείων για χρήση στην επιλογή των κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής.

Ο σκοπός της δειγματοληψίας αποτελεί τη βάση για το σχεδιασμό της, δηλαδή την επιλογή της θέσης, της διάρκειας και της συχνότητάς της.

Βασικά, στόχος κάθε δειγματοληψίας είναι η συλλογή **αντιπροσωπευτικού δείγματος**. Κανένα αναλυτικό αποτέλεσμα, ανεξάρτητα από την ακρίβεια και την ευαισθησία της μεθόδου που εφαρμόζεται, δεν μπορεί να είναι χρήσιμο αν το δείγμα που υπόκειται σε ανάλυση δεν είναι αντιπροσωπευτικό. Στον έλεγχο της ρύπανσης της ατμόσφαιρας ο στόχος αυτός δεν είναι πάντοτε εφικτός. Κι αυτά επειδή η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος είναι συνάρτηση τόσο της μορφής των συλλεγόμενων ρύπων όσο και της επίδρασης διαφόρων παραγόντων που μπορούν να αλλοιώσουν τη σύστασή του.

Γενικά η σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα σε ένα συγκεκριμένο σημείο εξαρτάται από τις υπάρχουσες πηγές εκπομπής ρύπων, τη συγκέντρωση και το χρόνο παραμονής των ρύπων στην ατμόσφαιρα, τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την παρουσία εμποδίων (π.χ. κτίρια, δένδρα) που δημιουργούν τυρβώδη ροή του αέρα κ.ά.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στη δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα.

## 8.2 Μετεωρολογικοί παράγοντες

Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, καθώς οι επιδράσεις από τις ετήσιες ή εποχιακές διακυμάνσεις των μετεωρολογικών συνθηκών υπερκαλύπτουν τις επιδράσεις από τις αντίστοιχες διακυμάνσεις των εκπομπών.

Οι μετεωρολογικές παράμετροι που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα είναι η άπνοια και η θερμοκρασιακή αναστροφή, η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου και η βροχή. Σε μικρότερο βαθμό επιδρούν η θερμοκρασία, η υγρασία και η ηλιακή ακτινοβολία.

Η καταγραφή των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στη διάρκεια της δειγματοληψίας είναι απαραίτητη για τη σωστή εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Σήμερα, οι σύγχρονοι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι εξοπλισμένοι με αυτόματα όργανα μέτρησης των βασικότερων μετεωρολογικών παραμέτρων.

## 8.3 Τοπογραφικοί παράγοντες

Οι τοπογραφικοί παράγοντες σε συνδυασμό με το σκοπό της δειγματοληψίας και την παρουσία τοπικών πηγών εκπομπής αποτελούν τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης θέσης δειγματοληψίας. Σε κάθε περίπτωση προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός της δειγματοληψίας πρέπει να πληρείται μια βασική προϋπόθεση: **η συσκευή δειγματοληψίας να θεωρείται ως ο φυσικός αποδέκτης των ρύπων**. Παρόλο που δεν έχουν καθορισθεί πρότυπες διαδικασίες για την επιλογή της θέσης δειγματοληψίας, υπάρχουν ορισμένοι γενικοί κανόνες όπως:

**α)** Η δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα πρέπει να γίνεται σε ύψος τουλάχιστον δύο μέτρων από το έδαφος. Το μέγιστο ύψος καθορίζεται από το σκοπό της δειγματοληψίας (π.χ. μελέτη της κατακόρυφης κατανομής ρύπων στην ατμόσφαιρα), αλλά θα πρέπει να διατηρείται σταθερό προκειμένου για δίκτυο σταθμών δειγματοληψίας.

**β)** Η θέση της δειγματοληψίας δεν πρέπει να είναι κοντά σε μεγάλες κατασκευές, π.χ. ψηλά κτίρια. Γενικά η κορυφή των γύρω κατασκευών δεν πρέπει να σχηματίζει γωνία μεγαλύτερη των 30° με το σημείο αναρρόφησης του δείγματος.

**γ)** Το σημείο αναρρόφησης δεν πρέπει να είναι εκτεθειμένο σε τοπικές πηγές εκπομπής (π.χ. καμινάδες).

δ) Η θέση της δειγματοληψίας πρέπει να είναι προστατευμένη από τις καιρικές συνθήκες, ενδεχόμενες φθορές και να διαθέτει απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

Μέσα στο πλαίσιο αυτών των γενικών κανόνων είναι δυνατή μία ευρεία επιλογή θέσεων δειγματοληψίας.

#### 8.4 Διάρκεια - συχνότητα δειγματοληψίας

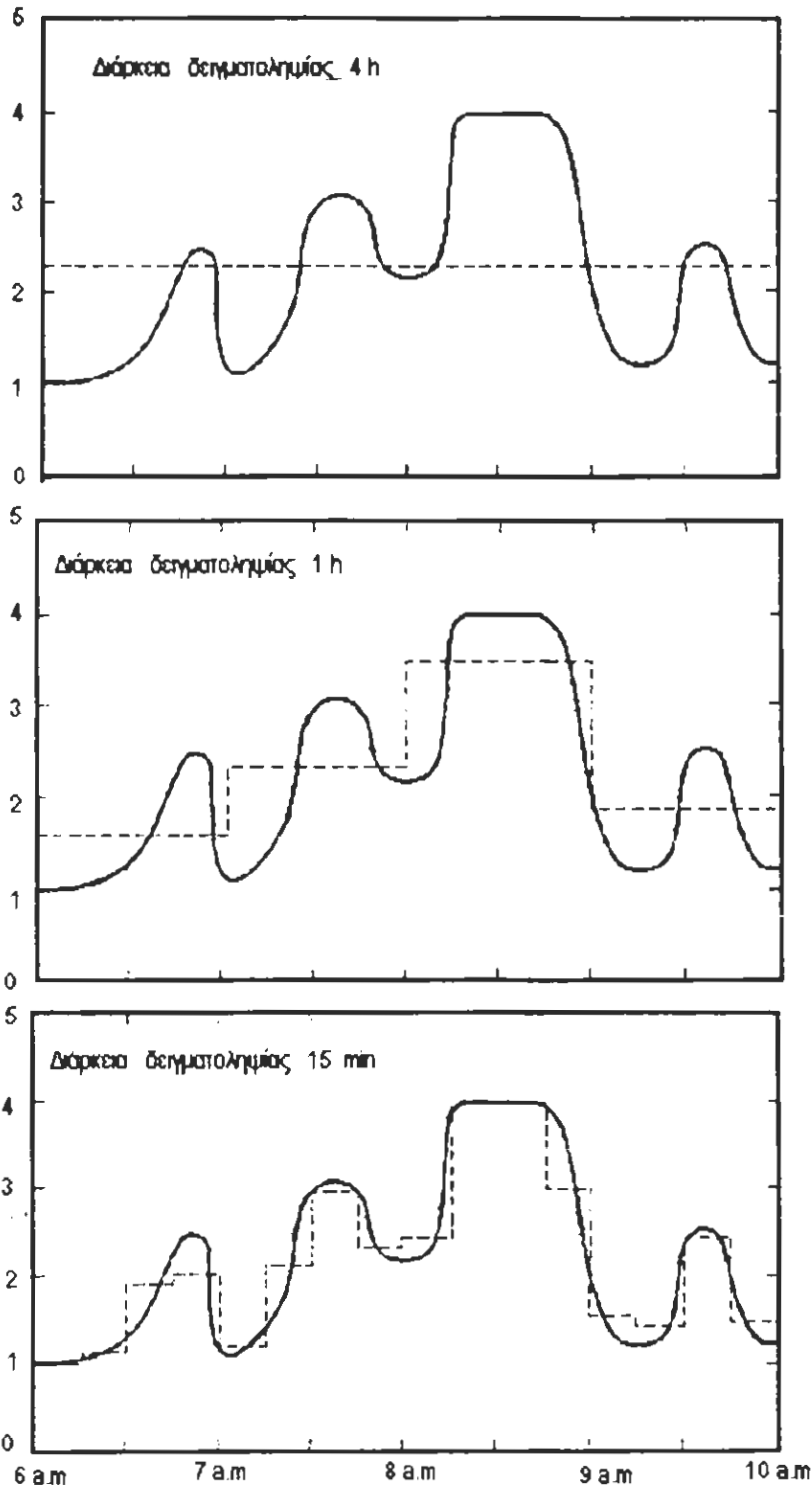
Η διάρκεια και η συχνότητα μιας δειγματοληψίας, δηλαδή πόσο χρόνο διαρκεί και πόσο συχνά επαναλαμβάνεται, καθορίζεται κυρίως με βάση το σκοπό της μελέτης που διεξάγεται, τη φύση των ρύπων που εξετάζονται, τις πηγές εκπομπής τους και τη συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα.

Σε ό,τι αφορά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, αυτή μπορεί να κυμαίνεται από μερικά λεπτά μέχρι και 48 ώρες, ανάλογα με τη συγκέντρωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα και τη χημική τους σταθερότητα. Η ποικιλία αυτή οφείλεται κατά ένα μέρος στη φύση των επιδράσεων που εμφανίζει κάποιος ρύπος στον αποδέκτη του. Για παράδειγμα, οι βλαβερές επιδράσεις του διοξειδίου του αζώτου στους οργανισμούς εκδηλώνονται μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έκθεσή τους, γι' αυτό απαιτείται δειγματοληψία μικρής διάρκειας και μεγάλης συχνότητας. Αντίθετα η μέση ετήσια συγκέντρωση μολύβδου στην ατμόσφαιρα παρέχει χρήσιμες πληροφορίες καθώς οι επιδράσεις του μολύβδου στους ζώντες οργανισμούς είναι συσσωρευτικές και μακροπρόθεσμες.

Ο καθορισμός της συχνότητας και της διάρκειας μιας δειγματοληψίας πρέπει να γίνεται προσεκτικά ώστε να παρακολουθούνται όσο το δυνατόν πιστότερα οι πραγματικές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορεί να είναι ωριαίες (εκπομπές από την κυκλοφορία) ημερήσιες, (βιομηχανικές εκπομπές) ή εποχιακές (οικιακή θέρμανση). Στο σχήμα 8.4.1 φαίνονται τρεις διαφορετικές επιλογές διάρκειας και συχνότητας δειγματοληψίας σε σχέση με τη διακύμανση της συγκέντρωσης ενός ρύπου στην ατμόσφαιρα.

Προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα πρότυπα ποιότητας της ατμόσφαιρας (όρια), η διάρκεια και η συχνότητα της δειγματοληψίας καθορίζεται από κανονιστικές διατάξεις. Στις διατάξεις αυτές η διάρκεια της δειγματοληψίας ποικίλει από ρύπο σε ρύπο (π.χ. όρια ωριαίας, 8ωρης ή 24ωρης βάσης). Για την εκτίμηση του βαθμού στον οποίο ένα πρόγραμμα δειγματοληψιών ανταποκρίνεται στις πραγματικές διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν αναπτυχθεί ειδικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος (μοντέλο)

Saltzman. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, αν οι πραγματικές περιοδικές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ενός ρύπου διαρκούν λιγότερο από την περίοδο της δειγματοληψίας τότε αυτές σχεδόν εξαλείφονται. Αντίθετα αν ο περιοδικός κύκλος των διακυμάνσεων είναι περίπου 5.5 φορές μεγαλύτερος από την περίοδο της δειγματοληψίας, τότε παρατηρείται το 90% της πραγματικής διακύμανσης της συγκέντρωσης.



Σχήμα 8.4.1 Επίδραση της διάρκειας δειγματοληψίας στη διακύμανση της συγκέντρωσης ενός ρύπου. (—) πραγματική συγκέντρωση  
(----) προσδιοριζόμενη συγκέντρωση

## 8.5 Μορφή των ρύπων της ατμόσφαιρας

- Η μορφή με την οποία βρίσκονται οι ρύποι στην ατμόσφαιρα καθορίζει και τη μέθοδο δειγματοληψίας. Γενικά διακρίνουμε δύο κατηγορίες ρύπων ανάλογα με τη μορφή τους : τους αέριους ρύπους (αέρια, ατμοί) και τους σωματιδιακούς (στερεά ή υγρά σωματίδια σε διασπορά στην αέρια φάση). Η δειγματοληψία αερίων από την ατμόσφαιρα απαιτεί μεγάλη προσοχή για αποφυγή της αλλοίωσης της σύστασης του δείγματος. Αν και τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας δεν υπόκεινται στην επίδραση δυνάμεων αδράνειας ή ηλεκτροστατικών δυνάμεων όπως τα αιωρούμενα σωματίδια, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις κατά τη δειγματοληψία:
- Η δειγματοληψία των αέριων ρύπων πρέπει να γίνεται από μια καλά αναμεμιγμένη αέρια μάζα, μέσα στην οποία ο αέριος ρύπος θα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος.
- Τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας πρέπει να βρίσκονται συχνά σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση και να μπορούν να αντιδράσουν με άλλα συστατικά του δείγματος ή με τα υλικά των συστημάτων δειγματοληψίας .
- Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη μία προκατεργασία του δείγματος πριν τη συλλογή, π.χ. διήθηση για απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων, κατακράτηση της υγρασίας κ.ά., που μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση της σύστασής του.

Οι **σωματιδιακοί ρύποι** (aerosol) αποτελούνται από διάκριτα σωματίδια μάζας και ως εκ τούτου υπόκεινται στην επίδραση δυνάμεων αδράνειας. Γι' αυτό και η συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος σωματιδίων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Αυτό φαίνεται παρακάτω στο παράδειγμα του σχήματος 8.5.1.

Έστω αέρια μάζα, η οποία κινείται ομοιόμορφα και οριζόντια. Η μάζα αυτή παριστάνεται με τις ρευστοδυναμικές γραμμές του σχήματος 8.5.1 α. Αν στην αέρια μάζα εισαχθεί το άκρο της συσκευής δειγματοληψίας χωρίς να αναρροφάται δείγμα, τότε οι ρευστοδυναμικές γραμμές παρακάμπτουν το εμπόδιο, όπως στο σχήμα 8.5.1 β. Αν αρχίσει η αναρρόφηση του δείγματος (με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού), τότε ένα μέρος της αέριας μάζας θα εισέλθει στο σωλήνα δειγματοληψίας (σχήμα 8.5.1 γ). Με αύξηση της ταχύτητας αναρρόφησης μπορεί να επιτευχθεί εξίσωση της γραμμικής ταχύτητας εισόδου του δείγματος στη συσκευή και της γραμμικής ταχύτητας κίνησης της αέριας μάζας. Στην περίπτωση αυτή έχουμε **ισοκινητική δειγματοληψία** (σχήμα 8.5.1δ). Επιπλέον αύξηση της ταχύτητας αναρρόφησης θα έχει πάλι ως αποτέλεσμα τη διατάραξη των ρευστοδυναμικών γραμμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.1 ε. Οι

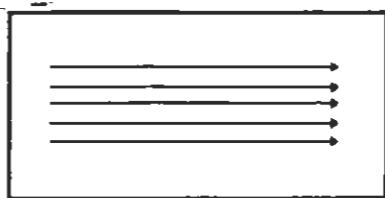
διάφορες συνθήκες δειγματοληψίας που διαταράσσουν τη μορφή των ρευστοδυναμικών γραμμών δεν παρεμποδίζουν τη συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος όταν συλλέγονται μόνο αέρια συστατικά με την προϋπόθεση, φυσικά, ότι αυτά είναι πλήρως αναμεμιγμένα με την αέρια μάζα.

Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση δειγματοληψίας ρυπογόνων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Κι αυτό επειδή τα τελευταία, ως διάκριτα σωματίδια μάζας, έχουν αδράνεια που η διεύθυνσή της συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταχύτητάς τους. Έτσι τα σωματίδια που ταξιδεύουν μέσα στην ομοιόμορφη αέρια μάζα (σχήμα 8.5.1 κ) έχουν αδράνεια παράλληλη με τις ρευστοδυναμικές γραμμές. Αν, όπως στην περίπτωση 8.5.1 ι και 8.5.1 θ, οι γραμμές εξαναγκαστούν να αλλάξουν πορεία, οι δυνάμεις συνοχής των μορίων της αέριας μάζας δεν θα είναι ικανές να παρασύρουν και τα σωματίδια σε αυτή την αλλαγή. Τα σωματίδια εξαιτίας της αδράνειας, θα συνεχίσουν την κίνησή τους μέσα στο σωλήνα δειγματοληψίας. Το αποτέλεσμα θα είναι η συλλογή μεγαλύτερης ποσότητας σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αερίου δείγματος, δηλαδή συλλογή μη αντιπροσωπευτικού δείγματος. Μόνο όταν η ταχύτητα εισόδου της αέριας μάζας μέσα στο σωλήνα δειγματοληψίας γίνει ίση με την ταχύτητα κίνησής της έξω από αυτόν (ισοκινητική δειγματοληψία, σχήμα 8.5.1 η), συλλέγουμε τη σωστή αναλογία σωματιδίων ανά μονάδα όγκου δείγματος. Τότε το δείγμα είναι **αντιπροσωπευτικό**. Αν η ταχύτητα αναρρόφησης αυξηθεί πέρα από τις ισοκινητικές συνθήκες (σχήμα 8.5.1 ζ), η αδράνεια των σωματιδίων θα έχει πάλι ως αποτέλεσμα μη αντιπροσωπευτική δειγματοληψία, εφόσον θα συλλέγεται μικρότερη ποσότητα σωματιδίων ανά μονάδα όγκου αερίου δείγματος.

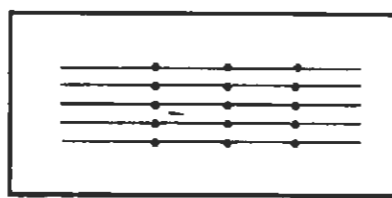
Από το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται καθαρά πως απαραίτητη προϋπόθεση για τη συλλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος σωματιδιακών ρύπων είναι η ισοκινητική δειγματοληψία, κάτι που δεν είναι απαραίτητο στην περίπτωση των αερίων ρύπων.

Η αδράνεια των σωματιδίων μπορεί επίσης να προκαλέσει σφάλματα δειγματοληψίας αν ο σωλήνας αναρρόφησης του δείγματος δεν είναι κατάλληλα ευθυγραμμισμένος με τη διεύθυνση κίνησης της αέριας μάζας (σχήμα 8.5.2).

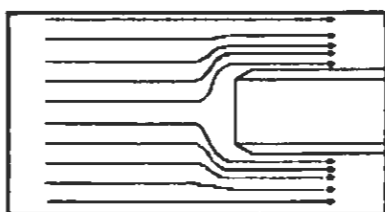




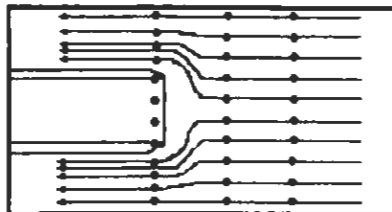
α



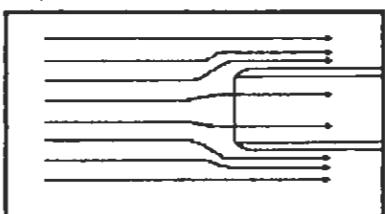
κ



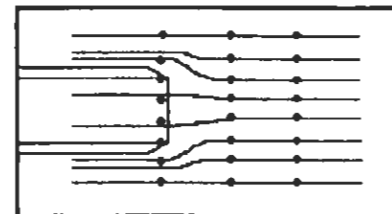
β



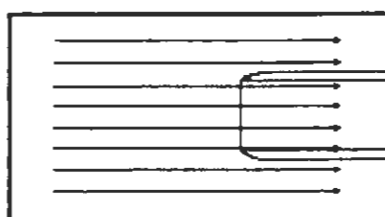
λ



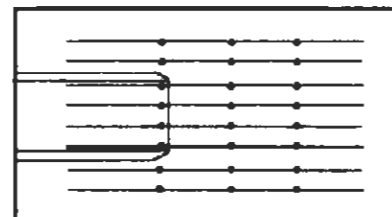
γ



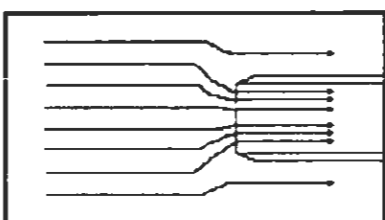
θ



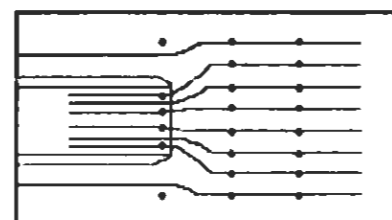
δ



η



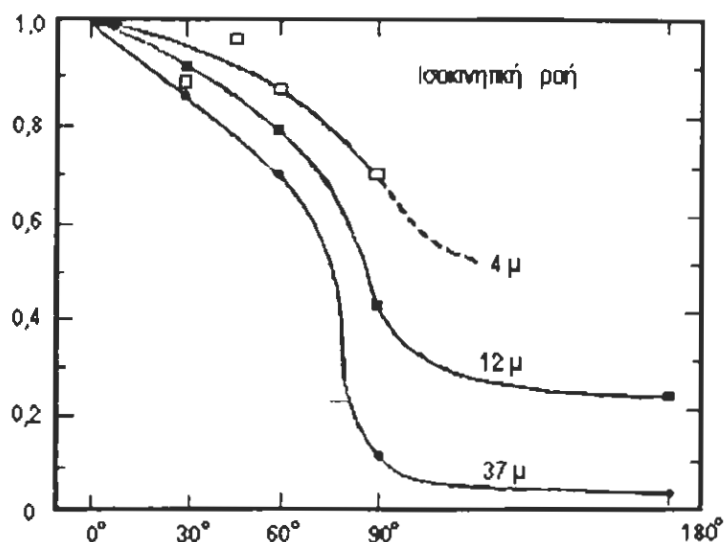
ε



ζ

**Σχήμα 8.5.1** Δειγματοληψία αερίων και από την ατμόσφαιρα  
(βλέπε επεξηγήσεις στο κείμενο).

Σε συνθήκες μη ισοκινητικής δειγματοληψίας η βαρύτητα και η επίδραση του ανέμου μπορεί να προκαλέσει παρεμπόδιση στην ποσοτική συλλογή σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.5.3, η συλλογή σωματιδίων από την ατμόσφαιρα ελαττώνεται όσο αυξάνει το μέγεθος των σωματιδίων και η ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 8.5.2 Επίδραση της ευθυγράμμισης του σωλήνα δειγματοληψίας με τη διεύθυνση κίνησης της αέριας μάζας στη δειγματοληψία σταγονιδίων φθαλικού διαθυλαθέρη διαμέτρου 4, 12 και 37 μm.

Η επίδραση της βαρύτητας των σωματιδίων όταν η επιφάνεια συλλογής είναι στραμμένη προς τα επάνω ή προς τα κάτω, περιγράφεται από τη σχέση :

$$C_c = \left(1 - \frac{U_s}{U_c}\right) C_a$$

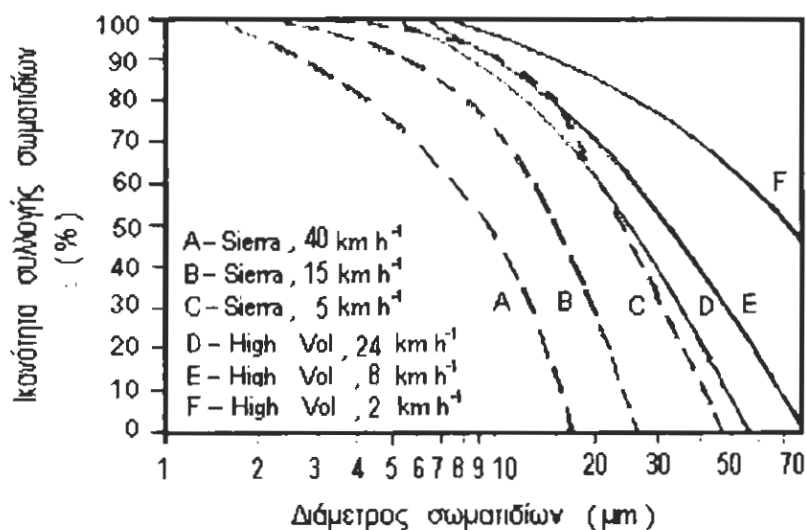
όπου:

$C_c$  = συγκέντρωση σωματιδίων στο δείγμα

$U_s$  = ταχύτητα κατακάθισης των σωματιδίων

$U_c$  = ταχύτητα δειγματοληψίας

$C_a$  = συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα



Σχήμα 8.5.3 Επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στη δειγματοληψία σωματιδίων από την ατμόσφαιρα (δειγματολήπτες Sierra και Standard Hi-Vol).

## 8.6 Συσκευές δειγματοληψίας

Οι συσκευές δειγματοληψίας μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση της σύστασης του συλλεγόμενου ατμοσφαιρικού δείγματος. Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως:

**α)** Χρησιμοποίηση ακατάλληλων υλικών για την κατασκευή τους. Τα μέρη των συσκευών δειγματοληψίας που έρχονται σε επαφή με το δείγμα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ειδικά υλικά, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τη φύση του συλλεγόμενου ρύπου. Κριτήρια επιλογής των υλικών είναι οι προσροφητικές τους ιδιότητες και οι επιφανειακές προσμίξεις.

Είναι γνωστά ότι η ύαλος παρουσιάζει μεγάλη συγγένεια με συστατικά όπως το νερό, το διοξείδιο του αζώτου, το βενζόλιο, η ανιλίνη κ.ά. Το διοξείδιο του αζώτου ειδικά προσροφάται τόσο ισχυρά στο βοριοπυριτικό γυαλί ώστε απομακρύνεται μόνο με έκπλυση με αντιδραστήριο Saltzman.

Η διάχυση αερίων συστατικών στα πλαστικά είναι ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα στη δειγματοληψία από την ατμόσφαιρα. Τα ελαστομερή υλικά (περιλαμβανομένου και του φυσικού καουτσούκ), το νεοπρένιο και το P.V.C. , παρουσιάζουν έντονα αυτό το φαινόμενο. Αντίθετα οι απώλειες αερίων συστατικών λόγω διάχυσης σε αδρανή πλαστικά όπως το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Teflon), το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο, είναι αμελητέες.

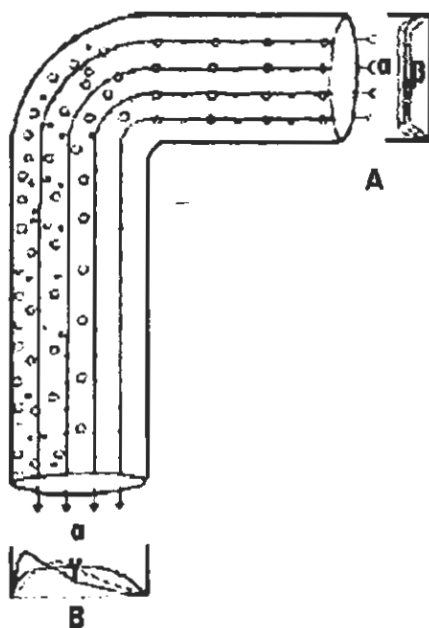
**β)** Συμπύκνωση ατμοσφαιρικής υγρασίας μέσα στη συσκευή δειγματοληψίας. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει δραστικές συνθήκες για ορισμένα αέρια συστατικά ή απομάκρυνσή τους από το δείγμα λόγω διάλυσης στην υγρή φάση. Οι σωματιδιακοί ρύποι επίσης μπορούν να είναι υγροσκοπικά και να προσροφούν υδρατμούς.

**γ)** Διαρροές αερίων συστατικών του δείγματος ή κατακρήση αιωρούμενων σωματιδίων στα τοιχώματα των σωλήνων αναρρόφησης, ιδιαίτερα σε σημεία όπου υπάρχουν γωνίες. Στο σχήμα 8.6.1 φαίνεται πώς μεταβάλλεται η κατανομή των αιωρούμενων σωματιδίων σ' ένα δείγμα, εξαιτίας της καμπής που σχηματίζει ο σωλήνας δειγματοληψίας.

**δ)** Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας. Η έκθεση της συσκευής δειγματοληψίας στην ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει την έναρξη φωτοχημικών αντιδράσεων, καθώς πολλοί αέριοι ρύποι είναι φωτοχημικά δραστικοί.

**ε)** Επανασυλλογή, δηλαδή αναρρόφηση δείγματος που ήδη έχει περάσει από το σύστημα δειγματοληψίας. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με χρησιμοποίηση μεγάλου

μήκους σωλήνων εξάτμισης, οι οποίοι εκβάλλουν μακριά από το σημείο αναρρόφησης του δείγματος.



**Σχήμα 8.6.1** Διαφοροποίηση της κατανομής των σωματιδίων στο δείγμα εξαιτίας της καμπής του σωλήνα δειγματοληψίας.  
A. Αρχική κατανομή σωματιδίων (α. μικρά, β. μεγάλου μεγέθους).  
B. Τελική κατανομή σωματιδίων (α. μικρά, β. μεγάλα, γ. μεσαία)

## 8.7 Δειγματοληψία από πηγές εκπομπής

Η δειγματοληψία από πηγές εκπομπής περιλαμβάνει τη συλλογή ατμοσφαιρικών ρύπων πριν από την εκπομπή και την αραίωσή τους στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές εκπομπής συνήθως χωρίζονται σε σταθερές (καμινάδες εργοστασίων, καπνοδόχοι κατοικιών) και κινητές (εξατμίσεις βενζινοκίνητων-πετρελαιοκίνητων οχημάτων και αεροσκαφών).

Οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους γίνεται δειγματοληψία σε πηγές εκπομπής είναι:

- α) Προσδιορισμός του ρυπαντικού φορτίου που εκπέμπεται από μια ορισμένη πηγή και έλεγχος της τήρησης των ορίων εκπομπής.
- β) Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων αντιρρύπανσης.
- γ) Συλλογή στοιχείων σχετικά με τις εκπομπές διαφόρων πηγών για χρήση στη λήψη μέτρων και για τη διασφάλιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

### 8.7.1 Δειγματοληψία από σταθερές πηγές εκπομπής

Η δειγματοληψία από σταθερές πηγές εκπομπής απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό ο οποίος πρέπει να βασίζεται στη γνώση της παραγωγικής διαδικασίας κατά την οποία θα γίνει η δειγματοληψία και των επιπτώσεών της στους εκπεμπόμενους ρύπους.

Βασικός στόχος της δειγματοληψίας σε μια σταθερή πηγή εκπομπής είναι η σύσταση του δείγματος να ανταποκρίνεται στην πραγματική συγκέντρωση του ρύπου στα αερολύματα σε ένα ορισμένο σημείο της καμινάδας και για ορισμένη χρονική στιγμή. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός συνήθως συλλέγονται δείγματα **σύνθετα** (από το ίδιο σημείο, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές) ή **ολοκληρωμένα** (την ίδια χρονική στιγμή, αλλά από διαφορετικά σημεία της καμινάδας).

Τα σφάλματα που προκύπτουν συνήθως οφείλονται σε μη σωστή επιλογή της περιόδου δειγματοληψίας (περίοδοι μέγιστης εκπομπής ρύπων), σε μη ικανοποιητικό αριθμό δειγμάτων ή ακόμη σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και αλλαγές της σύστασης των αερολυμάτων, που δεν λαμβάνονται υπόψη. Γι' αυτό η δειγματοληψία από μια καμινάδα πρέπει να συνοδεύεται και από μετρήσεις ορισμένων βασικών φυσικών παραμέτρων όπως υγρασία, θερμοκρασία, πίεση και ταχύτητα εξόδου των αερολυμάτων, καθώς επίσης και ανάλυση της σύστασης των αερολυμάτων σε συσκευή Orsat (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> κ.ά.).

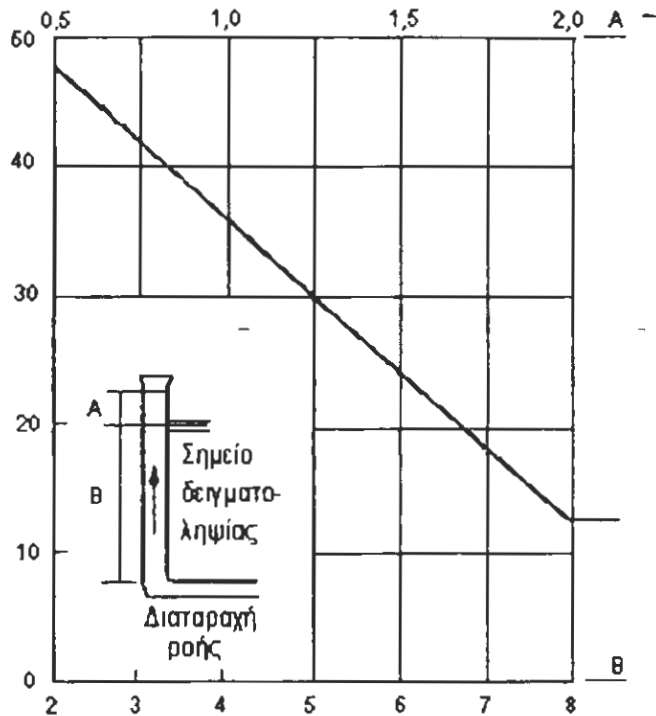
Η επιλογή του ιδανικού σημείου δειγματοληψίας είναι δύσκολη και απαιτεί ασφάλεια για το προσωπικό που θα κάνει τη δειγματοληψία, πρόσβαση στο εσωτερικό της καμινάδας από κατάλληλο άνοιγμα, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για τη λειτουργία των συσκευών και αποφυγή διαταραχής της ροής των αερολυμάτων.

Σχετικά με τη διαταραχή της ροής των αερολυμάτων έχουν καθιερωθεί ορισμένα κριτήρια. Σύμφωνα με αυτά μια διατομή κατακόρυφης καμινάδας θεωρείται καλή για δειγματοληψία όταν απέχει οκτώ ισοδύναμες διαμέτρους κατόντι και δύο ισοδύναμες διαμέτρους ανάντι μιας διαταραχής ροής, η οποία μπορεί να προκαλείται από μία γωνία, είσοδο ή έξοδο (σχήμα 8.7.1). Σημειώνεται ότι η ισοδύναμη διάμετρος καμινάδας εκφράζεται από το λόγο:

$$4 \times \frac{\text{εμβαδό διατομής}}{\text{περίμετρος διατομής}}$$

Οπότε είναι ίση με την πραγματική διάμετρο, προκειμένου για κυκλική καμινάδα. Η κατανομή των σημείων δειγματοληψίας επάνω σε αυτή την ιδανική διατομή γίνεται με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 8.7.2. Δηλαδή σε μια καμινάδα κυκλικής διατομής τα σημεία δειγματοληψίας τοποθετούνται στο κέντρο κυκλικών τομέων ίσου εμβαδού ενώ σε μία καμινάδα ορθογωνίας διατομής, στα κέντρα τουλάχιστον 9 ορθογωνίων ίσου εμβαδού.

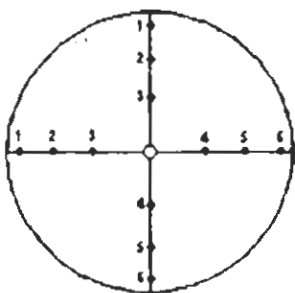
Αριθμός των ανάντι υδραυλικών διαμέτρων (μεταξύ του σημείου διαταραχής της ροής και του σημείου δειγματοληψίας)



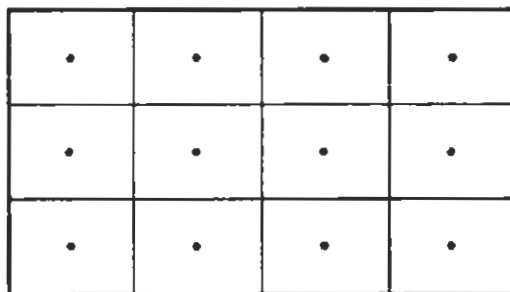
Αριθμός των κατάντι υδραυλικών διαμέτρων (μεταξύ του σημείου διαταραχής της ροής και του σημείου δειγματοληψίας)

**Σχήμα 8.7.1** Αριθμός σημείων δειγματοληψίας από καμινάδα.  
1. θέση δειγματοληψίας, 2,3.διαταραχές ροής

Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει διατομή καμινάδας που να εκπληρώνει τις παραπάνω προϋποθέσεις, η δειγματοληψία μπορεί να γίνει από άλλες θέσεις με αυξανόμενο αριθμό σημείων δειγματοληψίας όσο η θέση απομακρύνεται από την ιδανική (σχήμα 8.7.2). Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού δειγμάτων που πρέπει να ληφθούν από διάφορα σημεία μιας καμινάδας, η δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Γι' αυτό συχνά η ακρίβεια θυσιάζεται για χάρη της εξοικονόμησης χρόνου και απασχολούμενου προσωπικού.



Κυκλική διατομή

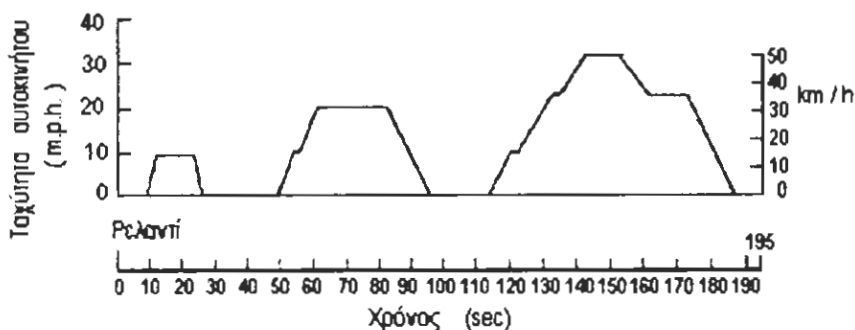


Ορθογώνια διατομή

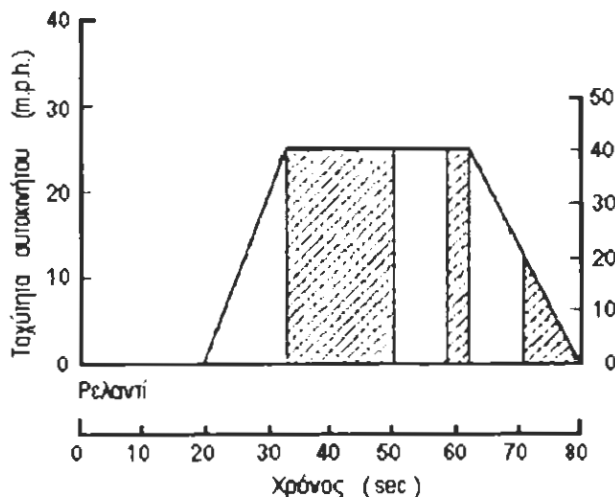
**Σχήμα 8.7.2** Διατομές καμινάδας χωρισμένες σε δώδεκα τομές ίσου εμβαδού (•) σημεία δειγματοληψίας.

### 8.7.2 Δειγματοληψία από κινητές πηγές εκπομπής

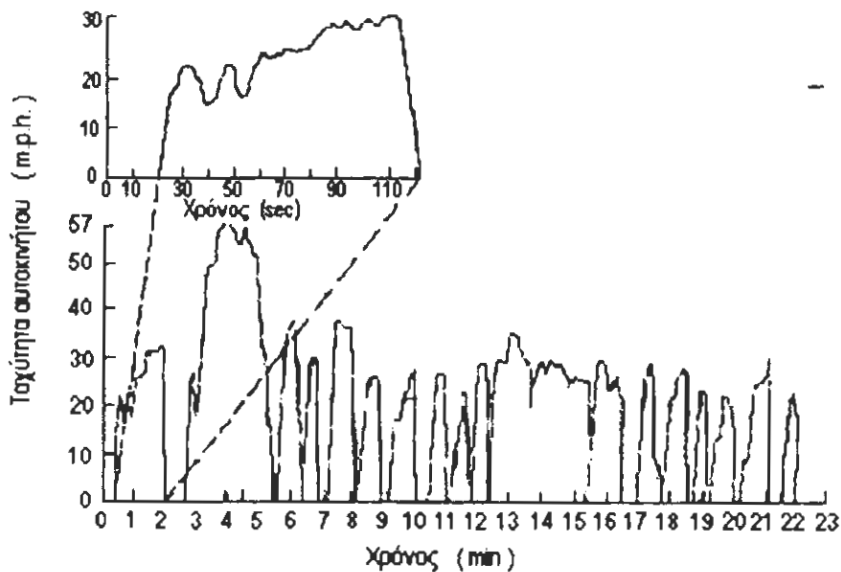
Η δειγματοληψία από εξατμίσεις οχημάτων και αεροσκαφών απαιτεί ειδικές συσκευές. Οι εκπομπές αυτών των πηγών εξαρτώνται σημαντικά από τη λειτουργία της μηχανής γι' αυτό για τη δειγματοληψία ακολουθείται ορισμένος κύκλος λειτουργίας της. Γενικά ένας κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει τέσσερα στάδια : το ρελαντί, την επιτάχυνση, την κίνηση με οικονομική ταχύτητα και την επιβράδυνση. Υπάρχουν διάφορα πρότυπα κύκλων λειτουργίας της μηχανής που μπορούν να εφαρμοστούν για τον έλεγχο των οχημάτων : το Ευρωπαϊκό, το Ιαπωνικό, των Ηνωμένων Πολιτειών και της Καλιφόρνιας (σχήματα 8.7.3 - 8.7.6). Συνήθως ο έλεγχος των εξατμίσεων γίνεται με το όχημα τοποθετημένο επάνω σε ένα δυναμόμετρο εφοδιασμένο με τροχούς αδράνειας και φρένα ώστε να αναπαράγεται το βάρος του οχήματος και η πίεση που ασκεί στο δρόμο, σε ορισμένη ταχύτητα. Η δειγματοληψία που εφαρμόζεται για τον έλεγχο των εξατμίσεων των αεροσκαφών δεν είναι "σύνθετη", δηλαδή δε γίνεται κατά τη διάρκεια ενός αντιπροσωπευτικού πλήρους κύκλου λειτουργίας, αλλά στηρίζεται σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.



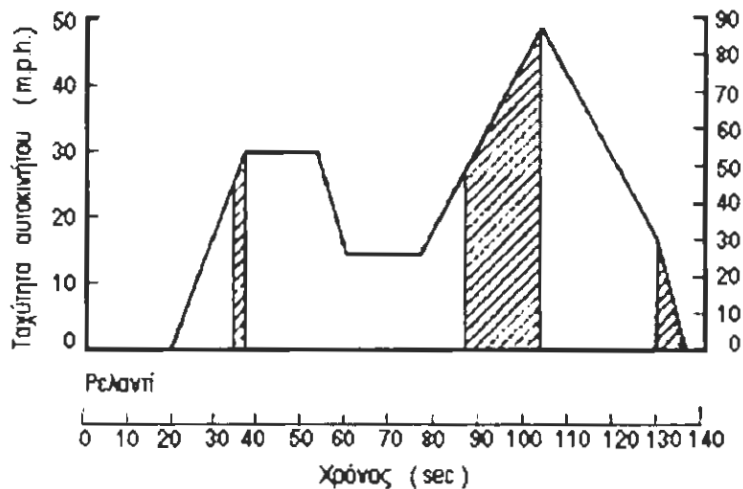
Σχήμα 8.7.3 Ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης: (Ο υπολογισμός των εκπομπών γίνεται από τέσσερις συνεχόμενους κύκλους, Καθένας από τους οποίους αρχίζει με κρύα μηχανή).



Σχήμα 8.7.4 Ιαπωνικός κύκλος οδήγησης. [Ο έλεγχος των εκπομπών γίνεται από τρεις τέτοιους κύκλους με προθερμασμένη μηχανή. Οι εκπομπές που αντιστοιχούν στα γραμμοσκιασμένα τμήματα δε λαμβάνονται υπόψη. Κάθε στάδιο του κύκλου συμμετέχει στον υπολογισμό με διαφορετικό συντελεστή: ρελαντί (0.11), επιτάχυνση (0.35), οικονομική ταχύτητα (0.52), επιβράδυνση (0.02)].



**Σχήμα 8.7.5** Κύκλος οδήγησης των ΗΠΑ. (Ο υπολογισμός των εκπομπών γίνεται από έναν κύκλο που ξεκινά με κρύα μηχανή).



**Σχήμα 8.7.6** Κύκλος οδήγησης της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ). (Ο υπολογισμός των εκπομπών γίνεται από 7 συνεχόμενους τέτοιους κύκλους, ο πέμπτος από τους οποίους δε λαμβάνεται υπόψη. Οι εκπομπές που αντιστοιχούν στα γραμμοσκιασμένα τμήματα του κύκλου δε χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των ολικών εκπομπών του οχήματος)

## 8.8 Συστήματα δειγματοληψίας ρύπων της ατμόσφαιρας

Τα συστήματα δειγματοληψίας ατμοσφαιρικών ρύπων περιλαμβάνουν γενικά τέσσερα υποσυστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται:

- εισαγωγή του αέρα
- συλλογή των ρύπων
- αναρρόφηση του αέρα
- μέτρηση της ταχύτητας αναρρόφησης (παροχή)



Η σωστή λειτουργία καθενός από τα παραπάνω υποσυστήματα είναι βασικής σημασίας για μια σωστή δειγματοληψία είτε από την ατμόσφαιρα είτε από πηγές εκπομπής.

Τα συστήματα εισαγωγής του αέρα και συλλογής των ρύπων εξαρτώνται βασικά από τη φύση των συλλεγόμενων ρύπων (αέρια, σωματίδια), γι' αυτό και εξετάζονται μαζί με τις αντίστοιχες μεθόδους δειγματοληψίας .

Αντίθετα τα συστήματα αναρρόφησης του αέρα και μέτρησης της παροχής είναι ανεξάρτητα της φύσης των συλλεγόμενων ρύπων. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τις αντλίες κενού, τους μετρητές όγκου και τους μετρητές πίεσης και θερμοκρασίας.

### 8.8.1 Αντλίες κενού

Οι αντλίες κενού είναι διαφόρων τύπων και μεγεθών:

**α. Ηλεκτρικές αντλίες.** Είναι κατάλληλες για μεγάλο χρόνο δειγματοληψίας. Εξασφαλίζουν ομοιόμορφη λειτουργία ανεξάρτητα από τις μεταβολές στη γραμμή φόρτωσης. Αντλίες που λειτουργούν με μπαταρία είναι απαραίτητες για τις περιπτώσεις που δεν υπάρχει παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ. δειγματοληψία στο ύπαιθρο).

**β. Χειροκίνητες αντλίες** (συνήθως γυάλινες ή πλαστικές σύριγγες). Είναι κατάλληλες για τη δειγματοληψία μικρών όγκων και για περιπτώσεις που δεν απαιτείται σταθερή ροή του δείγματος.

**γ. Υδραεραντλίες .** Χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει επαρκής παροχή αέρα σε σταθερή πίεση.

**δ. Σιφώνια.** Τα σιφώνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δειγματοληψία μικρών όγκων αερίων δειγμάτων και προτιμούνται όταν απαιτείται πολύ μικρή ταχύτητα δειγματοληψίας. Ο σωλήνας εισόδου του αερίου πρέπει να φθάνει μέχρι τον πυθμένα σχεδόν του δοχείου ώστε να διατηρείται ομοιόμορφη ροή καθώς πέφτει η στάθμη του υγρού.

### 8.8.2 Μετρητές όγκου

Οι συσκευές αυτές είναι απαραίτητες για τη συσχέτιση της ποσότητας του συλλεγόμενου ρύπου με τη συγκέντρωσή του στο αρχικό δείγμα και χρησιμοποιούνται όταν το δείγμα αναρροφάται με μια αντλία κενού.

Οι μετρητές όγκου διακρίνονται σε δύο τύπους: τα ογκόμετρα και τα παροχόμετρα.

**α. Ογκόμετρα (Volume meters).** Τα ογκόμετρα μετρούν το συνολικό όγκο αέρα που περνά μέσα από αυτά σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Η μέτρηση γίνεται με αντικατάσταση ορισμένου όγκου υγρού ή αέρα, οπότε διακρίνονται σε υγρού τύπου (υγρόμετρα) και ξηρού τύπου (μετρητές διαφράγματος). Τα υγρόμετρα έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια (σφάλμα  $\pm 0,5\%$ ), αλλά είναι πολύ βαριά και ως εκ τούτου δεν είναι εύχρηστα.

Τα ογκόμετρα ξηρού τύπου είναι λιγότερο ακριβή, αλλά πιο πρακτικά στη χρήση. Ένα καλά συντηρημένο και βαθμονομημένο ογκόμετρο έχει σφάλμα 2 - 4%. Τα ογκόμετρα έχουν το πλεονέκτημα ότι η μέτρηση του όγκου δεν επηρεάζεται από διακυμάνσεις της παροχής κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας.

**β. Παροχόμετρα (Rate meters).** Τα παροχόμετρα μετρούν την ταχύτητα του αερίου δείγματος μέσα στο σύστημα δειγματοληψίας. Αποτελούνται από περιστρεφόμετρα (rotameters) και σωλήνες καθορισμένης διαμέτρου ή τριχοειδή ροόμετρα (σωλήνες pitot, μετρητές venturi κ.ά.). Είναι μικρού όγκου και εύχρηστα. Όμως απαιτούν ομοιόμορφη λειτουργία της αντλίας και ακριβή χρονομέτρηση της δειγματοληψίας. Η ακρίβειά τους ελαττώνεται σημαντικά σε παροχές μικρότερες των  $10 \text{ ml min}^{-1}$ . Ακόμη και όταν είναι βαθμονομημένα έχουν μικρότερη ακρίβεια από τα ογκόμετρα, στη μέτρηση του συνολικού όγκου του δείγματος.

### 8.8.3 Μετρητές πίεσης – θερμοκρασίας

Η μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας σε ένα σύστημα δειγματοληψίας αερίων δειγμάτων είναι ουσιαστικής σημασίας, καθώς ο όγκος του δείγματος εξαρτάται από τις δύο αυτές παραμέτρους.

Για τη μέτρηση της πίεσης χρησιμοποιούνται τα μανόμετρα. Το μανόμετρο συνήθως τοποθετείται αμέσως μετά το μετρητή όγκου και χρησιμεύει:

**α.** Για την παρακολούθηση της πίεσης, ώστε να γίνει η κατάλληλη διόρθωση του όγκου (σε περίπτωση πολύ χαμηλής πίεσης).

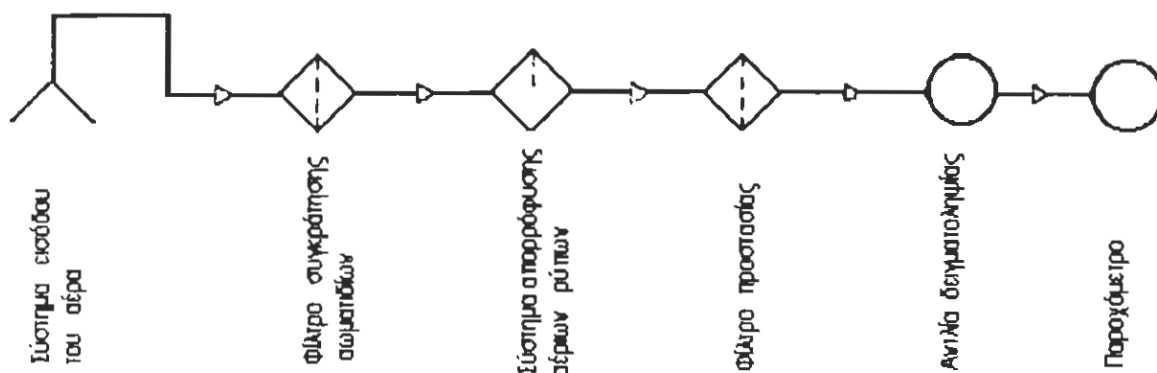
**β.** Για τη διακοπή της δειγματοληψίας σε περίπτωση που παρατηρείται μεγάλη αντίσταση στη ροή του αερίου, π.χ. εξαιτίας σχηματισμού πάγου ή απόφραξης των σωλήνων δειγματοληψίας από στερεά.

Αν το μανόμετρο τοποθετηθεί ακριβώς πριν από την αντλία τότε με μέτρηση της πίεσης μπορεί να υπολογιστεί και η παροχή του δείγματος, με την προϋπόθεση ότι το

σύστημα δειγματοληψίας έχει σταθερή αντίσταση και επαναλήψιμη. Στην περίπτωση αυτή γίνεται βαθμονόμηση της παροχής ως προς την πίεση.

Τόσο οι μετρητές όσο και τα συστήματα δειγματοληψίας πρέπει να βαθμονομούνται τακτικά για να εξασφαλίζουν ακριβείς μετρήσεις. Η βασική συσκευή για τη βαθμονόμηση είναι το αερίομετρο (gasometer).

Στο σχήμα 8.8.1 δίνεται η διάταξη ενός συστήματος δειγματοληψίας που προτείνεται από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) για τον προσδιορισμό SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> και καπνού.



**Σχήμα 8.8.1** Σχηματική διάταξη συστήματος δειγματοληψίας για τον προσδιορισμό SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> και καπνού (ΕΛΟΤ 673).

## 8.9 Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από την ατμόσφαιρα και από πηγές εκπομπής

### 8.9.1 Μέθοδοι δειγματοληψίας αερίων ρύπων από την ατμόσφαιρα

Οι μέθοδοι δειγματοληψίας αερίων ρύπων από την ατμόσφαιρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις μεθόδους που επιτυγχάνουν απομόνωση και συλλογή ενός ή περισσότερων αερίων ή ατμών από την ατμόσφαιρα (προσρόφηση, απορρόφηση, συμπύκνωση) και στις μεθόδους που επιτυγχάνουν συλλογή αυτούσιου ατμοσφαιρικού αέρα (στιγμιαία δειγματοληψία).

Στις μεθόδους της πρώτης κατηγορίας στις οποίες οι αέριοι ρύποι συλλέγονται από μεγάλο όγκο αέρα επιτυγχάνεται και ταυτόχρονη προσυγκέντρωση του συλλεγόμενου ρύπου. Στις μεθόδους αυτές είναι απαραίτητο να απομακρύνονται τα αιωρούμενα σωματίδια πριν τη δειγματοληψία. Η συλλογή των σωματιδίων μαζί με τα αέρια ή τους ατμούς είναι ανεπιθύμητη επειδή:

α. εμποδίζουν τη δειγματοληψία στομώνοντας τα ακροφύσια των συσκευών.

β. πιθανόν να παρεμποδίζουν τη χημική ανάλυση των αέριων ρύπων Η απομάκρυνση των σωματιδίων γίνεται με διήθηση του ατμοσφαιρικού δείγματος πριν τη συλλογή των ρύπων. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι κατασκευασμένα από χαρτί κυτταρίνης, υαλονήματα ή πορώδεις πλαστικές μεμβράνες.

Παρακάτω εξετάζεται κάθε μέθοδος δειγματοληψίας χωριστά.

### 8.9.2 Προσρόφηση

Η μέθοδος της προσρόφησης (absorption) στηρίζεται στην προσρόφηση αερίων ή ατμών σε κατάλληλα στερεά προσροφητικά. Είναι πολύ αποτελεσματική για τη δειγματοληψία αέριων ρύπων που βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα. Υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται ως προσροφητικά είναι ο ενεργός άνθρακας, η πηκτή  $\text{SiO}_2$  (silica gel), η πηκτή  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumina) και διάφορα υλικά αέριας χρωματογραφίας.

Στην επιλογή του κατάλληλου προσροφητικού σημαντικό ρόλο παίζουν οι παρακάτω ιδιότητες:

- **Εκλεκτικότητα.** Ο ενεργός άνθρακας έχει μικρότερη εκλεκτικότητα από το silica gel ενώ τα υλικά αέριας χρωματογραφίας είναι πολύ εκλεκτικά.
- **Πολικότητα.** Οι πηκτές  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  είναι ηλεκτρικά πολικές ενώσεις. Η προσροφητική τους ικανότητα αυξάνει όσο αυξάνει η πολικότητα των αερίων. Αυτό αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα επειδή μπορεί να παρατηρηθεί εκρόφηση αερίων με μικρότερη πολικότητα καθώς προσροφούνται αέρια μεγαλύτερης πολικότητας. Άλλο σημαντικό μειονέκτημα των πολικών προσροφητικών είναι το γεγονός ότι συγκρατούν την υγρασία της ατμόσφαιρας και έτσι ελαττώνεται η προσροφητική τους ικανότητα.

Ο ενεργός άνθρακας είναι μη πολικός και συνεπώς έχει την ικανότητα να προσροφά οργανικά αέρια και ατμούς ενώ δεν συγκρατεί τους υδρατμούς.

- **Δραστικότητα.** Τα προσροφητικά πρέπει να είναι χημικώς αδρανή και να μην αντιδρούν με τα αέρια που συγκρατούν εκτός αν η χημειορόφηση είναι επιθυμητή, οπότε υπόκεινται σε κατάλληλη κατεργασία.
- **Ενεργός επιφάνεια.** Τα προσροφητικά πρέπει να έχουν μεγάλη ενεργό επιφάνεια. Οι πηκτές  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$  έχουν ενεργό επιφάνεια  $200 - 600 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ , ο ενεργός

άνθρακας  $500 - 2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ , ενώ σημαντικά μεγαλύτερη είναι η ενεργός επιφάνεια των υλικών αέριας χρωματογραφίας.

- **Χωρητικότητα.** Η χωρητικότητα των προσροφητικών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπεται ποσοτική συγκράτηση των αέριων ρύπων.
- **Εκροφητικές ιδιότητες.** Οι εκροφητικές ιδιότητες των προσροφητικών πρέπει να επιτρέπουν ποσοτική ανάκτηση των προσροφημένων ρύπων. Η εκρόφηση αερίων και ατμών από το silica gel είναι ευκολότερη από ό,τι στον ενεργό άνθρακα και μπορεί να γίνει με εμφύσηση καθαρού-ξηρού αέρα σε θερμοκρασία μέχρι  $300^\circ\text{C}$  ή με εκχύλιση με έναν πολικό διαλύτη ( $\text{H}_2\text{O}$ , αλκοόλες, κ.ά.). Επιπλέον με εκλεκτική εκρόφηση μπορεί να επιτευχθεί και διαχωρισμός των προσροφημένων αερίων.

Ο ενεργός άνθρακας αν και έχει μεγάλη προσροφητική ικανότητα, παρουσιάζει δυσκολία κατά την εκρόφηση. Αέρια και ατμοί που είναι προσροφημένα σε ενεργό άνθρακα μπορούν να εκροφηθούν είτε με αντικατάστασή τους με υπέρθερμο ατμό ( $\approx 300^\circ\text{C}$ ) είτε με θέρμανση ( $200 - 250^\circ\text{C}$ ) του άνθρακα υπό κενό και απόσταξη του προσροφημένου συστατικού είτε με εκχύλιση του ενεργού άνθρακα σε οργανικό διαλύτη. Αντίθετα τα υλικά αέριας χρωματογραφίας έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης εκρόφησης, η οποία μπορεί να γίνει είτε με εκχύλιση σε έναν οργανικό διαλύτη είτε με παραλαβή του προσροφημένου συστατικού με ρεύμα αδρανούς αερίου και κατευθείαν προσδιορισμό με αέρια χρωματογραφία.

Ο βαθμός προσρόφησης είναι μεγαλύτερος σε χαμηλές θερμοκρασίες, ιδίως για τα αέρια με χαμηλό σημείο βρασμού. Αέρια όπως υδρογόνο, άζωτο, οξυγόνο, μονοξειδίο του άνθρακα και μεθάνιο δεν μπορούν στις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος να συγκρατηθούν στον ενεργό άνθρακα με φυσική προσρόφηση. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, ούτε η αμμωνία, ούτε το αιθυλένιο, ούτε η φορμαλδεΐδη ούτε και το υδρόθειο προσροφούνται ποσοτικά, αλλά η προσρόφηση μπορεί να αυξηθεί με ψύξη της συσκευής δειγματοληψίας.

Τα συστήματα δειγματοληψίας που στηρίζονται στη μέθοδο της προσρόφησης περιλαμβάνουν:

**α. Σωλήνες ενεργού άνθρακα.** Χρησιμοποιούνται για τη συλλογή οργανικών αερίων και ατμών από την ατμόσφαιρα (αλειφατικών, αρωματικών και χλωριωμένων υδρογονανθράκων). Οι σωλήνες είναι συνήθως γυάλινοι σε σχήμα U ή ευθύγραμμοι. Η ταχύτητα αναρρόφησης του δείγματος είναι  $1 - 2 \text{ l / min}$ . Η εκρόφηση γίνεται με υπέρθερμο ατμό, απόσταξη υπό κενό ή εκχύλιση σε οργανικό διαλύτη.

**β. Σύριγγες πληρωμένες με υλικό αέριας χρωματογραφίας.** Η ταχύτητα της δειγματοληψίας κυμαίνεται από 0,05 μέχρι 2 l/min. Η εκρόφηση γίνεται με εκχύλιση σε έναν οργανικό διαλύτη ή με ρεύμα αδρανούς αερίου.

### 8.9.3 Απορρόφηση

Η μέθοδος της απορρόφησης (absorption) στηρίζεται στην εκλεκτική διάλυση αέριων συστατικών σε μια υγρή (ή στερεή) φάση.

Ο βαθμός απορρόφησης ενός αερίου σε ένα συγκεκριμένο διαλύτη εξαρτάται από τη μερική τάση ατμών του αερίου πάνω από το διάλυμά του σε κατάσταση ισορροπίας. Ο βαθμός απορρόφησης (κυρίως στην περίπτωση πτητικών συστατικών) μπορεί να αυξηθεί με δειγματοληψία σε χαμηλή θερμοκρασία και με τη χημική αντίδραση των αέριων συστατικών με το απορροφητικό μέσο.

Ο βαθμός απορρόφησης ενός αερίου σε μια υγρή φάση εξαρτάται επίσης από την έκταση της επιφάνειας επαφής αερίου υγρού, γι' αυτό και οι συσκευές απορρόφησης σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρέχουν τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια επαφής μεταξύ των φουσαλίδων του αερίου και του απορροφητικού διαλύματος.

Η απορρόφηση, όπως και η προσρόφηση, εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Ο βαθμός απορρόφησης ιδίως των πτητικών συστατικών είναι μεγαλύτερος σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Στον πίνακα 8.9.1 δίνεται ο βαθμός απορρόφησης ορισμένων αερίων ρύπων σε διάφορα διαλύματα για διαφορετικές ταχύτητες δειγματοληψίας. Δύο είναι οι κύριες τεχνικές δειγματοληψίας αερίων από την ατμόσφαιρα που στηρίζονται στη μέθοδο της απορρόφησης.

Πίνακας 8.9.1

Απορρόφηση αερίων ρύπων σε διαλύματα

Αέριος Ρύπος	Διάλυμα απορρόφησης	Ταχύτητα Δειγματοληψίας (lit min <sup>-1</sup> )	Βαθμός απορρόφησης (%)
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	99,8
HCl	H <sub>2</sub> O	28,3	97,1
HCl	H <sub>2</sub> O	3,4	100
HClO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	99,8
CH <sub>3</sub> COOH	H <sub>2</sub> O	3,4	99,5
NO <sub>2</sub>	Αντιδραστήριο Saltzman	0,3	100
HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	100
HN <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	84,3
Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	πολύ χαμηλός*
Cl <sub>2</sub>	2% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3,4	77,0
H <sub>2</sub> NCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	3,4	99,6

\* Το Cl<sub>2</sub> διαλύεται στο νερό, σε ποσοστό μόλις 1%.

### α. Απορρόφηση αερίων σε υγρή φάση

Στην τεχνική αυτή το αέριο δείγμα διαβάζεται μέσα από απορροφητικό διάλυμα που είναι τοποθετημένο μέσα σε ειδική συσκευή. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση αερίων ονομάζονται **πλυντρίδες αερίων** και είναι διαφόρων τύπων (σχήμα 8.9.1). Κατά τη δειγματοληψία με πλυντρίδες το αέριο δείγμα αναγκάζεται να περάσει μέσα από ένα σωλήνα, το άκρο του οποίου βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του διαλύματος απορρόφησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αερίου και τη διασπορά τους μέσα στο διάλυμα. Στη συνέχεια το αέριο διαλύεται στο διάλυμα απορρόφησης ή αντιδρά με τα συστατικά του.

Το άκρο του σωλήνα διασποράς μπορεί να είναι ανοικτό ή να φράζεται από πορώδες γυαλί (με σπές μεγέθους 50-100 μm). Οι ανοικτοί σωλήνες είναι κατάλληλοι για τη δειγματοληψία οξειδωτικών της ατμόσφαιρας, π.χ. O<sub>3</sub>, ενώ οι σωλήνες με πορώδες γυαλί για τους περισσότερους αερίους ρύπους (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, κλπ).

Για την επίτευξη μεγαλύτερου χρόνου συγκράτησης των φυσαλίδων σε επαφή με το διάλυμα απορρόφησης σχεδιάστηκαν πλυντρίδες με σπειροειδή σωλήνα διασποράς (σχήμα 8.9.1 Δ). Οι πλυντρίδες αυτές έχουν το μειονέκτημα της χαμηλής ταχύτητας ροής του αερίου δείγματος.

Το σοβαρότερο μειονέκτημα της δειγματοληψίας αέριων ρύπων με πλυντρίδες είναι η εξάτμιση του διαλύματος απορρόφησης η οποία σε ξηρά κλίματα μπορεί να είναι σημαντική.

#### **β. Απορρόφηση αερίων σε στερεή φάση.**

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται πύργοι με κοκκώδη υλικά, κυρίως όμως φίλτρα (από χαρτί, ίνες υάλου ή πολυκαρβονικές μεμβράνες) εμποτισμένα με ειδικό αντιδραστήριο με το οποίο ο αέριος ρύπος αντιδρά και συγκρατείται.

Η τεχνική αυτή πλεονεκτεί έναντι της χρήσης πλυντρίδων επειδή οι πλυντρίδες είναι εύθραυστες, παρουσιάζουν δυσκολία στην τοποθέτηση και απομάκρυνση του διαλύματος απορρόφησης καθώς και κίνδυνο εξάτμισής του. Τα εμποτισμένα φίλτρα αντίθετα, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως: επιτρέπουν τη δειγματοληψία μεγάλων όγκων αέρα χωρίς κίνδυνο εξάτμισης του αντιδραστηρίου με το οποίο είναι εμποτισμένα, επιτρέπουν μεγάλες ταχύτητες αναρρόφησης δείγματος, δεν είναι εύθραυστα, είναι φθηνά και εξαιτίας του μικρού βάρους τους μεταφέρονται εύκολα στο εργαστήριο όπου θα γίνει η ανάλυση.

Οι αέριοι ρύποι που συγκρατούνται επάνω στο φίλτρο εκχυλίζονται με νερό ή έναν άλλο διαλύτη και προσδιορίζονται με την κατάλληλη χημική μέθοδο.

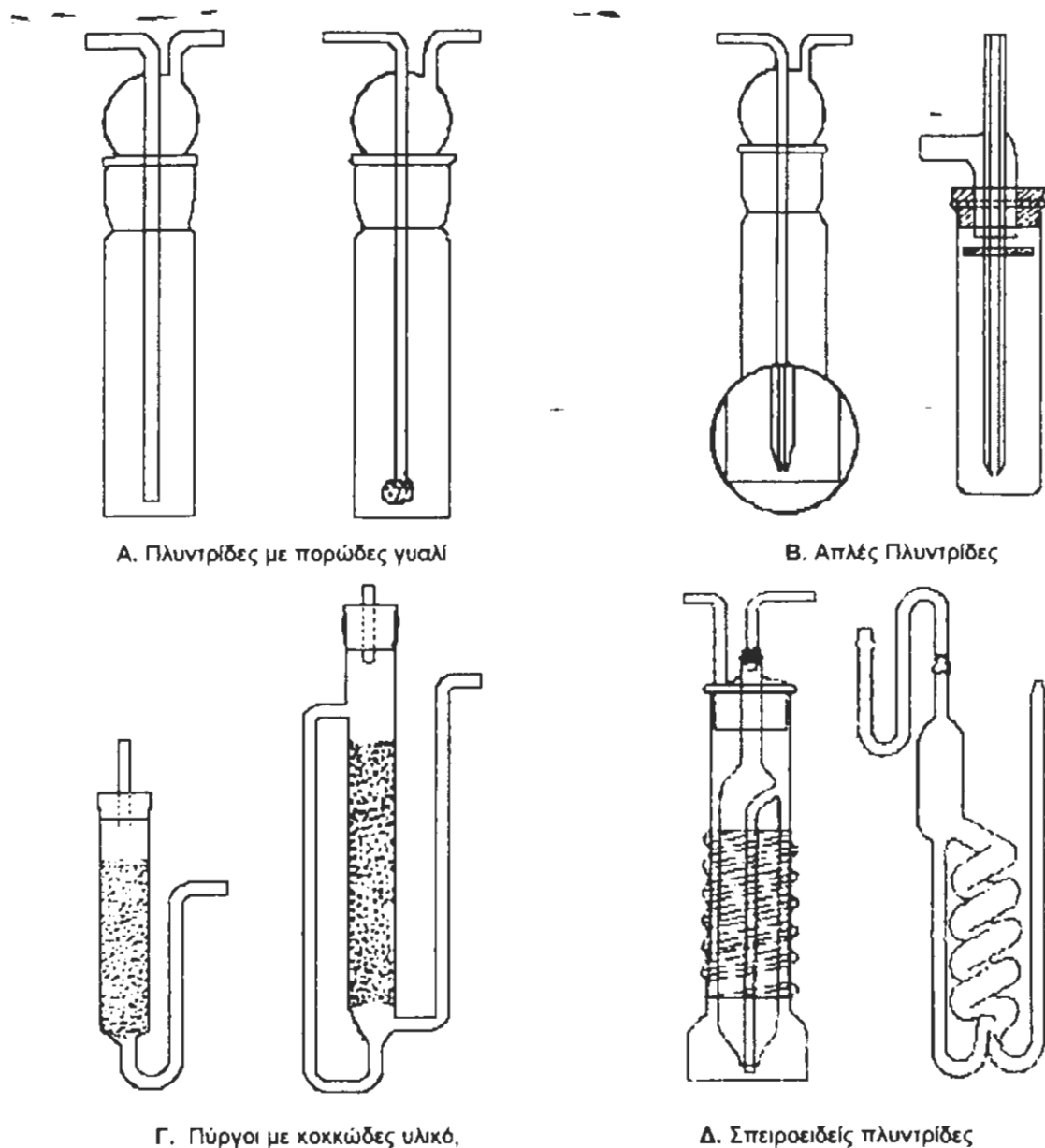
Επειδή κατά τη δειγματοληψία με εμποτισμένα φίλτρα συγκρατούνται και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας, συνήθως αυτά απομακρύνονται με ένα προφίλτρο το οποίο δεν πρέπει να αντιδρά με τους αέριους ρύπους. Η τεχνική δειγματοληψίας με εμποτισμένα φίλτρα χρησιμοποιείται για πολλούς αέριους ρύπους, όπως  $\text{HCl}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , πτητικές ενώσεις αρσενικού και φθορίου,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , κ.ά.

#### **8.9.4 Συμπύκνωση (Condensation, cryogenic trapping)**

Η μέθοδος της συμπύκνωσης (condensation, cryogenic trapping) στηρίζεται στην ψύξη του αέριου δείγματος σε θερμοκρασία χαμηλότερη του σημείου βρασμού ή πήξης των συστατικών του, οπότε αυτά αντίστοιχα υγροποιούνται ή στερεοποιούνται.

Τα ψυκτικά που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών είναι πάγος, στερεό διοξείδιο του άνθρακα, υγρό οξυγόνο, υγρό άζωτο και υγρό ήλιο. Στον πίνακα 8.9.2 δίνονται οι κυριότερες ουσίες που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά και οι θερμοκρασίες τους σε κατάσταση ισορροπίας.





**Σχήμα 8.9.1** Συστήματα απορρόφησης.

Ένα ψυκτικό θεωρείται κατάλληλο για τη δειγματοληψία ενός συγκεκριμένου αερίου με τη μέθοδο της συμπύκνωσης όταν η τάση ατμών του αερίου στη θερμοκρασία συλλογής είναι αρκετά χαμηλή ( $\leq 1$  mm Hg) ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος εξάτμισής του.

Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός από ψυκτικά με προοδευτικά χαμηλότερη θερμοκρασία, επιτυγχάνοντας έτσι μία κλασματική συμπύκνωση με ψύξη. Τα συστήματα δειγματοληψίας που στηρίζονται στη μέθοδο της συμπύκνωσης ονομάζονται **παγίδες συμπύκνωσης**. Στο σχήμα 8.9.2 παριστάνεται ένα σύστημα από πέντε παγίδες για κλασματική συμπύκνωση σε θερμοκρασίες από  $-16^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $-195^{\circ}\text{C}$ .

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.9.2

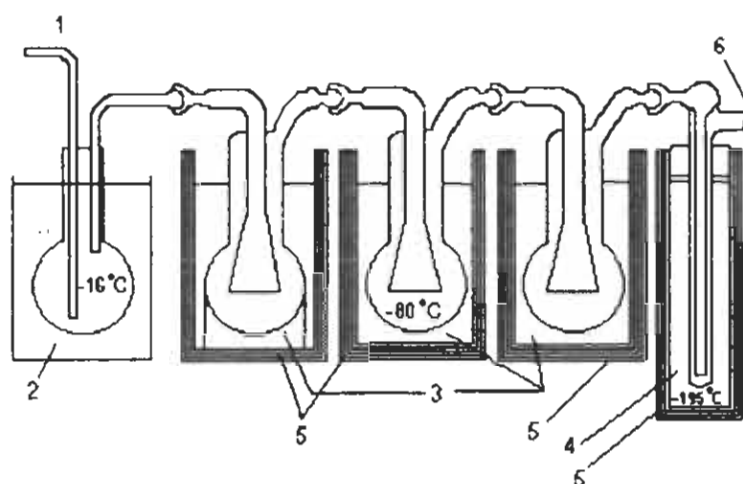
Θερμοκρασίες ισορροπίας διαφόρων ψυκτικών συστημάτων

Ψυκτικό	Θερμοκρασία (°C)
Πάγος και νερό	0
Πάγος και NaCl	-21,0
Τετραχλωράνθρακας (χιόνι)*	-22,9
Υγρή αμμωνία	-33,4
Χλωροβενζόλιο (χιόνι)	-45,2
Χλωροφόρμιο (χιόνι)	-63,5
Στερεό διοξείδιο του άνθρακα	-78,5
Στερεό διοξείδιο του άνθρακα και ακετόνη	-78,5
Στερεό διοξείδιο του άνθρακα και ισοπροπανόλη	-78,5
Οξικός αιθυλεστέρας (χιόνι)	-83,6
Τολουόλιο (χιόνι)	-95,0
Διθειάνθρακας	-118,5
Υγρός αέρας	-147
Υγρό οξυγόνο	-183
Υγρό άζωτο**	-196

\* Το "χιόνι" παρασκευάζεται με τοποθέτηση του διαλύτη σε δοχείο Dewar και προσθήκη διαδοχικά μικρών ποσοτήτων υγρού αζώτου με ταυτόχρονη ταχεία ανάδευση μέχρι να σχηματιστεί ένα παχύρρευστο υγρό.

\*\* Το υγρό άζωτο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συμπύκνωση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αέρα επειδή στη θερμοκρασία των  $-196^{\circ}\text{C}$  υγροποιείται και το οξυγόνο που είναι το κύριο συστατικό του αέρα.

Η συμπύκνωση παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων δειγματοληψίας. Πρώτον, το δείγμα είναι απευθείας έτοιμο για περαιτέρω διαχωρισμό ή ανάλυση χωρίς να απαιτείται απομάκρυνση διαλυτών ή εκρόφηση από το προσροφητικό. Η συμπύκνωση είναι γενικά η πιο αξιόπιστη μέθοδος συντήρησης αερίων και ατμών μετά τη συλλογή τους χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αυτά να αντιδράσουν μεταξύ τους ή με τα υλικά της συσκευής δειγματοληψίας.



Σχήμα 8.9.2 Σύστημα παγίδων για κλασματική συμπύκνωση με ψύξη

1. Είσοδος αέρα, 2. Πάγο - NaCl, 3. Ξηρός πάγος ( $\text{CO}_2$ ) - ακετόνη.
4. Υγρό άζωτο, 5. Δοχείο Dewar, 6. Εξόδος προς παροχόμετρο και αντλία.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί σχετικά πολύπλοκο εξοπλισμό, συνεχή παρακολούθηση της δειγματοληψίας και ότι μαζί με τους αέριους ρύπους συμπυκνώνονται και μεγάλες ποσότητες νερού (10 lit ατμοσφαιρικού αέρα στους 25°C περιέχουν 0.25 lit νερού σε συνθήκες 100% σχετικής υγρασίας). Γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται συνεχόμενες παγίδες με διαδοχικά χαμηλότερες θερμοκρασίες, η πρώτη από τις οποίες χρησιμεύει για τη συγκράτηση των υδρατμών. Πάντως η ανάμιξη των ρύπων με το νερό δεν δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα καθόσον είναι εύκολη η εκχύλισή τους.

Ένα ειδικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στη μέθοδο της συμπύκνωσης προκαλείται από το σχηματισμό στερεών ή υγρών σωματιδίων διαφόρων μεγεθών, τα οποία εισέρχονται στο σύστημα συμπύκνωσης και ελαττώνουν την ικανότητα συλλογής. Γι' αυτά είναι απαραίτητη η συγκράτηση αυτών των σωματιδίων με ένα απλό φίλτρο (π.χ. υαλοβάμβακα).

#### **8.9.5 Δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα (σπγμιαία δειγματοληψία)**

Η μέθοδος αυτή (grab sampling) συνίσταται σε συλλογή δείγματος αυτούσιου ατμοσφαιρικού αέρα σε ένα μη περατό δοχείο. Στη συνέχεια το δείγμα μεταφέρεται στο εργαστήριο για ανάλυση. Επειδή στην περίπτωση αυτή οι ρύποι δεν προσυγκεντρώνονται, η μέθοδος είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου τα αέρια συστατικά βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις ή μπορούν να προσδιοριστούν με πολύ ευαίσθητες αναλυτικές μεθόδους. Επιπλέον το δείγμα είναι πιο ευαίσθητο σε επιμολύνσεις εξαιτίας διαφυγών.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα περιλαμβάνουν φιαλίδια κενά από αέρα, σύριγγες και διαφόρων τύπων πλαστικούς σάκους. Η συλλογή του δείγματος γίνεται με εμφύσηση ή με αντικατάσταση αερίου ή υγρού. Μερικά χαρακτηριστικά είδη τέτοιων συστημάτων δίνονται στο σχήμα 8.9.3

Τα κενά από αέρα φιαλίδια (σχήμα 8.9.3 Α) συνίστανται σε γυάλινα δοχεία από τα οποία απομακρύνθηκε ο αέρας με αντλία κενού μέχρι την πίεση του 1 mm Hg ή και λιγότερο και στη συνέχεια στεγανοποιήθηκε το στόμιο με σύντηξη. Για τη συλλογή δείγματος απλώς σπάζουμε το άκρο του φιαλιδίου. Στη συνέχεια σφραγίζουμε το στόμιο με πώμα από κερί.

Τα φιαλίδια αυτά είναι κατάλληλα για τη δειγματοληψία CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>, αλλά ακατάλληλα για αέρια χημικά δραστικά (όπως H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub> ή SO<sub>2</sub>) επειδή υπάρχει κίνδυνος αυτά να αντιδράσουν με το κερί που χρησιμοποιείται για να κλείνονται αεροστεγώς. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την τοποθέτηση μέσα στα φιαλίδια μιας χημικής ουσίας (απορροφητικό υγρό) με την οποία θα αντιδράσει ο ρύπος και θα συγκρατηθεί.

Ο όγκος του ατμοσφαιρικού δείγματος που συλλέγεται στο φιαλίδιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_s = V_b \frac{(P_1 - P_2)}{P_1}$$

Όπου  $V_s$  = ο όγκος του δείγματος σε ατμοσφαιρική πίεση

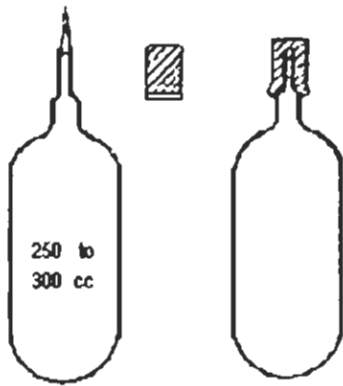
$V_b$  = ο όγκος του δοχείου δειγματοληψίας

$P_1$  = η ατμοσφαιρική πίεση

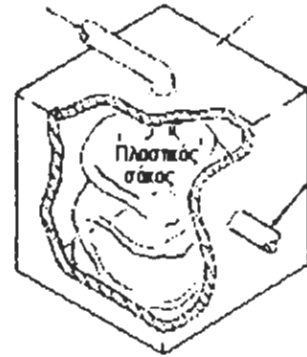
$P_2$  = η πίεση στο κενό δοχείο (~1 mm Hg)

Για τη δειγματοληψία με τη μέθοδο της αντικατάστασης αερίου ή υγρού (Σχήμα 8.9.3 Γ, Δ, Ε, Ζ) είναι απαραίτητο να εκδιωχθεί τελείως το αρχικά περιεχόμενο του δοχείου και να αντικατασταθεί με το δείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πίεσης ή υποπίεσης με τη βοήθεια μίας αναρροφητικής αντλίας (πουάρ) διπλής ενέργειας. Για να κενωθεί μία φιάλη χωρητικότητας 250 ml απαιτούνται 30 - 40 συμπιέσεις με ένα πουάρ 75 ml.

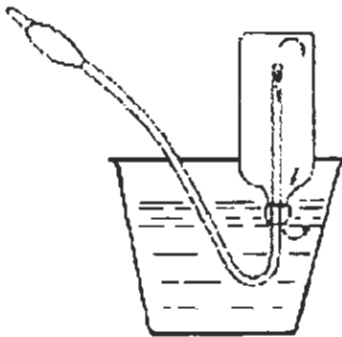
Ένα πλεονέκτημα των περισσότερων μεθόδων δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αέρα είναι ότι δεν απαιτείται ακριβής μέτρηση του όγκου του δείγματος που συλλέγεται αν στη συνέχεια μικρή ποσότητα αυτού διοχετεύεται προς απ' ευθείας ανάλυση. Όμως η πίεση και η θερμοκρασία του δείγματος πρέπει να είναι γνωστές ώστε να μπορεί να γίνει αναφορά στις κανονικές συνθήκες.



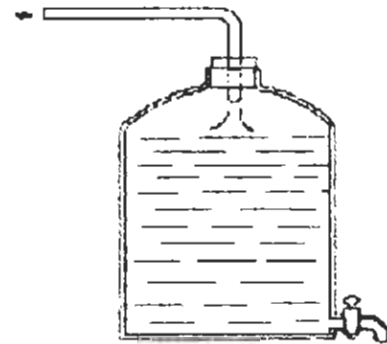
A. Φιαλίδια κενά από αέρα.



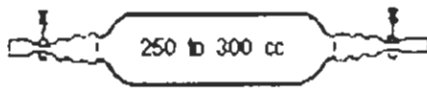
B. Δειγματοληψία με εμφύσηση σε κενό πλαστικό σάκο.



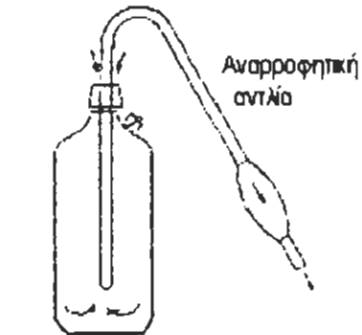
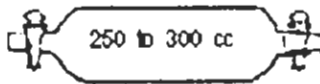
Γ. Δειγματοληψία με αντικατάσταση του αέρα της αντεστραμμένης φιάλης.



Δ. Δειγματοληψία με αντικατάσταση του υγρού του δοχείου.



E. Δειγματοληψία με αντικατάσταση του αέρα των σωλήνων.



Z. Δειγματοληψία με αντικατάσταση του αέρα της φιάλης.

**Σχήμα 8.9.3** Συστήματα δειγματοληψίας ατμοσφαιρικού αέρα (grab sampling)

## **8.10 Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων απο την ατμόσφαιρα**

### **8.10.1 Διήθηση**

Η δειγματοληψία αεροζόλ με διήθηση (filtration) στηρίζεται στον εξαναγκασμό του ατμοσφαιρικού αέρα να περάσει μέσα από ένα σύστημα μικροσκοπικών οπών (φίλτρο). Το φίλτρο μπορεί να αποτελείται από επικαλυπτόμενες ίνες (φίλτρα ινών υάλου ή κυτταρίνης) από οργανικές μεμβράνες με καθορισμένο μέγεθος πόρων (μεμβράνες όξινης/νιτρικής κυτταρίνης, πολυκαρβονικές μεμβράνες, μεμβράνες Teflon) ή τέλος από κόκκους ή πορώδες γυαλί.

Η συγκράτηση των σωματιδίων στο φίλτρο είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανισμών όπως ανάσχεση, διάχυση, πρόσκρουση λόγω αδράνειας και κατακάθιση λόγω βαρύτητας. Με απ' ευθείας ανάσχεση συγκρατούνται τα σωματίδια με διαστάσεις μεγαλύτερες από το μέγεθος των πόρων του διηθητικού υλικού ενώ τα πολύ μικρά σωματίδια ( $d < 0.4 \mu\text{m}$ ) συγκρατούνται κυρίως με διάχυση. Τα σωματίδια με ενδιάμεσες διαστάσεις συγκρατούνται εκλεκτικά με πρόσκρουση.

Ο τύπος του φίλτρου που επιλέγεται για μία δειγματοληψία αεροζόλ εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την ικανότητα συλλογής σωματιδίων ορισμένου μεγέθους, τη δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης της χημικής σύστασης των σωματιδίων, το κόστος, κ.λ.π.

### **8.10.2 Ικανότητα συλλογής σωματιδίων**

Η ικανότητα ενός φίλτρου να συγκρατεί τα διαφόρων μεγεθών σωματίδια που υπάρχουν στο δειγματοληπτούμενο αέρα εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων του, το μέγεθος των σωματιδίων, την ταχύτητα διήθησης και την ποσότητα των ήδη συλλεγμένων σωματιδίων. Χαμηλή ταχύτητα δειγματοληψίας ευνοεί τη συγκράτηση μικρών σωματιδίων λόγω διάχυσης. Αύξηση της ταχύτητας δειγματοληψίας ελαττώνει τη διάχυση αλλά αυξάνει την αδράνεια των σωματιδίων και επομένως τη συγκράτηση τους λόγω πρόσκρουσης. Όσο μικραίνει το μέγεθος των πόρων ενός φίλτρου τόσο η ικανότητα συλλογής μεγαλώνει, αλλά ταυτόχρονα ελαττώνεται η ταχύτητα διήθησης. Στον Πίνακα 8.10.1 δίνεται το ποσοστά των σωματιδίων διαμέτρου 0.1 και 1.0  $\mu\text{m}$  που συγκρατείται απο διαφόρων τύπων φίλτρα σε παροχές που ισοδυναμούν με πίεση 1.0 και 10.0 cm Hg.

Πίνακας 8.10.1

Ικανότητα συγκράτησης σωματιδίων διαμέτρου 0.1 και 1.0  $\mu\text{m}$  σε παροχές που ισοδυναμούν με πιέσεις 1.0 και 10.0cm Hg.

Τύπος φίλτρου	Σύσταση φίλτρου	D = 0,1 $\mu\text{m}$		D = 1,0 $\mu\text{m}$	
		$\Delta p$ (cm Hg)			
		1,0	10,0	1,0	10,0
Whatman No 1	Ίνες κυτταρίνης	56	87	98,1	99,7
Whatman No 41	Ίνες κυτταρίνης	44	84	92,0	99,1
Gelman A	Ίνες υάλου	>99,9	99,9	>99,9	>99,9
Gelman A /E	Ίνες υάλου	99,0	99,6	>99,9	>99,9
Millipore MF /HA (0,45 $\mu\text{m}$ )	Μεμβράνες οξικής / νιτρικής κυτταρίνης	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9
Millipore FH (0,4 $\mu\text{m}$ )	Μεμβράνες PTFE	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9
millipore FS (3,0 $\mu\text{m}$ )	Μεμβράνες PTFE	99,5	99,7	99,9	99,8
Nuclepore NO 10 (0,1 $\mu\text{m}$ )	Πολυκαρβονικές μεμβράνες	>99,9	>99,9	>99,9	>99,9
Nuclepore N 100 (1,0 $\mu\text{m}$ )	Πολυκαρβονικές μεμβράνες	49	43	87	98,1

Συνήθως η ικανότητα συλλογής αναφέρεται σε καθαρά φίλτρα. Όμως τα σωματίδια που συσσωρεύονται πάνω στο φίλτρο κατά τη δειγματοληψία αυξάνουν την ικανότητα συλλογής. Ταυτόχρονα αλλά σε μικρότερο βαθμό, μεγαλώνει και η αντίσταση του φίλτρου. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν χρησιμοποιούνται φίλτρα με τη μέγιστη ικανότητα συλλογής επειδή απαιτούν πολύ χαμηλές παροχές και ισχυρές αντλίες.

### 8.10.3 Χημική σύσταση φίλτρων

Βασική σημασία στην επιλογή των κατάλληλων φίλτρων για τη δειγματοληψία αεροζόλ έχει και η χημική τους σύσταση. Τα φίλτρα πρέπει να είναι χημικώς αδρανή ως προς τους συλλεγόμενους σωματιδιακούς ρύπους. Έχει διαπιστωθεί π.χ. ότι στην επιφάνεια των αλκαλικών φίλτρων (όπως είναι τα φίλτρα από υαλονήματα) σχηματίζονται κατά τη δειγματοληψία σωματίδια σαν αποτέλεσμα της προσρόφησης και οξειδωσης των οξεογόνων αερίων, κυρίως  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_2$ . Γι' αυτό και τα φίλτρα από υαλονήματα είναι ακατάλληλα για τον προσδιορισμό των θειικών και νιτρικών αεροζόλ. Η χημική σύσταση των φίλτρων παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου με την οποία θα γίνει η χημική ανάλυση των σωματιδίων. Έτσι, π.χ. για χημική ανάλυση των σωματιδίων με τη μέθοδο της νετρονικής ενεργοποίησης προτιμούνται

τα φίλτρα κυτταρίνης (Whatman No 41) ή τα φίλτρα μεμβράνης εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητάς τους σε μεταλλικές προσμίξεις και της ομοιόμορφης κατανομής των προσμίξεων στην επιφάνειά τους. Αντίθετα τα φίλτρα από ίνες υάλου είναι κατάλληλα για χημική ανάλυση των σωματιδίων με τη μέθοδο της φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης. Στον Πίνακα 8.10.2 περιγράφονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συνηθέστερων τύπων φίλτρων.

#### 8.10.4 Προβλήματα δειγματοληψίας σωματιδίων με διήθηση

Ένα πρόβλημα που εμφανίζεται κατά τη δειγματοληψία αεροζόλ από την ατμόσφαιρα με τη μέθοδο της διήθησης, ανεξάρτητα από τη χημική σύσταση του χρησιμοποιούμενου φίλτρου, είναι οι αντιδράσεις των σωματιδίων μεταξύ τους ή με αέριους ρύπους. Τα μεγάλα μεγέθους αλκαλικά σωματίδια εξουδετερώνουν τα μικρού μεγέθους σωματίδια των θειικών, ενώ προσροφούν και οξειδώνουν το SO<sub>2</sub>. Εξουδετέρωση των όξινων σωματιδίων μπορεί επίσης να προκληθεί από την ατμοσφαιρική αμμωνία. Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων πάνω στο φίλτρο μειώνεται σημαντικά με δειγματοληψία κατά μέγεθος, δηλαδή με διαχωρισμό των σωματιδίων σε κλάσματα ανάλογα με το μέγεθός τους.

Ακόμη η προσρόφηση αέριων ρύπων από τα σωματίδια μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση ειδικών συσκευών που ονομάζονται δειγματολήπτες διάχυσης ή συνήθως **απογυμνωτές** (denuders). Οι απογυμνωτές τοποθετούνται πριν από τη συσκευή διήθησης. Αποτελούνται από στενούς και μακρείς σωλήνες, καλυμμένους εσωτερικά με κατάλληλη απορροφητική ουσία. Σε ορισμένη ταχύτητα δειγματοληψίας και για ορισμένο μήκος σωλήνα, τα μικρά μόρια των αερίων διαχέονται στα τοιχώματα του σωλήνα όπου συγκρατούνται πλήρως από το απορροφητικό. Αντίθετα τα λιγότερο ευκίνητα σωματίδια περνούν μέσα από τον απογυμνωτή και συλλέγονται πάνω στο φίλτρο.

Συνήθεις αέριοι ρύποι που μπορούν να απομακρυνθούν με απογυμνωτές είναι το διοξείδιο του θείου, η αμμωνία και το νιτρικό οξύ. Το Σχήμα 8.10.1 παριστάνει ένα σύστημα απογυμνωτών για απομάκρυνση HCl – HNO<sub>3</sub> (με NaF) και SO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>S (με τετραχλωροϋδραργυρικό κάλιο).





**Σχήμα 8.10.1** Σύστημα δειγματοληψίας αποτελούμενο από δύο απογυμνωτές (1,2) και φίλτρο διήθησης (3). **Απογυμνωτής 1:** 90x0,6 cm, εσωτερική κάλυψη με NaF, συγκρατούνται HCl και HNO<sub>3</sub>. **Απογυμνωτής 2:** 25x0,6 cm, εσωτερική κάλυψη με άλας τετραχλωροϋδραργύρου, συγκρατούνται SO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S

**Πίνακας 8.10.2**

Ιδιότητες διαφόρων τύπων φίλτρων που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Σύσταση φίλτρου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαρτί κυτταρίνης	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Χαμηλό περιεχόμενο τέφρας</li> <li>- Υψηλή καθαρότητα</li> <li>- Υψηλή μηχανική αντοχή</li> <li>- Χαμηλό κόστος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μη ομοιόμορφη επιφάνεια</li> <li>- Μεγάλη αντίσταση</li> <li>- Υγροσκοπικότητα</li> <li>- Περιορισμένη ικανότητα συλλογής</li> </ul>
Ίνες υάλου	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Μεγάλη ικανότητα συλλογής</li> <li>- Μειωμένη υγροσκοπικότητα</li> <li>- Αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες</li> <li>- Αντοχή σε οξέα</li> <li>- Αντοχή σε οργανικούς διαλύτες</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Εύθραυστα</li> <li>- Αντιδρούν ή προσροφούν αέριους ρύπους (π.χ. SO<sub>2</sub>)</li> </ul>
Μεμβράνες κυτταρίνης (οξική/νιτρική κυτταρίνη, αναγεννημένη κυτταρίνη)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ελάχιστο περιεχόμενο τέφρας</li> <li>- Υψηλή καθαρότητα</li> <li>- Μη υγροσκοπικά</li> <li>- Ανθεκτικά σε οργανικούς διαλύτες</li> <li>- Ανθεκτικά σε οξέα</li> <li>- Μεγάλη ικανότητα συλλογής (για μικρό μέγεθος πόρων)</li> <li>- Επιφανειακή συλλογή σωματιδίων</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Σχετικά μεγάλη αντίσταση (περιορισμένη ποσότητα δείγματος)</li> </ul>
Μεμβράνες PTFE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Όλα τα πλεονεκτήματα των μεμβρανών κυτταρίνης</li> <li>- Χημικώς αδρανή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Υψηλό κόστος</li> </ul>
Πολυκαρβονικές μεμβράνες	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Όλα τα πλεονεκτήματα των μεμβρανών κυτταρίνης</li> <li>- Χημικώς αδρανή</li> <li>- Λεία επιφάνεια (κατάλληλα για ηλεκτρονικό μικροσκόπιο)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Υψηλό κόστος</li> </ul>

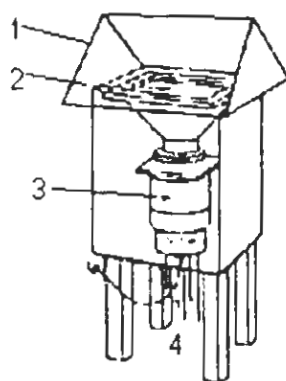
Τα συστήματα δειγματοληψίας αιωρούμενων σωματιδίων με τη μέθοδο της διήθησης περιλαμβάνουν:

#### α. Δειγματολήπτες μεγάλου όγκου (High Volume Samplers).

Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ολικών αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας (TSP). Αποτελούνται από έναν υποδοχέα φίλτρου, ένα κάλυμμα οροφής και μία αντλία ικανή να αναρροφά μεγάλους όγκους αέρα ( $1.1 - 1.7 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ) (Σχήμα 8.10.2). Το φίλτρο (διαστάσεων  $20 \times 25 \text{ cm}$ ) τοποθετείται οριζόντια με όψη προς τα επάνω. Χρησιμοποιούνται φίλτρα από υαλονήματα ή κυτταρίνη. Το κάλυμμα οροφής προστατεύει το φίλτρο από τη βροχή και την κατακάθιση σωματιδίων μεγαλύτερων από  $50 \mu\text{m}$ . Αυτό γίνεται επειδή η αναρρόφηση του αέρα γίνεται από το κενό που υπάρχει μεταξύ υποδοχέα φίλτρου και καλύμματος οροφής. Έτσι ο αέρας για να φτάσει στο φίλτρο πρέπει πρώτα να κινηθεί προς τα επάνω. Οι διαστάσεις της οροφής είναι τέτοιες ώστε σωματίδια μεγαλύτερα από  $50 \mu\text{m}$  να κατακάθονται λόγω βαρύτητας κι έτσι να μη συλλέγονται. Αυτά φυσικά ισχύει μόνο για περιόδους άπνοιας ενώ σε περιπτώσεις που φυσά ισχυρός άνεμος δεν αποκλείεται η συλλογή σωματιδίων μεγαλύτερων από  $50 \mu\text{m}$ . Οι δειγματολήπτες Hi-Vol πρέπει να βαθμονομούνται τακτικά (περίπου κάθε έξι μήνες).

#### β. Δειγματολήπτες μικρού όγκου (Low Volume Samplers).

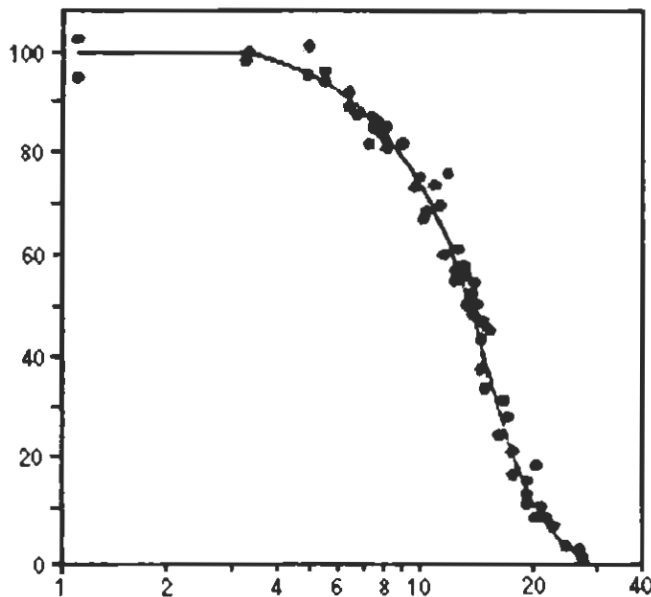
Οι δειγματολήπτες αυτοί έχουν χαμηλή παροχή, περίπου  $2 \text{ m}^3$  το 24ωρο. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούν είναι κυκλικά, διαμέτρου συνήθως  $47 \text{ mm}$ . Το υλικό των φίλτρων ποικίλλει ανάλογα με τα σωματίδια που θα συλλέγουν και τη μέθοδο ανάλυσής τους. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τη δειγματοληψία θειικών και νιτρικών σωματιδίων, μόλυβδου και άλλων βαρέων μετάλλων, καπνού, κ.λ.π. Εξαιτίας της χαμηλής παροχής οι δειγματολήπτες αυτοί συλλέγουν κυρίως σωματίδια μικρότερα από  $10 \mu\text{m}$ .



Σχήμα 8.10.2 Δειγματολήπτης μεγάλου όγκου (Hi-Vol)  
1. Κάλυμμα, 2. Φίλτρο, 3. Μοτέρ, 4. Έξοδος αέρα

#### γ. Δειγματολήπτες αναπνεύσιμης σκόνης (Inhalable particle samplers).

Είναι συνήθως δειγματολήπτες Hi-Vol με ειδικό σύστημα εισαγωγής του αέρα (κεφαλή) ώστε να επιτρέπεται η συγκράτηση μόνον του αναπνεύσιμου κλάσματος των σωματιδίων (0-10  $\mu\text{m}$  ή 0-15  $\mu\text{m}$ ). Η διάμετρος των 10  $\mu\text{m}$  ή 15  $\mu\text{m}$  ονομάζεται **οριακή διάμετρος** και σημαίνει ότι το σύστημα εισαγωγής του αέρα έχει την ικανότητα να περιορίζει κατά 50% τη συγκράτηση σωματιδίων με διάμετρο  $>10 \mu\text{m}$  ή  $>15 \mu\text{m}$ , αντίστοιχα. Στο Σχήμα 8.10.3 δίνεται η ικανότητα συλλογής ενός δειγματολήπτη με κεφαλή οριακής διαμέτρου 15  $\mu\text{m}$ .



**Σχήμα 8.10.3** Καμπύλη ικανότητας συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων δειγματολήπτη τύπου Siesta με κεφαλή οριακής διαμέτρου 15  $\mu\text{m}$  (ταχύτητα δειγματοληψίας 40  $\text{ft}^3/\text{min}$ , ταχύτητα ανέμου 2  $\text{km/h}$ )

#### 8.10.5 Πρόσκρουση

Η δειγματοληψία σωματιδίων με τη μέθοδο της πρόσκρουσης (impingement) στηρίζεται στον εξαναγκασμό του ατμοσφαιρικού αέρα να περάσει μέσα από ένα ακροφύσιο (οπότε αυξάνει η ταχύτητά του) και στη συνέχεια να προσκρούσει επάνω σ' ένα εμπόδιο (οπότε αλλάζει ξαφνικά η πορεία του). Με την αύξηση της ταχύτητας του δείγματος αυξάνει η επιτάχυνση των σωματιδίων τα οποία προσκρούοντας στο εμπόδιο συλλέγονται λόγω αδράνειας.

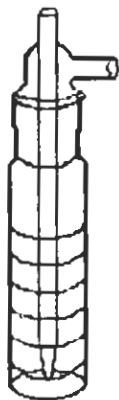
Οι συσκευές δειγματοληψίας που στηρίζονται στη μέθοδο της πρόσκρουσης (impingers) ομοιάζουν με τις πλυντρίδες αερίων και είναι δύο τύπων: α) υγρού τύπου και β) ξηρού τύπου (Σχήμα 8.10.4). Στις συσκευές υγρού τύπου η συλλογή των σωματιδίων γίνεται μέσα σ' ένα υγρό, στο οποίο τα σωματίδια πρέπει να είναι αδιάλυτα.

Εφόσον στη μέθοδο της πρόσκρουσης η συλλογή των σωματιδίων οφείλεται στην αδράνειά τους (καθορίζεται δηλαδή από την ταχύτητα και τη μάζα τους), η ικανότητα συλλογής σωματιδίων ορισμένης διαμέτρου θα εξαρτάται από την ταχύτητα δειγματοληψίας. Αυτή στα συνήθη συστήματα πρόσκρουσης κυμαίνεται από 3 μέχρι 30 L min<sup>-1</sup>.

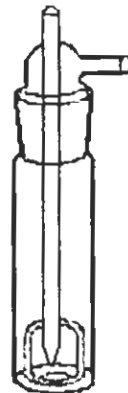
Η παραπάνω αρχή αποτελεί τη βάση λειτουργίας των σύγχρονων συσκευών πρόσκρουσης με τις οποίες επιτυγχάνεται διαχωρισμός των σωματιδίων σε κλάσματα ανάλογα με το μέγεθός τους (προσκρουστήρες). Οι προσκρουστήρες είναι δύο τύπων:

α) οι προσκρουστήρες αδράνειας (inertial impactors, cascade impactors) και

β) οι προσκρουστήρες αντίθετης ροής (virtual impactors).

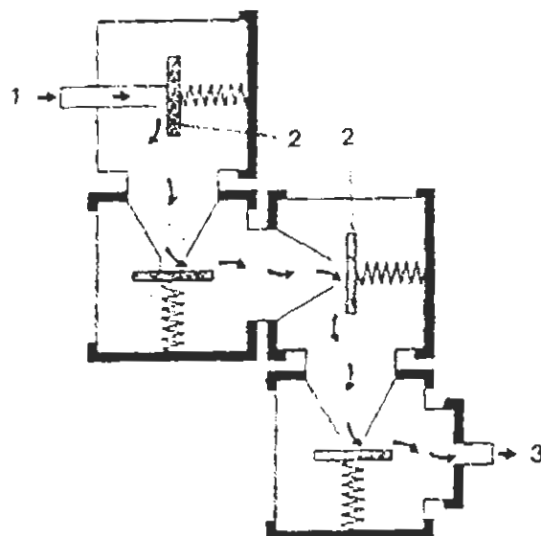


A. υγρού τύπου



B. υγρού - ξηρού τύπου

Σχήμα 8.10.4 Συσκευές δειγματοληψίας αιωρούμενων σωματιδίων με τη μέθοδο της πρόσκρουσης.



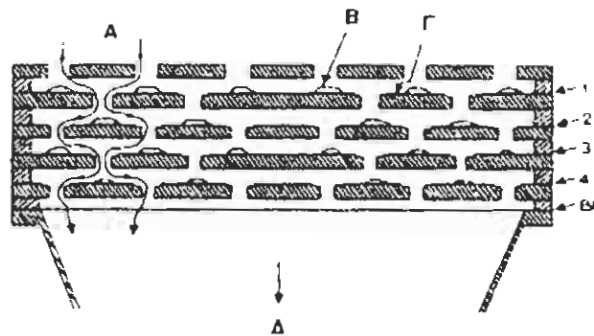
Σχήμα 8.10.5 Προσκρουστήρας αδράνειας (cascade impactor)  
1. Είσοδος αεροζόλ, 2. Επιφάνειες πρόσκρουσης, 3. Έξοδος

## β) οι προσκρουστήρες αντίθετης ροής (virtual impactors).

Οι προσκρουστήρες αδράνειας αποτελούνται από ένα σύστημα διαδοχικών ακροφυσίων και επιφανειών συλλογής (Σχήμα 8.10.5). Η ταχύτητα του δείγματος αυξάνει συνεχώς από την είσοδο μέχρι την έξοδο της συσκευής. Αυτό επιτυγχάνεται με σταδιακή ελάττωση της διαμέτρου των ακροφυσίων ή της απόστασης ακροφυσίου-επιφάνειας συλλογής. Έτσι επιτυγχάνεται διαχωρισμός των σωματιδίων σε κλάσματα, ανάλογα με το μέγεθος τους. Τα μεγαλύτερα σωματίδια συλλέγονται στην πρώτη επιφάνεια συλλογής ενώ στις επόμενες επιφάνειες συλλέγονται σωματίδια με διαδοχικά μικρότερο μέγεθος. Τα πολύ μικρά σωματίδια συγκρατούνται από το φίλτρο που υπάρχει στην έξοδο της συσκευής. Οι προσκρουστήρες που κυκλοφορούν στο εμπόριο διαθέτουν 2 - 6 επιφάνειες συλλογής. Οι προσκρουστήρες μεγάλου όγκου είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να τοποθετούνται επάνω σε δειγματολήπτες μεγάλου όγκου (Σχήμα 8.10.6).

Οι προσκρουστήρες αδράνειας έχουν ορισμένα μειονεκτήματα κυριότερα από τα οποία είναι:

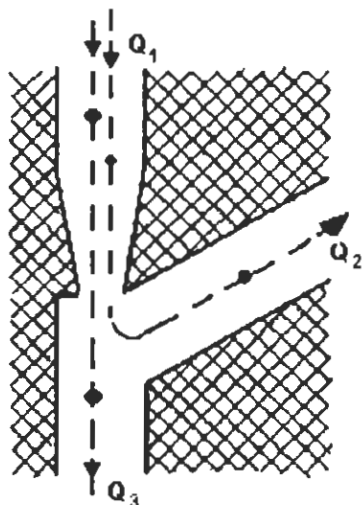
- η επαναιώρηση των σωματιδίων τα οποία δεν κατορθώνουν να συγκρατηθούν στη σωστή επιφάνεια συλλογής, με αποτέλεσμα ορισμένα μεγάλα σωματίδια να συλλέγονται στο κλάσμα των μικρών σωματιδίων.
- η συσσώρευση πολλών σωματιδίων σε μία μικρή επιφάνεια (κάτω από τα ακροφύσια ή τις σχισμές του προσκρουστήρα) με αποτέλεσμα την εύκολη απομάκρυνσή τους και την επανασυλλογή τους σε επόμενες επιφάνειες συλλογής.



**Σχήμα 8.10.6** Προσκρουστήρας αδράνειας μεγάλου όγκου (Hi-Vol inertial impactor) με 4 επιφάνειες πρόσκρουσης και τελικό φίλτρο (BF). Α. Ροή αέρα, Β. Απόθεση σωματιδίων, Γ. Επιφάνεια πρόσκρουσης, Δ. Προς αντλία

Τα προβλήματα αυτά αποφεύγονται με τη χρήση των προσκρουστήρων αντίθετης ροής. Ένας τέτοιος προσκρουστήρας στην απλούστερη μορφή του μπορεί να διαχωρίζει έναν πληθυσμό σωματιδίων ποικίλης διαμέτρου σε δύο κλάσματα (διχοτόμος δειγματολήπτης) με την τεχνική των αντίθετων ρευμάτων. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου δειγματολήπτη δίνεται παραστατικά στο Σχήμα 8.10.7

Το δείγμα σωματιδίων εισέρχεται στον προσκρουστήρα μέσα από ένα κωνικό ακροφύσιο με ταχύτητα  $Q_1$ . Στο άκρο του ακροφυσίου οι ρευστοδυναμικές γραμμές υπόκεινται σε αλλαγή της διεύθυνσης τους κατά  $90^\circ$  ως  $120^\circ$ . Έτσι δημιουργούνται δύο ρεύματα με αλλαγή διεύθυνσης των ρευστοδυναμικών γραμμών και διαχωρίζονται στο ρεύμα  $Q_2$  και  $Q_3$ , όπου  $Q_2 \gg Q_3$ . Τα μικρά σωματίδια ακολουθούν την αλλαγή διεύθυνσης των ρευστοδυναμικών γραμμών και διαχωρίζονται στο ρεύμα  $Q_2$ , ενώ τα μεγάλα συνεχίζουν την κίνηση τους στο ρεύμα  $Q_3$ . Τα δύο κλάσματα σωματιδίων συλλέγονται σε φίλτρα για περαιτέρω χημική ανάλυση.



**Σχήμα 8.10.7** Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας ενός προσκρουστήρα αντίθετης ροής. Ολική ταχύτητα ροής  $Q_1 = Q_2 + Q_3$ .

### 8.10.6 Διάχυση

Η κίνηση των αιωρούμενων σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από  $1 \mu\text{m}$  επηρεάζεται σημαντικά από τυχαίες συγκρούσεις με μόρια αερίων συστατικών. Αυτή η κίνηση ονομάζεται διάχυση Brown (Brownian diffusion) και για ορισμένη θερμοκρασία εξαρτάται από τις διαστάσεις των σωματιδίων. Τα μικρά σωματίδια που έχουν μικρή επιτάχυνση επηρεάζονται ισχυρότερα από τις συγκρούσεις τους με τα μόρια των αερίων και για αυτό εμφανίζουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάχυσης από ό,τι τα μεγάλα σωματίδια (τα σωματίδια με διάμετρο  $< 0.3 \mu\text{m}$  έχουν ταχύτητα διάχυσης  $> 10 \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ ).

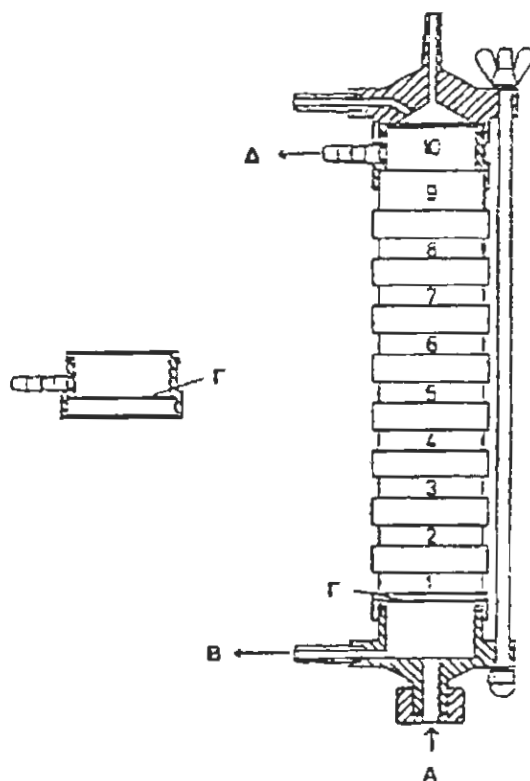
Η διάχυση Brown είναι ο μηχανισμός στον οποίο στηρίζεται ο διαχωρισμός και η συλλογή σωματιδίων μικρότερων από 0.3  $\mu\text{m}$ . Στα σωματίδια αυτά οι μηχανισμοί κατακάθισης λόγω βαρύτητας ή πρόσκρουσης είναι αμελητέοι. Ο διαχωρισμός σε κλάσματα των σωματιδίων με διάμετρο  $< 0.3 \mu\text{m}$  επιτυγχάνεται με ειδικές συσκευές που ονομάζονται δειγματολήπτες διάχυσης (diffusion batteries). Ο δειγματολήπτης διάχυσης αποτελείται από ένα σύστημα δίσκων από ανοξείδωτο χάλυβα διαφορετικού πάχους, οι οποίοι φέρουν μεγάλο αριθμό στρογγυλών οπών. Οι δίσκοι συνδέονται κατά σειρά, έχοντας μεταξύ τους ένα πλευρικό σωλήνα απ' όπου αναρροφάται το δείγμα του αέρα. Τα σωματίδια λόγω της κίνησης Brown, διαχέονται στα τοιχώματα των σωλήνων που σχηματίζονται από τους διάτρητους δίσκους κι έτσι απομακρύνονται από το δείγμα. Πρώτα απομακρύνονται τα μικρότερα σωματίδια (επειδή έχουν μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης) και σταδιακά τα μεγαλύτερα σωματίδια.

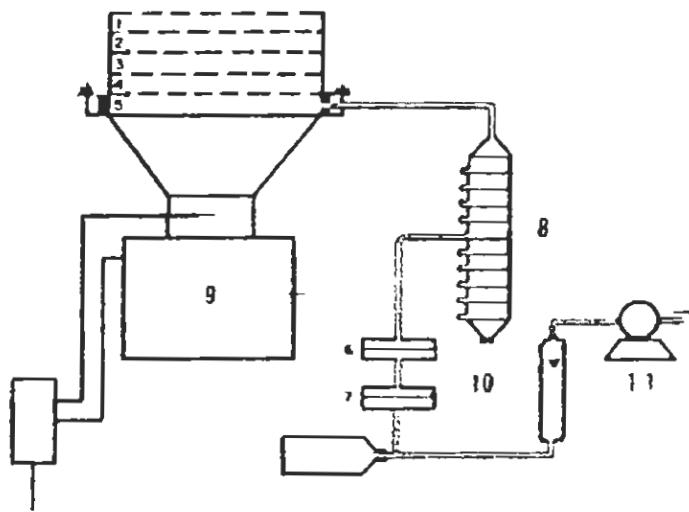
Η χρησιμοποίηση των δειγματοληπτών διάχυσης περιορίζεται μόνον στα πολύ μικρά σωματίδια γι' αυτό και ένας προδιαχωρισμός των σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 1  $\mu\text{m}$  είναι απαραίτητος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Εκτός αυτού οι δειγματολήπτες διάχυσης δεν επιτυγχάνουν τόσο ακριβή κλασματοποίηση των σωματιδίων όσο οι προσκρουστήρες. Στο Σχήμα 8.10.8 δίνεται ένας δειγματολήπτης διάχυσης με ικανότητα διαχωρισμού 10 κλασμάτων.

Η χρησιμοποίηση των δειγματοληπτών διάχυσης είναι ευρεία κατά τα τελευταία χρόνια, μετά τη διαπίστωση ότι ένα σημαντικό κλάσμα των θειικών και νιτρικών σωματιδίων καθώς και του ατμοσφαιρικού μολύβδου, βρίσκονται με μορφή σωματιδίων μικρότερων από 0.3  $\mu\text{m}$  οπότε δεν μπορούν να συλλεγούν με τους προσκρουστήρες. Στο Σχήμα 8.10.9 δίνεται ένα σύστημα κλασματοποίησης και συλλογής αιωρούμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα με συνδυασμό προσκρουστήρα και δειγματολήπτη διάχυσης.

#### Σχήμα 8.10.8

Δειγματολήπτης διάχυσης με ικανότητα διαχωρισμού 10 κλασμάτων (συνολικό μήκος 32 cm). Α. Είσοδος αέρα, Β. Έξοδος σωματιδίων ( $d > 1 \mu\text{m}$ ), Γ. Επιφάνεια συλλογής, Δ. Έξοδος αέρα.





**Σχήμα 8.10.9** Σχηματικό διάγραμμα συστήματος κλασματοποίησης και συλλογής αεροζόλ από την ατμόσφαιρα: 1 - 4. Επιφάνειες συλλογής προσκρουστήρα, 5. Τελικό φίλτρο προσκρουστήρα, 6. Φίλτρο Tεφλον, 7. Φίλτρο εμποτισμένο με αμμωνία, 8. Δειγματολήπτης διάχυσης, 9. Αντλία Hi-Vol, 10. Παροχόμετρο, 11. Αντλία.

### 8.10.7 Φυγοκέντρηση

Η μέθοδος της φυγοκέντρησης (centrifugal collection) στηρίζεται στον εξαναγκασμό του αέρα να ακολουθήσει μία σπειροειδή διαδρομή μέσα σ' έναν κυκλώνα. Οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται επάνω στα σωματίδια τα αναγκάζουν να κινηθούν προς τα τοιχώματα του κυκλώνα και να αποτεθούν επάνω στην επιφάνεια της συλλογής. Έτσι, επιτυγχάνεται κι ένας στοιχειώδης διαχωρισμός των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθός τους, ο οποίος όμως είναι λιγότερο ακριβής σε σύγκριση με τους προσκρουστήρες αδράνειας.

Οι κυκλώνες ή φυγοκεντρικοί προσκρουστήρες (cyclons, centrifugal impactors), όπως αλλιώς ονομάζονται, χρησιμοποιούνται κυρίως για το διαχωρισμό και συλλογή του κλάσματος των μικρών σωματιδίων. Το κλάσμα των μεγάλων σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί με παράλληλη δειγματοληψία της συνολικής ποσότητας σωματιδίων.



### 8.10.8 Κατακάλιση λόγω βαρύτητας

Τα σωματίδια της ατμόσφαιρας κατακάθονται λόγω της βαρύτητας (gravitational collection) με ταχύτητα ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας τους, σύμφωνα με το νόμο του Stokes. Η ταχύτητα κατακάλισης των μικρού μεγέθους σωματιδίων είναι χαμηλή σε σχέση με τις κινήσεις των αερίων μαζών, με αποτέλεσμα τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10 μm να παραμένουν εν αιώρηση στην ατμόσφαιρα. Τα μεγαλύτερα σωματίδια που καθιζάνουν αποτελούν την πίπτουσα σκόνη (dustfall) ή ξηρή απόθεση (dry deposition).

Η δειγματοληψία της πίπτουσας σκόνης γίνεται μέσα σε δοχεία τα οποία ονομάζονται δειγματολήπτες ξηρής απόθεσης. Οι δειγματολήπτες ξηρής απόθεσης είναι από τις πρώτες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Δεν έχουν καθορισμένο σχήμα και μέγεθος. Συνήθως έχουν τη μορφή λεκάνης ή κυλίνδρου με οριζόντια επιφάνεια συλλογής. Στο Σχήμα 8.10.10 δίνονται μερικοί τύποι δειγματοληπτών ξηρής απόθεσης που χρησιμοποιούνται από διάφορες χώρες στα δίκτυα ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται αυτόματι δειγματολήπτες υγρής (βροχή) - ξηρής απόθεσης (Σχήμα 8.10.10).

Το σχήμα του δειγματολήπτη επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος (και την ποσότητα) των σωματιδίων που αποτίθενται (Σχήμα 8.10.10). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ελεύθερη πτώση των σωματιδίων της σκόνης μόνο τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια ακολουθούν μία σχεδόν κατακόρυφη διαδρομή. Αντίθετα τα μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια πέφτουν υπό γωνία, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητά τους καθώς και από την ταχύτητα του ανέμου. Στον Πίνακα 8.10.1 δίνεται η γωνία πρόσπτωσης των σωματιδίων σε μια οριζόντια επιφάνεια για δύο διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

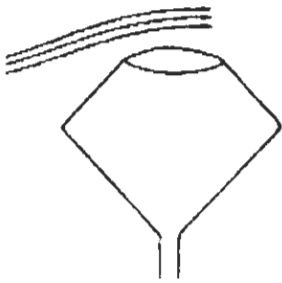
Η γωνία πρόσπτωσης των σωματιδίων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν εξετάζεται η απόθεση σωματιδίων γύρω από μία καμινάδα. Οι θέσεις δειγματοληψίας πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να συλλέγονται και τα βαρύτερα σωματίδια που αποτίθενται κοντά στην καμινάδα.

Ένα πρόβλημα που παρατηρείται συχνά στους δειγματολήπτες πίπτουσας σκόνης είναι η απώλεια δείγματος με το φύσημα του ανέμου. Αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση δοχείων στα οποία το ύψος είναι διπλάσιο της διαμέτρου. Ακόμη συχνά συνιστάται η χρησιμοποίηση μικρής ποσότητας νερού, στο οποίο προστίθεται και κάποιο αλκοκτόνο (π.χ. Cu504) ή αντιψυκτικό (π.χ. 2-μεθοξυ-αιθανόλη) προς αποφυγή ανάπτυξης αλογόνων ή σχηματισμού πάγου.

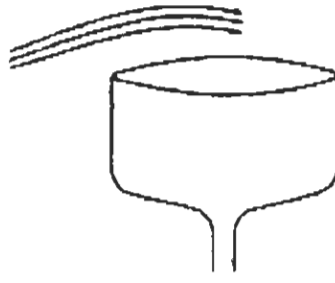
Πίνακας 8.10.1

Γωνία πρόσπτωσης σωματιδίων σε οριζόντια επιφάνεια.

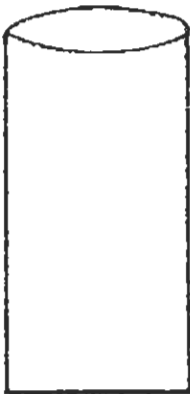
Μέγεθος (μm)	Πυκνότητα	Γωνία πρόσπτωσης	
		2,2 m sec <sup>-1</sup>	4,5 m sec <sup>-1</sup>
1000	1	61	42
800	1	54	34
600	1	45	27
400	1	37	20
200	1	20	10
100	1	8	4
50	1	2	1
1000	2	75	61
800	2	70	54
600	2	64	45
400	2	56	47
200	2	35	20
100	2	25	8
50	2	4	3



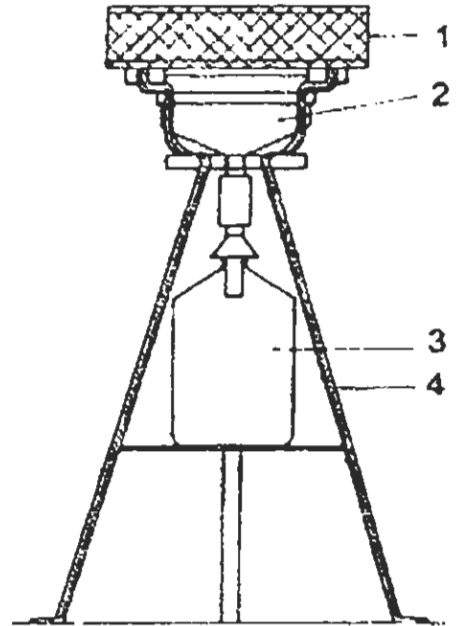
Α. Γαλλικό Πρότυπο



Β. Αγγλικό Πρότυπο



Γ. Νορβηγικό Πρότυπο



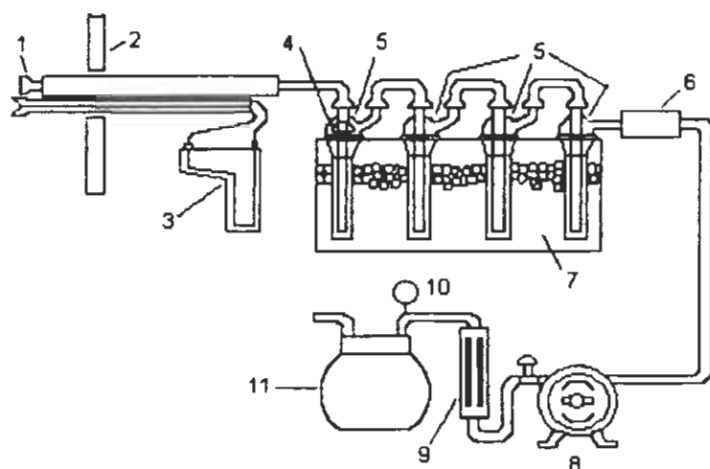
Δ. Πλήρες σύστημα συλλογής της πέπτουσας σκόνης (Αγγλικό πρότυπο)(1. Προστατευτικό πλέγμα, 2. Γυάλινο χωνί, 3. Δοχείο συλλογής, 4. Στήριγμα)

Σχήμα 8.10.10 Διάφοροι τύποι δειγματοληπτών ξηρής απόθεσης

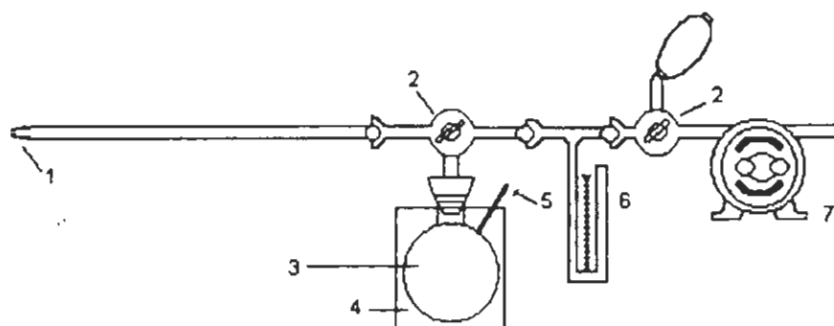
## 8.11 Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από καμινάδες

Για τη συλλογή αέριων ρύπων που εκπέμπονται από καμινάδες δεν απαιτείται ισοκινητική δειγματοληψία. Τα δείγματα όμως που συλλέγονται πρέπει να είναι ανάλογα της ταχύτητας εκπομπής των αερολυμάτων όταν αυτή δεν είναι σταθερή. Εναλλακτικά, σε περιπτώσεις μη σταθερής ταχύτητας εκπομπής, μπορούν να συλλεγούν «σύνθετα» δείγματα από πολλά στιγμιαία δείγματα σε διαφορετικές ταχύτητες εκπομπής.

Για πολλούς αέριους ρύπους έχουν καθοριστεί πρότυπες τεχνικές δειγματοληψίας από καμινάδες. Στα Σχήματα 8.11.1 και 8.11.2 δίνονται διαγραμματικά οι πρότυπες συστοιχίες δειγματοληψίας για  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$ .



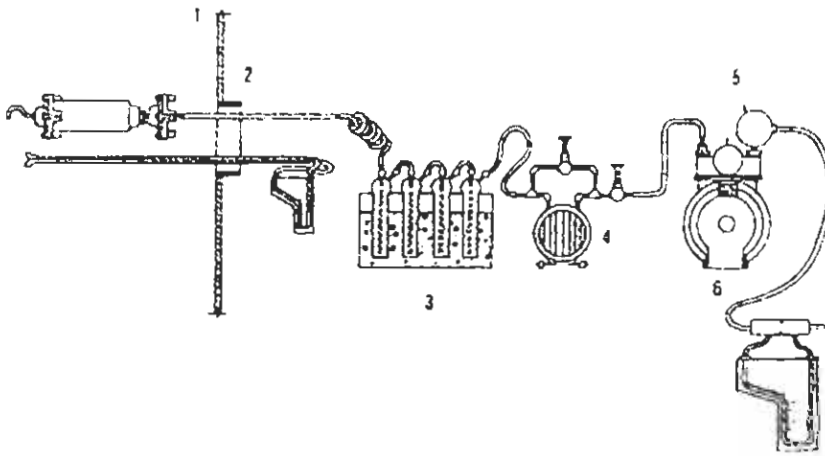
**Σχήμα 8.11.1** Πρότυπη συστοιχία δειγματοληψίας  $\text{SO}_2$  από καμινάδες  
1. Ακροφύσιο (με υαλοβάμβακα από pyrex ή quartz), 2. Καμινάδα,  
3. Μανόμετρο Pitot, 4. Υαλοβάμβακας, 5. Πλυντρίδες, 6. Ξηραντικό (Silica gel).  
7. Παγόλουτρο 8. Αντλία, 9. Παροχόμετρο, 10. Θερμόμετρο, 11. Ογκόμετρο



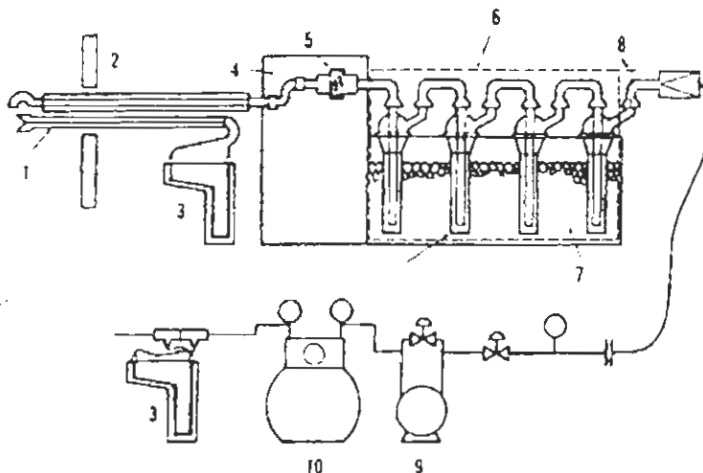
**Σχήμα 8.11.2** Πρότυπη συστοιχία δειγματοληψίας  $\text{NO}_x$  από καμινάδες. 1. Φίλτρο,  
2. Σωλήνας δειγματοληψίας, 3. Δοχείο συλλογής, 4. Στήριγμα,  
5. Θερμόμετρο, 6. Μανόμετρο, 7. Αντλία.

## 8.12 Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων από καμινάδες

Για τη δειγματοληψία σωματιδίων που εκπέμπονται από καμινάδες υπάρχουν διάφορες τεχνικές οι οποίες βασίζονται κυρίως στη μέθοδο της διήθησης. Το φίλτρο συλλογής των σωματιδίων μπορεί να βρίσκεται μέσα ή έξω από την καμινάδα (Σχήματα 8.12.1 και 8.12.2). Η δειγματοληψία γίνεται ισοκινητικά με ρύθμιση της ταχύτητας δειγματοληψίας σύμφωνα με την ταχύτητα εξόδου των αερολυμάτων. Η υγρασία των αερολυμάτων προσδιορίζεται μετά από συμπύκνωση. Στα Σχήματα 8.12.1 και 8.12.2 δίνονται δύο πρότυπες τεχνικές δειγματοληψίας σωματιδίων από καμινάδες.



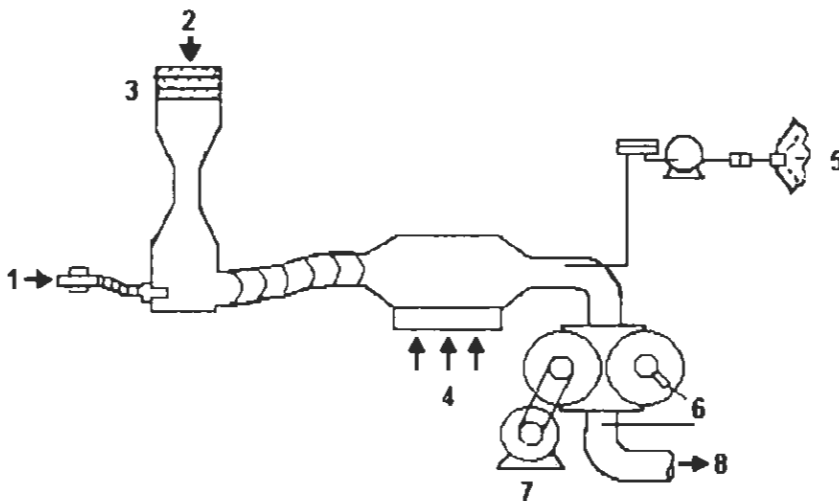
Σχήμα 8.12.1 Συστοιχία δειγματοληψίας σωματιδίων από καμινάδες με εσωτερικό δειγματολήπτη (ASTM) 1. Φίλτρο συλλογής σωματιδίων, 2. Καμινάδα, 3. Παγίδες συμπύκνωσης, 4. Αντλία, 5. Θερμόμετρο, 6. Ογκόμετρο



Σχήμα 8.12.2 Συστοιχία δειγματοληψίας σωματιδίων από καμινάδες με εξωτερικό δειγματολήπτη (EPA) 1. Ακροφύσιο, 2. Καμινάδα, 3. Μανόμετρα Pitot, 4. Θερμαινόμενη περιοχή, 5. Φίλτρο συλλογής σωματιδίων, 6. Παγίδες συμπύκνωσης, 7. Παγόλουτρο, 8. Θερμόμετρο, 9. Αντλία, 10. Ογκόμετρο.

### 8.13 Μέθοδοι δειγματοληψίας ρύπων από εξατμίσεις αυτοκινήτων

Η δειγματοληψία αέριων ρύπων από εξατμίσεις αυτοκινήτων γίνεται με συλλογή των καυσαερίων που εκπέμπονται στη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου οδήγησης. Στη συνέχεια τα καυσαέρια αραιώνονται προς αποφυγή συμπύκνωσης των αέριων συστατικών λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας. Η αραιώση γίνεται με ξηρό διηθημένο αέρα σε αναλογία αέρας : καυσαέριο = 4:1 συνήθως. Πριν την αραιώση τα καυσαέρια διηθούνται για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Το αραιωμένο καυσαέριο ψύχεται και διοχετεύεται σε δοχεία συλλογής (συνήθως σάκους πλαστικούς) για περαιτέρω ανάλυση. Στο Σχήμα 8.13.1 φαίνεται απλοποιημένο ένα σύστημα δειγματοληψίας αέριων ρύπων από εξατμίσεις αυτοκινήτων.

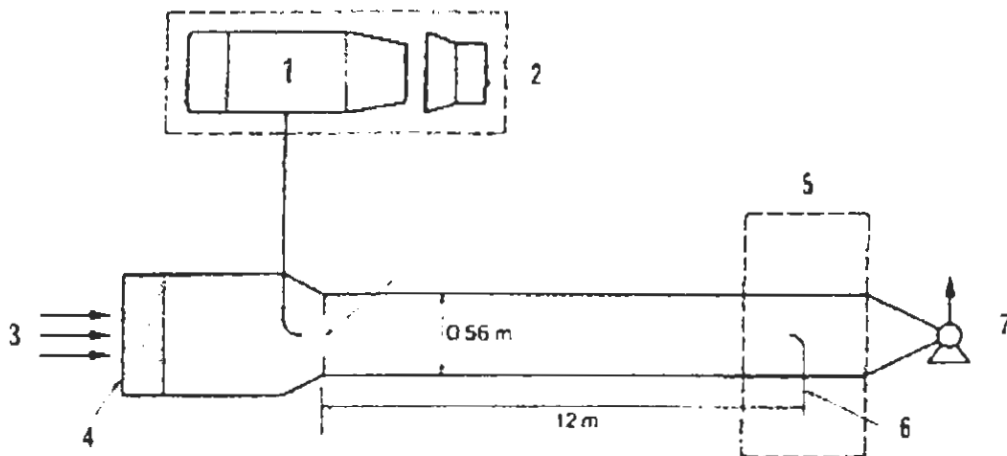


**Σχήμα 8.13.1** Σύστημα δειγματοληψίας αέριων ρύπων από εξατμίσεις αυτοκινήτων  
1. Εξάτμιση, 2. Αέρας αραιώσης, 3. Φίλτρο, 4. Εναλλάκτης θερμότητας,  
5. Σάκος συλλογής δείγματος, 6. Ογκόμετρο, 7. Αντλία, 8. Έξοδος.

### 8.14 Μέθοδοι δειγματοληψίας σωματιδίων από εξατμίσεις αυτοκινήτων

Η δειγματοληψία σωματιδίων από εξατμίσεις αυτοκινήτων παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Αυτά οφείλονται α) στο ότι οι σωματιδιακές εκπομπές των αυτοκινήτων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα μεγεθών από μερικά mm μέχρι κάτω από 1 μm, β) στην υψηλή θερμοκρασία και υγρασία των καυσαερίων και γ) στην έλλειψη σταθερής και ομοιόμορφης ταχύτητας εκπομπής.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές δειγματοληψίας, οι περισσότερες από τις οποίες στηρίζονται στη μέθοδο της διήθησης. Τα καυσαέρια τα οποία παράγονται στη διάρκεια ενός ολόκληρου κύκλου λειτουργίας της μηχανής, διοχετεύονται σε ένα δοχείο (τούνελ αραίωσης) όπου αραιώνονται με διηθημένο ξηρό αέρα. Η αναλογία αραίωσης κυμαίνεται από 1 :4 μέχρι 1 :10 (καυσαέριο:αέρας). Από το αραιωμένο αυτό καυσαέριο γίνεται ισοκινητική δειγματοληψία με τη μέθοδο της διήθησης. Επιπλέον μπορεί να γίνει και διαχωρισμός των σωματιδίων σε κλάσματα ανάλογα με το μέγεθός τους. Στο Σχήμα 8.14.1 παριστάνεται διαγραμματικά ένα σύστημα δειγματοληψίας αεροζόλ από εξατμίσεις αυτοκινήτων.



**Σχήμα 8.14.1** Σύστημα δειγματοληψίας σωματιδίων από εξατμίσεις αυτοκινήτων.

1. Αυτοκίνητο, 2. Μονάδα δυναμομέτρου, 3. Αέρας αραίωσης,
4. Φίλτρο από υαλονήματα, 5. Σταθμός δειγματοληψίας,
6. Ακροφύσια συλλογής αραιωμένου δείγματος, 7. Ανεμιστήρας.

## 9 ΔΙΑΧΥΣΗ ΡΥΠΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

### 9.1 Ανύψωση πλουμίου

#### 9.1.1 Εισαγωγή

Η ανύψωση του πλουμίου αποτελεί βασικό παράγοντα προσδιορισμού της μέγιστης συγκέντρωσης ρύπων στο επίπεδο του εδάφους για τις περισσότερες πηγές επειδή τυπικά αυξάνει το ενεργό ύψος της καπνοδόχου από 2 έως 10 φορές το πραγματικό ύψος εκπομπής. Επειδή η μέγιστη συγκέντρωση εδάφους είναι περίπου ανάλογη με το αντίστροφο τετράγωνο του ενεργού ύψους καπνοδόχου, η ανύψωση του πλουμίου μπορεί να ελαττώσει τη συγκέντρωση εδάφους μέχρι 100 φορές. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί ρύποι εκπέμπονται με μεγάλη ταχύτητα ή θερμοκρασία και συνεπώς η ανύψωση του πλουμίου πρέπει να υπολογισθεί. Πάντως, ρύποι που εκπέμπονται από οπές σε κτίρια ή από κινητήρες αυτοκινήτων έχουν πολύ μικρή ανύψωση πλουμίου.

Λίγες περιοχές της ανύψωσης του πλουμίου είναι καλά κατανοητές, όπως η τροχιά πλουμίου πριν την τελική ανύψωση και η τελική ανύψωση σε ευσταθείς συνθήκες. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η επίδραση της τύρβης του περιβάλλοντα αέρα έξω από το πλούμιο είναι αμελητέα. Όταν η τύρβη περιβάλλοντος επιδρά στο πλούμιο, τα πρότυπα είναι λιγότερο αξιόπιστα και απαιτείται περισσότερη έρευνα.

### 9.2 Οι εξισώσεις του κλιμακωτού πρότυπου (Top-Hat)

Τα περισσότερα πρότυπα βασίζονται σε νόμους της Μηχανικής των Ρευστών, όπως διατήρησης της μάζας, της δυναμικής πυκνότητας και ορμής. Η διανομή της θερμοκρασίας, της ταχύτητας ή άλλων ποσοτήτων εγκάρσια στο πλούμιο θεωρούνται ότι έχουν κλιμακωτή κατανομή, δηλαδή μια μεταβλητή έχει μια ορισμένη τιμή μέσα στο πλούμιο και μια άλλη τιμή έξω από αυτό και έτσι υπάρχει ασυνέχεια στην ακτίνα ( $R$ ) του πλουμίου. Βασικά ενδιαφερόμαστε για μέσες τιμές στη διατομή του πλουμίου.

#### 9.2.1 Ορισμοί

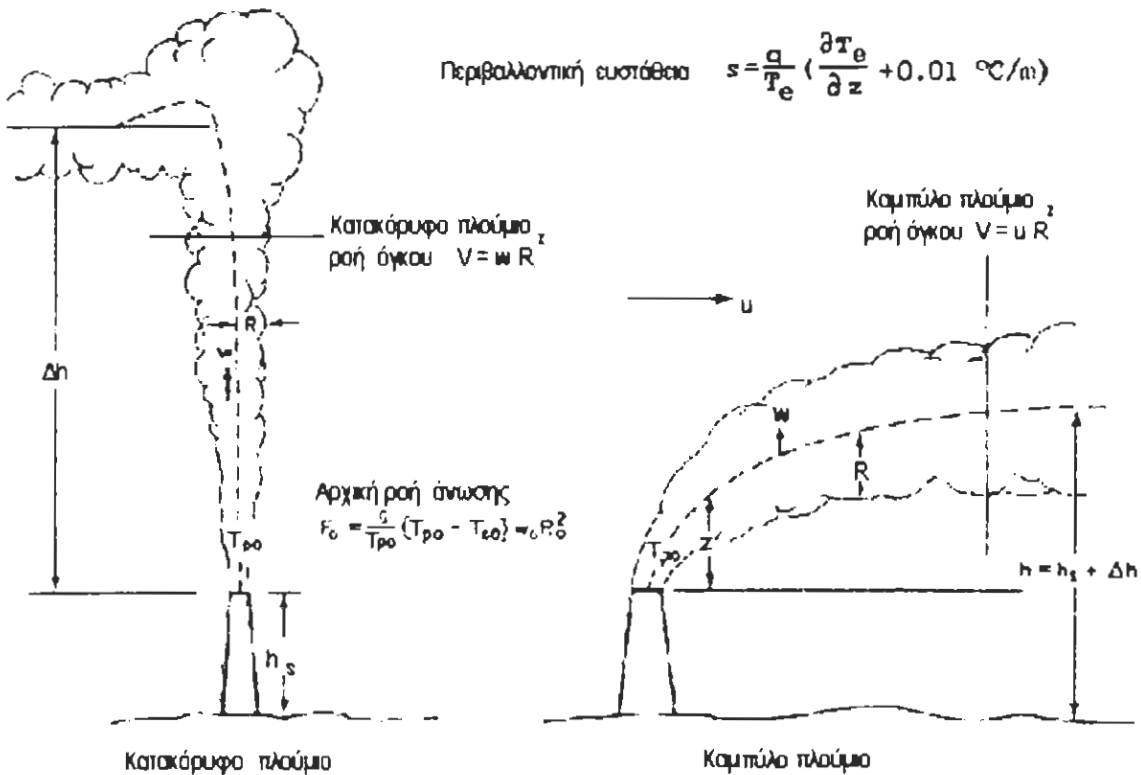
Το σχήμα 9.2.1 είναι ένα σχηματικό διάγραμμα κατακόρυφου πλουμίου που δείχνει πολλές από τις μεταβλητές και τις παραμέτρους που είναι σπουδαίες στον υπολογισμό της ανύψωσής του. Ένα πλούμιο είναι συνήθως σχεδόν “κατακόρυφο” αν η ταχύτητα

του ανέμου είναι μικρότερη από 1 m/sec. Σημειώστε τη διαφορά στο σχήμα στον ορισμό της ροής όγκου του πλουμίου.

$$V = wR^2 \text{ (κατακόρυφο)}$$

$$V = uR^2 \text{ (καμπύλο)} \quad (9.2.1)$$

όπου  $w$  η κατακόρυφη ταχύτητα του πλουμίου,  $u$  η ταχύτητα του περιβάλλοντα αέρα και  $R$  είναι η ακτίνα του πλουμίου σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του πλουμίου. Στις εξισώσεις 9.2.1 όπως και σε άλλες εξισώσεις στο κεφάλαιο αυτό, ο συντελεστής  $\pi$  αφήνεται έξω.



**Σχήμα 9.2.1** Σχηματικό διάγραμμα κατακόρυφου και καμπύλου πλουμίου που επιδεικνύει μερικές από τις παραμέτρους και μεταβλητές που είναι βασικές στους υπολογισμούς ανύψωσης πλουμίου.

Η αρχική ροή όγκου ορίζεται χρησιμοποιώντας την αρχική κατακόρυφη ταχύτητα του πλουμίου στην έξοδο της καπνοδόχου:

$$V_0 = w_0 R_0^2 \quad (9.2.2)$$



Η αρχική ροή άνωσης ( $F_0$ ) και η ροή ορμής ( $M_0$ ) ορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$F_0 = \frac{g}{T_{p_0}} (T_{p_0} - T_{e_0}) V_0 \quad (9.2.3)$$

$$M_0 = \frac{\rho_{p_0}}{\rho_{e_0}} w_0 V_0 \quad (9.2.4)$$

όπου οι δείκτες  $p$ ,  $e$  και  $0$  δείχνουν πλούμιο, περιβάλλον και αρχικές τιμές αντίστοιχα. Για πλούμια των οποίων το μοριακό βάρος ( $m$ ) διαφέρει πολύ από τον αέρα, η εξίσωση 9.2.3 θα έπρεπε να ξαναγραφτεί αντικαθιστώντας όλες τις θερμοκρασίες ( $T$ ) με λόγο  $T/m_0$  ( $m_0$  μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με 28,9). Οι τιμές της ροής άνωσης ( $F$ ) και ροής της ορμής ( $M$ ) μπορούν να αλλάζουν με το ύψος, οπότε προσδιορίζονται από τις

σχέσεις: 
$$F_0 = \frac{g}{T_p} (T_p - T_e) V \quad (9.2.5)$$

$$M = wV \quad (9.2.6)$$

Η σταθερότητα περιβάλλοντος ( $s$ ) παίζει πρωταρχικό ρόλο στην επιβράδυνση της κατακόρυφης κίνησης του πλουμίου:

$$s = \frac{g}{T_e} \left( \frac{\partial T_e}{\partial z} + 0.01 \text{ } ^\circ\text{C/m} \right) \quad (9.2.7)$$

Ο τελευταίος παράγοντας είναι η αδιαβατική θερμοβαθμίδα που απλοποιείται στο  $0,01^\circ \text{C/m}$  από την τιμή της  $0,0098^\circ \text{C/m}$ .

Ο λόγος ( $S$ ) της ενεργού διατομής που επηρεάζεται από την ορμή του πλουμίου προς τη διατομή του λεγόμενου θερμικού πλουμίου γίνεται σήμερα δεκτό ότι είναι περίπου 2,3 για καμπύλα πλούμια. Ο συντελεστής αυτός επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση και της τροχιάς του πλουμίου και της τελικής ανύψωσής του. Επειδή αγνοούμε τις λεπτομέρειες της τύρβης, έχουμε κατά μια λιγότερη εξίσωση διατήρησης από ότι ανεξάρτητες μεταβλητές. Μια πρόσθετη σχέση που λέγεται «παραδοχή κλεισίματος» είναι αναγκαία για την επίλυση των εξισώσεων. Το κλείσιμο που χρησιμοποιείται συχνά είναι η παραδοχή εισροής του Taylor.

$$\frac{dV}{dz} = 2Rv_e$$

$$v_e = \alpha w \quad (\text{κατακόρυφο πλούμιο})$$

$$v_e = \beta u \quad (\text{καμπύλο πλούμιο})$$

## 9.2.2 Το σύστημα των εξισώσεων για κατακόρυφο πλούμιο

Διατήρηση άνωσης:

$$\frac{dF}{dz} = -sV \quad (9.2.8)$$

Διατήρηση της ορμής:

$$\frac{dM}{dz} = \frac{F}{w} \quad (9.2.9)$$

Κλείσιμο:

$$\frac{dV}{dz} = 2\alpha R w = 2\alpha M^{1/2} \quad (9.2.10)$$

όπου  $\alpha = 0,08$ .

## 9.2.3 Ομάδα εξισώσεων για καμπύλο πλούμιο

Διατήρηση άνωσης

$$\frac{dF}{dz} = -\frac{sV}{S} \quad (9.2.11)$$

όπου  $S$  ισούται με 2,3.

Διατήρηση ορμής:

$$\frac{dM}{dz} = \frac{F}{w} \quad (9.2.12)$$

Κλείσιμο:

$$\frac{dV}{dz} = 2\beta R u$$

ή αν  $u$  ισούται με μια σταθερά

$$R = \beta z \quad (9.2.13)$$

όπου  $\beta$  είναι ίσο με 0,6 για πλούμιο άνωσης και  $\beta = 0,4 + 1,2 (u/w_0)$  για δέσμη.

### 9.3 Τροχιά του πλουμίου κοντά στην πηγή

Μερικές φορές η τροχιά του πλουμίου κοντά στην πηγή πρέπει να υπολογισθεί πριν η σταθερότητα του περιβάλλοντος ή η τύρβη του περιβάλλοντος έχει σημαντική επίδραση. Η σταθερότητα έχει μικρή επίδραση για χρονικές περιόδους μικρότερες από  $s^{-1/2}$  που μεταβάλλεται μεταξύ 10 και 100 sec και η τύρβη του περιβάλλοντος δεν είναι σημαντική σε αποστάσεις μικρότερες από 10 ύψη καπνοδόχου.

#### 9.3.1 Κατακόρυφα πλούμια

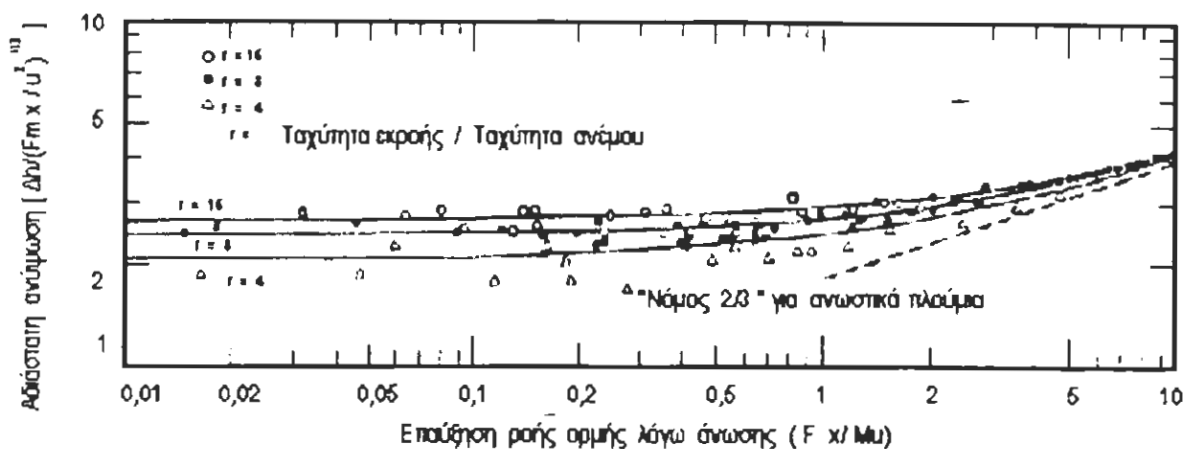
Για τα περισσότερα πλούμια η αρχική ανύψωση εξαρτάται κυρίως από την ορμή. Σε αυτό το στάδιο η ακτίνα είναι ίση με  $(R) = 0,16z$  και η μέση κατακόρυφη ταχύτητα ίση με  $(w) = 6,25 M^{1/2}/z$ . Μετάβαση στην περιοχή επικράτησης της άνωσης συμβαίνει σε χρόνο  $T = M/F_0$ , μετά από τον οποίο η ακτίνα είναι ίση με  $(R)=0,15z$  και η μέση κατακόρυφη ταχύτητα  $(w) = 2.3 (F_0/z)^{1/3}$ .

#### 9.3.2 Καμπύλα πλούμια

Για μικρούς χρόνους η ροή άνωσης μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Η μετάβαση στην περιοχή επικράτησης της άνωσης συμβαίνει σε  $t = M/F_0$  όπως και για το κατακόρυφο πλούμιο. Ο χρόνος αυτός βρέθηκε να είναι 5 sec περίπου, που αντιστοιχεί σε διανυόμενη απόσταση 50 μέτρων μόνο. Η τροχιά του πλουμίου σε αυτή την περιοχή δίνεται από την εξίσωση:

$$z = \left( \frac{3}{\beta_1^2} \frac{M}{u^2} x + \frac{3}{2\beta_2^2} \frac{F_0}{u^3} x^2 \right)^{1/3} \quad (9.3.1)$$

Αυτή η εξίσωση συγκρίνεται με παρατηρήσεις στο σχήμα 9.3.1 όπου η ανύψωση του πλουμίου και η κατάντι απόσταση έχουν κατάλληλα αδιαστατοποιηθεί και διαφορετικές καμπύλες σχεδιάζονται για τιμές  $w_0/u$  ίσες με 4,8 και 16. Συνεπώς, με τις υποδείξεις χρησιμοποιείται  $\beta_2 = 0.6$  στον όρο  $F_0$  στην εξίσωση 9.3.1 και  $\beta_1 = 0.4 + 1.2 (u/w_0)$  χρησιμοποιείται στον όρο  $M$ .



**Σχήμα 9.3.1** Παρατηρημένες τροχιές πλουμίου ως συνάρτηση της κατάντι απόστασης (αδιαστατοποιημένα) που φανερώνουν τη μετάβαση από το νόμο «1/3» της δέσμης στο νόμο «2/3» του ανωστικού πλουμίου.

Για πλούμια που ελέγχονται από άνωση, η εξίσωση 9.3.1 γίνεται:

$$z = 1.6F_0^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (9.3.2)$$

Αυτός είναι ο περίφημος «νόμος του 2/3» που έχει αποδειχθεί να συμφωνεί με την πλειονότητα των δεδομένων του εργαστηρίου και της φύσης. Ο συντελεστής 1.6 αναμένεται να είναι ακριβής μέσα σε  $\pm 40\%$  με μεταβολές οφειλόμενες στο κατώρευμα ή σε τοπικές μορφολογικές επιδράσεις.

#### 9.4 Άνοδος πλουμίου περιοριζόμενη από την ευστάθεια περιβάλλοντος

Τη νύχτα ένα βαθύ (100 με 200 m) ευσταθές στρώμα σχηματίζεται συνήθως κοντά στο έδαφος και άλλα στρώματα μεταβαλλόμενης ευστάθειας πάνω από αυτό. Την ημέρα συνήθως υπάρχει ένα καλά αναμεμιγμένο οριακό στρώμα μεταγωγής βάθους 500 ως 2000 m με μια ευσταθή στρωματωμένη «καπελλωτή αναστροφή» στην κορυφή. Τα πλούμια σχεδόν πάντοτε θα έχουν να αντιμετωπίσουν ευσταθή στρώματα αέρα σε κάποιο σημείο της τροχιάς τους. Αναγνωρίζοντας ότι  $w = dz/dt$ , παραγωγίζοντας την εξίσωση 9.2.9 ή 9.2.12 ως προς το  $t$  και αντικαθιστώντας από την εξίσωση 9.2.8 ή 9.2.11, παίρνουμε:

$$\frac{d^2M}{dt^2} = -sM \quad (9.4.1)$$

Αυτή είναι η εξίσωση του αρμονικού ταλαντωτή με περίοδο ίση με την περίοδο  $-2\pi s^{-1/2}$ . Η κατακόρυφη ταχύτητα ( $w$ ) πρέπει να ενεργεί ως αποσβηνόμενος αρμονικός ταλαντωτής επειδή η ροή όγκου ( $V$ ) πάντοτε μεγαλώνει με το χρόνο ως αποτέλεσμα της πλευρικής εισροής. Εκεί όπου η κατακόρυφη ταχύτητα για πρώτη φορά μηδενίζεται, επιτυγχάνεται η μέγιστη ανύψωση του πλουμίου. Ως αποτέλεσμα της αντίστασης κυματισμού, το πολύ μία ή δύο ταλαντώσεις που προβλέπονται από την εξίσωση 9.4.1 είναι ορατές.

#### 9.4.1 Κατακόρυφα πλούμια

Οι λύσεις του αρμονικού ταλαντωτή καθώς εργαστηριακά και φυσικά πειράματα, υποδεικνύουν ότι το ύψος ισορροπίας ( $z_{eq}$ ) κατακόρυφης δέσμης σε ευσταθές περιβάλλον είναι:

$$z_{eq} = 2.44 \left( \frac{M}{s} \right)^{1/4} \quad (9.4.2)$$

Για πλούμια άνωσης, ο Briggs βρίσκει ότι:

$$z_{eq} = 5.3F_0^{1/4} s^{-3/8} - 6R_0 \quad (9.4.3)$$

Ο όρος διόρθωσης  $6R_0$  δηλώνει ότι υπάρχει μια φαινόμενη πηγή σε απόσταση έξι ακτινών καπνοδόχου κάτω από το πραγματικό ύψος καπνοδόχου.

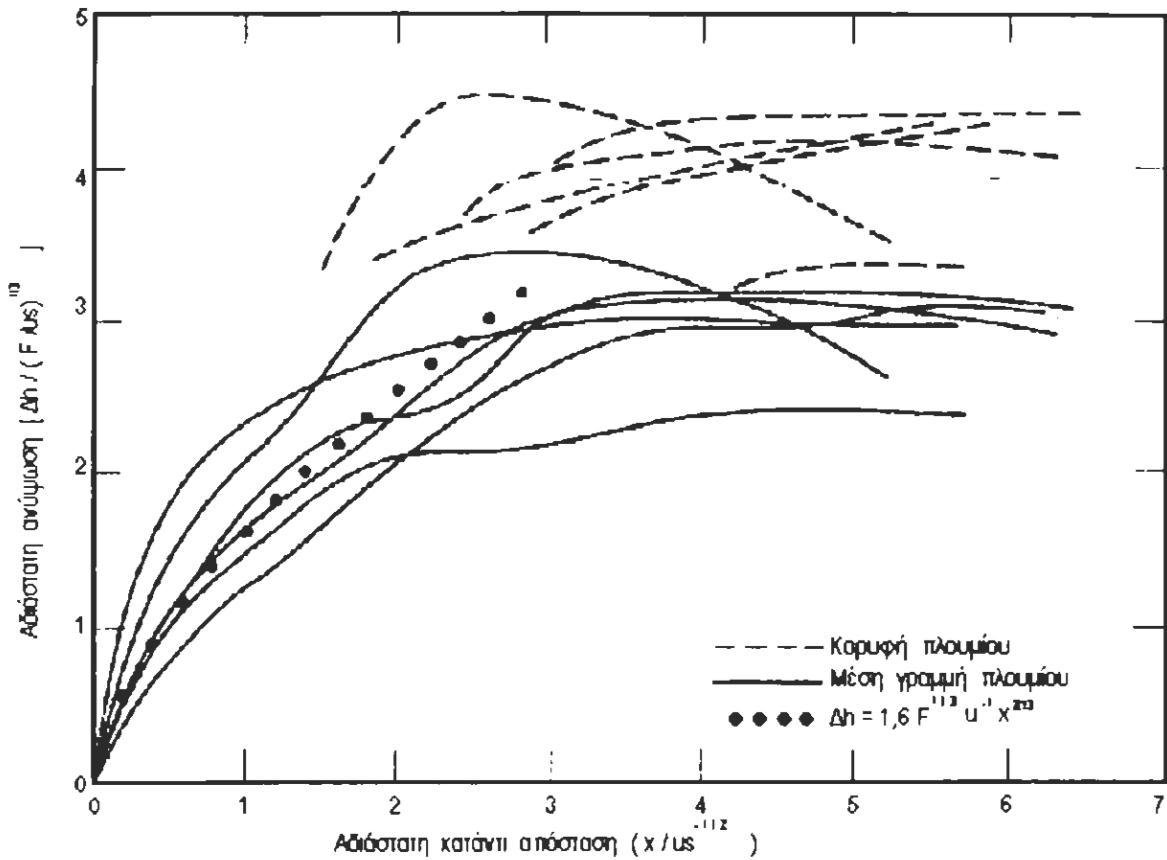
#### 9.4.2 Καμπύλα πλούμια

Όταν το πλούμιο καμπυλώνεται, ο λόγος του μέγιστου ύψους πλουμίου προς το ύψος ισορροπίας προβλέπεται να είναι 1.5 ή 1.2 για δέσμη και για ισχυρά ανωστικό πλούμιο αντίστοιχα. Σχέσεις για την τελική ανύψωση της οριζοντιωμένης δέσμης σε ευσταθές περιβάλλον δεν έχουν αναπτυχθεί ικανοποιητικά λόγω έλλειψης στοιχείων. Πάντως, η σχέση για την τελική ανύψωση ανωστικού πλουμίου είναι αρκετά γνωστή.

$$\Delta h = 2.6 \left( \frac{F_0}{us} \right)^{1/3} \quad (9.4.4)$$

Ο συντελεστής στη σχέση αυτή προέκυψε μετά από συγκρίσεις με πολλές παρατηρήσεις, συμπεριλαμβανομένων των μετρήσεων για την ανύψωση του πλουμίου

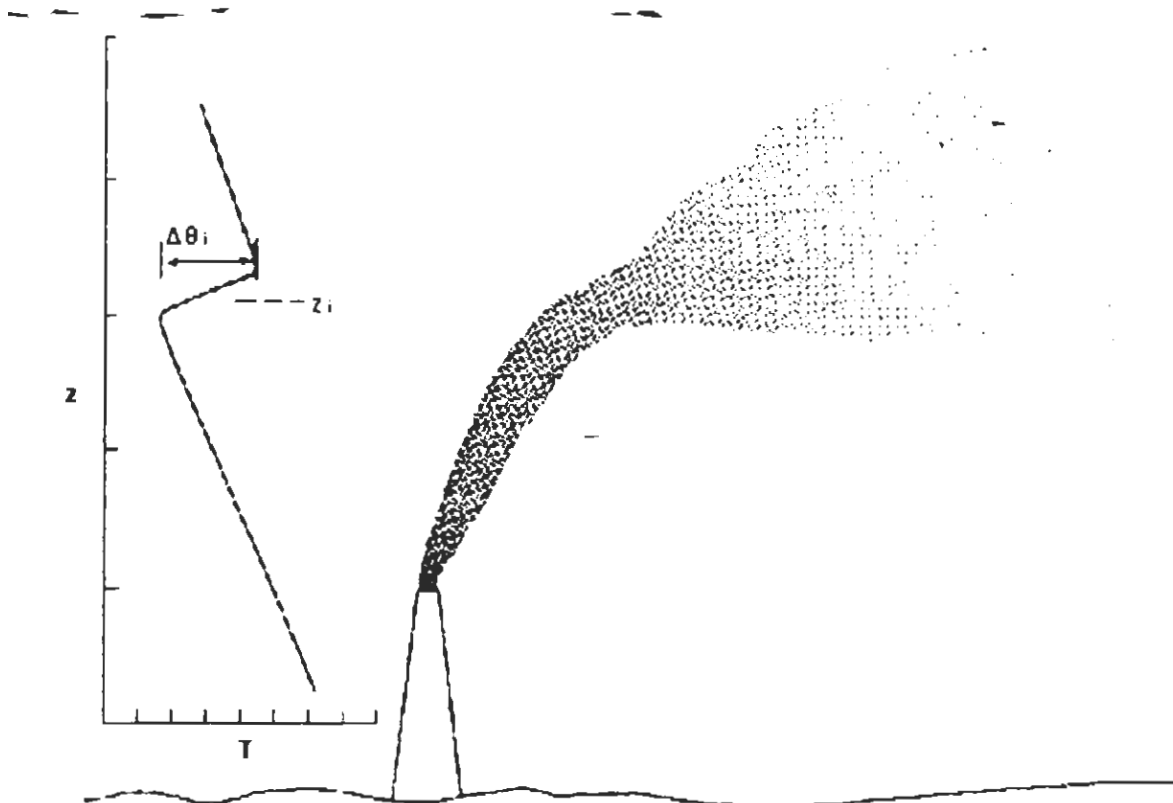
από το σταθμό ισχύος TVA, που φαίνονται στο σχήμα 9.4.1. Για τις μετρήσεις αυτές, ο συντελεστής 2.6 είναι ελαφρά συντηρητικός. Η ταχύτητα του ανέμου ( $u$ ) στη σχέση αυτή είναι η μέση τιμή μεταξύ των υψών  $h_s$  και  $h_s + \Delta h$ .



**Σχήμα 9.4.1** Παρατηρημένες τροχιές πλουμίου ως συνάρτηση της κατάντι απόστασης (αδιάστατοποιημένης) που φανερώνουν τη μέγιστη ανύψωση που επιτυγχάνεται σε ανωστικά πλούμια.

### 9.5 Εισχώρηση πλουμίου σε ανυψωμένη αναστροφή

Αν ένα πλούμιο εισχωρήσει σε μια ανυψωμένη αναστροφή, οι συγκεντρώσεις στο έδαφος μπορεί να μειωθούν δραστικά γιατί τότε η αναστροφή αποτελεί ισχυρό αναχαιτιστή της προς τα κάτω διάχυσης. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 9.5.1. Αν το πλούμιο δεν εισχωρήσει στην αναστροφή, παγιδεύεται κάτω από αυτή και τότε μπορεί να προκύψουν υψηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος. Ας ορίσουμε αυθαίρετα ότι μια αναστροφή είναι ένα πήδημα ( $\Delta\theta_i$ ) στη δυναμική θερμοκρασία σε ένα ύψος  $z_{ai}$  πάνω από την καπνοδόχο. Ορίζεται ένταση αναστροφής  $\eta$  ( $g/\theta_a$ )  $\Delta\theta_i$ . Αν το πλούμιο εισχωρήσει στην αναστροφή, η ροή άνωσης μειώνεται κατά  $(g/\theta_a)$   $\Delta\theta_i$   $V_i$ ,



Σχήμα 9.5.1 Γράφημα πλουμίου που εισχωρεί σε ανυψωμένη αναστροφή.

όπου  $V_i$  είναι η ροή όγκου του πλουμίου στο ύψος  $z_i$ . Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πλούμιο θα εισχωρήσει στην αναστροφή αν  $F > (g/\theta_a) \Delta\theta_i V_i$ . Ας θυμηθούμε ότι η ροή όγκου ( $V_i$ ) του πλουμίου έχει ορισθεί ως ίση με την πραγματική ροή όγκου διαιρεμένη με το  $\pi$ . Η ροή όγκου για κατακόρυφα πλούμια άνωσης και κατακόρυφες δέσμες δίνεται από την  $0.07 F_0^{1/3} z^{5/3}$  και  $0.16 M^{1/2} z$  αντίστοιχα. Έτσι εισχώρηση προβλέπεται αν ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες.

Κατακόρυφο Πλούμιο Άνωσης :

$$z_{ei} < 4.9 F_0^{2/5} \left( \frac{g}{\theta_a} \Delta\theta_i \right)^{-3/5} \quad (9.5.1)$$

Κατακόρυφη δέσμη:

$$z_{ei} < 6.2 \frac{F_0 / M^{1/2}}{(g/\theta_a) \Delta\theta_i} \quad (9.5.2)$$

Οριζοντιωμένες δέσμες δεν θα καλυφθούν εδώ γιατί έχουν μικρή ικανότητα να εισχωρήσουν σε αναστροφές. Η ροή όγκου (διαιρεμένη με το  $\pi$ ) ενός ανωστικού καμπύλου πλουμίου δίνεται από  $V = 0.16 u z^2$  και εισχώρηση θα συμβεί αν:

$$z_{cl} < 2.5 \left\{ \frac{F_0}{[u(g/\theta_a)\Delta\theta_i]} \right\}^{1/2} \quad (9.5.3)$$

Η σχέση αυτή παρέχει σχεδόν καλή συμφωνία με δεδομένα από τον σταθμό ισχύος Ravenswood της πόλης της Νέας Υόρκης, όπως ανακοινώθηκε από τους Simon και Proudfit. Αν η τελική ανύψωση του πλουμίου ( $\Delta h$ ) είναι μέσα σε ένα συντελεστή 2 από το ύψος αναστροφής ( $z_{cl}$ ) πάνω από την καπνοδόχο, μόνο τμήμα ( $P$ ) του πλουμίου μπορεί να εισχωρήσει στην αναστροφή. Στην περίπτωση αυτή ο Briggs προτείνει τη

σχέση: 
$$P = 1.5 - \frac{z_{cl}}{\Delta h} \quad (9.5.4)$$

## 9.6 Ανύψωση πλουμίου ελεγχόμενη από την τύρβη του περιβάλλοντος

Σε συνεφιά, ημέρες με άνεμο ή τυπικά ηλιόλουστα καλοκαιρινά απογεύματα, η σταθερότητα μπορεί να είναι ουδέτερη ή αδιαβατική στα χαμηλότερα 500 ως 2000 m. Αν το πλούμιο δεν φθάσει σε ευσταθή στρώματα, πιθανόν η ανύψωση να περιορίζεται από την τύρβη του περιβάλλοντος, η οποία τελικά αραιώνει την απομένουσα άνωση του πλουμίου. Πριν από αυτή τη χρονική στιγμή η εσωτερική τύρβη του πλουμίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τύρβη του περιβάλλοντος. Ο Briggs ανέπτυξε το μοντέλο «διάσπασης» για τις περιπτώσεις όπου η ανύψωση περιορίζεται από την τύρβη του περιβάλλοντος. Στο μοντέλο «διάσπασης» η άνοδος του πλουμίου υποτίθεται ότι τελειώνει όταν ο ρυθμός απορρόφησης των εσωτερικών δινών του πλουμίου εξισώνεται με το ρυθμό απορρόφησης των δινών του περιβάλλοντος.

### 9.6.1 Σχεδόν ουδέτερες συνθήκες

Η τελική ανύψωση δέσμης στο μοντέλο «διάσπασης» υποτίθεται ότι συμβαίνει όταν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$1.5 \frac{w^3}{z} = \varepsilon \quad (9.6.1)$$

Το αριστερό μέλος είναι η τιμή του ρυθμού απορρόφησης των εσωτερικών του πλουμίου και  $\varepsilon$  είναι ο ρυθμός απορρόφησης των δινών του περιβάλλοντος.



Για ανωστικό καμπύλο πλούμιο:

$$z = h_s + 1.6F_0^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (9.6.2)$$

και εξ' ορισμού  $w = dz/dt$ . Με χρήση της σχέσης  $dx = u dt$  και  $\epsilon = u^3/0,4z$  υπολογιζόμενων στο ύψος  $z = h_s + \Delta h$  είναι εύκολο να καταλήξουμε στην ακόλουθη απλοποιημένη σχέση για την ανύψωση του πλουμίου:

$$\Delta h = 1.54 \left( \frac{F_0}{uu_*^2} \right)^{2/3} h_s^{1/3} \quad (9.6.3)$$

Για δέσμη δεν υπάρχουν πειστικά δεδομένα, αλλά μια θεωρητική εκτίμηση ανύψωσης του πλουμίου στο μοντέλο «διάσπασης» σε ουδέτερες συνθήκες είναι:

$$\Delta h = 3D (w_0/u - 1) \quad (9.6.4)$$

όπου  $D$  είναι η διάμετρος της καπνοδόχου και  $w_0$  η αρχική ταχύτητα του πλουμίου.

### 9.6.2 Συνθήκες μεταγωγής

Όταν έχουμε συνθήκες μεταγωγής, η τιμή του ρυθμού απορρόφησης  $\epsilon = u^3/0,4z$  για ουδέτερες συνθήκες πρέπει να αντικατασταθεί από μια κατ' εκτίμηση τιμή που έγινε από τον Briggs για καθοδικά ρεύματα μεταγωγής  $\epsilon = 0,25H$  όπου  $H$  η επιφανειακή ροή άνωσης. Η τελική προβλεπόμενη τιμή για ανύψωση ανωστικών πλουμίων είναι:

$$\Delta h = 3 \left( \frac{F_0}{u} \right)^{3/5} H^{-2/5} \quad (9.6.5)$$

Να σημειωθεί ότι η σχέση αυτή είναι προκαταρκτική. Οι παρατηρήσεις ανύψωσης πλουμίου σε ασταθείς συνθήκες είναι οι λιγότερο ικανοποιητικές λόγω της γρήγορης αραίωσης.

## 9.7 Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος με το πρότυπο διάσπασης

Για να φανεί γρήγορα η επίδραση της ενεργού ανύψωσης του πλουμίου  $h_e = h_s + \Delta h$  στη μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος (MGC), υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση στο πλούμιο είναι ομοιόμορφη. Έτσι η (MGC) θα ήταν αντιστρόφως ανάλογη στη ροή όγκου  $\pi u h_e^2$  τη στιγμή που το πλούμιο για πρώτη φορά κτυπάει στο έδαφος. Για σταθερό  $\sigma_y/\sigma_z$  η προκύπτουσα τιμή για την (MGC) είναι:

$$MGC = 0.234 \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \frac{Q}{u h_e^2} \quad (9.7.1)$$

Η μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος είναι μικρή για μικρές ταχύτητες ανέμου λόγω της μεγάλης ανύψωσης του πλουμίου και επίσης είναι μικρή για μεγάλες ταχύτητες ανέμου λόγω της μεγάλης αραίωσης. Καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνει, η ανύψωση του πλουμίου ελαττώνεται αλλά η αραίωση αυξάνει. Σε μια οριακή ταχύτητα ανέμου ( $u_c$  η (MGC) παίρνει μια μέγιστη τιμή  $[MG_{(max)}]$ . Για ουδέτερες συνθήκες το μοντέλο «διάσπασης» αν υποθέσουμε ότι  $\sigma_y/\sigma_z = 0.7$  δίνει ότι η οριακή τιμή για την ταχύτητα ανέμου προκύπτει όταν :

$$u_c = 2.15 \left( \frac{u}{u_s} \right)^{2/3} \left( \frac{F_0}{h_s} \right)^{1/3} \quad (9.7.2)$$

$$MG_{(max)} = 0.043 \left( \frac{u_s}{u} \right)^{2/3} \frac{Q}{F_0^{1/3} h_s^{5/3}} \quad (9.7.3)$$

Για ασταθείς συνθήκες η οριακή τιμή για την ταχύτητα ανέμου συμβαίνει για  $\Delta h/h_s = 5$ .

$$u_c = 0.43 F_0 H^{-2/3} h_s^{-5/3} \quad (9.7.4)$$

$$MG_{(max)} = 0.015 \frac{QH^{2/3}}{F_0 h_s^{1/3}} \quad (9.7.5)$$

Αν υπάρχει αμφιβολία για το πότε να χρησιμοποιήσει κανείς σχέσεις για ουδέτερες ή ασταθείς συνθήκες, χρησιμοποιούμε τότε αυτές που δίνουν την μεγαλύτερη (MGC). Σε ποσοτικές συγκρίσεις για την (MGC) που έγιναν κοντά σε σταθμούς βρέθηκε ότι η διαχωριστική γραμμή μεταξύ σχέσεων για ουδέτερες και ασταθείς συνθήκες είναι  $u=7$  m/sec.

## 9.8 Πολλαπλές πηγές

Πολλές θέσεις έχουν καπνοδόχους τόσο κοντά μεταξύ τους ώστε με γυμνό μάτι φαίνεται ότι τα πλούμια αναμειγνύονται. Η ελαττωμένη τότε πλευρική εισροή και η αυξημένη άνωση των ενωμένων πλουμίων μπορεί να αυξήσει σημαντικά την άνοδο του πλουμίου. Παραδείγματα πολλαπλών πηγών είναι τα ρεύματα πύργων ψύξεως μηχανικής κυκλοφορίας ή σειρά καπνοδόχων σταθμών ισχύος. Ο Briggs ανέπτυξε την ακόλουθη εμπειρική μέθοδο που βασίστηκε στα δεδομένα του TVA για την ανύψωση πλουμίου. Ορίζεται παράγοντας επαύξεσης ( $E_N$ ) ο λόγος της ανύψωσης πλουμίου από  $N$  καπνοδόχους προς αυτή από μια καπνοδόχο. Η ανύψωση του ανωστικού καμπυλωμένου πλουμίου από μια καπνοδόχο ( $\Delta h_1$ ) υποθέτουμε ότι δίνεται από την εξίσωση 9.4.4. Η απόσταση μεταξύ των καπνοδόχων είναι  $\Delta x$ . Έτσι μια σχέση για τον ( $E_N$ ) που έχει καλή ασυμπτωτική συμπεριφορά είναι:

$$MG_{(\max)} = 0.015 \tilde{R} \quad (9.7.5)$$

$$(E_N) = \left( \frac{N+S}{1+S} \right)^{1/3} \quad (9.8.1)$$

όπου:

$$S = 6 \left[ \frac{(N-1)\Delta x}{N^{1/3}\Delta h_1} \right] \quad (9.8.2)$$

Δεν υπάρχει εξάρτηση του ( $E_N$ ) από τη διεύθυνση του ανέμου σε σχέση με τη γραμμή διάταξης των καπνοδόχων γι' αυτά τα δεδομένα, αν και βρέθηκε ότι η ανύψωση του πλουμίου από γραμμές ρευμάτων πύργων ψύξης μηχανικής κυκλοφορίας είναι μεγαλύτερη για διευθύνσεις του ανέμου παράλληλα προς τη γραμμή των πηγών. Για κατακόρυφα πλούμια, ανάμειξη υποτίθεται ότι γίνεται σε ένα ύψος ( $z_m$ ) όπου η ακτίνα ( $R$ ) ισούται με το  $1/2$  της απόστασης των καπνοδόχων ( $0,5 \Delta x$ ). Τα πλούμια θεωρούνται τότε σαν να έχουν συνδυασμένη άνωση προερχόμενη από μια φαινόμενη πηγή σε μια απόσταση  $(1 - N^{1/2})z_m$  πιο κάτω από τα πραγματικά ύψη των καπνοδόχων.

## 9.9 Επιδράσεις πηγών

### 9.9.1 Σύνοψη

Οι υπολογισμοί διάχυσης θα μπορούσαν πολύ να απλουστευθούν αν οι καπνοδόχοι και τα κτίρια δεν εμπόδιζαν τη ροή τον αέρα. Οι περισσότερες καπνοδόχοι είναι κτισμένες δίπλα σε άλλα βιομηχανικά κτίρια, όμως μερικές εταιρείες ηλεκτρισμού κτίζουν τεράστιες καπνοδόχους, ακόμα και 300 m, σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας με καύση ορυκτών καυσίμων, ώστε να εξασφαλισθεί ότι τα καυσαέρια θα πάνε τόσο ψηλά που να μην υπάρχει πιθανότητα αλληλεπίδρασης των ρύπων με άλλα κτίρια. Άλλες βιομηχανίες χρησιμοποιούν μικρούς εξαεριστήρες τοποθετημένους στις σκεπές των κτιρίων για να αφήσουν τοξικά υλικά στην ατμόσφαιρα. Οι καπνοδόχοι στις περισσότερες κατοικίες και εμπορικά κτίρια είναι συνήθως μικρές και καθόλου ενοχλητικές από αισθητική άποψη.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να δώσει κατευθύνσεις σε:

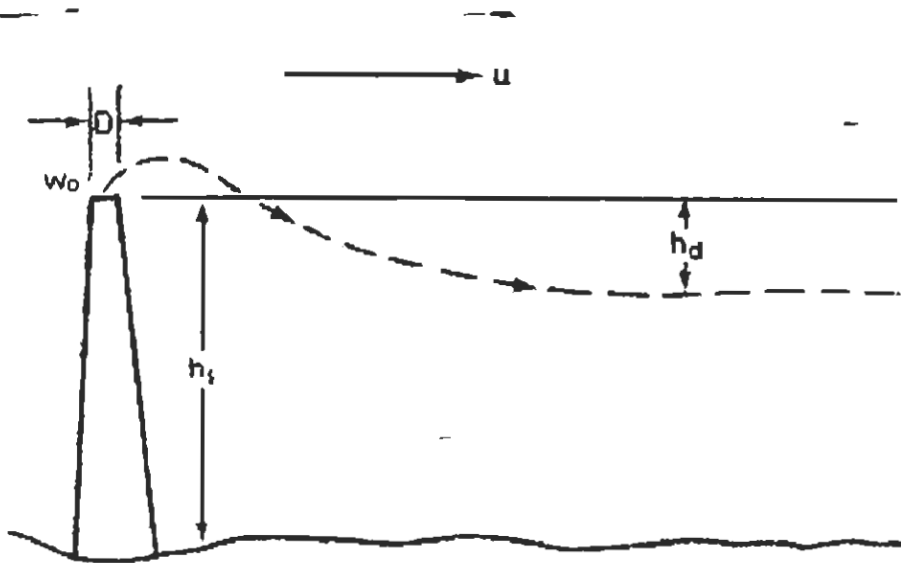
- (α) Υπολογισμούς συγκεντρώσεων σε συγκροτήματα κτιρίων λόγω εκπομπών από υπάρχουσες πηγές.
- (β) Σχεδιασμό της τοποθέτησης καπνοδόχου για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της ρύπανσης.

### 9.9.2 Αεροδυναμικό φαινόμενο καπνοδόχου

Η χαμηλή πίεση στον ομόρου της καπνοδόχου μπορεί να κάνει το πλούμιο να συρθεί προς τα κάτω, πίσω από την καπνοδόχο. Το κατώρευμα μπορεί να εμποδιστεί αποτελεσματικά διατηρώντας την ταχύτητα εκροής ( $w_0$ ) σε μια τιμή μεγαλύτερη από την εγκάρσια ταχύτητα του ανέμου ( $u$ ). Έχει γίνει γενικά αποδεκτό ότι το κατώρευμα δεν θα συμβεί για λόγο  $w_0/u$  μεγαλύτερο από 1,5. Για  $w_0/u$  μικρότερο από 1,5 ο Briggs προτείνει ότι η απόσταση  $h_d$  που το πλούμιο κατέρχεται κάτω από την κορυφή της καμινάδας, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$h_d = 2 (w_0/u - 1.5) D \quad (9.9.1)$$

όπου  $D$  η εσωτερική διάμετρος της καπνοδόχου όπως φαίνεται στο σχήμα 9.9.1.



**Σχήμα 9.9.1** Σχηματικό διάγραμμα καπνοδόχου και βασικών φυσικών παραμέτρων :  
 $w_0$  ταχύτητα εκροής,  $u$  ταχύτητα ανέμου,  $D$  εσωτερική διάμετρος καπνοδόχου,  
 $h_s$  ύψος καπνοδόχου και  $h_d$  κάθοδος κατωρεύματος.

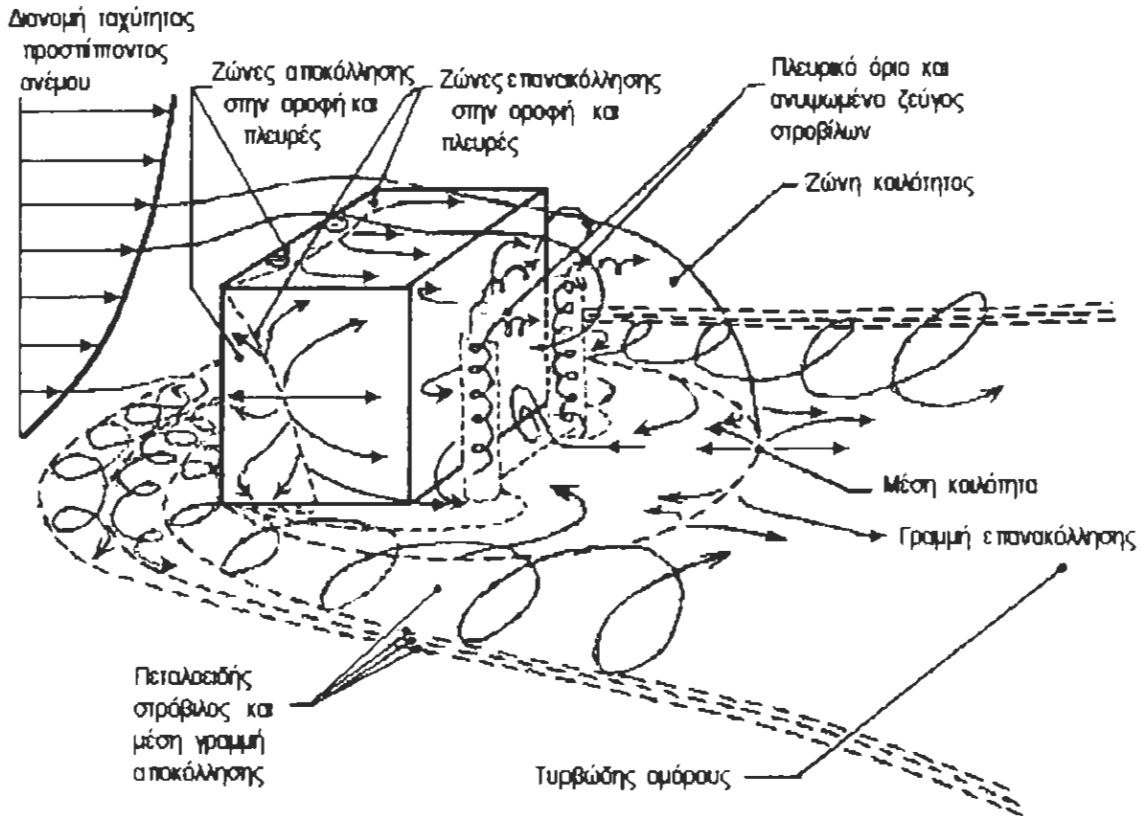
### 9.9.3 Η δομή της ροής γύρω από κτίρια

Στο σχήμα 9.9.2 φαίνεται η ροή γύρω από ένα απλό κτίριο ως αποτέλεσμα πολλών πειραμάτων που έχουν γίνει σε αεροδυναμικές σήραγγες και στην ύπαιθρο. Το ανάντι οριακό στρώμα υποτίθεται ότι είναι τυρβώδες.

Στη μετωπική επιφάνεια του κτιρίου που δεν φαίνεται στο σχήμα υπάρχει σημείο ανακοπής περίπου στα  $2/3$  προς τα πάνω στην επιφάνεια. Ο αέρας κάτω από το σημείο ανακοπής κινείται προς τα κάτω. Τα σπουδαία χαρακτηριστικά του σχήματος είναι οι αποκολλημένες ζώνες ανακυκλοφορίας στην οροφή και στις πλευρές, ο τυρβώδης ομόρους της κοιλότητας και ο τυρβώδης ομόρους κατόντι.

Έστω  $H$  το ύψος του κτιρίου,  $W$  το εγκάρσιο στον άνεμο πλάτος και  $L$  το μήκος κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Ο αέρας υποτίθεται κάθετος στην πρόσοψη του κτιρίου, ενώ αν δεν είναι τότε η ροή αλλάζει δραστικά και δεν ισχύουν αυτά που ακολουθούν. Για λόγους  $L/H$  μεγαλύτερους της μονάδας, μπορεί να αναμένεται επανακόλληση των γραμμών ροής στην οροφή και στα πλευρά, εκτός αν ο λόγος  $W/H$  είναι πολύ μεγάλος. Μεταξύ της ανάντι ακμής της οροφής και της γραμμής επανακόλλησης της ροής υπάρχει μια ζώνη ανακυκλοφορίας (σχήμα 9.9.3). Ρύποι που αφήνονται στην περιοχή

αυτή με χαμηλή ταχύτητα από οπές εξαερισμού ή από χαμηλές καπνοδόχους μπορούν να προκαλέσουν υψηλές συγκεντρώσεις μέσα στη ζώνη αυτή.



**Σχήμα 9.9.2** Πρότυπο ροής πλησίον κτιρίου με οξείες ακμές, μέσα σε παχύ οριακό στρώμα (Hosker).

Έστω  $\zeta$  το μικρότερο από τα  $H$  και  $W$  και  $\xi$  το μεγαλύτερο. Ορίζεται ως χαρακτηριστικό μήκος, το μέγεθος  $\tilde{R} = \zeta^{2/3} \xi^{1/3}$ .

Ο Wilson βρήκε ότι η κοιλότητα στην οροφή εκτείνεται σε απόσταση:

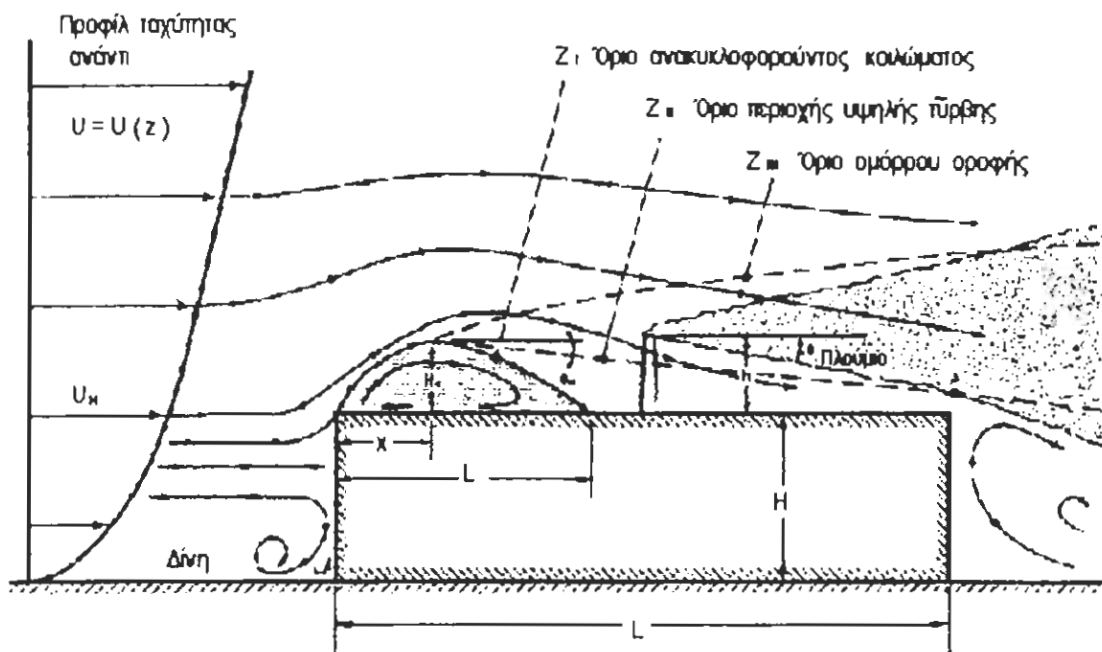
$$L_c \cong 0.9 \tilde{R} \quad (9.9.2)$$

από την ανάντι ακμή και έχει μέγιστο ύψος:

$$H_c \cong 0.22 \tilde{R} \quad (9.9.2 \alpha)$$

σε μια απόσταση από την ανάντι ακμή:

$$x_c = \tilde{R} / 2 \quad (9.9.2 \beta)$$



**Σχήμα 9.9.3** Η ροή πάνω στο διάμεσο εγκάρσιο επίπεδο επιμήκους κτιρίου με επίπεδη οροφή, με άνεμο κάθετα στο κτίριο.

Η κοιλότητα αυτή περιορίζεται πάνω από ένα τυρβώδες στρώμα διάτμησης (ζώνη II, σχήμα 9.9.3) και υπεράνω αυτού από ένα τυρβώδη ομόρου οροφής (ζώνη III). Το πάνω άκρο του στρώματος διάτμησης που αρχίζει κοντά στη θέση του μέγιστου ύψους της κοιλότητας, δίνεται περίπου από τον τύπο:

$$z_{II} / \bar{R} = 0.27 - 0.1x / \bar{R} \quad (9.9.3 \alpha)$$

και το όριο του ομόρου οροφής προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$z_{III} / \bar{R} = 0.28(x / \bar{R})^{1/3} \quad (9.9.3 \beta)$$

Στην εξίσωση (9.9.3) το  $x$  μετράται από την ανάντι ακμή της οροφής και είναι μεγαλύτερο του  $x_c$ . Ο Wilson προτείνει ότι, αν μια καπνοδόχος τοποθετημένη στη σκεπή είναι αρκετά υψηλή ώστε η χαμηλότερη άκρη του πλουμίου να παραμένει πάνω από τη ζώνη II, τότε η μόλυνση στη σκεπή είναι απίθανη. Επίσης αν το πλούμιο ξεπερνάει το όριο του ομόρου, δεν υπάρχει σχεδόν κανένας κίνδυνος ρύπανσης. Συνιστάται να σχεδιασθεί μια γραμμή με κλίση 0,2 στην ανάντι διεύθυνση του ανέμου από ένα σημείο στη ζώνη II ή στο όριο της ζώνης III (ανάλογα το περιθώριο ασφάλειας) αμέσως υπεράνω της εισόδου του αέρα ή άλλου κρίσιμου λήπτη που είναι πλησιέστερος στην απάνεμη άκρη της σκεπής. Η ενεργός έξοδος της καπνοδόχου θα πρέπει να είναι υπεράνω της γραμμής αυτής.

Ο κοιλωματικός ομόρους πίσω από την κατασκευή είναι σημαντικός γιατί τα πλούμια που εγκλωβίζονται στην κοιλότητα μπορούν γρήγορα να αναμιχθούν προς το έδαφος. Έστω  $x_r$ ,  $y_r$ ,  $z_r$  το μήκος, πλάτος και ύψος του κοιλώματος του ομόρου αντίστοιχα. Οι διαστάσεις  $y_r$ ,  $z_r$  σπάνια υπερβαίνουν τις διαστάσεις του κτιρίου περισσότερο από 50%.

Ο Hosker ανέπτυξε τους ακόλουθους εμπειρικούς τύπους για το μήκος του κοιλώματος ομόρου ( $x_r$ ):

$$x_r/H = \frac{A(W/H)}{1 + B(W/H)} \quad (9.9.4)$$

όπου περίπου για  $L/H < 1$

$$A = -2.0 + 3.7 \left( \frac{L}{H} \right)^{-1/3}$$

$$B = -0.15 + 0.305 \left( \frac{L}{H} \right)^{-1/3} \quad (9.9.5 \alpha)$$

ενώ για  $L/H \geq 1$ , που η ροή επανακολλάται στη σκεπή και στις πλευρές:

$$A = 1.75$$

$$B = 0.25 \quad (9.9.5 \beta)$$

Η έκταση της κοιλότητας μετράται από την απάνεμη πλευρά του κτιρίου. Για κυβικά κτίρια, αυτοί οι τύποι προβλέπουν ότι το μήκος του κοιλωματικού ομόρου ( $x_r$ ) είναι 2,5 φορές μεγαλύτερο του ύψους του κτιρίου. Το μέγιστο κοιλωματικό μήκος ομόρου ( $\approx 10H$ ) προβλέπεται για μεγάλα  $W/H$  (π.χ. κτίρια δύο διαστάσεων).

## 9.10 Υπολογισμοί διάχυσης γύρω από κτίρια

Η βιβλιογραφία για τη διάχυση γύρω από κτίρια είναι γεμάτη από "κανόνες αντίχειρα" που βασίζονται σε πρακτική εμπειρία και παρατηρήσεις σε αεροδυναμικές σήραγγες, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να επαληθεύονται από φυσική συλλογιστική και θεωρητικές αναλύσεις. Τα ακόλουθα τμήματα είναι αυθαίρετα χωρισμένα σε πηγές που βρίσκονται ανάντι του κτιρίου και σε πηγές κοντά στο κτίριο.



### 9.10.1 Μονωμένες πηγές ανάντι κτιρίων

Εάν η πηγή βρίσκεται σε μια απόσταση μεγαλύτερη από  $2H$  ανάντι του κτιρίου και το ύψος της ( $h_s$ ) είναι μεγαλύτερο από τα  $2/3$  του ύψους του κτιρίου, το πλούμιο θα ανυψωθεί πάνω από την επιφάνεια του κτιρίου. Μέρος του πλουμίου σε ύψη χαμηλότερα από το  $2H/3$  θα πιαστεί στο κατώρευμα της μετωπικής δίνης και θα μεταφερθεί στο χαμηλότερο μέρος του κτιρίου. Στη συνέχεια μέρος από αυτό το υλικό θα πιαστεί στην πεταλοειδή δίνη που εκφεύγει κατά μήκος της άκρης του ορόρου. Αν η ροή επανακολληθεί στην οροφή του κτιρίου και στις πλευρές, μπορεί να δημιουργηθούν υψηλές συγκεντρώσεις σε αυτά τα σημεία, ενώ αν το μήκος ( $L$ ) του κτιρίου είναι μικρό, η ροή δεν θα επανακολληθεί και το πλούμιο θα αποκλίνει πάνω από το κοίλωμα. Ρύπος που θα εγκλωβιστεί στην κοιλότητα του ορόρου θα αναμιχθεί πλήρως προς το έδαφος. Η συνολική επίδραση του κτιρίου είναι στο να αυξηθεί η διασπορά του πλουμίου, μπορεί όμως να προκύψουν, αν και τοπικά, υψηλές συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους οι οποίες να οφείλονται στις αεροδυναμικές επιδράσεις του κτιρίου.

Οι Wilson και Netteville συμπεραίνουν ότι σ' αυτή την περίπτωση η πιο σπουδαία επίδραση ενός κτιρίου είναι στο να αναμίξει τις συγκεντρώσεις του πλουμίου μεταξύ του εδάφους και της οροφής. Έτσι η συγκέντρωση της οροφής θα έπρεπε να κρατηθεί μέσα σε ορισμένα όρια. Στις μελέτες σχεδίασης το ύψος της καπνοδόχου στο μοντέλο μπορεί να μεταβάλλεται έτσι ώστε το ύψος στο οποίο εμφανίζεται η τιμή της μέγιστης ανεκτής ισοσυγκέντρωσης, να είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο ύψος κτιρίου που βρίσκεται στα κατάντι.

Για ομάδες κτιρίων ή σχήματα κτιρίων όχι συνηθισμένα, δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα ή μετρήσεις υπαίθρου, είναι απαραίτητες για την πρακτική αξιολόγηση μιας τοποθεσίας. Ο Cagnetti δείχνει πως αποτελέσματα για διάχυση γύρω από ένα συγκρότημα αντιδραστήρα, μεταβάλλονται σημαντικά όταν υπάρχει μια μικρή αλλαγή στη διεύθυνση του ανέμου.

### 9.10.2 Πηγές κοντά στα κτίρια

Στις περισσότερες περιπτώσεις εξαιρετικά και καπνοδόχοι τοποθετούνται επάνω ή κοντά στο κτίριο. Πρωταρχικά στοιχεία διερεύνησης είναι, αν οι ρύποι εκπέμπονται μέσα στην κοιλότητα ή στη ζώνη ανακυκλοφορίας, το μέγεθος της συγκέντρωσης σε αυτές τις ζώνες, η απόκλιση των γραμμών ροής καθώς και η αύξηση της διασποράς για τα πλούμια έξω από τις ζώνες.

α) **Εξαεριστικά:** Όπως σημειώθηκε νωρίτερα, ένα εξαεριστικό τοποθετημένο χαμηλότερα από τα 2/3 του ύψους της ανάντι επιφάνειας θα εκπέμπει μέσα στην προσήνεμη δίνη και έτσι οι ρύποι θα μεταφέρονται γύρω από τις πλευρές, κοντά στο έδαφος, ενώ ένα εξαεριστικό τοποθετημένο υψηλότερα θα εκπέμπει μέσα σε ροή που περνάει πάνω από το κτίριο. Εάν εξαεριστικά οροφής τοποθετηθούν στις αποκολλημένες περιοχές κοντά στην ακμή προσβολής της οροφής και των πλευρών, ανεπαρκής αερισμός μπορεί να οδηγήσει σε ψηλές συγκεντρώσεις και ανακυκλοφορίες. Οι Halitsky και Wilson παρουσιάζουν μετρήσεις σε αεροδυναμική σήραγγα διανομών συγκεντρώσεων που προκύπτουν από ποικίλους τύπους ως προς τη θέση των εξαεριστικών, τα σχήματα κτιρίου και τους λόγους ταχύτητας εκροής προς ταχύτητα ανέμου ( $w_0/u$ ). Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 9.10.1 όπου η σχεδιασμένη συγκέντρωση  $K$  έγινε αδιάστατη με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\text{αδιάστατο: } K = Cw/Q \quad (9.10.1)$$

όπου

$C$  = συγκέντρωση ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$u$  = ταχύτητα ανέμου ( $\text{m}/\text{sec}$ )

$Q$  = ένταση πηγής ( $\mu\text{g}/\text{sec}$ ),

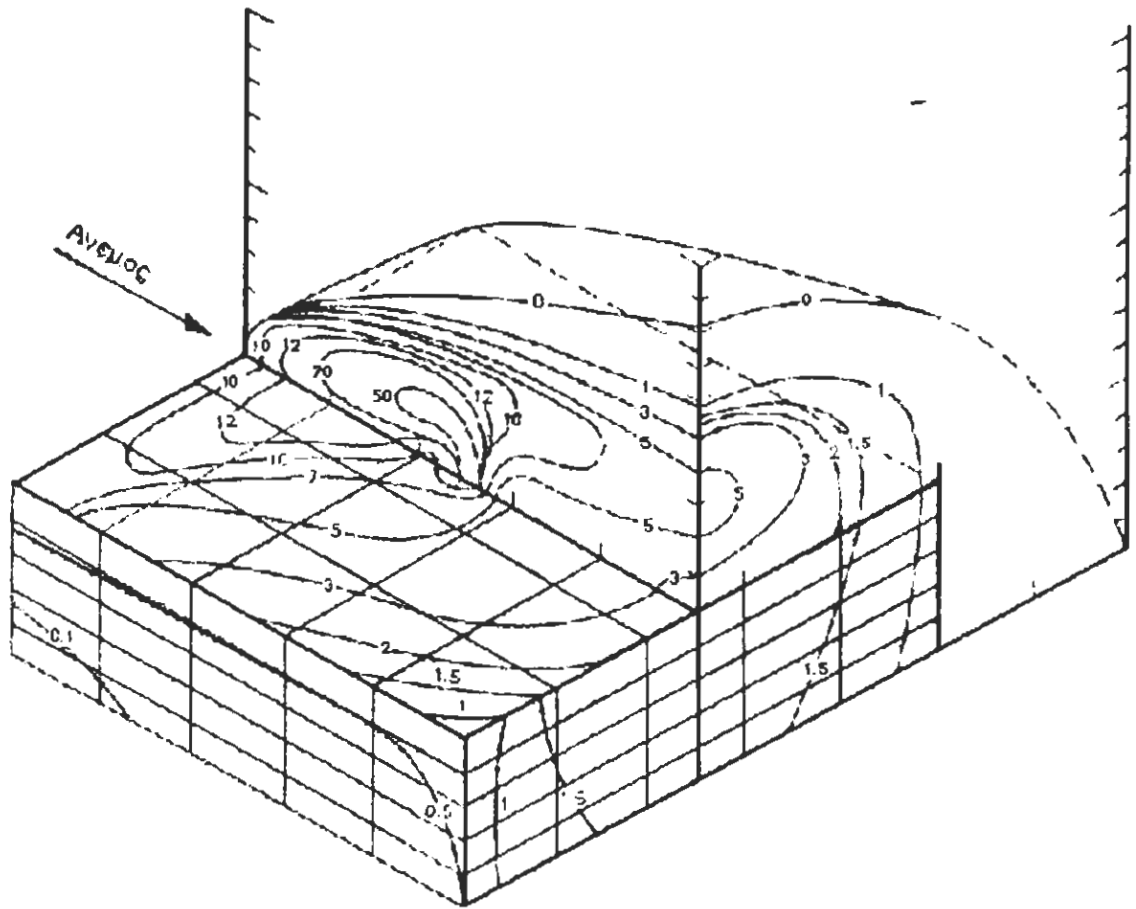
$A$  = κατάλληλη χαρακτηριστική επιφάνεια (π.χ.  $WH$ ) για το μελετημένο κτίριο ( $\text{m}^2$ ).

Τα πειράματα στην αεροδυναμική σήραγγα υποδεικνύουν ότι χαμηλά εξαεριστικά στο επίπεδο της οροφής με χαμηλή ταχύτητα εξόδου, δίνουν μέγιστες τιμές του  $K$  στην οροφή μεταξύ 10 και 100. Στη σχεδίαση του εξαερισμού εκφυγής και συστημάτων εισαγωγής, προτείνεται να χρησιμοποιείται η σταθερή τιμή του 100 για το  $K$ .

Οι επιδράσεις μεταβολής της ταχύτητας εκροής ( $w_0$ ) και του ύψους του εξαερισμού της καπνοδόχου ( $h_0$ ) παρουσιάζονται στα πειράματα των Halitsky και Wilson.

Οι συγκεντρώσεις στην οροφή μπορούν να μειωθούν δραστικά, αυξάνοντας την προς τα πάνω ταχύτητα εκροής και τοποθετώντας σχετικά μικρές καπνοδόχους. Αν ο λόγος ( $w_0/u$ ) αυξηθεί από 0,5 σε 1,0 η μέγιστη συγκέντρωση οροφής ελαττώνεται κατά ένα παράγοντα 2 ή 3. Ο Wilson βρήκε ότι το ανώτερο όριο στο λόγο της συγκέντρωσης σε απόσταση ( $x$ ) από το εξαεριστικό προς τη συγκέντρωση του εξαεριστικού είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου ( $u$ ), της απόστασης ( $x$ ), της ταχύτητας εκροής ( $w_0$ ) και της επιφάνειας του εξαεριστικού ( $A_w$ ):

$$\left[ C(x)/C(\text{εξόδου}) \right]_{\text{άνω όριο}} = 9.1 w_0/u A_w/x^2 \quad (9.10.2)$$



**Σχήμα 9.10.1** Καμπύλες αδιάστατης ισοσυγκέντρωσης ( $K=CAu/Q$ ) για εξαεριστικό πάνω στην οροφή κτιρίου, όπου  $L/H= W/H = 3.0$  και  $w_0/u \approx 1.0$ .

**β) Ενεργό ύψος καπνοδόχου:** Το σημαντικότερο είναι να κρατήσουμε το πλούμιο μακριά από την κοιλότητα τον ομόρου, όπου θα μεταφερόταν στο έδαφος και θα ανακυκλοφορούσε σε μια περιοχή με χαμηλούς ρυθμούς αερισμού.

Αυτό το πρόβλημα προκύπτει όταν το πλούμιο ελευθερώνεται πολύ κοντά στο κτίριο και/ή σε πολύ χαμηλή ταχύτητα  $w_0$ . Ο γνωστός "2,5 φορές κανόνας" εφαρμόζεται συχνά διότι η πείρα έδειξε ότι υπάρχουν λίγα προβλήματα κατωρέματος αν μια καπνοδόχος κτισθεί με ύψος τουλάχιστον 2,5 φορές το ύψος του κτιρίου. Από τα προηγούμενα διαγράμματα είναι φανερό ότι η κοιλότητα του ομόρου δεν εκτείνεται σε αυτό το ύψος, γεγονός προφανώς αναγνωρισμένο από χρόνια, από παρατηρήσεις του πλουμίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο κανόνας των 2,5 φορές μπορεί να χαλαρωθεί και οι συγκεντρώσεις ρύπων μπορούν ακόμη να διατηρηθούν μέσα σε παραδεχτά όρια. Ο Briggs ανέπτυξε μια άμεση μέθοδο προσδιορισμού του ενεργού ύψους ενός πλουμίου κοντά στην κοιλότητα του ομόρου.

Πρώτα το κατώρευμα της καπνοδόχου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 9.9.1. Το ενεργό ύψος της καπνοδόχου μετά το κατώρευμα είναι  $h'$  το οποίο ισούται με

το ύψος της καπνοδόχου ( $h_s$ ) πλην το κατώρευμα ( $h_d$ ) (βλέπε σχήμα 9.10.2). Έστω ότι  $\zeta$  ορίζεται το μικρότερο από τα  $W$  και  $H$ . Τότε αν  $h'$  είναι μεγαλύτερο από  $H+1,5\zeta$ , το πλούμιο είναι έξω από του ομόρου και το ενεργό ύψος πλουμίου ( $h_e$ ) ισούται με  $h'$ . Αλλιώς το πλούμιο επηρεάζεται απο το κτίριο.

Για  $h' > H + 1,5\zeta$

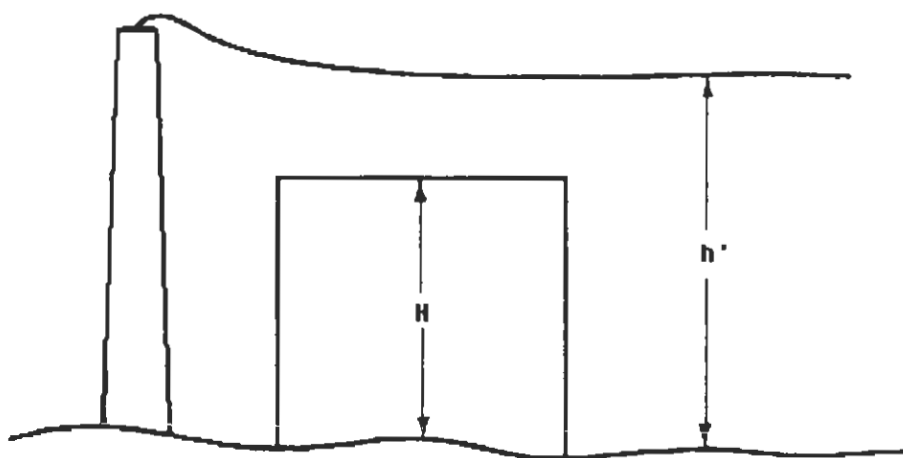
$$h_e = h' \quad (9.10.3)$$

Για  $h' < H + 1,5\zeta$  και  $h' > H$

$$h_e = 2h' - (H + 1.5\zeta) \quad (9.10.4)$$

Για  $h' < H$

$$h_e = h' - 1.5\zeta \quad (9.10.5)$$



**Σχήμα 9.10.2** Διάγραμμα του ενεργού ύψους πλουμίου στην περίπτωση κατωρεύματος λόγω κοντινού κτιρίου.

Τελικά το πλούμιο υποτίθεται ότι παγιδεύεται στην κοιλότητα αν το ενεργό ύψος της πηγής ( $h_e$ ) που υπολογίσθηκε προηγούμενα είναι μικρότερο από  $0,5 \zeta$ . Σε αυτή την περίπτωση το πλούμιο μπορεί να θεωρηθεί ως μια πηγή στο επίπεδο του εδάφους με αρχική επιφάνεια  $\zeta^2$ .

Βάσει των παρατηρήσεων υπαίθρου σε πλούμια που ελευθερώθηκαν από ένα μεγάλο εξαεριστικό σε κτίριο αντιδραστήρα, οι Johnson και άλλοι ανέπτυξαν την έννοια του "χωρισμένου  $h$ " για εκτίμηση του ενεργού ύψους του πλουμίου. Βρήκαν ότι για ένα συγκεκριμένο είδος αντιδραστήρα για σχέσεις ταχυτήτων  $w_0/u$  μεταξύ 1 και 5 το πλούμιο

θα βρισκόταν πότε μέσα και πότε έξω από την κοιλότητα. Το ποσοστό του χρόνου που το πλούμιο ήταν μέσα στην κοιλότητα δύνεται από τις σχέσεις:

$$E = 2.58 - 1.58w_0/u \quad (1 < w_0/u < 1.5) \quad (9.10.6)$$

$$E = 0.3 - 0.6w_0/u \quad (1.5 < w_0/u < 5) \quad (9.10.7)$$

Αυτό το αποτέλεσμα πιθανόν να εξαρτάται σημαντικά από τη συγκεκριμένη θέση του εξαεριστικού, από το μέγεθος του εξαεριστικού, τη θέση και τη γεωμετρία του κτιρίου.

**γ) Συγκεντρώσεις μέσα και κατάντι της κοιλότητας:** Η αδιάστατη συγκέντρωση ( $K=CAu/Q$ ) σε μια κοιλότητα ομόρου γενικά βρίσκεται να είναι μεταξύ 0,2 και 2 εάν υποθέσουμε ότι το πλούμιο είναι σχεδόν εντελώς μέσα στην κοιλότητα ( $h_e < 0,5z$ ). Οι συγκεντρώσεις είναι σχετικά ομοιόμορφες στην υπήνεμη πλευρά του κτιρίου σε όλη την κοιλότητα. Λόγω αυτής της γρήγορης ανάμιξης, εκπομπή ρύπων μέσα στην κοιλότητα του ομόρου από πηγές στο επίπεδο του εδάφους ή από χαμηλές καπνοδόχους δημιουργεί μικρή διαφορά στις προκύπτουσες συγκεντρώσεις. Όμως, μια υψηλότερη καπνοδόχος περίπου του ίδιου ύψους με το ύψος της κοιλότητας του ομόρου, μπορεί να καταλήξει στη μεταφορά των εκπομπών σχεδόν κατευθείαν στο έδαφος κατά μήκος του καμπύλου ορίου του στρώματος διάτμησης που καλύπτει την κοιλότητα. Αυτή είναι μια περίπτωση όπου μια ψηλή καπνοδόχος μπορεί να προκαλέσει στο επίπεδο του εδάφους υψηλότερες συγκεντρώσεις από ότι μια χαμηλή.

Για πλούμια που δεν εισέρχονται στις κοιλότητες των κτιρίων ( $h_e > z/2$ ) η σχέση του Gaussian πλουμίου (εξίσωση 9.11.1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθούν οι συγκεντρώσεις. Συνήθως η ταχύτητα του ανέμου ( $u$ ) ορίζεται στο ( $z$ ) ίση προς ( $H$ ). Αν το πλούμιο μπαίνει στην κοιλότητα του κτιρίου, χρησιμοποιούνται τροποποιήσεις στον τύπο του Gaussian πλουμίου για τη συγκέντρωση κατά μήκος της γραμμής συμμετρίας λόγω πηγής στο έδαφος.

$$C = Q/(\pi \sigma_y \sigma_z + cWH)/u \quad (9.10.8)$$

Η "σταθερά"  $c$  υπολογίσθηκε δαισθητικά από τον Gilford ότι βρίσκεται μεταξύ 0,5 και 2, με τη χαμηλότερη τιμή να συμφωνεί αρκετά καλά με τα αποτελέσματα ελέγχων. Ο παράγοντας  $cWH$  αντιπροσωπεύει την ενεργό, κάθετα προς τον άνεμο, επιφάνεια του κτιρίου. Οι παράμετροι διασποράς  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  μπορούν να βρεθούν με τις

μεθόδους που δίνονται παρακάτω, αν και οι μετρήσεις υποδεικνύουν ότι οι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  στους ομόρους πιθανόν να χρειαστεί να τροποποιηθούν στο μέλλον. Για παράδειγμα η χρήση των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  ανοιχτής μορφολογίας εδάφους, οδηγεί σε συγκέντρωση ελαττωμένη ανάλογα με την απόσταση υψωμένη στο -1.3 και -1.6 και ανάλογα με την ευστάθεια. Οι Meroney, Yang, Huber και Snyder βρήκαν τον εκθέτη να είναι πλησιέστερα στο -0,8 μέχρι μια απόσταση 50H, το οποίο μάλλον οφείλεται στην αναχαίτιση της διασποράς ως αποτέλεσμα μιας πολύ επίμονης πεταλοειδούς δίνης. Σε μελέτες σε πλήρη κλίμακα πεδίου ο εκθέτης βρέθηκε να είναι περίπου -1,3.

## 9.11 Πρότυπο πλουμίου Gauss για συνεχείς πηγές

### 9.11.1 Γιατί χρησιμοποιείται το πρότυπο Gauss

Το πρότυπο Gauss εξετάζεται πρώτο ως το βασικό εργαλείο για υπολογισμούς διασποράς και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο διότι:

1. Δίνει αποτελέσματα που συμφωνούν με πειραματικά δεδομένα τόσο καλά, όσο οποιοδήποτε άλλο πρότυπο.
2. Είναι σχετικά εύκολοι οι μαθηματικοί υπολογισμοί πάνω στην εξίσωση αυτή.
3. Είναι εννοιολογικά ελκυστικό.
4. Είναι συνεπές με την τυχαία, φύση της τύρβης.
5. Αποτελεί μια λύση στην εξίσωση διασποράς του Fick με σταθερά K και u.
6. Άλλα καλούμενα θεωρητικά πρότυπα εμπεριέχουν μεγάλο ποσοστό εμπειρισμού στα τελικά στάδια.
7. Εξαιτίας των παραπάνω το πρότυπο υιοθετείται από τα περισσότερα κρατικά εγχειρίδια υπολογισμού διασποράς έχοντας έτσι μια «επίσημη» αναγνώριση.

### 9.11.2 Μορφή του προτύπου Gauss

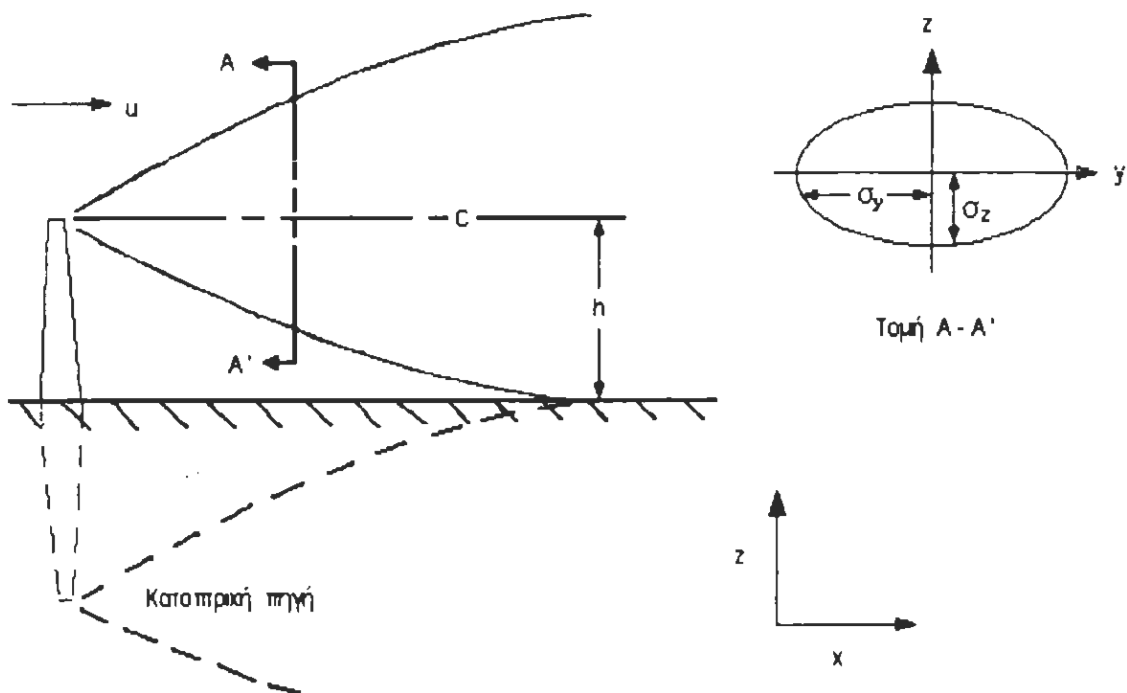
Ας θεωρήσουμε μια συνεχή ένταση πηγής Q ( $\mu\text{gr}/\text{sec}$ ), σε ενεργό ύψος (h) πάνω από το έδαφος. Υποθέτουμε ότι η ταχύτητα (u) του ανέμου είναι ομοιόμορφη με το ύψος. Η συγκέντρωση C ( $\mu\text{gr}/\text{sec}$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-y^2/2\sigma_y^2} [e^{-(z-h)^2/2\sigma_z^2} + e^{-(z+h)^2/2\sigma_z^2}] \quad (9.11.1)$$

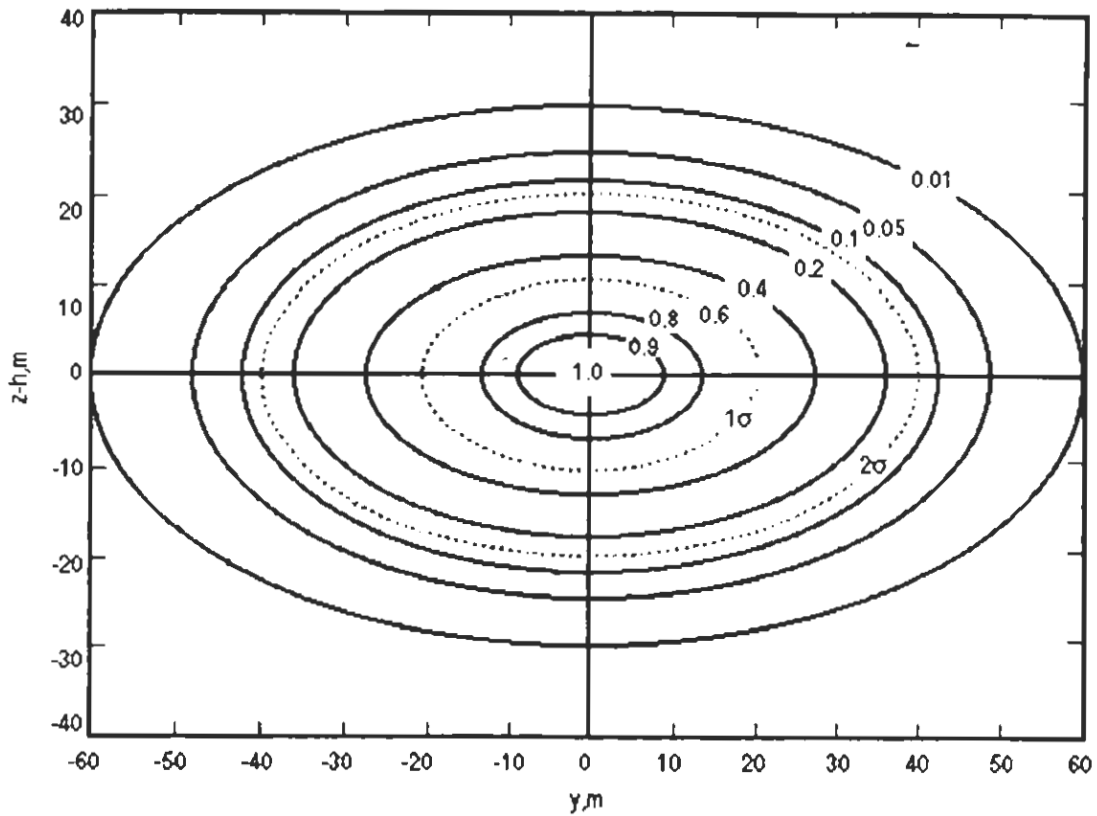
Η συντεταγμένη  $y$  είναι η οριζόντια διεύθυνση κάθετη στον άξονα του πλουμίου,  $y=0$  σε άξονα. Η συντεταγμένη  $z$  είναι το ύψος πάνω από το έδαφος, που προς το παρόν θεωρείται επίπεδο και ομοιόμορφο. Οι παράμετροι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις της κατανομής της συγκέντρωσης  $C$  κατά τις διευθύνσεις  $y$  και  $z$  αντίστοιχα.

Ο τελευταίος όρος στην παρένθεση λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση του πλουμίου στο έδαφος δεχόμενοι μια κατοπτρική πηγή σε απόσταση  $h$  κάτω από το έδαφος. Τα σχήματα 9.11.1 και 9.11.2 περιέχουν διαγράμματα του πρότυπου Gauss για το πλούμιο. Όλες οι μεταβλητές υποτίθεται ότι είναι τιμές μέσου όρου για χρόνο 10 min.

Νεόφερτοι στο πεδίο αυτό συνήθως ρωτούν «τι συμβαίνει στην εξίσωση Gauss όταν η ταχύτητα του ανέμου ( $u$ ) γίνει μηδέν ;». Η τυπική απάντηση είναι ότι «άνεμοι νηνεμίας ορίζονται ως οι άνεμοι με ταχύτητα ίση ή μικρότερη από 0,5 m/sec». Η αλήθεια είναι ότι το ανεμόμετρο κοντά στην επιφάνεια, μπορεί να γράφει  $u=0$  m/sec, αλλά οι άνεμοι ψηλά στο πλανητικό οριακό στρώμα σπάνια σταματούν τελείως. Υπάρχει σχεδόν πάντα ένα ελαφρό αεράκι και η εκ πρώτης όψεως τυπική απάντηση στην ερώτηση αυτή πρέπει να βασισθεί σε σημαντική πείρα. Το ενεργό ύψος ( $h$ ) μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι παράμετροι διασποράς  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  δίνονται ως συνάρτηση της κατάντι απόστασης από την πηγή και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας και βασίζονται σε συνδυασμό πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρίας.



**Σχήμα 9.11.1** Διάγραμμα τυπικού πλουμίου, που δείχνει βασικές έννοιες για το πρότυπο πλουμίου Gauss. Σύμβολα :  $u$  είναι η ταχύτητα του ανέμου,  $h$  το ενεργό ύψος της πηγής και  $\sigma_y, \sigma_z$  τυπικές αποκλίσεις της εγκάρσιας διανομής συγκέντρωσης.



**Σχήμα 9.11.2** Εγκάρσια τομή διαμέσου πλουμίου Gauss με  $\sigma_y=20\text{ m}$  ,  $\sigma_z = 10\text{ m}$  και κεντρική συγκέντρωση 1,0.

### 9.11.2 Τρόποι καθορισμού ευστάθειας

Για μια αρχική εκτίμηση των  $\sigma_y$  ,  $\sigma_z$  στην περίπτωση απουσίας αξιόπιστων μετρήσεων τύρβης πρέπει πρώτα να καθοριστεί η κατηγορία ευστάθειας με μια κατά προτίμηση απλή μέθοδο, βασισμένη σε φθηνές και εύκολες μετρήσεις. Η πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Pasquill και ελαφρώς τροποποιήθηκε από τον Turner. Ο πίνακας 9.11.1 περιέχει την κατάταξη σε πέντε ομάδες ταχυτήτων του αέρα στην επιφάνεια, σε τρεις ομάδες ημερήσιας ηλιοφάνειας και σε δυο ομάδες νυκτερινής νέφωσης. Γενικά κατηγορίες ευστάθειας A, B και C χαρακτηρίζουν ασταθείς συνθήκες, η D σχεδόν ουδέτερες συνθήκες και οι E, F αντιπροσωπεύουν ευσταθείς συνθήκες. Το κενό στον πίνακα 9.11.1 μπορεί να συμπληρωθεί με μια κατηγορία G και ισχύει όταν πνέει άνεμος μικρής ταχύτητας με ευσταθείς συνθήκες. Εάν είναι διαθέσιμες μετρήσεις τύρβης τότε είναι προτιμότερο να εκτιμηθούν οι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  με βάση τα  $\sigma_\theta$  και  $\sigma_\phi$  που είναι οι τυπικές αποκλίσεις των



διακυμάνσεων της κατεύθυνσης του ανέμου κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα.

Οι κατηγορίες ορίζονται χρησιμοποιώντας την κατεύθυνση του ανέμου  $\theta$  καταγεγραμμένη για περίοδο 1 ώρας κατά τον ακόλουθο τρόπο:

A: διακυμάνσεις του  $\theta$  ξεπερνούν τις  $90^\circ$  (από μέγιστο σε μέγιστο)

B<sub>1</sub>: διακυμάνσεις του  $\theta$  είναι μεταξύ  $40^\circ$  και  $90^\circ$

B<sub>2</sub>: διακυμάνσεις του  $\theta$  μεταξύ  $15^\circ$  και  $40^\circ$

C: διακυμάνσεις του  $\theta$  μεγαλύτερες των  $15^\circ$ , αλλά όχι απότομες

D: διακυμάνσεις του  $\theta$  μικρής διάρκειας κάτω των  $15^\circ$

**Πίνακας 9.11.1**

Μετεωρολογικές Συνθήκες καθορισμού κατηγοριών Ευστάθειας κατά Pasquill.

A: Εξαιρετικά ασταθής, B: Ενδιάμεσα ασταθής, C: Ελαφρά ασταθής, D: Ουδέτερη\*, E: Ελαφρά ασταθής, E: Ενδιάμεσα ασταθής

Επιφανειακός Άνεμος u(m/s)	Ημερήσια ηλιοφάνεια			Νυχτερινές συνθήκες	
	Ισχυρή	Μέση	Ελαφρά	Ελαφρά νέφωση ή >4/8 χαμηλά νέφη	$\leq 3/8$ νέφωση**
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

\* Εφαρμόσιμες για βαριά νέφωση, νύχτα ή μέρα.

\*\* Ορίζεται ως το τμήμα εκείνο του ουρανού πάνω από τον τοπικό ορίζοντα που καλύπτεται από σύννεφα.

Στον πίνακα 9.11.2 φαίνονται οι κατηγορίες σύμφωνα με τον Cramer που βασίζονται σε παρατηρήσεις των διακυμάνσεων του ανέμου σε ύψος 10 m. Στην ουδέτερη κατηγορία ξεχωρίζει δύο διαφορετικούς τύπους τραχύτητας. Οι βασικές μέθοδοι κατάταξης τύρβης συγκρίνονται στον πίνακα 9.11.3

**Πίνακας 9.11.2**

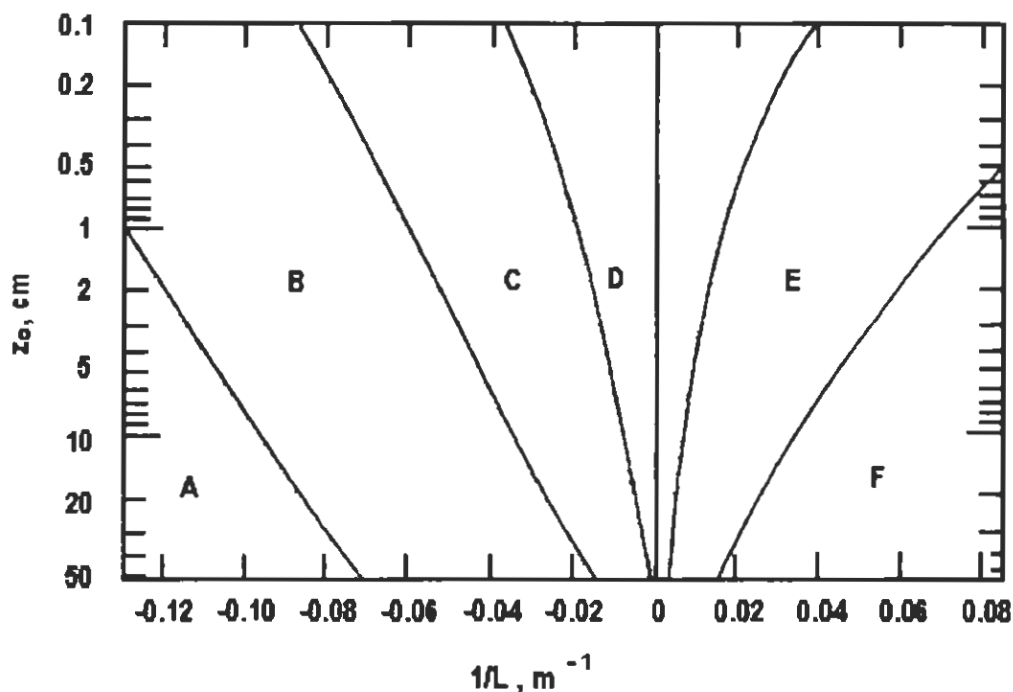
Κατηγορίες τύρβης κατά Cramer.

Περιγραφή κατηγορίας	$\sigma_\theta$ , μοίρες (στα 10 m)	$\sigma_\theta$ , μοίρες (στα 10 m)
Εξαιρετικά ασταθής	30	10
Σχεδόν ουδέτερη (ανώμαλη επιφάνεια, δέντρα, κτίρια)	15	5
Σχεδόν ουδέτερη (πολύ ομαλό γρασιδί)	6	2
Εξαιρετικά ευσταθής	3	1

Πίνακας 9.11.3

Σχέσεις μεταξύ των διαφόρων μεθόδων διάκρισης κατηγοριών τύρβης.

Περιγραφή σταθερότητας	Pasquill	Tumer	BNL	$\sigma_z$ , μίρες (στα 10 m)
Πολύ ασταθής	A	1	A	25
Ενδιάμεσα ασταθής	B	2	B <sub>1</sub>	20
Ελαφρά ασταθής	C	3	B <sub>2</sub>	15
Ουδέτερη	D	4	C	10
Ελαφρά ευσταθής	E	6		5
Ενδιάμεσα ευσταθής	F	7	D	2,5



Σχήμα 9.11.3 Καμπύλες που δείχνουν τις κατηγορίες ευστάθειας κατά Pasquill ως συνάρτηση του μήκους ευστάθειας των Monin-Obukhov και του μήκους αεροδυναμικής τραχύτητας. A, εξαιρετικά ασταθείς συνθήκες, B ενδιάμεσα ασταθείς συνθήκες, C ελαφρώς ασταθείς συνθήκες, D ουδέτερες συνθήκες (που ισχύει για βαριά συννεφιά μέρα ή νύχτα), E ελαφρώς ευσταθείς συνθήκες, F ενδιάμεσα ευσταθείς συνθήκες.

Ο Golder ανέλυσε δεδομένα διάχυσης για να βρει γραφική σχέση μεταξύ της τραχύτητας  $z_0$  και του μήκους  $L$  των Monin-Obukhov και των κατηγοριών του Pasquill, που φαίνονται στο σχήμα 9.11.3. Εάν δύο από τις παραπάνω παραμέτρους είναι γνωστές, εκτιμάται η τρίτη από το σχήμα.

Τα μεγέθη που απαιτούνται για να χαρακτηρίσουν τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  στο οριακό στρώμα είναι τα ακόλουθα :

1. Το ύψος τραχύτητας  $z_0$  και η ταχύτητα τριβής  $u_*$  ως μέτρα της μηχανικής τύρβης.
2. Το βάθος μίξης  $z_i$  και το μήκος Monin-Obukhov  $L$  ή η εισροή θερμότητας  $H$ , ως μέτρα της ημερήσιας τύρβης μεταφοράς.

3. Η ταχύτητα του ανέμου  $u$  και η τυπική απόκλιση των διακυμάνσεων του ανέμου  $\sigma_\theta$  (το διάνυσμα ανέμου χρειάζεται για να καθορίσει τον άνεμο μεταφοράς και η  $\sigma_\theta$  χρειάζεται για τον καθορισμό της  $\sigma_y$  ειδικά σε ευσταθείς συνθήκες).

Σε έναν πύργο 61 m μπορούν να μετρηθούν από τα τυπικά όργανα που ορίζονται από την Επιτροπή Πυρηνικών Κανονισμών όλες οι ποσότητες εκτός από το βάθος μίξης  $z_i$  και με ραδιοβόλιση μπορεί να μετρηθεί το  $z_i$ .

Παρά τις έντονες συστάσεις για χρήση μετρήσεων τύρβης για την εκτίμηση της διάχυσης, οι περισσότεροι άνθρωποι ακόμα και σήμερα χρησιμοποιούν κατηγορίες του Pasquill γιατί δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις και γιατί είναι πιο εύκολη η χρήση τους.

Ο χρήστης πάντως πρέπει να είναι ενήμερος των περιπτώσεων που χρησιμοποιεί τις κατηγορίες Pasquill έξω από την περιοχή ισχύος. Για τις περιπτώσεις αυτές κρίνονται αναγκαίες άμεσες μετρήσεις τύρβης ή θεωρητικές επεκτάσεις.

## 9.12 Εκλογή των $\sigma_y$ και $\sigma_z$

### 9.12.1 Μέθοδοι κατηγορίας ευστάθειας

Ο M.E. Smith συνόψισε τους τύπους του B.N.L. οι οποίοι βασίζονται σε μέσες ωριαίες μετρήσεις για διάχυση σε απόσταση μέχρι 10 Km, ενός μη ανωστικού πλουμίου που εκπέμφθηκε από ύψος 108 m.

$$\sigma_y = ax^b \quad \sigma_z = cx^d \quad (x \text{ σε μέτρα}) \quad (9.12.1)$$

Τιμές των παραμέτρων  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  δίνονται στον πίνακα 9.12.1.

Ο Briggs συνδυάζοντας τις καμπύλες των Pasquill, BNL και TVA χρησιμοποιώντας θεωρητικές γνώσεις και εξετάζοντας τα ασυμπτωματικά όρια τύπων, κατέληξε στην ευρέως χρησιμοποιούμενη ομάδα τύπων που δίνεται στον πίνακα 9.12.2. Η αρχική εξάπλωση του πλουμίου για όλες τις κατηγορίες ευστάθειας είναι ανάλογη του  $x$  με συντελεστή αναλογίας την  $\sigma_\theta$  (σε ακτίνια). Σε μεγάλες αποστάσεις η  $\sigma_y$  είναι ανάλογη του  $x^{0.5}$ . Στους τύπους αυτούς οι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  είναι ανεξάρτητες από το ύψος εκπομπής και την τραχύτητα.

Πρόσφατα πειράματα διάχυσης κάτω από καθαρό ουρανό, σχεδόν ήρεμες συνθήκες νύχτας (η καλούμενη κατηγορία G) υποδεικνύουν ότι η οριζόντια διάχυση είναι πραγματικά μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια τέτοιων συνθηκών παρά κάτω από συνθήκες κατηγορίας F διότι το πλούμιο σχηματίζει μαίανδρο υπό συνθήκες G, πράγμα το οποίο έχει ως αποτελέσματα το  $\sigma_{\theta}$  να ισούται με  $20^{\circ}$  ή και περισσότερο και σχεδόν μικρή ωριαία συγκέντρωση εδάφους σε ένα δεδομένο σημείο.

Ο Van der Hoven ανέλυσε πολλά πειράματα διάχυσης κατηγορίας G και βρήκε ότι οι παρατηρούμενες τιμές του  $\sigma_y$  αντιστοιχούσαν σε τιμές μεταξύ κατηγοριών A και F. Έτσι η διάχυση σε τιμές πινακοποιημένων παραμέτρων διασποράς είναι ακόμα απροσδιόριστη όταν επικρατεί η κατηγορία ευστάθειας G. Φυσικά η διάχυση μπορεί ακόμη να εκτιμηθεί με βάση τις πραγματικές μετρήσεις του  $\sigma_{\theta}$ .

Τα  $\sigma$  είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με τη χρήση των τάξεων σταθερότητας (ευστάθειας) σε σύνθετη τοπογραφία. Η χρήση μετρήσεων του  $\sigma_{\theta}$  και  $\sigma_e$  είναι η καλύτερη λύση σε αυτή την αβεβαιότητα.

### 9.12.2 Η μέθοδος των $\sigma_{\theta}$ και $\sigma_e$

Έχει γίνει αρκετή έρευνα για τον καλύτερο τρόπο συσχέτισης των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  με τα  $\sigma_{\theta}$  και  $\sigma_e$ . Η προσπάθεια πίσω από αυτή την έρευνα είναι η αφαίρεση κάποιου στρώματος εμπειρίας (οι καμπύλες Pasquill-Gifford) από τους υπολογισμούς διάχυσης με ανάπτυξη μιας τεχνικής η οποία σχετίζει τη διάχυση απ' ευθείας με την τύρβη. Ο Taylor προτείνει τους τύπους:

$$\sigma_y = \sigma_{\theta} t f_y \frac{Z_{el}}{\Delta h} \quad (9.12.2)$$

$$\sigma_z = \sigma_{\theta} t f_z \frac{\lambda_{mE}}{5u} \quad (9.12.3)$$

όπου  $f_y$  και  $f_z$  είναι γενικές συναρτήσεις και  $T_y$ ,  $T_z$  είναι κλίμακες χρόνου της τύρβης κατά τις διευθύνσεις  $y$  και  $z$ . Υπονοείται ότι οι χρόνοι μέσης τιμής για όλες τις μεταβλητές είναι ίσοι και ότι οι παράμετροι της τύρβης μετρούνται ή εκτιμούνται κοντά στο ύψος εκπομπής. Αφού οι υπολογισμοί διάχυσης γενικά γίνονται στην πράξη για κατάντι αποστάσεις ( $x$ ) παρά για χρόνους ( $t$ ) η παρακάτω μορφή των εξισώσεων 9.12.2 και 9.12.3 είναι προτιμητέα.

$$\sigma_y = \sigma_\theta x f_y \left( \frac{x}{u T_y} \right) \quad (9.12.4)$$

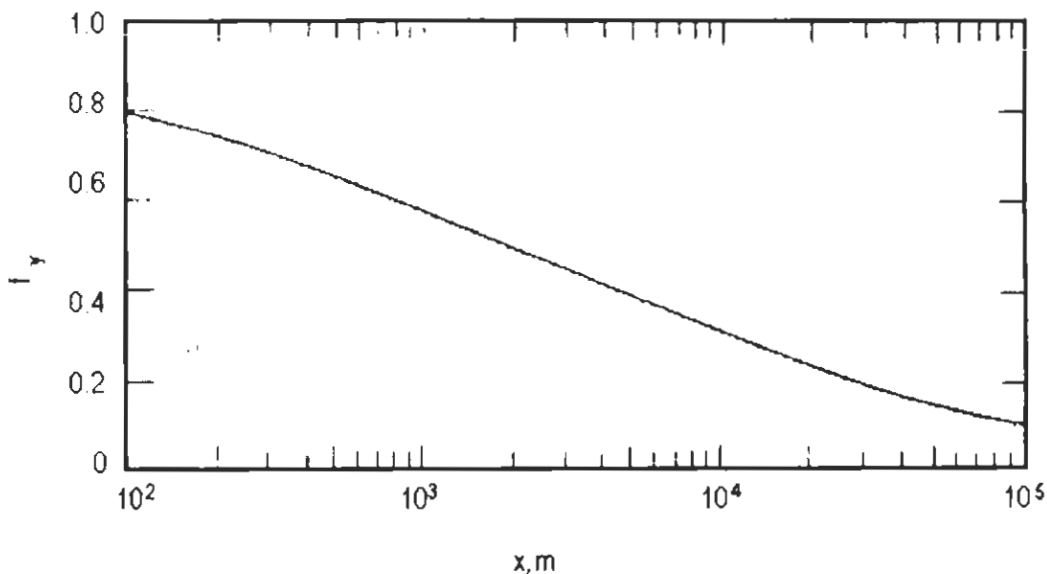
$$\sigma_z = \sigma_\theta x f_z \tilde{R} \quad (9.12.5)$$

όπου γίνεται παραδεκτό ότι  $\sigma_\theta = \sigma_w/u$  και  $\sigma_e = \sigma_w/u$ . Με τον καθορισμό των γενικών συναρτήσεων  $f_y$  και  $f_z$ , οι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  καθορίζονται τελείως με παρατηρήσεις των  $\sigma_\theta$  και  $\sigma_e$ . Λογικά οι  $T_y$  και  $T_z$  είναι συναρτήσεις ομοιότητας των  $z/z_0$ ,  $z/L$  και  $Lf/u$ . Ο Inwin έχει εξάγει την ακόλουθη προσέγγιση στον εμπειρικό πίνακα του Pasquill.

$$f_y = (1 + 0.031x^{0.46})^{-1} \quad (x \leq 10^4 \text{ m})$$

$$= 33x^{-1/2} \quad (x > 10^4 \text{ m}) \quad (9.12.6)$$

όπου  $x$  σε μέτρα. Η λύση αυτή παρίσταται γραφικά στο σχήμα 9.12.1. Η προσέγγιση έχει την επιθυμητή ιδιότητα ότι το  $\sigma_y \approx x$  σε μικρές αποστάσεις. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 10 Km, η μέση διάτμηση κατεύθυνσης ανέμου στο πλανητικό οριακό στρώμα μπορεί να γίνει σημαντική και ο Pasquill υποδεικνύει τον προσεγγιστικό κανόνα: προσθέστε στο  $\sigma_y$  που ήδη υπολογίσθηκε τον όρο  $0,03 (\Delta\alpha)^2 x^2$ , όπου  $\Delta\alpha$  (σε rad) είναι η μεταβολή στην κατεύθυνση του ανέμου μέσα στο βάθος του πλουμίου.



**Σχήμα 9.12.1**  $f_y = \sigma_y/(\sigma_\theta x)$  σύμφωνα με την εξίσωση 4.7, η οποία είναι η προσέγγιση του Inwin να προσαρμόσει τον πίνακα του Pasquill.

Η γενικευμένη συνάρτηση  $f_z$  είναι πιο δύσκολο να υπολογισθεί επειδή υπάρχουν λιγότερα δεδομένα για την κατακόρυφη διανομή της συγκέντρωσης. Επί πλέον, διανομή κατά Gauss στην κατακόρυφη διεύθυνση βρίσκεται μόνο όσο το  $\sigma_z$  είναι μικρότερο από το ύψος της πηγής, αλλιώς ανάκλαση και απορρόφηση στην επιφάνεια εδάφους παραμορφώνουν το πλούμιο. Φυσικά ανεξάρτητα από τη μορφή του πλουμίου, το  $\sigma_z$  μπορεί πάντα να υπολογισθεί ως η τυπική απόκλιση των παρατηρηθέντων συγκεντρώσεων. Ο Draxler σχεδίασε παρατηρημένες τιμές του  $f_z = \sigma_z / (\sigma_{wt})$  ως συνάρτηση του χρόνου μετά από εκπομπή για διάφορα πειράματα διάχυσης. Διαίρεσε τα δεδομένα διάχυσης σε πηγές στάθμης εδάφους και ανυψωμένες πηγές και υπέδειξε την ακόλουθη σχέση για το  $f_y$  (όλες τις κατηγορίες) και  $f_z$  (ευσταθή και ουδέτερη) :

$$f_y = f_z = \left[ 1 + 0.40(x / uT_y)^{1/2} \right]^1 \quad (9.12.7)$$

όπου  $T_z$  θεωρείται ίσο με  $5T_y$ . Παρουσίασε μια ελαφρά διαφορετική σχέση για αιωρούμενες πηγές, αλλά για κάθε  $x$  οι σχέσεις συμφωνούν με  $\pm 20\%$ , η οποία είναι μια καλή ακρίβεια που μπορούσε να περιμένει κανείς.

### 9.13 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Είναι γενικά παραδεκτό ότι η ταχύτητα του ανέμου ( $u$ ) που εμφανίζεται στη βασική σχέση του Gauss (εξίσωση 9.11.1) πρέπει να είναι η μέση τιμή μέσα στο βάθος του πλουμίου. Στην πράξη χρησιμοποιείται η ταχύτητα στο ενεργό ύψος εκπομπής. Μερικές φορές υπάρχουν παρατηρήσεις της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αυτό, αλλά συχνά η ταχύτητα πρέπει να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι θεωρητικές σχέσεις :

$$u = \frac{u_*}{4} \left\{ \ln \frac{z}{z_0} - 2 \ln \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\Phi_m} \right) \right] - \ln \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\Phi_m^2} \right) \right] + 2 \tan^{-1} \frac{1}{\Phi_m} - \frac{\pi}{2} \right\} \quad (9.13.1)$$

και

$$u = \frac{u_*}{0,4} \left( \ln \frac{z}{z_0} + 5 \frac{z}{L} \right) \quad (9.13.2)$$

ή ο ακόλουθος εκθετικός νόμος μπορούν να χρησιμοποιηθούν :

$$u = u_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (9.13.3)$$

όπου  $z$  η απόσταση από το έδαφος σε μέτρα και  $u_{10}$  η παρατηρούμενη ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m. Οι τιμές της παραμέτρου  $p$  φαίνονται στον πίνακα 9.13.1.

**Πίνακας 9.13.1**  
Εκτιμήσεις του εκθέτη ( $p$ ) στην εξίσωση 4.9 για τις έξι κατηγορίες σταθερότητας και δύο τραχύτητες.

Κατηγορία σταθερότητας						
	A	B	C	D	E	F
Αστική περιοχή	0,15	0,15	0,20	0,25	0,40	0,60
Ανοικτή περιοχή	0,07	0,07	0,10	0,15	0,35	0,55

Ο εκθετικός νόμος είναι λιγότερο ακριβής από τις εξισώσεις 9.13.1 και 9.13.2 και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για ύψη πάνω από 200 m (υποθέτουμε πως  $u = u_{200}$  για  $z > 200$  m), αλλά είναι μια εύχρηστη σχέση για τη λύση του προβλήματος μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.

#### 9.14 Μέγιστη εδαφική συγκέντρωση και καπνισμός

Επειδή οι κανονισμοί έχουν γραφεί με βάση τη μέγιστη εδαφική συγκέντρωση, είναι αναγκαίο να παραγωγίσουμε την εξίσωση πλουμίου του Gauss ως προς  $x$  και να θέσουμε το αποτέλεσμα ίσο με μηδέν για να καθορίσουμε την απόσταση εμφάνισης της μέγιστης συγκέντρωσης. Όταν το  $\sigma_y$  είναι ανάλογο του  $\sigma_z$ , η μέγιστη συγκέντρωση συμβαίνει σε κάποια απόσταση κατάντι όπου  $2\sigma_z^2 = h$ , με  $h$  το ενεργό ύψος του πλουμίου (ίσο με  $h_s + \Delta h$ ). Η συγκέντρωση σε αυτή την απόσταση δίνεται από τη

σχέση: 
$$C_{\max} = \frac{2Q}{\pi h^2 e u} \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (9.14.1)$$

Η εμπειρία δείχνει ότι η κρίσιμη αυτή απόσταση είναι μερικές δεκάδες φορές το ύψος της καπνοδόχου ( $h_s$ ) κατάντι. Όταν υπάρχει ανύψωση του πλουμίου τότε υπάρχει μια κρίσιμη ταχύτητα ανέμου στην οποία η συγκέντρωση  $C$  έχει μέγιστο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «καπνισμός μεγάλης ταχύτητας ανέμου» και μπορεί να κρατήσει για ώρες. Ο όρος «καπνισμός» εδώ σημαίνει μια κατάσταση κατά την οποία μεγάλες συγκεντρώσεις μεταφέρονται στο έδαφος από το ανυψωμένο πλούμιο. Ο σχέσεις 9.7.1

και 9.7.2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας ανέμου ( $u_c$ ) και της μέγιστης συγκέντρωσης εδάφους σε αυτή την ταχύτητα. Η σχέση 9.6.2 δίνει την ανύψωση του πλουμίου ( $\Delta h$ ) κάτω από τις παραπάνω συνθήκες. Η συγκέντρωση  $C$  μπορεί να υπολογισθεί από την εξ. 9.14.1.

«Περιορισμένης ανάμιξης καπνισμός» δημιουργείται όταν η διάχυση προς τα πάνω ή εισχώρηση του πλουμίου περιορίζεται από αναστροφή κάτω από την οποία έχουμε ισχυρή ανάμιξη. Στο Los Angeles για παράδειγμα, μια αρκετά επίμονη θαλάσσια αναστροφή εμφανίζεται σε ύψος περίπου 500 m. Αν το ύψος της αναστροφής είναι  $z_i$  και υποθεθεί πως η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων στο πλουμίο είναι σταθερή από το έδαφος έως το ύψος  $z_i$  τότε η συγκέντρωση στο επίπεδο του εδάφους δίνεται από τη σχέση :

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u z_i \sigma_y} \quad (9.14.2)$$

Η εμπειρία της Tennessee Valley Authority δείχνει ότι καπνισμός περιορισμένης ανάμιξης δίνει πιο συχνά μέγιστες εδαφικές συγκεντρώσεις για τις πολύ υψηλές καπνοδόχους ( $h_s > 100$  m), ενώ καπνισμός μεγάλης ταχύτητας είναι συχνότερα κρίσιμος για τις χαμηλότερες καπνοδόχους.

Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό ως εξής: θεωρείστε το λόγο συγκέντρωσης που υπολογίζεται από τις δύο μεθόδους:

$$V \quad \frac{C_{LM}}{C_{HW}} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{h^2 e}{2z_i \sigma_z} \quad (9.14.3)$$

Αν υποθέσουμε ότι  $h^2 = 2\sigma_y^2$  στο σημείο μέγιστης συγκέντρωσης, τότε η εξίσωση 9.14.3 γίνεται:

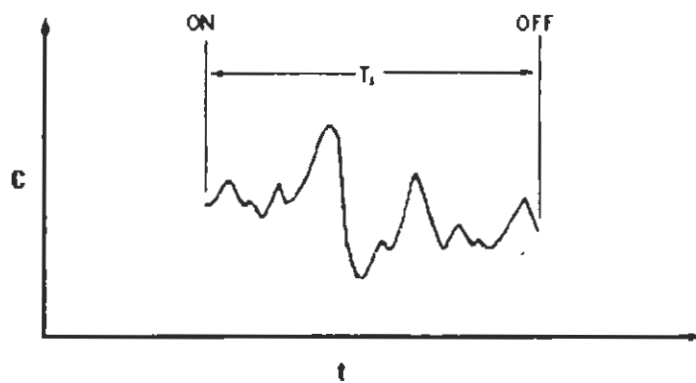
$$\frac{C_{LM}}{C_{HW}} = 2.4 \frac{h}{z_i} \quad (9.14.4)$$

Αν το ύψος μίξης  $z_i$  είναι 500 m, τότε ο περιορισμένης ανάμιξης καπνισμός μπορεί να είναι περισσότερο σημαντικός από τον καπνισμό μεγάλης ταχύτητας ανέμου όταν το ενεργό ύψος του πλουμίου είναι μεγαλύτερο από 200 m.

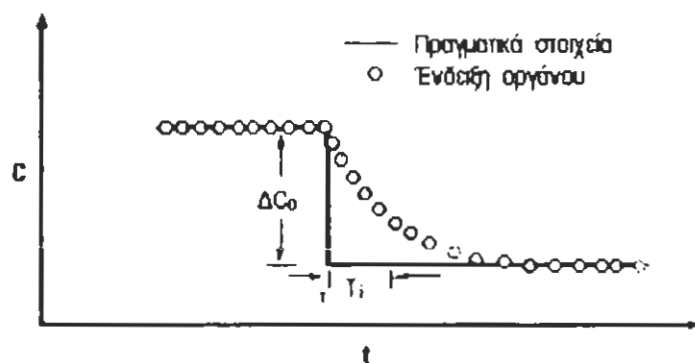


### 9.15 Χρόνοι μέσου όρου και λόγοι μέγιστης προς μέση προσέγγιση.

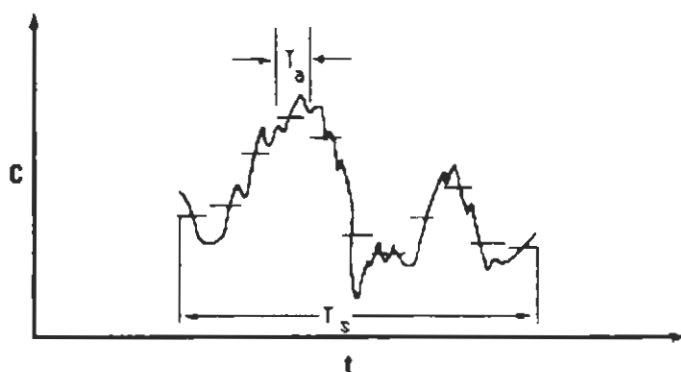
Ένα μετρητικό όργανο πρέπει να ανάβει και να σβήνει και πάντα να έχει κάποια αδράνεια απόκρισης σε πολύ γρήγορες μεταβολές. Ακόμη στην προσπάθεια να κρατήσουμε την ποσότητα των μετρήσεων σε ένα επίπεδο ευχρηστίας, παίρνουμε μέσες τιμές συνήθως σε ομάδες δεδομένων, κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα. Η όλη περίοδος κατά την οποία το όργανο λειτουργεί ονομάζεται χρόνος δειγματοληψίας και ο χρόνος που επιβάλλεται λόγω της αδράνειας του οργάνου και / ή της λήψης μέσης τιμής ονομάζεται χρόνος μέσης τιμής. Αυτές οι έννοιες φαίνονται στο σχήμα 9.15.1



(a) Χρόνος δειγματοληψίας ( $T_s$ ) είναι η διάρκεια καταγραφής μετρήσεων



(b) Χρονική καθυστέρηση οργάνου ( $T_i$ ) που ορίζεται ως  $\Delta C / \Delta C_0 = e^{-(t-t_0)/T_i}$



(c) Χρόνος μέσης τιμής ( $T_a$ )

**Σχήμα 9.15.1** Γράφημα χρόνου δειγματοληψίας  $T_s$  (a), χρονική καθυστέρηση οργάνου  $T_i$  (b) και χρόνου μέσης τιμής  $T_a$  (c).

Αποτέλεσμα του πεπερασμένου χρόνου δειγματοσμού και της μέσης τιμής είναι η αφαίρεση από τις μετρήσεις των πολύ μεγάλων και πολύ χαμηλών συχνοτήτων που θα μπορούσαν έτσι να επηρεάσουν την ολική μεταβλητότητα. Αν ο χρόνος δειγματοσμού είναι  $T_s$  τότε στρόβιλοι με περίοδο μεγαλύτερη από  $T_s$  δεν θα συμβάλλουν στον υπολογισμό της μεταβλητότητας. Παρόμοια, αν ο χρόνος μέσης τιμής είναι  $T_a$  τότε οι στρόβιλοι με περίοδο μικρότερη από  $T_a$  δεν θα επηρεάζουν τη μεταβλητότητα. Ο Pasquill έχει εκφράσει αναλυτικά τις επιδράσεις αυτές :

$$\sigma^2(T_s, T_a) = \sigma^2(\infty, 0) \int_0^{\infty} F(n) \frac{\sin^2 \pi n T_a}{(\pi n T_a)^2} \left[ 1 - \frac{\sin^2 \pi n T_s}{(\pi n T_s)^2} \right] dn \quad (9.15.1)$$

όπου  $\sigma^2(T_s, T_a)$  είναι η μεταβλητότητα για χρόνους δειγματοσμού  $T_s$  και μέσου όρου  $T_a$  και  $F(n)$  η συνάρτηση φάσματος στην συχνότητα  $n$ .

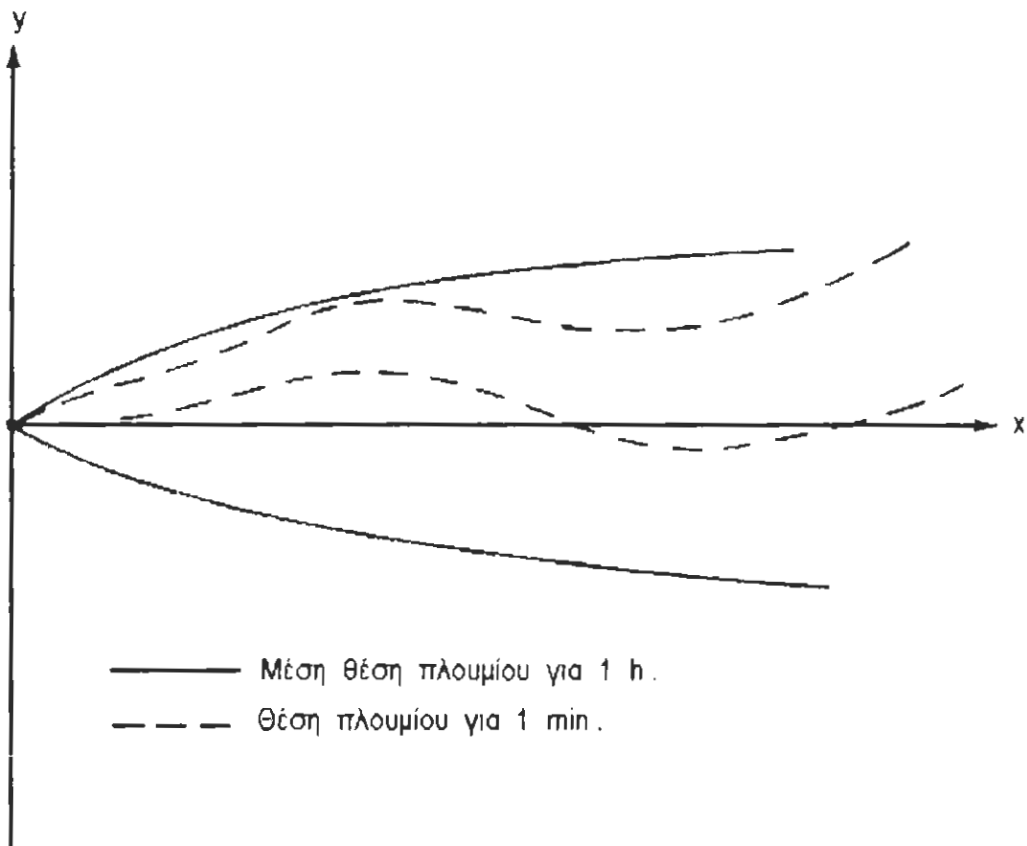
Οι παράμετροι διάχυσης ( $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ ) συνδέονται απ' ευθείας με την τυπική απόκλιση των διακυμάνσεων της ταχύτητας της τύρβης ( $\sigma_v$  και  $\sigma_w$ ). Καθώς ο χρόνος δειγματοσμού αυξάνει, η φυσική διαίσθηση και η εξίσωση 9.15.1 μας λέει ότι οι παρατηρούμενες τιμές  $\sigma_v$  και  $\sigma_w$  και επομένως και οι  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  αυξάνουν. Το ακριβές ποσό της αύξησης είναι καθαρά συνάρτηση του φάσματος  $F(n)$  και των χρόνων  $T_s$  και  $T_a$  και η αναλυτική σχέση 9.15.1 γρήγορα γίνεται πολύπλοκη. Παραπέρα, καθώς η φασματική ενέργεια της τύρβης στις συνιστώσες κατά  $y$  και  $z$  δεν είναι αναγκαστικά η ίδια, η αύξηση των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  με το χρόνο μέσης τιμής δεν είναι ούτε αυτή απαραίτητα η ίδια. Ο Gifford πρότεινε σαν τρόπο εκτίμησης της επίδρασης του χρόνιου δειγματοσμού την εμπειρική σχέση :

$$\frac{\sigma_{y_d}}{\sigma_{y_e}} = \left( \frac{T_{s_d}}{T_{s_e}} \right)^q \quad (9.15.2)$$

όπου  $d$  και  $e$  αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις και το  $q$  μεταβάλλεται στην περιοχή από 0,25 ως 0,3 για 1 ώρα.  $< T_{sd} < 100$  ώρες και ισούται περίπου 0,2 για 3 λεπτά  $< T_{sd} < 1$  hr. Οι τυπικές καμπύλες Pasquill-Gifford αντιπροσωπεύουν χρόνο δειγματοσμού  $T_s$  περίπου 10 min.

Μια μέτρηση της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικής ρύπανσης ( $C_a$ ) αποτελεί μια μέση τιμή για χρονική περίοδο  $T_a$ . Αν το αρχείο των συγκεντρώσεων (όπως στο σχήμα 9.15.1) έχει σημαντική «ενέργεια» σε περιόδους μεγαλύτερες από  $T_a$  τότε οι μετρήσεις συγκέντρωσης  $C_a$  δεν είναι πολύ αντιπροσωπευτικές της πραγματικής μέσης τιμής ( $\bar{C}$ ). Από φυσική άποψη αυτή η κατάσταση οφείλεται στην ελικοειδή κίνηση του πλουμίου, όπως στο σχήμα 9.15.2. Καθώς το λεπτό πλούμιο ταλαντεύεται πάνω από το

συγκεκριμένο σημείο, η συγκέντρωση είναι μεγάλη για ένα σύντομο διάστημα, αλλά το συγκεκριμένο σημείο κατόπιν πέφτει σε χαμηλή τιμή πάλι, καθώς το πλούμιο βρίσκεται πάνω από μια άλλη θέση. Ο Gifford δήλωσε πως ο λόγος συγκεντρώσεων  $P/M$  είναι της τάξης από 1 έως 5 για την πηγή και το λήπτη στην ίδια ανύψωση. Καθώς το ενεργό ύψος του πλουμίου αυξάνει ενώ ο λήπτης παραμένει στο έδαφος, ο λόγος συγκεντρώσεων  $P/M$  αυξάνει δίνοντας τιμές από 50 έως 100 ή περισσότερο, κοντά σε μια καμινάδα ύψους 100 m. Ο λόγος  $P/M$  μειώνεται καθώς η απόσταση από την πηγή αυξάνει.



Σχήμα 9.15.2 Σύγκριση θέσης πλουμίου για μικρό και μεγάλο χρόνο μέσης τιμής.

Το πρόβλημα  $P/M$  μπορεί να αναλυθεί υποθέτοντας ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές κλίμακες διάχυσης, όπου η συνολική διάχυση  $\sigma^2$  για μια μεγάλη περίοδο ισούται με το άθροισμα των διαχύσεων  $y^2$  των στιγμιαίων πλουμίων που οφείλονται στις μικρές κλίμακες της τύρβης συν την συνεισφορά της  $D^2$  που οφείλεται στην ελικοειδή κίνηση του πλουμίου:

$$\sigma^2 = \overline{y^2} + D^2 \quad (9.15.3)$$

Αυτή η υπόθεση οδηγεί στην ακόλουθη σχέση για το λόγο P/M :

$$\frac{P}{M} = \frac{\overline{y^2} + D^2}{\overline{y^2}} \exp \left[ \frac{\overline{y^2}}{2(\overline{y^2} + D^2)} + \frac{(z-h)^2}{2(\overline{y^2} + D^2)} \right] \quad (9.15.4)$$

## 9.16 Το πρότυπο τομέα για μεγάλους χρόνους δειγματοσμού

Για μεγάλες χρονικές περιόδους, όπως ημερών ή μηνών, η διεύθυνση του ανέμου είναι πιθανόν να καλύπτει όλες τις διευθύνσεις της πυξίδας. Η οριζόντια, κάθετη στον άνεμο, κατανομή συγκέντρωσης στο πλούμιο, που συνήθως αντιπροσωπεύεται από την  $\sigma_y$  δεν θα είναι πλέον σημαντική αφού η κατανομή της συχνότητας της κατεύθυνσης ταχύτητας του ανέμου είναι ομαλή για όλες τις κατευθύνσεις της πυξίδας. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πρότυπο του τομέα, κάνοντας την υπόθεση ότι δεν υπάρχει οριζόντια κάθετη στον άνεμο μεταβολή συγκέντρωσης μέσα σε ένα γωνιακό τομέα ίσο με τη διακριτοποίηση των κατευθύνσεων στο ανεμολόγιο. Ο τύπος για τη συγκέντρωση ρύπων στο έδαφος από συνεχή σημειακή πηγή μέσα σε τομείς αυθαίρετης γωνίας  $2\pi/n$  (σε rad) είναι ο εξής :

$$C = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{fQn}{2\pi\sigma_z ux} \right) e^{-h^2/2\sigma_z^2} \quad (9.16.1)$$

όπου  $f$  το τμήμα το χρόνου που ο άνεμος πνέει σε αυτόν τον τομέα. Έτσι με δεδομένο το ετήσιο ανεμολόγιο, μπορεί να υπολογιστεί η μέση ετήσια συγκέντρωση από μια συνεχή πηγή ρύπανσης.

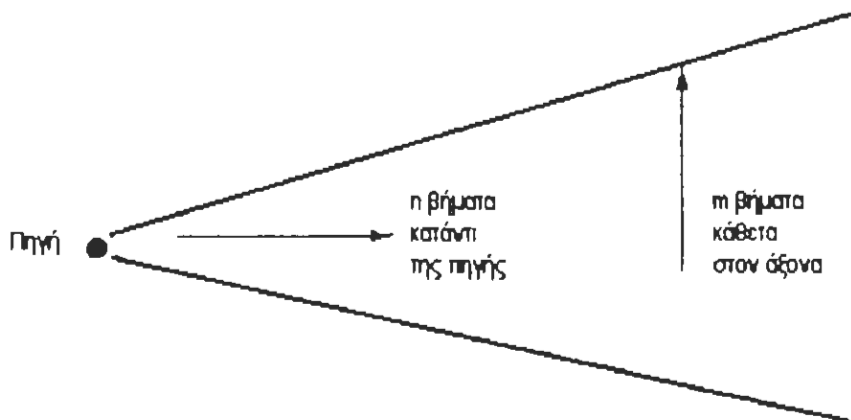
## 9.17 Στατιστικά πρότυπα διάχυσης από συνεχείς σημειακές πηγές

### 9.17.1 Εισαγωγή

Η θεμελίωση των στατιστικών προτύπων που γίνεται εδώ βασίζεται στο γεγονός ότι οι κινήσεις διάχυσης έχουν κάποια τυχαία ή στοχαστική φύση. Έτσι η τροχιά ενός σωματιδίου μπορεί να περιγραφεί από μια στατιστική συνάρτηση. Αν υποθέσουμε ότι τα σωματίδια δεν έχουν μνήμη των προηγούμενων κινήσεών τους και ότι η πιθανότητα τους να πάνε δεξιά ή αριστερά οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι ίση, τότε θα ακολουθήσουν το δρόμο του «μεθυσμένου» ή τροχιά «Monte Carlo». Αυτό το απλό πρότυπο των διακριτών βημάτων ισχύει για τη μοριακή διάχυση. Έστω  $n$  τα βήματα

κατάντι της πηγής και  $m$  τα βήματα κάθετα στον άξονα (Σχήμα 9.17.1). Τα σωματίδια ρέουν κατάντι κατά τη διεύθυνση  $n$  με σταθερό ρυθμό και μπορούν να διαχυθούν μόνο στην εγκάρσια διεύθυνση. Η πιθανότητα να βρεθεί ένα σωματίδιο σε απόσταση  $n$ ,  $m$  βημάτων δίνεται απο τη σχέση :

$$P(n, m) = \left(\frac{2}{\pi m}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{-m^2}{2n}\right) \quad (9.17.1)$$



**Σχήμα 9.17.1** Μετατόπιση κατά  $m$  και  $n$  βήματα στο πρόβλημα Monte Carlo.

Καθώς το  $n$  αυξάνει η λύση πλησιάζει τη γνωστή μας Gaussian καμπύλη τύπου καμπάνας όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 9.11 με  $\sigma^2 = n$ . Επειδή το  $n$  είναι ανάλογο του χρόνου, το αποτέλεσμα ενός καθαρού τέτοιου μοντέλου διάχυσης Monte Carlo είναι  $\sigma$  ανάλογο του  $t^{1/2}$ .

### 9.17.2 Θεώρημα του Taylor

Η φυσική βάση του δρόμου του «μεθυσμένου» ή της μεθόδου Monte Carlo ασυσχέτιστων κινήσεων δεν ισχύει για, ατμοσφαιρική διάχυση. Στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας σε ύψη από 10 έως 100 m, κατά τη διάρκεια της ημέρας, η τυρβώδης ταχύτητα  $v'(t)$  θα πρέπει να συσχετισθεί με την ταχύτητα  $v'(t+\Delta t)$  για χρονικές καθυστερήσεις  $\Delta t$  ακόμα και μερικών λεπτών. Για πολύ μικρές καθυστερήσεις της τάξης του 1 sec, οι ταχύτητες  $v'(t)$  και  $v'(t+\Delta t)$  είναι σχεδόν ίδιες. Ένας συντελεστής αυτοσυσχέτισης,  $R(\Delta t)$  ορίζεται από τη σχέση :

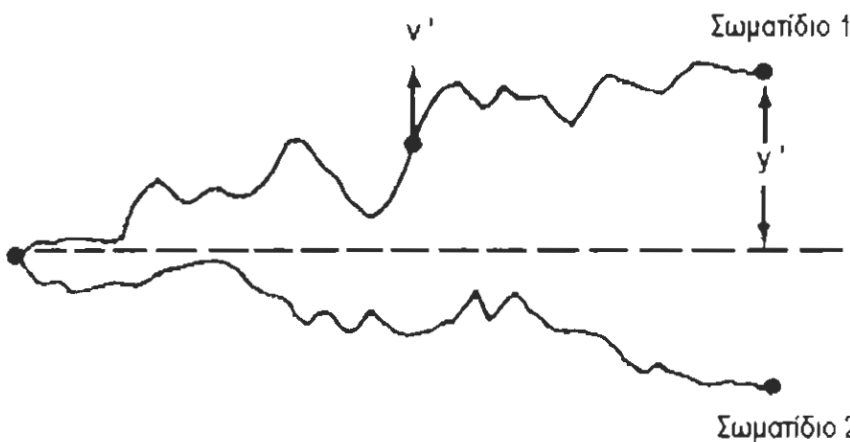
$$R(\Delta t) = \frac{\overline{v(t)v(t+\Delta t)}}{\sigma_v^2} \quad (9.17.2)$$

όπου η επιγραμμή υποδεικνύει μέση χρονική τιμή.

Για μικρές χρονικές καθυστερήσεις,  $R \rightarrow 1$  ενώ για μεγάλες  $R \rightarrow 0$ . Οι ταχύτητες ( $v'$ ) που πραγματευόμαστε εδώ αναφέρονται σε αυτές που αισθάνονται τα σωματίδια ή το πακέτο αερίου καθώς αυτά κινούνται. Το σύστημα αυτό ονομάζεται Lagrangian σύστημα κίνησης.

Το θεώρημα του Taylor για τη διάχυση από μια συνεχή πηγή αρχίζει με την υπόθεση ότι  $y$  είναι η κάθετη απόκλιση από ένα σταθερό άξονα ενός τυπικού σωματιδίου λόγω της ταχύτητας της δίνης  $v'$  μετά από χρόνο  $t$ . Το σύμβολο  $y^2$  (που ισούται με  $\sigma_y^2$  υποδηλώνει τη μέση τετραγωνική τιμή μεγάλου αριθμού τιμών  $y$ ). Υποθέτουμε ότι τα σωματίδια εκπέμπονται από ένα σημείο και οι τροχιές τους φαίνονται στο σχήμα 9.17.2. Κάθε σωματίδιο στερείται αδράνειας και ακολουθεί ακριβώς τη ροή του αέρα. Τότε ο ρυθμός μεταβολής με το χρόνο του  $\sigma_y^2$  είναι :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_y^2}{dt} &= \frac{dy^2}{dt} = 2y \frac{dy}{dt} = 2y v' \\ &= 2 \int_0^t \overline{v'(t)v'(t+\tau)} d\tau \end{aligned} \quad (9.17.3)$$



Σχήμα 9.17.2 Τροχιές που ακολουθούν δύο τυπικά σωματίδια.

Εάν η τύρβη (δεν μεταβάλλεται χωρικά) είναι ομογενής και στατική (σταθερή χρονικά), τότε η εξίσωση 9.17.2 μπορεί να αντικατασταθεί στην εξίσωση 9.17.3 οπότε προκύπτει μετά από ολοκλήρωση :

$$\sigma_y^2 = 2\sigma_v^2 \int_0^t \int_0^t R(\tau) d\tau d\tau \quad (9.17.4)$$

Η (9.17.4) αναφέρεται συνήθως ως εξίσωση Taylor.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απλές προσεγγίσεις για να υπολογίσουμε τη συμπεριφορά του  $\sigma_y^2$  για μικρούς και μεγάλους χρόνους.

Καθώς το  $t \rightarrow 0$

$$R(t) \rightarrow 1 \text{ και } \sigma_y^2 \approx \sigma_v^2 t^2 \text{ ή } \sigma_y \approx t \quad (9.17.5)$$

Καθώς το  $t \rightarrow \infty$

$$\int_0^t R(t') dt' = T$$

όπου  $T$  είναι μία σταθερά γνωστή ως «κλίμακα χρόνου» και

$$\sigma_y^2 \cong 2\sigma_v^2 Tt \text{ ή } \sigma_y \approx t^{1/2} \quad (9.17.6)$$

Γι' αυτό καθώς ο χρόνος κίνησης για συνεχές πλούμιο αυξάνει, ο ρυθμός διάχυσης πέφτει. Αρχικά οι κινήσεις των σωματιδίων είναι γραμμικές γιατί «θυμούνται την αρχική τους ταχύτητα. Όταν όμως περάσει αρκετός χρόνος και τα σωματίδια παύουν να θυμούνται τις αρχικές τους κινήσεις, το πρόβλημα μεταπίπτει σε πρόβλημα Monte Carlo με  $\sigma_y \approx t^{1/2}$

Μια απλή εκθετική σχέση :

$$R(t) = \exp(-t/T) \quad (9.17.7)$$

έχει αποδειχθεί χρήσιμη προσέγγιση στην αυτοσυσχέτιση. Η ολοκλήρωση της εξίσωσης (9.17.4) με τη βοήθεια της παραπάνω μορφής της  $R(t)$  καταλήγει στη λύση:

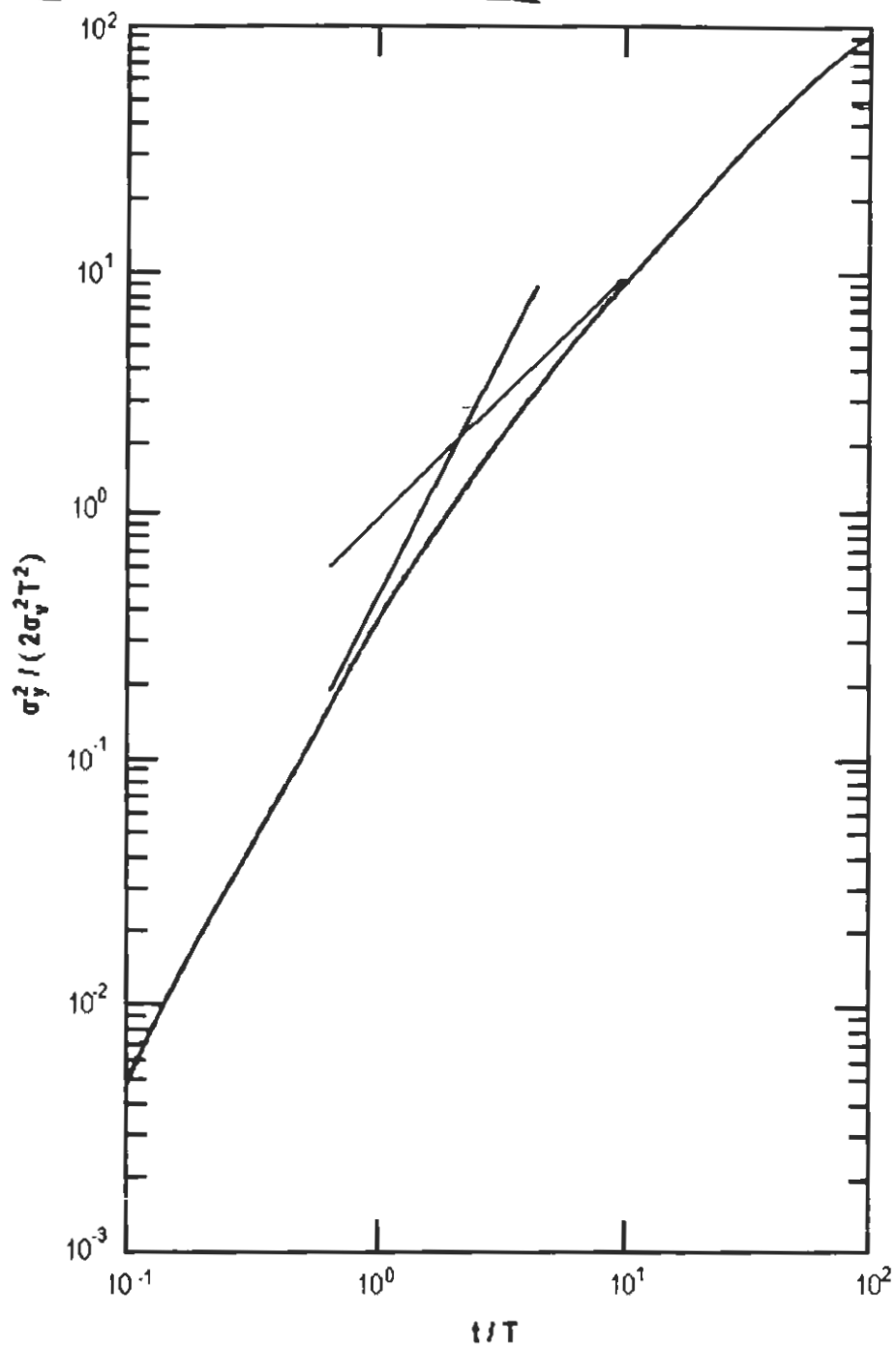
$$\sigma_y^2 = 2\sigma_v^2 T^2 \left[ \frac{1}{T} - 1 + \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right] \quad (9.17.8)$$

που σχεδιάζεται στο σχήμα 9.17.3. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι ασύμπτωτες γραμμές  $\sigma_y^2 = \sigma_v^2 t^2$  και  $\sigma_y^2 = 2\sigma_v^2 Tt$  τέμνονται περίπου στο σημείο όπου το  $t$  είναι διπλάσιο της χρονικής κλίμακας  $T$ . Η εξίσωση 9.17.8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πάρουμε μια θεωρητική μορφή για τη συνάρτηση  $f_y$  :

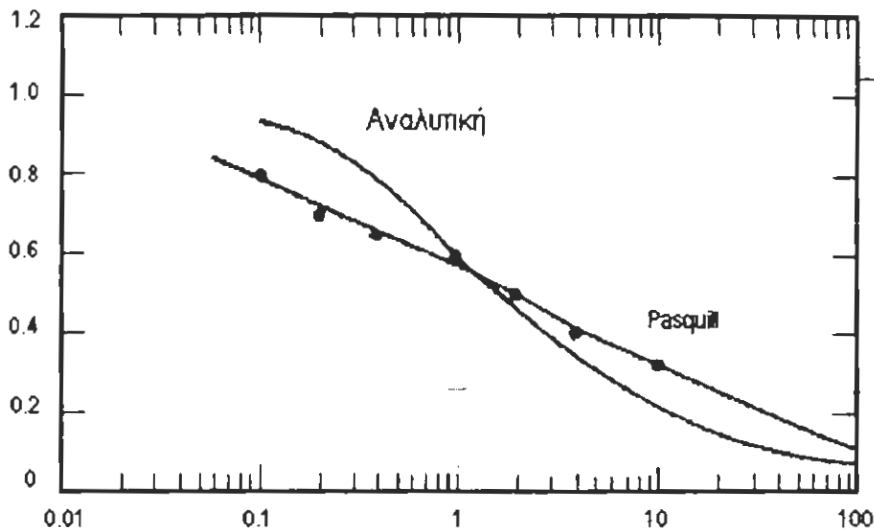
$$f_y\left(\frac{t}{T}\right) = \frac{\sigma_y}{\sigma_v t} = \sqrt{2} \frac{T}{t} \left[ \frac{t}{T} - 1 + \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]^{1/2} \quad (9.17.9)$$

Στο σχήμα 9.17.4 συγκρίνουμε τη σχέση για το  $f_y$  (για  $u = 5 \text{ m/s}$ ,  $T = 50 \text{ sec}$  και  $t = x/u$ ) με την αντίστοιχη συνάρτηση Pasquill. Βλέπουμε ότι υπάρχει καλή συμφωνία στη μεσαία περιοχή, όπου  $f$  είναι περίπου 0.5 και  $x$  περίπου 1 km αλλά η σχέση (9.17.9) ελαφρώς υπερεκτιμά στα μικρά  $x$  και υποεκτιμά στα μεγάλα  $x$  σε σύγκριση με την καμπύλη Pasquill. Οι Doran, Horst, Nickola και Draxler ορίζουν μία διαφορετική κλίμακα χρόνου ( $T_i$ ) ως ο χρόνος στον οποίο η  $f_y$  πέφτει στο 0.5. Βάσει της (9.17.9) βρίσκουμε  $T_i \cong 7T$  όπου  $T_i$  η Lagrangian κλίμακα μήκους. Φυσικά κάθε χρήστης της εξίσωσης πρέπει να εκτιμά τις αυστηρές φυσικές παραδοχές που έγιναν για την εξαγωγή της εξίσωσης αυτής. Επειδή έγινε η υπόθεση ότι η τύρβη είναι ομογενής και στατική, η θεωρία αναμένεται να μην ισχύει για οριακό στρώμα κοντά στην επιφάνεια.





**Σχήμα. 9.17.3** Αναλυτική λύση (εξ. 9.17.3) της εξίσωσης του Taylor με την παραδοχή ότι  $R(t) = \exp(-t/T)$ . Οι ασυμπτωτικές λύσεις για μικρούς και μεγάλους χρόνους φαίνονται στο σχήμα.



**Σχήμα 9.17.4** Σύγκριση της εμπειρικής πρότασης του Pasquill για την  $f(x)$  με την αναλυτική λύση (εξ. 9.17.4) της εξίσωσης του Taylor με τη παραδοχή ότι  $t = x/u$  και  $u = 5 \text{ m/s}$ ,  $T = 50 \text{ sec}$ .

Ο Sutton έλυσε την εξίσωση (9.17.4) του Taylor χρησιμοποιώντας την ακόλουθη μορφή για το R:

$$R(t) = \left( \frac{v}{v + \sigma_v t} \right)^n \quad (0 < n < 1) \quad (9.17.10)$$

όπου  $n$  η συνεκτικότητα. Προκύπτει ότι :

$$\sigma_y^2 = \frac{2v^n}{(1-n)(2-n)\sigma_v^2} (\sigma_v^2 t)^{2-n} = \frac{1}{2} C_y^2 (ut)^{2-n} \quad (9.17.11)$$

Ο παράγοντας  $n$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_1 / u_2 = (z_1 / z_2)^{n/(2-n)} \quad (9.17.12)$$

### 9.17.3 Η επίδραση του μεγέθους δίνης στον $\sigma_y$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τη θεωρία Taylor, ο ρυθμός μεταβολής του  $\sigma_y$  πέφτει με το χρόνο κίνησης για συνεχές πλούμιο. Μπορούμε να προβλέψουμε ότι η επίδραση μικρών δινών ελαττώνεται όσο μεγαλώνει το πλούμιο, αφού μικρές ταλαντώσεις των σωματιδίων βαθιά μέσα στο πλούμιο δεν συνεισφέρουν στη διάχυσή του συνολικά. Αντίθετα δίνες τάξης μεγέθους  $\sigma$  ή και μεγαλύτερες, προκαλούν το

μεγαλύτερο μέρος της διάχυσης. Αυτό μπορεί να δειχθεί αφού ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης  $R(t)$  και το φάσμα ενέργειας " $F(n)$ " είναι γνωστό ότι είναι αυτομετασχηματισμοί Fourier ο ένας του άλλου. Η μεταβλητή  $[n F(n)]$  είναι ανάλογη προς το ποσό της ενέργειας της τύρβης που μεταφέρεται από δίνες συχνότητας  $n$ . (Η συχνότητα  $n$  αυξάνει όσο μικραίνει το μέγεθος της δίνης).

Η εξίσωση Taylor (9.17.4) μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\sigma_v^2 = \sigma_v^2 t^2 \int_0^{\infty} F(n) \frac{\sin^2(\pi n t)}{(\pi n t)^2} dn \quad (9.17.13)$$

Ο χρόνος δειγματοληψίας ( $T_s$ ) γίνεται δεκτό ότι είναι μεγαλύτερος από το χρόνο διαδρομής  $t$ . Έτσι εξασφαλίζεται ότι το πλούμιο είναι συνεχές και όχι στιγμιαίο. Ο όρος  $\sin(\pi n t)/(\pi n t)^2$  είναι μονάδα για μεγάλες δίνες με συχνότητες μικρότερες περίπου από  $1/t$  και γίνεται μηδέν για μικρές δίνες με συχνότητες μεγαλύτερες από  $1/t$ . Δηλαδή ο όρος αυτός ενεργεί ως φίλτρο που περνάει μόνο χαμηλής συχνότητας δίνες και με αύξηση του χρόνου όλο και λιγότερες δίνες περνούν το φίλτρο. Έτσι  $\sigma_v \approx t$  για μικρά  $t$  και  $\sigma_v \approx t^{1/2}$  για μεγαλύτερα  $t$ .

Υπάρχει μια χαμηλή συχνότητα αποκοπής που επιβάλλεται από τον ορισμένο χρόνο δειγματοληψίας  $T_s$ . Αυτή η συχνότητα αποκοπής λαμβάνεται υπόψη πολλαπλασιάζοντας το ολοκλήρωμα (9.17.13) επί :

$$[1 - \sin^2(\pi n T_s)/(\pi n T_s)^2] \quad (\text{βλέπε 9.15.1})$$

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η διάχυση από συνεχή πηγή επηρεάζεται μόνο από δίνες με περιόδους μεταξύ του χρόνου διαδρομής και του χρόνου μέτρησης. Ο Pasquill σημειώνει ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι ισοδύναμα με την απλή εξίσωση :

$$\sigma_v^2 = \sigma_v^2 (T_s/\beta, t/\beta) t^2 \quad (9.17.14)$$

όπου  $\beta$  είναι ο λόγος της κλίμακας χρόνου κατά Lagrange προς την Euler που έχει παρατηρηθεί ότι είναι περίπου 4. Οι όροι στην παρένθεση σημαίνουν ότι το  $\sigma_v^2$  μετράται από ένα σταθερό ανεμόμετρο σε συνολικό χρόνο  $T_s/\beta$  όπου διαδοχικοί μέσοι όροι σε χρόνο  $t/\beta$  παίρνονται μέσα στο χρόνο μέτρησης πριν υπολογισθεί το  $\sigma_v^2$ . Η έννοια του χρόνου δειγματοληψίας και μέσης τιμής φαίνεται στο σχήμα 9.15.1. Έτσι για σταθερό  $T_s$  η ενεργός τυρβώδης ενέργεια  $\sigma_v^2$  θα μειωθεί με την αύξηση του χρόνου διαδρομής. Με

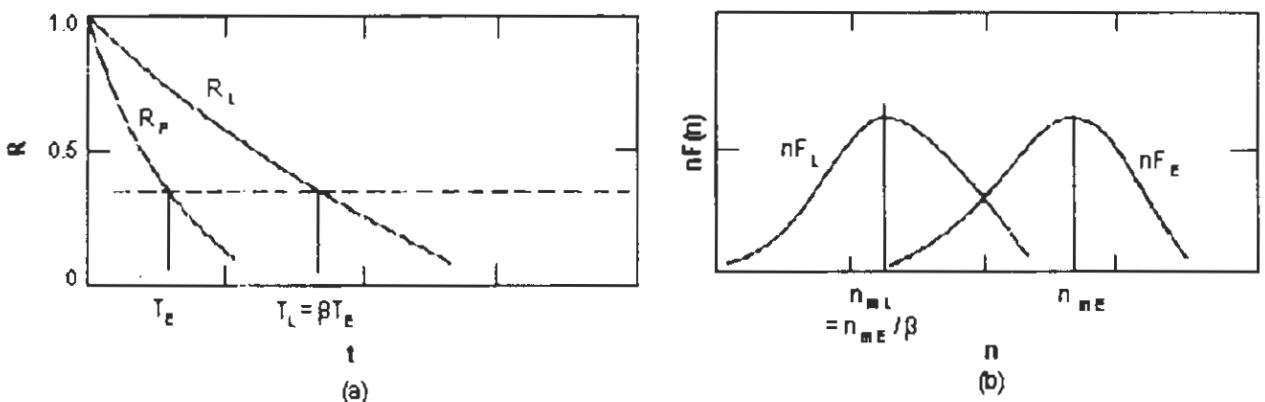
την εξίσωση (9.17.14) η διάχυση μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας βασικές παρατηρήσεις ταχύτητας ανέμου.

#### 9.17.4 Σχέσεις Lagrange - Euler

Μικρά στοιχεία από αέριους ρύπους ή αδρανή σωματίδια ακολουθούν τη ροή ακριβώς. Διαισθητικά ταχύτητες που μετρούνται από αντικείμενα που ακολουθούν (Lagrangian) τη ροή μεταβάλλονται λιγότερο από τις ταχύτητες που μετριοούνται από ένα σταθερό ανεμόμετρο (Eulerian).

Το πρόβλημα είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις σταθερών ανεμόμετρων για να υπολογίσουμε τη διασπορά, πράγμα που κάνει αναγκαία την ανάπτυξη σχέσεων μεταξύ της τύρβης κατά Euler και Lagrange. Το άθροισμα ενέργειας στην εξίσωση (9.17.13) και η αυτοσυσχέτιση  $R(t)$  στην εξίσωση του Taylor (9.17.4) είναι παράμετροι Lagrange.

Εάν γνωρίζουμε το  $\sigma_y^2$ , ο  $nR_L(t)\sigma_v^2$  μπορεί να υπολογισθεί (σχέση 9.17.4) από την  $d^2 \sigma_y^2/dt^2$ . Είναι όμως δύσκολο να υπολογισθούν δεύτερες παράγωγοι για παρατηρήσεις υπαίθρου. Μια κοινή μέθοδος σύγκρισης της τύρβης Lagrange και Euler, είναι να υπολογισθούν οι  $R_L(t)$  και  $R_E(t)$  χρησιμοποιώντας σύγχρονες μετρήσεις μπαλόνια και σταθερά ανεμόμετρα.



**Σχήμα 9.17.5** Eulerian  $R_E$  και Lagrangian  $R_L$  αυτοσυσχετογράμματα (α) και φάσματα (β), στα οποία γίνεται παραδεκτό ότι έχουν όμοια σχήματα αλλά και χρονικές κλίμακες που διαφέρουν κατά έναν συντελεστή  $\beta$ .

Οι Gifford και Hay-Pasquill προτείνουν ότι τα διαγράμματα φασματικής ενέργειας και αυτοσυσχέτισης κατά Lagrange και Euler είναι σχήμα, αλλά μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά έναν παράγοντα  $\beta$ . Το σχήμα 9.17.5 δείχνει αυτήν την ομοιότητα, που μπορεί να εκφρασθεί αναλυτικά :

$$nF_L(n) = \beta nF_E(\beta n) \quad (9.17.15)$$

$$R_L(\beta t) = R_E(t) \quad (9.17.16)$$

όπου  $\beta$  μπορεί τυπικά να ορισθεί ως ο λόγος της κλίμακας χρόνου κατά Lagrange και Euler:

$$\beta = T_L/T_E \quad (9.17.17)$$

Ο Pasquill προτείνει ότι κατά μέσο όρο στο πλανητικό οριακό στρώμα, ο  $\beta$  είναι 4 για ουδέτερες συνθήκες, τείνει στο 10 καθώς η ευστάθεια αυξάνει και τείνει στη μονάδα με τη μείωσή της. Υπάρχει αρκετή διασπορά στις παρατηρήσεις του  $\beta$ .

### 9.17.5 Μοντέλα τροχιών σωματιδίων Monte Carlo

Στην πράξη, στο μοντέλο του υπολογιστή χρησιμοποιούνται χρόνοι δευτερολέπτων και υποτίθεται η ακόλουθη εξίσωση :

$$x(t) = x(t - \Delta t) + u\Delta t \quad (9.17.18)$$

όπου η ολική ταχύτητα  $u$ , είναι το άθροισμα της μέσης και της τυρβώδους συνιστώσας

$$u = \bar{u} + u' \quad (9.17.19)$$

Η τυρβώδης συνιστώσα είναι το άθροισμα της συσχετισμένης συνιστώσας και της τυχαίας ή Monte Carlo συνιστώσας.

$$u'(t) = u'(t - \Delta t)R(\Delta t) + u'' \quad (9.17.20)$$

όπου η τυχαία συνιστώσα  $u''$  υποτίθεται ότι έχει κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή και μεταβλητότητα  $\sigma_w^2$  που δίνεται από :

$$\sigma_w^2 = \sigma_u^2 [1 - R^2(\Delta t)] \quad (9.17.21)$$

Η σχέση αυτή είναι αναγκαία για τη διατήρηση της ενέργειας  $\sigma_u^2$  από το ένα χρονικό βήμα στο επόμενο. Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης  $R(\Delta t)$  είναι μια μεταβλητή Lagrange.

Η τυρβώδης ενέργεια  $\sigma_u^2$  μπορεί να εκτιμηθεί από τις εξισώσεις οριακού στρώματος, όπως φαίνεται στις εξισώσεις 9.17.22 έως 9.17.33 :

$$\frac{\sigma_w}{w_*} = 0,96 \left( \frac{3z}{z_i} + \frac{L}{z_i} \right)^{1/3} \quad \left( 0 < \frac{z}{z_i} < \frac{z_i}{z_i} \right) \quad (9.17.22)$$

$$= 0,763 \left( \frac{z}{z_i} \right)^{0,175} \quad \left( \frac{z_i}{z_i} < \frac{z}{z_i} < 0,4 \right) \quad (9.17.23)$$

$$= 0,722 \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right)^{0,207} \quad \left( 0,4 < \frac{z}{z_i} < 0,96 \right) \quad (9.17.24)$$

$$= 0,37 \quad \left( 0,96 < \frac{z}{z_i} < 1 \right) \quad (9.17.25)$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = 1,3 \exp \left( -2 \frac{fz}{u_*} \right) \text{ (ουδέτερη)} \quad (9.17.26)$$

$$= 1,3 \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right) \text{ (ευσταθής)} \quad (9.17.27)$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = \left( 12 - 0,5 \frac{z_i}{L} \right)^{1/3} \text{ (ασταθής)} \quad (9.17.28)$$

$$= 1,3 \exp \left( -2 \frac{fz}{u_*} \right) \text{ (ουδέτερη)} \quad (9.17.29)$$

$$= 1,3 \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right) \text{ (ευσταθής)} \quad (9.17.30)$$

$$\frac{\sigma_v}{u_*} = \left( 12 - 0,5 \frac{z_i}{L} \right)^{1/3} \text{ (ασταθής)} \quad (9.17.31)$$

$$= 2,0 \exp \left( -3 \frac{fz}{u_*} \right) \text{ (ουδέτερη)} \quad (9.17.32)$$

$$= 2,0 \left( 1 - \frac{z}{z_i} \right) \quad (\text{ευσταθής}) \quad (9.17.33)$$

Κάθε μορφή για την  $R(\Delta t)$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά η απλούστερη είναι  $R(\Delta t) = \exp(-\Delta t/T_L)$ . Έτσι η χρονική κλίμακα Langrange πρέπει να εκτιμηθεί πριν να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 9.17.20. Χρησιμοποιούμε τη σχέση :

$$T_L = \beta T_E = \beta \frac{\lambda_{mE}}{5u} \quad (9.17.34)$$

όπου  $\lambda_{mE}$  είναι το μήκος κλίμακας της ενέργειας μεγίστου στο φάσμα ενέργειας κατά Euler. Ο λόγος (1/5) προέρχεται από το γεγονός ότι το φάσμα για, ένα αποδεκτό αυτοσυσχετόγραμμα της μορφής  $\exp(-\Delta t/T_E)$  έχει ενέργεια κορυφής σε περίοδο περίπου  $5T_E$ . Τότε, αν αντικαταστήσουμε με  $i = \sigma_w/u$  στην εξίσωση 9.17.34, η χρονική κλίμακα ( $T_L$ ) γίνεται :

$$T_L = 0.1 \lambda_{mE} / \sigma_w \quad (9.17.35)$$

Τυπικές κλίμακες χρόνου ( $T_L$ ) για οριακό στρώμα μεταφοράς βάθους 1000 m και χρόνου δειγματοληψίας περίπου 1 h είναι τάξεως μεγέθους 100 sec.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι οι υπολογισμοί διάχυσης σχετίζονται άμεσα με τα βασικά χαρακτηριστικά της τύρβης. Οι υπολογισμένες τιμές  $\sigma_y$  συμφωνούν ακριβώς με την αναλυτική λύση της εξίσωσης του Taylor (βλέπε εξίσωση 9.17.8) όταν μέσοι άνεμοι και τύρβη υποτίθεται ότι είναι σταθεροί και ομογενείς. Στις εφαρμογές αυτές τα σωματίδια απελευθερώνονται από το ίδιο σημείο και η αρχική τυρβώδης ταχύτητα επιλέγεται τυχαία από την κατανομή Gauss με μέση τιμή μηδέν και μεταβλητή τα  $\sigma_w^2$ .

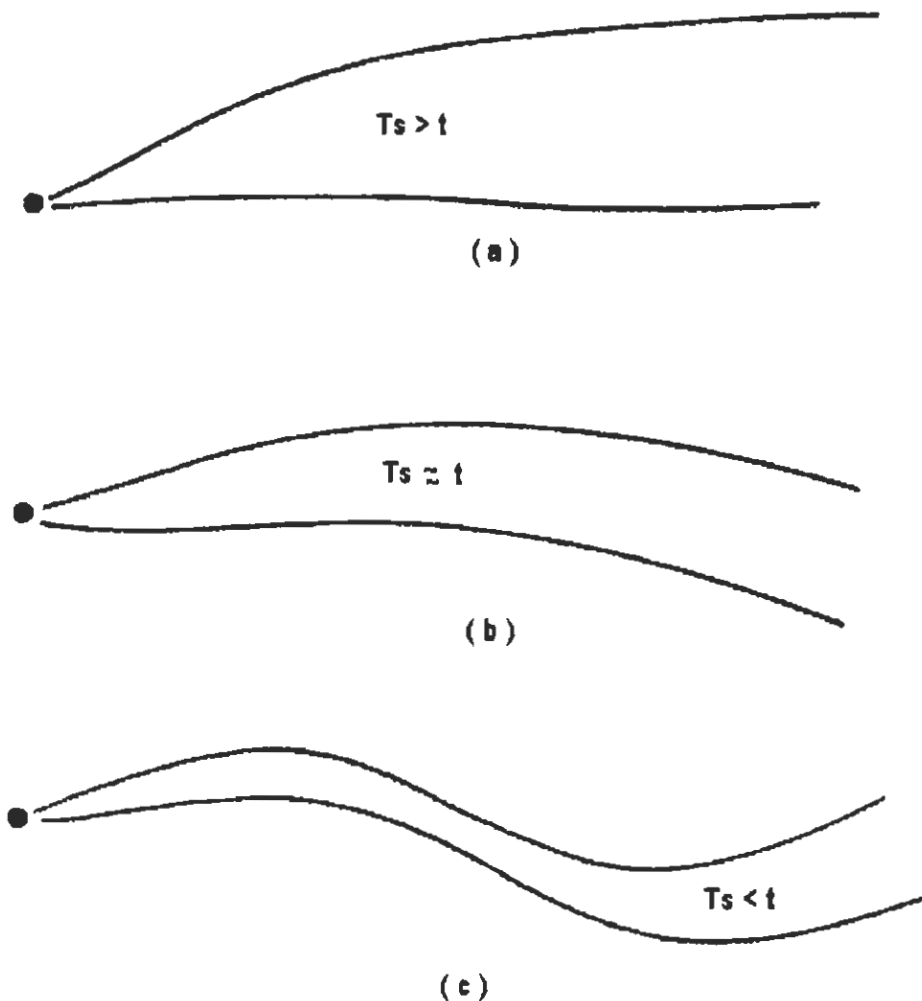
## 9.18 Διάχυση νέφους

### 9.18.1 Εισαγωγή

Η πιο συγκεκριμένη άποψη της ατμοσφαιρικής διάχυσης είναι η διαφορά της μεταξύ πλουμίου και νέφους. Οι σχέσεις διάχυσης του πλουμίου εφαρμόζονται στα λεγόμενα πλούμια όπου η απελευθέρωση και οι χρόνοι δειγματοληψίας είναι μεγάλοι σε σύγκριση με το χρόνο διαδρομής από την πηγή στο δέκτη. Από την άλλη μεριά, οι τύποι της σχετικής διάχυσης ή του νέφους εφαρμόζονται στις ονομαζόμενες στιγμιαίες πηγές,

όπου ο χρόνος απελευθέρωσης ή χρόνος δειγματοληψίας είναι μικρός σε σχέση με το χρόνο διαδρομής. Οι ορισμοί αυτοί οδηγούν σε δίλημμα όταν ο χρόνος εκπομπής είναι περίπου ίσος με το χρόνο δειγματοληψίας ή διαδρομής όπως φαίνεται στο σχήμα 9.18.1.

Οι παράμετροι διασποράς του νέφους ή της σχετικής διάχυσης ( $\sigma$ ) που είναι κατάλληλοι για τα στιγμιαία πλούμια στο σχήμα 9.18.1 (c) έχουν μετρηθεί σε πολύ λίγα πειράματα υπαίθρου. Συνεπώς εμφανίζονται αμφίβολες περιπτώσεις στις οποίες μερικοί που αναπτύσσουν πρότυπα χρησιμοποιούν τα  $\sigma$  των Pasquill-Gifford που είναι για συνεχή πλούμια και για το νέφος.



**Σχήμα 9.18.1** Σχήματα πλουμίων ανάλογα με το χρόνο δειγματοληψίας ( $T_s$ ) και χρόνο διαδρομής ( $t$ ). (a) Συνεχής πηγή πλουμίου ( $T_s \gg t$ ). (b) Συνεχές ή στιγμιαίο πλούμιο ( $T_s \approx t$ ). (c) Στιγμιαίο πλούμιο ( $T_s \ll t$ ).



### 9.18.2 Στατιστική ανημετώπιση

Στη στατιστική προσέγγιση κατά Taylor για τη διάχυση απο συνεχή πηγή πλουμίου συζητήθηκαν οι τροχιές των μεμονωμένων σωματιδίων σχετικά με σταθερό άξονα. Πάντως για διάχυση νέφους, δεν μπορεί να ορισθεί σταθερός άξονας και πρέπει να μελετηθεί η κίνηση ενός σωματιδίου σχετικά με άλλα. Γι' αυτό η διάχυση νέφους συχνά καλείται σχετική διάχυση. Ο Batchelor γράφει μια εξίσωση ανάλογη προς την εξίσωση του Taylor:

$$\overline{y^2} = \overline{y_0^2} + 2 \int_0^T \int_0^t \overline{\delta v(t) \delta v(t+t_1)} dt_1 dt \quad (9.18.1)$$

όπου  $y_0$  είναι η αρχική απόσταση των δύο σωματιδίων και  $\delta v$  είναι η σχετική τους ταχύτητα ( $\delta v = v_2 - v_1$ ).

Οι Smith και Hay κατέληξαν στην εξίσωση για την αύξηση του νέφους:

$$\frac{d\sigma}{dx} = 2\beta i^2 \int_0^\infty \frac{n^2}{(1+n^2)^2} \left[ \frac{1 - e^{-r^2 n^2}}{nr} \right] dn \quad (9.18.2)$$

όπου  $i = \sigma/\mu$  είναι η ένταση της τύρβης,  $r = \sigma/l$  και  $n = kl$  ( $k$  ο αριθμός κύματος). Η συνάρτηση στάθμισης (μέσα στην αγκύλη) είναι στην ουσία, μια συνάρτηση φίλτρου ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιείται στη στατιστική θεωρία για συνεχή πλούμια.

Αυτή η συνάρτηση μας λέει ότι οι δίνες με μεγέθη περίπου ίσα με το μέγεθος του νέφους ή του συγκροτήματος είναι οι πιο σπουδαίες για την ανάπτυξη του νέφους. Αντίθετα δίνες με μεγέθη πολύ μικρότερα ή πολύ μεγαλύτερα του μεγέθους του νέφους συνεισφέρουν λίγο στη διάχυσή του. Το φίλτρο μπορεί να θεωρηθεί σαν παράθυρο που περνάει μεγέθη δινών περίπου μεταξύ  $\sigma/2$  και  $5\sigma$ . Το επιχείρημα για την έλλειψη συνεισφοράς των μικρών δινών είναι το ίδιο για διάχυση του πλουμίου και του νέφους. Οι μικρές δίνες μετακινούν σωματίδια μέσα στο πλούμιο ή στο νέφος με μικρή επίδραση στη διάχυση. Μεγάλες δίνες απλώς καθαρά μεταφέρουν το νέφος όλο μαζί. Απο την άλλη μεριά, οι μεγάλες δίνες μπορούν να συνεισφέρουν στη διάχυση πλουμίου από ένα σταθερό άξονα. Αυτή η κατάσταση συνοψίζεται στον πίνακα 9.18.1.

Πίνακας 9.18.1

Τύπος διάχυσης	Περιοχή μεγέθους δινών που συνεισφέρουν στη διάχυση
Πλούμιο	Δίνες με μεγέθη μεγαλύτερα από το $u$ πολλαπλασιασμένο με το χρόνο δείγματος
Νέφος	Μόνο δίνες με μέγεθος κοντά στο μέγεθος του νέφους (με ένα παράγοντα $\pm 3$ )

Όταν η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) της κατανομής του υλικού σε ένα νέφος είναι γνωστή, η συγκέντρωση ( $C$ ) του υλικού μπορεί να υπολογισθεί από τη Gaussian σχέση:

$$C = \frac{Q_p}{(2\pi)^{3/2} \sigma^3} e^{-r^2/2\sigma^2} \quad (9.18.3)$$

όπου  $Q_p$  αντιπροσωπεύει τις εκπομπές (σε μάζα ανά sec) και γίνεται παραδεκτό ότι η διάχυση είναι ιστροπική (δηλαδή ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις). Η μεταβλητή  $r$  είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο του νέφους. Ο Richardson διαπίστωσε την εξάρτηση της διάχυσης του νέφους με τη διάστασή του όταν χρησιμοποίησε εμπειρικά δεδομένα σε πολλές κλίμακες για να εξάγει μια έκφραση για την ενεργό τυρβώδη διαχυτότητα για νέφη:

$$K = 0.2\sigma^{4/3} \quad (6.4)$$

όπου  $K$  έχει μονάδες τετραγωνικών μέτρων ανά δευτερόλεπτο και  $\sigma$  έχει μονάδες μέτρων.

Το κύριο αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ πλουμίου και διάχυσης νέφους είναι ότι υπάρχει μια περιοχή στην οποία η ανάπτυξη του νέφους είναι μεγαλύτερη της ανάπτυξης του πλουμίου. Αυτό συμβαίνει όταν το νέφος μεγαλώνει δια μέσου μεγεθών μέσα στην αδρανειακή υποπεριοχή του ενεργειακού φάσματος, όπου η φασματική ενέργεια αναπτύσσεται ταχέως με το μέγεθος των δινών.

### 9.18.3 Προσέγγιση ομοιότητας

Ο Batchelor απομόνωσε τις βασικές φυσικές παραμέτρους που εμπριέχονται στη διάχυση νέφους και τις χρησιμοποίησε για να εξάγει σχέσεις ομοιότητας. Για παράδειγμα, επιχειρηματολόγησε ότι για μικρούς χρόνους, όταν οι διαστάσεις του νέφους ήταν σε κλίμακες μέσα στην περιοχή της αδρανειακής υποπεριοχής, ο ρυθμός διάχυσης του νέφους ( $d\sigma^2/dt$ ) ήταν συνάρτηση του ρυθμού απορρόφησης ( $\epsilon$ ), του χρόνου μετά την απελευθέρωση ( $t$ ) και του αρχικού μεγέθους του νέφους ( $\sigma_0$ ):

$$\frac{d\sigma^2}{dt} \cong t(\epsilon\sigma_0)^{2/3} \quad (9.18.5)$$

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + c_1 t^2 (\varepsilon \sigma_0)^{2/3} \quad (9.18.6)$$

Στην πράξη αυτός ο νόμος διάχυσης εφαρμόζεται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα. Για μεγαλύτερους χρόνους, όταν το νέφος θα έχει χάσει το αρχικό του μέγεθος, ισχύει ο ακόλουθος νόμος ομοιότητας:

$$\frac{d\sigma^2}{dt} \cong \varepsilon t^2 \quad (9.18.7)$$

$$\sigma^2 = c_2 \varepsilon t^3 \quad (9.18.8)$$

Η σταθερά  $c_2$  έχει υπολογισθεί από μερικά πειράματα και γενικά θεωρείται ότι είναι τάξεως μονάδας. Τα περισσότερα πειράματα δίνουν τη σχέση  $0.5 < c_2 < 2$ .

Για ακόμα μεγαλύτερους χρόνους, όταν οι διαστάσεις του νέφους είναι σε κλίμακες μεγαλύτερες από το μέγεθος των δινών της αδρανειακής υποπεριοχής, ο ρυθμός της διάχυσης του νέφους γίνεται ίσος με το ρυθμό διάχυσης του πλουμίου.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_{\text{νεφ}}^2 = \sigma_{\text{ελ}}^2 \quad (9.18.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις αυτές, μπορούμε να συνοψίσουμε τις διαφορές μεταξύ της διάχυσης του νέφους και του πλουμίου (πίνακας 9.18.2).

**Πίνακας 9.18.2**  
Σύγκριση διάχυσης μεταξύ νέφους και πλουμίου.

	Μικροί χρόνοι	Μεγάλοι χρόνοι
Νέφος	$\sigma \approx t$ (πολύ μικρό $t$ ) $\sigma \approx t^{3/2}$ (ενδιάμεσο)	$\sigma \approx t^{1/2}$ ( $t > T_1$ )
Πλούμιο	$\sigma \approx t$ ( $t < T_1$ )	$\sigma \approx t^{1/2}$ ( $t > T_1$ )

Η  $\sigma \approx t^{3/2}$  περιοχή πράγματι εμφανίζεται στις παρατηρήσεις διάχυσης του νέφους. Τυπικά ένας νόμος  $t^{3/2}$  είναι εφαρμόσιμος μόνο σε μέρος της περιοχής των περισσότερων πειραμάτων.

Σε μια προσπάθεια να αναπτυχθεί μια θεωρία για το  $\sigma_y$  που ταιριάζει στις παρατηρήσεις και για νέφος και για πλούμιο, ο Gifford άρχισε με την στατιστική εξίσωση:  $\dot{v}(t) = v(t - \Delta t)R(\Delta t) + v''$  η οποία είναι ένας τύπος της Langevin:

$$\frac{C_{LM}}{C_{HW}} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{1/2} \frac{h^2 e}{2z_1 \sigma_y} \quad (9.18.10)$$

όπου  $\eta$  είναι μια τυχαία επιτάχυνση και  $\beta^{-1}$  ισούται με την Lagrangian τυρβώδη κλίμακα χρόνου  $T_{Lv}$ . Μια άλλη λύση της εξίσωσης είναι:

$$\frac{\sigma_y^2}{2K_y t} = \frac{t}{T_{Lv}} - (1 - e^{-t/T_{Lv}}) - 0.5 \left( 1 - \frac{v_0^2 T_{Lv}}{K_y} \right) (1 - e^{-t/T_{Lv}})^2 \quad (9.18.11)$$

όπου η τυρβώδης διαχυτότητα ( $K_y$ ) εφαρμόζεται σε ολόκληρη τη ροή, δηλαδή είναι αυστηρά μια ποσότητα μεγάλης κλίμακας και  $v_0$  είναι η αρχική ταχύτητα στην πηγή. Αν η εξίσωση 9.18.11 ολοκληρωθεί για όλες τις πιθανές αρχικές ταχύτητες ( $v_0$ ) τότε παίρνεται η λύση του Taylor (εξίσωση 9.17.8) για διάχυση απο συνεχή πηγή. Για σταθερή  $v_0$ , η παραπάνω λύση εφαρμόζεται στη στιγμιαία διάχυση για μικρούς χρόνους. Καθώς ο χρόνος αυξάνει η λύση πλησιάζει την εξίσωση του Fick.

$$\sigma_y^2 = 2 K_y t$$

### 9.19 Εφαρμογές

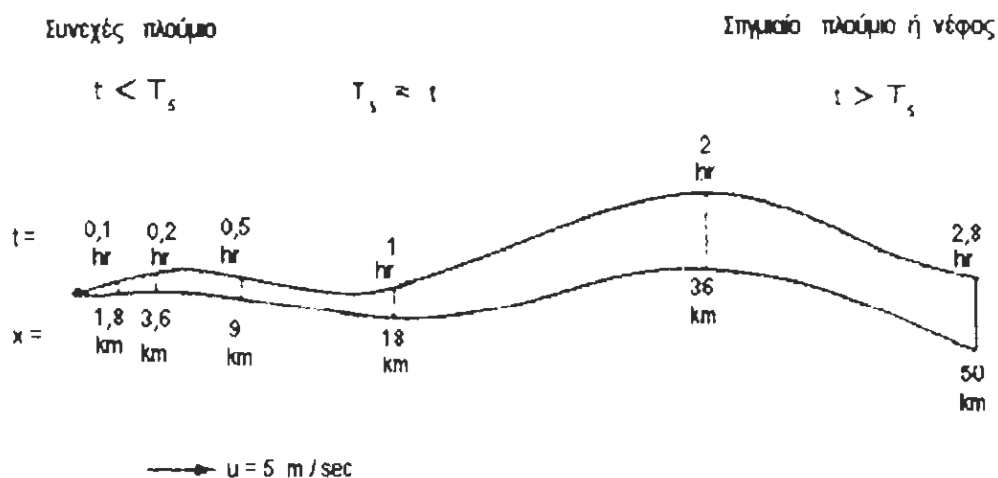
Οι θεωρίες διάχυσης του νέφους είναι λίγες και η βάση δεδομένων είναι μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερη απο τη βάση δεδομένων για τη διάχυση του πλουμίου. Δεν είναι άξιο απορίας τότε γιατί αρκετά μοντέλα που εφαρμόστηκαν για διάχυση νέφους επανέρχονται και χρησιμοποιούν τα  $\sigma$  του πλουμίου. Συνιστούμε τη χρήση της σχέσης του Batchelor:

$$\sigma_y^2 = \epsilon t^3$$

για χρόνους διαδρομής του νέφους μικρότερους απο  $10^4$  δευτερόλεπτα. Ο ρυθμός απορρόφησης τύρβης θα έπρεπε να εκτιμάται τοπικά κατ' αρχήν και κατόπιν σε ένα ύψος στο μέσο του οριακού στρώματος καθώς το  $\sigma$  πλησιάζει στην τιμή  $0.3 z_i$ . Για χρόνους διαδρομής μεγαλύτερους απο  $10^4$  η σταθερά  $c_3$  στη σχέση  $\sigma_y = c_3 t$  θα έπρεπε να ταιριαστεί έτσι ώστε  $c_3 = \epsilon^{1/2} (10^4 \text{ sec})^{1/2}$  δηλαδή οι δύο καμπύλες τέμνονται στο  $t = 10^4 \text{ sec}$ . Παρόμοια διαδικασία χρησιμοποιείται για το  $\sigma_z$  εκτός του ότι  $\sigma_z = 0.3 z$  για όλους τους χρόνους, αφού το  $\sigma_z$  αποκτήσει πρώτα αυτή την τιμή.

Μια φωτογραφία συνεχούς πλουμίου δίνει πληροφορίες περίπου για τη διάχυση νέφους επειδή ο χρόνος δειγματοληψίας είναι ουσιαστικά μηδενικός.

Το σχήμα 9.19.1 δείχνει μια άλλη περίπτωση στην οποία τα αποτελέσματα ενός μοναδικού πειράματος μπορεί να δώσουν πληροφορίες για τη διάχυση του νέφους, τη διάχυση του πλουμίου και ένα συνδυασμό των δύο. Έστω ότι ένα μακρύ πλούμιο σταθμού ισχύος δειγματοληπτείται από διάφορα αεροσκάφη για περίοδο μιας ώρας. Κάθε αεροσκάφος πετάει δια μέσον εγκάρσιων τομών του πλουμίου σε δοσμένη απόσταση κατάντι για ολόκληρη την ώρα. Η ταχύτητα του ανέμου είναι 5 m/s. Κατά τη διάρκεια χρόνου διαδρομής ίσου με το χρόνο δειγματοληψίας, το πλούμιο καλύπτει απόσταση 18 km. Έτσι, για κατάντι αποστάσεις ( $x$ ) μικρότερες από περίπου 10 km οι παρατηρήσεις του αεροσκάφους δίνουν πληροφορίες για τη συνεχή διάχυση του πλουμίου. Για  $x$  μεγαλύτερο από περίπου 30 km οι παρατηρήσεις τους αεροσκάφους σχετίζονται περισσότερο με τη διάχυση του νέφους. Οι περισσότερες φωτογραφίες και παρατηρήσεις αεροσκαφών των πλουμίων σε αποστάσεις μεγάλες ( $x > 50$  ή 100 km) είναι χρήσιμες μόνο στο ότι δίνουν πληροφορίες για τη διάχυση του νέφους.



**Σχήμα 9.19.1** Διάγραμμα πλουμίου που δειγματοληπτείται από αεροσκάφος για 1hr ( $T_s = 1hr$ ) σε κατάντι αποστάσεις. Όταν ο χρόνος μετακίνησης ( $t$ ) είναι μικρότερος από  $T_s$ , η παρατηρημένη κατανομή φανερώνει συνεχές πλούμιο. Όταν είναι μεγαλύτερα από  $T_s$  η παρατηρημένη κατανομή φανερώνει στιγμιαίο πλούμιο ή νέφος.

## 10. ΝΕΡΟ ΚΑΙ Η ΜΟΛΥΝΣΗ ΤΟΥ

Η μόλυνση του νερού είναι οποιαδήποτε φυσική η χημική μεταβολή που συμβαίνει μέσα σε αυτό και επηρεάζει δυσμενώς τους οργανισμούς. Όπως πολλά άλλα προβλήματα είναι παγκόσμιας εμβέλειας, αλλά οι μορφές της μόλυνσης ποικίλουν σύμφωνα με το επίπεδο ανάπτυξης της χώρας. Σε φτωχότερα, μη βιομηχανοποιημένα κράτη, η μόλυνση του νερού κατά κύριο λόγο προκαλείται από απόβλητα ανθρώπων και ζώων, παθογόνους οργανισμούς που υπάρχουν στα τελευταία, από τα μικροβιοκτόνα και από ιζήματα που προέρχονται από εσφαλμένες γεωργικές και ξυλουργικές εργασίες. Πλούσια, βιομηχανικά κράτη επίσης έχουν αυτά τα προβλήματα, αλλά με την περισσότερη πολυδάπανη ζωή τους και την ευρέως διαδεδομένη βιομηχανία, παράγουν μια επιπρόσθετη κατηγορία από ενδεχόμενους βλαβερούς ρύπους : θερμότητα, τοξικά μέταλλα, οξέα, μικροβιοκτόνα και οργανικά χημικά. Μεταξύ των δύο αυτών ακραίων περιπτώσεων υπάρχουν πολυάριθμες χώρες με διαφορετικά επίπεδα βιομηχανοποίησης. Συχνά έχουν ανεπαρκείς νόμους ή και κανένα για την αντιμετώπιση της μόλυνσης του νερού ή αν έχουν καλούς νόμους, συχνά δεν τους εφαρμόζουν σωστά. Τα ύδατά τους παρόλα αυτά είναι πολύ μολυσμένα από μια ποικιλία βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων.

Όπως οι αέριοι ρύποι έτσι και οι υδάτινοι προέρχονται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Επειδή το νερό δεν περιορίζεται από συγκεκριμένα όρια, οι ρύποι που παράγονται σε μια χώρα συχνά καταλήγουν στα νερά μιας άλλης. Η απερίσκεπτη απόρριψη αποβλήτων στα ποτάμια, ατυχήματα (όπως διαρροές πετρελαίου) και ανεξέλεγκτη αύξηση του πληθυσμού μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες σε λίμνες, ρέματα και ωκεανούς.

Η μεταφορά των ρύπων από τις λίμνες και τα ποτάμια στους ωκεανούς είναι μόνο το μισό πρόβλημα. Πρόσφατα επιστήμονες έχουν αποκαλύψει τη διασταύρωση μόλυνσης ,π.χ τη μετακίνηση ενός ρύπου από έναν μέσο (αέρα) σε άλλο όπως το νερό. Για παράδειγμα τα μικροβιοκτόνα που ψεκάζονται στις καλλιέργειες μπορεί να παρασυρθούν στις κοντινές λίμνες και από εκεί στους ωκεανούς. Τα τοξικά οργανικά απόβλητα που εξατμίζονται από τις λιμνούλες γύρω από βιομηχανίες, ξεπλένονται στον ουρανό μόνο από τη βροχή. Τα βλαβερά απόβλητα που έχουν εισχωρήσει στο έδαφος διαρρέουν μέσα στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες οι οποίοι εφοδιάζουν τα ποτάμια. Σημαντικά επίπεδα αυτών και άλλων τοξικών χημικών παραμένουν στις λίμνες εξαιτίας του μολυσμένου υπόγειου νερού και της απόθεσης από την ατμοσφαιρική

μόλυνση. Δυστυχώς πολύ λίγα έχουν γίνει από το 1986 για την εξάλειψη των αεροπαραγόμενων τοξικών.

### 10.1 Σημειακές και μη σημειακές πηγές

Όταν μελετάμε τις πηγές της ρύπανσης του νερού, σκεφτόμαστε κυρίως τις βιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και αντίστοιχα επεξεργασίας λυμάτων, τα οποία αδειάζουν τόνους τοξικών χημικών σε υπονόμους, λίμνες και ποτάμια. Αυτές οι **σημειακές πηγές**, όπως αποκαλούνται, επειδή είναι σε ξεχωριστές περιοχές, είναι σχετικά εύκολο να ελεγχθούν. Οι **μη σημειακές πηγές** είναι σε λιγότερο εμφανείς τοποθεσίες όπως φάρμες, δάση, λιβάδια και αστικούς δρόμους. Για παράδειγμα το βρόχινο νερό μεταφέρει λάδια από τους αυτοκινητόδρομους, μικροβιοκτόνα και λιπάσματα από αστικούς κήπους μέσα στους υπονόμους όμβριων υδάτων και μετά σε ρέματα.

Μερικές ουσίες περιέχουν σκόνη, ιζήματα, μικροβιοκτόνα, αμίαντο, λιπάσματα, βαρέα μέταλλα, άλατα, λάδια, λίπη και απορρίμματα και ακόμα αέριους ρύπους που ξεπλένονται στον ουρανό από τη βροχή. Επειδή οι πηγές είναι πολλές και διασκορπισμένες, ο έλεγχος έχει αποδειχθεί δύσκολος.

Τα οικοσυστήματα του γλυκού νερού διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

Τα **οικοσυστήματα ροής** περιλαμβάνουν ποτάμια και ρέματα. Επειδή το νερό ρέει πιο γρήγορα σε αυτά από ότι στις λίμνες, μπορούν να αυτοκαθαριστούν. Παρόλα αυτά, αυτή η καθαρική επίδραση είναι ανώφελη αν ο εφοδιασμός ρύπων είναι συνεχής ή κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος της όχθης του ποταμού, καθώς είναι συνηθισμένο σε πολλές βιομηχανικές χώρες όπως αυτές στην Ευρώπη.

Τα **στατικά οικοσυστήματα** όπως λίμνες και νερόλακκοι, είναι συνήθως περισσότερο επιρρεπείς στη μόλυνση επειδή το νερό αντικαθίσταται με χαμηλότερους ρυθμούς. Μια πλήρης αντικατάσταση ή ανακύκλωση του νερού της λίμνης μπορεί να χρειαστεί από 10 μέχρι 100 χρόνια ή περισσότερα και έτσι οι ρύποι μπορούν να φθάσουν σε επικίνδυνα επίπεδα.

Οι λίμνες γενικά χωρίζονται σε τρεις ζώνες : (1) η παράκτια ζώνη, τα ρηχά νερά κατά μήκος της ακτής όπου φυτρώνει η βλάστηση, όπως ψαθιά και βούρλα, (2) η λιμνώδης ζώνη, τα βαθιά νερά όπου εισχωρεί το ηλιακό φως και όπου ζει

φυτοπλαγκτόν όπως φύκια και (3) η βαθιά ζώνη, στην οποία δεν εισέρχεται το ηλιακό φως.

Οι παράκτιες και λιμνώδεις ζώνες έχουν ζωτική σημασία στην υγεία μιας λίμνης γιατί είναι τόπος διαβίωσης για πολλούς φωτοσυνθετικούς οργανισμούς που παρέχουν τροφή και οξυγόνο στην υδάτινη ζωή. Συμπερασματικά η μόλυνση στις ζώνες αυτές μπορεί να καταστρέψει την οικολογική υγεία της λίμνης και την ευεξία αυτών που εξαρτώνται σε αυτές για τροφή. Η βαθιά ζώνη είναι επίσης μια οικολογικά σημαντική ζώνη. Στη λάσπη και το ίζημα στο βυθό ζουν δισεκατομμύρια βακτηρίων και μυκητοκτόνων. Διαλύουν οργανική ύλη αποθηκευμένη από ανώτερα στρώματα και έτσι βοηθάει να ελευθερωθούν θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται για την ανάπτυξη των φυτών στην παράκτια και λιμνώδη ζώνη. Οι ρύποι που δηλητηριάζουν αυτούς τους οργανισμούς διασπών μια οργανική οικολογική διαδικασία.

Τους ζεστούς μήνες οι λίμνες μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις θερμοκρασιακές ζώνες. Το επιφανειακό ζεστό νερό καλείται **επιλίμνιο**, το βαθύτερο κρύο νερό διαμορφώνει το **υπολίμνιο** και η μεταβατική περιοχή ανάμεσά τους καλείται **μεταλίμνιο** ή **θερμοκλινές**.

Στις εύκρατες περιοχές οι λίμνες περνούν μέσα από μια σημαντική διαδικασία ανάμειξης δύο φορές το χρόνο, η οποία επιτρέπει την πλήρη ανάμειξη οξυγόνου, θρεπτικών συστατικών και φυτοπλαγκτόν.

Ο εποχιακός κύκλος των λιμνών είναι σημαντικός γιατί βοηθά την κυκλοφορία οξυγόνου από το νερό της επιφάνειας σε βαθύτερα νερά, το φθινόπωρο, ο οποίος επιτρέπει στους οργανισμούς να επιβιώσουν στη βαθιά ζώνη. Την άνοιξη μεταφέρει σημαντικά θρεπτικά συστατικά από τα κατώτερα στρώματα στα ανώτερα, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα φυτά και τα φύκια.

## 10.2 Μόλυνση από θρεπτικά συστατικά και ευτροφικότητα

Ποτάμια, ρέματα και λίμνες περιέχουν πολλά οργανικά και ανόργανα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται από τα φυτά και τα ζώα που ζουν σε αυτά. Σε υψηλότερες από το κανονικό συγκεντρώσεις παρόλα αυτά, τα συστατικά αυτά γίνονται ρύποι.

Οι κυριότεροι υδάτινοι ρύποι είναι οργανικά και ανόργανα θρεπτικά συστατικά, μεταδοτικοί παράγοντες, οργανικοί και ανόργανοι τοξικοί οργανισμοί, ιζήματα και θερμότητα.



- Τα **οργανικά θρεπτικά συστατικά** προέρχονται από παχυντήρια ζώων, εργοστάσια επεξεργασίας αστικών λυμάτων και βιομηχανία. Προάγουν την ανάπτυξη φυσικών πληθυσμών υδάτινων βακτηρίων. Η βακτηριακή αποσύνθεση των οργανικών ουσιών έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου, με τρομερές επιπτώσεις στους υπόλοιπους οργανισμούς που εξαρτώνται από το οξυγόνο.
- Δύο **ανόργανα φυτικά θρεπτικά συστατικά** μεγάλου ενδιαφέροντος είναι το άζωτο και ο φώσφορος. Προέρχονται κύρια από δεξαμενές σήψης, αγροτικές εκτάσεις, πολύ λιπασμένες καλλιέργειες, εργοστάσια επεξεργασίας λυμάτων και προκαλούν εκτεταμένη φυτική ανάπτυξη η οποία εμποδίζει τις πλωτές υδάτινες δίοδους. Η βακτηριακή αποσύνθεση των φυτών το φθινόπωρο έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση του διαλυμένου οξυγόνου, η οποία μπορεί να θανατώσει με ασφυξία ψάρια και άλλους οργανισμούς.
- Το νερό μπορεί να περιέχει παθογενή βακτήρια, ιούς, πρωτόζωα και παράσιτα (**μεταδοτικοί παράγοντες**). Ανεπεξέργαστα ή ελλιπώς επεξεργασμένα λύματα, ζωικά απόβλητα, απορρίμματα συσκευασίας κρεάτων και μερικά άγρια είδη, είναι οι κύριες πηγές. Οι ασθένειες που μεταδίδονται στο νερό παρουσιάζουν ένα ειδικό πρόβλημα στα αναπτυσσόμενα κράτη με φτωχά αναπτυγμένες τις δραστηριότητες επεξεργασίας λυμάτων.
- Οι **τοξικοί οργανικοί ρύποι** περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό χημικών, όπως μικροβιοκτόνα και μονωτικά ηλεκτρικών εξοπλισμών, πολλά από τα οποία είναι μη βιοδιασπώμενα ή αργά διασπώμενα, βιολογικά μεγενθυμένα και καρκινογενή.
- Οι **τοξικοί ανόργανοι ρύποι** περιέχουν μια μεγάλη γκάμα χημικών, όπως μέταλλα και άλατα, από ένα μεγάλο αριθμό πηγών. Ο **υδράργυρος** είναι ιδιαίτερα προβληματικός ρύπος λόγω της μετατροπής του σε μέθυλο και διμέθυλο υδράργυρο σε υδάτινα οικοσυστήματα από αερόβια βακτήρια. Αυτές οι μορφές είναι περισσότερο τοξικές από τον ανόργανο υδράργυρο. Ο μεθυλικός υδράργυρος είναι βιολογικά μεγενθυμένος στην τροφική αλυσίδα.
- Τα **ιζήματα**, ο κύριος υδάτινος ρύπος, είναι υποπροϊόν διάβρωσης που προέρχεται από την κακή διαχείριση κοπής της ξυλείας, τη γεωργία, την κτηνοτροφία, την εξόρυξη και τις κατασκευές.
- Τα **ιζήματα** καταστρέφουν τις περιοχές αναπαραγωγής και διατροφής των ψαριών, μειώνει τον πληθυσμό των ψαριών και οστρακοειδών, μολύνει τις

λιμνούλες που χρησιμοποιούνται για ξεκούραση, καταστρέφει τα αυγά και τη μαρίδα, γεμίζει τις λίμνες και τα ρέματα και μειώνει τη διείσδυση του φωτός, έτσι ώστε να θέτει σε κίνδυνο τα υδρόβια φυτά.

- Η **θερμική μόλυνση** σχετίζεται με τη θέρμανση ή ψύξη του νερού, τα οποία μεταβάλλουν δραστικά τη χλωρίδα και την πανίδα, μέσα στο νερό. Μεγάλες ποσότητες θερμότητας μπορούν να σκοτώσουν οργανισμούς ευαίσθητους σε αυτές τις συνθήκες και βλάπτει οργανισμούς που εξαρτώνται από υδάτινα οικοσυστήματα.

### 10.3 Μόλυνση υπόγειων υδάτων

Μέχρι τα 1970 λίγοι άνθρωποι συνειδητοποίησαν ότι τα υπόγεια ύδατα μπορούσαν να μολυνθούν. Υπήρχε η αντίληψη ότι τα υπόγεια ύδατα προστατεύονταν από το έδαφος και τα πετρώματα πάνω από τα οποία το νερό των λιωμένων χιονιών, βιομηχανικά χημικά, μικροβιοκτόνα, λύματα, όξινη βροχή και άλλους μολυντές που απειλούν τα επιφανειακά ύδατα. Ξέρουμε ότι αυτή η άποψη ήταν απελπιστικά αισιόδοξη. Τα υπόγεια ύδατα μπορούν να μολυνθούν από πολλά ανθρώπινα τεχνάσματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Το νερό, όπως αναφέρουν οι επιστήμονες, απειλείται όλο και περισσότερο από τη μόλυνση. Πιο συγκεκριμένα, πολλοί ρύποι παρουσιάζονται σε πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό από ότι είναι στις περισσότερες μολυσμένες επιφάνειες. Επίσης πολλοί ρύποι είναι άγευστοι και άοσμοι σε συγκεντρώσεις που πιστεύεται ότι απειλείται η ανθρώπινη υγεία.

Περίπου 4500 δισεκατομμύρια λίτρα μολυσμένου νερού απορροφώνται από το έδαφος στις ΗΠΑ ημερησίως από δεξαμενές αποσύνθεσης, βόθρους, πετρελαιοπηγές, χωματερές, γεωργία και λιμνούλες με επικίνδυνους ρύπους. Δυστυχώς πολύ λίγα ξέρουμε για το μέγεθος της μόλυνσης του υπόγειου νερού. Ορισμένοι ειδικοί πιστεύουν ότι η μόλυνση του υπόγειου νερού είναι ένα πρόβλημα δευτερεύουσας σημασίας.

Χιλιάδες χημικών, πολλά από τα οποία ενδεχομένως είναι επικίνδυνα για την υγεία, εμφανίζονται στην επιφάνεια δειγμάτων νερού από μολυσμένα πηγάδια. Οι περισσότεροι κοινοί ρύποι είναι τα χλωριούχα, αζωτούχα, βαρέα μέταλλα και διάφοροι τοξικοί οργανισμοί, όπως μικροβιοκτόνα και λιπαντικοί παράγοντες. Τα οργανικά μίγματα χαμηλού μοριακού βάρους είναι ιδιαίτερα ανησυχητικά αφού πολλά από αυτά είναι καρκινογενή. Η ανησυχία πολλών ειδικών ιατρών είναι μεγάλη γιατί υπάρχει φόβος

ότι δεν υπάρχει ανώτατο όριο σε αυτά τα μίγματα, δηλαδή δεν υπάρχει όριο που να εξαλείφεται το ρίσκο του καρκίνου ή άλλων προβλημάτων. Άλλοι ειδικοί φοβούνται ότι πολλά χημικά μπορεί να συμπεριφέρονται συνεργατικά, μετατρέποντας ένα ενδεχομένως δύσκολο πρόβλημα σε εφιάλη της υγείας. Τα περισσότερα κοινά προβλήματα περιλαμβάνουν αποβολές, χαμηλό βάρος βρέφους, επιπλοκές στη γέννα και πρόωρος νηπιακός θάνατος. Οι ενήλικες και τα παιδιά υποφέρουν από δερματολογικά εξανθήματα, ερεθισμό ματιών και ένα πλήθος νευρολογικών προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων ζαλάδων, πονοκεφάλων και περιόδων εξασθένησης.

Πολλοί πιστεύουν ότι το υπόγειο νερό είναι ορμητικά ποτάμια. Αυτό όμως απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Το υπόγειο νερό τυπικά κινείται από 5 ως 64 εκατοστά την ημέρα. Καθώς κινείται τόσο αργά, μπορεί να χρειαστούν χρόνια έτσι ώστε μολυσμένα νερά που βρίσκονται σε μια περιοχή, να εμφανιστούν σε μια άλλη. Επιπρόσθετα όταν μολυνθεί ένας υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας, μπορεί να πάρει εκατοντάδες χρόνια για να αυτοκαθαριστεί.

Η ανίχνευση της μόλυνσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ακριβή και χρονοβόρα. Πολυάριθμα δοκιμαστικές γεωτρήσεις πρέπει να γίνουν σε δείγματα νερού και να διερευνηθεί ο βαθμός και η κατεύθυνση της ροής. Παρά τις εντατικές γεωτρήσεις, οι επίσημοι φορείς της υγείας μπορούν εύκολα να χάσουν μια μικρή ποσότητα ρύπων που ρέουν διαμέσου ενός τμήματος μεγάλου υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Για παράδειγμα υγρά που δύσκολα αναμειγνύονται με το νερό, μπορεί να μετακινούνται κατά μήκος της επιφάνειας ή του πυθμένα ενός υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε λεπτά στρώματα και συχνά είναι δύσκολο να ανιχνευτούν.

Εμποδίζοντας τη μόλυνση του υπόγειου νερού είναι γενικά ο φθηνότερος τρόπος για να προστατεύσουμε αυτούς τους ζωτικούς πόρους. Μειώνοντας την παραγωγή των επικίνδυνων αποβλήτων θα ήταν μια σημαντική πρώτη κίνηση. Οι βελτιώσεις στις μεθόδους αποσύνθεσης των αποβλήτων μπορούν επίσης να βοηθήσουν.

Για να καθαρίσουμε τους μολυσμένους υδροφόρους ορίζοντες μπορεί να είναι αναγκαίο να αντλήσουμε μολυσμένο νερό στην επιφάνεια, να καθαριστεί και να επιστρέψει πίσω στον υδροφόρο ορίζοντα. Νέες τεχνικές έχουν επίσης αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας φυσικώς εμφανιζόμενα βακτήρια που βρίσκονται στο έδαφος και στο υπόγειο νερό για το μερικό καθαρισμό της μόλυνσης. Οι μικροβιολόγοι έχουν γνώση από τα τέλη της δεκαετίας του εβδομήντα ότι ορισμένα βακτήρια μπορούν να χωνέψουν ή να διασπάσουν υδρογονάνθρακες στο έδαφος και στο υπόγειο νερό, μετατρέποντάς τα σε μονοξειδίο του άνθρακα και μεθάνιο.

Λόγω του ότι τα υπόγεια ύδατα μπορεί να χρειαστούν εκατοντάδες χρόνια για να αντικαταστήσουν την φτωχή διαχείριση των εδαφιαίων υδάτων, οδηγεί σε πολλά προβλήματα όπως η μόλυνση υπόγειων υδάτων, το άδειασμα των υπόγειων αποθεμάτων νερού, σχηματισμό εδαφικών κατακρημνισμάτων και διείσδυση αλμυρού νερού.

#### **10.4 Θαλάσσια ρύπανση**

Το γλυκό νερό είναι λιγότερο πυκνό από το αλμυρό, έτσι μέσα στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες στις ακτές ή στα νησιά, το γλυκό νερό από τις βροχοπτώσεις απλώνεται στο πάνω μέρος του αλμυρού που διεισδύει από τη θάλασσα. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού είναι τέτοια ώστε μια ισορροπημένη κατάσταση δημιουργείται στην οποία το γλυκό νερό εκτείνεται περίπου 40 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας για κάθε μέτρο υδροφόρου ορίζοντα που στην εκτείνεται στεριά πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι αν ο υδροφόρος ορίζοντας γλυκού νερού χαμηλώσει μόλις κατά 2 μέτρα το αλμυρό νερό από κάτω θα ανεβεί τόσο πολύ όσο 80 μέτρα και μπορεί εύκολα να μολύνει πηγάδια και αρδευτικά συστήματα.

Η θαλάσσια ρύπανση έχει να κάνει με δύο προβλήματα : ρύπανση από πετρέλαιο και πλαστικά.

##### **10.4.1 Ρύπανση από πετρέλαιο**

Περίπου 3.2 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι από πετρέλαιο εισέρχονται στις παγκόσμιες θάλασσες κάθε χρόνο. Περίπου μισό από το πετρέλαιο που ρυπαίνει τους ωκεανούς προέρχεται από φυσική διαρροή παραθαλάσσιων κοιτασμάτων. Το 1/5 προέρχεται από ανενεργές πετρελαιοπηγές, διαρροές σωλήνων και δεξαμενόπλοιων. Το υπόλοιπο προέρχεται από το διατιθέμενο πετρέλαιο της ενδοχώρας και μεταφέρεται στους ωκεανούς μέσω των ποταμών.

Ορισμένη ποσότητα πετρελαίου προέρχεται από τη μεταφορά του από μεσοθαλάσσιες πλατφόρμες σε παραθαλάσσιες και κατά τη διάρκεια κανονικών λειτουργιών. Η μόλυνση από αυτή την πηγή δεν έχει αποσπάσει την προσοχή του

κόσμου αν και οι επιδράσεις τους στη θαλάσσια ζωή και στα πουλιά μπορεί να είναι σημαντική.

#### **10.4.2 Ρύπανση από πλαστικά**

Περίπου 400.000 θαλάσσια θηλαστικά πεθαίνουν κάθε χρόνο σαν αποτέλεσμα των εκτιμώμενων 6.4 εκατομμυρίων –μετρικών τόνων πλαστικών στα οποία συμπεριλαμβάνονται δίκτυα, που απορρίπτονται στον ωκεανό ετησίως από τους επαγγελματίες ψαράδες, ναυτικούς και του πολεμικού ναυτικού. Δεκάδες χιλιάδες τόνων μπορεί επίσης να προέρχονται από ιδιωτικά σκάφη, εργοστάσια και παράκτιες δραστηριότητες. Κανένας δεν ξέρει τον αριθμό των θαλάσσιων πουλιών ή ψαριών που πεθαίνουν κάθε χρόνο από νάιλον δίχτυα ψαρέματος πλαστικές σακούλες, πλαστικά λουριά και πολλά άλλα αντικείμενα τα οποία είναι φτιαγμένα από μη βιοδιασπώμενο πλαστικό.

Τα πλαστικά δίκτυα παγιδεύουν τα ψάρια, τα πουλιά και τα θαλάσσια θηλαστικά. Μπορεί να στραγγαλιστούν ή να φοφήσουν από πείνα. Πλαστικές σακούλες που μοιάζουν με τσούχτρες τρώγονται από τις θαλάσσιες χελώνες. Όταν τα πουλιά και τα ψάρια καταβροχθίζουν πλαστικές χάντρες που μοιάζουν με μικρά οστρακόδερμα, μπορεί να δηλητηριαστούν και να φοφήσουν. Τα πλαστικά μαχαιροπήρουνα όταν καταβροχθισθούν μπορεί να πληγώσουν το στομάχι προκαλώντας εσωτερική αιμορραγία με αποτέλεσμα το θάνατο.

Πολλά μπαλόνια που ελευθερώνονται από διάφορες εορταστικές εκδηλώσεις καταλήγουν στη θάλασσα, όπου συχνά καταναλώνονται εσφαλμένα για τροφή από τους θαλάσσιους οργανισμούς. Συσσωρεύονται στο πεπτικό σύστημα και προκαλούν λιμοκτονία.

#### **10.5 Χημικά απόβλητα και ακαθαρσίες υπονόμων**

Τα υπόγεια ύδατα από λεπτά και αμμώδη υλικά είναι συχνά πολύ καθαρά. Αυτό οφείλεται στο ότι η άμμος έχει τεράστια επιφάνεια πάνω στην οποία απορροφώνται οι ακαθαρσίες. Αυτό το είδος *φιλτραρίσματος* δουλεύει αρκετά καλά για βιολογικές ακαθαρσίες όπως βακτήρια, τα οποία κολλάνε στους πέτρινους κόκκους και μετά συμπεριφέρονται ως αποσυνθετικά για να διασπασούν όποια οργανικά υλικά υπάρχουν

μέσα στο νερό. Πολλοί όμως χημικοί μολυντές, όπως βιομηχανικά απόβλητα, δεν αφαιρούνται από τα υπόγεια ύδατα με αυτού του είδους φιλτραρίσματος. Ακόμα δεν αποτελούνται όλοι οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες από λεπτόκοκκα υλικά. Μεγάλα κανάλια, όπως αυτά που βρίσκονται σε ασβεστόλιθο ή βασάλτη και πυκνές πέτρες με μεγάλες συνδέσεις παρέχουν λίγο φιλτράρισμα.

Όταν χημικά απόβλητα ή ακαθαρσίες υπονόμων χύνονται χωρίς επεξεργασία στο έδαφος και κυρίως αν το στρώμα πέτρας που βρίσκεται από κάτω είναι διαπερατό υπάρχει πάντοτε κίνδυνος ότι τα υπόγεια ύδατα θα μολυνθούν. Το πρόβλημα αυτό είναι ευρέως διαδεδομένο.

## 10.6 Υδάτινοι δρόμοι

Το περισσότερο από το νερό μας προέρχεται από λίμνες και ρέματα, υδάτινοι δρόμοι οι οποίοι συλλέγουν το τρεχούμενο νερό λιωμένων χιονιών, ιζήματα τα οποία δεν απορροφούνται από τα φυτά και δεν βυθίζονται μέσα στο έδαφος. Εμείς διαχειριζόμαστε τους υδάτινους δρόμους με πολλούς τρόπους και για πολλούς σκοπούς. Οι δύο πιο συνηθισμένοι λόγοι είναι να αυξήσουμε την τροφοδοσία σε μια περιοχή και να ελέγχουμε τις πλημμύρες.

## 10.7 Ποτάμια

Ρέματα και ποτάμια μας παρέχουν με νερό ηλεκτρική ενέργεια, καλλιεργήσιμα εδάφη, διάθεση αποβλήτων και κοιλάδες οι οποίες είναι κατάλληλες για δρομολόγηση αυτοκινητόδρομων. Ένα ρέμα τροφοδοτείται από πηγές και από λεκάνες απορροής. Ο ρυθμός με τον οποίον το ρέμα τροφοδοτείται με νερό καθορίζει τον όγκο εκφόρτωσης ή ροής. Η εκφόρτωση με την σειρά της επηρεάζει την ταχύτητα του ρέματος, πλάτος, βάθος και το ποσό ιζήματα ή ίλη (στερεά σωματίδια) μπορεί να μεταφέρει.

## 10.8 Πλημμύρες

Η πλημμύρα είναι αναφορικά υψηλή ροή ρέματος η οποία χύνεται έξω από το κανάλι του. Το κανάλι ενός ρέματος είναι σχηματιζόμενο κυρίως από την συνηθισμένη ποσότητα εκφόρτωσης. Όταν το ρέμα δέχεται έναν ασυνήθιστο όγκο νερού, το πλεόνασμα μπορεί μόνον να χυθεί πάνω από το ανάχωμα και να πλημμυρίσει έξω πάνω στο επίπεδο πλημμύρας. **Επίπεδα πλημμύρας** είναι φυσικές ασφαλιστικές βαλβίδες, περιοχές στις οποίες το ποτάμι έχει υπερχειλίσει τα αναχώματά του σε κάθε πλημμύρα για χιλιάδες χρόνια, εναποθέτοντας ίλη η οποία συχνά δημιουργεί εξαιρετη καλλιεργήσιμη γη.

Οι πλημμύρες μπορούν να περιγραφούν από τα **διαστήματα επανάληψης**, πόσο συχνά συμβαίνουν στην περιοχή και την **αιχμή εκφόρτωσης**, την ασυνήθιστα υψηλή εκφόρτωση κατά την διάρκεια μιας πλημμύρας. Το πλημμύρισμα γίνεται χειρότερο σε μια περιοχή όταν τα επίπεδα πλημμύρας πέφτουν ή η αιχμή εκφόρτωσης αυξάνεται.

## 10.9 Φράγματα

Τα φράγματα προκαλούν αποθέματα νερού για να τα συσσωρεύσουνε πίσω από αυτά. Έχουν χτιστεί για ποικίλους σκοπούς : να αποτρέπουν τις πλημμύρες κάτω από το φράγμα, να παράγουν ενέργεια και να αποθηκεύουνε νερό. Περισσότερο από το 15% των επιφανειακών ρεμάτων καταλήγει πίσω από ένα φράγμα.

Τα φράγματα είχαν κακή δημοσιογραφία πρόσφατα. Καθώς αναθεωρούμε τα προβλήματα, θα πρέπει να παρόλα αυτά να θυμηθούμε ότι τα περισσότερα φράγματα επιτυγχάνουν τον σκοπό τους να ελέγχουν την ροή ποταμών και ότι εκατομμύρια άνθρωποι εξαρτώνται από αυτά για επιβίωση, εργασία και ευημερία. Το κώλυμα είναι ότι τα φράγματα τείνουν να έχουν μία ολόκληρη σειρά από περιβαλλοντολογικές επιδράσεις τις οποίες οι κατασκευαστές τους μπορεί να μην είχαν προβλέψει. Μερικές από αυτές, είναι η κατακράτηση των ιζημάτων, εναπόθεση χώματος και η διαπύση.

Τα φράγματα τείνουν να προκαλούν πικρούς καβγάδες μεταξύ συντηρητικών και προφραγματικών δυνάμεων. Αυτοί μειώνουν την ταχύτητα του ποταμού και συχνά πλημμυρίζουν άγριες και όμορφες κοιλάδες, καταστρέφουν ποτάμια αθλήματα και την άγρια ζωή που κατοικεί εκεί. Τα αποθέματα πίσω από το φράγμα παρέχουν επίσης απέραντες επιφάνειες για απώλειες νερού λόγω εξάτμισης.

Πιθανόν το χειρότερο πρόβλημα με τα φράγματα, ωστόσο, είναι ότι μπορούν να σπάσουν και να σκοτώσουν κόσμο, ασυνήθιστα λόγω του ότι η ύλη που μαζεύεται πίσω από το φράγμα γρηγορότερα από ότι προβλεπόταν. Μόλις το φράγμα χτιστεί και ελεγχθεί ο ποταμός, άνθρωποι τείνουν να εγκαθίστανται στα επίπεδα πλημμύρας από κάτω. Χιλιάδες άνθρωποι στην Ινδία και Πακιστάν και εκατοντάδες στην Βόρεια Αμερική έχουν σκοτωθεί από φράγματα που σπάσανε. Είναι τρομακτικό να συνειδητοποιούμε ότι το 90% των φραγμάτων παγκοσμίως είναι λιγότερο από 40 χρονών και ακόμα δεν είχαν το χρόνο να φράξουν με εναποθέσεις λάσπης και να γίνουν ανασφαλή.

Λόγο των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούν η περίοδος των μεγάλων φραγμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής έχει πιθανών τελειώσει. Όλες οι χώρες ωστόσο θα συνεχίσουν να χτίζουν μερικά φράγματα για να παρέχουν αποθέματα πόσιμου νερού και να προμηθεύσουν μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια με ενέργεια.



## 11. ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ( CASE STUDIES )

### 11.1 Το πρόβλημα με το προστατευτικό στρώμα του όζοντος

Το 1985 η Βρετανική Ανταρκτική Ατμοσφαιρική Επιθεώρηση ανακοίνωσε μια ανησυχητική ανακάλυψη : τα στρώματα του όζοντος στη στρατόσφαιρα πάνω από το Νότιο Πόλο υποχωρούσαν με ορμή κατά τη διάρκεια του Σεπτεμβρίου και του Οκτωβρίου κάθε χρόνο καθώς ο ήλιος επανεμφανίζεται στο τέλος του μακρού πολικού χειμώνα. Αυτή η μείωση του όζοντος λαμβάνει χώρα τουλάχιστον από τη δεκαετία του 1960, αλλά δεν είχε εντοπιστεί προηγουμένως γιατί προγενέστεροι ερευνητές προγραμμάτισαν τα ειδικά όργανα, ώστε να αγνοούν τις μεταβολές στο στρώμα του όζοντος, κάτι που ήταν τελικά λάθος.

Κάθε χρόνο η τρύπα του όζοντος μεγαλώνει όλο και περισσότερο. Το 1993 το 70 τοις εκατό του Ανταρκτικού στρατοσφαιρικού όζοντος καταστράφηκε πάνω από μια περιοχή με μέγεθος περίπου ίσο με αυτό της Βόρειας Αμερικής. Δυστυχώς το φαινόμενο αυτό εξαπλώνεται και σε άλλα μέρη του πλανήτη. Περίπου 10 τοις εκατό όλου του στρατοσφαιρικού όζοντος παγκοσμίως καταστράφηκε κατά τη διάρκεια του χειμώνα του 1993 και οι απώλειες πάνω από το βόρειο Καναδά και τη Σιβηρία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπέρασαν το 25 τοις εκατό.

Γιατί ανησυχούμε για το όζον της στρατόσφαιρας; Στο επίπεδο του εδάφους το όζον είναι ένας επιζήμιος ρύπος, που καταστρέφει τα φυτά, τα υλικά των κτιρίων και την ανθρώπινη υγεία. Στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, παρόλα αυτά, όπου αντανάκλα τις επικίνδυνες υπεριώδεις ακτινοβολίες του ήλιου, το όζον είναι μια αναντικατάστατη πηγή. Χωρίς αυτό το προστατευτικό στρώμα οι οργανισμοί στην επιφάνεια της γης θα υποστούν εγκαύματα και γενετικές βλάβες από την επικίνδυνη ακτινοβολία. Απώλεια όζοντος σε ποσοστό 1% έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση κατά 2% της υπεριώδους ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης και μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση περίπου ενός εκατομμυρίου επιπλέον ειδών καρκίνου του δέρματος του ανθρώπου ετησίως σε όλον τον κόσμο αν δεν ληφθεί κανένα προστατευτικό μέτρο. Έτσι είναι επείγον να μάθουμε τι καταστρέφει το στρώμα του όζοντος και να βρούμε τρόπους να το αντιμετωπίσουμε όσο είναι αυτό δυνατόν.

Οι εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (-85 C έως -90 C) στην Ανταρκτική παίζουν ένα ρόλο στην απώλεια του όζοντος. Κατά τη διάρκεια των μακρών, σκοτεινών χειμερινών μηνών, το ισχυρό ορατό πάνω από τον ορίζοντα στροβίλισμα, απομονώνει τον αέρα

της Ανταρκτικής και επιτρέπει στις θερμοκρασίες της στρατόσφαιρας να πέσουν αρκετά χαμηλά ώστε να δημιουργήσουν κρυστάλλους από πάγο σε μεγάλα ύψη, κάτι που σπάνια συμβαίνει στον υπόλοιπο κόσμο. Τα μόρια του όζοντος και αυτά που περιέχουν χλώριο, απορροφώνται από αυτά τα σωματίδια πάγου. Όταν ο ήλιος επιστρέφει την άνοιξη και παρέχει ενέργεια για να ελευθερωθούν τα χλωριούχα ιόντα, καταστρεπτικές χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν γρήγορα χώρα.

Ο άνθρωπος ελευθερώνει πλήθος από σωματίδια που περιέχουν χλώριο, στην ατμόσφαιρα. Αυτά που πιστεύεται ότι είναι τα σημαντικότερα σχετικά με την απώλεια όζοντος, είναι οι χλωροφθοράνθρακες και τα αέρια αλογόνα. Οι χλωροφθοράνθρακες εφευρέθηκαν το 1928 από επιστήμονες της General Motors που έψαχναν για ένα λιγότερο τοξικό ψυκτικό από την αμμωνία. Κοινά γνωστοί με το εμπορικό όνομα Φρέον, οι χλωροφθοράνθρακες θεωρήθηκαν περίφημες ενώσεις. Είναι μη τοξικοί, μη εύφλεκτοι, χημικά αδρανείς, έχουν φθηνή παραγωγή και είναι χρήσιμοι σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Επειδή τα μόρια αυτά είναι τόσο σταθερά, παρόλα αυτά παραμένουν αναλλοίωτα για δεκαετίες ή ακόμα και αιώνες. Όταν απομακρυνθούν στη στρατόσφαιρα, η έντονη υπεριώδης ακτινοβολία απελευθερώνει άτομα χλωρίου που καταστρέφουν το όζον. Καθώς τα άτομα αυτά δεν λαμβάνουν μέρος σε αυτές τις αντιδράσεις, συνεχίζουν να καταστρέφουν το όζον για χρόνια ώσπου τελικά να κινηθούν προς το διάστημα.

Μέχρι το 1978 τα αεροζόλ χρησιμοποιούσαν περισσότερο χλωροφθοράνθρακα από οποιοδήποτε άλλο προϊόν. Αν και δεν γνωρίζαμε τις ειδικές συνθήκες στην Ανταρκτική εκείνη την εποχή, υπήρχε η υποψία ότι οι χλωροφθοράνθρακες ίσως απειλούσαν το όζον της στρατόσφαιρας. Έτσι εισήχθησαν νόμοι στις Ηνωμένες Πολιτείες, τον Καναδά και ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες που απαγόρευαν μη απαραίτητες χρήσεις. Παρόλα αυτά ακόμα 320000 μετρικοί τόνοι χλωροφθορανθράκων χρησιμοποιήθηκαν παγκοσμίως σε ετήσια βάση μέχρι το 1988 σαν ψυκτικά, διαλυτικά, προωθητικά σε σπρέι και αφρώδη εκρηκτικά μέσα.

Η ανακάλυψη των απωλειών του όζοντος της στρατόσφαιρας έφερε στην επιφάνεια μια αξιολογή και γρήγορη διεθνή ανταπόκριση. Σε ένα συνέδριο, το 1989 στο Ελσίνκι, ογδονταένα κράτη συμφώνησαν να αποσύρουν σταδιακά την παραγωγή χλωροφθορανθράκων με το πέρας του αιώνα. Σαν απόδειξη που δείχνει ότι οι απώλειες ήταν μεγαλύτερες και περισσότερο εξαπλωμένες από την αρχική θεώρηση, η τελευταία προθεσμία για την εξολόθρευση όλων των χλωροφθορανθράκων μεταφέρθηκε μέχρι το 1996 και ένα κεφάλαιο 500 εκατομμυρίων δολαρίων διατέθηκε για να βοηθήσει τα φτωχότερα κράτη να απαλλάξουν την τεχνολογία από τους χλωροφθοράνθρακες.

Ευτυχώς υπάρχουν ήδη εναλλακτικές λύσεις για τη μη χρησιμοποίηση χλωροφθορανθράκων. Τα πρώτα υποκατάστατα θα είναι οι υδρογονοχλωροφθοράνθρακες που ελευθερώνουν πολύ λιγότερο χλώριο ανά μόριο. Τελικά ελπίζουμε να αξιοποιήσουμε περισσότερο τα μόρια που δεν περιέχουν αλογόνα, τα οποία εργάζονται το ίδιο καλά και δεν είναι ακριβότερα από τους χλωροφθοράνθρακες.

Υπάρχουν ορισμένες αποδείξεις ότι η απαγόρευση των χλωροφθορανθράκων έχει ήδη κάποιο αποτέλεσμα. Το 1993 ερευνητές διαπίστωσαν ότι ο σχηματισμός χλωροφθοράνθρακα στην ατμόσφαιρα, ελαττωνόταν πιο γρήγορα από ότι αναμενόταν. Η συγκέντρωση του χλωροφθοράνθρακα-11 ήταν περίπου 75% χαμηλότερη από ότι ήταν πέντε χρόνια πριν, ενώ ο αντίστοιχος τύπος 12, αυξανόταν περίπου στο μισό του προηγούμενου βαθμού.

Αυτό είναι ένα παράδειγμα γρήγορης και αποτελεσματικής διεθνούς συνεργασίας με σκοπό την καταπολέμηση μιας κοινής περιβαλλοντικής απειλής. Έστω και αν οι ερευνητές διαφωνούν σχετικά με τις επιστημονικές αποδείξεις στο πόσες ακριβώς είναι οι απώλειες όζοντος εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και ποιοι είναι οι ειδικοί μηχανισμοί αυτών των απωλειών, η διεθνής κοινότητα συνήρθε και συμφώνησε σε μια πορεία δράσης.

## 11.2 Η ασθένεια της Μιναμάτα

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 οι κάτοικοι ενός μικρού παραθαλάσσιου χωριού, του Μιναμάτα στην Ιαπωνία, παρατήρησαν περίεργη συμπεριφορά που την ονόμασαν χορευτικές γάτες. Ανεξήγητα, οι γάτες άρχισαν να κάνουν σπασμωδικές κινήσεις, να παραπατούν και να αναπηδούν περίπου σαν να ήταν μεθυσμένες. Πολλές απέκτησαν αυτοκαταστροφικές τάσεις και έπεσαν από την αποβάθρα στη θάλασσα. Οι κάτοικοι δεν το συνειδητοποίησαν αμέσως αλλά ήταν μάρτυρες μιας δυσοίωνης προειδοποίησης, σχετικά με μια κρίση της υγείας και του περιβάλλοντος που θα έκανε το όνομα του χωριού τους συνώνυμο με μια θανατηφόρα ασθένεια. Οι γάτες τους υπέφεραν από εγκεφαλική βλάβη η οποία τώρα γνωρίζουμε ότι προκλήθηκε από δηλητηρίαση μεθυλικού υδραργύρου.

Το 1956 αναφέρθηκε η πρώτη ανθρώπινη περίπτωση νευρολογικής βλάβης. Ένα πεντάχρονο κοριτσάκι το οποίο ξαφνικά έπεσε σε σπασμωδικό παραλήρημα, μεταφέρθηκε στην τοπική κλινική. Μέσα σε λίγες εβδομάδες φαινόταν ότι ήταν

επιδερμικά τα νευρικά προβλήματα συμπεριλαμβανομένων μυοδιασμάτων, αίσθησης μυρμηγκιάσματος, πονοκεφάλων, θολή όραση, κακή άρθρωση λόγου και απώλεια ελέγχου των μυών. Για κάποιους άτυχους, αυτά τα ήπια συμπτώματα ακολουθούνταν από βίαιο τρεμούλιασμα, παράλυση, ακόμα και θάνατο. Επίσης υπήρξε ένας ασυνήθιστα υψηλός αριθμός ανωμαλιών στις γεννήσεις. Παιδιά γεννήθηκαν με τραγικές παραμορφώσεις, παράλυση και μόνιμη διανοητική καθυστέρηση. Έρευνες μεγάλης χρονικής διάρκειας έδειξαν ότι αυτά τα συμπτώματα προκλήθηκαν από υδράργυρο ο οποίος προερχόταν από τα θαλασσινά που ήταν η κύρια τροφή των κατοίκων και των γατών τους.

Για χρόνια το εργοστάσιο χημικών του Κίσσο ελευθέρωνε υπολείμματα που περιείχαν υδράργυρο, στον κόλπο της Μιναμάτα. Καθώς το στοιχείο του υδραργύρου δεν διαλύεται στο νερό, υποτίθεται ότι θα βυθιζότανε στα ιζήματα του πυθμένα και θα παρέμενε αδρανής. Οι επιστήμονες διαπίστωσαν παρόλα αυτά, ότι βακτήρια που ζούσαν σε αυτά τα ιζήματα μπορούσαν να μετατρέψουν τον μεταλλικό υδράργυρο σε ευδιάλυτο μεθυλικό υδράργυρο, ο οποίος απορροφούταν από το νερό και συγκεντρωνόταν στους ιστούς των υδρόβιων οργανισμών. Άνθρωποι που έτρωγαν ψάρια και οστρακοειδή από τον κόλπο εκτέθηκαν σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα αυτού του τοξικού χημικού. Συνολικά περισσότεροι από 3500 άνθρωποι προσβλήθηκαν και περίπου 50 πέθαναν από αυτό το οποίο έγινε γνωστό ως **ασθένεια της Μιναμάτα**. Μετά από περίπου 20 χρόνια έντονων διαμαρτυριών και αντιδικιών, η εταιρία του Κίσσο τελικά παραδέχτηκε ότι ευθυνόταν στην βύθιση του υδραργύρου και συμφώνησε να πληρώσει αποζημιώσεις στα θύματα.

Η βύθιση του υδραργύρου στον κόλπο της Μιναμάτα σταμάτησε εδώ και 20 χρόνια. Λάσπη που περιείχε υδράργυρο ανασύρθηκε και θάφτηκε κάπου αλλού και έτσι τώρα ο κόλπος θεωρείται ασφαλής για ψάρεμα. Παρόλα αυτά η βλάβη που υπέστησαν το πνεύμα και το σώμα αυτών των ανθρώπων που έφαγαν τα δηλητηριασμένα ψάρια δεν πρόκειται να θεραπευτεί ποτέ.

### 11.3 Η μόλυνση από ΜΡΤΡ και η ασθένεια του Πάρκινσον

Το 1983 ο Dr. J.W. Langston έκανε μια φανταστική ανακάλυψη. Πολλοί νέοι άντρες και γυναίκες εισήχθησαν στο νοσοκομείο του σε αφασία. Τελείως ακίνητοι, οι ασθενείς δεν ήταν ικανοί να ταΐσουν τους εαυτούς τους, να κουνήσουν τα άκρα τους ή να μιλήσουν.

Πολλοί μήνες εντατικής έρευνας αποκάλυψαν ότι οι απελπιστικά «παγωμένοι» ασθενείς ήταν ναρκομανείς που είχαν πάρει εργαστηριακά παρασκευασμένη ηρωίνη, ένα από τα πολλά νέα είδη ναρκωτικών. Αυτή η συγκεκριμένη παρτίδα ήταν λανθασμένα φτιαγμένη στο υπόγειο του σπιτιού του προμηθευτή και είχε μολυνθεί από μια χημική ουσία που καλείται **MPTP**, ένα πυρογενές συστατικό.

Ερευνητές έχουν μέχρι τώρα ανακαλύψει ότι το MPTP προσβάλλει ένα τμήμα του μεσοεγκεφάλου που σχετίζεται με την κίνηση των μυών. Αυτό το τμήμα είναι η περιοχή που σταδιακά επιδεινώνεται η κατάστασή της σε θύματα της εξασθένησης του οργανισμού, που είναι γνωστή σαν **ασθένεια του Πάρκινσον**, η οποία αναπτύσσεται συνήθως μετά την ηλικία των 45 χρόνων. Τα θύματα της ασθένειας αυτής πάσχουν από τρέμουλα και μερική ή ολική παράλυση.

Άτομα που εκτέθηκαν στο MPTP, ακόμα και σε μικρές ποσότητες, εμφάνισαν συμπτώματα της ασθένειας του Πάρκινσον μέσα σε λίγες μέρες. Οι μαϊμούδες που εκτέθηκαν στην ίδια ουσία εμφάνισαν επίσης συμπτώματα παρόμοια με τους ανθρώπους. Μελέτες έδειξαν ότι το MPTP προκαλεί αλλοίωση των κυττάρων στο τμήμα του μεσοεγκεφάλου.

Αυτό που ενοχλεί σε αυτή την ανακάλυψη είναι ότι το MPTP είναι εντυπωσιακά όμοιο με έναν αριθμό κοινών βιομηχανικών χημικών και ευρέως χρησιμοποιούμενων μικροβιοκτόνων. Περισσότερο μοιάζει με ένα είδος βοτάνου. Αυτό έχει οδηγήσει ορισμένους ερευνητές στο να πιστεύουν ότι η ασθένεια του Πάρκινσον μπορεί να ουσιαστικά να οφείλεται στη μόλυνση του περιβάλλοντος από τη βιομηχανία και από τα γεωργικά μικροβιοκτόνα.

Οι διαφωνούντες με αυτή τη θέση πιστεύουν ότι στο κυτταρικό επίπεδο η ασθένεια του Πάρκινσον δεν μοιάζει τόσο πολύ με τη δηλητηρίαση από το παραπάνω βότανο. Ένας αριθμίων μελετών απέτυχε στο να δείξει κάποια σχέση ανάμεσα στη βιομηχανοποίηση και στην ασθένεια. Άλλες μελέτες δεν έδειξαν καμία αύξηση της ασθένειας στις Ηνωμένες Πολιτείες μέχρι τη δεκαετία του 1940, όπου τότε τα επίπεδα της μόλυνσης άρχισαν να ανεβαίνουν. Έτσι στο συνέδριο του 1985 στο Εθνικό Ίδρυμα Υγείας, η πλειοψηφία των ερευνητών συμφώνησε ότι η ασθένεια δεν προέρχεται από την μόλυνση του περιβάλλοντος.

Περίπου την ίδια εποχή ο Andre Barbeau και οι συνάδελφοί του στο Ερευνητικό Ίδρυμα του Μόντρεαλ ανακοίνωσαν τα συνταρακτικά αποτελέσματα μιας μελέτης για την εμφάνιση της ασθένειας του Πάρκινσον στην επαρχία του Κεμπέκ. Οι ερευνητές έδειξαν, εκπλήσσοντας την ακαδημαϊκή κοινότητα, μια σημαντική σχέση ανάμεσα στη

χρήση των μικροβιοκτόνων και των συμπτωμάτων της ασθένειας. Η στατιστική συσχέτιση ήταν τόσο υψηλή που ήταν αδιαμφισβήτητη.

Οι ερευνητές έδωσαν έμφαση παρόλα αυτά στο ότι τα βότανα είναι μόλις μια περίπτωση από τα πολλά νευροτοξικά τα οποία είναι ικανά να καταστρέψουν τα νευρικά κύτταρα του συγκεκριμένου τμήματος του εγκεφάλου και να προκαλέσουν την ασθένεια αυτή. Σημείωσαν ότι ένας μεγάλος αριθμός πυρογενών ήταν επίσης ύποπτος. Πολλά από τα χημικά αυτά προέρχονται από τη χημική βιομηχανία.

Περαιτέρω αποδείξεις που υποστηρίζουν μια περιβαλλοντική πρόκληση της ασθένειας του Πάρκινσον, σύμφωνα με τον Barbeau και τους συναδέλφους του, δείχνουν ότι η ασθένεια δεν υπήρχε πριν τη βιομηχανική επανάσταση. Η εμφάνιση της ασθένειας αυξήθηκε απότομα κατά το 18<sup>ο</sup> αιώνα και έφτασε στο μέγιστο επίπεδο στις πρώτες δεκαετίες του 19<sup>ο</sup> αιώνα για άγνωστους λόγους. Παρόλα αυτά ο Barbeau προειδοποιεί ότι η αυξανόμενη χρήση του βοτάνου που αναφέρθηκε παραπάνω και άλλων παρόμοιων χημικών ουσιών, μπορεί να προκαλέσει αύξηση της εμφάνισης της ασθένειας.

Οι ειδικοί ακόμα δεν έχουν ξεκάθαρη άποψη. Αυτή τη στιγμή η έρευνα του Barbeau παραμένει η μοναδική που δείχνει μια συσχέτιση ανάμεσα στα MPTP και στην ασθένεια του Πάρκινσον. Χρειάζεται περαιτέρω έρευνα σχετικά με το αν υπάρχει όντως αυτή η σχέση και τι μπορούμε να κάνουμε σχετικά με αυτό.

#### **11.4 Η πόλη του Μπάνγκαλορ**

Η επίδραση των κλιματολογικών παραγόντων όπως η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνσή του, η θερμοκρασία και η ιζηματοποίηση στην αντιμετώπιση της ρύπανσης είναι πολύ μεγάλη.

Η ταχύτητα του ανέμου παίζει σημαντικό ρόλο στη διασπορά των ρύπων. Τα τελευταία χρόνια έχουν κτιστεί πολλά πολυώροφα κτίρια στην πόλη του Μπάνγκαλορ. Τα ψηλά αυτά οικοδομήματα εμποδίζουν την κίνηση του αέρα και έτσι έχουμε ανέμους με μικρή ταχύτητα. Αυτό μειώνει τη διασπορά των ρύπων. Επιπλέον μπορεί να έχουμε επικίνδυνες συνέπειες εξαιτίας της δομής των θυλάκων των ισχυρών ρύπων στις κοιλάδες (οι οποίοι είναι πολλοί στο Μπάνγκαλορ). Αν δεν παρθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης στο μέλλον, ενδέχεται η πόλη του Μπάνγκαλορ να μετατραπεί σε ένα νέο Λος Άντζελες.

Ένας άλλος ενδιαφέρον παράγοντας είναι η κατεύθυνση του ανέμου. Ένα σταθερό πρότυπο της κατεύθυνσης του ανέμου έχει παρατηρηθεί στο Μπράνγκαλορ που δείχνει ότι ο άνεμος έχει βορειοανατολική κατεύθυνση από Ιανουάριο έως Απρίλιο και Οκτώβριο έως Δεκέμβριο, αν και φυσά στην αντίθετη κατεύθυνση, που είναι νοτιοδυτικά από Μάιο έως Αύγουστο. Αυτό δίνει μια ένδειξη ότι η μελλοντική βιομηχανική ανάπτυξη της πόλης δεν θα είναι επιτρεπτή στις δύο παραπάνω ζώνες κατεύθυνσης. Διαφορετικά είναι πιθανό ότι οι βιομηχανίες που θα εκπέμπουν ρύπους και οι οποίες θα είναι εγκατεστημένες σε αυτές τις ζώνες, θα προκαλέσουν μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση στην πόλη. Από εδώ και στο εξής οι αρχές της πόλης πρέπει να είναι προσεκτικές στην έκδοση βιομηχανικών αδειών και να ελέγχουν την κατασκευή πολυώροφων κτιρίων.

Λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες χαμηλές θερμοκρασίες και τους ασθενέστερους ανέμους κατά τις πρώτες πρωινές ώρες και τη νύχτα το χειμώνα, η πιθανότητα συχνότητας σχηματισμού του αντίστροφου στρώματος πιθανότατα είναι υψηλή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση της ρύπανσης τις νύχτες ή τις πρωινές ώρες. Αυτή η παρατήρηση θα έχει μια σημαντική σχέση στον εντοπισμό της ρύπανσης που παράγουν οι βιομηχανίες, που μπορεί να προκύψει στο μέλλον.

Η ιζηματοποίηση παίζει επίσης ρόλο στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας με διαδικασίες βροχής και εδαφικής διάβρωσης από πλημμύρες. Η βροχή λαμβάνει χώρα όταν ουσίες που συμμετέχουν στο σχηματισμό των σταγόνων της βροχής και κατόπιν πέφτουν στο έδαφος κατά τη διάρκεια των περιόδων ιζηματοποίησης. Για παράδειγμα ξεχωριστές ουσίες μπορούν να δράσουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης για το σχηματισμό σταγονιδίων και έπειτα να πέσουν από την ατμόσφαιρα όταν τα τελευταία αναπτυχθούν σε ένα μέγεθος ικανό να τις κάνει να πέσουν στο έδαφος. Η εδαφική διάβρωση συμβαίνει όταν συλλέγονται ουσίες από τις σταγόνες της βροχής. Αέρια με σχετικά υψηλή σχέση με το νερό (π.χ. διοξείδιο του θείου) μπορούν να απομακρυνθούν μερικώς από την ατμόσφαιρα με διάβρωση κατά τη διάρκεια των περιόδων ιζηματοποίησης. Η τελευταία όταν γίνεται καθαρισμός της ατμόσφαιρας, παράγει ρύπανση του νερού το οποίο είναι πάλι ένα πρόβλημα. Όσο υπάρχει ενδιαφέρον για την ύλη των αιωρούμενων σωματιδίων, η ιζηματοποίηση μειώνει αποτελεσματικά τη συγκέντρωσή της στον αέρα.

Στην πόλη η ρύπανση που προκαλείται από τα αυτοκίνητα έχει υπερβεί τα όρια που έχουν καθοριστεί από την Κεντρική Ομάδα. Είναι πιο επιβλαβής λόγω της αναλογίας μολύβδου. Η ύλη των αιωρούμενων σωματιδίων και η παρουσία μολύβδου στον αέρα σε εμπορικές περιοχές είναι μεμονωμένη εξαιτίας του μεγάλου αριθμού αυτοκινήτων.

Ένας έλεγχος στα βενζινοκίνητα οχήματα είναι άκρως απαραίτητος. Αφού ελαχιστοποιήσουμε τα οχήματα αυτά, τα αντίστοιχα πετρελαίου μπορούν σιγά σιγά να

μειωθούν, καθώς εκλύουν πολύ καπνό που είναι ενοχλητικός. Οι εναλλακτικοί διακανονισμοί μπορεί να είναι ως ακολούθως :

1. Εισαγωγή ηλεκτρικών τρένων στο εσωτερικό του Μπάνγκαλορ ώστε να παρέχεται οικονομική και άνετη μεταφορά στο κοινό.
2. Η κυβέρνηση μπορεί επίσης να δώσει επαρκή κίνητρα και να ενθαρρύνει σχετικά με δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης του πεδίου των μηχανών που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια.
3. Τέλος ο συνωστισμός των ωρών αιχμής και τα συνεπακόλουθα υψηλά επίπεδα ρύπανσης μπορεί να μειωθούν αλλάζοντας τις κανονικές ώρες εργασίας και εξαπλώνοντας τα εργασιακά ταξίδια. Οι εναλλαγές υπερωριών συνεπάγονται τη δημιουργία μικρών συστηματικών αλλαγών στις ώρες εργασίας των υπαλλήλων ώστε οι λίγο αξιοποιήσιμοι χρόνοι ταξιδιού να χρησιμοποιούνται περισσότερο. Γίνεται κατανοητό ότι αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του συνωστισμού που επικρατεί στις ώρες αιχμής, μεγαλύτερη μέση ταχύτητα και λιγότερη μόλυνση.

Καθώς είναι αδύνατο να κάνουμε έλεγχο στους αέριους ρύπους που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, θα ήταν απαραίτητο να ταυτοποιήσουμε τις πηγές της ρύπανσης, την ενδεχόμενη συμβολή τους σε αυτή και επίσης να μελετήσουμε τον υπάρχοντα εξοπλισμό ελέγχου για την αποδοτικότητά του και να τα υιοθετήσουμε για να ταιριάξουμε την κατάσταση των σωματιδίων. Αυτό περιλαμβάνει τη μελέτη αποτίμησης των εκπομπών από διαφορετικές βιομηχανίες με μια ματιά στην εξακρίβωση της καταλληλότητας του εξοπλισμού ελέγχου της ρύπανσης για τις βιομηχανίες.

Ένα κανονικό πρόγραμμα ελέγχου της ποιότητας του αέρα του Μπάνγκαλορ έχει γίνει από την Ομάδα Ελέγχου Ρύπανσης της πολιτείας του Καρνατάκα. Επί του παρόντος η Ομάδα έχει λάβει τρεις παραμέτρους υπόψη : αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη, διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου και ανόργανος μόλυβδος για κανονικό έλεγχο. Επίσης είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν άλλες παράμετροι όπως υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα κλπ. Αυτό είναι σημαντικό γιατί το Μπάνγκαλορ έχει αναπτυχθεί σε μια μεγάλη βιομηχανική πόλη με διαφορετικούς τύπους βιομηχανιών που έχουν ήδη εγκατασταθεί και με σκοπό να εγκατασταθούν περισσότερες. Έχει έναν πληθυσμό περίπου τεσσάρων εκατομμυρίων με ένα μεγάλο αριθμό λεωφορείων, φορτηγών, μηχανοκίνητων και άλλων οχημάτων για την παροχή υπηρεσιών στις ανάγκες του μεγάλου πληθυσμού.

Θα ήταν κατάλληλο σε αυτό το σημείο να προτείνουμε μελέτες σχετικά με την ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια του χειμώνα που πιθανότατα είναι η πιο ευαίσθητη



εποχή για συγκέντρωση ρύπων. Αυτό αποδεικνύεται από τη μελέτη μετεωρολογικών παραγόντων όπως δείγμα ανέμου, θερμοκρασία και βροχόπτωση για μια χρονική περίοδο στο Μπάνγκαλορ. Ο ισχυρισμός για άλλες πόλεις της Ινδίας είναι επίσης αληθινός όπου οι επιπτώσεις της ρύπανσης πιστεύεται ότι είναι χειρότερες την περίοδο του χειμώνα. Η αποτίμηση του καπνού από τα βαρέα οχήματα θα ήταν άλλη μια σπουδαία συμβολή στον έλεγχο των μελλοντικών προβλημάτων που θα δημιουργήσει.

### 11.5 Το ατύχημα του Τσέρνομπιλ

Τις πρωινές ώρες στις 26 Απριλίου του 1986 συνέβη το χειρότερο ατύχημα στην ιστορία της πυρηνικής ενέργειας στο εργοστάσιο V.I. Lenin κοντά στο Τσέρνομπιλ στην Ουκρανία, 110 χλμ βόρεια του Κιέβου. Η παράβλεψη των διαδικασιών ασφαλείας του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια ενός παράνομου πειράματος σε χαμηλή ισχύ σε συνδυασμό με σοβαρά σχεδιαστικά λάθη στον αντιδραστήρα, οδήγησαν σε μια καταστροφική έκρηξη και στην παραλίγο τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα. Η απελευθέρωση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα προκάλεσε εκτεταμένη μόλυνση στην τότε Σοβιετική Ένωση και στη Βόρεια Ευρώπη, προσβάλλοντας χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Επί του παρόντος παραπάνω από τη μισή πυρηνικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της Σοβιετικής Ένωσης παράχθηκε από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες τύπου RBMK 1000, τέσσερεις από τους οποίους ήταν ενεργοί στο εργοστάσιο του Τσέρνομπιλ. Κάθε αντιδραστήρας έχει την ικανότητα να παράγει 3.200 MW θερμικής ενέργειας, η οποία μπορεί μετά να μετατραπεί σε 1.000 MW ηλεκτρικής ενέργειας από τις στροβιλογεννήτριες. Παρόλα αυτά αυτοί οι τύποι αντιδραστήρα οι οποίοι αντιπροσωπεύουν μια τροποποίηση του σχεδίου που χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή πλουτωνίου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή όπλων στη Σοβιετική Ένωση, έχουν πολλά σχεδιαστικά σφάλματα. Για παράδειγμα έχουν μια προβληματική αστάθεια στη χαμηλή ισχύ, σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες των ΗΠΑ, δεν έχουν ειδικό προστατευτικό περίβλημα το οποίο είναι να περιορίζει τις ραδιενεργές διαρροές. Αυτά τα ελαττώματα έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην πυρηνική καταστροφή του Τσέρνομπιλ.

Στον αντιδραστήρα του τύπου RBMK 1000 το υγρό νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό, μεταφέροντας τις μεγάλες ποσότητες θερμότητας που παράγεται για μετατροπή σε ηλεκτρική ισχύ από τις στροβιλογεννήτριες του εργοστασίου. Παρόλα

αυτά σε αυτό το σχέδιο ορισμένο από το υγρό νερό ατμοποιείται. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (*Light Water Reactors, LWR*) που χρησιμοποιούνται στις ΗΠΑ, όπου η εφαρμογή διατηρεί το νερό στην υγρή του φάση. Το πρόβλημα με τον ατμό είναι ότι είναι λιγότερο αποδοτικός στην απορρόφηση νετρονίων από ότι το υγρό νερό. Συνεπώς μια αύξηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα RBMK 1000 αυξάνει το ποσοστό παραγωγής ατμού και έτσι δημιουργούνται περισσότερα νετρόνια διαθέσιμα για την επίτευξη της πυρηνικής διάσπασης.

Η σειρά των γεγονότων που οδήγησαν στην πυρηνική καταστροφή του Τσέρνομπιλ ξεκίνησε με μια απόφαση διεξαγωγής ενός πειράματος κατά τη διάρκεια μιας ενδιάμεσης συντήρησης στον αντιδραστήρα νούμερο 4. Ο συγκεκριμένος που ήταν ο νεότερος ήταν ενεργός για περίπου δύο χρόνια. Στις 1 π.μ. στις 25 Απριλίου του 1986, η διαδικασία της σταδιακής μείωσης της ισχύος ξεκίνησε σε αυτόν τον αντιδραστήρα. Παρά την κανονική του θερμική έξοδο των 3.200 MW, μια έξοδος μεταξύ 700 και 1.000 MW ήταν απαιτούμενη για το πείραμα χαμηλής ισχύος. Στο επόμενο προπαρασκευαστικό στάδιο, το σύστημα άμεσης ψύξεως του πυρήνα (*Emergency Core Cooling System, ECCS*) αποσυνδέθηκε στις 2 μ.μ., δηλαδή την στιγμή που το εργοστάσιο λειτουργούσε με την μισή ισχύ. Παρόλα αυτά οι ανάγκη ηλεκτροδότησης της κοντινής πόλης του Τσέρνομπιλ καθιστούσε απαραίτητη τη συνέχιση παραγωγής ισχύος σε αυτό επίπεδο για ακόμη 9 ώρες. Κατά την περίοδο αυτή το ECCS παράμενε εκτός λειτουργίας.

Η διαδικασία μείωσης ισχύος ξανάρχισε στις 11:10 μ.μ. Αντί να φτάσει το απαιτούμενο επίπεδο ισχύος εξόδου για το πείραμα, έφτασε μόλις 30 MW θερμικής ενέργειας. Η εκτεταμένη ψύξη του αντιδραστήρα σήμαινε λανθασμένο κλείσιμο και μία μεγάλη παύση πριν την επανεκκίνηση. Έτσι για να συγκρατηθεί το επίπεδο ισχύος του αντιδραστήρα 4 σταθερό, οι χειριστές άρχισαν να αποσύρουν τις ράβδους ελέγχου από τον πυρήνα. Αυτή η ενέργειά τους ήταν αντίθετη με τις οδηγίες ασφαλείας. Σχεδόν όλες από τις 211 ράβδους ελέγχου αποσύρθηκαν μέσα στις επόμενες 2 ώρες, αυξάνοντας το επίπεδο ισχύος σε 200 MW θερμικής. Με μόνο λίγες ράβδους τοποθετημένες και όλα τα συστήματα άμεσης προστασίας εκτός λειτουργίας, ο αντιδραστήρας βρισκόταν σε πολύ ασταθή κατάσταση. Παρόλα αυτά στις 1:23 π.μ. στις 26 Απριλίου το προγραμματισμένο πείραμα ξεκίνησε. Η διάρκειά του ήταν μόνο 40 δευτερόλεπτα.

Στις 1:23:40 το επίπεδο ισχύος στον αντιδραστήρα 4 ανήλθε απότομα. Προσπάθειες ελέγχου της υπερθέρμανσης με εισαγωγή των ράβδων ελέγχου αποδείχθηκε μάταιη. Οι Σοβιετικές ηλεκτρονικές εξομοιώσεις έχουν δείξει ότι μέσα σε

2,5 δευτερόλεπτα το επίπεδο ισχύος στον αντιδραστήρα 4 ανήλθε στα 3.800 MW θερμικής και μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα σε 120 φορές της κανονικής ισχύος εξόδου 3.200 MW θερμικής. Τα καυτά περιεχόμενα από την τήξη των ράβδων καυσίμου διέρρευσαν στο υπερθερμασμένο νερό, προκαλώντας την εξάτμισή του. Ο καυτός ατμός αντέδρασε με την επικάλυψη ζirkονίου των ράβδων καυσίμου και με τον επιβραδυντικό γραφίτη για την παραγωγή αέριου υδρογόνου. Η αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του αντιδραστήρα από την εκτεταμένη παραγωγή ατμού εκτόξευσε το τιμιεντένιο περίβλημα. Η επακόλουθη εισροή αέρα ανέφλεξε το υδρογόνο και προκάλεσε τεράστια έκρηξη, ανατινάζοντας θραύσματα και ραδιενεργό υλικό σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000 μέτρων στον ουρανό. Καυτά κομμάτια του πυρήνα διασκορπίστηκαν πάνω από τη θέση του αντιδραστήρα, προκαλώντας ένα αριθμό πυρκαγιών. Ραδιενεργά υλικά από αυτές και την ίδια τη έκρηξη διασκορπίστηκαν στην ατμόσφαιρα για να μεταφερθούν από τους επικρατούντες ανέμους.

Στη Δύση, το πρώτο περιστατικό μαζικής ελευθέρωσης ραδιενεργού υλικού συνέβη όταν ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα εκπομπής αναφέρθηκαν στην Σουηδία το πρωί της 28<sup>ης</sup> Απριλίου και σύμφωνα με την κατεύθυνση των ανέμων η πηγή προέρχονταν από την Σοβιετική Ένωση. Πάντως δεν ήταν πριν από το απόγευμα της ίδιας μέρας όταν τα νέα του ατυχήματος του Τσέρνομπιλ δημοσιεύτηκαν τελικώς από την Σοβιετική Ένωση. Το μέγεθος της καταστροφής στο Τσέρνομπιλ και οι συνέπειές του το έκαναν με διαφορά ως το μεγαλύτερο ατύχημα που έχει συμβεί ποτέ στην βιομηχανία πυρηνικής ισχύος.

Η άμεση αντίδραση των σοβιετικών αρχών ήταν να στείλουν τοπικούς πυροσβέστες να σβήσουν τις 30 ή και παραπάνω πυρκαγιές που ξέσπασαν γύρω από το συγκρότημα του αντιδραστήρα. Αυτές οι εξωτερικές φωτιές σβήστηκαν στις 5:00 π.μ. την 26<sup>η</sup> Απριλίου, εμποδίζοντας έτσι την εξάπλωσή τους στον αντιδραστήρα 3. Τα τραγικά αποτελέσματα των γεγονότων εκείνης της νύχτας ήταν 31 νεκροί και πάνω από 200 που εμφάνισαν συμπτώματα που προέρχονταν από έντονη ακτινοβολία.

Μέσα στα χαλάσματα του αντιδραστήρα 4 οι πυρκαγιές που προέρχονταν από τον γραφίτη συνέχιζαν να μαίνονται, στέλνοντας ακόμα περισσότερο ραδιενεργό υλικό στην ατμόσφαιρα. Η επόμενη προτεραιότητα ήταν η αποτροπή διαφυγής ακτινοβολίας σκεπάζοντας τον καιγόμενο πυρήνα του αντιδραστήρα. Την 27<sup>η</sup> Απριλίου ελικόπτερα άρχισαν να ρίχνουν περίπου 5.000 τόνους δολομίτη, λάσπης, άμμου, βόριου και μόλυβδου στο περίβλημα του αντιδραστήρα. Ταυτόχρονα έγινε έγχυση υγρού αζώτου, ως ψυκτικό, κάτω από το θόλο του αντιδραστήρα. Αυτά τα μέτρα τελικά πέτυχαν να καλύψουν τον πυρήνα του αντιδραστήρα και να μειώσουν τη διαρροή ακτινοβολίας σε

ακτίνα 10 χλμ από το Τσέρνομπιλ δεν ειδοποιήθηκαν να εκκενώσουν τις εστίες τους παρά μόνο μετά από 36 ώρες αφού συνέβη το ατύχημα. Περίπου μια εβδομάδα αργότερα αυτή η ζώνη εκκένωσης επεκτάθηκε στα 30 χλμ φτάνοντας το συνολικό αριθμό των ανθρώπων που εγκατέλειψαν την περιοχή σε 135.000.

Η συνολική ποσότητα ακτινοβολίας που ελευθερώθηκε από την έκρηξη εκτιμήθηκε της τάξης των 50.000.000 Κιουρί σύμφωνα με τους Ρώσους ειδικούς. Αντίθετα οι ειδικοί της Δύσης εκτιμούν ότι η ακτινοβολία ήταν τριπλάσιου μεγέθους. Αρχικά άνεμοι από τα Νοτιοανατολικά ωθούσαν το ραδιενεργό σύννεφο από το Τσέρνομπιλ στην υπόλοιπη Ουκρανία, Λευκορωσία, Λετονία και Λιθουανία. Κατόπιν πέρασε στην Πολωνία, Νότια Φινλανδία και Σκανδιναβία και τελικά έφτασε μέχρι την κεντρική Ευρώπη και τη Βρετανία. Το ποσό των ραδιενεργών ρύπων σε αυτές τις χώρες κυρίως καθοριζόταν από ύπαρξη ισχυρών βροχοπτώσεων, οι οποίες καθάριζαν τα σύννεφα από τη δηλητηριώδη σκόνη. Σαν αποτέλεσμα, ορισμένες περιοχές, για παράδειγμα το Βόρειο και Δυτικό τμήμα της Βρετανίας, δέχτηκαν τεράστιες ποσότητες ραδιενεργών ρύπων. Τελικά η ραδιενέργεια από το Τσέρνομπιλ εντοπίστηκε ακόμα και στη Βόρεια Αμερική.

Οι μακροχρόνιες επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπινο πληθυσμό είναι αδύνατον να εκτιμηθούν. Εκατοντάδες περιπτώσεις εμπλέκονται στην αποτίμηση των μεμονωμένων εκθέσεων σε ακτινοβολία όπως η τοποθεσία, διατροφή και αν έβρεχε ή όχι όταν το ραδιενεργό σύννεφο διέσχισε την περιοχή. Εκτιμήσεις για το συνολικό αριθμό περιπτώσεων καρκίνου που αναμένονται παγκοσμίως τα επόμενα 70 χρόνια ποικίλουν από μερικές εκατοντάδες μέχρι 100.000. Πάντως στην πρώην Σοβιετική Ένωση ορισμένοι άνθρωποι συνεχίζουν να εκτίθενται σε επίπεδα ακτινοβολίας πάνω από τα επιτρεπτά, από εξωτερικές πηγές και την κατανάλωση μολυσμένων τροφίμων.

Οι τρεις εναπομείναντες αντιδραστήρες συνεχίζουν να λειτουργούν παρότι το εργοστάσιο έχει κριθεί ακατάλληλο από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας και κυρίως ο αντιδραστήρας είναι επικίνδυνος. Επιπρόσθετα σοβαρά ρήγματα έχουν εμφανιστεί στο τσιμεντένιο περίβλημα που εσωκλείει τον αντιδραστήρα 4.

## 12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.1

Μεθάνιο καίγεται με περίσσιο αέρα 20% και υγρασία, 0,0116 mol /moll ξηρού αέρα. Ποίοι είναι οι ρυθμοί ροής του καυσίμου αέρα, η σύσταση και ο ρυθμός ροής των προϊόντων καύσης;

ΛΥΣΗ:

Εδώ διαλέγουμε ως βάση 1 moll μεθανίου έτσι ώστε όλες οι υπολογιζόμενες ροές να είναι ανά moll μεθανίου  $E=0,20$  και  $x=0,0116$ , δηλαδή :

$$\eta_{CO_2} = x = 1$$

$$\eta_{H_2O \text{ καύσης}} = \frac{y}{2} = 2$$

$$\eta_{στοιχ} = x + \frac{y}{4} = 1 + \frac{4}{4} = 2$$

$$\eta_{στεγνώ} = \eta_{στοιχ} \left( \frac{1+E}{0,21} \right) = 2 \left( \frac{1,2}{0,21} \right) = 11,43$$

$$\eta_{συνολικό} = \eta_{στεγνώ} (1+x) = 11,43 \cdot 1,0116 = 11,56$$

$$\eta_{N_2} = 0,79 \eta_{στεγνώ} = 0,97 \cdot 11,43 = 9,03$$

$$\eta_{O_2} = E \eta_{στοιχ} = 0,2 \cdot 2 = 0,4$$

$$\eta_{H_2O \text{ συνολικό}} = \eta_{H_2O \text{ καύσης}} + X \eta_{στεγνώ} = 2 + 0,0116 \cdot 11,43 = 2,13$$

$$\eta_{συνολικό \text{ εξόδου}} = 1 + \frac{4}{2} + 2 \left[ \left( \frac{1+0,2}{0,21} \right) (1+0,0116) - 1 \right] = 12,56$$

Μπορούμε να ελέγξουμε αυτήν την λύση προσθέτοντας τα molls του κάθε στοιχείου  $1+2,13+9,03+0,4 = 12,56$ . Έτσι για ένα moll μεθανίου υπάρχουν 12,56 molls από παραγόμενα αέρια. Το κλάσμα των moll από οποιοδήποτε συστατικό των παραγομένων αερίων είναι :

$$y_i = \frac{\eta_i}{\eta_{συνολικό \text{ εξόδου}}} \quad (12.1)$$

Παρατηρούμε ότι εδώ  $y_i$  είναι τα κλασματικά moll του συστατικού  $i$ , χωρίς να μπερδεύεται με το  $y$  στο  $C_xH_y$ . Για παράδειγμα το κλασματικό moll για το  $CO_2$  είναι  $1/12,56=0,0796$ .

Αυτή η περίπτωση στην οποία μπορούμε να γράψουμε ένα μοριακό τύπο για το καύσιμο που περιέχει μόνο C και H είναι πιο εύκολη. Για στερεά καύσιμα (άνθρακα,

ξύλο, βιομάζα) η σύνθεση του καυσίμου είναι συνήθως εκφραζόμενη ως βάρος των C, H, N, S, O και στάχτης σε ξερή κατάσταση. Καταρχήν κάποιος θα μετέτρεπε όλα αυτά σε ένα τύπο σε σχέση με τα  $C_xH_yN_z$  κ.λ.π αλλά αυτό γίνεται σπάνια. Η κοινή διαδικασία, αναφέρεται παρακάτω.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.2

Ένας τυπικός άνθρακας έχει την ακόλουθη σύσταση κατά βάρος: υδρογόνο 5,0%, άνθρακα 75,8%, άζωτο 1,5 %, θείο 1,6%, οξυγόνο 7,4%, στάχτη 8,7%. Καίγεται με 20% περίσσιο αέρα με υγρασία 0,0116 mol/mol ξηρού αέρα και πλήρη καύση. Καθορίστε το ποσό και τη σύνθεση που παράχθηκε.

ΛΥΣΗ:

Αντί να διαλέξουμε ένα mol για τροφοδοσία διαλέγουμε 100 gr ξηρού άνθρακα. Τότε τα mols του κάθε συστατικού είναι  $\eta_c = 75,8/12 = 6,32$  ,  $\eta_H = 5,0/1 = 5,0$ ,  $\eta_{N_2} = 1,2/28 = 0,043$ ,  $\eta_s = 1,6/32 = 0,050$  και  $\eta_{O_2} = 7,4/32 = 0,231$ . Βλέπουμε ότι τα mols του  $CO_2$ ,  $H_2O$  και  $SO_2$  σχηματίστηκαν από την καύση είναι 6,32 ,  $5/2 = 2,50$  και 0,050 αντίστοιχα. Το άζωτο θεωρείται ότι βγαίνει ως  $N_2$  έτσι ώστε τα mols του αζώτου από το καύσιμο είναι 0,043. Τα mols του οξυγόνου που χρειάζονται είναι αυτά που χρειάζονται για να οξειδώσουν τα C, H και S, λιγότερα από αυτά που περιέχονται στο καύσιμο. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε :

$$\eta_{στοιχ} = \eta_c + \frac{\eta_H}{4} + \eta_s - \eta_{O_2} = 6,32 + \frac{5}{4} + 0,050 - 0,231 = 7,39 \frac{mol}{100gr \text{ ξηρού άνθρακα}}$$

και

$$\eta_{στεγνώ} = \eta_{στοιχ} \left( \frac{1+E}{0,21} \right) = 7,39 \cdot \frac{1,2}{0,21} = 42,23 \frac{mol}{100gr \text{ ξηρού άνθρακα}}$$

$$\eta_{συνολικώ} = \eta_{ξηρού} (1+x) = 42,23 \cdot 1,0116 = 42,72 \frac{mol}{100gr \text{ ξηρού άνθρακα}}$$

$$\eta_{N_2} = 0,79 \eta_{ξηρού} + \eta_{\text{αζωτο καυσίμου}} = 0,79 \cdot 42,23 + 0,043 = 33,40 \frac{mol}{100gr \text{ ξηρού άνθρακα}}$$

$$\eta_{O_2} = E \eta_{στοιχ} = 0,2 \cdot 7,39 = 1,48 \frac{mol}{100gr \text{ ξηρού άνθρακα}}$$

$$\eta_{\text{H}_2\text{O, συνολικό}} = \eta_{\text{H}_2\text{O, καύσις}} + X\eta_{\text{ξηρό}} = 2,50 + 0,0116 \cdot 42,23 = 2,99 \frac{\text{mol}}{100 \text{ gr ξηρού άνθρακα}}$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{συνολικό εξόδου}} &= \eta_C + \frac{\eta_H}{2} + \eta_S + \eta_{\text{καυσίμου N}_2} + \eta_{\text{στοιχ}} \left[ \left( \frac{1+E}{0,21} \right) (1+X) - 1 \right] = \\ &= 6,32 + 2,50 + 0,05 + 0,043 + 7,39 \left[ \left( \frac{1,2}{0,21} \right) \cdot 1,0116 - 1 \right] = 44,24 \frac{\text{mol}}{100 \text{ gr ξηρού άνθρακα}} \end{aligned}$$

Για έλεγχο προσθέτουμε τα molls του κάθε συστατικού στη ροή εξόδου και θα βρούμε τα ίδια αποτελέσματα. Μπορούμε να υπολογίσουμε τον τύπο των moll (τις% κατά όγκο) οποιουδήποτε συστατικού σε αυτή την καύση αερίων διαιρώντας τον αριθμό των moll με το γενικό σύνολο των moll. Έτσι για το παράδειγμα 12.2 :

$$y_{\text{SO}_2} = \frac{\eta_{\text{SO}_2}}{\eta_{\text{συνολικό εξόδου}}} = \frac{0,05}{44,24} = 0,001130 = 1130 \text{ ppm}$$

Οι περισσότεροι άνθρακες διατίθενται με 1 έως 5% υγρασία, κάποιοι άνθρακες έχουν μέχρι και 35% υγρασία. Οι άνθρακες μπορούν να απορροφήσουν υγρασία από την βροχή ή το χιόνι στους αποθηκευτικούς χώρους. Μερικοί άνθρακες αφυγραίνονται πριν την καύση, οι περισσότεροι όμως τροφοδοτούνται υγροί. Το παραπάνω παράδειγμα θα μπορούσε να τροποποιηθεί προσθέτοντας την υγρασία που περιέχεται στον άνθρακα και που υπό μορφή υδρατμών φεύγει από το λέβητα μαζί με τα καυσαέρια.

Βλέπουμε ότι αυτό το είδος υπολογισμού είναι βαρετό αλλά είναι εύκολο να γραφεί ως πρόγραμμα για κομπιούτερ.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.3

Υπολογίστε το αναμενόμενο κλάσμα CO moll για την καύση βενζίνης με  $x=8$ ,  $y=17$  και με παροχή αέρα 90 % από την απαιτούμενη για πλήρη καύση.

ΛΥΣΗ:

Εδώ η παροχή οξυγόνου είναι :

$$n_{\text{οξυγόνου}} = 0,9 n_{\text{στοιχ οξυγόνου}} = \left( x + \frac{y}{4} - z \right) = 0,9 \left( x + \frac{y}{4} \right)$$

Από το οποίο μπορούμε να γράψουμε :

$$\text{και } z = 0,1 \left( x + \frac{y}{4} \right) = 0,1 \left( 8 + \frac{17}{4} \right) = 1,225$$

$$y_{CO} = \frac{2 \times 1,225}{3,76 \left[ 8 + (17/4) - 1,225 \right] + 8 + (17/2)} = 0,042 = 4,2\%$$

#### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.4

Υπολογίστε το A/K και Φ για το παράδειγμα 12.3

ΛΥΣΗ:

Ο λόγος A/K είναι πάντοτε δηλούμενος σε όρους βάρους στην βιβλιογραφία των Μ.Ε.Κ. και στη γενική του μορφή είναι :

$$\frac{A}{K} = \frac{[x + (y/4) - z](32 + 3,76 \cdot 28)}{12x + 1 \cdot y} \quad (12.2)$$

όπου 32 και 28 είναι τα μοριακά βάρη των  $O_2$  και  $N_2$  ( $3,76 = 0,79/0,21$ ) 12 και 1 τα ατομικά βάρη των C και H αντίστοιχα. Γι' αυτό το παράδειγμα έχουμε :

$$\frac{A}{K} = \frac{(8 + 17/4 - 1,225)(32 + 3,76 \cdot 28)}{12 \cdot 8 + 1 \cdot 17} = 13,39 \quad \text{και}$$

$$\left( \frac{A}{K} \right)_{\text{στοιχειομετρικό}} = \frac{(8 + 17/4)(32 + 3,76 \cdot 28)}{12 \cdot 8 + 1 \cdot 17} = 14,88$$

$$\text{ισοδύναμος λόγος} = \phi = \frac{(A/F)_{\text{στοιχειομετρικό}}}{(A/F)_{\text{βασικό}}} = \frac{14,88}{13,39} = 1,11 = \frac{1}{0,9}$$

Αν υπήρχε παραπάνω από το στοιχειομετρικό ποσό οξυγόνο, τότε z όπως έχουμε ορίσει θα ήταν αρνητικός αριθμός και το Φ θα ήταν λιγότερο από 1,0. Μπορούμε επίσης να το γράψουμε με όρους όπως της σχέσης της παραπάνω παραγράφου :

$$\text{ισοδύναμος λόγος} = \phi = \frac{n_{\text{στοιχειομετρικό οξυγόνο}}}{n_{\text{πραγματικό οξυγόνο}}} = \frac{1}{1 + E} \quad (12.3)$$



Στην παλαιότερη βιβλιογραφία των Μ.Ε.Κ αναφέρονται περισσότερο σε λόγους A/K. Στα σύγχρονα και στα θεωρητικά βιβλία των Μ.Ε.Κ αναφέρονται κυρίως σε λόγους  $\Phi$ . Ο λόγος A/F έχει το πλεονέκτημα να κανονίζει με τις φυσικές ποσότητες του συστήματος αέρα-καυσίμου. Έχει το μειονέκτημα όμως ότι το A/K είναι συνάρτηση του καυσίμου, πχ εξαρτάται από τον λόγο y/x του παραδείγματος 12.4. Για μια συγκεκριμένη μηχανή που λειτουργεί με δύο διαφορετικές βενζίνες, έχει πρακτική ισοδύναμη συμπεριφορά για ίσες τιμές του  $\Phi$ , αλλά όχι για ίσες τιμές του A/K. Σχετικές ποσότητες που εμφανίζονται είναι :

$$\text{Λόγος καυσίμου - αέρα} = \frac{1}{\text{λόγος αέρα - καυσίμου}} = \frac{1}{A/K} = K/A \quad (12.4)$$

Και  $\lambda=1/\Phi$

Αν επαναλάβουμε το παράδειγμα 12.4 για διάφορες τιμές του  $\Phi$  θα βρούμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 12.1. Βλέπουμε ότι για οποιοδήποτε ισοδύναμο λόγο μικρότερο ή ίσο με 1,0 υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να κάψει όλο τον άνθρακα σε CO<sub>2</sub> και δεν υπάρχει καθόλου CO. Αυξάνοντας το  $\Phi$  η υπολογιζόμενη συγκέντρωση CO αυξάνεται γρήγορα.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.5

Υπολογίστε τη συγκέντρωση των υδρογονανθράκων που αναμένεται στα καυσαέρια μιας μηχανής με διάμετρο εμβόλου 6 cm, διαδρομή εμβόλου 5 cm και ζώνη απόσβεσης πάχους 0,2 m σε  $\Phi=1$ .

ΛΥΣΗ:

Εδώ υποθέτουμε ότι όλη η επιφάνεια του κυλίνδρου και η κεφαλή έχουν ζώνη απόσβεσης. Η κορυφή του εμβόλου δεν ψύχεται και δεν παίζει σπουδαίο ρόλο στην απόσβεση της φλόγας. Ο λόγος του όγκου της ζώνης απόσβεσης με τον όγκο του θαλάμου καύσης με διάμετρο D, διαδρομή εμβόλου L και ζώνη πάχους t (υποθέτοντας επίπεδη κεφαλή) είναι :

$$\left( \frac{\text{Σύνολο του όγκου απόσβεσης στον συνολικό όγκο}}{\text{}} \right) = \frac{tA}{V} = \frac{t \left( \frac{\pi}{4} D^2 + \pi DL \right)}{\frac{\pi}{4} D^2 L} = t \left( \frac{1}{L} + \frac{4}{D} \right) \quad (12.5)$$

$$= 0,02cm \left( \frac{1}{5cm} + \frac{4}{6cm} \right) = 0,017 = 1,7\%$$

Έτσι θα περιμέναμε 1,7% από το σύνολο των υδρογονανθράκων του καυσίμου να παρουσιάζεται στην εξάτμιση. Από τη σχέση (11) για  $z=0$ ,  $x=8$ ,  $y=17$  και  $\Phi=1$ , βρίσκουμε ότι για ένα mol καυσίμου έχουμε :

$$\left( \begin{array}{l} \text{Συνολικός αριθμός} \\ \text{mol προϊόντων} \\ \text{καύσης} \end{array} \right) = n_{\text{συνολικά}} = 3,76 \left( x + \frac{y}{4} \right) + x + \left( \frac{y}{2} \right)$$

$$= 3,76 \left( 8 + \frac{17}{4} \right) + 8 + \left( \frac{17}{2} \right) = 32,5 \frac{\text{mol προϊόντων καύσης}}{\text{mol καυσίμου}}$$

και

$$\left( \begin{array}{l} \text{Κλάσμα mol άκαυστου} \\ \text{καυσίμου στην εξάτμιση} \end{array} \right) = y_{\text{άκαυστο}} = \frac{0,017 \frac{\text{άκαυστα mol}}{\text{mol καυσίμου}}}{32,3 \frac{\text{mol προϊόντων καύσης}}{\text{mol καυσίμου}}} = 5,23 \cdot 10^{-4} = 523 \text{ ppm}$$

Αυτός ο υπολογισμός είναι πάρα πολύ απλουστευμένος σε σχέση με το τι ακριβώς γίνεται μέσα σε μια μηχανή, αλλά :

1. Το πάχος της απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε στο παράδειγμα είναι μέσα στις τιμές που βασικά μετρήθηκαν σε ειδικές εργαστηριακές μηχανές.
2. Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων είναι μέσα στα όρια αυτών που μετρούνται συνήθως.
3. Ο υπολογισμός δείχνει ότι περιμένουμε υψηλότερες συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων στην εξάτμιση, στις μικρές μηχανές, πράγμα που παρατηρείται.

Αυτό το παράδειγμα υποθέτει ότι οι υδρογονάνθρακες στην εξάτμιση έχουν την ίδια σχηματική σύνθεση με αυτούς του καυσίμου. Ο πίνακας 12.1 δείχνει την τυπική σύνθεση των υδρογονανθράκων σε αμεταχείριστες εξατμίσεις αυτοκινήτων. Το μεθάνιο, το αιθάνιο, η ασετιλίνη, το προπυλένιο, η φορμαλδεΰδη και άλλες αλδεΰδες δεν υπάρχουν στο καύσιμο αλλά έχουν σχηματιστεί από ημιτελή καύση, κυρίως στη ζώνη απόσβεσης. Το βενζόλιο, το τολουένιο και το ξυλένιο είναι παρόντα στο καύσιμο. Αυτά είναι τα συστατικά της βενζίνης με τις πιο χαμηλές ταχύτητες καύσης και γι' αυτό έχουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να περάσουν άκαυστα στην εξάτμιση.

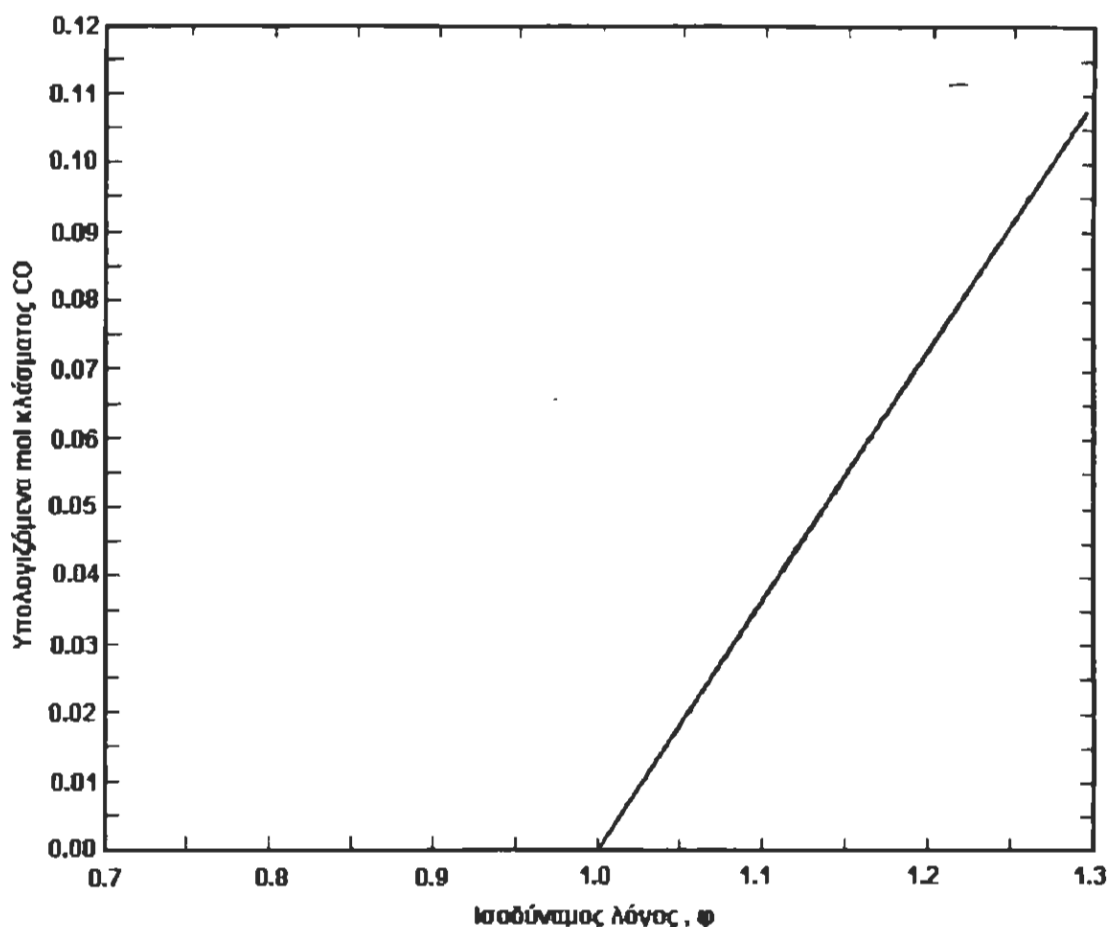
Συνήθως η σύσταση των υδρογονανθράκων μετρείται με χρωματογράφο και τα βάρη των διαφόρων συστατικών αθροίζονται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 12.1

Κύριοι υδρογονάνθρακες	"άκαυστοι"	Ppm
Μεθάνιο		170
Αιθάνιο		160
Ασετιλίνη		120
Φορμαλδεϋδη		100
Τολουένιο		55
Αλδεϋδες, εξαιρείται η Φορμαλδεϋδη		53
Ξυλένιο		50
Προπυλένιο		49
C <sub>4</sub> Αλκένιο		36
C <sub>5</sub> Αλκένιο		35
Βενζόλιο		22

Αυτός ο υπολογισμός δείχνει ότι το ποσοστό των υδρογονανθράκων στην εξάτμιση οχημάτων είναι ανεξάρτητο του λόγου αέρα – καυσίμου. Η παρατήρηση είναι πιο περίπλοκη. Το σχήμα 12.1 δείχνει σχηματικά τις τυπικές εκπομπές NO<sub>x</sub>, CO, HC από μηχανές αυτοκινήτων συναρτήσεως του  $\Phi$ . Για τιμές του  $\Phi$  μεγαλύτερες του 1 βλέπουμε ότι για το CO η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή στο σχήμα 12.1.

Για τους HC βλέπουμε ότι για τιμές του  $\Phi$  μικρότερες του 1, οι τιμές απεικονίζονται με μια ομαλή καμπύλη λίγο πολύ συνεχή, αλλά για τιμές του  $\Phi$  μεγαλύτερες του 1 οι εκπομπές HC αυξάνονται απότομα. Όταν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να ικανοποιήσει τις ανάγκες και του άνθρακα και του υδρογόνου στο καύσιμο, θα βρούμε CO, H<sub>2</sub> και άκαυστους HC στην εξάτμιση. Και τα τρία αυξάνονται καθώς το  $\Phi$  γίνεται μεγαλύτερο. (Τα H<sub>2</sub>, HC και CO ανταγωνίζονται για το διαθέσιμο O<sub>2</sub>. Και τα τρία αυξάνονται καθώς η ανεπάρκεια του οξυγόνου αυξάνεται). Μπορούμε επίσης να δούμε από το σχήμα 7.7.1 ότι η συγκέντρωση CO δεν γίνεται μηδενική καθώς το  $\Phi$  γίνεται μηδέν αλλά συνεχίζει σε χαμηλές τιμές ακόμη και όταν υπάρχει περίσσιος αέρας στα καυσαέρια.



Σχήμα 12.1 Υπολογισμένο CO, συγκέντρωση στην εξάτμιση για καύσιμο με μέση σύνθεση  $C_8H_{17}$  υποθέτοντας ότι είναι το μόνο αέριο το οποίο δεν είναι πλήρως οξειδωμένο.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.6

Από το σχήμα 12.2 υπολογίστε τη θερμοκρασία πριν την αρχή της καύσης, τη θερμοκρασία στο καιγόμενο αέριο ακριβώς μετά την αρχή της καύσης και τη θερμοκρασία στο καιγόμενο αέριο στο τέλος της καύσης

ΛΥΣΗ:

Το σχήμα δείχνει ότι η καύση αρχίζει περίπου 15 μοίρες πριν το Άνω Νεκρό Σημείο (Α.Ν.Σ) και συνεχίζει μέχρι περίπου 15 μοίρες μετά το Α.Ν.Σ. Στις 15 μοίρες πριν το Α.Ν.Σ. το έμβολο έχει διανύσει περίπου το 98% της διαδρομής του από το Κάτω Νεκρό Σημείο (Κ.Ν.Σ.). Έτσι μπορούμε με ασφάλεια να αγνοήσουμε περαιτέρω διαδρομή για το έμβολο και υποθέτουμε ότι το αέριο μέσα στον κύλινδρο έχει συμπιεστεί από το δηλωμένο λόγο συμπίεσης 7 : 1. Από τη θερμοδυναμική, για αδιαβατική συμπίεση βρίσκουμε :

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{R:(C_p-R)}$$

Λύνοντας με αντικατάσταση ως προς  $T_2$  βρίσκουμε :

$$T_2 = 528^{\circ}R \cdot (7)^{R/(3.5R-R)} = 1154^{\circ}R = 694^{\circ}F = 641K$$

Η θερμοκρασία που αυξάνει κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους της διαδικασίας καύσης, η οποία υποθέτουμε ότι είναι αδιαβατική και ότι συμβαίνει σε σταθερή πίεση, δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta T = \frac{m_{\text{καυσίμου}} \Delta h_{\text{καύσης}}}{m_{\text{προϊόντων καύσης}} C_{P, \text{προϊόντων καύσης}}} \quad (12.6)$$

Για μια τυπική βενζίνη με  $\Delta h_{\text{καύσης}}$  περίπου 19,020 Btu/lbm και  $C_{P, \text{προϊόντα καύσης}}$  περίπου 0,33 Btu/lbm F έχουμε :

$$\Delta h = \frac{1 \text{ lbm καυσίμου} \cdot 19,020 \text{ Btu/lbm}}{\left( 15,88 \frac{\text{lbm προϊόντων καύσης}}{\text{lbm καυσίμου}} \right) \left( 0,33 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^{\circ}F} \right)} = 3629^{\circ}F = 2016K$$

Η θερμοκρασία που αυξάνει κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους της διαδικασίας καύσης και την οποία υποθέτουμε ότι είναι αδιαβατική και συμβαίνει σε σταθερή πίεση, δίνεται από τη σχέση 12.6.

Αυτός ο υπολογισμός υπερεκτιμά τη θερμοκρασιακή αύξηση γιατί υποθέτει ότι όλος ο θάλαμος καύσης είναι γεμάτος με μίγμα αέρα – καυσίμου. Μετρήσεις δείχνουν ότι το 15% του όγκου του μίγματος στο θάλαμο καύσης είναι εναπομείναντα καυσαέρια από τον προηγούμενο κύκλο καύσης. Έτσι η απλευθερούμενη θερμότητα ανά κιλό των συνολικών αερίων στο θάλαμο καύσης θα είναι το 85% περίπου από αυτό που μόλις υπολογίστηκε ή  $\Delta T = 1440^{\circ}C$ . Προσθέτοντας αυτή τη θερμοκρασιακή αύξηση στην αρχική θερμοκρασία θα βρούμε μια θερμοκρασία των  $694 + 3085 = 3779^{\circ}F = 2082^{\circ}C$  η οποία είναι πρακτικά η τιμή για  $15^{\circ}$  πριν το Α.Ν.Σ. στο σχήμα 12.2.

Τελικά μπορούμε να ρωτήσουμε γιατί η θερμοκρασία στο σχήμα 12.2 πηγαίνει από 2350 K στους 2640 K κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης καύσης. Εμείς υπολογίσαμε την αρχική θερμοκρασιακή αύξηση υποθέτοντας ότι το πρώτο μέρος της καύσης λαμβάνει χώρα σε σταθερή πίεση. Αυτή η υπόθεση είναι αληθοφανής γιατί καθώς το πρώτο μέρος (κοντά στον αναφλεκτήρα) καίγεται, διαστέλλεται και σπρώχνει μακριά το εναπομείναν αέριο. Όμως αργότερα όταν το αέριο καίγεται, διαστέλλεται και αυτό και ως εκ τούτου συμπιέζει το αέριο που κάηκε πρώτο, έτσι ώστε να υπόκειται καύση σε πρακτικά σταθερή πίεση, ακολουθούμενη από αδιαβατική συμπίεση. Στο τέλος της

διαδικασίας καύσης δεν θα έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία, αλλά το πρώτο μέρος θα είναι το θερμότερο.

Αλλά αν θέλουμε να υπολογίσουμε τη μέση θερμοκρασία μπορούμε να προχωρήσουμε υποθέτοντας ότι όλη η διαδικασία καύσης λαμβάνει χώρα σε σταθερή τιμή για την οποία μπορούμε να γράψουμε :

$$\Delta T = \frac{m_{\text{καυσίμου}} \Delta u_{\text{καύσης}}}{m_{\text{προϊόντων καύσης}} C_{v \text{ προϊόντων καύσης}}} \quad (12.7)$$

Η θερμότητα της καύσης που χρησιμοποιείται σε αυτό το παράδειγμα και οι συνηθισμένες πινακοποιημένες θερμότητες καύσης δεν είναι  $\Delta u$  καύσης αλλά  $\Delta h$  καύσης κανονικά σε 1 ατμόσφαιρα και 25 °C.

Κάποιος μπορεί να κάνει αμελητέο λάθος στις περισσότερες περιπτώσεις επεξεργάζοντάς τις με το ίδιο  $C_v$  προϊόντων καύσης . Είναι τυπικά περίπου 0,126 Btu/lbm°F έτσι ώστε για τη συνολική καύση σε σταθερή τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε :

$$\Delta T = \frac{1 \text{ lbm καυσίμου} \cdot 19,020 \text{ Btu / lbm}}{\left( 15,88 \frac{\text{lbm προϊόντων καύσης}}{\text{lbm καυσίμου}} \right) \left( 0,26 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ F} \right)} = 4607^\circ F = 2559 \text{ K}$$

Το οποίο δείχνει ότι :

$$\frac{\Delta T_{\text{σταθερού όγκου}}}{\Delta T_{\text{σταθερής πίεσης}}} \approx \frac{C_p}{C_v} = \frac{0,33}{0,26} = 1,27 \quad (12.8)$$

Οι τιμές από το σχήμα 12.2 είναι:

$$\frac{\Delta T_{\text{αιχμής}}}{\Delta T_{\text{αρχικής καύσης}}} = \frac{2640 - 641}{2350 - 641} = 1,17 \quad (12.9)$$

Οι διαφορές μεταξύ αυτών των τιμών οφείλονται σε απώλειες θερμότητας από τα καυσαέρια και το έργο διαστολής που έγινε από τα αέρια στο έμβολο. Μετά από αυτήν την παρέμβαση σχετικά με τις θερμοκρασίες στο σχήμα 12.2 μπορούμε τώρα να εξετάσουμε τις τιμές NO.

Η πραγματική καμπύλη δείχνει ότι ο ρυθμός του σχηματισμού NO είναι αμελητέος έως ότου η θερμοκρασία φθάσει περίπου 2400 K. Η συγκέντρωση αυξάνεται δραματικά προς την ισορροπημένη τιμή περνώντας την περίπου 22 μοίρες μετά το A.N.Σ. Από εκεί

η συγκέντρωση πέφτει αλλά η θερμοκρασία των αερίων φθάνει περίπου 2300 K, ο ρυθμός αντίδρασης γίνεται αμελητέος και η συγκέντρωση NO είναι "αγώμενη" σε τιμή κάτω από την ισορροπημένη τιμή. Η περίοδος καύσης που δείχνεται αντιστοιχεί σε περίπου γωνία 30° του στροφαλοφόρου άξονα ή το 1/2 μιας περιστροφής και ο χρόνος καύσης είναι περίπου 2,5 ms.

Υπάρχει πολύ λίγο άζωτο στη βενζίνη και έτσι το ποσό του καυσίμου σε NO είναι γενικά αμελητέο. Το περισσότερο NO της εξάτμισης είναι θερμικό NO, παραγόμενο στο υψηλής - θερμοκρασίας μέρος της διαδικασίας καύσης.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.7

Η δεξαμενή του σχήματος 7.11.1 περιέχει υγρή βενζίνη στους 68 °F, σε ισορροπία ατμών αέρα – βενζίνης στον χώρο των ατμών. Αν τώρα αντλήσουμε υγρή βενζίνη, πόσα rounds βενζίνης θα εκπέμπουν στο αεριζόμενο αέριο ανά κυβικό πόδι υγρής βενζίνης που αντλήθηκε στη δεξαμενή;

ΛΥΣΗ:

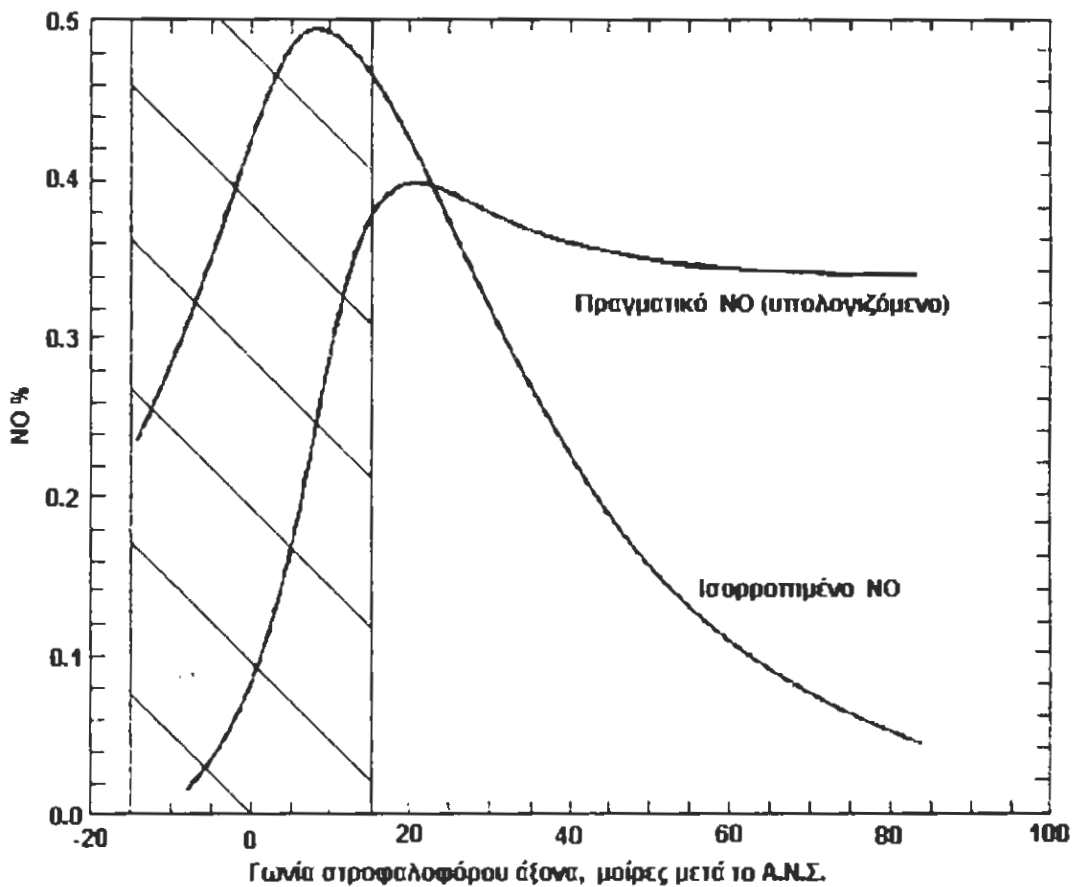
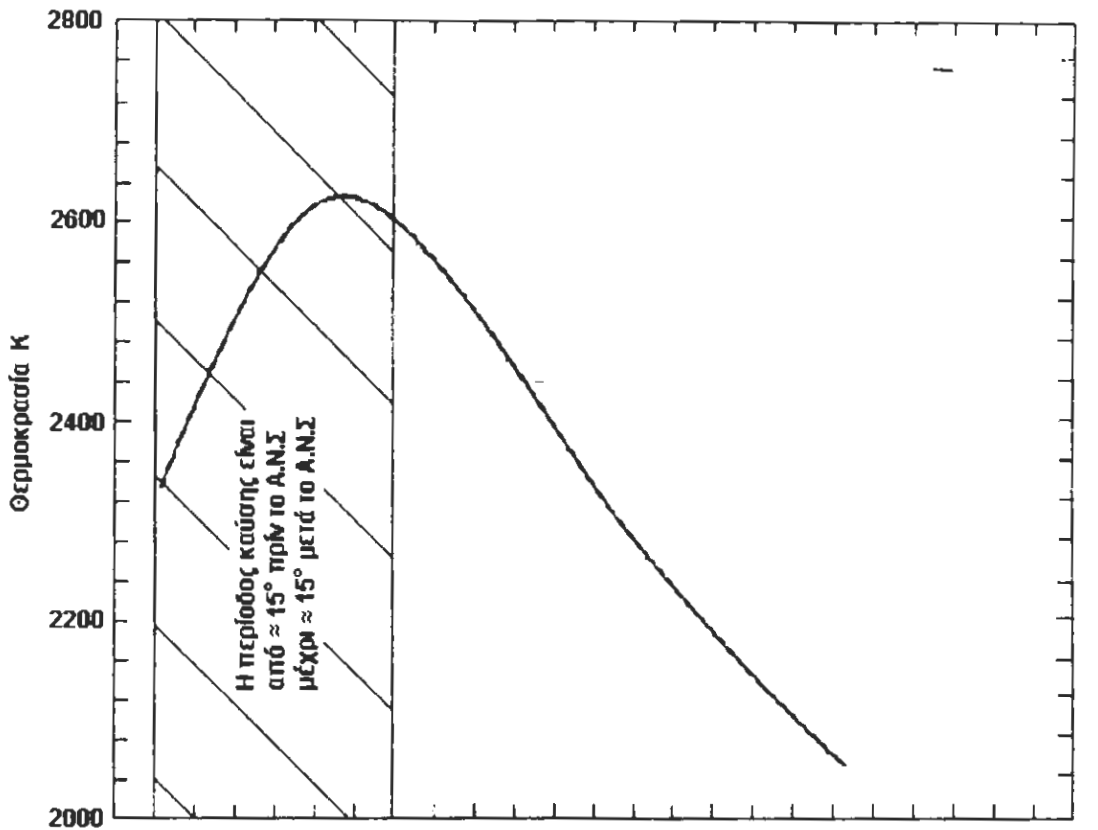
Χρησιμοποιώντας την πίεση από τους ατμούς βενζίνης βρίσκουμε :

$$\frac{m_i}{\Delta V} = \frac{x_i p_i M_i}{RT} = \frac{1,00 \cdot 1,45 \text{ psia} \cdot 78 \text{ lb/lbmol}}{(10,73 \text{ psi} \cdot \text{ft}^3 / \text{lbmol} \cdot \text{R}(528^\circ \text{R}))} = 0,020 \frac{\text{lb βενζίνης}}{\text{ft}^3 \text{ ατμοί}}$$

$$= 0,32 \frac{\text{kg βενζίνης}}{\text{m}^3 \text{ ατμοί}}$$

Η πυκνότητα της υγρής βενζίνης είναι περίπου 54 lb/ft<sup>3</sup> και το κλάσμα των εκπομπών γεμίσματος από τους ατμούς γεμίσματος είναι :

$$\left( \frac{\text{Μάζα βενζίνης μετατρεπόμενη σε ατμούς}}{\text{Μάζα υγρής βενζίνης γεμίσματος}} \right) = \frac{0,020 \text{ lb βενζίνης / ft}^3}{54 \text{ lb βενζίνης / ft}^3} = 3,7 \times 10^{-4} = 0,037\%$$



Σχήμα 12.2 Υπολογισμένη περιοχή των θερμοκρασιών και της συγκέντρωσης NO σε καιγόμενα αέρια κατά την διάρκεια της καύσης και αρχικής διαστολής. Αυτές είναι οι μέσες συγκεντρώσεις από όλη την μάζα καμένου αερίου για μικρή Μ.Ε.Κ. με λόγο συμπίεσης 7 λειτουργώντας στις 2000 στρ/λεπτ. Και  $\Phi=1$ .



## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 12.8

Η δεξαμενή στο παράδειγμα 12.7 περιέχει υγρή βενζίνη στους  $68^{\circ}\text{F}$ . Τώρα αντλούμε γρήγορα έξω από τη δεξαμενή ορισμένο υγρό. Αέρας στους  $68^{\circ}\text{F}$  εισέρχεται στη δεξαμενή για να αντικαταστήσει το υγρό που αποσύρθηκε. Κατά τη διάρκεια του αδειάσματος της υγρής βενζίνης, μερική από την εναπομένουσα βενζίνη σιγά-σιγά εξατμίζεται στο φρέσκο αέρα διασπάζοντάς τον τελικά με βενζίνη. Πόση βενζίνη διαφεύγει με αυτόν τον τρόπο;

ΛΥΣΗ:

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 7.11.1 και 12.1 έχουμε :

$$\frac{\Delta V_{\text{αποβλήθηκε}}}{V_{\text{δεξαμενής}}} = \left( \frac{V_{\text{ατμών}}}{V_{\text{δεξαμενής}}} \right) (y_{\text{τελικής βενζίνης}} - y_{\text{αρχικής βενζίνης}}) \quad (12.10)$$

και :

$$m_i = (c_i V_{\text{αέρα εισαγόμενου στη δεξαμενή}}) (y_{\text{τελικής βενζίνης}} - y_{\text{αρχικής βενζίνης}}) \quad (12.11)$$

Εδώ  $y_{\text{αρχικής βενζίνης}}=0$ . Δεν υπάρχει φανερή εκλογή για  $C_i$ . Αν η εξάτμιση έπαιρνε θέση σε εμβολοειδή μετατόπιση από κάτω, τότε το αέριο που πιέζεται έξω στον αερισμό θα ήταν φρέσκος αέρας που μόλις εισήλθε και δεν περιείχε βενζίνη. Αν η δεξαμενή αδιαστεί σταδιακά με τον εισερχόμενο αέρα να ανακατεύεται καλά με τον υπάρχοντα αέρα της δεξαμενής τότε τα αέρια πιεζόμενα έξω με τον αερισμό θα έχουν συγκέντρωση βενζίνης κοντά στη διασπαζόμενη τιμή. Εδώ υποθέτουμε ένα μέσο όρο αυτών των δύο ή  $C_i$  στον εκπεμπόμενο αέρα  $=0,5 C_{i\text{διασπαζόμενο}}$ .

Κάνοντας αυτήν την υπόθεση και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 7.11.2 και 7.11.4 βρίσκουμε :

$$\frac{m_i}{V_{\text{παραδεδωμένου αέρα}}} = 0,5 \frac{(y_{\text{τελικής βενζίνης}})(M)}{V_{\text{διαλιμένου αέρα}}} = 0,5 \left( \frac{x_i^2 p^2 M}{PRT} \right) \quad (12.12)$$

ή σε αυτό το παράδειγμα :

$$\frac{m_i}{V_{\text{παραδεχόμενου αέρα}}} = 0,5 \left[ \frac{1^2 (1,45 \text{ psia})^2 (78 \text{ lb/lbmol})}{(14,7 \text{ psia})(10,73 \text{ psi} \cdot \text{ft}^3 / \text{lbmol} \cdot \text{R})(528 \text{ R})} \right]$$

$$= 0,00098 \frac{\text{lb βενζίνης}}{\text{ft}^3 \text{ παραδεχόμενου αέρα}}$$

Αυτή η τιμή είναι περίπου το 5% ως μέγεθος των απευθείας απωλειών μετατόπισης στο παράδειγμα 12.7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) ΟΙ ΜΕΓΑΛΕΣ ΑΠΕΙΛΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
Sylvie Raucheux-Jean-Francois Noel  
Μετάφραση Μπέρτζ Στεπάνιαν
- 2) ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
Θ. Κουϊμτζής Καθ. Α.Π.Θ.  
Κ. Σαμαρά-Κωνσταντίνου Επίκ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
- 3) AIR POLLUTION  
Jeremy Coles
- 4) ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Karen Arms
- 5) AIR POLLUTION  
MN Rao-HVN Rao
- 6) ENVIRONMENTAL SCIENCE  
William P. Cunningham  
Barbara W. Saigo
- 7) AIR POLLUTION CONTROL ENGINEERING  
Noel De Nevers
- 8) INTRODUCTION TO ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
Vesilind
- 9) ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Daniel D. Chiras
- 10) ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ  
Γ. Μπεργελές
- 11) ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Andrew R.W. Jackson & Julie M. Jackson

