

# 1

## Εισαγωγή

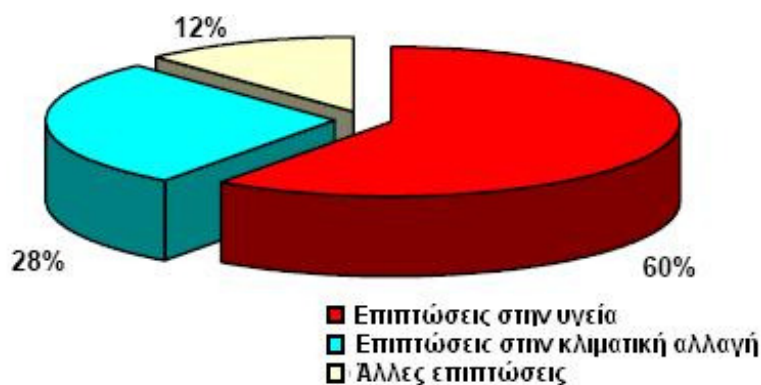
### 1.1 Ατμοσφαιρική ρύπανση, ένα παγκόσμιο πρόβλημα

Σε πολλές περιοχές της γης, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί το σημαντικότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη τις μεγάλες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Έχει υπολογισθεί ότι περίπου 1,200 εκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο εκτίθενται σε υπερβάλλουσες συγκεντρώσεις διοξειδίου του θείου και περίπου 1,400 εκατομμύρια σε υπερβάλλουσες συγκεντρώσεις καπνού και σωματιδίων. Πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν ότι 4-8 % των πρώιμων θανάτων οφείλεται σε έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια. Έχει υπολογιστεί π.χ. ότι στις υπό ανάπτυξη χώρες σημειώνονται κάθε χρόνο 0.5 – 1.0 εκατομμύριο πρώιμοι θάνατοι σαν αποτέλεσμα της έκθεσης στην αστική ατμοσφαιρική ρύπανση. Επίσης, σύμφωνα με τα συγκλονιστικά στοιχεία που περιέχονται στον πρώτο «Παγκόσμιο Ατλαντα για την Υγεία των Παιδιών και το Περιβάλλον» της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας, σχεδόν ο ένας στους τρεις θανάτους παιδιών παγκοσμίως οφείλεται στην περιβαλλοντική ρύπανση.

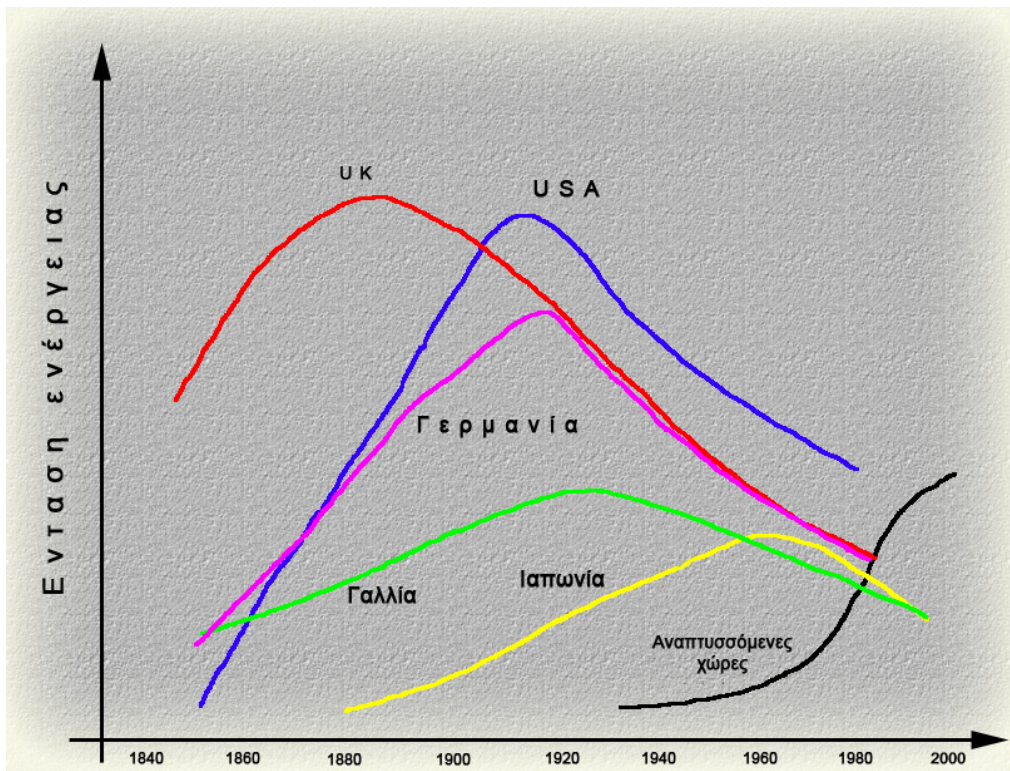
Πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μικρούς χρόνους παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα οι επιπτώσεις τους να περιορίζονται σε τοπικό επίπεδο. Κατά συνέπεια, μέχρι πριν λίγες δεκαετίες, η έρευνα σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης εστιαζόταν σε προβλήματα τοπικής κλίμακας, όπου εμφανίζονται και οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Παρ' όλα αυτά, πολλοί ατμοσφαιρικοί ρύποι έχουν μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η μεταφορά τους για μεγάλες αποστάσεις. Το πρόβλημα φαίνεται να είναι ιδιαίτερα οξυμένο στις Μεσογειακές χώρες, όπου η μεγάλη ηλιοφάνεια διευκολύνει την παραγωγή δευτερογενών φωτοχημικών ρύπων και ιδιαίτερα όζοντος. Για το λόγο αυτό, τις τελευταίες λίγες δεκαετίες κερδίζει συνεχώς έδαφος η άποψη ότι αποτελεσματικές στρατηγικές μείωσης της περιβαλλοντικής βλάβης, που προκαλείται από την ατμοσφαιρική ρύπανση, θα πρέπει να ενσωματώνουν την περιβαλλοντική επιβάρυνση από την μεγάλης κλίμακας μεταφορά αέριων ρύπων (συμπεριλαμβανομένης και της διακρατικής μεταφοράς) καθώς και των επιβαρύνσεων που αφορούν την κλιματική αλλαγή (σχήμα 1.1).

Η μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων (με εξαίρεση τα θερμοκήπια αέρια) στη δυτική Ευρώπη και τη βόρεια Αμερική έχει επιτευχθεί μέσω της νομοθέτησης και της εφαρμογής διεθνών, περιφερειακών, εθνικών και τοπικών κανονισμών που αφορούν τις εκπομπές των ρύπων και την ποιότητα του αέρα. Ταυτόχρονα, σημαντική είναι η επίδραση των οικονομικών συνθηκών και της τεχνολογικής προόδου. Η σημαντική μείωση στην ένταση της χρήσης ενέργειας επέτρεψε στην αποσύνδεση της χρήσης ενέργειας και της οικονομικής ανάπτυξης στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες και διευκόλυνε την μείωση των εκπομπών των ρύπων και την βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Αν για παράδειγμα εξετάσουμε τις οδικές μεταφορές, η χρήση ενέργειας ανά μονάδα απόστασης είναι το ποσό ενέργειας που δαπανάται δια τον αριθμό των οδικών χιλιομέτρων τα οποία διανύονται από τα οχήματα. Αυτό αποτελεί ένα μέτρο το οποίο υποδεικνύει την αποδοτικότητα του στόλου των οχημάτων. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως kg ισοδύναμου πετρελαίου ανά 1000 km του οχήματος ή σε άλλες περιπτώσεις l/100 km. Η κατανάλωση της ενέργειας από τις οδικές μεταφορές συμπεριλαμβάνει όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών, καθώς και την χρήση των οδών για αγροτικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Δεν συμπεριλαμβάνονται η χρήση βενζίνης σε στάσιμες μηχανές και το πετρέλαιο που χρησιμοποιείται στα τρακτέρ.

Δυστυχώς η ένταση της χρήσης της ενέργειας εμφανίζει την αντίστροφη τάση στις υπό ανάπτυξη χώρες (σχήμα 1.2), γεγονός το οποίο αναμένεται να δημιουργήσει μια πρόσθετη πίεση στο περιβάλλον. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε βέβαια ότι όλες οι ανεπτυγμένες χώρες πέρασαν από αυτό το στάδιο, έστω και αν αυτό έγινε σε εποχές κατά τις οποίες η ευαισθητοποίηση για τα περιβαλλοντικά θέματα δεν ήταν στο σημερινό επίπεδο.



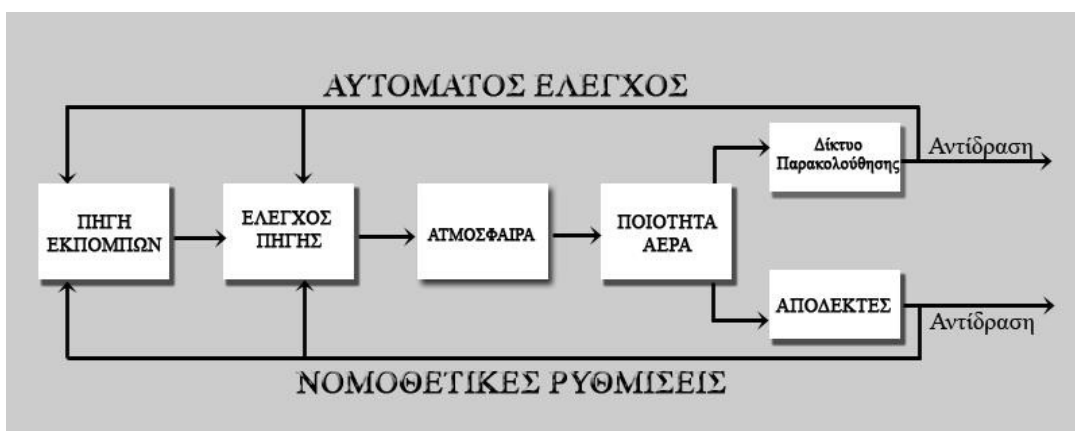
**Σχήμα 1.1.** Σχετική επιβάρυνση από διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε έξι υπό ανάπτυξη πόλεις: Μπανγκόκ (Ταϊλάνδη), Κρακοβία (Πολωνία), Μανίλα (Φιλιππίνες), Μουμπάι (Ινδία), Σαντιάγκο (Χιλή) και Σαγκάη (Κίνα).



**Σχήμα 1.2.** Ενεργειακή ένταση για πέντε βιομηχανικές χώρες και πρόβλεψη για τις υπό ανάπτυξη χώρες.

## 1.2 Διαχείριση Ποιότητας Αέρα

Προκειμένου να οικοδομηθεί μια αποτελεσματική στρατηγική περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι σημαντικό να διαγνωσθούν τα περιβαλλοντικά προβλήματα, να προσδιορισθεί η συνεισφορά των διαφόρων πηγών και να αναγνωρισθούν οικονομικά ανεκτές και βιώσιμες λύσεις.



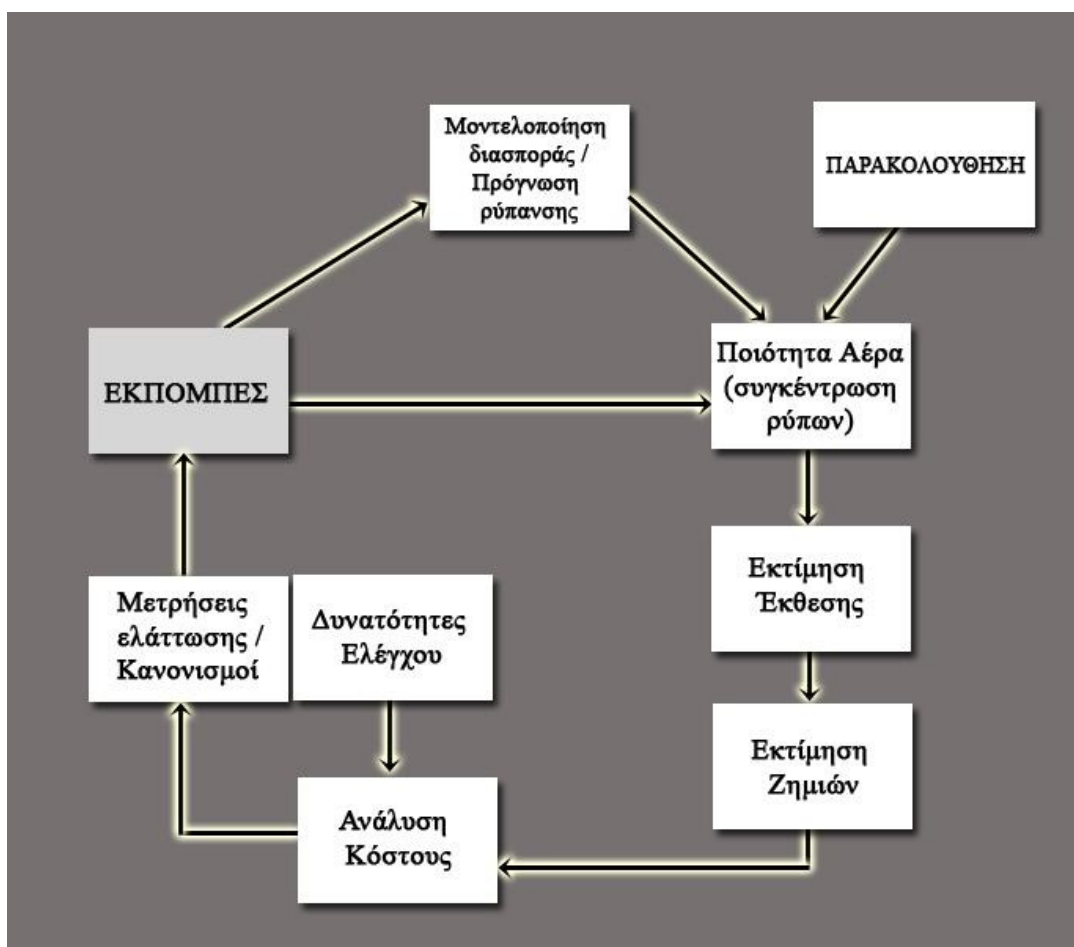
**Σχήμα 1.3.** Το σύστημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το σύστημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συντίθεται από ένα αριθμό συνιστωσών (σχήμα 1.3):

- Τις εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων, τόσο από ανθρωπογενείς όσο και από φυσικές πηγές.
- Τον έλεγχο που ασκείται πάνω στις πηγές. Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται εδώ για να δηλώσει συσκευές, συστήματα και λειτουργικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν ένα μέρος των ρύπων να καταλήξει στην ατμόσφαιρα.
- Τους μηχανισμούς διασποράς και απόθεσης καθώς και τους χημικούς μετασχηματισμούς που δρουν στην ατμόσφαιρα.
- Την ποιότητα του αέρα η οποία προσδιορίζεται σαν το συνολικό αποτέλεσμα των εκπομπών των ρύπων και της επίδρασης των ατμοσφαιρικών μηχανισμών πάνω σ' αυτούς.
- Τις νομοθετικές ρυθμίσεις που προκύπτουν σαν αποτέλεσμα της αντίδρασης των ανθρώπων που εκτίθενται στην ατμοσφαιρική ρύπανση
- Τον αυτόματο έλεγχο που ασκείται στις πηγές όταν το δίκτυο παρακολούθησης της ρύπανσης δείχνει επίπεδα ρύπανσης τα οποία υπερβαίνουν τις θεσμοθετημένες τιμές.

Διαχείριση της ποιότητας του αέρα είναι η παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης και ο έλεγχος των εκπομπών ώστε να εξαλειφθούν ή να περιορισθούν οι συνέπειές τους στο περιβάλλον. Η διαχείριση της ποιότητας του αέρα σε αστικές περιοχές είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο και σημαντικές συνιστώσες της είναι οι παρακάτω (σχήμα 1.4):

- Απογραφή των ρυπογόνων δραστηριοτήτων και των εκπομπών.
- Παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης και των παραμέτρων διασποράς.
- Υπολογισμός/ πρόγνωση των επιπέδων ρύπανσης με την βοήθεια μοντέλων ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Απογραφή του πληθυσμού, των υλικών και της αστικής ανάπτυξης.
- Υπολογισμός του αποτελέσματος συγκεκριμένων μέτρων μείωσης/ ελέγχου εκπομπών.
- Εγκαθίδρυση/ βελτίωση κανονισμών ατμοσφαιρικής ρύπανσης



Σχήμα 1.4. Βασικές συνιστώσες της διαχείρισης ποιότητας του αέρα.

### 1.3 Γενικές έννοιες ατμοσφαιρικής διασποράς

Οι ρύποι οι οποίοι εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα φθάνουν στους **αποδέκτες (receptors)** μέσω των κινήσεων του αέρα. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος **διασπορά (dispersion)** για να δηλώσει την μεταφορά και εξάπλωση στην ατμόσφαιρα ενός στοιχείου (ρύπου) το οποίο εκπέμπεται από κάποια πηγή. Με τον όρο **τυρβώδης διάχυση (turbulent diffusion)** εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία οι εκπεμπόμενοι ρύποι διασκορπίζονται υπό την επίδραση των **τυρβώδων στροβίλων (turbulent eddies)**. Η μοριακή διάχυση οφείλεται, αντίστοιχα, στις μοριακές κινήσεις. Η τυρβώδης διάχυση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον διασκορπισμό των ρύπων στην ατμόσφαιρα σε αντίθεση με την μοριακή διάχυση η οποία έχει πολύ μικρή συνεισφορά στις ατμοσφαιρικές διεργασίες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στις σημειώσεις αυτές θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με την τυρβώδη διάχυση.



**Σχήμα 1.5** Θύσανοι από τους πύργους ψύξης (μπροστά και αριστερά) και τις καμινάδες (πίσω και δεξιά) του σταθμού παραγωγής ηλεκτρισμού στην Καρδιά, Κοζάνης.

Κεντρικό ρόλο στην μελέτη της διασποράς, ιδιαίτερα από σημειακές πηγές, παίζει και η έννοια του **θυσάνου (plume)**. Στην ατμοσφαιρική ρύπανση, θύσανος ονομάζεται ένα αναγνωρίσιμο ρεύμα αέρα του οποίου η σύσταση διαφέρει από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος.

Ξεκινάμε με μία σχηματική παρουσίαση των παραμέτρων που έχουν σημαντική συνεισφορά για την διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

### **A. Στοιχεία πηγής.**

Τα χαρακτηριστικά των πηγών εκπομπής είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της διασποράς γιατί την προσδιορίζουν σε σημαντικό βαθμό, ιδιαίτερα σε μικρές αποστάσεις από την πηγή. Όπως είναι φανερό, το πιο σημαντικό στοιχείο των πηγών είναι ο ρυθμός εκπομπής των ρύπων, ο οποίος όμως δεν έχει επίδραση στην διασπορά τους. Τα χαρακτηριστικά των πηγών εκπομπής τα οποία είναι σημαντικά για την διασπορά είναι τα παρακάτω:

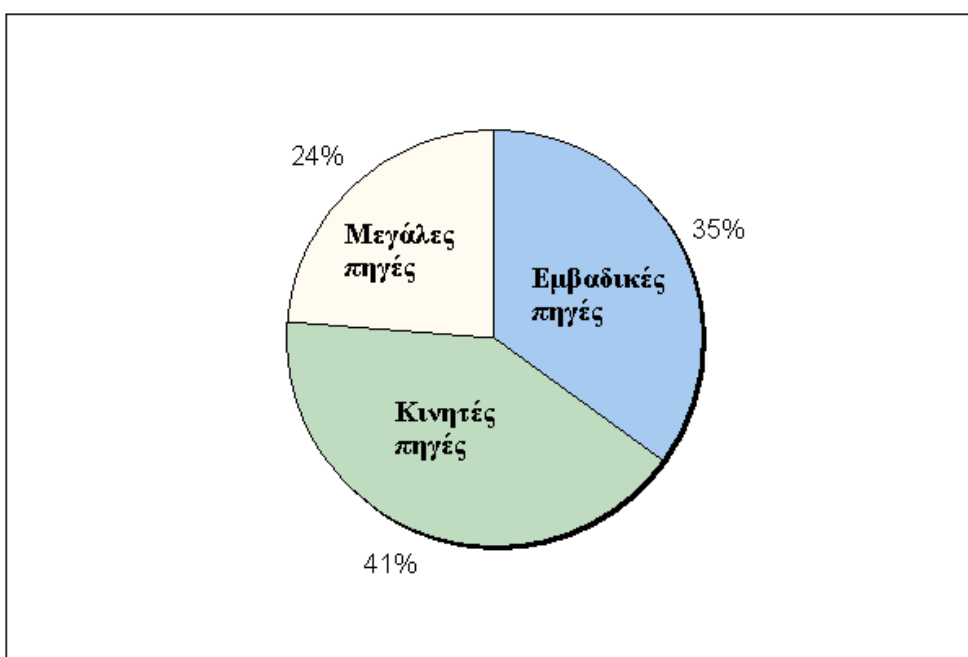
1) Η γεωμετρία της εκπομπής έχει μεγάλη σημασία για την εικόνα της διασποράς, τουλάχιστον για αποστάσεις που είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ή μικρότερες κάποιων χαρακτηριστικών διαστάσεων της πηγής. Παραδείγματα διαφορετικών περιπτώσεων γεωμετρίας εκπομπής είναι τα παρακάτω:

- **σημειακή πηγή (point source)** π.χ. καμινάδα,
- **εμβαδική πηγή (area source)**, π.χ. αστική περιοχή,
- **γραμμική πηγή (line source)**, π.χ. μεγάλη οδική αρτηρία.



2) Η χρονική διάρκεια της εκπομπής. Ιδιαίτερη σημασία σε αυτή την ταξινόμηση έχει η διαφορά ανάμεσα στα παρακάτω:

- **στιγμιαία εκπομπή (instantaneous release)**, π.χ. έκρηξη σε βιομηχανικό συγκρότημα ή εκπομπές μικρής χρονικής διάρκειας της τάξης των δευτερολέπτων,
- μακροχρόνια, **συνεχή εκπομπή (continuous emission)** κατά την οποία η χρονική περίοδος εκπομπής είναι ίση ή μεγαλύτερη από τον χρόνο που απαιτείται για να μεταφερθούν οι ρύποι από την πηγή στο σημείο ενδιαφέροντος.



**Σχήμα 1.6** Η κατανομή των ανθρωπογενών εκπομπών ανά τύπο πηγής.

### **Β. Ο ατμοσφαιρικός κύκλος διασποράς**

Μια ποικιλία ατμοσφαιρικών μηχανισμών είναι υπεύθυνη για την μεταφορά, τον μετασχηματισμό και την απομάκρυνση των αέριων ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα.

Το σχήμα 1.7 δείχνει σχηματικά τις διαδικασίες οι οποίες συντελούν στην διασπορά των αέριων ρύπων που εκπέμπονται από μία καμινάδα.

**α.** Επειδή πρόκειται, συνήθως για προϊόντα καύσης, οι αέριοι ρύποι όταν αφήνουν την καμινάδα είναι κατά κανόνα θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αρχική ορμή που έχουν τα καυσαέρια όταν φθάνουν στην κορυφή της καμινάδας έχει σαν αποτέλεσμα ο θύσανος να ανυψώνεται

μέχρι ενός ορισμένου ύψους. Το ύψος αυτό είναι βέβαια υψηλότερο του φυσικού ύψους της καμινάδας και ονομάζεται **ενεργό ύψος (effective height)** της καμινάδας. Η διαφορά ανάμεσα στο φυσικό και στο ενεργό ύψος της καμινάδας ονομάζεται αρχική **ανύψωση του θυσάνου (plume rise)**.

**β.** Τα καυσαέρια μεταφέρονται μακριά από την πηγή από τον μέσο άνεμο. Η επίδραση του ανέμου στα επίπεδα ρύπανσης είναι διπλή. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την περιοχή προς την οποία θα κατευθυνθούν οι ρύποι ενώ η ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τον ρυθμό αραίωσης τους. Η διεύθυνση του ανέμου είναι καθοριστικής σημασίας ιδιαίτερα στην περίπτωση που η ρύπανση προέρχεται από σημειακές πηγές (π.χ. βιομηχανικές καμινάδες). Σε αυτή την περίπτωση τα επίπεδα ρύπανσης σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να αλλάξουν δραστικά ακόμη και σε περίπτωση που η διεύθυνση του ανέμου μεταβληθεί με μόνο  $10^\circ$ . Σε αυτά τα πλαίσια η μεταβλητότητα της διεύθυνσης του ανέμου έχει ευεργετικές συνέπειες γιατί διασκορπίζεται η ρύπανση σε μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή με αποτέλεσμα οι τοπικές συγκεντρώσεις να είναι χαμηλότερες. Η **οριζόντια μεταφορά (advection)** αποτελεί τον πλέον σημαντικό μηχανισμό απομάκρυνσης και αραίωσης των ρύπων.

**γ.** Οι αναταρακτικές κινήσεις του αέρα (**τυρβώδεις στρόβιλοι, (turbulent eddies)**) είναι υπεύθυνες για την κατακόρυφη μεταφορά και την διαπλάτυνση του θυσάνου, με τελικό αποτέλεσμα την αραίωση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διάχυση (diffusion)**. Η κλίμακα και η ένταση της αραίωσης εξαρτώνται από τον βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας. Σε **συνθήκες ευστάθειας (stable conditions)** οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση γίνεται αργά ενώ σε **συνθήκες μεγάλης αστάθειας (very unstable ή convective conditions)** οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση πολύ έντονη. Η **διάχυση (diffusion)** των ρύπων γίνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια της γης το οποίο ονομάζεται **ύψος ανάμειξης (mixing height)**. Το στρώμα το οποίο περιέχεται ανάμεσα στην επιφάνεια της γης και το ύψος ανάμειξης ονομάζεται **στρώμα ανάμειξης (mixing layer)** ή **ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (atmospheric ή planetary boundary layer)**.

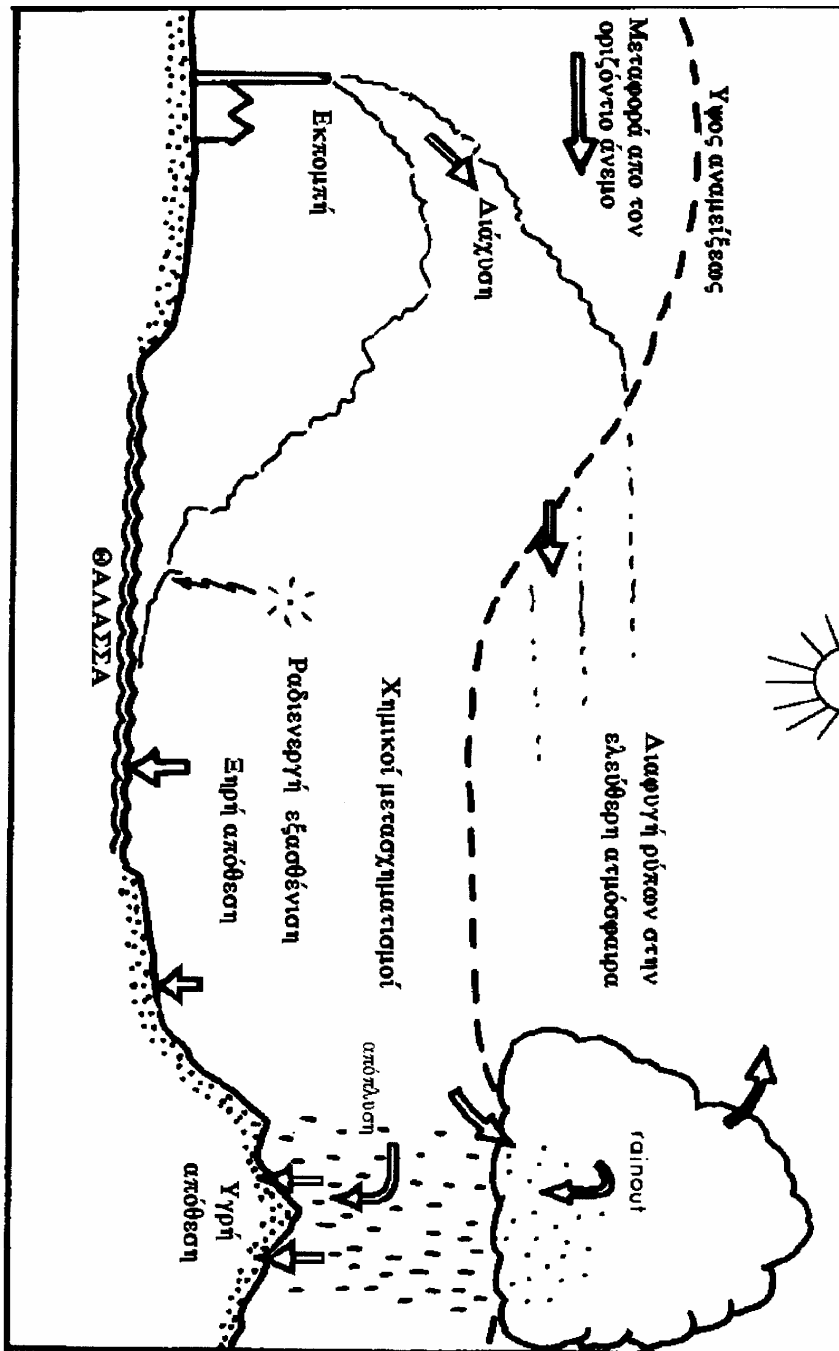
**δ.** Η μεταφορά των ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ονομάζεται **απόθεση (deposition)**.

Γενικά ξεχωρίζουμε τρεις διαφορετικούς τύπους απόθεσης:

I. **Καθίζηση (sedimentation)** ονομάζεται η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων. Η καθίζηση απομακρύνει τα μεγάλα σωματίδια από την ατμόσφαιρα, συνήθως σε μικρές αποστάσεις από την πηγή εκπομπής τους.

II. **Ξηρή απόθεση (dry deposition)** υφίστανται οι αέριοι ρύποι και τα μικρά σωματίδια τα οποία ακολουθούν αδρανώς τις κινήσεις του αέρα και τα οποία κατακρατούνται, όταν έρθουν σε επαφή, από την υποκείμενη επιφάνεια.





Σχήμα 1.7 Σχηματική περιγραφή των ατμοσφαιρικών διεργασιών που επιδρούν στην διασπορά και προσδιορίζουν τα επίπεδα των αερίων ρύπων .

III. **Υγρή απόθεση (wet deposition)** λαμβάνει χώρα σε περίπτωση υετού οπότε μπορεί να συμβεί κάποιο από τα παρακάτω ενδεχόμενα: Είτε σάρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων από την βροχή ή το χιόνι (**απόπλυση, wash out**) είτε πρόσληψη των ρύπων σε ένα προηγούμενο στάδιο από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα οποία αργότερα ενώνονται μεταξύ τους φτιάχνοντας σταγόνες βροχής (**βροχόπλυση και χιονόπλυση, rain out and snow out**). Η υγρή απόθεση είναι ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός μηχανισμός απομάκρυνσης των ρύπων από την ατμόσφαιρα.

Σε κάθε περίπτωση είναι πολύ σημαντικό όταν μελετάμε τους αέριους ρύπους και τις επιπτώσεις τους να ξεχωρίσουμε από την μία την συγκέντρωση των ρύπων στην ατμόσφαιρα, και τις επιπτώσεις της, και από την άλλη την αποτιθέμενη ρύπανση με τις αντίστοιχες επιπτώσεις. Ο λόγος για τον οποίο είναι τόσο σημαντικός αυτός ο διαχωρισμός είναι ότι η κλίμακα των δύο φαινομένων είναι πολύ διαφορετική. Οι απευθείας επιπτώσεις της αέριας ρύπανσης είναι περισσότερο τοπικό πρόβλημα και οι επιδράσεις είναι μεγαλύτερες στις περιοχές κοντά στην πηγή της ρύπανσης. Από την άλλη πλευρά, η επίδραση της απόθεσης εξαπλώνεται σε πολλές εκατοντάδες ή μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα σημαντικό διασυνοριακό πρόβλημα.

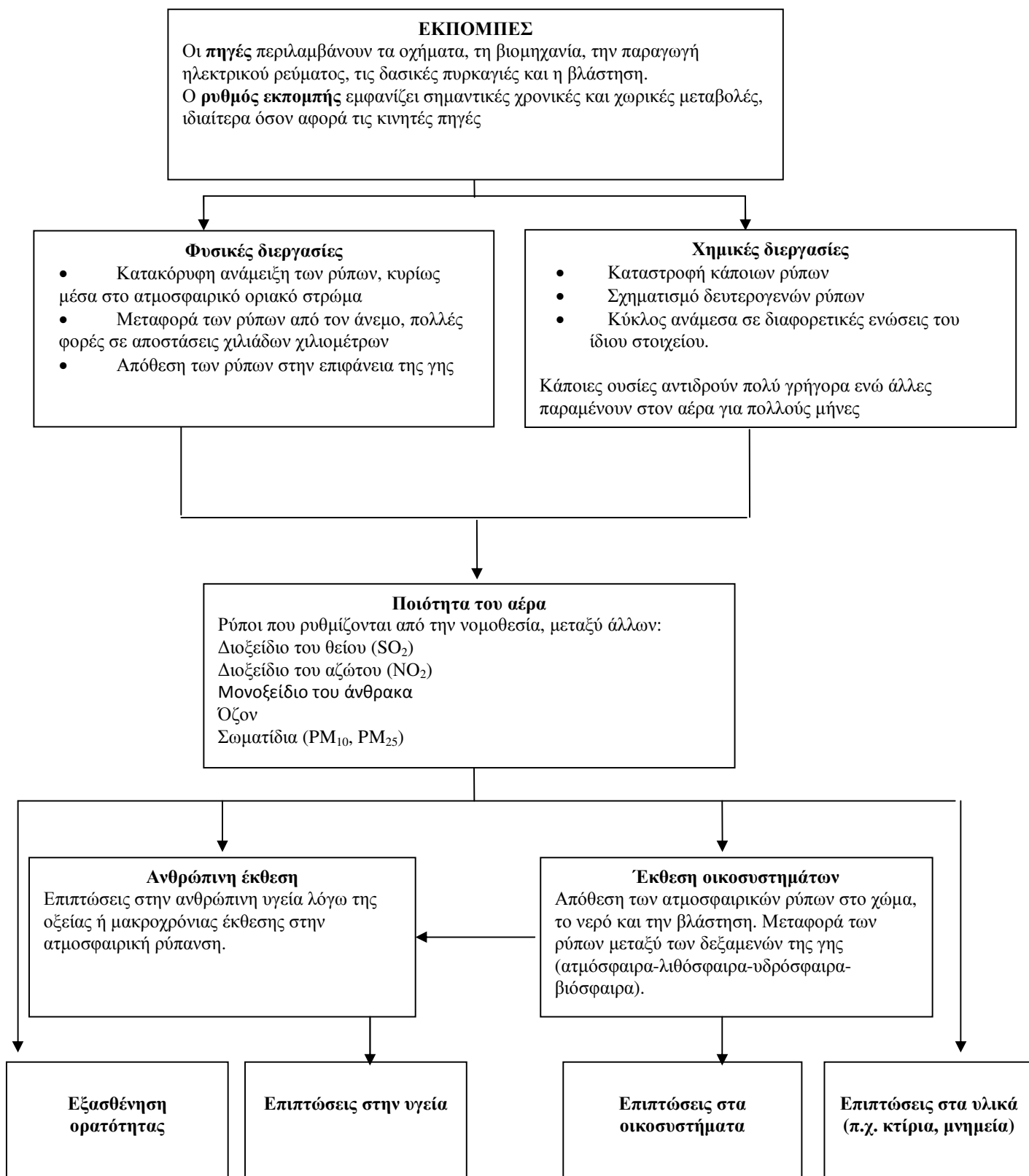
ε. Κατά τον χρόνο της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα οι ρύποι υφίστανται διάφορους χημικούς μετασχηματισμούς λόγω αντιδράσεων είτε μεταξύ τους είτε με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα είναι ένα αποτελεσματικό εργαστήριο αντιδράσεων μέσα στο οποίο διοχετεύονται χημικά ενεργά συστατικά με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός αριθμού καινούργιων ουσιών. Οι καινούργιες ουσίες παράγονται από αέρια και υγρά τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους και με τα σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Οι χημικές αντιδράσεις των ρύπων μπορεί να δώσουν και ουσίες οι οποίες δεν είναι ρύποι. Σε πολλές περιπτώσεις όμως στα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων περιλαμβάνονται και νέοι ρύποι οι οποίοι ονομάζονται **δευτερογενείς ρύποι (secondary pollutants)** σε αντιδιαστολή με αυτούς που εκπέμπονται από τις πηγές οι οποίοι ονομάζονται **πρωτογενείς ρύποι (primary pollutants)**.

στ. Ένα μέρος της ρύπανσης διαφεύγει από το στρώμα ανάμειξης στην **ελεύθερη ατμόσφαιρα (free atmosphere)**. Η απουσία αναταρακτικών κινήσεων στην ελεύθερη ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα η διάχυση και η κατακόρυφη μεταφορά των ρύπων να γίνεται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς. Από την άλλη μεριά, οι αντίστοιχοι ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί είναι μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής κλίμακας με αποτέλεσμα τα φαινόμενα να επηρεάζουν ευρύτερες περιοχές της γης.

### Γ. Τεχνικοί παράγοντες

Παραδείγματα τεχνικών παραγόντων είναι η θερμοχωρητικότητα των εκπεμπόμενων αερίων (η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ανύψωση του θυσάνου), το **κατώρευμα (downwash)** λόγω της αεροδυναμικής της καμινάδας το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κάθοδο του κεντρικού άξονα του θυσάνου, η καθίζηση λόγω βαρύτητας των μεγαλύτερων σωματιδίων κ.τ.λ.



Σχήμα 1.8 Διάγραμμα ροής του συστήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης