



N.K.U.A. - Department of Science

Psachna, Euboea - Euripus Campus

# Φυσική Περιβάλλοντος :

*“κεφ VIII: Η ατμοσφαιρική διασπορά - διάχυση”*

*Καθ. Μιχάλης Γρ Βραχόπουλος*

*Δρ. Δήμητρα Παπαδάκη*

Energy and Environmental Research Laboratory



# Ρύποι

- Ρύποι εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με διάφορους τρόπους
- Άνεμος, αποσύνθεση, αυτοκίνητα κ.λπ.
- Η ρύπανση της ατμόσφαιρας συνεπάγεται μια από τις κρισιμότερες απειλές της υγείας στον κόσμο και στη Χώρα μας με όρους νοσηρότητας και θνησιμότητας, ακόμη και σε περιοχές που είναι εκτεθειμένες σε χαμηλά επίπεδα, όπως έχουν οροθετηθεί πρόσφατα



# Γενική εικόνα της ρύπανσης

τύποι ρύπων

αέριοι  
σωματίδιακοί

πηγές ρύπων

φυσικές  
ανθρωπογενείς



καταβόθρες ρύπων



αλληλεπίδραση με περιβάλλον

χημικές αντιδράσεις  
εναπόθεση (ξηρά/υγρή)

χημικές αντιδράσεις  
διασπορά/διάχυση

# Ατμοσφαιρική Διασπορά ρύπων

Από το '70 και μετά υπήρξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρουσία χημικών στο περιβάλλον (διασπορά ρύπων σε αέρα, νερό και έδαφος) Σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. εντομοκτόνα, αρώματα) τα χημικά απελευθερώνονται στο περιβάλλον ηθελημένα.

Σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, VOC) τα χημικά εκπέμπονται στο περιβάλλον από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες και από την καύση. Άλλα χημικά (π.χ. διοξίνες, NH<sub>3</sub>, μεθυλικό ισοκυάνιο) διαρρέουν στο υπέδαφος, στα υδάτινα συστήματα και στον αέρα λόγω ατυχημάτων.

Γενικά υπάρχει δημόσιος προβληματισμός για την μακροχρόνια επίδρασή τους στο περιβάλλον, κάτι που οδήγησε σε σειρά μέτρων νόμων και οδηγιών, αναφορικά με τα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης των χημικών (μέση συγκέντρωση σε 1 ώρα, 1 μέρα, 1 χρόνο).

# Ατμοσφαιρική Διασπορά ρύπων

- Η συσσώρευση ρύπων σε μια περιοχή εξαρτάται από τους **ρυθμούς εκπομπής** των διαφόρων ρύπων,
- Από τους **ρυθμούς διασποράς** (και απομάκρυνσης) των ρύπων και
- Των **ρυθμών παραγωγής ή καταστροφής** τους (μέσω χημικών αντιδράσεων)
  
- Η διασπορά των ρύπων εξαρτάται σημαντικά από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και την ατμοσφαιρική ευστάθεια (δηλ. την τάση του αέρα να μην αναμιγνύεται σε κατακόρυφη διεύθυνση). Προφανώς εξαρτάται και από το είδος και τις ποσότητες των ρύπων.
- Με δυνατό άνεμο και καλή κατακόρυφη ανάμιξη οι ρύποι διασπείρονται γρήγορα σε μεγάλο όγκο αέρα.

- **Φυσικές πηγές ρύπανσης:** Εδώ περιλαμβάνονται εκείνες που υπάρχουν στη φύση και δεν είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Ενδεικτικά αναφέρονται τα δάση και τα ηφαίστεια.

- **Ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης:** Όπως προκύπτει και από το όνομά τους, στην κατηγορία αυτή εντάσσονται όλες οι πηγές ρύπανσης που είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μερικές από αυτές είναι η βιομηχανία, οι αστικές δραστηριότητες (αστικά λύματα, στερεά απορρίμματα) η κυκλοφορία, (οδική, αεροπορική, κτλ) οι κεντρικές θερμάνσεις, οι γεωργικές δραστηριότητες

# Πηγές Ατμοσφαιρικών ρύπων

Οι ρύποι εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με διάφορους τρόπους, Λ.χ.

- Ο άνεμος μεταφέρει σκόνη από το έδαφος στον αέρα
- Η αποσύνθεση των φυτών απελευθερώνει μεθάνιο
- Αυτοκίνητα, εκπέμπουν ρύπους από τις εξατμίσεις και κατά τη διάρκεια του εφοδιασμού τους με καύσιμα.
- Εργοστάσια, απελευθερώνουν αέριους ρύπους

Όσο υψηλότερη η καμινάδα, τόσο οι ρύποι διασπείρονται καλύτερα και σε μεγαλύτερο ύψος στην ατμόσφαιρα και πέφτουν στο έδαφος σε μεγάλες αποστάσεις.

# Φυσικές πηγές ρύπων



Copyright Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Διδάσκοντες: Καθηγητής Π. Κασσωμένος, <http://ecourse.uoi.gr/course/view.php?id=1280>.



# Ανθρωπογενείς πηγές



Copyright Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Διδάσκοντες: Καθηγητής Π. Κασσωμένος, <http://ecourse.uoi.gr/course/view.php?id=1280>.

# Πηγές Ατμοσφαιρικών ρύπων - διάχυσης

Διαχωρισμός πηγών:

**Σημειακές (Point source):** απελευθερώνουν ρύπου από ένα σημείο επί του εδάφους ή υπερυψωμένο, moles/s or gr/s

**Γραμμικές (Line source):** η απελευθέρωση γίνεται σε μια γραμμή, λ.χ. ροή αυτοκινήτων, moles/ms

**Επιφανειακές (Area source):** Αποτελούνται από ένα σύνολο σημειακών ή γραμμικών πηγών, λ.χ. χώρος στάθμευσης, πόλη κ.λπ., moles/m<sup>2</sup>s

**Όγκου (volume source):** παρόμοια με την εμβαδική πηγή αλλά με μη μηδενικό πάχος, moles/m<sup>3</sup>s

**Ειδικού τύπου:** απελευθερώνουν ρύπους για μικρή διάρκεια (κατά κανόνα) λ.χ. ατυχήματος

Επίσης μπορεί η παραγωγή να είναι συνεχής ή κατά διαστήματα.

# Είδη πηγών εκπομπής

με βάση τη γεωμετρική τους αναφορά:

**Σημειακές πηγές**: είναι μεμονωμένα σημεία, καμινάδα ή εργοστάσιο ή μια πόλη ολόκληρη, ανάλογα με την κλίμακα για το πρόβλημα που αναπτύσσεται.

**Επιφανειακές (εμβαδικές) πηγές:** είναι πηγές που δεν έχουν μεγάλη παροχή ρύπων, δηλαδή εκπέμπουν σχετικά λίγους ρύπους ανά μονάδα επιφάνειας. Έχουν όμως μεγάλη σημασία, γιατί η έκλυση ρύπων γίνεται σε μικρό ύψος, οπότε βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με τους αποδέκτες.

Τέτοιες πηγές είναι οι οικιστικές περιοχές, εμπορικά συγκροτήματα, κ.α.

**Γραμμικές πηγές:** είναι πηγές που έχουν χαρακτηριστικό αντιπρόσωπο την κίνηση οχημάτων στους δρόμους.

Από τις πηγές αυτές οι εκλύσεις γίνονται σε χαμηλά ύψη, και έτσι έχουν άμεση επίπτωση στους ανθρώπους, τα φυτά και τις κατασκευές.

Μπορούν να δημιουργήσουν αρκετά προβλήματα, αφού οι μηχανισμοί διάχυσης είναι περιορισμένοι.

- Στοιχεία πηγής.

Η γνώση των χαρακτηριστικών των πηγών εκπομπής είναι απαραίτητη για τις εκτιμήσεις της διασποράς

- Γεωμετρία πηγής

Σημασία για αποστάσεις της ίδιας τάξης μεγέθους ή μικρότερες.

✓ Σημειακή

✓ Εμβαδική.

✓ Γραμμική

- Χρονική διάρκεια εκπομπής

✓ Στιγμαία

✓ Συνεχής

- Τοποθεσία πηγής

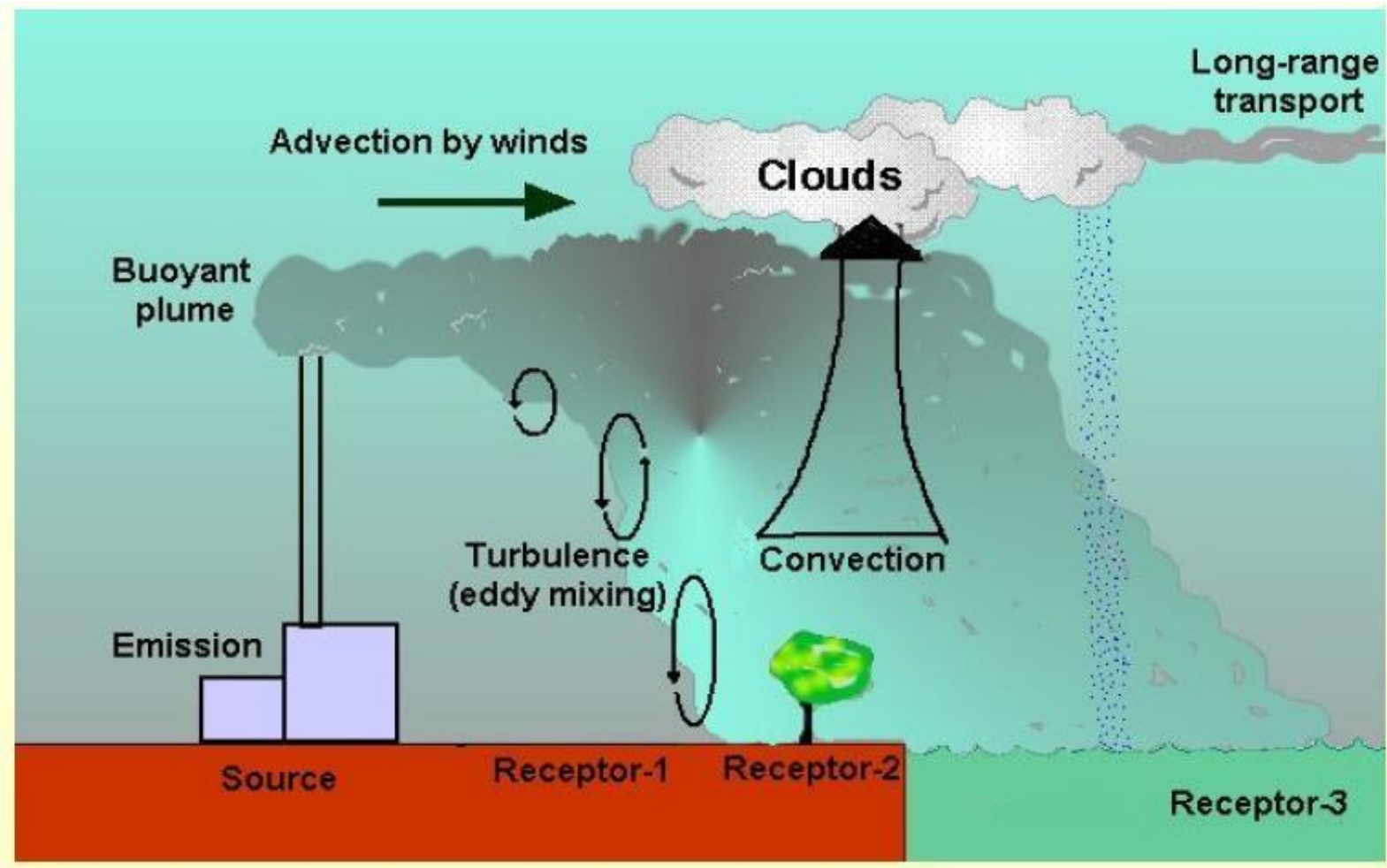
✓ Υψόμετρο

✓ Περιοχή

- Ρυθμός εκπομπής:  $c=m/t$  ή  $C=V/t$

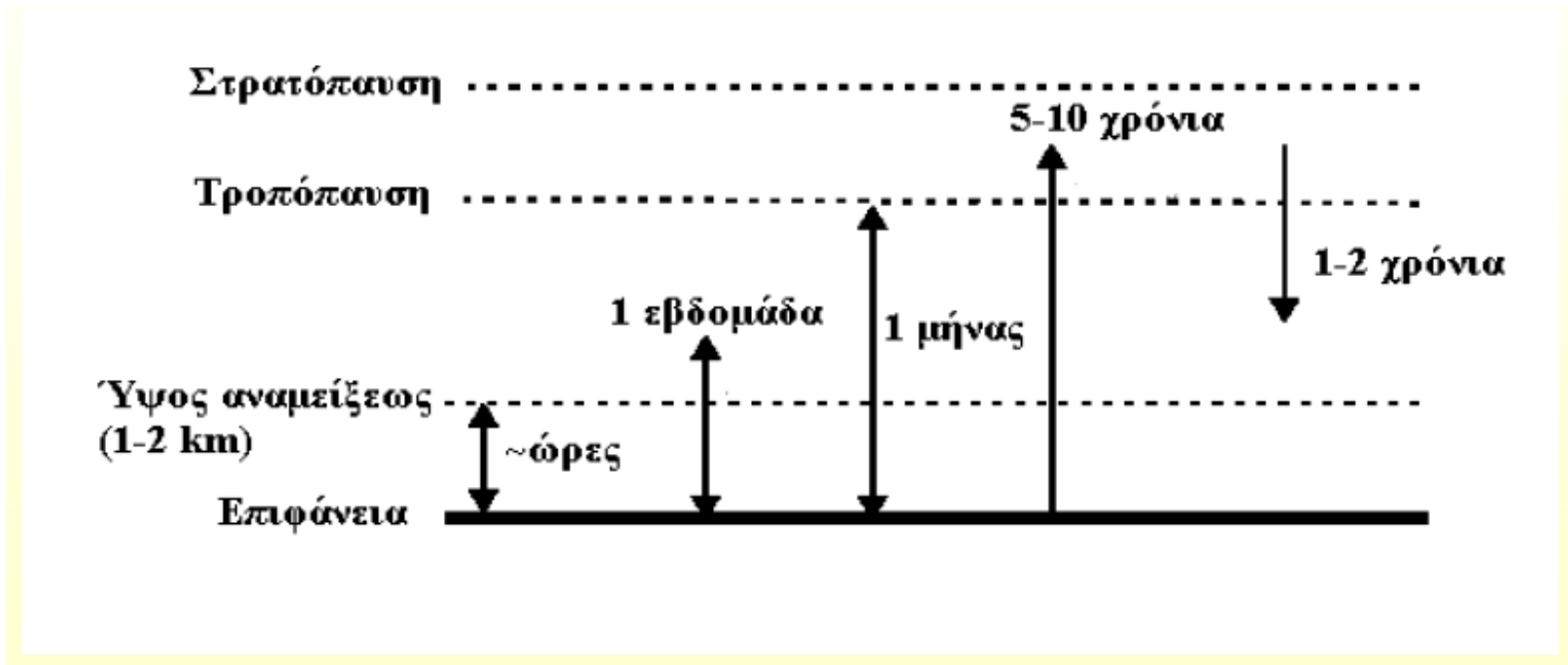
- Ένταση

# Διασπορά/διάχυση λόγω ατμοσφαιρικών κινήσεων



# Διασπορά/διάχυση λόγω ατμοσφαιρικών κινήσεων

..... η τοποθεσία αλλά και ο «χρόνος ζωής» εξαρτώνται από τις ατμοσφαιρικές κινήσεις





# Απομάκρυνση ρύπων από την ατμόσφαιρα

Γίνεται κυρίως με την εναπόθεσή τους στο έδαφος ή σε κτήρια και σε άλλες κατασκευές ή σε υδάτινες επιφάνειες ή σε έμβιους οργανισμούς. Η φυσική κατακάθιση προς τη Γη είναι σημαντική για πολλούς από τους αέριους ρύπους.

Σημαντικό ρόλο παίζουν οι μετεωρολογικές - ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η εναπόθεση σχετίζεται με την τραχύτητα, την ελκτικότητα κάθε ρύπου από έδαφος, και τις μετεωρολογικές συνθήκες Ο χώρος απομάκρυνσης ονομάζεται καταβόθρα.

Μπορούν να διαλυθούν στα σύννεφα, στη βροχή, στην ομίχλη ή και στο χιόνι. Καλείται υγρή εναπόθεση.

Εάν είναι μικρών σωματιδίων, μεταφέρονται επίσης στο έδαφος ή απορροφούνται από υλικά χωρίς να διαλυθούν σε νερό. Ξηρή εναπόθεση.

# Απομάκρυνση ρύπων από την ατμόσφαιρα

Η μελέτη της εναπόθεσης γίνεται με μέτρηση της ταχύτητας εναπόθεσης κάθε ρύπου.

Εξαρτάται από την αντίσταση που προβάλλουν τα διάφορα επιφανειακά στοιχεία και τα κατωτέρα τμήματα της ατμόσφαιρας.

Σχετίζεται με την τραχύτητα, την ελκτικότητα της επιφάνειας και τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν.

Για την ποσοτικοποίηση εισάγεται η έννοια του ηλεκτρικού ανάλογου. Δηλαδή παρουσιάζει μια ηλεκτρική αντίσταση ή συνδυάζονται πολλές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

# Καπνοθύσανος

- Τα καυσαέρια απελευθερώνονται από καμινάδες και τα αέρια αναμειγνύονται με τον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Καθώς ο καπνοθύσανος διεισδύει στον ατμοσφαιρικό αέρα, η διάμετρος διευρύνεται, ειδικά όταν μετακινείται κατά την διεύθυνση του ανέμου.
- Τα αέρια αυτά είναι θερμότερα και εκπέμπονται με μεγάλη ορμή, συνεπώς ανέρχονται, παράλληλα κάμπτεται και διασπείρεται.
- **Το τελικό του ύψος ονομάζεται ενεργό ή αποτελεσματικό ύψος της καμινάδας  $h_e$  ή (H) και είναι ψηλότερο από το ύψος της  $h_{st}$**   
$$h_e = h_{st} + \Delta h$$
- Η  $\Delta h$ , ανύψωση του καπνοθυσάνου = το ύψος στο οποίο ο καπνοθύσανος γίνεται παθητικός, δηλαδή ακολουθεί την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα

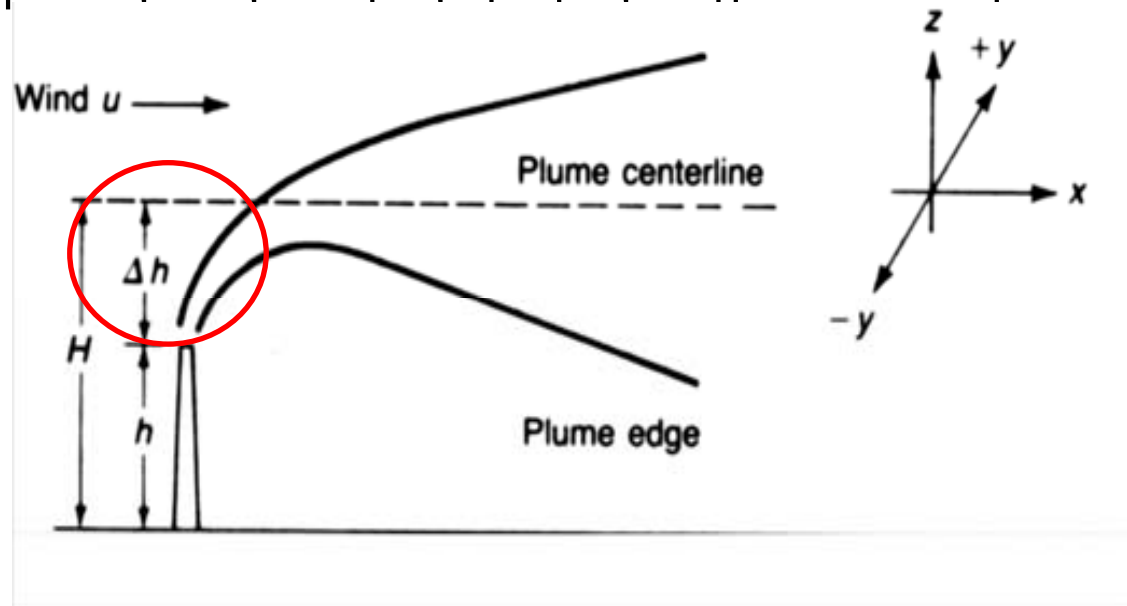
# Καπνοθύσανος

Οι καμινάδες είναι σχεδιασμένες να εκπέμπουν καπνό.

Το ρυπασμένο αέριο ρεύμα από μια καμινάδα καλείται πλούμιο (plume). Η ατμόσφαιρα έχει την δυνατότητα να διασπείρει τις εκπομπές, αλλά αυτή η δυνατότητα είναι περιορισμένη.

**Στιγμιαία εκπομπή (puff):**

η ταχεία απελευθέρωση ποσότητας ενός υλικού στην ατμόσφαιρα και θα διασπαρθεί από τις διαταραχές του τυρβώδους πεδίου. Μια συνεχής πηγή μπορεί να θεωρηθεί ως ένας άπειρος αριθμός στιγμιαίων εκπομπών.



# Υπολογισμός ανύψωσης

$$\Delta h (x) = C_1 Q_h^a x^b u^c$$

Για την απομάκρυνση των ατμοσφαιρικών Ρύπων

Όπου  $C_1$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  σταθερές,

$x$  είναι η πορεία του καπνοθυσάνου ,

$u$  είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πηγής και

$Q_h$  ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας από την πηγή.

- $\dot{Q}_h$  ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας από την πηγή

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_m \cdot c_p \cdot (T_s - T) \text{ (kW)}$$

$c_p$ , ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση,

$T_s$ , θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων,

$T$ , θερμοκρασία αέρα στο ύψος της καμινάδας  $h_{st}$  (καμινάδας)

$\dot{Q}_m$  ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης μάζας

- $\dot{Q}_m$  ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης μάζας

$$\dot{Q}_m = \rho_s \cdot \pi \cdot r_s^2 \cdot w_{gs} \text{ (kg / s)}$$

$\rho_s$ , πυκνότητα εξερχόμενου καυσαερίου,

$r_s$ , ακτίνα καμινάδας εξόδου των καυσαερίων

[ισοδύναμο  $r_s = (A/\pi)^{1/2}$ , για μη κυκλική έξοδο με εμβαδόν A]

$w_{gs}$ , ταχύτητα εξόδου καυσαερίων, κατά την κατακόρυφο.

# Υπολογισμός ροής της άνωσης

$$F_b = g w_{gs} r_s^2 (T_s - T) / T_s$$

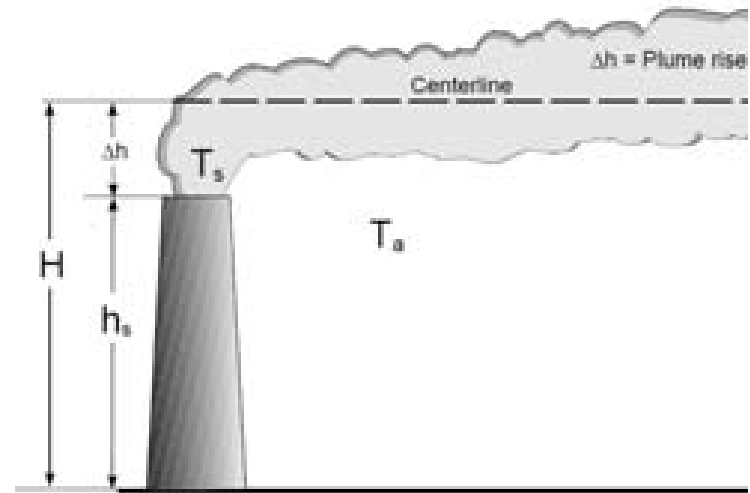
**Μέθοδος Briggs:** υπολογίζει την ροή της άνωσης  $F_b$

$T_s$  είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων

$T$  είναι η θερμοκρασία αέρα στην πηγή

$r_s$  είναι η ακτίνα της καμινάδας

$w_{gs}$  ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων κατά την κατακόρυφο





## Υπολογισμός ροής της ορμής

$$F_m = w_{gs}^2 r_s^2 (\rho_s / \rho) \sim w_{gs}^2 r_s^2$$

Η τελική ανύψωση σε ευσταθείς συνθήκες, δίνεται:

$$\Delta h = 2,6 \cdot \left( \frac{F_b}{u \cdot N^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Όπου N, η συχνότητα Brunt-Vaisalla  $N = \sqrt{-\frac{g}{\rho_w} \cdot \frac{\partial \rho_w}{\partial z}}$

Σε ασταθείς

$$\Delta h = 2,1 \cdot \left( \frac{r_s \cdot u^2}{N^2 \cdot F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)^3} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Για ουδέτερες συνθήκες:

$$\Delta h = 0,76 \cdot \left( \frac{r_s \cdot u^2}{u_*^2 \cdot F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)^3} \right)$$

- Υπάρχει περίπτωση οι αεροδυναμικές επιδράσεις να μην επιτρέψουν τις ανοδικές κινήσεις από την καμινάδα, οδεύοντας το προς το έδαφος.
- Το **κατώρευμα**, αυτό γίνεται όταν ο λόγος της ταχύτητας εξόδου προς την ταχύτητα του ανέμου είναι μικρός

Αποτέλεσμα– **προκύπτουν αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων.**

# Διασπορά vs Διάχυση

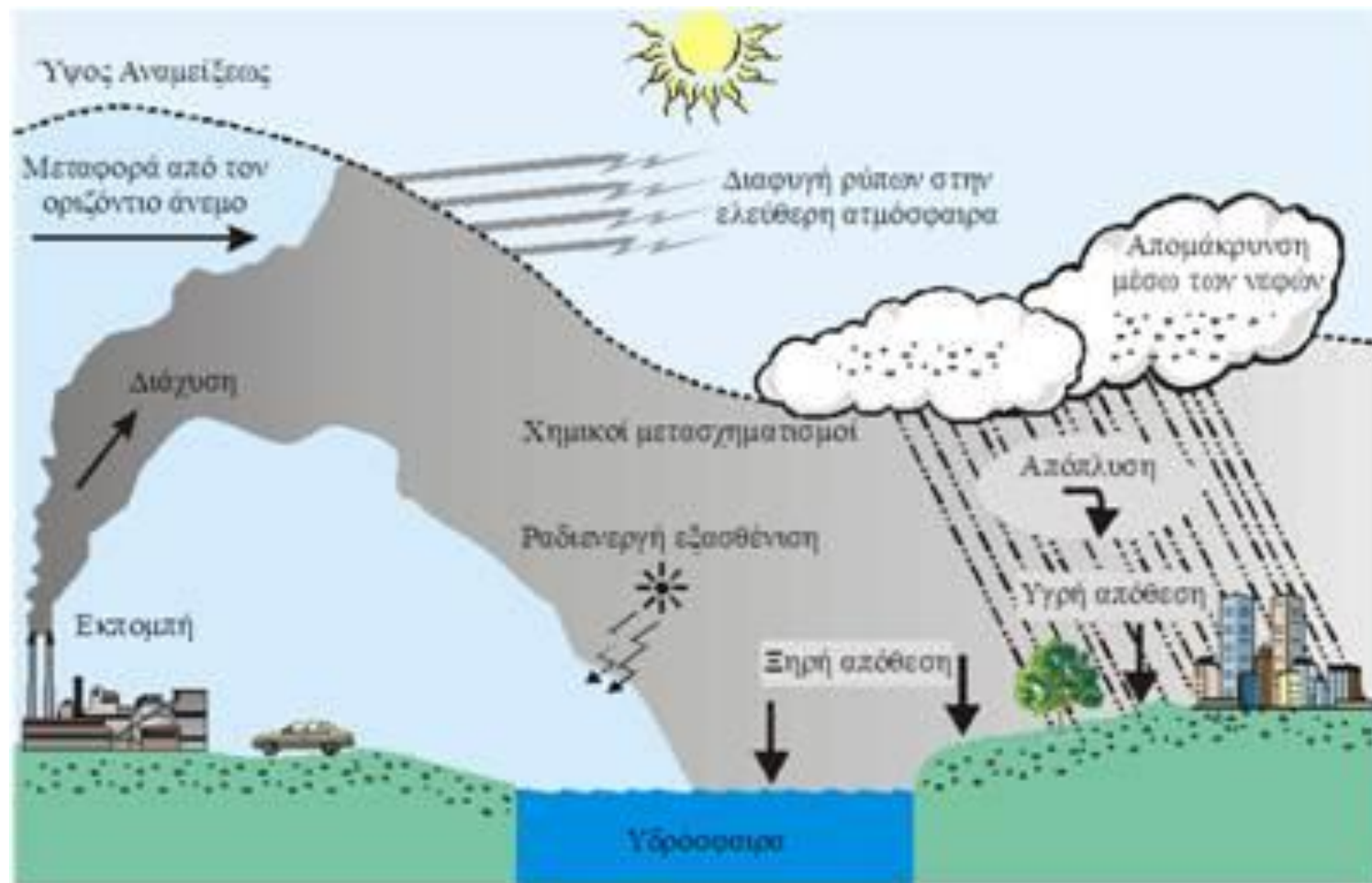
Η διασπορά ρύπων (pollutant dispersion) συνδέεται με τη διάχυση (diffusion) σε 2 επίπεδα:

(1) Η διασπορά είναι ένα είδος ανάμιξης (δηλ. σε μικροσκοπικό επίπεδο απαιτείται διάχυση μορίων). Αυτή η μικροσκοπική «διασπορά» δεν είναι πλήρως κατανοητή, αλλά γίνεται ιδιαίτερα γρήγορα.

2) Η διασπορά και η διάχυση περιγράφονται με παρόμοιες μαθηματικές σχέσεις.

$$[\text{Διασπορά}] = [\text{Μεταφορά μάζας λόγω ροής (ανέμου)}] + [\text{Διάχυση}]$$

(ή ως τυρβώδης διάχυση)



# Η ατμοσφαιρική διάχυση

Κύριος στόχος να περιγραφεί μαθηματικά η χωρική και η χρονική κατανομή των ρύπων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα.

Περιγράφεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση ατμοσφαιρικής διάχυσης του Fick, με την χρήση της εξίσωσης κατανομής του Gauss

Μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς:

Οι μαθηματικές σχέσεις που ερμηνεύουν και προβλέπουν τις συγκεντρώσεις των ρύπων λόγω διασποράς (και πρόσκρουσης) του πλουμίου.

Ενσωματώνουν μετεωρολογικές συνθήκες:

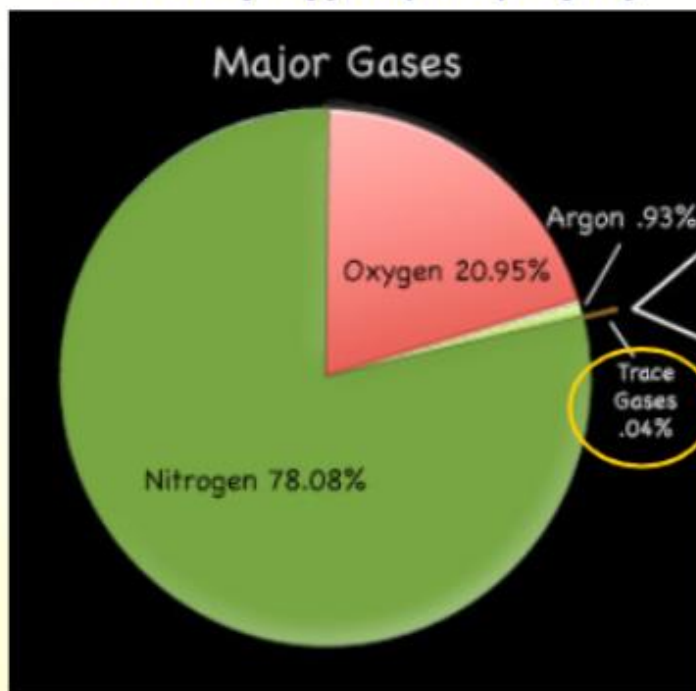
Θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, αστάθεια και τοπογραφία.

# Μοντέλα διασποράς

- Στόχος της διάχυσης είναι η περιγραφή της κατανομής των ρύπων που απελευθερώνονται.
- Η διάχυση περιγράφεται όπως ενός ρευστού.
- Η πρώτη προσέγγιση διασποράς ήταν από τον **Gauss**, άλλα και στη συνέχεια από τους Euler και Lagrange.
- Τα μοντέλα διασποράς προβλέπουν τις συγκεντρώσεις ρύπου.

## *Γιατί αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται τα μοντέλα διασποράς;*

### **Σύσταση της ατμόσφαιρας**



*Μεταβολή σύστασης από  
ανθρωπογενείς δραστηριότητες*



*Αύξηση συγκεντρώσεων ουσιών  
- Ατμοσφαιρική ρύπανση*



*Επιβάρυνση και βλαβερές  
συνέπειες στα οικοσυστήματα  
του πλανήτη και τα υλικά*



*Θέσπιση ορίων στις  
συγκεντρώσεις των ρύπων*



*Γνώση των συγκεντρώσεων  
των ρύπων*



# Η ατμοσφαιρική διάχυση

## Είδη μοντέλων:

(α) Γκαουσιανά (Gaussians): αξιοποιούν τη σχέση της κανονικής κατανομής. Χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση της επίπτωσης μη-αντιδρώντων ρύπων. Βασίζεται σε μέσες ως προς το χρόνο ατμοσφαιρικές μεταβλητές (Q σταθερό, το πλούμιο έχει κανονική κατανομή, ομοιόμορφη ταχύτητα ανέμου και διεύθυνση, ανάκλαση του πλουμίου στην επιφάνεια).

(β) Αριθμητικά μοντέλα: καλύτερα σε εφαρμογή σε πόλεις και όπου υπάρχουν αντιδρώντες ρύποι. Είναι πολύπλοκα και απαιτούν πολλά δεδομένα.

(γ) Στατιστικά μοντέλα: όταν η γνώση των φυσικοχημικών διεργασιών της πηγής είναι ελλιπής.

(δ) Φυσικά μοντέλα: απαιτούν τη μοντελοποίηση της ροής των ρευστών (fluid modeling).

## Αριθμητικά μοντέλα,

Σύστημα εξισώσεων που στηρίζονται στις αρχές διατήρησης της ορμής, ενέργειας και μάζας.

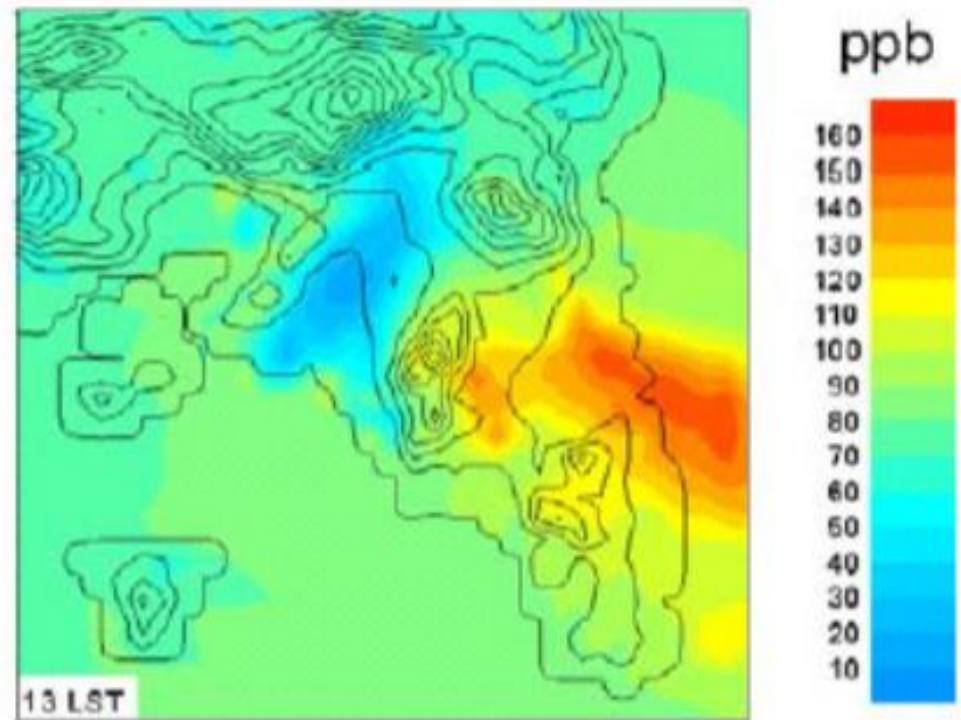
Επίλυση των εξισώσεων με αριθμητικές μεθόδους

## Πλεονεκτήματα,

- Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις πολύπλοκων συνθηκών (εμβαδικές πηγές, περιοχές με έντονο ανάγλυφο, πολύπλοκες μετεωρολογικές συνθήκες)
- Έρευνα

## Μειονεκτήματα,

- Μεγάλες απαιτήσεις σε δεδομένα
- Μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη



- **Φυσικά μοντέλα**

**Βάση:** Μικρής κλίμακας αναπαραστάσεις των φαινομένων σε εργαστήρια.

Αναπαράσταση πηγής/πηγών και τοπογραφίας.

Προσομοίωση διαφορετικών ατμοσφαιρικών συνθηκών.

Τυπικό μέγεθος αεροσύρραγγας: Δεκάδες μέτρα, 10m<sup>2</sup> εγκάρσια τομή.

Μέτρηση με επιστημονικά όργανα.

**Χρήση:**

Πολύπλοκη διαμόρφωση πηγών ή/και τοπογραφίας.

Παράσυρση αέριων ρύπων, κατώρευμα

Διασπορά αερίων μεγάλης πυκνότητας.

**Πλεονεκτήματα:**

- Μελέτες φαινομένων και επιδράσεων μικρής κλίμακας.
- Πολύπλοκες καταστάσεις ροής και ανάγλυφου

**Μειονεκτήματα:**

- Μεγάλο κόστος, χρονοβόρο
- Εφαρμογή σε μια μόνο περιοχή
- Προσομοίωση λίγων ατμοσφαιρικών συνθηκών.

- Στατιστικά μοντέλα

**Βάση:** Χρονοσειρές πειραματικών μετρήσεων.

Ημιεμπειρικές στατιστικές μεταξύ συγκεντρώσεων ρύπων και άλλων μεταβλητών όπως θερμοκρασία, άνεμος κ.λπ.

Υπολογισμός συγκεντρώσεων σε διάφορα χρονικά διαστήματα ανεξάρτητα από το χρονικό διάστημα καταγραφής δεδομένων.

**Χρήση:**

Μη πλήρης κατανόηση των φυσικών και χημικών διεργασιών.

Έλλειψη των απαραίτητων βάσεων δεδομένων για τη χρήση άλλων μοντέλων.

**Πλεονεκτήματα:**

- Απλά και εύκολα στη χρήση.
- Συγκρίσιμη ακρίβεια.

**Μειονεκτήματα:**

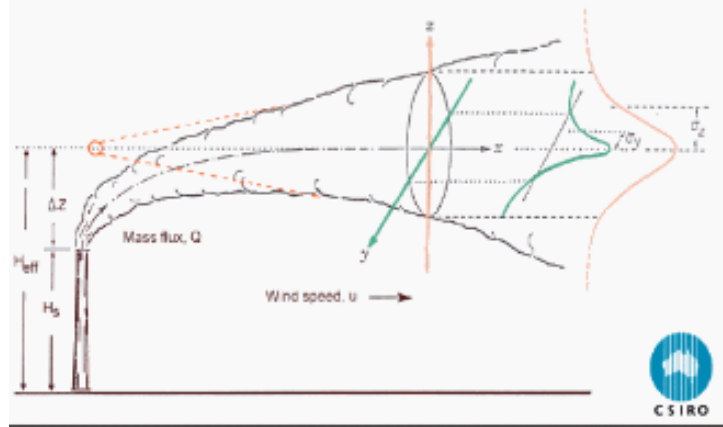
- Μικρή χωρικής και χρονική κατανομή.
- Ύπαρξη οργάνων μέτρησης των παραμέτρων

## Gaussian models (μοντέλα θυσάνου του Gauss)

Υπολογισμός της διασποράς των ρύπων.

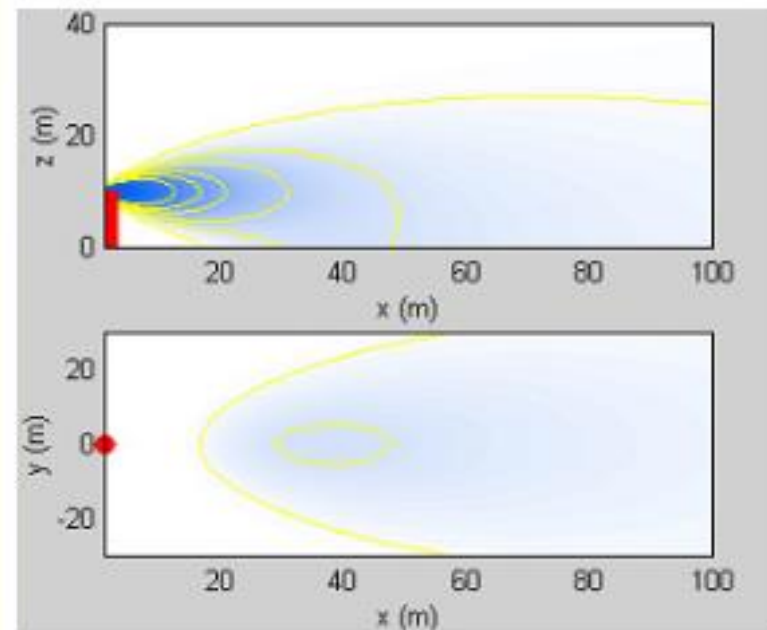
Η εγκάρσια και η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων – ακολουθούν κανονική κατανομή (κατανομή Gauss)

Geometry of a Gaussian Plume



### Πλεονεκτήματα,

- Απλά στη χρήση
- Περιορισμένες απαιτήσεις σε στοιχεία εισαγωγής
- Κατάλληλα για περιβαλλοντικές μελέτες



# Κανονική κατανομή

Ο τύπος της κανονικής κατανομής δημοσιεύτηκε πρώτη φορά από τον *Abraam De Moivre* , 1733 αλλά πολλοί άλλοι μαθηματικοί συνέβαλλαν επίσης στην περιγραφή της κατανομής, μεταξύ άλλων, ο **Friedrich Gauss (1777-1855)**.

Η κανονική κατανομή αποτελεί το περισσότερο χρησιμοποιούμενο **πρότυπο κατανομής** λόγω του ότι περιγράφει με επιτυχία πολλά φαινόμενα τα οποία εξαρτώνται από τυχαίες συνεχείς μεταβλητές.

# Κανονική κατανομή

- Η μαθηματική περιγραφή της κανονικής κατανομής δίνεται από τη σχέση

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}$$

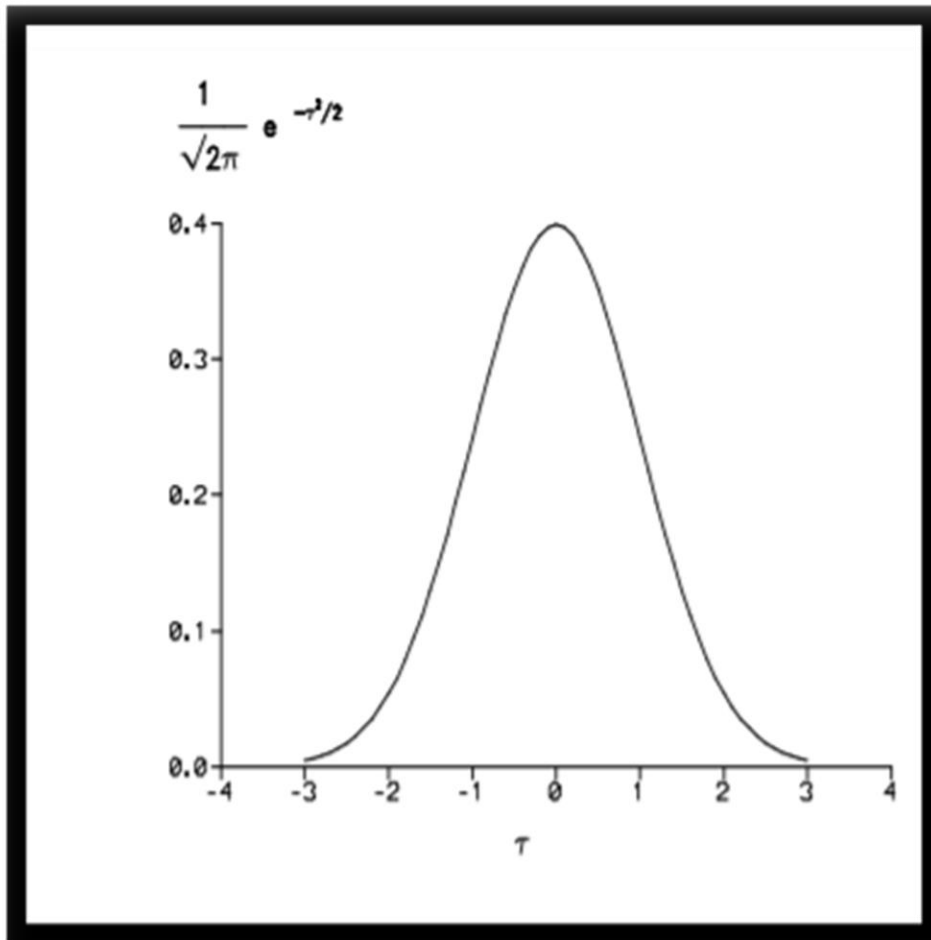
Όπου:

$\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση,

$M$  είναι η μέση τιμή και

$N$  είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων (όταν η συχνότητα δίνεται επί της εκατό τότε  $N = 100\%$ ).

# Κανονική κατανομή



Όταν γίνει γραφική παράσταση με το  $(x-M)$  στη τετμημένη και το  $y$  στη τεταγμένη, η συνάρτηση εμφανίζεται με σχήμα καμπάνας

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}$$

κανονική κατανομή, όπου  $\tau = (x-M)/\sigma$



## Εξίσωση κανονικής κατανομής

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}$$

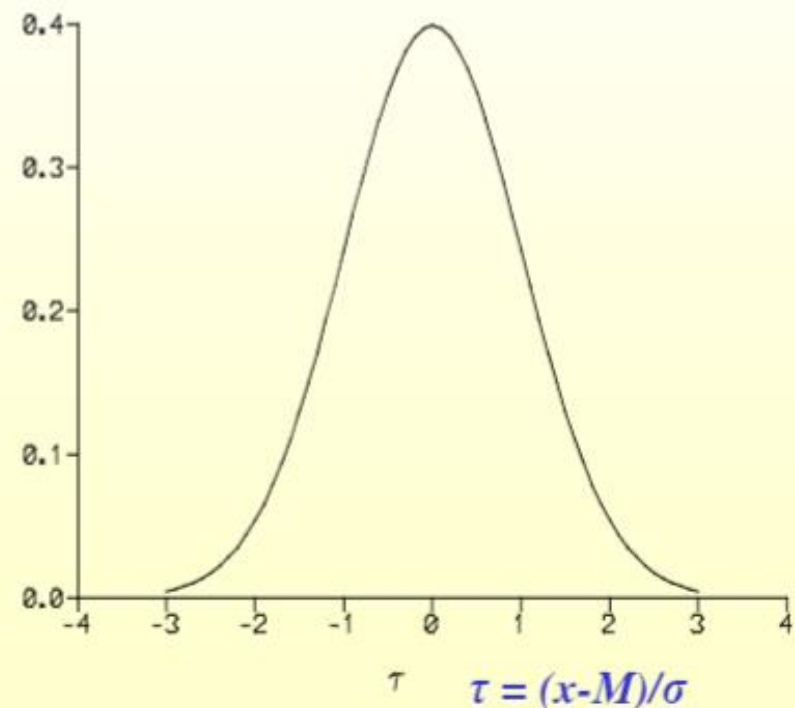
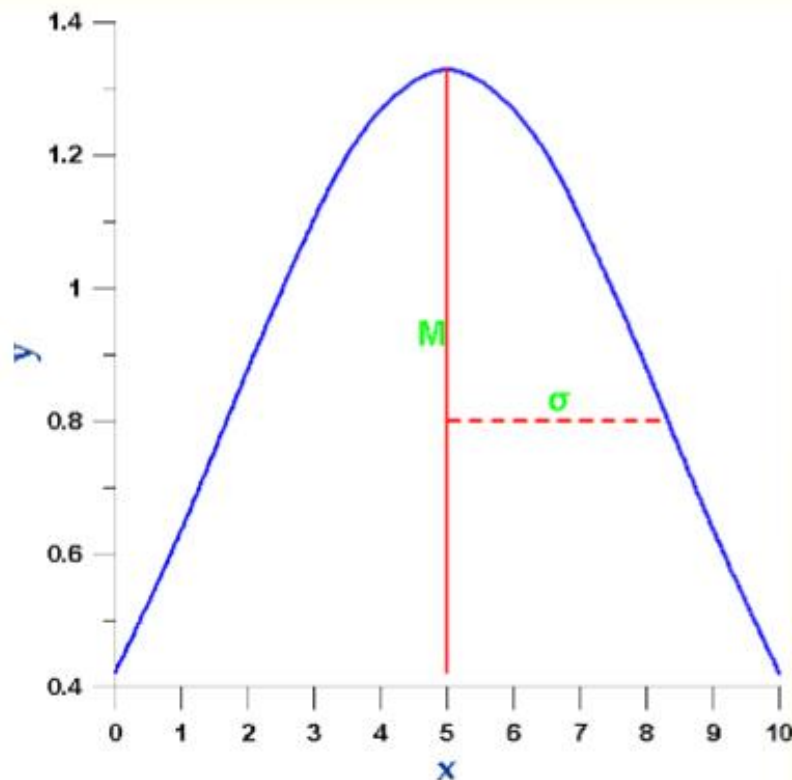
**M:** Μέση τιμή  $x$

**$\sigma$ :** Τυπική απόκλιση

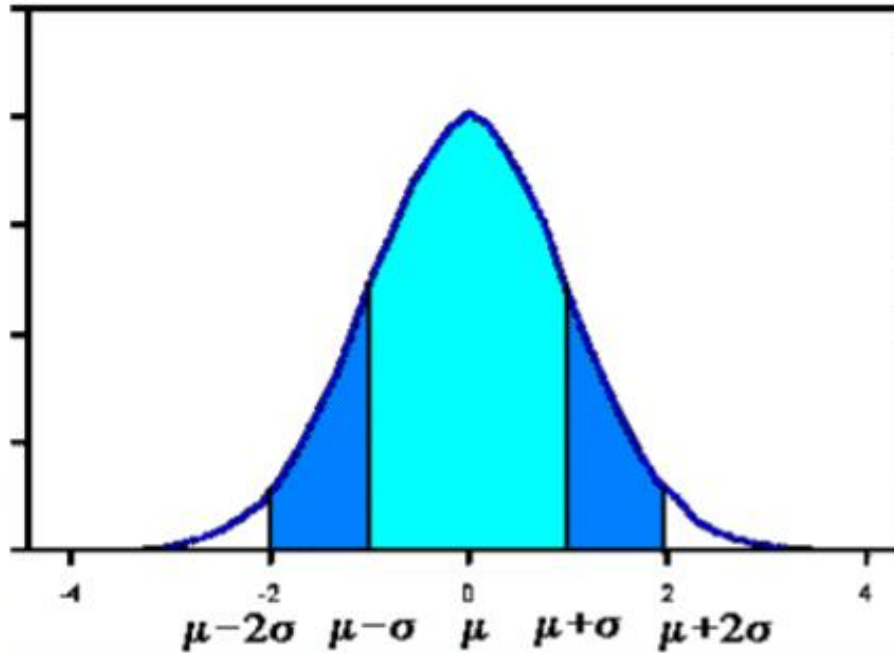
**N:** Αριθμός παρατηρήσεων

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\tau^2/2}$$

**Κανονική κατανομή**



## Χαρακτηριστικά κανονικής κατανομής



$$\mu = x - M$$

$(\mu - \sigma, \mu + \sigma) \rightarrow 68.2\%$  παρατηρήσεων

$(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma) \rightarrow 95.4\%$  παρατηρήσεων

$(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma) \rightarrow 99.7\%$  παρατηρήσεων

- Συμμετρική
- Ταύτιση μέσης τιμής, επικρατούσας τιμής και διαμέσου,
- Ορισμός πλήρως από  $M$  &  $\sigma$ ,
- Το Άθροισμα ή διαφορά δύο ανεξάρτητων κανονικών κατανομών είναι επίσης κανονική κατανομή.

Κανονική κατανομή εφαρμογή στις περιβαλλοντικές επιστήμες π.χ. κατανομή σφαλμάτων

# Κανονική κατανομή

- Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική και μία σημαντική της ιδιότητα είναι ότι η μέση τιμή (mean value), η επικρατούσα τιμή (mode) και η διάμεσος (median) συμπίπτουν
- **68%** των παρατηρήσεων βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ  $M - \sigma$  και  $M + \sigma$
- 95% των παρατηρήσεων βρίσκονται στο διάστημα  $M - 2\sigma$  και  $M + 2\sigma$
- Η κανονική κατανομή ορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους  $M$  και  $\sigma$ . Με άλλα λόγια, διαφορετικοί συνδυασμοί των  $M$  και  $\sigma$  καθορίζουν διαφορετικές κανονικές κατανομές. Διαφορετικές τιμές του  $M$  μετακινούν την καμπύλη της κατανομής κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Διαφορετικές τιμές του  $\sigma$  προσδιορίζουν σε ποιο βαθμό η καμπύλη γίνεται επίπεδη ή αιχμηρή
- **Το άθροισμα (ή η διαφορά) δύο ανεξάρτητων κανονικών κατανομών είναι επίσης κανονική κατανομή.**

# Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς

- Το Γκαουσιανό μοντέλο διασποράς δίνει την **δυνατότητα υπολογισμού του τρισδιάστατου πεδίου συγκέντρωσης ενός ρύπου**. Το πεδίο αυτό δημιουργείται από μια σημειακή πηγή εκπομπής (πχ μια καμινάδα) και βρίσκεται υπό χρονικά αμετάβλητες μετεωρολογικές συνθήκες και χρονικά αμετάβλητη-σταθερή εκπομπή.
- Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε μια σειρά παραδοχών όπως:
  1. Η πηγή των ρύπων είναι σημειακή (πχ καμινάδα).
  2. Η οριζόντια μεταφορά των ρύπων οφείλεται στον πνέοντα άνεμο.
  3. Όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα του θυσάνου, η διάχυση ακολουθεί την κανονική (Gaussian) κατανομή.
  4. Η εκπομπή (παροχή ) του ρύπου είναι σταθερή με το χρόνο.

# Παραδοχές του μοντελου

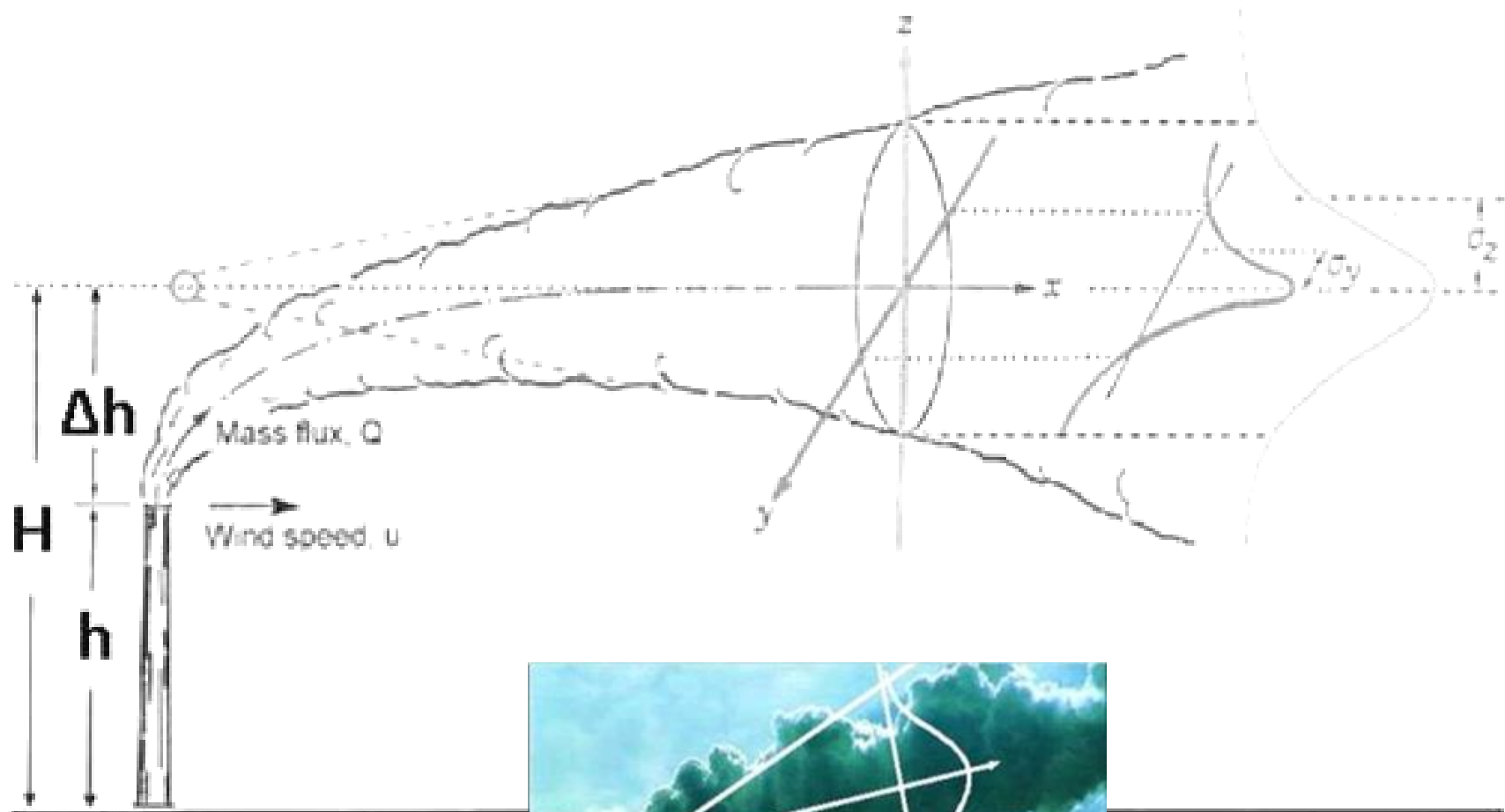
- Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι σταθερή σε κάθε ύψος αναφοράς και τουλάχιστον εντός του στρώματος που καλύπτει ο θύσανος.
- Οι ρύποι, μετά την εκπομπή τους δεν μετασχηματίζονται και δεν εμφανίζουν χημική δράση με άλλους ρύπους ή χημικά στοιχεία και ενώσεις της ατμόσφαιρας.
- Οι ρύποι μπορεί και να ανακλώνται από το έδαφος.
- Ο περιβάλλον χώρος είναι επίπεδος και χωρίς ψηλά εμπόδια.
- Η ατμόσφαιρα είναι ομογενής ως προς τις συνθήκες ευστάθειας ή αστάθειας, πράγμα που σημαίνει ότι σε όλα τα σημεία μελέτης της ατμόσφαιρας θεωρείται ότι επικρατούν οι ίδιες συνθήκες ευστάθειας ή αστάθειας.
- Οι ρύποι είναι σχετικά αδρανείς και στην περίπτωση των αερολυμάτων η αεροδυναμική τους διάμετρος είναι μικρότερη των 20  $\mu\text{m}$ .

# Στόχος μοντέλου

Ο βασικός στόχος ενός τέτοιου μοντέλου είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ενός ρύπου σε κάθε σημείο του χώρου [C(x,y,z)]

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, πρέπει να υπάρξουν μια σειρά από βήματα:

- Ο υπολογισμός της οριζόντιας συνιστώσας ( $u$ ) της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του χείλους της καμινάδας,
- Ο υπολογισμός της κατακόρυφης ταχύτητας εκροής των καυσαερίων ( $u_s$ ) από την πηγή-καμινάδα,
- Ο υπολογισμός του ενεργού ύψους ( $H$ ) του θυσάνου,
- Η απόσταση ( $x_f$ ) κατά μήκος του άξονα  $xx'$  του θυσάνου στην οποία παρατηρείται η μέγιστη ανύψωση του θυσάνου (ενεργό ύψος),
- Ο προσδιορισμός της ευστάθειας ή αστάθειας της ατμόσφαιρας,
- Ο μηχανισμός ανύψωσης των ρύπων (άνωση ή/και ορμή),
- Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ρύπου σε κάθε σημείο του χώρου ( $x,y,z$ ).



# Γκαουσιανό μοντέλο

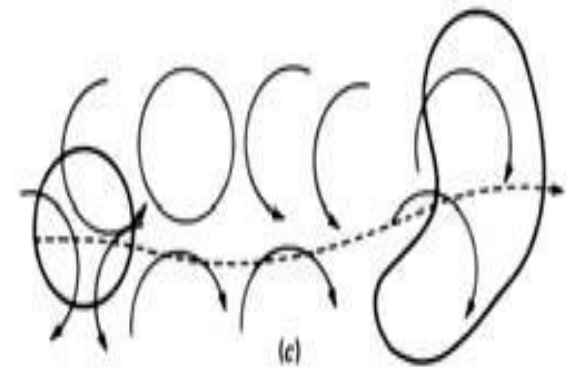
$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[ e^{-\frac{(H_{eff}^2 - z)}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z + H_{eff}^2)}{2\sigma_z^2}} \right]$$

- $c$  = συγκέντρωση σε μόνιμες συνθήκες στο σημείο  $(x, y, z)$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$
- $Q$  = ρυθμός εκπομπής,  $\text{mg}/\text{s}$
- $\sigma_y, \sigma_z$  = **οριζόντια και κατακόρυφη παράμετρος εξάπλωσης** (m), που είναι παράμετροι της απόστασης  $x$  και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας.
- $u$  = μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας,  $\text{m}/\text{s}$
- $y$  = οριζόντια απόσταση από τον κεντρικό άξονα του πλουμίου, m
- $z$  = κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο του εδάφους, m
- $H$  = ενεργό ύψος καμινάδας ( $H = h + \Delta h$ ), m
- $h$  = φυσικό ύψος καμινάδας, m
- $\Delta h$  = ανύψωση πλουμίου, m



# Διασπορά ρύπων

- Οι καμινάδες είναι σχεδιασμένες να εκπέμπουν καπνό. Το ρυπασμένο αέριο ρεύμα από την καμινάδα καλείται πλούμιο (plume).
- Η ατμόσφαιρα έχει την δυνατότητα να διασπείρει τις εκπομπές, αλλά αυτή η δυνατότητα είναι περιορισμένη.
- **Στιγμιαία εκπομπή (puff):** η ταχεία απελευθέρωση ποσότητας ενός υλικού στην ατμόσφαιρα και θα διασπαρθεί από τις διαταραχές του τυρβώδους πεδίου.
- Μια συνεχής πηγή μπορεί να θεωρηθεί ως ένας άπειρος αριθμός στιγμιαίων εκπομπών



# Η γκαουσιανή προσέγγιση καπνοθύσανου

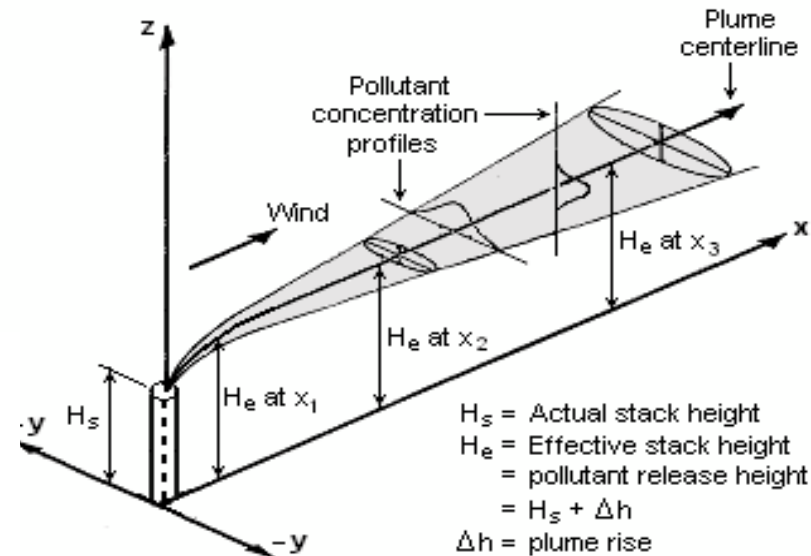
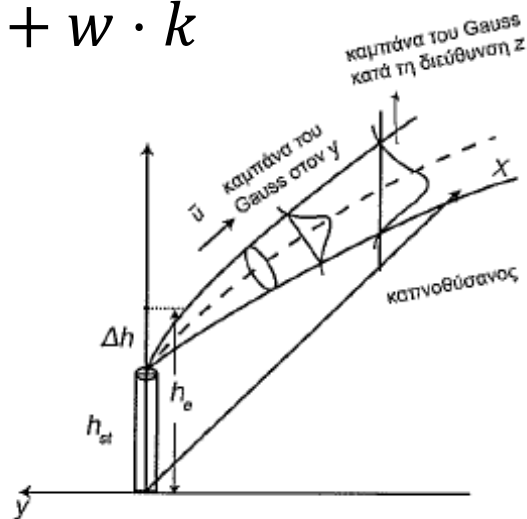
Βασίζεται σε απλή εξίσωση που περιγράφει το τρισδιάστατο πεδίο της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων από υπερυψωμένη σημειακή πηγή.

Απελευθερώνει ρύπους υπό ευσταθείς μετεωρολογικές συνθήκες.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla c = K \cdot \nabla^2 c$$

Όπου, διάνυσμα,

$$\vec{V} = u \cdot \vec{i} + v \cdot \vec{j} + w \cdot \vec{k}$$



## Διασπορά ρύπων - πλούμια

- Καπνός (σωματίδια και αέρια) εξέρχεται από καμινάδα (ή και το τσιγάρο)
- Σε κρύα και καθαρή ημέρα, το πλούμιο (καυσαέριο) θα ανέλθει αρχικά στον ουρανό, θα καμφθεί στη συνέχεια (ενώ ανέρχεται) και θα «χαθεί» (διαχυθεί)
- Με δυνατό αέρα, θα διασπαρθεί πολύ γρήγορα.
- Σε φθινοπωρινό πρωινό με άπνοια (και θερμοκρασιακή αναστροφή) ο καπνός θα «ταξιδεύει» οριζόντια και θα παγιδευείται.

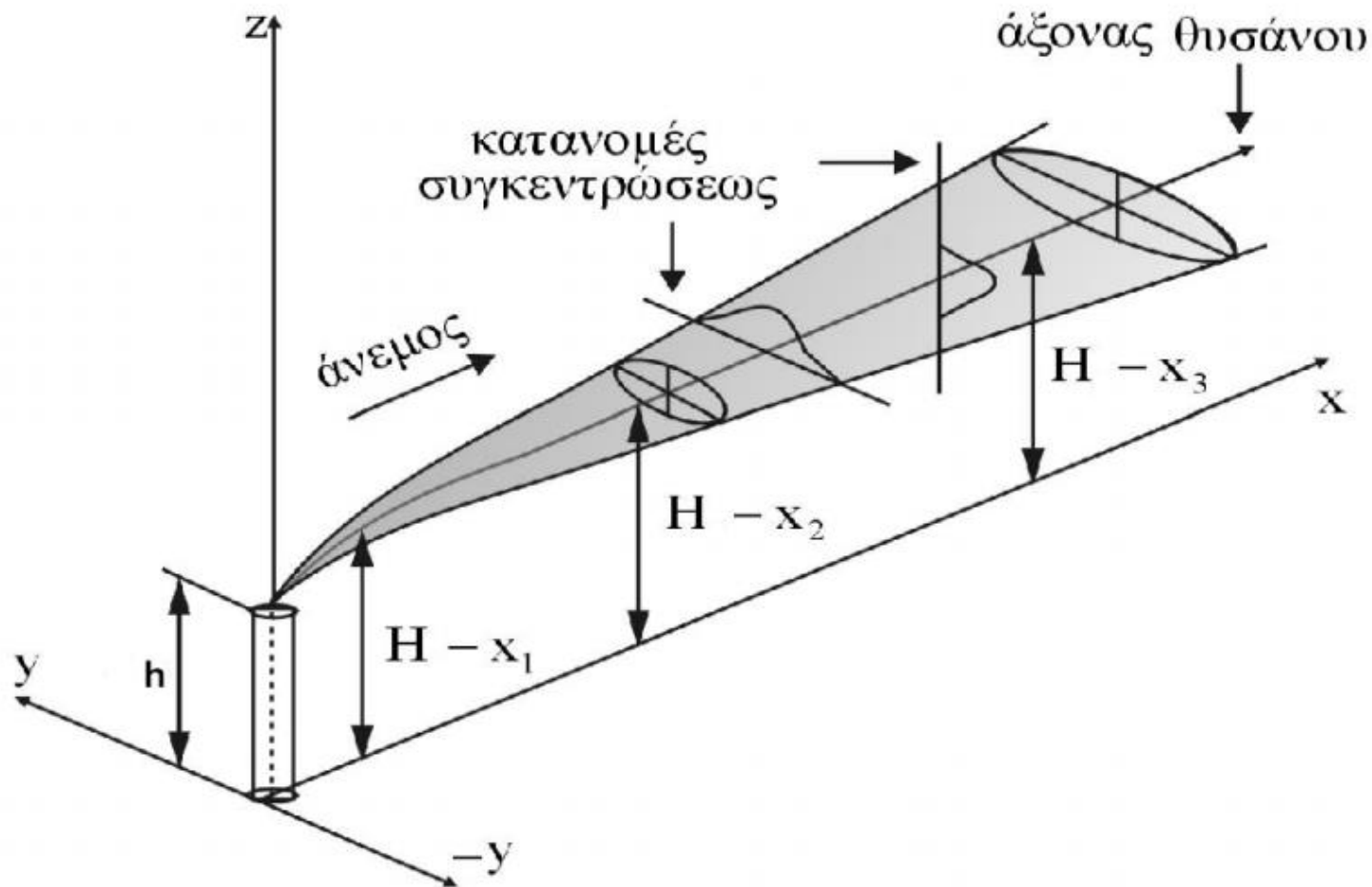


## Διασπορά ρύπων – τύποι πλούμιου

- **Ανωστικά πλούμια** (buoyant plumes)  
Ελαφρύτερα από τον αέρα, λ.χ. καυσαέρια από καυστήρες, μεθάνιο κ.λπ. (όταν είναι θερμά)
- **Πυκνά πλούμια** (Dense gas plumes)  
βαρύτερα από τον αέρα, λ.χ. CO<sub>2</sub>, ψυχρά αέρια κ.λπ.
- **Παθητικά ή ουδέτερα πλούμια** (Passive or neutral plumes)  
Περίπου στην πυκνότητα του αέρα.

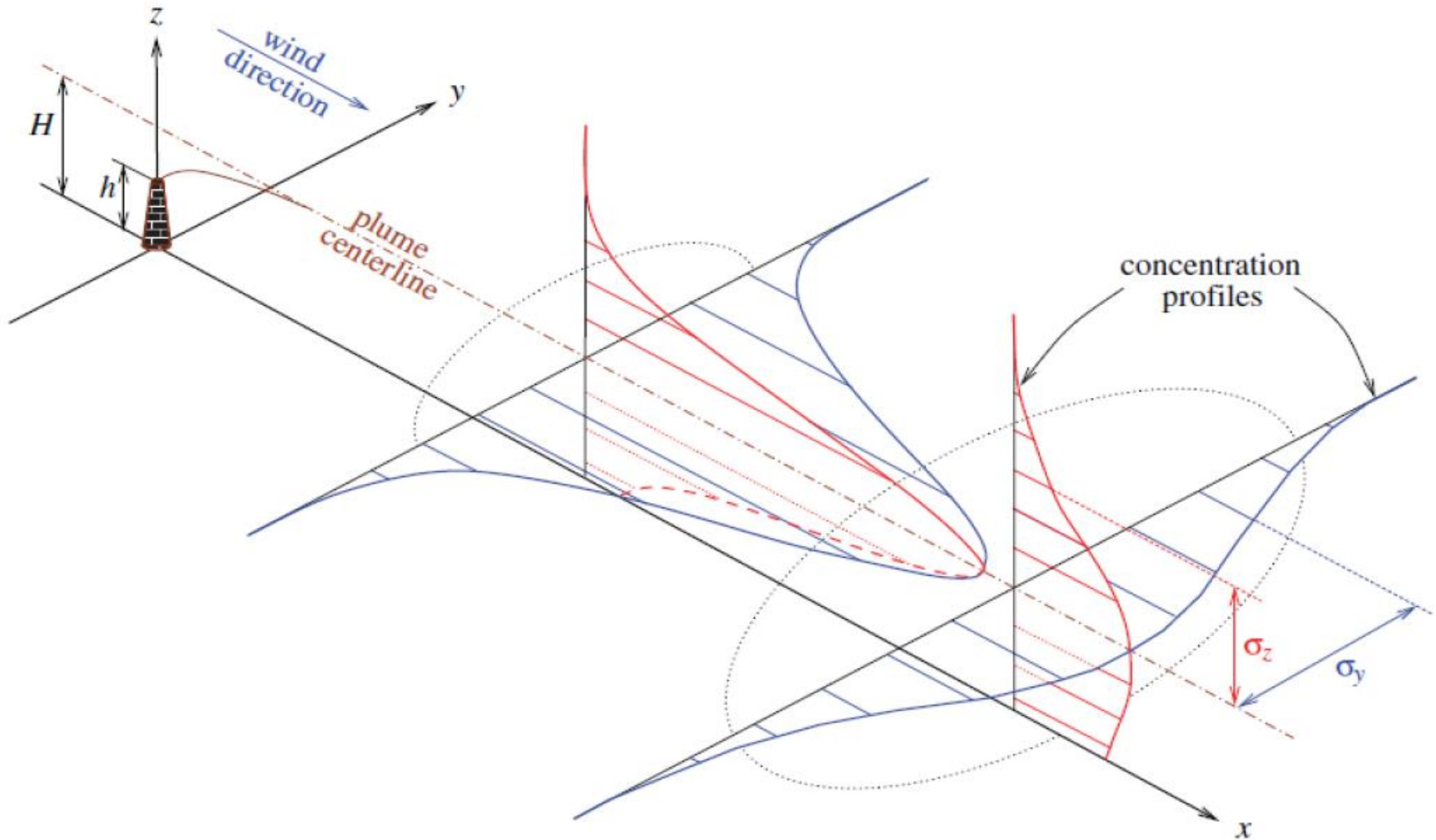
## Το μοντέλο, η λογική επίλυση

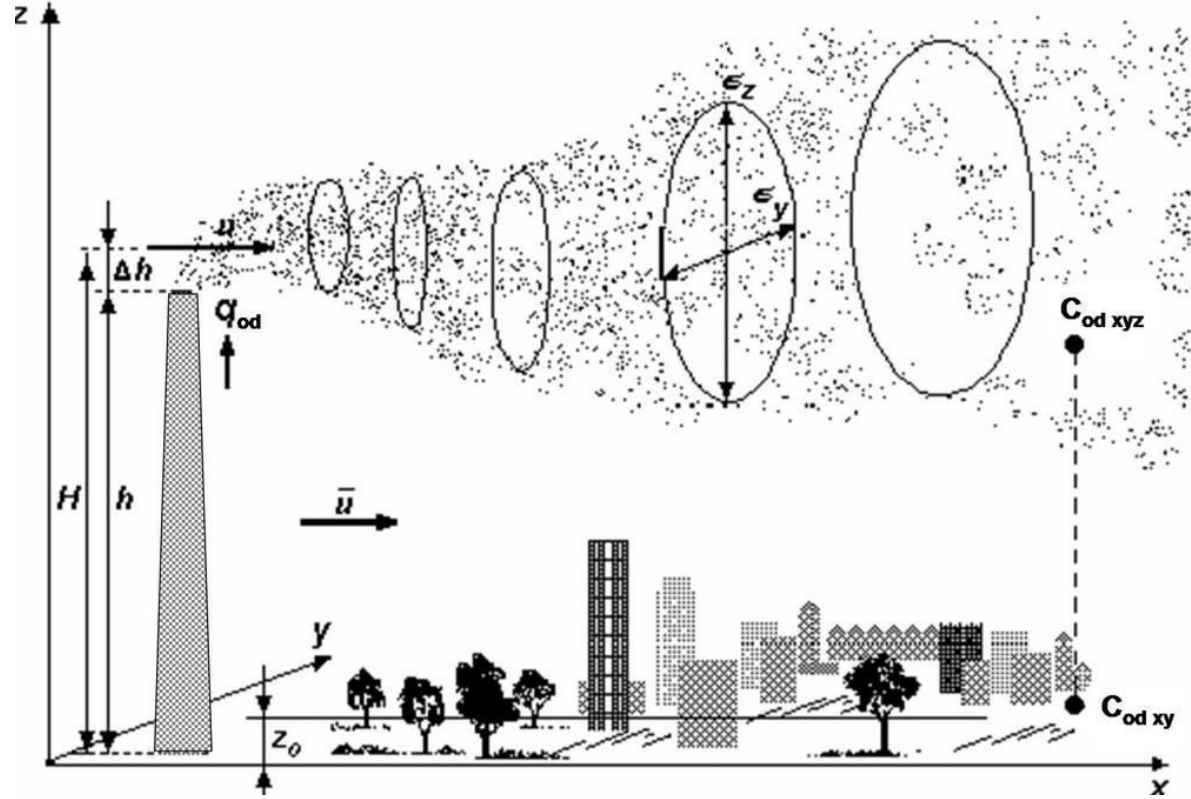
Στο σχήμα παρουσιάζεται η λογική ενός Gaussian Model διάχυσης και διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης



Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [1]

# Μορφή καπνοθυσάνου Gauss





$$C_{od,xyz} = \frac{q_{od}}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

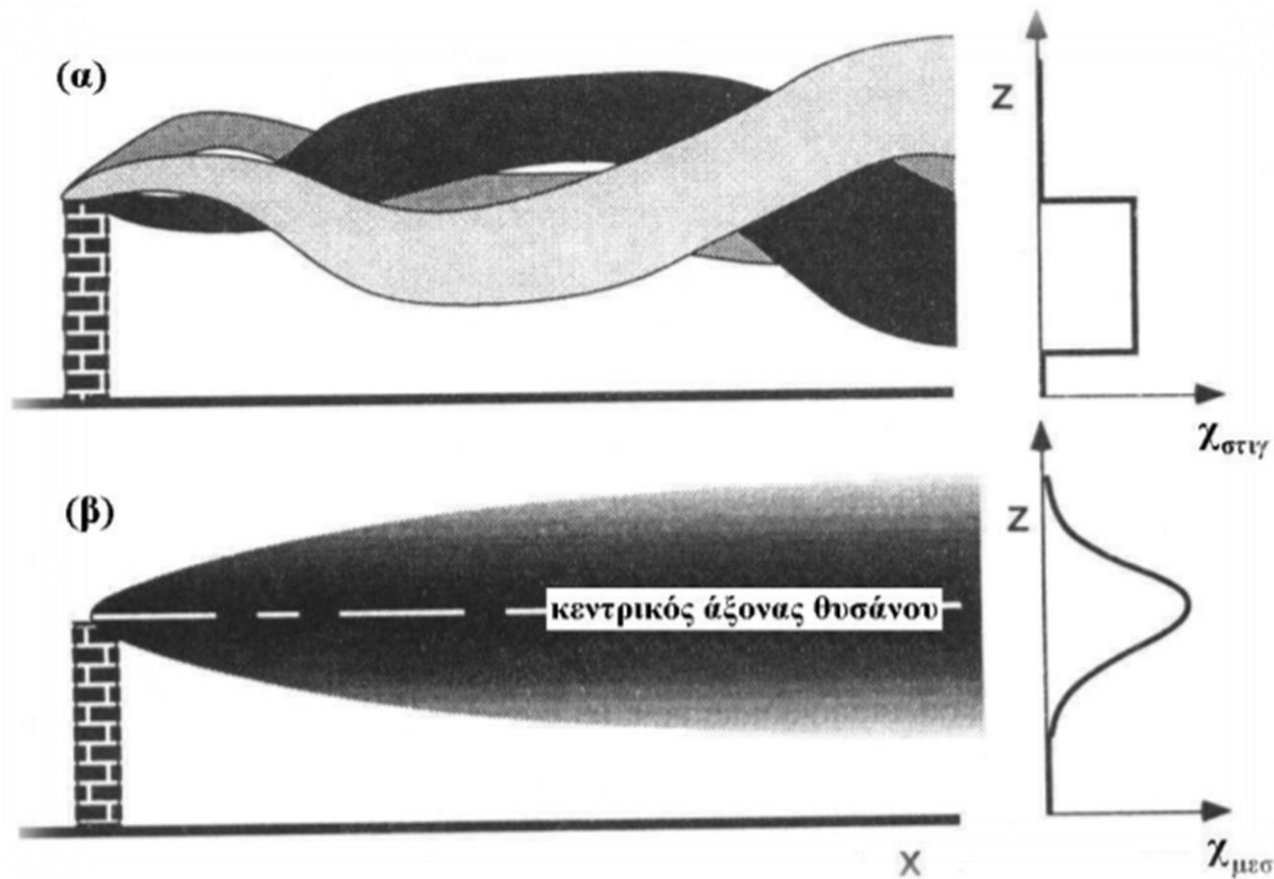
$$\begin{aligned} \sigma_y &= A x^a & A &= 0,08 \left(6 m^{-0,3} + 1 - \ln \frac{H}{z_0}\right) & a &= 0,367 (2,5 - m) \\ \sigma_z &= B x^b & B &= 0,38 m^{1,3} \left(8,7 - \ln \frac{H}{z_0}\right) & b &= 1,55 \exp(-2,35 m) \end{aligned}$$

# Εξίσωση Θυσάνου του Gauss

Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, τα μοντέλα που ακολουθούν αυτό το πρότυπο του Gauss είναι σε θέση να υπολογίσουν τις **μέσες συγκεντρώσεις ρύπων** που εκπέμπονται από συνεχείς ανυψωμένες πηγές με ικανοποιητική ακρίβεια,

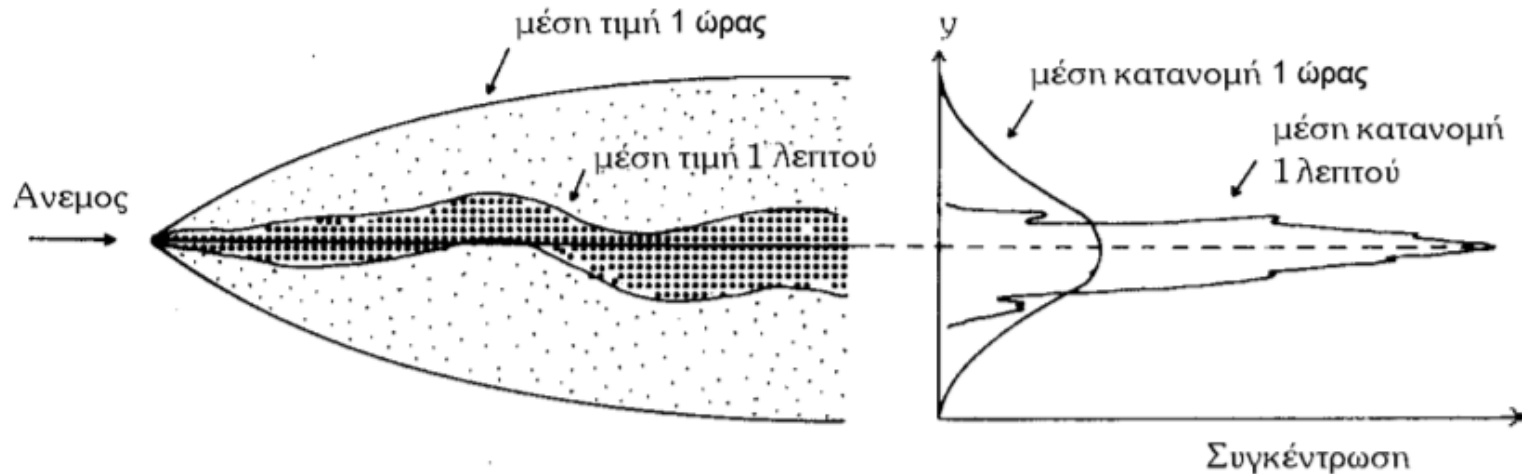
Αν και η εφαρμοσιμότητα αυτών των μοντέλων περιορίζεται σε συνθήκες *στασιμότητας και ομοιογένειας η απλότητα*, η ευκολία στη χρήση και οι χαμηλές απαιτήσεις σε στοιχεία εισαγωγής είχαν σαν αποτέλεσμα να γίνουν ιδιαίτερα δημοφιλή και χρήσιμά, ιδιαίτερα στην επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.





(α) Η στιγμιαία συμπεριφορά θυσάνων καπνού σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η στιγμιαία κατανομή της συγκέντρωσης του σκούρου θυσάνου φαίνεται στα δεξιά του σχήματος

(β) Η μέση συμπεριφορά πολλών θυσάνων (χρονική μέση τιμή). Η μέση συγκέντρωση που εμφανίζεται στα δεξιά του σχήματος ακολουθεί την κανονική κατανομή



Η κατανομή της μέσης τιμής 1 ώρας και 1 λεπτού, αντίστοιχα, της συγκέντρωσης ενός αέριου ρύπου κατά την διεύθυνση του πνέοντος ανέμου.

Στην αριστερή πλευρά φαίνεται η μορφή του θυσάνου ενώ στην δεξιά πλευρά εμφανίζονται οι εγκάρσιες κατανομές των συγκεντρώσεων.

# Συμπεράσματα

**α.** Οι συγκεντρώσεις σε κάποιο σημείο είναι ευθέως ανάλογες του ρυθμού εκπομπής  $Q$  αν οι υπόλοιπες συνθήκες παραμένουν σταθερές, οι αλλαγές στις εκπομπές θα μεταβάλλουν γραμμικά τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

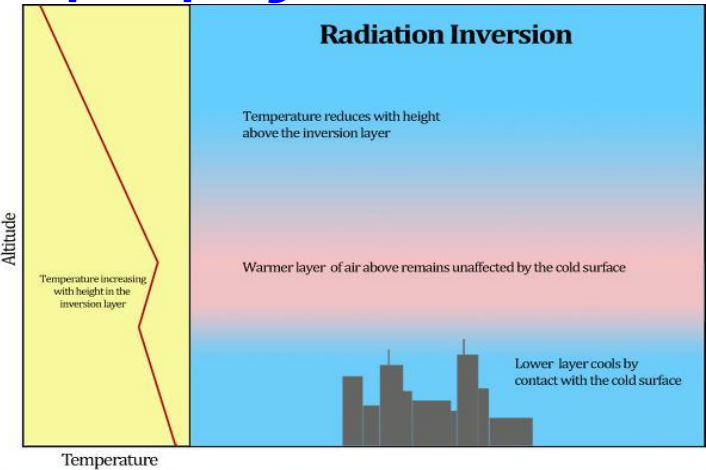
**β.** Οι συγκεντρώσεις μειώνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Σ' αυτή την περίπτωση δεν γίνεται αναφορά σε γραμμική σχέση γιατί τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  μεταβάλλονται επίσης με την ταχύτητα του ανέμου ενώ ακόμη ο άνεμος υπεισέρχεται στην εξίσωση υπολογισμού του ενεργού ύψους εκπομπής.

**γ.** Οι συγκεντρώσεις μειώνονται όσο αυξάνονται οι δύο τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ .

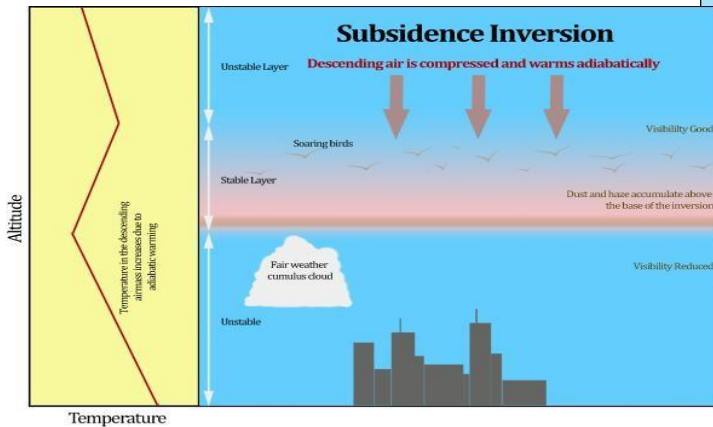
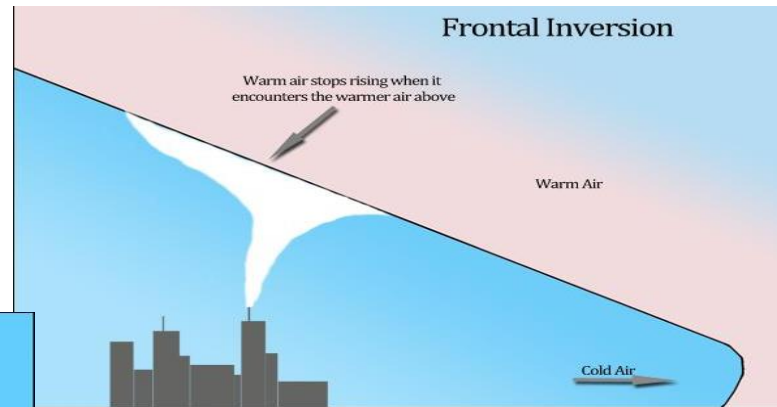
**τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  αυξάνονται με την απόσταση από την πηγή και μειώνονται όσο αυξάνεται η ευστάθεια της ατμόσφαιρας.**

# Συνηθισμένες αναστροφές

- Αναστροφές ακτινοβολίας

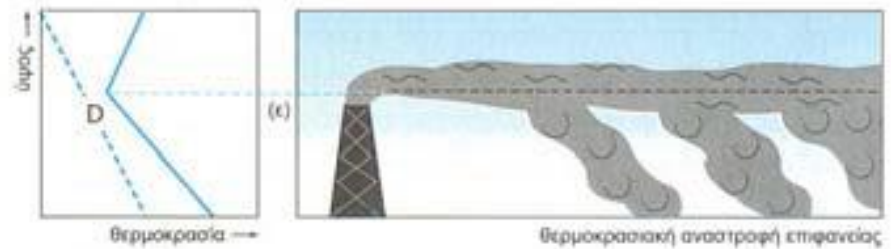
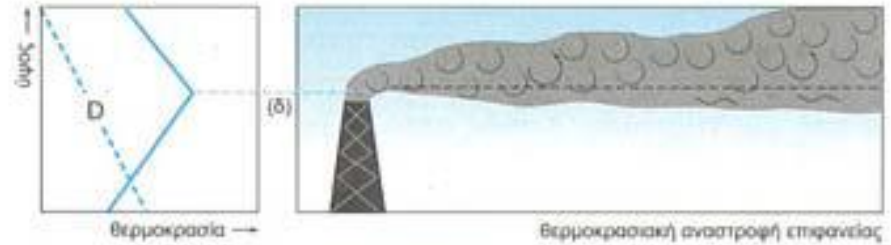


- Αναστροφές μετώπων



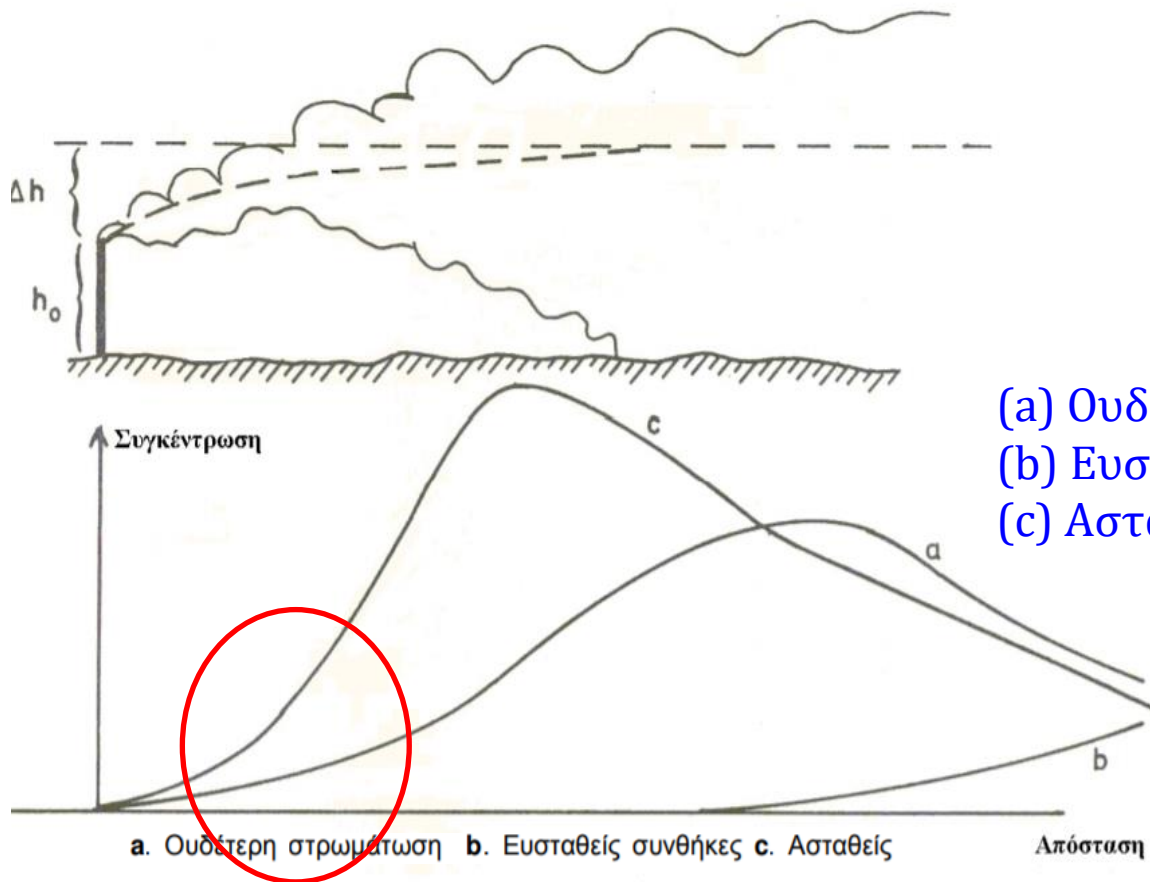
- Αναστροφές καθίζησης

# Κατακόρυφη διασπορά ρύπων





Διασπορά καπνού από καμινάδα σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας.  
Διακρίνονται οι βρόχοι που σχηματίζει ο καπνός.



- (a) Ουδέτερη στρωμάτωση
- (b) Ευσταθείς συνθήκες
- (c) Ασταθείς συνθήκες

a. Ουδέτερη στρωμάτωση b. Ευσταθείς συνθήκες c. Ασταθείς Απόσταση

Στο σχήμα παρουσιάζεται η επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας στις συγκεντρώσεις που προέρχονται από μια ανυψωμένη πηγή. Παρά το γεγονός ότι η **διασπορά είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες αστάθειας** σε σύγκριση με ευσταθείς συνθήκες, οι πρώτες δίνουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά στην πηγή.

Η εξήγηση αυτής της παράδοξης συμπεριφοράς βρίσκεται στην συμπεριφορά του θυσάνου ο οποίος **σε συνθήκες αστάθειας φθάνει νωρίτερα στο έδαφος**.

# Ανάκλαση

Μία βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μοντέλου του θυσάνου του Gauss είναι ότι η απόθεση στην επιφάνεια της γης είναι αμελητέα, άρα θα πρέπει τα σωματίδια της ρύπανσης να μπορούν κατά κάποιο τρόπο να επιστρέψουν πάλι στην ατμόσφαιρα.

Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιείται μία μαθηματική μέθοδος που ονομάζεται **καθρεπτισμός**.

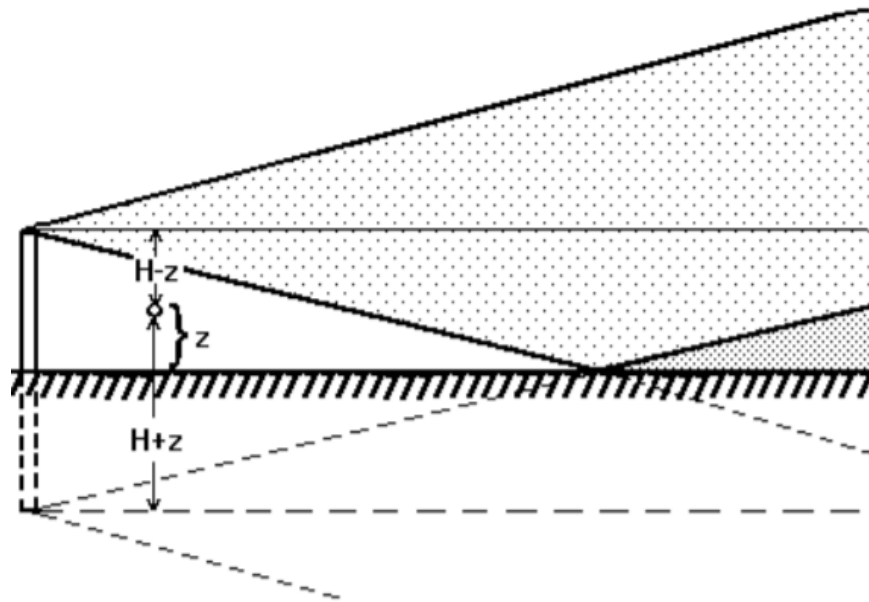
.... Αυτό σημαίνει ότι τοποθετείται μία εικονική πηγή (virtual source) σε ύψος  $-H$  και με την υπόθεση ότι η διασπορά από την εικονική πηγή γίνεται κατά ταυτόσημο τρόπο όπως από την πραγματική πηγή. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα των δύο πηγών



# Ανάκλαση

Το τμήμα του εικονικού θυσάνου που διέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους είναι ακριβώς το ίδιο με το τμήμα του θυσάνου από την πραγματική πηγή το οποίο χάνεται κάτω από το έδαφος και έτσι ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα ένα μέρος των ρύπων που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια κατακρατείται από αυτή.

Η ξηρή εναπόθεση είναι σχετικά αργή διαδικασία η οποία χρειάζεται μεγάλα χρονικά διαστήματα για να δράσει οπότε η σημασία της σε τοπική κλίμακα είναι μικρή.



# Προσδιορισμός των $\sigma_y$ και $\sigma_z$

Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις των γρήγορων διακυμάνσεων του ανέμου. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως σε ύψος 10 μέτρων και για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται ανεμόμετρα και/ή ανεμοδείκτες με μικρή χρονική σταθερά (π.χ. ανεμόμετρα με προπέλες, u,v,w σύστημα ανεμόμετρου, ηχητικό ανεμόμετρο κτλ.).

Οι παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτές τις περιπτώσεις για τον προσδιορισμό των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις της οριζόντιας και της κατακόρυφης διεύθυνσης του ανέμου,  $\sigma_\phi$  και  $\sigma_e$  αντίστοιχα. Οι τυπικές αποκλίσεις της κατανομής των συγκεντρώσεων των ρύπων σε κάποια απόσταση x δίνονται σε αυτή την περίπτωση από τις σχέσεις:

$$\sigma_y = x \sigma_\phi f_y \quad , \quad \sigma_z = x \sigma_e f_z$$

όπου τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  δίνονται σε μέτρα, τα  $\sigma_\phi$  και  $\sigma_e$  σε ακτίνια.

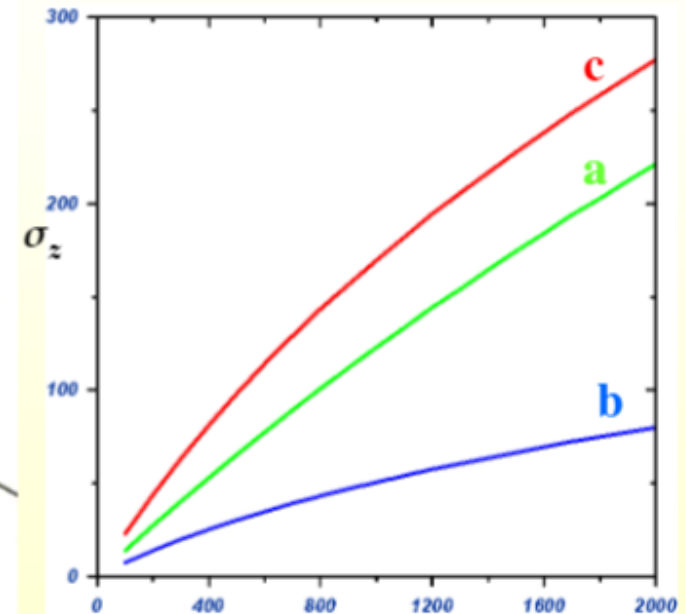
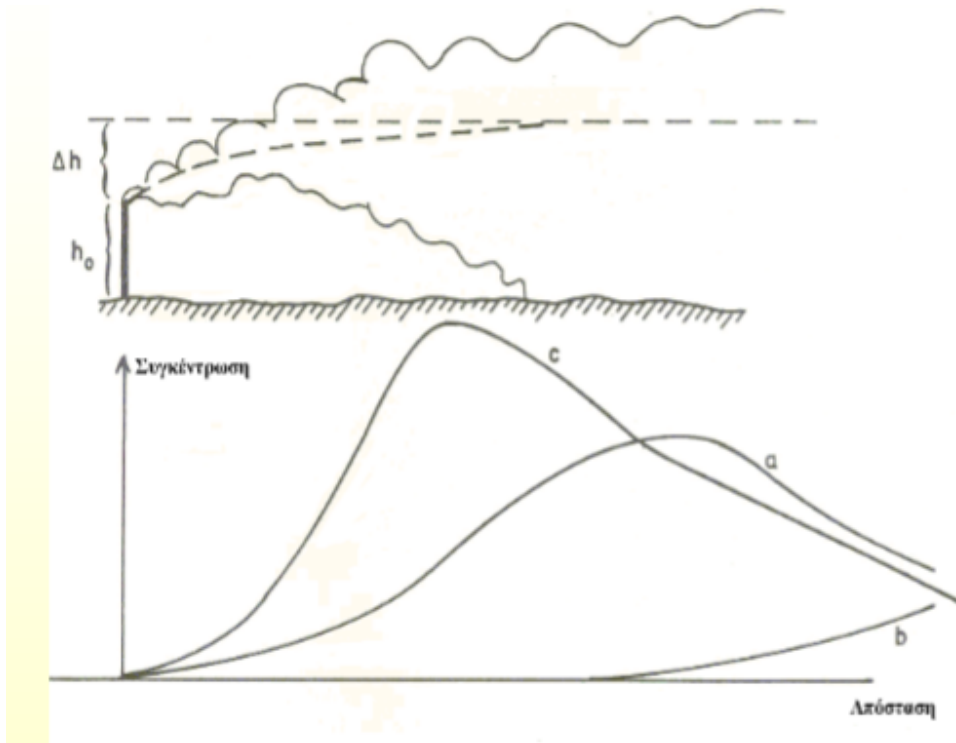
Οι παράμετροι  $f_y$  και  $f_z$  δίνονται από τις σχέσεις

$$f_y = 1 / [1 + 0.9(x/1000u)^{0.5}]$$

$$f_z = 1 / [1 + 0.9(x/500u)^{0.5}] \text{ (συνθήκες αστάθειας)}$$

$$f_z = 1 / [1 + 0.9(x/50u)^{0.5}] \text{ (συνθήκες ευστάθειας)}$$

$\sigma_y$  &  $\sigma_x$  : Αύξηση με την απόσταση από την πηγή, μείωση με την αύξηση της ευστάθειας



- (a) Ουδέτερη στρωμάτωση
- (b) Ευσταθείς συνθήκες
- (c) Ασταθείς συνθήκες

Απόσταση από την πηγή

Μετεωρολογικές Συνθήκες καθορισμού κατηγοριών Ευστάθειας κατά Pasquill  
 A: εξαιρετικά ασταθής, B: ενδιάμεσα ασταθής, C: ελαφρά ασταθής, D: ουδέτερη<sup>†</sup>,  
 E: Ενδιάμεσα ασταθής

Επιφανειακός Άνεμος u (m/s)	Ημερήσια Ηλιοφάνεια			Νυκτερινές συνθήκες	
	Ισχυρή	Μέση	Ελαφρά	Ελαφρά νέφωση ή > 4/8 χαμηλά νέφη	≤ 3/8 νέφωση <sup>††</sup>
< 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

<sup>†</sup> Εφαρμόσιμες για βαρεία νέφωση, νύχτα ή μέρα

<sup>††</sup> Ορίζεται ως το τμήμα εκείνο του ουρανού πάνω από τον τοπικό ορίζοντα που καλύπτεται από σύννεφα

**Πηγή:** Μπεργελές, 1992

# Ταξινόμηση ατμοσφαιρικής ευστάθειας τροποποίηση κατά Turner 1970

- Η ευστάθεια συναρτήσσει της κατακόρυφης ανάμιξης (ηλιακή ακτινοβολία σε συνδυασμό με ελαφρούς ανέμους).
- Ασταθείς συνθήκες υποδηλώνουν καλή κατακόρυφη ανάμιξη.
- Έξι κατηγορίες, αυθαίρετα ορισμένες, συμβολισμένες από το A έως το F, «A» είναι η πλέον ασταθής.

- Martin (1976):

$$\sigma_y = a \cdot b, \sigma_z = c \cdot d + f,$$

όπου: a, b, c, d & f είναι σταθερές που εξαρτώνται από την κατηγορία ευστάθειας και την απόσταση x (σε km).

- Οι προβλέψεις  $\pm 50\%$  των πραγματικών

Surface Wind Speed <sup>a</sup> (m/s)	Day Incoming Solar Radiation			Night Cloudiness <sup>e</sup>	
	Strong <sup>b</sup>	Moderate <sup>c</sup>	Slight <sup>d</sup>	Cloudy ( $\geq 4/8$ )	Clear ( $\leq 3/8$ )
< 2	A	A-B <sup>f</sup>	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

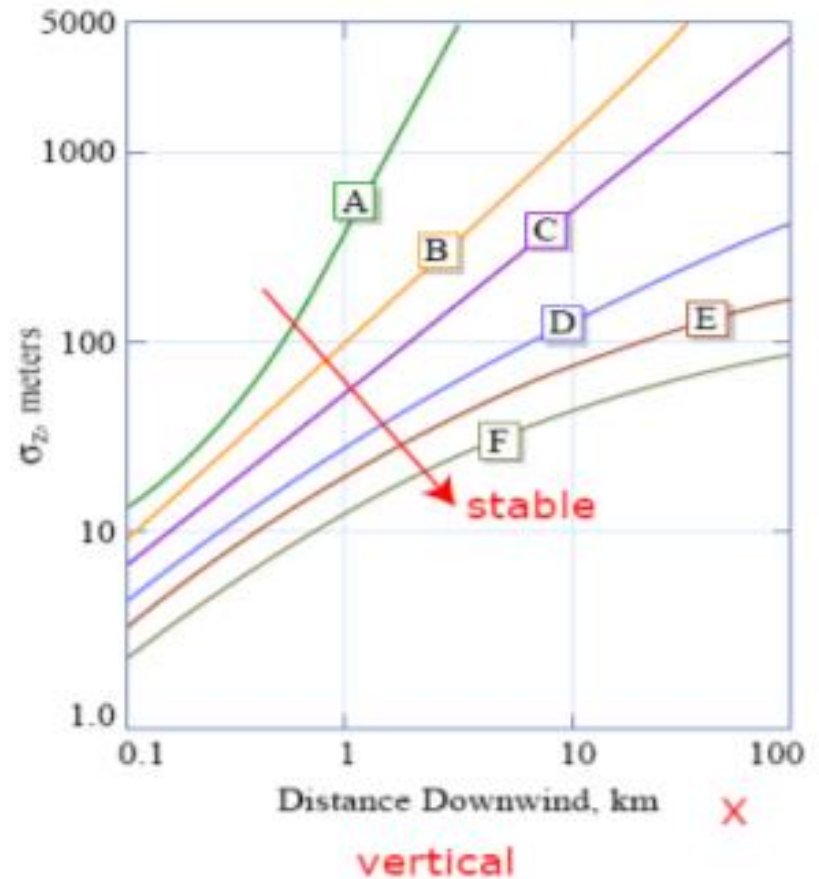
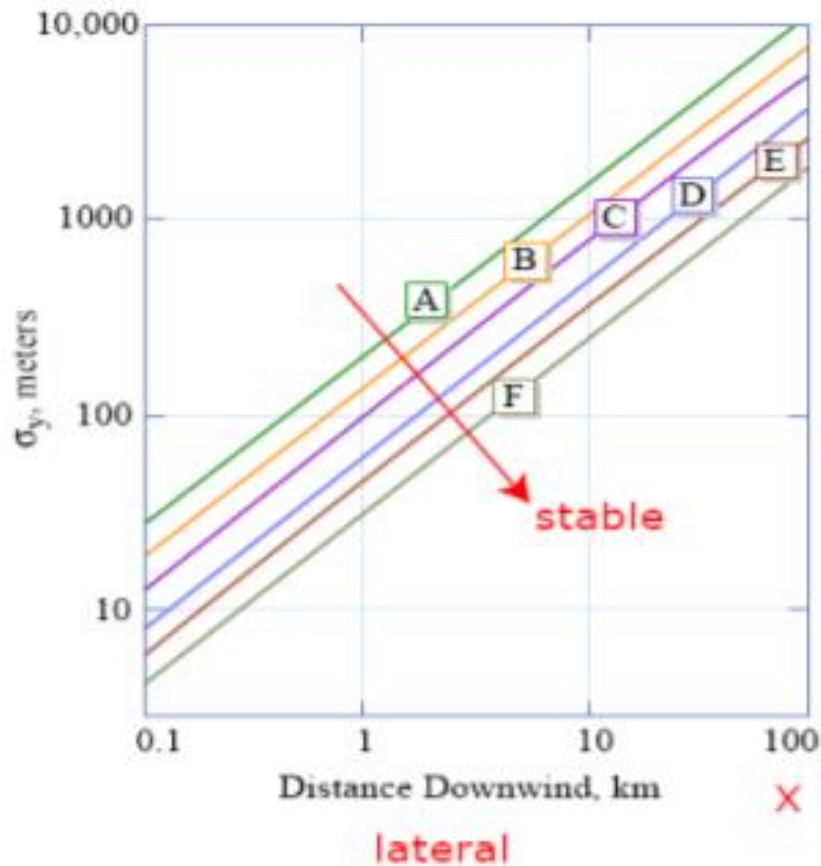
Notes:-

- Surface wind speed is measured at 10 m above the ground.
- Corresponds to clear summer day with sun higher than 60° above the horizon.
- Corresponds to a summer day with a few broken clouds, or a clear day with the sun 35-60° above the horizon.
- Corresponds to a fall afternoon, or a cloudy summer day, or clear summer day with the sun 15-35°.
- Cloudiness is defined as the fraction of sky covered by clouds.
- For A-B, B-C, or C-D conditions, average the values obtained for each.

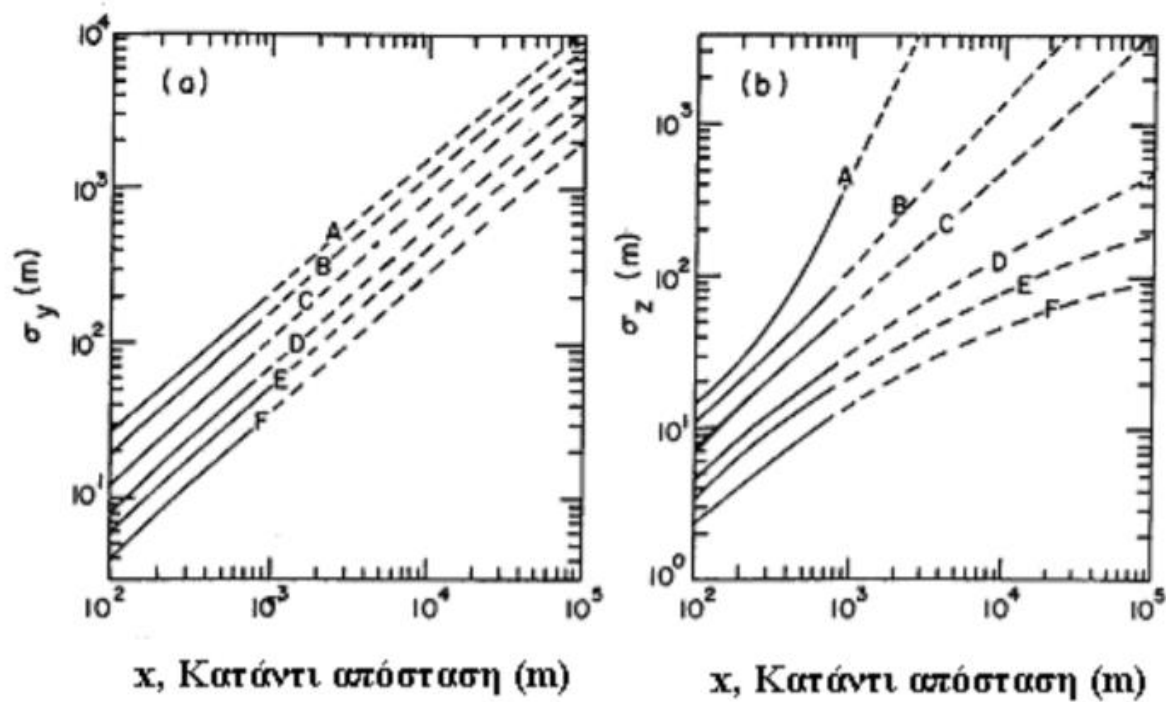
\* A = Very unstable, B = Moderately unstable, C = Slightly unstable, D = Neutral, E = Slightly stable, and F = Stable.

Regardless of wind speed, Class D should be assumed for overcast conditions, day or night.

STABILITY CLASSIFICATIONS\*



Συντελεστές διασποράς ως συνάρτηση της απόστασης και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας



**Σχήμα 3.3** Οι καμπύλες διασποράς Pasquill–Gifford για τις διάφορες κλάσεις ευστάθειας του Pasquill

**Πηγή:** Arya et al., 1999

Συσχετίσεις βασισμένες στις κλάσεις ευστάθειας. Οι διακεκομμένες γραμμές σημαίνουν ότι υπάρχει αμφιβολία πέρα από μία απόσταση από την πηγήστην διεύθυνση του άξονα  $x$ , γύρω στο 1 χλμ

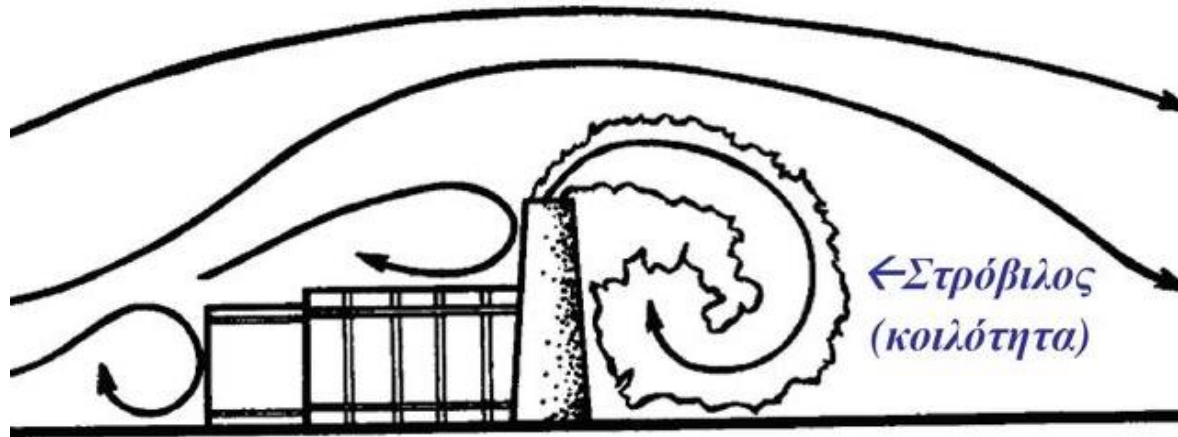
Οι εξισώσεις που πρότεινε ο Briggs (1973) για τον υπολογισμό των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  σε αποστάσεις  $10^2 < x < 10^4$  m.

Κλάση ευστάθειας κατά Pasquill	$\sigma_y(x)$ [m]	$\sigma_z(x)$ [m]
<b>ΥΠΑΙΘΡΟΣ</b>		
<b>A</b>	$0.22 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.20 \cdot x$
<b>B</b>	$0.16 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.12 \cdot x$
<b>C</b>	$0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0002 \cdot x)^{-1/2}$
<b>D</b>	$0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.06 \cdot x \cdot (1 + 0.0015 \cdot x)^{-1/2}$
<b>E</b>	$0.06 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.03 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x)^{-1}$
<b>F</b>	$0.04 \cdot x \cdot (1 + 0.0001 \cdot x)^{-1/2}$	$0.016 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x)^{-1}$
<b>ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ</b>		
<b>A-B</b>	$0.32 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x)^{-1/2}$	$0.24 \cdot x \cdot (1 + 0.001 \cdot x)^{-1/2}$
<b>C</b>	$0.22 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x)^{-1/2}$	$0.12 \cdot x$
<b>D</b>	$0.16 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x)^{-1/2}$	$0.14 \cdot x \cdot (1 + 0.0003 \cdot x)^{-1/2}$
<b>E-F</b>	$0.11 \cdot x \cdot (1 + 0.0004 \cdot x)^{-1/2}$	$0.08 \cdot x \cdot (1 + 0.00015 \cdot x)^{-1/2}$



# Επίδραση καμινάδας

Πεδίο ροής ανέμου γύρω από μια χαμηλή καμινάδα



- Υπήνεμη πλευρά  
Σχηματισμός κοιλότητας – επιστροφή τμήματος του θυσάνου στην πίσω πλευρά.

Εμπειρικός κανόνας:  $h=2,5H_b$

$h$ : ύψος καμινάδας,  $H_b$ : ύψος κτιρίου.

Αν  $h \geq 2,5H_b$ , μπορεί να υπάρξει μόνο κάθοδος θυσάνου λόγω της αεροδυναμικής της καμινάδας.

# Καπνισμός (fumigation)

Καπνισμός (fumigation) εμφανίζεται όταν η εξάπλωση του θυσάνου προς τα πάνω εμποδίζεται από μία αναστροφή της οποίας η βάση βρίσκεται σε σχετικά χαμηλό ύψος ενώ κάτω από αυτήν η ανάμειξη των ρύπων είναι έντονη. Λόγω της έντονης ανάμειξης η κατακόρυφη κατανομή των ρύπων είναι περίπου ομοιόμορφη. Οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στο έδαφος. Συμβάινει κυρίως το πρωί. Καθώς ο θύσανος όταν διαλύεται από την νυχτερινή αναστροφή

## **A. Διάλυση της αναστροφής**

Όταν διαλυθεί το πρωί η αναστροφή οι στρόβιλοι συντελούν στην ταχεία ανάμειξη των ρύπων κοντά στο έδαφος.

Ισχυει και στην περίπτωση της θαλάσσιας αύρας, όπου διαρκεί περισσότερο.

## **B. Παγίδευση**

Είναι η περιορισμένη ανάμειξη όταν παγιδευτεί στο στρώμα κάτω από μία αναστροφή ύψους μέσα στο οποίο υπάρχει έντονη ανάμειξη

## **Γ. Μεγάλη ένταση ανέμου**

Σε ισχυρούς ανέμους η ανύψωση είναι μικρή και ευνοείται ο καπνισμός

# Γραμμικές και επιφανειακές πηγές

- Στην γραμμική παίζει ρόλο η διεύθυνση του ανέμου (πχ αυτοκινητόδρομος)
- Η διάχυση είναι ευκολότερη όταν ο άνεμος ρέει κάθετα και όχι παράλληλα
- Όσοι κινούνται πάνω στον δρόμο αν ο άνεμος είναι παράλληλος εισπνέουν περισσότερους ρύπους
- Σε κάθε σημείο μίας πόλης (γραμμικές και επιφανειακές πηγές ρύπανσης) η ρύπανση προκύπτει από την συνισταμένη των συγκεντρώσεων από πολλές πηγές.

# Μεταφορά μεγάλης κλίμακας

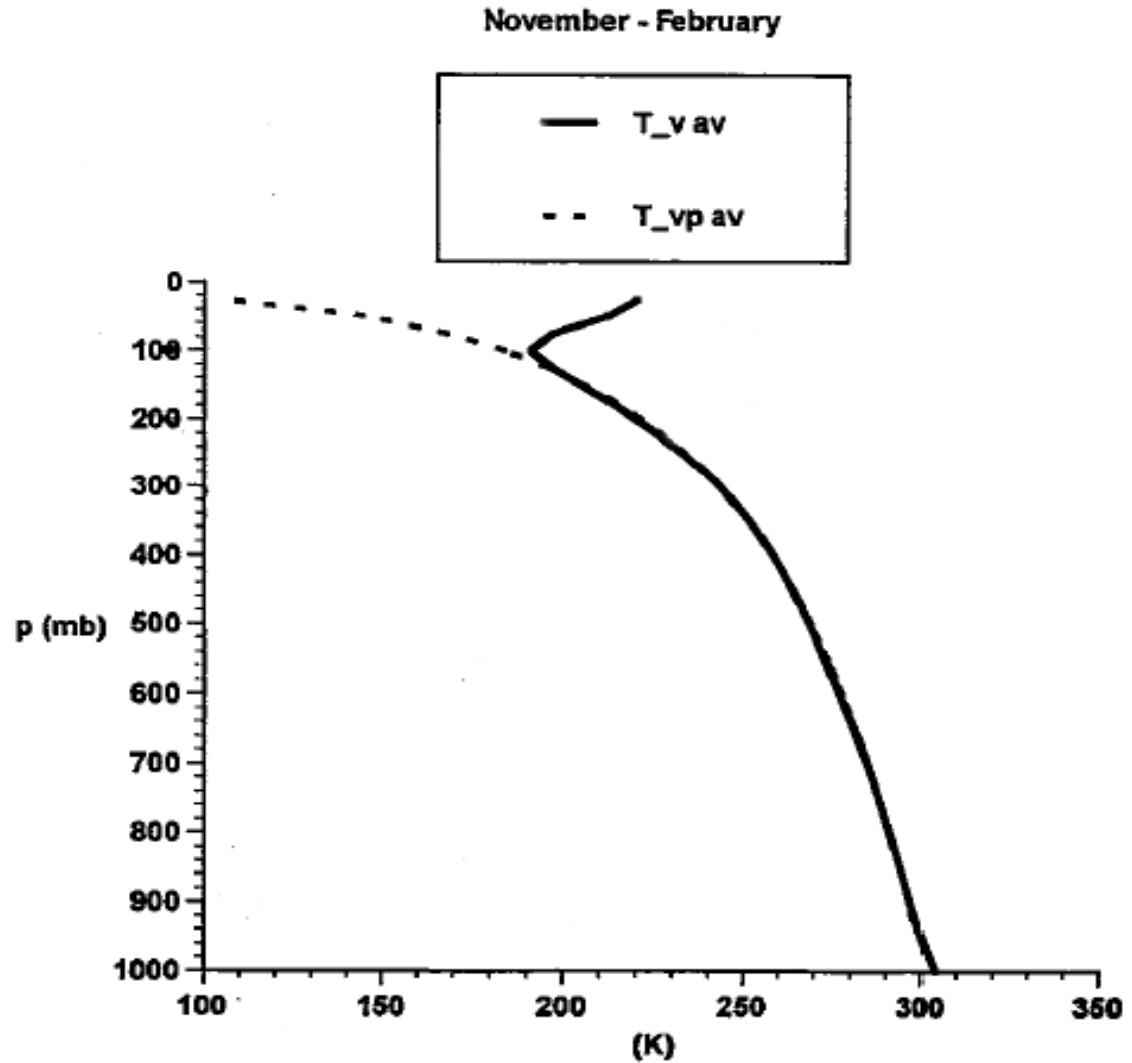
- Τα Γκαουσιανά μοντέλα είναι ακριβή ακόμη και για 50 χιλιόμετρα
- Σε μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτείται μοντέλο τροχιάς (πχ. Ηφαιστειακές εκρήξεις)
- Μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικές μεταβλητές (βροχή, ηλιοφάνεια κτλ) μπορούν να επηρεάσουν την μεταφορά των ρύπων

Thanks for your attention!

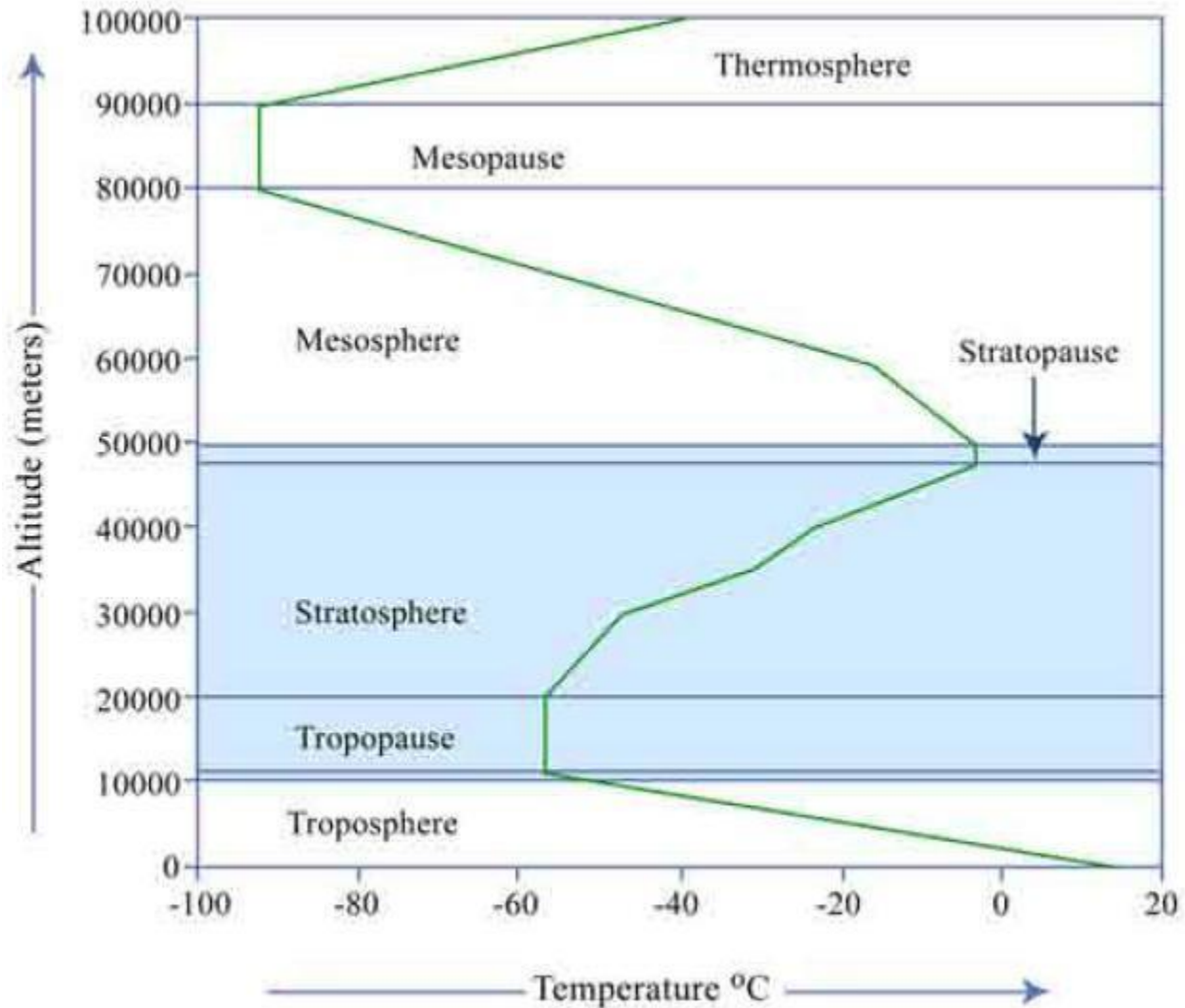
**Τέλος κεφαλαίου**

**Prof. Mic.Gr.Vrachopoulos**

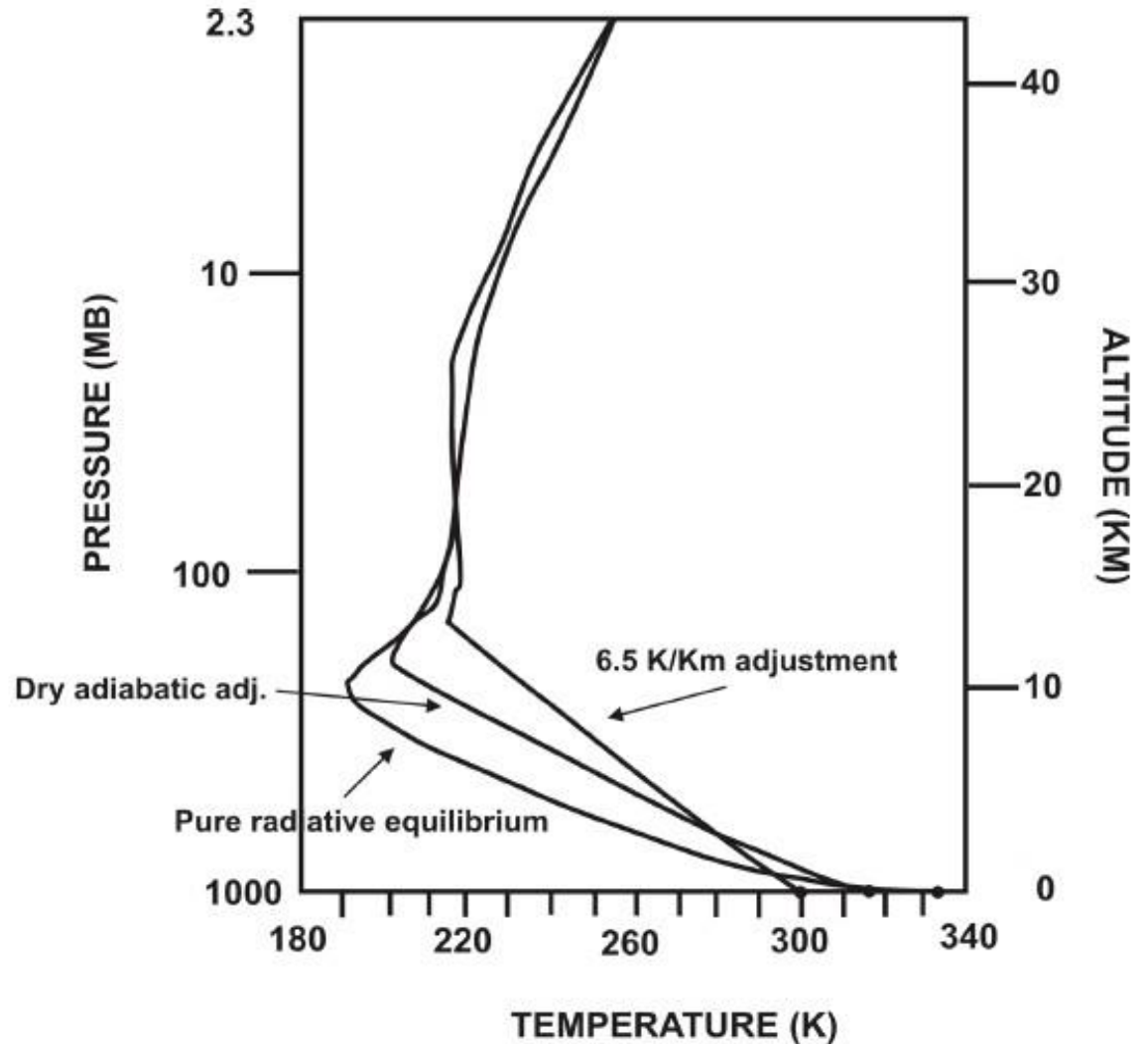
# $O_3$ και $CO_2$ σημαντικά για στρατόσφαιρα, και το $H_2O$ για την τροπόσφαιρα



# Θερμοκρασιακή δομή ατμόσφαιρας



# $O_3$ και $CO_2$ σημαντικά για στρατόσφαιρα, και το $H_2O$ για την τροπόσφαιρα





## Διασπορά Ρύπων (pollutant dispersion)

- Από το 70 και μετά υπήρξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρουσία χημικών στο περιβάλλον (σε αέρα, νερό και έδαφος)
- Σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. εντομοκτόνα, αρώματα) τα χημικά απελευθερώνονται στο περιβάλλον ηθελημένα.
- Σε άλλες περιπτώσεις (π.χ.  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $VOC$ ) τα χημικά εκπέμπονται στο περιβάλλον από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες και από την καύση.
- Άλλα χημικά (π.χ. διοξίνες,  $NH_3$ , μεθυλικό ισοκυάνιο) διαρρέουν στο υπέδαφος, στα υδάτινα συστήματα και στον αέρα λόγω ατυχημάτων.



Γενικά υπάρχει δημόσιος προβληματισμός για την μακροχρόνια επίδρασή τους στο περιβάλλον, κάτι που οδήγησε σε σειρά μέτρων νόμων και οδηγιών,

- .....
- αναφορικά με τα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης των χημικών (...μέση συγκέντρωση σε 1 ώρα, 1 μέρα, 1 χρόνο).
- Η συσσώρευση ρύπων σε μια περιοχή εξαρτάται προφανώς από τους ρυθμούς εκπομπής των διαφόρων ρύπων, από τους ρυθμούς διασποράς (και απομάκρυνσης) των ρύπων και των ρυθμών παραγωγής ή καταστροφής τους (μέσω χημικών αντιδράσεων).
- Η διασπορά των ρύπων εξαρτάται σημαντικά από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες και την ατμοσφαιρική ευστάθεια (δηλ. την τάση του αέρα να μην αναμιγνύεται σε κατακόρυφη διεύθυνση).
- Προφανώς εξαρτάται και από το είδος και τις ποσότητες των ρύπων.
- Με δυνατό άνεμο και καλή κατακόρυφη ανάμιξη οι ρύποι διασπείρονται γρήγορα σε μεγάλο όγκο αέρα.

# Η διασπορά ενός καπνοθυσάνου

Τα καυσαέρια απελευθερώνονται από καμινάδες και συχνά ωθούνται με ανεμιστήρες.

Εξέρχονται και αναμειγνύονται με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η διάμετρος του καπνοθυσάνου διευρύνεται κατά τη διείσδυσή του στον αέρα.

Τα αέρια που αποτελούν τον καπνοθύσανο είναι θερμότερα από τον αέρα, εκπέμπονται με μεγάλη ορμή και ανέρχονται.

Με την άνοδό του, κάμπτεται, απομακρύνεται από την πηγή και διασπείρεται πριν φτάσει στο έδαφος.

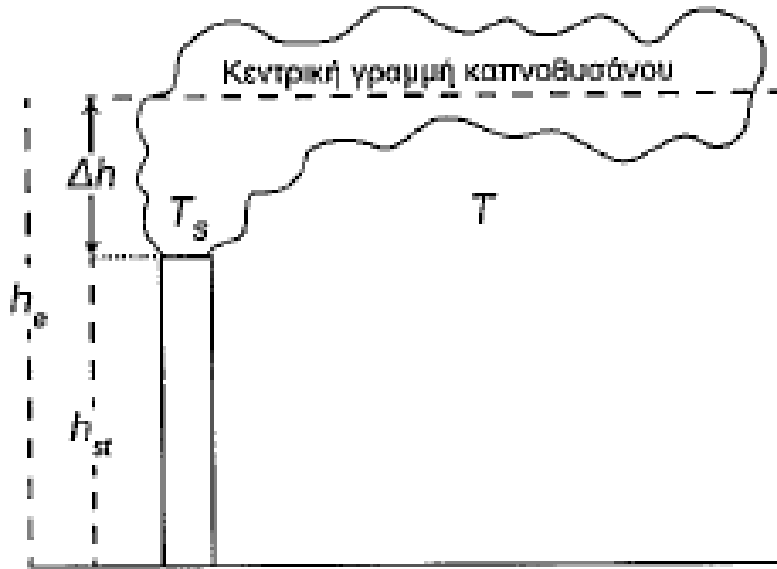
Το τελικό ύψος ονομάζεται ενεργό ύψος ή αποτελεσματικό ύψος της καμινάδας  $h_e$ .

$$h_e = h_{st} + \Delta h$$

$\Delta h$ , ανύψωση καπνοθυσάνου

# Η διασπορά ενός καπνοθυσάνου

Η ανύψωση εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της καμινάδας και τα χαρακτηριστικά των εξερχόμενων καυσαερίων (R).



Η διαφορά θερμοκρασίας ( $R-Air$ ) ορίζει την πυκνότητα του καπνοθυσάνου και επηρεάζει την άνοδό του.

Η ταχύτητα – που είναι συνάρτηση της διαμέτρου και της παροχής – ορίζει την ορμή του καπνοθυσάνου.

Σημαντικό ρόλο παίζουν και η ευστάθεια της ατμόσφαιρας και η ταχύτητα του ανέμου.

# Η διασπορά ενός καπνοθυσάνου

Ο υπολογισμός της ανύψωσης είναι σημαντικός για την απομάκρυνση των ρύπων.

Υπολογίζεται με ημ εμπειρικές μεθόδους.

Η μορφή των εξισώσεων είναι:

$$\Delta h(x) = C_1 Q_h^a x^b u^c$$

$C_1$ ,  $a, b, c$  σταθερές,  $x$ , η πορεία του καπνοθυσάνου προς την κατεύθυνση του ανέμου και  $u$ , η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πηγής  $h_{st}$ .

$Q_h$ , ο ρυθμός απελευθέρωσης της θερμότητας από τη πηγή ....

$$Q_h = Q_m c_p' (T_s - T)$$

$c_p'$ , ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση,  $T_s$ , θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων,  $T$ , θερμοκρασία αέρα  $h_{st}$ .

$Q_m$ , ο συνολικός ρυθμός απελευθέρωσης μάζας:

.....

$$\dots\dots Q_m = \rho_s \pi r_s^2 w_{gs}$$

$\rho_s$ , πυκνότητα εξερχόμενου καυσαερίου,

$r_s$ , ακτίνα καμινάδας εξόδου των καυσαερίων  $\sim (\text{ισοδύναμο } A/\pi)^{1/2}$ ,

$w_{gs}$ , ταχύτητα εξόδου καυσαερίων, κατά την κατακόρυφο.

Με βάση τη μέθοδο Briggs, η ροή της άνωσης,  $F_b$

$$F_b = g w_{gs} r_s^2 (T_s - T) / T_s$$

Για ανωστικούς καπνοθύσανους,  $T_s > T$

Για μη ανωστικούς,  $T_s \sim T$  καπνοχειμάρρους

$$\Delta h(x) = 2,3 F_m^{1/3} u^{-2/3} x^{1/3}$$

η ροή της ορμής,  $F_m$

$$F_m = w_{gs}^2 r_s^2 (\rho_s / \rho) \sim w_{gs}^2 r_s^2$$

Ισχύει για παρόμοιες πυκνότητας καυσαερίων και αέρα.

Η τελική ανύψωση του καπνοχειμάρρου σε ευσταθείς συνθήκες, δίδεται:

$$\Delta h = 2,6(F_b / uN^2)^{1/3}$$

Όπου N, η συχνότητα Brynt-Vaisalla

Σε συνθήκες άπνοιας, δεν ισχύουν οι πιο πάνω σχέσεις.  
Για περίπτωση δασικής πυρκαγιάς, δίδεται:

$$\Delta h = \left\{ \left[ \frac{3r_s x^2}{1,44F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)} \right] + \left( \frac{r_s}{0,6} \right) \right\}^{1/3} - \frac{r_s}{0,6}$$

Ο αριθμός Froude,  $F_r$ ,

$u$ , η ταχύτητα του ανέμου στα 10m από το έδαφος,

$r_s$ , η ακτίνα της φωτιάς σε m

Η κατακόρυφη ταχύτητα καυσαερίων (m/s)

$$w_{gs} = \frac{8,8 \times 10^{-2} Q_h T_s}{g(T_s - T) r_s^2}$$

όταν οι συνθήκες είναι ασταθείς, η τελική ανύψωση....

$$\Delta h = 2,1 * \left[ \frac{r_s u^2}{N^2 F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)^3} \right]^{1/3}$$

Όπου N, η συχνότητα Brunt-Vaisalla

Για ουδέτερες συνθήκες:

$$\Delta h = 0,76 * \left[ \frac{r_s u^2}{u_*^2 F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)^3} \right]$$

Σε ασταθείς συνθήκες...

$$\Delta h = 4,5 * \left[ \frac{r_s u^2 H_{inv}^{2/3}}{4 * w_*^2 F_r^2 \left( \frac{u}{w_{gs0}} \right)^3} \right]^{3/5}$$

Όπου,  $H_{inv}$  το ύψος της βάσης αναστροφής.

Παρότι οι μέγιστες συγκεντρώσεις του καπνοθύσανου εμφανίζονται στην κεντρική γραμμή του, δεν παρέχουν πληροφορίες για την μεταβολή.



# Η διασπορά καπνοθυσάνου

Είναι πιθανό ο καπνοθύσανος να μη μπορεί να ανυψωθεί ελεύθερα.

Η άκρη του μπορεί να κατευθυνθεί προς το έδαφος, κάτω ρεύμα, όταν ο λόγος της ταχύτητας καυσαερίων προς αυτής του ανέμου είναι μικρός.

# Διασπορά ρύπων vs. διάχυση

Η διασπορά ρύπων (pollutant dispersion) συνδέεται με τη διάχυση (diffusion) σε 2 επίπεδα:

(1) Η διασπορά είναι ένα είδος ανάμιξης (δηλ. σε μικροσκοπικό επίπεδο απαιτείται διάχυση μορίων). Αυτή η μικροσκοπική «διασπορά» δεν είναι πλήρως κατανοητή, αλλά γίνεται ιδιαίτερα γρήγορα.

(2) Η διασπορά και η διάχυση περιγράφονται με παρόμοιες μαθηματικές σχέσεις.

**Διασπορά = Μεταφορά μάζας λόγω ροής (ανέμου)+Διάχυση**

(ή ως τυρβώδης διάχυση)

# Διασπορά ρύπων

- Τι σημαίνει «συγκέντρωση καπνού»?

Αυθαίρετη «μέση» τιμή της συγκέντρωσης των συστατικών, είτε είναι μόρια ή σωματίδια (ή σταγονίδια). Η συγκέντρωση αυτή των ρύπων μπορεί να έχει επιπτώσεις στον άνθρωπο (οσμές, τοξικά συστατικά κ.λπ.).

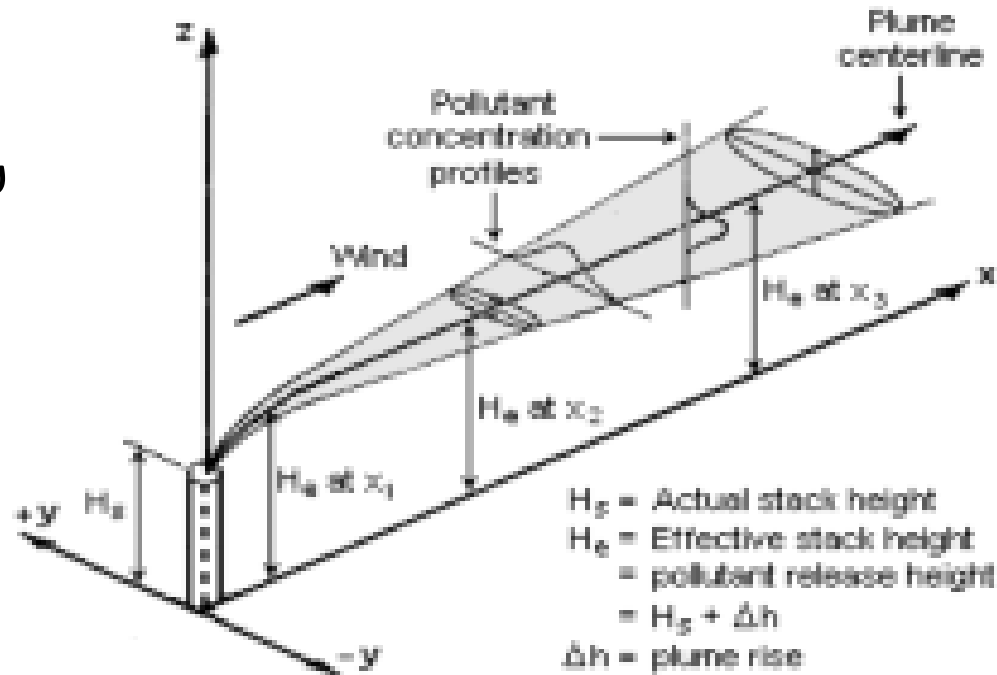
- Ένα προφανές μοντέλο για το πλούμιο του σχήματος έχει αναπτυχθεί για **μονοδιάστατη εξασθένηση σημειακής πηγής** (Crank 1975).

γίνεται η υπόθεση ότι:

x είναι η κατεύθυνση του ανέμου

z είναι η κατακόρυφη διάσταση

y είναι η κάθετη στο x διάσταση



## Διασπορά ρύπων – λύση εξασθένησης παλμού

$$\bar{c}_1 = \frac{M/A}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{4Dt}\right)}$$

Όπου  $\bar{C}_1$  η μέση συγκέντρωση ως προς το χρόνο και το ύψος  $z$   
 $M/A$  η διαλυμένη ουσία ανά μοναδιαία επιφάνεια του πλουμίου

- Εάν αντικατασταθεί  $t = \left(\frac{x}{u_o}\right)$  όπου  $u_o$  είναι η ταχύτητα του ανέμου.
- Το μοντέλο αποτυγχάνει παντελώς στην πρόβλεψη για το πόσο απλώνει το πλούμιο.
- Από τη λύση επίσης εκτιμάται το πλάτος της κορυφής  $l$ , είναι περίπου:

$$l = 4\sqrt{\pi D}$$

# Διασπορά ρύπων – λύση εξασθένησης παλμού

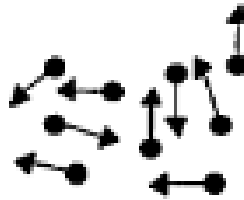
- Για τα αέρια  $D \sim 0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$  και για απόσταση  $x=10 \text{ km}$ , ο χρόνος διάχυσης είναι  $t=10 \text{ km}/15 \text{ km/h} \sim 40 \text{ min}$ , τότε  $l \sim 60 \text{ cm}$ , ενώ στην πραγματικότητα είναι της τάξης του  $1 \text{ km}$ . Η διασπορά διαφέρει τάξεις μεγέθους απ' τη διάχυση
- Η τεράστια αυτή απόκλιση οφείλεται στην επίδραση του ανέμου. Στη διάχυση η ανάμιξη είναι αποτέλεσμα της κίνησης Brown. Η διασπορά είναι μια ιδιαίτερα γρήγορη διαδικασία.
- Εάν υποθεθεί ότι το πλούμιο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$\bar{c}_1 \propto \frac{1}{\sqrt{E_y \left( \frac{x}{u_o} \right)}} \cdot e^{\left( -\frac{y^2}{4 E_y t} \right)}$$

όπου  $E_y$  ο παράγων «διασποράς» (dispersion coefficient) που προσδιορίζεται πειραματικά, με διαστάσεις  $L^2/t$

- Προφανώς δεν εξαρτάται από τη χημεία του πλουμίου και είναι συνάρτηση της απόστασης από την πηγή και της κατεύθυνσης του ανέμου. Ίδια τιμή για  $\text{CO}_2, \text{CH}_4$ , σωματίδια κ.λπ.

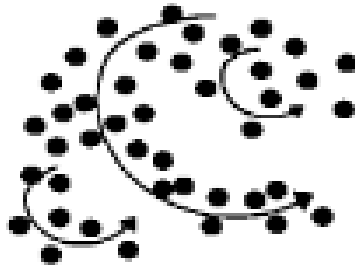
## MOLECULAR DIFFUSION



Typical Range,  $m^2/s$

vertical	$10^{-6} - 10^{-9}$
lateral	$10^{-6} - 10^{-9}$
longitudinal	$10^{18} - 10^{-2}$

## TURBULENT DIFFUSION



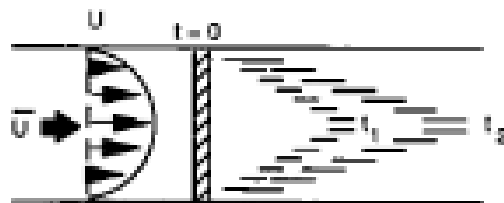
Typical Range,  $m^2/s$

vertical	$10^{-6} - 10^{-2}$
lateral	$10^{-2} - 10^2$
longitudinal	$10^2 - 10^2$

$$D_T = f(\text{Length scale}) \approx kL^{4/3}$$

where  $k$  = constant and  $L$  = length scale

## DISPERSION



Typical Range,  $m^2/s$

vertical	$10^3 - 10^{-1}$
lateral	$10^{-2} - 10^0$
longitudinal	$10^{-1} - 10^4$

$$D_T = f(\text{length scale, shear stress})$$



Mt Etna erupting, December 2002

# Εμπειρική Αντιμετώπιση της διασποράς

- Χρησιμοποιούνται οι σχέσεις διάχυσης από σημειακή πηγή αντικαθιστώντας την (ισότροπη) διαχυτότητα από συντελεστές διασποράς  $E_z, E_y$  και  $E_x$
- Μονοδιάστατη διασπορά (κατά την κατεύθυνση  $x$  του ανέμου) στιγμιαίας εκπομπής:

$$c_1(x, t) = \frac{m_o}{2\sqrt{\pi E_x t}} \cdot e^{-\left(\frac{(x-u_o t)^2}{4E_x t}\right)}$$

- *Τριδιάστατη διασπορά στιγμιαίας εκπομπής:*

$$c_1(x, y, z, t) = \frac{m_o}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{E_x E_y E_z}} \cdot e^{-\left(\frac{(x-u_o t)^2}{4E_x t} - \frac{y^2}{4E_y t} - \frac{z^2}{4E_z t}\right)}$$



- διασπορά συνεχούς εκπομπής (kmol/s or gr/s).

Η συγκέντρωση μεταβάλλεται σχετικά λίγο κατά την x-διεύθυνση, άρα:

$$c_1(x, y, z, t) = \frac{K}{4\pi t \sqrt{E_y E_z}} \cdot e^{\left( -\frac{y^2}{4E_y t} - \frac{z^2}{4E_z t} \right)}$$

Όπου:

$$t = \frac{x}{u_o} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^L c dx dy dz = m_o \frac{L}{u_o} \Rightarrow \dots K = \frac{m_o}{u_o}$$

και

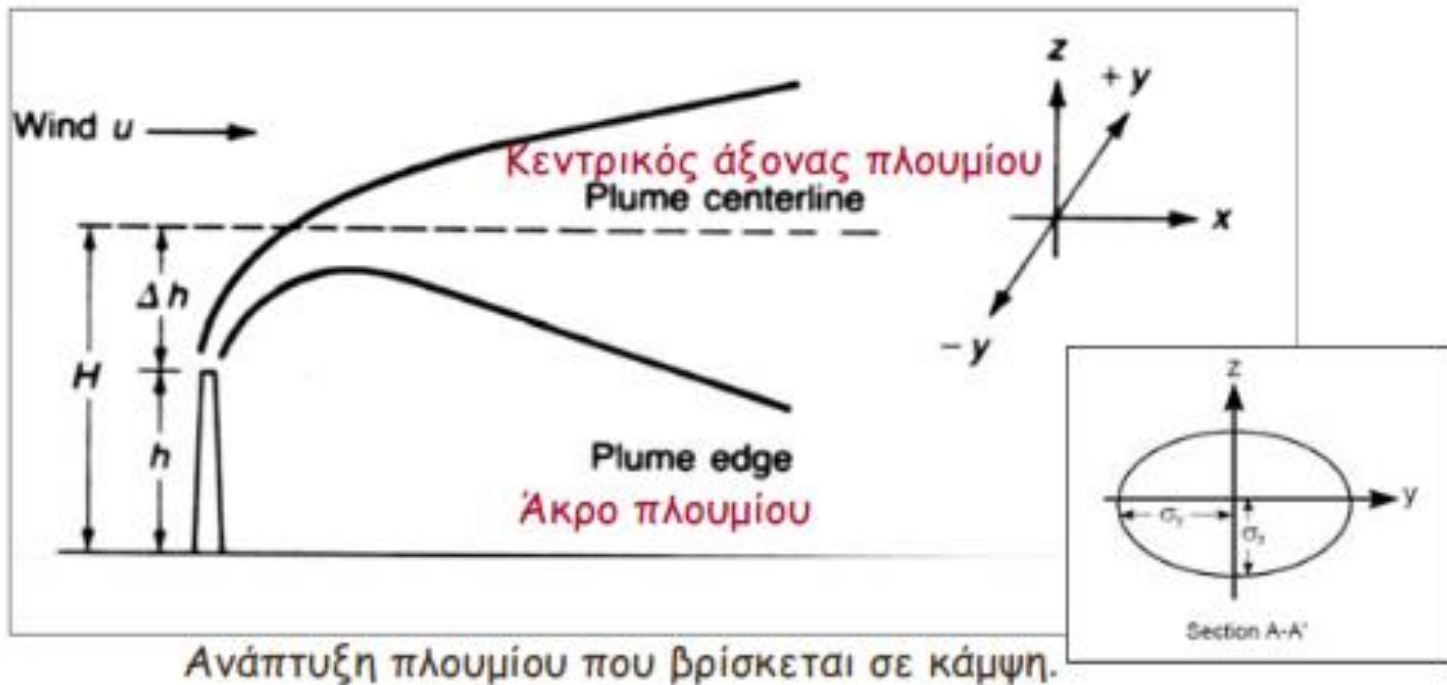
$$c(x, y, z, t) = \frac{m_o}{4\pi x \sqrt{E_y E_z}} \cdot e^{\left( -\frac{y^2}{4E_y t} - \frac{z^2}{4E_z t} \right)}$$

- Οι λύσεις είναι προσεγγιστικές, γιατί οι συντελεστές διασποράς δεν είναι χωρικά σταθεροί. Βλέπε εμπειρικά διαγράμματα τυπικής απόκλισης  $\sigma_y, \sigma_z$ , όπου:

$$\sigma = \sqrt{2Et} = \sqrt{2E \frac{x}{u_o}}$$

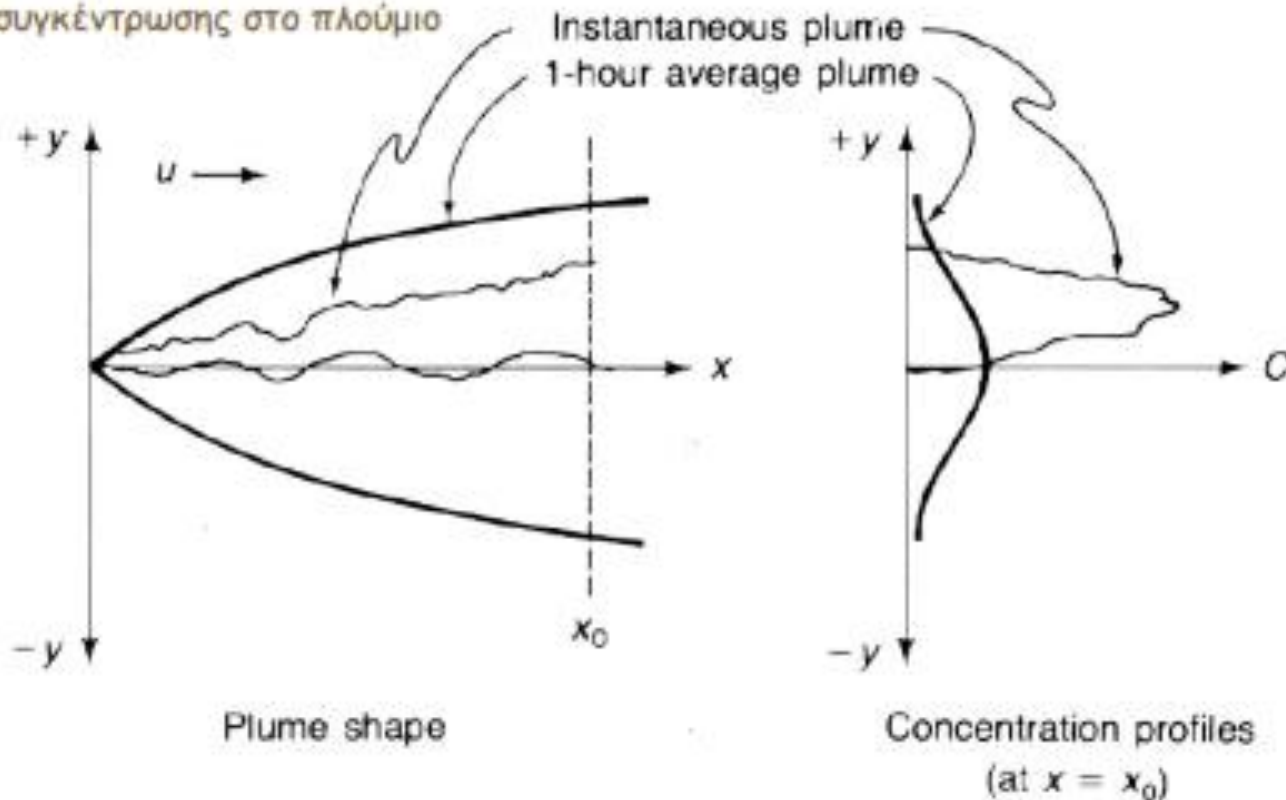
## Διασπορά ρύπων - κατανομή

- Οι διαστάσεις του πλουμίου σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονά του δίνονται γενικά με τη μορφή της τυπικής απόκλισης της κατανομής της μέσης συγκέντρωσης, μια που η κατανομή σε κάθε επίπεδο είναι σχεδόν κανονική.



# Διασπορά ρύπων - κατανομή συγκέντρωσης

Κατανομή συγκέντρωσης στο πλούμιο



Κάτοψη ενός στιγμιαίου πλουμίου και ενός μέσου ωριαίου πλουμίου.  
Το πλούμιο εξετάζεται σε μέσο χρόνο και όχι στιγμιαία.

# Η γκαουσιανή προσέγγιση καπνοθύσανου

Ο όρος που περιέχει παράγοντες διάχυσης στροβίλων, βοηθά στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ τυρβωδών ροών της ύλης, ισχύει:

$$\bar{v}'\bar{u}' = -K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad \bar{w}'\bar{c}' = -K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad \text{όπου } c(t) = \bar{c} + c'$$

Για  $K_y > K_z$ , η ενεργός διατομή του καπνοθύσανου παίρνει ελλειπτική μορφή, ισχύει:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = K \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right]$$

# Η γκαουσιανή προσέγγιση καπνοθύσανου

Βασικές παραδοχές του μοντέλου:

- Ισχύουν οι συνθήκες σταθερής κατάστασης ...  $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$
- Ο άνεμος είναι σταθερός και ομογενής με το ύψος, δηλαδή σταθερή ροή σε όλη την έκταση της διασποράς.
- Οι παράγοντες διάχυσης σταθεροί.
- Το επίπεδο του εδάφους δεν απορροφά το αέριο που κινείται. Δεν υπάρχει εναπόθεση υλικού, δηλαδή αλλαγή ποσότητας.
- Δεν λαμβάνουν χώρα χημικοί μετασχηματισμοί, ούτε αντιδράσεις, σε σχέση με την απόσταση από την πηγή.
- Για την σταθερή σημειακή πηγή συνεχούς εκπομπής σε τρεις διαστάσεις η διάχυση κατά τη διεύθυνση της κίνησης είναι μικρή και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, δηλαδή....

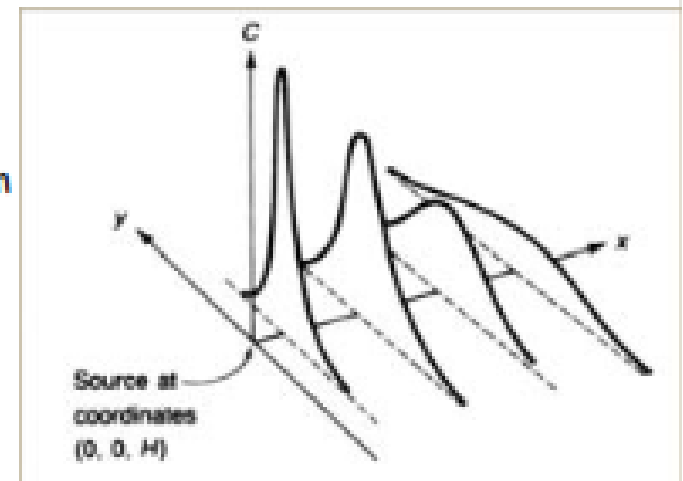
$$K_x \cdot \frac{\partial c}{\partial t} = 0$$

# Το Γκαουσιανό μοντέλο (Gaussian model) - Εμπειρικό (Pasquill, 1961)

- Τυχαίες διεργασίες οδηγούν συχνά σε κανονική κατανομή.
- Μη αντιδρώντα αέρια από υπερυψωμένη πηγή.

$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_x} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\}$$

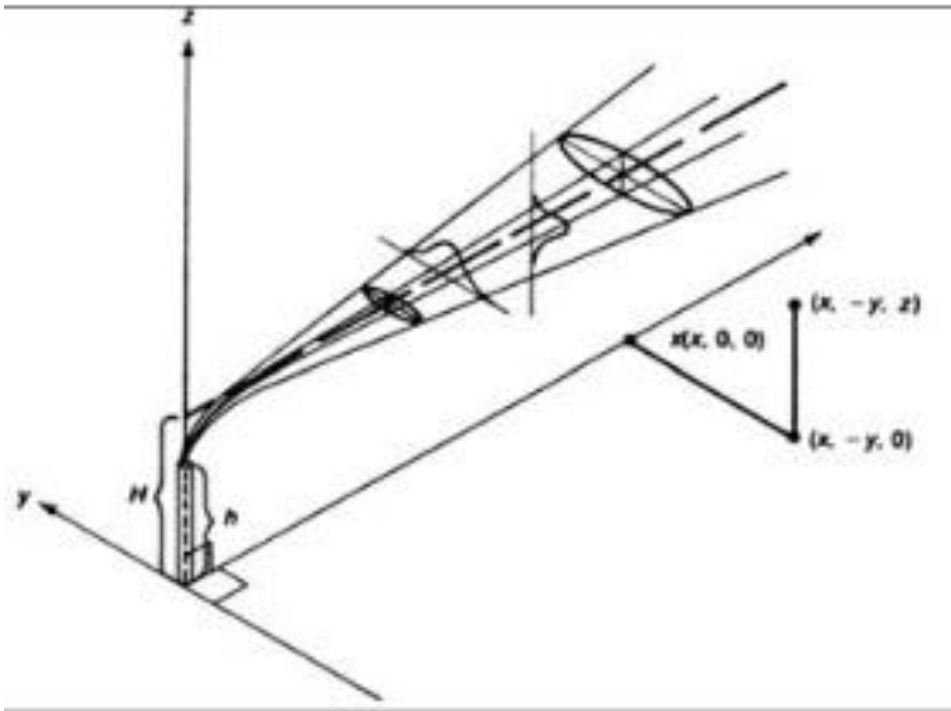
- $C$  = συγκέντρωση σε μόνιμες συνθήκες στο σημείο  $(x, y, z)$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$
- $Q$  = ρυθμός εκπομπής,  $\text{mg}/\text{s}$
- $\sigma_y, \sigma_z$  = οριζόντια και κατακόρυφη παράμετρος εξάπλωσης (m), που είναι παράμετροι της απόστασης  $x$  και της ατμοσφαιρικής ευστάθειας.
- $u$  = μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας,  $\text{m}/\text{s}$
- $y$  = οριζόντια απόσταση από τον κεντρικό άξονα του πλουμίου, m
- $z$  = κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο του εδάφους, m
- $H$  = ενεργό ύψος καμινάδας ( $H = h + \Delta h$ ), m
- $h$  = φυσικό ύψος καμινάδας, m
- $\Delta h$  = ανύψωση πλουμίου, m



# Το Γκαουσιανό μοντέλο (Gaussian model)

## ■ Διπλή γκαουσιανή εξίσωση

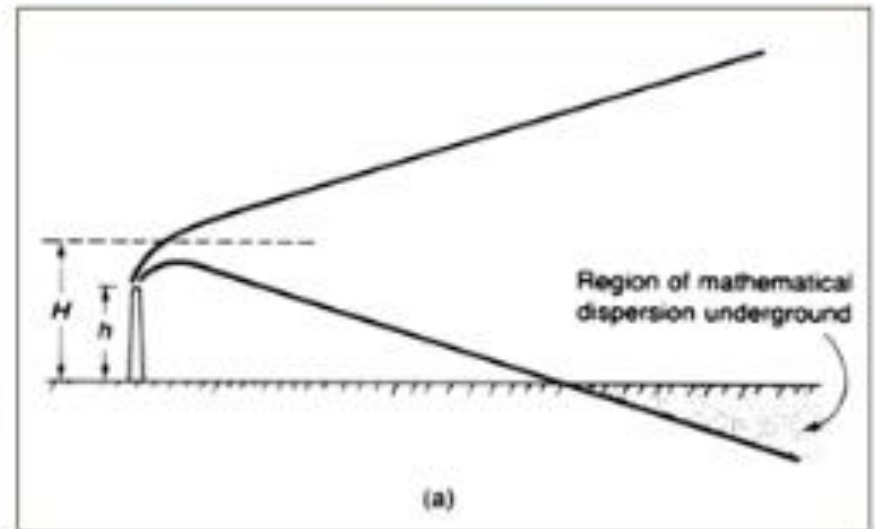
$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{Q}{2\pi\omega\sigma_y\sigma_x} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right\}$$



Δύο εκθετικοί όροι για το z.

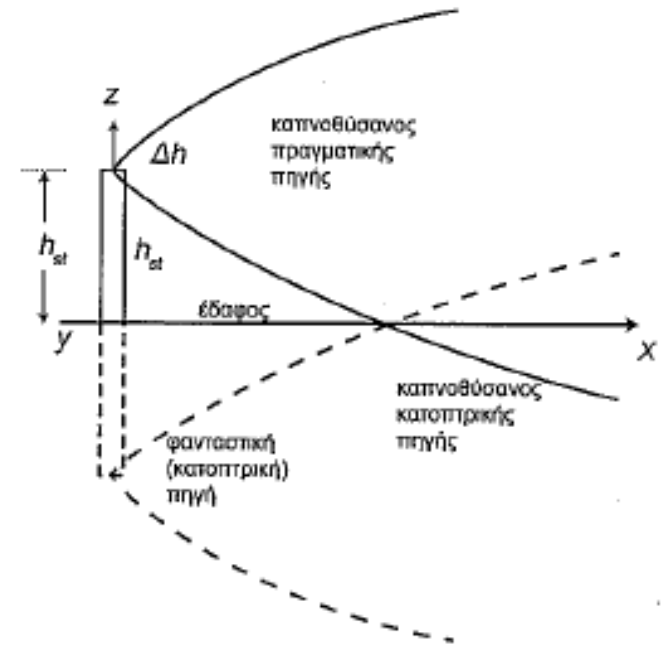
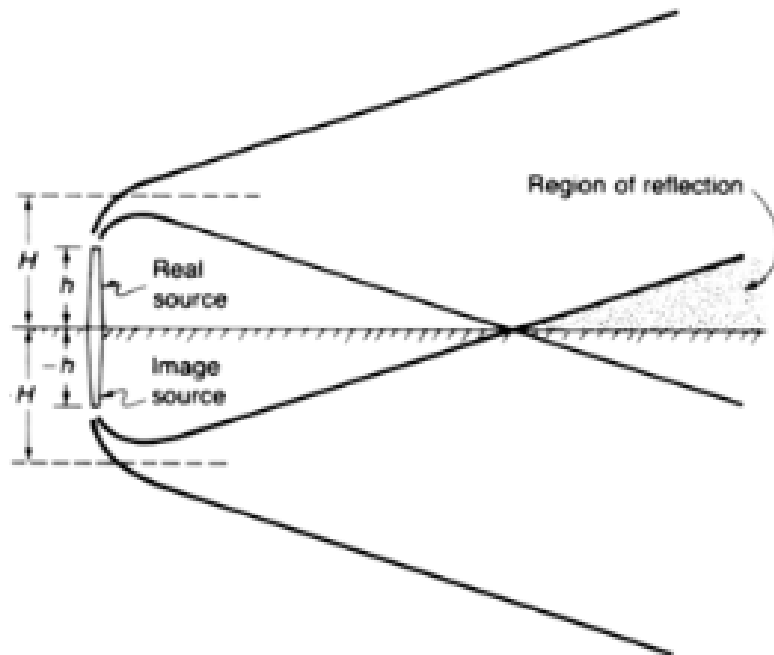
Γιατί:

Οι ρύποι δεν μπορούν να διασπαρθούν στο υπέδαφος



# Το διπλό Γκαουσιανό μοντέλο

- Το μοντέλο διορθώνεται με την προσθήκη φανταστικής πηγής, που εκπέμπει από  $-H$ .
- Έτσι προστίθεται στην συγκέντρωση πάνω από το έδαφος ποσότητα ίση με αυτή που χάνεται.
- Τι γίνεται όταν γίνεται ανάκλαση σε υδάτινη επιφάνεια;



Φανταστική ανάκλαση του καπνοθυσάνου στο έδαφος – κατοπτρική πηγή κάτω από το έδαφος

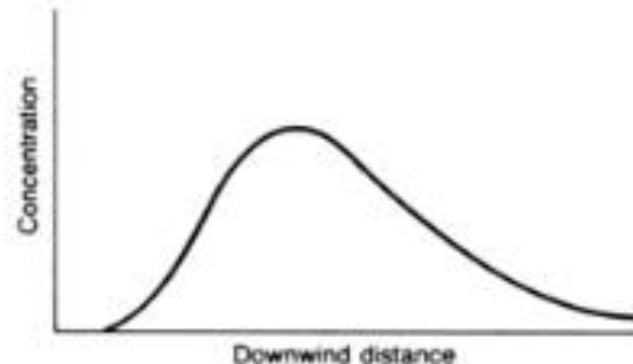


## Το διπλό Γκαουσιανό μοντέλο

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right) \right]$$

- Η κατάντη του ανέμου συγκέντρωση είναι ευθέως ανάλογη της πηγής,  $Q$
- Η κατάντη συγκέντρωση στο επίπεδο του εδάφους ( $z=0$ ) είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου.
- Επειδή  $\sigma_y$  &  $\sigma_z$  αυξάνουν με το  $x$ , η συγκέντρωση του πλουμίου στον κεντρικό άξονα μειώνεται με το  $x$ . Από την άλλη μεριά, η συγκέντρωση στο  $z=0$  αρχικά αυξάνει, φτάνει σε ένα μέγιστο και μετά μειώνεται.
- $\sigma_y$  &  $\sigma_z$  αυξάνουν με την τύρβη (αστάθεια)
- Η μέγιστη συγκ. στο έδαφος μειώνεται με αύξηση του  $H$  της καμινάδας

Συγκέντρωση στο έδαφος



# Η γκαουσιανή προσέγγιση καπνοθύσανου

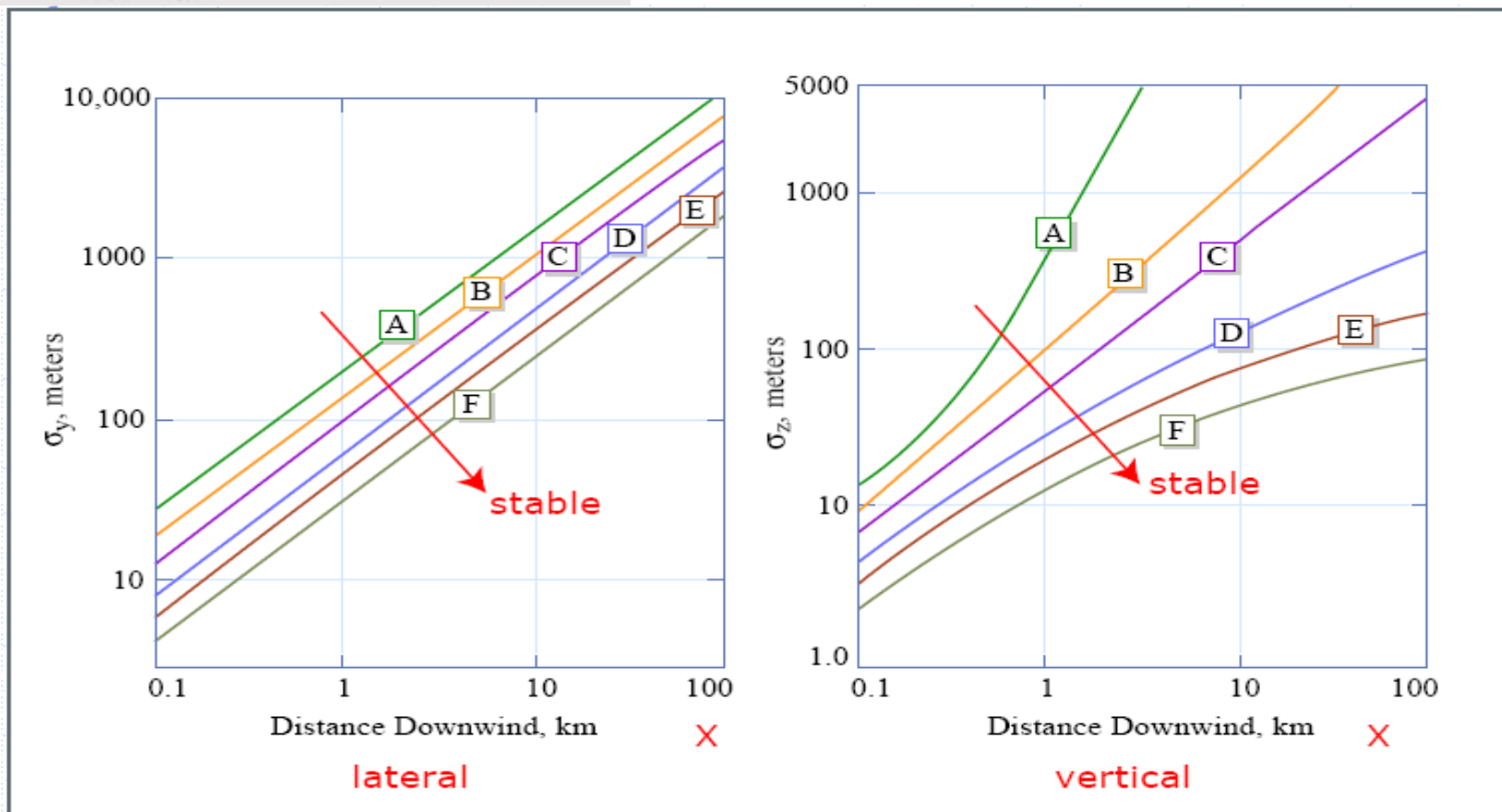
Χρησιμοποιείται όταν:

- Ισχύουν οι συνθήκες σταθερής κατάστασης, ευσταθής ή ουδέτερη. Δύσκολα σε ασταθείς συνθήκες –κατά τις τελευταίες δημιουργείται κατακόρυφη κίνηση –. Ούτε σε επιφανειακές πηγές
- Ο άνεμος είναι σταθερός και ομογενής με το ύψος, με ταχύτητα μικρότερη από 1m/s.
- Οι ρύποι δεν αντιδρούν μεταξύ τους, ούτε μετασχηματίζονται.
- Δεν έχει καλά αποτελέσματα αμέσως κάτω από την πηγή και σε μεγάλη απόσταση από αυτή >10km.
- Δεν λαμβάνουν χώρα χημικοί μετασχηματισμοί, ούτε αντιδράσεις, σε σχέση με την απόσταση από την πηγή.
- Οι τιμές συγκέντρωσης είναι μέσες σταθμισμένες σε ένα χρονικό διάστημα λ.χ. 10 λεπτά έως 1 ώρα

**Table 19.2** Values of Curve-Fit Constants for Calculating Dispersion Coefficients as a Function of Downwind Distance and Atmospheric Stability

Stability	$a$	$b^*$	$x < 1$ km			$x > 1$ km		
			$c$	$d$	$f$	$c$	$d$	$f$
A	213		440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156		106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104		61.0	0.911	0	61.0	0.911	0
D	68		33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5		22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34.0
F	34		14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

\*  $b = 0.894$  for all stability classes and values of  $x$ .



# Κατανομή ταχύτητας ανέμου - Εξίσωση ταχύτητας αέρα

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p$$

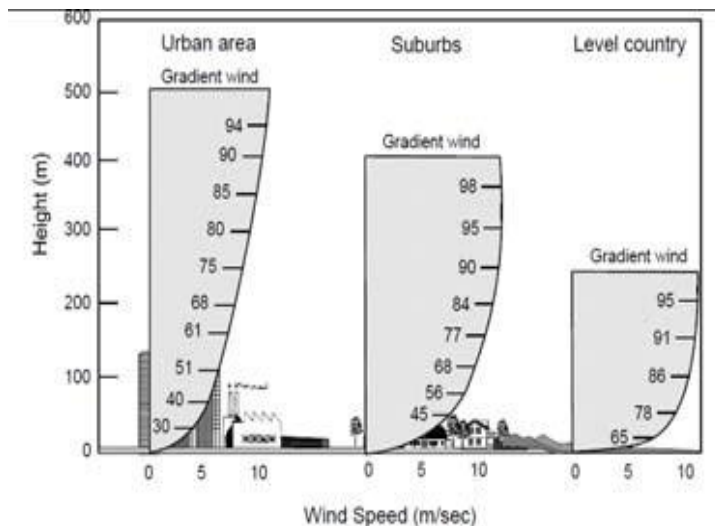


όπου

$z_1, z_2$  = ύψος 1 και 2, ο άνεμος μετράται συνήθως στα 10 m.

$u_1, u_2$  = ταχύτητες ανέμου στα  $z_1$  και  $z_2$

$p$  = εκθέτης.



Stability Class	Exponent ( $p$ )
A	0.15
B	0.15
C	0.20
D	0.25
E	0.40
F	0.60

# Ψηλές καμινάδες

$H > 2,5$  φορές υψηλότερες από τα ψηλότερα κτήρια στην περιοχή.

Αέρια καμινάδας με υψηλή ικανότητα άνωσης.

Ταχύτητα εξόδου  $> 1,5$  φορά της μέγιστης μέσης ταχύτητας ανέμου που αναμένεται.

Παρουσιάζουν σημαντική ανύψωση του πλουμίου.

Σε κλίβανους με υψηλές εκπομπές θερμότητας ( $>10$  MW).

- Η σχέση για τη συγκέντρωση στην κεντρική γραμμή του εδάφους:

$$c = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_x} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{H^2}{\sigma_z^2}\right)$$

- Η  $c$  σε κάθε σημείο  $x$ , θα πρέπει να μειώνεται σημαντικά καθώς το  $H$  αυξάνει.
- Ο λόγος για τη χρήση ψηλών καμινάδων.

# Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος κατάντη του ανέμου

- Πάντα συμβαίνει στην κεντρική γραμμή
  - Turner (1970): χρήση διαγράμματος του  $(Cu/Q)_{max}$  vs  $x_{max}$
  - Οι γραφικές παραστάσεις προσαρμόστηκαν από Ranchoux (1976)

$$\left(\frac{Cu}{Q}\right)_{max} = \exp \left[ a + b (\ln H) + c (\ln H)^2 + d (\ln H)^3 \right]$$

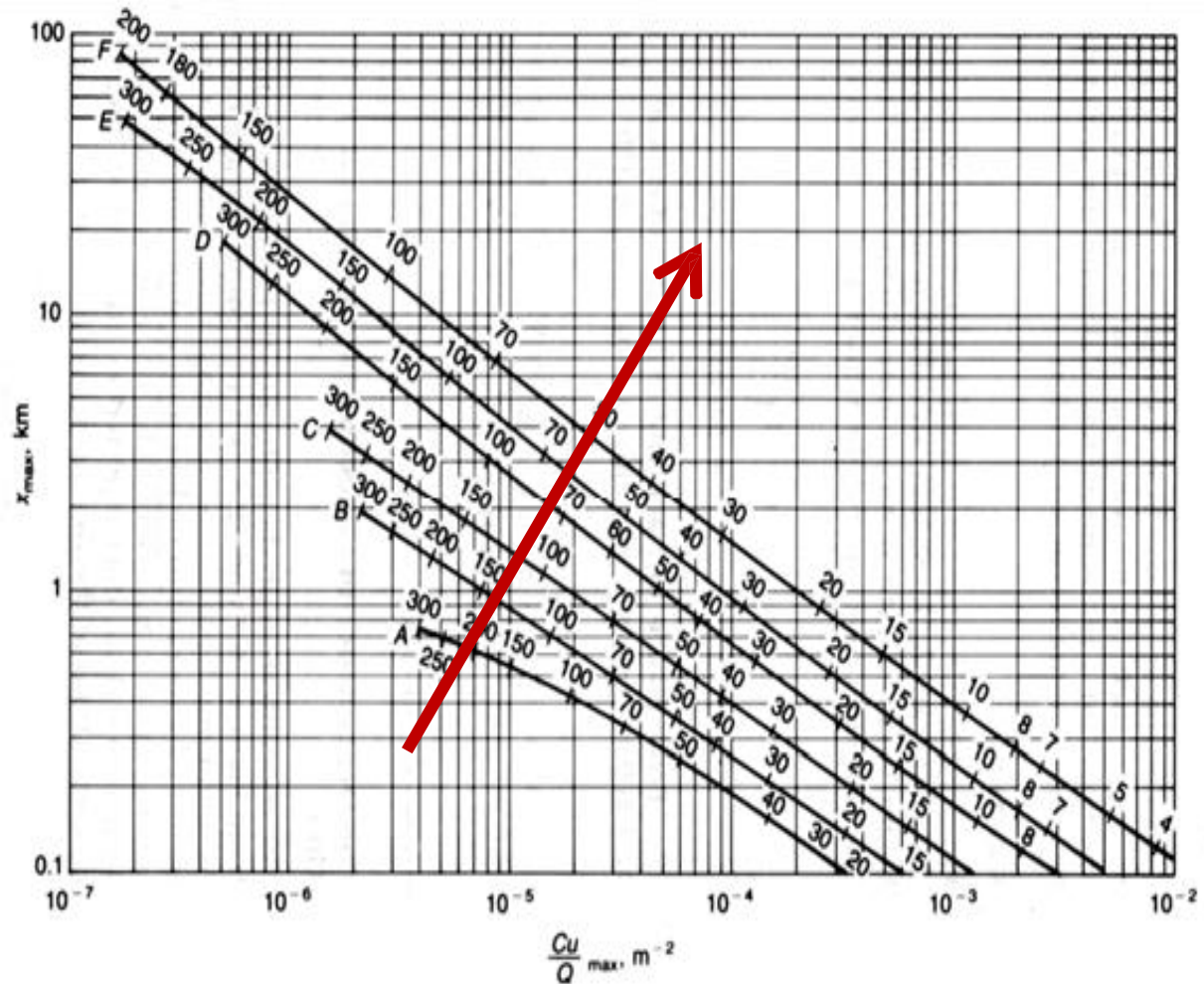
όπου  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη σταθερότητα.  
Το  $(Cu/Q)_{max}$  σε  $m^{-2}$  και το  $H$  σε  $m$ .

Τιμές των σταθερών με προσαρμογή για τον υπολογισμό του  $(Cu/Q)_{max}$  ως συνάρτηση της ατμοσφαιρικής σταθερότητας.

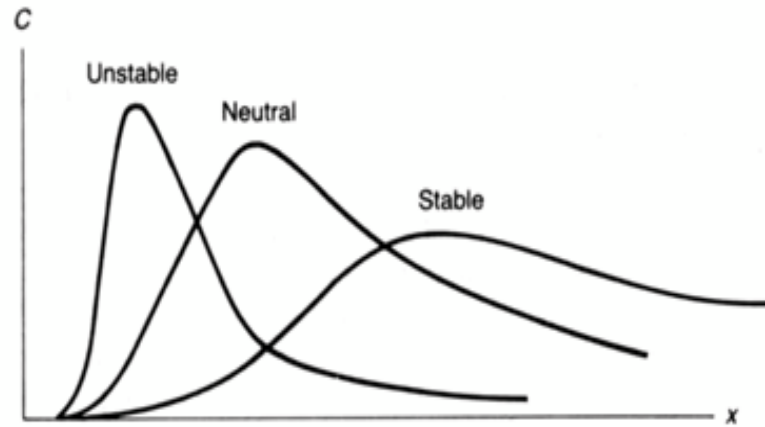
Stability	Constants			
	a	b	c	d
A	-1.0563	-2.7153	0.1261	0
B	-1.8060	-2.1912	0.0389	0
C	-1.9748	-1.9980	0	0
D	-2.5302	-1.5610	-0.0934	0
E	-1.4490	-2.5910	0.2181	-0.0343
F	-1.0488	-3.2252	0.4977	-0.0765

# Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος κατάντη του ανέμου

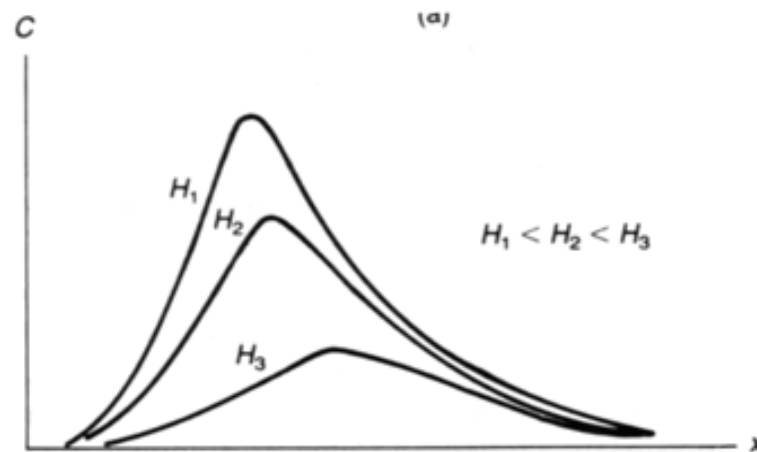
(προσαρμοσμένο από Turner, 1970)



# Συγκέντρωση στο έδαφος ως συνάρτηση της ατμοσφαιρικής αστάθειας



# Συγκέντρωση στο έδαφος ως συνάρτηση του ενεργού ύψους της καμινάδας



Διασπορά ρύπων



# Ανύψωση πλουμίου

- Το πλούμιο θερμών αερίων που εκπέμπεται κατακόρυφα έχει: **ορμή και άνωση.**
- Γρήγορα χάνει ορμή και το πλούμιο «κάμπτεται» προς την πλευρά του μέσου ανέμου.
- Πάντως η επίδραση της άνωσης είναι ακόμη σημαντική και το πλούμιο συνεχίζει να ανυψώνεται για αρκετό χρόνο μετά την καμπή του.
- Η ανύψωση του πλουμίου είναι ένα πολύπλοκο μαθηματικό πρόβλημα Εξαρτάται από: τη θερμοκρασία των αερίων στην καμινάδα, το μοριακό βάρος, την ταχύτητα εξόδου, τις συνθήκες ατμοσφαιρικής σταθερότητας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου κ.α.
- Πολλές εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις

## Ανύψωση πλουμίου

Αρκετές σχέσεις στη βιβλιογραφία....

**Το  $\Delta h$  μπορεί να διαφέρει μέχρι και 10 φορές από μοντέλο σε μοντέλο.**

Από τις γνωστότερες σχέσεις αυτή του Holland (1953):

$$\Delta h = \frac{v_s d_s}{u} \left[ 1,5 + 2,68(10^{-3}) P_a \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) d_s \right]$$

όπου

$v_s$  = ταχύτητα αερίων στην καμινάδα, m/s

$u$  = μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας, m/s

$d_s$  = εσωτερική διάμετρος καμινάδας, m

$P_a$  = ατμοσφαιρική πίεση, mbar

$T_s$  = θερμοκρασία αερίων καμινάδας, K

$T_a$  = ατμοσφαιρική θερμοκρασία, K

Η σχέση του Holland ισχύει για ουδέτερες συνθήκες.  
Η ανύψωση του πλουμίου χρειάζεται να διορθωθεί για άλλες συνθήκες σταθερότητας με χρήση πολλαπλασιαστών διόρθωσης:

- 1,2 για την κλάση σταθερότητας A
- 1,1 για την κλάση σταθερότητας B
- 0,9 για την κλάση σταθερότητας E
- 0,8 για την κλάση σταθερότητας F

Η σχέση μπορεί να γραφεί και ως: (Wark & Warner, 1981)

$$\Delta h = 1,5 \frac{v_s d_s}{u} + \frac{9,6 Q_n}{u}$$

όπου  $Q_n$  = η εκπεμπόμενη θερμότητα, MW

Η τροποποιημένη σχέση του Concawe

$$\Delta h = \frac{101,2 (Q_n)^{0,444}}{u^{0,694}}$$

# Ανύψωση πλουμίου - Το μοντέλο του Briggs

1. Χρησιμοποιείται από τα υπολογιστικά μοντέλα της ΕΡΑ
2. Καλύτερα αποτελέσματα για μεγάλα, θερμά πλούμια
3. Εκτιμά το  $\Delta h$  ως συνάρτηση της ειδικής ροή άνωσης,  $FB$
4. Το πλούμιο θα συνεχίζει να ανυψώνεται μετά την καμπή του λόγω άνωσης
5. Άλλοι παράγοντες: ταχύτητα ανέμου, απόσταση κατάντη.

Για ουδέτερες συνθήκες ευστάθειας, η κατάντη απόσταση μέχρι το σημείο της τελικής ανύψωσης του πλουμίου είναι  $x_f$

$$\Delta h = \frac{1,6(F_B)^{1/3}}{u} (x_f)^{2/3} \quad \text{για } x \geq x_f$$
$$\Delta h = \frac{1,6(F_B)^{1/3}}{u} (x)^{2/3} \quad \text{για } x < x_f$$

$$x^* = 34 * (F)^{2/5} \quad \text{για } F \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$$
$$x^* = 14 * (F)^{5/8} \quad \text{για } F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$$
$$x_f = 3,5x^*$$

## Ανύψωση πλουμίου - Το μοντέλο του Briggs

$$F_B = g \left( 1 - \frac{MW_s}{28,9} \right) \left( \frac{T_a}{T_s} \right) \frac{v_s d_s^2}{4} + 8,9 \left( \frac{P_o}{P_a} \right) Q_h$$

όπου

$F_B$  = η ειδική ροή άνωσης,  $m^4/s^3$

$g$  = η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $9,81m/s^2$

$MW_s$  = μοριακό βάρος του αερίου στην καμινάδα

$P_o$  = κανονική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας, mbar

Για τις περισσότερες εφαρμογές καύσης, το  $MW_s$  είναι περίπου 28,9, οπότε ο πρώτος όρος γίνεται μηδέν και.....

$$F_B = 8,9 \left( \frac{P_o}{P_a} \right) Q_h$$

## Ανύψωση πλουμίου - Το μοντέλο του Briggs

Για συνθήκες ευστάθειας, αρχικά υπολογίζεται η παράμετρος ευστάθειας  $S$  (σε  $s^{-2}$ ):

$$S = \frac{g}{T_a} \left( \frac{\Delta\theta}{\Delta z} \right)$$

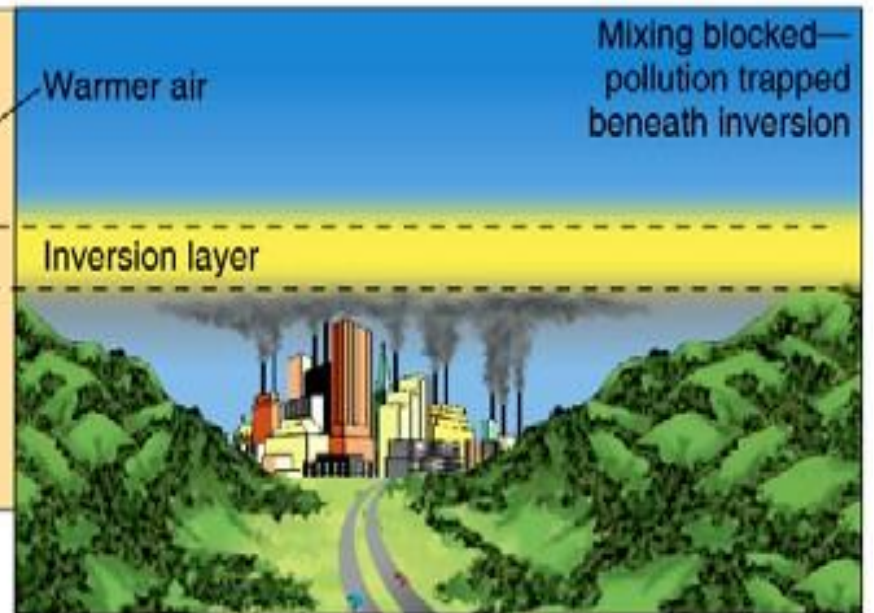
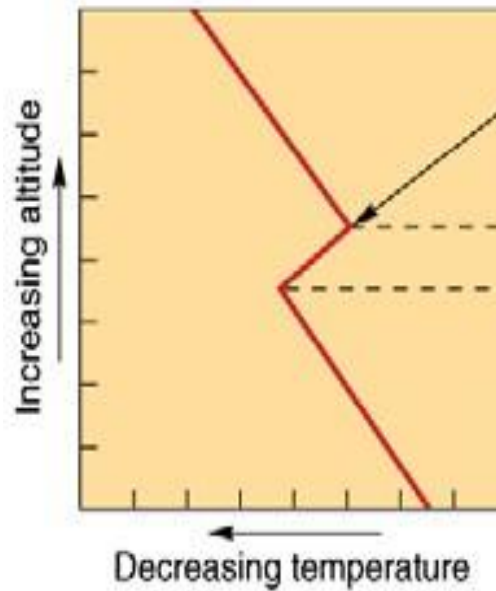
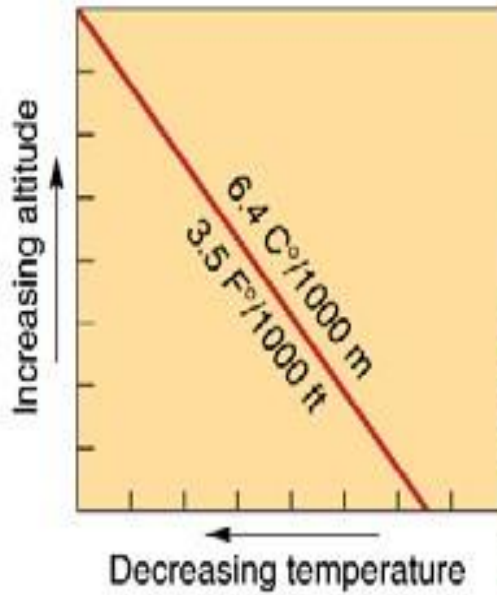
όπου  $\Delta\theta/\Delta z$  είναι η δυναμική βαθμίδα θερμοκρασίας (K/m)

Εάν δεν υπάρχουν δεδομένα: για την κατηγορία E,  $\Delta\theta/\Delta z = 0,02 \text{ K/m}$  και για την F,  $0,035 \text{ K/m}$ .

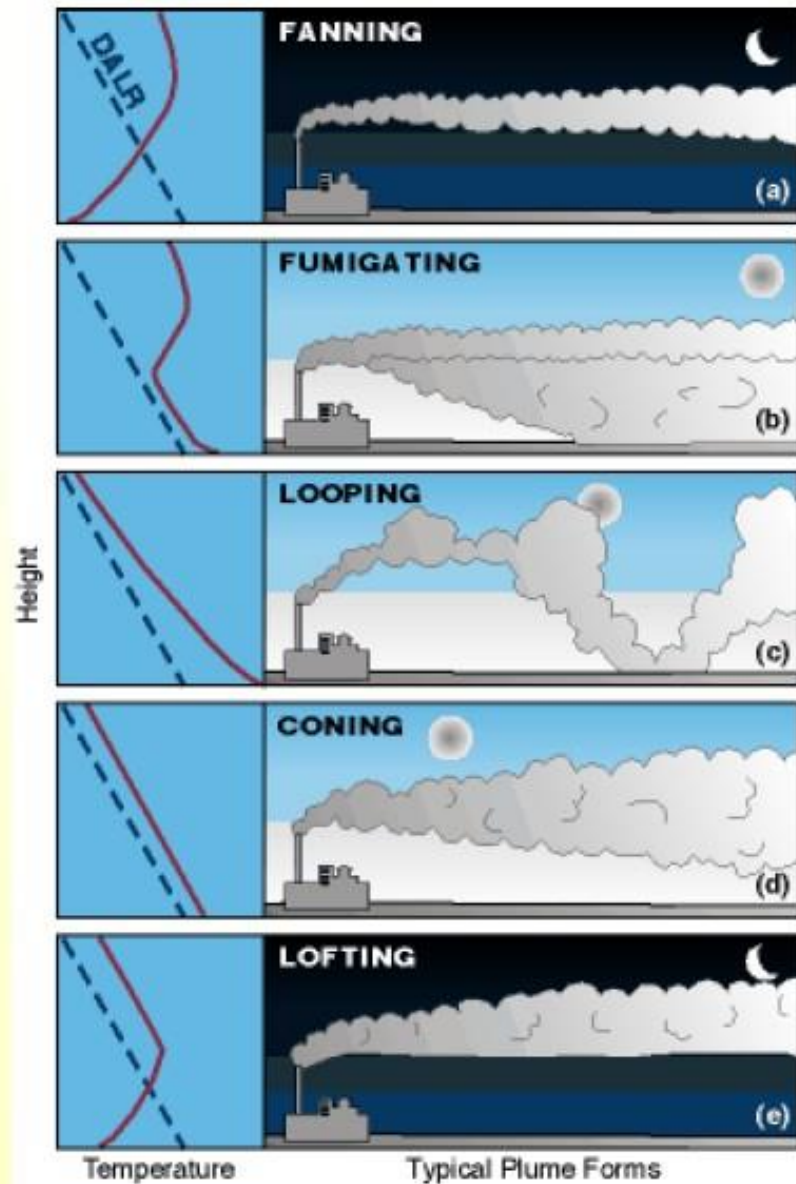
Στη συνέχεια η ανύψωση του πλουμίου:

$$\Delta h = 2,6 \left( \frac{F_B}{uS} \right)^{1/3} \quad \text{για } u \geq 1,5 \text{ m/s}$$
$$\Delta h = 2,6 F_B^{0,25} S^{-0,375} \quad \text{για } u < 1,5 \text{ m/s}$$

Χρησιμοποιείται το μικρότερο  $\Delta h$  από τα δύο.



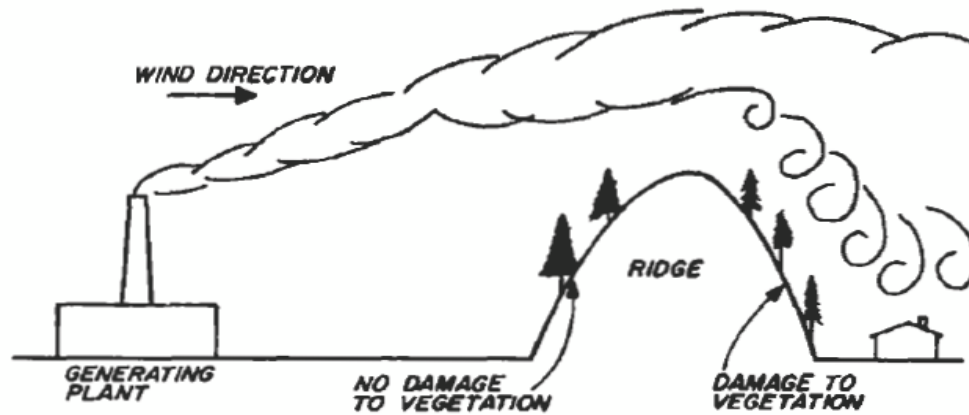
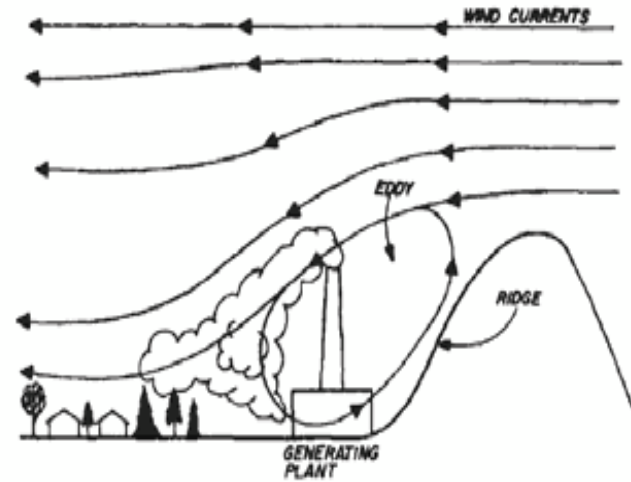
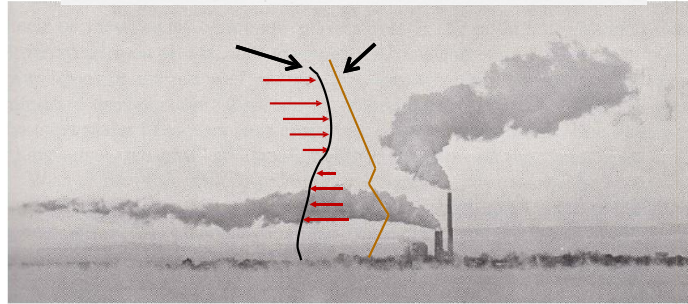
# Στατική ευστάθεια και θύσανος





**Sometimes the 3-d structure of the atmosphere requires a more detailed understanding and description of dispersion dynamics**

Condensation plumes for a 500 ft. and three 250 ft. stacks in Salem, Massachusetts. The picture, taken on a cold February morning, shows the complex thermal structure and large wind shear in the lower atmosphere. Steaming fog in the foreground is over the Beverly-Salem Harbor. The original photograph was taken by Ralph Turcotte, a staff photographer for the Beverly (MA) Times.



# “Handbook of Air Pollution Prevention and Control

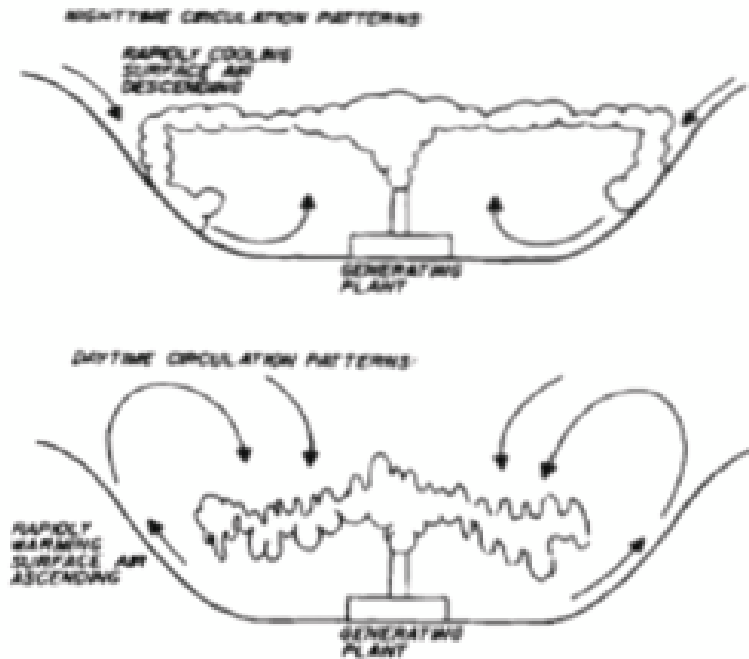


Figure 7. Diurnal air circulation effects associated with valleys.

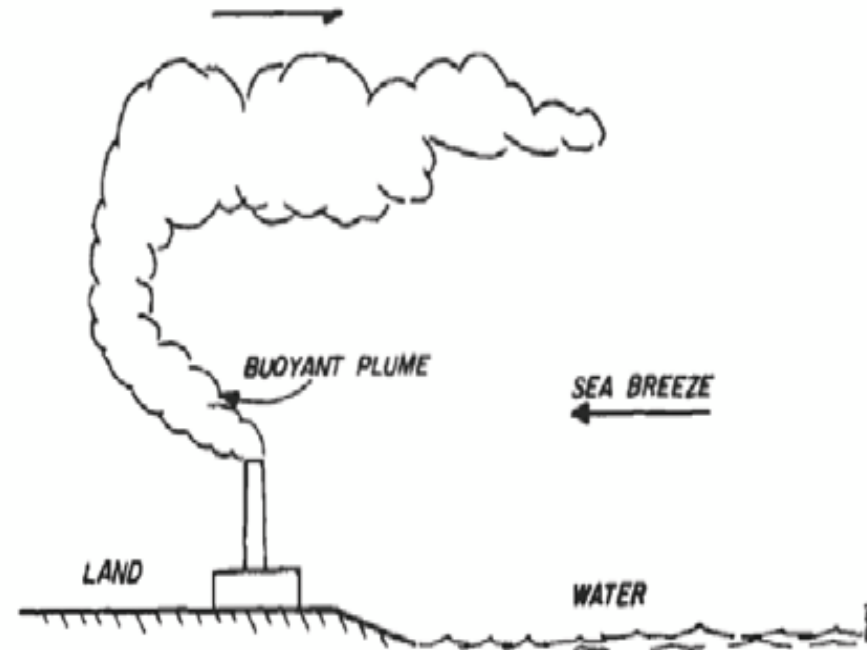


Figure 8. Shows effect of large water bodies on pollutant transport.

# Εφαρμογή περιπτώσεων διασποράς με τη χρήση γκαουσιανής προσέγγισης

Για την χάραξη ισορρυπαντικών γραμμών στο έδαφος, για  $z=0$ , προκύπτει:

$$c(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \bar{\sigma}_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{h_c^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Για τον υπολογισμό του σημείου με την μέγιστη συγκέντρωση στη διεύθυνση  $x$ , για  $y=0$ , επίσης προκύπτει:

$$c(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \bar{\sigma}_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{h_c^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Για τον ίδιο άξονα αλλά στο επίπεδο του εδάφους, θέτω  $h=0$ , και...

$$c(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi \bar{\sigma}_y \sigma_z}$$

Για τη μέγιστη συγκέντρωση ρύπων,  $c_{\max} = \frac{2Q}{\pi \bar{\sigma}_y \sigma_z} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y}\right)$  και εάν  $\sigma_y = \sigma_z$ ,

$$c_{\max} = \frac{2Q}{\pi \bar{\sigma}_y \sigma_z}$$

Εξαρτάται από το ενεργό ύψος καμινάδας και την ευστάθεια της ατμόσφαιρας

## Καπνισμός

Συμβαίνει όταν ο καπνοθύσανος δε μπορεί να μετακινηθεί και καταρρέει πίσω από τη πηγή.

Δημιουργεί υψηλές συγκεντρώσεις στο έδαφος,

Διακρίνεται:

α) **Η Διάλυση της αναστροφής**, πρωί όταν ο καπνοθύσανος είναι παγιδευμένος μέσα σε στρώμα αναστροφής. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις διατηρούνται για μια ώρα. Για πλάτος  $\Delta y$ , και ύψος  $h_e$ , ισχύει:

$$c = \frac{Q}{u h_e \Delta y}$$

β) **Η Παγίδευση**, όταν ο καπνοθύσανος παγιδεύεται στο στρώμα κάτω από την αναστροφή:

$$c = \frac{Q}{\sqrt{2\pi u H_{inv}} \sigma_y}$$

Η συγκέντρωση του ρύπου εξαρτάται από το ύψος της βάσης αναστροφής. Με σύγκριση της συγκέντρωσης του ρύπου όταν υφίσταται αναστροφή με εκείνο όταν δεν υφίσταται, προκύπτει ότι αν το ύψος της βάσης αναστροφής είναι μικρότερο από  $2,4 h_e$ , η συγκέντρωση του, λόγω περιορισμένης ανάμειξης είναι μεγαλύτερη από ότι στο έδαφος όταν δεν υπάρχει αναστροφή. Το ύψος αυτό καλείται **κρίσιμο ύψος αναστροφής**.

Με διαίρεση:

$$\frac{c_{\text{inv}}}{c_{\text{max}}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{eh_e^2}{2H_{\text{inv}}\sigma_z}$$

Και αν η απόσταση  $x$ , που είναι το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη συγκέντρωση, είναι εκεί που ο παράγοντας διασποράς  $\sigma_z$ , παίρνει τη τιμή,  $h_e^2 = 2\sigma_z^2$ , .....

$$\frac{c_{\text{inv}}}{c_{\text{max}}} \sim 2.4 \frac{h_e}{H_{\text{inv}}}$$

**γ) Μεγάλη ένταση ανέμου, επικρατούν ισχυροί άνεμοι η ανύψωση του καπνοθύσανου είναι μικρή και ευνοείται η εμφάνιση φαινομένου καπνισμού**

## Παγίδευση καπνοθύσανου σε κοιλάδα

Η γκαουσιανή προσέγγιση μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την παγίδευση του καπνοθύσανου σε μια κοιλάδα, όπως μεταξύ εδάφους και του  $H_{PBL}$ .

Στην περίπτωση απλής ομοιόμορφης ροής, που είναι παράλληλη με τον άξονα της κοιλάδας  $x$ , παρατηρείται για οποιοδήποτε  $y$ , ότι γίνεται:

$$c(x, y, 0) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \frac{Q}{D_v \sigma_x \bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h_c}{\sigma_x}\right)^2\right]$$

Όπου  $D_v$ , το εύρος της κοιλάδας

# Γραμμικές πηγές

Στην γραμμική πηγή παίζει ρόλο και η διεύθυνση του ανέμου

Η διάχυση των καυσαερίων γίνεται ευκολότερα όταν ο άνεμος πνέει κάθετα στο δρόμο (λ.χ. ενός αυτοκινητοδρόμου) και όχι παράλληλα προς αυτόν.

Χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι.

Κάθε τμήμα μήκους  $L$ , εκπέμπει καυσαέριο με ρυθμό  $Q$ , και η ισχύς της πηγής περιγράφεται με εκπομπή ανά μονάδα μήκους  $Q/L$ .

Η άνωση των καυσαερίων, θεωρείται αμελητέα όταν η πηγή βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα καυσαέρια διαχέονται οριζόντια (κατεύθυνση  $y$ ) παράλληλα στο δρόμο και κατακόρυφα.

Για κατακόρυφη διάχυση:

$$v \frac{\partial c}{\partial x} = K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

Δικαιολογείται θεωρητικά μόνο αν δεχθούμε ότι η διάχυση διαμέσου στροβίλων δε διαφέρει πολύ από τη διάχυση κατά Fick:

$$c = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi\bar{u}\sigma_z}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad \sigma_z^2 = \left(\frac{2K_z}{u}\right)x$$

$Q$ , Η παροχή μάζας ρύπων σε (kg/m)

# Γραμμικές πηγές

Με παραγωγή ως προς  $x$ , και εξίσωση με μηδέν 0, η συγκέντρωση στην επιφάνεια του εδάφους, κατά  $x$ , για άνεμο κάθετο στο δρόμο:

$$c = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi u \sigma_z}}$$

Για άνεμο υπό γωνία  $\theta$  με τον άξονα:

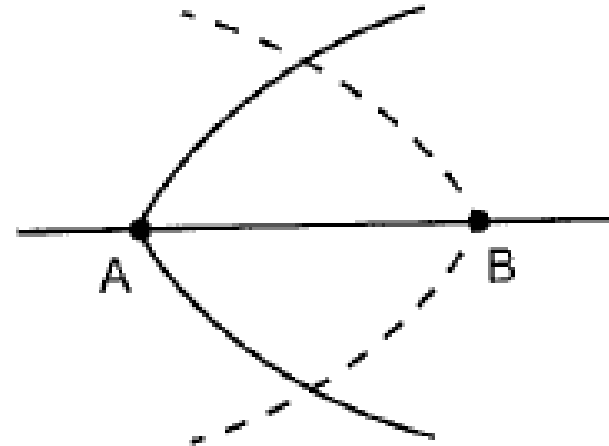
$$c = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi \sin \theta u \sigma_z}}$$

Διαπιστώνεται ότι για γραμμική πηγή η συγκέντρωση ρύπου ελαττώνεται συναρτήσει του 1 δια της ρίζας  $x$  ( $x^{-1/2}$ ), ενώ στη σημειακή του 1 δια  $x$ .



# Επιφανειακές πηγές

Ένα σύνολο από σημειακές και γραμμικές πηγές, λ.χ. μια πόλη.  
Σε κάθε σημείο η ρύπανση προκύπτει από τη συνισταμένη των συγκεντρώσεων από πολλές διαφορετικές πηγές/εκπομπές μέσα στην πόλη.



Σχηματική παράσταση υπολογισμού της συγκέντρωση σε ένα σημείο επιφανειακής πηγής, αντίθετα προς την κίνηση του ανέμου

## Στιγμαία εκπομπή

Όταν η πηγή δεν παρουσιάζει συνεχή εκπομπή, αλλά στιγμιαία:

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{5.5\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x} - \frac{y^2}{2\sigma_y} - \frac{z^2}{2\sigma_z}\right]$$

# Τέλος κεφαλαίου