

**Μάθημα 9<sup>ο</sup>**  
**Μοντέλα Διάχυσης & Διασποράς της**  
**Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης**

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Για την χωροχρονική μελέτη της διάχυσης και της διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν κατά καιρούς δημιουργηθεί και προταθεί διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης όπως Γκαουσιανά (Gaussian) μοντέλα θυσάνου για συνεχείς πηγές, στατιστικά μοντέλα διάχυσης από συνεχείς-σημειακές πηγές, μοντέλα διάχυσης «φούσκας», μοντέλα διαβάθμισης γνωστά και ως K-μοντέλα, μοντέλα αστικής διάχυσης και διασποράς ρύπων, μοντέλα μηχανισμών μεταφοράς, κλπ [1-14]. Ουσιαστικά, όλα αυτά τα μοντέλα είναι μια σειρά από εξισώσεις οι οποίες προσπαθούν να αποδώσουν τη χωροχρονική εξέλιξη της διάχυσης και της διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, λαμβάνοντας υπόψη τις μετεωρολογικές συνθήκες, την ευστάθεια και την αστάθεια της ατμόσφαιρας, το είδος της πηγής εκπομπής των ρύπων, κλπ.

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Στη συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης μιας απλοποιημένης μορφής ενός Γκαουσιανού μοντέλου διασποράς το οποίο δίνει την δυνατότητα υπολογισμού του τρισδιάστατου πεδίου συγκέντρωσης ενός ρύπου. Το πεδίο αυτό δημιουργείται από μια σημειακή πηγή εκπομπής (πχ καμινάδα) και βρίσκεται υπό χρονικά αμετάβλητες μετεωρολογικές συνθήκες και χρονικά αμετάβλητη-σταθερή εκπομπή. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε μια σειρά παραδοχών όπως [3]:

- Η πηγή των ρύπων είναι σημειακή (πχ καμινάδα)
- Η οριζόντια μεταφορά των ρύπων οφείλεται στον πνέοντα άνεμο
- Όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα του θυσάνου, η διάχυση ακολουθεί την κανονική (Gaussian) κατανομή
- Η εκπομπή (παροχή ) του ρύπου είναι σταθερή με το χρόνο

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

- 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 θεωρούμε 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  $\mu\text{m}$ .

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

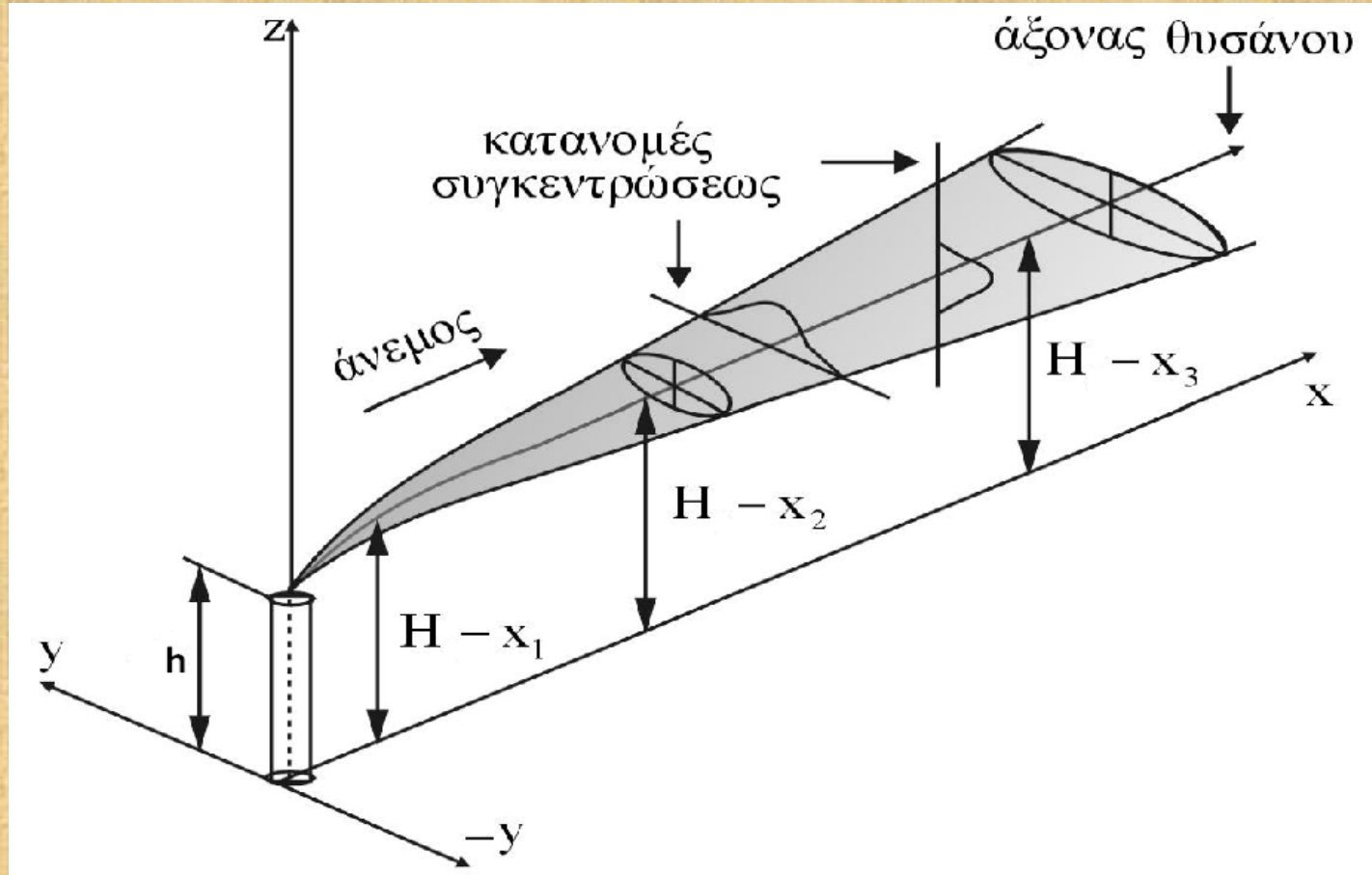
Για προφανείς πρακτικούς λόγους η μέτρηση της κατακόρυφης διανομής της θερμοκρασίας σε οποιοδήποτε σημείο δεν είναι εφικτή, για τον καθορισμό της ευστάθειας ή αστάθειας της ατμόσφαιρας έχει προταθεί ο ακόλουθος Πίνακας κατηγοριών ευστάθειας της ατμόσφαιρας (Πίνακας 1) κατά Pasquill [1], [2]:

Ημέρα				Νύχτα	
Ταχύτητα ανέμου ( $m \cdot s^{-1}$ )	Ισχυρή ηλιοφάνεια	Μέση ηλιοφάνεια	Ελαφρά ηλιοφάνεια	Ελαφριά ή χαμηλή νέφωση (<3/8)	Νέφωση (>4/8)
<2	A	A-B	B	F	G
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

Πίνακας 1. Κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill [2,3]

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει την «φιλοσοφία» ενός Γκαουσιανού (Gaussian) μοντέλου διάχυσης και διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.



Σχήμα 1. Γκαουσιανό μοντέλο διάχυσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [1]

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Ο βασικός στόχος ενός τέτοιου μοντέλου είναι ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ενός ρύπου σε κάθε σημείο του χώρου  $[C(x,y,z)]$ , με βάση βέβαια πάντα τις πιο πάνω παραδοχές. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, πρέπει να υπάρξουν μια σειρά από βήματα. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της οριζόντιας συνιστώσας ( $u$ ) της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του χείλους της καμινάδας, τον υπολογισμό της κατακόρυφης ταχύτητας εκροής των καυσαερίων ( $u_s$ ) από την πηγή-καμινάδα, τον υπολογισμό του ενεργού ύψους ( $H$ ) του θυσάνου, την απόσταση ( $x_f$ ) κατά μήκος του άξονα  $x$  του θυσάνου στην οποία παρατηρείται η μέγιστη ανύψωση του θυσάνου (ενεργό ύψος), τον προσδιορισμό της ευστάθειας ή αστάθειας της ατμόσφαιρας, τον μηχανισμό ανύψωσης των ρύπων (άνωση ή ορμή) και τέλος, τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου σε κάθε σημείο του χώρου  $(x,y,z)$ .

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, παρουσιάζονται στη συνέχεια συνοπτικά τα βήματα για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ενός ρύπου που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή (πχ καμινάδα) σε κάθε σημείο του χώρου  $(x,y,z)$  στην περιοχή όπου βρίσκεται η πηγή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Briggs.

## •Υπολογισμός της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του αέρα

Έστω ότι  $u_{ref}$  είναι η οριζόντια συνιστώσα του αέρα, μετρούμενη σε ένα ύψος  $z_{ref}$ . Τότε, σε κάθε άλλο ύψος  $z$ , μεγαλύτερο ή μικρότερο του ύψους αναφοράς  $z_{ref}$ , η οριζόντια συνιστώσα  $u$  του αέρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$u = u_{ref} \cdot \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^p$$

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Ο εκθέτης  $p$  έχει να κάνει με την τύρβη και παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με τις συνθήκες ευστάθειας ή αστάθειας της ατμόσφαιρας και ανάλογα με το είδος της περιοχής, αστική ή αγροτική (Πίνακας 2).

Κατηγορία ευστάθειας	Αγροτική περιοχή	Αστική περιοχή
<b>A</b>	0.07	0.15
<b>B</b>	0.07	0.15
<b>C</b>	0.10	0.20
<b>D</b>	0.15	0.25
<b>E</b>	0.35	0.30
<b>F</b>	0.55	0.30

Πίνακας 2. Τιμές του εκθέτη  $p$

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

## •Υπολογισμός ταχύτητας εκροής καυσαερίων

Αν  $Q$  είναι ο ρυθμός ροής μάζας των καυσαερίων σε  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $d$  σε  $\text{m}$  η εσωτερική διάμετρος της καμινάδας θεωρούμενης ως κυλινδρικής και  $\rho$  η πυκνότητα του ρύπου σε  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , τότε μπορεί να υπολογιστεί η κατακόρυφη ταχύτητα  $u_s$  εκπομπής του ρύπου σε  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , από τη σχέση:

$$u_s = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \rho \cdot d^2}$$

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Αν πάλι είναι γνωστός ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας  $Q_h$  από την πηγή εκπομπής του ρύπου, τότε ο ρυθμός ροής μάζας  $Q$ , μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$Q = \frac{Q_h}{c_p \cdot (T_s - T)}$$

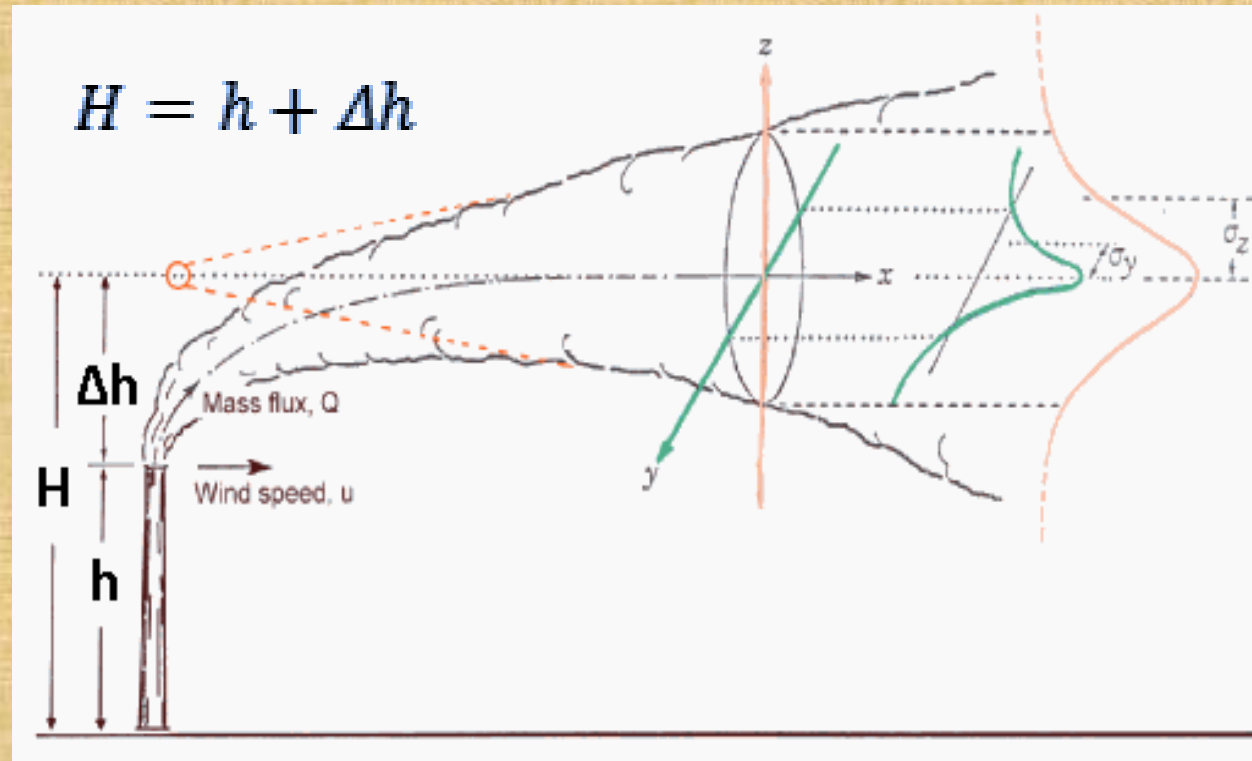
όπου:

- $Q_h$  : ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας σε  $J \cdot s^{-1}$
- $c_p$  : Η ειδική θερμότητα του αέριου ρύπου σε  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- $T_s$  : Η θερμοκρασία εκπομπής του ρύπου σε K
- $T$  : Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα
- $Q$  : Ο ρυθμός ροής μάζας σε  $kg \cdot s^{-1}$



# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Το ενεργό ύψος της καμινάδας ( $H$ ) είναι ένας καθοριστικός παράγοντας για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του ρύπου σε μια συγκεκριμένη θέση μακριά από την πηγή εκπομπής του. Για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους πρέπει να ακολουθηθούν μια σειρά από διαδοχικά ενδιάμεσα βήματα που περιγράφονται στη συνέχεια:

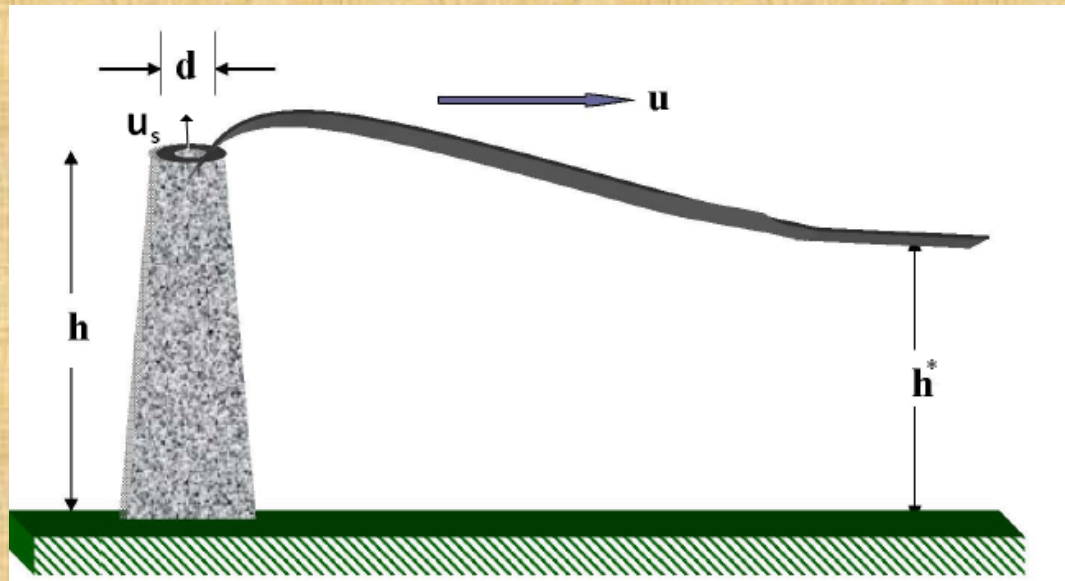


Σχήμα 2. Γεωμετρία ενός Γκαουσιανού πλουμίου-θυσάνου

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

## •Υπολογισμός κατωρέματος-απόπλυσης καμινάδας

Με τον όρο κατώρεμα (downwash) ή απόπλυση της καμινάδας νοείται το ύψος στο οποίο «πέφτει» ο θύσανος αμέσως μετά την έξοδό του από την καμινάδα, λόγω ιδιαιτέρων συνθηκών και τεχνικών χαρακτηριστικών της καμινάδας (Σχήμα 16). Ουσιαστικά είναι η κάθοδος του κεντρικού άξονα του θυσάνου προς το έδαφος, αμέσως μετά την έξοδό του από την καμινάδα. Το ύψος αυτό θα το συμβολίζουμε με  $h^*$  και θα χρησιμοποιείται από εδώ και πέρα για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους του θυσάνου-πλουμίου. Αν το φαινόμενο downwash ( $h^*$ ) της καμινάδας δεν μπορεί να μας είναι γνωστό ώστε να υπολογιστεί, τότε ισχύει ότι  $h^*=h$ , όπου  $h$  το φυσικό γεωμετρικό ύψος του χείλους της καμινάδας από το έδαφος.



Σχήμα 3. Γεωμετρία κατωρέματος (downwash) ή απόπλυσης καμινάδας

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

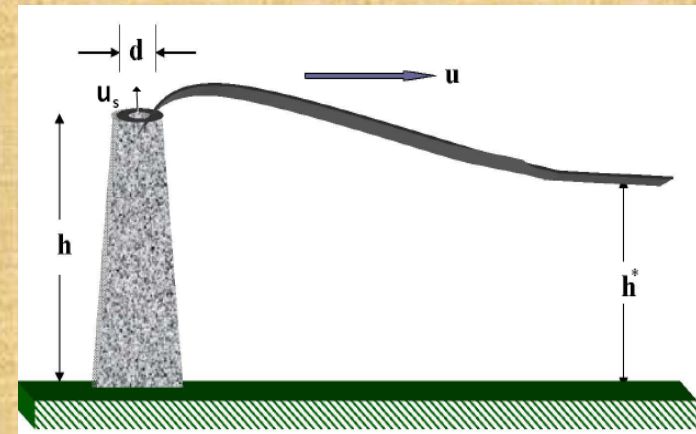
Για την μελέτη του φαινομένου κατωρεύματος ή απόπλυσης της καμινάδας, το φυσικό ύψος  $h$  της καμινάδας τροποποιείται σύμφωνα με τον Briggs (1973) όπως φαίνεται στις εξισώσεις:

$$h^* = h + 2 \cdot \left( \frac{u_s}{u} - 1.5 \right) \cdot d \quad \text{για} \quad u_s < 1.5 \cdot u$$

$$h^* = h \quad \text{για} \quad u_s \geq 1.5 \cdot u$$

όπου:

- $h$  : Το ύψος της σημειακής πηγής (πχ καμινάδα) σε (m)
- $h^*$  : Το ύψος κατωρεύματος-απόπλυσης σε (m)
- $u$  : Η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα στο ύψος της καμινάδας σε ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $u_s$  : Η κατακόρυφη ταχύτητα εκροής των ρύπων από την καμινάδα σε ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $d$  : Η εσωτερική διάμετρος της καμινάδας σε (m)



Σχήμα 3. Γεωμετρία κατωρεύματος (downwash) ή απόπλυσης καμινάδας

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Για τον προσδιορισμό των αιτιών και του τρόπου-είδους ανύψωσης του θυσάνου εντός του ΑΟΣ, απαιτείται να υπολογιστεί ο παράγοντας καμινάδας  $F$  σε  $m^4 \cdot s^{-3}$ , ο οποίος σύμφωνα με τον Briggs (1975) υπολογίζεται από την σχέση:

$$F = \frac{g \cdot u_s \cdot d^2 \cdot (T_s - T)}{4 \cdot T_s}$$

όπου:

- $u_s$  : Η κατακόρυφη ταχύτητα εκροής των ρύπων από την καμινάδα σε ( $m \cdot s^{-1}$ )
- $d$  : Η εσωτερική διάμετρος της καμινάδας σε (m)
- $T_s$  : Η θερμοκρασία των ρύπων κατά την έξοδό τους από την καμινάδα σε K
- $T$  : Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα σε K
- $g$  : Η επιτάχυνση της βαρύτητας σε ( $m \cdot s^{-2}$ )

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Επίσης, πρέπει να υπολογιστεί και ο παράγοντας  $\Delta T_c$  που ονομάζεται κρίσιμη θερμοκρασία και εκφράζει ουσιαστικά την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα. Εάν η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T = T_s - T$  είναι μεγαλύτερη ή ίση με την κρίσιμη θερμοκρασία  $\Delta T_c$ , τότε έχουμε ανύψωση του θυσάνου λόγω άνωσης, ενώ αν είναι μικρότερη έχουμε ανύψωση λόγω ορμής, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.

$\Delta T \geq \Delta T_c$	→	Ανύψωση λόγω άνωσης
$\Delta T < \Delta T_c$	→	Ανύψωση λόγω ορμής

Πίνακας 3. Κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας και είδος ανύψωσης

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Έτσι, για τις διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας ή αστάθειας εντός του ΑΟΣ, οι εξισώσεις που ακολουθούν υπολογίζουν την κρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας και το είδος ανύψωσης του θυσάνου.

## Ασταθές ή Ουδέτερο ΑΟΣ (Κατηγορία A,B,C,D)

$$(\Delta T)_c = 0.00575 \cdot u_s^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{T_s}{d^{\frac{1}{3}}} \quad \text{για } F \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$(\Delta T)_c = 0.0297 \cdot u_s^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{T_s}{d^{\frac{2}{3}}} \quad \text{για } F < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

## Ευσταθές ΑΟΣ (Κατηγορία E,F)

$$(\Delta T_c) = 0.019582 \cdot u_s \cdot T_s \cdot \sqrt{s} \quad \text{για κάθε } F$$

όπου η παράμετρος ευστάθειας  $s$  παίρνει τιμές :

$s = 0.02 \text{ K/m}$  για ευστάθεια της ατμόσφαιρας τάξης E και

$s = 0.035 \text{ K/m}$  για ευστάθεια της ατμόσφαιρας τάξης F

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

## •Υπολογισμός οριζόντιας απόστασης $x_f$ και ενεργού ύψους $H$ θυσάνου

Με τον όρο  $x_f$  συμβολίζεται η οριζόντια απόσταση από την καμινάδα-πηγή και κατά μήκος του άξονα  $xx'$ , στην οποία παρατηρείται η μέγιστη ανύψωση  $H$  του θυσάνου. Κατά την διάρκεια της ημέρας ή σε ημέρες ή και νύχτες οι οποίες είναι νεφελώδεις με ισχυρούς ανέμους η κατάσταση εντός του ΑΟΣ μπορεί να είναι ασταθής ή ουδέτερη. Το ύψος του ΑΟΣ κυμαίνεται μεταξύ των 500m μέχρι και 2000m περίπου. Κοντά στην καμινάδα-πηγή, η εσωτερική τύρβη του θυσάνου είναι πολύ μεγαλύτερη απ' αυτή του περιβάλλοντα αέρα. Αν ο θύσανος συνεχίσει να ανέρχεται μέσα στο ΑΟΣ, από ένα σημείο και μετά η ατμοσφαιρική τύρβη αρχίζει να υπερισχύει περιορίζοντας τελικά την ανύψωση του θυσάνου. Σε συνθήκες αστάθειας ή ουδέτερου ΑΟΣ δεν υπάρχει κάποιο ξεκάθαρο ανώτερο όριο στην ανύψωση του θυσάνου. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η ανύψωση λόγω άνωσης θεωρείται ότι διαρκεί μέχρις ότου επαρκής ποσότητα περιβάλλοντα αέρα εισέλθει στον θύσανο και μειώσει την θερμοκρασία του στα ίδια επίπεδα με αυτά του περιβάλλοντα αέρα. Στη συνέχεια ακολουθεί η καταβύθιση του θυσάνου προς το έδαφος.

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Κατά την διάρκεια της νύχτας σχηματίζεται ένα σχετικά μικρού πάχους ΑΟΣ (<200~300 m) στο οποίο επικρατούν ευσταθείς συνθήκες. Ακόμα και κατά την διάρκεια της μέρας, το άνω όριο του ασταθούς ΑΟΣ που σχηματίζεται κοντά στο έδαφος σημαδεύεται από μία υπερυψωμένη αναστροφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο θύσανος μπορεί να βρεθεί σε κάποιο στρώμα αέρα ο οποίος χαρακτηρίζεται από ευσταθή στρωμάτωση. Σ' αυτή την περίπτωση ο θύσανος φθάνει σε ένα μέγιστο ύψος και μετά από μία ή δύο ταλαντώσεις κατέρχεται στο τελικό ύψος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμική ανύψωση λόγω άνωσης του θυσάνου υπερिशύει της αντίστοιχης που οφείλεται στην ορμή των καυσαερίων. Στις περιπτώσεις όμως που η θερμοκρασία των αερίων  $T_s$  είναι μικρότερη ή ίση σχεδόν της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα  $T$  και ισχύει ότι  $\Delta T < \Delta T_c$ , η ανύψωση του θυσάνου λόγω της ορμής θα είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης λόγω της άνωσης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η επίδραση της αρχικής ορμής είναι σημαντική μόνο κοντά στην πηγή-καμινάδα και όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή εκπομπής των ρύπων η επίδραση αυτή μειώνεται, η απόσταση από την πηγή στην οποία ο κεντρικός άξονας του θυσάνου έχει φθάσει στο τελικό ύψος θεωρείται σ' αυτή την περίπτωση ίση με το μηδέν. Δηλαδή  $x_f = 0$  km, που πρακτικά σημαίνει κατακόρυφη ανύψωση του θυσάνου στο σημείο  $x=0$  km της θέσης της καμινάδας.

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι εξισώσεις που ακολουθούν περιγράφουν τον τρόπο υπολογισμού της απόστασης  $x_f$  σε km, καθώς επίσης και του ενεργού ύψους  $H$  του θυσάνου σε m, σε σχέση με την τις συνθήκες εντός του ΑΟΣ και του παράγοντα  $F$  της καμινάδας.

## Ασταθές ή Ουδέτερο ΑΟΣ (Κατηγορία Α,Β,С, D)

### 1<sup>η</sup> Περίπτωση: $\Delta T \geq \Delta T_c$ (Άνωση)

$$x_f = 0.049 \cdot F^{\frac{5}{8}} \quad \text{για } F < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$x_f = 0.119 \cdot F^{\frac{2}{5}} \quad \text{για } F \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$H = h^* + 21.425 \cdot \frac{F^{\frac{3}{4}}}{u} \quad \text{για } F < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$H = h^* + 38.71 \cdot \frac{F^{\frac{3}{5}}}{u} \quad \text{για } F \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

### 2<sup>η</sup> Περίπτωση: $\Delta T < \Delta T_c$ (Ορμή)

$$x_f = 0 \quad H = h^* + 3 \cdot d \cdot \frac{u_s}{u} \quad \text{για } \frac{u_s}{u} > 4$$

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

## Ευσταθές ΑΟΣ (Κατηγορία Ε, F, G)

1<sup>η</sup> Περίπτωση:  $\Delta T \geq \Delta T_c$  (Άνωση)

$$x_f = 0.0020715 \cdot \frac{u}{\sqrt{s}}$$

$$H = h^* + 2.6 \cdot \left( \frac{F}{u \cdot s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Κατακόρυφος θύσανος ( $u > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$$H = h^* + 4 \cdot F^{\frac{1}{4}} \cdot s^{\frac{-3}{8}}$$

Κεκαμμένος θύσανος ( $u \leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

2<sup>η</sup> Περίπτωση:  $\Delta T < \Delta T_c$  (Ορμή)

$$x_f = 0$$

$$H = h^* + 1.5 \cdot \left( \frac{u_s^2 \cdot d^2 \cdot T}{4 \cdot T_s \cdot u} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot s^{\frac{-1}{6}}$$

# Μοντέλα διασποράς της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις ο χρόνος που απαιτείται για την ανύψωση του θυσάνου στο τελικό ύψος είναι μικρός. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου ο χρόνος ανύψωσης του θυσάνου στο μέγιστο ενεργό του ύψος είναι σχετικά μεγάλος λόγω σταδιακής ανύψωσης του πλουμίου. Έτσι, σε αποστάσεις  $x < x_f$  μεταξύ πηγής-καμινάδας και θέσης μέγιστου ύψους ανύψωσης του θυσάνου, για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους του θυσάνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η εξίσωση

$$H = h^* + 1.60 \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot x^{\frac{2}{3}} \cdot u^{-1} \quad \text{για} \quad x < x_f$$

όπου  $x$  η απόσταση σε m από την πηγή-καμινάδα.

# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου

Μετά την παραπάνω διαδικασία και υπολογισμούς, είμαστε σε θέση να υπολογιστεί η συγκέντρωση  $C(x,y,z)$  του ρύπου σε  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  σε κάθε σημείο  $(x,y,z)$  του χώρου πέριξ της πηγής-καμινάδας. Η γενική εξίσωση υπολογισμού της συγκέντρωσης του ρύπου σε  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  σε κάθε σημείο  $(x,y,z)$  είναι:

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

όπου:

- $Q$**  : Ο ρυθμός εκπομπής-ροή μάζας του ρύπου από την πηγή σε  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\sigma_y$  και  $\sigma_z$**  : Οι τυπικές αποκλίσεις του θυσάνου στους άξονες  $yy'$  και  $zz'$  αντίστοιχα σε (m)
- $u$**  : Η μέση οριζόντια συνιστώσα του ανέμου στο ενεργό ύψος της πηγής, σε  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $H$**  : Το ενεργό ύψος εκπομπής της πηγής σε (m)
- $C$**  : Η συγκέντρωση του ρύπου σε  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου

Οι τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  του θυσάνου στους άξονες  $yy'$  και  $zz'$  (Σχήμα 2) αντίστοιχα σε μέτρα (m), υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_y = \frac{k_1 \cdot x}{\left[1 + \frac{x}{k_2}\right]^{k_3}} \quad \text{και} \quad \sigma_z = \frac{k_4 \cdot x}{\left[1 + \frac{x}{k_2}\right]^{k_5}}$$

όπου  $x$  η απόσταση σε (m) από την πηγή-καμινάδα και  $k_1, k_2, k_3, k_4$  και  $k_5$  συντελεστές των οποίων οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Κατηγορία ευστάθειας ή αστάθειας ΑΟΣ	$k_1$	$k_2$ (m)	$k_3$	$k_4$	$k_5$
A	0.2500	927	0.189	0.1020	-1.918
B	0.2020	370	0.162	0.0962	-0.101
C	0.1340	283	0.134	0.0722	+0.102
D	0.0787	707	0.135	0.0475	+0.465
E	0.0566	1070	0.137	0.0335	+0.624
F	0.0370	1170	0.134	0.0220	+0.700

Πίνακας 4. Τιμές συντελεστών υπολογισμού τυπικών αποκλίσεων θυσάνου

# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου

Αν θέλουμε να υπολογίσουμε την συγκέντρωση του ρύπου στην επιφάνεια του εδάφους ( $z=0$  m) και σε κάθε θέση  $(x,y)$  ως προς την πηγή-καμινάδα  $(0,0)$  χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot e^{\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}}$$

Επιπλέον, αν θέλουμε να υπολογίσουμε την συγκέντρωση του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους ( $z=0$  m) και κατά μήκος του άξονα του θυσάνου ( $y=0$  m) χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

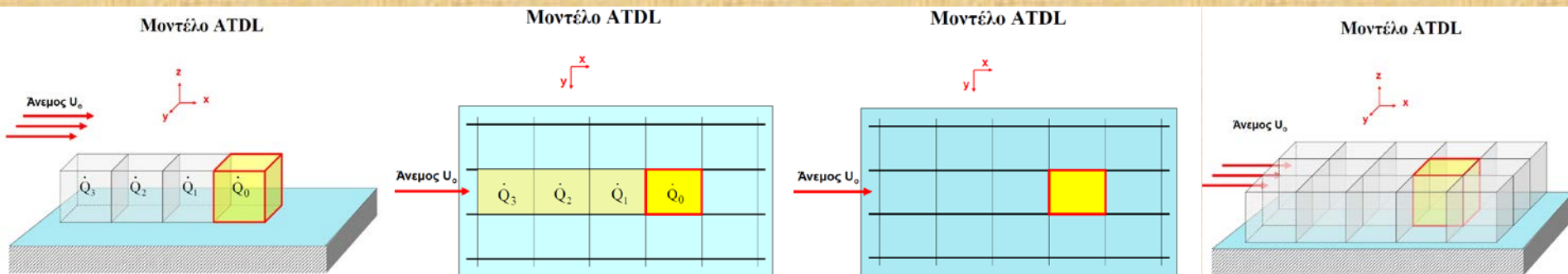
$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}}$$

Τέλος, στο επίπεδο του εδάφους ( $z=0$ m) και κατά μήκος του άξονα του θυσάνου ( $y=0$  m) για **σημειακή επιφανειακή πηγή** με μηδενικό ενεργό ύψος θυσάνου ( $H=0$  m) χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z}$$

# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου Μοντέλο ATDL

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ρύπων σε διάφορες αστικές περιοχές έχουν προταθεί πολλά και διαφορετικά μεταξύ τους μοντέλα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ένα από αυτά είναι και το μοντέλο ATDL που αναπτύχθηκε από τους Gifford και Hanna [9-13] στο εργαστήριο **A**tmospheric **T**urbulence and **D**iffusion **L**ab (ATDL) στο Oak Ridge U.S.A. Στη συνέχεια, παρατίθεται μια πολύ σύντομη και απλοποιημένη εκδοχή του μοντέλου ATDL διάχυσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από επιφανειακές πηγές, δηλαδή σημειακές πηγές που δεν καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στο επίπεδο  $(x,y)$  και που δεν εμφανίζουν σημαντικό ύψος από το έδαφος (σημειακές επιφανειακές πηγές).



# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου Μοντέλο ATDL

Αν με  $C$  συμβολίζεται η συγκέντρωση ενός ρύπου σε ένα κουτί διαστάσεων  $x,y,z$  (Σχήμα 17), μέσα στο οποίο υπάρχει παραγωγή ρύπανσης με ρυθμό  $Q_0$ , τότε σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο ATDL ισχύει:

$$C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left(\frac{\Delta x}{2}\right)^{(1-b)} \cdot \left[ \frac{Q_0 + \sum_{i=1}^n (\Pi_i \cdot Q_i)}{U_0 \cdot a \cdot (1-b)} \right] \quad \text{σε } \mu\text{g}/\text{m}^3$$

όπου:

$C$  : η συγκέντρωση του ρύπου σε  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

$\Delta x$  : Το μήκος της εξεταζόμενης περιοχής κατά τη διεύθυνση του ανέμου σε ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$Q_0$  : Ο ρυθμός παραγωγής ρύπανσης (ίδιου ρύπου) εντός της εξεταζόμενης περιοχής σε  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

$U_0$  : Η ταχύτητα του αέρα κατά μήκος του άξονα  $x$  της περιοχής σε ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$a$ ,  
 $b$  : Συντελεστές ατμοσφαιρικής κατάστασης (Πίνακας 5)

$Q_i$  : Ρυθμός παραγωγής του ρύπου στο «γειτονικό κουτί» ( $i$ ) σε  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

$\Pi_i$  : Αδιάστατος παράγοντας που υπολογίζεται από τη σχέση:

# Υπολογισμός συγκέντρωσης $C(x,y,z)$ του ρύπου Μοντέλο ATDL

$$P_i = (2 \cdot i + 1)^{(1-b)} - (2 \cdot i - 1)^{(1-b)}$$

Ταχύτητα αέρα (m/s)	Κατάσταση ατμόσφαιρας	$\alpha$	$b$
2	Πολύ ασταθής	0.40	0.91
2~3	Ασταθής	0.33	0.86
3~4	Ουδέτερη	0.22	0.80
2~4	Ευσταθής	0.06	0.71
4	Κατηγορία Pasquill "D"	0.15	0.75

Πίνακας 5. Τιμές συντελεστών  $\alpha$  και  $b$  με βάση την κατάσταση της ατμόσφαιρας

# Βιβλιογραφία

- [1] Μπεργελές Γ., 2006. Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ. ISBN: 960-254-660-3
- [2] Pasquill F., 1961. The estimation of the dispersion of windborne material, *The Meteorological Magazine*, 90, 1063, 33-49
- [3] Ατμοσφαιρική Ρύπανση-Κεφάλαιο 5ο. Πανεπιστήμιο Πατρών. Διαθέσιμο στο: [http://www.physics.upatras.gr/UploadedFiles/course\\_109\\_2195.pdf](http://www.physics.upatras.gr/UploadedFiles/course_109_2195.pdf)
- [4] Steven R. Hanna, Gary A. Briggs and Rayford P. Hosker, Jr., 1982. Handbook on ATMOSPHERIC DIFFUSION. National Technical Information Service, U. S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22161. ISBN 0-87079-127-3.
- [5] Briggs G.A., 1973. Diffuion Estimation for Small Emissions, ATDL Contribution File NO. 79, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory.
- [6] Briggs G.A., 1975. Plume Rise Predictions, in Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses, Workshop Froceedings, B o s t o n , Mass., Sept. 29-Oct. 3, 1975, pp. 59-111, American Meteorological Society, Boston, Mass.
- [7] Briggs G.A., 1979. Analytic Modeling of Drainage Flows, ATDL Report 79/22, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory.
- [8] Briggs G.A., 1984. Plume Rise and Buoyancy Effects, in Atmospheric Science and Power Production, Darryl Randerson (Ed.), American Meteorology Society, Boston
- [9] Gifford, F. A. and Hanna, S. R., 1970: Urban air pollution modelling. *Procedings of the 2nd International Clean Air Congress*, Washington, p. 1146.
- [10] Gifford, F. A. and Hanna, S. R., 1973: Modelling urban air pollution. *Atmospheric Environment*, 7, 131-136.
- [11] Gifford, F. A. and Hanna, S. R., 1975: Modelling urban air pollution. *Atmospheric Environment*, 9, 267-275.
- [12] Hanna S.R., 1978. Diurnal Variation of the Stability Factor in the Simple ATDL Urban Dispersion Model. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 28, 2, 147-150. DOI: 10.1080/00022470.1978.10470583.
- [13] Miller C.W., 1978. An Application of the ATDL Simple Dispersion Model. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 28, 8, 798-800. DOI: 10.1080/00022470.1978.10470663.