

# Διασπορά ατμοσφαιρικών ρύπων

Καθηγητής Δημοσθένης Α. Σαρηγιάννης

Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Μηχανικής

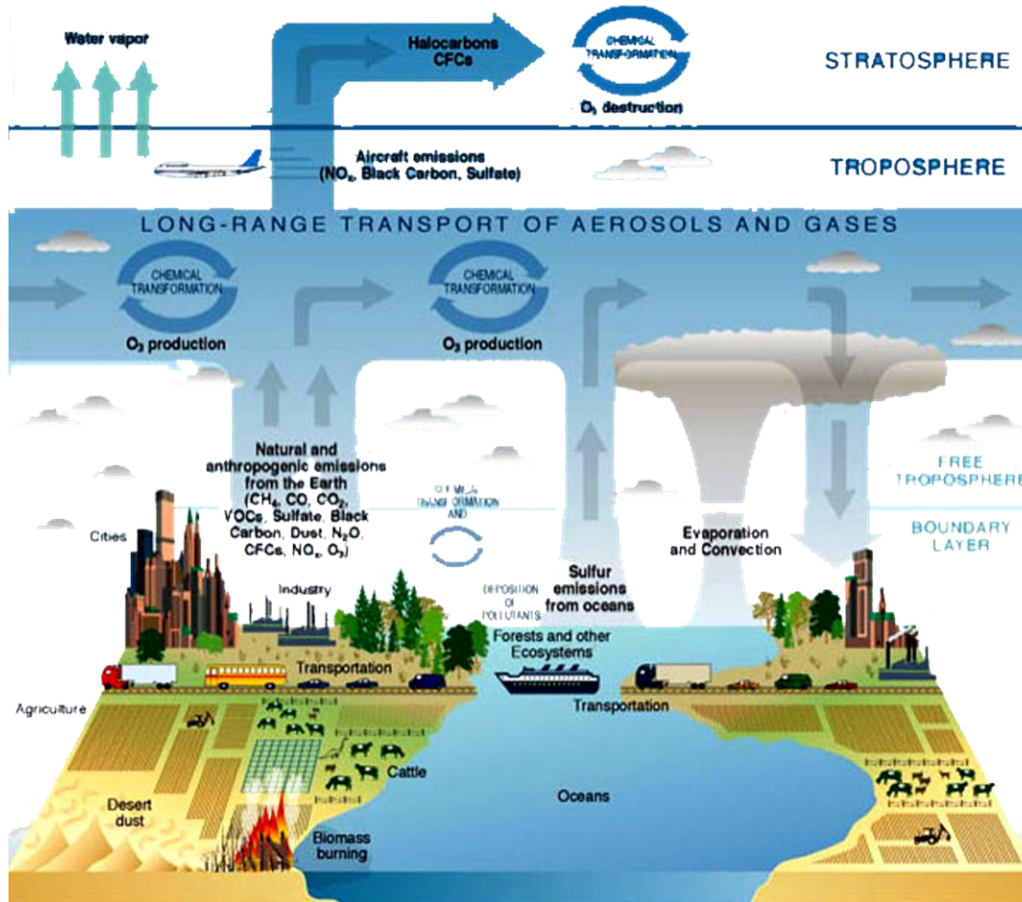
Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

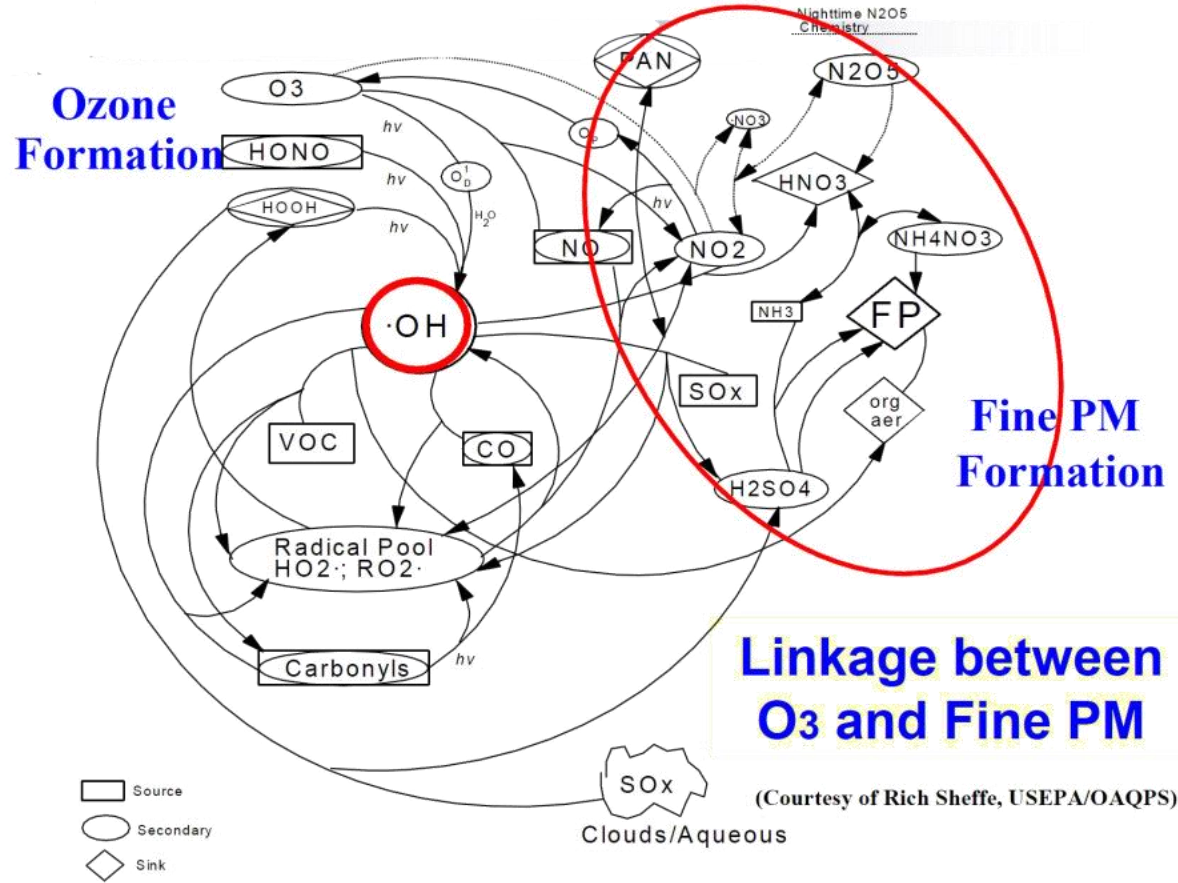
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

# **Βασικές ατμοσφαιρικές διεργασίες**

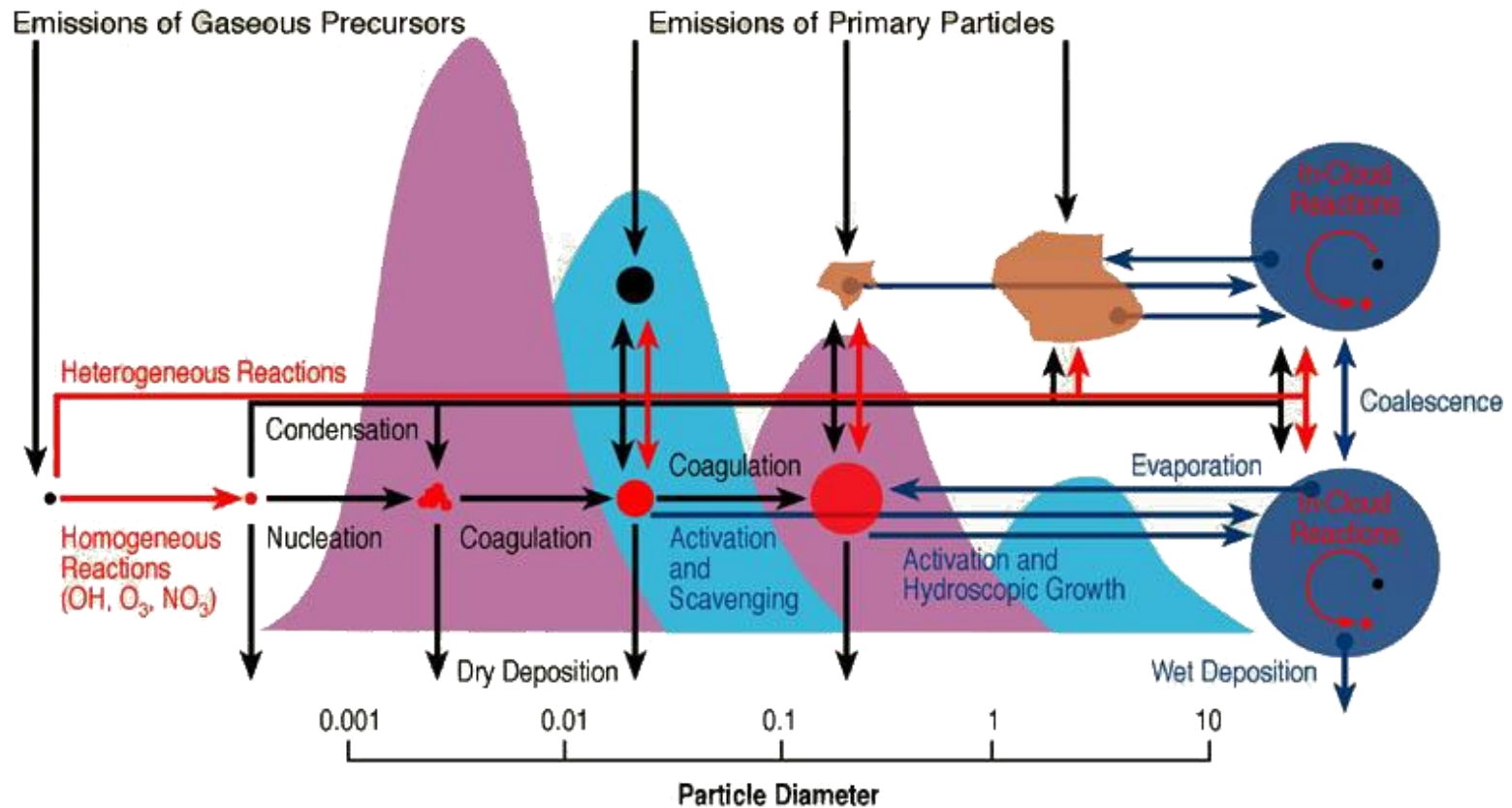
# Ατμοσφαιρικές διεργασίες – Διεργασίες μεταφοράς



# Ατμοσφαιρικές διεργασίες – Χημικές/φωτοχημικές διεργασίες



# Ατμοσφαιρικές διεργασίες – φυσικοχημικές διεργασίες

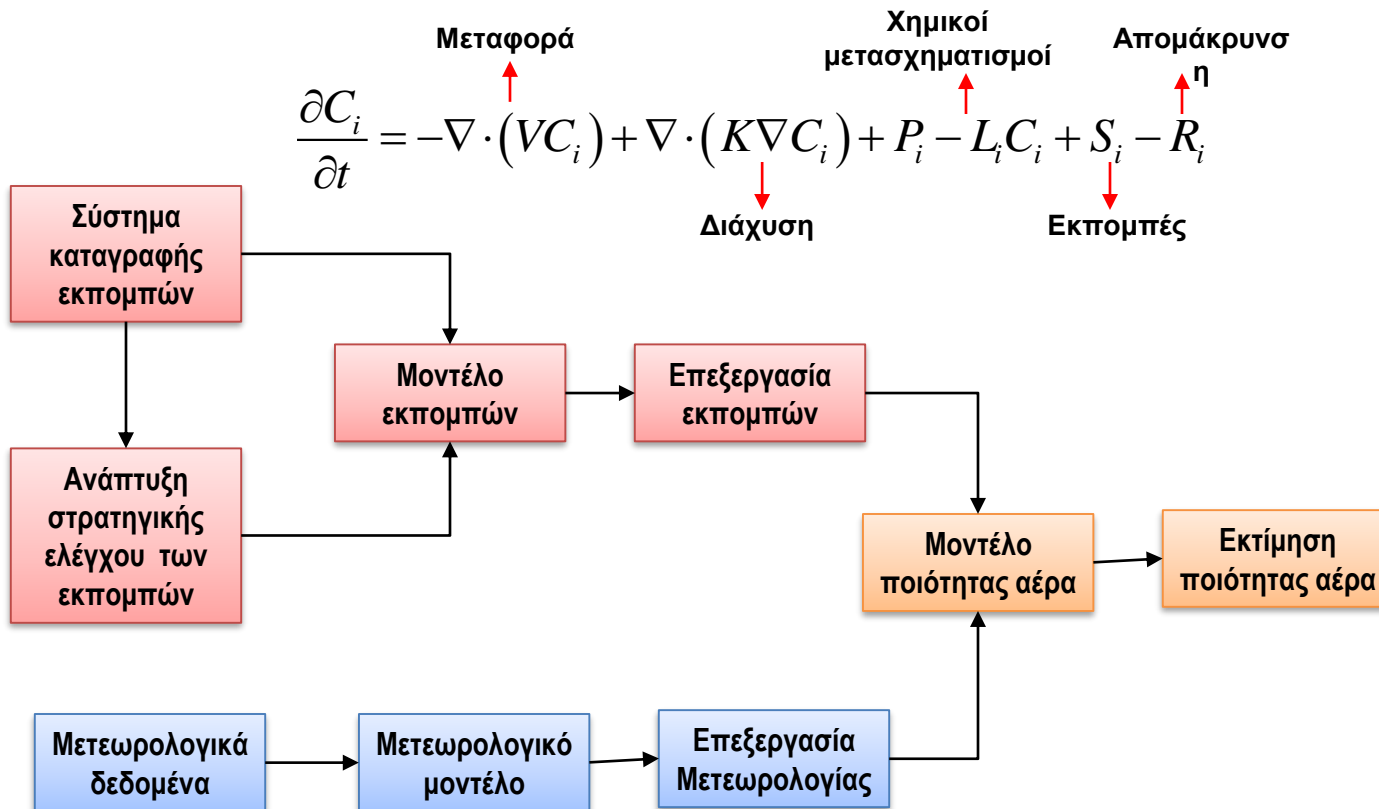


# Περιγραφή ατμοσφαιρικών διεργασιών – Μοντελοποίησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι βασικές διεργασίες περιγράφονται από την εξίσωση συνέχειας Navier-Stokes

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (VC_i) + \nabla \cdot (K\nabla C_i) + P_i - L_i C_i + S_i - R_i$$

Μεταφορά (↑)      Χημικοί μετασχηματισμοί (↑)      Απομάκρυνση (↑) η  
Διάχυση (↓)      Εκπομπές (↓)



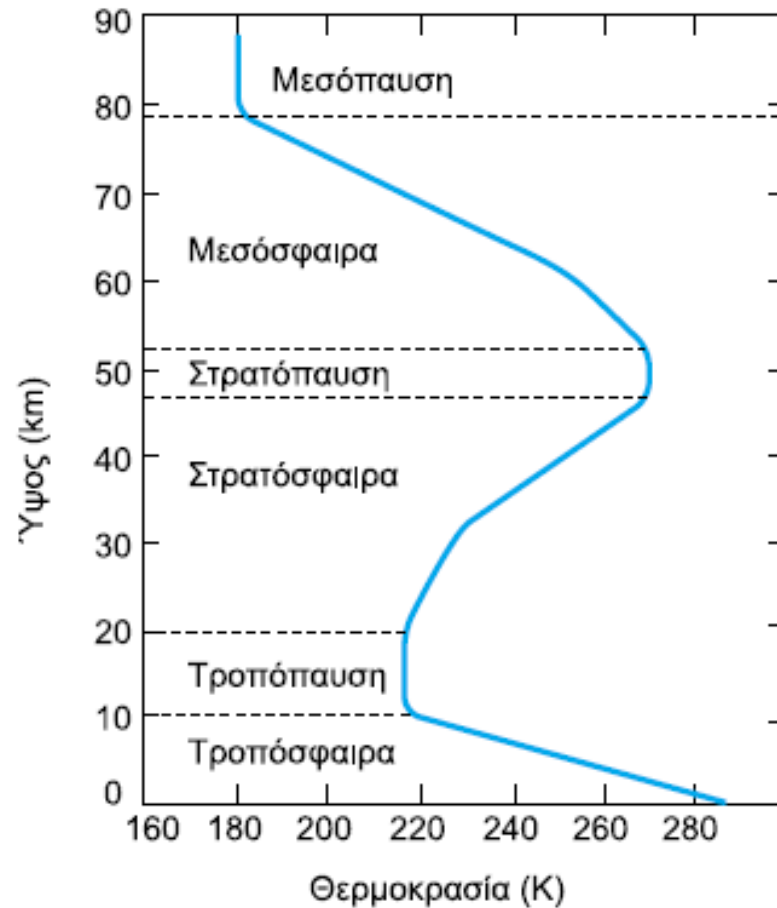
**Δομή και  
θερμοκρασιακή  
διαστρωμάτωση της  
ατμόσφαιρας**

# Τα στρώματα της ατμόσφαιρας

Ποιά η σημασία της ύπαρξης της τροπόπαυσης στη γήινη ατμόσφαιρα;

Πλανητικό οριακό στρώμα

Η μέση κατανομή της θερμοκρασίας διευκολύνει τη διασπορά των ρύπων στην κατακόρυφη διεύθυνση;





# Πως γίνεται η θέρμανση της τροπόσφαιρας;

Ηλιακή ενέργεια → απορρόφηση από τις αέριες μάζες (λίγο) →  
Θέρμανση επιφάνειας της γης → θέρμανση υπερκείμενου αέρα → ΚΟΚ  
(μηχανισμός φυσικής συναγωγής)

Περιβαλλοντική θερμοβαθμίδα (Ambient Lapse Rate) ALR

Ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα (dry adiabatic lapse rate) DALR  $\Gamma_b=10$  K/km

# Θέρμανση και ψύξη της ατμόσφαιρας

## Αδιαβατική θέρμανση και ψύξη στην ατμόσφαιρα:

Κατακόρυφες μετακινήσεις. Συνήθως συμβαίνουν λόγω των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης

Ατμοσφαιρικός αέρας ως ιδανικό αέριο

$$z_1 < z_2 \rightarrow p(z_1) > p(z_2)$$

$\rho$  ανάλογο  $1/T$  αν  $P =$  σταθερό

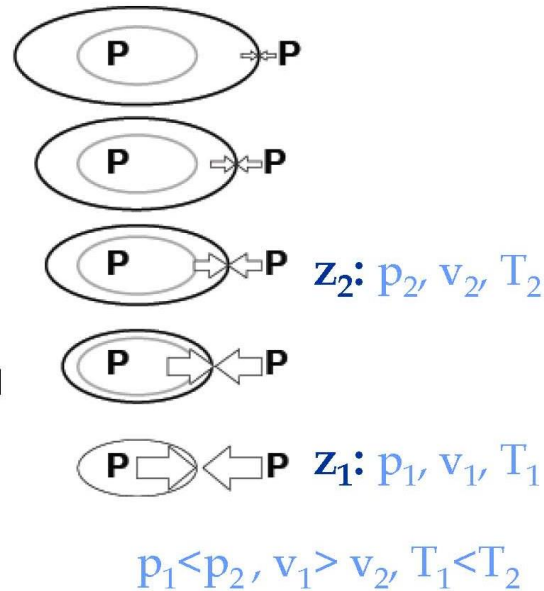
Ψυχρός αέρας πυκνότερος από τον θερμό αέρα

## Αδιαβατική ψύξη στην ατμόσφαιρα

Ανοδική κίνηση μαζών, Εκτόνωση, Ψύξη

## Αδιαβατική θέρμανση στην

ατμόσφαιρα Καθοδική κίνηση μαζών, Συμπίεση, Θέρμανση



# Ευστάθεια της ατμόσφαιρας

## ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Αδιαβατική κίνηση (ανοδική και καθοδική) πακέτων αέρα στην ατμόσφαιρα

Αδιαβατική θερμοβαθμίδα

$$\Gamma = - (dT/dz)_{ad}$$

Αδιαβατική θερμοβαθμίδα ξηρού αέρα

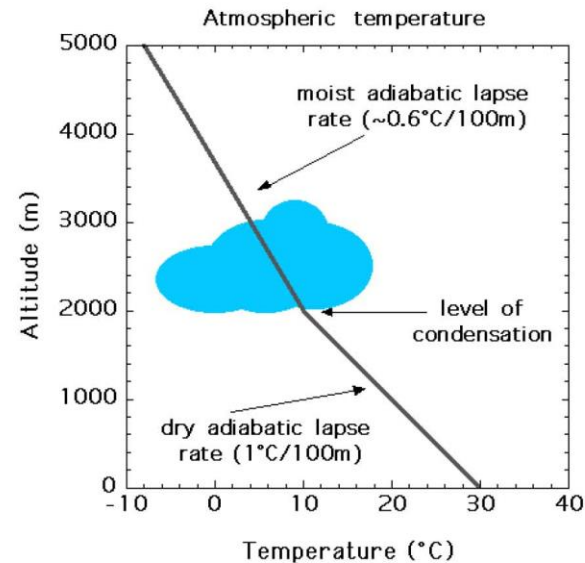
$$\Gamma_d = 9.8 \text{ K/km}$$

Αδιαβατική θερμοβαθμίδα υγρού αέρα  $\Gamma_w < \Gamma_d$

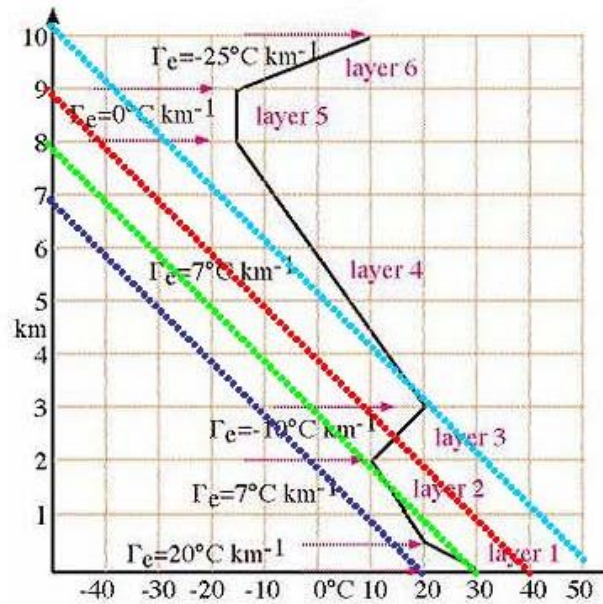
L: λανθάνουσα θερμότητα →  
 $+4 \text{ K/km}$

Πραγματική θερμοβαθμίδα

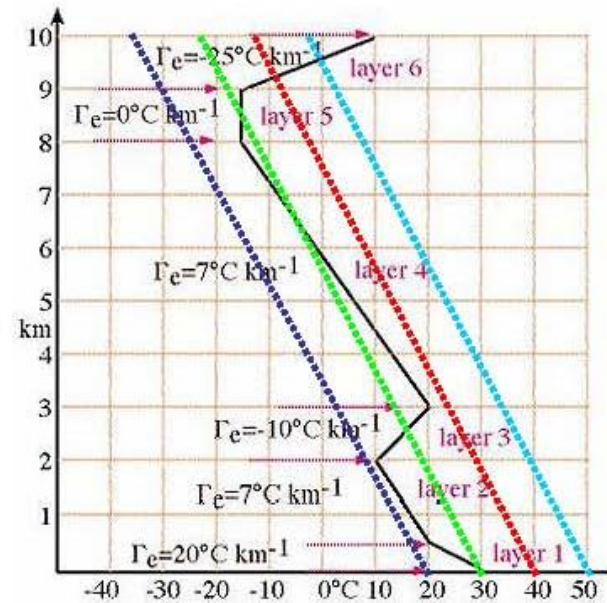
$$\Gamma_e = - dT/dz$$



# Θέρμανση και ψύξη της ατμόσφαιρας

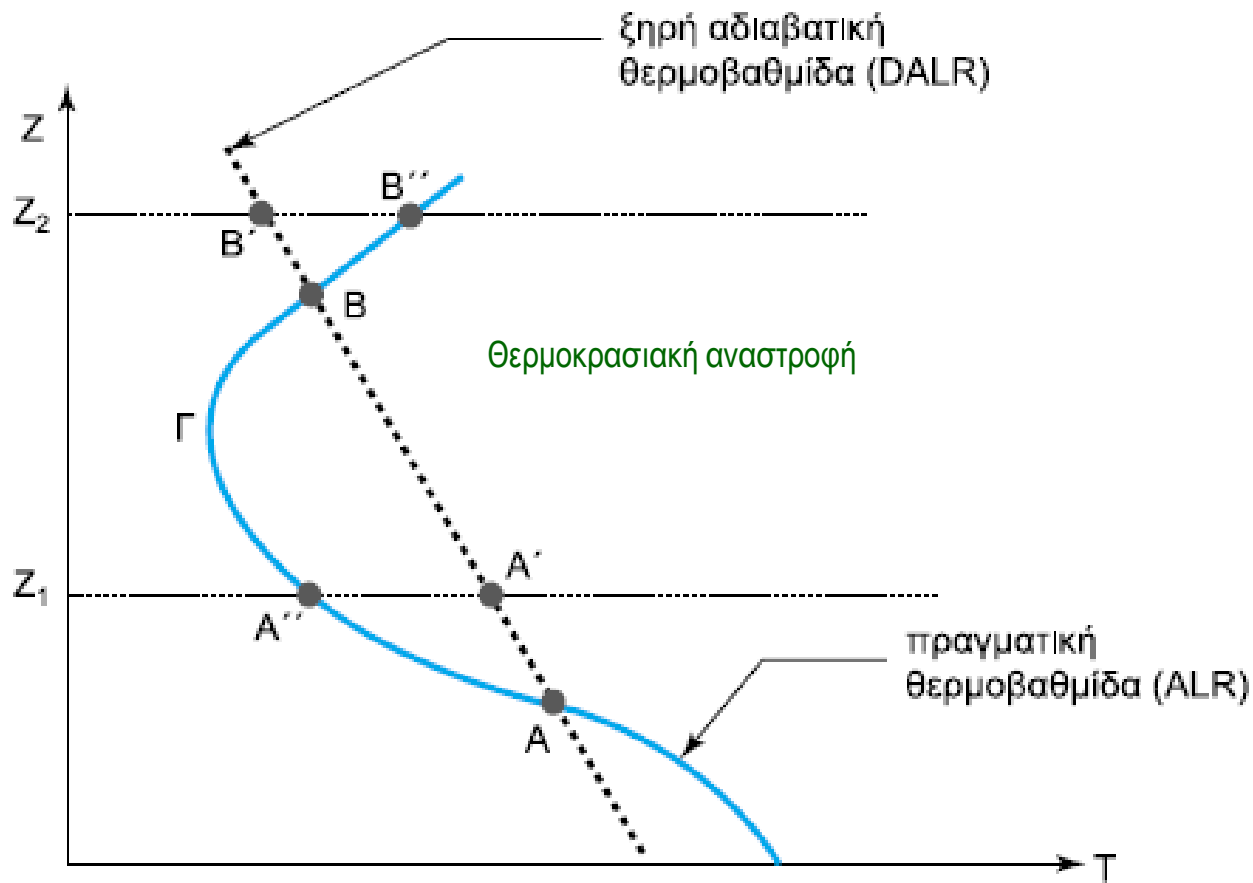


*Ξηρή αέρια μάζα*



*Υγρή αέρια μάζα*

# Ατμοσφαιρική ευστάθεια



# Θερμοκρασιακές αναστροφές

## Θερμοκρασιακή αναστροφή:

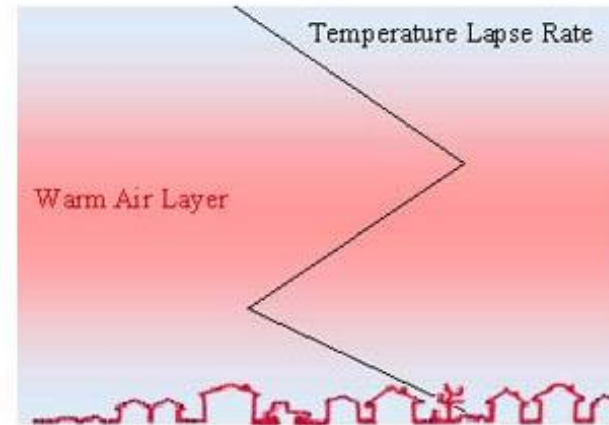
*Αύξηση θερμοκρασίας με το ύψος*

### Αποτελέσματα:

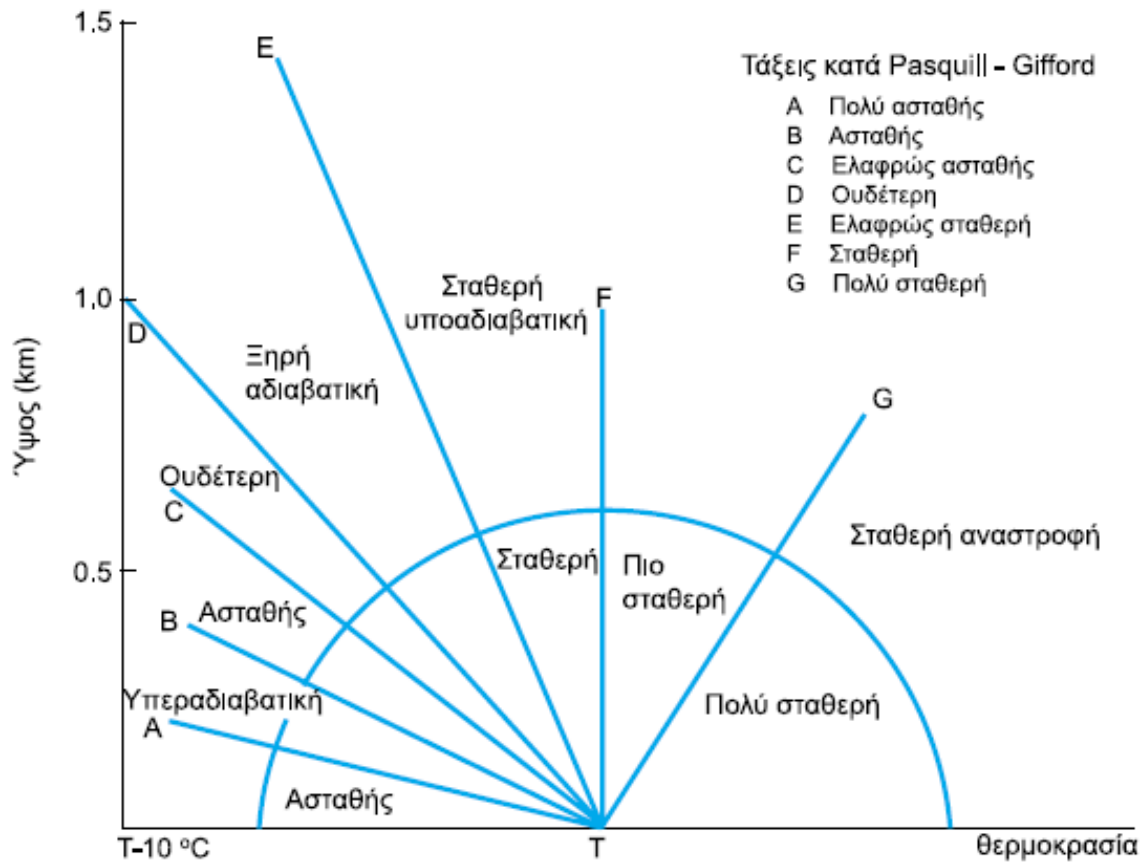
- *Ευσταθείς συνθήκες*
- *Θερμοβαθμίδα  $\Gamma_e$  αρνητική*

### Αιτίες:

- *Ψύξη με ακτινοβολία*
- *Οριζόντια μεταφορά ψυχρών μαζών*
- *Καθοδικοί άνεμοι λόγω αναγλύφου*
- *Σύστημα υψηλών πιέσεων*



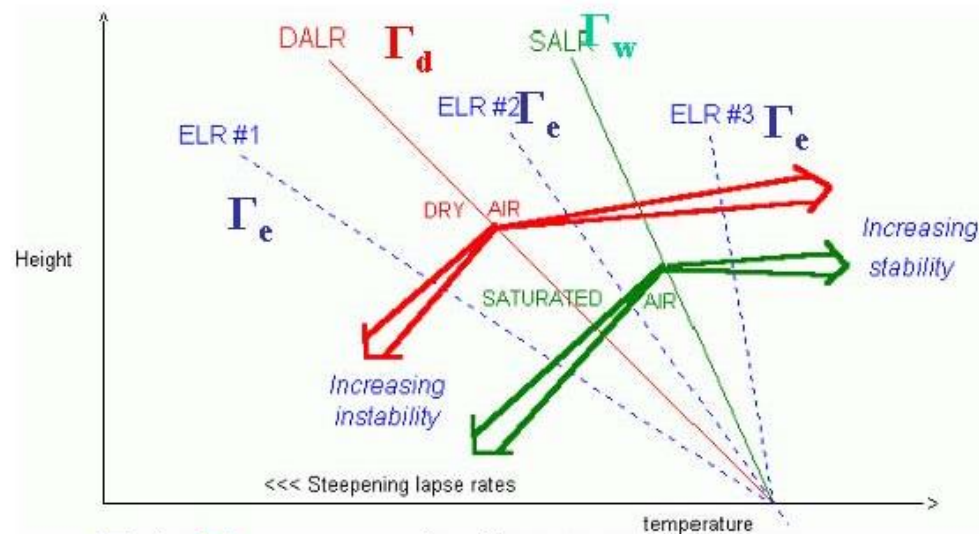
# Τάξεις ευστάθειας κατά Pasquill-Gifford



ALR > DALR ασταθής  
ALR < DALR ευстаθής  
ALR = DALR ουδέτερη



# Τάξεις ευστάθειας κατά Pasquill-Gifford



$$\Gamma_e > \Gamma_d$$

**Απόλυτη αστάθεια**

$$\Gamma_e = \Gamma_d$$

**Ουδέτερη (ξηρή)**

$$\Gamma_d > \Gamma_e > \Gamma_w$$

**Εξαρτώμενη αστάθεια**

$$\Gamma_e = \Gamma_w$$

**Ουδέτερη (υγρή)**

$$\Gamma_e < \Gamma_w$$

**Απόλυτη ευστάθεια**



# Οριακό στρώμα και ύψος ανάμειξης

## •Οριακό στρώμα

Επιφάνεια – 500/3000 m

**Αιτία:** Τριβή που εξασκεί το έδαφος στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Απόκριση σε μεταβολές της επιφανειακής θερμοκρασίας σε  $t < 1h$

Συσώρευση ρύπων

Διαφυγή ρύπων από οριακό στρώμα

→ Οριζόντια μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις

**Επιφανειακό στρώμα:** Πάχος: 10% του οριακού στρώματος – 50/300 m

Μεγάλη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

**Στρώμα ανάμειξης:** Ανοδικές και καθοδικές κινήσεις που επιτρέπουν τη μείξη των ρύπων λόγω τυρβώδους διάχυσης

**Ύψος ανάμειξης:** Επίδραση τριβής στην ταχύτητα του ανέμου και στη μείξη των ουσιών ως κάποιο ύψος (**μεταβλητό**)

**Κορυφή στρώματος ανάμειξης:** Συνήθως ύπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής

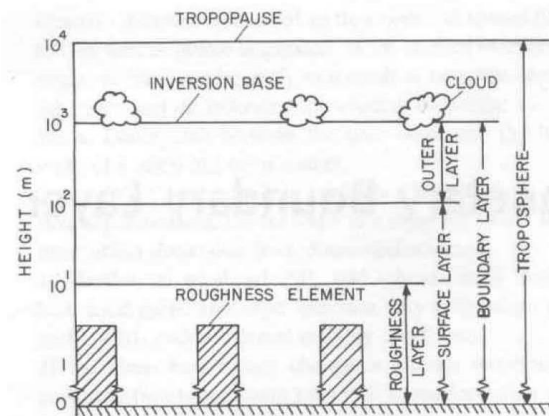


Figure 4.1 Schematic of the planetary boundary layer (PBL) as the lower part of the atmosphere.

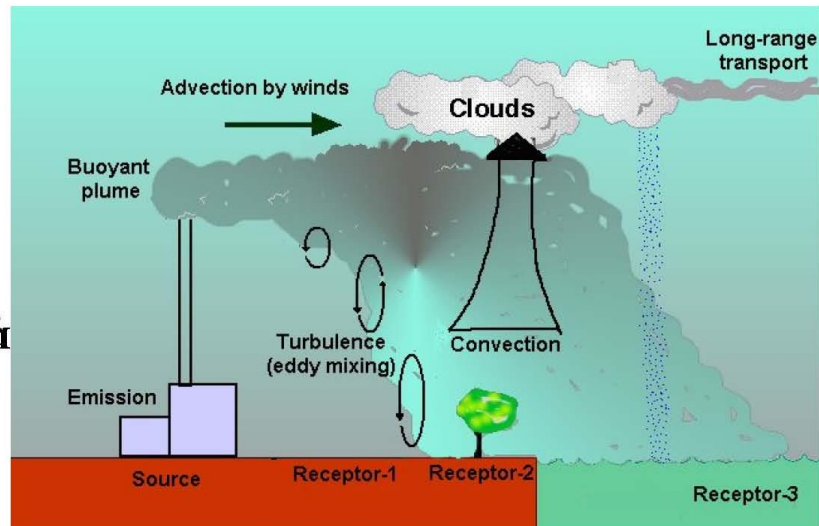
# Ατμοσφαιρική διασπορά

# Τι είναι ατμοσφαιρική διασπορά

**Ατμοσφαιρική Διασπορά:** Σειρά φυσικών διεργασιών που με τη συμβολή των κινήσεων του αέρα έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταφορά και την εξάπλωση ουσιών στην ατμόσφαιρα.

## Μηχανισμοί:

- Μοριακή Διάχυση
- Οριζόντια Μεταφορά
- Κατακόρυφη Μεταφορά
- Τυρβώδης Διάχυση



**Θύσανος:** Αναγνωρίσιμο ρεύμα αέρα που η σύστασή του διαφέρει από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος

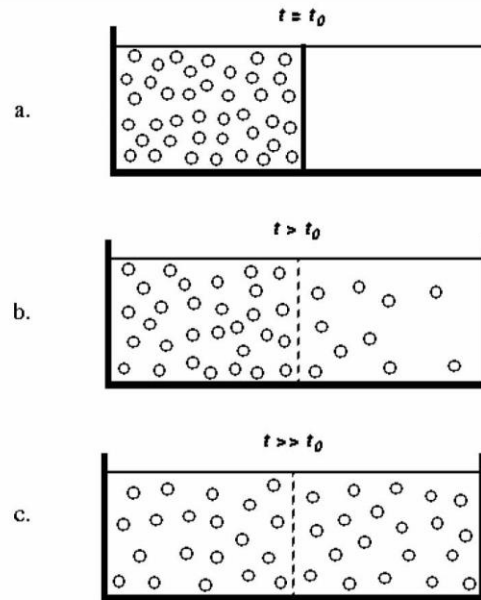
# Μοριακή διάχυση

**Μοριακή Διάχυση:** Ο διασκορπισμός μιας ουσίας λόγω της μέσης κίνησης ενός μορίου ή σωματιδίου ως αποτέλεσμα των συγκρούσεών του με άλλα μόρια ή σωματίδια

➤ Συμβαίνει όταν υπάρχει **διαφορά στη βαθμίδα συγκέντρωσης** της ουσίας.

➤ Η μέση απόσταση που διανύει ένα μόριο περιορίζεται από τη συχνότητα των συγκρούσεων με άλλα μόρια.

➤ **Μη αποτελεσματικός μηχανισμός** μεταφοράς μορίων αέρα λόγω της μεγάλης συχνότητας συγκρούσεων π.χ. σε ΚΣ πίεσης και θερμοκρασίας ο αριθμός συγκρούσεων ανέρχεται σε  $10^9/s$ .



Μοριακή διάχυση

# Οριζόντια μεταφορά

**Οριζόντια Μεταφορά:** Μεταφορά ενέργειας, αερίων και σωματιδίων λόγω οριζόντιας μετακίνησης των μαζών από τον άνεμο.

➤ Απομακρύνει τους ρύπους ως μια απόσταση από την πηγή

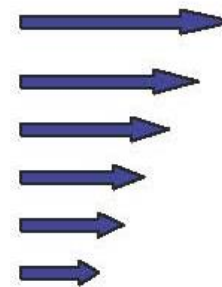
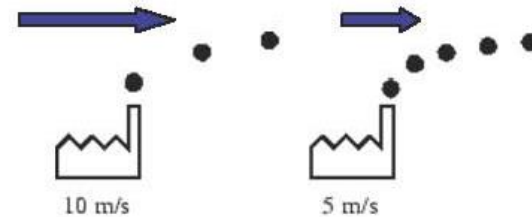
➤ Αραιώνει τους ρύπους

➤ Υπεύθυνη για τη **μεγάλη κλίμακας μετακίνηση των ρύπων** από τις πηγές σε περιοχές προς τη διεύθυνση του ανέμου

➤ **Μεγάλες ταχύτητες ανέμου, μεγαλύτερη μείωση** στις συγκεντρώσεις των ρύπων

Αεροχειμαρροι ~ έως 400 km/h

Άνεμοι στην επιφάνεια ~10-20 km/h



# Κατακόρυφη μεταφορά

**Κατακόρυφη Μεταφορά:** *Μεταφορά ενέργειας, αερίων και σωματιδίων λόγω κατακόρυφης μετακίνησης των μαζών.*

## **□** *Εξαναγκασμένη κατακόρυφη μεταφορά*

*Η ανοδική ή καθοδική κίνηση του αέρα προκαλείται από μηχανικές διεργασίες*

## **□** *Ελεύθερη κατακόρυφη μεταφορά*

*Ανοδική κίνηση αερίων μαζών λόγω ανομοιογενούς θέρμανσης του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία.*

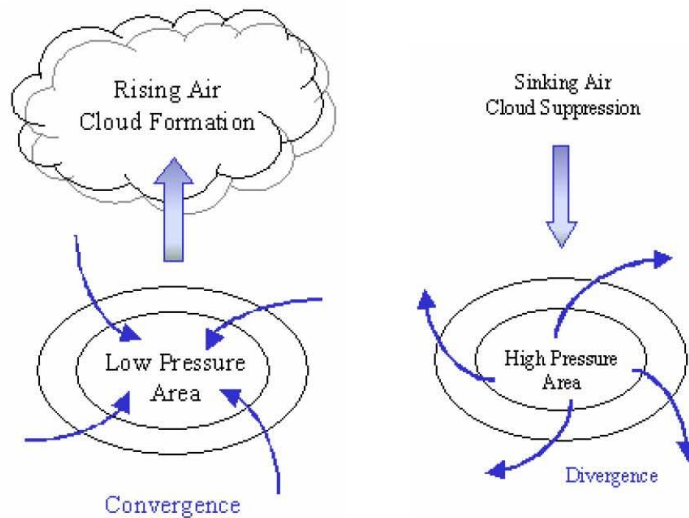


# Εξαναγκασμένη κατακόρυφη μεταφορά

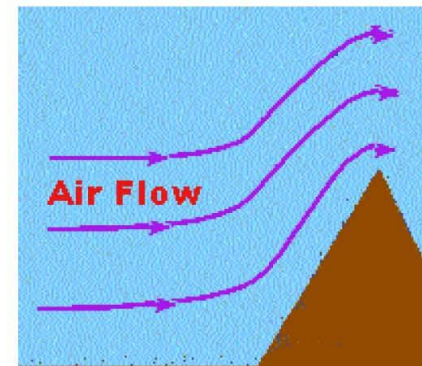
**Εξαναγκασμένη κατακόρυφη μεταφορά:** Η ανοδική ή καθοδική κίνηση του αέρα προκαλείται από μηχανικές διεργασίες

## Παραδείγματα

-Σύγκλιση (απόκλιση) οριζόντιων επιφανειακών ανέμων που εξαναγκάζουν το αέρα να ανεβεί (κατεβεί)

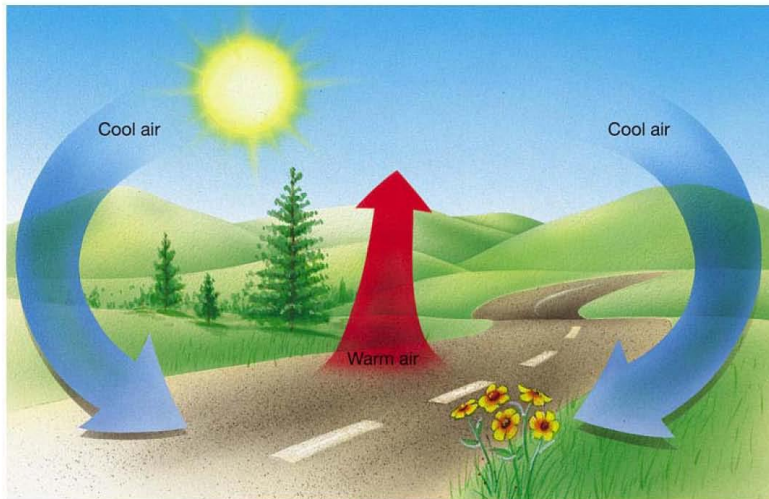


-Τοπογραφικά εμπόδια



# Ελεύθερη κατακόρυφη μεταφορά

**Ελεύθερη κατακόρυφη μεταφορά:** Ανοδική κίνηση αερίων μαζών λόγω ανομοιογενούς θέρμανσης του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία.



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

- **Θερμή επιφάνεια:** Μεταφορά ενέργειας από το έδαφος στα παρακείμενα μέρη του αέρα
- **Αέρας πάνω από το έδαφος:** Μικρότερη πυκνότητα, ανοδική κίνηση (θερμική στήλη)
- **Αντικατάσταση αερίων μαζών από γειτονικές που με τη σειρά τους θερμαίνονται και κινούνται ανοδικά .**

- **Εκτόνωση και ψύξη της θερμικής στήλης**
- **Συνέχιση διαδικασίας ως το ύψος όπου η θερμοκρασία των μαζών της στήλης προσεγγίζει τη θερμοκρασία του γειτονικού αέρα**



# Εξαναγκασμένη κατακόρυφη μεταφορά

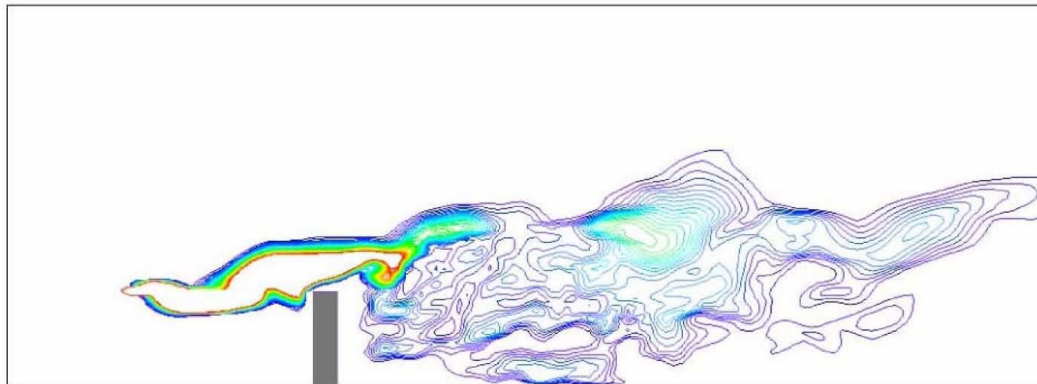
## Κατακόρυφη Μεταφορά

- *Απομάκρυνση της περίσσειας θερμότητας* από την επιφάνεια και τη μεταφορά της ψηλά στην ατμόσφαιρα. Χωρίς το μηχανισμό αυτό, η μέση θερμοκρασία εδάφους θα ήταν 52 °C αντί 15 °C
- *Δημιουργία νεφών*
- *Ανύψωση ρύπων* από την επιφάνεια με συνέπεια να μην είναι σε άμεση επαφή με τους ζώντες οργανισμούς.
- Κατά το σχηματισμό του νετού λαμβάνει χώρα *απόπλυση των υδατοδιαλυτών ρύπων*.
- *Μεταφορά κάποιων ρύπων σε υψηλά στρώματα* όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, με αποτέλεσμα τη διασπορά των ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις.

# Τυρβώδης διάχυση

**Τυρβώδης Διάχυση:** Ο διασκορπισμός μιας ουσίας υπό την επίδραση των τυρβώδων στροβίλων

**Τύρβη:** Πολύπλοκη κίνηση που οφείλεται στην ακανόνιστη, σχεδόν τυχαία κίνηση (συνεχόμενες μεταβολές του διανύσματος της ταχύτητας) του ανέμου που εξελίσσεται και στις τρεις διαστάσεις. Μείξη και διασκορπισμός ουσιών σε διάφορα υψόμετρα

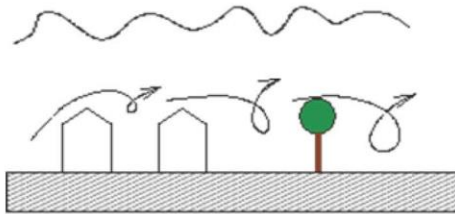


*Τυρβώδης διάχυση*

# Τυρβώδης διάχυση

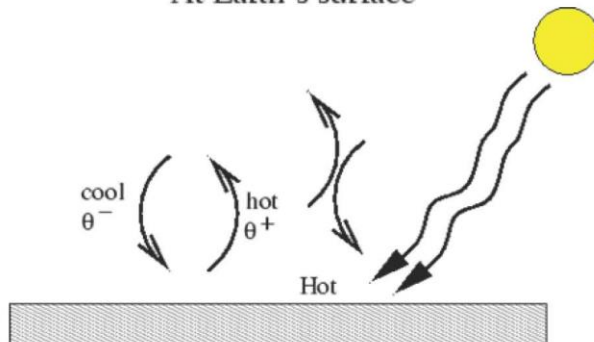
*Δημιουργία τύρβης από οποιοδήποτε μηχανισμό που εισάγει κίνηση σε ένα ρευστό (ακανόνιστες κινήσεις του ανέμου στις τρεις διαστάσεις)*

*Πηγές: Οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά αερίων μαζών*



At Earth's surface

**Μηχανική τυρβώδης διάχυση**  
Στρόβιλοι μικρής κλίμακας



**Θερμική τυρβώδης διάχυση**  
Στρόβιλοι μεγάλης κλίμακας

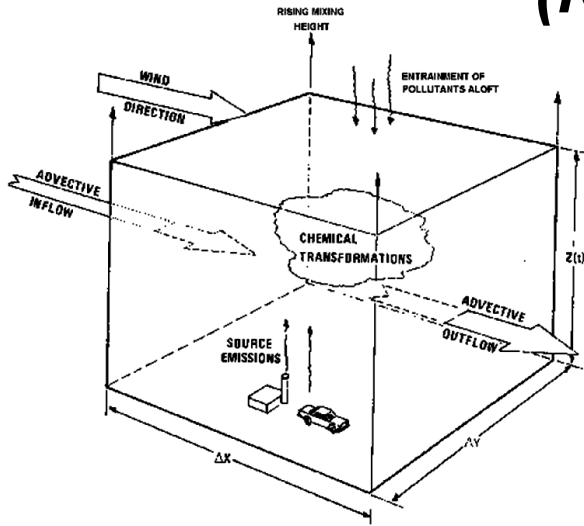
# Τυρβώδης διάχυση

## Τυρβώδης Διάχυση

- *Αναταράσσει και αναμειγνύει την ατμόσφαιρα και διασκορπίζει* τους υδρατμούς, τους ρύπους και άλλες ουσίες σε όλα τα υψόμετρα
- *Πολύ σημαντική κοντά στην επιφάνεια της γης* γιατί είναι συνδυασμός ανοδικών και καθοδικών κινήσεων με το ανάγλυφο της επιφάνειας
- *Υπαρξη τυρβώδων στροβίλων μικρών διαστάσεων* στη χαμηλότερη ατμόσφαιρα, ενώ στην υψηλότερη όχι
- *Άνεμοι συνήθως σχετικά ομαλοί στα υψηλότερα στρώματα.* Κάποιες φορές η ροή των ανέμων γίνεται τυρβώδης και επιδρά στην αεροπλοΐα.

# **Κατηγορίες μοντέλων ατμοσφαιρικής ρύπανσης/διασποράς**

# Αριθμητική μοντελοποίηση (Numerical Modeling)



Μια κυψελίδα → Απλούστερο αριθμητικό πρόβλημα

**Αντιμέτωπιση περιοχής ως ένα κουτί**  
z: έδαφος – θερμοκρασιακή αναστροφή ή ύψος οριακού στρώματος (μεταβλητό)  
x, y: έκταση περιοχής, ένταση μετεωρολογικών φαινομένων, κατανομή πηγών, στόχος

## •Εισροή ρύπων

-πηγές εντός της κυψελίδας (S)  
-μέση οριζόντια μεταφορά (άνεμος) ( $H_i$ ) και κατακόρυφη διάχυση ( $V_i$ )

## •Έκροή -απομάκρυνση ρύπων

-μέση οριζόντια μεταφορά (άνεμος) ( $H_o$ ) και κατακόρυφη μεταφορά ( $V_o$ )

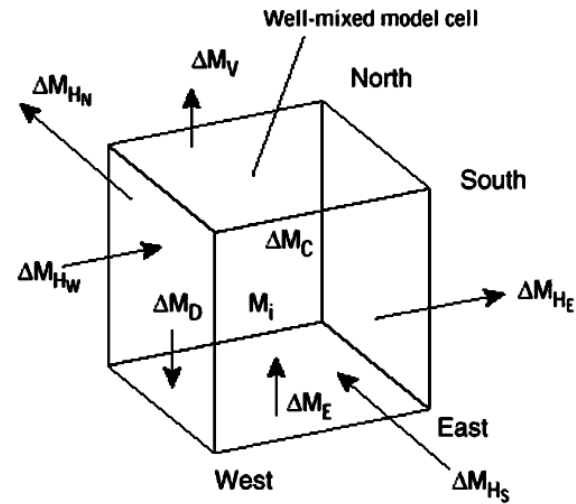
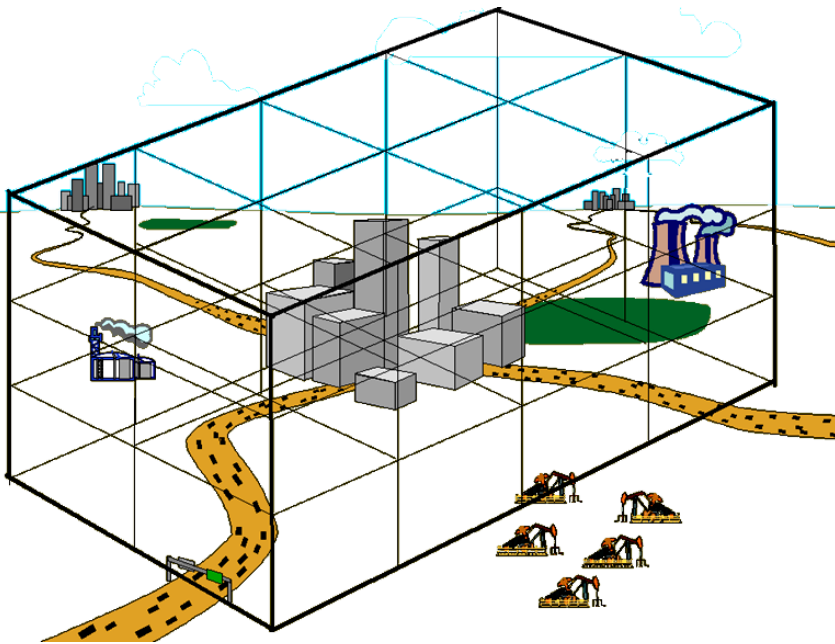
-χημικοί μετασχηματισμοί (C)

-Ξηρή εναπόθεση (D)

•Ακαριαία ανάμειξη ρύπων και χωρικά ομογενείς συγκεντρώσεις

$$\frac{dn}{dt} = S + H_i + V_i - H_o - V_o - C - D$$

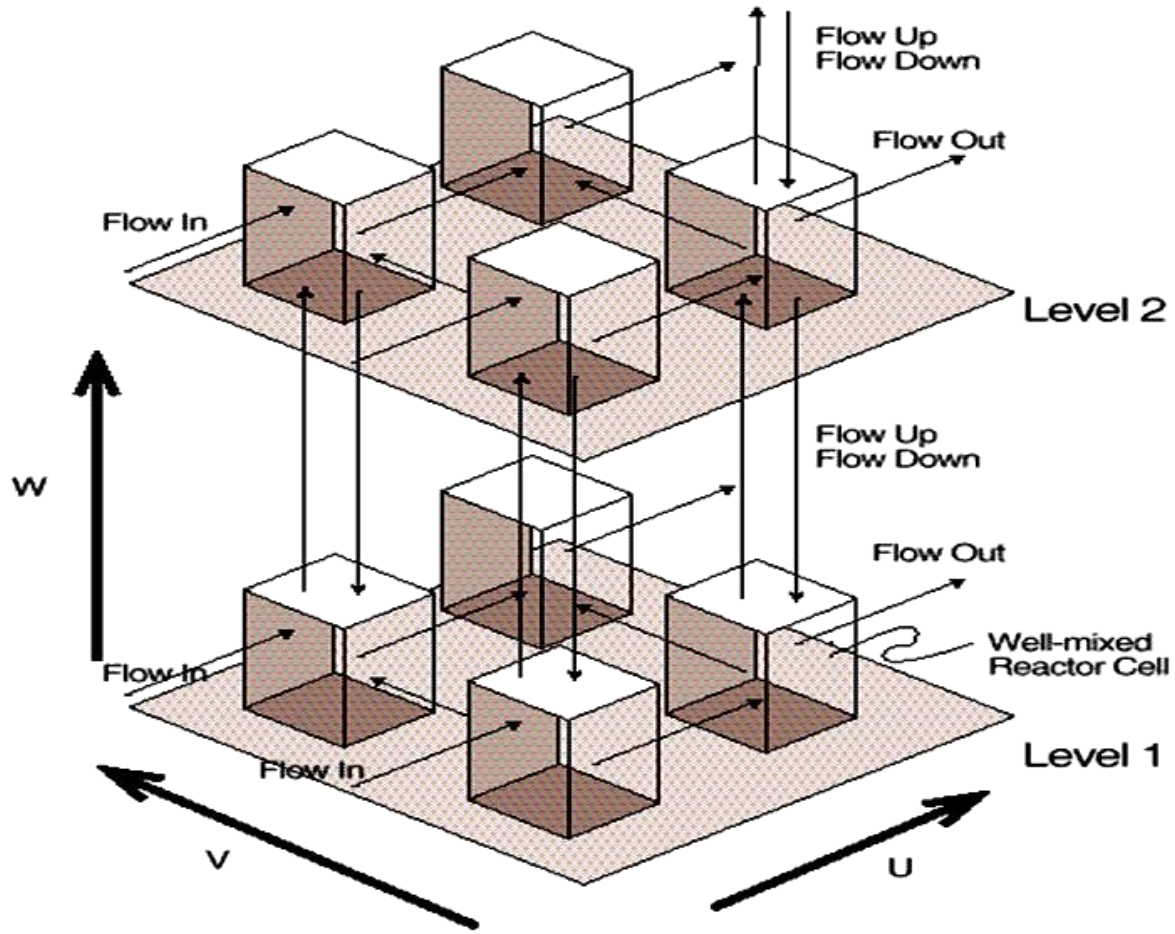
# Ευληριανό μοντέλο επεξεργασίας κελιών



H is horizontal transport  
V is vertical transport  
E is emissions  
D is surface deposition  
C is chemical transformations  
i is initial  
f is final  
M is species mixing ratios

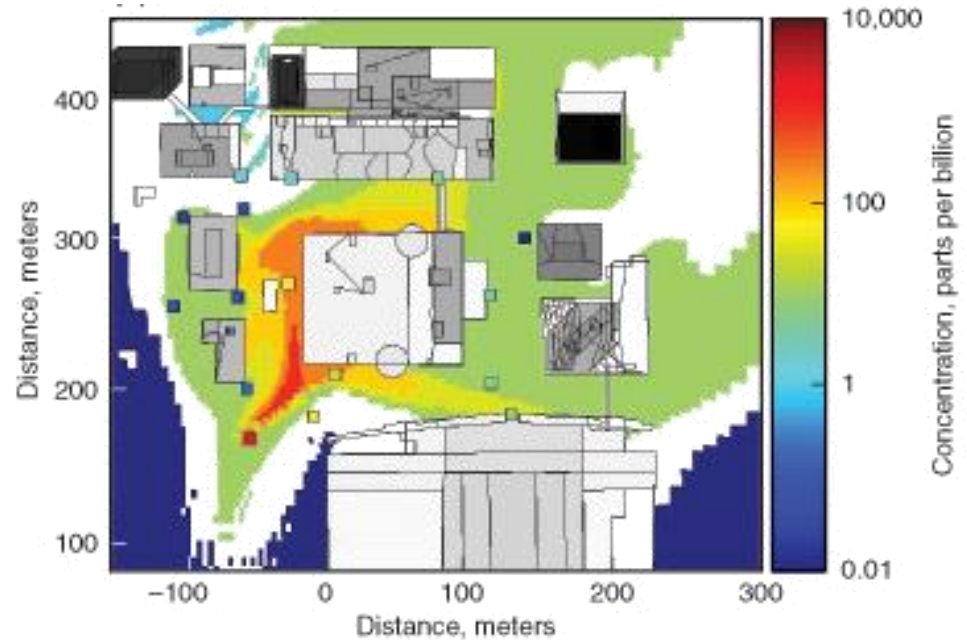
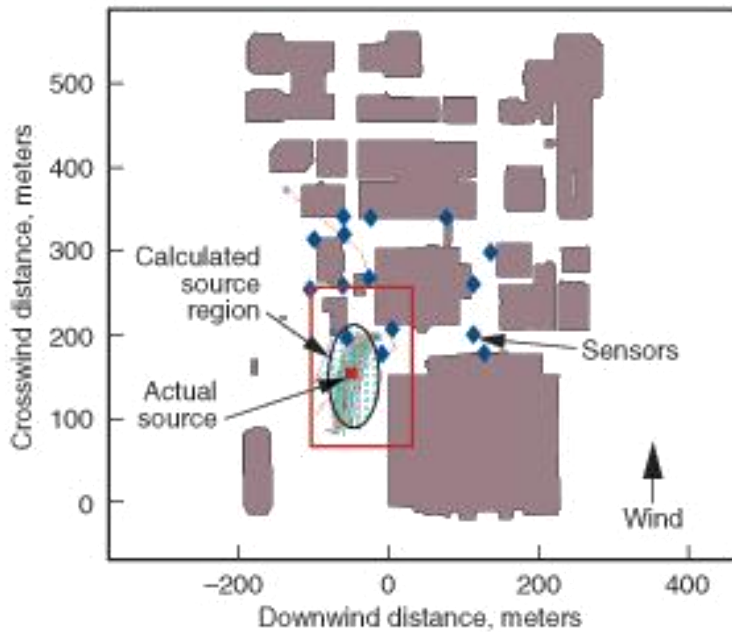


# Ζευγάριωμα κελιών





# Μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστο- Δυναμικής (CFD models)



$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V\nabla c + D\nabla^2 c + S$$

# Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναλυτικών αριθμητικών μοντέλων

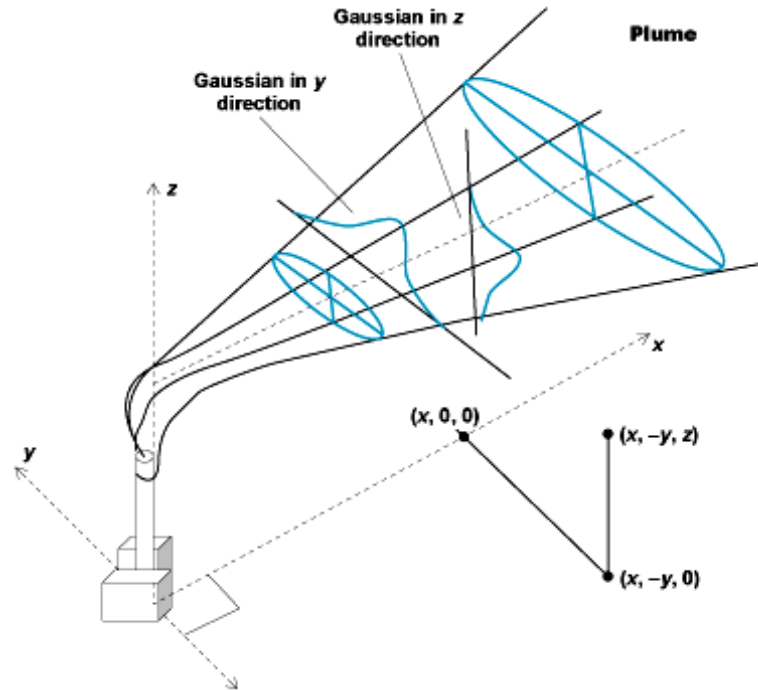
## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Περιγράφουν με σημαντική πιστότητα τη δυναμική του φαινομένου
- Μπορούν να περιγράψουν φαινόμενα σε υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση
- Μπορούν να κάνουν πρόβλεψη σε περιοχές όπου δεν προϋπάρχουν δεδομένα μετρήσεων
- Μας βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των φυσικοχημικών διεργασιών σε μια περιοχή και στο πως αυτές επιδρούν στην ατμοσφαιρική ρύπανση
- Τα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν σε ωριαίους χάρτες, δίνοντας μας την πλήρη εικόνα της διακύμανσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο χώρο και στο χρόνο

## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

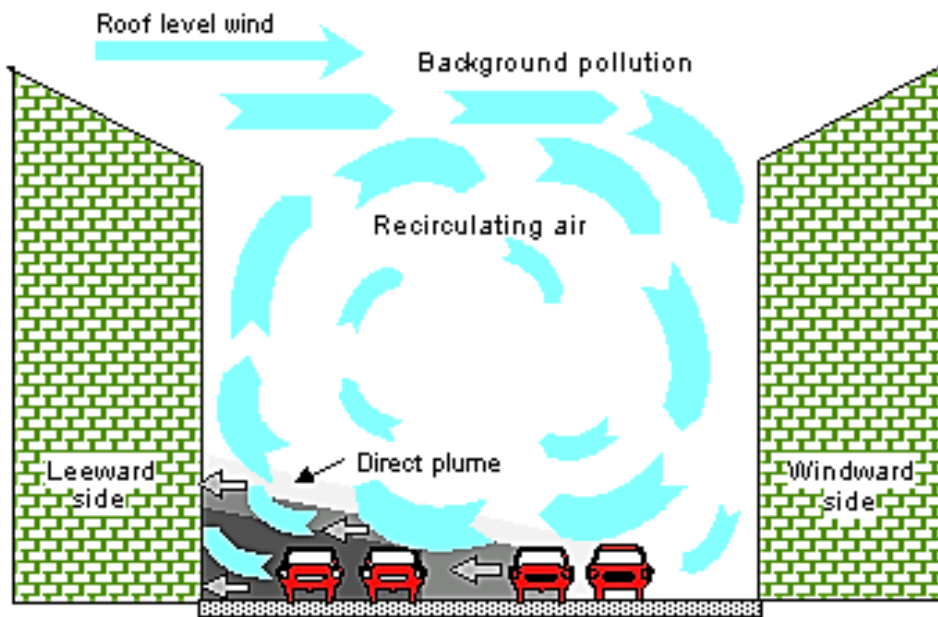
- Ακριβή δεδομένα εισόδου απαιτούνται σε ένα πλήθος παραμέτρων ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι εξίσου σωστά
- Συνήθως τα μοντέλα εκπομπών που συνδυάζονται με τα μοντέλα διασποράς δεν είναι εξίσου ενημερωμένα
- Μικρής χωρικής και χρονικής κλίμακας προβλέψεις σε φωτοχημικούς ρυπαντές εξακολουθούν να είναι προβληματικές
- Πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος (υπολογιστές, χρόνος υπολογισμού, εξειδικευμένο προσωπικό)

# Απλά αριθμητικά μοντέλα - Μοντέλα Gauss



$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ \exp\left(\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \right\}$$

# Ημι-εμπειρικά μοντέλα – STREET model



$$C = C_s + C_b$$

$$C_s = \frac{k \cdot Q}{\left(\sqrt{x^2 + z^2} + 2\right)(U + 0,5)}$$

$$C_s = \frac{k \cdot Q \cdot (H - z)}{(U + 0,5) \cdot H \cdot W}$$

# Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα απλών αριθμητικών και ημι-εμπειρικών μοντέλων

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Χαμηλό υπολογιστικό κόστος
- Εννίστε περιγράφουν σε ικανοποιητική χωρική και χρονική ανάλυση το πρόβλημα
- Μπορούν να κάνουν πρόβλεψη σε περιοχές όπου δεν προϋπάρχουν δεδομένα μετρήσεων
- Δεν απαιτούν ιδιαίτερα καταρτισμένο προσωπικό
- Δεν απαιτούν πολλά δεδομένα εισόδου

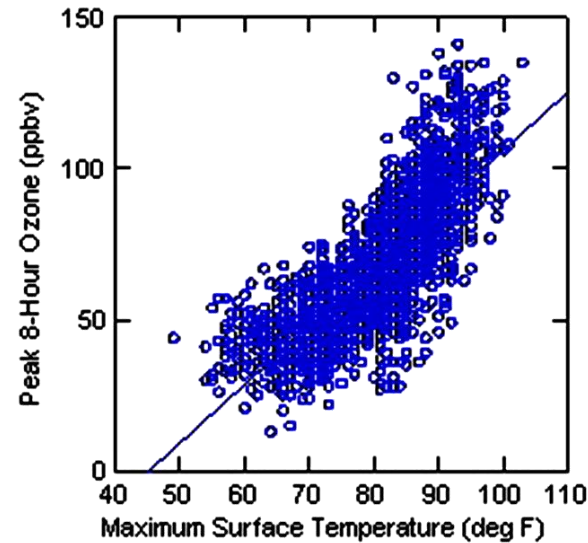
## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Απλοποιούν υπερβολικά το φυσικό φαινόμενο
- Χαμηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων
- Περιορισμένο εύρος συνθηκών καλής απόδοσης
- Δεν περιλαμβάνουν χημικούς μετασχηματισμούς – κατάλληλα για αδρανείς ρύπους κυρίως
- Μικρής χωρικής και χρονικής κλίμακας προβλέψεις είναι αδύνατες

# Στατιστικά μοντέλα

## Σχέσεις παλινδρόμησης

- Οι σχέσεις παλινδρόμησης περιγράφουν τη σχέση ανάμεσα στη συγκέντρωση των ρύπων και άλλων μεταβλητών που σχετίζονται με την πρόγνωση της συγκέντρωσης του ρυπαντή
- Η πιο απλή γραμμικής παλινδρόμησης περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση  
 **$y = mx + b$**
- Στο παράδειγμα, φαίνεται ότι η ( $T_{max}$ ) μέγιστη θερμοκρασία είναι μια πολύ καλή παράμετρος για την πρόγνωση της μέγιστης τιμής του όζοντος



$$[O_3] = 1.92 \cdot T_{max} - 86.8$$

$$r = 0.77$$

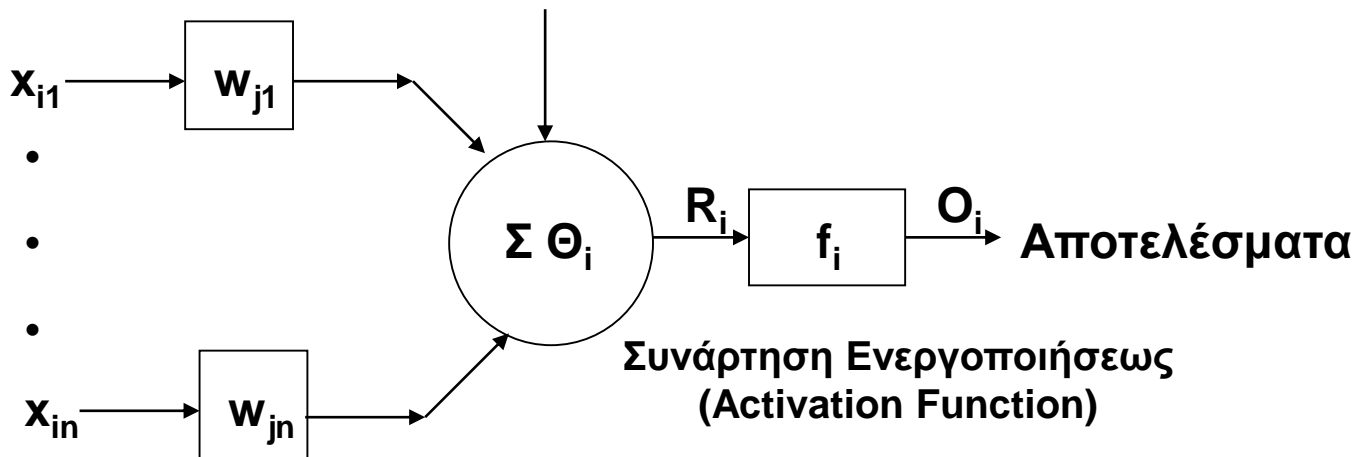
$$r^2 = 0.59$$

# Στατιστικά μοντέλα

*Το Βασικό Τεχνητό Νευρώριο*

Δεδομένα

Συντελεστής Αποκλίσεως

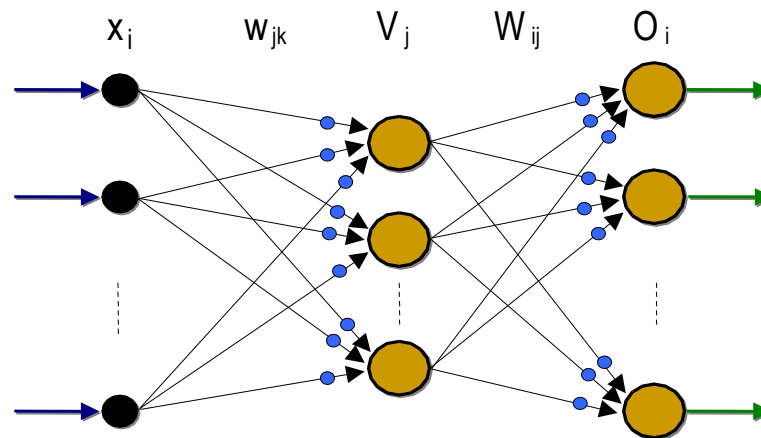


$$\text{Συνάρτηση Μεταφοράς } O_i = f_i \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} \right)$$

$$\text{Συνθήκη Ενεργοποίησης } \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ij} > \Theta_i$$

# Αντιληπτήρας Πολλαπλών Επιπέδων – Δομή - Ονοματολογία

Απλούστερη Μορφή



Αποτελείται από επίπεδα (ή μονάδες) και τις μεταξύ τους συνδέσεις  
Κατηγορίες Μονάδων:

- Εισόδου
- Κρυφές
- Εξόδου



# Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στατιστικών μοντέλων (παλινδρόμησης, ANN)

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Χαμηλό υπολογιστικό κόστος (όχι πάντα)
- Περιγράφουν σε ικανοποιητική χωρική και χρονική ανάλυση το πρόβλημα
- Ιδιαίτερα καλή απόδοση σε περιπτώσεις που εμπλέκονται χημικοί μετασχηματισμοί – κατάλληλα για ρύπους όλων των ειδών
- Πολύ καλή αξιοποίηση των υπαρχόντων δεδομένων/χρονοσειρών
- Τα ANN αποδίδουν πολύ καλά ακόμη και όταν μη γραμμικά φαινόμενα εμπλέκονται στη διεργασία
- Μπορούν να δώσουν αποτελέσματα σε

## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Δεν μπορούν να κάνουν πρόβλεψη σε περιοχές όπου δεν προϋπάρχουν δεδομένα μετρήσεων – απαιτείται ένα ικανοποιητικό μέγεθος χρονοσειράς δεδομένων
- Αγνοούν το φυσικό φαινόμενο που περιγράφει τη διεργασία
- Χαμηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων
- Το εύρος απόδοσης τους περιορίζεται στα όρια του εύρους των τιμών των δεδομένων εισόδου
- Είναι ακατάλληλα για την αξιολόγηση υποθετικών σεναρίων με παραμέτρους έξω από το φάσμα τιμών εκπαίδευσης
- Οι μέθοδοι γραμμικής παλινδρόμησης υστερούν σημαντικά όταν εμπλέκονται μεταβλητές που επιδρούν μη γραμμικά
- Πολλές φορές οι μέθοδοι γραμμικής παλινδρόμησης αδυνατούν να περιγράψουν τιμές σημαντικά διαφορετικές από τη μέση τιμή

# Πως επιλέγω το κατάλληλο μοντέλο για το πρόβλημα μου?

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου βασίζεται σε διάφορα κριτήρια:

- **Φύση και πολυπλοκότητα του προβλήματος**
  - Είναι απαραίτητο ένα πολύπλοκο μοντέλο για να λύσω το πρόβλημα μου?
  - Τι χρονική και χωρική διακριτότητα επιθυμώ?
- **Περιορισμοί σε δεδομένα εισόδου**
  - Έχω τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου? Και πόσο αξιόπιστα είναι αυτά τα δεδομένα?
  - Έχω διαθέσιμες χρονοσειρές από δεδομένα ρύπανσης και μεταβλητές που την επηρεάζουν?
- **Περιορισμοί σε υπολογιστικό κόστος**
  - Διαθέτω το λογισμικό που απαιτείται?
  - Διαθέτω αρκετά ισχυρούς υπολογιστές?
  - Διαθέτω ανθρώπους που μπορούν να κάνουν τα παραπάνω να δουλέψουν?
  - Πόσο γρήγορα μπορώ να πάρω/χρειάζομαι τα αποτελέσματα?



# **Το μοντέλο Gauss**

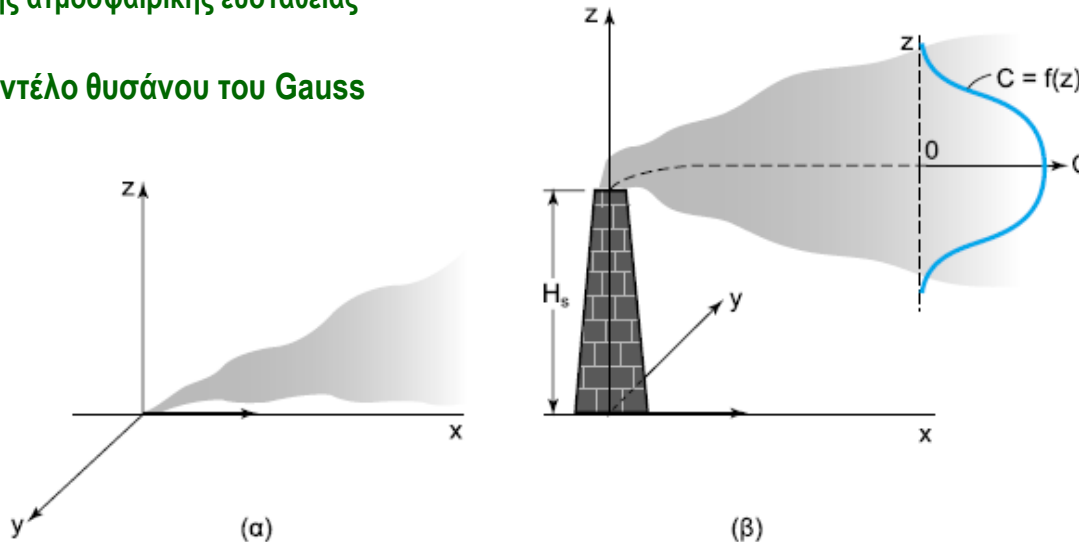
# Παράμετροι που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική διασπορά

Η διασπορά ενός ρύπου στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από

- α) μετεωρολογικές συνθήκες
- β) χαρακτηριστικά της πηγής ρύπανσης
- γ) από τη φύση του ρύπου
- δ) από την τοπολογία της περιοχής

Μετεωρολογικές συνθήκες: διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου, ένταση ατμοσφαιρικής τύρβης, θερμοκρασία και υγρασία της Ατμόσφαιρας, είδος της ατμοσφαιρικής ευστάθειας

## Μοντέλο θυσάνου του Gauss



# Μοντέλο θυσάνου του Gauss

- Σημειακή πηγή, συνεχής και σταθερή εκπομπή ρύπων ορισμένης αρχικής συγκέντρωσης
- Η μάζα που εκπέμπεται από την πηγή παραμένει σταθερή (π.χ. όχημ. Αντιδράσεις)
- Ακολουθεί τις κινήσεις της ατμόσφαιρας
- Αν οι ρύποι φθάσουν στο έδαφος θεωρείται ότι ανακλώνται και επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα
- Μετεωρολογικές συνθήκες σταθερές
- Γκαουσιανή κατανομή συγκέντρωσης του ρύπου σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση

## Κατανομή της συγκέντρωσης

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

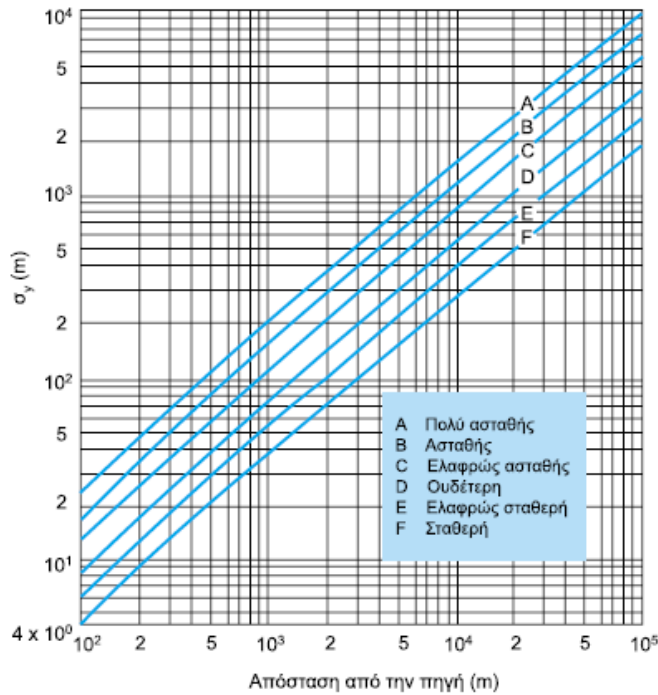
Πηγή ρύπων στο  $x=0, y=0, z=0$

Q: παροχή του ρύπου

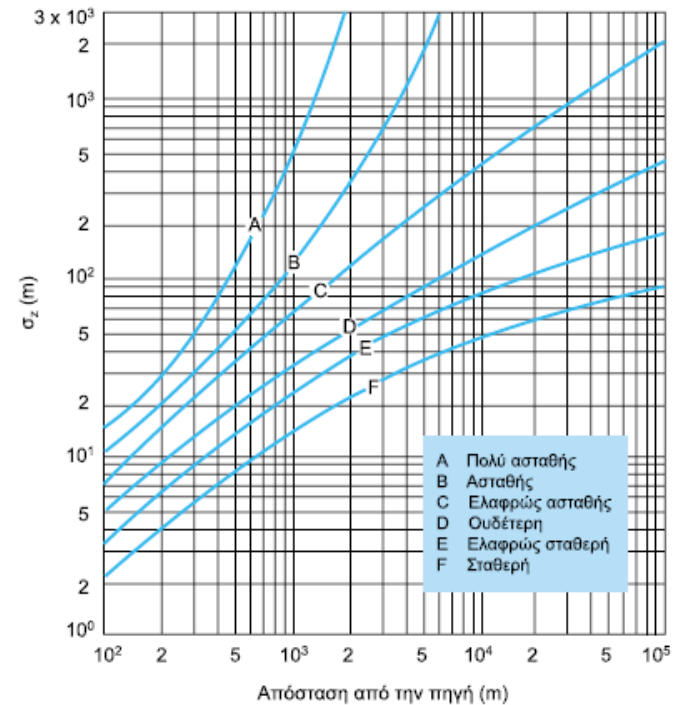
U: ταχύτητα του ανέμου (οριζόντια)

$\sigma_y, \sigma_z$ : οριζόντιος, κατακόρυφος συντελεστής διάχυσης σε m

# Οριζόντιος και κατακόρυφος συντελεστής διάχυσης

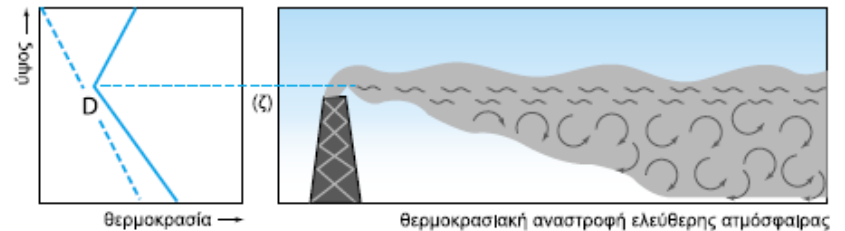
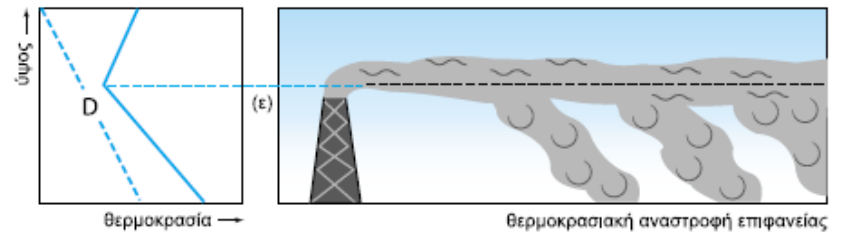
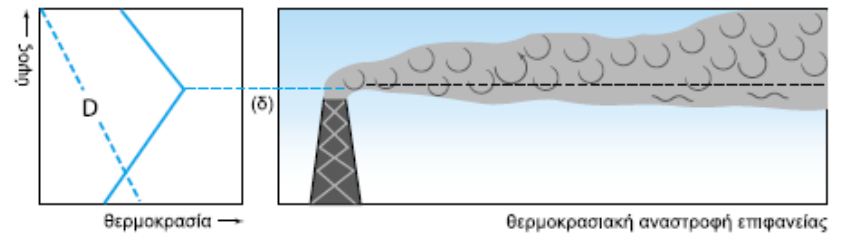
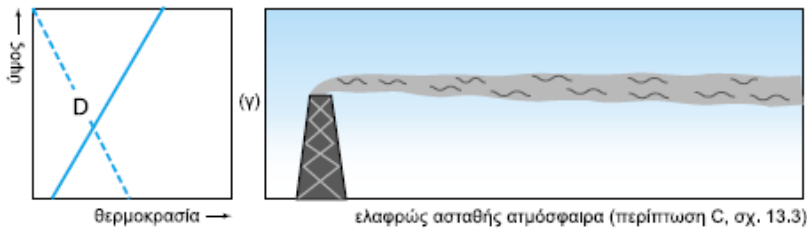
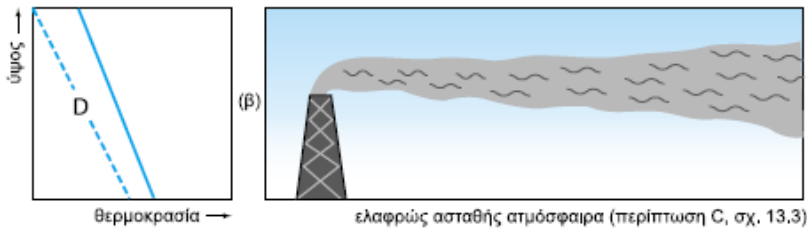
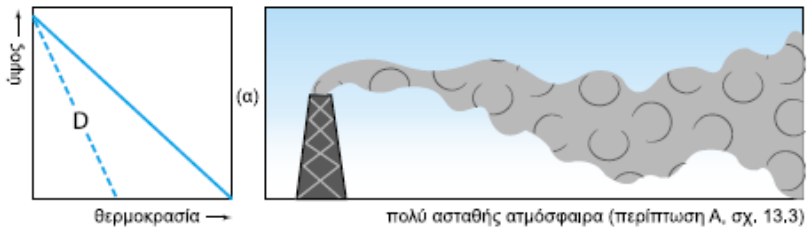


Παράμετρος διάχυσης  $\sigma_y$  ως συνάρτηση της κατάντη απόστασης x.



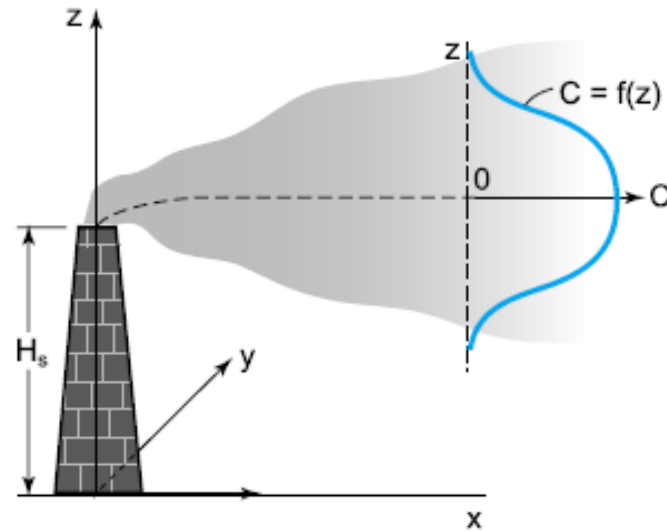
Παράμετρος διάχυσης  $\sigma_z$  ως συνάρτηση της κατάντη απόστασης x.

# Περιπτώσεις διασποράς θυσάνου για διάφορες κατανομές θερμοκρασίας





## Πηγή σε ύψος $H_s$



$$H = H_s + \Delta H$$

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

## Αποδέκτης στο έδαφος $z=0$

$$C_{(x,y,0)} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

Εκτιμήσεις συγκέντρωσης κάτω από την κεντρική γραμμή του θυσάνου και επάνω στο έδαφος ( $z=0$ )

$$C_{(x,0,0)} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

## Περίπτωση πυρκαγιών ή εκρήξεων

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

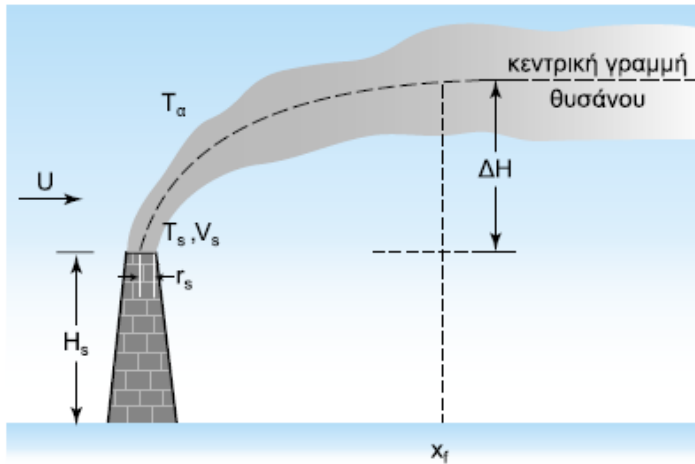
Για συγκεντρώσεις στο έδαφος θέτουμε  $z=0$  οπότε προκύπτει:

$$C_{(x,y,0)} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$

Στο έδαφος και στην κεντρική γραμμή ( $z=0, y=0$ )

$$C_{(x,0,0)} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z U}$$

# Περίπτωση ανωστικού θυσάνου



Στην απόσταση  $x_f$   
ο θύσανος οριζοντιώνεται

$$\Delta H = \frac{2V_s r_s}{U} [1.5 + 2.68 \times 10^{-2} P \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) 2r_s]$$

Εξίσωση Holland

όπου

$V_s$  = ταχύτητα εξόδου από την καμινάδα, m/s

$r_s$  = ακτίνα καμινάδας στην έξοδο της, m

$U$  = ταχύτητα ανέμου, m/s

$P$  = ατμοσφαιρική πίεση,  $kP_a$

$T_s$  = θερμοκρασία απαερίων στην έξοδο της καμινάδας, K

$T_a$  = θερμοκρασία ατμόσφαιρας, K

# Σχέσεις Briggs

Για ουδέτερες ή ασταθείς ατμοσφαιρικές καταστάσεις (A – B – C ή D):

➤ Για  $x < x_f$ :

$$\Delta H = \frac{1.6F^{1/3} x_f^{2/3}}{U}$$

όπου

$x_f$  = η απόσταση προς την κατεύθυνση του ανέμου στην οποία έχουμε την τελική ανύψωση του θυσάνου.

$U$  = ταχύτητα ανέμου στο χείλος της καμινάδας

$F$  = παράμετρος ανυψωτικής ροής

Η  $F$  μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$F = g V_s r_s^2 \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \quad \text{m}^4/\text{s}^3$$

και η  $x_f$ :

$$x_f = \begin{cases} 2.16F^{0.4} H_s^{0.6} & \text{για } H_s < 305 \text{ m} \\ 674^{0.4} & \text{για } H_s > 305 \text{ m} \end{cases}$$

➤ Για  $x > x_f$ :

$$\Delta H = \frac{1.6F^{1/3} x_f^{2/3}}{u} \left[ 0.4 + 0.64 \frac{x}{x_f} + 2.2 \left( \frac{x}{x_f} \right)^2 \right] \left( 1 + 0.8 \frac{x}{x_f} \right)^{-2}$$

**Ευχαριστώ για την  
προσοχή σας**