

Μοντέλα Θυσάνου του Gauss

- Κανονική Κατανομή*
- Εξισώσεις Gauss*
- Προσδιορισμός Συντελεστών Διασποράς*
- Ανάκλαση Ρύπων*
- Μέγιστες Συγκεντρώσεις*
- Παραδείγματα Εφαρμογής Εξισώσεων Gauss*

Μεταβολή του Ανέμου με το Ύψος

Μοντέλα θυσάνου του Gauss

Μοντέλα υπολογισμού των μέσων συγκεντρώσεων αδρανών ρύπων σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων από ανυψωμένη, συνεχή πηγή.

Εφαρμογή: Συνθήκες στασιμότητας κι ομοιογένειας

Δημοφιλή και χρήσιμα λόγω απλότητας, ευκολίας στη χρήση και χαμηλών απαιτήσεων σε δεδομένα εισαγωγής

Τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων

Αρχή των αξόνων η πηγή

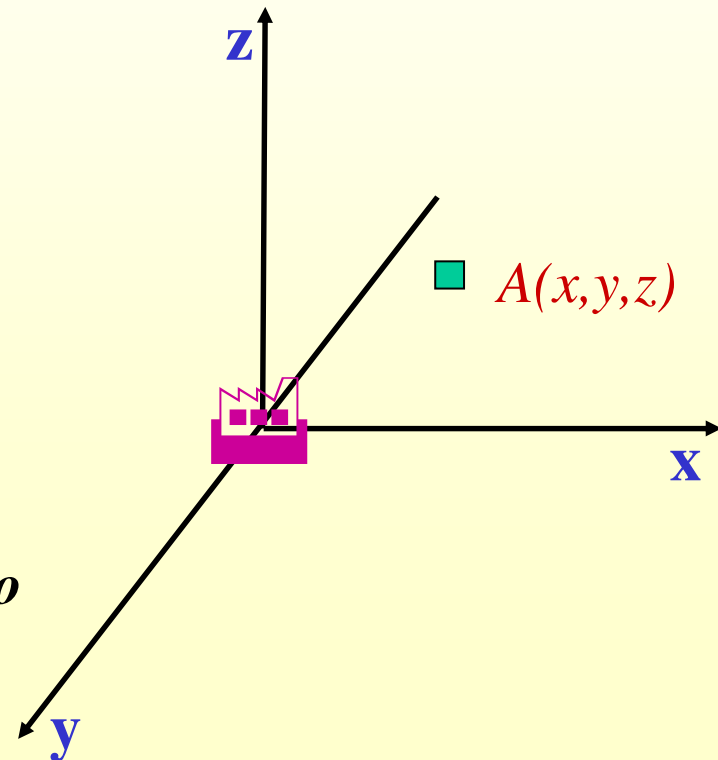
x → Διεύθυνση ανέμου (διαμήκης)

y → Κάθετος στη διεύθυνση ανέμου
(εγκάρσιος)

z → Κάθετος στο επίπεδο x, y
(κατακόρυφος)

Υπολογισμός συγκεντρώσεων στο σημείο

$A(x,y,z)$



Θύσανος: Αναγνωρίσιμο ρεύμα αέρα που η σύστασή του διαφέρει από αυτή του περιβάλλοντος χώρου.

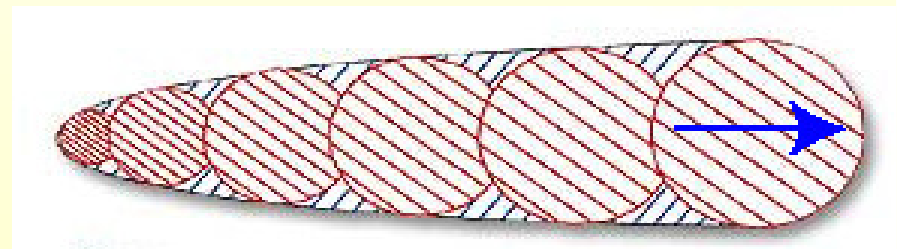
3 διαστάσεις: Διασπορά ρύπων

- Εξάπλωση θυσάνου λόγω μεταφοράς από τον μέσο άνεμο κατά μήκος του άξονα x

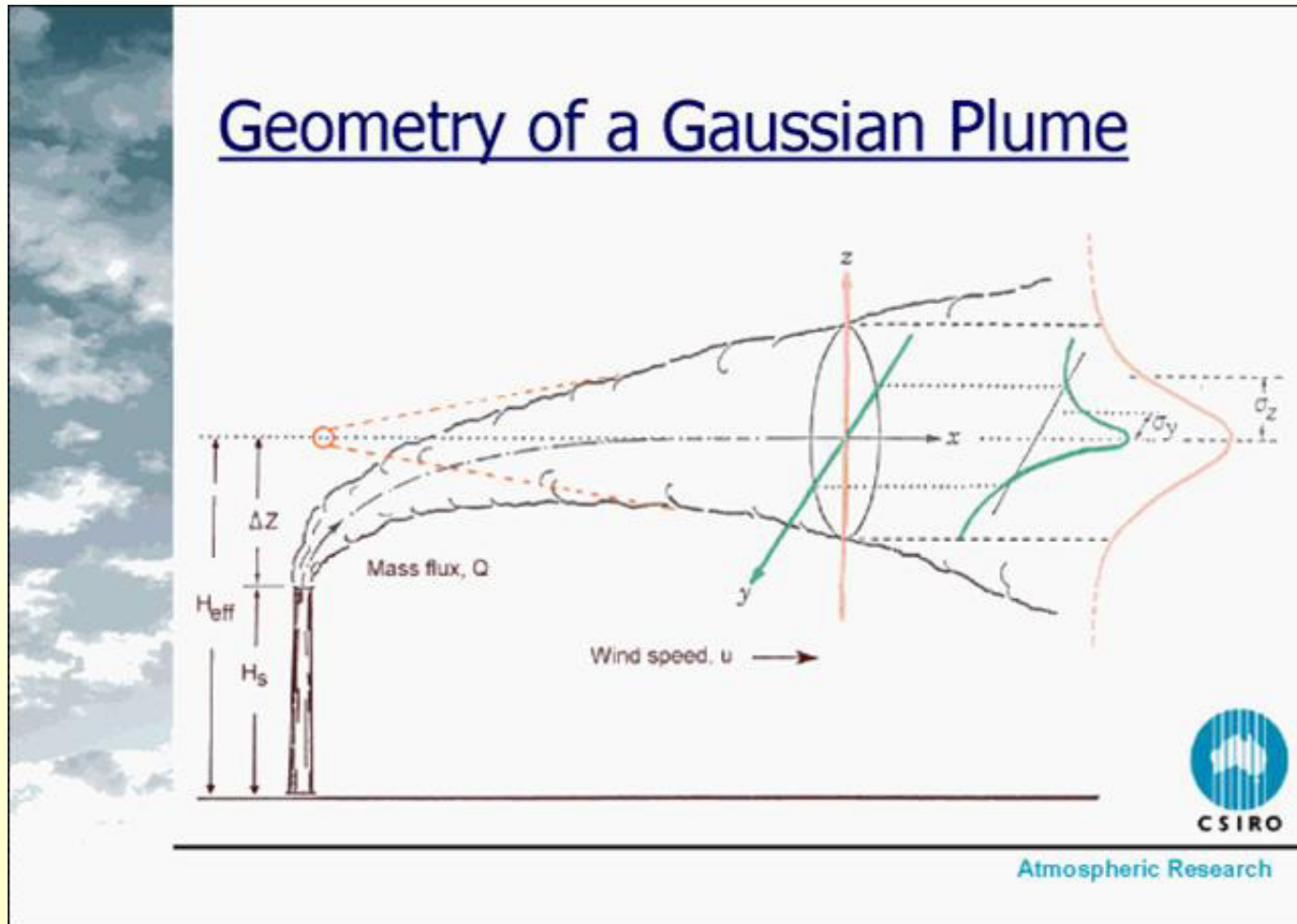
- Εξάπλωση θυσάνου λόγω τυρβώδους διάχυσης κατακόρυφα (z) και εγκάρσια, κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου (y).

Οριζόντια διάχυση συνήθως μεγαλύτερη από την κατακόρυφη λόγω των περιορισμών από έδαφος και του ύψους ανάμειξης.

Η διατομή των θυσάνων αυξάνει με την απόσταση από την πηγή δηλ. οι κατανομές των συγκεντρώσεων διευρύνονται .

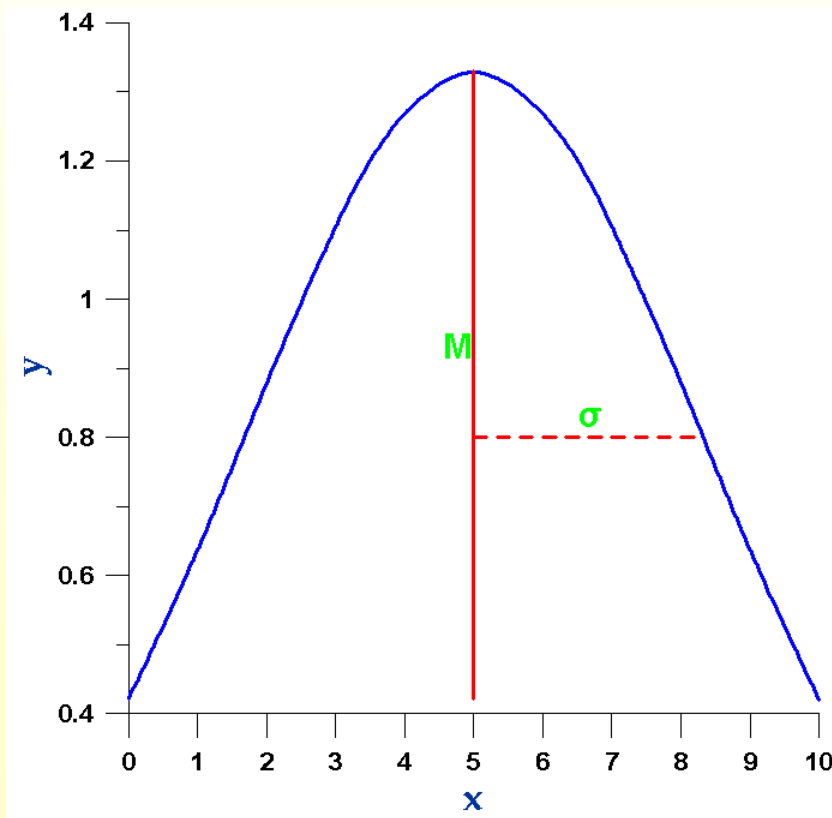


Μοντέλα Gauss: Η εγκάρσια & κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων ακολουθούν την κανονική κατανομή.



Εξίσωση κανονικής κατανομής

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



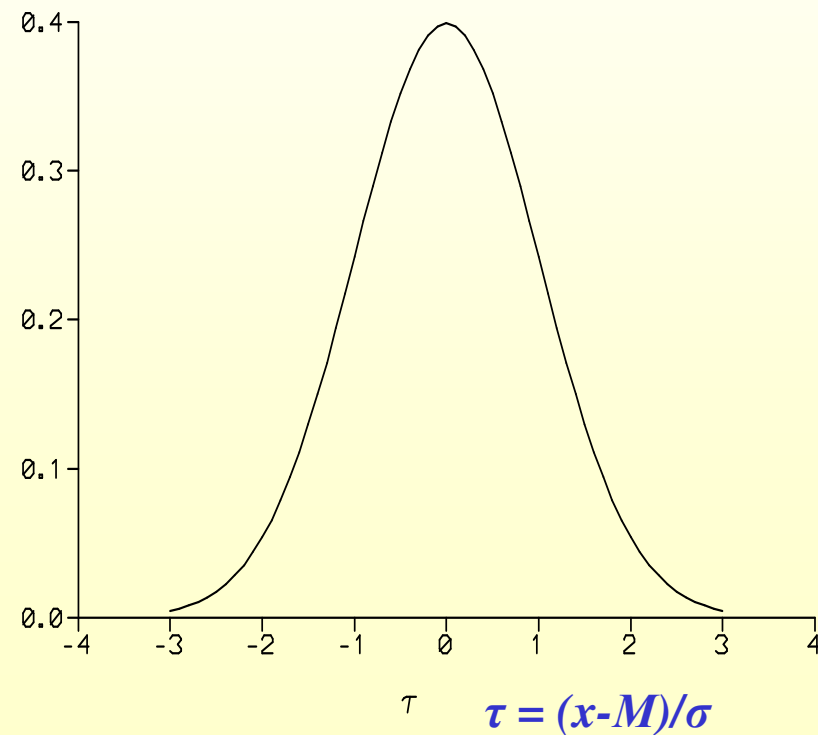
M: Μέση τιμή x

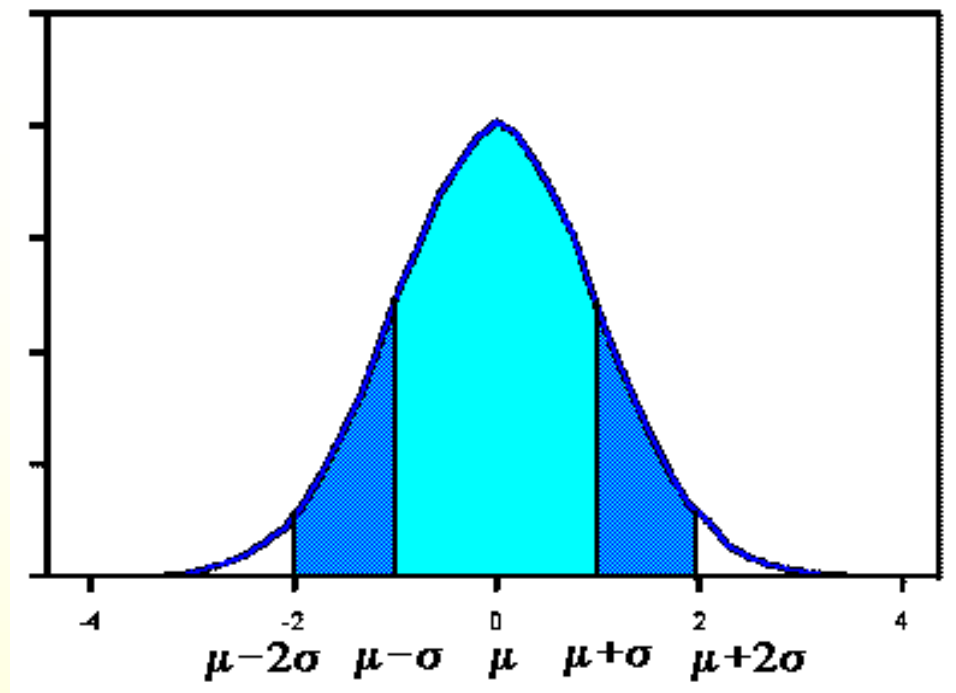
σ: Τυπική απόκλιση

N: Αριθμός παρατηρήσεων

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

Κανονική κατανομή





$$\mu = x - M$$

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

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

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

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

Χαρακτηριστικά κανονικής κατανομής

- Συμμετρική
- Ταύτιση μέσης τιμής, επικρατούσας τιμής και διαμέσου
- Ορισμός πλήρως από M & σ
- Άθροισμα ή διαφορά δύο ανεξάρτητων κανονικών κατανομών είναι κανονική κατανομή

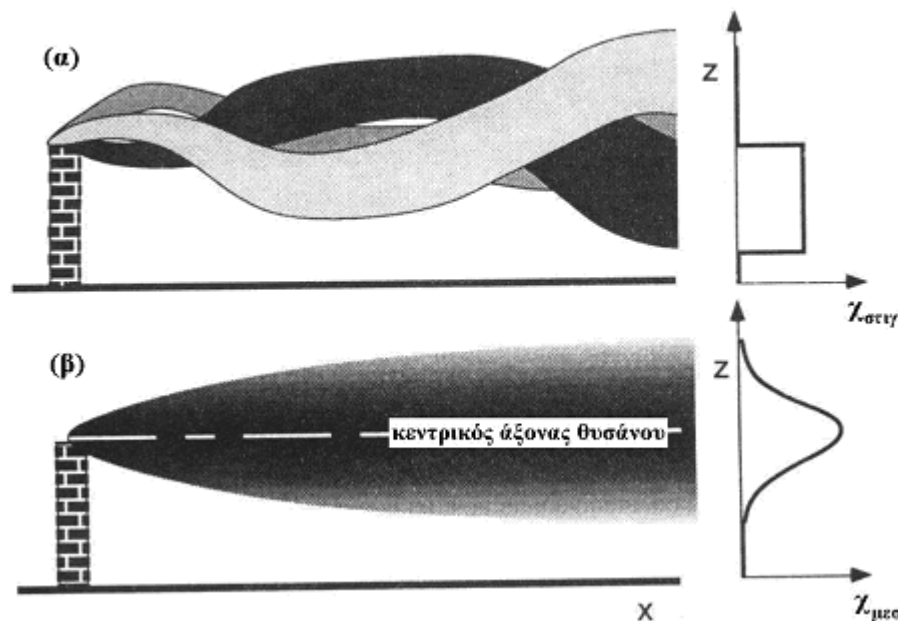
Μοντέλα Gauss: Η εγκάρσια & κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Ισχύει;

Διαφορά στην κατανομή συγκεντρώσεων μεταξύ στιγμιαίων και μέσων τιμών

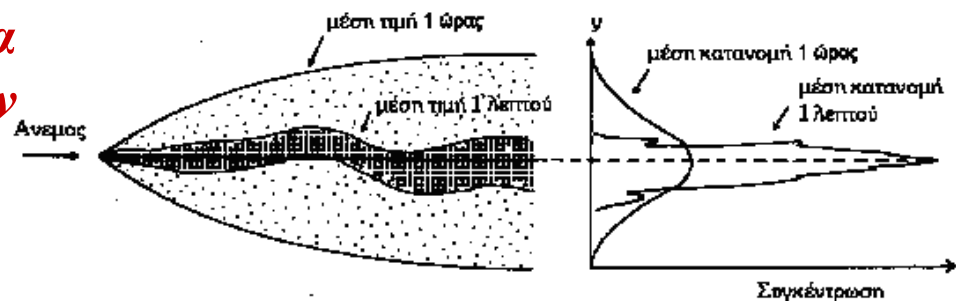
Στιγμιαίες κατανομές

Μέσες κατανομές



Χρήση μοντέλου Gauss για υπολογισμό συνήθως μέσων ωριαίων τιμών συγκεντρώσεων

Εμφάνιση κανονικής κατανομής από λίγα ως 15 λεπτά



Εξίσωση διασποράς σύμφωνα με τη θεωρία βαθμωτής μεταφοράς

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \right] + \bar{R} + \bar{S}$$

Sutton: Έννοια ενός συντελεστή διασποράς

σ_x , σ_y , σ_z : Διαμήκης, εγκάρσιος και κατακόρυφος συντελεστής διασποράς

Αντικατάσταση όρων τυρβώδους ροής με συντελεστές διασποράς

Απομάκρυνση από την πηγή → Διαπλάτυνση θυσάνου → Αύξηση σ

Εφαρμογή συγκεκριμένων προϋποθέσεων για την επίλυση της εξίσωσης διασποράς και γνώση κατανομών σύμφωνα με το πρότυπο Gauss

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των μοντέλων Θυσάνου του Gauss

- *Συνεχής εκπομπή ή χρονική διάρκεια μεγαλύτερη από το χρόνο μεταφοράς του ρύπου σε συγκεκριμένο σημείο*
- *Οι ρύποι είναι σχετικά αδρανείς & δεν συμβαίνει βαρυτική καθίζηση σωματιδίων ($d < 20 \mu m$)*
- *Σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες για το χρονικό διάστημα εφαρμογής του μοντέλου*
- *Διάνυσμα ταχύτητας ανέμου σταθερό, χρονικά και χωρικά*
- *Η επιφάνεια είναι ομαλή*
- *Η διάχυση στον x άξονα είναι ασήμαντη σε σχέση με τη μεταφορά λόγω μέσου ανέμου.*
- *Κατά την επαφή του ρύπου με το έδαφος, ο ρύπος ανακλάται*

Λύση εξίσωσης για ανυψωμένη σημειακή πηγή, σε επίπεδη περιοχή όταν δεν υπάρχουν ρύποι από ανάκλαση

Συγκέντρωση ρύπων σε σημείο A(x, y, z)

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

c(x,y,z): Συγκέντρωση του αέριου ρύπου στο σημείο A, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Q: ρυθμός εκπομπής του ρύπου ($\mu\text{g}/\text{s}$)

u: ταχύτητα του ανέμου, ms^{-1}

σ_y : τυπική απόκλιση της εγκάρσιας κατανομής της συγκέντρωσης, m

σ_z : τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης, m

H: ενεργό ύψος εκπομπής του θυσάνου, m

Μεταφορά από οριζόντιο άνεμο

$$\frac{1}{u}$$

Διάχυση προς στον εγκάρσιο άξονα

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

Κατακόρυφη διάχυση

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Εξίσωση διασποράς μοντέλων Gauss

(ανυψωμένη σημειακή πηγή, επίπεδη περιοχή, χωρίς ανάκλαση ρύπων)

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

- $c(x, y, z)$ ανάλογο Q

Γραμμική μεταβολή

- Μείωση $c(x, y, z)$ με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου u

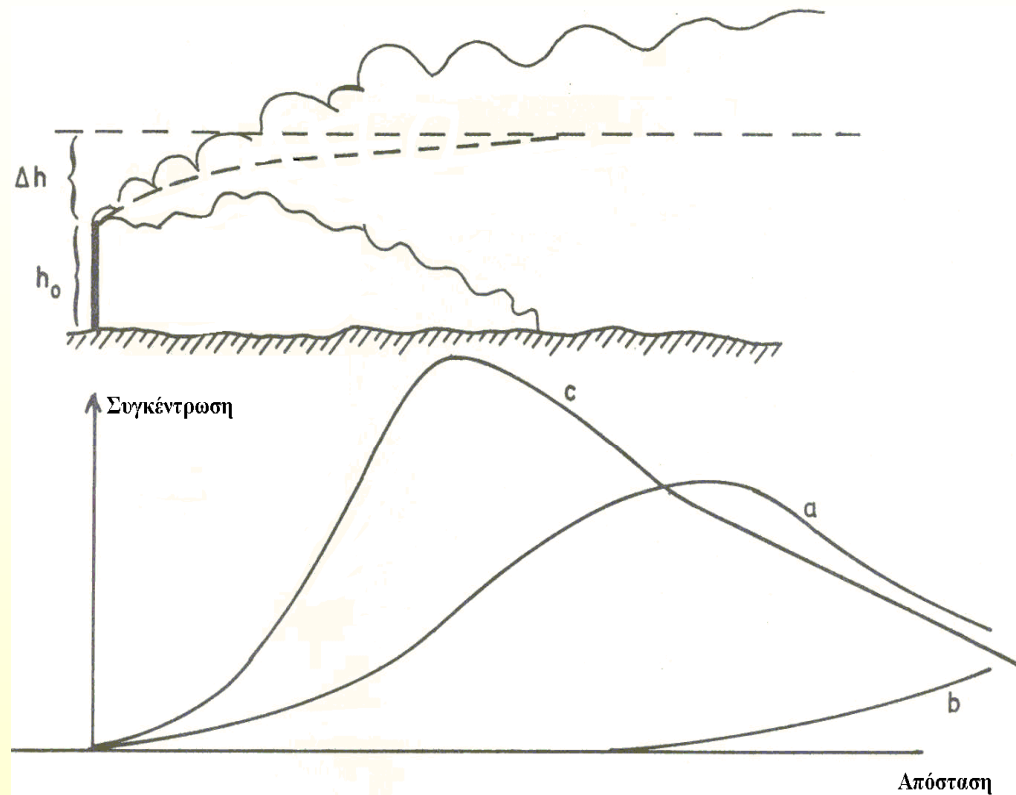
Μη γραμμική μεταβολή λόγω εξάρτησης συντελεστών διασποράς και ενεργού ύψους εκπομπής από άνεμο

$u=0$???

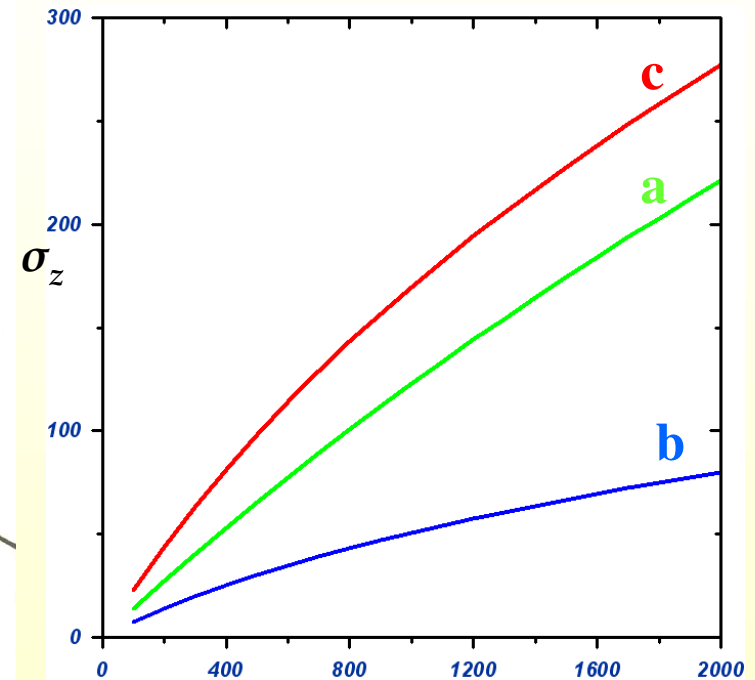
- Μείωση $c(x, y, z)$ με την αύξηση των συντελεστών διασποράς σ_z & σ_y

σ_z & σ_y : Αύξηση με την απόσταση από την πηγή, μείωση με την αύξηση της ευστάθειας

σ_z & σ_y : Αύξηση με την απόσταση από την πηγή, μείωση με την αύξηση της ευστάθειας



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



Απόσταση από πηγή

Ειδικές περιπτώσεις

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

• Συγκεντρώσεις στο έδαφος $A(x, y, 0)$

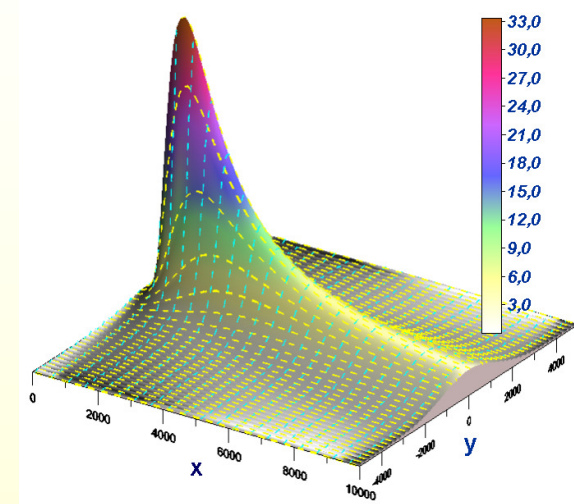
$$c(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

• Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος $A(x, 0, 0)$

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

• Απολύτως μέγιστες συγκεντρώσεις $A(x, 0, H)$

$$c(x, 0, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z}$$



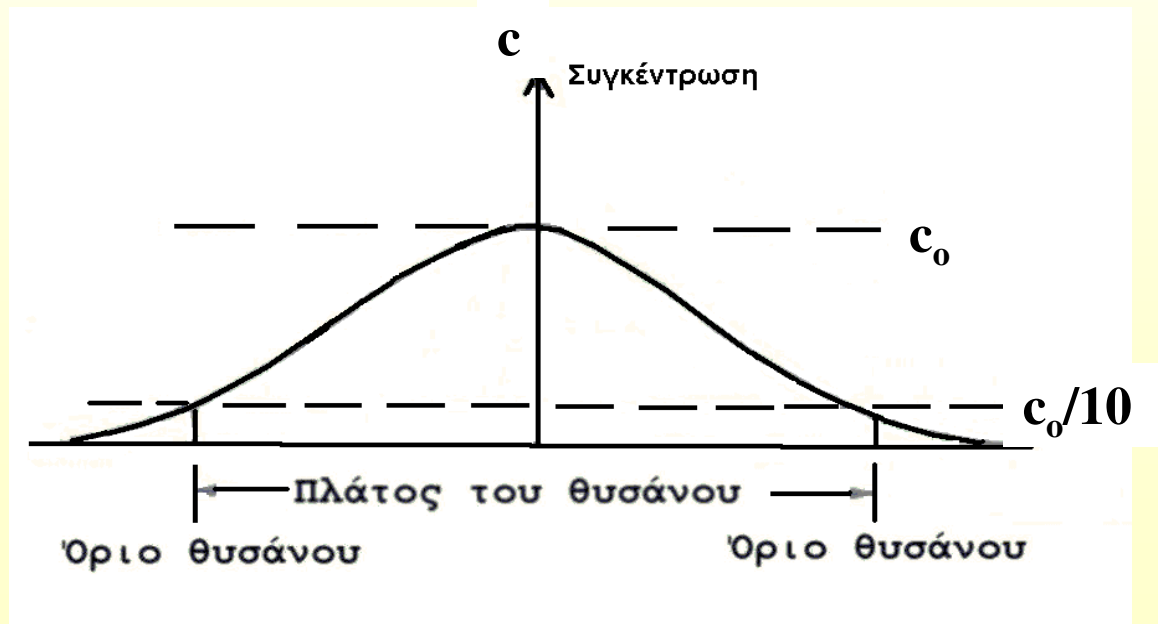
Ύψος κεντρικού άξονα του θυσάνου: Κέντρο μάζας των ρύπων (μέσο ύψος θυσάνου)

$$H_c = \frac{\sum_{n=1}^N c_n z_n}{\sum_{n=1}^N c_n}$$

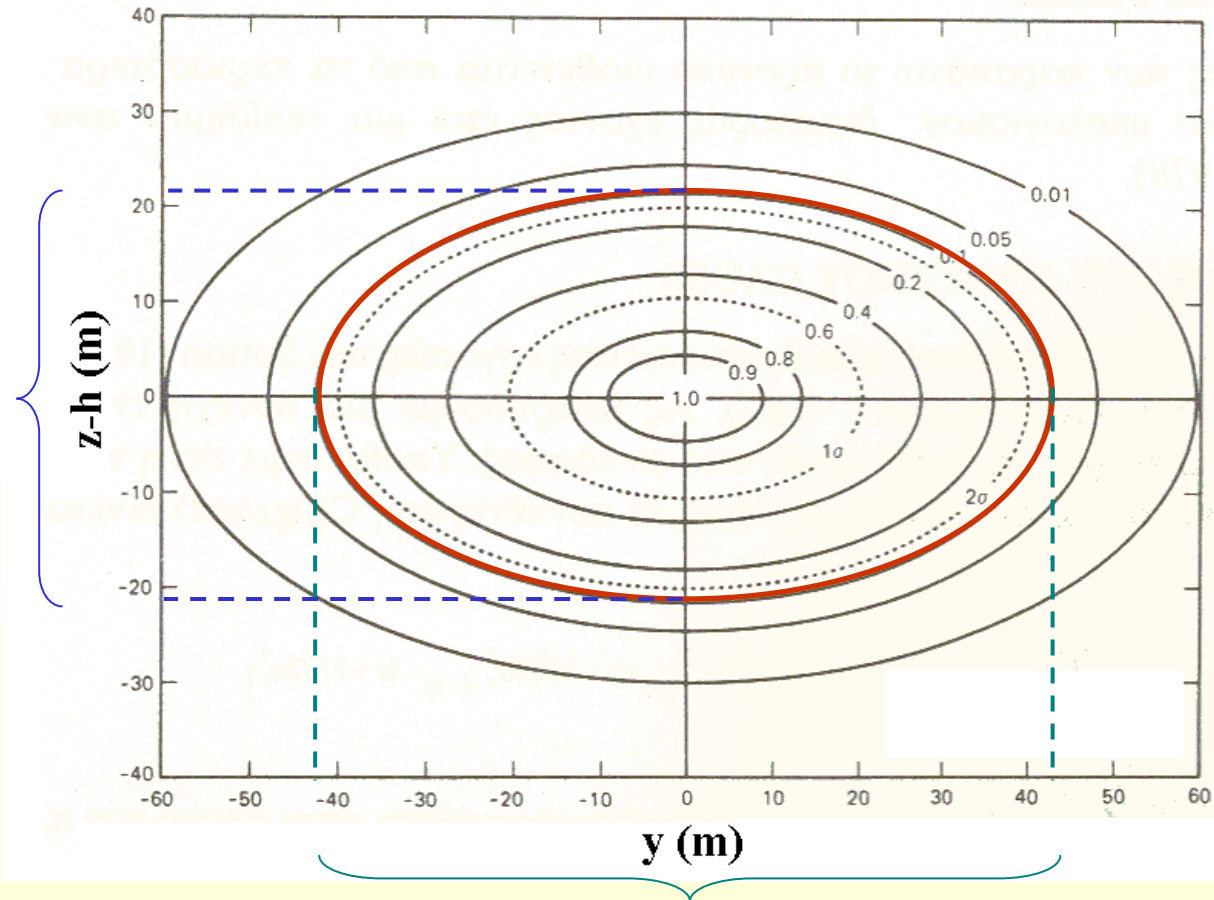
Όρια του θυσάνου: Σημεία όπου η συγκέντρωση είναι 10% της αντίστοιχης του κεντρικού άξονα

Κατακόρυφη διασπορά του θυσάνου: $\Delta z = 4.3 \sigma_z$

Εγκάρσια διασπορά του θυσάνου: $\Delta y = 4.3 \sigma_y$



$$\Delta z = 4.3 \sigma_z$$



$$\Delta y = 4.3 \sigma_y$$

Εγκάρσια τομή ενός θυσάνου του Gauss

Προσδιορισμός των σ_y και σ_z

$\sigma_y, \sigma_z \rightarrow$ Αντιπροσωπεύουν τη μεταφορά ρύπων λόγω τυρβώδους ροής

i) Από μετρήσεις των διακυμάνσεων του ανέμου

Προσδιορισμός των τυπικών αποκλίσεων της οριζόντιας και της κατακόρυφης διεύθυνσης του ανέμου, σ_ϕ και σ_e

$$\sigma_y = x \sigma_\phi f_y$$

$$\sigma_z = x \sigma_e f_z$$

$$\sigma_y, \sigma_z \rightarrow \text{m}, \sigma_\phi, \sigma_e \rightarrow \text{rad}$$

Παράμετροι f_y & f_z

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

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

συνθήκες αστάθειας

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

συνθήκες ευστάθειας

ii) Κλάσεις ευστάθειας κατά Pasquill

! Απλή, αλλά όχι ιδιαίτερα ακριβής μέθοδος

A: ΠΟΛΥ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

D: ΟΥΛΕΤΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ*

B: ΜΕΤΡΙΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

E: ΕΛΑΦΡΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

C: ΕΛΑΦΡΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

F: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ταχύτητα ανέμου m/s	ΗΜΕΡΑ			ΝΥΧΤΑ***	
	Ηλιακή Ακτινοβολία**			Λεπτή πλήρης νεφοκάλυψη ή $\geq 4/8$	$\leq 3/8$
	ΕΝΤΟΝΗ	ΜΕΣΗ	ΛΙΓΗ		
<2	A	A-B	B	F	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

* Ισχύει υπό συνθήκες ποκνής νέφωσης τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας.

** Έντονη ηλιακή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε τοπικές μεσημεριάτικες συνθήκες κατά την διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους. Λίγη ηλιακή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε παρόμοιες συνθήκες στο μέσο του χειμώνα.

*** Νύχτα χαρακτηρίζεται, γενικά η περίοδος 1 ώρα πριν την δύση μέχρι 1 ώρα μετά την ανατολή

Κλάσεις ευστάθειας κατά Pasquill

ΚΛΑΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	ΣΥΝΘΗΚΕΣ	ΦΥΣΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ
A	<i>ΠΟΛΥ ΑΣΤΑΘΕΙΣ</i>	Έντονη μείξη	Αργά το πρωί ως τα μέσα απογεύματος την άνοιξη και το καλοκαίρι
B	<i>ΜΕΤΡΙΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ</i>	Μέτρια μείξη	Διάρκεια ημέρας όλο το έτος
C	<i>ΕΛΑΦΡΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ</i>	Μικρή μείξη	Διάρκεια ημέρας όλο το έτος
D	<i>ΟΥΔΕΤΕΡΕΣ</i>	Ισχυροί άνεμοι, πλήρης νεφοκάλυψη, μετάβαση από ημέρα σε νύχτα	Ημέρες με νέφωση, Νύχτες με νέφωση, Άνεμοι μεγάλης έντασης Όλο το έτος
E	<i>ΕΛΑΦΡΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ</i>	Νυχτερινοί μέτριοι άνεμοι	Διάρκεια νύχτας Όλο το έτος
F	<i>ΜΕΤΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ</i>	Νύχτα με μη ύπαρξη νέφωσης και πολύ μικρό ύψος ανάμειξης	Νύχτα, καθαρός ουρανός, μικρής έντασης άνεμοι Όλο το έτος

Κλάσεις εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας

Ύψος ηλίου	Ηλιακή ακτινοβολία (Wm^{-2})	Κλάση ηλιακής ακτινοβολίας
>60°	>700	Έντονη
35° -	350-700	Μέση
15° -	70-350	Λίγη

Μεταβολές του ύψους του ηλίου σε ένα τόπο

(i) με την εποχή και (ii) με τη χρονική στιγμή της ημέρας.

Εποχιακή μεταβολή

Οφείλεται στη μεταβολή της κλίσης του άξονα της γης κατά τη διάρκεια ενός έτους

Ημερήσια μεταβολή

Οφείλεται στην περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της

Ύψος του ηλίου Ψ

$$\sin(\Psi) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta_s) - \cos(\phi) \cdot \cos(\delta_s) \cdot \cos\left[\frac{C \cdot t_{UTC}}{t_d} - \lambda_e\right]$$

Όπου ϕ και λ_e : γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα της περιοχής, δ_s : απόκλιση του ήλιου, t_{UTC} : Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος (UTC), t_d : διάρκεια της ημέρας σε ώρες).

Εφαρμογή: Εύρεση κλάσεων ευστάθειας από μετεωρολογικές παρατηρήσεις

14/6/2001 ΑΠΘ-Σταθμός Σχολής Θετικών Επιστημών
 Ώρα ανατολής: 5:00 Ώρα δύσης:20:00

Χρονική Περίοδος	Ύψος Ηλίου	Ταχύτητα ανέμου	Ηλιακή ακτινοβολία	Νέφωση	Κλάση Ευστάθειας
0-1	0	0.6	0	5	
1-2	0	0.6	0	4	
2-3	0	0.8	0	4	
3-4	0	1.1	0	4	
4-5	0	0.7	0	6	
5-6	5	1.0	45	7	
6-7	15	1.2	161	6	
7-8	26	1.6	255	6	
8-9	38	2.4	211	7	
9-10	49	2.2	517	6	
10-11	60	1.5	532	6	
11-12	69	3.2	868	5	
12-13	73	3.2	834	5	
13-14	68	3.8	537	5	
14-15	59	3.1	314	5	
15-16	48	2.1	46	6	
16-17	37	1.6	130	6	
17-18	26	2.6	254	7	
18-19	15	1.4	57	6	
19-20	4	1.1	31	4	
20-21	0	0.8	1	4	
21-22	0	0.8	0	5	
22-23	0	0.5	0	5	
23-24	0	1.4	0	5	

Ύψος ηλίου	Ηλιακή ακτινοβολία (Wm^{-2})	Κλάση ηλιακής ακτινοβολίας
>60°	>700	Έντονη
35° - 60°	350-700	Μέση
15° - 35°	70-350	Λίγη

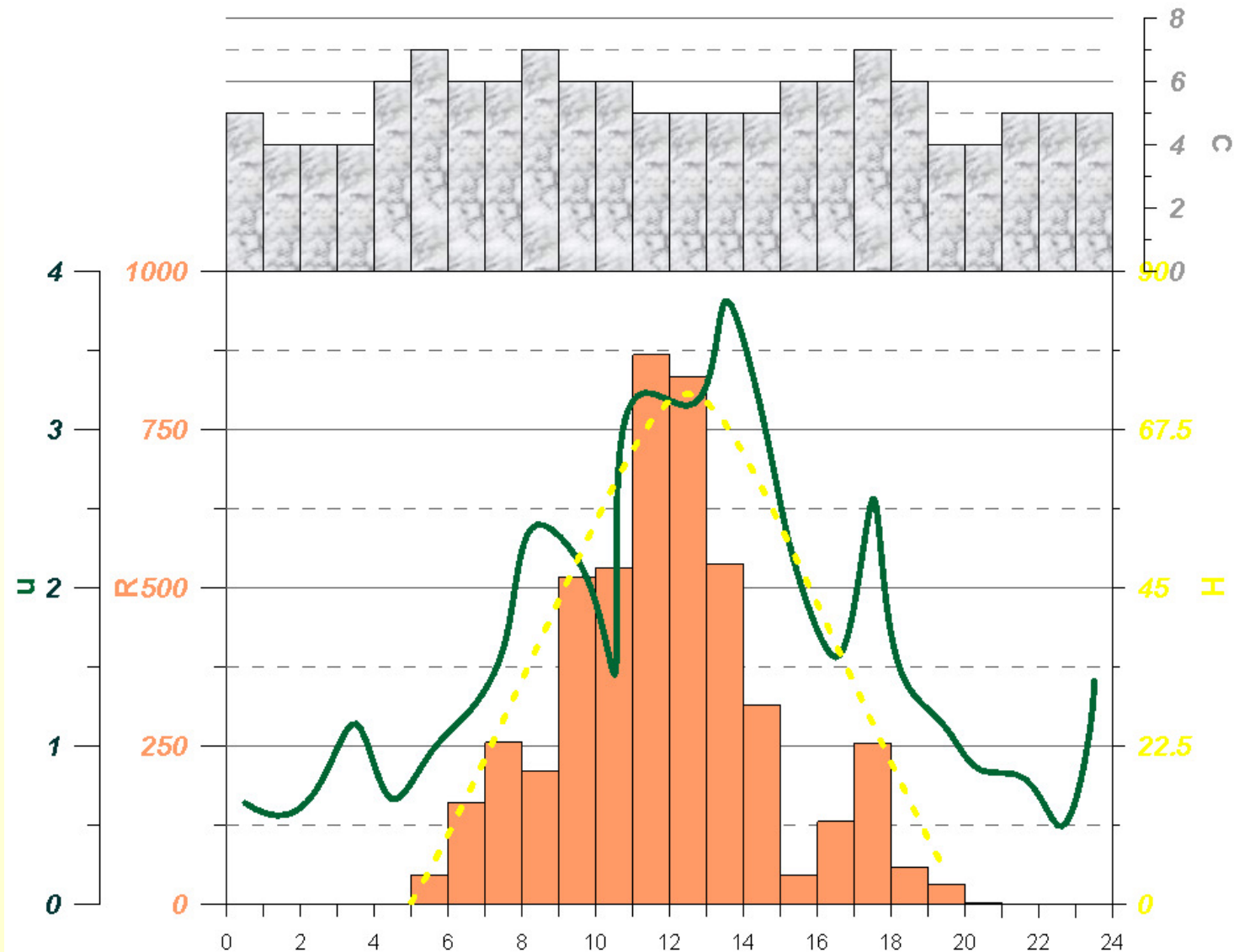
Ταχύτητα ανέμου m/s	ΗΜΕΡΑ			ΝΥΧΤΑ***	
	Ηλιακή Ακτινοβολία**			Λεπτή πλήρης νεφοκάλυψη ή $\geq 4/8$	$\leq 3/8$
	ΕΝΤΟΝΗ	ΜΕΣΗ	ΛΙΓΗ		
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

* D: Ισχύει υπό συνθήκες πυκνής νέφωσης τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας.

** Έντονη ηλιακή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε τυπικές μεσημεριάτικες συνθήκες κατά την διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους. Λίγη ηλιακή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε παρόμοιες συνθήκες στο μέσο του χειμώνα.

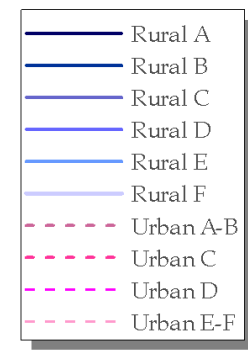
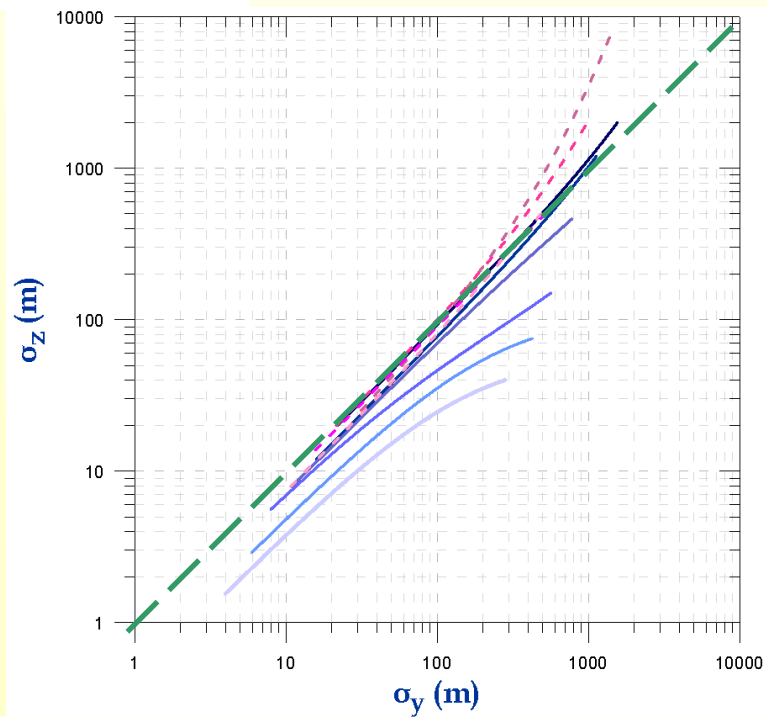
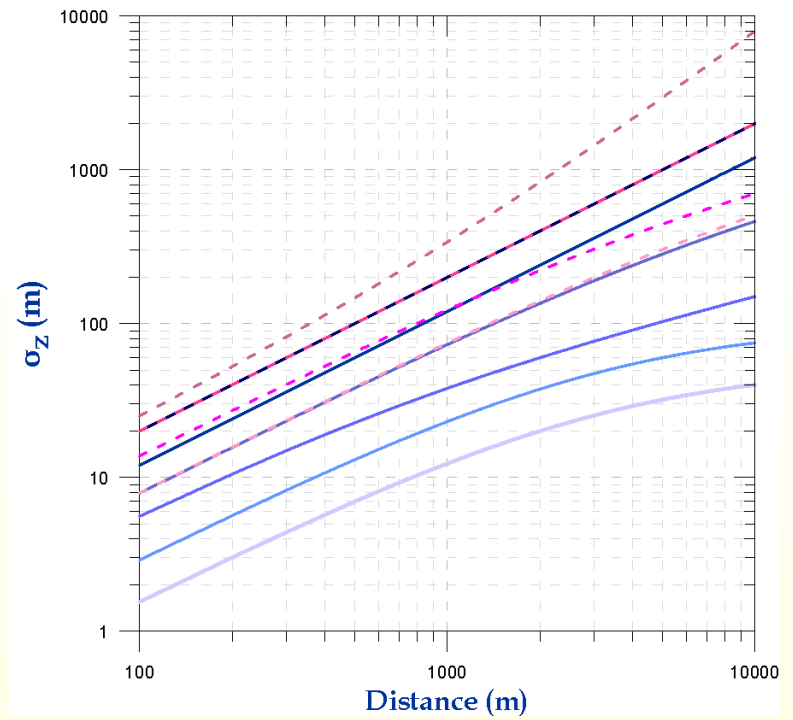
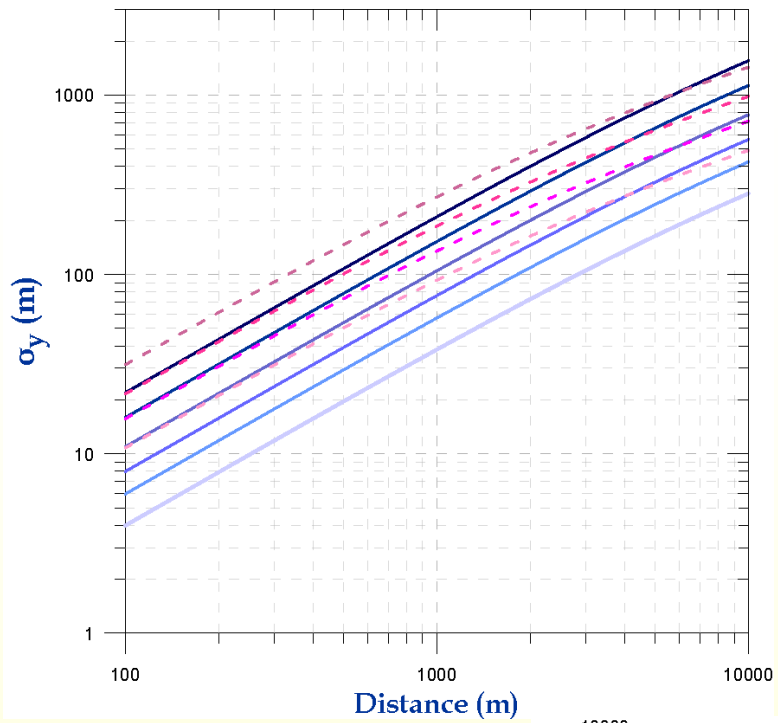
*** Νύχτα χαρακτηρίζεται, γενικά η περίοδος 1 ώρα πριν την δύση μέχρι 1 ώρα μετά την ανατολή

14/6/2001



Οι εξισώσεις Briggs (1973) για τον υπολογισμό των σ_y και σ_z σε αποστάσεις
 $10^2 < x < 10^4$ m.

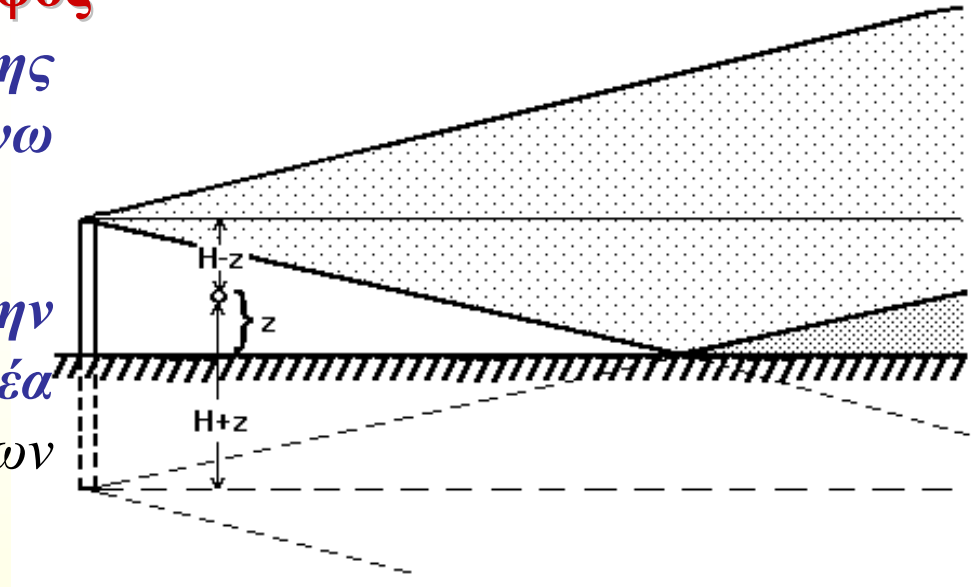
Κλάση ευστάθειας κατά Pasquill	$\sigma_y(x)$ [m]	$\sigma_z(x)$ [m]
ΥΠΑΙΘΡΟΣ		
A	$0.22x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x (1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x (1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$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



Ανάκλαση των ρύπων στο έδαφος

Περιορισμός κατακόρυφης εξάπλωσης του θυσάνου λόγω εδάφους.

Υπόθεση: Η απόθεση στην επιφάνεια της γης είναι αμελητέα (Πραγματικότητα: ένα μέρος των ρύπων κατακρατείται).



Καθρεπτισμός:

- Τοποθέτηση εικονικής πηγής σε ύψος $-H$.
- Διασπορά από την εικονική πηγή ακριβώς όμοια με την πραγματική πηγή.
- Τελικές συγκεντρώσεις: άθροισμα των δύο πηγών.

Εξίσωση

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

Ειδικές περιπτώσεις

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

• Συγκεντρώσεις στο έδαφος $A(x, y, 0)$

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

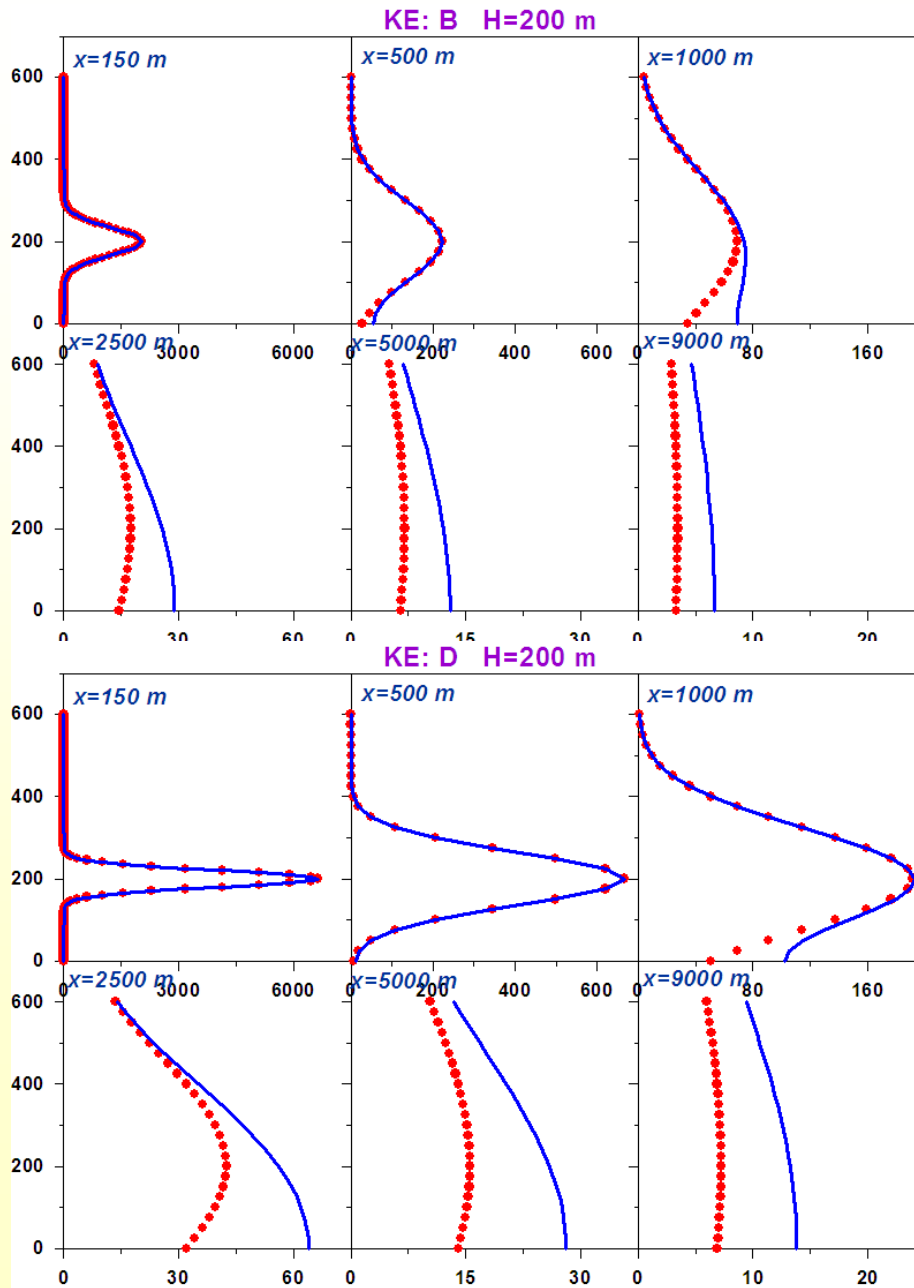
• Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος $A(x, 0, 0)$

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

• Απολύτως μέγιστες συγκεντρώσεις $A(x, 0, H)$

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

Παράδειγμα εφαρμογής εξισώσεων Gauss - 1



Κλάση Ευστάθειας: B

Αρχικές Συνθήκες

Ταχύτητα ανέμου: 5 m/s

Κεντρικό ύψος θυσάνου: 200 m

Ρυθμός Εκπομπής: 100g/s

●●●● Χωρίς ανάκλαση από έδαφος
(No Reflection)

— Με ανάκλαση από έδαφος (Gr.
Reflection)

Κλάση Ευστάθειας: D

Ανάκλαση των ρύπων στη βάση υπερυψωμένης αναστροφής Υπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής πάνω από το ύψος ανάμειξης

Πιθανότητα πολλαπλών ανακλάσεων στο έδαφος και στη βάση
της υπερυψωμένης αναστροφής → Υπόθεση πολλαπλών
εικονικών πηγών στο ύψος ανάμειξης z_i

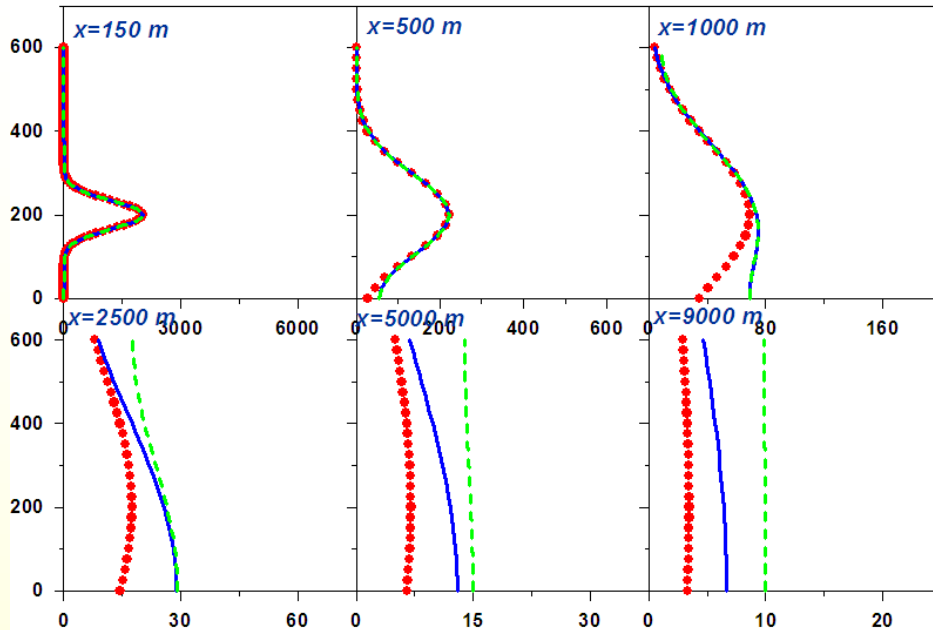
Εξίσωση

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

z_i : Ύψος ανάμειξης, J : αριθμός ανακλάσεων

Παράδειγμα εφαρμογής εξισώσεων Gauss - 2

ΚΕ: B H=200 m



Κλάση Ευστάθειας: B

Αρχικές Συνθήκες

Ταχύτητα ανέμου: 5 m/s

Κεντρικό ύψος θυσάνου: 200 m

Ρυθμός Εκπομπής: 100g/s

Ύψος Ανάμειξης: 600 m

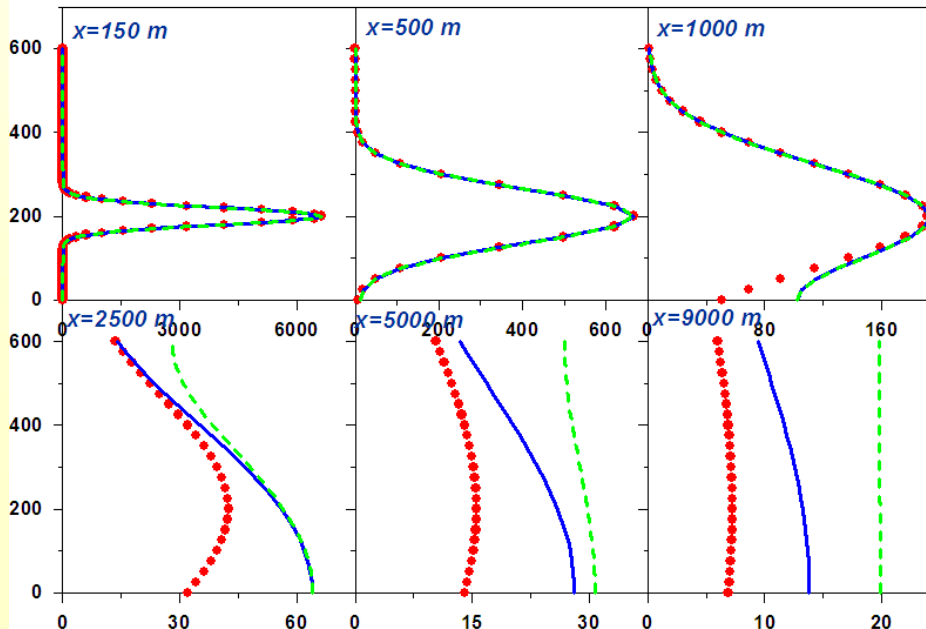
●●●● Χωρίς ανάκλαση από έδαφος (No Reflection)

— Με ανάκλαση από έδαφος (Gr. Reflection)

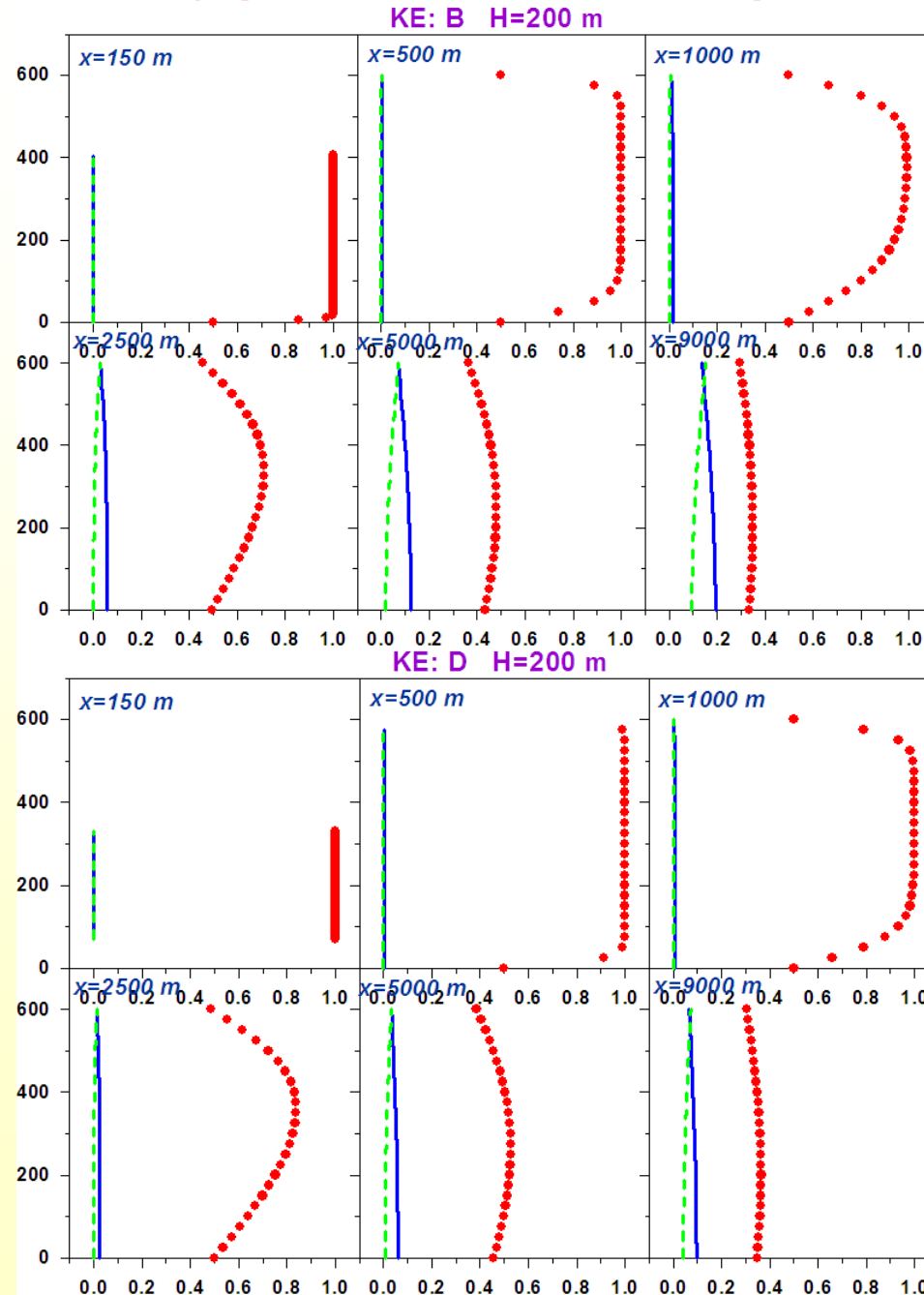
- - - Με ανάκλαση από έδαφος & οριακό στρώμα (Gr.+BI Reflection)

Κλάση Ευστάθειας: D

ΚΕ: D H=200 m



Συνεισφορά των ανακλάσεων στην συνολική συγκέντρωση



Κλάση Ευστάθειας: B

Αρχικές Συνθήκες

Ταχύτητα ανέμου: 5 m/s

Κεντρικό ύψος θυσάνου: 200 m

Ρυθμός Εκπομπής: 100g/s

Ύψος Ανάμειξης: 600 m

●●●● Χωρίς ανάκλαση από έδαφος
(No Reflection)

— Με ανάκλαση από έδαφος (Gr.
Reflection)

- - - Με ανάκλαση από έδαφος &
οριακό στρώμα (Gr.+BI
Reflection)

Κλάση Ευστάθειας: D

Συγκέντρωση ρύπων σε σημείο $A(x, y, z)$ από ανυψωμένη σημειακή πηγή, σε επίπεδη περιοχή

i) όταν δεν υπάρχουν ρύποι από ανάκλαση

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

ii) Ανάκλαση ρύπων από το έδαφος

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

iii) Ανάκλαση ρύπων από το έδαφος στη βάση υπερυψωμένης αναστροφής

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

Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος:

$$y=0, z=0$$

Απολύτως μέγιστες συγκεντρώσεις:

$$y=0, z=H$$

Συγκεντρώσεις στο έδαφος:

$$z=0$$

Καπνισμός: Ο τρόπος εξάπλωσης ενός θυσάνου όταν πάνω από το στρώμα ανάμειξης υπάρχει θερμοκρασιακή αναστροφή με χαμηλή βάση, ενώ κάτω από τη βάση η ανάμειξη των ρύπων είναι έντονη (αστάθεια).

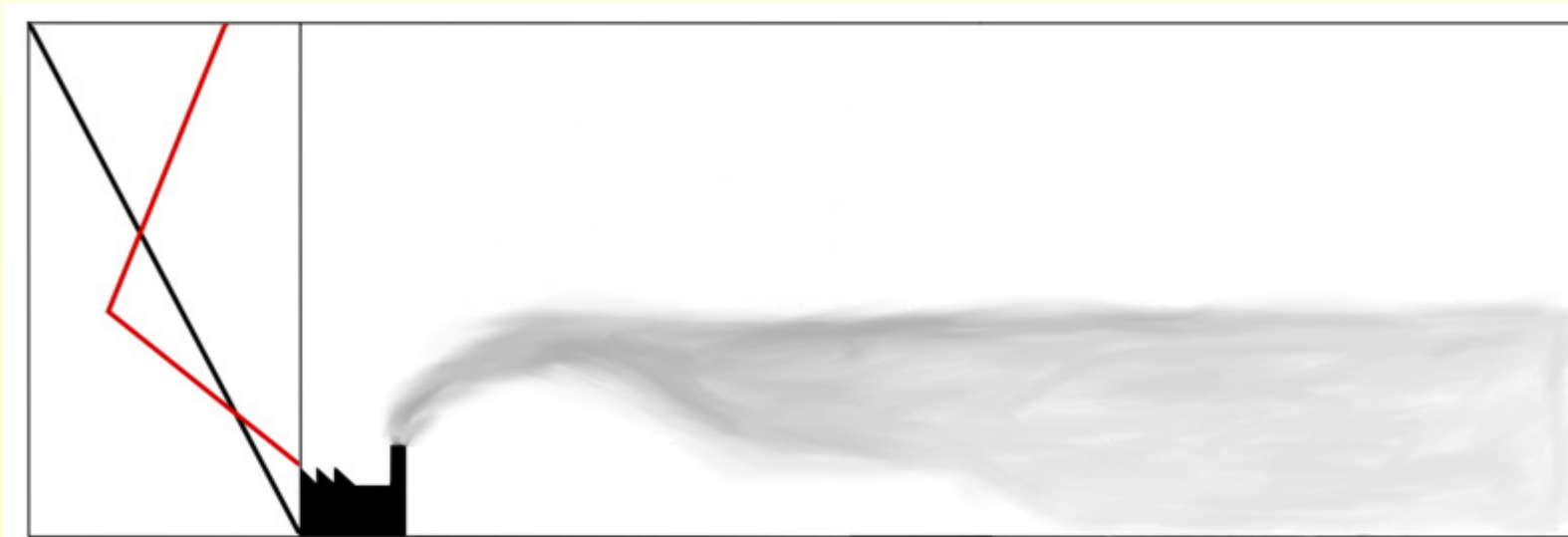
Κατακόρυφη κατανομή σχεδόν ομοιόμορφη λόγω έντονης ανάμειξης.

Συγκέντρωση στο έδαφος:

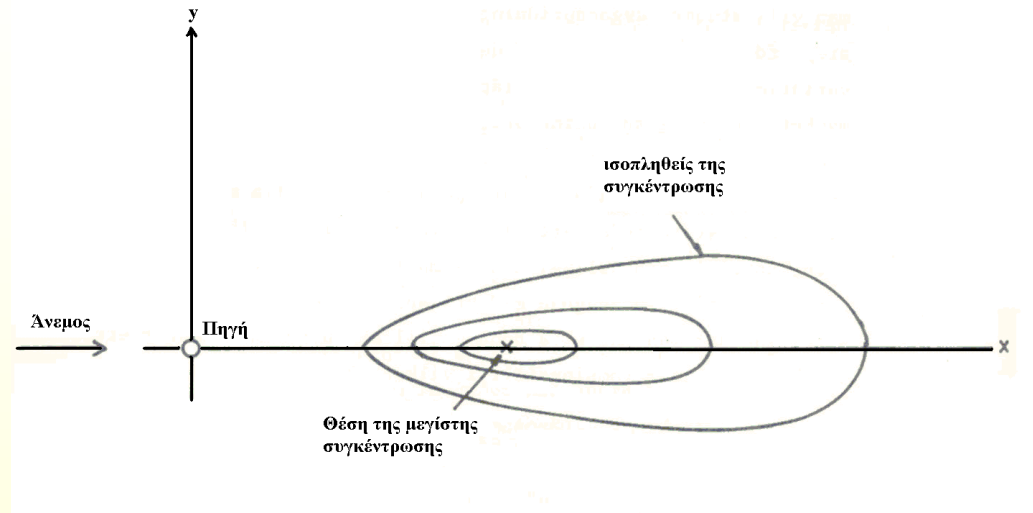
$$c(x, y, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_y z_i} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος: $c(x, 0, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_y z_i}$

z_i : Ύψος στρώματος ανάμειξης



Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος Απόσταση εμφάνισης μεγίστων

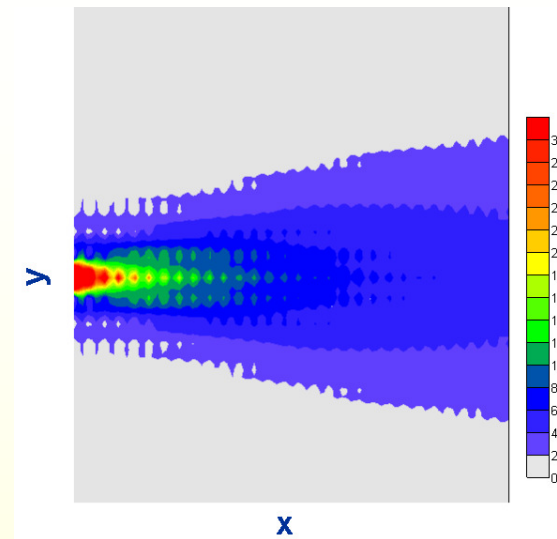
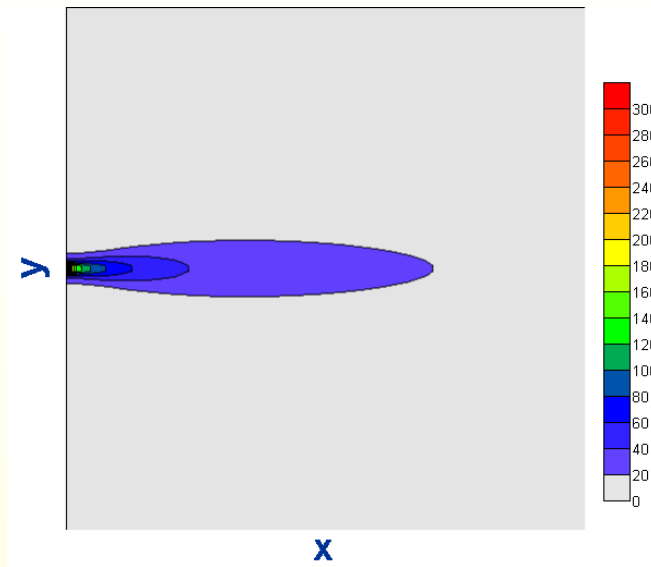


Υπερψωμένη πηγή: Μηδενικές συγκεντρώσεις στην άμεση γειτονία της καμινάδας. Αύξηση συγκεντρώσεων μετά από κάποια απόσταση → Μέγιστες τιμές συγκεντρώσεων → Βαθμιαία μείωση των συγκεντρώσεων.

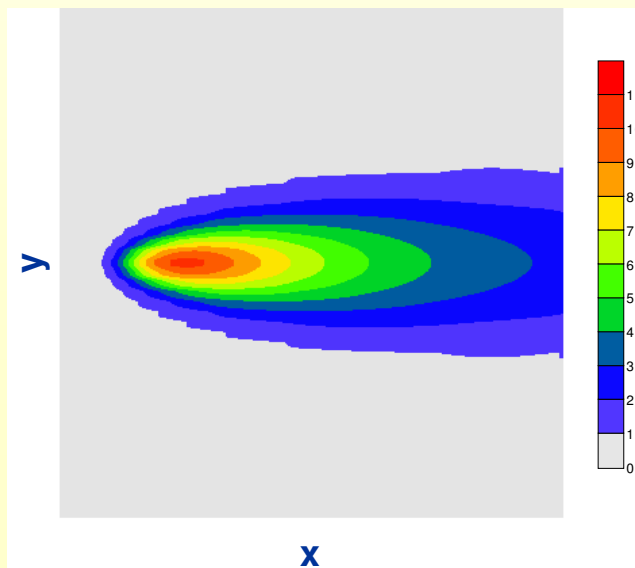
Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος:
$$c_{\max} = \frac{2Q}{\pi H^2 e u} \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$$

Θέση εμφάνισης μέγιστης συγκέντρωσης όταν ισχύει $H^2 = 2\sigma_z^2$

Συγκεντρώσεις με ύπαρξη χαμηλής αναστροφής και αστάθειας



Συγκεντρώσεις χωρίς ύπαρξη αναστροφής



Θέση εμφάνισης μέγιστης συγκέντρωσης όταν

$$H^2 = 2\sigma_z^2$$

Καπνισμός (ύπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής και αστάθεια)

Συγκέντρωση στο έδαφος: $c(x, y, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_y z_i} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$

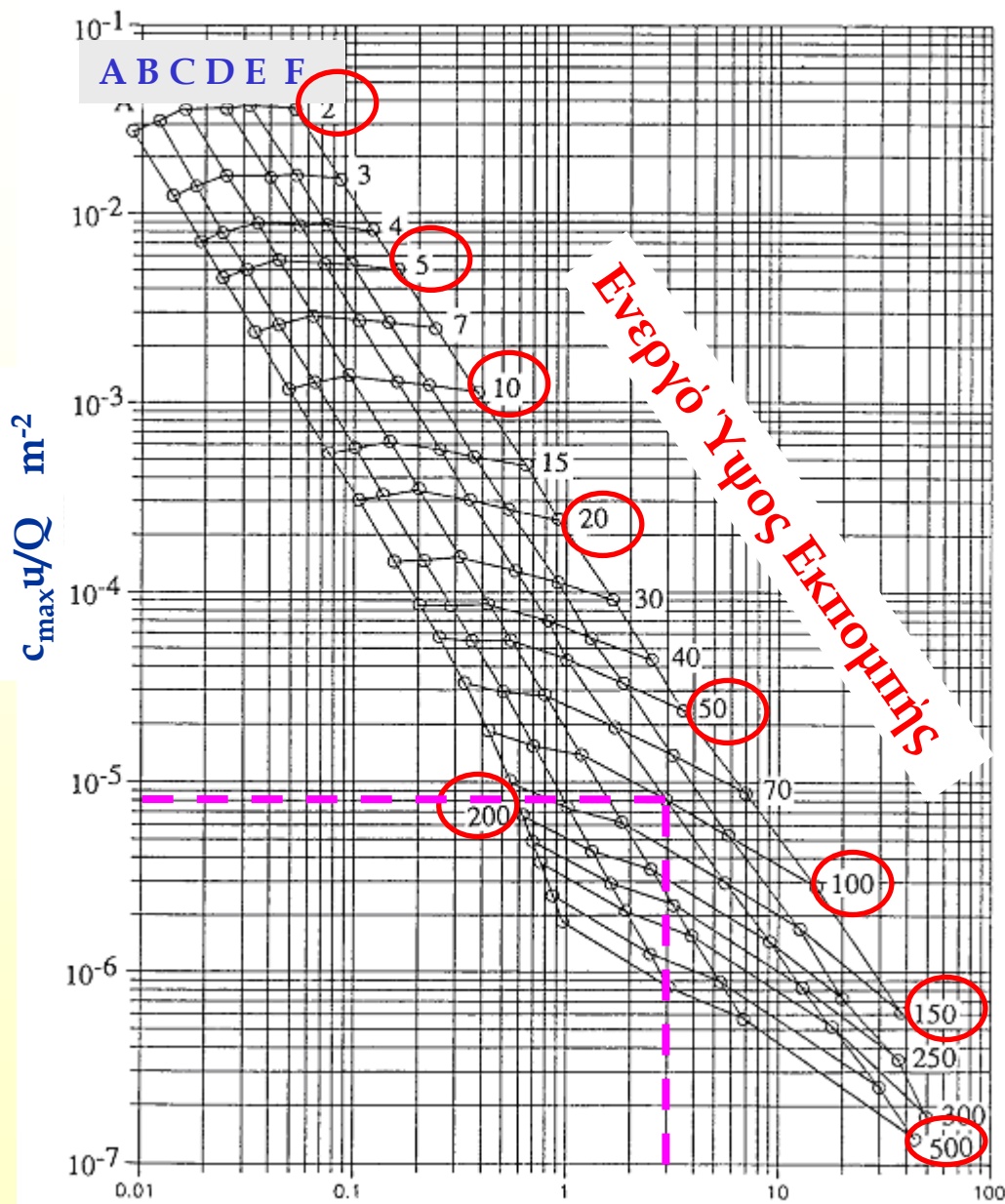
Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος: $c(x, 0, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_y z_i}$

Κανονικές συνθήκες (μη ύπαρξη θερμοκρασιακής αναστροφής)

Μέγιστη συγκέντρωση στο έδαφος: $c_{\max} = \frac{2Q}{\pi H^2 e u} \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$

Θέση εμφάνισης μέγιστης συγκέντρωσης όταν ισχύει $H = \sqrt{2}\sigma_z$

Πότε οι μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος εξ' αιτίας του καπνισμού είναι μεγαλύτερες στη θέση εμφάνισης της c_{\max} από τις αντίστοιχες των κανονικών συνθηκών? (Σχέση μεταξύ z_i & H)



Απόσταση εμφάνισης μέγιστης συγκέντρωσης στο έδαφος (km)

Όρια συγκεντρώσεων για την ποιότητα του αέρα → Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος

Μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος → Παραγωγή εξίσωσης Gauss ως προς x και αποτέλεσμα ίσο με 0

Δυσκολία λόγω πολύπλοκης εξάρτησης συντελεστών διασποράς από x →

Χρήση νομογράμματος

Παράδειγμα

$$Q=20 \text{ gs}^{-1}, u=5 \text{ ms}^{-1}, H=100 \text{ m } KE=D$$

Τομή D & ενεργού ύψους H

Κάθετη στον άξονα $x \rightarrow$ Εύρεση απόστασης εμφάνισης μέγιστης συγκέντρωσης

$$(x=3 \text{ km})$$

Κάθετη στον άξονα $y \rightarrow$ Εύρεση λόγου $c_{\max}u/Q$

$$(c_{\max}u/Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2})$$

$$c_{\max}u/Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2} \rightarrow c_{\max} = Q \cdot u^{-1} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}$$

$$c_{\max} = 20 \cdot 10^6 \text{ } \mu\text{g s}^{-1} \cdot 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2} / 5 \text{ m s}^{-1} \rightarrow c_{\max} = 32 \text{ } \mu\text{g/m}^{-3}$$

$$u=5 \text{ ms}^{-1}$$

$$KE: B \text{ (έντονη ηλιακή ακτινοβολία)} \quad x_{\max}=0.7 \text{ km}, c_{\max}=60 \text{ } \mu\text{g/m}^{-3}$$

$$KE: C \text{ (λίγη ηλιακή ακτινοβολία)} \quad x_{\max}=1.1 \text{ km}, c_{\max}=52 \text{ } \mu\text{g/m}^{-3}$$

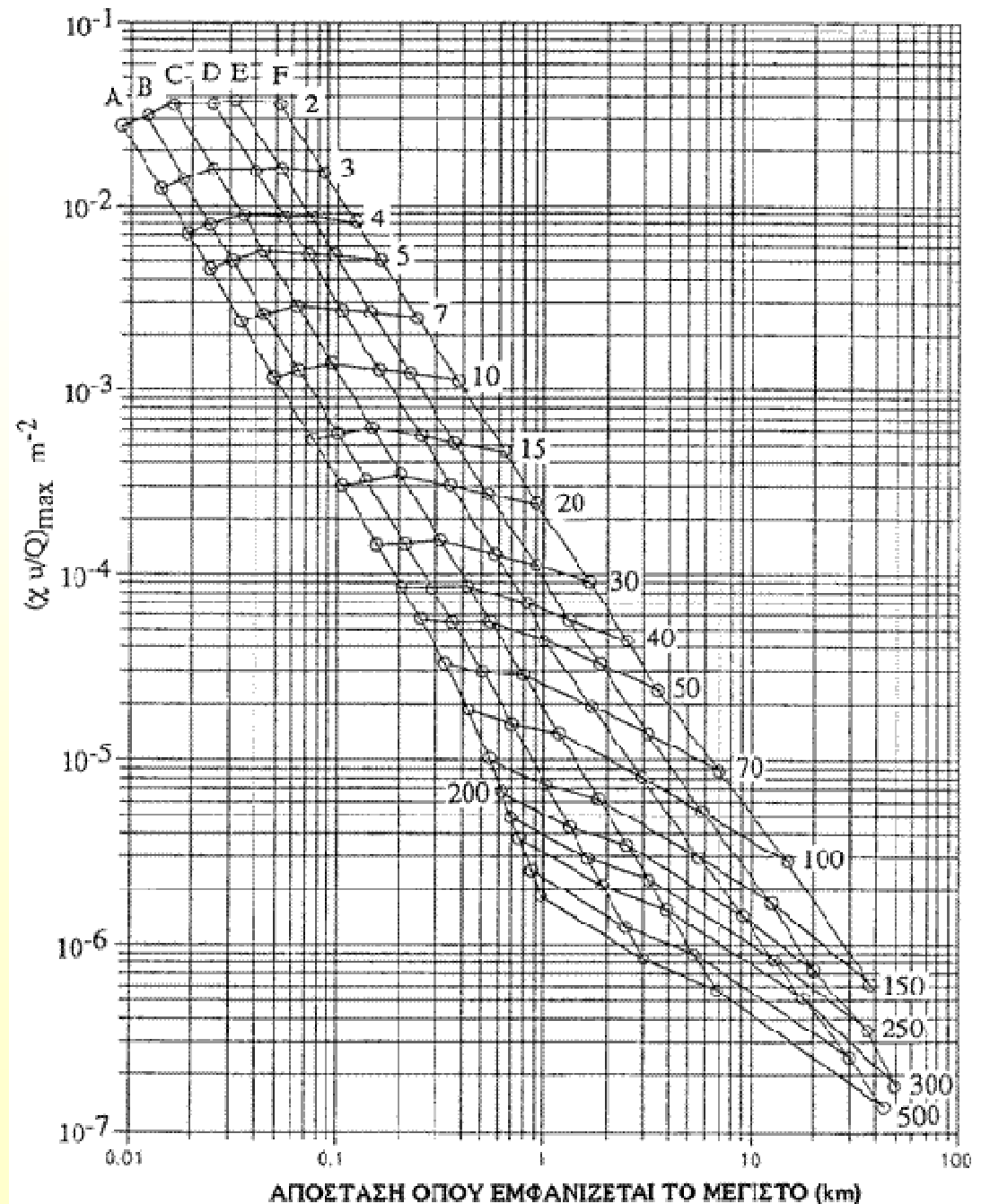
$$KE: E \text{ (νύχτα, νέφωση } < 3/8) \quad x_{\max}=6 \text{ km}, c_{\max}=20.8 \text{ } \mu\text{g/m}^{-3}$$

Ημέρα λίγη ηλιακή ακτινοβολία

Νύχτα με λεπτή νέφωση ή > 4/8

Χρήση νομογράμματος

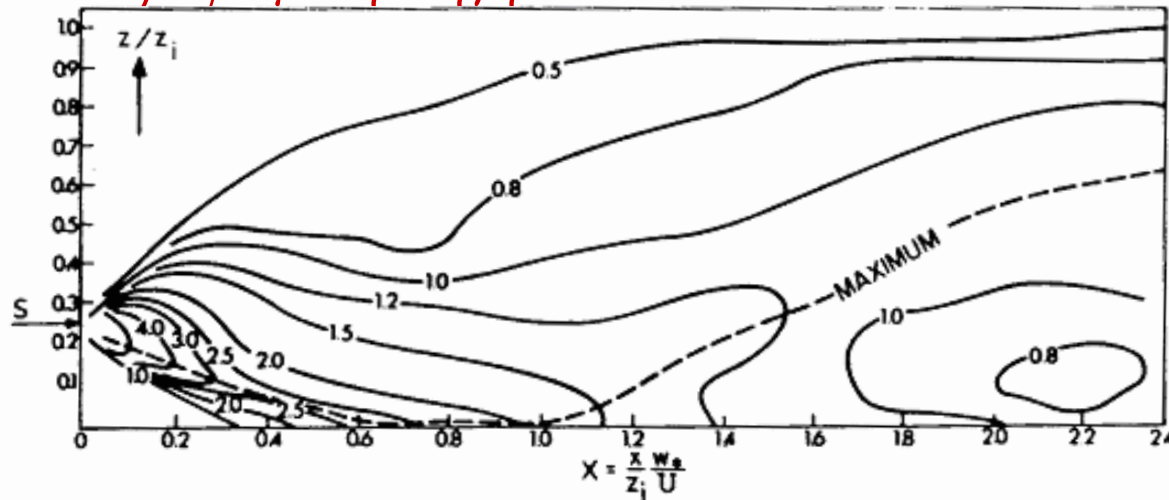
Εύκολη εύρεση της μέγιστης συγκέντρωσης στο έδαφος και της θέσης που εμφανίζεται όταν είναι γνωστά η ατμοσφαιρική κλάση ευστάθειας, το ενεργό ύψος εκπομπής και το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου



Περιπτώσεις όπου το μοντέλο του θυσάνου του Gauss είναι λιγότερο κατάλληλο

Α. Συνθήκες μεγάλης αστάθειας

Υπερυψωμένη Πηγή



H : ενεργό ύψος εκπομπής
 z_i : ύψος οριακού στρώματος
 u : ταχύτητα ανέμου
 w^* : κλίμακα ταχύτητας στο ύψος ανάμειξης

Παραδοχή μοντέλου θυσάνου του Gauss: Ο κεντρικός άξονας του θυσάνου βρίσκεται στο ύψος H (ενεργό ύψος εκπομπής)

Ισχύει σε συνθήκες ευστάθειας ή ουδέτερης στρωμάτωσης

Συνθήκες μεγάλης αστάθειας → Μεγάλες αποκλίσεις

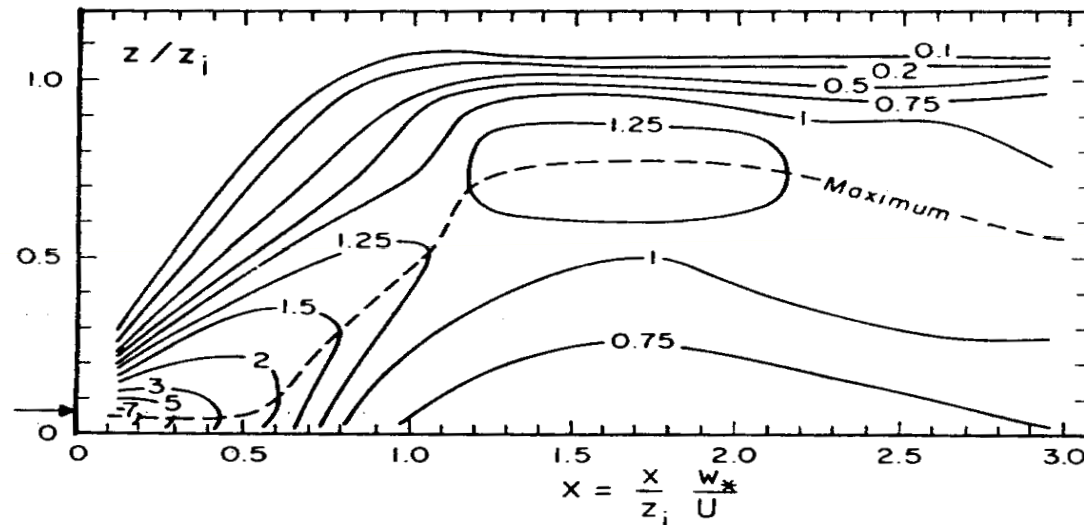
Εργαστηριακή προσομοίωση: Κάθοδος του κεντρικού άξονα του θυσάνου

Αρχή → $x=0$, $H=0.26 z_i$, έδαφος → $x = 0.6 z_i u/w^*$, $H=0$, ανύψωση → $H= z_i/2$.

Τυπικές τιμές: $z_i = 1000\text{m}$, $u=5 \text{ ms}^{-1}$, $w^*=1 \text{ ms}^{-1}$

$H_{\text{αρχικό}} = 260 \text{ m}$, $x_{\text{έδαφος}} = 3 \text{ km}$

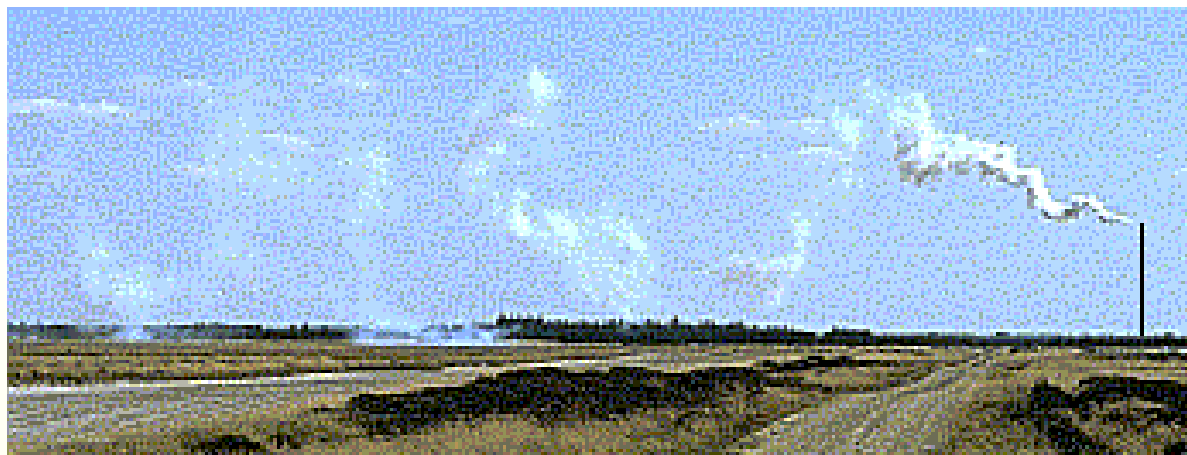
Πηγή κοντά στο έδαφος



Εργαστηριακή προσομοίωση: Ανύψωση του κεντρικού άξονα του θυσάνου
Αρχή $\rightarrow x=0, H \approx 0$, Ανύψωση θυσάνου σε απόσταση $x = 0.5 z_i u/w^*$, Μέγιστη
ανύψωση $\rightarrow H=0.7z_i$

Τυπικές τιμές: $z_i = 1000\text{m}$, $u=5 \text{ ms}^{-1}$, $w^*=1 \text{ ms}^{-1}$

$x_{\text{έδαφος}} = 2.5 \text{ km}$



Εξήγηση του φαινομένου

Δομή της τύρβης σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας: Μεγάλοι στρόβιλοι που εξαπλώνονται σε ολόκληρο το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας

Χρονική και χωρική εναλλαγή ανοδικών και καθοδικών ροών αέρα στο οριακό στρώμα → Ταχεία μεταφορά ρύπων στη κορυφή του οριακού στρώματος ή στο έδαφος.

Ανοδικές αναταρακτικές κινήσεις → Μεγαλύτερες ταχύτητες από τις καθοδικές και κάλυψη μικρότερων επιφανειών → Μεγαλύτερη πιθανότητα των εξερχόμενων ρύπων να βρεθούν σε καθοδική ροή αέρα απ' ότι σε ανοδική → Κάθοδος του κεντρικού άξονα του θυσάνου → Παραμονή του θυσάνου κοντά στο έδαφος για το χρονικό διάστημα που επικρατούν καθοδικές κινήσεις → Ανύψωση θυσάνου όταν βρεθεί σε ανοδική ροή αέρα

B. Εκπομπές ρύπων κοντά στο έδαφος

Επιπλοκές στην εφαρμογή του μοντέλου του θυσάνου του Gauss όταν οι πηγές εκπομπών είναι κοντά στο έδαφος

Αιτίες:

- Σχεδόν λογαριθμική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος
- Μη ομοιογενής κατακόρυφη δομή της τύρβης λόγω εδάφους
→ εγκάρσια κατανομή είναι κανονική, ενώ η κατακόρυφη κατανομή όχι.

Δε συνίσταται η εφαρμογή του μοντέλου θυσάνου του Gauss στην περίπτωση εκπομπών κοντά στο έδαφος

Γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου

Δυνατότητα ολοκλήρωσης εξίσωσης Gauss ως προς το χώρο & παραγωγή εξισώσεων για γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου.

Μη αναλυτικές λύσεις, χρήση αριθμητικών μεθόδων

Δρόμοι με πυκνή κυκλοφορία → γραμμικές πηγές

Ολοκλήρωση εξίσωσης Gauss ως προς το y .

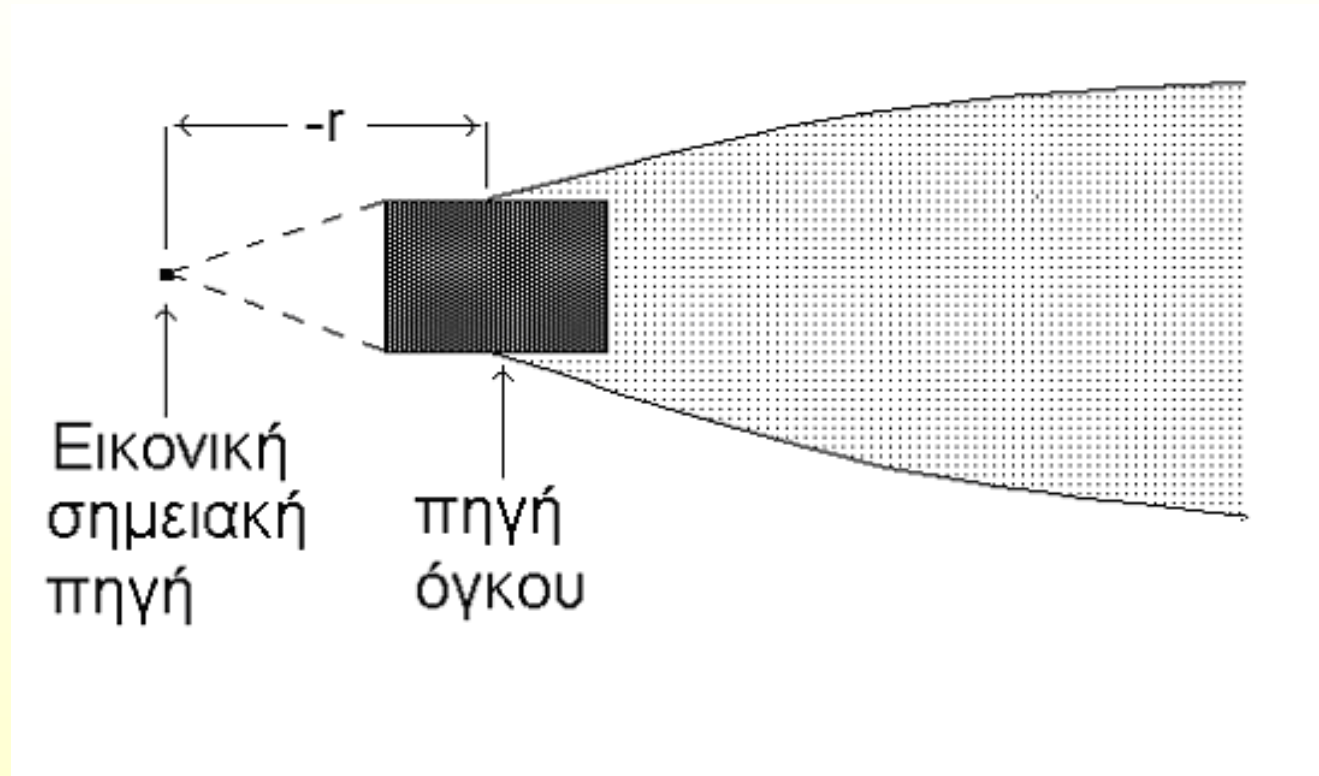
Άπειρη γραμμική πηγή κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου:

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

Ενεργό ύψος $\sim 2m$, πρόβλημα στην επιλογή του ανέμου

Υπολογισμός της διασποράς για τις πρώτες λίγες εκατοντάδες μέτρα → Χρήση ταχύτητας του ανέμου που έχει μετρηθεί σε ύψος περίπου 2 μέτρων πάνω από το έδαφος

Χρήση εικονικής πηγής για την προσομοίωση της διασποράς από γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου.



Μεταβολή του Ανέμου με το Ύψος

• *Μεταβολή του Ανέμου με το Ύψος*



Υπολογισμός διασποράς: Πρέπει να είναι γνωστή η διανυσματική ταχύτητα του ανέμου.

→ *Οριζόντια μεταφορά των ρύπων*

Μέτρο ταχύτητας του ανέμου → *Συντελεστές διασποράς*

→ *Ανύψωση του θυσάνου*

Διεύθυνση & φορά ταχύτητας του ανέμου → *Γεωγραφική περιοχή κατεύθυνσης του θυσάνου*

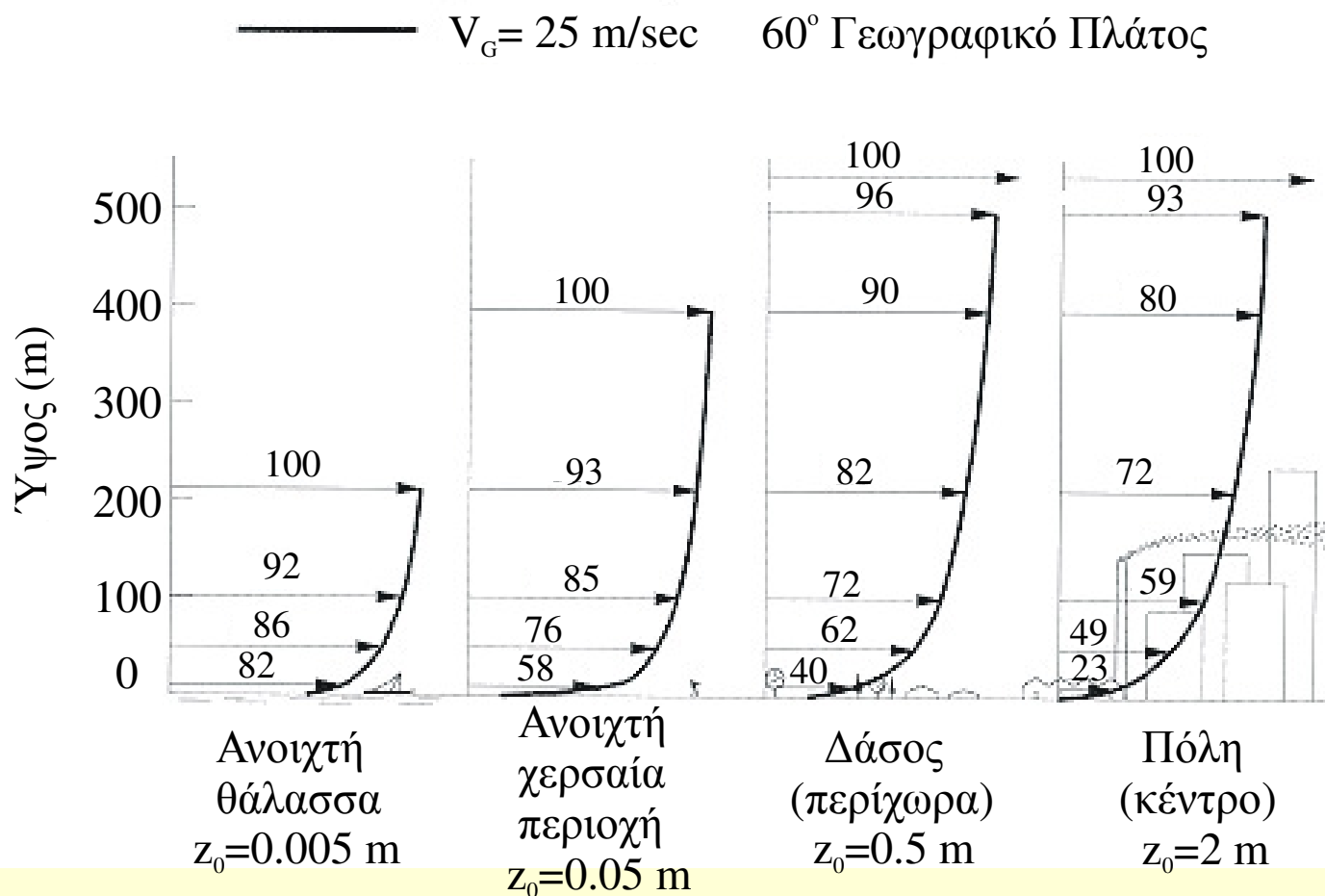
• Αύξηση μέτρου ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (τουλάχιστον στο χαμηλότερο μισό, περίπου, του ΟΣ)

• Έντονη μεταβολή του ανέμου με το ύψος στο στρώμα επιφανείας (χαμηλότερο περίπου 10% του οριακού στρώματος).

Παράγοντες επίδρασης στην αύξηση του μέτρου της ταχύτητας

• Τραχύτητα της υποκείμενης επιφάνειας

• Συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν στην ατμόσφαιρα



Τραχύτητα υποκείμενης επιφάνειας: Καθορίζει το μέγεθος των αυξήσεων με το ύψος και το ύψος του στρώματος που συμβαίνουν αυτές οι μεταβολές

Τραχύτερες επιφάνειες → Μεγαλύτερες μεταβολές, μεγαλύτερο ύψος

Μήκος τραχύτητας z_0 : Το ύψος πάνω από το έδαφος στο οποίο η ταχύτητα του ανέμου γίνεται ίση με το μηδέν.

- Μέτρο της τραχύτητας της επιφάνειας - Εξάρτηση από την κάλυψη του εδάφους.
- Μικρότερο από το φυσικό ύψος των στοιχείων τραχύτητας $z_0 = E/30$, E : μέσο ύψος εμποδίων επιφάνειας $z_0: 10^{-5} - 10 \text{ m}$
- Καθορισμός από τη γεωμετρία της επιφάνειας (κυρίως ύψος και πυκνότητα των στοιχείων τραχύτητας)
- Δεν μεταβάλλεται με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες με εξαίρεση την περίπτωση εύκαμπτων στοιχείων τραχύτητας (π.χ. στάχνα) όπου το μήκος τραχύτητας αλλάζει με την ταχύτητα του ανέμου.
- Μεταβολή για επιφάνειες με βλάστηση που παρουσιάζουν εποχιακή μεταβολή των χαρακτηριστικών τους.

Μέτρηση του ανέμου σε ύψος $h=10$ m → *Αναγωγή μετρήσεων στο ύψος της καμινάδας*

Μη ύπαρξη πειραματικών μετρήσεων → *Χρήση σχέσης*

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p$$

u_s : ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας

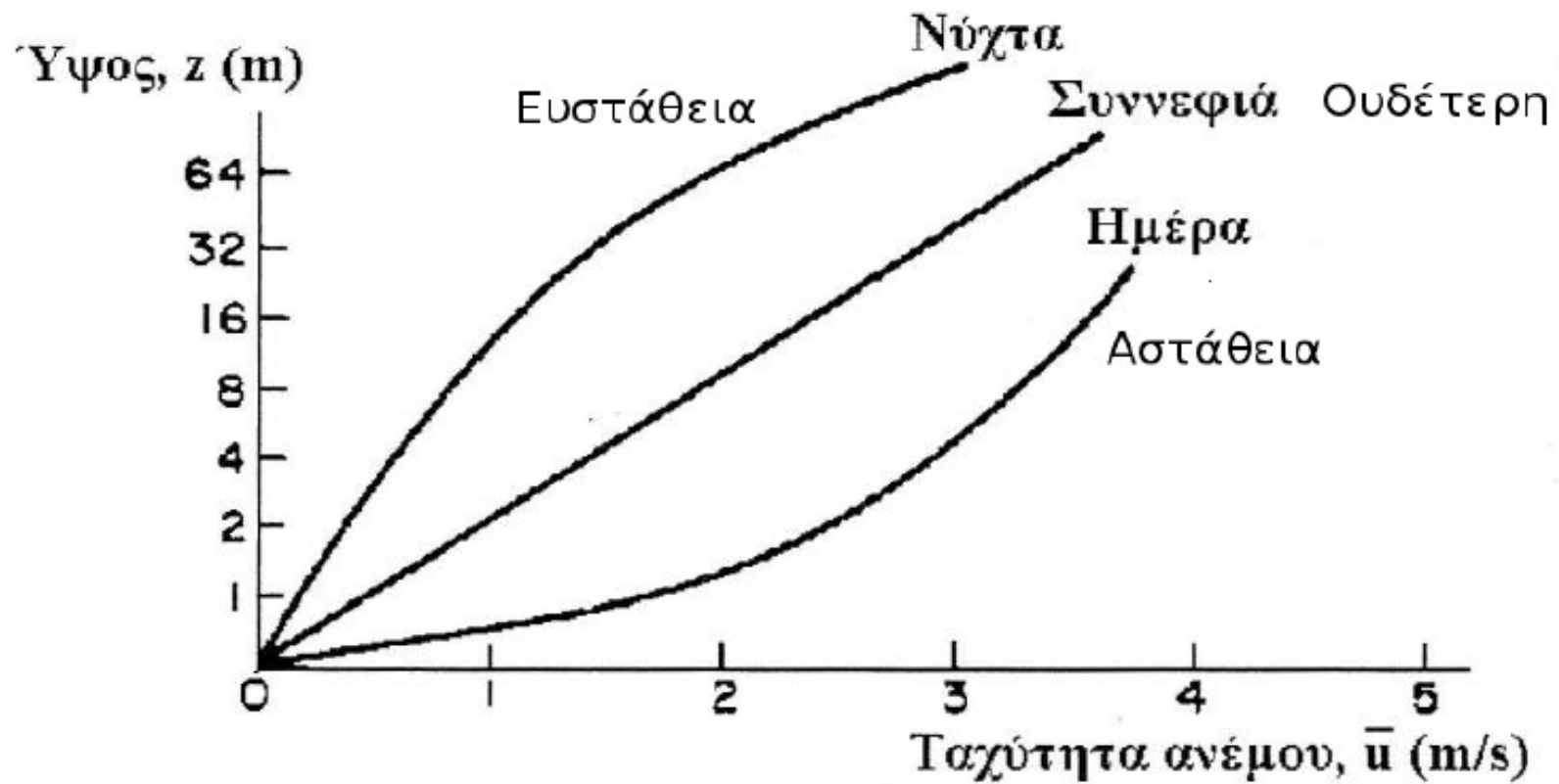
u_{ref} : μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς z_{ref}

h_s : ύψος της καμινάδας

p : εξάρτηση από συνθήκες ευστάθειας και τραχύτητα της επιφάνειας.

Σχετικά καλή ακρίβεια στο στρώμα 10-300 μέτρα.

Κλάση ευστάθειας	Εκθέτης p	
	Ύψαιθρος	Αστικές περιοχές
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.40
F	0.55	0.60



Κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας στο στρώμα επιφανείας για διάφορες κλάσεις ευστάθειας

Διεύθυνση του ανέμου

Μη σημαντική μεταβολή με το ύψος μέσα στο στρώμα επιφανείας εκτός των περιοχών με έντονο ανάγλυφο ή των περιπτώσεων τοπικών συστημάτων

Σημαντική μεταβολή της διεύθυνσης με το ύψος πάνω από το στρώμα επιφανείας

Μεγαλύτερη μεταβολή πάνω από τραχείς επιφάνειες και σε συνθήκες ευστάθειας

Υπολογισμός της μεταβολής της διεύθυνσης του ανέμου με το ύψος

$$\frac{\alpha(z)}{\alpha(h)} = d_1 [1 - \exp(-d_2 z / h)]$$

$\alpha(z)$: Μεταβολή διεύθυνσης του ανέμου σε ύψος z

h : Ύψος ανάμειξης

Εμπειρικοί συντελεστές $d_1=1.58$ και $d_2=1.0$

Παράδειγμα 1

Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι $u_{ref}=2m/s$ σε ύψος $z_{ref}=5m$, να βρεθεί η ταχύτητα του ανέμου u_s σε ύψος καμινάδας $h_s=100m$ για ύπαιθρο και αστική περιοχή για κλάσεις ευστάθειας B, D, και F;

Κλάση Ευστάθειας	Εκθέτης p	
	Ύπαιθρος	Αστικές Περιοχές
B	0.07	0.15
D	0.15	0.25
F	0.55	0.60

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p$$

<i>Κλάση Ευστάθειας</i>	<i>Ύπαιθρος</i>	<i>Αστικές Περιοχές</i>
B:	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.07}$ $u_s = 2.5m / s$	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.15}$ $u_s = 3.1m / s$
D:	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.15}$ $u_s = 3.1m / s$	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.25}$ $u_s = 4.2m / s$
F:	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.55}$ $u_s = 5.2m / s$	$u_s = 2m / s \left(\frac{100 m}{5m} \right)^{0.60}$ $u_s = 12.1m / s$

- Η μετάβαση από ασταθείς σε ευσταθείς συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου της ταχύτητας σε σταθερό ύψος
- Το μέτρο της ταχύτητας σε συγκεκριμένο ύψος είναι μικρότερο στην ύπαιθρο

Παράδειγμα 2

Αν η ταχύτητα του ανέμου είναι $u_{ref}=2m/s$ σε ύψος $z_{ref}=10m$, να βρεθεί για ποιο ύψος καμινάδας h_s η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με $u_s=3m/s$ για ύπαιθρο και αστική περιοχή για κλάσεις ευστάθειας B, C, E, και F;

<i>Κλάση Ευστάθειας</i>	<i>Εκθέτης p</i>	
	<i>Ύπαιθρος</i>	<i>Αστικές Περιοχές</i>
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
E	0.35	0.40
F	0.55	0.60

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \Leftrightarrow h_s = z_{ref} \left(\frac{u_s}{u_{ref}} \right)^{p^{-1}}$$

<i>Κλάση Ευστάθειας</i>	<i>Ύψαιθος</i>	<i>Αστικές Περιοχές</i>
B:	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.07}$ $h_s = 3277.9 m$	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.15}$ $h_s = 149.3 m$
C:	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.10}$ $h_s = 576.7 m$	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.20}$ $h_s = 75.9 m$
E	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.35}$ $h_s = 31.9 m$	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.40}$ $h_s = 27.6 m$
F:	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.55}$ $h_s = 20.9 m$	$h_s = 10 m \left(\frac{3m / s}{2m / s} \right)^{1/0.60}$ $h_s = 19.7 m$

➤ Οι λύσεις για την ύψαιθο και τις κλάσεις ευστάθειας B&C δεν είναι αποδεκτές γιατί η προσαρμογή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος δεν είναι ακριβής για $h_s > 300m$.

➤ Η μετάβαση από ασταθείς σε ευσταθείς συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ύψους όπου το μέτρο της ταχύτητας παρουσιάζει μια σταθερή τιμή