



Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Χημική & Περιβαλλοντική Τεχνολογία

**6^η εργαστηριακή δραστηριότητα:
Διασπορά αέριων ρύπων στην
ατμόσφαιρα**

Νικόλαος Γ. Σαββάκης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΕΛΜΕΠΑ

Ακαδημαϊκό Έτος 2022-2023

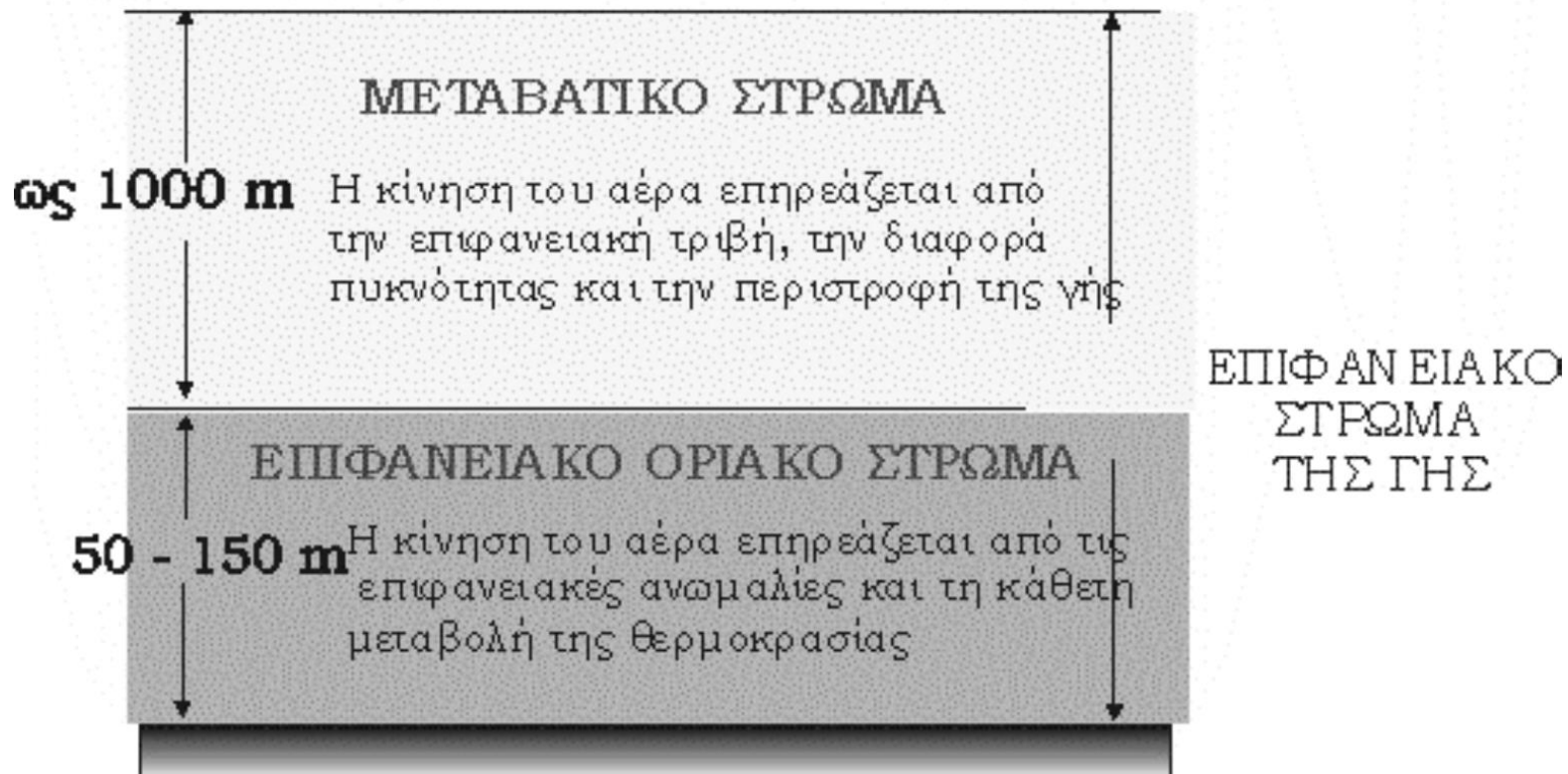
Παράμετροι που επηρεάζουν την τυρβώδη ροή, την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου

- *Η τριβή με το έδαφος*
- *Η κατακόρυφη κατανομή της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα*
- *Η τοπογραφία και η ύπαρξη κτισμάτων*

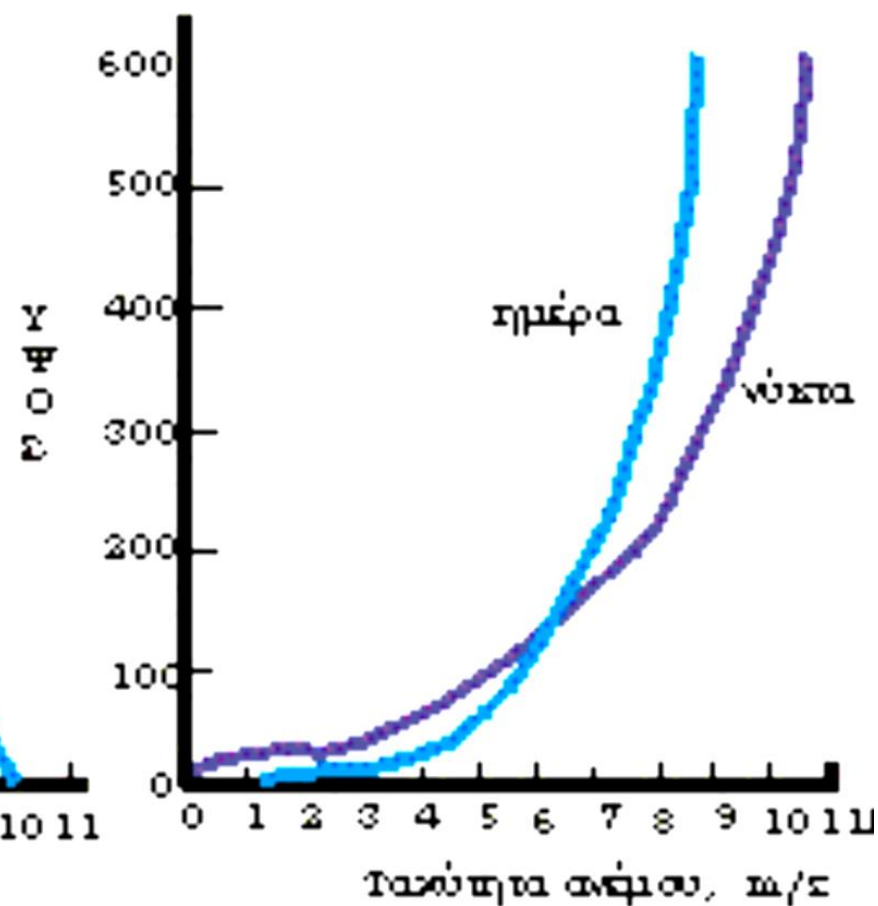
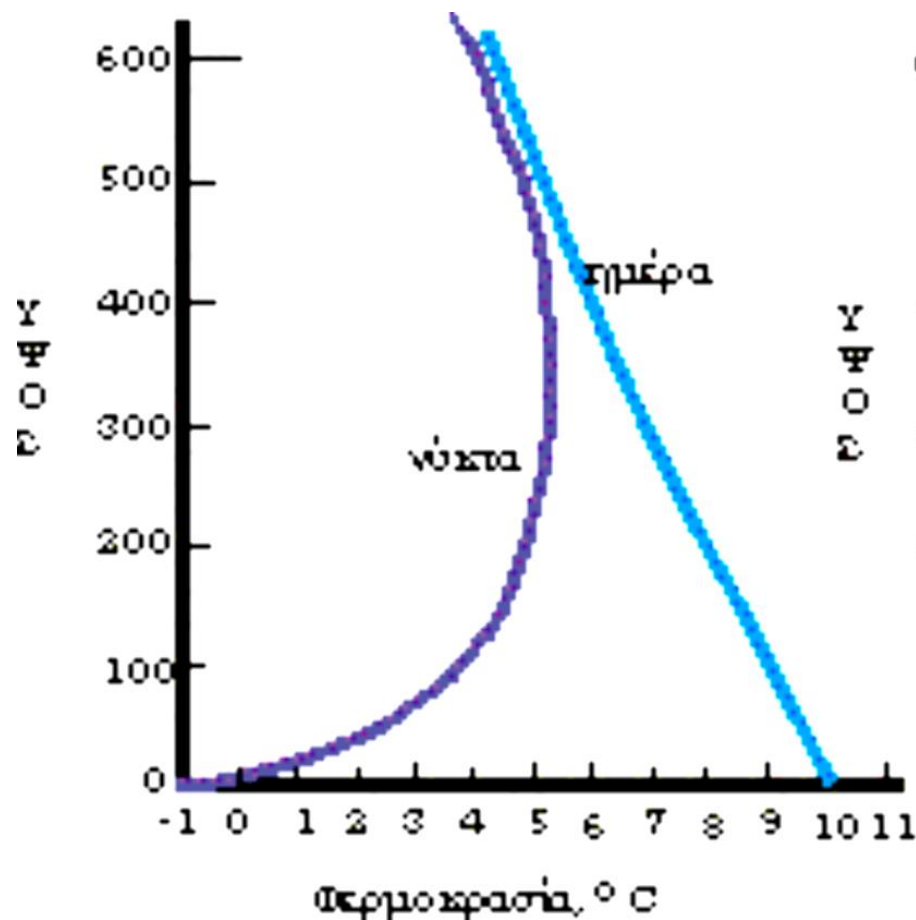


Η τριβή με το έδαφος

ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ



Μεταβολή της ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ και της ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ του ΑΝΕΜΟΥ σε σχέση με την απόσταση από το έδαφος



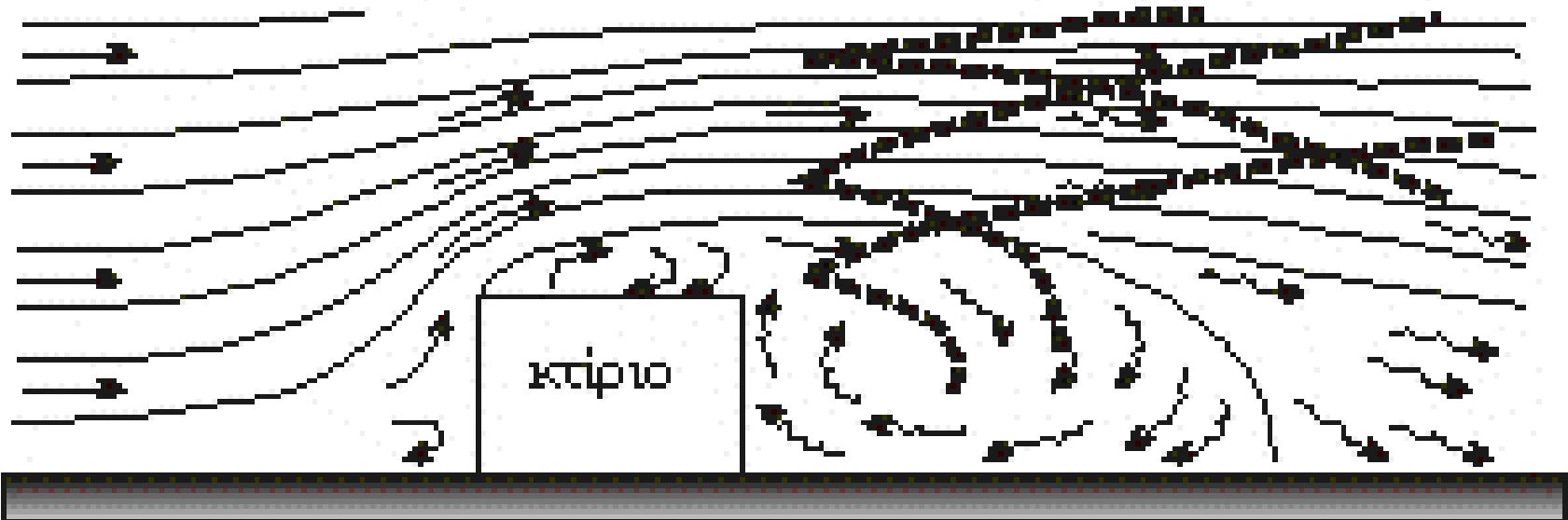
Η τοπογραφία και η ύπαρξη κτισμάτων

γραμμές
ρεύματος
αέρα

περιοχή
μετατόπισης

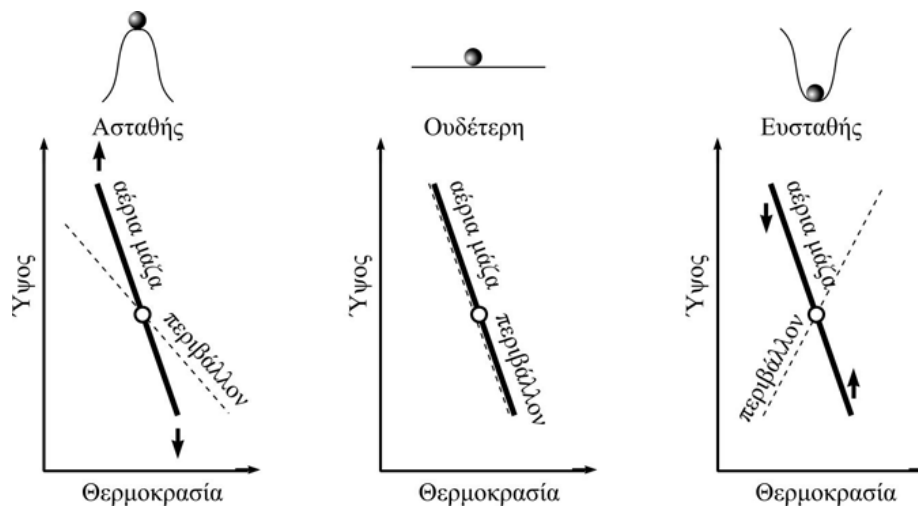
παγές
αερορυμάτων

κόννοι
διασποράς



Ατμοσφαιρική Σταθερότητα

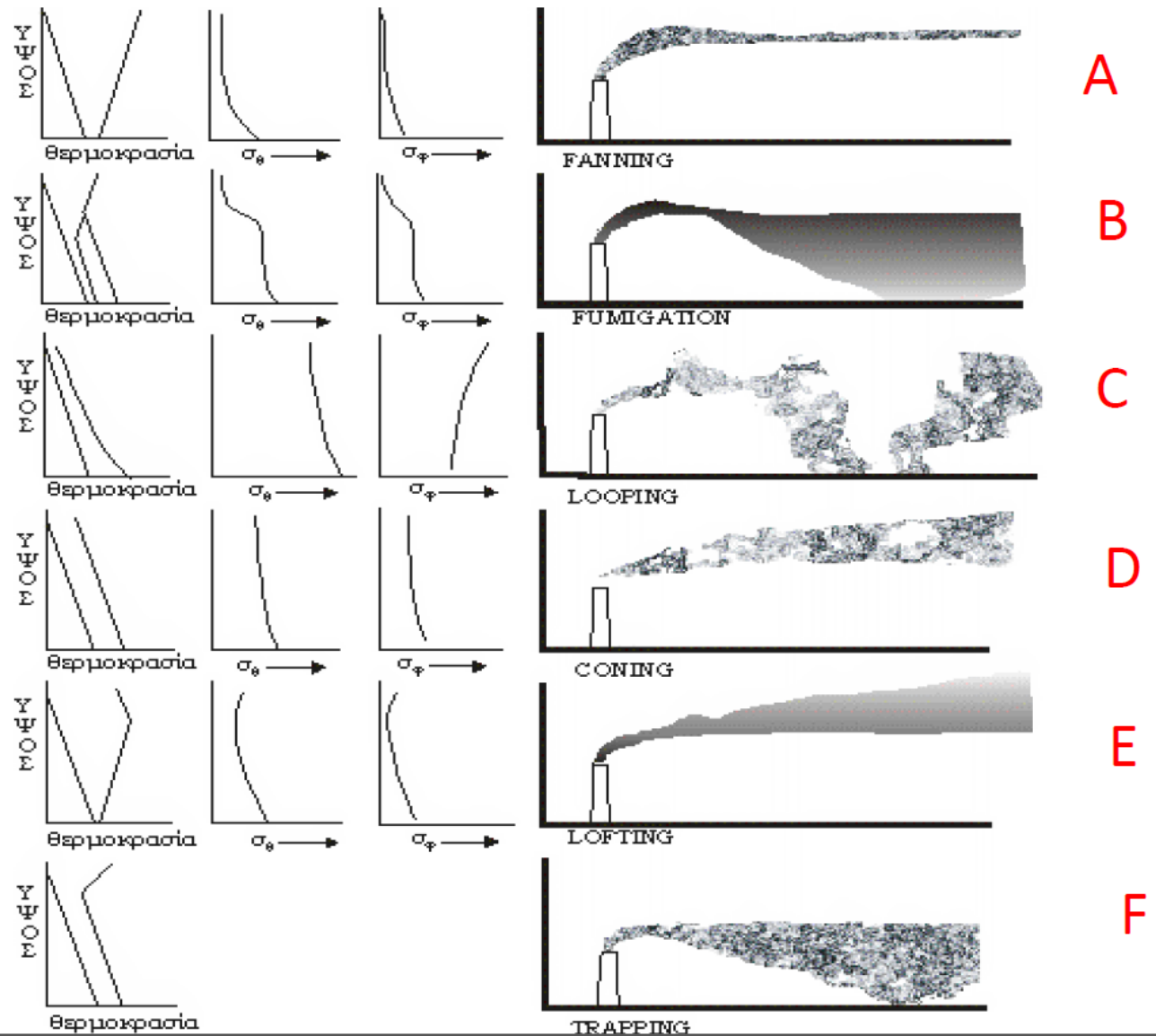
- Στη Μετεωρολογία διακρίνονται τρεις κύριες καταστάσεις σταθερότητας του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος: η ασταθής, η ουδέτερη και η ευσταθής.



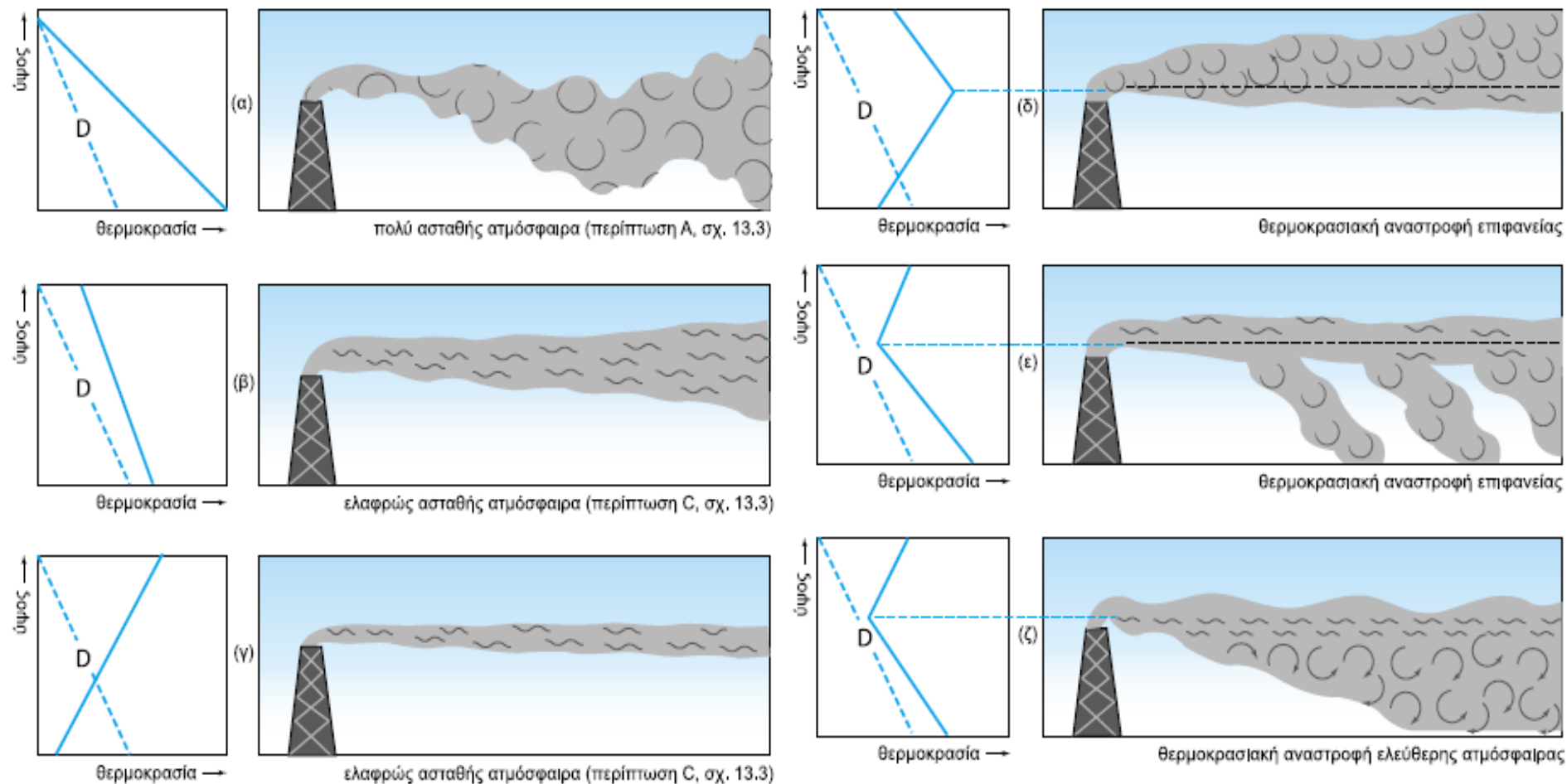
- Στο Σχήμα διακρίνονται οι καταστάσεις αυτές για μία μάζα αέρα που ελευθερώνεται στο ύψος που σημειώνεται με κύκλο και μετατοπίζεται κατακόρυφα.
- Στο συγκεκριμένο αυτό ύψος, η θερμοκρασία της μετακινούμενης αέριας μάζας θεωρείται ίδια με αυτή του περιβάλλοντος.

Διασπορά ρύπων σε σχέση με την ατμοσφαιρική σταθερότητα

Τα σ_θ και σ_ϕ παριστάνουν τις σταθερές αποκλίσεις στις μεταβολές της οριζόντιας και κάθετης διεύθυνσης του ανέμου



Περιπτώσεις διασποράς θυσάνου για διάφορες κατανομές θερμοκρασίας



Ατμοσφαιρική Σταθερότητα

Ο Pasquill το 1961 (Pasquill 1961, Turner 1994) παρουσίασε μία μέθοδο υπολογισμού της ατμοσφαιρικής σταθερότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις άνωσης (ηλιακή ακτινοβολία), και τη σχέση ηλιοφάνειας και συννεφιάς σε συνδυασμό με την επικρατούσα ταχύτητα του ανέμου.

Οι ασταθείς συνθήκες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

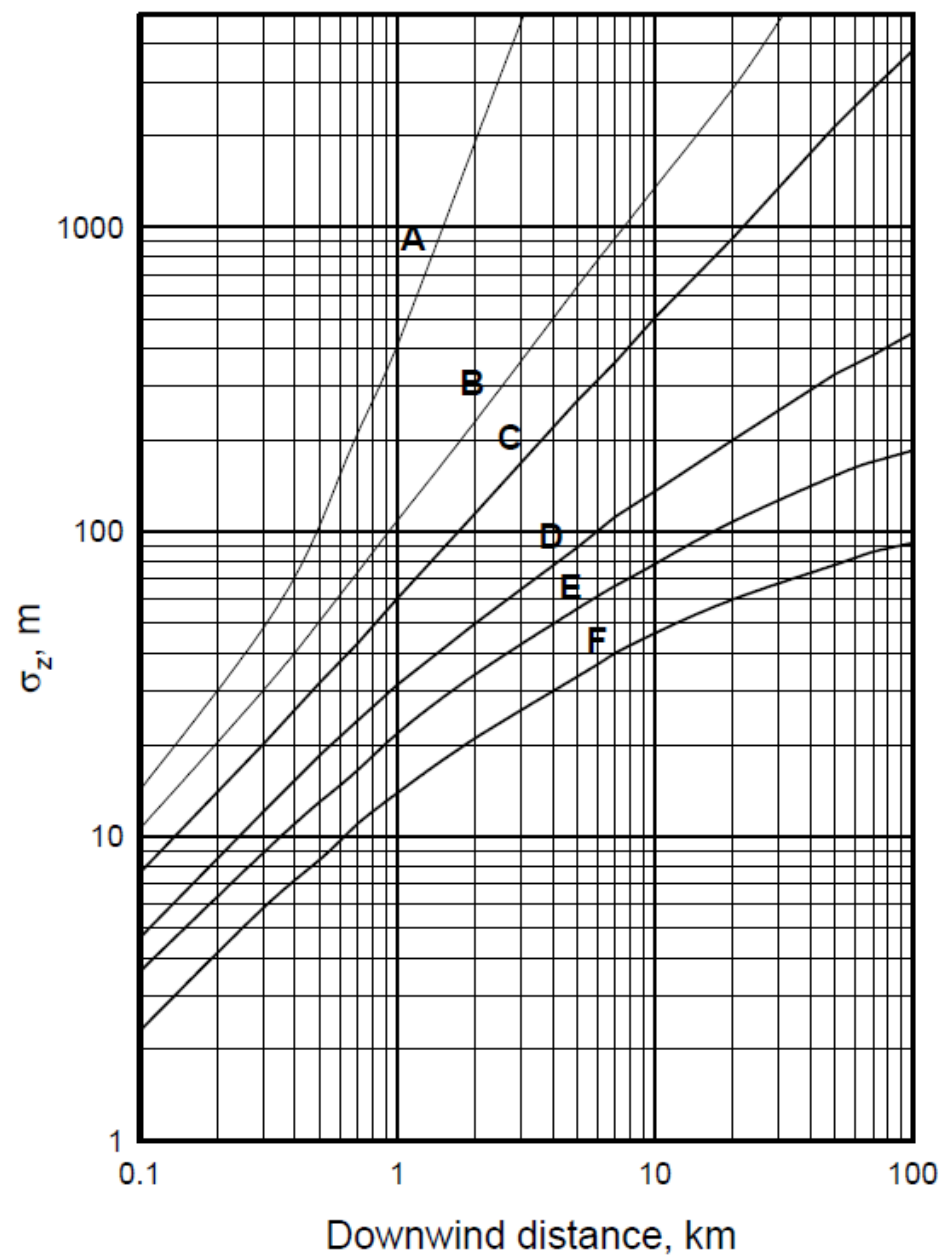
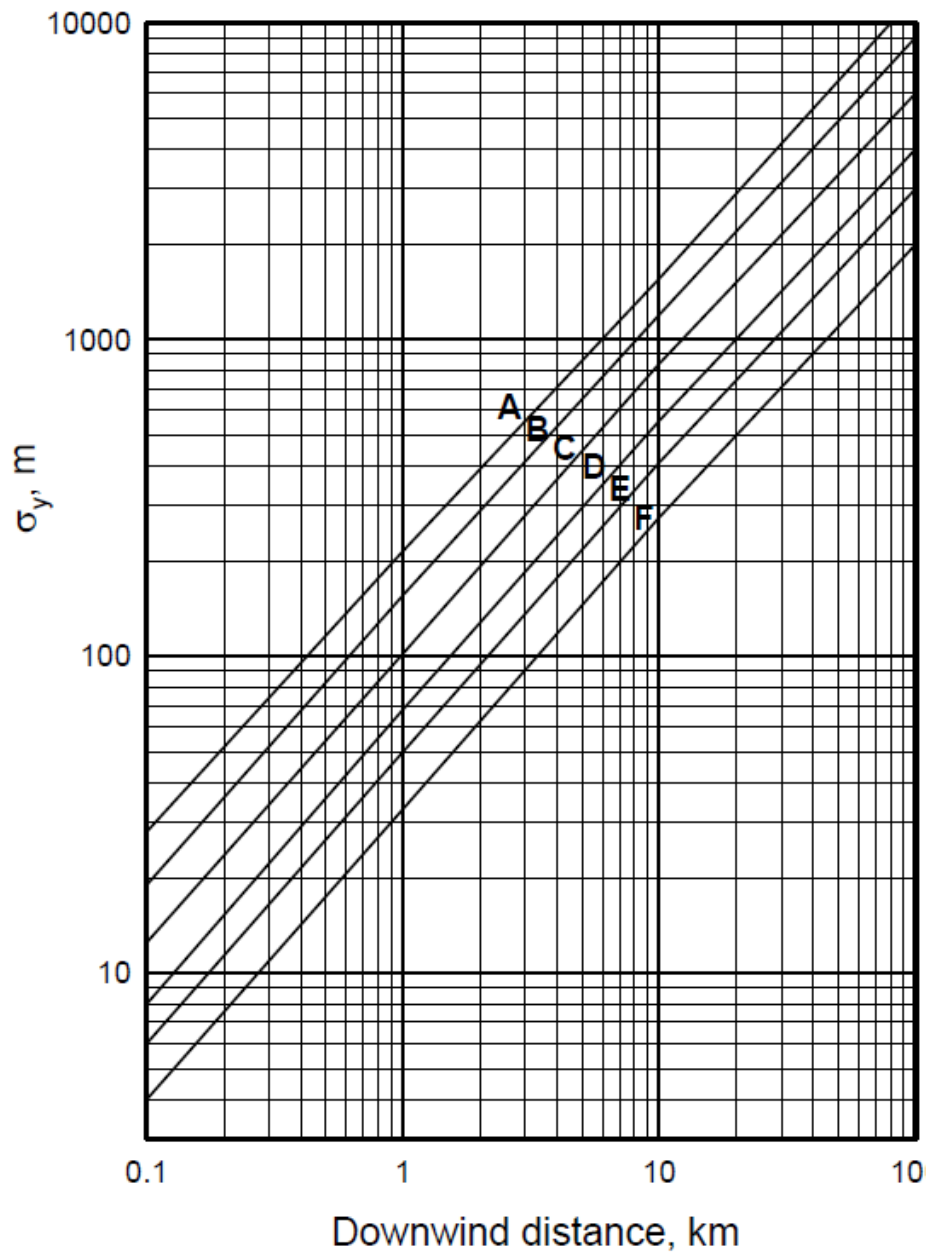
- 1) Ισχυρά ασταθής, τάξη σταθερότητας A.
- 2) Μέτρια ασταθής, τάξη σταθερότητας B.
- 3) Ελαφρώς ασταθής, τάξη σταθερότητας C.

Οι ευσταθείς συνθήκες χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

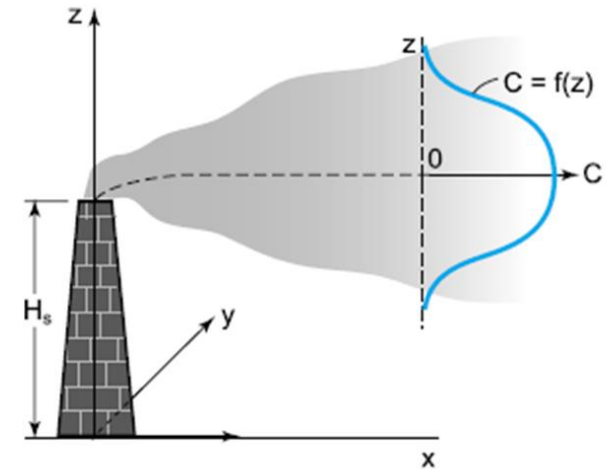
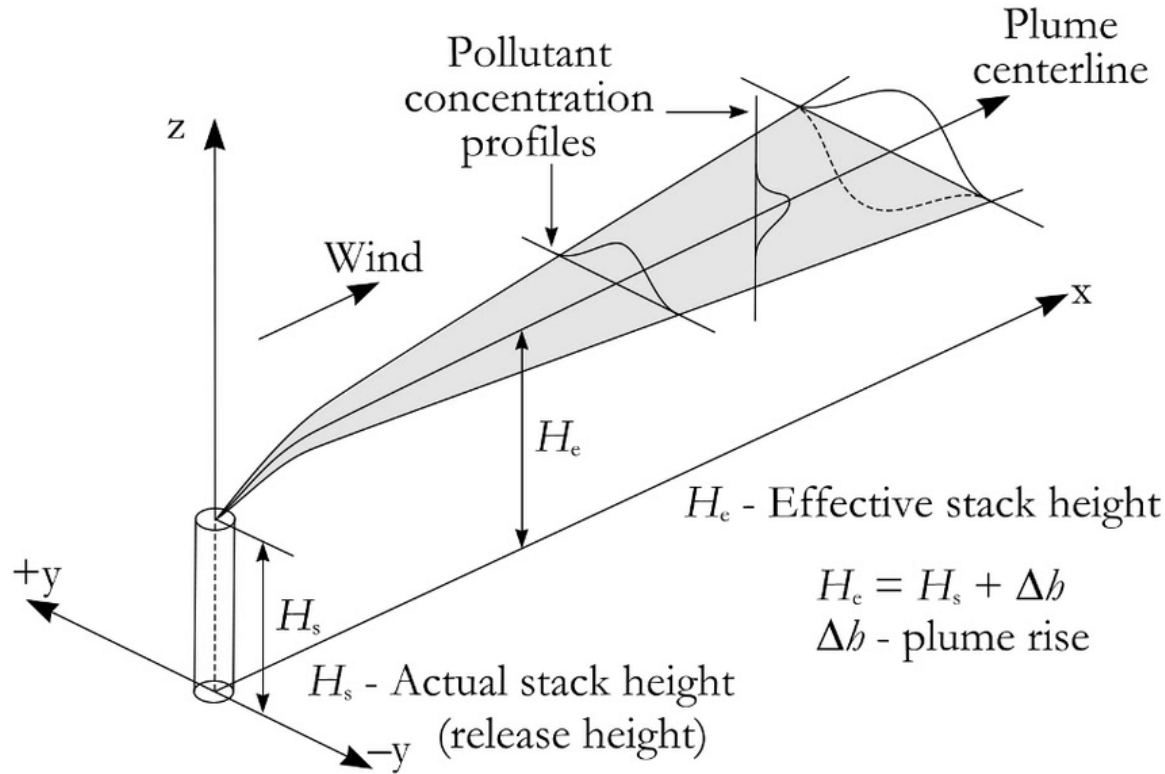
- 1) Ελαφρώς ευσταθής, τάξη σταθερότητας E.
- 2) Μέτρια ευσταθής, τάξη σταθερότητας F.
- 3) Ισχυρά ευσταθής, τάξη σταθερότητας G

Πίνακας 4.1. Ατμοσφαιρική σταθερότητα κατά Pasquill (Pasquill 1961).

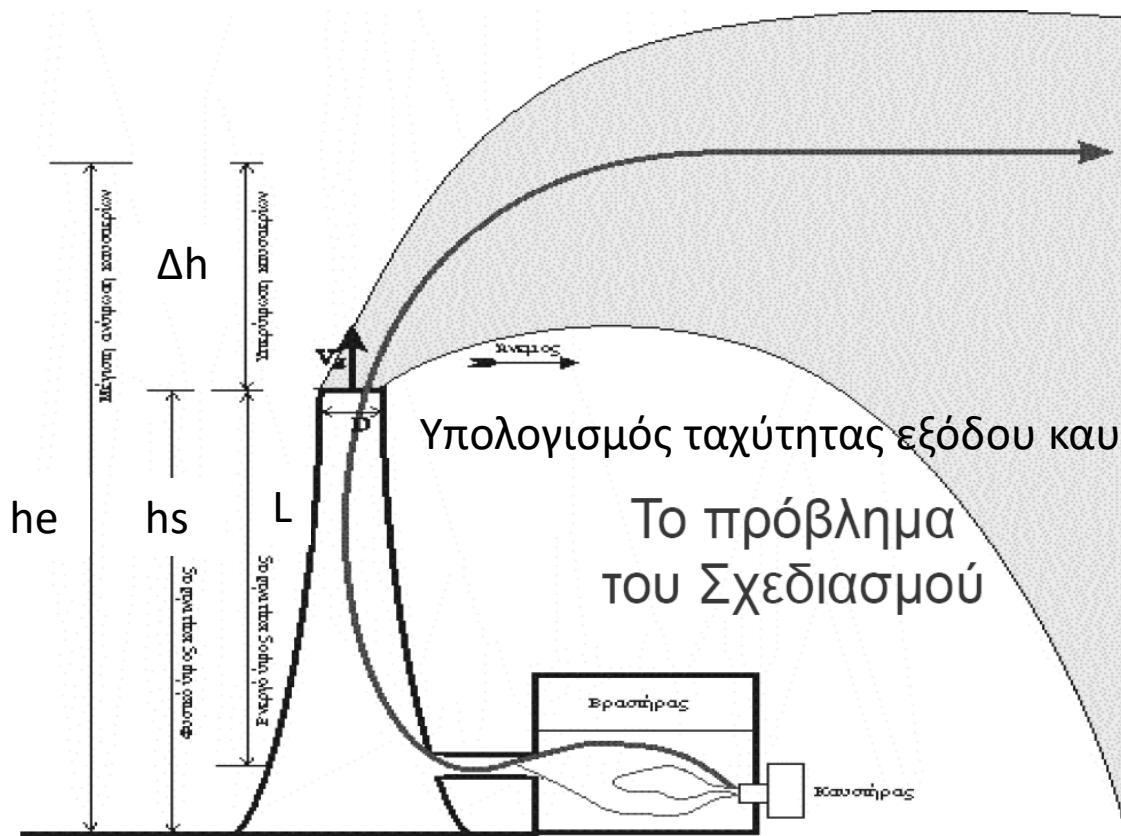
Ταχύτητα Ανέμου ⁺ (m/s)	Σχετική Νέφωση				
	0/8 - 2/8	3/8 - 5/8	6/8 - 8/8	Νύχτα < 3/8	> 4/8
< 2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	D	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D



Κατανομή συγκεντρώσεων και θέση του άξονα του κώνου διασποράς



$$h_e = h_s + \Delta h$$



Εξίσωση HOLLAND (1953)

$$\Delta h = \frac{1,5 * V_s * D_s + 4 * 10^{-5} * Q_h}{U_s}$$

$$\Rightarrow V_s * D_s = \frac{U_s * \Delta h - 4 * 10^{-5} * Q_h}{1,5}$$

Υπολογισμός ταχύτητας εξόδου καυσαερίων

Το πρόβλημα
του Σχεδιασμού

V_s = ταχύτητα εξόδου αερολυμάτων (m/s)

D_s = διάμετρος εξόδου καμινάδας (m)

Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)

U_s = ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας h_s (m/s)

Υπολογισμός ταχύτητας εξόδου καυσαερίων – Υπολογισμός διαμέτρου

$$V_g = \frac{\pi * C * (U_s * \Delta h - 4 * 10^{-5} * Q_h)^2}{9 * Q_g}$$

όπου:

- Q_g = ογκομετρική παροχή απαερίων (m³/sec)
- V_g = ταχύτητα εξόδου απαερίων, m/sec
- C = συντελεστής διαφράγματος (0,85 για μυτερές επιφάνειες με $L/D > 0,5$ και 0,95 για στρογγυλεμένες)
- Δh = υπερύψωση (m)
- Q_h = ρυθμός εκπομπής θερμότητας (cal/s)
- U_s = ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας, (m/s)

$$V_g = \frac{Q_g}{A} * \frac{1}{C} = \frac{Q_g}{\pi * \frac{D^2}{4}} * \frac{1}{C} \Leftrightarrow$$
$$D = 2 \sqrt{\frac{Q_g}{\pi * V_g} * \frac{1}{C}}$$

όπου:

- A = εμβαδόν κάθετης τομής για ταχύτητα, m²
- Q_g = ογκομετρική παροχή απαερίων (m³/sec)
- D = διάμετρος καμινάδας, m
- V_g = ταχύτητα εξόδου απαερίων, m/sec
- C = συντελεστής διαφράγματος (0,85 για μυτερές επιφάνειες με $L/D > 0,5$ και 0,95 για στρογγυλεμένες)

Ελκυσμός καμινάδας

Ελκυσμός Καμινάδας

$$DP = 0.35 \cdot L \cdot P_a \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_g} \right)$$

όπου:

- L = το ενεργό ύψος της καμινάδας, m
- P_a = η βαρομετρική πίεση της ατμόσφαιρας, mbar
- T_a = η εξωτερική θερμοκρασία ($^{\circ}K$)
- T_g = η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων ($^{\circ}K$)
- DP = ελκυσμός καμινάδας, mm/H₂O

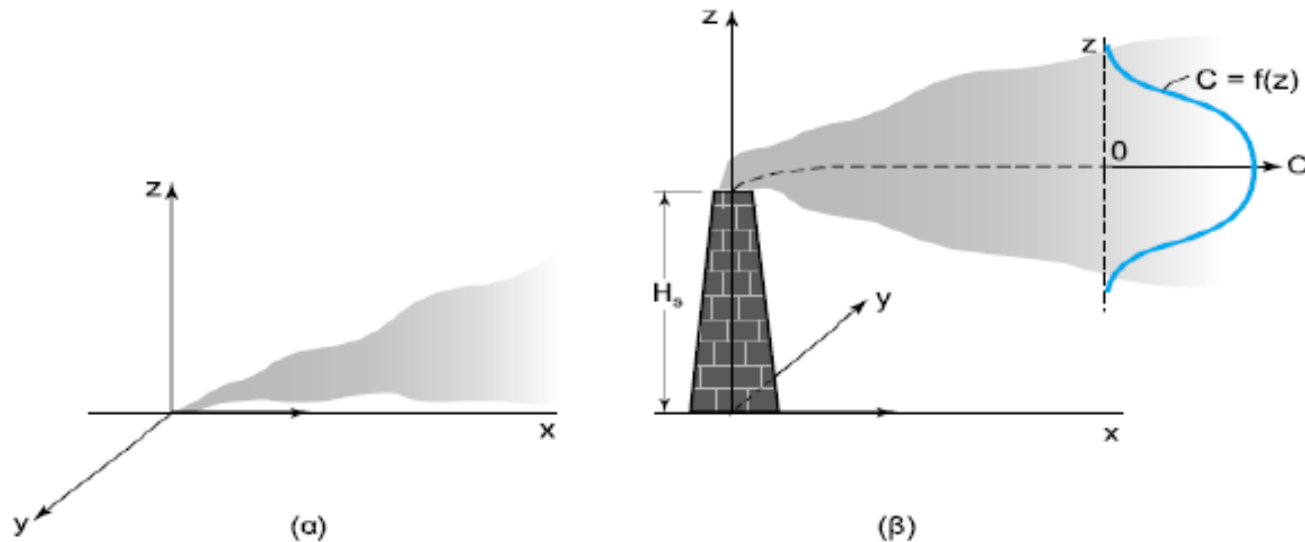
Απώλειες Ενέργειας

$$DP = DL + DF + V_g^2/2g$$

Όπου:

- DL = εσωτερική απώλεια ελκυσμού
- DF = απώλεια λόγω αλλαγής διεύθυνσης ροής των καυσαερίων κατά 90°
- $V_g^2/2g$ = απώλεια λόγω κινητικής ενέργειας των καυσαερίων στην έξοδό τους από την καμινάδα

Μοντέλο Gauss διασποράς καυσαερίων από καμινάδα

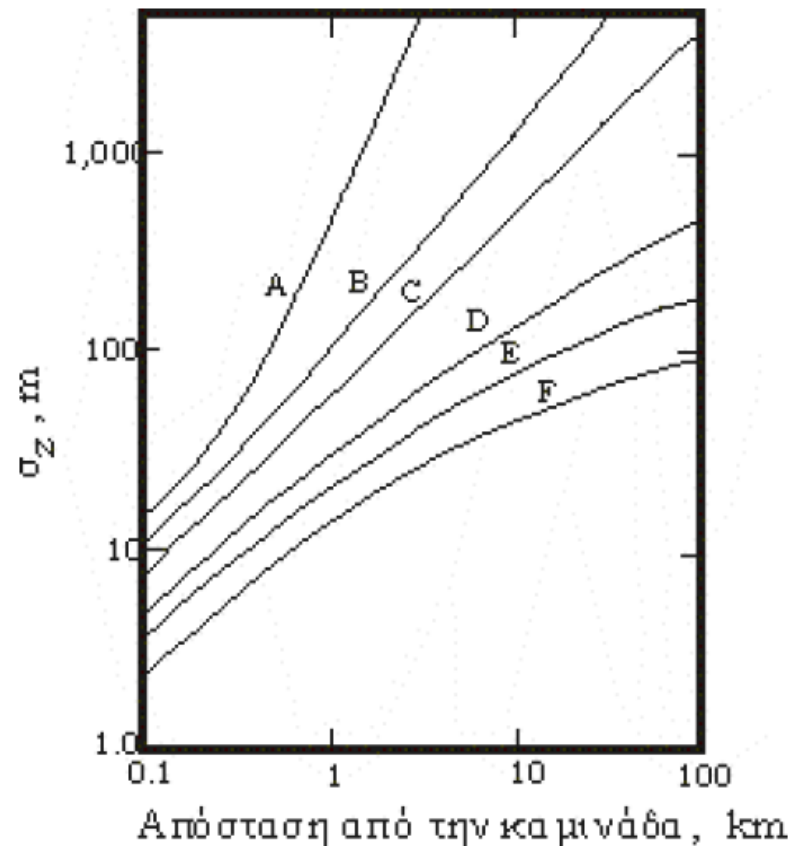
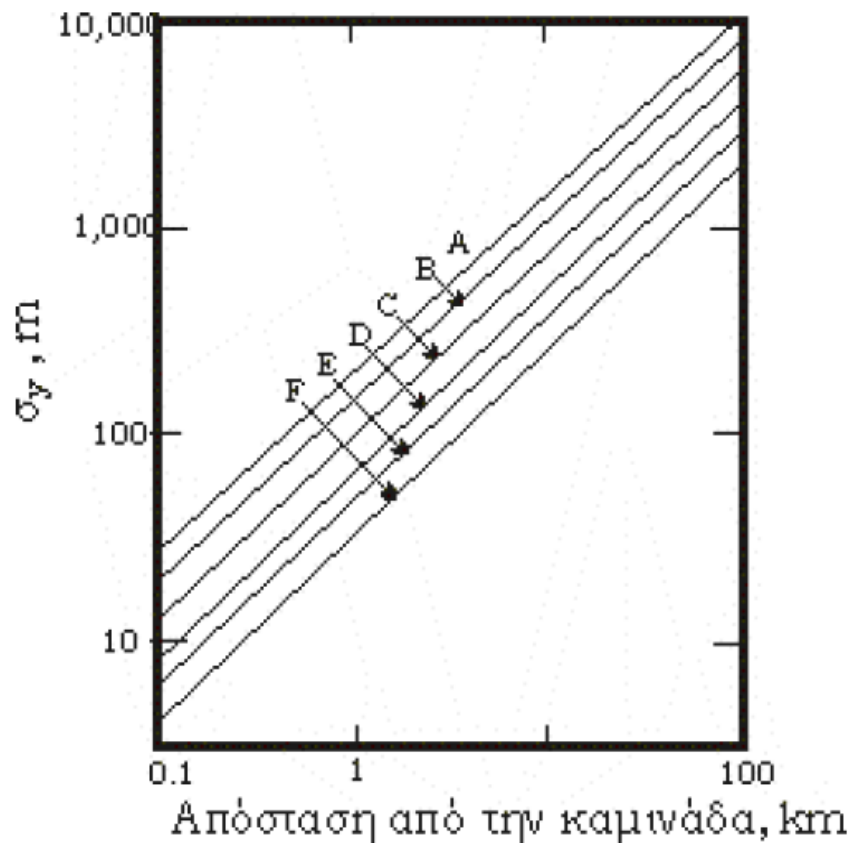


$$C_{x,y,z} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot U} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z - h_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z + h_e}{\sigma_y} \right)^2 \right]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

Παραδοχές για την ισχύ της εξίσωσης GAUSS

1. Συνεχής εκπομπή αερολυμάτων από την πηγή σε ρυθμούς ίσους ή μεγαλύτερους από την διασπορά λόγω του ανέμου ώστε η διάχυση προς την κατεύθυνση της μεταφοράς να είναι αμελητέα.
2. Το υλικό που διαχέεται είναι σταθερό αέριο ή αιώρημα σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 20 μm που παραμένει σε αιώρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών των αερολυμάτων ή με τα συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα και η παρουσία σωματιδίων με διάμετρο πιο μεγάλη των 20 μm μπορούν να αλλάξουν σημαντικά το μοντέλο διασποράς.
3. Όλη η μάζα των αερολυμάτων παραμένει στον κώνο διάχυσης και δεν έχουμε απώλεια υλικού λόγω προσρόφησης ή χημικής αντίδρασης κατά την επαφή με το έδαφος.
4. Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου παραμένουν σταθερές σ' όλο το μήκος της διασποράς.
5. Η κατανομή των συγκεντρώσεων είναι κανονική και στο οριζόντιο και στο κάθετο επίπεδο.
6. Τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας είναι σταθερά σ' όλο το μήκος της διασποράς και τα σ_y και σ_z είναι συνάρτηση της απόστασης από την καμινάδα.

Συντελεστές διασποράς σ_x , σ_y και σ_z σε συνάρτηση με την απόσταση από την καμινάδα

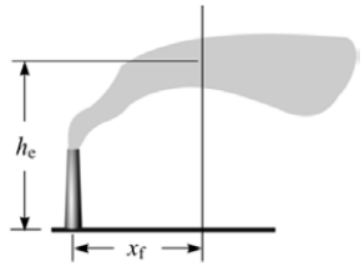


Τύπος διασποράς	$\sigma_y = a \cdot x^p$		$\sigma_z = b \cdot x^q$		Εύρος εφαρμογής για το σ_z , χ σε m
	a	p	b	q	
A	0,55202	0,85927	0,07791	1,1148	100-300
			0,01036	1,4787	300-500
			0,000218	2,1057	500-3000
B	0,38267	0,87024	0,1186	0,9711	100-500
			0,05419	1,1028	500-20000
C	0,22759	0,88812	0,11486	0,9074	100-20000
D	0,16209	0,87944	0,09261	0,8529	100-500
			0,25616	0,6727	500-3000
			0,52179	0,6020	3000-20000
E	0,11826	0,88167	0,08182	0,8178	100-500
			0,22387	0,6575	500-3000
			0,74895	0,5052	3000-20000
F	0,07948	0,88144	0,05498	0,8101	100-500
			0,1549	0,6485	500-3000
			0,92323	0,4234	3000-20000

Το φαινόμενο DOWNWASH

- ✓ Μία διόρθωση, επομένως, του ύψους της καμινάδας δίνεται από τις εξισώσεις του Briggs (Briggs 1975, Turner 1994). Η διόρθωση αυτή γίνεται με την εμπειρική αφαίρεση ενός ποσού από το φυσικό ύψος της καμινάδας.
- ✓ Έτσι το διορθωμένο ύψος, h_s' [m], της καμινάδας, υπολογίζεται από το φυσικό της ύψος, h_s [m], ως συνάρτηση της ταχύτητας εξόδου του αερίου, v_s [m], της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της καμινάδας, u_s [m], και της εσωτερικής διαμέτρου, d_s [m], της καμινάδας.
- ✓ Η διόρθωση γίνεται μόνο στην περίπτωση που $(v_s/u_s) < 1.5$

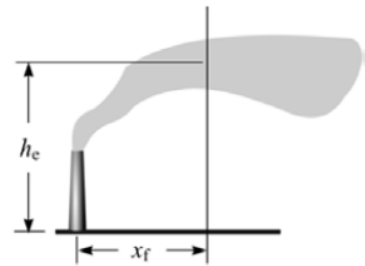
$$h_s' = h_s + 2 d_s \left(\frac{v_s}{u_s} - 1.5 \right)$$



Ανύψωση λόγω Άνωσης ή λόγω Ορμής

$$(T_s - T_a) \geq \Delta T_c$$

Ο υπολογισμός της κρίσιμης διαφοράς ΔT_c [K], γίνεται από εμπειρικές εξισώσεις



Ανύψωση λόγω Άνωσης ή λόγω Ορμής

με F_b συμβολίζεται
η παράμετρος άνωσης

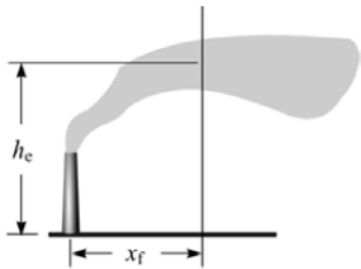
Με $(\partial\theta/\partial z)$ [K/m], συμβολίζεται
η αλλαγή της θερμοκρασίας
με το ύψος (εμπειρικά παίρνει
την τιμή 0.020 K/m για
σταθερότητα E, και την τιμή
0.035 για σταθερότητα F)

Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες (D) Συνθήκες	$\Delta T_c = 0.0297 T_s \left(\frac{v_s}{d_s^2} \right)^{1/3}$	όταν $F_b < 55$	(4.21)
---	--	-----------------	--------

Ουδέτερες (D) Συνθήκες	$\Delta T_c = 0.00575 T_s \left(\frac{v_s}{d_s^2} \right)^{1/3}$	όταν $F_b \geq 55$	(4.22)
---------------------------	---	--------------------	--------

$$\text{όπου } F_b = g v_s d_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{4 T_s} \right) \quad (4.23)$$

Ευσταθείς Συνθήκες (E,F)	$\Delta T_c = 0.019582 T_s v_s \sqrt{s}$	και $s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial\theta}{\partial z}$	(4.24)
-----------------------------	--	---	--------



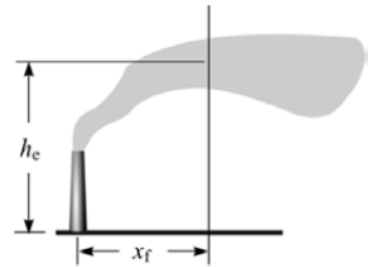
Σημείο καμπής

Ως σημείο καμπής ενός νέφους ορίζεται η απόσταση, x_f [m], από την πηγή, στην οποία το νέφος έχει λάβει τη μέγιστη ανύψωσή του.

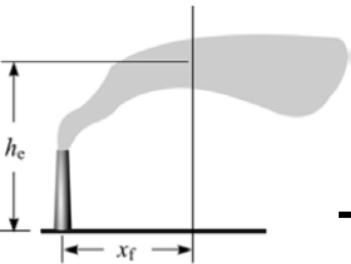
- ο υπολογισμός της ανύψωσης χωρίζεται σε δύο τμήματα:
- βαθμιαία ανύψωση ως το σημείο καμπής, και
 - τελική ανύψωση (η ανύψωση μετά το σημείο καμπής).

Οι υπολογισμοί είναι καθαρά εμπειρικοί και διαχωρίζονται, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και με το αν κυριαρχεί ως φαινόμενο, η άνωση ή η ορμή.

Σημείο καμπής



		Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)	Ευσταθείς Συνθήκες (E,F)
Α ν	$F_b < 55$	$x_f = 49 F_b^{5/8}$ (4.25)	$x_f = 2.0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}}$ (4.27)
ω σ η	$F_b \geq 55$	$x_f = 119 F_b^{2/5}$ (4.26)	όπου $s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$
Ο	$F_b = 0$	$x_f = \frac{4d_s (v_s + 3u_s)^2}{v_s u_s}$ (4.28)	
ρ μ ή	$F_b < 55$	$x_f = 49 F_b^{5/8}$ (4.29)	$x_f = 0.50 \pi \frac{u_s}{\sqrt{s}}$ (4.31)
	$F_b \geq 55$	$x_f = 119 F_b^{2/5}$ (4.30)	



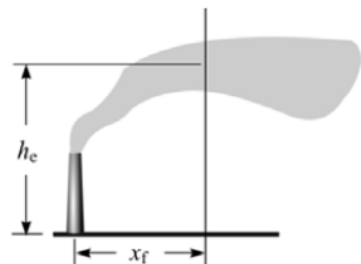
Υπολογισμός βαθμιαίας και τελικής ανύψωσης

Έχοντας υπολογίσει το σημείο καμπής, μπορεί να υπολογιστεί η βαθμιαία ανύψωση του νέφους πριν το σημείο καμπής και η τελική του ανύψωση μετά το σημείο καμπής.

	Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)		Ευσταθείς Συνθήκες (E, F)
Βαθμιαία ανύψωση (ανύψωση ως το σημείο καμπής)			
Α ν ω σ η	$h_e = h'_s + 1.60 \frac{(F_b x^2)^{1/3}}{u_s} \quad (4.32)$		
Ο ρ μ ή	$h_e = h'_s + 1.60 \left(\frac{3F_m x}{\beta_j^2 u_s^2} \right)^{1/3} \quad (4.33)$	$h_e = h'_s + \left(3F_m \frac{\sin(x\sqrt{s}/u_s)}{\beta_j^2 u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \quad (4.34)$	

$$\text{όπου } \beta_j = \frac{1}{3} + \frac{u_s}{v_s}, \quad s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad F_m = v_s^2 d_s^2 \left(\frac{T_a}{4T_s} \right) \quad (4.35)$$

Υπολογισμός βαθμιαίας και τελικής ανύψωσης



	Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)	Ευσταθείς Συνθήκες (E, F)
	Τελική ανύψωση (ανύψωση μετά το σημείο καμπής)	
Α ν ω σ η	$F_b < 55 \quad h_e = h'_s + 21.425 \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \quad (4.36)$	$h_e = h'_s + 2.6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} \quad (4.38)$
	$F_b \geq 55 \quad h_e = h'_s + 38.710 \frac{F_b^{3/5}}{u_s} \quad (4.37)$	
Ο ρ μ ή	$h_e = h'_s + 3d_s \frac{v_s}{u_s} \quad (4.39)$	$h_e = h'_s + 3d_s \frac{v_s}{u_s} \quad (4.40)$
		$h_e = h'_s + 1.5 \left(\frac{F_m}{u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \quad (4.41)$
		Επιλέγεται η μικρότερη τιμή των δύο*

* Επιλέγεται η μικρότερη τιμή από τις δύο, επειδή η ανύψωση σε σταθερές συνθήκες δε μπορεί να υπερβαίνει την ανύψωση σε ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες.

Παράδειγμα υπολογισμού βαθμιαίας και τελικής ανύψωσης νέφους αέριων ρύπων

Υπολογίστε την ανύψωση αέριου νέφους ρύπων, που εκπέμπονται από καμινάδα, ως συνάρτηση της απόστασης από την πηγή. Πρόκειται για μια αγροτική περιοχή κατά τη διάρκεια της νύχτας. Δίνονται τα παρακάτω δεδομένα:

- Σχετική νέφωση : 5/8
- Ταχύτητα ανέμου (10m), u_{ref} : 2 m/s
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_a : 280 K
- Θερμοκρασία εξόδου καμινάδας, T_s : 400 K
- Διάμετρος καμινάδας, d_s : 1 m
- Ύψος καμινάδας, h_s : 25 m
- Ταχύτητα εξερχόμενου αερίου, v_s : 4 m/s

Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας (25 m) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση με εκθέτη $p = 0.55$

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

Θεωρητικό υπόβαθρο και βασικοί όροι

Λύση

Εφόσον η εκπομπή συμβαίνει νύχτα με σχετική νέφωση 5/8 και ταχύτητα ανέμου στα 10 m ίση με 2 m/s, από τον παρακάτω πίνακα, προσδιορίζονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά Pasquill ως 'ευσταθείς τύπου F'.

Ταχύτητα Ανέμου ⁺ (m/s)	Σχετική Νέφωση				
	Ημέρα			Νύχτα	
	0/8 - 2/8	3/8 - 5/8	6/8 - 8/8	< 3/8	> 4/8
< 2	A	A - B	B	F	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	D	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

⁺ σε ύψος 10 m.

1. Προετοιμασία δείγματος

Λύση

Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της καμινάδας (25 m) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση με εκθέτη $p = 0.55$

$$u_s = u_{\text{ref}} \left(\frac{h_s}{z_{\text{ref}}} \right)^p = 3.31 \text{ m/s}$$

Εφόσον ο λόγος $(v_s/u_s) = 1.21 < 1.5$, απαιτείται διόρθωση του φυσικού ύψους της καμινάδας ως

$$h'_s = h_s + 2 d_s \left(\frac{v_s}{u_s} - 1.5 \right) = 24.4 \text{ m}$$

Κλάση ευστάθειας	Εκθέτης p (εξίσωση 7.1) στην ύπαιθρο	Εκθέτης p (εξίσωση 7.1) σε 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

Λύση

Ανύψωση λόγω Άνωσης ή λόγω Ορμής

Το κριτήριο για την επιλογή του αν η ανύψωση του νέφους γίνεται λόγω άνωσης ή λόγω ορμής δίνεται από την Εξίσωση $(T_s - T_a) \geq \Delta T_c$.

Για ευσταθείς συνθήκες, από τον παρακάτω πίνακα Εξ.(4.24)

$$\Delta T_c = 0.019582 T_s v_s \sqrt{s} = 1.097 \quad \text{για } s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0.00123$$

Ασταθείς (A,B,C)	$\Delta T_c = 0.0297 T_s \left(\frac{v_s}{d_s^2} \right)^{1/3}$	όταν $F_b < 55$	(4.21)
---------------------	--	-----------------	--------

ή Ουδέτερες (D) Συνθήκες	$\Delta T_c = 0.00575 T_s \left(\frac{v_s}{d_s^2} \right)^{1/3}$	όταν $F_b \geq 55$	(4.22)
--------------------------------	---	--------------------	--------

$$\Delta T_c = 1.097$$

$$\text{όπου } F_b = g v_s d_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{4 T_s} \right) \quad (4.23)$$

Ευσταθείς Συνθήκες (E,F)	$\Delta T_c = 0.019582 T_s v_s \sqrt{s}$	και $s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$	(4.24)
-----------------------------	--	--	--------

Λύση

Ανύψωση λόγω Άνωσης ή λόγω Ορμής

Επομένως, εφόσον $(T_s - T_a) = 120 \text{ K} \gg \Delta T_c = 1.097$, κυριαρχεί η άνωση

Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)				Ευσταθείς Συνθήκες (E,F)	
Α	$F_b < 55$	$x_f = 49 F_b^{5/8}$	(4.25)	$x_f = 2.0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}}$	(4.27)
ν					
ω	$F_b \geq 55$	$x_f = 119 F_b^{2/5}$	(4.26)	όπου $s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z}$	
σ					
η					
Ο	$F_b = 0$	$x_f = \frac{4d_s(v_s + 3u_s)^2}{v_s u_s}$	(4.28)		
ρ	$F_b < 55$	$x_f = 49 F_b^{5/8}$	(4.29)	$x_f = 0.50 \pi \frac{u_s}{\sqrt{s}}$	(4.31)
μ					
ή	$F_b \geq 55$	$x_f = 119 F_b^{2/5}$	(4.30)		

Σημείο καμπής

Το σημείο καμπής του νέφους, x_f (m), βρίσκεται από την εξίσωση:

$$x_f = 2.0715 \frac{u_s}{\sqrt{s}} = 195.8 \text{ m}$$

Λύση

Βαθμιαία και Τελική Ανύψωση Νέφους

Έχοντας υπολογίσει το σημείο καμπής, μπορεί να υπολογιστεί η βαθμιαία ανύψωση

$$h_e = h'_s + 1.60 \frac{(F_b x^2)^{1/3}}{u_s}$$

όπου $F_b = g v_s d_s \left(\frac{T_s - T_a}{4T_s} \right) = 2.94 \text{ m}^4/\text{s}^3$

και η τελική ανύψωση

$$h_e = h'_s + 2.6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3} = 47.8 \text{ m}$$

Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)	Ευσταθείς Συνθήκες (E, F)
Βαθμιαία ανύψωση (ανύψωση ως το σημείο καμπής)	
A v ω σ η	$h_e = h'_s + 1.60 \frac{(F_b x^2)^{1/3}}{u_s}$ (4.32)

Ασταθείς (A,B,C) ή Ουδέτερες Συνθήκες (D)	Ευσταθείς Συνθήκες (E, F)
Τελική ανύψωση (ανύψωση μετά το σημείο καμπής)	
A v ω σ η	$h_e = h'_s + 2.6 \left(\frac{F_b}{u_s s} \right)^{1/3}$ (4.38)

Παράδειγμα υπολογισμού βαθμιαίας και τελικής ανύψωσης νέφους αέριων ρύπων

