

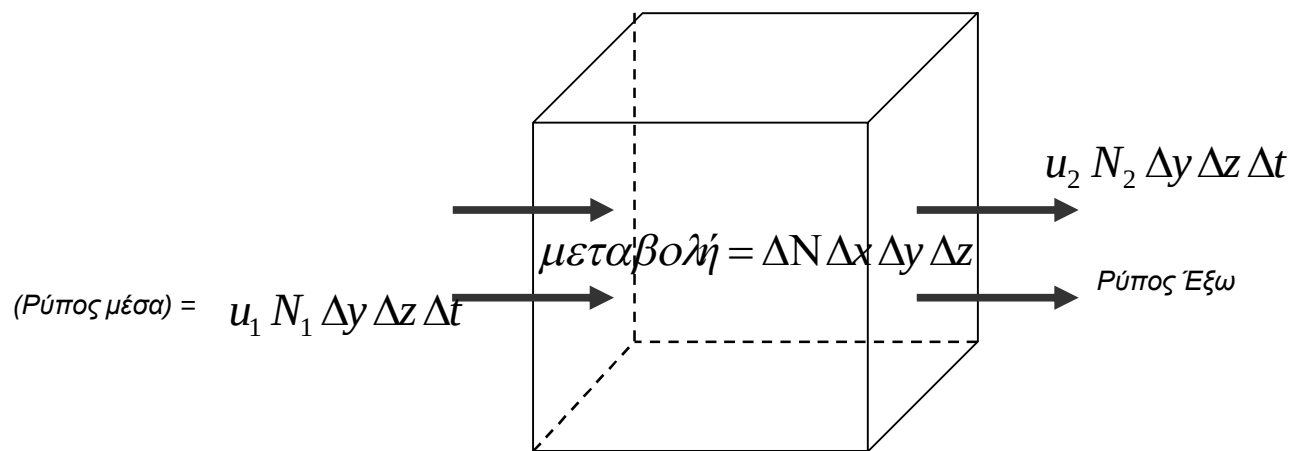
Ατμοσφαιρική Τυρβώδης Διάχυση

- Η μαθηματική περιγραφή της κατανομής των διαφόρων χημικών ενώσεων στην Ατμόσφαιρα μετά την εκπομπή τους είναι μια από τις εφαρμογές των ατμοσφαιρικών μοντέλων. Το πρόβλημα που πρέπει να λύσουμε είναι να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση ρύπων σε σημεία που μας ενδιαφέρει όταν γνωρίζουμε την εκπομπή των ρύπων.
- Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί ντετερμινιστικά, στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα για την επίλυση του προβλήματος της διασποράς των ρύπων στην Ατμόσφαιρα. Αριθμητικές και αναλυτικές λύσεις έχουν εφαρμοστεί για τα ντετερμινιστικά μοντέλα.
- Αριθμητικές λύσεις έχουν μεγαλύτερη εφαρμογή αλλά και χρειάζονται πλήθος δεδομένων και χρειάζονται μεγάλο υπολογιστικό χρόνο.
- Τα στοχαστικά Γκαουσιανά μοντέλα είναι τα πλέον εύχρηστα που χρησιμοποιούνται ευρέως για το διαχειριστικό έλεγχο των ρύπων.

Μέθοδοι του Euler και του Lagrange

- Υπάρχουν δύο γενικοί τρόποι περιγραφής της τυρβώδους διάχυσης στην Ατμόσφαιρα, η μέθοδος του Euler και η μέθοδος του Lagrange.
- Με τη μέθοδο του Euler η συμπεριφορά του συστήματος εξετάζεται σε ένα σταθερό σύστημα συντεταγμένων και είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος εξέτασης μεταφοράς μάζας και θερμότητας.
- Στη μέθοδο του Lagrange οι μεταβολές των συγκεντρώσεων περιγράφονται σχετικά με το μεταφερόμενο μέσο (π.χ. αέρας).

Γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας



Περιγραφή Euler

Η συγκέντρωση κάθε χημικής ένωσης κάθε χρονική στιγμή πρέπει να ικανοποιεί την ισορροπία μάζας μέσα στον όγκο που περιέχεται. Η εξίσωση αυτή είναι η εξίσωση συνέχειας και η απόδειξη της παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α του βιβλίου. Η μεταβολή της μάζας μέσα στον όγκο λόγω μεταφοράς (convection) αντισταθμίζεται με μεταφορά μάζας, η οποία παράγεται από χημικές αντιδράσεις και εκπομπές μέσα στον όγκο καθώς και από μεταφορά με μοριακή διάχυση. Η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου για κάθε στοιχείο i μας οδηγεί στην παρακάτω εξίσωση για τη συγκέντρωση c_i :

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j c_i) = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + S_i\left(\vec{x}, t\right) \quad (5-1)$$

όπου u_j είναι το j συστατικό της ταχύτητας του μέσου (π.χ. αέρα), D_i ο συντελεστής μοριακής διάχυσης της ένωσης i , R_i ο ρυθμός παραγωγής της ενώσεως i με χημικές αντιδράσεις και S_i ο ρυθμός εκπομπής της ένωσης i στο σημείο $\vec{x}$ για χρόνο t .

Μοντέλο θυσάνου του Gauss

Τα μοντέλα θυσάνου Gauss χρησιμοποιούνται σήμερα ευρύτατα καθώς έχει διαπιστωθεί μετά από σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις, ότι περιγράφουν ρεαλιστικά τη διασπορά των ρύπων σε μια στάσιμη Ατμόσφαιρα. Όπως έχουμε μελετήσει στο παρόν Κεφάλαιο σε ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, του οποίου η αρχή βρίσκεται στο έδαφος, αν ο άξονας x'x βρίσκεται στη διεύθυνση του ανέμου, ο άξονας y'y κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου και ο άξονας z'z κατακόρυφα, η συγκέντρωση ενός αέριου ρύπου σε σημείο με συντεταγμένες (x,y,z) περιγράφεται από την εξίσωση:

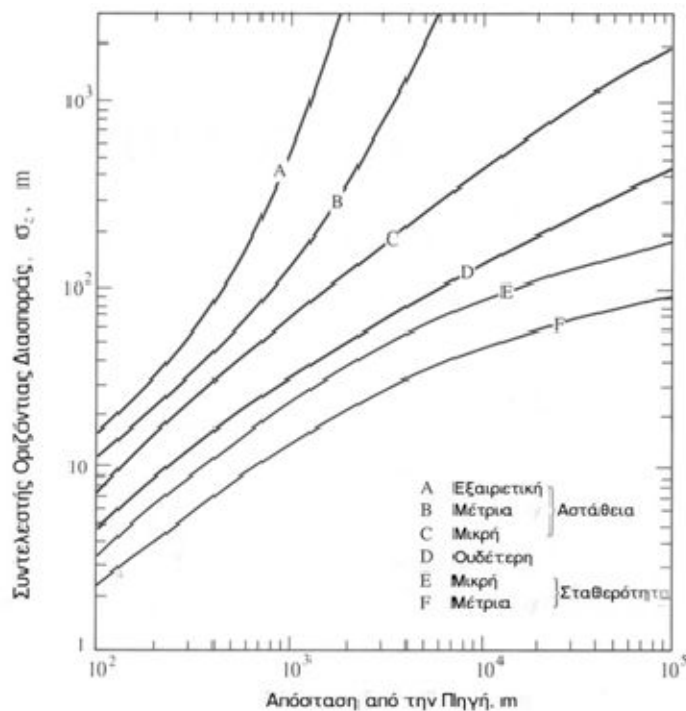
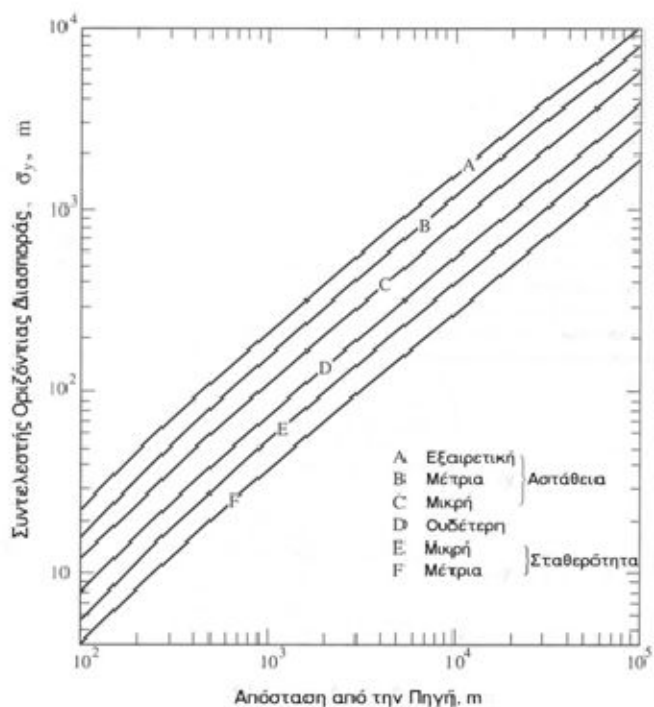
$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

όπου $c(x,y,z)$ είναι η συγκέντρωση του αέριου ρύπου στο σημείο (x,y,z) εκφρασμένη συνήθως σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Q ο ρυθμός εκπομπής του αέριου ρύπου, εκφρασμένος συνήθως σε $\mu\text{g}/\text{s}$, u η ταχύτητα του ανέμου σε m/s , σ_y και σ_z οι τυπικές αποκλίσεις της κατανομής στους άξονες y'y και z'z αντίστοιχα και H το ενεργό ύψος εκπομπής του θυσάνου.

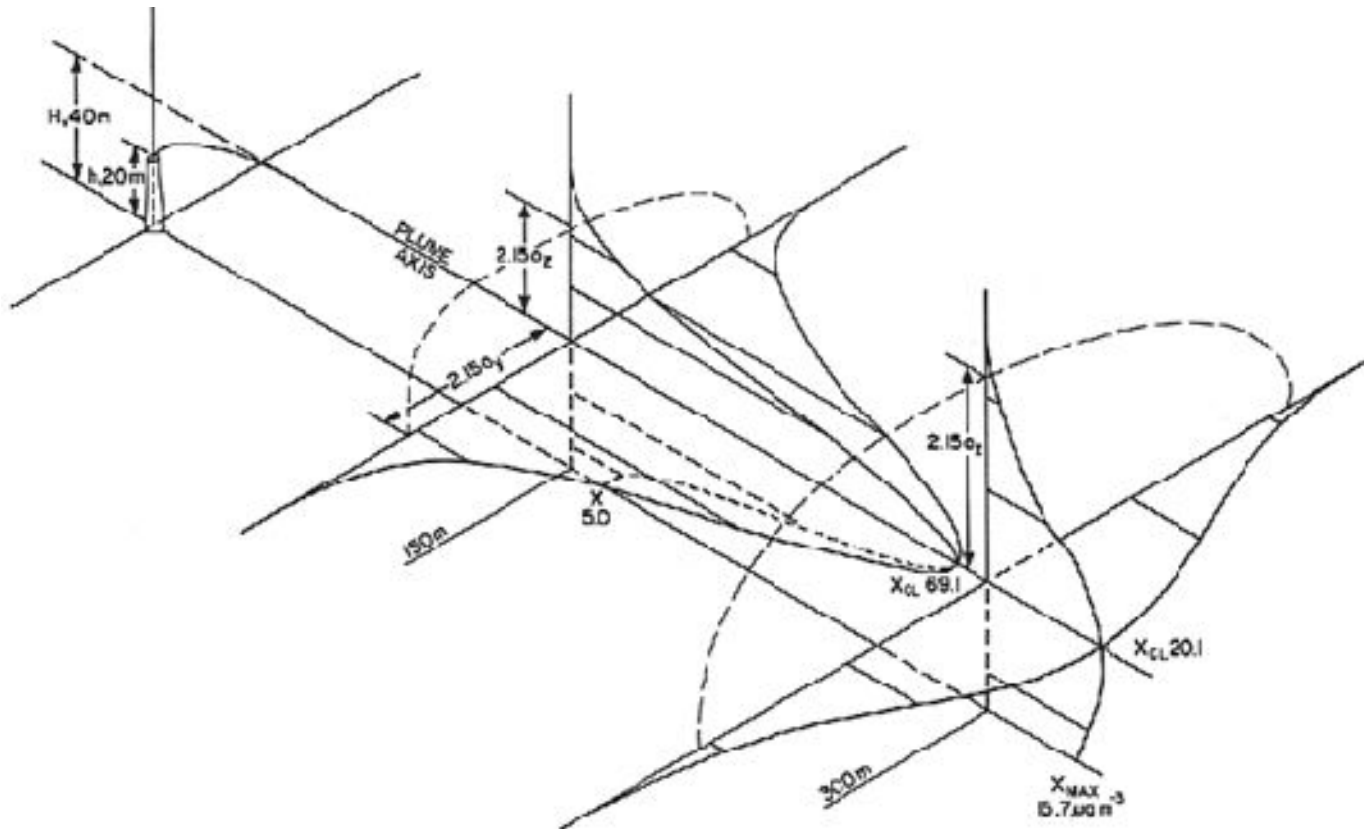
Προϋποθέσεις Μοντέλου Gauss

- Οι προϋποθέσεις για να μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία ένα μοντέλο θυσάνου Gauss και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα είναι οι ακόλουθες:
- Η εκπομπή των ρύπων θα πρέπει να είναι συνεχής ή τουλάχιστον να γίνεται για μια χρονική περίοδο, η οποία είναι μεγαλύτερη από το χρόνο διαδρομής του ρύπου από την πηγή μέχρι το σημείο που θέλουμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση.
- Οι ρύποι να είναι χημικά αδρανείς καθώς στο μοντέλο θυσάνου του Gauss δεν λαμβάνονται υπόψη χημικές αντιδράσεις.
- Στη διεύθυνση του ανέμου η μεταφορά των ρύπων κυριαρχεί της τυρβώδους διάχυσης.
- Η διάμετρος των αιωρούμενων σωματιδίων να είναι μικρότερη από 20 μm ώστε να παραμένουν αιωρούμενα στην Ατμόσφαιρα για τις χρονικές κλίμακες που εξετάζουμε.
- Όπως φαίνεται από την εξίσωση της συγκέντρωσης για την εφαρμογή του μοντέλου θα πρέπει η προς μελέτη περιοχή να βρίσκεται σε στάσιμη κατάσταση, όσον αφορά τις μετεωρολογικές παραμέτρους και τις παραμέτρους ευστάθειας τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να μεταφερθούν οι ρύποι από την πηγή στους αποδέκτες. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται σχετικά εύκολα στις περισσότερες περιπτώσεις. Για παράδειγμα αν έχουμε μεταφορά ρύπων σε αποστάσεις από την πηγή μικρότερες των 10 Km και η ταχύτητα του ανέμου είναι 5 m/s, ο χρόνος μεταφοράς των ρύπων είναι περίπου 35 λεπτά.

Καμπύλες των συναρτήσεων και βασισμένες στους υπολογισμούς του Pasquill



Γκαουσιανή περιγραφή της εκπομπής των ρύπων από καμινάδα

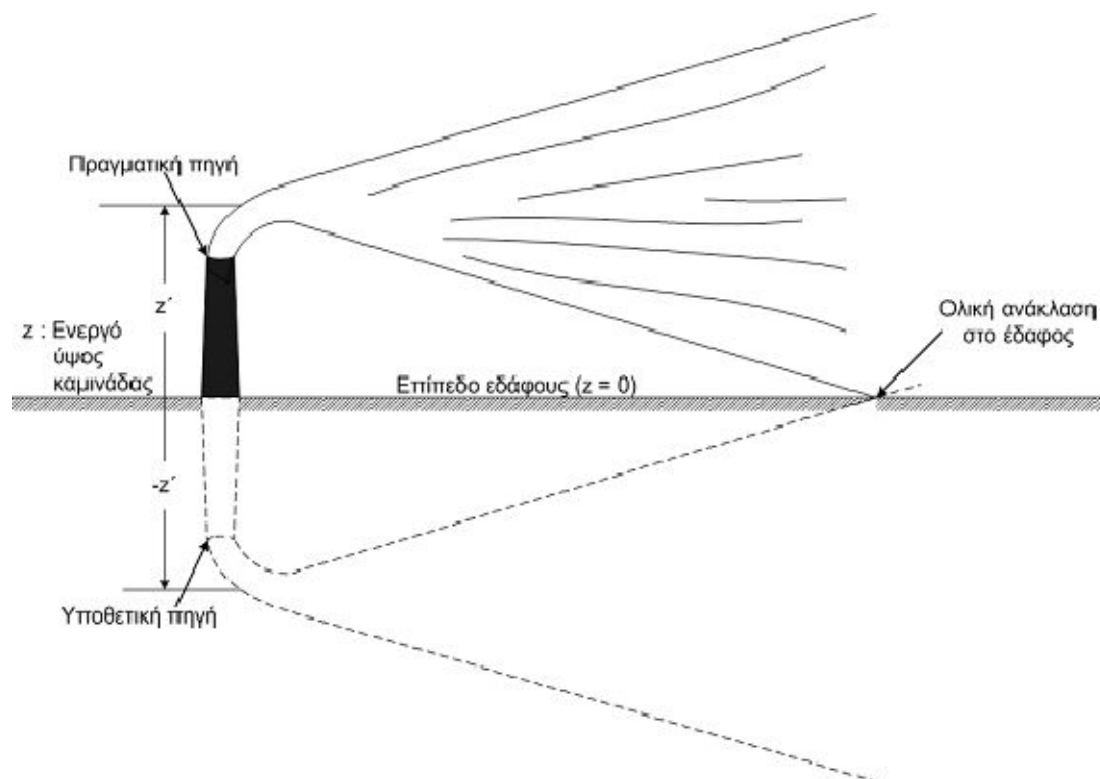


Μέθοδος Pasquill

Πίνακας : Αντιστοίχιση των κλάσεων ευστάθειας με τη μέθοδο της κατακόρυφης μεταβολής της θερμοκρασίας με τη μέθοδο του Pasquill.

Κλάση Ευστάθειας	Κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας dT (°C/100m)	Αντιστοίχιση σε κλάση Ευστάθειας με τη μέθοδο του Pasquill
Ασταθής	$dT < -1$	A+B+C
Ουδέτερη	$-1 \leq dT < 0$	D
Ελαφρά Ευσταθής	$0 \leq dT < 1$	E
Ευσταθής	$dT \leq 1$	F

Ολική ανάκλαση στο $z = 0$



Ατμοσφαιρική Ευστάθεια – Εφαρμογή στα Γκαουσιανά Μοντέλα

Η έννοια της δυναμικής θερμοκρασίας βοηθάει στην εξέταση της ατμοσφαιρικής ισορροπίας. Ορίσαμε ως δυναμική θερμοκρασία θ τη θερμοκρασία που προκύπτει όταν μεταφέρουμε αδιαβατικά ξηρό αέρα από την αρχική του κατάσταση σε πίεση 1000 mb. Είδαμε στο Κεφάλαιο 2 ότι

$$\theta = T \left(\frac{P_o}{P} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)}$$

όπου $P_o = 1000 \text{ mb}$.

Αριθμός Richardson

Η σχετική σπουδαιότητα της μεταφοράς των ρύπων και της τυρβώδους ροής λόγω μηχανικής διατμητικής τάσης μπορεί να εξεταστεί με τον αριθμό Richardson. Ορίζουμε στην αρχή την παράμετρο σταθερότητας s ως ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο η σταθερότητα της ατμόσφαιρας εμποδίζει τη δημιουργία της τύρβης:

$$s = \frac{g}{T} \left(\frac{\Delta\Theta}{\Delta z} \right)$$

Η τύρβη επίσης παράγεται απο μηχανική διατμητική δύναμη με ρυθμό $\left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2$.

Αριθμός Richardson - Συνέχεια

Ο αριθμός Richardson είναι ο λόγος της παραμέτρου σταθερότητας s προς την παραγωγή τύρβης και παραμένει δείκτης σταθερότητας της Ατμόσφαιρας αλλά και δείκτης της παρουσίας τύρβης. Η εξίσωση ορίζει τον αριθμό Richardson (Schnelle and Dey, 1999):

$$Ri = \frac{g \left(\frac{\Delta \Theta}{\Delta z} \right)}{T \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2}$$

Ο αριθμός Richardson και οι καταστάσεις ευστάθειας στην Ατμόσφαιρα

Κατάσταση Ισορροπίας	Αριθμός Richardson	Ατμοσφαιρικές Συνθήκες
Ευσταθής	$Ri > 0,25$	Απουσία κατακόρυφης ανάμιξης, μικρές ταχύτητες ανέμου, μετριασμός της μηχανικής τύρβης, μικρή διασπορά πλουμίου
Ευσταθής	$0 < Ri < 0,25$	Η μηχανική τύρβη περιορίζεται με σταθερή διαστρωμάτωση της Ατμόσφαιρας
Ουδέτερη	$Ri = 0$	Ύπαρξη μόνο μηχανικής τύρβης
Ασταθής	$-0,03 < Ri < 0$	Μηχανική τύρβη και μεταφορά
Ασταθής	$Ri < 0,04$	Η μεταφορά κυριαρχεί, μικρή ταχύτητα ανέμου, σημαντική κατακόρυφη κίνηση, γρήγορη διασπορά του πλουμίου κατακόρυφα και οριζόντια

Ο συντελεστής p

Ο συντελεστής P αποτελεί μία αδιάστατη μεταβλητή που συνδέει την ταχύτητα του αέρα σε διάφορα υψόμετρα. Στην Ατμόσφαιρα περιγράφουμε συχνά τη μεταβλητότητα του αέρα με το ύψος χρησιμοποιώντας ένα εκθετικό νόμο που γράφεται ως

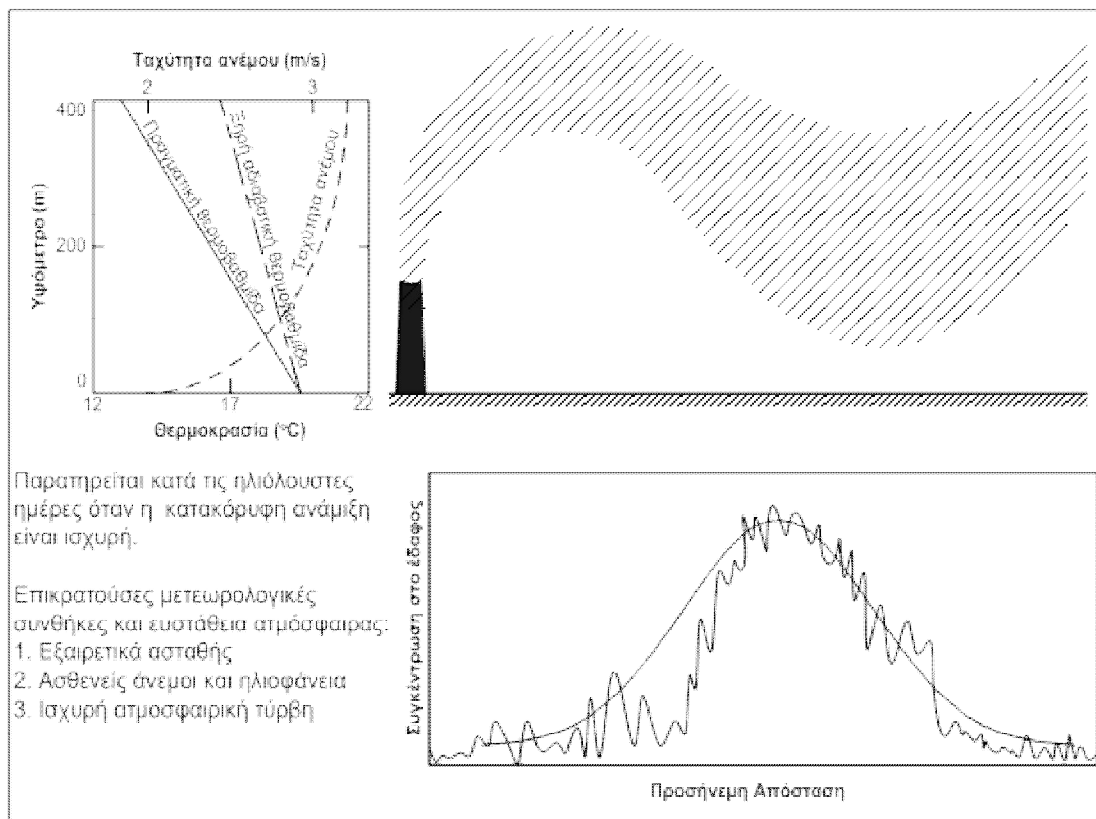
$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_m} = \left(\frac{z}{z_m} \right)^p$$

όπου $\bar{u}$ είναι η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z , $\bar{u}_m$ είναι η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z_m και P είναι η δύναμη που η τιμή της εξαρτάται από τις συνθήκες ευστάθειας και την επιφανειακή τριβή.

Τιμές παραμέτρων που αφορούν τα προφίλ της θερμοκρασίας και ταχύτητας του ανέμου στα μοντέλα θυσάνου/ ανύψωσης πλουμίου

Μορφή πλουμίου	h (m)	ΔT ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)	P (αδιάστατο)	Ισορροπία Ατμόσφαιρας
Βροχγοειδής	5 – 100	-1,8	0,145	Ασταθής
Κωνική	5 – 100	-1,0	0,170	Ουδέτερη
Ινώδης	5 – 20	+1,4	0,44	Ευσταθής (με αναστροφή θερμοκρασίας)
	200 – 400	-0,7	0,25	Μέτρια Ευσταθής
Καθιζάμενη	5 – 125	-0,7	0,25	Μέτρια Ευσταθής
	($\geq 22,6$ $^{\circ}\text{C}$)			
	125 – 200	+1,4	0,44	Ευσταθής (με αναστροφή θερμοκρασίας)
	200 – 400	-1,0	0,170	Ουδέτερη
Ανυψωτική	5 – 200	+1,4	0,44	Ευσταθής (με αναστροφή θερμοκρασίας)
	200 – 400	+0,7	0,25	Ουδέτερη

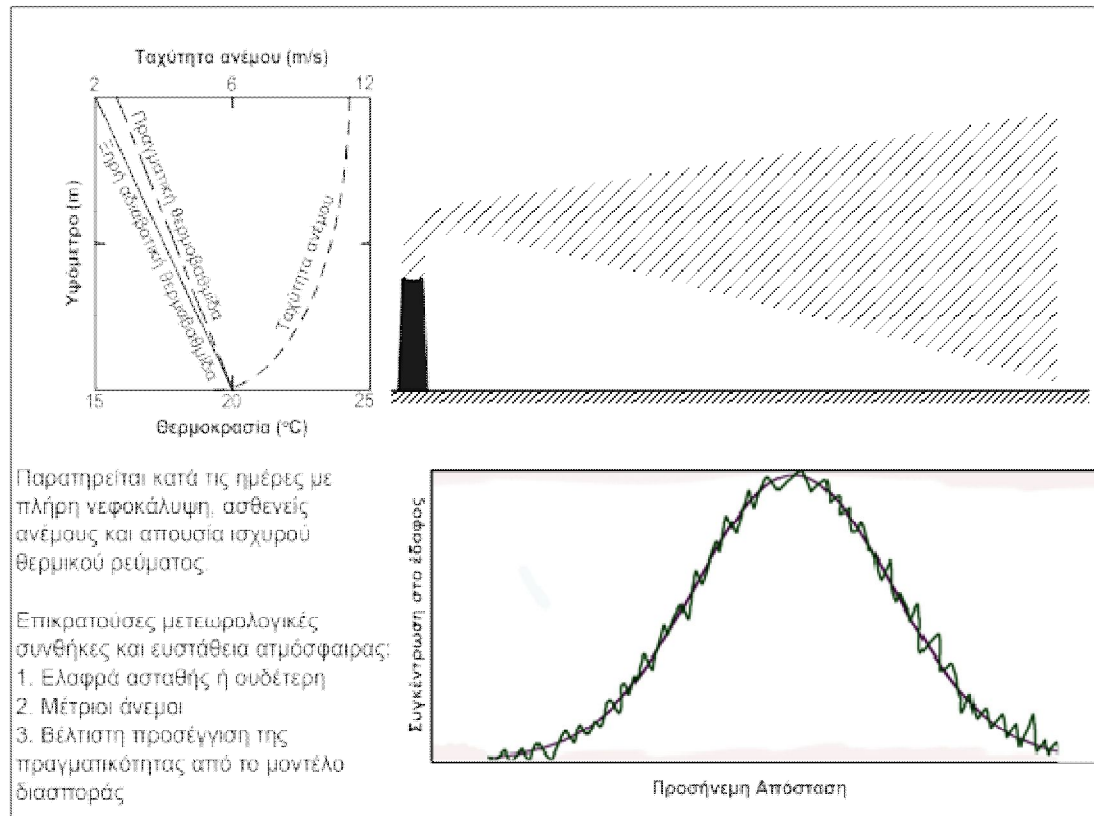
Βρογχοειδής μορφή πλουμίου



Βρογχοειδής μορφή πλουμίου

- Το πλούμιο σε αυτή την περίπτωση συνδέεται με συνθήκες μεταφοράς και υψηλό βαθμό τύρβης. Η μορφή αυτή του πλουμίου παρατηρείται σε ημέρες που είναι ζεστές με καθαρό ουρανό και χαμηλή ταχύτητα ανέμου.
- Πηγές με χαμηλό ύψος καμινάδας και χαμηλές εκπομπές θερμότητας μπορούν να παρουσιάσουν αυτή τη βρογχοειδή μορφή. Η θερμική αστάθεια της ατμόσφαιρας μπορεί να μετακινεί το πλούμιο στο έδαφος με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλές επιφανειακές συγκεντρώσεις.
- Αυτό όμως αλλάζει γρήγορα λόγω της ύπαρξης τυρβώδους ροής στην κατακόρυφο με αποτέλεσμα να έχουμε μετακίνηση του πλουμίου προς τα επάνω.
- Η εφαρμογή των Γκαουσιανών μοντέλων για πλούμιο βρογχοειδής μορφής δε δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όπως για παράδειγμα για την κωνική μορφή πλουμίου που θα εξετάσουμε αμέσως τώρα.

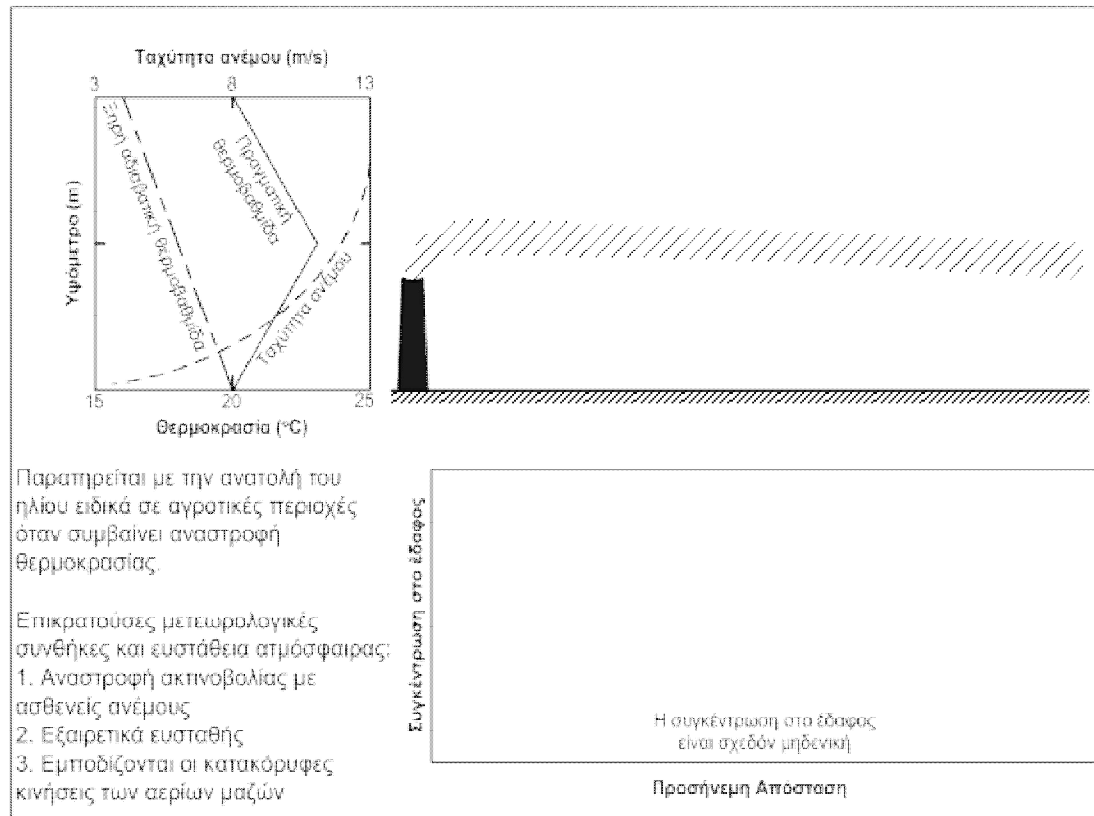
Κωνική μορφή πλουμίου



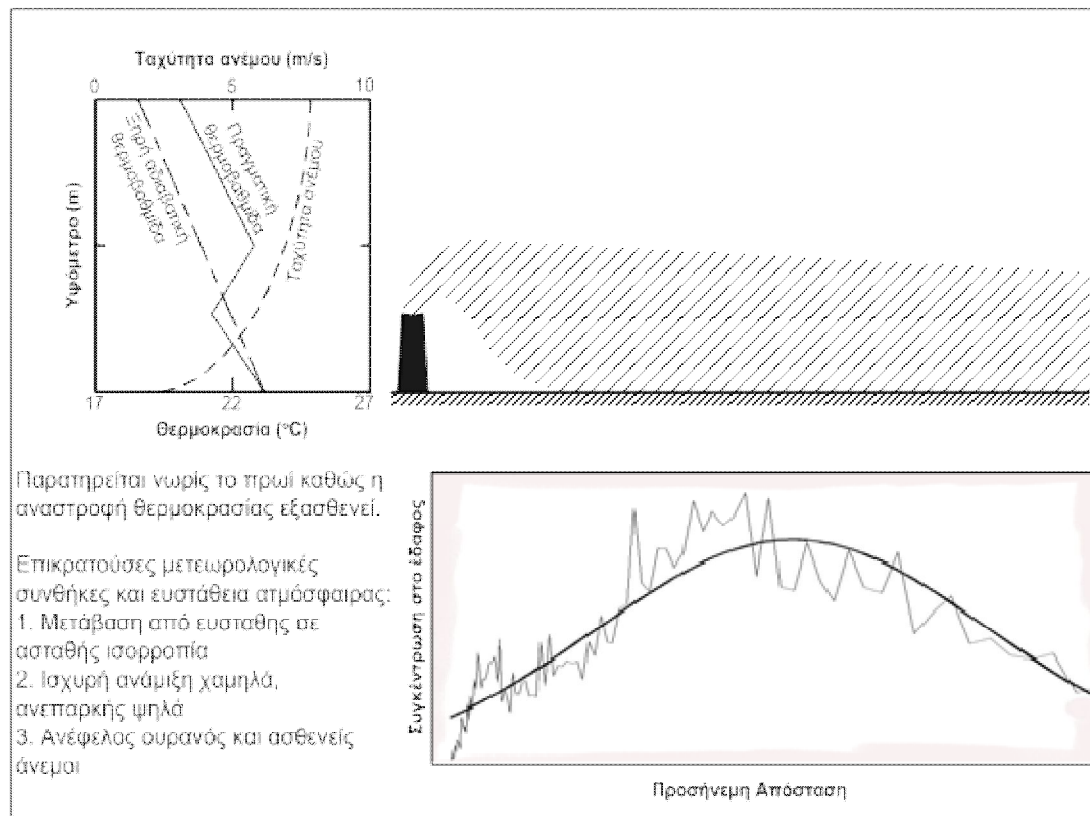
Κωνική μορφή πλουμίου

- Η κωνική μορφή του πλουμίου εμφανίζεται σε συνθήκες ουδέτερης ισορροπίας και τα Γκαουσιανά μοντέλα μπορούν να περιγράψουν τη διασπορά ρύπων σε αυτές τις συνθήκες.
- Πλούμια που χαρακτηρίζονται από κατακόρυφη μεταφορά και χαμηλές ταχύτητες αέρα θα παρουσιάζουν μεγάλη ανύψωση πλουμίου και επομένως χαμηλότερη από άλλες συνθήκες επιφανειακή συγκέντρωση.
- Υψηλότερες ταχύτητες ανέμου οδηγούν σε μεγαλύτερη διασπορά των ρύπων.
- Καταστάσεις ουδέτερης ευστάθειας παρουσιάζονται συχνά στην Ατμόσφαιρα και σε περιπτώσεις που έχουμε καμινάδες με μικρό ύψος αυτό ίσως οδηγήσει σε υψηλές επιφανειακές συγκεντρώσεις

Ινώδης μορφή πλουμίου



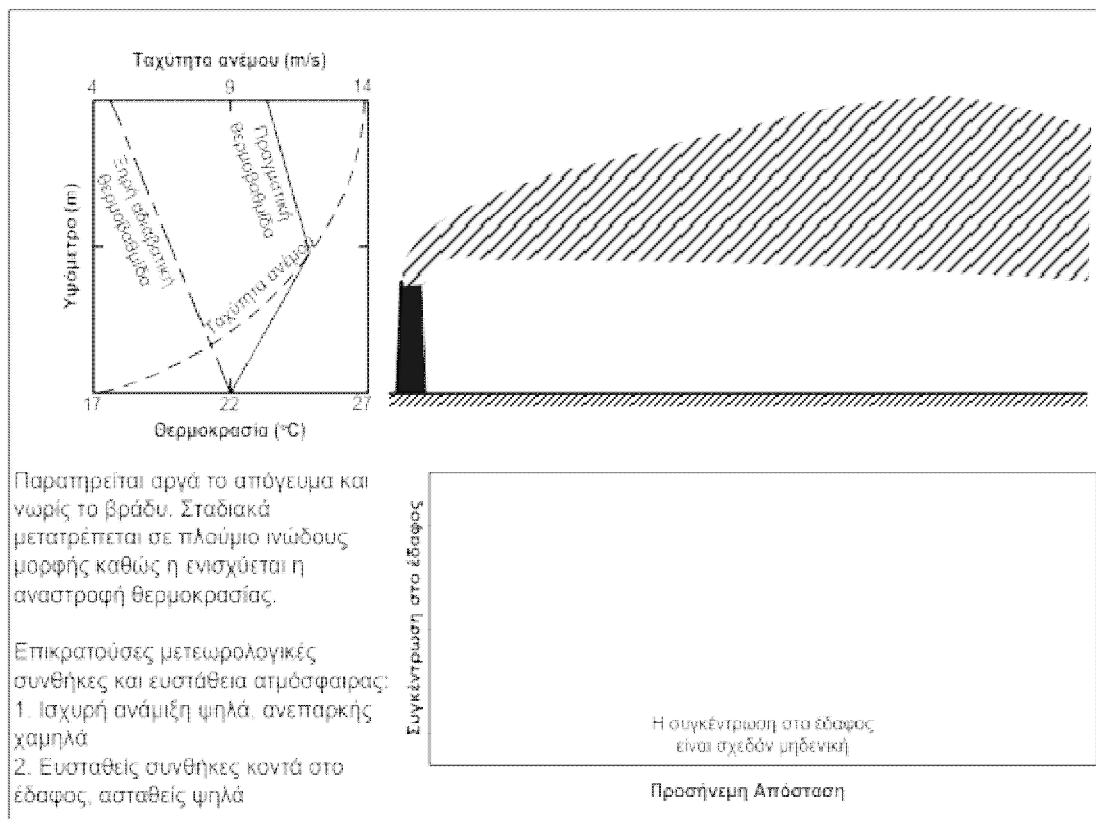
Καθιζάμενη μορφή πλουμίου



Ινώδης και Καθιζάμενη μορφή πλουμίου

- Καταστάσεις σταθερής ισορροπίας συνδέονται με την ινώδη μορφή πλουμίου. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε καταστάσεις αναστροφής το πρωί και η κατακόρυφη ανάμιξη είναι πολύ μικρή.
- Κατά τη διάρκεια που η αναστροφή σταματάει έχουμε την επίδραση ασταθών αερίων μαζών στο πλούμιο από την επιφάνεια του εδάφους προς τα επάνω. Υψηλός βαθμός ανάμιξης λαμβάνει χώρα κάτω από αυτές τις συνθήκες και το πλούμιο φτάνει στο έδαφος με καθιζάμενη μορφή.
- Σε αυτές τις συνθήκες μπορούμε να έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στην επιφάνεια του εδάφους. Η καθιζάμενη μορφή πλουμίου δεν παρατηρείται για περιόδους μεγαλύτερες από μισή ώρα. Επομένως η καθιζάμενη μορφή πλουμίου δεν είναι σημαντική στις μελέτες υπολογισμού της μέσης συγκέντρωσης ρύπων από σημειακές πηγές για περιόδους μεγαλύτερες της μιας ώρας.
- Επίσης σε περιπτώσεις σταθερής αναστροφής το πλούμιο δεν έχει τη δυνατότητα να περάσει την αναστροφή με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στο επίπεδο του εδάφους.

Ανυψωτική μορφή πλουμίου



Ανυψωτική μορφή πλουμίου

- Η ανυψωτική μορφή πλουμίου παρατηρείται συνήθως αργά το απόγευμα όταν αρχίζει να δημιουργείται αναστροφή από το έδαφος και ανεβαίνει προς τα επάνω.
- Το πλούμιο δε μπορεί να διαπεράσει την αναστροφή προς τα κάτω αλλά διαχέεται προς τα επάνω.

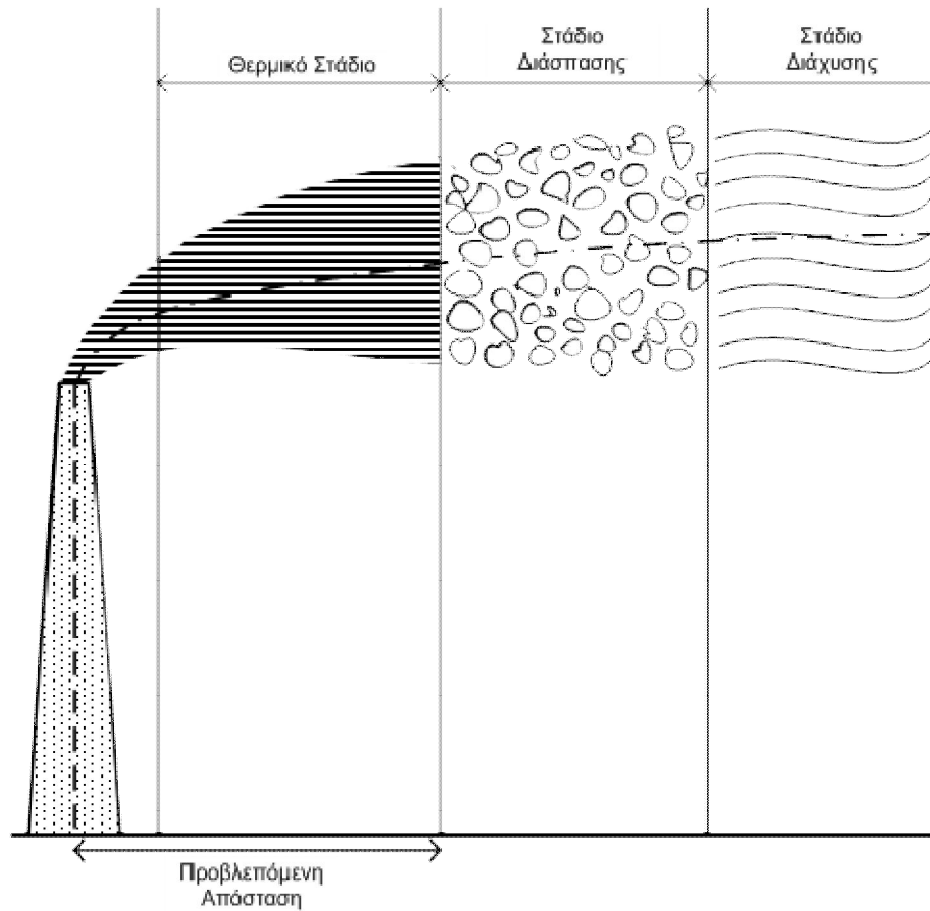
Ανύψωση πλουμίου

- Όταν τα απαέρια μίας καμινάδας έχουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος, τότε το πλούμιο ανέρχεται λόγω θερμοκρασιακής άνωσης.
- Επίσης η ανύψωση του πλουμίου λαμβάνει χώρα, όταν τα απαέρια εξέρχονται με μεγάλη ταχύτητα από την καμινάδα.
- Ορισμένα πλούμια εκπέμπονται έχοντας ίδια θερμοκρασία με αυτήν του περιβάλλοντος, αλλά ανυψώνονται λόγω των χαρακτηριστικών των ρύπων που εκπέμπονται (πυκνότητα και σύνθεση).
- Αυτά τα αέρια παρουσιάζουν θετική ανύψωση εάν είναι ελαφρότερα από τον αέρα και αρνητική ανύψωση εάν είναι βαρύτερα από τον αέρα

Ανύψωση πλουμίου

- Η ανύψωση του πλουμίου ζεστών αερίων περιγράφεται από τα ακόλουθα στάδια:
- **(1) Θερμικό στάδιο**, το οποίο χαρακτηρίζεται από:
 - - ανάμιξη λόγω ιδίας τύρβης,
 - - συγκράτηση μέτριας ανύψωσης και επίπεδου σχήματος,
 - - εφαρμογή γραμμικού θερμικού μοντέλου και τέλος
- - περιγραφή του φαινομένου από τον Briggs που θεωρεί, ότι το πλούμιο φθάνει το μέγιστο ύψος ανύψωσης στο στάδιο αυτό.
- **(2) Στάδιο διάσπασης**, το οποίο χαρακτηρίζεται από:
 - - κυριαρχία της ατμοσφαιρικής τύρβης,
 - - διάσπαση του πλουμίου σε μικρά τμήματα και
- - βηματική αύξηση της διαμέτρου του πλουμίου.
- **(3) Στάδιο διάχυσης**, το οποίο χαρακτηρίζεται από:
 - - κυριαρχία της ατμοσφαιρικής τυρβώδους διάχυσης,
 - - συγκρότηση του πλουμίου— ακόμα μεγαλύτερη διάχυση και
 - - σχετικά αργή ανάπτυξη.
-
-

Γραφική περιγραφή της ανύψωσης του πλουμίου



Ανύψωση πλουμίου

Έχοντας ως στόχο την εκπομπή των ρύπων σε μεγαλύτερο ύψος οι ρύποι από τις καμινάδες απελευθερώνονται με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από την θερμοκρασία του γύρω αέρα και με μεγάλη ορμή. Ως αποτέλεσμα το ενεργό ύψος της καμινάδας (h) είναι το άθροισμα του κανονικού ύψους της καμινάδας (h_s) και της ανύψωσης του πλουμίου (Δh) και εκφράζεται ως:

$$h = h_s + \Delta h$$