

# 5

## Μοντέλα θυσάνου του Gauss

Όπως προαναφέρθηκε η δημοφιλέστερη μεθοδολογία υπολογισμού της ατμοσφαιρικής διασποράς σε πρακτικές εφαρμογές βασίζεται στην εξίσωση θυσάνου του Gauss. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, τα μοντέλα που ακολουθούν αυτό το πρότυπο είναι σε θέση να υπολογίσουν τις μέσες συγκεντρώσεις ρύπων που εκπέμπονται από συνεχείς ανυψωμένες πηγές με ικανοποιητική ακρίβεια, ιδιαίτερα για ρυθμιστικές εφαρμογές. Αν και η εφαρμοσιμότητα αυτών των μοντέλων περιορίζεται σε συνθήκες στασιμότητας και ομοιογένειας η απλότητα, η ευκολία στη χρήση και οι χαμηλές απαιτήσεις σε στοιχεία εισαγωγής είχαν σαν αποτέλεσμα να γίνουν ιδιαίτερα δημοφιλή και χρήσιμα, ιδιαίτερα στην επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

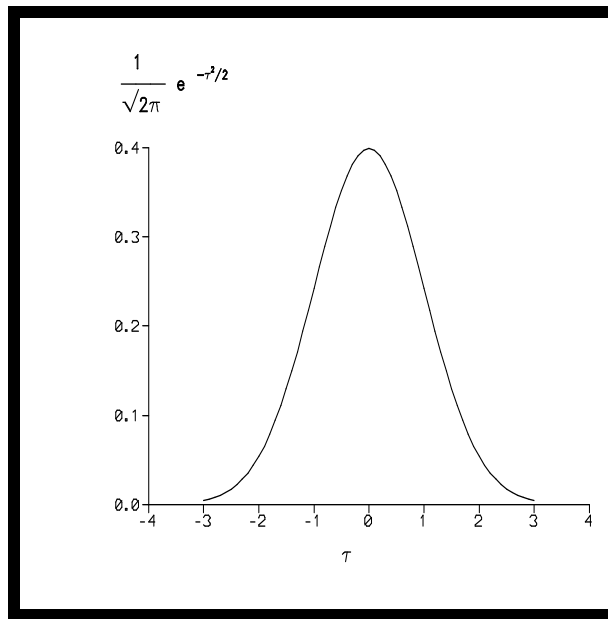
### 5.1 Κανονική κατανομή

Ο τύπος της κανονικής κατανομής δημοσιεύτηκε πρώτη φορά από τον Abraam De Moivre το 1733 αλλά πολλοί άλλοι μαθηματικοί συνέβαλλαν επίσης στην περιγραφή της κατανομής, μεταξύ άλλων, ο Frierdrich Gauss (1777-1855). Σε αναγνώριση της συμβολής του, η κατανομή ονομάζεται πολλές φορές, κατανομή Gauss.

Η κανονική κατανομή αποτελεί το περισσότερο χρησιμοποιούμενο πρότυπο κατανομής λόγω του ότι περιγράφει με επιτυχία πολλά φαινόμενα τα οποία εξαρτώνται από τυχαίες συνεχείς μεταβλητές. Η μαθηματική περιγραφή της κανονικής κατανομής δίνεται από τη σχέση

$$y = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

όπου  $\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση,  $M$  είναι η μέση τιμή και  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων (όταν η συχνότητα δίνεται επί της εκατό τότε  $N = 100\%$ ).



**Σχήμα 5.1** : Η κανονική κατανομή, όπου  $\tau = (x-M)/\sigma$

Όταν γίνει γραφική παράσταση με το  $(x-M)$  στη τετμημένη και το  $y$  στη τεταγμένη, η συνάρτηση εμφανίζεται με σχήμα καμπάνας (σχήμα 5.1).

Οι κυριότερες ιδιότητες της κανονικής κατανομής είναι οι παρακάτω:

α. Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική και μία σημαντική της ιδιότητα είναι ότι η **μέση τιμή (mean value)**, η **επικρατούσα τιμή (mode)** και η **διάμεσος (median)** συμπίπτουν.

β. 68% των παρατηρήσεων βρίσκονται στο διάστημα μεταξύ  $M - \sigma$  και  $M + \sigma$  ενώ 95% των παρατηρήσεων βρίσκονται στο διάστημα  $M - 2\sigma$  και  $M + 2\sigma$ .

γ. Η κανονική κατανομή ορίζεται πλήρως από τις παραμέτρους  $M$  και  $\sigma$ . Με άλλα λόγια, διαφορετικοί συνδυασμοί των  $M$  και  $\sigma$  καθορίζουν διαφορετικές κανονικές κατανομές. Διαφορετικές τιμές του  $M$  μετακινούν την καμπύλη της κατανομής κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Διαφορετικές τιμές του  $\sigma$  προσδιορίζουν σε ποιο βαθμό η καμπύλη γίνεται επίπεδη ή αιχμηρή.

δ. Το άθροισμα (ή η διαφορά) δύο ανεξάρτητων κανονικών κατανομών είναι επίσης κανονική κατανομή.

Στις Περιβαλλοντικές επιστήμες η κανονική κατανομή έχει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις. Η κατανομή π.χ. των σφαλμάτων των μετρήσεων είναι συχνά κανονική κατανομή γιατί οι διάφοροι παράγοντες που προκαλούν τα σφάλματα είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και εμφανίζονται τυχαία. Κατά την επανειλημμένη ζύγιση ενός δείγματος π.χ. βρίσκονται, λόγω τυχαίων σφαλμάτων, διαφορετικές τιμές οι οποίες ακολουθούν την κανονική κατανομή. Όπως θα αναφερθεί στα επόμενα

κεφάλαια, η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται στην περιγραφή της εγκάρσιας και της κατακόρυφης κατανομής των συγκεντρώσεων σε ένα θύσανο.

## 5.2 Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των μοντέλων Θυσάνου του Gauss

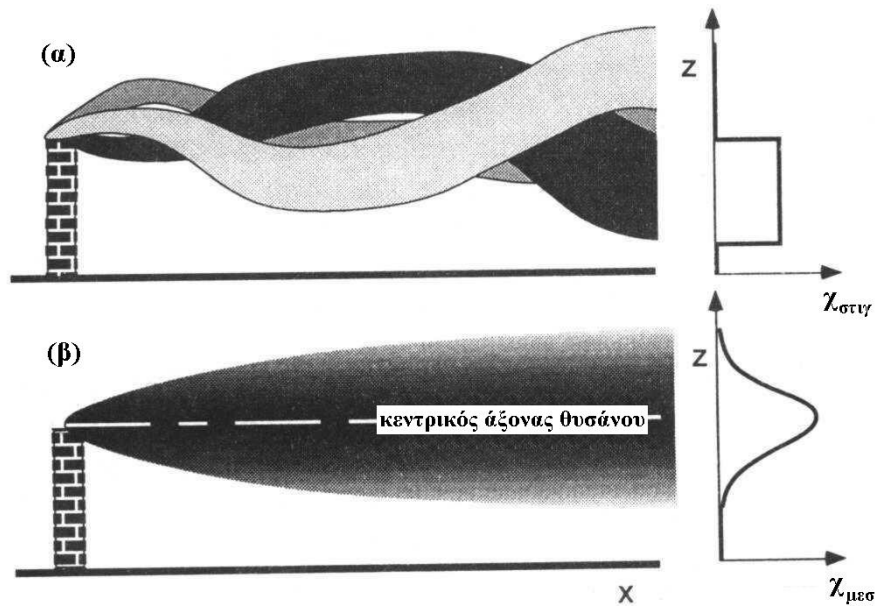
Είναι συνηθισμένη πρακτική να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της διασποράς μοντέλα τα οποία βασίζονται στην παραδοχή του θυσάνου του Gauss. Πριν την εφαρμογή κάποιου τέτοιου μοντέλου και προκειμένου να διασφαλιστεί όσο το δυνατόν η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου θα πρέπει να εξετάσουμε το κατά πόσο στην υπό μελέτη περίπτωση πληρούνται οι υποθέσεις πάνω στις οποίες βασίζεται το μοντέλο του θυσάνου του Gauss. Μία βασική καταγραφή περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- Η εκπομπή είναι συνεχής ή τουλάχιστον η εκπομπή γίνεται για χρονική περίοδο η οποία είναι μεγαλύτερη του χρόνου διαδρομής από την πηγή ως το σημείο στο οποίο εξετάζουμε τις συγκεντρώσεις. Αν βέβαια η εφαρμογή του μοντέλου θυσάνου του Gauss γίνεται σε ωριαία βάση τότε η εκπομπή θα πρέπει να διαρκεί τουλάχιστον μία ώρα.

- Οι ρύποι είναι σχετικά αδρανείς και στην περίπτωση των αερολυμάτων η διάμετρος τους είναι μικρότερη περίπου από τα 20  $\mu\text{m}$ , άρα παραμένουν αιωρούμενα στην ατμόσφαιρα για τις χρονικές κλίμακες που μελετάμε. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι σε πολλά μοντέλα χρησιμοποιούνται τεχνικές οι οποίες επιτρέπουν την παράκαμψη αυτού του περιορισμού.

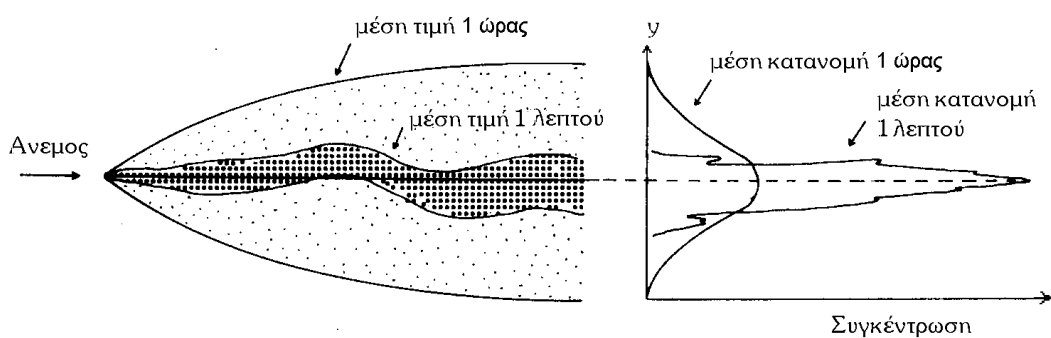
- Στην ατμόσφαιρα επικρατούν συνθήκες στασιμότητας, δηλ. οι μετεωρολογικές συνθήκες δεν αλλάζουν για το χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να μεταφερθούν οι ρύποι από την πηγή ως τους αποδέκτες. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η συνθήκη ικανοποιείται σχετικά εύκολα. Π.χ. στις περιπτώσεις που μελετάμε την διασπορά σε τοπική κλίμακα ( $x \leq 10 \text{ km}$ ) και ο άνεμος είναι  $5 \text{ ms}^{-1}$  τότε ο χρόνος που χρειάζεται για να μεταφερθούν οι ρύποι από την πηγή ως το άκρο της υπό μελέτη περιοχής είναι μικρότερος των περίπου 35 λεπτών. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη περίπτωση, αν η εφαρμογή του μοντέλου θυσάνου του Gauss γίνεται σε ωριαία βάση τότε θα πρέπει να πληρούται το αυστηρότερο των δύο κριτηρίων (σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει οι συνθήκες στασιμότητας να επικρατούν τουλάχιστον για 60 λεπτά).

- Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου δεν παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές με το ύψος, τουλάχιστον στο στρώμα που καλύπτει ο θύσανος.



**Σχήμα 5.2 :** (α) Η στιγμιαία συμπεριφορά θυσάνων καπνού σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η στιγμιαία κατανομή της συγκέντρωσης του σκούρου θυσάνου φαίνεται στα δεξιά του σχήματος.

(β) Η μέση συμπεριφορά πολλών θυσάνων (χρονική μέση τιμή). Η μέση συγκέντρωση που εμφανίζεται στα δεξιά του σχήματος ακολουθεί την κανονική κατανομή.



**Σχήμα 5.3 :** Η κατανομή της μέσης τιμής 1 ώρας και 1 λεπτού, αντίστοιχα, της συγκέντρωσης ενός αέριου ρύπου κατά την διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Στην αριστερή πλευρά φαίνεται η μορφή του θυσάνου ενώ στην δεξιά μεριά εμφανίζονται οι εγκάρσιες κατανομές των συγκεντρώσεων.

- Η βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή του μοντέλου του θυσάνου του Gauss είναι ότι οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης τόσο στην εγκάρσια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι περίπου κανονικές (ανεξάρτητες η μία της άλλης). Σε επόμενο κεφάλαιο θα απαριθμήσουμε ορισμένες περιπτώσεις όπου γνωρίζουμε από την εμπειρία μας ότι η εφαρμογή του μοντέλου του θυσάνου του Gauss είναι λιγότερο ενδεικτική.

Είναι σημαντικό εδώ να διευκρινίσουμε την διαφορά ανάμεσα στην κατανομή των στιγμιαίων και των μέσων συγκεντρώσεων. Η διαφορά αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2 το οποίο δείχνει ένα στιγμιότυπο της συγκέντρωσης καθώς και την μέση συγκέντρωση ενός ορατού αέριου ρύπου (π.χ. καπνού). Όπως φαίνεται σ' αυτό το σχήμα η στιγμιαία συγκέντρωση του ρύπου δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή ενώ το στιγμιότυπο του θυσάνου παρουσιάζει κάποιους χαρακτηριστικούς μαιάνδρους. Από την άλλη μεριά η κατανομή της μέσης συγκέντρωσης στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι περίπου κανονική ενώ και ο θύσανος είναι συμμετρικά κατανομημένος γύρω από τον κεντρικό άξονα (το κέντρο μάζας των ρύπων). Στο σχήμα 5.3 εμφανίζεται η κατανομή της μέσης τιμής 1 ώρας και 1 λεπτού, αντίστοιχα, της συγκέντρωσης ενός αέριου ρύπου στην εγκάρσια διεύθυνση. Από το σχήμα αυτό είναι φανερό ότι ούτε η μέση τιμή του 1 λεπτού ακολουθεί την κανονική κατανομή. Το ερώτημα που προκύπτει είναι πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η περίοδος στην οποία υπολογίζουμε την μέση τιμή. Στην πράξη, το μοντέλο του θυσάνου του Gauss χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό των μέσων ωριαίων τιμών συγκεντρώσεων. Υπάρχουν όμως ενδείξεις ότι η κατανομή του Gauss εμφανίζεται και σε μέσες τιμές που αφορούν μικρότερα χρονικά διαστήματα, συνήθως της τάξης των λίγων έως δεκαπέντε λεπτών.

### 5.3 Οι εξισώσεις του Gauss

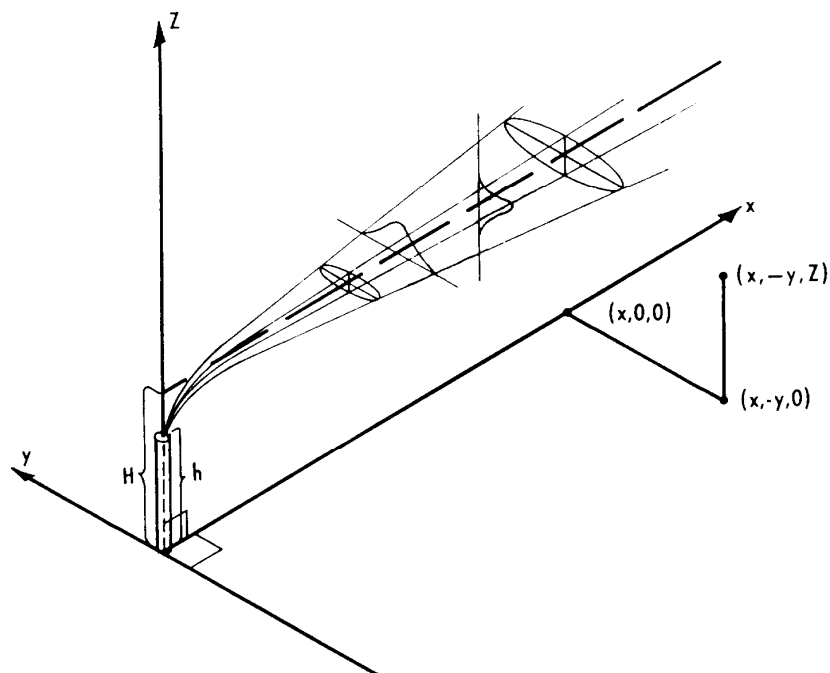
Η καταγωγή του μοντέλου του θυσάνου του Gauss βρίσκεται στην επιστημονική εργασία των Sutton (1932), Pasquill (1961) και Gifford(1961).

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε χρήση ενός ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων του οποίου η αρχή είναι στο έδαφος, ο άξονας x είναι προς την μέση διεύθυνση του ανέμου, ο άξονας y κάθετα προς την διεύθυνση του ανέμου στο οριζόντιο επίπεδο (εγκάρσια διεύθυνση) και ο άξονας z κατακόρυφα (σχήμα 3.6). Στην περίπτωση σημειακής πηγής σε επίπεδη περιοχή κατά την οποία οι ρύποι ακολουθούν πιστά τις κινήσεις της ατμόσφαιρας χωρίς να αποτίθενται στην επιφάνεια της γης ή να υπόκεινται σε χημικούς μετασχηματισμούς ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (5.2)$$

όπου στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω σύμβολα:

- $\chi(x,y,z)$  συγκέντρωση του αέριου ρύπου στο σημείο  $(x,y,z)$ , συνήθως  $\mu\text{g m}^{-3}$
- $Q$  ρυθμός εκπομπής του υπό μελέτη ρύπου, συνήθως  $\mu\text{g s}^{-1}$
- $u$  ταχύτητα του ανέμου,  $\text{ms}^{-1}$
- $\sigma_y$  τυπική απόκλιση της εγκάρσιας κατανομής της συγκέντρωσης (συνάρτηση της απόστασης  $x$  από την πηγή και της επικρατούσας ευστάθειας),  $\text{m}$
- $\sigma_z$  τυπική απόκλιση της κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης (συνάρτηση της απόστασης  $x$  από την πηγή και της επικρατούσας ευστάθειας),  $\text{m}$
- $H$  ύψος του κεντρικού άξονα του θυσάνου,  $\text{m}$ . Το  $H$  περιλαμβάνει τόσο το φυσικό ύψος εκπομπής όσο και την ενδεχόμενη ανύψωση του θυσάνου.



**Σχήμα 5.4** : Η κατανομή των συγκεντρώσεων σε ένα θύσανο του Gauss. Στο σχήμα φαίνονται ακόμα οι συντεταγμένες κάποιων χαρακτηριστικών σημείων.

Το ύψος του κεντρικού άξονα του θυσάνου,  $H_c$ , ορίζεται από το κέντρο μάζας των ρύπων, θα μπορούσε δηλ. να θεωρηθεί σαν το μέσο ύψος του θυσάνου. Αν υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε σε διάφορα ύψη  $z_n$  τις αντίστοιχες μέσες συγκεντρώσεις  $\chi_n$ , τότε το ύψος του κεντρικού άξονα ορίζεται από την εξίσωση:

$$H_c = \frac{\sum_{n=1}^N \chi_n \cdot z_n}{\sum_{n=1}^N \chi_n} \quad (5.3)$$

όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των υψών όπου η συγκέντρωση είναι γνωστή.

Σε πολλές περιπτώσεις, και ιδιαίτερα όταν εργαζόμαστε με μέσες τιμές 1 ώρας, τα όρια του θυσάνου είναι δυσδιάκριτα γιατί οι συγκεντρώσεις προσεγγίζουν βαθμιαία στο μηδέν (θεωρητικά, στην κανονική κατανομή οι συγκεντρώσεις τείνουν ασυμπτωτικά προς το μηδέν). Προκειμένου λοιπόν να μετρηθεί η εγκάρσια και η κατακόρυφη διασπορά του θυσάνου χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση της θέσης των ρύπων,  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ . Σε αναλογία με το προηγούμενο παράδειγμα, η τυπική απόκλιση στην κατακόρυφη διεύθυνση ορίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_z^2 = \frac{\sum_{n=1}^N \chi_n \cdot (z_n - H_c)^2}{\sum_{n=1}^N \chi_n} \quad (5.4)$$

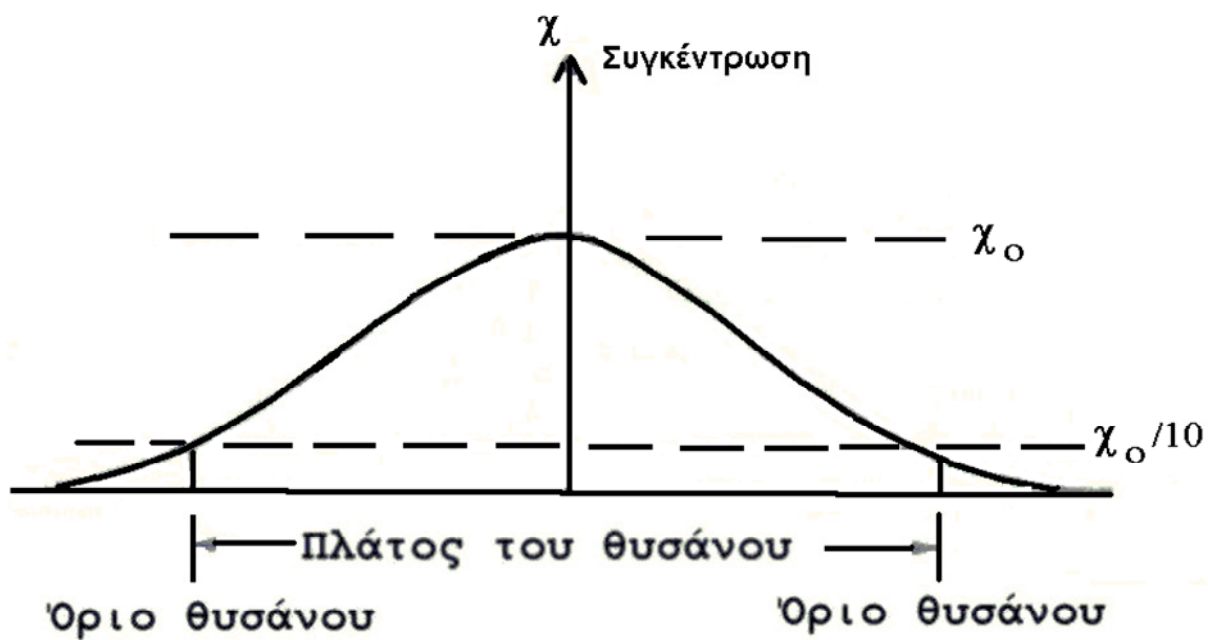
όπου  $\sigma_z^2$  είναι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης.

Μια παρόμοια εξίσωση με την προηγούμενη μπορεί να ορισθεί για την εγκάρσια τυπική απόκλιση,  $\sigma_y$ .

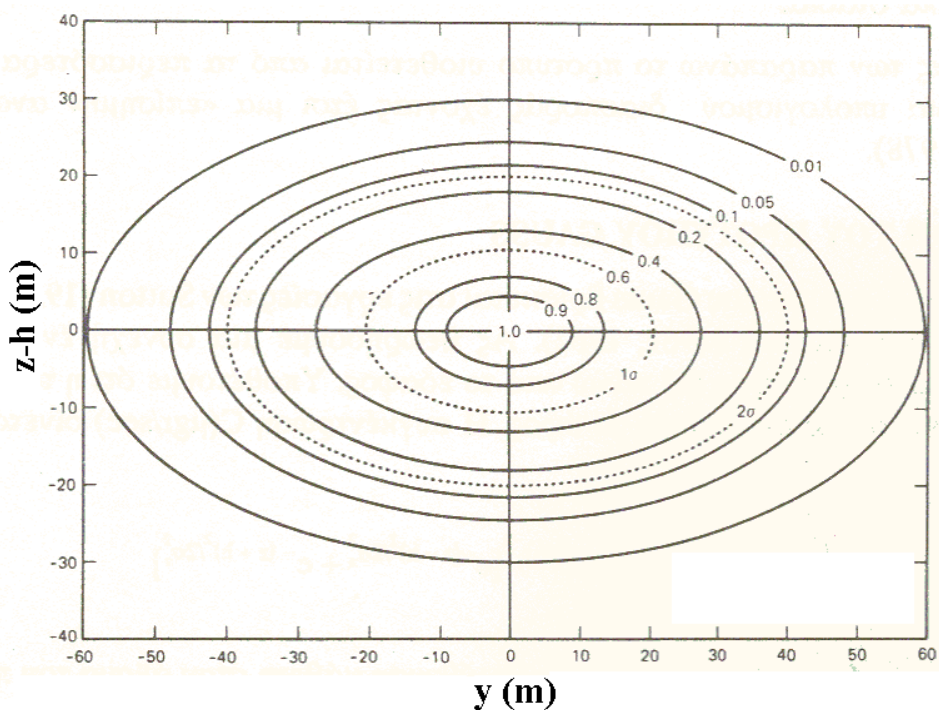
Με την βοήθεια των τυπικών αποκλίσεων μπορούν να ορισθούν τα όρια του θυσάνου. Για πρακτικούς σκοπούς αυτά συνήθως ορίζονται σαν τα σημεία όπου η συγκέντρωση πέφτει στο 10% της αντίστοιχης του κεντρικού άξονα. Σε αυτή την περίπτωση η κατακόρυφη διασπορά του θυσάνου (η διαφορά του ύψους ανάμεσα στο ανώτερο και το κατώτερο όριο) δίνεται από την σχέση:

$$\delta_z = 4.3 \sigma_z \quad (5.5)$$

Αντίστοιχα ορίζονται τα πλευρικά όρια και το πλάτος του θυσάνου (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 : Ορισμός των εννοιών όρια του θυσάνου και πλάτος του θυσάνου



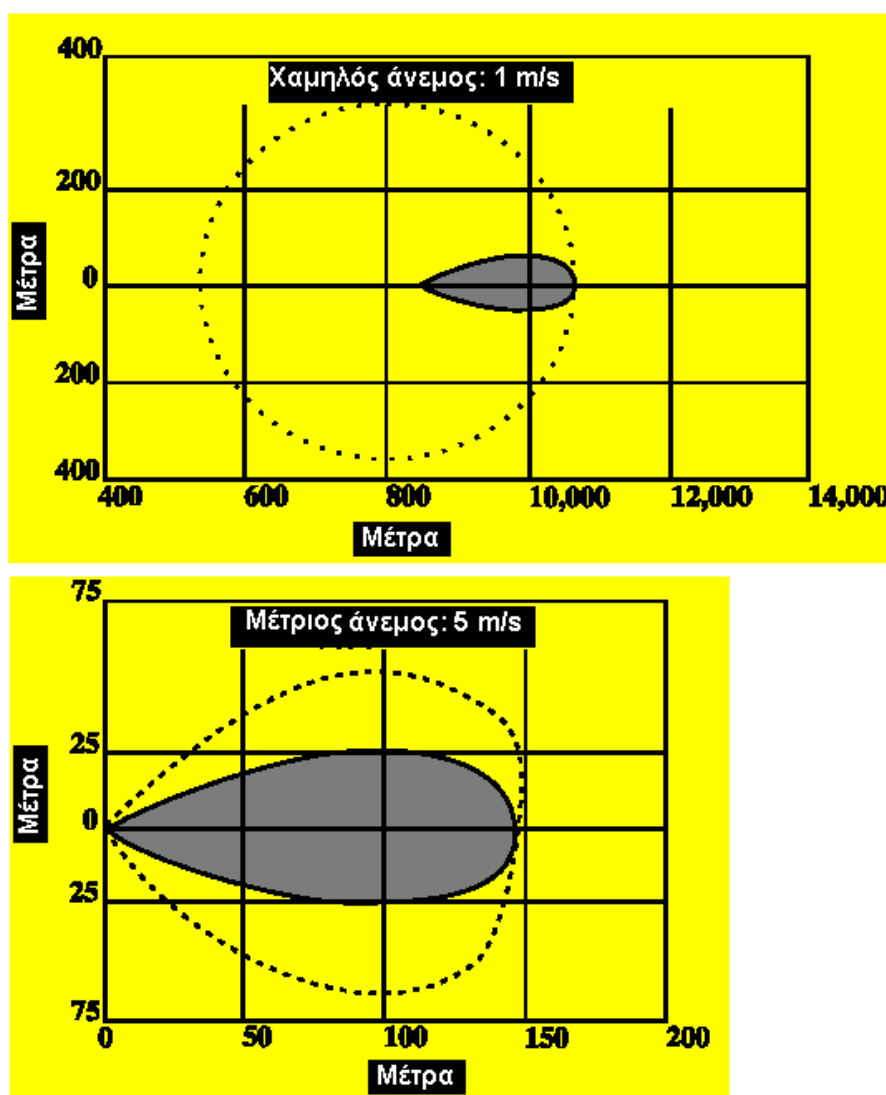
Σχήμα 5.6 : Εγκάρσια τομή διαμέσου ενός θυσάνου του Gauss με  $\sigma_y=20\text{m}$  και  $\sigma_z=20\text{m}$ . Η συγκέντρωση εκφράζεται σε σχετικές μονάδες, όπου 1 είναι η συγκέντρωση τον κεντρικό άξονα του θυσάνου.



Από την εξίσωση (5.2) μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα:

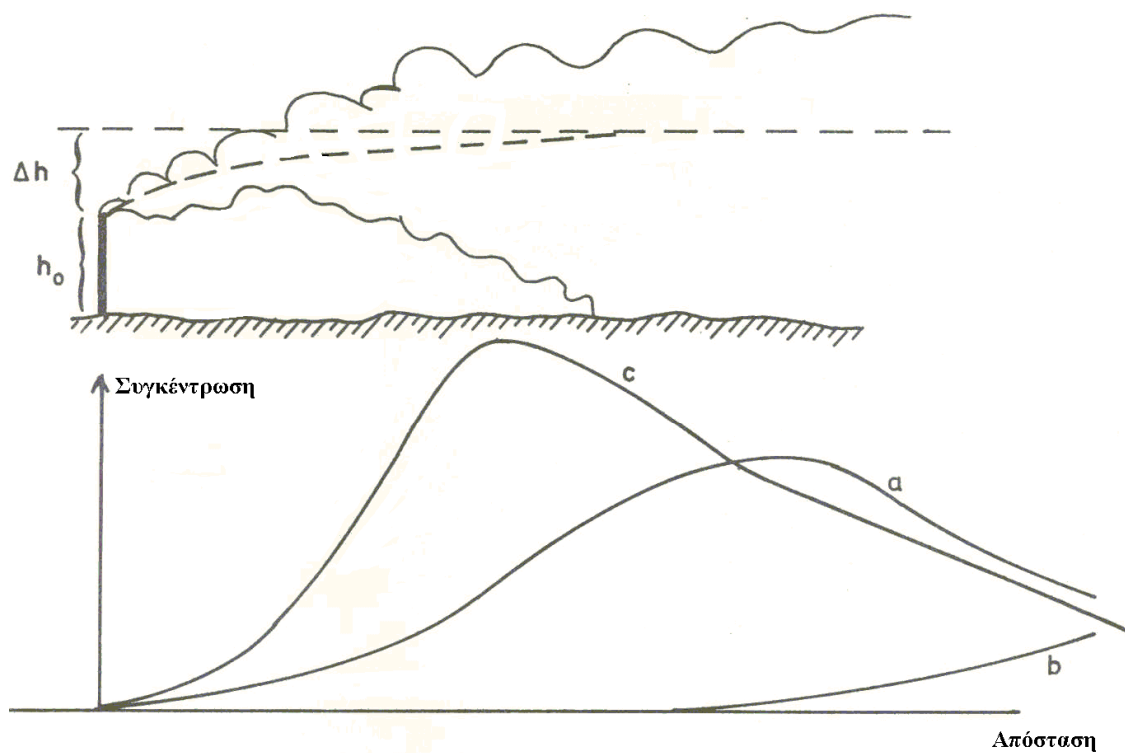
α. Οι συγκεντρώσεις σε κάποιο σημείο είναι ευθέως ανάλογες του ρυθμού εκπομπής  $Q$ . Αν οι υπόλοιπες συνθήκες παραμένουν σταθερές, οι αλλαγές στις εκπομπές θα μεταβάλλουν γραμμικά τις συγκεντρώσεις των ρύπων.

β. Οι συγκεντρώσεις μειώνονται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Σ' αυτή την περίπτωση δεν μπορούμε να μιλάμε για γραμμική σχέση γιατί όπως θα αναπτύξουμε στο επόμενο κεφάλαιο τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  μεταβάλλονται επίσης με την ταχύτητα του ανέμου ενώ ακόμη ο άνεμος υπεισέρχεται στην εξίσωση υπολογισμού του ενεργού ύψους εκπομπής.



**Σχήμα 5.7 :** Το αποτύπωμα του θυσάνου σε συνθήκες χαμηλών και μέτριων ανέμων, αντίστοιχα. Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τα όρια εμπιστοσύνης λόγω των ταλαντεύσεων της διεύθυνσης του ανέμου. Περιλαμβάνουν την περιοχή μέσα στην οποία ο θύσανος θα παραμείνει με πιθανότητα 95%.

γ. Οι συγκεντρώσεις μειώνονται όσο αυξάνονται οι δύο τυπικές αποκλίσεις,  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ . Όπως θα παρουσιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  αυξάνονται με την απόσταση από την πηγή και μειώνονται όσο αυξάνεται η ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Στο σχήμα 5.8 εμφανίζεται η επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας στις συγκεντρώσεις που προέρχονται από μια ανυψωμένη πηγή. Παρά το γεγονός ότι η διασπορά είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες αστάθειας σε σύγκριση με ευσταθείς συνθήκες, οι πρώτες δίνουν υψηλότερες συγκεντρώσεις κοντά στην πηγή. Η εξήγηση αυτής της παράδοξης συμπεριφοράς βρίσκεται στην συμπεριφορά του θυσάνου ο οποίος σε συνθήκες αστάθειας φθάνει νωρίτερα στο έδαφος.



**Σχήμα 5.8 :** Επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας στις συγκεντρώσεις από μια ανυψωμένη πηγή. **a.** Ουδέτερη στρωμάτωση **b.** Ευσταθείς συνθήκες **c.** Ασταθείς συνθήκες.

Όπως προκύπτει από προσεκτική εξέταση της εξίσωσης (5.2) το μοντέλο του θυσάνου του Gauss δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με μηδέν. Στην πραγματικότητα όμως ακόμα και στην περίπτωση που τα ανεμόμετρα δείχνουν ταχύτητα του ανέμου ίση με το μηδέν αυτό δεν σημαίνει ότι ο άνεμος έχει σταματήσει εντελώς (αυτό είναι πολύ σπάνια κατάσταση) αλλά απλούστατα ότι ο άνεμος είναι μικρότερος από το κατώφλι του

ανεμόμετρου και δεν μπορεί να μετρηθεί. Γι' αυτό τον λόγο η άπνοια ορίζεται σαν η ατμοσφαιρική κατάσταση κατά την οποία ο άνεμος είναι μικρότερος ή ίσος του  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . Είναι λοιπόν πολύ σημαντικό στην περίπτωση που πραγματοποιούνται μετρήσεις του ανέμου για την μελέτη της διασποράς σε μία περιοχή να χρησιμοποιούνται ανεμόμετρα τα οποία έχουν μικρό κατώφλι και μπορούν να μετρήσουν ικανοποιητικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Από την εξίσωση (5.2) μπορούμε να υπολογίσουμε τις εξισώσεις για κάποιες ενδιαφέρουσες ειδικές περιπτώσεις. Συχνά π.χ. μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τις μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένα αυτές οι συγκεντρώσεις αναμένονται κατά μήκος της προβολής του κεντρικού άξονα του θυσάνου στο έδαφος, δηλ. για  $y=0$  (κεντρικός άξονας) και  $z=0$  (έδαφος). Η εξίσωση που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$\chi(x,0,0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (5.6)$$

Οι απολύτως μέγιστες συγκεντρώσεις αναμένονται κατά μήκος του κεντρικού άξονα του θυσάνου ( $y=0$ ) στο ενεργό ύψος εκπομπής ( $z=H$ ) δηλ. :

$$\chi(x,0,H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \quad (5.7)$$

Οι συγκεντρώσεις στο έδαφος ( $z=0$ ) δίνονται από την σχέση :

$$\chi(x,y,0) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (5.8)$$

#### 5.4 Προσδιορισμός των $\sigma_y$ και $\sigma_z$

##### 5.4.α Από μετρήσεις των διακυμάνσεων του ανέμου.

Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις των γρήγορων διακυμάνσεων του ανέμου. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται συνήθως σε ύψος 10 μέτρων και για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται ανεμόμετρα και/ή ανεμοδείκτες με μικρή χρονική σταθερά (π.χ. ανεμόμετρα με προπέλες, u,v,w σύστημα ανεμόμετρου, ηχητικό ανεμόμετρο κτλ.). Οι παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτές

τις περιπτώσεις για τον προσδιορισμό των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις της οριζόντιας και της κατακόρυφης διεύθυνσης του ανέμου,  $\sigma_\varphi$  και  $\sigma_e$  αντίστοιχα. Οι τυπικές αποκλίσεις της κατανομής των συγκεντρώσεων των ρύπων σε κάποια απόσταση  $x$  δίνονται σε αυτή την περίπτωση από τις σχέσεις:

$$\sigma_y = x \sigma_\varphi f_y \quad (5.9)$$

$$\sigma_z = x \sigma_e f_z \quad (5.10)$$

όπου τα  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  δίνονται σε μέτρα, τα  $\sigma_\varphi$  και  $\sigma_e$  σε ακτίνια. Οι παράμετροι  $f_y$  και  $f_z$  δίνονται από τις σχέσεις

$$f_y = 1 / [1+0.9(x/1000u)^{0.5}] \quad (5.11)$$

$$f_z = 1 / [1+0.9(x/500u)^{0.5}] \text{ (συνθήκες αστάθειας)} \quad (5.12)$$

$$f_z = 1 / [1+0.9(x/50u)^{0.5}] \text{ (συνθήκες ευστάθειας)} \quad (5.13)$$

#### 5.4.β Κλάσεις ευστάθειας κατά Pasquill

Η απλούστερη, αν και όχι ιδιαίτερα ακριβής, μέθοδος για τον προσδιορισμό των συνθηκών ευστάθειας της ατμόσφαιρας είναι με την χρήση των κλάσεων ευστάθειας κατά Pasquill. Όπως φανερώνει το όνομα η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε πρώτα από τον Pasquill (1961) αν και έχει αργότερα υποστεί κάποιες τροποποιήσεις από άλλους ερευνητές και γι' αυτό συναντάται στην βιβλιογραφία με σύνθετα ονόματα όπως Pasquill-Gifford και Pasquill-Turner.

Ο πίνακας I περιέχει έξι κλάσεις ευστάθειας για πέντε κλάσεις ανέμων επιφανείας, τρεις κλάσεις ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας και δύο κλάσεις νέφωσης κατά την διάρκεια της νύχτας. Όπως προκύπτει απ' αυτό τον πίνακα, οι κλάσεις ευστάθειας παρέχουν μόνο μία ποιοτική εκτίμηση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λεπτομερή περιγραφή των συνθηκών ευστάθειας. Έτσι οι πολύ ασταθείς συνθήκες συμβολίζονται με A, και περνώντας από την μέτρια και ελαφρά αστάθεια (B και C αντίστοιχα) καταλήγουμε στην κλάση D η οποία αντιπροσωπεύει την ουδέτερη στρωμάτωση (η οποία επικρατεί σε συνθήκες πυκνής νέφωσης ή/και ισχυρών ανέμων). Οι ευσταθείς συνθήκες αντιπροσωπεύονται από δύο μόνο κλάσεις ευστάθειας (E και F για ελαφρά και μέτρια ευστάθεια, αντίστοιχα). Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η ακρίβειά των κλάσεων ευστάθειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαίτερες συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής και μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να οδηγήσουν σε λάθος εκτιμήσεις. Παρά τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν, οι κλάσεις ευστάθειας κατά Pasquill (συμπεριλαμβανομένων των αναθεωρημένων εκδόσεων που προαναφέρθηκαν) αποτελούν και σήμερα τη δημοφιλέστερη μέθοδο προσδιορισμού των συνθηκών ατμοσφαιρικής ευστάθειας, τουλάχιστον στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για ρυθμιστικούς σκοπούς. Ο κυριότερος λόγος είναι η απλότητά και ευχρηστία τους, οι περιορισμένες ανάγκες σε στοιχεία εισαγωγής αλλά και η συσσωρευμένη εμπειρία στη χρήση τους.

### ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Κλάσεις ευστάθειας σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες.

**A:** ΠΟΛΥ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

**D:** ΟΥΔΕΤΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ \*

**B:** ΜΕΤΡΙΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

**E:** ΕΛΑΦΡΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

**C:** ΕΛΑΦΡΑ ΑΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

**F:** ΜΕΤΡΙΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

ΑΝΕΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ m/s	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**			ΝΥΧΤΑ***	
	ΕΝΤΟΝΗ	ΜΕΣΗ	ΛΙΓΗ	ΛΕΠΤΗ ΝΕΦΩΣΗ ≤3/8	H >4/8 ΧΑΜΗΛΗ ΝΕΦΩΣΗ
<2	A	A-B****	B	-	-
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 πυκνής νέφωσης τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας.

\*\* Έντονη ηλιακή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε τυπικές μεσημεριατικές 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.

\*\*\*\* Στις περιπτώσεις που εμφανίζεται A-B, B-C και C-D πρέπει να χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δύο κλάσεων.

### ΠΙΝΑΚΑΣ Ιβ

Κλάσεις εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ύψος ηλίου	Ηλιακή ακτινοβολία (Wm <sup>-2</sup> )	Κλάση ακτινοβολία ηλιακής
>60°	>700	Έντονη
35° - 60°	350-700	Μέση
15° - 35°	70-350	Λίγη

## Υπολογισμός του ύψους του ηλίου

Το ύψος του ηλίου σε ένα τόπο μεταβάλλεται (i) με την εποχή και (ii) με τη χρονική στιγμή της ημέρας.

### (i) Εποχιακή μεταβολή

Οι Ιουλιανές ημέρες απλά απαριθμούν τις ημέρες – και τα κλάσματα ημέρας – τα οποία έχουν παρέλθει από την έναρξη του έτους. Έτσι π.χ. η Ιουλιανή ημερομηνία της 11 Φεβρουαρίου είναι  $d=42$  (31 ημέρες τον Ιανουάριο + 11 ημέρες τον Φεβρουάριο). Το όνομα δεν έχει καμιά σχέση με το Ιουλιανό ημερολόγιο το οποίο είναι κάτι διαφορετικό. Ο αριθμός των ημερών ανά έτος είναι  $d_y=365$  ενώ για δίσεκτα έτη  $d_y=366$ . Σε μη-δίσεκτα έτη το θερινό ηλιοστάσιο είναι  $d_r=173$

Η απόκλιση του ήλιου δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta_s = \Phi_r \cos \left[ \frac{d - d_r}{d_y} \right]$$

όπου  $C = 2\pi$  ακτίνια =  $360^\circ$ . Η κλίση του άξονα της γης ως προς το τροχιακό επίπεδο της γύρω από τον ήλιο είναι  $\Phi_r=23.45^\circ=0.409$  ακτίνια.

### (ii) Ημερήσια μεταβολή

Όπως η γη γυρίζει γύρω από τον άξονά της μεταβάλλεται η θέση του ήλιου πάνω από τον τοπικό ορίζοντα. Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο του ήλιου. Το ύψος του ήλιου ( $\Psi$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον τοπικό ορίζοντα. Η γωνία  $\Psi$  εξαρτάται μεταξύ άλλων από το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  και το μήκος της περιοχής  $\lambda_e$ :

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

όπου  $t_{UTC}$  είναι ο Συντονισμένος Παγκόσμιος Χρόνος (UTC), και  $t_d$  είναι η διάρκεια της ημέρας (=24 ώρες). Το γεωγραφικό πλάτος είναι θετικό βόρεια του ισημερινού και το γεωγραφικό μήκος είναι θετικό δυτικά του μεσημβρινού του Greenwich.

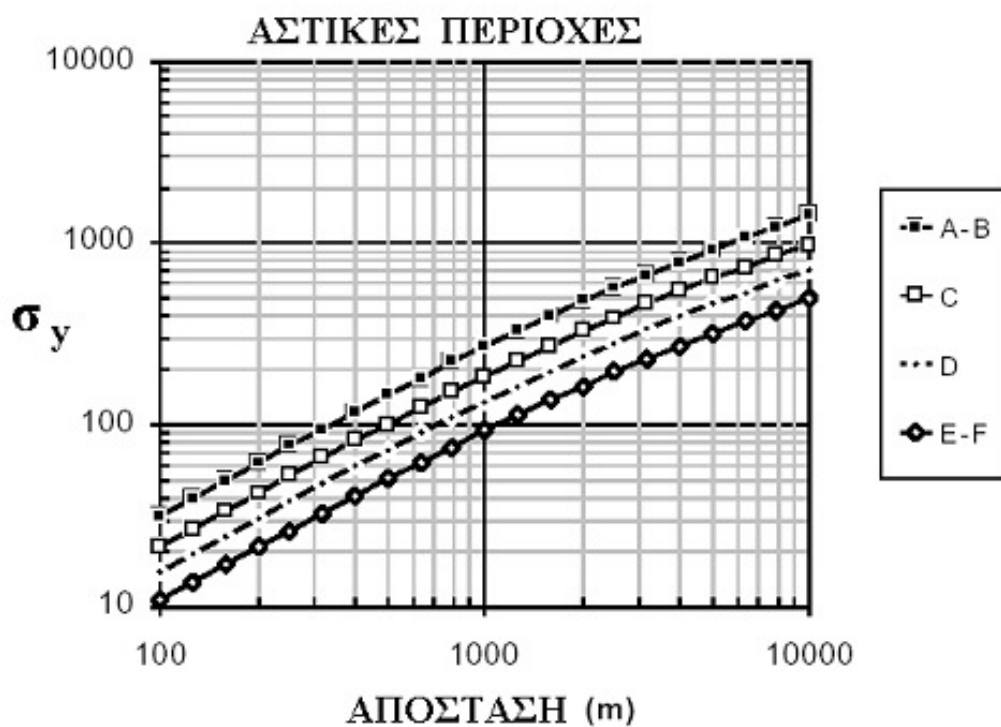
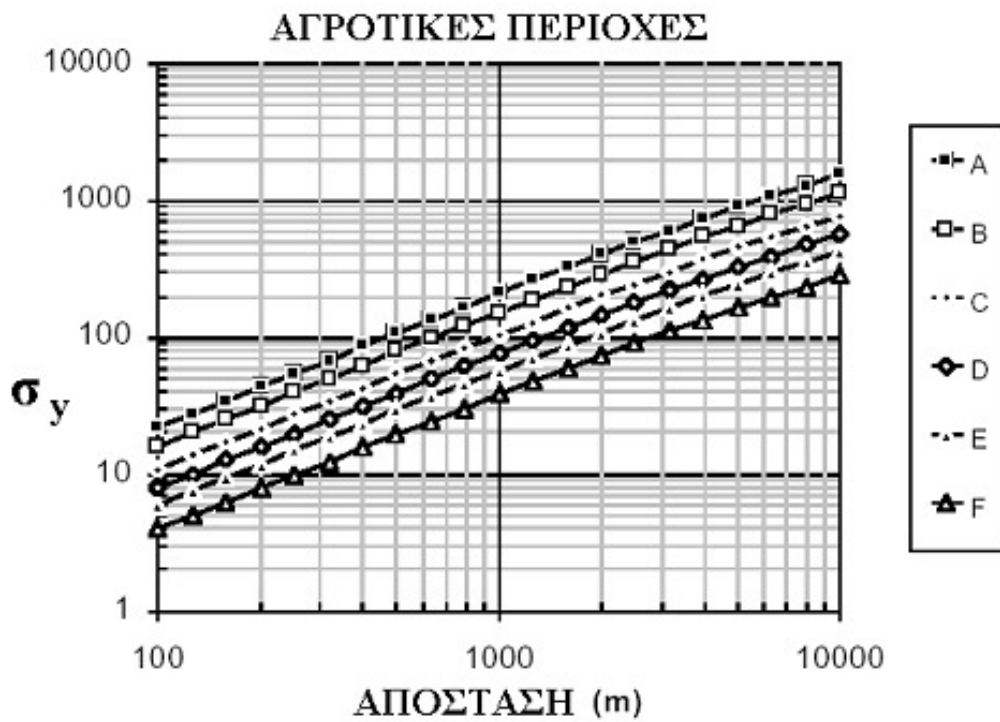
## Οι εξισώσεις Briggs

Τις προηγούμενες τέσσερις δεκαετίες προτάθηκαν διάφορες εξισώσεις για τον υπολογισμό των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$ . Μεταξύ άλλων, οι εξισώσεις που προτάθηκαν από τον Briggs θεωρούνται ότι παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα λεπτομερειακά δεδομένα. Οι εξισώσεις του Briggs εμφανίζονται στον Πίνακα II. Στα σχήματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις οι οποίες επιτρέπουν την εκτίμηση των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  σαν συνάρτηση της απόστασης από την πηγή και της κλάσης ευστάθειας.

**Πίνακας II**

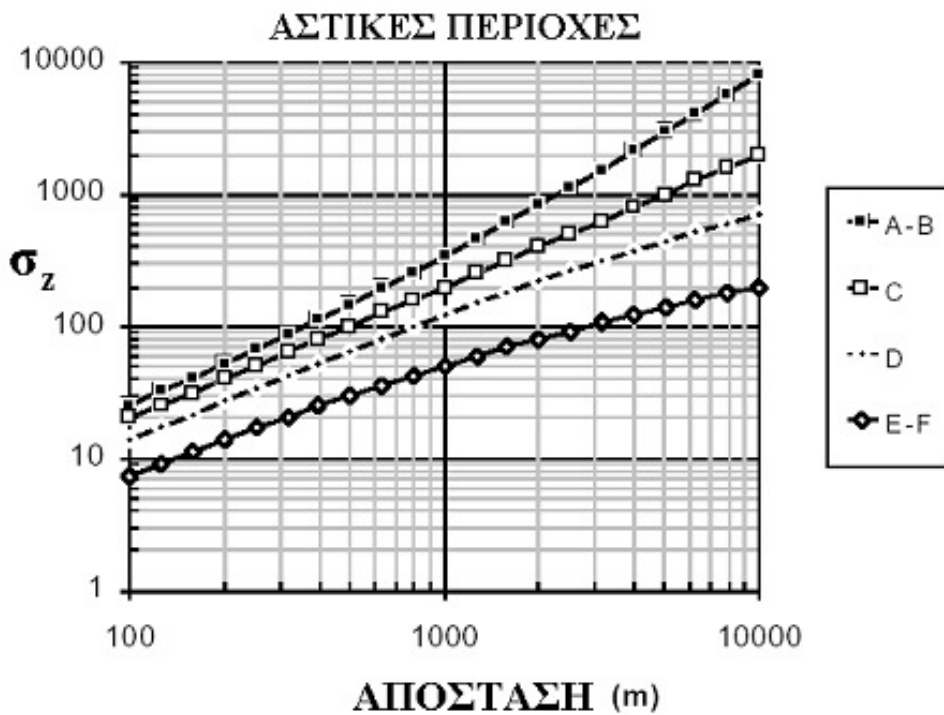
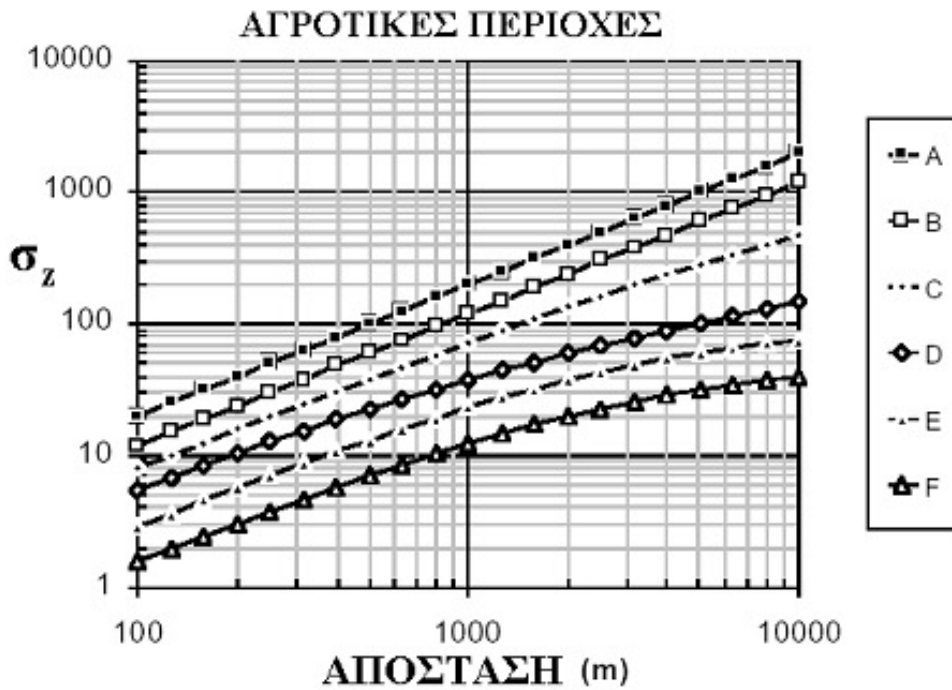
**Οι εξισώσεις που πρότεινε ο Briggs (1973) για τον υπολογισμό των  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  σε αποστάσεις  $10^2 < x < 10^4$  m.**

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



**Σχήμα 5.9 :** Υπολογισμός του  $\sigma_y$  σαν συνάρτηση της απόστασης και της κλάσης ευστάθειας για την ύπαιθρο και για αστικές περιοχές, αντίστοιχα



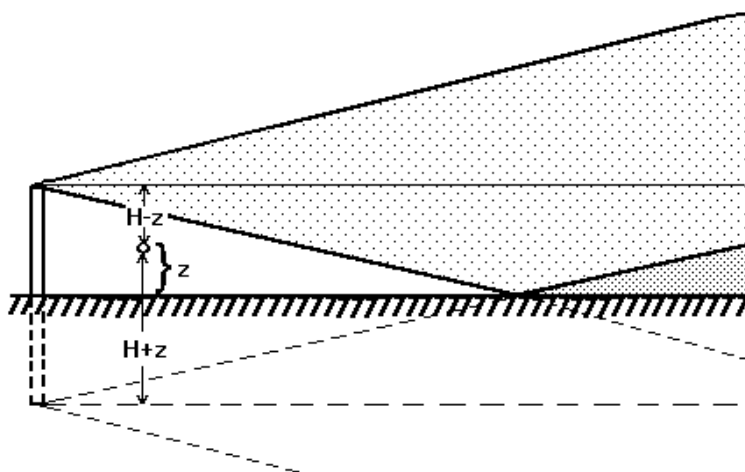


**Σχήμα 5.10 :** Υπολογισμός του  $\sigma_z$  σαν συνάρτηση της απόστασης και της κλάσης ευστάθειας για την ύπαιθρο και αστικές περιοχές, αντίστοιχα

## 5.5 Ανάκλαση των ρύπων στο έδαφος και στην βάση της υπερυψωμένης αναστροφής

Η παρουσία του εδάφους περιπλέκει κάπως τους υπολογισμούς γιατί περιορίζει την κατακόρυφη εξάπλωση του θυσάνου. Μία βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη του μοντέλου του θυσάνου του Gauss είναι ότι η απόθεση στην επιφάνεια της γης είναι αμελητέα, άρα θα πρέπει τα σωματίδια της ρύπανσης να μπορούν κατά κάποιο τρόπο να επιστρέψουν πάλι στην ατμόσφαιρα. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούμε μία μαθηματική μέθοδο που ονομάζεται **καθρεπτισμός**. Στην περίπτωση μας αυτό σημαίνει ότι τοποθετούμε μία **εικονική πηγή (virtual source)** σε ύψος  $-H$  και υποθέτουμε ότι η διασπορά από την εικονική πηγή γίνεται κατά ταυτόσημο τρόπο όπως από την πραγματική πηγή. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα των δύο πηγών (σχήμα 5.11). Το κομμάτι του εικονικού θυσάνου που περνάει την επιφάνεια του εδάφους είναι ακριβώς το ίδιο με το κομμάτι του θυσάνου από την πραγματική πηγή το οποίο χάνεται κάτω από το έδαφος και έτσι ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα ένας μέρος των ρύπων που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια κατακρατείται από αυτή. Η ξηρή εναπόθεση είναι σχετικά αργή διαδικασία η οποία χρειάζεται μεγάλα χρονικά διαστήματα για να δράσει οπότε η σημασία της σε τοπική κλίμακα είναι μικρή. Παρ' όλα αυτά όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, έχουν αναπτυχθεί κάποιες τεχνικές οι οποίες επιτρέπουν την τροποποίηση του βασικού μοντέλου του θυσάνου του Gauss ώστε να λαμβάνει υπόψη τη ξηρή εναπόθεση.



Σχήμα 5.11 : Η ανάκλαση των ρύπων στο έδαφος

Λαμβάνοντας υπόψη και την ανάκλαση των ρύπων στο έδαφος η εξίσωση (5.2) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \bullet \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (5.14)$$

Το ύψος ανάμειξης είναι το ύψος από την επιφάνεια της γης μέχρι το οποίο μεταφέρονται οι ρύποι από τους τυρβώδεις στροβίλους. Σε πολλές περιπτώσεις κατά την διάρκεια της ημέρας πάνω από το ύψος ανάμειξης υπάρχει μία υπερυψωμένη αναστροφή με αποτέλεσμα οι ρύποι να παγιδευονται ανάμεσα στην επιφάνεια του εδάφους και το ευσταθές στρώμα που υπάρχει ψηλά. Σ' αυτή την περίπτωση μπορούν να συμβούν πολλαπλές ανακλάσεις του θυσάνου τόσο στο έδαφος όσο και στην βάση της υπερυψωμένης αναστροφής. Η παρακάτω εξίσωση βρέθηκε ότι περιγράφει ικανοποιητικά αυτή την κατάσταση :

$$\chi(x,0,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \sum_{N=1}^j \left( \exp\left[-\frac{(z-H-2Nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H-2Nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z-H+2Nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H+2Nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right) \right\} \quad (5.15)$$

όπου  $z_i$  είναι το ύψος ανάμειξης και οι τιμές  $J=3$  ή  $4$  είναι αρκετές για να περιγράψουν όλες τις ανακλάσεις που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον.

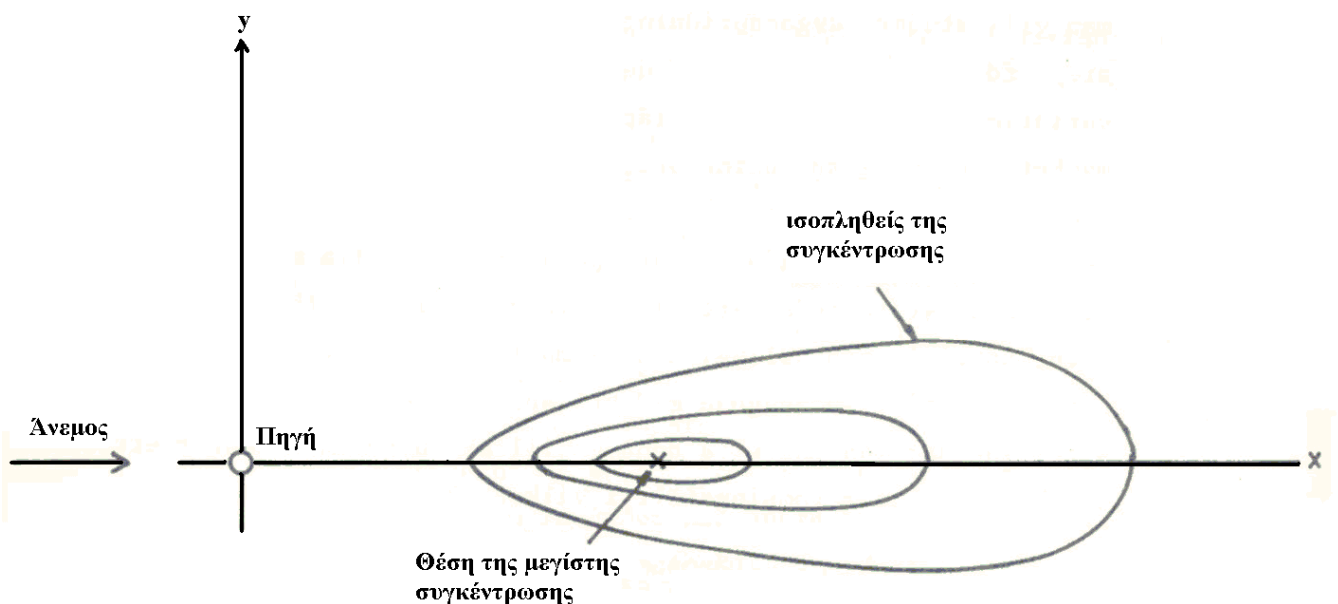
**Καπνισμός (fumigation)** εμφανίζεται όταν η εξάπλωση του θυσάνου προς τα πάνω εμποδίζεται από μία αναστροφή της οποίας η βάση βρίσκεται σε σχετικά

χαμηλό ύψος ενώ κάτω από αυτήν η ανάμειξη των ρύπων είναι έντονη. Λόγω της έντονης ανάμειξης η κατακόρυφη κατανομή των ρύπων είναι περίπου ομοιόμορφη. Σ' αυτή την περίπτωση η συγκέντρωση στο έδαφος υπολογίζεται από την σχέση :

$$\chi(x, y, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_y z_i} \quad (5.16)$$

### 5.6 Προσδιορισμός των μεγίστων συγκεντρώσεων στο έδαφος και της απόστασης όπου εμφανίζονται.

Στο σχήμα 5.12 εμφανίζονται σχηματικά οι συγκεντρώσεις επιφανείας από μια υπερυψωμένη πηγή. Στην άμεση γειτονία της καμινάδας οι συγκεντρώσεις είναι μηδενικές αλλά σε κάποια απόσταση από αυτήν αρχίζουν να αυξάνονται μέχρι ενός σημείου όπου εμφανίζεται ένα μέγιστο. Κατόπιν, αρχίζει η βαθμιαία μείωση των συγκεντρώσεων.

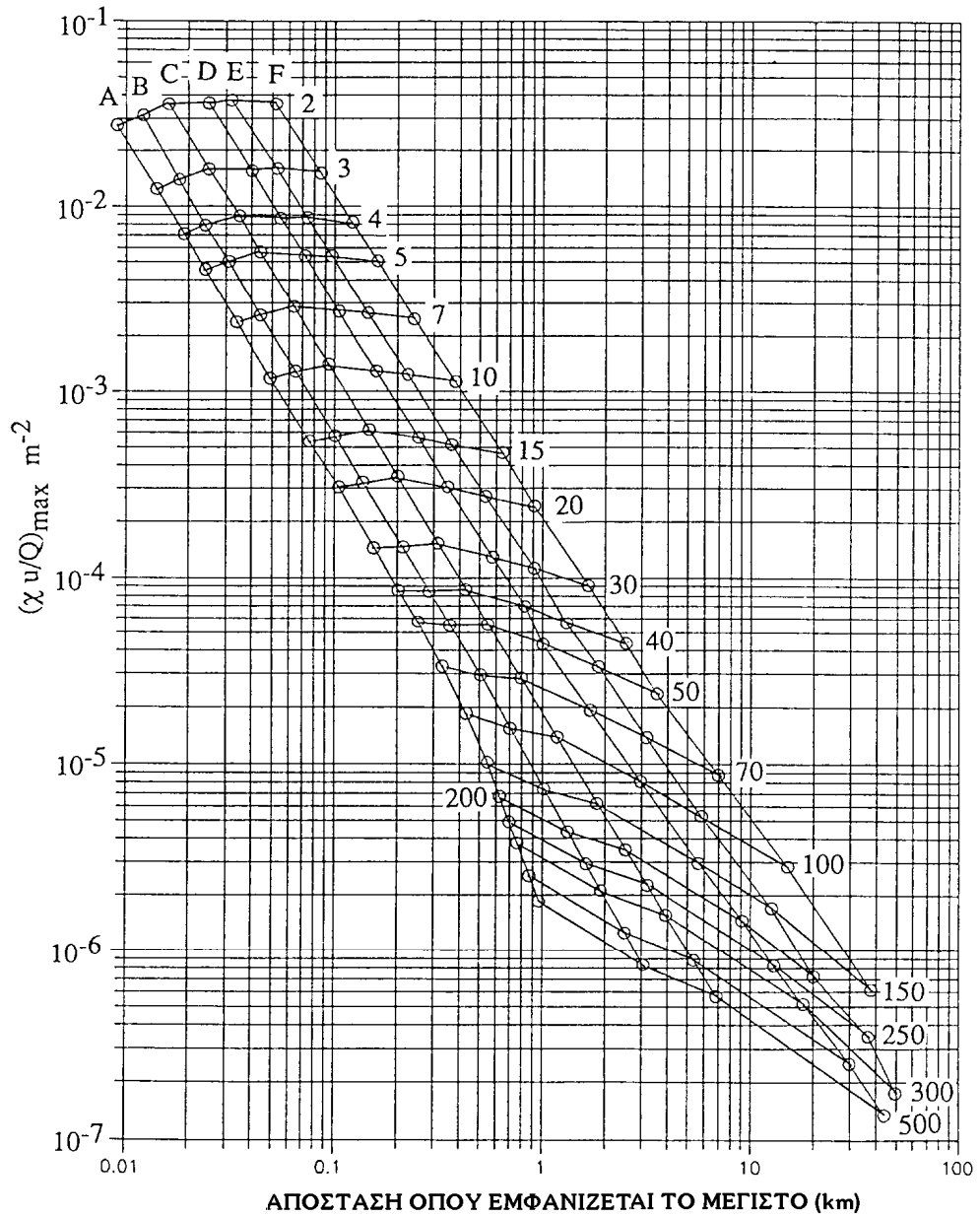


**Σχήμα 5.12 :** Το πεδίο των συγκεντρώσεων επιφανείας το οποίο προκύπτει από εκπομπές μίας καμινάδας

Οι κανονισμοί για την ποιότητα αέρα συνήθως αφορούν τις μέγιστες συγκεντρώσεις στο έδαφος και γι' αυτό είναι σημαντικό να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του θυσάνου του Gauss για να προσδιορίσουμε τόσο αυτά τα επίπεδα όσο και την απόσταση από την πηγή όπου αναμένονται. Αν λοιπόν παραγωγίσουμε την εξίσωση (5.2) ως προς  $x$  και βάλουμε το αποτέλεσμα ίσο με μηδέν τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση στην οποία αναμένονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις. Παρ' όλα αυτά οι παράμετροι διασποράς  $\sigma_y$  και  $\sigma_z$  είναι σχετικά πολύπλοκες συναρτήσεις του  $x$  και δεν είναι δυνατόν να βρεθεί μία γενική λύση στο πρόβλημα. Στην περίπτωση κατά την οποία το  $\sigma_y \propto \sigma_z$  τότε η μέγιστη συγκέντρωση εμφανίζεται στην απόσταση στην οποία ισχύει  $\sigma_z = (H^2/2)^{1/2}$ . Η εμπειρία δείχνει ότι η κρίσιμη απόσταση είναι περίπου ίση με μερικές δεκάδες φορές το ύψος της καμινάδας. Σε γενικές γραμμές όμως ο μόνος τρόπος για να βρεθεί η μέγιστη συγκέντρωση όπως και η απόσταση στην οποία εμφανίζεται είναι να εφαρμοστεί η εξίσωση (5.2) για διάφορες αποστάσεις, εκπομπές και ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτή η επίπονη διαδικασία είναι με την χρήση του νομογράμματος που εμφανίζεται στο σχήμα 5.13. Ο οριζόντιος άξονας είναι λογαριθμικός και δείχνει την απόσταση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη συγκέντρωση ενώ ο κάθετος άξονας είναι επίσης λογαριθμικός και δείχνει την μέγιστη συγκέντρωση κανονικοποιημένη με τον ρυθμό εκπομπής και την ταχύτητα του ανέμου. Η χρήση του νομογράμματος φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:

Έστω ότι έχουμε μία εκπομπή  $Q = 20 \text{ gs}^{-1}$  η οποία από μία καμινάδα ενεργού ύψους 100 μέτρων ενώ στην ατμόσφαιρα έχουμε  $u = 5 \text{ ms}^{-1}$  και κλάση ευστάθειας  $D$ . Ξεκινώντας από την καμπύλη της ευστάθειας  $D$  βρίσκουμε το σημείο (έστω  $A$ ) στο οποίο τέμνει την καμπύλη για ενεργό ύψος  $H = 100 \text{ m}$ . Από το σημείο αυτό χαράσσουμε την κάθετο στον οριζόντιο άξονα τον οποίο τέμνει στο σημείο  $x = 3 \text{ km}$ , η οποία είναι η απόσταση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη συγκέντρωση. Από το προηγούμενο σημείο  $A$  μπορούμε να χαράξουμε και μία κάθετο στον κάθετο άξονα τον οποίο τέμνει στο σημείο :

$$(xu/Q)_{\max} = 8 \cdot 10^{-6} \Rightarrow x_{\max} = 8 \cdot 10^{-6} Q/u = 8 \cdot (20/5) = 32 \mu\text{g} / \text{m}^3$$

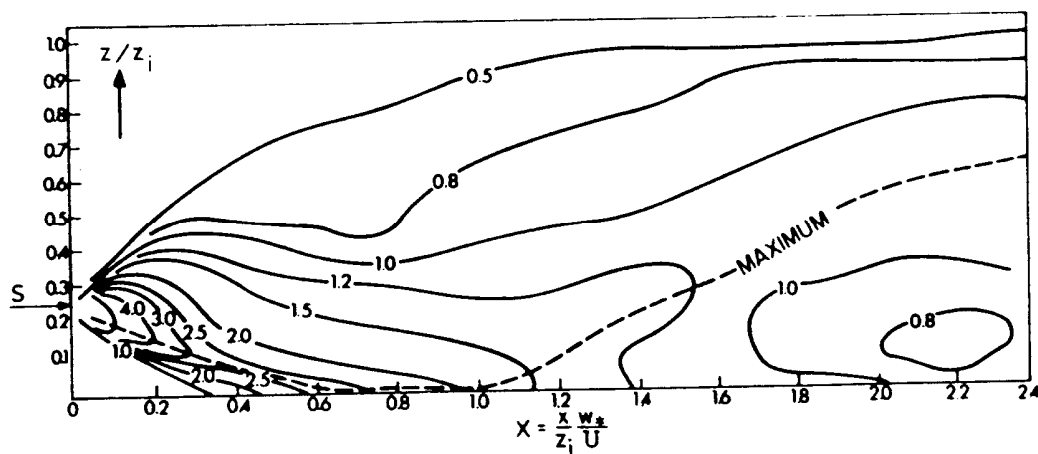


**Σχήμα 5.13** Νομόγραμμα για τον προσδιορισμό της απόστασης στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη συγκέντρωση εδάφους. Στην κορυφή των καμπυλών εμφανίζονται οι κλάσεις ευστάθειας ενώ οι αριθμοί στα δεξιά δείχνουν το ενεργό ύψος της εκπομπής.

## 5.7 Περιπτώσεις όπου το μοντέλο του θυσάνου του Gauss είναι λιγότερο κατάλληλο

### 5.7.α Συνθήκες μεγάλης αστάθειας.

Σύμφωνα με την εξίσωση του **μοντέλου του θυσάνου του Gauss** ο κεντρικός άξονας του θυσάνου, κατά μήκος του οποίου εμφανίζονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις, βρίσκεται στο ύψος  $H$  (ενεργό ύψος εκπομπής). Αυτή η παραδοχή είναι σε καλή συμφωνία με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ευστάθειας ή ουδέτερης στρωμάτωσης αλλά σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας παρουσιάζονται μεγάλες αποκλίσεις. Αυτό εμφανίζεται στο σχήμα 5.14 που δείχνει τα αποτελέσματα μιας εργαστηριακής προσομοίωσης. Το πιο εντυπωσιακό στοιχείο που εμφανίζεται στο σχήμα 5.14 είναι η κάθοδος του κεντρικού άξονα του θυσάνου, ο οποίος ξεκινά από ύψος  $H=0.26 z_i$  και φθάνει το έδαφος σε απόσταση  $x = 0.6z_i u/w^*$  από το σημείο εκπομπής. Χρησιμοποιώντας κάποιες τυπικές τιμές για τις άλλες παραμέτρους,  $z_i = 1000\text{m}$ ,  $u=5 \text{ ms}^{-1}$ ,  $w^*=1 \text{ ms}^{-1}$ , βρίσκουμε ότι ο κεντρικός άξονας του θυσάνου ο οποίος ξεκινά από ύψος  $H = 0.26 z_i = 260 \text{ m}$  φθάνει στο έδαφος σε απόσταση περίπου 3 km από την πηγή. Μετά από κάποια απόσταση ο κεντρικός άξονας του θυσάνου αρχίζει πάλι να ανυψώνεται μέχρι που καταλήγει στο ανώτερο μισό του οριακού στρώματος.



**Σχήμα 5.14** Εργαστηριακή προσομοίωση της διασποράς από ανυψωμένη πηγή (S) σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας. Στον οριζόντιο άξονα δείχνεται η αδιάστατη απόσταση ( $w^*$  είναι η κλίμακα ταχύτητας στο αναμεμιγμένο στρώμα (mixed layer) της ατμόσφαιρας), στον κατακόρυφο άξονα το αδιάστατο ύψος ενώ οι ισοπλυθείς δείχνουν σε αδιάστατη μορφή την ολοκληρωμένη ως προς την εγκάρσια διεύθυνση συγκέντρωση.

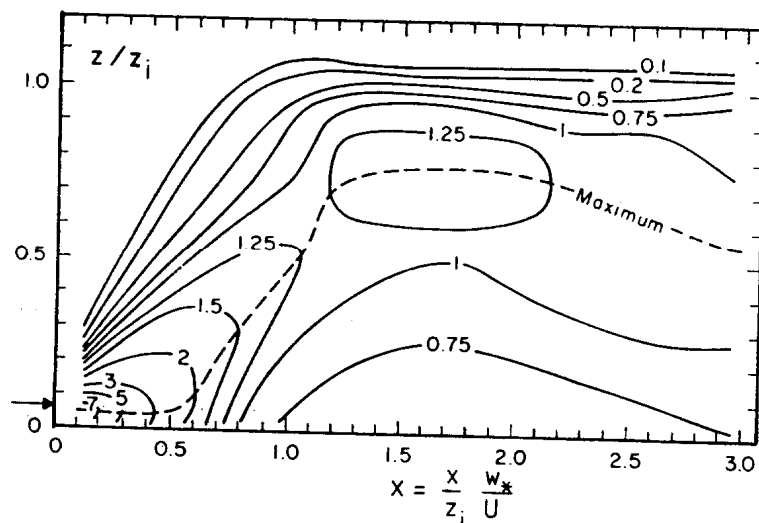


**Σχήμα 5.15.** Διασπορά καπνού από καμινάδα σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας. Διακρίνονται οι βρόχοι που σχηματίζει ο καπνός.

Στο σχήμα 5.16 φαίνεται η αντίστοιχη κατάσταση αλλά για την περίπτωση που η εκπομπή γίνεται κοντά στο έδαφος. Εδώ έχουμε ανύψωση του άξονα του θυσάνου ύστερα απόσταση  $x=0.6z_i/w \cdot \eta$  οποία χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τυπικές τιμές αντιστοιχεί σε 2.5 km.

Την αιτία για αυτή την περίεργη συμπεριφορά του θυσάνου θα πρέπει να την αναζητήσουμε στην δομή της τύρβης σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας η οποία ενεργειακά κυριαρχείται από μεγάλους στρόβιλους οι οποίοι εξαπλώνονται σε ολόκληρο το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας. Οι στρόβιλοι αυτοί έχουν σαν αποτέλεσμα να υπάρχει στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας μια εναλλαγή ανοδικών και καθοδικών ροών αέρα, τόσο χρονικά όσο και γεωγραφικά. Οι ρύποι που καταλήγουν στην ατμόσφαιρα σε παρόμοιες συνθήκες γρήγορα μεταφέρονται στη κορυφή του οριακού στρώματος ή στο έδαφος. Οι ανοδικές αναταρακτικές κινήσεις έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες από τις αντίστοιχες καθοδικές. Για λόγους συνέχειας θα πρέπει να καταλαμβάνουν μικρότερες επιφάνειες. Αυτό σημαίνει ότι οι ρύποι που εκλύονται από μια ανυψωμένη πηγή έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθούν σε μία καθοδική ροή αέρα απ' ότι σε μία ανοδική πράγμα το οποίο έχει σαν συνέπεια ότι κατά αρχήν ο κεντρικός άξονας του θυσάνου κατέρχεται. Όταν ο θύσανος είναι κοντά στο έδαφος, παραμένει εκεί για ένα διάστημα που αντιστοιχεί στον χρόνο που επικρατούν καθοδικές κινήσεις ενώ αρχίζει να ανυψώνεται όταν βρεθεί σε ανοδική ροή αέρα.





**Σχήμα 5.16** Εργαστηριακή προσομοίωση της διασποράς από πηγή κοντά στο έδαφος σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας. Τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ίδια όπως στο σχήμα 5.14.

### 5.7.β Εκπομπές ρύπων κοντά στο έδαφος

Κοντά στο έδαφος παρουσιάζονται κάποιες επιπλοκές στην εφαρμογή του μοντέλου του θυσάνου του Gauss:

- η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σχεδόν λογαριθμικά με το ύψος και είναι δύσκολο να εκλέξουμε μία τιμή του ανέμου που να είναι αντιπροσωπευτική για ολόκληρο το κατακόρυφο στρώμα το οποίο καταλαμβάνει ο θύσανος.
- η παρουσία του εδάφους έχει σαν συνέπεια ότι η κατακόρυφη δομή της τύρβης δεν είναι ομοιογενής. Διάφορες μετρήσεις σε θυσάνους από επιφανειακές πηγές έχουν επιβεβαιώσει ότι η εγκάρσια κατανομή είναι κανονική ενώ η κατακόρυφη κατανομή αποκλίνει από αυτό το πρότυπο.

Για τους παραπάνω λόγους το μοντέλο του θυσάνου του Gauss δεν ενδείκνυται για υπολογισμούς στην περίπτωση που έχουμε εκπομπή κοντά στο έδαφος.

### 5.8 Γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου.

Μέχρι εδώ περιοριστήκαμε στον υπολογισμό της διασποράς από σημειακές πηγές, πρόβλημα το οποίο είναι εννοιολογικά ευκολότερο. Σε γενικές γραμμές είναι δυνατόν να ολοκληρώσουμε την εξίσωση Gauss ως προς το χώρο και να παράγουμε τις αντίστοιχες εξισώσεις για γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου. Συνήθως αυτές

οι ολοκληρώσεις δεν οδηγούν σε αναλυτικές λύσεις και είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε αριθμητικές μεθόδους για την ολοκλήρωση της εξίσωσης. Στο εμπόριο υπάρχουν πολλά μοντέλα που μπορούν να υπολογίσουν την διασπορά από μη σημειακές πηγές (π.χ. Benson, 1979, EPA, 1986).

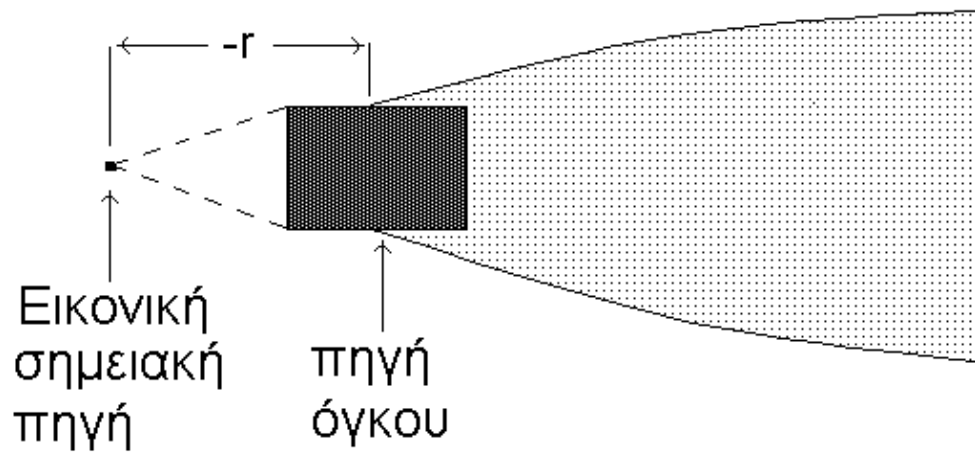
Οι περισσότεροι δρόμοι με πυκνή κυκλοφορία μπορούν να θεωρηθούν σαν γραμμικές πηγές. Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την ολοκλήρωση της εξίσωσης (5.2) ως προς το  $y$ . Στην ειδική περίπτωση που έχουμε μία άπειρη γραμμική πηγή κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου οι συγκεντρώσεις δίνονται από την σχέση:

$$\chi(x, y, 0) = \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (5.17)$$

όπου το  $q$  είναι η ένταση της πηγής ανά μονάδα μήκους, π.χ.  $\text{gs}^{-1}\text{m}^{-1}$ .

Λόγω του γεγονότος ότι οι εκπομπή των ρύπων λαμβάνει χώρα κοντά στο έδαφος (ενεργό ύψος  $\approx 2\text{m}$ ) υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην επιλογή του ανέμου ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στην σχέση (5.17). Σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως επιλέγουμε την ταχύτητα του ανέμου η οποία έχει μετρηθεί σε ύψος περίπου 2 μέτρων πάνω από το έδαφος για τον υπολογισμό της διασποράς τις πρώτες λίγες εκατοντάδες μέτρα από την πηγή.

Εναλλακτικά, μπορούμε σε πολλές περιπτώσεις να χρησιμοποιήσουμε την έννοια της εικονικής πηγής για να προσομοιώσουμε την διασπορά από γραμμικές, εμβαδικές και πηγές όγκου. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 5.17 όπου έχουμε τοποθετήσει μία εικονική σημειακή πηγή σε απόσταση  $-r$  προκειμένου να προσομοιώσουμε την διασπορά από μία πηγή όγκου.



**Σχήμα 5.17.** Χρήση εικονικής σημειακής πηγής για την προσομοίωση της διασποράς από μία πηγή όγκου.