

6

Ενεργό ύψος εκπομπής

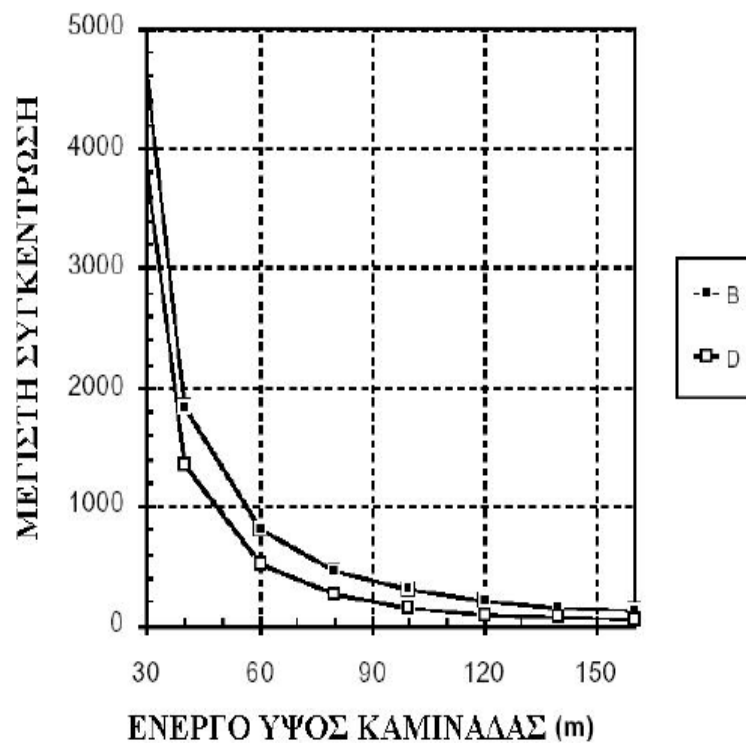
Οι περισσότεροι ρύποι που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα προέρχονται από καύσεις πράγμα το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από το περιβάλλον. Αυτό έχει σαν συνέπεια ο καπνός να ανυψώνεται με αποτέλεσμα το ενεργό ύψος (effective height) της καμινάδας, H , να είναι μεγαλύτερο από το φυσικό ύψος της, h . Η ανύψωση του θυσάνου (plume rise) λόγω της άνωσης λέγεται θερμική ανύψωση (thermal rise). Ακόμα, τα αέρια όταν αφήνουν την καμινάδα έχουν μια υψηλή αρχική ταχύτητα (δεν είναι ασυνήθεις ταχύτητες της τάξης των 20 ms^{-1}) γεγονός το οποίο επίσης συνεισφέρει στην ανύψωση του θυσάνου. Αυτή η επίδραση έχει γενικά μικρή εμβέλεια (ο χρόνος δράσης είναι περίπου 30-40 δευτερόλεπτα) και είναι συνήθως δευτερεύουσας σημασίας σε σύγκριση με την θερμική ανύψωση. Ένας εμπειρικός κανόνας λέει ότι αν η θερμοκρασία των αερίων υπερβαίνει αυτή του αέρα με 10-15 K τότε η θερμική ανύψωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη λόγω της ορμής. Από την άλλη πλευρά τα αέρια τα οποία είναι βαρύτερα του ατμοσφαιρικού αέρα κατέρχονται λόγω αρνητικής άνωσης ενώ και το κατώρευμα στην υπήνεμη πλευρά της καμινάδας μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την κάθοδο του θυσάνου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανύψωση του θυσάνου έχει πολύ μεγάλη σημασία στον υπολογισμό των μεγίστων συγκεντρώσεων εδάφους γιατί μπορεί να αυξήσει το ενεργό ύψος της καμινάδας με ένα παράγοντα 2 έως 10 φορές το φυσικό ύψος εκπομπής. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη συγκέντρωση εδάφους είναι χονδρικά αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του ενεργού ύψους της καμινάδας (σχήμα 6.1), είναι φανερό ότι η ανύψωση του θυσάνου μπορεί, στην ακραία περίπτωση, να μειώσει τις συγκεντρώσεις εδάφους με ένα παράγοντα της τάξης του 100.

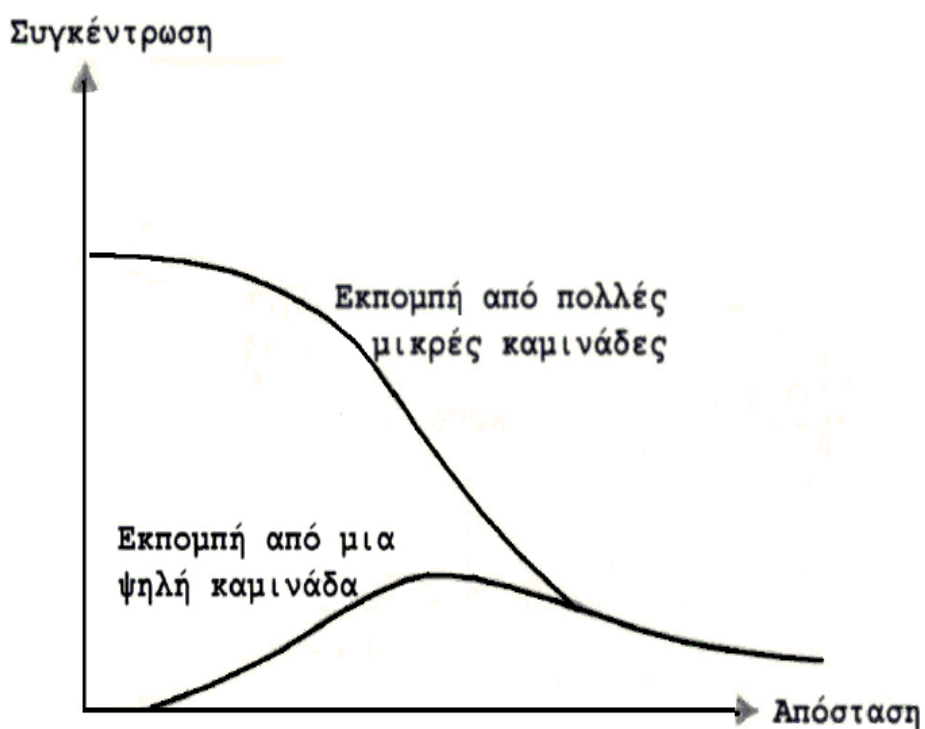
Οι παραπάνω διαπιστώσεις αφορούν κυρίως τη βιομηχανική ρύπανση. Οι ρύποι που εκπέμπονται από οχήματα και κεντρικές θερμάνσεις έχουν συνήθως πολύ μικρή ανύψωση. Ειδικά για τις κεντρικές θερμάνσεις, η περιβαλλοντική επιβάρυνση των πόλεων κατά την διάρκεια του χειμώνα είναι πολύ σημαντική, ιδιαίτερα για το διοξείδιο του θείου και τον καπνό που εκπέμπονται από τους καυστήρες. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο έχουν προχωρήσει σε πολλές Ευρωπαϊκές πόλεις στην λύση της τηλεθέρμανσης κατά την οποία το νερό θερμαίνεται σε μια

κεντρική μονάδα και μετά διανέμεται στις οικίες. Αντικαθιστώντας τις πολλές χαμηλές καμινάδες με μία υψηλή έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των τοπικών συγκεντρώσεων (σχήμα 6.2).

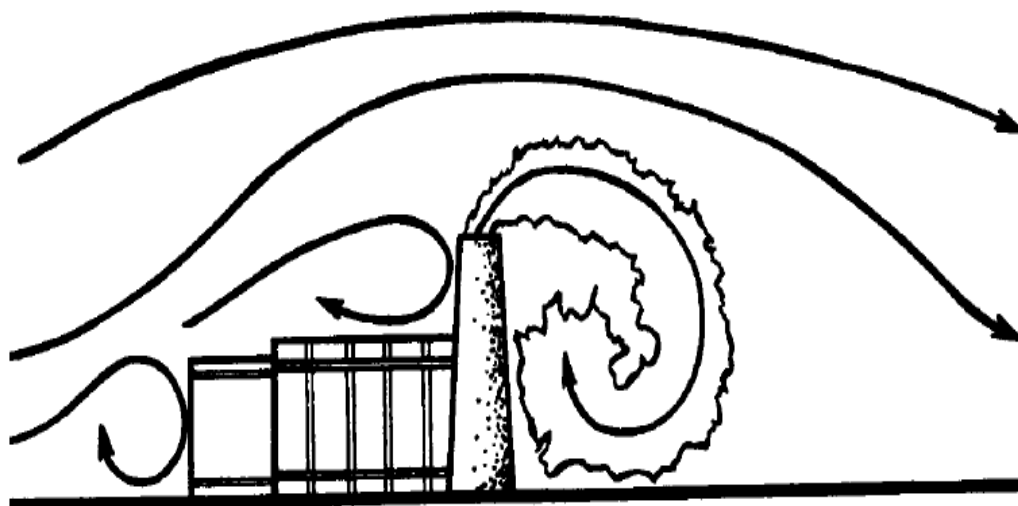
Η σημασία του ύψους εκπομπής ήταν ήδη γνωστή από τον 18^ο αιώνα οπότε ήταν γενικά αποδεκτός ο αφορισμός «The solution to pollution is dilution (Η λύση για την ρύπανση είναι η αραιώση)». Έτσι η κατασκευή ψηλών καμινάδων καθιερώθηκε σαν η πλέον αποδεκτή λύση για τον περιορισμό της ρύπανσης μιας και οι ρύποι αναμιγνύονται με το περιβάλλοντα αέρα και αραιώνουν πριν φθάσουν στο έδαφος. Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, αναδείχθηκε η σημασία των παγκοσμίων περιβαλλοντικών προβλημάτων τα οποία βέβαια δεν επηρεάζονται από το ύψος εκπομπής αλλά είναι αποτέλεσμα των συνολικών εκπομπών ρυπογόνων ουσιών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να τεθούν όρια όχι μόνο στις μέγιστες συγκεντρώσεις, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως σε τοπική κλίμακα, αλλά επίσης και στις συνολικές εκπομπές.



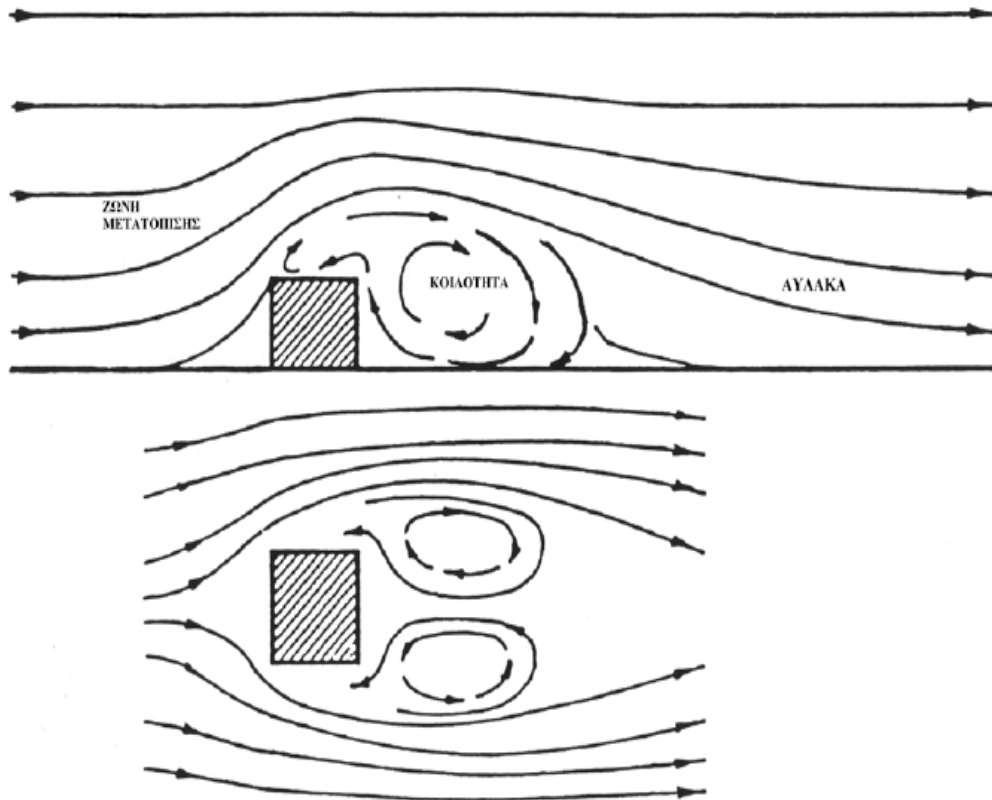
Σχήμα 6.1 Η επίδραση του ύψους εκπομπής στις παρατηρούμενες μέγιστες συγκεντρώσεις για δύο διαφορετικές κλάσεις ευστάθειας.



Σχήμα 6.2 Η εξέλιξη των συγκεντρώσεων στην διεύθυνση του ανέμου από δύο διαφορετικές κατηγορίες πηγών. Η ένταση της πηγής είναι η ίδια αλλά στην μια περίπτωση η εκπομπή γίνεται σε μικρό ύψος, διάχυτα πάνω από μια πόλη (π.χ. από καμινάδες κεντρικών θερμάνσεων) ενώ στην άλλη περίπτωση οι πολλές μικρές πηγές έχουν αντικατασταθεί από μια ψηλή καμινάδα.



Σχήμα 6.3. Σχηματική παρουσίαση του πεδίου ροής γύρω από μία χαμηλή καμινάδα τοποθετημένη στην κορυφή ενός κτιρίου.



Σχήμα 6.4 Σχηματική αναπαράσταση του πεδίου ροής γύρω από ένα κτίριο.

6.1 Επίδραση κτιρίων και κατώρευμα καμινάδας (stack downwash)

Στο σχήμα 6.3 γίνεται μία σχηματική παρουσίαση του πεδίου ροής γύρω από μία χαμηλή καμινάδα τοποθετημένη στην κορυφή ενός κτιρίου ενώ στο σχήμα 6.4 παρουσιάζεται το πεδίο ροής γύρω και πάνω από ένα κτίριο. Ο αέρας εξαναγκάζεται να ανυψωθεί μπροστά και πάνω από το κτίριο ενώ στην υπήνεμη πλευρά του σχηματίζεται ένας μεγάλος στρόβιλος (κοιλότητα, cavity). Οι ρύποι που εκλύονται από την καμινάδα μεταφέρονται από τον στρόβιλο χαμηλά στο έδαφος και ένα μέρος τους επιστρέφει στην πίσω πλευρά του κτιρίου. Όταν το ύψος της καμινάδας ξεπερνάει κάποιο όριο τότε ο θύσανος ξεφεύγει από τον στρόβιλο ο οποίος σχηματίζεται στην υπήνεμη πλευρά του κτιρίου και οι αρνητικές συνέπειες περιορίζονται σε μία αρνητική "ανύψωση" του θυσάνου, δηλ. σε μία κάθοδο του κεντρικού άξονά του λόγω της αεροδυναμικής της καμινάδας. Προκειμένου να αποφευχθεί η εμπλοκή του θυσάνου στον στρόβιλο πρέπει να εφαρμόζεται ο χοντρικός κανόνας ότι η καμινάδα θα πρέπει να έχει ύψος μεγαλύτερο από 1.5 φορές το ύψος του κτιρίου δηλ. το συνολικό ύψος της πάνω από το έδαφος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $2.5 H_b$, όπου H_b είναι το ύψος του κτιρίου. Σ' αυτή την περίπτωση παραμένει μόνο το χαμήλωμα του κεντρικού άξονα του θυσάνου λόγω της αεροδυναμικής της καμινάδας.

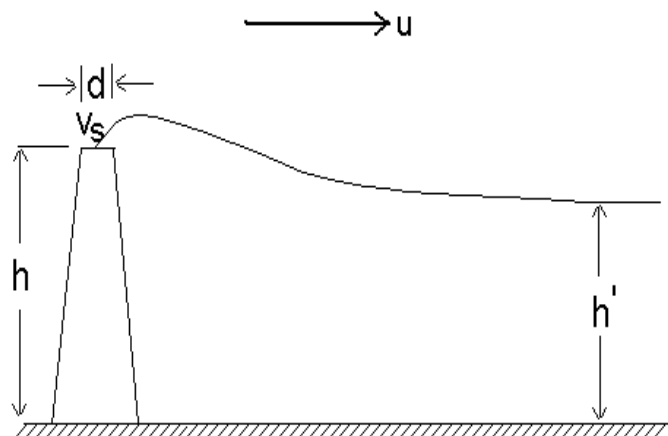
Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζονται σχηματικά οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της επίδρασης του κατωρεύματος. Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της καμινάδας αντικαθιστούμε στους υπολογισμούς μας το φυσικό ύψος της καμινάδας h με το h' το οποίο είναι μικρότερο ή ίσο του h .

$$h' = h \quad (v_s \geq 1.5u) \quad (6.1)$$

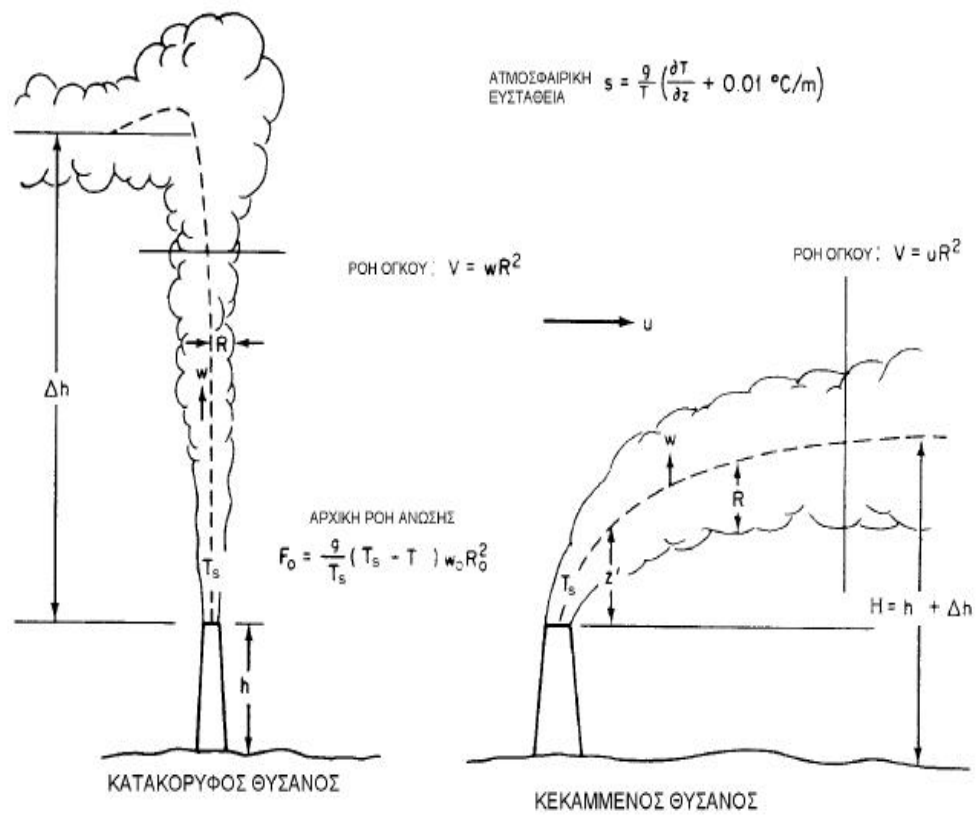
$$h' = h + 2d [(v_s/u) - 1.5] \quad (v_s < 1.5u) \quad (6.2)$$

όπου v_s είναι η ταχύτητα εξόδου των αερίων (ms^{-1}) και d είναι η εσωτερική διάμετρος της κορυφής της καμινάδας (m).

Αφού υπολογιστεί η τιμή του h' χρησιμοποιούμε μία από τις σχέσεις που δίνονται στα παρακάτω κεφάλαια προκειμένου να υπολογίσουμε την θερμική και τη μηχανική ανύψωση του θυσάνου.



Σχήμα 6.5 Χαρακτηριστικοί παράμετροι της καμινάδας οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της επίδρασης του κατωρεύματος (downwash) της καμινάδας. Τα διάφορα σύμβολα που υπάρχουν στο σχήμα εξηγούνται στο κείμενο.



Σχήμα 6.6 Τυπικό διάγραμμα ενός κατακόρυφου και ενός κεκαμμένου θυσάνου. Στο σχήμα φαίνονται και κάποια χαρακτηριστικά του θυσάνου τα οποία χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της ανύψωσής του.



Σχήμα 6.7 Φωτογραφίες ενός κατακόρυφου (αριστερά) και ενός κεκαμμένου θυσάνου (δεξιά).

6.2 Ανύψωση του θυσάνου

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζονται σχηματικά ένας κατακόρυφος θύσανος (vertical plume) και ένας κεκαμμένος θύσανος (bent-over plume) καθώς και οι διαφορετικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ανύψωσης σε κάθε περίπτωση. Ο θύσανος γίνεται κατακόρυφος όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι γενικά μικρότερη από 1 ms^{-1} .

Για τον υπολογισμό της ανύψωσης του θυσάνου έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία κατά κανόνα βασίζονται στους βασικούς νόμους της ρευστομηχανικής. Το βιβλίο των Hanna et. al. (1982) παρέχει μία εκτενή ανασκόπηση του θεωρητικού υπόβαθρου των υπαρχόντων μοντέλων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την ανύψωση του θυσάνου για την περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μη μηδενική και έχουμε την περίπτωση του κεκαμμένου θυσάνου. Οι φυσικοί παράμετροι που επιδρούν στην ανύψωση του θυσάνου είναι οι παρακάτω:

- παράμετρος καμινάδας (stack parameter) $F = g v_s d^2 (T_s - T) / 4 T_s$
- παράμετρος ευστάθειας (stability parameter) $S = g / \theta \partial \theta / \partial z$
- ταχύτητα ανέμου (wind velocity) u
- κάποια παράμετρος που εκφράζει την επίδραση της ατμοσφαιρικής τύρβης π.χ. u^*

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (ms^{-2}), T_s είναι η θερμοκρασία των αερίων όταν αφήνουν την καμινάδα (K), T η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα (K), $\partial \theta / \partial z$ η βαθμίδα της δυναμικής θερμοκρασίας (K/m) και u^* η ταχύτητα τριβής στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας (ms^{-1}). Η παράμετρος καμινάδας έχει μονάδες $\text{m}^4 \text{s}^{-3}$ ενώ η παράμετρος ευστάθειας s^{-2} . Η σχέση ανάμεσα στην κατακόρυφη βαθμίδα της δυναμικής θερμοκρασίας και την αντίστοιχη της θερμοκρασία είναι η παρακάτω:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma$$

όπου Γ είναι η ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα ($\Gamma = 0.0098 \text{ K/m}$).

Οι τρεις πρώτοι παράμετροι χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανάπτυξη μοντέλων για τον υπολογισμό της ανύψωσης του θυσάνου ενώ η επίδραση της ατμοσφαιρικής τύρβης θεωρείται, συνήθως, αμελητέα. Κατά συνέπεια, τα υπάρχοντα μοντέλα για να λειτουργήσουν χρειάζονται στοιχεία για την καμινάδα (d , v_s , T_s) και τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες (T , u , $\partial \theta / \partial z$). Το κύριο αποτέλεσμα του μοντέλου είναι η ανύψωση του θυσάνου Δh η οποία ορίζεται, έμμεσα, από την σχέση:

$$H = h' + \Delta h \quad (6.3)$$

όπου H είναι το ενεργό ύψος της καμινάδας (m), h' είναι το φυσικό ύψος της καμινάδας, ενδεχομένως διορθωμένο για την επίδραση του κατωρεύματος (m) και Δh η ανύψωση του θυσάνου (m).

Όπως αναφέρεται και παρακάτω, η ανύψωση του θυσάνου είναι μία συνεχιζόμενη διαδικασία γι' αυτό τον λόγο το ενεργό ύψος της καμινάδας είναι μία συνάρτηση της απόστασης x . Σε πολλές περισσότερες περιπτώσεις ενδιαφερόμαστε για την τελική ανύψωση, δηλ. το ύψος στο οποίο ο κεντρικός άξονας του θυσάνου σταθεροποιείται κατά κάποιο τρόπο αλλά λεπτομερειακοί υπολογισμοί συμπεριλαμβάνουν και την επίδραση της βαθμιαίας ανύψωσης του θυσάνου. Ενώ σε ευσταθείς συνθήκες μπορούμε σχετικά εύκολα να ορίσουμε το τελικό ύψος, σε ασταθείς όπως και σε συνθήκες ουδέτερης στρωμάτωσης το πρόβλημα είναι δυσκολότερο

Οι εξισώσεις που παρατίθενται στις επόμενες παραγράφους είναι σε μεγάλο βαθμό εμπειρικές, έχουν δηλαδή προκύψει με προσαρμογή καμπυλών στα πειραματικά δεδομένα. Αυτό εξηγεί κάποιες ιδιομορφίες που εμφανίζονται στις εξισώσεις καθώς και την έλλειψη συμβατότητας στις μονάδες.

6.2.α Θερμική ανύψωση θυσάνου σε συνθήκες αστάθειας ή ουδέτερης στρωμάτωσης.

Κατά την διάρκεια της ημέρας ή σε ημέρες/νύχτες οι οποίες είναι νεφελώδεις με ισχυρούς ανέμους η στρωμάτωση στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας μπορεί να είναι ασταθής ή ουδέτερη. Το ύψος του οριακού στρώματος παίρνει, σε τυπικές περιπτώσεις, τιμές στο διάστημα 500-2000m. Κοντά στην πηγή, η εσωτερική τύρβη του θυσάνου είναι πολύ μεγαλύτερη απ' αυτή του περιβάλλοντα αέρα. Αν ο θύσανος συνεχίσει να ανέρχεται μέσα στο οριακό στρώμα, από ένα σημείο και μετά η ατμοσφαιρική τύρβη αρχίζει να υπερισχύει περιορίζοντας τελικά την ανύψωση του θυσάνου.

Για συνθήκες αστάθειας ή ουδέτερης στρωμάτωσης ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για το τελικό ύψος του θυσάνου:

$$H = h' + 21.425 F^{3/4}/u \quad (F < 55) \quad (6.4)$$

$$H = h' + 38.71 F^{3/5}/u \quad (F \geq 55) \quad (6.5)$$

Σε συνθήκες αστάθειας ή ουδέτερης στρωμάτωσης δεν υπάρχει κάποιο ξεκάθαρο ανώτερο όριο στην ανύψωση του θυσάνου. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η επίδραση της άνωσης θεωρείται ότι διαρκεί μέχρις ότου επαρκής ποσότητα περιβάλλοντα αέρα εισέλθει στον θύσανο και μειώσει την θερμοκρασία του στα ίδια επίπεδα με αυτά του περιβάλλοντα αέρα. Η οριζόντια απόσταση στην οποία θεωρείται ότι παύει η ανύψωση δίνεται από τις σχέσεις

$$x_f = 0.049 F^{5/8} \quad (F < 55) \quad (6.6)$$

$$x_f = 0.119 F^{2/5} \quad (F \geq 55) \quad (6.7)$$

όπου x_f (km) είναι η απόσταση από την πηγή στην οποία ο κεντρικός άξονας του θυσάνου έχει φθάσει στο τελικό ύψος, H .

6.2.β Θερμική ανύψωση θυσάνου σε συνθήκες ευστάθειας

Κατά την διάρκεια της νύχτας σχηματίζεται ένα σχετικά ρηχό οριακό στρώμα (~200 m) στο οποίο επικρατούν ευσταθείς συνθήκες. Ακόμα και κατά την διάρκεια της μέρας, το άνω όριο του ασταθούς στρώματος που σχηματίζεται κοντά στο έδαφος σημαδεύεται από μία υπερυψωμένη αναστροφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις λοιπόν ο θύσανος μπορεί να βρεθεί σε κάποιο στρώμα αέρα ο οποίος χαρακτηρίζεται από ευσταθή στρωμάτωση. Σ' αυτή την περίπτωση ο θύσανος φθάνει σε ένα μέγιστο ύψος και μετά από μία ή δύο ταλαντώσεις κατέρχεται στο τελικό ύψος.

Σε συνθήκες ευστάθειας το τελικό ύψος του κεντρικού άξονα ενός κεκαμμένου θυσάνου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H = h' + 2.6 [F/(us)]^{1/3} \quad (6.8)$$

Η αντίστοιχη απόσταση είναι:

$$x_f = 0.00207 us^{-1/2} \quad (6.9)$$

Στην περίπτωση κατακόρυφου θυσάνου ($u < 1 \text{ ms}^{-1}$) η θερμική ανύψωση σε συνθήκες ευστάθειας δίνεται από την σχέση:

$$H = h' + 4 F^{1/4} s^{-3/8} \quad (6.10)$$

Σε συνθήκες ευστάθειας συνήθως λαμβάνεται σαν ενεργό ύψος η χαμηλότερη τιμή από τις εξισώσεις (6.8) και (6.10).

6.2.γ Ανύψωση θυσάνου όταν η θερμοκρασία των αερίων είναι παρόμοια με αυτή του περιβάλλοντα αέρα.

Όπως προαναφέρθηκε στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμική άνοδος του θυσάνου υπερσχύει της αντίστοιχης που οφείλεται στην ορμή των αερίων. Στις περιπτώσεις όμως που η θερμοκρασία των αερίων είναι χαμηλότερη ή ελαφρά υψηλότερη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα η ανύψωση του θυσάνου λόγω της ορμής θα είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης λόγω της άνωσης. Λόγω του γεγονότος ότι η επίδραση της αρχικής ορμής είναι σημαντική μόνο κοντά στην πηγή, η απόσταση από την πηγή στην οποία ο κεντρικός άξονας του θυσάνου έχει φθάσει στο τελικό ύψος θεωρείται σ' αυτή την περίπτωση ίση με το μηδέν.

Σε συνθήκες αστάθειας εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση,

$$H = h' + 3dv_s/u \quad (6.11),$$

ενώ σε συνθήκες ευστάθειας η παρακάτω σχέση είναι κατάλληλη,

$$H = h' + 1.5 [(v_s^2 d^2 T)/(4T_s u)]^{1/3} s^{-1/6} \quad (6.12).$$

Συνήθως χρησιμοποιούνται και οι δύο εξισώσεις (6.11) και (6.12) και επιλέγεται η χαμηλότερη από τις δύο τιμές.

6.2.δ Σταδιακή ανύψωση

Σε πολλές περιπτώσεις ο χρόνος που απαιτείται για την ανύψωση του θυσάνου στο τελικό ύψος είναι μικρός. Σε άλλες όμως, ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι υπολογισμοί γίνονται με πολύ καλή χωρική ανάλυση (π.χ. λίγες εκατοντάδες μέτρα) είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη τη σταδιακή ανύψωση του θυσάνου. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση

$$H = h' + 1.60 F^{1/3} x^{2/3} u^{-1} \quad (x < x_f) \quad (6.13)$$

Η παραπάνω προσεγγιστική εξίσωση εφαρμόζεται για όλες τις συνθήκες ευστάθειας. Σε περιπτώσεις που σε απόσταση $x_f < x_f$ το ύψος που υπολογίζεται από την εξίσωση (6.13) γίνει μεγαλύτερο ή ίσο του αντίστοιχου τελικού ύψους που υπολογίζεται στα προηγούμενα κεφάλαια τότε η εφαρμογή της εξίσωσης αυτής περιορίζεται μέχρι την απόσταση x_f .