

## ***ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΣΕ ΤΡΑΧΥ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΑΧΥΣΗΣ***

Δ. Παπαδόπουλος, Γ. Αραμπατζής και Δ. Ασημακόπουλος  
Τομέας ΙΙ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ε. Μ. Π.  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου, Αθήνα

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η ανώμαλη διαμόρφωση του εδάφους κάνει προβληματική τη χρήση απλών και διαδεδομένων εργαλείων πρόβλεψης της ποιότητας του αέρα όπως αυτό της προσέγγισης Gauss. Η χρήση σύνθετων αριθμητικών μοντέλων παρέχει ακριβείς προσομοιώσεις που όμως απαιτούν αυξημένο εξοπλισμό και υπολογιστικό χρόνο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης συγκεντρώσεων που στηρίζεται στην τρισδιάστατη εξίσωση διασποράς. Η τελευταία επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων προσαρμοσμένη κατάλληλα στις δυνατότητες ενός μέσου προσωπικού υπολογιστή. Εφαρμόζεται μια γενικευμένη συσχέτιση του ανέμου και των κατανομών των συντελεστών διάχυσης με την τραχύτητα του εδάφους, την ταχύτητα του ανέμου στην κορυφή του στρώματος ανάμιξης και τον καθαρό ρυθμό εισροής θερμότητας στην ατμόσφαιρα. Η ικανότητα του μοντέλου για την ακριβή εκτίμηση των συγκεντρώσεων από τις εκπομπές σημειακής πηγής ελέγχεται με αναλυτική λύση. Προσδιορίζεται η διασπορά ρύπων με εφαρμογή ρεαλιστικών κατανομών ανέμου και συντελεστών διάχυσης κάτω από διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες.

## ***AIR QUALITY PREDICTIONS UNDER CONDITIONS OF VARIABLE WIND AND DIFFUSIVITY PROFILES***

D. Papadopoulos, G. Arabatzis and D. Assimacopoulos  
Section II, Department of Chemical Engineering, N.T.U. of Athens  
Iroon Politechniou 9, 157 80 Zografos Campus, Athens

### **ABSTRACT**

A complex terrain makes the use of simple and well spread tools such, as Gaussian models, difficult for predicting air quality. The solution of the problem lies on the implementation of complex numerical models that give accurate predictions but are computationally much more demanding. This paper presents a numerical model for predicting pollutant dispersion based on the three dimensional diffusion equation and solved by the finite volume method. The solution procedure is implemented in such a way so that a middle class can be used for computations. Afterwards, a general method is presented for correlating the wind and eddy diffusivity profiles to the surface roughness, upper wind speed and net heat flux. The model's ability for accurate predictions is verified by comparing results with analytical solution. Then realistic wind profiles and dispersion coefficients for various meteorological conditions are used to determine the dispersion of pollutants.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αέριοι ρύποι που εκπέμπονται από διάφορες δραστηριότητες, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Η βασική μέθοδος, που χρησιμοποιείται στην καθημερινή πρακτική για την πρόβλεψη της κατανομής των ρύπων στην ατμόσφαιρα, είναι τα μοντέλα Gauss. Το βασικό μειονέκτημα των μοντέλων αυτών, είναι η αδυναμία τους να αντιμετωπίσουν μεταβλητό άνεμο και συντελεστές διάχυσης. Επιπλέον, οι συντελεστές της διασποράς εξαρτώνται ισχυρά από την τραχύτητα του εδάφους. Κατά την εφαρμογή των μοντέλων Gauss, οι συντελεστές της διασποράς επιλέγονται από εμπειρικές μελέτες που έχουν κατά καιρούς πραγματοποιηθεί με όμοιες οριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, ο Turner (1970) παρουσίασε τιμές των συντελεστών διασποράς για μετρίου ύψους καμινάδες και για ανοικτή περιοχή, ο Carpenter (1971) παρουσίασε τιμές για πολύ ψηλές καμινάδες σε ανοικτή περιοχή και ο McElroy (1969) για αστικές περιοχές.

Τα σύγχρονα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της διασποράς των ρύπων μπορούν να χειριστούν μεταβλητούς συντελεστές διάχυσης και σύνθετα πεδία ροής του ανέμου, παρέχοντας ακριβείς προβλέψεις. Ο Bartzis (1989), ανέπτυξε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιοδήποτε σύνθετο πεδίο και για όλες τις καταστάσεις ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Ο Kimura (1989), παρουσίασε ένα υδροστατικό μοντέλο κίνησης ατμοσφαιρικού αέρα. Οι Chrysikopoulos et al (1992) παρουσίασαν μια αναλυτική λύση της τρισδιάστατης εξίσωσης διάχυσης σε μόνιμη κατάσταση, που περιγράφει τη μεταφορά ρύπων από συνεχή πηγή στο επίπεδο του εδάφους. Οι Andretta et al (1993), ανέπτυξαν το MRBT μοντέλο, για τη διασπορά ενός αερίου ρύπου στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, κάτω από ομογενείς συνθήκες. Πολλά από τα μοντέλα αριθμητικής προσομοίωσης διασποράς ρύπων απαιτούν, ιδιαίτερα σε τρισδιάστατες γεωμετρίες, σημαντικά ποσά αποθηκευτικής μνήμης καθιστώντας περιορισμένη έως αδύνατη τη χρήση τους σε μέσου επιπέδου υπολογιστές.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης της διασποράς των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Το μοντέλο είναι σε θέση να αντιμετωπίσει μεταβλητά πεδία ανέμου και συντελεστών διάχυσης, τα οποία προκύπτουν από συσχετίσεις με την τραχύτητα του εδάφους, την ταχύτητα του ανέμου στην κορυφή του στρώματος ανάμιξης και τον καθαρό ρυθμό εισροής θερμότητας στην ατμόσφαιρα. Για την επίλυση του μοντέλου ακολουθείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Ο αλγόριθμος επίλυσης σχεδιάζεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η αποθήκευση τρισδιάστατων πινάκων, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε υπολογιστική μνήμη και καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή του σε μικροϋπολογιστές.

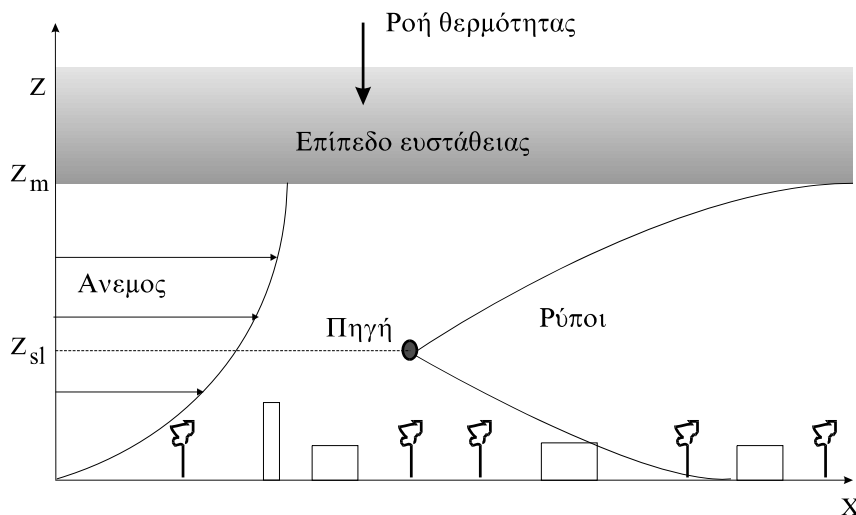
Το μοντέλο εφαρμόζεται στο πρόβλημα της διασποράς των ρύπων από σημειακή πηγή με ρεαλιστικές τιμές για τις κατανομές της ταχύτητας του ανέμου και των συντελεστών διάχυσης. Εκτιμάται η επίδραση της τραχύτητας του εδάφους, της ροής θερμότητας στην ατμόσφαιρα και της κατάστασης της ατμοσφαιρικής ευστάθειας στις συγκεντρώσεις των ρύπων. Συγκρίνεται η

συγκέντρωση των ρύπων, σε σχέση με την κατανομή που προβλέπεται από το μοντέλο Gauss, κατά τις τρεις διευθύνσεις και για διαφορετικές καταστάσεις ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Τέλος, αναδεικνύεται η ικανότητα του μοντέλου να αντιμετωπίσει περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας του εδάφους, με την επίλυση του προβλήματος της διασποράς γύρω από λόφο.

## 2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΡΥΠΩΝ

### 2.1 Το πρόβλημα που επιλύεται

Το βασικό πρόβλημα που επιλύεται παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Οι ρύποι εκπέμπονται με σταθερό ρυθμό ροής από σημειακή πηγή (καμινάδα) ύψους  $z_{sl}$ . Στο ύψος ανάμιξης  $z_m$  παρατηρείται θερμοκρασιακή αναστροφή, με αποτέλεσμα οι ρύποι να μην διαχέονται πάνω από το ύψος αυτό. Επίσης, δεν παρατηρείται εναπόθεση ρύπων στο έδαφος, ούτε χημικές αντιδράσεις στο πεδίο.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος που εξετάζεται.

Το ύψος της πηγής θεωρείται ίσο με  $z_{sl}=85$  m (συμπεριλαμβανομένης και της ανύψωσης των καυσαερίων) ενώ το ύψος ανάμιξης ίσο με  $z_m=275$  m.

Το πρόβλημα περιγράφεται από τη μερική διαφορική εξίσωση διασποράς των ρύπων, σε τρισδιάστατο πεδίο και μόνιμη κατάσταση.

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = S \quad (1)$$

### 2.2 Μέθοδος επίλυσης

Για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Το χωρικό πεδίο διαιρείται σε έναν αριθμό ( $N_x N_y N_z$ ) όγκων ελέγχου, πάνω στους οποίους ολοκληρώνεται η εξίσωση (1). Χρησιμοποιώντας κατάλληλες παραδοχές για τη

μεταβολή των διάφορων ποσοτήτων μεταξύ των όγκων ελέγχου, προκύπτει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής (Arampatzis et. al., 1994, Αραμπατζής et. al., 1991)

$$A_P C_P = A_E C_E + A_W C_W + A_N C_N + A_S C_S + A_H C_H + A_L C_L + B \quad (2)$$

η επίλυση του οποίου παρέχει τις τιμές της συγκέντρωσης σε κάθε όγκο ελέγχου.

Η μέθοδος όπως περιγράφηκε απαιτεί μεγάλα ποσά μνήμης υπολογιστή. Συγκεκριμένα απαιτείται η αποθήκευση των οκτώ συντελεστών της (2), των τιμών της συγκέντρωσης, των τριών ταχυτήτων και των τριών συντελεστών διάχυσης. Κάθε μια από τις παραπάνω ποσότητες αποτελεί ένα πίνακα τριών διαστάσεων μεγέθους  $N \times N \times N \times K$ , γεγονός που πολύ εύκολα μπορεί να εξαντλήσει την αποθηκευτική ικανότητα και των ισχυρότερων μικροϋπολογιστών.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, οι όροι  $A_H C_H$  και  $A_L C_L$  της σχέσης (2) μεταφέρονται στο σταθερό όρο  $B$  και αντιμετωπίζονται πεπλεγμένα (χρησιμοποιούνται οι πιο πρόσφατα υπολογισμένες τιμές της συγκέντρωσης). Με την τεχνική αυτή το σύστημα (2) μετατρέπεται σε  $NK$  ανεξάρτητα συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων, ένα για κάθε οριζόντιο επίπεδο, τα οποία επιλύονται επαναληπτικά (μέθοδος επίπεδο προς επίπεδο). Οι συντελεστές των νέων εξισώσεων μπορούν να αποθηκευτούν σε πίνακες δύο διαστάσεων. Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας απαιτούνται οι πληροφορίες εκείνες (συγκέντρωση, ταχύτητες και συντελεστές διάχυσης) που αναφέρονται στο τρέχον οριζόντιο επίπεδο ( $K$ ) και στα δύο γειτονικά του ( $K-1$  και  $K+1$ ). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η αποθήκευση τρισδιάστατων πινάκων.

Ο παραπάνω αλγόριθμος επίλυσης, προγραμματίστηκε σε κώδικα ικανό να εκτελεστεί σε έναν μέσω δυνατοτήτων προσωπικό υπολογιστή. Κατάλληλα υλοποιημένο τμήμα του κώδικα είναι υπεύθυνο για την ενημέρωση των πινάκων με τις τιμές των διαφόρων ποσοτήτων στο τρέχον οριζόντιο επίπεδο επίλυσης. Οι τιμές των υπόλοιπων επιπέδων αποθηκεύονται στην περιφερειακή μνήμη του υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μόνο όταν οι διαστάσεις του προβλήματος είναι τέτοιες που να μην επιτρέπουν την αποθήκευση όλων ή μερικών μεταβλητών στην κύρια μνήμη.

Η περίπτωση πολύπλοκης μορφολογίας του εδάφους, αντιμετωπίζεται με τη χρήση της μεθόδου του πορώδους μέσου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή οι ρυθμοί ροής σε κάθε επιφάνεια του όγκου ελέγχου πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή (πορώδες) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας που επιτρέπει την ροή ρύπων προς την συνολική επιφάνεια.

### **2.3 Συσχετίσεις για τους συντελεστές διάχυσης και την ταχύτητα του ανέμου**

Οι κατανομές της ταχύτητας του ανέμου και των συντελεστών διάχυσης, εξαρτώνται από την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Στο τμήμα της ατμόσφαιρας από το έδαφος έως το ύψος της πηγής, η ταχύτητα του ανέμου και οι συντελεστές διάχυσης ακολουθούν λογαριθμικές κατανομές, ενώ στο τμήμα από την πηγή έως το ύψος της θερμοκρασιακής αναστροφής

ακολουθούν γραμμική κατανομή (Seinfeld, 1986). Οι σχέσεις υπολογισμού συνοψίζονται στον πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Σχέσεις υπολογισμού ταχύτητας και συντελεστών διάχυσης (Seinfeld, 1986).

Ατμοσφαιρική κατάσταση	Ύψος	Ταχύτητα ανέμου	Συντελεστές διάχυσης
Μέχρι το ύψος της πηγής			
Ουδέτερη	$0 < z < z_{sl}$	$U = \frac{U_*}{0.4} \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right)$	$K_z = 0.4U_*z$ $K_y = 5K_z$
Ευσταθής	$0 < z < L$	$U = \frac{U_*}{0.4} \left[ \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right) + \frac{5.2z}{L} \right]$	$K_z = \frac{0.4U_*z}{\left(1 + \frac{5.2z}{L}\right)}$ $K_y = 6K_z$
	$L < z < z_{sl}$	$U = \frac{U_*}{0.4} \left[ \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right) + 5.2 \right]$	$K_z = \frac{0.4U_*z}{6.2}$ $K_y = 6K_z$
Ασταθής	$0 < z < z_{sl}$	$U = \frac{U_*}{0.4} \left\{ 2 \left( \tan^{-1} X - \tan^{-1} X_0 \right) + \ln \left( \frac{X-1}{X_0-1} \right) - \ln \left( \frac{X+1}{X_0+1} \right) \right\}$ $X = \left[ 1 - 15 \left( \frac{z+z_0}{L} \right) \right]^{1.4}$ $X_0 = \left[ 1 - 15 \frac{z_0}{L} \right]^{1.4}$	$K_z = 0.4U_*z \left( 1 - \frac{15z}{L} \right)^{0.25}$ $K_y = 2K_z$
Πάνω από το ύψος της πηγής			
Ουδέτερη	$z_{sl} < z < z_m$	$U = (U_g - U_{sl}) \left( \frac{z-z_{sl}}{z_m-z_{sl}} \right) + U_{sl}$	$K_z = 0.4U_*z_{sl}$ $K_y = 5K_z$
Ευσταθής	$z_{sl} < z < z_m$	$U = (U_g - U_{sl}) \left( \frac{z-z_{sl}}{z_m-z_{sl}} \right) + U_{sl}$	$K_z = 0.4U_*L$ $K_y = 6K_z$
Ασταθής	$z_{sl} < z < z_m$	$U = (U_g - U_{sl}) \left( \frac{z-z_{sl}}{z_m-z_{sl}} \right) + U_{sl}$	$K_z = 160U_*^2 \left( 1 - \frac{6000U_*}{L} \right)^{1.4}$ $K_y = 2K_z$

Για τον υπολογισμό των σχέσεων του πίνακα 1, απαιτούνται οι τιμές της παραμέτρου μήκους των Monin-Obukov,  $L$ , της τραχύτητας εδάφους  $z_0$  και την ταχύτητας τριβής  $U_*$ .

Η παράμετρος μήκους Monin & Obukov, ορίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$L = \frac{U_*^3 \rho C_p T}{k g H} \quad (3)$$

όπου,  $H$  είναι η ροή θερμότητας στην ατμόσφαιρα,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα,  $C_p$  είναι η ειδική θερμότητα,  $T$  είναι η θερμοκρασία,  $k$  η σταθερά του Karman ίση με 0.4 και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας. Επειδή η τιμή της ροής θερμότητας στην ατμόσφαιρα δεν είναι πάντα γνωστή ο Golder (1972) συσχέτισε τις καταστάσεις ατμοσφαιρικής ευστάθειας του Pasquill, με την τιμή της τραχύτητας του εδάφους  $z_0$  και της παραμέτρου  $L$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{1}{L} = \alpha + b \log z_0 \quad (4)$$

Οι συντελεστές  $a$  και  $b$  εξαρτώνται από την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας και δίνονται στον πίνακα 2.

**Πίνακας 2.** Συντελεστές για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $L$ .

	Καταστάσεις ευστάθειας Pasquill	$a$	$b$
Εξαιρετικά ασταθής	A	-0.096	+0.029
Μέτρια ασταθής	B	-0.037	+0.029
Ελαφρά ασταθής	C	-0.002	+0.018
Ουδέτερη	D	0	0
Ελαφρά ευσταθής	E	+0.004	-0.018
Εξαιρετικά ευσταθής	F	+0.035	-0.036

Η ταχύτητα τριβής μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο ενός γεωστροφικού συντελεστή  $C_g$  και του γεωστροφικού ανέμου  $U_g$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_* = C_g U_g \quad (5)$$

Ο γεωστροφικός συντελεστής είναι συνάρτηση του αριθμού επιφάνειας Rossby και της κατάστασης ατμοσφαιρικής ευστάθειας. Για ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση ο Lettau (1959) πρότεινε την εμπειρική σχέση:

$$C_g^{\text{ουδέτερη}} = 0.16 / [\log_{10}(R_0) - 1.8] \quad (6)$$

Για διαφορετική κατάσταση της ατμόσφαιρας ο γεωστροφικός συντελεστής δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$C_g^{\text{ασταθής}} = 1.6 C_g^{\text{ουδέτερη}} \quad (7)$$

$$C_g^{\text{ευσταθής}} = 0.6 C_g^{\text{ουδέτερη}} \quad (8)$$

Ο αριθμός επιφανείας Rossby ορίζεται ως

$$R_0 = U_g / z_0 f \quad (9)$$

όπου  $f$  είναι η παράμετρος Coriolis με τιμή της τάξης του  $10^{-4}$ .

Η τιμή της τραχύτητας του εδάφους μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη σχέση ( Lettau 1969):

$$z_0 = \frac{\bar{H}\alpha}{2\bar{A}} \quad (10)$$

όπου  $\bar{H}$  είναι το ενεργό ύψος των στοιχείων της τραχύτητας,  $\alpha$  είναι η μετωπική περιοχή που φαίνεται από τον άνεμο και  $\bar{A}$  είναι η συνολική επιφάνεια διαιρεμένη με τον αριθμό των στοιχείων τραχύτητας. Τυπικές τιμές για την τραχύτητα του εδάφους είναι 0.01-0.1 m για ανοικτή περιοχή, 0.1-1 m για δασώδη περιοχή και 0.5-10 m για αστικές περιοχές.

### 3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ

#### 3.1 Σύγκριση με το μοντέλο GAUSS

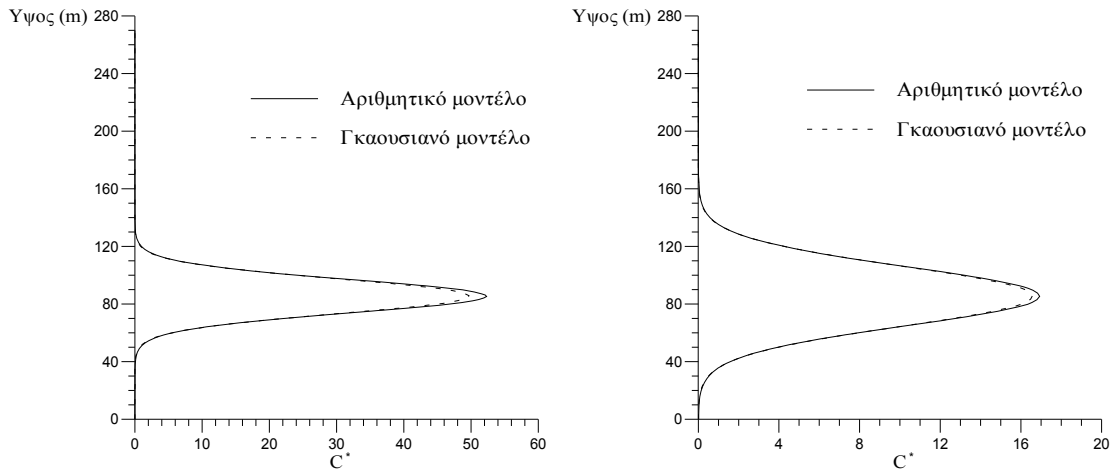
Η αξιοπιστία της μεθόδου που αναπτύχθηκε ελέγχεται με την επίλυση ενός προβλήματος αναφοράς θεωρώντας σταθερές κατανομές ταχύτητας ανέμου και συντελεστών διάχυσης. Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται ίση με 3.5 m/s, και ο ρυθμός εκπομπής από την πηγή ίσος με 0.55 kg/s. Χρησιμοποιείται υπολογιστικό πλέγμα 70x70x70 όγκων ελέγχου, για το οποίο εξακριβώθηκε ότι παρέχει ανεξαρτησία λύσης.

Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων που προκύπτουν από το αναλυτικό και το αριθμητικό μοντέλο για δύο αντιπροσωπευτικά σημεία του πεδίου. Η συγκέντρωση παρουσιάζεται με την κανονικοποιημένη της μορφή:

$$C^* = \frac{CU}{Q} \quad (11)$$

όπου  $U$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πηγής

Παρατηρούμε ότι σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς το αναλυτικό μοντέλο.

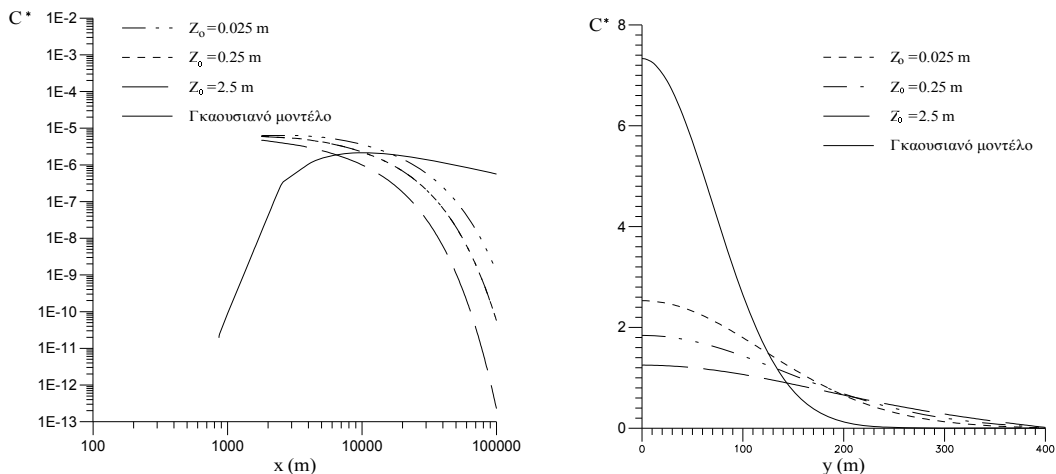


**Σχήμα 2.** Σύγκριση αριθμητικού και μοντέλου Gauss. Κατανομή συγκέντρωσης κατά το κατακόρυφο επίπεδο (α, αριστερά) 500 μέτρα από την πηγή και (β, δεξιά) 1500 μέτρα από την πηγή.

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους (οριζόντιο επίπεδο)

Στο σχήμα 3.α συγκρίνονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους κατά την διεύθυνση του ανέμου για διαφορετικές τιμές της τραχύτητας του εδάφους. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και η κατανομή που προκύπτει από το μοντέλο Gauss. Στο σχήμα 3.β συγκρίνονται οι αντίστοιχες κατανομές στο οριζόντιο επίπεδο, κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου και στο ύψος της πηγής.



**Σχήμα 3.** Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στην κατανομή της συγκέντρωσης κατά το οριζόντιο επίπεδο (α, αριστερά) στο επίπεδο του εδάφους και στη διεύθυνση του ανέμου και (β, δεξιά) στο ύψος της πηγής και κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

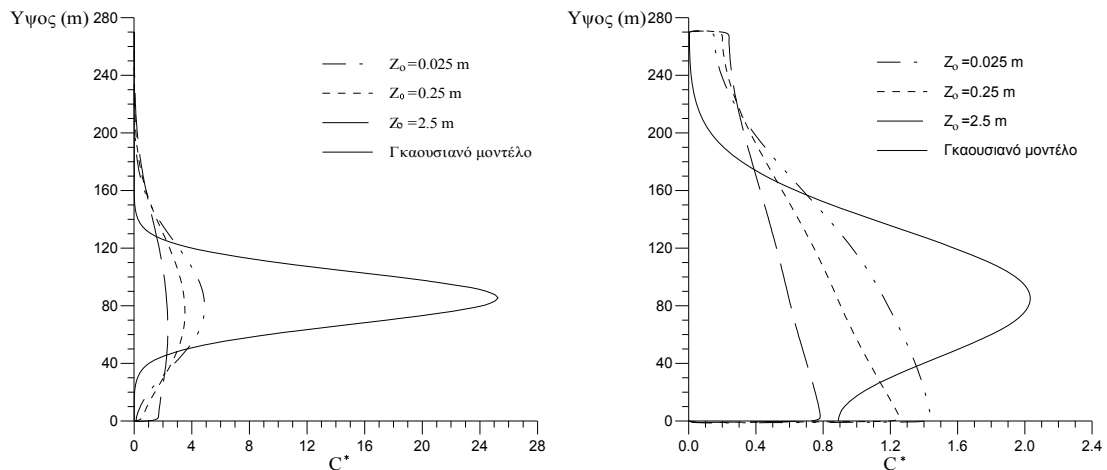
Από τις παραπάνω επιλύσεις προκύπτει ότι η διασπορά των ρύπων αυξάνει και το μέγιστο της κατανομής συγκέντρωσης μειώνεται με αύξηση της τραχύτητας του εδάφους. Το μέγιστο της κατανομής στο μοντέλο Gauss, στο οριζόντιο επίπεδο κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου, είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο που προκύπτει από το αριθμητικό μοντέλο.



## 4.2 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους (κατακόρυφο επίπεδο)

Στα σχήματα 4.α και 4.β συγκρίνονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων στο κατακόρυφο επίπεδο για δύο χαρακτηριστικά σημεία του πεδίου και για διαφορετικές τιμές της τραχύτητας εδάφους. Στα ίδια σχήματα παρουσιάζονται και οι κατανομές που προκύπτουν από το μοντέλο Gauss.

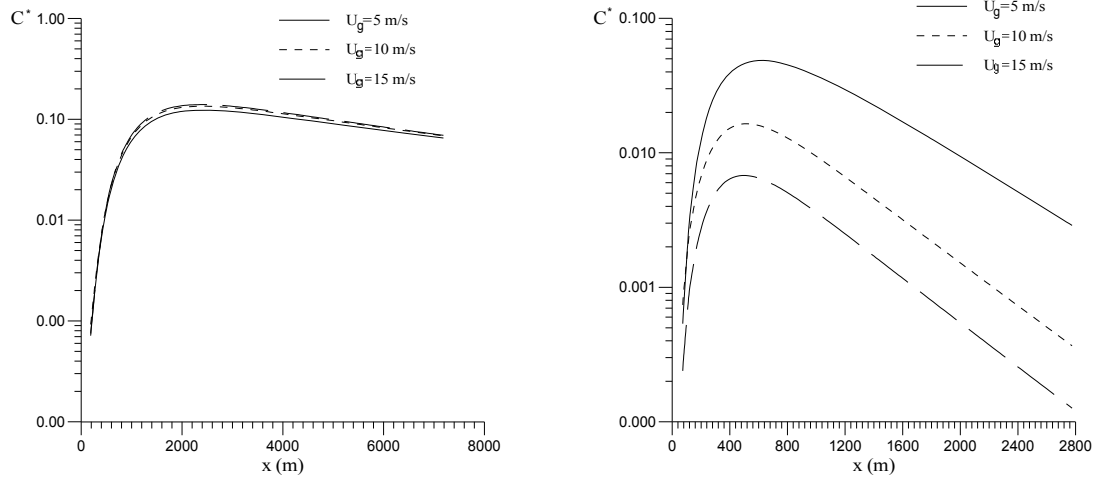
Η συγκέντρωση στο ύψος της πηγής είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που προβλέπει το μοντέλο Gauss. Καθώς η τραχύτητα αυξάνει, το μέγιστο της συγκέντρωσης μειώνεται. Στο μοντέλο Gauss (σχήμα 5β), το μέγιστο της συγκέντρωσης παρατηρείται πάντα στο ύψος της πηγής, σε αντίθεση με το αριθμητικό μοντέλο στο οποίο το ύψος εμφάνισής του μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση από την πηγή και η τιμή της τραχύτητας του εδάφους.



**Σχήμα 4.** Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στην κατανομή της συγκέντρωσης κατά το κατακόρυφο επίπεδο (α, αριστερά) 500 μέτρα από την πηγή και (β, δεξιά) 2500 μέτρα από την πηγή.

## 4.3 Επίδραση του γεωστροφικού ανέμου

Στα σχήματα 5.α και 5.β παρουσιάζονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων κατά το οριζόντιο επίπεδο στη διεύθυνση του ανέμου για διαφορετικές τιμές της έντασης του γεωστροφικού ανέμου και καταστάσεις ευστάθειας.

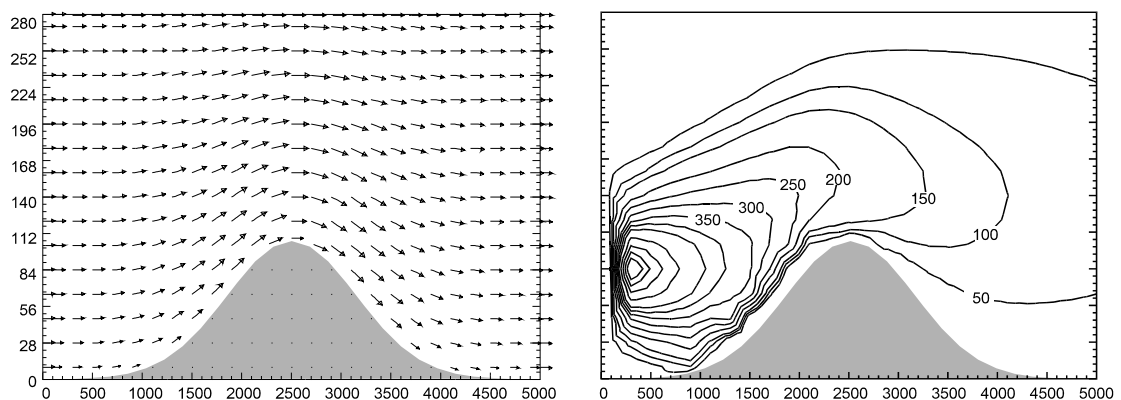


**Σχήμα 5.** Επίδραση του γεωστροφικού ανέμου στην κατανομή της συγκέντρωσης κατά το οριζόντιο επίπεδο και στη διεύθυνση του ανέμου ( $\alpha$ , αριστερά) για ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση και ( $\beta$ , δεξιά) για ασταθή ατμοσφαιρική κατάσταση.

Η ένταση του γεωστροφικού ανέμου δεν επηρεάζει την κατανομή των συγκεντρώσεων στην ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση, ενώ η επίδρασή του είναι σημαντική στην ασταθή κατάσταση.

#### 4.4 Επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του ανάγλυφου του εδάφους στην κατανομή της συγκέντρωσης ρύπων. Θεωρείται πεδίο ροής με εμπόδιο ένα λόφο ύψους 100 m (το ανάγλυφο του οποίου ακολουθεί την κατανομή Gauss). Η κατανομή της ταχύτητας του αέρα υπολογιζόμενη από τον κώδικα NOABL (Sherman, 1978) είναι εκείνη του σχήματος 6. Στο σχήμα 6, επίσης, παρουσιάζονται οι κατανομές των συγκεντρώσεων που προκύπτουν.



**Σχήμα 6.** Πεδίο ταχύτητας ανέμου (αριστερά) και κατανομή συγκεντρώσεων (δεξιά) γύρω από το λόφο.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάγκη εξασφάλισης της ποιότητας αέρα και οι απαιτήσεις που προκύπτουν από τη νέα νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος επιβάλλουν την ακριβή εκτίμηση της ποιότητας αέρα από τη λειτουργία ρυπογόνων δραστηριοτήτων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια έντονη εξάρτηση των συγκεντρώσεων από την τραχύτητα του εδάφους και την κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας.

Επίσης, φαίνεται η αδυναμία του αναλυτικού μοντέλου Gauss, να προσομοιώσει την ατμοσφαιρική διάχυση και η ανάγκη ανάπτυξης απλών μοντέλων, ικανών όμως να προσομοιώνουν την ατμοσφαιρική διάχυση με ικανοποιητική ακρίβεια.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andretta M., Bianconi R., Flospergher W. and Tamponi M. *The MRBT model: An analytical dispersion model in a finite mixing layer, sensitivity analysis and validation against tracer measurements*. Atmospheric Environment Vol 27A, No 11, pp 1665-1672, 1993.
- Αραμπατζής Γ., Δημητρίου Π. και Ασημακόπουλος Δ. *Αντιμετώπιση της Αριθμητικής Διάχυσης σε Προβλήματα Διασποράς Αερίων Ρύπων*. II Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Μυτιλήνης. 1-5 Σεπ. 1991.
- Arampatzis G., Assimacopoulos D. and Mitsoulis E. *Treatment of numerical diffusion in strong convective flows*. International journal for numerical methods in fluid Vol 18 pp 313-331, 1994.
- Bartzis J. G. *Turbulent diffusion modelling for wind flow and dispersion analysis*. Atmospheric Environment, Vol 23, No 9, pp 1963-1969, 1989.
- Chrysikopoulos C. V., Hildemann L.M. and Roberts P.V. *A three-dimensional steady-state atmospheric dispersion-deposition model for emissions from a ground-level area source*. Atmospheric Environment, Vol 26A, No 5, pp 747-757, 1992.
- Kimura F. *A simulation of wind and air pollution over complex terrain using a hydrostatic numerical model*. Atmospheric Environment, Vol 23, No 4, pp 723-730, 1989.
- Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, New York, 1980.
- Ragland K. W. and Dennis R.L. *Point source atmospheric diffusion with variable wind and diffusivity profiles*. Atmospheric Environment, Vol 9, pp 175-189, 1975.
- Seinfeld J. H. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley, New York, 1986.
- Sherman C.A. *A mass-consistent model for wind fields over complex terrain*. J. Applied Meteor., 17, 317-319, 1978.
- Turner D. B. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*. USEPA AP-26, 1970.