

**ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΩΝ ΔΥΟ ΦΑΣΕΩΝ ΣΕ ΜΗ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

**Υποψήφια Διδάκτορας : ΚΑΡΑΔΗΜΟΥ ΔΕΣΠΟΙΝΑ**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ: : Προσομοίωση διφασικών ροών σε εσωτερικούς χώρους με τεχνικές υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ν.Χ Μαρκάτος, Ομοτ. Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)

Χ. Σαρίμβεης, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Α. Χαλουλάκου, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Ημερομηνία Έναρξης: 4 Φεβρουαρίου 2010

**ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

**1. Στόχοι της διατριβής**

Ροές πολλών διαφορετικών φάσεων ρευστών, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους συναντώνται ευρέως σε πολλές διεργασίες σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) κατάλληλου για την αριθμητική προσομοίωση ροών δύο φάσεων σε γεωμετρίες τριών διαστάσεων (3D). Το μαθηματικό μοντέλο αφορά την περίπτωση του τύπου των διφασικών ροών, όπου η μία φάση είναι διασκορπισμένη μέσα στην άλλη, όπως: α) στερεό-αέρα, β) αέρας-υγρό, γ) υγρό-στερεό. Η αξιοπιστία του μαθηματικού μοντέλου ελέγχθηκε με την εφαρμογή του σε δύο περιπτώσεις διφασικών ροών διασκορπισμένου τύπου όπως είναι: α) η διασπορά σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα στην περίπτωση αεριζόμενου εσωτερικού χώρου (στερεό-αέρα) [1, 2] και β) η διασπορά φυσαλίδων στο νερό στην περίπτωση αντιδραστήρα με ανάδευση (αέρας-υγρό) [3, 4].

Η δυσμενής περίπτωση αραιής ροής αέρα και σωματιδίων στους εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της δυνατότητας αύξησης της αριθμητικής ακρίβειας των υπολογισμών. Στο πλαίσιο της επιστημονικής διερεύνησης επίτευξης ακριβέστερης αριθμητικής λύσης εφαρμόστηκε: α) ένα σχήμα διακριτοποίησης των όρων συναγωγής και στις τρεις διαστάσεις, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τον προσανατολισμό της ροής, με σκοπό τη μείωση της αριθμητικής διάχυσης, η οποία εμφανίζεται έντονη στην περίπτωση ροών με κλίση ως προς τις γραμμές του πλέγματος [2] και β) το πρότυπο μεταφοράς της Προσομοίωσης των Μεγάλων Δινών (LES, Large Eddy Simulation), με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση της τύρβης, η οποία συμβάλλει καθοριστικά τόσο στην ανάμιξη των δύο φάσεων μεταξύ τους όσο και στη διασπορά της διασκορπισμένης φάσης [5].

**2. Μαθηματικό μοντέλο διφασικής ροής**

Οι δύο φάσεις θεωρούνται διακριτές και αλληλεπιδρούν πλήρως μεταξύ τους. Χρησιμοποιείται η μέθοδος ροής δύο φάσεων (Euler-Euler), όπου οι δύο φάσεις θεωρούνται συνεχείς, οι εξισώσεις μεταφοράς ορμής εφαρμόζονται σε κάθε φάση και η αλληλεπίδραση

των δύο φάσεων προσεγγίζεται μαθηματικά με κατάλληλη εμπειρική σχέση. Το αριθμητικό πρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου, όπου οι δύο φάσεις μοιράζονται τον ίδιο όγκο ελέγχου και το μερίδιο του χώρου που καταλαμβάνει κάθε φάση υπολογίζεται ως κλάσμα όγκου.

Η γενική μορφή των μερικών διαφορικών εξισώσεων διατήρησης, Navier-Stokes και ενέργειας είναι η ακόλουθη [3,6,7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_i \rho_i \phi_i) + \text{div} \left( r_i \rho_i \vec{u}_i \phi_i - r_i \Gamma_{\phi,i} \text{grad} \phi_i \right) = S_{\phi,i} \quad (1)$$

Το κλάσμα όγκου και η πίεση υπολογίζονται με κατάλληλο χειρισμό της εξίσωσης συνέχειας, μέσω του αλγόριθμου IPSA [6,7] :

$$\frac{\partial(r_i \rho_i)}{\partial t} + \text{div} \left( r_i \rho_i \vec{u}_i \right) = S_{\phi,i} \quad (2)$$

$$\text{Το κλάσμα του όγκου ικανοποιεί την εξίσωση: } r_g + r_p = 1 \quad (3)$$

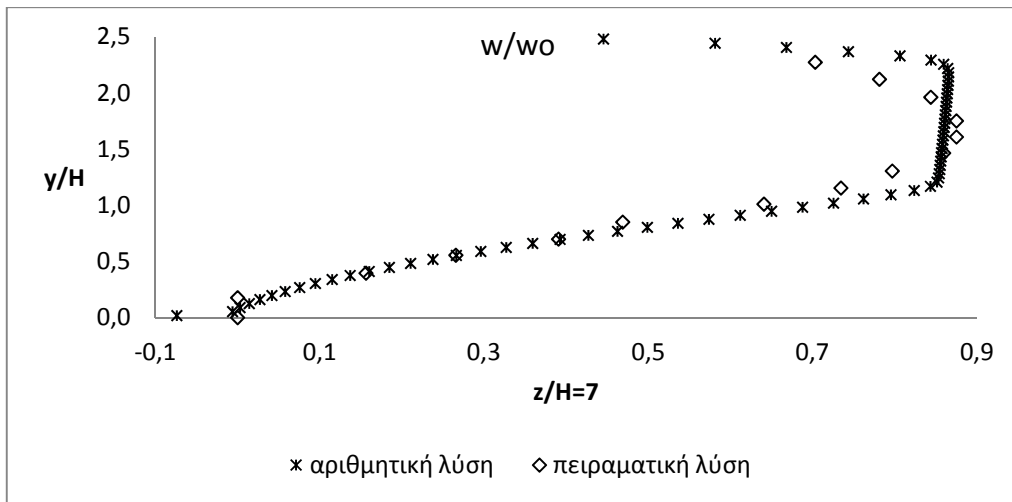
Η δύναμη της διαφασικής τριβής  $F_{f,ip}$  ανά μονάδα όγκου μεταξύ των δύο φάσεων λόγω διαφορετικών ταχυτήτων [8-10] είναι:

$$F_{f,ip} = 0.5 C_D A_{pr} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p) \equiv C_{f,ip} (V_g - V_p) \quad (4)$$

Τα σωματίδια θεωρείται ότι μεταφέρονται και διασκορπίζονται λόγω της τυρβώδους ροής του αέρα [11], και η κίνησή τους δεν επηρεάζει την ροή της αέριας φάσης (one-way coupling).

2.1 Βελτίωση της ακρίβειας του προτεινόμενου μοντέλου με κατάλληλη τροποποίηση του σχήματος διακριτοποίησης των όρων συναγωγής των μερικών διαφορικών εξισώσεων

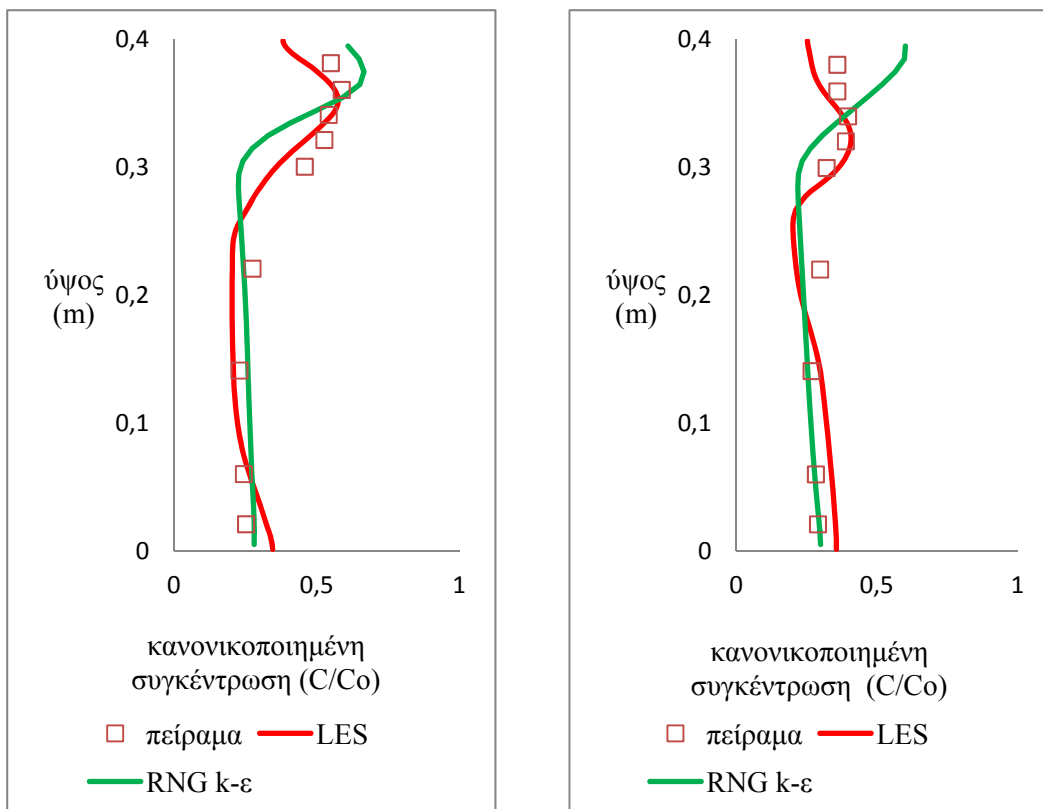
Το φαινόμενο της αριθμητικής ή ψευδούς διάχυσης παρουσιάζεται σε προβλήματα ροής πολλών διαστάσεων, όταν το σχήμα διακριτοποίησης των όρων συναγωγής των μερικών διαφορικών εξισώσεων διατήρησης αποτυγχάνει να προβλέψει την πραγματική διεύθυνση της ροής, όταν η διεύθυνση της ροής είναι λοξή προς τις γραμμές του πλέγματος. Για τη μείωση της αριθμητικής διάχυσης, η οποία παράγεται διαγώνια προς τη ροή αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε και στις τρεις διαστάσεις ένα αριθμητικό σχήμα, το οποίο κατά τη διακριτοποίηση των όρων συναγωγής λαμβάνει υπόψη του τη διεύθυνση της ροής, η οποία είναι κεκλιμένη προς τις γραμμές του πλέγματος [3, 12,13]. Η αξιοπιστία της αριθμητικής επίλυσης με την εφαρμογή του αριθμητικού σχήματος, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τον προσανατολισμό της ροής ελέγχθηκε στην περίπτωση της επίλυσης του πεδίου ροής της ταχύτητας στη γεωμετρία ενός σκαλοπατιού με φορά προς τα πίσω [14].



Σχήμα 1. Σύγκριση της αριθμητικής και της πειραματικής λύσης του πεδίου ροής της ταχύτητας στη γεωμετρία ενός σκαλοπατιού προς τα πίσω με την εφαρμογή του αριθμητικού σχήματος, το οποίο λαμβάνει υπόψη του τον προσανατολισμό της ροής.

## 2.2 Βελτίωση της ακρίβειας του προτεινόμενου μοντέλου με εφαρμογή του Πρότυπου Μεταφοράς Μεγάλων Δινών

Στο πρότυπο Εξομοίωσης των Μεγάλων Δινών (LES, Large Eddy Simulation) [15], οι μεγάλες κλίμακες της τυρβώδους ροής του αέρα, οι οποίες περιέχουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια επιλύονται άμεσα, ενώ οι μικρότερες κλίμακες (Sub-Grid Scales), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την απορρόφησή της, μοντελοποιούνται μαθηματικά. Πραγματοποιείται χωρικό φιλτράρισμα σε κάθε μεταβλητή του πεδίου ροής, μία συνιστώσα της οποίας επιλύεται άμεσα και η άλλη μοντελοποιείται μαθηματικά. Η αριθμητική λύση που προκύπτει με την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης Μεγάλων Δινών είναι πιο ακριβής από εκείνη, η οποία προκύπτει με την εφαρμογή ενός μοντέλου τύρβης δύο εξισώσεων [5].



Σχήμα 2. Κατακόρυφη κατανομή του κλάσματος όγκου των σωματιδίων με την εφαρμογή: α) του RNG k-ε μαθηματικού μοντέλου τύρβης και β) του Πρότυπου Μεταφοράς των Μεγάλων Δινών (LES).

Η ερευνητική εργασία χρηματοδοτείται από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ).

### 3. Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] Chen F., Yu S., Lai A., Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model, *Atmospheric Environment* 40, (2006), p. 357-367.
- [2] Karadimou D.P., Markatos N.C., A novel flow oriented discretization scheme for reducing false diffusion errors in three-dimensional (3D) flows: An application in the indoor environment, *Atmospheric Environment* 61, (2012), p. 327-339.
- [3] Π. Παπαδόπουλος, Δ.Π. Καραδήμου, Ν.Χ. Μαρκάτος, "Προσομοίωση διφασικής ροής νερού και φυσαλίδων σε αντιδραστήρα πλήρους ανάδευσης με τεχνικές υπολογιστικής ρευστοδυναμικής", Πρακτικά 9ου Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Χημικής Μηχανικής, Αθήνα, Μάιος 2013.
- [4] Yang, T.C.K., Peng, Y.W., Ke, C.S., Hsu, Y.C. & Fan, N.W., Computer Simulation of a New Gas – Induced Ozone Reactor, *The PHOENICS*, 1, 12, (1999), pp. 326 – 328.
- [5] Karadimou, D.P., Markatos, N.C., "Two-phase transient mathematical modelling of indoor aerosol by means of a flow-oriented discretization scheme", in: CD Proceedings of 10 HSTAM International Congress on Mechanics, Chania, Crete, May 2013.
- [6] Spalding D.B., Numerical Computation of Multiphase Flow and Heat-transfer. In Contribution to Recent Advances in Numerical Methods in Fluids, in: Taylor C. & Morgan K. (Eds.), Pineridge Press, (1978), p.139-167.
- [7] Markatos N.C., Modelling of two-phase transient flow and combustion of granular propellants, *International Journal of Multiphase Flow* 12 (6), (1983), p. 913-933.
- [8] Ishii M. and Mishima K., Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations, *Nuclear Engineering and Design* 82, (1984), p. 107-126.
- [9] Lee S.L., Particle drag in a dilute turbulent two-phase suspension flow, *International Journal Multiphase Flow* 13 (2), (1987), p. 247-256.
- [10] Hetsroni G., Particles-Turbulence interaction, *International Journal of Multiphase Flow* 15(5), (1989), p. 735-746.
- [11] Yakhot V., Orszag S.A., Thangam S., Gatski T.B. & Speziale C.G. (1992), Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A* 4(7), (1992), p. 1510-1520.
- [12] Patel M.K., Markatos N.C. and Cross M., An assessment of flow oriented schemes for reducing 'false diffusion, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 26, (1988), p. 2279-2304.
- [13] Carey C., Scanlon T.J. and Fraser S.M., SUCCA-an alternative scheme to reduce the effects of multidimensional false diffusion, *Applied Mathematical Modelling* 17(5), (1993), p. 263-270.
- [14] J.R.Fessler, J.K.Eaton, Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow, *J.Fluid Mech.* 314, (1999), p. 97–117.
- [15] Smagorinsky J., General circulation experimental with the primitive equations, *Monthly Weather Review* 93 3, (1963), p. 99.