

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΠΛΗΡΩΣ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μαρία Κ. Στεφανίδου<sup>1</sup> και Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Υποψήφια Διδάκτορας, η.τ. [mstefanidou@upatras.gr](mailto:mstefanidou@upatras.gr),

<sup>2</sup> Καθηγητής, η.τ. [yannopp@upatras.gr](mailto:yannopp@upatras.gr)

Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται αριθμητικά οι μέσες ιδιότητες μίας και δύο ανωστικών, κυκλικών, τυρβωδών φλεβών θερμού αέρα, οι οποίες εκβάλλουν κατακόρυφα από γειτονικά ακροφύσια ίδιας διαμέτρου σε ήρεμο και ομοιόμορφο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Εκτός από τη δύναμη αδρανείας που αποκτά η φλέβα λόγω αρχικής ταχύτητας, αναπτύσσεται και θετική ανωστική δύναμη λόγω του θερμότερου ρευστού της φλέβας σε σχέση με το περιβάλλον. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις των προαναφερθέντων φαινομένων πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή του λογισμικού ANSYS FLUENT CFD (version 19.1). Η μοντελοποίηση έγινε σε τρεις διαστάσεις. Στις προσομοιώσεις εφαρμόζεται το μοντέλο τύρβης  $k-\epsilon$ . Οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο είναι οι εξισώσεις RANS με την προσέγγιση Boussinesq αναφορικά με τις πυκνότητες των ρευστών. Τα αριθμητικά αποτελέσματα ταχυτήτων και συγκεντρώσεων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα της ολοκληρωματικής μεθόδου δείχνουν καλή συμφωνία, αναφορικά με την κατακόρυφη πλήρως ανωστικής φλέβα, ενώ για το ζεύγος φλεβών συμφωνούν καλά σε μεγάλες αποστάσεις από την έξοδο των φλεβών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Κυκλική ανωστική φλέβα, αριθμητική προσομοίωση, αλληλεπίδραση φλεβών, μέσες αξονικές ταχύτητες, μέσες θερμοκρασίες, μέσες συγκεντρώσεις.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάθεση θερμικών αποβλήτων πραγματοποιείται με καμινάδες και πύργους ψύξης όσον αφορά τα αέρια και με διαχύτες διαφόρων τύπων σε υδάτινους αποδέκτες αναφορικά με τα υγρά απόβλητα. Τα θερμικά απόβλητα παράγονται κατά τις βιομηχανικές διαδικασίες απόσταξης, εξάτμισης και παρασκευής ύδατος για μεταλλάκτες, διαχείρισης χαμηλής ενεργείας ατμού σε λέβητες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Συνήθως, ο ρυθμός παραγωγής θερμικών αποβλήτων είναι συνεχής και υψηλός με αποτέλεσμα να επηρεάζει την φυσική θερμοκρασία του αποδέκτη. Στην ατμόσφαιρα δύναται να προκαλέσει ή να συμβάλει σε φαινόμενα στρωματοποίησης και παγίδευσης ρύπων σε χαμηλά ύψη, καθιστώντας το ατμοσφαιρικό περιβάλλον επιβλαβές για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα.

Οι καμινάδες και οι πύργοι ψύξης μπορεί να είναι μεμονωμένες ή να είναι τοποθετημένες σε συστοιχία. (Briggs 1973, Schatzmann 1979). Οι επιπτώσεις αυτές καθιστούν απαραίτητη την ανάγκη πρόβλεψης του πεδίου ροής που δημιουργείται από τη διάχυση και ανάμιξη των ανωστικών φλεβών. Οι κατακόρυφες κυκλικές ανωστικές φλέβες σε ήρεμο περιβάλλον έχουν εξεταστεί από πολλούς

ερευνητές όπως οι Abraham (1963), George et al. (1977), Papanicolaou & List (1987, 1988), Noutsopoulos & Yannopoulos (1987), Wang & Law (2002).

Στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης εξετάζονται οι μέσες ταχύτητες και συγκεντρώσεις μίας και δύο ανωστικών, κυκλικών, τυρβωδών φλεβών από θερμό αέρα, οι οποίες εκβάλλουν κατακόρυφα από ακροφύσια ίδιας διαμέτρου σε ήρεμο και ομοιόμορφο ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Λόγω του θερμότερου ρευστού της φλέβας σε σχέση με το περιβάλλον, οι φλέβες αποκτούν θετική ανωστική δύναμη, εκτός από τη δύναμη της αδράνειας που έχουν λόγω της αρχικής ταχύτητας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της ολοκληρωματικής μεθόδου (OM), τα οποία είναι 2ας τάξεως ακριβείας για κυκλικές τυρβώδης ανωστικές φλέβες (Yannopoulos, 2006).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αποδείξει ότι η αριθμητική προσομοίωση είναι ένα αξιόπιστο ερευνητικό εργαλείο που μπορεί να προβλέπει κατανομές ταχυτήτων και συγκεντρώσεων σε μία ή και περισσότερες τυρβώδεις, ανωστικές φλέβες που εμφανίζονται σε ήρεμο περιβάλλον.

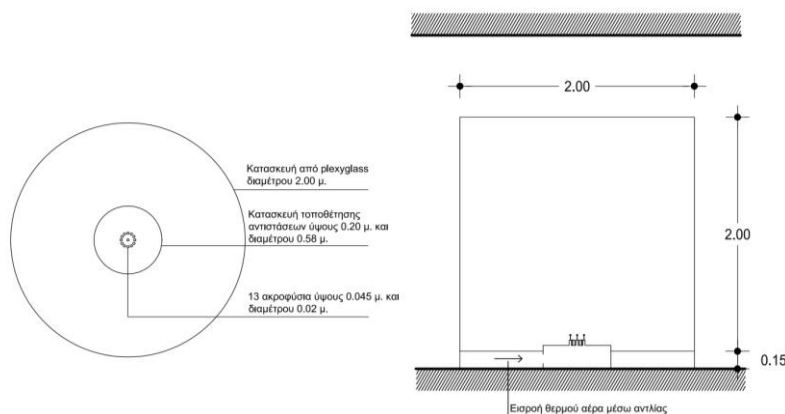
## 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 2.1 Αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις των προαναφερθέντων φαινομένων πραγματοποιούνται με την βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και συγκεκριμένα με την εφαρμογή του λογισμικού ANSYS FLUENT CFD Software version 19.1. Το ANSYS FLUENT επιλύει αριθμητικά της εξισώσεις RANS για την εύρεση των ροϊκών πεδίων.

#### 2.1.1 Περιγραφή μοντέλου

Η γεωμετρία του υπολογιστικού χώρου σχεδιάστηκε σε τρεις διαστάσεις στο Design Modeler του ANSYS. Οι διαστάσεις της γεωμετρίας του μοντέλου δόθηκαν σύμφωνα με τις διαστάσεις της πειραματικής εργαστηριακής διάταξης που είναι τοποθετημένη στο Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, η οποία διαθέτει ένα ακροφύσιο στο κέντρο και 12 περιμετρικά ακροφύσια διαμέτρου 2 cm., σε κορυφές κανονικού δωδεκαγώνου. Υπάρχει η δυνατότητα να κλείνονται τα στόμια των ακροφυσίων και να αφήνονται ανοικτά τα επιθυμητά για εκροή του θερμού αέρα. Ο χώρος όπου λαμβάνει χώρα το εργαστηριακό ομοίωμα περικλείεται από κυλινδρικό τοίχωμα από plexiglass διαμέτρου 2 m. και ύψους 2.85 m. (Σχήμα 1), ώστε να μην επηρεάζεται το φαινόμενο από τις κινήσεις αέρα στον ευρύτερο εργαστηριακό χώρο.



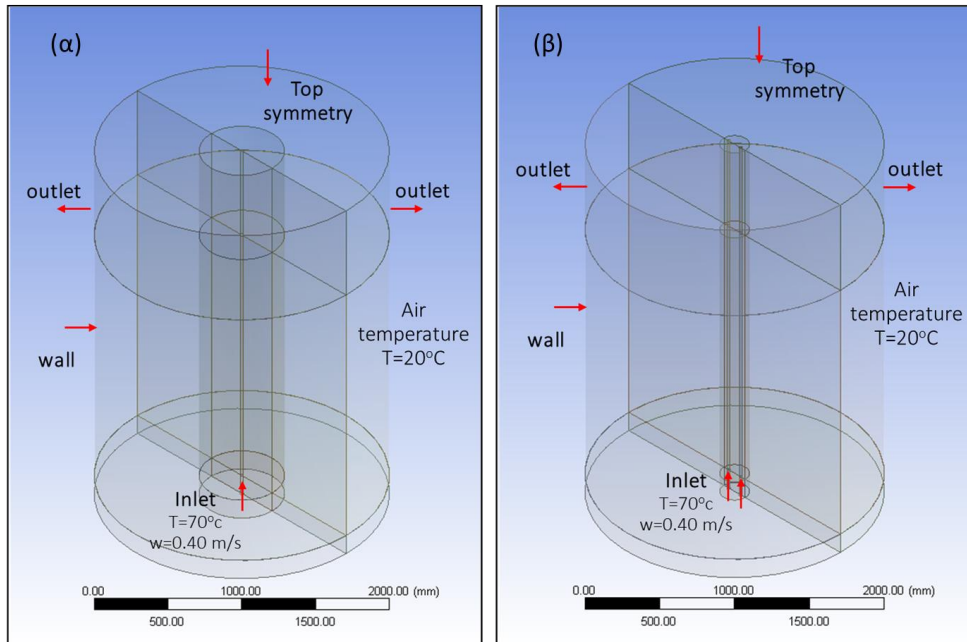
Σχήμα 1. Κάτοψη και τομή πειραματικής εργαστηριακής διάταξης.

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις (Σχήμα 2):

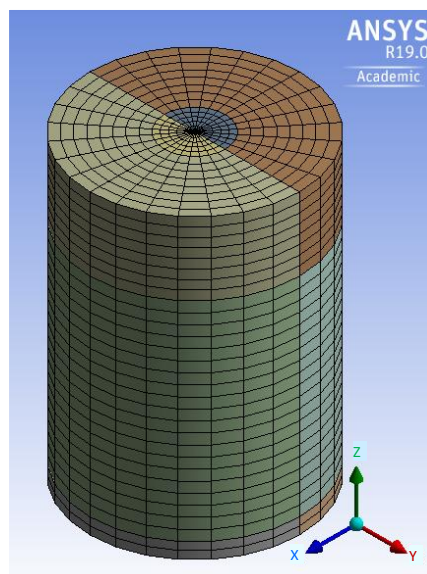
- α) Εκροής μόνο από το κεντρικό ακροφύσιο και
- β) Εκροής από δύο ακροφύσια συμμετρικά ως προς κατακόρυφο άξονα.

Στην περίπτωση β εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για δύο διαφορετικές αποστάσεις  $s = 2t$  μεταξύ των ακροφυσίων: βi για απόσταση μεταξύ τους  $s = 5 \text{ cm}$  και βii για απόσταση μεταξύ τους  $s = 11.7 \text{ cm}$ . Με  $t$  συμβολίζεται η μισή απόσταση μεταξύ των κέντρων των ακροφυσίων των φλεβών.

Στη συνέχεια έγινε η κατασκευή του πλέγματος για την αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου (Σχήμα 3). Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές πυκνότητες με διαφορετικό αριθμό κελιών για τις περιπτώσεις α και β, οι οποίες συμβολίζονται εν συντομία ως α1,α2,α3 και β1,β2,β3, αντιστοίχως. Πιο συγκεκριμένα, οι: (i) α1, β1, (ii) α2, β2 και (iii) α3, β3 έχουν τη μεγαλύτερη, μεσαία και μικρότερη πυκνότητα, αντίστοιχα.



Σχήμα 2. Απεικόνιση γεωμετρίας μοντέλου: (α) εκροή από κεντρικό ακροφύσιο και (β) εκροή από δύο ακροφύσια συμμετρικά ως προς κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 3. Απεικόνιση πλέγματος μοντέλου.

### 2.1.2 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Το λογισμικό ρυθμίστηκε με χρήση διπλής ακρίβειας (3D double precision) για να μειώσει το σφάλμα αριθμητικού υπολογισμού. Στις προσομοιώσεις εφαρμόζεται το μοντέλο τύρβης  $k-\varepsilon$ . Οι εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο του συγκεκριμένου προβλήματος, μετά την εισαγωγή της προσέγγισης Boussinesq αναφορικά με τις πυκνότητες των ρευστών, καταλήγουν στη μορφή:

Εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Εξισώσεις ορμής

$$\text{Κατά } x \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = B_x - \frac{\partial p}{\rho \partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{Κατά } y \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = B_y - \frac{\partial p}{\rho \partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{Κατά } z \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = B_z - \frac{\partial p}{\rho \partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Εξίσωση θερμικής ενεργείας ή διάχυσης ιχνηθέτη

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi_s \quad (5)$$

όπου  $u, v, w$  είναι οι ταχύτητες ροής κατά  $x, y, z$ , αντιστοίχως,  $t$  είναι ο χρόνος,  $p$  είναι η πίεση,  $\rho$  είναι η τοπική πυκνότητα του αέρα,  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του αέρα στην έξοδο της φλέβας (πυκνότητα αναφοράς),  $B_x, B_y, B_z$  είναι οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας κατά  $x, y, z$ , αντιστοίχως,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα,  $a$  είναι ο συντελεστής διάχυσης θερμότητας και  $\phi_s$  όρος πηγής, ο οποίος εκφράζει τον πιθανό ρυθμό κατανάλωσης θερμικής ενεργείας (απώλειες θερμότητας). Εάν η μεταβλητή θερμοκρασίας  $T$  της εξ. (5) αντικατασταθεί από την μεταβλητή της συγκέντρωσης  $c$  ρύπου ή ιχνηθέτη εν γένει, προκύπτει η εξίσωση διάχυσης αυτού, όπου  $a$  ο συντελεστής διάχυσης και  $\phi_s$  ο όρος πηγής του ιχνηθέτη (δημιουργία ή αλλαγή μορφής ιχνηθέτη). Η σύνδεση της πυκνότητας του ρευστού συνδέεται με την θερμοκρασία μέσω του ορισμού του συντελεστή διόγκωσης του ρευστού  $a_v = V^{-1} \partial V / \partial T$  και με χρήση της καταστατικής εξίσωσης προκύπτει η σχέση για την τοπική τιμή πυκνότητας ρευστού:

$$\rho - \rho_0 = -a_v \rho_0 (T - T_0) \quad (6)$$

Η πυκνότητα για το ρευστό του περιβάλλοντος προκύπτει εάν στην εξ. (6) τεθεί όπου  $\rho$  η τιμή του  $\rho_a$ , ήτοι  $\rho_a - \rho_0 = -a_v \rho_0 (T_a - T_0)$ . Από τον ορισμό της σχετικής συγκέντρωσης  $c$  μέσω πυκνοτήτων και τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει η σχέση για τη σχετική συγκέντρωση συναρτήσει θερμοκρασιών:

$$c = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_a - \rho_0} = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_a} \quad (7)$$

Στο αριθμητικό μοντέλο επιβάλλονται οι παρακάτω οριακές συνθήκες: Στα κάτω και πλευρικά όρια του πεδίου (bottom, wall) εφαρμόζονται συνθήκες μη ολίσθησης, ενώ στο πάνω όριο επιβάλλονται συνθήκες συμμετρίας. Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο των ακροφυσίων ελήφθη  $T_0=70\text{ }^\circ\text{C}$  και η ταχύτητα εκροής  $w_0=0.4\text{ m/s}$ . Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου ελήφθη  $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$ . Η τιμή του αρχικού αριθμού Froude των εξεταζομένων ανωστικών φλεβών ήταν  $F_0 = 2.19$ .

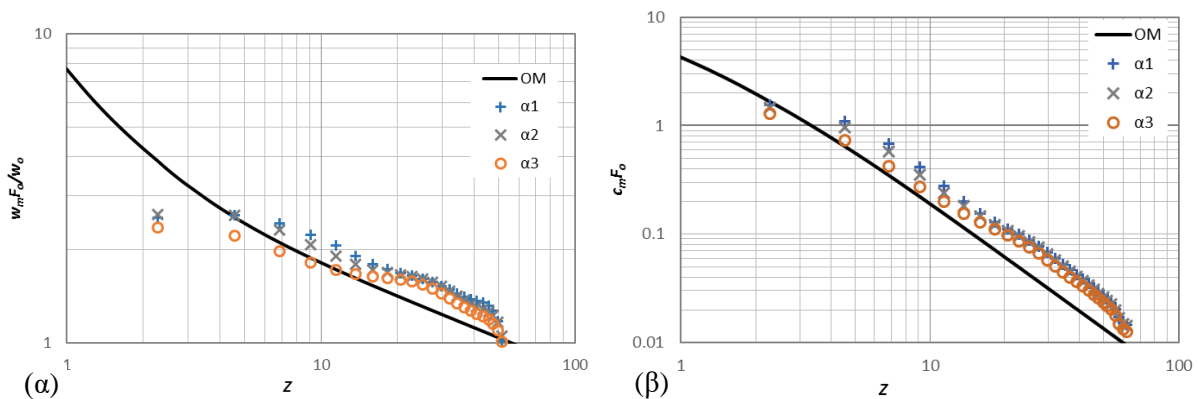
## 2.2 Ολοκληρωματική μέθοδος

Για την σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν με το λογισμικό ANSYS Fluent CFD, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσω των αξονικών ταχυτήτων και μέσω των συγκεντρώσεων, τα οποία έχουν ληφθεί με εφαρμογή της OM σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες και έχουν συγκριθεί με δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα διαφόρων ερευνητών. Η ακρίβεια υπολογισμού αυτών με την OM είναι 2ας τάξεως (Yannopoulos, 2006). Για την εφαρμογή της OM, οι εξισώσεις συνεχείας, ορμής και διάχυσης ιχνηθέτη ή/και θερμικής ενεργείας για μόνιμες συνθήκες ροής ολοκληρώνονται - κατ' αρχάς - χρονικώς, μετά από την αντικατάσταση Reynolds, κατά την οποίαν κάθε εξηρητημένη μεταβλητή θεωρείται ότι αποτελείται από την μέση τιμή και την διακύμανσή της περί την μέση τιμή. Στη συνέχεια, οι προκύπτουσες εξισώσεις μέσης ροής και διάχυσης ολοκληρώνονται επί της εγκάρσιας επιφάνειας του πεδίου κύριας ροής της φλέβας ή των φλεβών και λαμβάνονται οι μεταβολές των μέσων μεγεθών εξηρητημένων μεταβλητών (ταχυτήτων, θερμοκρασιών, συγκεντρώσεων) κατά την κύρια διεύθυνση της ροής. Για την ολοκλήρωση χρησιμοποιείται η εμπειρία από τα πειράματα για την μεταβολή των μεγεθών αυτών κατά την εγκάρσια διεύθυνση, η οποία ακολουθεί καμπύλη τύπου Gauss, καθώς και για την εγκάρσια διεύρυνση των φλεβών, η οποία λαμβάνει χώρα γραμμικώς.

## 2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 2.1 Εκροή από το κεντρικό ακροφύσιο

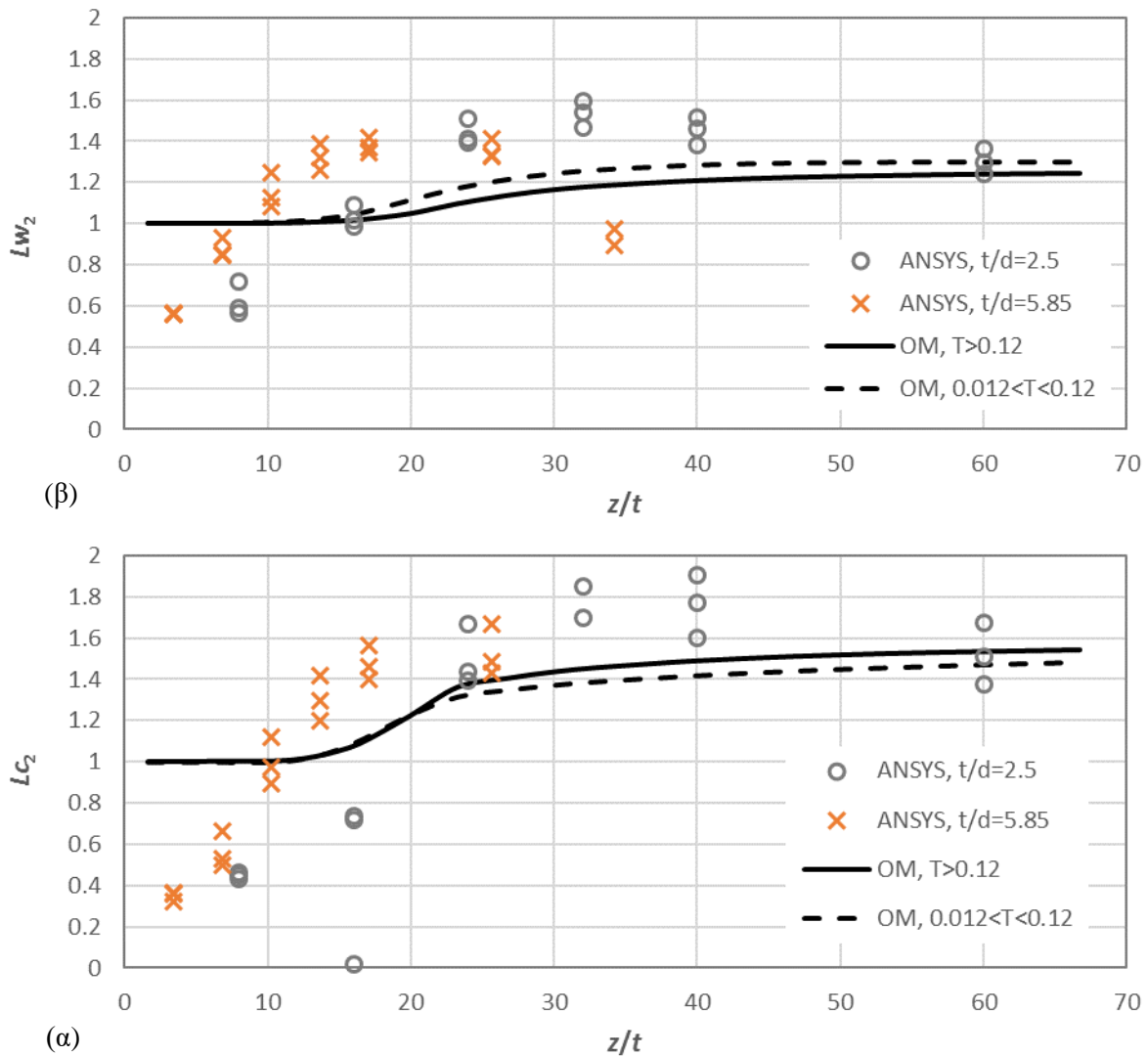
Από τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις  $\alpha_1, \alpha_2$  και  $\alpha_3$  που ελήφθησαν με το λογισμικό ANSYS Fluent CFD, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσω των αξονικών ταχυτήτων και μέσω των συγκεντρώσεων, τα οποία έχουν ληφθεί με την OM σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες (Σχήμα 4). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4, οι κατανομές της ταχύτητας και της συγκέντρωσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλέβας ακολουθούν ικανοποιητικά την ημιεμπειρική λύση OM για κυκλική ανωστική φλέβα σε ομοιόμορφο περιβάλλον. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι η αριθμητική λύση επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα πλέγματος. Έτσι, αν και αναμενόταν το πυκνότερο πλέγμα της περίπτωσης  $\alpha_1$  να δώσει καλύτερα αποτελέσματα, η βέλτιστη λύση ελήφθη με το αραιότερο πλέγμα της περίπτωσης  $\alpha_3$ .



**Σχήμα 4.** (α) Αξονική κατανομή μέσω των ταχυτήτων και (β) μέσω των συγκεντρώσεων κυκλικής κατακόρυφης φλέβας ως συνάρτηση του  $Z = (z/d)F_0^{-1}$ , για τις περιπτώσεις  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  με χρήση του λογισμικού ANSYS, και σύγκριση με την καμπύλη της ολοκληρωματικής μεθόδου (OM) (Yannopoulos, 2006).

## 2.1 Εκροή από δύο ακροφύσια συμμετρικά ως προς τον άξονα

Από τα αποτελέσματα που αριθμητικών αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  και  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  που ελήφθησαν με το λογισμικό ANSYS Fluent CFD, προέκυψαν οι λόγοι των μέσων αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσων αξονικών ταχυτήτων και μέσων συγκεντρώσεων, τα οποία έχουν ληφθεί με την OM σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες (Σχήμα 5). Η παράμετρος  $T=(t/d)F_0^{-1}$  καλείται δυναμικός αριθμός εγγύτητας των φλεβών και είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού αλληλεπίδρασης αυτών. Στις εξετασθείσες περιπτώσεις είχε τιμές  $T=0.57$  και  $1.34$ , για  $t/d=2.5$  και  $5.85$ , αντιστοίχως, όπου  $t$  η μισή οριζοντία απόσταση των ακροφυσίων των φλεβών του ζεύγους.



**Σχήμα 5.** Μεταβολή λόγων (α) μέσων αξονικών ταχυτήτων (β) μέσων αξονικών συγκεντρώσεων φλέβας ζεύγους και σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα OM.

Για  $T>0.12$  επικρατεί συμπεριφορά φλεβών πλήρους ανώσεως ως προς την αλληλεπίδραση και για  $0.012<T<0.12$  επικρατεί ενδιάμεση συμπεριφορά (Yannopoulos, 2010). Για τιμές  $10<z/t<35$ , η αριθμητική προσομοίωση με το ANSYS εμφανίζει υπερεκτίμηση των αξονικών ταχυτήτων (Σχήμα 5α) και συγκεντρώσεων (Σχήμα 5β) συγκριτικά με τα αποτελέσματα της OM, ενώ για τιμές μικρότερες του 10 εμφανίζει υποεκτίμηση. Η αριθμητική προσομοίωση φαίνεται να δίνει καλύτερα

αποτελέσματα σε σχετική συμφωνία με της OM για τιμές  $>35$ , ήτοι προσεγγίζοντας την οριακή τιμή  $\lim Lw_2 = 1.26$  για τον λόγο ταχυτήτων και  $\lim Lc_2 = 1.59$  για τον λόγο συγκεντρώσεων.

Η παρούσα μελέτη αποτελεί την βάση για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος με στόχο την βελτιστοποίηση του αριθμητικού μοντέλου, ώστε να επιτευχθεί ακριβέστερη αριθμητική λύση, η οποία θα επαληθευθεί και με νέα πειραματικά δεδομένα. Προς τον σκοπόν αυτόν, θα χρησιμοποιηθεί η υφισταμένη πειραματική διάταξη που περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent CFD προσομοιώθηκε αριθμητικά μια κατακόρυφη τυρβώδης κυκλική πλήρως ανωστική φλέβα, καθώς και ζεύγος ομοίων φλεβών με την προαναφερομένη φλέβα, για δύο διαφορετικές αποστάσεις των ακροφυσίων μεταξύ των και για τρεις πυκνότητες υπολογιστικού πλέγματος. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν, αναφορικά με τις αξονικές ταχύτητες και συγκεντρώσεις μέσης ροής, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ολοκληρωματικής μεθόδου και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η πυκνότητα πλέγματος επηρεάζει τα αποτελέσματα και, επομένως, είναι αναγκαία η σύγκριση με αξιόπιστα δεδομένα για τον καθορισμό της βέλτιστης πυκνότητας πλέγματος.
- Η επιτευχθείσα συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων μιας κυκλικής κατακόρυφης πλήρως ανωστικής φλέβας και των αντιστοίχων που ελήφθησαν με εφαρμογή της ολοκληρωματικής μεθόδου είναι αρκούντως ικανοποιητική.
- Αναφορικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων ζεύγους φλεβών, τα οποία απεικονίζονται ως λόγοι ταχύτητας ζεύγους προς την ταχύτητα μιας φλέβας στην ίδια υψομετρική θέση του άξονα, η αριθμητική προσομοίωση υποεκτιμά τους λόγους για  $z/t < 10$  και υπερεκτιμά τους λόγους για  $10 < z/t < 35$ . Τα αποτελέσματα των λόγων φαίνεται να έχουν καλύτερη ακρίβεια στην περιοχή  $z/t > 35$ , όπου προσεγγίζουν τις οριακές τιμές των λόγων ταχυτήτων και συγκεντρώσεων 1.26 και 1.59, αντιστοίχως.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abraham, G. (1963), “Jet diffusion in stagnant ambient fluid”, Publication 29, Series 1, Group 14, Section 14.42, Delft Hydraulics Laboratory.
- Bloutsos, A.A and P.C. Yannopoulos (2009), “Round turbulent buoyant jets discharged vertically upwards forming a regular polygon”, Journal of Hydraulic Research, Vol. 47, No. 2, pp. 263–274.
- Briggs, G.A. (1973), “Diffusion estimation for small emissions. Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory”, Environmental Research Laboratory, NOAA, 1973 Annual Rep. ATDL-79, 59pp
- George, W. K., R. L. Alpert and F. Tamanini (1977), “Turbulence measurements in an axisymmetric plume”, International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 1145-1154.
- Noutsopoulos, G. and P.C. Yannopoulos (1987), “The round vertical turbulent buoyant jet”, Journal of Hydraulic Research, Vol. 25, Issue 4, pp. 481-502

- Papanicolaou, P. N., and E. J. List (1987), “Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2059–2071.
- Papanicolaou, P. N., and E. J. List (1988), “Investigations of round vertical turbulent buoyant jets”, *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 195, pp. 341-391.
- Yannopoulos, P.C. (2006), “An Improved Integral Model for plane and round turbulent buoyant jets”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 547, pp. 267-296.
- Yannopoulos P.C. (2010). “Advanced integral model for groups of interacting round turbulent buoyant jets”. *Environ Fluid Mech*, 10(4), pp. 415-450.
- Schatzmann, M. (1979), “An integral model of plume rise”, *Atmospheric Environment*, Vol. 13, pp. 721-731.
- Wang, H., and A. W. K. Law (2002), “Second-order integral model for a round buoyant jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 459, pp. 397-428.



# Simulation of plumes flow and mixing in a calm environment

M. K. Stefanidou<sup>1</sup> and P. C. Yannopoulos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Patras,  
265 04 Patras, Greece

\*Corresponding author: E-mail: mstefanidou@upatras.gr, Tel +30 2610 996592

In the present study, the mean properties of a single and pairs of round vertical turbulent plumes of hot air, which discharged vertically upwards from adjacent nozzles of the same diameter into a calm and uniform atmospheric environment, are numerically examined. Besides the inertial force due to initial velocity of plumes, a positive upward buoyant force develops due to the warmer fluid relative to the environment. The numerical simulations of the aforementioned phenomena were carried out by the application of the ANSYS FLUENT CFD Software, version 19.1. Modeling was made in three dimensions. In the simulations the k-e turbulent model was applied. The equations governing the phenomenon are the RANS equations with the Boussinesq approximation with respect to fluid densities. The numerical results for velocities and concentrations compared to the corresponding ones of the integral method indicate good agreement regarding the single vertical turbulent round plume, while they agree well at large axial distances from the plume exits.

**Key words:** Round buoyant jet, numerical simulation, buoyant jet interaction, mean axial velocities, mean temperatures, mean concentrations.