

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΔΙΑΧΥΤΗ

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

<sup>1</sup>Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα

\*Στοιχεία επικοινωνίας: [yannopp@upatras.gr](mailto:yannopp@upatras.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται αριθμητική προσομοίωση των μέσων ιδιοτήτων κατακορύφων τυρβωδών ανωστικών φλεβών από γραμμικό διαχύτη με ένα, δύο, τρία ή πέντε ακροφύσια από τα οποία εκβάλλει πόσιμο ύδωρ σε υδάτινο ήρεμο περιβάλλον αλμυρού ύδατος. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ANSYS FLUENT CFD (version R.3). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση συγκρίνονται με αντίστοιχα της ολοκληρωματικής μεθόδου για κυκλικές τυρβώδεις ανωστικές φλέβες και παρουσιάζουν αρκετά καλή συμφωνία. Η μοντελοποίηση έγινε σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιώντας είτε το μοντέλο τύρβης *Spalart-Allmaras* είτε το *k- $\omega$* . Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων συμπεραίνεται η ικανοποιητική ακρίβεια των παραδοχών της ολοκληρωματικής μεθόδου και η καλύτερη συμπεριφορά του *Spalart-Allmaras* σε ροές πλουμίων.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Αριθμητική προσομοίωση, αλληλεπίδραση φλεβών, μέσες αξονικές ταχύτητες, μέσες συγκεντρώσεις, θαλάσσιος διαχύτης.

### SIMULATION OF VERTICAL BUOYANT JETS FROM A LINEAR DIFFUSER

Maria K. Stefanidou<sup>1</sup> and Panayotis C. Yannopoulos<sup>1\*</sup>

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

\*Corresponding author: [yannopp@upatras.gr](mailto:yannopp@upatras.gr)

### ABSTRACT

In the present study, the mean properties of vertical turbulent buoyant jets from a linear diffuser with one, two, three or five nozzles, from which tap water discharges into a quiescent environment of salt water, are numerically investigated. The numerical simulations were carried out by the implementation of the ANSYS FLUENT CFD Software (version R.3). The results obtained from the simulations are compared with corresponding results using the integral method for round turbulent buoyant jets and indicate fairly good agreement. Modeling was made in three dimensions using either the *Spalart-Allmaras* or *k- $\omega$*  turbulence model. The comparison of the results from both methods implies satisfactory accuracy of approximations made in integral method and the advanced behaviour of *Spalart-Allmaras* regarding plume flows.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Numerical simulation, buoyant jet interaction, mean axial velocities, mean concentrations, sea outfall.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατακόρυφες κυκλικές ανωστικές φλέβες σε ήρεμο περιβάλλον έχουν εξεταστεί από πολλούς ερευνητές, όπως τους Abraham (1963), George *et al.* (1977), Papanicolaou & List (1987, 1988), Noutsopoulos & Yannopoulos (1987), Wang & Law (2002). Η εκτενής όμως χρήση των πολλαπλών διαχυτών στην απόρριψη επεξεργασμένων και μη επεξεργασμένων λυμάτων σε μεγάλα υδάτινα σώματα, όπως είναι το θαλάσσιο περιβάλλον, οδήγησε τους ερευνητές να στραφούν προς την μελέτη της αλληλεπίδρασης των κυκλικών ανωστικών φλεβών με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική επίπτωση.

Οι διαχύτες μπορεί να φέρουν πολλαπλά στόμια εξόδου καθώς έχει αποδειχθεί ότι η εκβολή λυμάτων από πολλαπλό διαχύτη μειώνει τον όγκο και τη συγκέντρωση σε ρύπους, επομένως πετυχαίνει μεγαλύτερες αραιώσεις σε σύγκριση με την αραιώση από ένα ακροφύσιο (Fischer *et al.* 1979, Lee & Chu 2003, Bloutsos & Yannopoulos 2009). Οι επιπτώσεις της διάθεσης αποβλήτων καθιστούν απαραίτητη την βαθιά γνώση της μηχανικής τέτοιων ροών ώστε να υπάρξει σχεδιασμός αποτελεσματικών διατάξεων σε αραιώση. Για το λόγο αυτό η μελέτη πολλαπλών ανωστικών φλεβών και η ανάγκη πρόβλεψης του πεδίου ροής που δημιουργείται από τη διάχυση και ανάμιξη αυτών είναι πολύ σημαντική για την μηχανική των ρευστών. Υπάρχουν δύο τύποι διαχυτών για την απόρριψη των λυμάτων: Ο γραμμικός (πολλαπλός), όπου τα ακροφύσια είναι τοποθετημένα κατά μήκος του αγωγού εκβολής σε διάφορες διατάξεις, και ο κυκλικός, όπου τα ακροφύσια είναι διατεταγμένα στις κορυφές οριζώντιου κανονικού πολυγώνου, όπως ο διαχύτης τύπου ροζέττας.

Με την αλληλεπίδραση κατακόρυφων κυκλικών ανωστικών φλεβών σε σειρά έχουν ασχοληθεί πολλοί ερευνητές, όπως οι Yannopoulos & Noutsopoulos (2006a,b), Moawad *et al.* (2001), Briggs (1975), Yannopoulos (1996), Papps & Wood (1997), Davidson *et al.* (2002), Manohar *et al.* (2004), Cenedese and Gatto (2016), He *et al.* (2018). Παράλληλα έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν τη συμπεριφορά της αλληλεπίδρασης των ανωστικών φλεβών, όπως των Frick *et al.* (2001), Jirka & Akar (1991), Yannopoulos (2010) και Davidson *et al.* (1994).

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές ερευνητικές εργασίες, οι οποίες προσομοιώνουν αριθμητικά κυκλικές ανωστικές φλέβες (Ardalan & Fereidon 2019, Yan *et al.* 2019), αλλά υπάρχουν σχετικά λίγες μελέτες που εστιάζουν στην αλληλεπίδραση κυκλικών φλεβών σε σειρά όπως των Morkhtarzadeh-Dehgan *et al.* (2006), Yan X. (2019), Lou *et al.* (2019).

Η ροή για την περίπτωση αλληλεπίδρασης  $N$  φλεβών πλήρους ανώσεως καθορίζεται από τη διάμετρο  $d$  του στομίου, την ταχύτητα εξόδου της φλέβας  $w_0$ , την κατακόρυφη απόσταση  $z$ , την φαινόμενη επιτάχυνση  $g'_0 = (\rho_\alpha - \rho_0)/\rho_0$ , όπου  $\rho_0, \rho_\alpha$  πυκνότητες ρευστού στην έξοδο της φλέβας και στο περιβάλλον, την μισή απόσταση μεταξύ των κέντρων των ακροφυσίων  $t$  και το πλήθος  $N$  των φλεβών. Εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση (θεώρημα των  $\pi$  ή *Vaschy-Buckingham*), οι έξι ανεξάρτητες διαστατές μεταβλητές περιέχουν δύο διαστάσεις (μήκος και χρόνο). Επομένως δυνάμεθα να σχηματίσουμε τέσσερις ανεξάρτητες αδιάστατες μεταβλητές για την μελέτη κάθε εξηρημένης αδιάστατης μεταβλητής. Από πρακτικής και φυσικής απόψεως επιλέγονται οι αδιάστατες ανεξάρτητες μεταβλητές της αξονικής απόστασης  $z/t$ , του αριθμού Froude  $F_0 = w_0/\sqrt{g'_0 d}$ , του δυναμικού αριθμού εγγύτητας ή γειτνίασης των φλεβών  $T = t/(dF_0)$  και του αριθμού αλληλεπιδρουσών φλεβών  $N$ .

Στην παρούσα εργασία με τη βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης, εξετάζονται οι μέσες ταχύτητες και συγκεντρώσεις μίας, δύο, τριών και πέντε ανωστικών, κυκλικών, τυρβωδών φλεβών ποσίμου ύδατος σε σειρά καθώς και η αλληλεπίδρασή τους, οι οποίες εκβάλλουν κατακόρυφα από ακροφύσια ίδιας διαμέτρου σε ήρεμο και ομοιόμορφο υδάτινο αλατούχο περιβάλλον ίδιας θερμοκρασίας με το νερό της φλέβας, αλλά με μεγαλύτερη πυκνότητα. Λόγω της μικρότερης πυκνότητας του 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. Επειδή το ελαφρύτερο ρευστό της φλέβας τείνει να ανέβει υψηλότερα,

λόγω της άνωσης, συμπαρασύρει ρευστό του περιβάλλοντος από τα χαμηλότερα επίπεδα, το αναμιγνύει με το ρευστό της φλέβας και το μεταφέρει σε υψηλότερα επίπεδα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της ολοκληρωματικής μεθόδου (OM), τα οποία είναι 2ας τάξεως ακριβείας για κυκλικές τυρβώδεις ανωστικές φλέβες (Yannopoulos 2006, Yannopoulos 2010) και βασίζονται στην επαλληλία τοπικών εισροών άνωσης και κινητικής ενεργείας για την μέση ροή.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, αφενός, να εξετάσει την αξιοπιστία του αριθμητικού μοντέλου στην περίπτωση μιας φλέβας με πλήρη άνωση και, αφ' ετέρου, να συγκρίνει τις προβλέψεις του αριθμητικού μοντέλου, για την περίπτωση δύο, τριών και πέντε φλεβών με πλήρη άνωση, με τα αποτελέσματα λόγω αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή της OM.

## 2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

### 2.1 Μοντέλο προσομοίωσης

Για την αριθμητική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ανωστικών τυρβωδών φλεβών, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε χρήση του λογισμικού CFD ANSYS FLUENT έκδοσης R.3. Η μοντελοποίηση έγινε σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιώντας είτε το μοντέλο τύρβης *Spalart-Allmaras* είτε το *k- $\omega$* .

Το ANSYS FLUENT επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις RANS για την εύρεση των ροϊκών πεδίων και την εξίσωση διάχυσης για την εύρεση μεταβολής πυκνοτήτων ή συγκεντρώσεων.

Η γεωμετρία του υπολογιστικού χώρου σχεδιάστηκε στο Design Modeler του ANSYS. Ο υπολογιστικός χώρος περικλείεται από κυλινδρικό τοίχωμα διαμέτρου 2 m. και ύψους 2.85 m, στο μέσον της βάσης του οποίου ευρίσκεται ο γραμμικός διαχύτης. (Σχήμα 1).

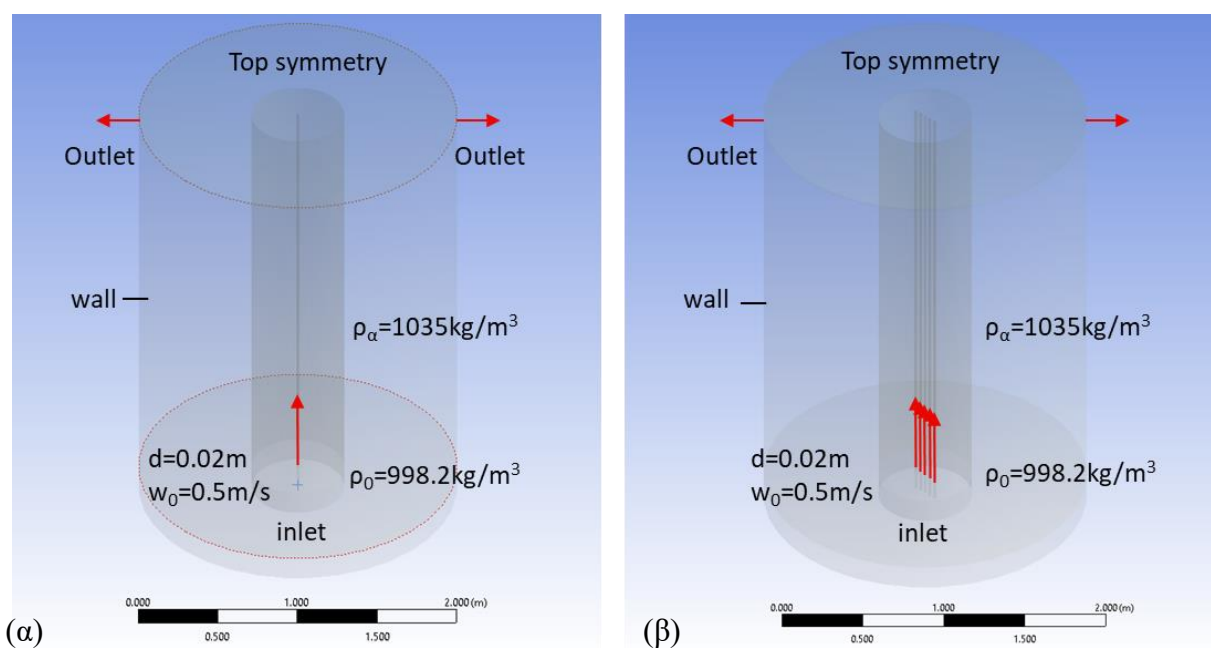
Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια:

Σενάριο I. Εκροή μόνο από το κεντρικό ακροφύσιο

Σενάριο II. Εκροή από δύο ακροφύσια συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

Σενάριο III. Εκροή από τρία ακροφύσια σε σειρά συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα

Σενάριο IV. Εκροή από πέντε ακροφύσια σε σειρά συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα.



**Σχήμα 1.** Απεικόνιση γεωμετρίας μοντέλου: (α) εκροή από κεντρικό ακροφύσιο και (β) εκροή από  $N=5$  ακροφύσια συμμετρικά ως προς κατακόρυφο άξονα.

Στα Σενάρια II, III και IV εξετάστηκε η περίπτωση για απόσταση μεταξύ των κέντρων των ακροφυσίων  $t = 2$  cm με ακροφύσια διαμέτρου  $d=2$ cm. Στη συνέχεια έγινε η κατασκευή του πλέγματος για την αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου. Ο αριθμός των κελιών του πλέγματος είναι για τα Σενάρια I, II, III, IV, 457111, 553390, 626071 και 786741 αντίστοιχα, ενώ έχουν στοιχεία μεγέθους  $3 \times 10^{-4}$  m στην περιοχή ενδιαφέροντος και  $3 \times 10^{-3}$  m στον υπόλοιπο υπολογιστικό χώρο. Ο χρόνος εκτέλεσης υπολογισμού για κάθε περίπτωση είναι περίπου 48 ώρες.

## 2.2 Μαθηματική ανάλυση

Στην παρούσα εργασία και τα τέσσερα Σενάρια I, II, III και IV εξετάστηκαν με τα μοντέλα τύρβης *Sparart-Allmaras* και *k- $\omega$* , καθώς στην εργασία Stefanidou & Yannopoulos (2019) τα παραπάνω μοντέλα έδειξαν καλύτερη πρόβλεψη των αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων μιας πλήρως ανωστικής φλέβας σε σύγκριση με το *k- $\epsilon$* .

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Εξισώσεις ορμής

$$\text{Κατά } x \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = B_x - \frac{\partial p}{\rho \partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\text{Κατά } y \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = B_y - \frac{\partial p}{\rho \partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{Κατά } z \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = B_z - \frac{\partial p}{\rho \partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

Εξίσωση διάχυσης ιχνηθέτη

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + \varphi_s \quad (2.5)$$

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 ύδατος,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  είναι οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας κατά  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , αντιστοίχως,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ύδατος,  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης μάζας και  $\varphi_s$  όρος πηγής, ο οποίος εκφράζει τον πιθανό ρυθμό μεταβολής μάζας, όταν ο ρύπος δεν είναι συντηρητικός, και  $c$  είναι η μεταβλητή της συγκέντρωσης ρύπου ή ιχνηθέτη εν γένει. Η σχετική συγκέντρωση του ιχνηθέτη ορίζεται ως:

$$c = \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a - \rho_0} \quad (2.6)$$

Στο αριθμητικό μοντέλο επιβάλλονται οι παρακάτω οριακές συνθήκες: Στα κάτω και πλευρικά όρια του πεδίου (wall) εφαρμόζονται συνθήκες μη ολίσθησης, ενώ στο επάνω όριο επιβάλλονται συνθήκες συμμετρίας. Η πυκνότητα του ύδατος στην έξοδο των ακροφυσίων ελήφθη  $\rho_0=998.2 \text{ kg/m}^3$  και η ταχύτητα εκροής  $w_0=0.5 \text{ m/s}$ . Η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού ελήφθη  $\rho_a=1035 \text{ kg/m}^3$ . Και τα δύο ρευστά είναι ισοθερμοκρασιακά με θερμοκρασία  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η τιμή του αρχικού αριθμού Froude των εξεταζομένων ανωστικών φλεβών είναι  $F_0 = 5.87$ , η οποία δείχνει συμπεριφορά φλεβών πλήρους άνωσης μετά από απόσταση  $55 \text{ cm}$ , περίπου (Papanicolaou & List, 1988).

Η μέθοδος επίλυσης της πίεσης και των ταχυτήτων που εφαρμόστηκε είναι ο αλγόριθμος Simple, ο οποίος προτάθηκε από τους Patankar και Spalding (1972) και αποτελεί μια διαδικασία εκτίμησης-διόρθωσης για τον υπολογισμό της πίεσης επί μετατοπισμένου πλέγματος. Η μέθοδος είναι επαναληπτική.

### 2.3 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 λαμβάνονται με εφαρμογή της ΟΜ σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή της δυναμικής ροής (Yannopoulos, 2010). Για γραμμικό διαχύτη με  $N$  κατακόρυφα ακροφύσια, η μέθοδος της επαλληλίας παράγει τις ακόλουθες εξισώσεις για τους λόγους μέσω των αξονικών ταχυτήτων  $L_{wN} = w_{mN}/w_m$  και συγκεντρώσεων  $L_{cN} = c_{mN}/c_m$  των σχηματιζομένων φλεβών πλήρους άνωσεως προς τα ομοειδή μεγέθη στην ίδια στάθμη μιας όμοιας ανωστικής φλέβας (Yannopoulos 2010), ήτοι:

$$L_{wN} = \text{Exp} \left[ -\frac{(x/t)^2}{k_w^2(z/t)^2} \right] \left\{ \sum_{i=1}^N \text{Exp} \left[ -\frac{(y_i/t)^2}{k_3^2(z/t)^2} \right] \right\}^{1/3} \quad (2.7)$$

Παρομοίως, η επαλληλία τοπικών εισροών άνωσης καταλήγει στην εξίσωση:

$$L_{cN} = \frac{1}{L_{wN}} \text{Exp} \left[ -\frac{(x/t)^2}{k_4^2(z/t)^2} \right] \sum_{i=1}^N \text{Exp} \left[ -\frac{(y_i/t)^2}{k_4^2(z/t)^2} \right] \quad (2.8)$$

όπου  $y_i = y/t + N + 1 - 2i$ ,  $k_w = 0.11$ ,  $k_3 = k_w/\sqrt{3}$ ,  $k_4 = k_c/\sqrt{1 + \lambda^2}$ ,  $\lambda = k_c/k_w$  και  $k_c = 0.114$ .

Από την εξίσωση (2.7) υπολογίζεται η ταχύτητα του σύνθετου πεδίου μέσης ροής  $N$  φλεβών σε κάθε θέση  $(x,y,z)$ , όταν είναι γνωστή η ταχύτητα της μίας φλέβας στον άξονα και η εγκάρσια κατανομή αυτής στην ίδια στάθμη  $z$ . Παρομοίως, από την εξίσωση (2.8) υπολογίζεται η συγκέντρωση του συνθέτου πεδίου μέσης ροής  $N$  φλεβών σε κάθε θέση  $(x,y,z)$ , όταν είναι γνωστή η ταχύτητα και η συγκέντρωση της μίας φλέβας στον άξονα, καθώς και οι εγκάρσιες κατανομές αυτών στην ίδια στάθμη  $z$ .

Οι οριακές τιμές για τους λόγους αξονικών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων, όταν  $z \rightarrow \infty$ , δίνονται από τους τύπους  $N^{1/3}$  και  $N^{2/3}$ , αντίστοιχα.

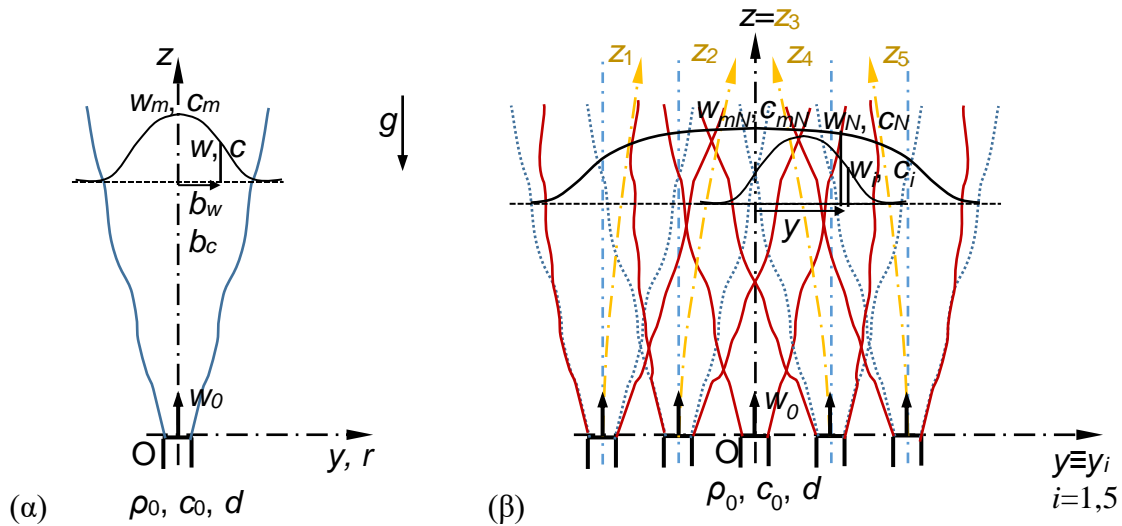
## 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 3.1 Μία φλέβα πλήρους άνωσης

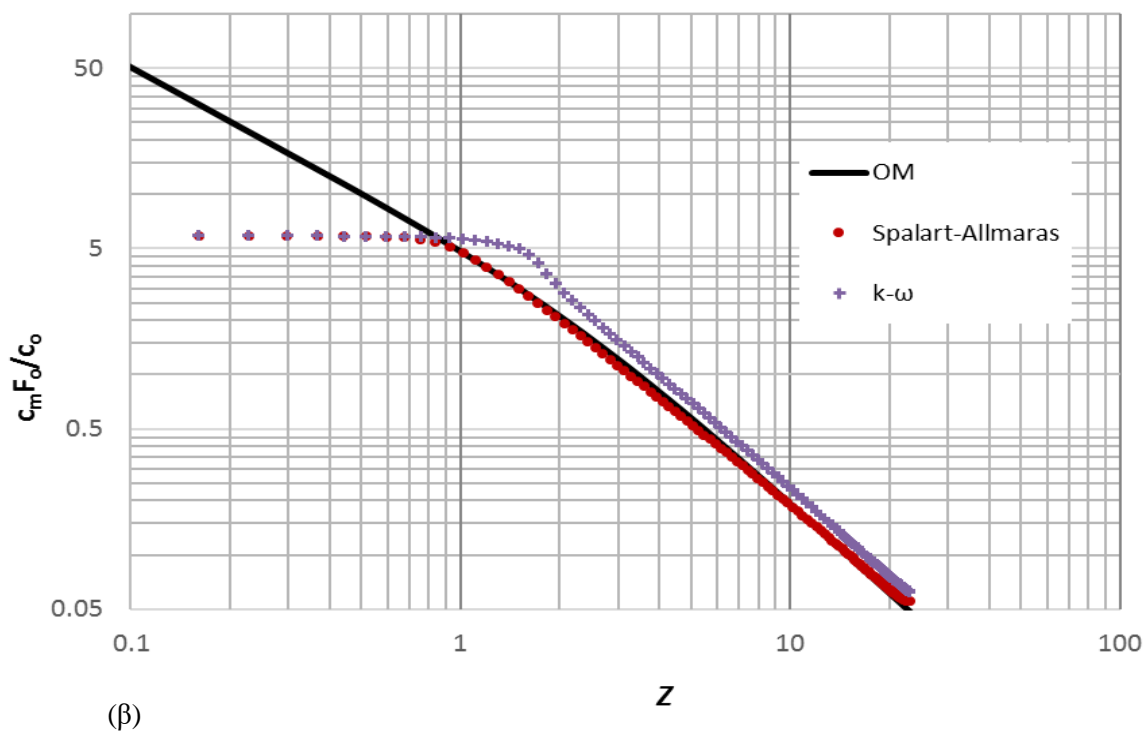
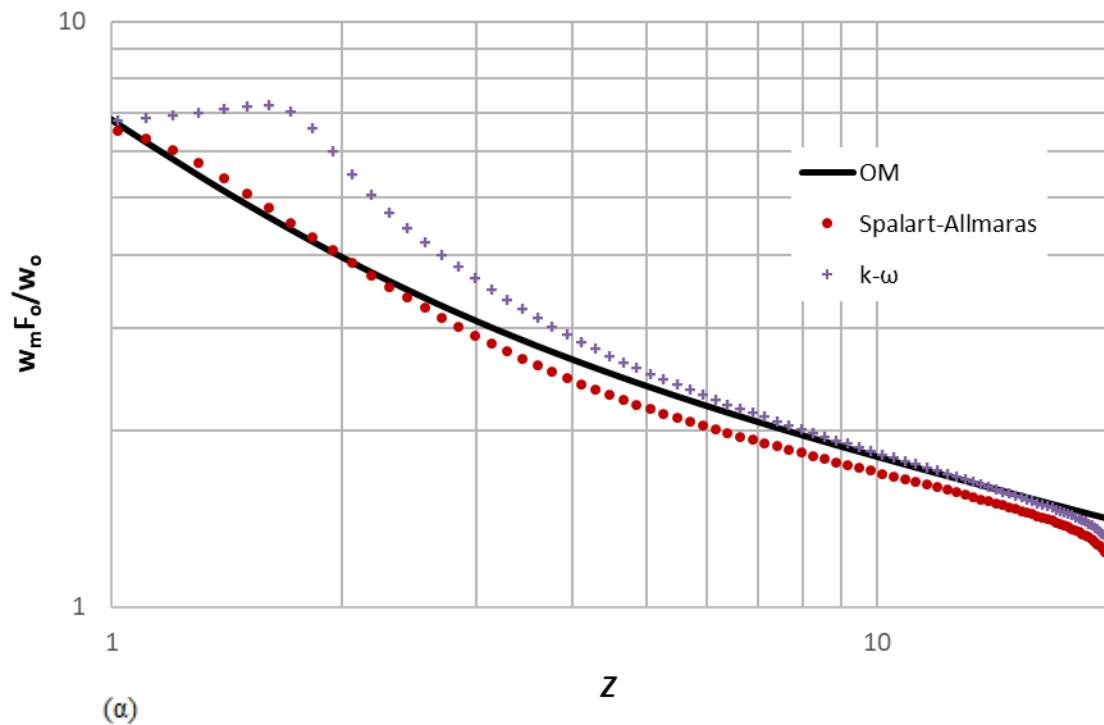
Στο Σχήμα 2 (α) δείχνονται τα βασικά χαρακτηριστικά μίας κυκλικής κατακόρυφης φλέβας. Από τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις δύο περιπτώσεις με τα διαφορετικά μοντέλα τύρβης

*Spalart-Allmaras* και  $k-\omega$  που ελήφθησαν με το λογισμικό ANSYS Fluent CFD, πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μέσω αξονικών ταχυτήτων και μέσω συγκεντρώσεων, τα οποία έχουν παραχθεί εφαρμόζοντας την ΟΜ σε κυκλικές κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες (Σχήμα 3).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3, οι κατανομές της ταχύτητας και της συγκέντρωσης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλέβας ακολουθούν ικανοποιητικά την ημιεμπειρική λύση ΟΜ για κυκλική ανωστική φλέβα σε ομοιόμορφο περιβάλλον. Η βέλτιστη λύση ελήφθη με το μοντέλο τύρβης *Spalart-Allmaras*, όπου και παρατηρείται σχεδόν πλήρης ταύτιση της καμπύλης σε όλο το πεδίο. Το μοντέλο  $k-\omega$  δίνει μεγαλύτερη απόκλιση από την λύση ΟΜ στην ενδιάμεση περιοχή άνωσης ( $Z \leq 5$ , όπου  $Z = (z/d)F_o^{-1}$ ), η οποία συμβαίνει πλησιέστερα στην έξοδο της φλέβας. Στην περιοχή αυτή η τύρβη απαρτίζεται από μεγάλες δίνες, τις οποίες το μοντέλο *Spalart-Allmaras* προσομοιώνει καλύτερα. Στην περιοχή μακριά από την έξοδο ( $Z \geq 5$ ), όπου οι δίνες έχουν μικρό μέγεθος, η προσομοίωση με το μοντέλο  $k-\omega$  βελτιώνεται σημαντικά και σχεδόν ταυτίζεται με την καμπύλη της ΟΜ. Η ακρίβεια και των δύο μοντέλων βελτιώνεται σημαντικά στις προβλέψεις αξονικών συγκεντρώσεων, με πάλι όμως υπεροχή του μοντέλου τύρβης *Spalart-Allmaras*.



**Σχήμα 2.** Απεικόνιση κατακόρυφων κυκλικών τυρβωδών φλεβών σε ήρεμο περιβάλλον: (α) μία φλέβα, (β) αλληλεπίδραση  $N=5$  φλεβών σε σειρά με εμφανή την σύγκλιση αυτών προς τον κύριο άξονα της ομάδας.

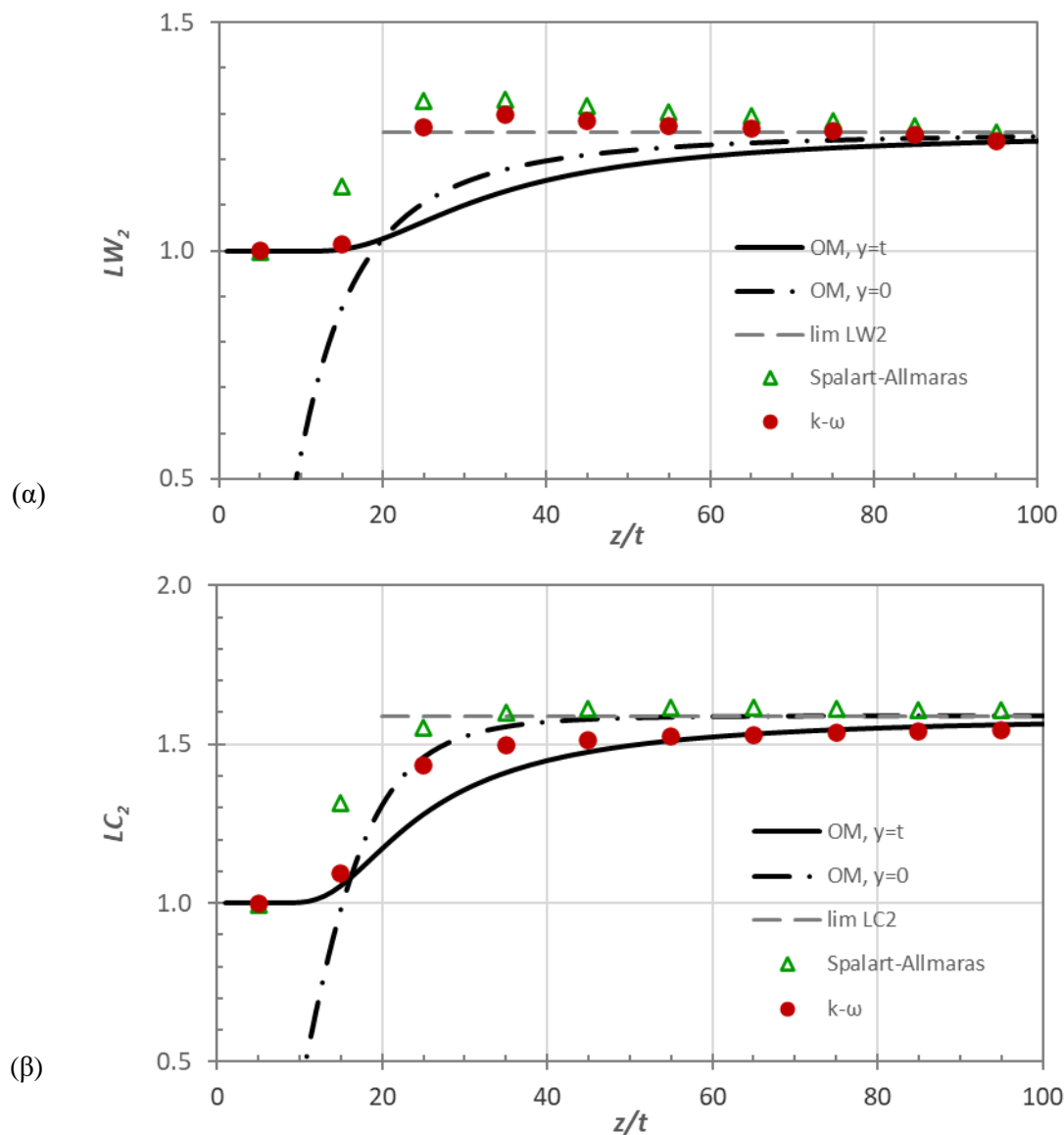


**Σχήμα 3.** (α) Αξονική κατανομή μέσω ταχυτήτων και (β) μέσω συγκεντρώσεων κυκλικής κατακόρυφης φλέβας ως συνάρτηση του  $Z = (z/d)F_o^{-1}$ , για τις περιπτώσεις *Spalart-Allmaras* και *k-ω* με χρήση του λογισμικού ANSYS, και σύγκριση με την καμπύλη της ολοκληρωματικής μεθόδου (OM) (Yannopoulos,2006).

### 3.2 Αλληλεπίδραση φλεβών πλήρους άνωσης

Στο Σχήμα 2 (β) δείχνονται τα βασικά χαρακτηριστικά  $N=5$  κατακόρυφων φλεβών, οι οποίες συγκλίνουν προς τον κοινό άξονα του γραμμικού διαχύτη με την αύξηση της αξονικής

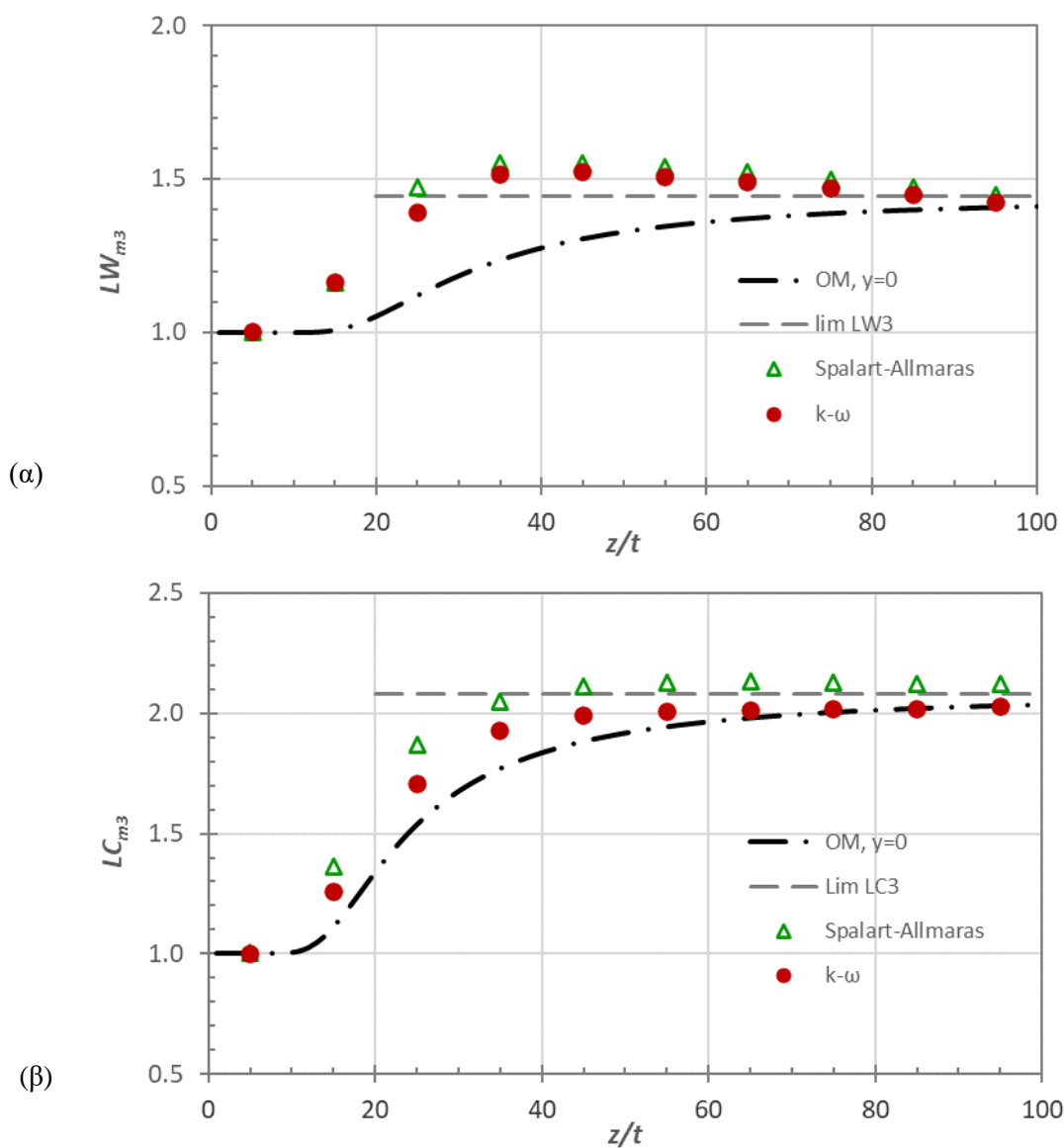
απόστασης  $z$ . Η σύγκλιση αυτή οφείλεται στην ροή δυναμικού που προκαλείται από την αλληλοσυμπαράσυρση των φλεβών. Στα Σχήματα 4, 5 και 6 απεικονίζονται οι λόγοι των μέσων αξονικών ταχυτήτων,  $Lw_2$ ,  $Lw_3$ ,  $Lw_5$ , και συγκεντρώσεων,  $Lc_2$ ,  $Lc_3$ ,  $Lc_5$ , αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων για τις περιπτώσεις δύο, τριών και πέντε κυκλικών κατακόρυφων φλεβών αντίστοιχα, που ελήφθησαν με το λογισμικό ANSYS Fluent CFD. Οι παραπάνω λόγοι συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρήχθησαν με την OM (Yannopoulos, 2010), η οποία δεν έχει λάβει υπ' όψιν την σύγκλιση των φλεβών λόγω της αλληλοσυμπαράσυρσης. Στα Σχήματα 4, 5 και 6, η διακεκομμένη εστιγμένη γραμμή δείχνει τη μεταβολή επί του άξονα συμμετρίας της ομάδας  $N$  φλεβών ( $y=0$ ). Η διακεκομμένη ευθεία γραμμή δείχνει, για κάθε περίπτωση ομάδας  $N$  φλεβών, το εκάστοτε όριο, στο οποίο συγκλίνουν οι λόγοι ταχυτήτων ή συγκεντρώσεων όταν  $z \rightarrow \infty$ .



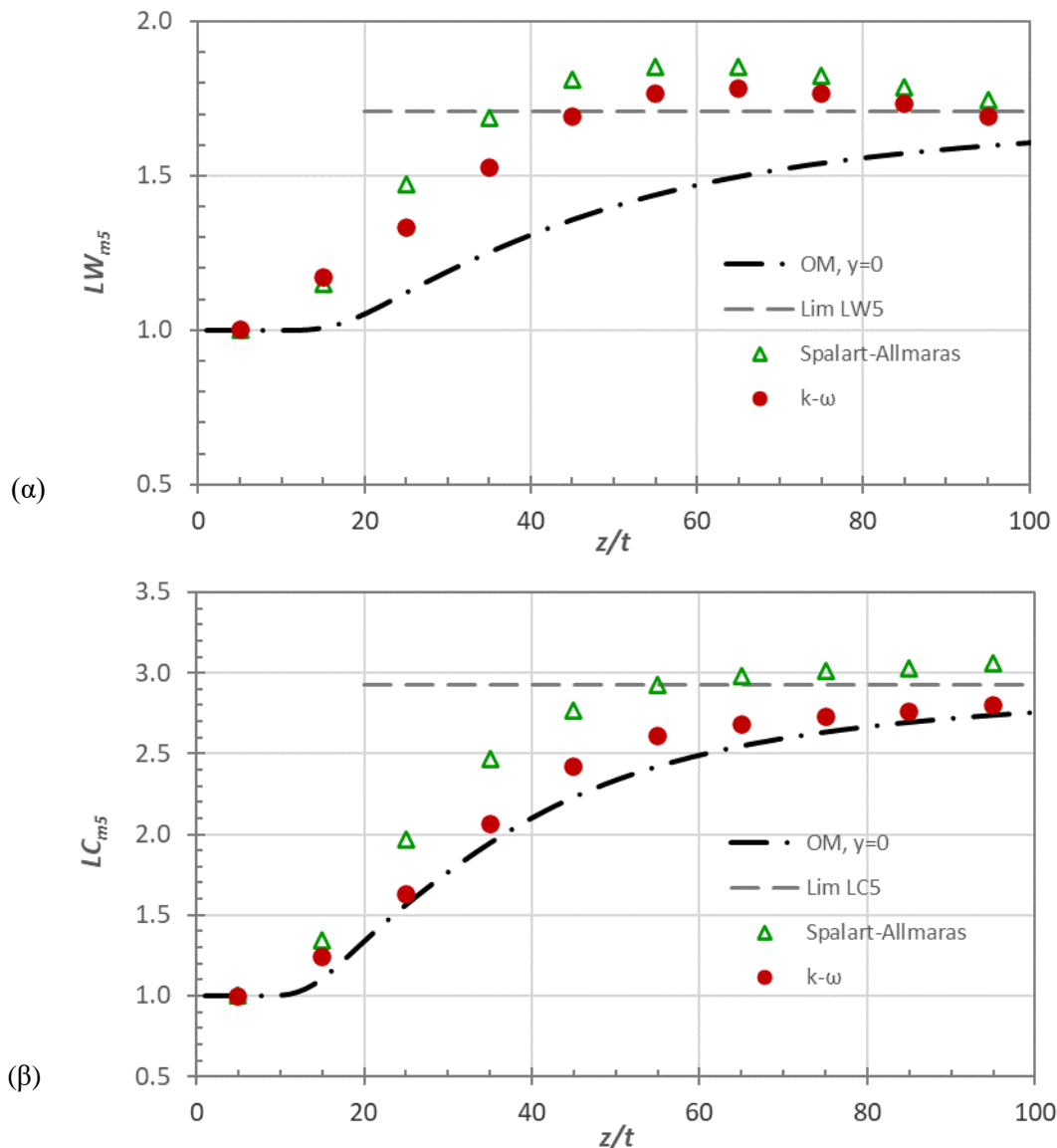
**Σχήμα 4.** Λόγοι (α) μέσων αξονικών ταχυτήτων και (β) μέσων αξονικών συγκεντρώσεων φλέβας ζεύγους και σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα OM. Η συνεχής γραμμή δείχνει την μεταβολή επί του κατακόρυφου άξονα της μιας φλέβας του ζεύγους.



Στο Σχήμα 4, η συνεχής γραμμή δείχνει την μεταβολή επί του κατακόρυφου άξονα της μιας φλέβας του ζεύγους ( $y=t$ ). Η παράμετρος  $T$  για τις εξετασθείσες περιπτώσεις έχει τιμή  $T=0.17$ , η οποία δείχνει συμπεριφορά αλληλεπίδρασης φλεβών με πλήρη άνωση. Στην οριακή περίπτωση όπου  $\mathbf{F}_0 \rightarrow \mathbf{0}$  η ανωστική φλέβα συμπεριφέρεται ως πλούμιο. Στην παρούσα μελέτη ο αριθμός Froude έχει τιμή  $F_0 = 5.87$ , οπότε οι φλέβες έχουν τα χαρακτηριστικά φλέβας με πλήρη άνωση. Η τομή των δύο καμπυλών της ΟΜ στα διαγράμματα του Σχήματος 4, δείχνει περίπου τη σύγκλιση των αξόνων των φλεβών του ζεύγους στον κοινό άξονα  $z$ , λόγω της δευτερογενούς ροής δυναμικού, η οποία δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν στις προβλέψεις της ΟΜ. Για τις ταχύτητες, η στάθμη που συγκλίνουν οι άξονες είναι  $z \approx 20t$  και για τις συγκεντρώσεις είναι  $z \approx 15t$ , για τα Σενάρια II, III και IV, αντίστοιχα. Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα που ελήφθησαν με τα μοντέλα τύρβης *Spalart-Allmaras* και *k- $\omega$* , η σύγκλιση των αξόνων των φλεβών γίνεται σε απόσταση  $z \approx 14t$ ,  $z \approx 8t$   $z \approx 8t$  αναφορικά με τις ταχύτητες και  $z \approx 10t$ ,  $z \approx 8t$ ,  $z \approx 10t$  αναφορικά με τις συγκεντρώσεις για τα Σενάρια II, III και IV, αντίστοιχα.



**Σχήμα 5.** Λόγοι (α) μέσω αξονικών ταχυτήτων και (β) μέσω αξονικών συγκεντρώσεων  $N=3$  φλεβών και σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα ΟΜ.



**Σχήμα 6.** Λόγοι (α) μέσω αξονικών ταχυτήτων και (β) μέσω αξονικών συγκεντρώσεων  $N=5$  φλεβών και σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με αποτελέσματα OM.

Οι προβλέψεις των αριθμητικών μοντέλων: *Spalart-Allmaras* και *k- $\omega$*  συμφωνούν πολύ καλά με τα αποτελέσματα της OM στην απομακρυσμένη περιοχή από τις εξόδους των φλεβών, τόσο στην περίπτωση των ταχυτήτων, όσο και στην περίπτωση των συγκεντρώσεων για  $N=2$ , ενώ παρατηρείται ότι οι λόγοι των ταχυτήτων για  $N=3$  και 5 φθάνουν στην οριακή τιμή σε μικρότερες αποστάσεις συγκριτικά με την πρόβλεψη της OM. Αντίθετα, στην περίπτωση των συγκεντρώσεων σε όλες τις περιπτώσεις η σύγκλιση στην εκάστοτε οριακή τιμή συμβαίνει σε μεγαλύτερες αξονικές αποστάσεις σε σύγκριση με την σύγκλιση των αντιστοίχων ταχυτήτων. Συγκρίνοντας τις ταχύτητες ή τις συγκεντρώσεις που προβλέπονται από τα δύο αριθμητικά μοντέλα τύρβης, παρατηρείται ότι το μοντέλο *Spalart-Allmaras* φθάνει στην εκάστοτε οριακή τιμή σε μικρότερες αξονικές αποστάσεις από εκείνες του *k- $\omega$* . Οι υψηλότερες τιμές λόγων ταχυτήτων και συγκεντρώσεων που προβλέπονται από τα δύο μοντέλα τύρβης, συγκριτικά με τις προβλέψεις της OM, αποδίδονται στο ότι η OM δεν λαμβάνει υπ' όψιν την συμβολή της ροής δυναμικού, η οποία προκαλεί σύγκλιση των φλεβών σε μικρότερες αξονικές αποστάσεις

από την σύγκλιση λόγω της επαλληλίας των εγκαρσίων κατανομών ταχυτήτων και συγκεντρώσεων.

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent CFD (version R.3), χρησιμοποιώντας εναλλακτικά τα μοντέλα τύρβης *Spalart-Allmaras* και *k- $\omega$* , προσομοιώθηκε αριθμητικά το πεδίο ροής και διάχυσης μιας μεμονωμένης φλέβας και ενός γραμμικού διαχύτη με δύο, τρεις και πέντε όμοιες κατακόρυφες τυρβώδης κυκλικές πλήρως ανωστικές φλέβες. 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 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. Εν γένει καλύτερη πρόβλεψη παρείχε το μοντέλο τύρβης *Spalart-Allmaras* σε όλη την περιοχή, ενώ το μοντέλο *k- $\omega$*  έδειξε καλύτερη συμφωνία με την ΟΜ στην περιοχή πλήρους ανώσεως ( $Z \geq 5$ ). Στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης φλεβών για  $N=2, 3$  και 5 φλέβες, για τις ενδιάμεσες αξονικές αποστάσεις  $z$ , οι αριθμητικές προβλέψεις δίνουν υψηλότερες τιμές των λόγων ταχυτήτων και συγκεντρώσεων σε σύγκριση με τις προβλέψεις της ΟΜ. Η απόκλιση αυτή είναι μεγαλύτερη κυρίως στις ταχύτητες.
- Συγκρίνοντας τις αριθμητικές προβλέψεις με χρήση των μοντέλων τύρβης στην ενδιάμεση περιοχή αξονικών αποστάσεων  $z/t$ , το μοντέλο *Spalart-Allmaras* έδωσε υψηλότερες τιμές ταχυτήτων και συγκεντρώσεων από τις αντίστοιχες τιμές του *k- $\omega$* .
- Η ροή δυναμικού, η οποία λαμβάνεται υπ' όψιν με την αριθμητική επίλυση του φαινομένου, ενώ δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν στην ΟΜ, συμβάλλει σε γρηγορότερη σύγκλιση των φλεβών προς ένα ενιαίο πεδίο.
- Οι λόγοι αξονικών συγκεντρώσεων των φλεβών συγκλίνουν γρηγορότερα από ό,τι οι λόγοι αξονικών ταχυτήτων και δείχνουν πολύ καλύτερη συμφωνία με την ΟΜ, η οποία φαίνεται να ισχύει ικανοποιητικά για γραμμικό διαχύτη, ιδίως για τις αξονικές συγκεντρώσεις.

Μία αρχική εκδοχή αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο 14ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), Βόλος, 16-17 Μαΐου 2019.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abraham, G. 1963. *Jet diffusion in stagnant ambient fluid*. Publication 29, Series 1, Group 14, Section 14.42, Delft Hydraulics Laboratory.
- Ardalan, H. and Vafaei, F. 2019. *CFD and Experimental Study of 45° Inclined Thermal-Saline Reversible Buoyant Jets in Stationary Ambient*, Environmental Processes, 6: 219-239.
- Bloutsos, A.A and. Yannopoulos P.C. 2009. *Round turbulent buoyant jets discharged vertically upwards forming a regular polygon*. Journal of Hydraulic Research, 47(2): 263–274.
- Briggs, G.A. 1975. Plume rise predictions. In: *Lectures on air pollution and environmental impact analyses*, 59–111, D.A. Haugen, ed. American Meteorological Society, Boston MA.

- Cenedese, C. and Gatto, V. M. 2016. *Impact of two plumes' interaction on submarine melting of tidewater glaciers: A laboratory study*. J. Phys. Oceanogr. 46:361–367.
- Davidson, M.J., Gaskin S. and Wood I.R. 2002. *A study of a buoyant axisymmetric jet in a small co-flow*. Journal of Hydraulic Research, 40(4): 477–489.
- Davidson, M. J. Papps, D. A. and Wood, I. R. 1994. *The behaviour of merging buoyant jets,* in Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes, edited by P. A. Davies and M. J. V. Neves, 255: 465–478.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic
- Frick, W.E., Roberts, P.J.W., Davis, L.R., Keyes, J., Baumgartner, D.J. and George K.P. 2001. *Dilution Models for Effluent Discharges: Visual Plumes*, 4th edn., US Environmental Protection Agency, Environmental Research Division, NERL, Standards and Applied Science Division, Office of Science and Technology, Athens GA.
- George, W. K., Alpert R. L. and Tamanini F. 1977. *Turbulence measurements in an axisymmetric plume*. International Journal of Heat Mass Transfer, 20: 1145–1154.
- He, Z., Zhang, W., Jiang, H., Zhao, L. and Han, X. 2018. *Dynamic interaction and mixing of two turbulent forced plumes in linearly stratified ambience*. J. Hydraul. Eng. 144, 04018072.
- Jirka, G.H. and Akar P.J. 1991. *Hydrodynamic classification of submerged multiport diffuser discharges*. Journal of Hydraulic Engineering, 117, No. 9:1113–1128.
- Lee, J.H.W., Chu V.H. 2003. *Turbulent jets and plumes - a Lagrangian approach*. Kluwer Academic Publishers, 390 pp.
- Lou, Y., He, Z., Jiang, H., Han, X. 2019. *Numerical simulation of two coalescing turbulent forced plumes in linearly stratified fluids*. Phys. Fluids, 31, 037111.
- Manohar, C.H.I, Sundararajan, T. Ramjee, V. and Kumar S.S. 2004. *A numerical and experimental investigation of the interactions between a non-uniform planar array of incompressible free jets*, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 44: 431–446.
- Moawad, A.K., Rajaratnam N. and Stanley S.J. 2001. *Mixing with multiple circular turbulent jets*, Journal of Hydraulic Research, 39(2): 163–168.
- Morkhtarzadeh-Dehgan M.R., Konig C.S. and Robins A.G. 2006. *Numerical study of single and two interacting turbulent plumes in atmospheric cross flow*. Atmospheric Environment, 40: 3909–3923.
- Noutsopoulos, G. and Yannopoulos P.C. 1987. *The round vertical turbulent buoyant jet*, Journal of Hydraulic Research, 25(4): 481–502
- Papanicolaou, P. N., and List E. J. 1987. *Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets*. International Journal of Heat Mass Transfer, 30: 2059–2071.
- Papanicolaou, P. N., and List E. J. 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. Journal Fluid Mechanics, 195: 341–391
- Papps, D.A., Wood I.R. 1997. *The effect of an intermittent flapping motion on the properties of merging plumes*. Journal of Hydraulic Research, 35(4): 455–472.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B. 1972. *A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 15, 1787–1806.
- Στεφανίδου, Μ.Κ και Γιαννόπουλος Π.Χ. 2019. *Αριθμητική προσομοίωση αλληλεπίδρασης ανωστικών φλεβών σε ήρεμο περιβάλλον*, Πρακτικά 14<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Ε.Υ.Ε., Βόλος, 484–491.

- 
- Wang, H. and Law A. W. K. 2002. *Second-order integral model for a round buoyant jet*. Journal of Fluid Mechanics, 459: 397-428.
- Yan X., Mohammadian A. and Chen X. 2019. *Three- dimensional numerical simulations of buoyant jets discharged from a rosette- type multiport diffuser*, J. of Marine Science and Eng. 7(409):1-15.
- Yan, X.; Mohammadian, A. 2019. *Numerical Modeling of Multiple Inclined Dense Jets Discharged from Moderately Spaced Ports*. Water, 7:2077.
- Yannopoulos P.C. 2010. *Advanced integral model for groups of interacting round turbulent buoyant jets*. Environ Fluid Mech, 10(4): 415-450.
- Yannopoulos, P.C. 1996. *Superposition model for multiple plumes and jets predicting end effects*. Journal of Geophysical Research, 101(D10):15153–15176.
- Yannopoulos, P.C. 2006. *An Improved Integral Model for plane and round turbulent buoyant jets*. Journal of Fluid Mechanics, 547: 267-296.
- Yannopoulos, P.C. and Noutsopoulos G.C. 2006a. *Interaction of vertical round turbulent buoyant jets I: Entrainment restriction approach*. Journal of Hydraulic Research, 44(2): 218–232.
- Yannopoulos, P.C. and Noutsopoulos G.C. 2006b. *Interaction of vertical round turbulent buoyant jets II: Superposition method*. Journal of Hydraulic Research, 44(2):233–248.