

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΘΜΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ-ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗ ΤΥΠΟΥ T ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Μακρυγιάννης Κ. Γεώργιος¹, Μάργαρης Π. Διονύσιος-Ελευθέριος²

¹Διπλ/χος Μηχανολόγος και Αεροναυπηγός Μηχανικός, MSc, Υπ. Διδάκτωρ Πανεπιστημίου Πατρών,
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Εργαστήριο Μηχανικής των Ρευστών και
Εφαρμογών Αυτής, geomak89@gmail.com

²Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Διευθυντής Εργαστηρίου
Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής, margaris@upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογιστική διερεύνηση της μεταβολής του βαθμού διαχωρισμού και της πτώσης πίεσης για διφασική ροή αέρα-νερού σε αγωγό κυκλικής διατομής, μικρής διαμέτρου, με ενσωματωμένη, κατακόρυφη ή υπό κλίση, διακλάδωση τύπου T, για σταθερή παροχή όγκου νερού και τρεις (3) διαφορετικές παροχές όγκου αέρα. Η υπολογιστική διερεύνηση περιελάμβανε δισδιάστατη και τρισδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος και εκτελέστηκε στο περιβάλλον του εμπορικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την υπεροχή της υπό κλίσης 45° διακλάδωσης τύπου T, δεδομένου ότι ο βαθμός διαχωρισμού δεν μεταβλήθηκε σημαντικά για τις δύο (2) «ακραίες» τιμές ογκομετρικής παροχής αέρα που εξετάστηκαν, και ήταν της τάξεως του 55%. Επιπλέον, η σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης προσέγγισης για τον υπολογισμό του βαθμού διαχωρισμού κατέδειξε την καταλληλότητα της πρώτης, καθότι αν και η τελική υπολογιζόμενη τιμή του βαθμού διαχωρισμού διέφερε από την αντίστοιχη της τρισδιάστατης επίλυσης, αυτή υποεκτιμήθηκε και μάλιστα η ποσοστιαία διαφορά δεν υπερέβη το 15%, απαιτώντας ωστόσο υπολογιστικό χρόνο σημαντικά μειωμένο, της τάξεως του 1/10 σε σύγκριση με τον αντίστοιχο χρόνο ολοκλήρωσης της τρισδιάστατης προσομοίωσης.

Λέξεις Κλειδιά: Διφασική ροή, Διακλάδωση τύπου T, Βαθμός διαχωρισμού, Πτώση πίεσης, Αέρας-νερό

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολυφασική καλείται η ταυτόχρονη ροή δύο ή περισσότερων φάσεων ενός μίγματος, οι οποίες μπορεί είτε να αντιστοιχούν στις τέσσερις (4) διαφορετικές καταστάσεις της ύλης (στερεά, υγρή, αέρια, πλάσμα), είτε να περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό τους. Η πολυφασική ροή συναντάται σε ένα πλήθος διεργασιών τόσο φυσικών (βροχή, χιόνι), όσο και βιομηχανικών, όπως για παράδειγμα η ροή που λαμβάνει χώρα σε έναν συμπτυκνωτή, έναν εξαμιστή ή έναν κυκλωνικό διαχωριστή.

Η διφασική ροή, τώρα, αποτελεί την πιο κοινή κατηγορία πολυφασικής ροής και μπορεί να έχει τον χαρακτήρα ροής: α) αερίου-στερεού, β) αερίου-υγρού, γ) υγρού-υγρού και δ) υγρού-στερεού. Μεταξύ των διαφόρων αυτών κατηγοριών διφασικής ροής, σημαντικότερο ενδιαφέρον και ταυτόχρονα μεγαλύτερη πολυπλοκότητα παρουσιάζει η διφασική ροή αερίου-υγρού, δεδομένου ότι αφενός βρίσκεται παρούσα σε πολλές και διαφορετικού είδους βιομηχανικές διεργασίες (Gao et al., 2016), αφετέρου διότι συνδυάζει τα χαρακτηριστικά μιας μεταβλητής διεπιφάνειας και τη συμπεριστασία

μιας φάσης. Η διφασική ροή αερίου-υγρού, αλλά και εν γενεί τόσο η μονοφασική, όσο και η διφασική ροή ρευστών, πραγματοποιείται διαμέσου δικτύου σωληνώσεων (αγωγών κυκλικής διατομής). Η υιοθέτηση της συγκεκριμένης γεωμετρίας για τους αγωγούς μεταφοράς πηγάζει ακριβώς από τα χαρακτηριστικά που αυτή προσδίδει, χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μεγαλύτερη δομική αντοχή και την εξασφάλιση της μεγαλύτερης δυνατής ελεύθερης διατομής για τη ροή του εκάστοτε ρευστού/ρευστών συγκριτικά με οποιαδήποτε άλλη γεωμετρική διαμόρφωση αγωγού (Rajput, 2010).

Οι διακλαδώσεις τύπου T αποτελούν κοινό εξάρτημα ενός δικτύου σωληνώσεων και χρησιμοποιούνται άλλοτε για τον διαχωρισμό μιας ροής ενός κύριου κλάδου σε επιμέρους κλάδους και άλλοτε για τη συμβολή μιας ροής διαφόρων κλάδων σε έναν κύριο κλάδο (Joyce & Soliman, 2016). Η ύπαρξη διακλαδώσεων τύπου T σε ένα δίκτυο σωληνώσεων οδηγεί αφενός σε διαφορετική -έναντι της αρχικής- κατανομή των φάσεων ενός μίγματος στους επιμέρους κλάδους των διακλαδώσεων, αφετέρου στην αύξηση της προκαλούμενης πτώσης πίεσης. Η κατανομή των φάσεων εξαρτάται από παραμέτρους όπως οι συνθήκες ροής, οι ιδιότητες των ρευστών του μίγματος και η γεωμετρία της διακλάδωσης (Shao et al., 2009). Ειδικότερα, σε περιπτώσεις που η διακλάδωση τύπου T αξιοποιείται για τον διαχωρισμό των φάσεων ενός μίγματος, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνει η αύξηση του βαθμού διαχωρισμού των φάσεων αυτού. Ο βαθμός διαχωρισμού αποτελεί συνάρτηση κυρίως της ορμής των φάσεων του μίγματος, του τύπου ροής που αναπτύσσεται πριν τη διακλάδωση, καθώς και της επίδρασης της βαρυτικής δύναμης στο πεδίο ροής (Margaris, 2007). Η γνώση, επομένως, της προκαλούμενης πτώσης πίεσης και της κατανομής των φάσεων στους διάφορους κλάδους των διακλαδώσεων τύπου T αποτελεί σημαντικό ζητούμενο για τον σωστό σχεδιασμό και την αξιόπιστη λειτουργία ενός δικτύου σωληνώσεων (Joyce & Soliman, 2014).

Στην παρούσα μελέτη διερευνήθηκε υπολογιστικά η μεταβολή του βαθμού διαχωρισμού διφασικής ροής αέρα-νερού σε αγωγό κυκλικής διατομής, μικρής διαμέτρου, με ενσωματωμένη, κατακόρυφη και υπό κλίση 30° και 45°, διακλάδωση τύπου T, για σταθερή παροχή όγκου νερού και τρεις (3) διαφορετικές παροχές όγκου αέρα, καθώς και η προκαλούμενη πτώση πίεσης στην περιοχή της διακλάδωσης σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Q: Ογκομετρική παροχή	Re: Αριθμός Reynolds
P: Πίεση	L_e : Μήκος εισόδου για πλήρως ανεπτυγμένη ροή
ΔP : Πτώση πίεσης	U: Φαινομενική ταχύτητα
θ : Γωνία	u: Μέση ταχύτητα
m: Παροχή μάζας ανά μονάδα επιφανείας	ε : Κλάσμα κενού
λ : Παράμετρος του τροποποιημένου ροϊκού χάρτη του Baker	η : Βαθμός διαχωρισμού
Ψ : Παράμετρος του τροποποιημένου ροϊκού χάρτη του Baker	F: Ποσοστό υγρής φάσης που συμπαράσύρεται εντός της διακλάδωσης τύπου T
Δείκτες	
w: Νερό	abs: Απόλυτη πίεση
a: Αέρας	tot.: Ολική πίεση
L: Υγρή φάση	T-Junction: Διακλάδωση τύπου T
G: Αέρια φάση	

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αφορούσε αρχικά τον προσδιορισμό του αναμενόμενου τύπου ροής, καθώς και τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους εισόδου του υπολογιστικού μοντέλου,

προκειμένου η διακλάδωσή του να ευρίσκεται στην περιοχή πλήρους ανεπτυγμένης ροής, προτού μελετηθεί ο βαθμός διαχωρισμού και εκτιμηθεί η πτώση πίεσης για τις διάφορες επιβαλλόμενες συνθήκες ροής, Πίνακας 1. Ο τύπος ροής εκτιμήθηκε με τη χρήση του τροποποιημένου ροϊκού χάρτη οριζόντιας ροής του Baker (Whalley, 1987), ενώ σημαντικοί παράμετροι της διαφασικής ροής υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας την εμπειρική συσχέτιση CISE (Premoli et al., 1971). Ακολούθως, αξιοποιώντας το εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS κατασκευάστηκε η 2-Δ γεωμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα, ενώ οι απαιτούμενες προσομοιώσεις εκτελέστηκαν στον εμπορικό κώδικα Fluent. Πέραν της διδιάστατης ανάλυσης, πραγματοποιήθηκε και τρισδιάστατη επίλυση του προβλήματος, προκειμένου να καταστεί δυνατή μία συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και να διαπιστωθεί η αξιοπιστία ή μη της -λιγότερο απαιτητικής από άποψη υπολογιστικού χρόνου- διδιάστατης ανάλυσης ως προς τον εκτιμώμενο βαθμό διαχωρισμού και την πτώση πίεσης.

2.1 Συνθήκες Ροής

Η υπολογιστική διερεύνηση αφορούσε διαφασική ροή αέρα-νερού σε αγωγό κυκλικής διατομής, διαμέτρου $D=20$ mm, με ενσωματωμένη διακλάδωση τύπου T. Για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση το υπολογιστικό μοντέλο περιελάμβανε μία διακλάδωση τύπου T, ενώ οι διαφορετικοί προσανατολισμοί που εξετάστηκαν αφορούσαν κατακόρυφη διακλάδωση και διακλάδωση υπό κλίση 30° και 45° ως προς την οριζόντιο, αντίστοιχα. Η ογκομετρική παροχή του νερού λήφθηκε σταθερή και ίση με $Q_w=3.0$ m³/h, ενώ ως αέρια φάση θεωρήθηκε συμπιεσμένος αέρας απόλυτης πίεσης $P_{abs}=2.40-3.30$ bar, Πίνακας 1.

Πίνακας 1. Σύνολο εξεταζόμενων υπολογιστικών συνθηκών ροής.

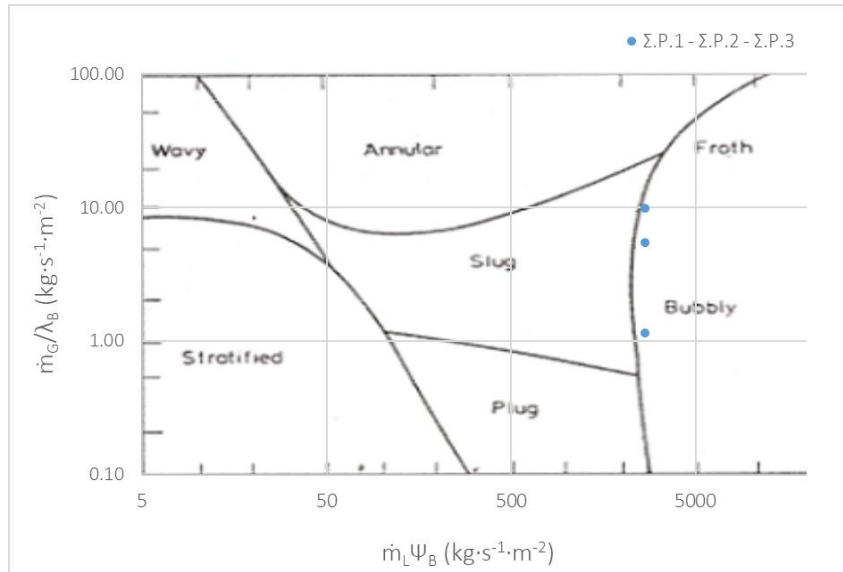
Q_w (m ³ /h)	Q_a (m ³ /h)	P_{abs} (bar)	$\theta_{T-Junction}$ (°)	Εξεταζόμενη Συνθήκη Ροής (Σ.Ρ.)
3.0	0.6	3.30	30, 45, 90	Σ.Ρ.1.1, 1.2, 1.3
	3.0	2.95		Σ.Ρ.2.1, 2.2, 2.3
	6.0	2.40		Σ.Ρ.3.1, 3.2, 3.3

2.2 Τύπος Ροής

Ο αναμενόμενος (θεωρητικά) τύπος ροής για τα τρία (3) δυνατά σεντ ογκομετρικών παροχών αέρα και νερού, Πίνακας 1, προσδιορίστηκε με τη βοήθεια του τροποποιημένου ροϊκού χάρτη οριζόντιας ροής του Baker. Οι προβλέψεις του εν λόγω ροϊκού χάρτη θεωρούνται αξιόπιστες για διαφασικό μίγμα αέρα-νερού και αγωγούς μικρής διαμέτρου ($D<50$ mm), συνθήκες που ικανοποιούνταν στην παρούσα μελέτη. Ο τύπος ροής προσδιορίζεται αφού υπολογιστούν οι παροχές μάζας ανά μονάδα επιφανείας των φάσεων του εκάστοτε διαφασικού μίγματος, καθώς και οι παράμετροι λ και Ψ που αποτελούν συνάρτηση των ιδιοτήτων των ρευστών του μίγματος (πυκνότητα, δυναμικό ιξώδες, επιφανειακή τάση) και των αντίστοιχων ιδιοτήτων του αέρα και του νερού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι τιμές των μεγεθών αυτών για τις εξεταζόμενες συνθήκες ροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, ενώ δεδομένης της φύσεως του μίγματος που μελετήθηκε, οι παράμετροι λ και Ψ έλαβαν τιμές ίσες με τη μονάδα. Ο τύπος ροής που προέκυψε τελικά για τις τρεις (3) εξεταζόμενες περιπτώσεις, Σχήμα 1, ήταν ροή με φυσαλίδες αέρα.

Πίνακας 2. Τιμές μεγεθών για τον προσδιορισμό του τύπου ροής στον τροποποιημένο ροϊκό χάρτη οριζόντιας ροής του Baker.

Συνθήκη Ροής	Q_w (m ³ /h)	Q_a (m ³ /h)	m_G (kg·s ⁻¹ ·m ⁻²)	m_L (kg·s ⁻¹ ·m ⁻²)	λ	Ψ
Σ.Ρ.1	3.0	0.6	1.15	2,647.81	1	1
Σ.Ρ.2		3.0	5.45			
Σ.Ρ.3		6.0	9.83			



Σχήμα 1. Θεωρητικός τύπος ροής για τις εξεταζόμενες ροϊκές συνθήκες.

2.3 Υπολογιστικό Μοντέλο

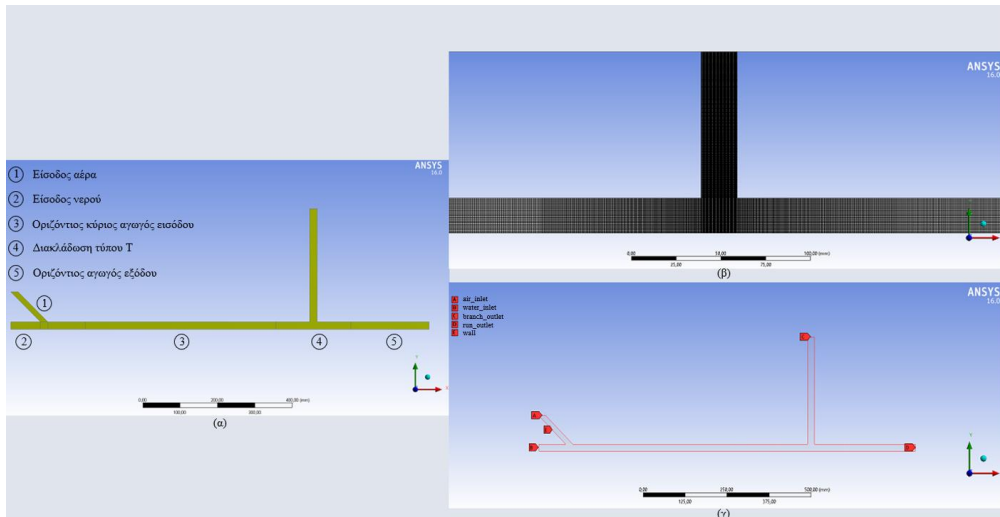
Οι 2-Δ και 3-Δ γεωμετρίες που κατασκευάστηκαν είχαν αμφότερες τις ίδιες διαστάσεις, Πίνακας 3, ενώ το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν δομημένο στην περίπτωση της 2-Δ γεωμετρίας, Σχήμα 2, και υβριδικό στην περίπτωση της 3-Δ γεωμετρίας, Σχήμα 3, αντίστοιχα. Το τελικό πλέγμα τόσο της 2-Δ, όσο και της 3-Δ γεωμετρίας προέκυψε ύστερα από ανεξαρτητοποίηση της λύσης από τον αριθμό των κελιών του πλέγματος και πιο συγκεκριμένα με την ολοκλήρωση της ανωτέρω διαδικασίας το πλέγμα της 2-Δ γεωμετρίας αριθμούσε περίπου 50,000 υπολογιστικά κελιά, ενώ το αντίστοιχο της 3-Δ γεωμετρίας 650,000 υπολογιστικά κελιά. Το μήκος του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου της συνολικής διάταξης διαχωρισμού καθορίστηκε, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη πλήρους ανεπτυγμένης ροής. Έτσι, για το σετ των μεγαλύτερων ογκομετρικών παροχών αέρα και νερού, δηλαδή για τον μεγαλύτερο αριθμό Re της διαφασικής ροής, το μήκος εισόδου για πλήρως ανεπτυγμένη ροή L_e υπολογίστηκε με την εφαρμογή της εξίσωσης $L_e = 4.4 \cdot Re \cdot D^{1/4}$ (Cengel & Cimbala, 2006), Πίνακας 4. Η τιμή που επιλέχθηκε, τελικά, για το μήκος εισόδου του υπολογιστικού μοντέλου ικανοποιούσε και τη συνθήκη που υπαγορεύεται από την προσέγγιση Nikuradse (1932).

Πίνακας 3. Κύριες διαστάσεις 2-Δ και 3-Δ υπολογιστικού μοντέλου.

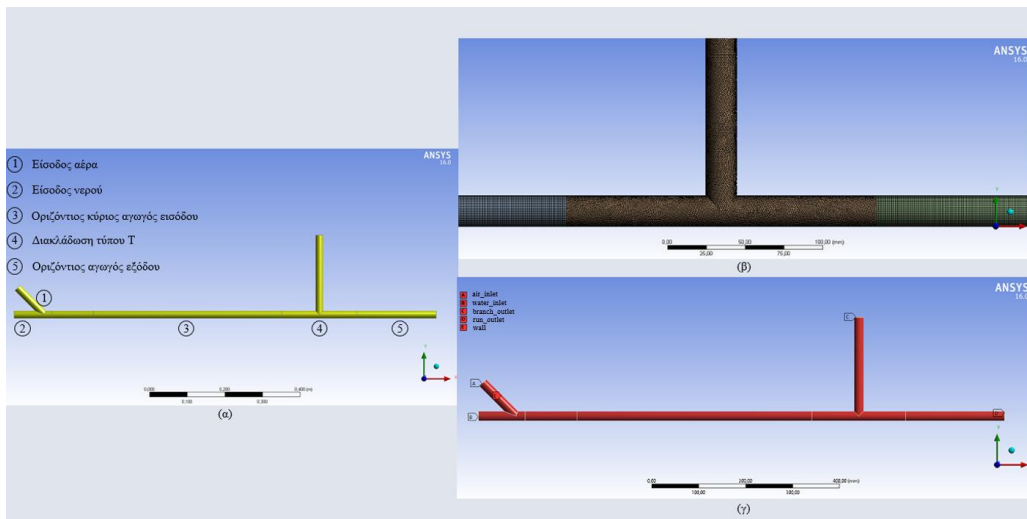
Χαρακτηριστικές Διαστάσεις Υπολογιστικής Γεωμετρίας (mm)	
Διάμετρος αγωγού	20
Μήκος οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου	700
Μήκος (κατακόρυφης) διακλάδωσης τύπου T	300
Μήκος οριζόντιου αγωγού εξόδου	300
Συνολικό μήκος διάταξης διαχωρισμού	1,120

Πίνακας 4. Καθορισμός μήκους οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου της συνολικής διάταξης διαχωρισμού που ικανοποιεί τη συνθήκη πλήρους ανεπτυγμένης ροής.

Συνθήκη Ροής	Q_w (m ³ /h)	Q_a (m ³ /h)	Re	L_e (mm)	L_e - Προσέγγιση Nikuradse
Σ.Ρ.3	3.0	6.0	53,000	700	$500 \leq L_e \leq 800$



Σχήμα 2. Γεωμετρία (α), δομημένο πλέγμα με εστίαση στην περιοχή της κατακόρυφης διακλάδωσης τύπου T (β) και εισοδοί, εξοδοί και τοιχώματα 2-Δ υπολογιστικού μοντέλου (γ).



Σχήμα 3. Γεωμετρία (α), υβριδικό πλέγμα με εστίαση στην περιοχή της κατακόρυφης διακλάδωσης τύπου T (β) και εισοδοί, εξοδοί και τοιχώματα 3-Δ υπολογιστικού μοντέλου (γ).

2.4 Αριθμητική Προσομοίωση

Το σύνολο των προσομοιώσεων εκτελέστηκε στον εμπορικό κώδικα Fluent, θεωρώντας τη διαφασική ροή μη-μόνιμη και επιλέγοντας για την «πρόοδο» στο πεδίο του χρόνου τον αλγόριθμο NITA (Non-Iterative Time Advancement). Επιπρόσθετα, ως πολυφασικό μοντέλο ορίστηκε το μοντέλο Volume of Fluid (VOF) και ως μοντέλο τύρβης το μοντέλο δύο (2) εξισώσεων Realizable k-ε, ενώ οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στις εισόδους και εξόδους του μοντέλου ήταν συνθήκες με βάση την ταχύτητα (velocity-inlet) και την πίεση (pressure-outlet), αντίστοιχα. Αναφορικά με τα σχήματα επίλυσης, ο υπολογισμός των βαθμίδων των διαφορών μεγεθών πραγματοποιήθηκε με το σχήμα Least Square Cell-Based, για το μέγεθος της πίεσης χρησιμοποιήθηκε το σχήμα Body Force Weighted, για το μέγεθος του κλάσματος όγκου το σχήμα Compressive, ενώ για τα μεγέθη της ορμής και της παραγωγής και της ανάλωσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας εφαρμόστηκε το σχήμα Second Order Upwind. Τέλος, η σύζευξη πίεσης-ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο PISO.

2.5 Σημαντικές Παράμετροι Διαφασικής Ροής

Πέραν του καθορισμού του μήκους του οριζώντιου κύριου αγωγού εισόδου της συνολικής διάταξης διαχωρισμού, υπολογίστηκαν και άλλες σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια διαφασική ροή, όπως οι φαινομενικές και οι μέσες ταχύτητες υγρής και αέριας φάσης, καθώς και το κλάσμα κενού της αέριας φάσης του μίγματος (αέρα), Πίνακας 5, αξιολογώντας την εμπειρική συσχέτιση CISE.

Πίνακας 5. Φαινομενική και μέση ταχύτητα υγρής και αέριας φάσης, καθώς και κλάσμα κενού αέριας φάσης υπολογισμένο με το εμπειρικό μοντέλο CISE.

Συνθήκη Ροής	Q_w (m ³ /h)	Q_a (m ³ /h)	U_w	U_a	u_w	u_a	ϵ_G
Σ.Ρ.1	3.0	0.6	2.65	0.96	3.31	4.80	0.20
Σ.Ρ.2		3.0		4.53	4.91	9.84	0.46
Σ.Ρ.3		6.0		8.16	6.31	14.06	0.58

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διερεύνησης επικεντρώθηκαν στην εξαγωγή του βαθμού διαχωρισμού, τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και εξόδου της διάταξης (inlet-to-run), καθώς και μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και της διακλάδωσης τύπου T (inlet-to-branch), για κάθε επιβαλλόμενη συνθήκη ροής και προσανατολισμό διακλάδωσης. Επιπλέον, σε κάθε υπολογιστική προσομοίωση προσδιορίστηκε η ταχύτητα και η πίεση στον άξονα του αγωγού, ενώ υπολογίστηκε και το ποσοστό της υγρής φάσης του μίγματος (νερού) που «συμπαρασυρόταν» εντός της διακλάδωσης τύπου T (water carryover).

3.1 Δισδιάστατη Υπολογιστική Διερεύνηση

Στους Πίνακες 6 και 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα διάφορα μεγέθη ενδιαφέροντος της υπολογιστικής διερεύνησης που αναφέρθηκαν ανωτέρω για τις δύο (2) ακραίες συνθήκες ροής που εξετάστηκαν, δηλαδή για τη μικρότερη ($Q_a=0.6$ m³/h) και τη μεγαλύτερη ($Q_a=6.0$ m³/h) ογκομετρική παροχή αέρα, αντίστοιχα, ενώ στο Σχήμα 4 αποτυπώνονται συγκεντρωτικά για τους τρεις (3) διαφορετικούς προσανατολισμούς της διακλάδωσης τύπου T οι μεταβολές του βαθμού διαχωρισμού, του ποσοστού της υγρής φάσης στη διακλάδωση και της πτώσης πίεσης μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και εξόδου της διάταξης (inlet-to-run), καθώς και μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και της διακλάδωσης τύπου T (inlet-to-branch).

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την υπεροχή της υπό κλίσης 45° διακλάδωσης τύπου T, καθότι παρά τη μεγάλη αύξηση της ογκομετρικής παροχής του αέρα ο βαθμός διαχωρισμού δεν μεταβλήθηκε και παρέμεινε σταθερός, της τάξεως του 55%. Η εν λόγω διακλάδωση εξασφάλισε συνολικά τον υψηλότερο βαθμό διαχωρισμού για την περίπτωση της μικρότερης ογκομετρικής παροχής αέρα, ενώ η ποσοστιαία διαφορά του βαθμού διαχωρισμού της στην περίπτωση της μεγαλύτερης ογκομετρικής παροχής αέρα από την υψηλότερη τιμή αυτού (για την υπό κλίση 30° διακλάδωση τύπου T) ήταν αμελητέα, της τάξεως του 0.5%.

Αναφορικά με τη συμπεριφορά της κατακόρυφης και της υπό κλίσης 30° διακλάδωσης τύπου T, η αύξηση της ογκομετρικής παροχής αέρα επέδρασε θετικά στον βαθμό διαχωρισμού, ιδιαίτερα στην περίπτωση της κατακόρυφης διακλάδωσης τύπου T όπου η ποσοστιαία μεταβολή του βαθμού διαχωρισμού ήταν της τάξεως του 80%.

Ακόμη, όπως αναμενόταν, παρατηρήθηκε ότι ο μεγαλύτερος βαθμός διαχωρισμού συνεπαγόταν και τη μεγαλύτερη πτώση πίεσης μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και εξόδου της διάταξης διαχωρισμού, με την τιμή της πτώσης πίεσης να ήταν μεγαλύτερη για τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα, της τάξεως των 1,000 Pa.

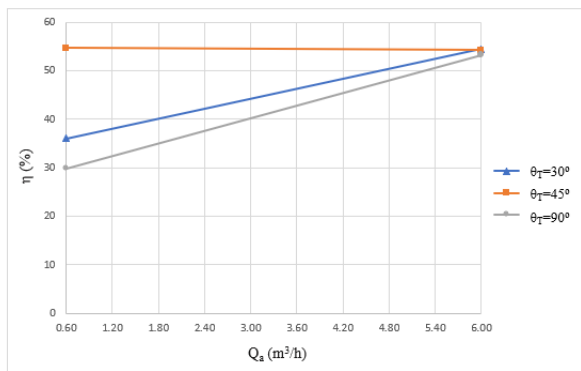
Τέλος, το ποσοστό της υγρής φάσης (νερού) που «συμπαρασυρόταν» εντός της διακλάδωσης ήταν το ελάχιστο στην υπό κλίση 30° διακλάδωση τύπου T για την περίπτωση της μικρότερης ογκομετρικής παροχής αέρα και στην κατακόρυφη διακλάδωση τύπου T για την περίπτωση της μεγαλύτερης ογκομετρικής παροχής αέρα, ενώ στην περίπτωση της υπό κλίσης 45° διακλάδωσης τύπου T το ποσοστό αυτό ήταν περίπου σταθερό, της τάξεως του 2%.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα δισδιάστατης υπολογιστικής διερεύνησης για τη μικρότερη ογκομετρική παροχή αέρα.

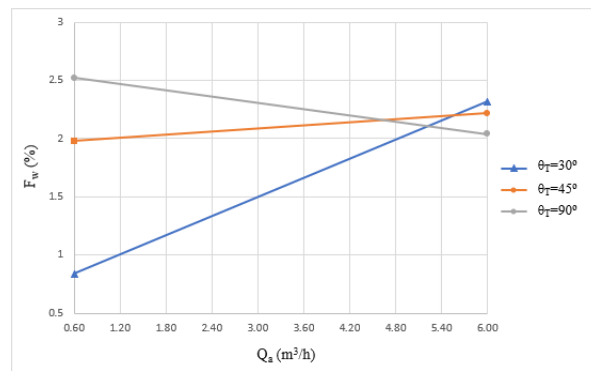
Μέγεθος	Προσανατολισμός Διακλάδωσης, θ_T (°)			Συνθήκη Ροής
	30°	45°	90°	
η (%)	36.04	54.68	29.84	Σ.Π.1
F_w (%)	0.84	1.98	2.52	
u (m/s)	3.44	3.45	3.53	
$P_{tot.}$ (Pa)	107,389.17	107,409.76	108,097.01	
$\Delta P_{inlet-to-run}$	90.01	109.12	64.95	
$\Delta P_{inlet-to-branch}$	6,118.74	6,152.74	6,313.94	

Πίνακας 7. Αποτελέσματα δισδιάστατης υπολογιστικής διερεύνησης για τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα.

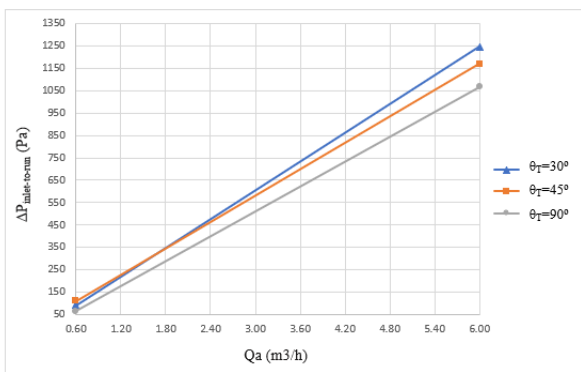
Μέγεθος	Προσανατολισμός Διακλάδωσης, θ_T (°)			Συνθήκη Ροής
	30°	45°	90°	
η (%)	54.53	54.31	53.29	Σ.Π.3
F_w (%)	2.32	2.22	2.04	
u (m/s)	5.94	5.95	5.95	
$P_{tot.}$ (Pa)	116,017.26	116,043.29	116,106.30	
$\Delta P_{inlet-to-run}$	1,246.84	1,170.33	1,067.07	
$\Delta P_{inlet-to-branch}$	4,866.60	4,959.11	5,093.18	



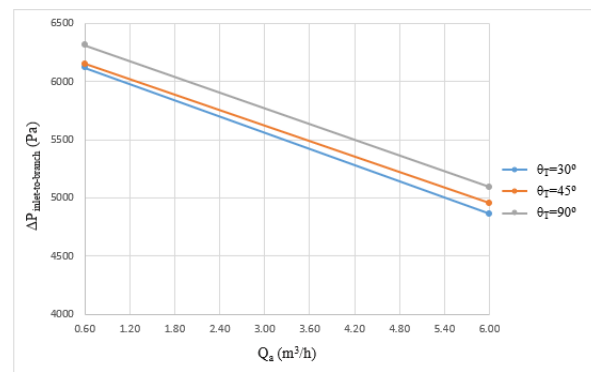
(α)



(β)



(γ)

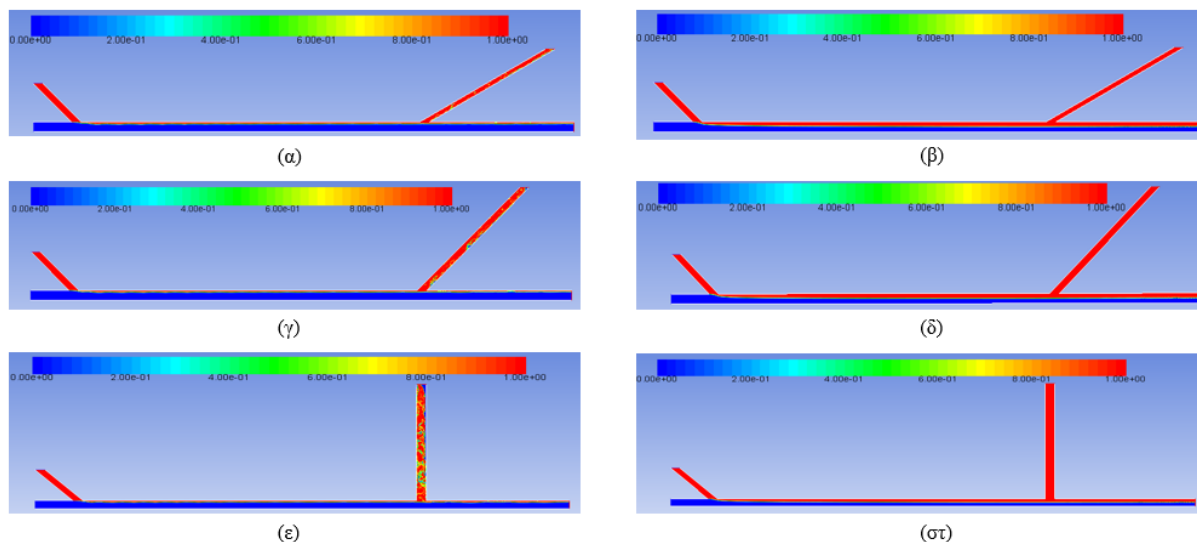


(δ)

Σχήμα 4. Μεταβολή του βαθμού διαχωρισμού (α), του ποσοστού της υγρής φάσης στη διακλάδωση τύπου T (β), της πτώσης πίεσης μεταξύ του οριζώντιου κύριου αγωγού εισόδου και εξόδου της διάταξης (γ) και της πτώσης πίεσης μεταξύ του οριζώντιου κύριου αγωγού εισόδου και της διακλάδωσης τύπου T (δ).

Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται η κατανομή των φάσεων για τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα και για τους τρεις (3) προσανατολισμούς διακλάδωσης τύπου T που εξετάστηκαν, από όπου προκύπτει ότι ο τύπος ροής (υπολογιστικά) αντιστοιχούσε σε στρωματοποιημένη ροή. Ο εν

λόγω τύπος ροής μπορεί να ευρίσκεται σε αντιπαράθεση με τον αντίστοιχο που υπαγορεύτηκε από τον ροϊκό χάρτη οριζόντιας ροής του Baker, Σχήμα 1, ωστόσο η συγκεκριμένη διαφορά υπεισέρχεται από το γεγονός ότι η δευτερεύουσα φάση (αέρας), στο σύνολο των υπολογιστικών προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, εισήχθη από υπό κλίση άνωθεν αγωγό προσαγωγής προκειμένου η προς διαχωρισμό φάση να ευρίσκεται στην άνω πλευρά της διάταξης, όπως και ο προσανατολισμός εκάστης διακλάδωσης τύπου T.



Σχήμα 5. Κατανομή φάσεων εντός του αγωγού για τη μικρότερη (α), (γ), (ε) και τη μεγαλύτερη (β), (δ), (στ) ογκομετρική παροχή αέρα για 30°, 45° και 90° διακλάδωση τύπου T, αντίστοιχα.

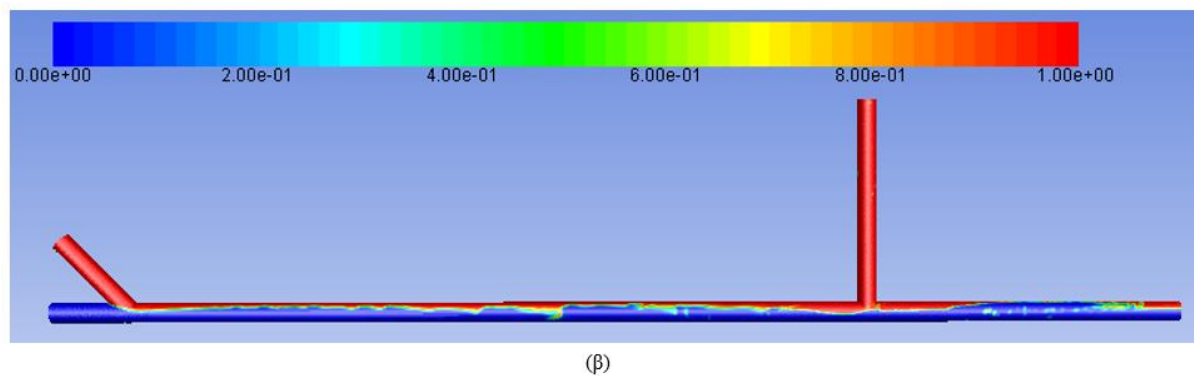
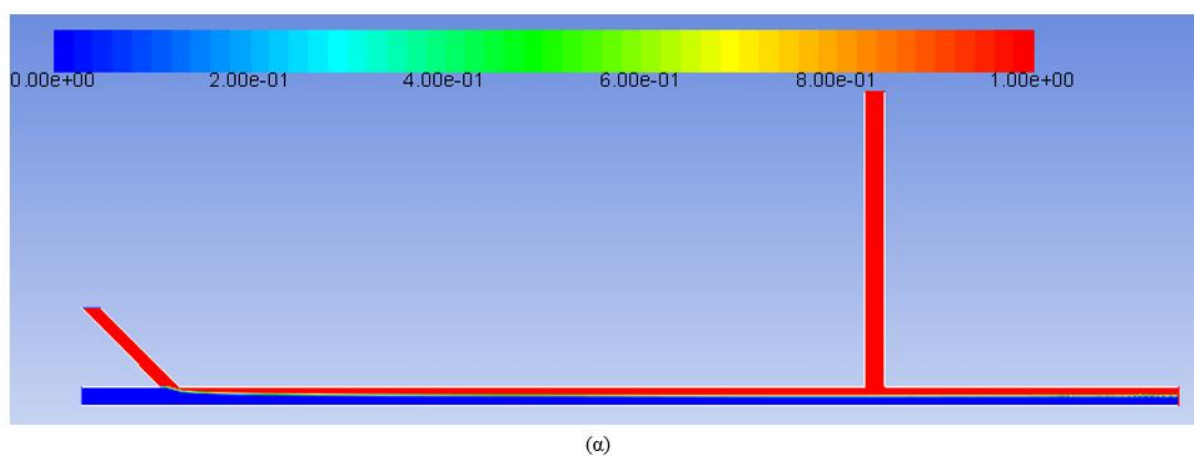
3.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Δισδιάστατης και Τρισδιάστατης Υπολογιστικής Διερεύνησης

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της διενέργειας δισδιάστατων προσομοιώσεων, και επομένως της ακρίβειας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, για τη μελέτη της μεταβολής του βαθμού διαχωρισμού, καθώς και άλλων σημαντικών παραμέτρων διφασικής ροής όπως της πτώσης πίεσης σε διατάξεις διαχωρισμού με διακλαδώσεις τύπου T, προσομοιώθηκε η «ακραία» συνθήκη ροής, δηλαδή η συνθήκη ροής για τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα, και για κατακόρυφη διακλάδωση τύπου T, σε κατάλληλο τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της δισδιάστατης και της τρισδιάστατης προσομοίωσης για την ίδια «ακραία» συνθήκη ροής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 8. Ο τύπος ροής που παρατηρήθηκε στον οριζόντιο κύριο αγωγό της διάταξης διαχωρισμού δεν διέφερε μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης προσέγγισης και όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 είχε τον χαρακτήρα στρωματοποιημένης ροής.

Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η δισδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος οδηγεί σε υποεκτίμηση του βαθμού διαχωρισμού της διακλάδωσης τύπου T και επακόλουθα της πτώσης πίεσης μεταξύ του οριζόντιου κύριου αγωγού εισόδου και εξόδου της διάταξης. Ωστόσο, το γεγονός αυτό, δηλαδή ότι η δισδιάστατη ανάλυση οδηγεί σε υποεκτίμηση και όχι υπερεκτίμηση του βαθμού διαχωρισμού, με την ποσοστιαία διαφορά της τιμής του συγκριτικά με την τιμή της τρισδιάστατης ανάλυσης να είναι της τάξεως του 15%, και λαμβάνοντας ακόμη υπόψη τον εξαιρετικά μειωμένο χρόνο ολοκλήρωσης της προσομοίωσης, που αντιστοιχούσε στο 1/10 του αντίστοιχου υπολογιστικού χρόνου ολοκλήρωσης της τρισδιάστατης προσομοίωσης, η δισδιάστατη προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει τον βασικό άξονα μελέτης της εν λόγω παραμέτρου.

Πίνακας 8. Συγκριτικά αποτελέσματα δισδιάστατης και τρισδιάστατης υπολογιστικής διερεύνησης για τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα.

Μέγεθος	Κλίμακα Υπολογιστικής Διερεύνησης	
	2-Δ Μοντέλο	3-Δ Μοντέλο
Βαθμός διαχωρισμού (%)	53.29	62.19
Αξονική ταχύτητα (m/s)	5.95	8.08
Πτώση πίεσης (inlet-to-run)	5,093.18	8,327.33



Σχήμα 6. Κατανομή φάσεων διφασικού μίγματος αέρα-νερού στο δισδιάστατο (α) και τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο (β).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη επιχείρησε την υπολογιστική διερεύνηση της μεταβολής του βαθμού διαχωρισμού διφασικής ροής αέρα-νερού σε αγωγό κυκλικής διατομής, μικρής διαμέτρου, με ενσωματωμένη, κατακόρυφη και υπό κλίση 30° και 45°, διακλάδωση τύπου T, για σταθερή παροχή όγκου νερού και τρεις (3) διαφορετικές παροχές όγκου αέρα, καθώς και της προκαλούμενης πτώσης πίεσης στην περιοχή της διακλάδωσης τύπου T. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν την υπεροχή της υπό κλίσης 45° διακλάδωσης, καθότι, παρά τη σημαντική αύξηση στην ογκομετρική παροχή του αέρα που κλήθηκε να διαχειριστεί, ο βαθμός διαχωρισμού παρέμεινε σχεδόν αμετάβλητος και ίσος με περίπου 55%, όπως και το ποσοστό της υγρής φάσης (νερού) που «συμπαρασυρόταν» εντός της διακλάδωσης τύπου T, το οποίο ανήλθε περίπου στο 2%. Αναφορικά με την καταλληλότητα της δισδιάστατης προσέγγισης του προβλήματος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής με τα αντίστοιχα

αποτελέσματα της τρισδιάστατης επίλυσης, για τη μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή αέρα, κατέδειξε το αξιόπιστο των αποτελεσμάτων της δισδιάστατης υπολογιστικής διερεύνησης του φαινομένου, δεδομένου ότι ο βαθμός διαχωρισμού στην περίπτωση της δισδιάστατης προσομοίωσης υποεκτιμήθηκε και δεν υπερεκτιμήθηκε και μάλιστα σε ένα αποδεκτό ποσοστό, της τάξεως του 15%, ενώ ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτήθηκε για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης ήταν συντριπτικά μικρότερος, της τάξεως του 1/10 του αντίστοιχου υπολογιστικού χρόνου της τρισδιάστατης προσομοίωσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία συγχρηματοδοτήθηκε μέσω της Πράξης «ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ» από πόρους του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», 2014-2020.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Çengel, Y.A. and Cimbala, J.M., Fluid mechanics: fundamentals and applications, 1st Ed., McGraw-Hill, 2006, p.325-327.

Gao Z.K., Yang Y.X., Zhai L.S., Ding M.S., Jin N.D. (2016), “Characterizing slug to churn flow transition by using multivariate pseudo Wigner distribution and multivariate multiscale entropy”, J. Chem. Eng. 291, p.74-81.

Joyce G., Soliman H.M. (2016), “Pressure drop for two-phase mixtures combining in a tee junction with wavy flow in the combined side”, Experimental Thermal and Fluid Science 70, p.307-315.

Joyce G., Soliman H.M. (2014), “Pressure drop in a horizontal, equal-sided, sharp-edged, combining tee junction with air-water flow”, Experimental Thermal and Fluid Science 50, p.140-149.

Margaris D.P. (2007), “T-junction separation modelling in gas-liquid two-phase flow”, Chemical Engineering and Processing 46, p. 150-158.

Nikuradse J. (1932), “Gesetzmäßigkeit der turbulenten Strömung in glatten Röhren”, Forschung Arb. Ing. Wesen 356.

Premoli A., Francesco D.D., Prina A. (1971), “A dimensional correlation for evaluating two-phase mixture density”, La Termotecnica 25, p.17-26.

Rajput, R.K. (2010), *A textbook of fluid mechanics and hydraulics machines*, S. Chand & Company Ltd. Ram Nagar, New Delhi.

Shao N., Gavriilidis A., Angeli P. (2009), “Flow regimes for adiabatic gas-liquid flow in microchannels”, J. Chem. Eng. Sci. 64, p.2749-2761.

Whaley, P.B., Boiling condensation, and gas-liquid flow, Clarendon Press, 1987.