

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ:  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ-  
ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΑ**

**Μ.Ν. Πάντζαλη, Α.Α. Μουζά, Σ.Β. Παράς**

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα μιας εκτενέστερης μελέτης [1], η οποία έχει ως στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Μελετάται αφενός το φαινόμενο της **πλημμύρισης** σε κεκλιμένους αγωγούς μικρής διαμέτρου, το οποίο παρουσιάζεται όταν οι εναλλάκτες χρησιμοποιούνται ως συμπυκνωτές (*reflux condensers*), και αφετέρου η δυνατότητα χρήσης **νανορευστών** ως βοηθητικών ρευστών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η έναρξη της πλημμύρισης είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κυμάτων που σχηματίζονται στη διεπιφάνεια, και της αέριας φάσης. Διατυπώθηκαν νέοι συσχετισμοί για την πρόβλεψη της πλημμύρισης στις δύο βασικές περιοχές της καμπύλης πλημμύρισης που παρατηρούνται σε κεκλιμένους αγωγούς μικρής διαμέτρου, καθώς και για τον προσδιορισμό του σημείου μετάβασης μεταξύ τους. Όσον αφορά τη χρήση των νανορευστών, η συνεισφορά τους σε συσκευές μεταφοράς θερμότητας είναι σημαντική όταν η ροή είναι στρωτή, ενώ είναι αμελητέα όταν η ροή είναι τυρβώδης. Η επιλογή του κατάλληλου νανορευστού είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι για να αυξηθεί η μεταφορά θερμότητας, πρέπει το ρευστό να έχει σημαντικά ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα και ταυτόχρονα όσο το δυνατόν μικρότερη αύξηση του ιξώδους σε σχέση με το φέρον ρευστό.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα τελευταία χρόνια, η στροφή προς τεχνολογίες φιλικότερες προς το περιβάλλον σε συνδυασμό με την ανάγκη εντατικοποίησης των διεργασιών, έχουν οδηγήσει σε μια προσπάθεια καλύτερης διαχείρισης και εξοικονόμησης της ενέργειας. Ταυτόχρονα η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη έχει στρέψει το ενδιαφέρον στην κατασκευή και εξέλιξη συστημάτων και εξοπλισμού **μικρών** διαστάσεων. Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας, οι οποίοι αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες με ειδική επιφανειακή διαμόρφωση, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλος λόγος επιφάνειας εναλλαγής προς όγκο.

Η απόδοση μιας διεργασίας εναλλαγής θερμότητας εξαρτάται τόσο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εναλλάκτη, όσο και από τα χαρακτηριστικά της ροής και το είδος των ρευστών που συμμετέχουν σε αυτή. Όταν οι συμπαγείς εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται ως συμπυκνωτές αντιροής (*reflux condensers*), δημιουργείται υγρή στιβάδα στα τοιχώματα των πλακών, η οποία λόγω της βαρύτητας ρέει διαμέσου των κεκλιμένων πτυχώσεων (που υπάρχουν στα τοιχώματα) προς τα κάτω, δηλαδή κατ' αντιροή με την ανερχόμενη αέρια φάση. Πλημμύριση χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η αέρια φάση καταφέρνει να συμπαράσχει μερικώς ή ολικώς την υγρή προς την κατεύθυνση ροής της, και αποτελεί οριακό σημείο λειτουργίας των συσκευών αυτών. Για *απλοποίηση* του προβλήματος η ροή σε κάθε ένα από τα κανάλια που δημιουργούν οι πτυχώσεις μπορεί να προσομοιαστεί με τη ροή σε κεκλιμένο σωλήνα ισοδύναμης διαμέτρου μικρότερης από 10 mm. Αν και το φαινόμενο της αντιροής υγρής-αέριας φάσης έχει μελετηθεί αρκετά λόγω της ιδιαίτερης σημασίας του και της συχνής εμφάνισής του σε φυσικές διεργασίες, δεν έχει κατανοηθεί πλήρως ο μηχανισμός του, ώστε να μπορεί να ελέγχεται και να προβλέπεται η εξέλιξή του. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αλληλεπίδραση των πολλών παραμέτρων που το διέπουν, και οι οποίες δρουν προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι *διαστάσεις* και η *γωνία κλίσης του αγωγού*, ο *τρόπος εισόδου* των ρευστών στη διάταξη και οι *ιδιότητες των δύο φάσεων* [2-4].

Μια εκτενής ανασκόπηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με την πλημμύριση έχει δημοσιευτεί από τους Bankoff & Lee [2]. Οι περισσότερες σχετικές μελέτες αναφέρονται

σε κατακόρυφους αγωγούς με εσωτερικές διαμέτρους κατά κανόνα μεγαλύτερες από 20 mm. Οι αναφορές που υπάρχουν για κεκλιμένους αγωγούς είναι ελάχιστες και τις περισσότερες φορές αφορούν μικρές αποκλίσεις από την κατακόρυφη θέση και μεγάλες διαμέτρους [5-8]. Πλήθος συσχετισμών έχουν διατυπωθεί για την πρόβλεψη της έναρξης της πλημμύρισης, οι οποίοι όμως δεν έχουν γενική ισχύ και δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστοι ούτε για τους μεγάλους αγωγούς, οι οποίοι έχουν μελετηθεί εκτενέστερα.

Είναι γνωστό ότι τα συμβατικά ρευστά έχουν γενικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τα περισσότερα στερεά. Η ιδέα της ενίσχυσης της θερμικής αγωγιμότητας των συμβατικών ρευστών με προσθήκη σε αυτά στερεών σωματιδίων είναι αρκετά παλιά, δεν ήταν όμως πρακτικά εφαρμόσιμη εξαιτίας προβλημάτων συσσωμάτωσης και κατακάθισης των σωματιδίων (διαστάσεων χιλιοστο- ή μικρο-μέτρων), διάβρωσης, επικαθίσεων στα κανάλια ροής και σημαντικής αύξησης της πτώσης πίεσης. Η παρασκευή στερεών σωματιδίων μεγέθους της τάξης των νανομέτρων (νανοσωματίδια) δημιούργησε νέο ερευνητικό ενδιαφέρον προς την κατεύθυνση αυτή. Τα κολλοειδή αιωρήματα που προκύπτουν από την προσθήκη νανοσωματιδίων σε συμβατικά ρευστά, γνωστά ως νανορευστά, παρουσιάζουν σημαντικά ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με το φέρον ρευστό. Αναλυτικότερη παρουσίαση των μελετών που αφορούν τους τρόπους παρασκευής, τις φυσικές ιδιότητες και την επίδραση των νανορευστών σε διεργασίες μεταφοράς θερμότητας συνοψίζονται σε πρόσφατα άρθρα ανασκόπησης [9-11], από όπου προκύπτει ότι είναι απαραίτητες περισσότερες πειραματικές μελέτες σχετικές με τη χρήση τους σε εξοπλισμό εναλλαγής θερμότητας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα μιας διδακτορικής διατριβής [1], όπου μελετάται αφενός το φαινόμενο της πλημμύρισης και αφετέρου η δυνατότητα χρήσης νανορευστών ως βοηθητικών ρευστών, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συμπαγών εναλλακτών θερμότητας.

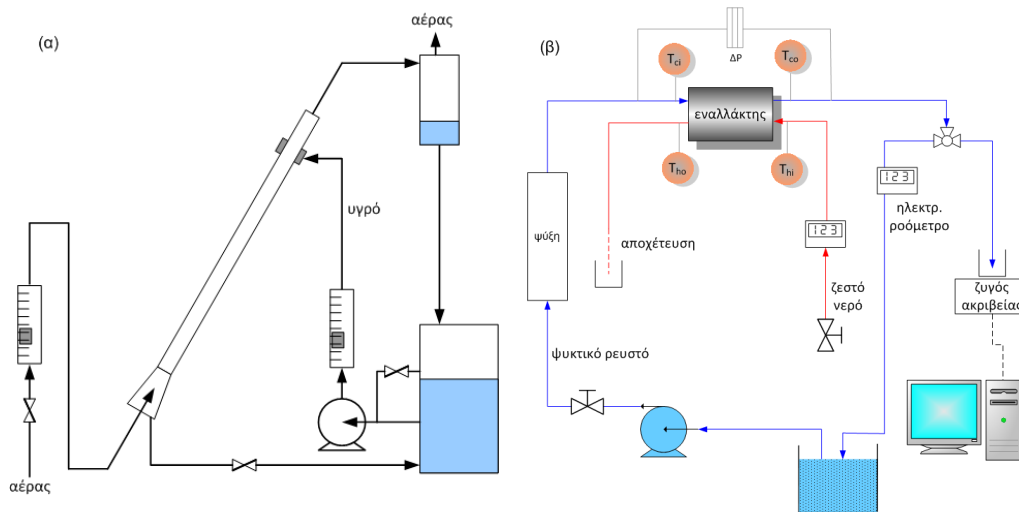
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η μελέτη της *διφασικής αντιρροής* και της *πλημμύρισης* διεξάγεται σε διαφανείς (από γυαλί ή Plexiglas<sup>®</sup>) κυλινδρικούς αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου,  $D$ , 7 και 9 mm και μήκους 0.6 m (Σχήμα 1α). Το υγρό εισέρχεται στη διάταξη από το πάνω μέρος του αγωγού με υπερχειλίση και ρέει προς τα κάτω, ενώ το αέριο ρέει σε αντιρροή με το υγρό. Ειδικά κατασκευασμένα τμήματα από Plexiglas<sup>®</sup> χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν ομαλές συνθήκες εισόδου και εξόδου. Το σύστημα μπορεί να τοποθετηθεί με διάφορες γωνίες κλίσης,  $\varphi$ , (30°, 45°, 60° και 75° ως προς το οριζόντιο). Για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας χρησιμοποιήθηκε η φωτογραφική και η αγωγιμομετρική μέθοδος, ενώ για τη μέτρηση της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα η ηλεκτροχημική μέθοδος. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη υπάρχουν στη διατριβή [1]. Με στόχο να μελετηθεί η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων του υγρού στο φαινόμενο, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα ρευστά, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών μεταφοράς θερμότητας με *νανορευστά* χρησιμοποιήθηκαν δύο εμπορικοί εναλλάκτες πλακών με διαμορφωμένη επιφάνεια. Ο πρώτος είναι ένας εναλλάκτης πλάκας μικρών διαστάσεων με ακίδες, μέρος ενός εμπορικού πακέτου υδρόψυξης επεξεργαστών ηλεκτρονικών υπολογιστών (Gigabyte<sup>®</sup> 3D Galaxy, GH-WIU01). Ο δεύτερος

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες υγρής φάσης.

Ρευστό	Σύμβολο	Πυκνότητα $\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ιξώδες $\mu_L$ (mPa·s)	Επιφ. τάση $\sigma$ (mN/m)
νερό	w	998	1.0	72
κ-βουτανόλη (0.02%)	but(2)	995	0.9	47
κ-βουτανόλη (0.05%)	but(5)	988	0.9	35
Tween 80 (0.15%)	tw	998	1.1	48
γλυκερίνη (30%)	gl(30)	1080	2.3	70
γλυκερίνη (50%)	gl(50)	1134	7.1	69
γλυκερίνη (66%)	gl(66)	1180	20.1	66
αιθυλενογλυκόλη	eth	1104	16.7	47



Σχήμα 1. Διάταξη για τη μελέτη της: α) πλημμύρισης & β) μεταφοράς θερμότητας με νανορευστά.

είναι ένας εμπορικός εναλλάκτης πλακών της εταιρείας *Alfa Laval*<sup>®</sup>, ο οποίος φέρει πτυχώσεις σε σχήμα τύπου ‘ψαροκόκαλου’. Οι εναλλάκτες προσαρμόστηκαν κατάλληλα σε δύο πειραματικές διατάξεις (Σχήμα 1β), στις οποίες χρησιμοποιείται νερό ή νανορευστό ως ψυκτικό, ενώ ως θερμό ρεύμα χρησιμοποιείται ζεστό νερό από θερμοσίφωνα. Οι παροχές και οι θερμοκρασίες εισόδου των ρευστών ελέγχονται, διατηρούνται σταθερές και καταγράφονται, όπως και οι θερμοκρασίες εξόδου, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Λεπτομερέστερη περιγραφή είναι διαθέσιμη στη διατριβή [1].

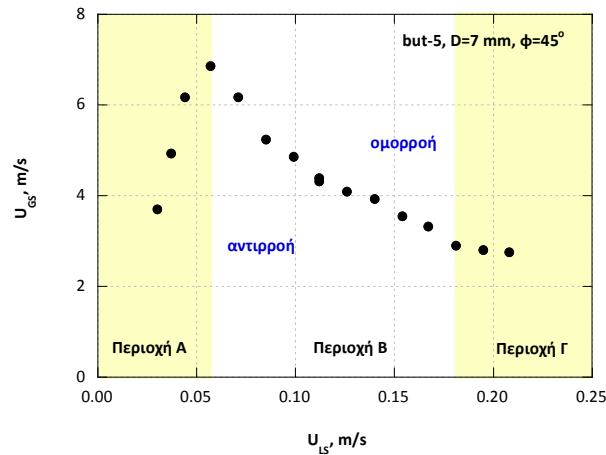
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### Χαρακτηριστικά διφασικής αντιρροής και πλημμύρισης

Η μελέτη αρχικά της *ελευθέρως ρέουσας στιβάδας* (ως οριακής κατάστασης της διφασικής αντιρροής) και κατόπιν της διφασικής αντιρροής, με σκοπό το χαρακτηρισμό του πεδίου ροής μέσα στους συμπακνωτές, έδειξε ότι τα χαρακτηριστικά της υγρής στιβάδας επηρεάζονται από τις ταχύτητες των δύο φάσεων. Τα κύματα που διαμορφώνονται στην υγρή στιβάδα, ενισχύονται με την παρουσία αέριας φάσης. Στην αλληλεπίδραση αυτών των κυμάτων με την αέρια φάση αποδίδεται η έναρξη της πλημμύρισης.

Μια τυπική πειραματική καμπύλη πλημμύρισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 με συντεταγμένες τη φαινομενική ταχύτητα του αερίου (ταχύτητα πλημμύρισης),  $U_{GS}$ , και τη φαινομενική ταχύτητα του υγρού,  $U_{LS}$ , κατά την έναρξη της πλημμύρισης. Στις καμπύλες πλημμύρισης διακρίνονται τρεις περιοχές ροής, όπως είχε παρατηρηθεί και σε προηγούμενη μελέτη στο Εργαστήριό μας σε αντίστοιχη γεωμετρία [12]. Πιο συγκεκριμένα, για χαμηλές παροχές υγρού η ταχύτητα πλημμύρισης αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την παροχή του υγρού (**Περιοχή Α**). Η έκταση της περιοχής αυτής εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού και η ύπαρξή της μπορεί να αποδοθεί στην καμπυλότητά του. Μετά από μια κρίσιμη παροχή υγρής φάσης αυτή η τάση αντιστρέφεται (**Περιοχή Β**) και η ταχύτητα πλημμύρισης γίνεται αντιστρόφως ανάλογη της παροχής του υγρού. Αυτή είναι και η ευρέως παρατηρούμενη τάση στην βιβλιογραφία. Παρατηρείται ότι ο μηχανισμός έναρξης της πλημμύρισης και στις δύο αυτές περιοχές είναι η καθήλωση ενός κύματος από την αέρια φάση το οποίο τελικά συμπαρασύρεται από αυτή. Για ακόμα μεγαλύτερες παροχές, το υγρό τείνει να φράξει τη διατομή του αγωγού στο σημείο ακριβώς μετά την είσοδό του σε αυτόν και για το λόγο αυτό η πλημμύριση μπορεί να ξεκινήσει και με πολύ χαμηλές παροχές αέριας φάσης (**Περιοχή Γ**). Οι μετρήσεις της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα έδειξαν ότι μετά την έναρξη της πλημμύρισης, μέρος του υγρού συνεχίζει να ρέει προς το κάτω μέρος του αγωγού, δηλαδή δεν παρατηρείται πλήρης αντιστροφή της ροής.

Η επίδραση της διαμέτρου στο φαινόμενο είναι αρκετά σημαντική. Εφόσον το μέσο πάχος της υγρής στιβάδας δε μεταβάλλεται σημαντικά με τη διάμετρο, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος τόσο μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για την αέρια φάση, με αποτέλεσμα για δεδομένο  $U_{GS}$



**Σχήμα 2.** Τυπική καμπύλη πλημμύρισης για κεκλιμένο αγωγό μικρής διαμέτρου.

να αυξάνεται η πραγματική της ταχύτητα και να διευκολύνεται η έναρξη της πλημμύρισης. Η επίδραση της κλίσης στην πλημμύριση είναι πιο περίπλοκη, λόγω των αντικρουόμενων μηχανισμών που παρατηρούνται. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [5], όταν η κλίση του αγωγού (ως προς το οριζόντιο) αυξάνεται, το πάχος της υγρής στιβάδας μειώνεται και επομένως απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα για την έναρξη της πλημμύρισης. Από την άλλη μεριά, πιο απότομες κλίσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πιο έντονων κυματισμών στη διεπιφάνεια, αυξάνοντας την 'αστάθεια' της ροής και προάγοντας την έναρξη της πλημμύρισης. Τα πειράματα της παρούσας μελέτης έδειξαν ότι η αύξηση της κλίσης του αγωγού μέχρι  $45^\circ$  οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες πλημμύρισης, ενώ για κλίσεις πάνω από  $45^\circ$  η επίδραση δεν είναι μεγάλη. Όταν όμως ο αγωγός πλησιάζει στην κατακόρυφη θέση και λόγω της αλλαγής της διαμόρφωσης της ροής, οι ταχύτητες πλημμύρισης μειώνονται σημαντικά.

Μελετήθηκε επίσης η επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων του υγρού στην πλημμύριση και πιο συγκεκριμένα του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης. Η αύξηση του ιξώδους διευκολύνει την έναρξη της πλημμύρισης, διότι δημιουργούνται στιβάδες μεγαλύτερου πάχους, όπου με την αντιρροή αέρα αναπτύσσονται μεγάλα κύματα. Η ελάττωση της επιφανειακής τάσης οδηγεί σε μικρή μείωση της ταχύτητας πλημμύρισης, λόγω της δημιουργίας έντονου κυματισμού στη στιβάδα. Ωστόσο, η προσθήκη μικρών ποσοτήτων επιφανειοδραστικών, παρόλο που μειώνει την επιφανειακή τάση, καθυστερεί την έναρξη της πλημμύρισης, πιθανώς λόγω αναχαίτισης του σχηματισμού κυμάτων, όπως προκύπτει από τη μελέτη των Lioumbas et al. [13].

Στη συνέχεια, και λόγω έλλειψης συσχετισμών που προβλέπουν τις ταχύτητες πλημμύρισης σε κεκλιμένους αγωγούς μικρής διαμέτρου, έγινε προσπάθεια να εξαχθούν νέοι συσχετισμοί, χρησιμοποιώντας διαστατική ανάλυση και λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παρατηρήσεις που έγιναν μέχρι τώρα. Οι αδιάστατοι αριθμοί που προέκυψαν και χρησιμοποιούνται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Ένας μοναδικός συσχετισμός δεν μπορεί να προβλέψει τις ταχύτητες πλημμύρισης σε όλες τις περιοχές εξαιτίας των διαφορετικών μηχανισμών που παρατηρούνται. Εφόσον οι Περιοχές A και B παρατηρούνται για όλα τα ρευστά και καλύπτουν το μεγαλύτερο εύρος παροχών, διαμορφώθηκαν για αυτές κατάλληλοι συσχετισμοί, καθώς και μια εκτίμηση του σημείου μετάβασης μεταξύ τους. Το σημείο μετάβασης εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υγρού και τη διάμετρο του αγωγού, παράμετροι οι οποίες μπορούν να ενσωματωθούν

**Πίνακας 2.** Αδιάστατοι αριθμοί.

Αριθμός	Τύπος	Αριθμός	Τύπος
Reynolds	$Re_s = U_s \cdot D \cdot \rho \cdot \mu^{-1}$	Froude	$Fr = U_s^2 (D \cdot g \cdot \sin \varphi)^{-1}$
Ohnesorge	$Oh = \mu \cdot (\rho \cdot \sigma \cdot D)^{-0.5}$	Kapitza	$Ka = \sigma \cdot \rho_L^{1/3} \cdot \mu_L^{-4/3} \cdot g^{-1/3}$

στον αριθμό Ohnesorge. Η μετάβαση από την Περιοχή A στη B γίνεται σε αριθμό Reynolds της υγρής φάσης ο οποίος υπολογίζεται από την Εξ. 1 με σφάλμα μικρότερο από 25%:

$$Re_{LS} = 1.48 \cdot Oh^{-0.85} \quad (1)$$

Οι συσχετισμοί που προέκυψαν για την πρόβλεψη της πλημμύρισης στις περιοχές A (Εξ. 2) και B (Εξ. 3) βασίζονται στους αριθμούς Reynolds και Froude του υγρού και του αερίου και τον αριθμό Karitza της υγρής φάσης και προβλέπουν την έναρξη της πλημμύρισης με ποσοστό σφάλματος μικρότερο του 25%. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι συσχετισμοί αυτοί δεν μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά του διαλύματος με το επιφανειοδραστικό (*tw*), εφόσον, όπως αναφέρθηκε, το διάλυμα αυτό παρουσιάζει ιδιόμορφη συμπεριφορά, δηλαδή η ταχύτητα πλημμύρισης αυξάνεται παρά τη χαμηλή του επιφανειακή τάση.

$$Fr_{GS}^{0.15} Re_{GS}^{-0.20} = 0.22 Fr_{LS}^{0.25} Re_{LS}^{-0.40} Ka^{0.33} + 0.42 \quad (2)$$

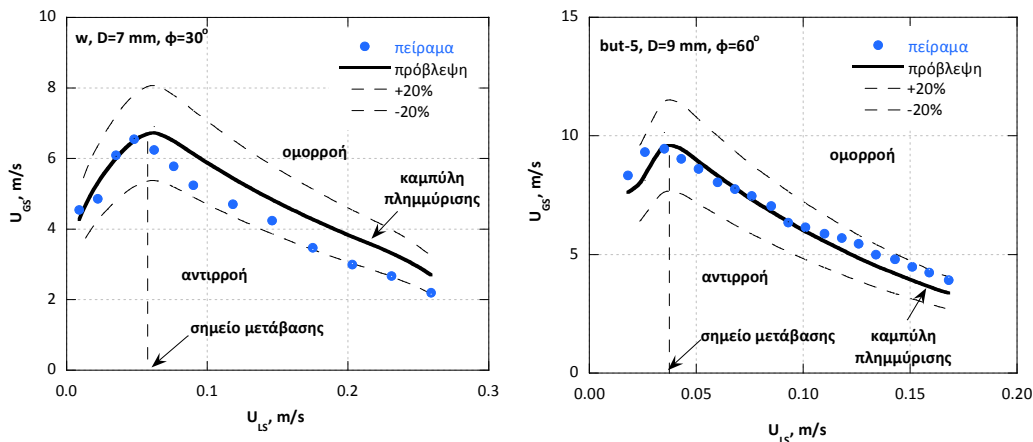
$$Fr_{GS}^{0.10} = -0.43 Fr_{LS}^{0.14} Re_{LS}^{0.66} Ka^{-0.60} + 2.18 \quad (3)$$

Οι δείκτες L, G συμβολίζουν την υγρή και αέρια φάση αντίστοιχα, ενώ ο S υποδηλώνει ότι ο αδιάστατος αριθμός βασίζεται στη φαινομενική ταχύτητα της φάσης.

Οι συσχετισμοί αυτοί αναμένεται ότι θα είναι χρήσιμοι στον προσδιορισμό του εύρους λειτουργίας εξοπλισμού με κανάλια μικρών διαστάσεων, η λειτουργία του οποίου περιορίζεται από την πλημμύριση. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες πλημμύρισης όπως προβλέπονται από τους συσχετισμούς μαζί με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα για το νερό και ένα διάλυμα βουτανόλης. Προσδιορίζεται επίσης η φαινομενική ταχύτητα του υγρού όπου συμβαίνει η μετάβαση μεταξύ των δύο περιοχών, η οποία ταιριάζει πολύ καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα (σφάλμα εκτίμησης ±20%).

Συμπερασματικά, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι σε συσκευές στις οποίες υπάρχει αντιρροή υγρής και αέριας φάσης μέσα σε στενούς αγωγούς και η πλημμύριση αποτελεί περιοριστικό παράγοντα λειτουργίας συνιστάται:

- η χρήση ρευστών χαμηλού ιξώδους και υψηλής επιφανειακής τάσης,
- η προσθήκη επιφανειοδραστικής ουσίας,
- η σχεδίαση των καναλιών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες διαμέτρους και με γωνίες κλίσης μεταξύ 45° και 75° και
- η χρήση παροχών που βρίσκονται κοντά στο σημείο μετάβασης από την Περιοχή A στη B, όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ταχύτητες πλημμύρισης.



**Σχήμα 3.** Τυπικές καμπύλες πρόβλεψης πλημμύρισης από τους προτεινόμενους συσχετισμούς και αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

### Μεταφορά θερμότητας με νανορευστά

Τα νανορευστά είναι κολλοειδή αιωρήματα, των οποίων τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Ανάμεσα στις σημαντικότερες είναι το είδος και η ποιότητα των νανοσωματιδίων που χρησιμοποιούνται, καθώς και η καλή ομογενοποίηση και σταθερότητα του αιωρήματος. Η επιλογή του νανορευστού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία βασίστηκε σε προκαταρκτικές μετρήσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων διαφόρων νανορευστών [1]. Ανάμεσα σε αυτά επιλέχθηκε για την εφαρμογή στους εναλλάκτες πλακών ένα υδατικό νανορευστό με σωματίδια CuO, το οποίο αγοράστηκε από την εταιρεία *Alfa Aesar*<sup>®</sup> σε συγκέντρωση 14% κ.ο. Το νανορευστό αυτό αραιώθηκε με απεσταγμένο νερό υπό μαγνητική ανάδευση προς τρία αιωρήματα χαμηλότερης συγκέντρωσης, 8%, 4% και 2% κ.ο., τα οποία παρουσίασαν νευτωνική συμπεριφορά και ικανοποιητική σταθερότητα. Σύμφωνα με τους Williams et al. [14], τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός νανορευστού εξαρτώνται από τη σχετική αύξηση στο ιξώδες και τη θερμική αγωγιμότητα. Έτσι, ανάμεσα στα τρία αυτά αιωρήματα επιλέχθηκε εκείνο με συγκέντρωση 4% κ.ο. ως τυπικό νανορευστό, εφόσον το πιο αραιό παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας (~4%), ενώ το πιο πυκνό έχει πολύ αυξημένο ιξώδες (~450%) σε σχέση με το νερό. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των αιωρημάτων και του νερού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Οι γενικές τάσεις που καταγράφονται είναι:

- αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας,
- αύξηση της πυκνότητας,
- μείωση της ειδικής θερμότητας και
- αύξηση του ιξώδους.

Στον εναλλάκτη πλάκας μικρών διαστάσεων με ακίδες το ρευστό ρέει σχεδόν αδιατάρακτο στα νοητά κανάλια που σχηματίζονται κατά τη φορά της ροής και μεταξύ των ακίδων, όπως προέκυψε από την προσομοίωση με κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, *CFD*, (Σχήμα 4α). Στην περίπτωση αυτή, τα πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση του νανορευστού έδειξαν ότι η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται όταν χρησιμοποιείται το νανορευστό αντί του νερού. Παρατηρήθηκε ότι για δεδομένο **θερμικό καθήκον**, η απαιτούμενη ογκομετρική παροχή νανορευστού είναι μέχρι και 4 φορές μικρότερη σε σύγκριση με του νερού, με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη πτώση πίεσης να είναι μέχρι και 6 φορές πιο χαμηλή (Σχήμα 5α). Δηλαδή, παρόλο που το νανορευστό έχει μεγαλύτερο ιξώδες και επομένως προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης για την *ίδια ογκομετρική παροχή*, όταν η σύγκριση γίνεται *βάσει του θερμικού καθήκοντος* του εναλλάκτη, αποδεικνύεται ότι η πτώση πίεσης του νανορευστού και συνεπώς η αντλητική ισχύς είναι σημαντικά χαμηλότερη εξαιτίας της μικρότερης παροχής του. Συνεπώς, το νανορευστό όχι μόνο απορροφά το ίδιο ποσό θερμότητας με μικρότερη παροχή, αλλά απαιτεί και λιγότερη αντλητική ισχύ. Το συμπέρασμα αυτό έχει μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό εξοπλισμού εναλλαγής θερμότητας, εφόσον υποδηλώνεται ότι σε τέτοιου είδους συσκευές, η χρήση των νανορευστών συντελεί στη μείωση του όγκου, δεδομένου ότι για συγκεκριμένο θερμικό καθήκον απαιτείται λιγότερο ρευστό σε σύγκριση με τα συμβατικά ψυκτικά ρευστά.

Αντίθετα, στον εμπορικό εναλλάκτη πλακών, όπου η ροή που διαμορφώνεται είναι αρκετά περίπλοκη και διαταραγμένη (Σχήμα 4β), η απόδοση στη μεταφορά θερμότητας παραμένει πρακτικά σταθερή, ενώ επιπλέον η πτώση πίεσης είναι μεγαλύτερη με το νανορευστό (Σχήμα 5β). Είναι γνωστό ότι στην τυρβώδη ροή η μεταφορά θερμότητας ενισχύεται σημαντικά σε σύγκριση με τη στρωτή ροή εξαιτίας των τυρβωδών δομών, της αποκόλλησης και επανακόλλησης

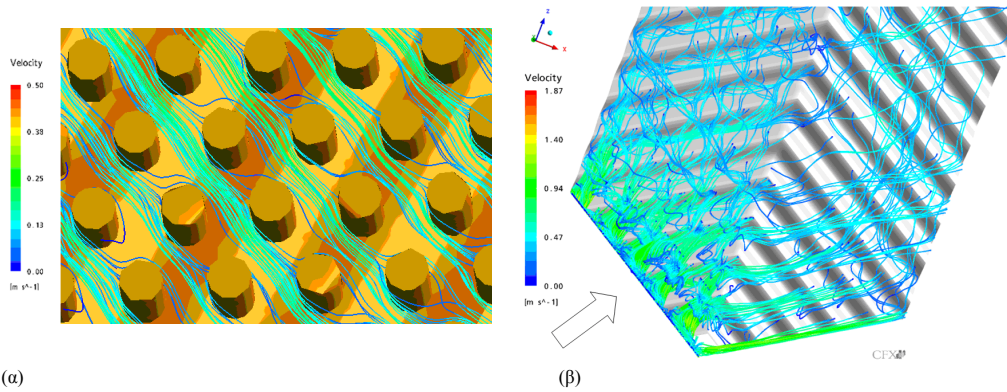
**Πίνακας 3.** Θερμοφυσικές ιδιότητες των νανορευστών με CuO και του νερού στους 25°C [1].

	Θερμική αγωγιμότητα (k, W/mK)	Ειδική θερμότητα ( $c_p$ , J/kg K)	Ιξώδες ( $\mu$ mPa s)	Πυκνότητα ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )
CuO 8% κ.ο.	0.720	2700	5.6	1510
CuO 4% κ.ο.	0.670	3280	2.0	1250
CuO 2% κ.ο.	0.630	3720	1.3	1130
νερό	0.607	4180	1.0	1000

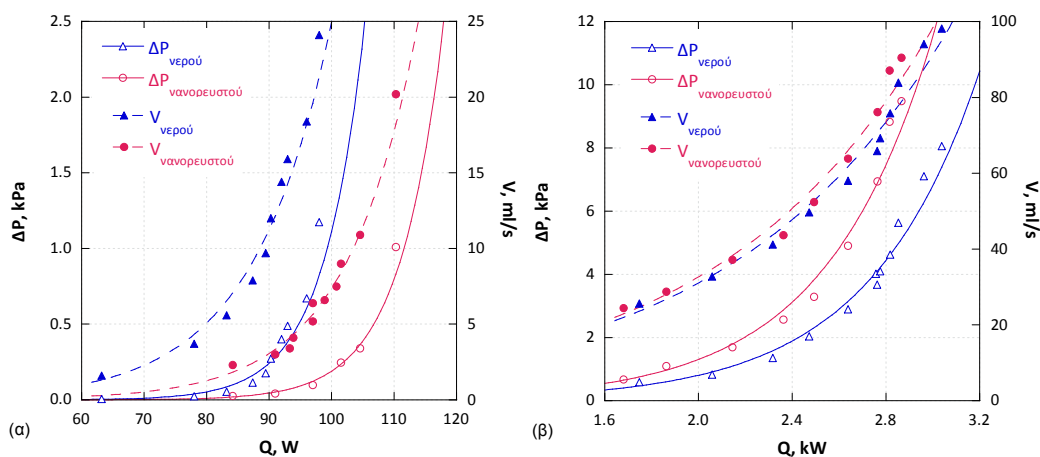
σης της ροής. Επιπλέον, κατά τη μεταφορά θερμότητας από μια επιφάνεια σε ένα ρευστό, η μεγαλύτερη αντίσταση παρουσιάζεται στο οριακό στρώμα, το πάχος του οποίου είναι ανάλογο του ιξώδους του ρευστού. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω του οριακού στρώματος είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μικρότερο είναι το πάχος του και όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού [15]. Τα νανορευστά, λόγω του σημαντικά αυξημένου ιξώδους σε σχέση με το φέρον ρευστό, δημιουργούν κατά τη ροή τους στους εναλλάκτες μικρότερης έντασης τυρβώδες συγκριτικά με το φέρον ρευστό [16] και παχύτερο οριακό στρώμα. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση της τυρβώδους ροής υπάρχουν δύο αντιτιθέμενοι μηχανισμοί που επιδρούν στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας:

- η ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα ευνοεί την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας, ενώ
- η αύξηση του ιξώδους λειτουργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Για το λόγο αυτό, η συνεισφορά των νανορευστών στη μεταφορά θερμότητας μπορεί να γίνει σημαντική και συγκρίσιμη με την ενίσχυση λόγω τυρβώδους, μόνο αν αυτά παρουσιάζουν σημαντικά ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα και ταυτόχρονα σχετικά μικρή αύξηση του ιξώδους σε σχέση με το φέρον ρευστό. Στην περίπτωση του εναλλάκτη πλάκας μικρών διαστάσεων δεν διαμορφώνεται έντονα τυρβώδης ροή και η συνεισφορά των νανορευστών στη μεταφορά θερμότητας προκύπτει ότι είναι σημαντική. Αντίθετα, στον εμπορικό εναλλάκτη



Σχήμα 4. Τυπική διαμόρφωση του πεδίου ροής, όπως προβλέπεται από το CFD: α) για τον εναλλάκτη πλάκας μικρών διαστάσεων και β) για τον εμπορικό εναλλάκτη πλάκων.



Σχήμα 5. Πτώση πίεσης,  $\Delta P$ , στο κανάλι ροής του ψυκτικού και ογκομετρική παροχή,  $V$ , ως προς το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας,  $Q$ , α) στον εναλλάκτη πλάκας μικρών διαστάσεων και β) στον εμπορικό εναλλάκτη πλάκων.

πλακών υπάρχει έντονο τυρβώδες και η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας στο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας προφανώς αντισταθμίζεται από την επίδραση του αυξημένου ιξώδους, με αποτέλεσμα η απόδοση του ναορευστού να είναι πρακτικά ίδια με αυτή του νερού. Συμπερασματικά, ένα συγκεκριμένο ναορευστό μπορεί να ενισχύει την απόδοση ενός εναλλάκτη, αλλά να μην επιφέρει καμιά επίδραση σε κάποιον άλλο, ενώ, όπως υποστηρίζεται στην πρόσφατη βιβλιογραφία [17-19], η απόδοση ενός ναορευστού εξαρτάται από:

- το πεδίο ροής που διαμορφώνεται σε κάθε συσκευή και
- όλες τις θερμοφυσικές του ιδιότητες.

Γενικά, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιλογή του ναορευστού που θα χρησιμοποιηθεί είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι τα ρευστά με σημαντικά ενισχυμένη θερμική αγωγιμότητα και ταυτόχρονα μικρή αλλαγή στο ιξώδες και την ειδική θερμότητα πιστεύεται ότι μπορούν να συμβάλουν πολύ περισσότερο στη μεταφορά θερμότητας. Η χρήση των ναορευστών μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη σε συσκευές μικρών διαστάσεων, όπου ο συνολικός όγκος του εξοπλισμού είναι βασικό μέλημα του σχεδιαστή. Η ροή που διαμορφώνεται σε τέτοιου είδους συσκευές δεν είναι έντονα τυρβώδης και, όπως φάνηκε από τα πειράματα στον εναλλάκτη πλάκας μικρών διαστάσεων, η παροχή του ναορευστού για δεδομένο θερμικό καθήκον μπορεί να είναι χαμηλότερη από αυτή του νερού, μειώνοντας έτσι την πτώση πίεσης και την απαίτηση σε αντλητική ισχύ. Μειονέκτημα, ωστόσο, αποτελεί το αυξημένο κόστος προμήθειας των ναορευστών και ο περιορισμένος χρόνος ζωής τους, λόγω κατακρήσθησης των σωματιδίων μετά από κάποιο χρόνο χρήσης. Τέλος, σε βιομηχανικούς εναλλάκτες, όπου απαιτούνται μεγάλες ποσότητες βοηθητικών ρευστών και συνήθως οι συνθήκες ροής είναι τυρβώδεις, δεν ενδείκνυται η χρήση ναορευστών, με βάση τα μέχρι τώρα πειραματικά δεδομένα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Πάντζαλη Μ.Ν. Μελέτη συμπαγών εναλλακτών θερμότητας. Χαρακτηριστικά διαφασικής ροής - Μεταφορά θερμότητας με ναορευστά. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, (2009).
- [2]. Bankoff S.G. and Lee S.C., A critical review of the flooding literature. In: Multiphase Science and Technology, Hemisphere Corp, NY: (1986); Vol. 2.
- [3]. Hewitt G.F., 30th US National Heat Transfer Conference, In search of two-phase flow, lecture, Portland, Oregon (1995).
- [4]. Mouza A.A., Pantzali M.N. and Paras S.V., Chem. Eng. Sci. **60**:4981 (2005).
- [5]. Barnea D., Ben Joseph N. and Taitel Y., Can. J. Chem. Eng. **64**:177 (1986).
- [6]. Celata G.P., Cumo M. and Setaro T., Exp. Thermal Fluid Science **5**:18 (1992).
- [7]. Wongwises S., Int. Commun. Heat Mass Transfer **25**:117 (1998).
- [8]. Zapke A. and Kroeger D.G., Int. J. Multiphase Flow **22**:461 (1996).
- [9]. Das S., Choi S. and Patel H., Heat Transfer Eng. **27**:3 (2006).
- [10]. Trisaksri V. and Wongwises S., Renew. Sust. Energ. Rev. **11**:512 (2007).
- [11]. Wang X.-Q. and Mujumdar A.S., Int. J. Thermal Sci. **46**:1 (2007).
- [12]. Mouza A.A., Paras S.V. and Karabelas A.J., Int. J. Multiphase Flow **29**:1395 (2003).
- [13]. Lioumbas J.S., Mouza A.A. and Paras S.V., Chem. Eng. J. **61**:4605 (2006).
- [14]. Williams W., Buongiorno J. and Hu L.-W., J. Heat Transfer **130**:042412 (2008).
- [15]. Zukauskas A., Int. J. Heat Mass Transfer **37**:207 (1994).
- [16]. He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D. and Lu H., Int. J. Heat Mass Transfer **50**:2272 (2007).
- [17]. Bergman T.L., Int. J. Heat Mass Transfer: In Press.
- [18]. Mansour R.B., Galanis N. and Nguyen C.T., Appl. Therm. Eng. **27**:240 (2007).
- [19]. Williams W. Experimental and Theoretical Investigation of Transport Phenomena in Nanoparticle Colloids (Nanofluids). PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA (2006).