

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΩΣ ΡΕΟΥΣΑΣ ΣΤΙΒΑΔΑΣ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΕ μ -ΚΑΝΑΛΙ

Γ.Μ. Σπανός¹, Α.Δ. Αναστασίου², Σ.Β. Παράς¹, Α.Α. Μουζά^{1*}

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, Ελλάδα

²School of Chemical and Process Engineering, University of Leeds, UK

*mouza@auth.gr

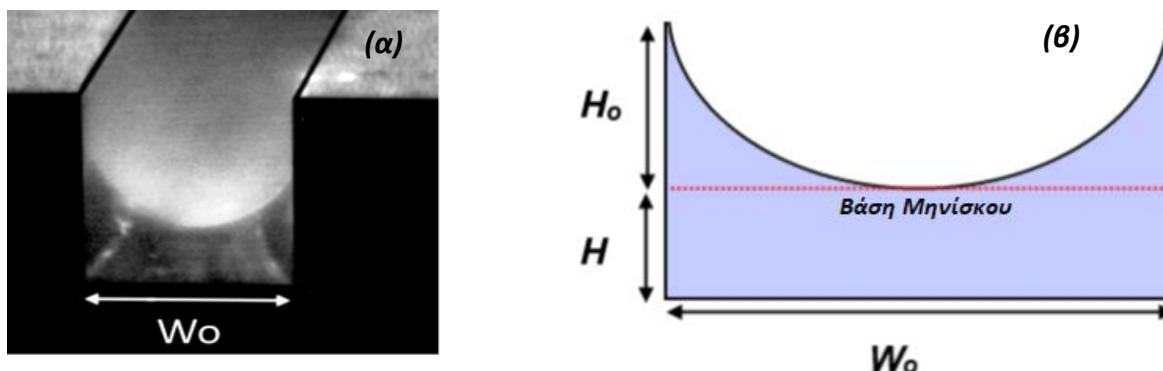
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μ -αντιδραστήρες ελευθέρως ρέουσας στιβάδας (*Falling Film micro-Reactors, FFMR*) είναι συσκευές επαφής υγρού-αερίου, με βασικό πλεονέκτημα την υψηλή τιμή του λόγου επιφάνεια επαφής /όγκο ρευστού. Σε προηγούμενες εργασίες της ομάδας μας είχε μελετηθεί η ροή Νευτωνικών ρευστών σε κεκλιμένο μ -κάναλι και είχαν προταθεί κατάλληλες σχεδιαστικές εξισώσεις. Ακόμη διερευνήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της υγρής στιβάδας όταν ως υγρή φάση χρησιμοποιούνται μη-Νευτωνικά ψευδοπλαστικά ρευστά. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μετρηθεί πειραματικά με μη παρεμβατική μέθοδο (μ -PIV) το πεδίο ταχύτητας στην υγρή στιβάδα μη-Νευτωνικών ψευδοπλαστικών (*shear thinning*) ρευστών και τα αποτελέσματα να συγκριθούν με αυτά αντίστοιχων Νευτωνικών ρευστών. Οι αρχικές πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες έγιναν στη βάση του σχηματιζόμενου μηνίσκου, έδειξαν ότι για ίδια παροχή υγρού η ταχύτητα του μη-Νευτωνικού ρευστού είναι γενικά μικρότερη αυτής ενός Νευτωνικού ίδιας παροχής που έχει ιξώδες ίσο με το ασυμπυκτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού. Επίσης βρέθηκε ότι για σχετικά μικρές παροχές της υγρής φάσης η κατανομή της ταχύτητας εμφανίζει δύο μέγιστα, ενώ για μεγαλύτερες είναι η συνήθης παραβολική.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη των μ -συσκευών, δηλαδή συσκευών των οποίων τουλάχιστον μία χαρακτηριστική διάσταση είναι μικρότερη του 1mm, έχει αναπτυχθεί ραγδαίως τις τελευταίες δεκαετίες. Ο λόγος της στροφής προς την μ -κλίμακα είναι τόσο η μικρή ποσότητα αντιδραστηρίων που χρειάζεται στις διεργασίες, όσο και οι πολλές λειτουργίες που μπορούν ταυτόχρονα να πραγματοποιηθούν σε μία μόνο συσκευή. Οι μ -αντιδραστήρες είναι εκτενώς μελετώμενες μ -συσκευές λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν συγκριτικά με τους συμβατικούς αντιδραστήρες^[1].

Οι μ -αντιδραστήρες ελευθέρως ρέουσας υγρής στιβάδας είναι συσκευές επαφής υγρού-αερίου, στις οποίες στόχος είναι η δημιουργία λεπτής στιβάδας υγρού και μεγάλης έκτασης διεπιφάνεια με συνέπεια την αύξηση της τιμής του λόγου επιφάνειας επαφής προς όγκο ρευστού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μηνίσκου που σχηματίζει η υγρή φάση (**Σχήμα 1**) επηρεάζουν τους ρυθμούς μεταφοράς μάζας και θερμότητας μεταξύ των δύο φάσεων.



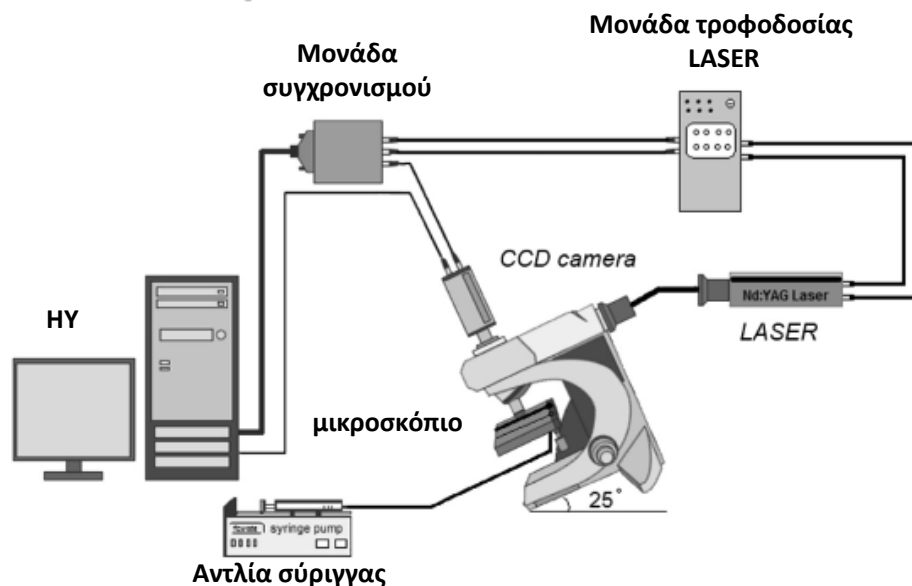
Σχήμα 1. α) Απεικόνιση του μηνίσκου σε μ -αγωγό και β) χαρακτηριστικά μεγέθη της υγρής στιβάδας.

Σε προηγούμενες εργασίες^[2,3] που αφορούσαν τη ροή Νευτωνικών ρευστών μετρήθηκαν πειραματικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σχηματιζόμενης υγρής στιβάδας (**Σχήμα 1b**) καθώς και η κατανομή της ταχύτητας μέσα στη στιβάδα. Διερευνήθηκε η επίδραση τόσο των φυσικών ιδιοτήτων (ιξώδες και επιφανειακή τάση), της ογκομετρικής παροχής της υγρής φάσης όσο και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της γωνίας κλίσης του ανοιχτού μ -καναλιού αφενός στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σχηματιζόμενης υγρής στιβάδας και αφετέρου στην κατανομή της ταχύτητας μέσα στην υγρή στιβάδα. Ως αποτέλεσμα διατυπώθηκαν κατάλληλες σχεδιαστικές εξισώσεις υπολογισμού του πάχους της υγρής στιβάδας και του σχήματος της διεπιφάνειας^[3]. Σε πρόσφατη εργασία της ομάδας μας^[4] αποδείχθηκε ότι οι προτεινόμενες σχέσεις ισχύουν επίσης όταν η υγρή φάση είναι ένα **μη Νευτωνικό** ψευδοπλαστικό (*shear thinning*) υγρό, με την προϋπόθεση κατάλληλης προσαρμογής των συντελεστών τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να προσδιορισθεί πειραματικά το πεδίο ταχύτητας στην ελευθέρως ρέουσα στιβάδα ενός μη-Νευτωνικού ψευδοπλαστικού ρευστού και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά αντίστοιχων Νευτωνικών ρευστών.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πειραματική διάταξη (**Σχήμα 2**) περιλαμβάνει το πειραματικό δοκίμιο, μια αντλία σύριγγας για την τροφοδοσία του ρευστού και το σύστημα μ -PIV.

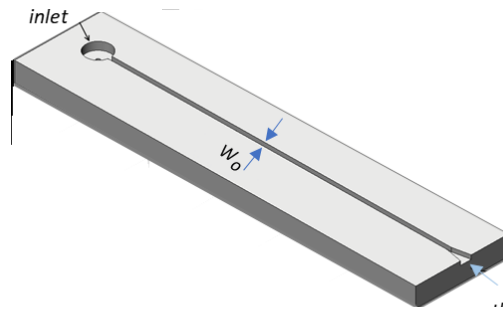


Σχήμα 2. Η πειραματική διάταξη.

Το πειραματικό δοκίμιο (**Σχήμα 3**) είναι ανοιχτό ορειχάλκινο μ -κανάλι τετραγωνικής διατομής ($W_0=1200\mu m$), το οποίο είναι κατασκευασμένο με υψηλής ακρίβειας μηχανουργική τεχνική. Η υγρή φάση διοχετεύεται σε κοιλότητα, της οποίας η υπερχειλίση εξασφαλίζει τη συνεχή ελεύθερη ροή του ρευστού στο μ -κανάλι.

Το μ -PIV είναι μια μετρητική τεχνική που επιτρέπει τη μέτρηση της τοπικής ταχύτητας σε μακρομάκρες με υψηλή χωρική ανάλυση και ακρίβεια. Το σύστημα μ -PIV που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από το μικροσκόπιο (*Nikon-Eclipse LV150*), ένα LASER διπλής κοιλότητας, CCD κάμερα υψηλής ευαισθησίας για την καταγραφή της ροής, τη μονάδα συγχρονισμού της κάμερας με το LASER και έναν υπολογιστή για την επεξεργασία των εικόνων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Το μικροσκόπιο με το πειραματικό δοκίμιο είναι στερεωμένο σε ειδικά κατασκευασμένη διάταξη (**Σχήμα 3**) ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί με κλίση 20-30 μοίρες ως προς το οριζόντιο επίπεδο και βήμα 5 μοιρών. Για την παρακολούθηση της ροής προστίθενται στο ρευστό κατάλληλοι ιχνηθέτες που στην προκειμένη περίπτωση είναι φθορίζοντα μικρο-σωματίδια (*Nile Red*

fluorescent carboxylate microspheres - Invitrogen) μέσης διαμέτρου 1 μm . Τέλος, η επεξεργασία των φωτογραφιών και ο προσδιορισμός της κατανομής ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό (*Flow Manager Software* της *Dantec Dynamics*). Τα πειράματα διεξήχθησαν σε ελεγχόμενη θερμοκρασία δωματίου 20 ± 1 $^{\circ}\text{C}$.

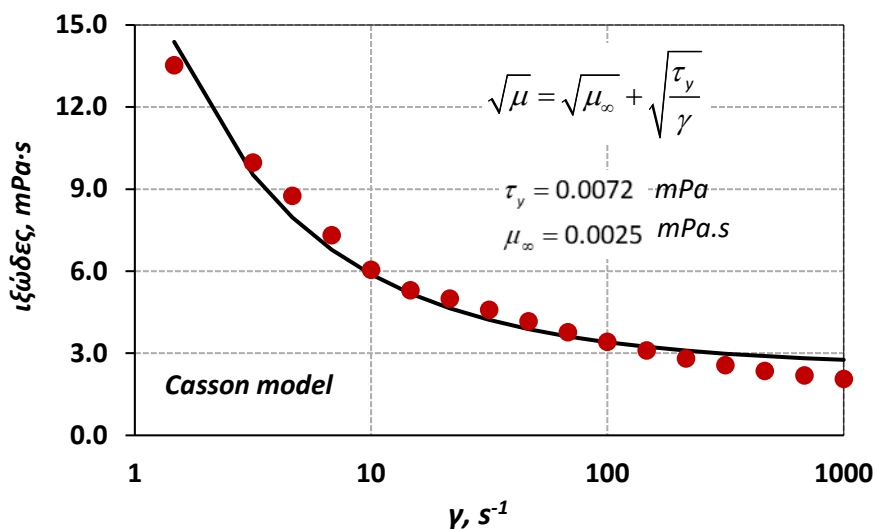


Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση του μ -καναλιού.

Αρχικά έγιναν πειράματα χρησιμοποιώντας μη-Νευτωνικό ρευστό που παρασκευάστηκε διαλύοντας μικρή ποσότητα κόμμεως ξανθάνης σε νερό. Η ξανθάνη είναι ένας βρώσιμος πολυσακχαρίτης που όταν προστίθεται σε ένα ρευστό το καθιστά μη Νευτωνικό (ψευδοπλαστικό)^[5]. Για σύγκριση χρησιμοποιήθηκε επίσης υδατικό διάλυμα γλυκερίνης, του οποίου το ιξώδες είναι ίσο με το ασυμπτωτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού. Η καμπύλη εξάρτησης του ιξώδους του μη-Νευτωνικού ρευστού από τον επιβαλλόμενο ρυθμό διάτμησης (Σχήμα 4) προσδιορίστηκε με κατάλληλο ρεόμετρο (*KSV Cam200*) και βρέθηκε ότι ακολουθεί το μοντέλο του *Casson*. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 1. Ιδιότητες χρησιμοποιούμενων ρευστών

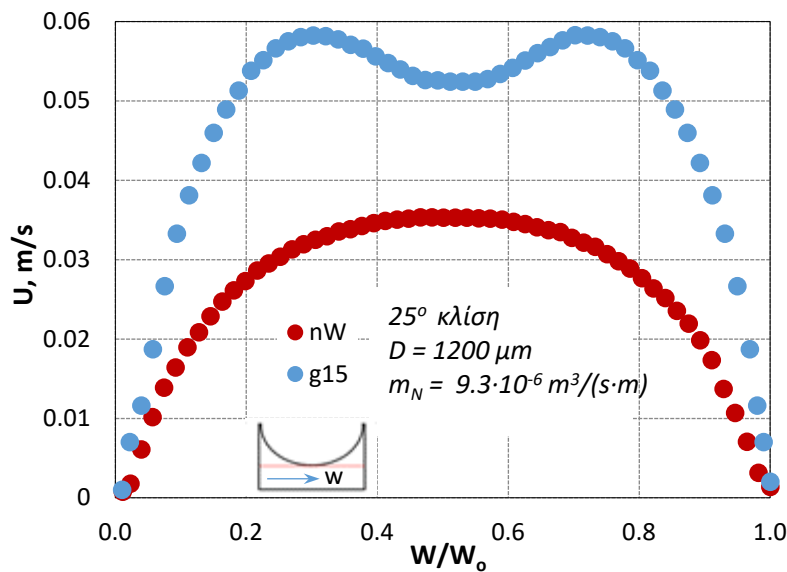
Όνομα	Σύσταση Ρευστών	Δείκτης διάθλασης	Γωνία επαφής (μοίρες)	ρ (kg/m^3)	σ (mN/m)	μ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
nW	100% νερό + 0.03g ξανθάνη	1.340	74	998	72.1	$\sqrt{\mu} = 0.05 + \frac{0.08485}{\sqrt{\gamma}}$
g15	15% γλυκερίνη + 75% νερό	1.350	74	1034	67.3	1.54



Σχήμα 4. Εξάρτηση του ιξώδους του μη-Νευτωνικού ρευστού από το ρυθμό διάτμησης.

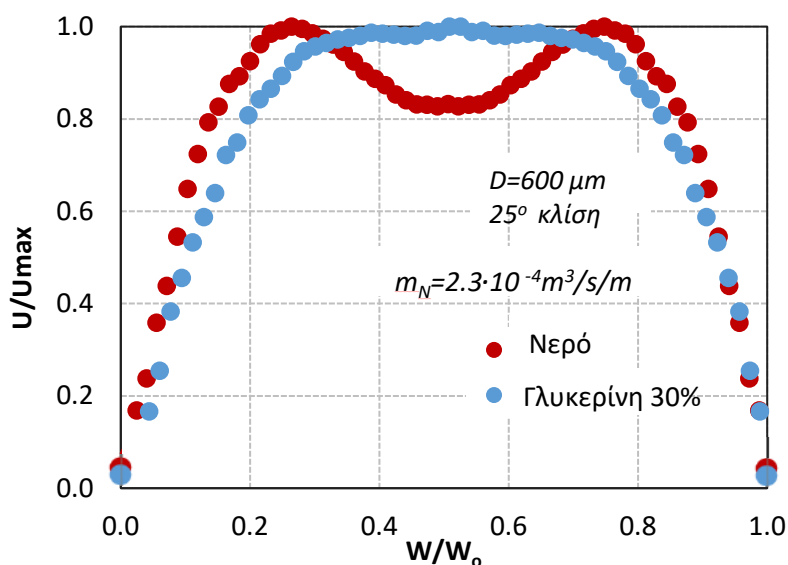
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας το μ -PIV μετρήθηκε η κατανομή της ταχύτητας στη βάση του μηνίσκου για κλίση 25° και σταθερή ανηγμένη παροχή m_N (Σχήμα 5). Όπου m_N είναι ο λόγος $\frac{Q}{W_0}$ της παροχής, Q , του υγρού προς το πλάτος, W_0 , του καναλιού. Χρησιμοποιήθηκε το μη Νευτωνικό ρευστό (nW) καθώς και το Νευτωνικό ρευστό (g15) (Πίνακας 1). Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι η ταχύτητα του μη-Νευτωνικού ρευστού είναι μικρότερη αυτής του Νευτωνικού, γεγονός το οποίο, για δεδομένη παροχή, υποδηλώνει αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας. Σε προηγούμενες εργασίες έχει βρεθεί ότι αφενός το υψηλό ιξώδες έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο πάχος υγρής στιβάδας^[3] και αφετέρου το μέσο ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού στην υγρή στιβάδα είναι υψηλότερο του ασυμπτωτικού^[4], το οποίο είναι το ιξώδες του Νευτωνικού ρευστού που χρησιμοποιήθηκε.



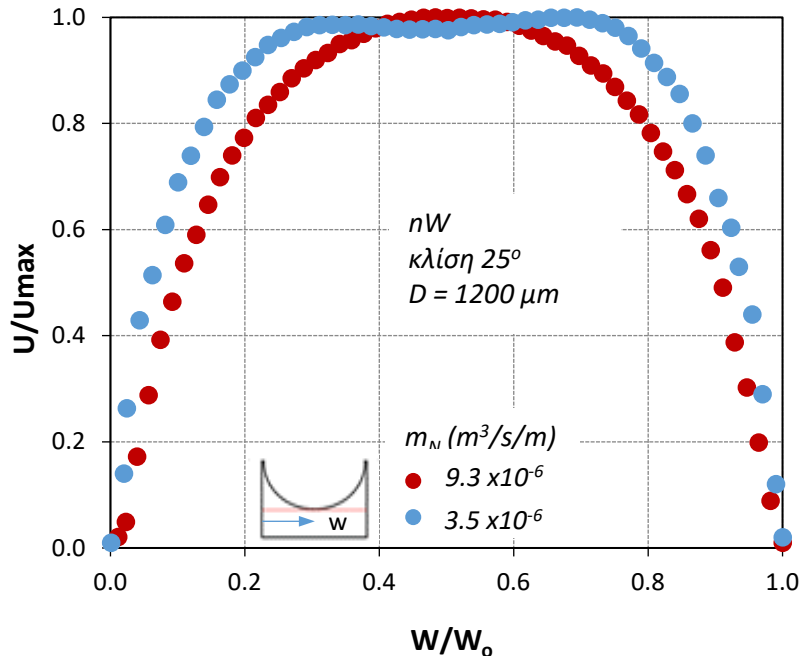
Σχήμα 5. Κατανομή της αξονικής ταχύτητας στη βάση του μηνίσκου.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι η κατανομή της ταχύτητας του g15 έχει σχήμα “M”. Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με τα ευρήματα των Anastasiou et al.^[3], οι οποίοι έκαναν αντίστοιχα πειράματα με Νευτωνικά ρευστά (Σχήμα 6) και διαπίστωσαν ότι η κατανομή της αξονικής ταχύτητας έχει σχήμα “M” όταν ο λόγος Ho/H (Σχήμα 1b) είναι μεγαλύτερος του 1.1.



Σχήμα 6. Επίδραση του ιξώδους του υγρού στην κατανομή της ταχύτητας στη βάση του μηνίσκου^[3].

Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από πειράματα που αφορούσαν τη μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας στη βάση του μηνίσκου για **διαφορετικές παροχές** του μη-Νευτωνικού ρευστού (**Σχήμα 7**). Είναι προφανές ότι για δεδομένη κλίση του μ -καναλιού η αύξηση της παροχής έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο πάχος στιβάδας με συνέπεια η κατανομή της ταχύτητας να έχει παραβολικό σχήμα.



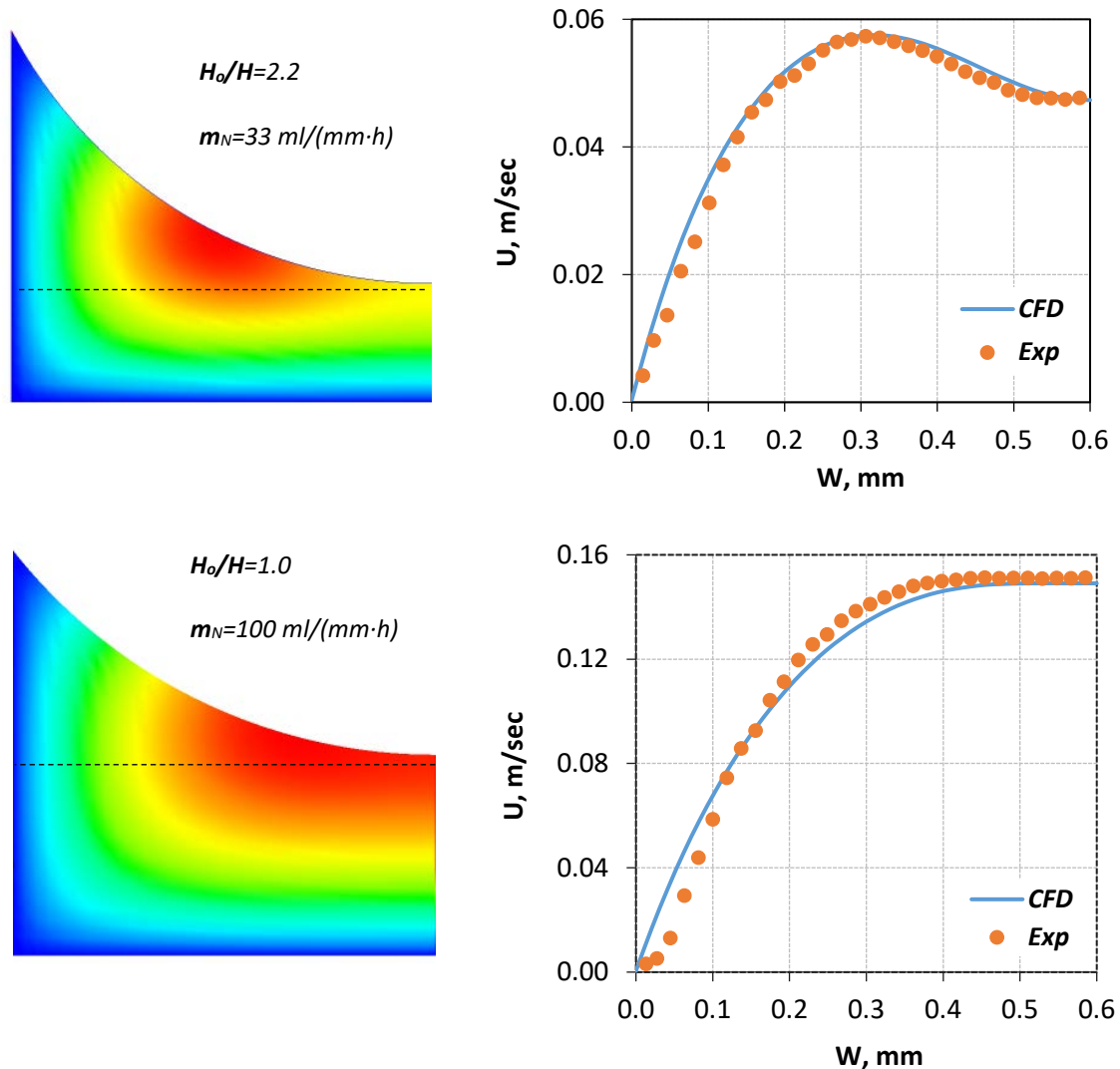
Σχήμα 7. Επίδραση της παροχής στην κατανομή της ταχύτητας στη βάση του μηνίσκου.

Η εμφάνιση κατανομής ταχύτητας με δύο μέγιστα, όπως στο **Σχήμα 6**, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι όταν το ύψος του σχηματιζόμενου μηνίσκου είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος της υγρής στιβάδας, η υγρή στιβάδα λεπταίνει κοντά στα τοιχώματα του καναλιού με αποτέλεσμα **υψηλότερες** ταχύτητες σ' αυτή την περιοχή. Σχετικές προσομοιώσεις με κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD)^[6] που αφορούσαν Νευτωνικό ρευστό (νερό) επιβεβαιώνουν την παραπάνω παρατήρηση (**Σχήμα 8**).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας ήταν να μελετηθεί πειραματικά η κατανομή της ταχύτητας του υγρού όταν ένα μη-Νευτωνικό ψευδοπλαστικό ρευστό ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας σε ανοιχτό μ -κανάλι. Οι πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες σε πρώτη φάση έγιναν στη βάση του μηνίσκου, έδειξαν ότι η ταχύτητα του μη-Νευτωνικού ρευστού είναι γενικά μικρότερη αυτής ενός Νευτωνικού ρευστού με ιξώδες ίσο με το ασυμπτωτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού. Επίσης για σχετικά μικρές παροχές του υγρού η κατανομή της ταχύτητας εμφανίζει δύο μέγιστες τιμές, ενώ για μεγαλύτερες παροχές η κατανομή έχει την συνήθη παραβολική μορφή.

Η πειραματική μελέτη είναι σε εξέλιξη με στόχο να διευκρινισθεί η σημασία της μη Νευτωνικότητας στα χαρακτηριστικά της στιβάδας. Γίνονται πειράματα για να μελετηθεί η επίδραση της παροχής και των φυσικών ιδιοτήτων του μη-Νευτωνικού ρευστού, καθώς και της κλίσης και του πλάτους του μ -καναλιού. Τελικός στόχος είναι η διατύπωση μιας στρατηγικής σχεδιασμού μ -αντιδραστήρων ελευθέρως ρέουσας στιβάδας.



Σχήμα 8. Τυπικές κατανομές ταχύτητας μέσα σε στιβάδα Νευτωνικού ρευστού^[5]

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τον τεχνικό του Εργαστηρίου κ. Φ. Λαμπρόπουλο για την κατασκευή της πειραματικής διάταξης και την τεχνική υποστήριξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Gavriilidis, A., Angeli, P., Cao, E., Yeong, K.K. and Wan, Y.S.S., 2002. *Trans IChemE*, 80(Part A): 3–30
- [2] Anastasiou, A. D., Makatsoris, C., Gavriilidis, A., Mouza, A.A. (2013). *Exp Ther Fluid Sci* 44: 90–99.
- [3] Anastasiou, A.D., Gavriilidis, A., Mouza, A.A. (2013). *Chem Eng Sci* 101: 744–775.
- [4] Koupa, A. T., Stergiou, Y.G., Mouza, A.A. (2019). *Fluids* 4: 8.
- [5] Anastasiou, A.D., Spyrogianni, A.S, Koskinas, K.C., Giannoglou, G.D., Paras, S.V (2012), *Medical Engineering & Physics* **34**, 211-218
- [6] Αναστασίου, Α.Δ. (2013) Μελέτη της ροής σε ανοιχτούς κεκλιμένους μικρο-αγωγούς, Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.