

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΕ μ -ΚΑΝΑΛΙ ΜΕ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ

Β.Α. Χατζηελευθερίου, Ι.Α. Στογιάννης, Α.Α. Μουζά, Σ.Β. Παράς
Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη
e-mail: paras@auth.gr

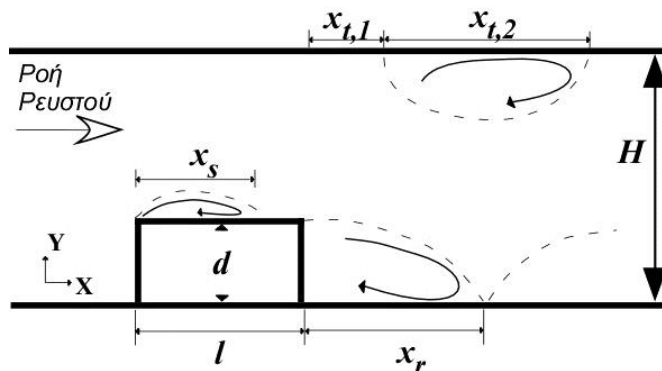
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη αυτή αφορά τη ροή ενός μη-νευτωνικού ρευστού σε μ -κανάλι ορθογωνικής διατομής, όπου υπάρχει ένα εμπόδιο. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της μη-νευτωνικής συμπεριφοράς του ρευστού στο μήκος της περιοχής ανακυκλοφορίας. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε Κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) και συγκρίθηκαν τα χαρακτηριστικά της ροής ενός νευτωνικού και ενός μη-νευτωνικού ρευστού για τις ίδιες συνθήκες. Βρέθηκε ότι για αριθμούς *Reynolds* μεγαλύτερους του 50 τα δυο ρευστά παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, ενώ για αριθμούς *Reynolds* μικρότερους του 50, για το μη-νευτωνικό ρευστό παρατηρείται μείωση της περιοχής ανακυκλοφορίας που φτάνει μέχρι 50% σε σχέση με την αντίστοιχη για το νευτωνικό ρευστό.

Λέξεις κλειδιά: μη-νευτωνικό ρευστό, μ -κανάλι, εμπόδιο, CFD, μήκος ανακυκλοφορίας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μ -συσκευές αποτελούν ένα νέο και ταχέως αναπτυσσόμενο κλάδο της Χημικής Μηχανικής λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως μεγάλους λόγους επιφάνειας προς όγκο και μικρούς χρόνους παραμονής. Στη μ -κλίμακα, η ανάμιξη, μία διεργασία πολύ συχνή στις περισσότερες εφαρμογές της Χημικής Μηχανικής, λαμβάνει χώρα σε δύο τύπους συσκευών: στους ενεργητικούς και στους παθητικούς μ -αναμίκτης. Οι ενεργητικοί μ -αναμίκτης χρησιμοποιούν κινούμενα μέρη, όπως προπέλες και αναδευτήρες, στο εσωτερικό της ροής με στόχο την ενίσχυση της ανάμιξης. Όπως είναι προφανές οι ενεργητικοί μ -αναμίκτης καταναλώνουν ενέργεια, συνήθως ηλεκτρική και προϋποθέτουν πολυπλοκότερα συστήματα σε σχέση με τους παθητικούς. Στην περίπτωση των παθητικών μ -αναμικτών η ενίσχυση της ανάμιξης γίνεται μέσω τροποποίησης του πεδίου ροής, δημιουργώντας περιοχές ανακυκλοφορίας. Στη μακρο-κλίμακα μια από τις συνηθέστερες διαμορφώσεις, που έχουν μελετηθεί εκτενέστατα, είναι οι βαθμίδες κατάβασης της ροής (*Backward Facing Step – BFS*). Στην περίπτωση αυτή το ρευστό ρέει αρχικά σε ένα κανάλι στενής διατομής και στη συνέχεια γίνεται μία απότομη διεύρυνση της διατομής που προκαλεί διαταραχές στη ροή του ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τις γεωμετρικές παραμέτρους του καναλιού και της διαμόρφωσης, τις ιδιότητες και την παροχή του ρευστού, δημιουργούνται περιοχές ανακυκλοφορίας (*recirculation zones*) [1]. Αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από αρνητικές, ως προς τη διεύθυνση της ροής, ταχύτητες και αναπτύσσονται κοντά στα τοιχώματα των καναλιών. Στην περίπτωση των εμποδίων, μπορούν να εμφανιστούν τρεις περιοχές ανακυκλοφορίας: μία επάνω στο εμπόδιο, μία στο άνω τοίχωμα του μ -καναλιού και μια ακριβώς μετά το εμπόδιο, η οποία αποτελεί και τη κύρια περιοχή ανακυκλοφορίας [2]. Οι τρεις περιοχές ανακυκλοφορίας και τα αντίστοιχα μήκη τους, x_s , $x_{t,2}$ και x_r , φαίνονται στο **Σχήμα 1**, όπου H είναι το ύψος του μ -καναλιού, d το ύψος του εμποδίου και l το μήκος του εμποδίου.



Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση της διάταξης και των περιοχών ανακυκλοφορίας. Συμβολισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών.

Στο Εργαστήριο Τ.Χ.Ε. του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΑΠΘ έχει προηγηθεί μελέτη [2] για την επίδραση ενός εμποδίου μέσα σε μ -κανάλι στη ροή ενός νευτωνικού υγρού. Για την πληρότητα της έρευνας, κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη της ροής ενός μη-νευτωνικού υγρού στο ίδιο μ -κανάλι, ώστε να παρατηρηθούν οι αλλαγές που μπορεί να προκαλεί η μη-νευτωνική συμπεριφορά του ρευστού στα χαρακτηριστικά της ροής του. Τα μη-νευτωνικά ρευστά συναντώνται σε βιομηχανίες Φαρμάκων και Τροφίμων, καθώς και σε εφαρμογές της Βιοϊατρικής Μηχανικής. Για να εξηγηθεί καλύτερα η μη-νευτωνική συμπεριφορά, κρίνεται απαραίτητη η παράθεση ορισμένων βασικών εννοιών. Αρχικά, ως *ρυθμός διάτμησης*, γ , ορίζεται η κλίση της ταχύτητας ως προς τον κάθετο στη ροή του ρευστού άξονα (**Εξ. 1**):

$$\gamma = du/dy \quad (1)$$

Ένα μέγεθος άμεσα σχετιζόμενο με το ρυθμό διάτμησης είναι η διατμητική τάση. Ως *διατμητική τάση*, τ , ορίζεται το πηλίκο της εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός ρευστού, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής, και συσχετίζεται με το ρυθμό διάτμησης μέσω της **Εξ. (2)**:

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (2)$$

Η σταθερά αναλογίας μ μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού διάτμησης είναι το *ιζώδες*. Όταν εξετάζεται η ροή ενός ρευστού σε έναν αγωγό, η διατμητική τάση που προκαλείται στο ρευστό από τα τοιχώματα του αγωγού ονομάζεται *τοιχωματική διατμητική τάση* (*Wall Shear Stress, WSS, τ_w*) [3].

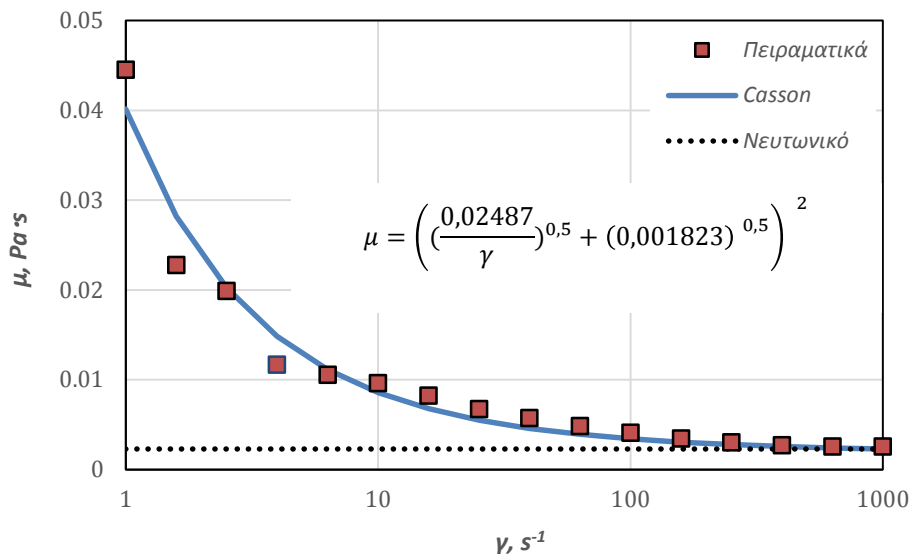
Όπως είναι σαφές από τα προαναφερθέντα, οι σχέσεις που συνδέουν τη διατμητική τάση με το ρυθμό διάτμησης σε ένα ρευστό δίνουν σημαντικές ρεολογικές πληροφορίες για το ρευστό αυτό. Γενικά τα μη-νευτωνικά ρευστά χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- στα πλαστικά *Bingham*, τα οποία συμπεριφέρονται ως ρευστά μόνο πάνω από μια τιμή διατμητικής τάσης,
- στα ψευδοπλαστικά ρευστά (*shear-thinning*) και στα θιξοτροπικά (*shear-thickening*) ρευστά, των οποίων το ιζώδες μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή του ρυθμού διάτμησης [3].

Ο πιο κοινός τύπος μη-νευτωνικού ρευστού είναι τα *shear-thinning* ή ψευδοπλαστικά ρευστά, στα οποία περιλαμβάνονται διάφορα συνήθη ρευστά, όπως το αίμα, οι χυμοί φρούτων, οι φυσικές κόλλες, τα κολλοειδή διαλύματα, τα γαλακτώματα κ.α.

Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται η καμπύλη ιζώδους ενός μη-νευτωνικού διαλύματος νερού-ξανθάνης (0.35 g/L ξανθάνη), το οποίο είναι το ρευστό που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που μπορούν να περιγράψουν τη μη-νευτωνική συμπεριφορά ενός τέτοιου ρευστού, όπως τα μοντέλα *Casson*, *Herschel-Buckley* κ.α. Η μέτρηση του ιζώδους του διαλύματος νερού-ξανθάνης έγινε με περιστροφικό μαγνητικό ρεόμετρο (*AR-G2, TA Instruments*®) και έδειξε (**Σχήμα 2**) ότι τα δεδομένα ακολουθούν πολύ ικανοποιητικά το μοντέλο *Casson* (**Εξ. 3**):

$$\mu = \left(\left(\frac{0,02487}{\gamma} \right)^{0,5} + (0,001823)^{0,5} \right)^2 \quad (3)$$



Σχήμα 2. Καμπύλη ιζώδους του μη-νευτωνικού ρευστού (υδατικό δ/μα ξανθάνης).

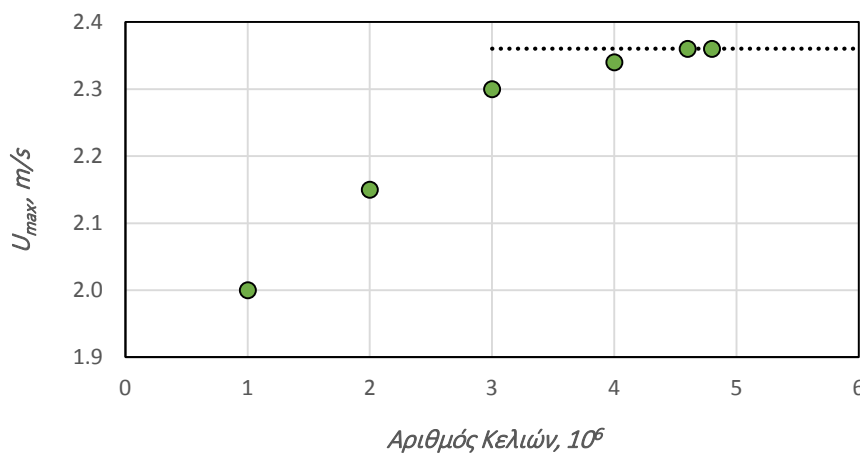
Σημειώνεται ότι για υψηλούς ρυθμούς διάτμησης το ιξώδες των μη-νευτωνικών ρευστών σταθεροποιείται σε μία συγκεκριμένη τιμή, δηλαδή δεν μεταβάλλεται με περαιτέρω αύξηση του ρυθμού διάτμησης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**. Πρακτικά πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή ρυθμού διάτμησης, τα μη-νευτωνικά ρευστά παρουσιάζουν νευτωνική συμπεριφορά. Οι σταθερές τιμές που λαμβάνει το ιξώδες του ρευστού για μηδενικό και για άπειρο ρυθμό διάτμησης καλούνται μηδενικό μ_0 και άπειρο μ_∞ ιξώδες αντίστοιχα. Έτσι, το ιξώδες του ρευστού, αναλόγως με τον ασκούμενο ρυθμό διάτμησης, λαμβάνει τιμές μεταξύ των μ_0 και μ_∞ .

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την μελέτη του φαινομένου, έγινε χρήση του κώδικα *ANSYS CFX 15.0[®]*, ο οποίος χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (*finite volume method, FVM*) για να επιλύσει τις εξισώσεις *Navier-Stokes*, και το πακέτο *ANSYS Workbench[®]* για τη δημιουργία του χώρου και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Αρχικά, γίνεται η δημιουργία της γεωμετρίας με χρήση ενός ενσωματωμένου περιβάλλοντος σχεδιασμού για Η/Υ (*Computed Aided Design, CAD*), στο οποίο δημιουργείται το μοντέλο του φυσικού χώρου, όπου ρέει το ρευστό (*computational domain*). Στο επόμενο στάδιο γίνεται ο καθορισμός των απαραίτητων παραμέτρων για τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος, το οποίο διαχωρίζει το χώρο σε στοιχειώδεις όγκους. Μέσα από διάφορες ρυθμίσεις επηρεάζεται τόσο η πυκνότητα (*grid density*) όσο και η ποιότητα (*grid quality*) του πλέγματος. Για τις προσομοιώσεις της παρούσας έρευνας, χρησιμοποιούνται εξάεδρα κελιά, τα οποία εμφανίζουν πολύ καλή αξιοπιστία και σταθερότητα κατά την επίλυση και προτείνονται για απλές γεωμετρίες δίχως καμπυλότητες [4].

Για την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η μελέτη της εξάρτησης της λύσης από το πλέγμα (*grid dependence study*), μέσα από την οποία ο χρήστης μπορεί να βρει τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό κελιών για αξιόπιστη λύση, αλλά και παράλληλα εξοικονόμηση πόρων, αφού όσο αυξάνεται ο αριθμός των κελιών, αυξάνεται και η απαίτηση σε υπολογιστική δύναμη, χρόνο και αποθηκευτικό χώρο. Στο **Σχήμα 3** φαίνεται το διάγραμμα που προέκυψε ύστερα από τη μελέτη εξάρτησης της λύσης από την πυκνότητα του πλέγματος με βάση τη μέγιστη ταχύτητα στο τέλος του εμποδίου. Τελικά, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν περίπου $4.5 \cdot 10^6$ κελιά.



Σχήμα 3. Εξάρτηση της λύσης από την πυκνότητα του πλέγματος με βάση τη μέγιστη ταχύτητα στο τέλος του εμποδίου.

Στο τμήμα προ-επεξεργασίας γίνεται ορισμός των φυσικών παραμέτρων του μοντέλου, όπως οι αρχικές (*initial*) και οι συνοριακές (*boundary*) συνθήκες του προβλήματος. Στις προσομοιώσεις της εργασίας ορίζεται η μαζική παροχή του ρευστού και μηδενική ταχύτητα στα τοιχώματα. Επίσης ορίζονται οι θερμοφυσικές και οι χημικές ιδιότητες των ρευστών που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση. Ειδικά για τη μελέτη του μη-νευτωνικού μίγματος νερού-ξανθάνης, ορίζεται το μοντέλο *Casson*, που περιγράφει τη μεταβολή του ιξώδους με τον ρυθμό διάτμησης. Τέλος επιλέγεται το μοντέλο επίλυσης, όπου στη στρωτή περιοχή της ροής οι εξισώσεις επιλύονται με *Απευθείας Αριθμητική Προσομοίωση (Direct Numerical Simulation, DNS)*, ενώ για την τυρβώδη περιοχή της ροής επιλέγεται το μοντέλο *k- ω* , διότι είναι σε θέση να προβλέψει καλύτερα ασταθείς ροές, όπως ανακυκλοφορίες, παρά το υψηλότερο υπολογιστικό κόστος [2].

Εισήχθησαν επίσης τρεις αδιάστατοι αριθμοί ως σχεδιαστικές μεταβλητές για την παραμετρική διεξαγωγή των προσομοιώσεων, οι οποίοι είναι:

- ο λόγος διαστάσεων του εμποδίου (*aspect ratio, AR*) εκφρασμένος ως ο λόγος του μήκους l ως προς το ύψος d του εμποδίου (l/d).

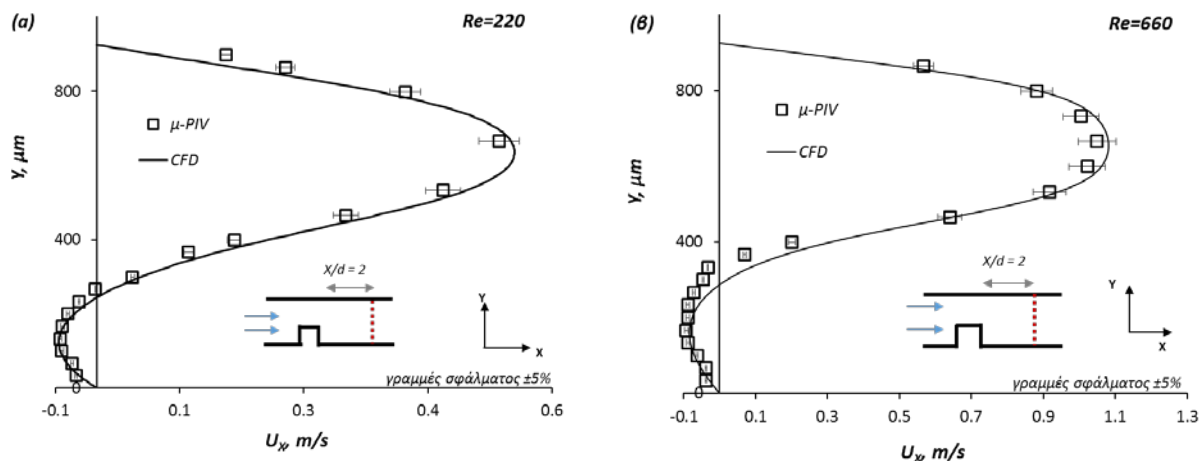
- ο βαθμός φραγής (*blockage ratio*, *BR*) του καναλιού από το εμπόδιο (d/H) που πρακτικά εκφράζει το ποσοστό της διατομής του καναλιού, το οποίο καλύπτει το εμπόδιο.
- ο αριθμός Re (UH/ν) εκφρασμένος ως ο λόγος του γινομένου της ταχύτητας (U) του ρευστού επί το ύψος (H) του καναλιού ως προς το κινηματικό ιξώδες (ν) του ρευστού. Στην παρούσα μελέτη, επειδή ο Re χρησιμοποιείται πρακτικά ως μία ανηγμένη έκφραση της παροχής του ρευστού, επιλέχθηκε το H ως χαρακτηριστικό μήκος καθώς παραμένει σταθερό, ενώ το d μεταβάλλεται με τις άλλες δυο σχεδιαστικές μεταβλητές. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό του αριθμού Re στα μη-νευτωνικά ρευστά χρησιμοποιείται το άπειρο ιξώδες μ_∞ ως ιξώδες αναφοράς.

Το λογισμικό ANSYS® είναι εγκατεστημένο στο δίκτυο H/Y του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων για παράλληλη επεξεργασία και επίλυση, που αποτελείται από 60 πυρήνες και 192GB RAM.

ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ CFD

Ο κώδικας *CFD*, που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική μελέτη, επικυρώθηκε με πειραματικά δεδομένα για την κατανομή της ταχύτητας, τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη μελέτη των Stogiannis et al. [2]. Οι προσομοιώσεις για την επικύρωση του κώδικα έγιναν σε αγωγό ίδιων διαστάσεων με αυτόν των πειραματικών δεδομένων ($H=925\mu\text{m}$, $AR=25$, $BR=0.43$) και για τις δύο περιοχές ροής ($Re=220$ και $Re=660$).

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4**, τα αποτελέσματα του κώδικα *CFD* συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα (μετρήσεις με μ -PIV). Παρατηρείται πολύ καλή πρόβλεψη της ταχύτητας τόσο κατά τη διεύθυνση της ροής (θετικές ταχύτητες) όσο και στην περιοχή ανακυκλοφορίας. Αν και η επίλυση είναι συχνά προβληματική σε περιοχές κοντά στα τοιχώματα του αγωγού, στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει πολύ καλή συμφωνία. Τέλος, οι γραμμές σφάλματος ανταποκρίνονται στην αβεβαιότητα της πειραματικής τεχνικής, η οποία έχει βρεθεί ότι είναι περίπου $\pm 5\%$ [5].

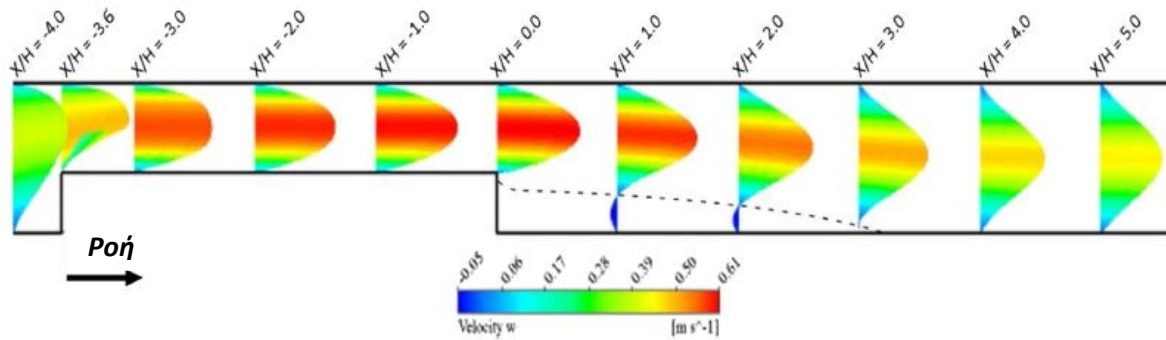


Σχήμα 4. Σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων για την κατανομή της ταχύτητας (μ -PIV) με τα αποτελέσματα του *CFD* για : α) τη στρωτή και β) την τυρβώδη περιοχή ροής (στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά, οι υπολογιστικές προσομοιώσεις χωρίστηκαν σε δύο ομάδες ανάλογα με τον αριθμό *Reynolds* που μελετάται ($Re > 100$ και $Re < 100$). Στην πρώτη ομάδα, δηλαδή για αριθμό *Reynolds* μεγαλύτερο του 100, έγινε αναπαγωγή των προσομοιώσεων της μελέτης των Stogiannis et al. [2] για το μη-νευτωνικό ρευστό, οι οποίες προέκυψαν ύστερα από εφαρμογή της *Μεθόδου Σχεδιασμού Πειραμάτων Box-Behnken*. Μέσω αυτών, μελετήθηκε η επίδραση των τριών σχεδιαστικών παραμέτρων (Re , AR και BR) στο μήκος ανακυκλοφορίας. Ο αριθμός Re μεταβάλλεται σε ένα εύρος μεταξύ 100 και 360, ενώ οι τιμές του BR είναι 0.4, 0.6 και 0.8. Το εύρος του αριθμού Re επιλέχθηκε κατάλληλα ώστε η ροή να παραμένει στη στρωτή περιοχή παρά τη μεταβολή του ύψους του εμποδίου. Τέλος, οι τιμές του AR έχουν εύρος μεταξύ 2 και 16, αλλάζοντας έτσι το μήκος του εμποδίου.

Στο **Σχήμα 5** παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας μέσα στον αγωγό για μια τυπική περίπτωση ($Re > 100$). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τα σημεία όπου $U_x=0$, διαχωρίζοντας με αυτό τον τρόπο την κύρια περιοχή ανακυκλοφορίας μετά το εμπόδιο. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αφορούν την **κύρια** περιοχή ανακυκλοφορίας μετά το εμπόδιο, επάνω στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού.

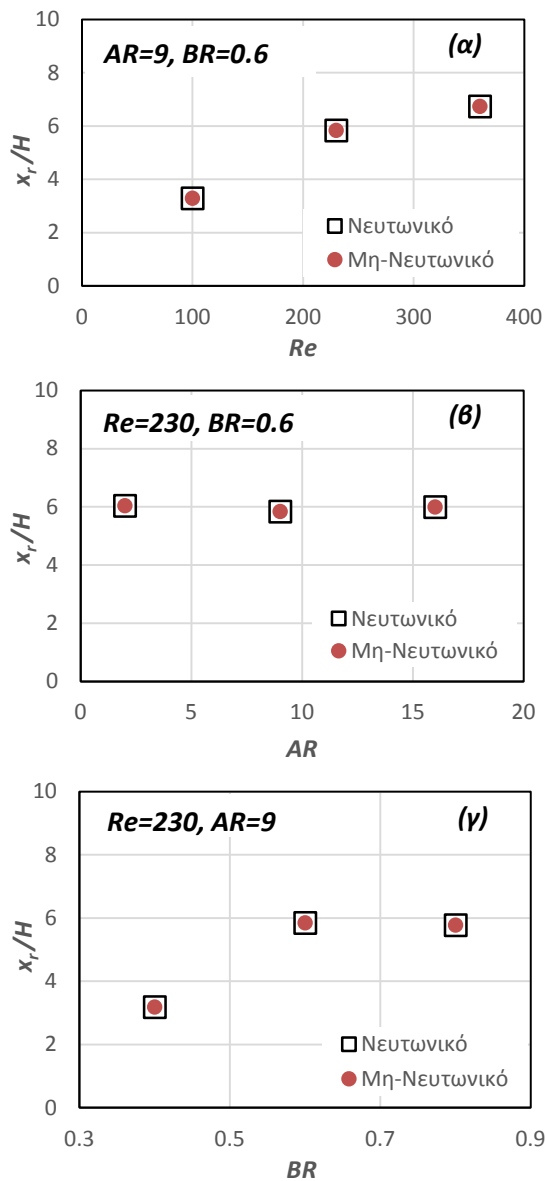


Σχήμα 5. Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού. ($BR=0.4$, $AR=9$, $Re=230$)

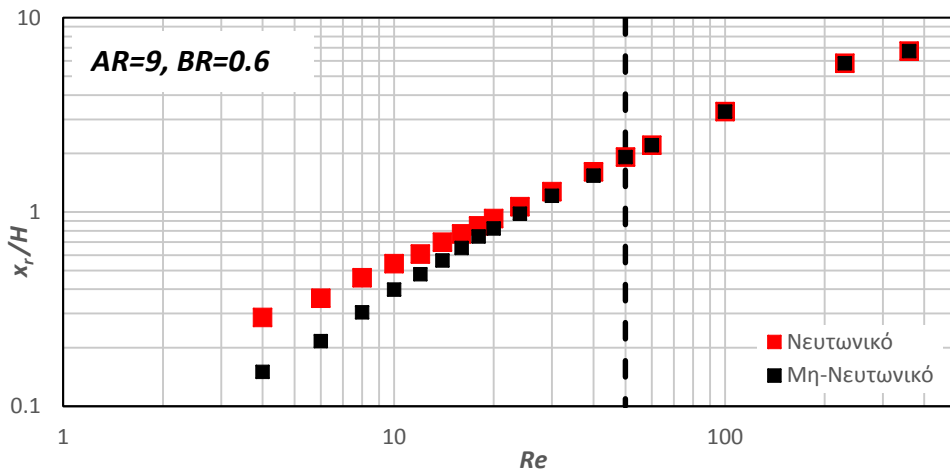
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6α, για αριθμούς $Re > 100$, το μήκος ανακυκλοφορίας για το νευτώνικό και το μη-νευτώνικό ρευστό είναι το ίδιο. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ρυθμοί διάτμησης είναι αρκετά υψηλοί ($\dot{\gamma} > 100 \text{ s}^{-1}$), οπότε το ιξώδες του μη-νευτώνικού ρευστού έχει την ασυμπτωτική του τιμή, δηλαδή είναι πρακτικά ίδιο με αυτό του νευτώνικού (Σχήμα 2). Επιπλέον, παρατηρούμε (Σχήμα 6β, 6γ) ότι ακόμα και αν αλλάξει η γεωμετρία του εμποδίου, δεν υπάρχουν διαφορές στη συμπεριφορά των δύο ρευστών. Όπως συμπεράναν και οι Stogiannis et al. [2] για το νευτώνικό ρευστό, ο βαθμός φραγής έχει μεγαλύτερη επίδραση στο μήκος ανακυκλοφορίας από το λόγο διαστάσεων του εμποδίου και στο μη-νευτώνικό ρευστό.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση του Re στο μήκος ανακυκλοφορίας για το ίδιο εμπόδιο ($AR=9$, $BR=0.6$). Οι αριθμοί Re που μελετήθηκαν είναι μεταξύ 4 και 60. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο Σχήμα 7. Παρατηρείται ότι για αριθμό $Re > 50$ το μη-νευτώνικό ρευστό συνεχίζει να παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το νευτώνικό. Ωστόσο, για $Re < 50$ το μη-νευτώνικό ρευστό αρχίζει να εμφανίζει σημαντικές διαφορές στο μήκος ανακυκλοφορίας σε σχέση με το νευτώνικό ρευστό. Η απόκλιση μεταξύ των δύο περιπτώσεων φτάνει μέχρι 50% για $Re=4$. Η διαφορά στο μήκος ανακυκλοφορίας γίνεται εμφανής στο Σχήμα 8, όπου παρουσιάζονται οι κατανομές ταχύτητας για $Re=14$ και για τα δύο είδη ρευστού.

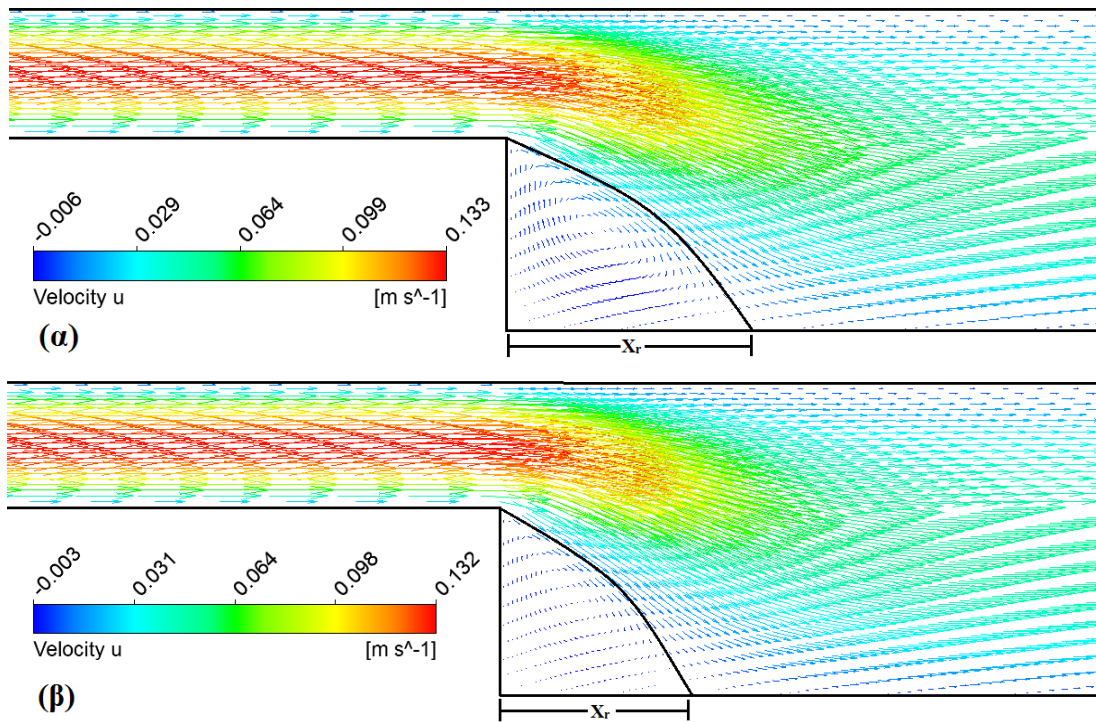
Συμπεραίνουμε ότι για $Re < 50$, οι ρυθμοί διάτμησης στην περιοχή ανακυκλοφορίας γίνονται μικρότεροι των 100 s^{-1} με αποτέλεσμα το ιξώδες να αυξάνεται έντονα και να μειώνεται αντίστοιχα το μήκος ανακυκλοφορίας. Αυτό το γεγονός γίνεται εμφανές στο Σχήμα 9, όπου παρατηρούνται τιμές ιξώδους ακόμα και 5 φορές μεγαλύτερες από αυτές του νευτώνικού ρευστού, σε συμφωνία με ότι αναφέρεται από τους Stogiannis et al. [2], οι οποίοι διαπίστωσαν ότι στα νευτώνικά ρευστά το μήκος ανακυκλοφορίας μειώνεται όταν αυξάνεται το ιξώδες.



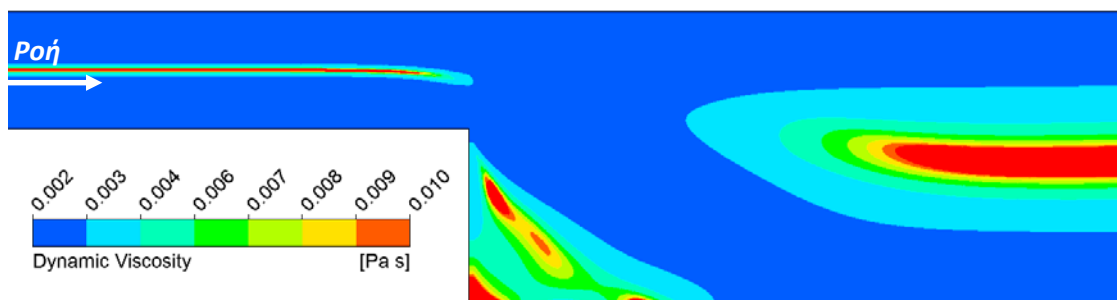
Σχήμα 6. Μεταβολή του μήκους ανακυκλοφορίας για νευτώνικό και μη-νευτώνικό ρευστό ως συνάρτηση του: α) Re , β) AR και γ) BR .



Σχήμα 7. Επίδραση του Re στο μήκος ανακυκλοφορίας για νευτώνικό και μη-νευτώνικό ρευστό. ($AR=9$, $BR=0.6$)



Σχήμα 8. Κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού και μήκος ανακυκλοφορίας για: α) νευτώνικό και β) μη-νευτώνικό ρευστό. ($Re=14$, $BR=0.6$ και $AR=9$)



Σχήμα 9. Κατανομή ιξώδους για το μη-νευτώνικό ρευστό στο επίπεδο συμμετρίας του αγωγού. ($Re=14$, $BR=0.6$ και $AR=9$)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε υπολογιστικά η ροή γύρω από ένα εμπόδιο μέσα σε ένα μ -κανάλι τόσο για ένα νευτωνικό ρευστό όσο και ένα μη-νευτωνικό ρευστό. Αρχικά, ο κώδικας *CFD* επιβεβαιώθηκε με πειραματικά δεδομένα για ένα ανάλογο μ -κανάλι, όπου βρέθηκε ότι τα αποτελέσματα της κατανομής της αξονικής ταχύτητας είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

Μέσω της υπολογιστικής μελέτης βρέθηκε ότι για αριθμούς $Re > 50$ το μη-νευτωνικό ρευστό εμφανίζει πρακτικά την ίδια συμπεριφορά με το νευτωνικό ρευστό. Έτσι η μεθοδολογία υπολογισμού του μήκους ανακυκλοφορίας που προτάθηκε από τους Stogiannis et al. [2] μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση μη-νευτωνικών ψευδοπλαστικών ρευστών. Για μικρότερους όμως αριθμούς Re , στο μη-νευτωνικό ρευστό παρατηρείται *ελάττωση* της *περιοχής ανακυκλοφορίας* σε σχέση με το νευτωνικό ρευστό, η οποία για το μικρότερο μελετούμενο αριθμό Re ($Re=4$) φτάνει μέχρι και 50%. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι σε εφαρμογές μη-νευτωνικών ρευστών απαιτείται πιο “έντονη” διαμόρφωση ή και αύξηση της παροχής (αύξηση ύψους και μήκους εμποδίου, αύξηση αριθμού Re) για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα με το νευτωνικό ρευστό στο συγκεκριμένο μ -αγωγό.

Στη συνέχεια της μελέτης, που είναι σε εξέλιξη, θα ερευνηθεί και η επίδραση της αλλαγής των διαστάσεων του εμποδίου για αριθμούς $Re < 50$ ώστε τελικώς να προταθεί συσχετισμός πρόβλεψης του μήκους ανακυκλοφορίας με δεδομένα τη γεωμετρία του εμποδίου και τον αριθμό Re .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Abu-Mulaweh, H.I., 2003. A review of research on laminar mixed convection flow over backward- and forward- facing steps. *Int. J. Therm. Sci.* **42**, 897-909.
- [2]. Stogiannis, I.A., Passos, A.D., Mouza, A.A., Paras, S.V., Penkanova, V., Tihon, J., 2014. Flow investigation in a micro-channel with a flow disturbing rib. *Che. Eng. Sci.* **119**, 65-76.
- [3]. McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P., 2008. *Βασικές Διεργασίες Χημικής Μηχανικής*. Ελληνική μετάφραση. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [4]. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Harlow, England; New York, Pearson Education Ltd.
- [5]. Anastasiou, A.D., Makatsoris, C., Gavriilidis, A., Mouza, A.A., 2013. Application of μ -PIV for investigating liquid film characteristics in an open inclined microchannel. *Exp. Therm Fluid Sci.* **44**, 90-99.