

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΗ-ΝΕΥΤΩΝΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΕ μ -ΚΑΝΑΛΙΑ ΜΕ ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Ι.Α. Στογιάννης, Π.Κ. Γλουστιάνου, Α.Α. Μουζά

Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
tel.: +30 2310 994161; Email: mouza@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, μελετώνται τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής μη-Νευτωνικού ρευστού σε μ -αγωγό τετραγωνικής διατομής που φέρει διαδοχικά εμπόδια (βαθμίδες ανάβασης/κατάβασης) χρησιμοποιώντας κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για την πρόβλεψη της μη-Νευτωνικής συμπεριφοράς του ρευστού χρησιμοποιείται το μοντέλο ιξώδους *Herschel-Bulkley*. Ο κώδικας *CFD* αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα που προήλθαν από όμοια πειραματική διάταξη. Με χρήση του αξιολογούμενου κώδικα διερευνάται η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εμποδίων (ύψος, μήκος), της απόστασης μεταξύ τους και της παροχής του ρευστού, στη διαμόρφωση του πεδίου ροής. Αποδεικνύεται ότι η ζώνη ανακυκλοφορίας του ρευστού, που εμφανίζεται μετά από τα εμπόδια, όπως και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται σε αυτή, αυξάνονται όταν αυξάνεται το πλάτος και του ύψος των εμποδίων, ενώ μεγάλου σχετικά μήκους εμπόδια που απέχουν πολύ, οδηγούν σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή πάνω και μετά από αυτά. Τα συμπεράσματα της μελέτης αναμένεται να αποδειχτούν χρήσιμα στο σχεδιασμό αποτελεσματικότερων μ -συσκευών.

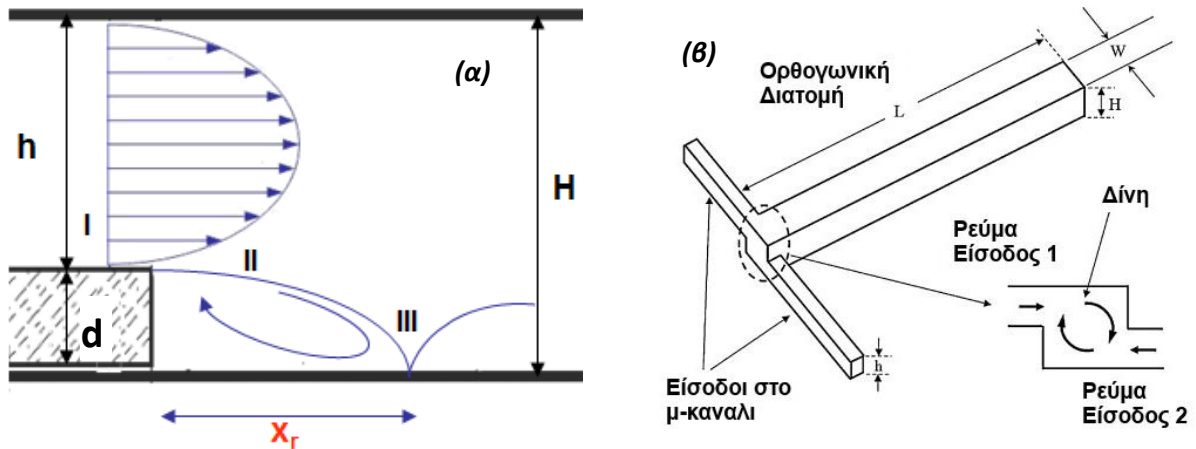
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο *μικροσυσκευές* αναφερόμαστε σε συσκευές τα κανάλια ροής των οποίων έχουν χαρακτηριστική διάσταση μικρότερη από 1mm. Οι μικροσυσκευές απασχολούν έντονα τα τελευταία χρόνια την ερευνητική κοινότητα λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων (απλή κατασκευή, αξιοπιστία, μικρό κόστος) που παρουσιάζουν έναντι των συμβατικών συσκευών μεγάλης κλίμακας^[1].

Η ανάμιξη ρευστών στη μικρο-κλίμακα είναι μία από τις σημαντικότερες διεργασίες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μικρο-συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο σε χημικές^[2] όσο και σε βιο-ιατρικές εφαρμογές^[3], καθότι η βελτίωση της ποιότητας της ανάμιξης οδηγεί σε αύξηση της διεπιφάνειας μεταξύ των αντιδρώντων και κατ' επέκταση σε αύξηση της απόδοσης της αντίδρασης. Επειδή η χαρακτηριστική διάσταση του αγωγού είναι μικρή, η ροή είναι συνήθως στρωτή. Συνεπώς η μοριακή διάχυση, η οποία αφενός είναι αργή και αφετέρου ανάλογη της έκτασης της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο φάσεων, αποτελεί τον κύριο μηχανισμό ανάμιξης. Μελέτες^[3-6] έχουν δείξει ότι η ύπαρξη διαμορφώσεων στο εσωτερικό των συσκευών (όπως εναλλασσόμενα κυκλικά τμήματα, πολυστρωματική ροή, βαθμίδες ανάβασης/κατάβασης) ευνοεί την ανάμιξη επειδή συνεισφέρει στη δημιουργία δευτερεύουσας ροής.

Στην περίπτωση αγωγού με βαθμίδες ανάβασης/κατάβασης, η δημιουργία δευτερεύουσας ροής που ενδιαφέρει για την ανάμιξη, πραγματοποιείται μετά τη βαθμίδα, όπου δημιουργείται περιοχή αναστροφής της ροής (**Σχήμα 1α**). Στην περιοχή αυτή οι μηχανισμοί μεταφοράς ορμής και μάζας διαφέρουν σημαντικά, ευνοώντας τελικά την ανάμιξη, με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές να ασχολούνται με την κατασκευή μ -αναμικτών στους οποίους αξιοποιείται αυτό το φαινόμενο (**Σχήμα 1β**). Τέλος, αναφέρεται ότι το μέγεθος της περιοχής αναστροφής της ροής, όπως και οι

συνθήκες οι οποίες επικρατούν σε αυτή, εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βαθμίδων ανάβασης/κατάβασης^[6].



- I. αρχική κατανομή ταχύτητας
- II. διαχωρισμός της ροής
- III. σημείο επανασχηματισμού οριακού στρώματος
- x_r : μήκος περιοχής ανακυκλοφορίας
- H : ύψος καναλιού
- d : ύψος εμποδίου

Σχήμα 1: α) Ροή μετά από βαθμίδα κατάβασης^[6], β) μ -αναμίκτης τύπου T με βαθμίδα ανάβασης και κατάβασης^[7].

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν δημοσιευθεί πειραματικές και υπολογιστικές μελέτες^[6-9] που αφορούν τη διερεύνηση της ανάμιξης σε διάφορα είδη γεωμετριών, με σκοπό την κατασκευή μ -αναμικτών που λειτουργούν στις βέλτιστες συνθήκες. Παρόλα αυτά, οι μελέτες περιορίζονται στη χρήση Νευτωνικών ρευστών, ενώ η περίπτωση ροής μη-Νευτωνικών ρευστών σε μ -κανάλια αναφέρεται ελάχιστα στη βιβλιογραφία^[10, 11].

Η μελέτη της ροής μη-Νευτωνικών ρευστών σε μ -αγωγούς, λόγω των διαφορών που παρουσιάζει με αυτή των Νευτωνικών στις κατανομές τις ταχύτητας, διατμητικής τάσης και στο συντελεστή διάχυσης, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές^[5, 12].

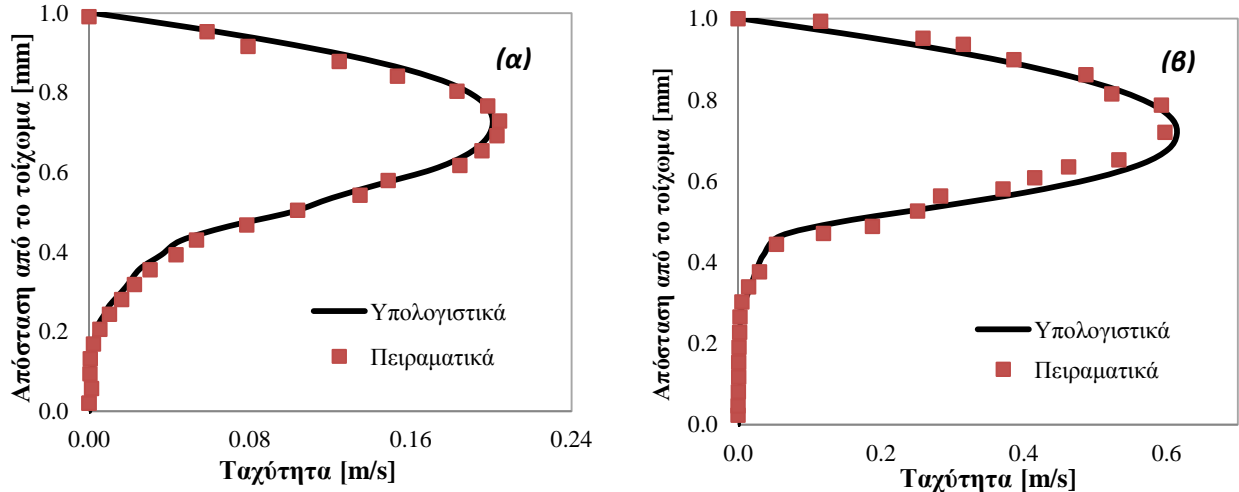
Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί με χρήση κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού (αδιάστατες εκφράσεις του ύψους και του μήκους των εμποδίων καθώς και της απόστασης μεταξύ δυο διαδοχικών εμποδίων) στη διαμόρφωση του πεδίου ροής, για διάφορες τιμές μαζικής παροχής. Ο τελικός στόχος είναι να αξιοποιηθούν τα αποτελεσμάτα σε ένα ευρύτερο ερευνητικό έργο το οποίο αφορά τη μελέτη της ανάμιξης μη-Νευτωνικών ρευστών σε μ -συσκευές και βρίσκεται σε εξέλιξη στο Εργαστήριό μας.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για την προσομοίωση της ροής μη-Νευτωνικού ρευστού σε μ -κανάλια διάφορων γεωμετριών χρησιμοποιήθηκε κώδικας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*ANSYS CFX 14.0*). Η ροή εισόδου του ρευστού θεωρήθηκε πλήρως ανεπτυγμένη (*fully developed flow*), ενώ ως οριακή συνθήκη για τα τοιχώματα χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη της μη-ολίσθησης (*no-slip condition*). Καθώς η ροή θεωρείται στρωτή χρησιμοποιήθηκε η απευθείας αριθμητική προσομοίωση (*Direct Numerical Simulation, DNS*) για την επίλυση των εξισώσεων συνέχειας και ορμής. Στις ίδιες γεωμετρίες

εκτός από μη-Νευτώνικά ρευστά μελετήθηκε και η ροή Νευτώνικου ρευστού, αντίστοιχων ιδιοτήτων.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του καναλιού πραγματοποιήθηκε αρχικά με βάση συγκεκριμένη πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριό μας^[13]. Η κατανομή της ταχύτητας, για διαφορετικές παροχές ρευστού, χρησιμοποιείται ως κριτήριο σύγκρισης του υπολογιστικού κώδικα με τα πειραματικά δεδομένα. Προκύπτει ότι τα αποτελέσματα του κώδικα *CFD* είναι σε πολύ καλή συμφωνία (απόκλιση μικρότερη από 10%) με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο **Σχήμα 2** παρουσιάζεται μία τυπική σύγκριση των κατανομών ταχύτητας για μαζικές παροχές 200 ml/h (**Σχήμα 2α**) και 600 ml/h (**Σχήμα 2β**).



Σχήμα 2 : Κατανομές ταχύτητας και αξιολόγηση υπολογιστικών αποτελεσμάτων από πειραματικές μετρήσεις σε ίδια γεωμετρία: α) $Re=8$, β) $Re=24$.

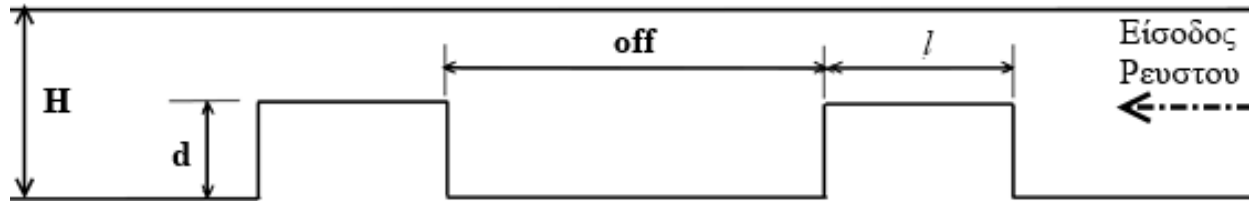
Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον επικυρωμένο κώδικα διερευνάται η επίδραση στο πεδίο ροής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τριών συνεχόμενων διαμορφώσεων σε έναν αγωγό τετραγωνικής διατομής 1mm.

Διερευνήθηκε η επίδραση του ύψους του εμποδίου (d), του μήκους του εμποδίου (l) και της απόστασης μεταξύ των εμποδίων (off) στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής μέσα στον αγωγό (**Σχήμα 3**). Για τη διευκόλυνση της μελέτης επιλέχθηκαν οι εξής αδιάστατες σχεδιαστικές παράμετροι:

- $d_H = \frac{\text{ύψος εμποδίου}}{\text{ύψος καναλιού}} = \frac{d}{H}$
- $l_d = \frac{\text{μήκος εμποδίου}}{\text{ύψος εμποδίου}} = \frac{l}{d}$
- $off_H = \frac{\text{απόσταση εμποδίων}}{\text{ύψος καναλιού}} = \frac{off}{H}$

Ως αποτέλεσμα και προς αποφυγή σπατάλης υπολογιστικής δύναμης, το μήκος του καναλιού είναι μεταβαλλόμενο και σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται ως:

$$L = 10 + 3 \cdot (d) + 2 \cdot (off) \quad [mm]$$

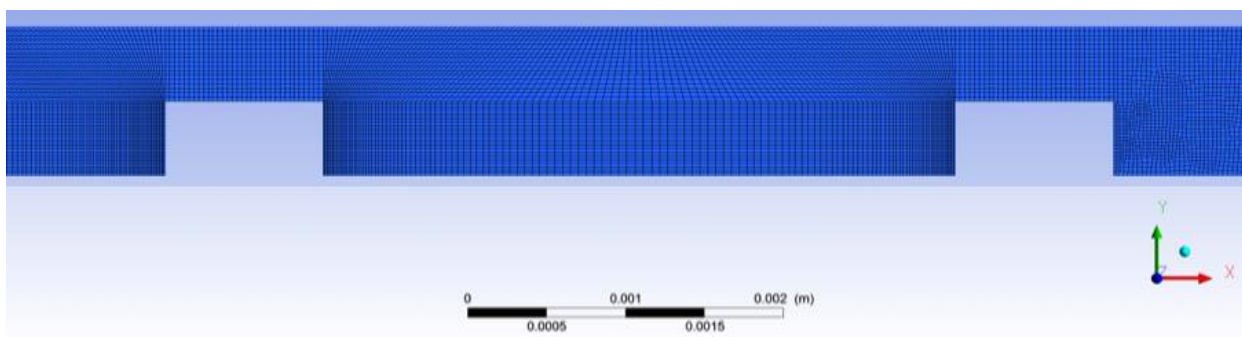


Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση μ -καναλιού με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του.

Επίσης, ως σχεδιαστική μεταβλητή επιλέγεται ο αριθμός *Reynolds*, $Re = \rho Vd / \mu_{eff}$ όπου μ_{eff} το ασυμπτωτικό ιξώδες του μη-Νευτωνικού ρευστού, δηλαδή του ιξώδους που αντιστοιχεί σε πολύ υψηλούς ρυθμούς διάτμησης. Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός *Re* αποτελεί απλώς μια αδιάστατη έκφραση της μαζικής παροχής του ρευστού.

Για την εξέταση της επίδρασης των σχεδιαστικών παραμέτρων στο πεδίο ροής, εκτελείται ένας αριθμός προσομοιώσεων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων. Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων γίνεται με τη βοήθεια Τεχνικής Σχεδιασμού Πειραμάτων (*Design of Experiments, DOE*). Οι τεχνικές *DOE* επιτρέπουν στο σχεδιαστή να εξάγει όσο το δυνατό περισσότερες πληροφορίες από έναν περιορισμένο αριθμό πειραμάτων^[14]. Στην παρούσα μελέτη, όπου εξετάζονται τέσσερις σχεδιαστικές παράμετροι, ο πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός τριών επιπέδων (δηλαδή, τρία επίπεδα τιμών για κάθε μεταβλητή) θα απαιτούσε 64 σχεδιαστικά σημεία (προσομοιώσεις). Χρησιμοποιώντας όμως την τεχνική *DOE*, και συγκεκριμένα τη μέθοδο *Box-Behnken*, ο αριθμός των προσομοιώσεων που απαιτούνται μειώνεται σε 25.

Επειδή η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται από τον αριθμό, το μέγεθος και την κατανομή των κελιών, για την επιλογή της πυκνότητας του υπολογιστικού πλέγματος γίνεται ανάλυση της εξάρτησης της λύσης από την πυκνότητά του (*grid dependence study*). Η μελέτη οδήγησε στην επιλογή και την κατασκευή μη-δομημένου πλέγματος (*unstructured grid*) που αποτελείται από περίπου 1,200,000 μέχρι 1,600,000 εξαεδρικά κελιά, ανάλογα με το μήκος του καναλιού ροής. Το πλέγμα σχεδιάζεται πιο πυκνό στην περιοχή γύρω από τα εμπόδια εφόσον εκεί αναμένονται οι διαταραχές της ροής. Μια λεπτομέρεια από ένα τυπικό πλέγμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4**.



Σχήμα 4: Λεπτομέρεια του πλέγματος για τις προσομοιώσεις του μ -καναλιού.

Η πρόβλεψη του ιξώδους του μη-Νευτωνικού ρευστού στον κώδικα *CFD* γίνεται με το μοντέλο *Herschel-Bulkley* που περιγράφεται από την **Εξ. 1**:

$$\tau = A + B\dot{\gamma}^C \quad (1)$$

όπου τ η διατμητική τάση σε Pa, A η οριακή διατμητική τάση (*yield stress*) ίση με 0.02160 Pa, B ο συντελεστής ιξώδους (*viscosity coefficient*) που ισούται με $0.01345 \text{ Pa s}^{1/C}$, γ ο ρυθμός διάτμησης σε s^{-1} και C ο δείκτης ρυθμού (*rate index*) ίσος με 0.7812. Οι παραπάνω τιμές περιγράφουν τη συμπεριφορά ρευστού ανάλογου του αίματος για ρυθμούς διάτμησης από 1 έως 1000 s^{-1} [15-16]. Για τη περίπτωση του Νευτωνικού ρευστού χρησιμοποιήθηκε το ασυμπτωτικό ιξώδες που προβλέπει το μοντέλο για υψηλούς ρυθμούς διάτμησης και είναι 0.0035 Pa s .

Η ροή εισόδου θεωρήθηκε πλήρως ανεπτυγμένη (*fully developed flow*), ενώ ως οριακή συνθήκη εξόδου ορίστηκε η μηδενική στατική πίεση. Για τα τοιχώματα του καναλιού χρησιμοποιήθηκε η συνθήκη μη-ολίσθησης (*no-slip condition*) και, τέλος, για εξοικονόμηση υπολογιστικής δύναμης, επιλέχθηκε κατάλληλα επίπεδο συμμετρίας (*symmetry*).

Οι προσομοιώσεις διεξάγονται σε συστοιχία υπολογιστών υψηλής απόδοσης (*High Performance Cluster, HPC*) για παράλληλη επεξεργασία η οποία αποτελείται από 36 επεξεργαστές 64-bit και 80 GB RAM. Για κάθε προσομοίωση κατασκευάζεται ένα υπολογιστικό μοντέλο της μ -συσκευής χρησιμοποιώντας τις παραμετρικές δυνατότητες του λογισμικού *ANSYS Workbench*[®] 14.0.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η επίδραση του ύψους, του μήκους και της απόστασης μεταξύ των εμποδίων στην κατανομή της ταχύτητας και στη συνολική πτώση πίεσης στο μ -κανάλι. Πιο συγκεκριμένα, για τις πέντε χαρακτηριστικές περιπτώσεις του **Πίνακα 1**, γίνεται σύγκριση της κατανομής της ταχύτητας σε διάφορα σημεία του μ -καναλιού, δηλαδή σε απόσταση 1mm μετά το εμπόδιο, στη μέση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων και 1mm πριν το επόμενο εμπόδιο.

Πίνακας 1: Σχεδιαστικά σημεία προσομοιώσεων.

DOE #	d_H	l_d	off_H	Re	Πτώση πίεσης (Pa/mm)
1	0.4	3.5	4.5	8	8.8
2	0.8	3.5	4.5	8	98.3
3	0.6	2	3	16	33.9
4	0.6	5	3	16	44.4
5	0.6	2	6	16	28.3

Όσον αφορά στην πτώση πίεσης, από τις περιπτώσεις *DOE # 1-2* προκύπτει ότι μία αύξηση κατά 50% του ύψους του εμποδίου προκαλεί 91% αύξηση της πτώσης πίεσης ανά μονάδα μήκους, τιμή ιδιαίτερα υψηλή λαμβάνοντας υπόψη ότι η παροχή στην προκειμένη περίπτωση είναι χαμηλή. Επίσης, εμπόδια διπλάσιου περίπου μήκους προκαλούν αύξηση της πτώσης πίεσης κατά 24% (*DOE # 3-4*). Τέλος, από τις περιπτώσεις *DOE # 3-5* φαίνεται ότι η αύξηση της απόστασης των εμποδίων οδηγεί σε μείωση της πτώσης πίεσης, εφόσον σε αυτή την περίπτωση η ροή διαμορφώνεται μεταξύ των εμποδίων με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας.

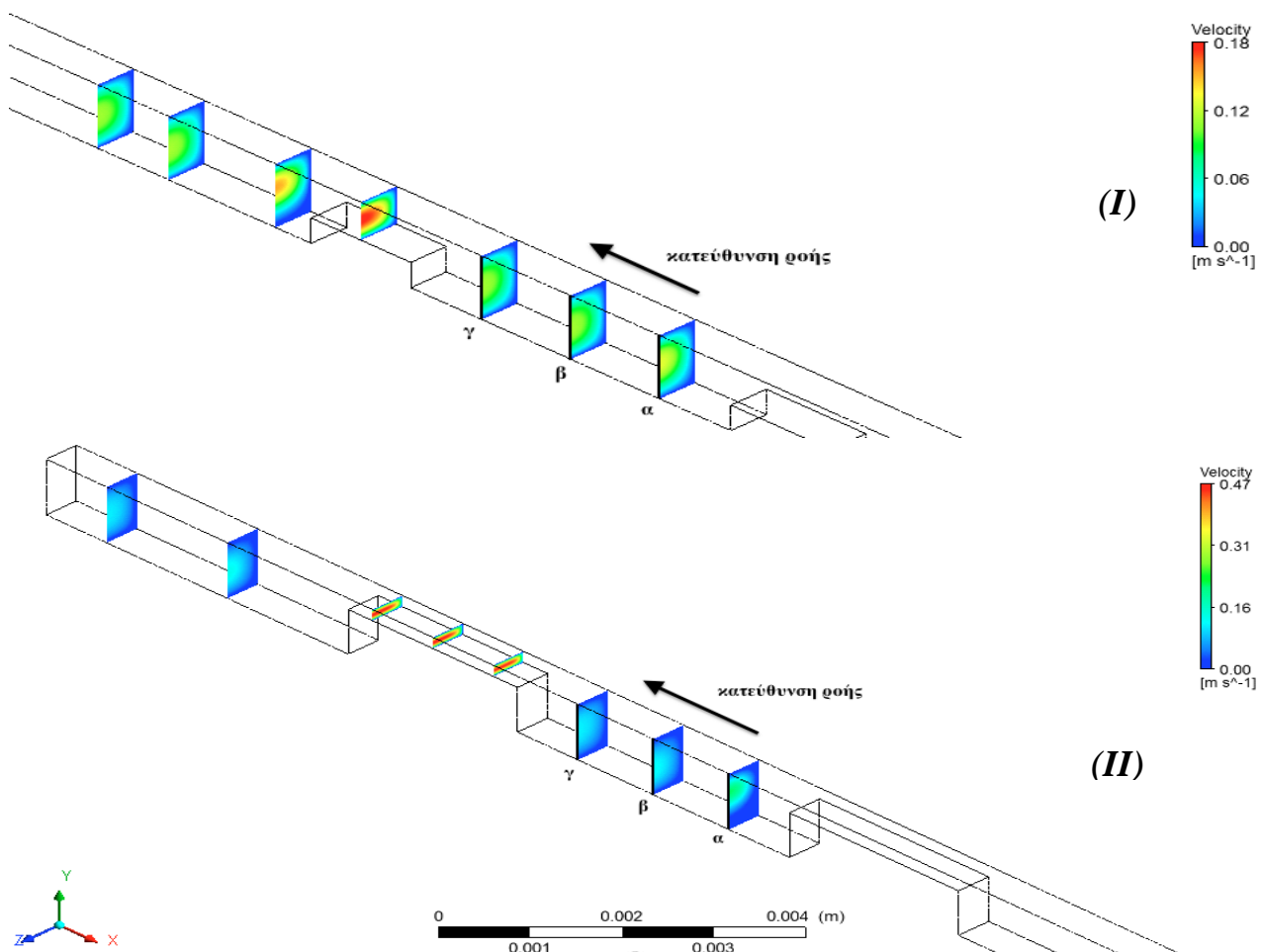
Πραγματοποιούνται οι παρακάτω συγκρίσεις προσομοιώσεων με στόχο την αναπαράσταση των διαφοροποιήσεων στο πεδίο ταχύτητας για χαρακτηριστικές μεταβολές των σχεδιαστικών μεταβλητών:

- *DOE # 1-2* (μελέτη επίδρασης ύψους των εμποδίων)
- *DOE # 3-4* (μελέτη επίδρασης μήκους των εμποδίων)
- *DOE # 3-5* (μελέτη επίδρασης απόστασης εμποδίων)

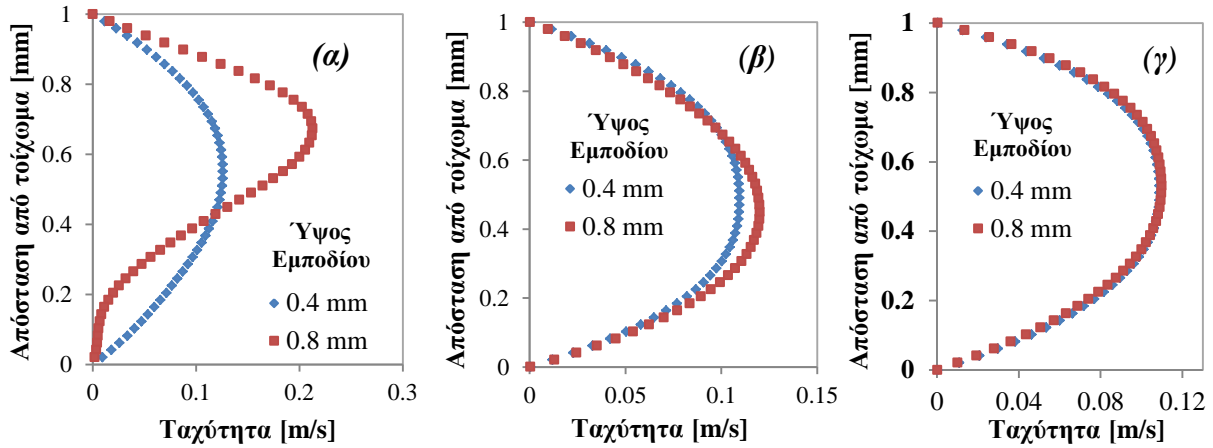
Παρατηρώντας το **Σχήμα 5** προκύπτει ότι σε εμπόδια που καταλαμβάνουν το 40% του ύψους ($d_H=0.4$) (**Σχήμα 5-I**), η ταχύτητα πάνω από τα εμπόδια είναι κατά 35% χαμηλότερη απ' ό,τι στην περίπτωση εμποδίων με $d_H=0.8$ (**Σχήμα 5-II**). Επίσης, η περιοχή αναστροφής της ροής στην πρώτη περίπτωση είναι μικρότερη (περίπου η μισή) από τη δεύτερη περίπτωση.

Το συμπέρασμα αυτό γίνεται εμφανέστερο στο **Σχήμα 6α**, όπου παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας μετά το εμπόδιο. Από το **Σχήμα 6β** προκύπτει ότι στη μέση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων, στην περίπτωση του χαμηλότερου εμποδίου, η ροή είναι σχεδόν πλήρως ανεπτυγμένη ενώ, στη δεύτερη περίπτωση, η ροή δεν έχει διαμορφωθεί πλήρως. Στο **Σχήμα 6γ** φαίνεται ότι το ύψος του εμποδίου δεν επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα του μη-Νευτωνικού ρευστού 1mm πριν το εμπόδιο και η ροή παραμένει ανεπτυγμένη και στις δύο περιπτώσεις.

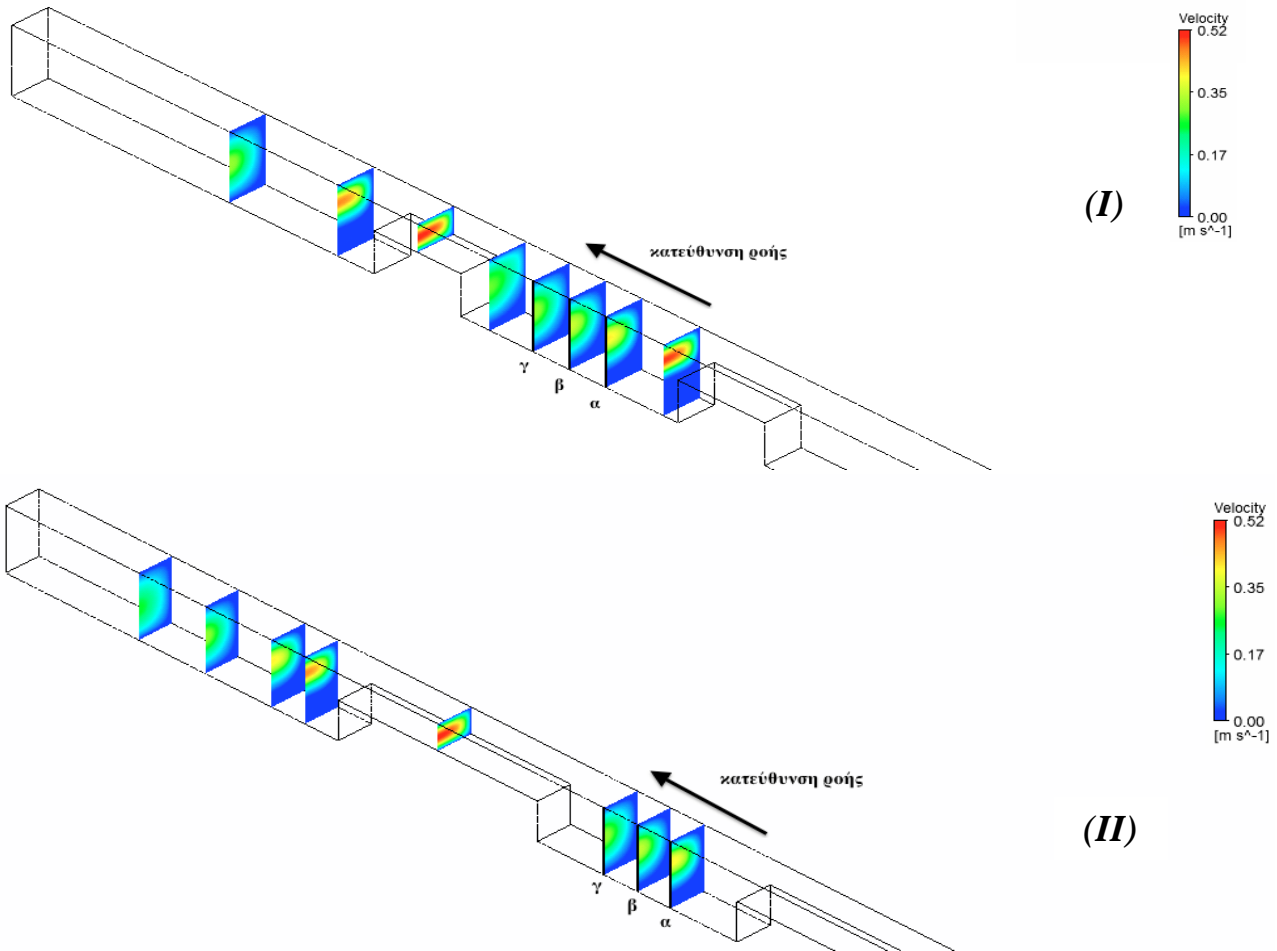
Από το **Σχήμα 7** προκύπτει ότι το μήκος των εμποδίων δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή της ταχύτητας. Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τις κατανομές της ταχύτητας (**Σχήμα 8**). Στο **Σχήμα 8α** φαίνεται ότι η περιοχή αναστροφής της ροής έχει το ίδιο μήκος και στις δύο περιπτώσεις, ενώ παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση στην ταχύτητα ανάμεσα στα δύο συνεχόμενα εμπόδια (**Σχήματα 8β & 8γ**).



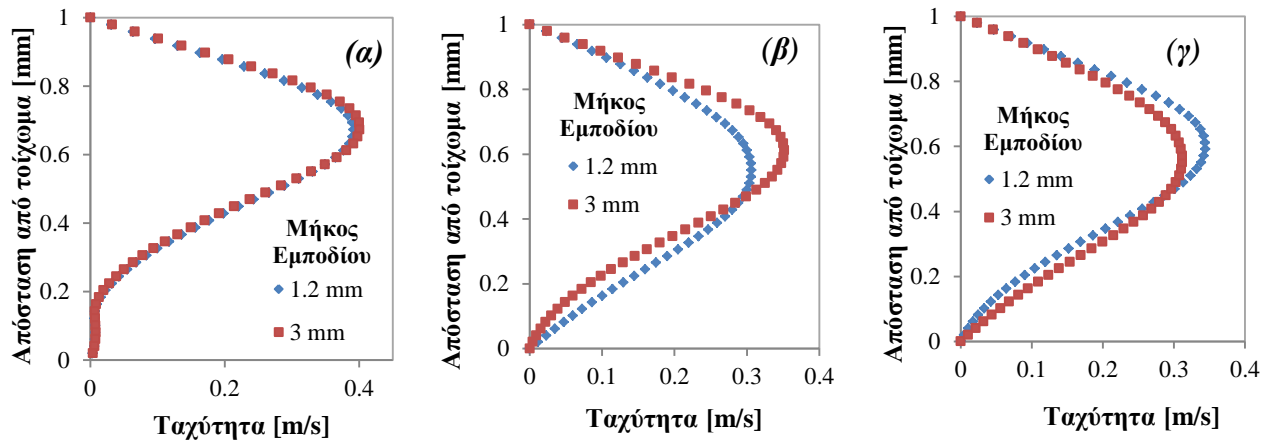
Σχήμα 5: Κατανομή ταχύτητας μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου εμποδίου: I) ύψος εμποδίου 0.4mm και II) ύψος εμποδίου 0.8mm.



Σχήμα 6: Επίδραση του ύψους του εμποδίου στην κατανομή της ταχύτητας για τις δύο περιπτώσεις στα σημεία: α) 1mm μετά το δεύτερο εμπόδιο, β) μέση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων και γ) 1mm πριν το τρίτο εμπόδιο.

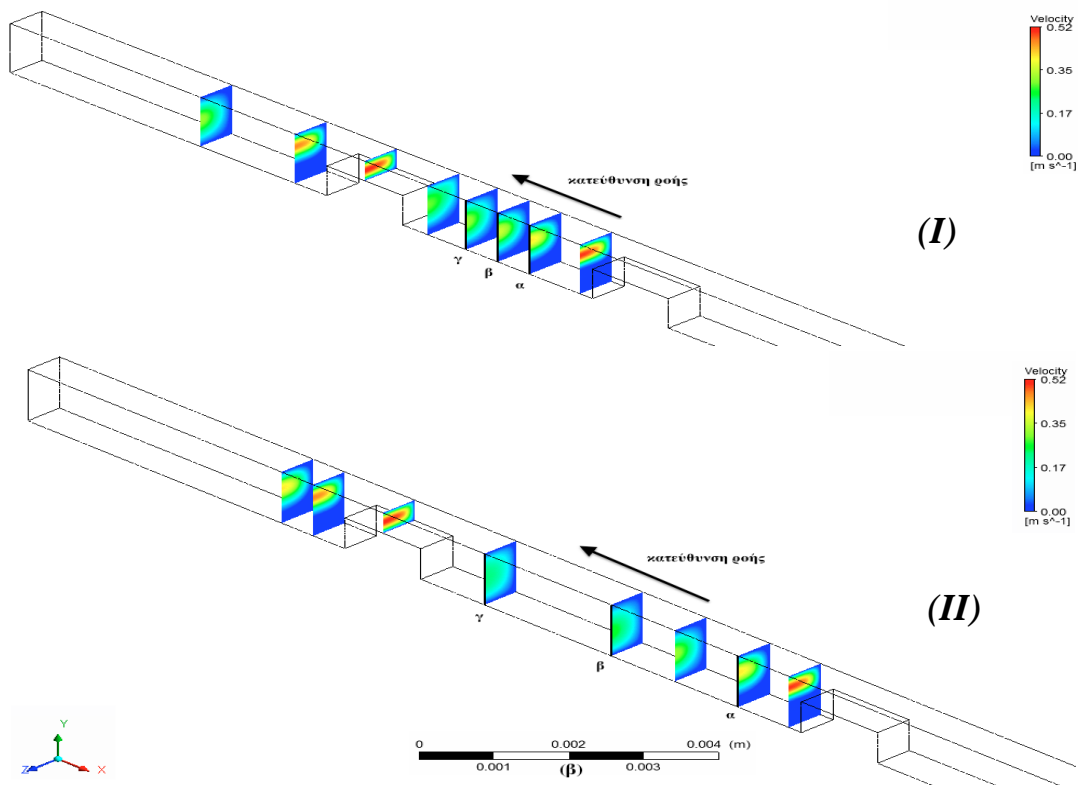


Σχήμα 7: Κατανομή ταχύτητας μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου εμποδίου: I) για μήκος εμποδίου 1.2 mm και II) για μήκος εμποδίου 3 mm.

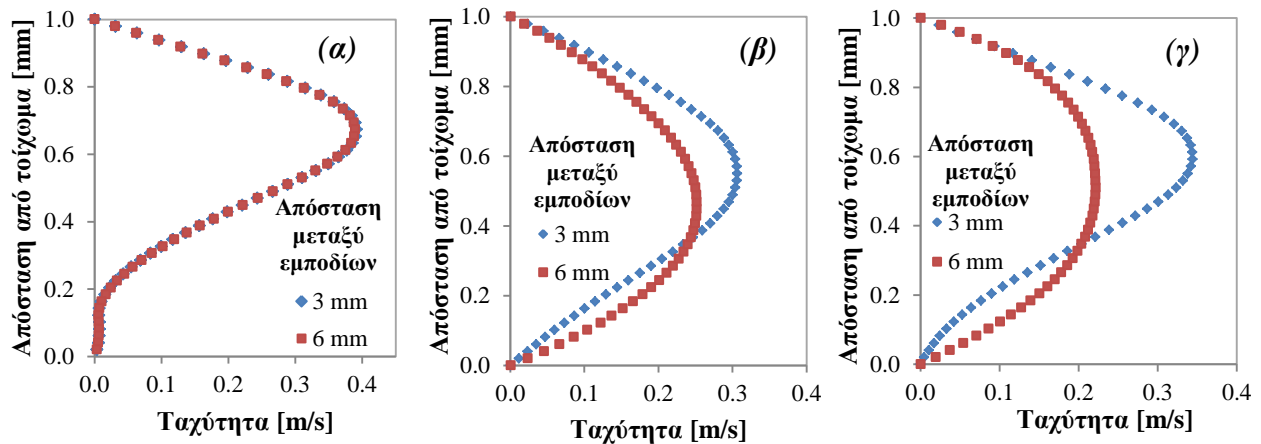


Σχήμα 8: Επίδραση του μήκους του εμποδίου στην κατανομή της ταχύτητας για: α) 1mm μετά το δεύτερο εμπόδιο, β) μέση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων και γ) 1mm πριν το τρίτο εμπόδιο.

Από τα **Σχήματα 9 & 10α**, προκύπτει ότι η περιοχή αναστροφής της ροής στις δύο περιπτώσεις είναι του ίδιου μεγέθους. Στα **Σχήματα 9 & 10β** φαίνεται ότι η ροή επανέρχεται στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή της σε απόσταση 3mm μετά το εμπόδιο και, στην περίπτωση εμποδίων που απέχουν 6mm, φτάνει με αυτή τη διαμόρφωση στο επόμενο εμπόδιο (**Σχήμα 10γ**). Η διαταραχή της ροής στην περίπτωση των εμποδίων που απέχουν 3mm οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων στην περιοχή μεταξύ των εμποδίων (**Σχήματα 10β & 10γ**).



Σχήμα 9: Κατανομή ταχύτητας μεταξύ του δευτέρου και του τρίτου εμποδίου: I) για απόσταση εμποδίων 3 mm και II) για απόσταση εμποδίων 6 mm.



Σχήμα 10: Επίδραση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών εμποδίων στην κατανομή της ταχύτητας για τις δύο περιπτώσεις στα σημεία: α) 1mm μετά το δεύτερο εμπόδιο, β) μέση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων και γ) 1mm πριν το τρίτο εμπόδιο.

Το μήκος της περιοχής ανακυκλοφορίας x_r (Σχήμα 1α) είναι μία παράμετρος η οποία εξαρτάται σημαντικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εμποδίου καθώς από και τον αριθμό Re ^[6]. Στον Πίνακα 2 δίνονται για τυπικές περιπτώσεις των σχεδιαστικών παραμέτρων τα μήκη ανακυκλοφορίας για τη περίπτωση ροής μη-Νευτωνικού και Νευτωνικού ρευστού. Όπως είναι εμφανές για την ροή μη-Νευτωνικών ρευστών, το μήκος της περιοχής ανακυκλοφορίας αυξάνεται σε σχέση με τη ροή ενός Νευτωνικού ρευστού για όλες τις γεωμετρικές παραμέτρους των εμποδίων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

Πίνακας 2: Μήκος περιοχής ανακυκλοφορίας x_r για τα σχεδιαστικά σημεία των προσομοιώσεων.

DOE #	d_H	l_d	off_H	Re	x_r (μη-Νευτωνικό, μm)	x_r (Νευτωνικό, μm)
1	0.4	3.5	4.5	8	1100	1000
2	0.8	3.5	4.5	8	1300	1100
3	0.6	2	3	16	1250	1050
4	0.6	5	3	16	1200	1100
5	0.6	2	6	16	1210	1130

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία εξετάστηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διαμορφώσεων (βαθμίδων ανάβασης/κατάβασης) του μ -καναλιού στο πεδίο ροής ενός μη-Νευτωνικού ρευστού. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ύψους οδηγεί σε αύξηση της περιοχής αναστροφής της ροής, περιοχή ιδιαίτερα κρίσιμη για την ανάμιξη, ωστόσο προκαλεί, όπως αναμενόταν, σημαντική αύξηση της πτώσης πίεσης (Πίνακας 1), γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση του συστήματος. Επίσης, η αύξηση της απόστασης μεταξύ των εμποδίων συντελεί στην εξομάλυνση της ροής με αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες σε πτώση πίεσης.

Η παρούσα μελέτη, η οποία αποτελεί μέρος διπλωματικής εργασίας^[17] αναμένεται να συνεισφέρει στην έρευνα των μ -συσκευών με ρευστά που παρουσιάζουν μη-Νευτωνική συμπεριφορά και φέρουν γεωμετρικές διαμορφώσεις αντίστοιχες με μία βαθμίδα ανάβασης και κατάβασης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τον Καθηγητή Σ.Β. Παρά για τις πολύτιμες παρατηρήσεις και προτάσεις του, τον Α.Δ. Αναστασίου, Υποψήφιο Διδάκτορα και την Α. Βάρκα, φοιτήτρια του τμήματος Χημικών Μηχανικών, για τα πειραματικά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hessel, V., Löwe, H., Schönfeld, F., 2005 Micromixers—a review on passive and active mixing principles. *Chem. Eng. Sci.* **60** (8), 2479-501.
- [2] Stone, A. H., Stroock, D. A., Ajdari, A., 2004 Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab on-a-chip. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **36**, 381–411.
- [3] Beebe, J. D., Mensing, A. G., Walker, M. G., 2002 Physics and applications of microfluids in biology. *Ann. Rev. Biomed. Eng.*, **4**, 261-86.
- [4] Stroock, D. A., Dertinger, W. K. S., Ajdari A., Mezic I., Stone A. H., Whitesides M. G., 2002 Chaotic mixers for microchannels. *Science*, **295**, 647-51.
- [5] Tang, H. G., Lu, B. Y., Zhang, S. X., Wang, F. F., Tao, Q. W., 2012 Experimental investigation of non-Newtonian liquid flow in microchannels. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **173**, 21-9.
- [6] Mouza, A.A., Pantzali, M.N., Paras, S.V., Tihon, J., 2005 Experimental and numerical study of backward-facing step flow. *5th National Chemical Engineering Conference*, Thessaloniki, Greece.
- [7] Ansari, A. M., Kim K., Anwar K., Kim S. M., 2012 Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs, *Chem. Eng. J.*, **181**(2), 846-50.
- [8] Judy, J., Maynes, D., Webb, B., 2002 Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. *Heat Mass Transfer*, **45**, 3477-91.
- [9] Li, Z., He, L. H., Tang, H.G., Tao, Q., 2007 Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes. *Heat Mass Transfer*, **50**, 3447-59.
- [10] Wilding, P, Shoffner, A. M., Kircka, J. L., 1994 Manipulation and flow of biological fluids in straight channels micromachined in silicon. *Clin. Chem*, **40**, 43-57.
- [11] Srivastava, N., Burns, A. M., 2006 Analysis of non-Newtonian liquids using a microfluidic capillary viscometer. *Anal. Chem*, **78**, 1690-708.
- [12] Koo, J., Kleinstreuer. C., 2003 Liquid flow in microchannels: experimental observations and computational analyses of microfluidics effects, *J. Micromech. Microeng.*, **13**, 568-79.
- [13] Βάρκα, Α., 2013. Μελέτη της ροής αναλόγου αίματος σε μ-αγωγό με στένωση. *9^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής*, Αθήνα, Ελλάδα,
- [14] Box, G.E.P., Hunter, J.S., Hunter, W.G., 2005 *Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery*: Wiley-Interscience New York.
- [15] Choi, W.H., Barakat I. A., 2005 Numerical study of the impact of non-Newtonian blood behavior on flow over a two-dimensional backward facing step. *Biorheology* **42**, 493-509.
- [16] Anastasiou, A.D., Spyrogianni, A.S., Koskinas, K.C., Giannoglou, G.D., Paras S.V., 2012 *Med Eng Phys*, **34**(2), 211-218.
- [17] Γλουστιάνου, Π.Κ., 2013 Υπολογιστική μελέτη της ροής μη-Νευτωνικού ρευστού σε μικροαγωγό με στενώσεις, *Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.