



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ
ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ
ΔΙΕΡΕΥΝΙΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ**

Καστανιάς Π. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής

*Στους Γονείς μου,
Στον καθηγητή, Ανδρόνικο Ε. Φιλίο,
Στη Σοφία.*

II ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ’

<i>Είδος Εργασίας</i>	Διπλωματική Εργασία	
<i>Τίτλος Εργασίας</i>	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	
<i>Σπουδαστής</i>	ΚΑΣΤΑΝΙΑΣ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
<i>Επιβλέπων Καθηγ.</i>	ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής	
<i>Τμήμα</i>	Μηχανολόγων Μηχανικών	
<i>Τομέας</i>	Ρευστών	
<i>Ημερομηνία</i>	10 / 2010	
<i>Λέξεις κλειδιά</i>	Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Μικροανάμιξη, Μικρορευστονική	
<p><u>Περίληψη :</u></p> <p>Σε αυτή την διπλωματική εργασία παρουσιάζονται διάφορα συστήματα και τεχνικές μικροανάμιξης που εμφανίστηκαν και χρησιμοποιούνται έως και σήμερα με παραλλαγές και βελτιώσεις. Γίνεται εμβάθυνση στην διαδικασία ανάμιξης, όπου αξιοποιείται η μοριακή διάχυση ή το φαινόμενο Dean, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε δομής. Επιπλέον, εντοπίζεται η αποδοτικότητα του κάθε μικροαναμικτή, με στόχο την χρήση του σε υβριδικά μοντέλα μικροανάμιξης τα οποία συνδυάζουν νέες τεχνολογίες με συμβατικές.</p> <p>Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, επιχειρείται αριθμητική επίλυση της ροής σε μικροαναμικτή τύπου T, με έναν γνωστό εμπορικό κώδικα CFD, με σκοπό την σύγκριση των διαφορετικών δομών που δημιουργούνται με διαμόρφωση εμποδίων – διαφραγμάτων στο μικροκανάλι ανάμιξης και τη μελέτη της συμπεριφοράς και της απόδοσής τους σε ένα ευρύ φάσμα αριθμού Reynolds. Επίσης, διερευνάται η βέλτιστη εσωτερική διάταξη των διαφραγμάτων (βέλτιστο μήκος τους κάθετα στη ροή και βέλτιστη μεταξύ τους απόσταση), με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του βαθμού ανάμιξης και την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας (πτώση πίεσης).</p>		

<i>Type of report</i>	Diploma Thesis	
<i>Title</i>	NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW IN MICROMIXER OF TYPE T UP SERIES WITH INTERNAL CONFIGURATION OF LINE OF DIAPHRAGMS AND INVESTIGATION OF MOST OPTIMAL GEOMETRY	
<i>Student (s)</i>	KASTANIAS	KONSTANTINOS
<i>Supervisor</i>	ANAGNOSTOPOULOS JOHN, Assistant Professor	
<i>Department</i>	Mechanical Engineering	
<i>Section</i>	Fluids	
<i>Date</i>	10 / 2010	
<i>Keywords</i>	Computational Fluid Dynamics (CFD), Micromixing, Microfluidics	
<p>Abstract :</p> <p>In this dissertation we present various systems and techniques of micromixing that initially were presented and still being used until today with some variants even improvements. We get deeper into the mixing process, byexploiting the molecular diffusion or Dean phenomenon, while simultaneously we present the advantages and the disadvantages of each structure. Moreover, the efficiency of each micromixer is being located, aiming to be used in hybrid micromixing models, were new technologies are being combined with conventional.</p> <p>On the second part of this dissertation, a numerical solution of flow in a micromixer type T (know with the commercial code CFD), isbeing attempted in order to compare the different structures that are created with configuration of obstacles - diaphragms in the microchannel of mixture. We also examine the behavior and the performance of those structures, into a wide renge of the Reynolds number. In addition, we examine the optimal internal provision of diaphragms (diaphragms optimal length vertical at the flow and optimal from each other distance), with criterion at the same time the maximization of the degree of mixing and the minimization of energy losses (pressure drop).</p>		

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

a	: Αδιάστατος κυματικός αριθμός
a_{grav}	: Διάνυσμα επιτάχυνσης βαρύτητας
c	: Ειδική θερμότητα
c_p	: Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση
c_v	: Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο
d	: Υδραυλική διάμετρος
g_w	: Ροή της ϕ από την δυτική επιφάνεια του όγκου ελέγχου
h	: Ειδική ενθαλπία
h	: Ειδική ενθαλπία ηρεμίας
i_l	: Μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση l
k	: Κινητική ενέργεια τύρβης
l	: Κλίμακα μήκους τύρβης
l_{mol}	: Μέση ελεύθερη διαδρομή
n	: Μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια
p	: Υδροστατική πίεση (N/m^2)
q	: Ρυθμός ροής θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας
u	: Ταχύτητα
w	: Αξονική ταχύτητα
A	: Εμβαδόν επιφανείας
ASM	: (Asymmetric Serpentine Micromixer) Ασύμμετρος ελικοειδής αναμίκτης
C_e	: Ροή μάζας από την ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου = $(\rho u)_e A_e$
CE	: Ροή ποσότητας ϕ από την ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου = $(\rho u)_e A_e \phi_e$
C_r	: Αριθμός Courant
D_e	: Γενικευμένος συντελεστής διάχυσης στην ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου
DE	: Ροή λόγω διάχυσης από την ανατολική επιφάνεια του όγκου ελέγχου
D_l	: Συντελεστής διάχυσης του συστατικού l στο μίγμα
M_A	: Μοριακό βάρος συστατικού A
M^*	: Αρμονικός μέσος όρος του μοριακού βάρους M
N	: Αριθμός μορίων σε ένα kmole = 6.022×10^{26}
Pe	: Αριθμός Peclet
Pec	: Τοπικός αριθμός Peclet
P-SAR	: Planar Split-And-Recombine (επίπεδη διάσπαση και επανασύνδεση)
Q	: Παροχή
P	: Βρεχόμενη περίμετρος

R	: Παγκόσμια σταθερά των αερίων
Re	: Αριθμός Reynolds
S	: Παράγοντας αναλογίας για ποσοστό μορίων με ορθό προσανατολισμό
Sh	: Ρυθμός παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου
SAR	: Split-And-Recombine (διάσπαση και επανασύνδεση)
T	: Θερμοκρασία
\bar{T}	: Μέση θερμοκρασία
V	: Όγκος
α	: Συντελεστής θερμικής διαχυτότητας
γ	: Αδιάστατος συντελεστής διαχυτότητας
δ	: Πάχος λεπτού στρώματος ροής
θ	: Γωνία
κ	: Αδιάστατος αριθμός δίνης
λ	: Συντελεστής
λ	: Μήκους κύματος
μ	: Δυναμικό ιξώδες
ν	: Κινηματικό ιξώδες
ρ	: Πυκνότητα
$\bar{\rho}$: Πυκνότητα αναφοράς
t_i	: Διάνυσμα της ιξώδες διατμητικής τάσης
ϕ	: Εξαρτημένη μεταβλητή
Γ_h	: Συντελεστής εναλλαγής για την θερμότητα
Γ_I	: Συντελεστής εναλλαγής του συστατικού I στο μίγμα
Δp	: Πτώση πίεσης
Δt	: Απόσταση δύο πλεγματικών σημείων στην εξέλιξη του χρόνου
Δx	: Απόσταση δύο πλεγματικών σημείων στη x – διεύθυνση
E	: Ενέργεια
E	: Ενέργεια ενεργοποίησης, τάξης μεγέθους 10^8 J/kmole

Περιεχόμενα

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Σκοπός και οργάνωση εργασίας	2
1.2	Μικρορευστονική	2
1.3	Μικροανάμιξη	3
2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ	7
2.1	Στρατιγηκές μικροανάμιξης	8
2.1.1	Ενεργητικοί μικροαναμίκτες	8
2.1.2	Παθητικοί μικροαναμίκτες	9
2.1.2.1	Ελασματοποίηση	9
2.1.2.2	Έγχυση	12
2.1.2.3	Σταγονίδιο	12
2.1.2.4	Περιστροφή	13
2.2	Δινοροές	20
2.3	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα τεχνικών μικροανάμιξης	30
3	ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ	35
	Εισαγωγή	36
3.1	Σπειροειδείς μικροαναμίκτες	37
3.2	Αποσύνδεση και επανασύνδεση (P-SAR) μικροαναμίκτης	42
3.3	Ασύμμετρη ελικοειδής μίξη (ASM)	49
3.3.1	Απεικόνιση ροής σε ένα κυρτό κανάλι με μία απότομη αύξηση διατομής	50
3.3.2	Ασύμμετρος ελικοειδής αναμίκτης (ASM)	51
3.4	Υβριδικές προσεγγίσεις μικροανάμιξης	55
3.4.1	ASM που συνδιάζονται με λοξά εμπόδια	56
3.4.2	Απεικόνιση ροής	59
3.5	ASM σε συνδυασμό με σπειροειδές τμήμα	59
3.6	Ηλεκτροκινητική μίξη στα συστήματα μικροανάμιξης	62

4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T	69
4.1	Κατασκευή όγκου και υπολογιστικού πλέγματος	70
4.2	Ανάλυση της ροής σε λογισμικό CFD	73
4.3	Επιλογή υπολογιστικού πλέγματος	75
5	ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ	79
5.1	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 25%	80
5.2	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 25% και διαφορετικές αποστάσεις διαφραγμάτων	. 91
5.3	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 60%	93
5.4	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 50%	103
5.3	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	108
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	113
6.1	Σύνοψη – Συμπεράσματα	114
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	115
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117

VIII ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ’

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1	Σκοπός και οργάνωση εργασίας	2
1.2	Μικρορρευστονική	2
1.3	Μικροανάμιξη	3

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτή την διπλωματική εξετάζεται η μικροανάμιξη ως μια ολοένα αναπτυσσόμενη διεργασία που εντάσσεται στην επιστήμη της μικρορευστονικής. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι μικροανάμιξης, με βάση τις οποίες έχουν δημιουργηθεί οι διάφορες γεωμετρίες των μικροαναμικτών, που αναλύονται στο τρίτο κεφάλαιο. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων, με στόχο να ξεχωρίσουν οι πιο συμφέρουσες, από άποψης ευκολίας κατασκευής και αποτελεσματικότητας ανάμιξης. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής, μελετάται αριθμητικά η ανάμιξη σε έναν μικροαναμικτή τύπου T με εσωτερική διαμόρφωση από σειρά διαφραγμάτων, και διερευνάται η δυνατότητα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του ως συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

1.2 ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΗ

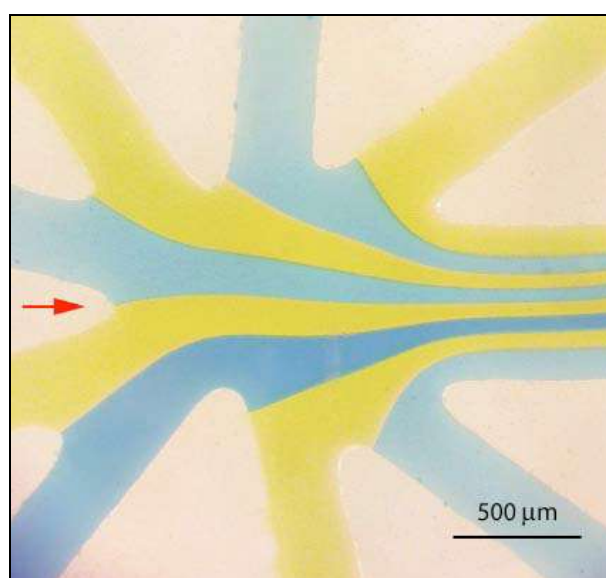
Η μικρορευστονική είναι η επιστήμη και η τεχνολογία της επεξεργασίας και του χειρισμού των ρευστών στους αγωγούς που έχουν διαστάσεις περίπου 10μm έως και λίγες εκατοντάδες μm, και η τεχνολογία αυτή γίνεται όλο και περισσότερο σημαντική λόγω και των επικρατουσών τάσεων σε πολλές χημικές και βιολογικές εφαρμογές ανάμιξης και ανάλυσης ουσιών. Η δυνατότητα να αντικατασταθεί η μεγάλης κλίμακας συμβατική εργαστηριακή οργάνωση με τα μικρογραφημένα και ανεξάρτητα συστήματα προσφέρει ποικίλα πλεονεκτήματα, που περιλαμβάνουν τις μειωμένες δαπάνες υλικού, τη μικρή κατανάλωση αντιδραστηρίων (ουσιών προς ανάμιξη με τα βασικά στοιχεία προς ανάλυση), τις γρηγορότερες και ταχύτερες αναλύσεις, και την ικανότητα της λειτουργίας σε μια μαζική παράλληλη κλίμακα, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός απόδοσης. Επιπλέον, αυτή η τεχνολογία αποσκοπεί και στην εκτέλεση των διαδικασιών που είναι εξαιρετικά δύσκολο ή αδύνατο να πραγματοποιηθούν στην μακροκλίμακα.

Αν και αυτή η τεχνολογία βρίσκεται στα πρώτα στάδια ανάπτυξής της, τα μικροσυστήματα έχουν γίνει αναπόφευκτα σε διάφορους καθιερωμένους και αναδυόμενους ερευνητικούς τομείς συμπεριλαμβανομένου και του DNA, της πρωτεϊνικής ανάλυσης, της αλυσιδωτής αντίδρασης πολυμερών (polymerase chain reaction - PCR), την ταξινόμηση νανορευστών, τον χειρισμό ρευστού, της συνθετικής χημείας και της κατάλυσης, και της μικροανάμιξης. Από οικονομικής άποψης, η αγορά biochip

αντιπροσώπευσε από μόνη της μια επιχείρηση 400 εκατομμυρίων δολαρίων το έτος 2000, ενώ το 2009 είχε αυξήσει την δραστηριότητά της τουλάχιστον στο δεκαπλάσιο. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις αυτών των όλο και πιο περίπλοκων στόχων ανάλυσης, αυτή η τεχνολογία υιοθετείται επιτυχώς στην έρευνα μ TAS (Micro Total Analysis Systems) (ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης μικροϋπολογιστών), η οποία παρέχει την δυνατότητα να αναμιχθούν γρήγορα δύο ή περισσότερα ρεύματα αντιδραστηρίων σε μια πολύ μικρή από άποψης διαστάσεων συσκευή.

1.3 ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗ

Η μίξη μικρορευστών (μικροανάμιξη) είναι μια βασική διαδικασία σε ένα πλήθος μικρογραφημένων συστημάτων ανάλυσης. Μερικές από τις πρόσφατες απαιτήσεις, περιλαμβάνουν τα πρωτεϊνικά κρύσταλλα, τις κινητικές μελέτες της πρωτεΐνης, τους βιοαισθητήρες, το σχηματισμό φύτρων για την αύξηση της υβριδοποίησης, τις σειρές μικροϋπολογιστών ανάλυσης DNA, τη μίξη των βιολογικών αντιδραστηρίων, και τις κινητικές μελέτες του υγρού – αντιδράσεις φάσεως υγρών. Αν και είναι θεμελιώδους σπουδαιότητας, για τα ρεύματα των αντιδραστηρίων στους μικρούς αγωγούς, συνεχίζει να θέτει τις προκλήσεις εξ αιτίας των περιορισμών που συνδέονται με τη λειτουργία σε ένα ιδιαίτερα δυσμενές καθεστώς στρωτής ροής που διέπεται από τη μοριακή διάχυση (Σχήμα I-1).



Σχήμα 1-1. Στρωτή ροή microchannel. Τα υδάτινα ρεύματα που εμφανίζονται με τις μπλε και κίτρινες χρωστικές ουσίες στην είσοδο microchannel (πλάτους 600 μ m, ύψους 29 μ m) σε ένα ποσοστό ροής που αντιστοιχεί σε $Re \sim 5$. Εισαγωγή ρευστών, ελλείπει οποιασδήποτε αναταραχής.

Χαρακτηριστικά, η ροή στους επίπεδους αγωγούς μικροκλίμακας, χαρακτηρίζεται από τους αριθμούς Reynolds (Re) που είναι αρκετά κάτω από την περιοχή δημιουργίας τύρβης (συνήθως, $Re < 2000$ σε μικροκλίμακα - macroscale). Ο αριθμός Reynolds αντιπροσωπεύει την αναλογία μεταξύ των αδρανών στοιχείων των καναλιών και του ιξώδους των ρευστών και δίνεται από την εξίσωση:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (1-1)$$

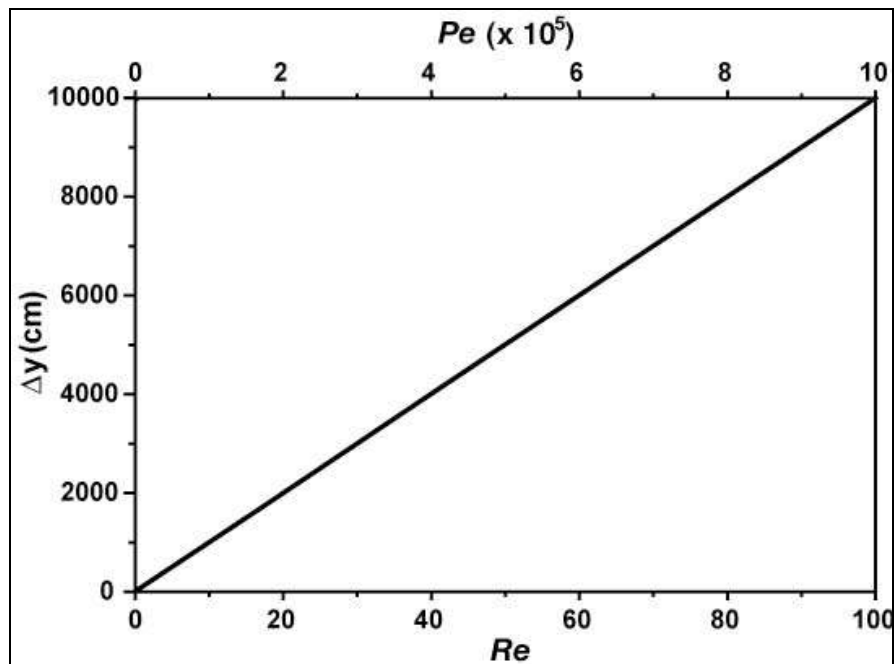
όπου το V είναι η μέση ταχύτητα ροής, το d είναι η υδραυλική διάμετρος καναλιών και το ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Για $Re < 100$ σε αυτά τα ομαλά επίπεδα μικροκανάλια, η μοριακή διάχυση είναι η κυρίαρχη κινητήρια δύναμη για να εμφανιστεί οποιαδήποτε μίξη. Επιπλέον, τιμές του αριθμού Péclet (Pe), που είναι η αναλογία μεταξύ της ροής μάζας λόγω της μεταφοράς και της εγκάρσιας διάχυσης, είναι σχετικά υψηλός στα μικροκανάλια ($Pe > 100$):

$$Pe = \frac{V \cdot d}{D_{mol}} \quad (1-2)$$

όπου D_{mol} μοριακή διάχυση. Αυτή η σχετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των εκ μεταφοράς και διάχυσης χρονοδιαγραμμάτων, υπονοεί, ότι οι κατάντι αποστάσεις πέρα από τις οποίες τα ρευστά πρέπει να ταξιδέψουν για να γίνουν εντελώς αναμεμιγμένα είναι:

$$\Delta y_m \sim V \cdot \left(\frac{d^2}{D}\right) = Pe \cdot d \quad (1-3)$$

Οι αριθμοί Pe και Re είναι γραμμικά εξαρτημένοι με το μήκος των καναλιών, με αποτέλεσμα να είναι γενικά απαγορευτικό το μεγάλο μέγεθος τους, με συνέπεια την ανάγκη να χρησιμοποιηθούν δύσκαμπτα μακριά κανάλια για να επιτευχθεί ο στόχος της ανάμιξης (σχήμα 1-2). Κατά συνέπεια, πολλά από τα οφέλη της μικρογραφίας των σχεδίων του εργαστηρίου για την κατασκευή ενός τσιπ είναι αρνητικά. Για να αντιμετωπισθούν αυτοί οι περιορισμοί, έχει πραγματοποιηθεί ιδιαίτερη προσπάθεια προς την κατεύθυνση ανάπτυξης στρατηγικών που θα βοηθήσουν να επιτευχθεί γρήγορη στρωτή ροή που θα αναμίξει τα μικρορευστά.



Σχήμα 1-2. Η γραμμική εξάρτηση της μίξης του μήκους με το Pe σε σχέση με τις χαρακτηριστικές microfluidic διαστάσεις ($d=100\mu\text{m}$, $V=0.01 - 100\text{cm/s}$, $D_{\text{mol}}=10^{-6}\text{cm}^2/\text{s}$) για ένα σύστημα δύο υδάτινων ρευμάτων.

6 ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ’

2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

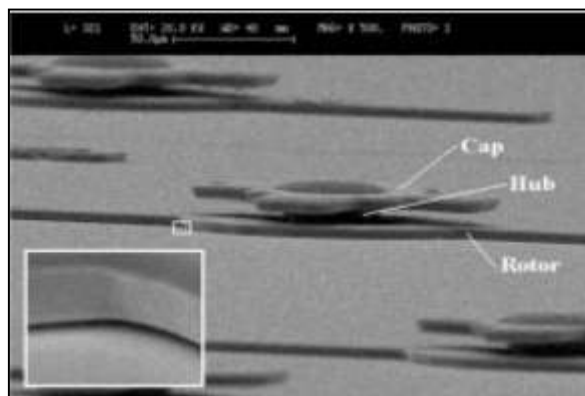
2.1	Στρατηγικές μικροανάμιξης	8
2.1.1	Ενεργητικοί μικροαναμίκτες	8
2.1.2	Παθητικοί μικροαναμίκτες (micromixers)	9
2.1.1.1	Παράλληλες στρωτές ροές	9
2.1.1.2	Έγχυση	12
2.1.1.3	Σταγονίδιο	12
2.1.1.4	Περιστροφή	13
2.2	Δινοροές	20
2.3	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα τεχνικών μικροανάμιξης	30

2.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

Στην προηγούμενη δεκαετία, ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό του ερευνητικού πεδίου είχε ως σκοπό την ανάπτυξη των νέων στρατηγικών μικροανάμιξης. Τα νέα δεδομένα δίνουν μια ολιστική άποψη αυτών των τεχνικών μικροανάμιξης και εφαρμογών τους. Γενικά, μια στρατηγική ανάμιξης μπορεί να ταξινομηθεί σε ενεργητική είτε σε παθητική, ανάλογα με το μηχανισμό που χρησιμοποιεί για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

2.1.1 Ενεργητικοί μικροαναμίκτης

Οι ενεργητικοί μικροαναμίκτης, χρησιμοποιούν τις εξωτερικές δυνάμεις, πέρα από την ενέργεια που σχετίζεται με τη ροή, προκειμένου να εκτελεσθεί η μίξη. Μερικά παραδείγματα των τεχνικών που αναπτύσσονται για να πραγματοποιήσουν αυτή την μέθοδο είναι, η ηλεκτροώσμωση, η μαγνητική ανάδευση (Σχήμα 2-1), η ακουστική ώθηση και τα υπερηχητικά μοντέλα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους μικροαναμίκτης παθητικού τύπου, είναι ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να ενεργοποιούνται κατόπιν παραγγελίας. Δηλαδή, να ενεργούν στην ροή και να προκαλούν ανάμιξη εφόσον ζητηθεί από τον ερευνητή, ενώ στο υπόλοιπο της διαδικασίας κατά την οποία παραμένουν ανενεργά η ροή να εξελίσσεται με φυσικό τρόπο και αν προκύπτει ανάμιξη να οφείλεται αποκλειστικά στην στρωτή ροή και την διάχυση.



Σχήμα 2-1. Εικόνα SEM ενός μαγνητικού αναδευτήρα. Ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο αναγκάζει το μαγνητικό αναδευτήρα να περιστραφεί γρήγορα στο ρευστό περιβάλλον. Το γενικό ύψος του αναδευτήρα είναι 25 μm με ένα χάσμα 0.5 μm μεταξύ του στροφέα και του υποστρώματος (παρεμβολή). Οι μεμονωμένοι αναδευτήρες μικροϋπολογιστών ισαπέχουν μεταξύ τους κατά 500 μm .

Ενώ γενικά είναι αποτελεσματικά στην παραγωγή της αναταραχής για ρευστά που αναμιγνύονται στις μικρού μήκους κλίμακες, αυτά τα σχέδια δεν είναι συχνά εύκολο να

ενσωματωθούν με άλλα μικρορρευστά συστατικά και να προσθέσουν χαρακτηριστικά στην ουσιαστική πολυπλοκότητα της διαδικασίας επεξεργασίας. Επιπλέον, τα υψηλά ηλεκτρικά πεδία, η μηχανική διάτμηση, ή η παραγωγή των μη τετριμμένων ποσών θερμότητας που δημιουργούνται, δεν είναι συμβατά για τη χρήση στις εφαρμογές που περιλαμβάνουν ευαίσθητα είδη όπως για παράδειγμα βιολογικά δείγματα.

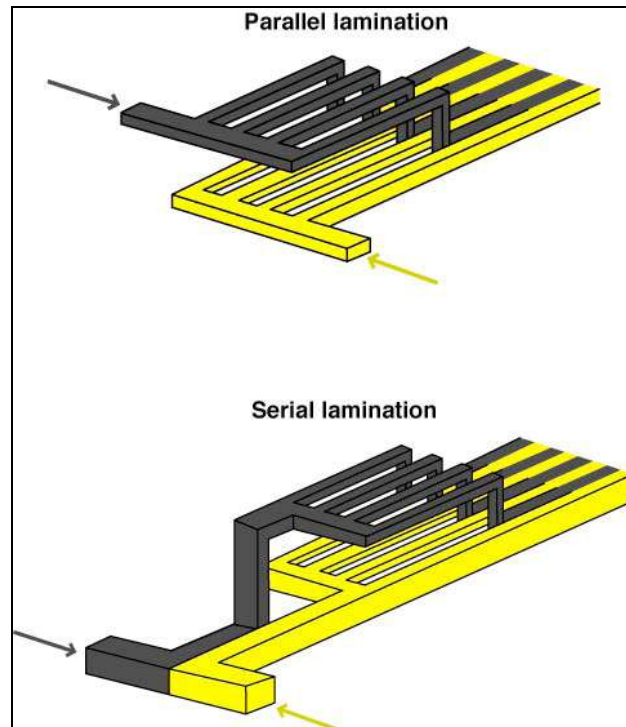
2.1.2 Παθητικοί μικροαναμίκτες (micromixers)

Οι παθητικοί αναμκτήρες, αφ' ετέρου, αποφεύγουν αυτά τα προβλήματα με την εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών των ειδικών τομέων ροής για να αναμίζουν τα είδη χωρίς εφαρμογή των εξωτερικών ηλεκτρικών ή μηχανικών δυνάμεων. Αυτά τα σχέδια είναι επίσης συχνά απλούστερα για να κατασκευαστούν και να διασυνδεθούν με άλλα μικρορρευστά συστατικά. Οι παθητικοί μικροαναμίκτες μπορούν να υποκατηγοριοποιηθούν ευρέως, βασισμένα στις τεχνικές παράλληλων στρωτών ροών, περιστροφής, εγχύσεων και σταγονιδίων.

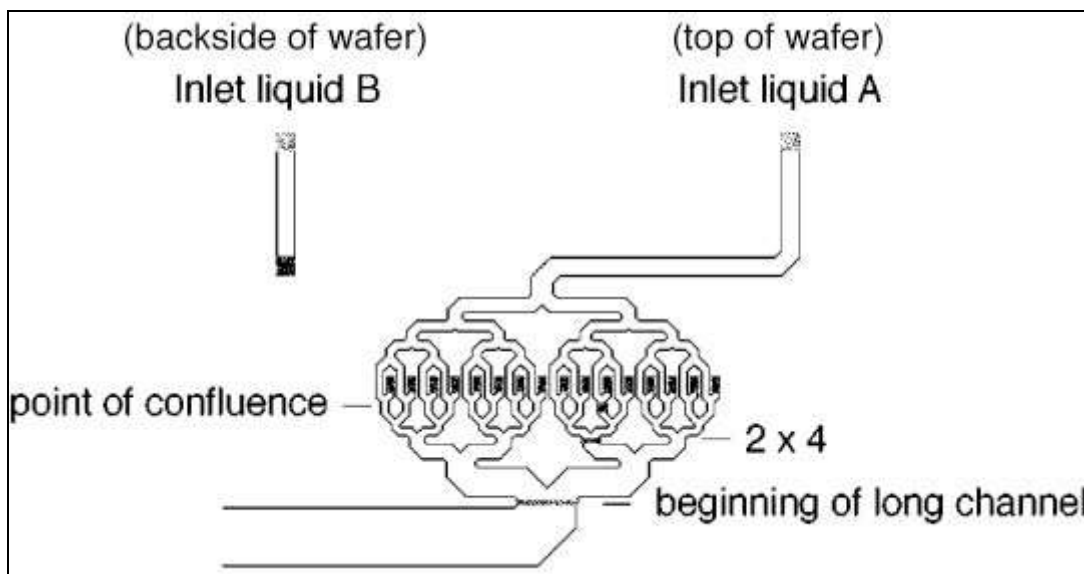
2.1.1.1 Παράλληλες στρωτές ροές

Οι αναμίκτες παράλληλων στρωτών ροών, βασίζονται στην δομή των επαναλαμβανόμενων επιπέδων ανάμιξης στα στρώματα των πολλαπλών παράλληλων ρευμάτων (το λεγόμενο φαινόμενο διάσπαση-και-επανασύνδεση) προκειμένου να αυξηθεί η περιοχή διεπαφής μεταξύ των ουσιών, ώστε να επιταχυνθεί η συνολικής διαδικασίας μεταφοράς με διάχυση. Και οι δύο παράλληλες και σειριακές διακυμάνσεις (Σχήμα 2-2) αυτής της βασικής ιδέας έχουν ερευνηθεί.

Ο Bessoth (1999), έχει ερευνήσει την παράλληλη στρωτή ροή με το διαχωρισμό δύο ρευστών σε δεκαέξι ρεύματα στις δύο πλευρές μιας πολυστρωματικής διάταξης (Σχήμα 2-3). Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της πολυστρωματικής διάταξης δημιουργήθηκαν από πλακίδια γυαλιού με χάραξη και στις δύο όψεις, όπου στη συνέχεια ενώθηκαν για να σχηματίσει μια εναλλαγή γυαλιού / πυριτίου / γυαλιού. Ο Kirner (2004), έχει καταδείξει έναν άλλο αναμικτή τύπων πολυστρωματικής διάταξης όπου και τα τρία τσιπ ήταν κατασκευασμένα χρησιμοποιώντας την μικρολιθογραφία (microlithography).



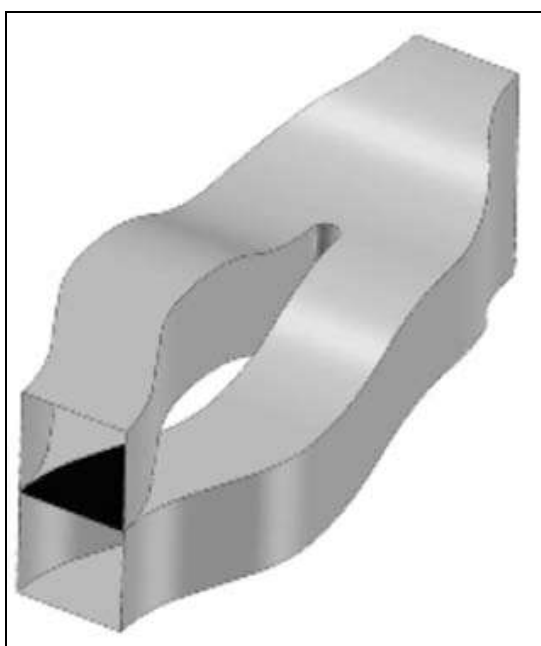
Σχήμα 2-2. Τεχνικές για την παράλληλη στρωτή ροή.



Σχήμα 2-3. Παράδειγμα της δομής καναλιών που χρησιμοποιείται για να εκτελέσει της παράλληλης στρωτής μίξη. (Bessoth 1999)

Η ιδέα της τμηματικής ανάμιξης με παράλληλες στρωτές ροές, όπου τα ρεύματα που αναμιγνύονται είναι χωρισμένα σε ένα κοινό κανάλι εισόδου, προτάθηκε πρώτα από τους Schwesinger και Branebjerg (1996). Συνήθως, τα ρεύματα κατευθύνονται αρχικά σε έναν οριζόντιο αγωγό και μετά το ένα ή και τα δύο ρεύματα αφού συστραφούν, ώστε να αρχίσει ο διαχωρισμός, οδηγούνται σε μια ακολουθία στροφών για να επανασυνδεθούν τελικά και

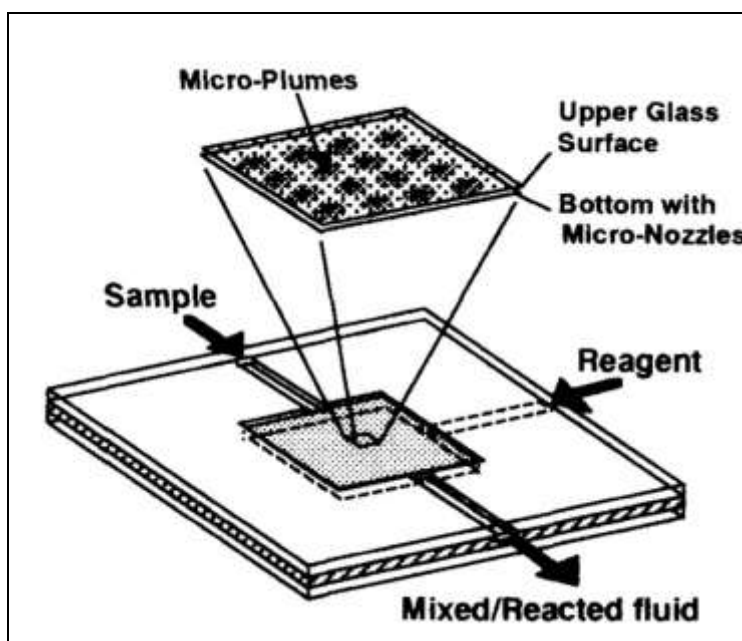
να δημιουργήσουν παράλληλες στρωτές ροές. Στην πραγματικότητα, εντούτοις, εάν το ρευστό υπόκειται σε ξαφνικές εναλλαγές στην κατεύθυνση του, είναι πιθανόν να εμφανιστούν διαχύσεις, κάνοντας το εξαιρετικά περίπλοκο την επίτευξη των παράλληλων στρωτών ροών που να κατέχουν τα ίδια διατομικά στοιχεία. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι δευτεροβάθμιες ροές, ο Schönfeld (2004) έχει σχεδιάσει έναν αναμίκτη διάσπασης-επανασύνδεσης ενσωματώνοντας την ελάχιστη κυρτότητα καναλιών ικανή σχεδόν να πλησιάσει τα ιδανικά σχεδιαγράμματα πετάλου (Σχήμα 2-4). Ο Lee (2006) και η ομάδα του, έχουν παρουσιάσει σε μια πρόσφατη εργασία τους, ότι η μίξη SAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα ροών. Ο αναμίκτης τους, ενσωμάτωσε τις τρισδιάστατες δομές υπό μορφή επαναλαμβανόμενων μονάδων όπου ο υψηλότερος αριθμός μονάδων απαιτείται για να επιτύχει τη μίξη στα υψηλότερα ποσοστά ροής. Ενώ οι αναμίκτες παράλληλης στρωτής ροής είναι ιδιαίτερα επιτυχείς, η σύνθετη τρισδιάστατη γεωμετρία ροής που συνδέεται με τα περισσότερα από αυτά τα σχέδια απαιτεί, δυσκίνητες κατασκευές και πολύπλοκη ακολουθία βημάτων. Επιπλέον, τα βήματα που πραγματοποιούνται από αυτά τα κανάλια, δεν καθιστούν πάντα ευνοϊκή την ένταξή τους σε συστήματα «on-chip».



Σχήμα 2-4. Παράδειγμα της δομής καναλιών που χρησιμοποιείται για να εκτελέσει την τμηματική μίξη σε παράλληλες στρωτές ροές.

2.1.1.2 Έγχυση

Οι μικροαναμικτές έγχυσης είναι παρόμοια με τους αναμικτές παράλληλης στρωτής ροής, εκτός από το ότι μόνο ένα από τα ρεύματα εισόδου είναι χωρισμένο στα πολλαπλάσια ρεύματα και έπειτα εγχέεται στο άλλο ρέοντα ρεύμα. Χαρακτηριστικά, οι σειρές ακροφυσίων, χρησιμοποιούνται για να εγχύσουν μικροσταγονίδια ενός ρευστού πάνω από άλλο, προκειμένου να αυξηθεί η γενική περιοχή επαφών επιφάνειας και να αυξηθεί συνεπώς η μίξη λόγω διάχυσης. Ο Miyake (1993) ήταν μεταξύ των πρώτων, που για να χρησιμοποιήσει αυτήν την έννοια σε ένα σχέδιο αναμικτών, τοποθέτησε 400 ακροφύσια σε σειρές σε μια τετραγωνική επιφάνεια (Σχήμα 2-5). Οι τριχοειδείς ροές έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης για να παραγάγουν μικροσταγονίδια. Αν και αυτοί οι αναμικτές είναι σε θέση για πιο γρήγορη ανάμιξη μεταξύ των διαφορετικών ουσιών, η επεξεργασία είναι σύνθετη και η οργάνωση απαιτεί μια πολλαπλής στάθμης διαδικασία που μπορεί να είναι αρκετά κουραστική. Επιπλέον, μπορεί να είναι δύσκολο για να κατασκευαστούν οι σειρές που περιλαμβάνουν τις εκατοντάδες των ακροφυσίων με τόση μεγάλη ακρίβεια.

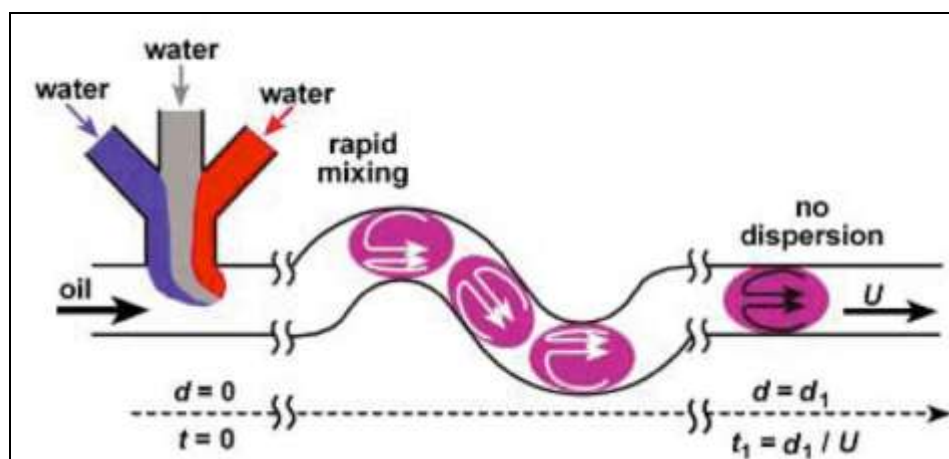


Σχήμα 2-5. Παράδειγμα ενός έγχυση-τύπου micromixer. Τα ακροφύσια χωρίζονται μεταξύ τους ανά 100μm και ένας τομέας μίξης της περιοχής 2mm × 2mm περιλαμβάνει μέχρι 400 ακροφύσια.

2.1.1.3 Σταγονίδιο

Μικροαναμικτής βασισμένος στην ανάμιξη του σταγονιδίου, προσφέρει μια ελκυστική προσέγγιση για να υπερνικήσει πολλές από τις επιπλοκές που συνδέονται με την επεξεργασία των τρισδιάστατων δομών στους αναμικτές τύπων παράλληλης στρωτής

ροής και εγχύσεων. Τα ρευστά στοιχεία που παγιδεύονται στα σταγονίδια αναμιγνύονται λόγω της παρουσίας ενός εσωτερικού τομέα ροής που είναι χαρακτηριστικός της κίνησης των σταγονιδίων. Ο Ismagilov (2003), έχει χρησιμοποιήσει αυτήν την έμφυτη επανακυκλοφορία για να αναμίξει τα περιορισμένα σταγονίδια ρευστών που είναι διασκορπισμένα σε ένα ημιαναμεμιγμένο υγρό (Σχήμα 2-6). Ο Günther (2005) έχει δείξει ότι τα υγρά μπορούν να αναμιχθούν από την επανακυκλοφορία που συνδέεται με την εισαγωγή μιας φάσης αερίου που διαμορφώνει μια τετμημένη ροή υγροποιημένου αερίου.

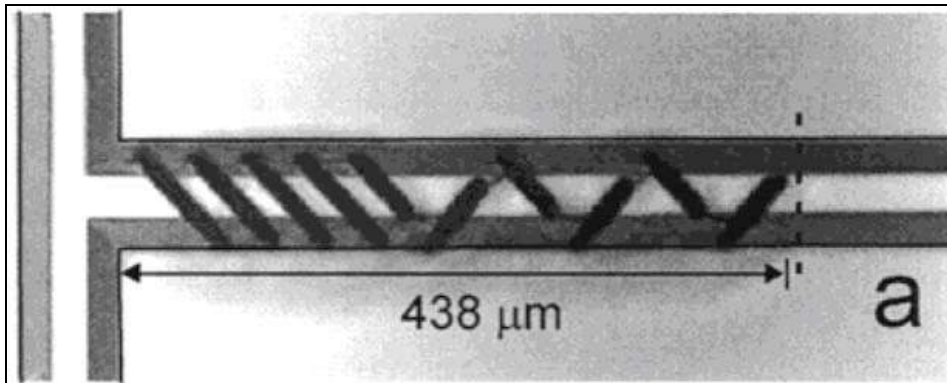


Σχήμα 2-6. Παράδειγμα micromixer σταγονιδίου. Η μέγιστη διατομή στον αναμίκτη ήταν 50μm.

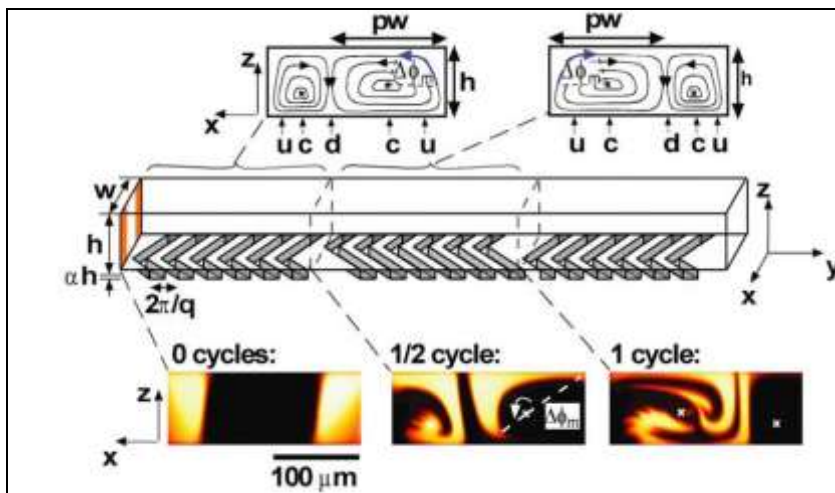
2.1.1.4 Περιστροφή

Οι παθητικοί αναμίκτης περιστροφής που σχεδιάζονται για να παραγάγουν τις εγκάρσιες ροές, έχουν ερευνηθεί επίσης και σε περιπτώσεις με εσωτερικές διαμορφώσεις τύπου με αυλάκια, με κορυφογραμμές, με προβολές και εμπόδια που είναι διαμορφωμένα μέσα στα κανάλια για να προκαλέσουν τις διαταραχές στο σχέδιο ροής (μοντέλα SHM). Ο Johnson και ο Stroock (2002) (Σχήμα 2-7) και (Σχήμα 2-8) αντίστοιχα έχουν εφαρμόσει αυτή την τεχνική με τη μορφοποίηση του πατώματος του μικροκαναλιού με τα πλάγια αυλάκια, για να παραγάγουν τις πλευρικές ροές που επιμηκύνουν και συμπιέζουν επανειλημμένα τις ουσίες σαν συνέχεια της αναταραχής που προκαλούν τα απλά διαμορφωμένα κανάλια. Σε αυτά τα σχέδια η γρηγορότερα χαοτική μίξη επιτυγχάνεται σε χαμηλότερο Re και το μήκος μίξης έχει μια λογαριθμική εξάρτηση με τον αριθμό Peclet (Pe). Ο Howell (2005) και η ομάδα του, παρουσίασαν μια τροποποίηση αυτού του βασικού σχεδίου, το οποίο περιλαμβάνει τη διαμόρφωση των κορυφογραμμών στην κορυφή και στο κατώτατο σημείο του καναλιού. Σε αυτόν τον αναμίκτη, οι συνδυασμένες εγκάρσιες ροές που παρήχθησαν στην κορυφή και στο κατώτατο σημείο του καναλιού συνέβαλαν στη μίξη. Ένας άλλος αναμίκτης με τα διαμορφωμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα στην

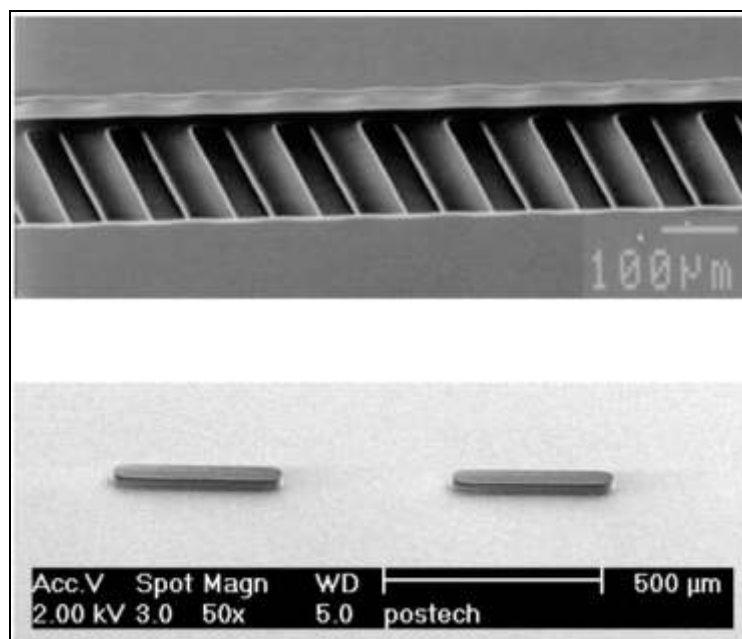
κορυφή και το κατώτατο σημείο του καναλιού έχει παρουσιαστεί (Σχήμα 2-9). Τα εμπόδια που τοποθετήθηκαν στο πάνω τοίχο σε τακτά χρονικά διαστήματα προκάλεσαν τις περιοδικές διαταραχές στο ελικοειδές σχεδιάγραμμα ροής που παρήχθη από τη δράση των κεκλιμένων αυλακιών που διαμορφώθηκαν κατά μήκος ολόκληρης της κατώτατης επιφάνειας.



Σχήμα 2-7. Πλάγια φρεάτια για τη χαοτική μίξη. Αυτός ο αναμίκτης χρησιμοποιήθηκε για τη μίξη και κάτω από τις ηλεκτροοσμωτικές και προσανατολισμένες προς την πίεση ροές.



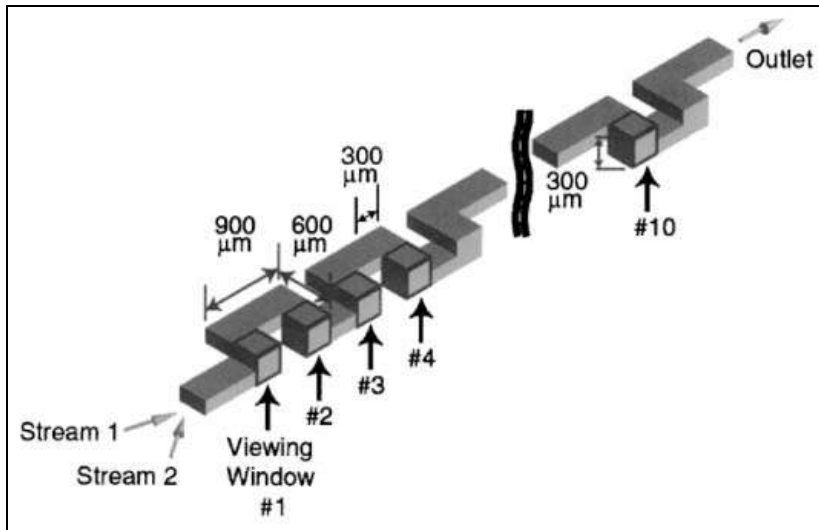
Σχήμα 2-8. Τμηματικός αναμίκτης σχεδίου με διαμόρφωση SHM (Staggered Herringbone Mixer).



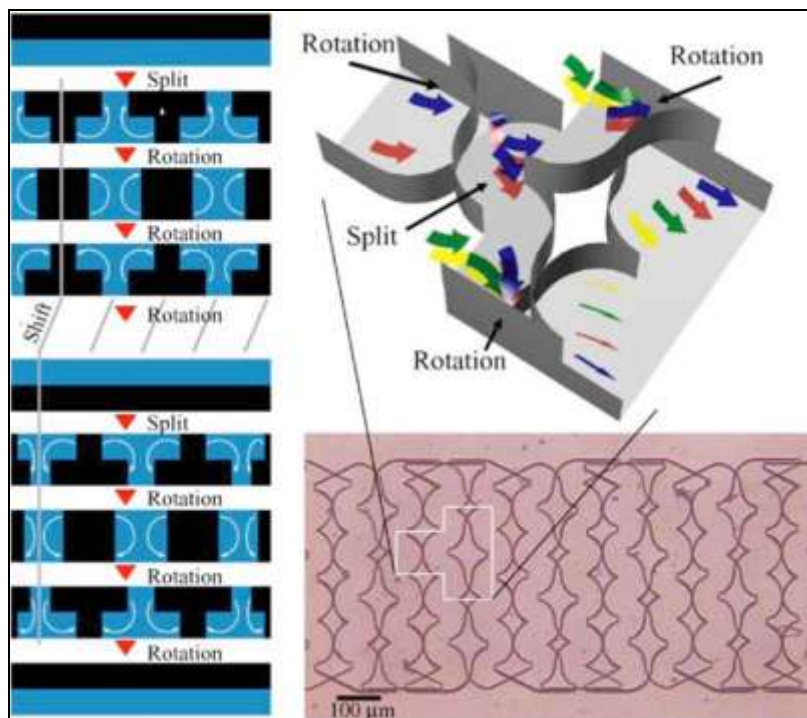
Σχήμα 2-9. Εμπόδιο που ενσωματώνεται σε μικροαναμίκτη. Τα αυλάκια είναι στραμμένα κατά 45° με ένα βάθος $9\mu\text{m}$ και τα εμπόδια είναι πλάτους $30\mu\text{m}$ και ύψους $40\mu\text{m}$.

Μια τρισδιάστατη (3D) ελικοειδής γεωμετρία με τις επαναλαμβανόμενες «C-διαμορφωμένες» μονάδες έχει παρουσιαστεί από τον Liu (2000) (Σχήμα 2-10). Ένας παρόμοιος μικροαναμίκτης με τις επαναλαμβανόμενες L-διαμορφωμένες μονάδες κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση της απόδοσης των μικρορευστών βιοαισθητήρων. Η αποδοτικότητα αυτού του αναμίκτη αυξάνεται αναλογικά με το Re λόγω της παρουσίας στροβίλων που διαμορφώνονται στις εναλλαγές των καναλιών. Ο Kim (2005) παρουσίασε έναν αναμίκτη που έχει τριγωνικές προβολές στους τοίχους των μικροκαναλιών που προκαλούν την ανατάραξη των ουσιών. Ένας αναμίκτης, που μπορεί να ταξινομηθεί ως αναμίκτης SAR επίσης, με τα συνδυασμένα αποτελέσματα του διαχωρισμού-και-επανάσυνδεσης (SAR) και της μετατόπισης, έχει πραγματοποιηθεί σε μια γεωμετρία που αποτελείται από μια σειρά «F-διαμορφώσεων» αναμιγνύοντας τα ρευστά. Η τρισδιάστατη παθητική περιστροφή που χρησιμοποιεί μια διαδικασία αποσύνθεσης, έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για να είναι αποδοτική για τη μίξη (Σχήμα 2-11). Ενώ αυτό το σχέδιο αναμικτών είναι αποτελεσματικό για Re που κυμαίνεται από 1 - 50, η αποδοτικότητά της είναι υψηλότερη για τιμή $Re = 10$ λόγω της συνδυασμένης επιρροής των αναταραχών ροής, των διαδικασιών αποσύνθεσης και διάχυσης. Στα χαμηλότερα ποσοστά ροής ($Re = 1$) που οι αναταραχές της διεπαφής είναι απών, η μίξη αποσύνθεσης και διάχυσης, περιορίζεται. Στα υψηλότερα ποσοστά ροής ($Re=50$) η διάχυση είναι ελάχιστη και τα ρευστά αναμιγνύονται μέσω των αναταραχών και των διαδικασιών διάσπασης.

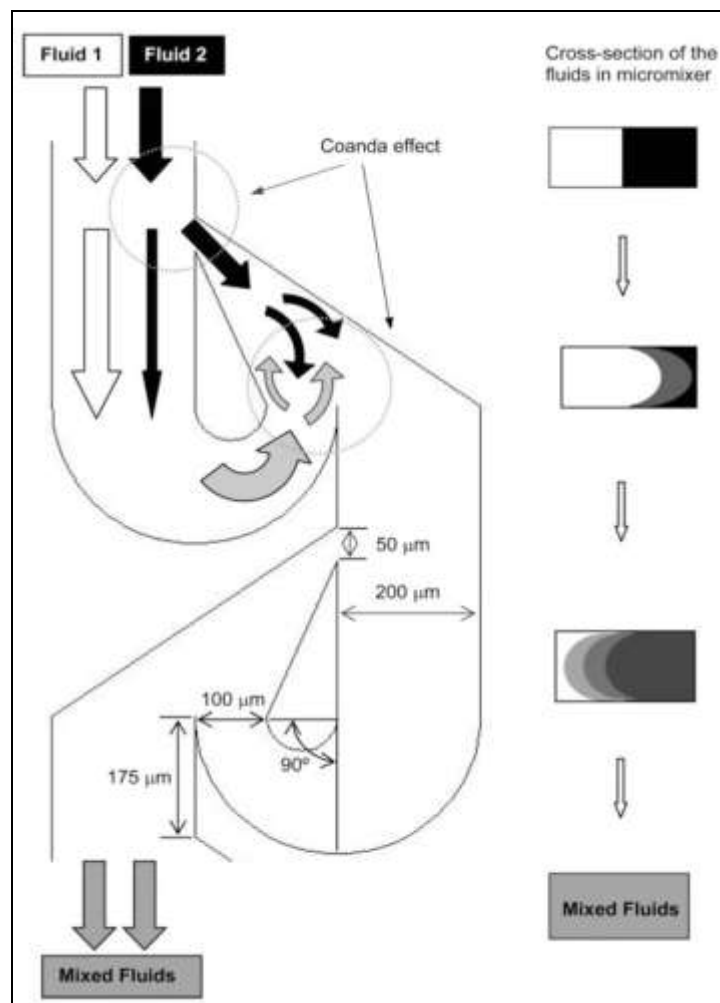
Άλλα παραδείγματα των τεχνικών που έχουν εισαχθεί πρόσφατα περιλαμβάνουν την μονή κυκλοφορία σε μια αίθουσα μίξης που είναι αποδοτική στα υψηλά ποσοστά ροής ($Re \geq 50$), μια παθητική (inplane) μικροαναμικτή με τις τροποποιημένες δομές Telsa που υιοθέτησαν τη «επίδραση Coanda» για να βελτιώσουν τη μίξη, παρουσιάζεται στο (Σχήμα 2-12).



Σχήμα 2-10. Τρισδιάστατος ελικοειδής αναμικτής καναλιών με τις C-διαμορφωμένες μονάδες.

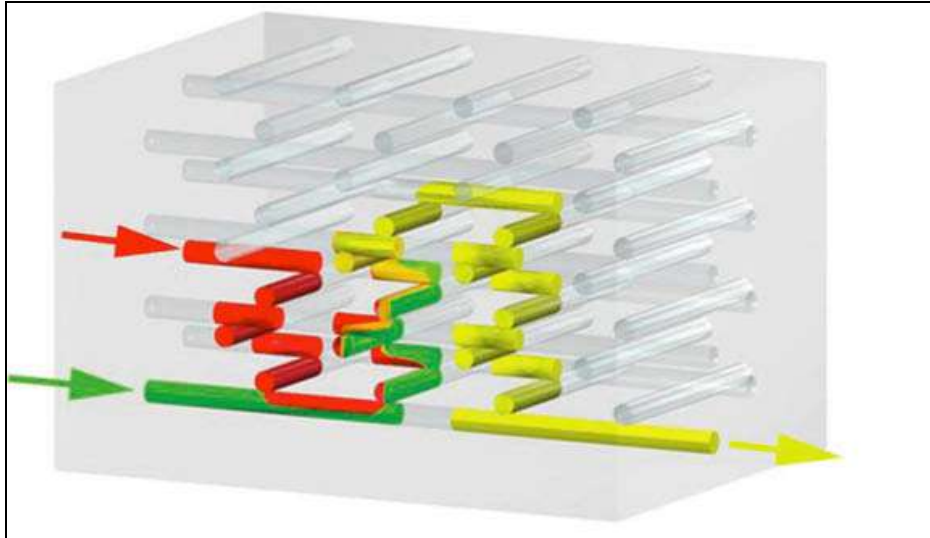


Σχήμα 2-11. Το Micromixer που χρησιμοποιεί τα ρευστά στοιχεία στη διαδικασία διάσπασης.

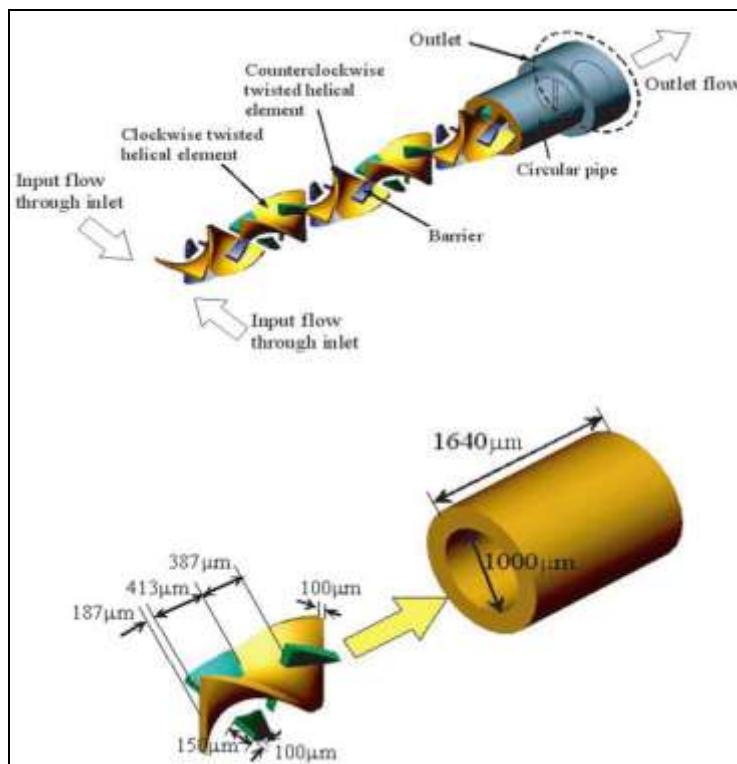


Σχήμα 2-12. Σχηματική αναπαράσταση του micromixer με τις δομές Telsa. Η μίξη σε αυτόν τον τύπο αναμίκτη επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την επίδραση «Coanda».

Η μίξη στα πιο σύνθετα τρισδιάστατα δίκτυα ροής έχει ερευνηθεί επίσης. Για παράδειγμα, η μικροστερεολιθογραφία έχει χρησιμοποιηθεί για να κατασκευάσει τη γεωμετρία μιμούμενη τους συμβατικούς στατικούς αναμίκτης της μακροκλίμακας. Ένα άλλο παράδειγμα, περιλαμβάνει την κατασκευή του τρισδιάστατου μικροαγγειακού δικτύου, που ενσωματώνει τις σειρές τετραγωνικών σπειροειδών πύργων (Σχήμα 2-13). Το προκύπτον σχέδιο, προήλθε από τους τετραγωνικούς σπειροειδείς πύργους που ενσωματώθηκαν μέσα σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο και ώθησε το ρευστό σε μίξη μέσω της χαοτικής μετατόπισης. Η αποδοτικότητα της μίξης, σε αυτήν την περίπτωση, δημιούργησε μια εκθετική εξάρτηση με τον αριθμό Re . Ένα εμπόδιο τύπου Kenics ενσωματώθηκε στον μικροαναμίκτη, που λειτουργεί χρησιμοποιώντας το συνδυασμένο τέντωμα / δίπλωμα και διαδικασίες όπως ο διαχωρισμός και ο επαναπροσανατολισμός και έχει κατασκευαστεί επίσης, χρησιμοποιώντας τη μικροστερεολιθογραφία (Σχήμα 2-14).



Σχήμα 2-13. Σχηματική αναπαράσταση του τετραγωνικού σπειροειδούς πύργου μικροαναμίκτη.



Σχήμα 2-14 . Ενσωματωμένο εμπόδιο Kenics micromixer. Ο αναμίκτης έχει μια σειρά εναλλασσόμενων ελικοειδών στοιχείων με τα εμπόδια που διαμορφώνονται σε αυτούς.

Ο Πίνακας 2-1 παρέχει μια αντιπροσωπευτική δειγματοληψία για μερικούς από τους βασικούς αναμίκτες που περιγράφονται ανωτέρω. Πολλά από τα σχέδια αναμικτών που απαριθμούνται, ενσωματώνουν τις σύνθετες τρισδιάστατες δομές που, από μια πρακτική σκοπιά, είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν κατά τρόπο σύμφωνο με τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να κατασκευάσουν τα τυποποιημένα τμήματα

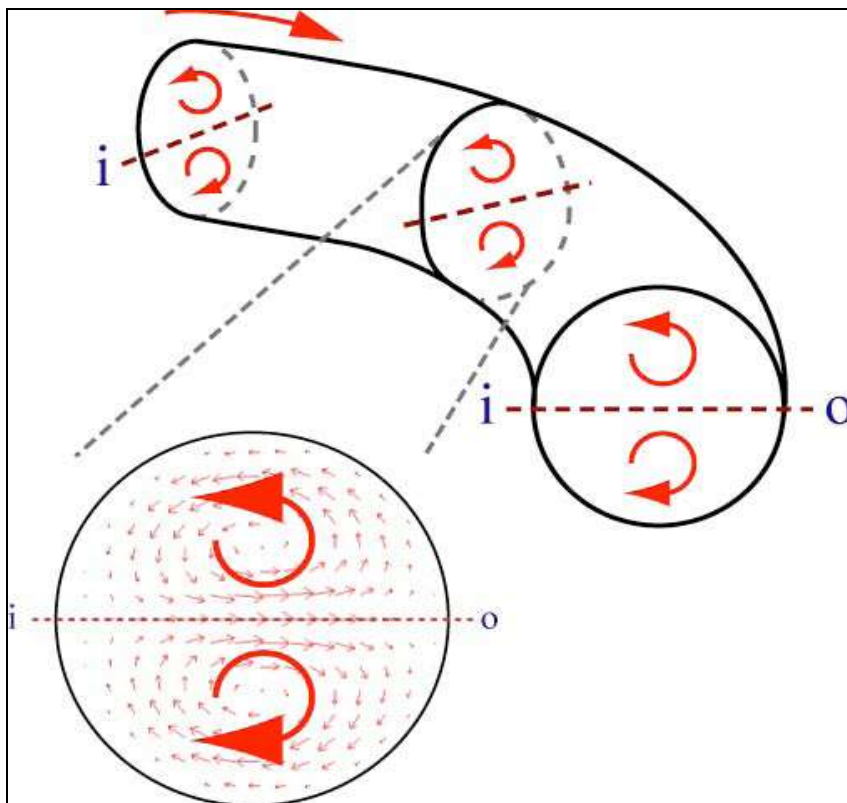
εργαστηριακών τσιπ. Η ανάγκη να ενσωματωθούν οι εξειδικευμένες διαδικασίες ή και τα ακριβή βήματα ευθυγράμμισης καθιστά αυτές τις προσεγγίσεις λιγότερο ελκυστικές, και από οικονομικής άποψης, αλλά, και σε ότι αφορά τις προοπτικές ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

Πίνακας 2-1. Συνοπτική παρουσίαση των πρόσφατων σχεδίων micromixer

Source	Re	Mixing Length	Effective range
Liu	6 – 70	>90% in ~ 11.7 mm (Re=70)	Re>35 Better at high flow rates
Johnson	0.03 - 0.45	>90% in ~ 0.443 mm (Re=70)	Better at low flow rates
Stroock	$10^{-2} - 10$	90% in ~ 7 mm (Re= 10^{-2})	$10^{-2} \leq Re \leq 10$ Better at low flow rates
Therriault	0.15 – 70	90% in ~ 6 mm (Re=30)	Re>10 Better at high flow rates
Hong	0.08 – 8.31	90% in ~ 7 mm (Re=4.16)	$4 \leq Re \leq 8.3$ Better at high flow rates
Kim	0.2 – 2.28	80% in ~ 13 mm (Re=0.2)	$0.2 \leq Re \leq 2.28$ Better at low flow rates
Kim	7 – 28	90% in ~ 5 mm (Re=7)	$7 \leq Re \leq 28$ Better at low flow rates
Park	1 – 50	85% in ~ 4 mm (Re=10)	$1 \leq Re \leq 50$ Best at Re = 10

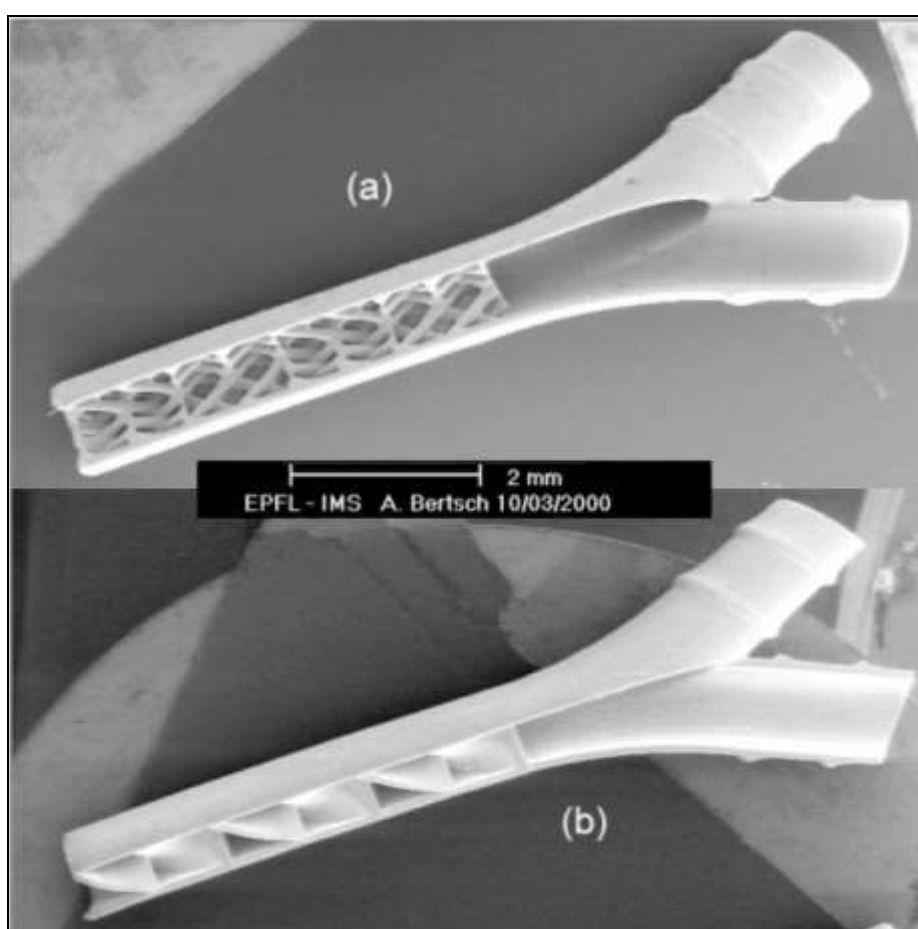
2.2 ΔΙΝΟΡΡΟΕΣ

Ο χειρισμός της εμφάνισης των εγκάρσιων φαινομένων δίνης που προκύπτουν φυσικά στις συγκεκριμένες ροές προσφέρει μια προσέγγιση για την εξέταση μερικών μειονεκτημάτων που συνδέονται με τις πρόσφατες τεχνικές μικροανάμιξης. Για παράδειγμα, τα ρευστά που οδηγούνται μέσω των καμπυλόγραμμων καναλιών, υπόκεινται σε μια αλληλεπίδραση μεταξύ των αδρανών επιφανειών, ενεργώντας στην άμεση αξονική τους κίνηση, και των φυγοκεντρικών αποτελεσμάτων, ενεργώντας κατά μήκος της ακτίνας της κυρτότητας του αγωγού. Υπό τους κατάλληλους όρους, αυτά τα αποτελέσματα καθιερώνουν μια ακτινωτή κλίση πίεσης της οποίας το μέγεθος μπορεί να γίνει επαρκές για να παραγάγει έναν εγκάρσιο τομέα ροής υπό μορφή δύο αντιθέτως περιστρεφόμενων δινών επάνω και κάτω από το μέσο επίπεδο του καναλιού (το « i » και το « o » δείχνουν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους του σωλήνα στο Σχήμα 2-15). Αυτές οι αποκαλούμενες ροές του Dean εμφανίζονται ευρέως στη φύση και διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο σε ποικίλες εφαρμογές που κυμαίνονται από τη εφαρμοσμένη μηχανική (π.χ., εναλλάκτες θερμότητας, συστήματα σωληνώσεων) ως τη βιοϊατρική επιστήμη (π.χ., αρτηριακή ροή αίματος, όργανα ανάλυσης).



Σχήμα 2-15. Εγκάρσια δινορροή σε έναν κυρτό σωλήνα.

Η έννοια της χρησιμοποίησης της δίνης για τη μίξη, στην μακροκλίμακα, έχει εξερευνηθεί εκτενώς όπου και γίνεται η χρήση των ελικοειδών σωλήνων ή των σωλήνων που επεκτείνονται από ένα 2D πλάνο σε μια κυρτή τροχιά ροής. Μια περαιτέρω προσαρμογή των αποτελεσμάτων του Dean είναι τα αποκαλούμενα συστρεμμένα σχέδια σωλήνων (που κατασκευάζονται με την ένωση μιας σειράς επίπεδων κυρτών τμημάτων έτσι ώστε κάθε επόμενο τμήμα να είναι προσανατολισμένο σε μια διαφορετική γωνία σε σχέση με την προηγούμενη) στο οποίο η έμφυτη συμμετρία της δευτεροβάθμιας ροής βελτιώνει την διαταραχή, παράγοντας τις χαοτικές τροχιές μορίων.



Σχήμα 2-16. Εικόνα των μικροαναμικτών SEM, βασισμένη στους συμβατικούς στατικούς αναμίκτης.

Οι παραλλαγές των ελικοειδών και των συστρεμμένων ρυθμίσεων των σωλήνων στην μικροκλίμακα έχουν ερευνηθεί προηγουμένως για να ενισχύσουν τη μίξη στα μικρορευστονικά συστήματα, εντούτοις, η αντίστοιχη μη – επίπεδη γεωμετρία ροής απαιτεί συχνά πολλαπλές ή εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας (π.χ., Σχήμα 2-16). Οι Yi και Bau (2003) επεξεργάστηκαν τη δευτεροβάθμια επανακυκλοφορία ροής στις δομές που αποτελούνται από 90° κάμψεις (Σχήμα 2-17). Κατασκεύασαν επίσης έναν

τρισδιάστατο αναδευτήρα από μια πολλαπλής στάθμης διαδικασία, χρησιμοποιώντας τις κεραμικές ταινίες ως εμπόδια και δημιούργησαν τον αναμίκτη για να είναι αποτελεσματικός σε $Re > 10$.

Η εγκάρσια δευτεροβάθμια ροή που συνδέεται με τα αποτελέσματα της δίνης, μπορεί να χαρακτηριστεί από έναν αδιάστατο αριθμό δίνης «κ» που εκφράζει τα σχετικά μεγέθη των αδρανών και φυγοκεντρικών δυνάμεων στις δυνάμεις ιξώδους:

$$\kappa = \delta \cdot 0.5 \cdot Re \quad (2-1)$$

όπου δ είναι μια γεωμετρική παράμετρος που αφορά την έκταση των φυγοκεντρικών αποτελεσμάτων και δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{d}{R} \quad (2-2)$$

όπου το d είναι η χαρακτηριστική διατομή διάστασης καναλιών, και το R είναι η ακτίνα πορειών ροής της κυρτότητας. Εδώ υπολογίζουμε

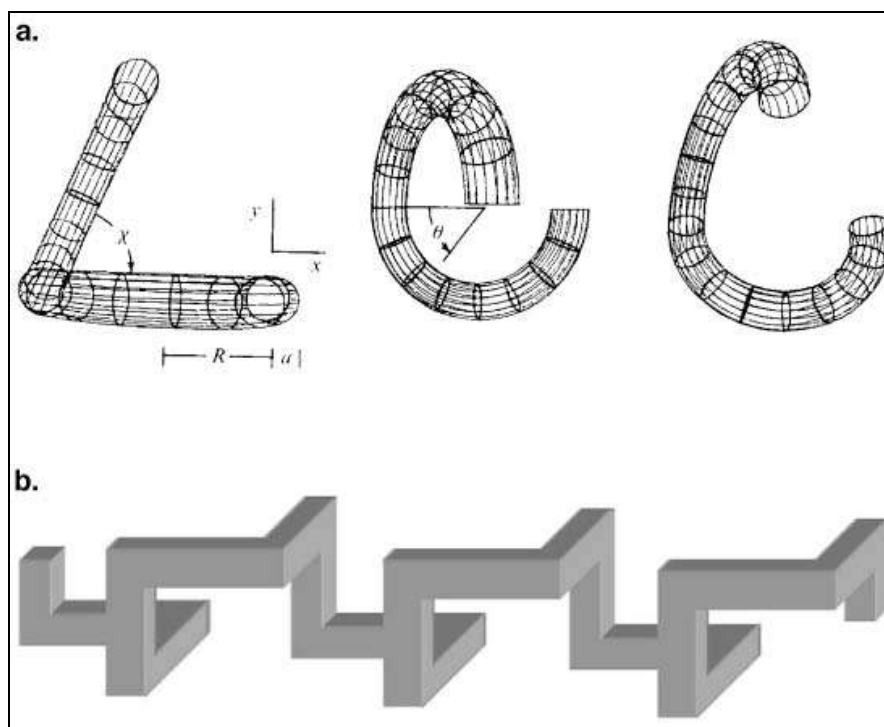
$$Re = V \cdot \frac{d}{\nu} \quad (2-3)$$

με τη λήψη του d ως υδραυλική διάμετρο καναλιών

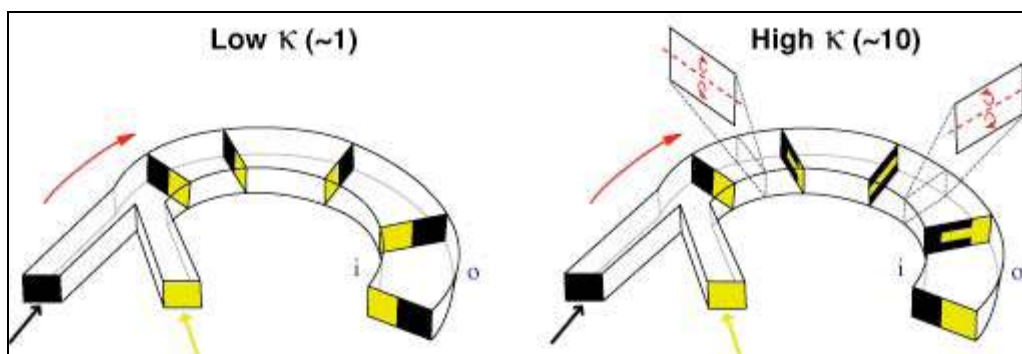
$$d = \frac{4A_c}{P} \quad (2-4)$$

όπου το A_c είναι το εμβαδόν κάθετης επιφανείας ως προς την ροή και το P είναι η βρεχόμενη περίμετρος (οι τραπεζοειδείς διατομές μικροκαναλιών προσεγγίστηκαν όπως οι ορθογωνικές). Στο μικροκανάλι, οι ροές του Dean εμπίπτουν γενικά στο καθεστώς $\kappa \ll 100$, όπου η δευτεροβάθμια ροή αποτελείται από ένα ζευγάρι αντίθετων περιστρεφόμενων δινών που εμφανίζονται συμμετρικά επάνω και κάτω από το μεσοδιάστημα του καναλιού. Στα ποσοστά χαμηλής ροής ($\kappa \sim 1$) τα φυγοκεντρικά αποτελέσματα δεν είναι αρκετά ισχυρά ώστε να διαταράξουν σημαντικά την αξονική στρωτή ροή. Δεδομένου ότι το ποσοστό ροής αυξάνεται ($\kappa \sim 10$) το εγκάρσιο τμήμα ροής ενεργεί στο ρευστό από τον εσωτερικό τοίχο του καναλιού ακτινωτά προς τον εξωτερικό (Σχήμα 2-18). Στο σχήμα αυτό, δύο παράλληλα ρεύματα διαφορετικών ουσιών (γκρι και μαύρο) εισάγονται σε ένα κυρτό μικροκανάλι με στρωτή ροή. Για $\kappa \sim 10$ (δεξιά), η εγκάρσια ροή που παράγεται από τις αντιθέτως περιστρεφόμενες δίνες, μεταφέρει το

εσωτερικό (γκρι) ρεύμα προς τον εξωτερικό τοίχο ενώ το εξωτερικό (μαύρο) ρεύμα μετακινείται προς το εσωτερικό αναγκάζοντας την αλλαγή των θέσεων του κάθε είδους να μετατεθούν στην έξοδο.

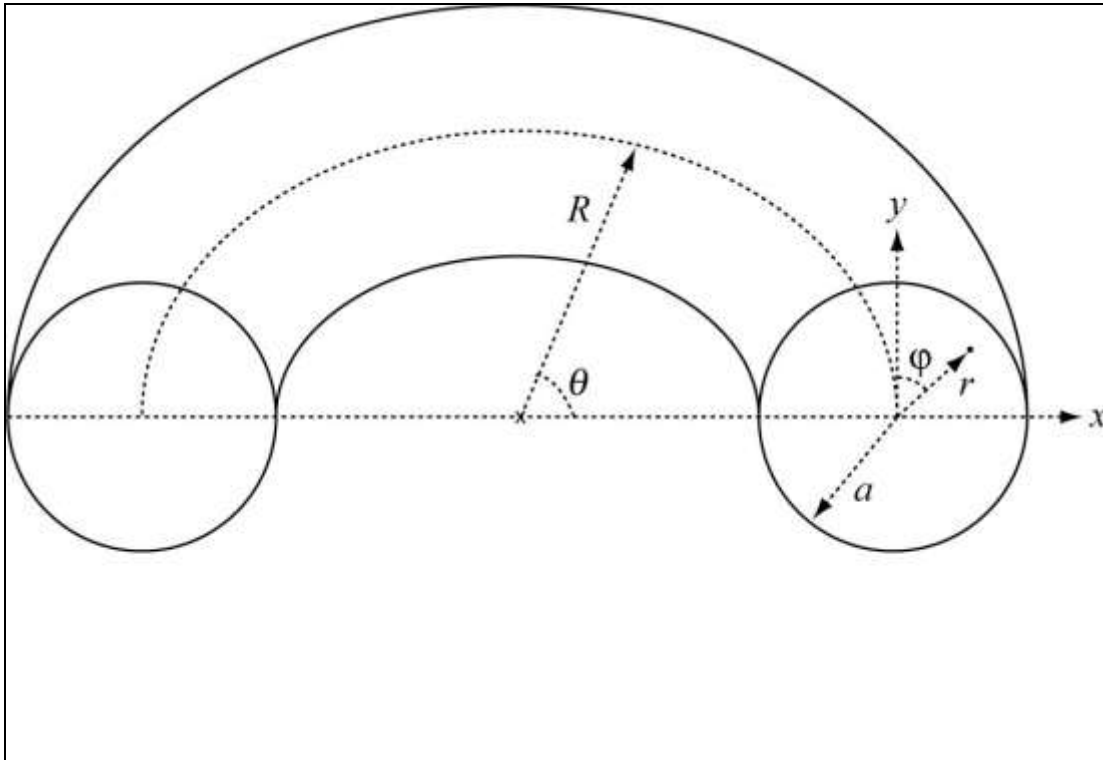


Σχήμα 2-17. Τρισδιάστατος αναδευτήρας που αποτελείται από μια σειρά τετραγωνικών κάμψεων.



Σχήμα 2-18. Εξιδανικευμένα φαινόμενα ροής του Dean κυρτά microchannels.

Υπό αυτούς τους όρους (το χαμηλό όριο κυρτότητας ($\delta < 1$), $Re < 100$), τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του δευτεροβάθμιας ροής, περιγράφονται από τη λύση δινών σε μια ανάλυση διαταραχής των εξισώσεων της κίνησης. Οι εξισώσεις της κίνησης γράφονται στα δύο σπειροειδή τοπικά ισότιμα συστήματα (X, Y, θ) και (ρ, ϕ, θ) . Ο τομέας ροής θεωρήθηκε ότι ήταν σταθερός, ασυμπίεστος και αναπτύσσεται πλήρως σε ολόκληρη τη γεωμετρία (Σχήμα 2-19).



Σχήμα 2-19. Σπειροειδές ισότιμο σύστημα.

Ο Dean (1927-1928) έδειξε ότι οι δευτεροβάθμιες ταχύτητες ροής δίνονται από τις ακόλουθες δύο εξισώσεις:

$$u = \frac{A^2 \kappa^2}{4468} (1 - x^2 - y^2) \cdot (4 - 5x^2 - 23y^2 + 8x^2y^2 + x^4 + 7y^4) \quad (2-5)$$

$$u = \frac{A^2 \kappa^2}{1152} (1 - x^2 - y^2) \cdot xy \cdot (3 - x^2 - y^2)$$

όπου το A είναι μια αδιάστατη παράμετρος εκφράζοντας τη γενική κλίση πίεσης που οδηγεί τη ροή και δίνεται από:

$$A = \frac{a^2}{\mu V \text{Re}} \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad (2-6)$$

όπου μ είναι το δυναμικό ιξώδες, το V είναι η μέση αξονική ταχύτητα και το P είναι η πίεση. Το αξονικό τμήμα ταχύτητας στην τοπική συντεταγμένη (x, y, θ) δίνεται από:

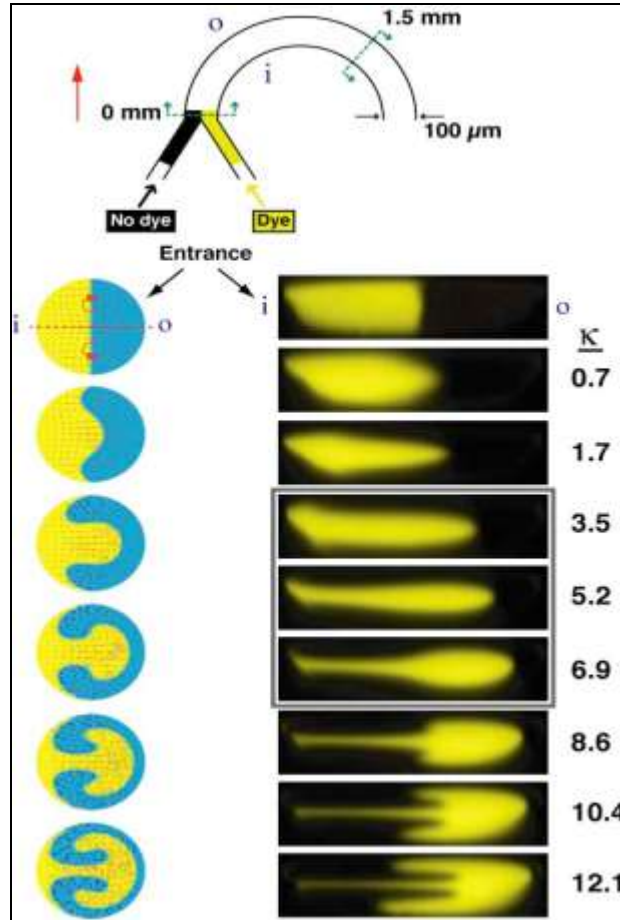
$$w = \frac{2\kappa^2}{\text{Re}}(1 - x^2 - y^2) \quad (2-7)$$

Ο Jones (1989) παρουσίασε την ανεξάρτητη μεταβλητή, από το χρόνο t στη γωνιακή θέση θ με τη διαίρεση της εξίσωσης (2-5) με την εξίσωση (2-7), οπότε η εξίσωση αλλάζει στην μορφή (2-8α) και ο Castelain (2000) έδειξε ότι το προκύπτον σύστημα δύο διαφορικών εξισώσεων καθορίζει τη επιφανειακή χαρτογράφηση των ρευστών για τις διαφορετικές τιμές του θ :

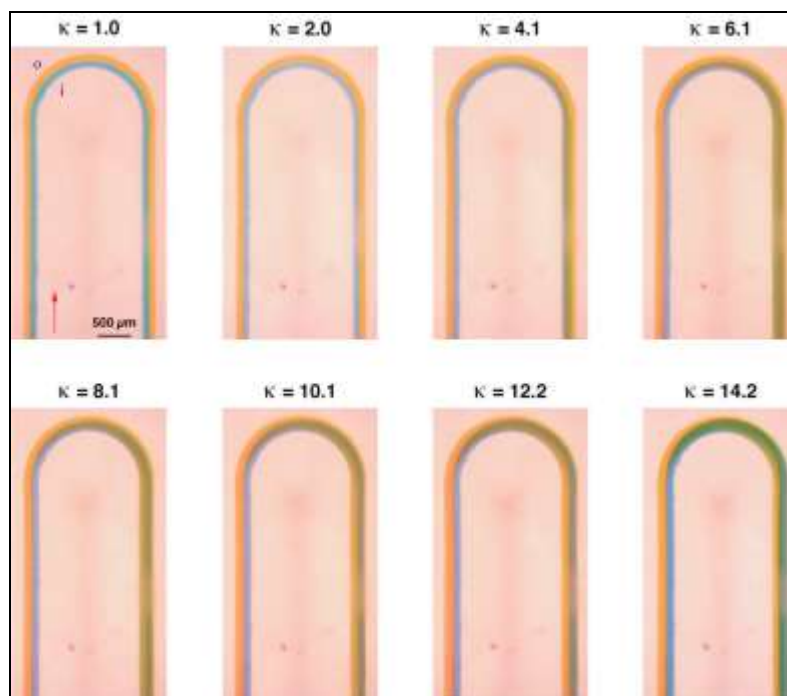
$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{\text{Re}}{144}(4 - 5x^2 - 23y^2 + 8x^2y^2 + x^4 + 7y^4) \quad (2-8\alpha)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = \frac{\text{Re}}{24} \cdot xy \cdot (3 - x^2 - y^2) \quad (2-8\beta)$$

Τα φυγοκεντρικά αποτελέσματα είναι μέγιστα κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των καναλιών όπου η αξονική ταχύτητα είναι μέγιστη. Μια σχεδόν πλήρης περιστροφή 180° μπορεί να πραγματοποιηθεί, αναγκάζοντας τα δύο παράλληλα ρεύματα ουσιών, να μετατεθούν πλήρως εντός του καναλιού. Τα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν καλή προσέγγιση με λεπτομέρειες αυτής της επίδρασης να παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-20 όπου γίνεται σχηματική αναπαράσταση της κυρτής διάταξης μικροκαναλιού και η γεωμετρία που ερευνάται είναι (πλάτους $100\mu\text{m}$, ύψους $29\mu\text{m}$, ακτίνα της κυρτότητας $630\mu\text{m}$, «ι» και «ο» δείχνουν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους καναλιών). Ο εγκάρσιος τομέας ροής εξετάστηκε στο κυρτό τμήμα και σε μια θέση 1.5mm μετά την είσοδο. Αναλυτικά υπολογισμένα σχεδιαγράμματα ταχύτητας και συγκέντρωσης παρουσιάζεται (αριστερά) ενώ στα (δεξιά) εμφανίζονται οι εστιακές διατομικές εικόνες της εγκάρσιας ροής για ποσοστά ροής που κυμαίνονται από $2.6 < \text{Re} < 45.1$ ($0.7 < \kappa < 12.1$). Η ίδια επίδραση μπορεί επίσης να παρουσιαστεί από τα υδάτινα ρεύματα απεικόνισης με τις διαφορετικές χρωστικές ουσίες (Σχήμα 2-21).

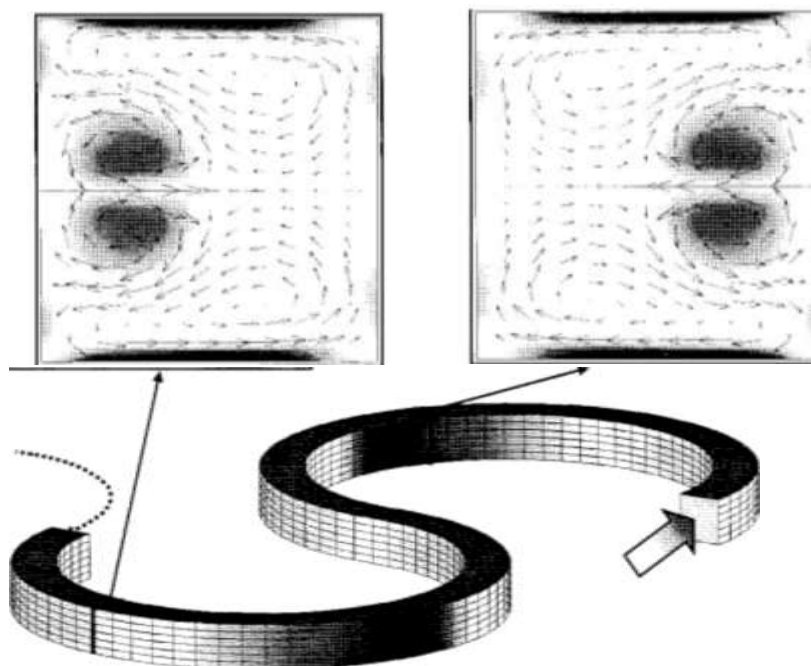


Σχήμα 2-20. Έρευνα για τη ροή του Dean σε μια διατομή ενός μικροκαναλιού . (Ανώτερος)



Σχήμα 2-21. Απεικόνιση της ροής του Dean σε μικροκανάλι. ($3.6 < Re < 50$) ($1.0 < \kappa < 14.2$).

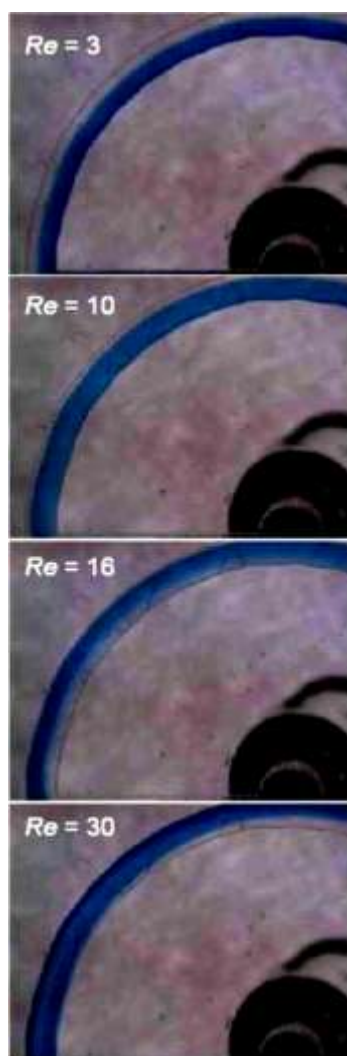
Ένα πρόσθετο ζευγάρι δινών είναι γνωστό ότι μπορεί να εμφανίζεται στους υψηλότερους αριθμούς Re , και οι πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει, ότι ενισχυμένο μπορεί να εμφανιστεί σε αυτές τις ροές (Σχήμα 2-22). Εντούτοις, το αντίστοιχο Re σε αυτά τα πειράματα είναι αρκετά μεγάλα ($Re > 100$) και έξω από τη σειρά των όρων που είναι ρεαλιστικά επιτεύξιμοι στα περισσότερα μικρορευστονικά συστήματα.



Σχήμα 2-22. Ροή του Dean που αναμιγνύει στα υψηλά ποσοστά ροής για $\kappa > 200$.

Τα αποτελέσματα του Dean έχουν ερευνηθεί στη μελέτη ελικοειδούς ανάμιξης, όπως τα μικροκανάλια. Σε αυτά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την περιστροφή του Dean στα ρευστά που ρέουν από μια κάμψη σε μία άλλη οφείλονται στην αντίσταση των κυρτών τμημάτων, και αυτός ο κύκλος συνεχίζεται κατά μήκος ολόκληρου του καναλιού. Συνεπώς, η διεπαφή μεταξύ των δύο ρευστών, και η απλή κυματοειδής μορφή μεταξύ των τοίχων των καναλιών και της μικρής ανάμιξης που εμφανίζεται, αποδίδεται στη μοριακή διάχυση και στη διεπαφή μεταξύ των δύο ρευμάτων. Ένας τρόπος υπερνίκησης αυτού του προβλήματος, αντιστροφής ροής, είναι να σχεδιαστεί ένα κανάλι με ένα σπειροειδές σχήμα έτσι ώστε οι εγκάρσιες δευτεροβάθμιες ροές να είναι συνεχείς και στις μεγαλύτερες αποστάσεις. Ο Howell (2004) έχει παρουσιάσει δεδομένα για να είναι επιτεύξιμη η εμφάνιση του φαινομένου Dean στα μεγάλα (διατομικές διαστάσεις $> 1\text{mm}$) κυκλικά κανάλια (Σχήμα 2-23) ενώ ο Vanka (2004), έχει μελετήσει αυτήν την επίδραση σε ένα σπειροειδές κανάλι (793 μm πλάτους και 397 μm ύψους) σε ένα ποσοστό ροής που αντιστοιχεί σε $Re=6,8$. Σε τέτοια κανάλια, το ρευστό δοκιμάζει μια μείωση της ακτίνας,

της κυρτότητας των καναλιών, καθώς ρέει προς τα κάτω, συνοδευόμενη από μια αντίστοιχη αύξηση στη δύναμη της εγκάρσιας δευτεροβάθμιας ροής. Ο Mengeaud (2002) εκτέλεσε τις πεπερασμένες προσομοιώσεις στοιχείων για microchannel πλάτους 100μm. Διαπίστωσαν ότι κάτω από έναν κρίσιμο $Re \sim 80$, η μίξη επιτεύχθηκε από τη μοριακή διάχυση μόνο. Σε υψηλότερα Re , στην στρωτή ροή, η μίξη αποδόθηκε στην επανακυκλοφορία, που προκάλεσε μια εγκάρσια δύναμη και στην ταχύτητα ροής. Ο Πίνακας 2-2 παρέχει μερικά πρόσφατα παραδείγματα, που περιλαμβάνει τα δευτεροβάθμια αποτελέσματα ροής στις επίπεδες διαμορφώσεις μικροκαναλιών.



Σχήμα 2-23. Αποτελέσματα του Dean σε κυκλικό microchannel.

Πίνακας 2-2. Παραδείγματα από πειράματα σε επίπεδα microchannels

Source	Design	Dimensions ^a	Flow rate	Result
Liu (2000)	Square-wave	w = 300 μm h = 150 μm	$Re = 6 - 140$	Chaotic advection: $Re > 70$
Mengeaud (2002)	Zig-zag	w = 100 μm h = 48 μm	$Re = 1 - 800$	Laminar recirculations: $Re > \sim 80$
Yi (2003)	Square bends		$Re = 1 - 80$	Secondary flow effectiveness: $Re > 10$
Therriault (2003)	Serpentine	d = 150 μm R = 500 μm	$to = 0.15 - 70$ $K = 0.08 - 38.3^b$	Linear dependence on effectiveness: $Re > 10$
Yamaguchi (2004)	Serpentine	w = 210 μm h = 205 μm R = 500 μm	$Re = 5 - 26^b$ $\kappa = 3.22 - 16.73$	Permanent distortion of interface: $Re = 26$
Vanka (2003)	Spiral Concentric	w = 793 μm h = 397 μm Max. R = 9.398 mm R = 6.096, 4.826, 3.556 mm	$Re = 6.8$ $\kappa = 1.98 - 13.8$ $\kappa = 2.4 - 3.2$	Significantly better mixing than straight channel geometries at $Re = 6.8$
Vanka (2004)	Curved duct		$Re = 0.1 - 10$	Enhanced mixing at $Re > 10$ for $Sc = 1000$
Howellefa (2004)	Circular (Figure 4)	w = 1.27 mm h = 1.27 mm R = 5 mm	$Re = 3 - 30$ $\kappa = 1.5 - 15.1^b$	Onset of secondary flow: $Re > 10$
Schönfeldetal (2004)	Meandering	w = 0.2 mm R = 1.0 mm	$Re = 2 - 2012$ $\kappa = 1 - 900$	Additional pair of vortices: $\kappa > 200$
Jiang (2004)	Meandering (Figure 8)	w = 1 mm h = 1 mm	$\kappa = 35 - 351$	Additional vortex pair: $\kappa > 140$

a w = width, h = height, d = diameter, R = radius of curvature.

b Η υδραυλική διάμετρος υπολογίστηκε από τις δεδομένες διαστάσεις και χρησιμοποιήθηκε έπειτα για να υπολογίσει το Re και (κ) για τα υδάτινα συστήματα.

2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

Σε μια πλειοψηφία των σχεδίων μικροαναμικτών, η αποδοτικότητα χαρακτηρίζεται από την εισαγωγή δύο παράλληλων υγρών ρευμάτων και της παρατήρησης της ελάχιστης απόστασης πέρα από την οποία γίνονται τα δύο αυτά ρεύματα αναμεμιγμένα. Εξετάζοντας πιο προσεκτικά, εντούτοις, είναι επίσης εμφανές ότι η διαδικασία και οι συγκρίσεις μεταξύ των αποδόσεων των διαφορετικών σχεδίων είναι περίπλοκη. Για παράδειγμα, οι διαφορετικές ερευνητικές ομάδες υιοθετούν τις διαφορετικές πειραματικές τεχνικές για να καθορίσουν πότε τα ρευστά ρεύματα γίνονται πλήρως αναμεμιγμένα. Αυτά τα πειράματα κυμαίνονται από την παρατήρηση των αλλαγών χρώματος στη διεπαφή μεταξύ των ρευμάτων των διαφορετικών χρωστικών ουσιών στην εισαγωγή των αντιδραστηρίων (π.χ. φενολφαιδίνης και υδροξειδίου του νατρίου) που αντιδρούν για να διαμορφώσουν ένα ορατό ενδιάμεσο μέτωπο μεταξύ των ρευμάτων. Εκτός από αυτές τις τεχνικές μέτρησης «top view», μερικές ομάδες έχουν υιοθετήσει την ομοεστιακή μικροσκόπηση στην εικόνα στις κάθετες διατομές (cross section) σε έναν τομέα της ροής. Η κατάσταση γίνεται πιο σύνθετη όταν συνδυάζεται περαιτέρω αυτή η ποικιλία των πειραματικών τεχνικών χαρακτηρισμού με τη χρήση των διαφορετικών εργαζόμενων ρευστών και των διαφορετικών αλγορίθμων ανάλυσης στοιχείων (πίνακες 2-3 και 2-4). Αυτή η έλλειψη ενός κοινού συνόλου πειραματικών και ανάλυσης πρωτοκόλλων, το καθιστά σχεδόν αδύνατο να συγκριθούν με κοινή λογική τα διαφορετικά σχέδια. Εντούτοις, αυτό είναι ακριβώς το στοιχείο που απαιτείται, προκειμένου να αναπτυχθούν οι προηγμένοι αναμίκτες για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των μελλοντικών μικροκατασκευών συστημάτων ανάλυσης. Ένας εξίσου σοβαρός παράγοντας που αγνοείται συχνά, είναι η ευκολία με την οποία ένα ιδιαίτερο σχέδιο μπορεί να κατασκευαστεί. Πολλά από τα σχέδια αναμικτών ενσωματώνουν μέχρι τώρα τις σύνθετες τρισδιάστατες δομές που, από μια πρακτική σκοπιά, είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν κατά τρόπο σύμφωνο με τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να κατασκευάσουν τα τυποποιημένα τμήματα “lab-on-a-chip”. Η ανάγκη να ενσωματωθούν οι εξειδικευμένες διαδικασίες ή και τα ακριβή πολυστρωματικά βήματα ευθυγράμμισης καθιστά αυτές τις προσεγγίσεις λιγότερο ελκυστικές και από οικονομικής άποψης και από προοπτικές ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Μερικοί απ' αυτούς, ακόμη, απαιτούν χρονοδιαγράμματα παραγωγής δεδομένων, για ώρες ή ακόμα και ημέρες.

Πίνακας 2-3. Η περίληψη των τεχνικών που χρησιμοποιούνται στην εικόνα και χαρακτηρίζει τη μίξη.

Source	Fluid system	Dye/indicator	Imaging	Intensity
Liu	Ethyl alcohol	Phenolphthalein, NaOH pellets	Top view	Normalized
Johnson	Carbonate buffer	Rhodamine B	Top view	Normalized
Stroock	Glycerol/water	Fluorescein- labeled polymer	Cross-section	a
Therriault	Water	Fluorescent red or green	Top view	Normalized
Hong	Aqueous sodium morpholine propane sulfonate buffer Perfluorodecaline/ C ₆ F ₁₁ C ₂ H ₄ OH	Fluo-4 and CaCl ₂ [Fe(SCN) _x] ^{(3-x)+}	Top view	Color
Kim	Ethanol	Phenolphthalein, NaOH, Rhodamine B	Top view	Normalized
Kim	Ethanol	Phenolphthalein, NaOH	Top view	Normalized
Park	Water	Fluorescein	Cross-section	a

Πίνακας 2-4. Μίξη των τεχνικών χαρακτηρισμού στα επίπεδα δευτεροβάθμια συστήματα ροής.

Source	Fluid system	Dye/indicator	Imaging	Intensity
Liu	Ethyl alcohol	Phenolphthalein, NaOH pellets	Top view	Normalized
Mengeaudet	Phosphate buffer	Fluorescein	Top	
Yiefa	Water	Dye	Top	
Therriault	Water	Fluorescent red or green	Top	Normalized
Yamaguchi	Water	Red, green	Top	
Vanka	Sucrose solution	Rhodamine 6G	Top	Color
Howellefa	Water	Blue food	Top	
Jiang	Water	NaSCN, Fe(NO ₃) ₃	Top	

Η παθητική μικροανάμιξη μπορεί να επιτευχθεί στις πιο σύντομες αποστάσεις με τη χρησιμοποίηση απλουστευμένων μικροκαναλιών (ιδανικά, επίπεδος 2D που περιτοιχίζεται ομαλά) που μπορούν να είναι εύκολα κατασκευάσιμα (ιδανικά, σε ένα ενιαίο βήμα λιθογραφίας) με βατές κλίμακες και ιδιαίτερα πρακτικές. Τα φυσικά αποτελέσματα ροής του Dean που προκύπτουν, στα μικρορευστά, στους κυρτούς αγωγούς προσφέρουν μια τεράστια ευχέρεια κατασκευής τέτοιων μικροαναμικτών που θα βοηθήσουν τη τεχνολογία μικροανάμιξης για να ανταποκριθεί στην αναμενόμενη δυνατότητα των τεχνικών αυτών.

Ενώ ένα μεγάλο ρεύμα παραγωγής τεχνικών μικροανάμιξης, έχουν συνεισφέρει στον τομέα της μικρορευστονικής, πολλές από αυτές, βέβαια, απαιτούν γεωμετρία καναλιών που χρησιμοποιούν τις σύνθετες τεχνικές επεξεργασίας. Αν και διαμορφώνοντας τις επιφάνειες με τα περίπλοκα χαρακτηριστικά γνωρίσματα φαίνονται απλές, ένα πρόβλημα προκύπτει όταν πρέπει δύο διαμορφωμένες επιφάνειες να ευθυγραμμιστούν, να συγκεντρωθούν και να συνδεθούν με την μέγιστη ακρίβεια. Σε περιπτώσεις όπου η σύνδεση είναι αμετάκλητη, η ευκαιρία να ευθυγραμμίσει εκ νέου σε περίπτωση αρχικού λάθους είναι ανύπαρκτη και πολλά από τα βήματα επεξεργασίας πρέπει να επαναληφθούν.

Η δημιουργία των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που χρησιμοποιούν τις εξειδικευμένες τεχνικές όπως για παράδειγμα η στερεολιθογραφία, είναι όχι μόνο χρονοβόρα αλλά και ακριβή για να εκτελεστεί από τα περισσότερα ερευνητικά εργαστήρια. Επιπλέον, τέτοιες τεχνικές είναι μη πρακτικές όταν πρόκειται για έρευνα όπου υπάρχουν διερευνητικά ή θεμελιώδη στάδια και πραγματοποιούνται πειράματα που πρέπει να εκτελεσθούν για να επιτύχουν τα βέλτιστα και σωστά αποτελέσματα. Η εξέταση όλων αυτών των παραγόντων και η πληθώρα μικροαναμικτών που υπάρχει στη βιβλιογραφία, και των δύο μεθόδων, ενεργητικών και παθητικών, προκύπτει η ανάγκη να δημιουργηθούν οι αναμίκτες που επιτυγχάνουν παθητική μικροανάμιξη στις πιο σύντομες πιθανές αποστάσεις με τη χρησιμοποίηση απλουστευμένων μικροκαναλιών που να μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα (ιδανικά, σε ένα ενιαίο βήμα λιθογραφίας) και σε χρονικά βήματα ανάλογα των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

3

ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Εισαγωγή	36
3.1	Σπειροειδεις μικροαναμίκτες	37
3.2	Αποσυνδεση και επανασυνδεση (P-SAR) micromixers	42
3.3	Ασυμμετρη ελικοειδης μιξη (ASM)	49
	3.3.1 Απεικόνιση ροής σε ένα κυρτό κανάλι με μια απότομη αύξηση διατομής	50
	3.3.2 Ασυμμετρικός ελικοειδής αναμίκτης (ASM)	51
3.4	Υβριδικες προσεγγισεις μικροαναμιξης	55
	3.4.1 ASM που συνδυάζονται με τα λοξά εμπόδια	56
	3.4.2 Απεικόνιση ροής	59
3.5	ASM – σε συνδιασμό με σπειροειδές τμήμα	59
3.6	Ηλεκτροκινητική μίξη στα συστήματα μικροαναμιξης	62

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο, ερευνάται η χρήση διαφόρων γεωμετριών οι οποίες θα καταδείξουν ποια από αυτές έχει την αποδοτικότερη μίξη με σχήματα τα οποία θα μπορούσαν να κατασκευαστούν εύκολα και οικονομικά. Τα δομικά μοντέλα που γενικότερα χρησιμοποιούνται είναι τα σπειροειδή, ο (P-SAR) αποσύνδεση και επανασύνδεση, το (ASM) ασύμμετρος ελικοειδής αναμίκτης και το υβριδικό μοντέλο. Σε όλα αυτά τα μοντέλα η λογική έχει ως βάση την ανάμιξη με της ροές του Dean οπότε θα προκύψουν άμεσα συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση. Οι φυσικές ροές του Dean προσφέρουν μια ελπιδοφόρο προσέγγιση για να υπερνικήσουν πολλούς από τους περιορισμούς που συνδέονται με 2D επίπεδα μικροκανάλια. Τα ρευστά που οδηγούνται μέσω των καμπυλόγραμμων καναλιών δοκιμάζουν μια αλληλεπίδραση μεταξύ των αδρανών τοιχωμάτων ενεργώντας στην άμεση αξονική κίνηση και των φυγοκεντρικών αποτελεσμάτων ενεργώντας κατά μήκος της ακτίνας του αγωγού και της όλης κυρτότητας. Υπό τους κατάλληλους όρους, αυτά τα αποτελέσματα καθιερώνουν μια ακτινωτή κλίση πίεσης, της οποίας, το μέγεθος μπορεί να γίνει επαρκές για να παραγάγει έναν εγκάρσιο τομέα ροής.

Τα ακόλουθα σχέδια μικροαναμικτών ερευνώνται και χαρακτηρίζονται:

- a. Σπειροειδής γεωμετρία: τα σπειροειδή τμήματα που παρατάσσονται κατά μήκος της πορείας της ροής. Η προσθήκη περισσότερων στροφών στη σπείρα αυξάνει το γενικό μήκος περιγράμματος του καναλιού αλλά κρατά το μέγεθος του καναλιού στο ελάχιστο. Λόγω της κυρτότητας προκαλούνται δίνες που συμβάλλουν στη μίξη στα υψηλά ποσοστά ροής, ενώ τα αρκετά μεγάλα μήκη καναλιών προκαλούν την μίξη διάχυσης στα χαμηλότερα ποσοστά ροής.
- b. Επίπεδη διάσπαση-και-επανασύνδεση, (Planar split-and-recombine) (P-SAR): κυρτή γεωμετρία στην οποία το κύριο κανάλι ροής είναι χωρισμένο στα πολλαπλάσια στενά κανάλια με ανάλογα ρεύματα και έπειτα ευθυγραμμισμένα εκ νέου στις ακριβείς θέσεις ρέουν σε κοινό κανάλι. Από τη δράση των αντιθέτως περιστρεφόμενων δινών του Dean τα δύο ρεύματα αντιδραστηρίων που εισάγονται στον αναμίκτη, πολλαπλασιάζονται και ορίζονται όπως τα εναλλασσόμενα ελάσματα ώστε να αυξηθεί η γενική ενδιάμεση περιοχή για τη διάχυτη μίξη.
- c. Ασύμμετρος ελικοειδής αναμίκτης (Asymmetric Serpentine Mixer) (ASM): γεωμετρία στην οποία τα συμβατικά ελικοειδή κανάλια, είναι διαμορφωμένα

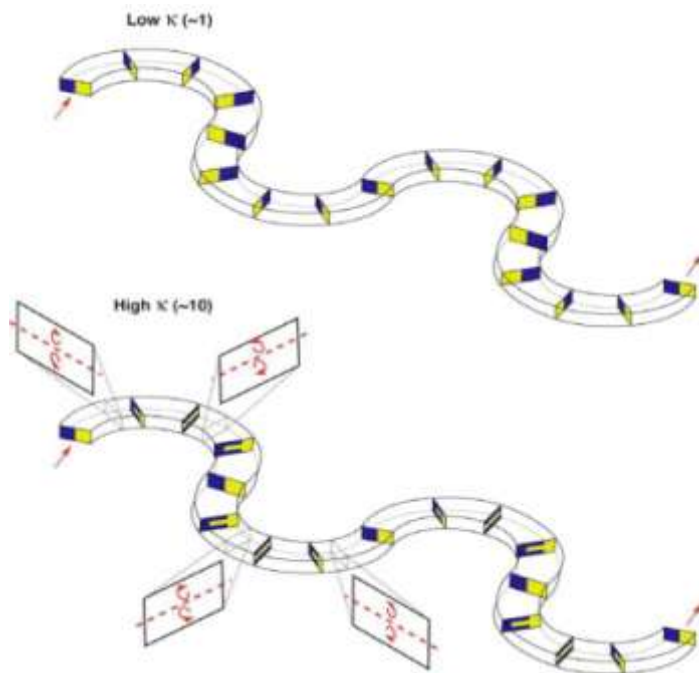
με τις απότομες εναλλαγές πλάτους καναλιών σε περιοδικές θέσεις. Οι επεκτάσεις εισάγουν ένα νέο σύστημα δίνης στο οριζόντιο επίπεδο που ενεργεί σε αρμονία με το προϋπάρχον, προκληθέν ζευγάρι δίνης του Dean στο κάθετο επίπεδο, ώστε να αναμίξει άμεσα τα ρεύματα με τα αυξανόμενα ποσοστά ροής.

- d. Οι υβριδικές διαμορφώσεις μικροαναμίκτη: βασισμένες στο συνδυασμό των ευδιάκριτων στοιχείων μίξης όπως ο εγκάρσιες ροές Dean, τα αποτελέσματα δίνης επέκτασης έχουν βοηθήσει στο σχεδιασμό μικροαναμικτών που θεωρούνται αποτελεσματικά σε πολύ επεκταμένο αριθμό Re . Ένα παράδειγμα μιας απλής διαδικασίας για να βελτιώσει την αποδοτικότητα του μικροαναμίκτη περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας υβριδικής προσέγγισης, με το οποίο τα στοιχεία που σχεδιάζονται στις προκαταρκτικές μελέτες, αποτελεσματικός $Re > 1$, θα συνδυαστεί (είτε σε σειρά είτε παράλληλα) με στοιχεία αποτελεσματικά σε $Re < 1$. Μια τεχνική, θα ήταν να ενσωματωθούν τα χαοτικά αποτελέσματα με το βασικό σχέδιο ASM, με τη διαμόρφωση αυλάκωσης ή με τις δομές ψαροκόκκαλων στο πάτωμα του καναλιού. Μια άλλη τεχνική, περιλαμβάνει, το συνδυασμό της σπείρας και των σχεδίων ASM.

3.1 ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΙΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΕΣ

Εδώ ερευνάται τη χρήση της συμπαγούς σπειροειδής-διαμορφωμένης γεωμετρίας ροής με σκοπό να επιτύχει την αποδοτική μίξη με ένα σχήμα που μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο βήμα λιθογραφίας χωρίς την ανάγκη για την πολυστρωματική ευθυγράμμιση. Η αρχική εργασία με τα αποτελέσματα του Dean έχει περιλάβει την έρευνα για τη μίξη σπειροειδών καναλιών. Δυστυχώς, σε αυτά τα κανάλια που χρησιμοποιούν την αντίσταση των κυρτών τμημάτων, τα αποτελέσματα που προκαλούν την ανάμιξη, είναι η περιστροφή των ροών του Dean αντιστρέφοντας τα ρευστά καθώς μεταφέρονται από την μία καμπή στην επόμενη, και αυτός ο κύκλος συνεχίζεται κατά μήκος του ολόκληρου μήκους του καναλιού (Σχήμα 3-1). Στη συμβατική γεωμετρία, οποιαδήποτε μίξη που εμφανίζεται είναι καθαρά από τη διάχυση. Στα κυρτά κανάλια, οι εγκάρσιες δευτεροβάθμιες ροές του Dean προκύπτουν ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αδρανών και φυγοκεντρικών δυνάμεων. Με το σχεδιασμό των κυρτών καναλιών με τα σπειροειδή σχήματα, η δύναμη αυτών των δευτεροβάθμιων ροών αυξάνεται όσο τα ρευστά μετακινούνται από τις εξωτερικές στις εσωτερικές περιοχές της σπειροειδούς πορείας όπου η ακτίνα της κυρτότητας είναι μικρότερη.

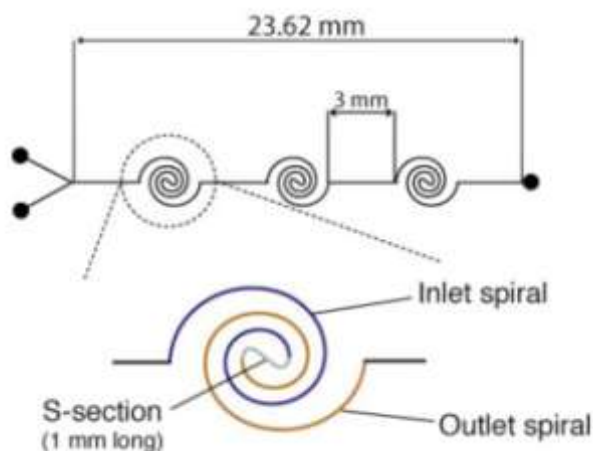
Επιπλέον, η κατεύθυνση της περιστροφής των δευτεροβάθμιων ροών είναι συνεχής σε ολόκληρο το μήκος της σπείρας, σε σύγκριση με τα σχέδια που ενσωματώνουν τα εναλλασσόμενα τμήματα της αντίστασης της κυρτότητας (π.χ., ελικοειδή κανάλια). Στα ποσοστά χαμηλής ροής ($Re < 1$), η δύναμη αυτών των δευτεροβάθμιων ροών δεν είναι επαρκής για να διαταράξει σημαντικά την στρωτή ροή, και η μίξη μεταξύ δύο παράλληλων ρευμάτων οφείλεται πρώτιστα από τη διάχυση. Εντούτοις, δεδομένου ότι αυτά τα κανάλια είναι ένα σπειροειδές σχήμα, το απαραίτητο μήκος που απαιτείται για να επιτευχθούν αξιόλογα επίπεδα μίξης, από τη διάχυση, μπορεί να αυξηθεί, συγχρόνως κρατώντας το γενικό μέγεθος του καναλιού στο ελάχιστο (Πίνακα 3-1). Με το αυξανόμενο ποσοστό ροής ($Re > 1$), οι δευτεροβάθμιες ροές γίνονται ισχυρότερες και αυξάνουν πολύ την έκταση της μίξης. Κατά συνέπεια, η σπειροειδής γεωμετρία προσφέρει τα πλεονεκτήματα και υπό τους χαμηλούς και υψηλούς όρους ποσοστού ροής.



Σχήμα 3-1. Εξιδανικευμένα φαινόμενα ροής του Dean σε ελικοειδές microchannel.

Η ιδέα των σπειροειδών – διαμορφωμένων μικροκαναλιών δημιουργήθηκε από το ότι προσφέρουν το πλεονέκτημα να στηρίζουν την κατεύθυνση της εγκάρσιας περιστροφής του Dean για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η επίδραση της αντίστροφης εγκάρσιας περιστροφής που είναι επικρατούσα στην ελικοειδή γεωμετρία μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, η γεωμετρία σπείρας που απαιτείται για να χτιστούν αυτά τα μικροκανάλια καταλαμβάνει αρκετά μικρό εμβαδόν όταν ενσωματώνεται στα εργαστηριακά chip μικροσυστημάτων. Σε τέτοια κανάλια το ρευστό δοκιμάζει μια μείωση

της ακτίνας καμπυλότητας, καθώς ρέει προς τα κάτω, συνοδευόμενο από μια αντίστοιχη αύξηση στη δύναμη της εγκάρσιας δευτεροβάθμιας ροής.



Σχήμα 3-2. Σχηματική αναπαράσταση του σπειροειδούς δικτύου που ενσωματώνει τρία σπειρώματα. Κάθε τμήμα αποτελείται από μια σπείρα κολπίσκων που ενώνεται από το κεντρικό «S» - τμήμα.

Ποικίλα σπειροειδή κανάλια σχεδιάστηκαν, κάθε ένα που ενσωματώνει τη μεμονωμένη σπείρα αναμιγνύοντας τα τμήματα που συνδέθηκαν το ένα μετά το άλλο. Κάθε τμήμα αποτελούταν από μια σπείρα κολπίσκων που συνδέθηκε με κεντρικό «S» - με σκοπό την επικοινωνία με το επόμενο τμήμα σπείρας (Σχήμα 3-2).

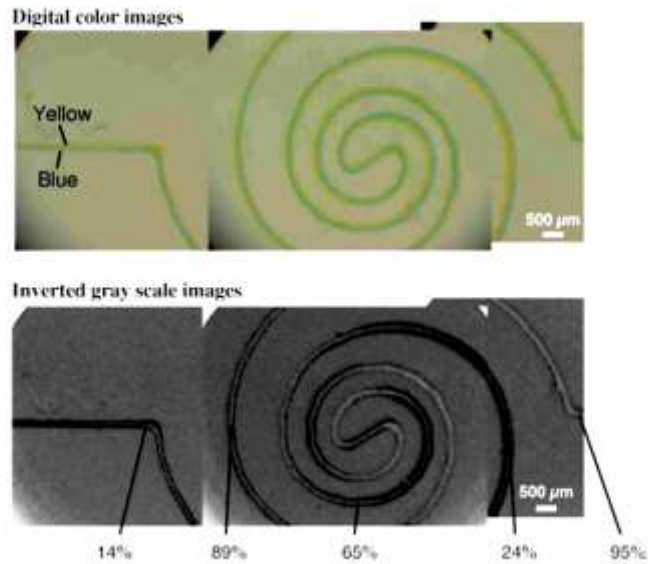
Παρατηρώντας μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν για διάφορες διαστάσεις αλλά και ποσότητες σπειροειδών καναλιών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3-1, διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του μήκους των μεμονωμένων σπειροειδών περιγραμμάτων, τα πιο υψηλά επίπεδα μίξης μπορούν να επιτευχθούν μέσα στο πρώτο σπειροειδές τμήμα (Σχήμα 3-3) Το αυξανόμενο μήκος όχι μόνο παρέχει μια μακροχρόνια κατάσταση για τη διάχυση στα αργά ποσοστά ροής, αλλά και βοηθάει στη στήριξη της εγκάρσιας δευτεροβάθμιας ροής. Η δύναμη των εγκάρσιων δευτεροβάθμιων ροών είναι σε ένα μέγιστο στα τόξα με τη μικρότερη ακτίνα κυρτότητας (δηλ., στη κεντρική περιοχή της σπείρας), και ως εκ τούτου στα υψηλότερα ποσοστά ροής η περισσότερη μίξη αναμένεται για να εμφανιστεί σε αυτά τα τμήματα.

Πίνακας 3-1. Διαστάσεις των πέντε διαφορετικών σπειροειδών σχεδίων καναλιών που ερευνώνται

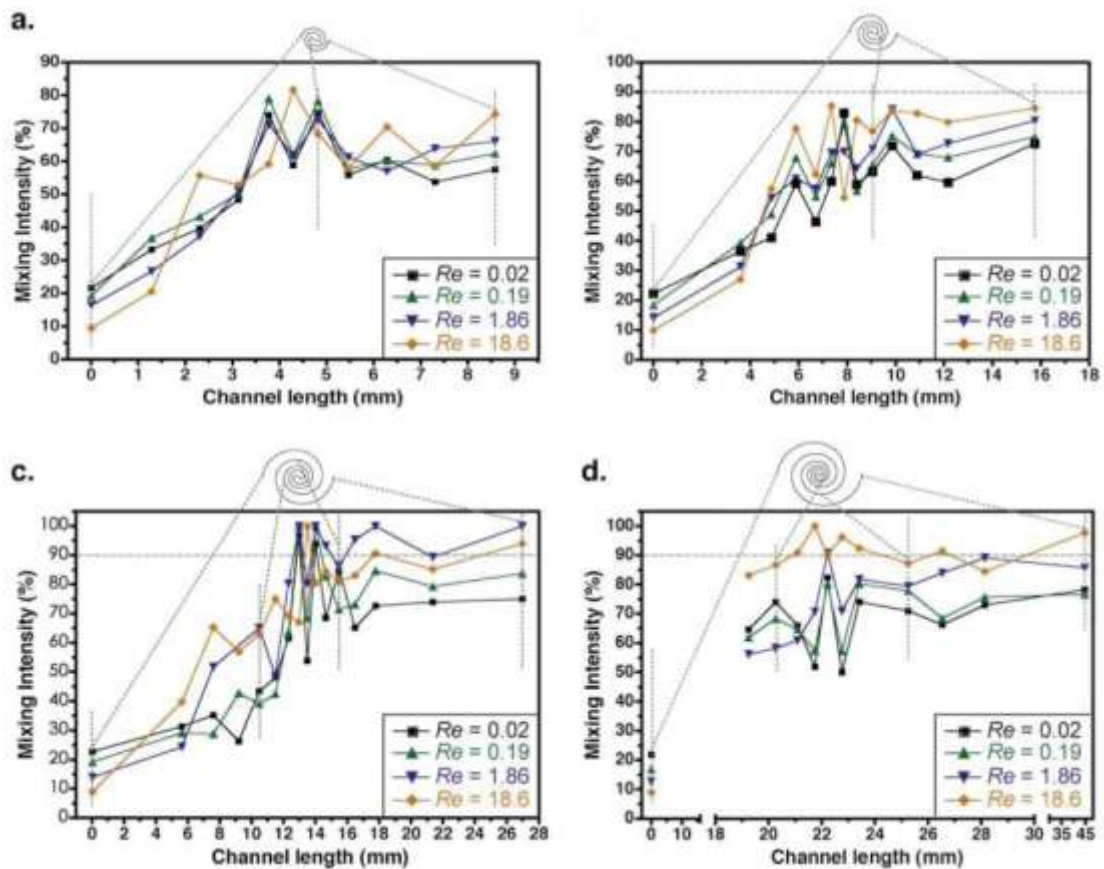
Όλες οι ποσότητες μετριοούνται στις μονάδες του mm. Όλα τα κανάλια είναι ύψους 29μm

Spiral design	Arcs on spiral	Max. radius of curvature	Length of inlet/outlet spiral	Length of mixing section	Footprint of mixing section
1	2	0.52	1.47	3.97	1.2x1.0
2	4	0.81	3.77	8.57	1.7x1.5
3	6	1.27	7.35	15.73	2.9x2.3

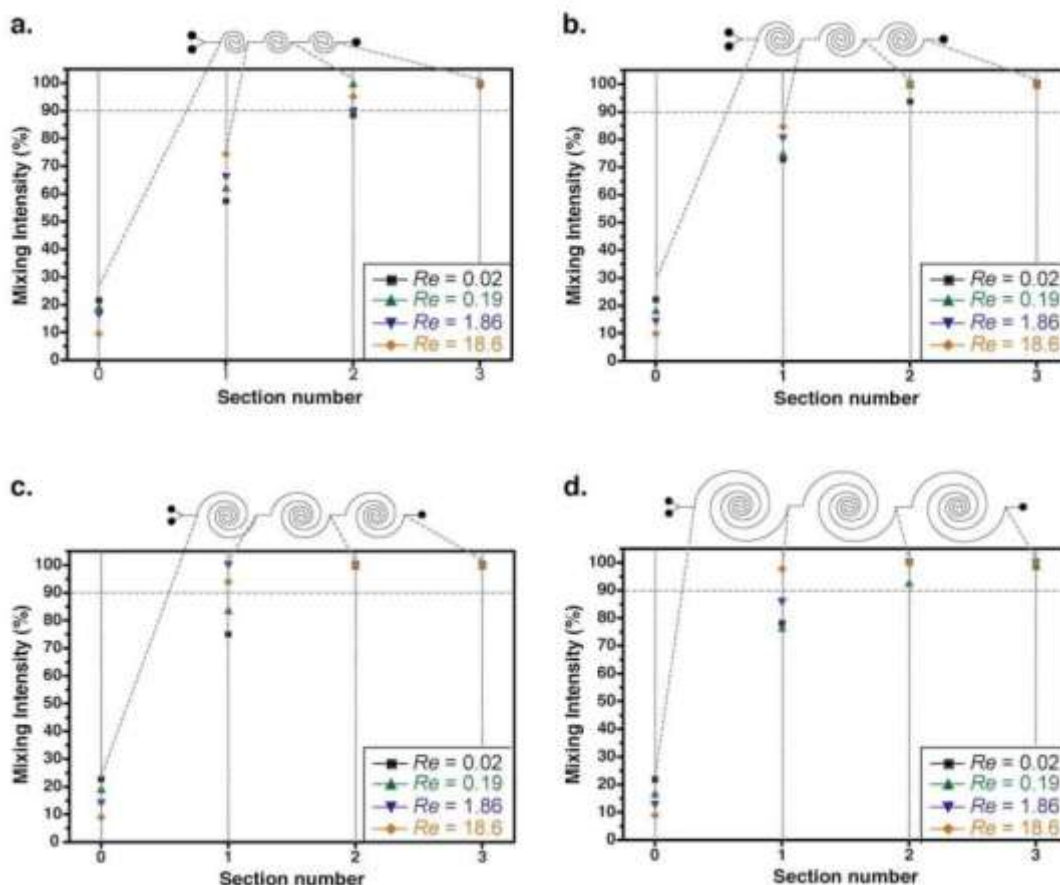
4	8	1.98	12.96	26.95	4.4x3.6
5	10	3.10	21.73	44.49	6.9x5.5



Σχήμα 3-3. Εικόνες της σπειροειδούς μίξης. Ψηφιακές εικόνες χρώματος



Σχήμα 3-4. Ένταση μίξης κατά μήκος της πορείας ροής του πρώτου σπειροειδούς τμήματος. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται είναι για τέσσερα (a), έξι (b), οκτώ (c) και δέκα (d) τόξα, σε σπειροειδή κανάλια.



Σχήμα 3-5. Ένταση μίξης στο τέλος κάθε σπειροειδούς τμήματος. Τα στοιχεία λαμβάνονται ως λειτουργία του Re στο τέλος κάθε τμήματος για τέσσερα (a), έξι (b), οκτώ (c) και δέκα (d) τόξα, σε σπειροειδή κανάλια.

Περίληψη του σπειροειδούς μικροαναμίκτη

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάστηκε μια περιεκτική μελέτη του ρευστού που αναμίχτηκε σε σπειροειδή μικροαναμίκτη. Στα χαμηλότερα ποσοστά ροής, η διάχυση είναι ο αρχικός μηχανισμός από τον οποίο η μίξη εμφανίζεται. Στα υψηλότερα ποσοστά ροής, η δευτεροβάθμια ροή Dean επηρεάζει και συμβάλλει στα αυξανόμενα επίπεδα μίξης. Μέσα στα σπειροειδή περιγράμματα, δοκιμάζει μια αύξηση στο μέγεθος των φυγοκεντρικών δυνάμεων που συνοδεύονται από μια αύξηση της απόδοσης αντίστοιχα στη μίξη. Τα μήκη των σπειροειδών περιγραμμάτων μπορούν να αυξηθούν μέσα στα μεμονωμένα σπειροειδή τμήματα για να επιτύχουν την πρόσθετη μίξη σε ένα τμήμα. Εναλλακτικά, τα πολλαπλάσια τμήματα των σπειρών με λιγότερα τόξα μπορούν να σχεδιαστούν για να επιτύχουν τη μίξη στα υψηλότερα ποσοστά ροής δεδομένου ότι τα φυγοκεντρικά αποτελέσματα είναι ισχυρότερα στις εσωτερικές περιοχές της σπείρας. Σε καθεμία περίπτωση, η ιδιαίτερη ευελιξία είναι διαθέσιμη στα κανάλια σχεδίου βάσει των ποσοστών ροής και του

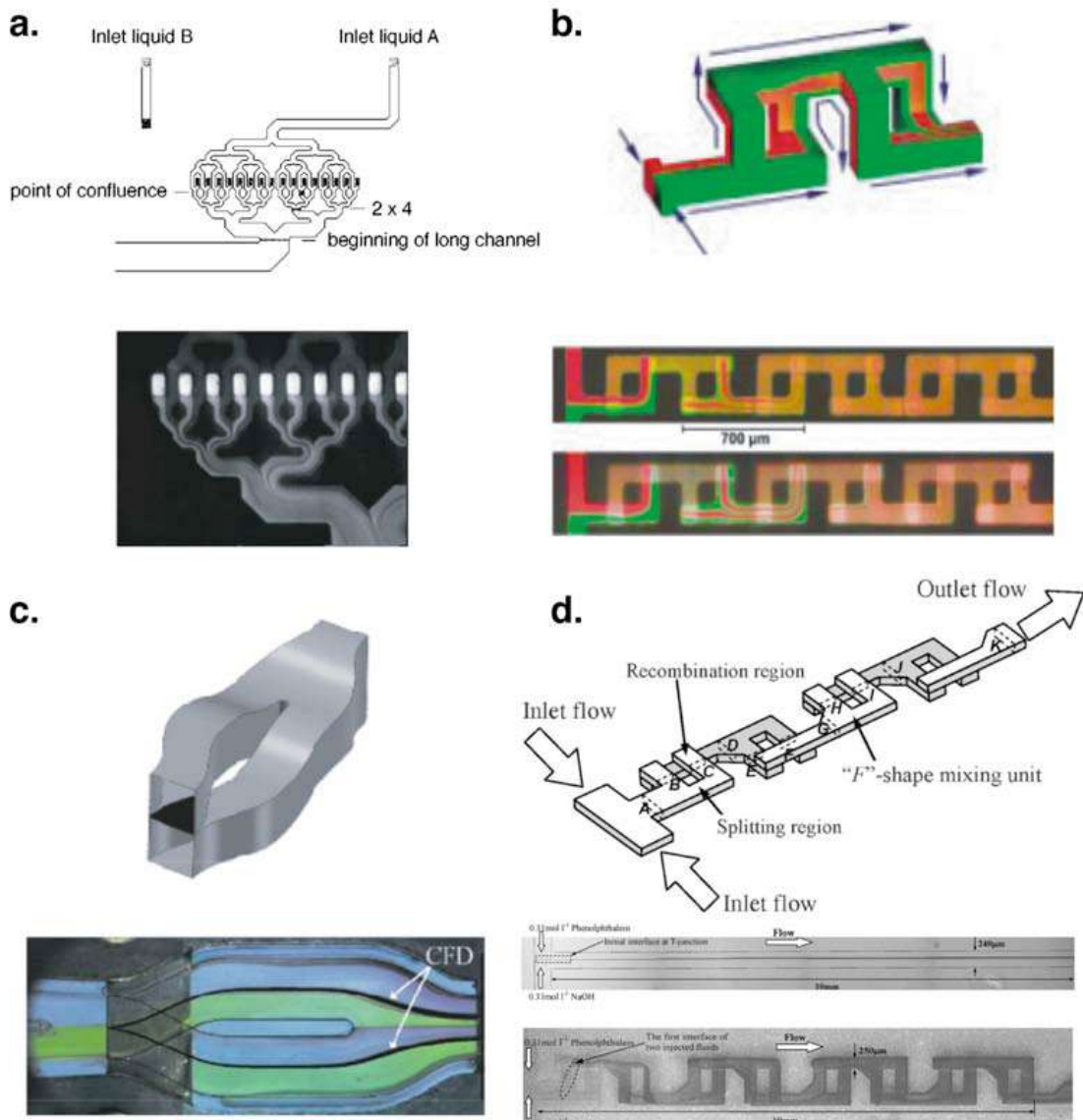
διαθέσιμου εμβαδού των συσκευών. Κανένας εξειδικευμένος εργαστηριακός εξοπλισμός δεν χρησιμοποιείται και τα κανάλια κατασκευάζονται σε λιγότερο από 30 λεπτά. Τα σχέδια μικροαναμικτών μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα στα περισσότερα μικρορευστονικά συστήματα που απαιτούν την απλή επίπεδη γεωμετρία και την αποδοτική μίξη. Η ενσωμάτωση των απότομων επεκτάσεων στις κατάλληλες θέσεις κατά μήκος των καναλιών μπορεί περαιτέρω να ενισχύσει την αποδοτικότητα αυτών των σπειροειδών αναμικτών. Οι επεκτάσεις προκαλούν ένα εγκάρσιο ζευγάρι δίνης στο οριζόντιο επίπεδο σε κάθε πλευρά της εισόδου της επέκτασης. Όταν συνδέονται με τις προκληθείσες δίνες που υπάρχουν στο κάθετο επίπεδο, τα ρευστά είδη μπορούν να ανακατευτούν γρήγορα από τη δράση αυτού του συστήματος πολυδίνης. Η χρησιμότητα της ενσωμάτωσης των επεκτάσεων αναλύεται σε παρακάτω υποκεφάλαιο, το οποίο περιγράφει τη λειτουργία ενός νέου ασυμμετρικού ελικοειδούς αναμικτή (ASM).

3.2 ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΣΥΝΔΕΣΗ (P-SAR) MICROMIXERS

Ο (P-SAR) (planar split-and-recombine) μικροαναμικτής, είναι αναμικτής που καταδεικνύει πως, η διάσπαση και η επανασύνδεση μπορεί να επιτευχθεί στην επίπεδη 2D μικροκανάλια. Τα εγγενή περιστροφικά χαρακτηριστικά των ροών του Dean στα κυρτά κανάλια αξιοποιούνται εδώ. Η διάσπαση και ο επανασυνδυασμός είναι μια παθητική τεχνική μικροανάμιξης που περιλαμβάνει την δημιουργία πολλαπλών εναλλασσόμενων φύλλων ρευστών που αναμιγνύονται, δημιουργώντας μια αυξανόμενη ενδιάμεση περιοχή, πέρα από την οποία, η διάχυτη μεταφοράς, μπορεί να πραγματοποιηθεί. Με τη χρησιμοποίηση αυτής της προσέγγισης, οι εκθετικές μειώσεις των μηκών, της μίξης, είναι εφικτές και αναμενόμενες. Οι συμβατικοί αναμικτές SAR, στηρίζονται στις σύνθετες τεχνικές επεξεργασίας για να προσδιοριστεί ο αριθμός βασικών διαδικασιών και των απαραίτητων παράλληλων ροών. Παραδείγματος χάριν, το σχέδιο ενός τμηματικού αναμικτή στρωτών παράλληλων ροών περιλαμβάνει μια διαδικασία επεξεργασίας, πολλαπλών βημάτων, αρχίζοντας με το χωρισμό των δύο ρευμάτων, όπου ένα ρεύμα κατευθύνεται συνήθως υπό γωνία στο άλλο ρεύμα, κατόπιν τα δύο μεμονωμένα ρεύματα διαχωρίζονται στα πολλαπλάσια στενότερα ρεύματα και έπειτα επαναπροσανατολίζονται με έναν τέτοιο τρόπο, ώστε τα εναλλασσόμενα παράλληλα ρεύματα των δύο ουσιών να οδεύουν σε ένα ενιαίο κανάλι ροής.

Οι παράλληλοι αναμικτές, στρωτών ροών, συνήθως περιλαμβάνουν τον διαχωρισμό των επιμέρους ρευμάτων εισόδου σε πολλαπλές ροές πριν από την συνένωση τους, με

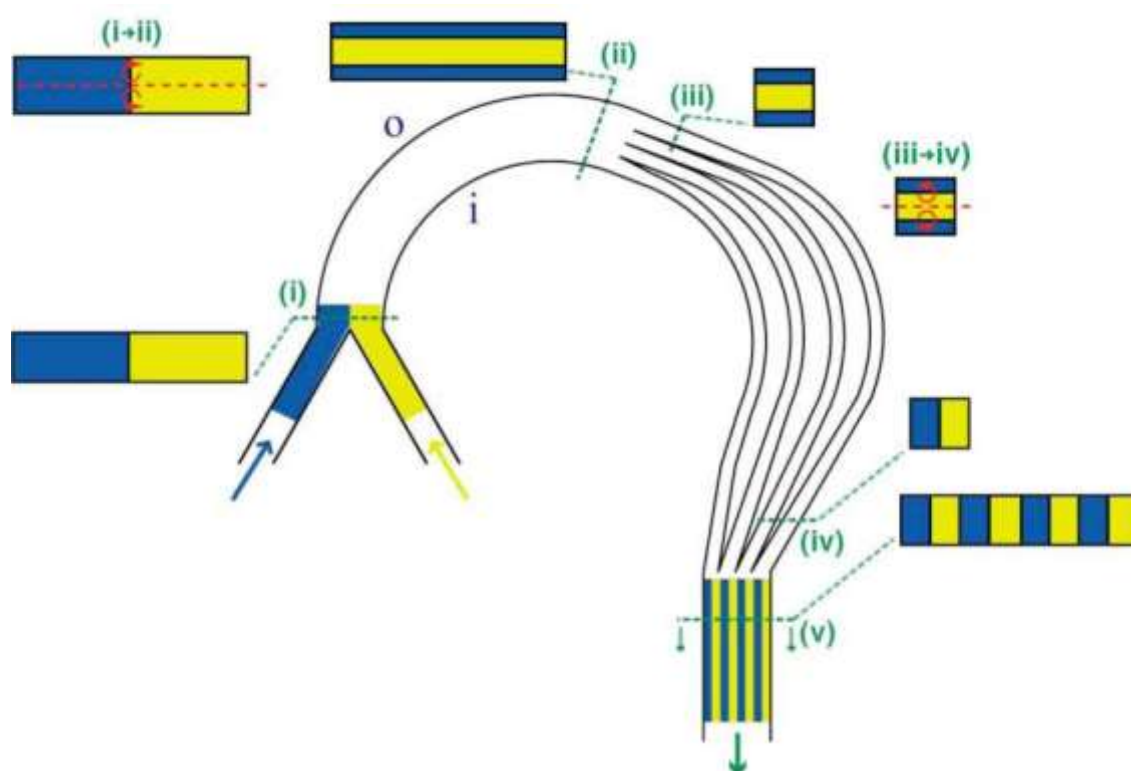
έναν εναλλασσόμενο τρόπο. Μερικά παραδείγματα των πρόσφατων αναμικτών SAR παρουσιάζονται στο (Σχήμα 3-6). Η επεξεργασία τέτοιων συστημάτων απαιτεί συνήθως εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές για να δημιουργηθούν και να στηθούν αυτές οι σύνθετες τρισδιάστατες δομές. Επιπλέον, εάν τέτοιοι αναμικτές πρόκειται να γίνουν σε στερεότυπη βάση, οι δαπάνες επεξεργασίας είναι ένας σοβαρός παράγοντας που πρέπει να εξετάζεται κάθε φορά. Τα φαινόμενα ροής του Dean προσφέρουν μια ελπιδοφόρο προσέγγιση στους αναμικτές SAR στην επίπεδη 2D γεωμετρία. Οι αναμικτές κατασκευάζονται από ένα ενιαίο βήμα λιθογραφίας χωρίς την ανάγκη για τον εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές. Οι συμβατικοί αναμικτές SAR έχουν έναν βέλτιστο αριθμό διασπασμένων ρευμάτων, ενώ, οι αναμικτές P-SAR, λειτουργούν καλύτερα με την αύξηση των αριθμό των πολλαπλών ροών ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος ανάμιξης, συνεχώς μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των ρευμάτων διάσπασης. Μια σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας που ενσωματώνεται μαζί με μια εικόνα ροής παρουσιάζεται στο σχήμα 3-6 όπου: (a) Παράλληλος αναμικτής ελασματοποίησης του (Bessoth, F. G. deMello, A. J. Manz, A., *Microstructure for efficient continuous flow mixing*, *Anal. Commun.* 1999, 36, 213-215). (b) Τμηματικός αναμικτής ελασματοποίησης. (Chen, H.; Meiners, J.-C. *Topological mixing on a microfluidic chip*, *Appl. Phys. Lett.* 2004, 84, 2193-2195. 2004 American Institute of Physics). (c) Βελτιστοποιημένος αναμικτής SAR από (Schönfeld, F.; Hessel, V.; Hoffman, C., *An optimized split-and-recombine micro-mixer with uniform 'chaotic' mixing*, *Lab Chip* 2004, 4, 65-69). (d) Αναμικτής δευτέρης γενιάς, (Kim, D. S. Lee, S. H. Kwon, T. H.; Ahn, C. H., *A serpentine laminating micromixer combining splitting/recombination and advection*, *Lab Chip* 2005, 5, 739-747).



Σχήμα 3-6. Παραδείγματα των επιλεγμένων αναμικτών SAR από τη βιβλιογραφία.

Ο εγγενής περιστροφικός χαρακτήρας των ροών του Dean μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα απλό 2D μικροκανάλι για να αυξήσει την ενδιάμεση περιοχή μεταξύ των ουσιών χωρίς την ανάγκη να κατασκευαστεί η περίπλοκη τρισδιάστατη γεωμετρία (π.χ. σχήμα 3-6). Σε αυτό το επίπεδο διάσπαση- επανασυνδυασμός, στο σχέδιο (P-SAR), το ρεύμα υγρού, οδεύει μέσω ενός κυρτού τμήματος που προκαλεί τις ταυτόχρονες περιστροφές (-90°) στα ανώτερα και κατώτερα στρώματα του καναλιού, ενώ φτάνοντας σε ένα επιθυμητό σημείο και αφού έχουν παραλληλιστεί οι ροές, πραγματοποιείται πολλαπλή διάσπαση της ροής σε επιμέρους κανάλια όπου η ροή συνεχίζει κατά μήκος των κυρτών τροχιών έτσι ώστε κάθε μεμονωμένο διασπασμένο ρεύμα να δοκιμαστεί σε ένα δεύτερο ζευγάρι δυνάμεων και περιστροφών κατά 90° . Αυτά τα διαδοχικά βήματα περιστροφής μεταθέτουν τη θέση κάθε είδους έτσι ώστε εναλλασσόμενα φύλλα να διαμορφώνονται

όταν επανασυνδέονται τα ρεύματα. Η απεικόνιση μιας εξιδανικευμένης ροής του Dean που μεσολαβούν, η διάσπαση και ο επανασυνδυασμός της μίξης, παρουσιάζεται στο σχήμα 3-7. Τα παράλληλα υγρά ρεύματα εισάγονται στο κυρτό μικροκανάλι (θέση i) και οδεύουν μέσω αυτού μέσω ενός κυρτού τμήματος που προκαλεί τις ταυτόχρονες περιστροφές -90° στα ανώτερα και χαμηλότερα μισά του καναλιού (μεταξύ των θέσεων i και II) στο σημείο (θέση III) όπου η ροή είναι διαχωρίζεται στα πολλαπλάσια ρεύματα που συνεχίζονται κατά μήκος των κυρτών τροχιών έτσι ώστε κάθε μεμονωμένο διασπασμένο ρεύμα να πραγματοποιήσει μια άλλη σειρά από περιστροφές κατά -90° (μεταξύ των θέσεων III και IV). Αυτά τα διαδοχικά βήματα περιστροφής μεταθέτουν τη θέση κάθε είδους έτσι ώστε εναλλασσόμενα φύλλα να διαμορφώσουν μια οριστική μορφή πριν επανασυνδέθούν (θέση V). Στο σχήμα «α» και «ο» ορίζουν τους εσωτερικούς και εξωτερικούς τοίχους των καναλιών, αντίστοιχα.



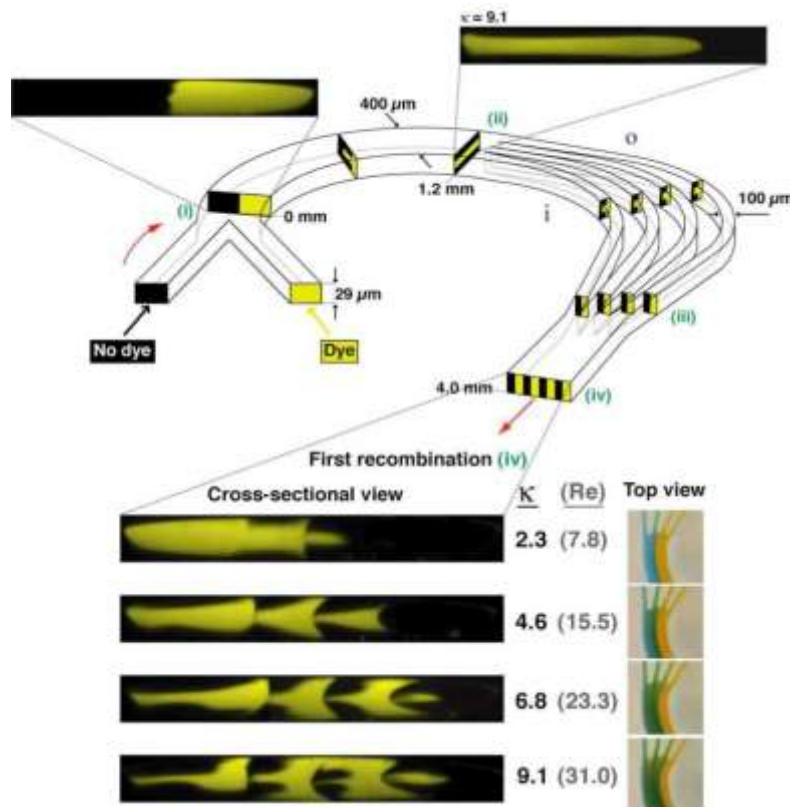
Σχήμα 3-7. Δισδιάστατο μικροκανάλι P-SAR

Σε χαμηλές ταχύτητες ροής, η δευτερεύουσα ροή δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλέσει επαρκή περιστροφή με αποτέλεσμα το ρεύμα που ρέει κατά μήκος του εσωτερικού τοιχώματος του καναλιού να παρουσιάζει ελάχιστη απόκλιση ή έλξη προς το εξωτερικό τοίχο. Αυτό είναι προφανές από τις ομοεστιακές εικόνες που προέρχονται από το εσωτερικό των καναλιών σε απόσταση 3,0 χιλιοστά κατάντη στη θέση iv στο σχήμα 3-7. Στα υψηλότερα ποσοστά ροής, εντούτοις, τα ρευστά υποβάλλονται σε μια ακολουθία

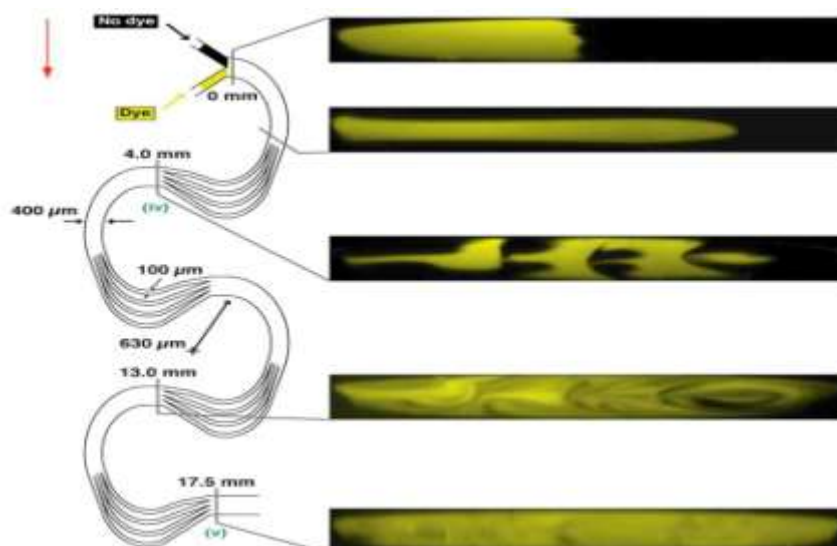
περιστροφών ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης δύναμης των εγκάρσιων δευτεροβάθμιων ροών με αποτέλεσμα κατά την επανασύνδεση, να προκύπτει αντίστοιχη αύξηση της περιοχής διεπαφής. Οι εικόνες ροής που λαμβάνονται στο τέλος του πρώτου στοιχείου P-SAR απεικονίζουν σαφώς το σχηματισμό στα υψηλότερα ποσοστά ροής (σχήμα 3-8).

Αν τώρα δημιουργηθεί μια αλληλουχία από στοιχεία P-SAR, έστω τέσσερα, θα διαπιστωθεί ότι η ροή οδεύοντας μέσα από αυτή την διάταξη, αναγκάζεται να πραγματοποιεί μια σειρά από μίξεις που θα έχουν ως αποτέλεσμα την μέγιστη ανάμιξη των δύο ή και περισσότερων ρευστών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τέτοιου είδους διάταξη ενώ παράλληλα παρουσιάζεται η πρόοδος της μίξης.

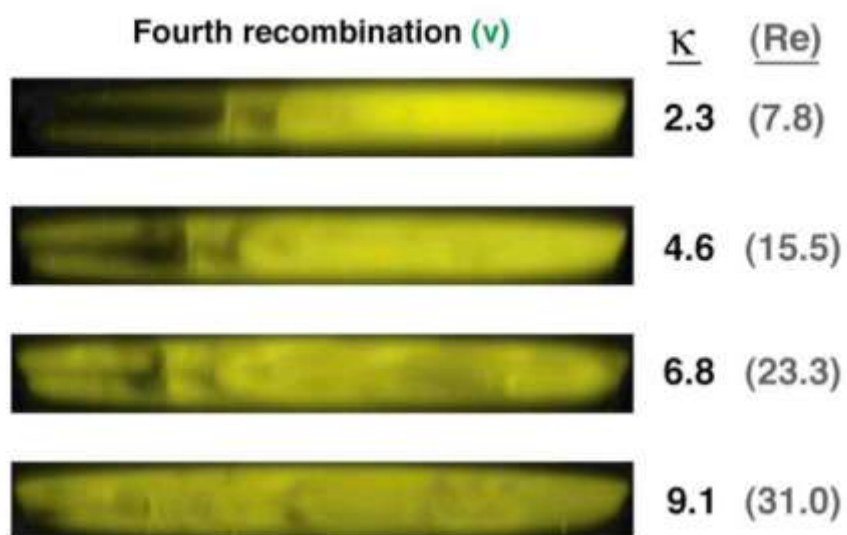
Το σχήμα 3-9 παρουσιάζει διατομικές ομοεστιακές εικόνες που λαμβάνονται στις διαφορετικές, κατά μήκος του καναλιού διατομές, για $\kappa = 9.1$ (όπου $Re = 31.0$). Οι ομοεστιακές εικόνες που λαμβάνονται στα διαφορετικά ποσοστά ροής με (κ) για τιμές ($2.3 < \kappa < 9.1$) στο τέλος του επανασυνδυασμού του τέταρτου στοιχείου P-SAR δείχνουν ότι το επίπεδο μίξης έφτασε στο 90% (Σχήμα 3-10).



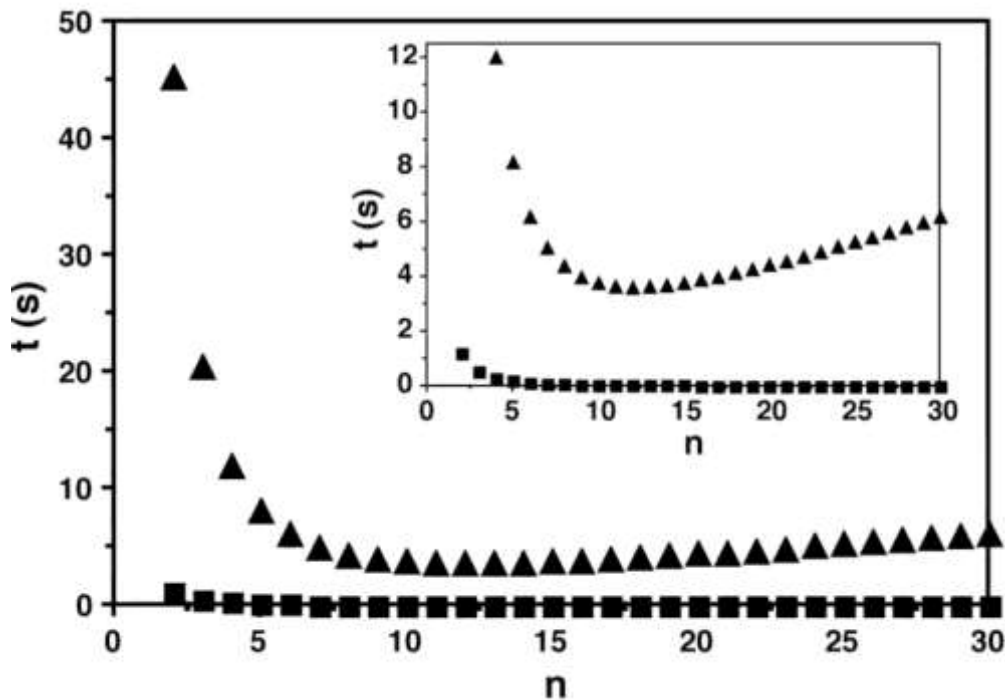
Σχήμα 3-8. Απεικόνιση ροής στο πρώτο στοιχείο P-SAR.



Σχήμα 3-9. Διατομικές εικόνες για $\kappa = 9.1$ κατά μήκος του P-SAR micromixer. Οι ομοεστιακές εικόνες λήφθηκαν για κ που αντιστοιχεί $Re = 31.0$.



Σχήμα 3-10. Ομοεστιακές διατομικές εικόνες που λαμβάνονται στον τέταρτο επανασυνδυασμό. Οι εικόνες αντιστοιχούν στη θέση IV στα σχήματα 3-9.



Σχήμα 3-11. Ο χρόνος ανάμειξης για τα σχέδια συμβατικών αναμικτών SAR και P-SAR.. Σύγκριση του συνολικού χρόνου ανάμειξης για αντίστοιχους αριθμούς διασπάσεων για τα συμβατικά micromixer σχέδια SAR [▲] και για P-SAR [■] micromixer σχέδια.

Περίληψη του P-SAR micromixers

Η έννοια SAR (split-and-recombine) διάσπαση-και-επανασυνδυασμός στη μίξη σε ένα επίπεδο σχήμα μέσω ενός νέου P-SAR μικροαναμικτή, εμφανίζεται να είναι ιδιαίτερα ικανό σε αποδοτικά επίπεδα μίξης χωρίς την ανάγκη για τις σύνθετες τρισδιάστατες δομές καναλιών. Όπως συνέβη με τους σπειροειδείς αναμικτές, η επεξεργασία μπορεί να επιτευχθεί συνήθως σε περίπου τριάντα λεπτά. Μια αύξηση στον αριθμό διασπασμένων ρευμάτων θα οδηγούσε σε μια αντίστοιχη αύξηση στον αριθμό των παράλληλων ροών που παράγονται. Συνεπώς, η αποδοτικότητα μπορεί να ενισχυθεί και η μίξη θα επιτυγχανόταν στις αρκετά πιο σύντομες προς τα κάτω αποστάσεις. Η σχετικά γραμμική κλιμάκωση μεταξύ των χρονοδιαγραμμάτων που συνδέονται με τα αξονικά και εγκάρσια συστατικά της ρευστής κίνησης προκύπτει ότι αυτή η γεωμετρία μπορεί να κλιμακωθεί και να βελτιστοποιηθεί, και να ενσωματωθεί εύκολα σε μια ευρεία σειρά συστημάτων εργαστηριακών τσιπ. Μια σημαντική πτυχή του σχεδίου P-SAR είναι ότι ο γενικός χρόνος μίξης, όπως φαίνεται και στο (Σχήμα 3-11), μειώνεται συνεχώς με την αύξηση του αριθμού διασπασμένων ρευμάτων. Αντίθετα από τους συμβατικούς αναμικτές SAR όπου ο χρόνος μίξης αυξάνεται με το αυξανόμενο ποσό διακλαδιζόμενων δικτύων, ο χρόνος μίξης

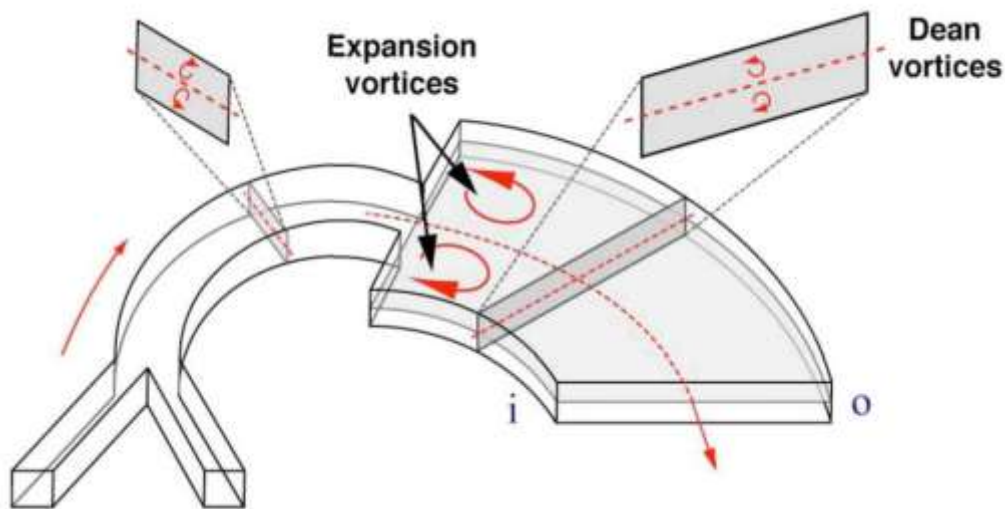
είναι εδώ λίγο πολύ ανεξάρτητος από τον αριθμό μεμονωμένων διασπασμένων ρευμάτων που χρησιμοποιείται.

3.3 ΑΣΥΜΜΕΤΡΗ ΕΛΙΚΟΕΙΔΗΣ ΜΙΞΗ (ASM)

Ένας νέος μικροαναμίκτης αποκαλούμενος ασυμμετρικός ελικοειδής αναμίκτης (ASM), παρουσιάζεται ως επέκταση της ιδέας των SAR μοντέλων. Με τη διαμόρφωση ενός ελικοειδούς καναλιού και με μια απότομη αλλαγή της διατομής, παράγεται ένα ζευγάρι δίνης σε κάθε άνοιγμα. Τα συνδυασμένα αποτελέσματα των δινών του Dean στο κατακόρυφο επίπεδο και των δινών των οριζόντιων επιπέδων, χρησιμοποιούνται για να αναμίσξουν γρήγορα τα ρεύματα των ρευστών και για να επιτύχουν τα αποδοτικά επίπεδα μίξης συγκρίσιμα με τους αναμίκτες βασισμένους στη χαοτική μετατόπιση. Τα ASM απαιτούν τα απλά 2D κανάλια και μπορούν να κατασκευαστούν από ένα ενιαίο βήμα λιθογραφίας. Η πρακτική χρησιμότητα του σχεδίου ASM καταδεικνύεται με την παρατήρηση της επιρροής της, στις δεσμευτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ μιας χρωστικής ουσίας και ενός άλλου ρευστού (πχ DNA). Οι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν προκειμένου να σχεδιαστούν τα βέλτιστα σχέδια ASM συζητούνται επίσης σε αυτό το κεφάλαιο.

Η ιδέα της χρησιμοποίησης των στροβίλων που διαμορφώνονται στις κάμψεις των μικροκαναλιών είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος να επιτευχθούν τα υψηλά επίπεδα παθητική μίξης. Παραδείγματος χάριν ο Liu (2000), σχεδίασε μια τρισδιάστατη ελικοειδή μορφή αναμικτών όπου τα επαναλαμβανόμενα «G» διαμορφωμένα στοιχεία, παρατάχθηκαν κατά μήκος της διαδρομής της ροής. Ο αναμίκτης κατασκευάστηκε από μιας διπλής όψης χαρακτηριστική επιφάνεια πυριτίου για να πραγματοποιήσει την απαραίτητη τρισδιάστατη δομή. Ο Theriault (2003), σχεδίασε ένα τρισδιάστατο micromixer υπό μορφή τετραγωνικού σπειροειδούς πύργου. Και στις δύο αυτές τις περιπτώσεις, τα πιο υψηλά επίπεδα μίξης επιτεύχθηκαν στα αυξανόμενα ποσοστά ροής ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης δύναμης των στροβίλων που διαμορφώθηκαν στις αιχμηρές κάμψεις (-90°). Αν και αυτές οι τεχνικές είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές, η αντίστοιχη μη επίπεδη γεωμετρία ροής απαιτεί συχνά τις πολλαπλές και εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας που μερικές φορές το χρονοδιάγραμμα κατασκευής τους, διαμορφώνεται από αρκετές ώρες έως και μέρες! Κατά το σχεδιασμό ASM, τα δύο συστήματα των δινών, ένα στο οριζόντιο επίπεδο και το άλλο στο κατακόρυφο επίπεδο, δημιουργούνται ώστε να δρουν σε αρμονία για να εκτελείτε τάχιστα και αποτελεσματική μικροανάμιξη.

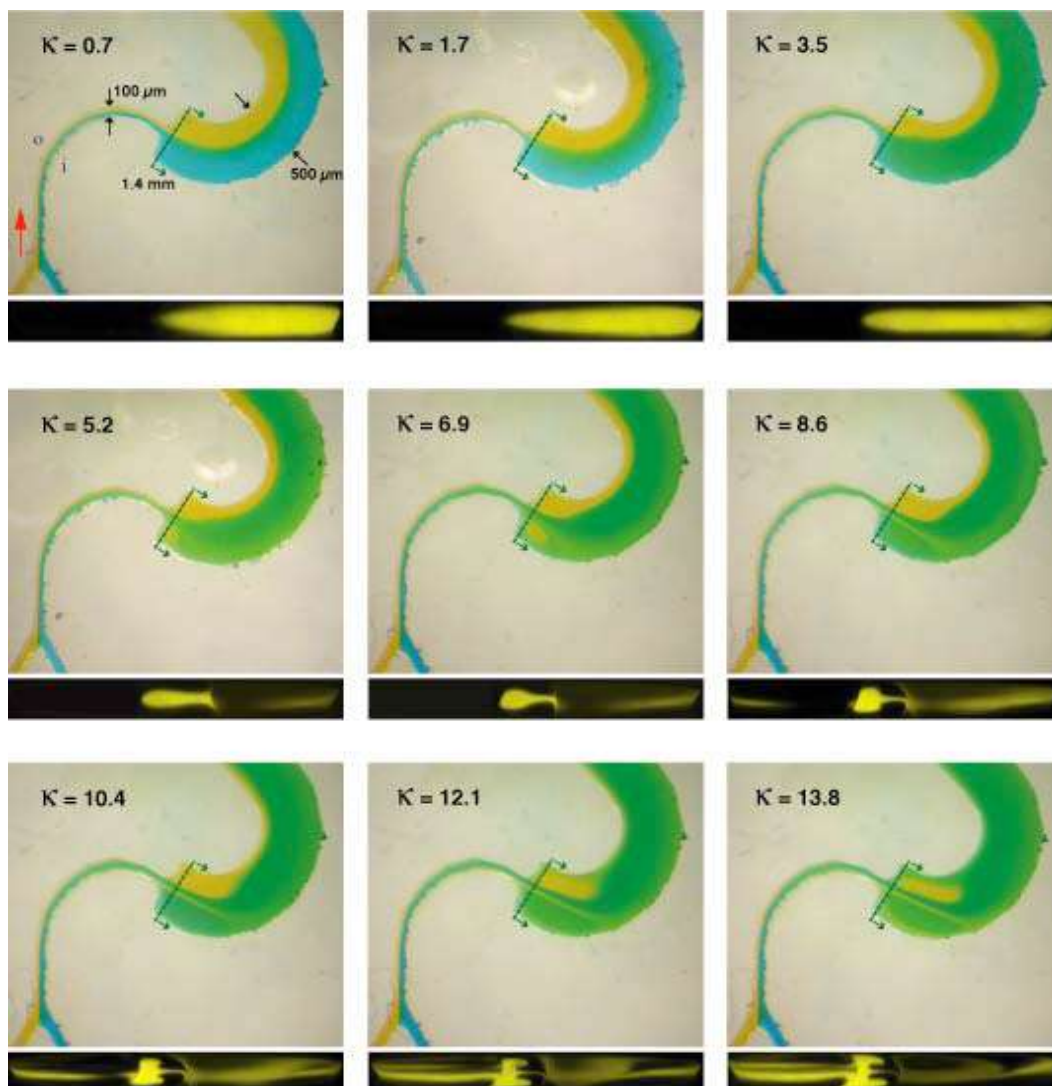
Πέρα από μια κρίσιμη τιμή Re , το υγρό που αντιμετωπίζει μια ξαφνική αύξηση της διασυνοριακής επαφής, η μία επιφάνεια της διατομής υπόκειται σε τοπικό διαχωρισμό από τον τοίχο με σκοπό την αντιμετώπιση των αρνητικών τιμών πίεσης με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ζεύγους δίνη εφαρμοζόμενες στην είσοδο της επέκτασης. Όταν αυτά τα φαινόμενα στροβιλισμού, στο οριζόντιο επίπεδο, πραγματοποιούνται σε συνδυασμό με Dean στροβιλισμούς στο κατακόρυφο επίπεδο, το αντίστοιχο πεδίο ροής πολυδινών μπορεί να επιταχύνει την περαιτέρω μίξη μεταξύ των ουσιών (Σχήμα 3-12).



Σχήμα 3-12. Φαινόμενα πολυδινών σε μικροκανάλι.

3.3.1 Απεικόνιση ροής σε ένα κυρτό κανάλι με μια απότομη αύξηση διατομής

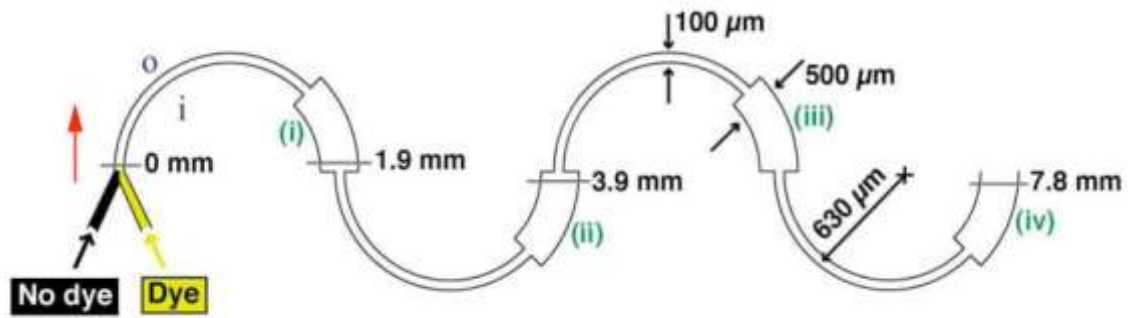
Η συνδυασμένη επίδραση του συστήματος πολυδίνης παρατηρήθηκε από την άμεση απεικόνιση των χρωματισμένων ρευμάτων χρωστικών ουσιών σε ένα κυρτό microchannel που έχει μια ακτίνα της κυρτότητας $630\mu\text{m}$ και σε αυτό έχει δημιουργηθεί ένας διαχύτης με γωνία ανοίγματος 180° προκαλώντας μια αλλαγή στο πλάτος του καναλιού από 100 σε $500\mu\text{m}$ (Σχήμα 3-13). Οι αντίστοιχες διατομικές ομοεστιακές εικόνες των παράλληλων υδάτινων ρευμάτων με μία από τις διακριτές ουσίες, δείχνουν ότι πέρα από ένα κρίσιμο ποσοστό ροής η γρήγορη μίξη μπορεί να επιτευχθεί και στα οριζόντια και στα κάθετα επίπεδα του καναλιού.



Σχήμα 3-13. Πολυδίνες. Εικόνες τοπ-άποψης (κύριες) και αντίστοιχες ομοεστιακές διατομικές εικόνες (δευτερεύουσες) που λαμβάνονται στην είσοδο σε μια επέκταση.

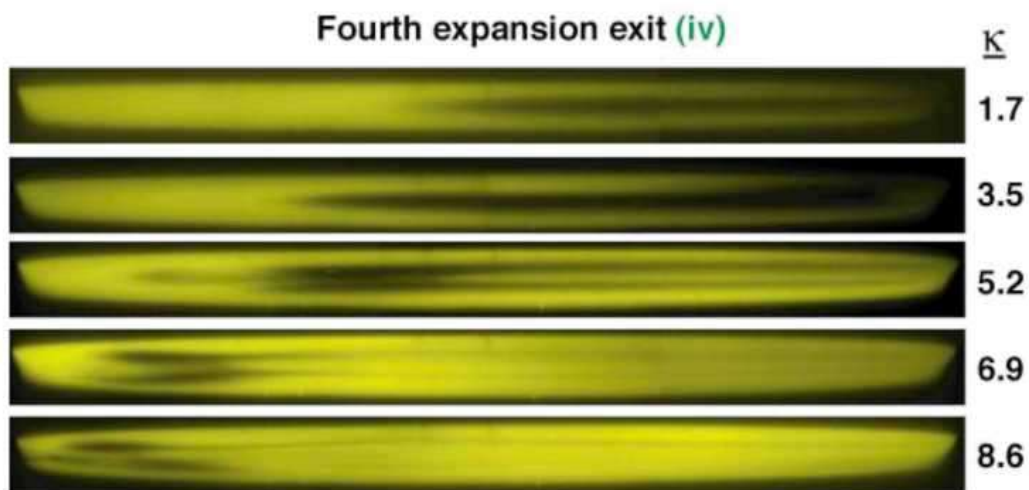
3.3.2 Ασυμμετρικός ελικοειδής αναμίκτης (ASM)

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου πολυδινών παρουσιάζεται σε ένα ασυμμετρικό ελικοειδές σχέδιο μικροαναμίκτη (Asymmetric Serpentine Micromixer - ASM) που αποτελείται από ένα κυρτό ελικοειδές μικροκανάλι που ενσωματώνει τις απότομες αλλαγές διατομής που διαμορφώνονται στο τελευταίο τέταρτο κάθε αντιτιθέμενου ημικυκλικού τόξου (Σχήμα 3-14). Οι εναλλαγές είναι εύρους 500 μm και το υπόλοιπο του καναλιού είναι εύρους 100 μm . Το κανάλι έχει ένα ομοιόμορφο ύψος 29 μm και η ακτίνα της κυρτότητας είναι 630 μm .

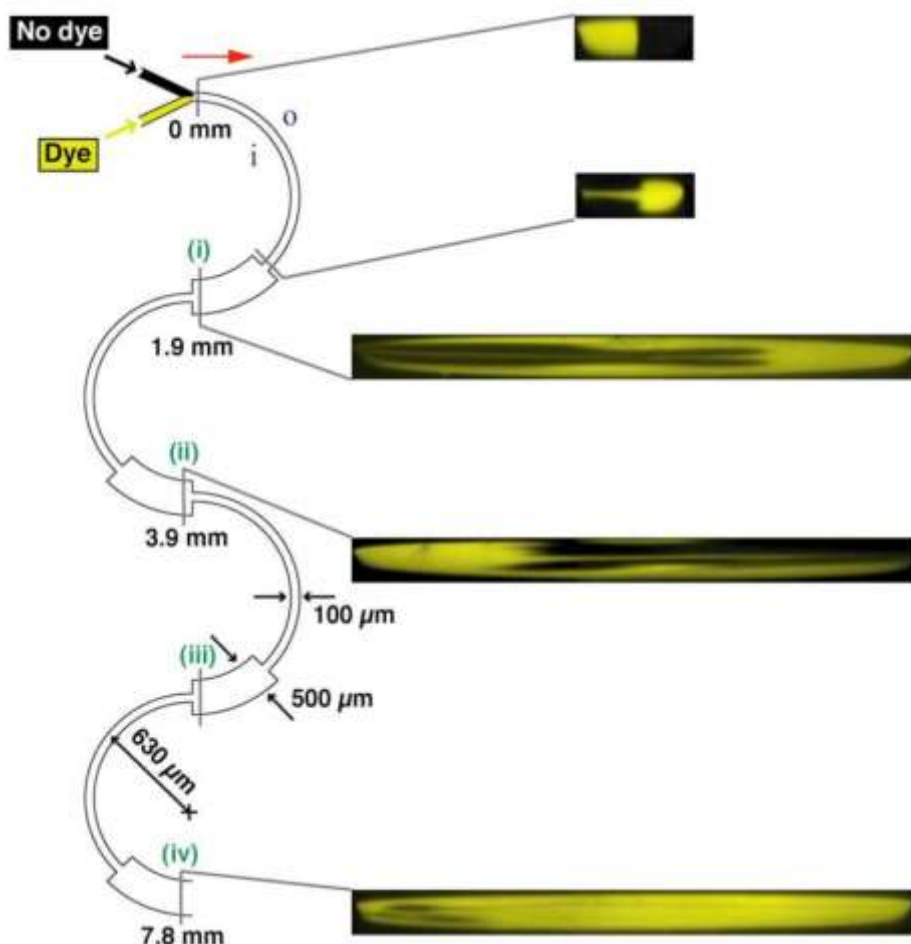


Σχήμα 3-14. Σχέδιο ASM.

Η συνδυασμένη επίδραση του συστήματος πολυδίνης παρουσιάζεται με άμεση απεικόνιση των χρωματισμένων ρευμάτων των χρωστικών ουσιών, στο κυρτό μικροακανάλι που ενσωματώνει μια επέκταση πλάτους από 100 έως 500μm, όπου η διατομική ομοεστιακή απεικόνιση δείχνει, ότι η μίξη ενισχύεται μόνο πάνω από ένα κρίσιμο ποσοστό ροής, στο οποίο η δύναμη και των δύο δινών, του Dean και της επέκτασης γίνεται σημαντική (Σχήμα 3-15). Το σχήμα 3-16 παρουσιάζει διατομικές εικόνες που λαμβάνονται κατά μήκος των ASM για $\kappa=8.6$ και (με $Re=32.2$)

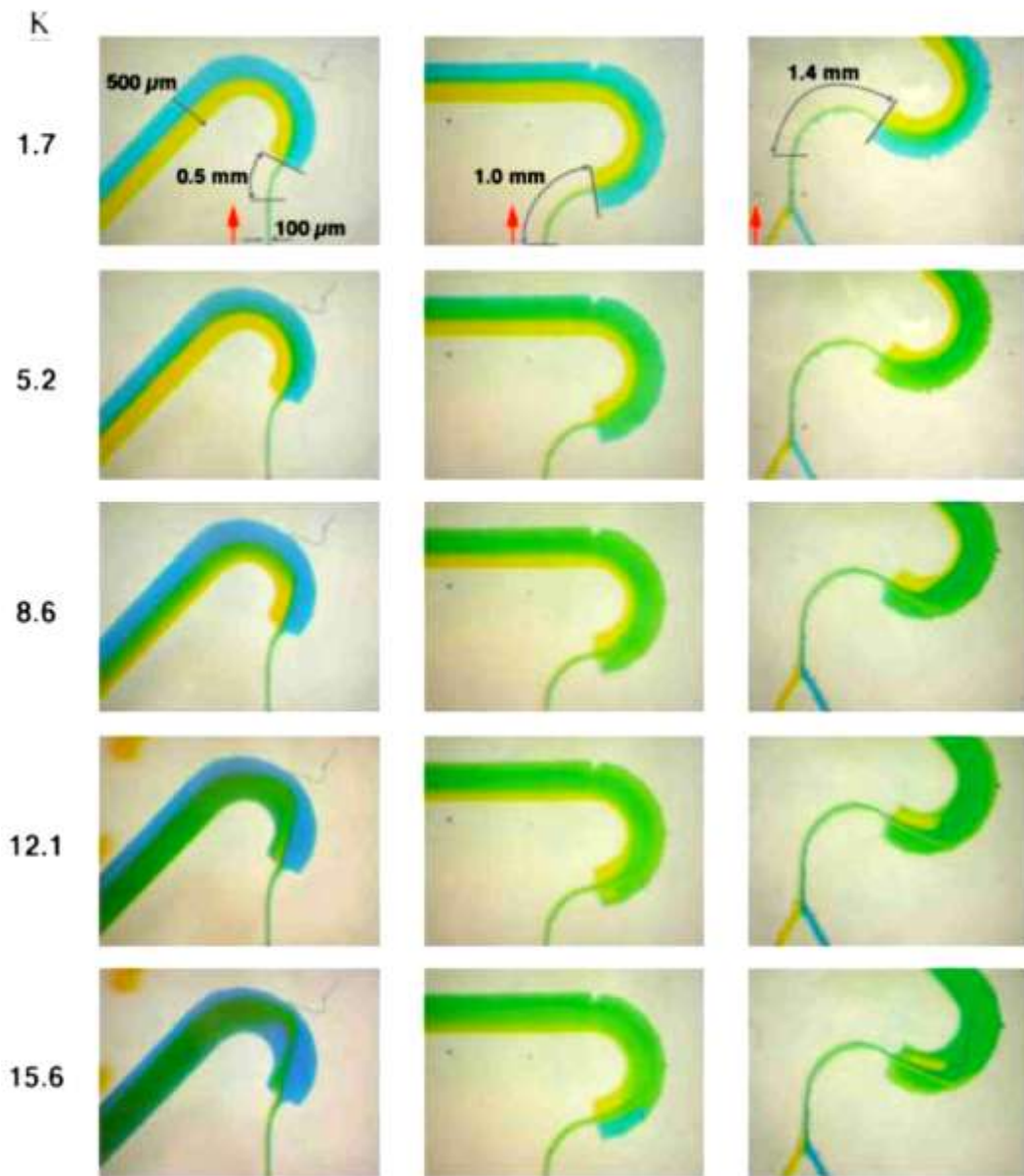


Σχήμα 3-15. Ομοεστιακές διατομικές εικόνες, στην έξοδο της τέταρτης διεύρυνσης. Οι εικόνες λαμβάνονται 7.8mm. μετά την είσοδο στον αναμικτή



Σχήμα 3-16. Διατομικές εικόνες για $\kappa = 8.6$ κατά μήκος των ASM.

Το βέλτιστο σχέδιο ASM περιλαμβάνει δύο γεωμετρικές εκτιμήσεις. Κατ' αρχάς, οι αυξήσεις διατομών πρέπει να τοποθετηθούν στις θέσεις, όπου ταυτόχρονα, εναλλαγές τουλάχιστον 90° να έχουν εμφανιστεί στα ανώτερα και κατώτερα μισά της διατομής, προκειμένου να ευθυγραμμιστεί η διεπαφή μεταξύ των ειδών και να μεγιστοποιηθούν τα αποτελέσματα επέκτασης και στα δύο είδη. Το σχήμα 3-17 παρουσιάζει εικόνες ροής των παράλληλων υδάτινων ρευμάτων που χαρακτηρίζονται με τον γκρι και σκούρο γκρι χρωματισμό για τις διαφορετικές θέσεις της επέκτασης. Δεύτερον, αυτά τα φαινόμενα εξαρτώνται από την αναλογία επέκτασης εισόδου – εξόδου. Το σχέδιο ASM ενσωματώνει την αναλογία επέκτασης 1:5 (μετά από πειράματα και τις ανάλογες εξισώσεις Bernoulli και του συντελεστή απώλειας τριβής $fe = Ke \cdot \frac{u^2}{2g}$ με $Ke = (1 - \frac{S_a}{S_b})$ όπου το S_a και το S_b είναι οι διατομές εισόδου και εξόδου αντίστοιχα), που παρέχει μια ισορροπία μεταξύ ευνοϊκών συνθηκών και της ευκολίας της επεξεργασίας.



Σχήμα 3-17. Εικόνες ροής στις διαφορετικές θέσεις επέκτασης με τις αυξανόμενες τιμές του κ.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια νέα τεχνική βασισμένη σε ένα σύστημα πολιδυνών. Ο αναμίκτης αποτελείται από μια διαμόρφωση ενός κλασικού – συμβατικού ελικοειδούς καναλιού με ορισμένες απότομες αλλαγές στο πλάτος του καναλιού και σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος αυτού. Σε αυτό το ασυμμετρικό ελικοειδές σχέδιο αναμικτών, το πρώτο ζευγάρι των δινών προκλήθηκε από την εγκάρσια περιστροφή του Dean στο κάθετο επίπεδο και το δεύτερο ζευγάρι των δινών προκλήθηκε από τις απότομες επεκτάσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Η συνδυασμένη δράση αυτών των δινών, χρησιμοποιήθηκε αποτελεσματικά για να αναμίξει τα υγρά είδη. Το μεγαλύτερο

πλεονέκτημα του σχεδίου ASM ήταν ότι κατασκευάστηκε από ένα ενιαίο μαλακό βήμα λιθογραφίας.

Μια πρόσφατη εργασία που περιλαμβάνει την υπολογιστική και πειραματική έρευνα για τη ροή μέσα σε κανάλια με ξαφνικές εναλλαγές στην γεωμετρία του μικροκαναλιού επέκτασης, καταδεικνύει ότι, η κρίσιμη τιμή για το χωρισμό ροής για να εμφανιστεί ανάμιξη στο μικροκανάλι με μια αναλογία επέκτασης του 1/3 (100: 300μm και ύψος 50μm) με τον αριθμό Re να είναι σε τιμή $Re = 22.5$. Η αναλογία επέκτασης του 1/5 που επιλέχτηκε κατά το σχεδιασμό ASM σε άλλη εργασία, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, βρέθηκε να είναι η βέλτιστη βασιζόμενη στο γεγονός ότι η αυξημένη αναλογία απέδωσε μόνο μια ελάχιστη αύξηση στην ισχύ στις δίνες επέκτασης και ότι ένα ευρύτερο κανάλι θα έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία ανάμιξης όταν θα παρουσιάζεται και θερμική σύνδεση. Από την άποψη των όρων ροής για τα ρευστά, τα αντίστοιχα ποσοστά ροής που απαιτούνται για να επιτύχουν μίξη σε επίπεδο 80% που εμφανίζεται σε μια θέση μετά την είσοδο στο κανάλι περίπου 7mm, είναι $Q > 10^{-1} \text{ mL/min}$ για το σχέδιο ASM και οι $Q < 10^{-6} \text{ mL/min}$ για το SHM. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί, ότι η μίξη μπορεί να επιτευχθεί σε πιο σύντομες αποστάσεις με απλή αύξηση στα ποσοστά ροής. Αυτό θα οδηγούσε σε μια συνδυασμένη επίδραση της γρηγορότερης εγκάρσιας περιστροφής του Dean με την αυξανόμενη δύναμη των δινών επέκτασης. Ωστόσο, θα ήταν δύσκολο να διατηρηθεί η αναγκαία πτώση πίεσης που απαιτείται για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών ροής.

3.4 ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

Οι τεχνικές για τον συνδυασμό διαφορετικών στρατηγικών μικροανάμιξης, προκειμένου να ενισχυθεί σε μεγάλο βαθμό το εύρος των ρυθμών ροής όπου θα είναι αποτελεσματική η ανάμιξη και πως μπορεί να επιτευχθεί, θα παρουσιαστούν παρακάτω. Τα πρώτα αποτελέσματα σε δύο τέτοιες υβριδικές τεχνικές δείχνουν ότι η ταχεία μικροανάμιξη μπορεί να επιτευχθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα πάνω από ένα πολύ διευρυμένο φάσμα αριθμού Re που καλύπτει πάνω από τέσσερις τάξεις μεγέθους. Η πρώτη τεχνική περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των χαοτικών αναμειξέων με το σχεδιασμό ASM και η δεύτερη τεχνική που αφορά το συνδυασμό των διαμορφώσεων σπείρας με κανάλι ASM.

Η τρέχουσα γενιά μικροαναμικτών έχει γενικά ένα περιορισμένο φάσμα, όπου είναι δυνατή η αποτελεσματική ανάμιξη (π.χ., βλέπε πίνακα I-1). Για παράδειγμα, τα ρευστά μιγμάτων που εισέρχονται σε αναμίκτες με διαμορφώσεις ψαροκόκκαλου στο ένα επίπεδο (SHM) είναι αποτελεσματικά για $Re < 1$ με την αυξανόμενη αποδοτικότητα στο

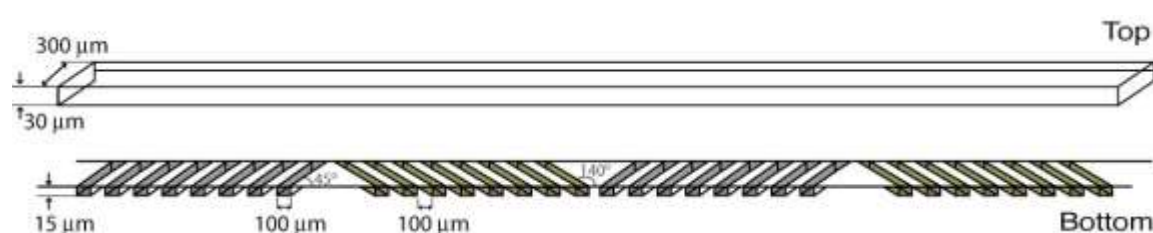
χαμηλότερο ρυθμό ροής. Ο (C) διαμορφωμένος αναμίκτης αφ' ετέρου έχει μια αποτελεσματική συμπεριφορά για $Re > 1$ με αυξανόμενη αποδοτικότητα σε υψηλότερο Re . Ο P-SAR micromixer που αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι αποδοτικότερος στα ποσοστά ροής, όπου οι δίνες έχουν προκαλέσει τις εγκάρσιες περιστροφές έτσι ώστε τα ρευστά στρώματα να διαμορφώνουν μια τριπλή ροή, αποτελούμενη από μία κεντρική και δύο άλλες που την πλαισιώνουν εκατέρωθεν πριν εισαχθούν στα μεμονωμένα διασπασμένα ρεύματα. Τα ASM, παρόμοια με το C-διαμορφωμένο αναμίκτη, παρέχουν την καλή μίξη για $Re > 1$ για σύντομα μήκη μίξης. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ανάγκη να συνδυαστούν οι αποδοτικότητες των διαφορετικών στρατηγικών προκειμένου να σχεδιαστούν οι αναμίκτες που είναι σε θέση να παρέχουν αποδοτική μίξη, ουσιαστικά, σε οποιοδήποτε δεδομένο ποσοστό ροής. Από μια πρακτική σκοπιά, ο αναμίκτης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει τη γρήγορη μίξη για τιμές Re με εύρος $0.01 < Re < 100$. Αυτό θα κάλυπτε τη λειτουργούσα σειρά και τους όρους των περισσότερων ρεαλιστικών συστημάτων μικρορευστονικής.

3.4.1 ASM που συνδυάζονται με τα λοξά εμπόδια

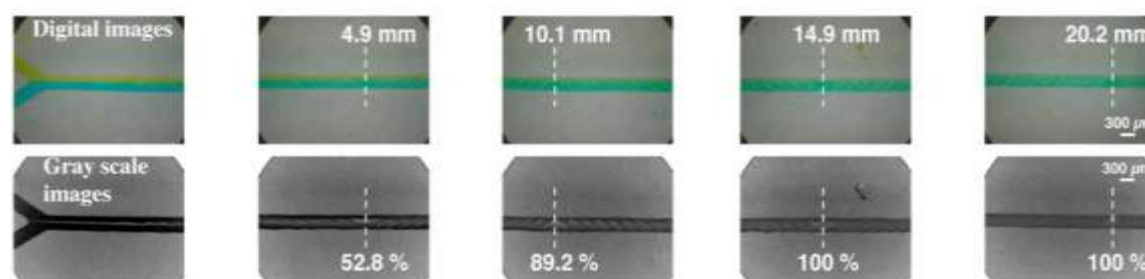
Η έννοια αυτού του αναμίκτη περιλαμβάνει τη ενοποίηση δύο τεχνικών που λειτουργούν σε δύο διαφορετικά καθεστάτα ροής. Η χρήση των ροών του Dean σε ένα κυρτό κανάλι με τις περιοδικές εναλλαγές διατομών, έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματική για $Re > 1$ μέσω του σχεδίου καναλιών ASM στο κεφάλαιο 3.3. Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα αυτού του αναμίκτη προτείνεται η ιδέα της ενσωμάτωσης των πλάγιων εμποδίων που τοποθετούνται κατά μήκος της κατώτατης επιφάνειας του καναλιού (Σχήμα 3-18). Η χαοτική μίξη που προκαλείται από τα εμπόδια είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική τεχνική για το ρευστό για τιμές $Re < 1$. Ο συνδυασμός αυτών των δύο στρατηγικών με ένα ενιαίο υβριδικό σχήμα θα ήταν ένας εξαιρετικά χρήσιμος αναμίκτης για να πραγματοποιηθούν αντιδράσεις σε μικροσυστήματα.

Για ροές Stokes ($Re < 1$) και για $\alpha < 0.3$ (όπου το α είναι το σχετικό ύψος των εμποδίων) έχει παρουσιαστεί ότι η μορφή της ροής είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό Re . Επιπλέον, το μέσο ποσοστό εμπόδιο-προκληθείσας εγκάρσιας περιστροφής μπορεί να καθοριστεί από μια διαπίστωση ότι δηλαδή η περιστροφή εξαρτάται από τις γεωμετρικές παραμέτρους όπως το πλάτος καναλιών (w), το ύψος (h), την γωνία στην οποία τα εμπόδια ευθυγραμμίζονται στη ροή (θ) και το κύριο διάνυσμα των εμποδίων (q). Η μέγιστη εγκάρσια ροή εμφανίζεται για $\theta = 45^\circ$ και για το $aqh \sim 2$. Το Σχήμα 3-19 παρουσιάζει

εικόνες από την μίξη σε ένα ευθύ κανάλι που διαμορφώνεται με τα πλάγια εμπόδια στην κατώτατη επιφάνεια του καναλιού. Τα εμπόδια ύψους 15 μm , τακτοποιούνται σε εναλλασσόμενα σύνολα 15 εμποδίων, όπου το κάθε σύνολο ευθυγραμμίζεται σε 45° και 140° αντίστοιχα στην κατεύθυνση της ροής. Η διαφορά στην κατεύθυνση και τη γωνία των εμποδίων, έγινε για την εναλλαγή του κέντρου του εγκάρσιου ροϊκού τομέα με στόχο να είναι στενό με γωνία θ στις 45°. Η ροή μελετήθηκε αρχικά στα κανάλια που έχουν εναλλασσόμενα σύνολα τριών και επτά εμποδίων και βρέθηκε ποιοτικά, ότι σε όλες τις περιπτώσεις, που ερευνήθηκαν, ένα γενικό μήκος καναλιών που απαιτήθηκε για να επιτύχει τα λογικά επίπεδα μίξης ήταν περίπου 1.5cm.



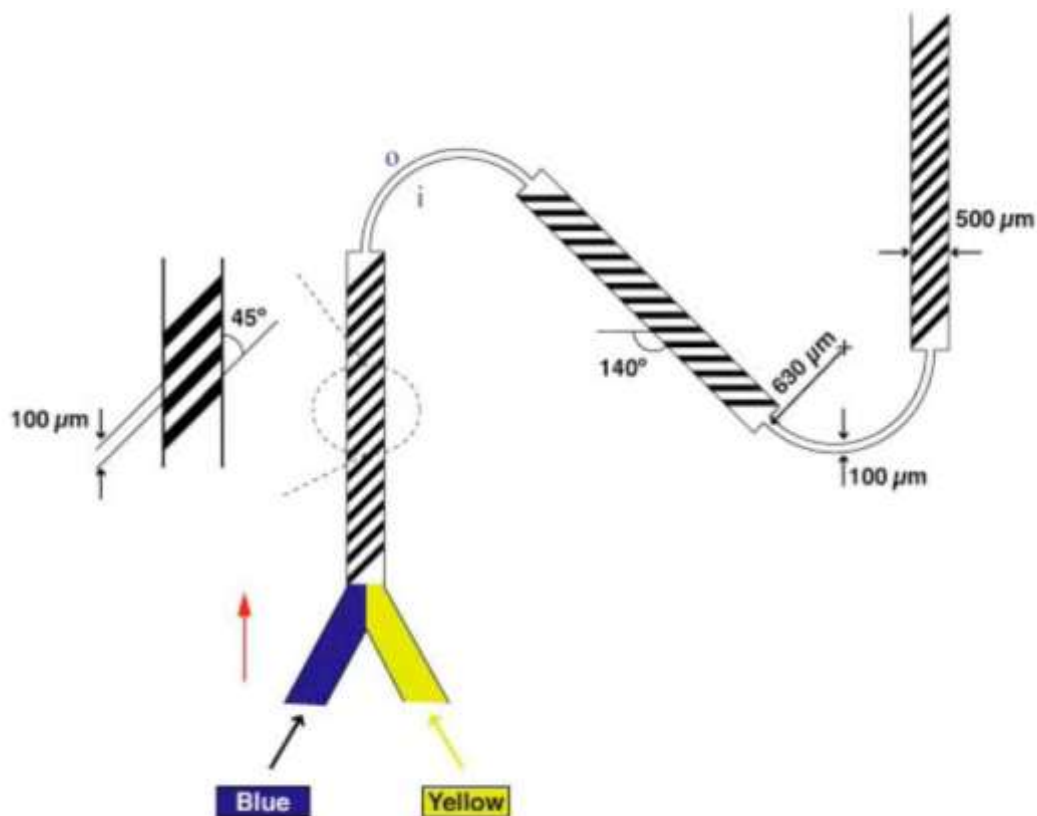
Σχήμα 3-18. Σχηματική αναπαράσταση μικροκαναλιού με τα εμπόδια κατά μήκος του πατώματος.



Σχήμα 3-19. Εικόνες τοπ-άποψης σε ένα ευθύ κανάλι με τα εμπόδια στο πάτωμα.

Ο υβριδικός μικροαναμίκτης είναι ένας συνδυασμός του σχεδίου ASM και μικροκαναλιού με τα πλάγια εμπόδια (Σχήμα 3-18). Το τοπ στρώμα ήταν μια τροποποίηση του σχεδίου ASM, έτσι ώστε η περιοχή επέκτασης να γίνει μακρύτερη για να ενσωματώσει ένας διάδρομος για τα εμπόδια που διαμορφώθηκαν στην κατώτατη επιφάνεια (Σχήμα 3-20). Η τοπ επιφάνεια είχε ένα ομοίμορφο ύψος 29 μm και η αναλογία επέκτασης ήταν διατηρημένη στο 1:5 με τα στενά κανάλια να έχουν ένα πλάτος 100 μm και στην ευρύτερη επέκταση να έχει ένα πλάτος 500 μm . Η ακτίνα της κυρτότητας διατηρήθηκε κατά 630 μm κατά μήκος των στενότερων τόξων ενώ οι περιοχές επέκτασης αποτελούνταν από τα ευθεία τμήματα. Κατά μήκος του πατώματος αυτών των ευθέων

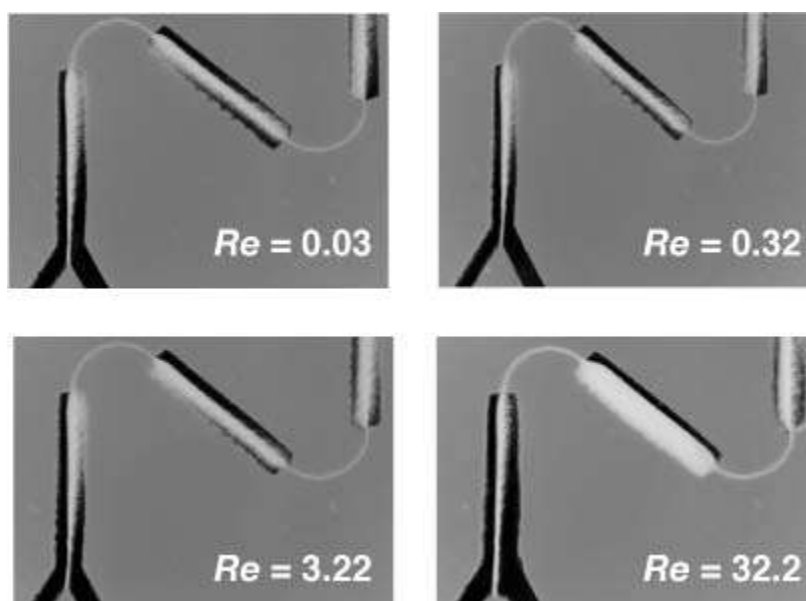
τμημάτων, τοποθετήθηκαν τα εμπόδια υπό γωνία, που έχουν ένα πλάτος $100\mu\text{m}$ και το ύψος $15\mu\text{m}$. Η απόσταση μεταξύ των εμποδίων διατηρήθηκε στα $100\mu\text{m}$. Αυτά τα εμπόδια κατασκευάστηκαν σε ένα χωριστό στρώμα και ευθυγραμμίστηκαν προσεκτικά στη τοπ επιφάνεια. Δεκαπέντε εμπόδια σε κάθε μεμονωμένη περιοχή επέκτασης ευθυγραμμίστηκαν ομοιόμορφα στην κατεύθυνση ροής αλλά εναλλάσσονταν από 45° σε 140° από τη μια επέκταση στην άλλη, προκειμένου να αντισταθμιστεί το φαινόμενο που προκάλεσε τη συμμετρία ροής, η οποία είναι χαρακτηριστική των εναλλασσόμενων συνόλων εμποδίων που ευθυγραμμίζονται στην ίδια γωνία. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι επεκτάσεις στην ανώτερη επιφάνεια τοποθετήθηκαν στις προς τα κάτω θέσεις όπου ταυτόχρονα εναλλαγές τουλάχιστον 90° εμφανίστηκαν στα ανώτερα και χαμηλότερα μισά της διατομής προκειμένου να ευθυγραμμιστεί η διεπαφή μεταξύ των ειδών με το οριζόντιο επίπεδο και να μεγιστοποιηθούν τα αποτελέσματα επέκτασης στα δύο είδη που αναμιγνύονται.



Σχήμα 3-20. Σχέδιο των ASM με τα κλιμένα εμπόδια. Το τοπ στρώμα είναι μια τροποποίηση του σχεδίου καναλιών ASM (Σχήμα 3-14)

3.4.2 Απεικόνιση ροής

Η τοπ-άποψη που αναμιγνύει τις εικόνες των υδάτινων ρευμάτων παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 3-21). Οι εικόνες παρουσιάζονται για ένα ευρύ φάσμα των ποσοστών ροής που κυμαίνονται από $0.03 \leq Re \leq 32.2$. Στα χαμηλότερα ποσοστά ροής ($Re < 1$) η μίξη αποδίδεται στις εγκάρσιες χαοτικές ροές που προκαλούνται από τα πλάγια εμπόδια από το κατώτατο σημείο του καναλιού και στις υψηλότερες ροές ($Re > 1$) η γρήγορη μίξη παράγεται από τη συνδυασμένη επίδραση των δινών του Dean και των δινών στο οριζόντιο επίπεδο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες της ροής μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας την υδραυλική διάμετρο που υπολογίστηκε στα στενά τμήματα πλάτους 100μm. Αν και τα αρχικά αποτελέσματα, ποιοτικά, προτείνουν ότι αυτό το σχέδιο είναι σε θέση για μίξη, ο περαιτέρω χαρακτηρισμός που χρησιμοποιεί τη διατομική ομοεστιακή απεικόνιση, χρειάζεται για να καταδείξει την σειρά που θα λάβει στα ποσοστά μίξης.



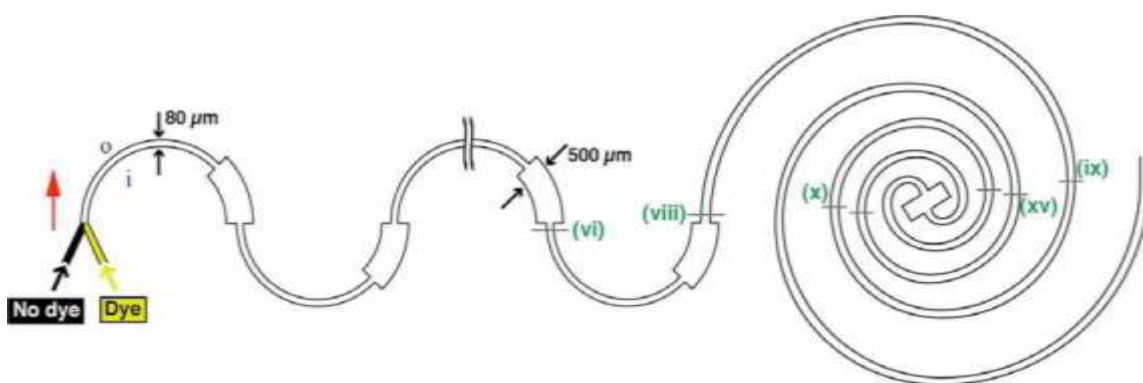
Σχήμα 3-21. Εικόνες ροής σε ένα κανάλι ASM με τα εμπόδια που διαμορφώνονται κατά μήκος του πατώματος.

3.5 ASM – ΣΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΕ ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΕΣ ΤΜΗΜΑ

Ο υβριδικός προτεινόμενος αναμίκτης εδώ είναι ένας συνδυασμός του σχεδίου καναλιών ASM και ενός σπειροειδούς τμήματος μίξης. Ένα τεράστιο πλεονέκτημα αυτού του σχεδίου πέρα από τον υβριδικό αναμίκτη με τα πλάγια εμπόδια που περιγράφονται ανωτέρω, είναι, ότι ο αναμίκτης μπορεί να κατασκευαστεί από ένα ενιαίο βήμα

λιθογραφίας και δεν απαιτεί οποιεσδήποτε διαδικασίες ευθυγράμμισης πριν από τη σύνδεση. Στα υψηλά ποσοστά ροής, η μίξη επιτυγχάνεται από τη συνδυασμένη επίδραση των δινών επέκτασης. Στα χαμηλότερα ποσοστά ροής εντούτοις, η μίξη επιτυγχάνεται μέσω της εγκάρσιας διάχυσης και της ενσωμάτωσης του σπειροειδούς τμήματος στο τέλος των ASM.

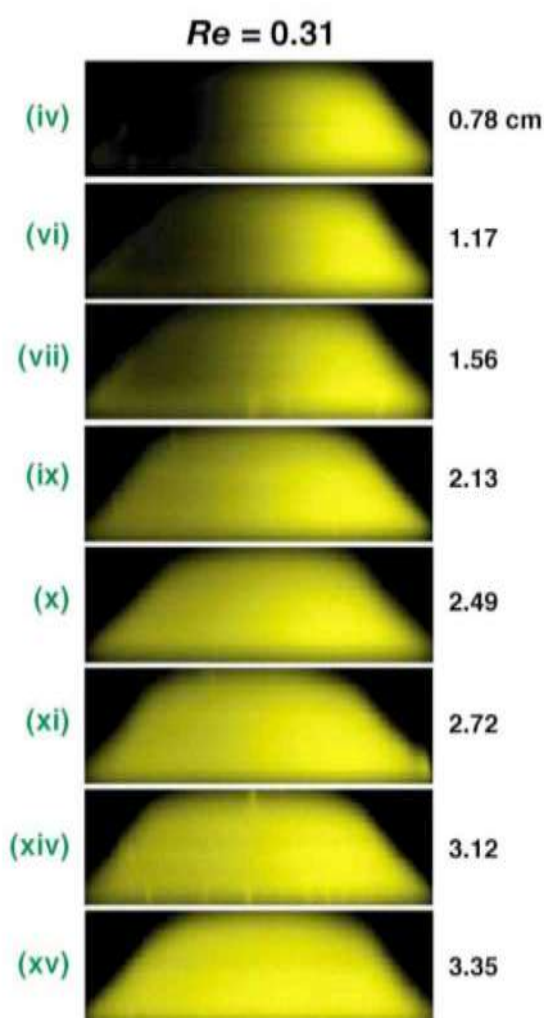
Το σχέδιο ASM συνδυάζεται με το σπειροειδές σχέδιο 8 τόξων για να κατασκευαστεί αυτός ο υβριδικός αναμικτής (Σχήμα 3-22). Το σπειροειδές τμήμα τοποθετείται μετά από τον αναμικτή ASM που έχει οκτώ επεκτάσεις που είναι πλάτους 500μm. Το 1mm πλάτους μακροχρόνιο «S» που ενώνει τα τμήματα των 8 σπειρών τροποποιείται για να ενσωματώσει ένα σύντομο τμήμα επέκτασης (πλάτους 400μm) προκειμένου να αντισταθμιστεί η ομοιόμορφη αντιστροφή της εγκάρσιας περιστροφής του Dean (στα ποσοστά ροής που αντιστοιχούν $Re > 1$) που εμφανίζεται λόγω της αντίστασης στη γεωμετρία της κυρτότητας. Η απότομη αύξηση στο πλάτος βοηθά στην αλλαγή της συμμετρίας του τομέα ροής με αποτέλεσμα να παραγάγει τις δίνες επέκτασης από κάθε πλευρά της εισόδου σε αυτό το τμήμα. Το υπόλοιπο του καναλιού έχει ένα ομοιόμορφο πλάτος 80μm και ολόκληρο το κανάλι είναι ύψους 29μm. Γενικό το μήκος του αναμικτή είναι 4.26cm. και η περιοχή μίξης καταλαμβάνει μια συνολική έκταση (14.39mm. x 3.42mm). Οι σπείρες κολπίσκων και εξόδου σχεδιάζονται για να έχουν μια ακτίνα κυρτότητας που κυμαίνεται από 1.9cm. ως 0.42cm. και από μια ομοιόμορφη αποσύνδεση 80% κάθε 90°.



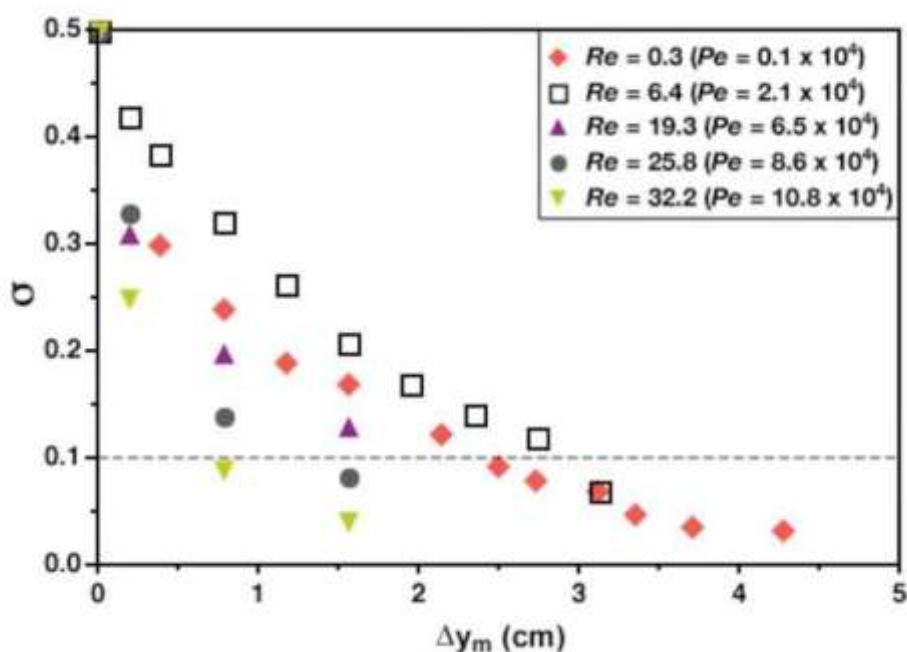
Σχήμα 3-22. Σχέδιο ενός ASM-σπειροειδούς υβριδικού μικροαναμικτή.

Η αποτελεσματικότητα του σχεδίου ASM για τα ποσοστά ροής που αντιστοιχούν σε $Re > 1$ έχει συζητηθεί ήδη σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τμήμα αυτό παρουσιάζεται η επίδοση του υβριδικού σχεδιασμού σε συνδυασμό με ροές με $Re < 1$. Οι διατομικές εικόνες

δύο παράλληλων υδάτινων ρευμάτων, λήφθηκαν χρησιμοποιώντας την ομοεστιακή μικροσκοπηση (Σχήμα 3-23). Μπορεί, κάποιος, να δει από τις εικόνες, ότι η μίξη επιτυγχάνεται καθαρά από την πλευρική διάχυση, και ένα επίπεδο ανάμιξης 80%, που αναμιγνύει επιτυγχάνεται στη 2.4cm προς τα κάτω θέση σε $Re \sim 0.3$, με ακόμα μεγαλύτερες αποδοτικότητες πιθανότητες στα χαμηλότερα ποσοστά. Το σχήμα 3-24 παρουσιάζει την απόσταση που απαιτείται για να επιτευχθεί ανάμιξη σε ποσοστό 80% για τις διαφορετικές τιμές του Re με την ταυτόχρονη εξάρτηση ποσοστού ροής του (σ) σε σχέση με την προς τα κάτω απόσταση.



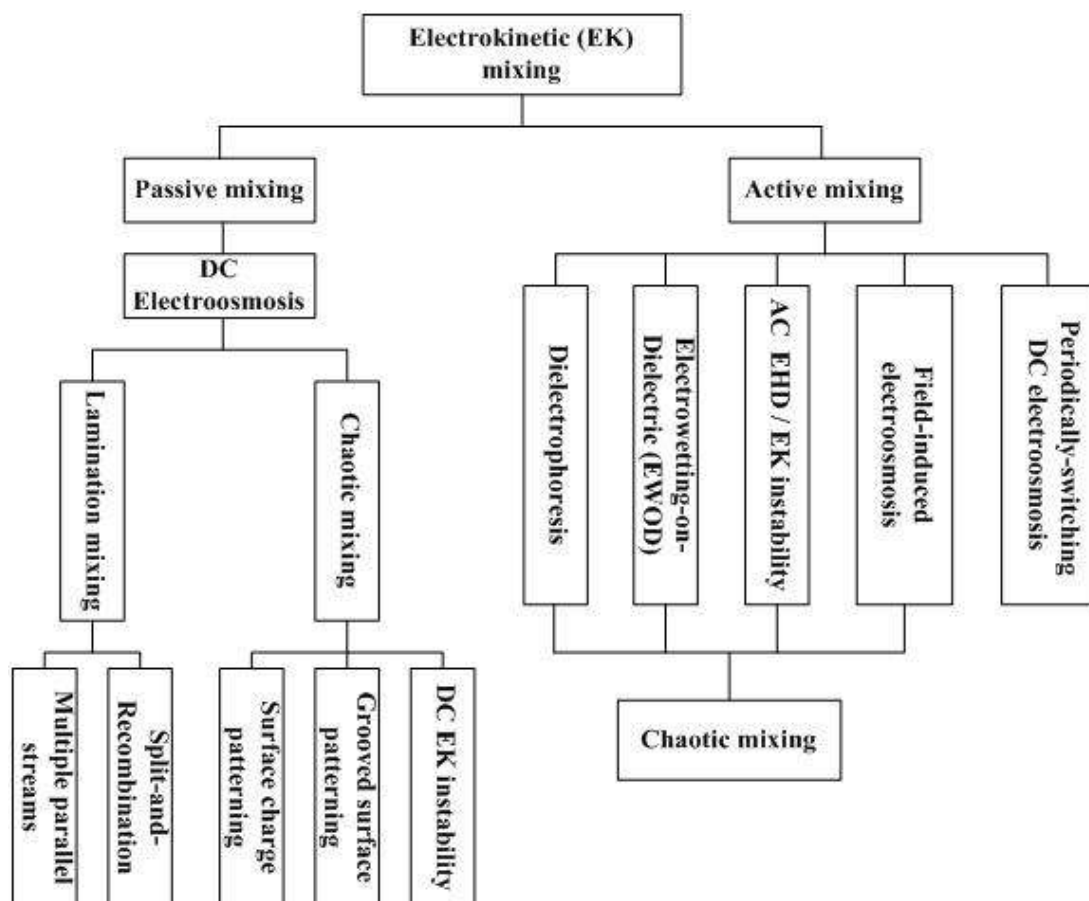
Σχήμα 3-23. Ομοεστιακές διατομικές εικόνες στο ASM-σπειροειδές υβριδικού μικροαναμικτή.



Σχήμα 3-24. Απόδοση της μίξη του ASM-σπειροειδούς υβριδίου μικροαναμίκτη.

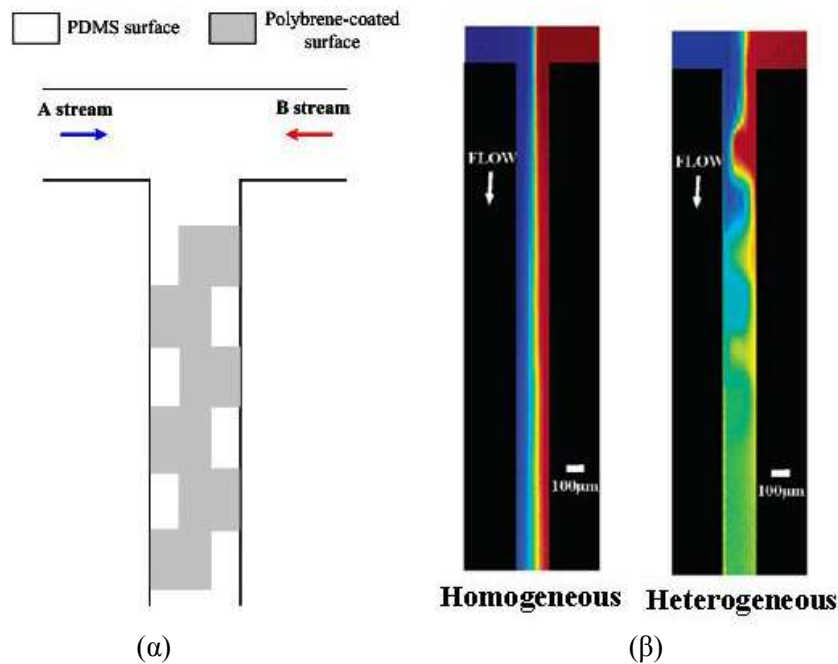
3.6 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΙΚΗ ΜΙΞΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΞΗΣ

Σε αυτήν την διάταξη, η μίξη μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαρακτηρισμένη άλλοτε ως παθητική και άλλοτε ως ενεργητική, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-25. Η παθητική μίξη αναφέρεται στην επίδραση της μίξης στα ηλεκτροκινητικώς οδηγούμενα συστήματα και ενισχύεται λόγω της ιδιαιτερότητας της γεωμετρία τους, στις ιδιότητες της επιφανείας, ή στο φαινόμενο της αστάθειας η οποία εμφανίζεται στο πλαίσιο υπό την διοχέτευση ενός στατικού (συνεχές ρεύμα – DC) ηλεκτρικού πεδίου. Η ενεργός μίξη αναφέρεται στην αύξηση της μίξης στα ηλεκτροκινητά-οδηγημένα μικρορευστονικά συστήματα χρησιμοποιώντας ένα χρονικά εξαρτημένο ηλεκτρικό πεδίο με τη βοήθεια μιας εξωτερικά χρονικά εξαρτημένης ή ανεξάρτητης ηλεκτρικής δύναμης. Η χαοτική μίξη μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια των ακόλουθων σχεδίων: διηλεκτρική διαταραχή (τμήματος), το τίναγμα του βασικού σταγονιδίου, DC/AC - EKI (ή EHD) αστάθεια, της προκληθείσα ηλεκτρώσωσης, των διαμορφωμένων επιφανειών και της αυλακωμένης επιφάνειας.



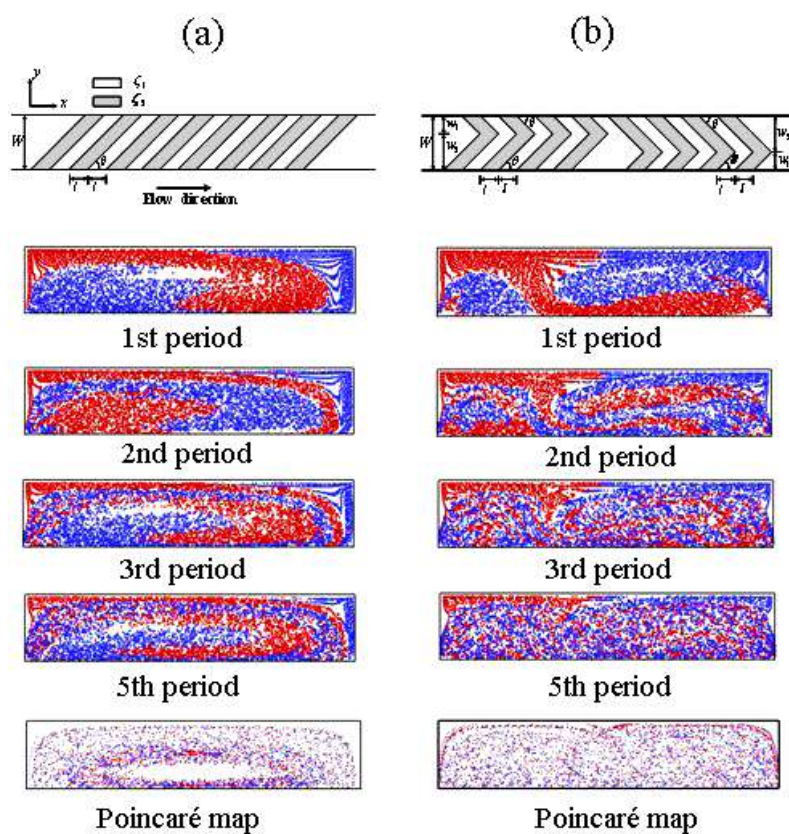
Σχήμα 3-25. Σχέδιο ταξινόμησης για τη μικρορευστονική μίξη βασισμένη στην ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά, η ηλεκτροκίνητη παθητική μίξη μπορεί να ταξινομηθεί, είτε ως στρωτή παράλληλη ροή είτε ως χαοτική μίξη. Στην περίπτωση της στρωτής ροής, η ανάμιξη, στηρίζεται κυρίως στη μοριακή επίδραση διάχυσης μεταξύ δύο ή περισσότερων παράλληλων ρευμάτων, ενώ στη χαοτική μίξη αναφέρεται συνήθως στην ενδιάμεση περιοχή επαφών μεταξύ δύο ρευμάτων που αναμιγνύονται. Η ετερογενής διαμόρφωση επιφάνειας, είναι μια παθητική μέθοδος για να δημιουργήσει τη χαοτική ηλεκτροοσμωτική μίξη της ροής. Ο Biddiss (2004) χρησιμοποίησε μια μέθοδο για να δημιουργήσει μια ανομοιόμορφη διανομή στο κατώτατο σημείο του μικροκαναλιού PDMS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-26(α). Το ζητούμενο δυναμικό, των PDMS επιφανειών είναι -83mV . Σε αυτό το κανάλι μίξης, ο τοίχος καναλιών με το αρνητικό δυναμικό οδηγεί τη ροή κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής, ενώ η ετερογενής επιφάνεια με ένα θετικό δυναμικό τείνει να σταματήσει τη ροή. Για να ικανοποιήσουν τη συνοχή, τα εγκάρσια τμήματα ροής πρέπει να δημιουργήσουν τις δευτεροβάθμιες ροές μέσα στο κανάλι μίξης. Στο Σχήμα 3-26(β), μπορεί να δει κανείς, ότι η εγκάρσια ροή που προκλήθηκε και η μίξη ενισχύθηκε σε μεγάλο βαθμό από το ετερογενές μικροκανάλι.

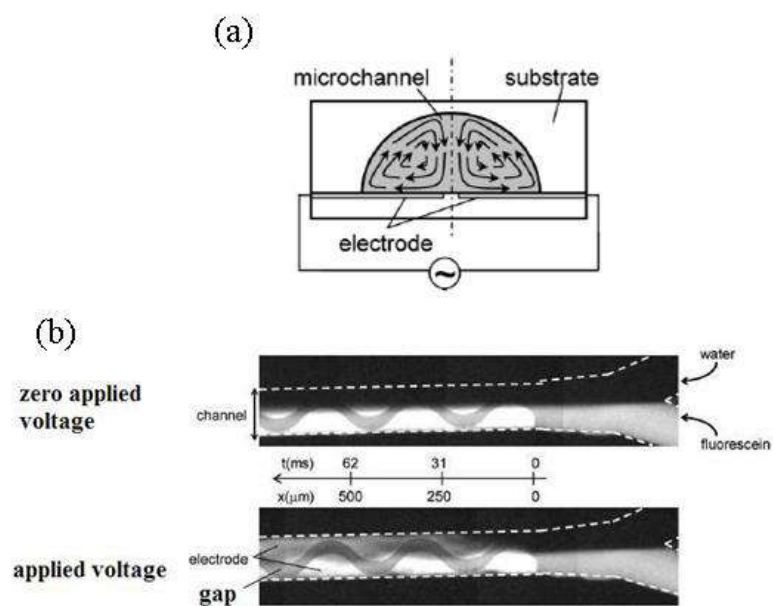


Σχήμα 3-26. (α) ετερογενής διαμορφωμένη επιφάνειας τ-μορφής microchannel. (β) πειραματική εικόνα των ειδών που αναμιγνύονται σε ομοιογενές και ετερογενές microchannel.

Επιπλέον, ο Chang και Yang (2006) επίσης υιοθέτησαν μια μέθοδο παρακολούθησης μορίων για να απεικονίσουν τη διαδικασία μίξης από μια προοπτική διατομής ενός ετερογενούς μικροκαναλιού, όπως φαίνεται σε Σχήμα 3-27. Τα κανάλια μίξης, που εξετάστηκαν στη μελέτη τους, χαρακτηρίστηκαν από μια περιοδική επανάληψη αναμιγνύοντας την αρχική κατάσταση. Το Σχήμα 4-10(α) δείχνει ότι οι δεξιόστροφες εγκάρσιως περιστροφικές ροές με μια ελλειπτική περιοχή που παράγονται στο μικροκάνάλι. Σύμφωνα με το θεώρημα (KAM) Kolmogorov-Arnold-Moser στο δυναμικό σύστημα, το ρευστό σε αυτήν την περιοχή δεν μπορεί να αναμιχθεί με τα περίχωρά τους (χωρίς μια μοριακή επίδραση διάχυσης). Κατά συνέπεια, η μίξη είναι τοπικά χαοτική στο κανάλι μίξης με τις διαμορφωμένες κατ' ευθείαν διαγώνιες ετερογενείς λωρίδες. Αντίθετα, με πριν, η αδρανής περιοχή εξαφανίζεται στο Σχήμα 3-27(β) όπου προκαλείται. η σφαιρική χαοτική μίξη, παρατηρείται ότι δύο άνισες αντιθέτως περιστρεφόμενες ροές δίνης (δηλ. μια δίνη που τρεμοπαίζει) υπάρχει σε αυτό το σύστημα μίξης. Θεωρείται ότι δύο άνισες αντι-περιστρεφόμενες ροές υπάρχουν σε αυτό το σύστημα ανάμιξης. Η δίνη που παρέχει ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς των δύο χρωματιστών διαφορετικών σωματιδίων, από αριστερά προς τα δεξιά και δεξιά προς τα αριστερά, παρουσιάζεται με ένα περιοδικό τρόπο. Η ιδέα αυτού του σχεδιασμού εντάσσεται στα πλαίσια των δεσμών συστρεμμένων σχεδίων (link twist map - LTM).



Σχήμα 3-27. Απεικόνιση της μίξης στις διαφορετικές περιόδους μικροκαναλιών με (a) τις ευθείες διαγώνιες ετερογενείς λουρίδες και (b) τις ανομοιογενείς ασυμμετρικές ετερογενείς λωρίδες ψαροκόκκαλων.



Σχήμα 3-28. (α) Γραφική απεικόνιση της AC ηλεκτρώσωσης. (β) εικόνες φθορισμού της ανάμειξης μεταξύ δύο ρευμάτων με ή χωρίς την εφαρμογή ημιτονοειδούς τάσης.

Η επιλογή της οδήγησης των ευρών και των συχνοτήτων, και η βελτιστοποίηση των όρων λειτουργίας είναι συνήθως μια πρόκληση στο σχεδιασμό ενός ενεργού μικροαναμίκτη. Υπό τους κατάλληλους όρους λειτουργίας, η σημαντικότερη μερίδα των ηλεκτροκίνητων ενεργών σχεδίων μίξης στη βιβλιογραφία είναι σε θέση να προκαλέσει τη χαοτική μίξη. Η ανά τομέα προκληθείσα ηλεκτρώσμωση έχει εφαρμοστεί ευρέως στον ενεργό έλεγχο των ηλεκτρώσμωτικών ροών και την υγρή άντληση μικροκαναλιών, με μια μικρότερη εφαρμογή στην μικροϋπολογιστική μίξη. Ο Sasaki (2006) πρότεινε ένα γρήγορο σχέδιο μικροϋπολογιστικής μίξης για ένα σύστημα ροής που συνδυάστηκε με την ηλεκτρώσμωση εναλλασσόμενου ρεύματος. Η (AC) ηλεκτρώσμωση μπορεί να προκληθεί από έναν τομέα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια όπως στην ηλεκτρόλυση και στην παραγωγή φυσαλίδων, εφ' όσον η συχνότητα είναι υψηλότερη από τον αντίστροφο χρόνο της αντίδρασης ηλεκτροδίων (>1 kHz). Η πόλωση του διπλού στρώματος, προκαλείται από έναν χωρητικό μηχανισμό (πυκνωτή). Η μέσος τιμή της ταχύτητας ολίσθησης στην επιφάνεια ηλεκτροδίων είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της εφαρμοσμένης τάσης στο ηλεκτρόδιο. Ως εκ τούτου, μια υψηλότερη ηλεκτρωσμωτική ταχύτητα ροής μπορεί να παραχθεί με χαμηλότερη τάση που εφαρμόζεται σε μια βέλτιστη συχνότητα. Το Σχήμα 3-28(α) παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση ενός προκληθέντος σχεδίου ροής εναλλασσόμενου ρεύματος ηλεκτρωσμωτικού μικροκαναλιού σε μια ημιελλiptική διατομή. Η σχεδίαση μίας συνεστραμμένης διαμόρφωσης, όπως φαίνεται στο Σχέδιο 3-28(β), προκαλεί μια τρεμάμενη ροή δίνης που μπορεί να παραχθεί στο προς τα κάτω κανάλι που οδηγεί σε μια χαοτική μίξη. Αυτός ο αναμίκτης εντάσσεται επίσης μέσα στο πλαίσιο των LTM.

Γενικά, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν διάφορες τεχνικές για τις υβριδικές στρατηγικές μικροανάμιξης. Η πρώτη τεχνική περιλαμβάνει το συνδυασμό χαοτικής μίξης με τη δημιουργία πολύδινών από το σχέδιο ASM. Στα ποσοστά χαμηλής ροής που αντιστοιχούν σε $Re < 1$, η μίξη επιτυγχάνεται από τις εγκάρσιες ροές που προκαλούνται από τα εμπόδια, ενώ στα υψηλότερα ποσοστά ροής που αντιστοιχούν $Re > 1$, η μίξη επιτυγχάνεται από έναν συνδυασμό δινών του Dean και δινών επέκτασης. Η δεύτερη τεχνική περιλαμβάνει την προσθήκη ενός σπειροειδούς τμήματος μίξης στο τέλος του σχεδίου ASM. Η μίξη στα ποσοστά χαμηλής ροής ($Re < 1$) επιτυγχάνεται καθαρά από τη διάχυση δεδομένου ότι το σπειροειδές τμήμα συστεγάζει μια εναλλαγή της διατομής του, στο μέσο του, όπως απαιτείται. Και οι δύο αυτές οι τεχνικές, επεκτείνουν πολύ την αποδοτικότητα της μίξης, και ιδιαίτερα, μπορούν να επιτευχθούν για μεγάλο εύρος τιμών

του Re. Επίσης στη περίπτωση την ηλεκτροκινητικής μίξης, που είναι ένας συνδυασμός ASM με πλάγια εμπόδια με ταυτόχρονη παρουσία ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάστηκε το πως πολώνει τα μόρια των προς ανάμιξη ρευστών και ανά τακτά χρονικά διαστήματα και μετά τα απελευθερώνει προκαλώντας αναταραχή της ροής. Η παρουσία των πλάγιων εμποδίων δεν είναι βασική αρχή αλλά παρουσιάζεται σαν μια επιπλέον εφαρμογή που θα επιτρέψει την αύξηση του εύρους χρησιμότητας των καναλιών για τα αντίστοιχα μεγέθη του Re.

4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ T

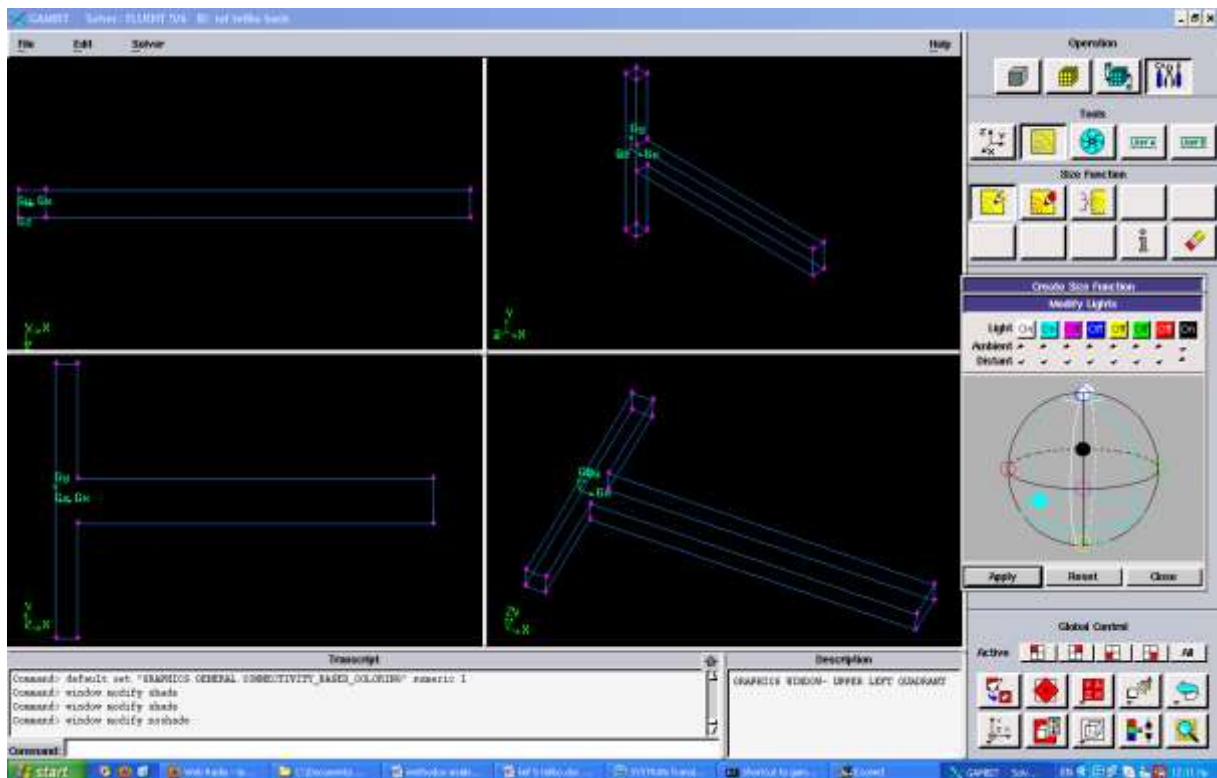
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4.1	Κατασκευή γεωμετρίας και υπολογιστικού πλέγματος	70
4.2	Ανάλυση της ροής με λογισμικό CFD	73
4.3	Επιλογή υπολογιστικού πλέγματος	75

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η διαδικασία δημιουργίας της γεωμετρίας του μικροαναμικτή και ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος ροής με υπολογιστικό πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Ταυτόχρονα εξετάζεται η διαμόρφωση του υπολογιστικού πλέγματος σε ότι αφορά την πυκνότητά του και την γεωμετρία του, με σκοπό την επιλογή του κατάλληλου για το μικροκανάλι που εξετάζεται.

4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

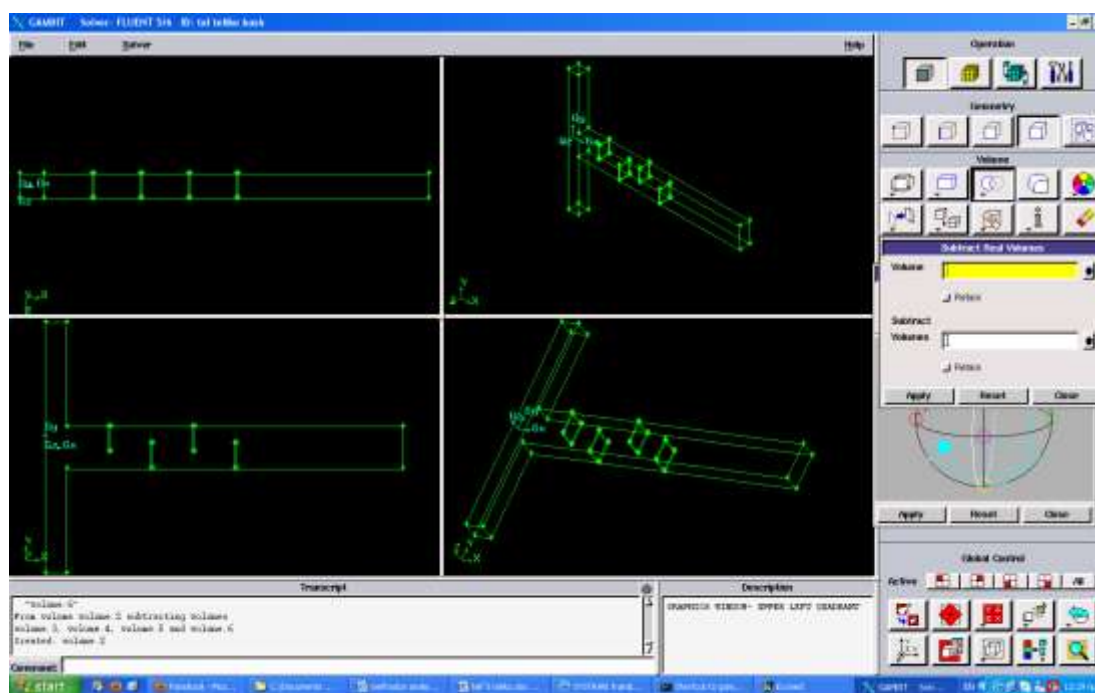
Για την πραγματοποίηση αριθμητικών πειραμάτων με τον κώδικα CFD (Fluent), κατασκευάστηκε μέσω του προγράμματος Gambit (Σχήμα 4.1), ένα μικροκανάλι με δυο εισόδους και μία έξοδο, στο οποίο θα εισαχθούν δύο διαφορετικά προς ανάμιξη ρευστά. Το μήκος των καναλιών εισόδου παραμένει σταθερό και ίσο με 500μm όπως και το κανάλι μίξης, που έχει ολικό μήκος 1700μm. Το δε πλάτος περιορίζεται στα 100μm και στα 200μm για τα κανάλια εισόδου και μίξης αντίστοιχα. Το ολικό ύψος του καναλιού είναι σε όλο το μήκος του 100μm.



Σχήμα 4.1 Επιφάνεια σχεδίασης Gambit, μοντέλο T.

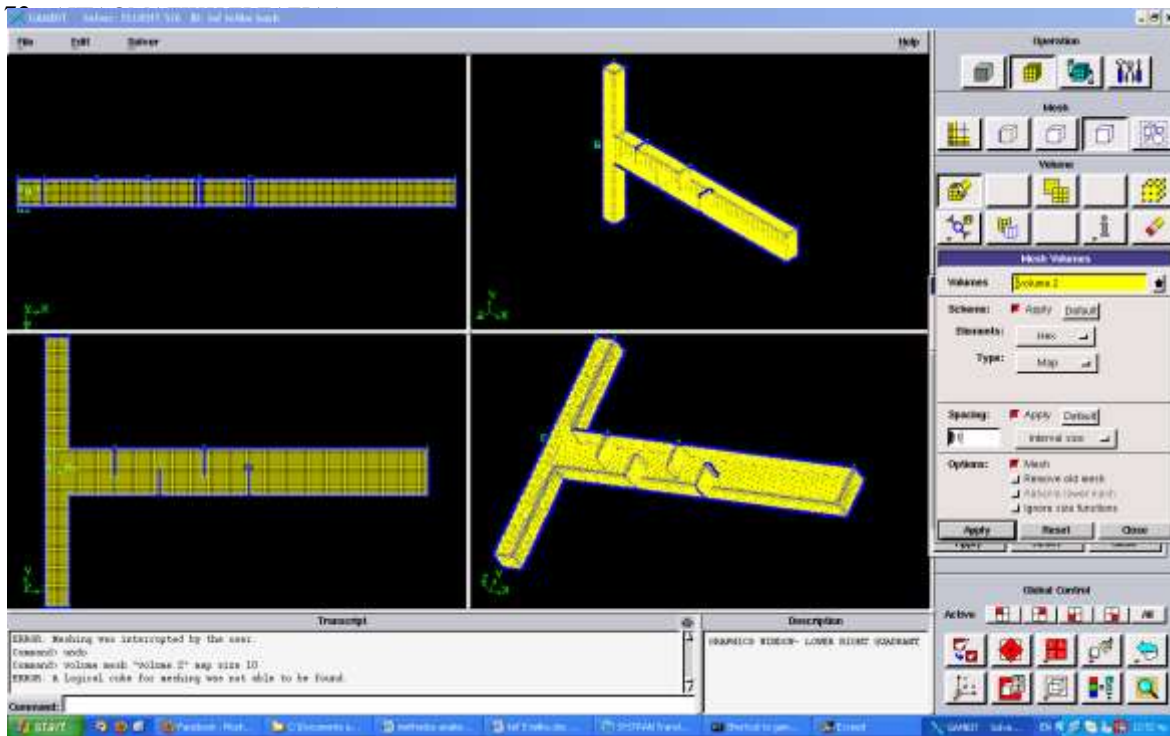
Ταυτόχρονα, για να βελτιωθεί ο ρυθμός ανάμιξης των δύο ρευστών τοποθετούνται εμπόδια ανά κάποιες συγκεκριμένες αποστάσεις μέσα στο μικροκανάλι ανάμιξης και με

διαφορετικά μήκη κάθε φορά. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η κατασκευή του μικροαναμικτή τύπου T με πλάτος εμποδίου 120 μm . Επίσης πραγματοποιήθηκαν υπολογιστικά πειράματα και για τις περιπτώσεις όπου το ύψος των εμποδίων ήταν αντίστοιχα, 50 μm , 70 μm και 100 μm , καθώς και για διαφορετικές σχετικές αποστάσεις μεταξύ τους.

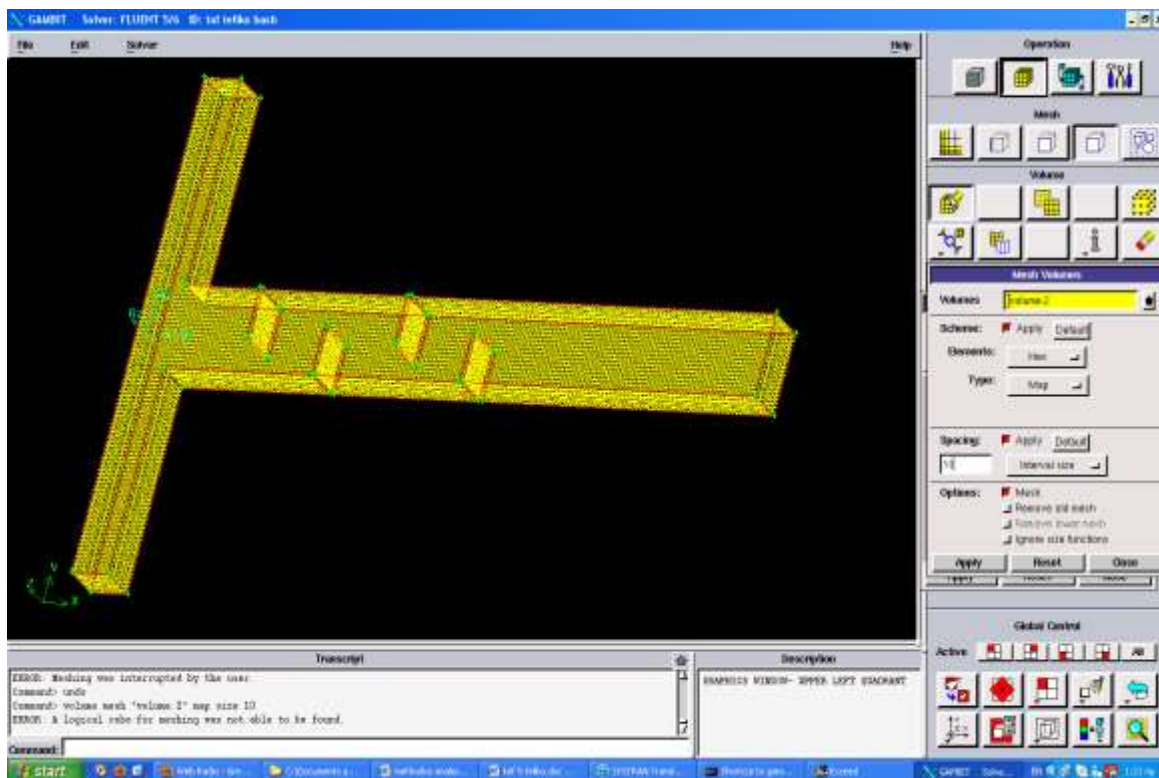


Σχήμα 4.2 Επιφάνεια σχεδίασης Gambit, μοντέλο T με εμπόδια στο κανάλι ανάμιξης.

Αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή του αγωγού, θα πρέπει να δημιουργηθεί το υπολογιστικό πλέγμα μέσω του προγράμματος Gambit, όπου δίνονται πολλαπλές επιλογές ως προς το μέγεθος του πλέγματος, την πυκνότητα του αλλά και το σχήμα του. Βασικό σχήμα που επιλέχτηκε, ήταν το ορθογωνικό και με μέσο μήκος πλευράς όγκου ελέγχου 10 μm . Στα σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζεται ο όγκος με το πλέγμα σε πλήρη ανάπτυξη.



Σχήμα 4.3 Επιφάνεια σχεδίασης Gambit, υπολογιστικό πλέγμα.



Σχήμα 4.4 Επιφάνεια σχεδίασης Gambit, υπολογιστικό πλέγμα.

Έχοντας την γεωμετρία του πεδίου ροής και το πλέγμα, πρέπει να οριστούν οι επιφάνειες εισόδου, εξόδου και να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες και οι λοιπές παράμετροι της ροής. Μετά, και την ολοκλήρωση του ορισμού των συνοριακών επιφανειών, μεταφέρονται όλα τα δεδομένα στο υπολογιστικό πρόγραμμα (Fluent).

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CFD

Το υπολογιστικό πακέτο Fluent6.3, είναι λογισμικό στο οποίο ο ερευνητής χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση φαινομένων μετάδοσης θερμότητας, ροής, στερεοποίησης και τήξης. Η χρήση του λογισμικού απαιτεί την ύπαρξη ενός σχεδιαστικού πακέτου, εν προκειμένω το Gambit, από το οποίο κατασκευάζεται το γεωμετρικό μοντέλο και το υπολογιστικό πλέγμα.

Στην περίπτωση που ακολουθεί, θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση της ροής για το πώς συμπεριφέρεται ανάλογα το αριθμό Reynolds αλλά και σε σχέση με την ύπαρξη διαφραγμάτων που βοηθούν στην ενίσχυση της ανάμιξης. Συγκεκριμένα εισάγεται το αρχείο που έχει εξαχθεί από το σχεδιαστικό πρόγραμμα Gambit, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται έλεγχος σε ότι αφορά την ορθότητα του πλέγματος ώστε να αποφευχθούν λάθος λύσεις και πιθανά σφάλματα. Βέβαια παρουσιάζεται το ερώτημα που αφορά, τον σχεδιασμό του πλέγματος αλλά και την πυκνότητά του. Αυτό θα αναλυθεί στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων με αριθμητικά δεδομένα που προκύπτουν από ανάλογες συγκρίσεις μέσω του προγράμματος ανάλυσης της ροής. Κατόπιν, επιλέγεται η αριθμητική μέθοδος με την οποία θα πραγματοποιηθεί η επίλυση. Στην συγκεκριμένη διαδικασία, επιλέγεται η ανάλυση βασισμένη στις εξισώσεις των Navier –Stokes. Ειδικότερα, η pressure-based επίλυση που επιλέγεται, υιοθετεί έναν αλγόριθμο που ανήκει σε μια γενική κατηγορία μεθόδων αποκαλούμενων μέθοδοι προβολής [A. J. Chorin. Numerical solution of navier-stokes equations. Mathematics of Computation, 22:745-762, 1968.] Στη μέθοδο αυτή, η ικανοποίηση της εξίσωσης συνέχειας επιτυγχάνεται με την επίλυση μιας εξίσωσης πίεσης (ή διόρθωση πίεσης). Η εξίσωση πίεσης προέρχεται από την επίλυση των εξισώσεων ορμής κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ταχύτητα που διορθώνεται από την πίεση να ικανοποιεί τη συνέχεια. Δεδομένου ότι οι ροϊκές εξισώσεις είναι μη-γραμμικές και μη-ανεξάρτητες η διαδικασία λύσης περιλαμβάνει επαναλήψεις όπου το σύστημα των εξισώσεων λύνεται επαναληπτικά έως ότου συγκλίνει η λύση του. Η ροή που εξετάζεται είναι μόνιμη, συνεκτική ροή χαμηλού αριθμού Re, δηλαδή στρωτή και οι εξισώσεις που την διέπουν είναι:

Εξίσωση ορμής

$$\partial_j \cdot u_j + u_j \cdot \partial_j \cdot u_i = -\frac{1}{\rho_0} \partial_i \cdot p + \nu \cdot \nabla^2 u_i + E_i$$

Εξίσωση συνέχειας

$$\partial_j \cdot u_j = 0$$

Όπου u_i είναι η συνιστώσα της ταχύτητας, p η πίεση, ρ_0 η πυκνότητα E_i είναι οι εξωτερικές δυνάμεις ανά μονάδα μάζας, ν είναι το κινηματικό ιξώδες, t είναι ο χρόνος, και οι δείκτες i, j αναφέρονται σε συντεταγμένες στο χώρο σε σχέση με το $x_i, x_j, i, j = 1, 2, 3$. Η αδιαστατοποίηση των δεδομένων χρησιμοποιεί τις εξισώσεις:

$$u'_i = \frac{u_i}{U}, \quad x'_i = \frac{x_i}{d}, \quad p'_i = \left(\frac{d_i}{(\rho_o \nu U)} \right) \cdot p$$

$$E'_i = \left(\frac{\nu \cdot U}{d^2} \right) E_i, \quad t'_i = \left(\frac{\nu}{d^2} \right) t_i,$$

Όπου U είναι η ταχύτητα αναφοράς, και d το μήκος αναφοράς. Οπότε οι αρχικές εξισώσεις μετατρέπονται σε:

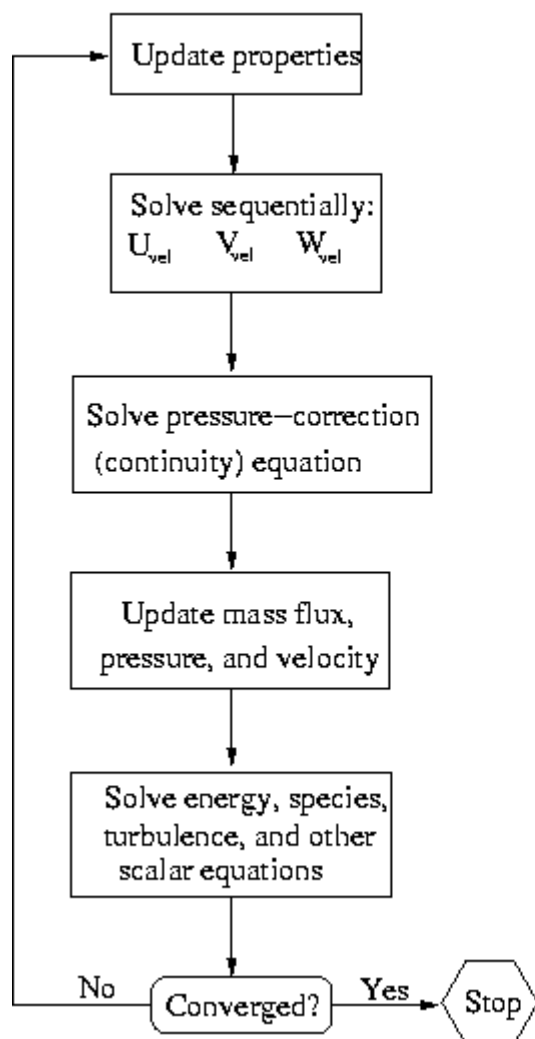
$$\partial_j \cdot u_j + \text{Re} \cdot u_j \cdot \partial_j \cdot u_i = -\partial_i \cdot p + \nabla^2 u_i + E_i \quad (4.1)$$

$$\partial_j u_j = 0 \quad (4.2)$$

Ο αλγόριθμο, επίλυσης αποτελείται από τα βήματα που φαίνονται στο σχήμα 4.5 και συνοψίζονται παρακάτω:

1. Ενημέρωση ιδιοτήτων των ρευστών (η πυκνότητα, το ιξώδες, η πίεση, η ταχύτητα), με βάση την τρέχουσα λύση.
2. Λύνονται οι εξισώσεις ορμής για τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις, η μια μετά από την άλλη, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατες ενημερωμένες τιμές ροής μάζας και πίεσης από την προηγούμενη επανάληψη.
3. Επιλύεται η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα δεδομένα ταχύτητας και ροής μάζας.
4. Λύνονται ενδεχόμενες πρόσθετες εξισώσεις για διόρθωση των ταχυτήτων, πίεσης και ροής μάζας, εφόσον υπάρχουν, όπως για τα μεγέθη της τύρβης για την ενέργεια, κλπ. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λύνεται μια εξίσωση για μια ιδιότητα των ρευστών που ελήφθει διαφορετική, όπως η ειδική θερμότητα, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός ανάμιξης.
5. Έλεγχος για τη σύγκλιση των εξισώσεων.

Pressure-Based Segregated Algorithm



Σχήμα 4.5 Μέθοδος επίλυσης

4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Έχοντας τα δεδομένα για τις αρχικές συνθήκες εισόδου και εξόδου της ροής και με την λογική ότι η ροή είναι στρωτή, μιας και ο αριθμός Reynolds θα κυμανθεί στην έρευνα, μεταξύ των τιμών $0,1 \leq Re \leq 1000$.

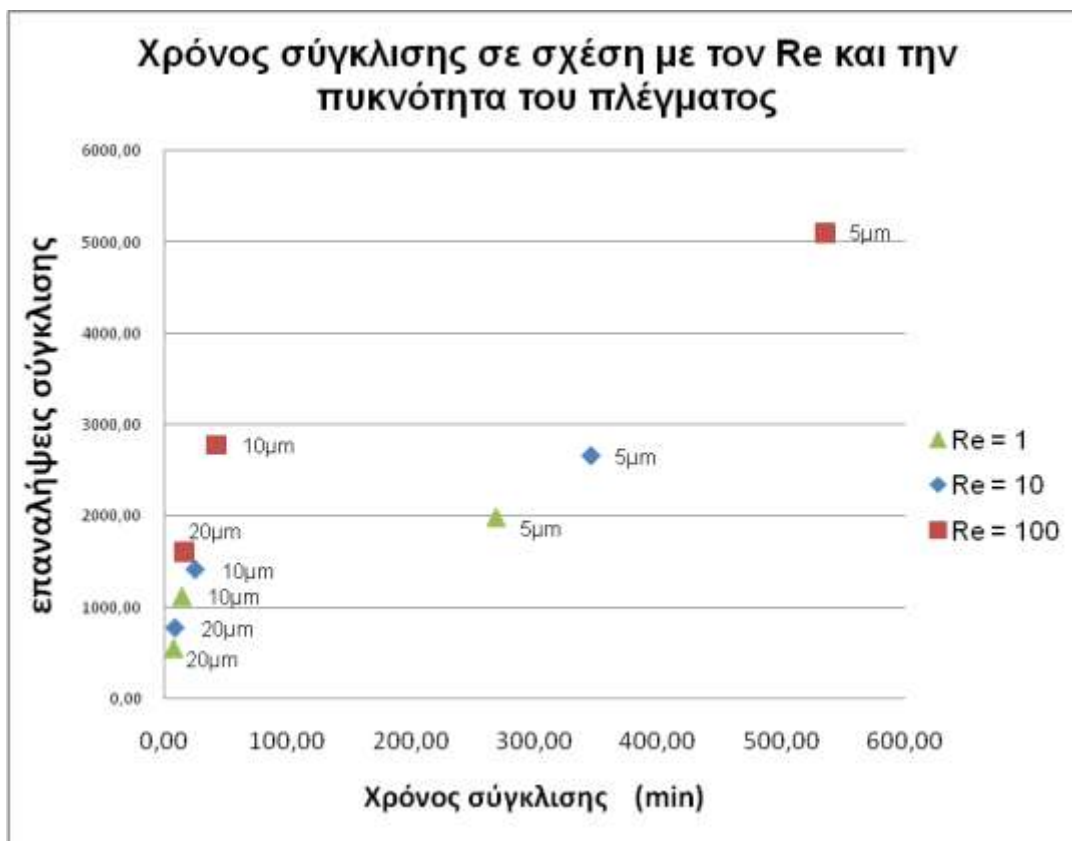
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το πως εξελίσσεται η σύγκλιση της μεθόδου ανάλογα την πυκνότητα του πλέγματος διάσταση κελιού ($20\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$) αλλά και πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα για τις διαφορετικές τιμές του αριθμού Reynolds. Συγκεκριμένα, στην δεύτερη γραμμή του πίνακα καταγράφεται ο αριθμός Re για τον οποίο γίνεται η δοκιμή της ροής εφαρμόζοντας διάσταση κελιών πλέγματος αντίστοιχη με αυτή που αναγράφεται στην πρώτη γραμμή του πίνακα ($20\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ & $5\mu\text{m}$). Στην τρίτη σειρά καταγράφονται οι απαιτούμενες επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι η μέθοδος να συγκλίνει σύμφωνα με το κριτήριο της σύγκλισης, που ήταν το $(*10^{-6})$ για την εξίσωση του βαθμού ανάμιξης και $(*10^{-14})$ για τις υπόλοιπες. Στην τέταρτη και πέμπτη γραμμή

παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του ποσοστού ανάμιξης και της πτώσης πίεσης αντίστοιχα για την μέθοδο που εξετάζεται. Τέλος στην έκτη γραμμή εμφανίζεται ο χρόνος που απαιτήθηκε ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει.

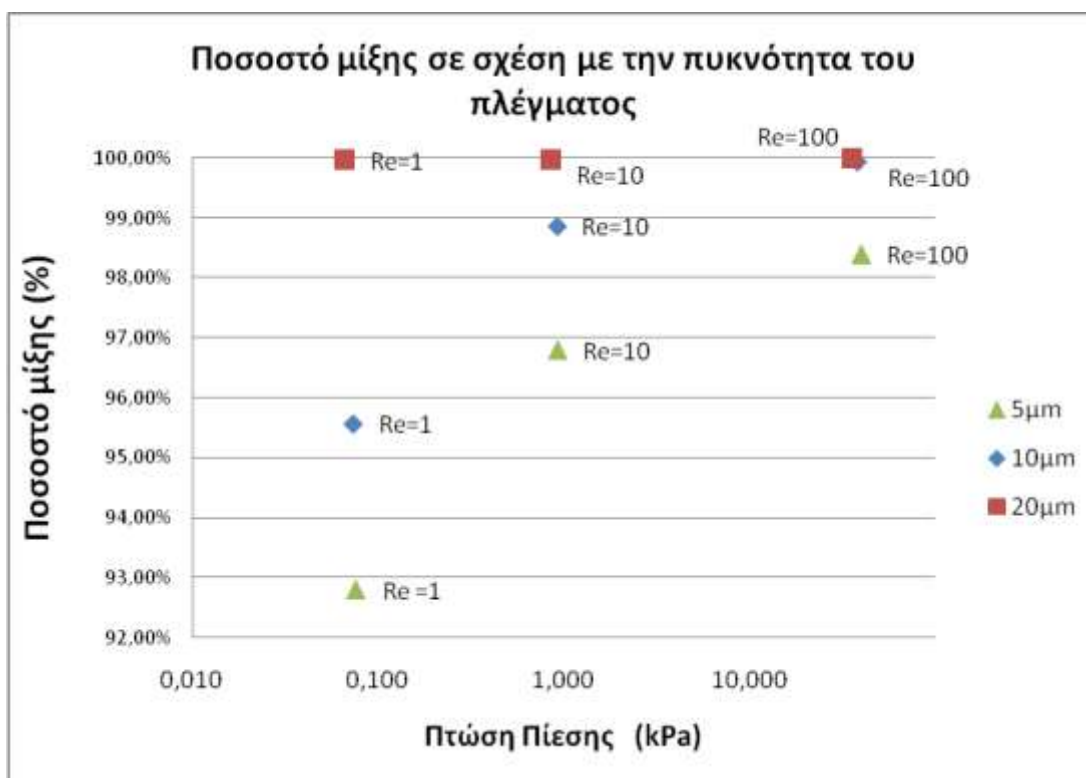
Mesh	20 μ m	20 μ m	20 μ m	10 μ m	10 μ m	10 μ m	5 μ m	5 μ m	5 μ m
Re	1	10	100	1	10	100	1	10	100
Iteration	558	770	1605	1125	1410	2781	1986	2656	5109
% mixing	99.97	99.97	99.99	98.36	95.57	99.95	92.80	96.80	98.40
Δp_{out} (kPa)	0.066	0.856	35.703	0.073	0.920	38.063	0.076	0.932	40.274
Time (h:m:s)	0:07:36	0:08:40	0:15:36	0:14:05	0:22:00	0:36:45	4:28:45	5:45:25	8:55:44

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα σύγκλισης, επαναλήψεων, ποσοστού μίξης, πτώσης πίεσης και χρόνου σύγκλισης.

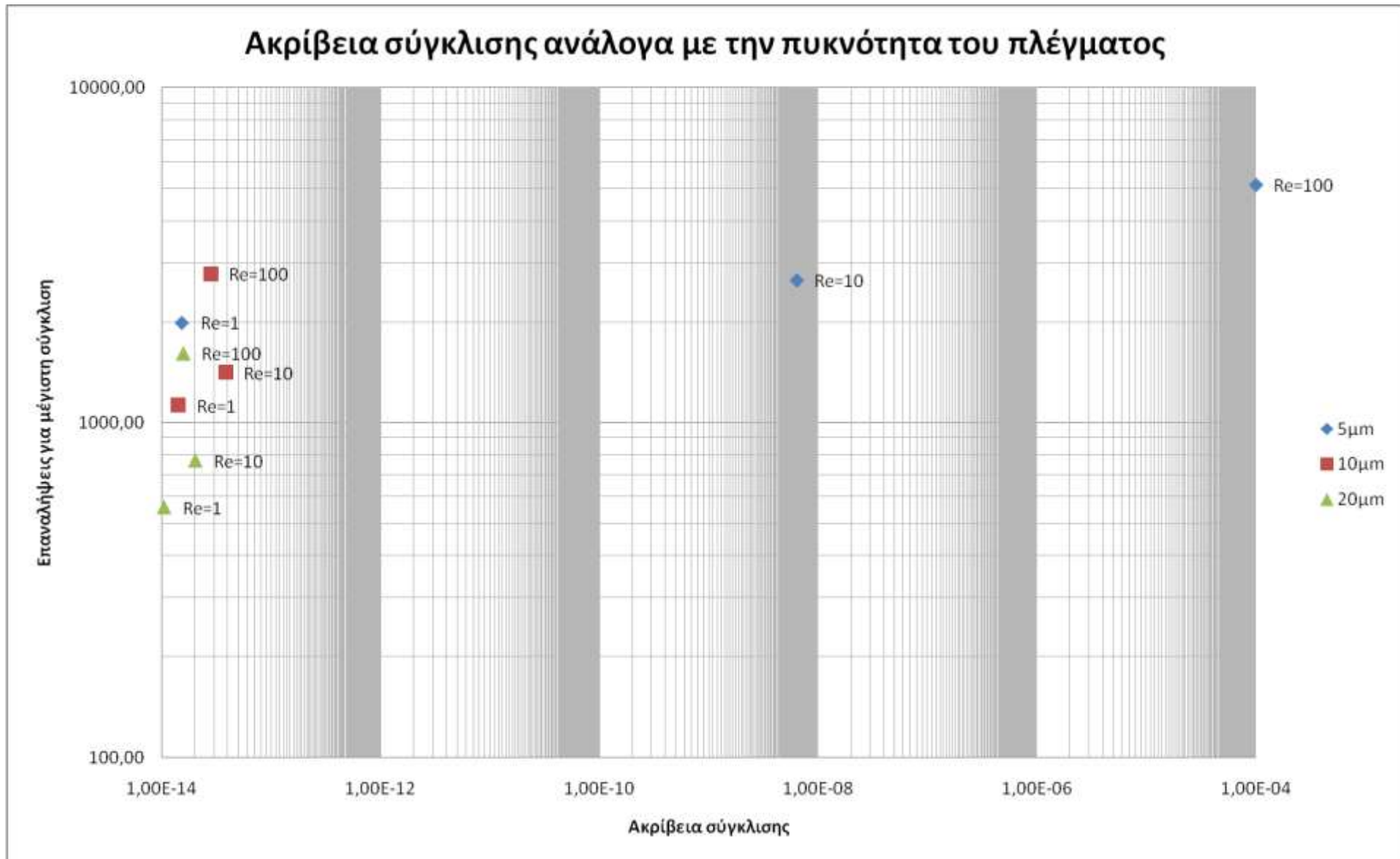
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα που σχετίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε σχέση με την πυκνότητα του πλέγματος διακριτοποίησης, ενώ ταυτόχρονα διαπιστώνεται η λειτουργικότητα των πλεγμάτων ανάλογα τον αριθμό Reynolds. Συγκεκριμένα διαπιστώνεται ότι για πολύ μικρά Re η σύγκλιση δεν είναι εφικτή με την μέγιστη ακρίβεια για πολύ πυκνά πλέγματα, και αυτό οφείλεται στην αδυναμία του μοντέλου ανάλυσης ροής και των εξισώσεων που χρησιμοποιεί (Σχήμα 4.8 και Σχήμα 4.6). Επιπλέον, παρατηρείται το φαινόμενο, ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα του πλέγματος, τόσο η χρονική διάρκεια σύγκλισης αυξάνεται, καθιστώντας την διαδικασία υπερβολικά χρονοβόρα και ασύμφορη για πραγματοποίηση πολλαπλών πειραμάτων. Η αραιή διάταξη πλέγματος επιτυγχάνει σύγκλιση σε περιορισμένο χρονικό διάστημα αλλά η ακρίβεια του αποτελέσματος δεν θα μπορούσε να θεωρηθεί αξιόπιστη αφού εμφανίζει μέγιστο ποσοστό μίξης ίδιο (100%), για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds εξ’ αιτίας αυξημένου σφάλματος αριθμητικής διάχυσης (σχήμα 4.7). Οπότε για την ανάλυση των πειραματικών διατάξεων θα εφαρμοστεί μια μέση λύση (10 μ m) η οποία παρουσιάζει μέτρια ποσοστά ακρίβειας σύγκλισης αλλά σε περιορισμένο χρόνο, ενώ ταυτόχρονα τα αποτελέσματα πλησιάζουν τα αντίστοιχα άλλων ερευνητικών μεθόδων. (Computational fluid dynamic simulation of liquid – liquid mixing in a static T-shaped micromixer, Elmabruk A. Wang Yun –dong, Dai You-yuan, Dec 2008) , (Numerical Analysis of Fluid Mixing in T-Shape Micro Mixer, Muhammad S., Arne E. & Kaennakham S. Oct. 2007)



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα χρόνου σύγκλισης για διάφορες τιμές πυκνότητας πλέγματος με αντίστοιχες τιμές Reynolds



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα χρόνου σύγκλισης για διάφορες τιμές πυκνότητας πλέγματος με αντίστοιχες τιμές Reynolds.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα ακρίβειας σύγκλισης για διάφορες τιμές πυκνότητας πλέγματος με αντίστοιχες τιμές Reynolds

5

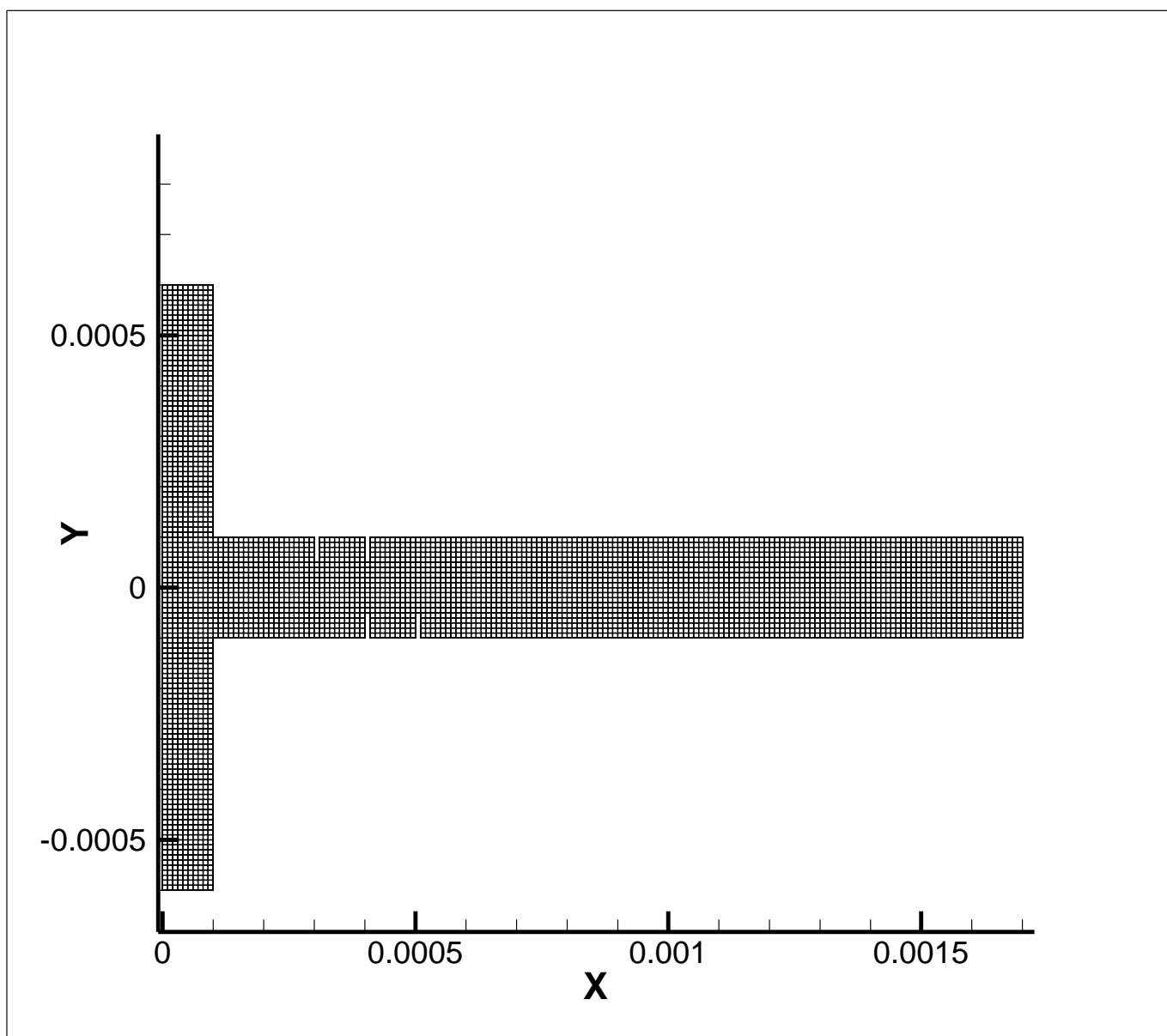
ΜΕΛΕΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

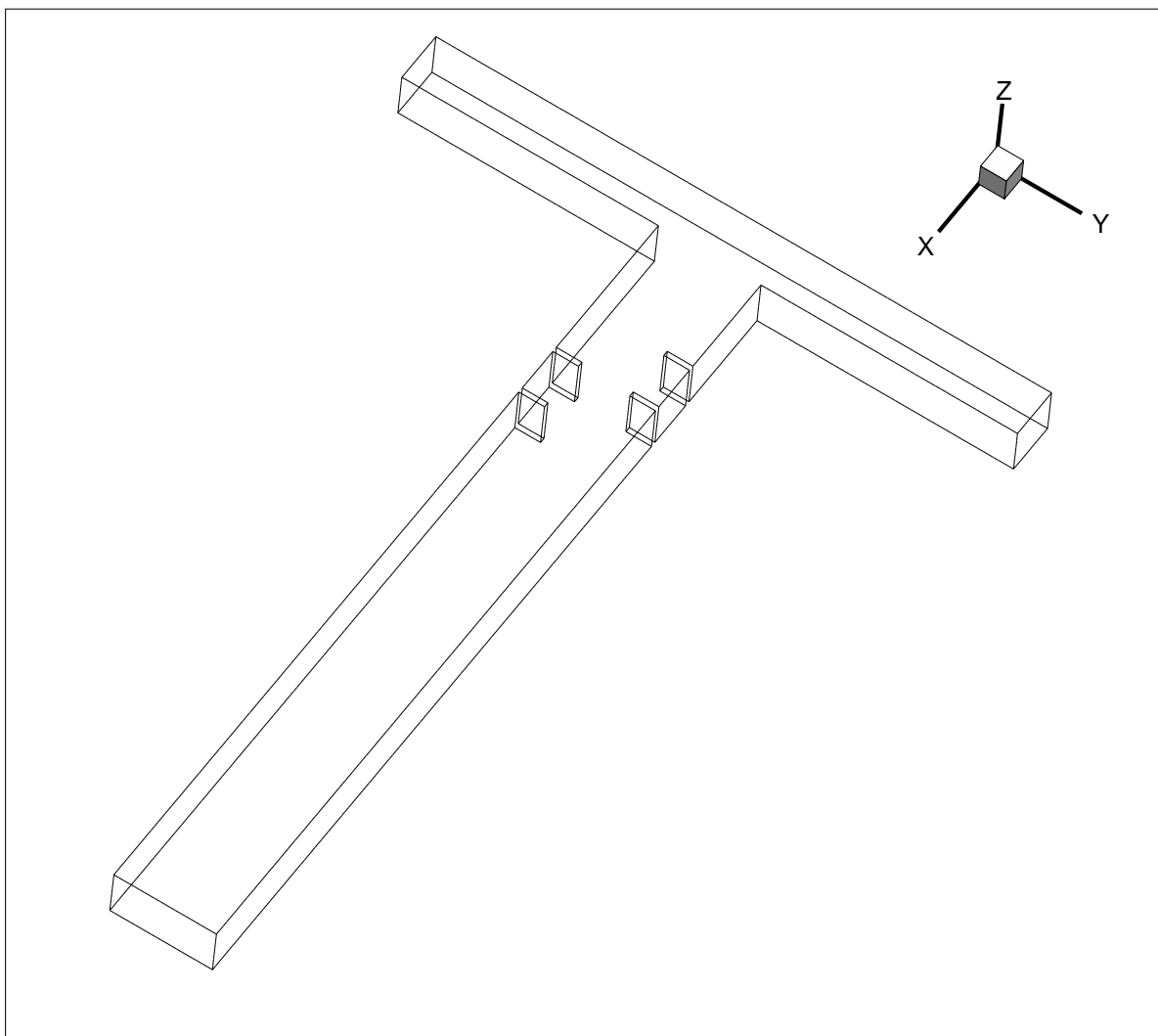
5.1	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 25%	80
5.2	Ροή σε απλό T με μείωση υδραυλικής διατομής κατά 25%, και διαφορετικές αποστάσεις διαφραγμάτων	91
5.3	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 60%	93
5.4	Ροή σε απλό T με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 50%	103
5.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	108

5.1 ΡΟΗ ΣΕ ΑΠΛΟ T ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 25%

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ροής και κατά συνέπεια της ανάμιξης σε απλό μικροαναμικτή T με κατακόρυφα εμπόδια/διαφράγματα στον άξονα (Z) με πάχος διαφραγμάτων εμποδίων 10 μ m και ύψος εμποδίων 50 μ m. Ως αρχικές συνθήκες, στην είσοδο του T, θέτονται τρεις διαφορετικές ταχύτητες εισόδου (0.1m/s , 1.0m/s , 10.0m/s) οι οποίες μας δίνουν αντίστοιχες τιμές για τον αριθμό Reynolds (10.0, 100.0 & 1000.0). Στην έξοδο του T έχουμε πίεση περιβάλλοντος 1Atm.

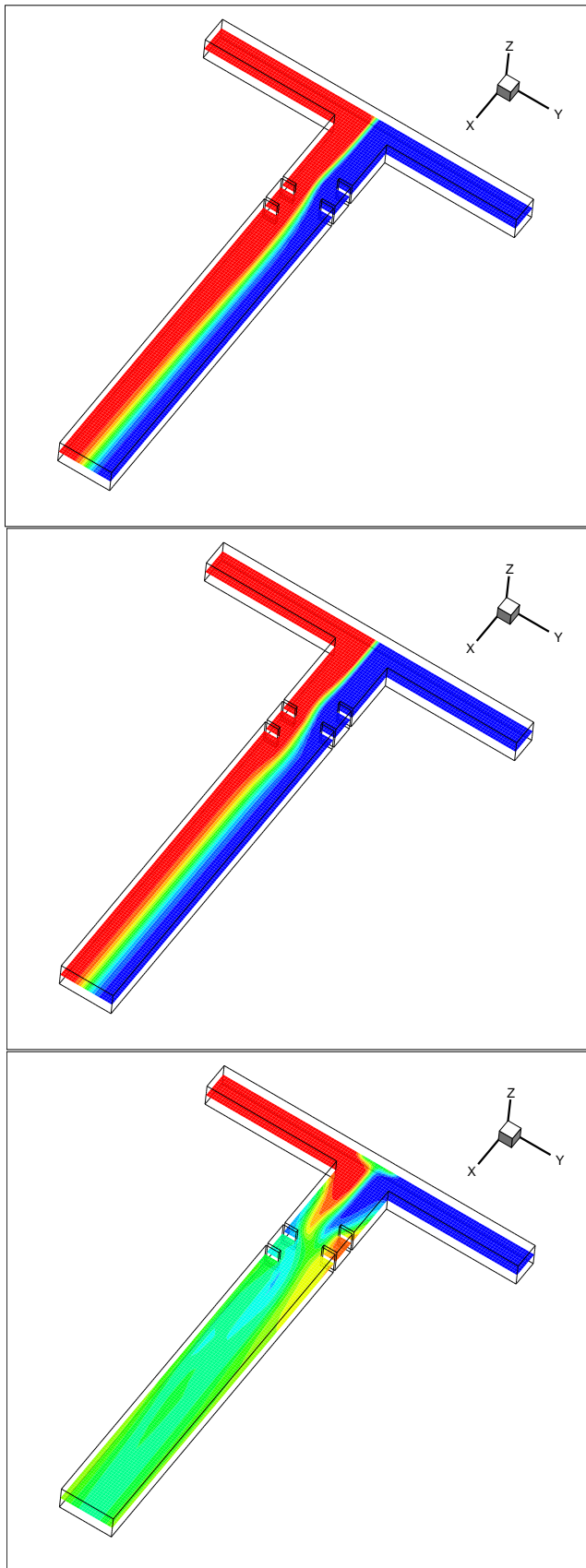


Σχήμα 5.1.1 Πλέγμα απλού T με κατακόρυφα εμπόδια στον άξονα (Z) διαστάσεων (X,Y,Z)(10x50x100 μ m)

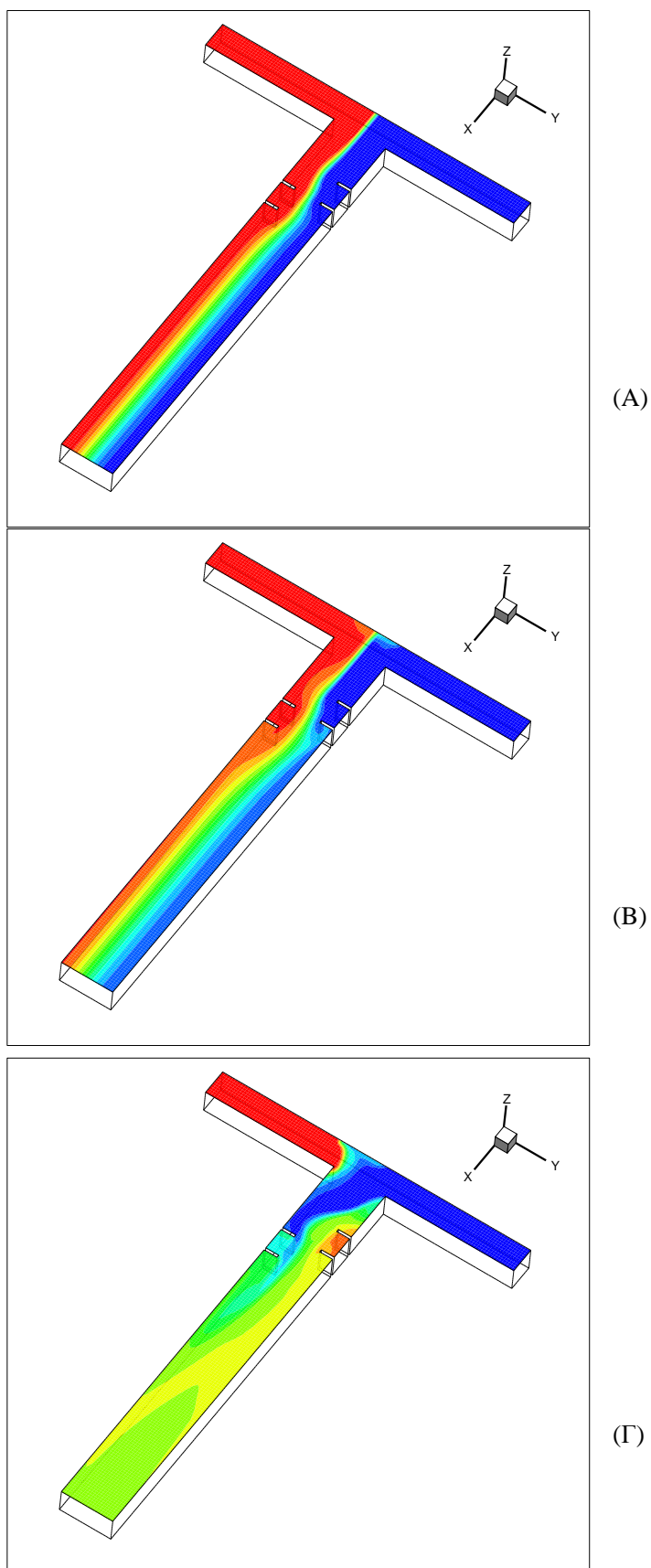


Σχήμα 5.1.2 Υπολογιστικός χώρος απλού T με κατακόρυφα εμπόδια στον άξονα (Z) διαστάσεων (X,Y,Z)(10x50x100 μ m)

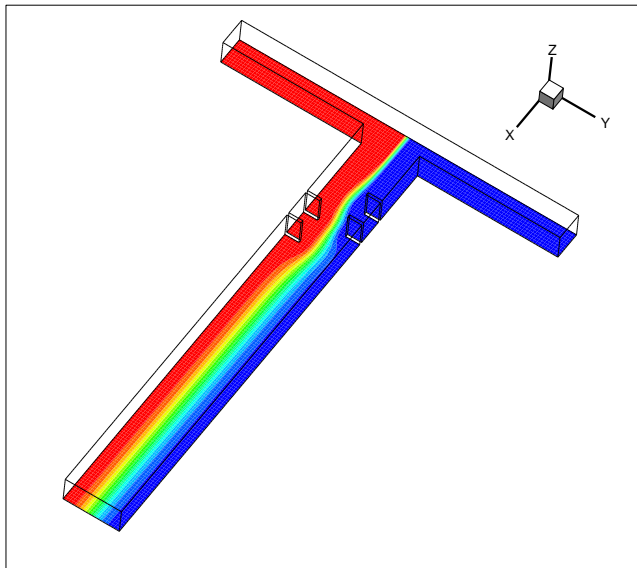
Στο σχήμα 5.1.1 και 5.1.2 απεικονίζονται το υπολογιστικό πλέγμα και η γεωμετρία του πεδίου ροής αντίστοιχα για μικροκανάλι με διαστάσεις αγωγού εισόδου 500 μ m και αγωγό ανάμιξης 1700 μ m. Το δε πλέγμα που απεικονίζεται έχει κατασκευαστεί με διάσταση πλευράς όγκου ελέγχου 10 μ m.



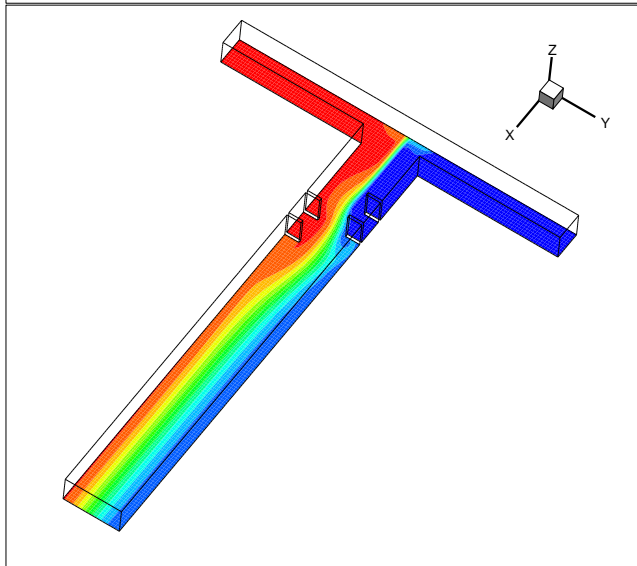
Σχήμα 5.1.3 Ροη στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού στον άξονα Z , για διαφορετικές τιμές Re. A) Re=10, B) Re=100, & Γ) Re=1000.



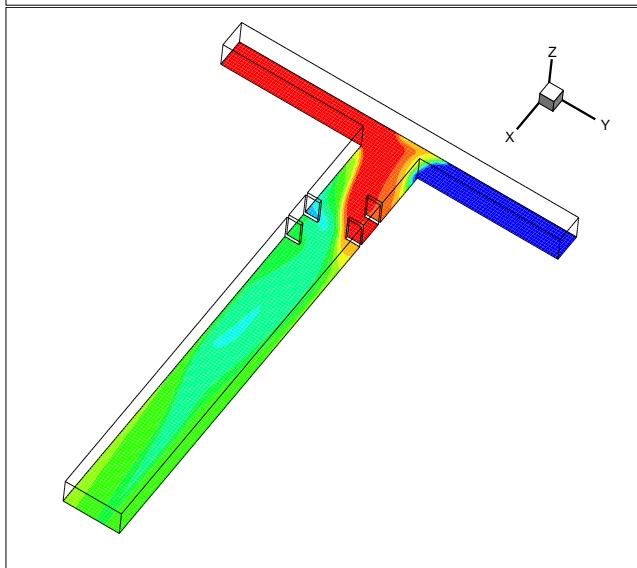
Σχήμα 5.1.4. Ροη κοντά στην άνω επιφάνεια του μικροκαναλιού, για διαφορετικές τιμές Re . A) $Re=10$, B) $Re=100$ & Γ) $Re=1000$.



(Α)

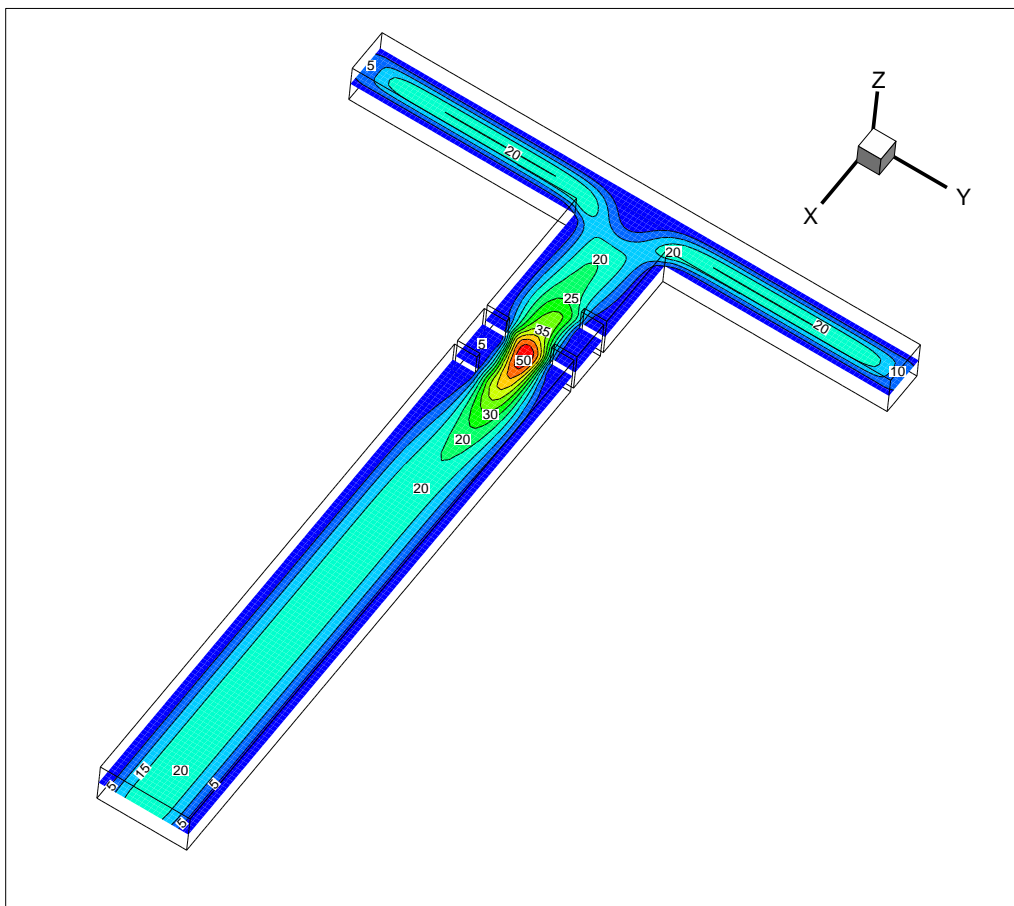


(Β)

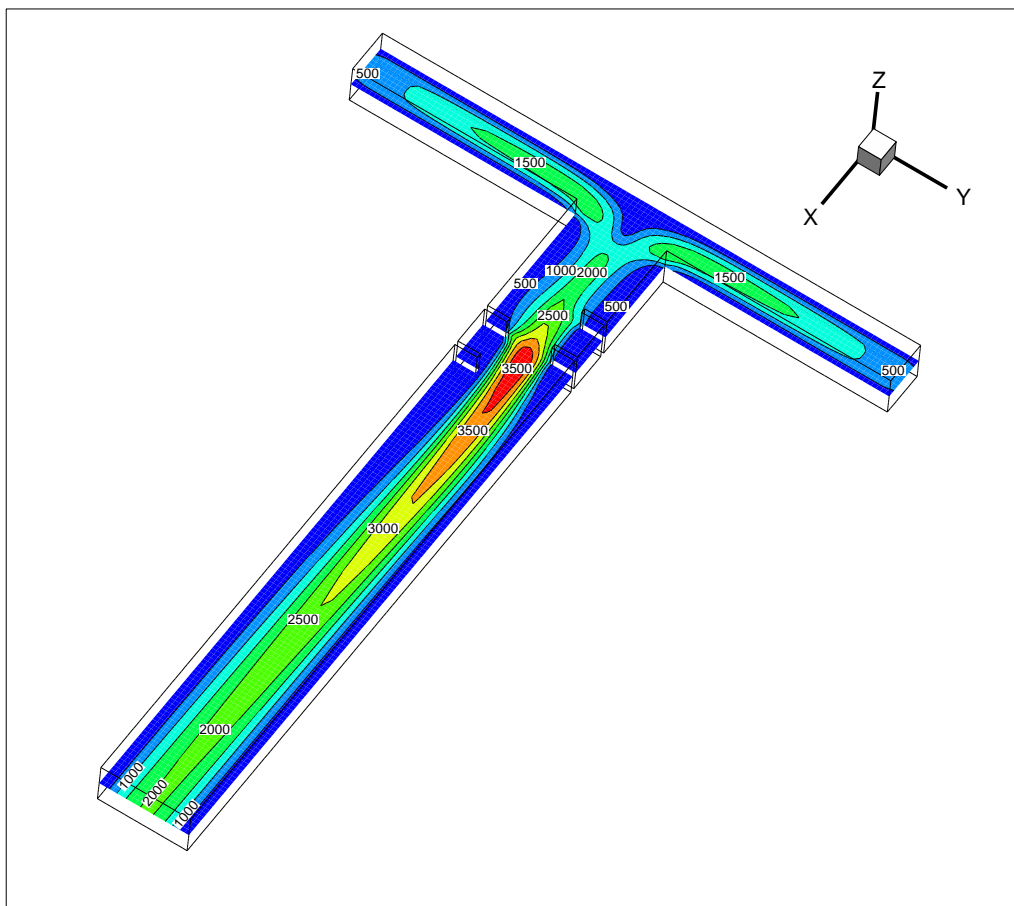


(Γ)

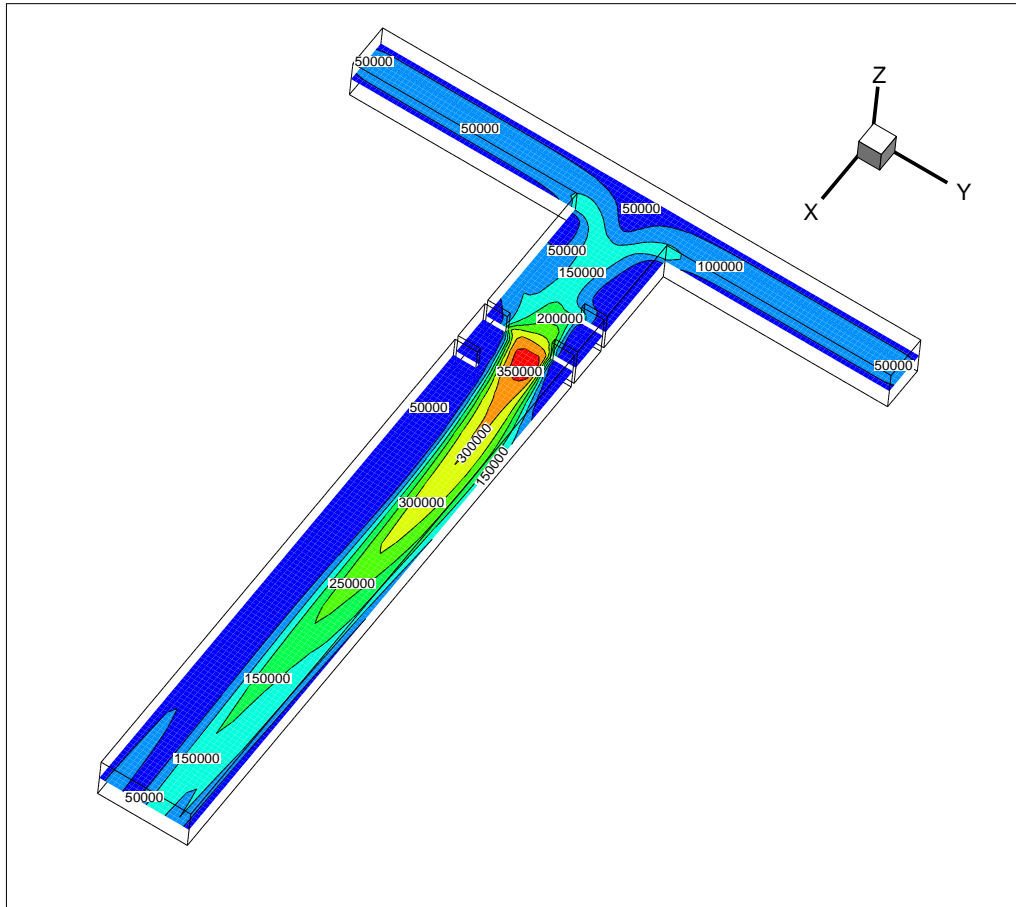
Σχήμα 5.1.5. Ροή κοντά στην κάτω επιφάνεια του μικροκαναλιού, για διαφορετικές τιμές Re. Α) Re=10, Β) Re=100 & Γ) Re=1000.



(A)

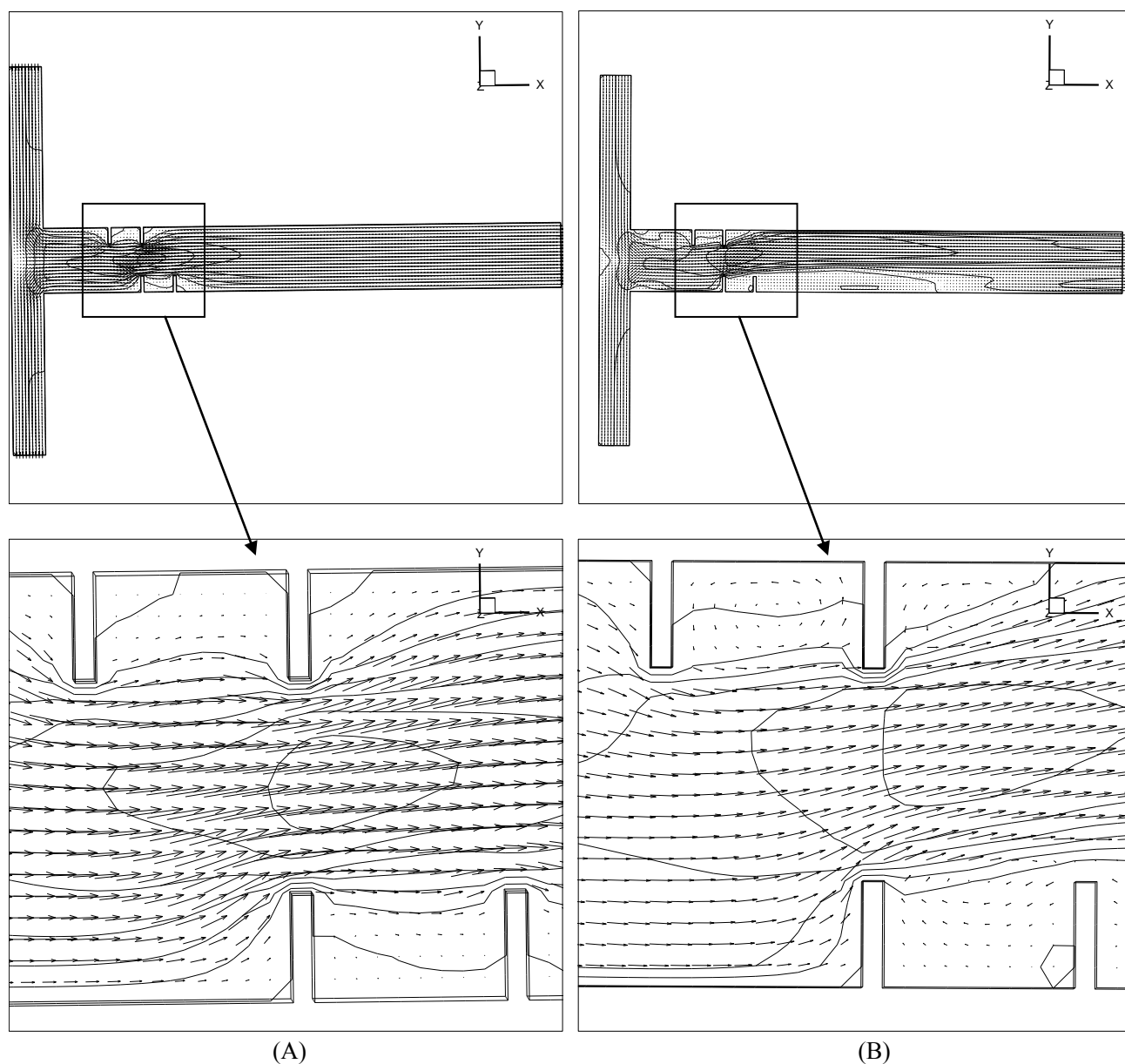


(B)



Σχήμα 5.1.6. Μεταβολή της πίεσης της ροής στο επίπεδο συμμετρίας ως προς τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές Re. A) $Re=10$, B) $Re=100$ & C) $Re=1000$.

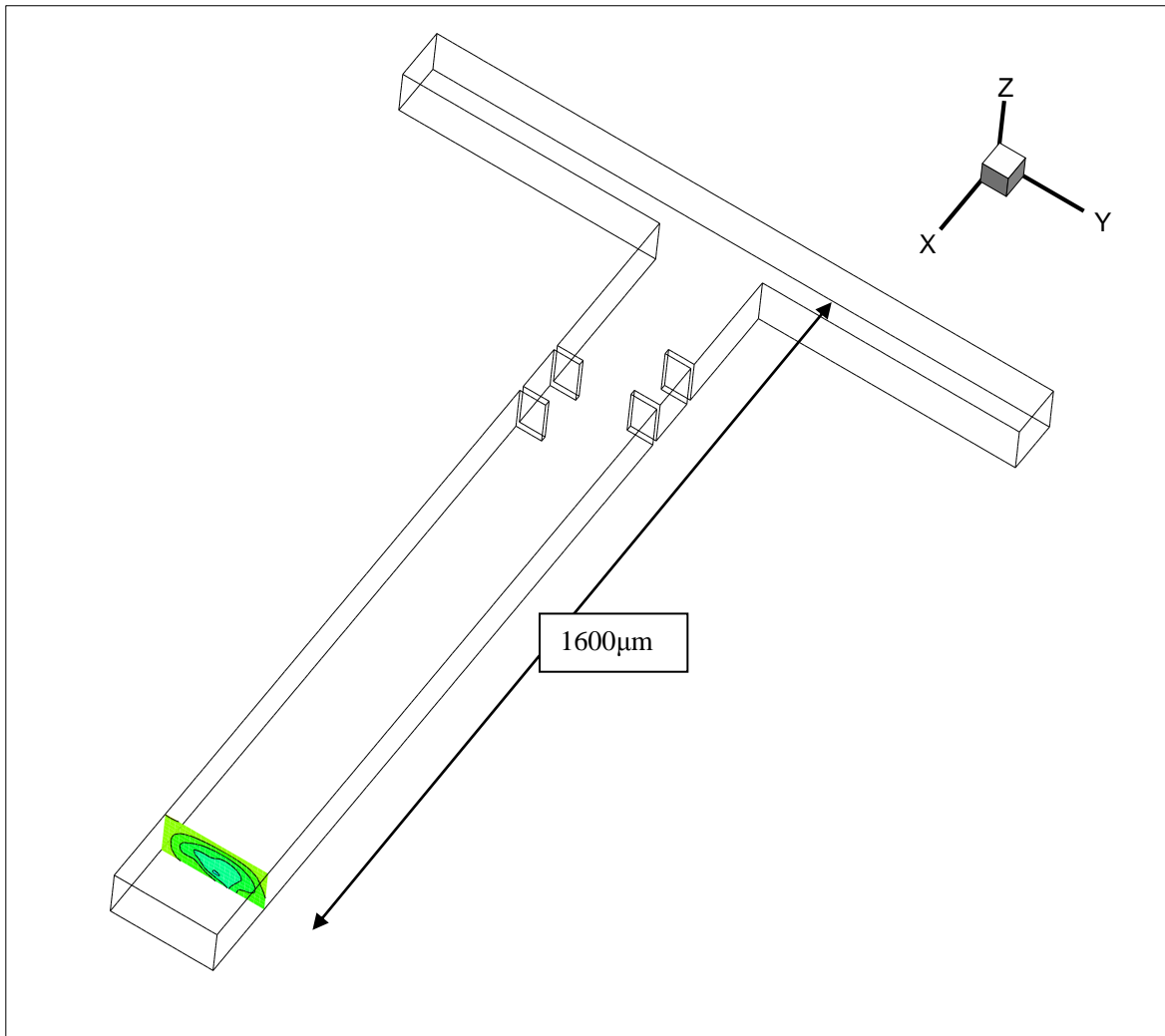
Στα σχήματα 5.1.3 , 5.1.4 και 5.1.5 απεικονίζονται τα τρία σημαντικά οριζόντια επίπεδα της ροής στον άξονα Z , δηλαδή κοντά στις επιφάνειες δημιουργίας οριακού στρώματος και στη επιφάνεια συμμετρίας όπου εμφανίζεται η μέγιστη ταχύτητα. Στο σχήμα 5.1.3 παρουσιάζεται η ροή στο επίπεδο συμμετρίας όπου φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ανάμιξη για μικρούς αριθμούς Re δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα μιας και η ζώνη – περιοχή ανάμιξης περιορίζεται σε μια πολύ στενή λωρίδα συμμετρικά του άξονα X. Στα σχήματα 5.1.4 & 5.1.5 η ανάμιξη εμφανίζει μεγαλύτερη ζώνη ανάμιξης και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη επιπλέον δυνάμεων επιφανείας που δρουν καταλυτικά στην αύξηση της απόδοσης της μίξης.



Σχήμα 5.1.7. Γραμμές ροής για διανύσματα ταχύτητας στο σημείο όπου η διατομή παρουσιάζει μείωση.

A) $Re = 10$ & B) $Re = 1000$

Στην παραπάνω εικόνα 5.1.7 παρουσιάζονται γραμμές ροής και διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας για δύο διαφορετικούς αριθμούς Re . Διαπιστώνεται ότι η ροή παρουσιάζει φαινόμενα ανακυκλοφορίας στις εσοχές των εμποδίων ειδικά στην περίπτωση του αυξημένου Re . Αυτό ενισχύει την ανάμιξη των ρευστών μιας και τα αναγκάζει να υποστούν διάχυση το ένα εντός του άλλου. Σε μικρότερα Reynolds η διαδικασία δεν προκαλεί διάχυση λόγω έλλειψης στροβιλισμών ενώ ταυτόχρονα η μίξη γίνεται κυρίως στο επίπεδο διεπαφής των δύο ρευστών στο μέσο του καναλιού ανάμιξης.



Σχήμα 5.1.8. Επιφάνεια ελέγχου βαθμού ανάμιξης

Για την εύρεση του βαθμού απόδοσης, εφαρμόζονται οι εξής εξισώσεις:

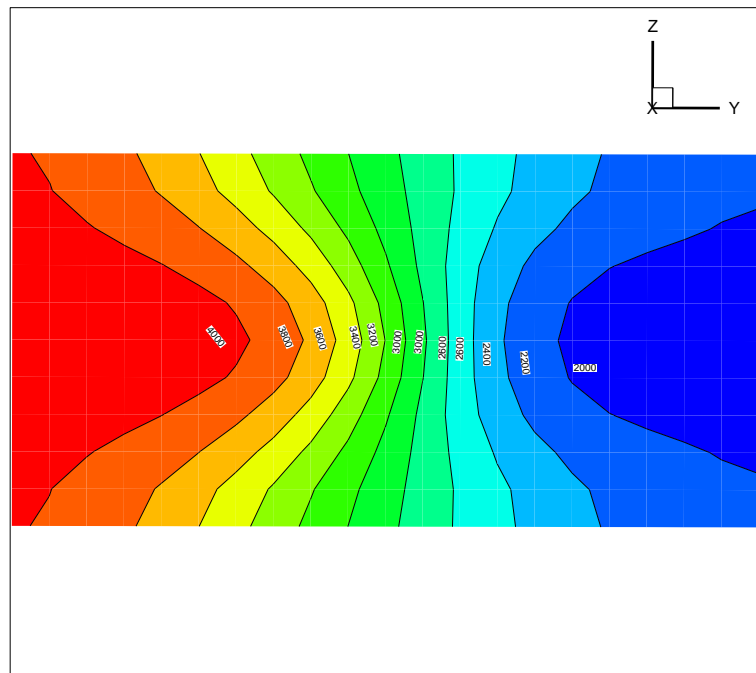
$$c'_p = \frac{1}{N} \cdot \left\{ \sum_i^N (c_{pi} - \bar{c}_p)^2 \right\}$$

$$a(\%) = c'_p - \bar{c}_p$$

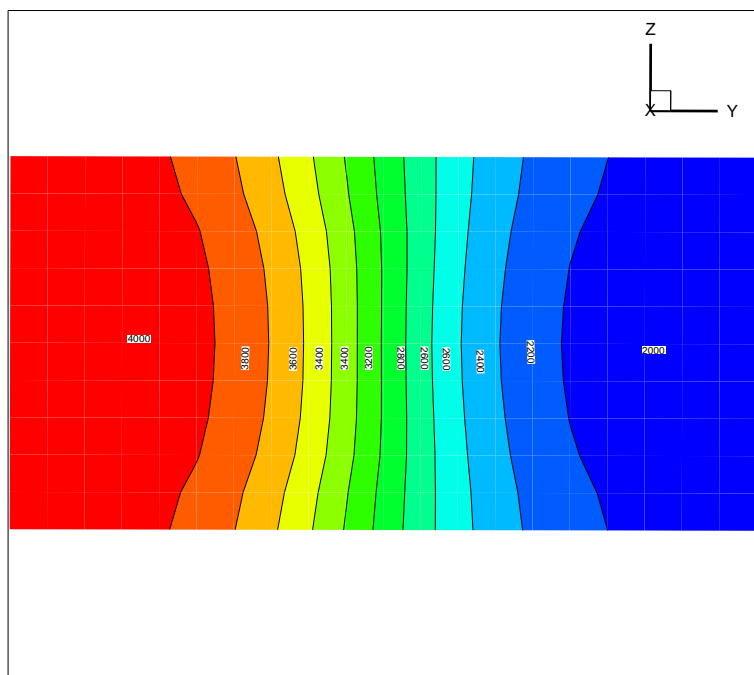
Όπου (α) ο βαθμός απόδοσης της ανάμιξης, N ο αριθμός των κελιών της επιφανείας ελέγχου.



(A)



(B)



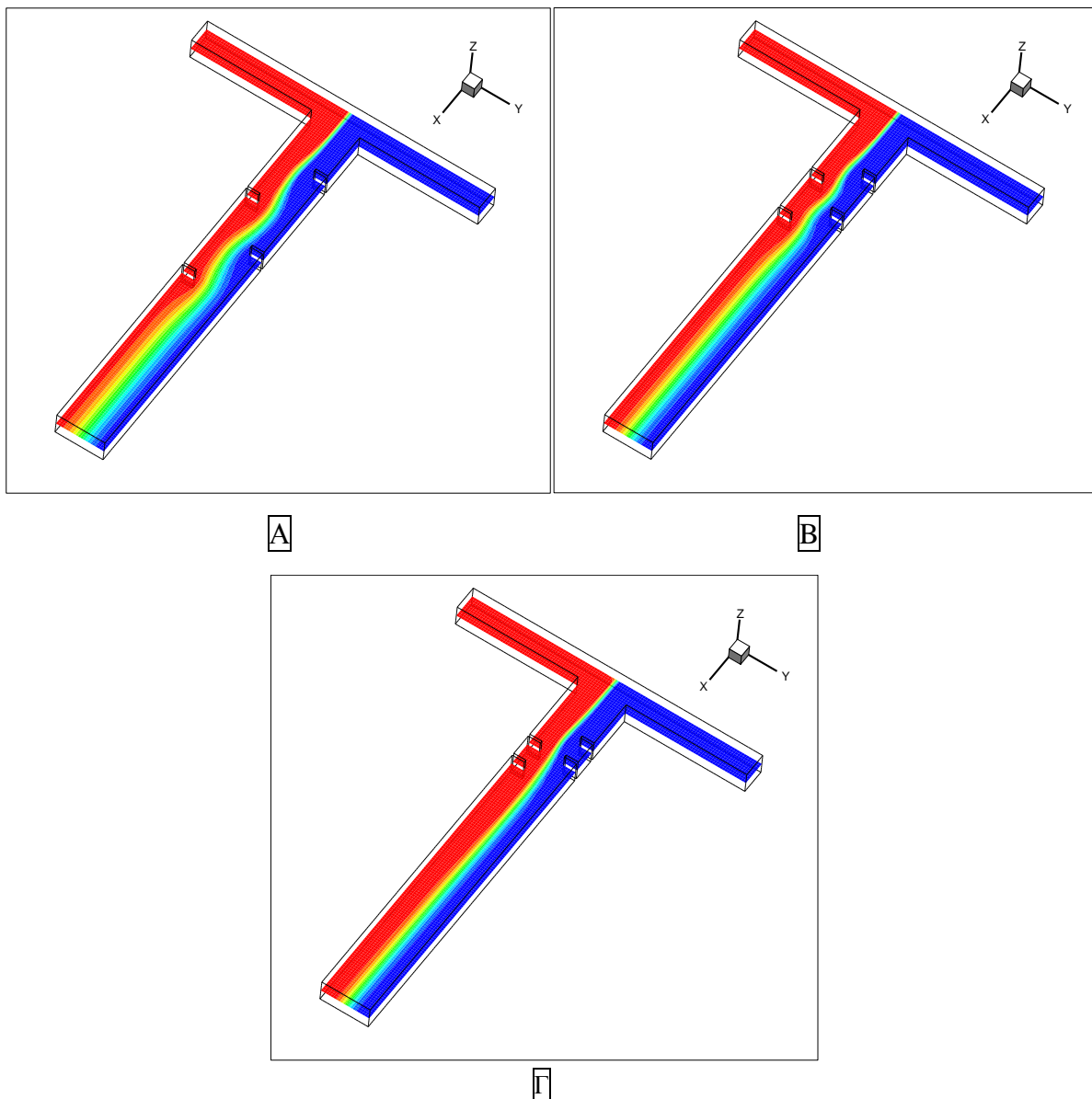
(Γ)

Σχήμα 5.1.9. Βαθμός ανάμιξης στην έξοδο του μικροκαναλιού, για διαφορετικές τιμές Re . α) $Re=1000$, β) $Re=100$ & γ) $Re=10$ με ύψος εμποδίων $10\mu m$ και απόσταση εμποδίων $100\mu m$. Δείκτης ανάμιξης ο c'_p με αρχικές καταστάσεις, $c_{p1}=1800$ και $c_{p2}=4200$

Παραπάνω, παρουσιάζονται ομοεστιακές εικόνες της ανάμιξης κοντά στην έξοδο του καναλιού. Στο σχήμα 5.1.9.(Α), η μίξη είναι αποτελεσματική λόγω της ανάπτυξης τρισδιάστατων δινών με την βοήθεια και των εμποδίων που έχουν εφαρμοστεί εντός του καναλιού. Αντίθετα στις δύο άλλες περιπτώσεις (Β & Γ), η ανάπτυξη είναι περιορισμένη και μόνο λόγω της διάχυσης στις διεπαφές των δύο ρευστών παρουσιάζεται μια περιοχή μίξης συμμετρικά του άξονα Z . Επιπλέον παρατηρείται ότι στις επιφάνειες (άνω και κάτω) του καναλιού το ποσοστό μίξης λίγο πιο αυξημένο και αυτό είναι προϊόν της ύπαρξης οριακού στρώματος.

5.2 ΡΟΗ ΣΕ ΑΠΛΟ Τ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΤΑ 25%, ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΩΝ

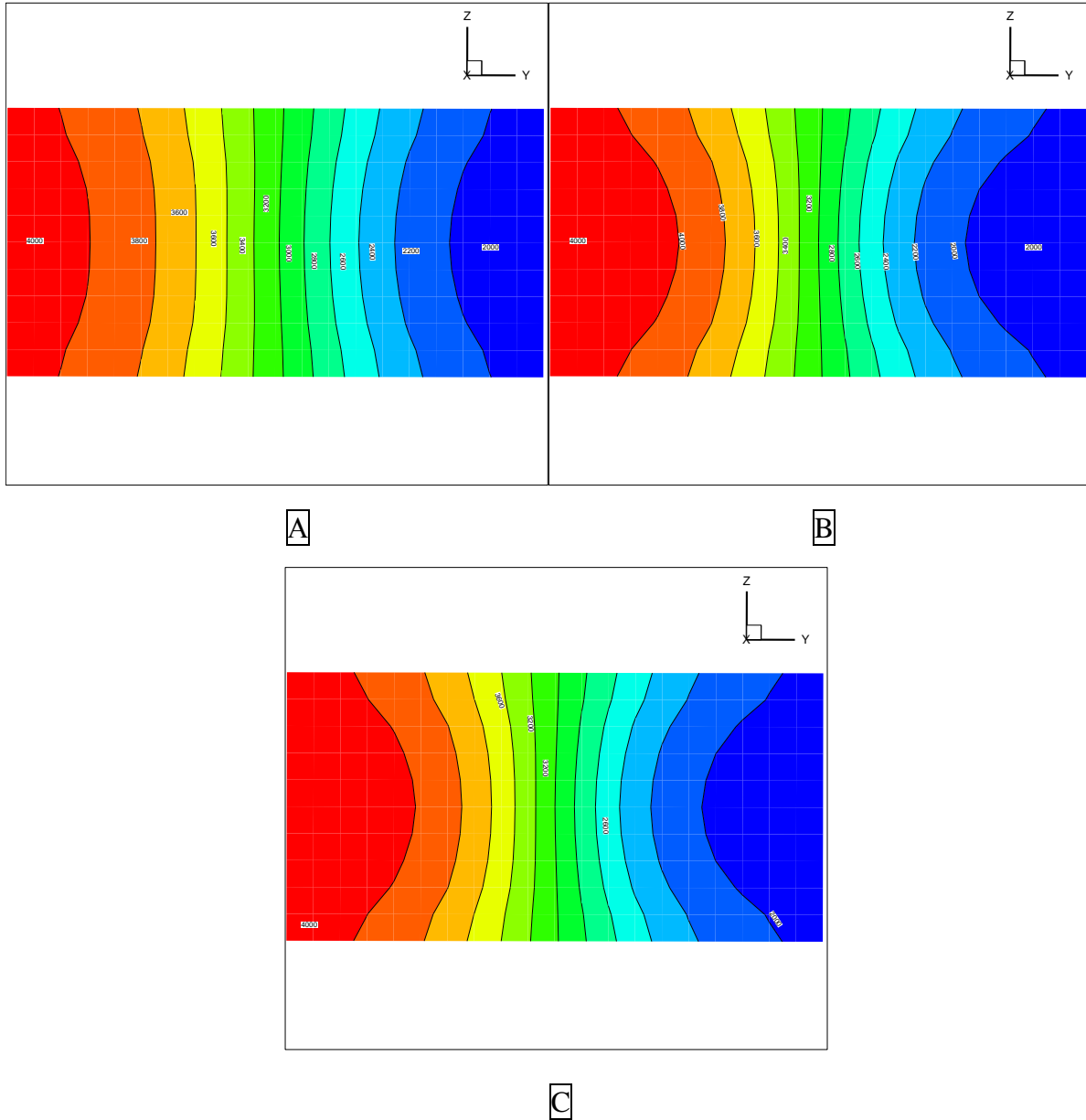
Παρουσιάζεται η εξέλιξη της ροής και κατά συνέπεια της ανάμιξης σε στον μικροαναμικτή για διάφορες αποστάσεις εμποδίων 100, 200 και 400 μm και ύψος εμποδίων 50 μm .



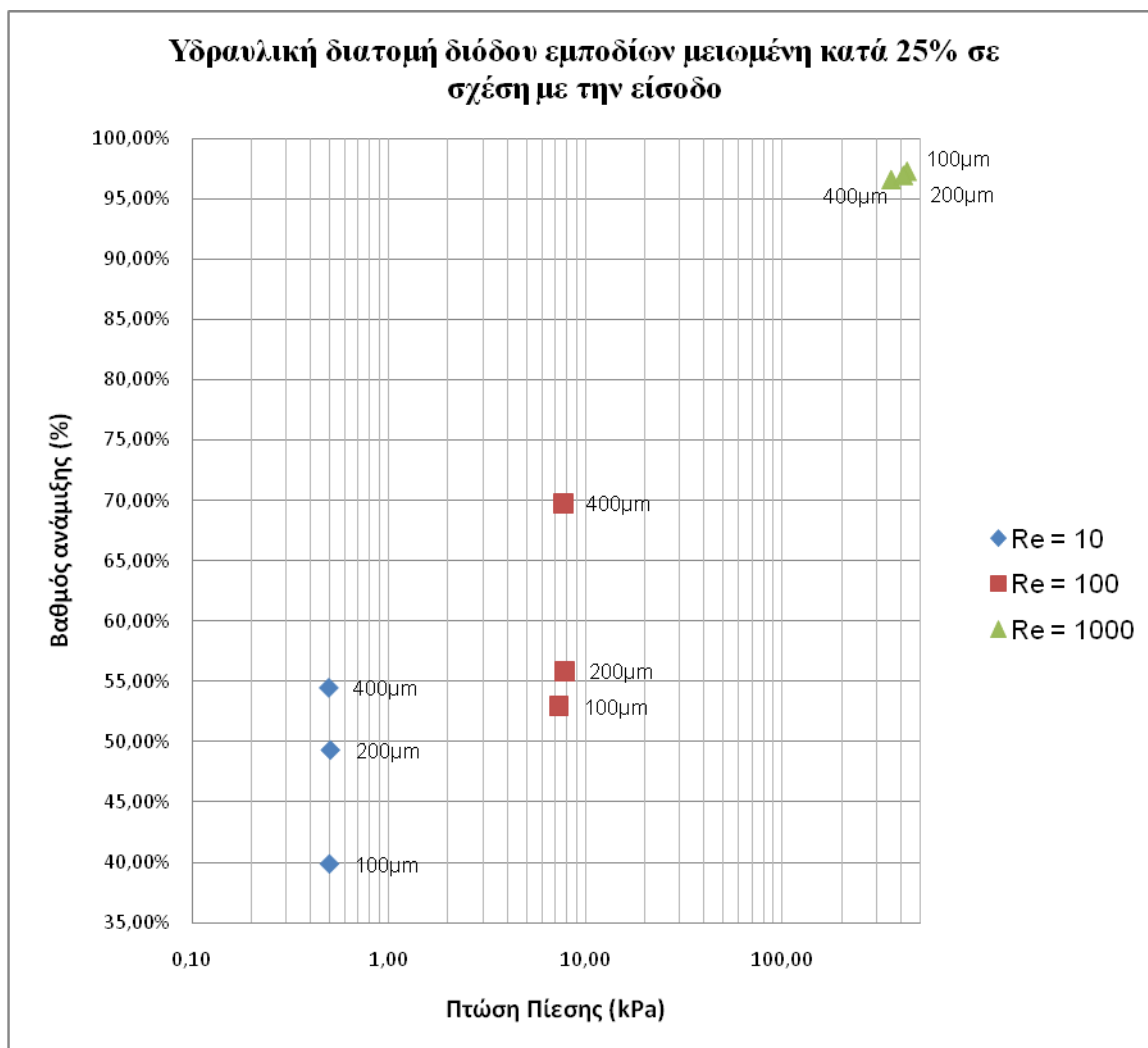
Σχήμα 5.2.1 Ροή στο επίπεδο συμμετρίας ως προς τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 50 μm A) 400 μm , B) 200 μm & Γ) 100 μm . (συνθήκες ροής: $u=0.1\text{m/s}$ – $Re=10$)

Παρατηρώντας τις εικόνες του σχήματος 5.2.1 που λαμβάνονται από την ανάλυση της ροής επίπεδο συμμετρίας κατά τον άξονα Z του καναλιού, διαπιστώνεται ότι καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των εμποδίων, η περιοχή μίξης αυξάνεται Σχήμα 5.2.1(A). Η ανάμιξη έχει πραγματοποιηθεί καθαρά από διάχυση στην διεπιφάνεια των δύο ρευστών. Είναι φανερό ότι όσο πιο κοντά είναι τοποθετημένα τα εμπόδια τόσο μικρότερη είναι η ζώνη ανάμιξης. Αυτό είναι συνέπεια της αδυναμίας των ρευστών να έρθουν σε παραμείνουν σε επαφή και να υπάρξει διάχυση λόγω του μεγαλύτερου πλάτους καναλιού

για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αντίθετα εφαρμόζοντας τα εμπόδια σε μεγαλύτερο μήκος καναλιού, τόσο αυξάνεται η περίοδος επαφής των ρευστών υπό μικρότερη δίοδο με συνέπεια την περεταίρω διάχυση. Παρακάτω σχήμα 5.2.2 παρουσιάζεται η μίξη στην έξοδο των αντίστοιχων καναλιών για τις αντίστοιχες εσωτερικές διαμορφώσεις.



Σχήμα 5.2.2. Ομοεστιακές εικόνες στην έξοδο του μικροκαναλιού, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 50μm A) 400μm , B) 200μm & C) 100μm. (συνθήκες ροής: $u=0.1\text{m/s}$ – $Re=10$)

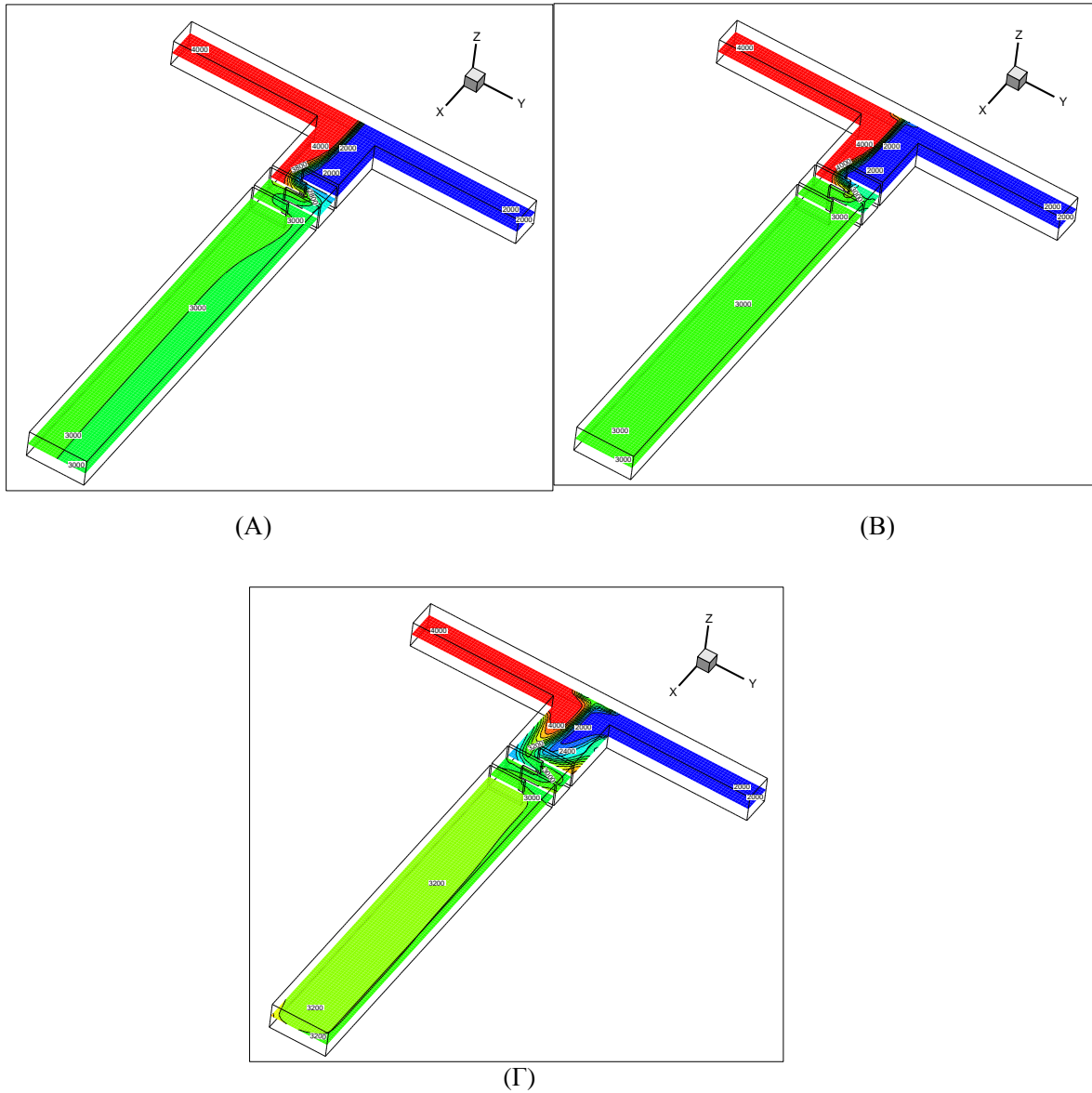


Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το ποσοστό μίξης σε σχέση με την πτώση πίεσης που προκαλούν τα διαφράγματα που έχουν εφαρμοστεί εντός του καναλιού. Διαπιστώνεται ότι καλύτερη ανάμιξη αποδίδει η περίπτωση της αυξημένη ταχύτητας ροής ($Re=1000$). Όμως, η πτώση πίεσης που παρουσιάζεται χαρακτηρίζει την μέθοδο αδύνατη στην εφαρμογή της μιας και τέτοιου είδους ροές δεν πραγματοποιούνται σε τόσο μικρή κλίμακα. Στην περίπτωση της ταχύτητας (0.1m/s) η μίξη φτάνει στο 54% υπό την προϋπόθεση της παρουσίας εμποδίων σε απόσταση $400\mu\text{m}$. Η βέλτιστη και παράλληλα εφαρμόσιμη κατασκευή αναδεικνύεται η περίπτωση με ταχύτητα ροής $u=1\text{m/s}$ και απόσταση εμποδίων $400\mu\text{m}$. Το ποσοστό μίξης ανέρχεται περίπου στο 70% με ταυτόχρονη πτώση πίεσης 7.0 kPa . Στις χαμηλές ταχύτητες η μίξη δεν μπορεί να ανέλθει πάνω από ένα ποσοστό 55% για το συγκεκριμένο ύψος εμποδίων.

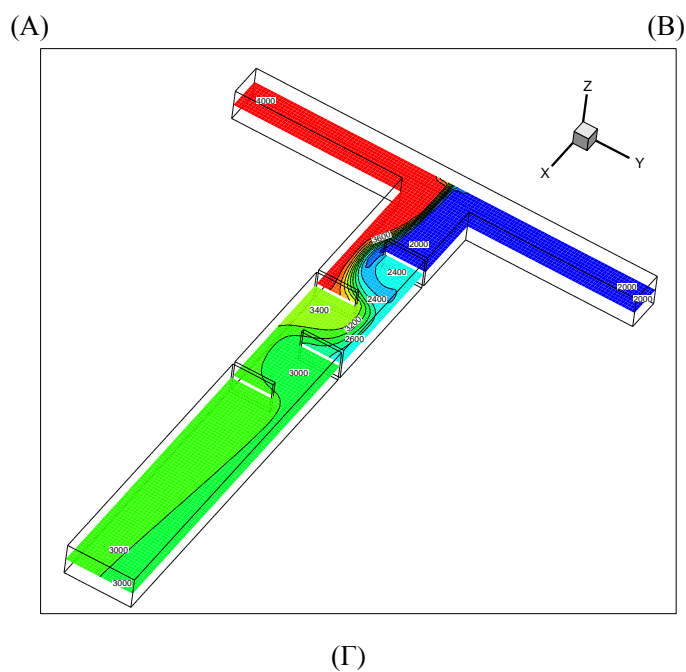
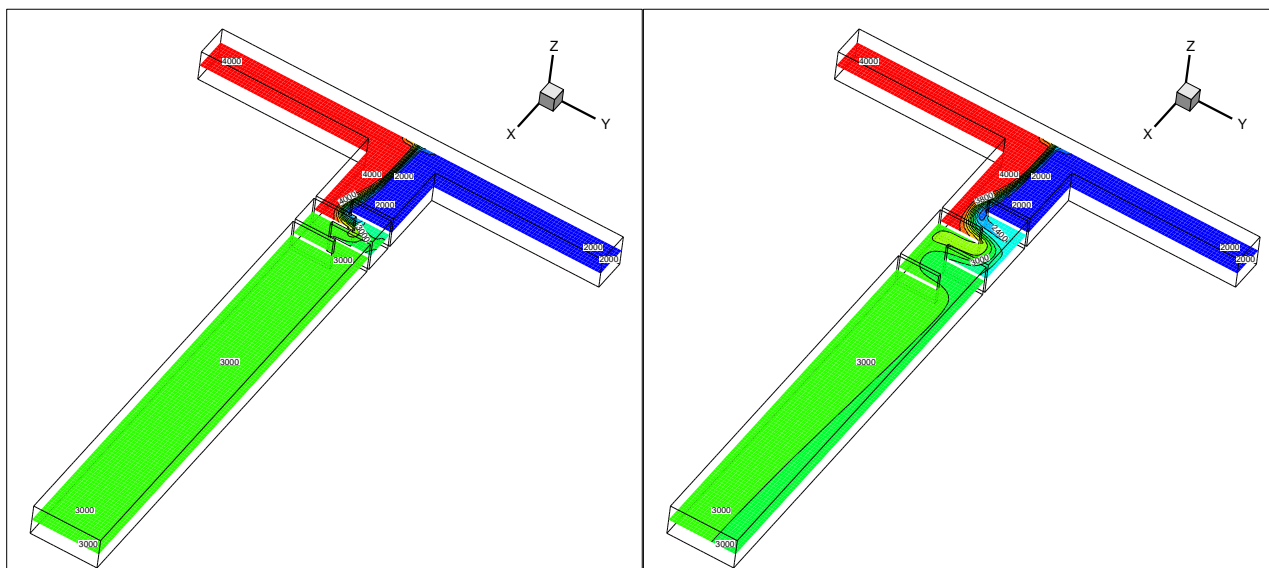
5.3 ΡΟΗ ΣΕ ΑΠΛΟ Τ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 60%

Παρουσιάζεται η εξέλιξη της ροής και της ανάμιξης σε μικροαναμικτή τύπου T με κατακόρυφα εμπόδια στον άξονα (Z) με απόσταση εμποδίων 100, 200 και $400\mu\text{m}$ και

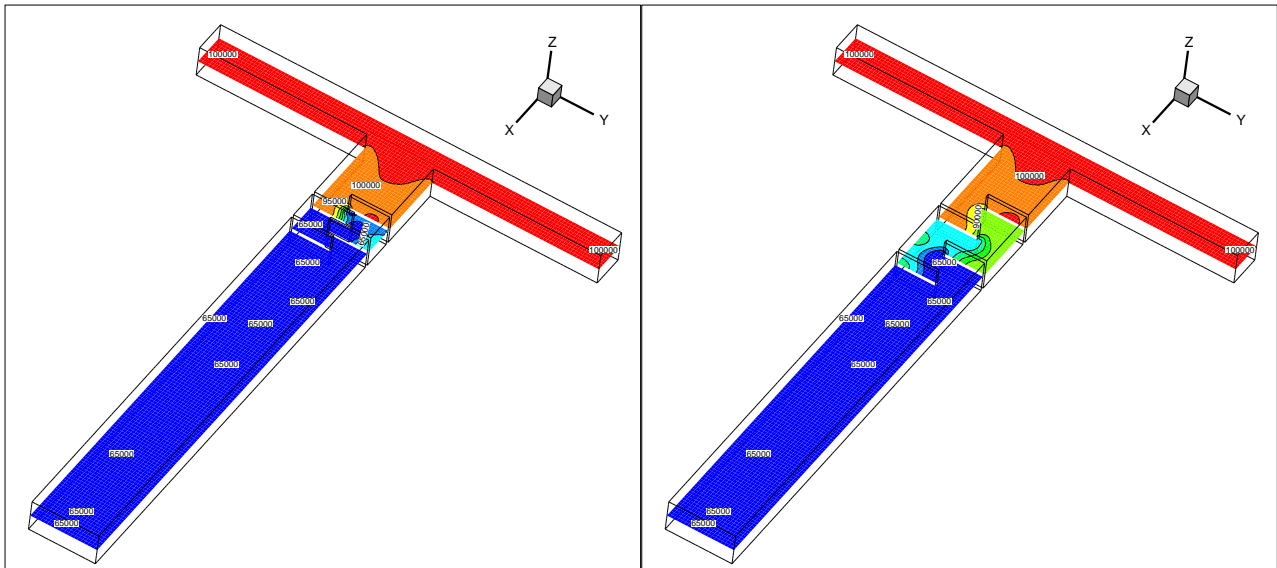
ύψος εμποδίων $120\mu\text{m}$. Ως αρχικές συνθήκες, στην είσοδο του μικροκαναλιού, έχουν τεθεί οι ταχύτητες εισόδου (0.1m/s , 1.0m/s , 10.0m/s) οι οποίες δίνουν αντίστοιχες τιμές για τον αριθμό Reynolds (10.0 , 100.0 & 1000.0). Στην έξοδο του όγκου ελέγχου επικρατεί πίεση περιβάλλοντος 1Atm .



Σχήμα 5.3.1 Ροή στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, με ύψος εμποδίων $120\mu\text{m}$ σε μεταξύ τους απόσταση $100\mu\text{m}$, για διαφορετικές τιμές Reynolds. Α) $\text{Re}=10$, Β) $\text{Re}=100$ & Γ) $\text{Re}=1000$.

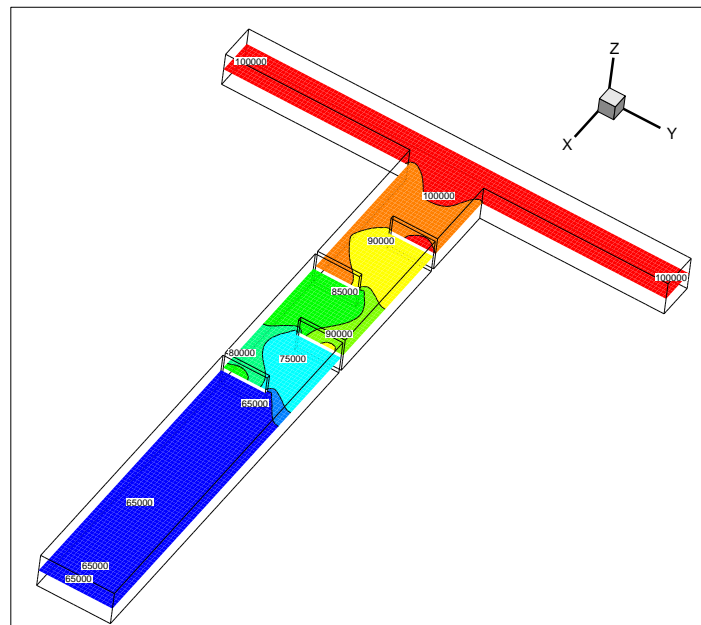


Σχήμα 5.3.2 Ροή στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 120 μm A) 100 μm , B) 200 μm & Γ) 400 μm . (συνθήκες ροής: $u=1.0\text{m/s}$ – $Re=100$)



(A)

(B)

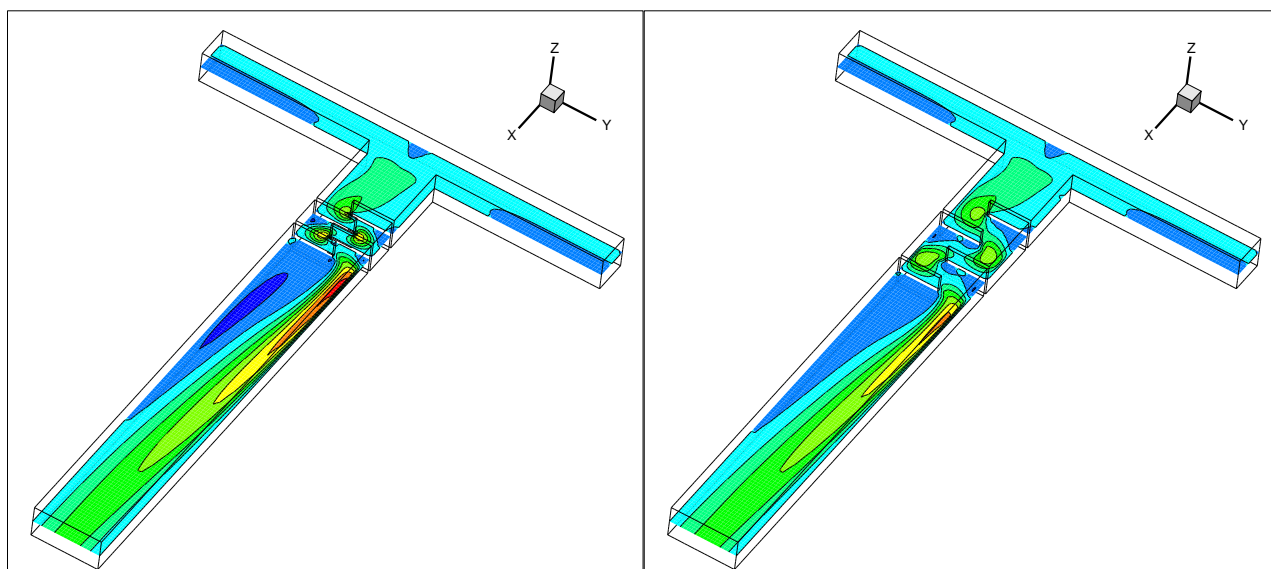


(Γ)

Σχήμα 5.3.3 Πτώση ολικής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 120 μm A) 100 μm , B) 200 μm & Γ) 400 μm . (συνθήκες ροής: $u=1.0\text{m/s}$ – $Re=100$)

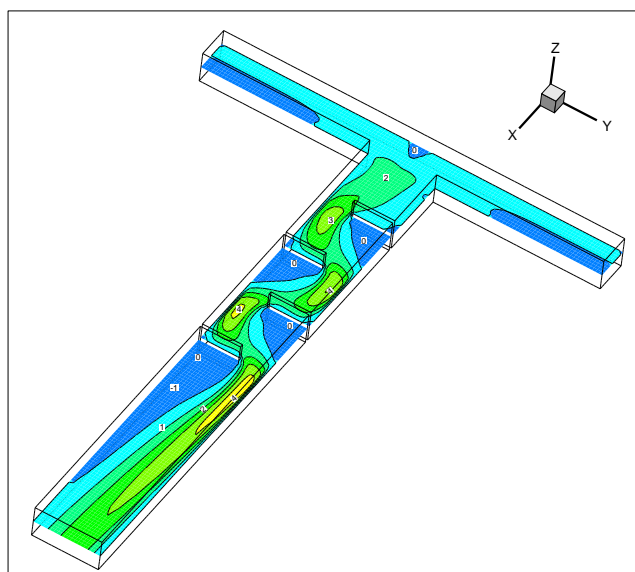
Στο παραπάνω σχήμα (5.3.1) παρουσιάζεται η ροή σε μικροκάναλι όπου τα διαφράγματα έχουν τοποθετηθεί στην ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα όσο αυξάνει ο αριθμός Re τόσο το ποσοστό μίξης να μειώνεται. Στα σχήματα 5.3.2 και 5.3.3 παρουσιάζεται η ανάμιξη για σταθερό αριθμό $Re=100$, όπου όπως θα αποδειχτεί παρακάτω είναι και ο βέλτιστος για την συγκεκριμένη διάταξη, ενώ ταυτόχρονα διαπιστώνεται πώς επηρεάζει η διαμόρφωση την πίεση κατά μήκος της ροής. Στην (A) περίπτωση είναι φανερό ότι η πτώση πίεσης που εμφανίζεται και είναι

αντίστοιχη και για της περιπτώσεις Β & Γ προκαλείται σε συντομότερο διάστημα του μικροκαναλιού με αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάμιξη των ουσιών.



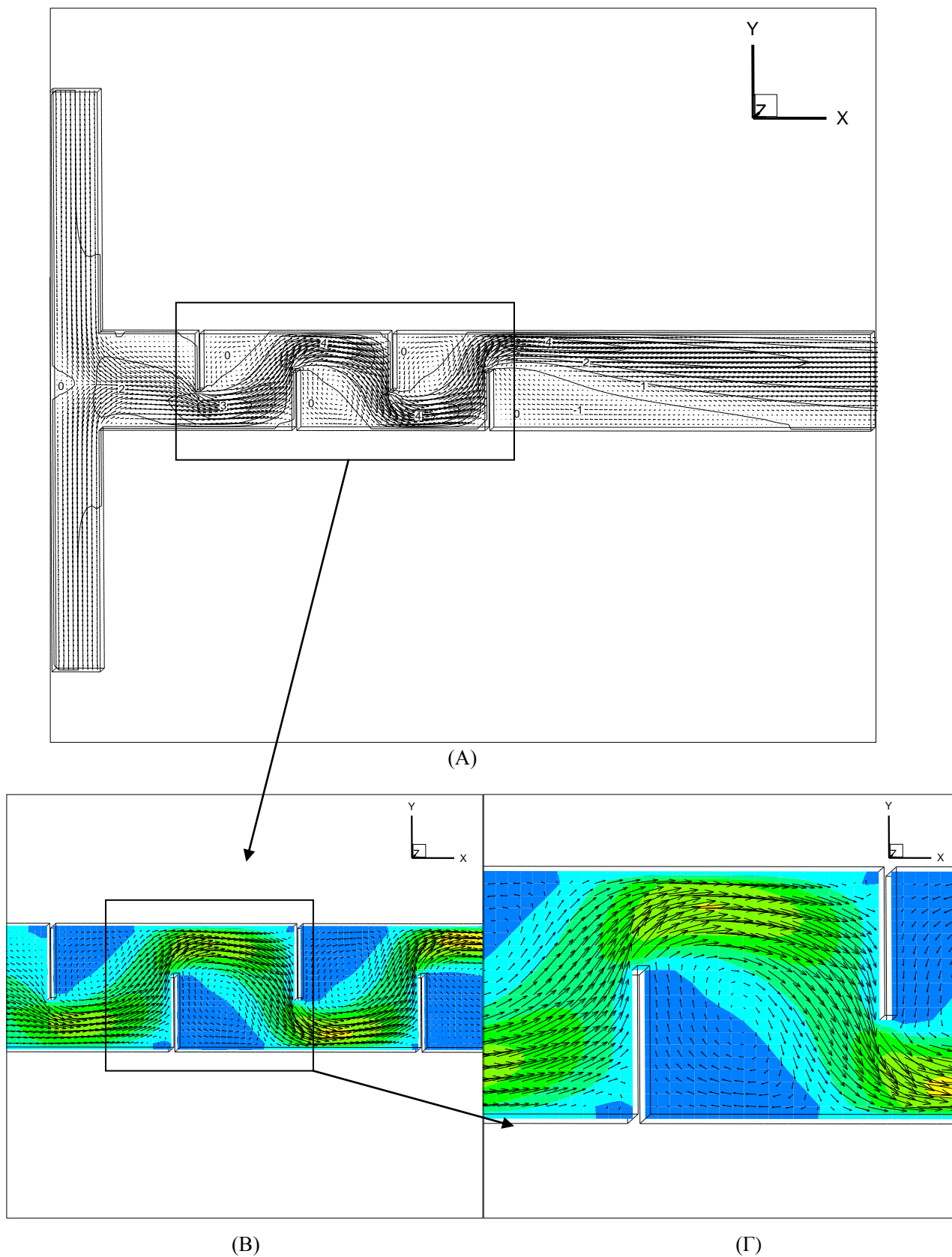
(A)

(B)

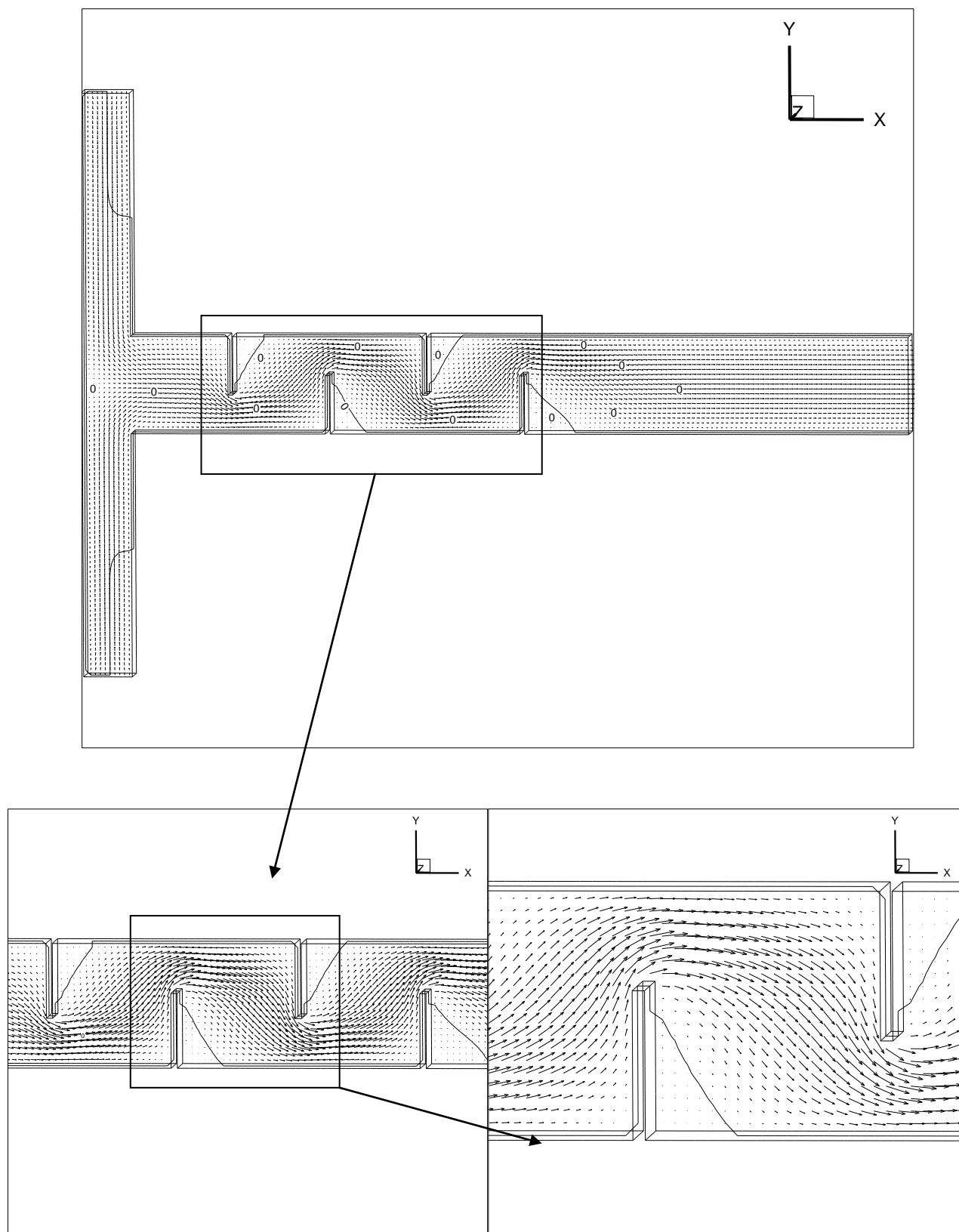


(Γ)

Σχήμα 5.3.4 Μεταβολή ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 120μm A) 100μm , B) 200μm & Γ) 400μm. (συνθήκες ροής: $u=1.0\text{m/s}$ – $Re=100$)

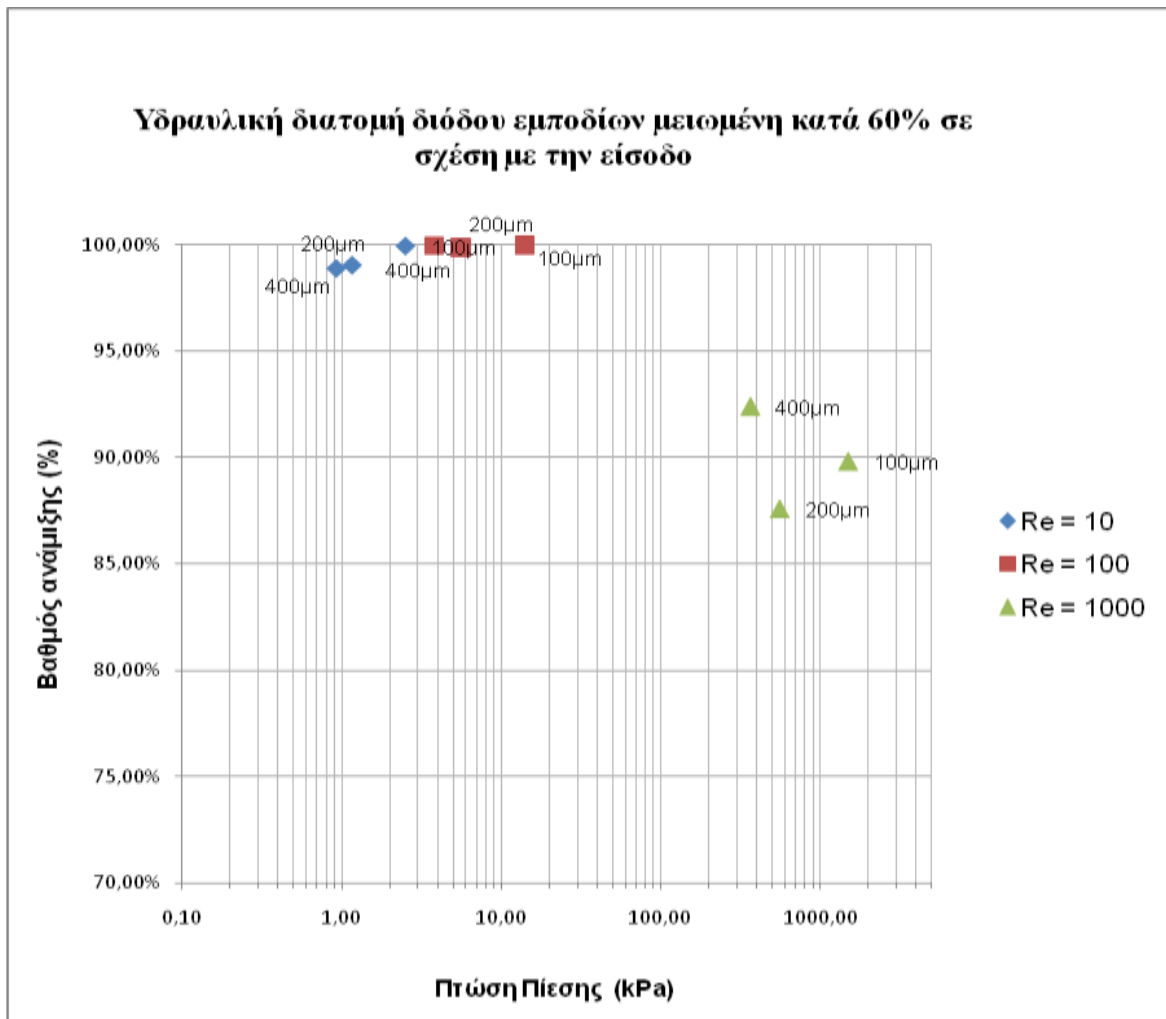


Σχήμα 5.3.5 Διανύσματα ταχυτήτων στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού, για απόσταση εμποδίων ύψους 120 μm , ίση με 400 μm και για $Re = 100$



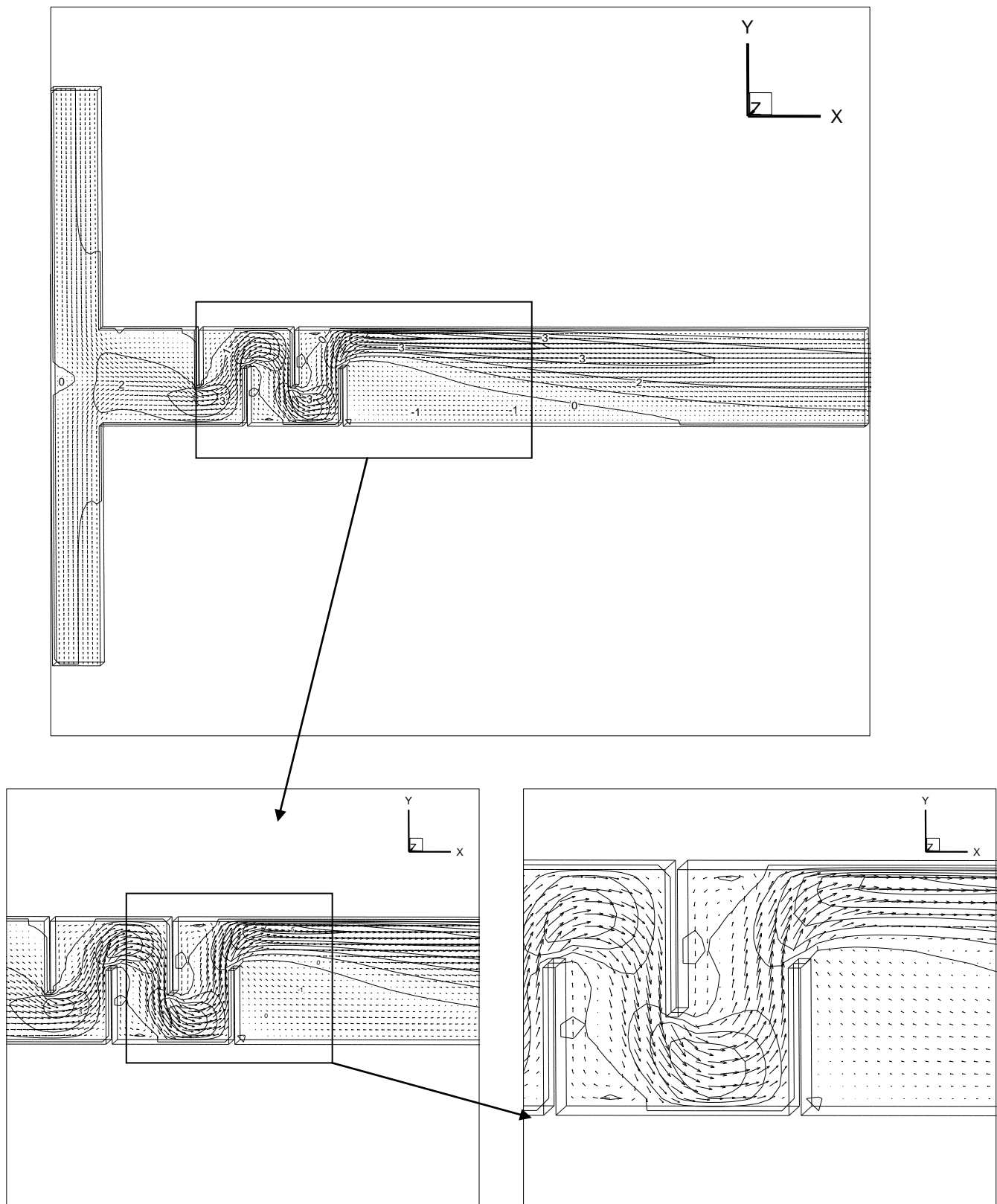
Σχήμα 5.3.6 Διανύσματα στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού, για απόσταση εμποδίων ύψους 120 μm , ίση με 400 μm και για $Re = 10$

Από τα σχήματα 5.3.5 και 5.3.6 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός Re τόσο πιο έντονη γίνεται η περιοχή ανακυκλοφορίας του ρευστού πίσω από τα σημεία εναλλαγής της πορείας του. Αυτό βέβαια είναι το επιδιωκόμενο φαινόμενο με απώτερο σκοπό να προκληθεί μικροανάμιξη λόγω των δινών και της άμεσης διάχυσης του ενός ρευστού στο εσωτερικό του δεύτερου. Όμως υπάρχει ένα όριο, το οποίο επηρεάζει την συγκεκριμένη διάταξη και αυτό δεν είναι άλλο από τον αριθμό Re ο οποίος όσο αυξάνεται τόσο τα ροϊκά στοιχεία δεν εισέρχονται στις ζώνες ανακυκλοφορίας με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει να πραγματοποιείται η ανάμιξη στο επιθυμητό ποσοστό που θα περίμενε κανείς από τον αναμικτή. Στο παρακάτω διάγραμμα διαπιστώνεται το προαναφερθέν πρόβλημα.



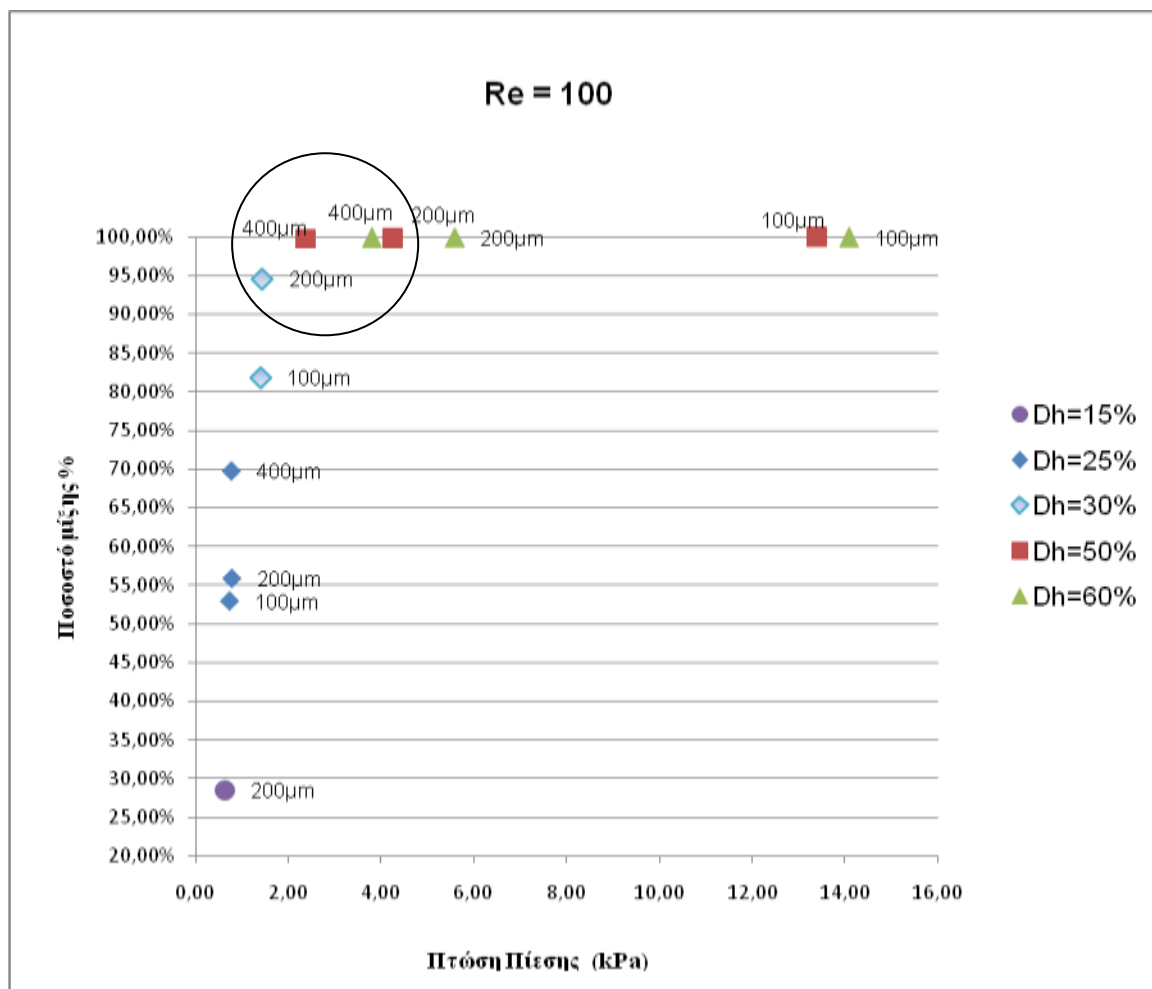
Σχήμα 5.3.7 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για ανάλογες τιμές Reynolds σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διάμετρο περιορισμένη κατά 60% σε σχέση με την είσοδο.

Στο σχήμα 5.3.7 διαπιστώνεται, ότι η διάταξη του μικροαναμικτή που προκαλεί μείωση της υδραυλικής διαμέτρου της ροής 60% σε σχέση με την αρχική, παρουσιάζει αυξημένα ποσοστά ανάμιξης για τιμές Reynolds που κυμαίνονται στην περιοχή του Re=100.



Σχήμα 5.3.8 Διανύσματα ταχύτητας στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού, για απόστασης εμποδίων ύψους $120\mu\text{m}$, ίση με $200\mu\text{m}$ και για $Re = 100$

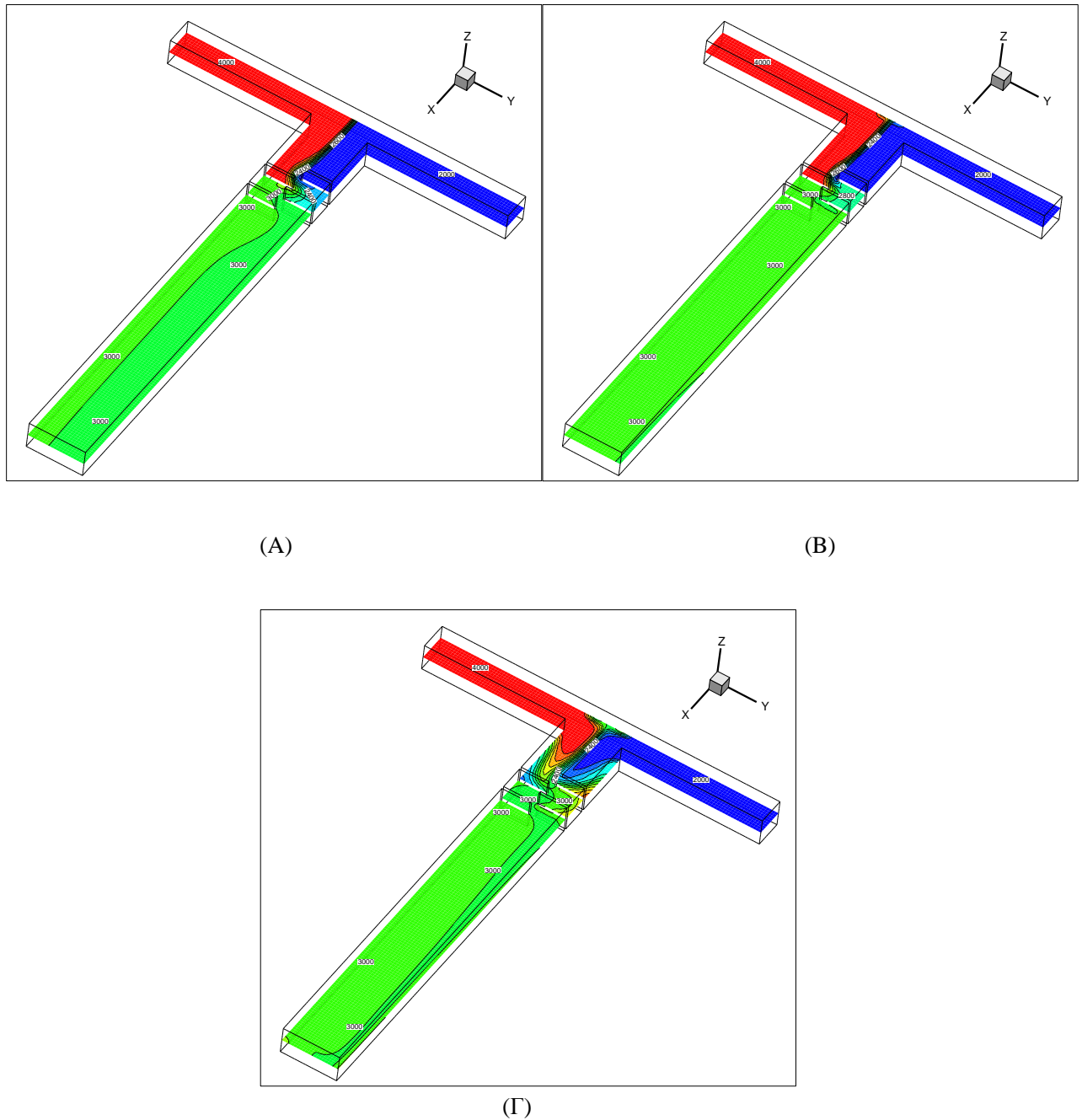
Από τα σχήματα 5.3.8 και 5.3.5 παρατηρούμε ότι η ροή με αριθμό Reynolds ($Re=100$) παρουσιάζει στις μικρές αποστάσεις εμποδίων έντονα φαινόμενα ανακυκλοφορίας και μάλιστα σε βαθμό που προκαλεί ιδιαίτερη μείωση της ωφέλιμης υδραυλικής διατομής. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της πτώσης πίεσης στην ροή που όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 5.3.3 Αυτό βέβαια δεν είναι το επιθυμητό για την κατασκευή ενός μικροαναμικτή. Έτσι, διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του, με πρόσθετες προσομοιώσεις, και τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στο Σχήμα 5.3.9 Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η αποτελεσματικότητα του μικροκαναλιού για $Re = 100$ ανάλογα με το μήκος εισόδου (κάθετα ως προς την ροή) του διαφράγματος. Παρατηρείται ότι σχηματίζεται μια καμπύλη σημείων – λύσεων στην οποία αρχικά αυξάνει δραστικά η ανάμιξη, ενώ στη συνέχεια αρχίζει να αυξάνει υπερβολικά η πίεση. Οπότε η περιοχή βέλτιστης ανάμιξης σημειώνεται εντός του κύκλου στο παρακάτω διάγραμμα και είναι η $Dh=30\%$ έως 50%



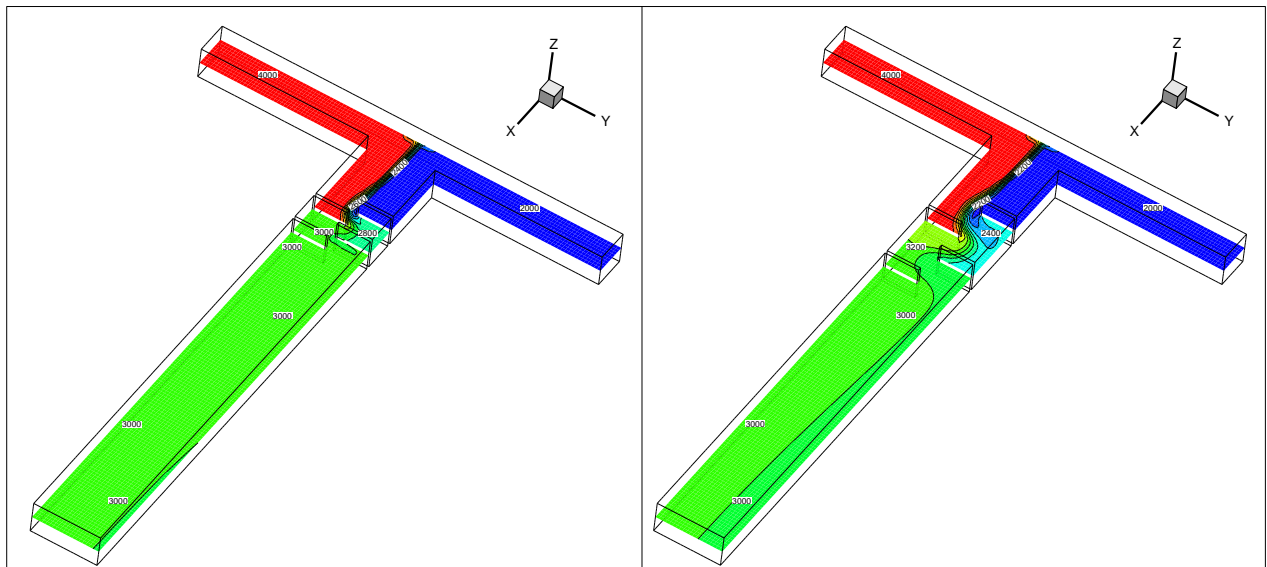
Σχήμα 5.3.9 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για τιμή Reynolds $Re=100$ σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διάμετρο περιορισμένη κατά ποσοστό Dh από $15\% \sim 60\%$ σε σχέση με την είσοδο.

5.4 ΡΟΗ ΣΕ ΑΠΛΟ Τ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 50%

Αντίστοιχη μελέτη με το κεφάλαιο 5.3 έγινε για διαφορετικό ύψος εμποδίων, ίσο με 100 μm . Ως αρχικές συνθήκες, στην είσοδο έχουν τεθεί οι ταχύτητες εισόδου (0.1m/s , 1.0m/s , 10.0m/s) οι οποίες μας δίνουν αντίστοιχες τιμές για τον αριθμό Reynolds (10.0, 100.0 & 1000.0). Στην έξοδο του μικροκαναλιού επικρατεί πίεση περιβάλλοντος 1Atm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχέδια 5.4.1 έως και 5.4.5.

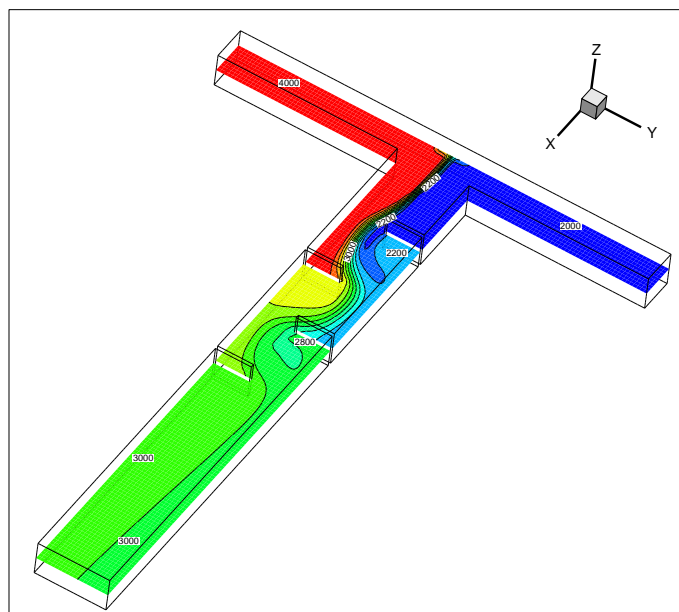


Σχήμα 5.4.1 Ροή στο μέσο του μικροκαναλιού με ύψος εμποδίων 100 μm σε μεταξύ τους απόσταση 100 μm , για διαφορετικές τιμές Reynolds. A) 10, B) 100 & Γ) 1000.



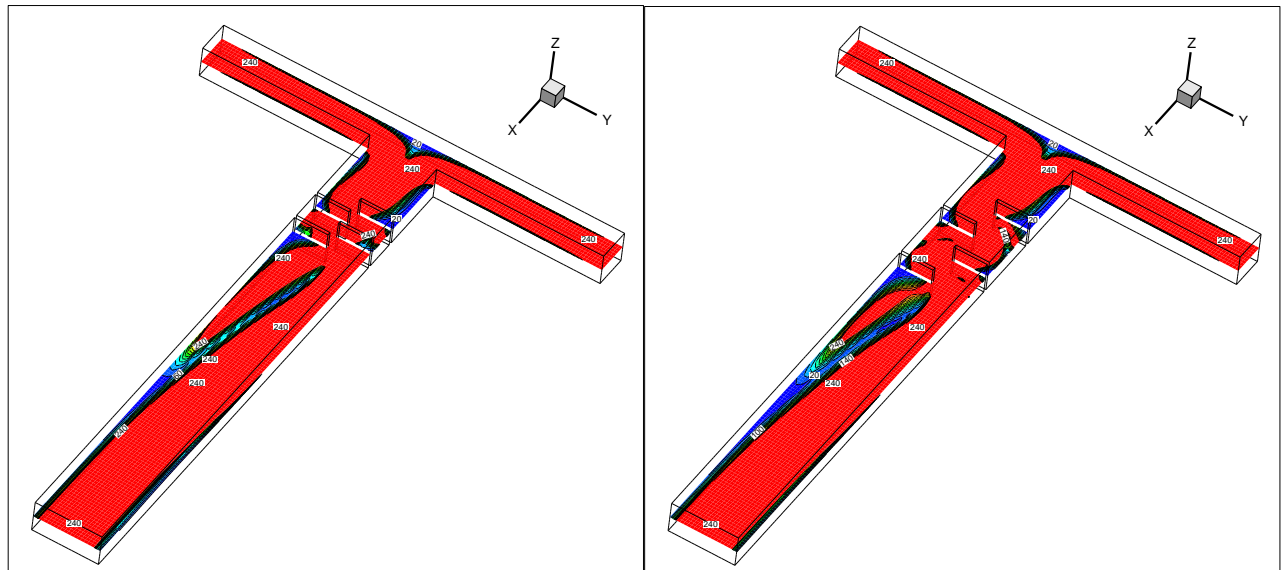
(A)

(B)



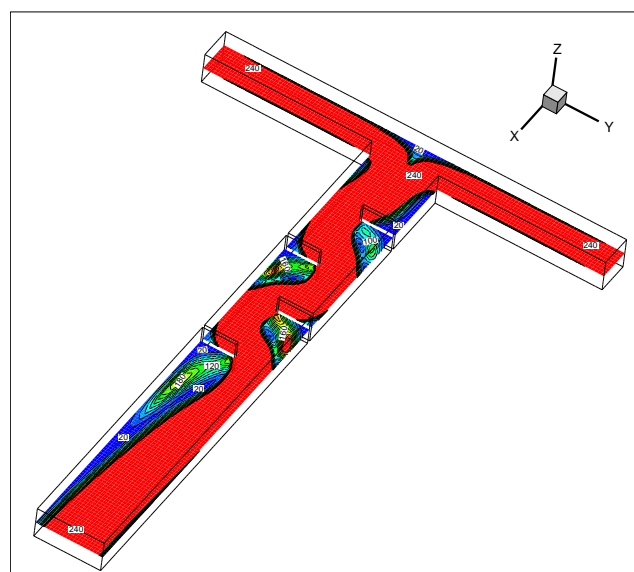
(C)

Σχήμα 5.4.2 Ροή στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 100μm A) 100μm , B) 200μm & Γ) 400μm. (συνθήκες ροής: $u=1.0\text{m/s}$ – $Re=100$)



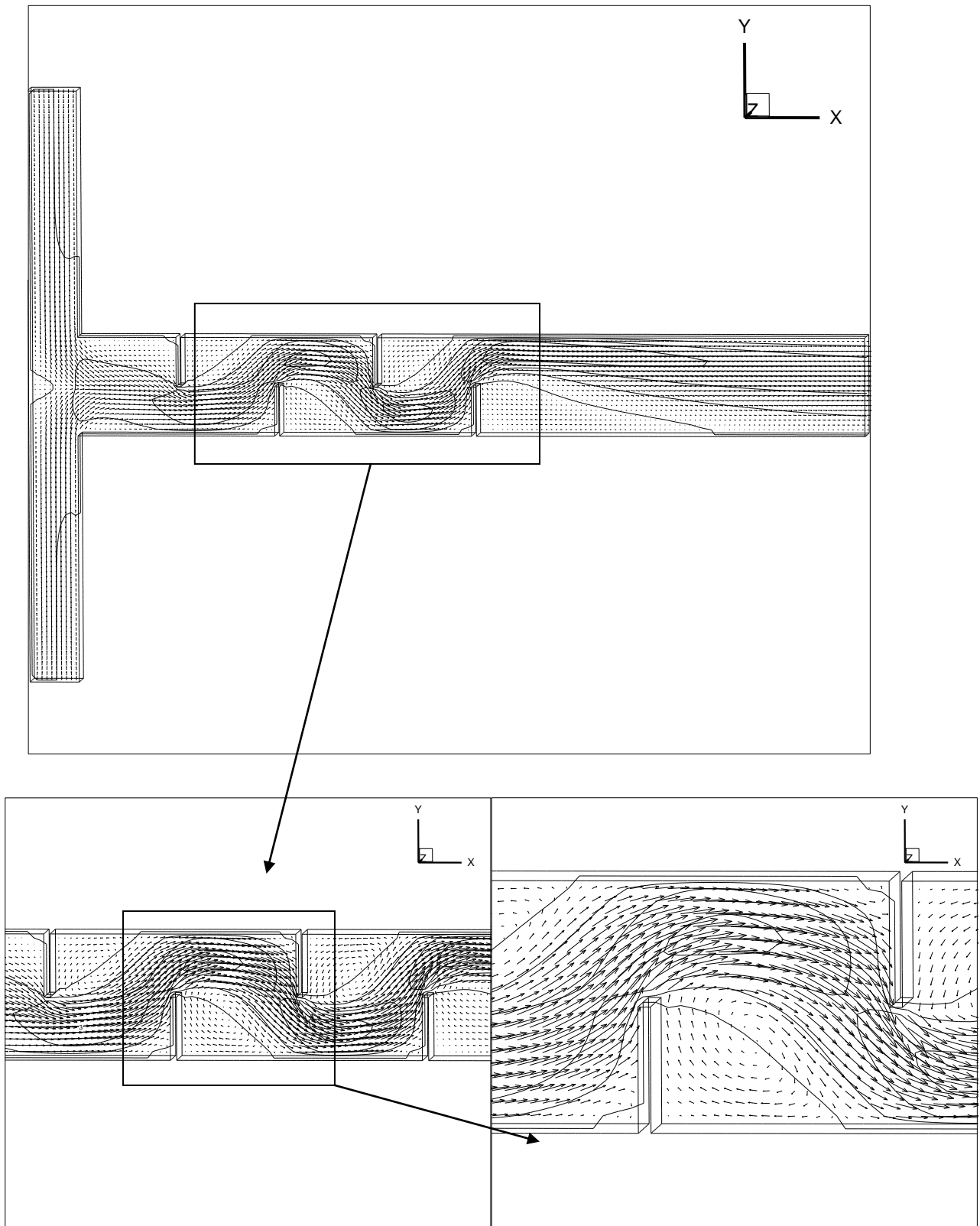
(A)

(B)

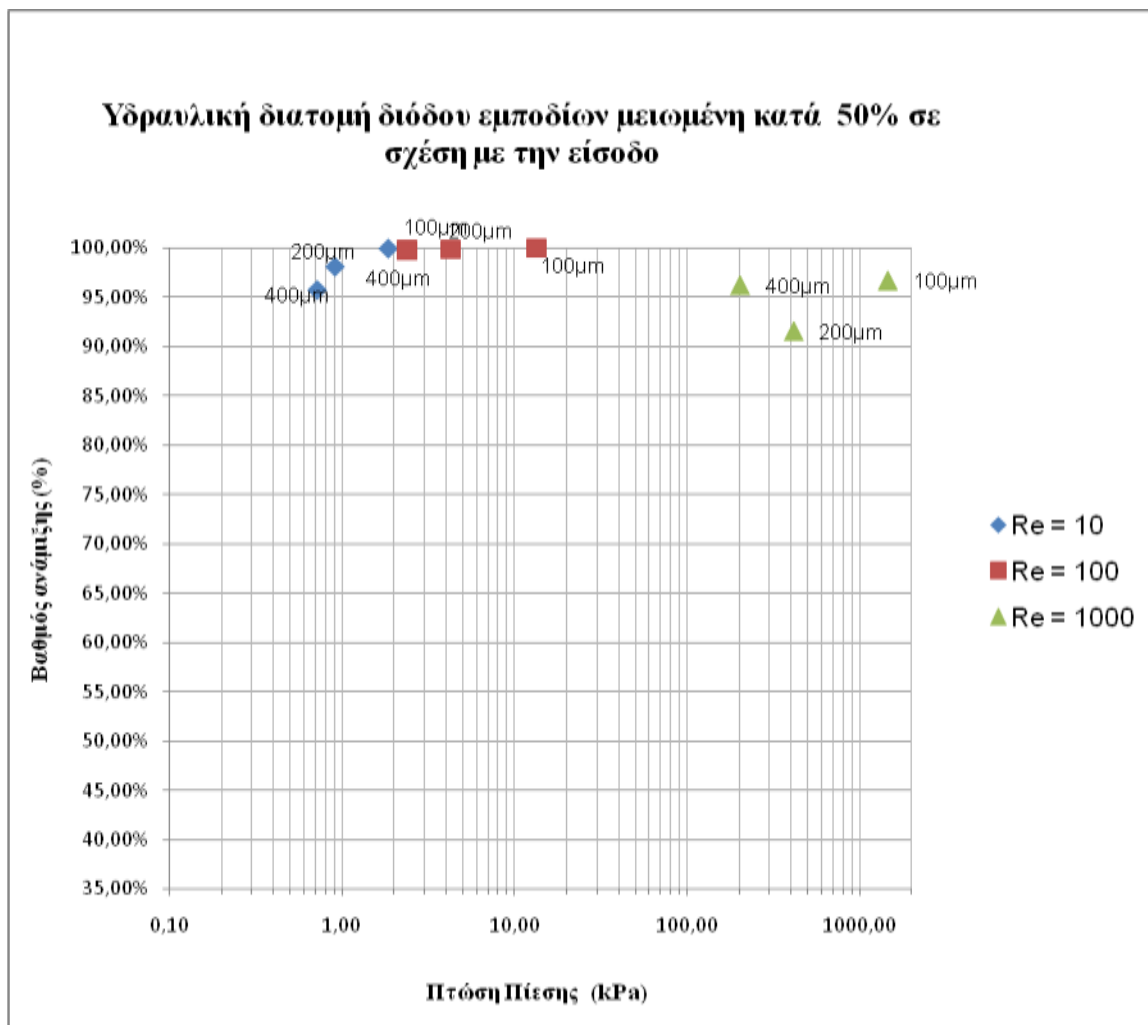


(C)

Σχήμα 5.4.3 Μεταβολή της δυναμικής πίεσης στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού κατά τον άξονα Z, για διαφορετικές τιμές απόστασης εμποδίων ύψους 100 μm A) 100 μm , B) 200 μm & Γ) 400 μm . (συνθήκες ροής: $u=1.0\text{m/s}$ – $Re=100$)



Σχήμα 5.4.4 Διανύσματα ταχυτήτων στο επίπεδο συμμετρίας του μικροκαναλιού, για απόσταση εμποδίων ύψους 100μm, ίση με 400μm και για $Re = 100$

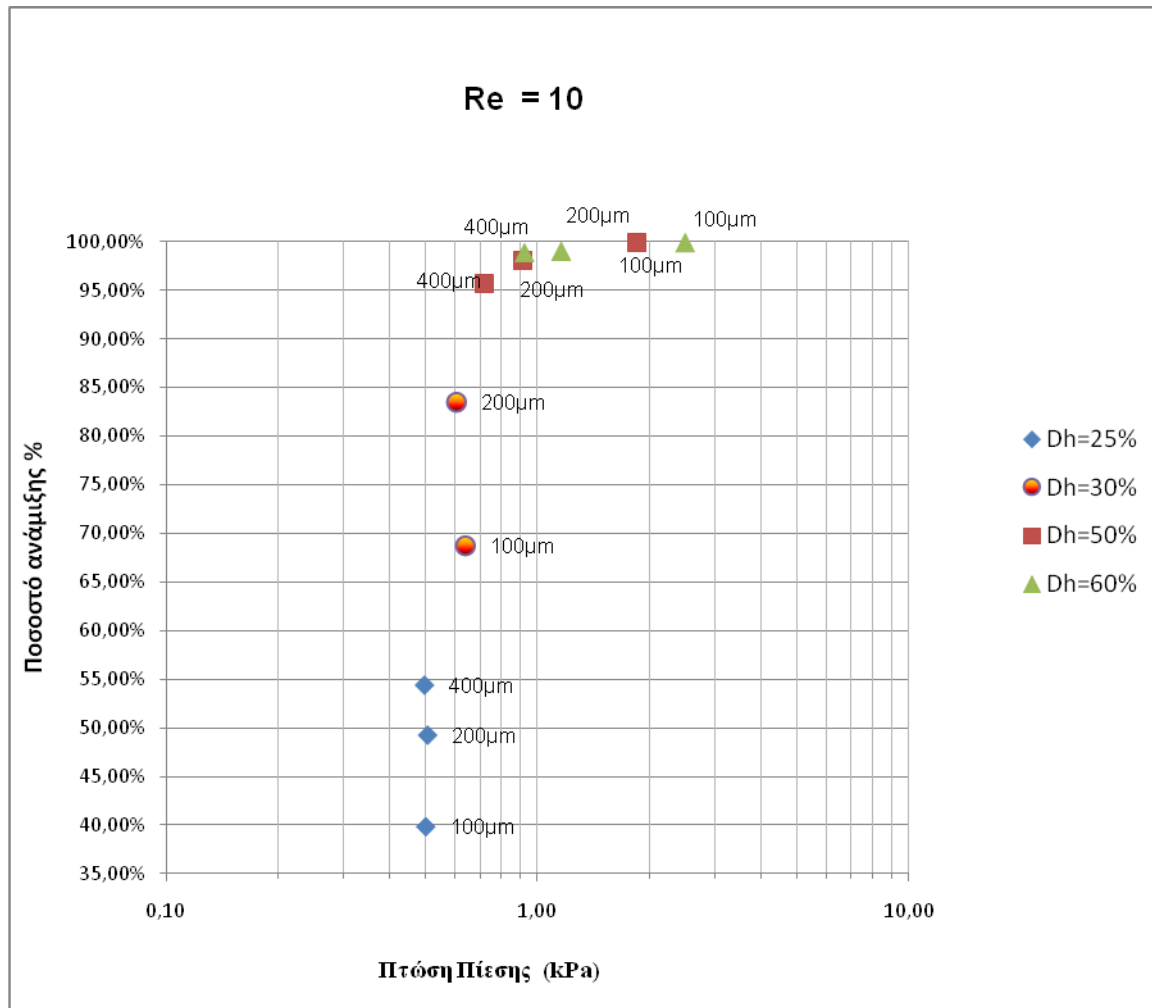


Σχήμα 5.4.5 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για ανάλογες τιμές Reynolds σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διάμετρο περιορισμένη κατά 50% σε σχέση με την είσοδο.

Στα σχήματα 5.4.1 και 5.4.2 απεικονίζεται η ανάμιξη που πραγματοποιείται λόγω της δημιουργίας του φαινομένου της ανακυκλοφορίας στα σημεία που υπάρχει έντονη αυξομείωση της διατομής της ροής. Το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτερα έντονο όσο αυξάνεται ο αριθμός Reynolds, όμως αυξανόμενης της τιμής του πάνω από $Re=100$ το μοντέλο μικροανάμιξης παρουσιάζει αστάθεια και πτώση της απόδοσής του. Στο διάγραμμα του σχήματος 5.4.5 είναι φανερό ότι το μοντέλο έχει βέλτιστη απόδοση στην περιοχή $Re=100$. Βέβαια γεννιέται και το ερώτημα ποια διάταξη από αυτές που παρουσιάζονται σε αυτή την παράγραφο είναι αποδοτικότερη. Θέτοντας ως στόχο την μέγιστη μίξη με την μικρότερη δυνατή δαπάνη ως προς την ενέργεια που θα προσδώσουμε στο ρευστό (δηλαδή τις μικρότερες απώλειες πίεσεως), παρατηρείται ότι η κατασκευή με απόσταση εμποδίων $200\mu\text{m}$ ενδείκνυται για $Re=100$, ενώ για $Re=10$ ενδείκνυται περισσότερο η κατασκευή με απόσταση εμποδίων $100\mu\text{m}$.

5.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Εφαρμόζοντας σε όλες τις γεωμετρίες της πειραματικής διάταξης, τις ίδιες συνθήκες εισόδου και εξόδου για διαφορετικά μεγέθη του αριθμού Re , προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα, ενώ τα ποσοτικά αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον πίνακα 5.1

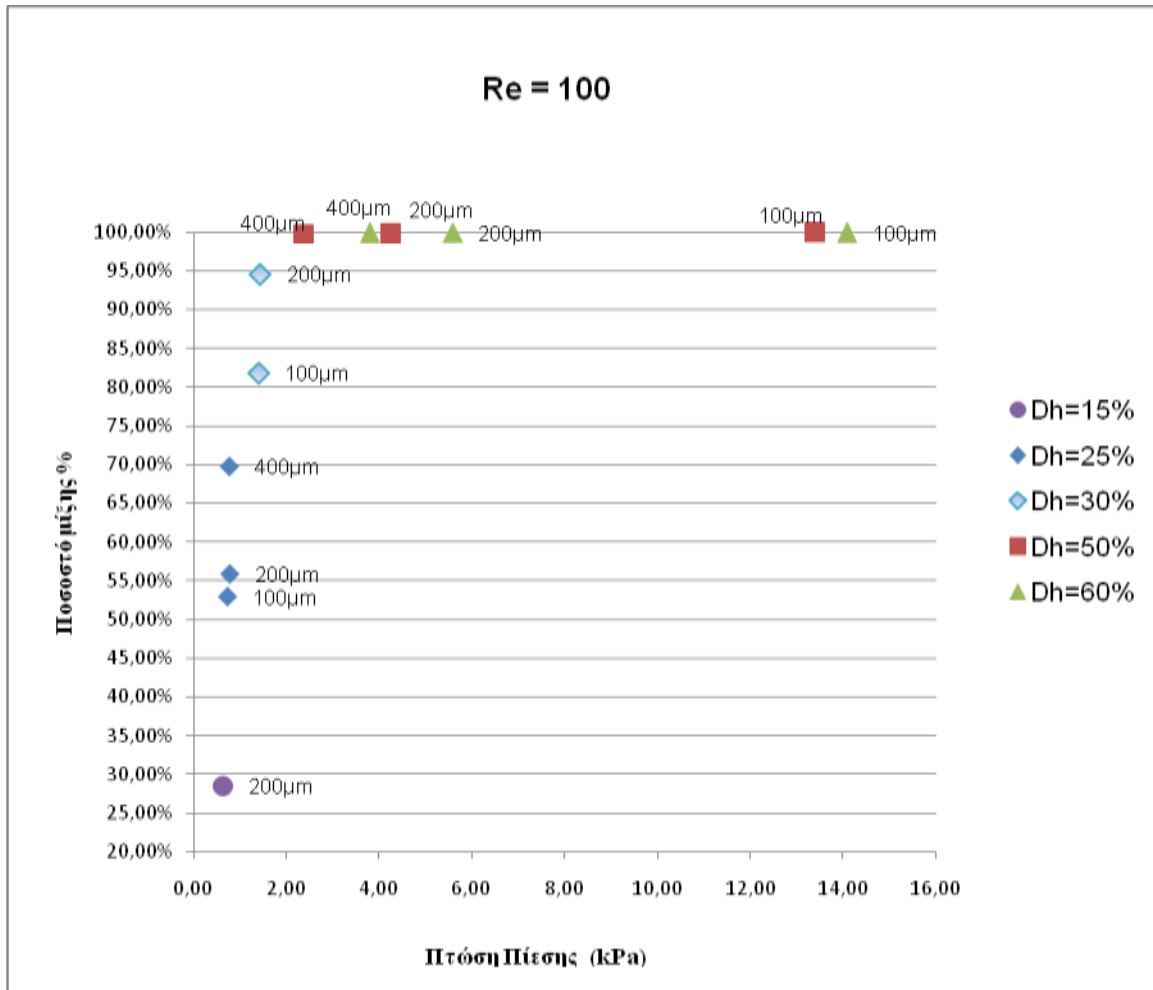


Σχήμα 5.5.1 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για τιμή Reynolds $Re=10$ σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διάμετρο περιορισμένη κατά ποσοστό από 25% ~ 60% σε σχέση με την είσοδο.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι όσο η υδραυλική διάμετρος μειώνεται, για την περίπτωση που ελέγχεται, δηλαδή για $Re=10$ το ποσοστό ανάμιξης αυξάνεται. Επίσης διαπιστώνεται ότι χωρίς ιδιαίτερη πτώση πίεσης η ανάμιξη φτάνει σε υψηλά ποσοστά και συγκεκριμένα για μεταξύ εμποδίων απόσταση ίση με 100μm και μείωση υδραυλικής διαμέτρου ίση με 60% το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 99,92%. Οπότε, επιλέγοντας μια διάταξη για μικρούς αριθμούς Reynolds η προαναφερθείσα θεωρείται ως η βέλτιστη.

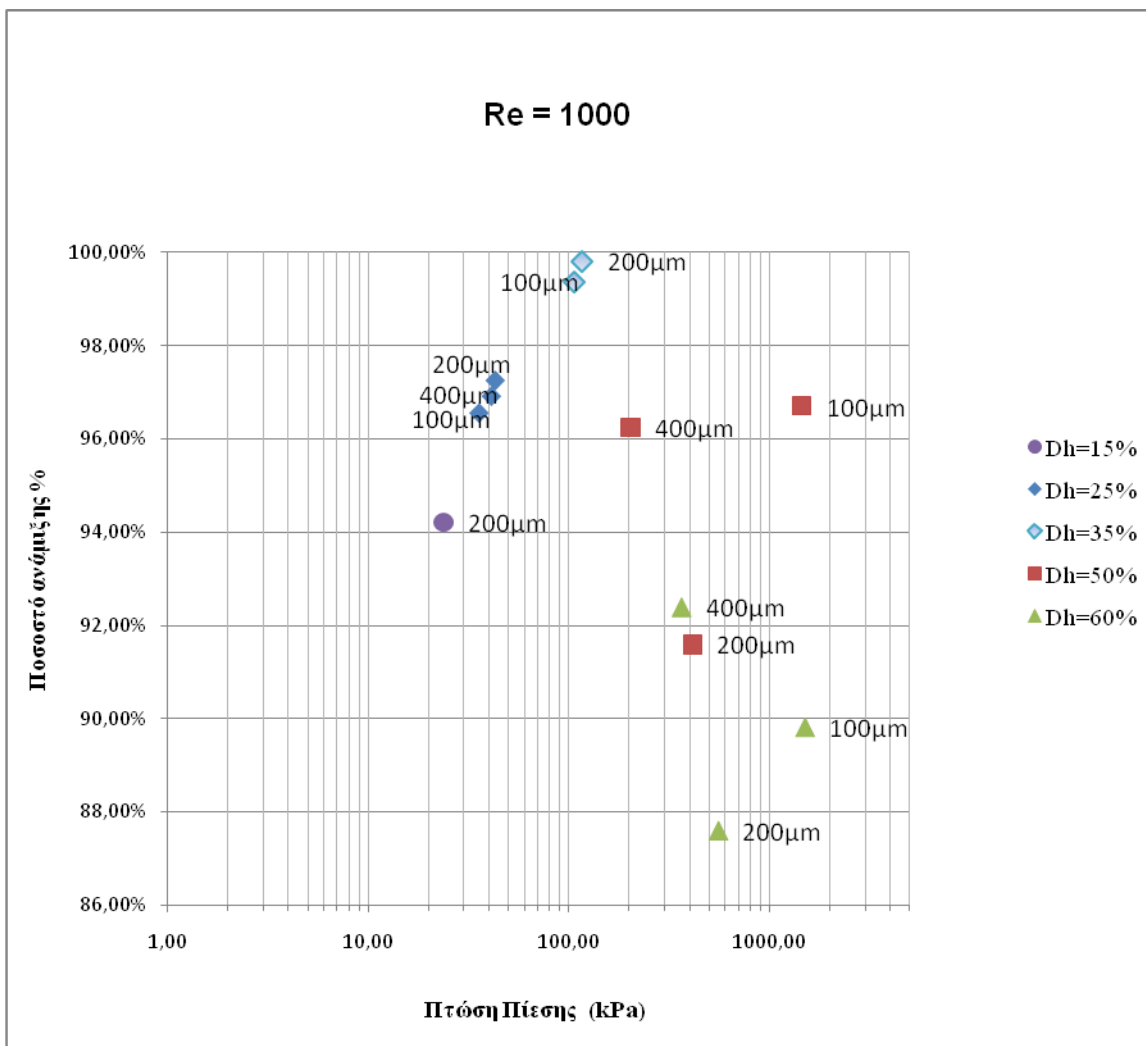
Σχέση υδραυλικής διατομής σε σχέση με την αρχική / απόσταση εμποδίων % / μm	mix Re=10 %	mix Re=100 %	mix Re=1000 %	ΔP Re=10 (kP)	ΔP Re=100 (kP)	ΔP Re=1000 (kP)
15/ 200	22,46%	28,47%	94,22%	0,464	0,629	23,834
25 / 100	39,87%	52,95%	96,56%	0,498	0,730	35,572
25 / 200	49,30%	55,86%	97,25%	0,504	0,780	42,896
25 / 400	54,45%	69,76%	96,92%	0,494	0,769	41,038
35/ 100	68,78%	81,83%	99,36%	0,639	1,390	107,086
35 / 200	83,53%	94,55%	99,81%	0,605	1,441	117,055
50 / 100	99,90%	99,99%	96,72%	1,855	13,401	1449,001
50 / 200	98,07%	99,87%	91,59%	0,912	4,254	414,478
50 / 400	95,71%	99,77%	96,24%	0,718	2,368	202,778
60 / 100	99,92%	99,97%	89,81%	2,503	14,091	1500,317
60 / 200	99,02%	99,88%	87,59%	1,157	5,591	556,581
60 / 400	98,87%	99,95%	92,38%	0,920	3,806	364,739

Πίνακας 5.1 Δεδομένα ποσοστού μίξης με την αντίστοιχη πτώση πίεσης για διαφορετικές διατάξεις, υδραυλικής διαμέτρου και απόστασης εμποδίων, για αντίστοιχους αριθμούς Re.



Σχήμα 5.5.2 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για τιμή Reynolds $Re=100$ σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διάμετρο περιορισμένη κατά ποσοστό από 15% ~ 60% σε σχέση με την είσοδο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.5.2 παρατηρεί κάποιος ότι όσο η υδραυλική διάμετρος μειώνεται, για την περίπτωση που ελέγχεται, δηλαδή για $Re=100$ το ποσοστό ανάμιξης αυξάνεται. Βέβαια υπάρχει μια ταύτιση των δύο περιπτώσεων με σχετική υδραυλική διατομή ίση με 50% και 60%. Και στις δυο προαναφερθείσες περιπτώσεις διαπιστώνεται ανάμιξη κοντά στο 100% με μόνη διαφορά στην πτώση πίεσης. Από τον πίνακα 5.1 προκύπτει ότι η διάταξη με σχετική υδραυλική διατομή 25% και απόσταση εμποδίων 100μm έχει το υψηλότερο ποσοστό ανάμιξης και ίσο με 99,99%. Όμως αν και επιτυγχάνεται η μέγιστη μίξη, η πτώση πίεσης είναι αυξημένη σε επίπεδα υπερβολικά μιας και για ανάλογη ανάμιξη με ποσοστό 99,95% επιτυγχάνεται με πτώση πίεσης ίσο με το 1/4 της προηγούμενης με την διάταξη στην οποία η σχετική υδραυλική διατομή είναι ίση με 60% ενώ τα εμπόδια είναι τοποθετημένα σε απόσταση 400μm μεταξύ τους.



Σχήμα 5.5.3 Διάγραμμα ποσοστού ανάμιξης σε σχέση με την πτώση πίεσης για τιμή Reynolds $Re=1000$ σε κανάλι μικροανάμιξης με υδραυλική διατομή περιορισμένη κατά ποσοστό από 15% ~ 60% σε σχέση με την είσοδο.

Στο διάγραμμα του σχήματος 5.5.3 παρατηρεί κάποιος ότι όσο η υδραυλική διατομή μειώνεται, για την περίπτωση που ελέγχεται, δηλαδή για $Re=1000$ το ποσοστό ανάμιξης αυξάνεται έως ένα μέγιστο και ύστερα παρουσιάζει απότομη μείωση. Από το διάγραμμα είναι προφανές ότι για σχετική υδραυλική διατομή ίση με 35% της αρχικής, παρουσιάζεται η μέγιστη ανάμιξη. Από τον πίνακα 5.1 προκύπτει ότι η διάταξη με σχετική υδραυλική διατομή 35% και απόσταση εμποδίων 200μm έχει το υψηλότερο ποσοστό ανάμιξης και ίσο με 99,81% με επιπλέον διαπίστωση την χαμηλή πτώση πίεσης σε σχέση με άλλες διατάξεις.

Αν, εν κατακλείδι αυτής της έρευνας, τεθεί το ερώτημα για το ποια από όλες τις παραπάνω διατάξεις θα είχε την καλύτερη απόδοση ανάμιξης για διαφορετικές τιμές Reynolds χωρίς να χρειάζεται να προσαρμόζονται τα διαφράγματα και οι σχετικές υδραυλικές διατομές, η απάντηση μπορεί να δοθεί συνδυάζοντας τα στοιχεία των διαγραμμάτων 5.5.1, 5.5.2 & 5.5.3 και του πίνακα 5.1. Είναι φανερό ότι για υδραυλική διάμετρο μειωμένη κατά 50% και για απόσταση εμποδίων 100μm επιτυγχάνεται η βέλτιστη ανάμιξη για $Re = 10$ & 100 που είναι και η πιθανότερη περιοχή εφαρμογής

τέτοιων μικροαναμικτών, εμφανίζοντας μικρές απώλειες ενέργειας. Βέβαια στην προαναφερθείσα διαμόρφωση, εμφανίζεται μεγαλύτερη πτώση πίεσης σε σχέση με την ίδια σχετική υδραυλική διάμετρο αλλά με αυξημένη την απόσταση μεταξύ των διαφραγμάτων πλευράς (400μm) η οποία παρουσιάζει αυξημένη απόδοση για αυξημένες τιμές $Re = 1000$. Είναι ξεκάθαρο, ότι για τις δύο προαναφερθείσες διαμορφώσεις καναλιού μικροανάμιξης, η μία επιλέγεται για μικρά Re ενώ η δεύτερη για μεγαλύτερα Re . Άρα η τελική επιλογή για το ποια διαμόρφωση θα προτιμηθεί, για την κατασκευή και την χρήση της σε εργαστηριακά chip, είναι απόφαση που εξαρτάται από το τι αναζητά ο εκάστοτε ερευνητής και ποιες απαιτήσεις και περιορισμό υπάρχουν στην χρήση του μικροαναμικτή.

6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

6.1 Σύνοψη - Συμπεράσματα	114
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	115

6.1 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν να παρουσιαστούν οι γεωμετρίες μικροανάμιξης που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια αλλά και οι ροϊκοί μηχανισμοί που συντελούν στην ανάμιξη των μικρορευστών. Η αριθμητική προσομοίωση της ροής εφαρμόστηκε για τη μελέτη ενός μικροαναμικτή τύπου T με εσωτερικές διαμορφώσεις σειράς διαφραγμάτων, που ως σκοπό έχουν τη βελτίωση της ικανότητας ανάμιξης του απλού μικροαναμικτή. Στόχος της διερεύνησης ήταν να εντοπιστεί η κατάλληλη διάταξη των διαφραγμάτων που θα προσδίδει στον υπό εξέταση μικροαναμικτή την μέγιστη αποδοτικότητα για μεγάλο εύρος αριθμού Re.

Στο εσωτερικό του μικροαναμικτή, τοποθετήθηκαν σε προκαθορισμένες θέσεις διαφράγματα/επόδια με σκοπό την μείωση της σχετικής διατομής του καναλιού ανάμιξης, ενώ ταυτόχρονα οι μεταξύ τους αποστάσεις μεταβάλλονταν με σκοπό την αυξομείωση της πίεσης και της έντασης των στροβιλισμών και διαταραχών της ροής, που αποτελεί τον βασικό σκοπό της εφαρμογής διαφραγμάτων εντός του μικροαναμικτή. Η διερεύνηση και ανάλυση της ροής έγινε για διάφορες συνθήκες εισόδου (παροχές) των εισερχομένων μικρορευστών με ανάλογη επίπτωση στο μέγεθος του αριθμού Re.

Για την πραγματοποίηση των αριθμητικών πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν γνωστά προγράμματα σχεδίασης και ανάλυσης ροής. Συγκεκριμένα στο πρόγραμμα Gambit σχεδιάστηκε ο όγκος ελέγχου όπως και το υπολογιστικό πλέγμα. Η ροή αναλύθηκε με το λογισμικό Fluent, επιλύοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes για μόνιμη, στρωτή ροή με pressure based αλγόριθμο.

Το βασικό ερώτημα που διερευνήθηκε είναι ποια από όλες τις εξεταζόμενες διατάξεις έχει την καλύτερη απόδοση ανάμιξης σε συγκεκριμένη περιοχή του αριθμού Re με σχετικά χαμηλές απώλειες πίεσης, και βρέθηκε ότι υπάρχει σε κάθε περίπτωση ένας βέλτιστος συνδυασμός ύψους-απόστασης διαφραγμάτων. Ο συνδυασμός αυτός δεν είναι ίδιος για όλες τις περιοχές του αρ. Reynolds, επομένως η βέλτιστη σχεδίαση της διάταξης εξαρτάται από αυτόν. Όμως, για τις τυπικές ροές που εμφανίζονται σε πρακτικούς μικροαναμικτές φαίνεται ότι μπορεί να σχεδιαστεί μια συγκεκριμένη διάταξη με ικανοποιητική απόδοση σε ένα εύρος τιμών του αριθμού Re.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για πολύ μικρές μειώσεις της υδραυλικής διατομής, η ανάμιξη που επιτυγχάνεται είναι σχετικά μικρή για αριθμούς $Re < 10$ ενώ για μεγαλύτερης κλίμακας $Re > 100$ πλησιάζει την πλήρη, σε πολύ υψηλά ποσοστά. Αυτό είναι συνέπεια της δημιουργίας ή μη των στροβιλισμών και περιοχών ανακυκλοφορίας της ροής πίσω από τα διαφράγματα, στις οποίες ενισχύεται σημαντικά η ανάμιξη των δύο ρευστών. Όμως, όταν εφαρμοστεί πολύ μεγάλο ποσοστό μείωσης της υδραυλικής διατομής, η ανάμιξη που επιτυγχάνεται για τις αντίστοιχες καταστάσεις ροής εμφανίζει αντίστροφη συμπεριφορά. Λογική εξήγηση στο φαινόμενο αυτό είναι, ότι σε αυξημένες τιμές $Re \approx 1000$ η δημιουργία στροβιλισμών είναι τέτοια που αναγκάζει τα μικρορευστά να διέλθουν από μια αρκετά μικρή ενεργό διατομή του μικροκαναλιού, αλλά με αυξημένες τιμές ροϊκής ταχύτητας με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επαρκής χρόνος για άμεση διάχυση στη διεπιφάνεια, άλλα και να περιορίζεται η ένταση των στροβιλισμών μεταξύ των εμποδίων, ενώ επίσης αυξάνονται πολύ οι απώλειες ενέργειας (πτώση πίεσης).

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Σε περαιτέρω έρευνα που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στο μέλλον για τον μικραναμίκτη τύπου T, θα ήταν σκόπιμο να αναζητηθεί η βελτιστοποίηση της διάταξης με υδραυλική διατομή μειωμένη κατά 25% και απόσταση διαφραγμάτων 400μm, αφού όπως δείχνουν τα αποτελέσματα (Πίνακας 5.1), υστερεί μόνο σε πολύ μικρούς αριθμούς $Re < 50$, ενώ παρουσιάζει την μικρότερη πτώση πίεσης. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει ανάλυση της ροής με χρήση πυκνότερων πλεγμάτων ώστε η λύση και τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτή να πλησιάσουν περισσότερο στα πραγματικά που θα προέκυπταν και από μια πειραματική διάταξη εργαστηρίου. Ακόμη, θα μπορούσε να μελετηθεί η χρήση εμποδίων με κλίση ως προς την κατεύθυνση της ροής αντί για κάθετα προς αυτήν, ώστε να μειωθεί η πτώση πίεσης για συγκεκριμένο βαθμό ανάμιξης.

Τέλος, ανάλογη διερεύνηση και ανάλυση θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε άλλους τύπους μικροαναμικτών που αναφέρονται και περιγράφονται στην παρούσα εργασία, με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους.

7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Shaw C. T.: Using computational fluid dynamics, Prentice Hall.
2. Abbott M. R. and Basce D. R.: Computational fluid dynamics – An introduction for engineers, Longman, 1989.
3. Smith C. T.: Numerical Solution of partial difference equation: finite difference methods 3d edn, Oxford University press, Oxford, 1985.
4. Roache P. J.: Computational fluid dynamics. Hermosa Publishes, 1982.
5. Hirsch C.: Numerical computation of internal and external flows. Vol. I & II. J. Wiley & Sons, 1988.
6. Nacamura S.: Computational methods in engineering and science. J. Wiley & sons, 1977.
7. Pedro Martins. : Electroactive β -PVDF Polymer as Fluidic Acoustic Mixer for Lab-on-a-Chip Applications, 2008
8. Chien-Fu Chen, Shih-Chi Kuo, Chin-Chou Chu, and Fan-Gang Tseng: A power-free liquid driven method for micro mixing application 2008
9. Arjun P. Sudarsan: Multivortex micromixing 2006
10. Lene K. HjertagerOsenbroch, CFD Modelling of Turbulent Mass Transfer in a Mixing Channel, 2005
11. Chih-Chang Chang and Ruey-Jen Yang: Electrokinetic Mixing in Microfluidic Systems 2007
12. Timothy J. Johnson, David Ross, Michael Gaitan, and Laurie E.Locascio : Rapid Electrokinetic Mixing, 2004
13. Branebjerg J. , Gravenesen P. , Krog J , Nielsen C. : In proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, 1966.
14. Schonfeld F., Hessel V., Hoffman C. :Lab Chip 2004
15. Lee S. W. , Lee S. S., Know T. H.J. : Micromech. Microeng 2006
16. Miyake R., Lammerink T. S. J. : In Proceedings of IEEE Micro Elctro Mechanical Systems Workshop, 1993
17. Song H., Tice J. D., Ismagilov R. F. : Angew. Chem. Int, 2003
18. Gunther A., Jhunjhinwala M., Thalmann M., Schmidt M. : K. F. Langmuir, 2005
19. Stroock A. D., Dertinger S. K. W., Ajdari A., Mezic I. : G. M. Science, 2002
20. Liu R. H., Stremmer M. A., Sharp K. V., Olsen M. G. : Microelectromechan Systems, 2000
21. Kim D. J., Oh H. J., Park T. H., Choo J. B., Lee S. H. : Analyst, 2005
22. Jones S. W., Thomas O. M., Aref H. J. : Fluid Mech., 1989
23. Yi M., Bau H.H. : Heat Fluid Flow, 2003
24. Dean W. R. Rhilos Mag. Ser. : Fluid Dynamics Taskforce. 1927
25. Dean W. R. Rhilos Mag. Ser. : Fluid Dynamics Taskforce. 1928

26. Castelain C., Berger D., Legentilhomme P., Mokrani A., Peerhossaini H. : Int j. Heat Mass Transfers, 2000
27. Howell P. B., Mott D. R., Golden J. P., Ligler F. S. : Lab Chip, 2004
28. Mengeaud V., Josseland J., Girault H. H. : Anal. Chem. 2002
29. Trimbach D., Feldman K., Spencer N. D., Broer D. J., Bastiaanses C. W. : Langmuir 2003
30. Biddiss E., Erickson D., Li D., Heterogeneous surface charge enhanced micromixing for electrokinetic flow Anal Chem., 2004
31. Chang C-C, Yang R. J., : A particle tracking method for analyzing chaotic electroosmotic flow mixing in 3D microchannels with patterned charged surface, 2006
32. Sasaki n., Kitamori T., Kim H. B., : AC electroosmotic micromixer for chemical processing in a microchannel, Lab Chip, 2006
33. Chih C. C., Ruey J. Y., : Electrokinetic Mixing in Microfluidic Systems, 2008
34. Μαρκάτος Ν., Ασημακόπουλος Δ.: Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Παπασωτηρίου, 1995.
35. Παπανίκας Δ.: Υπολογιστική ρευστοδυναμική. Εκδόσεις πανεπιστημίου Πατρών, 1995.
36. Τσαγγάρης Σωκράτης : Μηχανική των ρευστών. Εκδόσεις Συμεών 1995.
37. Παπαϊωάννου Α. Θ.: Μηχανική των ρευστών. Τόμος I & II. Γκελμπεσης Γ., 1993.
38. Φιλίος Α. Ε.: Δυναμική των ρευστών. Εξισώσεις διατήρησης και εφαρμογές. Τμήμα Εκπαιδευτικών Τεχνολόγων Μηχανικών, Α.Σ.Ε.Τ.Ε.Μ. / Σ.Ε.Λ.Ε.Τ.Ε., 2001.

Και τις ηλεκτρονικές διευθύνσεις:

1. www.cfd-online.com
2. www.atreas.gr
3. www.fluent.com
4. www.engr.ucsb.edu
5. www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE1400/Section4/laminar_turbulent.htm
6. <http://strc.herts.ac.uk/mm/micromixers.html>
7. www.lof.cnrs.fr
8. <http://www.comsol.com/showroom>