ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

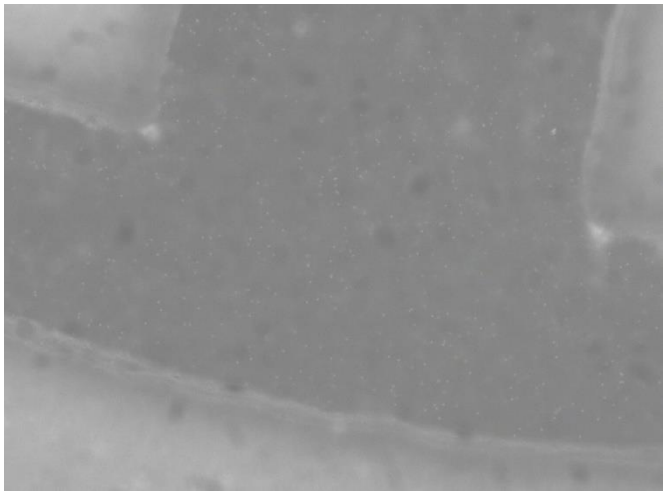
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΗ ΤΥΠΟΥ ΛΑΒΥΡΙΝΘΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ MICRO-PIV

EXPERIMENTAL FLOW STUDY OF A PASSIVE LABYRINTH-TYPE MICROMIXER USING MICRO-PIV



ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Επιβλέπων: **Δ.Σ. ΜΑΘΙΟΥΛΑΚΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π**.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

From darkness to light, from narrowness to broad-mindedness, from prejudice to tolerance, it is the voice of life, which calls us to come and learn.

(Inscribed on a bell atop Hayes Hall, University of Buffalo ,USA)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

- ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....5
- ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ABSTRACT.....6
- ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....7
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:**ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ.....8
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:** 2.1ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΗ.....10

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΕΣ.....14

2.2.1Μηχανισμοί μίξης ρευστών.....14

2.2.2 Χάρτες Poincare.....18

2.2.3 Ενεργητικοί μικροαναμίκτες.....20

2.2.4 Παθητικοί μικροαναμίκτες.....22

2.2.5 Εφαρμογές μικροαναμικτών.....26

2.2.6 Κατασκευή μικροαναμικτών.....32

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ DNA.....36
- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:** 4.1Η ΜΕΘΟΔΟΣ PIV.....40

4.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PIV.....41

4.3 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ.....42

4.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ MICRO-PIV.....44

4.4.1 Μικροσκόπια στη μέθοδο micro PIV.....45

4.4.2 Εξελίξεις στη μέθοδο micro PIV.....47

4.4.3 Η μέθοδος micro-PIV σε μικροαναμίκτες.....47

4.4.4 Βασικές αρχές λειτουργίας των laser.....51

4.4.5 Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου.....54

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:** ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....58

5.1 Γενικά στοιχεία για το μικροαναμίκτη.....58
5.2 Μελέτη του πεδίου συγκέντρωσης.....66

5.3 Μελέτη πεδίων ταχυτήτων.....82

5.3.1 Πρώτες μετρήσεις PIV.....82

5.3.2 Τελικές μετρήσεις PIV 92

5.3.3 Προφίλ ταχυτήτων κατά μήκος μιας γραμμής.....158

5.3.4 Μελέτη παροχών- συνέχειας της ροής..... 172

5.3.5 Μελέτη των προφίλ ταχυτήτων στις στροφές.....180

5.3.6 Μελέτη της περιοχής ανακοπής-νεκρής ζώνης.....188

- ΓΕΝΙΚΑ-ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....198
- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....199
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ:

A. Κώδικας επεξεργασίας εικόνων PIV.....200

B. Κώδικας επεξεργασίας αποτελεσμάτων PIV.....204

- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....214

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ το καθηγητή κύριο Δημήτριο Μαθιουλάκη, που με μύησε στο κόσμο της πειραματικής ρευστομηχανικής με τις ατέλειωτες ώρες που αφιέρωσε βοηθώντας με για την εργασία μου .

Ευχαριστώ επίσης το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος και το Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής για τη κατασκευή του μικροαναμίκτη και την αμέριστη και συνεχή βοήθεια τους σε τεχνογνωσία και εξοπλισμό ώστε να διεξαχθούν σωστά τα πειράματα στο ΕΜΠ. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γ.Κόκκορη, την Δρ. Α. Τσερέπη, την κυρία Γ. Κάπρου, MSc, υποψήφια διδάκτωρ, την κυρία Ι. Κεφαλά, MSc, καθώς και τον κύριο Β.Παπαδόπουλο, MSc.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσης εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη της ροής ενός παθητικού ,επίπεδου μικροαναμίκτη τύπου διαχωρισμού και επανένωσης(split and merge) με καμπυλωμένα κανάλια τύπου λαβύρινθου βάθους 60 μm , με τη χρήση της τεχνικής micro-PIV ,για ανάμιξη δύο ρευμάτων ρευστού παροχής 2.7 μL/min(συνολική παροχή 5.4μL/min , Re=0.5) .Ειδικότερα, διεξάγονται μετρήσεις ταχυτήτων μέσω micro-PIV σε τρία βάθη του καναλιού καθώς και της συγκέντρωσης σωματιδίων στα σημεία διαχωρισμού και επανένωσης του αναμίκτη με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την ανάμιξη. Παρά τον χαμηλό αριθμό Re παρατηρήθηκε ελαφρώς τρισδιάστατη ροή σχετιζόμενη με την τάση δημιουργίας δινών Dean, καθώς και φαινόμενα μεταφοράς μάζας στα σημεία διακλάδωσης ,τα οποία ευνοούν ιδιαιτέρως την ανάμιξη .

ABSTRACT

The present diploma thesis examines experimentally the flow of water in a passive, planar, split and merge micromixer with labyrinth-type channels ,of depth 60 μm, via the micro-PIV technique, for Re number 0.5 . In particular, the velocity field in 3 depths is examined, as well as the concentration field via an image processing code in order to study the diffusion and convection(Dean Vortices) phenomena. Although the Re number was quite low, a slightly 3D flow pattern was revealed, as well as some mass convection phenomena in the junction areas which contribute greatly to mixing.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την σήμερον ημέρα οι μικρορευστονικές συσκευές παίζουν ένα ολοένα και αυξανόμενα σημαντικό ρόλο στη βιομηχανία και έρευνα της χημείας της βιοχημείας, την ιατρικής και της μηχανολογίας. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το έτος 2012 ,1200 δημοσιεύσεις αφορούσαν μικρορευστονικές συσκευές, ενώ το 2014 οι πωλήσεις σε τέτοιου είδους συσκευές άγγιξαν παγκοσμίως τα 2.5 δις δολάρια. Η βελτιστοποίηση των παραπάνω συσκευών απαιτεί μεθόδους μέτρησης μεγεθών όπως η ταχύτητα, η πίεση, οι συγκεντρώσεις κ.α. στη μικροκλίμακα. Μία μη επεμβατική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση πεδίου ταχυτήτων στη μικροκλίμακα είναι η micro-PIV. Ένας τύπος μικρορευστομηχανικών συσκευών είναι οι μικροαναμίκτες, εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για τους οποίους παρατίθεται στην παρούσα εργασία. Μικροαναμίκτης είναι μία συσκευή της οποίας ο σκοπός είναι ταχεία η ανάμειξη 2 υγρών ρευμάτων χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό χώρο ,χρόνο και ενέργεια . Είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία με εφαρμογές όπως η κρυστάλλωση(crystallization),η εξαγωγή(extraction), ο πολυμερισμός(polymerization),η οργανική σύνθεση(organic synthesis), η ενζυματική πέψη του DNA,η αναδίπλωση πρωτεϊνών, η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης(PCR) κ.α. Για να επιτύχουμε ταχεία ανάμιξη θέλουμε κανάλια πολύ μικρής διάστασης. Από την άλλη όμως οι πεπερασμένες ταχύτητες είναι υποχρεωτικές ώστε να παραμείνουν στη συσκευή αρκετή ώρα τα στοιχεία του ρευστού για να επιτευχθεί ανάμιξη. Κάτι τέτοιο απαιτεί συνεπώς πολύ μικρό αριθμό Re(τάξης μεγέθους 1) .

Στη συγκεκριμένη διπλωματική μελετάται ένας παθητικός ,επίπεδος μικροαναμίκτης για βιοαναλυτικές εφαρμογές , ο οποίος κατασκευάστηκε στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος, στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής . Μελετήθηκαν τα πεδία ταχυτήτων σε 8 θέσεις , για 3 διακριτά βάθη. Ολοκληρώνοντας οι ταχύτητες υπολογίσθηκαν οι παροχές ανά μονάδα βάθους στις διατομές των καναλιών. Επιβεβαιώνοντας την εξίσωση συνέχειας έγινε προσπάθεια να κατανοηθεί αν υπάρχει ορμή κάθετη στο επίπεδο μέτρησης , δηλαδή ροή σε 3 διαστάσεις. Αυτό επιβεβαιώθηκε και θεωρείται αρχή ύπαρξης δινών Dean.

Σημαντική είναι επίσης η μέτρηση του πεδίου συγκέντρωσης σε κάθε μικροαναμίκτη. Η ταυτόχρονη μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων καθώς και του πεδίου συγκεντρώσεων σε μικρορευστονικές συσκευές γίνεται σήμερα με τις συνδυασμό των μεθόδων μ-PIV και μ-LIF. Μια τέτοια διάταξη απαιτεί 2 laser, ένα φωτοπολλαπλασιαστή και μια CCD κάμερα. Αντίθετα, μέσω επεξεργασίας των εικόνων από το micro-PIV είναι δυνατή η ταυτόχρονη εξαγωγή των 2 πεδίων με χρήση ενός laser και μιας CCD κάμερας, ώστε να γίνει επαρκής μελέτη των φαινομένων μεταφοράς και διάχυσης. Οι δυνατότητες αυτής της ιδέας μελετώνται στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Τα 3 βασικά σετ εξισώσεων που διέπουν τη μηχανική ρευστών όπου το μοντέλο συνεχούς μέσου είναι επαρκές είναι οι παρακάτω: Διατήρηση μάζας(ή εξίσωση συνέχειας), η διατήρηση της ορμής και η διατήρηση της ενέργειας υπό τη μορφή του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u}\nabla\rho + \rho\nabla\cdot\vec{u} = 0$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΟΡΜΗΣ

$$\frac{\partial \rho\vec{u}}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{u})\vec{u} + \rho\vec{u}\cdot\nabla\vec{u} = \rho\vec{g} - \nabla p$$

ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(\frac{1}{2}v^2 + e\right)\right] + \nabla\left[\rho\left(\frac{1}{2}v^2 + e\right)\vec{v}\right] = \rho\vec{v}\cdot\vec{g} - \nabla(p\vec{v}) - \nabla\vec{q}$$

όπου q είναι η πυκνότητα θερμοροής και e η εσωτερική ενέργεια.

ΥΛΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ+ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ+ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ= ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER -STOKES(για ασυμπίεστη ροή , νευτώνειο ρευστό, στρωτή ροή)

Για <u>ασυμπίεστο ρευστό</u>(div **V**=0) καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \vec{v}\cdot\nabla\vec{v} - \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v} = \frac{D\vec{v}}{Dt} + -\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \vec{g}$$

όπου D/Dt η υλική παράγωγος.

Οι εξισώσεις Navier- Stokes <u>σε μικροροές</u>, λόγω των μικρών αριθμών Re και της ασυμπίεστης ροής αγνοείται ο όρος $\vec{v}\cdot\nabla\vec{v}$ συναγωγής που οφείλεται στον αδράνεια του ρευστού, καθώς και η επιτάχυνση της βαρύτητας , οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

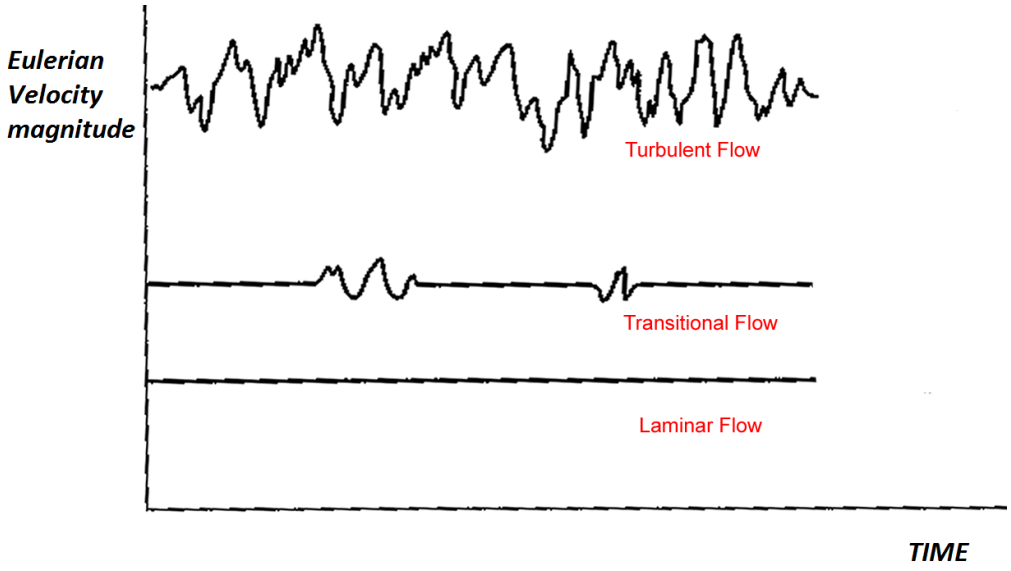
$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} - \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right)$$

Για χρονικά μη μεταβαλλόμενη (steady state) κατάσταση αγνοώντας και τον όρο χρονικής μεταβολής παίρνουμε την εξίσωση Stokes για έρπουσα ροή(creeping flow):

$$-\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right)+\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v}=0$$

Στρωτή-Τυρβώδης ροή

Στρωτή ροή σημαίνει ότι κατά την Euler περιγραφή ενός πεδίου ρευστού, σε κάθε διάνυσμα $\vec{r}(x,y,z)$ το διάνυσμα της ταχύτητας του πεδίου είναι σταθερή συνάρτηση: Αντίθετα κατά την τυρβώδη ροή το σήμα που λαμβάνουμε είναι χαοτικό:



Σχήμα 1.1 : Κατάταξη των Ροών.

Το γεγονός της τυρβώδους ανάμειξης μετατρέπει ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας σε θερμότητα και απαιτείται πολλαπλάσια πίεση για να περάσει μια συγκεκριμένη παροχή από ένα σωλήνα.

Ο ξακουστός Γερμανός θεωρητικός φυσικός Arnold Sommerfeld, είπε κάποτε ότι πριν πεθάνει θα ήθελε να καταλάβει 2 φαινόμενα: την κβαντομηχανική και την τύρβη.

Στρωτοί-τυρβώδεις στρόβιλοι: Ένας στρόβιλος μπορεί να είναι και στρωτός. Αυτό μπορούμε να το συμπεράνουμε αν μετρήσουμε τη ταχύτητα σε ένα σημείο αυτού για διάφορες χρονικές στιγμές, όπου θα είναι ίδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΝΙΚΗ(MICROFLUIDICS)

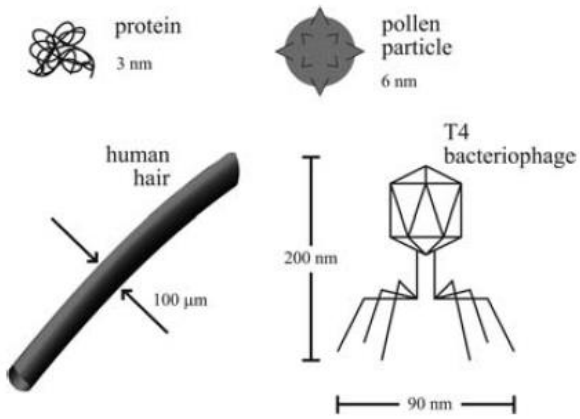
Το περιοδικό MIT Technology Review ανέδειξε τη μικρορευστονική(microfluidics) σε μια από τις 10 αναπτυσσόμενες τεχνολογίες που θα αλλάξουν το κόσμο. Η μικρορευστονική βασίζεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ βασικής γνώσης και τεχνολογίας. Η βασική γνώση προτείνει ιδέες για πιθανά design τα οποία άν πραγματοποιηθούν μπορούν να οδηγήσουν σε συστήματα τεχνολογικής σημασίας και αντίστοιχα να οδηγήσουν σε εξελίξεις στην επιστήμη. Η μικρορευστονική ασχολείται με τη συμπεριφορά, τον ακριβή έλεγχο και τη διαχείριση ρευστών με μικρή κατανάλωση ενέργειας, τα οποία είναι γεωμετρικά περιορισμένα σε κλίμακα κάτω του 1 χιλιοστού. Η μικρορευστονική εμφανίστηκε τη δεκαετία του 80 και σήμερα χρησιμοποιείται σε χιλιάδες εφαρμογές όπως κεφαλές εκτυπωτών, τεχνολογίες Lab on Chip για αναλύσεις , DNA chips, micro-propulsion και μικροθερμικές συσκευές.

Πλεονεκτήματα συσκευών μικρορευστονικής :

- Μικρός όγκος
- Δυνατότητα μαζικής παραγωγής
- ταχύτητα στην ανάλυση- ενσωμάτωση σε άλλα μικροσυστήματα
- Μικρό κόστος(συνήθως)

Στα μικροκανάλια, η ροή είναι συνήθως στρωτή και ο αριθμός Re είναι τουλάχιστον 2 τάξεις μεγέθους κάτω κάτω από την κρίσιμη τιμή για μετάβαση σε τυρβώδη ροή.

Από άποψη ρευστομηχανικής η ικανότητα μας να κατασκευάσουμε συσκευές μικρο- και νανοκλίμακας έχει πολλές προκλήσεις. Για παράδειγμα για εφαρμογές σε συσκευές που διαχειρίζονται υγρά , όπως είναι και οι περισσότερες βιοχημικές και βιοαναλυτικές εφαρμογές φαινόμενα interfacial και ηλεκτροχημικά είναι ιδιαίτερης σημασίας ενώ φαινόμενα όπως η βαρύτητα και η πίεση είναι ήσσονος σημασίας. Επίσης η συνθήκη μη ολίσθησης που πολύ εύκολα χρησιμοποιούμε στις μακροσκοπικές ροές συχνά δεν ισχύει. Επίσης ενώ η ροή με πολύ χαμηλό Re συνήθως μας οδηγεί να αμελήσουμε το μη γραμμικό όρο της συναγωγής και τη δυσκολία της μοντελοποίησης της τυρβώδους ροής , από την άλλη υπάρχει ιδιαίτερη μη γραμμικότητα στον όρο πηγής (source) στην εξίσωση Poisson-Boltzmann, καθώς και κατά την αλληλεπίδραση της ηλεκτροδυναμικής με τη ροή. Επίσης ιδιαίτερη αβεβαιότητα εισάγουν οι οριακές συνθήκες ηλεκτρώσμωσης (electroosmosis) .



Σχήμα 2.1.1 : Κλίμακα μηκών ορισμένων βιολογικών αντικειμένων

Βασικές διαφορές της ρευστομηχανικής στη μικροκλίμακα και στη μακροκλίμακα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 4 βασικούς πυλώνες: Φαινόμενα ασυνέχειας του μέσου, έντονη επίδραση του τοιχώματος, φαινόμενα που αφορούν το χαμηλό αριθμό Re και φαινόμενα πολλών κλιμάκων και πολλαπλών φυσικών φαινομένων(multiscale και multiphysics).Μερικά από τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να μοντελοποιηθούν με απλές παραλλαγές στις εξισώσεις Navier Stokes.Από την άλλη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Boltzmann ή και η και μοντέλα μοριακής δυναμικής (molecular dynamics implementation) του νόμου του Νεύτωνα, κάτι που όμως είναι απαγορευτικό για πολύπλοκες γεωμετρίες για λόγους υπολογιστικού κόστους. Συνεπώς χρησιμοποιούνται συνήθως μεσοσκοπικά και υβριδικά (ατομιστικά και μεθόδους συνεχούς μέσου)μοντέλα.

Ροές σε μικροκανάλια

Τελευταία, ιδιαίτερα αυξημένο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και efficient συσκευές βιοχημικής ανάλυσης σε επίπεδο μικροκλίμακας και νανοκλίμακας. Σε τέτοια συστήματα, ο λόγος $\frac{\epsilon\pi\iota\varphi\acute{\alpha}\nu\epsilon\iota\alpha}{\acute{o}\gamma\kappa o\varsigma}$ είναι ιδιαίτερα μεγάλος και η κρίσιμη διάσταση είναι συγκρίσιμη με το μέγεθος των μορίων του ρευστού.

$$\frac{F_{surface}}{F_{volume}} \propto \frac{l^2}{l^3} = \frac{1}{l} \xrightarrow{l \to 0} \infty$$

Επίσης, ο Re κυμαίνεται από 0.1-200, δηλαδή σε πολύ χαμηλά επίπεδα στρωτής ροής για πολλούς λόγους κύριοι εκ των οποίων είναι:

- Απαιτείται χρόνος για να γίνουν οι αναλύσεις του ρευστού(περιορισμός στη ταχύτητα).
- Επιθυμούνται μικρές απώλειες πίεσης για μικρή ενέργεια άντλησης του ρευστού.

Μια εξίσωση που μας δίνει τις ενδεικτικές απώλειες πίεσης για στρωτή ροή , νευτώνιο ρευστό είναι η εξίσωση Darcy: $\Delta p = \dot{V}\,\frac{8\mu L}{\pi R^4}$

- Τις περισσότερες φορές η στεγανοποίηση των μικροκαναλιών δεν αντέχει υψηλές πιέσεις.

Στην κλίμακα των LOC(Lab on a chip-εργαστήριο σε ψηφίδα) συστημάτων οι ογκικές δυνάμεις(όπως η αδράνεια και η βαρύτητα) που κυριαρχούν στη καθημερινή μας ζωή γίνονται ασήμαντες , ενώ οι επιφανειακές δυνάμεις(επιφανειακές τάσεις, ιξώδες) κυρίαρχες. Οι εξισώσεις Navier Stokes δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα μέχρι μια συγκεκριμένη κρίσιμη διάσταση καναλιού . Αν το πλάτος του καναλιού είναι μικρότερο από 10 διαστάσεις του μορίου του ρευστού(fluid diameters) , οι εξισώσεις NV δεν δίνουν καλά αποτελέσματα και οι επιστήμονες χρησιμοποιούν ατομιστικά μοντέλα μοριακής δυναμικής. Συγκεκριμένα, ο αριθμός Knudsen μας βοηθά να διαχωρίσουμε 3 διακριτές περιπτώσεις κατά τη μοντελοποίηση της ροής:

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

, όπου λ η μέση ελεύθερη διαδρομή του μορίου(mean free path) και L χαρακτηριστικό μήκος της ροής. Για ένα αέριο Boltzman to λ ισούται:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2}\pi d^2 pL}$$

- Για Kn<0.01 ισχύει η θεωρία συνεχούς μέσου
- Για 0.01<Kn<0.1 ισχύει η θεωρία συνεχούς μέσου αλλά με κατάλληλη οριακή συνθήκη ολίσθησης στο τοίχωμα. Ο Maxwell πρότεινε οριακή συνθήκη: $u - u_{wall} = \lambda \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_w$
- Για 0.1<Kn<10 είναι η μεταβατική περιοχή στην οποία χρησιμοποιείται η εξίσωση Boltzmann.
- Για Kn>10 ουσιαστικά έχουμε ελεύθερη μοριακή κατάσταση και δε θεωρούμε ότι η ύλη πια αποτελείται από στοιχεία ρευστού, αλλά από μόρια .

<u>Ειδικότερα στοιχεία για μοντελοποίηση όταν Kn>10:</u>

Για υψηλούς αριθμούς Kn για οι ιδιότητες του συνεχούς μέσου εξάγονται από στατιστικές μεθόδους. Για τα αέρια ισχύει η θεωρία Chapman- Enskog. Η αλληλεπίδραση μεταξύ μη πολικών μορίων δίνεται από το δυναμικό Lennard-Jones , από τη σχέση:

$\varphi_{ij}(r) = 4\varepsilon\left[c_{ij}(\frac{\sigma}{r})^{12} - d_{ij}(\frac{\sigma}{r})^{6}\right]$, όπου σ η χαρακτηριστική διάμετρος του μορίου, r η απόσταση μεταξύ 2 μορίων και ε η χαρακτηριστική ενέργεια η οποία είναι η ενέργεια έλξης μεταξύ των μορίων.

Συνεπώς η δύναμη μεταξύ των μορίων εξάγεται ως εξής:

$$F_{ij} = -\frac{d\varphi_{ij}(r)}{dr} = \frac{48\varepsilon}{\sigma}\left[c_{ij}(\frac{\sigma}{r})^{13} - d_{ij}(\frac{\sigma}{r})^{7}\right]$$

Η κινητική θεωρία εφαρμόζεται για υγρά : Η δυναμική συνεκτικότητα για παράδειγμα δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\mathrm{N_A}\hbar}{\bar{v}}\exp(3.8T_b / T)$$

όπου Na ο αριθμός Avogadro(αριθμός μορίων σε ένα mol), hbar η σταθερά του Planck ,v ο μοριακός όγκος.

Όταν όμως δεν υπάρχουν αρκετά μόρια για να έχουμε καλή στατιστική χρησιμοποιούνται άλλα μοντέλα για να προσομοιωθούν τα φαινόμενα μεταφοράς: Το μοντέλο μοριακής δυναμικής (molecular dynamics- ντετερμινιστική μέθοδος) και η προσομοίωση Direct Monte Carlo(DSMC-στατιστική μέθοδος).

<u>Μοριακή δυναμική:</u>

Η δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ 2 μορίων δίνεται από τη σχέση Lenard -Jones:

$\vec{f}_{ij}(r) = -\vec{f}_{ji}(r)$. Κατόπιν η δυναμική των μορίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$m\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \sum_{j=1, j\neq 1}^{N} \vec{f}_{ij}$. Η διαδικασία ξεκινά ως εξής:1. Καθορισμός αρχικών συνθηκών και γεωμετρικών παραμέτρων,2. υπολογισμός της δύναμης αλληλεπίδρασης και 3. ολοκλήρωση της εξίσωσης του Νεύτωνα.

<u>Direct Monte Carlo Simulation:</u>

Στη μέθοδο αυτή , πολλά μόρια μοντελοποιούνται μαζί σαν ένα σωματίδιο. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μορίων κάθε σωματιδίου υπολογίζεται στατιστικά, ενώ η κίνηση του σωματιδίου υπολογίζεται ντετερμινιστικά. Τα βασικά στάδια είναι τα εξής:

1. Καθορισμός της κίνησης του σωματιδίου

2.Indication and cross referencing των σωματιδίων

3. Προσομοίωση της σύγκρουσης των σωματιδίων

4. Sampling των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του μέσου.

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΕΣ

Μικροαναμίκτης είναι μία συσκευή της οποίας ο σκοπός είναι ταχεία η ανάμειξη 2 υγρών ρευμάτων. Οι μικροαναμίκτες είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία με εφαρμογές στη χημική και βιοχημική βιομηχανία όπως: ενζυματική πέψη DNA, κρυστάλλωση(crystallization), εξαγωγή(extraction), πολυμερισμός(polymerization),οργανική σύνθεση(organic synthesis) σε εργαστηριακό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Ανήκουν στην γενική κατηγορία τεχνολογιών Lab on Chip(LOC technologies). Ο γενικός στόχος των μικροαναμικτών είναι η επίτευξη ταχείας ανάμειξης χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό χώρο. Πιο συγκεκριμένα , ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της διεπιφανειακής(interfacial) περιοχής μεταξύ δύο συρρεόντων ρευστών χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό χώρο ,χρόνο και ενέργεια. Γενικά λοιπόν, το μήκος ανάμειξης είναι ανάλογο του αριθμού h*Peclet, όπου h είναι το ύψος του μικροκαναλιού.

2.2.1 Μηχανισμοί μίξης ρευστών:

Τα φαινόμενα μεταφοράς σε μικροαναμίκτες μπορούν να περιγραφούν θεωρητικά σε 2 βασικά επίπεδα: το μοριακό(molecular) και το συνεχές(continuum).Τα 2 επίπεδα αυτά αφορούν τη τυπική κλίμακα μήκους της ροής. Το συνεχές μοντέλο μπορεί να περιγράψει τα περισσότερα φαινόμενα μεταφοράς σε μικροαναμίκτες με ένα μήκος τάξης μεγέθους (length scale) από μικρόμετρα μέχρι εκατοστά. Οι περισσότεροι μικροαναμίκτες ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία. Αντίθετα , τα μοριακά μοντέλα περιγράφουν φαινόμενα με κλίμακα μήκους από 1 nm μέχρι 1 μm. Αυτοί οι αναμίκτες λέγονται συνήθως και νανομίκτες(nanomixers).

Σε αυστηρά στρωτή ροή , οι μηχανισμοί ανάμειξης είναι 2 ,η *διάχυση(diffusion)* και η *συναγωγή (advection ή convection)*.

Δ*ιάχυση* ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία μόρια μεταφέρονται από μια περιοχή με υψηλότερη συγκέντρωση σε μια περιοχή με μικρότερη μέσω του μηχανισμού της κίνησης Brown και περιγράφεται μαθηματικά από το νόμο του Fick:

$$j = -D\frac{d\varphi}{dx}$$ όπου

$$D = \frac{kT}{6\pi\mu R}$$

όπου K είναι η σταθερά του Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία, R η ακτίνα των μορίων και μ η δυναμική συνεκτικότητα του μέσου και D ο συντελεστής διάχυσης.Ο μέσος χρόνος για να διαχυθεί ένα σωματίδιο σε μια απόσταση x δίνεται από τη σχέση:

$$x^2 = 2Dt$$

ο συγκεκριμένος νόμος συνεπάγεται και ότι όσο μικραίνει η διάσταση του καναλιού , τόσο γρήγορα συμβαίνει και ανάμιξη.

Ώς *συναγωγή* χαρακτηρίζεται η μεταφορά μάζας κατά την οποία μετακινούνται στοιχειώδεις όγκοι της ουσίας στο εσωτερικό των οποίων η τυχαία κίνηση των μορίων υπάρχει και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του στοιχειώδους όγκου. Η ταχύτητα συναγωγής περιορίζεται από τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ ενός στοιχείου όγκου και του γειτονικού του. Ο συντελεστής που περιγράφει τη μεταφορά μάζας με συναγωγή είναι το ιξώδες μ (dynamic viscosity).

Εξίσωση Συναγωγής -Διάχυσης:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (D \nabla c) - \vec{v} \nabla c$$

Ο συντελεστής διάχυσης D, η κινηματική συνεκτικότητα ν , η θερμική διαχυτότητα α= kρ c (όπου κ , ρ, c είναι η θερμική αγωγιμότητα, η πυκνότητα κι η ειδική θερμότητα αντίστοιχα) είναι όλες ιδιότητες μεταφοράς(transport properties) και έχουν μονάδα m^2/sec. Ο λόγος μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων αντιπροσωπεύει ένα γκρουπ αδιάστατων αριθμών που μας δείχνει τον ανταγωνισμό μεταξύ των φαινομένων/διαδικασιών(processes) μεταφοράς.

- *Αριθμός Schmidt*(λόγος μεταξύ μεταφορά ορμής(momentum transport-viscous diffusion) και μεταφοράς λόγω μοριακής διάχυσης.:

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$$

- *Αριθμός Lewis*(λόγος μεταξύ μεταφοράς θερμότητας και διάχυσης):

$$Le = \frac{a}{D} = \frac{k}{c \rho D}$$

- *Αριθμός Reynolds(λόγος αδρανειακών προς συνεκτικών δυνάμεων)*

$$\mathrm{Re} = \frac{\left\| \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right\|}{\left\| \mu \nabla^2 \vec{u} \right\|} \cong \frac{\rho U^2 / X}{\mu U / X^2} = \frac{U \mathrm{X}}{\nu}$$

όπου X: χαρακτηριστικό μήκος ροής(πχ. Διάμετρος για σωλήνες ή απόσταση από ακμή προσβολής για πλάκα ή υδραυλική διάμετρος $4A/P_{wet}$ για διατομές μη κυκλικές).Σε χαμηλούς αριθμούς Re κυριαρχούν οι συνεκτικές δυνάμεις και η διάχυση.

- *Peclet number*(Λόγος συναγωγής και διάχυσης):

$$Pe = \frac{UL}{D}$$

- *Αριθμός Fourier*(μέσος χρόνος διάχυσης δια το χαρακτηριστικό μήκος στο τετράγωνο- striation thickness):

$$Fo = \frac{Dt_{diff}}{L^2_{mixing}}$$

Ο αριθμός Fourier είναι ιδιαίτερα χρήσιμος γιατί μπορεί να μας δείξει το λόγο μήκους(L) προς πλάτος(W) στου μικροαναμίκτη ώστε τα 2 ρεύματα ώστε να αναμειχθούν πλήρως(t diffusion=t residence), για μια απλή περίπτωση μικροαναμικτη τύπου T:

$$t_{res} = t_{dif} \Rightarrow \frac{L_{mixer}}{U} = \frac{FoL_{mixing}{}^2}{D} = \frac{FoW^2}{D}$$

$$\Rightarrow \frac{Lmixer}{W} = Fo\frac{\bar{u}W}{D} = FoPe_w$$

Για μια τυπική τιμή του αριθμού Φουριέ 0.1<Fo<1 και ενα αριθμό Peclet 10<Pe_w<10000 το γινόμενο βγαίνει 10<Lmixer/w<10000.

Ένα παράδειγμα με τυπικά νούμερα βλέπουμε παρακάτω:

W(μm)	**L mixer, min(cm)**
20	2
50	5
100	10
250	25
500	50

Το μήκος όπως παρατηρούμε βγαίνει υπερβολικά σε ορισμένες περιπτώσεις. Για αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιούνται άλλες πιο αποδοτικές γεωμετρίες.

Άν όμως έχουμε περίπτωση διαδοχικής διαστρωμάτωσης(Sequential Lamination) ή διαχωρισμού και επανένωσης της ροής(Split and Recombine ή Split and Merge), δηλαδή οι είσοδοι χωρίζονται και ξαναενώνονται n φορές τότε το μήκος ανάμειξης μειώνεται σε L mixing=W/n κι έτσι ο λόγος μήκους προς πλάτος μικροκαναλιού γίνεται

$$\frac{Lmixer}{W} = Fo\frac{\bar{u}W}{D} = \frac{1}{n^2}FoPe_w$$

δηλαδή το μήκος ανάμειξης μειώνεται με ένα όρο τετραγώνου των αριθμό των φορών διαχωρισμού της ροής.

- Αριθμός Stokes

$$Stk = \frac{t_o \cdot u_o}{l_o}$$

Είναι ο λόγος χαρακτηριστικού χρόνου ενός σωματιδίου σε μία ροή προς το χαρακτηριστικό χρόνο της ροής. Είναι πολύ σημαντικός για την μέθοδο Particle Image Velocimetry γιατί δείχνει το κατά ποσο τα σωματίδια παρακολουθούν τη ροή. Για χαμηλούς Re, όπως στη περίπτωση της παρούσης διπλωματικής, ο χαρακτηριστικός χρόνος για ένα σωματίδιο δίνεται από τη σχέση:

$$t_o = \frac{\rho d^2}{18\mu}$$

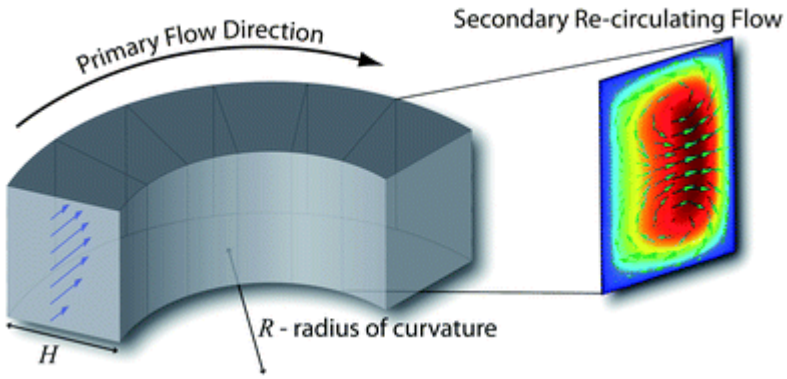
Για αριθμό Stk < 0.1 το σφάλμα της τροχιάς των σωματιδίων σε σχέση με τη ροή στο PIV είναι μικρότερο του 1%.

Ένας επιπλέον μηχανισμός ανάμιξης: Οι δίνες Dean(Dean Vortices)

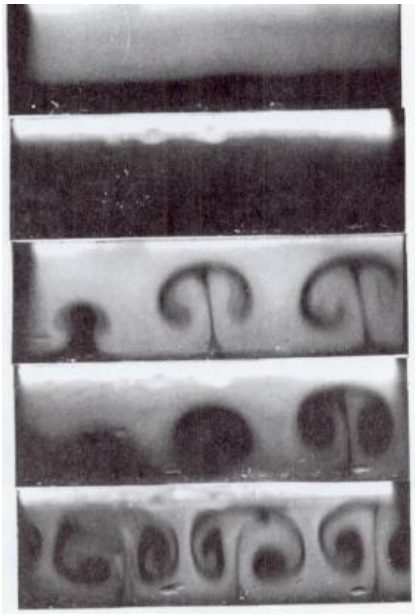
Στρόβιλοι Dean είναι ένα φαινόμενο σε τρισδιάστατη ροή , κατά το οποίο αναπτύσσονται 2 στρόβιλοι κάθετοι στην κατεύθυνση της ροής όταν αυτή διαβαίνει από καμπυλωμένο κανάλι. Ο αριθμός που εκφράζει το φαινόμενο είναι ο αριθμός Dean :

$$D_n = K = \mathrm{Re}\sqrt{\frac{D_h}{R_c}}$$

όπου Rc η ακτίνα καμπυλότητας του μικροκαναλιού και Dh η υδραυλική διάμετρος .



Σχήμα 2.2.1.1 : Η δημιουργία δινών Dean σε καμπυλωμένο κανάλι.

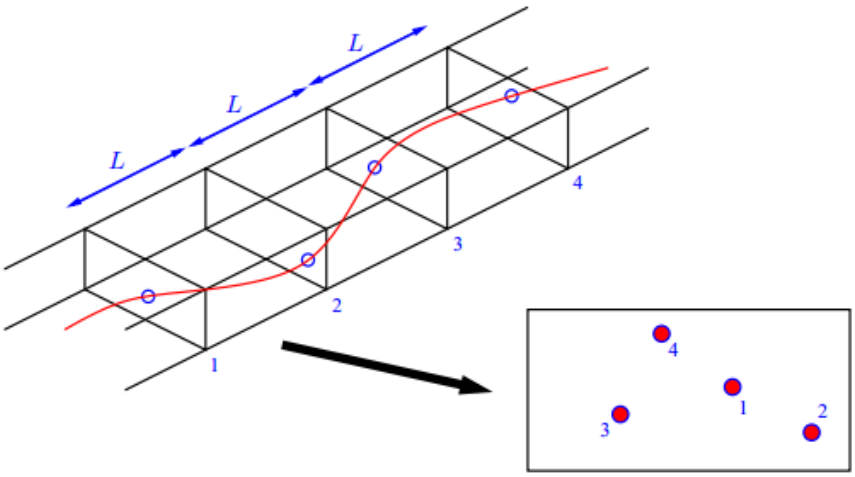


Εικόνα 2.2.1.1 : Εξέλιξη δινών Dean σε αριθμό Dean 430[65].

Δίνες έχουν παρατηρηθεί να δημιουργούνται μετά από ένα αριθμό K=40 και να αναπτύσσονται πλήρως μετά από ένα K=80[65].

2.2.2 Επισκόπιση/ αξιολόγηση της ανάμιξης: οι Χάρτες Poincare.

Μία χρήσιμη μέθοδος[3] για να καταλάβουμε τη μίξη 2 ρευστών είναι να χρησιμοποιήσουμε τις τομές Poincare της ροής. Χάρτης Poincare είναι ένα διάγραμμα στο οποίο κάνοντας τομή κάθετα στην κύρια κατεύθυνση της ροής σημειώνουμε το που τμείται η τροχιά ενός σωματιδίου του ρευστού με την εν λόγω διατομή για πολλά σημεία της ροής ανά συγκεκριμένο διάστημα μήκους .



Σχήμα 2.2.2.1: Κατασκευή μιας τομής Poincare.

2.2.3 ΕΙΔΗ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΩΝ:

Κατηγοριοποίηση μικροαναμικτών: Παθητικοί ή ενεργητικοί.

Ενεργητικοί

Οι ενεργητικοί μικροαναμίκτες χρησιμοποιούν εξωτερική ενέργεια καθώς και ενέργεια άντλησης για να δημιουργήσουν χρονικά μεταβαλλόμενες διαταραχές οι οποίες ανακινούν το ρευστό και επιταχύνουν τη διαδικασία ανάμιξης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανάλογα με το είδος το τρόπου με τον οποίο προσφέρουμε ενέργεια στο σύστημα: μεταβαλλόμενου πεδίου πίεσης(pressure field -driven), ακουστικοί ή υπερήχων (acoustic-ultrasonic driven), μεταβλητής θερμοκρασίας(temperature induced) ,μαγνητουδροδυναμικοί(magneto-hydrodynamic), μικροαναμίκτες ηλεκτροδιαβροχής(electrowetting), ηλεκτρονικητικοί(electrokinetic) καθώς και μικροαναμίκτες φυγοκεντρικοί(Coriolis) και βιολογικής διέγερσης (biological actuators). Πρέπει να αναφέρουμε ότι η ανάγκη να ενσωματωθούν τα συστήματα αυτά που προσφέρουν εξωτερική ενέργεια σε μια μικροσυσκευή αυξάνει το κόστος και πολλές φορές είναι τοπολογικά αδύνατο. Επίσης μηχανισμοί όπου τα υπερηχητικά κύματα και οι μεγάλες βαθμίδες θερμοκρασίας καταστρέφουν ρευστά που έχουν βιολογικό υλικό (πχ DNA).Συνεπώς σπάνια χρησιμοποιούνται για βιολογικές και βιοχημικές εφαρμογές. Παρακάτω ακολουθούν λεπτομέρειες και ερευνητικές εξελίξεις για το κάθε είδος ειδικά:

<u>Μικροαναμίκτες πεδίου πίεσης:</u>

Στις εισόδους του μικροαναμίκτη μπορούν να μεταβάλλονται περιοδικά η ταχύτητα(Glasgow 2003)[47] ή και να αποκόπτεται περιοδικά η άντληση(Deshmuck 2000)[46].

<u>Ηλεκτροκινητικοί μικροαναμίκτες:</u>

Στους μικροαναμίκτες τέτοιου είδους χρησιμοποιούνται μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία για επίτευξη ανάμιξης. Οι Oddy et al. [48]σχεδίασε ένα μικροαναμίκτη στην άκρη του οποίου εισάγονταν ταλαντούμενες τάσεις , συνεπώς μέσω διαδικασίας ηλεκτρώσμωσης δημιουργούνταν μεταβαλλόμενες ροές.

<u>Μικροαναμίκτες ηλεκτροδιαβροχής:</u>

Η ηλεκτροδιαβροχή βασίζεται στον έλεγχο της διεπιφανειακής τάσης μιας σταγόνας μέσω ηλεκτρικού πεδίου. Δημιουργώντας και καταστρέφοντας σταγόνες επιτυγχάνεται ταχεία ανάμιξη.

<u>Μικροαναμίκτες υπερήχων:</u>

Τα ακουστικά κύματα που δημιουργούνται σ ένα μικροκανάλι δημιουργούνται από πιεζοηλεκτρικούς κεραμικούς μετατροπείς. Οι Yang et al.(2000)[49] πέτυχαν μίξη νερού και αιθανόλης με διέγερση ενός πιεζοηλεκτρικού στα 150V και 48 KHz.

Φυγοκεντρικοί μικροαναμίκτες(Centrifugal/ Coriolis actuator):

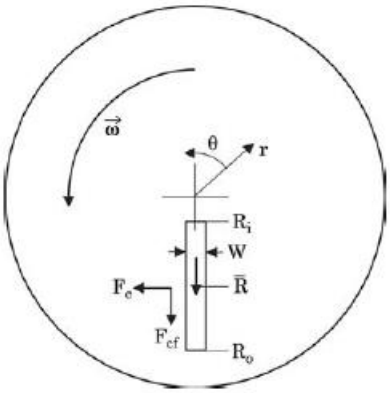
Ένας στρεφόμενος δίσκος στρέφεται με ταχύτητα ω. Το ρευστό εισέρχεται σε γωνιακή θέση Ri και εξέρχεται σε γωνιακή θέση Ro.

Ουσιαστικά στην εξίσωση διατήρησης της ορμής προστίθενται 2 όροι:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} + -\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v} = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \vec{f}_{cf} + \vec{f}_c$$

όπου: $f_{cf} = -\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})$, $fc = -2\vec{\omega}\times\vec{v}$ και αποδεικνύεται ότι ισχύει:

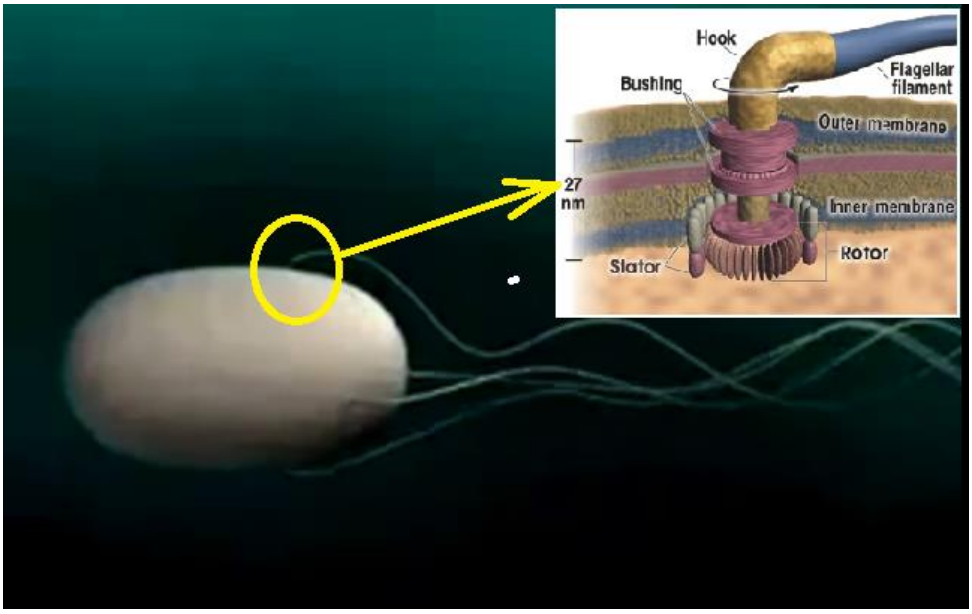
$$fc = \frac{\bar{R}W^2\omega^3}{8\mu} \text{ και } \frac{f_c}{f_{cf}} = \frac{W^2\omega}{8\mu}$$



Σχήμα 2.2.3.1: Σχηματικό διάγραμμα ανάμικτη συνδεδεμένο σε στρεφόμενο δίσκο για εκμετάλλευση των δυνάμεων coriolis/φυγόκεντρου για βελτιωμένη μίξη.

Μικροαναμίκτες Βιολογικής διέγερσης:

Λειτουργούν στο επίπεδο της νανοκλίμακας σε υγρό περιβάλλον με τη βοήθεια βιομοριακών motors από flagellated βακτηρίων όπως η Esherichia coli και η Serratia Marcescens. Ο βακτηριακός (flagellar) κινητήρας έχει διάμετροο 50 nm και αποτελείται από 20 διαφορετικά μέρη. Ο κινητήρας κινεί μακριά πλοκάμια που επιτρέπουν στο βακτήριο να κολυμπά. Η συχνότητα του κινητήρα είναι στα 100 Hz και σε πολλές περιπτώσεις ενισχύει σημαντικά την εγκάρσια στη κίνηση του βακτηρίου μεταφορά μάζας σε ένα μικροαναμίκτη.



Σχήμα 2.2.3.2: Μηχανισμός κίνησης βακτηρίων που βελτιώνει την μικροανάμιξη.

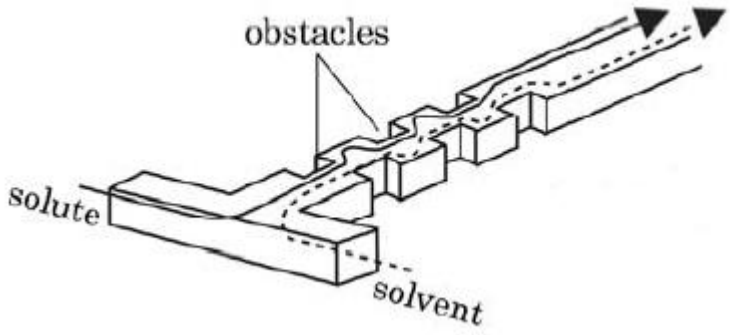
2.2.4 Παθητικοί μικροαναμίκτες

Οι παθητικοί μικροαναμίκτες βασίζονται μόνο στην ενέργεια για την άντληση του ρευστού και χρησιμοποιούν ειδικούς σχεδιασμούς καναλιών για να ανακατανείμουν τη ροή μειώνοντας το μήκος διάχυσης και μεγιστοποιώντας την επιφάνεια διεπαφής(contact surface area). Οι παθητικοί μικροαναμίκτες ήταν οι πρώτοι που κατασκευάστηκαν, είναι αρκετά φτηνοί και μπορούν πιο εύκολα να ενσωματωθούν σε περίπλοκες LOC μικροσυσκευές.

Σχήμα 2.2.4.1: Είδη παθητικών μικροαναμικτών

Μικροαναμίκτες χαοτικής συναγωγής:

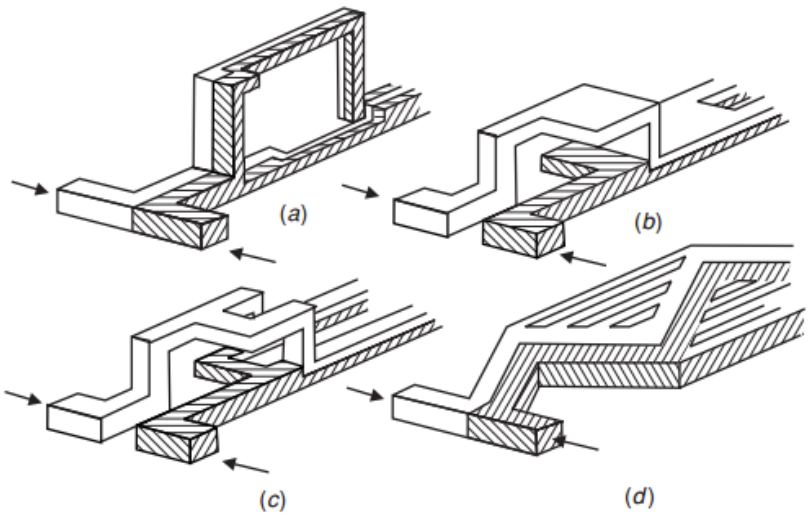
Οι Wong et al.[51] μελέτησαν την επίδραση εμποδίων στα τοιχώματα των καναλιών ενός Τ-μικροαναμίκτη με διαστάσεις διατομής 30x 30 μm. Σε μεγάλους Re (>200) δημιουργούνται δίνες οι οποίες επηρεάζουν το πατερν της στρωτής ροής στον άξονα του καναλιού ευνοώντας την μεταφορά μάζας κάθετα στη ροή. Ένα αρνητικό ήταν όμως η μεγάλη πτώση πίεσης που εισάγεται (χρειάστηκε μια πίεση άντλησης κοντά στα 2 bar)



Σχήμα 2.2.4.2: Μικροαναμίκτης χαοτικής συναγωγής των Wong et al.

Μικροαναμίκτες διαδοχικής διαστρωμάτωσης

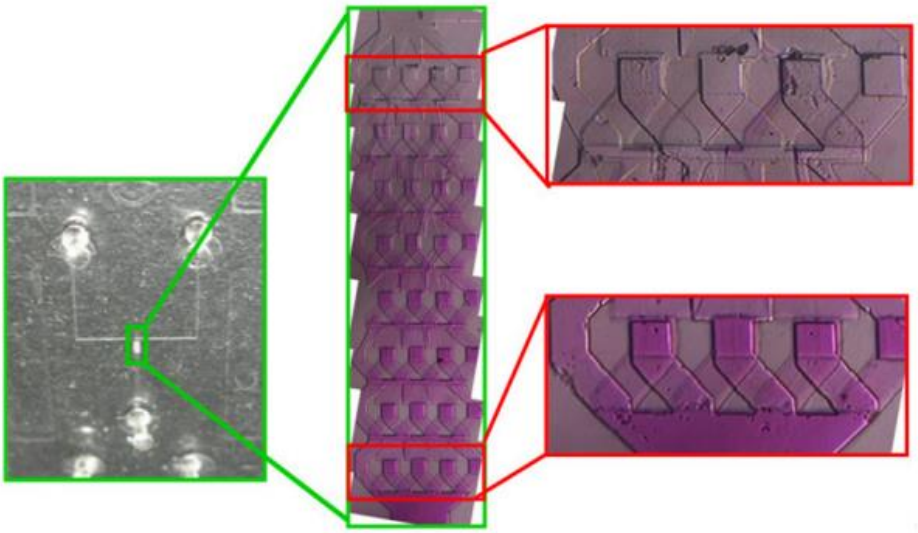
Η διαδοχική διαστρωμάτωση μπορεί να επιτευχθεί σε ένα επίπεδο είτε και σε 3D σχεδιασμούς, όπως βλέπουμε παρακάτω.



Σχήμα 2.2.4.3: Μικροαναμίκτες τύπου διαδοχικής διαστρωμάτωσης(split and recombine).Οι a, b είναι των Branebjerg et al.[52], ο c των Manson et al.[53] και ο d των He et al.[54].

Μικροαναμίκτες παράλληλης διαστρωμάτωσης:

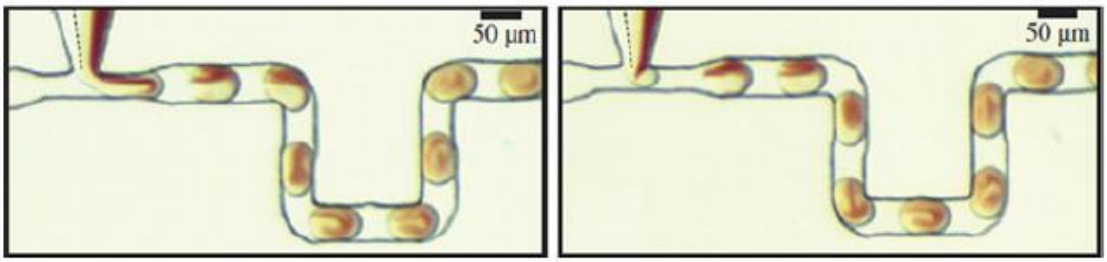
Οι Cha et al.[55] έφτιαξαν το παρακάτω μικροαναμίκτη όπου η ροή διαχωρίζεται και ξαναενώνεται σε παράλληλες διαδρομές:



Σχήμα 2.2.4.4: Οι Cha et al. πέτυχαν 90% ανάμιξη με χρήση της παραπάνω γεωμετρίας παράλληλης διαστρωμάτωσης.

Μικροαναμίκτες σταγονιδίων

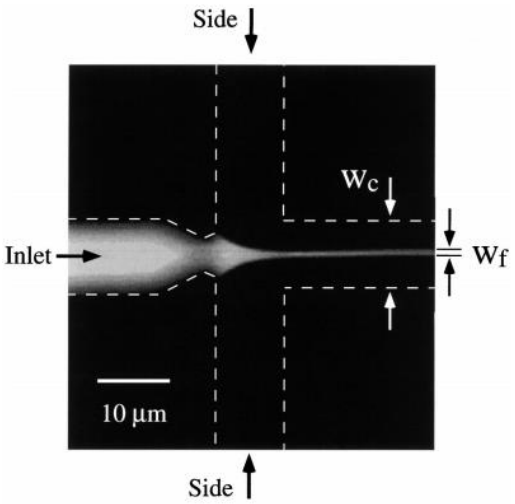
Οι Bringer et al. [56]κατάφεραν να δημιουργήσουν συνθήκες χαοτικής συναγωγής μέσω της δημιουργίας μικροσταγόνων. Οι μικροσταγόνες αλληλεπιδρώντας με το τοίχωμα κατά τις στροφές δημιουργούν περιοχές ανακυκλοφορίας στο ρευστό ευνοώντας τη μεταφορά μάζας .



Μικροαναμίκτες σταγονιδίων των Bringer et al.

Μικροαναμίκτες υδροδυναμικής εστίασης(hydrodynamic focusing):

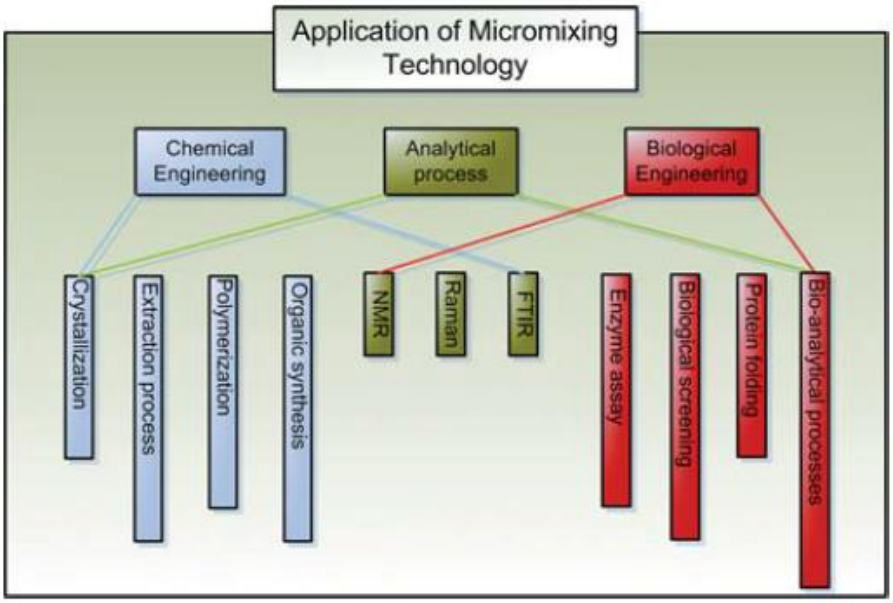
Κατά την υδροδυναμική εστίαση ένα διάλυμα το οποίο διοχετεύεται από το κεντρικό κανάλι διαρρέει μεταξύ της ροής 2 εξωτερικών ρευστών τα οποία διοχετεύονται από 2 πλαϊνά κανάλια, περιορίζοντας έτσι τη ροή του διαλύματος σε μικρότερο πάχος ροής. Το πάχος αυτό εξαρτάται από τις παροχές των 3 καναλιών. Αφού ο χρόνος ανάμιξης από τη σχέση είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου του μήκους διάχυσης ,x^2=2Dt,(ουσιαστικά του πάχους της μεσαίας ροής), όσο το μειώνουμε τόσο γρηγορότερη θα γίνεται η ανάμιξη. Οι Knight et al. [59]πέτυχαν μικροανάμιξη σε κάτω από 10 μsec σε παροχές της τάξης των νανόλιτρων το δευτερόλεπτο .



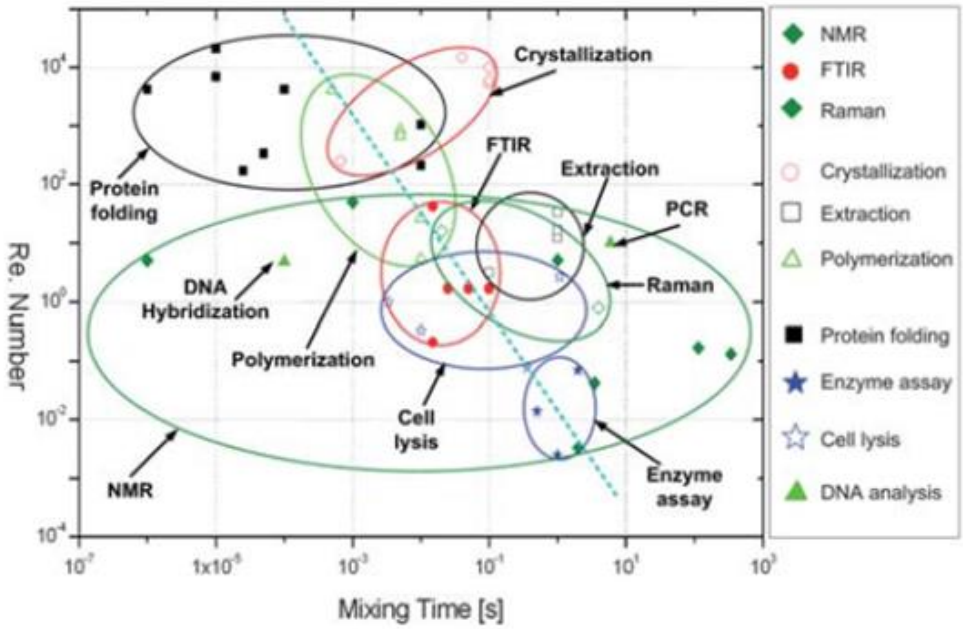
Σχήμα 2.2.4.5: Μικροαναμίκτης υδροδυναμικής εστίασης, Knight et al.[59]

2.2.5 ΕΦΑΜΟΓΕΣ ΜΙΚΡΟΑΝΑΜΙΚΤΩΝ:

Οι τεχνολογίες τύπου Lab on Chip, μέρος των οποίων είναι σχεδόν πάντα και ένας μικροαναμίκτης, είναι αντικείμενο εντατικής έρευνας τις τελευταίες 2 δεκαετίες με εφαρμογές κυρίως στα πεδία της χημείας και της βιολογίας. Πρόσφατα ο συνδυασμός της μικρορευστονικής και της βιοιατρικής τεχνολογίας οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη των LOC εφαρμογών στην ιατρική διάγνωση, την discovery ναρκωτικών και την έρευνα(stem cell research).



Σχήμα 2.2.5.1: Κατηγοριοποίηση εφαρμογών μικροαναμικτών ανάλογα με το επιστημονικό πεδίο.



Σχήμα 2.2.5.2: Κατηγοριοποίηση μικροαναμικτών για κάθε διαδικασία σε σχέση με το χρόνο ανάμιξης.

Εφαρμογές σε χημικές αντιδράσεις:

Αρκετά συστήματα στη βιομηχανία και σε εργαστήρια χρησιμοποιούν μικρορευστομηχανική τεχνολογία σε εφαρμογές όπως κρυσταλλοποιήση(crystallization), extraction, πολυμερισμός(polymerization),οργανική σύνθεση(organic synthesis) .Στη χημική βιομηχανία, οι διαδικασίες χημικών αντιδράσεων χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: σειριακές , συνδυασμένες και πολλαπλές(multi-mode).Οι περισσότερες χημικές εφαρμογές έχουν ταυτόχρονη (simultaneous) ή σειριακή διάταξη μίξης, με εξαίρεση τις εφαρμογές καταλυτών όπου έχουν κυρίως multimode mixing configurations. Το όφελος των μικροαναμικτών σε αυτές τις εφαρμογές είναι ο ιδιαίτερα μικρός χρόνος της διαδικασίας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους της παραγωγής.

Εφαρμογές κρυσταλλοποίησης: Η κρυσταλλοποίηση παίζει ένα σημαντικό ρόλο στη χημική βιομηχανία και ειδικότερα στην ανάπτυξη φαρμάκων, το σχεδιασμό καταλυτών και στη παραγωγή φωτογραφικών υλικών. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, η κρυσταλλοποίηση σε μικροαναμείκτες(micromixing crystallization) δίνει υψηλή ευελιξία και ελεγξιμότητα **.** Τα δύο βασικά στάδια της κρυσταλλοποίησης είναι η πυρηνοποίηση και η κρυσταλλική ανάπτυξη(crystal growth).Κατά την πυρηνοποίηση, ο υπερκορεσμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός και το επίπεδο του υπερκορεσμού(supersaturation) εξαρτάται από τον τοπικό ρυθμό ανάμιξης. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση μεταξύ τοπικής ανάμιξης και τοπικού υπερκορεσμού είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Οι ερευνητές αξιολογούν αυτές τις διεργασίες κρυσταλλοποίησης χρησιμοποιώντας κυρίως T και Y μικροαναμείκτες σε τυρβώδη ροή(Re >2300) , παράγοντας μεγάλες ποσότητες κρυσταλλικών προϊόντων. Για παράδειγμα, ο Stahl et al. [10] μελέτησε την κρυσταλλοποίηση του βενζοικού οξέος σε ένα T μικροαναμίκτη που αναμίγνυε υδροχλωρικό οξύ και υγρό διάλυμα(aqueous sodium benzoate) σε αριθμούς Re 6000-7000. Οι Haselhuhn και Kind[11] εργάστηκαν πάνω στην precipitation του calcium oxalate σε ένα Y μικροαναμείκτη εν σειρά με ένα σωλήνα αντίδρασης με ένα Re=5300 μέσα στο σωλήνα. Ο Schwarzer et al. εξέτασε precipitation νανοσωματιδίων θειούχου βαρίου(barium sulfate) σε ένα T μικροαναμείκτη σε Re=200-15000.

Εφαρμογές σε χημικό διαχωρισμό(extraction processes):Μικροαναμείκτες χρησιμοποιούνται κυρίως για χημικό διαχωρισμό υγρού από υγρό(liquid-liquid extraction).Οι διαδικασίες διαχωρισμού χωρίζονται σε 2 στάδια:αρχή διασποράς(formation of dispersion) και φάση εξαγωγής (subsequent phase seperation for extraction). Ο κύριος παράγοντας είναι η μεταφορά μάζας κατά μήκος της επιφάνειας των 2 φάσεων. Για να επιτευχθεί διαχωρισμός φάσης απαιτείται επαρκής ανάμειξη και dispersion. Οι μικροαναμείκτες , με την υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο και το μικρό μήκος ανάμιξης είναι ικανοί να διαχωρίσουν τα ρευστά σε μικρά στοιχεία και για αυτό προτιμούνται για τέτοιες διαδικασίες. Ο Freitas et al. [11]ασχολήθηκε με ένα interdigital micromixer για την ασηπτική (aseptic) παραγωγή μικροσφαιρών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εξαγωγής διαλύματος(solvent extraction) δείχνοντας πως τα μικροσφαιρίδια για παρεντερικά φάρμακα (parenteral drugs) μπορούν να παραχθούν από μια ολοκληρωμένη διαδικασία

βασισμένη σε ένα μικροαναμείκτη. Οι Mae et al.[12] μελέτησαν 2 είδη split and recombination μικροαναμικτών για το διαχωρισμό φαινόλης από δωδεκάνη(dodecane) σε ένα δευτερόλεπτο με μία παροχή 5-20 L/h.Έδειξαν ότι οι μικροαναμίκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μαζική παραγωγή. Οι Sprogies et al. [13]αξιολόγησαν ένα στατικό μικροαναμίκτη(static micromixer) για ροή από εξαγωγή(extraction) μέσω γαλακτοποίησης καθώς και αξιολόγησαν την απόδοσης της γαλακτοποίησης χωρίς επιφανειοδραστική ουσία. Οι Okubo et al. [14]αξιολόγησαν διαδικασίες ταχείες εξαγωγής(rapid extraction processes) για τη συνένωση σταγονιδίων σε χρονικό διάστημα 1 δευτερολέπτου και ροές 3-20 ml/min.

Εφαρμογές πολυμερισμού: Πολυμερισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία μονομερή ενώνονται για να δημιουργήσουν μια πολυμερική αλυσίδα. Σε μια αντίδραση πολυμερισμού είναι συχνά επιθυμητό να ελέγχουμε το μοριακό βάρος της αλυσίδας. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν το μοριακό βάρος όπως η θερμοκρασία, η συγκέντρωση του οξυδικού εκκινητή κ.α. Το μεγάλο πλεονέκτημα όμως της χρήση μικροαναμικτών είναι η μεγάλη ικανότητα για θερμορύθμιση λόγω του μεγάλου λόγου επιφάνεια προς όγκο που έχουν. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι οι μικροαναμίκτες έχουν συνήθως πολύ μικρό μήκος ανάμειξης και επιτρέπουν τη γρήγορη μεταφορά μάζας , πολύ πιο γρήγορα από τη χρονική κλίμακα της αντίδρασης πολυμερισμού. Οι Iwasaki , Yoshida[15] και Rosenfeld χρησιμοποίησαν μικροαναμίκτες για να ελέγξουν τη θερμοκρασία σε μια αντίδραση πολυμερισμού. Οι Nagaki et al.[16] χρησιμοποίησαν μικροαναμίκτες με πολύ γρήγορη ανάμιξη για να ελέγξουν το μοριακό βάρος και την πολυδιασπορά(polydispersity) σε ένα μεγάλο αριθμό Re(0.1<Re<1000).

Εφαρμογές σε οργανική σύνθεση: Οργανική σύνθεση χρησιμοποιώντας μικροκανάλια χρησιμοποιείται ευρέως στην δίωξη ναρκωτικών και την ανάπτυξη διαδικασιών(process developement). Πολλά είδη αντιδράσεων έχουν μελετηθεί όπως η πρόσθεση Michael (Michael addition), η συμπύκνωση Knovenagel (Knovenagel condensation),η σύνθεση Witting(Witting synthesis),η αντίδραση Hantzsch(Hantzsch reaction), σε εργαστηριακό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο. Οι Chambers και Spink[17] σχεδίασαν ένα μικροαναμίκτη με μορφη σερπαντίνας για να αναμείξουν fluorine και άζωτο με ταυτόχρονη αντίδραση με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία. Οι Suga et al[18] χρησιμοποιήσαν ένα μικροαναμίκτη τύπου multilamination στον οποίο γινόταν ανάμιξη και αντίδραση ιόντων N-acyliminium με αρωματικό υδρογονάνθρακα. Οι Kim et al.[19] έφτιαξαν ένα μικροαναμίκτη από PDMS με σειρές οδόντων για ανάμιξη και αντίδραση. Γλυκόζη και οξυδάση γλυκόζης(glucose oxidase- GOX) εισάγονταν στο μικροαναμίκτη και η τελική ενζυματικά καταλυόμενη αντίδραση της γλυκόζης με οξυγόνο παρήγαγε γλυκονολακτόνη (gluconolactone) και υπεροξείδιο του υδρογόνου(H_2O_2).

<u>Εφαρμογές στην κλινική ιατρική/βιοχημεία:</u>

Στην κλινική ιατρική και τη βιολογία χρησιμοποιούνται ευρέως συσκευές μικρορευστομηχανικής για διάφορες εφαρμογές όπως: Ανάλυση DNA,ανάλυση αίματος , ανίχνευση ενζυμικής βιολογικής δραστηριότητας(biological screening enzyme assays), αναδίπλωση πρωτεϊνών(protein folding) ,ανάλυση συμπτωμάτων για διάφορους νόσους

και ιατροδικαστική. Enzyme assays χρησιμοποιούνται ευρέως στην κλινική και βιολογική χημεία για να μετρηθεί η ενζυματική δραστηριότητα. Η χρησιμοποίηση μικρορευστομηχανικών συσκευών στις εφαρμογές αυτές εισάγει πολλά πλεονεκτήματα όπως μειωμένο κόστος, μικρή χρησιμοποίηση δείγματος για ιδιαιτέρως πολύπλοκα δείγματα ή πολύ χαμηλή συγκέντρωση μορίων.

Οι Yun και Yoon [21]έφτιαξαν ένα τρισδιάστατο μικροαναμίκτη τύπου σερπαντίνας για να εξάγουν το DNA από δείγματα αίματος σε παροχές 10-70 ml/min.

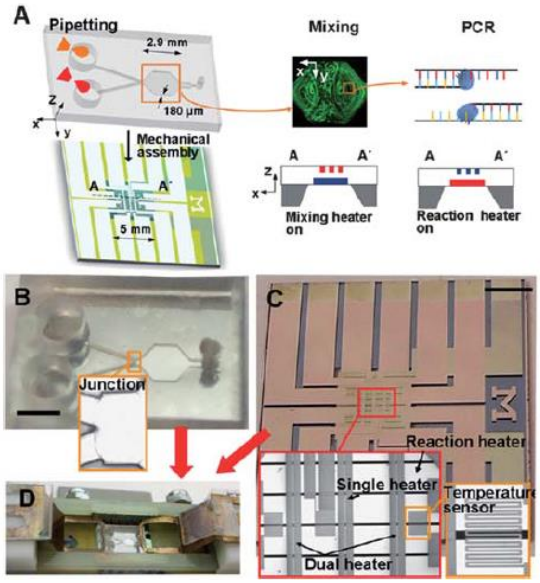
Εφαρμογές σε ενζυμική ανοσοπροσόφηση(enzyme assay):

Η ενζυμική ανοσοπροσρόφηση χρησιμοποιείται ευρέως στη βιοχημεία για να μετρηθεί η ενζυματική δραστηριότητα. Οι Hadd et al.[22] χρησιμοποίησαν ένα T μικροαναμείκτη για ανάμιξη substrate,ενζύμου και inhibitor σε ποσότητες νανολίτρων χρησιμοποιώντας ηλεκτροκινητική ροή. Οι Tseng et al.[23] έφτιαξαν ένα ενεργό μικροαναμίκτη που χρησιμοποιούσε επιφανειακά ακουστικά κύματα(surface acoustic waves) τα οποία παράγονταν από μια ενσωματωμένη σειρά interdigitized transducers(IDTs). Η διαδικασία ανάμιξης περιλάμβανε μία αντίδραση digestion μεταξύ αιμογλοβίνης και τρυπσίνης (trypsin)σε χρονική διάρκεια 2 sec και αριθμό Re=0.071 και παροχή 0.9ml/min.Οι Milller και Wheeler [24] έκανα enzyme assay χρησιμοποιώντας ψηφιακή μικρορευστομηχανική(Digital Microfluidics-DMF).Στη συσκευή αυτή γινόταν ταυτόχρονα η ανάμειξη, η detection και η quantification(ποσοτικοποίηση) μικρών μορίων.

Εφαρμογή σε βιοαναλυτικές διαδικασίες όπως διαχωρισμός και λύση κυττάρων και ανάλυση DNA:

Οι μικροαναμίκτες έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλές εφαρμογές όπως cell culturing, λύση κυττάρων(cell lysis), ανάλυση DNA (DNA analysis) και πλήρως ολοκληρωμένα βιολογικά μ-Total analysis Systems(TAS).Πιο συγκεκριμένα, η αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης-polymerase chain reaction(ή PCR) είναι πολύ σημαντική για τη βιοχημεία. Οι Hashimoto et al.[24] μελέτησαν μια συσκευή PCR συνεχής ροής μαζί με ένα ligation detection reaction(LDR) μίγμα για την ανίχνευση χαμηλής περιεκτικότητας (low-abundance) ανωμαλίες DNA χρησιμοποιώντας ένα Y μικροαναμίκτη.

Οι Kim et al.[25]μελέτησαν τον αυτόνομο πολλαπλασιασμό με PCR ενός κομματιού DNA χρησιμοποιώντας μηχανισμούς συναγωγής ελεγχόμενους με την αλλαγή της θερμοκρασίας του συστήματος.



Σχήμα 2.2.5.3: Η διάταξη PCR των Kim et al.Παρατηρούμε το θάλαμο μικροανάμιξης .Γίνεται διαδοχικά συλλογή(pipetting), μικροανάμιξη και PCR.Η μικροανάμιξη γίνεται με συναγωγή λόγω διαφοράς θερμοκρασίας .Στο C βλέπουμε το μικροσυσκευή θέρμανσης που περιλαμβάνει σένσορες θερμότητας.Οι μονές και διπλές αντιστάσεις είναι για τη μικροανάμιξη και ο reaction heater για το PCR. Στο D βλέπουμε το assembly όλων των εξαρτημάτων.

Οι Heule και Manz[26] έκαναν ένα DNA hybridization assay χρησιμοποιώντας ένα πολυδιαστρωματικού (multilamination) μικροαναμίκτη όπου τα ολιγομερή του DNA(20-μερή) διαφορετικών αλληλουχιών εισάγονταν στο chip σε παροχές 40 και 120μL/min. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η διαδικασία μπορούσε να γίνει άνετα σε 5-7 sec και σε ορισμένες περιπτώσεις 1 sec.

Για την ανάλυση ενδοκυτταρικού υλικού (subcellular) όπως RNA ,DNA και ενδοκυτταρικών πρωτεϊνών απαιτείται κυτταρική λύση. Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για να διασπαστεί ένα κύταρρο: χημική και μηχανική. Οι Chun et al.[27] χρησιμοποίησαν ένα μικροαναμίκτη ενσωματωμένο σε ένα πολυηλεκτρολιτικό εξαγωγέα ιόντων (polyelectrolytic ion extractor) για να μελετηθεί η διαδικασία λύσης του κυττάρου . Ο μικροαναμίκτης πέτυχε γρήγορη και αποδοτική λύση ανθρωπίνων ερυθροκυττάρων με ελάχιστη damage στα λευκά αιμοσφαίρια. Οι Johansson et al.[28]έδειξαν ότι ένας ενεργός μικροαναμίκτης που λειτουργεί με υπέρηχους μπορεί να κάνει επαρκή χημική λύση κυττάρων E.coli K21.Οι Chen et al.[29] πέτυχαν διαχωρισμό και λύση κυττάρων αίματος καθώς και DNA purification διαδοχικά.

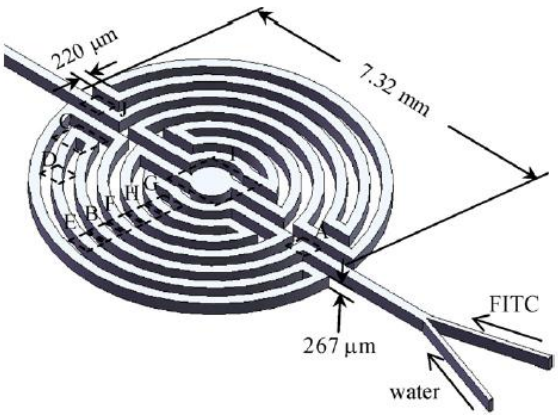
Εφαρμογές σε αναδίπλωση πρωτεινών(protein folding): Η αναδίπλωση πρωτεινών είναι πολύ σημαντική διαδικασία για φυσιολογικές και genomic διαδικασίες γιατί γιατί η αναδίπλωση πρωτεινών σχετίζεται με πολλές κατηγορίες καρκίνων καθώς και γεννετικές διαταραχές. Η χρονική κλίμακα του protein folding είναι τάξης μεγέθους nanosecond μέχρι μερικά msec. Οι Roder et al[30] χρησιμοποίησαν μια παθητική jet mixing τεχνική για αναδίπλωση της πρωτεΐνης pancreatic trypsin inhibitor(BPTI). Η χρονική κλίμακα ανάμιξης ήταν 10 msec και απεδείχθη αποτελεσματική. Μια πιο γρήγορο μέθοδο κατάφεραν οι Chan

et al[31] σχεδίασαν ένα υπερταχύ συνεχής ροής μικροαναμίκτη για να αναδιπλώσουν cytochrome C. Η ολοκληρωμένη ανάμιξη επετεύχθη σε 1-10 μsec επειδή η κλίμακα μήκους ανάμιξης της διάχυσης ήταν 0.1μm. Για την ίδια εφαρμογή οι Bilsel et al. [32] έφτιαξαν ένα παθητικό μικροαναμίκτη και πέτυχαν ανάμιξη σε 25-50 μsec σε Re 150-350. Ενδιαφέρον έχει επίσης η έρευνα των Apetri et al.[33] οι οποίοι μελέτησαν αναδίπλωση της human prion πρωτεΐνης χρησιμοποιώντας ένα capillary μικροαναμίκτη συνεχής ροής, σε χρονική κλίμακα ανάμιξης 100μ sec και πλήρως τυρβώδη ροή(Re 4000-7000).

Εφαρμογές σε ανίχνευση και ανάλυση ουσιών:

Μη καταστροφικές αναλυτικές/ανιχνευτικές μέθοδοι προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε χημικές και βιοχημικές διαδικασίες. Μια από αυτές είναι οι διάφορες τεχνικές φασματοσκοπίας που έχουν εφαρμοστεί για ανάλυση χημικών αντιδράσεων, ανίχνευση protein folding και refolding.Επίσης η NMR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση μοριακών δομών. Προσφάτως πολλοί ερευνητές εφαρμόζουν τις παραπάνω μεθόδους σε μικροσυσκευές οι οποίες συνήθως εμπεριέχουν και μικροαναμίκτες. Για παράδειγμα, οι Ahola et al.[34] έδειξαν ότι οι τοπικές εντάσεις σημάτων μπορούσαν να ανιχνευτούν σε εμπορικό μικροαναμίκτη που δρα ταυτόχρονα και ως αντιδραστήρας. Ο μικροαναμίκτης μετρούσε τη κατανομή της ταχύτητας του υγρού μέσω NMR. Ο αριθμός Re κυμαινόταν 10-3<Re <10 και με χρόνους ανάμιξης 10-6<Tmix<100.
Όσον αφορά φασματοσκοπία FT-IR , η οποία είναι πολύ χρήσιμη για τη μη καταστροφική διερεύνηση της δομικής πληροφορίας συνθετικών προϊόντων, την διερεύνηση μετάλλαξης πρωτεϊνών και τη κατασκευή φαρμάκων, οι μικροαναμίκτες παίζουν σημαντικό ρόλο στις χημικές αντιδράσεις που εμπεριέχουν τα παραπάνω. Συγκεκριμένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος Time Resolved FT-IR για μελέτη ταχύτατων χημικών αντιδράσεων σε χρονικές κλίμακες picosec ως millisec. Οι Hinsmann et al.[35] παρουσίασαν ένα 3D Y μικροαναμίκτη για να κάνουν χημικές αντιδράσεις σε χρονική κλίμακα 100 msec, Re=1.67 και ταυτόχρονα έκαναν TR-FTIR.Η διάταξη περιλάμβανε μεταβλητό πάχος μικροκαναλιού για έλεγχο της διαδικασίας και του χρόνου ανάμιξης.
Raman φασματοσκοπία: Η Raman φασματοσκοπία έχει πολλές εφαρμογές σε χημεία και βιολογία και βασίζεται στη ανελαστική σκέδαση του φωτός. Έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες φασματοσκοπικές μέθοδος λόγω της επιτόπου ανάλυσης πολυμερών, με μεγάλη ευαισθησία σε οργανικά μόρια καθώς και μη fluorescent δείγματα.Οι Barnes et al.[36] χρησιμοποίησαν ένα focusing μικροαναμίκτη για monitoring droplet πολυμερισμού με τη χρήση Raman φασματοσκοπίας. Οι Rinke et al.[37] χρησιμοποίησαν επιτόπια φασματοσκοπία Raman για να κάνουν monitoring την υδρόλυση της acetal σε ένα T μικροαντιδραστήρα. Η χωρική ακρίβεια για ανάλυση των συγκεντρώσεων ήταν 10 μm.

Οι Li et al.[62] μελέτησαν ένα παθητικό μικροαναμίκτη τύπου λαβυρίνθου για ενίσχυση των μηχανισμων ροής Dean . Για πρώτη φορά σε 2 D παθητικό μικροαναμίκτη παρατηρήθηκαν multiple flow bands σε Re = 5 μόνο. Δηλαδή σπάσιμο της συμμετρίας των 2 δινών Dean που παρατηρούνται στους συνήθεις μικροαναμίκτες τύπου σερπαντίνας.



Σχήμα 2.2.5.4: Μικροαναμίκτης τύπου λαβυρίνθου των Li et al.(2012).

Μια ακόμη βιοχημική εφαρμογή είναι η ενζυματική πέψη(enzymatic digestion) του DNA με περιοριστικά ένζυμα τα οποία αναγνωρίζουν και κόβουν την αλυσίδα σε συγκεκριμένες θέσεις. Αυτά τα ένζυμα χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστεί μια αλλαγή στο γενετικό κώδικα(single nucleotide polymorphism ή νουκλεικός πολυμορφισμός SNP) που συμβαίνει σε ένα σημείο όπου κανονικά τα ένζυμα αυτά θα έκοβαν. Η αποτελεσματική ανάμειξη του ενζύμου με το DNA είναι κρίσιμη για να έχουμε μια γρήγορη διαδικασία ζύμωσης (digestion).

2.2.6 Κατασκευή μικροαναμικτών

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι κατασκευής μικροκαναλίων, οι σημαντικότερες εκ των οποίων αναφέρονται παρακάτω:

<u>Φωτολιθογραφία(Photolithography)</u>

Η φωτολιθογραφία εμφανίστηκε για πρώτη φορά στη κατασκευή μικροηλεκτρονικών. Υπάρχει και η μέθοδος της electron lithography, x-ray lithography και ion lithography αλλά για μικροαναμίκτες χρησιμοποιείται κυρίως φωτολιθογραφία(κυρίως με ακτινοβολία UV) και κάποιες φορές λιθογραφία ακτίνων χ. Οι παραπάνω μέθοδοι περιορίζονται σε 2D μικροαναμίκτες καθώς δεν υπάρχει ιδιαίτερος έλεγχος στη τρίτη διάσταση. Η βασική αρχή είναι ότι το φως διερχόμενο μιας κατάλληλα διαμορφωμένης φωτοανθεκτικής (photoresistive) μάσκας πέφτει πάνω σε φωτοευαίσθητο υλικό διαμορφώνοντας το επιθυμητό δισδιάστατο pattern των καναλιών.

<u>Chemical Vapor Deposition(CVD)</u>

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια χημική αντίδραση μεταξύ αέριων αντιδρώντων για παραγωγή στερεού προϊόντος σε μορφή λεπτού υμένα σε θερμαινόμενη επιφάνεια.

Ένας κατάλογος με τις χημικές αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται φαίνεται παρακάτω:

Material	Chemical Reactions
Silicon	$SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2\uparrow$
	$SiH_2Cl_2 \rightarrow SiCl_2 + 2H_2\uparrow$
	$SiCl_2 + H_2 \rightarrow Si + 2HCl\uparrow$
Polysilicon	$SiH_4 \xrightarrow{630^\circ C, 60Pa} Si + 2H_2\uparrow$
Silicon dioxide	$SiH_4 + O_2 \xrightarrow{430^\circ C, 1bar} SiO_2 + 2H_2\uparrow$
	$SiH_4 + O_2 \xrightarrow{430^\circ C, 40Pa} SiO_2 + 2H_2\uparrow$
	$Si(OC_2H_5)_4 \xrightarrow{700^\circ C, 40Pa} SiO_2 + Gas\uparrow$
	$Si(OC_2H_5)_4 + O_2 \xrightarrow{400^\circ C, 0.5bar} SiO_2 + Gas\uparrow$
	$SiH_2Cl_2 + 2N_2O \xrightarrow{900^\circ C, 40Pa} SiO_2 + Gas\uparrow$
	$SiH_4 + 4N_2O \xrightarrow{350^\circ C, plasma, 40Pa} SiO_2 + Gas\uparrow$
Silicon nitride	$SiH_2Cl_2 + 4NH_3 \xrightarrow{750^\circ C, 30Pa} Si_3N_4 + Gas\uparrow$
	$3SiH_4 + 4NH_3 \xrightarrow{700^\circ C, plasma, 30Pa} Si_3N_4 + Gas\uparrow$
	$3Si + 4NH_3 \xrightarrow{300^\circ C, plasma, 30Pa} Si_3N_4 + 6H_2\uparrow$
Silicide	$4SiH_4 + 2WF_6 \xrightarrow{400^\circ C, 30Pa} 2WSi_2 + 12HF\uparrow + 2H_2\uparrow$
	$4SiH_2Cl_2 + 2TaCl_5 \xrightarrow{600^\circ C, 60Pa} 2TaSi_2 + 18HCl\uparrow$
	$2SiH_4 + TiCl_4 \xrightarrow{450^\circ C, plasma, 30Pa} 2TiSi_2 + 4HCl\uparrow + 2H_2\uparrow$

Σχήμα 2.2.5.5: Κατάλογος χρήσιμων χημικών αντιδράσεων για κατασκευή μικροαναμικτών.

<u>Θερμική οξείδωση(thermal oxidation)</u>

Χωρίζεται σε ξηρή και υγρή οξείδωση σε θερμοκρασίες 800-1200 oC.Το πάχος του οξειδίου σιλικόνης μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια για τη δημιουργία των επιθυμητών καναλιών.

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \text{ (dry)}$$

$$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + H_2 \uparrow \text{ (wet)}$$

<u>Physical Vapor Deposition</u>

Σε αντίθεση με τη μέθοδο CVD και τη μέθοδο θερμικής οξείδωσης, η PVD δημιουργεί υμένια σε ένα υλικό-βάση κατευθείαν από μια στερεή πηγή. Η μέθοδος είναι ιδιαιτέρως προτιμητέα για δημιουργία φιλμ αγωγών υλικών όπως μέταλλα και πυριτίδια (silicides). Η μέθοδος αποτελεί ουσιαστικά σύνθεση 2 διαφορετικών μεθόδων: της εξάτμισης (evaporation) και επίστρωσης(sputtering).Η εξάτμιση αφήνει ένα λεπτό φιλμ πάνω σε ένα υπόστρωμα (substrate) από sublimation ενός θερμαινόμενου υλικού -πηγή σε κενό. Η θέρμανση μπορεί να γίνει με αντιστάσεις, laser ή με εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων. Η επίστρωση (sputtering) χρησιμοποιεί ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για να ιονιστεί ένα χημικά αδρανές αέριο, συνήθως αργό ώστε να έρθει σε κατάσταση πλάσματος. Κατόπιν, τα θετικά ιόντα αργού επιταχύνονται και βομβαρδίζουν το υλικό. Τα άτομα του υλικού τότε ξεκολλούν από αυτό, και συμπυκνώνονται πάνω στο υλικό βάση σε μορφή λεπτού φιλμ.

ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΚΑΝΑΛΙΑ ΠΟΛΥΙΜΙΔΙΟΥ ΣΕ POLYIMIDE(PI)

Το πολυιμίδιο (Polyimide) είναι ένα αρνητικά φωτοανθεκτικό(negative photoresistive) υλικό και έρχεται σε μορφή Proimide 348-349 ή PI-2732. Υμένια πολυιμιδίου (polyimide) έχουν ένα πάχος στρώματος 40 μm. Η fluorinated polyimide είναι οπτικά διαφανής. Σαν υλικό βάσης(substrate) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο, τιτάνιο και πλατίνα. Το πολυιμίδιο (polyimide) μπορεί να χαραχτεί με πλάσμα οξυγόνου(oxygen plasma etching), φωτολιθογραφία ,RIE(reactive ion etching) και lamination ,καθώς και με συνδυασμό των παραπάνω.

Παρακάτω παρατίθενται φυσικές ιδιότητες του PI:

ρ=1420kg/m3.

k=0.1-0.35(W/K)

γ (thermal expansion coefficient)=30-60E-6K^{-1}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ DNA (DNA TRANSPORT)

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ DNA

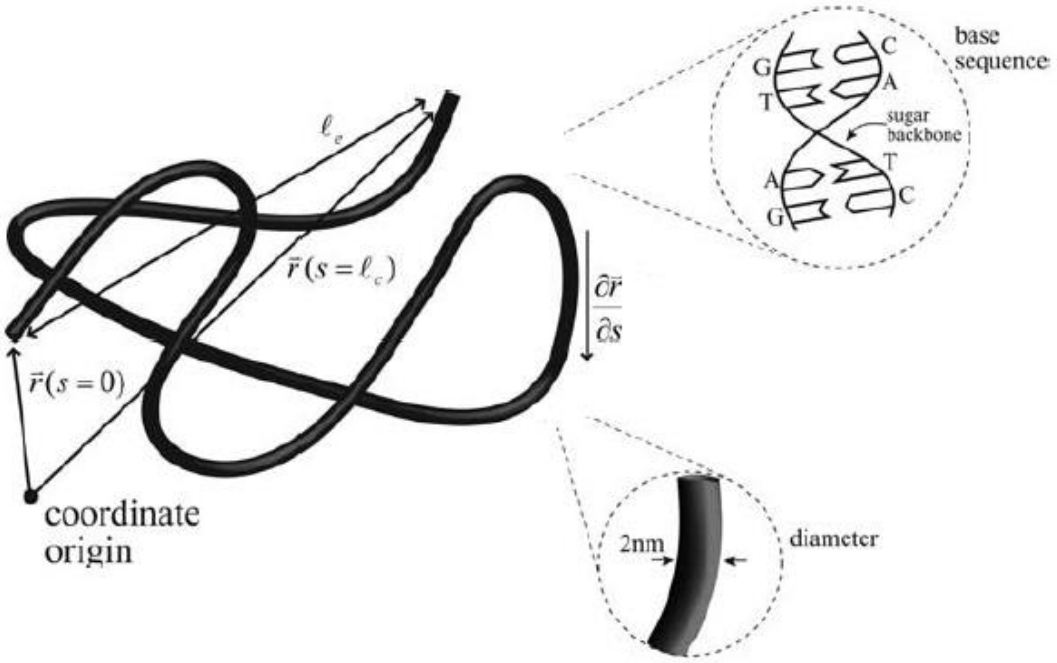
Το DNA (δεσοξυριβονουκλεικό οξύ) υπάρχει σε διάφορες μορφές διπλής έλικας(double stranded) όπως A-DNA, B-DNA και Z-DNA.Το B-DNA έχει τις φυσικές ιδιότητες ενός γραμμικού -μη διακλαδωμένου μακρομορίου, ανεξάρτητα από την αλληλουχία των βάσεων(A,T,C,G). Οι αλυσίδες ενώνονται με δεσμούς υδρογόνου, οι οποίοι σπάνε όταν προσφέρουμε θερμότητα αφήνοντας μόνους τους κλώνους(ss-DNA ή single stranded DNA).Κάθε αλυσίδα έχει χοντρικά διάμετρο 2nm.

Θεωρώντας το μοντέλο δυναμικής του Zimm και υποθέτοντας ότι η effective solid particle radius προσσεγγίζεται ως <rg>/3, καταλήγουμε ότι ο συντελεστής διάχυσης του DNA σε υδατικό διάλυμα είναι:

$D \cong \frac{K_B T}{2\pi\mu < r_g >}$, όπου μ είναι η κινητικότητα (viscous mobility)για ένα ιόν με hydrated radius α $\mu \cong \frac{1}{6\pi\mu\alpha}$ και <rg> η radius of gyration του μορίου DNA. Η rg είναι μια στατιστική μέτρηση των γραμμικών αποστάσεων μεταξύ των διαφόρων σημείων του κορμού του DNA και ορίζεται ως:

$$\left\langle r_g \right\rangle^2 = \frac{1}{l_c^{\,2}} \int_{s2=0}^{lc} \int_{s1=0}^{s1=s2} \left\langle \left| \vec{r}(s1) - \vec{r}(s2) \right|^2 \right\rangle ds_1 ds_2$$

Το μήκος lc(contour length) ορίζεται ως η προβολή του μήκους μεταξύ των 2 άκρων του DNA σε ένα άξονα, όπως φαίνεται παρακάτω, και κυμαίνεται από 50 kbp(base pairs) για το λ βακτηριοφάγο(l bacteriophage) μέχρι 3.2 Gbp για τον άνθρωπο :



Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικά μήκη σε μία αλυσίδα DNA.

Το βαθμωτό μέγεθος s προέρχονται από το σύστημα συντεταγμένων και ορίζεται ως το μήκος τόξου κατά μήκος του κορμού του πολυμερούς όπου s=0 είναι το ένα άκρο και s= lc είναι το άλλο άκρο. Το le(end to end length) είναι το μήκος από το ένα άκρο στο άλλο.

Πειραματικά έχει βρεθεί ο παρακάτω νόμος για το συντελεστή διάχυσης του DNA στο νερό:

$$D \cong 3 \cdot 10^{-12} \left(\frac{lc}{1\mu m} \right)^{-0.57} \cong 3 \cdot 10^{-10} N_{bp}{}^{-0.57} m^2 / s$$

ΙΔΕΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ DNA

(IDEAL CHAIN MODELS FOR BULK DNA PHYSICAL PROPERTIES)

Τα μοντέλα που προσπαθούμε να αναπτύξουμε έχουν σαν βασική είσοδο το lc, και μια μεταβλητή που μπορούμε να μετρήσουμε που αφορά το configuration του DNA σε bulk διάλυμα , την radius of gyration<rg>. Τα μοντέλα έχουν τέτοιες ιδιότητες ώστε το <rg> να μπορεί να υπολογισθεί από το lc.

Μοντέλο Kratky -Porod(wormlike chain)

Το συγκεκριμένο μοντέλο αντιμετωπίζει το πολυμερές σαν ιδεατό, μακροσκοπικό, αξονοσυμμετρική δέσμη με flexural rigidity YI(Nm^2) όπου Y(pa) το μέτρο ελαστικότητας του Young και I(m^4) είναι η ροπή αδράνειας(second moment of area of the beam), η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$YI = \frac{3\langle r_g \rangle^2 k_B T}{l_c}$$

Για θερμοκρασία δωματίου, YI=2E-28Nm^2.

Η μέση τιμή του le υπολογίζεται ως εξής:

$$\langle l_e \rangle = \sqrt{2\frac{YI}{k_B} l_c - 2\left(\frac{YI}{k_B}\right)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{l_c k_B T}{YI}\right)\right]}$$

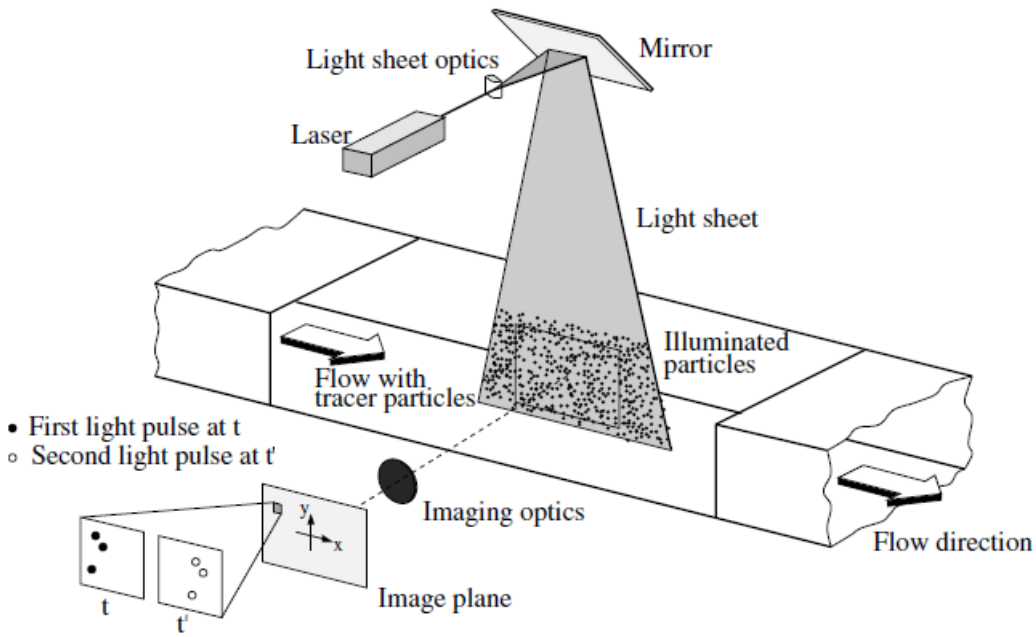
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1: Η ΜΕΘΟΔΟΣ PIV

Η μέθοδος PIV(Particle Image Velocimetry) είναι μία μη επεμβατική μέθοδος μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων μιας ροής.

Η μέθοδος PIV ξεκίνησε τη δεκαετία του 70 και έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους όπως η ανεμομετρία Laser-Doppler , η ανεμομετρία θερμού νήματος και η ανεμομετρία με σωλήνες Pitot, κύρια εκ των οποίων είναι:Η PIV είναι μη επεμβατική μέθοδος, μπορεί να μετρηθεί στιγμιαία όλο το πεδίο ταχυτήτων, ταυτόχρονα για πολλά σημεία (whole -field method) , και με μεγάλη ακρίβεια.

Στη μέθοδο αυτή η ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο του φύλου φωτός προκύπτει από τη μέση στατιστικώς μετατόπιση ,για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα dt, αριθμού σωματιδίων , τα οποία περιέχονται σε παράθυρο ορθογώνιου σχήματος που περιλαμβάνει το σημείο μέτρησης.



Σχήμα 4.1.1: Η αρχή μέτρησης σε διάταξη PIV.

Η μετατόπιση των σωματιδίων υπολογίζεται από τη σύγκριση 2 εικόνων που έχουν ληφθεί σε χρονική απόσταση dt, με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης(cross correlation) .Διαιρούμενη η μετατόπιση με το διάστημα του χρόνου παίρνουμε τη ταχύτητα του στοιχείου ρευστού στο correlation window.

$$Velocity = \frac{Displacemet(pixels) \cdot CF}{Dt}$$

όπου CF (calibration factor) είναι η αντιστοιχία pixel σε μικρόμετρα και εξαρτάται από το φακό της κάμερας που χρησιμοποιούμε.

Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\varphi(\tau_x,\tau_y)=\iint I_1(x,y)I_2(x+\tau_x,y+\tau_y)dxdy$$

Η μη συνεχής στην πραγματικότητα συνάρτηση ετεροσυσχέτησης υπολογίζεται με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier:

$\varphi(\tau_x,\tau_y)=F^{-1}[F(I_1)F^*(I_2)]$ όπου F* ο συζυγής μιγαδικός(complex conjugate) του Μετασχηματισμού Φουριε.

Οι F(I1) και F(I2) υπολογίζονται ως εξής:

$$\mathrm{I}(k\Delta x,l\Delta y)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}F(m,n)e^{i2\pi(\frac{mk}{M}+\frac{nl}{L})}$$

$$F(m,n)=\frac{1}{MN}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N-1}I(k\Delta x,k\Delta y)e^{-i2\pi(\frac{mk}{M}+\frac{nl}{L})}$$

όπου Δx,Δy οι διαστάσεις ενός pixel, και k=1,....M, l=1,.....N οι αρίθμηση των pixel στις 2 διαστάσεις. Για βέλτιστα αποτελέσματα της στατιστικής μεθόδου είναι σημαντικό η μετατόπιση των σωματιδίων να μη ξεπερνά το 1/4 του εκάστοτε correlation window.Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της ετεροσυσχέτισης που δίνουν ανά περιπτώσεις καλύτερα αποτελέσματα από την κλασσική μέθοδο όπως: FFT(frequency based), Phase only correlation, Ensemble(για να μειωθεί ο θόρυβος από την κίνηση Brown) ,Hart, άμεση συσχέτιση(direct)

4.2: ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PIV

Το ολικό σφάλμα για ένα διάνυσμα μετατόπισης χωρίζεται σε συστηματικό σφάλμα και σε υπόλοιπα σφάλματα(residual). Το συστηματικό σφάλμα οφείλεται στην στατιστική μέθοδο της ετεροσυσχέτισης και ειδικότερα στα σημεία όπου υπάρχουν βαθμίδες ταχύτητας .

$e_{tot}=e_{sys}+e_{resid}$

Στην πράξη βέβαια είναι ιδιαίτερα δύσκολο να διαχωρίσουμε τα συστηματικά από τα υπόλοιπα σφάλματα οπότε προτιμούμε να χωρίσουμε τα σφάλματα σε bias error(β) και τυχαίο σφάλμα(σ-random). Το τυχαίο σφάλμα οφείλεται στην εκτίμηση στην κορυφή της ετεροσυσχέτισης και το bias σφάλμα οφείλεται στο ότι τα σωματίδια δεν ακολουθούν επακριβώς τη ροή, ιδιαίτερα σε σημεία υψηλής στροβιλότητας.

$e_{tot}=e_{bias}+e_{rms}$

Το συνολικό σφάλμα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N}-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_o)^2} = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2}$$

Το σ μπορεί να μειωθεί παίρνοντας μεγάλο αριθμό δεδομένων και βγάζοντας το μέσο όρο. Το β είναι συνήθως μια περιοδική διακύμανση και δε μπορεί να εξαλειφθεί παίρνοντας μεγάλο αριθμό δεδομένων.

Μία μέθοδος για να υπολογισθεί το bias(β) και το random error(σ) είναι να μελετηθούν PIV αναλύσεις από στατική (quiscent) ροή ενός single exposed particle ζεύγους εικόνων καθώς και double exposed single images[60],[61].

Αφού έχουμε πάρει τα δεδομένα των μετατοπίσεων, κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας εισάγεται το σφάλμα λόγω της κίνησης Brown.Για 2 διαστάσεις , το σφάλμα αυτό υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{\Delta x} = \frac{1}{u}\sqrt{\frac{2D}{Dt}} \quad \text{και} \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{\Delta x} = \frac{1}{u}\sqrt{\frac{2D}{Dt}}$$

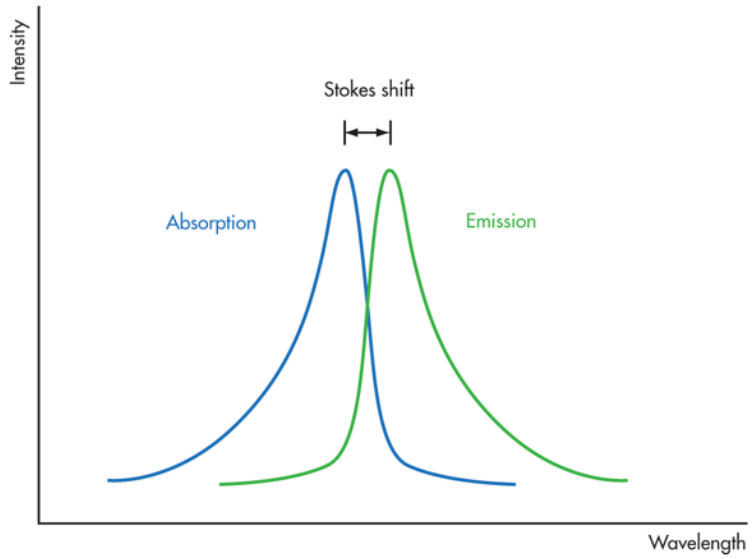
Μία δεύτερη μέθοδος για να υπολογισθεί η ακρίβεια της μεθόδου PIV βασίζεται στην υπολογιστική προσομοίωση κατά την οποία, μεταβάλλοντας μόνο μια παράμετρο τη φορά μπορούν να παραχθούν και επεξεργαστούν τεχνητές εικόνες των σωματιδίων και να συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η τυχαία μετακίνηση των σωματιδίων μέσω κώδικα Monte Carlo και ο μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων(Ο[1000]) για κάθε παράμετρο μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα.

4.3: ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ -ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ[8]

Τα ιδανικά σωματίδια ανιχνευτές που προστίθενται στο ρευστό ακολουθούν την πορεία του ρευστού ακριβώς. Επιπρόσθετα πρέπει να μην επηρεάζουν τη ροή και να μην αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Πρακτικά μπορούμε μόνο να προσεγγίσουμε αυτή την ιδανική κατάσταση. Σημαντικό είναι επίσης να λάβουμε υπόψη και την ικανότητα των σωματιδίων να σκεδάζουν το φως. Χρειαζόμαστε λοιπόν μια βέλτιστη λύση αφού τα μικρά σωματίδια δεν επηρεάζουν τη ροή αλλά έχουν χειρότερες ιδιότητες σκέδασης του φωτός. Η απόδοση (efficiency) της σκέδασης του φωτός καθορίζεται από τη διαφορά του δείκτη διάθλασης ρευστού και σωματιδίων. Σημειώνουμε πως μια μεγάλη διαφορά στη διάμετρο σωματιδίων ανιχνευτών και ρευστού απαιτούν και πολύ μικρή διάμετρο σωματιδίων.

Ο μηχανισμός για την ανίχνευση των σωματιδίων(Stokes Shift) βασίζεται στο γεγονός ότι αυτά απορροφούν το φως του λέιζερ(532nm) και εκπέμπουν φως σε διαφορετικό-μετατοπισμένο μήκος κύματος (560nm) .Συνεπώς εμείς με ένα απλό φίλτρο μπορούμε να

απορροφούμε να αποκόψουμε το μήκος κύματος του λέιζερ και να κρατήσουμε μόνο το επιθυμητό μήκος κύματος που προέρχεται από τα σωματίδια.



Σχήμα 4.3.1 :Φάσμα απορρόφησης και εκπομπής των σωματιδίων ανιχνευτών.

Όταν το σωματίδιο -ανιχνευτής(seed particle) γίνεται αρκετά μικρό, το συνολικό αποτέλεσμα των συγκρούσεων μεταξύ αυτών και ενός αριθμού των μορίων του ρευστού γίνεται ασταθής , αποτρέποντας το σωματίδιο από το να ακολουθήσει τη ροή σε ένα βαθμό , λόγω κίνησης Brown. Σε περιοχές όπου η βαθμίδα της ταχύτητας είναι μικρή, η επίδραση της διάχυσης λόγω κίνησης brown μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια διαδικασία white-noise που αυξάνει την αβεβαιότητα στην οποία μπορεί να υπολογιστεί η μετατόπισης του σωματιδίου. Το σφάλμα υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon_B = \frac{< s^2 >^{0.5}}{\Delta x} = \frac{1}{u}\sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} ,$$

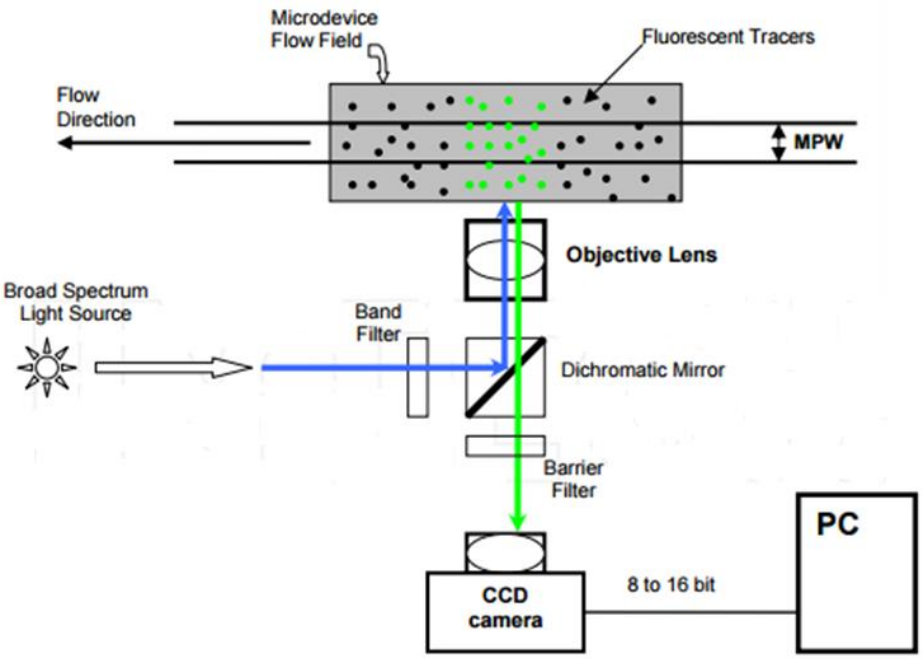
όπου D ο συντελεστής διάχυσης του Einstein $D = \frac{kT}{3\pi\mu d_p}$ και θεωρώντας ότι η μέση τετραγωνική απόσταση διάχυσης είναι $< s^2 >= 2D\Delta t$.

4.4 : Η ΜΕΘΟΔΟΣ MICRO-PIV

Η μέθοδος μ-PIV αποτελείται ουσιαστικά από ένα συμβατικό σύστημα PIV μαζί με ένα μικροσκόπιο και φωσφορίζοντα σωματίδια ανιχνευτές. Ένας συγχρονιστής(sychronizer) συγχρονίζει τη κάμερα και το παλμό του laser ώστε οι φωτογραφίες για την ετεροσυσχέτιση να καταγράφονται ακριβώς τη στιγμή που τα σωματίδια ανιχνευτές φωτίζονται από το laser. Η κάμερα καταγράφει τη εικόνα του μικροσκοπίου και η διαδικασία στατιστική επεξεργασίας για την εξαγωγή των διανυσμάτων της ταχυτητας είναι πανοομιότυπη με αυτή του συμβατικού PIV.Μερικές πρώτες διαφορές φαίνονται παρακάτω:

micro -PIV vs PIV[9]:

- Field of view:30-300 μm vs 30-300mm.
- Vector Spacing : 1-10μm vs 1-10 mm.
- Interrogation cell : 2-20 μm vs 2-20 mm.
- Tracer Particle diameter: 0.3-1 μm vs 3-30 μm.
- Μελέτη κυρίως 2D ροών vs μελέτη και 3D ροών.



Σχήμα 4.4.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος micro-PIV.

4.4.1: ΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ MICRO- PIV

Τα βασικά οπτικά χαρακτηριστικά που αναγράφονται σε κάθε μικροσκόπιο είναι η μεγέθυνση(M) και το numerical aperture(NA) .Η μεγέθυνση δείχνει πόσες φορές η κάθετη στον οπτικό άξονα διάσταση ενός αντικειμένου που κείται στο object plane μεγεθύνεται στην εικόνα στην άλλη μεριά του φακού.

Nα=n*sinΘ

όπου η ο δείκτης διάθλασης και Θ η μισή γωνία του κώνου φωτός.

Το NA(numerical aperture) είναι πολύ σημαντικό για τη μέθοδο μ-PIV διότι πρώτον καθορίζει το μη γραμμικό τρόπο με τον οποίο συλλέγει το φως ο αντικειμενικός φακός και δεύτερον καθορίζει με αντιστρόφως ανάλογο τρόπο την resolving ability(RA) ή ανάλυση(resolution) του φακού, δηλαδή τη μικρότερη διακριτή(descernible) απόσταση μεταξύ 2 σημείων στο αντικειμενικό επίπεδο, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$RA = \frac{0.61 \cdot \lambda_a}{NA}$$

όπου λα είναι το μήκος κύματος του φωτός στον αέρα.

Τρίτον , το NA καθορίζει με μη γραμμικό τρόπο το εστιακό βάθος(DoF) του αντικειμενικού φακού. Μια πρώτη προσέγγιση έγινε από τον Shillaber(1944):

$$DoF = \lambda_a \frac{\sqrt{n^2 - NA^2}}{NA^2}$$

Η εικόνα που παίρνουμε από ένα σωματίδιο ανιχνευτή είναι η συνέλιξη της γεωμετρικής εικόνας Md_p (όπου M η μεγέθυνση), με την συνάρτηση point-spread.

Το μετρούμενο βάθος(correlation depth) του οποίου τα σωματίδια θα μετρηθούν δίνεται σύμφωνα με τους Meinhart et al.(2000) [40]από τη σχέση:

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16 d_p}{\tan\theta} + dp$$

όπου $NA = n\sin\theta \approx \frac{na}{f}$, n ο δείκτης διάθλασης του υλικού μεταξύ του αντικειμενικού φακού και του μικροαναμίκτη, λ είναι το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός NA είναι το αριθμητικό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού, θ η μισή γωνία μεταξύ του προσπίπτοντος φωτός και της καθέτου και dp η διάμετρος του σωματιδίου.

Καθώς το φως προσπίπτει σε σφαιρικό σωματίδιο διαμέτρου dp, το σκεδαζόμενο φως σε ένα επίπεδο δεν είναι κυκλικός δίσκος, αλλά δίσκος Airy. Για διάμετρο σωματιδίου

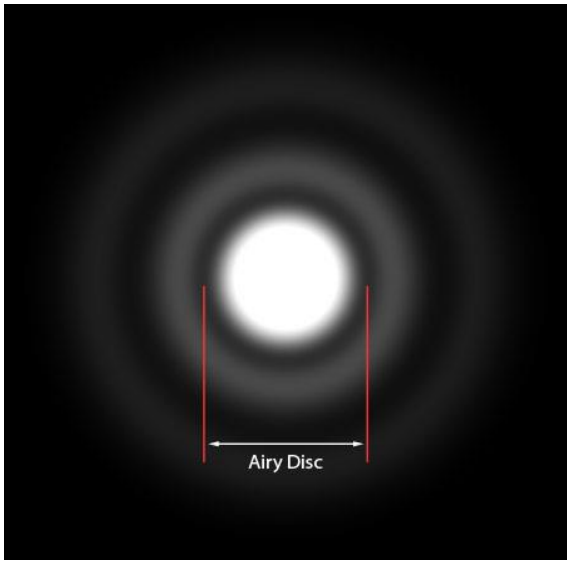
μεγαλύτερου από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία του Mie.

Χρησιμοποιείται η ανοιγμένη διάμετρος $q = \frac{\pi d_p}{\lambda}$

Γενικά πάντως η ένταση του σκεδαζόμενου φωτός αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου του σωματιδίου.

Η διάμετρος της point spread function για το κεντρικό δίσκο της μέγιστης φωτεινότητας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$d_s = \frac{1.22(1+M)\lambda}{NA}$$



Σχήμα 4..4.1.1: Η συνάρτηση point -spread και ο δίσκος Airy.

Προσεγγίζοντας με γκαουσιανές καμπύλες τα ds και Mdp μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την πραγματική διάμετρο του σωματιδίου στην εικόνα ως εξής:

$$d_e = \sqrt{[M^2 d_p{}^2 + d_s{}^2]}$$

4.4.2 : Εξελίξεις στη μέθοδο micro-PIV

Η πρώτη εφαρμογή της PIV σε μικροκλίμακα παρουσιάστηκε από τον Santiago (1998)[41] ο οποίος μελέτησε ροή Hele-Shaw γύρω από ένα κύλινδρο 30 μm. Χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος ετεροσυσχέτισης και επιβεβαιώθηκε ότι η κίνηση Brown παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια της μεθόδου.

Οι Wojciech Kowalczyk et al. (2007)[58] πρότειναν για σωματίδια ανιχνευτές στη μέθοδο μ - PIV μικροοργανισμούς, και ειδικότερα ζυμομύκητες(yeast cells) με διάμετρο 3-10 μm. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει τη βιοσυμβατότητα σε μικροαναμίκτες που αυτή είναι απαραίτητη και παράλληλα πρέπει να γίνει μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων.

Σχήμα 4.4.2.1: Μέτρηση μ-PIV με σωματίδια ανιχνευτές ζυμομύκητες.

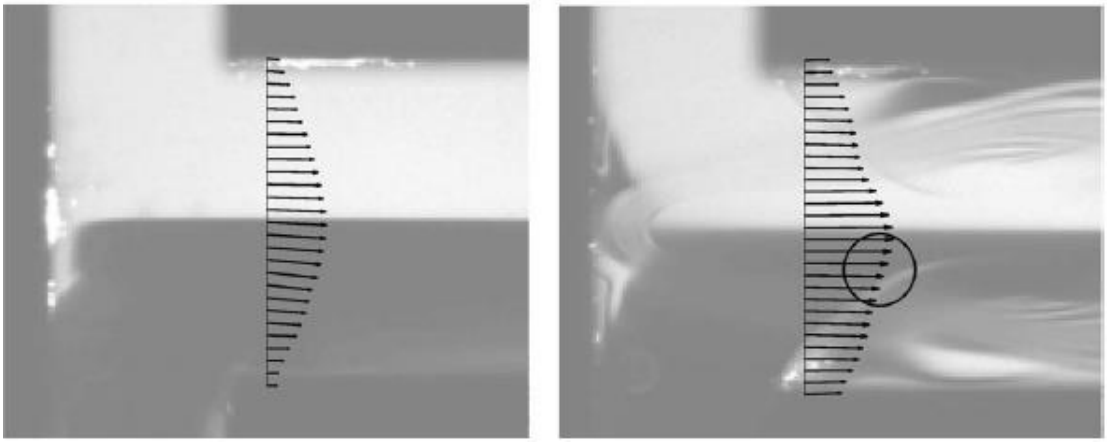
Ενδιαφέρον είναι επίσης να αναφέρουμε ότι η μέθοδος micro- PIV είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στο δείκτη διάθλασης των αναμιγνυόμενων ρευστών, λόγω του βάθους εστιακού πεδίου που επηρεάζεται από αυτόν. Οι Kim et al.(2007) [50] κατάφεραν να την εφαρμόσουν για ρευστά με διαφορετικό δεικτη διάθλασης (γλυκερίνη και νερό).

4.4.3 : Η μέθοδος micro -PIV σε μικροαναμίκτες:

Η μέθοδος micro-PIV από τη πρώτη φορά που εφαρμόστηκες στα τέλη της δεκαετίας του 90 έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη στους μικροαναμίκτες, διότι από το πεδίο ταχυτήτων μπορούμε να εξάγουμε πολλές πληροφορίες για την ικανότητα ανάμιξης μιας διάταξης, και συνεπώς να βελτιώσουμε το σχεδιασμό ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής της μικροσυσκευής.

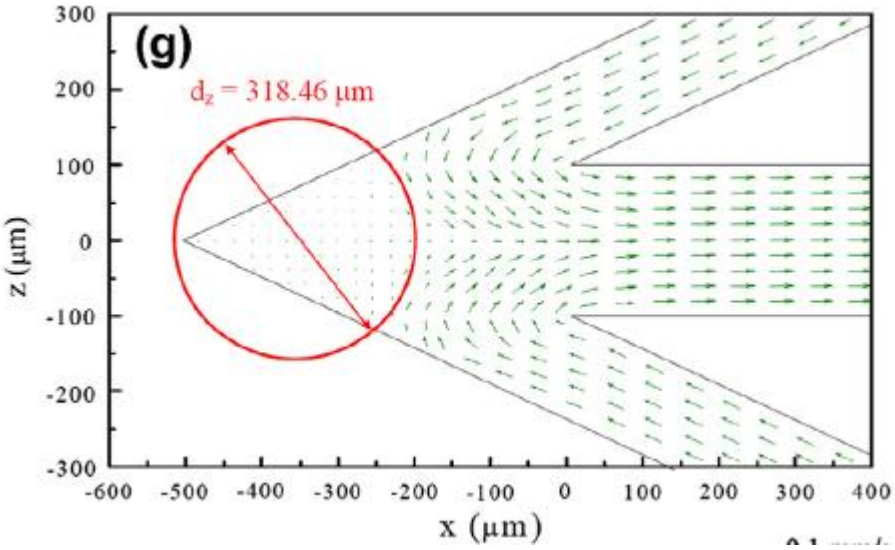
Οι Hoffman et al.(2006)[39]μελέτησαν ένα Τ-μικροαναμίκτη χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τη μέθοδο μ-LIF(Laser-induced fluorescence)για μέτρηση το πεδίου συγκέντρωσης και μ-PIV για επιβεβαίωση υπολογιστικών μοντέλων για το πεδίο ταχυτήτων .Στον αναμίκτη

γινόταν η χημική αντίδραση μεταξύ HCl και NaOH .Αποδείχτηκε ότι για Re>160 εμφανίζονται περιοχές δινών (vortex regimes) και 3D ροή στην μπορούσε να επιτευχθεί μικρό μήκος ανάμιξης.



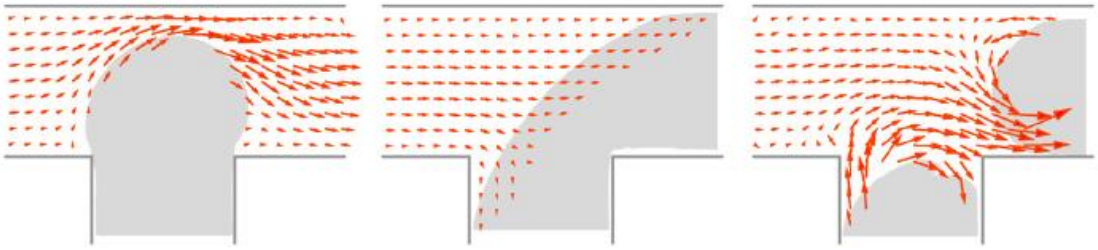
Σχήμα 4.4.3.1: Ο T- μικροαναμίκτης των Hoffman et al. για Re =120 (αριστερά) και Re = 186(δεξιά) με χρήση μ-LIF και μ-PIV.

Οι Shou et al. [42] έκαναν επίσης συνδυασμό των μεθόδων μ-LIF και μ-PIV για την οπτικοποίηση και ποσοτικοποίηση των πεδίων συγκέντρωσης και ταχυτήτων μικροαναμικτών τύπου Y σε γωνίες 30-60-90-120 μοιρών. Η βέλτιστη γωνία βρέθηκε να είναι -60 μοίρες.



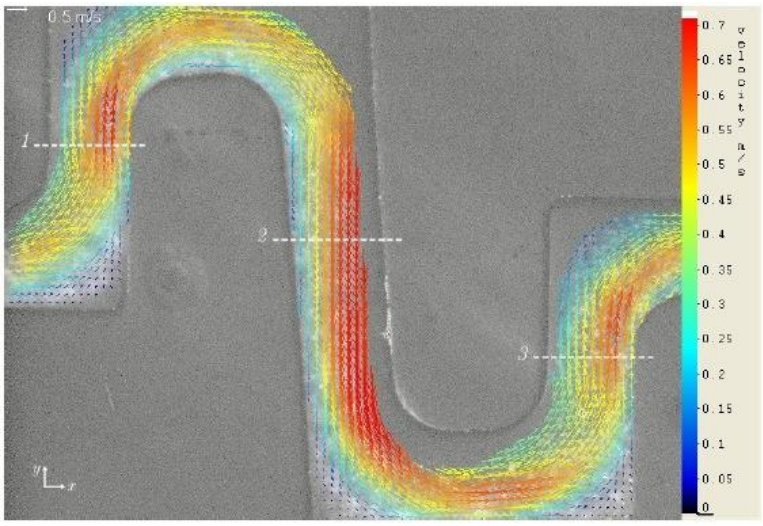
Σχήμα 4.4.3.2: Η εργασία των Shou et al.: Η Dz , η διάμετρος της νεκρός ζώνης η οποία όσο αυξάνεται μειώνεται το μήκος ανάμιξης. Εν προκειμένω το μήκος ανάμιξης είναι 13000 μm.

Επίσης Οι Volkert van Steijn et al.(2007) [43] μελέτησαν τη ροή φυσαλίδων σε μία T-junction ενός μικροαναμίκτη με χρήση μ-PIVκαι παρατήρησαν ότι σε καμία περίπτωση δεν κλείνει το κανάλι από τη φυσαλίδα πάνω από 75%.



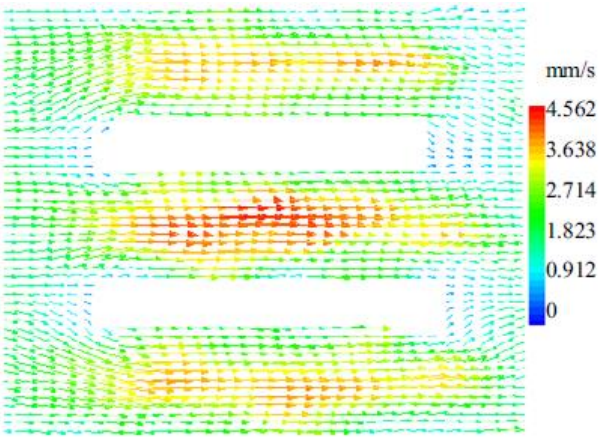
Σχήμα 4.4.3.3 : Μετρήσεις μ-PIV για ροή με φυσαλίδα σε T-junction.

Ο Hamid Farangis Zadeh (2005) εφάρμοσε μ-PIV και μ-LIF σε ενεργό επίπεδο μικροαναμίκτη τύπου μεάνδρου. Ο μικροαναμίκτης είχε ταλαντούμενη ηλεκτρική διέγερση 14.5 V/mm και η ανάμιξη ήταν άριστη.



Σχήμα 4.4.3.4: Πεδίο ταχυτήτων με τη μέθοδο μ-PIV σε ενεργό μικροαναμίκτη.

Οι Wang et al.[64] μελέτησαν υπολογιστικά και πειραματικά με micro-PiV ένα μικροαναμίκτη με διαδοχικά ορθογώνια εμπόδια(barrier embedded micromixer):



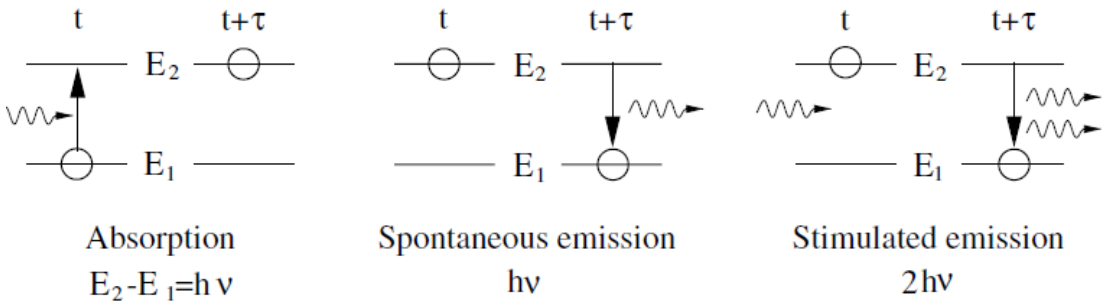
Σχήμα 4.4.3.5: Micro-PIV σε μικροαναμίκτη των Wang et al.(2005)

Μία πολύ ενδιαφέρουσα τέλος εφαρμογή, είναι η μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων και του πεδίου συγκέντρωσης ταυτόχρονα ,μόνο με μετρήσεις μ-PIV.Οι Yang et al[64] αφού μέτρησαν το πεδίο Τ μικροαναμίκτη με 2 είδη σωματιδίων 200nm που εξέπεμπαν σε 2 διαφορετικά μήκη κύματος , επεξεργάστηκαν τις έγχρωμες εικόνες για να δούν το πεδίο συγκεντρώσεων και τη διάχυση αυτών στο μικροαναμίκτη.

4.4.4 : ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ LASER

Το laser είναι μία από τις πιο σημαντικές συσκευές σε μία διάταξη micro-PIV.Η βασική αρχή λειτουργίας αυτών αναφέρεται παρακάτω:

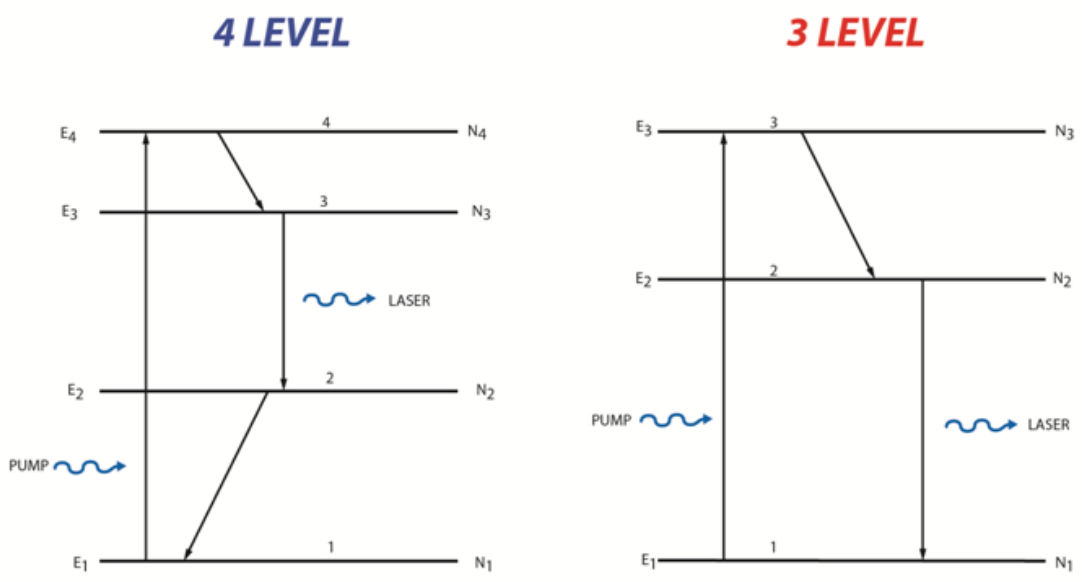
Είναι γνωστό από την κβαντομηχανική ότι κάθε άτομο μπορεί να βρεθεί σε διάφορες κβαντισμένες καταστάσεις ενέργειας από 3 βασικές αλληλεπιδράσεις με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ο ένας τρόπος είναι η αποδιέγερση διεγερμένου ατόμου από μια ενεργειακή στάθμη σε μι άλλη με εκπομπή φωτονίου(spontaneous emission). Από την άλλη υπάρχει η περίπτωση ένα φωτόνιο με κατάλληλη ενέργεια E=hν να απορροφηθεί από ένα άτομο, ανεβάζοντας το σε υψηλότερη ενεργειακά στάθμη(κβαντική απορρόφηση) .Τρίτον υπάρχει η τρίτη αλληλεπίδραση κατά την οποία το προσπίπτον φωτόνιο να διεγείρει ένα ήδη διεγερμένο άτομο ώστε να μεταπέσει μη αυθόρμητα(αντίθετα με τη πρώτη αλληλεπίδραση) σε χαμηλότερη στάθμη. Τότε επιπρόσθετα με το προσπίπτον φωτόνιο εκπέμπεται και ένα δεύτερο σε φάση με το πρώτο, δηλαδή το προσπίπτον κύμα ενισχύεται. Η διαδικασία ονομάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή(stimulated emission).Τα 2 αυτά φωτόνια θα συναντήσουν 2 διεγερμένα άτομα και με εξαναγκασμένη εκπομπή θα δημιουργήσουν 4 , και έτσι αν έχουμε αρκετά μεγάλο αριθμό από διεγερμένα άτομα, τότε μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μεγάλο αριθμό από πανομοιότυπα φωτόνια, δηλαδή μια δέσμη Laser(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).



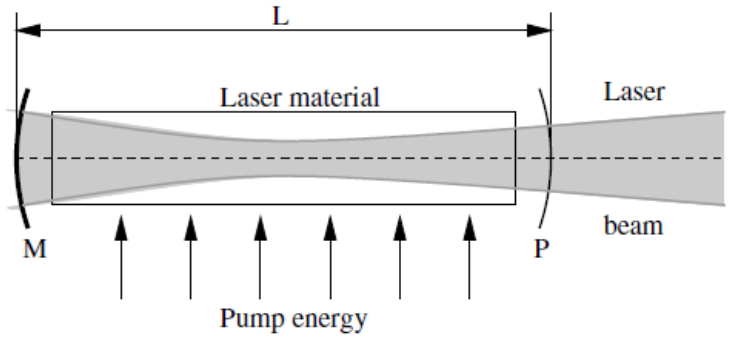
Σχήμα 4.4.4.1 : Διαγραμματική παρουσίαση των αλληλεπιδράσεων φωτονίων με την ύλη.

Ένα σημαντικό πρόβλημα για την αποδοτική λειτουργία των laser είναι η επιλογή των κατάλληλων ενεργειακών σταθμών. Η συμμετοχή μόνο 2 ενεργειακών σταθμών είναι αδύνατη, γιατί οι ρυθμοί μετάβασης είναι ίδιοι και για τις 2 κατευθύνσεις και μετά από λίγο έχουμε ισορροπία, δηλαδή για κάθε ένα φωτόνιο που δημιουργείται με εξαναγκασμένη εκπομπή , κάποιο άλλο απορροφάται και το συνολικό κέρδος είναι μηδενικό. Για να πετύχουμε σταθερή σχέση πληθυσμιακής αναστροφής(περισσότερα άτομα σε διεγερμένη κατάσταση, ώστε να ευνοείται η εξαναγκασμένη εκπομπή) απαιτούνται τουλάχιστον 3 επίπεδα ενέργειας, ενώ με τη συμμετοχή 4 έχουμε ποιο αποδοτική λειτουργία. Έτσι λοιπόν θα έχουμε τη θεμελιώδη στάθμη(ground level) και μια στάθμη άντλησης(pump level) ανάμεσα στις οποίες γίνεται η ενεργειακή άντληση παρέχοντας τη κατάλληλη διαφορά ενέργειας. Η στάθμη άντλησης μπορεί να είναι μια

διευρυμένη ζώνη ενεργειακών επιπέδων που όλα μπορούν διεγερθούν με άντληση. Έτσι εξασφαλίζουμε καλύτερη χρήση της δαπανώμενης ενέργειας άντλησης, η οποία όποιας φύσης και αν είναι έχει συνήθως μεγάλο φάσμα συχνοτήτων.



Σχήμα 4.4.4.2: Διαδικασία παραγωγής φωτονίων σε laser 4 και 3 ενεργειακών επιπέδων.



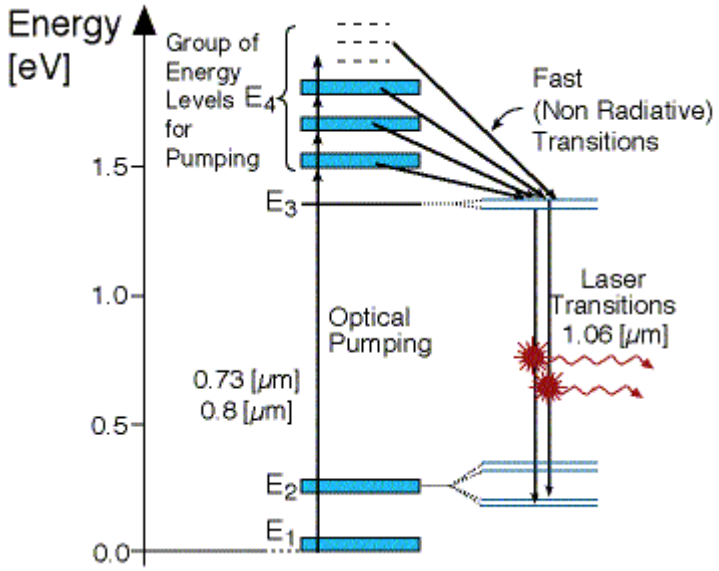
Σχήμα 4.4.4.3: Σχηματικό διάγραμμα ενός λειζερ.

ΕΙΔΗ ΛΕΙΖΕΡ:

- Helium-Neon, λ=633nm.Έχουν αρκετά μικρό φασματικό εύρος , αρκετά καλή ποιότητα δέσμης και μικρή ισχύ εξόδου(0.5-10mW)
- Argon-ion lasers.Παρέχουν δέσμη ακτινοβολίας στο ορατό φως και σε υψηλές ισχείς(30-100Watts).
- Semiconductor lasers:Έχουν πολύμικρές διαστάσεις, μικρό κόστος κατασκευή και λειτουργίας,μεγάλη απόδοση, ικανοποιητική ισχύ(10Watt σε παλμούς 100 ns) και μεγάλο εύρος εκπομπής ακτινοβολίας από 0.5μm ως 90 μm(far infrared)

- Excimer Lasers:(excited dimmers ή διμερών μορίων) είναι λέιζερ παλμική ακτινοβολίας με κύριες εφαρμογές στο UV.εργό μέσο είναι διατομικά συστήματα ευγενούς αερίου και αλογόνου,
- Neodym -YAG lasers,λ=1064nm και λ =532 nm.
- Neodym-YLF(Yttrium lithium fluoride) lasers, λ=1053nm και λ = 526nm. Χρησιμοποιούνται για PIV υψηλής ταχύτητας

Είναι τα πιο σημαντικά λέιζερ στερεάς κατάστασης για PIV.Η δέσμη δημιουργείται από ιόντα Nd^{3+}. Τα ιόντα μπορούν να είναι ενσωματωμένα σε κρυστάλλους YAG(yttrium-aluminum-garnet).Τα λέιζερ αυτά έχουν υψηλή ενίσχυση και καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.Η διέγερση (Excitation) γίνεται από οπτική άντληση (optical pumping) σε μια ευρεία ενεργειακή ζώνη με μη εκπεμπόμενες μεταβάσεις ηλεκτρονίων(non radiative transitions) στο άνω επίπεδο λέιζερ. Το σύστημα είναι 4 επιπέδων.Η οπτική άντληση γίνεται με λάμπα flashlamp η οποία συνεπάγεται ανάγκες υδρόψυξης. Το ενεργειακό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.4.4.4 : Ενεργειακό διάγραμμα ενός laser Nd-Yag.

4.4.5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου περιέχει όλα τα αναγκαία εργαλεία για μέτρηση μ-PIV: Μία CCD κάμερα, οπτικό μικροσκόπιο, laser, μικροαντλία, συγχρονιστή.

ΚΑΜΕΡΑ:

CCD κάμερα: 12 bit, ανάλυση 1376x1024, χωρική ανάλυση 1.4 MPixel. Λαμβάνει 10 καρέ το δευτερόλεπτο(fmax=15Hz)

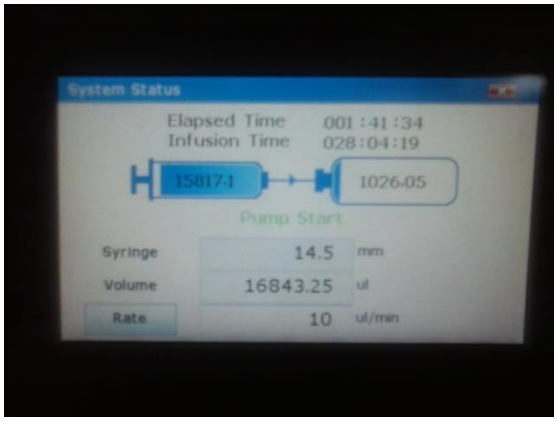
Μοντέλο: TSI POWERVIEW 1.4MP , 1376x1024 PIXEL

Εικόνα 4.4.5.1: Η κάμερα CCD του εργαστηρίου αεροδυναμικής Ε.Μ.Π.

ΜΙΚΡΟΑΝΤΛΙΑ:

ΜΟΝΤΕΛΟ: SYRING PUMP:CHEMYX 200 FUSION PUMP

Εικόνα 4.4.5.2: *Η μικροαντλία (syringe pump) CHEMYX 200 FUSION PUMP της εργαστηριακής διάταξης. Σύριγγα: 14.5mm διάμετρος, 10 ml όγκος.*



Εικόνα 4.4.5.3 : *Η οθόνη της μικροαντλίας. Επιλέγοντας το είδος της σύριγγας που εισάγουμε(δηλαδή διάμετρο) γνωρίζουμε τη παροχή ρυθμίζοντας κατάλληλα τη μετατόπιση του εμβόλου με ένα ατέρμονα κοχλία.*

ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ:

Οπτικό μικροσκόπιο, μοντέλο OLYMPUS IX2-SP.

Εικόνα 4.4.5.4: Το μικροσκόπιο του εργαστηρίου αεροδυναμικής, Ε.Μ.Π

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΑΚΟΥ	
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΑΝΟΙΓΜΑ:	0.3
ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ:	10mm
ΓΩΝΙΑ ΚΩΝΟΥ ΦΩΤΟΣ:	60deg
ΜΕΓΕΝΘΥΣΗ:	10
ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ:	1.08μm
ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ f	26.5
THRESHOLD ε	0.1

Υπενθυμίζουμε πως το μετρούμενο βάθος(correlation depth) του οποίου τα σωματίδια θα μετρηθούν δίνεται σύμφωνα με τους Meinhart et al.(2000) [40]από τη σχέση:

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16d_p}{\tan\theta} + dp$$

και στη περίπτωσή μας είναι στα 29.75 μm(± 14.87 μm).

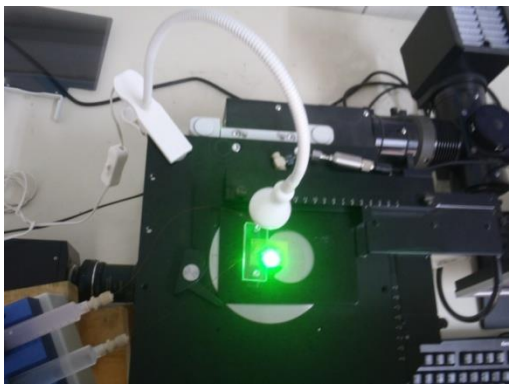
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ(d=1μm): Απορροφούν το φως του λέιζερ(532nm) και εκπέμπουν φως μήκος κύματος (560nm).Μοντέλο: Fluoromax polymer microspheres, company: thermo scientific , διαλυμα 1%, πυκνότητα σωματιδίων 1.05 g/cm^3 και refractive index(δείκτη διάθλασης) 1.59 .

LASER:

YAG 15-Solo Nd, εταιρία New Wave.

Το laser εκπέμπει στα 532 nm. Η ενέργεια των παλμών του είναι 15 mJ και το πλάτος παλμού είναι 3-5 ns. Επιπλέον, η διάμετρος της δέσμης (beam) του laser είναι 2,5 mm.

Εικόνα 4.4.5.5: Η διάταξη του laser+ synchroniser TSI LASER PULSE 610036



Εικόνα 4.4.5.6: Παλμός του laser εν λειτουργία σε micro-piv σε μικρορευστονική διάταξη. Συχνότητα laser 4.83 Hz.

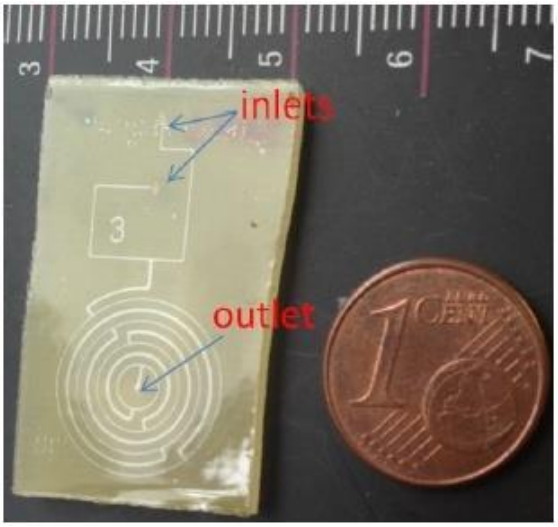
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ -ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά στοιχεία για το μικροαναμίκτη

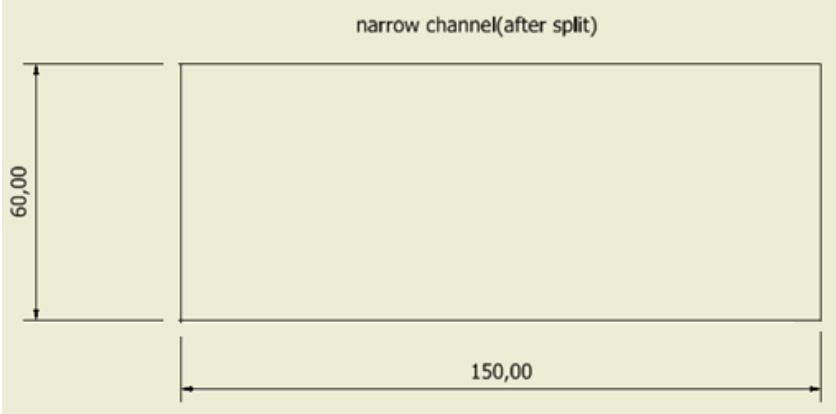
Ο μικροαναμίκτης που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα κατασκευάστηκε στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος από τους Ιωάννα Ν.Κεφαλά, Βασίλειο Ε.Παπαδόπουλο , Γεωργία Κάπρου, Γιώργο Κόκκορη και Αγγελική Τσερέπη. Είναι τύπου λαβυρίνθου(Labyrinth), διαχωρισμού και επανένωσης(split and Merge) , επίπεδος(planar) και παθητικός (passive). Οι εφαρμογές τέτοιας γεωμετρίας είναι κυρίως βιοαναλυτικές , όπως η ενζυματική πέψη του DNA. Το συνολικό μήκος καναλίων μικροαναμίκτη είναι 18.6 mm(!)

Ο μικροαναμίκτης πιάνεται στο chip holder .Στην είσοδο του εισέρχονται τα μικροκανάλια εισόδου, τα οποία είναι συνδεδεμένα με τις 2 μικροαντλίες σύριγγας. Στις μικροαντλίες βάζουμε 10 ml απιονισμένο νερό και μέσα σε αυτό εισάγουμε 1% διάλυμα σωματιδίων , το οποίο περιέχει 1% σωματίδια ανιχνευτές.

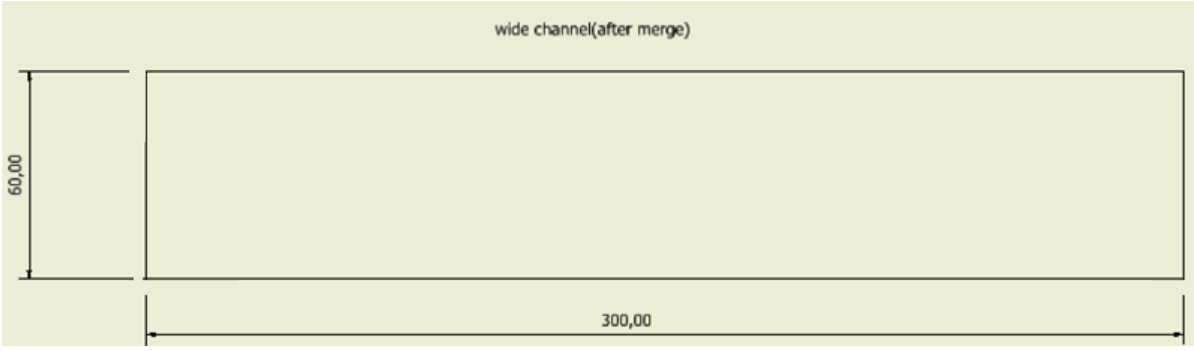


Εικόνα 5.1.1: Φωτογραφία του μικροαναμίκτη που μελετήθηκε.

Διαστάσεις(σε μm) της διατομής των καναλιών:



Σχήμα 5.1.1: Σκαρίφημα του στενού καναλιού του μικροαναμίκτη μετά τους διαχωρισμούς



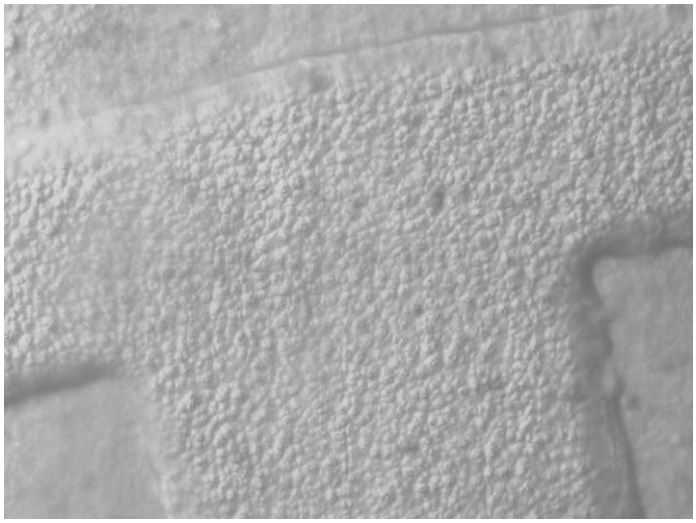
Σχήμα 5.1.2 : Σκαρίφημα του πλατιού καναλιού του μικροαναμίκτη μετά τις συνενώσεις.

Ο μικροαναμίκτης έχει 4 σημεία διαχωρισμού της ροής(split) και 4 σημεία συνένωσης της ροής(merge). Οι κύριοι μηχανισμού που ευνοούν την ανάμιξη στη συγκεκριμένη μικρορευστονική συσκευή είναι 3: Οι δίνες Dean, οι βαθμίδες συγκέντρωσης στα σημεία συνένωσης(junctions) καθώς και η μείωση του μήκους ανάμιξης διαχωρίζοντας αλλεπάλληλα τη ροή σε 2 ρεύματα.

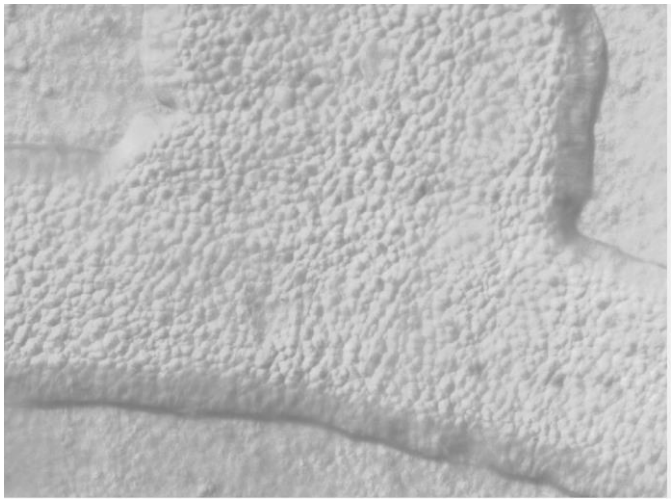
Διαδικασία κατασκευής:

Το κατώτατο υπόστρωμα αποτελείται από τυπικό PCB. Η βάση του μικροαναμίκτη αποτελείται από πολυιμίδιο το οποίο έχει θερμανθεί στους 120 βαθμούς κελσίου για 2 ώρες . Πάνω σε αυτό μπαίνει δεύτερο στρώμα πολυιμιδίου το οποίο αφού θερμανθεί και αυτό εκτίθεται σε ακτινοβολία UV πίσω από κατάλληλα διαμορφωμένη φωτοανθεκτική μάσκα. Έτσι δημιουργούνται τα κανάλια του μικροαναμίκτη. Η στεγανοποίηση του αναμίκτη(πάνω μέρος του καναλιού), γίνεται μέσω μιας ταινίας πολυεφίνης πάχους 70μm,

της εταιρίας STARLAB με κολλητικό μέσον την σιλικόνη. Η πολυολεφίνη προτιμάται για την υψηλή διαφάνεια και χαμηλό αυτο-φθορισμό(auto -fluorescence).



Εικόνα 5.1.2: Σημείο συνένωσης(merge),πυθμένας του καναλιού.

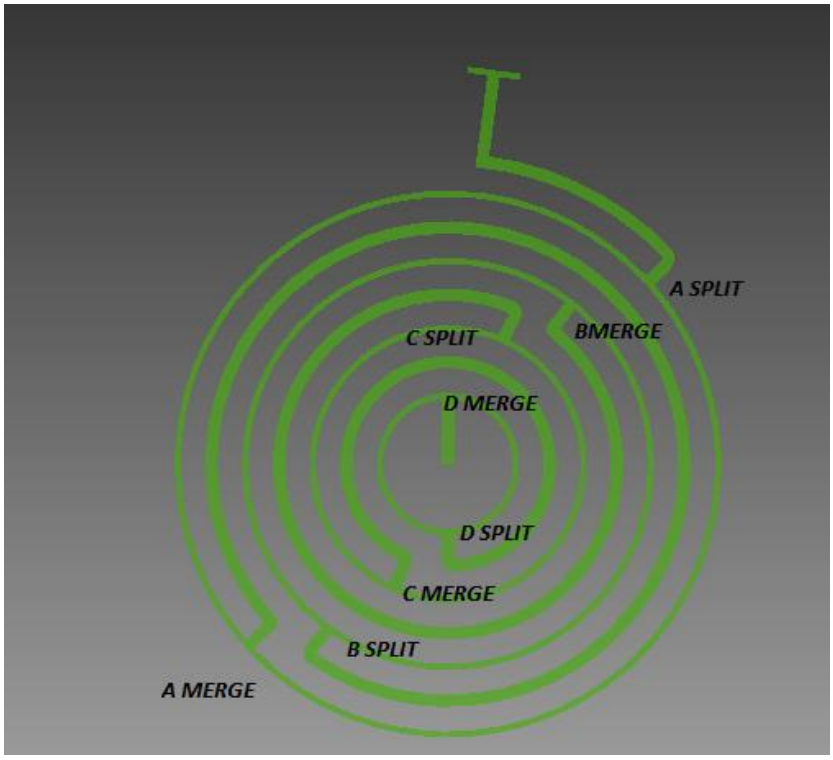


Εικόνα 5.1.3: Σημείο διαχωρισμού(split),πυθμένας του καναλιού.

Ακολουθεί η ονοματολογία θέσεων του μικροαναμίκτη :

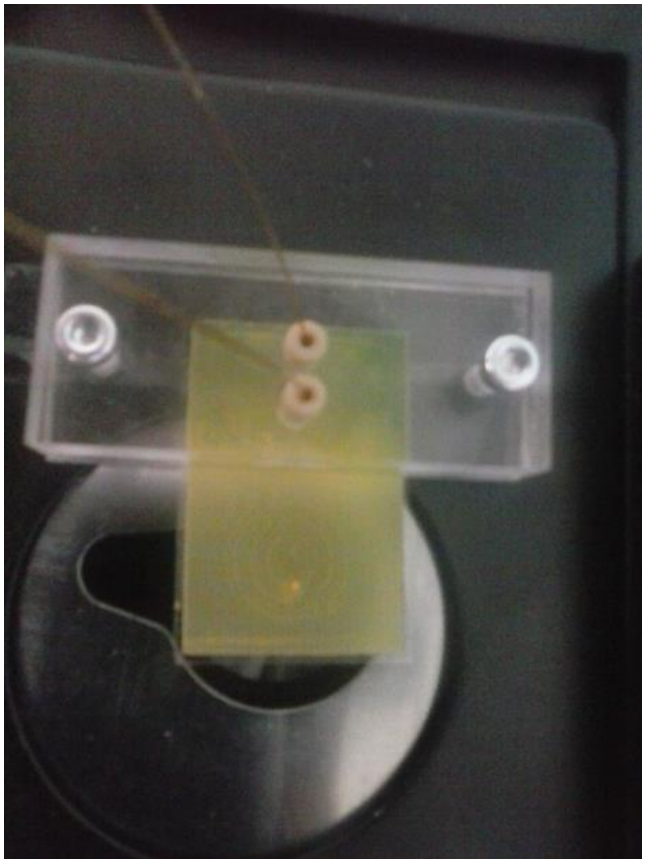
SPLIT=σημείο διαχωρισμού

MERGE = σημείο συνένωσης



Σχήμα 5.1.3: Η τοποθέτηση του μικροαναμίκτη στη διάταξη φαίνεται παρακάτω:

Εικόνα 5.1.4: Παρατηρείται η αντλία με 2 σύριγγες, οι μικροαγωγοί που καταλήγουν στο chip holder που συγκρατεί το μικροαναμίκτη καθώς και το μικροσκόπιο.



Εικόνα 5.1.5: Ο μικροαναμίκτης στο chip holder πάνω από το φακό του μικροσκοπίου.

Χαρακτηριστικά της ροής:

Flow specifications:(de-ionized water@20°C)	
v(m^2/s)	0.000001
ρ(kg/m^3)	998.3
μ(pa * sec)	0.0009983
T(K)	293.15

Χαρακτηριστικοί αριθμοί της ροής:

Flow numbers	
Q(μL/min)	5.4
u(m/sec)big channel	0.0050
u(m/sec)small channel	0.0050
Dean (big channel)	0.0611
Dean (small channel)	0.0485
Re (big channel)	0.5000
Re (small channel)	0.4286
Sc	2.49E+06
τp(relaxation time in sec)	5.84327E-08
Pe	1.86E+06
Knudsen	1.84905E-10
Stk	4.86939E-06

Υπολογισμός συντελεστή διάχυσης σωματιδίων διαμέτρους 1μm στο απιονισμένο νερό:

$D = \frac{K_b T}{6\pi\mu R}$ όπου Kb=1.3807E-23 η σταθερά Boltzmann.

Συνεπώς D=4.024E-13m^2/sec.

Στην πραγματικότητα το νούμερο αυτό μπορεί να διαφέρει για τους παρακάτω λόγους: μη ακρίβεια στην υπόθεση θερμοκρασίας /δυναμικής συνεκτικότητας καθώς και ύπαρξη ενδομοριακών δυνάμεων οι οποίες στο παραπάνω τύπο αγνοούνται. Αντίθετα, ο συντελεστής διάχυσης για τα συνήθη βιομόρια για τα οποία θα χρησιμοποιηθεί ο μικροαναμικτης είναι 10E-10 συνεπώς πολύ μεγαλύτερος.

Ακόμη , ο δείκτης διάθλασης στο νερό είναι 1.33.

Σχετικό σφάλμα από κίνηση Brown:

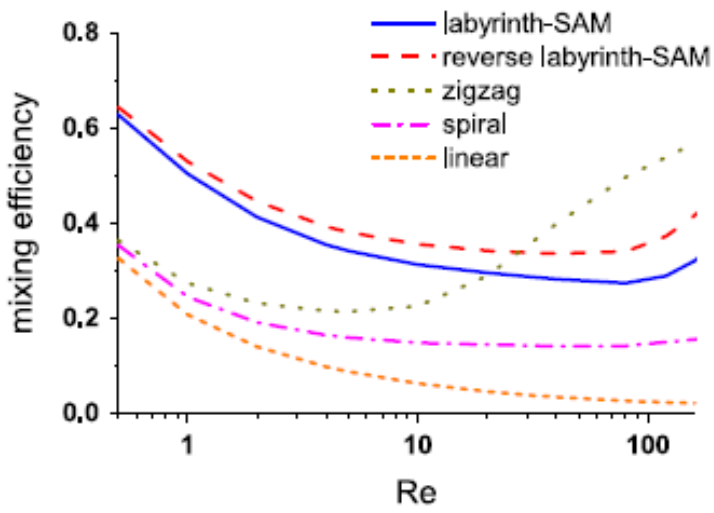
Dt(sec)	4.00E-04
Seeding Particles diameter	1.00E-06
Error of Brownian Motion	6.7809E-01

Σωματίδια ανιχνευτές: Στα 10 ml βαζω 100 μL διαλυματος σωματιδιων.

Πρωτού ξεκινήσουμε τα πειράματα μελετήθηκαν τα στοιχεία που είχαμε για το μικροαναμίκτη από τους ερευνητές που τον κατασκεύασαν. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα στοιχεία για την απόδοση του αναμίκτη από το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε, Δημόκριτος[63] ως συνάρτηση του αριθμού Re.Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε το ANSYS Fluent. Από το διάγραμμα αυτό, περιμένουμε μη σημαντική συνεισφορά δινών Dean στο Re των πειραμάτων που διεξήγαμε στο ΕΜΠ. Ώς mixing efficiency ορίζεται το παρακάτω μέγεθος:

$$n = 1 - \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{C_i - \overline{C}}{\overline{C}}\right)^2}$$

, όπου $\overline{C}$ η αναμενόμενη συγκέντρωση(0.5) και Ci η τοπική συγκέντρωση στο σημείο i μιας διατομής και N ο αριθμός των σημείων στη διατομή.



Σχήμα 5.1.4: Στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος παρατηρήθηκε υπολογιστικά ότι μετά από ένα Re 80 αρχίζουν να συμμετέχουν σημαντικά στην ανάμιξη οι δίνες Dean.

Πρώτες μετρήσεις με το μικροαναμίκτη στο Ε.Μ.Π.:

Αρχικά έγινε επιβεβαίωση των διαστάσεων των μικροαναμικτών .Ήταν γνωστό ότι αντιστοιχούν 3.125 pixel /μm. Συνεπώς από τις συντεταγμένες μπορούμε να υπολογίσουμε τα πλάτη που βρέθηκαν 155 και 282 μm τα οποία είναι πολύ κοντά στις διαστάσεις που περιμέναμε 150 και 300μm.Παρατηρήθηκε μια ελαφριά κωνικότητα στα τοιχώματα.

5.2: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΜΕ ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ micro-PIV.

Η παραπάνω μέθοδος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον [64]γιατί μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα μεταφοράς λόγω ορμής μαζί με φαινόμενα διάχυσης , αν χρησιμοποιηθούν αρκετά μικρής διαμέτρου σωματίδια(<200nm).Δεν χρειάζεται εισαγωγή 2ης ουσίας ή 2ης κάμερας ή 2ου laser όπως στο μ-LIF ,που συχνά συνδυάζεται με το μ-PIV σε μικροαναμίκτες για ταυτόχρονη μέτρηση πεδίου ταχυτήτων και συγκεντρώσεων.

Αναμενόμενα σφάλματα του κώδικα παρατηρούνται : Λόγω Υπολογισμού Κεντροειδούς(λόγω δίσκου Airy), απόδοση αλγόριθμου εύρεσης κύκλων σε εικόνα(λόγω χαμηλού κοντράστ) .

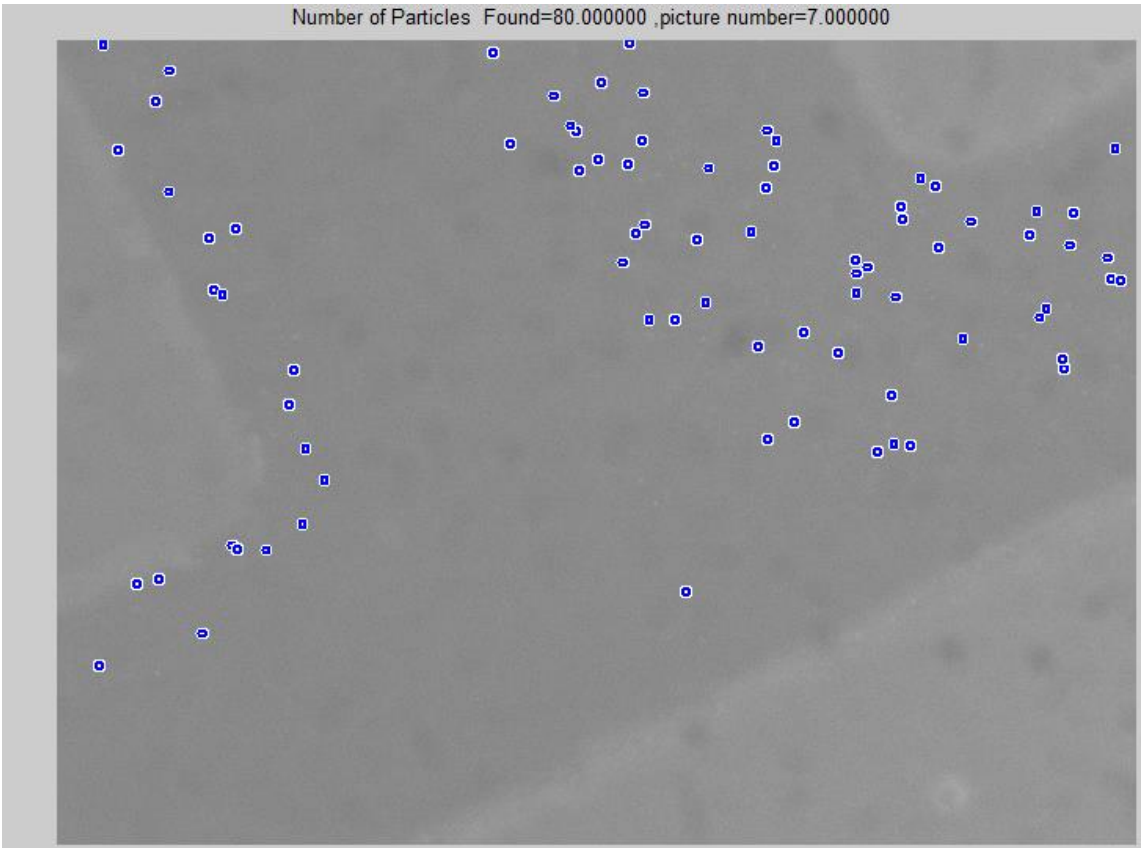
Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση κύκλων σε εικόνα είναι ο κυκλικός μετασχηματισμός Hough(circular Hough transform) . Η βασική αρχή του μετασχηματισμού είναι η εξής: Αρχικά υπολογίζεται η βαθμίδα φωτεινότητας για κάθε θέση στο επίπεδο, ως ένα διάνυσμα που δείχνει τη κατεύθυνση μέγιστης αλλαγής φωτεινότητας. Το μέτρο του διανύσματος δείχνει και το μέγεθος της βαθμίδας.

$|\nabla f| = \sqrt{G_x{}^2 + G_y{}^2}$ (μέτρο βαθμίδας)

$\alpha = \tan^{-1}(\frac{G_y}{G_x})$ (κατεύθυνση βαθμίδας)

Η εφαρμογή γράφτηκε σε κώδικα στο matlab(βλ. Παράρτημα). Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε είναι η imfindcircles της βιβλιοθήκης του matlab. Βρίσκει τα κεντροειδή των σωματιδίων και τα αποθηκεύει σε ένα πίνακα. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε για 2000 εικόνες σε κάθε θέση. Στο τέλος έχουμε ένα πίνακα, με διαστάσεις τις διαστάσεις της εικόνας και σε κάθε θέση του οποίου έχουμε των αριθμό των σωματιδίων που πέρασαν από τη θέση αυτή για τις 2000εικόνες.

Παράδειγμα εφαρμογής για μία θέση:



Εικόνα 5.2.1 : Αποτέλεσμα εύρεσης των σωματιδίων στην εικόνα από το PIV μέσω του κώδικα που φτιάχτηκε στο MATLAB.

Παρατηρείται κατά μέσο όρο εύρεση περίπου 80% των σωματιδίων. Δεδομένης της επεξεργασίας 2000 εικόνων, το σφάλμα μειώνεται σημαντικά.

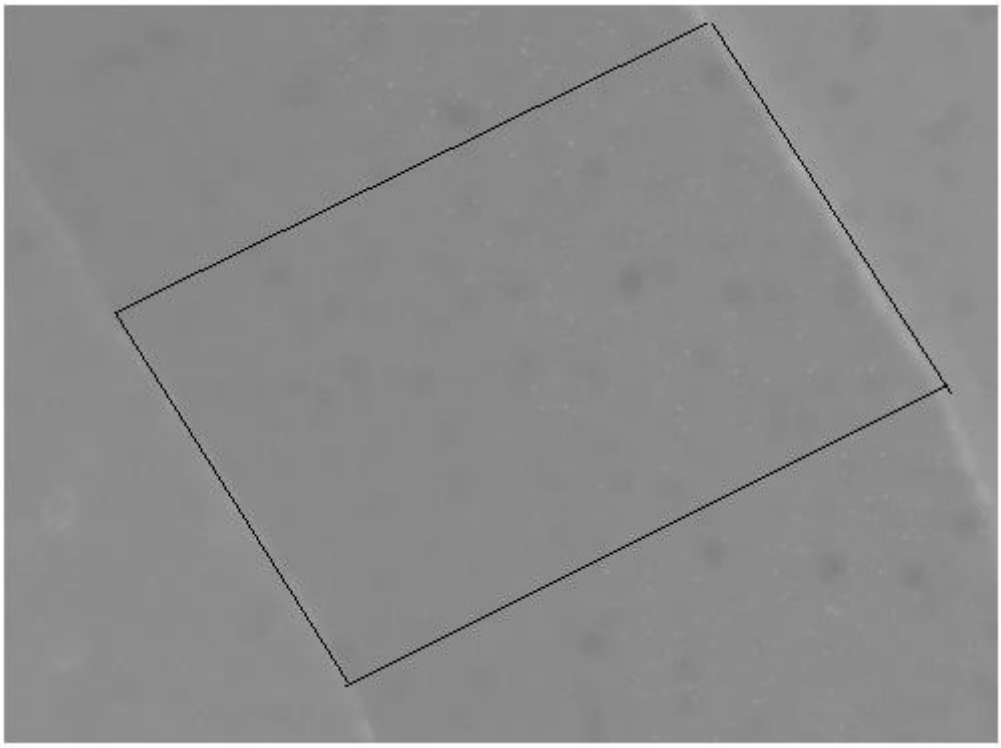
Ρευστό: Νερό+ Νερό και στις 2 σύριγγες, 2.7μL/min από κάθε σύριγγα.

Βάθος μέτρησης : 30 μm(μεσο βάθος). Σχόλιο για το βάθος: δε μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, λόγω της ελαστικότητας του lamination το οποίο φουσκώνει με ελαφριά αύξηση της πίεσης. Το βάθος υπολογίζεται από τη διαφορά εστίασης lamination με πυθμένα. Πρακτικά μετριέται με τη μικρορύθμιση του μικροσκοπίου.

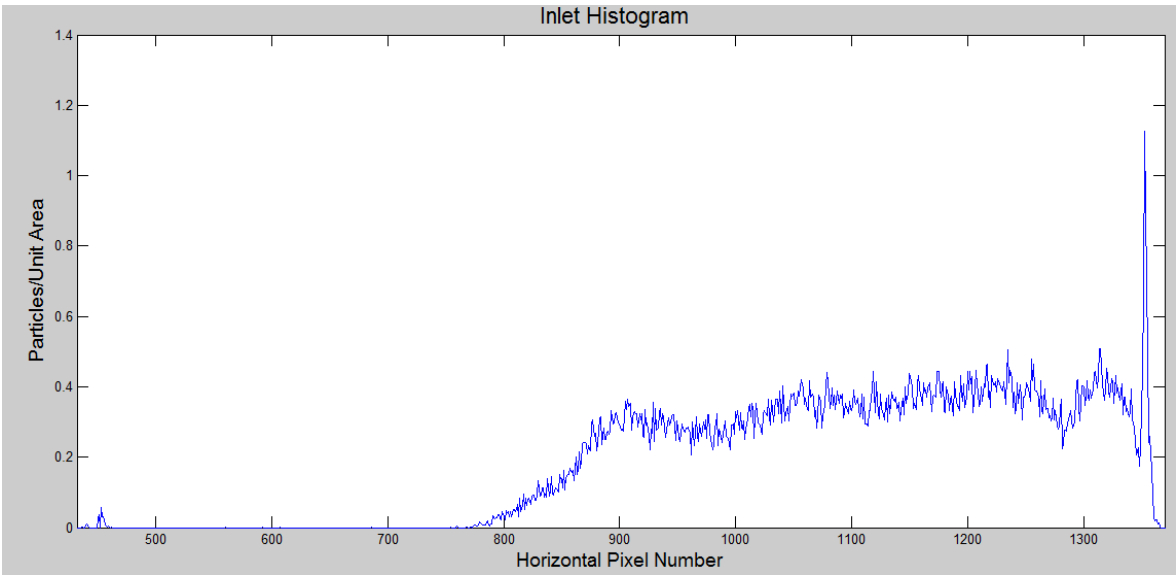
Τα particles found /unit area(μονάδα επιφανείας) είναι ενδεικτικός αριθμός και εξαρτάται από την απόδοση του κώδικα και το μέγεθος του πλαισίου που μελετάται. Η μονάδα επιφανείας είναι τετραγωνικά pixel.

DT=400 MICROSECONDS.

ΘΕΣΗ INLET (πριν το πρώτο διαχωρισμό)

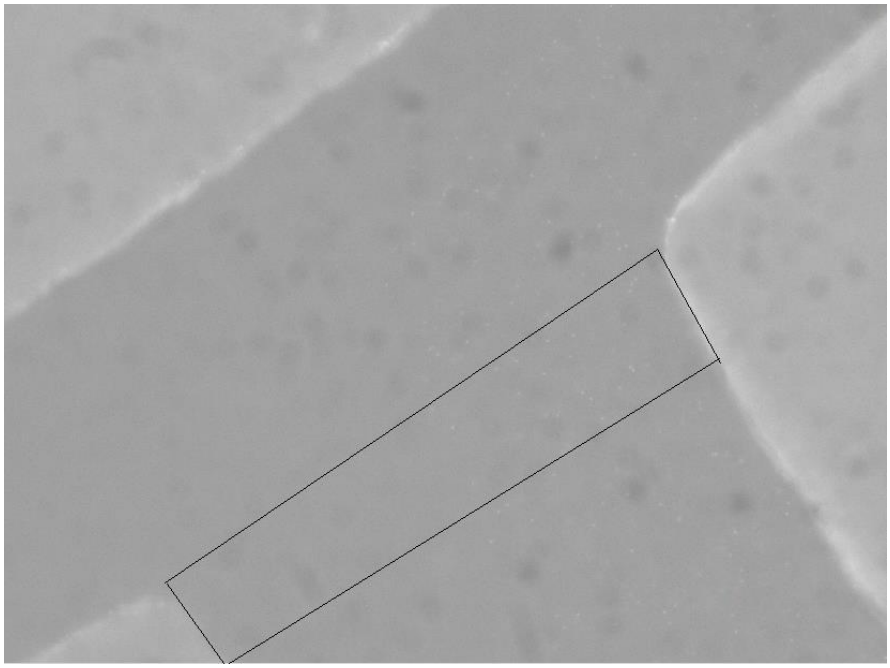


ΕΙΚΟΝΑ 5.2.2 :Παρατηρούνται τα στίγματα σωματιδίων ως λευκά σφαιρίδια στο κανάλι του μικροαναμίκτη Στο πλαίσιο είναι η περιοχή η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του παρακάτω ιστογράμματος συγκεντρώσεων.

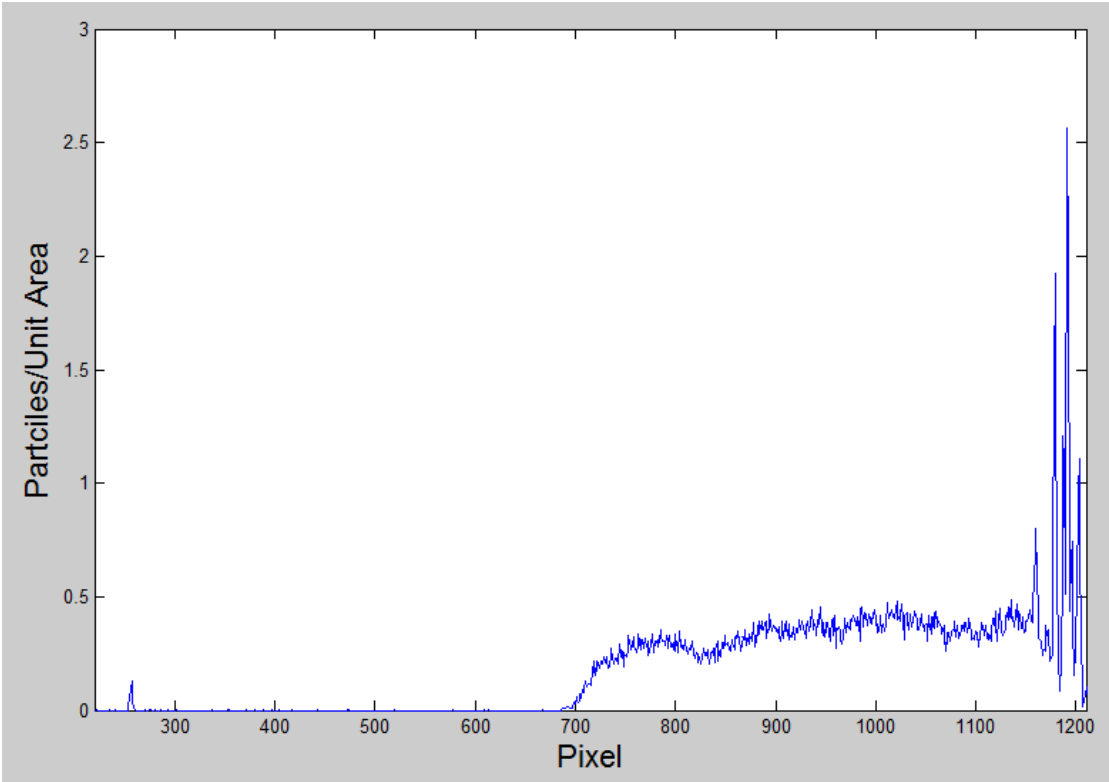


Σχήμα 5.2.1: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά πλάτος του καναλιού

ΘΕΣΗ A SPLIT

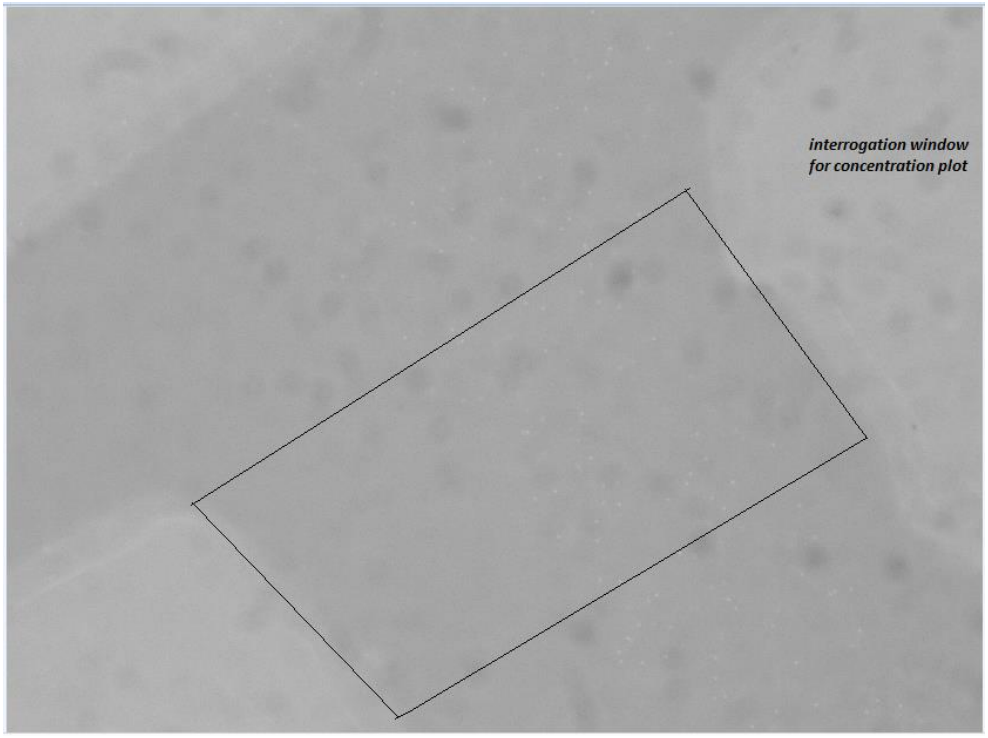


Εικόνα 5.2.3 : Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

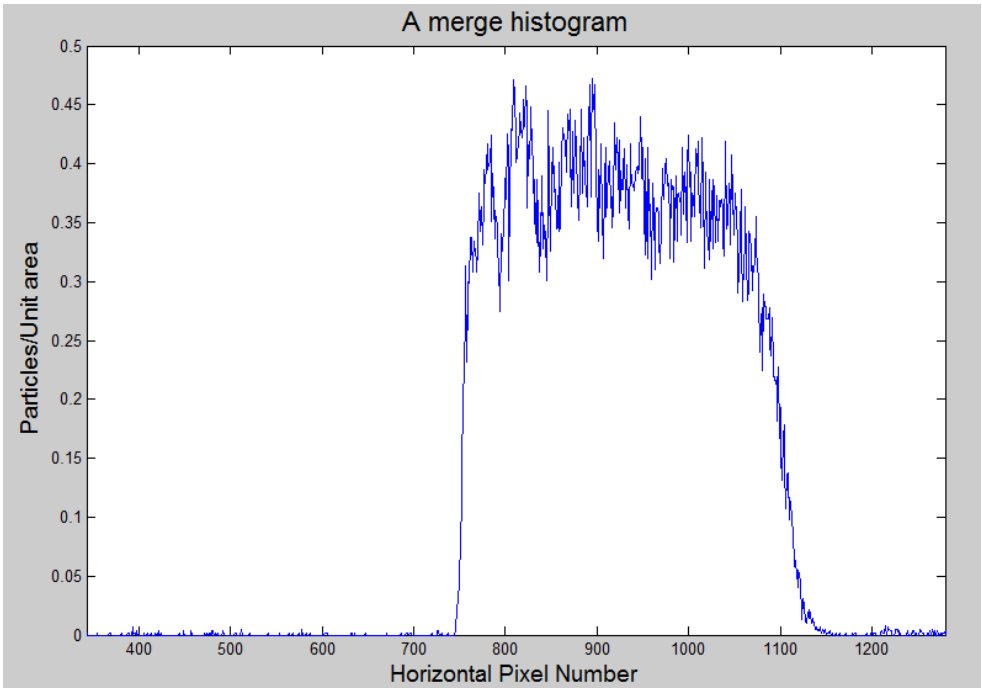


Σχήμα 5.2.2: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού

ΘΕΣΗ A MERGE

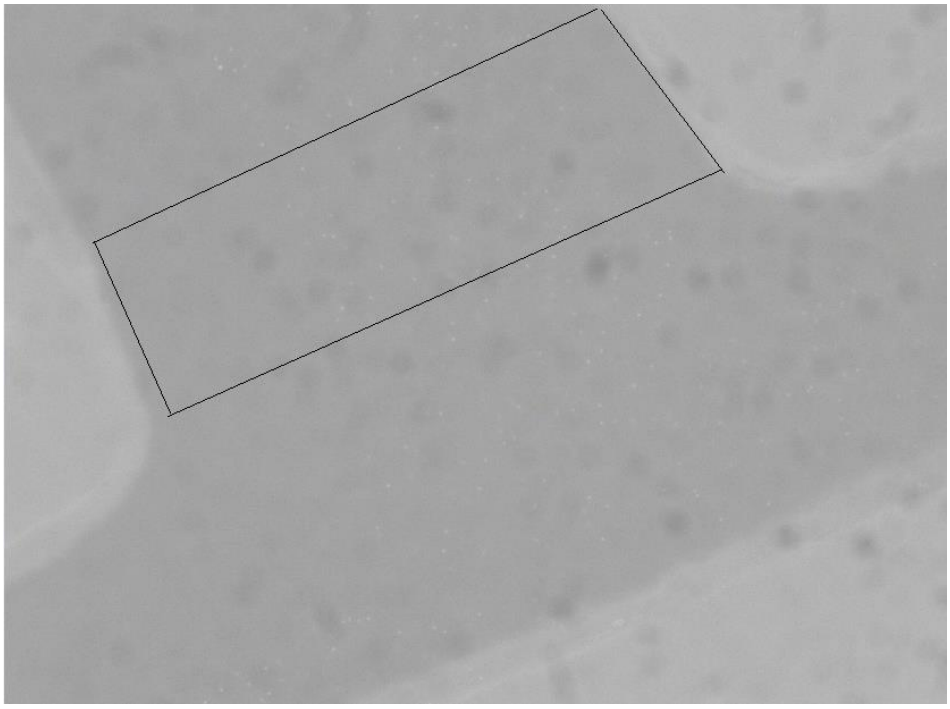


Εικόνα 5.2.4 : Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

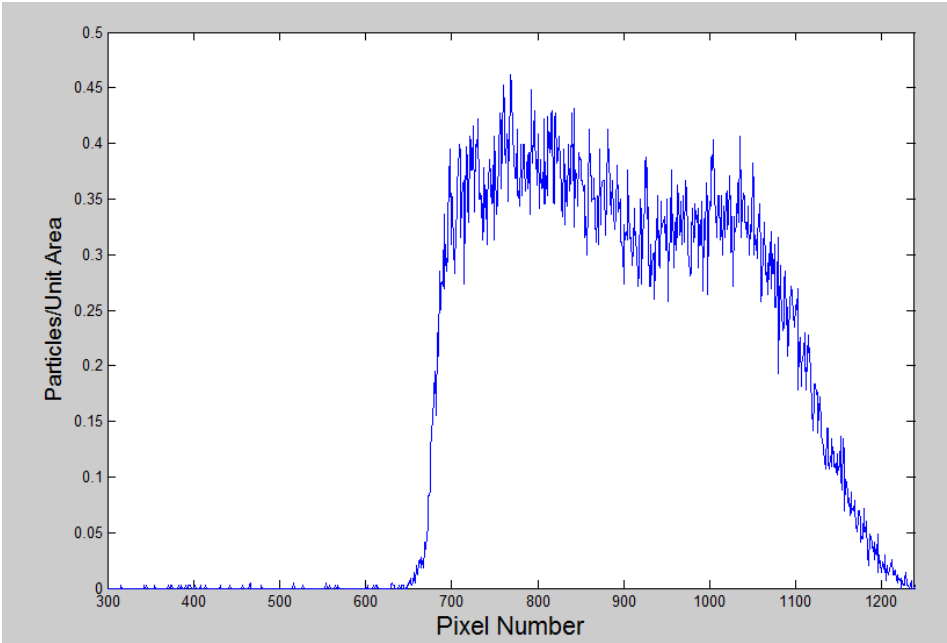


Σχήμα 5.2.3: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού. Η λωρίδα των σωματιδίων, ευρισκόμενη στο εξωτερικό του καναλιού, δεν πλησιάζει το τοίχωμα μετά τη συνένωση.

ΘΕΣΗ Β SPLIT

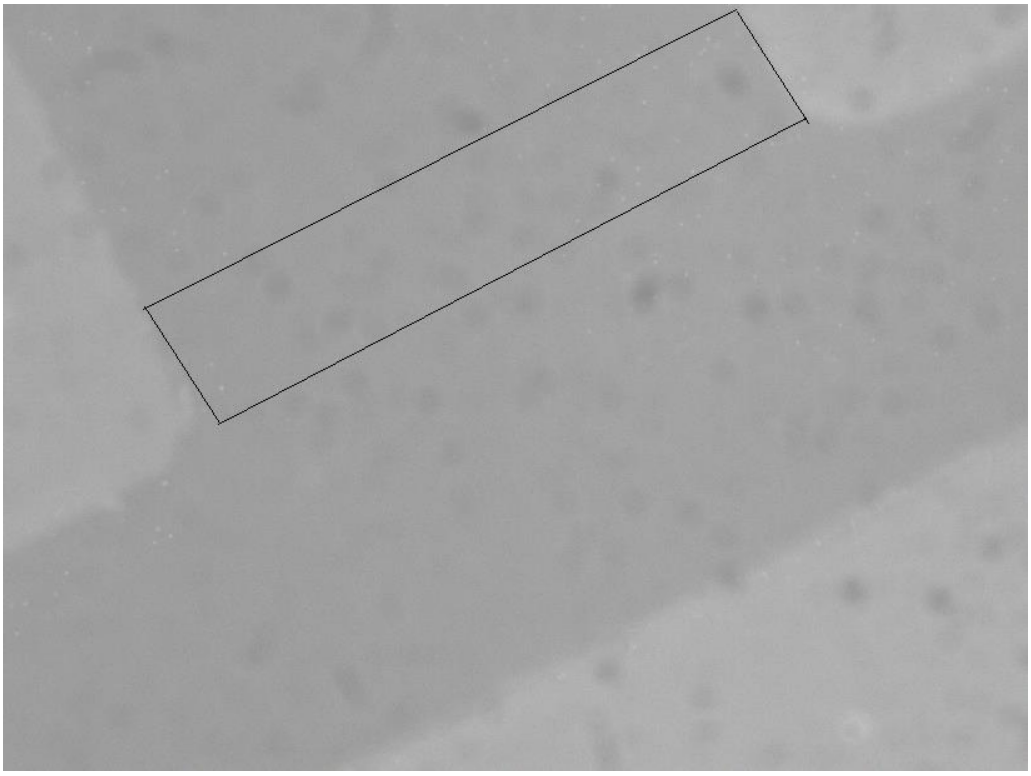


Εικόνα 5.2.5 : Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

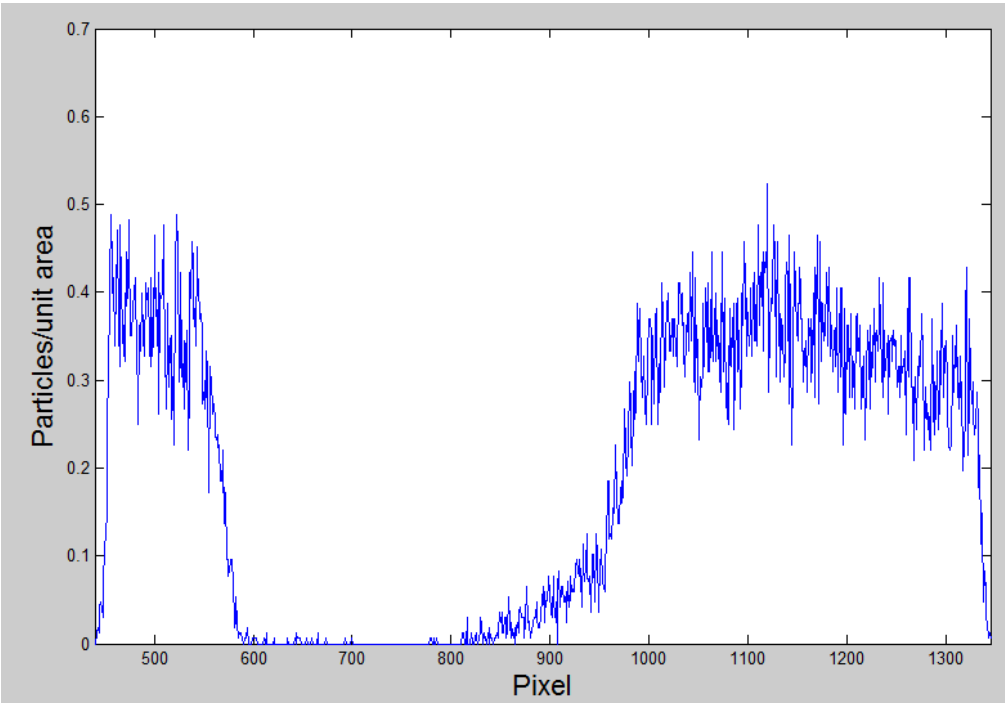


Σχήμα 5.2.4: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού.

ΘΕΣΗ Β MERGE

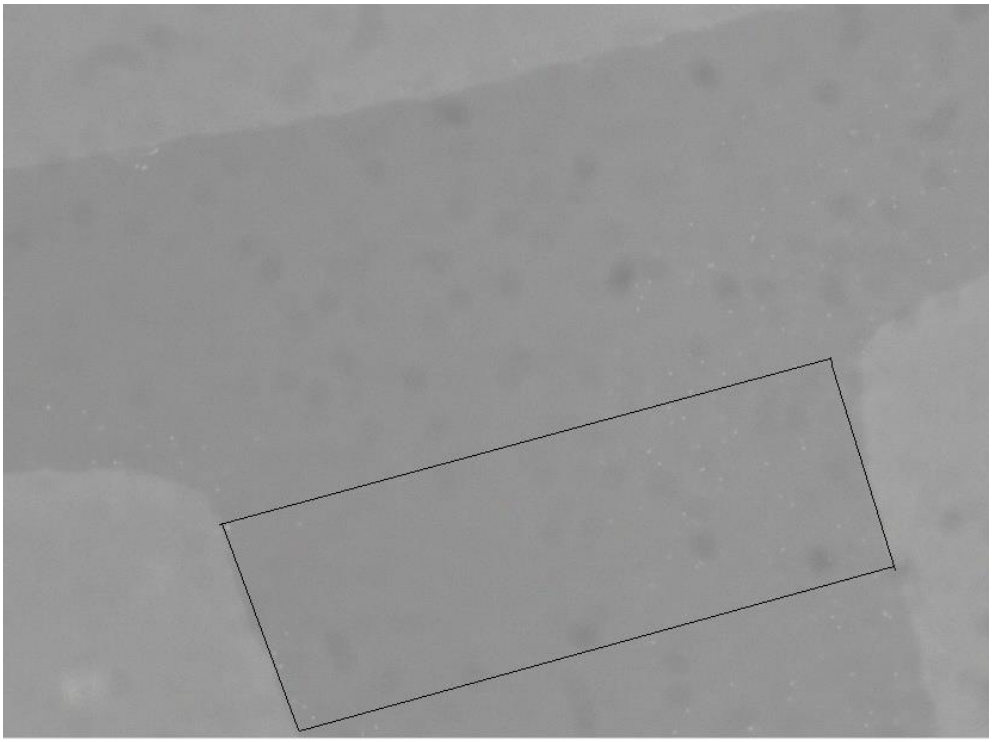


Εικόνα 5.2.6 : Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

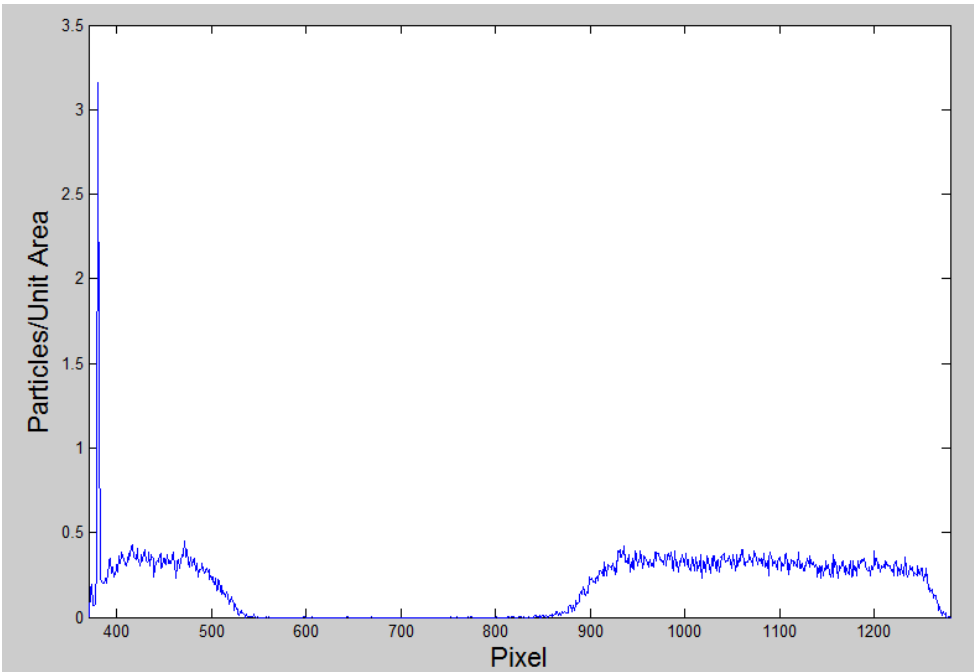


Σχήμα 5.2.5: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού.

ΘΕΣΗ C SPLIT

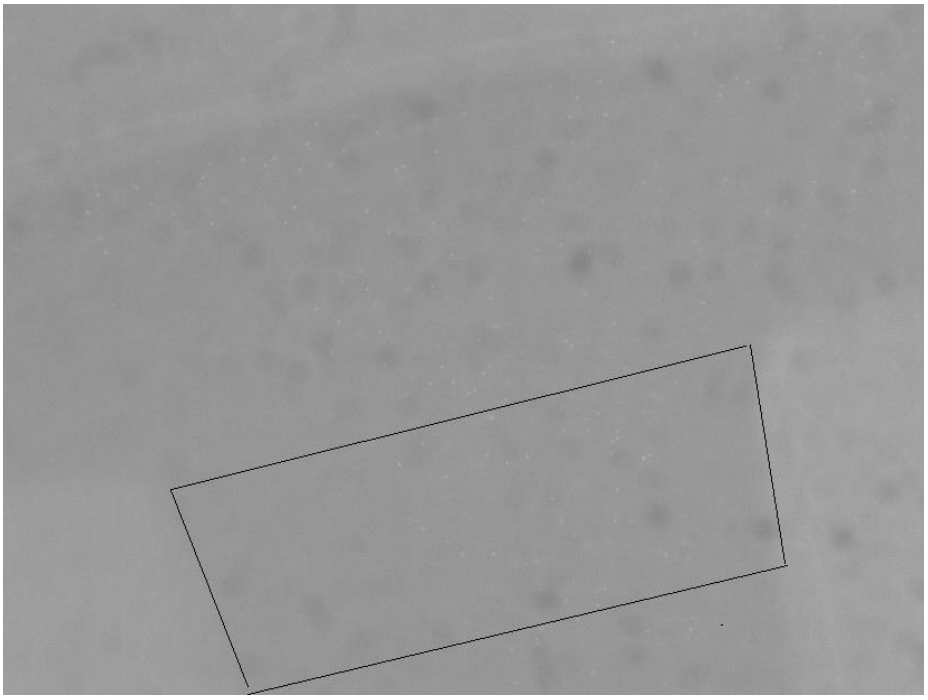


Εικόνα 5.2.7: Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

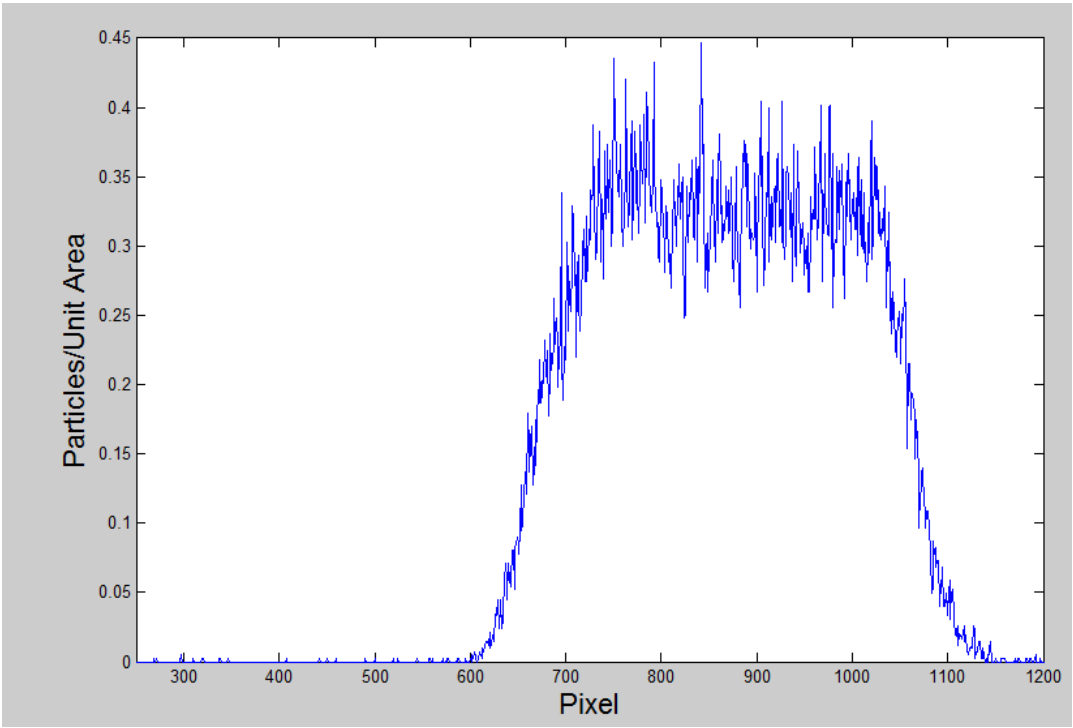


Σχήμα 5.2.6: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού.

ΘΕΣΗ C MERGE

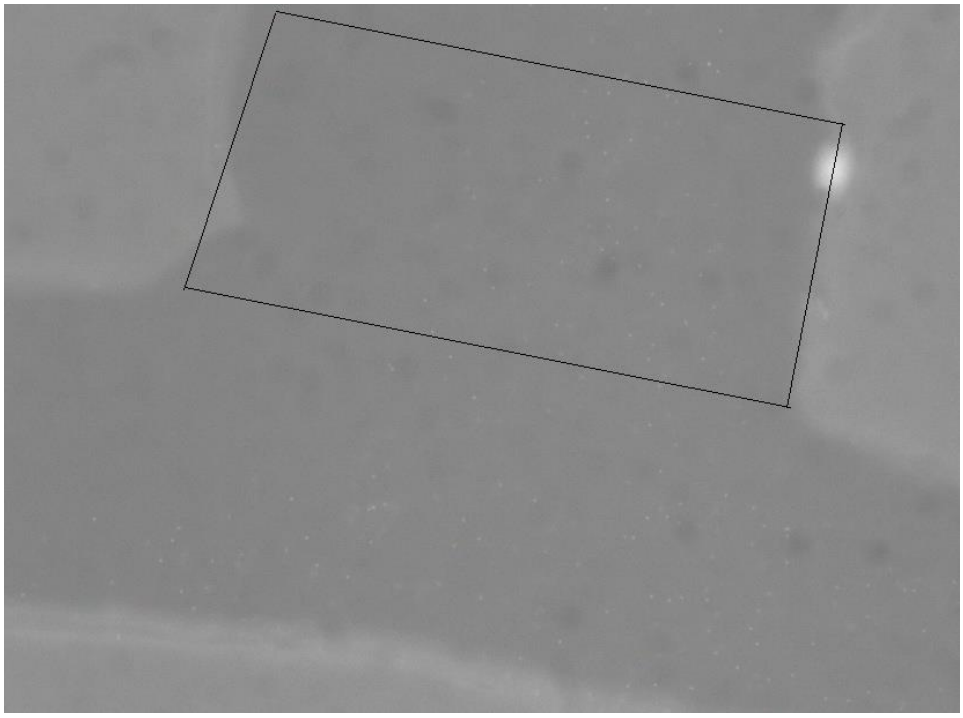


Εικόνα 5.2.8: Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

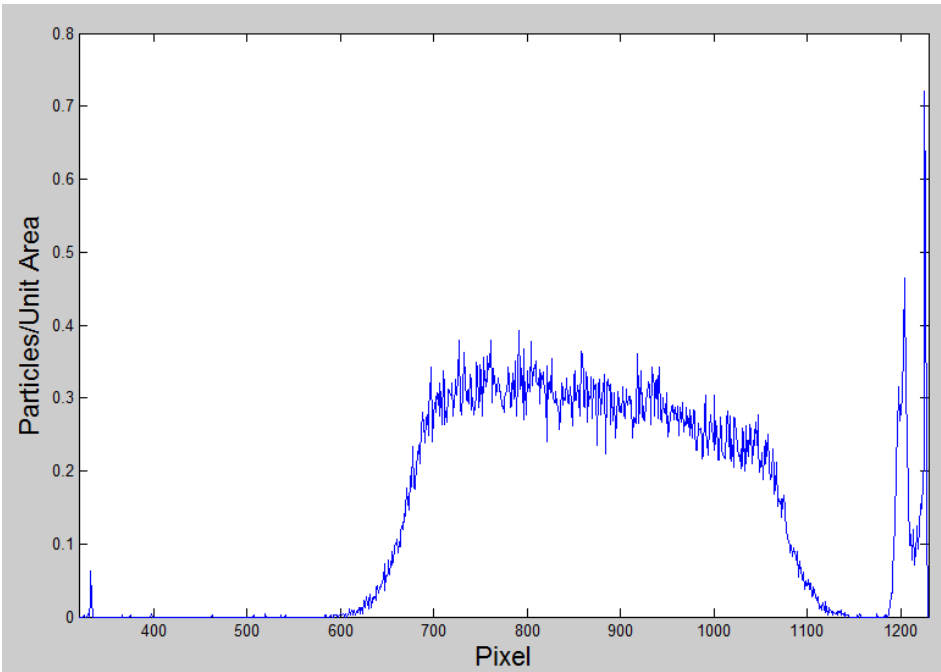


Σχήμα 5.2.7: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού. Η λωρίδα των σωματιδίων, ευρισκόμενη στο εξωτερικό του καναλιού, δεν πλησιάζει το τοίχωμα μετά τη συνένωση.

ΘΕΣΗ D SPLIT

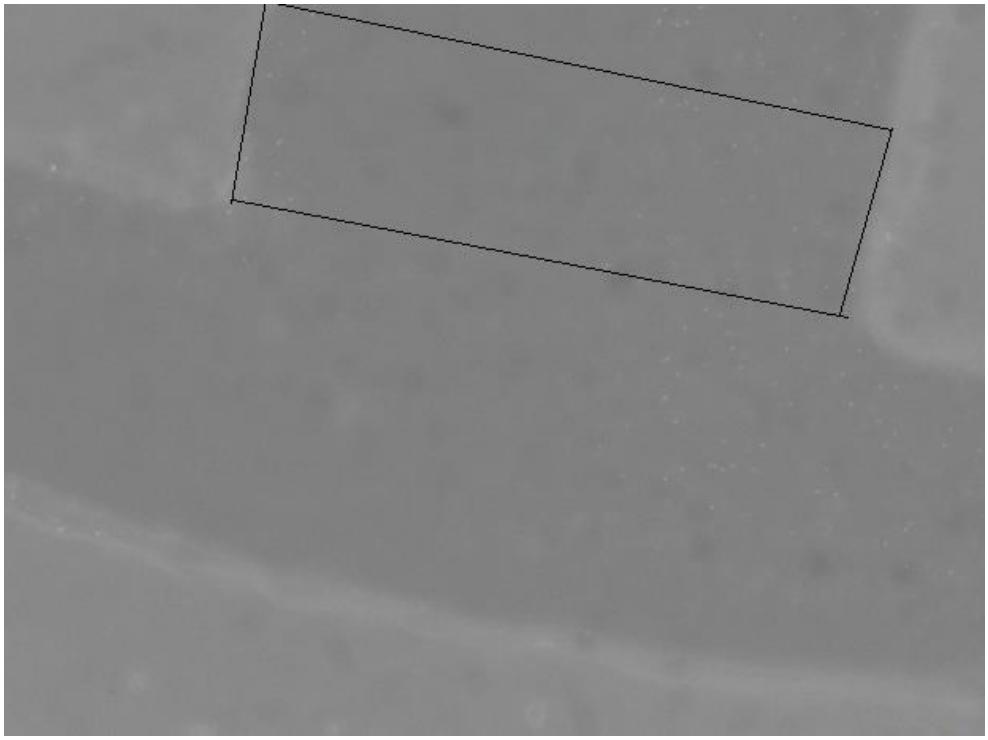


Εικόνα 5.2.9: Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

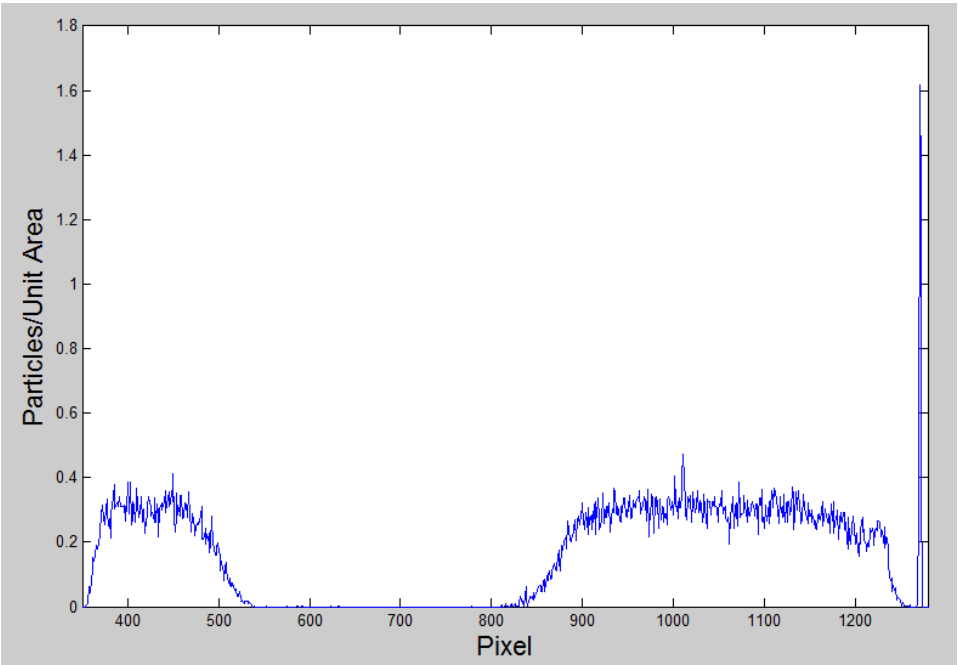


Σχήμα 5.2.8: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού. Η λωρίδα των σωματιδίων, μετατοπισμένη προς το κέντρο του καναλιού διαχωρίζεται στα 2 κανάλια μετά το διαχωρισμό.

ΘΕΣΗ D MERGE

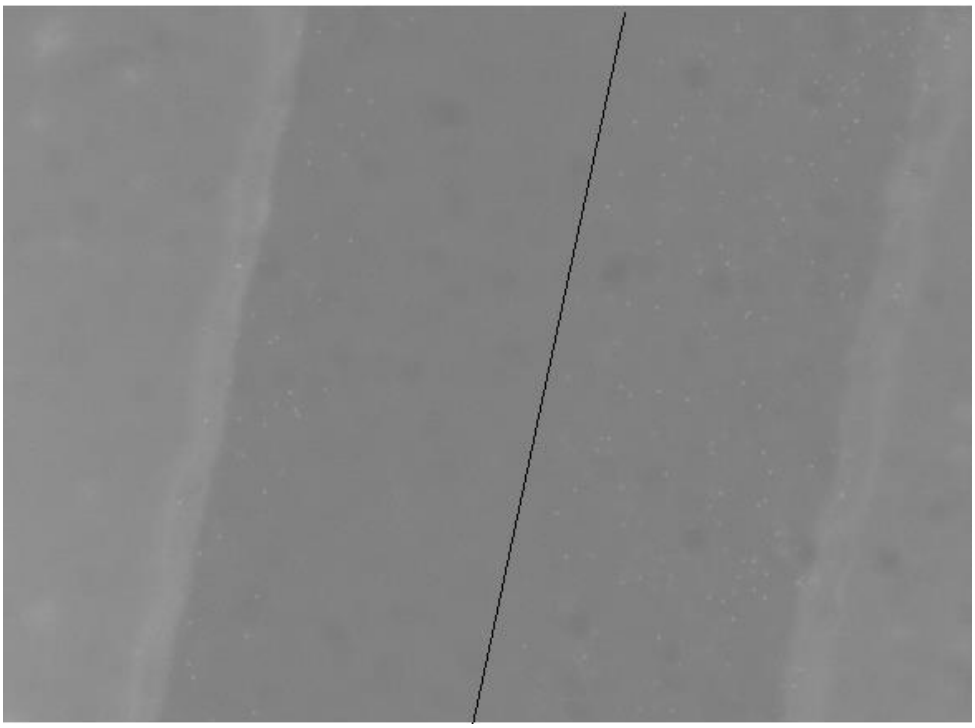


Εικόνα 5.2.10: Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).

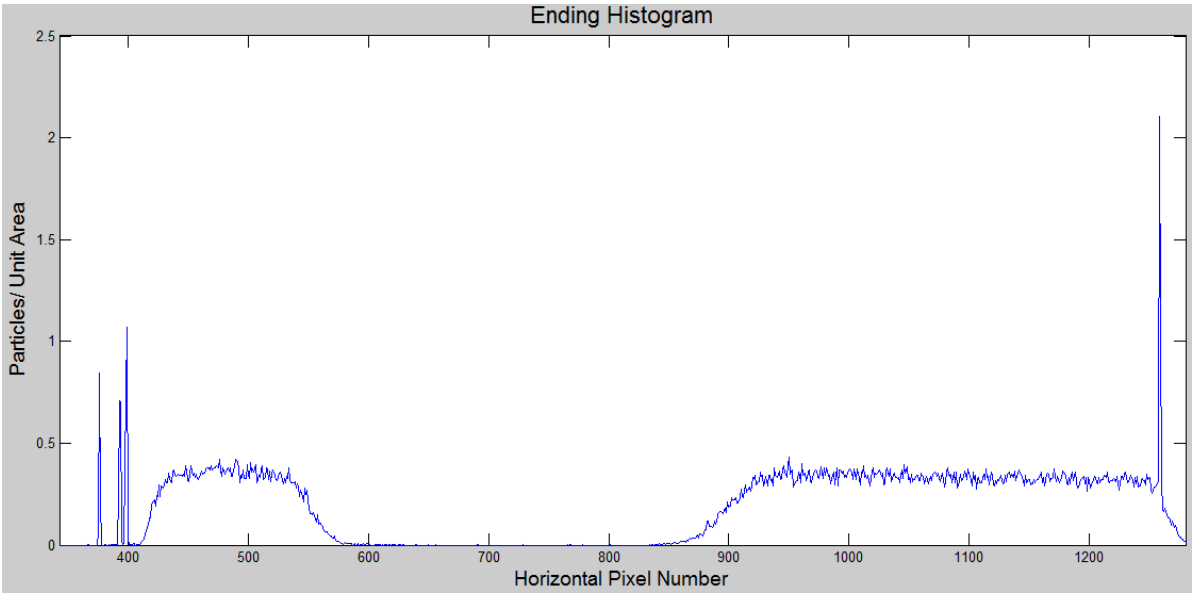


Σχήμα 5.2.9: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού.

ΘΕΣΗ ENDING(ΜΕΤΑ ΤΗ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΣΥΝΕΝΩΣΗ)

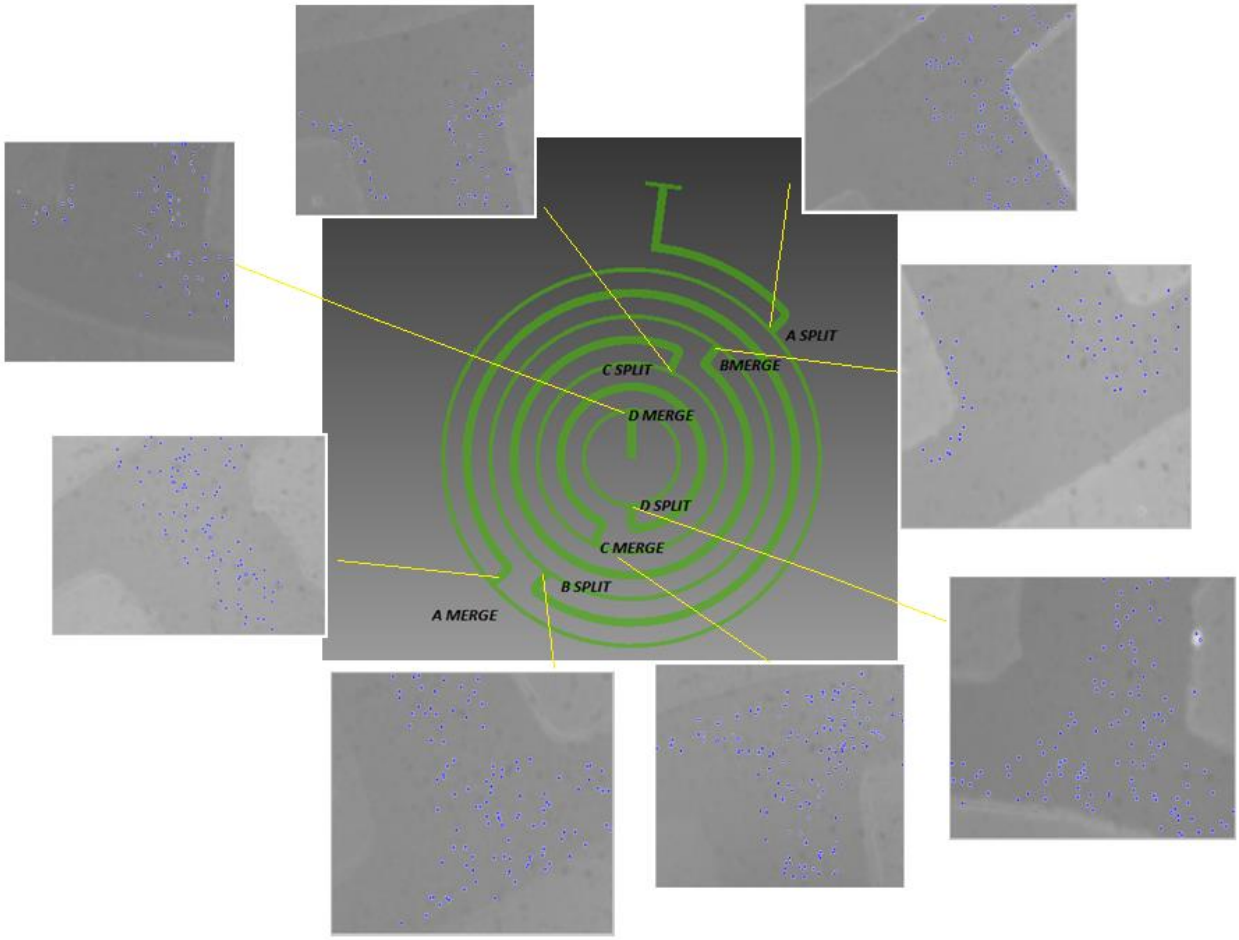


Εικόνα 5.2.11: Στο πλαίσιο παρατηρείται το εμβαδό στο οποίο φαίνεται παρακάτω η ανάλυση συγκέντρωσης(κατά μήκος του πλάτους του καναλιού).



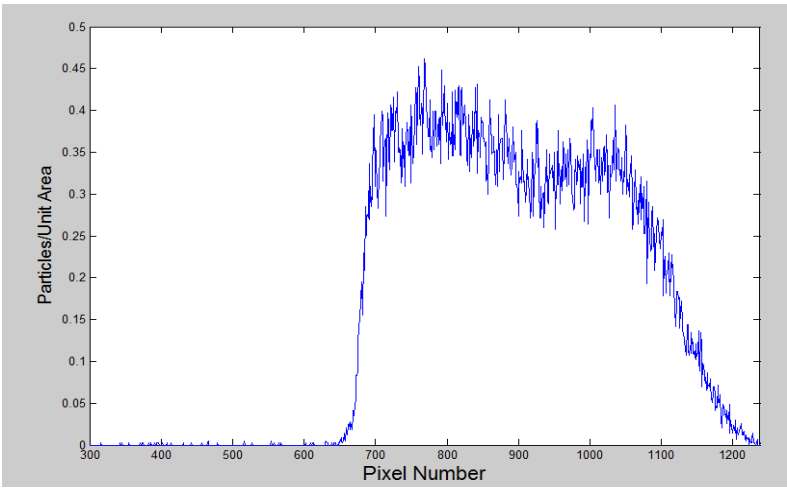
Σχήμα 5.2.10: Συγκέντρωση σωματιδίων ανά μονάδα επιφανείας(pixel^2) κατά το πλάτος του καναλιού.

Συνοψίζοντας τις μετρήσεις συγκέντρωσης παίρνουμε το παρακάτω σχήμα:

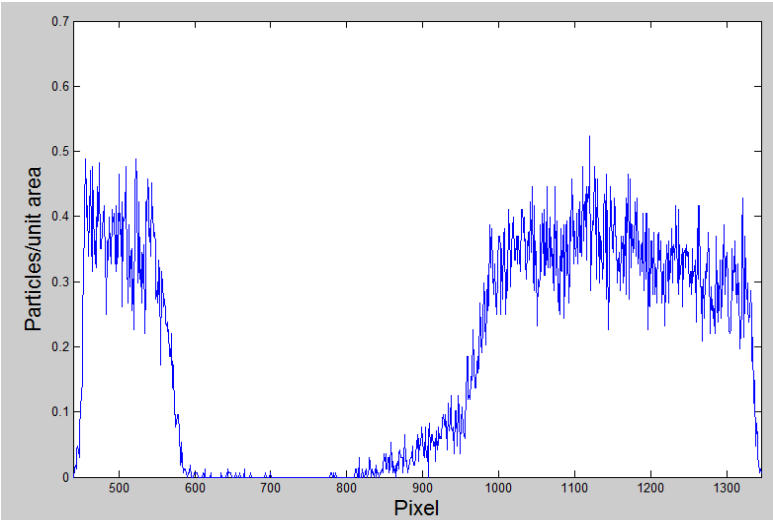


Σχήμα 5.2.11:Συνοπτική παρουσίαση των πεδίων συγκεντρώσεων στις διάφορες θέσεις του μικροαναμίκτη.

Υπενθυμίζουμε ότι τα 2 προφίλ συγκεντρώσεων που επαναλαμβάνονται συνέχεια είναι:



Σχήμα 5.2.12: Το ένα ρεύμα μετατοπισμένο προς το κέντρο του καναλιού.



Σχήμα 5.2.13: Το ένα αρχικό ρεύμα διαχωρισμένο σε δύο , στα 2 τοιχώματα. Το φαινόμενο της διάχυσης γίνεται λοιπόν και στις 2 μεριές του καναλιού ταυτόχρονα.

Ορισμός βαθμού απόδοσης για το μικροαναμίκτη (mixing efficiency):

$$n = 1 - \sqrt{\left(\frac{N_{found} - N_{\exp}}{N_{\exp}}\right)^2} = 1 - \sqrt{\left(\frac{N_{found} - 0.5N_{tot}}{N_{\exp}}\right)^2}$$

- Nexp= Nexpected δηλαδή τα μισά σωματίδια από αυτά που μετρήθηκαν.
- Nfound= Τα σωματίδια που μετρήθηκαν στη μεριά του ρεύματος όπου αρχικά εισήχθησαν 0 σωματίδια(αριστερή λωρίδα στην εικόνα)

Βαθμός απόδοσης για την έξοδο:

Mixing efficiency =52.41%. Σημειώνουμε όμως ότι ο βαθμός απόδοσης αφορά μόνο τα φαινόμενα μεταφοράς και καθόλου αυτά της διάχυσης.

Συμπεράσματα -παρατηρήσεις:

Επειδή ο συντελεστής διάχυσης των σωματιδίων ανιχνευτών (τάξης 10^{-13}) είναι πολύ μικρότερος από αυτό ενός διαλύματος με βιομόρια(τάξη 10^{-9}-10^{-10}), δεν είναι δυνατή η ικανοποιητική μελέτη της ικανότητας ανάμιξης του μικροαναμίκτη που δουλεύει μόνο με διάχυση με τη χρήση σωματιδίων ανιχνευτών 1μm, αλλά είναι ιδανική αν η ανάμιξη οφείλεται κυρίως σε μεταφορά λόγω ορμής(momentum transfer). Για σωματίδια ανιχνευτές τάξης 50 μm και κάτω , ο αριθμός Pe πέφτει σημαντικά θα μπορούσε όμως η μέθοδος να γίνει ανταγωνιστική της μ-LIF για την μελέτη του πεδίου συγκεντρώσεων καθώς δεν απαιτεί δεύτερο laser και δεύτερη διάταξη κάμερας, μειώνοντας πολύ σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα της διάταξης. Συνεπώς αν παρατηρούταν και η διάχυση θα έβγαινε σημαντικά μεγαλύτερος ο βαθμός απόδοσης (mixing efficiency) και θα μειωνόταν η διαφορά από τον βαθμό που υπολογίζει υπολογιστικά το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

και είναι 63% για D=10E-10. Όσον αφορά τα φαινόμενα μεταφοράς/συναγωγής μάζας στο μικροαναμίκτη, ακολουθώντας την λωρίδα με τα σωματίδια, παρατηρούμε πως αυτή μικραίνει σε πλάτος στις στροφές, λόγω των υψηλών ταχυτήτων(αυξάνοντας τη βαθμίδα συγκέντρωσης , καθώς και αποκόπτεται περιοδικά (ανά 2 διαχωρισμούς) σε 2 λωρίδες όταν κινείται στο εξωτερικό διάδρομο του καναλιού(θέση B SPLIT και D SPLIT).Αντίστοιχα, ανά 2 συνενώσεις επανακολλώνται οι 2 λωρίδες όταν ευρίσκονται και οι 2 στον εξωτερικό διάδρομο του καναλιού(θέση CMERGE). Ξαναθυμίζουμε ότι η λωρίδα αντιπροσωπεύει το ένα από τα 2 αναμιγνυόμενα ρεύματα ρευστού. Η μεταφορά ενός κομματιού της λωρίδας λοιπόν στο απέναντι άκρο του καναλιού, οδηγεί λόγω της βαθμίδας συγκέντρωσης σε διάχυση και στο άλλο άκρο του καναλιού, εκεί που προηγουμένως η συγκέντρωση του συγκεκριμένου ρεύματος ήταν μηδενική.

5.3 : ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΔΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

5.3.1: ΠΡΩΤΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ PIV

Στις πρώτες μετρήσεις που πήραμε παρατηρήθηκε ένα απόβλητο που έφραζε ελαφρώς τον τελευταίο διαχωρισμό της ροής , το οποίο οδηγεί σε μη ομοιόμορφο διαχωρισμό της παροχής , συνεπώς και σε μη συμμετρικές ταχύτητες .Οι μετρήσεις πάρθηκαν για να μελετηθεί πόσο ανάντι του εμποδίου επηρεάζεται η ροή. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Insight 4g χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε FORTRAN και για τα αποτελέσματα των rms χρησιμοποιήθηκε το Tecplot 360.

Χαρακτηριστικά μετρήσεων:

Υγρό : απιονισμένο νερό,20°C.

Dt=400 microsec.

Peak to Noise ratio 1.5

Q=5.4microliters/min(Αναμενόμενη ταχύτητα 5mm/sec)

Βάθος μέτρησης micro-PIV (Depth of correlation-Meinhart(2000)) =29.75 μm

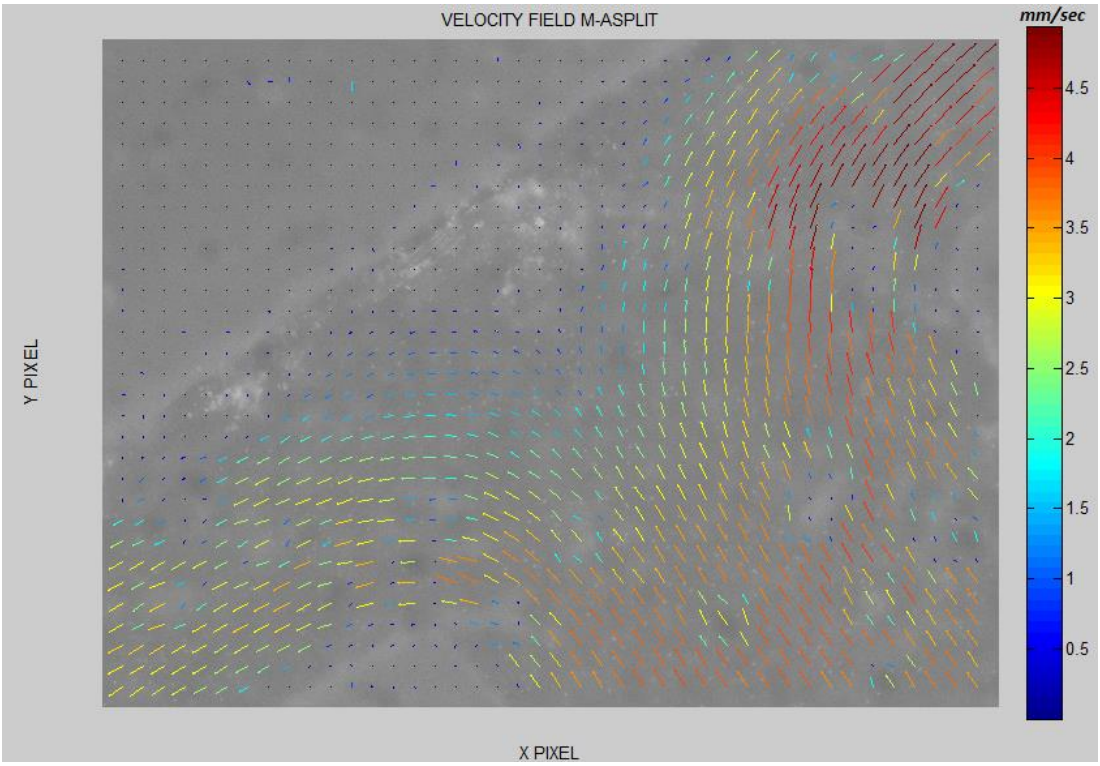
Σημειώνουμε πως το rms (τυπική απόκλιση) βρίσκεται από τον τύπο:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}$$

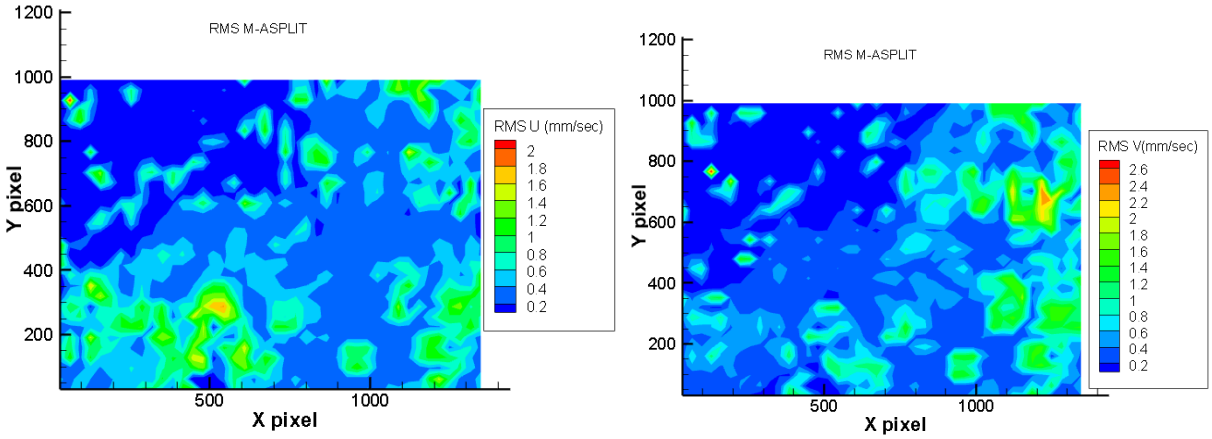
Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν σε μέσο βάθος 33.25μm.

Επεξήγηση ονοματολογίας:

M-ASPLIT : M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ,A SPLIT= ΠΡΩΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ



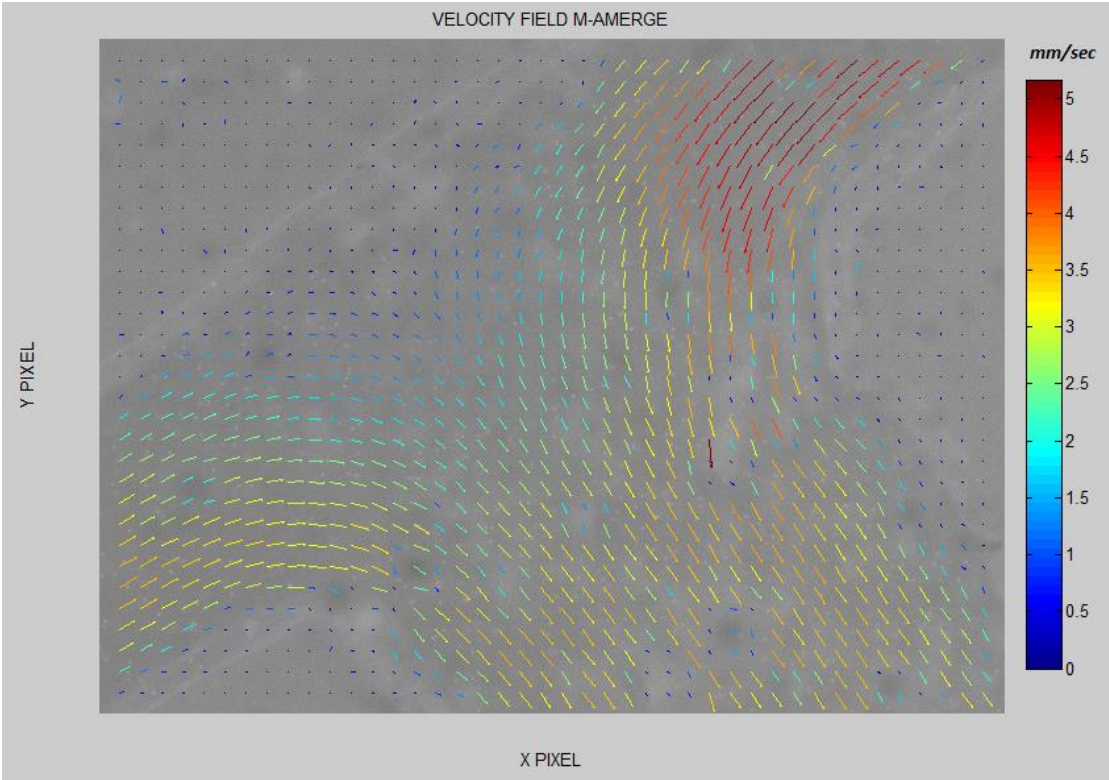
Σχήμα 5.3.1.1: Το πεδίο ταχυτήτων στο πρώτο σημείο διαχωρισμού.



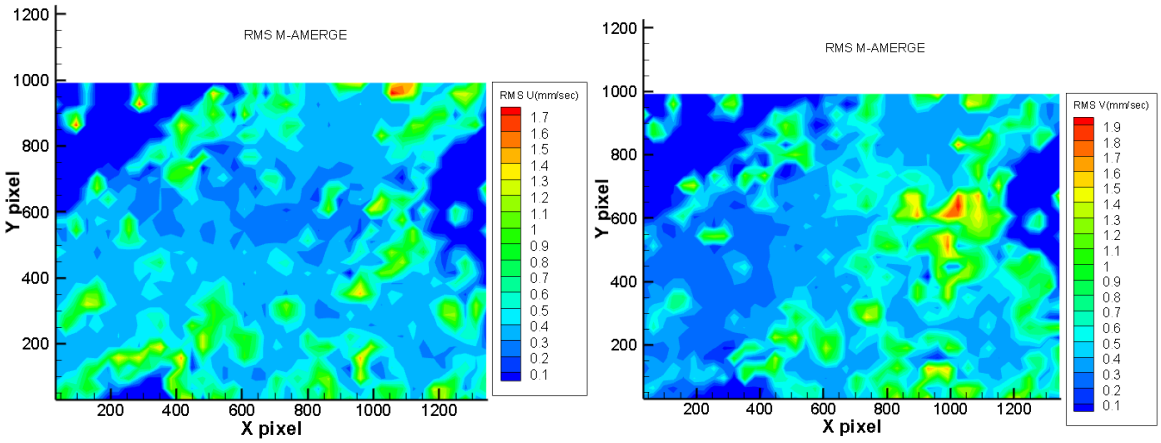
Σχήμα 5.3.1.2: Οι τυπικές αποκλίσεις στο πρώτο σημείο διαχωρισμού, για την οριζόντια και κάθετη ταχύτητα.

Δικαιολόγηση μικρών ταχυτήτων(Αναμενόμενη ταχύτητα λόγω παροχής και διαστάσεων διατομής τα 5 mm/sec). Πιθανόν κωνικότητας τοιχωμάτων, η διάσταση του πλάτος είναι μεγαλύτερη της αναμενόμενης. Πιθανόν το lamination να έχει ξεκολλήσει στις άκρες, αυξάνοντας τη διατομή.Επίσης έχει διαπιστωθεί και μη ακρίβεια στη διάσταση του βάθους .Πιθανές και διαρροές ρευστού από το lamination.Άλλος λόγος: απόβλητα /υπερβολική τραχύτητα πυθμένα.

2η παρατήρηση: φαίνονται διανύσματα εκεί που κανονικά δεν υπάρχει ρευστό. Πιθανόν έπρεπε να πάρουμε 1000 και όχι 500 για να αφαιρεθούν.

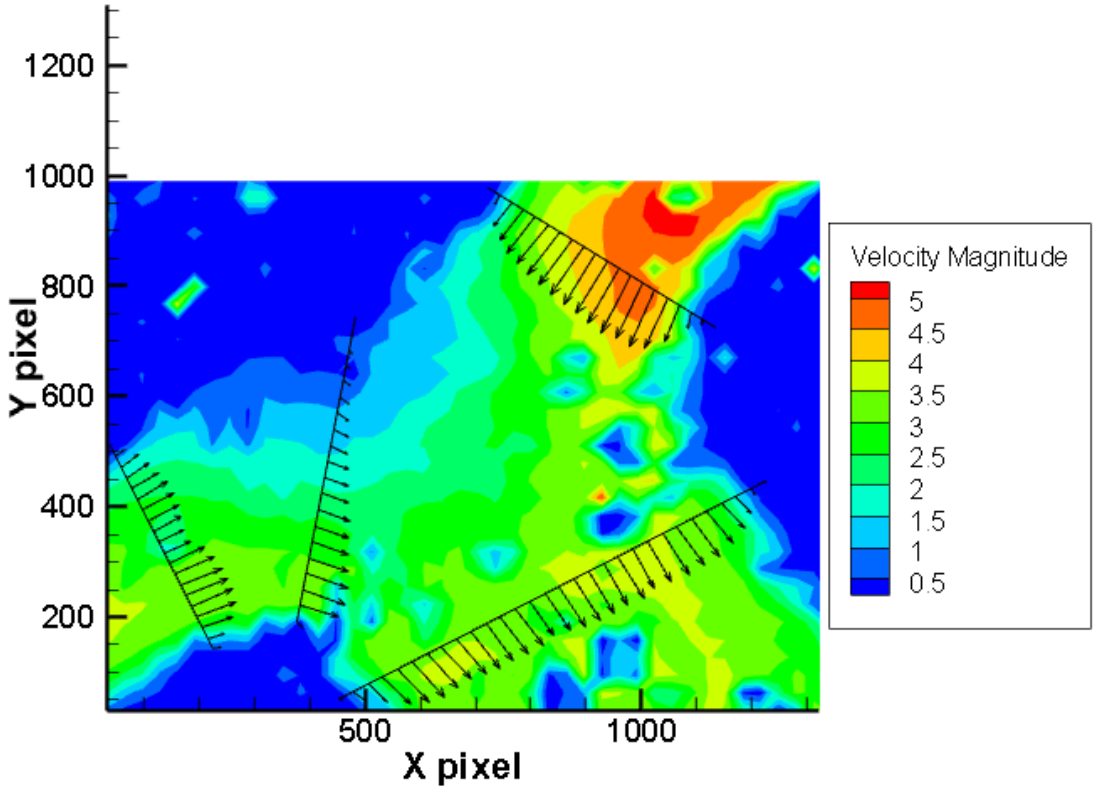


Σχήμα 5.3.1.3: Το πεδίο ταχυτήτων στο πρώτο σημείο συνένωσης.



Σχήμα 5.3.1.4: Οι τυπικές αποκλίσεις στο πρώτο σημείο επανένωσης, για την οριζόντια και κάθετη ταχύτητα.

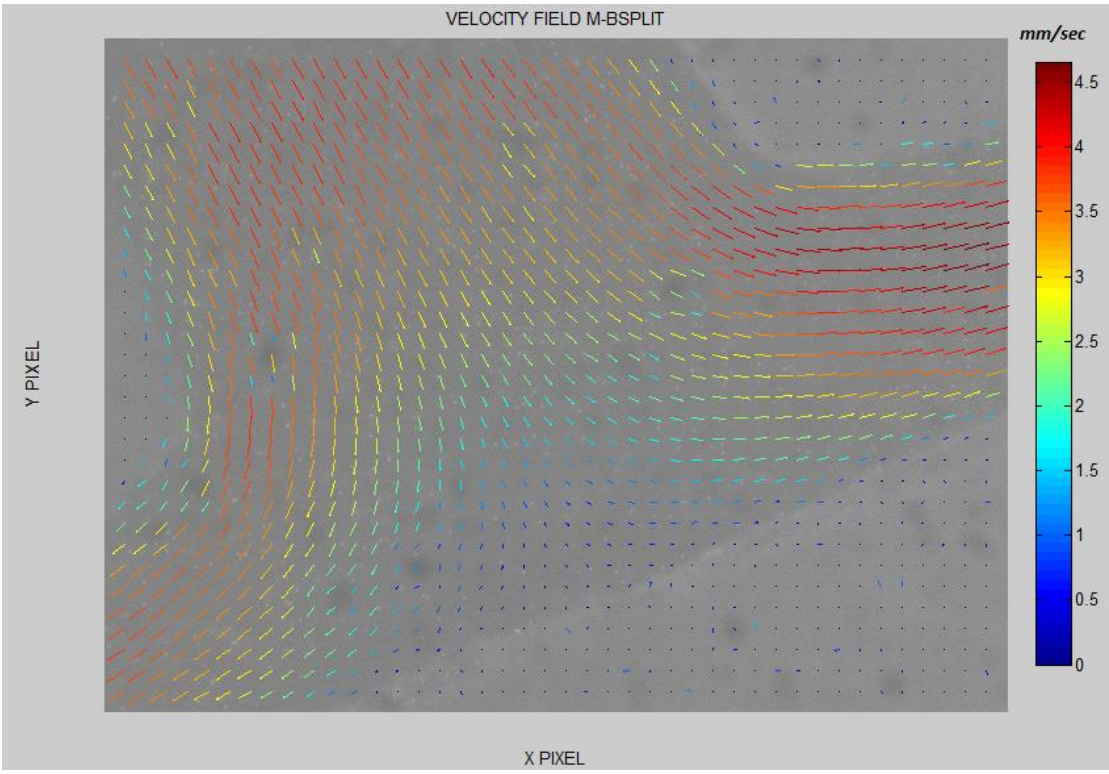
Μελετήθηκαν επίσης τα προφίλ κατά μια γραμμή κατά πλάτος των καναλιών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



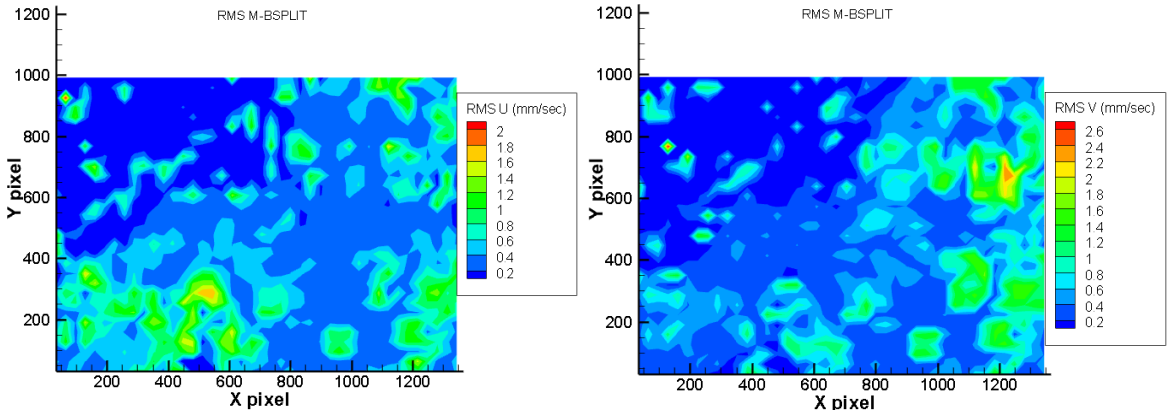
Σχήμα 5.3.1.5: Μελέτη των προφίλ στα κανάλια πριν και μετά τη συνένωση.

Τα προφίλ απέχουν δεν είναι τελείως ομοιόμορφα για τους παρακάτω λόγους:

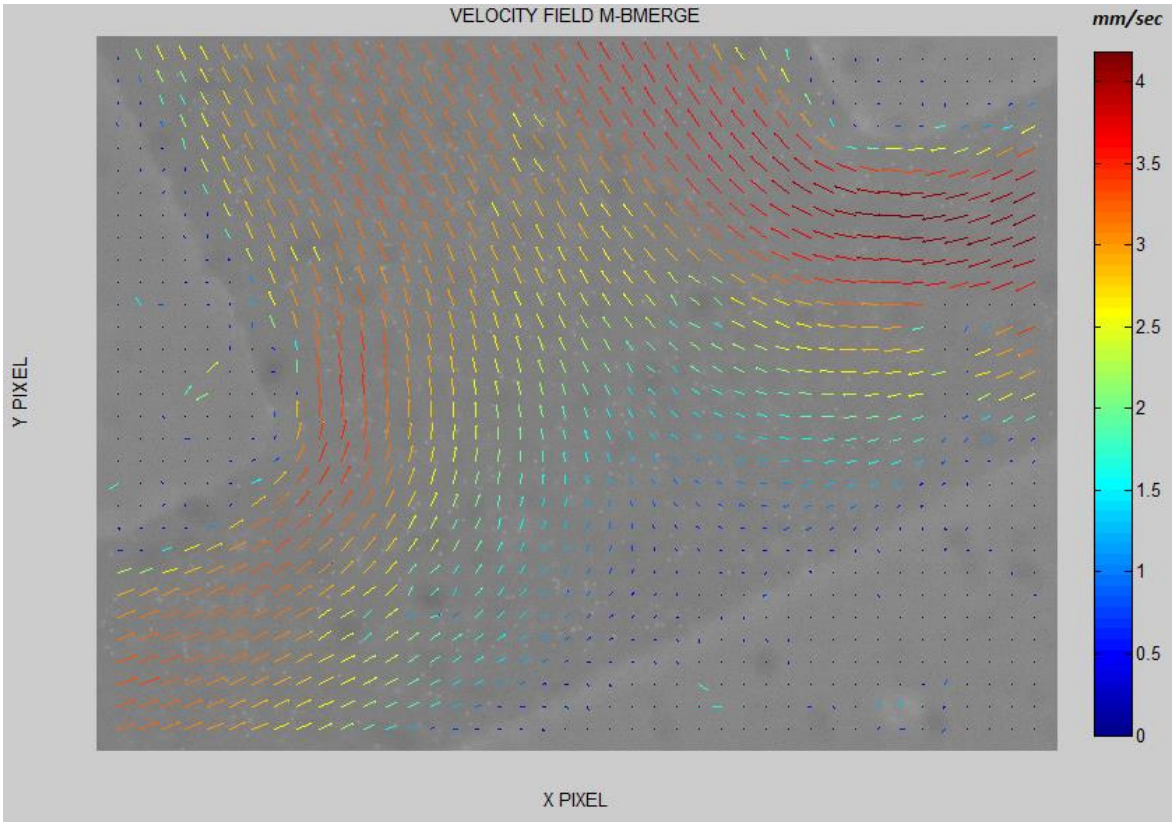
Απόβλητα σκόνης στο φακό της κάμερας μας κάνουν να χάνουμε διανύσματα. Επίσης απόβλητα σκόνης μέσα στο κανάλι δημιουργούν φράγματα όπου τοπικά αυξάνουν ή μειώνουν τη ταχύτητα τοπικά. Αυτός είναι και ο λόγος που παρακάτω επανελήφθησαν οι παραπάνω μετρήσεις. Τέλος αναφέρουμε πως τα κανάλια είναι καμπυλωμένα και όχι ευθύγραμμα και εφόσον σε μια στροφή η κλίση πίεσης είναι μεγαλύτερη στο εσωτερικό διάδρομο περιμένουμε μια ανισοκατανόμή στην ταχύτητα κοντά στις στροφές(ελαφρώς μεγαλύτερες ταχύτητες στην εσωτερική διαδρομή, για μικρούς Re.)



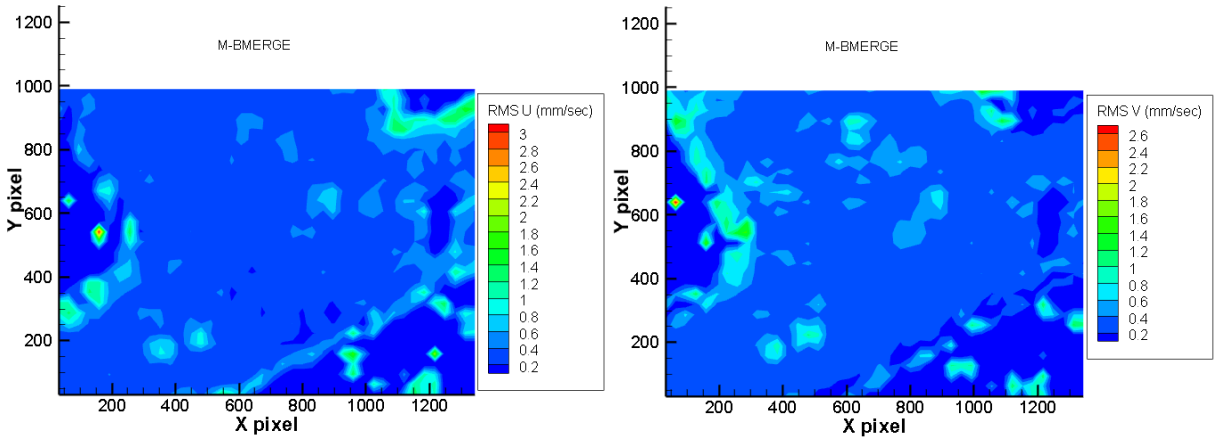
Σχήμα 5.3.1.6: Πεδίο ταχυτήτων στο δεύτερο σημείο διαχωρισμού.



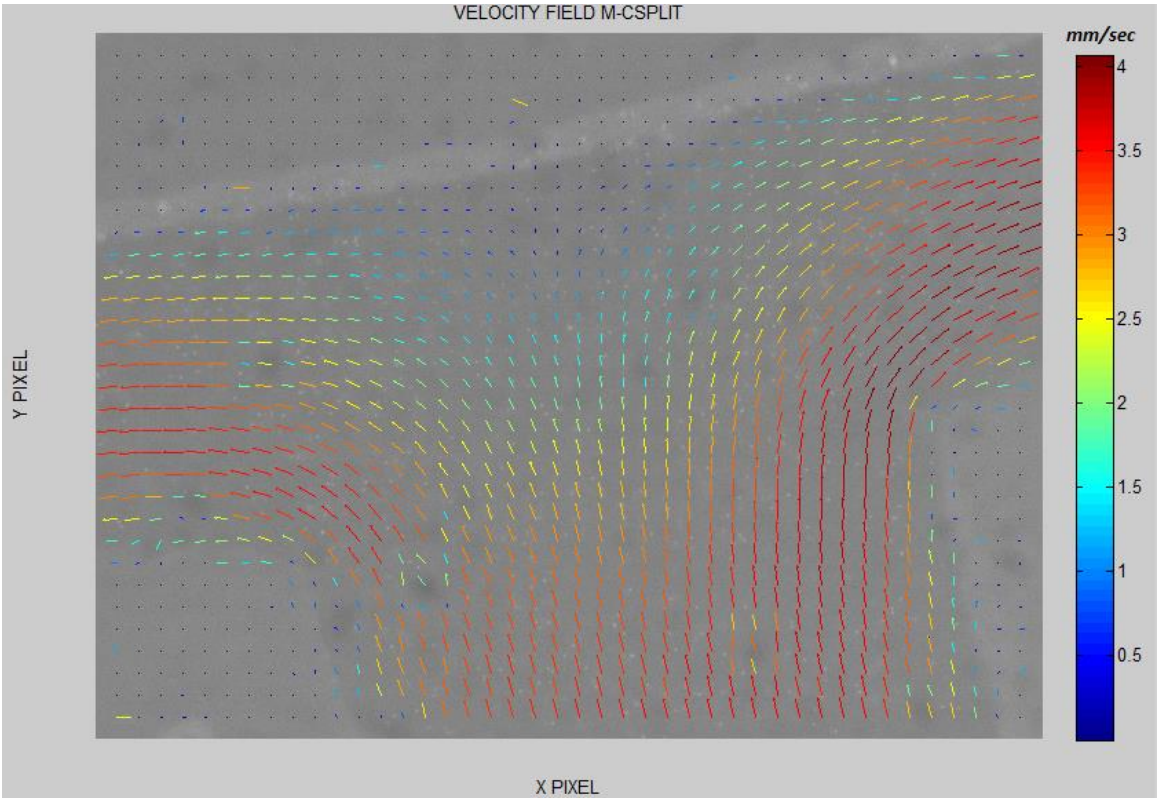
Σχήμα 5.3.1.7: Τυπικές αποκλίσεις στο δεύτερο σημείο διαχωρισμού, κάθετη (U) και οριζόντια(V) ταχύτητα.



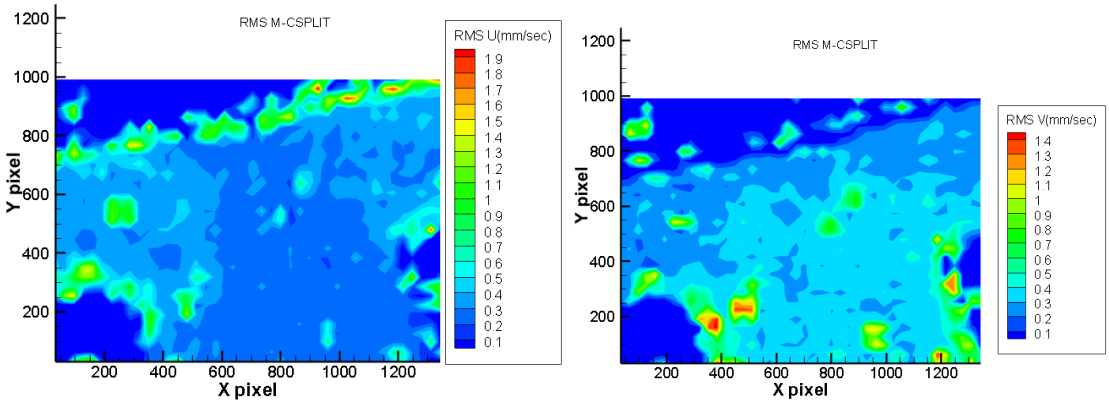
Σχήμα 5.3.1.8: Πεδίο ταχυτήτων στο δεύτερο σημείο επανένωσης.



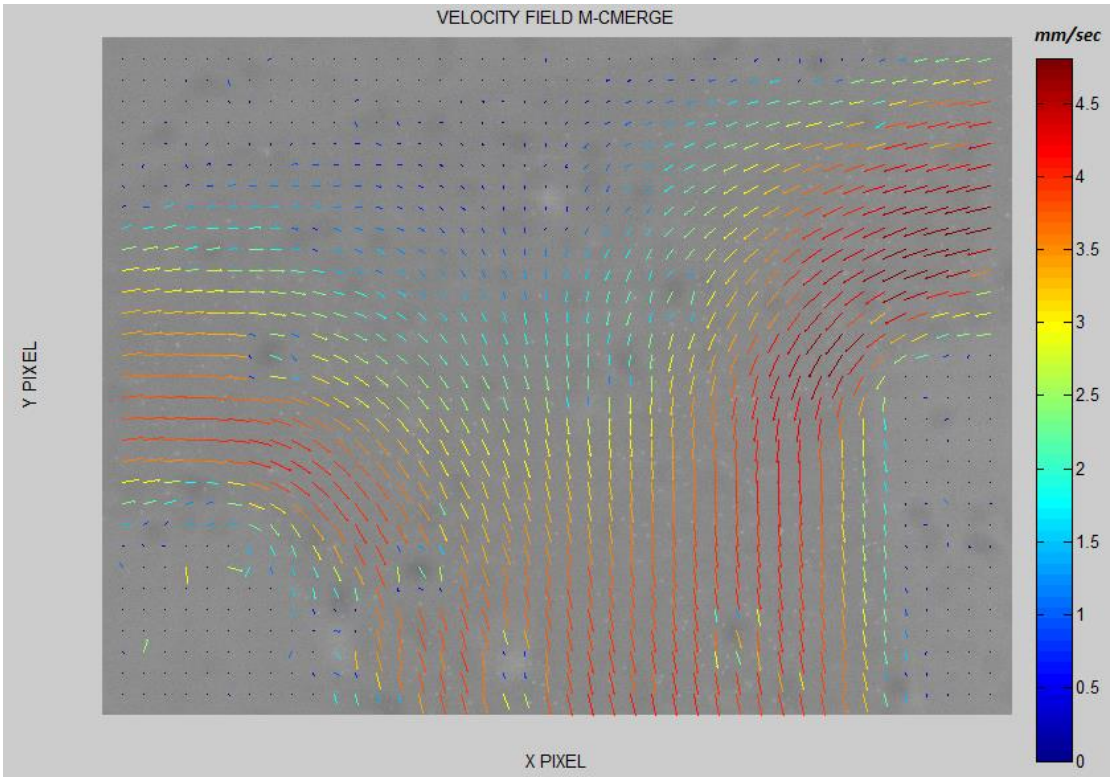
Σχήμα 5.3.1.9: Τυπικές αποκλίσεις στο δεύτερο σημείο επανένωσης , κάθετη (U) και οριζόντια(V) ταχύτητα.



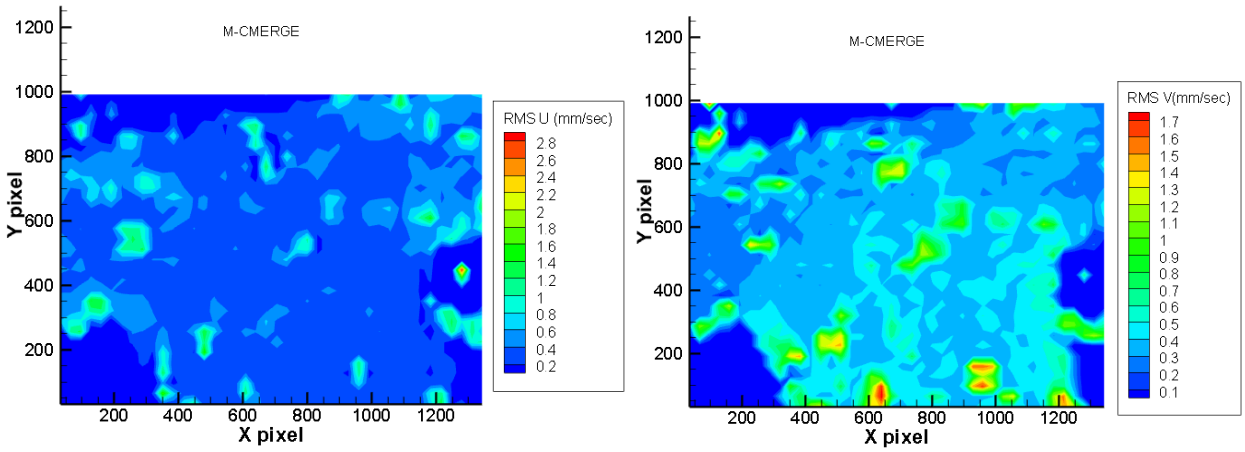
Σχήμα 5.3.1.10 : Πεδίο ταχυτήτων στο τρίτο σημείο διαχωρισμού.



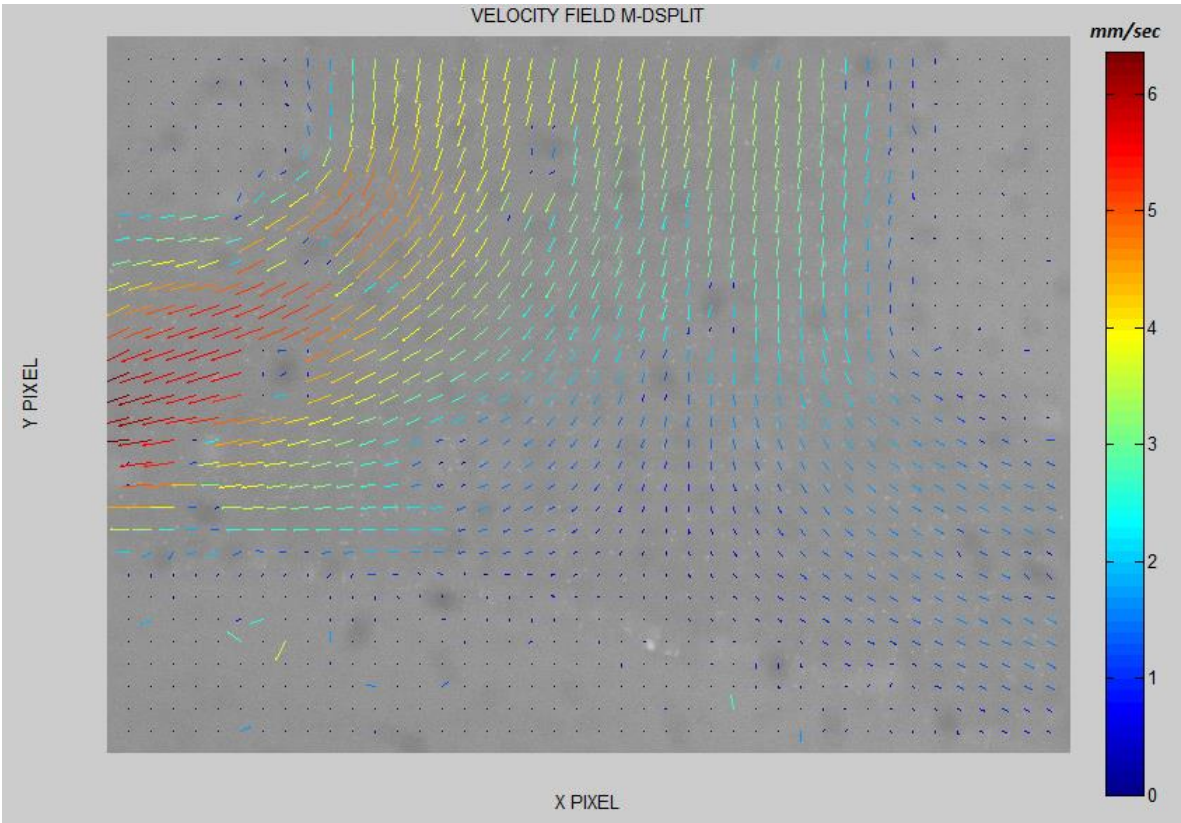
Σχήμα 5.3.1.11 : Τυπικές αποκλίσεις ταχυτήτων στο τρίτο σημείο διαχωρισμού.



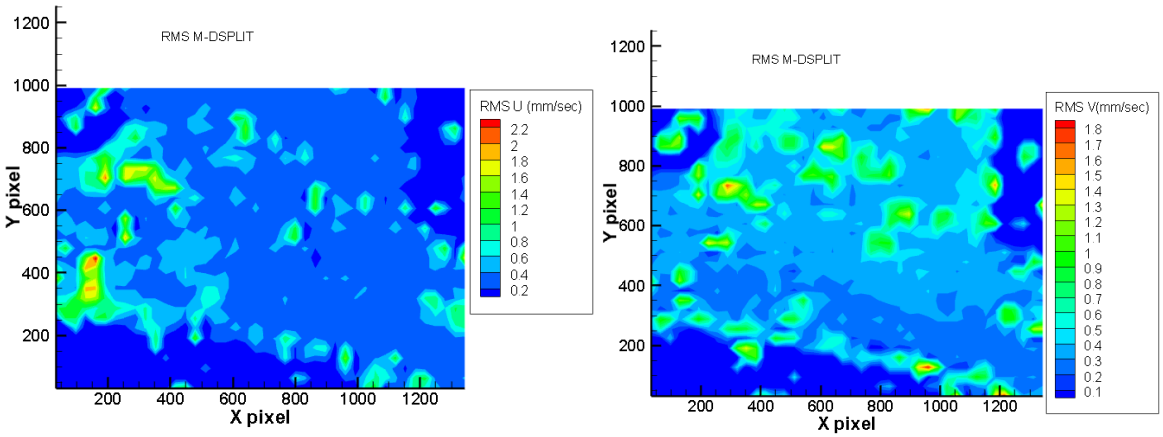
Σχήμα 5.3.1.12 : Πεδίο ταχυτήτων στο τρίτο σημείο επανένωσης.



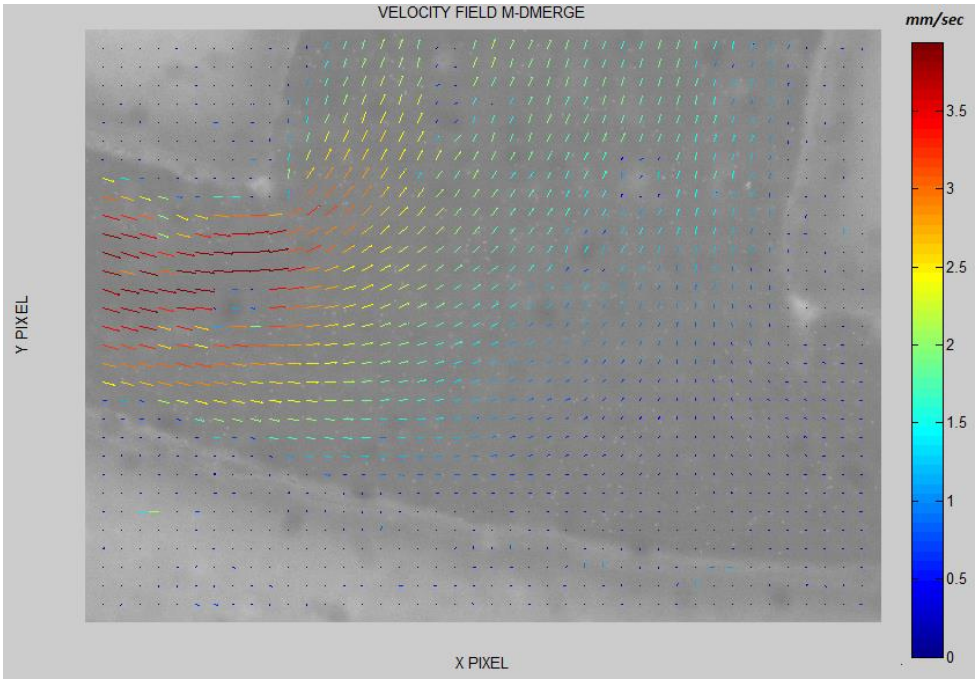
Σχήμα 5.3.1.13 : Τυπικές αποκλίσεις ταχυτήτων στο τρίτο σημείο επανένωσης.



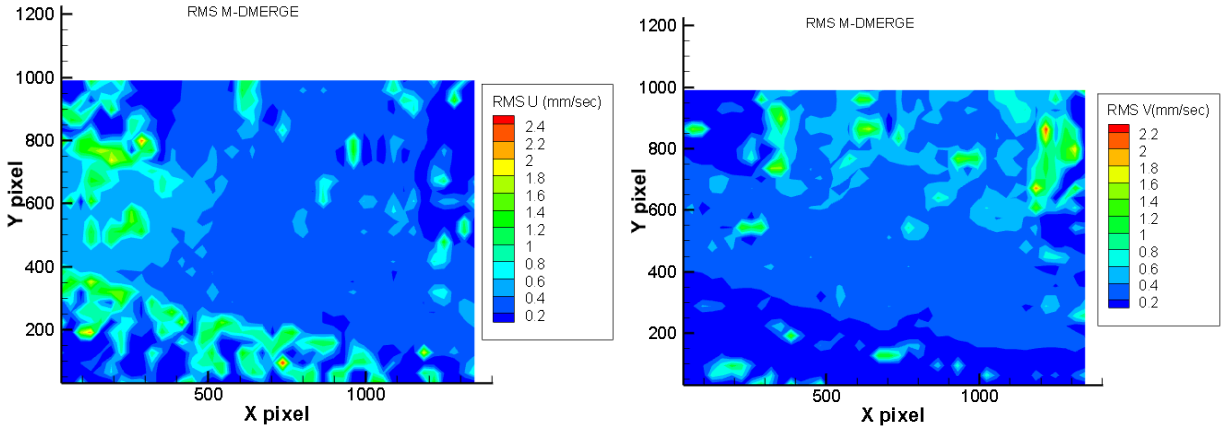
Σχήμα 5.3.1.14 : Πεδίο ταχυτήτων στο τέταρτο σημείο διαχωρισμού .



Σχήμα 5.3.1.15 : Τυπικές αποκλίσεις ταχυτήτων στο τέταρτο σημείο διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.1.16 : Πεδίο ταχυτήτων στο τέταρτο σημείο επανένωσης.



Σχήμα 5.3.1.17 : Τυπικές αποκλίσεις ταχυτήτων στο τέταρτο σημείο επανένωσης.

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ/ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ: ΠΟΣΟ ΑΝΑΝΤΗ ΤΟΥ ΕΜΠΟΔΙΟΥ ΤΕΛΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΤΗΚΕ Η ΡΟΗ?

Το απόβλητο κόλλας είχε παρατηρηθεί στο μικροσκόπιο μεταξύ M-DSPLIT και M-DMERGE, αλλάζοντας την παροχή που διέρχεται από το ένα κανάλι, περιορίζοντας την στο 26.5% της παροχής από το κανάλι που δεν είχε απόβλητο. Το πεδίο είναι εμφανώς επηρεασμένο όμως στο M-DSPLIT το οποίο βρισκόταν σε απόσταση 2.5 mm από το απόβλητο. Οι ταχύτητες που παρατηρούνται στο M-DSPLIT, απο τη μερία που βρίσκεται το απόβλητο είναι υποτετραπλάσιες σε σχέση με το άλλο κανάλι.

5.3.2 : ΤΕΛΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ PIV

Αφού βεβαιώθηκε η καθαρότητα των καναλιών(η μη ύπαρξη φυσαλίδων καθώς και σκόνης/κόλλας από το lamination μέσα στα κανάλια) πήραμε τις τελευταίες μετρήσεις. Αναπόφευκτη ανακρίβεια εισάγεται βέβαια λόγω του lamination που φουσκώνει και συρρικνώνεται αλλάζοντας την διατομή ανάλογα με τη πίεση. Ανακρίβεια(γεωμετρική) υπάρχει επίσης λόγω της κατασκευής.

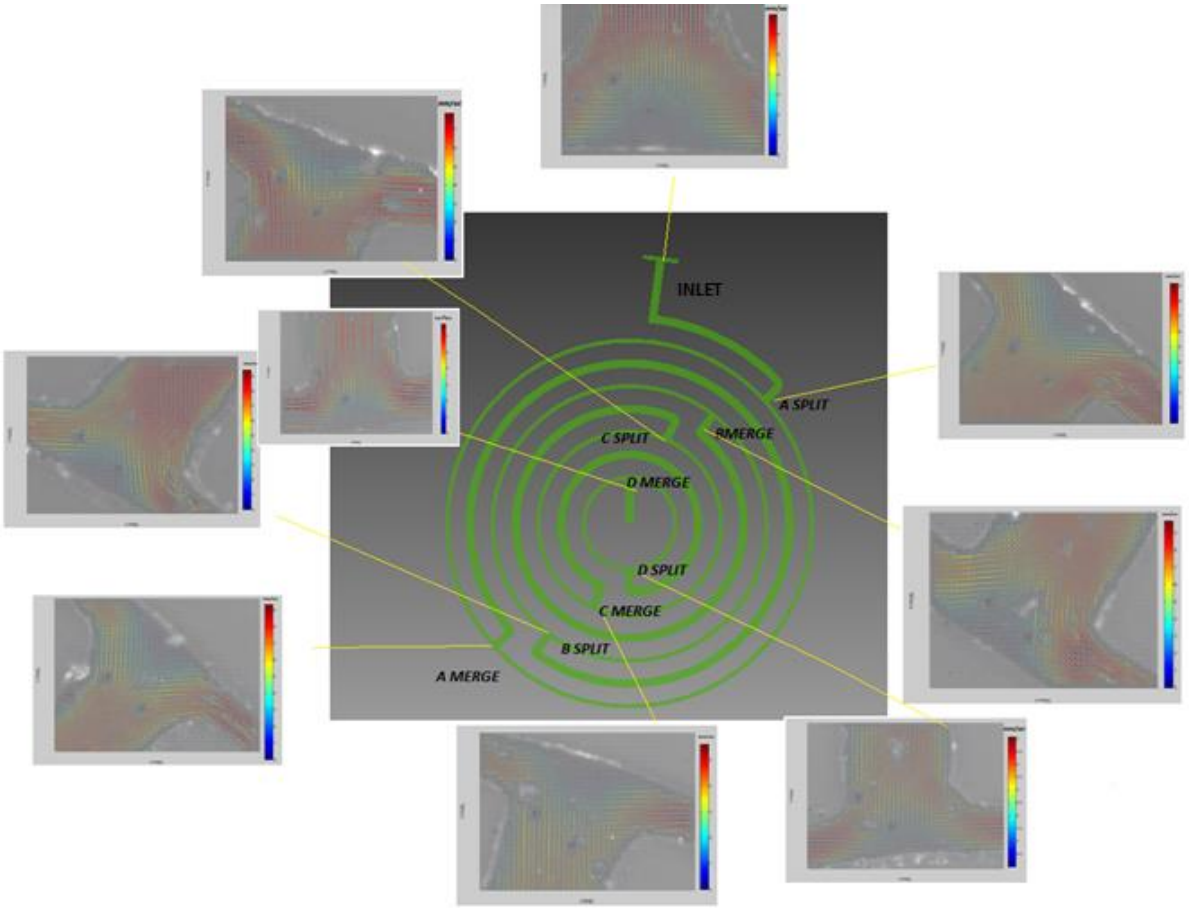
Βάθος ετεροσυσχέτισης micro-PIV (Depth of correlation-Meinhart(2000)) =29.75 μm

Ισχύουν τα παραπάνω στοιχεία της ροής. Παροχή όπως και πριν 5.4 μL/min.

Στοιχεία επεξεργασίας στο INSIGHT 4G:

Χρησιμοποιήθηκε επεξεργασία ετεροσυσχέτισης με classic PIV,με interrogation area :64X64(Για κάθε περιοχή με επιφάνεια 64X64 πίξελ βγάζω ένα διάνυσμα),Peak to noise ratio στο Gaussian Peak(plugin settings): 1.5. Για κάθε θέση παίρνουμε 500 φωτογραφίες με χρονικό διάστημα 400 μικροσεκόντ.

Η ονοματολογία των βαθών περιγράφεται παρακάτω. Παρακάτω παρατίθενται τα πεδία ταχυτήτων στις 9 μετρούμενες θέσεις(για 3 βάθη).Υπενθυμίζουμε τις θέσεις στις οποίες έγιναν μετρήσεις στο σχήμα παρακάτω:



Σχήμα 5.3.2.1: Σχηματικά οι μετρήσεις ταχυτήτων και οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκαν.

Ακολουθούν οι μετρήσεις για κάθε θέση.

ΘΕΣΗ INLET (ΠΡΙΝ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ)

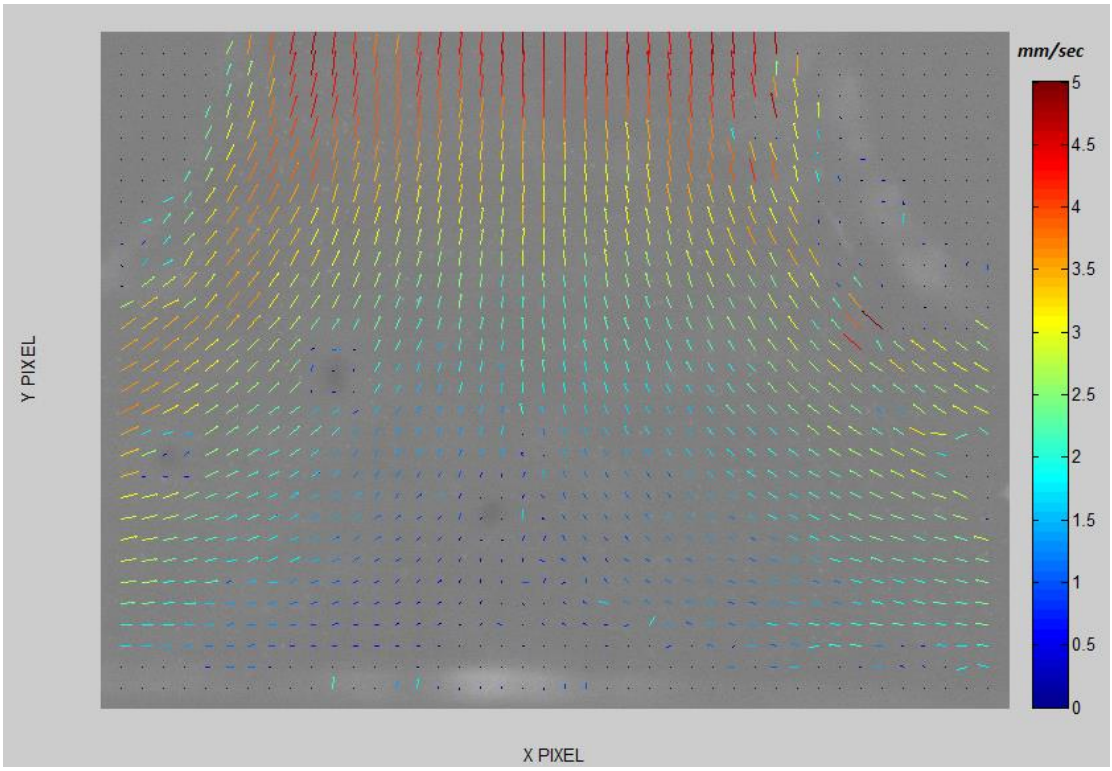
*Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικο βάθος*79.8μm) *:*

*D=DOWN=-15*1.33 =19.95μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

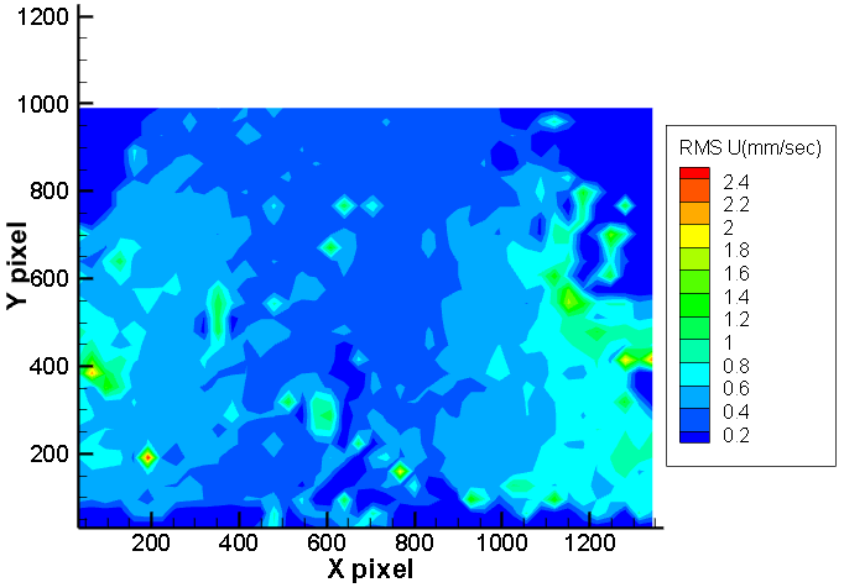
*U=UP=+15*1.33 =19.95μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

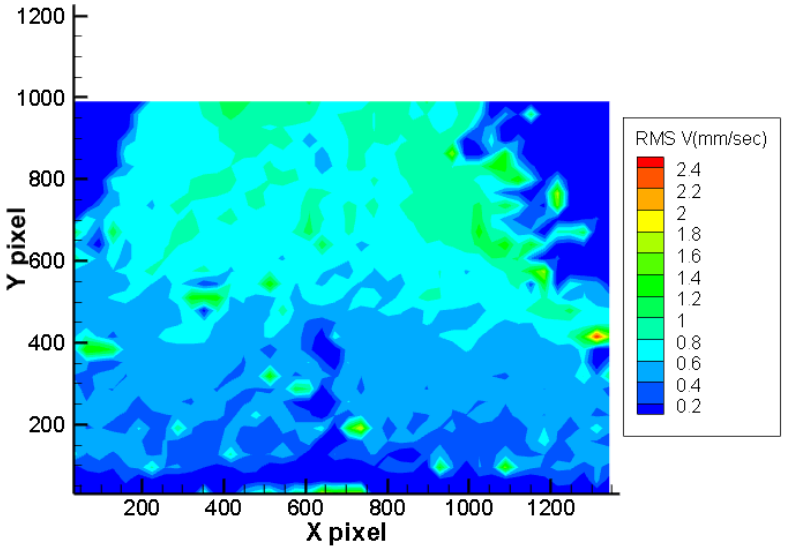
ΘΕΣΗ D INLET(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.2: Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση εισόδου.

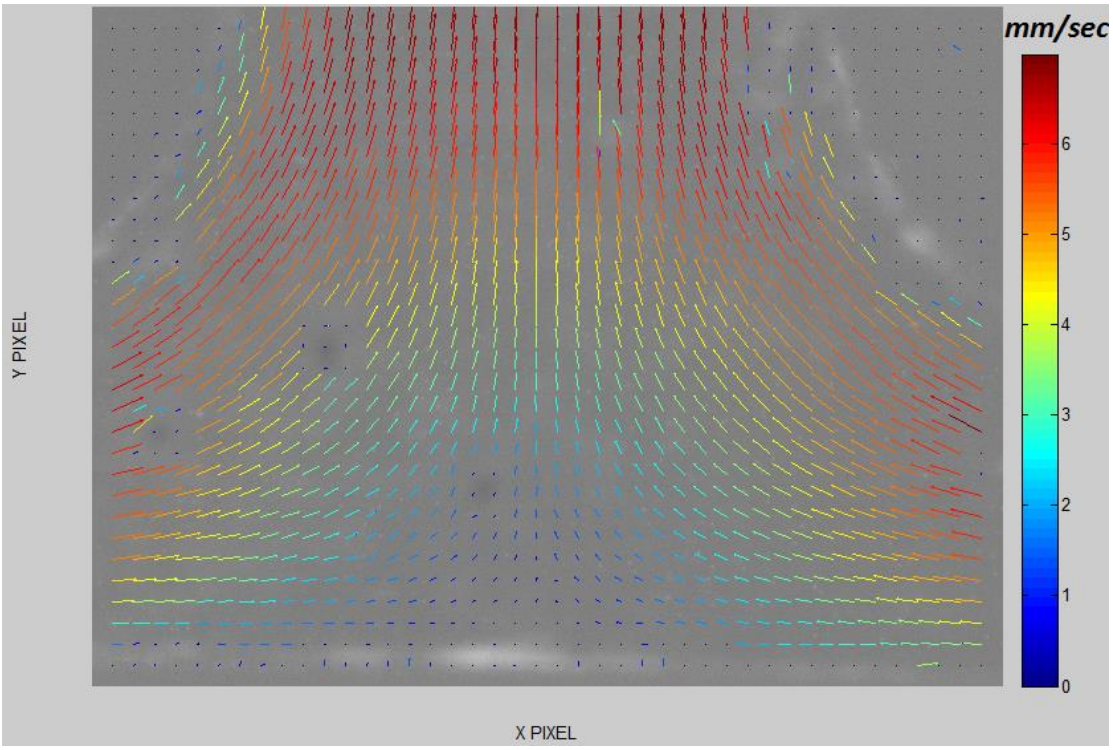


Σχήμα 5.3.2.3: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα, στην θέση εισόδου.

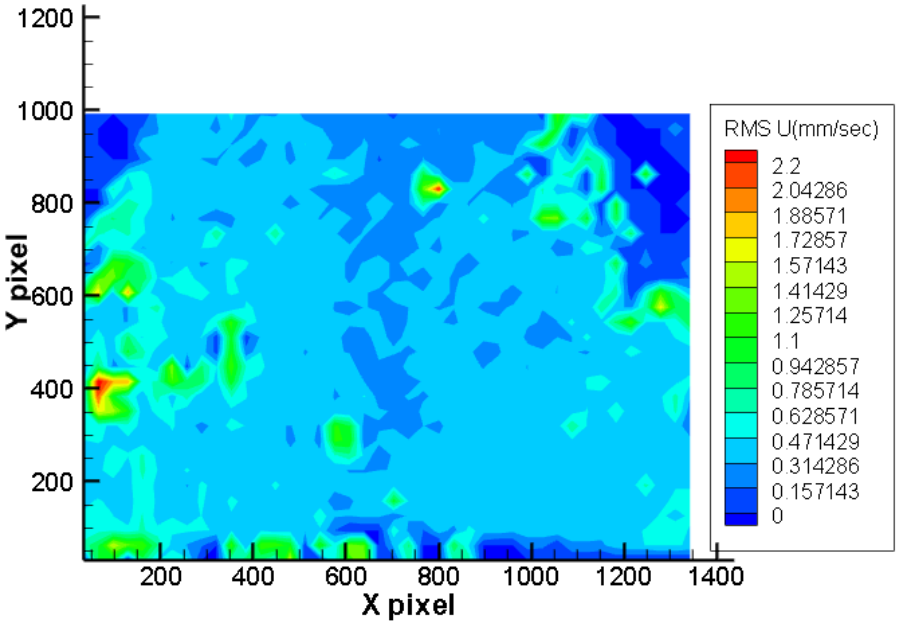


Σχήμα 5.3.2.4: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα, στην θέση εισόδου.

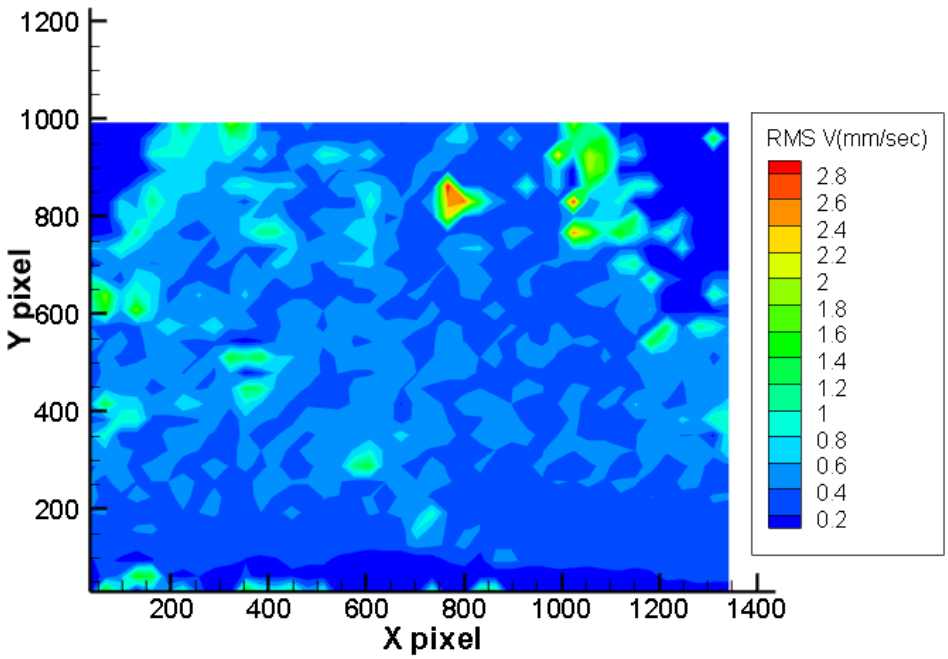
ΘΕΣΗ Μ INLET(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



Σχήμα 5.3.2.5 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση εισόδου.

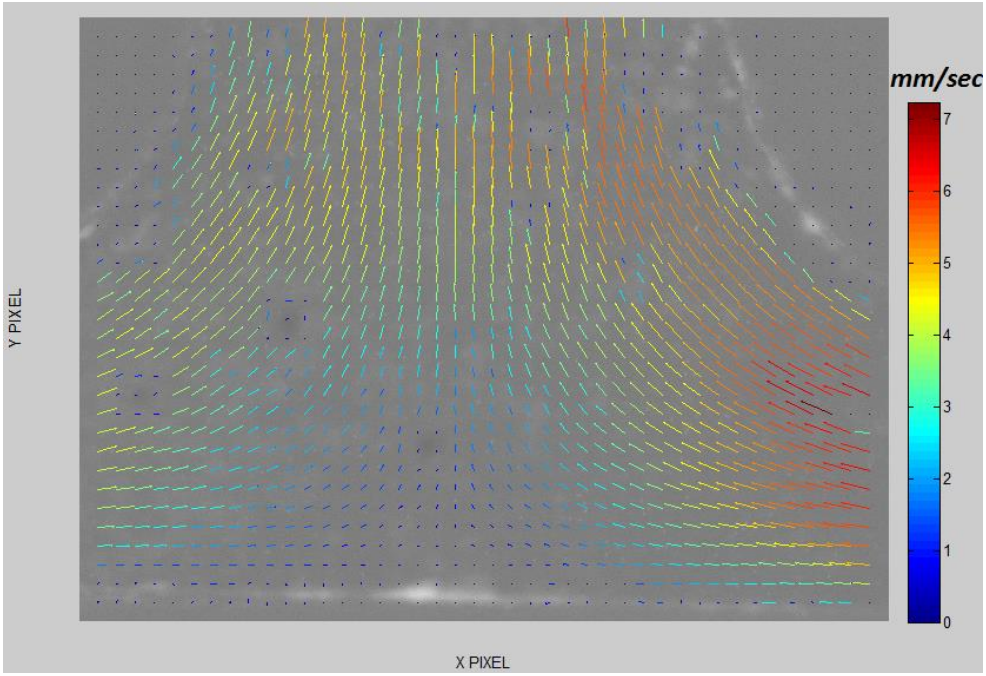


Σχήμα 5.3.2.6: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.

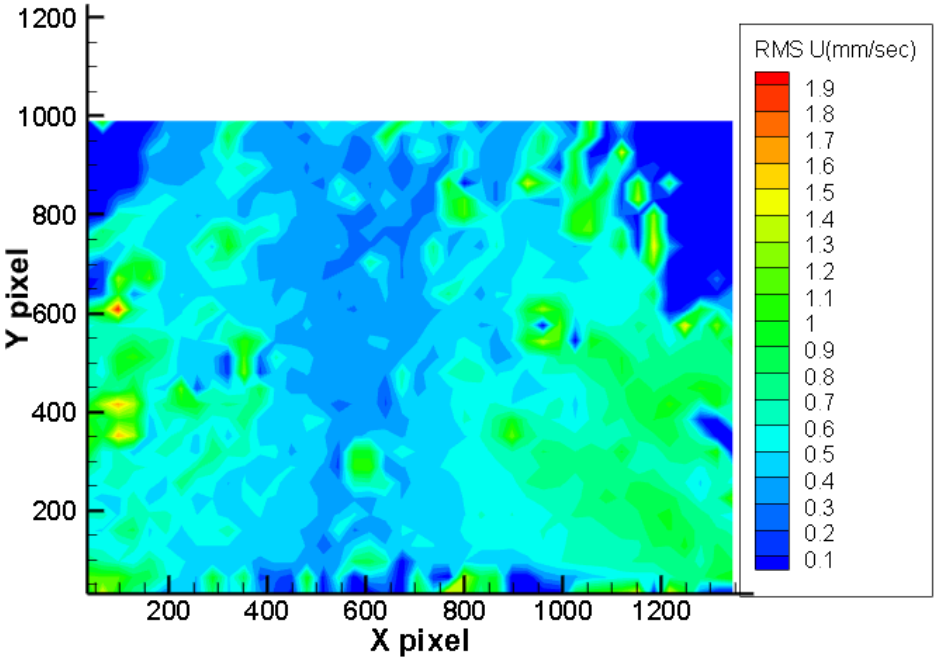


Σχήμα 5.3.2.7: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα.

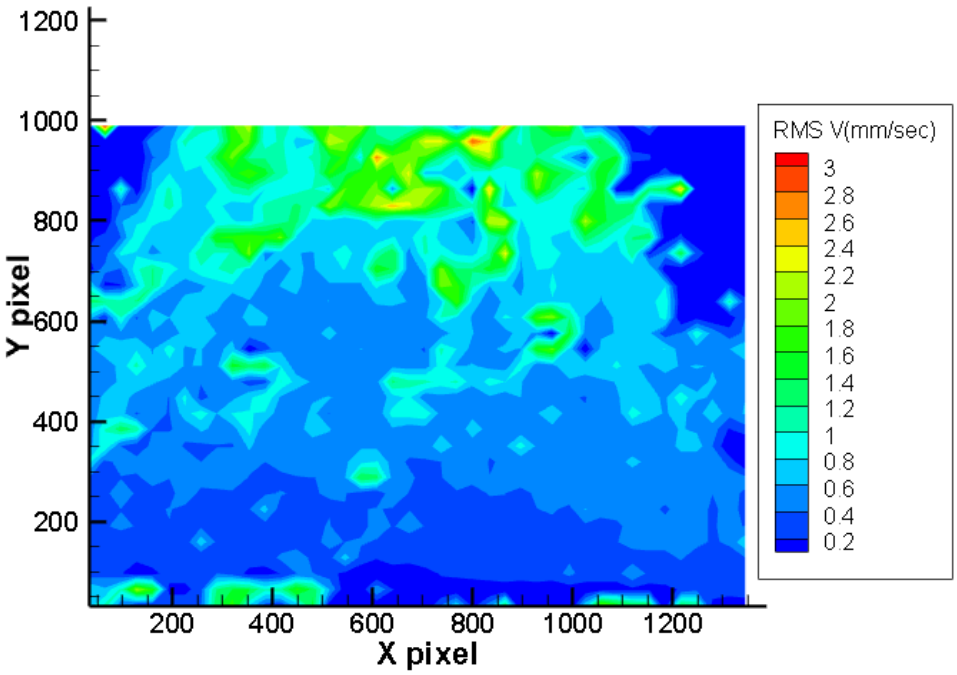
ΘΕΣΗ U INLET(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.8 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση εισόδου.



Σχήμα 5.3.2.9 : Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.



Σχήμα 5.3.2.10 : Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα.

ΘΕΣΗ A SPLIT:

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

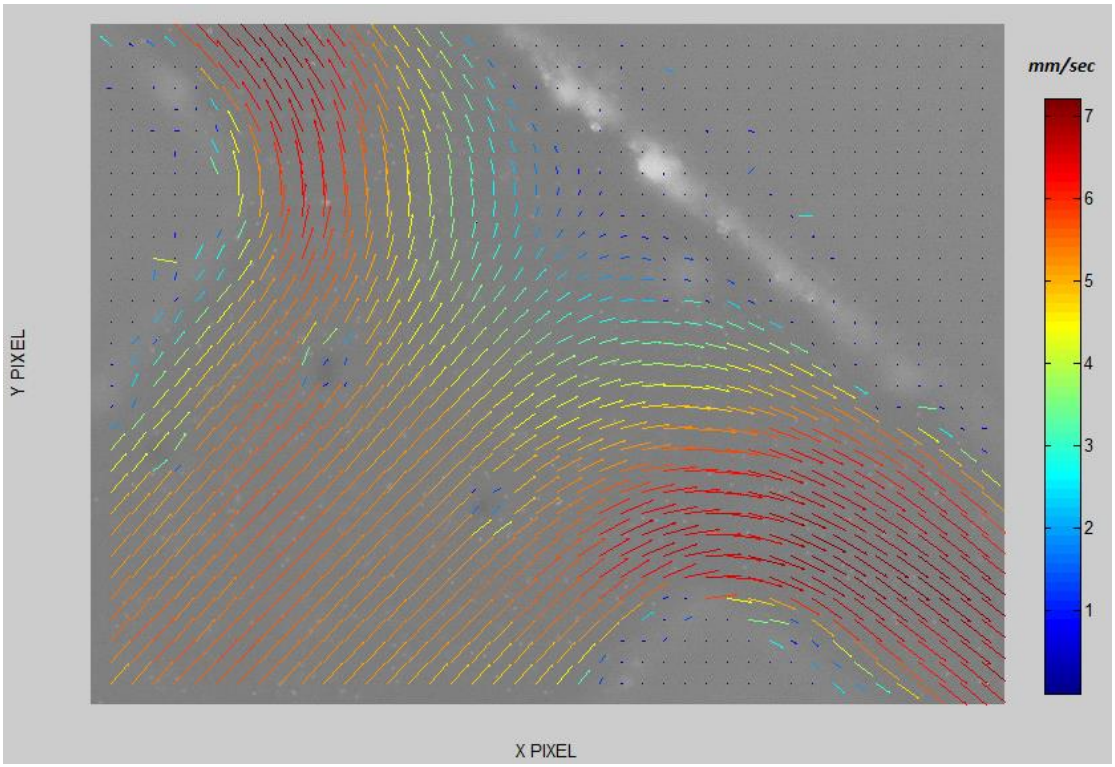
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

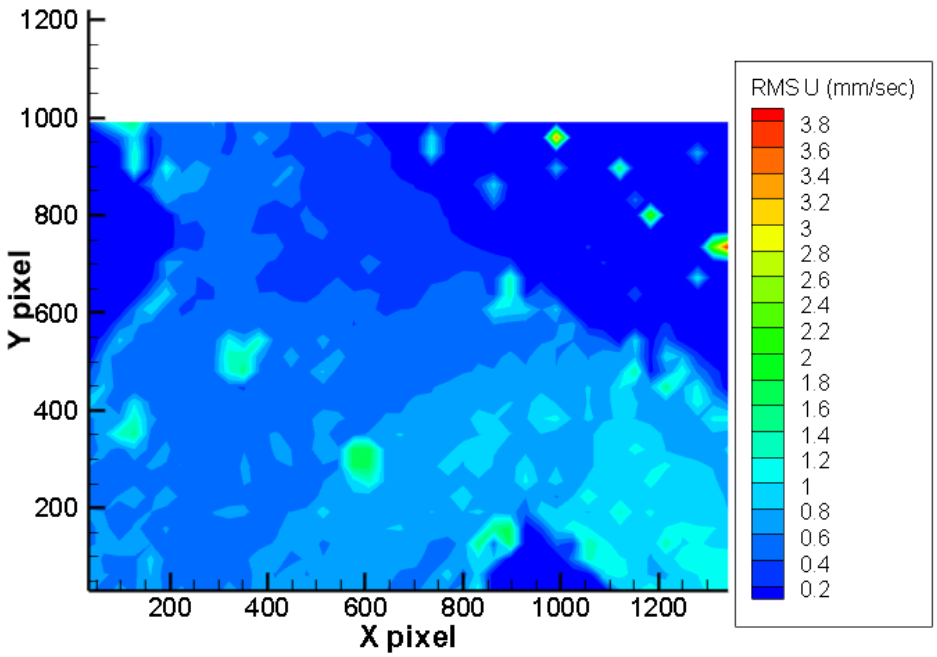
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re:)0.64

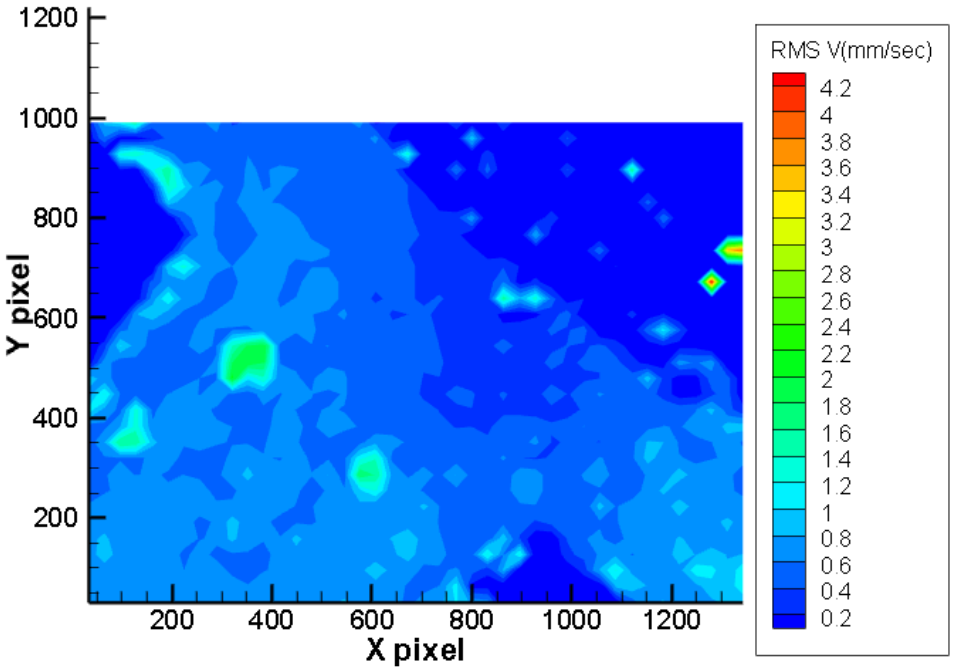
ΘΕΣΗ D A SPLIT(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.11 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση πρώτου διαχωρισμού.

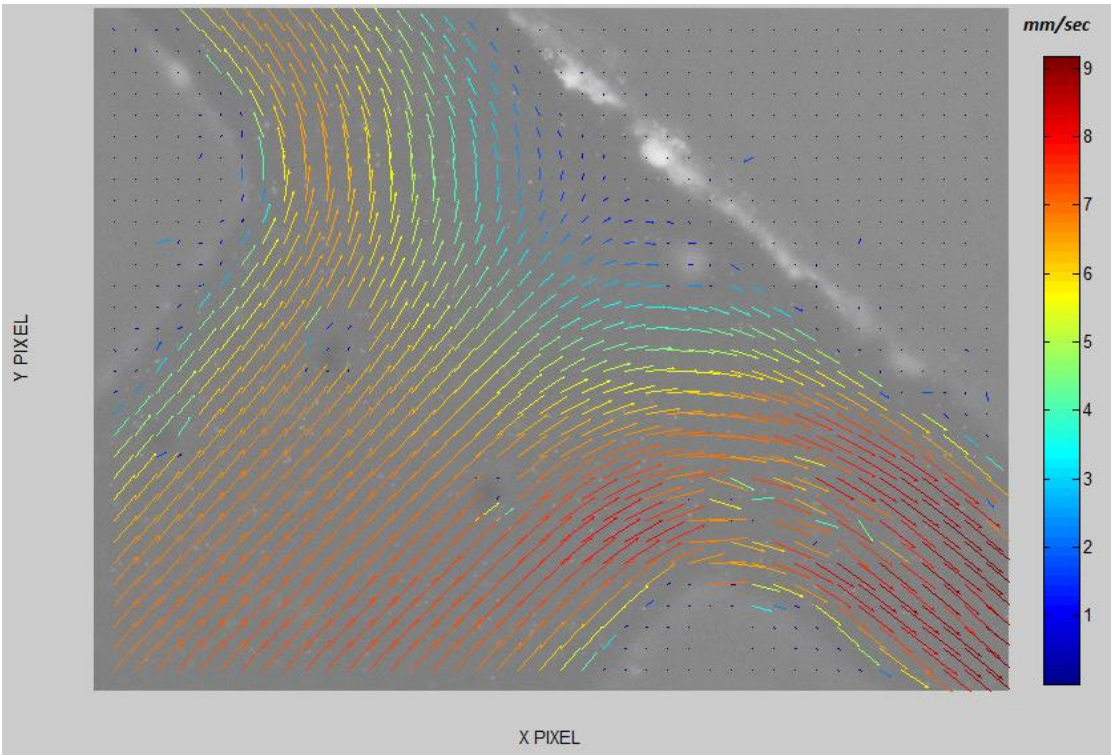


Σχήμα 5.3.2.12: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.

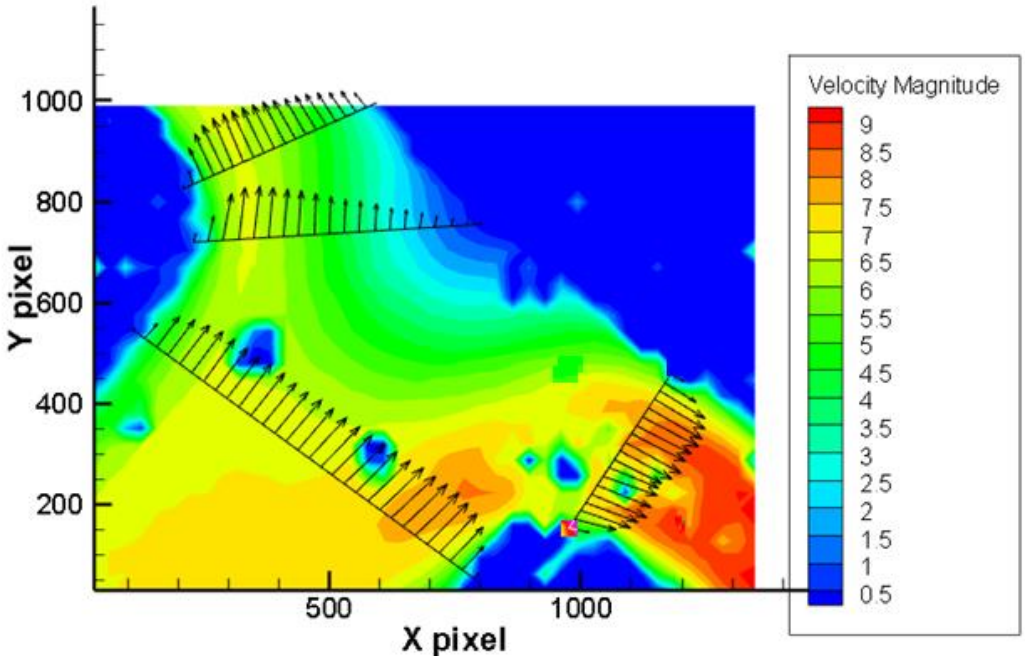


Σχήμα 5.3.2.13 : Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.

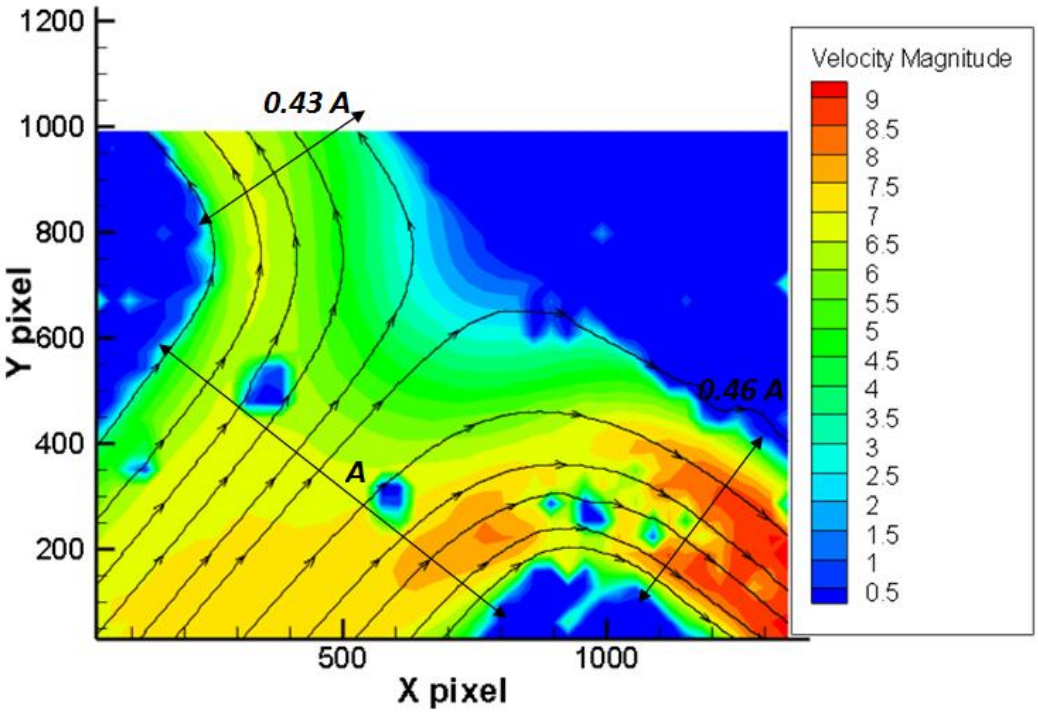
ΘΕΣΗ Μ ASPLIT(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



Σχήμα 5.3.2.14 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση πρώτου διαχωρισμού.

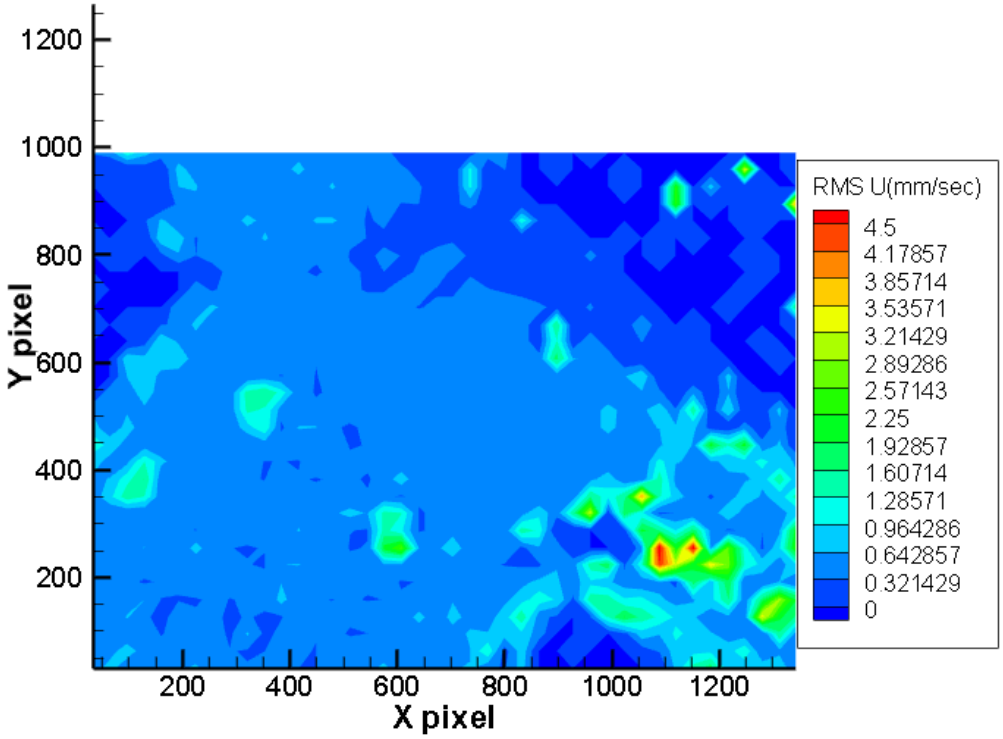


Σχήμα 5.3.2.15 : Προφίλ ταχυτήτων στην θέση πρώτου διαχωρισμού .

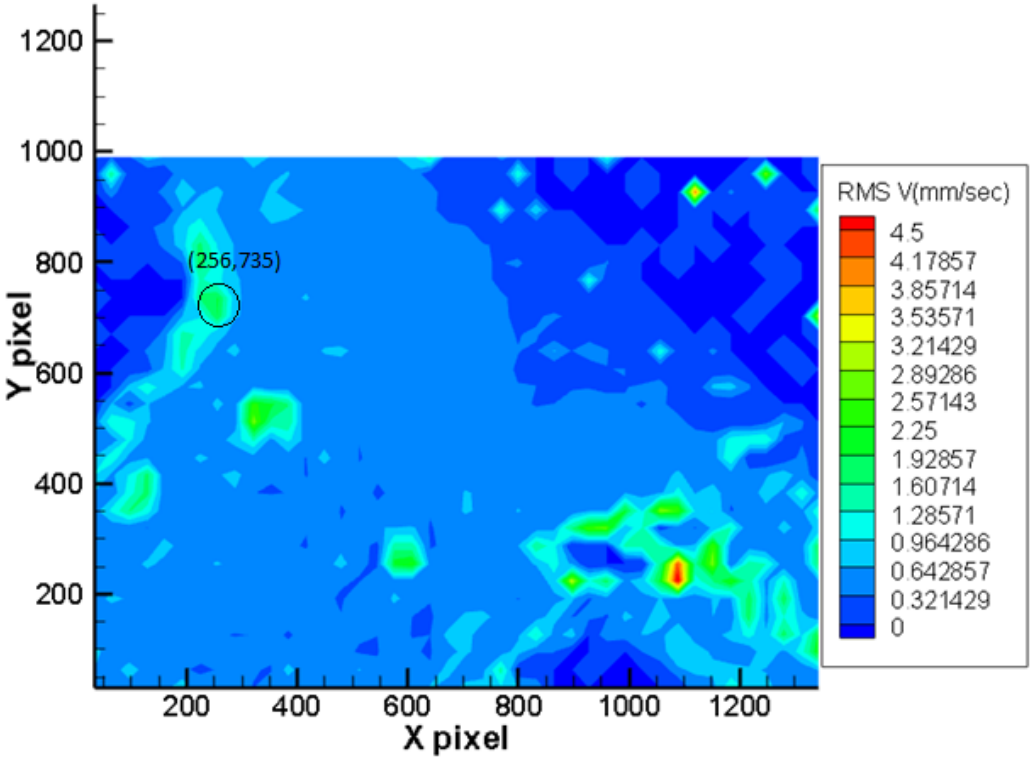


Σχήμα 5.3.2.16 : Γραμμές ροής στην θέση πρώτου διαχωρισμού .

Παρατηρείται ανακρίβεια στις διαστάσεις του πλάτους των καναλιών λόγω κατασκευαστικών λόγων. Θεωρητικά τα κανάλια μετά το διαχωρισμό έχουν πλάτος το μισό (150μm)από το μεγάλο(300 μm).

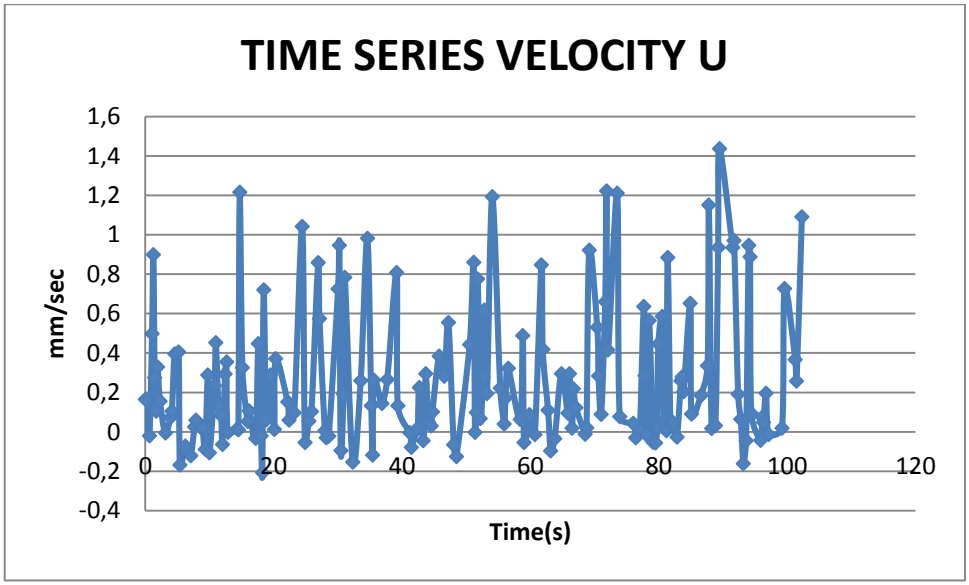


Σχήμα 5.3.2.17: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.

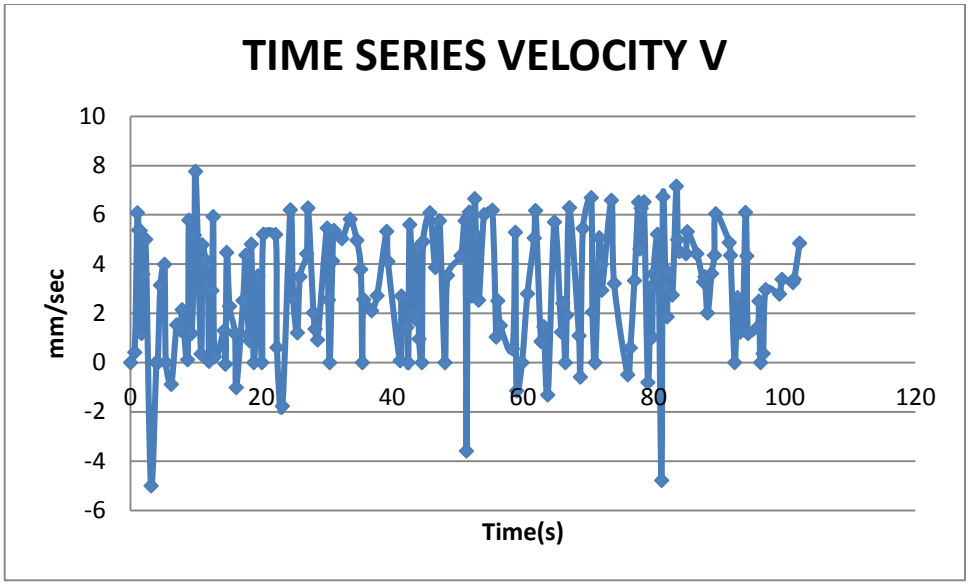


Σχήμα 5.3.2.18 : Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (256,735) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.

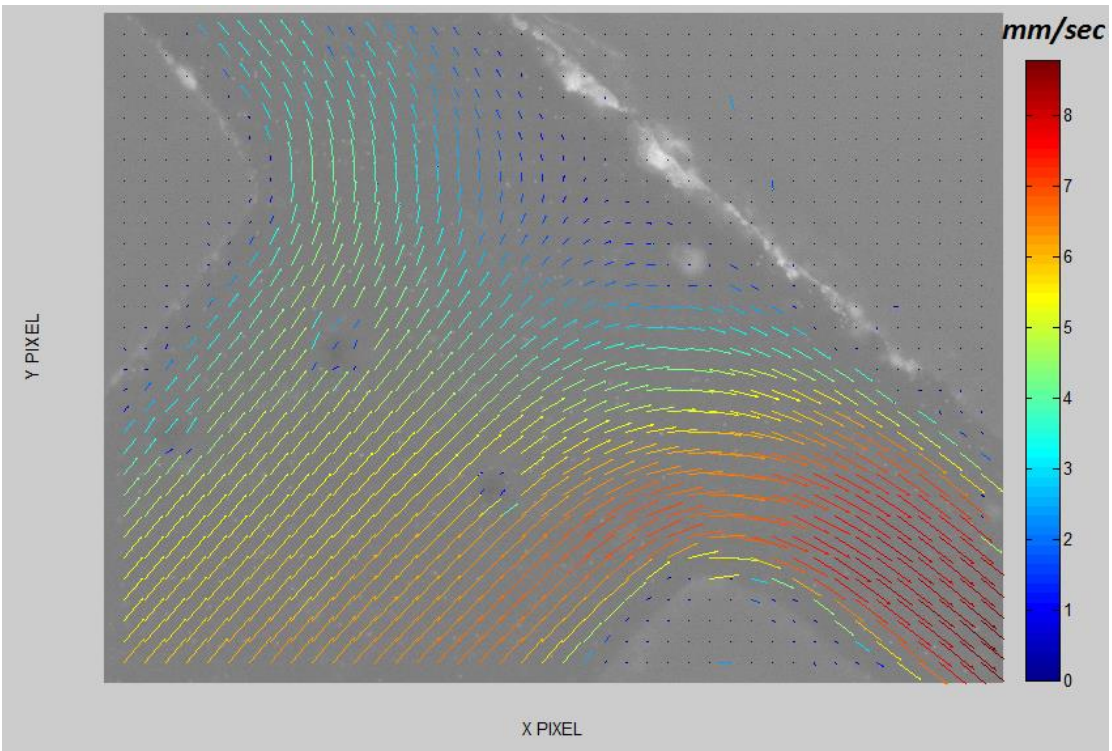


Σχήμα 5.3.2.19:Χρονοσειρά για το σημείο (256,735) , οριζόντια ταχύτητα.



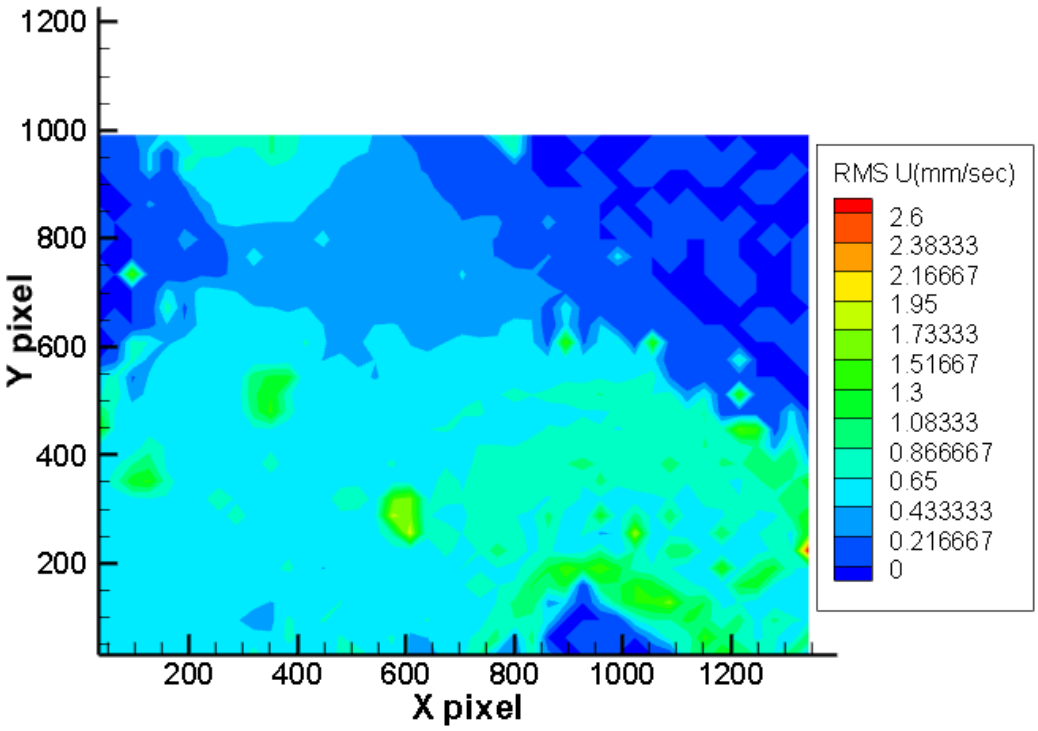
Σχήμα 5.3.2.20:Χρονοσειρά για το σημείο (256,735) , κατακόρυφη ταχύτητα.

ΘΕΣΗ U ASPLIT(ΠΡΟΣ LAMINATION)

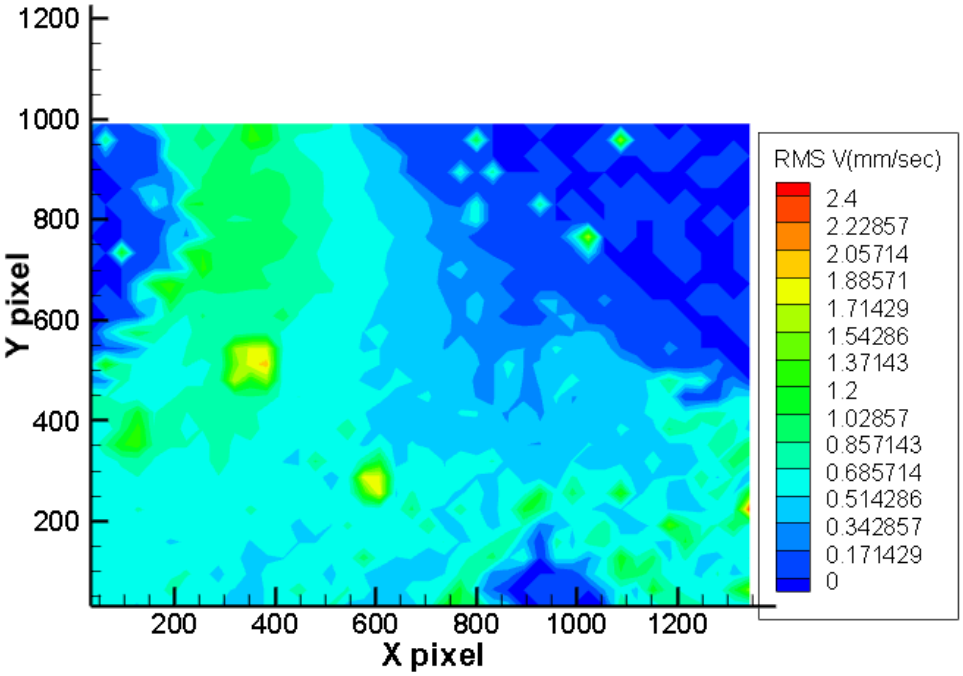


Σχήμα 5.3.2.21 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση πρώτου διαχωρισμού.

Και εδώ παρατηρείται ασυμμετρία στη διάσταση του πλάτους μετά το split.



Σχήμα 5.3.2.22: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.



Σχήμα 5.3.2.23: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα.

ΘΕΣΗ A MERGE

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

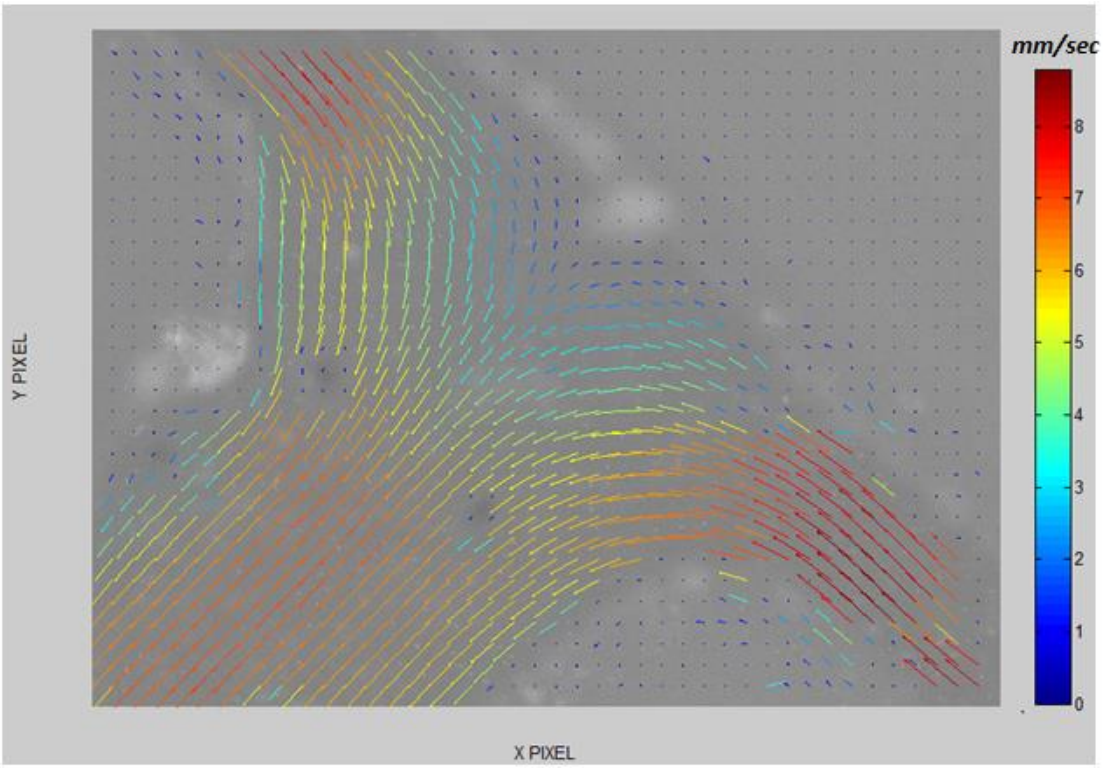
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

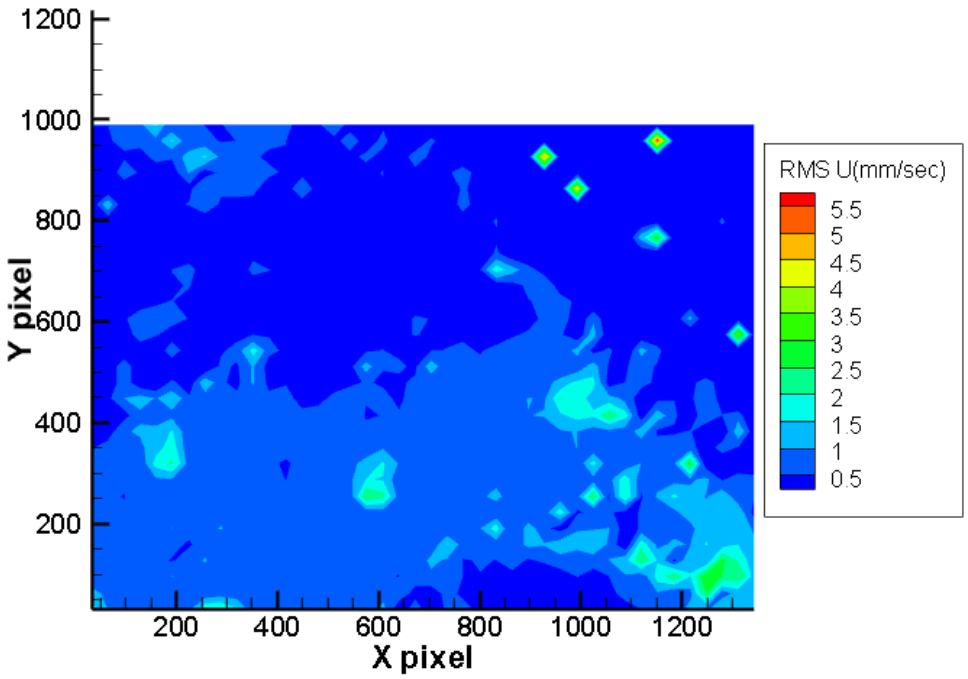
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.53

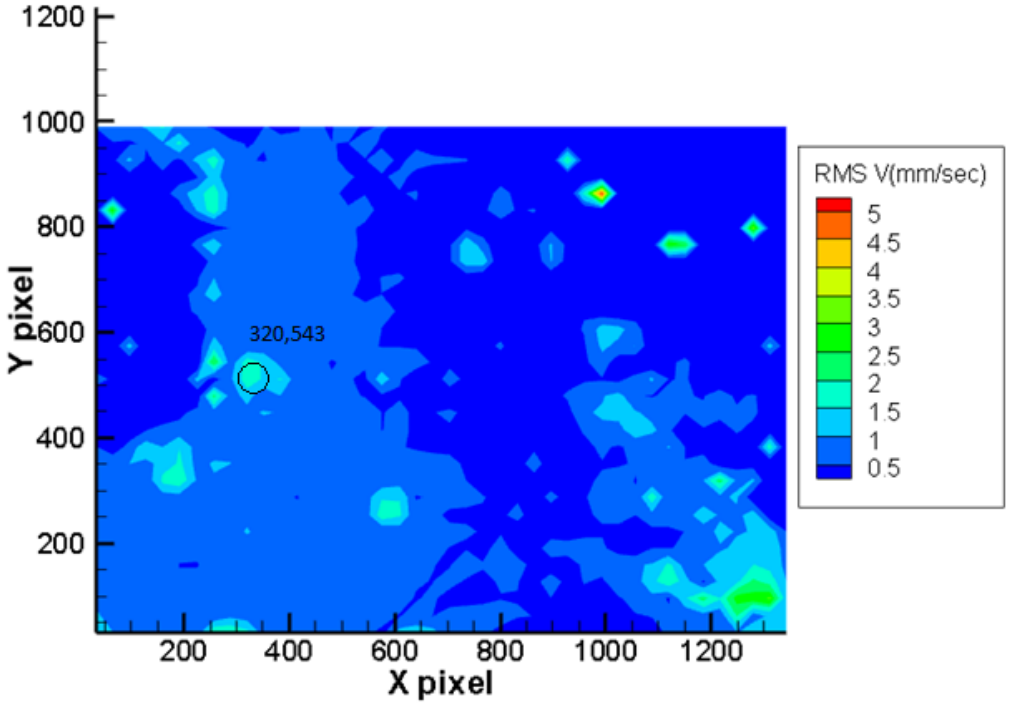
ΘΕΣΗ D AMERGE(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.24 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση πρώτης επανένωσης.

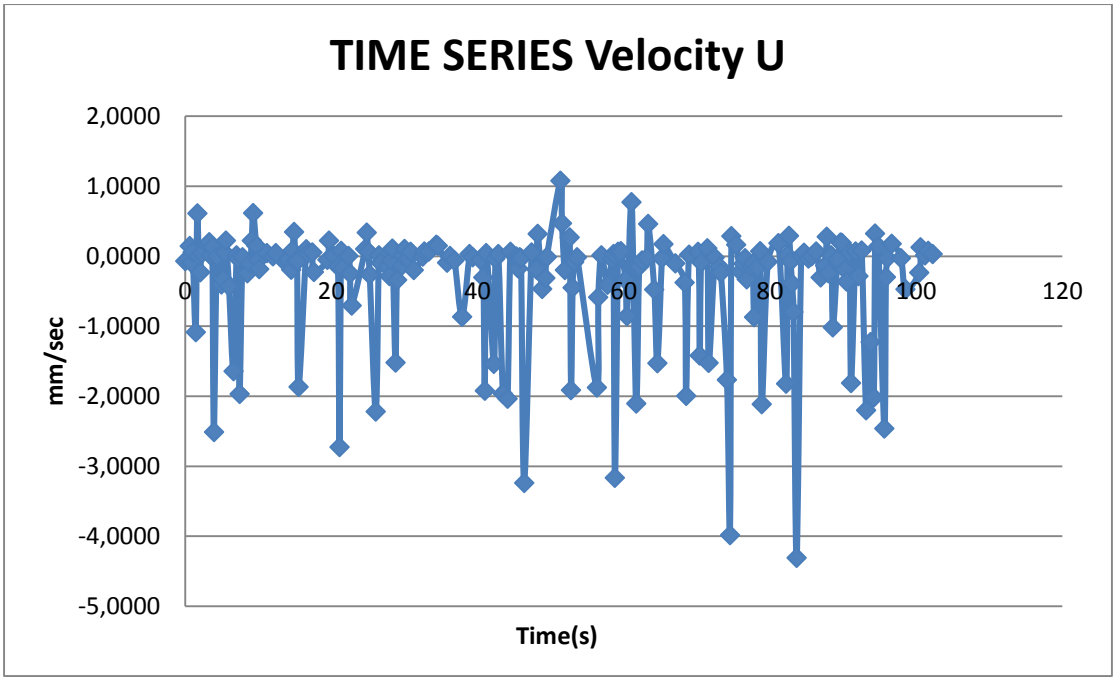


Σχήμα 5.3.2.25: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την οριζόντια ταχύτητα.

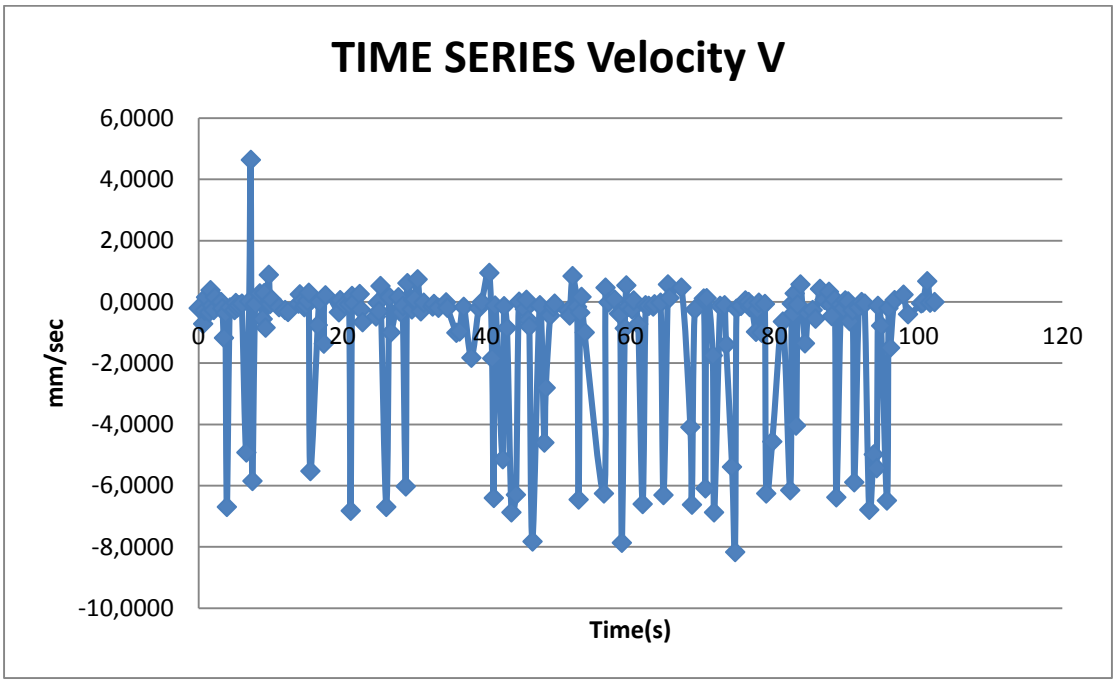


Σχήμα 5.3.2.26: Μέτρηση τυπικής απόκλισης για την κατακόρυφη ταχύτητα.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (320,543)για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.

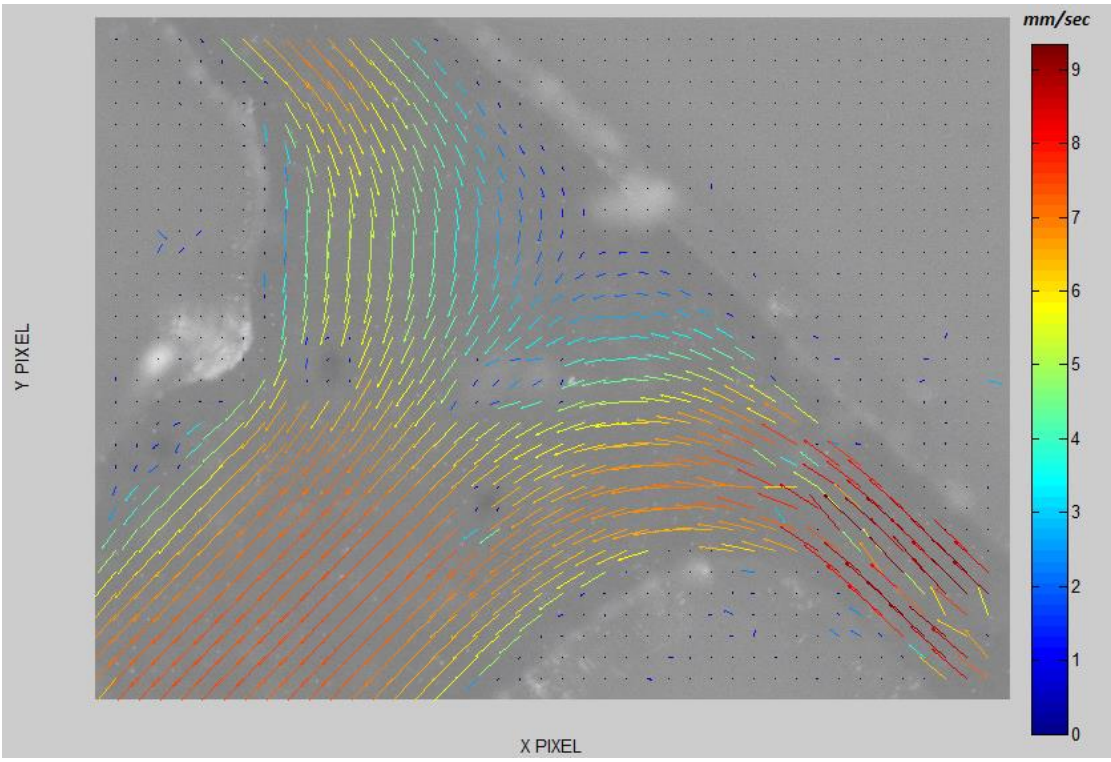


*Σχήμα 5.3.2.27 :Χρονοσειρά για το σημείο (*320,543*) , οριζόντια ταχύτητα.*

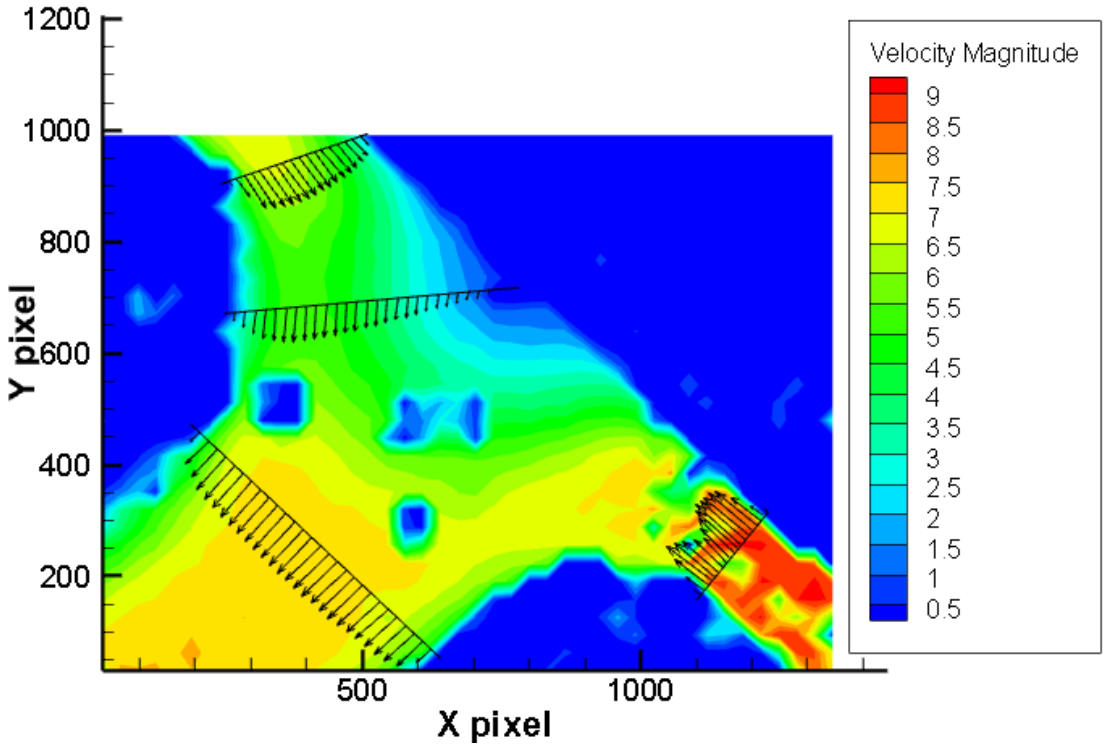


*Σχήμα 5.3.2.28 :Χρονοσειρά για το σημείο (*320,543*) , κατακόρυφη ταχύτητα.*

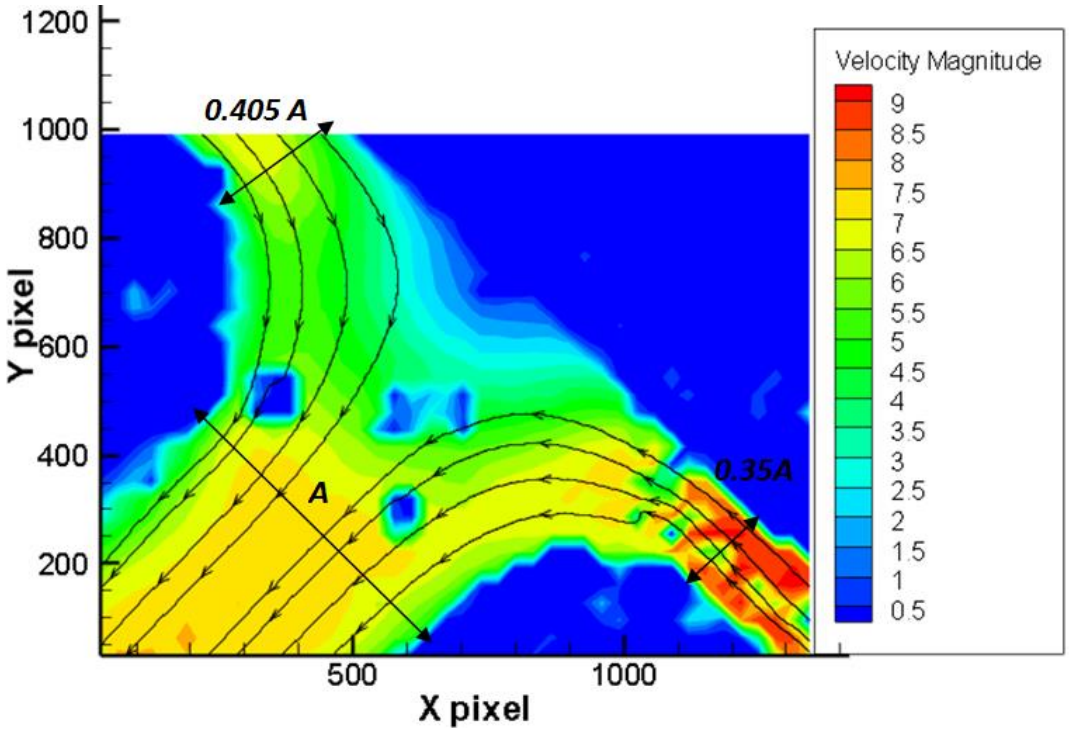
ΘΕΣΗ Μ AMERGE(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



Σχήμα 5.3.2.29 : Μέτρηση ταχυτήτων στην θέση πρώτης επανένωσης.

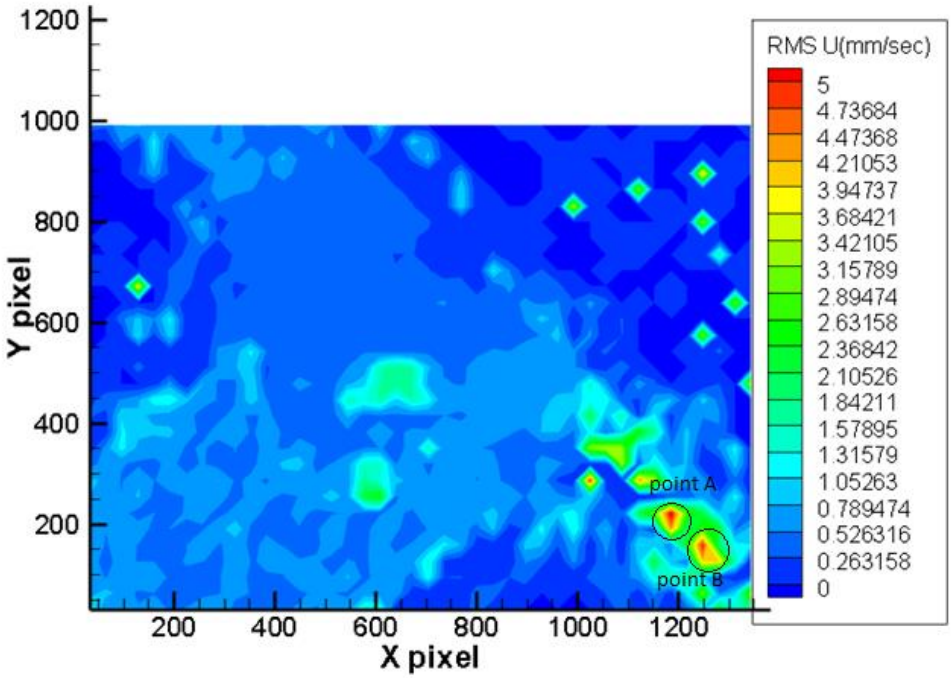


Σχήμα 5.3.2.30 : Μέτρηση των προφίλ ταχυτήτων σε κανάλια και στροφές, πρώτη συνένωση.



Σχήμα 5.3.2.31: Γραμμές ροής, σημείο πρώτης συνένωσης , μέσο βάθος

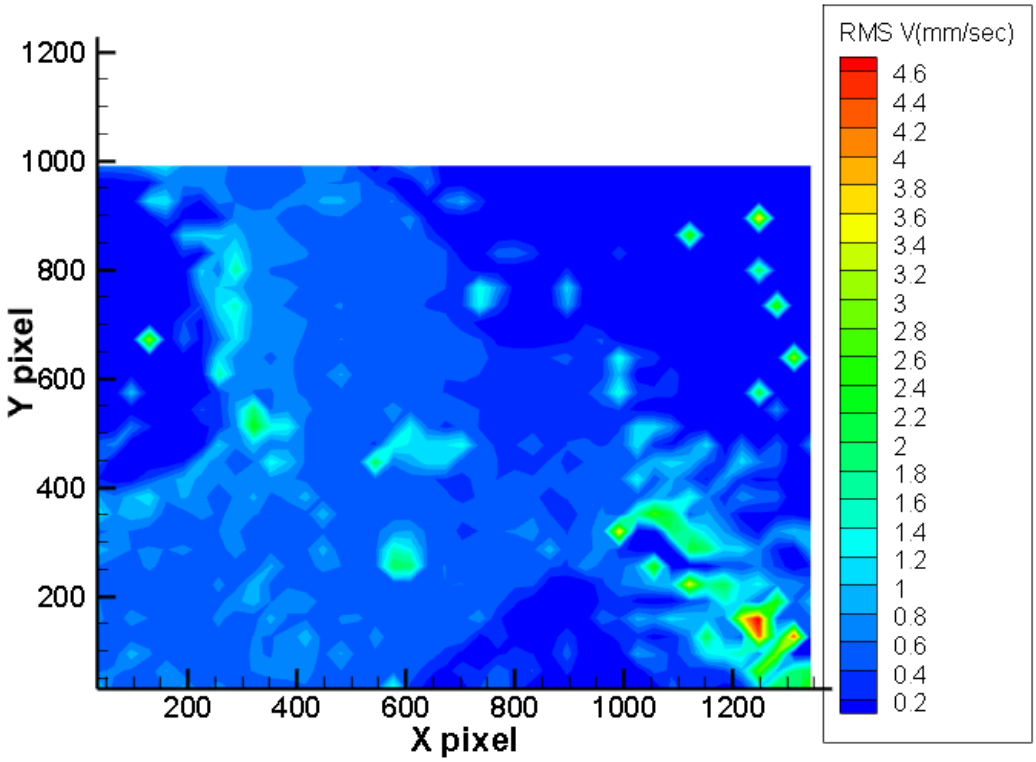
Παρατηρείται ιδιαίτερη ασυμμετρία λόγω κατασκευής .Αυτός είναι και ο λόγος της αυξημένης ταχύτητας στο δεξί κανάλι.



Σχήμα 5.3.2.32: Μέτρηση τυπικής απόκλισης οριζόντιας ταχύτητας ,θέση πρώτης επανένωσης.

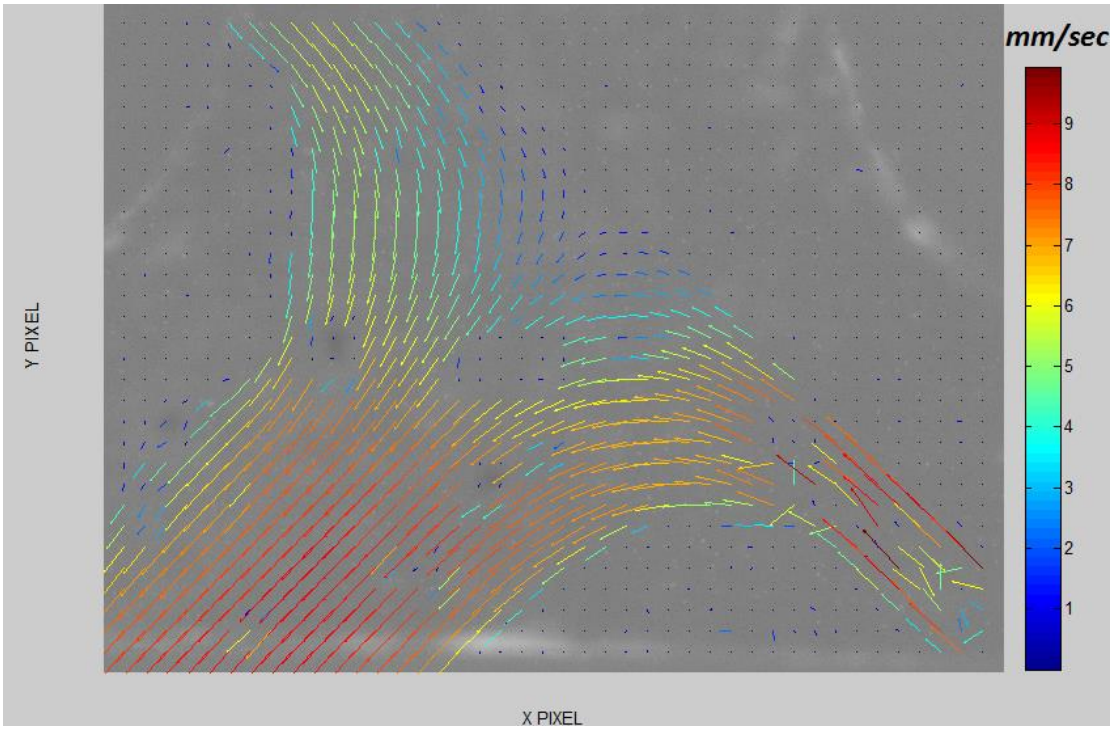
Χρονοσειρά Point A(1180,223):Μόνο 5 διανύσματα στα 500 αποδεκτά από το peak to noise ratio της cross correlation εξού και το αυξημένο rms.

Χρονοσειρά Point B(1242,162):Μόνο 6/500 διανύσματα αποδεκτά από το cross correlation εξού και το αυξημένο rms.

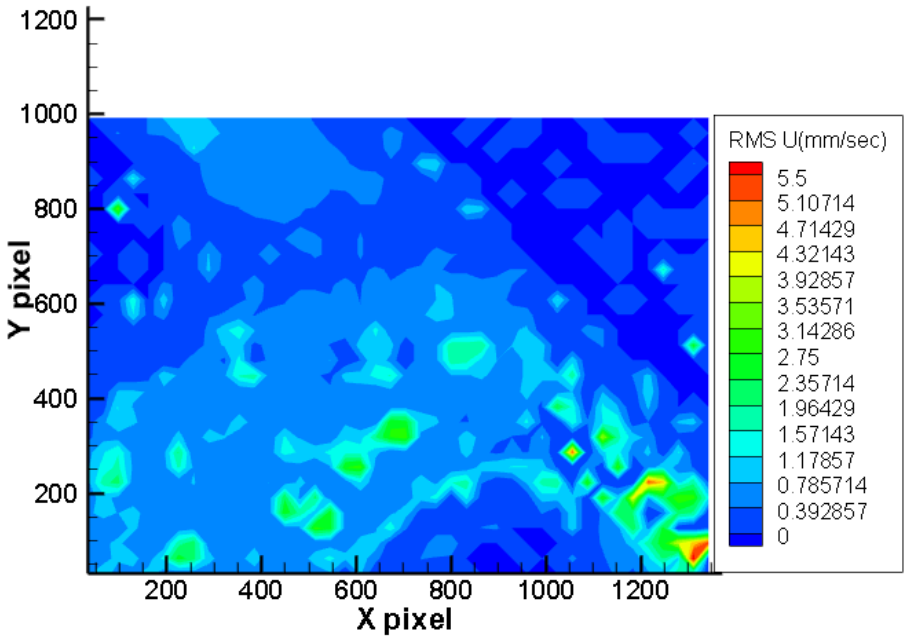


Σχήμα 5.3.2.33: Μέτρηση τυπικής απόκλισης κατακόρυφης ταχύτητας ,θέση πρώτης επανένωσης.

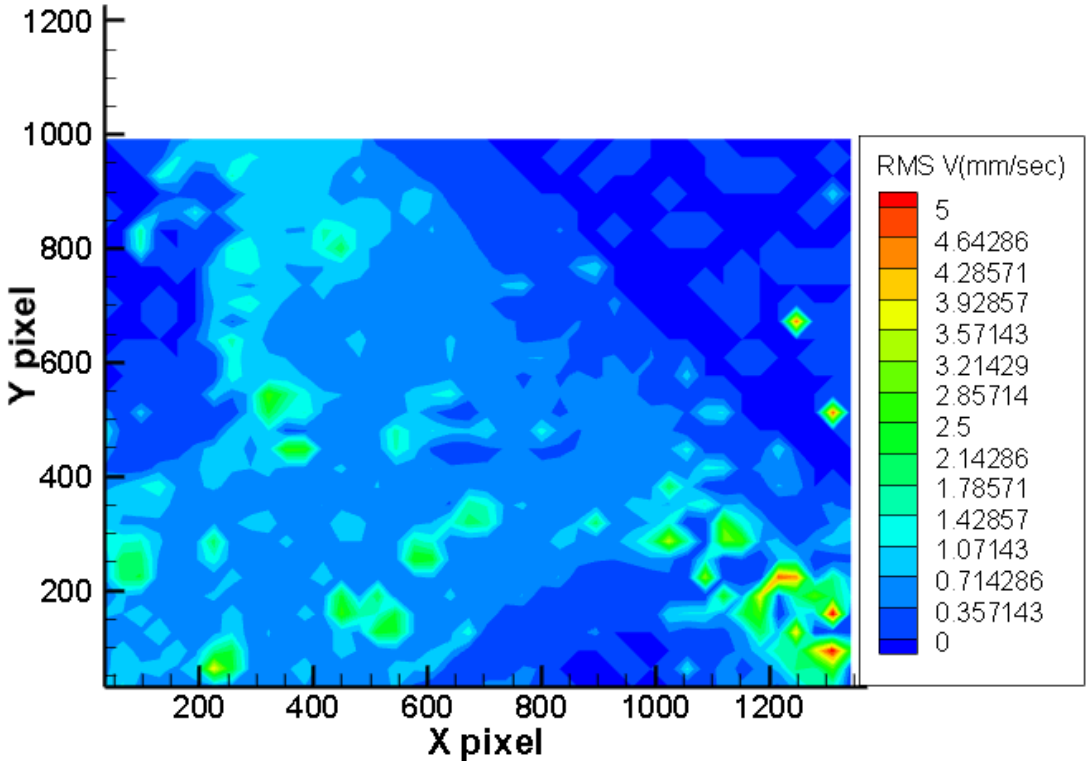
ΘΕΣΗ U AMERGE(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.34: Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, σημείο πρώτης επανένωσης, προς το lamination.



Σχήμα 5.3.2.35: Μέτρηση τυπικής απόκλισης οριζόντιας ταχύτητας,θέση πρώτης επανένωσης



Σχήμα 5.3.2.36: Μέτρηση τυπικής απόκλισης κατακόρυφης ταχύτητας, θέση πρώτης επανένωσης

ΘΕΣΗ B SPLIT

*Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικο βάθος*79.8μm) *:*

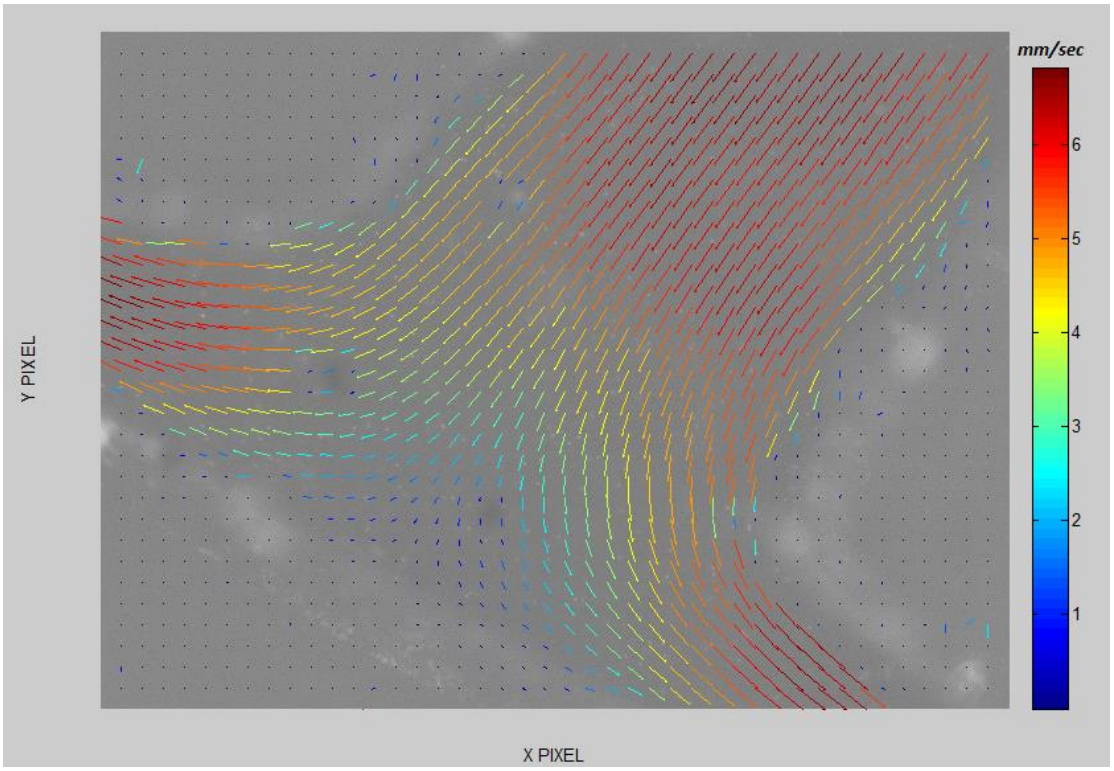
*D=DOWN=-15*1.33 =19.95μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+15*1.33 =19.95μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

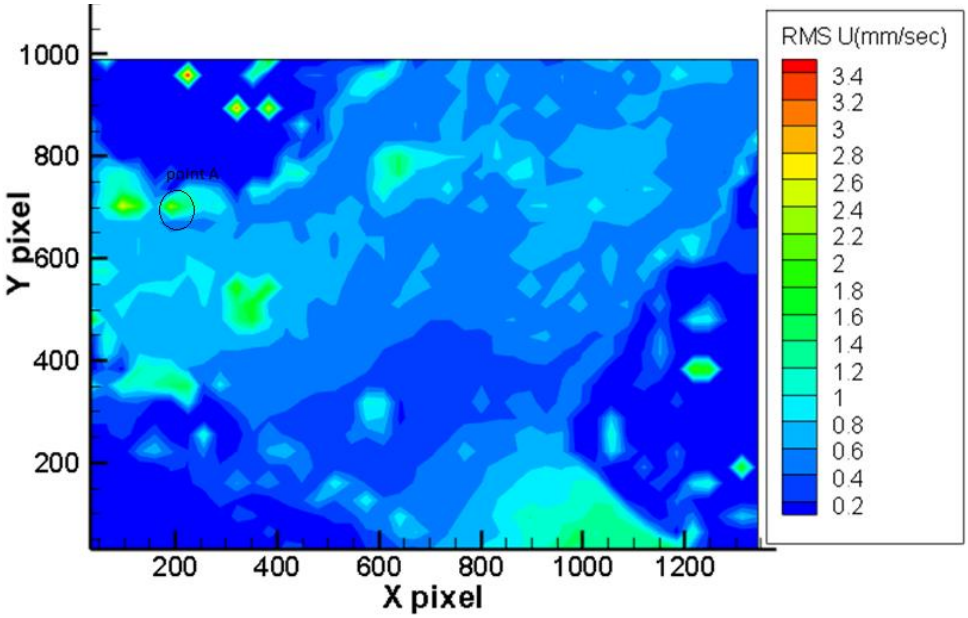
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.67

ΘΕΣΗ D BSPLIT(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)

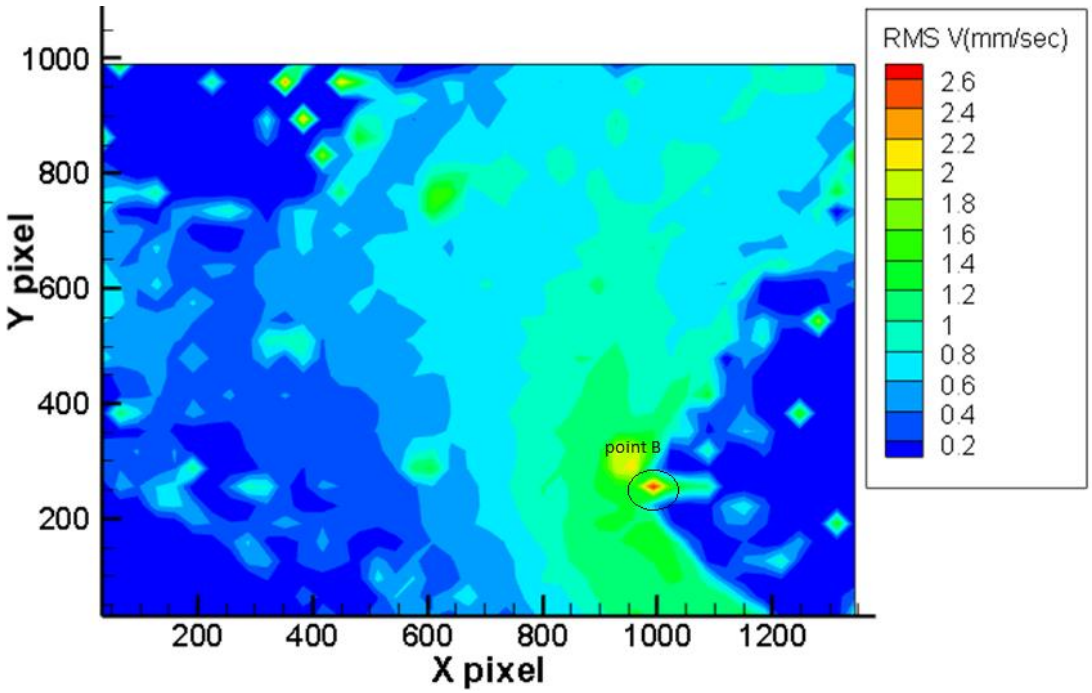


Σχήμα 5.3.2.37: Μέτρηση πεδίου ταχυτήτων, σημείο δεύτερου διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.2.38: Μέτρηση τυπικής απόκλισης οριζόντιας ταχύτητας, σημείο δεύτερου διαχωρισμού.

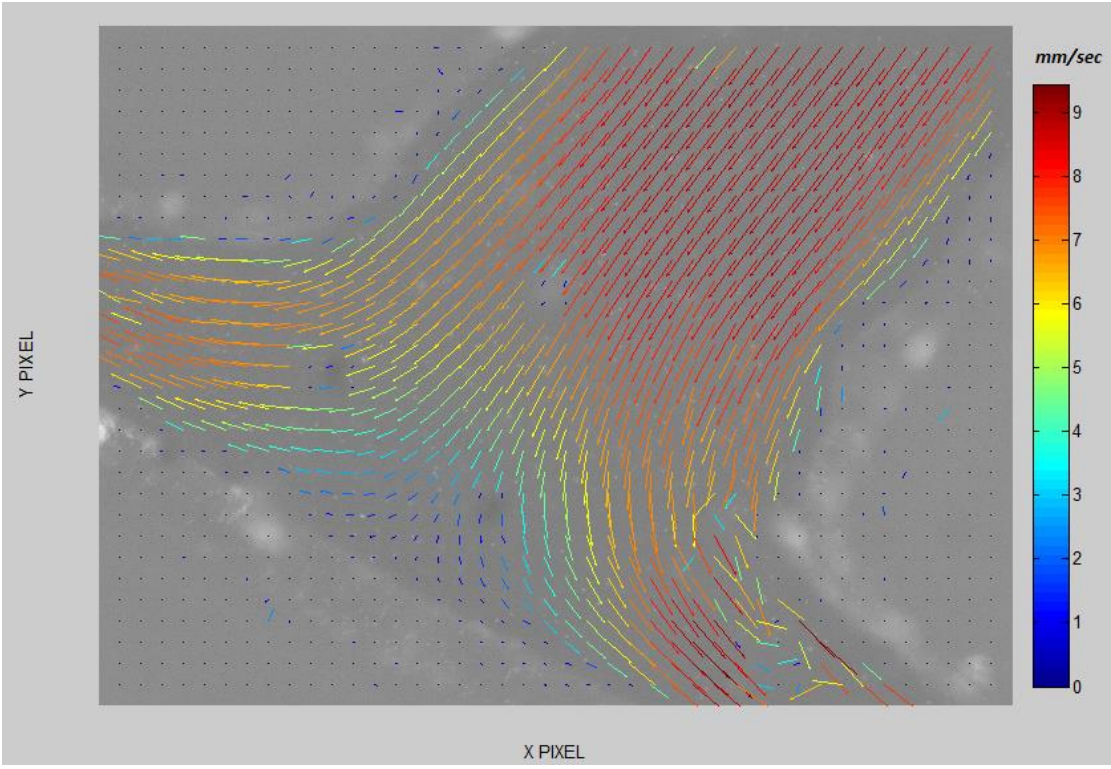
Όσον αφορα τη χρονοσειρά του Point A: Μόνο 5/500 διανύσματα δέχεται η cross correlation εξού και το υψηλό rms.



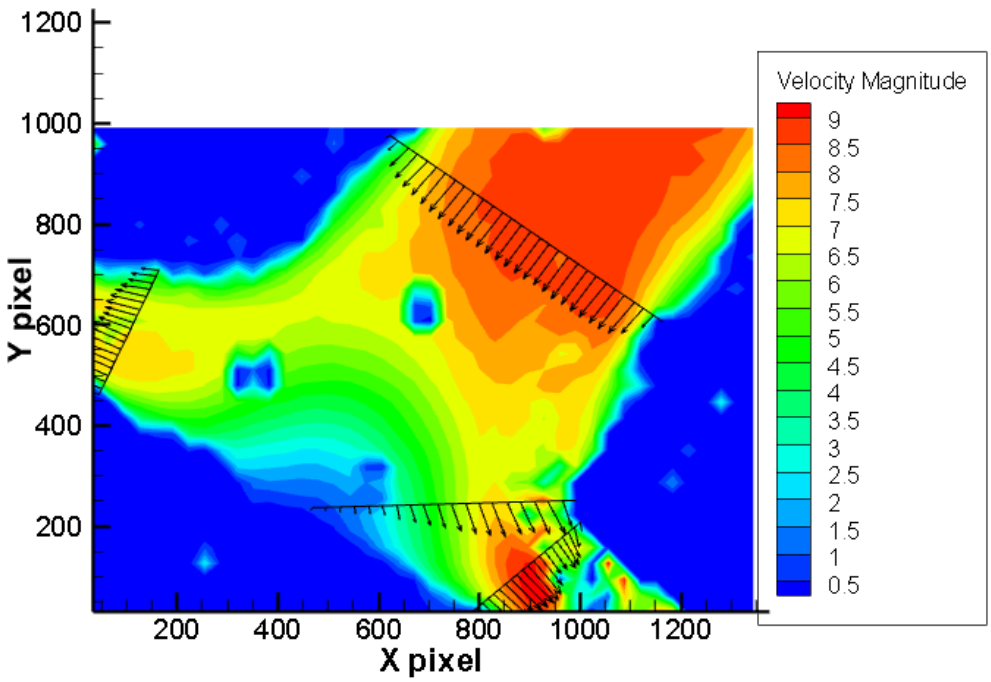
Σχήμα 5.3.2.39: Μέτρηση τυπικής απόκλισης κατακόρυφης ταχύτητας, σημείο δεύτερου διαχωρισμού.

Όσον αφορά τη χρονοσειρά του Point B, μόνο 2 στα 500 διανύσματα δέχεται η cross correlation ,εξού και το υψηλό rms.

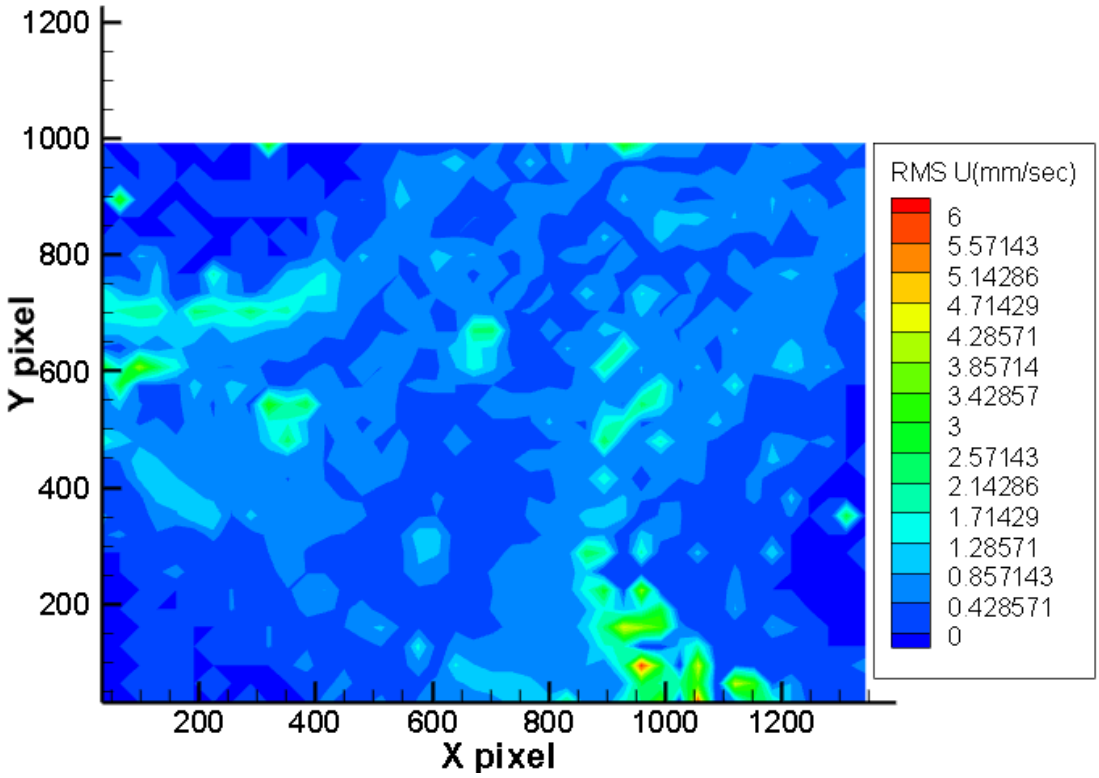
ΘΕΣΗ M BSPLIT(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



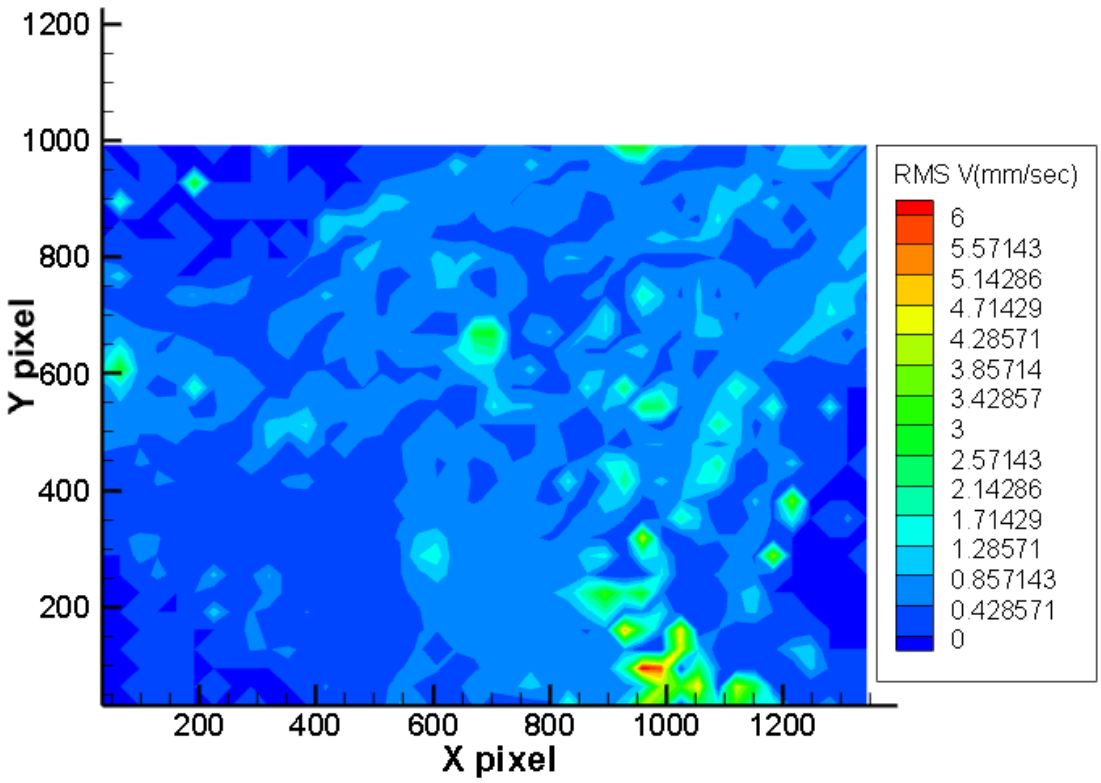
Σχήμα 5.3.2.40: Πεδίο ταχυτήτων, σημείο δεύτερου διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.2.41: Προφίλ ταχυτήτων στο σημείο δεύτερου διαχωρισμού.

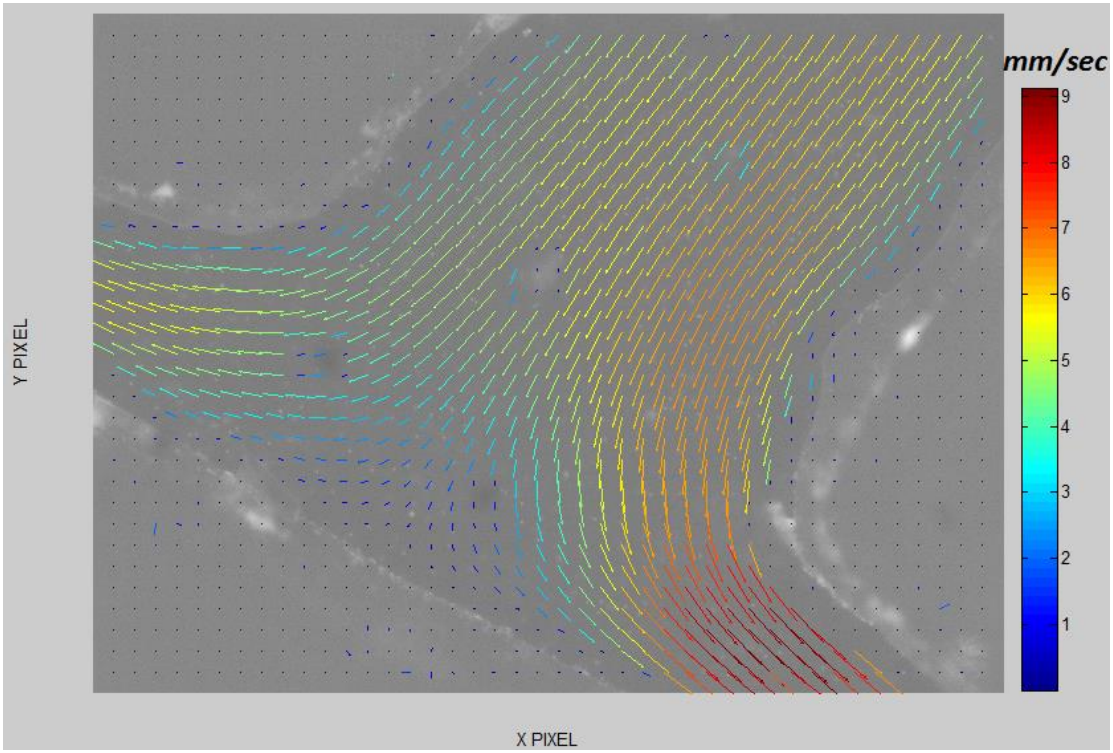


Σχήμα 5.3.2.42: Μέτρηση τυπικής απόκλισης οριζόντιας ταχύτητας

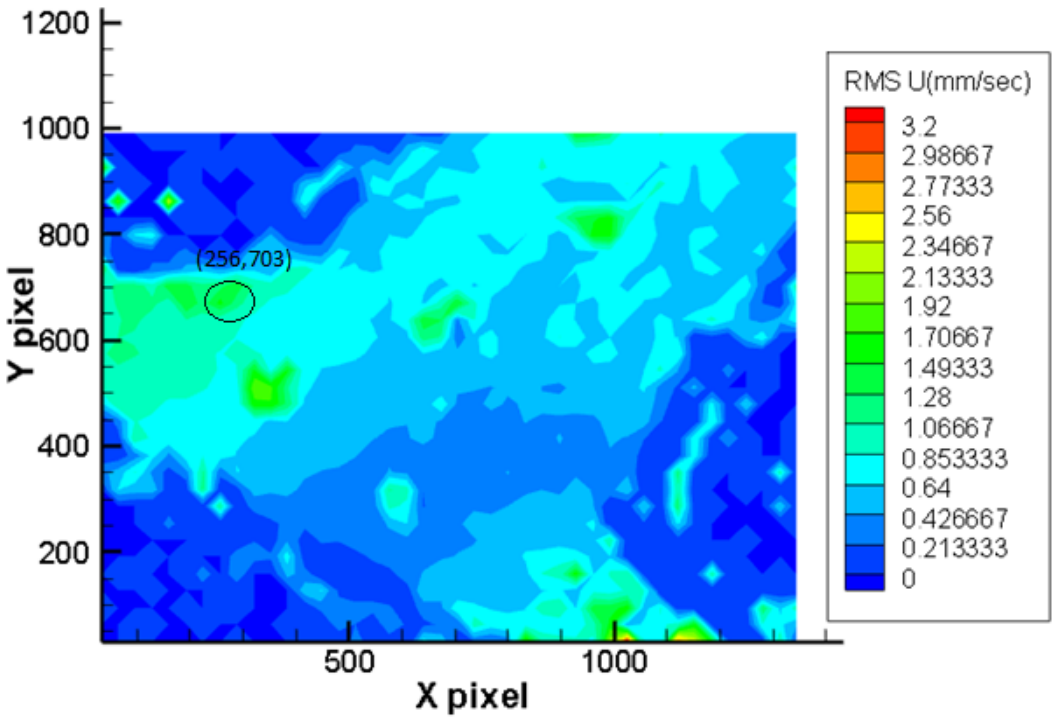


Σχήμα 5.3.2.43: Μέτρηση τυπικής απόκλισης κατακόρυφης ταχύτητας

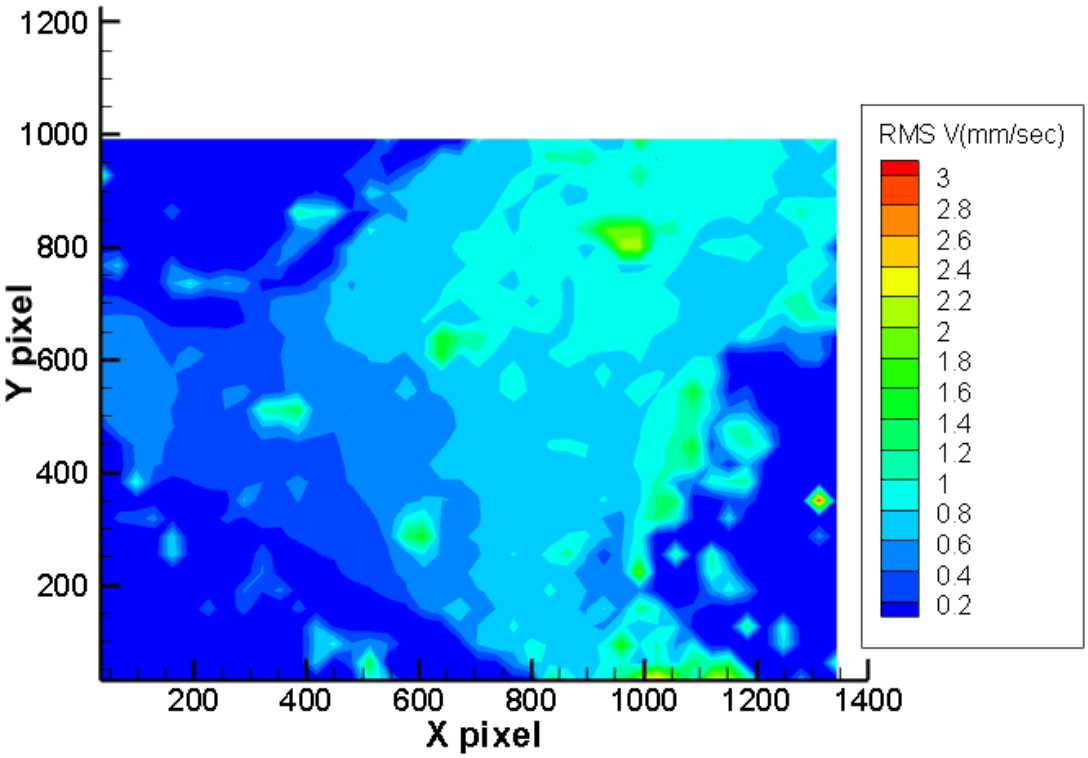
ΘΕΣΗ U BSPLIT(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.44 : Πεδίο ταχυτήτων, σημείο δεύτερου διαχωρισμού.

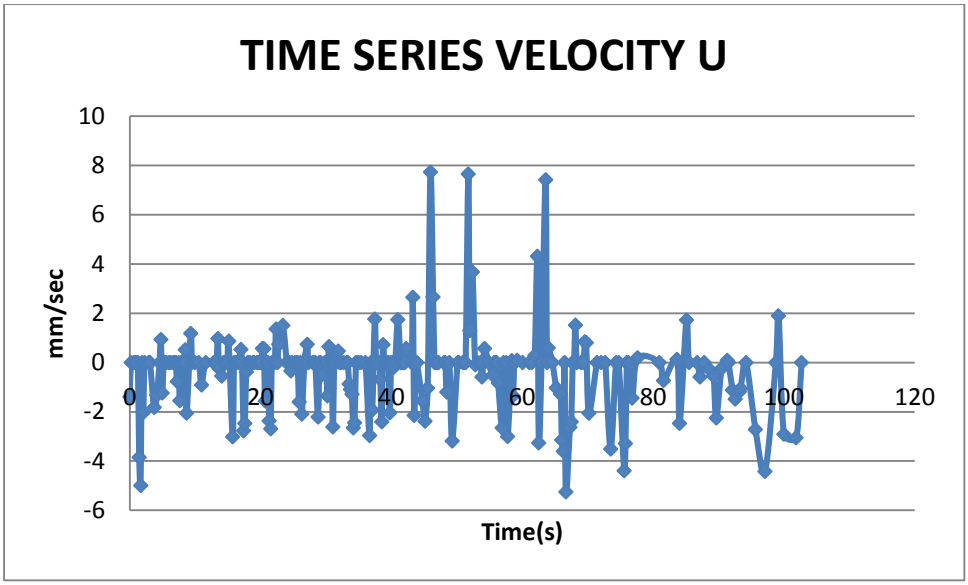


Σχήμα 5.3.2.45: Μέτρηση τυπικής απόκλισης οριζόντιας ταχύτητας

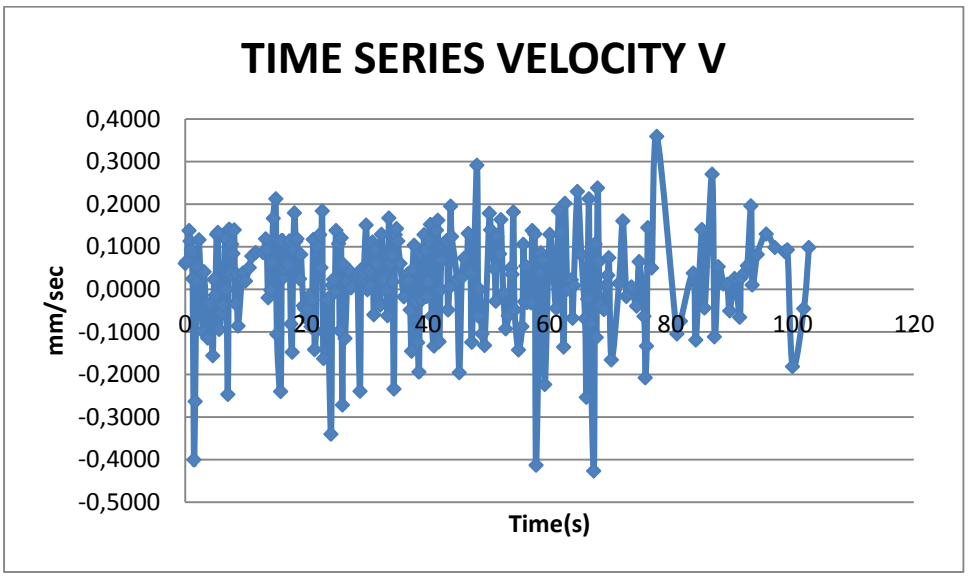


Σχήμα 5.3.2.46 : Μέτρηση τυπικής απόκλισης κατακόρυφης ταχύτητας

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (256,703) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.



Σχήμα 5.3.2.47 : Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας, σημείο (256,703) στη θέση δεύτερου διαχωρισμού



Σχήμα 5.3.2.48 : Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας, σημείο (256,703) στη θέση δεύτερου διαχωρισμού.

ΘΕΣΗ BMERGE

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

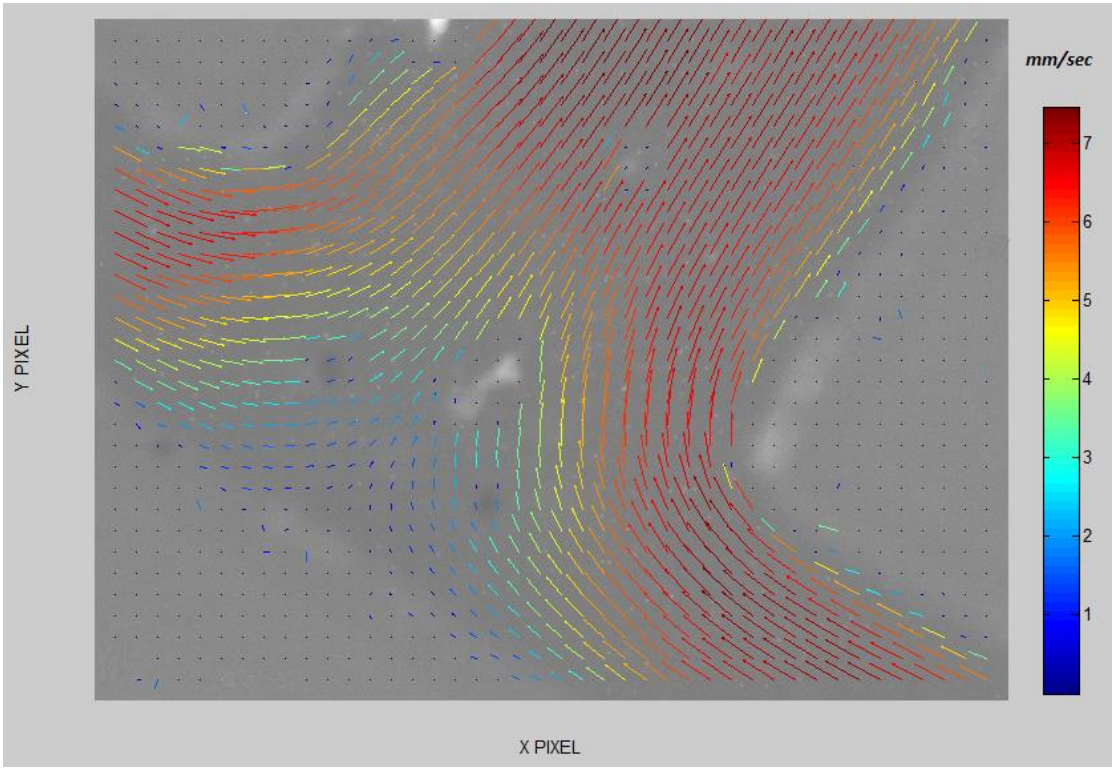
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

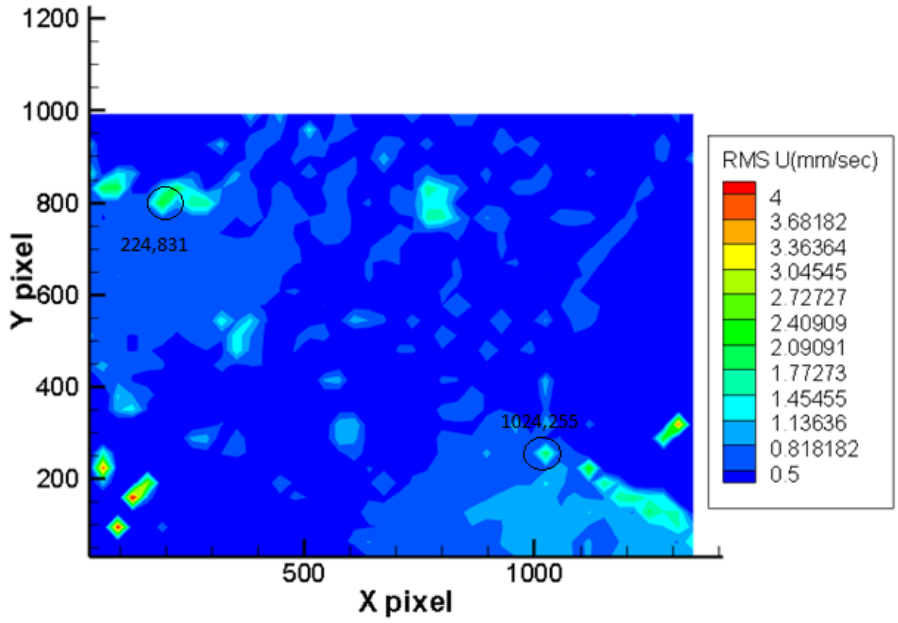
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.66

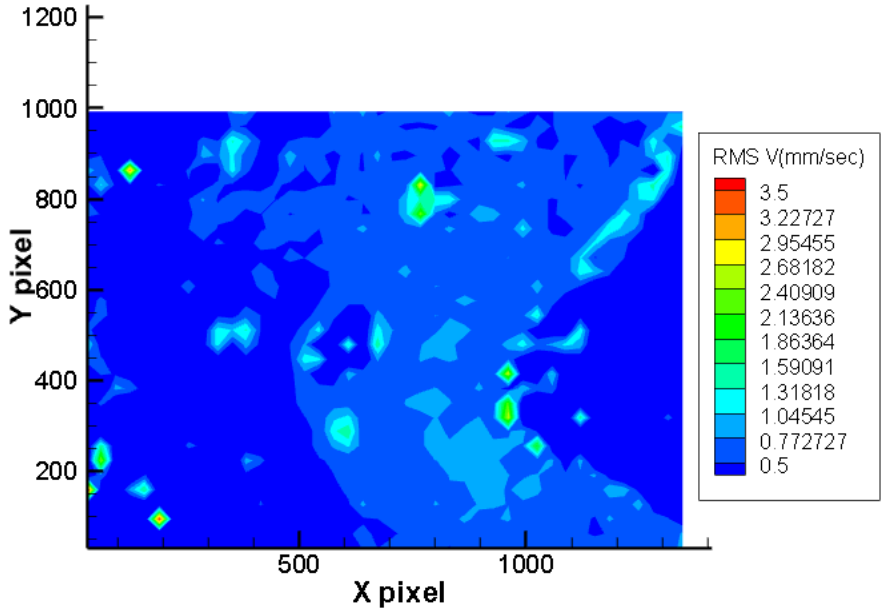
ΘΕΣΗ D BMERGE(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.49: Πεδίο ταχυτήτων, σημείο δεύτερης επανένωσης.



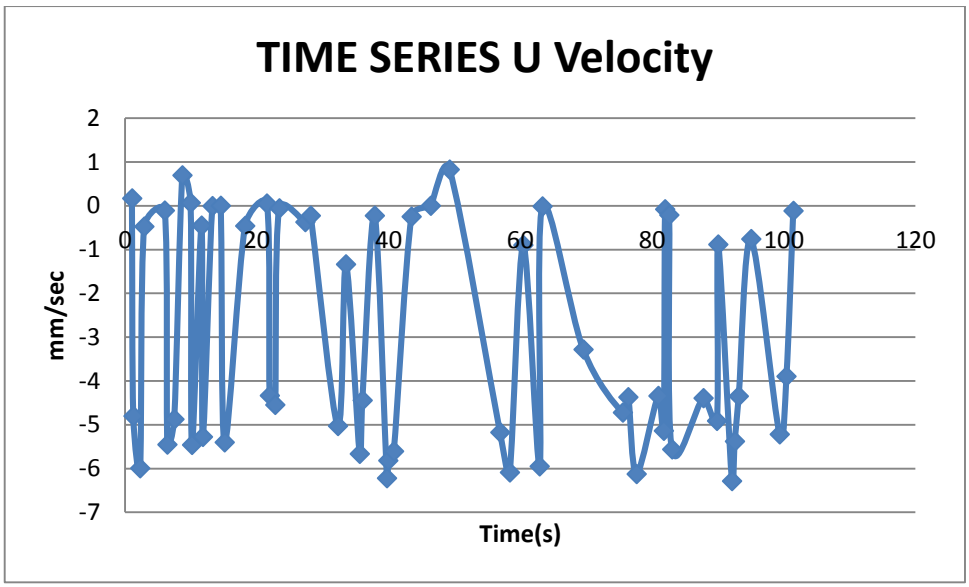
Σχήμα 5.3.2.50 : Τυπική απόκλιση οριζόντιας ταχύτητας σημείο δεύτερης επανένωσης.



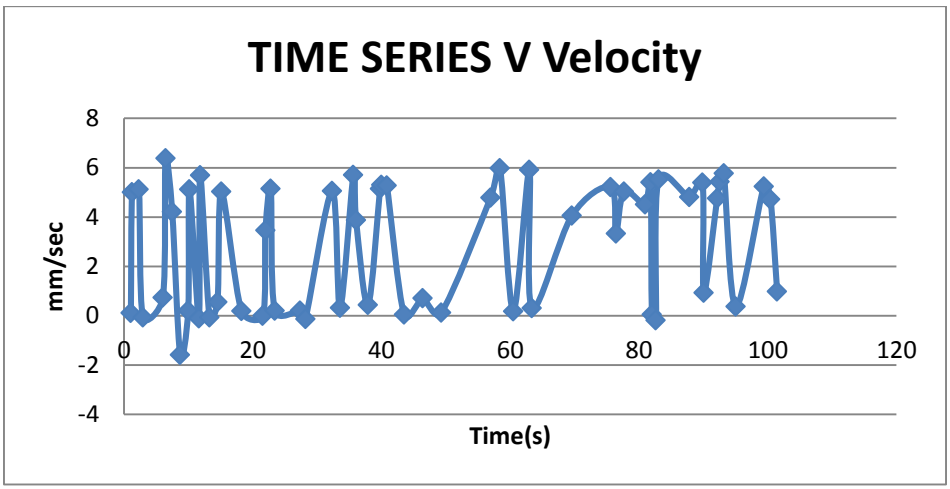
Σχήμα 5.3.2.51 : Τυπική απόκλιση κατακόρυφης ταχύτητας σημείο δεύτερης επανένωσης.

Όσον αφορά τη χρονοσειρά του σημείου (224,831): Μόνο 9/500 σωστά διανύσματα εξού και το υψηλό rms.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (1024,255) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.

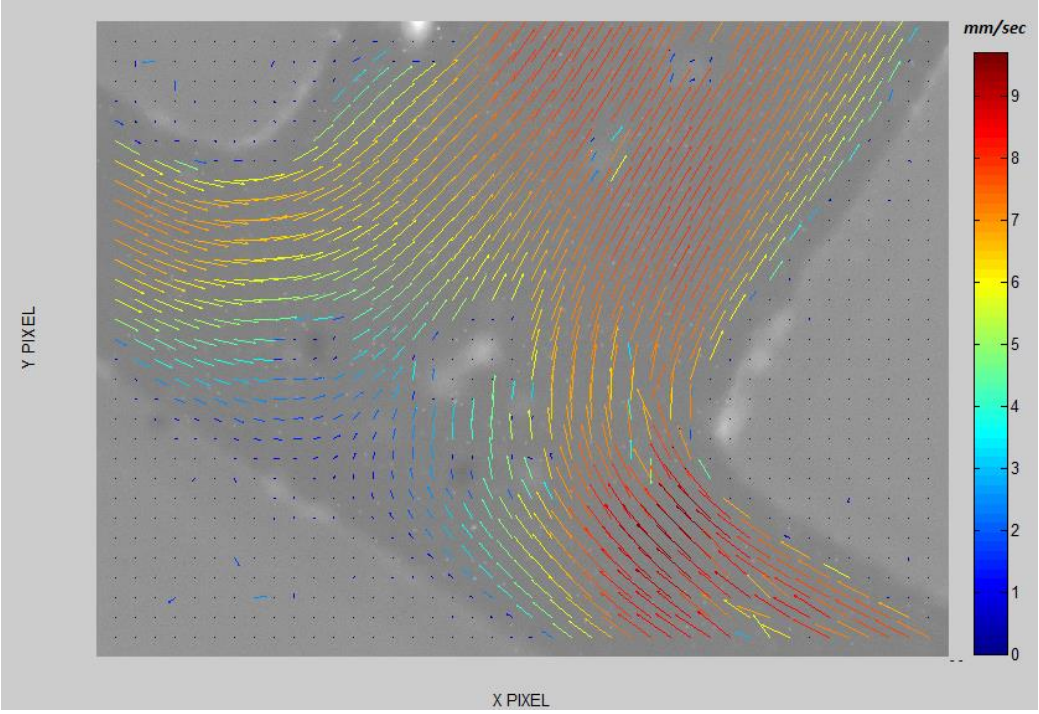


Σχήμα 5.3.2.52 :Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας σημείου (1024,255).

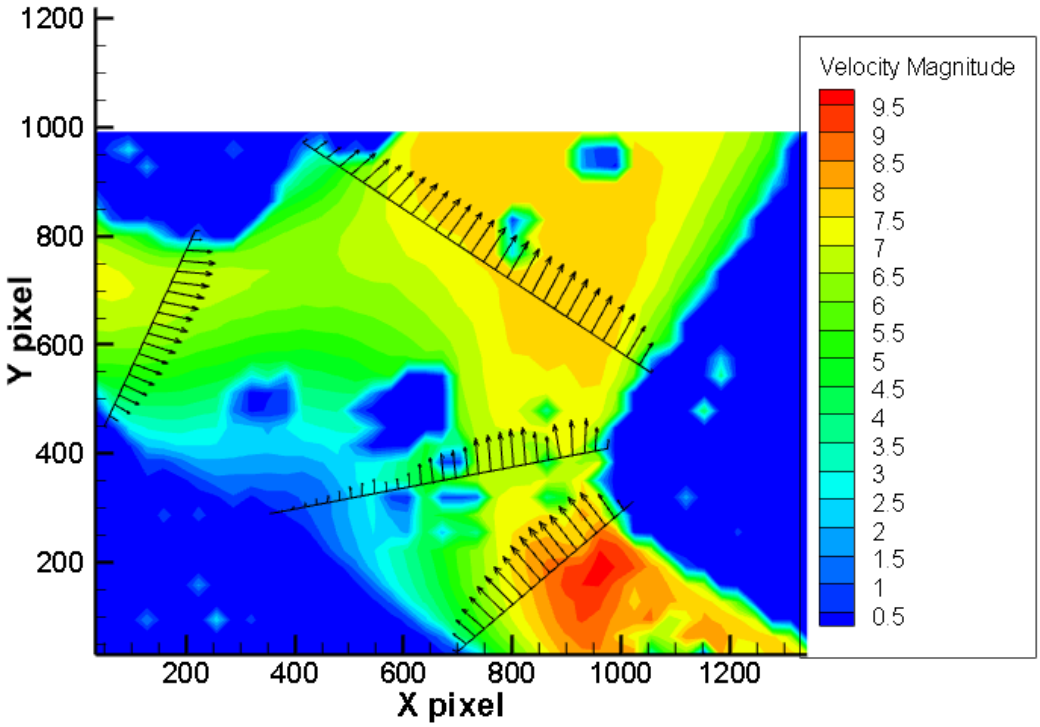


Σχήμα 5.3.2.53 :Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας σημείου (1024,255).

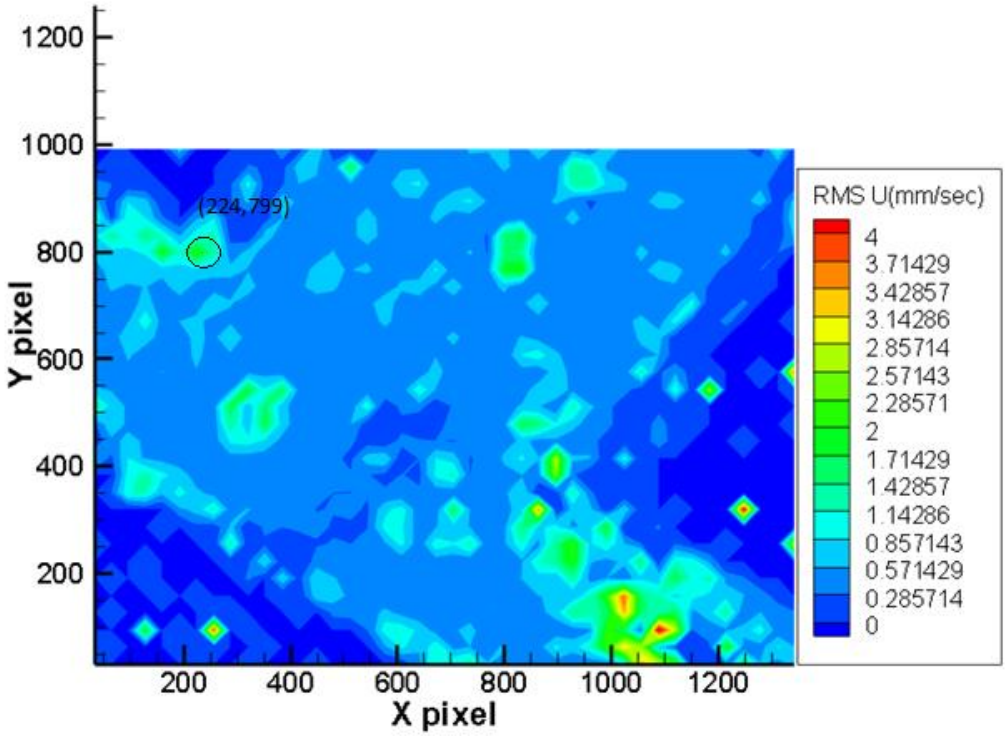
ΘΕΣΗ Μ Β MERGE(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



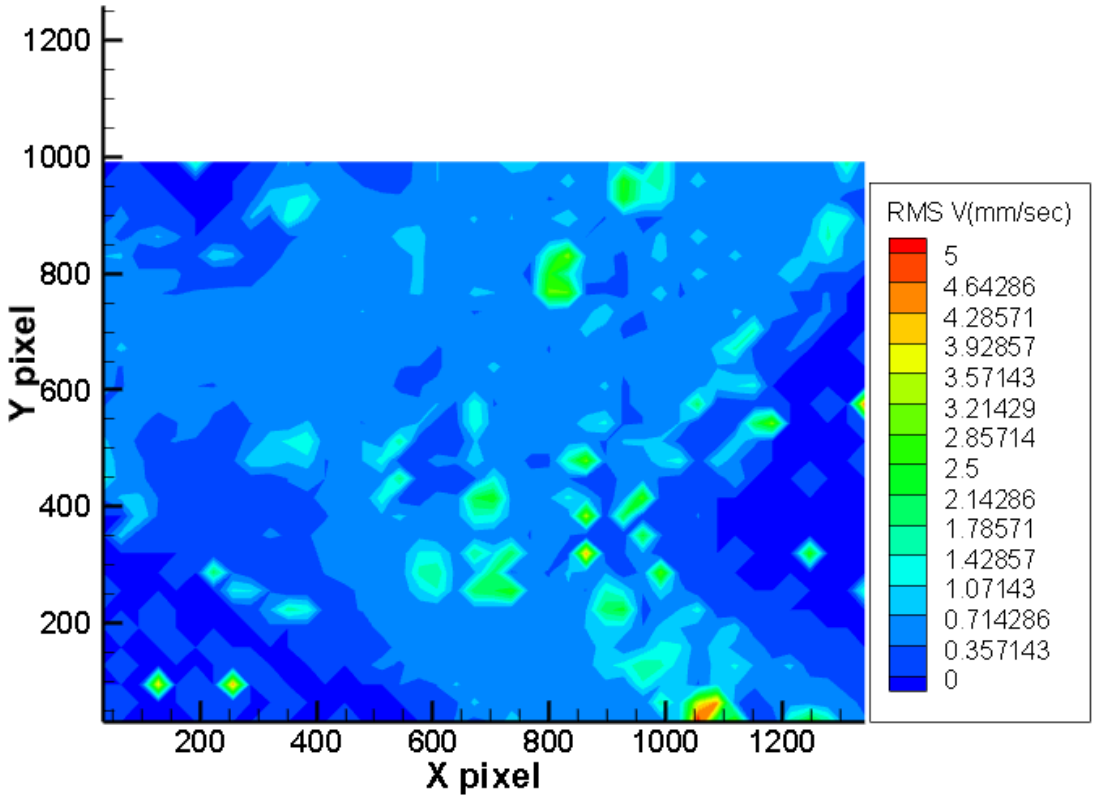
Σχήμα 5.3.2.54: Πεδίο ταχυτήτων, σημείο δεύτερης επανένωσης



Σχήμα 5.3.2.55 : Προφίλ ταχυτήτων στο σημείο δεύτερης επανένωσης.

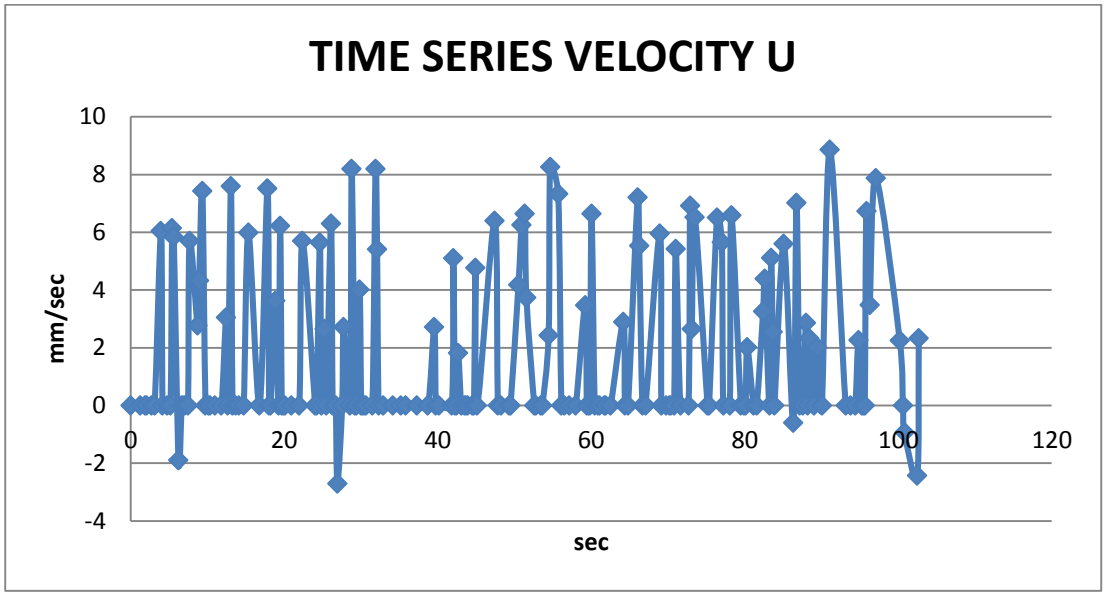


Σχήμα 5.3.2.56 : Τυπική απόκλιση οριζόντιας ταχύτητας.

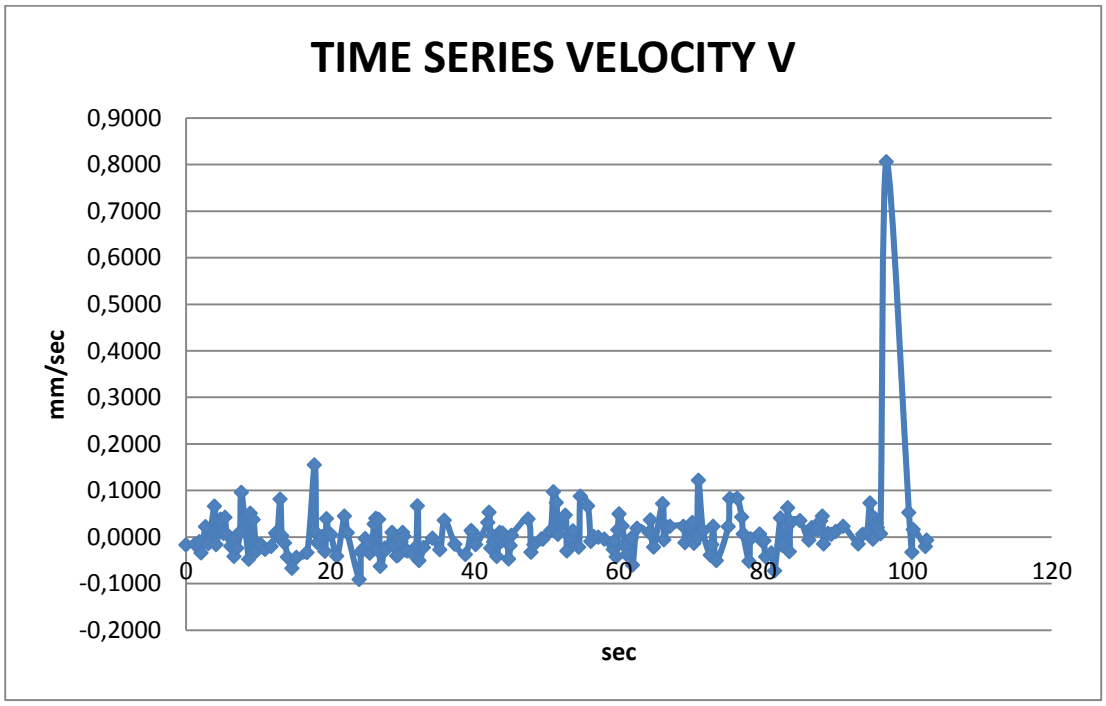


Σχήμα 5.3.2.57 : Τυπική απόκλιση κατακόρυφης ταχύτητας.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (224,799) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.

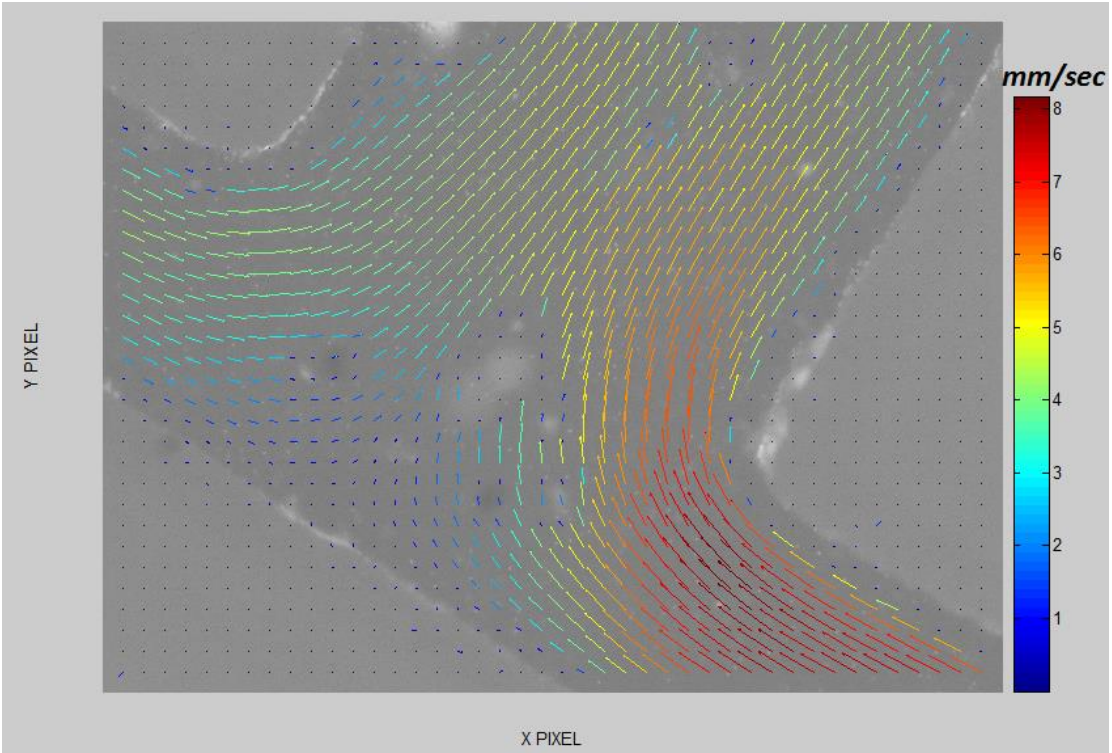


Σχήμα 5.3.2.58: Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας , σημείο (224,799).

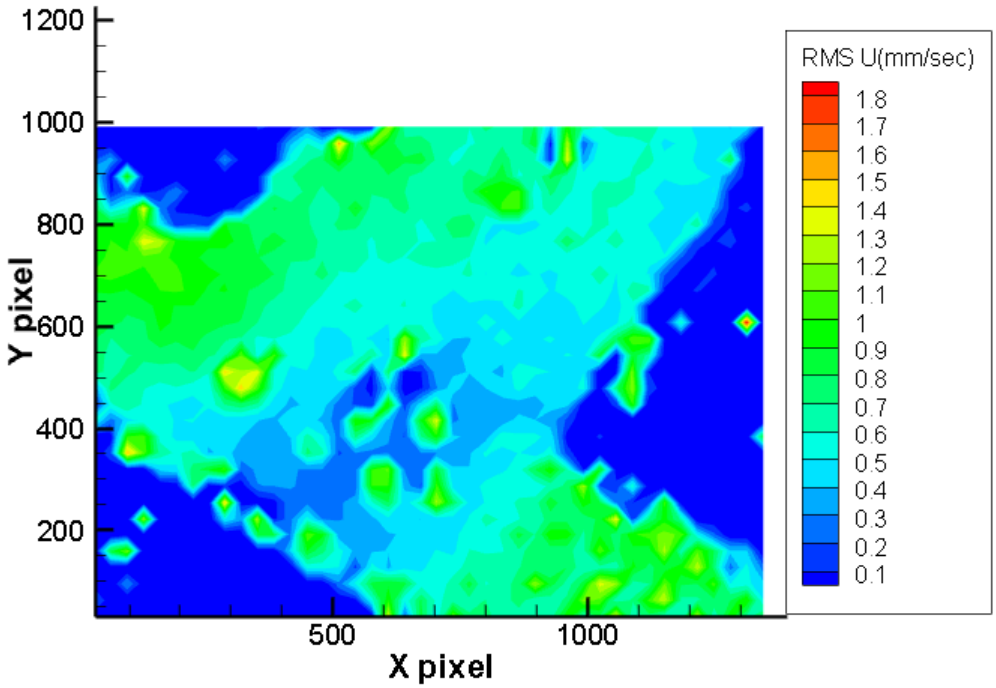


Σχήμα 5.3.2.59: Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας , σημείο (224,799).

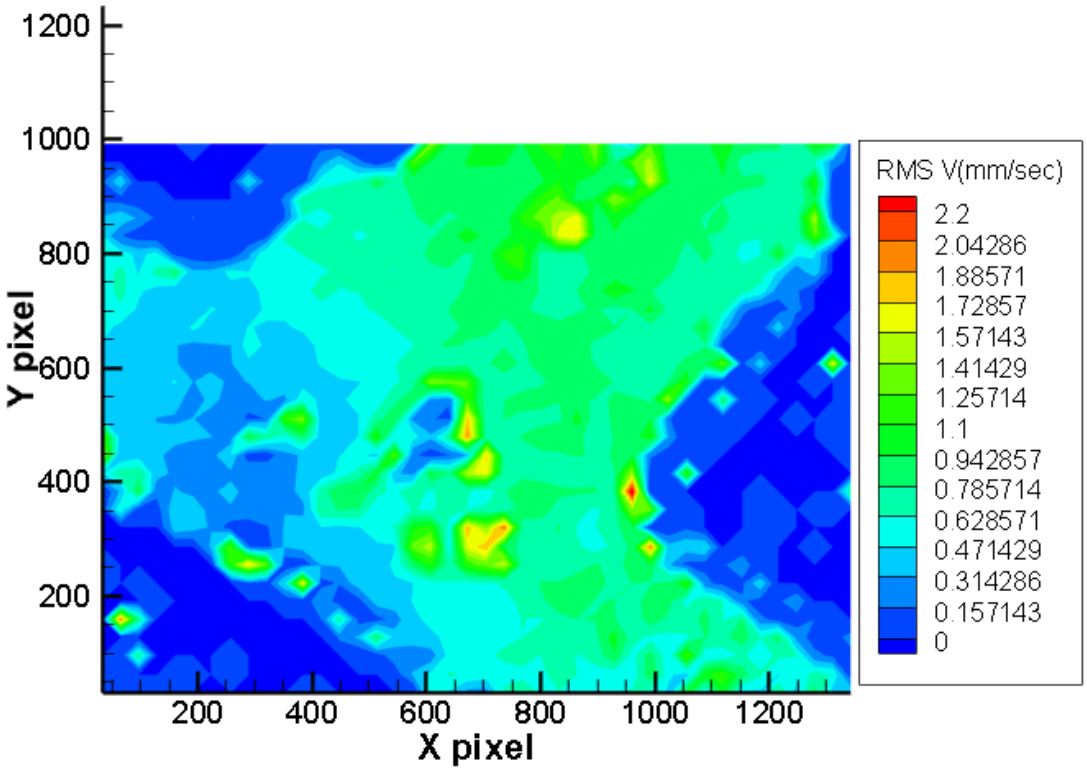
ΘΕΣΗ U BMERGE(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.60 : Πεδίο ταχυτήτων, θέση δεύτερης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.61 : Τυπική απόκλιση οριζόντιας ταχύτητας, θέση δεύτερης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.62 : Τυπική απόκλιση κατακόρυφης ταχύτητας, θέση δεύτερης επανένωσης.

ΘΕΣΗ C SPLIT

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

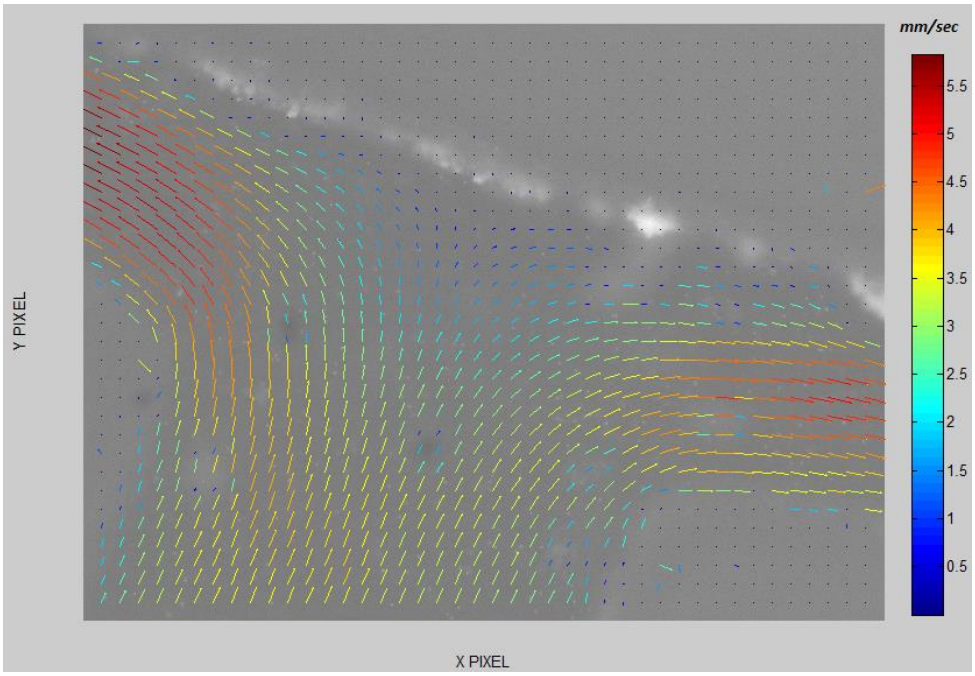
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

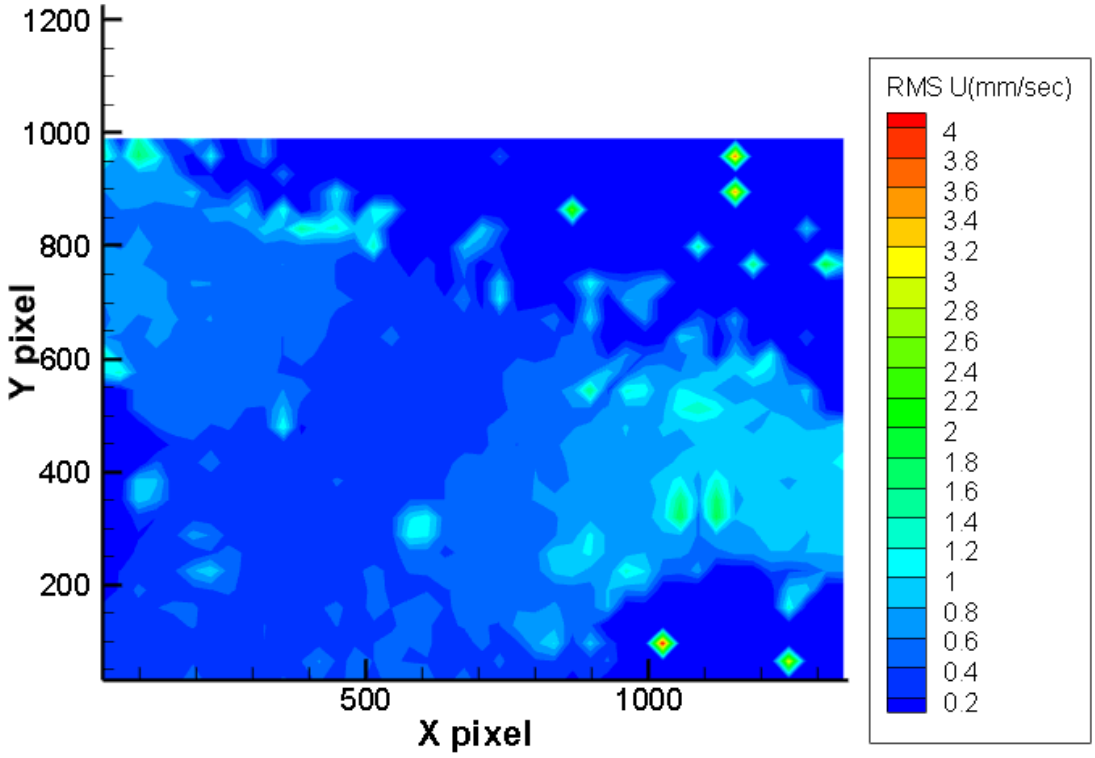
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.57

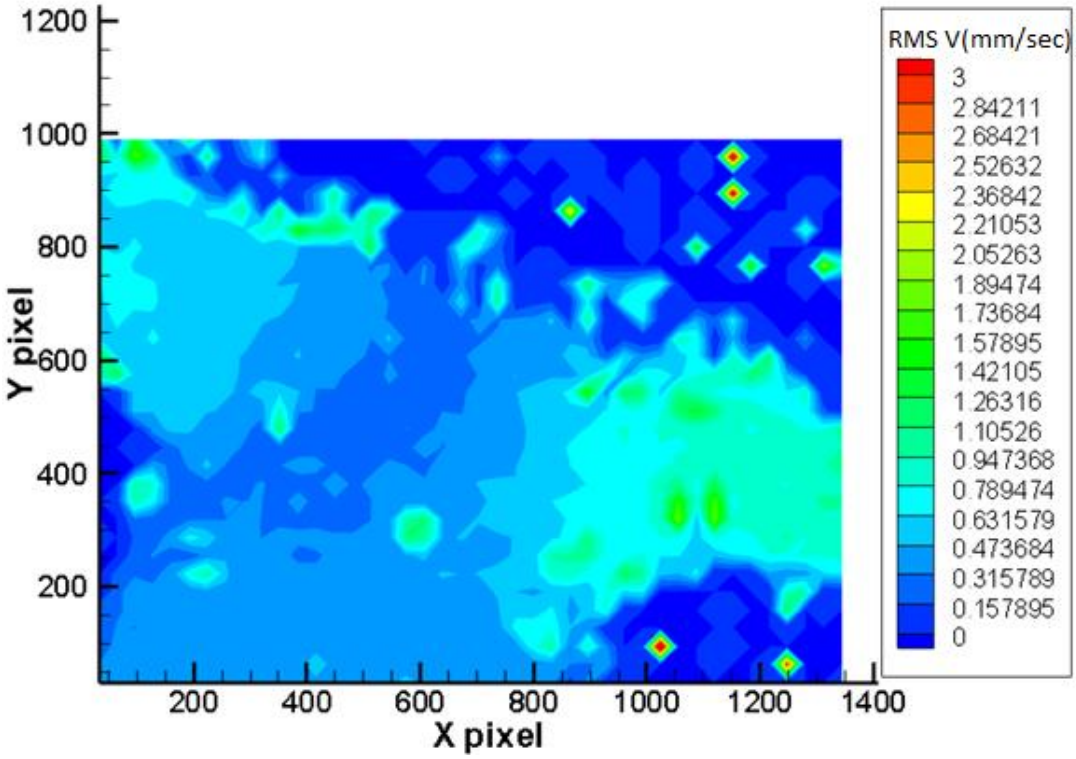
ΘΕΣΗ D CSPLIT(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.63 : Πεδίο ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

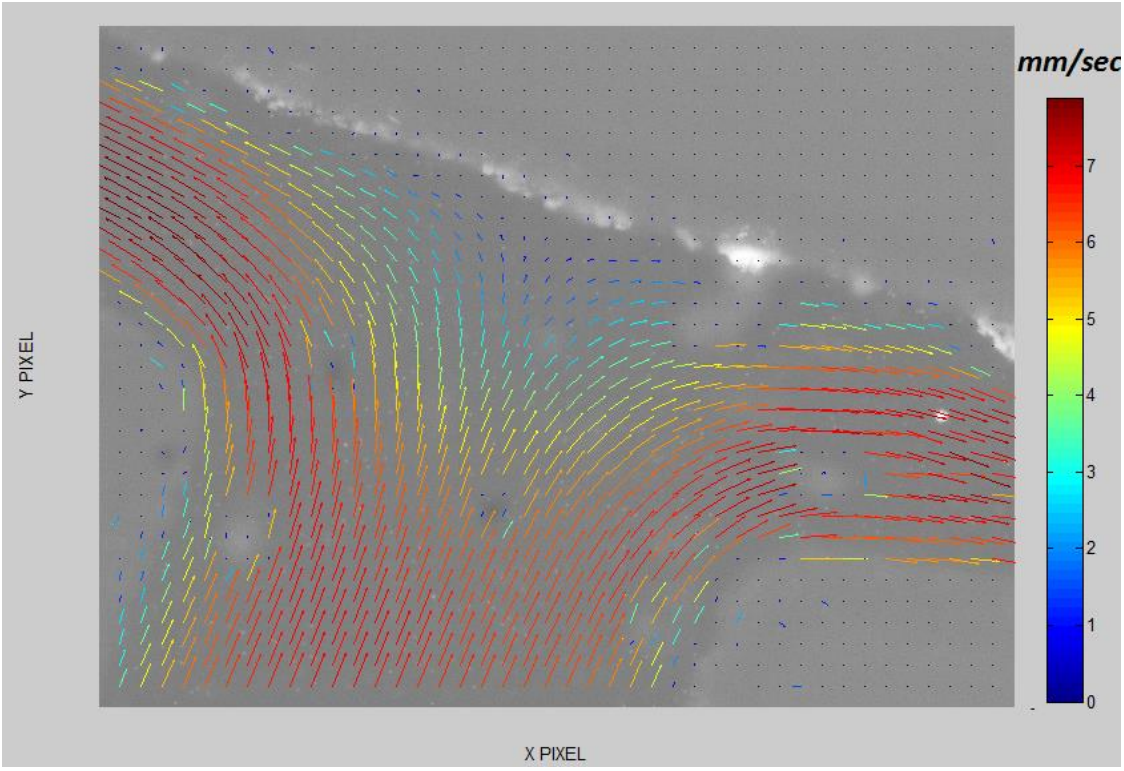


Σχήμα 5.3.2.64 : Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

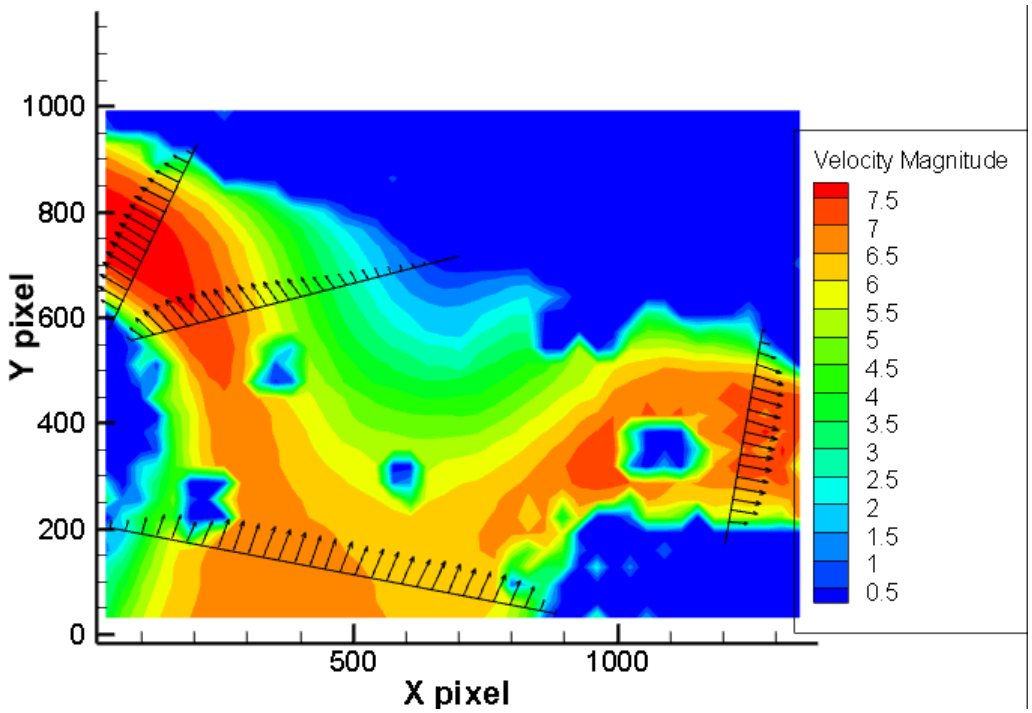


Σχήμα 5.3.2.65 : Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

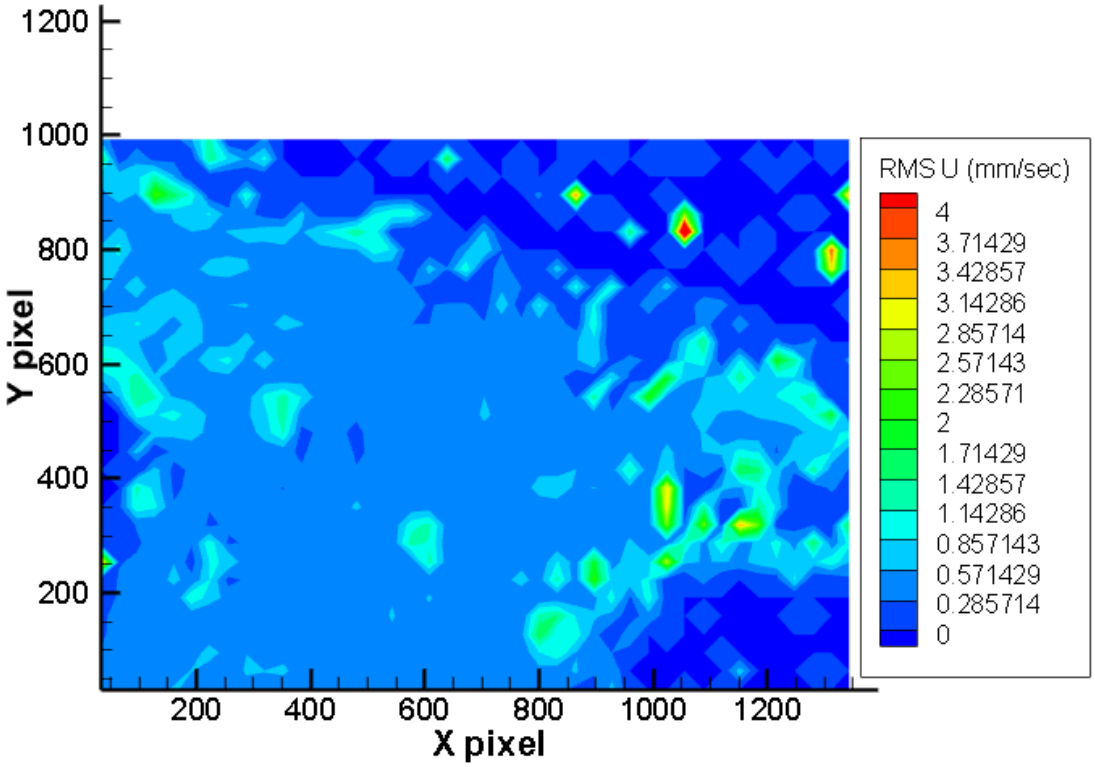
M C SPLIT(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



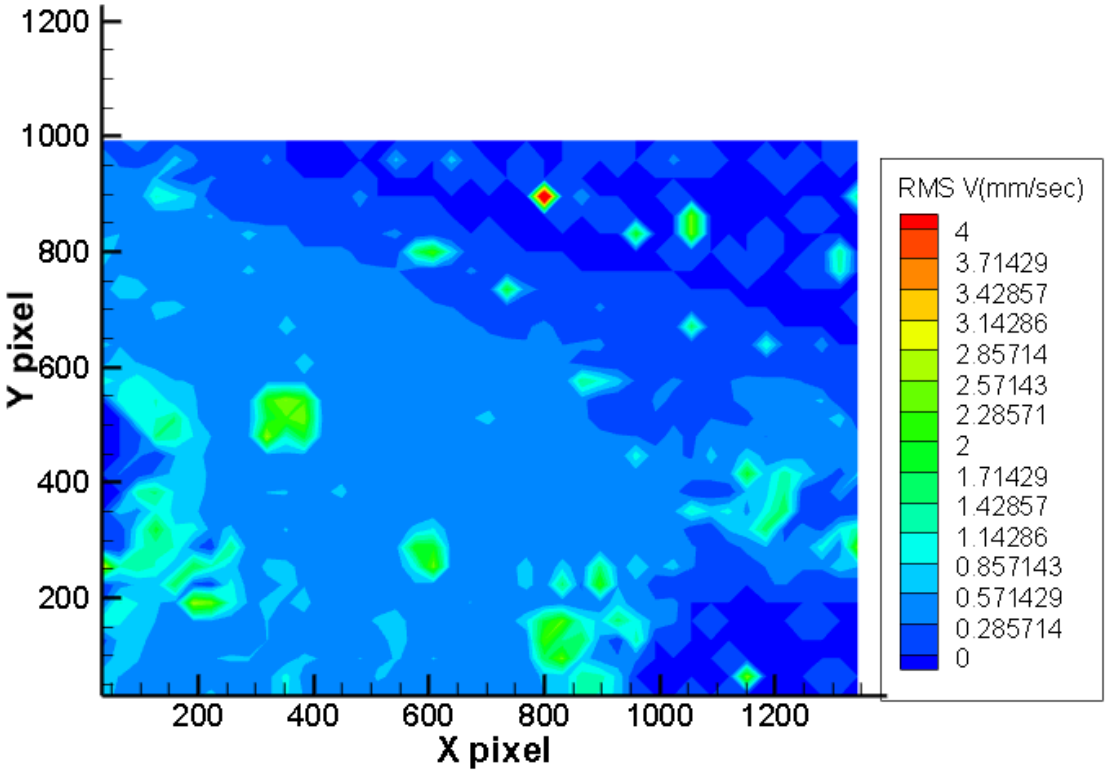
Σχήμα 5.3.2.66 : Πεδίο ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.2.67: Προφίλ ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

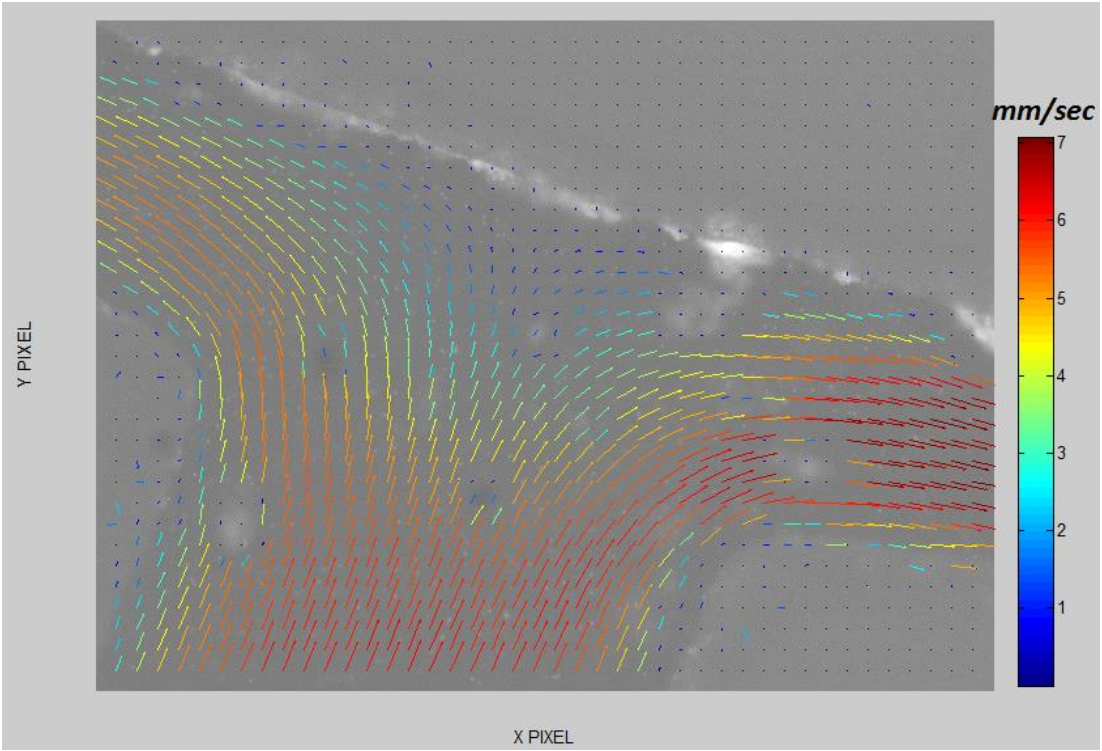


Σχήμα 5.3.2.68 : Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

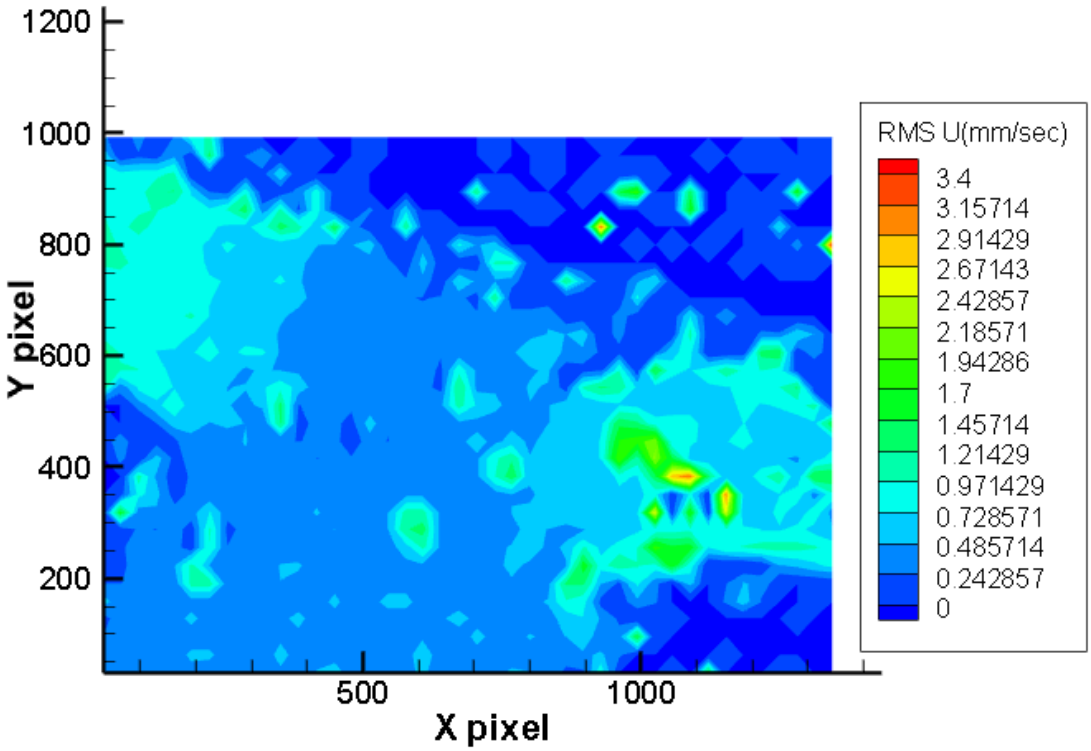


Σχήμα 5.3.2.69 : Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

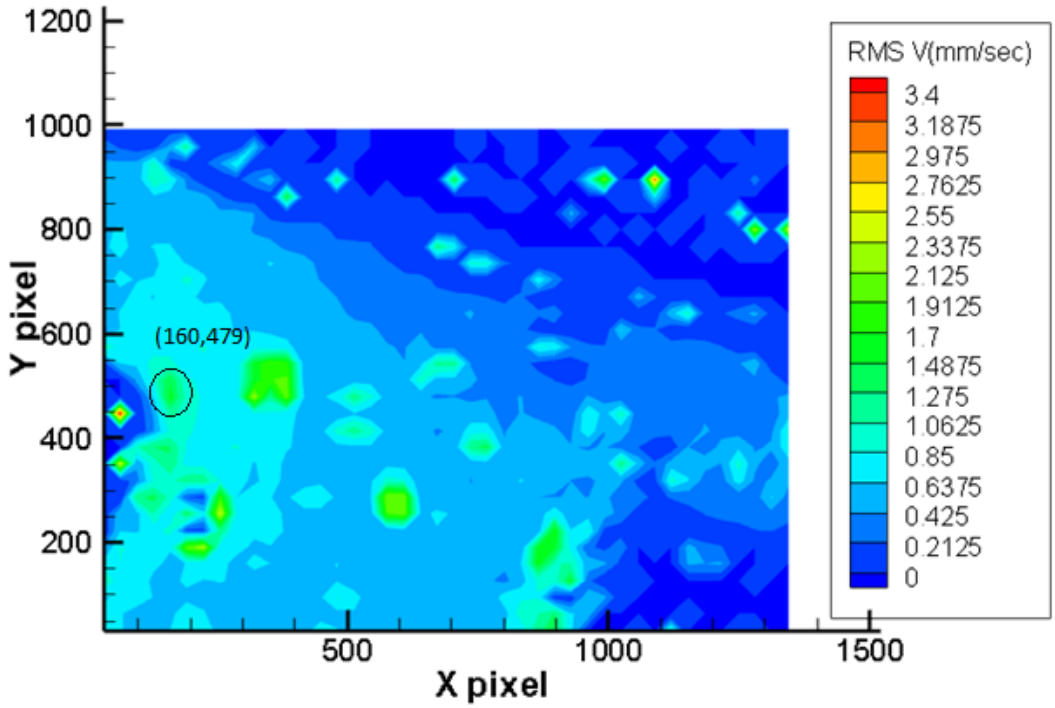
ΘΕΣΗ U C SPLIT(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.70: Πεδίο ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

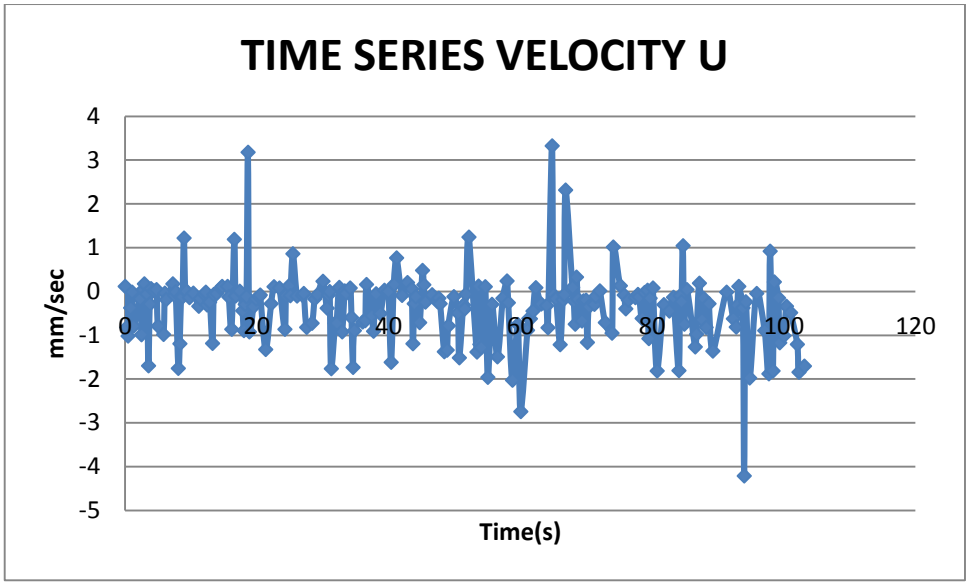


Σχήμα 5.3.2.71: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

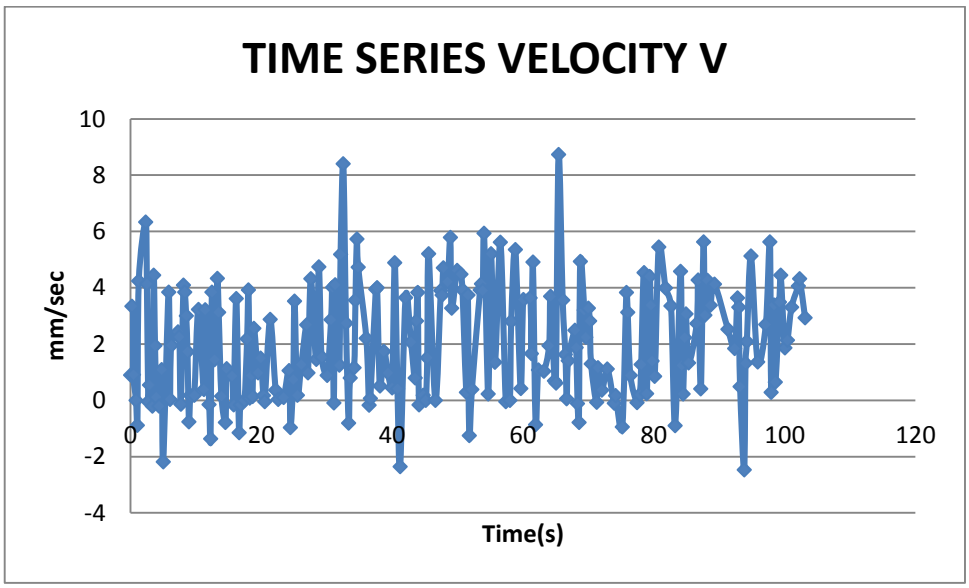


Σχήμα 5.3.2.72: Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τρίτου διαχωρισμού.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (160,479) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.



Σχήμα 5.3.2.73:Χρονοσειρά σημείου (160,479) ,οριζόντια ταχύτητα



Σχήμα 5.3.2.74 :Χρονοσειρά σημείου (160,479) ,κατακόρυφη ταχύτητα.

ΘΕΣΗ C MERGE

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

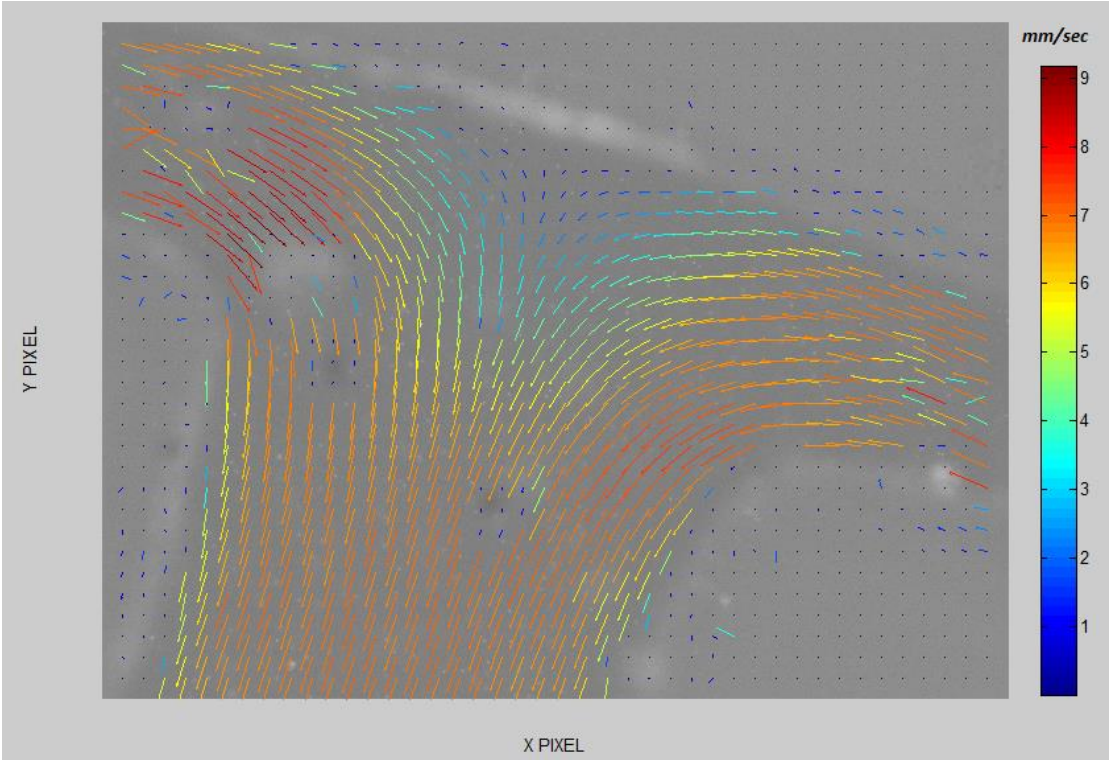
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

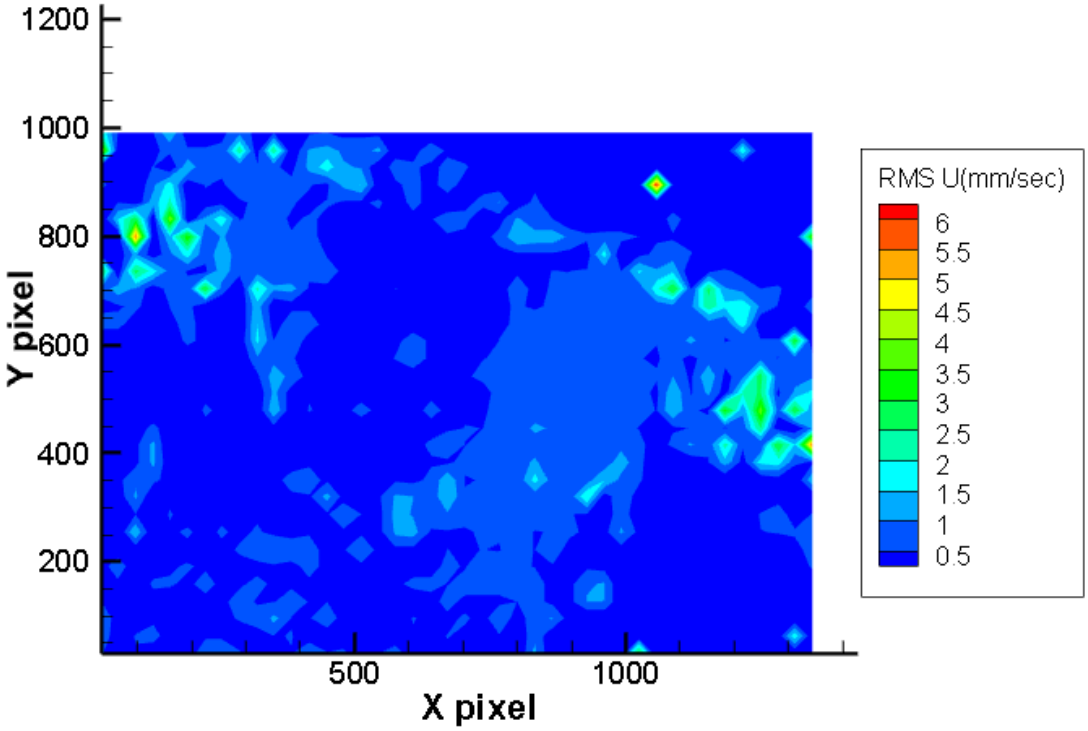
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.61

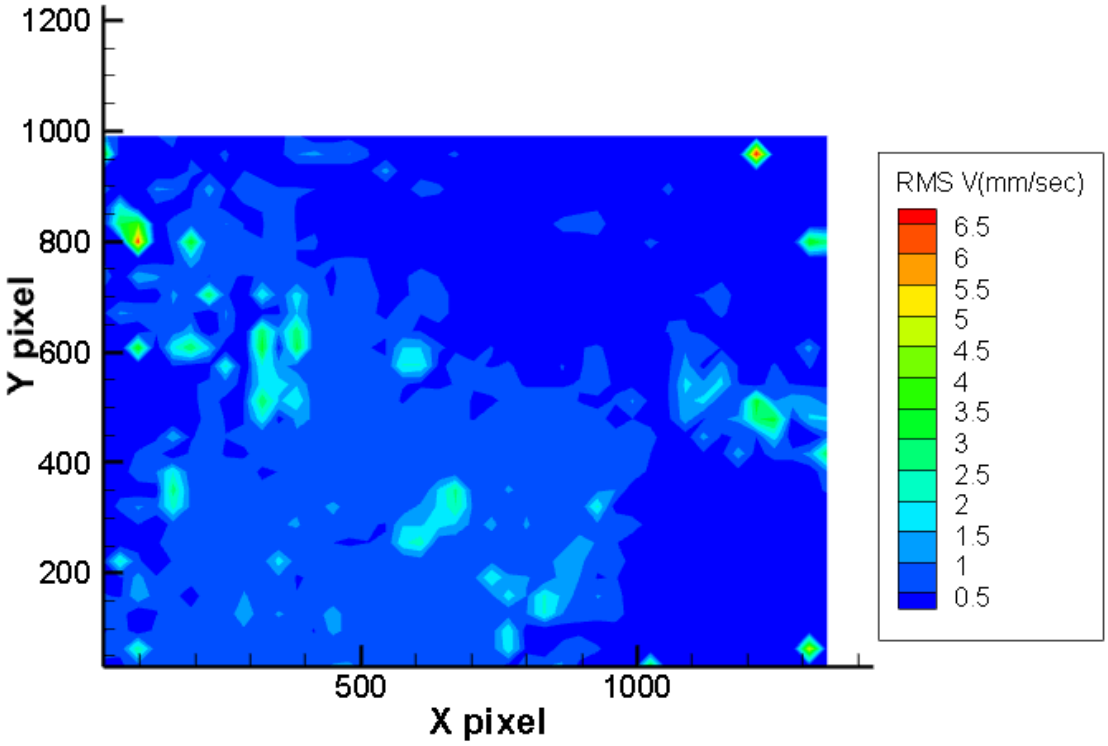
ΘΕΣΗ D CMERGE(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.75 : Πεδίο ταχυτήτων θέση τρίτης επανένωσης .

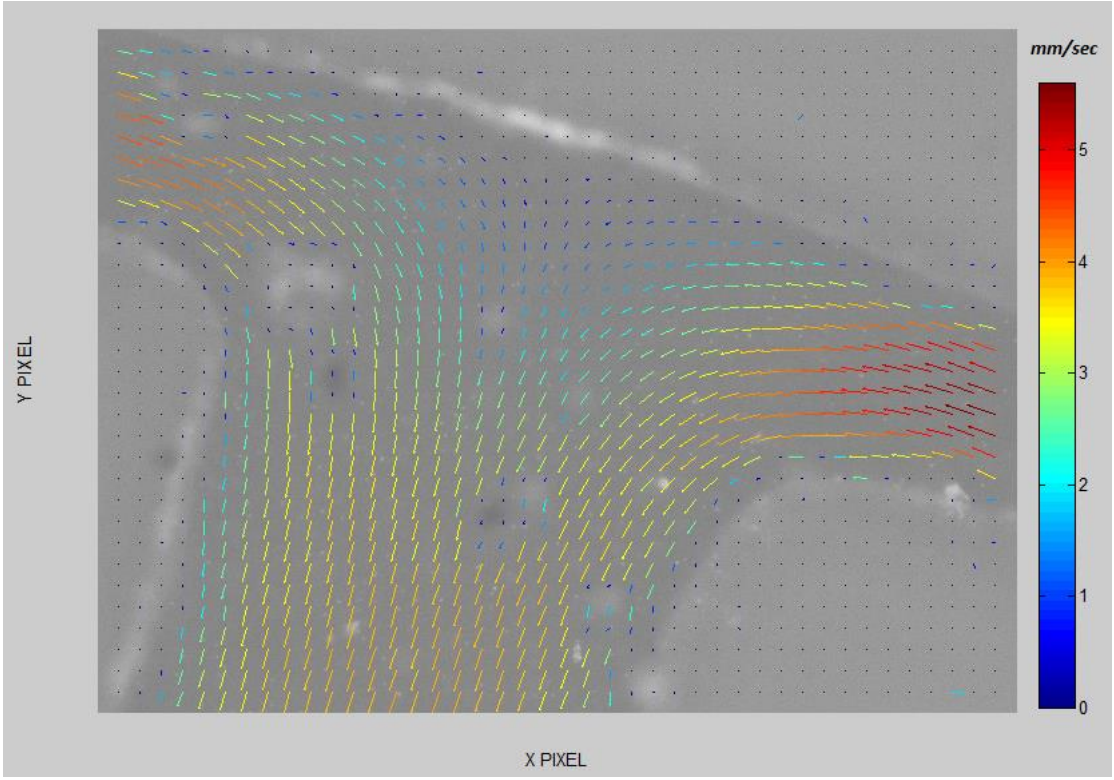


Σχήμα 5.3.2.76 : Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων θέση τρίτης επανένωσης .

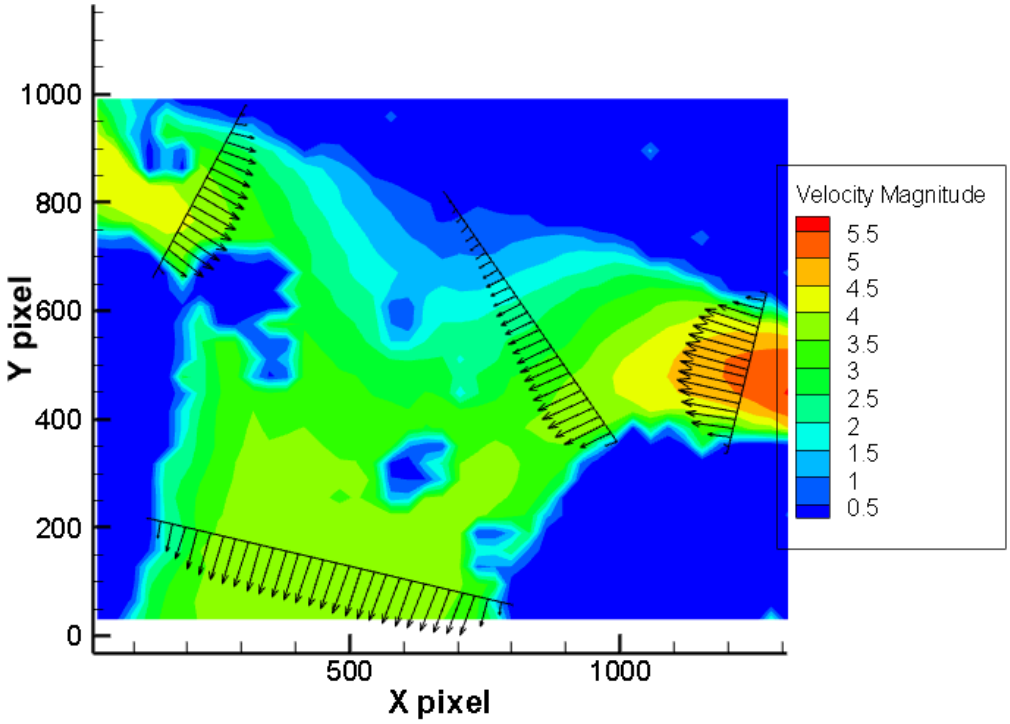


Σχήμα 5.3.2.77 : Τυπικές κατακόρυφων οριζόντιων ταχυτήτων θέση τρίτης επανένωσης .

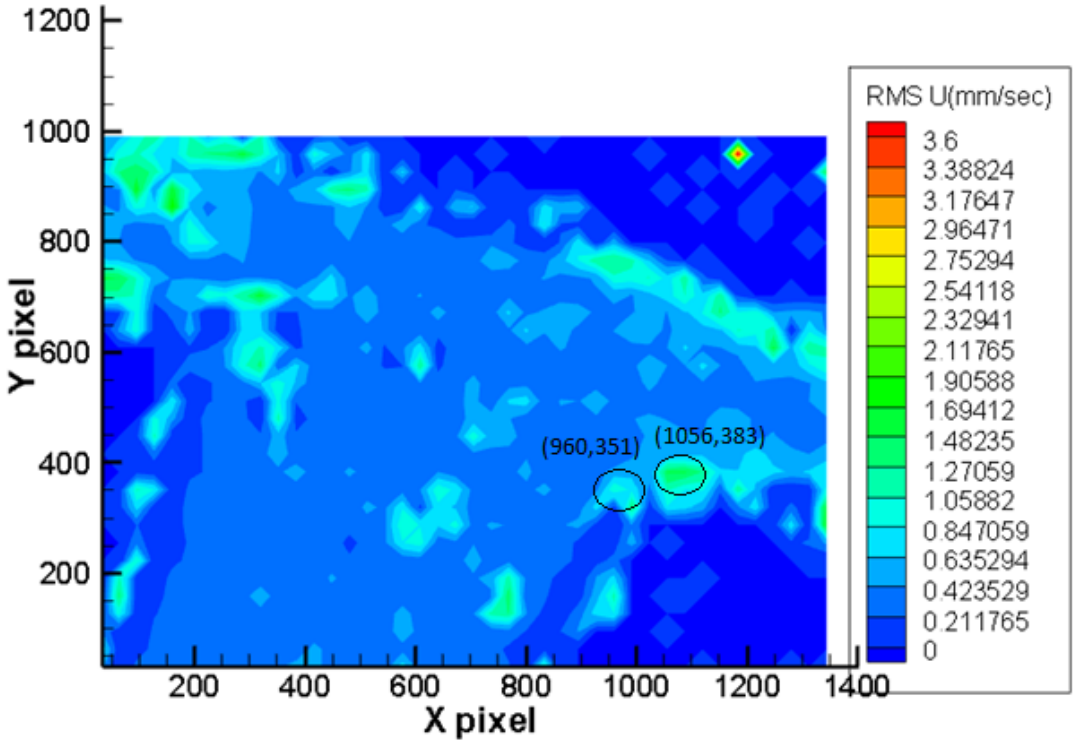
ΘΕΣΗ Μ CMERGE(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



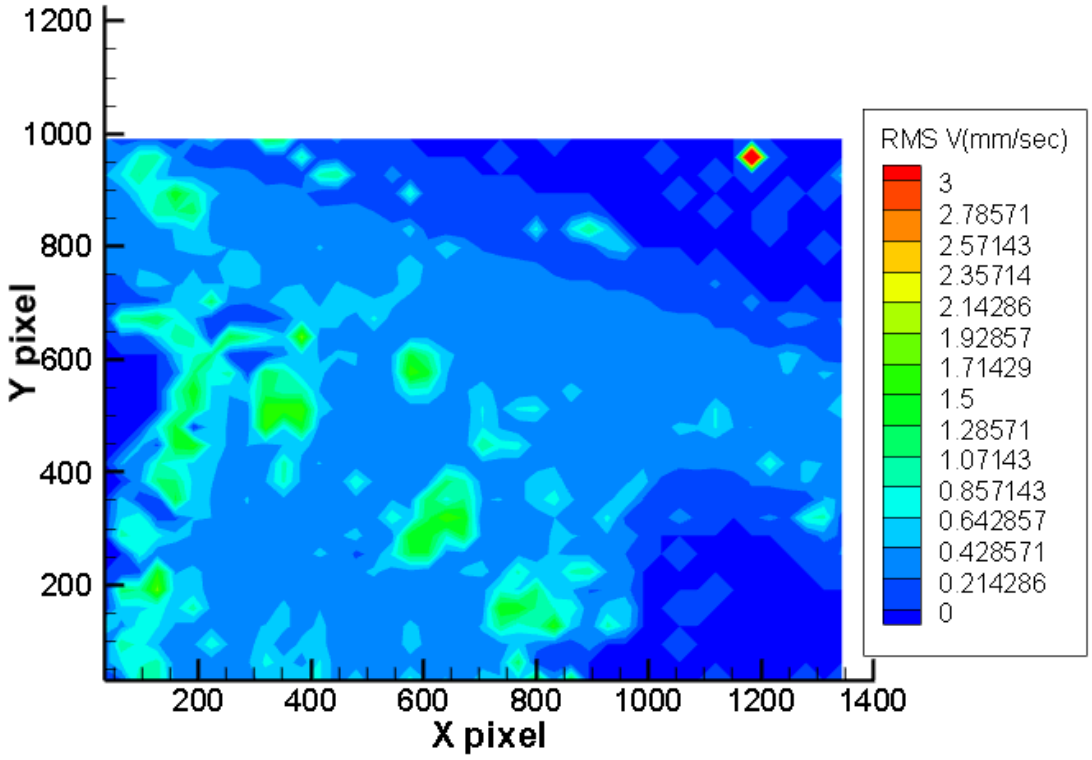
Σχήμα 5.3.2.78 : Πεδίο ταχυτήτων θέση τρίτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.79 : Προφίλ ταχυτήτων ,θέση τρίτης επανένωσης.



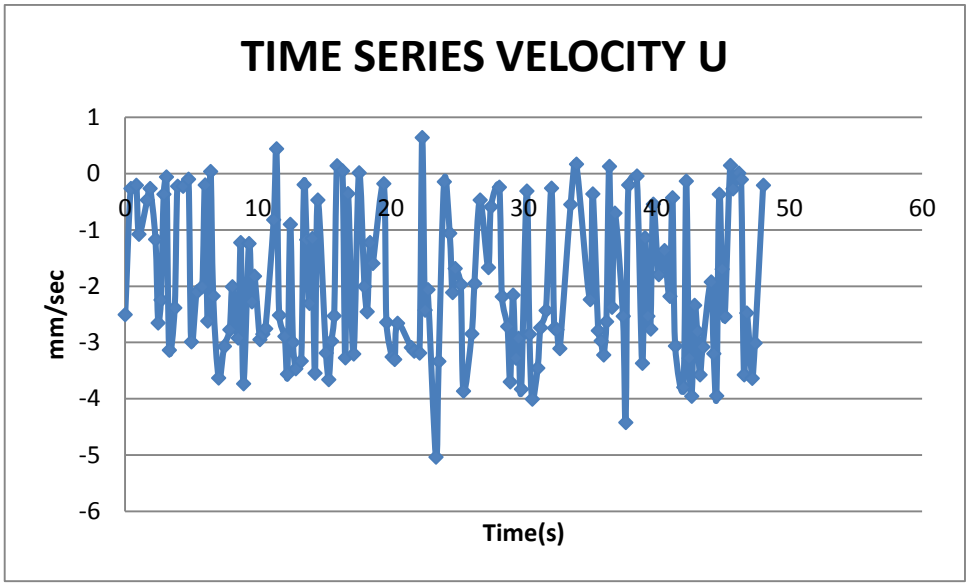
Σχήμα 5.3.2.80 : Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων ,θέση τρίτης επανένωσης.



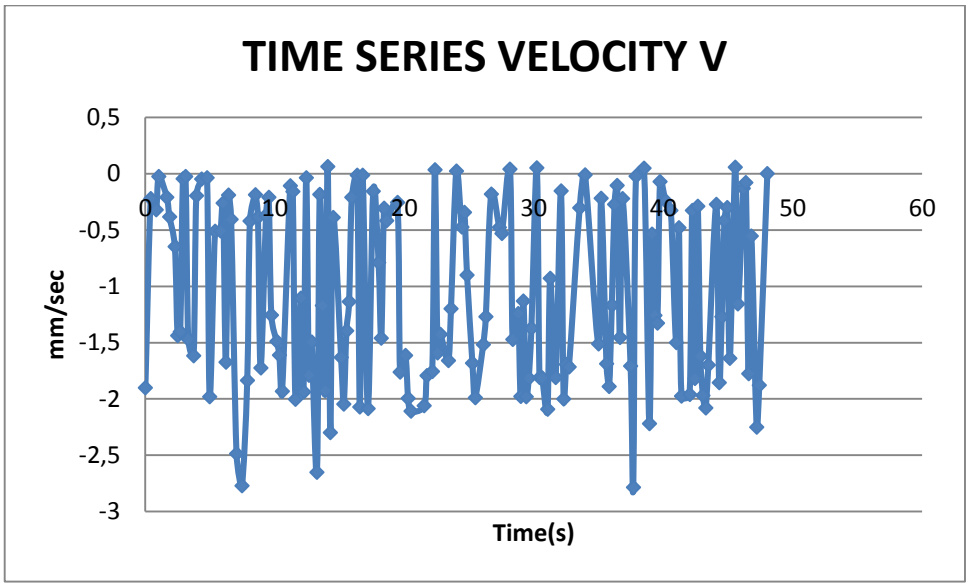
Σχήμα 5.3.2.81 : Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων ,θέση τρίτης επανένωσης.

Όσον αφορά τη χρονοσειρά του σημείου (1056,383): Μόνο 5/500 διανύσματα αποδέχεται η ετεροσυσχέτιση, εξού και η υψηλή τυπική απόκλιση.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (960,351) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.

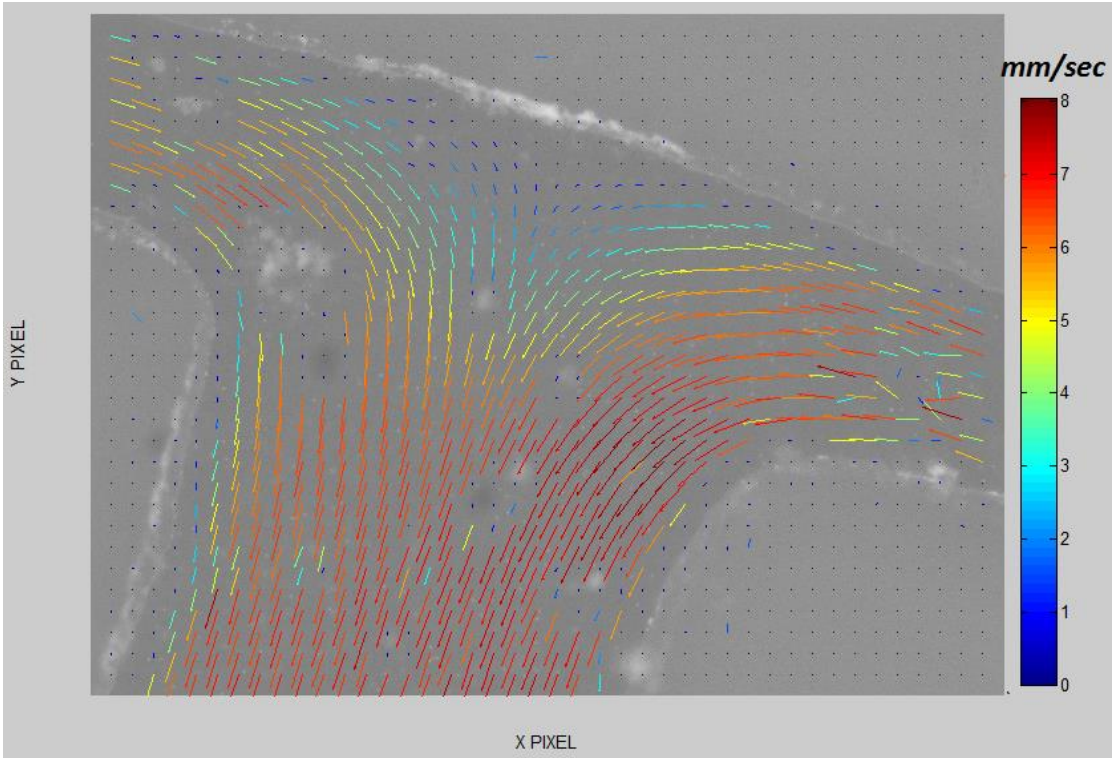


Σχήμα 5.3.2.81: Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας του σημείου (960,351).

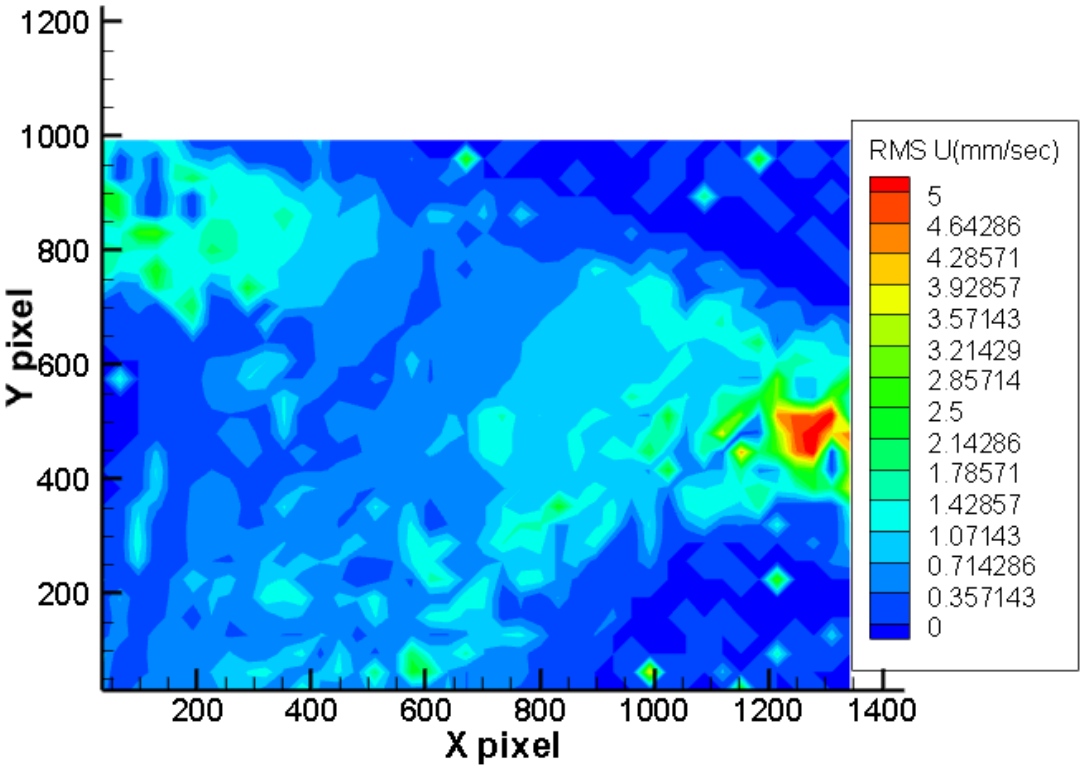


Σχήμα 5.3.2.82: Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας του σημείου (960,351).

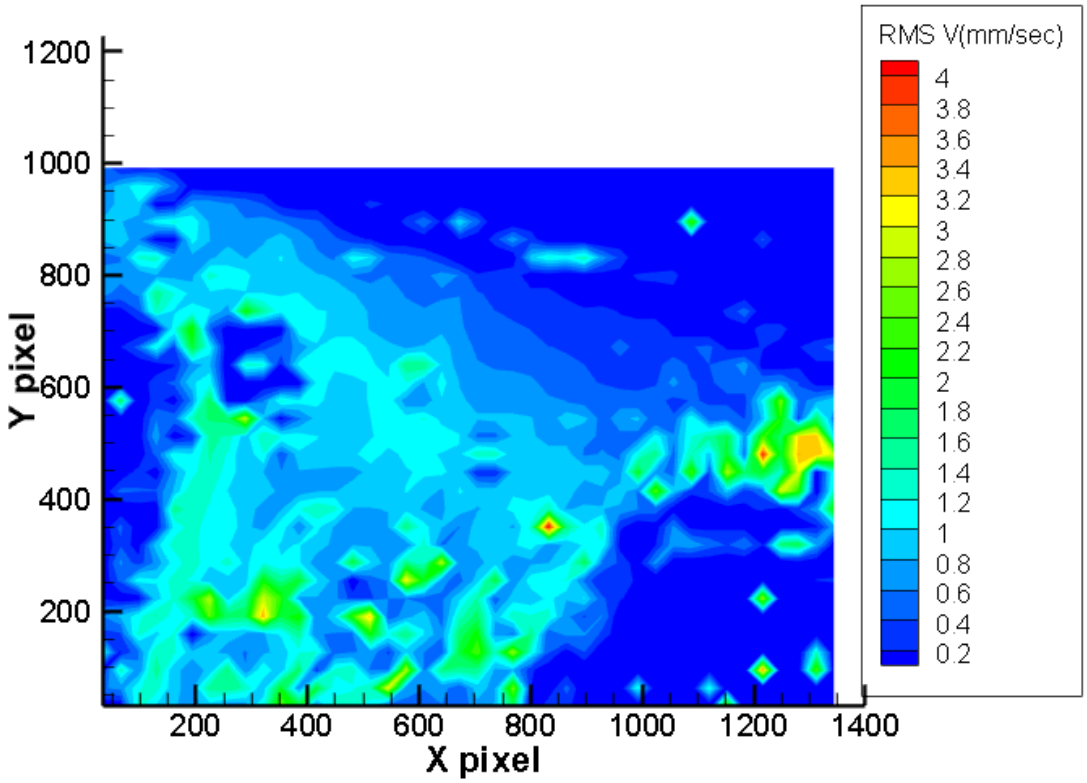
ΘΕΣΗ U CMERGE(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.83: Πεδίο ταχυτήτων, θέση τρίτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.84: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τρίτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.85 : Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τρίτης επανένωσης.

ΘΕΣΗ D SPLIT

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

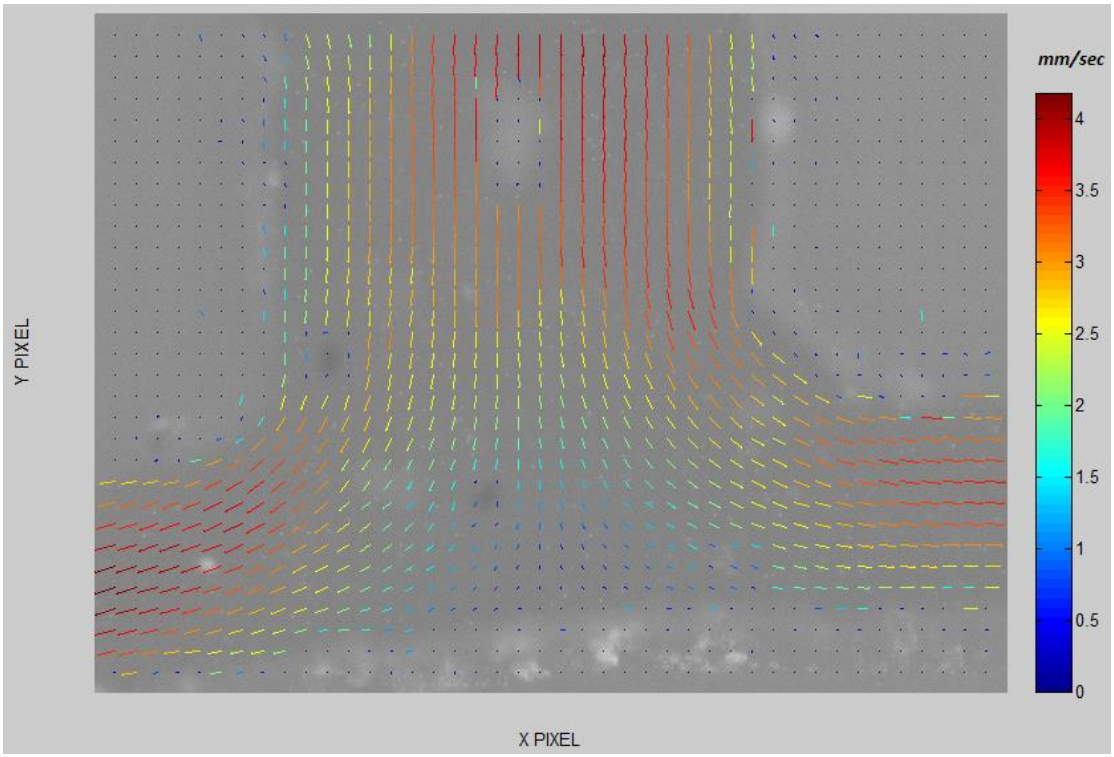
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

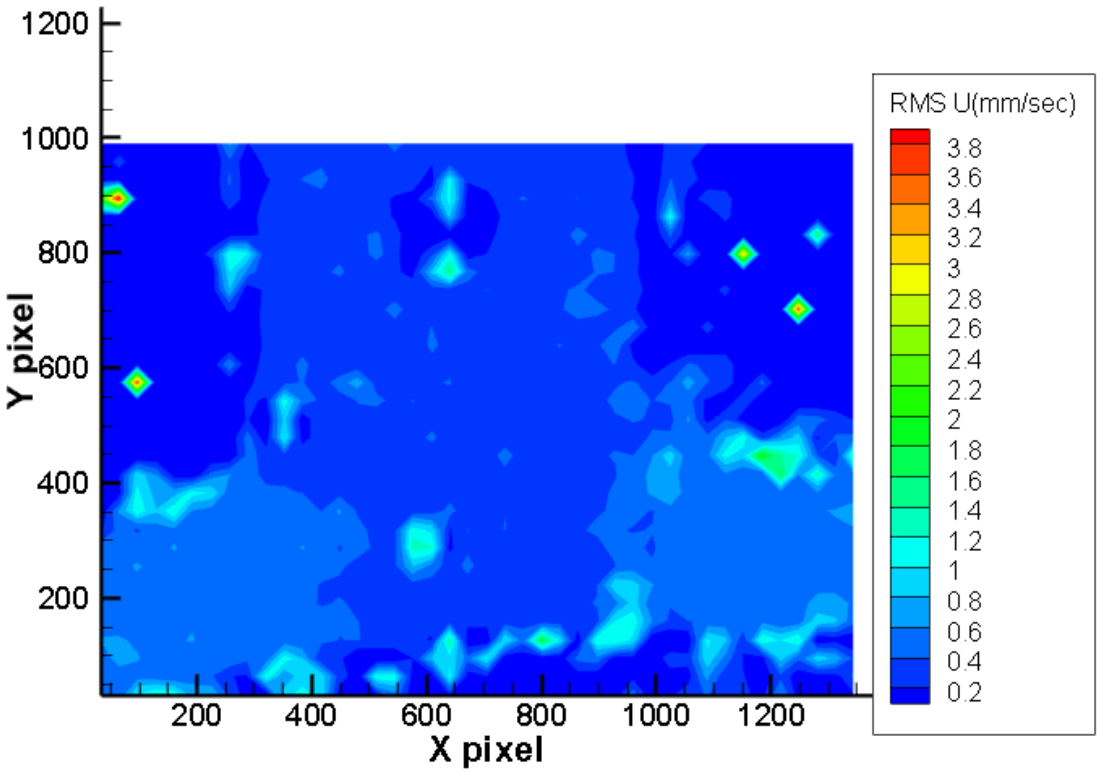
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.34

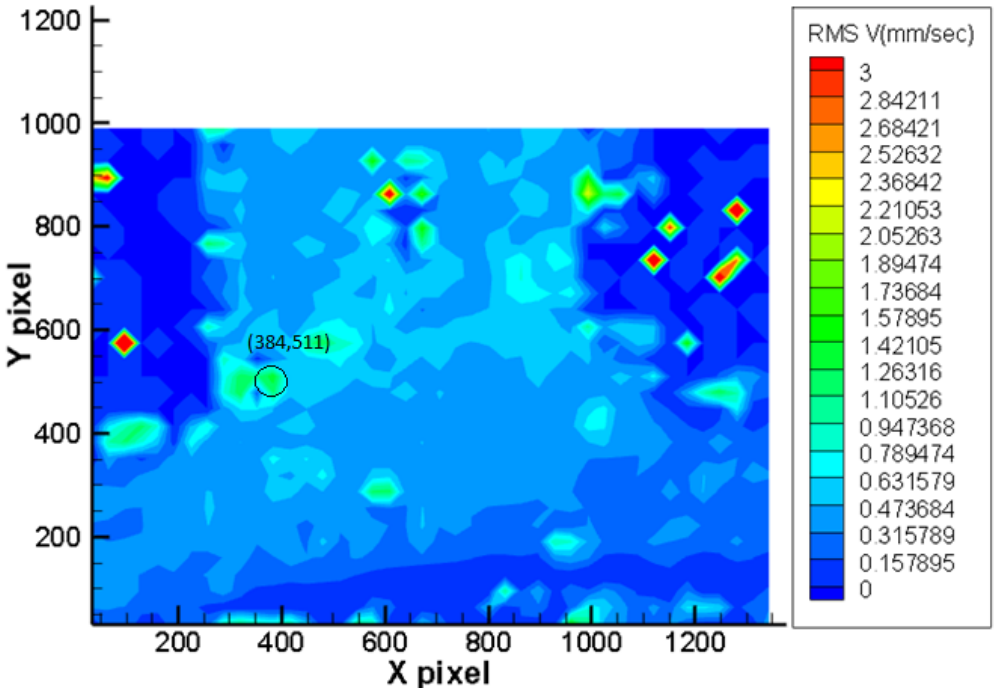
ΘΕΣΗ D DSPLIT(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.86:Πεδίο ταχυτήτων, θέση τέταρτου διαχωρισμού.

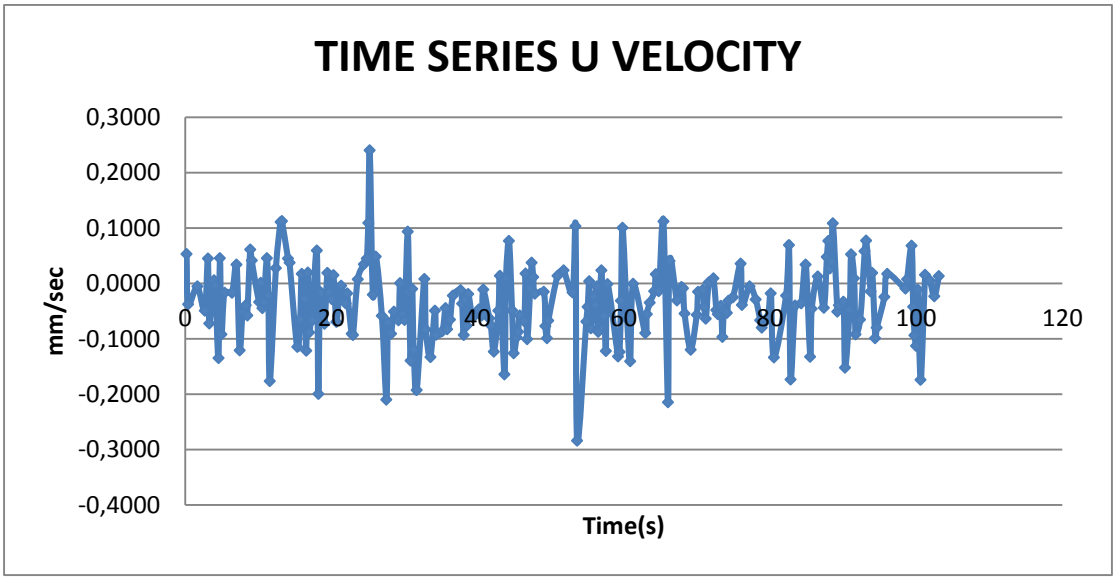


Σχήμα 5.3.2.87:Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τέταρτου διαχωρισμού.

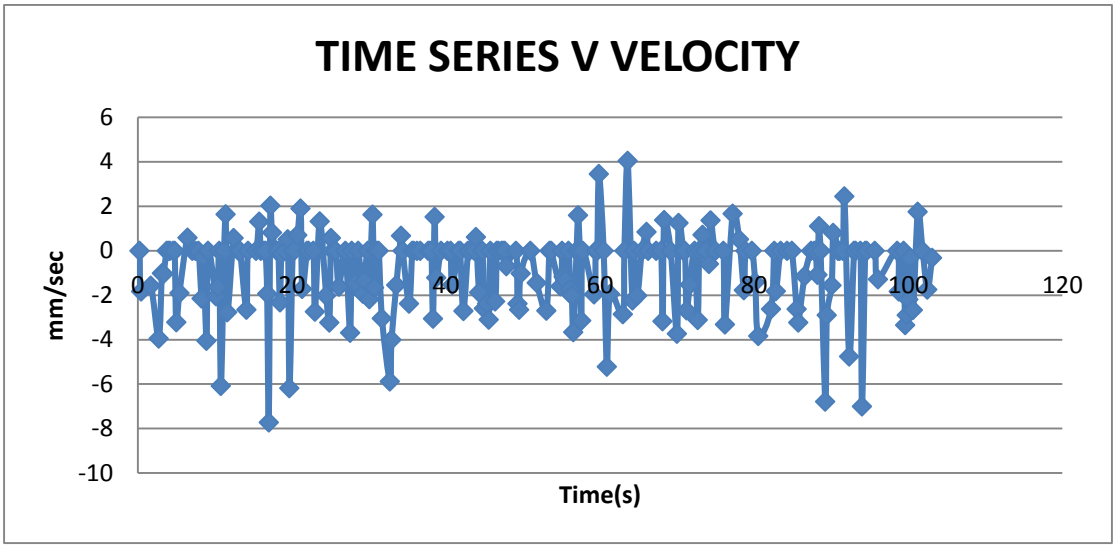


Σχήμα 5.3.2.88:Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφωνταχυτήτων, θέση τέταρτου διαχωρισμού.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (384,511) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.



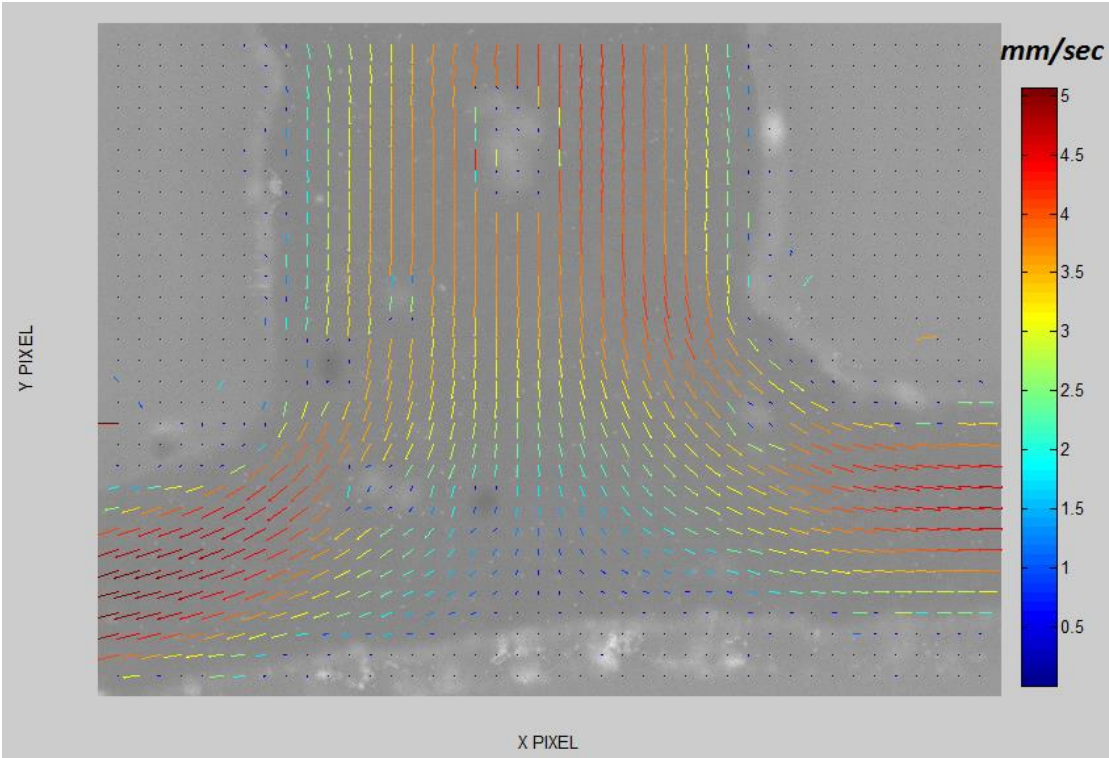
Σχήμα 5.3.2.89: Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας του σημείου (384,511).



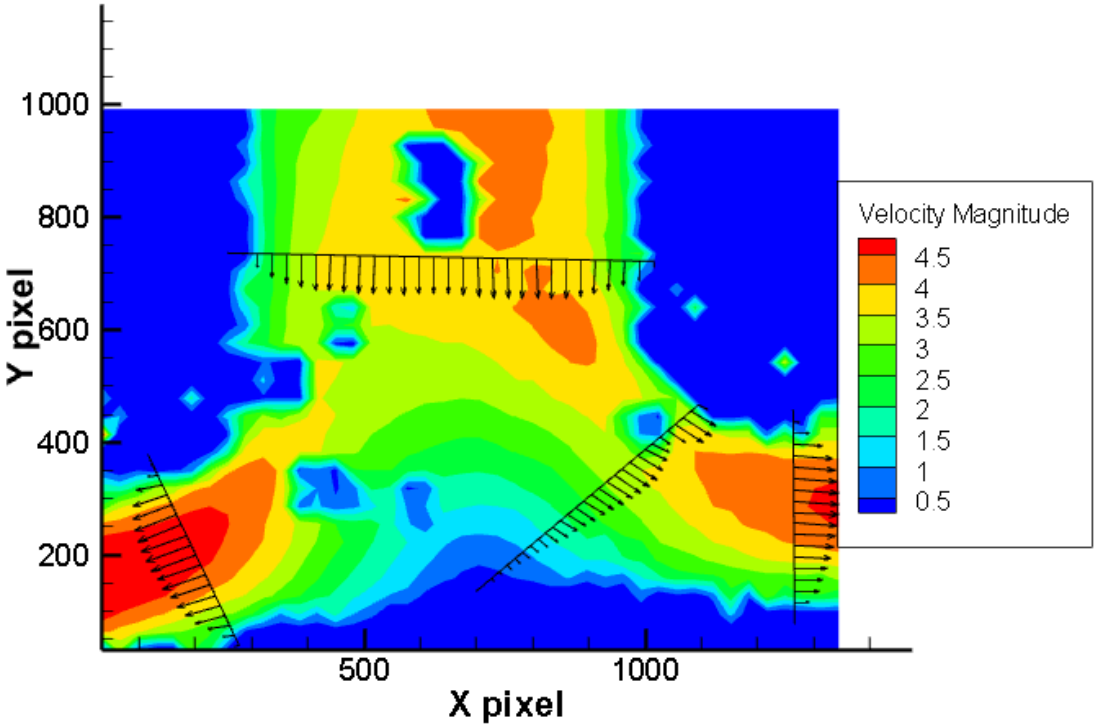
Σχήμα 5.3.2.90: Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας του σημείου (384,511).

Η μεγάλη διακύμανση στο συγκεκριμένο σημείο οφείλεται σε απόβλητο στο φακό της κάμερας που έκρυβε μερικά πίξελ .

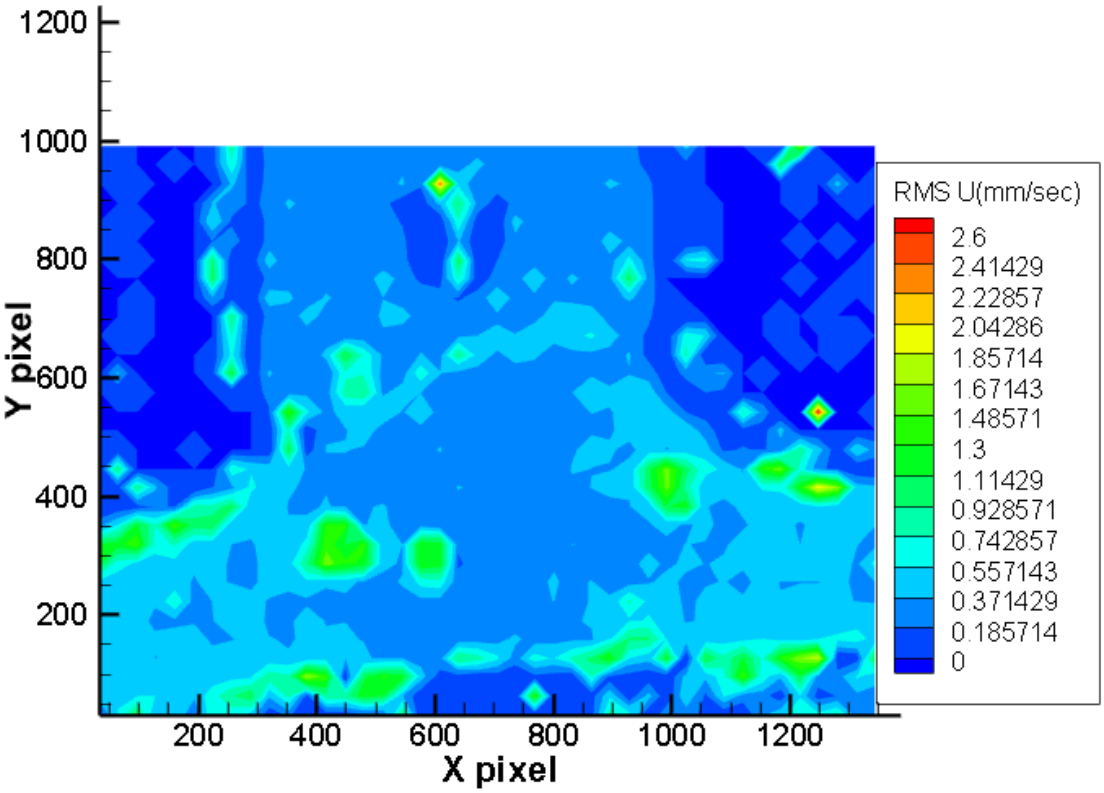
ΘΕΣΗ Μ DSPLIT(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



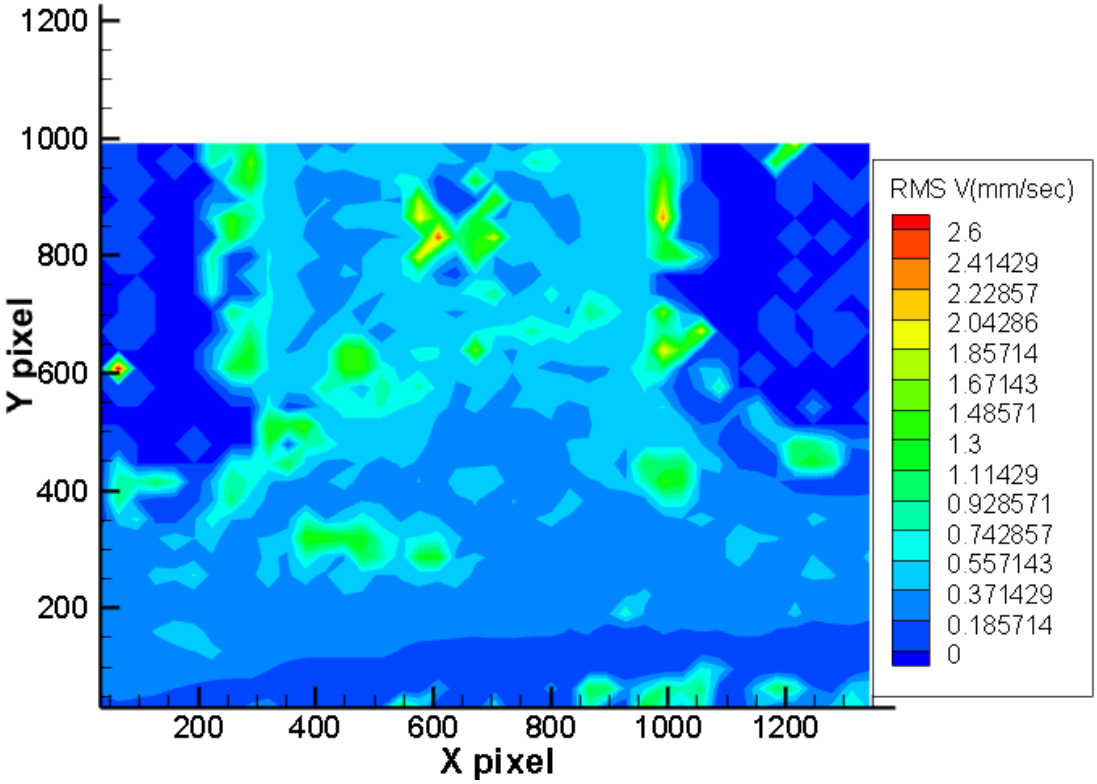
Σχήμα 5.3.2.91: Πεδίο ταχυτήτων ,θέση τέταρτου διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.2.92: Προφίλ ταχυτήτων ,θέση τέταρτου διαχωρισμού.

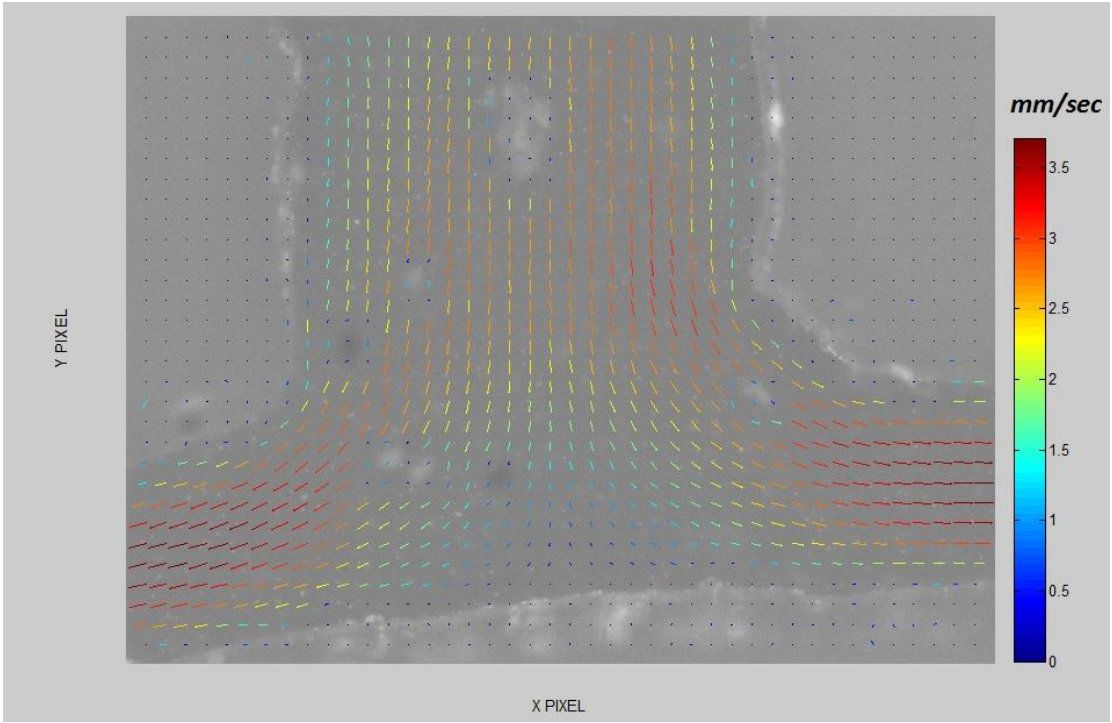


Σχήμα 5.3.2.93: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων ,θέση τέταρτου διαχωρισμού.

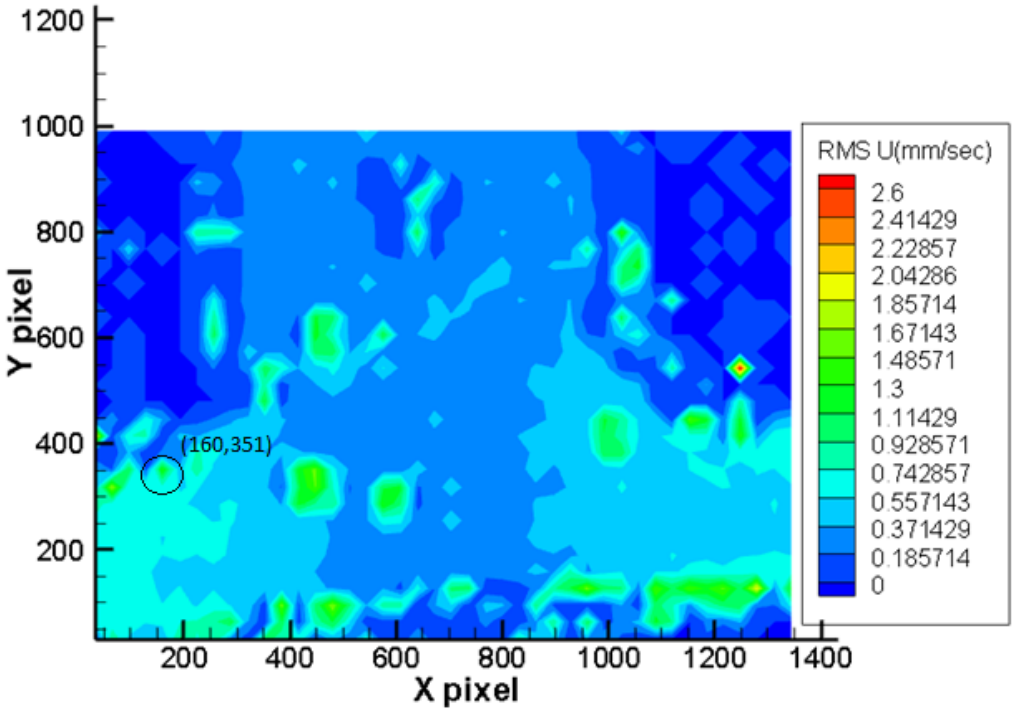


Σχήμα 5.3.2.94: Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων ,θέση τέταρτου διαχωρισμού.

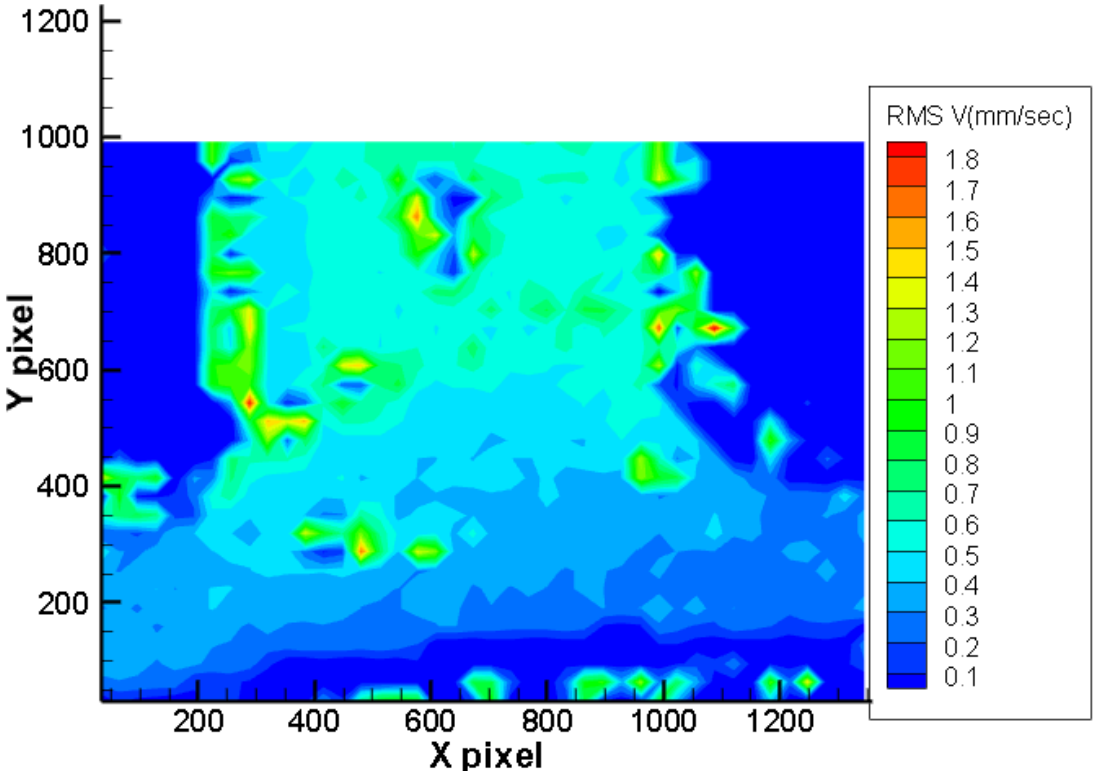
ΘΕΣΗ U DSPLIT(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.95: Πεδίο ταχυτήτων , θέση τέταρτου διαχωρισμού.

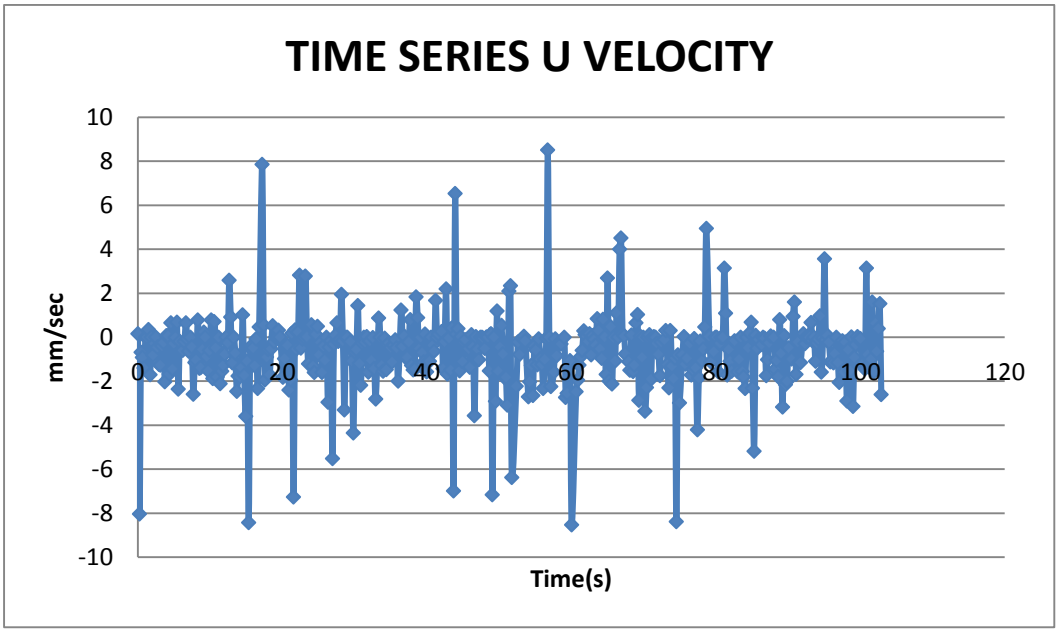


Σχήμα 5.3.2.96: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων , θέση τέταρτου διαχωρισμού.

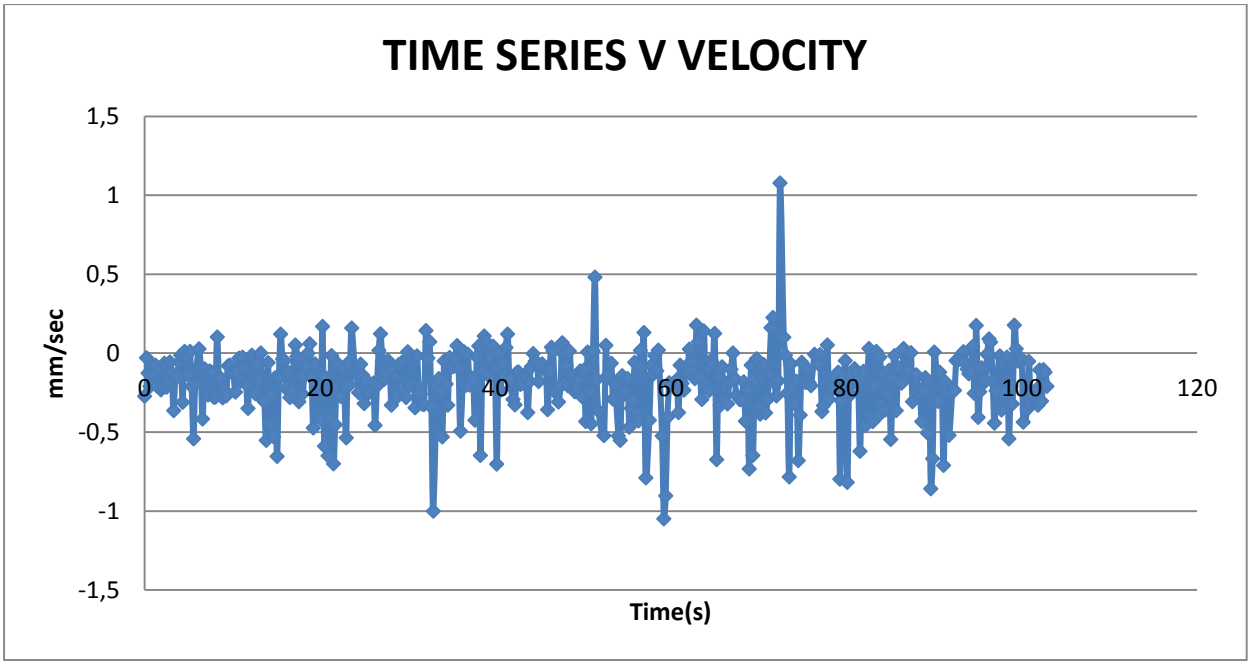


Σχήμα 5.3.2.97: Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων , θέση τέταρτου διαχωρισμού.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (160,351) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.



Σχήμα 5.3.2.98: Χρονοσειρά οριζόντιων ταχυτήτων, σημείο (160,351).



Σχήμα 5.3.2.99: Χρονοσειρά κατακόρυφων ταχυτήτων, σημείο (160,351).

ΘΕΣΗ D MERGE

Επεξήγηση ονοματολογίας(συνολικό βάθος 66.5 μm):

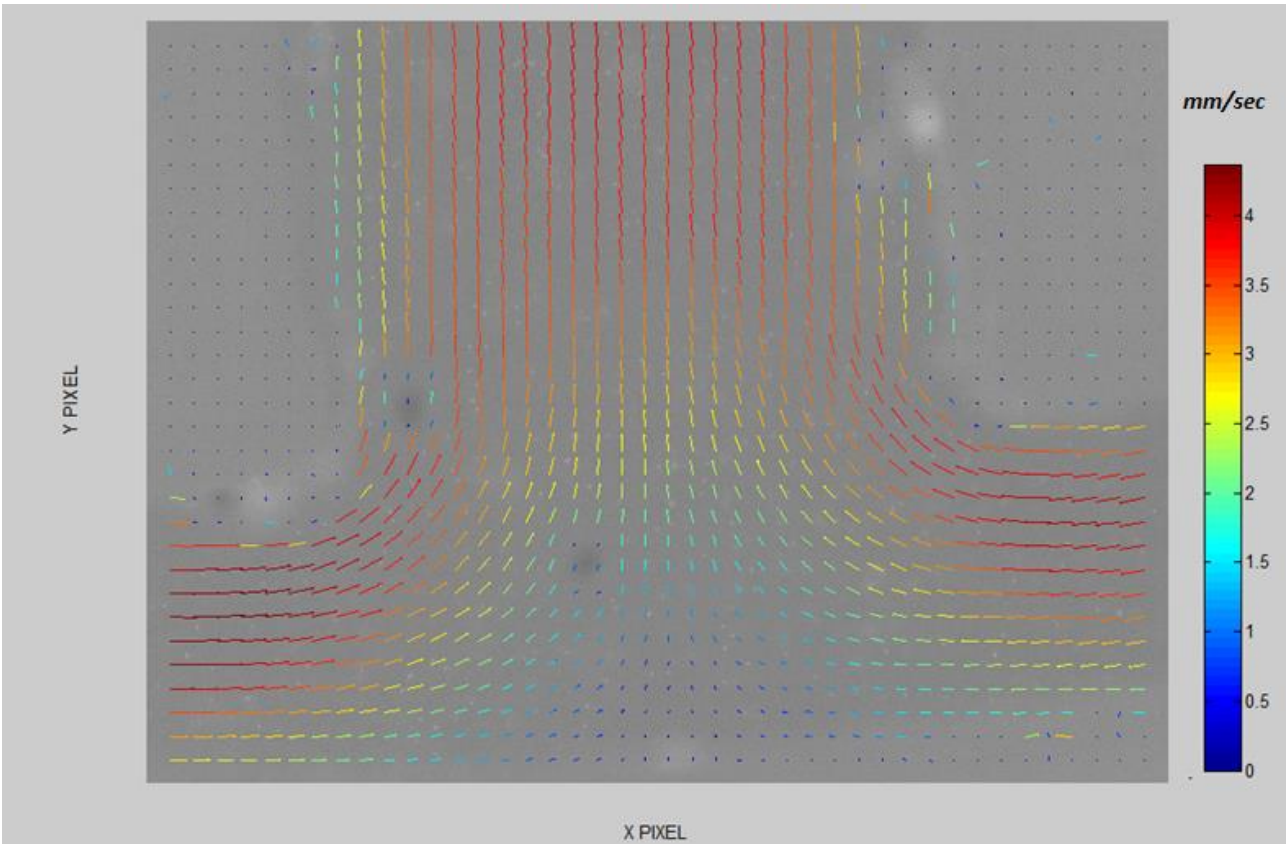
*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

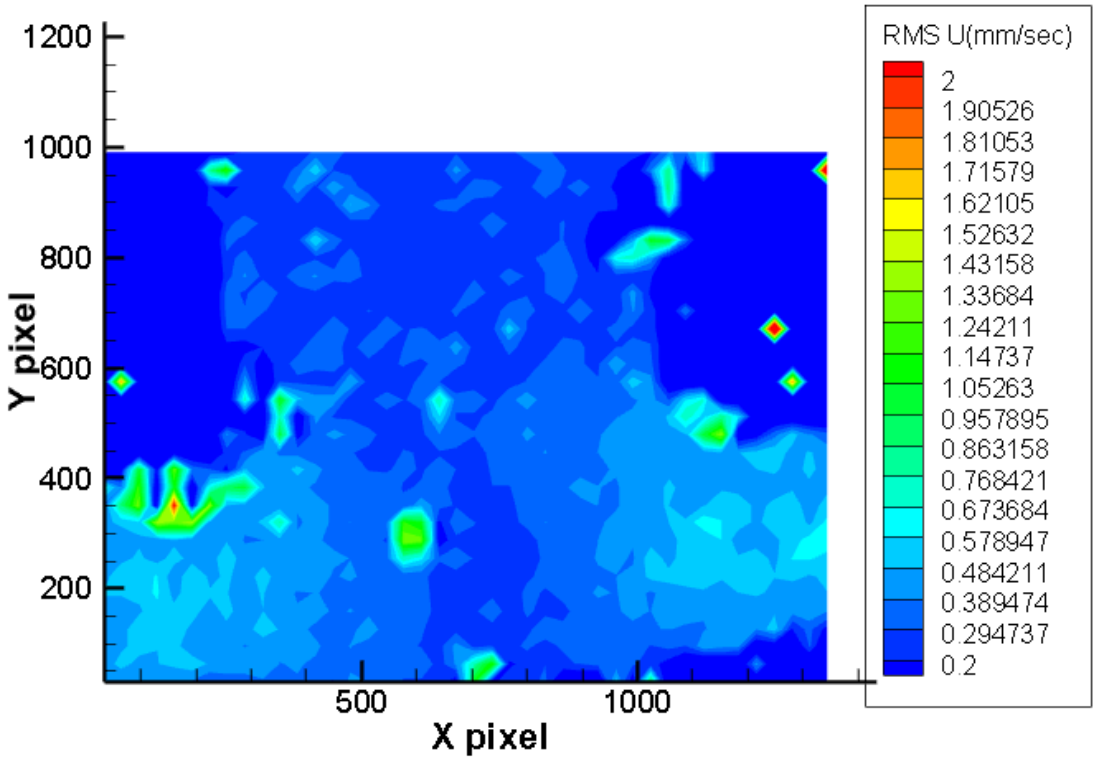
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Re: 0.48

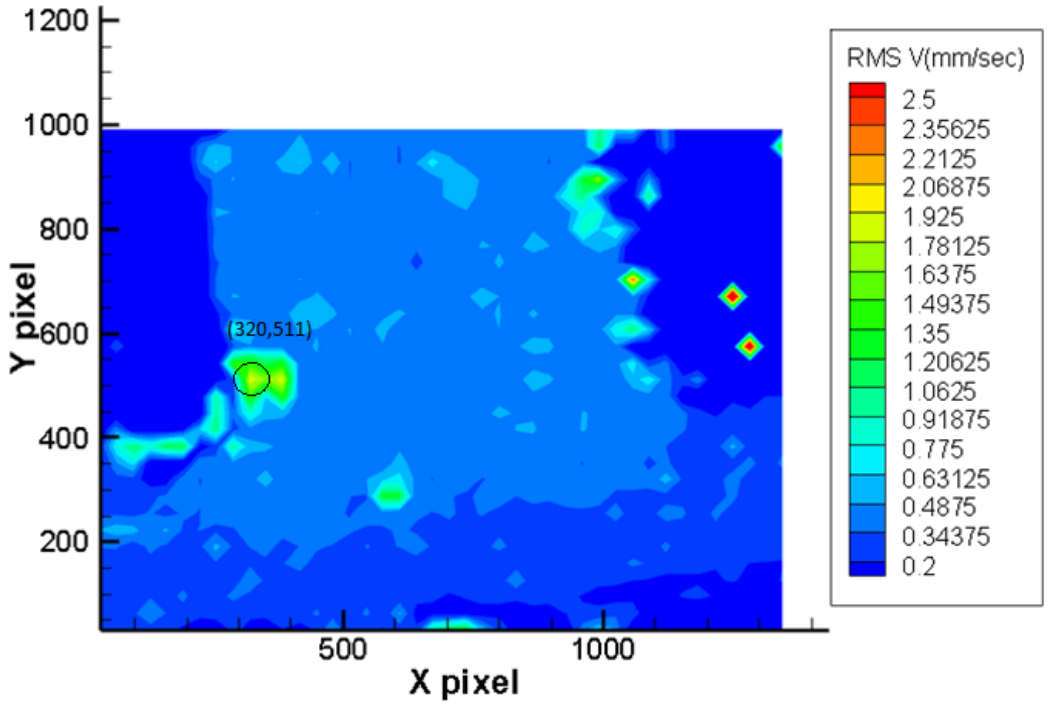
ΘΕΣΗ D DMERGE(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)



Σχήμα 5.3.2.100: Πεδίο ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης

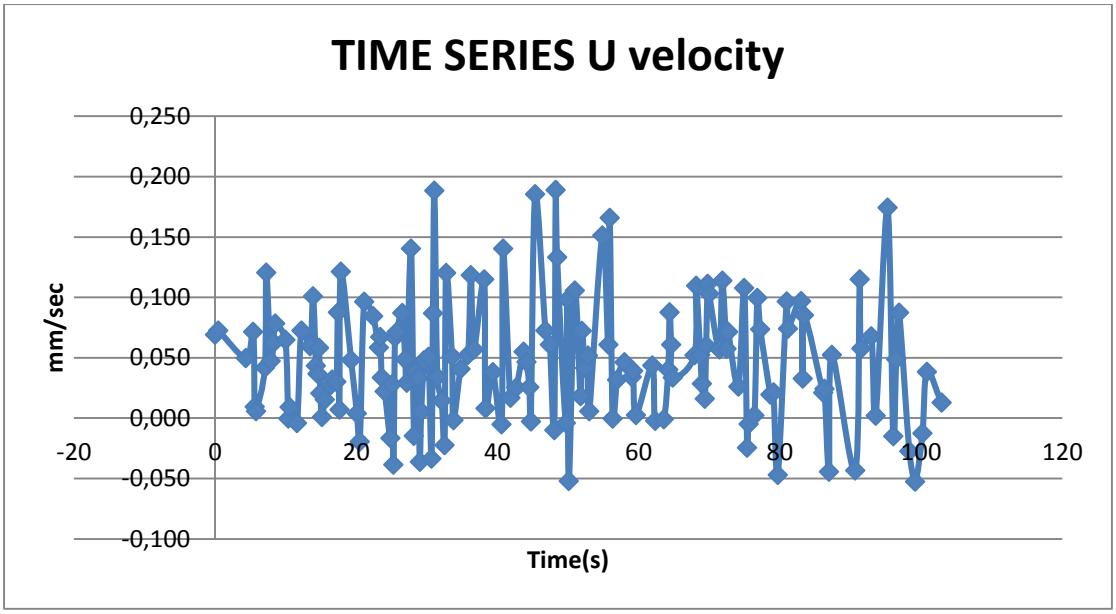


Σχήμα 5.3.2.101: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης.

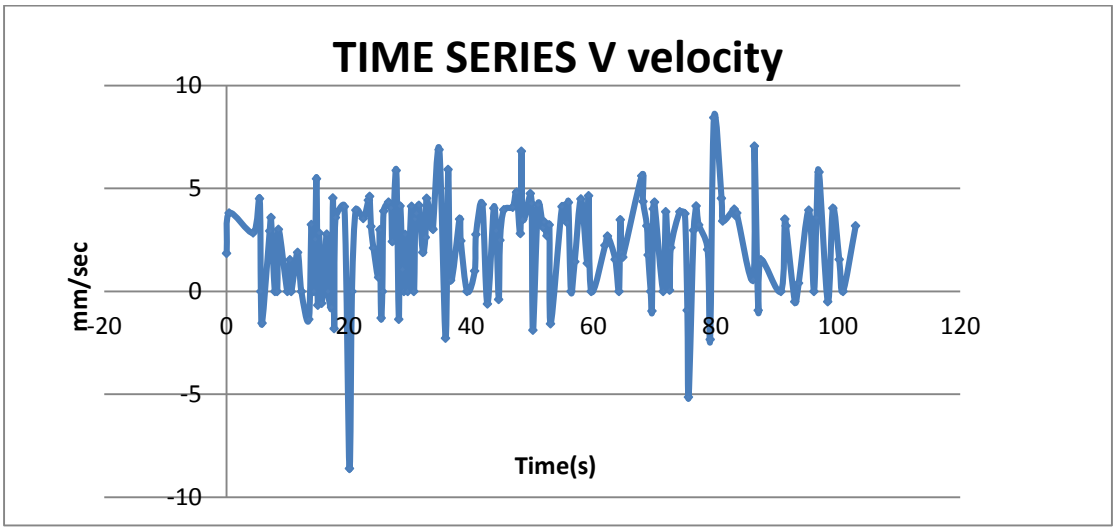


Σχήμα 5.3.2.102: Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης.

Παρακάτω παρατίθεται η χρονοσειρά του σημείου (320,511) για την οριζόντια(U)και κάθετη(V) ταχύτητα.



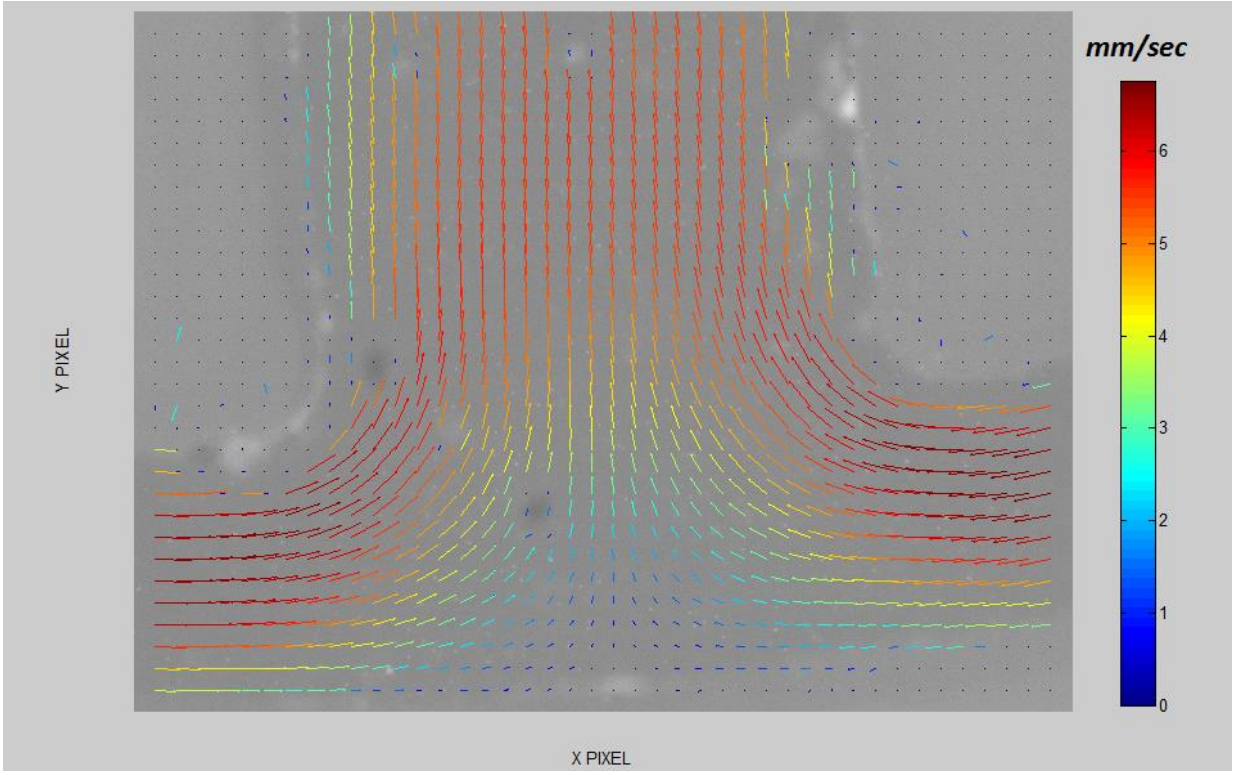
Σχήμα 5.3.2.103: Χρονοσειρά οριζόντιας ταχύτητας του σημείου (320,511).



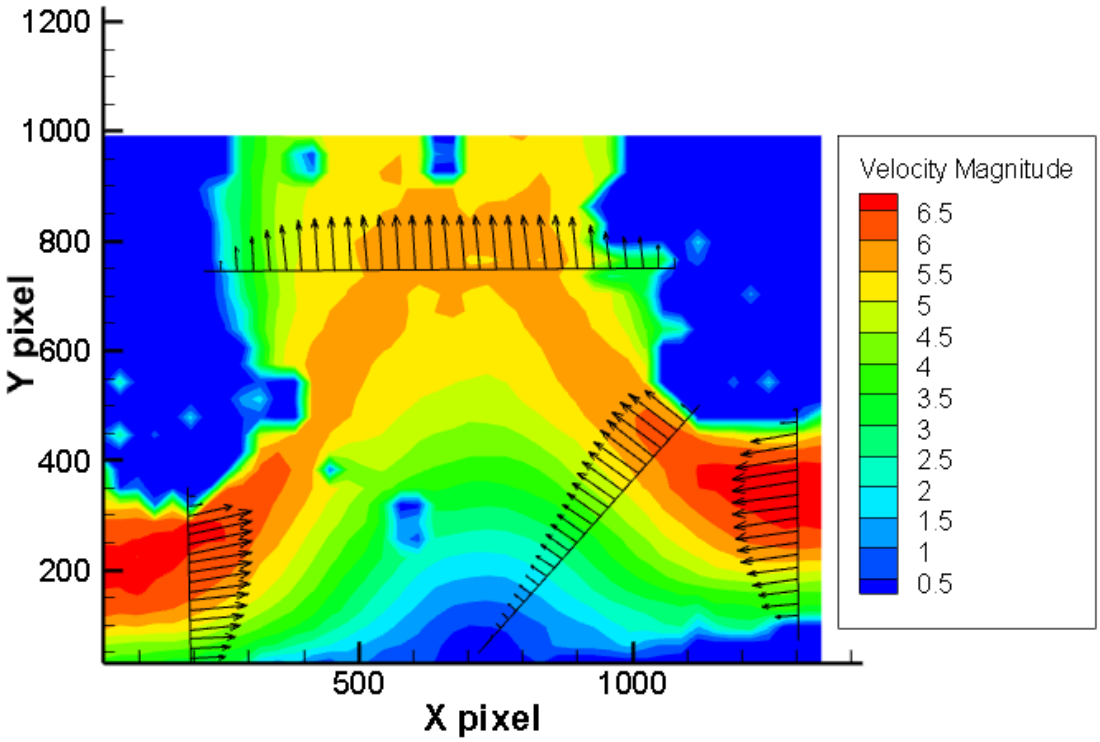
Σχήμα 5.3.2.104: Χρονοσειρά κατακόρυφης ταχύτητας του σημείου (320,511).

Η μεγάλη διακύμανση στο συγκεκριμένο σημείο οφείλεται σε απόβλητο στο φακό της κάμερας που έκρυβε μερικά πίξελ .

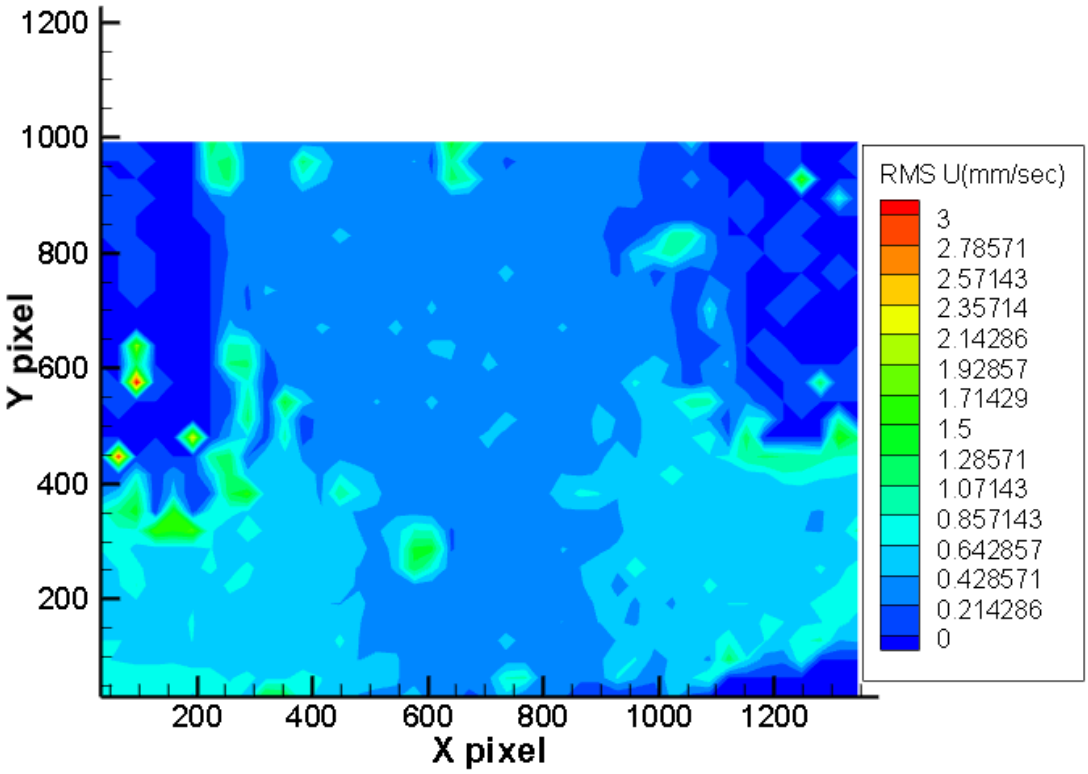
ΘΕΣΗ Μ DMERGE(ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ)



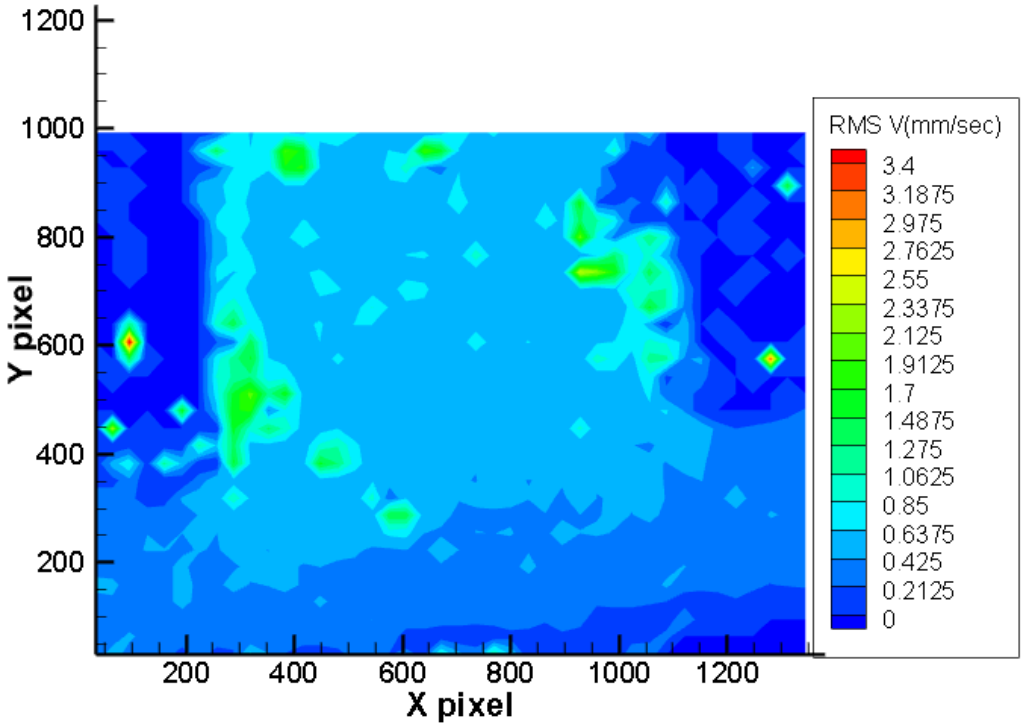
Σχήμα 5.3.2.105: Πεδίο ταχυτήτων, σημείο τέταρτης επανένωσης .



Σχήμα 5.3.2.106: Προφίλ ταχυτήτων, σημείο τέταρτης επανένωσης .

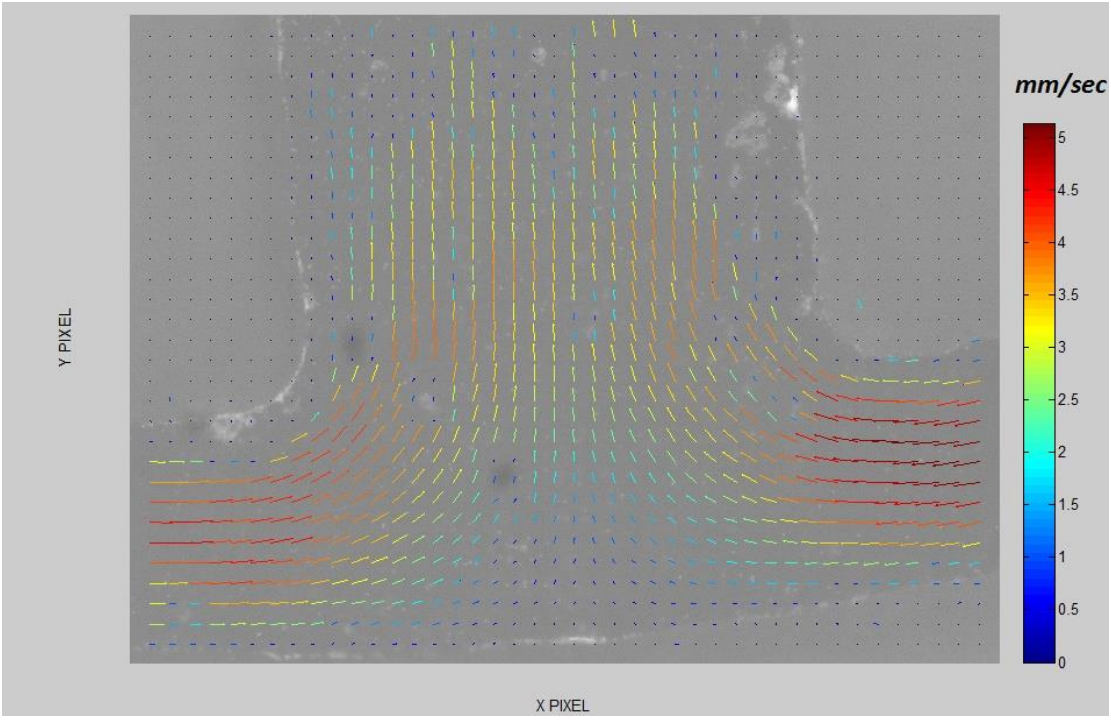


Σχήμα 5.3.2.107: Τυπικές αποκλίσεις οριζόντιων ταχυτήτων, σημείο τέταρτης επανένωσης .

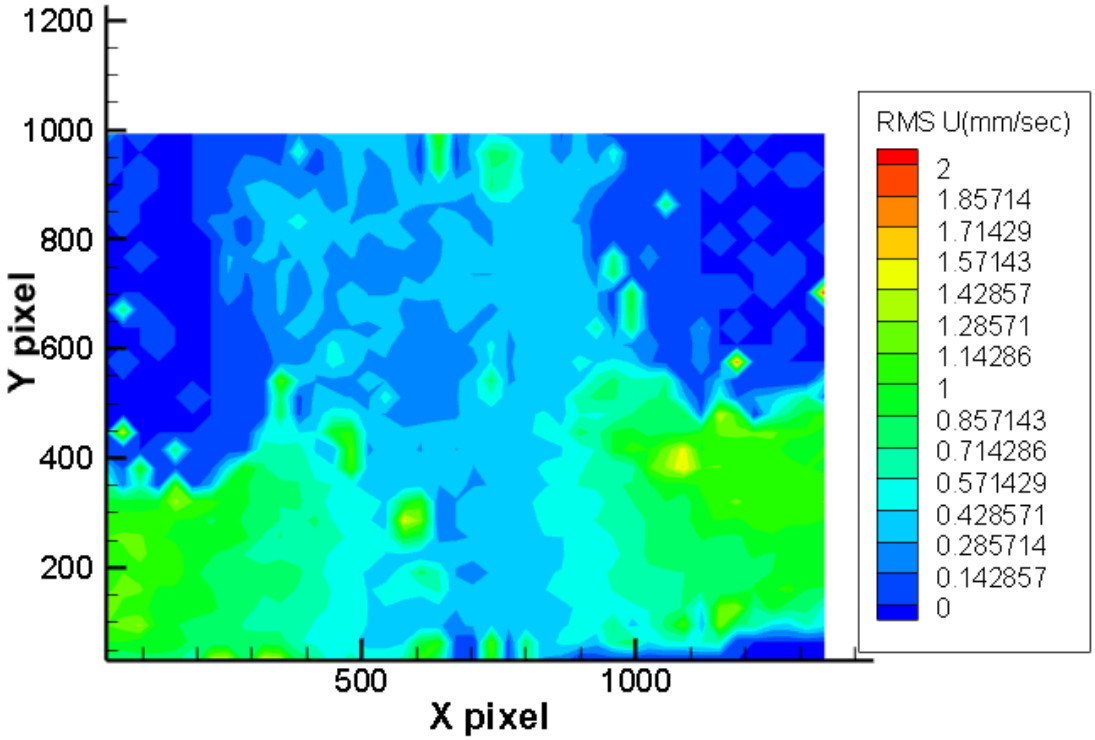


Σχήμα 5.3.2.108: Τυπικές αποκλίσεις κατακόρυφων ταχυτήτων, σημείο τέταρτης επανένωσης .

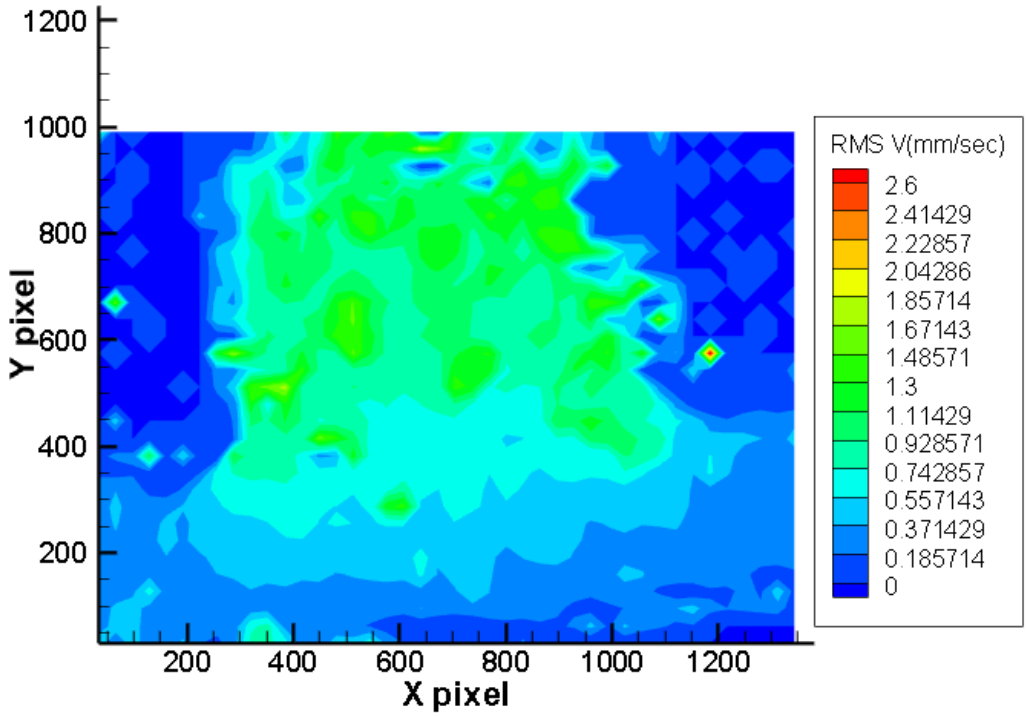
ΘΕΣΗ U DMERGE(ΠΡΟΣ LAMINATION)



Σχήμα 5.3.2.109: Πεδίο ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.110: Τυπική απόκλιση οριζόντιων ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.2.111: Τυπική απόκλιση κατακόρυφων ταχυτήτων, θέση τέταρτης επανένωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Σχόλια για τα διαγράμματα RMS:

Τα μεγάλα rms (τυπικές αποκλίσεις) πάνω από 2mm/sec οφείλονται κατά ένα ποσοστό στη μη συνεχή παροχή της μικροαντλίας. Κυρίως οφείλεται σε απόβλητα κόλλας που απομένουν στο lamination και δυσκολεύουν την ετεροσυσχέτιση λόγω της έλλειψης σωματιδίων ανιχνευτών σε κάποια interrogation window στις φωτογραφίες. Στα σημεία όπου δεν υπάρχει κάποια τεχνική δυσκολία ή πρόβλημα η τυπική απόκλιση δεν ξεπερνά τα 1.5 mm/sec, δηλαδή περίπου το 30% της αναμενόμενης ταχύτητας(5 mm/sec) .Δεν διαφέρει από θέση σε θέση ή από τα σημεία διαχωρισμού σε σχέση με τα σημεία επανένωσης.

Σχόλια για τα διαγράμματα των πεδίων ταχυτήτων:

Οι μη ομοιόμορφες ταχύτητες κατά τον διαχωρισμό της ροής οφείλονται κυρίως σε κατασκευαστικές ασυμμετρίες οι οποίες οδηγούν στο μη ομοιόμορφο διαχωρισμό της ροής. Επίσης, ο μηδενισμός της ταχύτητας για κάποιες εικόνες μπορεί να οφείλεται στο γεγονός της μη παρουσίας σωματιδίων στο συγκεκριμένο εικονίδιο (interrogation window) κατά τον στατιστικό υπολογισμό της ταχύτητας .

Όσον αφορά τις δίνες Dean , σύμφωνα με έρευνες[65] δίνες έχουν παρατηρηθεί να δημιουργούνται μετά από ένα αριθμό K=40 και να αναπτύσσονται πλήρως μετά από ένα K=80.Πώς ανιχνεύονται οι δίνες Dean σε ένα πεδίου ταχυτήτων κάθετο σε αυτές ,όπως στην περίπτωση μετρήσεων micro-PIV :Αν παρατηρήσουμε μηδενική ταχύτητα σε ένα επίπεδο(έστω το middle), ενώ δούμε σημαντική ταχύτητα σε ένα άλλο επίπεδο, τότε σημαίνει ότι έχουμε διαφυγή ορμής κάθετα στο επίπεδο του correlation , κάτι που υπονοεί την ύπαρξη τρισδιάστατης ροής, η οποία κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται σε δίνες Dean. Όπως περιμέναμε και θεωρητικά, λόγω του μικρού αριθμού Dean(0.06-0.35), η ομοιομορφία και συνέχεια των προφίλ δεν υποδεικνύει από μόνη της την ύπαρξη δινών Dean.Ένας δεύτερος τρόπους ανίχνευσης τρισδιάστατης ροής (υπόνοια αρχής δημιουργίας δινών) είναι ο έλεγχος της αρχής συνέχειας της παροχής στα σημεία συνένωσης και διαχωρισμού(βλ. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ).

5.3.3: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ(LINE PLOTS)

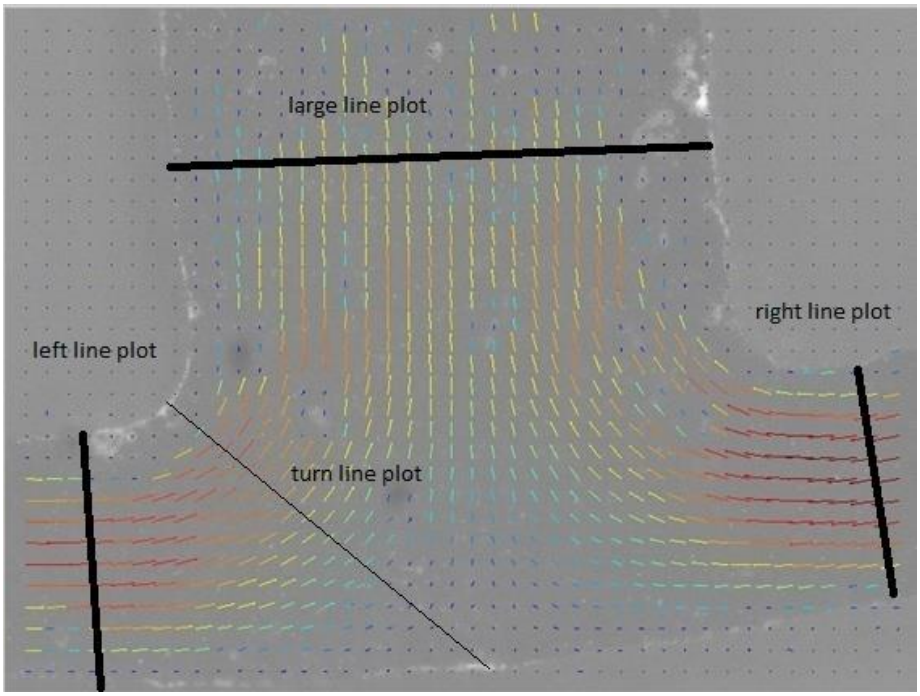
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα ταχυτήτων κατά μια γραμμή κάθετη στη ροή , για τα κανάλια με το μικρότερη πλάτος (150μm-αριστερά και δεξιά) καθώς και για το κεντρικό κανάλι (300μm- large).Επεξήγηση της ονοματολογίας των βαθών ακολουθεί παρακάτω:

*D=DOWN=-12.5*1.33 =16.625μm από μέσο βάθος(ΠΡΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑ)*

*U=UP=+12.5*1.33 =16.625 μm από μέσο βάθος(προς LAMINATION)*

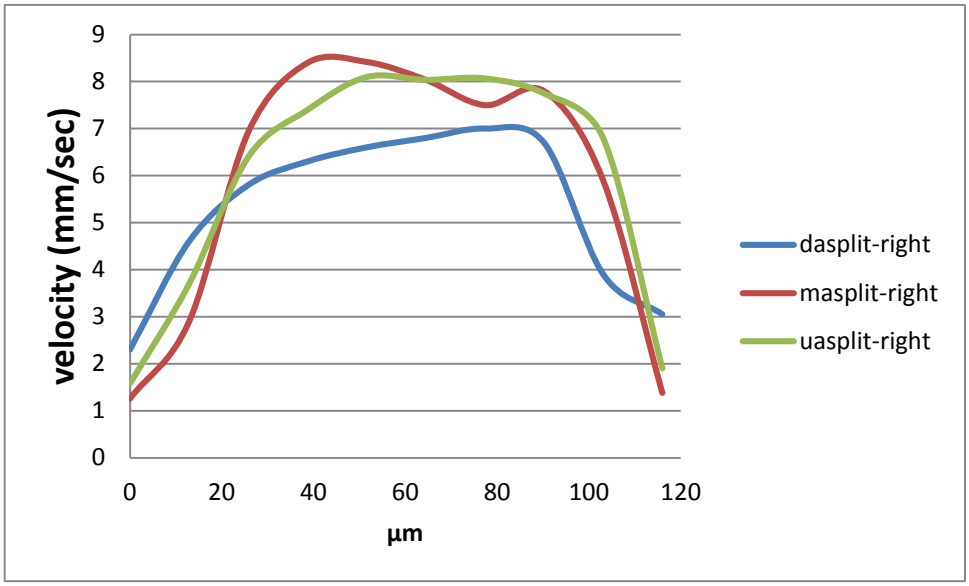
M=MIDDLE=ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ

Μελετήθηκαν τα προφίλ στο φαρδύ και στα 2 στενά κανάλια(δεξιά και αριστερά) σε κάθε σημείο διαχωρισμού και συνένωσης(σύνολο 8) , όπως φαίνεται στην εικόνα και για όλα τα βάθη.

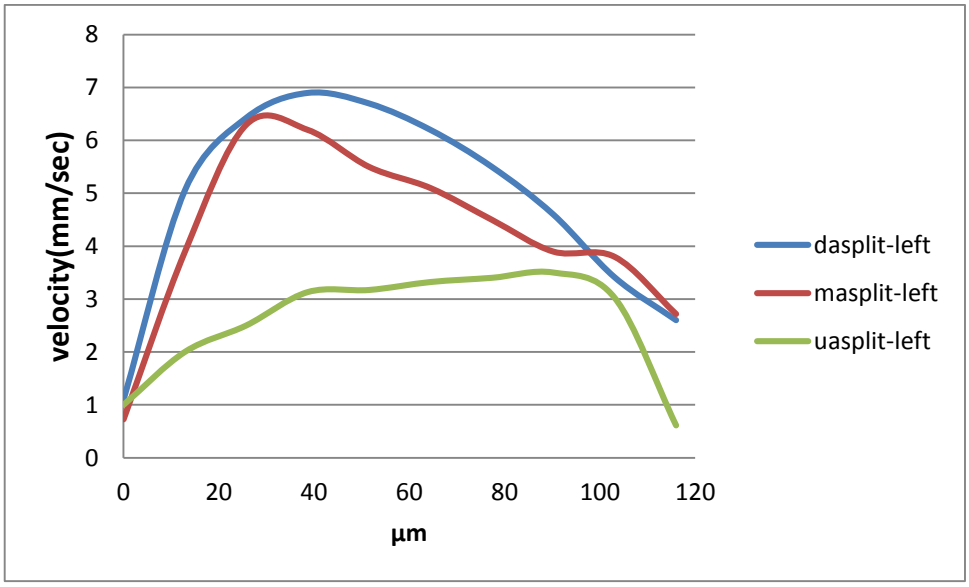


Σχήμα 5.3.3.1: Τα προφίλ ταχυτήτων που συγκρίθηκαν από θέση σε θέση.

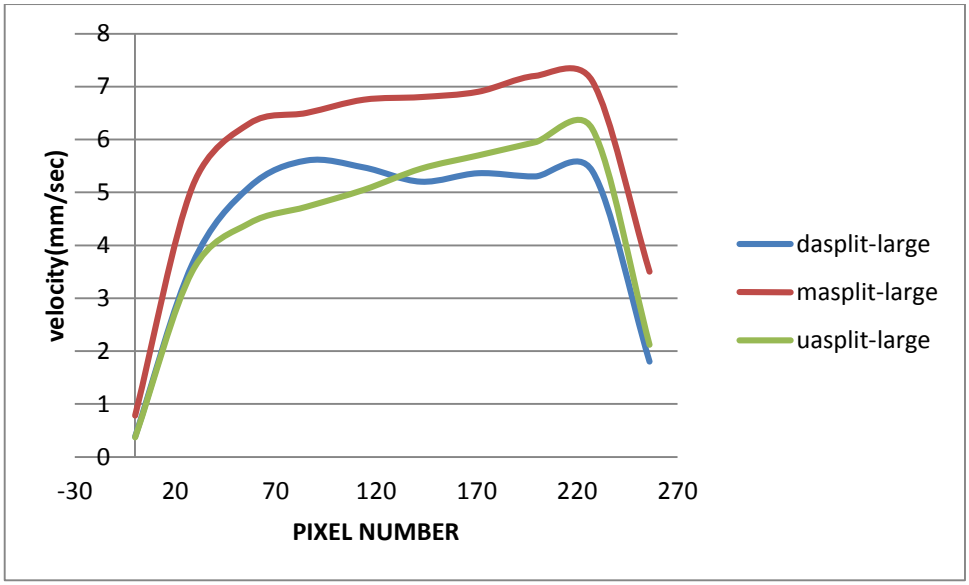
ΘΕΣΗ A-SPLIT



Σχήμα 5.3.3.2:Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.



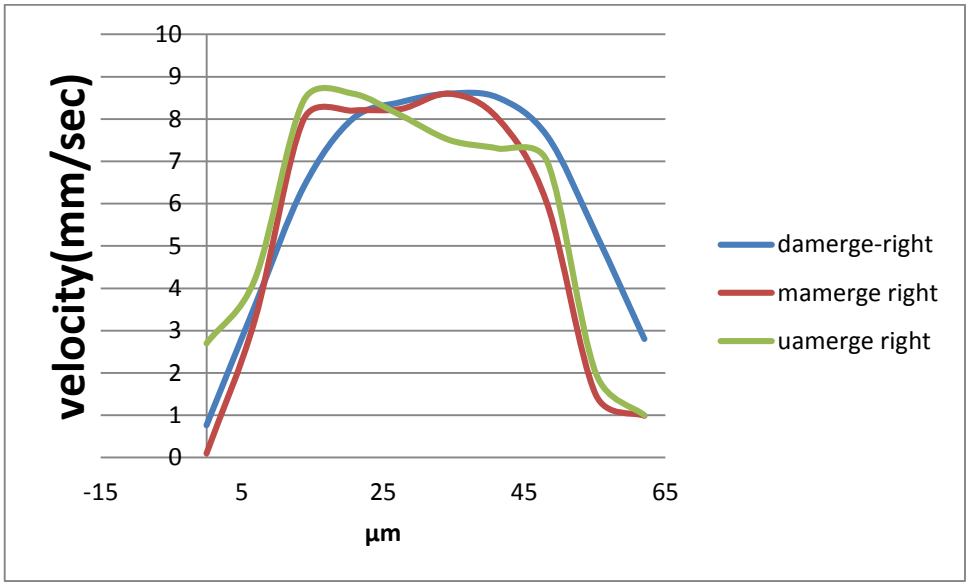
Σχήμα 5.3.3.3:Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.



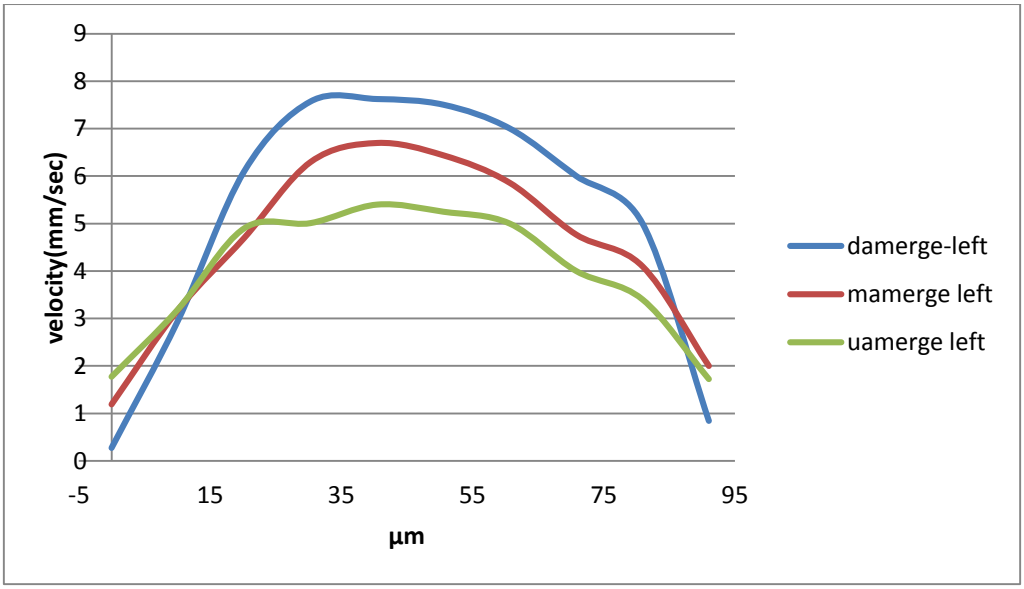
Σχήμα 5.3.3.4 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

Η μικρή ασυμμετρία στο κεντρικό κανάλι παρατηρείται γιατί υπάρχει μη ομοιόμορφος διαχωρισμός της ροής μετέπειτα του διαχωρισμού.

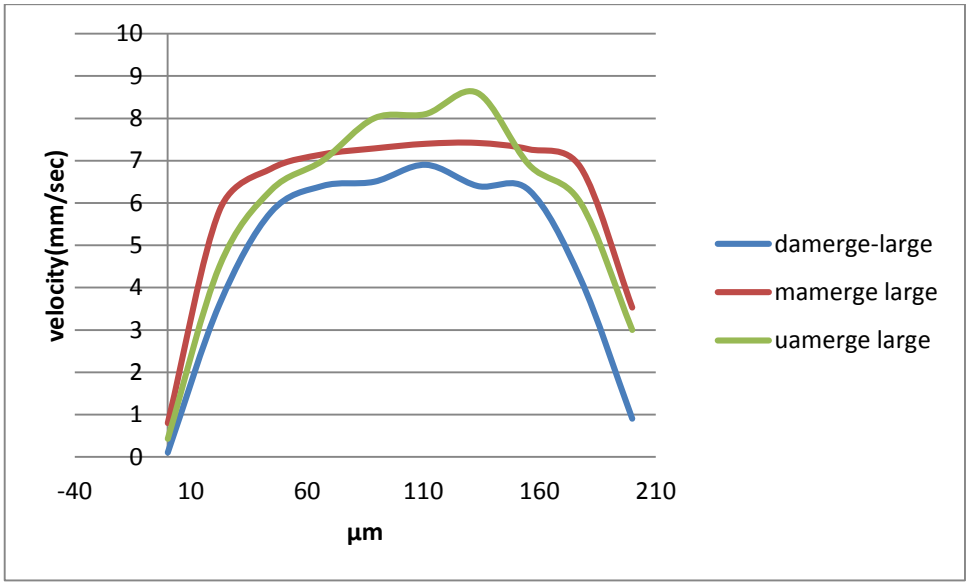
ΘΕΣΗ A-MERGE



Σχήμα 5.3.3.5 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

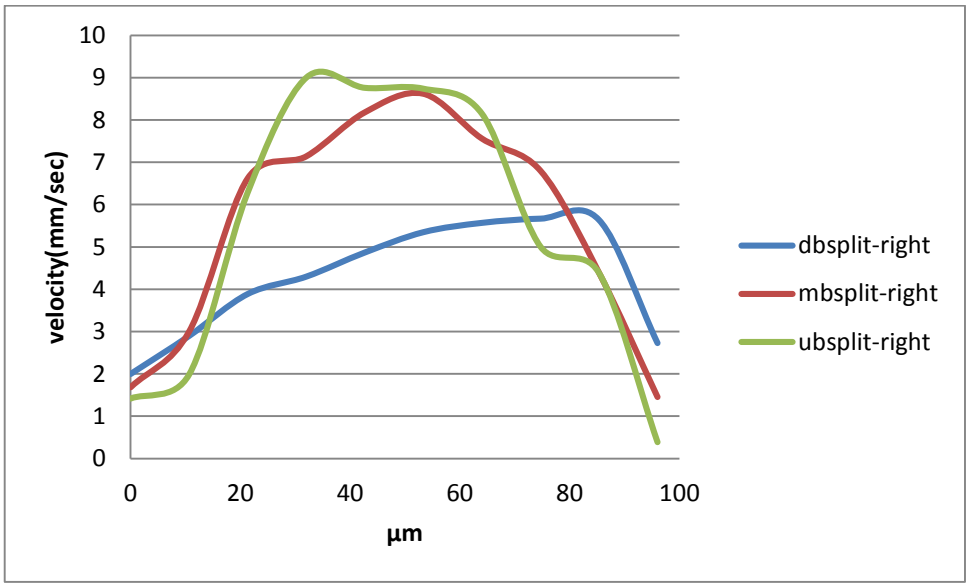


Σχήμα 5.3.3.6 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.

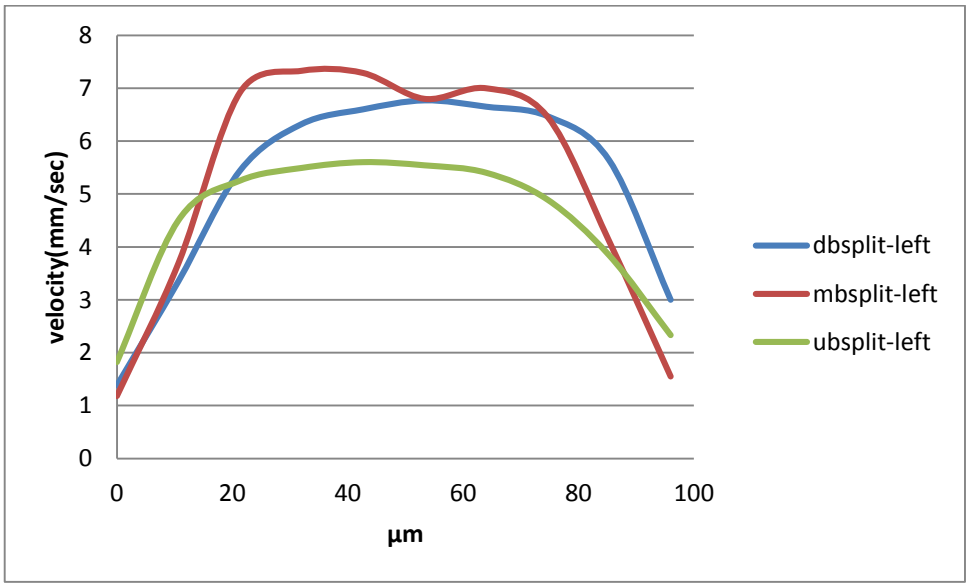


Σχήμα 5.3.3.7 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

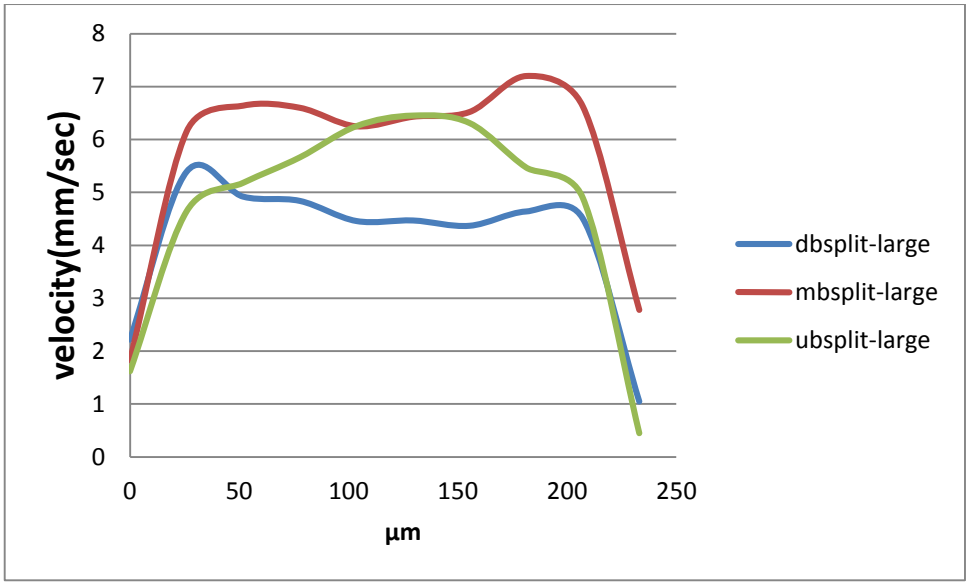
ΘΕΣΗ B-SPLIT



Σχήμα 5.3.3.8 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

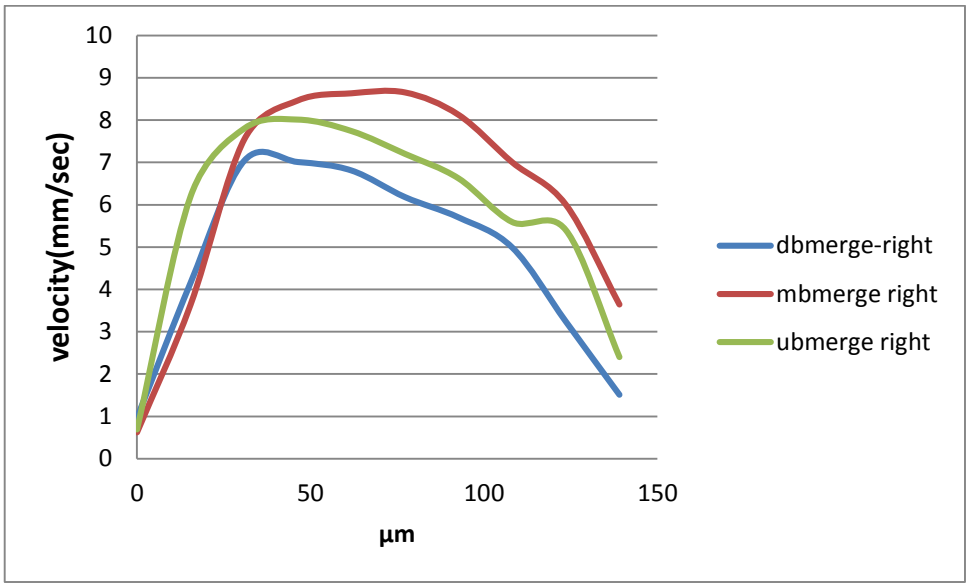


Σχήμα 5.3.3.9 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.

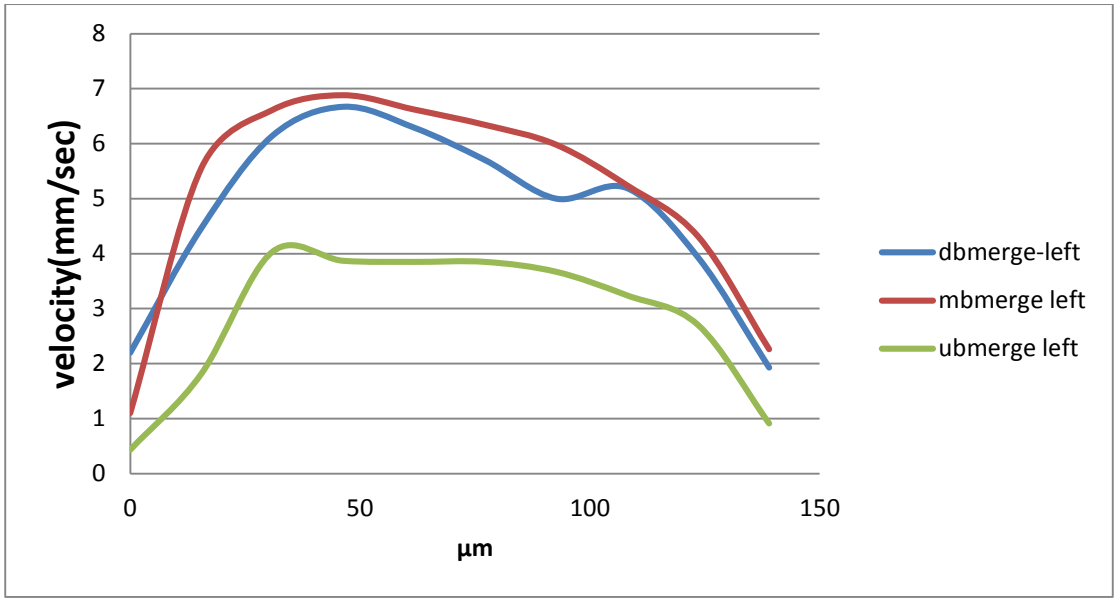


Σχήμα 5.3.3.9 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

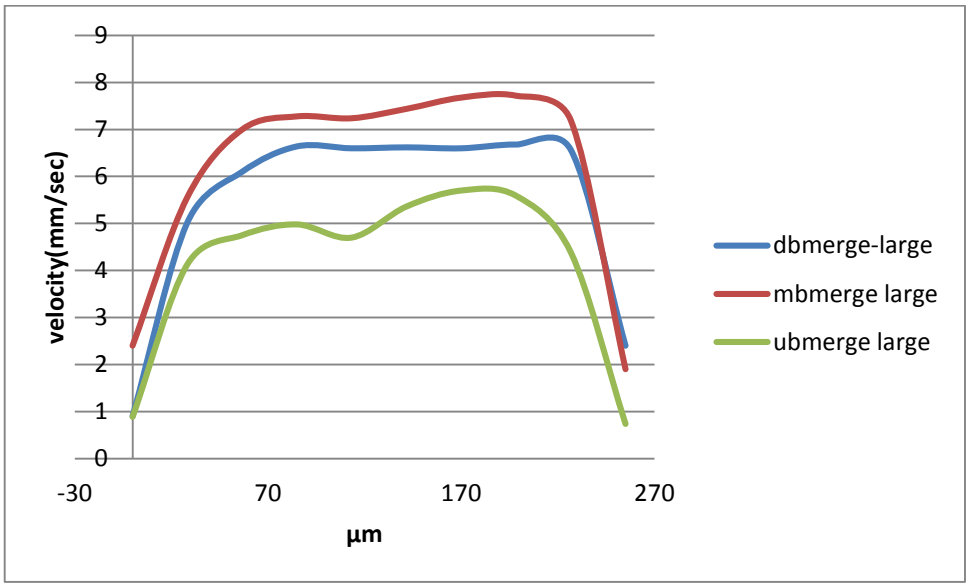
ΘΕΣΗ B-MERGE



Σχήμα 5.3.3.10 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

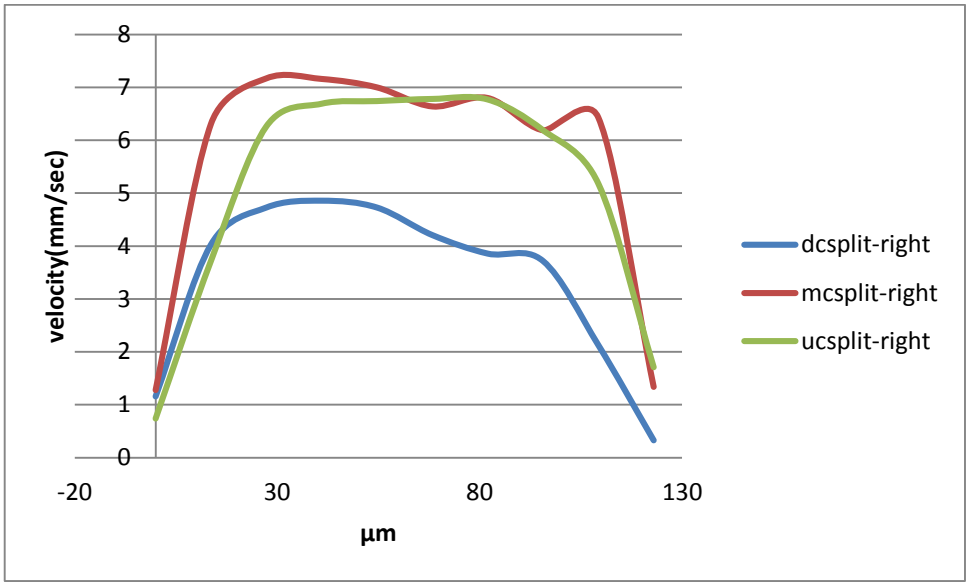


Σχήμα 5.3.3.11 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.

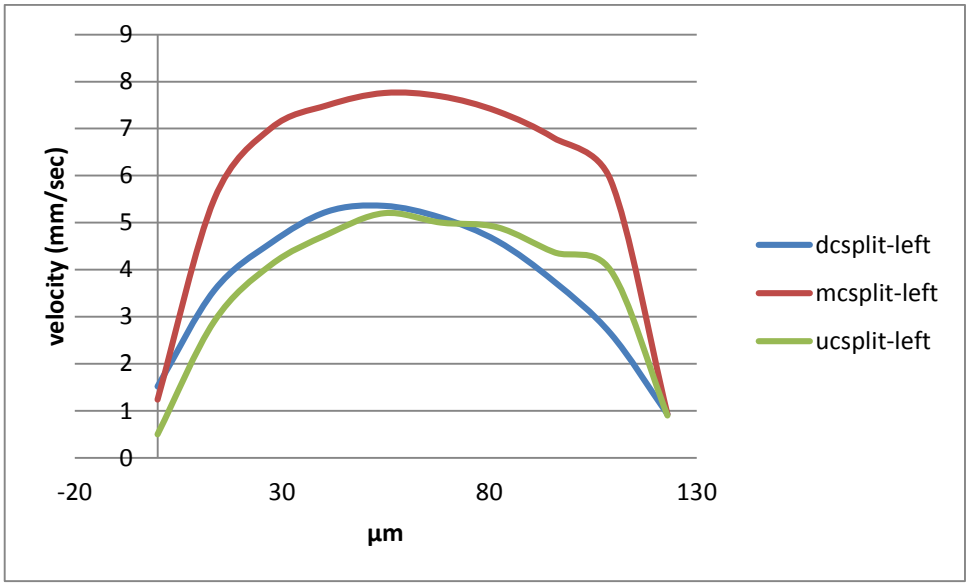


Σχήμα 5.3.3.12 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

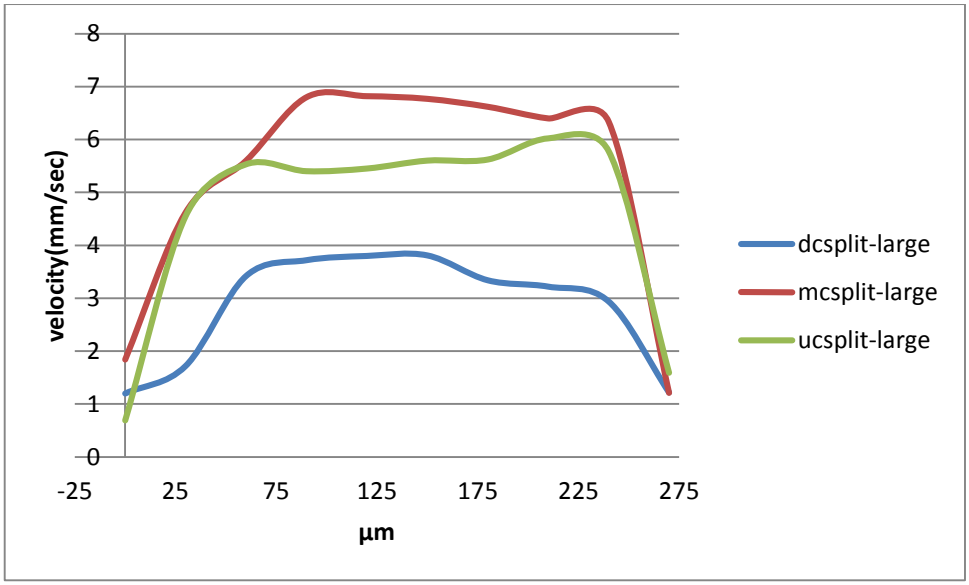
ΘΕΣΗ C-SPLIT



Σχήμα 5.3.3.13 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

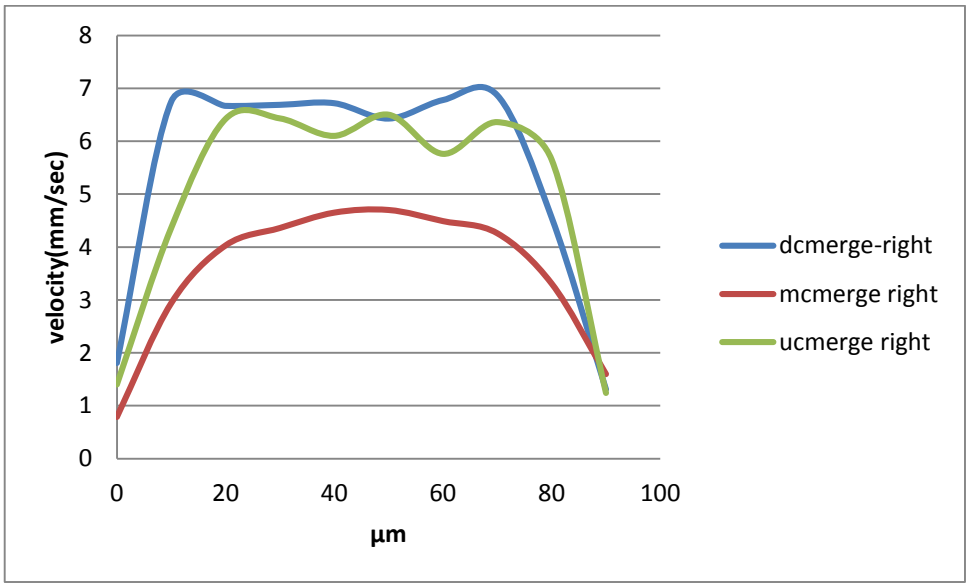


Σχήμα 5.3.3.14 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.

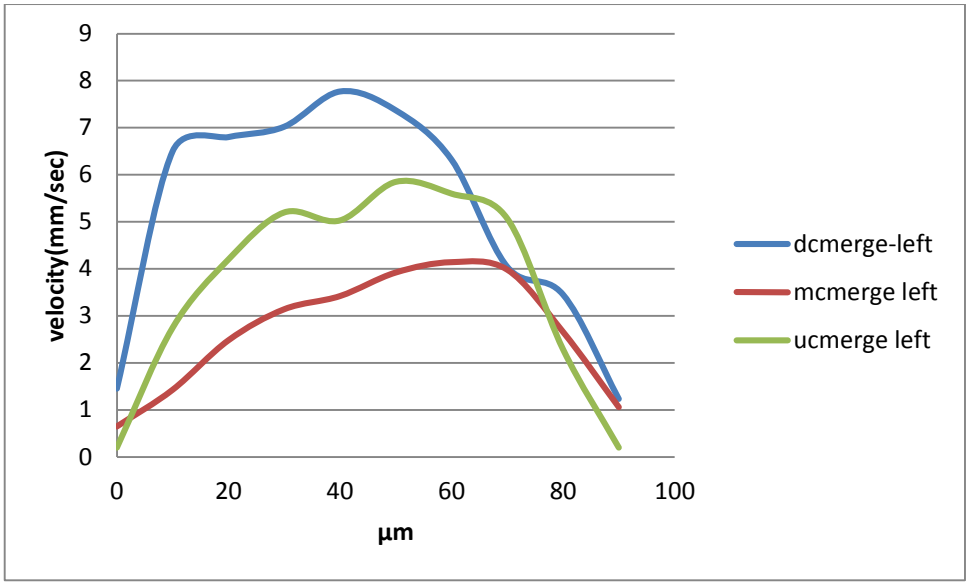


Σχήμα 5.3.3.15 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

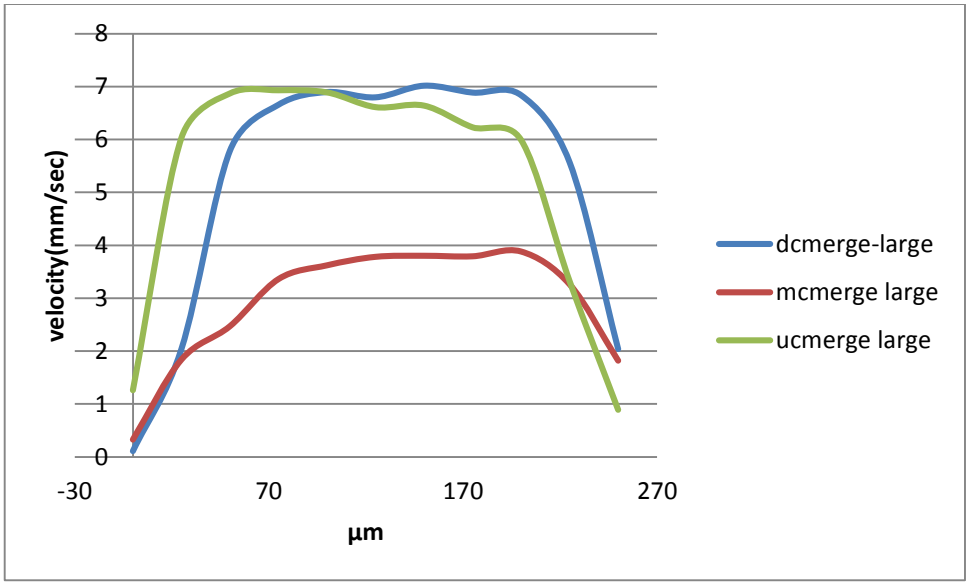
ΘΕΣΗ C-MERGE



Σχήμα 5.3.3.16 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

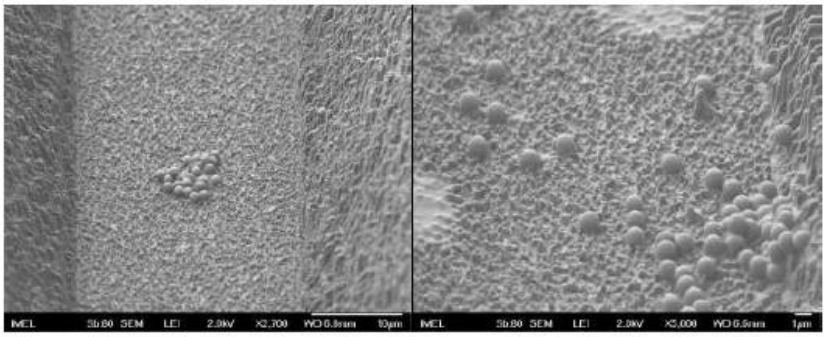


Σχήμα 5.3.3.17 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.



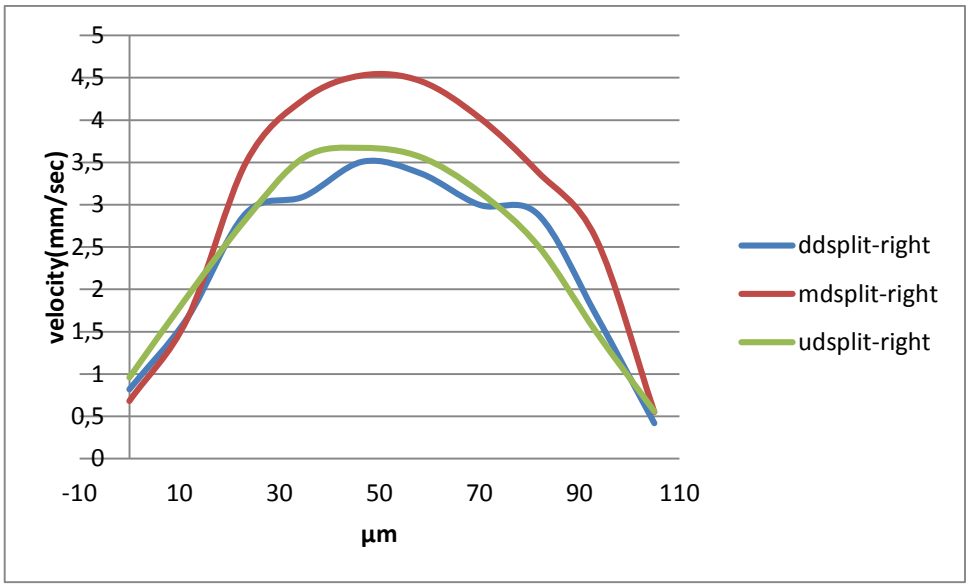
Σχήμα 5.3.3.18 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

Στην συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι στο μεσαίο βάθος οι ταχύτητες είναι μικρότερες. Η εξήγηση είναι η εξής: Στο βάθος down το πλάτος στο δεξί κανάλι είναι 89.77μm, το πλάτος στο βάθος up(προς lamination) είναι 89.95μm ενώ το πλάτος στο βάθος middle είναι 98.73 μm. Συνεπώς στο μέσο βάθος το μεγαλύτερο πλάτος δημιουργεί και μικρότερες ταχύτητες(για την ίδια παροχή). Η μείωση του πλάτους κοντά στο πυθμένα και στο lamination πιθανόν να οφείλεται σε συγκέντρωση σωματιδίων ανιχνευτών που κολλάνε στο τοίχωμα μετά από κάποιες ώρες πειράματος. Παρακάτω φαίνεται μια φωτογραφία (από άλλες μετρήσεις) όπου φαίνονται τα σωματίδια ανιχνευτές να μαζεύονται στο πυθμένα δημιουργώντας συσσωμάτωμα:

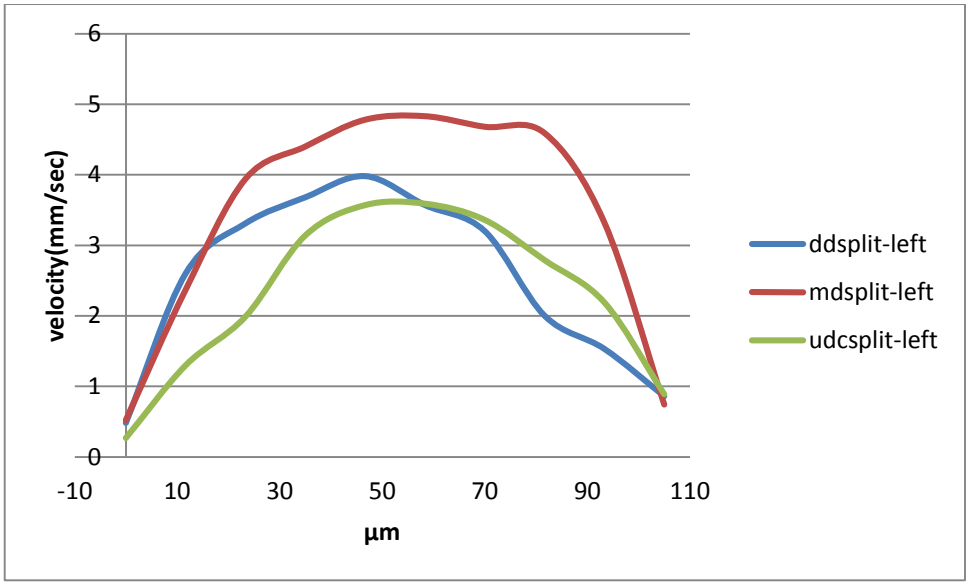


Εικόνα 5.3.3.1: Δημιουργία συσσωματώματος σε μετρήσεις μ-PIV σε ορθογωνικό ευθύγραμμο κανάλι.

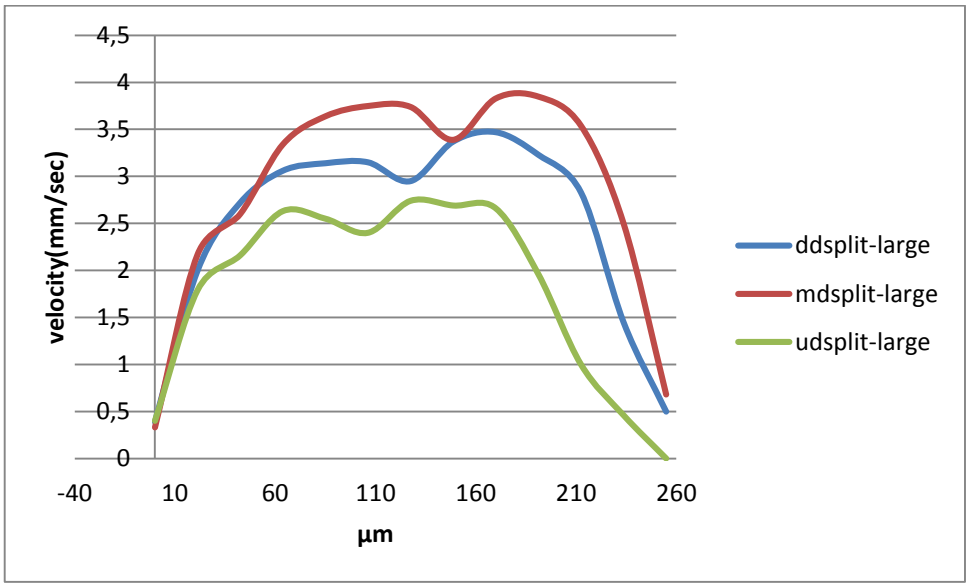
ΘΕΣΗ D-SPLIT



Σχήμα 5.3.3.19 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.

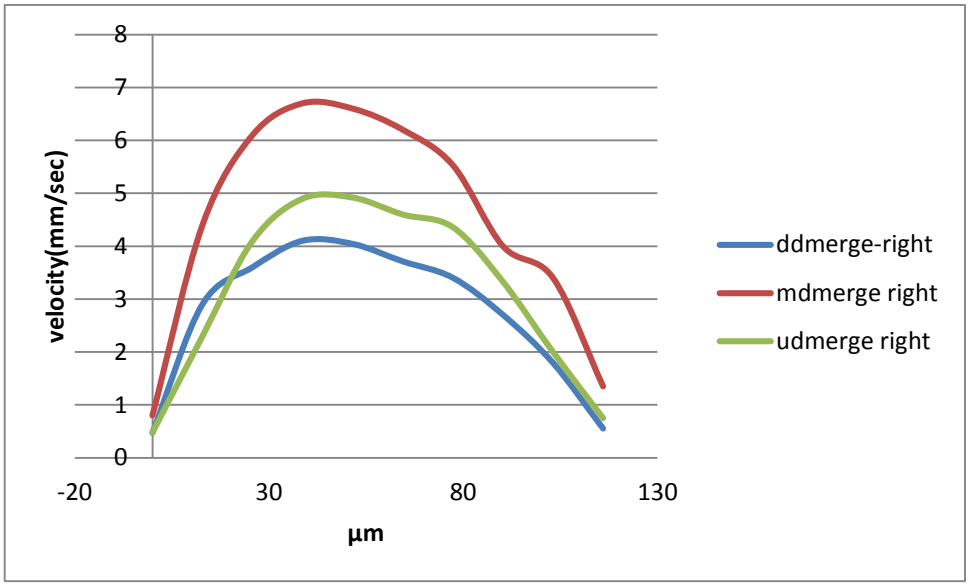


Σχήμα 5.3.3.20 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.

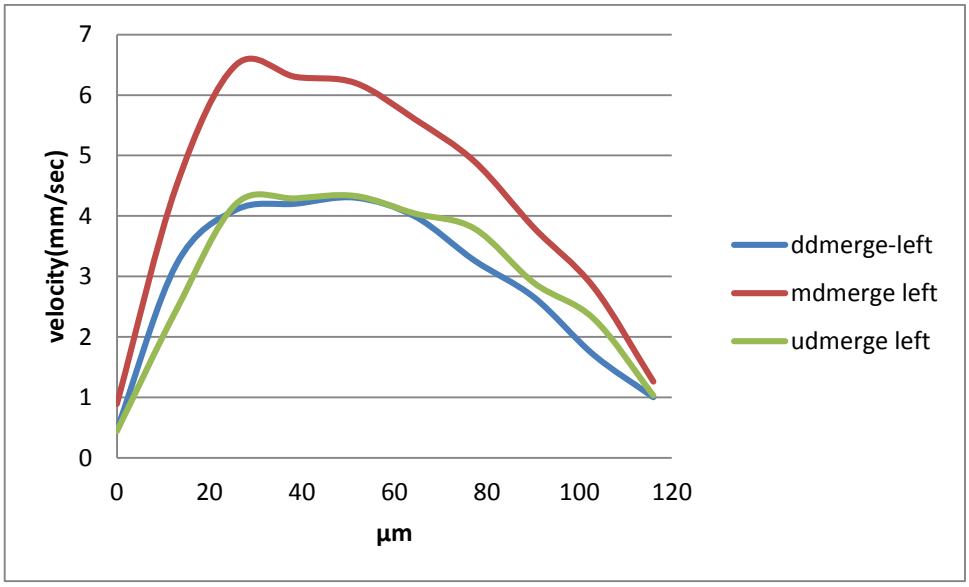


Σχήμα 5.3.3.21 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

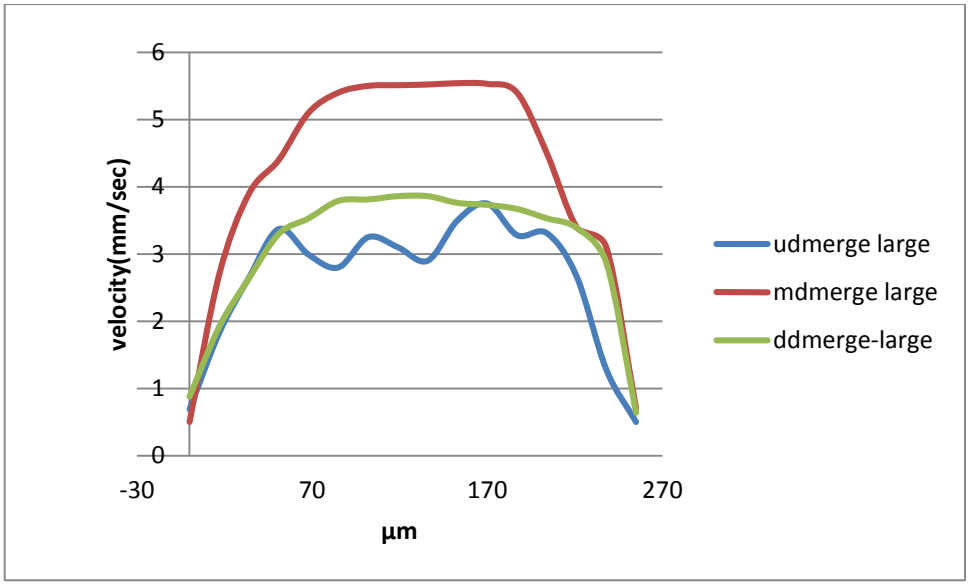
ΘΕΣΗ D-MERGE



Σχήμα 5.3.3.22 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, δεξί κανάλι.



Σχήμα 5.3.3.23 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, αριστερό κανάλι.



Σχήμα 5.3.3.24 :Σύγκριση ταχυτήτων κατά βάθος, φαρδύ κανάλι.

Σχολιασμός:

Ο λόγος που παρατηρείται σε ορισμένες μετρήσεις ανομοιομορφία των ταχυτήτων συνεπώς και της παροχής(γινόμενο ταχύτητα επί διατομή) είναι κυρίως διότι η πτώση πίεσης στη μια διαδρομή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πτώση πίεσης στην άλλη. Η ανομοιομορφία στη πτώση πίεσης στις δυο διαδρομές ενός διαχωρισμού οφείλεται κυρίως σε γεωμετρικές ατέλειες των καναλιών λόγω κατασκευής, καθώς και σε διόγκωση του lamination σε κάποια σημεία. Συνεπώς , σε ορισμένα από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ανομοιομορφία μεταξύ δεξιού (right) και αριστερού (left) καναλιού, και ειδικότερα στα σημεία :A Merge ,A Split, C merge.Ενδιαφέρον είναι επίσης το γεγονός ότι η ανομοιομορφία εμφανίζεται σε κάποια βάθη. Αυτό φαίνεται και παρακάτω στη μελέτη των παροχών και οφείλεται πιθανόν σε επικάθηση σωματιδίων ανιχνευτών.

Στην πλειοψηφία όμως των διαγραμμάτων επιβεβαιώνεται η θεωρητικά αναμενόμενη παρατήρηση ότι η ταχύτητες στο μέσο βάθος(middle) είναι αυξημένες σε σχέση με τα προφίλ κοντά στο lamination και στο πυθμένα, όπου ισχύει η συνθήκη μη ολίσθησης που επιβάλλει μηδενική ταχύτητα.

5.3.4 : ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΑΡΟΧΩΝ- ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Από ολοκλήρωση των προφίλ ταχυτήτων μπορεί να γίνει υπολογισμός της παροχής ανά μονάδα βάθους. Η σύγκριση των παροχών σε ένα σημείο διαχωρισμού είναι θεμελιώδης για την λειτουργία του μικροαναμίκτη , καθώς περιμένουμε τη μισή παροχή να πάει στο ένα κανάλι και τη μισή στο άλλο για σωστή λειτουργία του αναμίκτη. Επιπρόσθετα, συγκρίνοντας την παροχή που μπαίνει και βγαίνει για ένα επίπεδο σε ένα σημείο διαχωρισμού μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το αν η ροή είναι τρισδιάστατη. Παρακάτω παρατίθεται για κάθε θέση και βάθος η επί τις 100 απόκλιση της παροχής των καναλιών μετά το διαχωρισμό από την αναμενόμενη, η οποία είναι η μισή της εισερχόμενης.

Ποσοστό απόκλισης=Discrepancy percent(%):

$a = abs\left(\frac{Qtheor - Q\exp}{Qtheor}\right)*100\%$, όπου Qtheor το άθροισμα των παροχών πριν το διαχωρισμό και Qexp η πειραματική τιμή της παροχής ανά μονάδα βάθους στο πλατύ κανάλι(μετά το διαχωρισμό). Τα αποτελέσματα των παροχών ανά μονάδα βάθους για τις 8X3=24 θέσεις(3 βάθη, 8 θέσεις) φαίνονται παρακάτω(Σημειώνουμε ότι large είναι το άθροισμα των παροχών των 2 στενών καναλιών και large real είναι η παροχή που μετρήθηκε ολοκληρώνοντας τις ταχύτητες στο φαρδύ κανάλι):

	M A SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	2000.00	2740.00	4740.00	3270.00
Q/b(mm^2/sec)	640.00	876.80	1516.80	1046.40
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	72.99		Discrepancy(%)	44.95
	U A SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1140.00	2400.00	3540.00	4200.00
Q/b(mm^2/sec)	364.80	768.00	1132.80	1344.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	47.50		Discrepancy(%)	15.71
	D A SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	2140.00	2320.00	4460.00	4340.00
Q/b(mm^2/sec)	684.80	742.40	1427.20	1388.80
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	92.24		Discrepancy(%)	2.76
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q (mm^2/sec)	1689.60	2387.20	4076.80	3779.20

Πίνακας 5.3.4.1: Μελέτη παροχών, θέση πρώτου διαχωρισμού.

	M A MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1350.00	1310.00	2660.00	3810.00
Q/b(mm^2/sec)	432.00	419.20	851.20	1219.20
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	103.05		Discrepancy(%)	30.18
	U A MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1190.00	1180.00	2370.00	4200.00
Q/b(mm^2/sec)	380.80	377.60	758.40	1344.00
Ratio(Qleft/Qright)	100.85		Discrepancy(%)	43.57
	D A MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1770.00	1800.00	3570.00	3620.00
Q/b(mm^2/sec)	566.40	576.00	1142.40	1158.40
Ratio(Qleft/Qright)	98.33		Discrepancy(%)	1.38
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1379.20	1372.80	2752.00	3721.60

Πίνακας 5.3.4.2: Μελέτη παροχών, θέση πρώτης επανένωσης .

	M B SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1590.00	1890.00	3480.00	5130.00
Q/b(mm^2/sec)	508.80	604.80	1113.60	1641.60
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	84.13		Discrepancy(%)	32.16
	U B SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1150.00	1990.00	3140.00	3500.00
Q/b(mm^2/sec)	368.00	636.80	1004.80	1120.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	57.79		Discrepancy(%)	10.29
	D B SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1600.00	1370.00	2970.00	3740.00
Q/b(mm^2/sec)	512.00	438.40	950.40	1196.80
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	116.79		Discrepancy(%)	20.59
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1388.80	1680.00	3068.80	3958.40

Πίνακας 5.3.4.3: Μελέτη παροχών, θέση δεύτερου διαχωρισμού.

	M B MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1950.00	2780.00	4730.00	5100.00
Q/b(mm^2/sec)	624.00	889.60	1513.60	1632.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	70.14		Discrepancy(%)	7.25
	U B MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1100.00	2310.00	3410.00	3416.00
Q/b(mm^2/sec)	352.00	739.20	1091.20	1093.12
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	47.62		Discrepancy(%)	0.176
	D B MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	2020.00	2290.00	4310.00	4550.00
Q/b(mm^2/sec)	646.40	732.80	1379.20	1456.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	88.21		Discrepancy(%)	5.27
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1622.40	2361.60	3984.00	4181.12

Πίνακας 5.3.4.4: Μελέτη παροχών, θέση δεύτερης επανένωσης.

	M C SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	2240.00	2270.00	4510.00	4830.00
Q/b(mm^2/sec)	716.80	726.40	1443.20	1545.60
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	98.68	6.00	Discrepancy(%)	6.63
			Discrepancy(%)	
	U C SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1480.00	1870.00	3350.00	4100.00
Q/b(mm^2/sec)	473.60	598.40	1072.00	1312.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	79.14		Discrepancy(%)	18.29
	D C SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1620.00	1360.00	2980.00	2690.00
Q/b(mm^2/sec)	518.40	435.20	953.60	860.80
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	119.12		Discrepancy(%)	10.78
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1708.80	1760.00	3468.80	3718.40

Πίνακας 5.3.4.5: Μελέτη παροχών, θέση τρίτου διαχωρισμού.

	M C-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1005.00	1130.00	2135.00	2260.00
Q/b(mm^2/sec)	321.60	361.60	683.20	723.20
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	88.94		Discrepancy(%)	5.53
	U C-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1490.00	1750.00	3240.00	4070.00
Q/b(mm^2/sec)	476.80	560.00	1036.80	1302.40
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	85.14		Discrepancy(%)	20.39
	D C-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	2290.00	2010.00	4300.00	4340.00
Q/b(mm^2/sec)	732.80	643.20	1376.00	1388.80
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	113.93		Discrepancy(%)	0.92
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1531.20	1564.80	3096.00	3414.40

Πίνακας 5.3.4.6: Μελέτη παροχών, θέση τρίτης επανένωσης.

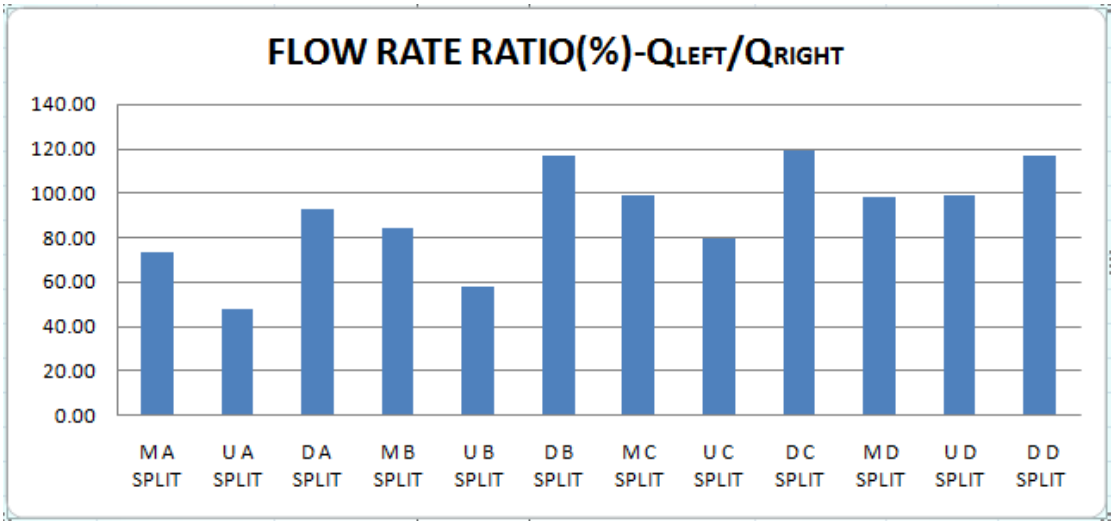
	M D SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1130.00	1150.00	2280.00	2420.00
Q/b(mm^2/sec)	361.60	368.00	729.60	774.40
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	98.26		Discrepancy(%)	5.79
	U D SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	820.00	828.00	1648.00	1660.00
Q/b(mm^2/sec)	262.40	264.96	527.36	531.20
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	99.03		Discrepancy(%)	0.72
	D D SPLIT			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1060.00	910.00	1970.00	2250.00
Q/b(mm^2/sec)	339.20	291.20	630.40	720.00
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	116.48		Discrepancy(%)	12.44
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	963.20	924.16	1887.36	2025.60

Πίνακας 5.3.4.7: Μελέτη παροχών, θέση τέταρτου διαχωρισμού.

	M D-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1760.00	1997.00	3757.00	3476.00
Q/b(mm^2/sec)	563.20	639.04	1202.24	1112.32
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	88.13		Discrepancy(%)	8.08
	U D-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1063.70	1452.00	2515.70	2135.00
Q/b(mm^2/sec)	340.38	464.64	805.02	683.20
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	73.26		Discrepancy(%)	17.83
	D D-MERGE			
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
Q/b(pixel*mm/sec)	1126.00	1344.00	2470.00	2593.00
Q/b(mm^2/sec)	360.32	430.08	790.40	829.76
	LEFT-RIGHT			CONTINUITY
Ratio(Qleft/Qright)	83.78		Discrepancy(%)	4.74
	LEFT	RIGHT	LARGE	LARGE REAL
SUM Q(mm^2/sec)	1263.90	1533.76	2797.66	2625.28

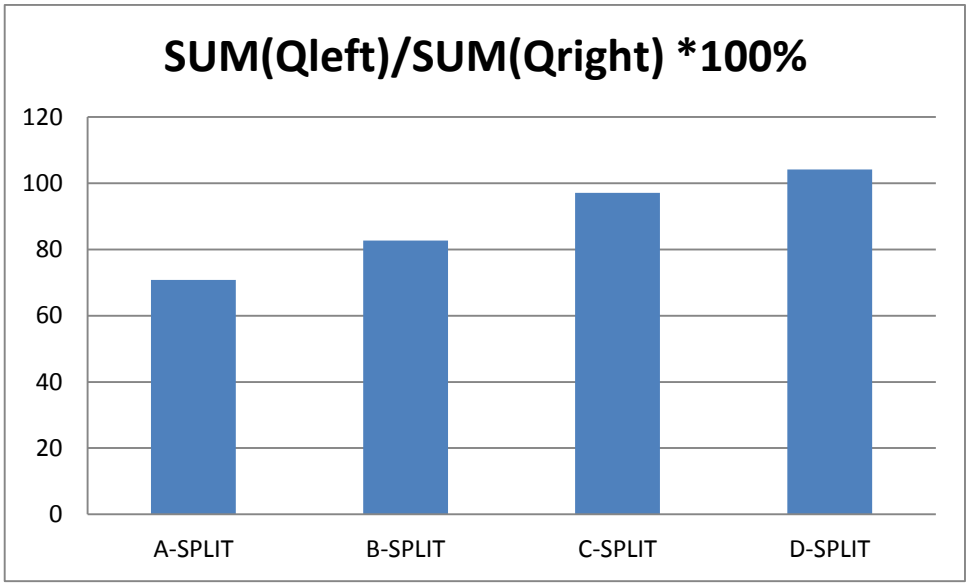
Πίνακας 5.3.4.8: Μελέτη παροχών, θέση τέταρτης επανένωσης.

Τα αποτελέσματα για το διαχωρισμό του κύριου ρεύματος στο δεξί και το αριστερό ρεύμα σε μορφή διαγραμμάτων φαίνονται παρακάτω (αναμενόμενος λόγος παροχών 100%) :



Σχήμα 5.3.4.1: Ομοιομορφία διαχωρισμού της ροής για κάθε θέση/βάθος.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στις θέσεις U-ASPLIT και U-BSPLIT η μεγάλη ανομοιομορφία στη γεωμετρία του μικροαναμίκτη, συνεπάγεται διαφορετικές απώλειες πίεσης στα 2 κανάλια μετά το διαχωρισμό, κάτι το οποίο συνεπάγεται με τη σειρά του μη ομοιόμορφο διαχωρισμό της παροχής(το ρευστό προτιμά πάντα τη διαδρομή με τις μικρότερες απώλειες). Η γεωμετρική ανομοιομορφία οφείλεται κυρίως σε κατασκευαστικές ανακρίβειες είτε σε επικάθιση σωματιδίων ανιχνευτών. Στις θέσεις M-ASPLIT,M-BSPLIT,D-BSPLIT,U-CSPLIT,D-CSPLIT και D-DSPLIT παρατηρείται ανομοιομορφία περίπου 10%, ενώ τέλος στις θέσεις D-ASPLIT ,M-DSPLIT και U-DSPLIT παρατηρείται άριστος διαχωρισμός της ροής, με απόκλιση κάτω του 5%. Αθροίζοντας τις παροχές για όλα τα βάθη μπορούμε να αναλύσουμε την ανομοιομορφία κατά το διαχωρισμό συνολικά. Συνεπώς παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.3.4.2: Ομοιομορφία διαχωρισμού της συνολικής παροχής για κάθε θέση διαχωρισμού.

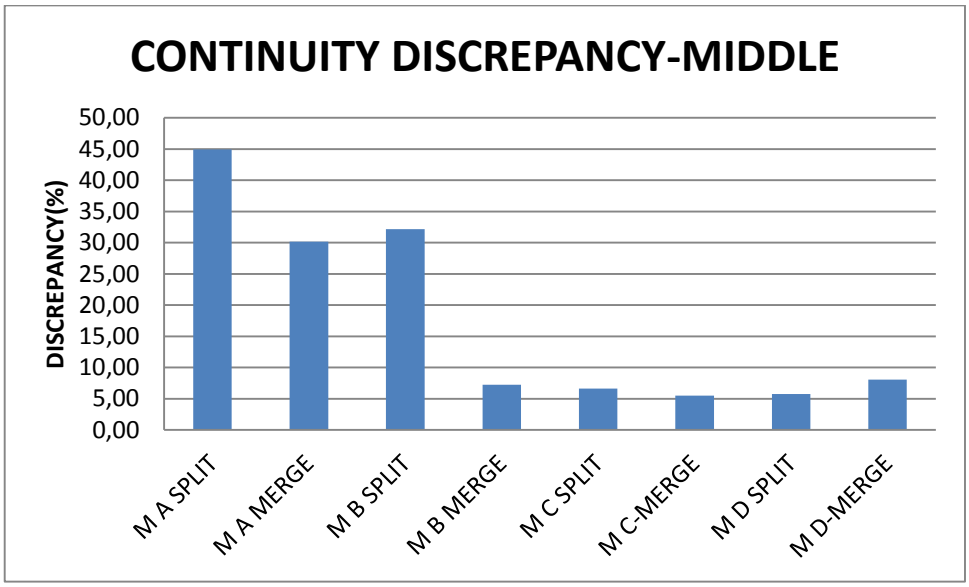
Παρατηρούμε ότι συνολικά μεγαλύτερη γεωμετρική ανομοιομορφία (συνεπώς και ανομοιομορφία στις παροχές) έχουν τα σημεία A-SPLIT και B-SPLIT.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ- ΕΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΓΙΑ 3D ΡΟΗ

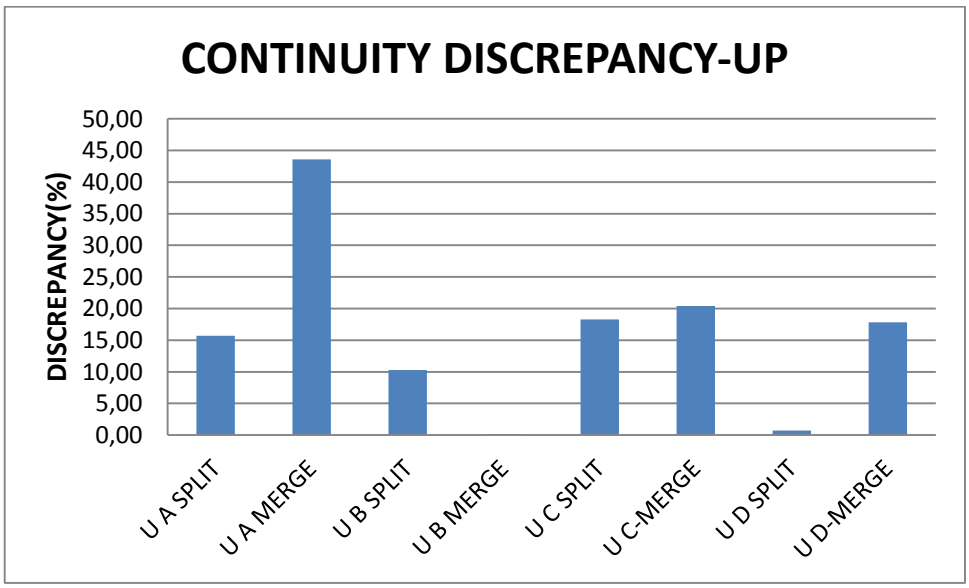
Παρακάτω παραθέτουμε μελέτη της συνέχειας της ροής από το άθροισμα των εισερχόμενων/εξερχόμενων παροχών(ανά μονάδα βάθους) σε σχέση με τη πειραματικά ευρισκόμενη παροχή(ανά μονάδα βάθους) στο μεγάλο κανάλι. Υπενθυμίζουμε ότι:

Ποσοστό απόκλισης=Discrepancy percent(%):

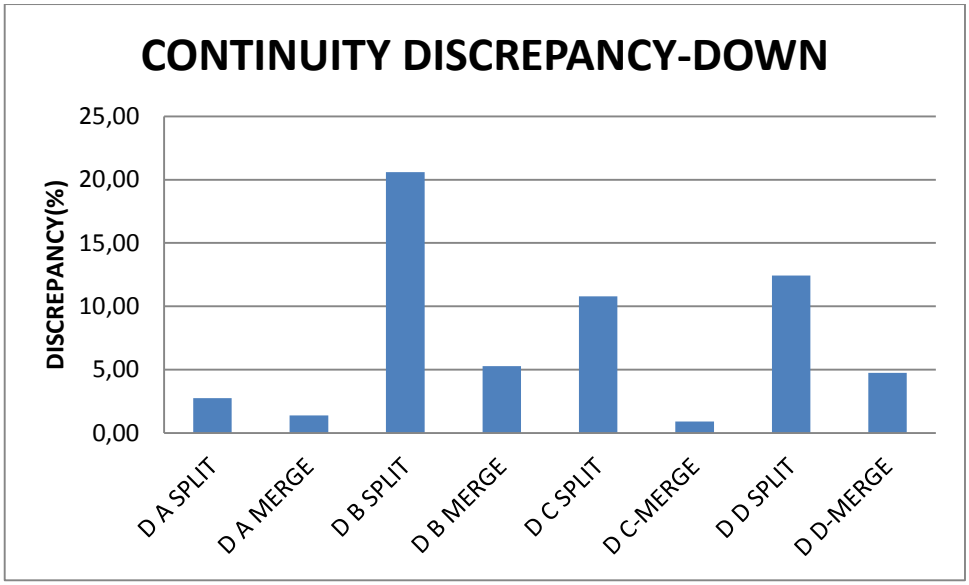
$a = abs\left(\frac{Qtheor - Q\exp}{Qtheor}\right)*100\%$, όπου Qtheor το άθροισμα των παροχών πριν το διαχωρισμό και Qexp η πειραματική τιμή της παροχής ανά μονάδα βάθους στο πλατύ κανάλι(μετά το διαχωρισμό).



Σχήμα 5.3.4.3:Μελέτη της συνέχειας της ροής για το μέσο βάθος.



Σχήμα 5.3.4.4:Μελέτη της συνέχειας της ροής για τη θέση προς το lamination.



Σχήμα 5.3.4.5 :Μελέτη της συνέχειας της ροής για τη θέση προς το πυθμένα.

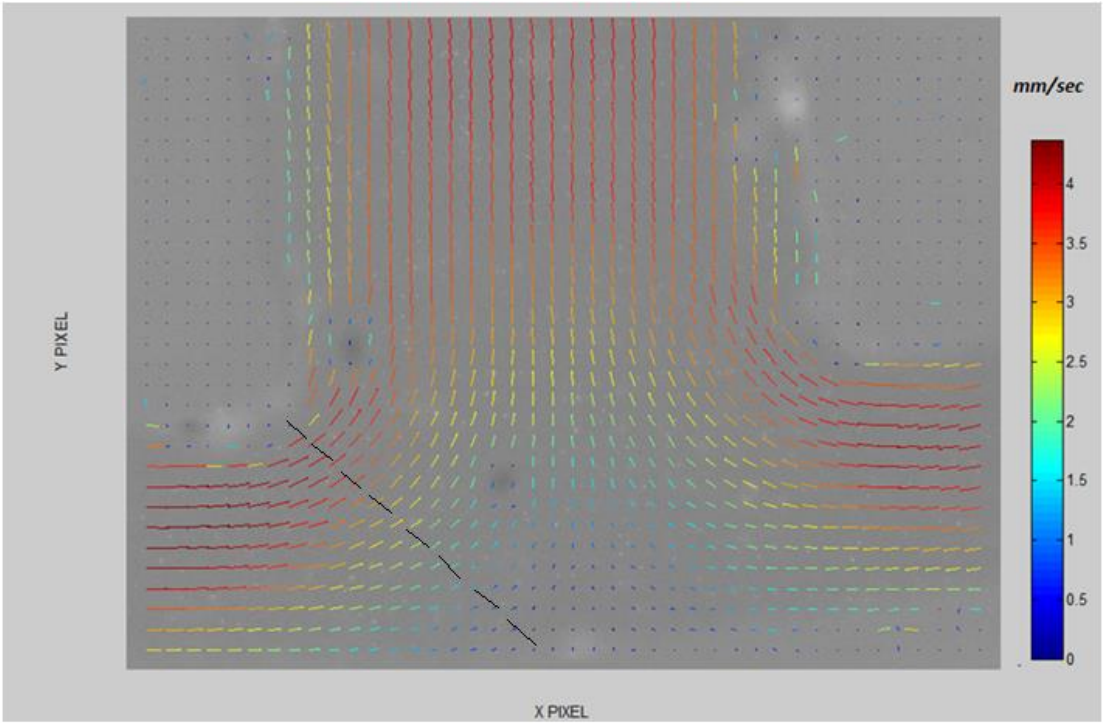
Σχόλια/Συμπεράσματα:

Η μη ικανοποίηση της εξίσωσης συνέχειας με απόκλιση πάνω από 10 % υπονοεί ξεκάθαρα απώλεια ορμής κάθετα στο επίπεδο μέτρησης. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα με τη σειρά το μας δείχνει την αρχή σχηματισμού κάποιου είδους τρισδιάστατου πεδίου , που πιθανόν να οφείλεται σε αρχή σχηματισμού δινών Dean. Οι θέσεις στις οποίες παρατηρείται η απόκλιση έντονα είναι οι A-SPLIT,A-MERGE, B-SPLIT,C-SPLIT, C-MERGE, και D-MERGE.

5.3.5: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΙΣ ΣΤΡΟΦΕΣ (turn line plots)

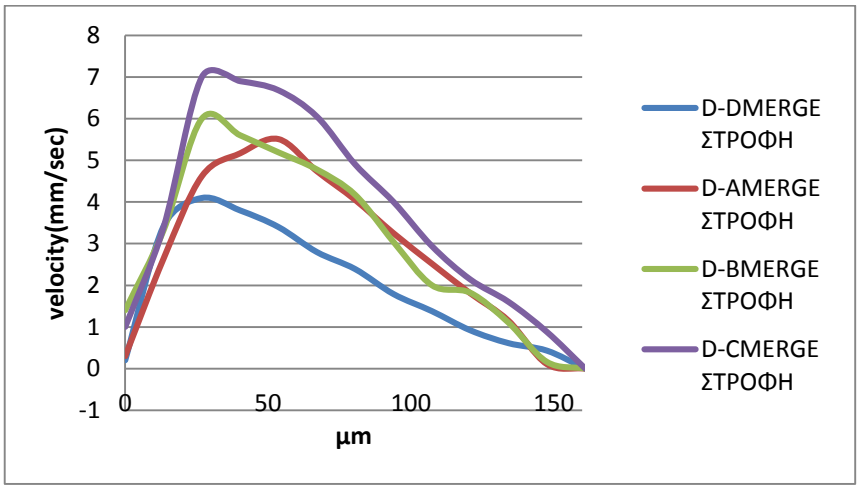
Σύγκριση μεταξύ διαφόρων θέσεων(για κάθε βάθος)

Στο παρακάτω διάγραμμα επεξηγείται η γραμμή κάθετη στη ροή στην οποία φτιάχτηκαν τα διαγράμματα. Συγκρίνονται οι στροφές στις διάφορες θέσεις καθώς και οι στροφές στα διάφορα βάθη. Ισχύει η ονοματολογία D=DOWN =16.625μm από μέσο βάθος, M=MIDDLE=μέσο βάθος, U=UP=16.625μm από μέσο βάθος(προς lamination).

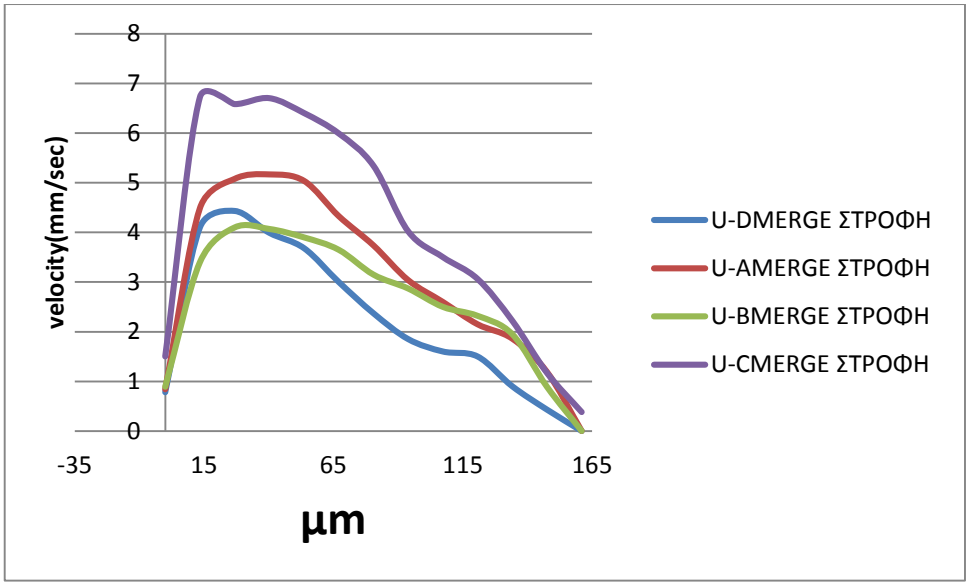


Σχήμα 5.3.5.1: Θέση στην οποία υπολογίστηκαν τα προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές.

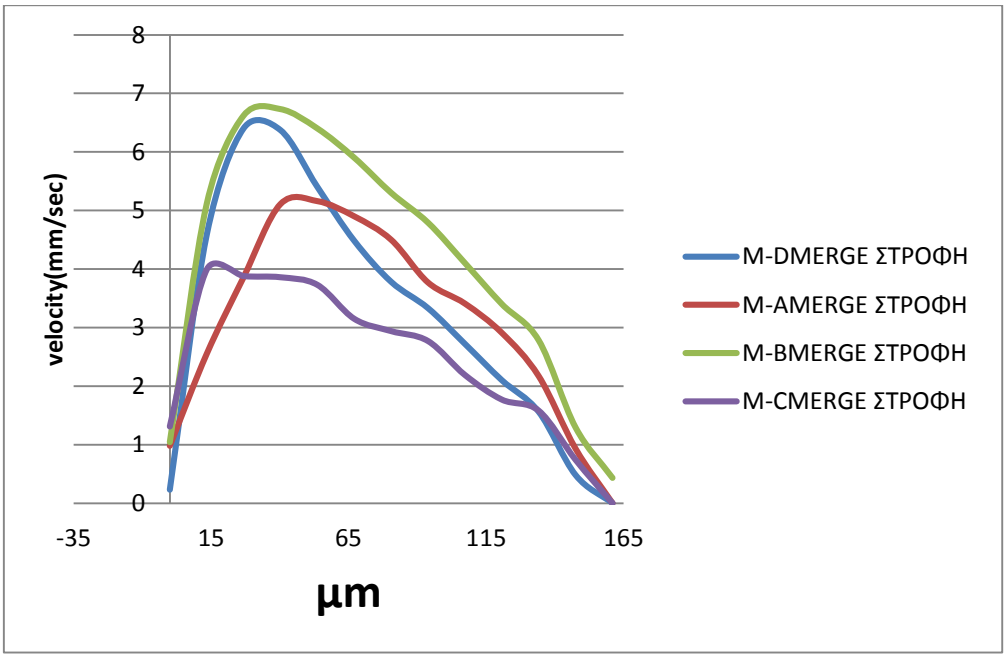
ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΑΝΕΝΩΣΗΣ (MERGES):



Σχήμα 5.3.5.2: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές προς το πυθμένα.

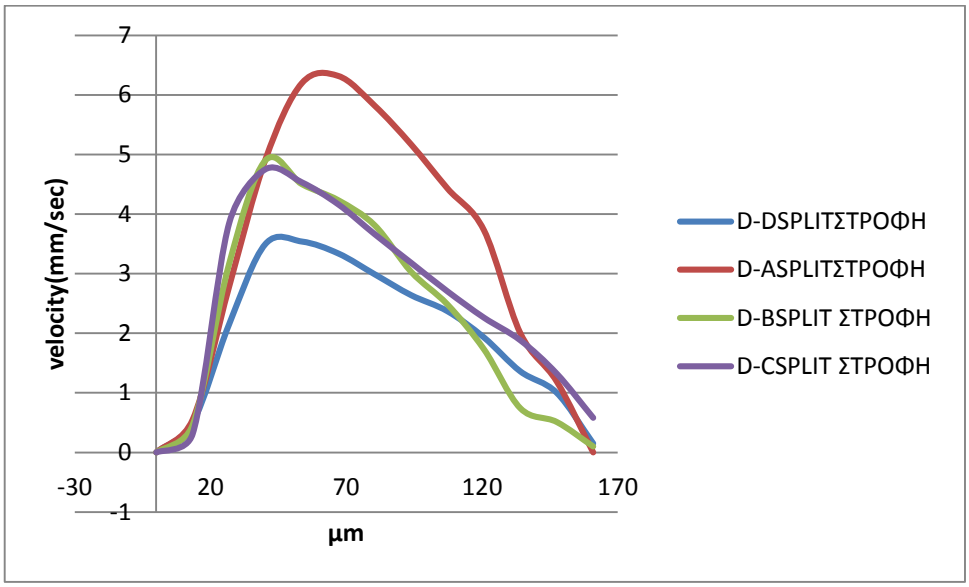


Σχήμα 5.3.5.3: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές προς το lamination.

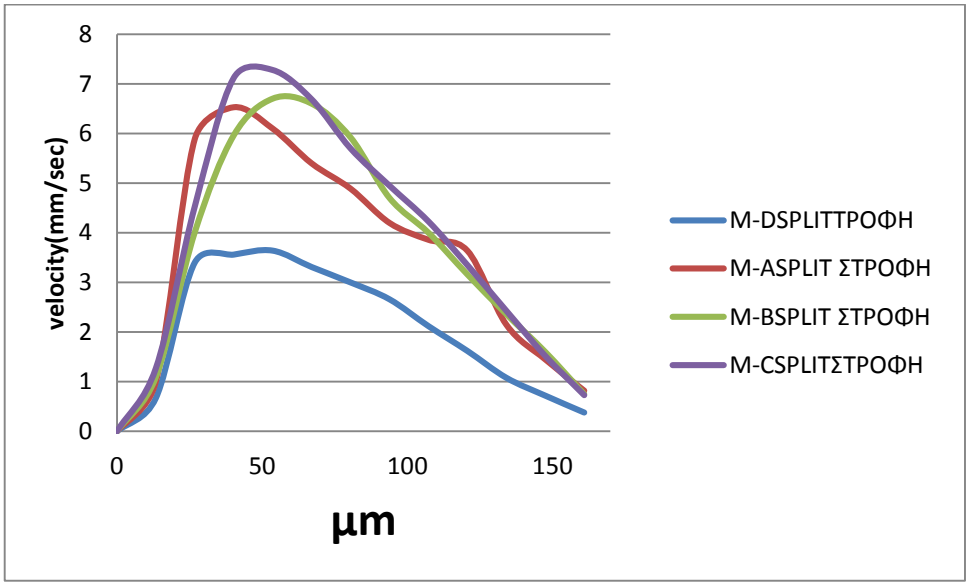


Σχήμα 5.3.5.4: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές στο μέσο βάθος.

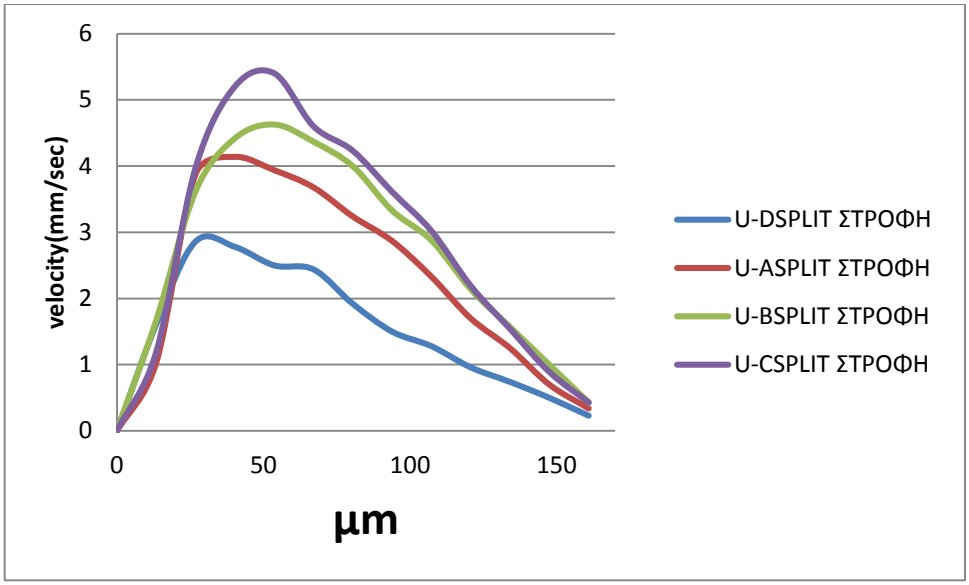
ΣΗΜΕΙΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ (SPLITS):



Σχήμα 5.3.5.5: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές προς το πυθμένα.



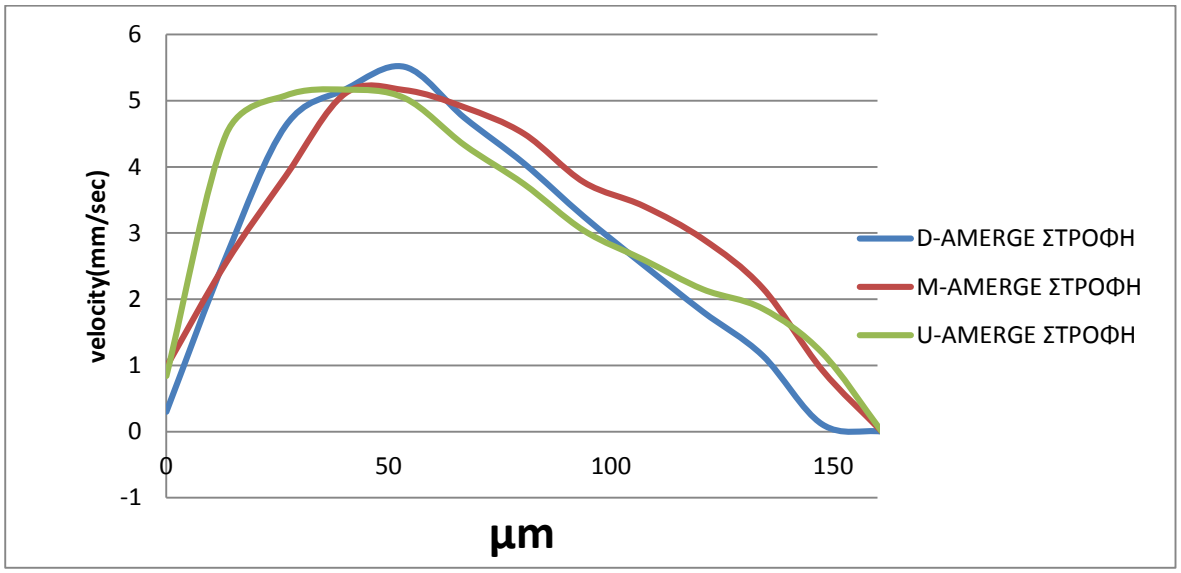
Σχήμα 5.3.5.6: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές ,μέσο βάθος.



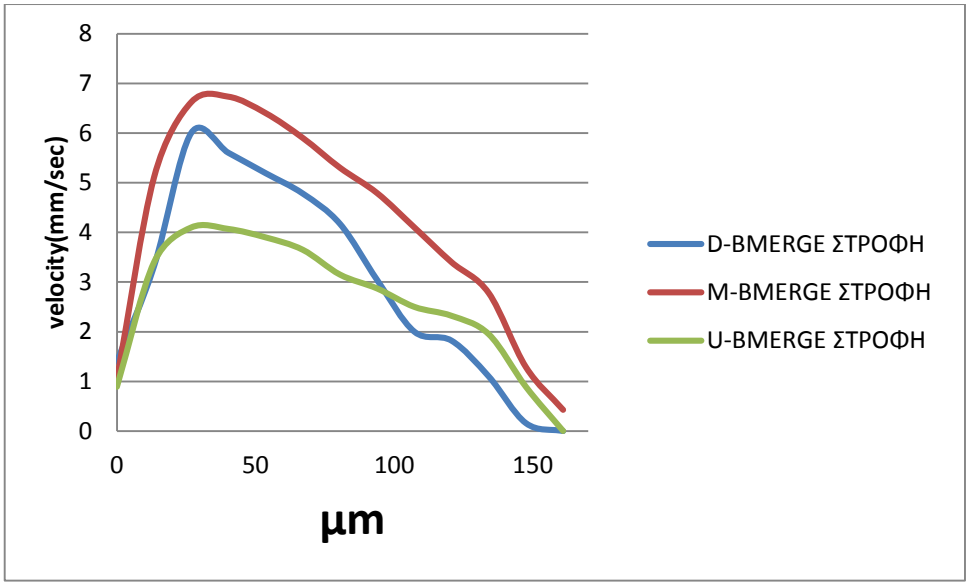
Σχήμα 5.3.5.7: Σύγκριση των προφίλ των ταχυτήτων στις στροφές προς το lamination.

Προφίλ στις στροφές- Σύγκριση μεταξύ βαθών(για την ίδια θέση κάθε φορά):

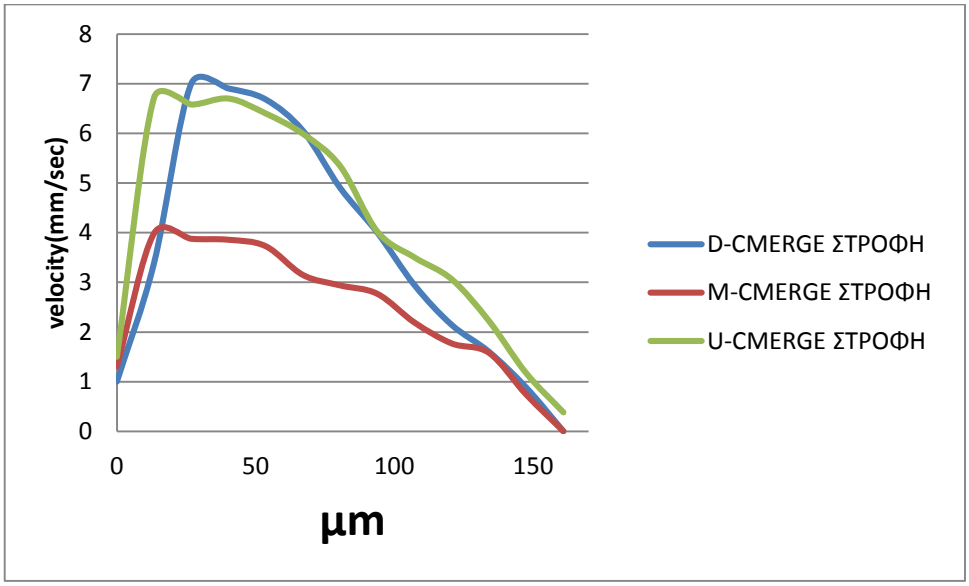
ΣΥΝΕΝΩΣΕΙΣ(MERGES):



Σχήμα 5.3.5.8: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.

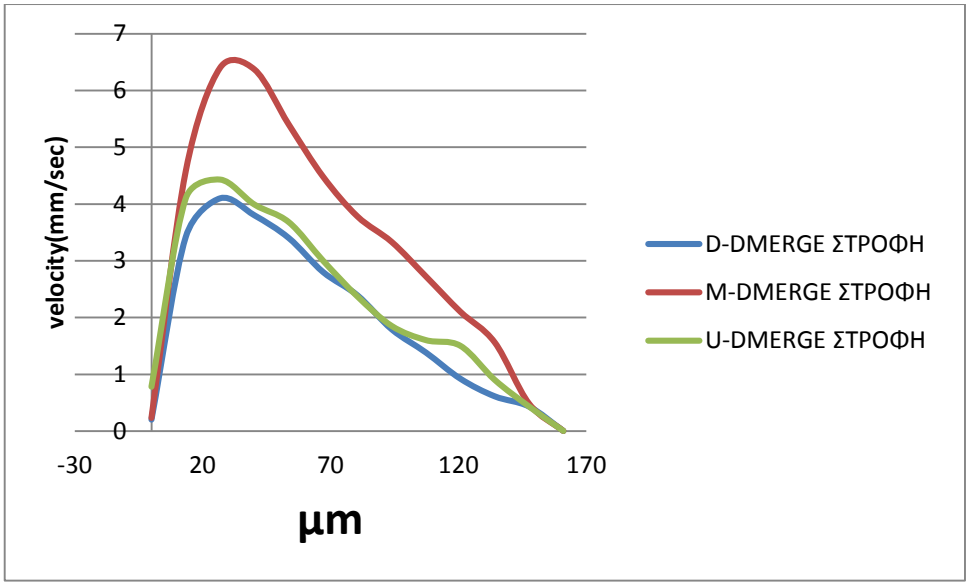


Σχήμα 5.3.5.9: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.



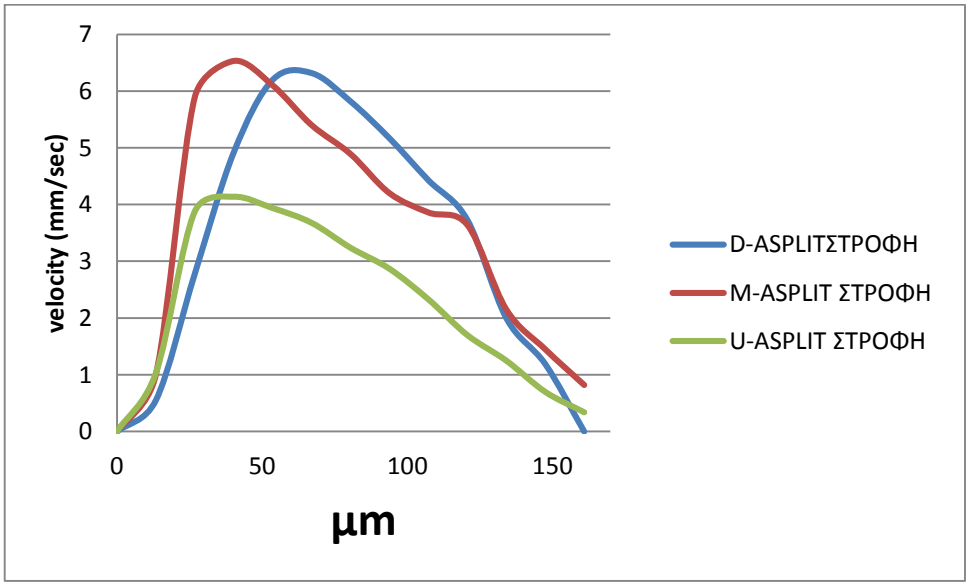
Σχήμα 5.3.5.10: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.

Στην συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι στο μεσαίο βάθος οι ταχύτητες στη στροφή είναι μικρότερες. Η εξήγηση είναι η εξής:down: πλάτος 89.77μm, πλάτος up:89.95μm, πλάτος middle:98.73 μm. Συνεπώς στο μέσο βάθος το μεγαλύτερο πλάτος δημιουργεί και μικρότερες ταχύτητες(για την ίδια παροχή). Η μείωση του πλάτους κοντά στο πυθμένα και στο lamination πιθανόν να οφείλεται σε συγκέντρωση σωματιδίων ανιχνευτών που κολλάνε στο τοίχωμα μετά από κάποιες ώρες πειράματος.

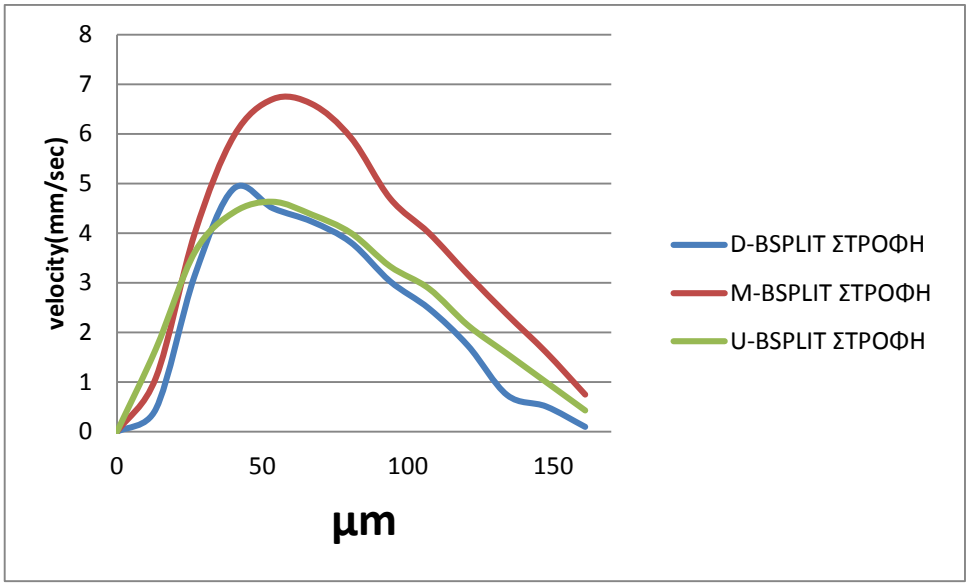


Σχήμα 5.3.5.11: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.

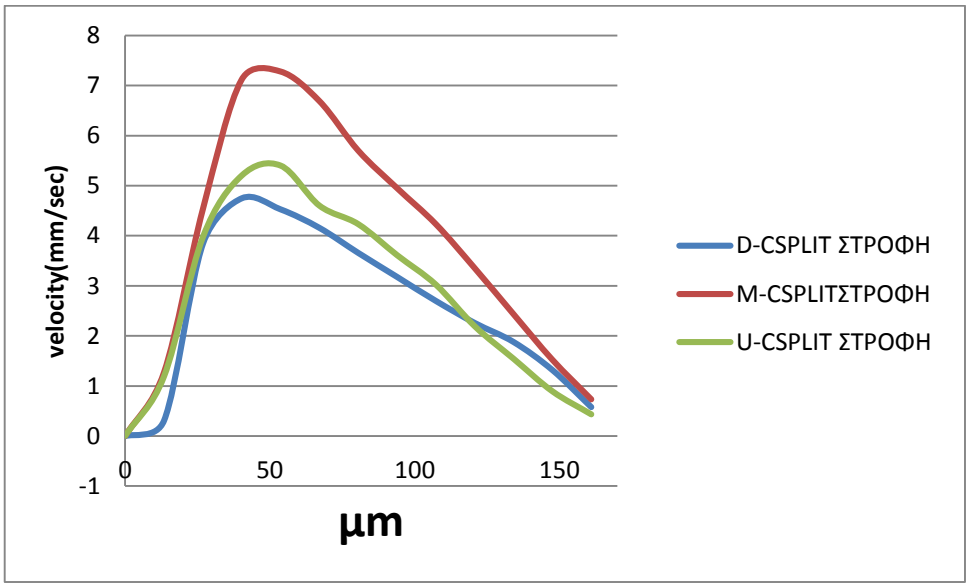
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΙ(SPLITS):



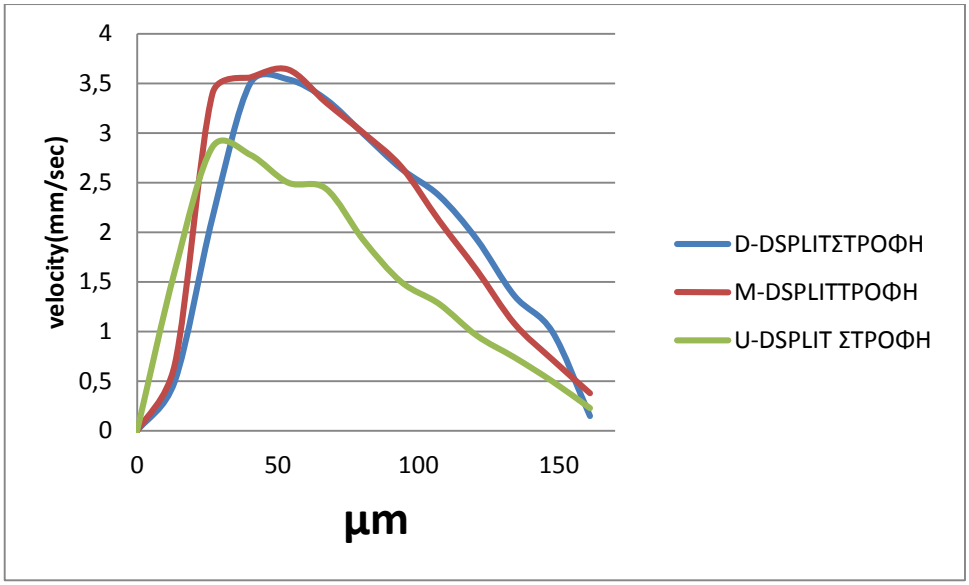
Σχήμα 5.3.5.12: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.



Σχήμα 5.3.5.13: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.



Σχήμα 5.3.5.14: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.



Σχήμα 5.3.5.15: Σύγκριση των προφίλ ταχυτήτων για διάφορα βάθη.

Σχολιασμός/Συμπεράσματα διαγραμμάτων:

Ο λόγος που παρατηρείται μεγαλύτερη ταχύτητα στο εσωτερικό της στροφής(μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας), απ'ότι στην εξώτερη διαδρομή (μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας) είναι η μεγαλύτερη πτώση πίεσης στην πρώτη περίπτωση ,με την υψηλή καμπυλότητα. Αυτό το περιμένουμε και θεωρητικά αφού οι αδρανειακές δυνάμεις(φυγόκεντρες σε καμπυλωμένο κανάλι) που οφείλονται στον όρο $\vec{v}\nabla\vec{v}$ αμελούνται λόγω του πολύ χαμηλού Re και υπερισχύουν οι δυνάμεις συνεκτικότητας λόγω του όρου $\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{v}$.Συνεπώς το μέγιστο παρατηρείται στην εσωτερική πλευρά. Φυσικά ισχύει και η συνθήκη μη ολίσθησης στα τοιχώματα(v=0).

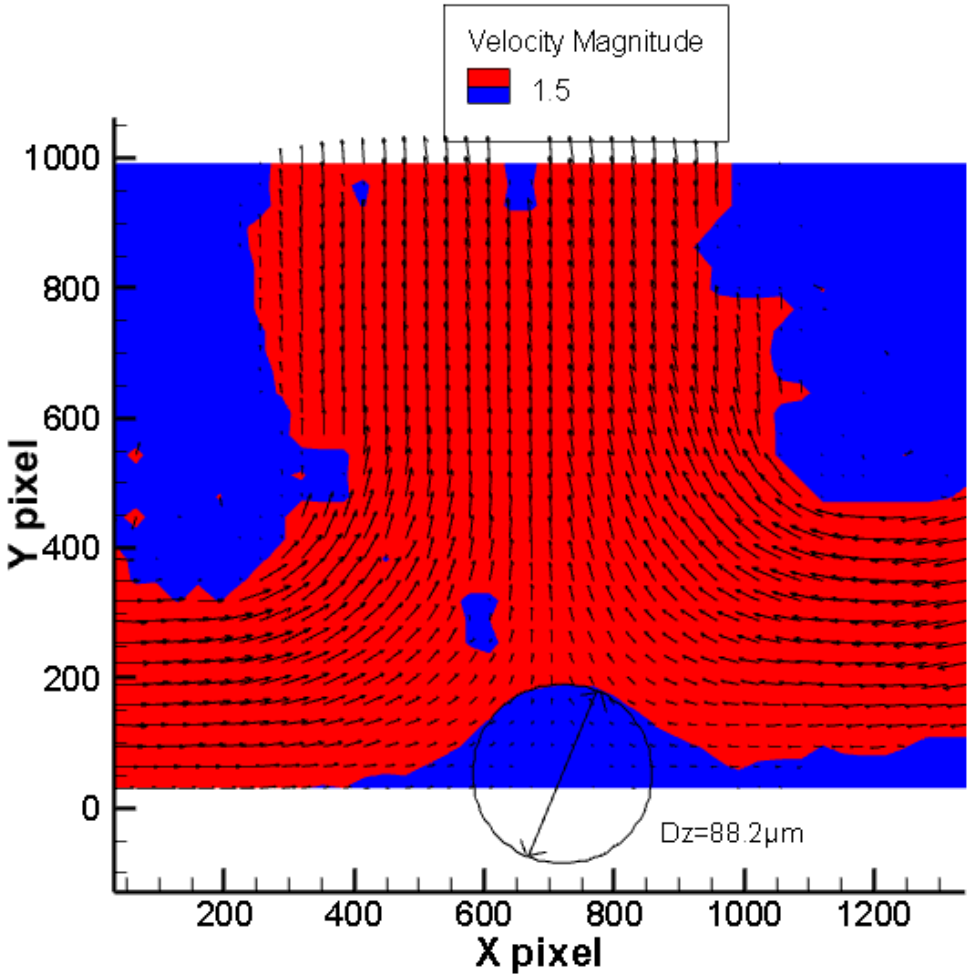
5.3.6: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΝΑΚΟΠΗΣ

Υπολογισμός διάστασης περιοχής ανακοπής (stagnation region size) ή περιοχής νεκρής ζώνης (dead zone).

Η περιοχή ανακοπής ή νεκρή ζώνη είναι η περιοχή κατά την οποία έρχονται σε επαφή τα 2 ρεύματα με πολύ μικρές ταχύτητες, συνεπώς είναι ιδιαιτέρως σημαντική για τα φαινόμενα διάχυσης. Όπως έχει επιβεβαιωθεί από τη βιβλιογραφία υπάρχει εμφανής συσχέτιση της διάστασης της περιοχής ανακοπής με την απόδοση της ανάμιξης(Shou-Shing Hsieh et al.,2013)[42]

Κριτήριο: όποιες ταχύτητες είναι πάνω από 1.5mm/sec αποκόπτονται .Οι υπόλοιπες θεωρούνται περιοχή ανακοπής. Στην περιοχή που απομένει υπολογίζεται γραφικά μια αντίστοιχη διάμετρος νεκρής ζώνης, υπολογίζοντας τη διάμετρο ενός κύκλου που εφάπτεται στην νεκρή περιοχή (βλ.σχήμα παρακάτω).

Παράδειγμα νεκρής ζώνης σε μία θέση του μικροαναμίκτη:



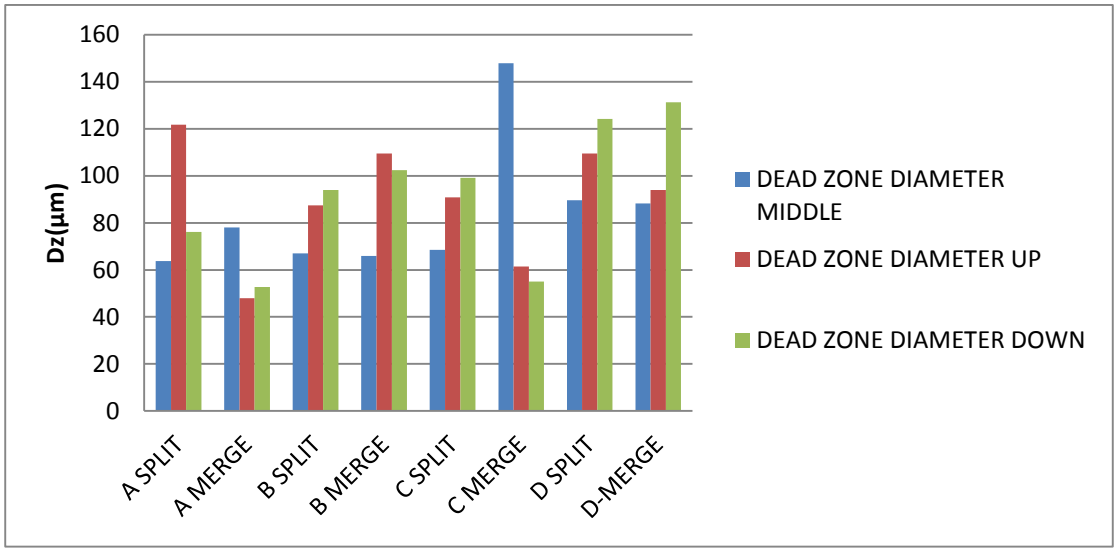
Σχήμα 5.3.6.1: Γραφικός τρόπος υπολογισμού της διαμέτρου νεκρής ζώνης μέσω εφαπτόμενου κύκλου στην περιοχή ανακοπής(με ταχύτητες μικρότερες των 1.5 mm/sec.)

Η Dz για όλες τις θέσεις συνένωσης και διαχωρισμού φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

	M A SPLIT	M A MERGE	M B SPLIT	M B MERGE	M C SPLIT	M C-MERGE	M D SPLIT	M D-MERGE
DEAD ZONE DIAMETER(PIXELS)	199.12	244	209.36	205.9	214	462	280	275.86
DEAD ZONE DIAMETER(μm)	63.7184	78.08	66.9952	65.888	68.48	147.84	89.6	88.2752
	U A SPLIT	U A MERGE	U B SPLIT	U B MERGE	U C SPLIT	U C-MERGE	U D SPLIT	U D-MERGE
DEAD ZONE DIAMETER(PIXELS)	380.34	150	273.12	342	284	192	342	293.82
DEAD ZONE DIAMETER(μm)	121.7088	48	87.3984	109.44	90.88	61.44	109.44	94.0224
	D A SPLIT	D A MERGE	D B SPLIT	D B MERGE	D C SPLIT	D C-MERGE	D D SPLIT	D D-MERGE
DEAD ZONE DIAMETER(PIXELS)	238	164.92	293.54	320	310	172	388	410
DEAD ZONE DIAMETER(μm)	76.16	52.7744	93.9328	102.4	99.2	55.04	124.16	131.2

Πίνακας 5.3.6.1:Υπολογισμός διαμέτρων νεκρής ζώνης για όλες τις θέσεις/βάθη.

Παρακάτω παρατίθεται σύγκριση διαμέτρου νεκρής ζώνης για διάφορα βάθη και θέσεις:



Σχήμα 5.3.6.2: Σύγκριση διαμέτρου νεκρής ζώνης για θέσεις /βάθη.

Σχόλια/Συμπεράσματα:

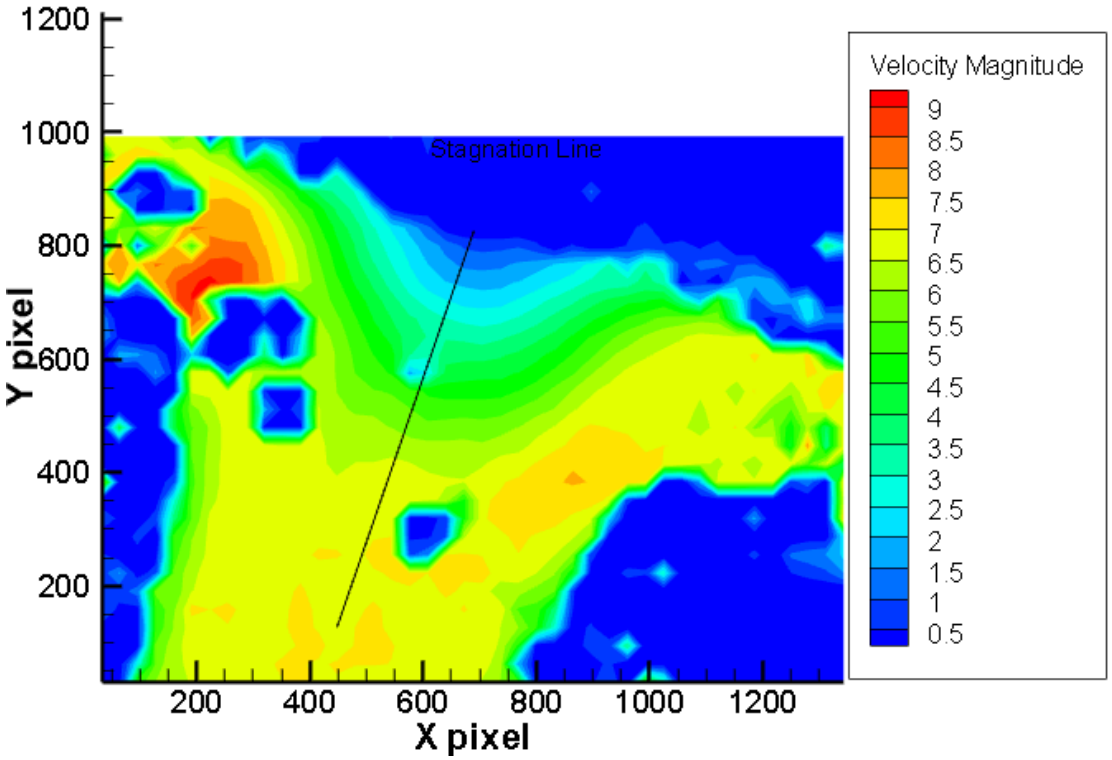
Η διάμετρος της νεκρής ζώνης κυμαίνεται από50 μέχρι 150 μm.Μέση τιμή της διαμέτρου για το μέσο βάθος(middle) είναι τα 83.6 μm, η μέση τιμή για τη θέση κοντά στο lamination είναι τα 90.29 , και μέση τιμή για τη θέση κοντά στο πυθμένα(down) τα 91.85μm. Όπως ήταν αναμενόμενο, για την πλειοψηφία των θέσεων η διάμετρος νεκρής ζώνης για τις θέσεις που είναι πιο κοντά στο πυθμένα και το lamination(up και down) είναι μεγαλύτερη, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης που επιβάλλει μηδενική ταχύτητα στο τοίχωμα. Ειδικότερα, συγκρίνοντας την επίδραση του lamination(από πολυολεφίνη+ κόλλα σιλικόνης) σε σχέση με το πυθμένα(από πολυιμίδιο) παρατηρούμε ότι το πολυιμίδιο έχει μεγαλύτερη επίδραση στην Dz, καθιστώντας τη μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη θέση κοντά στο lamination (στις 5 από τις 8 θέσεις).

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΝΑΚΟΠΗΣ-ΣΥΝΕΧΕΙΑ

Παρακάτω ακολουθούν οι συγκρίσεις των ταχυτήτων κατά μήκος των γραμμών ανακοπής (stagnation lines).

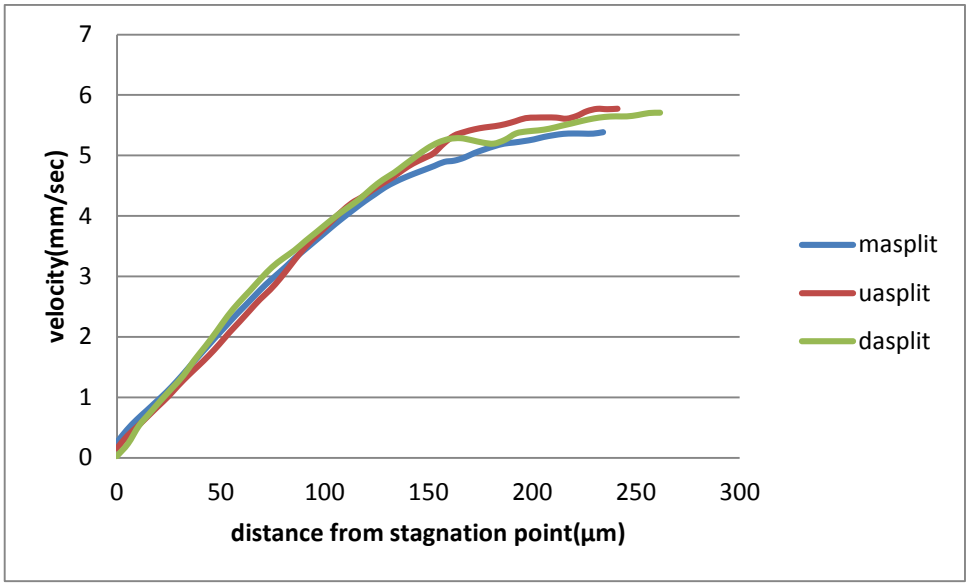
ΓΡΑΜΜΗ ΑΝΑΚΟΠΗΣ(STAGNATION LINE):

Ως stagnation line αναφέρουμε την γραμμή που ξεκινά από το σημείο αποκοπής και προχωρά κάθετα στο τοίχωμα μακριά από αυτό. Σχηματικά:

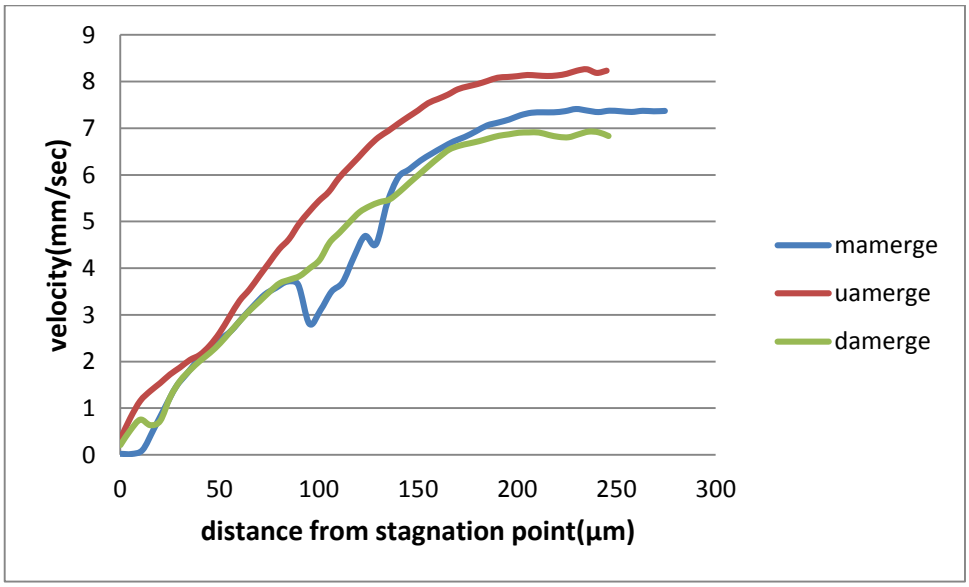


Σχήμα 5.3.6.3: Η γραμμή ανακοπής, της οποίας το προφίλ ταχυτήτων μελετήθηκε.

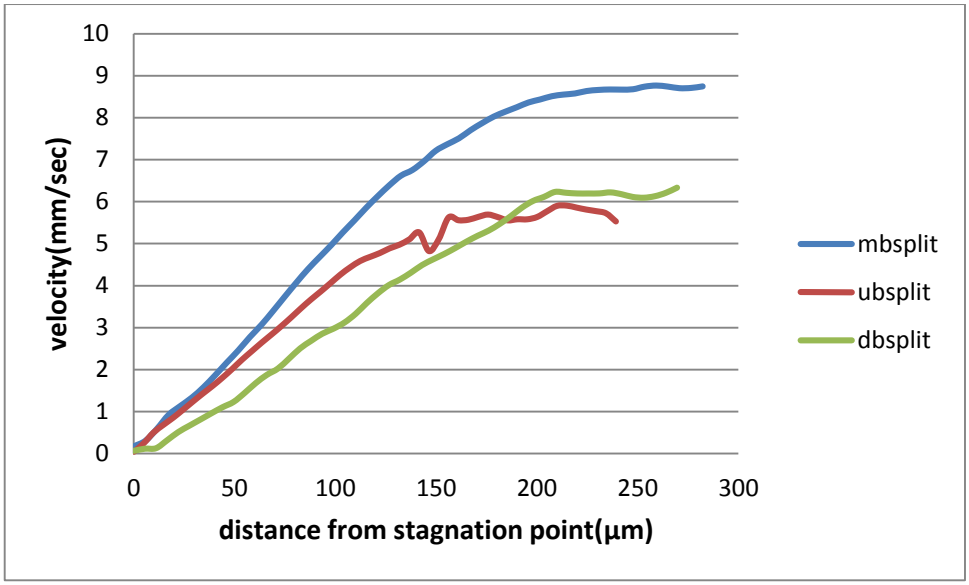
Σύγκριση της διαμόρφωσης της ταχύτητας στη γραμμή ανακοπής κατά βάθος(ίδια θέση):



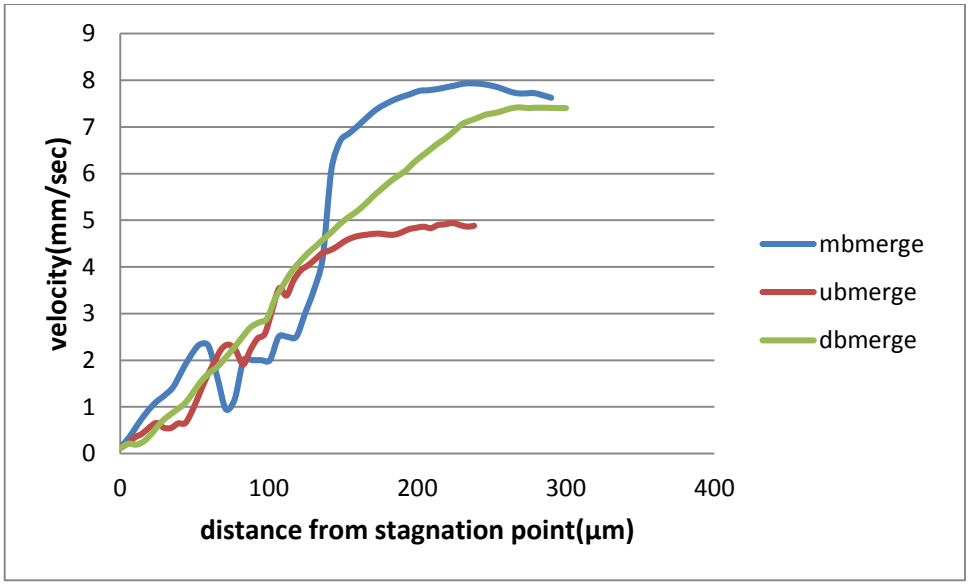
Σχήμα 5.3.6.4: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής ,θέση πρώτου διαχωρισμού



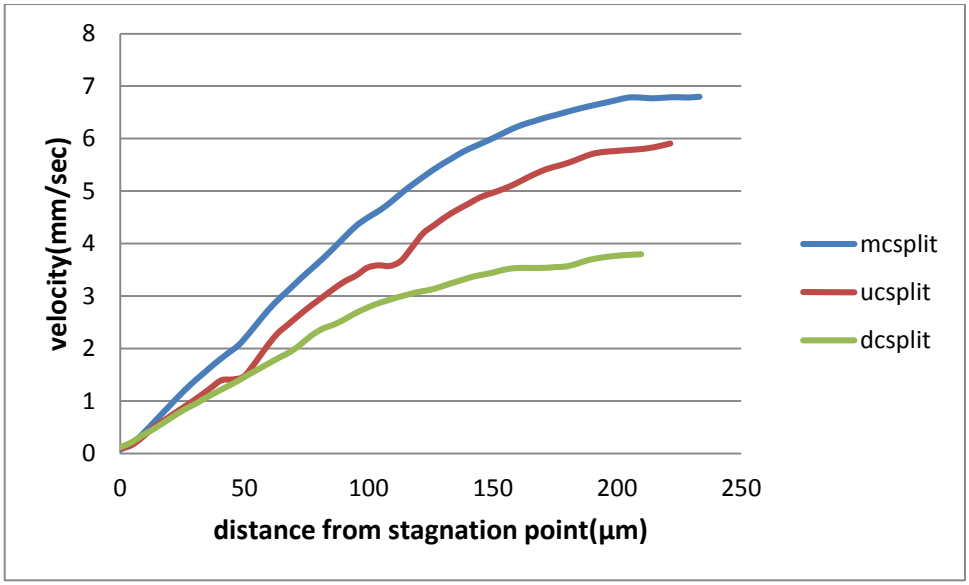
Σχήμα 5.3.6.5: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής ,θέση πρώτης επανένωσης.



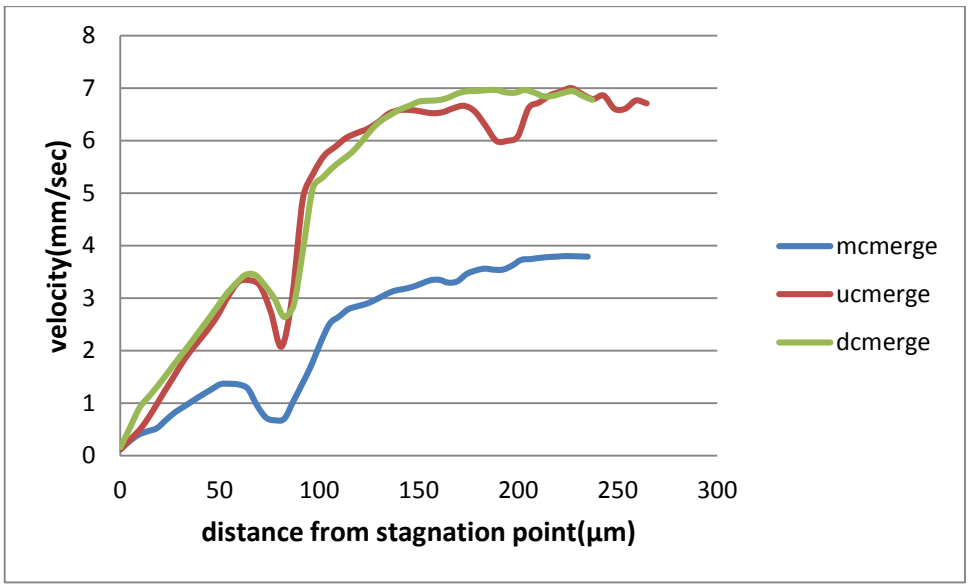
Σχήμα 5.3.6.6: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής,θέση δεύτερου διαχωρισμού.



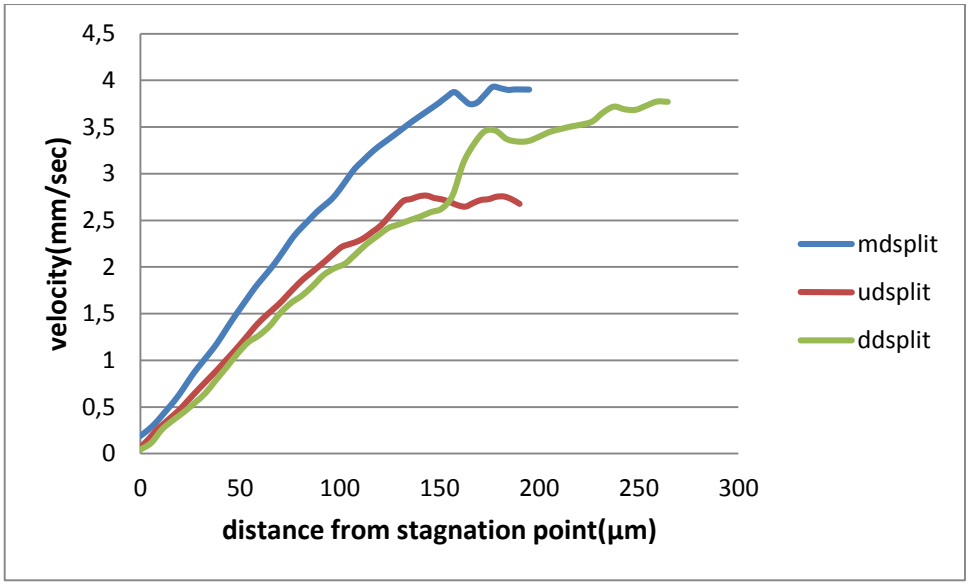
Σχήμα 5.3.6.7: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής ,θέση δεύτερης επανένωσης.



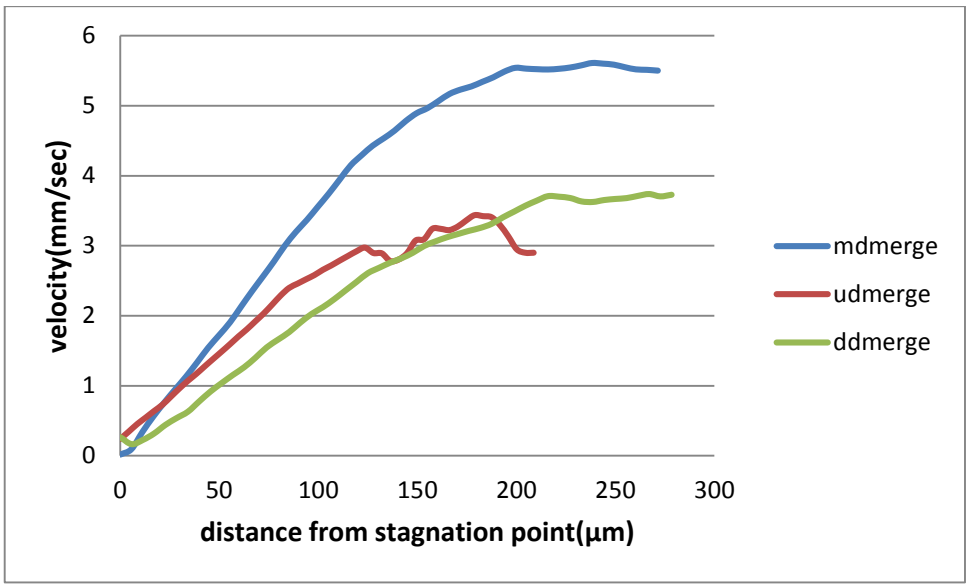
Σχήμα 5.3.6.8: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής ,θέση τρίτου διαχωρισμού.



Σχήμα 5.3.6.9: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής,θέση τρίτης επανένωσης.



Σχήμα 5.3.6.10 : Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής ,θέση τέταρτου διαχωρισμού.

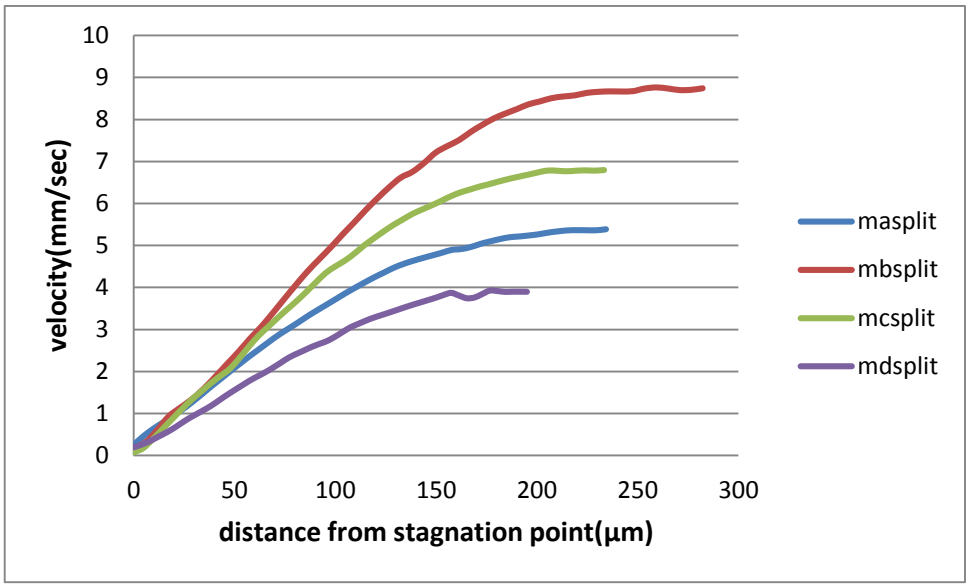


Σχήμα 5.3.6.11 : Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής,θέση τέταρτης επανένωσης.

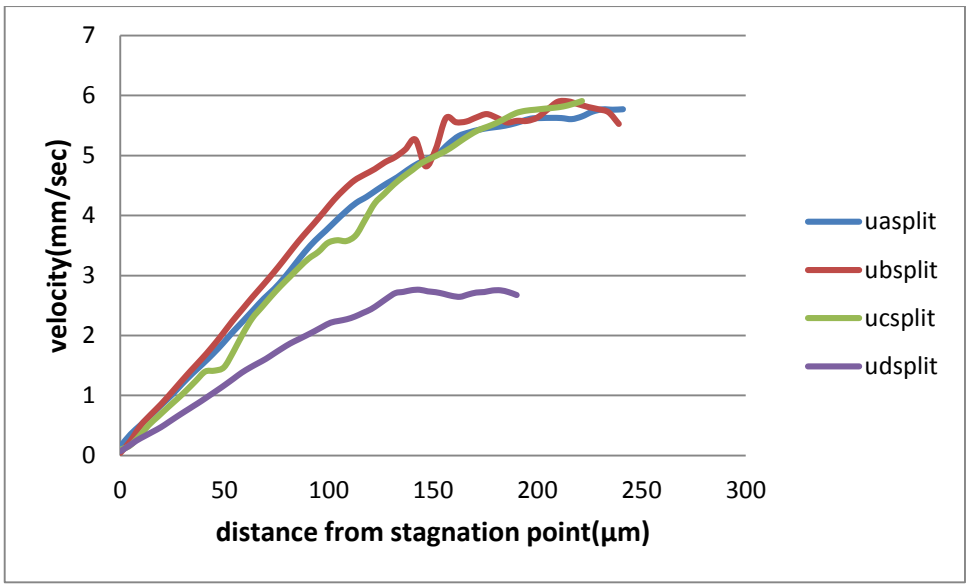
Σχόλια/συμπεράσματα: Γενικά παρατηρείται ότι στο στη μέτρηση κοντά στο lamination (up) πάντα η ροή διαμορφώνεται στη σταθερή (και μέγιστη) ταχύτητα νωρίτερα από τις μετρήσεις σε μέσο(middle) ή μικρότερο(down) βάθος, σε απόσταση περίπου 150 μm από το σημείο ανακοπής(stagnation point).

Πώς εξελίσσεται η stagnation line από την πρώτη στη τελευταία θέση?

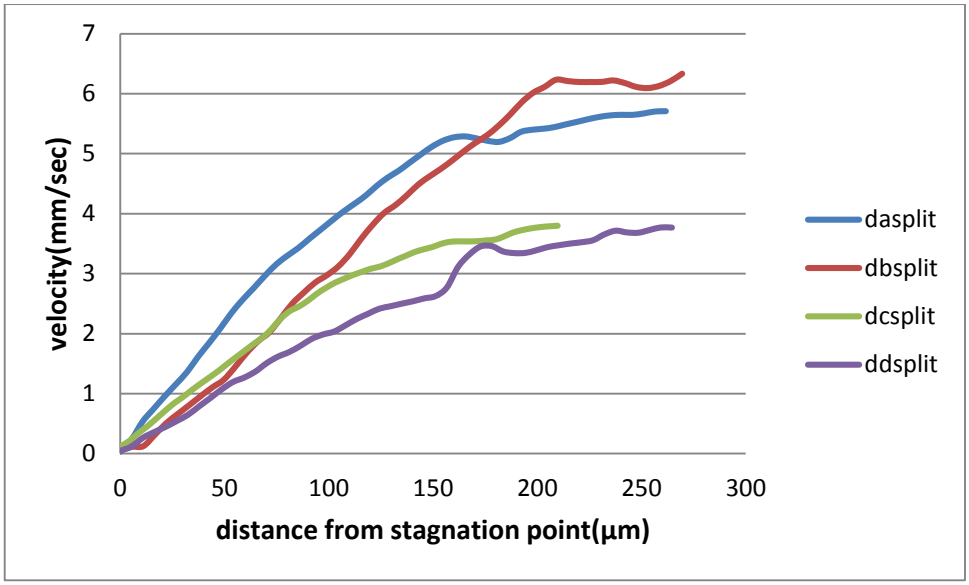
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα για τη γραμμή ανακοπής για το ίδιο βάθος αλλά για κάθε θέση:



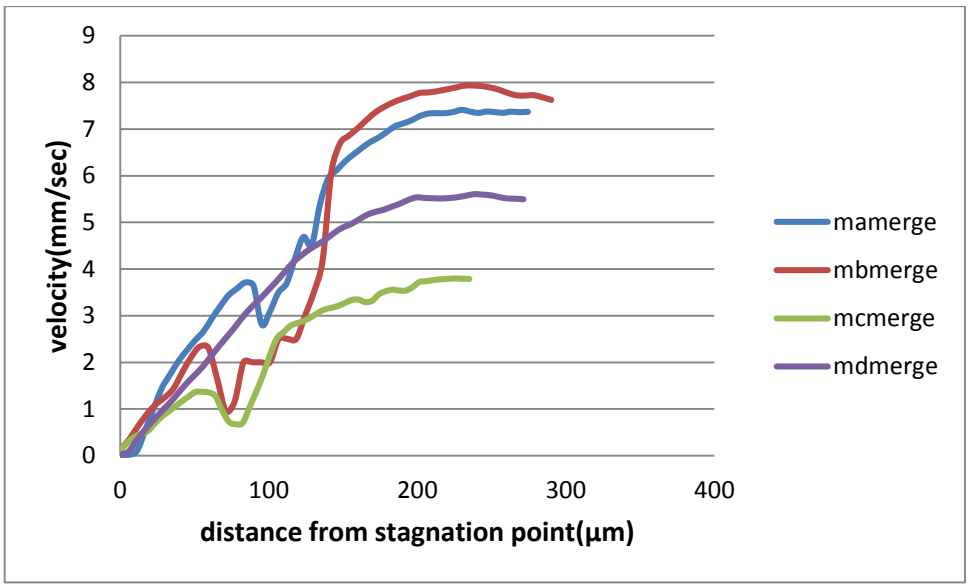
Σχήμα 5.3.6.12 : Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις διαχωρισμού, μέσο βάθος .



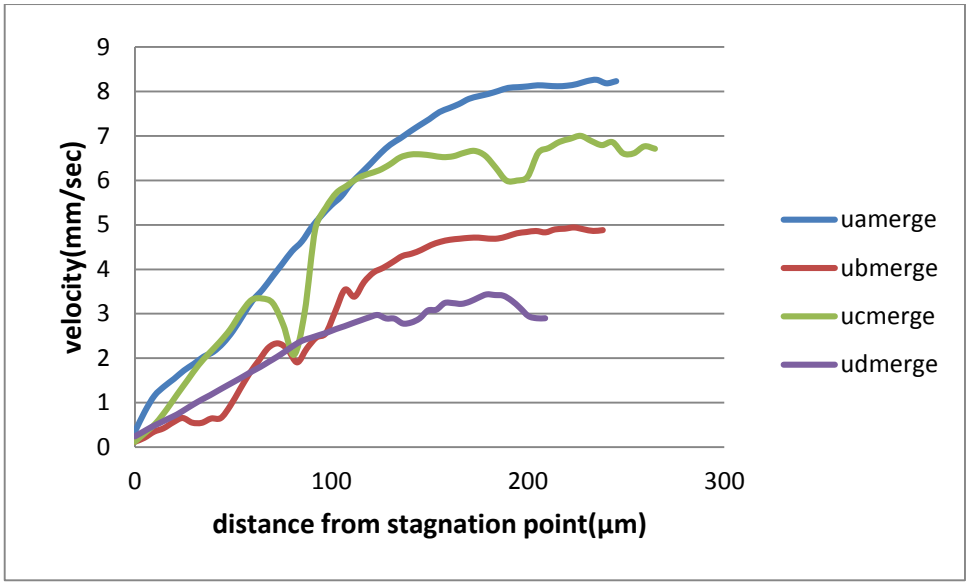
Σχήμα 5.3.6.13 : Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις διαχωρισμού, προς lamination .



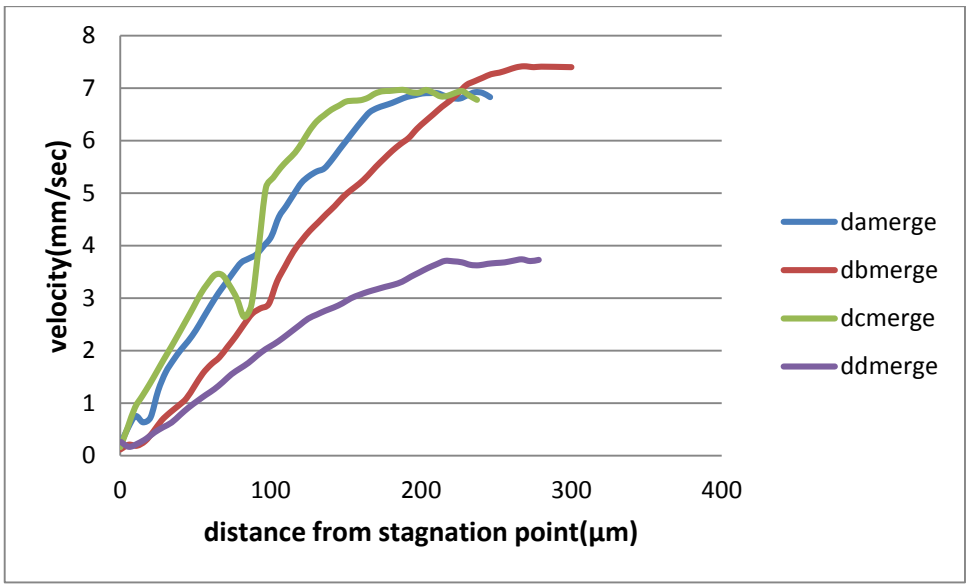
Σχήμα 5.3.6.14 : Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις διαχωρισμού, προς πυθμένα .



Σχήμα 5.3.6.15: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις επανένωσης, μέσο βάθος .



Σχήμα 5.3.6.16: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις επανένωσης, θέση προς lamination .



Σχήμα 5.3.6.17: Διαμόρφωση της ταχύτητας κατά μήκος της γραμμής ανακοπής για τις θέσεις επανένωσης, προς πυθμένα .

Σχόλια/Συμπεράσματα:

Για τα σημεία διαχωρισμού(splits) , η ταχύτητα στη γραμμή αποκοπής διαμορφώνεται πρώτα για τις θέσεις με τις μικρότερες ταχύτητες, εν προκειμένω η d-split(διαμόρφωση σε 150μm). Όσο αυξάνει η ταχύτητα η περιοχή ανακοπής αυξάνεται και η ταχύτητα στη γραμμή ανακοπής διαμορφώνεται ολοένα και πιο αργά, σε απόσταση 200 και πάνω μm από το σημείο ανακοπής.

ΓΕΝΙΚΑ-ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά τα προφίλ των ταχυτήτων στα κανάλια και τις στροφές, δεν παρατηρείται κάποια εξέλιξη από θέση σε θέση. Γενικό συμπέρασμα είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα στο μέσο βάθος σε σχέση με τα υπόλοιπα λόγω της επίδρασης των τοιχωμάτων που επιβάλλουν συνθήκη μη ολίσθησης .Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στο προφίλ ταχυτήτων στις στροφές, παρατηρούνται επίσης μεγαλύτερες ταχύτητες στον εσωτερικό διάδρομο σε σχέση με τον εξωτερικό, λόγω του χαμηλού αριθμού Re και της υψηλότερης κλίσης πίεσης στη πρώτη περίπτωση. Οι τυπικές αποκλίσεις των μετρήσεων είναι ομοιόμορφες από σημείο σε σημείο στην πλειοψηφία τους και κυμαίνονται στο 1-1.5mm/sec.

Όσον αφορά στην περιοχή ανακοπής (ή νεκρή ζώνη), η αντίστοιχη διάμετρος της νεκρής ζώνης κυμαίνεται από 50 μέχρι 150 μm.Μέση τιμή της διαμέτρου για το μέσο βάθος(middle) είναι τα 83.6 μm, η μέση τιμή για τη θέση κοντά στο lamination είναι τα 90.29 , και μέση τιμή για τη θέση κοντά στο πυθμένα(down) τα 91.85μm. Όπως ήταν αναμενόμενο, για την πλειοψηφία των θέσεων η διάμετρος νεκρής ζώνης για τις θέσεις που είναι πιο κοντά στο πυθμένα και το lamination(up και down) είναι μεγαλύτερη, λόγω της συνθήκης μη ολίσθησης που επιβάλλει μηδενική ταχύτητα στο τοίχωμα. Ειδικότερα, συγκρίνοντας την επίδραση του lamination(από πολυολεφίνη+ κόλλα σιλικόνης) σε σχέση με το πυθμένα(από πολυιμίδιο) παρατηρούμε ότι το πολυιμίδιο έχει μεγαλύτερη επίδραση στην Dz, καθιστώντας τη μεγαλύτερη σε σχέση με το αντίστοιχο βάθος κοντά στο lamination (στις 5 από τις 8 θέσεις).Πιθανόν να οφείλεται και σε μεγαλύτερη επικάθηση σωματιδίων-ανιχνευτών στο πυθμένα .

Όσον αφορά τη μελέτη της ανάμιξης με τη χρήση της μεθόδου micro-PIV, επειδή ο συντελεστής διάχυσης των σωματιδίων ανιχνευτών (τάξης 10^{-13}) είναι πολύ μικρότερος από αυτό ενός διαλύματος με βιομόρια(τάξη 10^{-9}-10^{-10}), δεν είναι δυνατή η ικανοποιητική μελέτη της ικανότητας ανάμιξης του μικροαναμίκτη που δουλεύει μόνο με διάχυση με τη χρήση σωματιδίων ανιχνευτών 1μm, αλλά είναι ιδανική αν η ανάμιξη οφείλεται κυρίως σε μεταφορά λόγω ορμής(momentum transfer). Όσον αφορά τα φαινόμενα μεταφοράς/συναγωγής μάζας στο μικροαναμίκτη, ακολουθώντας την λωρίδα με τα σωματίδια, παρατηρούμε πως αυτή μικραίνει σε πλάτος στις στροφές, λόγω των υψηλών ταχυτήτων(αυξάνοντας τη βαθμίδα συγκέντρωσης), καθώς και αποκόπτεται περιοδικά (ανά 2 διαχωρισμούς) σε 2 λωρίδες όταν κινείται στο εξωτερικό διάδρομο του καναλιού(θέση B SPLIT και D SPLIT).Αντίστοιχα, ανά 2 συνενώσεις επανακολλώνται οι 2 λωρίδες όταν ευρίσκονται και οι 2 στον εξωτερικό διάδρομο του καναλιού(θέση C-MERGE). Τα φαινόμενα αυτά της συναγωγής ευνοούν την ανάμιξη. Τρισδιάστατη ροή και φαινόμενα μεταφοράς μάζας επιβεβαιώθηκαν και από την μη επιβεβαίωση της εξίσωσης συνέχειας στην πλειοψηφία των θέσεων, μέσω ολοκλήρωση των ταχυτήτων στις διατομές. Κάτι τέτοιο υπονοεί ύπαρξη ορμής κάθετη στο επίπεδο μέτρησης συνεπώς και αρχή δημιουργία δινών Dean.

Όσον αφορά στο πόσο ανάντη επηρεάζεται ο διαχωρισμός της ροής στη συγκεκριμένη γεωμετρία, αναφέρουμε ότι παρατηρήθηκε ότι σε απόσταση 2.5 mm από απόβλητο το πεδίο ταχυτήτων ήταν σαφώς επηρεασμένο.

Τέλος , μια κατασκευαστική παρατήρηση είναι ότι οι πιέσεις που επικρατούν για την τάξη μεγέθους της παροχής που χρησιμοποιείται είναι επικίνδυνο να διογκώσουν το lamination, επηρεάζοντας τη λειτουργία του μικροαναμίκτη. Επίσης η κόλλα σιλικόνης που χρησιμοποιείται για να κολληθεί το lamination αφήνει συχνά κατάλοιπα που αλλάζουν τη διατομή, επηρεάζοντας τη ροή. Αντ' αυτής λοιπόν μία πρόταση είναι χρήση άλλων στεγανοτικών αντί της χρήσης κόλλας από σιλικόνη.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ:

Με σωματίδια ανιχνευτές διαμέτρου 40nm, ο συντελεστής διάχυσης γίνεται τάξης 1E-11 συνεπώς η διάχυση πλησιάζει σημαντικά την τάξη διάχυσης που έχουν τα βιομόρια. Τόσο μικρή διάμετρος σωματιδίου βέβαια θα απαιτεί φακό με υψηλό ζουμ και πολύ μικρό αριθμητικό άνοιγμα, καθώς και κάμερα CCD υψηλής ανάλυσης για να δουλέψει η μέθοδος micro-PIV και να γίνει η στατιστική ανάλυση της ετεροσυσχέτισης.

Μελετώντας την ροή στο συγκεκριμένο μικροαναμίκτη για Re 5,10,50 θα μπορούσαμε να δούμε την εξέλιξη/δημιουργία δινών Dean , καθώς κι τον έντονο τρισδιάστατο χαρακτήρα της ροής μέσω του ελέγχου της εξίσωσης συνέχειας από ολοκλήρωση των πεδίων ταχυτήτων. Για τον ίδιο λόγο σημαντική είναι επίσης η αύξηση του βάθους του καναλιού ώστε να αυξηθεί ο λόγος βάθους/ πλάτους. Ομοίως μπορεί να μελετηθεί το μέγεθος της περιοχής ανακοπής σε σχέση με την απόδοση του μικροαναμίκτη για τους διάφορους αριθμούς Re.H μελέτη των πεδίων ταχυτήτων για 5 ή 7 διαφορετικά βάθη θα ήταν Ιδιαιτέρως σημαντική .Ενδιαφέρουσα θα ήταν τέλος και η μελέτη της ροής υπολογιστικά , με κώδικα CFD και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά δεδομένα από το micro-piv.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Ο κώδικας σε matlab που γράφτηκε για την καταγραφή των σωματιδίων στις εικόνες και την αξιολόγηση του μικροαναμίκτη παρατίθεται παρακάτω:

```
clc
clear all

%CHANGE CRITERIA FOR CALCULATING MIXING INDEX!
%CODE FOR MICROMIXING EVALUATION.RUNNING TIME FOR 4PICS=42 SEC.
%Find circles using circular Hough transform
%SETION 1- READING and processing multiple images IMAGES.
% use impixelregion to find pixel info
numberofimages=1999;
n=zeros;

histogram=zeros(1024,1376);
sumhisto=0;
totalnumber=0;
totalefficiency=0;


for k=1: numberofimages
    picnum=k;
    % Create a mat filename, and load it into a structure called
matData.

 %jpgFileName = strcat(num2str(k),'.jpg'); %CAREFULLY CHANGE THE NAME
OF THE PICS
jpgFileName = strcat('micropiv (', num2str(k), ').jpg'); %CAREFULLY
CHANGE THE NAME OF THE PICS

image=imread(jpgFileName);
image=rgb2gray(image); % %this command makes the picture black and
white-grayscale

clc
[centers,radii]=imfindcircles(image,[3,8],'Sensitivity',0.95,'Edge',0
.3);
% CAREFULLY ADJUST SENSITIVITY AND EDGE ACCORDING TO YOUR PICS
%[centers,          radii]          =          imfindcircles(image,[3
10],'Sensitivity',0.89,'Edge',0.13,'ObjectPolarity','Bright');%
CAREFULLY ADJUST SENSITIVITY AND EDGE ACCORDING TO YOUR PICS mostly
good for croppind
%[centers,          radii]          =          imfindcircles(image,[3
8],'Sensitivity',0.89,'Edge',0.001);
% CAREFULLY ADJUST SENSITIVITY AND EDGE ACCORDING TO YOUR PICS with
crop criteria
%imgage=imclearborder(image);% removes the wall of the channel and
dots near the wall  croooooppp
figure(2);
imshow(image);
viscircles(centers, radii,'EdgeColor','b');
numpart=length(centers); %number of particles found in the pic
```

```
totalnumber=numpart+totalnumber;

str = sprintf('Number of Particles  Found=%f ,picture number=%f ',
numpart,picnum );
title(str)

%-----------------------------------------------------------------------

  % SECTION HISTOGRAM
%becareful  with  vector  centers-coordinates  vs  matlab  lines-
columns!they are
%opposite!
%a=size(img1);
b=size(centers);

   for p=1:b(1)

       % if round(centers(k,1))== i    && round(centers(k,2))==j

       %histogram(i,j)=     histogram(i,j)+1;     %loop this for all
pics in the other code

    histogram(  round(centers(p,2)),round(centers(p,1)  ))         =
histogram    (round(centers(p,2)),round(centers(p,1) ))   +1;

      end

%-----------------------------------------------------------------------
%SECTION 3 - CALCULATING EFFICIENCY FOR EACH PICTURE


%evaluation criteria of micromixer:
% n(k)=1-abs(  (c-0.5*numpart)/  (0.5*numpart)  )   ;

%-----------------------------------------------------------------------


% image(M) = mean2(image);%CROPPPPP150

   clc
%                 [centers,    radii]    =    imfindcircles(image,[2
8],'Sensitivity',0.89,'Edge',0.17,'ObjectPolarity','Bright');%
CAREFULLY ADJUST SENSITIVITY AND EDGE ACCORDING TO YOUR PICS mostly
good for cropping
%
%
% numparthalf=length(centers);
%      totalefficiency=totalefficiency+1-abs(           (numparthalf-
0.5*numpart)/(0.5*numpart))   ;
% % figure(2)
% % imshow(image);
% % viscircles(centers, radii,'EdgeColor','b');
end


    for cc=1:1024
        for dd=1:1376
            sumhisto=histogram(cc,dd)+sumhisto;
```

```
        end
    end


%-----------------------------------------------------------------------
% %SECTION 2D HISTOGRAM
% % histogram=fliplr(histogram);%2fores
% his=imrotate(histogram,-34.5);
% imshow(his);
%
% h = imfreehand; %draw something CROPPP
% M = ~h.createMask();%CROPPP
% his(M) =0;
% imshow(his);
%
% sizehis=size(his);
% histo2d= zeros (1,sizehis(2) );  %
%     for j= 1:sizehis(2)
% for i =1: sizehis(1)
%   histo2d(1,j)=histo2d(1,j)+ his(i,j);
%
%
% end
%
%     end


%-----------------------------------------------------------------------
```

Παράρτημα Β

Ο κώδικας σε FORTRAN που επεξεργάζεται τα δεδομένα από το πρόγραμμα INSIGHT 4G του εργαστηρίου παρατίθεται παρακάτω:

```
PROGRAM FR
    IMPLICIT INTEGER (K)
    DIMENSION VR(1302),X(100),RMS(50),ISN(50)
    DIMENSION VL(20) , SM(20) , UR(1302) , SUMU(1302), SUMV(1302)
    DIMENSION AVG1(1302),AVG2(1302) ,RMS1(1302),RMS2(1302),VEL1(1302)
    DIMENSION VF(1302),UF(1302) ,PIXELS1(1302),PIXELS2(1302),MM(1302)
    INTEGER M1,I,IST,I1, ITOT,J1,JSTART,NFSTART,NFEND,II,AA ,LKLK,J
    DIMENSION VEL2(1302)
    DOUBLE PRECISION DT,DX,DY,SCALX,IWIDTH,PI,VRMAX,XX,YY,UU,VV,VR,UR
    DOUBLE PRECISION VF,SM,PERCENT,UF,VM,UM,JSUM,ISUM,CC,DD,TIME,FREQ
    INTEGER III,II
    CHARACTER*150 DPATH,A,STRR,FMT
    CHARACTER*150 FILENAME,DIR
!     CHARACTER*40 DTFILE
      CHARACTER*300 FIRST ,SECOND,THIRD,FOURTH,FIFTH
      OPEN(5555,FILE='RMS.DAT')
      OPEN(9999,FILE='TIMESERIES.DAT')

    !OPEN(3,FILE='15OUT1.DAT')
    !OPEN(4,FILE='15OUT2.DAT')
    !OPEN(5,FILE='15FREQ.DAT')
    !OPEN(8,FILE='15A.DAT')
    ! DEPTH=15.
```

```
    ! IPOINT=20.


C**************** BASIC INPUT DATA *************************

    FREQ=4.83

    JSTART=1

    IST=1

          SCALX=3.125!pixel/micrometers

            DT=400!dt in microseconds

          DX=32.!half of the interrogation window

            DY=32.

       I1=42  !  2*dimension/(dimension  of  interogation  window)-1  ,1376,  interrogation
window:64x64

           J1=31!same for 1024

            ITOT=I1*J1

C************************CHANNEL GEOMETRY ******************************

       !   SMBASE=24.

    PI=ACOS(-1.)

    !FI=54.7*PI/180.

    ! IWIDTH=SMBASE+2.*DEPTH*TAN(PI/2.-FI)

    IWIDTH=300

C***************  64x64  IS  THE  DIMESNION  OF  THE  INTERRROGATION
WINDOW******************

    VRMAX=64./7.!criteria to drop a vector

    !VRMIN=0.01

    NFSTART=1

    NFEND=499! number of pics/files

    ! NFILES=NFEND-NFSTART+1
```

```
      OPEN(5000,FILE='OUTFILe.DAT')
      DO 55 I=1,ITOT

      SUMV(I)=0.
      SUMU(I)=0.
      MM(I)=0
      RMS1(I)=0.
      RMS2(I)=0.
      !PIXELS(I)=0.
      !PIXELS(I)=0.
55     CONTINUE
        ! READ (*,*) LKLK
         TIME=0.
         III=0
     DO 100 M1=1,499! LOOP FOR ALL FILES

      TIME=(M1-1)/FREQ
       III=III+1
     !DIR='C:\Users\Antony\Documents\ntua\thesis\CIRCLES\30 a split\'

       !FILENAME='2.DAT'
!   WRITE(*,*) STRR
      K0=M1/100000
     KA=M1-100000*K0
     K1=KA/10000
     KA=KA-10000*K1
     K2=KA/1000
```

```
      KA=KA-1000*K2
      K3=KA/100
      KA=KA-100*K3
      K4=KA/10
      K5=KA-10*K4

      FILENAME='dbsplit'//CHAR(48+K0)//CHAR(48+K1)//CHAR(48+K2)//
     *CHAR(48+K3)//CHAR(48+K4)//CHAR(48+K5)//'.T000.D000.P000.H000.L.vec
     *'
         OPEN(3000,FILE='NUMAVG.DAT')
       WRITE(3000,*) FILENAME
       !WRITE(*,*) FILENAME
        !read(*,*) lklk
       OPEN (M1,FILE=FILENAME)
C***************READ DATA **************************
        READ (M1,*)
      DO 10 I=1,ITOT
              READ(M1,*) XX,YY ,UU ,VV ,CON
          PIXELS1(I)= XX
          PIXELS2(I)= YY
      IF(CON.EQ.-1)THEN
         UR(I)=1000000.
         VR(I)=VV
          ELSE
      UR(I)=UU
      VR(I)=VV
         ENDIF
```

```
! IF(VR(I,J).LT.0.) GOTO 16
      IF((ABS(UR(I)).GT.VRMAX).OR.(ABS(VR(I)).GT.VRMAX))THEN
      GOTO 16
    ELSE
        MM(I)=MM(I)+1
         SUMU(I)=SUMU(I)+UR(I)
  SUMV(I)=SUMV(I)+VR(I)

    ENDIF
  IF ( (ABS(XX-992).LE.0.1).AND.(ABS(YY-255).LE.0.1) )THEN
  VEL1(III)=UR(I)
  VEL2(III)=VR(I)
 WRITE (9999,*) TIME ,VEL1(III), VEL2(III)
 ENDIF
  ! WRITE(2,*) SUMU, SUMV
C     WRITE(2,*) II,JJ,VR(II,JJ)
16    CONTINUE

     !WRITE(333,*) MM(I)
C**************COMPUTE AVERAGE FIELD based on the data of a file****************************************
10        CONTINUE
          CLOSE(M1)    !closing all files one at a time
100   CONTINUE

!AVG U, V CALCULATION
```

```
        DO 666 J=1,ITOT
            IF(MM(J).EQ.0) THEN
    UF(J)=0.
    VF(J)=0.
GOTO 11
            ENDIF
    UF(J)=1000.*SUMU(J)/(MM(J)*DT*SCALX) ! conversion of velocity by dividing by dt and pixel/distance number. velocity in mm/millisecond
            VF(J)=1000.*SUMV(J)/(MM(J)*DT*SCALX)
       !WRITE(*,*) UF(I)
       ! READ(*,*)LKLK
11     WRITE(5000,*)PIXELS1(J),PIXELS2(J),UF(J) ,VF(J),1        !,I,M1!XX YY UUF VF


666     CONTINUE
      CLOSE(5000)
    CLOSE(3000)
!RMS CALCULATION
OPEN(7777,FILE='NUMRMS.DAT')
            DO 1111 M1=1,499
       K0=M1/100000
    KA=M1-100000*K0
    K1=KA/10000
    KA=KA-10000*K1
    K2=KA/1000
    KA=KA-1000*K2
    K3=KA/100
    KA=KA-100*K3
```

```
      K4=KA/10
      K5=KA-10*K4

      FILENAME='dbsplit'//CHAR(48+K0)//CHAR(48+K1)//CHAR(48+K2)//
     *CHAR(48+K3)//CHAR(48+K4)//CHAR(48+K5)//'.T000.D000.P000.H000.L.vec
     *'

WRITE(7777,*) FILENAME
          OPEN (M1,FILE=FILENAME)
       READ (M1,*)
          DO 2222 J=1,ITOT

        READ(M1,*) XX,YY ,UU ,VV ,CON
               IF (CON.EQ.-1)THEN
        GOTO 2222
        ENDIF
               IF(MM(J).EQ.0) THEN
      RMS1(J)=0.
      RMS2(J)=0.
       GOTO 2222
       ENDIF

          IF((ABS(UU).GT.VRMAX).OR.(ABS(VV).GT.VRMAX))THEN
             GOTO 2222
           ENDIF
           RMS1(J)=RMS1(J)+ (UU/DT/SCALX*1000-UF(J))**2
        RMS2(J)=RMS2(J)+(VV/DT/SCALX*1000-VF(J))**2
```

```
2222      CONTINUE
          CLOSE(M1)
1111     CONTINUE

      DO 99   I=1,ITOT
              IF(MM(I).EQ.0) THEN
       RMS1(I)=0.
       RMS2(I)=0.
      GOTO 23
      ENDIF

       RMS1(I)=SQRT(RMS1(I)/MM(I))
       RMS2(I)=SQRT(RMS2(I)/MM(I))
23      WRITE(5555 ,*)PIXELS1(I),',',PIXELS2(I) ,',',RMS1(I),',',RMS2(I),   * ,',',1
99    CONTINUE
     CLOSE(7777)
       CLOSE(5555)
      !READ(*,*)   LKLK
      STOP
     ENDPROGRAM
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Applications of micromixing technology, Gi Seok Jeong,a Seok Chung,Chang-Beom Kima and Sang-Hoon Lee, Analyst, 2010, 135, 460–473
[2] Approximate mapping method for prediction of chaotic mixing in spatial-periodic microchannel H.M. Xiaa,b, C. Shua,∗, Y.T. Chewa, Z.P. Wangb, chemical engineering research and design 8 8 (2010) 1419–1426.
[3] Mixing in Microchannels Martin A Ewart Imperial College, London, SW7 2AZ
[4] Μηχανική των Ρευστών, Σωκράτης Τσαγγάρης, Αθήνα 2005.
[5] Particle image Velocimetry : A practical guide,Markus Raffel, Christian E. Willert, Steve T. Wereley, Jürgen Kompenhans
[6] Βιορευστομηχανική και Βιοιατρική τεχνολογία, Σωκράτης Τσαγγάρης ,Αθήνα 2004.
[7] Topologic mixing on a microfluidic chip Hao Chen and Jens-Christian Meinersa), APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 84, NUMBER 12 22 MARCH 2004
[8]Digital particle image velocimetry, theory and application,Jerry Westerweel, Delft University Press, 1993
[9]Micro and Nanoscale Fluid Mechanics,transport in microfluidic devices,Brian J.Kirby,Cambridge University Press
[10] M. St_ahl, B. L. Aslund and A. C. Rasmuson, AIChE J., 2001, 47,
1544–1560.
[11] S. Freitas, H. P. Merkle and B. Gander, J. Controlled Release, 2005,
102, 313–332.
[12] K. Mae, T. Maki, I. Hasegawa, U. Eto, Y. Mizutani and N. Honda,Chem. Eng. J., 2004, 101, 31–38.
[13] T. Sprogies, J. M. K€ohler and G. A. Groß, Chem. Eng. J., 2008, 135,
199–202.
[14] Y. Okubo, M. Toma, H. Ueda, T. Maki and K. Mae, Chem. Eng. J., 2004, 101, 39–48.
[15] T. Iwasaki and J. Yoshida, Macromolecules, 2005, 38, 1159–1163
[16] A. Nagaki, K. Kawamura, S. Suga, T. Ando, M. Sawamoto and
J. Yoshida, J. Am. Chem. Soc., 2004, 126, 14702–14703.
[17] R. D. Chambers and R. C. H. Spink, Chem. Commun., 1999,
883–884.
[18] S. Suga, A. Nagaki and J. Yoshida, Chem. Commun., 2003, 354–355
[19] D. J. Kim, H. J. Oh, T. H. Park, J. B. Choo and S. H. Lee, Analyst,
2005, 130, 293–298.
[20]Μαθήματα οπτικής ,Γιώργος Ασημέλλης,press Line(2005)
[21] K. S. Yun and E. Yoon, Biotechnol. Bioprocess Eng., 2004, 9, 86–92.
[22] A. G. Hadd, D. E. Raymond, J. W. Halliwell, S. C. Jacobson and J. M. Ramsey, Anal. Chem., 1997, 69, 3407–3412
[23] W. Tseng, J. Lin, W. Sung, S. Chen and G. Lee, J. Micromech. Microeng., 2006, 16, 539.
[24] M. Hashimoto, F. Barany, F. Xu and S. A. Soper, Analyst, 2007, 132, 913–921
[25] S. J. Kim, F. Wang, M. A. Burns and K. Kurabayashi, Anal. Chem., 2009, 81, 4510–4516
[26] M. Heule and A. Manz, Lab Chip, 2004, 4, 506–511
[27] H. Lu, M. A. Schmidt and K. F. Jensen, Lab Chip, 2005, 5, 23–29
[28] L. Johansson, S. Johansson, F. Nikolajeff and S. Thorslund, Lab Chip, 2009, 9, 297–304
[29] X. Chen, D. Cui, C. Liu, H. Li and J. Chen, Anal. Chim. Acta, 2007, 584, 237–243
[30] H. Roder and K. Wuthrich, Proteins: Struct., Funct., Genet., 1986, 1, 34–42
[31] C. K. Chan, Y. Hu, S. Takahashi, D. L. Rousseau, W. A. Eaton and J. Hofrichter, Proc. Natl. Acad. Sci., 1997, vol. 94
[32] O. Bilsel, C. Kayatekin, L. A.Wallace and C. R. Matthews, Rev. Sci. Instrum., 2005, 76, 014302
[33] A. C. Apetri, W. K. Surewicz, K. Maki and H. Roder, J. Am. Chem.

Soc., 2006, 128, 11673
[34] S. Ahola, F. Casanova, J. Perlo, K. M€unnemann, B. Bl€umich and
S. Stapf, Lab Chip, 2006, 6, 90–95.
[35] P. Hinsmann, J. Frank, P. Svasek, M. Harasek and B. Lendl, Lab
Chip, 2001, 1, 16–21
[36] S. E. Barnes, Z. T. Cygan, J. K. Yates, K. L. Beers and E. J. Amis,
Analyst, 2006, 131, 1027–1033
[37] In situ Raman spectroscopy to monitor the hydrolysis of acetal in microreactors Guenter Rinke , Angela Ewinger , Sigrid Kerschbaum , Monika Rink, Microfluid Nanofluid (2011) 10:145–153
[38] Digital Micro PIV (μPIV) and Velocity Profiles ,*In Vitro* and *In Vivo*, Aristotle G. Koutsiaris
[39] Experimental investigation of liquid–liquid mixing in T-shape micro-mixers using _-LIF and _-PIV ,Marko Hoffmann∗, Michael Schluter, Norbert Rabiger, Chemical Engineering Science 61 (2006) 2968 – 2976
[40] Meinhart, C.D., Wereley, S.T., Gray, M.H.B., 2000. Volume illumination for
two-dimensional particle image velocimetry. Measurement Science and
Technology 11, 809–814.
[41] Santiago J.G., Wereley S.T., Meinhart C.D., Beebe D.J., Adrian R.J., 'A particle image velocimetry system for microfluidics', Experiments in Fluids, Volume 25, Issue 4, 316-319 (1998)
[42] Mixing efficiency of Y-type micromixers with different angles, Shou-Shing Hsieh ⇑, Jyun-Wei Lin, Jyun-Hong Chen, International Journal of Heat and Fluid Flow 44 (2013) 130–139
[43] μ-PIV study of the formation of segmented flowin microfluidic T-junctions ,Volkert van Steijna,∗, Michiel T. Kreutzerb, Chris R. Kleijna, Chemical Engineering Science 62 (2007) 7505 – 7514
[44]Micromixers , Fundamentals, design and Fabrication, Nam-Teung Nguyen,William Andrew.
[45] Experimental Validation of flow and Mass Transport in an Electrically- excited Micromixer(dissertation), Hamid Farangis Zadeh, Institut fur Kern und Energietechnik, 2005.
[46] Deshmukh A, Liepmann D, Pisano A (2000) Characterization of a micro-mixing, pumping, and valving system. In: Proceedings 11th international conference on solid-state sensor and actuators (Transducers'01), Munich, Germany, 10–14 June 2001, pp 950–953
[47] Glasgow I, Aubry N (2003) Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing. Lab Chip 3(2):114–120
[48] Oddy M, Santiago J, Mikkelsen J (2001) Electrokinetic instability micromixing. Anal Chem 73(24):5822–5832
[49] Yang Z, Goto H, Matsumoto M, Maeda R (2000) Active micromixer for microfluidic
systems using lead-zirconate-titanate (PZT)-generated ultrasonic vibration. Electrophoresis 21(1):116–119
[50] Micro PIV measurement of two-fluid flow with different refractive indices B J Kim, Y Z Liu, and H J Sung, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 1097–1103
[51] S.H. Wong, M.C.L. Ward and C.W. Wharton, ''Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer,''
Sensors and Actuators B: Physical, pp. 359–379, 2004
[52]Branebjerg J et al 1996 Fast mixing by lamination Proc. MEMS'96, 9th IEEE Int. Workshop Micro Electromechanical System (San Diego, CA) pp 441–6

[53]Munson M S and Yager P 2004 Simple quantitative optical method for monitoring the extent of mixing applied to a novel microfluidic mixer Anal. Chim. Acta 507 63–71

[54]He B et al 2001 A picoliter–volume mixer for microfluidic analytical systems Anal. Chem. 73 1942–7

[55] Cha J, Kim J, Ryu S, Park J, Jeong Y, Park S, Kim H, Chun K (2006) A highly efficient 3D micromixer using soft PDMS bonding. J Micromech Microeng 16:1778
[56] Bringer M, Gerdts C, Song H, Tice J, Ismagilov R (1818) Microfluidic systems for chemical kinetics that rely on chaotic mixing in droplets. Philos Trans R Soc Lond A Math Phys. Eng .Sci 362:1087
[57] Knight J, Vishwanath A, Brody J, Austin R (1998) Hydrodynamic focusing on a silicon chip:
mixing nanoliters in microseconds. Phys Rev Lett 80(17):3863–3866
[58] A biological seeding particle approach for l-PIV measurements of a fluid flow provoked by microorganisms Wojciech Kowalczyk , Bogumila Ewelina Zima Æ Antonio Delgado, Exp Fluids (2007) 43:147–150
[59] Knight J, Vishwanath A, Brody J, Austin R (1998) Hydrodynamic focusing on a silicon chip:
mixing nanoliters in microseconds. Phys Rev Lett 80(17):3863–3866
[60] Willert C., Stasicki, B., Raffel M., Kompenhans J. (1995): A digital
video camera for application of particle image velocimetry in
high-speed flows, Proc. SPIE 2546 *Intl. Symp. on Optical Science,*
Engineering and Instrumentation, 9–14 July, San Diego (USA),
pp.124–134.
[61] Willert, C. (1996): The fully digital evaluation of photographic PIV
recordings, *Appl. Sci. Res.*, **56**, pp. 79–102.
[62] Design and test of a passive planar labyrinth micromixer for rapid fluid mixing ,Peng Li ,Jeremy Cogswell b, Mohammad Faghri , Sensors and Actuators B 174 (2012) 126–132
[63] A labyrinth split and merge micromixer for bioanalytical
applications,Ioanna N. Kefala,Vasileios E. Papadopoulos, · Georgia Karpou,
George Kokkoris, ·George Papadakis1 · Angeliki Tserepi, Microfluid Nanofluid,DOI
10.1007/s10404-015-1610-4
[64] Jing-Tang Yang,a_ Yu-Hsuan Lai, Wei-Feng Fang, and Miao-Hsing Hsu
Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan,
BIOMICROFLUIDICS **4**, 014109 _2010
[65] Phillip M. Ligrani ,A Study of Dean Vortex Development and Structure in a Curved Rectangular Channel With Aspect Ratio of 40 at Dean Numbers up to 430,NASA,1994.
[66] Koutsiaris A. K., Mathioulakis D.S., Tsangaris S., Micro scope PIV for velocity-field measurement of particle suspension flowing inside glass capillaries. Meas. Sci. Technol., Vol. 10, pp 1037-1046, 1999