

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ Particle Image
Velocimetry (PIV)**

**ΤΡΙΚΚΑΛΙΩΤΗΣ ΑΣΤΕΡΙΟΣ
ΜΟΣΚΟΒΕΛΗΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Dr ΤΟΜΠΟΥΛΙΔΗΣ ΑΝΑΝΙΑΣ**

ΚΟΖΑΝΗ (ΙΟΥΛΙΟΣ, 2014)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας εργαστηριακής διάταξης για τη μελέτη δίνης που παράγεται από μικρής διαμέτρου προπέλα με την οπτική μέθοδο Particle Image Velocimetry (PIV). Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σχετικά με την PIV μέθοδο καθώς και κάποια ιστορική αναφορά σχετικά με αυτή. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη, ο εργαστηριακός εξοπλισμός και η διαδικασία του πειράματος. Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων και στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Σκοπός της εργασίας ήταν να εγκαταστήσουμε και να συγχρονίσουμε τον εξοπλισμό του εργαστηρίου (λέιζερ, κάμερα, Η/Υ) και να δείξουμε, με μια απλή εφαρμογή, πως πραγματοποιείται η PIV ανάλυση. Το βασικό συμπέρασμα όλης της εργασίας είναι πως καταφέραμε να μετρήσουμε και να απεικονίσουμε την ροή, καθώς επίσης να μετρήσουμε την κινητική ενέργεια και τις τάσεις που αναπτύσσονται στη ροή.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Περιεχόμενα.....	2
Κεφάλαιο 1: Μέθοδοι οπτικών μετρήσεων	
1.1 Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV).....	4
1.1.1 Ιστορικά στοιχεία για PIV.....	5
1.1.2 Εξοπλισμός και Συσκευές PIV.....	6
1.1.3 Ανάλυση της τεχνικής PIV.....	9
1.1.4 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα PIV.....	11
1.1.5 Πιο σύνθετες δομές PIV.....	13
1.1.6 Εφαρμογές PIV.....	17
Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός και Υλοποίηση εργαστηριακής διάταξης για τη μελέτη δίνης που παράγεται από μικρής διαμέτρου προπέλα με τη μέθοδο PIV	
2.1 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου.....	18
2.1.1 Συγχρονισμός του λέιζερ για διπλό παλμό.....	22
2.1.2 Βαθμονόμηση της κάμερας.....	28
2.1.3 Χρονισμός παλμών και κάμερας.....	30
2.2 Διαδικασία πειράματος.....	32
Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων	
3.1 Λογισμικό Davis Flowmaster 7.2.....	34
3.1.1 Επιλογή μεθόδου συσχέτισης.....	34
3.1.2 Η αρχή της cross-correlation και το μαθηματικό υπόβαθρο.....	35
3.1.3 Μετασχηματισμός Fourier FFT.....	38
3.1.4 Παράθυρο έρευνας (interrogation window).....	38
3.2 Φίλτρα.....	38
3.2.1 Γραμμικά και μη γραμμικά φίλτρα.....	39
3.2.1.1 Φίλτρο εξομάλυνσης.....	39
3.2.1.2 Φίλτρο διάβρωσης και διαστολής.....	40

3.3 Υπολογισμός διανυσματικού πεδίου PIV με το λογισμικό Flowmaster 7.2 της Davis.....	40
3.3.1 Προ-επεξεργασία εικόνας.....	41
3.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων διανυσμάτων.....	41
3.3.3 Επεξεργασία διανυσμάτων.....	43
3.4 Υπολογισμός διανυσματικού και βαθμωτού πεδίου.....	44
3.5 Τυρβώδης Ροή, Διατμητικές και Ορθές Τάσεις.....	46
3.5.1 Εξισώσεις της τυρβώδους ροής.....	47
 Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων	
4.1 Πειραματική διάταξη 1 – Ευθεία ροή.....	50
4.1.1 Διανυσματικό πεδίο στις 1000 και 3000 εικόνες.....	51
4.1.2 Μέση Κινητική Ενέργεια.....	55
4.1.3 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια.....	57
4.1.4 Διατμητικές και Ορθές Τάσεις.....	59
4.2 Πειραματική διάταξη 2 – Ροή κάθετη στη διεύθυνση της κάμερας (δίνη).....	63
4.2.1 Διανυσματικό πεδίο στις 1000 και 3000 εικόνες.....	63
4.2.2 Μέση Κινητική Ενέργεια.....	67
4.2.3 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια.....	69
4.2.4 Διατμητικές και Ορθές Τάσεις.....	71
Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	75

Εισαγωγή

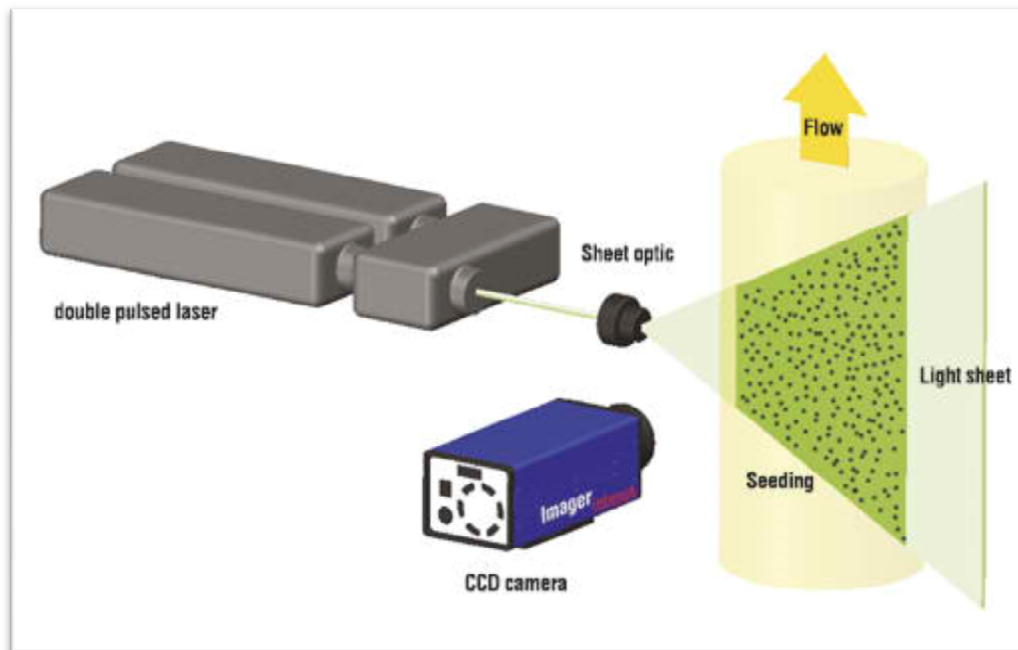
Κεφάλαιο 1: Μέθοδοι Οπτικών Μετρήσεων

1.1 Η μέθοδος Particle Image Velocimetry (PIV)

Η Particle Image Velocimetry (PIV) είναι μια οπτική μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας του ρευστού που χρησιμοποιείται κυρίως στην έρευνα. Το ρευστό τροφοδοτείται με σωματίδια τα οποία, για τους σκοπούς της PIV, πρέπει γενικά να ακολουθούν πιστά τη δυναμική ροή. Αυτή η κίνηση των εν λόγω σωματιδίων είναι που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα της ροής που μελετάται. Άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ροής είναι οι Laser Doppler velocimetry και Hot-wire anemometry. Η κύρια διαφορά μεταξύ της PIV και των παραπάνω τεχνικών είναι ότι η PIV παράγει δισδιάστατα (2D) διανυσματικά πεδία, ενώ οι άλλες τεχνικές μετρούν την ταχύτητα σε ένα σημείο.

Για την τεχνική PIV, η συγκέντρωση των σωματιδίων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός μεμονωμένων σωματιδίων σε μια εικόνα. Όταν η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι τόσο χαμηλή ώστε να είναι δυνατό να ακολουθήσουμε ένα μεμονωμένο σωματίδιο τότε λέγεται Particle tracking velocimetry (ροομετρία παρακολούθησης σωματιδίων), ενώ η Laser speckle velocimetry χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι τόσο υψηλή που είναι δύσκολο να παρατηρήσουμε μεμονωμένα σωματίδια σε μια εικόνα.

Ένας τυπικός εξοπλισμός PIV αποτελείται από μια κάμερα (συνήθως μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή με ένα τσιπ CCD σε σύγχρονα συστήματα), ένα λέιζερ υψηλής ενέργειας, για παράδειγμα ένα διπλού παλμού Nd: YAG laser ή ένα λέιζερ ατμών χαλκού, μία οπτική διάταξη για τη μετατροπή του φωτός λέιζερ σε ένα λεπτό (laser sheet) «φύλλο φωτός», συνήθως χρησιμοποιούνται κυλινδρικοί και σφαιρικοί φακοί, μία μονάδα συγχρονισμού που δίνει το εξωτερικό έναυσμα για τον έλεγχο της κάμερας και του λέιζερ, τα τροφοδοτικά σωματίδια και το ρευστό το οποίο ερευνάται. Ένα καλώδιο οπτικών ινών ή «υγρό οδηγητικό φως» (liquid light guide) συνδέει συχνά το λέιζερ με τη διάταξη του φακού [1].



Σχήμα 1.1: Τυπική διάταξη PIV [3]

1.1.1 Ιστορικά στοιχεία για PIV

Αν και η μέθοδος της προσθήκης σωματιδίων ή αντικειμένων σε ένα ρευστό προκειμένου να παρατηρηθεί η ροή του, ενδέχεται να έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς μέσα στους αιώνες, καμία διαρκή εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι γνωστή. Ο πρώτος που χρησιμοποίησε σωματίδια για τη μελέτη ρευστών συστηματικότερα ήταν ο Ludwig Prandtl, που το έκανε στις αρχές του 20ου αιώνα.

Η μέθοδος Laser Doppler Velocimetry προϋπήρχε της PIV σαν ψηφιακό σύστημα λέιζερ, τέτοιας ανάλυσης, ώστε να γίνει ευρέως γνωστή για την έρευνα και τη βιομηχανική χρήση. Σε θέση να λαμβάνει όλες τις μετρήσεις ταχύτητας ενός ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σημείο, μπορεί να θεωρηθεί άμεσος προκάτοχος του δισδιάστατου PIV. Η τεχνική PIV βρήκε τις ρίζες της στην Laser speckle velocimetry, μια τεχνική που πολλές ομάδες άρχισαν να πειραματίζονται με αυτή στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 διαπιστώθηκε ότι ήταν πιο επωφελής να μειωθεί η συγκέντρωση των σωματιδίων σε επίπεδα όπου θα μπορούσαν να παρατηρηθούν μεμονωμένα σωματίδια. Σε αυτές τις υψηλότερες πυκνότητες σωματιδίων παρατηρήθηκε ότι ήταν πιο εύκολο να μελετηθεί η ροή αν είχε χωριστεί σε πολύ μικρές περιοχές, που θα μπορούσαν να αναλυθούν χωριστά για τη δημιουργία μίας ταχύτητας ανά περιοχή. Οι εικόνες συνήθως καταγράφονταν χρησιμοποιώντας αναλογικές κάμερες και απαιτούνταν τεράστια υπολογιστική δύναμη και χρόνος προκειμένου να αναλυθούν.

Με την αυξανόμενη δύναμη των υπολογιστών και την ευρεία χρήση των καμερών CCD έγινε δελεαστικό να κάνουμε τα πάντα ψηφιακά. Οι συνέπειες ενός τέτοιου εγχειρήματος αναλύθηκαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 και με την πάροδο του χρόνου το ψηφιακό PIV έγινε όλο και περισσότερο κοινό, σε σημείο που σήμερα κυριαρχεί απόλυτα [1].

1.1.2 Εξοπλισμός και Συσκευές PIV

- Τροφοδοσία σωματιδίων (Seeding Particles)

Η τροφοδοσία των σωματιδίων είναι μια εγγενώς κρίσιμη συνιστώσα του συστήματος PIV. Ανάλογα με το ρευστό που μελετάται, τα σωματίδια πρέπει να ακολουθούν τη ροή αρκετά ικανοποιητικά για την ανάλυση PIV. Αν και η επιλογή των σωματιδίων εξαρτάται από τη φύση του ρευστού και της ροής, γενικά για τις macro PIV έρευνες χρησιμοποιούνται γυάλινες σφαίρες, πολυστυρένιο, οξειδία αλουμινίου ή σταγονίδια πετρελαίου (εφόσον το ρευστό αντικείμενο της έρευνας είναι αέριο). Πρέπει να έχουν εγγενώς ιδιότητες σκέδασης φωτός, έτσι ώστε το «φύλλο λέιζερ» που προσπίπτει στη ροή του ρευστού να σκεδάζεται μακριά από τα σωματίδια και να διασκορπιστεί προς την κάμερα.

Τα σωματίδια είναι συνήθως της τάξης των 10 έως 100 μm, ή ακόμα και πιο μικρά αναλόγως της εφαρμογής. Όσον αφορά το μέγεθος, τα σωματίδια πρέπει να είναι αρκετά μικρά ώστε ο χρόνος απόκρισης των σωματιδίων με την κίνηση του ρευστού να είναι αρκετά μικρός για να ακολουθούν με ακρίβεια τη ροή, αλλά αρκετά μεγάλος για να σκορπίσουν σημαντική ποσότητα του φωτός του λέιζερ. Εξαιτίας του μικρού μεγέθους των σωματιδίων, η κίνηση των σωματιδίων κυριαρχείται από δύναμη αντίστασης “Stokes” και φαινόμενα ηρεμίας ή ανύψωσης. Κατά προσέγγιση τα σωματίδια είναι σαν σφαιρικά μόρια με πολύ χαμηλό αριθμό Reynolds, έτσι η ικανότητα των σωματιδίων να ακολουθούν τη ροή του ρευστού είναι ακριβώς ανάλογη με τη διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ των μορίων και του ρευστού και ακριβώς ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου των σωματιδίων. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$U_p(t) = U \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \right]$$

όπου U_p η ταχύτητα του σωματιδίου, U η ταχύτητα της ροής, t ο χρόνος και τ_s ο χρόνος ηρεμίας του σωματιδίου.

$$\tau_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu}$$

όπου d_p η διάμετρος του σωματιδίου, ρ_p η πυκνότητα του σωματιδίου και μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Ο λόγος U_p/U σε σχέση με το χρόνο δείχνει πόσο καλά ακολουθούν τα σωματίδια τη ροή [3]. Το σκεδασμένο φως από τα σωματίδια κυριαρχείται από σκέδαση Mie και γι' αυτό είναι ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου των σωματιδίων. Επομένως, το μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να είναι κατάλληλα ισορροπημένο ώστε να βγει αρκετό φως για να απεικονιστούν με ακρίβεια όλα τα σωματίδια μέσα στο «επίπεδο φύλλο λέιζερ», αλλά αρκετά μικρό ώστε να ακολουθήσουν με ακρίβεια τη ροή.

Ο μηχανισμός τροφοδότησης σωματιδίων πρέπει να είναι επίσης κατάλληλα σχεδιασμένος έτσι ώστε η ροή να τροφοδοτείται επαρκώς χωρίς να διαταράσσεται υπερβολικά.

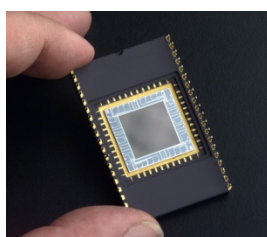
- Κάμερα (Camera)

Για να εκτελέσουμε την ανάλυση PIV στη ροή, απαιτούνται δύο εκθέσεις του λέιζερ στην κάμερα από τη ροή. Αρχικά, με την αδυναμία των καμερών να καταγράψουν πολλαπλές εικόνες σε υψηλές ταχύτητες, δύο εκθέσεις καταγράφονταν στην ίδια εικόνα και αυτή η ενιαία εικόνα χρησιμοποιούνταν για τον προσδιορισμό της ροής. Μια διαδικασία που ονομάζεται αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση αυτή. Ωστόσο, ως αποτέλεσμα της αυτοσυσχέτισης η κατεύθυνση της ροής δεν είναι σαφής, καθώς δεν είναι ξεκάθαρο ποια είναι τα σημεία των σωματιδίων από τον πρώτο παλμό και ποια είναι από το δεύτερο. Από τότε αναπτύχθηκαν ταχύτερες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές με CCD¹ τσιπ που μπορούν να συλλαμβάνουν δύο καρέ σε υψηλή ταχύτητα με διαφορά μερικές εκατοντάδες ns μεταξύ των εικόνων. Αυτό επέτρεψε κάθε έκθεση να απομονωθεί στη δικιά του εικόνα για πιο ακριβή ανάλυση πολλαπλής συσχέτισης (cross-correlation). Ο περιορισμός των τυπικών καμερών είναι ότι αυτή η γρήγορη ταχύτητα περιορίζεται σε ένα ζευγάρι λήψεων. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε ζευγάρι λήψεων, πρέπει να

¹ Ο ανιχνευτής **charge-coupled device (CCD)**, που μεταφράζεται ως «συσκευή (ή διάταξη) συζευγμένου φορτίου», είναι ένας καταχωρητής ολίσθησης, μια πολύ μικρή πλάκα πάνω στην οποία βρίσκονται διατεταγμένα έως και μερικά εκατομμύρια στοιχεία ενός ημιαγωγίμου υλικού ευαίσθητου στο φως (συνήθως πυριτίου) και χρησιμεύει για τη λήψη ειδώλων (φωτογραφιών και βίντεο). Όταν ο ανιχνευτής εκτίθεται σε μια φωτεινή πηγή, σε καθένα απ' αυτά τα στοιχεία απελευθερώνονται ηλεκτρικά φορτία (ηλεκτρόνια) σε ευθεία αναλογία με τα φωτόνια που πέφτουν πάνω στο στοιχείο. Μετά την έκθεση στο φως ο αριθμός των συγκεντρωμένων ηλεκτρονίων στο κάθε στοιχείο καθορίζει τη φωτεινότητα του αντίστοιχου σημείου πάνω στην οθόνη του υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο ανιχνευτής CCD. Έτσι η φωτογραφημένη εικόνα ανασυντίθεται σημείο προς σημείο στην οθόνη.

μεταφερθεί στον υπολογιστή πριν από ένα άλλο ζευγάρι μπορεί να ληφθεί. Τυπικές κάμερες μπορούν να λάβουν μόνο ένα ζευγάρι λήψεων με πολύ πιο αργή ταχύτητα. Υψηλής ταχύτητας κάμερες CCD είναι διαθέσιμες, αλλά είναι πολύ πιο ακριβές. Τα πλεονεκτήματα του CCD σε σχέση με τις φωτογραφικές πλάκες είναι τα εξής:

1. Μεγαλύτερη ευαισθησία - καταφέρνουν να «συλλαμβάνουν» σχεδόν το 60% των φωτονίων που πέφτουν πάνω τους, έναντι μόνο 5% των πλακών, άρα απαιτείται λιγότερος χρόνος για την πόζα.
2. Δυνατότητα ψηφιακής επεξεργασίας των φωτογραφιών. Η κεφαλή που περιέχει τον αισθητήρα CCD (Σχήμα 1.2) είναι φτιαγμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να ενσωματώνεται πάνω στο φακό.



Σχήμα 1.2: Αισθητήρας CCD [1]

- Λείζερ και οπτικά (Laser and Optics)

Όταν εφαρμόζεται μακροσκοπικά η τεχνική PIV, τα λέιζερ κυριαρχούν λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν υψηλής ισχύος ακτίνες φωτός με περιορισμένη διάρκεια παλμού. Αυτό παράγει μικρούς χρόνους έκθεσης για κάθε εικόνα. Τα Nd:YAG λέιζερ, που χρησιμοποιούνται συνήθως στην PIV, εκπέμπουν κυρίως στο μήκος κύματος των 1064 nm και στις αρμονικές του (532, 266, κλπ.) Για λόγους ασφαλείας, η εκπομπή λέιζερ συνήθως φιλτράρεται ώστε να απομονωθούν οι αρμονικές των 532 nm (αυτό είναι το πράσινο φως, η μόνη αρμονική ορατή με γυμνό μάτι).

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από τον συνδυασμό σφαιρικών και κυλινδρικών φακών. Ο κυλινδρικός φακός επεκτείνει το λέιζερ σε ένα επίπεδο, ενώ ο σφαιρικός φακός συμπιέζει το επίπεδο σε ένα λεπτό φύλλο. Αυτό είναι κρίσιμης σημασίας, καθώς η τεχνική PIV γενικά δεν μπορεί να μετρήσει κίνηση κάθετη στο «φύλλο λέιζερ» και ιδανικά αυτό εξαλείφεται με τη διατήρηση ενός εντελώς 2-διαστάσεων «φύλλο λέιζερ». Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι ο σφαιρικός φακός, δεν μπορεί να συμπιέσει το φύλλο λέιζερ σε ένα πραγματικό 2-διαστάσεων επίπεδο. Το ελάχιστο πάχος είναι της τάξης του μήκους κύματος του φωτός του λέιζερ και εμφανίζεται σε μια πεπερασμένη απόσταση από την εγκατάσταση οπτικών (το κεντρικό σημείο του

σφαιρικού φακού). Αυτή είναι η ιδανική τοποθεσία για να θέσουμε την περιοχή ανάλυσης του πειράματος.

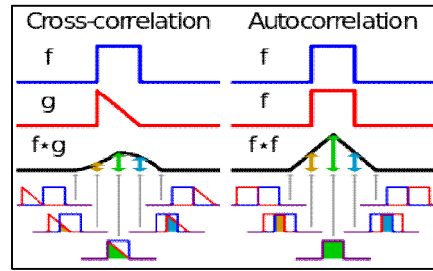
Ο σωστός φακός για τη φωτογραφική μηχανή θα πρέπει επίσης να επιλέγεται για τη σωστή εστίαση και να απεικονίζει τα σωματίδια εντός της περιοχής έρευνας.

- Διάταξη συγχρονισμού (Synchronizer)

Η διάταξη συγχρονισμού δίνει μία τάση που αποτελεί το εξωτερικό έναυσμα (external trigger) τόσο για την κάμερα (κάμερες) όσο και για το λέιζερ. Ενώ κατά το παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί αναλογικά συστήματα, με τη μορφή φωτοαισθητήρα, με περιστρεφόμενο διάφραγμα και μια πηγή φωτός, τα περισσότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ψηφιακά. Η διάταξη συγχρονισμού ελέγχεται από έναν υπολογιστή και μπορεί να δώσει το χρονοδιάγραμμα του κάθε καρέ της ακολουθίας της κάμερας CCD σε συνδυασμό με την ενεργοποίηση του λέιζερ με χρονική ακρίβεια 1 ns. Έτσι, ο χρόνος μεταξύ κάθε παλμού του λέιζερ και η τοποθέτηση της βολής του λέιζερ σε σχέση με το χρονοδιάγραμμα της φωτογραφικής μηχανής μπορεί να είναι απόλυτα ελεγχόμενος. Η γνώση αυτού του χρόνου είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι είναι απαραίτητο να καθοριστεί η ταχύτητα του ρευστού στην ανάλυση της τεχνικής PIV. Αυτόνομες ηλεκτρονικές διατάξεις συγχρονισμού, που ονομάζονται ψηφιακές γεννήτριες καθυστέρησης, προσφέρουν μεταβλητό χρόνο ανάλυσης από 250 ps έως μερικά ms. Με αρκετά κανάλια συγχρονισμού, μπορεί να ελέγχει πολλές «πηγές φωτός» καθώς και να προβλέπει πολλαπλά ανοίγματα της κάμερα [1].

1.1.3 Ανάλυση της τεχνικής PIV

Οι εικόνες χωρίζονται σε μεγάλο αριθμό τομέων, ή παράθυρα. Στη συνέχεια είναι δυνατό να υπολογιστεί ένα διάνυσμα μετατόπισης για κάθε παράθυρο με τη βοήθεια της επεξεργασίας σήματος και με τις τεχνικές autocorrelation ή cross-correlation (Σχήμα 1.3). Αυτό μετατρέπεται σε ταχύτητα χρησιμοποιώντας το χρονικό διάστημα μεταξύ της βολής του λέιζερ και το φυσικό μέγεθος του κάθε pixel στην κάμερα. Το μέγεθος του παραθύρου μελέτης (interrogation window) θα πρέπει να επιλέγει έτσι ώστε να χωράνε κατά μέσο όρο τουλάχιστον 6 σωματίδια ανά παράθυρο [1].



Σχήμα 1.3: Οπτική σύγκριση μεταξύ της cross-correlation και της autocorrelation

Για συνεχείς συναρτήσεις f και g , με εφαρμογή του αλγορίθμου της FFT (Fast Fourier Transform, μετατροπή των συναρτήσεων στο φασματικό πεδίο) η cross-correlation ορίζεται ως:

$$(f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt$$

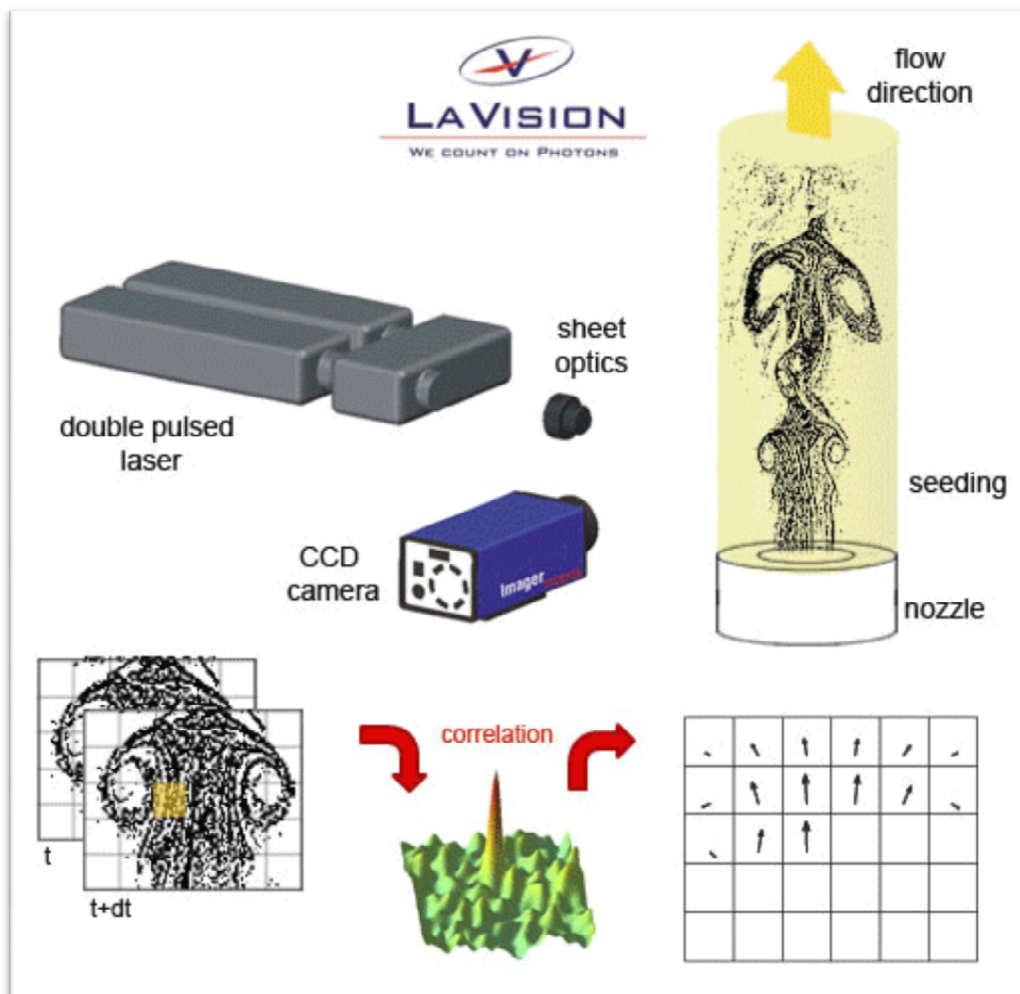
Στην autocorrelation, η οποία είναι η cross-correlation του σήματος με τον εαυτό της, θα υπάρχει πάντα μια κορυφή σε υστέρηση μηδέν εκτός και αν το σήμα είναι ένα ασήμαντο μηδενικό σήμα. Η autocorrelation ορίζεται ως:

$$(f \star f^*)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + \tau)f^*(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f^*(t - \tau)d$$

όπου f^* ο συζυγής μιγαδικός και τ η χρονική υστέρηση.

Για την ακριβή ανάλυση PIV, είναι ιδανικό ότι η περιοχή της ροής που μας ενδιαφέρει θα πρέπει να παρουσιάζει μετατόπιση σωματιδίων κατά μέσο όρο στο $\frac{1}{4}$ του παραθύρου που μελετάται (interrogation window). Για παράδειγμα 8 pixels όταν το interrogation window είναι 32x32 pixels. Αυτός είναι ένας συμβιβασμός που γίνεται διότι σε ένα μεγάλο διάστημα του χρόνου θα μπορούσαν τα σωματίδια να κινηθούν πέρα από το πλαίσιο της εικόνας με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο που μετακινήθηκε το interrogation window, ή από την άλλη σε ένα μικρότερο διάστημα του χρόνου δεν θα μπορούσε να εντοπιστεί τυχόν μετατόπιση των σωματιδίων εντός της ροής [1].

Το διάχυτο φως από κάθε σωματίδιο θα πρέπει να είναι της τάξεως των 2 έως 4 pixels σε ολόκληρη την εικόνα. Αν είναι πολύ μεγάλη μια περιοχή που καταγράφεται, τότε μειώνεται το μέγεθος των σωματιδίων της εικόνας και ενδέχεται να προκύψει λάθος εντοπισμού μεγίστου της συνάρτησης συσχέτισης (peak-locking) με την απώλεια των επιμέρους pixels. Υπάρχουν μέθοδοι για να ξεπεραστεί αυτό το φαινόμενο, αλλά απαιτούν κάποια επιπλέον εργασία [1]. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη με όλες τις συσκευές για την PIV ανάλυση.



Σχήμα 1.4: Ανάλυση PIV [3]

1.1.4 Πλεονεκτήματα / Μειονεκτήματα PIV

- Πλεονεκτήματα

Η μέθοδος είναι σε μεγάλο βαθμό μη παρεμβατική. Η προσθήκη κατάλληλων σωματιδίων δεν προκαλούν γενικά σημαντικές στρεβλώσεις στη ροή του ρευστού.

Με τις οπτικές μετρήσεις δεν χρειάζονται σωλήνες pitot, ανεμόμετρα Hotwire και γενικά διάφοροι μετρητές παροχής. Η μέθοδος είναι ικανή να μετράει μια ολόκληρη δισδιάστατη διατομή του πεδίου ροής.

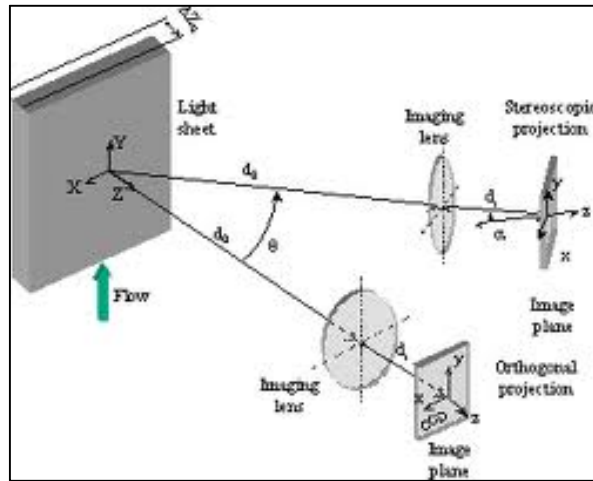
Με την υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων επιτυγχάνεται η παραγωγή μεγάλου αριθμού ζευγαριών εικόνων που, σε έναν προσωπικό υπολογιστή μπορούν να αναλυθούν σε πραγματικό ή μεταγενέστερο χρόνο, καθώς επίσης μπορεί να γίνεται συχνή και συνεχής ενημέρωση.

Η τιμές μετατόπισης των pixels επιτρέπουν υψηλό βαθμό ακρίβειας, δεδομένου ότι κάθε δiάνυσμα είναι ο στατιστικός μέσος όρος για πολλά σωματίδια μέσα σε ένα συγκεκριμένο τετράγωνο «παράθυρο». Η μετατόπιση μπορεί τυπικά να είναι ακριβής στο 10% του ενός pixel στο επίπεδο της εικόνας.

- Μειονεκτήματα

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα σωματίδια εξαιτίας της πυκνότητά τους, δεν ακολουθούν απόλυτα την κίνηση του ρευστού (αέριο / υγρό). Αν τα πειράματα γίνονται π.χ. στο νερό, είναι εύκολο να βρεθούν πολύ φθηνά σωματίδια (π.χ. πλαστική σκόνη με διάμετρο περίπου 60 μm) με πυκνότητα ίδια με αυτή του νερού. Εάν η πυκνότητα εξακολουθεί να μην ταιριάζει, η πυκνότητα του ρευστού μπορεί να προσαρμόζεται με την αύξηση / μείωση της θερμοκρασίας του. Αυτό οδηγεί σε μικρές αλλαγές στον αριθμό Reynolds, έτσι η ταχύτητα του ρευστού ή το μέγεθος του πειραματικού αντικείμενου πρέπει να αλλάξει.

Η PIV εν γένει δεν είναι μέθοδος μέτρησης στοιχείων κατά μήκος του άξονα z-(με κατεύθυνση προς / από την κάμερα). Αυτά τα στοιχεία δεν θα χαθούν, αλλά θα εισάγουν παρεμβολές στα στοιχεία των x / y-συνιστωσών που προκαλούνται από παράλλαξη. Τα προβλήματα αυτά δεν υπάρχουν σε Στερεοσκοπικό PIV, το οποίο χρησιμοποιεί δύο κάμερες για τη μέτρηση και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας (Σχήμα 1.5 & 1.6).



Σχήμα 1.5: Σχηματικά μια τυπική διάταξη μέτρησης τρισδιάστατης ροής

Δεδομένου ότι τα διανύσματα της ταχύτητας βασίζονται στην πολλαπλή συσχέτιση (cross-correlation) σε μικρές περιοχές της ροής, το πεδίο ταχύτητας είναι ένας χωρικά μέσος όρος που αναπαριστά το πραγματικό πεδίο της ταχύτητας. Αυτό προφανώς έχει συνέπειες για την ακρίβεια των χωρικών παραγώγων του πεδίου ταχύτητας, στροβιλότητας, και των συναρτήσεων χωρικής συσχέτισης, οι οποίες συχνά προέρχονται από πεδία ταχύτητας PIV.

Τα εμπορικά συστήματα PIV περιέχουν λέιζερ κλάσης IV και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης / ταχύτητας που κάνουν τα συστήματα δυνητικά επικίνδυνα και πολύ ακριβά. Εμπορικά συστήματα έχουν απαγορευτικά υψηλό κόστος (τουλάχιστον 100.000\$) [1].

1.1.5 Πιο σύνθετες δομές PIV

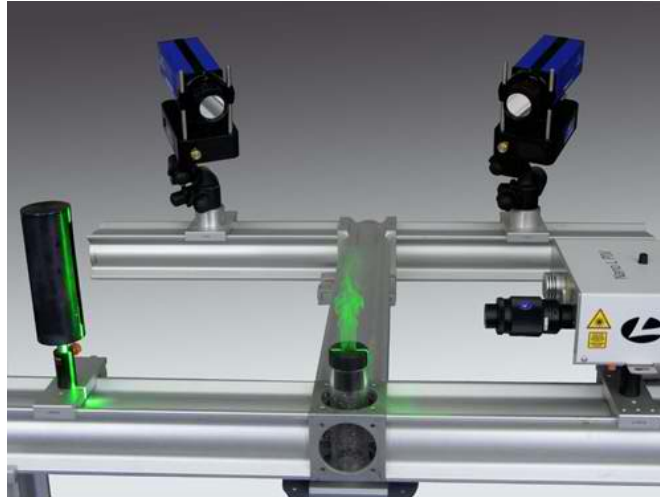
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές μέθοδοι PIV πιο σύνθετες:

- *Molecular Tagging Velocimetry* ή *MTV*

Η μέθοδος αυτή μπορεί να μεταφραστεί ως μοριακή ροομετρία και για αυτή χρησιμοποιούνται σωματίδια σε μέγεθος μορίου τα οποία πολλές φορές είναι ένα μέρος της ροής. Τα μικρά μόρια που είναι πολύ πιο κοντά με το μέγεθος και την πυκνότητα της ροής ελαχιστοποιούν το σφάλμα των σωματιδίων που δεν ακολουθούν τη ροή.

- *Stereoscopic PIV*

Η στερεοσκοπική PIV χρησιμοποιεί δύο κάμερες με ξεχωριστές γωνίες προβολής για να εξάγει τη μετατόπιση στις 3 διαστάσεις. Και οι δύο φωτογραφικές μηχανές πρέπει να επικεντρωθούν στο ίδιο σημείο στη ροή και πρέπει να είναι σωστά βαθμονομημένες ώστε να έχουν το ίδιο σημείο εστίασης (Σχήμα 1.6).



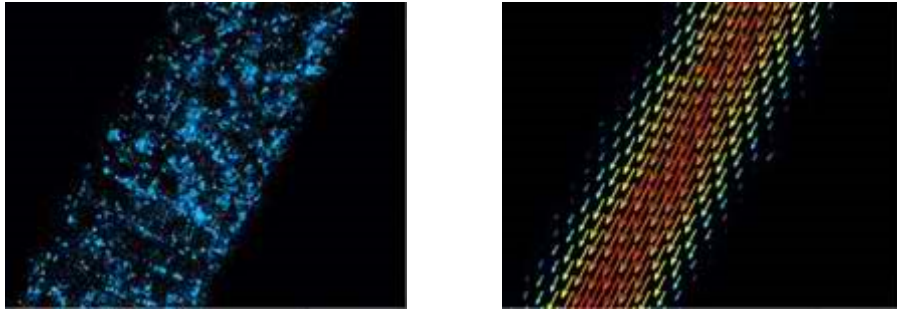
Σχήμα 1.6: *Stereoscopic PIV* [3]

- *Dual Plane Stereoscopic PIV*

Είναι μια επέκταση της στερεοσκοπικής PIV με την προσθήκη ενός δεύτερου πλάνου που αντισταθμίζεται άμεσα από το πρώτο. Γι' αυτή την ανάλυση χρειάζονται τέσσερις κάμερες. Τα δυο πλάνα δημιουργούνται από το διαχωρισμό του φωτός του λέιζερ με ένα διαχωριστή δέσμης. Κάθε δέσμη είναι πολωμένη ορθογώνια σε σχέση με την άλλη.

- *Micro PIV*

Με την χρήση ενός επιφθορισμένου μικροσκοπίου μπορούμε να αναλύσουμε μικροσκοπικές ροές. Η MicroPIV χρησιμοποιεί τα φθορίζοντα μόρια που διεγείρονται σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος και εκπέμπουν σε άλλο μήκος κύματος. Το φως του λέιζερ αντανακλάται μέσα από ένα διχροϊκό καθρέφτη, ταξιδεύει μέσα από έναν αντικειμενικό φακό που εστιάζει στο σημείο ενδιαφέροντος, και φωτίζει έναν περιφερειακό όγκο.



Σχήμα 1.7: Εικόνα από *Microscopic PIV* και το αποτέλεσμα του *Vector-Field* [3]

- *Holographic PIV*

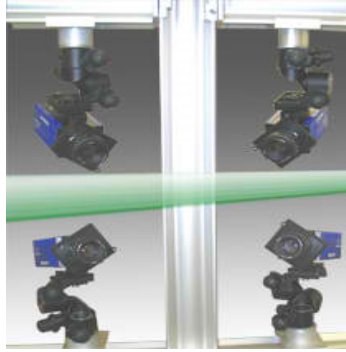
Η ολογραφική PIV αποσπά το σύνολο της κίνησης των σωματιδίων σε όλα τα επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση μιας συμβατικής πηγής φωτός με ένα λέιζερ. Τα σωματίδια που «χτυπήθηκαν» από το λέιζερ θα σκεδάσουν το φως και αυτό θα επηρεάσει τον ασκέδατο φωτισμό, με αποτέλεσμα τους χαρακτηριστικούς δακτυλίους διάθλασης.

- *Scanning PIV*

Με τη χρήση ενός περιστρεφόμενου κατόπτρου, υψηλής ταχύτητας μηχανή και τη διόρθωση για τις γεωμετρικές μεταβολές, η PIV μπορεί να γίνει σχεδόν αμέσως σε ένα σύνολο πλάνων σε όλο το πεδίο της ροής.

- *Volume Tomographic PIV*

Η ογκομετρική τεχνική ανάλυσης, όπως η ολογραφική PIV, χρησιμοποιεί τέσσερις κάμερες προσανατολισμένες σε διαφορετικές γωνίες, αλλά επικεντρώνεται στο ίδιο σημείο για τον προσδιορισμό όλων των ιδιοτήτων επιτάχυνσης ενός ρευστού (Σχήμα 1.8).



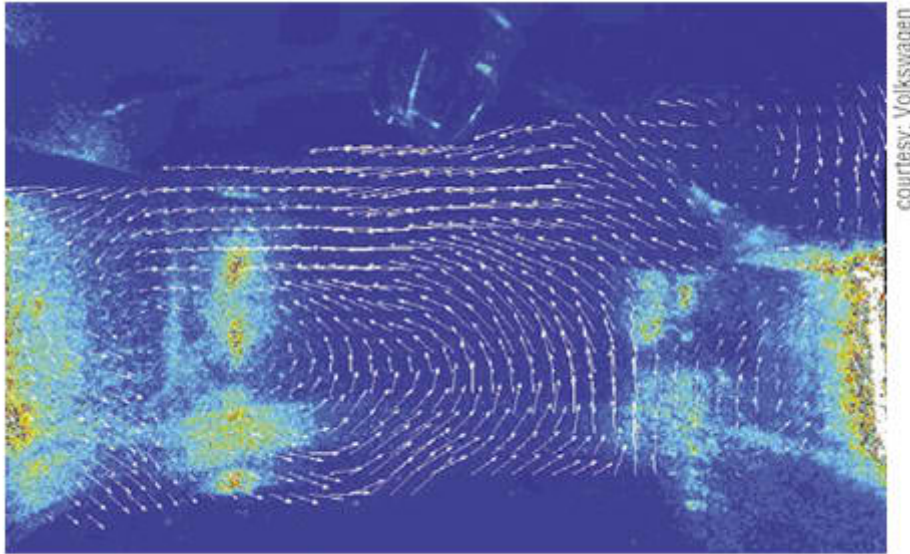
Σχήμα 1.8: Volume Tomographic PIV [3]

- *Particle Tracking Velocimetry*

Χρησιμοποιώντας την PIV ανάλυση σαν μια αρχική υπόθεση για την ανάλυση PTV, μπορεί να ληφθεί πιο ακριβή ανάλυση από αυτή του χωρικού μέσου όρου της μεθόδου cross-correlation που χαρακτηρίζει την PIV ανάλυση μόνο.

- *Endoscopic PIV*

Μετρήσεις PIV σε IC, TURBO μηχανές ή αντλίες απαιτούν συνήθως την κατασκευή ακριβών πρωτοτύπων με μεγάλα παράθυρα. Η ενδοσκοπική PIV χρησιμοποιεί ενδοσκόπια για την κάμερα και το λέιζερ έτσι ώστε μια μικρή τρύπα είναι το μόνο σημείο πρόσβασης. Η αξιοσημείωτη καμπυλότητα πεδίου που προκαλείται από ένα ενδοσκόπιο διορθώνεται αυτόματα από το λογισμικό. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται με σκοπό τη μελέτη της καύσης και του πεδίου ροής με ελάχιστη οπτική πρόσβαση σε πραγματικές συνθήκες μηχανής [1]. Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται η ροή μέσα σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 1.9: Tumble flow in IC engine [3]

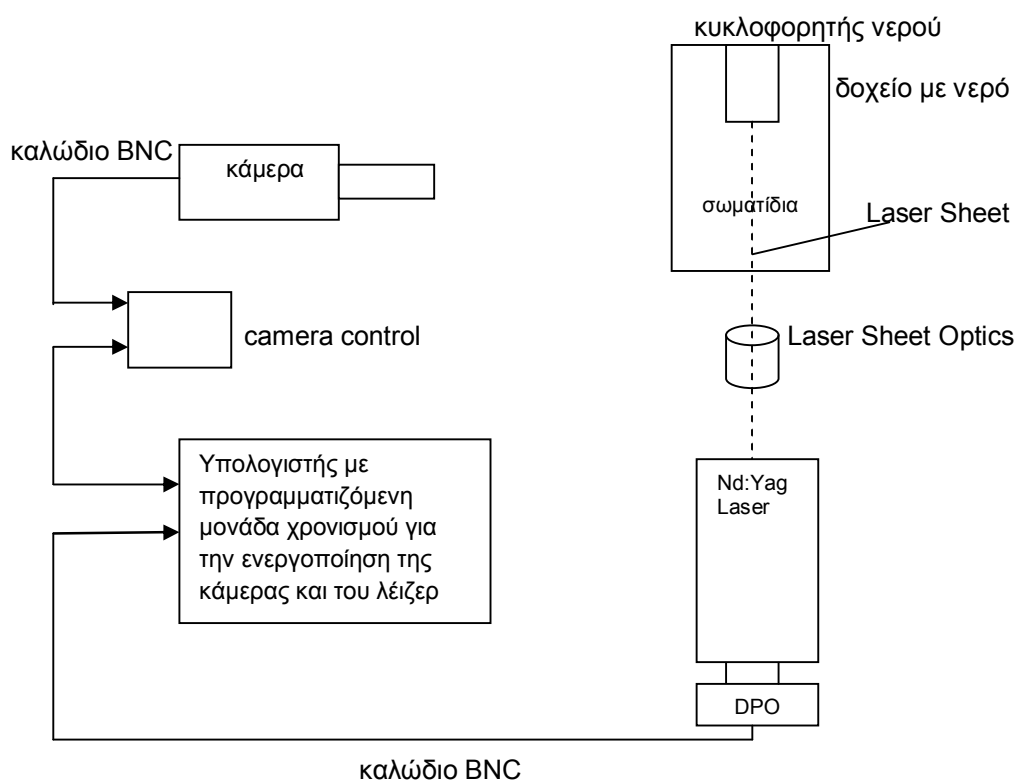
1.1.6 Εφαρμογές PIV

Η μέθοδος PIV έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων ροής, που κυμαίνονται από τη ροή πάνω από ένα φτερό αεροσκάφους σε μια αεροδυναμική σήραγγα, έως το σχηματισμό δίνης σε προσθετικές βαλβίδες της καρδιάς. Οι 3-διαστάσεων (3D) τεχνικές έχουν εφαρμοστεί σε αναλύσεις τυρβώδους ροής και jets.

Υποτυπώδη αλγόριθμοι PIV βασίζονται στην «πολλαπλής συσχέτιση» cross-correlation και μπορούν να υλοποιηθούν μέσα σε λίγες ώρες, ενώ πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι μπορεί να απαιτούν σημαντικό χρόνο. Πολλές εφαρμογές ανοικτού κώδικα είναι διαθέσιμες, συμπεριλαμβανομένων των URAPIV και mpriv (Matlab Toolbox), PyPIV (μια εφαρμογή σε Python), JPIV (εφαρμογή Java), OSIV και Gpriv (εφαρμογές σε C).

Κεφάλαιο 2: Σχεδιασμός και υλοποίηση εργαστηριακής διάταξης για τη μελέτη δίνης που παράγεται από μικρής διαμέτρου προπέλα με τη μέθοδο PIV

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς ο σχεδιασμός και η λειτουργία της αναπτυχθείσας εργαστηριακής διάταξης για την μελέτη δίνης που παράγεται από μικρής διαμέτρου προπέλα μέσα σε νερό. Η κάτοψη της εγκατάστασης φαίνεται παρακάτω:

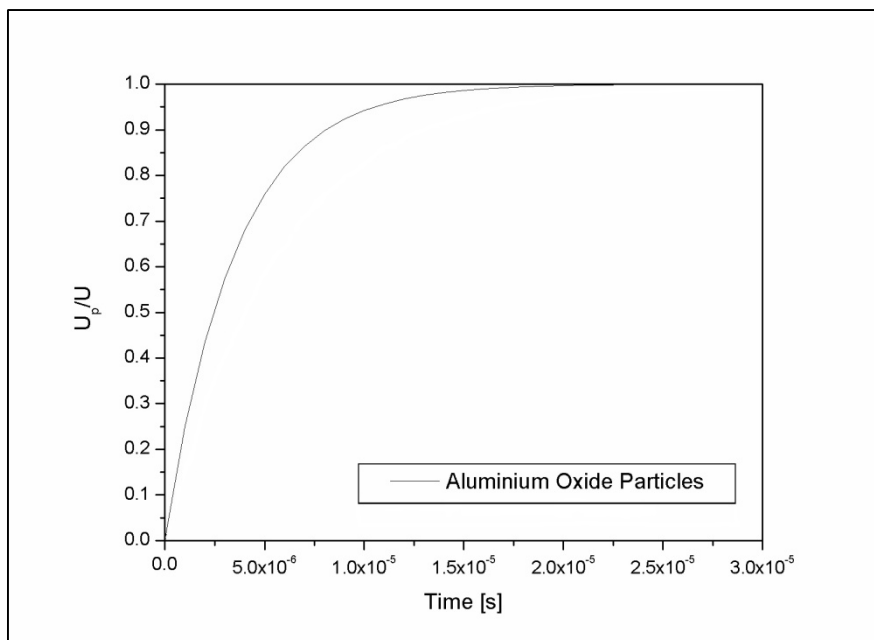


Σχήμα 2.1: Κάτοψη πειραματικής διάταξης με τον εξοπλισμό PIV

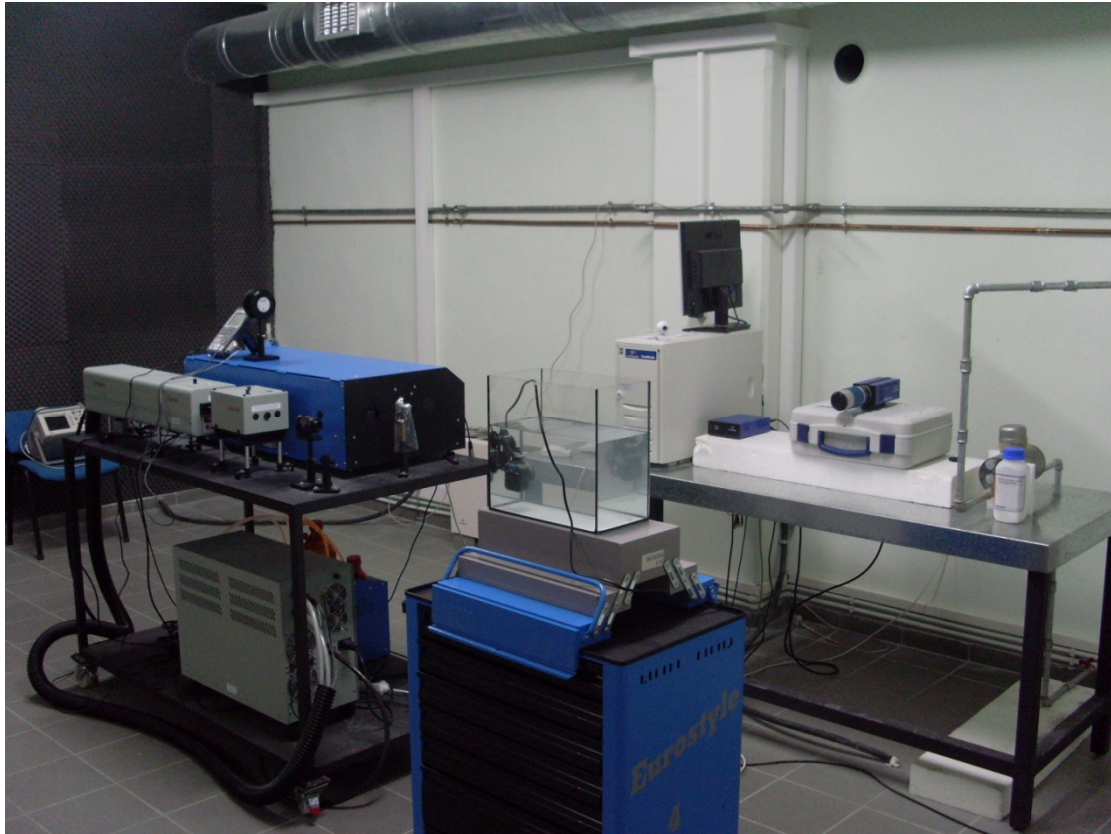
2.1 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου

Ο χώρος στον οποίο έχει στηθεί η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ένα γυάλινο δοχείο (30cm X 20cm X 30cm) το οποίο γεμίσαμε με νερό. Μέσα στο δοχείο τοποθετήσαμε δύο κυκλοφορητές νερού για να προσομοιώσουμε τις δίνες που δημιουργούνται. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 ο

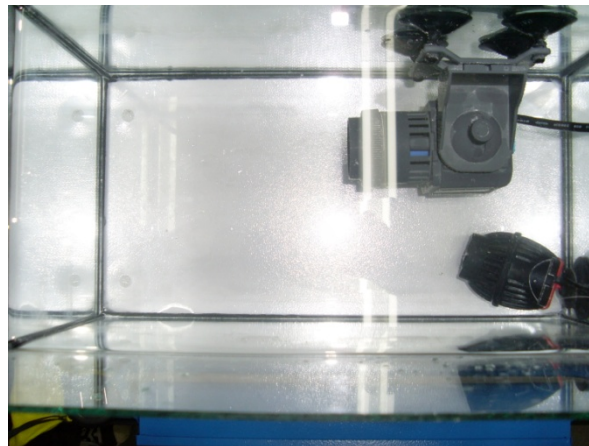
μεγάλος κυκλοφορητής είναι ο κύριος κυκλοφορητής του πειράματος με μέγιστη παροχή 2400 l/h. Ο μικρότερος είναι δευτερεύων και τοποθετήθηκε στη βάση του δοχείου για να δημιουργήσει ένα ρεύμα ώστε να συμπαρασύρει τα σωματίδια που καταπέφτουν στον πάτο του δοχείου. Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, για να κάνουμε PIV ανάλυση πρέπει να τροφοδοτήσουμε το ρευστό με σωματίδια (particles). Επίσης τα σωματίδια πρέπει να είναι της τάξης των μm, για το λόγω αυτό επιλέξαμε οξειδία του αλουμινίου σε σκόνη (aluminum oxide, calcined insulating powder), τα οποία προμηθευτήκαμε από την εταιρεία Alfa Aesar (www.alfa.com). Η μέση διάμετρος των σωματιδίων είναι 5 μm και η πυκνότητα σε θερμοκρασία 20°C είναι 3.7 g/cm³. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει και στην ενότητα 1.1.2 ο λόγος U_p/U σε σχέση με το χρόνο δείχνει πόσο καλά ακολουθούν τα σωματίδια τη ροή. Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.2) φαίνεται ότι τα σωματίδια (οξειδία του αλουμινίου) φθάνουν το 90% της ταχύτητας της ροής εντός 8 μs. Για να βεβαιωθούμε ότι τα σωματίδια μας ακολουθούνε τη ροή κάναμε τους παρακάτω υπολογισμούς. Από τα δεδομένα του κυκλοφορητή γνωρίζουμε ότι η παροχή είναι 2,4 m³/h και επομένως υπολογίζουμε την ταχύτητα 0,34 m/s, δεδομένης διαμέτρου 5cm. Άρα το χρονικό διάστημα προκύπτει 0,14 s, που είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από τα 8μs που χρειάζονται τα σωματίδια να ακολουθήσουν τη ροή.



Σχήμα 2.2: Ο χρόνος απόκρισης των σωματιδίων



Σχήμα 2.3: Η πειραματική διάταξη με το λέιζερ και την κάμερα

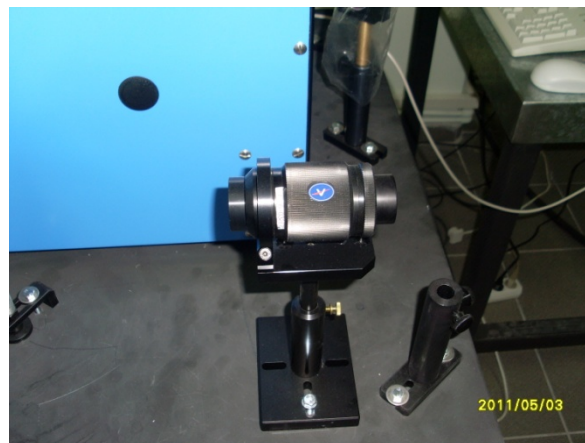


Σχήμα 2.4: Οι κυκλοφορητές νερού που δημιουργούν τη δίνη

Η κάμερα που χρησιμοποιήσαμε είναι η Imager Pro X 2M (1200pixels x1600pixels) υψηλής ανάλυσης 14 bit και ανήκει στην οικογένεια καμερών CCD με υψηλή χωρική ανάλυση και ενσωματωμένη μνήμη στην κεφαλή της κάμερας που επιτρέπει πολύ γρήγορη αποθήκευση δεδομένων. Η οικογένεια καμερών Imager pro X προσφέρει

υψηλής ευαισθησίας αισθητήρες και χαμηλού επιπέδου ηλεκτρονικού θορύβου. Η κάμερα έχει το χαρακτηριστικό γνώρισμα της διπλής έκθεσης (double exposure) με ελάχιστο χρόνο μεταξύ των εικόνων μέχρι 180 ns. Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε για την ανάλυσή μας είναι το DaVis 7.2 και ο υπολογιστής είναι ένας AMD Opteron(tm) Processor 250 στα 2.4 GHz με προγραμματιζόμενη μονάδα χρονισμού (programmable timing unit) για τον συγχρονισμό της κάμερας και του λέιζερ, για να πάρουμε PIV εικόνες. Η κάμερα, ο υπολογιστής και το λογισμικό είναι από την εταιρεία LaVision (www.lavision.com).

Συνήθως για την μέθοδο PIV τα λέιζερ που χρησιμοποιούνται είναι τα διπλού παλμού Nd:YAG laser λόγω του μονοχρωματικού φωτός και της υψηλής ενέργειας. Το λέιζερ που χρησιμοποιήσαμε εμείς είναι το SURELITE III-10 (με μέγιστη ενέργεια 425 mJ στα 532 nm) της εταιρείας Continuum. Όπως αναφέραμε παραπάνω για την PIV ανάλυση χρειαζόμαστε διπλό παλμό από το λέιζερ. Το Double Pulse Option (DPO) είναι μια εξωτερική συσκευή από την οποία μπορούμε να επιλέξουμε μονό ή διπλό παλμό και επίσης μπορούμε να ρυθμίσουμε τον χρόνο μεταξύ του διπλού παλμού (pulse separation). Η συσκευή αυτή είναι επίσης από την continuum και συνδέεται με το λέιζερ. Η διαδικασία συγχρονισμού του λέιζερ παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.1.1. Για τον συγχρονισμό του λέιζερ χρησιμοποιήσαμε επίσης μια φωτοδίοδο και έναν παλμογράφο. Την ενέργεια και την ισχύ του λέιζερ την μετρήσαμε με ένα μετρητή ισχύος (power meter). Ο παλμογράφος είναι ο «DSO3102A» της «Agilent Technologies» ενώ ο μετρητής ισχύος είναι ο «Field Max II-Top» της Coherent». Ο αισθητήρας με τον οποίο μετρήσαμε την ισχύ είναι ο «PM10V1 thermopile sensor» επίσης της «Coherent» με μέγιστη μετρήσιμη ισχύ τα 30W.

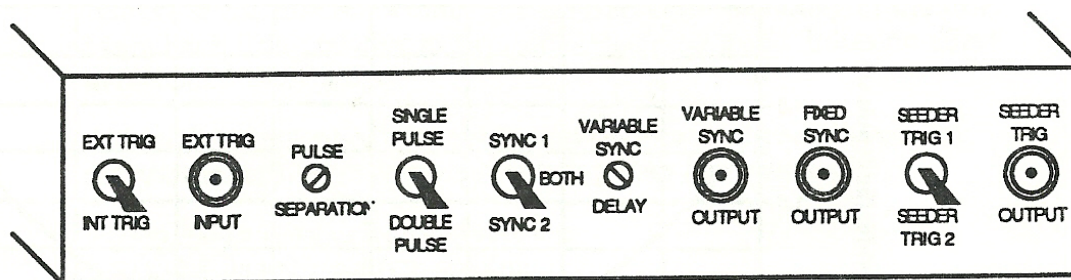


Σχήμα 2.5: Το οπτικό που μετατρέπει τη δέση του λέιζερ σε επίπεδο «φύλλο»

Το τελευταίο, αλλά ένα από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήσαμε είναι το οπτικό (sheet optics). Με δυο κυλινδρικούς φακούς μετατρέπει τη δέση του λέιζερ σε επίπεδο «φύλλο» (light sheet). Το οπτικό είναι επίσης της εταιρείας LaVision και φαίνεται στο Σχήμα 2.5.

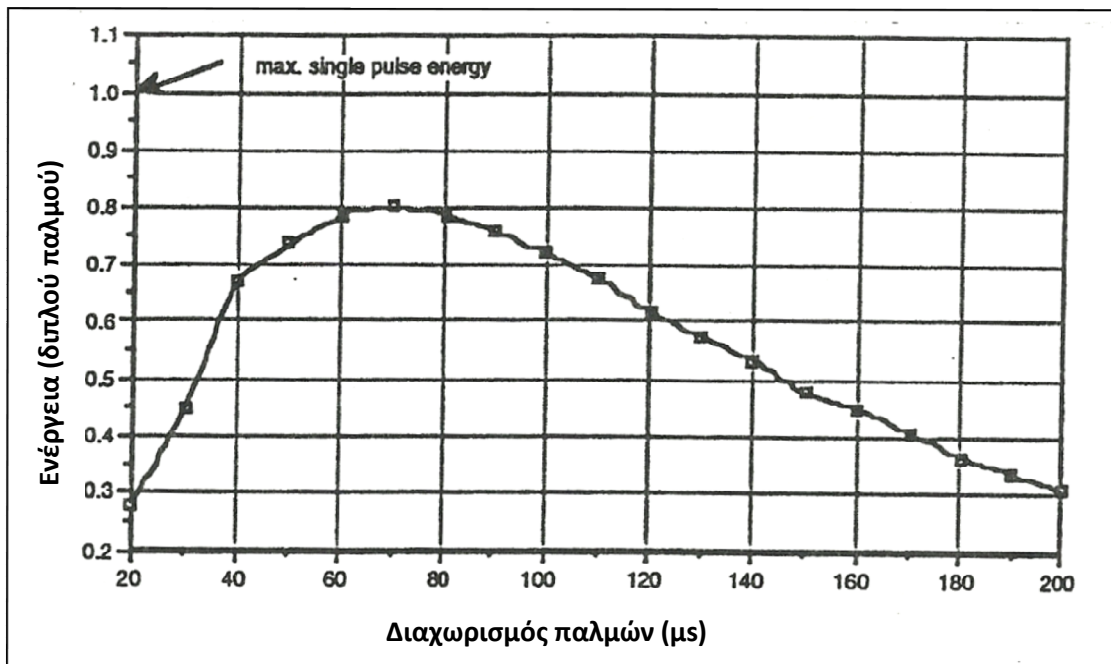
2.1.1 Συγχρονισμός του λέιζερ για διπλό παλμό

Το πιο σημαντικό κομμάτι της διπλωματικής ήταν ο συγχρονισμός του διπλού παλμού του λέιζερ. Επειδή το λέιζερ που χρησιμοποιήσαμε είναι μονού παλμού η εναλλαγή μεταξύ μονού/διπλού παλμού γίνεται από τη συσκευή Double Pulse Option (Σχήμα 2.6).

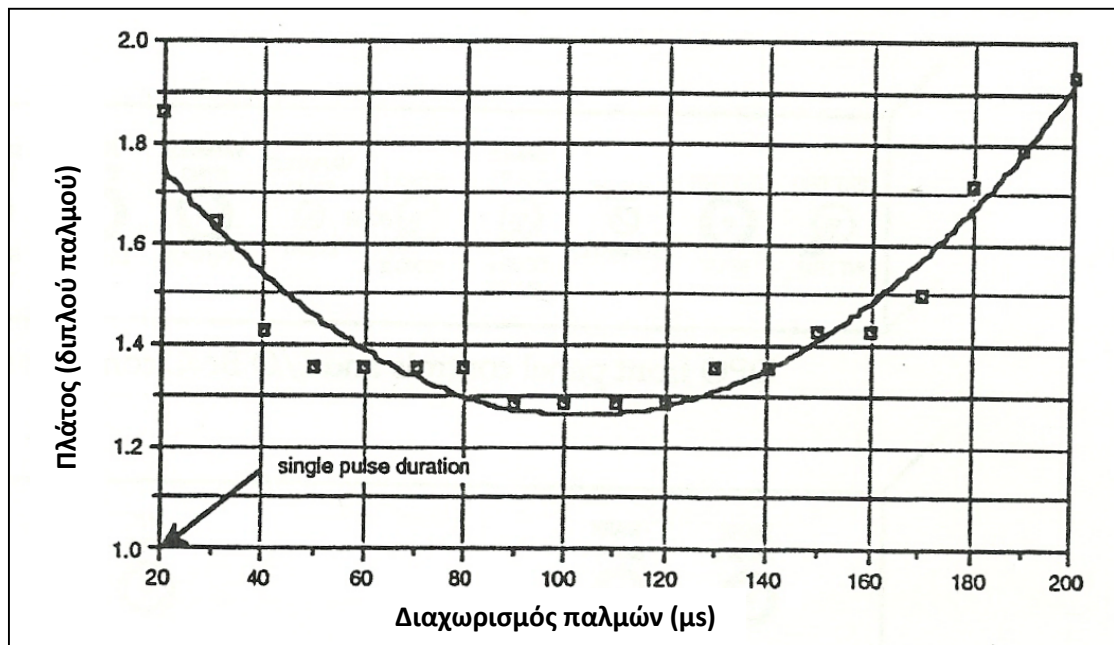


Σχήμα 2.6: Το μπροστινό τμήμα του DPO με τους διακόπτες

Το DPO παράγει δυο παλμούς από ένα μόνο flashlamp (του λέιζερ), δηλαδή αυτό που κάνει είναι να διαιρεί την διαθέσιμη ενέργεια σε δυο παλμούς. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δυο παλμών μπορεί να είναι από 20 έως 200 μ s και στο σχήμα 2.7 φαίνεται η ενέργεια των δύο παλμών σε σχέση με το εύρος διαχωρισμού ενώ στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το πλάτος των παλμών ανάλογα με τον διαχωρισμό των παλμών. Τη μέγιστη ενέργεια, όπως προκύπτει και από το διάγραμμα την παίρνουμε όταν ο δεύτερος παλμός απέχει από τον πρώτο 70 μ s. Η παραπάνω εικόνα και τα δύο διαγράμματα που έπονται είναι παρμένα από το εγχειρίδιο του DPO.



Σχήμα 2.7: Η ενέργεια των παλμών σε σχέση με τον διαχωρισμό τους

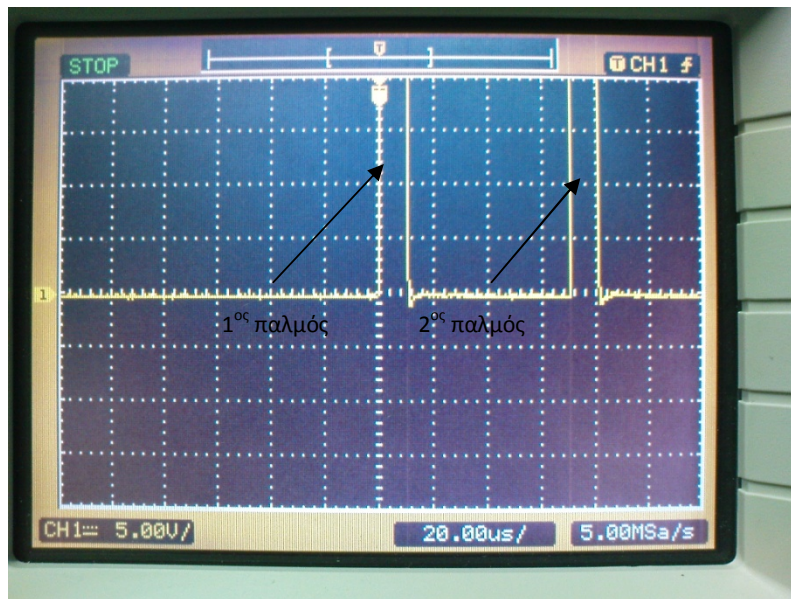


Σχήμα 2.8: Το πλάτος των παλμών σε σχέση με τον διαχωρισμό τους

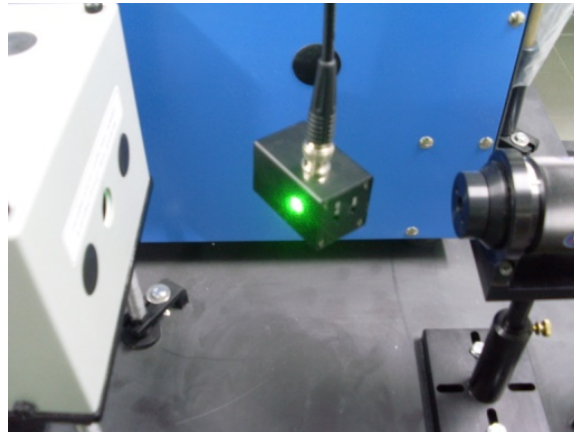
Για την δικιά μας εφαρμογή οι ρυθμίσεις που θέλουμε είναι οι εξής:

1. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη EXT TRIG / INT TRIG στην επιλογή INT TRIG, ώστε το ίδιο το λέιζερ να ανοίξει το Q-switch.
2. Από το ποτενσιόμετρο PULSE SEPARATION ρυθμίζουμε τον χρόνο μεταξύ των δυο παλμών στα 200 μ s. Τον χρόνο $dt=200 \mu$ s τον επιλέξαμε μετά από δοκιμές καθώς διαπιστώσαμε ότι σε μικρότερο dt δεν μπορούσαμε να ανιχνεύσουμε τη δίνη και επίσης στα 200 μ s η ενέργεια των παλμών είναι αρκετά μικρή ώστε να μην δημιουργήσουμε πρόβλημα στην κάμερα.
3. Ρυθμίζουμε τον διακόπτη SINGLE / DOUBLE PULSE στην επιλογή DOUBLE PULSE για να πάρουμε διπλό παλμό και
4. τον διακόπτη SYNC1 / BOTH / SYNC2 τον τοποθετούμε στο SYNC1.

Για να ρυθμίσουμε τον χρόνο μεταξύ των παλμών στα 200 μ s χρησιμοποιήσαμε, όπως αναφέραμε έναν παλμογράφο και μια φωτοδίοδο. Αρχικά συνδέσαμε το DPO με τον παλμογράφο. Αυτό το κάναμε με ένα καλώδιο BNC συνδέοντας την θύρα FIXED SYNC OUTPUT του DPO με τη θύρα του παλμογράφου. Έπειτα ρυθμίσαμε τους διακόπτες στις επιλογές DOUBLE PULSE, SYNC1 και θέσαμε το λέιζερ σε λειτουργία εμφανίζοντας τον πρώτο παλμό. Μείωση του Q-switch συνεπάγεται αύξηση της ενέργειας του πρώτου παλμού. Το επόμενο βήμα ήταν να αλλάξουμε την επιλογή του διακόπτη σε BOTH ώστε να πάρουμε και τους δύο παλμούς, και για να είναι και οι δύο παλμοί ορατοί στον παλμογράφο μειώσαμε το Q-switch από το control του λέιζερ περίπου στα 180 μ s. Όσο μειώνουμε το Q-switch αυξάνουμε την ενέργεια του δεύτερου παλμού σε βάρος του πρώτου. Από το ποτενσιόμετρο PULSE SEPARATION και με τη βοήθεια του παλμογράφου ρυθμίσαμε τον χρόνο του διπλού παλμού στα 200 μ s (Σχήμα 2.9). Για να βεβαιωθούμε ότι ρυθμίσαμε τον χρόνο των παλμών σωστά συνδέσαμε την φωτοδίοδο, η οποία μετατρέπει το φως του λέιζερ σε τάση, με τον παλμογράφο και την τοποθετήσαμε ακριβώς μπροστά στην ακτίνα του λέιζερ (Σχήμα 2.10). Η σύνδεση έγινε πάλι με ένα BNC καλώδιο και τελικά διαπιστώσαμε ότι πραγματικά ο χρόνος μεταξύ των παλμών ήταν 200 μ s. Αυτό το διαπιστώσαμε και στην οθόνη του παλμογράφου, όπου φαινόταν ξεκάθαρα ο διπλός παλμός που δίνει το DPO να ταυτίζεται με τον παλμό που παίρνουμε από την δέσμη του λέιζερ. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση 200 ns από την ώρα που δίνει σήμα το DPO μέχρι την ώρα του πρώτου παλμού. Αυτό οφείλεται στον χρόνο που χρειάζεται ώστε να ανοίξει το Q-switch και αυτή την καθυστέρηση την δώσαμε σαν δεδομένο στο λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε στην επιλογή αρχική καθυστέρηση (initial delay).



Σχήμα 2.9: Οι δύο παλμοί στην οθόνη του παλμογράφου



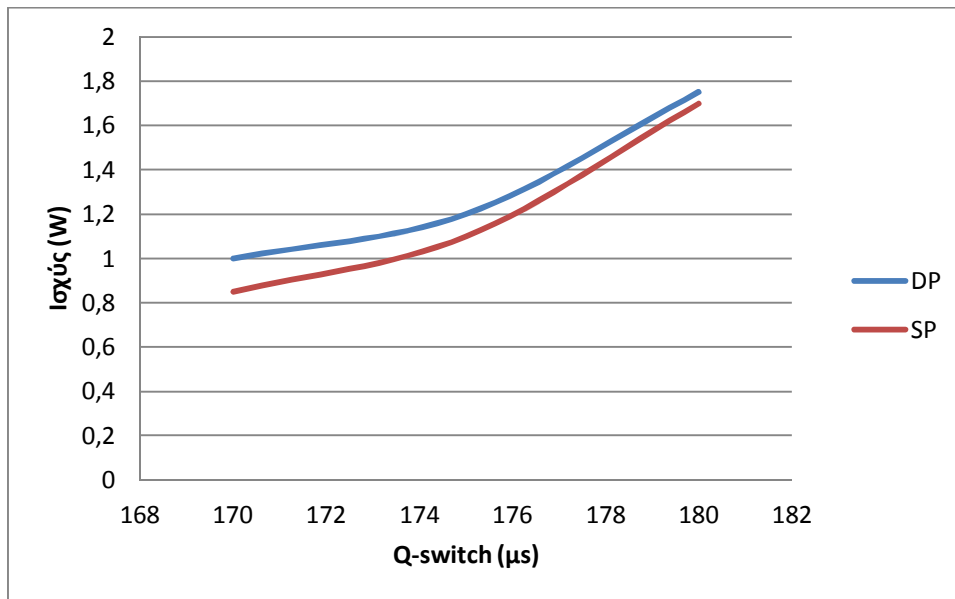
Σχήμα 2.10: Η φωτοδιόδος μπροστά στην ακτίνα του λέιζερ

Σημαντικό επίσης είναι να γνωρίζουμε και την ισχύ του κάθε παλμού, καθώς αυτή θέλουμε να είναι ίδια ή περίπου ίδια σε κάθε έναν από τους δύο παλμούς, για να παίρνουμε ίδιας φωτεινότητας φωτογραφίες για την PIV ανάλυση. Επειδή ο χρόνος μεταξύ των παλμών είναι πολύ μικρός, το power meter δεν μπορεί να ανιχνεύσει την ισχύ του κάθε παλμού χωριστά. Έτσι για να μετρήσουμε την ισχύ κάθε παλμού ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία.

Μπροστά στη δέσμη του λέιζερ τοποθετήσαμε τον thermopile αισθητήρα, τον οποίο συνδέσαμε με το power meter. Ρυθμίσαμε από το DPO την επιλογή DOUBLE PULSE, μειώσαμε το χρόνο Q-switch αρχικά στα 180 μ s και μετρήσαμε την συνολική ενέργεια του διπλού παλμού. Έπειτα αλλάξαμε την επιλογή σε SINGLE PULSE και μετρήσαμε την ισχύ, αυτή τη φορά του μονού παλμού. Αν τώρα αφαιρέσουμε την ισχύ του μονού παλμού από την συνολική ισχύ του διπλού παλμού θα βρούμε την ισχύ του δεύτερου παλμού. Τη διαδικασία αυτή την κάναμε για διάφορους χρόνους του Q-switch μέχρι να βρούμε τον κατάλληλο χρόνο (Q-switch) στον οποίο η ισχύς των δύο παλμών να είναι περίπου ίση. Στις παρακάτω φωτογραφίες (σχήμα 2.11) απεικονίζεται το power meter, ενώ στο διάγραμμα παρουσιάζεται η ισχύς του μονού και διπλού παλμού σε σχέση με το χρόνο του Q-switch. Τελικά καταλήξαμε ότι για Q-switch ίσο με 175 μ s, αν και δεν είναι ίσες οι ενέργειες των παλμών, παίρνουμε εικόνες ίδιας φωτεινότητας περίπου. Αυτό οφείλεται στο ότι στην δεύτερη εικόνα ο χρόνος έκθεσης (exposure time) της κάμερας είναι μεγαλύτερος και έτσι ο δεύτερος παλμός πρέπει να είναι μικρότερης ενέργειας.



Σχήμα 2.11: Το power meter μαζί με τον αισθητήρα και η μέτρηση της ισχύος του παλμού



Σχήμα 2.12: Η ισχύς των παλμών σε σχέση με τον χρόνο του Q-switch

Σε όλες τις εργασίες που κάναμε στο εργαστήριο κατά τις οποίες είχαμε το λέιζερ σε λειτουργία, και πρωτίστως για λόγους ασφαλείας, φορούσαμε προστατευτικά γυαλιά της εταιρείας Laser Vision. Τα συγκεκριμένα γυαλιά είναι μη διαπερατά στο πράσινο φως ($\lambda=532$ nm), όπου εκπέμπει και το λέιζερ.

2.1.2 Βαθμονόμηση της κάμερας

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η κάμερα που χρησιμοποιήσαμε είναι η “Imager Pro Plus X 2M” με ανάλυση 1600 x 1200 pixels και ο φακός είναι ο “UV CoastalOpt® SLR”.



Σχήμα 2.12: Το control της κάμερας (αριστερά) και η κάμερα με τον φακό (δεξιά)

Όπως φαίνεται και στην φωτογραφία η κάμερα πρώτα συνδέεται με το “camera control” και έπειτα γίνεται η κατάλληλη συνδεσμολογία με τον υπολογιστή σύμφωνα με τις οδηγίες σύνδεσης, οι οποίες υπάρχουν αναλυτικά στο εγχειρίδιο εγκατάστασης της κάμερας, από την εταιρεία LaVision. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιούμε έχει ενσωματωμένες στην PTU θύρες σύνδεσης για μία ή περισσότερες κάμερες και από το λογισμικό “DaVis 7.2” μπορούμε να ενεργοποιήσουμε τις ακόλουθες επιλογές: απλή ή διπλή εικόνα (single or double frame) και απλή ή διπλή έκθεση (single or double exposure).

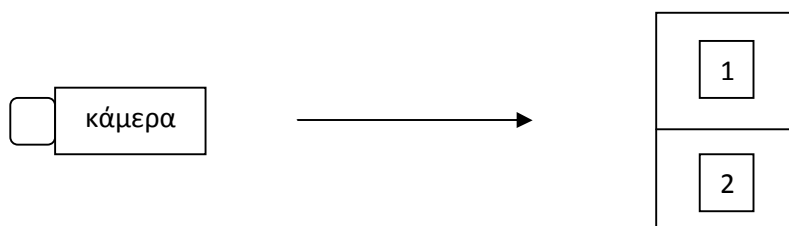
Στην περίπτωση “single frame / double exposure” και οι δυο εκθέσεις του λέιζερ αποθηκεύονται σε μια εικόνα (Σχήμα 2.13) και έχουμε PIV με αυτό-συσχέτιση “auto-

correlation”. Με αυτή την επιλογή μπορούμε να επιλέξουμε εμείς το χρόνο έκθεσης (exposure time).



Σχήμα 2.13: Εγγραφή για “auto-correlation”

Αντίστοιχα στην περίπτωση “double frame / double exposure” έχουμε δυο ξεχωριστές εικόνες, δηλαδή ο πρώτος παλμός από το λέιζερ φωτίζει την πρώτη εικόνα ενώ ο δεύτερος παλμός την δεύτερη (Σχήμα 2.14). Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος έκθεσης (exposure time) καθορίζεται από το πρόγραμμα αυτόματα. Την επιλογή “double frame / double exposure” την χρησιμοποιούμε για πολλαπλή συσχέτιση “cross-correlation”.

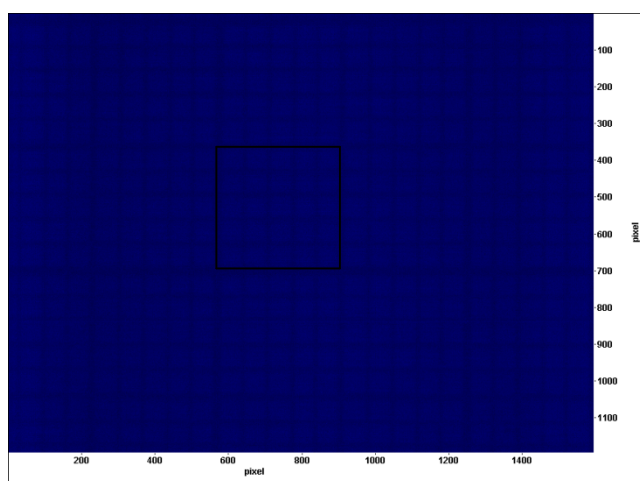


Σχήμα 2.14: Εγγραφή για “cross-correlation”

Για να επιλέξουμε “double frame / double exposure (cross-correlation)”, από το πρόγραμμα “DaVis” πηγαίνουμε στην επιλογή “setup”, επιλέγουμε “Recording – Timing Setup” και τσεκάρουμε την επιλογή “double events” ενώ στην “camera 1” επιλέγουμε “T1A” και “T1B”.

Το επόμενο βήμα ήταν να καθορίσουμε τη μέγιστη και την ελάχιστη μετακίνηση των σωματιδίων που μπορούμε να ανιχνεύσουμε με τον φακό που διαθέτουμε. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι η εξής. Αρχικά βάλαμε τον φακό στο μέγιστο zoom και τοποθετήσαμε ένα μιλιμετρέ χαρτί σε μία απόσταση ώστε να το βλέπουμε καθαρά. Πήραμε μία φωτογραφία (1600 x 1200 pixels) και βρήκαμε ότι το 1 cm αντιστοιχεί σε 334 pixels άρα συνεπάγεται ότι έχουμε 29,9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ (Σχήμα 2.15).

Επίσης γνωρίζουμε ότι ο χρόνος μεταξύ των διπλών παλμών του λέιζερ είναι από 20 - 200μs. Αν υποθέσουμε ότι έχουμε μια μετακίνηση 10 pixels, με μια απλή διαίρεση υπολογίζουμε ότι για μέγιστο zoom η ταχύτητα που μπορούμε να ανιχνεύσουμε μπορεί να είναι από 0,15 μέχρι 1,5 m/s. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογίσαμε ότι για ελάχιστο zoom του φακού η ταχύτητα κυμαίνεται από 2,5 έως 25 m/s ενώ για ένα τυχαίο σημείο όπου τοποθετήσαμε το χαρτί 1 μέτρο μακριά από το φακό βρήκαμε ότι η ταχύτητα μπορεί να είναι από 0,32 μέχρι 3,2 m/s.



Εικόνα 2.15 Φωτογραφία με μέγιστο zoom

2.1.3 Χρονισμός παλμών και κάμερας

Μετά από τον συγχρονισμό των παλμών και τη βαθμονόμηση της κάμερας, μέσω του “Programmable Timing Unit”, συγχρονίσαμε το λέιζερ με την κάμερα. Το PTU είναι μια PCI κάρτα στον Η/Υ που έχει στόχο να δίνει και να δέχεται σήματα από το λέιζερ και την κάμερα. Από το πρόγραμμα DaVis μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ “internal” ή “external trigger”. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει στην παράγραφο 2.1.1, συγχρονίσαμε τους δύο παλμούς του λέιζερ στα 200 μs. Με ένα BNC καλώδιο συνδέσαμε το λέιζερ, μέσω του DPO από τη θύρα FIXED SYNC OUTPUT, με το PTU στη θύρα Trigger. Με αυτήν τη διαδικασία και τη βοήθεια του προγράμματος DaVis, στην ουσία καταφέραμε να δώσουμε το εξωτερικό έναυσμα (external trigger) του πρώτου παλμού για να πάρουμε την πρώτη εικόνα. Δηλαδή μόλις «πυροβολεί» το λέιζερ ταυτόχρονα η κάμερα παίρνει την πρώτη εικόνα. Για να πάρουμε την δεύτερη εικόνα, μέσα από το software καθορίζουμε εμείς το χρόνο (dt) που

μεσολαβεί μεταξύ των παλμών. Οπότε από τα Devices – Recording –Timing επιλέγουμε:

1. Trigger source: External cyclic trigger
2. Trigger rate: 10 Hz
3. Recording rate: 10 HZ
4. dt: 200 μ s

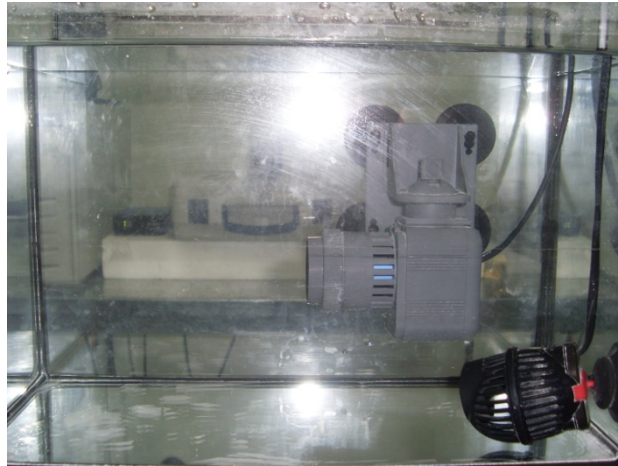
Η δεύτερη εικόνα θα παρθεί 200 μ s μετά την πρώτη, γνωρίζοντας ότι και ο δεύτερος παλμός του λέιζερ έπεται 200 μ s του πρώτου. Η φωτεινότητα των εικόνων εξαρτάται από τον χρόνο έκθεσης (exposure time), όπου στην περίπτωση που έχουμε εξωτερικό έναυσμα (external trigger) είναι προκαθορισμένο από το λογισμικό και δεν μπορούμε να το αλλάξουμε. Για το λόγο αυτό , αυτό που κάναμε ήταν να εξισορροπήσουμε την ισχύ του κάθε παλμού με το χρόνο έκθεσης (exposure time) ώστε να πάρουμε τελικά ίδιας φωτεινότητας εικόνες. Την διαδικασία αυτή την περιγράψαμε στην παράγραφο 2.1.1, στην μέτρηση της ισχύς των παλμών.

2.2 Διαδικασία πειράματος

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε βήμα προς βήμα τη διαδικασία για να πάρουμε τις μετρήσεις που θα επεξεργαστούμε μετά στην PIV ανάλυση.

Έναρξη διαδικασίας

1. Θέτουμε σε λειτουργία τον κυκλοφορητή νερού και τροφοδοτούμε με σωματίδια τη δίνη που δημιουργείται.



2. Ευθυγραμμίζουμε την κάμερα και εστιάζουμε με το φακό ώστε να βλέπουμε καθαρά τη δίνη.
3. Ελέγχουμε τους διακόπτες του DPO ώστε να είναι ενεργοποιημένες οι επιλογές DOUBLE PULSE και SYNC1.
4. Ανάβουμε το λέιζερ με την εξής σειρά: στο control του λέιζερ i) ανοίγουμε τον κόκκινο διακόπτη O/I ii) γυρνάμε το κλειδί από την θέση O στη θέση I και πατάμε το κουμπί START/STOP iii) μετά από 20 λεπτά περίπου (μέχρι να ζεσταθεί το flashlamp) ενεργοποιούμε το κουμπί SHUTTER iv) με το κουμπί SELECT και τα βελάκια ρυθμίζουμε το Q-switch στα 175 μ s (για τη δικιά μας εφαρμογή όπως αναφέρουμε παραπάνω) και επιλέγουμε συχνότητα μεταξύ των παλμών 10 Hz (δηλαδή παλμός ανά 100ms) επιλέγοντας P01. (ΠΡΟΣΟΧΗ! Σε όλη τη διάρκεια που είναι ενεργοποιημένο το λέιζερ φοράμε τα προστατευτικά γυαλιά)



5. Από το πρόγραμμα DaVis 7.2 αφού επιλέξουμε να κάνουμε ένα καινούριο “project”, από το μενού των επιλογών (settings) επιλέγουμε το εικονίδιο “device” και ρυθμίζουμε τις ακόλουθες επιλογές: Στο “Recording: Timing- Trigger source” επιλέγουμε “External cyclic trigger” με “Trigger rate” 10 Hz και $dt=200$ μs . Από το εικονίδιο “acquisition” μπορούμε να επιλέξουμε τον αριθμό των εικόνων που θέλουμε και μετά πατάμε start recording για να πάρουμε τις μετρήσεις.
6. Κλείνουμε το λέιζερ αντίστροφα όπως το ανοίξαμε. Για λόγους ασφαλείας, πάντα ανεβάζουμε το Q-switch στα 470 μs μειώνοντας έτσι την ισχύ του λέιζερ.

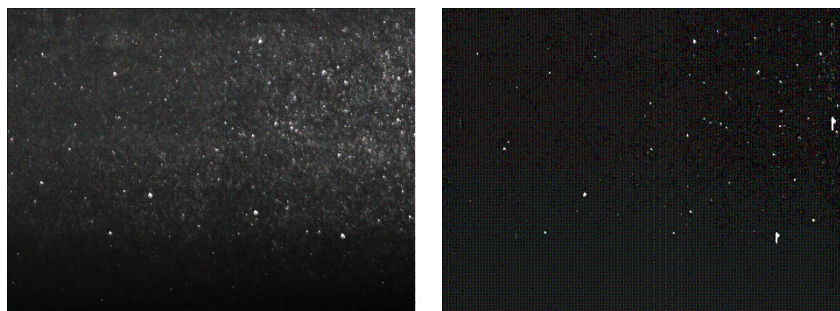
Λήξη διαδικασίας

Την παραπάνω διαδικασία την επαναλαμβάνουμε κάθε φορά που θέλουμε να πάρουμε μετρήσεις. Το επόμενο βήμα αφού πάρουμε και αποθηκεύσουμε τις μετρήσεις μας είναι να τις επεξεργαστούμε και να κάνουμε την PIV ανάλυση. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3: Επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 και θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα.

Για την ανάλυσή μας, το δείγμα που πήραμε είναι 3000 ζευγάρια εικόνων και ενδεικτικά κάποιες εικόνες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Ένα τυχαίο ζευγάρι εικόνων διπλής έκθεσης (double exposure)

3.1 Λογισμικό DaVis FlowMaster 7.2

Το Flow Master 7.2 της DaVis είναι το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε την PIV ανάλυση. Το πακέτο αυτό, του προγράμματος, εκτός από την διαχείριση των συσκευών (κάμερας, PTU) περιέχει τον αλγόριθμο για την PIV ανάλυση καθώς και μερικά φίλτρα υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων. Μέσα από το πρόγραμμα καθορίσαμε το παράθυρο έρευνας (interrogation window) καθώς επίσης και τη μέθοδο συσχέτισης. Οι παράμετροι αυτοί αναλύονται στην παράγραφο 3.1.1

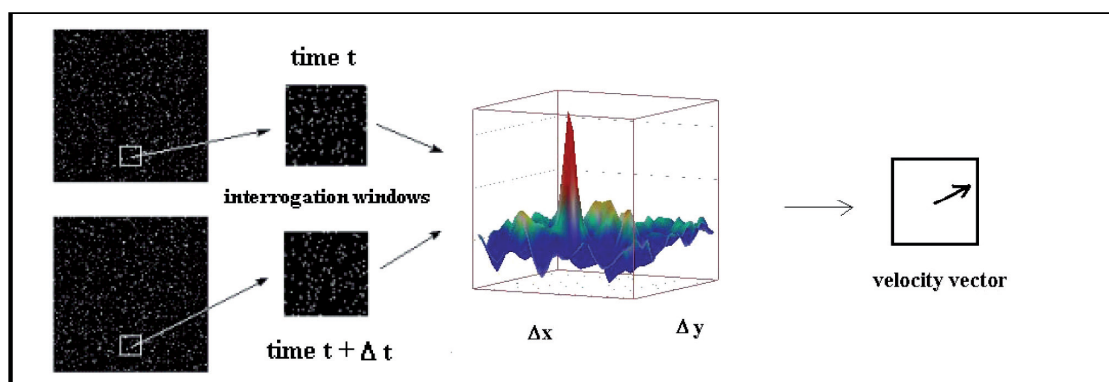
3.1.1 Επιλογή μεθόδου συσχέτισης

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι συσχέτισης που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για την PIV ανάλυση. Η μία είναι η λεγόμενη « τεχνική της αυτό-συσχέτισης » (auto-correlation technique), χρησιμοποιώντας μια εικόνα διπλής έκθεσης, δηλαδή η κίνηση των σωματιδίων συλλαμβάνεται σε δύο χρόνους έκθεσης μιας κάμερας CCD, καθώς το ηλεκτρονικό κλείστρο της κάμερας ανοίγει και κλείνει δύο φορές.

Η άλλη μέθοδος, την οποία χρησιμοποιήσαμε σε αυτή την εργασία, είναι αυτή της σταυρωτής -συσχέτισης ή cross-correlation, όπου έχουμε δυο εικόνες διπλής έκθεσης. Αυτό σημαίνει ότι η κίνηση των σωματιδίων συλλαμβάνεται σε δύο διαφορετικές εικόνες σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα.

3.1.2 Η αρχή της cross-correlation και το μαθηματικό υπόβαθρο

Έστω X_i είναι το διάνυσμα θέσης και x_i το διάνυσμα θέσης της εικόνας του σωματιδίου i στην πρώτη έκθεση, αντίστοιχα, συνεπάγεται $X_i = x_i/M$, όπου M είναι ο συντελεστής μεγέθυνσης.



Σχήμα 3.2: Σχηματικά η μέθοδος της cross-correlation

Η ένταση του πεδίου της εικόνας της πρώτης έκθεσης μπορεί να εκφράζεται με τη σχέση:

$$I(x) = \sum_{i=1}^N V_0(X_i) \tau(x - x_i)$$

όπου $V_0(X_i)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς που δίνει την ενέργεια του φωτός της εικόνας ενός σωματιδίου i στο δεδομένο όγκο και τη μετατροπή της σε ένα ηλεκτρονικό σήμα, και $\tau(x)$ είναι η συνάρτηση του εύρους του φακού απεικόνισης, η οποία συνήθως θεωρείται Gaussian² και στις δύο κατευθύνσεις του επιπέδου.

² Gaussian είναι συνάρτηση της μορφής $f(x) = a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right) + d$, όπου a, b, c, d πραγματικοί αριθμοί και η γραφική παράσταση της είναι μια συμμετρική «κωδωνοειδής καμπύλη»

Υποθέτοντας ότι μεταξύ των δύο χρόνων έκθεσης όλα τα σωματίδια μέσα στο «παράθυρο έρευνας» έχουν μετακινηθεί με έναν ίδιο φορέα μετατόπισης ΔX , η ένταση του πεδίου της εικόνας της δεύτερης έκθεσης μπορεί να εκφράζεται με τη σχέση:

$$I'(x) = \sum_{j=1}^N V'_0(X_j + \Delta X) \tau(x - x_j - \delta x)$$

όπου δx είναι η μετατόπιση της εικόνας του σωματιδίου, που μπορεί λογικά να προσεγγιστεί κατά $\Delta X \cong \delta x/M$

Η σταυρωτή συσχέτιση από δυο παράθυρα έρευνας ορίζεται:

$$R(s) = \langle I(x)I(x + s) \rangle$$

όπου s είναι το διάνυσμα διαχωρισμού στο επίπεδο της συσχέτισης και $\langle \rangle$ είναι ο μέσος χωρικός τελεστής στο παράθυρο έρευνας.

Το R μπορεί να αναλυθεί σε τρία μέρη:

$$R(s) = R_C(s) + R_F(s) + R_D(s)$$

όπου R_C είναι η συσχέτιση των μέσων εντάσεων της εικόνας και R_F είναι η κυμαινόμενη συνιστώσα θορύβου, που προκύπτουν για $i \neq j$. Η μέγιστη μετατόπισης της συσχέτισης R_D παριστά τη συνιστώσα του συντελεστή της σταυρωτής συσχέτισης που αντιστοιχεί στη συσχέτιση των εικόνων των σωματιδίων από την πρώτη έκθεση με πανομοιότυπες εικόνες των σωματιδίων στη δεύτερη έκθεση ($i = j$). Αυτή η μετατόπιση είναι μέγιστη για $s = \delta x$. Ως εκ τούτου ο προσδιορισμός της μέγιστης αυτής θέσης δx δίδει ΔX . Αυτή η θέση, συνήθως στην σταυρωτή συσχέτιση λαμβάνεται με τη χρήση αλγορίθμου Fast-Fourier Transform (FFT). Στην γενική περίπτωση, όταν όλα τα σωματίδια μέσα στο «παράθυρο έρευνας» δεν έχουν ομοιόμορφες ταχύτητες (αναταράξεις, κλίσεις ταχύτητας), η θέση της μέγιστης μετατόπισης είναι αυτή με την πιο πιθανή μετατόπιση μέσα στο «παράθυρο έρευνας».

Η τιμή του s προσδιορίζεται με ακρίβεια από το συσχετισμό των δεδομένων παρεμβολής, που λαμβάνονται μέσα από μια τακτοποίηση αυτών των δεδομένων με κάποια συνάρτηση μοντελοποίησης (π.χ. προφίλ Gaussian) [6].

Αναλυτικότερα ο συντελεστής της σταυρωτής συσχέτισης ορίζεται:

$$R_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i,j)S(i + \delta i, j + \delta j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I^2(i,j) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S^2(i + \delta i, j + \delta j)}}$$

Σε αυτήν την εξίσωση το R είναι ο συντελεστής συσχέτισης που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 και I και S είναι οι εντάσεις στο «παραθύρο έρευνας» και στην «περιοχής αναζήτησης» αντίστοιχα, μετά την αφαίρεση της μέσης έντασης στο κάθε παράθυρο, για το κάθε pixel (i, j). Το μέγεθος του «παραθύρου έρευνας» είναι m × n pixels , και επιλέγεται από το χρήστη , ανάλογα με την ταχύτητα της ροής και του χρόνου διαχωρισμού μεταξύ των δύο εικόνων . Το μέγεθος θα πρέπει να είναι κατάλληλο έτσι ώστε η κατανομή των σωματιδίων που συλλαμβάνονται στην πρώτη εικόνα να παραμένει και στην δεύτερη επίσης, μετατοπισμένη. Με τον προσδιορισμό του συντελεστή συσχέτισης σε κάθε θέση της μετατόπισης του «παραθύρου έρευνας» , και βρίσκοντας την μετατόπιση (δi , δj) που αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή του συντελεστή σταυρωτής συσχέτισης , η ταχύτητα των σωματιδίων εντός του «παραθύρου έρευνας» μπορεί να υπολογιστεί , εφόσον η διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο εικόνων είναι γνωστή. Οι ερευνητές , όμως, θα πρέπει να είναι προσεκτικοί, διότι η κορυφή του συντελεστή συσχέτισης πρέπει να αντιστοιχεί σε μία τιμή που να υπερβαίνει κάποιο όριο που ορίζεται από το χρήστη, διαφορετικά η κορυφή θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε ένα θόρυβο παρά σε ένα σήμα αιχμής. Στην περίπτωση μας έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε για την αποδεκτή τιμή του συντελεστή κορυφής συσχέτισης να είναι πάνω από 1/2. Αυτός είναι ο λόγος για το γεγονός ότι έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε τον συντελεστή συσχέτισης αντί της συνάρτησης συσχέτισης για την οποία ο χρήστης δεν μπορεί να γνωρίζει το εύρος των τιμών του για διαφορετικές ρυθμίσεις (διαφορετικά λείζερ και διαφορετική κλίμακα του γκρίζου της κάμερας), που θα μπορούσαν να αλλάξουν. Αυτή η τιμή ποικίλει ανάλογα με το είδος της ροής. Για παράδειγμα, εάν η ροή είναι στρωτή, όπου η κατανομή των σωματιδίων αναμένεται να είναι σταθερή στο χρόνο , το όριο για την συσχέτιση του συντελεστή θα μπορούσε να φθάσει τις τιμές του 0,9 . Σε τυρβώδης ροή, όπου η κίνηση είναι τρισδιάστατη και αναμένονται στοχαστικές κατανομές των σωματιδίων, το όριο του συντελεστή συσχέτισης σίγουρα θα είναι μικρότερο [4].

3.1.3 Μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Τα εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων για τον υπολογισμό της σταυρωτής συσχέτισης, βασίζονται σε Fast Fourier Transform (FFT) αλγορίθμους.

Ο αλγόριθμος της σταυρωτής συσχέτισης για την επίλυση N δεδομένων χρειάζεται N^2 υπολογισμούς ενώ ο αριθμός των αναγκαίων υπολογισμών, για μια διαδικασία με διεξαγωγή της FFT, γίνεται $2 \times N$.

Χρησιμοποιώντας την FFT, στην ουσία επιταχύνουμε τον υπολογισμό της συσχέτισης. Το θεώρημα λέει ότι πολλαπλασιάζοντας το μετασχηματισμό Fourier της μιας συνάρτησης με το συζυγή μιγαδικό του μετασχηματισμού Fourier της άλλης, δίνει το μετασχηματισμό Fourier της συσχέτισης τους [5]. Η FFT εκφράζεται από τη σχέση:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, \dots, N-1$$

3.1.4 Παράθυρο έρευνας (interrogation window)

Όπως αναφέραμε και στην παράγραφο 2.1.2 οι ταχύτητες που μπορούμε να ανιχνεύσουμε κυμαίνονται από 0,15 έως 25 m/s. Η ταχύτητα της εφαρμογής υποθέσαμε ότι μπορεί να είναι μέχρι 1 m/s που αυτό συνεπάγεται με περίπου 7 pixels, επομένως το παράθυρο έρευνας (interrogation window) που επιλέξαμε είναι 32 x 32 pixels μιας και όπως έχουμε αναφέρει το interrogation window είναι το τετραπλάσιο από την μετατόπιση των σωματιδίων.

3.2 Φίλτρα

Οι λειτουργίες των φίλτρων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία της εικόνας. Χρησιμοποιούνται για λείανση (smoothing), ανίχνευση ακμών, την υφή ή την ενίσχυση της αντίθεσης, και πολλές άλλες ειδικές λειτουργίες. Υπάρχουν πολλά φίλτρα, μερικά από τα οποία λειτουργούν γειτονικά του pixel και άλλα, που χρησιμοποιούν τον μετασχηματισμό Fourier και λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων [3].

3.2.1 Γραμμικά και μη γραμμικά φίλτρα

Μεταξύ αυτών των φίλτρων τα πιο χρησιμοποιούμενα είναι αυτά, που υπολογίζουν τη νέα τιμή ενός ρixel από ένα γραμμικό συνδυασμό των 8 περιφερειακών και του κεντρικού ρixel. Μαθηματικά αυτό μπορεί να παρασταθεί ως ένας πίνακας 3x3, ο οποίος μετακινείται πάνω στην εικόνα για να υπολογίσει ένα νέο κεντρικό ρixel κάθε φορά που εφαρμόζεται σε μια περιοχή 3x3:

$$f'_{i,j} = \begin{pmatrix} a_1 f_{i-1,j-1} & a_2 f_{i,j-1} & a_3 f_{i+1,j-1} \\ b_1 f_{i-1,j} & b_2 f_{i,j} & b_3 f_{i+1,j} \\ c_1 f_{i-1,j+1} & c_2 f_{i,j+1} & c_3 f_{i+1,j+1} \end{pmatrix} / sum$$

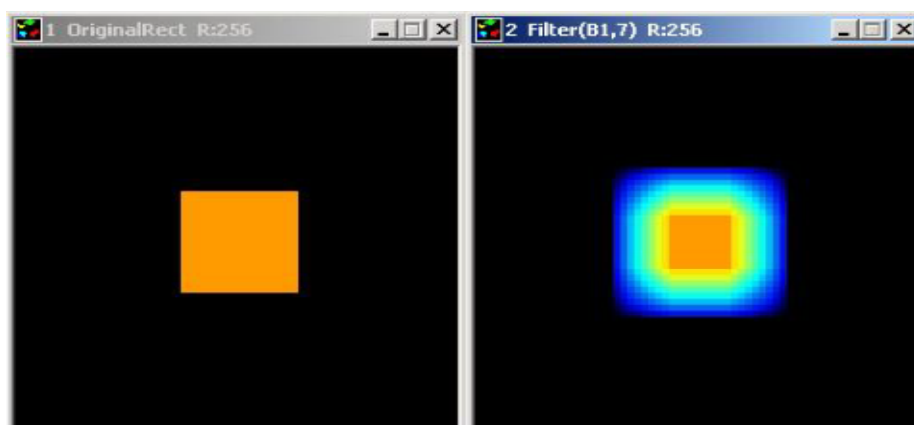
Όπου,

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} / sum$$

είναι ο πίνακας του φίλτρου και sum ο συντελεστής του αθροίσματος. Μόνο όταν το άθροισμα είναι μεγαλύτερο από τα στοιχεία του πίνακα του φίλτρου, η μέση ένταση της εικόνας παραμένει η ίδια. Για παράδειγμα, εάν όλα τα στοιχεία του φίλτρου είναι 1, τότε το άθροισμα θα οριστεί 9, προκειμένου να μην αλλάξει η μέση ένταση της εικόνας [3].

3.2.1.1 Φίλτρο εξομάλυνσης (Smoothing filter)

Τα φίλτρα εξομάλυνσης χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των υψηλών συχνοτήτων του θορύβου με τη λήψη ενός μέσου όρου από τα γειτονικά του κεντρικού ρixel. Φυσικά, οποιαδήποτε φίλτρο εξομάλυνσης λειαίνει οποιοσδήποτε αιχμηρές άκρες, οι οποίες δεν είναι θόρυβος, αλλά πραγματικές (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Πραγματική εικόνα (αριστερά) και εικόνα με φίλτρο εξομάλυνσης (δεξιά)[3]

3.2.1.2 Φίλτρο «διάβρωσης» και «διαστολής» (Erosion and Dilation filter)

Αυτό το φίλτρο διαχωρίζει τα pixels μίας περιοχής 3x3 σύμφωνα με την έντασή τους. Αντί να λάβει το μεσαίο στοιχείο, η διάβρωση θα γίνει στο προηγούμενο στοιχείο. Το αποτέλεσμα είναι ένα είδος διάβρωσης, ώστε η εικόνα να δείχνει πιο μακριά στο επίπεδο του φόντου (Σχήμα 3.4 αριστερά). Το φίλτρο dilation «διαστολής» κάνει ακριβώς το αντίθετο. Θα πάρει το επόμενο στοιχείο μετά το μεσαίο και το αποτέλεσμα είναι ότι τα άκρα γίνονται πιο έντονα και οι κορυφές πλαταινούν ώστε να γίνει πιο ομαλή η εικόνα (Σχήμα 3.4 δεξιά).



Σχήμα 3.4: Παραδείγματα με φίλτρο διάβρωσης (αριστερά) και με φίλτρο διαστολής (δεξιά)[3]

3.3 Υπολογισμός διανυσματικού πεδίου PIV με το λογισμικό Flowmaster 7.2 της Davis

Το λογισμικό Flowmaster 7.2 παρέχει τις κεντρικές λειτουργίες για την PIV επεξεργασία της εικόνας. Αυτές οι λειτουργίες για την PIV ανάλυση χωρίζονται σε τρεις ενότητες.

1. Η πρώτη είναι αυτή της προ-επεξεργασίας της εικόνας (Image Preprocessing)
2. Έπειτα, ο υπολογισμός παραμέτρων των διανυσμάτων (Vector Calculation Parameter)
3. Και τέλος η επεξεργασία των διανυσμάτων (Vector Postprocessing).

3.3.1 Προ-επεξεργασία εικόνας (Image Preprocessing)

Χρησιμοποιώντας την προ-επεξεργασία της εικόνας έχουμε τη δυνατότητα να επέμβουμε στην εικόνα του σωματιδίου πριν από τον υπολογισμό του διανύσματος. Συχνά αυτό βοηθά στην βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων, ειδικά αν έχουμε υψηλές ή τοπικές μεταβολές της εντάσεις του φόντου.

Από το λογισμικό επιλέγουμε το φίλτρο ομαλοποίησης της έντασης των σωματιδίων, φίλτρο μεγίστου/ελαχίστου. Αυτό το φίλτρο εφαρμόζει μια τοπική διόρθωση της έντασης των σωματιδίων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αν οι εικόνες των σωματιδίων έχουν υψηλές διακυμάνσεις έντασης, π.χ. λόγω ανομοιογενούς διαμέτρου των σωματιδίων. Το φίλτρο θα καθορίσει τη μέγιστη και ελάχιστη ένταση σε ένα τοπικό παράθυρο, που ορίζεται από την κλίμακα μήκους [pixel].

Για τις δικές μας μετρήσεις επιλέξαμε κλίμακα 4 pixel. Η μέση αυτή ένταση υπολογίζεται και η αρχική ομαλοποιείται πάνω σε αυτήν. Ως εκ τούτου θα υπάρχει ομοιογενή ένταση των σωματιδίων, έτσι ώστε ακόμα και τα μικρά σωματίδια να συμβάλουν στη συσχέτιση. Αυτό το φίλτρο επεμβαίνει μόνο στην ένταση των σωματιδίων και όχι στη θέση τους [3].

3.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων διανυσμάτων (Vector Calculation Parameter)

Χρησιμοποιώντας τον υπολογισμό των παραμέτρων μπορούμε να επιλέξουμε το εύρος των δεδομένων, τον τρόπο συσχέτισης και τις εικόνες που χρησιμοποιούνται για την συσχέτιση. Η συσχέτιση μπορεί να γίνει σε ένα μόνο στάδιο ή μέσω επαναλήψεων. Επίσης μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος του παραθύρου έρευνας και της επικάλυψης.

Για τη δική μας εφαρμογή μέσω του λογισμικού Flowmaster 7.2 στην ενότητα του υπολογισμού παραμέτρων επιλέξαμε σαν μέθοδο συσχέτισης αυτή της σταυρωτής συσχέτισης, όπως ήδη έχουμε προαναφέρει. Στη λειτουργία σταυρωτής συσχέτισης η αρχική εικόνα αποτελείται από δύο πλαίσια τοποθετημένα το ένα επάνω στο άλλο.

Το πρώτο πλαίσιο (frame = 0), περιέχει την 1^η έκθεση ενώ το δεύτερο πλαίσιο (frame = 1) περιλαμβάνει τη 2^η. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την συσχέτιση όλων των παραθύρων έρευνας μεταξύ των δυο πλαισίων. Η υψηλότερη κορυφή στην εικόνα της συσχέτισης είναι η πιο πιθανή θέση μετατόπισης, ds του διανύσματος.

Μια άλλη παράμετρος είναι αυτή των επαναλήψεων, όπου η PIV μπορεί να γίνει με ένα ενιαίο πέρασμα με σταθερό μέγεθος του παραθύρου (single pass) ή με επαναλήψεις με σταθερό ή μειούμενο μέγεθος του παραθύρου (multi pass). Για κάθε επιλογή μπορούμε να επιλέξουμε τον αριθμό των επαναλήψεων.

- **Single pass:** Ο υπολογισμός του διανύσματος γίνεται με ένα πέρασμα. Το παράθυρο έρευνας και η επικάλυψη είναι σταθερά κατά την διαδικασία και δεν υπάρχει μετ-επεξεργασία κατά τον υπολογισμό του διανύσματος.
- **Multi pass:** Το διανυσματικό πεδίο υπολογίζεται από έναν αριθμό επαναλήψεων N_x με μειούμενο μέγεθος του παραθύρου έρευνας. Η διαδικασία ξεκινά με το πρώτο πέρασμα στο αρχικό μέγεθος του παραθύρου και υπολογίζει ένα διανυσματικό πεδίο αναφοράς. Στο επόμενο πέρασμα το μέγεθος του παραθύρου είναι το μισό του προηγούμενου και το διάνυσμα που υπολογίζεται στο πρώτο πέρασμα χρησιμοποιείται ως η καλύτερη επιλογή για τη μετατόπιση του παραθύρου. Με αυτόν τον τρόπο η μετατόπιση του παραθύρου είναι προσαρμοσμένη ώστε να υπολογίσουμε τα διανύσματα στα ακόλουθα βήματα με μεγαλύτερη ακρίβεια και πιο αξιόπιστα. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα ίδια σωματίδια συσχετίζονται μεταξύ τους, ακόμα και αν χρησιμοποιούνται μικρά παράθυρα έρευνας, όπου λιγότερα σωματίδια μπορούν να εισέλθουν ή να εξαφανιστούν από το παράθυρο.

Η επόμενη παράμετρος είναι ο αλγόριθμος με τον οποίο θα υλοποιηθεί η σταυρωτή συσχέτιση των εικόνων. Όπως επίσης έχουμε προαναφέρει ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι ο μετασχηματισμός Fourier και η μαθηματική εξίσωση είναι η εξής:

$$C(dx, dy) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) I_2(x + dx, y + dy) , -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2}$$

Όπου, I_1 και I_2 είναι οι εντάσεις των εικόνων του 1ου και 2ου παραθύρου έρευνας και η δισδιάστατη συνάρτηση C δίνει τη δύναμη συσχέτισης για όλες τις ακέραιες μετατοπίσεις (dx, dy) ανάμεσα στα δυο παράθυρα έρευνας. n είναι το μέγεθος του παραθύρου έρευνας και συνήθως επίσης το μέγεθος του επιπέδου συσχέτισης, δηλαδή $\pm n / 2$ είναι η μέγιστη υπολογιζόμενη μετατόπιση. Στην πραγματικότητα η πιο πάνω εξίσωση απεικονίζει έναν κυκλικό FFT αλγόριθμο που υπολογίζει μια κυκλική συσχέτιση του παραθύρου έρευνας και είναι παρόμοια, αλλά όχι ακριβώς ίδια με τη μαθηματική εξίσωση της πραγματικής συσχέτισης. Κυκλική, σημαίνει ότι η συσχέτιση υπολογίζεται πάνω σε ένα καινούριο πρότυπο που προκύπτει από τα δυο παράθυρα έρευνας, μεγέθους ($n \times n$), να επαναλαμβάνονται σε δυο διαστάσεις. Μαθηματικά από τα δύο $n \times n$ παράθυρα υπολογίζεται ο 2D FFT, ο οποίος πολλαπλασιάζεται με το συζυγή του για να υπολογιστεί ο αντίστροφος του, που τελικά αποδίδει την κυκλική συνάρτηση συσχέτισης. Αυτή η εξίσωση είναι σχεδόν 50 φορές ταχύτερη από την απευθείας συσχέτιση, εκτός αν τα παράθυρα έρευνας είναι πολύ μικρά [3].

3.3.3 Επεξεργασία διανυσμάτων (Vector Postprocessing)

Τέλος στην ενότητα επεξεργασίας των διανυσμάτων, και πάλι μέσω των φίλτρων του λογισμικού που χρησιμοποιούμε, μπορούμε να μειώσουμε το θόρυβο και να επαληθεύσουμε το διανυσματικό πεδίο. Τα φίλτρα που επιλέξαμε είναι: a) της παρεμβολής (interpolation), b) της εξομάλυνσης (smoothing) και c) της αποθορυβοποίησης και ισχυρής λείανσης (denoising and robust smoothing).

- a) Μόλις αφαιρεθούν τα λανθασμένα διανύσματα, στα εναπομείναντα κενά εισάγονται διανύσματα παρεμβολής τα οποία υπολογίζονται από τον μέσο όρο των μη μηδενικών γειτονικών διανυσμάτων. Αυτό φυσικά είναι εφικτό όταν υπάρχουν τουλάχιστον δύο γειτονικά διανύσματα.
- b) Το τελικό διανυσματικό πεδίο μπορεί να εξομαλυνθεί με ένα απλό 3×3 φίλτρο εξομάλυνσης για τη μείωση του θορύβου. Στην περίπτωση αυτή ο μέσος όρος όλων των μη μηδενικών γειτονικών διανυσμάτων υπολογίζεται χωριστά για κάθε κενό χώρο και εφαρμόζεται το εξομαλυσμένο διάνυσμα σε αυτό το κενό.
- c) Αυτό το προηγμένο φίλτρο είναι ένα γρήγορο, μη γραμμικό και βοηθά στο να εξαλείψει το θόρυβο (ψευδή διανύσματα) από το διανυσματικό πεδίο. Για όλες τις θέσεις στο διανυσματικό πεδίο ερευνά διαδοχικά τη γειτονιά, για

καθορισμένο αριθμό διανυσμάτων, ώστε να εξομαλύνει N αριθμό διανυσμάτων κοντά στα διανύσματα στη δεδομένη θέση της πηγής και να αντικαταστήσει το διάνυσμα στο πεδίο σαν αποτέλεσμα συνάρτησης των N διανυσμάτων [3].

3.4 Υπολογισμός διανυσματικού και βαθμωτού πεδίου (vector and scalar field)

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε τις παραμέτρους και τους τύπους που χρησιμοποιεί το λογισμικό, στην διαδικασία υπολογισμού του διανυσματικού και βαθμωτού πεδίου στην PIV ανάλυση. Τα δεδομένα αυτά που εξάγαμε, τα επεξεργαστήκαμε και τα αποτελέσματα θα τα παρουσιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

- Μέσο διανυσματικό πεδίο, Average V: Το μέσο διανυσματικό πεδίο V_{avg} υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{avg} = 1/n \sum_{i=1}^n V_i$$

- Μέση τετραγωνική ρίζα, RMS V: Η μέση τετραγωνική ρίζα (τυπική απόκλιση) του διανυσματικού πεδίου V_{rms} υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{rms} = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (V_i - V_{avg})^2}$$

- Μέση κινητική ενέργεια, E_{ake} : Η μέση κινητική ενέργεια υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E_{ake} = 1/2 |V_{avg}|^2$$

- Τυρβώδης κινητική ενέργεια, E_{tke} : Η τυρβώδης κινητική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{tke} = 1/2 |V_{rms}|^2 \quad (1)$$

σύμφωνα με την βιβλιογραφία [8] ή πιο αναλυτικά από την εξίσωση:

$$E_{tke} = \frac{1}{2}(v_{xrms}^2 + v_{yrms}^2 + v_{zrms}^2) \quad (2)$$

Όπου v_{xrms} , v_{yrms} , v_{zrms} οι συνιστώσες του διανύσματος V_{rms}

Με το PIV δεν έχουμε την τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας οπότε την εκτιμούμε:

$$v_{zrms} = \frac{v_{xrms} + v_{yrms}}{2} \quad (3)$$

Και τελικά θα πάρουμε:

$$E_{tke} = \frac{2.5}{4} v_{xrms}^2 + \frac{2.5}{4} v_{yrms}^2 + \frac{v_{xrms}v_{yrms}}{4} \quad (4)$$

Σύμφωνα με το λογισμικό Flowmaster 7.2 η τυρβώδης κινητική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{tke} = 3/4 V_{rms}^2 \quad (5)$$

και επίσης γνωρίζουμε ότι :

$$V_{rms}^2 = v_{xrms}^2 + v_{yrms}^2 \quad (6)$$

Από τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει ότι:

$$E_{tke} = \frac{3}{4} v_{xrms}^2 + \frac{3}{4} v_{yrms}^2 \quad (7)$$

Βλέπουμε ότι υπάρχει διαφορά στον τρόπο υπολογισμού από τη βιβλιογραφία και τον τρόπο υπολογισμού του λογισμικού μας (σχέσεις 4 και 7) και αυτό οφείλεται στη διαφορά της εκτίμησης της συνεισφοράς τρίτης συνιστώσας της ταχύτητας που στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται ως το $\frac{1}{4} v_{rms}^2$.

- Τάσεις Reynolds στις διευθύνσεις xx, yy, xy: Οι τάσεις Reynolds υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$V_{RS_{xx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{avg})_x^2$$

$$V_{RS_{yy}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{avg})_y^2$$

$$V_{RS_{xy}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((V_i - V_{avg})_x (V_i - V_{avg})_y)$$

3.5 Τυρβώδης Ροή, Διατμητικές και Ορθές Τάσεις

Τυρβώδης χαρακτηρίζεται η ροή στην οποία παρατηρείται (1) ακανόνιστη κίνηση των ρευστών σωματιδίων, (2) ανάμειξη των γειτονικών στρώσεων του ρευστού και (3) οι δυνάμεις αδράνειας υπερισχύουν αυτών του ιξώδους.

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια που οφείλεται είτε στις συνθήκες ροής, είτε σε τυχαίες αναταράξεις σε περιοχές όπου η κατανομή της μέσης ταχύτητας στην κύρια διεύθυνση της ροής εμφανίζει μεγάλες κλίσεις και κατά συνέπεια οι διατμητικές τάσεις είναι μεγάλες.

Το ιδιαίτερο γνώρισμα της τύρβης είναι η συνεχής μεταβολή των χαρακτηριστικών της ροής στο χρόνο και στο χώρο. Για παράδειγμα σε ένα σημείο του πεδίου ροής (χώρος - περιγραφή κατά Euler) οι διάφορες ιδιότητές του μεταβάλλονται χρονικά ως εξής:

- Ταχύτητα $u = u(t)$
- Πίεση $p = p(t)$
- Θερμοκρασία $\theta = \theta(t)$, κ.λ.π.

Διαχωρίζοντας τη μέση (χρονικά) τιμή και τη διακύμανση σε σχέση με αυτή της ταχύτητας και πίεσης σε ένα σημείο του πεδίου ροής ενός ρευστού έχουμε:

$$V = \bar{V} + V' \text{ και } p = \bar{p} + p'$$

ή αναλύοντας την ταχύτητα στις συνιστώσες της

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w'$$

Οι όροι με την παύλα είναι οι χρονικά μέσες τιμές, ενώ αυτοί με τον τόνο οι διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή.

3.5.1 Εξισώσεις της τυρβώδους ροής

Στις εξισώσεις της συνέχειας και της κίνησης αντικαθιστούμε τις τρεις συνιστώσες ταχύτητας και την πίεση με τη μέση τιμή και τη διακύμανσή τους και στη συνέχεια λαμβάνουμε το χρονικό μέσο όρο των εξισώσεων.

Από την εξίσωση συνέχειας προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \text{ και } \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0$$

Οι εξισώσεις των Navier - Stokes λαμβάνοντας τη μέση χρονική τιμή μετασχηματίζονται στις εξισώσεις Reynolds οι οποίες σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

όπου οι όροι

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \overline{v'w'} \text{ και} \\ \sigma_x = -\rho \overline{u'^2}, \quad \sigma_y = -\rho \overline{v'^2}, \quad \sigma_z = -\rho \overline{w'^2} \end{aligned}$$

ονομάζονται διαμητρικές και ορθές τάσεις του Reynolds αντίστοιχα [7].

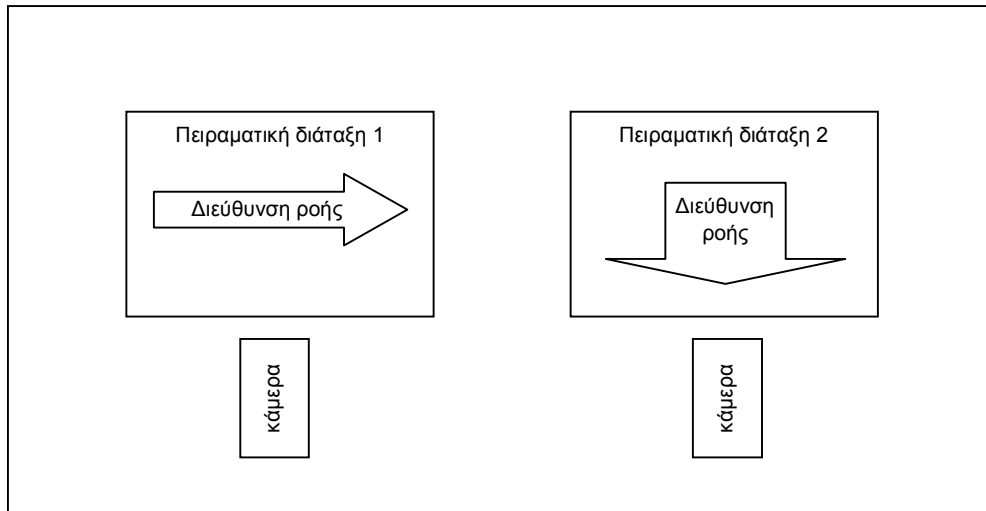
Για τις δικές μας πειραματικές μετρήσεις και για να βεβαιωθούμε ότι η μέθοδος και τα αποτελέσματα είναι ορθά, κάναμε τη διαδικασία σε ένα μικρό δείγμα πέντε εικόνων, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζουμε στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1). Η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν η εξής: i) Κάναμε ανάλυση PIV σε πέντε εικόνες και για ένα τυχαίο ζευγάρι pixels πήραμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα των V_x , V_y και υπολογίσαμε όλα τα υπόλοιπα δεδομένα π.χ V_{ave} , V_{rms} κλπ (Πίνακας 1). ii) Συγκρίναμε, ώστε να βεβαιωθούμε ότι τα αποτελέσματα είτε από τον υπολογισμό του vector field είτε από το scalar field είναι ίδια. iii) Επίσης συγκρίναμε ότι τα αποτελέσματα προκύπτουν από τους αντίστοιχους τύπους. iv) Ακόμα υπολογίσαμε ότι 1 cm είναι ίσο με 115 pixels και επομένως έχουμε 86,9μm/pixel. Αυτό το αποτέλεσμα το διαιρέσαμε με 200μs που είναι ο χρόνος μεταξύ των παλμών και πήραμε 0,4345 m/s. v) Τέλος βεβαιωθήκαμε ότι οι μονάδες όλων των αποτελεσμάτων είναι υπολογισμένες σε m/s και όχι σε pixels καθώς είναι πολλαπλασιασμένα με 0,4345.

frame	pixel	pixel	Vx	Vy	Vx-Vavex	Vy-Vavey	(Vx-Vavex)^2	(Vy-Vavey)^2	(Vx-Vavex)*(Vy-Vavey)
1	472	360	2,233956	4,440288	1,466713	3,557254	2,151248	12,654057	5,217471691
2	472	360	1,087792	0,227828	0,320549	-0,655206	0,102752	0,429295	-0,210025695
3	472	360	-0,346965	0,221508	-1,114208	-0,661526	1,241459	0,437616	0,737077206
4	472	360	0,570898	-0,549653	-0,196345	-1,432687	0,038551	2,052591	0,281300603
5	472	360	0,290533	0,075198	-0,476710	-0,807836	0,227252	0,652599	0,385103243
Δεδομένα από το davis στο vector field									
average			0,767243	0,883034					
IVavel				1,169790668					
						rms	0,969699	2,014085	
						IVrmsl		2,235364654	
Δεδομένα από το davis στο scalar field									
average kinetic	0,6842051	1/2*(abs Vave)^2				pixel	pixel	average	rms
turbulent kinetic	3,74764135	3/4*(abs Vrms)^2			Vx	472	360	0,767243	0,969699
Reynold stress XY	1,28218541	1/n*sum[(Vx-Vavex)*(Vy-Vavey)]			Vy	472	360	0,883034	2,014085
Reynold stress XX	0,75225239	1/n*sum[(Vx-Vavex)^2]			IVI	472	360	1,169791	2,235365
Reynold stress YY	3,24523172	1/n*sum[(Vy-Vavey)^2]							
TSS max 2D	1,78822144	sqrt(1/4*(ReYY-ReXX)^2+ReXY^2)							
						average kinetic			0,684204
						turbulent kinetic			3,747637
						Reynold stress XY			1,282184
						Reynold stress XX			0,752252
						Reynold stress YY			3,245227
						TSS max 2D			1,788219

Πίνακας 1: Δεδομένα από το λογισμικό Davis Flowmaster 7.2 για PIV σε δείγμα 5 εικόνων

Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Για τη δική μας εφαρμογή την PIV ανάλυση την κάναμε για δυο διαφορετικές διατάξεις του κυκλοφορητή. Η πρώτη μέτρηση έγινε στη διεύθυνση της ροής μετρώντας την ροή που αναπτύσσεται ευθεία μπροστά από τον κυκλοφορητή (πειραματική διάταξη 1) ενώ η δεύτερη έγινε σε επίπεδο κάθετο της ροής μετρώντας τη δίνη που δημιουργείται (πειραματική διάταξη 2). (Σχήμα 4.1)

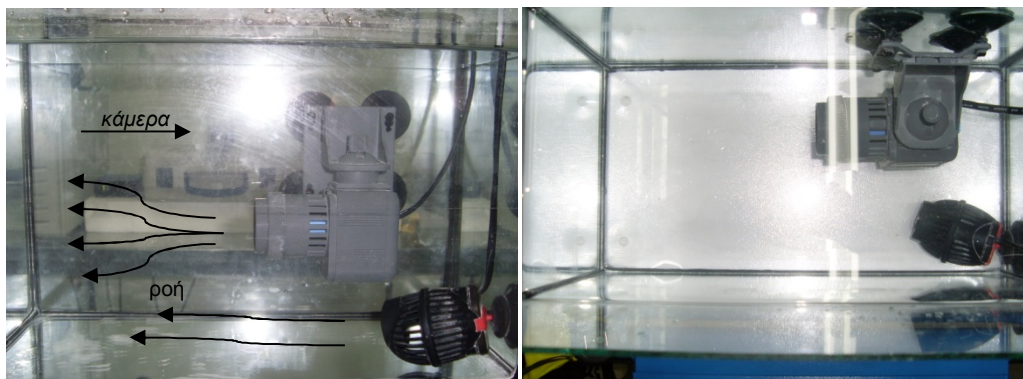


Σχήμα 4.1: Σχηματικά οι δυο διατάξεις της εφαρμογής μας

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται παρακάτω χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό Tecplot 10.

4.1 Πειραματική διάταξη 1 – Ευθεία ροή

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η διάταξη του δοχείου με τους κυκλοφορητές να βρίσκονται κάθετα με την κάμερα.

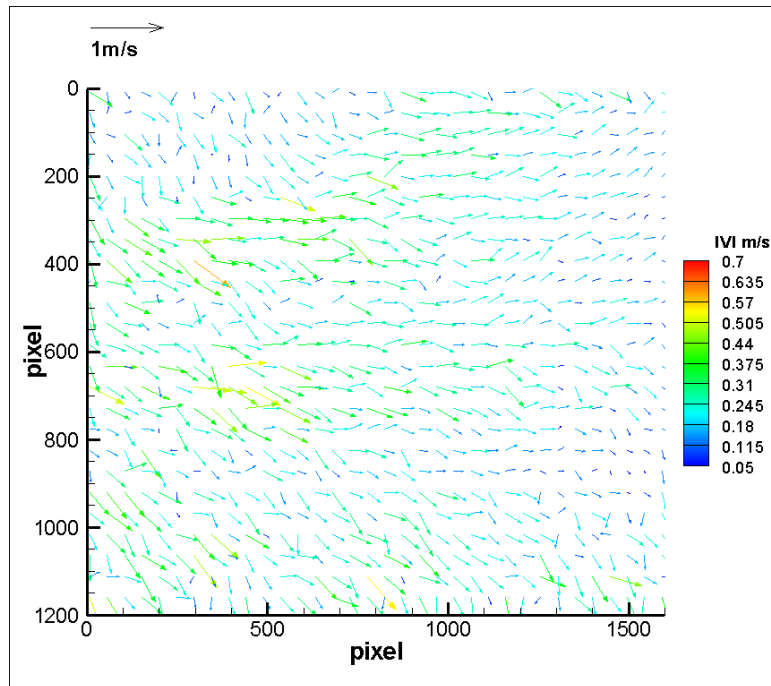


Σχήμα 4.2: Οι κυκλοφορητές στην δημιουργία ευθείας ροής

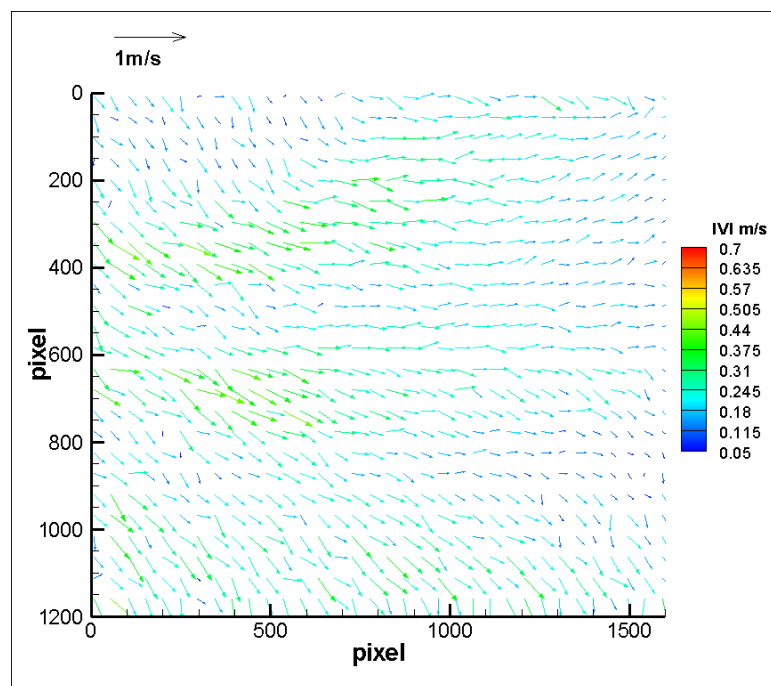
Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που πήραμε με και χωρίς τη χρήση φίλτρων και η διαφορά μεταξύ 1000 και 3000 εικόνων.

4.1.1 Διανυσματικό πεδίο στις 1000 και 3000 εικόνες

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι μέσες απόλυτες ταχύτητες του διανυσματικού πεδίου στην ευθεία ροή μπροστά από τους κυκλοφορητές.



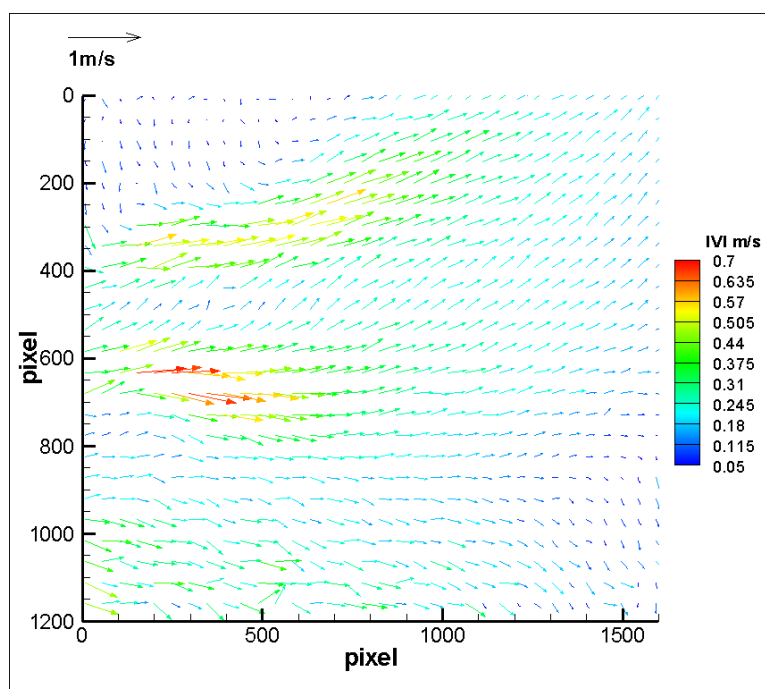
Σχήμα 4.3: Διανυσματικό πεδίο χωρίς κανένα φίλτρο στις 1000 εικόνες



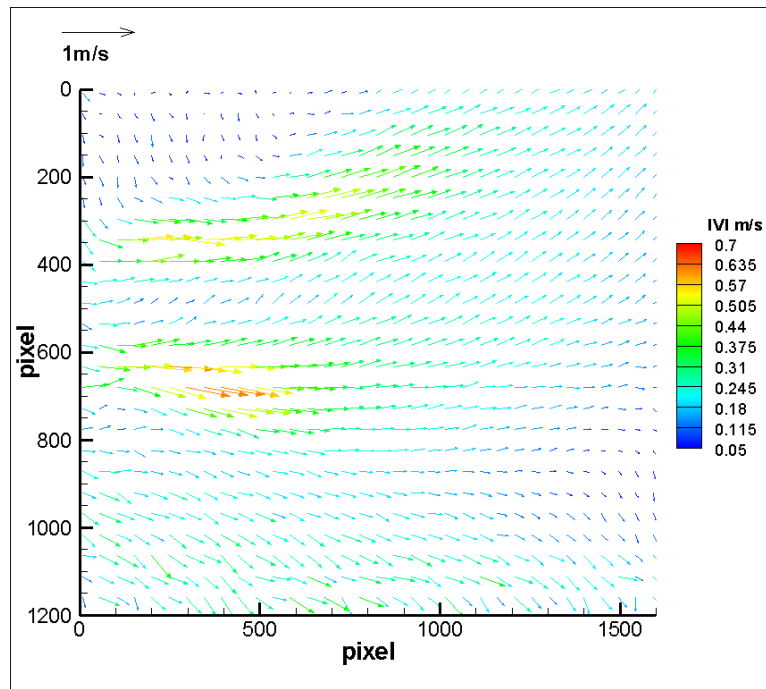
Σχήμα 4.4: Διανυσματικό πεδίο χωρίς κανένα φίλτρο στις 3000 εικόνες

Στις δυο παραπάνω εικόνες (Σχήματα 4.5 & 4.6) βλέπουμε το διανυσματικό πεδίο που σχηματίζεται από τους κυκλοφορητές στο ρευστό. Από τις εικόνες συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερο δείγμα εικόνων έχουμε τόσο καλύτερα, ακριβέστερα και πιο ομαλοποιημένα αποτελέσματα παίρνουμε, αν και βέβαια είναι περισσότερο χρονοβόρα η επεξεργασία.

Αυτό που παρατηρούμε στις εικόνες είναι μια αναμενόμενη αύξηση της ταχύτητας του ρευστού ακριβώς μπροστά από την προπέλα. Η αυξημένη ταχύτητα στο κάτω μέρος οφείλεται στον δεύτερο, μικρότερης ισχύος, κυκλοφορητή που χρησιμοποιήσαμε ώστε να αυξήσουμε στο σύνολο όλη τη ροή, και στην πραγματικότητα να έχουμε καλύτερη κυκλοφορία των σωματιδίων που χρησιμοποιήσαμε.

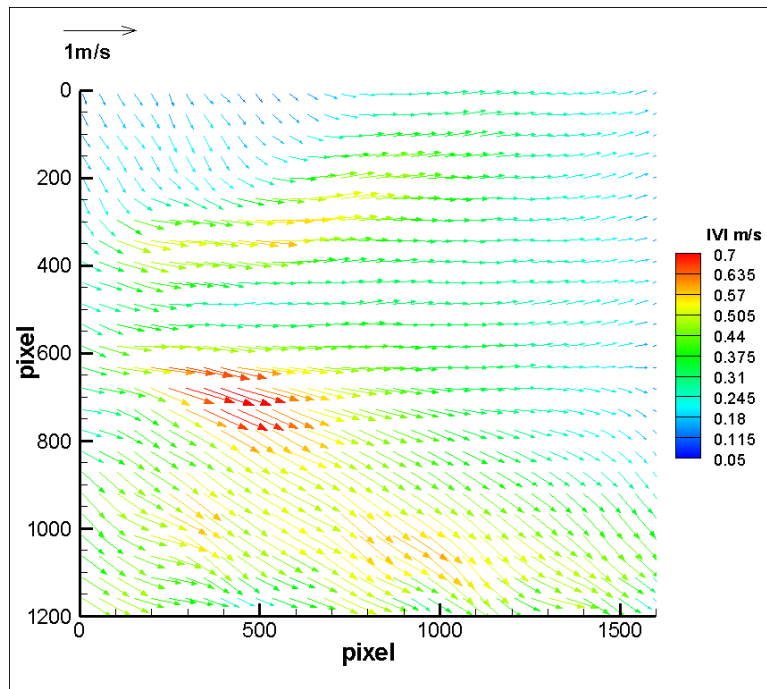


Σχήμα 4.5: Διανυσματικό πεδίο με multi pass στις 1000 εικόνες

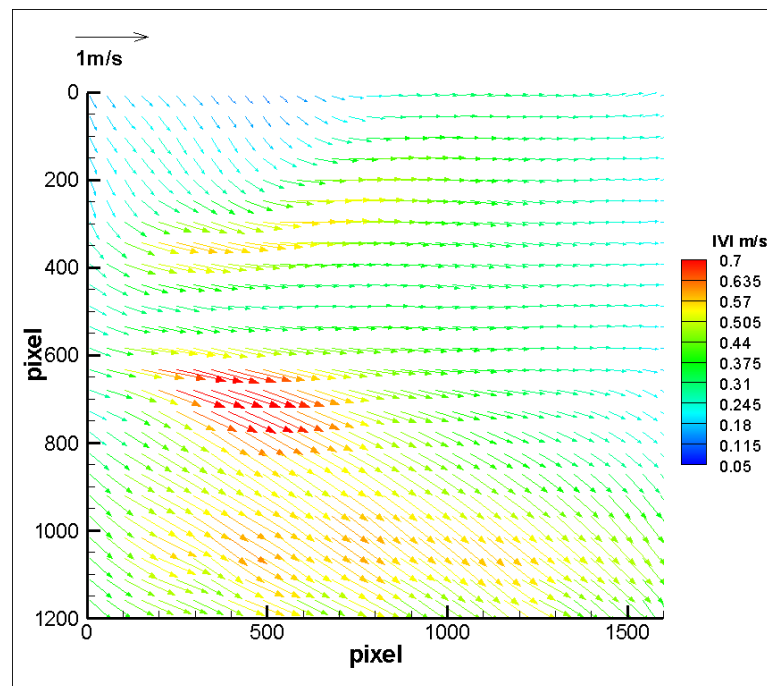


Σχήμα 4.6: Διανυσματικό πεδίο με multi pass στις 3000 εικόνες

Με την επιλογή multi pass, όπως ήδη έχουμε αναφέρει και στην 3.3.2 υποενότητα του 3 κεφαλαίου, το διανυσματικό πεδίο υπολογίζεται από έναν αριθμό επαναλήψεων N_x με μειούμενο μέγεθος του παραθύρου έρευνας. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τις εικόνες 4.4 έως 4.6 παρατηρούμε ότι με την επιλογή multi pass τα διανύσματα στο πεδίο είναι πιο διατεταγμένα σε σχέση με τα άτακτα διανύσματα του πεδίου χωρίς κάποιο φίλτρο. Με τα πολλαπλά περάσματα στην PIV διαδικασία έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



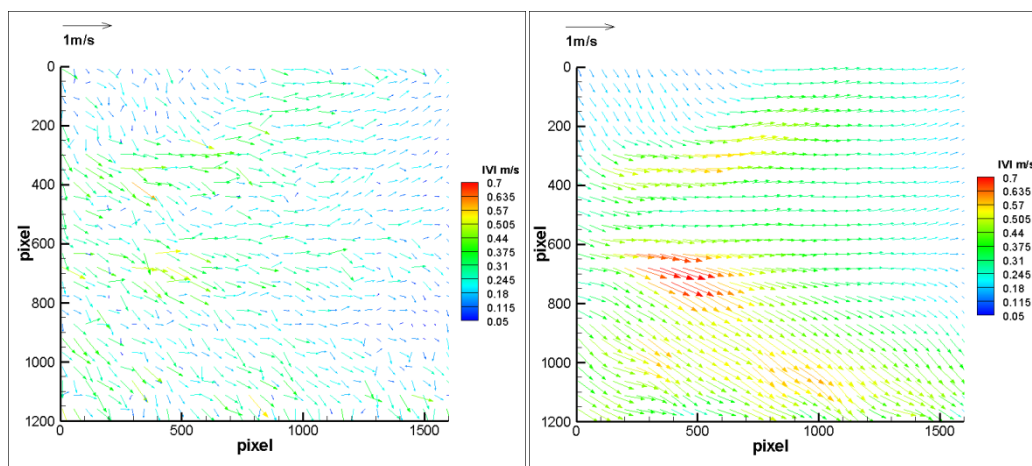
Σχήμα 4.7: Διανυσματικό πεδίο με όλα τα φίλτρα ενεργά στις 1000 εικόνες



Σχήμα 4.8: Διανυσματικό πεδίο με όλα τα φίλτρα ενεργά στις 3000 εικόνες

Στις εικόνες 4.7 και 4.8 παρατηρούμε ότι το διανυσματικό πεδίο είναι περίπου ίδιο στις 1000 και 3000 εικόνες. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι με την εφαρμογή όλων των φίλτρων προ-επεξεργασίας τις εικόνες, τα φίλτρα επεξεργασίας των διανυσμάτων και του τελικού διανυσματικού πεδίου (smoothing filter, erosion and dilation filter, multi pass, denoising and robust smoothing filter), δεν παίζει σημαντικό ρόλο το πλήθος

του δείγματος. Άρα όσον αφορά τη μέση ταχύτητα, με μικρότερο δείγμα και εφαρμογή των φίλτρων έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα σε λιγότερο χρόνο. Αντίθετα στα στατιστικά μεγέθη της τύρβης το δείγμα παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.9: Διανυσματικό πεδίο χωρίς φίλτρα (αριστερά) και με όλα τα φίλτρα (δεξιά) στις 1000 εικόνες

Στην εικόνα (Σχήμα 4.9) γίνεται σύγκριση του διανυσματικού πεδίου στις 1000 εικόνες χωρίς και με τη χρήση των φίλτρων. Είναι φανερό ότι με τη χρήση των φίλτρων έχουμε πιο ομαλοποιημένο και ακριβέστερο αποτέλεσμα.

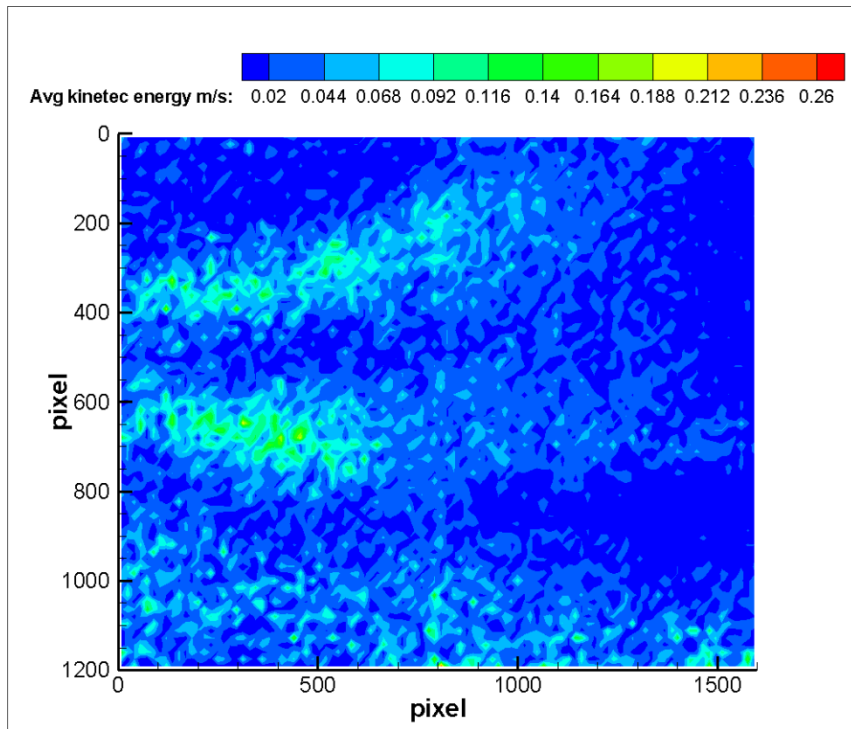
Όσον αφορά τώρα το διανυσματικό πεδίο και την ταχύτητα του ρευστού, όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ότι η ταχύτητα είναι αυξημένη μπροστά από τον κυκλοφορητή και μάλιστα φαίνεται και η επιρροή του δεύτερου κυκλοφορητή στο κάτω σκέλος του διανυσματικού πεδίου. Η ταχύτητα κυμαίνεται από 0,05 έως 0,7 m/s και είναι μια σχετικά γρήγορη ροή.

4.1.2 Μέση Κινητική Ενέργεια

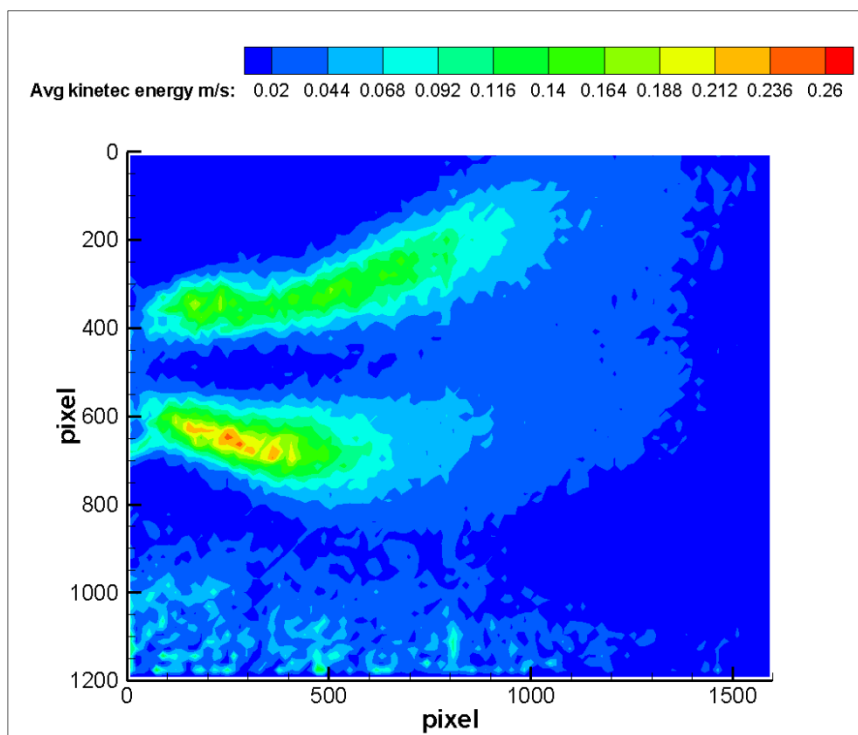
Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 3, η μέση κινητική ενέργεια υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_{ake} = 1/2 |V_{avg}|^2$$

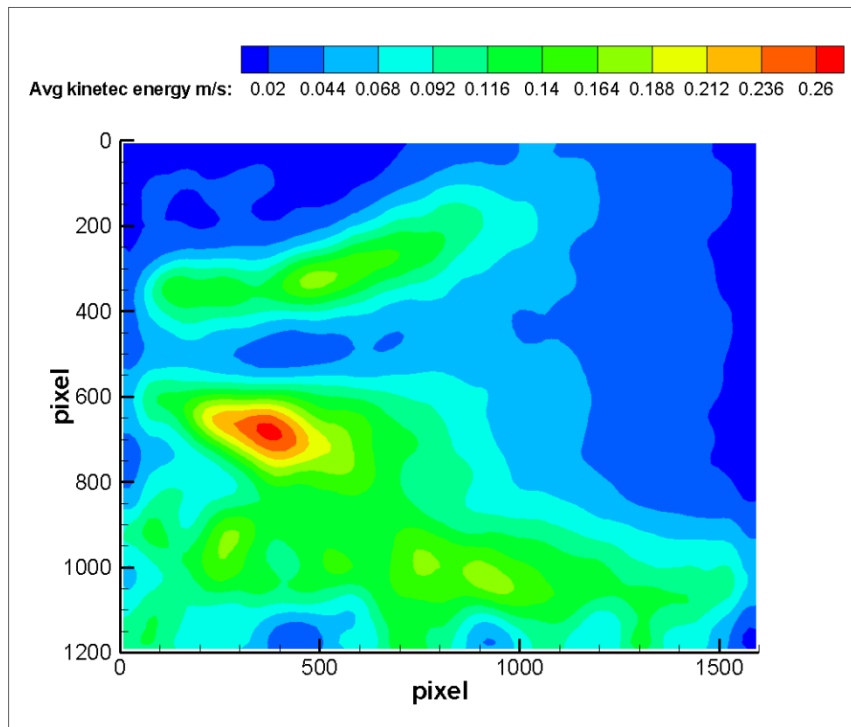
Στις παρακάτω εικόνες (Σχήματα 4.10, 4.11, 4.12) θα παρουσιάσουμε το βαθμωτό πεδίο της μέσης κινητικής ενέργειας για το δείγμα 1000 εικόνων, της ευθείας ροής, για όλες τις περιπτώσεις των φίλτρων, όπως στην ενότητα 4.1.1. Το βαθμωτό πεδίο είναι παρόμοιο είτε για τις 1000 είτε για τις 3000 εικόνες.



Σχήμα 4.10: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας χωρίς κανένα φίλτρο



Σχήμα 4.11: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας με multi pass



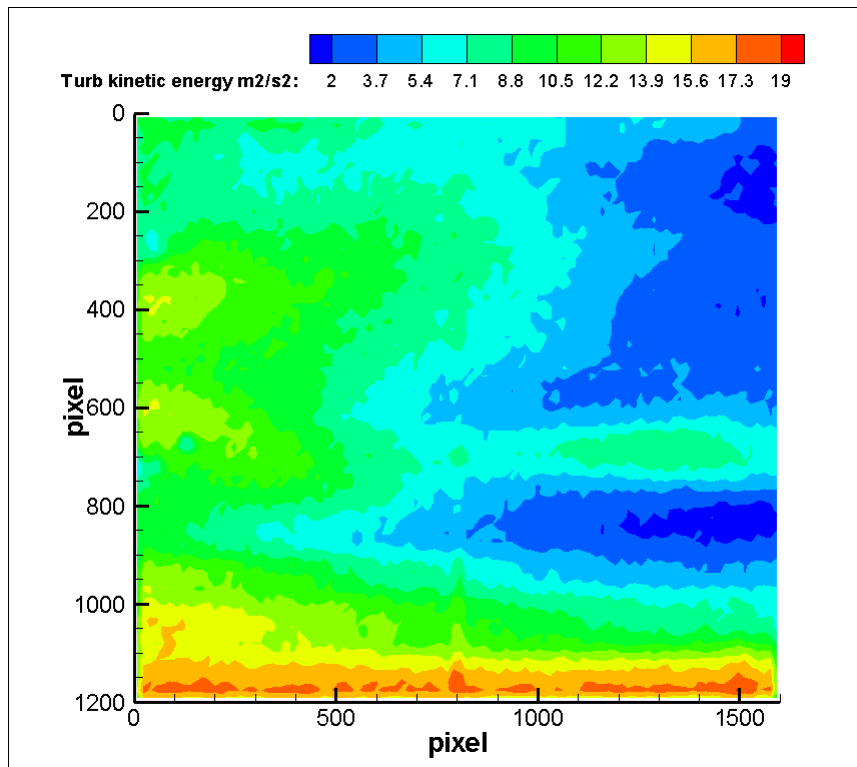
Σχήμα 4.12: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας με όλα τα φίλτρα ενεργά

Η λειτουργία των φίλτρων είναι ολοφάνερη ως προς την ομαλοποίηση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του βαθμωτού πεδίου της μέσης κινητικής ενέργειας. Όπως και στο διανυσματικό πεδίο έτσι και στο βαθμωτό πεδίο παρατηρούμε την αυξημένη κινητική ενέργεια μπροστά από τον κυκλοφορητή. Η ενέργεια κυμαίνεται από 0,2 Joule/Kg μπροστά από τον κυκλοφορητή και περίπου 0,02 Joule/Kg μακριά από αυτόν.

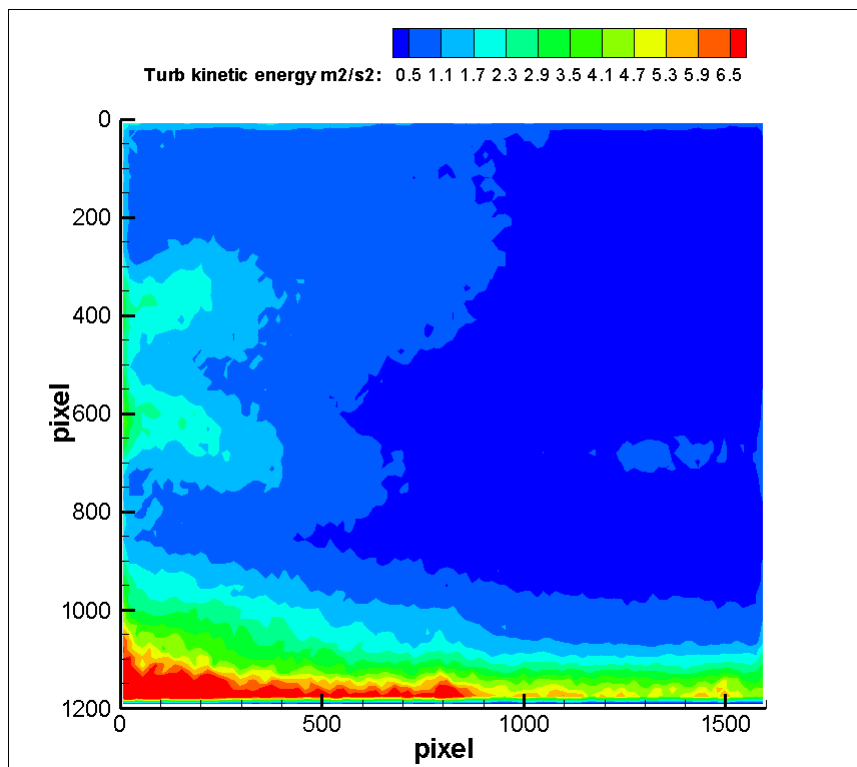
4.1.3 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια

Ορίζεται η τυπική απόκλιση της διακύμανσης της ταχύτητας $1/2V_{rms}^2$. Όπως έχουμε αναφέρει όμως, η E_{tke} υπολογίζεται από την εξίσωση:

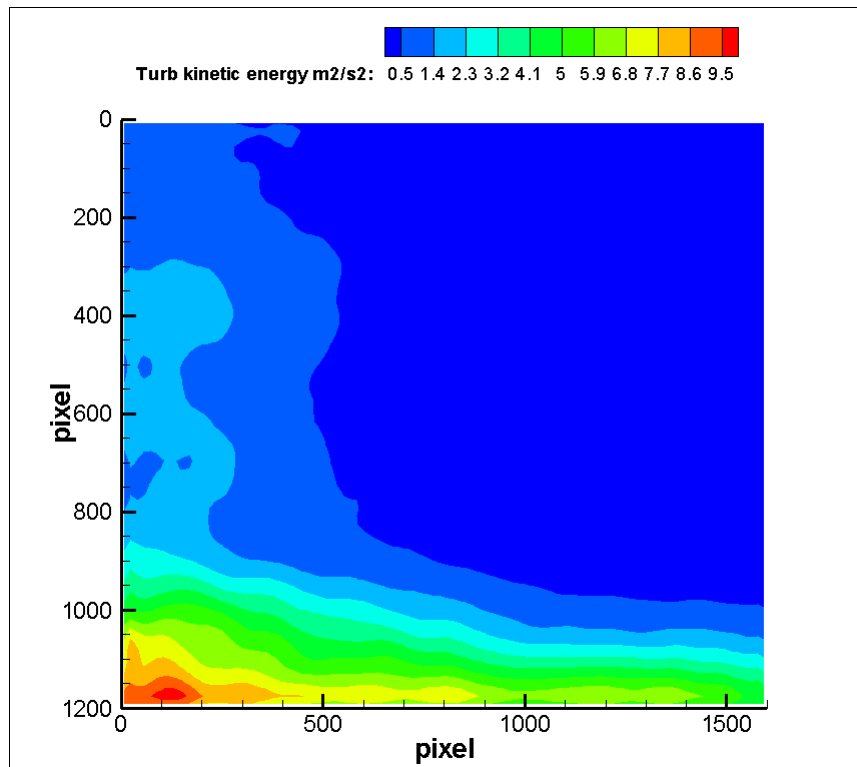
$$E_{tke} = 3/4V_{rms}^2$$



Σχήμα 4.13: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας χωρίς κανένα φίλτρο



Σχήμα 4.14: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας με multi pass

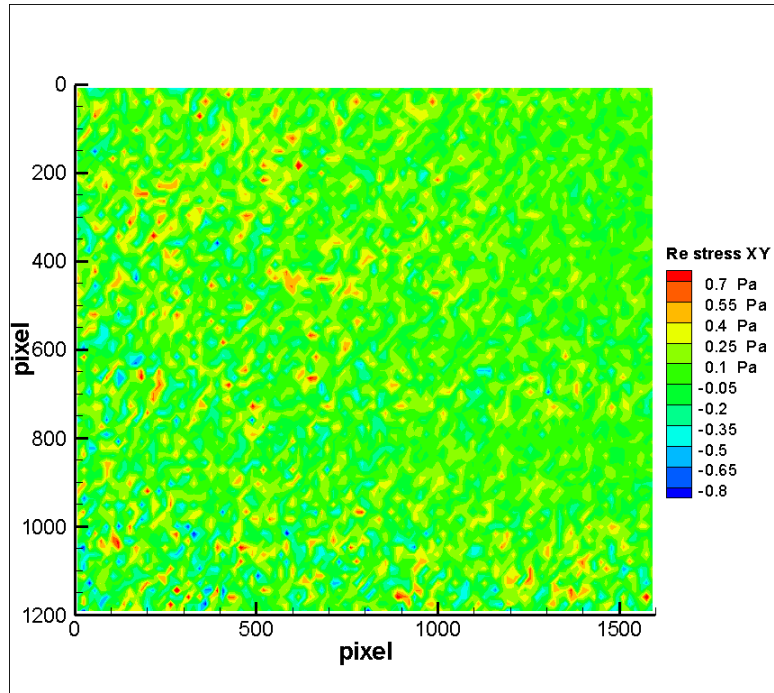


Σχήμα 4.15: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας με όλα τα φίλτρα ενεργά

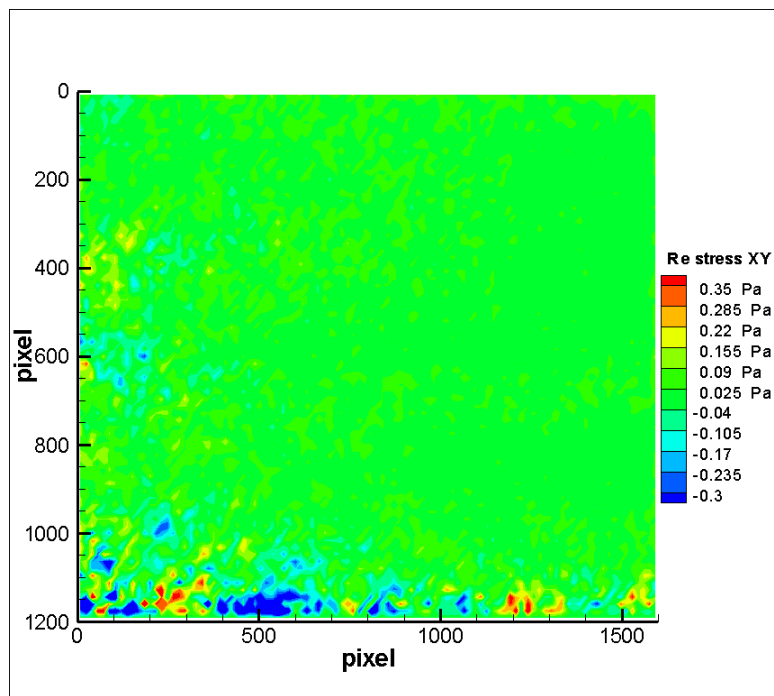
Από τις παραπάνω εικόνες, σε δείγμα 1000 εικόνων (Σχήματα 4.13, 4.14, 4.15) βγαίνει το συμπέρασμα ότι μπροστά από τους κυκλοφορητές δημιουργείται τύρβη. Παραγωγή της τύρβης σημαίνει μετατροπή της ενέργειας της μέσης ροής σε ΤΚΕ, η οποία με τη δράση του ιξώδους μετατρέπεται σε θερμότητα. Όταν οι ρυθμοί παραγωγής της ΤΚΕ και απωλειών σε θερμότητα είναι ίδιοι, τότε υπάρχει ισορροπία στο πεδίο ροής. Η μεταφορά της ενέργειας από τη μέση ροή στην τύρβη γίνεται από τους μεγαλύτερους στροβίλους (δίνες) προς τους μικρότερους και από τους μικρότερους δυνατούς μετατρέπεται σε θερμότητα υπό την επίδραση του ιξώδους. Ποτέ η μέση ροή δεν ανακτά ενέργεια από την τύρβη [7].

4.1.4 Διατμητικές και Ορθές τάσεις

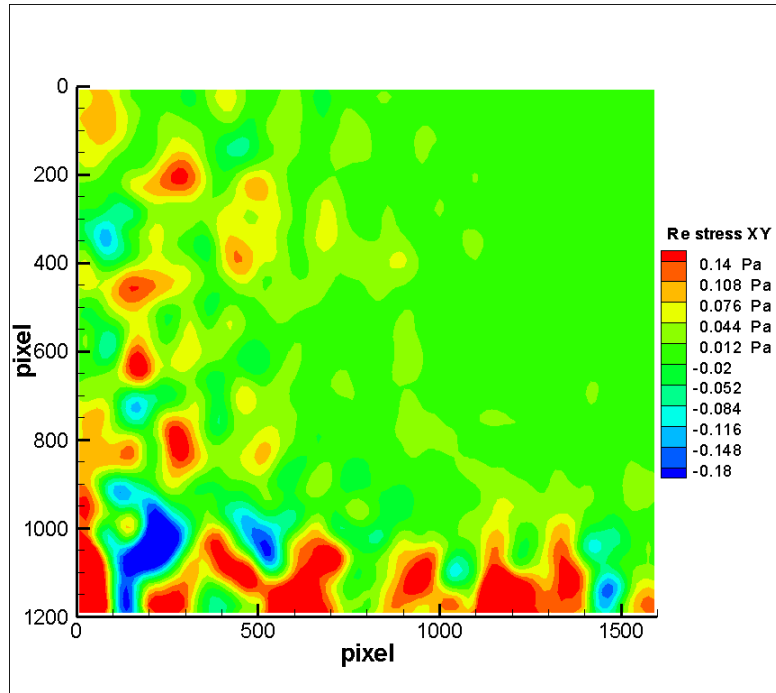
Στις παρακάτω εικόνες που παρατίθενται (Σχήματα 4.16- 4.21) παρουσιάζονται οι διατμητικές τάσεις Reynolds στην διεύθυνση xy και οι ορθές τάσεις Reynolds στις διευθύνσεις xx και yy αντίστοιχα σε όλες τις περιπτώσεις των φίλτρων, όπως και στις προηγούμενες ενότητες. Τα αποτελέσματα είναι στις 1000 εικόνες.



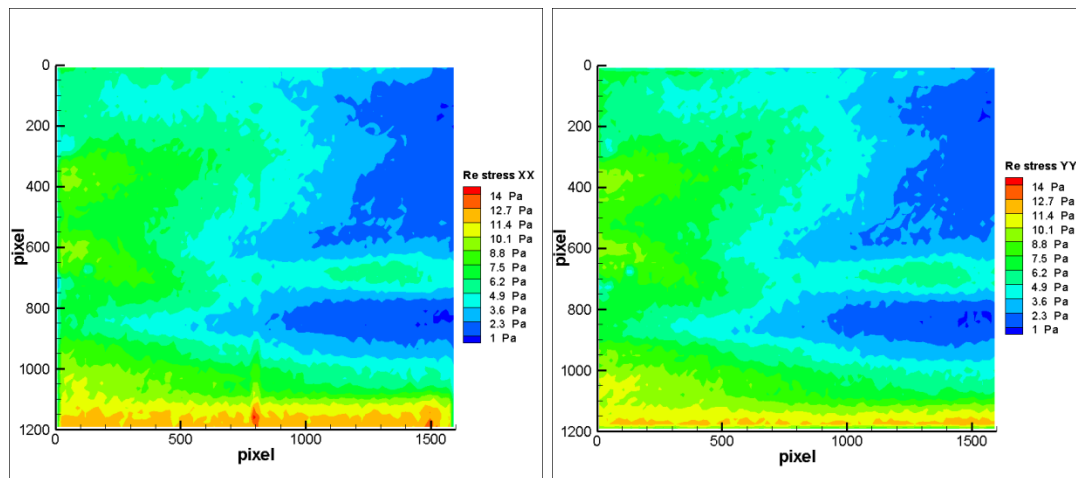
Σχήμα 4.16: Βαθμωτό πεδίο διατμητικών τάσεων χωρίς κανένα φίλτρο



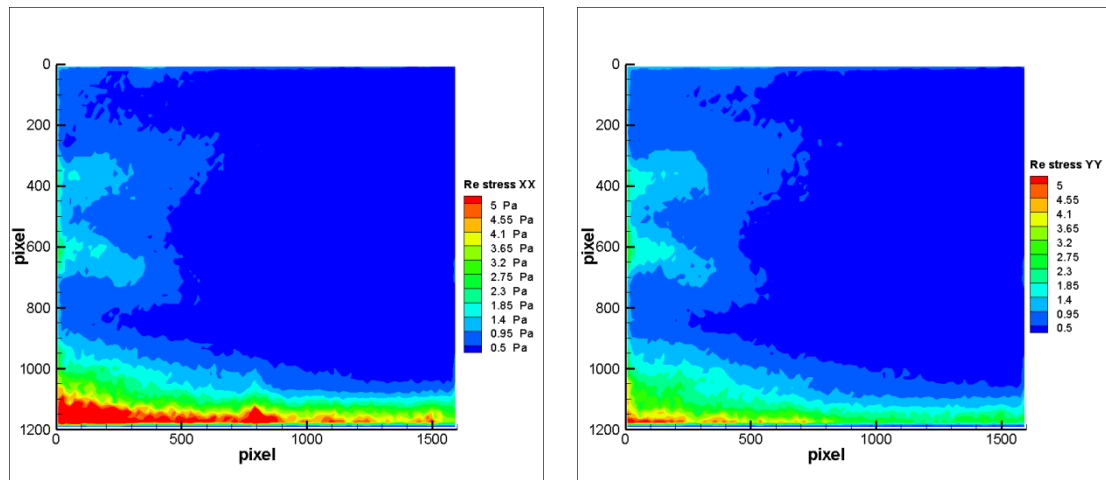
Σχήμα 4.17: Βαθμωτό πεδίο διατμητικών τάσεων με φίλτρο multi pass



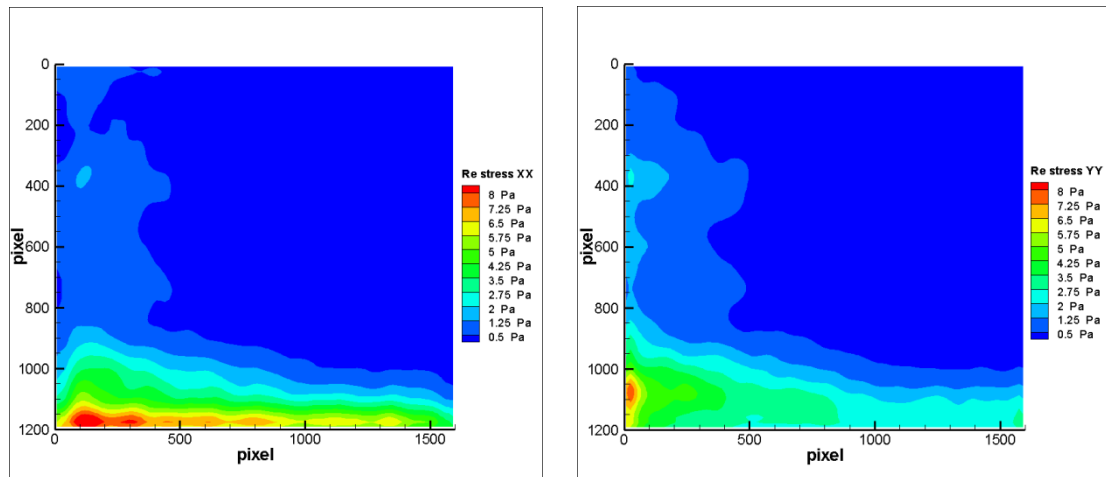
Σχήμα 4.18: Βαθμωτό πεδίο διατμητικών τάσεων με όλα τα φίλτρα ενεργά



Σχήμα 4.19: Βαθμωτά πεδία ορθών τάσεων στις διευθύνσεις xx (αριστερά) και yy (δεξιά) χωρίς κανένα φίλτρο



Σχήμα 4.20: Βαθμωτά πεδία ορθών τάσεων στις διευθύνσεις xx (αριστερά) και yy (δεξιά) με φίλτρο *multi pass*

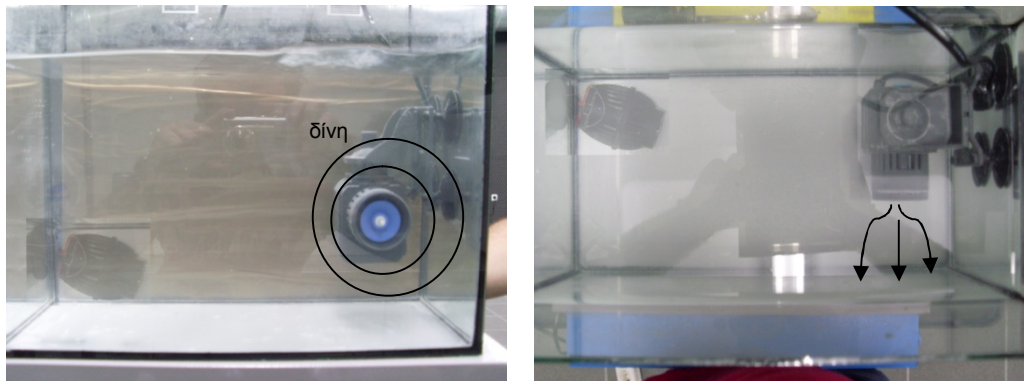


Σχήμα 4.21: Βαθμωτά πεδία ορθών τάσεων στις διευθύνσεις xx (αριστερά) και yy (δεξιά) με όλα τα φίλτρα ενεργά

Εξ ορισμού Reynolds stress είναι το καθαρό ποσοστό μεταφοράς της ορμής στην επιφάνεια ενός ρευστού που προκύπτει από στροβιλισμό του ρευστού. Στις παραπάνω εικόνες (Σχήματα 4.16- 4.21) βλέπουμε πως διαμορφώνεται το πεδίο των διατμητικών και ορθών τάσεων στο ρευστό. Παρατηρούνται τοπικά σημεία όπου οι τάσεις είναι αυξημένες, κυρίως κοντά στον κυκλοφορητή και στον πυθμένα του δοχείου λόγω του δεύτερου κυκλοφορητή, όπως ήδη έχουμε αναφέρει.

4.2 Πειραματική διάταξη 2 – Ροή κάθετη στη διεύθυνση της κάμερας (Δίνη)

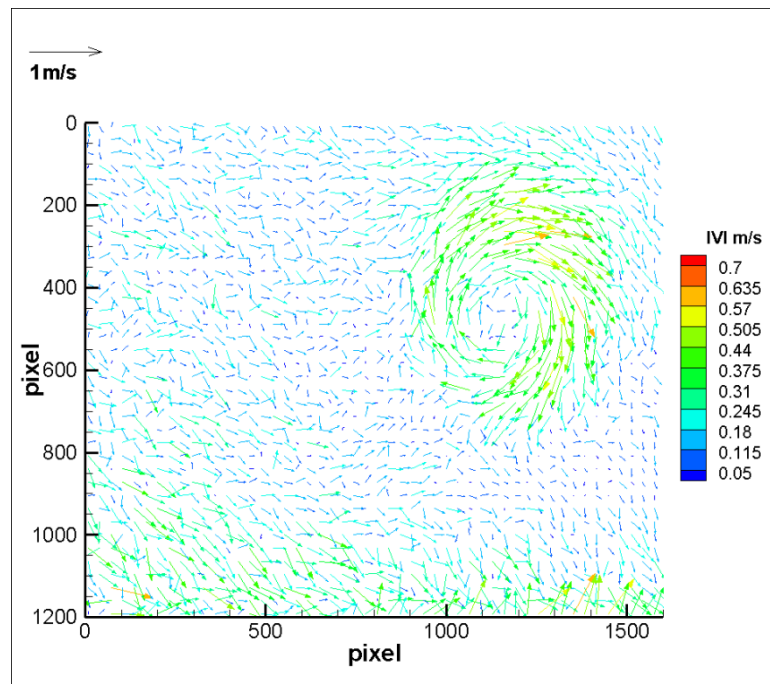
Στο σχήμα 4.22 φαίνεται η διάταξη του δοχείου με τους κυκλοφορητές να βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση με την κάμερα.



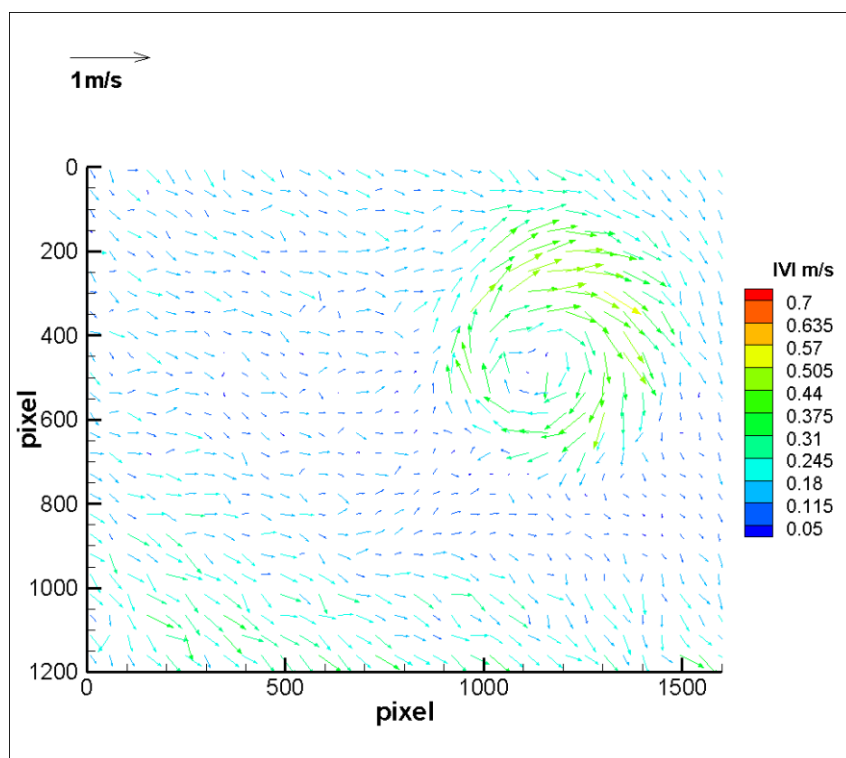
Σχήμα 4.22: Ο κυκλοφορητής στην δημιουργία δίνης

4.2.1 Διανυσματικό πεδίο στις 1000 και 3000 εικόνες

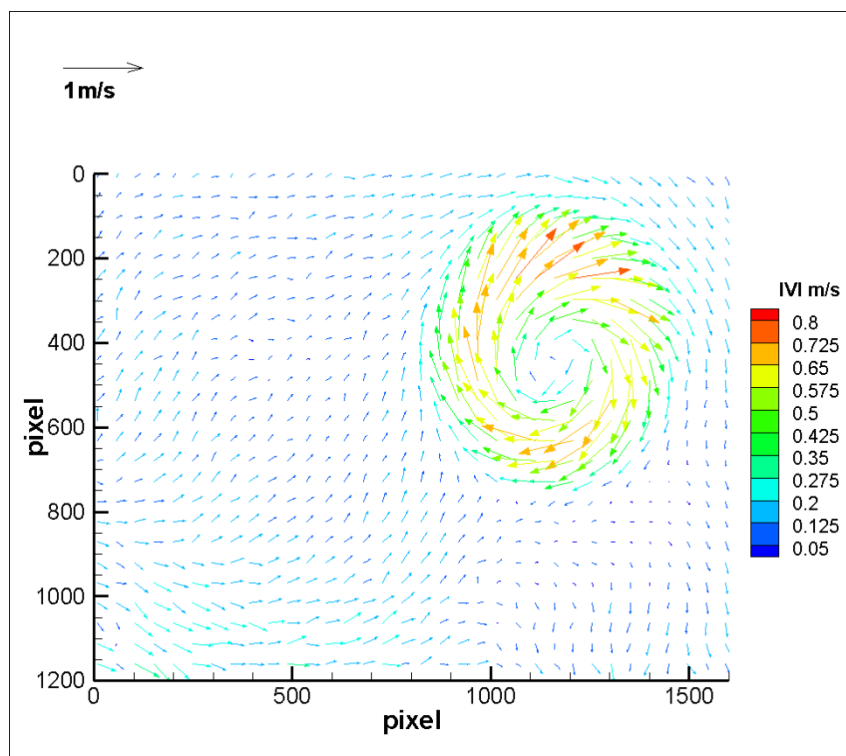
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι μέσες απόλυτες ταχύτητες του διανυσματικού πεδίου της δίνης που δημιουργείται από τον κυκλοφορητή.



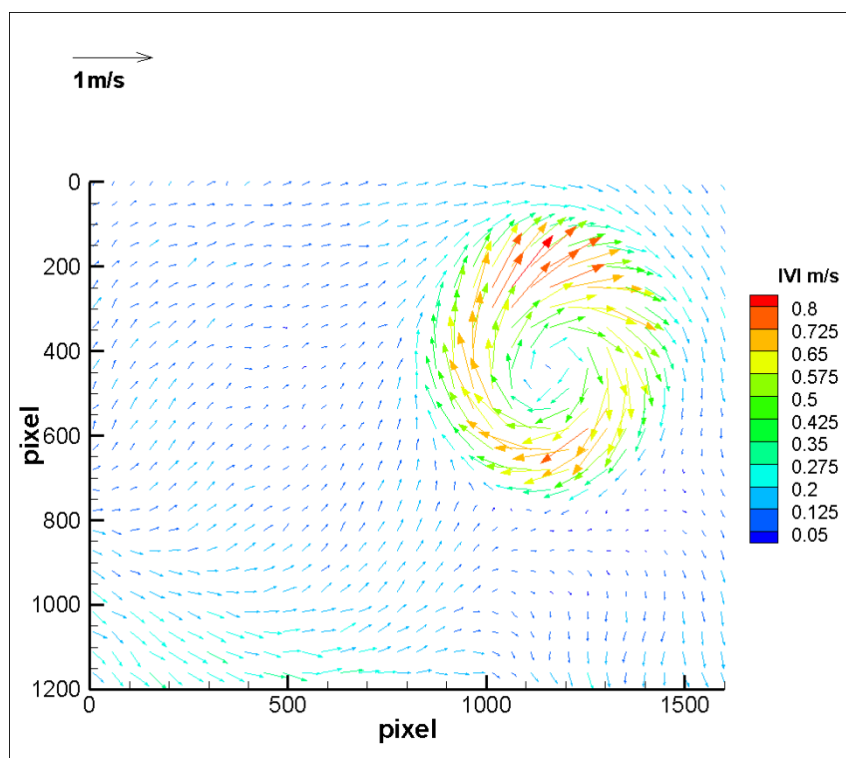
Σχήμα 4.23: Διανυσματικό πεδίο χωρίς κανένα φίλτρο στις 1000 εικόνες



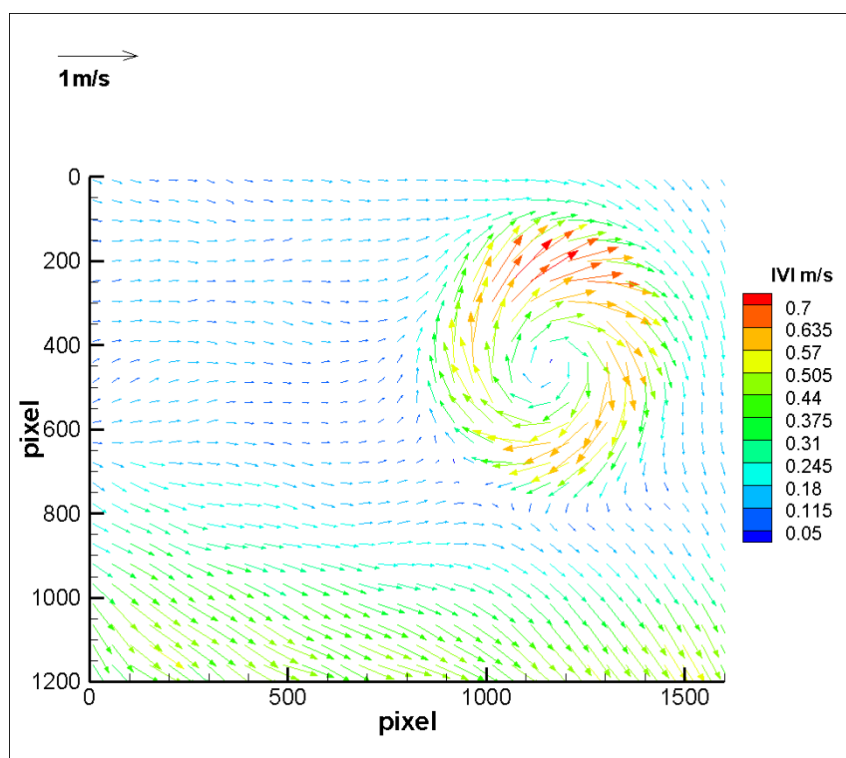
Σχήμα 4.24: Διανυσματικό πεδίο χωρίς κανένα φίλτρο στις 3000 εικόνες



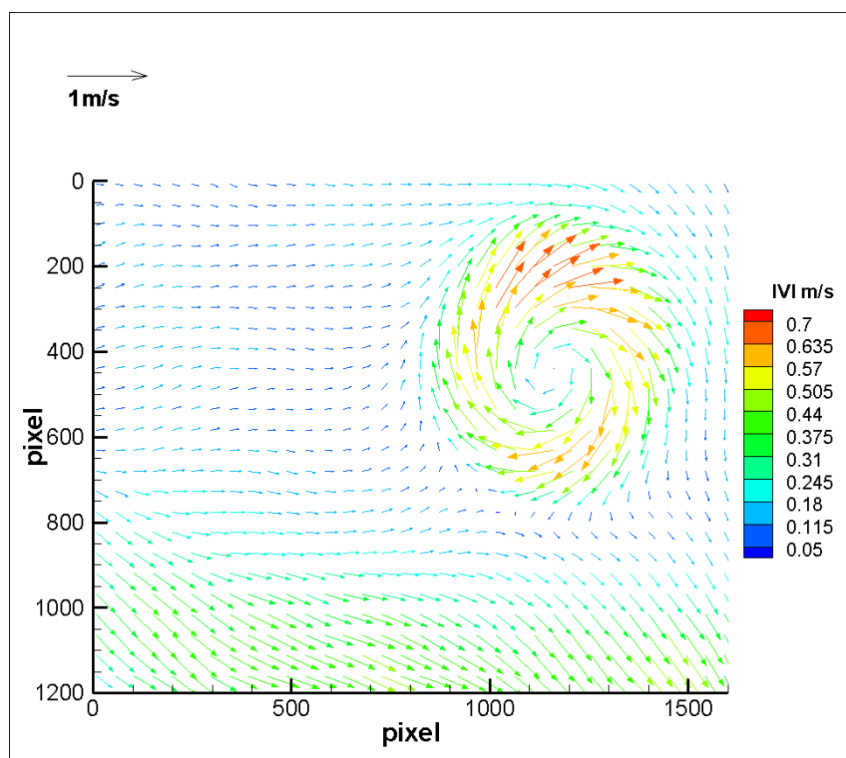
Σχήμα 4.25: Διανυσματικό πεδίο με multi pass στις 1000 εικόνες



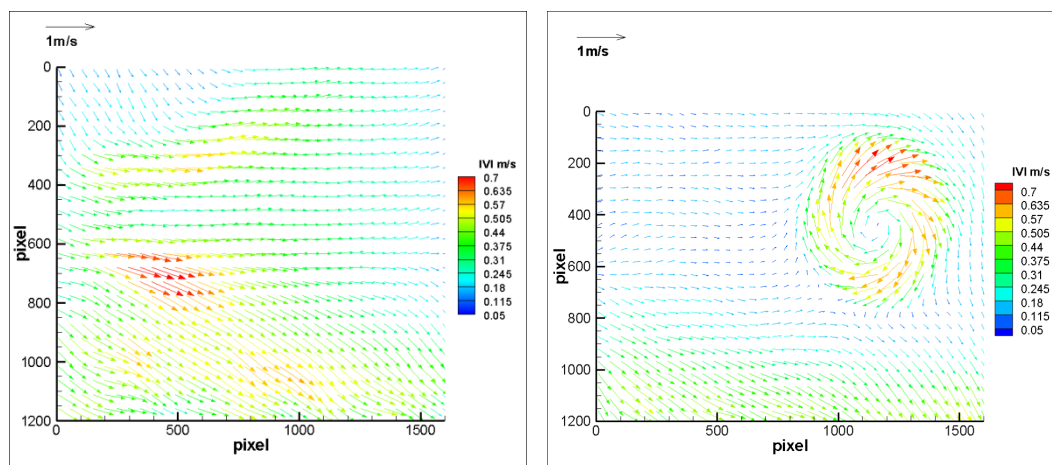
Σχήμα 4.26: Διανυσματικό πεδίο με multi pass στις 3000 εικόνες



Σχήμα 4.27: Διανυσματικό πεδίο με όλα τα φίλτρα ενεργά στις 1000 εικόνες



Σχήμα 4.28: Διανυσματικό πεδίο με όλα τα φίλτρα ενεργά στις 3000 εικόνες



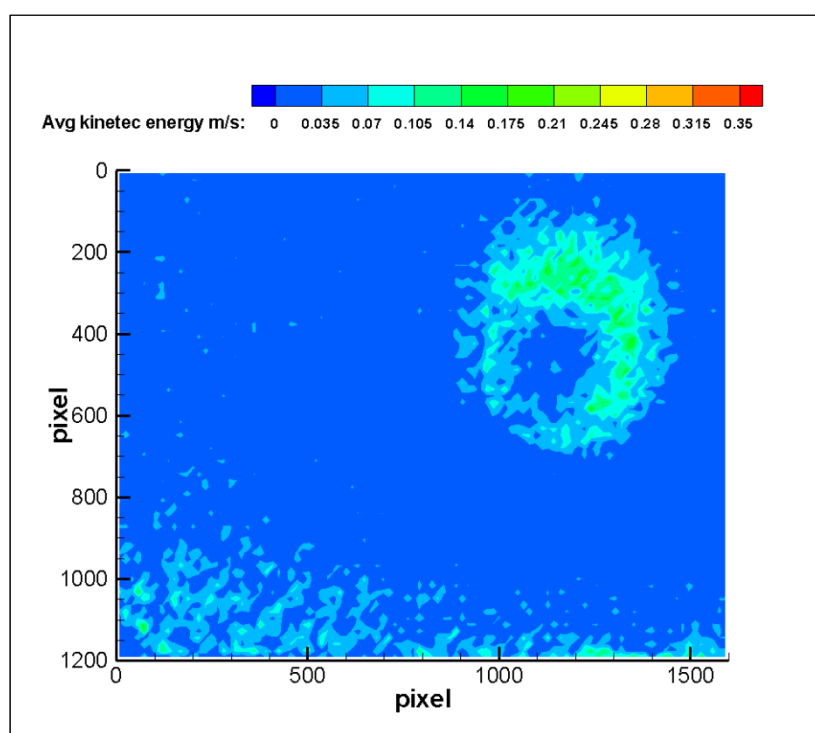
Σχήμα 4.29: Διανυσματικό πεδίο με όλα τα φίλτρα ενεργά στην ευθεία ροή (αριστερά) και στην δίνη (δεξιά)

Αυτό που παρατηρούμε στις παραπάνω εικόνες(Σχήματα 4.23- 4.29), όπως και στην ευθεία ροή, είναι μια αναμενόμενη αύξηση της ταχύτητας του ρευστού ακριβώς μπροστά από την προπέλα. Όσον αφορά την χρήση των φίλτρων είναι φανερό ότι τα

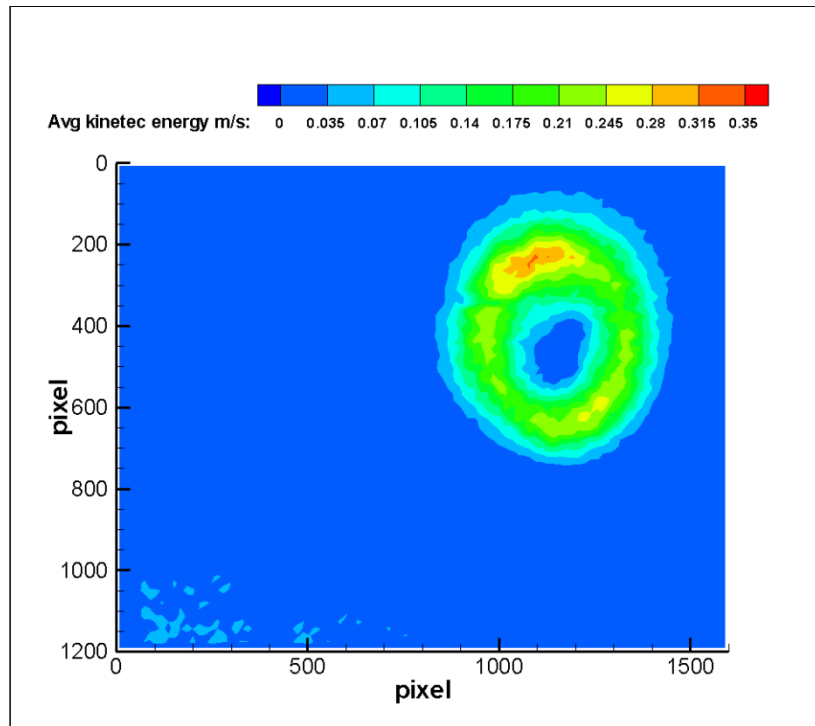
αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια τόσο στο δείγμα των 1000 όσο και των 3000 εικόνων. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει σκοπός της λειτουργία των φίλτρων είναι να ομαλοποιήσουν το οπτικό αποτέλεσμα. Συνεπώς για να είναι μια μέτρηση αξιόπιστη, το καλύτερο είναι να κάνουμε την ανάλυση PIV χωρίς φίλτρα αλλά σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο δείγμα. Στις εικόνες (Σχήμα 4.29) βλέπουμε παράλληλα το διανυσματικό πεδίο στην ευθεία ροή και τη δίνη και μπορούμε να δούμε πως αναπτύσσεται η ροή μπροστά από τον κυκλοφορητή.

4.2.2 Μέση Κινητική Ενέργεια

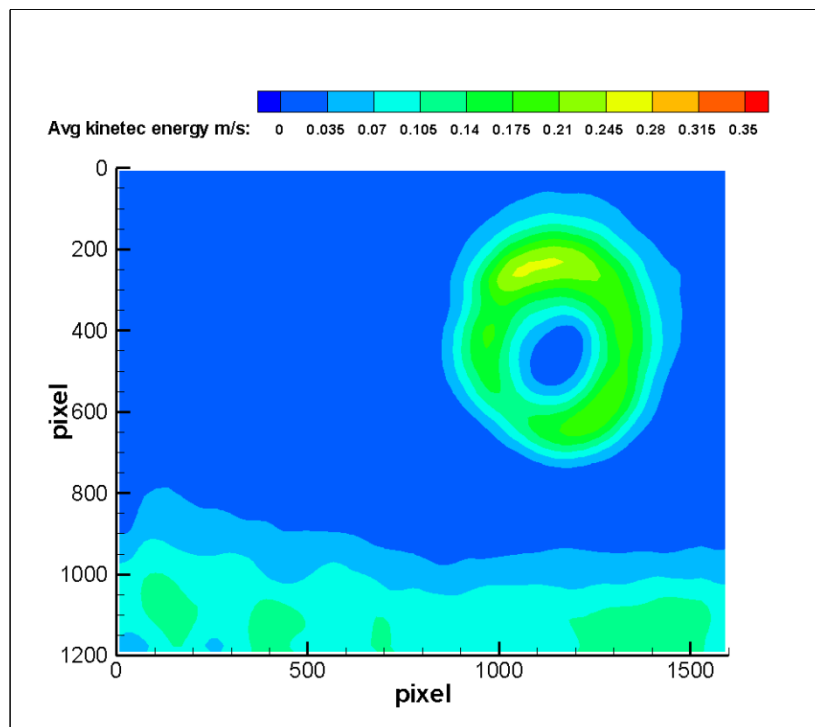
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε το βαθμωτό πεδίο τις μέσης κινητικής ενέργειας της δίνης, όπως κάναμε και παραπάνω στην ευθεία ροή (ενότητα 4.1.2).



Σχήμα 4.30: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας χωρίς κανένα φίλτρο



Σχήμα 4.31: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας με φίλτρο multi pass

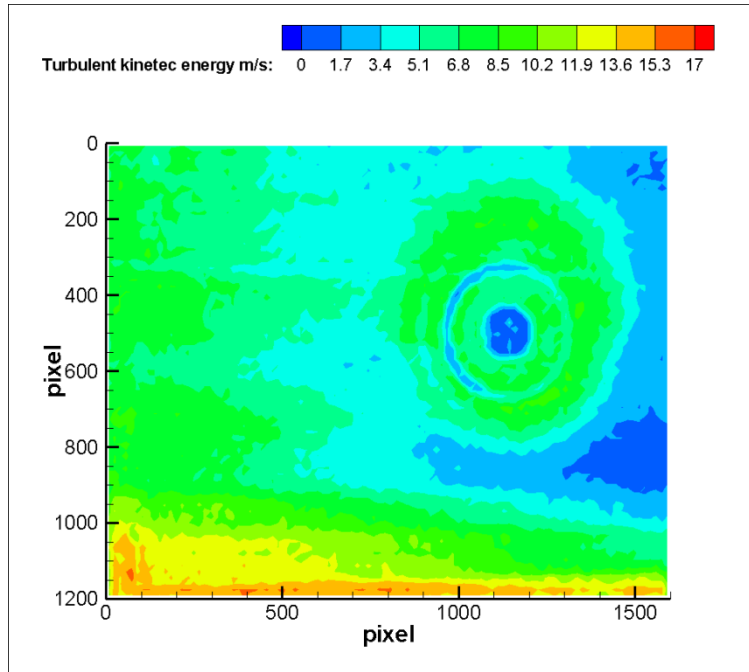


Σχήμα 4.32: Βαθμωτό πεδίο μέσης κινητικής ενέργειας με όλα τα φίλτρα ενεργά

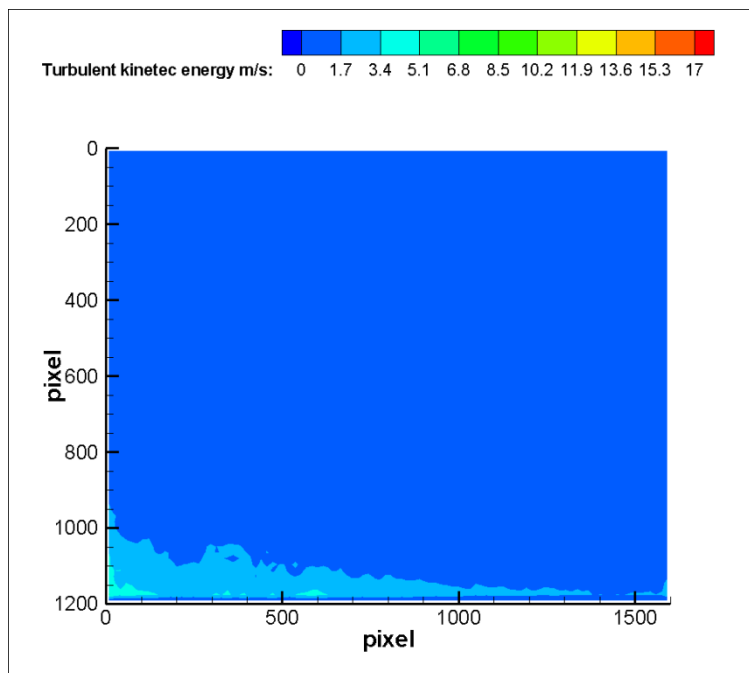
Όπως και στην ευθεία ροή έτσι και στην δίνη παρατηρείται αυξημένη κινητική ενέργεια μπροστά στον κυκλοφορητή. Στο κάτω μέρος της εικόνας η αύξηση της ταχύτητα (Σχήμα 4.28) και συνεπώς και της κινητικής ενέργειας (Σχήμα 4.32), οφείλεται στον δεύτερο κυκλοφορητή της εφαρμογής, τον οποίο χρησιμοποιήσαμε ώστε να δημιουργήσουμε ανακυκλοφορία στο ρευστό για να μπορούν τα σωματίδια να κινούνται μέσα στο ρευστό, μιας και ήταν αρκετά βαριά και έμεναν στον πυθμένα. Στο κέντρο της δίνης που είναι και ο άξονας της προπέλας, η κινητική ενέργεια είναι πολύ χαμηλή κάτι που μπορεί να είναι συνέπεια των μικρών διακυμάνσεων της ταχύτητας, που ούτως ή άλλως είναι χαμηλή, κοντά στο κέντρο της δίνης,

4.2.3 Τυρβώδης Κινητική Ενέργεια

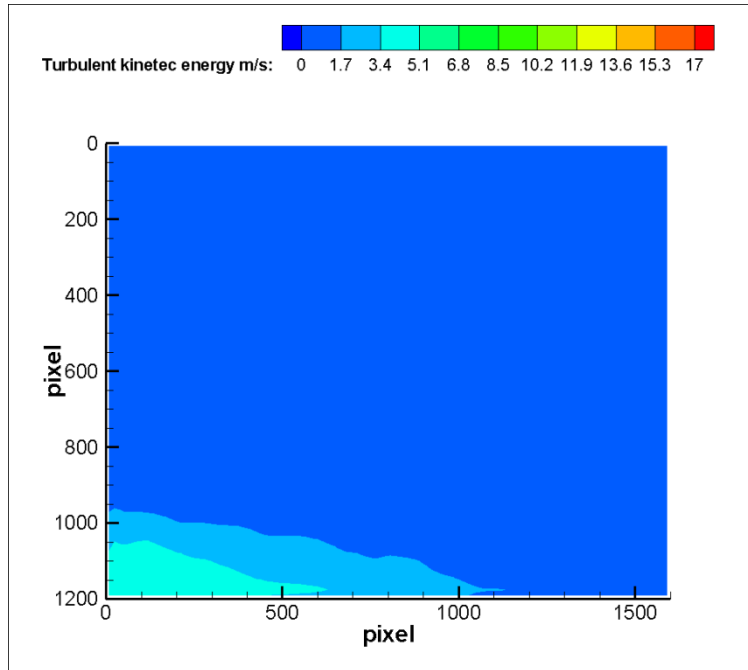
Όπως και στην ευθεία ροή έτσι κι εδώ παρουσιάζονται αντίστοιχα τα αποτελέσματα τις τυρβώδους κινητικής ενέργειας στη δίνη. Στην πρώτη εικόνα (Σχήμα 4.33) φαίνεται ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια είναι κυμαινόμενη μέσα στο πεδίο. Όταν όμως χρησιμοποιήσαμε τα φίλτρα (Σχήματα 4.34, 4.35) το αποτέλεσμα ήταν να υπάρχουν σημαντικές αλλαγές της ενέργειας μέσα στο πεδίο, γιατί με τα φίλτρα μίκραινε η τυπική απόκλιση της ταχύτητας σε κάθε σημείο στα στιγμιαία πεδία ταχύτητας και επομένως μειώνονταν και η υπολογισμένη κινητική ενέργεια.



Σχήμα 4.33: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας χωρίς κανένα φίλτρο



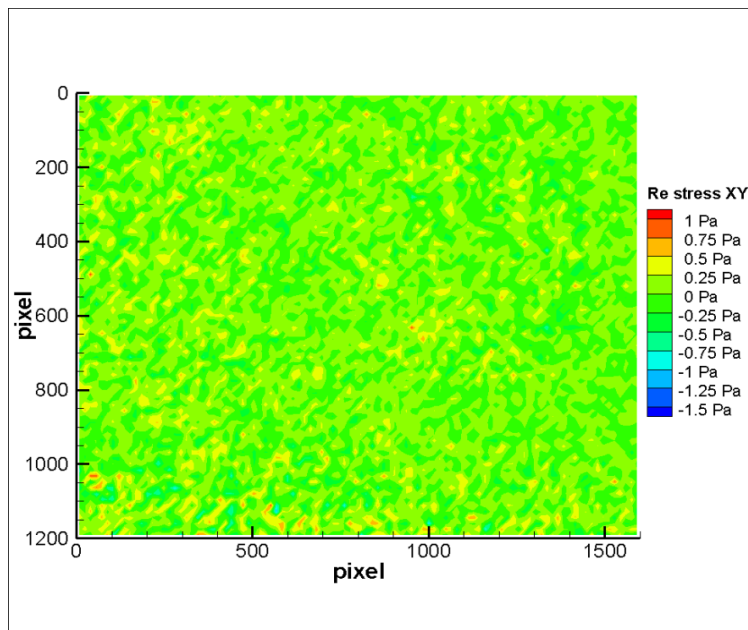
Σχήμα 4.34: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας με multi pass



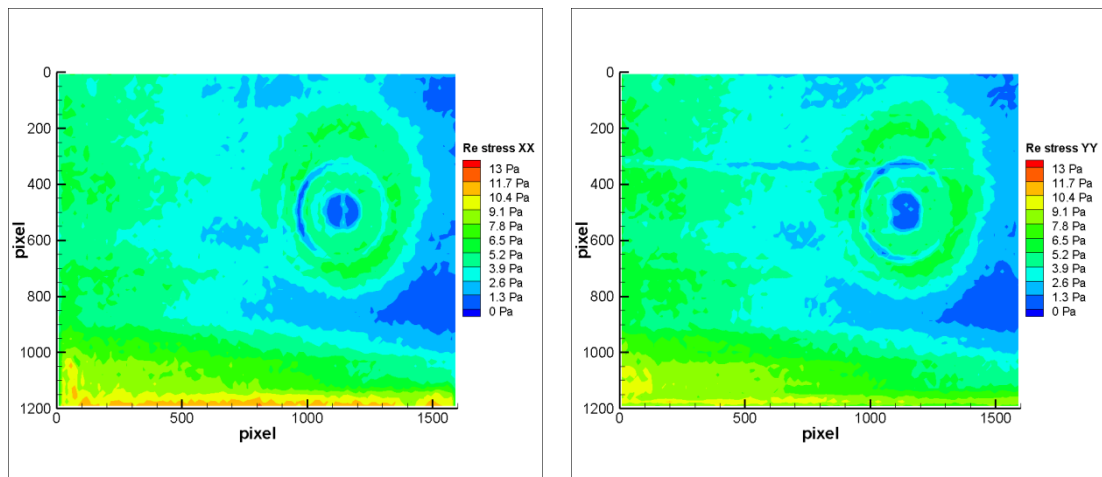
Σχήμα 4.35: Βαθμωτό πεδίο τυρβώδους κινητικής ενέργειας με όλα τα φίλτρα ενεργά

4.2.4 Διατμητικές και Ορθές Τάσεις στη δίνη

Εδώ θα παρουσιάσουμε τις τάσεις Reynolds στη περίπτωση του δείγματος των 1000 εικόνων και χωρίς κανένα φίλτρο.



Σχήμα 4.36: Βαθμωτό πεδίο διατμητικών τάσεων



Σχήμα 4.37: Βαθμωτά πεδία ορθών τάσεων στις διευθύνσεις xx (αριστερά) και yy (δεξιά)

Στην εικόνα (Σχήμα 4.36) παρουσιάζεται το πεδίο με τις διατμητικές τάσεις που δημιουργείται από τη δίνη. Σε αντίθεση με την ευθεία ροή όπου υπάρχουν τοπικές εντάσεις των τάσεων, εδώ παρατηρείται πολύ μικρή αυξομείωση. Και στις δυο περιπτώσεις οι τάσεις είναι πολύ μικρές της τάξεως από 0.5 έως 1 Pa. Στις επόμενες δυο εικόνες δείχνουμε τα πεδία των τάσεων στις διευθύνσεις x και y .

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μίας εργαστηριακής διάταξης για την μελέτη μιας ροής – δίνης που δημιουργείται από κυκλοφορητή νερού μικρής διαμέτρου. Η διάταξη αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Π.Δ.Μ. και περιλαμβάνει ολοκληρωμένο σύστημα οπτικών μετρήσεων με λέιζερ διπλού παλμού, CCD κάμερα (βλέπε κεφάλαιο 1) και συστήματα ασφαλείας. Ο κύριος σκοπός της διπλωματικής ήταν να οργανώσουμε και να στήσουμε την πειραματική διάταξη, καθώς επίσης να συγχρονίσουμε το λέιζερ με την κάμερα και το λογισμικό του υπολογιστή. Αφού ολοκληρώσαμε αυτή τη διαδικασία πήραμε μετρήσεις από μια σχετικά απλή εφαρμογή, όπως αναφέραμε, δείξαμε ότι λειτουργεί σωστά και παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα. Όσον αφορά τον εξοπλισμό του εργαστηρίου η σημαντικότερη και πιο χρονοβόρα διαδικασία ήταν να συγχρονίσουμε όλες μας τις συσκευές ώστε να μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει για την PIV ανάλυση χρειαζόμαστε λέιζερ διπλού παλμού, επομένως το πρώτο μας βήμα ήταν να διαχωρίσουμε τον παλμό, από το μονού παλμού λέιζερ που χρησιμοποιήσαμε, σε διπλό παλμό. Το επόμενο βήμα ήταν να βαθμονομήσουμε την κάμερα ώστε να γνωρίζουμε την αντιστοιχία των pixels με τα cm. Έπειτα μέσα από το λογισμικό συγχρονίσαμε το λέιζερ μαζί με την κάμερα. Μέσα από όλη τη διαδικασία της PIV ανάλυσης καταφέραμε να μετρήσουμε την ταχύτητα του ρευστού, την κινητική ενέργεια, την τυρβώδη κινητική ενέργεια, τις διατμητικές και ορθές τάσεις και να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για την λειτουργία μερικών φίλτρων που χρησιμοποιήσαμε. Το βασικό συμπέρασμα για τη λειτουργία των φίλτρων είναι ότι με τη χρήση τους τα αποτελέσματα είναι πιο ομαλοποιημένα. Ιδανικά θα θέλαμε τα διανυσματικά και βαθμωτά πεδία χωρίς φίλτρα να είναι ίδια με αυτά που δίνουν οι εικόνες μετά την επεξεργασία τους από τα φίλτρα αλλά αυτό δεν είναι εφικτό εξαιτίας αβεβαιοτήτων που εισάγονται στο πείραμα από παράγοντες όπως αντανάκλασεις φωτός, μη επαρκής αριθμός σωματιδίων στην εικόνα, θόρυβος κ.λπ.

Με βάση την παρούσα εργασία, λαμβάνοντας κάποιος υπόψη τη διαδικασία λειτουργίας του εξοπλισμού του εργαστηρίου, μπορεί να αναπτύξει πιο ενδιαφέρουσες και μεγαλύτερες εφαρμογές. Για παράδειγμα την μέτρηση του πεδίου ταχύτητας που παράγεται από έναν συμπιεστή που αναπτύσσονται σε μια εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης κλπ.

Τέλος η προσθήκη ενός γρήγορου συστήματος PIV στο δυναμικό του εργαστηρίου θα έδινε μεγαλύτερες δυνατότητες μελέτης της τυρβώδους ροής καθώς ο χρόνος απόκρισης ενός τέτοιου συστήματος είναι αντίστοιχος των χρονικών κλιμάκων της τύρβης και επιπλέον τα αποτελέσματα από ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσαν να συγκριθούν με υπολογισμούς Large Eddy Simulations (LES) όχι μόνο ως προς το μέσο πεδίο ροής αλλά και ως προς τα στιγμιαία διανυσματικά πεδία.

Βιβλιογραφία

1. Wikipedia, επίσημη ιστοσελίδα <http://en.wikipedia.org>
2. M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, “Particle Image Velocimetry”, Second Edition, Springer (2007)
3. La Vision, επίσημη ιστοσελίδα <http://www.lavision.de>
4. Dr Κολοκοτρώνης Δ., “Experimental Investigation of the Internal Flow Field of Model Fuel Injectors”, 2007
5. Douglas A. Lyon: “The Discrete Fourier Transform, Part 6: Cross-Correlation”, in *Journal of Object Technology*, vol. 9. no. 2, March - April 2010 pp. 17 – 22
6. Article, Aerospace lab Issue 1 - December 2009 - Principles and Applications of Particle Image Velocimetry
7. Π. Ν. Παπανικολάου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, “ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ”, (2010)
8. http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_kinetic_energy