



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

**Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της
συχνότητας παλλόμενων δεσμών αέρα στον έλεγχο
της ροής απότομης διεύρυνσης.**

**The influence of the frequency of pulsating jets on
the recirculation zone of a backward facing step.
An experimental study.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Φιλίππου Κ. Γεωργίου

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Μαθιουλάκης Σ. Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2010

Στους γονείς μου και στην αδερφή μου Ευγενία.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα προς:

Τον αναπληρωτή καθηγητή του Τομέα Ρευστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, κ. Μαθιουλάκη Δημήτριο, ο οποίος μου ανέθεσε την εκπόνηση της εργασίας, με καθοδήγησε και μου αφιέρωσε πολύ από τον πολύτιμο χρόνο του για να πετύχω το στόχο μου.

Τον υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Ρευστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, κ. Καπίρη Παναγιώτη, ο οποίος μου παρείχε πολύτιμη υποστήριξη και βοήθεια καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και τους συμφοιτητές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για τα πέντε όμορφα χρόνια που περάσαμε μαζί.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της συχνότητας παλλόμενων δεσμών αέρα στον έλεγχο της ροής απότομης διεύρυνσης. Ο αριθμός Reynolds της ροής ήταν $Re = 8000$, ενώ οι παλλόμενες δέσμες αέρα εισήχθησαν στη ροή από μια σχισμή, η οποία περιείχε 20 οπές, πολύ κοντά στην άνω ακμή της απότομης διεύρυνσης. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η τεχνική PIV δύο διαστάσεων (2D-Particle Image Velocimetry) με σύστημα σκανδαλισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στη ροή σχηματίζονται δύο περιοχές ανακυκλοφορίας, μια κύρια ανθρολογιακής φοράς (port όπως την αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που κινείται μαζί με το ελεύθερο ρεύμα), η οποία εκτείνεται από την περιοχή απότομης διεύρυνσης μέχρι την περιοχή επανακόλλησης και μια δευτερεύουσα, η οποία είναι ωρολογιακής φοράς, βρίσκεται στην περιοχή της κάτω ακμής της απότομης διεύρυνσης και είναι πολύ μικρότερη της πρώτης. Το μήκος επανακόλλησης μεταβάλλεται με τη συχνότητα των δεσμών, ενώ υπάρχει μια συχνότητα στην οποία το μήκος γίνεται ελάχιστο. Όταν η ροή διεγείρεται με τη βέλτιστη συχνότητα, ώστε να ισχύει $St = 0.22$ για τον αδιάστατο αριθμό Strouhal με βάση το ύψος H της απότομης διεύρυνσης, το μήκος επανακόλλησης μειώνεται κατά 21% περίπου σε σχέση με το μήκος χωρίς έλεγχο. Με την διεξαγωγή συγχρονισμένων μετρήσεων μέσα στην περίοδο της δέσμης, παρατηρήθηκε ότι το μήκος επανακόλλησης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου και η όλη διαδικασία είναι ένα ασταθές δυναμικό φαινόμενο. Συγχρονισμένες μετρήσεις κοντά στην απότομη διεύρυνση έδειξαν την ύπαρξη μιας δίνης, η οποία εκλύεται από το ύψος της άνω ακμής της απότομης διεύρυνσης και ταξιδεύει επεκτεινόμενη μέσα στην περίοδο προς το σημείο επανακόλλησης. Η ταχύτητά της U_x βρέθηκε περίπου σταθερή και ίση με $0.33U_\infty$ και η $\overline{U}_y \simeq 0.09U_\infty$.

In the present Diploma Thesis the effect of the frequency of pulsating jets on the recirculation zone of a backward facing step was experimentally investigated. A $Re = 8000$ was chosen as test case and periodic perturbation was introduced from a slot, containing 20 holes, near the step edge. A two dimensional particle image velocimeter (PIV) with a triggering mechanism was used in the flow-field measurements. The measurements showed that there are two recirculation bubbles in the flow, one major counter-clockwise bubble (port as received by a person travelling with the free stream), which expands from the step area to the recirculation region and a minor port clockwise bubble, which is formed near the bottom area of the step and is considerably smaller than the first one. The reattachment length varies with the perturbation frequency, while there exists an optimum frequency, in which the reattachment length is minimum. When perturbed with this optimum frequency, with which the non-dimensional Strouhal number based on the step height H is $St = 0.22$, the reattachment length is reduced by almost 21% of the uncontrolled case. Performing synchronised measurements inside the jet period, it was observed that the reattachment length varies also in the period itself. The reattachment process is therefore a highly non-stable dynamic phenomenon. Synchronised measurements near the the backward facing step showed that there exists a vortex, which is released from the step edge and travels towards the reattachment region, expanding inside the period. This vortex is travelling with an almost stable velocity component, $U_x = 0.33U_\infty$ and a velocity component $\overline{U}_y \simeq 0.09U_\infty$.

Περιεχόμενα

I	Θεωρητικά στοιχεία	11
1	Γενικά περί ελέγχου ροής	12
1.1	Εισαγωγή	12
1.2	Τι είναι ο έλεγχος ροής;	13
1.3	Ιστορική αναδρομή	13
1.4	Ενοποιώντας τις αρχές	14
1.4.1	Οι στόχοι του ελέγχου και ο συσχετισμός τους	14
1.4.2	Σχήματα κατάταξης	15
1.5	Έλεγχος αποκόλλησης	17
1.5.1	Σταθερή αποκόλληση	17
1.5.2	Έλεγχος με πρόσδοση ορμής σε ροή κοντά σε τοίχωμα Ενεργός έλεγχος με πρόσδοση ορμής σε ροή κοντά σε τοίχωμα Έλεγχος με δέσμες ρευστού	18 19 19
2	Ανεμομετρία Θερμού Νήματος	20
	Hot Wire Anemometry	20
2.1	Η μέθοδος του θερμού νήματος	20
2.2	Ηλεκτρικές διατάξεις θερμού νήματος	21
2.2.1	Ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος	22
2.2.2	Ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασίας	23
2.3	Εφαρμογές θερμού νήματος	25
3	Η τεχνική PIV (Particle Image Velocimetry)	27
3.1	Εισαγωγή	27
3.2	Ιστορικό υπόβαθρο	27
3.3	Αρχή της τεχνικής PIV	30
3.4	Ανάπτυξη της τεχνικής PIV μέχρι σήμερα	33
3.4.1	Παρούσα κατάσταση	34
3.4.2	Μελλοντικές δυνατότητες και βελτιώσεις	34
3.5	Η τεχνική PIV στην αεροδυναμική	37
3.6	Τεχνολογικά σημεία-σταθμοί της PIV	38
3.7	Παραδείγματα εφαρμογών	39
4	Βαλβίδες	40
4.1	Εισαγωγή	40
4.2	Βαλβίδες ελέγχου πίεσης	41
4.2.1	Βαλβίδες ελέγχου πίεσης με ελατήριο Σχεδιαστικά στοιχεία βαλβίδων άμεσης δράσης (Direct Acting) Σχεδιαστικά στοιχεία βαλβίδων πιλότου (Pilot Operated Valves)	41 42 45
4.3	Ηλεκτρικές βαλβίδες ελέγχου πίεσης	46

II	Πειραματικό Μέρος	48
5	Σειρά Πειραμάτων Ανεμομετρίας Θερμού Νήματος	49
5.1	Εισαγωγή	49
5.2	Πειραματική διάταξη	49
5.3	Πειραματική διαδικασία	53
5.4	Πειραματικά αποτελέσματα	54
5.5	Συμπεράσματα	62
6	Σειρά Πειραμάτων PIV	63
6.1	Εισαγωγή	63
6.2	Πειραματική διάταξη	63
	Αεροδυναμική σήραγγα	64
6.2.1	Δοκίμιο απότομης διεύρυνσης	65
6.2.2	Φωτογραφική μηχανή	66
6.2.3	Συσκευή λείζερ	67
6.2.4	Ηλεκτροβαλβίδα αέρος	67
6.2.5	Γεννήτρια καπνού	67
6.3	Πειραματική διαδικασία	68
6.3.1	Προετοιμασία του πειράματος	68
6.3.2	Συλλογή των δεδομένων	69
6.3.3	Βαθμονόμηση, επεξεργασία και μετα-επεξεργασία	70
	Βαθμονόμηση 2-διαστάσεων	70
	Επεξεργασία δεδομένων	70
	Μετα-επεξεργασία δεδομένων	72
6.4	Αποτελέσματα και Συζήτηση	72
6.4.1	Παράθυρο επανακόλλησης της ροής χωρίς την εφαρμογή ελέγχου	73
6.4.2	Παράθυρο επανακόλλησης της ροής με εφαρμογή ελέγχου	75
	Ασύγχρονες μετρήσεις	75
	Συγχρονισμένες μετρήσεις	98
6.4.3	Μεσαίο παράθυρο λήψης	112
6.4.4	Παράθυρο απότομης διεύρυνσης	115
	Συγχρονισμένες μετρήσεις χωρίς ελεύθερο ρεύμα	115
	Ασύγχρονες μετρήσεις με ελεύθερο ρεύμα	140
	Συγχρονισμένες μετρήσεις με ελεύθερο ρεύμα	143
7	Κυριότερα Συμπεράσματα	156
III	Παράρτημα	157

Κατάλογος πινάκων

6.1	Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της περιόδου της δέσμης	76
6.2	Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης καταγραφής	98

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Οι στόχοι του ελέγχου ροής και η αλληλοσυσχέτισή τους	15
1.2	Κατάταξη των στρατηγικών ελέγχου	16
1.3	Διάφοροι βρόχοι για ενεργό έλεγχο	17
1.4	Παθητικό φύσημα μέσα από τρύπες στην ακμή πρόσπτωσης και στα φλαπς της ακμής εκφυγής	18
2.1	Διάφοροι τύποι θερμού νήματος	20
2.2	Διάφοροι τύποι θερμού φιλμ	21
2.3	Διάταξη θερμού νήματος σταθερού ρεύματος	22
2.4	α)Απόκριση διάταξης σταθερού ρεύματος, β)δράση διάταξης αντιστάθμισης, γ)απόκριση διάταξης θερμού νήματος με διάταξη αντιστάθμισης	23
2.5	Διάγραμμα εξόδου-ταχύτητας διάταξης σταθερού ρεύματος	23
2.6	Διάταξη νήματος σταθερής θερμοκρασίας	24
2.7	Καμπύλη βαθμονόμησης θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας	24
2.8	Εμφάνιση σφάλματος μετρήσεων σε νερό	25
2.9	Θερμό νήμα υπό γωνία α ως προς το ρεύμα ρευστού	25
2.10	Διπλό νήμα τύπου X	26
2.11	Διπλό νήμα τύπου X και οι σχετικές γωνίες ως προς το ρεύμα ρευστού	26
2.12	Τριπλό θερμό νήμα	26
2.13	Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού	26
3.1	Ο Ludwig Prandtl μπροστά από τη σήραγγα οπτικοποίησης ροής νερού το 1904.	28
3.2	Αποκολλημένη ροή πίσω από πτέρυγα, μια σύγχρονη απεικόνιση του πειράματος του Prandtl.	29
3.3	Ο διανυσματικός χάρτης του στιγμιαίου πεδίου ταχυτήτων της εικόνας 3.2	29
3.4	Πειραματική διάταξη PIV σε αεροσήραγγα	31
3.5	Οι τρεις περιπτώσεις πυκνότητας εικόνας: α)χαμηλή (PTV), β) μέση (PIV) και γ) υψηλή (LSV)	32
3.6	PIV υπερ-ευκρίνειας. (a) Διανύσματα σε κανονικό πλέγμα από ανάλυση συσχέτισης. (b) Διανύσματα μεμονωμένων σωματιδίων που ελήφθησαν από εντοπισμό σωματιδίων με φίλτρο Kalman, χρησιμοποιώντας τα διανύσματα του (a) ως πρώτες εκτιμήσεις [105]	35
3.7	Μετρήσεις PIV σε ροή που περιέχει 5 φουσαλίδες. Η ταχύτητα των φουσαλίδων σημειώνονται με τα μονά βέλη.	36
4.1	Καμπύλη ροής ενός μικρού ρυθμιστή πίεσης	42
4.2	Καμπύλη ροής ενός τυπικού 1/4” ρυθμιστή	42
4.3	Καμπύλη ροής ρυθμιστή πίεσης ακριβείας	43
4.4	Αρχή λειτουργίας των βαλβίδων άμεσης δράσης	43
4.5	Τυπική βαλβίδα διαφράγματος σε τομή	43
4.6	Ισορροπία δυνάμεων σε βαλβίδα διαφράγματος	44
4.7	Τομή βαλβίδας εμβόλου (πάνω) και τα μέρη που διατηρούν την ισορροπία δυνάμεων (κάτω)	44
4.8	Τομή βαλβίδας πιλότου	45
4.9	Σχεδιάγραμμα της αρχής λειτουργίας βαλβίδας πιλότου	46
4.10	Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής βαλβίδας	46
4.11	Τομή ηλεκτρικής βαλβίδας. Ο δίσκος είναι ανοικτός και επιτρέπει τη ροή από τη θύρα παροχής στην εργαζόμενη θύρα. Το άνοιγμα ανακούφισης είναι κλειστό	47
5.1	Η ηλεκτοβαλβίδα αέρος σε τομή	50

5.2	Τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτροβαλβίδας αέρος	51
5.3	Διαστάσεις της ηλεκτροβαλβίδας αέρος	51
5.4	Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος θερμού νήματος	52
5.5	Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος θερμού νήματος σε κοντινή λήψη	52
5.6	Το ανώτερο μέρος του προγράμματος σκανδαλισμού	53
5.7	Το εσωτερικό μέρος του συστήματος σκανδαλισμού	54
5.8	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 14 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα	55
5.9	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 20 ms με 8 ms κλειστή βαλβίδα	55
5.10	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 20 ms με 10 ms κλειστή βαλβίδα	56
5.11	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 4 ms κλειστή βαλβίδα	56
5.12	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα	57
5.13	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 8 ms κλειστή βαλβίδα	57
5.14	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 4 ms κλειστή βαλβίδα	58
5.15	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 15 ms κλειστή βαλβίδα	58
5.16	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 20 ms κλειστή βαλβίδα	59
5.17	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 22 ms κλειστή βαλβίδα	59
5.18	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 50 ms με 25 ms κλειστή βαλβίδα	60
5.19	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα	60
5.20	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 250 ms κλειστή βαλβίδα	61
5.21	Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 491 ms κλειστή βαλβίδα	61
5.22	Οι δέσμες αέρα (κόκκινο) όπως διαμορφώνονται μέσα από το δοκίμιο. Με πράσινο χρώμα ο παλμός σκανδαλισμού της ηλεκτροβαλβίδας αέρος.	62
6.1	Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος PIV	63
6.2	Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος PIV σε κοντινότερη λήψη	64
6.3	Η διάταξη του πειράματος και το σύστημα συντεταγμένων	65
6.4	Το δοκίμιο της απότομης διεύρυνσης	66
6.5	Η φωτογραφική μηχανή	66
6.6	Το σύστημα λείζερ	67
6.7	Η γεννήτρια καπνού	68
6.8	Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.	73
6.9	Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.	74
6.10	Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.	74
6.11	Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.	75
6.12	Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της περιόδου της δέσμης	76
6.13	Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	78
6.14	Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	78
6.15	Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	79
6.16	Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	79
6.17	Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	80
6.18	Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	80
6.19	Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	81
6.20	Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.	81

Μέρος Ι

Θεωρητικά στοιχεία

Κεφάλαιο 1

Γενικά περί ελέγχου ροής

1.1 Εισαγωγή

Οι δραματικά αυξανόμενες απαιτήσεις εκ των χερσαίων, αυτοκίνητων και σιδηροδρόμων, καθώς και εναέριων συστημάτων μεταφοράς οδηγούν στην ανάγκη για την βελτίωση και τελειοποίηση τους. Χωρίς προδιαγραφές που να αφορούν το περιβάλλον ή περιορισμούς που να αφορούν στην συμπεριφορά και απόδοσή τους, αυτές οι απαιτήσεις θα έχουν έχουν καλυφθεί μόνο μερικώς και όχι ικανοποιητικά. Σήμερα είμαστε σε θέση να πιστεύουμε ότι ο ενεργός έλεγχος ροής αποτελεί μια τεχνολογία κλειδί, η οποία θα έχει πολύ σημαντική συνεισφορά στην επιδίωξη του στόχου των καλύτερων και πιο βιώσιμων λύσεων. Ο έλεγχος της ροής ρευστών προσδίδει πολλά πλεονεκτήματα σε τεχνολογικές εφαρμογές. Η ροή γύρω ή μέσα σε σώματα δημιουργεί άνωση, οπισθέλκουσα, ροπές πάνω στο σώμα, πρόσδοση ή αφαίρεση θερμότητας με συναγωγή. Θόρυβος από την αλληλεπίδραση ενός σώματος με τον αέρα του περιβάλλοντος είναι καθημερινό φαινόμενο σε πολλές εφαρμογές. Επιπρόσθετα η αλληλεπίδραση με ένα σώμα αλλάζει την κατάσταση της ροής δραστικά. Μια πλήρως ομαλή ροή γύρω από την πτέρυγα ενός αεροσκάφους, η οποία δίνει αρκετή άνωση, μπορεί να μετατραπεί σε πολύ ανώμαλη και να αποκολληθεί από την επιφάνεια με αποτέλεσμα την απώλεια άνωσης. Σε συστήματα ψύξης μηχανών και σε άλλα συστήματα απαιτούνται πολύ τυρβώδεις ροές στα διάφορα μέρη τους ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη μεταφορά θερμότητας. Σε μελλοντικές μηχανές αεροσκαφών από την άλλη, όπως για παράδειγμα αυτές που θα πληρούν τις προϋποθέσεις του EU Vision 2020, η αυξημένη μεταφορά θερμότητας πρέπει να αποφευχθεί με κάθε κόστος σε μερικά μέρη της μηχανής. Βαθμίδες του στροβίλου ενδέχεται να εκτεθούν σε καυσαέριο πολύ υψηλής θερμοκρασίας, το οποίο απαιτείται για τον υψηλό βαθμό απόδοσης της μηχανής, με αποτέλεσμα να καταστραφούν. Σε τέτοιες εφαρμογές ποιο στρωτές συνθήκες ροής θα είχαν το πλεονέκτημα της φτωχότερης μεταφοράς θερμότητας.

Η τυρβώδης ροή σε ένα θάλαμο καύσης, για παράδειγμα σε μία μηχανή αεροσκάφους, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον θερμοδυναμική απόδοση της ίδιας της μηχανής και των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα της. Η συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς που αφορούν την έκλυση ρύπων, όπως τα NO_x , δημιουργούν την ανάγκη για χαμηλό λόγο αέρα – καυσίμου. Αυτό όμως σε συνδυασμό με την απαίτηση για ελαφρές μηχανές έχει ως αποτέλεσμα θερμοακουστικές αστάθειες στον θάλαμο. Η έκλυση θορύβου είναι ένα από τα προβλήματα που προκύπτουν από τα παραπάνω δεδομένα. Πιο σοβαρά προβλήματα θα προκύψουν από το μηχανικό φορτίο που θα πρέπει να αντέξει ο θάλαμος καύσης.

Βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των αεροσκαφών μέσω του ελέγχου ροής θα μειωθεί σημαντικά η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου και θα εξοικονομηθούν πολλά χρήματα για τις αεροπορικές εταιρίες και τους καταναλωτές. Δεν είναι μόνο η αύξηση της άνωσης μέσω του ελέγχου ροής που θα επιτρέπει μικρότερες και ελαφρύτερες μηχανές που καταναλώνουν λιγότερο καύσιμο. Είναι επίσης και η μειωμένη επαγόμενη από τη ροή οπισθέλκουσα, η οποία προέρχεται από τα διάφορα μέρη του αεροσκάφους, όπως για παράδειγμα το σύστημα προσγείωσης. Όταν είναι δυνατόν η ανάβαση και η προσγείωση να γίνεται σε πιο απότομες τροχιές χάρη στην μεγαλύτερη άνωση που κερδίζουμε με τον έλεγχο ροής, τα επίπεδα του ήχου στο έδαφος μειώνονται αισθητά. Επιπλέον είναι η βελτιωμένη σχεδίαση των αεροπορικών μηχανών που επιτρέπει μικρότερο μέγεθος με λιγότερες βαθμίδες συμπίεστη, πάλι με τη χρήση ελέγχου ροής. Θα μπορούσε κανείς να παραθέσει πολλά ακόμα παραδείγματα από αεροπορικά συστήματα.

Συμπερασματικά ο έλεγχος ροής ρευστών είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές και αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο όμως να απαντηθούν κάποια ερωτήματα που γεννούνται από την ανάγνωση των προηγούμενων παραδειγμάτων. Πώς ορίζεται ο έλεγχος ροής;

Ποια είδη ελέγχου υπάρχουν και ποιές οι διαφορές τους; Τέτοιου είδους ερωτήματα θα βρουν να απάντηση στα επόμενα τμήματα αυτού του κεφαλαίου.

1.2 Τι είναι ο έλεγχος ροής;

Ο ορισμός που προτιμάται είναι αυτός που προτείνει ο Mohamed Gad-el-Hak [18], ο οποίος δόθηκε από τον Flatt το 1961 [4] και αναφερόταν σε προσκολλημένες σε τοίχωμα ροές (wall-bounded), θα μπορούσε όμως να επεκταθεί και σε ελεύθερες διάτμησης (free shear flows):

Ο έλεγχος οριακού στρώματος περιλαμβάνει οποιονδήποτε μηχανισμό ή διαδικασία μέσω των οποίων το οριακό στρώμα ενός ρευστού καταλήγει να συμπεριφέρεται διαφορετικά από ότι θα συμπεριφερόταν υπό κανονικές συνθήκες, αν η ροή αναπτυσσόταν κανονικά κατά μήκος μιας ομαλής ευθείας επιφάνειας.

Πρωτοπόρος στην μελέτη του σύγχρονου ελέγχου ροής υπήρξε ο Prandtl, του οποίου η εργασία παρουσιάστηκε στο τρίτο Διεθνές Συνέδριο των Μαθηματικών που έλαβε χώρα στη Χαϊδελβέργη, Γερμανία. Η εργασία με τίτλο “Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung” εισήγαγε την θεωρία του οριακού στρώματος, εξήγησε τον μηχανισμό της σταθερής αποκόλλησης, άνοιξε το δρόμο για την κατανόηση της κίνησης των πραγματικών ρευστών και περιέγραψε-εξήγησε πολλά πειράματα στα οποία το οριακό στρώμα είχε ελεγχθεί.

Ο Prandtl το 1904 χρησιμοποίησε ενεργό έλεγχο ροής, συγκεκριμένα απορρόφηση ρευστού για να καθυστερήσει την αποκόλληση της ροής από την επιφάνεια κυλίνδρου, για να καταδείξει την επίδραση του ελέγχου στην φύση και τη συμπεριφορά της ροής. Στις επόμενες τρεις δεκαετίες που ακολούθησαν οι σχεδιαστές αεροσκαφών, χωρίς να απορρίπτουν την ανακάλυψη του Prandtl, περιορίστηκαν στην αποδοχή ότι η άνωση και η οπισθέλκουσα μιας αεροτομής είναι προκαθορισμένες και ότι κανείς ή τίποτα δεν δύναται να τις αλλάξει. Αυτό άλλαξε χάρη στη γερμανική έρευνα στον έλεγχο του οριακού στρώματος πριν και κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Στα χρόνια που ακολούθησαν τον Πόλεμο εκτενής έρευνα πραγματοποιήθηκε στον έλεγχο στρωτών ροών, όπου το αναπτυσσόμενο οριακό στρώμα κατά μήκος των εξωτερικών επιφανειών, κρατήθηκε στην χαμηλής οπισθέλκουσας στρωτή κατάσταση, στην Ευρώπη και την Αμερική. Η κρίση του πετρελαίου την δεκαετία του 1970 επανέφερε το ενδιαφέρον των ερευνητών για την μείωση της αντίστασης τριβής (skin-friction drag) ακόμα και σε τυρβώδη οριακά στρώματα. Την δεκαετία του 1990 και έπειτα η ανάγκη για πολύ ευκίνητα (supermanouevrable) πολεμικά αεροσκάφη, για γρηγορότερα και πιο αθόρυβα υποθαλάσσια οχήματα καθώς και για υπερηχητικές μεταφορές προσφέρει ένα ευρύ πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος για τους ερευνητές.

1.3 Ιστορική αναδρομή

Ο έλεγχος ροής περιλαμβάνει παθητικές και ενεργές συσκευές οι οποίες επηρεάζουν προς το συμφέρον μας τις διάφορες ροές. Άσχετα αν ο σκοπός είναι η καθυστέρηση ή η επιτάχυνση της μετάβασης από στρωτή ροή σε τυρβώδη, ο περιορισμός ή ενίσχυση της τύρβης, η αποφυγή ή η πρόκληση αποκόλλησης, χρήσιμα τελικά αποτελέσματα είναι η μείωση της οπισθέλκουσας, η αύξηση της άνωσης, η ενίσχυση της μίξης και καταστολή του θορύβου. Σύμφωνα με τη γνώμη των μελετητών υπάρχουν πέντε φάσεις στην ανάπτυξη αυτού του πολύ απαιτητικού αλλά πολύ χρήσιμου επιστημονικού πεδίου: Η εμπειρική εποχή (πριν το 1900), η επιστημονική εποχή (1900-1940), η εποχή του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (1940-1970), η εποχή της ενεργειακής κρίσης (1970-1990) και η σύγχρονη εποχή από το 1990 και έπειτα. Η τέχνη του ελέγχου της ροής έχει πιθανόν τις ρίζες της στην προϊστορική εποχή όταν μυτερά ακόντια και βέλη που δεν μπορούσαν να ταξιδέψουν χωρίς την συνδρομή του φτερού στο τέλος τους αναπτύχθηκαν εμπειρικά από τον πρωτόγονο άνθρωπο. Ο πιο σύγχρονος άνθρωπος εφάρμοσε επίσης μεθόδους ελέγχου ροών για να επιτύχει διάφορα αποτελέσματα. Σχετικά σύντομα μετά την αυγή του πολιτισμού και την δημιουργία των αγροτικών κοινωνιών κάπου 8000 χρόνια πριν, εμφανίστηκαν πολύπλοκα συστήματα άρδευσης κατά μήκος των κατοικημένων εκτάσεων κοντά σε ποταμούς για τον έλεγχο της ροής του νερού, αποδεσμεύοντας τον άνθρωπο από τις ιδιοτροπίες του νερού.

Η επιστήμη του ελέγχου της ροής γεννήθηκε με τον Prandtl (1904) που εισήγαγε τη θεωρία του οριακού στρώματος, εξήγησε τη φυσική πίσω από τα φαινόμενα αποκόλλησης και περιέγραψε πολλά πειράματα στα οποία είχε ελεγχθεί το οριακό στρώμα. Αργά αλλά σταθερά από τότε η ανάπτυξη συσκευών και εξαρτημάτων ελέγχου ροών δεν είναι πια διαδικασίες δοκιμής-λάθους, αλλά υπάρχει μια ολόκληρη φυσική και πολλές αρχές που εφαρμόζονται για τον σχεδιασμό τους.

Ο Β' Παγκόσμιος Πόλεμος και ο Ψυχρός Πόλεμος που τον ακολούθησε ανανέωσε και τόνωσε το ενδιαφέρον των ερευνητών με αποτέλεσμα να επιταχυνθεί πολύ η πρόοδος του τομέα αυτού κατά την τρίτη περίοδο. Οι

στρατιωτικές ανάγκες των υπερδυνάμεων υπαγόρευε την ανάπτυξη γρήγορων, ευκίνητων και αποτελεσματικών αεροσκαφών, πυραύλων, πλοίων, υποβρυχίων και τορπιλών και ο έλεγχος ροής έπαιξε μεγάλο ρόλο στην επίτευξη των στόχων αυτών. Ο έλεγχος της στρωτής ροής και η μείωση της οπισθέλκουσας με πολυμερή αποτελούν μερικά από τα σημαντικά επιτεύγματα αυτής της περιόδου. Τμηματικές περιλήψεις της έρευνας πάνω στον έλεγχο ροής αυτής της περιόδου μπορεί να βρει κανείς στα βιβλία που εκδόθηκαν από τους Lachmann (1961) [4] και Wells (1969)[6].

Η ενεργειακή κρίση που εντάθηκε από το αραβικό εμπόργκο πετρελαίου το 1973 μετέφερε το ενδιαφέρον από τον στρατιωτικό στον πολιτικό τομέα. Κατά την περίοδο 1970-1990 κυβερνήσεις και ιδιωτικές επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο, αλλά ιδιαίτερα στις βιομηχανικές χώρες επένδυσαν πολλά χρήματα στην έρευνα για μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας και συνεπώς στην μείωση της οπισθέλκουσας στην πολιτική αεροπορία, την ναυσιπλοΐα και στα επίγεια μέσα μεταφοράς, στην βελτίωση της απόδοσης των σωληνώσεων και άλλων εξαρτημάτων. Η διαθεσιμότητα φτηνών και γρήγορων υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα να λυθούν υπολογιστικά πολύπλοκες καταστάσεις ροών που δεν επιδέχονταν αναλυτική λύση. Μερικές στρατηγικές ελέγχου, όπως τα επικαλύμματα για την καθυστέρηση της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή (transition-delaying compliant coatings)[44], βελτιστοποιήθηκαν με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Εξαρτήματα για τη διάσπαση της μεγάλης τυρβής (Large-Eddy Breakup Devices—LEBUs) είναι παραδείγματα μεθόδων ελέγχου που εφαρμόστηκαν αυτή την περίοδο σε τυρβώδη οριακά στρώματα. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με αυτά και άλλα εξαρτήματα που εισήχθησαν αυτήν την περίοδο μπορεί να βρει κανείς στα [48, 40, 11]. Πολυάριθμα συνέδρια αφιερωμένα στον έλεγχο ροής έγιναν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ιδιαίτερα πάνω στη μείωση της οπισθέλκουσας. Παρόλα αυτά η αφθονία καυσίμων κατά τη διάρκεια του 1990 και η ξεχασμένη πια κρίση του 1973 μείωσαν το ενδιαφέρον και τον ενθουσιασμό των ερευνητών για την τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας.

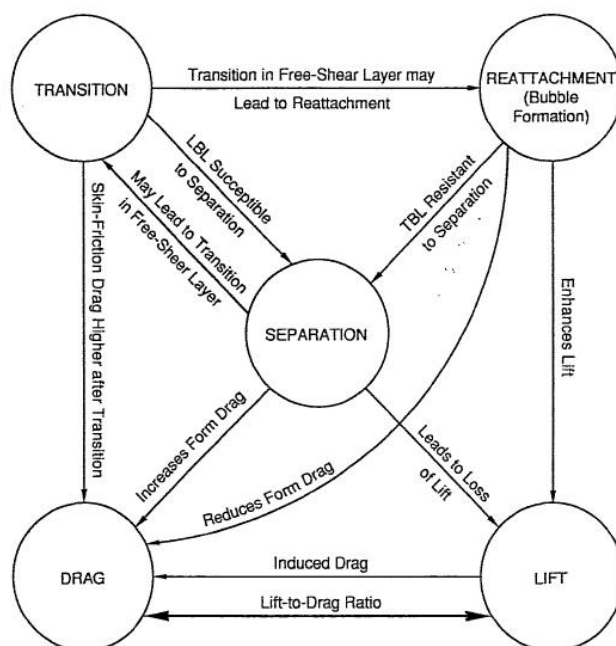
Από την δεκαετία του 1990 και έπειτα, πιο πολύπλοκα συστήματα ελέγχου αντίδρασης (reactive control), τα οποία στοχεύουν στην χειραγώγηση των πανταχού παρόντων συνεκτικών δομών σε μεταβατικές και τυρβώδεις ροές [33, 102], αποτελούν αντικείμενο μελέτης για πολλούς ερευνητές. Η θεωρητική πρόοδος τον έλεγχο χάους και η ανάπτυξη των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και των νευρωνικών δικτύων βοηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση. Δημοσιεύσεις που αφορούν τον έλεγχο αντίδρασης είναι μεταξύ άλλων και οι εξής: [104, 86, 43, 45]. Περισσότερες πληροφορίες περί των σύγχρονων τάσεων του ελέγχου ροής και των ορίων του με έμφαση στον έλεγχο τυρβώδων ροών μπορεί να βρει ο αναγνώστης στο [19]. Στο παρόν κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας θα γίνει μια προσπάθεια σύντομης παρουσίασης των διαφόρων ειδών κλασσικού ελέγχου ροής με έμφαση στον έλεγχο αποκόλλησης και ιδιαίτερα στον έλεγχο μέσω έκχυσης ρευστού σε ροή κοντά σε τοιχώματα.

1.4 Ενοποιώντας τις αρχές

Κάθε στρατηγική ελέγχου επιλέγεται με βάση το είδος της ροής και τον στόχο που θέλουμε να πετύχουμε με τον έλεγχο. Οι στόχοι αυτοί σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους και υπάρχουν πολλοί τρόποι κατάταξης των διαφόρων στρατηγικών ελέγχου. Η παρουσία ή η έλλειψη τοιχωμάτων, οι αριθμοί Reynolds και Mach και ο χαρακτήρας των ασταθειών της ροής είναι παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο ελέγχου που θα επιλεγεί.

1.4.1 Οι στόχοι του ελέγχου και ο συσχετισμός τους

Στο παρόν τμήμα θα δοθεί έμφαση σε ροές προσκολλημένες σε τοίχωμα και ιδιαίτερα στο πολύ σημαντικό από άποψη τεχνολογικού ενδιαφέροντος οριακό στρώμα. Μια εξωτερική προσκολλημένη ροή, όπως αυτή που αναπτύσσεται στην εξωτερική επιφάνεια ενός αεροσκάφους ή ενός υποβρυχίου, μπορεί να χειραγωγηθεί για να επιτευχθούν καθυστέρηση της μετάβασης, αναβολή αποκόλλησης, αύξηση άνωσης, μειωμένη οπισθέλκουσα, ενίσχυση της τύρβης και της μεταφοράς θερμότητας και καταστολή του θορύβου. Αυτοί οι στόχοι δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται σχηματικά η αλληλοσυσχέτιση των στόχων. Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι ας σκεφτούμε την ροή γύρω από την πτέρυγα ενός αεροσκάφους. Εάν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες, ενισχύεται η αντίσταση στην αποκόλληση και περισσότερη άνωση μπορεί να κερδηθεί με μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης. Από την άλλη η αντίσταση τριβής (skin friction drag) για μια στρωτή ροή μπορεί να είναι μέχρι και μια τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή μιας τυρβώδους ροής. Εάν καθυστερήσει η μετάβαση επιτυγχάνεται μικρότερη τριβή (skin friction), όπως και μικρότερος θόρυβος προερχόμενος από την ροή. Παρόλα αυτά, το στρωτό οριακό στρώμα μπορεί να υποστηρίξει μόνο πολύ μικρές απότομες κλίσεις πίεσης (adverse pressure gradients) χωρίς αποκόλληση και μείωση της άνωσης με παράλληλη αύξηση της αντίστασης. Άπαξ και το στρωτό οριακό στρώμα αποκολληθεί, μια στρώση ελεύθερου φύλλου διάτμησης σχηματίζεται και για μέτριους αριθμούς



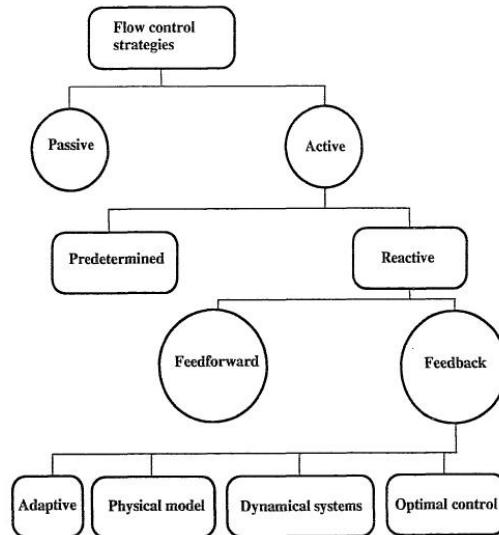
Σχήμα 1.1: Οι στόχοι του ελέγχου ροής και η αλληλοσυσχετίσή τους

Reynolds συμβαίνει μετάβαση στην τύρβη. Αυξημένη παρασύρση ρευστού μεγάλης ταχύτητας εξαιτίας της τυρβώδους ανάμιξης μπορεί να οδηγήσει σε επανακόλληση της αποκολλημένης περιοχής και τον σχηματισμό μιας στρωτής φυσαλίδας αποκόλλησης. Σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης η φυσαλίδα διασπάται και είτε αποκολλάται πλήρως ή δημιουργεί μια μακρύτερη. Σε κάθε περίπτωση αυξάνει η αντίσταση και το “σκαλί” της καμπύλης άνωσης χαμηλώνει. Ο τελικός στόχος όλων αυτών είναι να βελτιωθεί η απόδοση της αεροτομής μέσω της αύξησης του λόγου άνωσης προς αντίσταση. Παρόλα αυτά, η επαγόμενη αντίσταση προκαλείται από την άνωση που προέρχεται από μια ανωστική επιφάνεια με πεπερασμένη έκταση. Επιπλέον περισσότερη άνωση δημιουργείται σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης αλλά η αντίσταση μορφής (form drag) αυξάνει επίσης σε αυτές τις γωνίες πρόσπτωσης.

Όλα τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι όταν κάποιος προσπαθήσει να πετύχει ένα συγκεκριμένο στόχο με ένα είδος ελέγχου μόνο, συναντά προβλήματα από την δυσμενή επιρροή που μπορεί να έχει αυτός ο έλεγχος σε ένα άλλο στόχο. Η ιδανική μέθοδος ελέγχου που είναι απλή, φθηνή στην κατασκευή και δεν έχει μειονεκτήματα δεν υπάρχει και ο μηχανικός θα πρέπει να κάνει συμβιβασμούς και μάλιστα συνεχείς για να πετύχει ένα συγκεκριμένο σχεδιαστικό στόχο.

1.4.2 Σχήματα κατάταξης

Υπάρχουν διάφορα σχήματα κατάταξης για τις μεθόδους ελέγχου ροής. Ένας τρόπος είναι ανάλογα αν η τεχνική εφαρμόζεται στο τοίχωμα ή μακριά από αυτό. Η επιφάνεια μπορεί να έχει επιρροή στη ροή και αυτό εξαρτάται από την τραχύτητα, το σχήμα, την καμπυλότητα, την κίνηση των τοιχωμάτων, τη θερμοκρασία και το πορώδες. Η θέρμανση και η ψύξη της επιφάνειας μπορεί να επηρεάσει τη ροή μέσω των κλίσεων της συνεκτικότητας και της πυκνότητας. Μεταφορά μάζας μπορεί να λάβει χώρα μέσα από πορώδη τοιχώματα ή ανοίγματα. Η απορρόφηση ή η έκχυση ρευστού μπορεί να έχουν σημαντική επιρροή στο πεδίο ροής, καθώς επηρεάζουν ιδιαίτερα τη μορφή του πεδίου ταχυτήτων κοντά στο τοίχωμα και συνεπώς την ευαισθησία στη μετάβαση και την αποκόλληση. Διάφορα πρόσθετα όπως πολυμερή, surfactants, microbubbles, σταγόνες, σωματίδια, σκόνη ή ίνες, μπορούν να προστεθούν στη ροή μέσα από την επιφάνεια. Συσκευές ελέγχου τοποθετημένες μακριά από την επιφάνεια μπορεί να έχουν θετική συνεισφορά. Εξαρτήματα διάσπασης της μεγάλης τύρβης, που επίσης καλούνται εξαρτήματα εξωτερικού στρώματος, ηχητικά κύματα ου βομβαρδίζουν το στρώμα διάτμησης από το εξωτερικό, πρόσθετα που εισάγονται στο μέσον του στρώματος διάτμησης, χειραγώγηση των επιπέδων και φασμάτων τύρβης του ελευθέρου ρεύματος, ριπές, μαγνητικές και ηλεκτρικές υδροδυναμικές δυνάμεις είναι παραδείγματα τεχνικών ελέγχου ροής μακριά από το τοίχωμα.



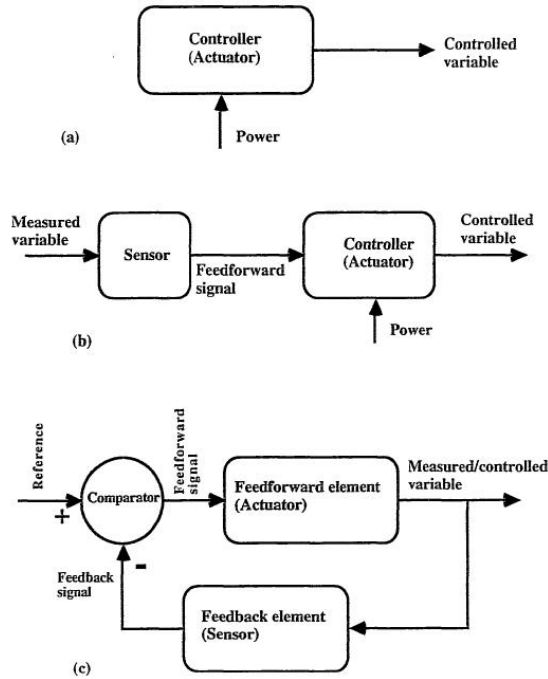
Σχήμα 1.2: Κατάταξη των στρατηγικών ελέγχου

Ένα δεύτερο σχήμα για την κατάταξη των μεθόδων αφορά τη δαπάνη ενέργειας και τον βρόχο ελέγχου που χρησιμοποιείται. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.2, μια συσκευή ελέγχου μπορεί να είναι παθητική, απαιτώντας μηδενική βοηθητική ενέργεια, ή ενεργητική, απαιτώντας δαπάνη ενέργειας. Ο ενεργός έλεγχος χωρίζεται περαιτέρω σε προκαθορισμένο (predetermined) ή αντίδρασης (reactive). Ο προκαθορισμένος περιλαμβάνει την εισαγωγή σταθερής ή μεταβλητής ποσότητας ενέργειας, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συγκεκριμένη κατάσταση της ροής. Ο βρόχος στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ανοιχτός και δεν απαιτούνται αισθητήρες. Ο έλεγχος αντίδρασης αποτελεί ειδική κατηγορία ενεργού ελέγχου, όπου η είσοδος ελέγχου αναπροσαρμόζεται συνεχώς με βάση κάποιου είδους μέτρηση. Ο βρόχος σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να είναι είτε ανοιχτός, εμπρόσθιας τροφοδότησης (feedforward) ή κλειστός με ανατροφοδότηση (feedback). Η κλασική θεωρία ελέγχου ασχολείται κυρίως με τον έλεγχο αντίδρασης. Τα παραπάνω φαίνονται και στο σχήμα 1.3.

Ο διαχωρισμός μεταξύ εμπρόσθιας τροφοδότησης και ανατροφοδότησης είναι πολύ σημαντικός όταν αφορά τον έλεγχο ροών που περιλαμβάνει αισθητήρες και επενεργητές. Στον έλεγχο με εμπρόσθια τροφοδότηση η μετρούμενη και η ελεγχόμενη μεταβλητή διαφέρουν. Για παράδειγμα, η πίεση ή η ταχύτητα μπορεί να μετρούνται σε μια θέση ανάντι και το σήμα μαζί με κάποιο κατάλληλο κανόνα ελέγχου να θέτουν σε ενέργεια ένα επενεργητή, ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζει τη ταχύτητα σε μια θέση κατάντι. Στον έλεγχο με ανατροφοδότηση από την άλλη μεριά πρέπει η ελεγχόμενη μεταβλητή να μετράται, να ανατροφοδοτείται και να συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς.

Ένα άλλο σχήμα κατάταξης βασίζεται στο αν η μέθοδος ελέγχου μεταβάλλει άμεσα το στιγμιαίο/μέσο προφίλ ταχυτήτων ή επιλεκτικά επηρεάζει τις μικρές δομές τύρβης. Από την παρατήρηση των εξισώσεων Navier-Stokes γραμμικές για το τοίχωμα φαίνεται ότι οι κατά την έννοια του εκπετάσματος (spanwise) και κατά την έννοια της ροής (streamwise) ροές στροβιλότητας στο τοίχωμα μπορούν να μεταβληθούν, είτε στιγμιαία είτε κατά το μέσο, μέσω κίνησης των τοιχωμάτων, καμπυλότητας, απορρόφησης/έκχυσης, spanwise ή streamwise κλίσης πίεσης ή κανονικής κλίσης συνεκτικότητας. Αυτές οι ροές στροβιλότητας καθορίζουν την πληρότητα (fullness) των αντίστοιχων προφίλ ταχυτήτων. Για παράδειγμα, απορρόφηση (ή προς τα κάτω κίνηση τοιχωμάτων), ευνοϊκή κλίση πίεσης ή χαμηλότερη συνεκτικότητα μεταξύ ρευστού και τοιχωμάτων οδηγεί σε ροή στροβιλότητας μακριά από το τοίχωμα, καθιστώντας την επιφάνεια μια πηγή streamwise και spanwise στροβιλότητας. Τα αντίστοιχα πληρέστερα προφίλ ταχυτήτων έχουν αρνητική καμπυλότητα στο τοίχωμα και είναι πιο ανθεκτικά στη μετάβαση και την αποκόλληση, αλλά σχετίζονται με υψηλότερες αντιστάσεις τριβής. Αντιστρόφως, ένα προφίλ ταχυτήτων με κλίση μπορεί να παραχθεί με έκχυση, αντίθετη κλίση πίεσης ή μεγαλύτερη συνεκτικότητα με το τοίχωμα. Τέτοια προφίλ είναι περισσότερο επιρρεπή σε μετάβαση και αποκόλληση, αλλά σχετίζονται με χαμηλή, ακόμα και αρνητική, αντίσταση τριβής. Ας σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές τεχνικές για να επηρεαστεί η κλίση της συνεκτικότητας με το τοίχωμα, όπως ψύξη ή θέρμανση της επιφάνειας, έκχυση ρευστού μεγαλύτερης ή μικρότερης συνεκτικότητας από το τοίχωμα κ.α.

Εναλλακτικά οι συσκευές ελέγχου μπορεί να στοχεύουν συγκεκριμένες δομές της ροής αντί να αλλάζουν



Σχήμα 1.3: Διάφοροι βρόχοι για ενεργό έλεγχο

συνολικά το προφίλ ταχύτητας. Τα LEBUs για παράδειγμα μπορούν να στοχεύουν μόνο σε μικρές δομές τύρβης σε τυρβώδεις προσκολλημένες ροές. Αυτές οι μικροδομές είναι υπεύθυνες για το στιγμιαίο προφίλ με κλίση και τη δευτερογενή αστάθεια στην ουδέτερη ζώνη (Buffer Zone) και η καταστολή τους οδηγεί σε καθυστέρηση της μείωσης της κλίσης του προφίλ ταχυτήτων σε πάχυνση της περιοχής του τοιχώματος, μειωμένη παραγωγή τάσεων Reynolds, μεταφορά ορμής και τριβή αντίστασης.

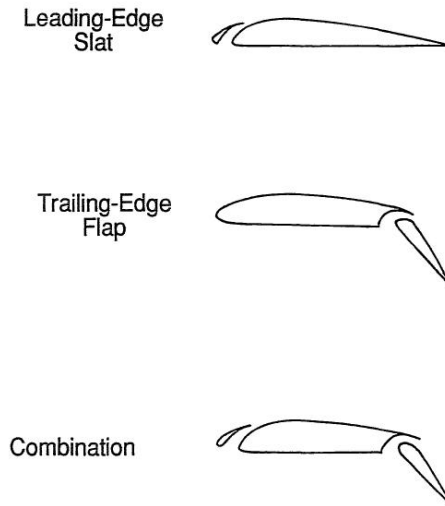
1.5 Έλεγχος αποκόλλησης

1.5.1 Σταθερή αποκόλληση

Η αποκόλληση ενός σταθερού οριακού στρώματος δύο διαστάσεων εξηγήθηκε πρώτα από τον Prandtl στη κλασική του εργασία που αναφέραμε προηγούμενα. Τα σωματίδια του ρευστού κοντά στην επιφάνεια καθυστερούνται από την τριβή που αναπτύσσουν με το τοίχωμα και από οποιαδήποτε αντίθετη κλίση πίεσης παρούσα στην ελεύθερη ροή. Αν το ρευστό κοντά στο τοίχωμα δεν έχει αρκετή ορμή για να συνεχίσει την κίνησή του, θα έρθει σε ηρεμία στο σημείο ή τη γραμμή αποκόλλησης. Πιο κάτω οι αντίθετες δυνάμεις πίεσης θα προκαλέσουν αναστροφή της ροής. Αφού η ταχύτητα στο τοίχωμα είναι μηδενική, η μερική παράγωγος $(\partial u / \partial y)_{y=0}$ πρέπει να είναι θετική ανάντι της αποκόλλησης, μηδέν στο σημείο (γραμμή) αποκόλλησης και αρνητική στην περιοχή όπου η ροή είναι αναστροφή. Για μια αξονικά συμμετρική ροή, η γραμμή αποκόλλησης γίνεται κύκλος και το σημείο όπου εξαφανίζεται η διάτμηση συμπίπτει με το σημείο αποκόλλησης.

Σύμφωνα με την άποψη του Prandtl το σημείο αποκόλλησης καθορίζεται εντελώς από εξωτερικές συνθήκες. Η αποκόλληση του οριακού στρώματος συνοδεύεται από πάχυνση της περιοχής ανακυκλοφορίας και παραγωγή στροβιλότητας. Κατάντι του σημείου αποκόλλησης το στρώμα διάτμησης είτε περνάει πάνω από την περιοχή ανακυκλοφορίας και επανακολλάται στην επιφάνεια του σώματος ή σχηματίζει ένα ομόρου και δεν επανακολλάται ποτέ. Η χαρακτηριστική διάσταση την περιοχής ανακυκλοφορίας είναι αρκετά μεγάλη στην τελευταία περίπτωση και είναι της τάξης του ύψους του σώματος.

Η αναλυτική λύση ενός σταθερού στρωτού οριακού στρώματος δυο διαστάσεων με προκαθορισμένη εξωτερική κατανομή πίεσης ή ταχύτητας παύει να ισχύει στο σημείο αποκόλλησης και αυτό είναι γνωστό ως ιδιομορφία Goldstein. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι προφανώς μια φυσική ιδιότητα της ροής και μπορεί να ξεπεραστεί με την εισαγωγή του πάχους μετατόπισης ή της κατανομής της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα αντί της εξωτερικής πίε-



Σχήμα 1.4: Παθητικό φύσημα μέσα από τρύπες στην ακμή πρόσπτωσης και στα φλαπς της ακμής εκφυγής

σης. Αυτή το είδος ανάλυσης καλείται αντίστροφος υπολογισμός (inverse calculation).

1.5.2 Έλεγχος με πρόσδοση ορμής σε ροή κοντά σε τοίχωμα

Σε αυτή την κατηγορία μεθόδων το κοινό χαρακτηριστικό είναι η παροχή πρόσθετης ενέργειας στα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται κοντά στο τοίχωμα και υφίστανται καθυστέρηση στο οριακό στρώμα. Η επιπλέον διαμήκης ορμή παρέχεται είτε από εξωτερική πηγή είτε από τοπική καθοδήγηση του ρευστού στη περιοχή του τοιχώματος. Οι παθητικές τεχνικές δεν απαιτούν βοηθητική παροχή ενέργειας, αλλά προκαλούν αύξηση στην αντίσταση. Παθητικές τεχνικές είναι : η εσκεμμένη πρόκληση μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή ανάντι του υποθετικού σημείου αποκόλλησης στρωτής ροής [78, 112], πλέγματα οριακού στρώματος για την πρόληψη αποκόλλησης στα ακροπτερύγια οπισθοκλινών πτερύγων, η τοποθέτηση μια συστοιχίας γεννητριών δινών (vortex generators) στο σώμα για την αύξηση του επιπέδου τύρβης και την ενίσχυση της ορμής και της ενέργειας στην περιοχή του τοιχώματος [92, 41], κυματιστή ακμή εκφυγής [113], κλιμακωτά πρυμναία τμήματα για τη δημιουργία συστήματος δινών στη βάση ενός blunt σώματος [72, 61, 62] κ.α.

Οι ενεργητικές τεχνικές για την αναβολή της αποκόλλησης απαιτούν δαπάνη ενέργειας. Προφανώς, η ενέργεια που θα κερδηθεί από την εφαρμογή του ελέγχου πρέπει να ξεπερνά την απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία της συσκευής. Σε αυτές τις μεθόδους συμπεριλαμβάνονται η απορρόφηση, η μεταφορά ενέργειας, η έγχυση ρευστού παράλληλα στο τοίχωμα για την αύξηση της ορμής του οριακού στρώματος ή κανονικά προς το τοίχωμα για την ενίσχυση του ρυθμού ανάμιξης [66], κ.α. Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιείται είτε κάποιου είδους φυσική είτε η υφιστάμενη διαφορά πίεσης του αεροδυναμικού σώματος για την εναπόθεση του ρευστού στην ζώνη του οριακού στρώματος που έχει μειωμένη ταχύτητα. Στη φύση συναντάται η τελευταία περίπτωση ελέγχου στην διχαλωτή ουρά του γερακιού και στα φτερά κάποιων πτηνών.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με τις ενεργητικές τεχνικές, καθώς αυτό είναι και το αντικείμενο της δικιάς μας εργασίας. Αυτό δεν σημαίνει βέβαια ότι παραγνωρίζουμε τη σημασία των παθητικών τεχνικών. Ας σημειωθεί ότι η τεχνική παθητικού φύσηματος μέσα από τρύπες στην ακμή πρόσπτωσης και στα φλαπς της ακμής εκφυγής βρίσκει ευρεία χρήση σε αεροπορικές πτέρυγες, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4. Παρόλο που σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται άμεση δαπάνη ενέργειας, η ένταση του φύσηματος περιορίζεται από την διαφορά πίεσης που υπάρχει στο σώμα. Εντούτοις, το αποτέλεσμα στην άωση και την αντίσταση μπορεί να είναι δραματικό. Σε σύγκριση με την απλή περίπτωση πτέρυγας, όπου ένα μόνο φλάπ ακμής εκφυγής χρησιμοποιείται, η μέγιστη άωση αυξάνεται κατά 175%, ενώ η οπισθέλκουσα που αντιστοιχεί σε C_{Lmax} αυξάνεται περισσότερο από 180%. Τα αντίστοιχα νούμερα όταν χρησιμοποιηθεί ένα φλαπ με δύο τρύπες είναι αντίστοιχα, 230% και 500%. Η επαγόμενη αντίσταση, η οποία πρέπει να ληφθεί επιπλέον υπόψιν, είναι ανάλογη του C_L^2 και επομένως η συνολική οπισθέλκουσα αυξάνει απότομα σε χαμηλές ταχύτητες πτήσης αεροσκαφών.

Ενεργός έλεγχος με πρόσδοση ορμής σε ροή κοντά σε τοίχωμα

Οι τεχνικές ενεργής πρόσδοσης ορμής περιλαμβάνουν παραγωγή δινών μέσω διακριτής έγχυσης ή φυσήματος, ενίσχυση τύρβης ή τάσεων Reynolds μέσω της χρήσης δυναμικά ενεργοποιημένων ή οδηγούμενων μηχανισμών και απευθείας εραπτομενική έγχυση ρευστού υψηλής ταχύτητας. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η χρήση έγχυσης ρευστού με δέσμες για την παραγωγή streamwise δινών. Αυτή η ιδέα ξεκίνησε τη δεκαετία του 1950 [90, 5, 58, 63] και αποτελεί αντικείμενο έρευνας μέχρι και σήμερα [117, 94, 65, 38]. Αυτό που είναι ιδιαίτερα ελκυστικό είναι η δυνατότητα να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται οι γεννήτριες δινών κατά το δοκούν, γεγονός που εξαφανίζει την παρασιτική αντίσταση στην περίπτωση όπου δεν λαμβάνει χώρα φύσημα. Οι χρησιμοποιούμενες γραμμές παροχής ρευστού λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις και για αυτό είναι σχετικά μικρές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και ως στοιχεία δομικής ενίσχυσης. Η έρευνα πάνω στο αντικείμενο δεν έχει ολοκληρωθεί και σημερινά πεδία έρευνας αποτελούν ο βέλτιστος προσανατολισμός έγχυσης, η χωροθέτηση των δεσμών, η γεωμετρία και το μέγεθος μιας μεμονωμένης τρύπας, η ταχύτητα έκχυσης, η πίεση κ.α.

Πολλοί μηχανισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτή τη μορφή ελέγχου ροής συμπεριλαμβανομένου ακουστικών οδηγών [32], ενσωματωμένων πλακών, spoilers και flaps που έχουν τη δυνατότητα να ταλαντώνονται [93, 98, 80, 36, 67, 68], δυναμικό φύσημα κατά την έννοια της χορδής και κατά την έννοια του εκπετάσματος [84, 46, 110, 30], ακόμα και δυναμική κίνηση ολόκληρου του σώματος.

Έλεγχος με δέσμες ρευστού

Η απευθείας εραπτομενική έγχυση δεσμών αέρα είναι η τεχνική ελέγχου που προτιμάται και εφαρμόζεται σε στρατιωτικά και STOL (short take-off and landing) μεταγωγικά αεροσκάφη. Χρησιμοποιείται αέρας υψηλής πίεσης επιτρέποντας σχετικά μικρές εσωτερικές γραμμές παροχής, αντίθετα με την απορρόφηση, η οποία αν και είναι πιο αποδοτική από την έγχυση σε χαμηλές αλλά και υψηλές ταχύτητες πτήσης, απαιτεί μεγάλες γραμμές [74]. Σε μερικές εφαρμογές, εισάγεται ελαφρύτερο αέριο για την μείωση του ρυθμού εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του τοιχώματος και του εξωτερικού ρεύματος, με σκοπό την θερμική προστασία σε υψηλές υπερηχητικές ταχύτητες.

Αέρας απομάστευσης υψηλής πίεσης από ήταν διαθέσιμος από τις πρώτες μηχανές jet. Η υπολογιστική ρευστομηχανική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σήμερα για το σχεδιασμό του συστήματος και τη βελτιστοποίηση του προφίλ ταχύτητας έγχυσης για δεδομένη ροή μάζας, με σκοπό την βέλτιστη καθυστέρηση της αποκόλλησης [101]. Εραπτομενική έγχυση χρησιμοποιείται επίσης για τη σταθεροποίηση παγιδευμένης δίνης, ιδιαίτερα στη περιοχή του γονάτου των flaps. Η βιβλιογραφία της σταθερής έγχυσης είναι εκτενής με τις περισσότερες πληροφορίες να χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1950. Η περίπτωση του ελέγχου σε υψηλές ταχύτητες καλύπτεται από τους Delery [39] και Viswanath [87]. Πιθανού ενδιαφέροντος είναι η εφαρμογή τεχνικών ελέγχου τύρβης για την μείωση της ανάμιξης μεταξύ της εγχυόμενης και της προσπίπτουσας ροής, με σκοπό τη διατήρηση της υψηλής ορμής κοντά στο τοίχωμα για μεγαλύτερη απόσταση κατάντι [79].

Η εραπτομενική έγχυση αέρα στην επάνω επιφάνεια μιας στρογγυλεμένης ακμής πρόσπτωσης αεροτομής θέτει μια ενεργή συνθήκη Kutta σταθεροποιώντας την τοποθεσία της αποκόλλησης. Αυτή η έννοια ελέγχου της κυκλοφορίας αρχικά περιγράφηκε από τους Cheeseman και Seed [55] και από τότε έχει δημιουργηθεί μια σημαντική βάση δεδομένων για την αξιολόγηση της απόδοσης [97], [81], [82]. Ο McLachlan [31] διεξήγαγε μια έρευνα για τη ροή γύρω από μια αεροτομή ελέγχου δύο διαστάσεων με σταθερή έγχυση στις ακμές πρόσπτωσης και εκφυγής. Σε αριθμούς Reynolds, με χαρακτηριστικό μήκος τη χορδή, του εύρους $1.2 \times 10^5 - 3.9 \times 10^5$, παρατήρησε δραματική αύξηση στο συντελεστή άνωσης όταν γινόταν χρήση έγχυσης στην ακμή εκφυγής για τον έλεγχο της τοποθεσίας των πίσω σημείων αποκόλλησης. Σημείωσε δε ότι η αύξηση αυτή ήταν της τάξης των 80 φορών την τιμή του συντελεστή ορμής έγχυσης. Όταν γινόταν ταυτόχρονη έγχυση και στις δύο ακμές παρατήρησε μια μικρή πτώση στην άνωση.

Αν και δεν σχετίζεται άμεσα με τον έλεγχο αποκόλλησης, δέσμες με μορφή λεπτών φύλλων, οι οποίες εξέρχονται από την spanwise κατεύθυνση από τα ακροπερύγια μιας ευθείας πτέρυγας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της άνωσης μέσω της ενεργής αύξησης του εμπετάσματος της πτέρυγας. Αυτή η εφαρμογή αναφέρθηκε πρώτα από τους Ayers και Wild το 1956 και καθιστά πιθανό να χρησιμοποιηθεί μια τέτοια διάταξη στη θέση στη θέση των συμβατικών flaps και ailerons για την αλλαγή των αεροδυναμικών δυνάμεων που ενεργούν σε ένα αεροσκάφος [107]. Είτε μια ενιαία επιμήκης σχισμή [76, 106], είτε περισσότερες βραχύτερες [115], [114] χρησιμοποιούνται κατα μήκος της χορδής στα ακροπερύγια. Η μεγέθυνση του λόγου επιμήκους που σχετίζεται με την πλευρική μετακίνηση των δινών του ακροπερυγίου οδηγεί σε μείωση της επαγόμενης αντίστασης και έχει και θετική επίδραση στην απώλεια στήριξης (stall).

Κεφάλαιο 2

Ανεμομετρία Θερμού Νήματος Hot Wire Anemometry

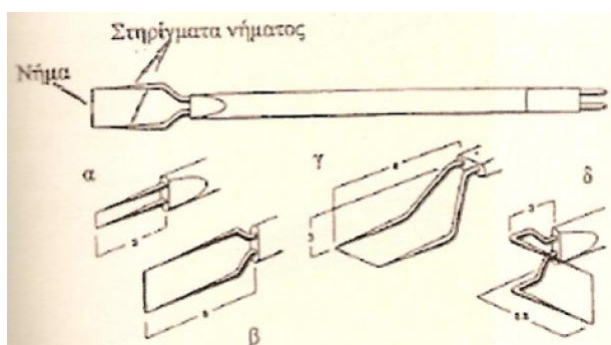
2.1 Η μέθοδος του θερμού νήματος

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ταχυτήτων ρευστού και βασίζεται στην σχέση που συνδέει την απαγόμενη θερμότητα ενός θερμαινόμενου σώματος εκτιθεμένου σε ρεύμα ρευστού, με τη ταχύτητα του ρευστού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι θερμού νήματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1. Ο τύπος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή. Επί παραδείγματι υπάρχουν νήματα με κατάλληλα στηρίγματα τα οποία μπορούν να προσεγγίσουν δύσκολα σημεία και δεν επηρεάζουν τη μέτρηση. Τέτοια χρησιμοποιούνται για μετρήσεις κοντά σε στερεά όρια, δηλαδή μέσα σε οριακά στρώματα (τα νήματα γ,δ του σχήματος 2.1).

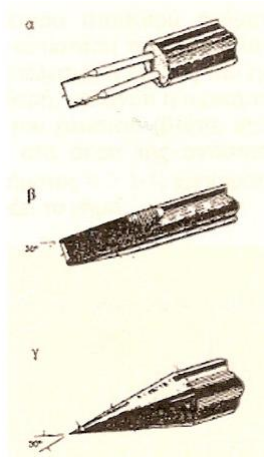
Τα υλικά κατασκευής των νημάτων είναι κυρίως τρία: το βολφράμιο, η πλατίνα και το κράμα πλατίνας-ιριδίου σε αναλογία 80-20 %. Από τα υλικά αυτά:

1. Το βολφράμιο έχει υψηλό θερμοκρασιακό συντελεστή ωμικής αντίστασης και υψηλή αντοχή. Παρουσιάζει όμως γρήγορη οξείδωση σε θερμοκρασίες άνω των 300 βαθμών Κελσίου. Η μικρότερη διάμετρος νήματος βολφραμίου που έχει κατασκευαστεί είναι 2,5 μm .
2. Η πλατίνα έχει καλό θερμοκρασιακό συντελεστή ωμικής αντίστασης και δεν οξειδώνεται εύκολα. Παρουσιάζει όμως μικρή μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μικρότερη διάμετρος νήματος από πλατίνα που έχει κατασκευαστεί είναι 0.5 μm .
3. Νήματα από κράμα πλατίνας-ιριδίου αποτελούν μια μέση λύση, δεδομένου ότι δεν οξειδώνονται εύκολα και παρουσιάζουν καλή μηχανική αντοχή. Τέτοια νήματα χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες απαγορευτικές για τα άλλα δύο είδη.

Κατά τη σχεδίαση ενός θερμού νήματος, η επιλογή της διαμέτρου και του μήκους του προκύπτει από την ικανοποίηση διαφόρων αντιφατικών απαιτήσεων, όπως:



Σχήμα 2.1: Διάφοροι τύποι θερμού νήματος



Σχήμα 2.2: Διάφοροι τύποι θερμού φίλμ

1. Το μήκος πρέπει να είναι μικρό για να υπάρχει καλύτερη χωρική διακριτότητα και μικρότερα αεροδυναμικά φορτία.
2. Το μήκος πρέπει να είναι μεγάλο ώστε οι θερμικές απώλειες προς τα στηρίγματα του νήματος να είναι περιορισμένες, η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του νήματος πιο ομοιόμορφη και η επίδραση των στηριγμάτων μικρή.
3. Η διάμετρος πρέπει να είναι μικρή για να αποφευχθεί η έκλυση δινών που προκαλεί θόρυβο στις μετρήσεις, ο χρόνος απόκρισης να είναι μικρός λόγω της μικρότερης θερμικής αδράνειας και η χωρική διακριτότητα πρέπει να είναι καλή.
4. Η διάμετρος πρέπει να είναι μεγάλη για λόγους αντοχής και για την αποφυγή επικάθησης σκόνης.

Τα νήματα σήμερα κατασκευάζονται σε διαμέτρους από 2.5-5 μm και με μήκος έως 1 mm. Ειδικότερα σε μετρήσεις σε νερό, για λόγους αντοχής, χρησιμοποιούνται διατάξεις μεγαλύτερης διαμέτρου (έως και 50 μm), στις οποίες όμως το ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό αποτελεί ένα πολύ λεπτό στρώμα (hot-film) για τη μείωση της θερμικής αδράνειας. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τρεις τύποι hot-film: κυλινδρικός, σφηνοειδής και κωνικός.

Η μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού σε ένα συγκεκριμένο σημείο γίνεται τοποθετώντας το νήμα στο σημείο αυτό. Αν θεωρήσουμε ότι η παραγόμενη θερμότητα λόγω του φαινομένου Joule απάγεται όλη προς το ρέον ρευστό τότε θα ισχύει η σχέση:

$$R_w I^2 = \pi d l h (T_w - T_f)$$

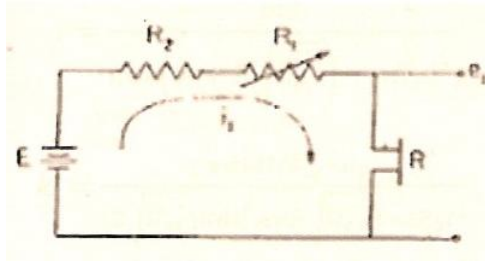
, όπου R_w , I , d , l , h , T_w , T_f είναι αντιστοίχως η ωμική αντίσταση του νήματος, η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το νήμα, η διάμετρος του νήματος, το μήκος του, ο συντελεστής συναγωγής, η θερμοκρασία του νήματος και η θερμοκρασία του ρευστού. Η ταχύτητα του ρευστού υπεισέρχεται εμμέσως στην παραπάνω εξίσωση μέσω του συντελεστή συναγωγής, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ρευστού και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένο το νήμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι στην ψύξη του νήματος συνεισφέρουν μόνο οι κάθετες προς το νήμα συνιστώσες της ταχύτητας.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι ο προσδιορισμός του διανύσματος της ταχύτητας σε διδιάστατο και τρισδιάστατο πεδίο ροής γίνεται με τη χρήση δύο και τριών νημάτων αντίστοιχα.

2.2 Ηλεκτρικές διατάξεις θερμού νήματος

Οι διατάξεις που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα είναι κυρίως δύο:

1. Διάταξη σταθερού ρεύματος, όπου η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το νήμα είναι σταθερή.
2. Διάταξη σταθερής θερμοκρασίας, όπου η μέση θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή.



Σχήμα 2.3: Διάταξη θερμού νήματος σταθερού ρεύματος

2.2.1 Ανεμόμετρο σταθερού ρεύματος

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτη, ενώ αργότερα καθιερώθηκε η διάταξη σταθερής θερμοκρασίας, λόγω των πλεονεκτημάτων που διαθέτει έναντι της πρώτης.

Στη διάταξη του ανεμόμετρου σταθερού ρεύματος το θερμό νήμα είναι συνδεδεμένο εν σειρά με ωμική αντίσταση πολύ μεγαλύτερη από τη δική του (π.χ. 1000 φορές μεγαλύτερη), με αποτέλεσμα η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει να είναι ουσιαστικά σταθερή, μολονότι η ωμική αντίστασή του μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ρευστού, βλ. σχ. 2.3. Έξοδος του οργάνου είναι η πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης του νήματος, e . Η μεταβλητή αντίσταση R_1 χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το νήμα.

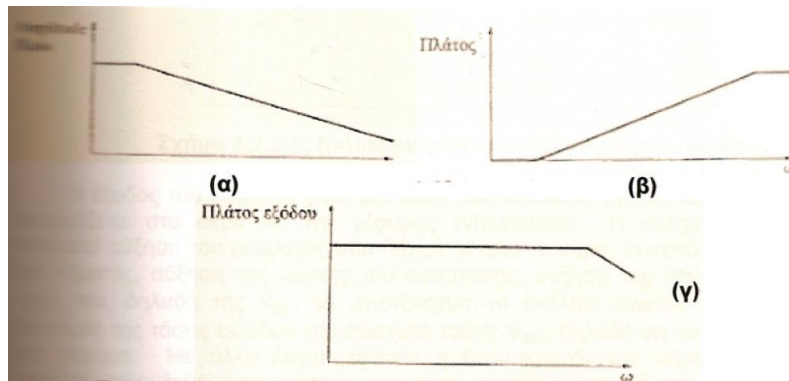
Αν η ταχύτητα του ρευστού αυξηθεί, τότε ο συντελεστής συναγωγής h θα αυξηθεί με αποτέλεσμα να απάγεται θερμότητα από το νήμα με μεγαλύτερο ρυθμό και έτσι η θερμοκρασία και η ωμική του αντίσταση του να μειωθούν. Επομένως μειώνεται και η πτώση τάσης στα άκρα του. Η ευαισθησία του οργάνου είναι λοιπόν αρνητική. Μειούμενης της θερμοκρασίας του νήματος η θερμοκρασιακή διαφορά του από το ρευστό μειώνεται (εφόσον η θερμοκρασία του ρευστού παραμένει σταθερή) έως ότου επέλθει ισορροπία μεταξύ της παραγόμενης θερμότητας και της απαγόμενης από το ρευστό. Ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας από την ηλεκτρική αντίσταση του θερμού νήματος, λόγω του φαινομένου Joule, αποθηκεύεται στο νήμα και ένα άλλο απάγεται προς το ρευστό (αμελώντας μια μικρή ποσότητα θερμότητας η οποία διοχετεύεται προς τα στηρίγματα του νήματος και είναι της τάξης του 15% συνήθως).

Η βασική εξίσωση που αφορά στη λειτουργία του θερμού νήματος σταθερού ρεύματος γράφεται στη μορφή

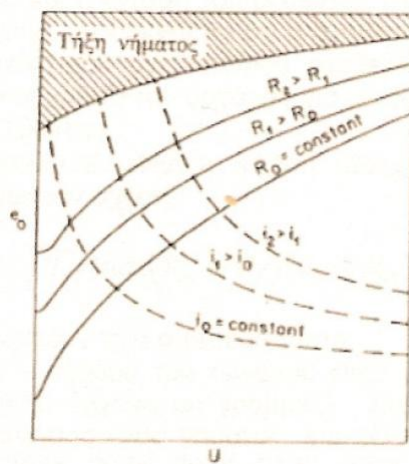
$$\tau \frac{de}{dt} + e = \kappa u_{ef}$$

,όπου τ , κ οι σταθερά χρόνου (sec) και η ευαισθησία ($\frac{Volt*mm}{sec}$) αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι το θερμό νήμα σταθερού ρεύματος συμπεριφέρεται ως όργανο πρώτης τάξης. Οι σταθερές χρόνου και ευαισθησίας είναι αντιστρόφως ανάλογες του μέτρου της ταχύτητας [26]. Όσο αυξάνει η συχνότητα μεταβολής της ταχύτητας του ρευστού (π.χ. όπως ένα τυρβώδες πεδίο ροής) τόσο μειώνεται το πλάτος της μετρούμενης ταχύτητας από το όργανο, ακόμα και αν το πραγματικό πλάτος παραμένει αμετάβλητο, βλ. σχ. 2.4 το α. Η σταθερά χρόνου αυτών των οργάνων δεν μπορεί να μειωθεί πολύ κάτω από 1 ms και επομένως η απόκρισή τους είναι καλή για συχνότητες το πολύ μέχρι 160 Hz. Επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση πεδίων ροής υψηλών συχνοτήτων. Το σφάλμα αυτό μπορεί να μετριασθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονική διάταξη αντιστάθμισης, η οποία συνδεδεμένη στην έξοδο της διάταξης του σχήματος 2.3 προκαλεί τέτοια αύξηση του πλάτους (βλ. σχ. 2.4 το β), ώστε μεταβαλλόμενης της συχνότητας της ταχύτητας του ρευστού, να διατηρείται σταθερό το πλάτος της τάσης εξόδου του οργάνου (βλ. σχ. 2.4 το γ). Παρόλα αυτά επειδή η σταθερά χρόνου του οργάνου εξαρτάται από το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού, βάσει της οποίας πρέπει να γίνει αντίστοιχα η ρύθμιση της διάταξης αντιστάθμισης, η παραπάνω λύση δεν είναι πάντα εφικτή, όταν λ.χ. το μέτρο της ταχύτητας μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο με το χρόνο. Ένα επιπλέον μειονέκτημα που παρουσιάζει η διάταξη αυτή είναι ότι εάν η ταχύτητα του ρευστού ξαφνικά μειωθεί, τότε επειδή η ένταση του ρεύματος θα παραμείνει η ίδια, η παραγόμενη ενέργεια Joule δεν θα απορροφηθεί από το ρευστό, προκαλώντας τήξη του νήματος.

Για τους παραπάνω λόγους το θερμό νήμα σταθερού ρεύματος αντικαταστάθηκε από το θερμό νήμα σταθερής θερμοκρασίας, του οποίου η σταθερά χρόνου είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του ρευστού και πολύ μικρότερη της αντίστοιχης της διάταξης σταθερού ρεύματος. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσης εξόδου-ταχύτητας ρευστού μιας διάταξης σταθερού ρεύματος για τρεις εντάσεις ρεύματος. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή του διαγράμματος αντιστοιχεί σε καταστάσεις τήξης του νήματος, λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Στο



Σχήμα 2.4: α)Απόκριση διάταξης σταθερού ρεύματος, β)δράση διάταξης αντιστάθμισης, γ)απόκριση διάταξης θερμού νήματος με διάταξη αντιστάθμισης



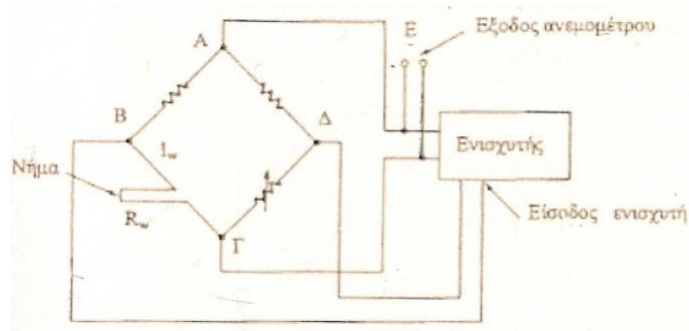
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα εξόδου-ταχύτητας διάταξης σταθερού ρεύματος

ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται αντίστοιχες καμπύλες όταν η αντίσταση του νήματος είναι σταθερή, το οποίο επιτυγχάνεται με τη διάταξη σταθερής θερμοκρασίας που θα παρουσιαστεί πιο κάτω.

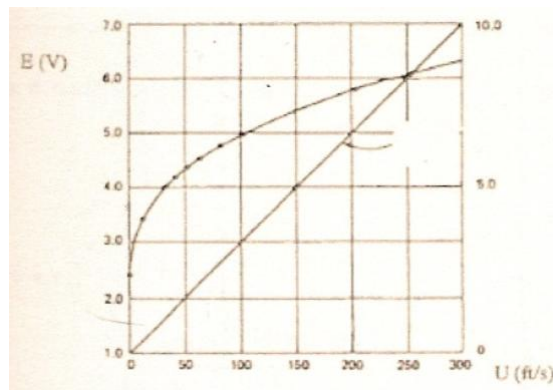
2.2.2 Ανεμόμετρο σταθερής θερμοκρασίας

Στη διάταξη σταθερής θερμοκρασίας, η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή μέσω ενός ηλεκτρονικού συστήματος ανάδρασης. Συγκεκριμένα το θερμό νήμα αποτελεί έναν από τους τέσσερις κλάδους μιας γέφυρας Wheatstone, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, στην οποία ένας ενισχυτής τάσης αναλαμβάνει την ισοροπία της γέφυρας όταν η ωμική αντίσταση του νήματος μεταβάλλεται στιγμιαία λόγω της μεταβαλλόμενης ταχύτητας του ρευστού. Δηλαδή εάν υποθεθεί ότι η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει, η ωμική αντίσταση του νήματος θα μειωθεί λόγω της ψύξης του, η πτώση τάσης $V_{B\Gamma}$ στα άκρα του θα μειωθεί και επομένως η πτώση τάσης $V_{\Delta B}$ στα άκρα του ενισχυτή τάσης θα αυξηθεί, καθώς ισχύει $V_{\Delta B} = V_{\Delta\Gamma} - V_{B\Gamma}$.

Η έξοδος του ενισχυτή είναι μια τάση πολλαπλάσια της εισόδου του, η οποία εφαρμόζεται στα άκρα ΑΓ της γέφυρας Wheatstone. Η αυξημένη αυτή τάση προκαλεί αύξηση του ρεύματος που διέρχεται από το νήμα, άρα και θέρμανση του νήματος, αύξηση της ωμικής αντίστασης του, αύξηση της πτώσης τάσης στα άκρα του, δηλαδή της $V_{B\Gamma}$, με αποτέλεσμα να επέλθει τελικός μηδενισμός της διαφοράς τάσης εισόδου του ενισχυτή ($V_{B\Delta}$) και ισοροπία στη γέφυρα. Με άλλα λόγια, εφόσον η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σταθερή, εάν αυξηθεί η ταχύτητα του ρευστού, πρέπει η παραγόμενη θερμότητα από το νήμα να αυξηθεί, λόγω αύξησης της αναγόμενης θερμότητας από το ρευστό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω αύξησης της έντασης του ρεύματος, η οποία γίνεται σχεδόν ακαριαία από τον ενισχυτή τάσης. Αντίστοιχα, αν μειωθεί η ταχύτητα του ρευστού πρέπει η ένταση του ρεύματος να μειωθεί κ.ο.κ. Μέσω της ηλεκτρονικής διάταξης του ενισχυτή τάσης αποδεικνύεται ότι η σταθερά



Σχήμα 2.6: Διάταξη νήματος σταθερής θερμοκρασίας



Σχήμα 2.7: Καμπύλη βαθμονόμησης θερμού νήματος σταθερής θερμοκρασίας

χρόνου του οργάνου είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του ανεμομέτρου σταθερού ρεύματος, γεγονός που επιτρέπει την ανεπιφύλακτη χρήση του οργάνου για μετρήσεις γρήγορων μεταβολών ταχύτητας της τάξης των 100 kHz.

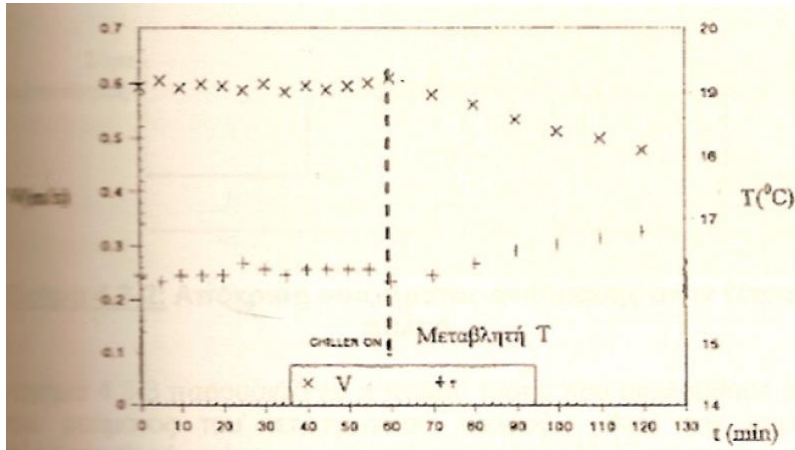
Η έξοδος του οργάνου E , είναι η πτώση τάσης $V_{\Delta\Gamma}$. Εφόσον η γέφυρα τελικά ισορροπεί ισχύει η σχέση:

$$E^2 = \frac{(A + B\sqrt{U_{ef}})\pi dl(R_w - R_f)(R_1 + R_w)^2}{R_w R_0 a}$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτουν τρία βασικά συμπεράσματα:

1. Η σχέση εισόδου-εξόδου του οργάνου είναι μη γραμμική, δηλαδή το θερμό νήμα σταθερής θερμοκρασίας είναι μη γραμμικό όργανο. Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η καμπύλη βαθμονόμησης ενός νήματος, για έξι διαφορετικές θερμοκρασίες ρευστού, δηλαδή 283 K, 293 K, 303 K, 313 K, 333 K και 353 K, με θερμοκρασία νήματος 473 K. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας του ρευστού, δηλαδή μειούμενης της θερμοκρασιακής διαφοράς νήματος-ρευστού, η τάση εξόδου μειώνεται, δεδομένου ότι η απαγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη και επομένως η ένταση του ρεύματος που διέρχεται από το θερμό νήμα είναι μικρότερη.
2. Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση του οργάνου ως προς τη δρώσα ταχύτητα U_{ef} , προκύπτει ότι η μερική παράγωγος $\partial E/\partial U_{ef}$, δηλαδή η ευαισθησία του οργάνου, μειώνεται μειούμενης της θερμοκρασιακής διαφοράς θερμού νήματος-ρευστού. Για αυτό το λόγο η θερμοκρασιακή διαφορά πρέπει να είναι μεγάλη, της τάξης των 200 βαθμών Κελσίου, για μετρήσεις σε αέρα. Η θερμοκρασία του νήματος μπορεί να ρυθμιστεί μέσω της μεταβλητής αντίστασης της γέφυρας Wheatstone.
3. Παραγωγίζοντας τη σχέση του οργάνου ως προς τη θερμοκρασία του ρευστού T_f , προκύπτει ότι η μερική παράγωγος $\partial E/\partial T_f$, δηλαδή η ευαισθησία του οργάνου σε μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού, αυξάνει όταν η θερμοκρασιακή διαφορά θερμού νήματος-ρευστού μειώνεται. Συνέπεια αυτού είναι ότι εάν το θερμό νήμα χρησιμοποιείται ως μέσο μέτρησης της θερμοκρασίας του ρευστού και όχι της ταχύτητάς του, πρέπει η θερμοκρασία ρευστού και νήματος να μη διαφέρουν πολύ.

Μια συνέπεια της διαπίστωσης (2) είναι η εμφάνιση σφάλματος στις μετρήσεις ταχυτήτων σε νερό. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία του νήματος διατηρείται σχετικά χαμηλή (περίπου στους 60 βαθμούς Κελσίου)



Σχήμα 2.8: Εμφάνιση σφάλματος μετρήσεων σε νερό

για αποφυγή εμφάνισης φυσαλίδων στο νερό λόγω βρασμού και έτσι η θερμοκρασιακή διαφορά νήματος-ρευστού είναι μικρή. Επομένως εάν η ταχύτητα του ρευστού είναι π.χ. σταθερή, μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού προκαλεί μεταβολή της εξόδου του οργάνου, η οποία εσφαλμένα μεταφράζεται ως αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαία η χρήση διάταξης διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας του ρευστού. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται η έξοδος ενός θερμού νήματος όταν η θερμοκρασία του ρευστού είναι σταθερή, καθώς και όταν αυξάνει. Στη δεύτερη περίπτωση, για αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού από 16 σε 17 βαθμούς Κελσίου, η ταχύτητα φαίνεται να μειώνεται από 0.6 σε 0.46 $\frac{m}{s}$, δηλαδή μια μείωση της τάξης του 20%.

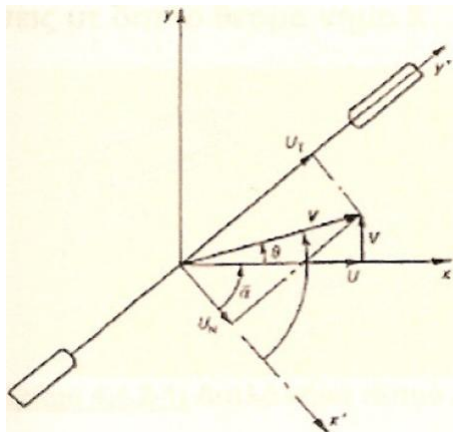
2.3 Εφαρμογές θερμού νήματος

Παρακάτω θα αναφερθούν επιγραμματικά μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές του θερμού νήματος. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μαθηματική θεμελίωση των εφαρμογών μπορεί να βρει ο αναγνώστης στο [26].

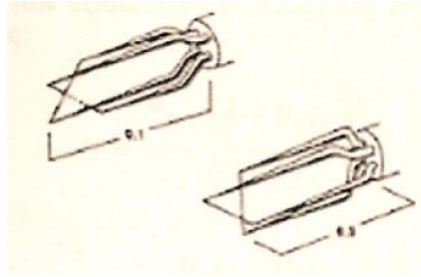
- Μέτρηση τάσεων Reynolds: Με χρήση θερμού νήματος μπορούν να μετρηθούν οι τάσεις Reynolds

$$-\overline{\rho u^2}, -\overline{\rho v^2}, -\overline{\rho uv},$$

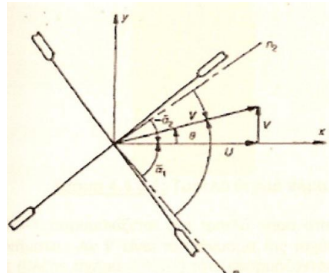
τοποθετώντας το νήμα κάθετα στη ροή υπό γωνία α και $-\alpha$ (βλ. σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9: Θερμό νήμα υπό γωνία α ως προς το ρεύμα ρευστού

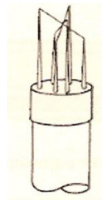


Σχήμα 2.10: Διπλό νήμα τύπου X

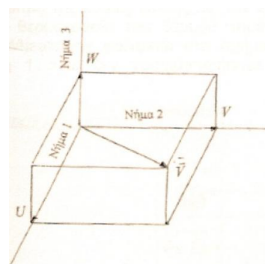


Σχήμα 2.11: Διπλό νήμα τύπου X και οι σχετικές γωνίες ως προς το ρεύμα ρευστού

- Μετρήσεις με διπλό νήμα X: Με δύο θερμά νήματα που σχηματίζουν το γράμμα X είναι δυνατόν να μετρηθούν οι συνιστώσες (U,V) της ταχύτητας σε διδιάστατο πεδίο ροής (βλ. σχήματα 2.10 και 2.11).
- Μετρήσεις με τριπλό νήμα: Με τη χρήση τριών κάθετων μεταξύ τους θερμών νημάτων είναι δυνατόν να μετρηθούν οι συνιστώσες (U,V,W) της ταχύτητας του ρευστού σε τρισδιάστατο πεδίο ροής (βλ. σχήματα 2.12 και 2.13). Προϋπόθεση για τον υπολογισμό είναι να παίρνουν και οι τρεις συνιστώσες θετικές τιμές.



Σχήμα 2.12: Τριπλό θερμό νήμα



Σχήμα 2.13: Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού

Κεφάλαιο 3

Η τεχνική PIV (Particle Image Velocimetry)

3.1 Εισαγωγή

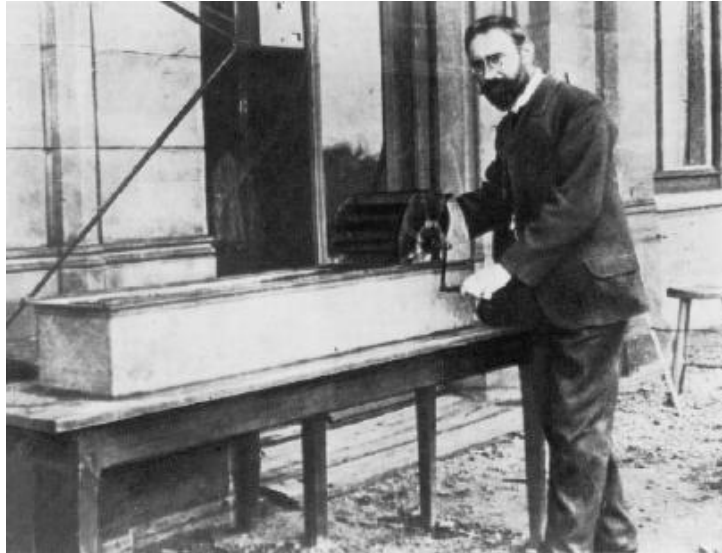
Η τεχνική PIV είναι μια μετρητική τεχνική, η οποία επιτρέπει την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα ολόκληρων πεδίων ροής σε μερικά μόνο κλάσματα του δευτερολέπτου. Η εξέλιξη της τεχνικής αυτής ξεκίνησε τη δεκαετία του 1880. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 η τεχνική ξέφυγε από τα στενά όρια των εργαστηρίων και βρήκε εφαρμογή στη βιομηχανική έρευνα, παράλληλα με τη μετάβαση από τις φωτογραφικές τεχνικές στις τεχνικές καταγραφής video. Οι πρώτες εφαρμογές PIV εκτός εργαστηρίου σε αεροσήραγγες, όπως αυτές γίνονταν στα μέσα του 1980, χαρακτηρίζονταν από τα παρακάτω χρονικά μεγέθη: Ο χρόνος να στηθεί το σύστημα και να ληφθούν φωτογραφίες καλής εστίασης ήταν 2-3 μέρες, ο απαιτούμενος χρόνος για την επεξεργασία του φιλμ ήταν μισή με μια μέρα, ο απαιτούμενος χρόνος για την αξιολόγηση μιας μόνο φωτογραφίας ήταν 24 με 28 ώρες. Στη σημερινή εποχή με την εξέλιξη των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και της υπολογιστικής και αποθηκευτικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι δυνατή η καταγραφή και η επεξεργασία χιλιάδων εικόνων σε χρόνο ασύγκριτα μικρότερο από αυτόν της δεκαετίας του 1980, αλλά και αυτής του 1990.

Η τεχνική σήμερα χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, οι οποίες έχουν αυξηθεί δραστικά με τα χρόνια. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την αεροδυναμική μέχρι τη βιολογία, από την έρευνα τύρβης μέχρι διάφορες εφαρμογές στην αεροδιαστημική, από την μελέτη της καύσης σε ροές δύο φάσεων μέχρι τα μικροσυστήματα και τις μικροδιατάξεις. Εξαιτίας αυτού του μεγάλου εύρους εφαρμογών οι ερευνητές που χρησιμοποιούν την τεχνική έχουν αυξηθεί από μια χούφτα στις αρχές του '80 σε χιλιάδες την σημερινή ημέρα. Επιπλέον χάρη στην ποικιλία εφαρμογών και την πληθώρα δυνατοτήτων στο φωτισμό, τη καταγραφή και την αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές παραλλαγές της μεθόδου.

3.2 Ιστορικό υπόβαθρο

Τα ανθρώπινα όντα ενδιαφέρονται πολύ για την παρατήρηση της φύσης, καθώς αυτή ήταν και είναι μεγίστης σημασίας για την επιβίωσή τους. Οι ανθρώπινες αισθήσεις είναι ειδικά προσαρμοσμένες να αναγνωρίζουν κινούμενα αντικείμενα, καθώς σε πολλές περιπτώσεις αυτά σημαίνουν πιθανό κίνδυνο. Είναι εύκολο να φανταστεί κανείς πως η παρατήρηση κινούμενων σωμάτων είχε οδηγήσει στα πρώτα απλά πειράματα με διατάξεις και εργαλεία διαθέσιμα στη φύση. Σήμερα αυτή η πρωτόγονη συμπεριφορά είναι ολοφάνερη, όταν μικρά παιδιά ρίχνουν ξύλα από μια γέφυρα σε ένα ποτάμι και τα παρατηρούν καθώς επιπλέουν παρασυρόμενα από τα ρεύματα. Ακόμα και αυτός ο απλός πειραματισμός επιτρέπει στα παιδιά να κάνουν εκτιμήσεις για την ταχύτητα του νερού και να παρατηρήσουν δομές, όπως στροβίλους, τον ομόρου πίσω από εμπόδια κ.τ.λ.π.

Τέτοια πειραματικά εργαλεία επιτρέπουν δυστυχώς μόνο ποιοτικές παρατηρήσεις των ιδιοτήτων μιας ροής. Ένα μεγάλο βήμα εμπρός στην έρευνα ροών έγινε όταν κατέστη δυνατή η αντικατάσταση τέτοιων παθητικών παρατηρήσεων της φύσης από καλά σχεδιασμένα πειράματα, για την εξαγωγή πληροφοριών με χρήση τεχνικών οπτικοποίησης. Ένας πολύ γνωστός πρωτοπόρος μιας παρόμοιας διαδικασίας ήταν ο Ludwig Prandtl, ένας από τους πιο σημαντικούς ερευνητές της μηχανικής των ρευστών, ο οποίος χρησιμοποίησε τεχνικές οπτικοποίησης σε σήραγγα νερού για τη μελέτη αποκολλημένων ροών πίσω από πτέρυγες και άλλα αντικείμενα. Η φωτογραφία 3.1



Σχήμα 3.1: Ο Ludwig Prandtl μπροστά από τη σήραγγα οπτικοποίησης ροής νερού το 1904.

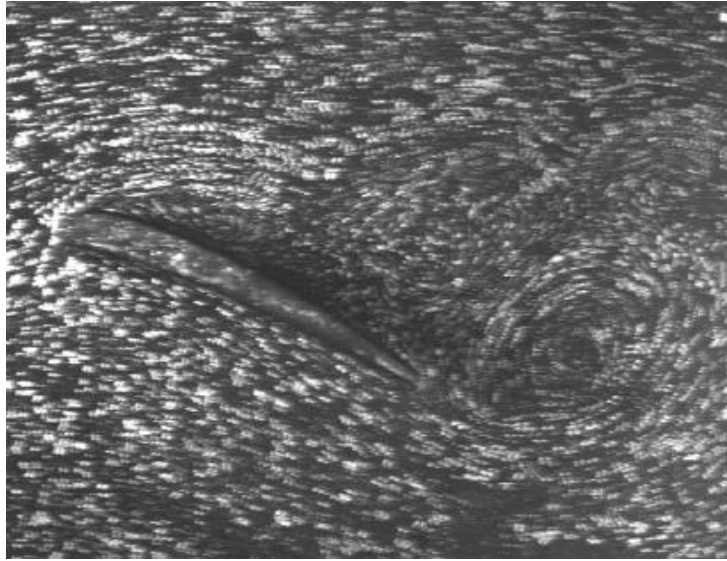
δείχνει τον Prandtl το 1904 μπροστά από την σήραγγα, να οδηγεί χειροκίνητα τη ροή γυρίζοντας ένα τροχό με περύγια [10]. Η σήραγγα αποτελείται από ένα άνω και ένα κάτω τμήμα, τα οποία χωρίζονται από ένα οριζόντιο τοίχωμα. Το νερό ανακυκλοφορεί από το άνω ανοικτό κανάλι, όπου η ροή είναι παρατηρήσιμη, πίσω στον κάτω κλειστό αγωγό. Δισδιάστατα μοντέλα όπως κύλινδροι, πρίσματα και πτέρυγες μπορούσαν εύκολα να τοποθετηθούν στο πάνω κανάλι, με τρόπο ώστε να εκτείνονται πάνω από την επιφάνεια του νερού.

Η ροή οπτικοποιείται με τη διανομή μορίων μίκας στην επιφάνεια του νερού. Ο Prandtl μελέτησε τις δομές της ροής σε κατάσταση σταθερής, καθώς και ασταθούς ροής (στην αρχή της ροής) με αυτή τη ρύθμιση [73].

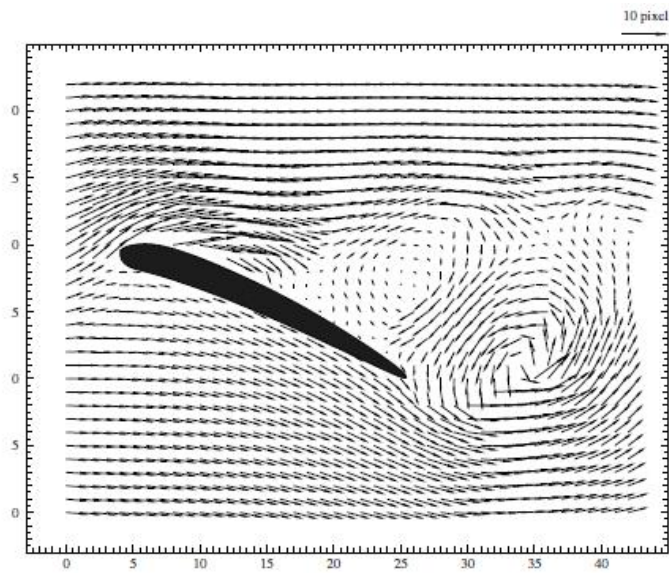
Αλλάζοντας μια σειρά από παραμέτρους στο πείραμα (μοντέλο, γωνία πρόσπτωσης, ταχύτητα ροής, σταθερή-ασταθής ροή) ο Prandtl απέκτησε γνώση για πολλά βασικά χαρακτηριστικά των φαινομένων της ασταθούς ροής. Παρόλα αυτά την εποχή εκείνη ήταν δυνατή μόνο η ποιοτική περιγραφή του πεδίου ροής. Κανένα ποσοτικό σύμπερασμα δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί, για την ταχύτητα της ροής επί παραδείγματι.

Σήμερα ένα αιώνα μετά τα πειράματα του Prandtl, είναι δυνατή η εξαγωγή ποσοτικών πληροφοριών για το στιγμιαίο πεδίο ταχυτήτων της ροής, ακριβώς από το ίδιο είδος εικόνων που ήταν διαθέσιμες και στον Prandtl. Μια τέτοια εικόνα φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Ένα αντίγραφο της σήραγγας νερού του Prandtl, μαζί με μια λάμπα και μια βιντεοκάμερα, χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της ροής, η οποία οπτικοποιείται με τη βοήθεια μορίων αργιλίου που διανεμήθηκαν στην επιφάνεια του νερού.

Επεξεργασία αυτής της καταγραφής με κάποιες μεθόδους οδηγούν σε ένα διανυσματικό χάρτη του στιγμιαίου πεδίου ταχυτήτων, όπως του σχήματος 3.3. Αυτό σημαίνει ότι οι βασικές αρχές που κρύβονται πίσω από την ποσοτική τεχνική απεικόνισης ήταν γνωστές για πολύ καιρό. Εντούτοις, η επιστημονική και τεχνική πρόοδος που συντελέστηκε τα τελευταία 20 χρόνια στην οπτική, τα λέιζερ, τα ηλεκτρονικά, τις τεχνικές βίντεο και τους υπολογιστές, ήταν απαραίτητη για την ανάπτυξη περαιτέρω μιας τεχνικής που να επιτρέπει την ποιοτική οπτικοποίηση της ροής σε τέτοιο βαθμό, που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποσοτικές μετρήσεις σε πολύπλοκα στιγμιαία πεδία ταχυτήτων.



Σχήμα 3.2: Αποκολλημένη ροή πίσω από πτέρυγα, μια σύγχρονη απεικόνιση του πειράματος του Prandtl.



Σχήμα 3.3: Ο διανυσματικός χάρτης του στιγμιαίου πεδίου ταχυτήτων της εικόνας 3.2

3.3 Αρχή της τεχνικής PIV

Παρακάτω θα περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής μετρητικής τεχνικής. Η πειραματική διάταξη ενός συστήματος PIV αποτελείται από αρκετά υποσυστήματα. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρέπει να προστεθούν στη ροή σωματίδια-σκεδαστές φωτός. Αυτά τα σωματίδια πρέπει να φωτιστούν σε ένα επίπεδο της ροής τουλάχιστον δύο φορές σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το φως που σκεδάζεται από τα σωματίδια πρέπει να καταγραφεί είτε σε ένα καρτέ είτε σε μια ακολουθία καρτέ. Η μετατόπιση των εικόνων των σωματιδίων μεταξύ των παλμών φωτός πρέπει να καθοριστεί μέσω τεχνικών εκτίμησης των καταγραφών PIV. Για να καταστεί δυνατή η διαχείριση του μεγάλου ποσού πληροφοριών, το οποίο μπορεί να συλλεχθεί με την τεχνική PIV, απαιτείται μια εξελιγμένη-σοφιστική διαδικασία μετα-επεξεργασίας (post-processing).

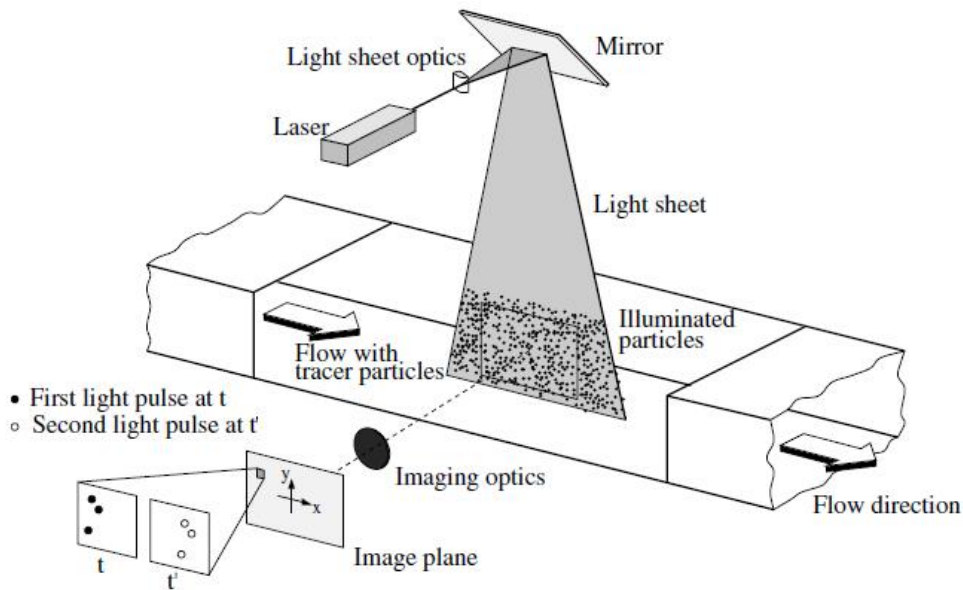
Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη για καταγραφή PIV σε αεροσήραγγα. Μικρά σωματίδια-σκεδαστές φωτός προστίθενται στη ροή. Ένα επίπεδο (φύλλο φωτός) της ροής φωτίζεται δύο φορές μέσω ενός λέιζερ (η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών φωτός εξαρτάται από τη μέση ταχύτητα της ροής και τη μεγέθυνση της απεικόνισης). Υποτίθεται ότι τα σωματίδια κινούνται με τη τοπική ταχύτητα ροής μεταξύ δύο φωτισμών. Το φως που σκεδάζεται από τα σωματίδια καταγράφεται από ένα φακό *υψηλής ποιότητας* είτε σε ένα μόνο καρτέ (π.χ. σε μια υψηλής ανάλυσης ψηφιακή ή φιλμ φωτογραφική μηχανή) είτε σε δύο ξεχωριστά καρτέ σε ειδικές συσχετισμένες ψηφιακές κάμερες (cross-correlation digital cameras). Μετά από τη λήψη της φωτογραφίας PIV, αυτή ψηφιοποιείται με τη βοήθεια σαρωτή και η έξοδος μεταφέρεται στη μνήμη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στη διαδικασία της ανάλυσης-αξιολόγησης η ψηφιακή καταγραφή PIV διαιρείται σε μικρές υποπεριοχές, τις “περιοχές διερεύνησης”. Το τοπικό διάγραμμα μετατόπισης για τις εικόνες των σκεδαστών φωτός του πρώτου και δεύτερου φωτισμού καθορίζεται για κάθε περιοχή διερεύνησης μέσω στατιστικών μεθόδων (αυτοσυσχέτιση και ετεροσυσχέτιση). Υποτίθεται ότι όλα τα σωματίδια μέσα σε μια περιοχή διερεύνησης έχουν μετακινηθεί μεταξύ των δύο φωτισμών κατά ομοιογενή τρόπο. Η προβολή του διανύσματος της τοπικής ταχύτητας ροής στο επίπεδο του φύλλου φωτός (διάγραμμα ταχύτητας δύο συνιστωσών) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο φωτισμών και τη μεγέθυνση κατά την απεικόνιση.

Η διαδικασία της διερεύνησης επαναλαμβάνεται για όλες τις περιοχές διερεύνησης της καταγραφής PIV. Με τις σύγχρονες φωτογραφικές μηχανές CCD (Charge Coupled Device), οι οποίες έχουν 1000×1000 στοιχεία αισθητήρων και περισσότερα, είναι δυνατή η καταγραφή μεγάλου αριθμού εικόνων PIV το λεπτό. Καταγραφή μεγάλης ταχύτητας στους συμπληρωματικούς αισθητήρες ημιαγωγών μεταλλικών οξειδίων (CMOS-Complementary Metal Oxide Semiconductor) επιτρέπει τη δειγματοληψία στο εύρος του kHz. Η ανάλυση-αξιολόγηση μιας ψηφιακής καταγραφής με αρκετές χιλιάδες στιγμιαία διανύσματα ταχύτητας (εξαρτάται από το μέγεθος της καταγραφής, την περιοχή διερεύνησης και τον αλγόριθμο επεξεργασίας) είναι της τάξης του ενός δευτερολέπτου ή και λιγότερο για ένα τυπικό σημερινό υπολογιστή. Εάν απαιτούνται δεδομένα σε ακόμα υψηλότερους ρυθμούς για διαδικτυακή παρακολούθηση της ροής, υπάρχουν εξειδικευμένα λογισμικά, τα οποία εκτελούν υπολογισμούς με μειωμένη ακρίβεια μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου και είναι εμπορικά διαθέσιμα.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να συζητηθούν μερικές γενικές πτυχές της τεχνικής PIV, προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση της μεθόδου:

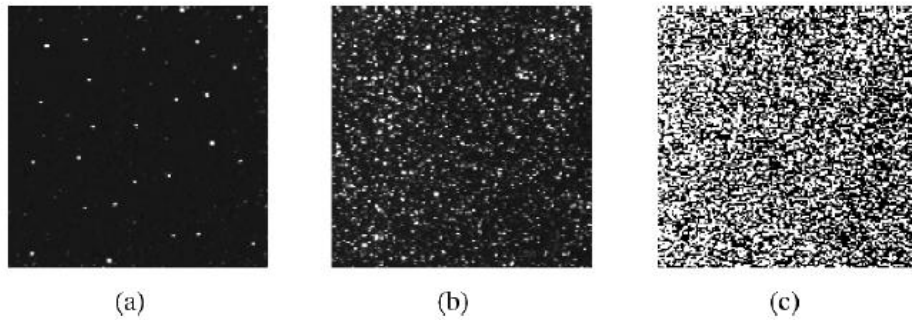
- **Μη παρεμβατική μέτρηση ταχύτητας.** Σε αντίθεση με τεχνικές μέτρησης ταχυτήτων ροών που χρησιμοποιούν σωλήνες πίεσης ή θερμό νήμα, η τεχνική PIV, η οποία είναι μια οπτική τεχνική, λειτουργεί μη παρεμβατικά. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της ακόμα και σε ροές υψηλών ταχυτήτων με δονήσεις ή σε οριακά στρώματα κοντά σε τοιχώματα, όπου η ροή μπορεί να ενοχληθεί από την παρουσία σωλήνων πίεσης κ.τ.λ.π.
- **Έμμεση μέτρηση ταχύτητας.** Με τον ίδιο τρόπο όπως οι μετρήσεις ταχυτήτων με χρήση λέιζερ Doppler, η τεχνική PIV μετρά έμμεσα την ταχύτητα ενός στοιχείου του ρευστού μέσω της μέτρησης της ταχύτητας σωματιδίων-σκεδαστών φωτός μέσα στη ροή, τα οποία στις περισσότερες εφαρμογές έχουν προστεθεί στη ροή πριν την έναρξη του πειράματος. Σε διαφανείς ροές τα σωματίδια βρίσκονται ήδη μέσα στη ροή. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα είναι δυνατή η μέτρηση της ταχύτητας των σωματιδίων, όπως επίσης και της ταχύτητας του ρευστού, για την οποία θα προστεθούν επιπλέον μικρά σωματίδια-σκεδαστές.
- **Τεχνική ολόκληρου πεδίου.** Η τεχνική PIV επιτρέπει την καταγραφή εικόνων μεγάλων τμημάτων των πεδίων ροής σε μια ποικιλία εφαρμογών σε αέρια και υγρά μέσα και την εξαγωγή πληροφοριών για την ταχύτητα μέσω αυτών των εικόνων. Αυτή η ιδιότητα είναι μοναδική. Εκτός από τη τεχνική DGV (Doppler Global Velocimetry, γνωστή και ως Planar Doppler Velocimetry) [77, 49, 64, 54], η οποία είναι μια νέα τεχνική κατάλληλη ιδιαίτερα για μέσων και υψηλών ταχυτήτων ροές αέρα και τη MTV (Molecular Tagging Velocimetry) [16], όλες οι άλλες τεχνικές επιτρέπουν τη μέτρηση της ταχύτητας σε ένα σημείο, παρόλα αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις με υψηλή χρονική ευκρίνεια. Η χωρική ευκρίνεια της PIV είναι μεγάλη, ενώ



Σχήμα 3.4: Πειραματική διάταξη PIV σε αεροσήραγα

η χρονική ευκρίνεια (ρυθμός των καρέ καταγραφής εικόνων) είναι περιορισμένη, λόγω τεχνολογικών περιορισμών. Αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύγκριση αποτελεσμάτων PIV και κλασικών τεχνικών. Η στιγμιαία σύλληψη εικόνας και η υψηλή χωρική ευκρίνεια της PIV επιτρέπουν τον εντοπισμό χωρικών δομών ακόμα και σε ασταθή πεδία ροής.

- **Καθυστέρηση ταχύτητας.** Η ανάγκη χρήσης σωματιδίων-σκεδαστών φωτός για τη μέτρηση της ταχύτητας της ροής απαιτεί προσοχή σε κάθε πείραμα, για να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά ακολουθούν πιστά την κίνηση των στοιχείων του ρευστού, τουλάχιστον σε τέτοιο βαθμό που να ικανοποιεί τους στόχους της έρευνας. Τα μικρότερα σωματίδια ακολουθούν καλύτερα τη ροή.
- **Φωτισμός.** Για εφαρμογές σε αέριες ροές απαιτείται μια υψηλής ισχύος πηγή φωτός για το φωτισμό των μικροσκοπικών σωματιδίων, ώστε το φωτογραφικό φιλμ ή ο αισθητήρας της κάμερας να εκτεθούν επαρκώς στο σκεδασμένο φως. Εντούτοις, η ανάγκη για χρήση μεγαλύτερων σωματιδίων εξαιτίας της αποδοτικότερης σκέδασης του φωτός, έρχεται σε αντίθεση με την απαίτηση για χρήση όσο το δυνατόν μικρότερων σωματιδίων, τα οποία θα ακολουθούν τη ροή πιστά. Στις περισσότερες εφαρμογές πρέπει να βρεθεί κάποιος συμβιβασμός. Σε ροές υγρών μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία σκεδάζουν πολύ περισσότερο φως. Για αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν πηγές φωτός με αρκετά χαμηλότερη μέγιστη ισχύ.
- **Διάρκεια του παλμού φωτισμού.** Η διάρκεια του παλμού φωτισμού πρέπει να είναι αρκετά σύντομη, ώστε να “παγώσει” τη κίνηση των σωματιδίων κατά την έκθεση στον παλμό, προκειμένου να αποφευχθεί θόλωμα (blurring) της εικόνας (χωρίς γραμμές).
- **Χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών φωτισμού.** Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών φωτισμού πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να είναι δυνατός ο καθορισμός της μετατόπισης μεταξύ των εικόνων των σωματιδίων, με ικανοποιητική ευκρίνεια και ταυτόχρονα να είναι αρκετά μικρή για να αποφευχθεί η διαφυγή από το φύλλο φωτός μεταξύ διαδοχικών φωτισμών, σωματιδίων με συνιστώσα ταχύτητας εκτός επιπέδου.
- **Διανομή των σωματιδίων στη ροή.** Στην ποιοτική οπτικοποίηση ροής συγκεκριμένες περιοχές της ροής γίνονται ορατές, μαρκάροντας γραμμές ροής με σωματίδια-σκεδαστές φωτός (καπνός, μοργιά). Ανάλογα με τη θέση της συσκευής τροφοδοσίας τα σωματίδια θα εισέλθουν σε συγκεκριμένες περιοχές της ροής (οριακά στρώματα, ομόρου πίσω από εμπόδια κ.λ.π.). Η δομή και η χρονική εξέλιξη αυτών των δομών μπορεί να μελετηθεί μέσω μεθόδων ποιοτικής οπτικοποίησης της ροής. Στην τεχνική PIV η κατάσταση είναι διαφορετική: μια ομοιογενής κατανομή της πυκνότητας του μέσου είναι επιθυμητή, για καταγραφές PIV υψηλής



Σχήμα 3.5: Οι τρεις περιπτώσεις πυκνότητας εικόνας: a) χαμηλή (PTV), b) μέση (PIV) και c) υψηλή (LSV)

ποιότητας, προκειμένου να εξαχθούν τα βέλτιστα συμπεράσματα από την αξιολόγηση. Σε καταγραφές PIV υψηλής ποιότητας δεν μπορούν να ανιχνευθούν δομές του πεδίου ροής.

- Πυκνότητα των εικόνων των σωματιδίων-σκεδαστών φωτός.** Ποιοτικά τρεις διαφορετικοί τύποι πυκνότητας εικόνας μπορούν να διακριθούν [96], οι οποίοι φαίνονται στο σχήμα 3.5. Στην περίπτωση της χαμηλής πυκνότητας εικόνας, μπορούν να ανιχνευθούν εικόνες μεμονωμένων σωματιδίων και να προσδιοριστούν εικόνες που αντιστοιχούν στο ίδιο σωματίδιο, προερχόμενες από διαφορετικούς φωτισμούς. Η χαμηλής πυκνότητας εικόνα απαιτεί μεθόδους εντοπισμού (tracking methods) για την αξιολόγηση. Συνεπώς, η κατάσταση αναφέρεται ως “Particle Tracking Velocimetry”, σε συντομογραφία PTV. Στην περίπτωση της μέσης πυκνότητας εικόνας, οι εικόνες μεμονωμένων σωματιδίων είναι επίσης ανιχνεύσιμες. Εντούτοις, δεν είναι δυνατός πλέον ο προσδιορισμός ζευγών εικόνων με απλή οπτική παρατήρηση της καταγραφής. Η μέση πυκνότητα εικόνας είναι απαραίτητη για την εφαρμογή των καθιερωμένων στατιστικών μεθόδων αξιολόγησης PIV. Στην περίπτωση της υψηλής πυκνότητας εικόνας δεν είναι δυνατή ούτε η ανίχνευση μεμονωμένων εικόνων, καθώς αυτές αλληλοεπικαλύπτονται στις περισσότερες περιπτώσεις και σχηματίζουν στίγματα. Αυτή η κατάσταση καλείται “Laser Speckle Velocimetry”, LSV, ένας όρος που χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1980 και για τη μέση πυκνότητα εικόνας, καθώς οι (οπτικές) τεχνικές αξιολόγησης ήταν πολύ παρόμοιες και για τις δύο περιπτώσεις.
- Αριθμός φωτισμών ανά καταγραφή.** Για φωτογραφικές και ψηφιακές τεχνικές, πρέπει να διακρίνουμε αν είναι δυνατό να αποθηκεύσουμε τις εικόνες των σκεδαστών φωτός σε διαφορετικά καρέ για κάθε φωτισμό ή αν όλες οι εικόνες λόγω διαφορετικών φωτισμών πρέπει να αποθηκευτούν στο ένα ενιαίο καρέ.
- Αριθμός συνιστωσών του διανύσματος ταχύτητας.** Εξαιτίας του φωτισμού του πεδίου ροής σε ένα επίπεδο, μόνο δύο συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας μπορούν να καθοριστούν με τη κλασική τεχνική PIV δύο συνιστωσών (2C-PIV). Υπάρχουν επίσης και μέθοδοι για τον υπολογισμό της τρίτης συνιστώσας της ταχύτητας (στερεοφωνικές τεχνικές, PIV δύο επιπέδων και ολογραφική καταγραφή [69, 70], η οποία από μόνη της είναι τριών διαστάσεων). Αυτές οι τεχνικές ονομάζονται 3C-PIV. Όλες οι μέθοδοι λειτουργούν σε επίπεδους χώρους του πεδίου ροής (2D-PIV).
- Επέκταση του όγκου παρατήρησης.** Γενικά η επέκταση του όγκου παρατήρησης είναι εφικτή μέσω ολογραφικών τεχνικών (3D-PIV) [50]. Άλλες μέθοδοι όπως η τοποθέτηση αρκετών παραλλήλων φύλλων φωτός σε ένα όγκο [69] ή η σάρωση ενός όγκου με ένα χρονικό βήμα [34, 35] θα αναφέρονται ως 2+1D-PIV.
- Χρονική ευκρίνεια.** Παλαιότερα τα περισσότερα συστήματα PIV επέτρεπαν την καταγραφή με υψηλή χωρική ευκρίνεια, αλλά σε σχετικά χαμηλούς ρυθμούς καρέ. Παρόλα αυτά, η εξέλιξη των λέιζερ υψηλών ταχυτήτων και της κάμερας επιτρέπει την λήψη μετρήσεων στις περισσότερες υγρές και αέριες ροές.
- Χωρική ευκρίνεια.** Το μέγεθος των περιοχών διερεύνησης κατά την αξιολόγηση πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ώστε οι κλίσεις της ταχύτητας να μην έχουν σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, αυτό καθορίζει τον αριθμό των ανεξάρτητων διανυσμάτων ταχύτητας και επομένως τη μέγιστη χωρική ευκρίνεια του χάρτη ταχυτήτων που μπορεί να ληφθεί για μια δεδομένη χωρική ευκρίνεια του αισθητήρα, τον οποίο χρησιμοποιούμε για τη καταγραφή.
- Ικανότητα επανάληψης της αξιολόγησης.** Στην τεχνική PIV πλήρεις πληροφορίες για το πεδίο ταχυτήτων της ροής (εκτός από τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών και τη μεγέθυνση κατά την καταγραφή)

αποθηκεύονται στο χρόνο της καταγραφής σε ένα πολύ πρώιμο στάδιο της μείωσης των δεδομένων. Αυτό οδηγεί στο πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, ότι οι καταγραφές PIV μπορούν εύκολα να ανταλλαχθούν για αξιολόγηση και μετα-επεξεργασία με άλλους που χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές. Οι πληροφορίες για το πεδίο ταχυτήτων της ροής που βρίσκονται εξολοκλήρου στην καταγραφή PIV, είναι εκμεταλλεύσιμες αργότερα με ένα πολύ διαφορετικό τρόπο από αυτόν για τον οποίο είχαν αρχικά συλλεχθεί, χωρίς την ανάγκη να επαναληφθεί το πείραμα.

Παραπάνω παρουσιάστηκαν σύντομα τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής PIV για την κατανόηση της μοναδικότητας της μεθόδου. Η PIV ανοίγει νέους ορίζοντες στη μηχανική των ρευστών, ειδικά στις ασταθείς ροές, καθώς επιτρέπει τη σύλληψη ολόκληρου του πεδίου ροής στιγμιαία. Εντούτοις, άλλες ποσοτικές τεχνικές οπτικοποίησης της ροής [9] που δίνουν πληροφορίες για σημαντικές φυσικές ποσότητες της ροής, όπως η πυκνότητα, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση κ.τ.λ.π. είναι ήδη πολύ γνωστές και ευρύτατα χρησιμοποιούμενες. Επιπλέον αναπτύσσονται νέες οπτικές τεχνικές για τη μέτρηση ποσοτήτων στην επιφάνεια ενός μοντέλου, όπως η πίεση και η παραμόρφωση. Συνεπώς, μια πιο ολοκληρωμένη πειραματική περιγραφή ενός σύνθετου πεδίου ροής θα είναι δυνατή και διαθέσιμη για σύγκριση με τα αποτελέσματα αριθμητικών υπολογισμών στο μέλλον, συνδυάζοντας διαφορετικές τεχνικές.

3.4 Ανάπτυξη της τεχνικής PIV μέχρι σήμερα

Σε αυτό το τμήμα θα παρουσιαστεί βιβλιογραφία που περιγράφει τις βασικές αρχές της PIV αλλά και σημαντικά σημεία της ιστορικής της εξέλιξης. Ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει σε εργασίες που έλαβαν χώρα μετά το 2000, ενώ στο τέλος θα γίνει μια περίληψη της παρούσας κατάστασης και θα δοθεί μια εικόνα μελλοντικών δυνατοτήτων της τεχνικής.

Το σημαντικότερο γεγονός στην εξέλιξη της τεχνικής τα τελευταία 30 χρόνια είναι η αντικατάσταση των αναλογικών τεχνικών καταγραφής και αξιολόγησης από ψηφιακές τεχνικές. Αν και η συμβολή των αναλογικών τεχνικών υπήρξε μέγιστη στην εξέλιξη της PIV, ειδικά στο αρχικό στάδιο εφαρμογής της, αυτή δεν βρίσκεται μέσα στους κύριους στόχους της παρουσίασης αυτού του τμήματος.

Υπάρχουν αρκετές πηγές που περιγράφουν τις βασικές αρχές της τεχνικής κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί να ανατρέξει κανείς στο SPIE Milestone series 99, που συντάχθηκε από τον Grant το 1994 [14]. Αυτή η σειρά περιλαμβάνει περισσότερα από 70 έγγραφα που δημοσιεύτηκαν μεταξύ 1932 και 1993. Η πλειοψηφία τους προέρχεται από τη δεκαετία του '80, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που περιγράφουν τις ρίζες της σύγχρονης PIV, το πρώιμο έργο του Menyart [89], την ανάπτυξη χαμηλής και υψηλής πυκνότητας εικόνας, οπτικές τεχνικές συσχετισμού κ.α. Άρθρα επισκόπησης από τους Lauterborn και Vogel [111] και από τον Adrian [95, 96], κάποια από τα οποία εμφανίζονται επίσης και στο [14], παρουσιάζουν την γρήγορη ανάπτυξη και τη συνολική τεχνογνωσία γύρω από την PIV μέσα σε μια δεκαετία.

Η τεχνική από τη σκοπιά της οπτικής περιγράφεται στο κεφάλαιο του Hinsch [13], το οποίο περιλαμβάνεται στο βιβλίο "Speckle metrology". Αυτή η συνεισφορά είναι σημαντική για την κατανόηση της οπτικής της μεθόδου και περιλαμβάνει 104 αναφορές σε βιβλιογραφία.

Εκείνη την εποχή έλαβε χώρα ισχυρός ανταγωνισμός σχετικά με την καλύτερη απόδοση των οπτικών και ψηφιακών μεθόδων στην αξιολόγηση καταγραφών PIV. Λεπτομέρειες των βασικών θεωρητικών αρχών της ψηφιακής PIV βρίσκονται στην διδακτορική διατριβή του Westerweel [59] Αυτό το βιβλίο περιλαμβάνει περισσότερες από 100 αναφορές.

Μια εργασία ανασκόπησης από τον Grant το 1997 [53] περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές φωτισμού, καταγραφής και αξιολόγησης. Η εργασία περιέχει 188 αναφορές. Η βιβλιογραφία που παρουσιάζεται στο έργο του Adrian [15] είναι πολύ εκτενής, περιλαμβάνει εργασίες μέχρι το 1995 και παρουσιάζει πολλές εργασίες από τη πρώτη δεκαετία εφαρμογής της μεθόδου.

Ένα άλλο σημαντικό βιβλίο σχετικά με την PIV είναι το [20] και συγγραφέας του είναι ο Raffel. Αυτό το βιβλίο περιλαμβάνει μια γενική περιγραφή της τεχνικής, εξηγεί το μαθηματικό, φυσικό και τεχνικό υπόβαθρό της, περιγράφει τις τεχνικές αξιολόγησης των καταγραφών και τις μεθόδους μετα-επεξεργασίας, δίνει παραδείγματα εφαρμογών και γενικά είναι ένα πολύ χρήσιμο εγχειρίδιο για κάθε φοιτητή, επιστήμονα, αλλά και για όποιον θέλει να ασχοληθεί με τη τεχνική.

Γύρω και μετά το 2000 έχουν γίνει πολλές σημαντικές εργασίες πάνω στην τεχνική PIV. Ο όρος "υπερευκρίνεια" (super-resolution) αναφέρεται σε μέσα διερεύνησης που βελτιώνουν την χωρική ευκρίνεια πέρα από αυτή του βασικού σημείου διερεύνησης συσχέτισης. Όπως είχε αρχικά προταθεί από τον Keane [71], τα διανύσματα από τη βασική ανάλυση συσχέτισης χρησιμοποιούνται για το αξιόπιστο ταίριασμα των εικόνων σε ένα

σχήμα εντοπισμού των σωματιδίων, αποκτώντας έτσι 5-10 ανεξάρτητα διανύσματα για κάθε σημείο διερεύνησης. Πολλές βελτιώσεις σε αυτή τη μέθοδο έχουν προταθεί [22, 24]. Το σχήμα 3.6 δείχνει ένα τυπικό αποτέλεσμα της διαδικασίας υπερ-ευκρίνειας [105].

Κάθε μια από τις ερευνητικές ομάδες των Yamamoto, Kobayashi και Okamoto έχουν βελτιώσει τη διαδικασία διερεύνησης σημαντικά [83, 103, 56]. Η προσέγγιση του Yamamoto και των συνεργατών μπορεί να καταταγεί στις μεθόδους που θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως συσχέτιση άνευ πλέγματος. Μια τρίτη προσέγγιση είναι η ιεραρχική μέθοδος συσχέτισης, στην οποία τα αποτελέσματα της συσχέτισης μεγάλων σημείων διερεύνησης χρησιμοποιούνται για την οδήγηση της ανάλυσης συσχέτισης μικρότερων σημείων, μέχρι του σημείου χρήσης πολύ μικρών σημείων [42]. Μια ακόμα προσέγγιση, βασισμένη στην συσχέτιση, είναι η περιστροφή και η παραμόρφωση του δεύτερου παραθύρου και η διεξαγωγή συσχέτισης χρησιμοποιώντας έξι παραμέτρους: δυο μετατοπίσεις, δύο μετατοπίσεις και δύο περιστροφές [52]. Η μέθοδος δίνει μια πιο ακριβή εκτίμηση των παραγώγων [75].

Τέλος χρήση της PIV σε ροές μικροκλίμακας [100] μείωσε τον τυπικό όγκο μέτρησης από 1 mm σε 10 μικρά και λιγότερο. Αυτή η αξιοθαύμαστη αύξηση δύο τάξεων μεγέθους στην χωρική ευκρίνεια επιτυγχάνεται με κόστος τη μείωση του πεδίου παρατήρησης κατά ένα αντίστοιχο ποσό. Ακόμα και έτσι παρέχει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των μικροροών.

3.4.1 Παρούσα κατάσταση

Επί του παρόντος το πιο συνηθισμένο σύστημα PIV που πωλείται από εμπορικές εταιρίες αποτελείται από μια κάμερα ετεροσυσχέτισης 2000×2000 στοιχείων (cross-correlation camera) και ένα λέιζερ διπλού παλμού τύπου Nd:Yag, το οποίο παράγει το φύλλο φωτός. Η ψύξη της κάμερας για την επίτευξη καλύτερου λόγου σήματος προς θόρυβο για τις εικόνες βελτιώνει την αποδοτικότητα για κάθε στοιχείο, βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ευκρίνεια των εικόνων. Στην έρευνα που σχετίζεται με την τύρβη η χρήση ενός απλού 2D-PIV έχει υπάρξει πολύ προσοδοφόρα στην αποκάλυψη βασικών πτυχών της δομής της. Κάποιες από αυτές τις δομές είχαν παρατηρηθεί ή υποθεθεί από προωμότερες οπτικοποιήσεις, αλλά η αξιοπιστία της PIV έκανε δυνατή την ποσοτικοποίηση της στροβιλότητας και την αποκάλυψη μη παρατηρήσιμων φαινομένων, τα οποία ολοκληρώνουν την εικόνα της δομής ορισμένων ροών, όπως η τύρβη κοντά σε τοιχώματα. Πιο εκλεπτυσμένα συστήματα PIV θα ενισχύσουν τις προσπάθειες για την κατανόηση της τύρβης, αλλά δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υποτιμάται ο πλούτος πληροφοριών που μπορεί να αποκτηθεί με το απλό σύστημα 2D.

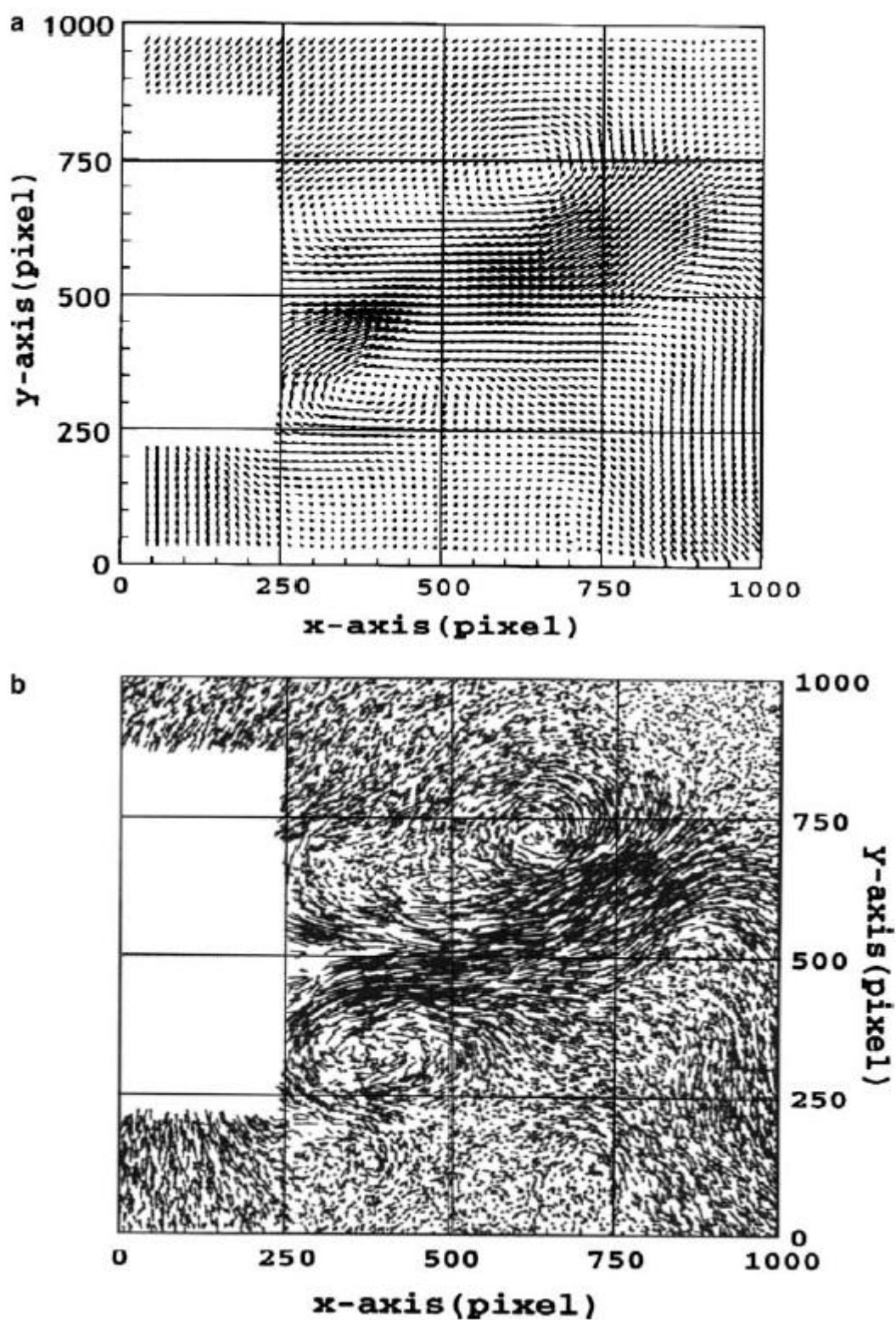
Η στερεοφωνική PIV (Stereo-PIV) βρίσκει σχετικά συχνή εφαρμογή και λειτουργεί ικανοποιητικά, εκτός του ότι η εκτός επιπέδου συνιστώσα της ταχύτητας είναι λιγότερο ακριβής σε σχέση με τις εντός επιπέδου συνιστώσες.

Πολύ σημασία έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη μεθόδων ακριβείας για τη μέτρηση της μετατόπισης εικόνας από το πεδίο εικόνων. Φαίνεται ότι βρισκόμαστε κοντά στην ανάπτυξη αλγορίθμων που πλησιάζουν το βέλτιστο και ότι λίγα μπορούμε να περιμένουμε σχετικά με την βελτίωση της απόδοσης στο μέλλον. Κοινός τόπος για τις μετρήσεις 2D είναι σήμερα περίπου 300×300 διανύσματα με ένα δυναμικό εύρος ταχύτητας όχι περισσότερο από 200:1. Εξαιτίας αυτού του μικρού δυναμικού εύρους, πολλά πειράματα γίνονται για τη βελτίωση αυτού του παράγοντα. Οι ρυθμοί παραγωγής καρτέ έχουν αυξηθεί δραματικά με την έλευση νέων φωτογραφικών μηχανών και λέιζερ υψηλού ρυθμού επαναληπτικότητας, οδηγώντας σε αύξηση των δυνατοτήτων της τεχνικής. Η ταυτόχρονη σύζευξη της PIV με άλλες τεχνικές, όπως PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence) έχει γνωρίσει επιτυχία. Η συνδυασμένες μετρήσεις ταχύτητας ρευστού και μιας δεύτερης φάσης, όπως σωματιδίων, σταγόνων ή ατμών είναι μια χρήσιμη και σημαντική επέκταση της μεθόδου σε πολυφασικές ροές. Η ταυτόχρονη μέτρηση της ταχύτητας υγρού και φυσαλίδων από τους Lindken και Merzkirch [88], η οποία φαίνεται και στο σχήμα 3.7, είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα.

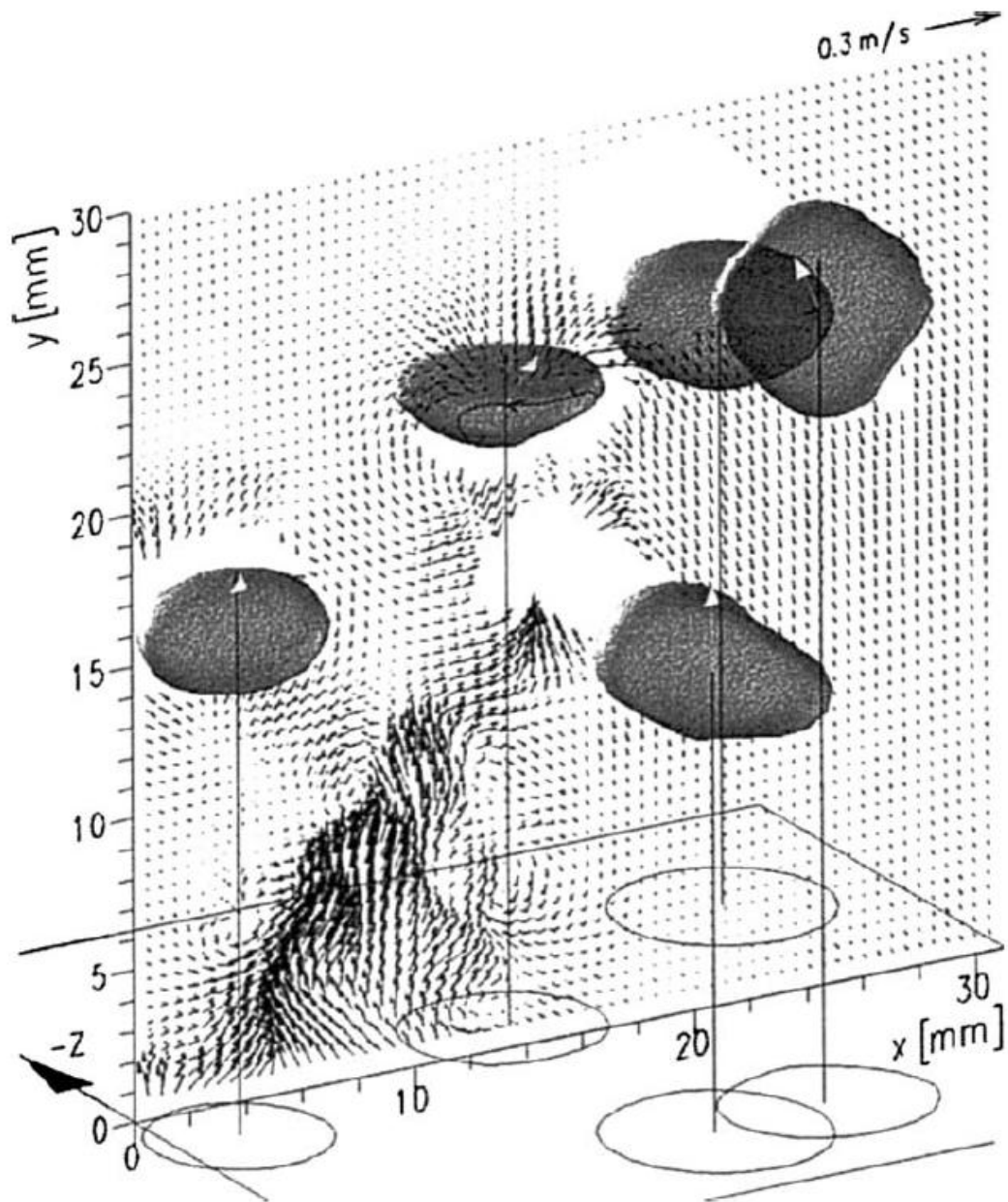
3.4.2 Μελλοντικές δυνατότητες και βελτιώσεις

Είναι πολύ ριγοκίνδυνο να προβλεφθεί το μέλλον, μιας και η πρόοδος της τεχνικής εξαρτάται από βελτιώσεις στην τεχνολογία των συνιστωσών της, όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, λέιζερ και κάμερες. Εντούτοις μπορεί να συνταχθεί με κάποια σιγουριά μια λίστα, η οποία να περιέχει μερικές βελτιώσεις που θα κάνουν την PIV πολύ πιο χρήσιμη:

1. Μια γενική-ενοποιημένη θεωρία θα πρέπει να αναπτυχθεί, η οποία να ενσωματώνει όλες τις παρακάτω πτυχές της PIV:
 - Τη δυναμική των σωματιδίων και τη σχέση μεταξύ των μετρούμενων μετατοπίσεων των σωματιδίων, της ταχύτητάς τους και της ταχύτητας του ρευστού.



Σχήμα 3.6: PIV υπερ-ευκρίνειας. (a) Διανύσματα σε κανονικό πλέγμα από ανάλυση συσχέτισης. (b) Διανύσματα μεμονωμένων σωματιδίων που ελήφθησαν από εντοπισμό σωματιδίων με φίλτρο Kalman, χρησιμοποιώντας τα διανύσματα του (a) ως πρώτες εκτιμήσεις [105]



Σχήμα 3.7: Μετρήσεις PIV σε ροή που περιέχει 5 φυσαλίδες. Η ταχύτητα των φυσαλίδων σημειώνονται με τα μονά βέλη.

- Την απεικόνιση, συμπεριλαμβανομένης της ακρίβειας της χαρτογράφησης και της αντιστάθμισης της παραμόρφωσης.
 - Την καταγραφή των εικόνων και την επίδραση της μετατροπής σε στοιχεία (pixelization) με καλά μοντέλα θορύβου για τις κάμερες.
 - Βέλτιστους αλγορίθμους για τον εντοπισμό σωματιδίων με μέγιστη ακρίβεια.
 - Βέλτιστους αλγορίθμους για το ταίριασμα εικόνων σωματιδίων με μέγιστη αξιοπιστία.
 - Την παρεμβολή και την ομαλοποίηση δειγμάτων δεδομένων που έχουν ληφθεί κανονικά από διερεύνηση συσχετίσης ή τυχαία από PTV ή PIV υπερ- ευκρίνειας.
2. Νέες, πιο πολύπλευρες μέθοδοι τροφοδοσίας σωματιδίων απαιτούνται για να:
- Επιτρέπουν την εύκολη βελτιστοποίηση της συγκέντρωσης και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μεγάλους όγκους.
 - Παράγουν νέα σωματίδια για ροές με σημαντική επιτάχυνση, π.χ. σωματίδια μεγάλης αντίστασης με μεγάλη διασπορά, όπως αγκαθωτές σφαίρες (spiny spheres).
3. Ο στόχος πρέπει να είναι η επίτευξη δυναμικού εύρους ταχύτητας της τάξης του 1000:1—αυτό θα αύξανε κατά πολύ τη χρησιμότητα της PIV και θα καθιστούσε την επίπονη βελτιστοποίηση κάποιων πειραματικών παραμέτρων λιγότερο σημαντική.
4. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων θα πρέπει να υπόκεινται σε ολοένα και περισσότερο αυστηρές προδιαγραφές. Πιο συγκεκριμένα οι πειραματιστές θα πρέπει συχνά να:
- Αποδεικνύουν την επάρκεια της χωρικής ευκρίνειας, κάνοντας συχνές δοκιμές της ευκρίνειας πλέγματος και/ή δοκιμές χωρικής απόκρισης συχνότητας.
 - Αποδεικνύουν την ακρίβεια και την αναπαραγωγικότητα των μετρήσεων της ταχύτητας.
 - Εξετάζουν τα ιστογράμματα πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων της ταχύτητας για στοιχεία πειραματικών αντικειμένων.
5. Πρέπει να αναζητηθούν τρόποι για τη μείωση του κόστους του συστήματος:
- Μειώνοντας τα κόστη των πηγών ενέργειας και την φωτογραφικών μηχανών.
 - Αναπτύσσοντας συστήματα χαμηλού κόστους για συγκεκριμένους σκοπούς, όπως το PIV-σωλήνα (probe-PIV).

3.5 Η τεχνική PIV στην αεροδυναμική

Η χρήση της τεχνικής PIV είναι πολύ ελκυστική στη σύγχρονη αεροδυναμική, επειδή βοηθά στην κατανόηση ασταθών φαινομένων της ροής, όπως για παράδειγμα, στις αποκολλημένες ροές γύρω από ένα μοντέλο σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Η τεχνική επιτρέπει την πραγματοποίηση χωρικά αναλυμένων μετρήσεων του στιγμιαίου πεδίου ταχυτήτων μέσα σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και τον εντοπισμό μικρών και μεγάλων χωρικών δομών στο πεδίο. Μια επιπρόσθετη ανάγκη της σύγχρονης αεροδυναμικής είναι ότι ο αυξανόμενος αριθμός και η ποιότητα των αριθμητικών υπολογισμών του πεδίου απαιτούν επαρκή πειραματικά δεδομένα για επαλήθευση των αριθμητικών κωδίκων, με σκοπό να επαληθευθεί ότι το πρόβλημα έχει μοντελοποιηθεί σωστά. Για να γίνει αυτό πρέπει να διεξάγονται προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα σε στενή συνεργασία με εκείνους τους επιστήμονες που πραγματοποιούν τους αριθμητικούς υπολογισμούς. Τα πειραματικά δεδομένα πρέπει να διαθέτουν υψηλή χρονική και χωρική ευκρίνεια για να είναι δυνατή η σύγκρισή τους με τα αριθμητικά πεδία, που χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα δεδομένων. Η τεχνική PIV είναι ένα κατάλληλο πειραματικό εργαλείο για αυτό το σκοπό, ειδικά εάν απαιτούνται πληροφορίες για το στιγμιαίο πεδίο ταχυτήτων.

Ένα σύστημα PIV για τη μελέτη ροών αέρα σε αεροσήραγγες πρέπει να μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλές ταχύτητες ροής (π.χ. ταχύτητες ροής μικρότερες του 1 m/sec σε οριακά στρώματα), καθώς επίσης και σε υψηλές (ταχύτητες ροής μέχρι 600 m/sec σε υπερηχητικές ροές με κύματα κρούσης). Πεδία ροών πάνω από στερεά, κινούμενα ή παραμορφώσιμα μοντέλα πρέπει να ερευνηθούν. Η εφαρμογή της τεχνικής σε μεγάλες βιομηχανικές αεροσήραγγες παρουσιάζει ορισμένα ιδιαίτερα προβλήματα: μεγάλη περιοχή παρατήρησης, μεγάλες αποστάσεις

μεταξύ της περιοχής παρατήρησης, της πηγής φωτός και της κάμερας, περιορισμένος χρόνος για μετρήσεις και μεγάλα λειτουργικά κόστη για την αεροσήραγγα.

Η περιγραφή των παραπάνω προβλημάτων οδηγεί στην εισαγωγή κάποιων απαιτήσεων, οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν, όταν η τεχνική εφαρμόζεται στην αεροδυναμική. Καταρχήν μια υψηλή χωρική ευκρίνεια του πεδίου δεδομένων είναι αναγκαία για την επίλυση μεγάλης και μικρής κλίμακας δομών της ροής. Αυτή η προϋπόθεση επηρεάζει άμεσα την επιλογή του εξοπλισμού καταγραφής. Μια δεύτερη σημαντική προϋπόθεση είναι ότι απαιτείται μια μεγάλη πυκνότητα πειραματικών δεδομένων για να μπορεί να γίνει μια ουσιαστική σύγκριση με τα αποτελέσματα αριθμητικών υπολογισμών. Κατά συνέπεια, η πυκνότητα εικόνας των σωματιδίων-σκεδαστών φωτός, με άλλα λόγια ο αριθμός των εικόνων σωματιδίων ανά περιοχή διερεύνησης, πρέπει να είναι μεγάλη. Μια ισχυρή γεννήτρια τροφοδοσίας σωματιδίων (μεγάλη συγκέντρωση σωματιδίων στον μετρούμενο όγκο της ροής ακόμα και για χαμηλές ταχύτητες) απαιτείται για αυτό το σκοπό. Καθώς η ταχύτητα του πεδίου μετράται έμμεσα μέσω της μέτρησης της ταχύτητας των σωματιδίων που προστίθενται στη ροή, τα σωματίδια πρέπει να ακολουθούν τη ροή πιστά. Αυτό απαιτεί τη χρήση πολύ μικρών σωματιδίων. Παρόλα αυτά, τα μικρά σωματίδια σκεδάζουν πολύ λίγο φως. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μια τρίτη σημαντική προϋπόθεση για την εφαρμογή της PIV στην αεροδυναμική: ένα πολύ ισχυρό λέιζερ παλμών απαιτείται για τον φωτισμό του πεδίου ροής.

3.6 Τεχνολογικά σημεία-σταθμοί της PIV

Παρακάτω θα παρουσιαστούν μερικά από τα πιο σημαντικά τεχνολογικά σημεία-σταθμοί στην εξέλιξη της PIV. Αυτά επέκτειναν τους ορίζοντες της τεχνικής και η κατάκτησή τους δίνει τη δυνατότητα σε νέους ερευνητές να μελετήσουν ολοένα και συνθετότερες ροές.

- **Αξιόπιστες πηγές φωτός υψηλής ισχύος για εφαρμογές σε αέρα:** Η χρήση του διπλού ταλαντωτή Nd:Yag λέιζερ (δύο αντηχεία, διπλασιασμός συχνότητας, για την επίτευξη μήκους κύματος της τάξης των $\lambda = 532nm$ σε ορατό φως) επέτρεψε για πρώτη φορά το φωτισμό ενός επιπέδου στη ροή με παλμικά λέιζερ της ίδιας σταθερής ενέργειας, με οποιαδήποτε χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο παλμών. Έτσι η ευθυγράμμιση της οπτικής του φύλλου φωτός και η απόκτηση της εικόνας διευκολύνθηκε αρκετά.
- **Βιντεοκάμερα ετεροσυσχετισμού:** Οι σημερινές προηγμένες βιντεοκάμερες σάρωσης επιτρέπουν στους χρήστες την αποθήκευση ενός ζεύγους εικόνων των σωματιδίων-σκεδαστών σε ξεχωριστά καρέ για κάθε φωτισμό, με ενδιάμεσους χρόνους μικρότερους από 1 μs . Αυτό το χαρακτηριστικό λύνει άμεσα το πρόβλημα της αφαίρεσης των ασαφειών, ακόμα και για ροές υψηλών ταχυτήτων. Μεγέθη αισθητήρων 2000×2000 στοιχείων και περισσότερων, μαζί με την εφαρμογή μεθόδων ετεροσυσχετισμού με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο κατά την αξιολόγηση, αποφέρουν πεδία διανυσμάτων ταχυτήτων της ίδιας ποιότητας με εκείνα που ήταν δυνατά μόνο στη φωτογραφική καταγραφή του παρελθόντος.
- **Κάμερα CMOS υψηλής ταχύτητας:** Μια άλλη πρόσφατη τεχνική βελτίωση είναι η ανάπτυξη των αισθητήρων CMOS, οι οποίοι έχουν ενεργούς αισθητήρες εικονοκυττάρων (APS), στους οποίους εκτός από τη φωτοδίοδο ενσωματώνεται και ένας ενισχυτής σε κάθε εικονοκύτταρο. Αυτό μετατρέπει τη φόρτιση που συσσωρεύεται στη φωτοδίοδο σε μια τάση που ενισχύεται μέσα στο εικονοκύτταρο και μετά μεταφέρεται σε διαδοχικές σειρές και στήλες σε παραπέρα κυκλώματα επεξεργασίας σήματος. Η διαδικασία αυτή, σε συνδυασμό με παράλληλες ηλεκτρονικές συσκευές αποθήκευσης, επιτρέπει την καταγραφή και το χειρισμό μερικών χιλιάδων καρέ ανά δευτερόλεπτο με αποδεκτά επίπεδα θορύβου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των περισσότερων αισθητήρων CMOS είναι η δυνατότητά τους να καταγράφουν εικόνες υψηλής αντίθεσης χωρίς προβλήματα.
- **Μικροσκοπική καταγραφή PIV:** Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων χρόνων έχει γίνει σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνικής PIV μικροκλίμακας (μPIV). Η ανάπτυξη της τεχνικής έχει επεκτείνει την τυπική χωρική ευκρίνεια της PIV από την τάξη του 1 mm στην τάξη του 1 μm . Το γεγονός αυτό προκύπτει ως αποτέλεσμα πρωτότυπων βελτιώσεων στον τεχνικό εξοπλισμό και το λογισμικό μετα-επεξεργασίας. Η χρησιμότητα της τεχνικής μPIV έχει καταδειχθεί από την εφαρμογή της σε ροές σε μικροκανάλια, μικροακροφύσια, BioMEMS και ροές γύρω από στοιχεία-κελιά (cells). Παρόλο που η τεχνική είχε αναπτυχθεί αρχικά για μετρήσεις ταχυτήτων μικροκλίμακας, έχει επεκταθεί σε μετρήσεις θέσεων τοιχωμάτων με ακρίβεια δεκάδων nm, παραμορφώσεων υδρογέλης (hydrogels), στη θερμομετρία μικροσωματιδίων και στην υπέρυθη-PIV.

3.7 Παραδείγματα εφαρμογών

Μερικά πολύ ενδιαφέροντα παραδείγματα εφαρμογών της τεχνικής παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω, για να πάρει ο αναγνώστης μια γεύση από το εύρος και την πολυμορφία των εφαρμογών της τεχνικής σήμερα. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις λεπτομέρειες των παραδειγμάτων μπορεί να βρει ο αναγνώστης στο [21]:

- **Σε ροές υγρών:** Αλληλεπίδραση δινών με ελεύθερη επιφάνεια, μελέτη της μεταφοράς θερμότητας και ροές Couette.
- **Σε οριακά στρώματα:** Αστάθειες οριακών στρωμάτων, τυρβώδες οριακό στρώμα.
- **Σε υπερηχητικές ροές:** Πτερύγιο με έκχυση αέρα ψύξης, υπερηχητική ροή πάνω από μια αεροτομή, αλληλεπίδραση κρουστικού κύματος-τυρβώδους οριακού στρώματος.
- **Stereo PIV εφαρμοσμένη σε ροή με δακτύλιο δινών.**
- **PIV διπλού επιπέδου (Dual Plane PIV) εφαρμοσμένη σε ροή με δακτύλιο δινών.**
- **Διάδοση Rayleigh-Bénard μεγάλης κλίμακας.**
- **Ανάλυση ακολουθίας εικόνων PIV.**
- **Χάρτες ταχυτήτων και πιέσεων πάνω από μια υπερηχητική πτέρυγα Δέλτα.**
- **Ανίχνευση συνεκτικών δομών σε ροή σε απότομη διεύρυνση.**
- **Ποσοτική μελέτη του ζευγαρώματος δινών σε περιστροφική δέσμη αέρα.**
- **Προσεγγίσεις στέρεο και όγκου στην αεροδυναμική ελικοπτερόυ:** Μετρήσεις σε αεροσήραγγα των δινών των πτερυγίων του συμπιεστή.
- **Stereo PIV εφαρμοσμένη σε υπερηχητικό στρόβιλο.**
- **PIV εφαρμοσμένη σε υπερηχητικό φυγοκεντρικό συμπιεστή.**
- **PIV σε αντιδρούσες ροές.**
- **Μελέτη PIV υψηλής ταχύτητας στις πηγές θορύβου ακμής εκφυγής.**
- **PIV όγκου.**
- **Υπερηχητικές μετρήσεις PIV σε μοντέλο διαστημοπλοίου.**
- **Stereo PIV πολλών επιπέδων.**
- **PIV μικροκλίμακας σε αεροσήραγγα.**
- **Μίκρο-PIV στις επιστήμες ζωής:** Βιοσυμβατή μPIV-Μια πειραματική μελέτη.

Κεφάλαιο 4

Βαλβίδες

4.1 Εισαγωγή

Η πνευματική (pneumatics) είναι επιστημονικός κλάδος που ασχολείται με τις μηχανικές ιδιότητες των αερίων, όπως η πίεση και η πυκνότητα, και χρησιμοποιεί πεπιεσμένο αέριο σαν πηγή ενέργειας για την επίλυση πολλών μηχανολογικών προβλημάτων. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο αέριο είναι ο αέρας και για αυτό το λόγο η χρήση του έχει γίνει συνώνυμη με την πνευματική. Η υδραυλική από την άλλη είναι κλάδος που ασχολείται με τις μηχανικές ιδιότητες των υγρών και τη χρήση τους ως πηγή ενέργειας για την επίλυση μηχανολογικών προβλημάτων. Η πνευματική και η υδραυλική είναι παρόμοιες από πολλές απόψεις και αναφέρονται συχνά με το γενικό όρο ισχύς ρευστών.

Ο αέρας χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά σαν μέσο μεταφοράς ενέργειας πριν από 2000 χρόνια και οι διάφοροι τομείς εφαρμογών αντανακλούν την τεχνολογική πρόοδο που συντελέστηκε από τότε. Η βιομηχανική χρήση μεγαλύτερης κλίμακας άρχισε το 1888 όταν ένας κεντρικός σταθμός συμπίεσης 1.5 kW εγκαταστάθηκε στο Παρίσι για να τροφοδοτεί την πόλη με πεπιεσμένο αέρα. Η επικράτηση όμως της ηλεκτρικής ενέργειας σχεδόν εξαφάνισε αυτόν τον τρόπο μεταφοράς ενέργειας, χωρίς να σημαίνει ότι ο ανταγωνισμός μεταξύ πνευματικών/υδραυλικών και ηλεκτρικών συστημάτων δεν συνεχίζεται μέχρι τις μέρες μας.

Γύρω στα 1900 τα πιο συνήθη πνευματικά στοιχεία σε χρήση ήταν τα πνευματικά σφυριά, π.χ. σε ναυπηγεία. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας το πριτσίνωμα (riveting) έχει αντικατασταθεί από τη συγκόλληση (welding) και πλέον πνευματικά σφυριά συναντά κανείς μόνο σε εργοτάξια. Οι βιομηχανικές εφαρμογές πνευματικών στοιχείων για αυτοματισμούς ξεκίνησαν γύρω στα 1950 όταν αυξήθηκε η ανάγκη για αυτούς στις γραμμές παραγωγής και έγιναν διαθέσιμα κατάλληλα ελαστομερή υλικά για τις στεγανώσεις σε βαλβίδες και έμβολα.

Πολλές μηχανές απαιτούν κάποιου είδους λογική ελέγχου για την ασφαλή λειτουργία τους. Τη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκαν στοιχεία ρευστών (fluidic elements) τα οποία χρησιμοποιούσαν το φαινόμενο Coanda για να δώσουν συναρτήσεις Boole AND ή OR. Λειτουργούσαν σε πίεση περίπου 0.3 bar και θεωρούνται πνευματικά ανάλογα ηλεκτρονικού ελέγχου [8, 23]. Πολλές παρουσιάσεις σε συνέδρια που αφορούσαν την ενέργεια ρευστών συζητούσαν τα σχετικά οφέλη αυτού του τύπου ελέγχου. Αναπτύχθηκαν πνευματικοί αισθητήρες για πολλές ποσότητες, ακόμα και ολοκληρωμένα συστήματα ελέγχου πτήσης αεριοθούμενων αεροσκαφών [12]. Σήμερα αυτού του τύπου η λογική ελέγχου είναι μουσειακή και συναντάται μόνο σε μηχανές που λειτουργούν σε εκρηκτικά περιβάλλοντα. Ο έλεγχος γίνεται από ηλεκτρονικούς υπολογιστές στη μορφή PLC (programmable logic controller) με μαγνητικούς αισθητήρες για τη θέση εμβόλου και ηλεκτρικά οδηγούμενες βαλβίδες.

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του αέρα ως μέσο μεταφοράς ενέργειας είναι η απλότητα στη μετατροπή της πίεσης σε δύναμη, με άλλα λόγια μετατόπιση χρησιμοποιώντας ένα έμβολο μέσα σε κυκλική οπή. Αυτοί οι επενεργητές είναι απλοί στο σχεδιασμό, μπορούν να είναι πολύ γρήγοροι και δεν υπερθερμαίνονται ακόμα και αν stallάρουν επ' αόριστον. Ένας ρυθμιστής πίεσης μπορεί εύκολα να ελέγξει τις παραγόμενες δυνάμεις. Η απουσία παραγωγής θερμότητας επιτρέπει μικρό μέγεθος και εξαιρετικό λόγο ισχύος προς βάρος: ο στρόβιλος σε ένα μύλο χειρός ζυγίζει μόνο 185 γρ. και έχει ισχύ εξόδου 2 kW. Οι πνευματικοί κύλινδροι χρησιμοποιούνται για αυτό το λόγο ευρύτατα όταν όταν μάζες μέχρι 20 κιλά πρέπει να μεταφερθούν σε αποστάσεις μέχρι 1 μέτρο στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Ένα πλεονέκτημα των οδηγών ισχύος ρευστών είναι η ευκολία στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος. Ο απλός περιορισμός μιας μεταβλητής είναι αρκετός για να μειώσει την ισχύ συνεχόμενα από την ονομαστική τιμή στο μηδέν. Αυτός είναι και ο λόγος που οι υδραυλικοί οδηγοί ήταν πολύ δημοφιλείς σε εργαλεία μηχανών, καθώς

απαιτούνται πολύ εκλεπτυσμένα ηλεκτρονικά ισχύος και επεξεργασία σήματος για να επιτευχθεί η ίδια συμπεριφορά με ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίες από την μεριά τους προσφέρουν ένα αριθμό από πλεονεκτήματα.

Ο αέρας δεν προκαλεί σπινθηρισμούς, δεν είναι επιβλαβής για την υγεία και μπορεί να αποθηκευθεί εύκολα. Οι πνευματικοί επενεργητές είναι λοιπόν κατάλληλοι για χρήση στο εκρηκτικό περιβάλλον των χημικών εργοστασίων. Εάν δεν χρησιμοποιείται λιπαντικό, ο αέρας μπορεί να διοχετευθεί από το μηχανισμό κατευθείαν στην ατμόσφαιρα. Μια δεύτερη γραμμή επιστροφής δεν είναι απαραίτητη, αλλά συνήθως εφαρμόζεται κάποιου είδους σίγαση. Οι διάφορες διαρροές δεν προκαλούν μόλυνση του περιβάλλοντος και ηλεκτρικές εκκενώσεις και συχνά αγνοούνται με αποτελέσματα απώλειες που θα μπορούσαν να αποφευχθούν και υψηλά κόστη λειτουργίας. Ακόμα και ένα απλό δοχείο μπορεί να αποθηκεύσει πνευματική ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και κάτω από αντίξοες συνθήκες. Για αδιάκοπη χρήση σε βιομηχανική κλίμακα ένα δοχείο πίεσης και ένας συμπιεστής που θα το γεμίζει είναι αρκετά.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ελεύθερο αγαθό, γεγονός που δημιουργεί την εντύπωση ότι είναι φτηνή μορφή ενέργειας. Το περισσότερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί ο συμπιεστής μετατρέπεται σε θερμότητα και ανάλογα με το σύστημα, αυτή η μετατροπή κυμαίνεται από 60 μέχρι 90 %. Η πνευματική ενέργεια είναι επομένως πιο ακριβή από την ήδη ακριβή ηλεκτρική ενέργεια. Ένας κανόνας είναι ότι ένας συμπιεστής ο οποίος αναρροφά 11 l/sec ατμοσφαιρικού αέρα χρειάζεται περίπου 4 kW ηλεκτρικής ενέργειας για να δώσει ως πίεση εξόδου 7 bar [7]. Παρόλα αυτά σε ένα σύγχρονο εργοστάσιο η θερμότητα από τους συμπιεστές μπορεί να ανακτηθεί και να μειώσει το κόστος του συμπιεσμένου αέρα σε ποσοστό 80% [25]. Είναι επομένως αδύνατον να γίνει ακριβής υπολογισμός του κόστους του συμπιεσμένου αέρα ή του ενεργειακού κόστους των πνευματικών εργαλείων. Μέρος όμως του μειονεκτήματος στο κόστος καλύπτεται από το γεγονός ότι τα πνευματικά εξαρτήματα είναι φτηνά και λειτουργούν σε πολλούς κύκλους ανά εργατοημέρα.

4.2 Βαλβίδες ελέγχου πίεσης

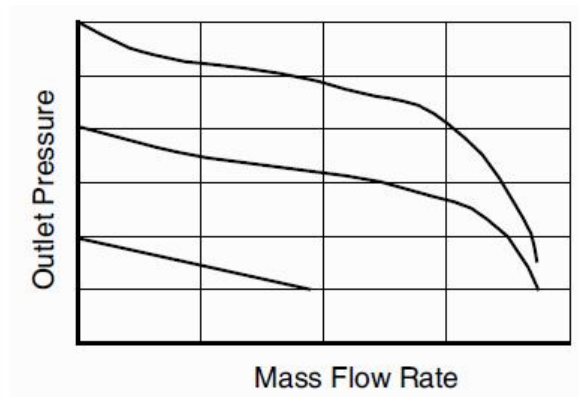
Μια βαλβίδα ελέγχου πίεσης ορίζεται κατά ISO 5598 ως “μια βαλβίδα της οποίας ο σκοπός είναι να ελέγχει την πίεση”. Στην πνευματική αυτό σημαίνει συνήθως τη μείωση της πίεσης που παρέχει ο συμπιεστής με στραγγαλισμό. Σε μερικές εφαρμογές όμως χρησιμοποιούνται βαλβίδες ανακούφισης, οι οποίες ανοίγουν και απελευθερώνουν συμπιεσμένο αέρα για παράδειγμα, όταν αυτός φτάσει σε κάποια κρίσιμη πίεση. Τέτοιες βαλβίδες είναι γνωστές ως βαλβίδες ασφαλείας και χρησιμοποιούνται π.χ. για την πρόληψη της καταστροφής δοχείων πίεσης, ενώ βρίσκουν και πολλές άλλες εφαρμογές στην βιομηχανία και αλλού.

4.2.1 Βαλβίδες ελέγχου πίεσης με ελατήριο

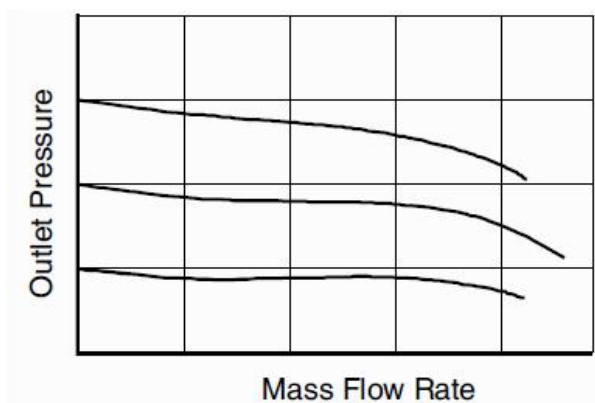
Οι βαλβίδες ελέγχου πίεσης ή ρυθμιστές πίεσης χρησιμοποιούνται για την μείωση της πίεσης που ασκείται στα κατάντι μέρη ενός πνευματικού κυκλώματος. Μια τέτοια βαλβίδα ενσωματώνεται σε ένα συνδυασμένο σύστημα από φίλτρο, ρυθμιστή και μερικές φορές λιπαντή για την προετοιμασία του συμπιεσμένου αέρα πριν αυτός φτάσει στον πνευματικό μηχανισμό. Άλλες τυπικές εφαρμογές-χρήσεις είναι ο έλεγχος της πίεσης σε πνευματικά εργαλεία, όπως κατσαβίδια, και σε κυλίνδρους.

Δεν υπάρχουν πληροφορίες για την δυναμική των βαλβίδων αυτών και μπορούν να θεωρηθούν ως συσκευές χαμηλής συχνότητας. Εάν τυχόν εμφανιστούν ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας, αυτές συνήθως απορροφώνται από τον συμπιεσμένο αέρα που βρίσκεται είτε στις σωληνώσεις που συνδέουν τα μέρη του κυκλώματος, είτε σε ξεχωριστό δοχείο αποθήκευσης.

Οι ρυθμιστές πίεσης γενικής χρήσης έχουν χαρακτηριστικά που καλύπτουν τις ανάγκες των περισσότερων βιομηχανικών εφαρμογών. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η σχέση της πίεσης εξόδου σαν συνάρτηση του ρυθμού ροής μάζας για σταθερή πίεση εισόδου σε ένα μικρο ρυθμιστή. Για τον ιδανικό ρυθμιστή οι γραμμές θα ήταν παράλληλες στον άξονα x , δηλαδή δεν θα άλλαζε καθόλου η πίεση εξόδου ακόμα και αν συνέβαιναν μεγάλες αλλαγές στη ροή. Συνεπώς η βαλβίδα του σχήματος δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές όπου η ροή αλλάζει σημαντικά. Ένας όρος που χρησιμοποιείται για την πτώση πίεσης λόγω της ροής είναι ο *drop*. Επιπλέον αυτής της πτώσης υπάρχει και σημαντική υστέρηση, δηλαδή διαφορετική πίεση για τον ίδιο ρυθμό ροής ανάλογα με το εάν ο ρυθμός αυξανόταν ή μειωνόταν. Το διεθνές πρότυπο ISO 6953 καθορίζει διαδικασίες ελέγχου για την εξαγωγή αυτών των καμπυλών. Τα γενικά χαρακτηριστικά της καμπύλης ροής είναι παρόμοια για όλους τους ρυθμιστές. Η τελική μορφή της εξαρτάται σημαντικά από τον εσωτερικό σχεδιασμό. Για μεγαλύτερους ρυθμιστές οι καμπύλες προσεγγίζουν την ιδανική κατάσταση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη ροής ενός μικρού ρυθμιστή πίεσης



Σχήμα 4.2: Καμπύλη ροής ενός τυπικού 1/4" ρυθμιστή

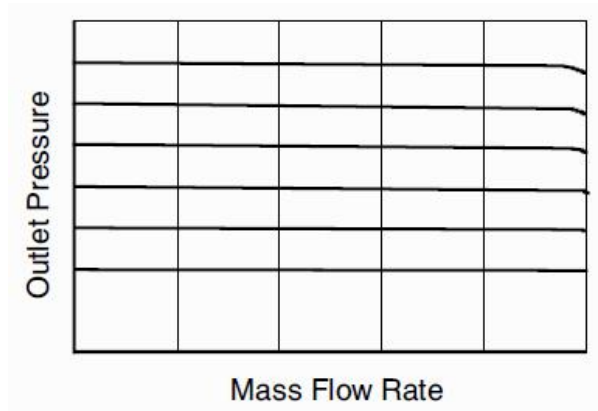
Οι ρυθμιστές πίεσης ακριβείας (precision regulators) χρησιμοποιούνται όταν ο έλεγχος της πίεσης πρέπει να έχει μικρές ανοχές. Τυπικές εφαρμογές είναι μουσικά συστήματα και ιατρικές συσκευές. Ο σχεδιασμός τους είναι πιο πολύπλοκος και είναι πολύ πιο ακριβείς σε σχέση με τους ρυθμιστές γενικής χρήσης. Οι καμπύλες τους φαίνονται στο σχήμα 4.3 και η συμπεριφορά τους προσεγγίζει τον ιδανικό ρυθμιστή.

Σχεδιαστικά στοιχεία βαλβίδων άμεσης δράσης (Direct Acting)

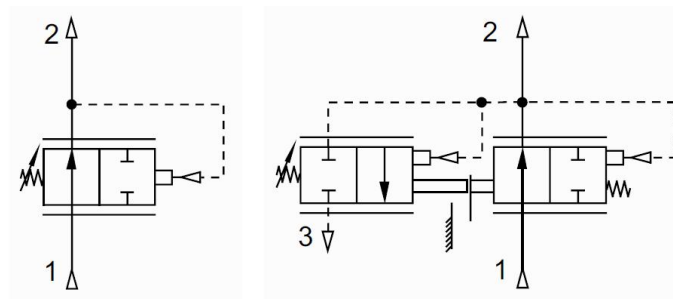
Η αρχή λειτουργίας των ρυθμιστών άμεσης δράσης φαίνεται στο σχήμα 4.4. Ο αέρας ρέει μέσα από την αρχικά ανοιχτή βαλβίδα και αυξάνει την πίεση κατάντι. Αυτή η πίεση δρα στην βαλβίδα για να την κλείσει. Στη σταθερή κατάσταση υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στη δύναμη του ελατηρίου και την δύναμη από την ασκούμενη πίεση. Η βαλβίδες ανακούφισης έχουν τυπικά και μια δεύτερη βαλβίδα, η οποία ανοίγει και αφήνει τη επιπλέον πίεση να φύγει προς την ατμόσφαιρα, όπως στο σχήμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται poppets αντί για αξονάκια (spools), τα οποία θα έκαναν την βαλβίδα πιο ακριβή και λιγότερο συμπαγή.

Μια τυπική βαλβίδα άμεσης δράσης φαίνεται στο σχήμα 4.5. Αυτή η βαλβίδα κάνει χρήση ενός διαφράγματος για να "αισθάνεται" την πίεση εξόδου και ένα κωνικό poppet για το στραγγαλισμό της ροής από την θύρα εισόδου στην θύρα εξόδου. Το ελατήριο του poppet αναγκάζει το poppet σε επαφή είτε με το διάφραγμα είτε με τη θέση. Το διάφραγμα είναι μια ενισχυμένη μεμβράνη από νιτρίλιο (nitrile) πάνω στην οποία είναι προσαρμοσμένος ένας άκαμπτος κεντρικός δίσκος αλουμινίου. Ένα μηχανικό εμπόδιο περιορίζει τη μέγιστη μετατόπιση του διαφράγματος, ώστε αυτό να μην παραμορφώνεται πέρα από το όριο ελαστικότητάς του.

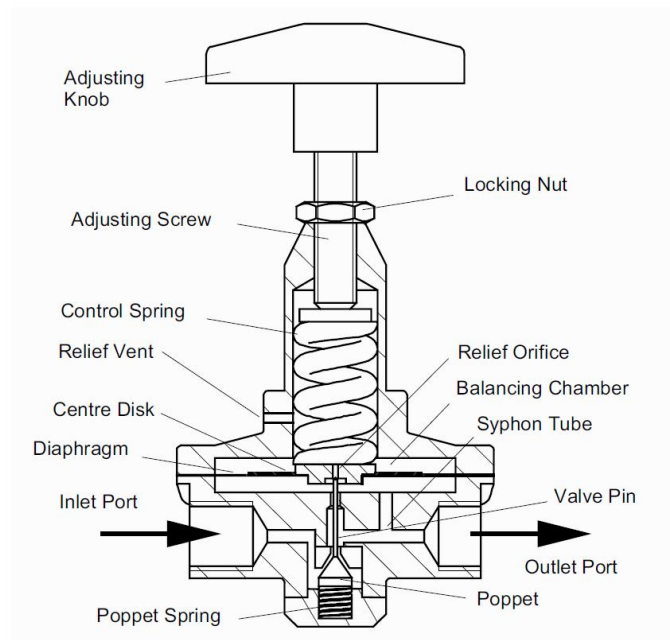
Η τιμή της πίεσης στην έξοδο δίδεται από τη θέση του κοχλία ρύθμισης (adjusting screw). Αυτή καθορίζει τη δύναμη πάνω στο ελατήριο ελέγχου. Σε σταθερή κατάσταση αυτή η δύναμη αντισταθμίζεται από τη δύναμη της πίεσης εξόδου που ασκείται στο διάφραγμα, όπως στο σχήμα 4.6. Η ακίδα της βαλβίδας συνδέει το διάφραγμα με το poppet. Εάν η πίεση εξόδου είναι πολύ χαμηλή, το ελατήριο ελέγχου πιέζει προς τα κάτω το διάφραγμα και το poppet και μεγεθύνει τη περιοχή της ροής. Περισσότερος αέρας μπορεί να ρεύσει προς την θύρα εξόδου



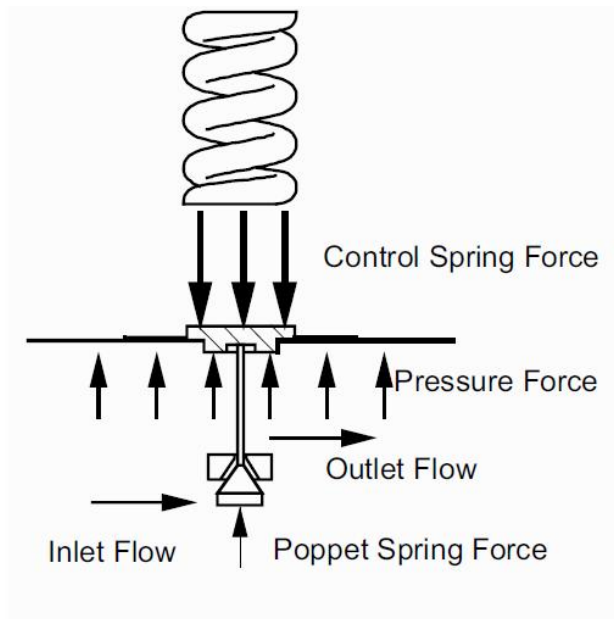
Σχήμα 4.3: Καμπύλη ροής ρυθμιστή πίεσης ακριβείας



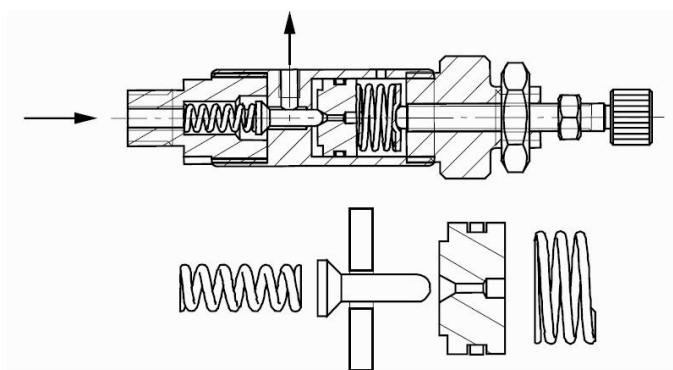
Σχήμα 4.4: Αρχή λειτουργίας των βαλβίδων άμεσης δράσης



Σχήμα 4.5: Τυπική βαλβίδα διαφράγματος σε τομή



Σχήμα 4.6: Ισορροπία δυνάμεων σε βαλβίδα διαφράγματος



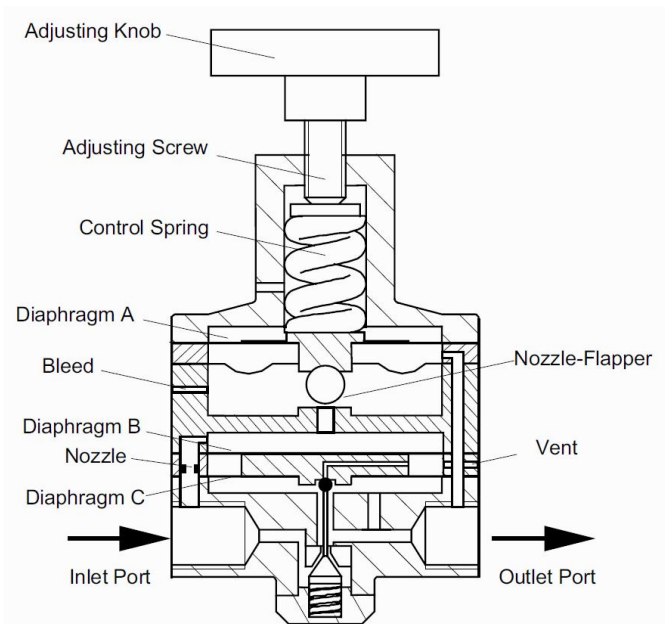
Σχήμα 4.7: Τομή βαλβίδας εμβόλου (πάνω) και τα μέρη που διατηρούν την ισορροπία δυνάμεων (κάτω)

και η πίεση αυξάνει. Εάν η πίεση εξόδου είναι πολύ μεγάλη συμβαίνει η αντίστροφη διαδικασία. Εάν η πίεση υπερβεί ένα όριο, το διάφραγμα ανασηκώνεται από την ακίδα και ανοίγει το στόμιο ανακούφισης στο κέντρο του διαφράγματος. Η επιπλέον πίεση κατάντι μειώνεται μέσα από το στόμιο και την οπή ανακούφισης (relief vent). Εάν η βαλβίδα δεν έχει επιλεγεί προσεκτικά βάσει των συγκεκριμένων συνθηκών λειτουργίας, η ανακούφιση μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις πίεσης.

Για αυξημένη απόδοση κάποιες βαλβίδες χρησιμοποιούν ένα ισορροπημένο ως προς την πίεση poppet, το οποίο έχει και στις δύο πλευρές του την ίδια πίεση και έτσι εξαφανίζεται η όποια επίδραση της πίεσης στη θέση του και στο στόμιο ανακούφισης [17]. Αντί ενός επίπεδου διαφράγματος κάποιες βαλβίδες έχουν ένα κυλιόμενο διάφραγμα, το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερες μετατοπίσεις του poppet.

Το διάφραγμα επιτρέπει μεγάλη επιφάνεια “αίσθησης” και δεν έχει σχεδόν καθόλου τριβή. Άλλα σχέδια περιλαμβάνουν έμβολα, ειδικά για μικρές και πολύ μικρές (μινιατούρες) βαλβίδες. Αυτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών πιέσεων και παρέχουν μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια “αίσθησης” για δοσμένο μέγεθος βαλβίδας. Παρόλα αυτά είναι λιγότερο ευαίσθητες σε αλλαγές πίεσης και αντιδρούν πιο αργά. Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν βαλβίδες economiser για κυλίνδρους. Στο σχήμα 4.7 φαίνεται μια τέτοια βαλβίδα και τα μέρη που διατηρούν την ισορροπία δυνάμεων. Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια με αυτή των βαλβίδων διαφράγματος.

Εάν η πίεση εξόδου πρέπει να αλλάζει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, τότε χρησιμοποιούνται βαλβίδες *dome-loaded*. Αντί για ελατήριο ελέγχου το οποίο παράγει τη δύναμη που αντιστέκεται στην πίεση εξόδου, κάνουν χρήση μιας πίεσης ελέγχου που δρα στο διάφραγμα ή στο έμβολο. Τυπικές εφαρμογές είναι οι βαλβίδες ενίσχυσης



Σχήμα 4.8: Τομή βαλβίδας πιλότου

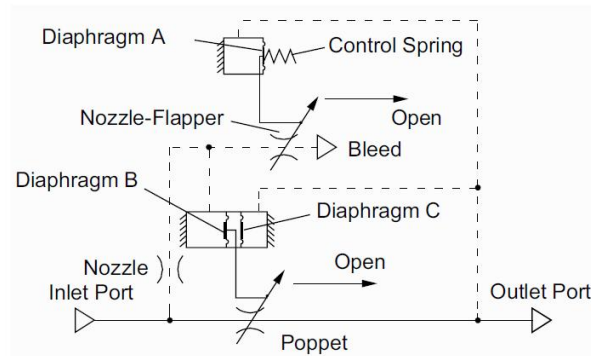
(booster valves) σε συμβατικά συστήματα φρένων φορητών, όπου η εντολή για φρενάρισμα πρέπει να μεταδοθεί από το πετάλι μέσω γραμμών μεγάλου μήκους στον άξονα του ρυμουλκούμενου. Για την αποφυγή σημαντικών απωλειών τριβής και μεγάλων όγκων μεταξύ πεταλιού και θαλάμου φρένου, ο οποίος θα έπρεπε να φορτίζεται κάθε φορά που το φρένο ενεργοποιείται, οι βαλβίδες ενίσχυσης χρησιμοποιούνται ως ενισχυτές ισχύος: το σήμα εισόδου χαμηλής ισχύος ενισχύεται και μεταφέρεται σε μια ροή συγκεκριμένης πίεσης και σχεδόν άπειρου ρυθμού ροής. Παρόμοιες βαλβίδες χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για την αποφυγή ηλεκτρικών σημάτων εισόδου σε εκρηκτικό περιβάλλον.

Σχεδιαστικά στοιχεία βαλβίδων πιλότου (Pilot Operated Valves)

Η γραμμική ανάλυση ενός ρυθμιστή άμεσης δράσης δείχνει ότι είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου με ένα αναλογικό ελεγκτή [27]. Αυτού του τύπου το σύστημα είναι γνωστό για την απλότητα, την ευστάθεια και την ταχύτητα στην απόκριση. Παρόλα αυτά τυπικά οδηγεί σε σφάλμα μόνιμης απόκρισης. Σε εφαρμογές που απαιτείται πίεση εξόδου ανεξάρτητη του φορτίου, χρησιμοποιούνται ρυθμιστές δύο σταδίων. Το πρώτο στάδιο ελέγχει τη θέση του poppet, ενώ το δεύτερο ελέγχει τη ροή από τη θύρα υψηλής πίεσης στη θύρα εξόδου.

Στο πρώτο στάδιο η διαφορά μεταξύ σημείου ρύθμισης, συμπίεσης του ελατηρίου ελέγχου και εξωτερικής πίεσης, δύναμης στο διάφραγμα A, υπολογίζεται ώστε να καθορίζει την αντίσταση της βαλβίδας nozzle-flapper. Αυτή η βαλβίδα είναι το δεύτερο στάδιο ενός διαιρέτη πίεσης, ο οποίος έχει ένα σταθερό ακροφύσιο (nozzle) σαν πρώτο στάδιο. Η πίεση ανάμεσα σε αυτούς τους δύο περιορισμούς ενεργεί στο διπλό διάφραγμα που αποτελείται από τα διαφράγματα B και C. Στην απέναντι πλευρά του διπλού διαφράγματος ενεργεί η πίεση εξόδου. Η μετατόπιση του διπλού διαφράγματος ελέγχει το άνοιγμα του poppet που περιορίζει τη ροή αέρα από τη θύρα εισόδου στη θύρα εξόδου. Εάν η κατάντι πίεση αυξηθεί υπερβολικά, το διάφραγμα C ανασηκώνεται από την ακίδα της βαλβίδας για να ανοίξει το στόμιο ανακούφισης στο κέντρο του διαφράγματος. Η επιπλέον πίεση μειώνεται μέσα από το στόμιο και την οπή ανακούφισης. Τα παραπάνω μπορεί να δει κανείς στο σχήμα 4.8, ενώ ένα σχέδιο της αρχής λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 4.9.

Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδίου είναι η συνδυασμένη συμπεριφορά του διπλού διαφράγματος B και C. Όσο υπάρχει διαφορά πίεσης στο διπλό διάφραγμα θα υπάρχει και μεταβολή στη μετατόπιση. Αυτό οδηγεί σε πολύ υψηλό κέρδος στο βρόχο ελέγχου και μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης σχεδόν στο μηδέν. Το μειονέκτημα είναι η συνεχής ροή αέρα μέσα από το διαιρέτη πίεσης που μπορεί να ξεπεράσει τα αρκετά λίτρα το λεπτό.



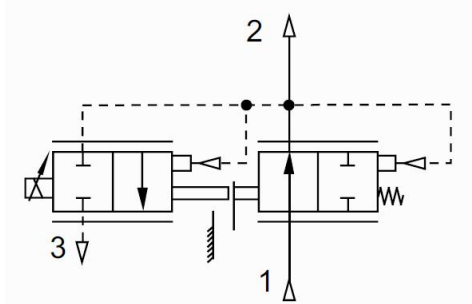
Σχήμα 4.9: Σχεδιάγραμμα της αρχής λειτουργίας βαλβίδας πιλότου

4.3 Ηλεκτρικές βαλβίδες ελέγχου πίεσης

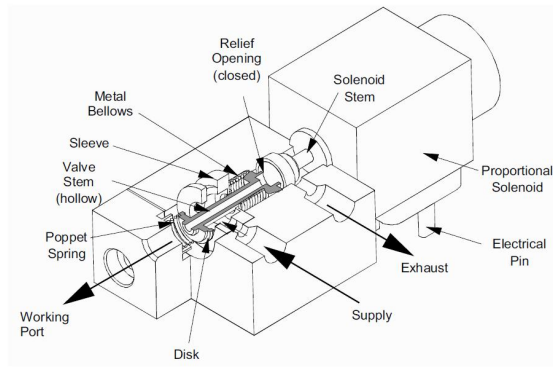
Οι μηχανικές βαλβίδες πίεσης έχουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος και μηδενική απαίτηση για τροφοδοσία ενέργειας. Παρόλα αυτά, όταν αυτοματοποιούνται οι διαδικασίες υπάρχει το μειονέκτημα ότι το σημείο ρύθμισής τους δεν μπορεί να αλλάξει με ένα ηλεκτρικό ελεγκτή. Σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται μια ηλεκτρική βαλβίδα ελέγχου πίεσης. Ως παράδειγμα θα αναφερθεί το σύστημα φρένων στο μετρό του Παρισιού, το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτροπνευματικούς ρυθμιστές πίεσης [85].

Η βασική διαφορά ενός ηλεκτρικού και ενός χειροκίνητου ρυθμιστή πίεσης είναι η αντικατάσταση του ελατηρίου ελέγχου από ένα αναλογικό σωληνοειδές, το οποίο δημιουργεί μια δύναμη ανάλογη του ηλεκτρικού σήματος ελέγχου. Στο σχήμα 4.10 φαίνεται η αρχή λειτουργίας. Στη μόνιμη κατάσταση, η δύναμη του σωληνοειδούς εξισορροπείται από το γινόμενο της πίεσης στην εργαζόμενη θύρα και του εμβαδού του poppet η του δίσκου. Καθώς η δύναμη του σωληνοειδούς είναι περιορισμένη και πολύ μικρότερη από αυτή ενός ελατηρίου ελέγχου, οι δυνάμεις τριβής πρέπει να πρέπει να κρατηθούν σε χαμηλά επίπεδα. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση ενός κατάλληλα διαμορφωμένου ηλεκτρικού σήματος, το οποίο κρατά τα μηχανικά μέρη συνεχώς σε κίνηση για τη μείωση της τριβής [28].

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένας τύπος σχεδίου που δεν απαιτεί στεγανοποίηση με τριβή, αλλά χρησιμοποιεί ένα μεταλλικό πτυχωτό σύνδεσμο. Ο αέρας εισέρχεται από τη θύρα εισόδου και την συνδετική οπή στο εσωτερικό του “μανικιού”. Αυτό το “μανίκι” είναι συγκολλημένο στο ένα άκρο ενός μεταλλικού πτυχωτού συνδέσμου, ενώ το άλλο άκρο του συνδέσμου είναι προσαρμοσμένο σταθερά στο στέλεχος της βαλβίδας. Αυτός ο σύνδεσμος επιτρέπει τη μετατόπιση του στελέχους και του δίσκου. Για την εξισορρόπηση της δύναμης του ελατηρίου του συνδέσμου χρησιμοποιείται το ελατήριο του poppet. Αυτό επίσης κλείνει τη βαλβίδα εάν δεν υπάρχει δύναμη από το σωληνοειδές. Όταν η εργαζόμενη πίεση είναι χαμηλότερη από το σημείο ρύθμισης, ο αέρας φεύγει από το εσωτερικό του “μανικιού” μέσα από τον αύλακα που σχηματίζεται από το εμπρόσθιο μέρος του “μανικιού” και του δίσκου προς την εργαζόμενη θύρα. Το άνοιγμα ανακούφισης είναι τότε κλειστό. Καθώς η εργαζόμενη πίεση πλησιάζει το σημείο ρύθμισης η απόσταση μεταξύ του εμπρόσθιου μέρους του “μανικιού” και του δίσκου μειώνεται, μέχρι ο αύλακας να κλείσει τελείως. Όταν η πίεση στην εργαζόμενη θύρα υπερβεί το σημείο ρύθμισης,



Σχήμα 4.10: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής βαλβίδας



Σχήμα 4.11: Τομή ηλεκτρικής βαλβίδας. Ο δίσκος είναι ανοικτός και επιτρέπει τη ροή από τη θύρα παροχής στην εργαζόμενη θύρα. Το άνοιγμα ανακούφισης είναι κλειστό

το ελατήριο του poppet κλείνει τη βαλβίδα και ο αέρας ρέει μέσα από το κούφιο στέλεχος της βαλβίδας και τον αύλακα που σχηματίζεται από το άκρο του στελέχους της βαλβίδας και από το “μαξιλάρι” (pad) στο στέλεχος του σωληνοειδούς προς τη θύρα αποτόνωσης.

Αυτή η βαλβίδα είναι ένα παράδειγμα των πρώιμων ηλεκτρικών βαλβίδων που κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 [51]. Ενώ αυτές ήταν κατασκευασμένες εξολοκλήρου από μέταλλο, οι σημερινές βαλβίδες αποτελούνται από πλαστικά μέρη στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, π.χ. τα έμβολα και τα poppets είναι πλαστικά, και μόνο τα ελατήρια και το περίβλημα είναι από μέταλλο.

Αυτού του τύπου οι βαλβίδες έχουν πολλούς περιορισμούς. Εξαιτίας των χαρακτηριστικών του σωληνοειδούς, το εύρος συχνοτήτων των εισόδων ελέγχου είναι περιορισμένο και αυτές οι βαλβίδες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλών συχνοτήτων. Το μέγεθος του δίσκου περιορίζεται από τη χαμηλή δύναμη του σωληνοειδούς και αυτό με τη σειρά του περιορίζει το μέγιστο ρυθμό ροής της βαλβίδας. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ροής δείχνουν τυπικά σημαντικό φαινόμενο droop. Για να επιτευχθεί καλλίτερο αποτέλεσμα, αυτού του τύπου οι βαλβίδες βρίσκουν χρήση ως πιλοτικές βαλβίδες, τις οποίες ακολουθεί μια βαλβίδα ενίσχυσης (booster valve).

Μέρος II

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 5

Σειρά Πειραμάτων Ανεμομετρίας Θερμού Νήματος

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σειρά μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο με τη χρήση ανεμομετρίας θερμού νήματος. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η διερεύνηση των χαρακτηριστικών της ηλεκτροβαλβίδα και των δεσμών αέρος που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη της επίδρασης της συχνότητας παλλόμενων δεσμών αέρα στον έλεγχο της ροής απότομης διεύρυνσης.

5.2 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη είναι σχετικά απλή και αποτελείται από την ηλεκτροβαλβίδα αέρος, η οποία έχει στηριχθεί ακλόνητα σε ένα τραπέζι, τη διάταξη του θερμού νήματος και ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επεξεργασία των δεδομένων. Παρακάτω θα δοθεί μια πιο περιεκτική περιγραφή κάθε στοιχείου ξεχωριστά.

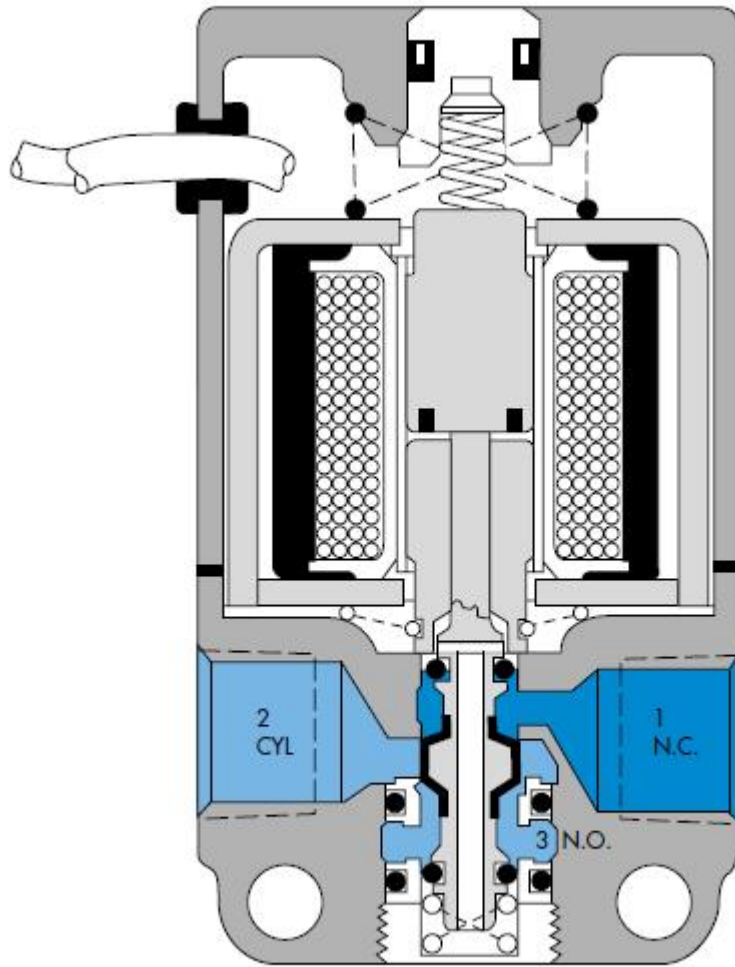
Ηλεκτροβαλβίδα αέρος: Η ηλεκτροβαλβίδα είναι μοντέλο της σειράς 100 με μέγεθος θύρας 1/8" και μέγιστη ροή 180 NI/min, κατασκευής της εταιρίας MAC. Η βαλβίδα σε τομή φαίνεται στη φωτογραφία 5.1 και παρουσιάζει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία φαίνονται στον πίνακα της φωτογραφίας 5.2. Τέλος πλήρεις διαστάσεις φαίνονται στο τεχνικό σχέδιο της φωτογραφίας 5.3. Όλες τις παρακάτω πληροφορίες τις έχουμε λάβει από τον επίσημο κατάλογο της εταιρίας MAC [2]:

Θερμό νήμα: Το θερμό νήμα που χρησιμοποιήσαμε είναι της εταιρίας TSI και έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Probe model:	1244-20 W
Serial number:	f-470
Διάμετρος νήματος:	D=51 μm
Μήκος νήματος:	L=1 mm
Υλικό κατασκευής	Εσωτερικά χαλαζίας, εξωτερικά λευκόχρυσος
Θερμικός συντελεστής αντίστασης:	$\alpha = 0.0024\Omega/^{\circ}\text{C}$
Ηλεκτρική αντίσταση στους 20 βαθμούς Κελσίου	$R_0 = 10.5\Omega$

Γέφυρα Wheatstone: Το θερμό νήμα είναι, όπως έχει αναφερθεί και στα θεωρητικά περί ανεμομετρίας θερμού νήματος, μια από τις τέσσερις αντιστάσεις μιας γέφυρας Wheatstone. Η γέφυρα που χρησιμοποιήθηκε είναι κατασκευής της εταιρίας DANTEC και είναι το μοντέλο CTA BRIDGE 56C17.

Παρακάτω φαίνεται δύο φωτογραφίες (5.4, 5.5) της διάταξης του πειράματος που ελήφθησαν λίγο πριν την έναρξη των μετρήσεων:



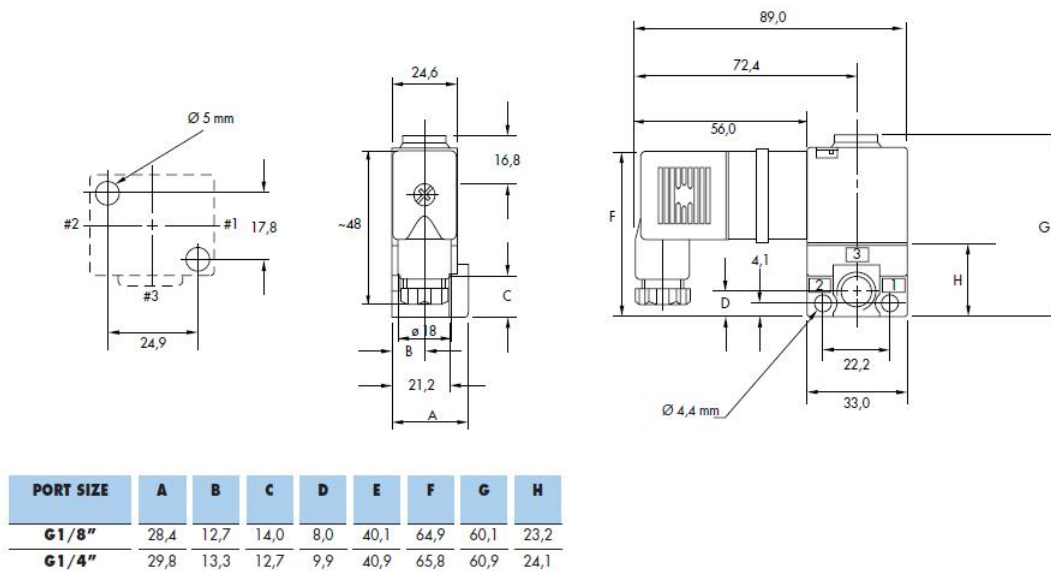
Σχήμα 5.1: Η ηλεκτοβαλβίδα αέρος σε τομή

TECHNICAL DATA	
Fluid :	Compressed air, vacuum, inert gases
Pressure range :	Vacuum to 10 bar
Lubrication :	Not required, if used select a medium aniline point lubricant (between 80°C and 100°C)
Filtration :	40 μ
Temperature range :	-18°C to +60°C
Orifice :	2 mm
Flow (at 6 bar, ΔP=1 bar) :	180 NI/min (C _v 0.18)
Leak rate :	50 cm ³ /min
Coil :	Epoxy encapsulated - class A wires - 100% ED (specify mod 0449)
Voltage range :	-15% to +10% of nominal voltage
Protection :	IP 65
Power :	Inrush : 14.8 VA Holding : 10.9 VA = 1 to 17 W
Response times :	24 V=8.5 W Energize : 7 ms De-energize : 2 ms 50Hz/6 W Energize : 3-8 ms De-energize : 2-7 ms

Spare parts : • Solenoid operator (power ≥ 4 W) : D1-XXYZZ, including mounting screws 32184 and seal 16234.

Options : • NPTF threads.

Σχήμα 5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτροβαλβίδας αέρος



Σχήμα 5.3: Διαστάσεις της ηλεκτροβαλβίδας αέρος



Σχήμα 5.4: Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος θερμού νήματος



Σχήμα 5.5: Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος θερμού νήματος σε κοντινή λήψη

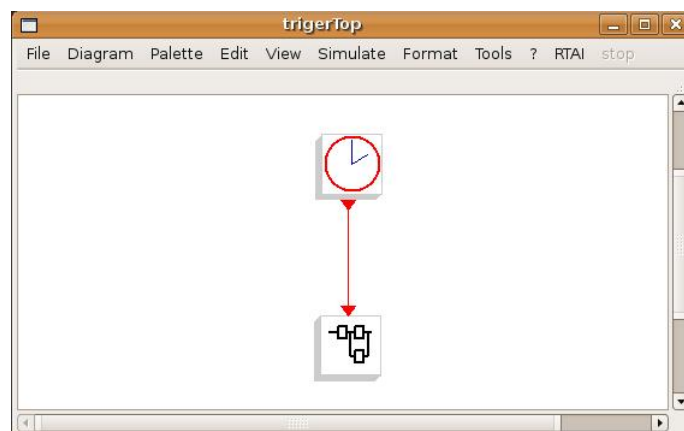
5.3 Πειραματική διαδικασία

Ο σκανδαλισμός (triggering) της ηλεκτροβαλβίδας αέρος έγινε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή με τη χρήση λογισμικού πραγματικού χρόνου σε λειτουργικό σύστημα Linux (Real time Linux-based software). Το λογισμικό ονομάζεται Real Time Application Interface (RTAI) και είναι ένα τμήμα του πυρήνα του Linux, το οποίο μπορεί να εκτελέσει εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το Scilab/Scicos είναι ένα γραφικό περιβάλλον το οποίο περιέχει μια βιβλιοθήκη από κουτιά (blocks) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συστήματος σκανδαλισμού. Μια άλλη βιβλιοθήκη κουτιών πραγματικού χρόνου ορίζεται στο RTAI-Lib. Αρχικά μέσω του Scilab/Scicos γίνεται προσομοίωση του προγράμματος ελέγχου. Εν συνεχεία τα κουτιά του Scilab/Scicos μετατρέπονται σε αντίστοιχα πραγματικού χρόνου του RTAI-Lib. Το εκτελέσιμο πρόγραμμα μπορεί να δημιουργηθεί με τη μεταγλώττιση του πηγαίου προγράμματος μέσω του εργαλείου RTAIcodegen του Scicos. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας ο αναγνώστης παραπέμπεται σε μια εργασία που χρησιμοποιεί το παραπάνω λογισμικό για τη δημιουργία ενός ελεγκτή ηλεκτρομηχανικού συστήματος [99].

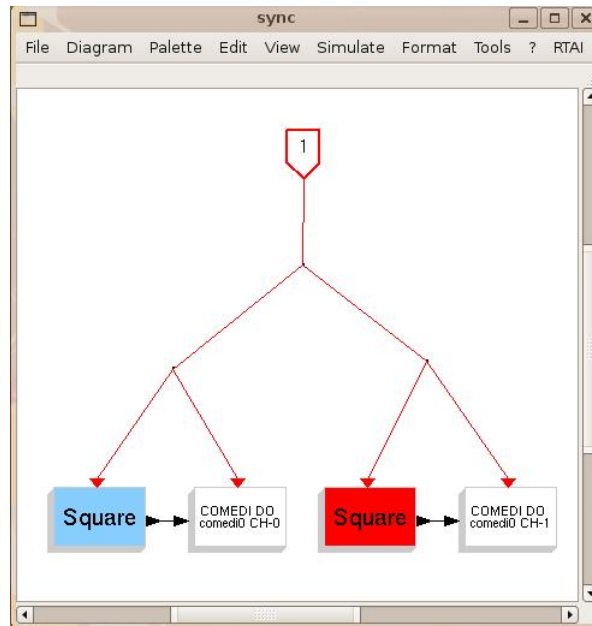
Παρακάτω φαίνεται το σύστημα σκανδαλισμού στο Scilab/Scicos:

Στη φωτογραφία 5.6 φαίνεται η γεννήτρια παλμών ή αλλιώς το ρολόι παλμών, το οποίο παράγει παλμούς με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ο διαιρέτης συχνότητας είναι ένα κουτί (γαλάζιου χρώματος) στο οποίο καθορίζεται η περίοδος σε ms (ή αλλιώς η συχνότητα) με την οποία λειτουργεί η ηλεκτροβαλβίδα, καθώς και ο χρόνος σε ms κατά τον οποίο η ηλεκτροβαλβίδα θα παραμένει κλειστή. Με αυτά τα δύο στοιχεία καθορίζεται και η διάρκεια της δέσμης αέρα που δημιουργεί η βαλβίδα. Ο κλάδος που καταλήγει στο κουτί κόκκινου χρώματος είναι σε αυτή τη φάση ανενεργός.

Το πείραμα περιλάμβανε δύο φάσεις. Σε πρώτη φάση, μετά τον καθορισμό των παραπάνω στοιχείων στο λογισμικό ελέγχου, τοποθετήθηκε το θερμό νήμα σε απόσταση περίπου 1 cm από την θύρα εξόδου της βαλβίδας και άνοιξε η παροχή αέρα προς τη βαλβίδα από το αεροφυλάκιο που βρίσκεται στο υπόγειο του κτιρίου αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Η πίεση του αέρα στην εγκατάσταση του πειράματος ήταν περίπου 5 bar. Στη δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο απότομης διεύρυνσης. Το δοκίμιο αυτό χρησιμοποιείται στη σειρά πειραμάτων PIV του επόμενου κεφαλαίου και τα χαρακτηριστικά του θα αναλυθούν εκεί. Σε αυτό το σημείο θα αναφερθεί μόνο ότι διαθέτει κοντά στη άνω ακμή του μια σχισμή, η οποία περιέχει μια σειρά οπών από τις οποίες διέρχεται ο αέρας και σχηματίζει δέσμες. Η ηλεκτροβαλβίδα συνδέθηκε με το δοκίμιο απότομης διεύρυνσης, το θερμό νήμα τοποθετήθηκε σε απόσταση 1 cm περίπου από μια εκ των κεντρικών οπών του και έγιναν μετρήσεις για να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά των δεσμών αέρα, όταν αυτές διαμορφώνονται μέσα από το δοκίμιο. Τα δεδομένα από το θερμό νήμα αποθηκεύτηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την μετέπειτα επεξεργασία.



Σχήμα 5.6: Το ανώτερο μέρος του προγράμματος σκανδαλισμού

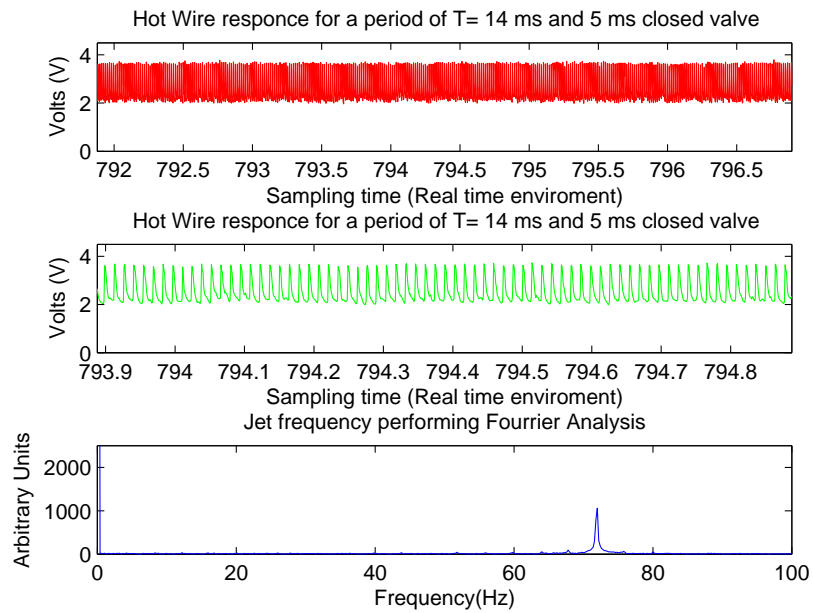


Σχήμα 5.7: Το εσωτερικό μέρος του συστήματος σκανδαλισμού

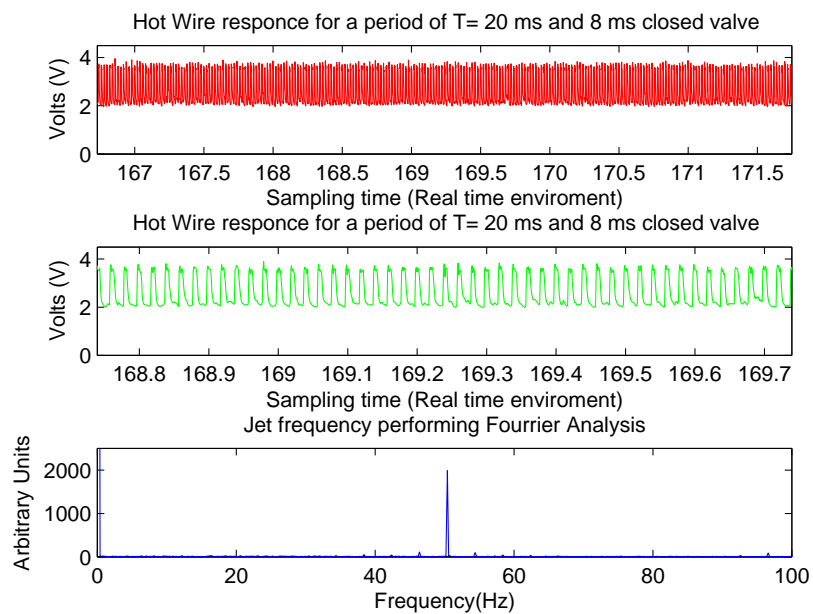
5.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης των μετρήσεων με χρήση ανεμομετρίας θερμού νήματος. Στο καθένα από τα διαγράμματα διακρίνονται τρεις γραφικές παραστάσεις. Η πρώτη (κόκκινο) είναι η απόκριση του θερμού νήματος σαν συνάρτηση του χρόνου δειγματοληψίας, η δεύτερη (πράσινο) είναι ουσιαστικά ίδια με την πρώτη, αλλά σε μεγαλύτερη ανάλυση ως προς τον άξονα του χρόνου για καλύτερη εποπτεία της μορφής των παλμών και η τρίτη (μπλε) παρουσιάζει τη συχνότητα της δέσμης. Η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων έγινε με μετασχηματισμό Fourier στα δεδομένα.

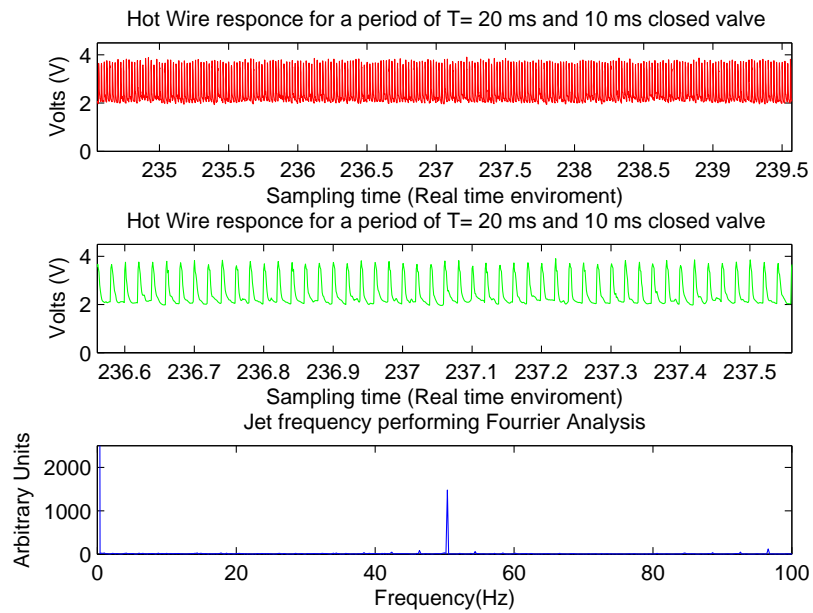
Τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης των πειραμάτων θερμού νήματος παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί:



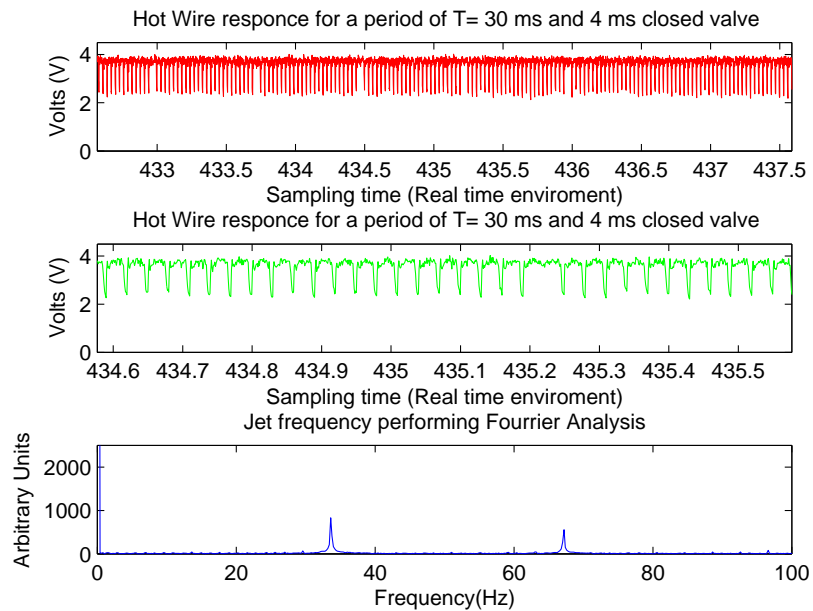
Σχήμα 5.8: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 14 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα



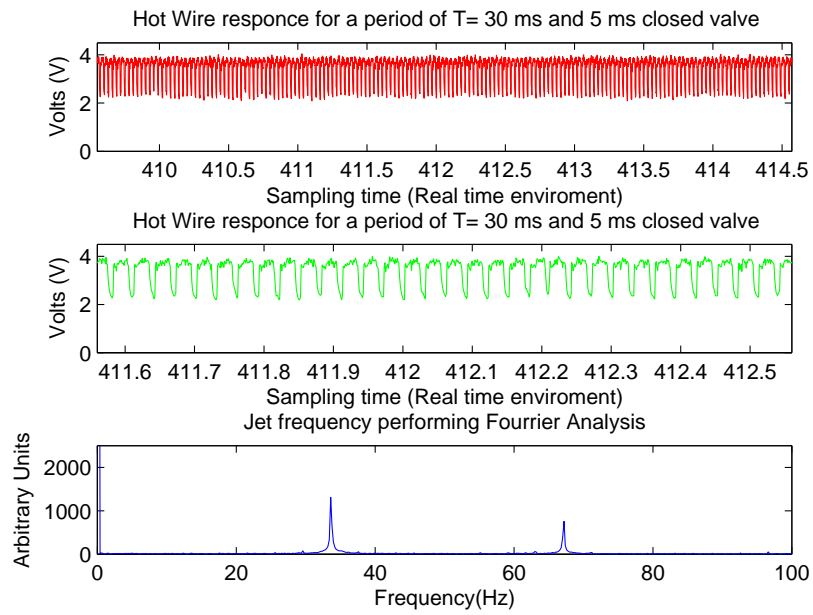
Σχήμα 5.9: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 20 ms με 8 ms κλειστή βαλβίδα



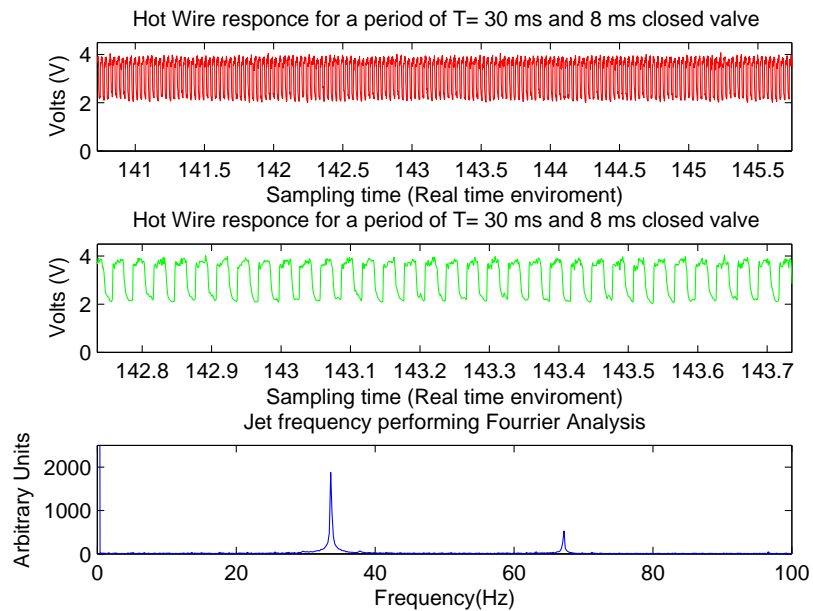
Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 20 ms με 10 ms κλειστή βαλβίδα



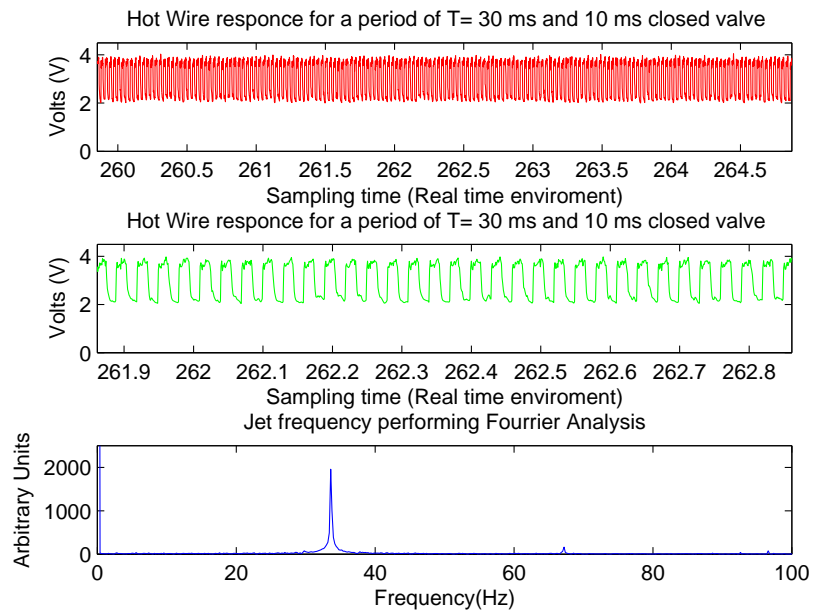
Σχήμα 5.11: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 4 ms κλειστή βαλβίδα



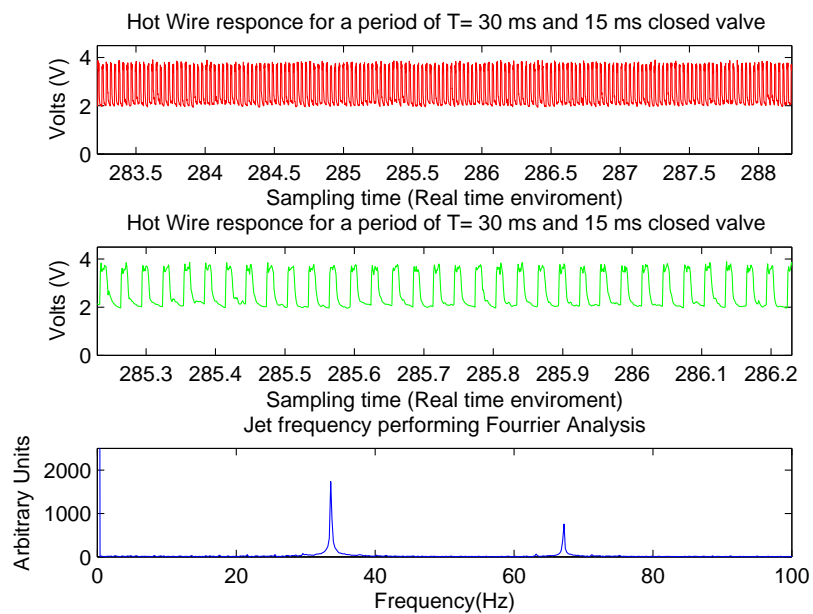
Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα



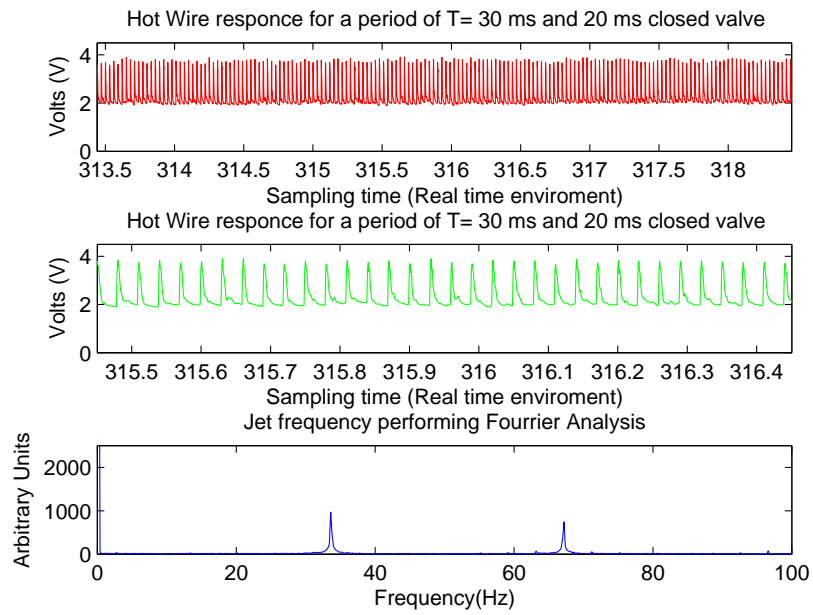
Σχήμα 5.13: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 8 ms κλειστή βαλβίδα



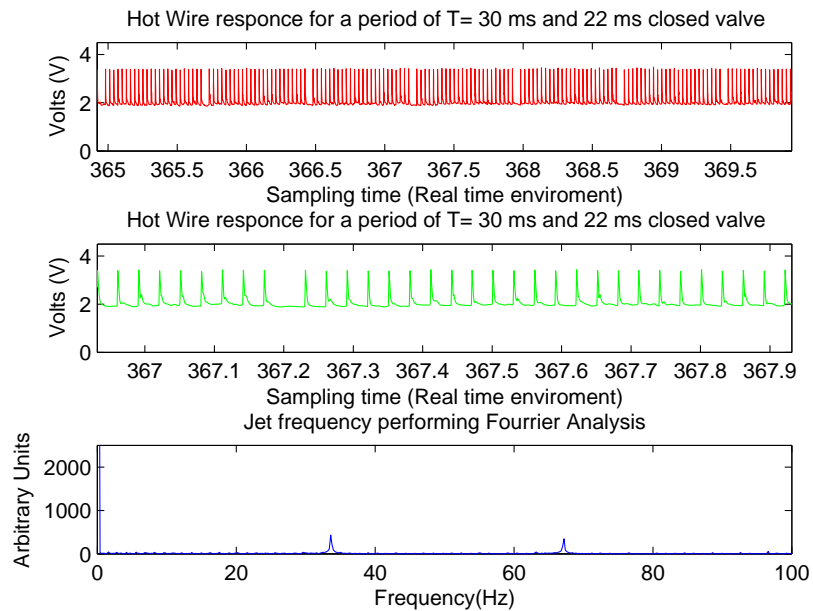
Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 4 ms κλειστή βαλβίδα



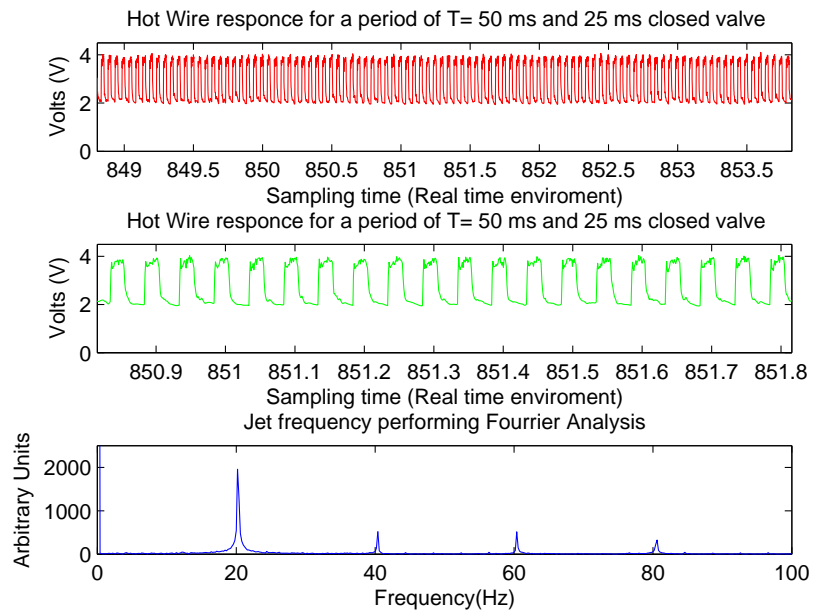
Σχήμα 5.15: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 15 ms κλειστή βαλβίδα



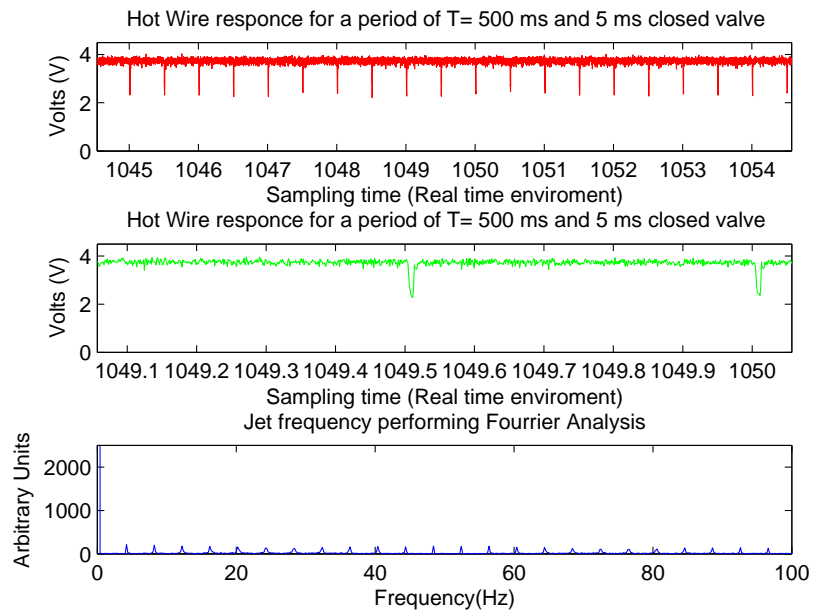
Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 20 ms κλειστή βαλβίδα



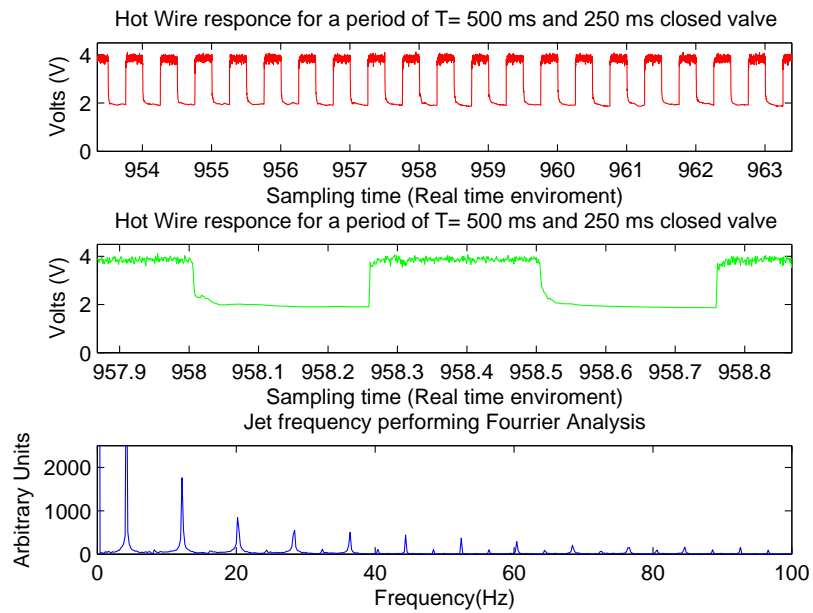
Σχήμα 5.17: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 30 ms με 22 ms κλειστή βαλβίδα



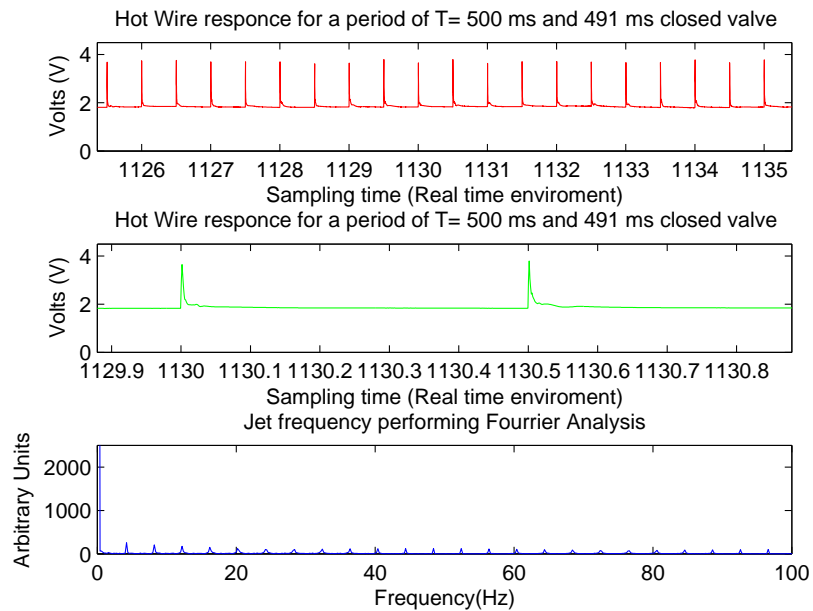
Σχήμα 5.18: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 50 ms με 25 ms κλειστή βαλβίδα



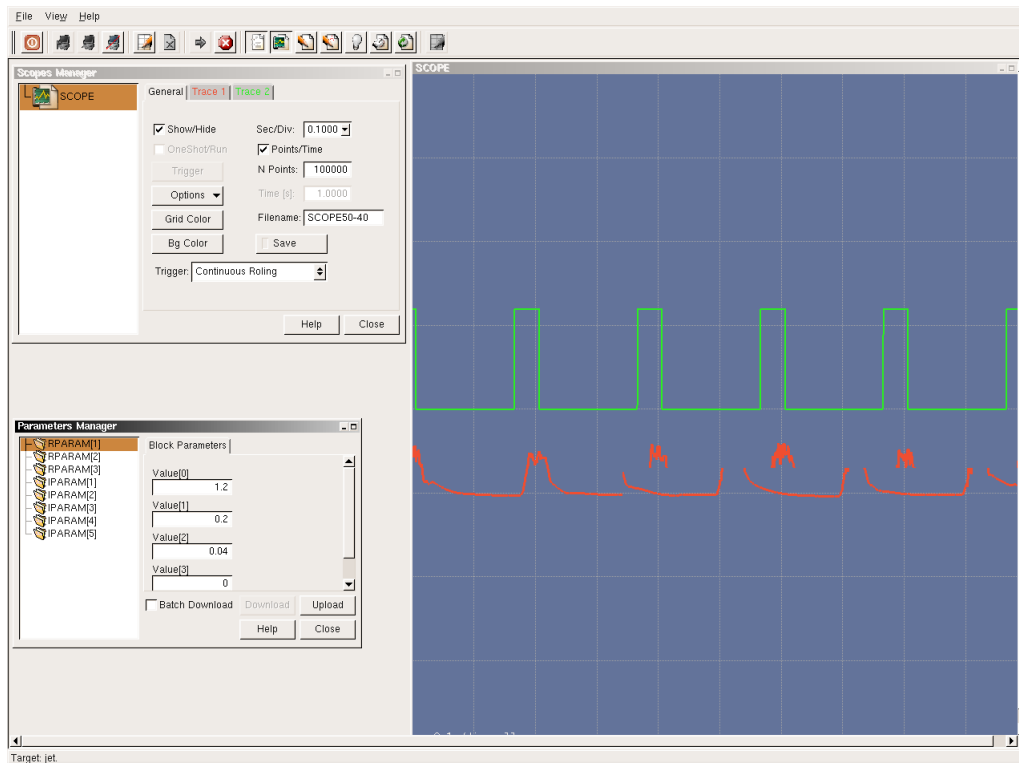
Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 5 ms κλειστή βαλβίδα



Σχήμα 5.20: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 250 ms κλειστή βαλβίδα



Σχήμα 5.21: Αποτελέσματα για περίοδο δέσμης 500 ms με 491 ms κλειστή βαλβίδα



Σχήμα 5.22: Οι δέσμες αέρα (κόκκινο) όπως διαμορφώνονται μέσα από το δοκίμιο. Με πράσινο χρώμα ο παλμός σκανδαλισμού της ηλεκτροβαλβίδας αέρος.

5.5 Συμπεράσματα

Ο κατασκευαστής δίνει ως οριακές συνθήκες λειτουργίας της βαλβίδας στα 24 V ένα χρόνο ενεργοποίησης 7 ms και ένα χρόνο απενεργοποίησης 2 ms (5.2). Με άλλα λόγια μια περίοδο δέσμης 9 ms ή συχνότητα περίπου 111 Hz και διάρκεια της δέσμης 7 ms. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν στο εργαστήριο παρατηρήθηκε ότι οι οριακοί χρόνοι που επιτεύχθηκαν για ομαλή λειτουργία της βαλβίδας, δηλαδή χωρίς να “κολλάει”, ήταν 14 ms περίοδο δέσμης ή συχνότητα περίπου 71 Hz με διάρκεια δέσμης 9 ms (5.8). Για περιόδους μικρότερες των 14 ms (ή συχνότητες μεγαλύτερες των 71 Hz) και για διάρκεια της δέσμης κάτω από 9 ms η βαλβίδα δυσλειτουργούσε. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στο σωλήνα από πλαστικό (πολυουρεθάνη) που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή αέρα προς τη βαλβίδα. Πιθανόν εάν χρησιμοποιηθούν σωλήνες από μέταλλο ή άλλο πιο άκαμπτο υλικό από την πολυουρεθάνη το σύστημα να μπορέσει να φτάσει τους οριακούς χρόνους που δίνει ο κατασκευαστής. Εντούτοις οι παλμοί που διαμορφώθηκαν με την παρούσα διάταξη είναι απόλυτα ικανοποιητικοί, καθώς ήταν γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι οι χρόνοι ενδιαφέροντος για τους σκοπούς αυτής της εργασίας ήταν πολύ μικρότεροι από τους οριακούς.

Οι δέσμες αέρα που διαμορφώθηκαν με την παρούσα διάταξη μπορεί να έχουν μορφή τετραγωνικού (5.18,5.20), μικρής διάρκειας (5.21) ή μεγάλης διάρκειας παλμού (5.12, 5.19). Στο σχήμα 5.22 υπάρχει μια καθυστέρηση στην απόκριση της ηλεκτροβαλβίδας σε σχέση με το πρόγραμμα σκανδαλισμού. Το πρόγραμμα δίνει εντολή για το σχηματισμό δέσμης, αλλά η ηλεκτροβαλβίδα δεν μπορεί να ακολουθήσει την εντολή ακαριαία, παρά μόνο μετά από 10 ms περίπου. Αυτό οφείλεται στο ελατήριο του μηχανισμού της βαλβίδας, το οποίο καθυστερεί την όλη διαδικασία καθώς αποκρίνεται πιο αργά από το ηλεκτρικό μέρος.

Συμπερασματικά λοιπόν η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας της βαλβίδας στην παρούσα διάταξη και οι μορφές δέσμης αέρα που διαμορφώνονται είναι απόλυτα ικανοποιητικές και εξυπηρετούν στο μέγιστο τις ανάγκες αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 6

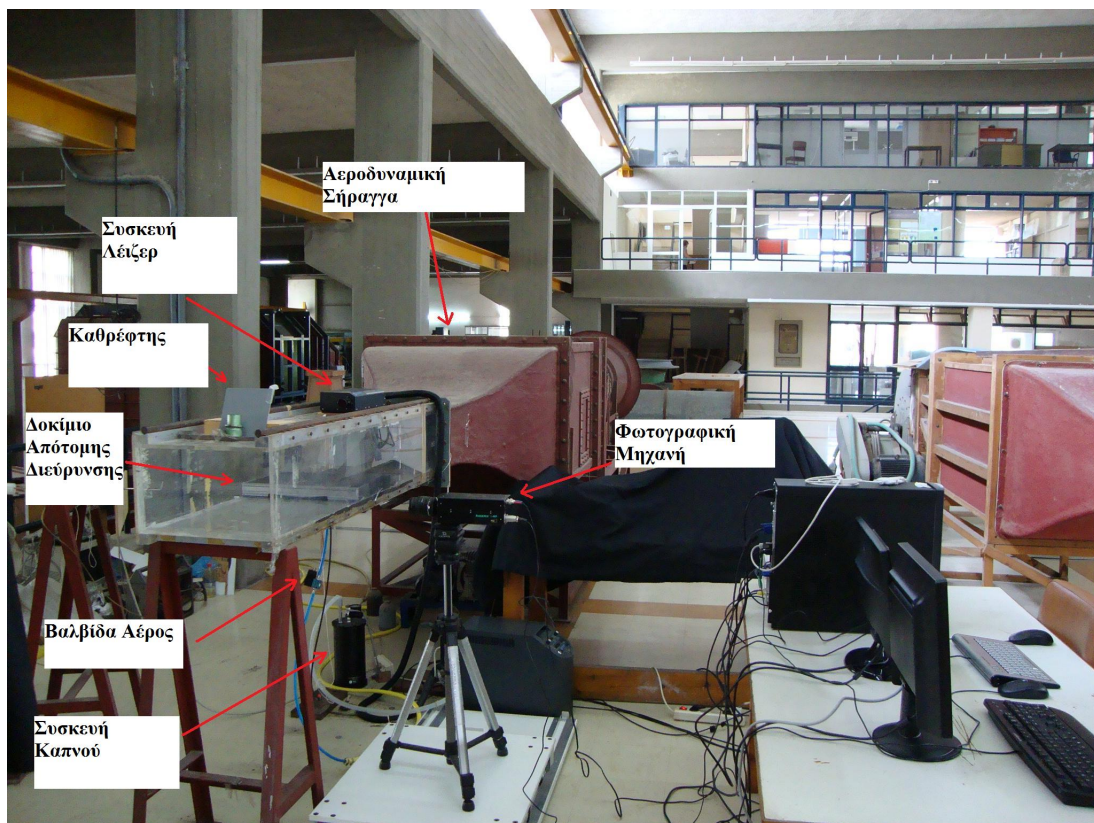
Σειρά Πειραμάτων PIV

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σειρά πειραμάτων που έγιναν σε μια από τις αεροδυναμικές σήραγγες του εργαστηρίου αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με χρήση της τεχνικής PIV. Σκοπός της σειράς πειραμάτων είναι η διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας παλλόμενων δεσμών αέρα στον έλεγχο της ροής απότομης διεύρυνσης.

6.2 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στις δύο φωτογραφίες 6.1,6.2 που ακολουθούν:



Σχήμα 6.1: Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος PIV



Σχήμα 6.2: Φωτογραφία της διάταξης του πειράματος PIV σε κοντινότερη λήψη

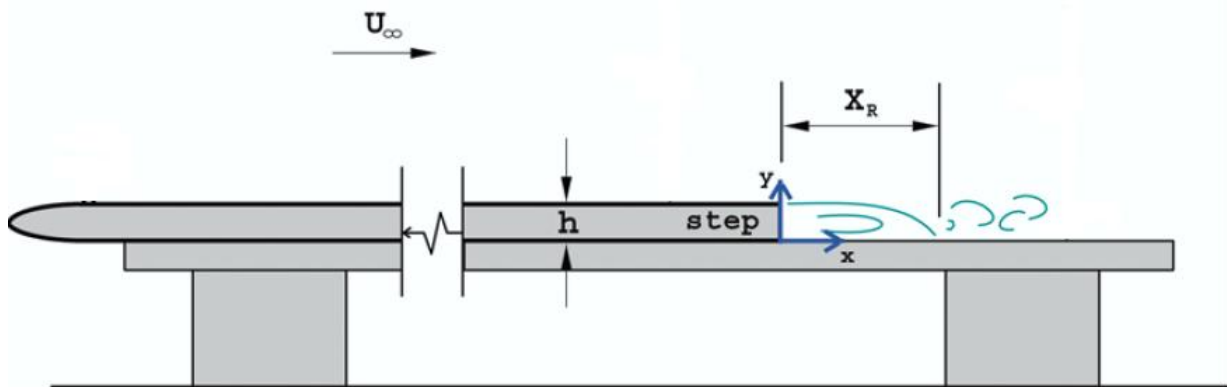
Στις δύο αυτές φωτογραφίες διακρίνονται: η αεροσήραγγα στα αριστερά με κόκκινο χρώμα, η οποία ακολουθείται από το μοντέλο της απότομης διεύρυνσης, η φωτογραφική μηχανή, η συσκευή λέιζερ, η συσκευή καπνού, η ηλεκτροβαλβίδα αέρος και οι οθόνες των υπολογιστών που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος και τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων. Παρακάτω θα δοθεί μια πιο εκτενής περιγραφή του κάθε στοιχείου ξεχωριστά.

Ένα απλό σχέδιο της διάταξης όπου φαίνεται και το σύστημα αξόνων στη βάση της απότομης διεύρυνσης παρουσιάζεται στην φωτογραφία 6.3.

Αεροδυναμική σήραγγα

Η σήραγγα είναι χαμηλής ταχύτητας, ανοικτού κυκλώματος, συνεχούς λειτουργίας και διαθέτει φουσητήρα αξονικού τύπου. Η ρύθμιση της ταχύτητας της ροής του αέρα γίνεται έμμεσα μέσω της ρύθμισης των στροφών του φουσητήρα με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή με χειροστρόφαλο. Στη σήραγγα αυτή μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες αέρα από 3 έως 20 m/s.

Το αποκλίνον και το συγκλίνον τμήμα της αεροσήραγγας έχουν παραβολικό σχήμα για τη δημιουργία κατά το δυνατόν ομοιόμορφης και ομαλής ροής. Σε αυτά είναι τοποθετημένα πλέγματα για την ομαλοποίηση της ροής και την καταστροφή δινών που τυχόν σχηματίζονται πριν η ροή φτάσει στο τμήμα δοκιμών. Ανάμεσά τους υπάρχει ένα τμήμα τετραγωνικής διατομής, το ονομαζόμενο τμήμα εφισυχασμού, όπου η ροή γίνεται πιο ομοιόμορφη.



Σχήμα 6.3: Η διάταξη του πειράματος και το σύστημα συντεταγμένων

Το τμήμα εισόδου στην περιοχή δοκιμών έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε το πολύ λεπτό οριακό στρώμα που σχηματίζεται στην κάτω μεριά του συγκλίνοντος ακροφυσίου να οδηγείται εκτός του τμήματος δοκιμών. Αυτό επιτυγχάνεται με μια λεπτή σχισμή σχισμή που βρίσκεται λίγο πριν το τμήμα δοκιμών και είναι κάθετη στη ροή, εκτεινόμενη από τη μία ως την άλλη άκρη του τμήματος. Στο επάνω μέρος αυτής της σχισμής έχει τοποθετηθεί ένα κομμάτι γυαλόχαρτο για τον έλεγχο του σημείου έναρξης της τυρβώδους ροής.

Το τμήμα δοκιμών είναι ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 22.5×42 cm και μήκος 150 cm. Είναι κατασκευασμένο από plexiglass, ώστε να είναι δυνατή μελέτη της ροής με τεχνικές οπτικοποίησης. Το επάνω μέρος του τμήματος αποτελείται από αποσπώμενα κομμάτια plexiglass για να είναι δυνατές διάφορες τροποποιήσεις. Υπάρχει επίσης δυνατότητα κίνησης φορείου πάνω σε οδηγούς ράβδους.

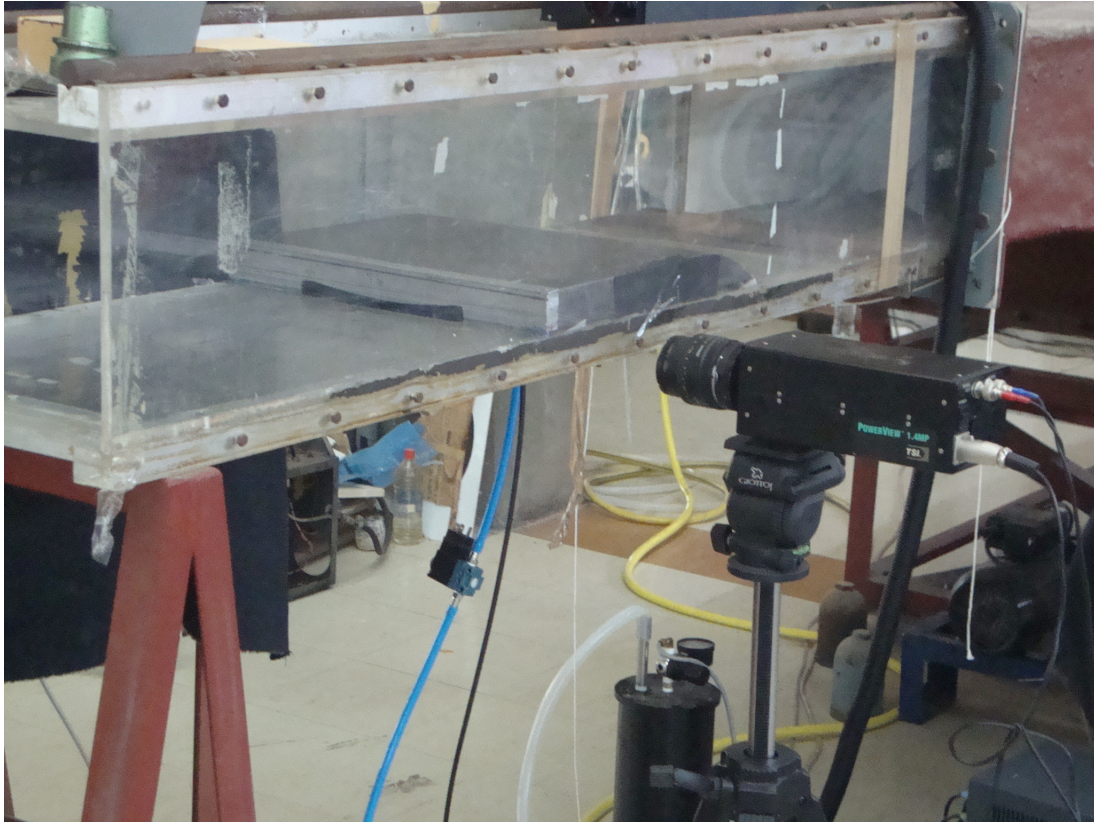
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας έχουν ως εξής:

Εταιρία κατασκευής:	NEOVENT
Τύπος:	VM 60.10.2 8°
Στροφές σε RPM:	2910
Ισχύς κινητήρα:	7.5 HP
Ωφέλιμη ολική πίεση:	70kg/m ²

6.2.1 Δοκίμιο απότομης διεύρυνσης

Το δοκίμιο-μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος είναι μια απότομη διεύρυνση με πλάτος 420 mm, ύψος 41 mm και συνολικό μήκος 420 mm. Το μπροστινό μέρος αποτελείται από ένα καμπύλο τμήμα, ώστε να υπάρχει ομαλή άφιξη του ρευστού στο πίσω μέρος, όπου βρίσκεται η απότομη διεύρυνση. Η απότομη διεύρυνση είναι ορθογωνικής διατομής και δημιουργεί ένα “σκαλοπάτι” με το τμήμα δοκιμών της αεροσήραγγας. Στο κατάντι, ως προς τη ροή, άκρο του μοντέλου και σε πολύ μικρή απόσταση από την ακμή του—περίπου 6 cm—υπάρχει μια σχισμή, πίσω από την οποία βρίσκεται μια σειρά από 20 οπές εκ των οποίων εξέρχεται η παροχή αέρα, μέσω της ηλεκτροβαλβίδας, με τη μορφή δεσμών. Η διάμετρος κάθε οπής είναι 1.8 mm. Το εσωτερικό του μοντέλου είναι κούφιο, ενώ στο κάτω μέρος υπάρχει μια υποδοχή για το σωλήνα παροχής αέρα από την ηλεκτροβαλβίδα, ο οποίος καταλήγει μέσω ενός συστήματος τεσσάρων σωλήνων στις 20 οπές του μοντέλου.

Στη φωτογραφία 6.4 που ακολουθεί φαίνεται το δοκίμιο της απότομης διεύρυνσης. Διακρίνονται το καμπύλο τμήμα ανάντι και η σχισμή που περιέχει τις οπές λίγο κάτω από την ακμή του δοκιμίου.



Σχήμα 6.4: Το δοκίμιο της απότομης διεύρυνσης

6.2.2 Φωτογραφική μηχανή

Η φωτογραφική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος είναι η TSI POWERVIEW 1.4MP. Η μηχανή έχει 1376×1040 ανάλυση εικονοστοιχείων, μέγεθος εικονοστοιχείου 6.45×6.45 , ανάλυση εξόδου 12 bits, ρυθμό καρέ στη μέγιστη ανάλυση (καρέ ανά δευτερόλεπτο) 10 FPS, εύρος φάσματος 270-1100 nm, ενώ είναι τύπου διεπαφής PCI. Η κάμερα διαθέτει ένα υψηλής απόδοσης σύστημα ψύξης δύο σταδίων που μειώνει τον θόρυβο στις καταγραφές, ενώ προσφέρει και μεγάλους χρόνους έκθεσης για την καταγραφή μεγάλων και μικρών σωματιδίων στη ροή. Οι παραπάνω πληροφορίες προέρχονται από τον επίσημο κατάλογο προϊόντων της εταιρίας TSI [1]

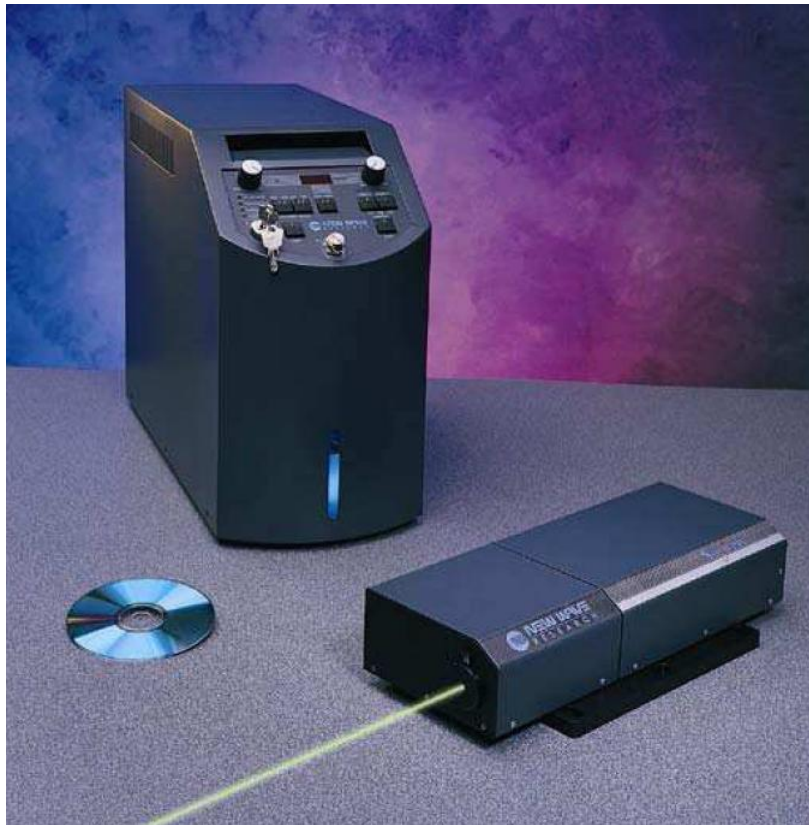
Στην φωτογραφία 6.5 που ακολουθεί φαίνεται η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε:



Σχήμα 6.5: Η φωτογραφική μηχανή

6.2.3 Συσκευή λέιζερ

Το σύστημα λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε είναι το SOLO PIV, τύπου Nd:YAG, κατασκευής της εταιρίας NEW WAVE RESEARCH. Αυτό το συμπαγές σύστημα, με τη διπλή κεφαλή λέιζερ είναι σχεδιασμένο για την παροχή μιας πολύ ομοιόμορφης, πράσινης στο χρώμα, πηγής φωτός για εφαρμογές PIV. Οι διάφοροι ελεγκτές και η μονάδα παροχής ισχύος βρίσκονται σε μια ενιαία μονάδα, γεγονός που κάνει το σύστημα μικρό και ευέλικτο. Στη φωτογραφία 6.6 φαίνεται μια φωτογραφία του συστήματος:



Σχήμα 6.6: Το σύστημα λέιζερ

6.2.4 Ηλεκτροβαλβίδα αέρος

Η ηλεκτροβαλβίδα αέρος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.2.5 Γεννήτρια καπνού

Ως μέσο οπτικοποίησης χρησιμοποιήθηκε καπνός, ο οποίος παράγεται από μια γεννήτρια καπνού της εταιρίας TSI (μοντέλο 9307), η οποία φαίνεται στη φωτογραφία 6.7.

Η γεννήτρια αυτή παράγει μεγάλες ποσότητες σταγονιδίων λαδιού και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές PIV ή LDV (Laser Doppler Velocimetry). Είναι ιδανική για ροές μεγάλων ταχυτήτων, όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός σωματιδίων-σκεδαστών φωτός. Η γεννήτρια λειτουργεί καλύτερα με ελαιόλαδο.

Η συσκευή χρησιμοποιεί ένα ακροφύσιο Laskin για την παραγωγή των σταγονιδίων. Ο πεπιεσμένος αέρας ψεκάζει το λάδι στην δεξαμενή της γεννήτριας και ένα εσωτερικό φίλτρο εμποδίζει τα μεγαλύτερα σταγονίδια να εισέλθουν στο ρεύμα που κατευθύνεται προς την έξοδο της συσκευής, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή μόνο μικρών στο μέγεθος σταγονιδίων.

Είναι δυνατή η λήψη μεγαλύτερου όγκου παραγωγής σταγονιδίων με αύξηση της εσωτερικής πίεσης της συσκευής, χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στο μέγεθός τους. Ένας ρυθμιστής με μετρητή πίεσης παρέχει ένα εύκολο τρόπο ελέγχου της πίεσης του εσωτερικού αέρα. Τέλος η γεννήτρια είναι εξοπλισμένη με εξωτερικό μετρητή της στάθμης του λαδιού στη δεξαμενή το ψεκαστήρα.



Σχήμα 6.7: Η γεννήτρια καπνού

6.3 Πειραματική διαδικασία

6.3.1 Προετοιμασία του πειράματος

Προτού αρχίσει η συλλογή των πειραματικών δεδομένων πρέπει να ρυθμιστούν και να ελεγχθούν οι διάφορες τεχνικές παράμετροι του πειράματος. Στην διαδικασία αυτή ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Ελέγχεται η πίεση του αέρα στο αεροφυλάκιο. Η παροχή αυτή αέρα καταλήγει στην ηλεκτροβαλβίδα αέρος και στη συσκευή καπνού, οπότε για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων πρέπει να διατηρείται σταθερή για όλες τις περιπτώσεις μελέτης. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας η πίεση διατηρείται στα 5 bar περίπου.
2. Τίθεται σε λειτουργία η αεροδυναμική σήραγγα και οι στροφές του φυσητήρα ρυθμίζονται ώστε η ταχύτητα του αέρα να είναι η ελάχιστη δυνατή. Με τη βοήθεια ενός μανομέτρου μετράται η πίεση του ελεύθερου ρεύματος στην έξοδο της περιοχής δοκιμών και μέσω αυτής η ταχύτητα του αέρα. Για μια θερμοκρασία αέρα στο εργαστήριο κοντά στους 27°C (ή 300K) η πυκνότητα του αέρα είναι $1.18\text{Kg}/\text{m}^3$ και η κινηματική συνεκτικότητα $15.6 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ περίπου. Επομένως η ταχύτητα του αέρα προκύπτει περίπου $3\text{m}/\text{s}$ και ο αριθμός Reynolds με χαρακτηριστικό μέγεθος το ύψος του μοντέλου της απότομης διεύρυνσης ($H = 41\text{mm}$) προκύπτει:

$$Re = \frac{U_{\infty}H}{\nu} \cong 8000$$

περίπου.

3. Καθορίζεται το παράθυρο λήψης και τοποθετείται σωστά η φωτογραφική μηχανή ως προς τη περιοχή δοκιμών της αεροδυναμικής σήραγγας. Αρχικά με τη χρήση ενός ισόπλευρου και ορθογωνίου χάρακα-τριγώνου τοποθετείται η μηχανή κάθετα στη ροή, με άλλα λόγια κάθετα στο plexiglass του τμήματος δοκιμών. Το λογισμικό PIV που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία είναι το Insight 3G της εταιρίας TSI. Τίθεται σε λειτουργία το πρόγραμμα αυτό και ακολούθως η φωτογραφική μηχανή. Στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται το παράθυρο λήψης, το οποίο ακόμα δεν έχει ρυθμιστεί. Στη συνέχεια τοποθετείται ένας μεταλλικός χάρακας κατά μήκος μιας γραμμής, η οποία είναι κάθετη στη βάση του δοκιμίου απότομης διεύρυνσης και στο μέσον της. Αυτή η γραμμή υποδηλώνει και το επίπεδο το οποίο θα φωτιστεί από το φύλλο φωτός και στο οποίο θα γίνουν οι διάφορες μετρήσεις. Με τη βοήθεια της εικόνας που εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή μετακινείται αρχικά το τρέιλερ που στηρίζεται ο τρίποδας της φωτογραφικής μηχανής στο επιθυμητό σημείο. Μετά ο τρίποδας ρυθμίζεται ώστε η εικόνα της κάμερας στην οθόνη να περιλαμβάνει οριακά στο κάτω μέρος την ακμή του χάρακα. Με αυτό τον τρόπο έχει ρυθμιστεί το παράθυρο λήψης, ώστε να βρίσκεται στο επιθυμητό μέρος του νοητού άξονα x , ο οποίος αντιστοιχεί στην ακμή του χάρακα, και να περιλαμβάνει το όλο το τμήμα ενδιαφέροντος του νοητού άξονα y , ο οποίος είναι κάθετος στην ακμή του χάρακα. Η πρώτη φωτογραφία που λαμβάνεται είναι η εικόνα του παραθύρου λήψης.

4. Όπως έχει αναφερθεί και στα εισαγωγικά περί PIV, μια πολύ σημαντική παράμετρος της τεχνικής για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων είναι η σωστή εστίαση πάνω στα σωματίδια-σκεδαστές φωτός. Για να γίνει σωστή εστίαση αφαιρείται ο χάρακας και ενεργοποιούνται η γεννήτρια καπνού και η συσκευή λέιζερ. Στη συνέχεια μετακινείται ο καθρέφτης που εκτρέπει την δέσμη φωτός, ώστε να φωτίσει την γραμμή που υποδηλώνει το φύλλο φωτός, ενώ στην οθόνη του υπολογιστή καταγράφεται σε συνεχή ροή εικόνας η ροή του ρευστού με τα σωματίδια. Γίνεται κατόπιν μεγέθυνση (zoom) σε μια περιοχή της ροής και ρυθμίζεται ο φακός της κάμερας χειροκίνητα, ώστε να φαίνονται τα σωματίδια καθαρά στην οθόνη του υπολογιστή. Η εικόνα που λαμβάνεται μετά τις τελικές ρυθμίσεις είναι παρόμοια με αυτές τις οποίες θα επεξεργαστεί το πρόγραμμα Insight 3G για την εξαγωγή του πεδίου ταχυτήτων της ροής. Για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διακρίνονται καθαρά τα σωματίδια στην οθόνη σε αυτή τη φάση του πειράματος.

6.3.2 Συλλογή των δεδομένων

Με την ολοκλήρωση της προετοιμασίας αρχίζει το κύριο μέρος του πειράματος που είναι η συλλογή των δεδομένων. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται δύο υπολογιστές. Ο πρώτος χρησιμεύει στον έλεγχο του εξωτερικού σκανδαλισμού του λέιζερ και της κάμερας και στον σκανδαλισμό της ηλεκτροβαλβίδας, ενώ στον δεύτερο έχει τεθεί σε λειτουργία το πρόγραμμα Insight 3G, το οποίο ελέγχει τον εσωτερικό σκανδαλισμό του λέιζερ και της κάμερας (γίνεται από το ίδιο το πρόγραμμα) και όλες τις παραμέτρους της τεχνικής PIV. Ανάλογα με την περίπτωση μελέτης αλλάζει η μέθοδος σκανδαλισμού.

Ο εξωτερικός σκανδαλισμός (external triggering) του λέιζερ και της κάμερας και ο σκανδαλισμός της ηλεκτροβαλβίδας αέρος έγιναν με το ίδιο πρόγραμμα του Scilab/Scicos, που περιγράφηκε στο αντίστοιχο μέρος του προηγούμενου κεφαλαίου. Η μόνη διαφορά με προηγούμενως είναι ότι ο επιπλέον κλάδος για την οδήγηση του λέιζερ και της κάμερας είναι ενεργοποιημένος. Στα σχήματα 5.6 και 5.7 φαίνεται το σύστημα σκανδαλισμού.

Στο σύστημα υπάρχει όπως και στο προηγούμενο πρόγραμμα μια γεννήτρια παλμών (ρολόδι), η οποία παράγει παλμούς σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ο διαιρέτης συχνότητας κόκκινου χρώματος στο εσωτερικό πρόγραμμα καθορίζει τη συχνότητα λειτουργίας του λέιζερ και τη συχνότητα ενεργοποίησης της φωτογραφικής μηχανής. Στο κουτί αυτό υπάρχει μια επιλογή ολίσθησης (delay), η οποία καθορίζει σε πόσο χρόνο μετά την ενεργοποίηση της βαλβίδας θα γίνει ο φωτισμός και η καταγραφή.

Πριν ξεκινήσει η λήψη των φωτογραφιών ρυθμίζονται οι επιλογές χρονισμού από ένα μενού επιλογών που παρέχει το πρόγραμμα. Είναι σημαντικό για την πληρότητα της περιγραφής της διαδικασίας του πειράματος να εξηγηθούν οι παράμετροι αυτού του μενού επιλογών. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή κάθε επιλογής:

- **PIV Frame Mode:** Επιλέγεται Straddle και η φωτογραφική μηχανή καταγράφει δύο διαδοχικές εικόνες της ίδιας έκθεσης.
- **Pulse Rep. Rate:** Ορίζεται στα 4.83 Hz. Αυτή η παράμετρος είναι ουσιαστικά ο χρονισμός από την αρχή μιας ακολουθίας παλμού λέιζερ μέχρι την αρχή της επόμενης ακολουθίας παλμού λέιζερ.
- **Laser Pulse Delay:** Ορίζεται στα 401 μ s. Η παράμετρος αυτή ρυθμίζεται ώστε να δίδεται παλμός στο λέιζερ ακριβώς στο τέλος του πρώτου καρέ. Στα συστήματα Nd:Yag είναι ο χρόνος από την αρχή μιας ακολουθίας παλμού μέχρι την ενεργοποίηση του διακόπτη Q1 του λέιζερ.
- **Delta T:** Ορίζεται στα 100 μ s. Αυτή η παράμετρος αναφέρεται στον διαχωρισμό παλμού (Pulse Separation). Ο διαχωρισμός παλμού (dT) είναι πολύ σημαντική παράμετρος για το ταίριασμα του συστήματος PIV με την ταχύτητα της ροής. Διαλέγεται τέτοιος χρόνος, ώστε να βελτιστοποιούνται οι παραμορφώσεις των εικόνων των σωματιδίων. Στα συστήματα Nd:Yag είναι ο χρόνος μεταξύ της ενεργοποίησης του διακόπτη Q1 και Q2 του λέιζερ.
- **PIV Exposure:** Ορίζεται στα 405 μ s. Είναι ο χρόνος κατά τον οποίο είναι ανοικτό το πρώτο διάφραγμα της κάμερας PIV.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις αναφέρονται σε εσωτερικό σκανδαλισμό (internal triggering), δηλαδή όταν ο synchronizer του λέιζερ ξεκινά την επόμενη ακολουθία παλμού σύμφωνα με τον Pulse Rep. Rate, ο οποίος έχει καθοριστεί παραπάνω. Εάν επιλεγεί εξωτερικός σκανδαλισμός πρέπει να καθοριστούν δύο ακόμα παράμετροι:

- **Trigger Timeout:** Ορίζεται στα 1000 ms. Είναι ο χρόνος που πρέπει να περιμένει ο synchronizer του λέιζερ μέχρι να λάβει την είσοδο του εξωτερικού σκανδαλισμού.

- **Laser Pulses/Trigger:** Ορίζεται ως 1. Είναι ο αριθμός παλμών λέιζερ ανά εξωτερικό σκανδαλισμό.

Αφού ολοκληρωθούν και οι ρυθμίσεις χρονισμού τίθεται σε λειτουργία η ηλεκτροβαλβίδα αέρος και ανοίγει η παροχή αέρα προς αυτή. Από το πρόγραμμα Insight 3G επιλέγεται ο αριθμός φωτογραφιών που θα καταγραφούν για κάθε περίπτωση μελέτης, ο οποίος είναι 300 φωτογραφίες, και ξεκινά η καταγραφή των εικόνων. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στο δίσκο του υπολογιστή.

6.3.3 Βαθμονόμηση, επεξεργασία και μετα-επεξεργασία

Την συλλογή των δεδομένων ακολουθούν οι διαδικασίες βαθμονόμησης 2-διαστάσεων, επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας δεδομένων. Οι διαδικασίες αυτές γίνονται μέσω των αλγορίθμων του προγράμματος Insight 3G.

Βαθμονόμηση 2-διαστάσεων

Η διαδικασία αυτή γίνεται για την χωρική βαθμονόμηση των εικόνων που καταγράφηκαν. Η βαθμονόμηση είναι ένας χάρτης μεταξύ των εικονοστοιχείων της κάμερας και των συντεταγμένων του φυσικού κόσμου. Αυτός ο χάρτης χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία για τη μετατροπή των μετατοπίσεων της εικόνας σε συντεταγμένες του φυσικού κόσμου. Επιλέγεται να γίνει βαθμονόμηση για θέση της κάμερας L (Left), ή χρησιμοποιώντας ναυτικούς όρους για θέση port. Με τον όρο port εννοείται πως αν ο παρατηρητής κινείται μαζί με το ελεύθερο ρεύμα της ροής θα δει την φωτογραφική μηχανή στα αριστερά του.

Το πρόγραμμα υπολογίζει την ταχύτητα της ροής μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$Velocity = \frac{(Pixel \ Displacement) \times (mm/pixel)}{dt(ms)}$$

Από μια εκ των φωτογραφιών του χάρακα που είχαν καταγραφεί κατά την προετοιμασία μετράται το μέγεθος του οριζοντίου οπτικού πεδίου, το οποίο προκύπτει ίσο με 6.3 cm ή 63 mm. Η ανάλυση της εικόνας σε εικονοστοιχεία είναι 1376×1024 . Επομένως

$$Calibration \ Factor = 63/1376 = 0.004578 \ mm/pixel = 45.78 \ \mu m/pixel$$

Το κάθετο οπτικό πεδίο προκύπτει ίσο με

$$Vertical \ FoV = 1024 \times 45.78 = 46.88 \ mm$$

Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των εικόνων γίνεται με τη μέθοδο της ετεροσυσχέτισης (cross-correlation), η οποία μπορεί να χωριστεί σε 4 βήματα:

1. Παραγωγή πλέγματος (Generating Grids)
2. Προετοιμασία των περιοχών (Masking Spots)
3. Πραγματοποίηση ετεροσυσχέτισης (Performing cross-correlation)
4. Εντοπισμός κορυφών (Locating Peaks)

Αρχικά ορίζεται στο πρόγραμμα το μέγεθος των περιοχών διερεύνησης A και B, οι οποίες στην παρούσα εργασία είναι τετράγωνα και για τις δύο διαδοχικές εικόνες που λαμβάνονται και έχουν μέγεθος 64×64 εικονοστοιχεία. Κατόπιν εισάγεται η μέγιστη μετατόπιση εικόνας σωματιδίου σαν κλάσμα του μεγέθους της περιοχής διερεύνησης κατά την επεξεργασία. Ο αλγόριθμος του εντοπισμού κορυφών χρησιμοποιεί αυτή την τιμή για να περιορίσει την περιοχή διερεύνησης στον χάρτη ετεροσυσχέτισης στα εικονοστοιχεία με μετατόπιση που δεν ξεπερνά τη μέγιστη. Επιλέγεται ως μέγιστη μετατόπιση $dx = dy = 0.25$ Στη συνέχεια η μέθοδος ακολουθεί τα 4 βήματα, τα οποία θα αναλυθούν ξεχωριστά.

Παραγωγή πλέγματος: Η μηχανή παραγωγής πλέγματος χωρίζει την εικόνα που λαμβάνει ως είσοδο σε μικρότερες περιοχές προς επεξεργασία και αρχικοποιεί το διανυσματικό πεδίο. Για κάθε τμήμα του πλέγματος, το πρόγραμμα αντιγράφει τα εικονοστοιχεία από την εικόνα εισόδου στις περιοχές διερεύνησης και τα προωθεί στη

μηχανή προετοιμασίας. Επιλέγεται πλέγμα Nyquist, το οποίο είναι το κλασσικό πλέγμα για PIV. Αυτό ορίζει διανύσματα με μήκος κατά x και y ίσα με το μισό του μεγέθους της περιοχής διερεύνησης. Δεν χρησιμοποιούνται offsets περιοχών και η γίνεται μόνο ένα πέρασμα στο διανυσματικό πεδίο. Αυτό δίνει ένα διανυσματικό πλέγμα με 50% επικάλυψη περιοχής, το οποίο ικανοποιεί τα δειγματοληπτικά κριτήρια Nyquist.

Προετοιμασία των περιοχών: Η μηχανή προετοιμασίας τροποποιεί τις περιοχές διερεύνησης και τις προωθεί στη μηχανή ετεροσυσχέτισης. Αυτό γίνεται για την αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο στο χάρτη ετεροσυσχέτισης. Επιλέγεται γκαουσιανή προετοιμασία (Gaussian Mask), στην οποία κάθε εικονοστοιχείο της περιοχής διερεύνησης πολλαπλασιάζεται με μια γκαουσιανή συνάρτηση βάρους, ώστε η περιοχή να είναι φωτεινή στο κέντρο και σκοτεινή γύρω από τα άκρα. Έτσι δίνεται περισσότερη αξία στα κεντρικά εικονοστοιχεία και λιγότερη στα ακριανά. Από κάθε εικονοστοιχείο αφαιρείται η μέση τιμή έντασης φωτεινότητας της περιοχής διερεύνησης προτού εφαρμοστεί η συνάρτηση βάρους. Επιπλέον ορίζονται και οι παρακάτω παράμετροι στο πρόγραμμα:

- Η γκαουσιανή ακτίνα να ισούται με 1. Με αυτή τη ρύθμιση μειώνεται η φωτεινότητα στα άκρα του οριζοντίου και κάθετου άξονα στο 13.5% της φωτεινότητας του κεντρικού εικονοστοιχείου.
- Η ελάχιστη μέση ένταση στην περιοχή διερεύνησης να είναι μεγαλύτερη του 10. Αυτή η παράμετρος χρησιμοποιείται για το φιλτράρισμα και την απόρριψη των περιοχών που δεν περιέχουν εικόνες σωματιδίων. Όσες εικόνες είναι κάτω του κατωτάτου ορίου απορρίπτονται.

Πραγματοποίηση ετεροσυσχέτισης: Η μηχανή ετεροσυσχέτισης υπολογίζει τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης των τροποποιημένων περιοχών A και B και την επιστρέφει ως ένα χάρτη ετεροσυσχέτισης. Η συνάρτηση αυτή είναι ένας αλγόριθμος που αθροίζει το ταίριασμα των εικόνων των σωματιδίων για όλες τις μετατοπίσεις εικονοστοιχείων μέσα στα όρια μετατόπισης. Το υψηλότερο εικονοστοιχείο του χάρτη ετεροσυσχέτισης υποτίθεται ότι είναι η κορυφή της μετατόπισης της εικόνας του σωματιδίου, η οποία προκαλείται από τη συνεισφορά πολλών ζευγών σωματιδίων. Άλλες κορυφές υποτίθεται ότι είναι κορυφές θορύβου, οι οποίες προκαλούνται από το τυχαίο ταίριασμα των εικόνων διαφορετικών σωματιδίων. Επιλέγεται να γίνει ετεροσυσχέτιση με χρήση γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT-Fast Fourier Transform Correlation). Το μέγεθος των περιοχών πρέπει να είναι το ίδιο και δύναμη του 2 ($64 = 2^6$).

Εντοπισμός κορυφών: Η μηχανή εντοπισμού κορυφών εντοπίζει την περιοχή κορυφής στο χάρτη ετεροσυσχέτισης. Επιλέγεται γκαουσιανή κορυφή, η οποία εντοπίζει την κορυφή με ακρίβεια κάτω του εικονοστοιχείου, μέσω της παρεμβολής μιας καμπύλης Γκάους στο υψηλότερο εικονοστοιχείο του χάρτη και στους 4 κοντινότερους γείτονές του. Πραγματοποιούνται δύο παρεμβολές τριών σημείων: μια κατά την κατεύθυνση x με το εικονοστοιχείο κορυφής και αυτά εκ αριστερών και εκ δεξιών του και μια κατά την y κατεύθυνση με το εικονοστοιχείο κορυφής και αυτά από πάνω και κάτω του. Η εξίσωση κορυφής Γκάους είναι η :

$$dx = x + \frac{\log l - \log r}{2(\log l + \log r - 2 \log c)} - x_0$$

, όπου l, r, c είναι οι τιμές της έντασης για το αριστερό, το δεξί και το εικονοστοιχείο κορυφής στο χάρτη ετεροσυσχέτισης, x είναι η ακέραια στροφή και x_0 είναι η περιοχή μηδενικής στροφής.

Στον εντοπισμό κορυφών ορίζεται στο πρόγραμμα ο λόγος κορυφής προς κορυφή θορύβου να είναι μεγαλύτερος του 1.5. Όπως έχει αναφερθεί η υψηλότερη κορυφή αντιστοιχεί στην μετατόπιση της εικόνας του σωματιδίου και η δεύτερη υψηλότερη κορυφή είναι κορυφή θορύβου. Ο λόγος αυτός δείχνει πόσο υψηλότερη είναι η κορυφή μετατόπισης από την υψηλότερη κορυφή θορύβου. Χαμηλοί λόγοι υποδεικνύουν μικρότερη σιγουριά ότι η κορυφή μετατόπισης είναι η σωστή. Για αυτό το λόγο επιλέγεται η συγκεκριμένη τιμή.

Μετα-επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία εικόνων PIV μπορεί να παράγει σωστές μετρήσεις ταχύτητας σε ποσοστό άνω του 95%, εάν ακολουθηθούν οι κατευθυντήριες γραμμές για την καταγραφή και την επεξεργασία εικόνων που χαράχθηκαν από τους Keane και Adrian [91]. Χαμένα ζευγάρια σωματιδίων εξαιτίας της κίνησής τους εντός και εκτός του φύλλου φωτός ή χαμηλή πυκνότητα σωματιδίων που έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλής ισχύος σήματος ετεροσυσχέτιση οδηγούν σε λάθος-ψεύτικα διανύσματα. Αυτά τα διανύσματα προκύπτουν όταν η υψηλότερη κορυφή ετεροσυσχέτισης δεν δημιουργείται εξαιτίας ενός ζεύγους σωματιδίων που κινούνται στο ρευστό, δηλαδή δεν είναι η κορυφή ταχύτητας, αλλά όταν το τυχαίο ταίριασμα των εικόνων σωματιδίων παράγει την υψηλότερη κορυφή. Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί συναρτήσεις επικύρωσης, οι οποίες φιλτράρουν τα λανθασμένα διανύσματα και τα αντικαθιστούν με παρεμβολή.

Η μετά-επεξεργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. **Τοπική επικύρωση διανύσματος (Vector Local Validation):** Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται τα διανύσματα στη γειτονιά κάθε διανύσματος για τον υπολογισμό μια τιμής αναφοράς. Όταν η διαφορά του τρέχοντος διανύσματος από το διάνυσμα αναφοράς είναι μεγαλύτερη από μια ανοχή, τότε το τρέχον διάνυσμα θεωρείται ως λανθασμένο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση σε αυτήν την εργασία είναι η εξέταση του τοπικού μέσου (Median Test). Οι συνιστώσες του διανύσματος αναφοράς είναι η μέση τιμή όλων των διανυσμάτων στην γειτονιά. Η γειτονιά έχει μέγεθος 3×3 και η ανοχή, σε μονάδες εικονοστοιχείων, ορίζεται στα 2 εικονοστοιχεία, $dU = dV = 2 \text{ pixels}$.
2. **Τροποποίηση διανυσμάτων:** Η τροποποίηση γίνεται μετά την επικύρωση, για την πλήρωση οπών στο πεδίο διανυσμάτων ή/και για την ομαλοποίηση του πεδίου. Αυτές οι οπές προέρχονται από την απόρριψη διανυσμάτων κατά το προηγούμενο βήμα. Οι οπές πληρώνονται με τον τοπικό αριθμητικό μέσο (Local Mean) των διανυσμάτων της γειτονιάς, σε μια γειτονιά 3×3 . Να σημειωθεί ότι απαιτείται ένας αριθμός από 3 έγκυρα γειτονικά διανύσματα για την πλήρωση μιας οπής. Επιπλέον επιλέγεται να γίνει αναδρομική πλήρωση (Recursive Filling), δηλαδή ο αλγόριθμος πλήρωσης ταξινομεί τις οπές ανάλογα με τον αριθμό των αρχικά έγκυρων γειτόνων και έπειτα πληρώνει πρώτα τις οπές με τους περισσότερους έγκυρους γείτονες, μιας και αυτές έχουν τις καλύτερες πιθανότητες να πληρωθούν. Στη συνέχεια πληρώνει τις οπές με τους δεύτερους περισσότερους έγκυρους γείτονες, μια διαδικασία στην οποία οι οπές που πληρώθηκαν στο προηγούμενο βήμα θεωρούνται ως έγκυροι γείτονες. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να πληρωθούν όλες οι οπές. Αν δεν χρησιμοποιηθεί η αναδρομική πλήρωση, η πλήρωση ξεκινά πάντα από το άνω αριστερό άκρο του διανυσματικού πεδίου και προχωρά προς το κάτω αριστερό άκρο σειρά-σειρά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα πρότυπα (patterns) στο προκύπτον διανυσματικό πεδίο, εάν υπάρχουν πολλές οπές στο πεδίο εισόδου.

6.4 Αποτελέσματα και Συζήτηση

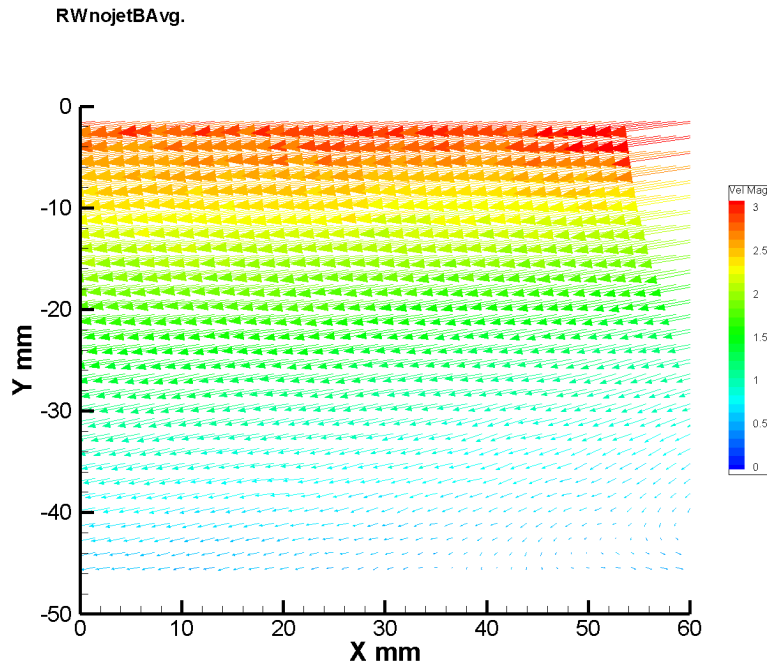
Στο παρόν τμήμα αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σειράς πειραμάτων PIV και ακολουθεί ο σχολιασμός τους. Το τμήμα χωρίζεται σε τέσσερα διαφορετικά υποτμήματα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα από τα τέσσερα παράθυρα λήψης ή οπτικά πεδία, τα οποία ορίζονται ως εξής:

1. **Παράθυρο απότομης διεύρυνσης:** Εκτείνεται από 0-63 mm και θα αναφέρεται ως παράθυρο 1.
2. **Μεσαίο παράθυρο λήψης:** Εκτείνεται από 63-126 mm και θα αναφέρεται ως παράθυρο 2.
3. **Παράθυρο επανακόλλησης της ροής με εφαρμογή ελέγχου:** Εκτείνεται από 126-189 mm και θα αναφέρεται ως παράθυρο 3.
4. **Παράθυρο επανακόλλησης της ροής χωρίς την εφαρμογή ελέγχου:** Εκτείνεται από 189-252 mm και θα αναφέρεται ως παράθυρο 4.

Να σημειωθεί ότι ως αρχή του συστήματος συντεταγμένων θεωρείται το σημείο τομής της γραμμής που υποδηλώνει το φύλλο φωτός (βλ. πειραματική διαδικασία αυτού του κεφαλαίου) και της κάτω ακμής του δοκιμίου της απότομης διεύρυνσης και ότι τυχόν κενές περιοχές στα διαγράμματα οφείλονται στην απόρριψη των εκεί διανυσμάτων κατά τη διαδικασία της μεταεπεξεργασίας. Η πλήρωση των οπών απέτυχε καθώς δεν βρέθηκε ο απαραίτητος αριθμός έγκυρων γειτόνων για εξαχθεί ο αριθμητικός μέσος της γειτονιάς.

Για κάθε μια από τις περιπτώσεις μελέτης παρουσιάζονται τέσσερα διαγράμματα:

1. Το διάγραμμα του μέσου διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων της ροής.
2. Το διάγραμμα της μέσης κατανομής τιμών του πεδίου ταχυτήτων της ροής.
3. Η τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας της ροής.
4. Η μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής, δηλαδή η ποσότητα $-u'v'$.



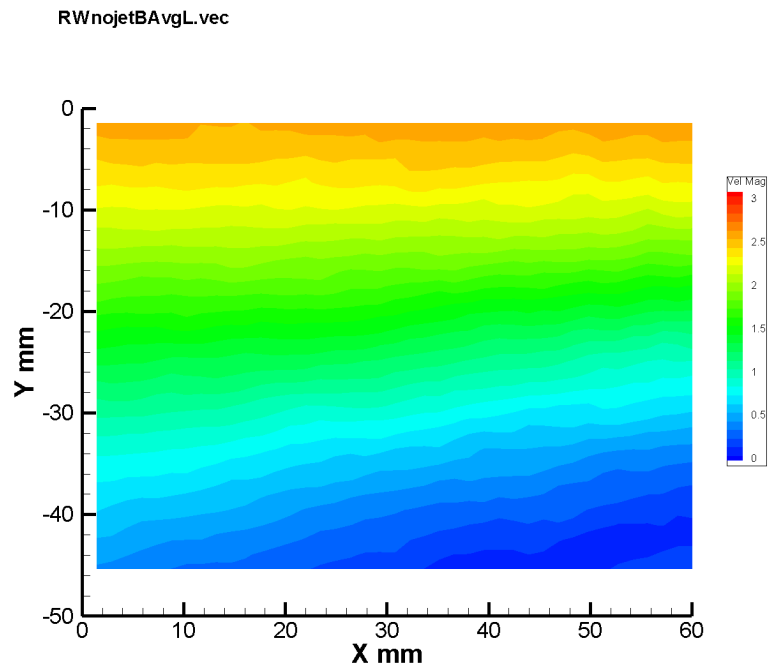
Σχήμα 6.8: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.

6.4.1 Παράθυρο επανακόλλησης της ροής χωρίς την εφαρμογή ελέγχου

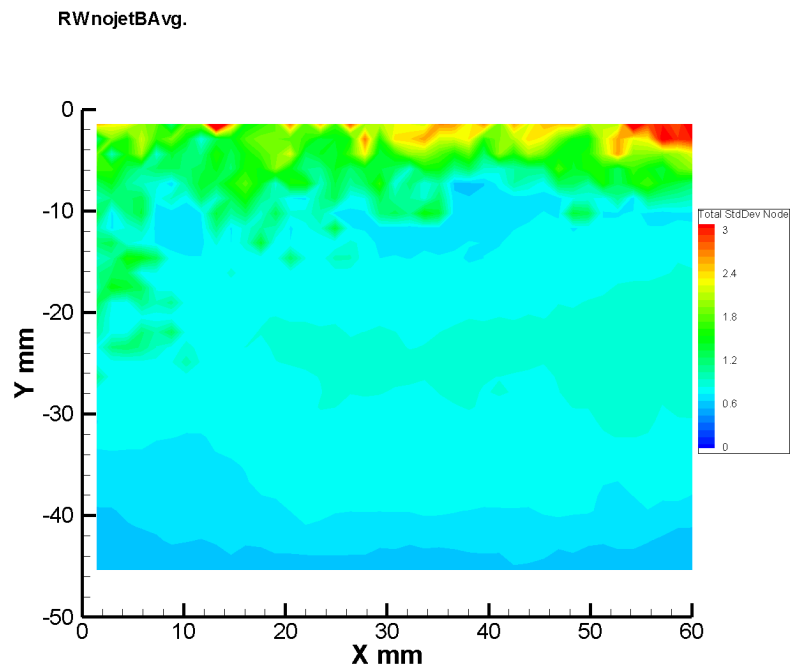
Στο διαγράμματα 6.8 και 6.9 το σημείο επανακόλλησης της ροής χωρίς την εφαρμογή ελέγχου φαίνεται να είναι στα 44 mm από την αρχή του άξονα x , οπότε βρίσκεται στα 205 mm περίπου από την απότομη διεύρυνση και ισχύει $x_{R_0} \simeq 205 \text{ mm}$. Το σημείο επανακόλλησης κανονικοποιημένο με το ύψος του δοκιμίου είναι $x_{R_0}/H \simeq 205/41 = 5$. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται πολύ κοντά στο μήκος επανακόλλησης που μέτρησαν οι Yoshioka, Obi και Masuda ($x_{R_0}/H = 5.5$) [116], Emmanuel Creusé, André Giovannini και Iraj Mortazavi ($x_{R_0}/H = 4.51$)[47] και οι Kostas, Soria και Chong ($x_{R_0}/H = 4.8 \pm 0.2$)[60]. Γενικά το μήκος επανακόλλησης της ροής παρουσιάζει μια διακύμανση τιμών που οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες των πειραμάτων και κυρίως στον διαφορετικό αριθμό Reynolds. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι Tihon, Pěnkavoná και Παντζαλή [108] μέτρησαν ένα μήκος $x_{R_0}/H = 7$ και οι Václav Uruba, Pavel Jonáš και Oton Mazur $x_{R_0}/H = 6$ περίπου [109]. Μια εκτενής παρουσίαση σχετικών πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν διακύμανση από 4.8 – 8.2 δίνεται στο [57].

Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης των διαταραχών της U_x συνιστώσας της ροής 6.10 υπάρχει μια περιοχή που εκτείνεται από 0 έως -10 περίπου χιλιοστά κατά τον άξονα y (36 mm ή 0.9H περίπου από το κάτω τοίχωμα), όπου εμφανίζονται έντονες αναταράξεις στη ροή. Στην περιοχή του άξονα x από 189-237 mm από την απότομη διεύρυνση (4.6H-5.8H από την απότομη διεύρυνση και 15-60 mm στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων) και από -20 έως -30 mm (16-26 mm από το κάτω τοίχωμα) κατά τον y υπάρχει μια περιοχή με αυξημένες αναταράξεις σε σχέση με τη γύρω περιοχή της. Αυτή είναι η περιοχή όπου η ροή αρχίζει και επιβραδύνεται σταδιακά για να επανακολληθεί στο κάτω τοίχωμα του τμήματος δοκιμών και να διαχωριστεί σε δύο κατευθύνσεις, μια κατάντι και μια ανάντι του σημείου επανακόλλησης, με κατεύθυνση αντίθετη προς το ελεύθερο ρεύμα, η οποία οριοθετεί την περιοχή ανακυκλοφορίας.

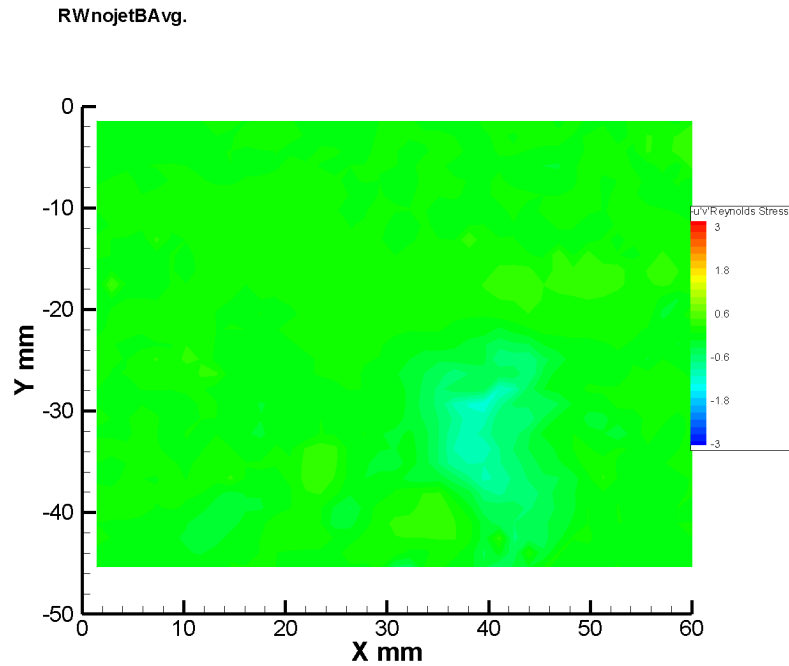
Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα στο σχήμα 6.11 έχουν πολύ χαμηλές τιμές-γύρω από το μηδέν-σε όλο σχεδόν το οπτικό πεδίο με εξαίρεση μια περιοχή που εκτείνεται από 207-217 mm από την απότομη διεύρυνση (5.04H-5.3H από την απότομη διεύρυνση και 35-45 mm στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων) κατά x και από -26 mm έως -45 mm (0-20 ή 0.5H mm περίπου από το κάτω τοίχωμα) κατά y , όπου λαμβάνουν υψηλές απόλυτες τιμές. Εκεί κοντά βρίσκεται το σημείο επανακόλλησης της ροής και εμφανίζονται έντονες αναταράξεις.



Σχήμα 6.9: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.10: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.11: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα για ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 4, ασύγχρονες μετρήσεις.

6.4.2 Παράθυρο επανακόλλησης της ροής με εφαρμογή ελέγχου

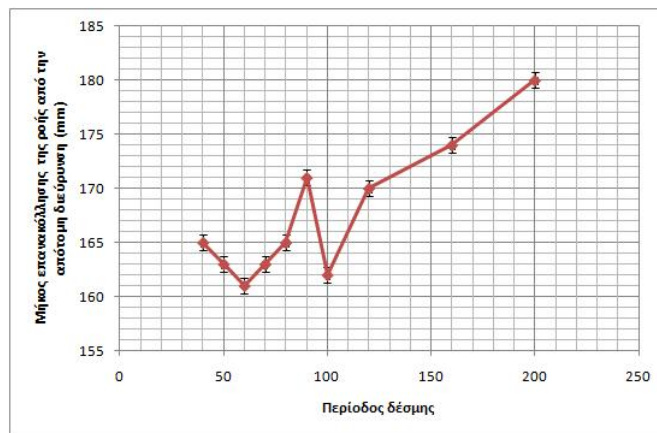
Ασύγχρονες μετρήσεις

Ο σκανδαλισμός του λέιζερ και της κάμερας είναι εσωτερικός, δηλαδή γίνεται αυτόματα από την κεντρική μονάδα του, σύμφωνα με ό,τι ειπώθηκε στο τμήμα της πειραματικής διαδικασίας. Η διάρκεια της δέσμης είναι 20 ms και η περίοδος μεταβάλλεται από 40 μέχρι 200 ms. Παρατηρώντας τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων που ακολουθούν μετά το σχολιασμό, διαπιστώνεται ότι το μήκος επανακόλλησης της ροής μεταβάλλεται συναρτήσει της περιόδου της δέσμης. Η εξάρτηση αυτή παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 6.1, ενώ για καλύτερη εποπτεία ακολουθεί η γραφική παράσταση του μήκους επανακόλλησης συναρτήσει της περιόδου της δέσμης στο σχήμα 6.12.

Περίοδος δέσμης (ms)	Μήκος επανακόλλησης x_R (mm)	Μήκος επανακόλλησης/Ύψος δοκιμίου x_R/H
40	165	4.02
50	163	3.98
60	161	3.93
70	163	3.98
80	165	4.02
90	171	4.17
100	162	3.95
120	170	4.15
160	174	4.24
200	180	4.39

Πίνακας 6.1: Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της περιόδου της δέσμης

Στο διάγραμμα έχουν εισαχθεί και οι γραμμές σφάλματος του μήκους επανακόλλησης. Η χωρική ευκρίνεια της μεθόδου είναι 0.7325 mm, ένα μέγεθος που προκύπτει από παρατήρηση στα αρχεία εξόδου του προγράμματος, τα οποία προκύπτουν μετά από τη διαδικασία ανάλυσης που περιγράφηκε πρωτύτερα. Είναι εμφανές ότι υπάρχουν δύο συχνότητες στις οποίες το μήκος επανακόλλησης παρουσιάζει ελάχιστα. Το πρώτο ελάχιστο παρουσιάζεται για $T = 60ms$ και το δεύτερο για $T = 100ms$. Επειδή η διαφορά τους είναι μέσα στα όρια του σφάλματος δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το ποια συχνότητα είναι τελικά η βέλτιστη. Πρέπει επομένως να διεξαχθούν και άλλα πειράματα για περισσότερες συχνότητες γύρω από αυτές τις τιμές, ώστε να υπάρξει απάντηση σε αυτό το ερώτημα.



Σχήμα 6.12: Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της περιόδου της δέσμης

Ο αριθμός Strouhal για την περίπτωση των 60 ms ή 16.66 Hz περίπου, προκύπτει ίσος με $St = f_e H / U_\infty \simeq 0.22$, ενώ για την περίπτωση των 100 ms ή 10 Hz ίσος με $St \simeq 0.14$. Οι Yoshioka, Obi και Masuda [116] βρήκαν τον βέλτιστο αριθμό Strouhal ίσο με 0.19, στην εργασία των Emmanuel Creusé, André Giovannini και Iraj Mortazavi [47] βρέθηκε ίσος με 0.2 για την περίπτωση ελέγχου με δέσμες ρευστού, ενώ στην εργασία των Greenblatt και Wygnanski [37] παρουσιάζονται αποτελέσματα που βρίσκονται κοντά σε αυτά της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα οι Roos και Kegelmann [98] βρήκαν έναν Strouhal ίσο με 0.29 και οι Huppertz και Janke [29] ίσο με 0.18. Η περίπτωση λοιπόν των 16.6 Hz είναι πιο κοντά στα προαναφερθέντα αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο θα μελετηθεί εκτενέστερα στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας.

Με την παρατήρηση ότι η βέλτιστη περίοδος είναι $T = 60ms$ η μείωση του μήκους επανακόλλησης προκύπτει

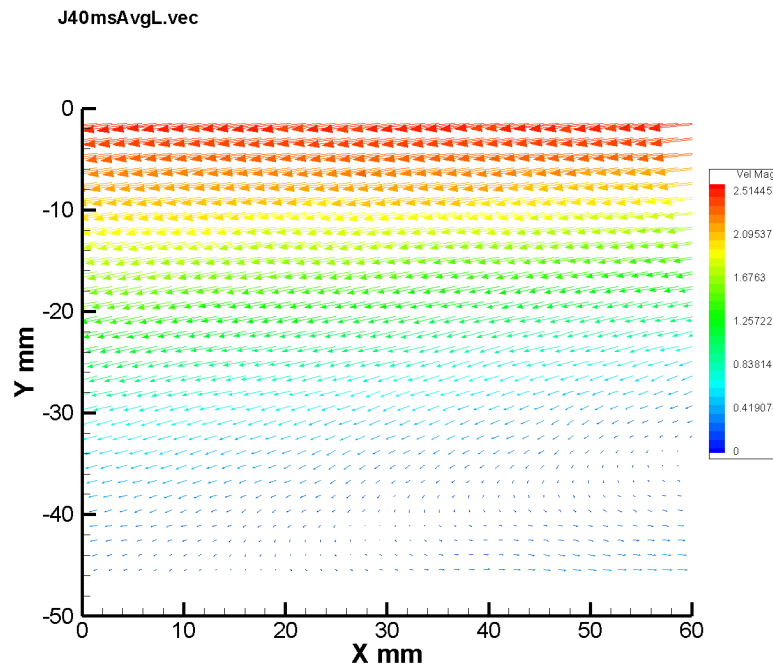
ίση με:

$$\Delta x\% = \frac{x_{R_0} - x_R}{x_{R_0}} = \frac{205 - 161}{205} = 21.4\%$$

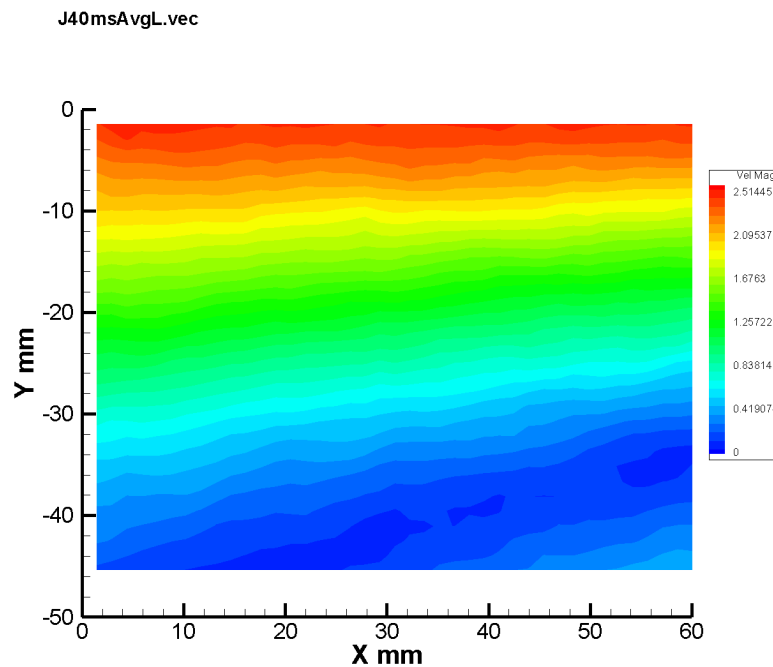
της περίπτωσης χωρίς έλεγχο. Συγκριτικά να αναφερθεί ότι στην [116] βρέθηκε ίση με 30 % περίπου για $Re = 3700$, στην [98] ομοίως για $Re = 7500$, στην [47] 56% για $Re = 2000$, στην [29] 63% για στρωτή ροή και τέλος στην [108] η μείωση φτάνει το ποσοστό του 80 % για $Re = 260$! Η μεγάλη διακύμανση των αποτελεσμάτων οφείλεται στις διαφορετικές προσεγγίσεις ελέγχου και τις συνθήκες των πειραμάτων. Ωστόσο καθίσταται σαφές ότι ο έλεγχος της ροής κοντά σε τέτοια συχνότητα, ώστε ο αριθμός Strouhal να βρίσκεται στα πλαίσια των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οδηγεί σε σημαντική μείωση του μήκους επανακόλλησης της ροής.

Η τυπική απόκλιση της U_x συνιστώσας παρουσιάζει αυξημένες τιμές για μικρές περιόδους δέσμης, οι οποίες σταδιακά εξασθενούν καθώς η περίοδος αυξάνεται. Αυτό σημαίνει ότι οι μικρές περίοδοι ή οι μεγάλες συχνότητες δέσμης προκαλούν αναταράξεις στη ροή σε μεγαλύτερο βαθμό από τις χαμηλότερες συχνότητες. Ως προς τη μορφή των διαγραμμάτων αξίζει να σχολιασθεί ότι οι περιοχές μεγάλων αναταράξεων εκτείνονται κυρίως από 0 έως -10 mm (36 ή 0.9H από το κάτω τοίχωμα) κατά y και καταλαμβάνουν όλο το μήκος του άξονα x , που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο οπτικό πεδίο. Εξαιρέση αποτελούν οι περιπτώσεις $T = 80ms$ και $T = 90ms$ που φαίνονται στα σχήματα 6.31 και 6.35, όπου η περιοχή αυτή περιορίζεται στο τμήμα 0 έως -5 mm (41 mm ή H από το κάτω τοίχωμα) και 0 έως -20 mm (26 mm ή 0.6H περίπου από το κάτω τοίχωμα) αντίστοιχα κατά y και 126-166 mm ή 3H-4H από την απότομη διεύρυνση (20 έως 60 mm περίπου κατά x).

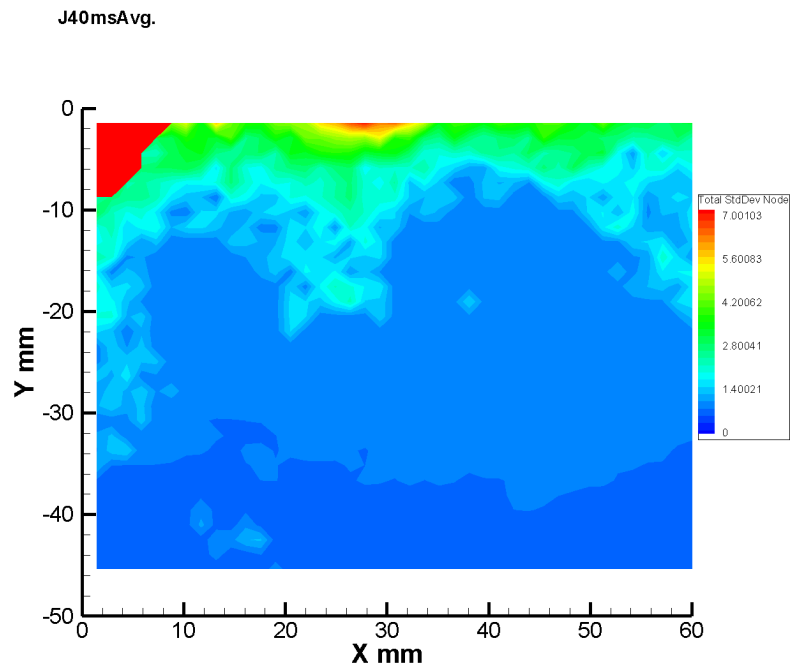
Η κατανομή των τάσεων Reynolds/πυκνότητα εμφανίζει διαφοροποίηση από συχνότητα σε συχνότητα. Για τις μικρές περιόδους υπάρχει αύξηση της απόλυτης τιμής τους σε σχέση με την περίπτωση χωρίς έλεγχο κοντά στο σημείο επανακόλλησης της ροής (σχ. 6.16,6.20). Για $T = 60ms$ στο σχήμα 6.24 οι τάσεις διατηρούνται κοντά στο 0, εκτός από μια πολύ μικρή περιοχή που εκτείνεται από -20 έως -30 mm (16-26 mm από το κάτω τοίχωμα) κατά y και 126-136 mm ή 3H-3.3H από την απότομη διεύρυνση (50-60 mm στο διάγραμμα) κατά x . Για μεγαλύτερες συχνότητες οι τάσεις παρουσιάζουν σποραδικά αυξημένες τιμές.



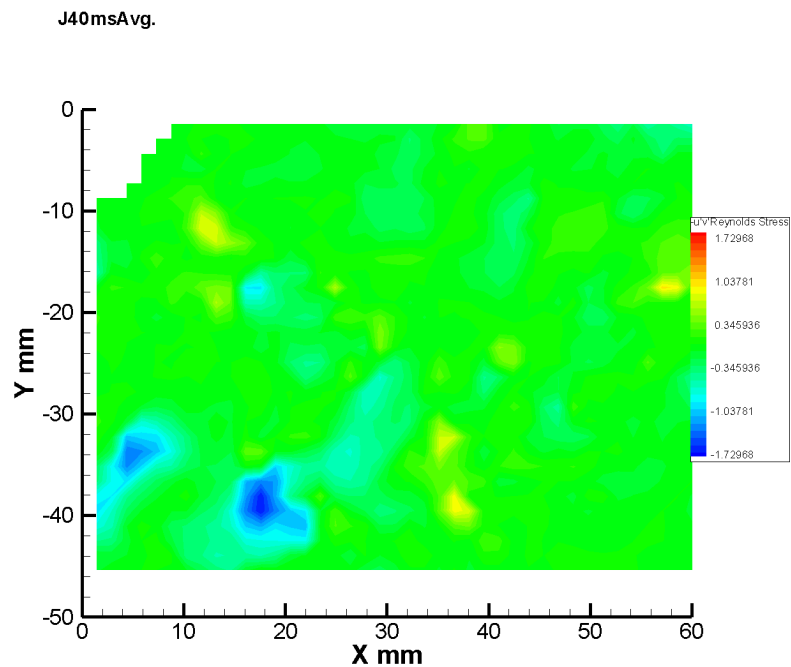
Σχήμα 6.13: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



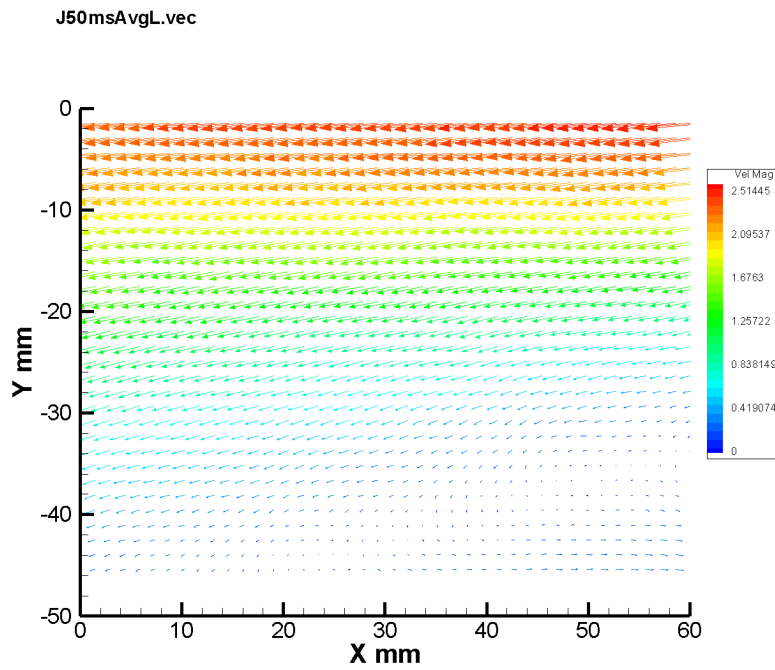
Σχήμα 6.14: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



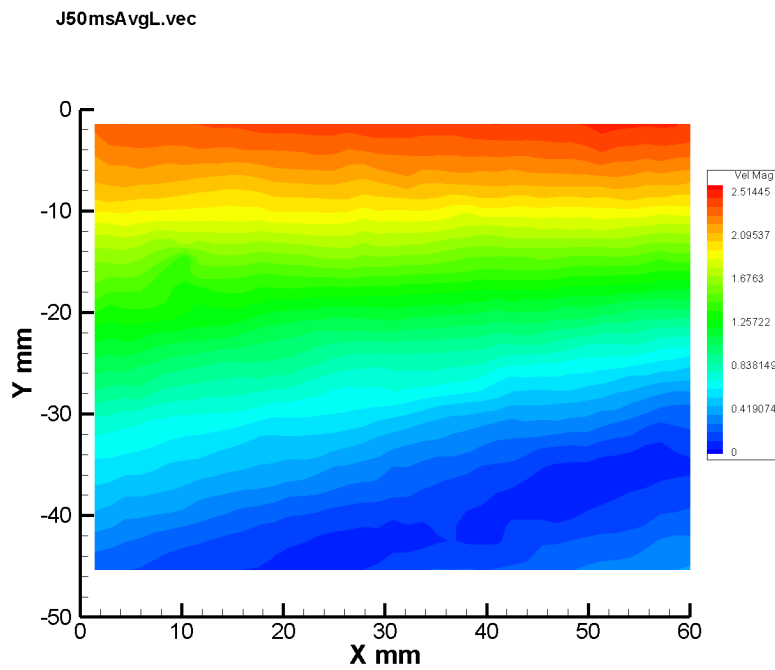
Σχήμα 6.15: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



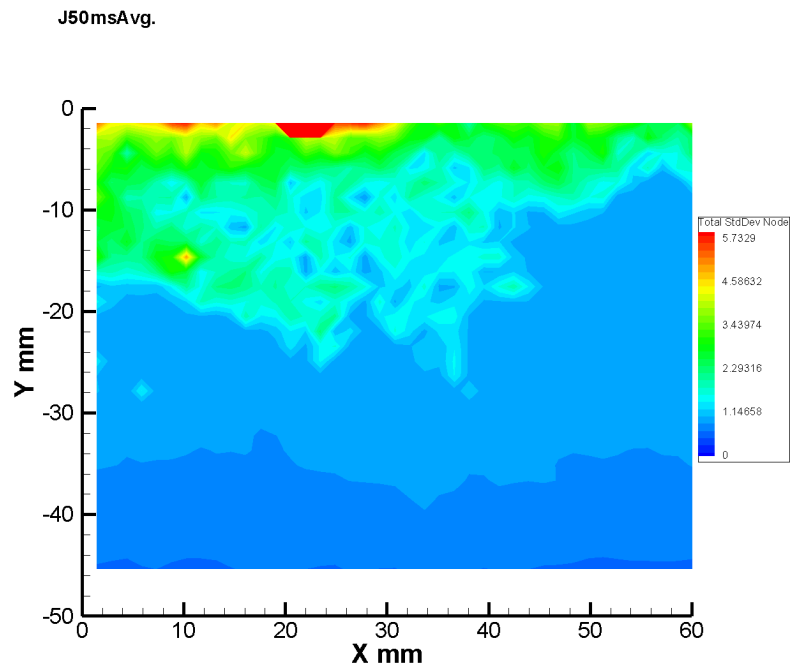
Σχήμα 6.16: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



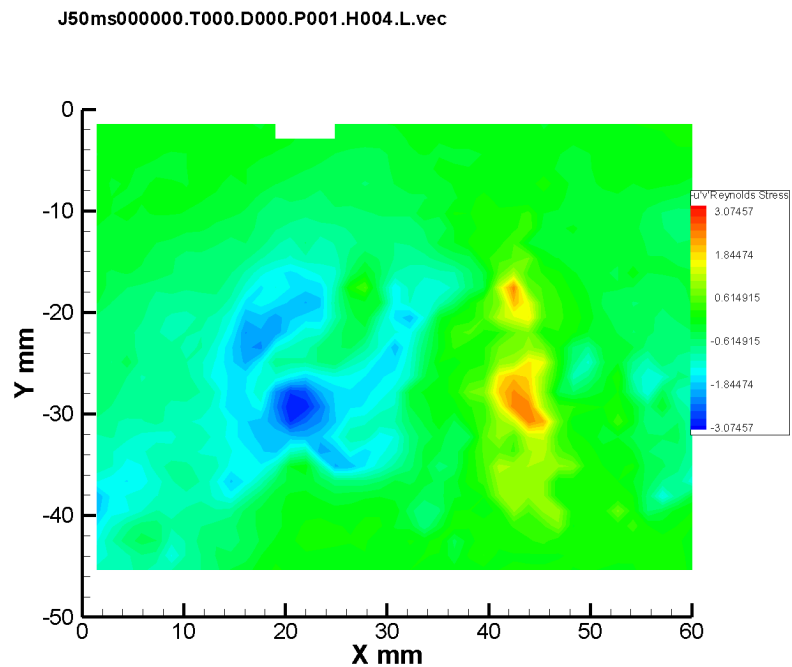
Σχήμα 6.17: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



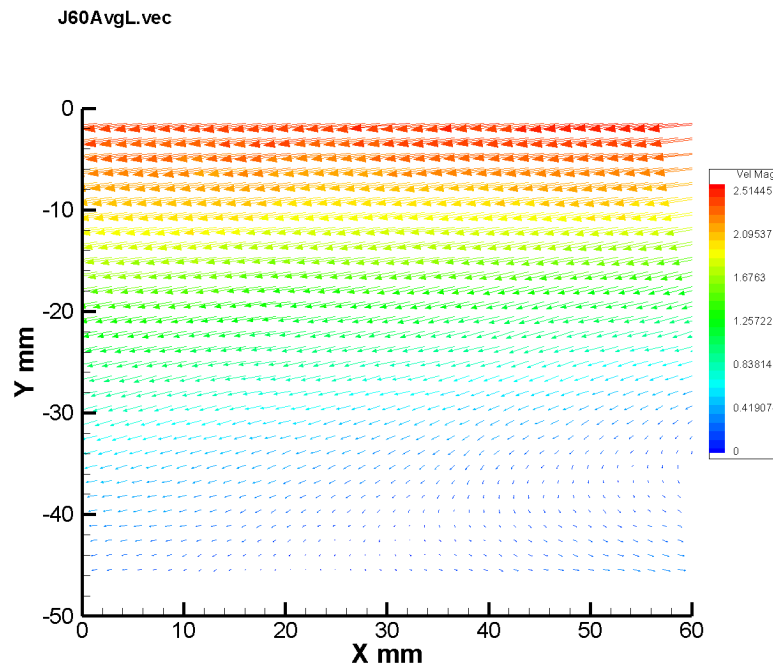
Σχήμα 6.18: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



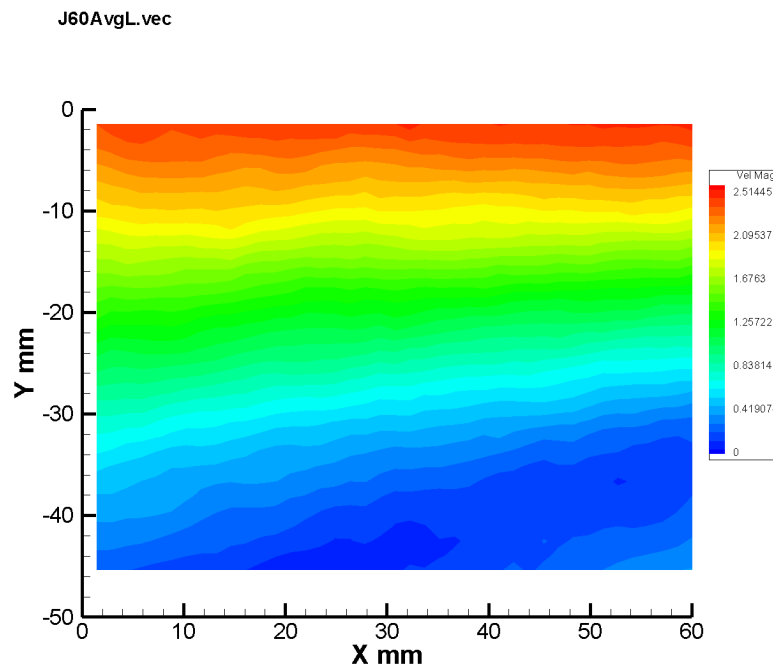
Σχήμα 6.19: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



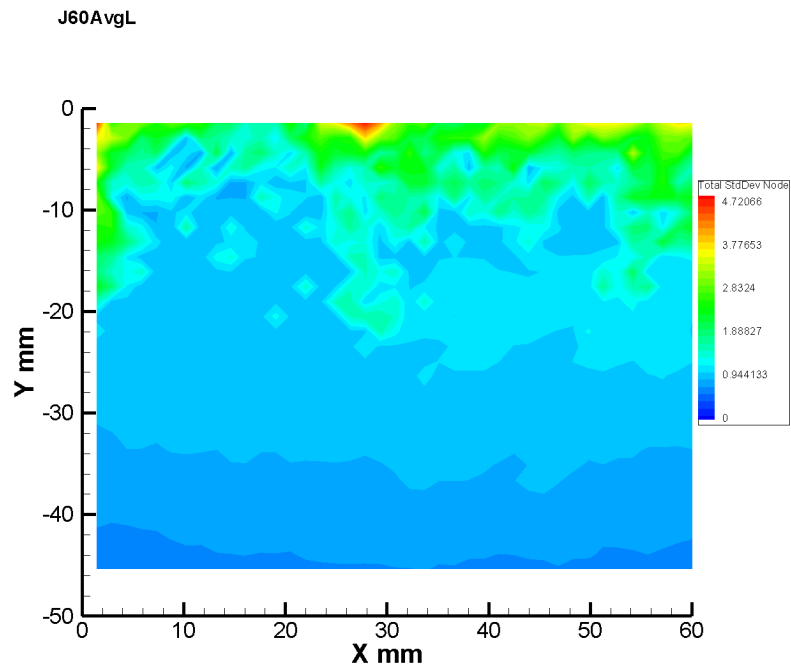
Σχήμα 6.20: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



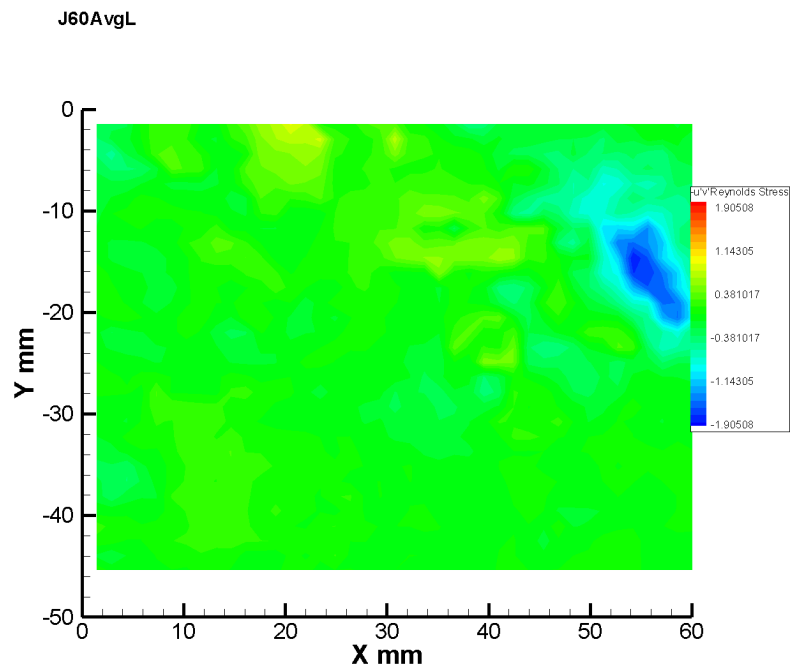
Σχήμα 6.21: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



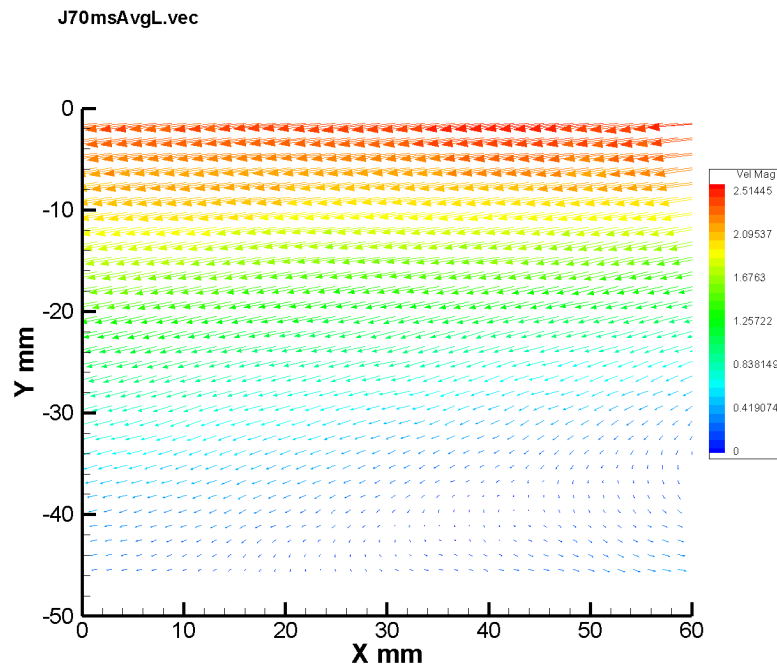
Σχήμα 6.22: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



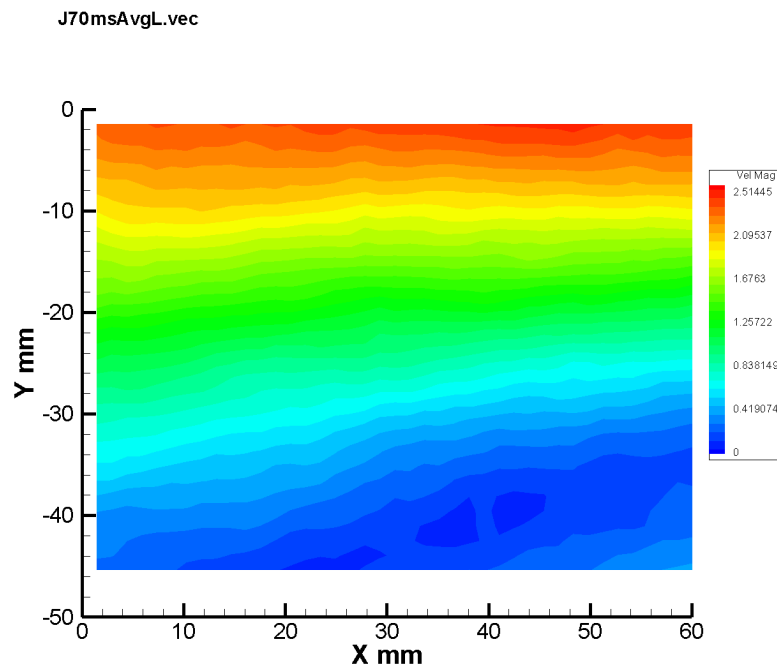
Σχήμα 6.23: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



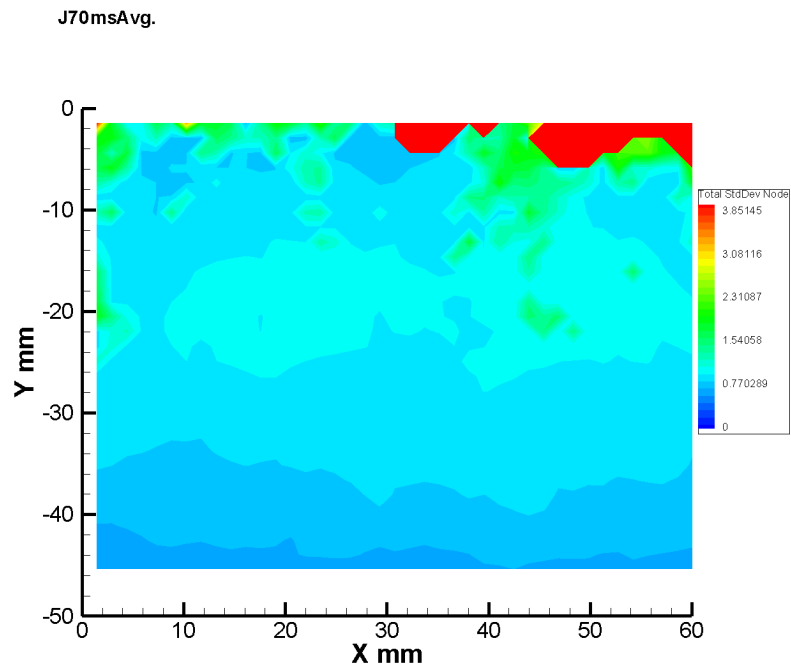
Σχήμα 6.24: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



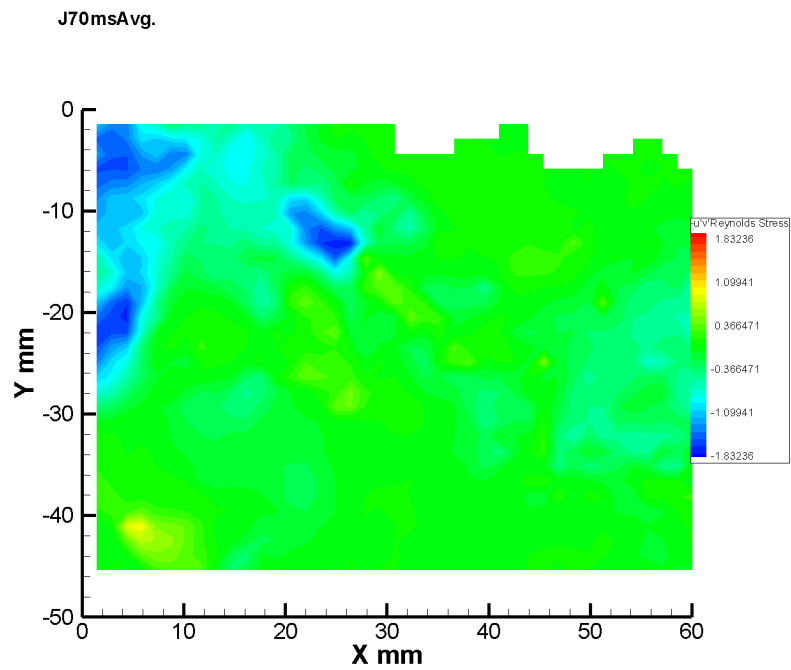
Σχήμα 6.25: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 70 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



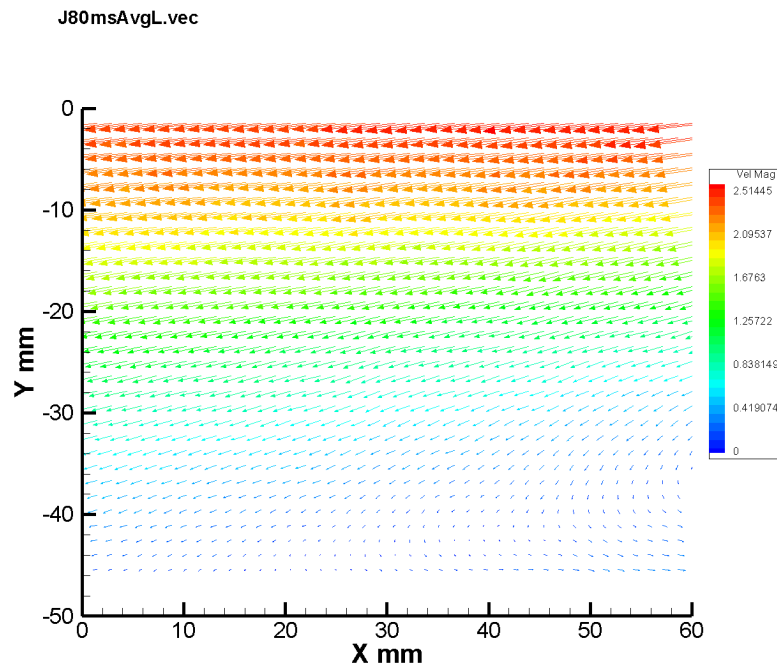
Σχήμα 6.26: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 70 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



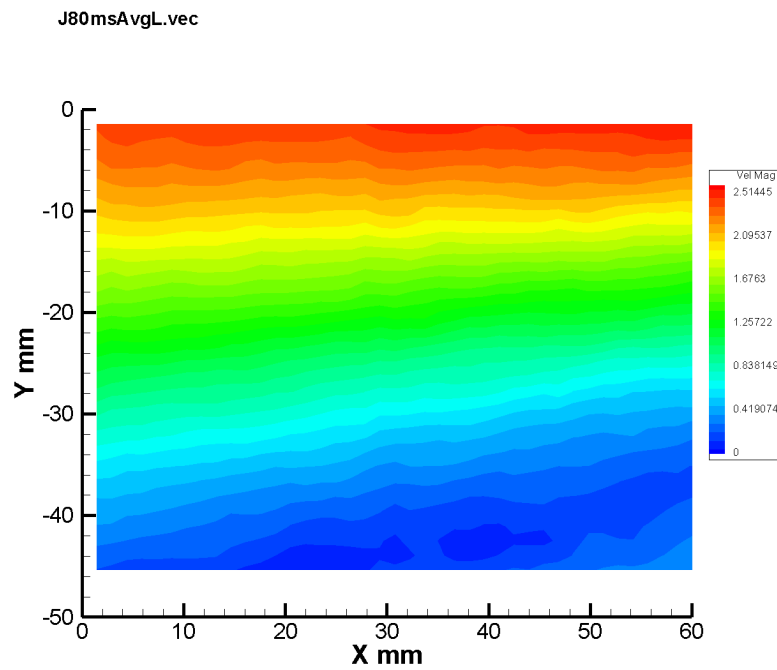
Σχήμα 6.27: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 70 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



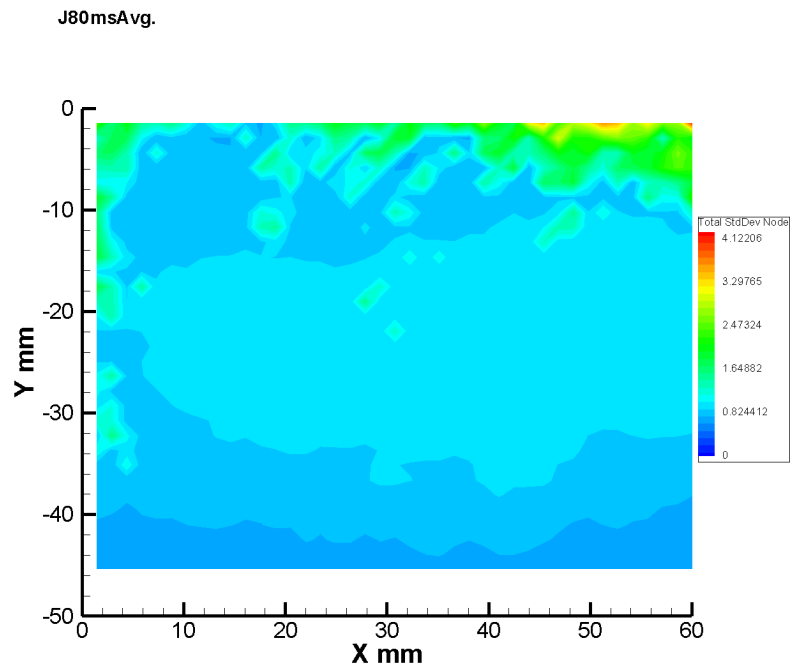
Σχήμα 6.28: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 70 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



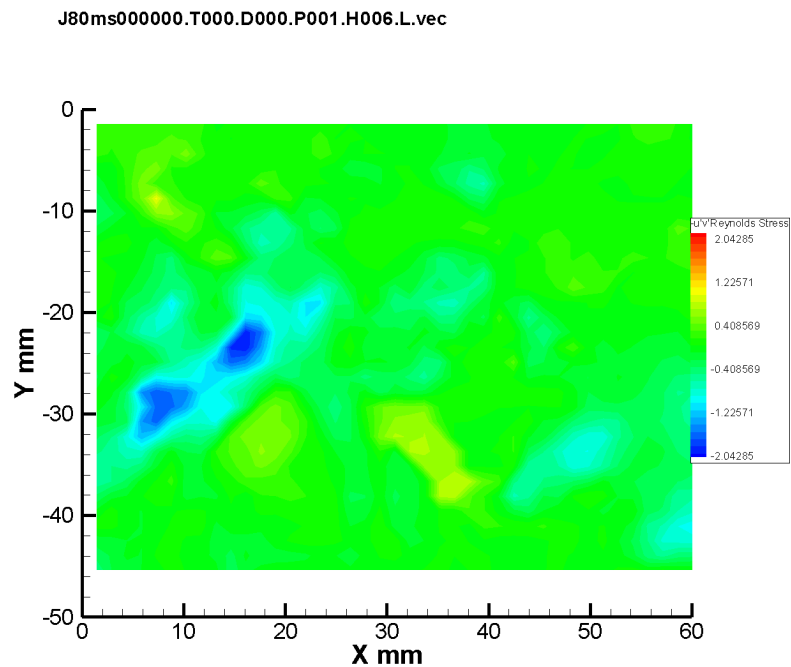
Σχήμα 6.29: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 80 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



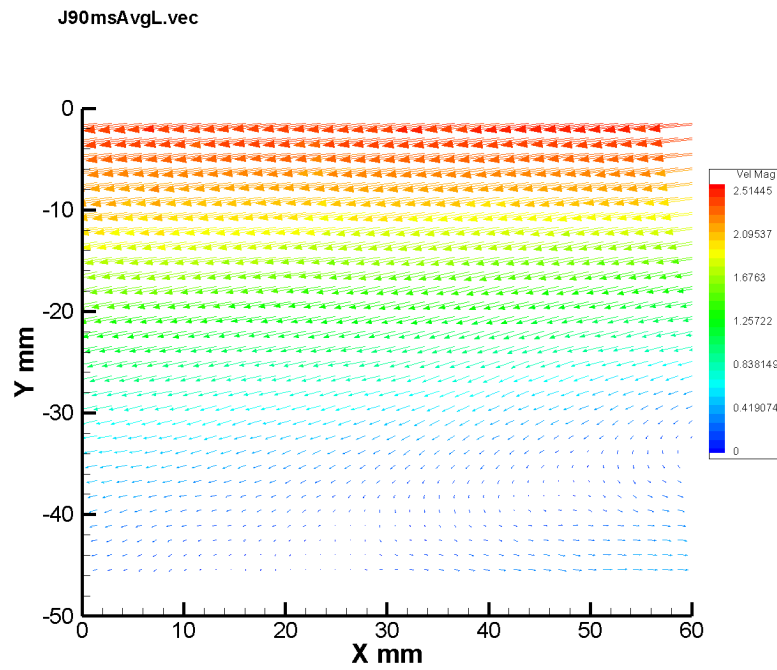
Σχήμα 6.30: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 80 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



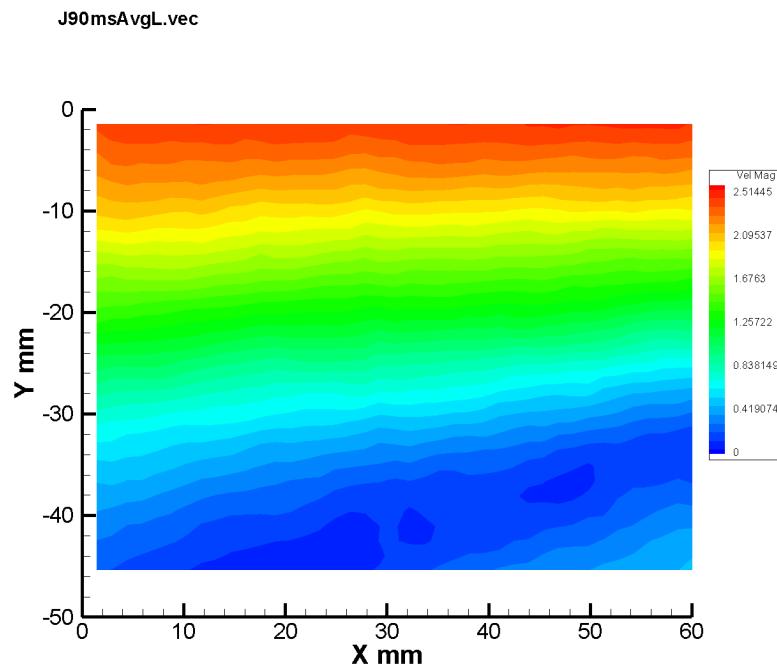
Σχήμα 6.31: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 80 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



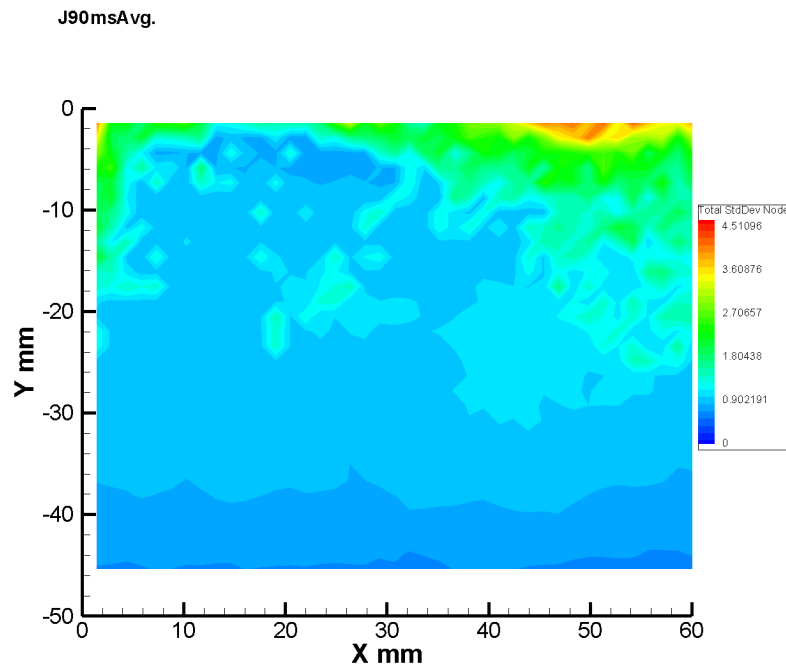
Σχήμα 6.32: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 80 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



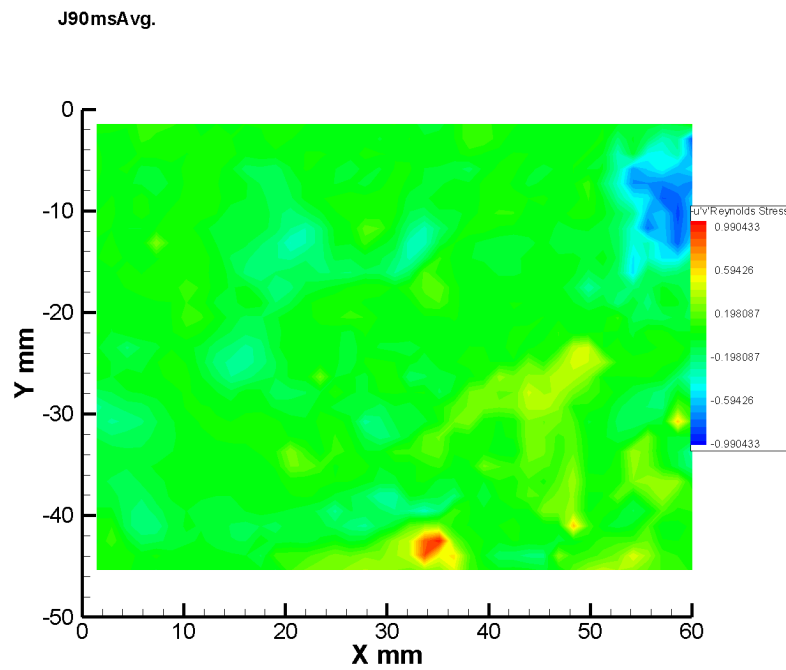
Σχήμα 6.33: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 90 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



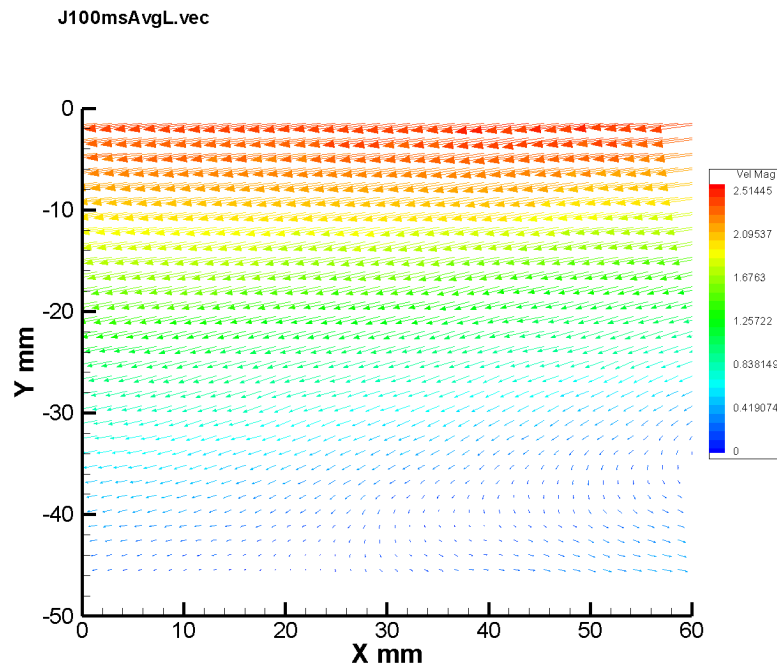
Σχήμα 6.34: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 90 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



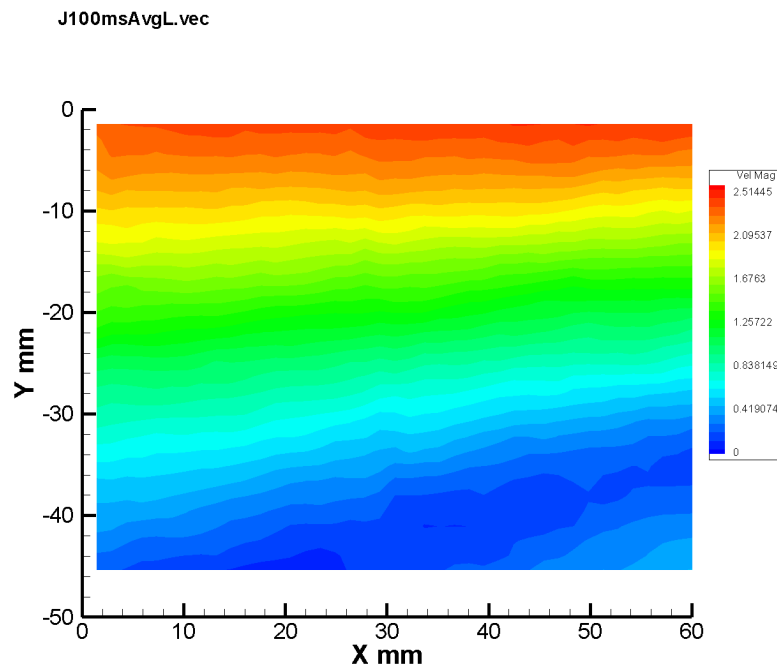
Σχήμα 6.35: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 90 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



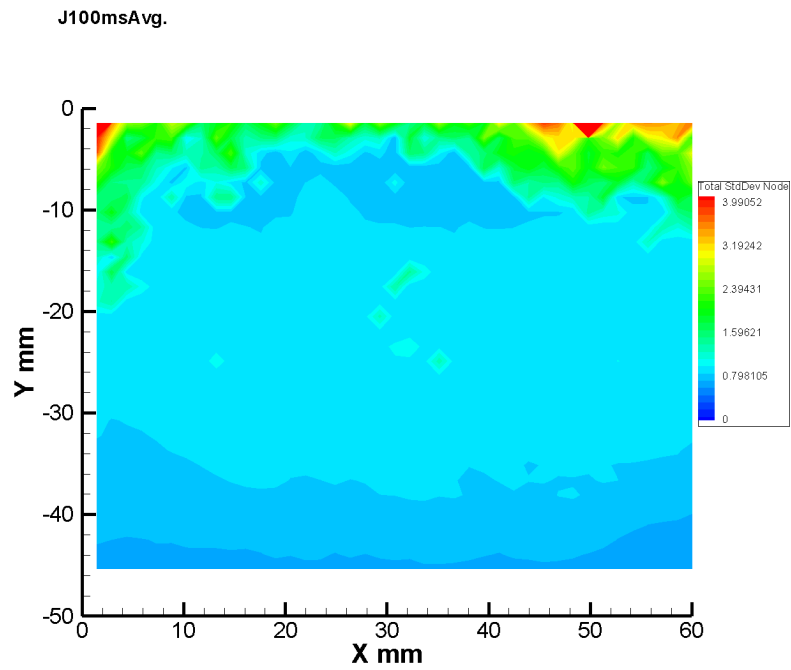
Σχήμα 6.36: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 90 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



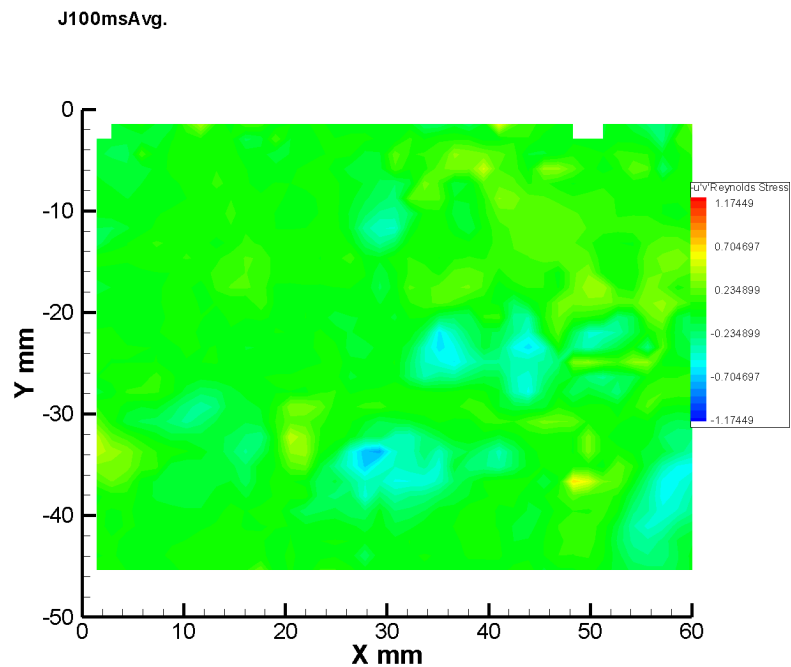
Σχήμα 6.37: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 100 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



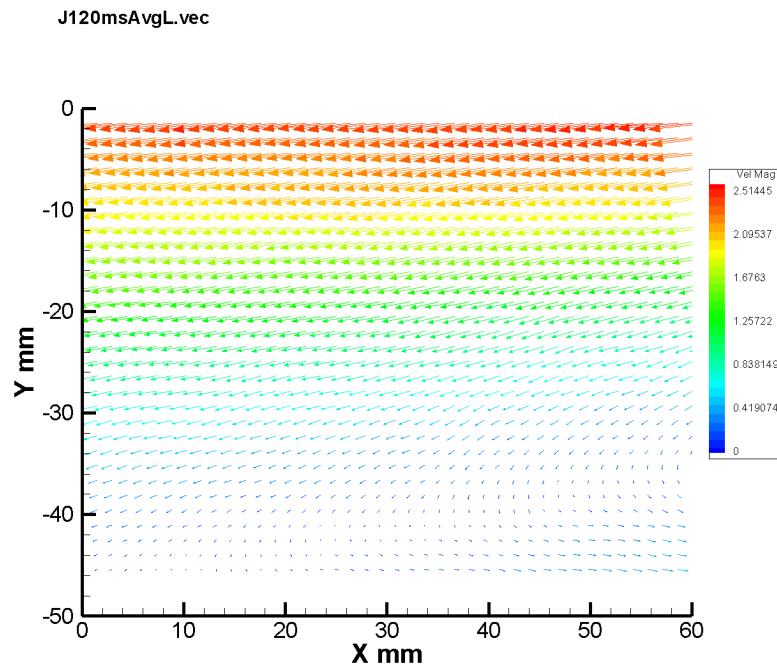
Σχήμα 6.38: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 100 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



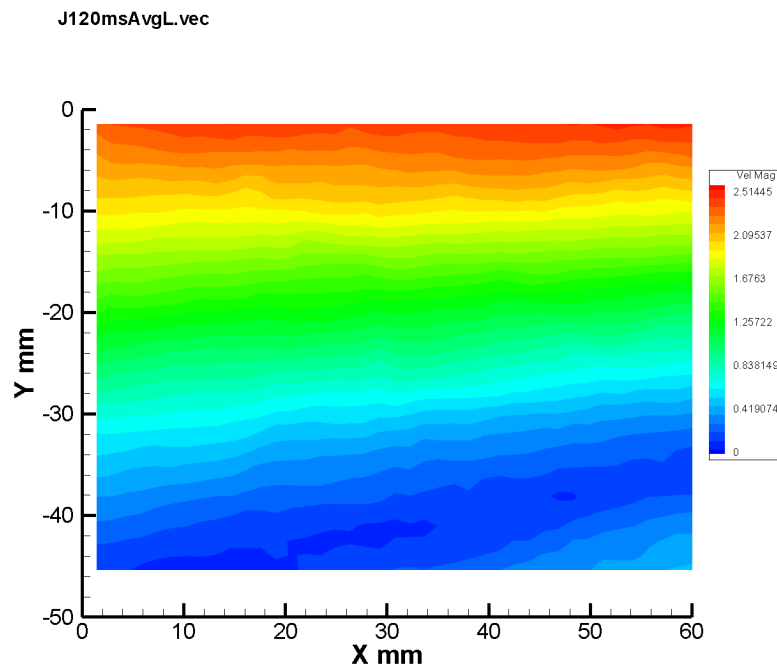
Σχήμα 6.39: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 100 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



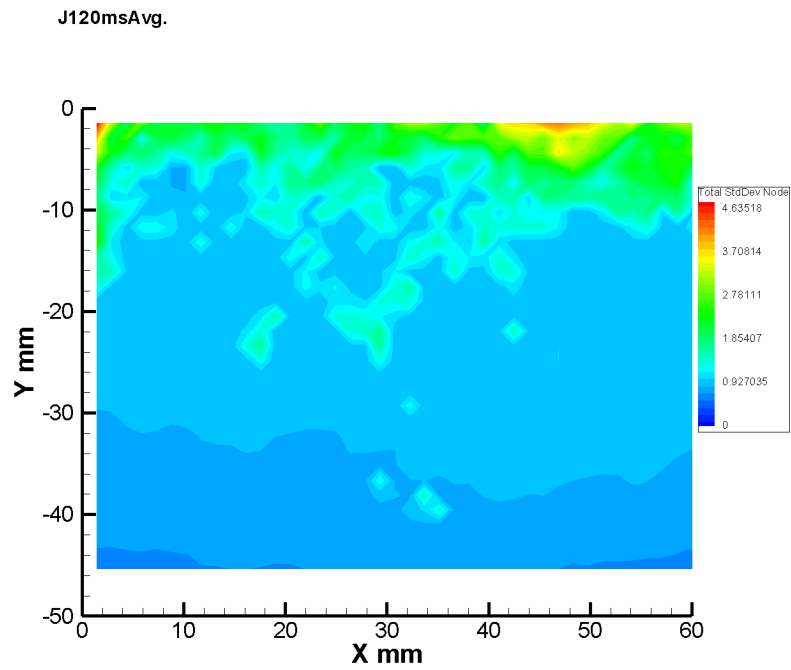
Σχήμα 6.40: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 100 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



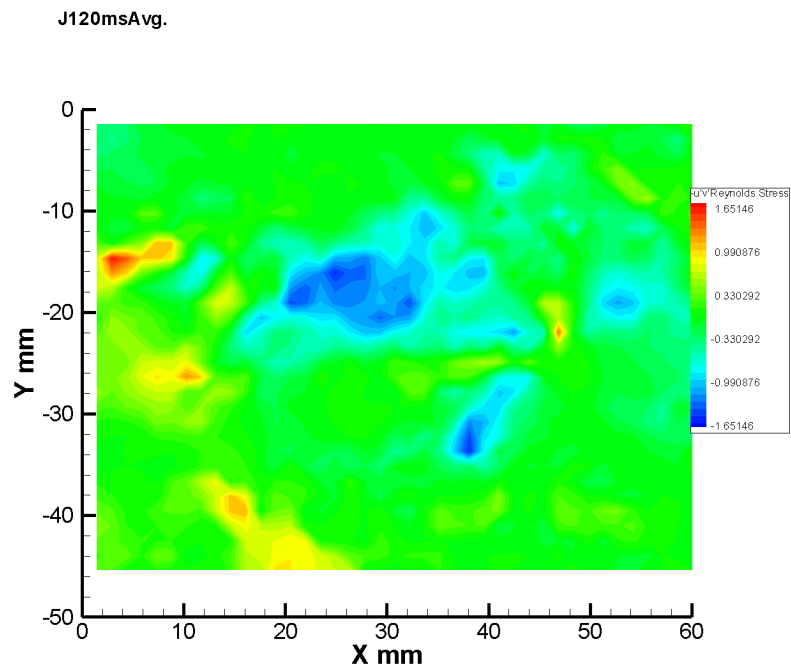
Σχήμα 6.41: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 120 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



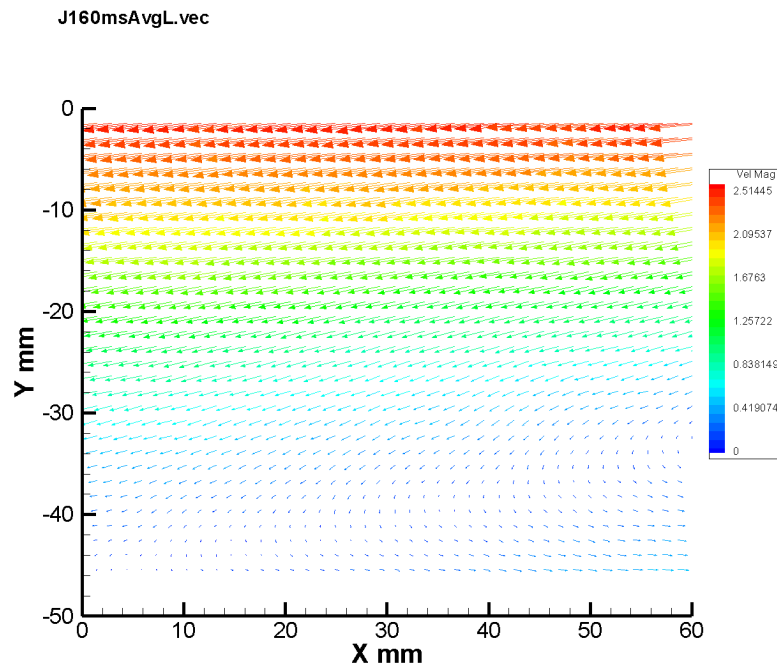
Σχήμα 6.42: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 120 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



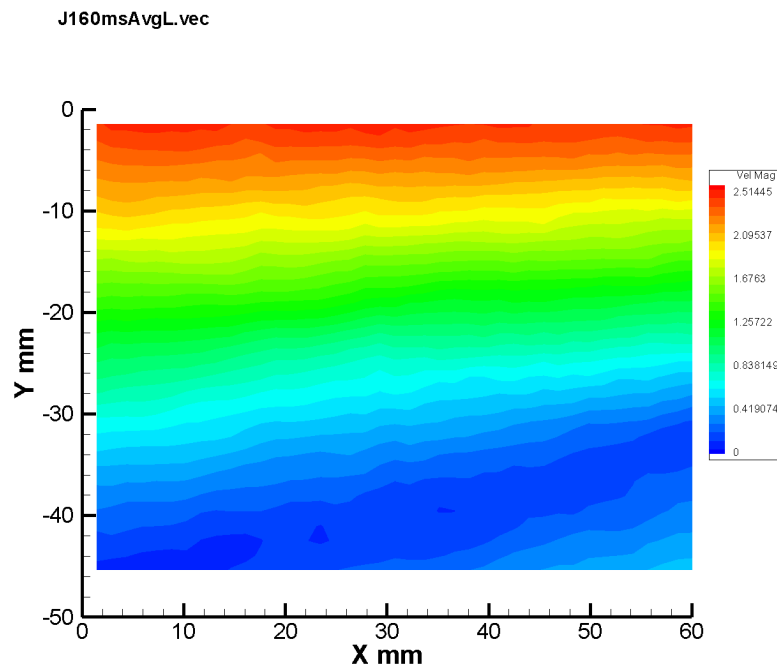
Σχήμα 6.43: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 120 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



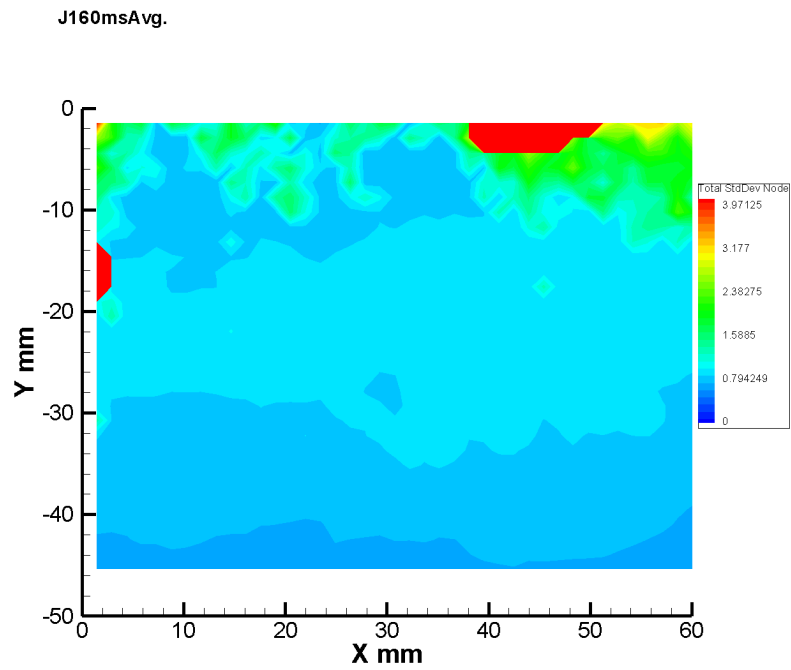
Σχήμα 6.44: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 120 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



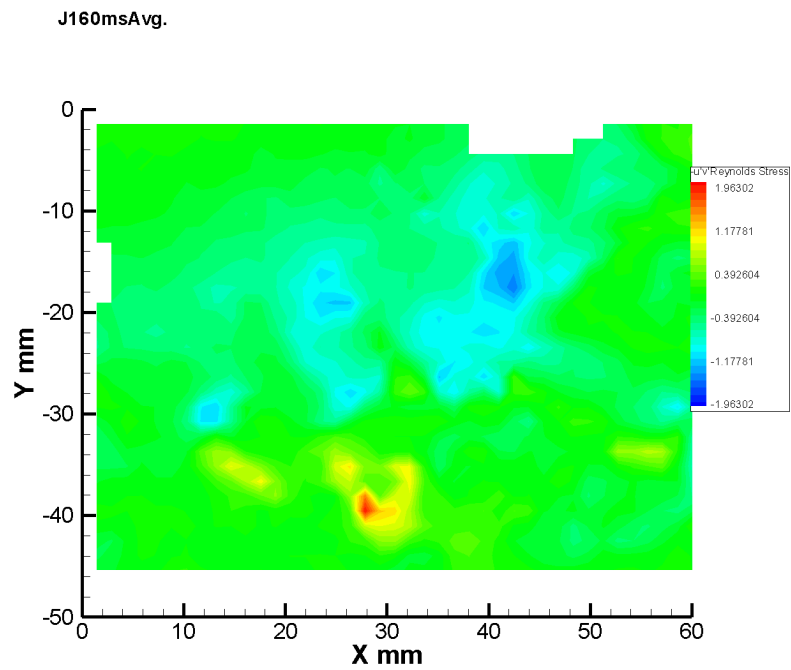
Σχήμα 6.45: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 160 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



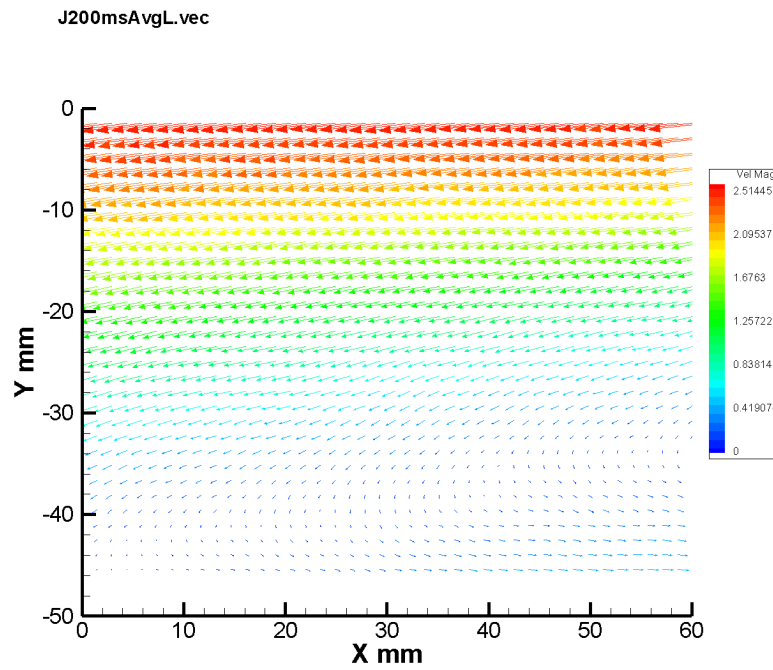
Σχήμα 6.46: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 160 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



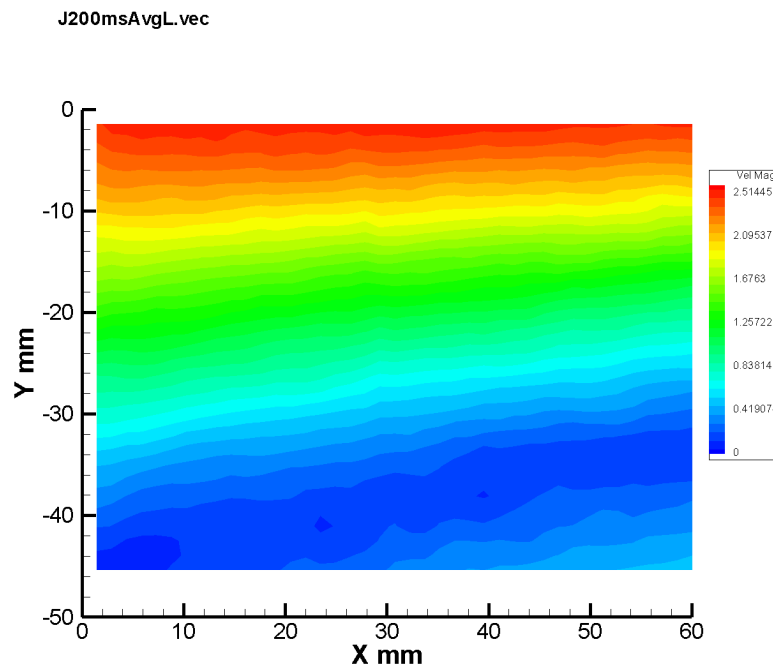
Σχήμα 6.47: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 160 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



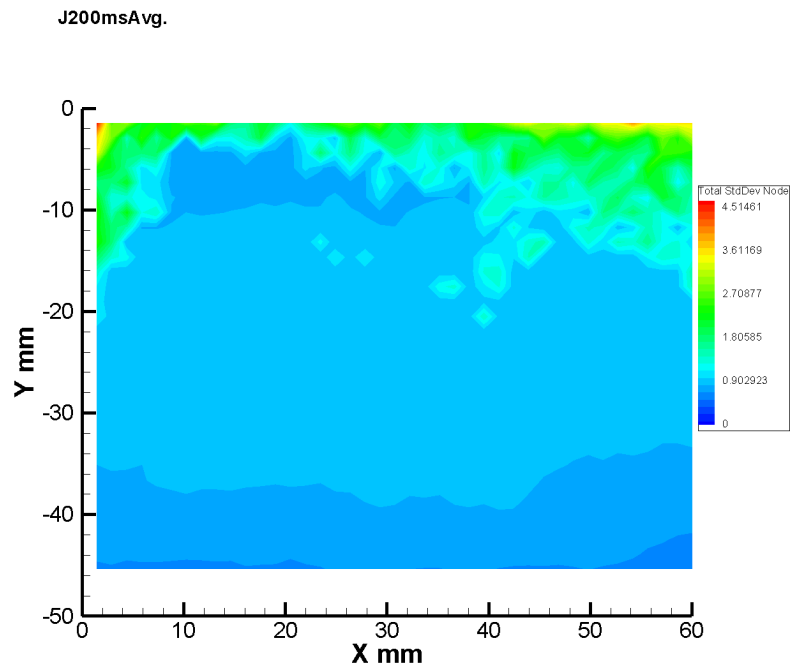
Σχήμα 6.48: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 160 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



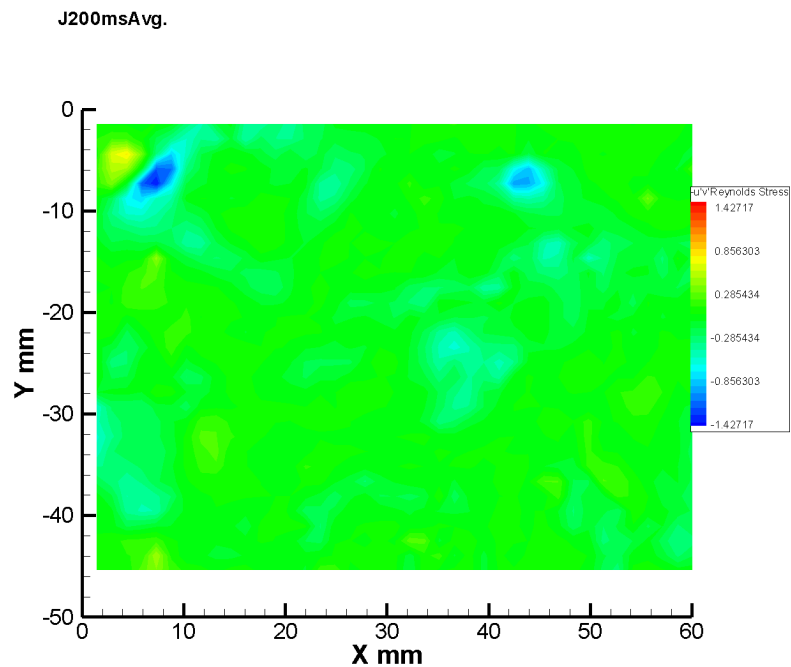
Σχήμα 6.49: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 200 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.50: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 200 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.51: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 200 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.



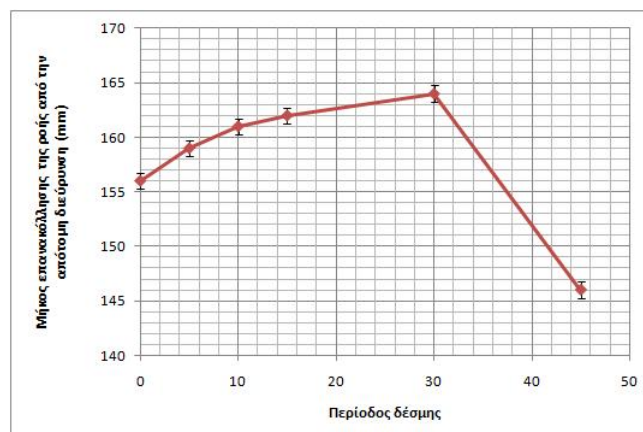
Σχήμα 6.52: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για περίοδο 200 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, ασύγχρονες μετρήσεις.

Συγχρονισμένες μετρήσεις

Στην περίπτωση των συγχρονισμένων μετρήσεων ο σκανδαλισμός του λέιζερ και της κάμερας γίνεται εξωτερικά από το πρόγραμμα που συντάχθηκε στο Scilab/Scicos. Η περίοδος της δέσμης είναι 60 ms και η διάρκειά της 20 ms. Να σημειωθεί ότι, όπως παρατηρήθηκε στο διάγραμμα 5.22, η βαλβίδα καθυστερεί να ενεργοποιηθεί κατά 10 ms από την εντολή ενεργοποίησης του προγράμματος. Αρχικά η βαλβίδα ηρεμεί και στα 40 ms δίνεται εντολή ενεργοποίησης από το πρόγραμμα. Στα 50 ms η βαλβίδα ενεργοποιείται. Οι καταγραφές γίνονται με χρονική καθυστέρηση 0,5,10,15,30,45 ms μέσα στη περίοδο της δέσμης. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας που περιέχει τη μεταβολή του σημείου επανακόλλησης συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης καταγραφής, ενώ ακολουθεί και σχετικό διάγραμμα.

Χρονική καθυστέρηση (ms)	Μήκος επανακόλλησης x_R (mm)	Μήκος επανακόλλησης/Ύψος δοκιμίου x_R/H
0	156	3.80
5	159	3.88
10	161	3.93
15	162	3.93
30	164	4.00
45	146	3.56

Πίνακας 6.2: Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης καταγραφής

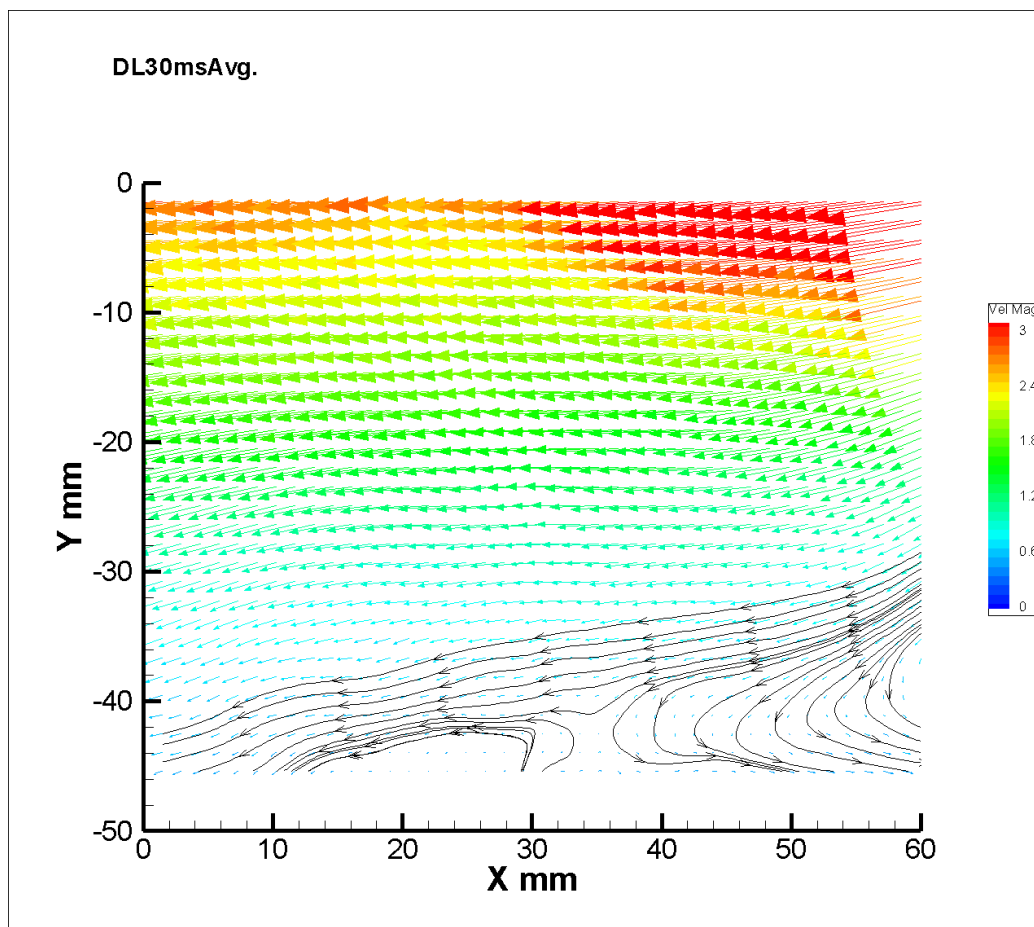


Σχήμα 6.53: Το μήκος επανακόλλησης της ροής συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης καταγραφής

Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η επανακόλληση της ροής είναι ένα πολύ ασταθές δυναμικό φαινόμενο (βλ. και την εργασία [109]) και ότι το σημείο επανακόλλησης μεταβάλλεται κατά τις διάφορες φάσεις εξέλιξης της δέσμης. Κατά τη φάση ηρεμίας (10-50 ms) έχει τάση προς αύξηση από 10-30 ms, ενώ μειώνεται για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms. Όπως αναμενόταν κατά τη φάση δράσης της δέσμης (50-10 ms) μειώνεται σε σχέση με τη φάση ηρεμίας. Το διάγραμμα δεν είναι πλήρες και πρέπει να γίνουν μελλοντικά περισσότερες μετρήσεις για τον πλήρη καθορισμό της μορφής του διαγράμματος στην περιοχή από 50-10 ms. Η περιοχή ανακυκλοφορίας μοιάζει με ένα σεντόνι το οποίο τινάζεται. Αρχικά η περιοχή χαμηλών ταχυτήτων είναι ανυψωμένη κατά y κοντά στα $3H$ του άξονα x από την απότομη διεύρυνση. Σταδιακά η ανύψωση προχωρά προς τα θετικά του άξονα x και εξασθενεί, ώστε να καταλήξει να καταλαμβάνει όλη την περιοχή του οπτικού πεδίου κατά x και να εκτείνεται $0.4H$ από τον πυθμένα.

Στην περίπτωση της καθυστέρησης καταγραφής των 30 ms υπάρχει μια δεύτερη μικρή περιοχή ανακυκλοφορίας, η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.54. Έχουν προστεθεί στον πυθμένα οριζόντιες γραμμές ροής για καλύτερη εποπτεία. Η περιοχή εκτείνεται από 10-30 mm κατά x ($3.9H$ - $4.36H$ από την απότομη διεύρυνση) και

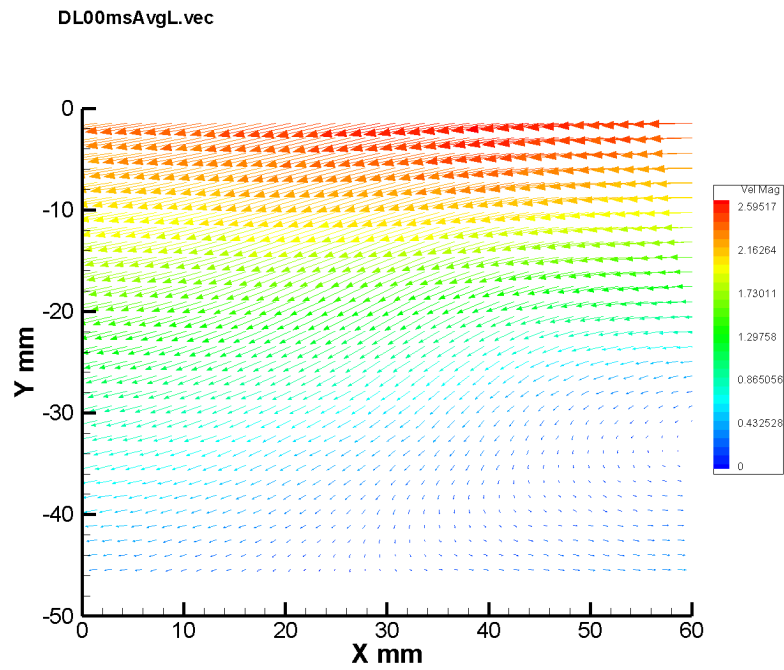
απέχει στο υψηλότερο σημείο της κατά 4 mm (0.01H) από τον πυθμένα.



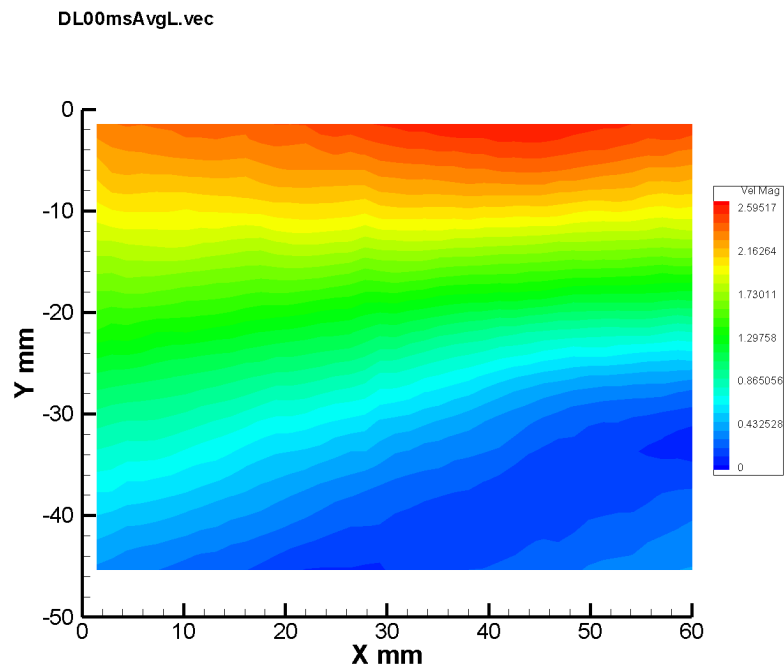
Σχήμα 6.54: Δευτερεύουσα περιοχή ανακυκλοφορίας στην περίπτωση καθυστέρησης καταγραφής 30 ms

Στα διαγράμματα της τυπικής απόκλισης της U_x συνιστώσας υπάρχει μια περιοχή ενδιάμεσων τιμών στο κέντρο των διαγραμμάτων, η οποία μεταβάλλεται με τις φάσεις της δέσμης. Η περιοχή αυτή έχει μεγάλη έκταση κατά τη λειτουργία της δέσμης, όπως στο σχήμα 6.61, ενώ συρρικνώνεται μετά την παύση της δέσμης, όπως στο σχήμα 6.69.

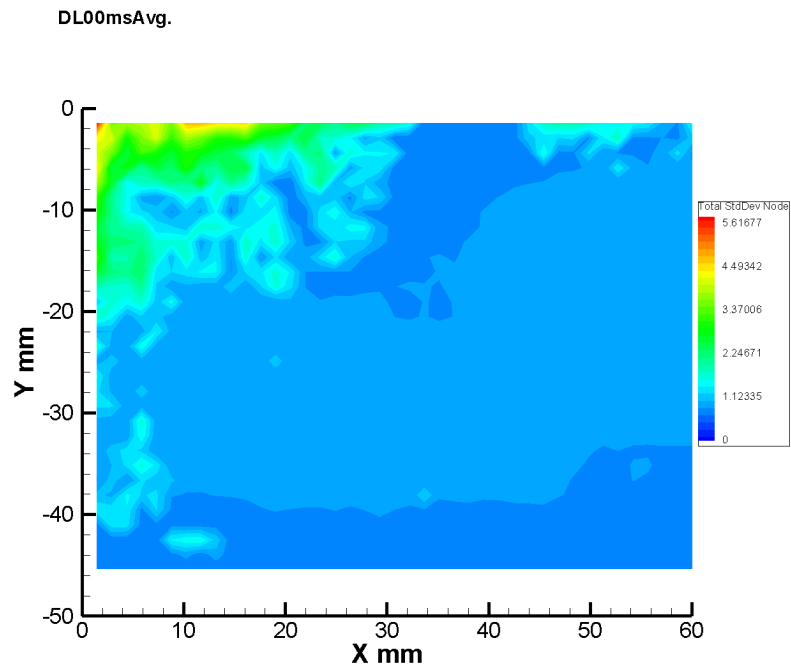
Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα παρουσιάζουν αυξημένη απόλυτη τιμή σε μεγάλες περιοχές κοντά στον πυθμένα για τις περιπτώσεις των 10 και 15 ms, όπως φαίνεται στα σχήματα 6.66 και 6.70. Αυτό οφείλεται στην μετάβαση του μήκους επανακόλλησης προς μεγαλύτερες τιμές μετά την απενεργοποίηση του ελέγχου και τη δημιουργία μεγάλων αναταράξεων. Λίγο πριν ανοίξει και πάλι η βαλβίδα η τάξη έχει αποκατασταθεί σε μεγάλο βαθμό (βλ σχήματα 6.74 και 6.78) και οι τάσεις παρουσιάζουν τιμές κοντά στο μηδέν στον πυθμένα.



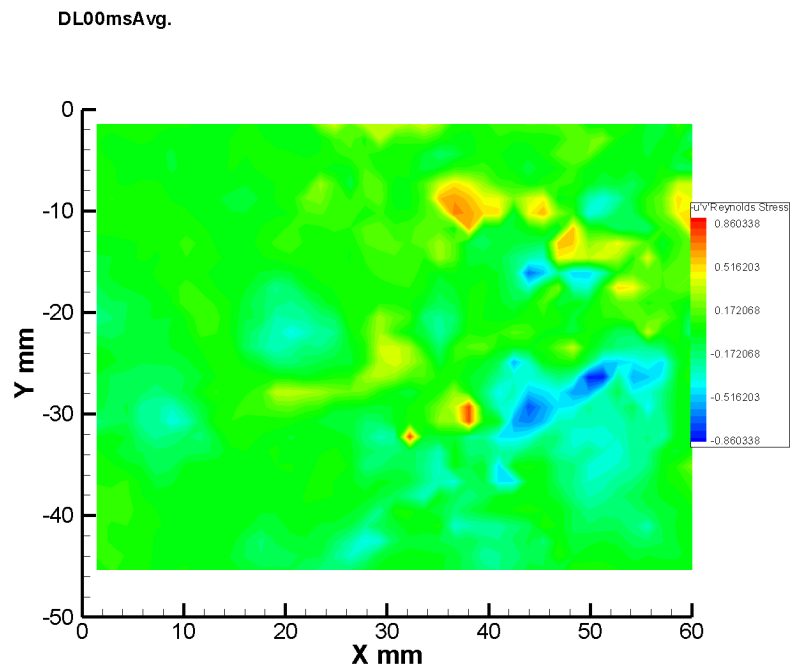
Σχήμα 6.55: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



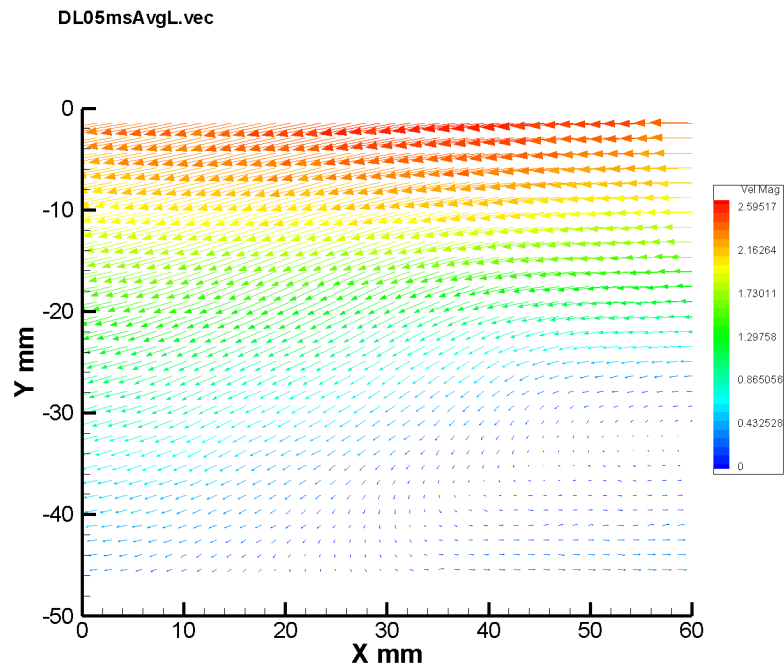
Σχήμα 6.56: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



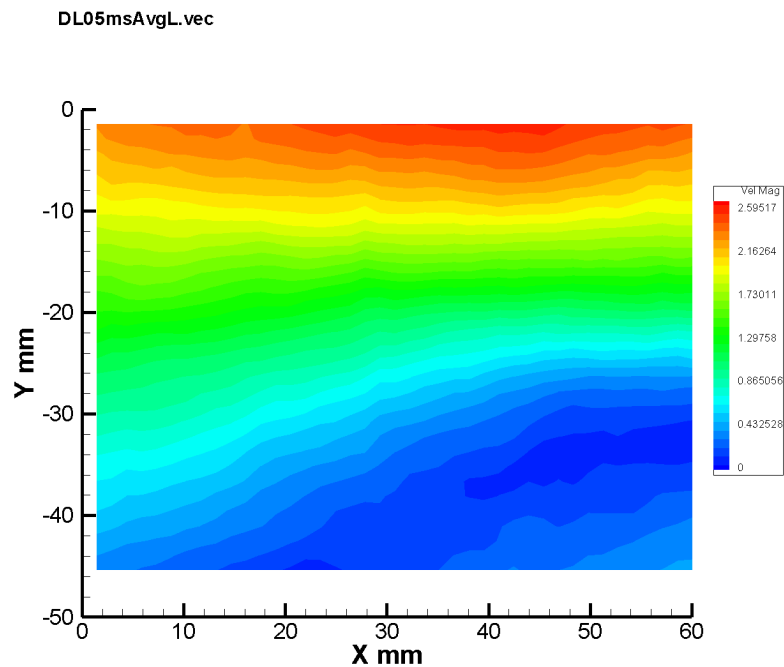
Σχήμα 6.57: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



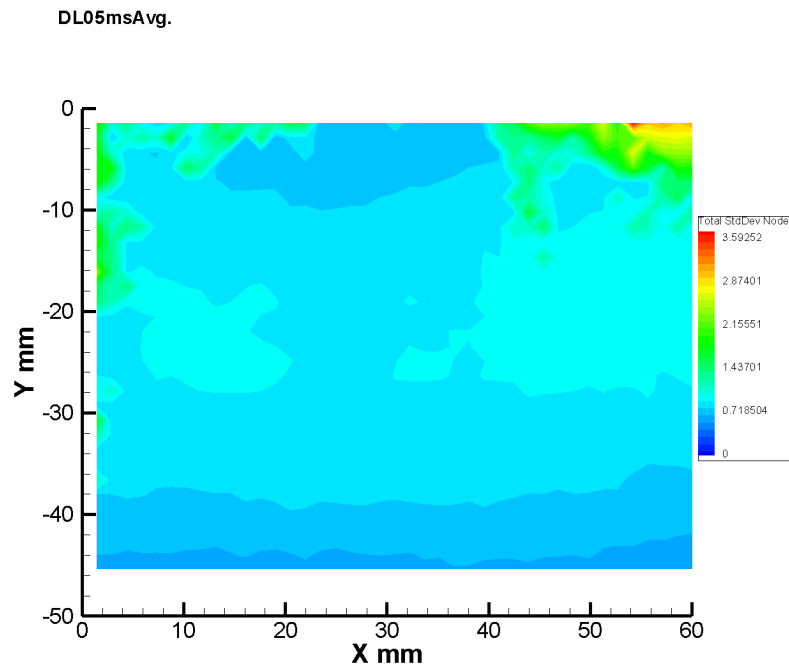
Σχήμα 6.58: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



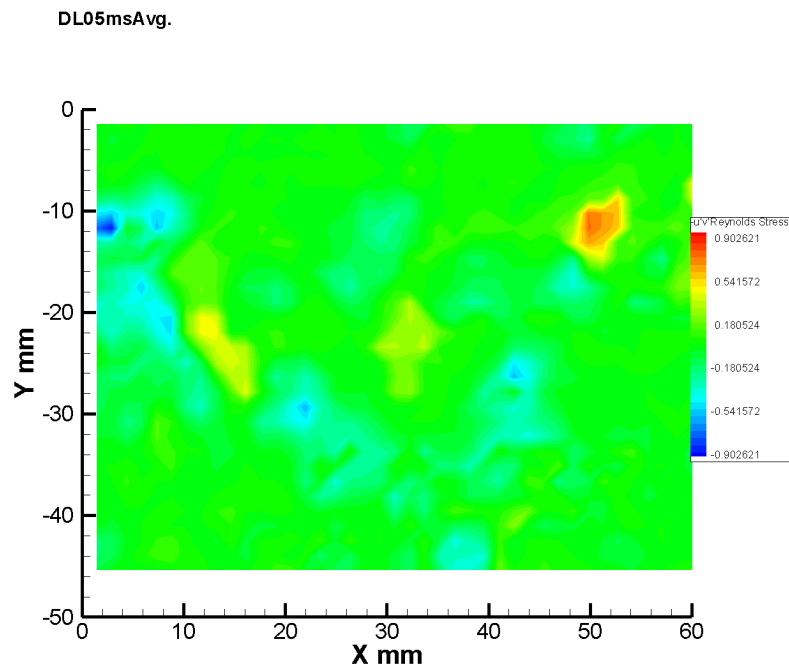
Σχήμα 6.59: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



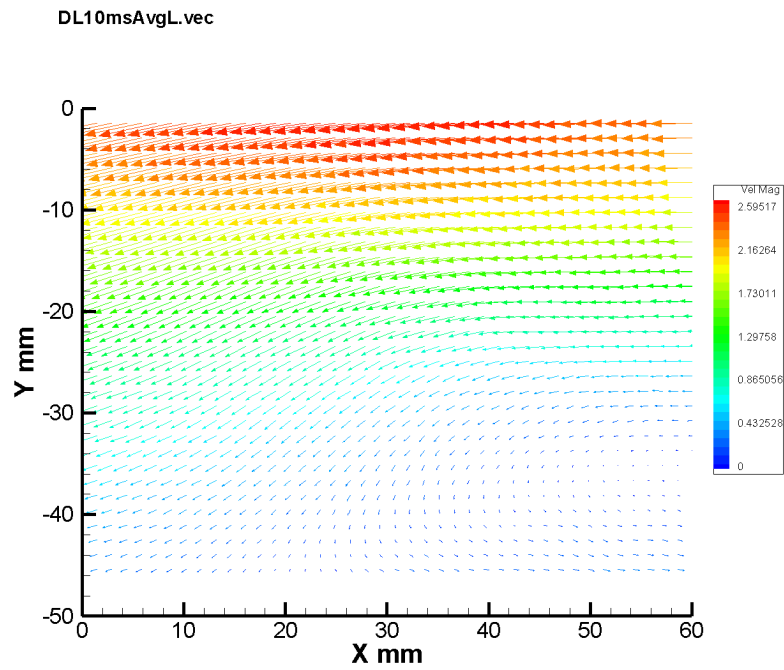
Σχήμα 6.60: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



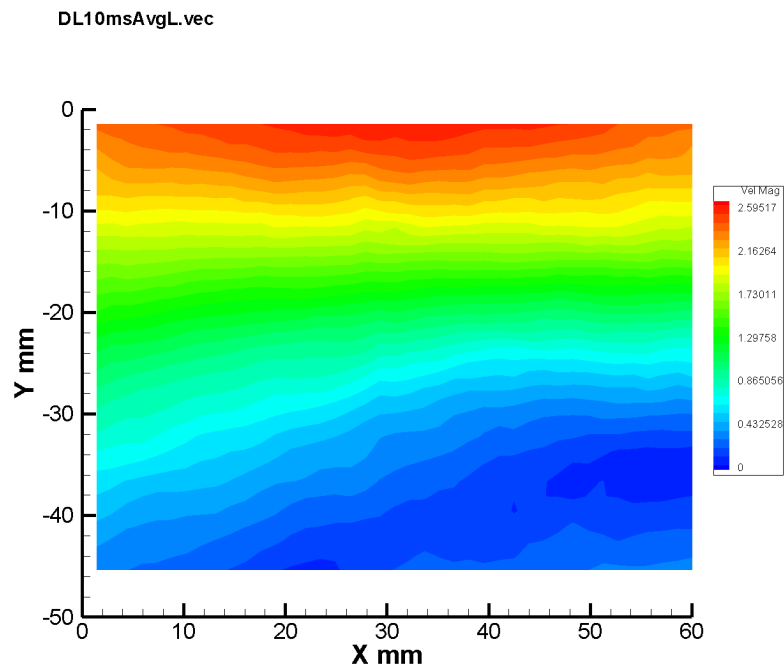
Σχήμα 6.61: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



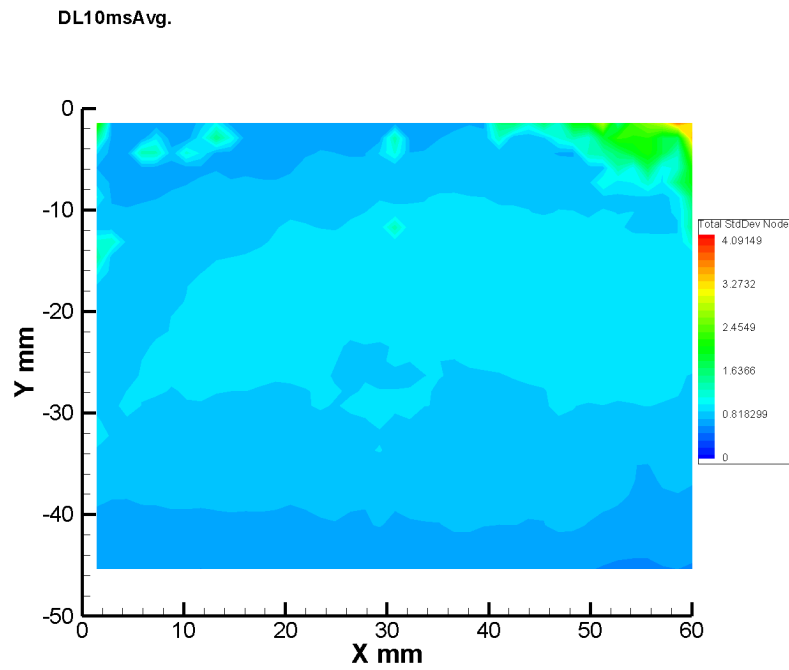
Σχήμα 6.62: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



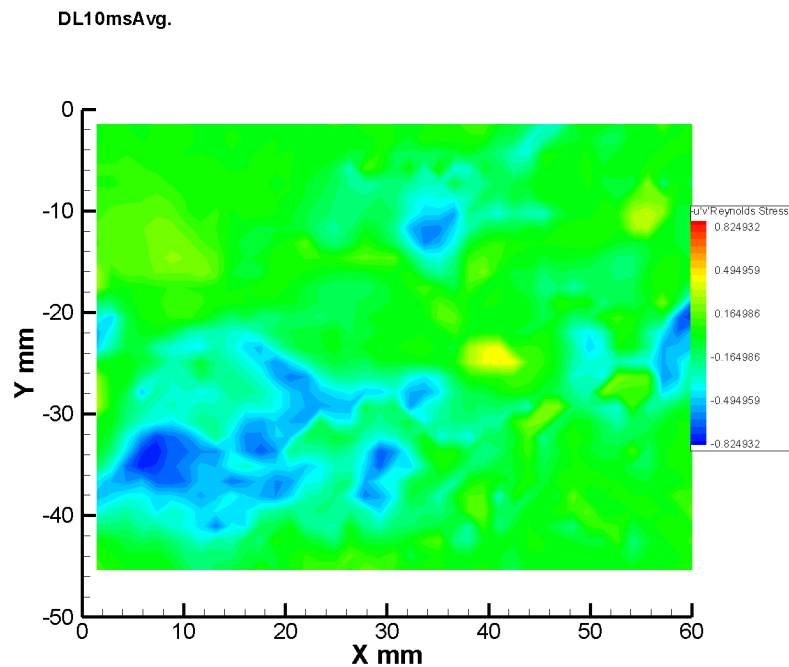
Σχήμα 6.63: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



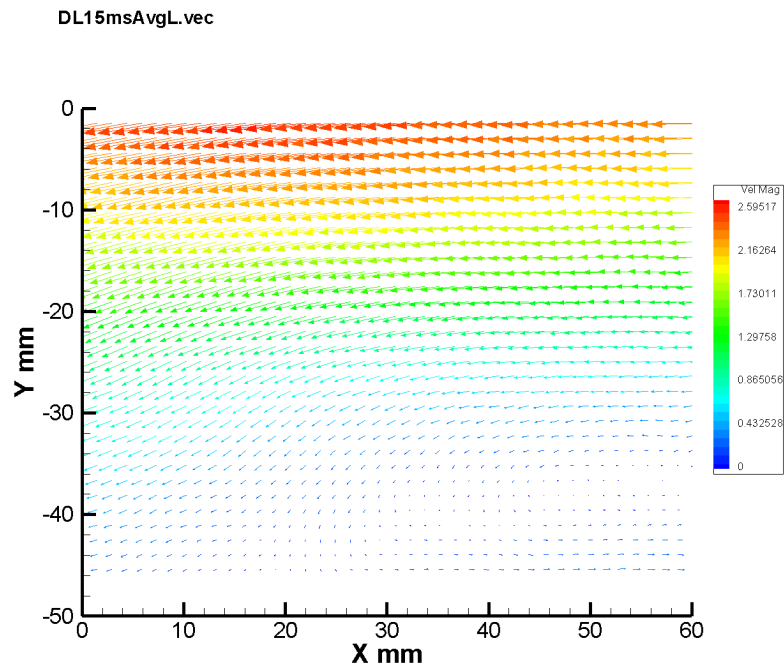
Σχήμα 6.64: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



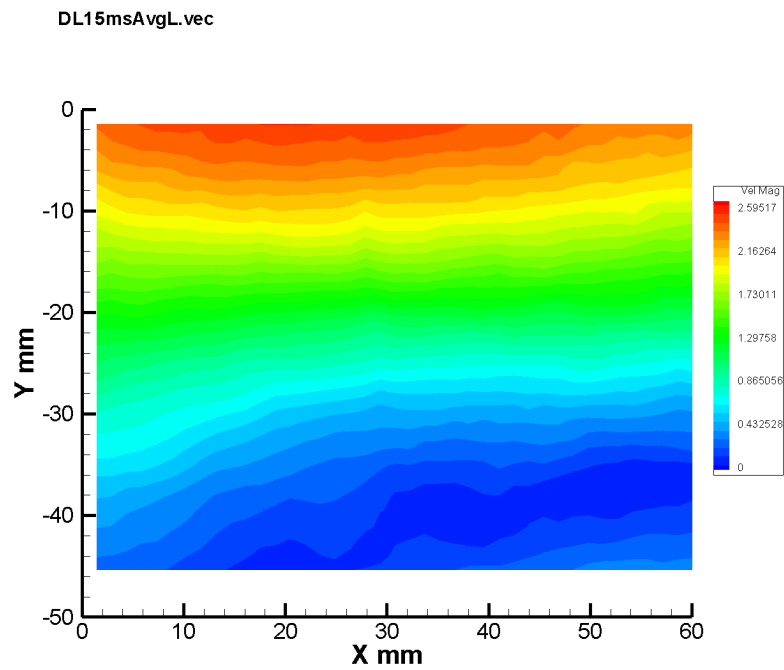
Σχήμα 6.65: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



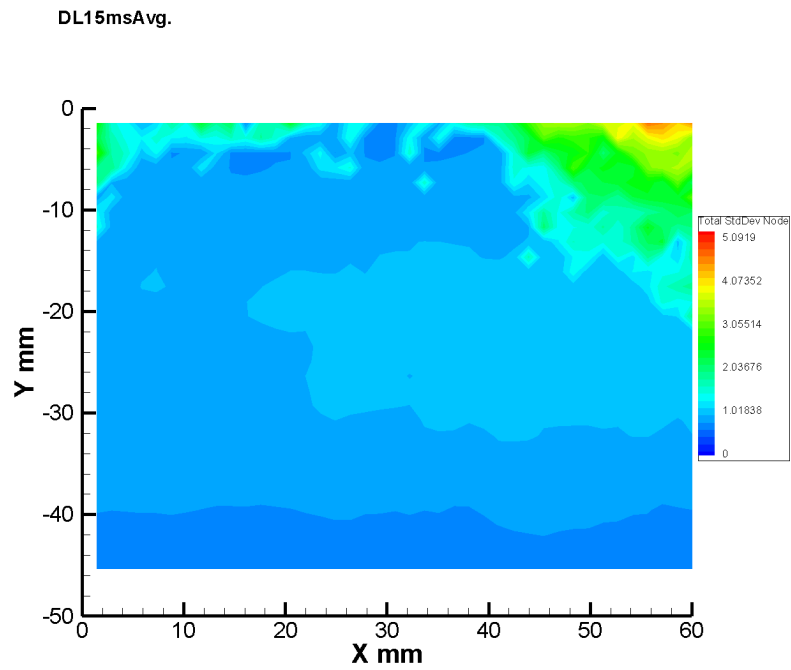
Σχήμα 6.66: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



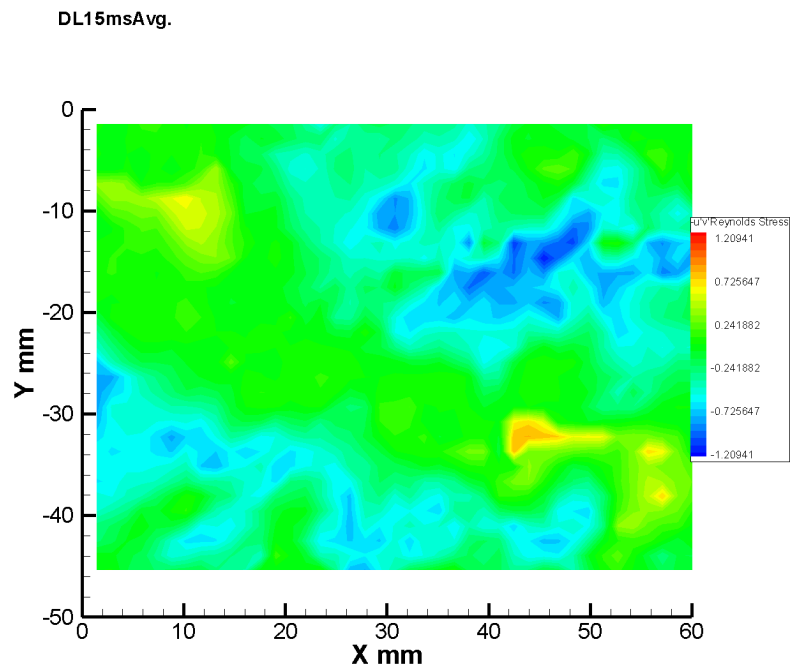
Σχήμα 6.67: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



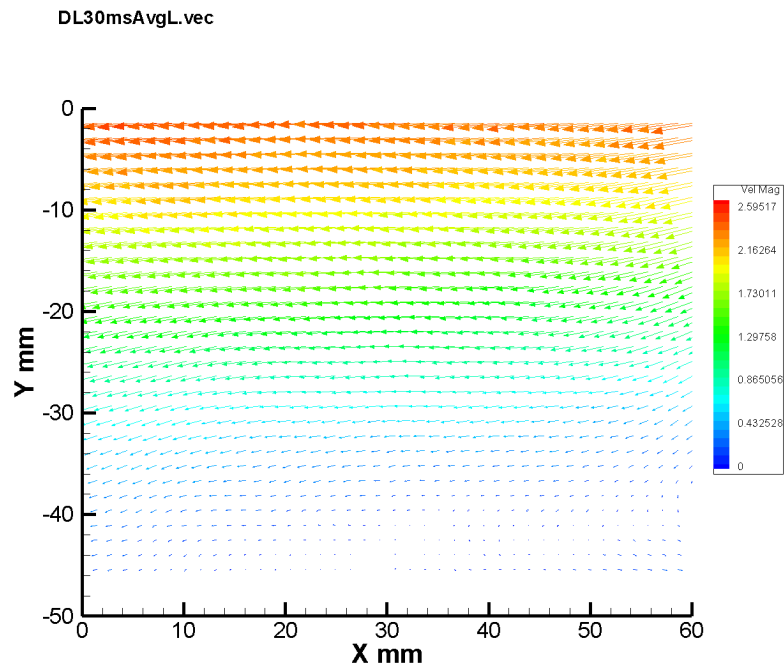
Σχήμα 6.68: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



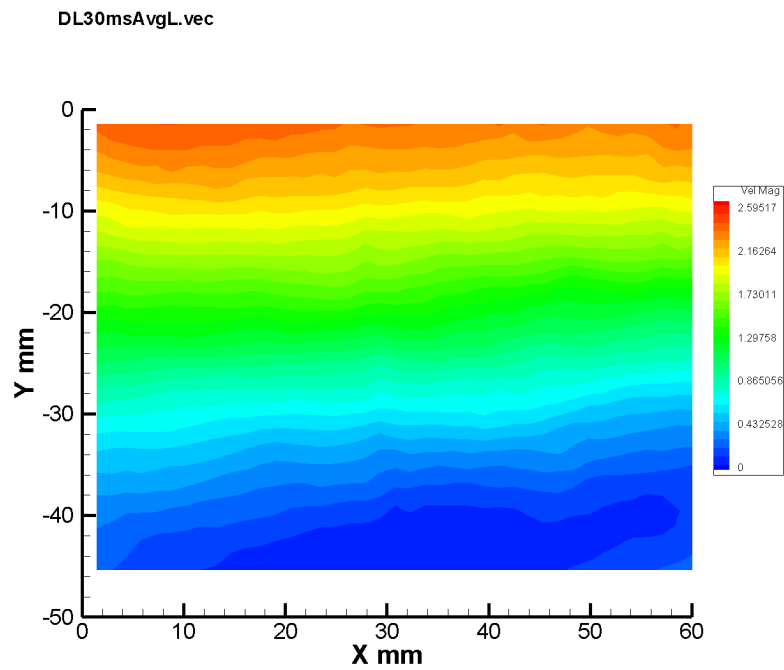
Σχήμα 6.69: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



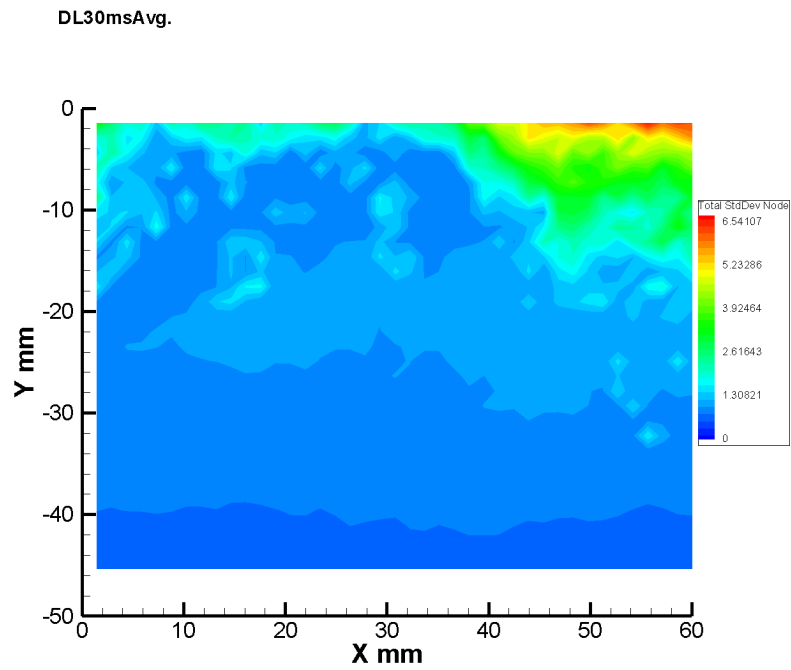
Σχήμα 6.70: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



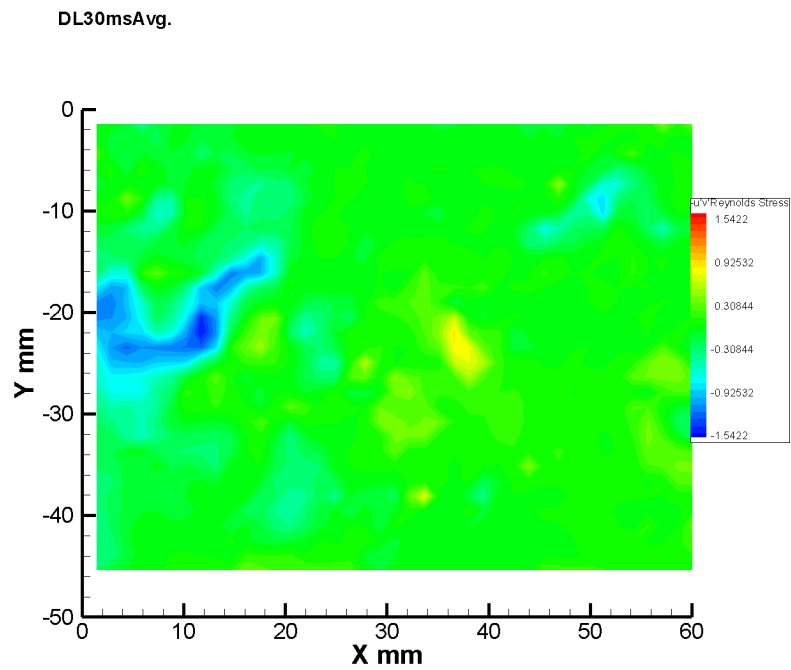
Σχήμα 6.71: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



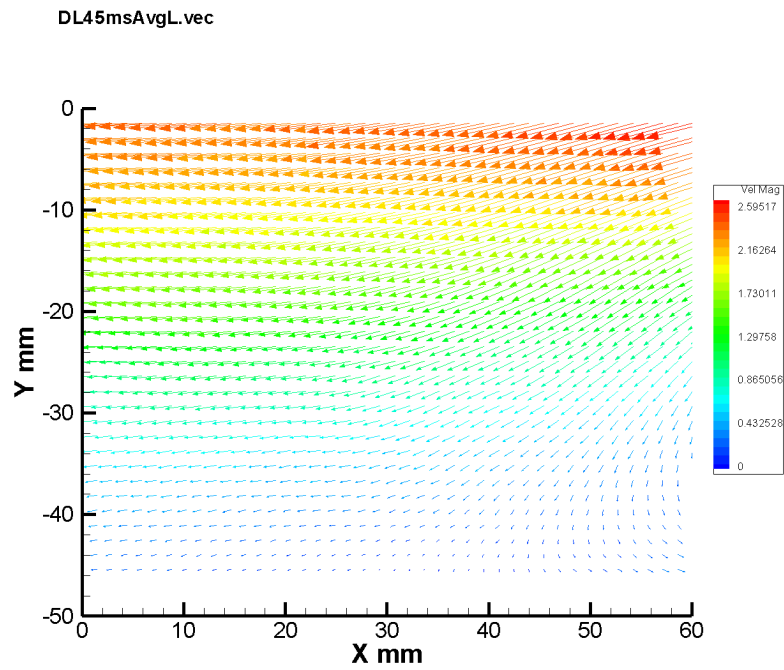
Σχήμα 6.72: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



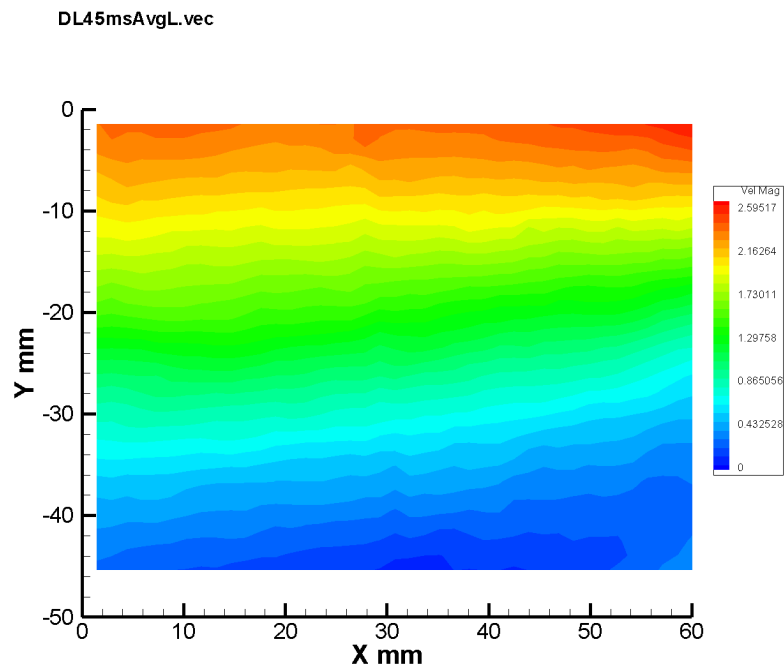
Σχήμα 6.73: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



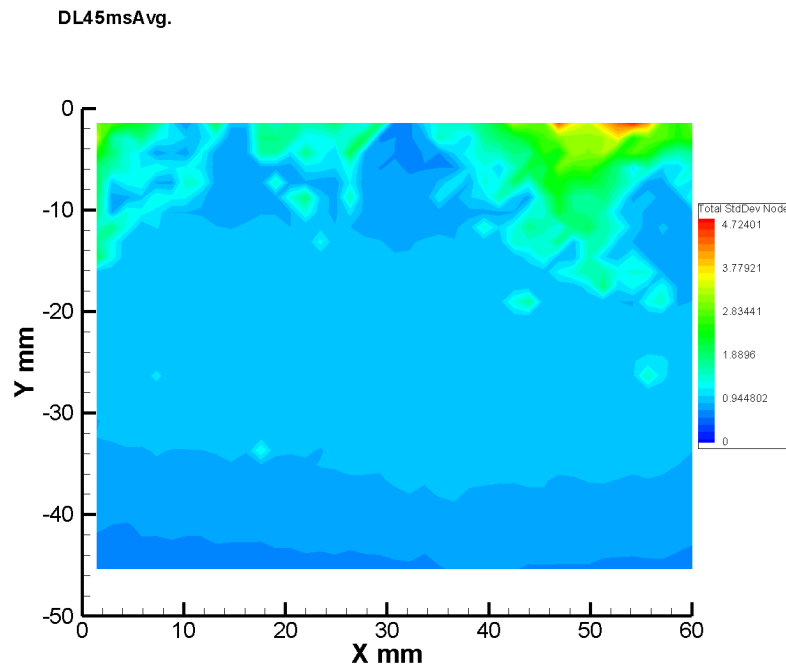
Σχήμα 6.74: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



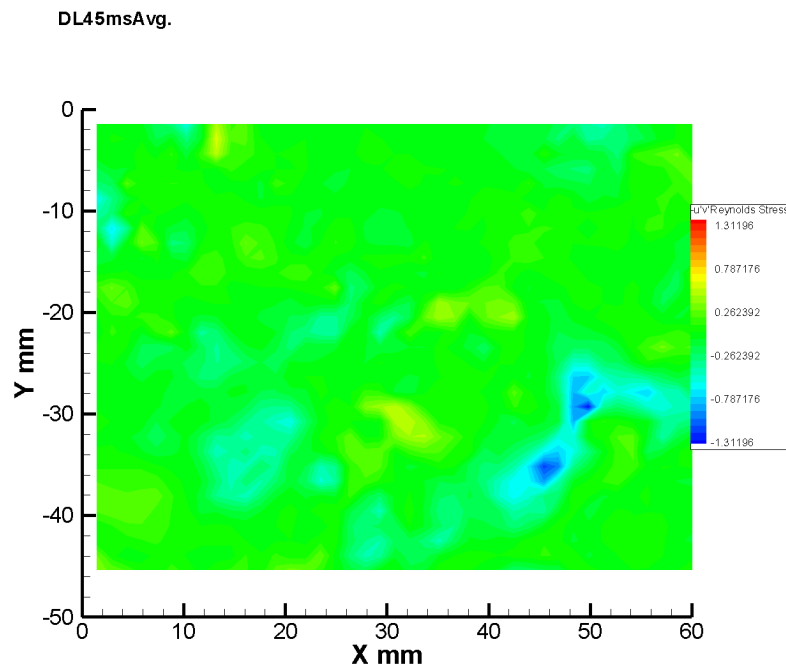
Σχήμα 6.75: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.76: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.77: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.78: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 3, συγχρονισμένες μετρήσεις.

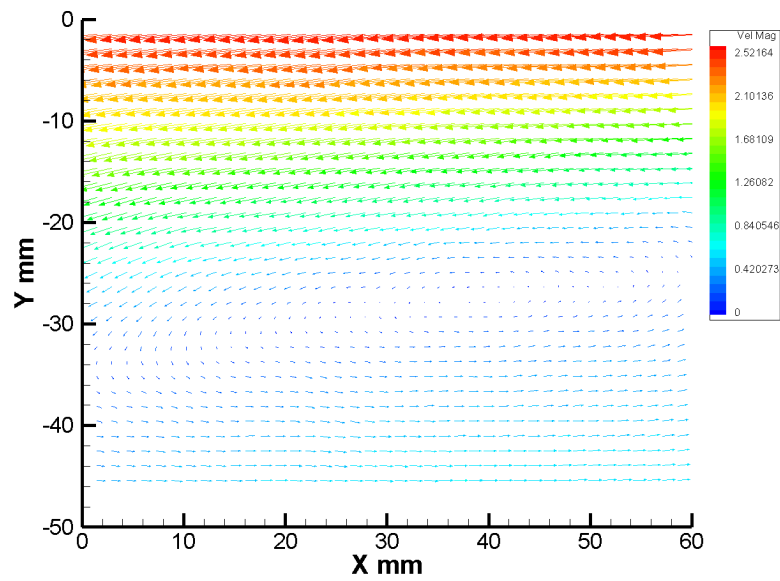
6.4.3 Μεσαίο παράθυρο λήψης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στο μεσαίο παράθυρο λήψης. Η περίοδος της δέσμης είναι 60 ms και διάρκειά της είναι 20 ms, για τους λόγους που εξηγήθηκαν προωτέρα.

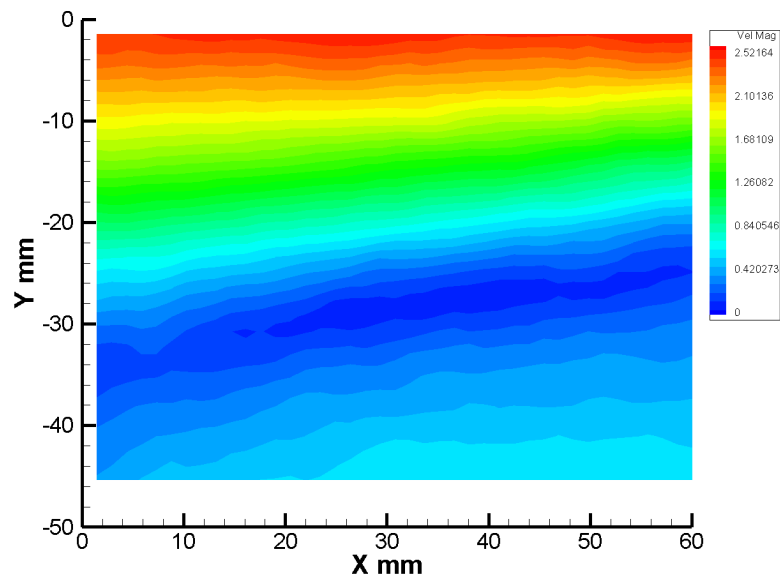
Η ροή είναι χωρισμένη σε τρεις χαρακτηριστικές περιοχές, μια που ακολουθεί τη φορά του ελεύθερου ρεύματος και εκτείνεται από 0 έως -10 mm κατά y (36 mm ή 0.9H περίπου από το κάτω τοίχωμα) και έχει ταχύτητες κοντά σε αυτές του ελεύθερου ρεύματος, μια περιοχή από -10 έως -20 mm (26 mm ή 0.63H από το κάτω τοίχωμα), όπου η ροή αρχίζει να επιβραδύνεται σταδιακά και τέλος μια περιοχή από κει και κάτω (ύψους 0.70H περίπου), όπου υπάρχει μια τεράστια περιοχή ανακυκλοφορίας (recirculation region) με ανθωρολογιακή φορά (port). Η περιοχή εκτείνεται προς τις δύο κατευθύνσεις εκτός του οπτικού πεδίου, προς το δοκίμιο απότομης διεύρυνση και προς το παράθυρο επανακόλλησης, όπου και εξαφανίζεται στο σημείο επανακόλλησης στα 4H από την απότομη διεύρυνση περίπου. Επομένως δεν μπορεί να βγει συμπέρασμα για το πλήρες μέγεθός της, προτού μελετηθεί το αντίστοιχο διάγραμμα για την περιοχή της απότομης διεύρυνσης. Η δομή αυτή είναι χαρακτηριστική της ροής σε απότομη διεύρυνση και ενδεικτικά να αναφερθεί ότι στην [116] η φυσαλίδα αυτή εκτείνεται μέχρι $y/H = 0.6$ περίπου στο κέντρο, ένα αποτέλεσμα πολύ κοντά σε αυτό της παρούσας εργασίας.

Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της U_x συνιστώσας παρατηρείται μια σταδιακή μείωση τιμών από υψηλές στην περιοχή όπου το ελεύθερο ρεύμα και η φυσαλίδα αλληλεπιδρούν, σε χαμηλότερες προς τον πυθμένα της περιοχής δοκιμών.

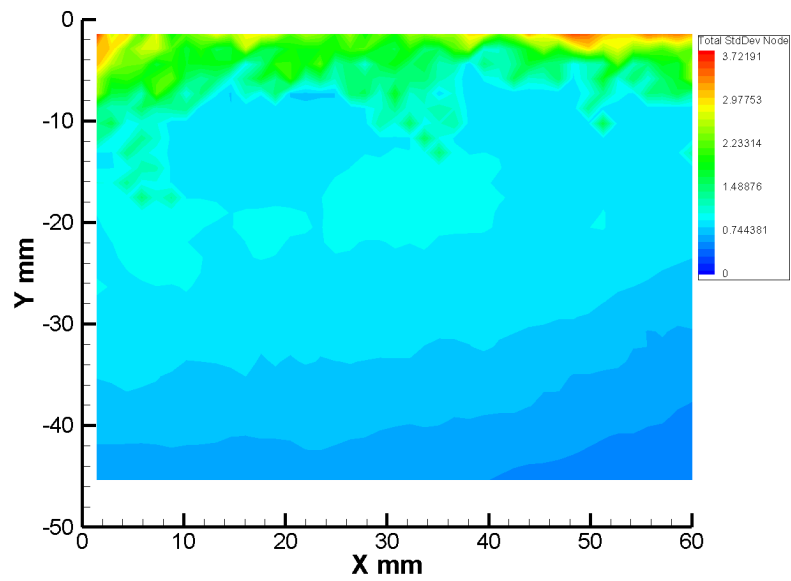
Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα παρουσιάζουν μερικές σποραδικές διακυμάνσεις γύρω από το 0, με υψηλές περιοχές απολύτων τιμών να εμφανίζονται κοντά στην περιοχή επιβράδυνσης γύρω από τα 2.2H κατά x από την απότομη διεύρυνση και στα χαμηλότερα στρώματα της ροής.



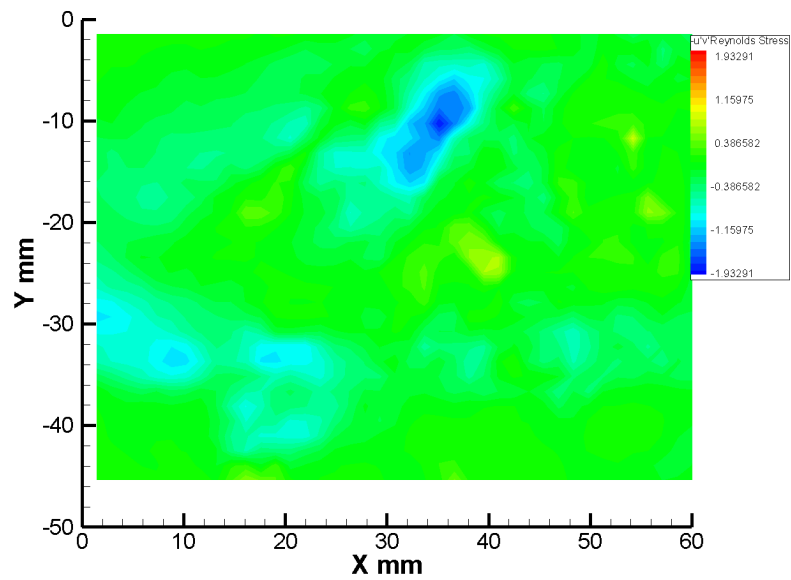
Σχήμα 6.79: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 2, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.80: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 2, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.81: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 2, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.82: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 2, ασύγχρονες μετρήσεις.

6.4.4 Παράθυρο απότομης διεύρυνσης

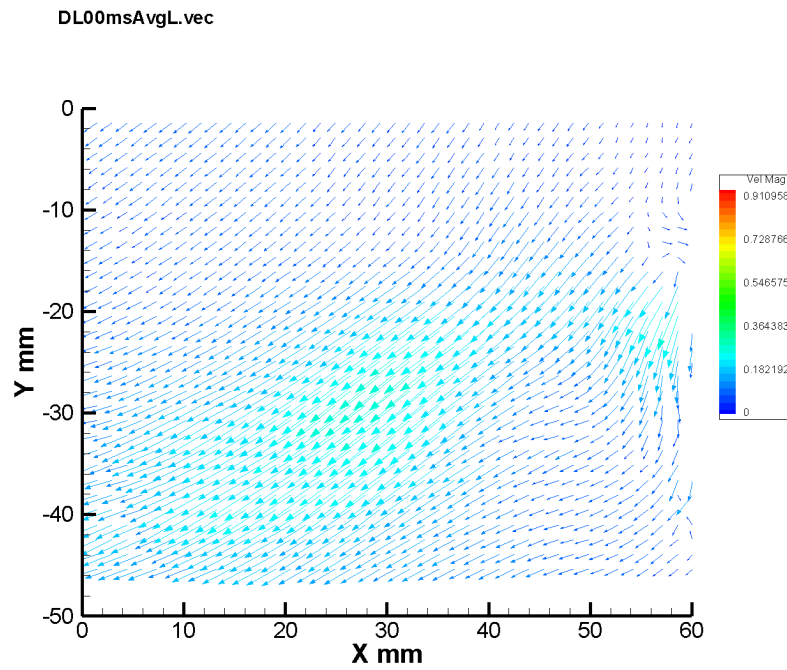
Συγχρονισμένες μετρήσεις χωρίς ελεύθερο ρεύμα

Σε αυτή τη σειρά μετρήσεων απενεργοποιείται η αεροδυναμική σήραγγα και αέρας παρέχεται μόνο στην ηλεκτροβαλβίδα αέρος. Σκοπός είναι η μελέτη της εξέλιξης της δέσμης στη διάρκεια μια περιόδου. Ο σκανδαλισμός είναι και σε αυτή τη περίπτωση εξωτερικός. Για την περίοδο και τη διάρκεια της δέσμης ισχύει ότι και προηγουμένως και η χρονική καθυστέρηση των καταγραφών είναι 0,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55 ms.

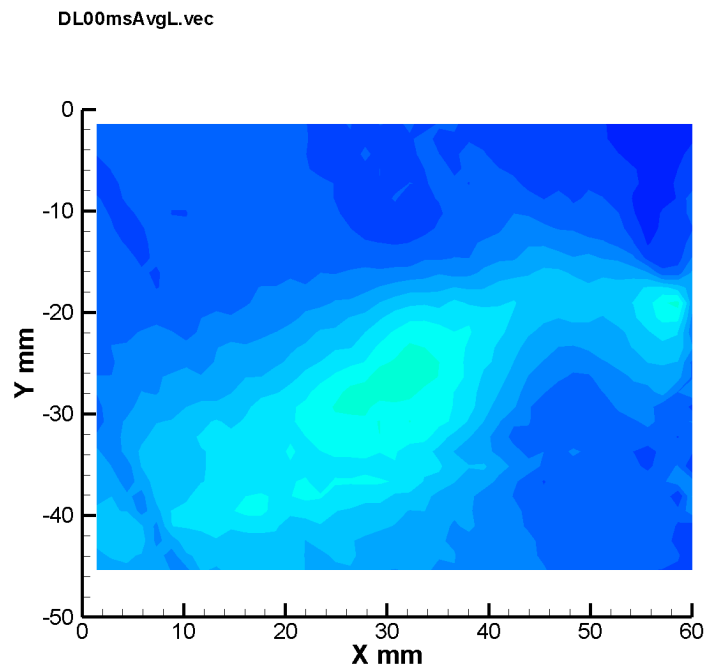
Οι ταχύτητες της δέσμης είναι (βλ. σχήμα 6.95 της τάξης των $U_{jet} = 0.2U_{\infty}$). Στα διαγράμματα υπάρχει μια περιοχή στην οποία η ροή φαίνεται να είναι διαμορφωμένη και ανεπηρέαστη από την εξέλιξη της δέσμης. Η περιοχή αυτή βρίσκεται γύρω από τα 30 mm (0.75H από την απότομη διεύρυνση) κατά x και η έκτασή της μεταβάλλεται μέσα στη περίοδο. Η μεγαλύτερη έκταση παρατηρείται κατά τη λειτουργία της βαλβίδας (0 ms καθυστέρηση, βλ. σχ. 6.84), ενώ η μικρότερη κάπου στα 10 ms καθυστέρηση όταν η βαλβίδα απενεργοποιείται, βλ. σχ.6.92. Η μέση ταχύτητα της ροής εκεί κυμαίνεται από 0.2-0.3 m/s ($0.06 - 0.1U_{\infty}$) περίπου και η περιοχή είναι στραμμένη κατά -45° από τον οριζόντιο άξονα.

Στα διαγράμματα της τυπικής απόκλισης της U_x συνιστώσας υπάρχει μια περιοχή κοντά στην απότομη διεύρυνση (0-30 mm ή 0-0.75H) κατά x , όπου υπάρχουν αυξημένες αναταράξεις. Η έκταση των αναταράξεων αυτών ταλαντώνεται με το χρόνο. Από 0-10 ms εξασθενεί, από 15 έως 35 ms αυξάνεται για να γίνει μέγιστη στα 30-35 ms και μετά αρχίζει να εξασθενεί και πάλι. Κοντά στα -24 mm κατά y ή περίπου 0,5 H από τον πυθμένα, παρουσιάζονται πάντα οι μεγαλύτερες τιμές αναταράξεων.

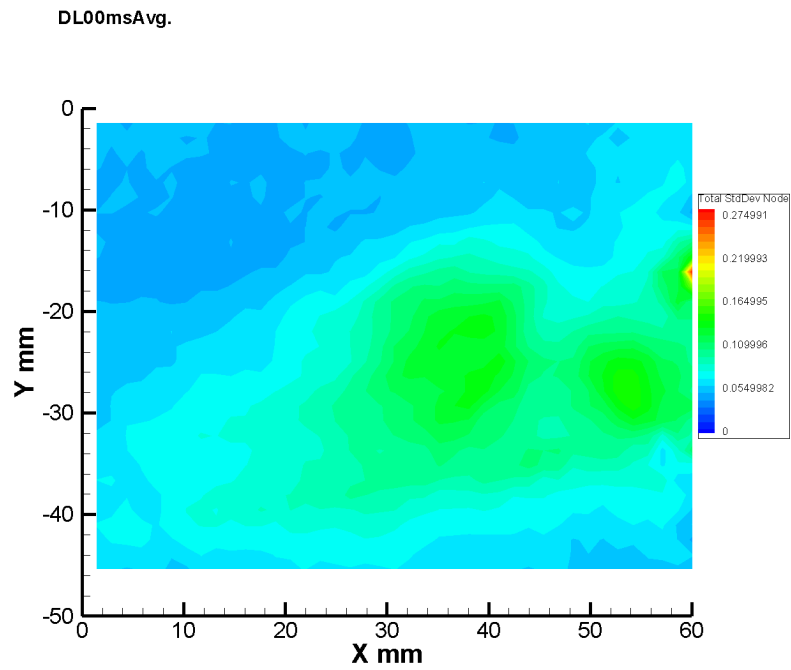
Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα παρουσιάζουν τιμές γύρω από 0 στα περισσότερα διάγραμμα. Εμφανίζονται ωστόσο κάποιες σποραδικές εξαιρέσεις όπου υπάρχουν σε ορισμένες περιοχές ορισμένες μεγαλύτερες απόλυτες τιμές. Παράδειγμα είναι το διάγραμμα της περίπτωσης καθυστέρησης 20 ms, βλ. σχ. 6.102.



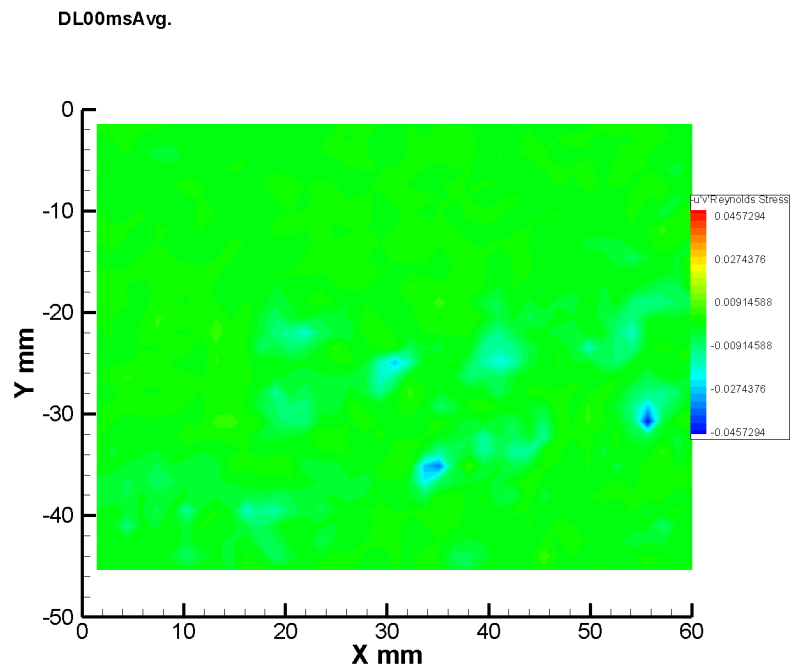
Σχήμα 6.83: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



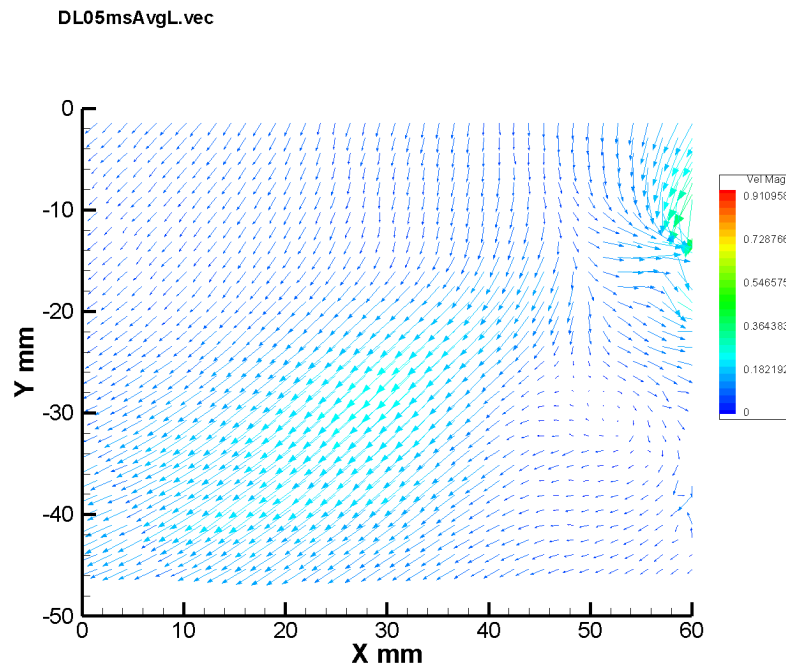
Σχήμα 6.84: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



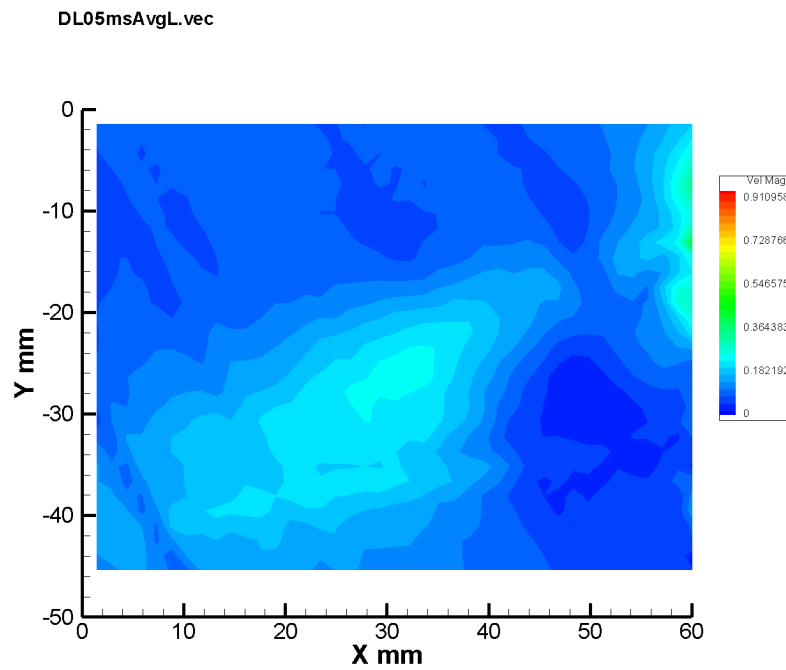
Σχήμα 6.85: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



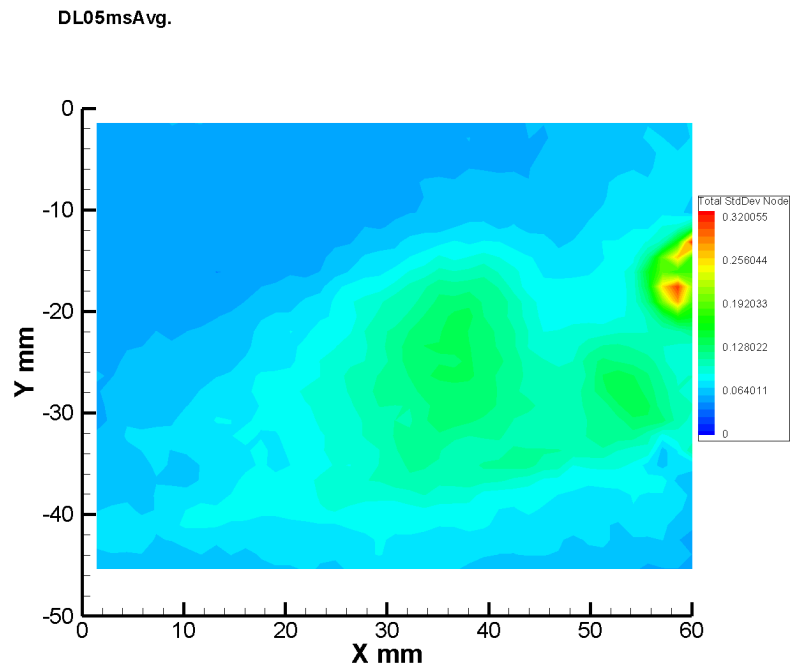
Σχήμα 6.86: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



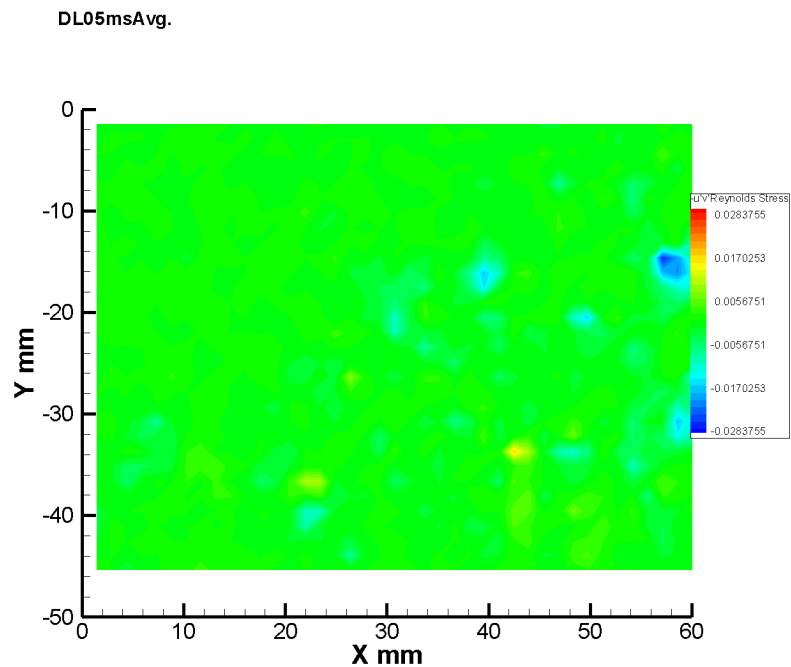
Σχήμα 6.87: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



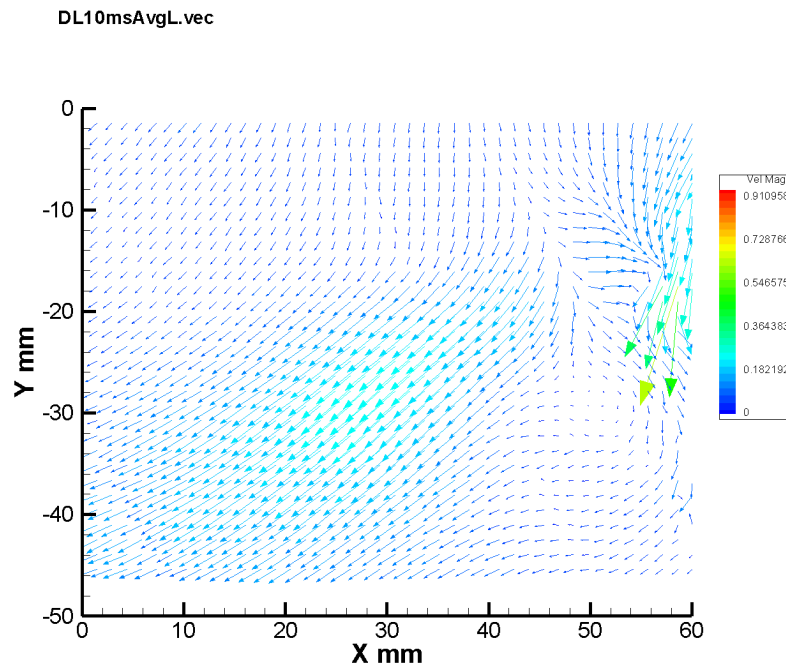
Σχήμα 6.88: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



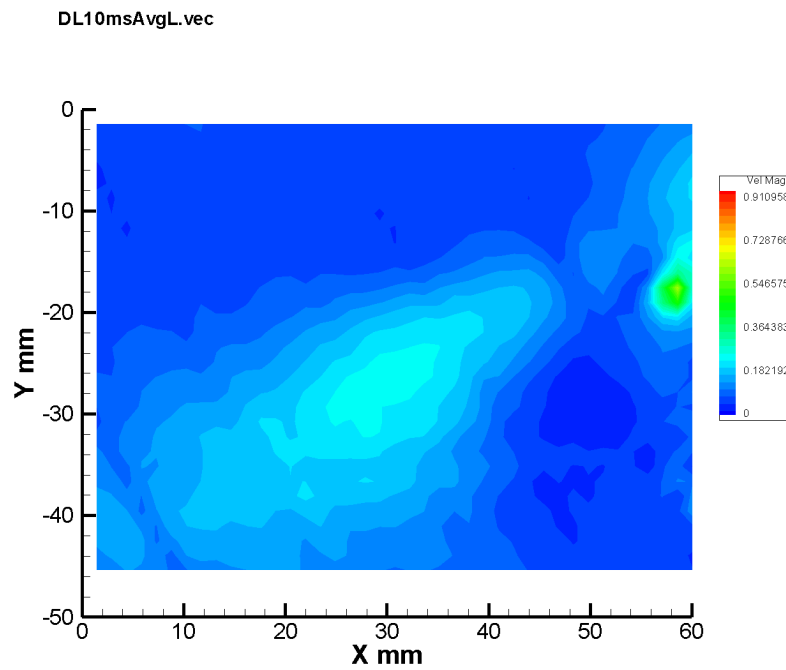
Σχήμα 6.89: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



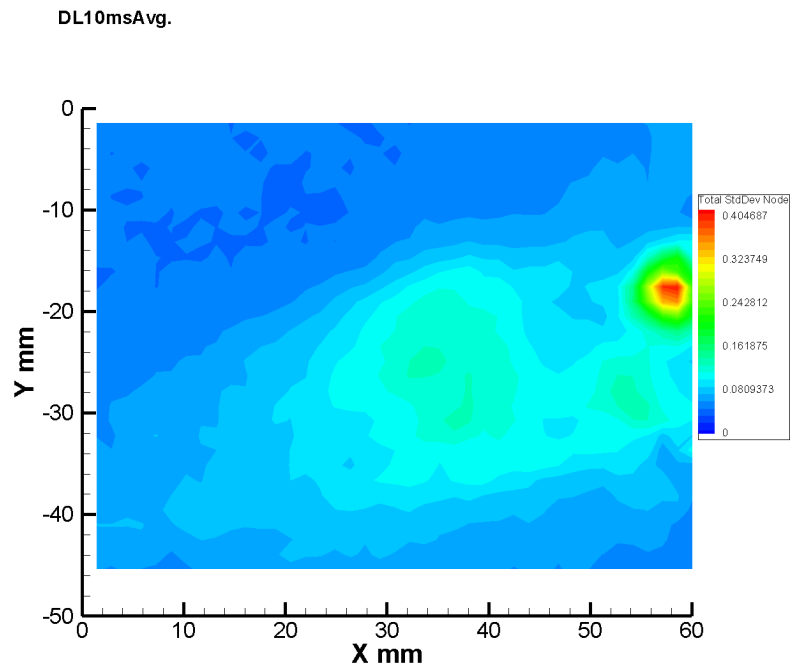
Σχήμα 6.90: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 5 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



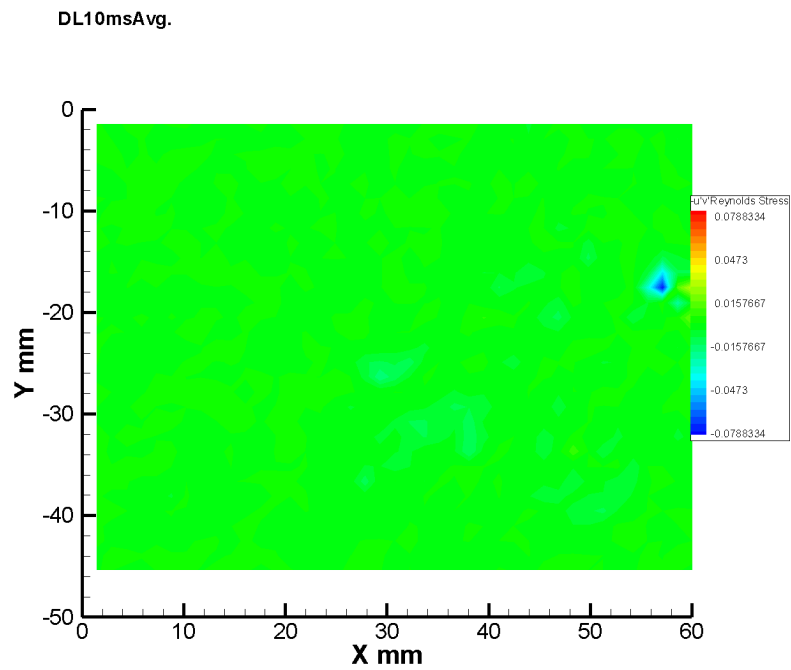
Σχήμα 6.91: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



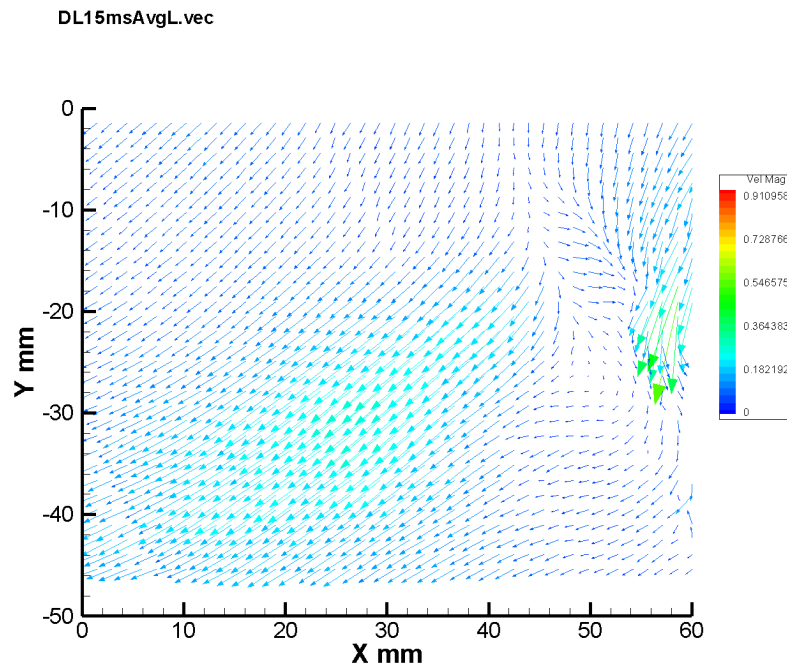
Σχήμα 6.92: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



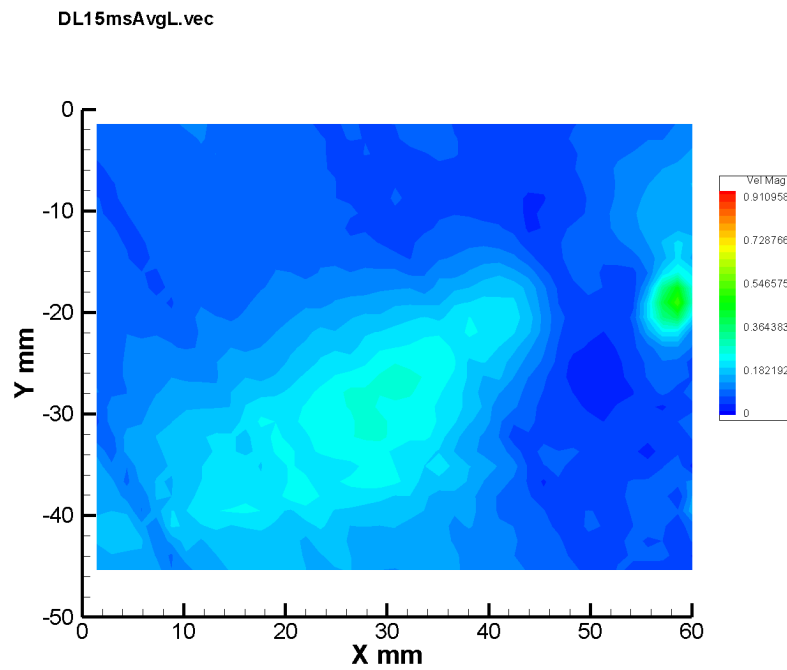
Σχήμα 6.93: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



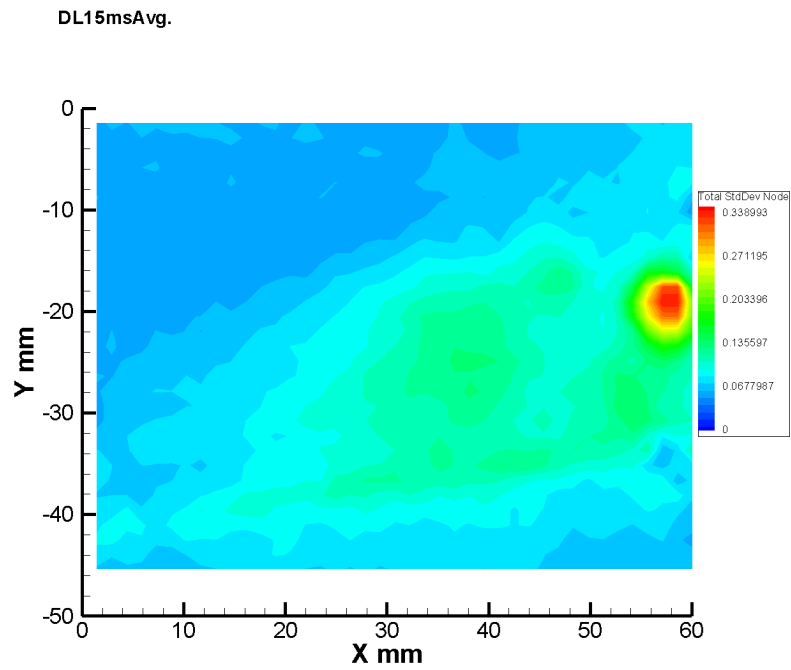
Σχήμα 6.94: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



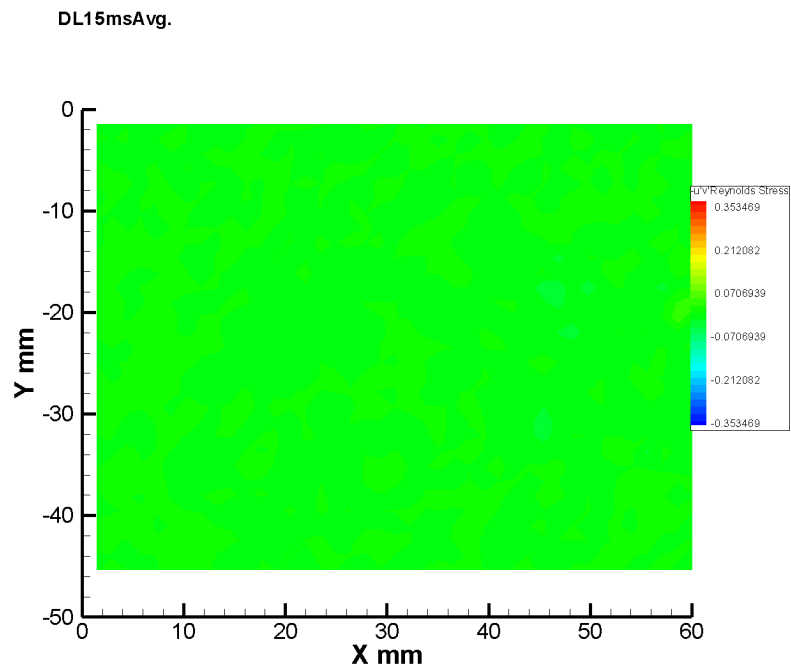
Σχήμα 6.95: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



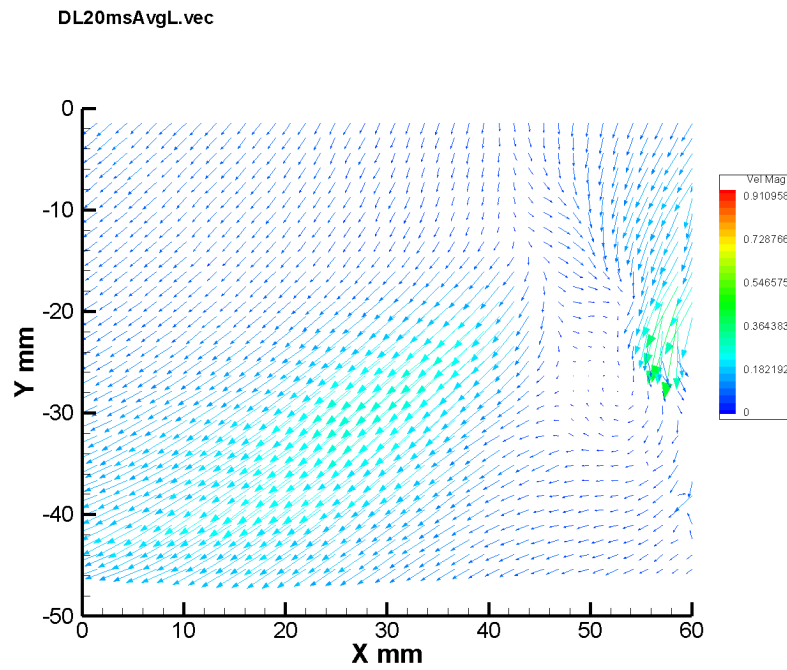
Σχήμα 6.96: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



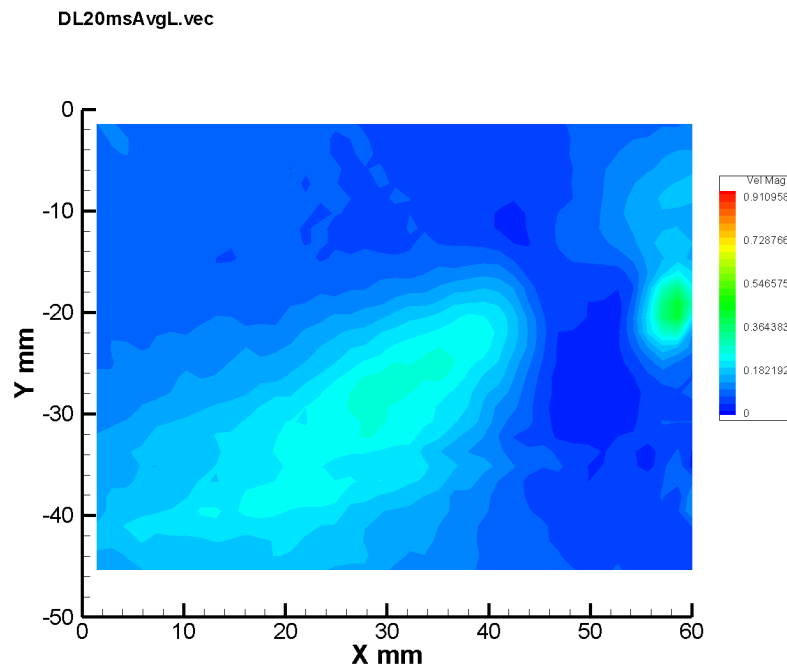
Σχήμα 6.97: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



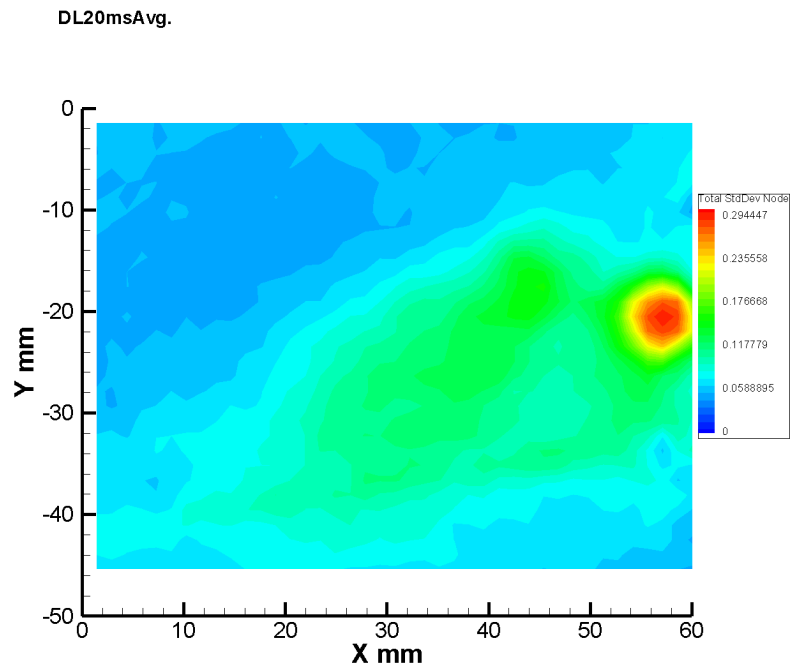
Σχήμα 6.98: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 15 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



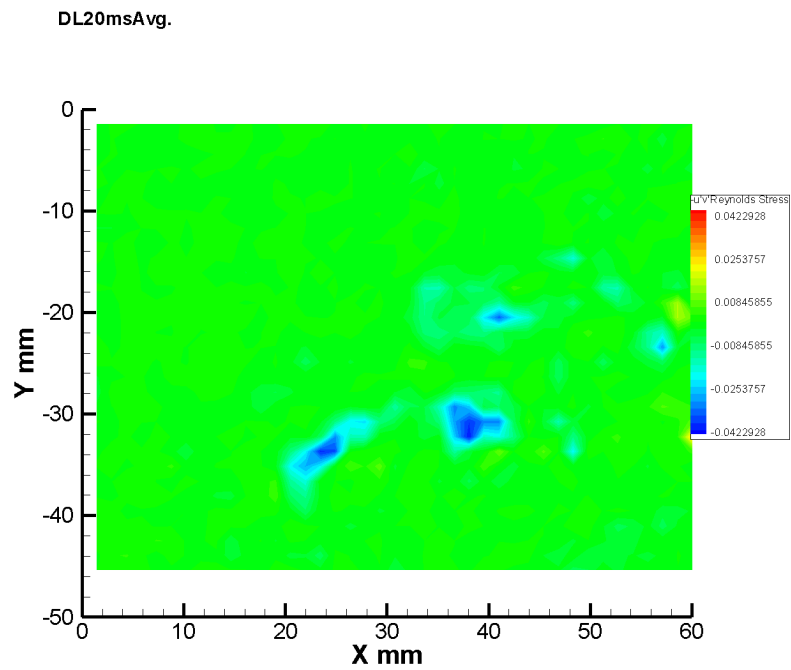
Σχήμα 6.99: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



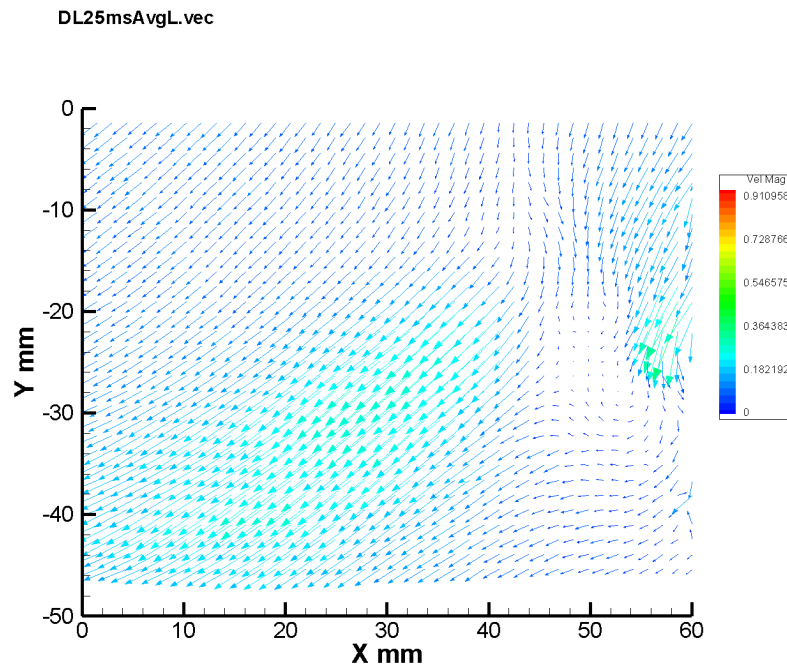
Σχήμα 6.100: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



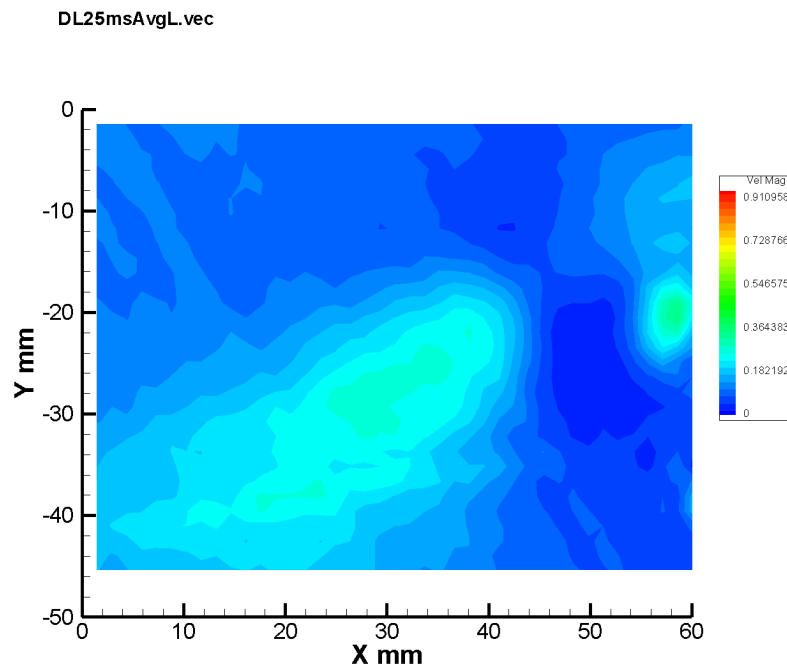
Σχήμα 6.101: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



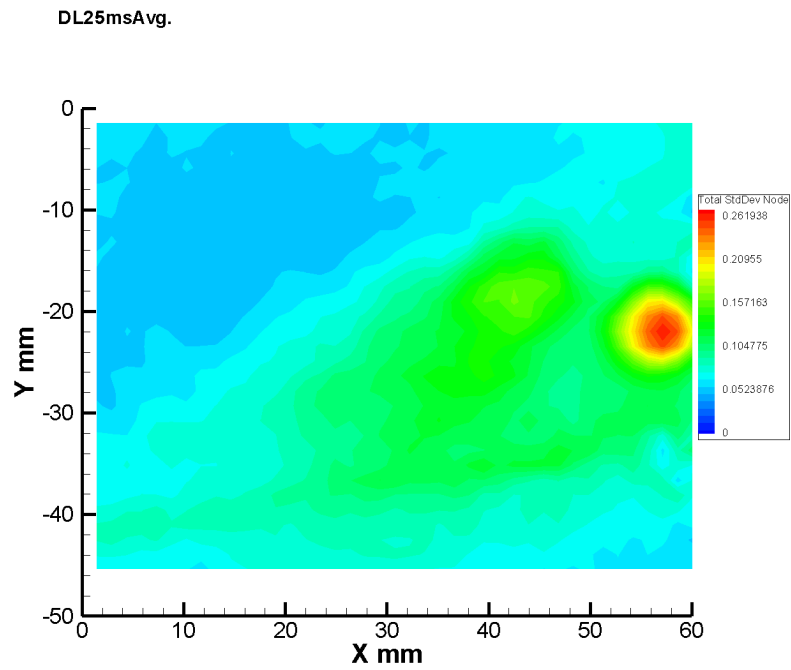
Σχήμα 6.102: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



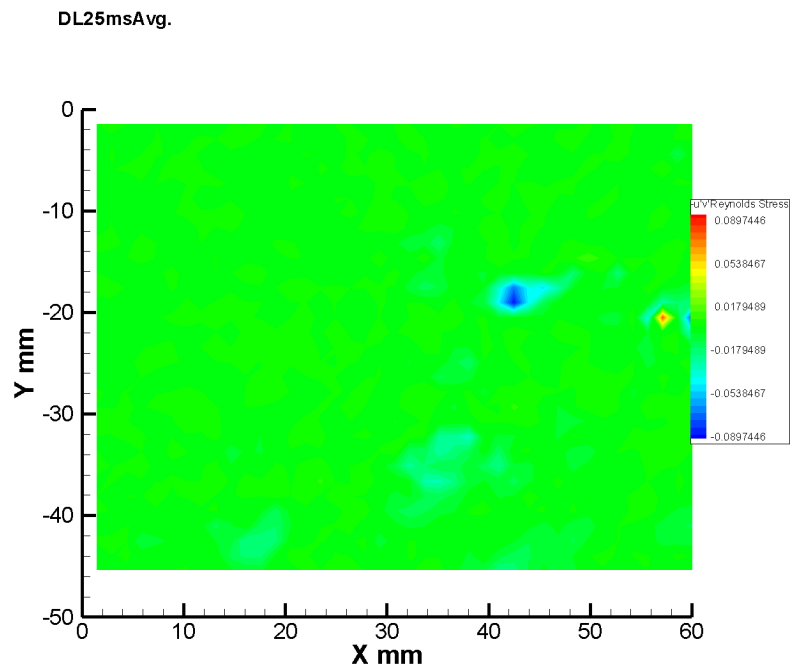
Σχήμα 6.103: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 25 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



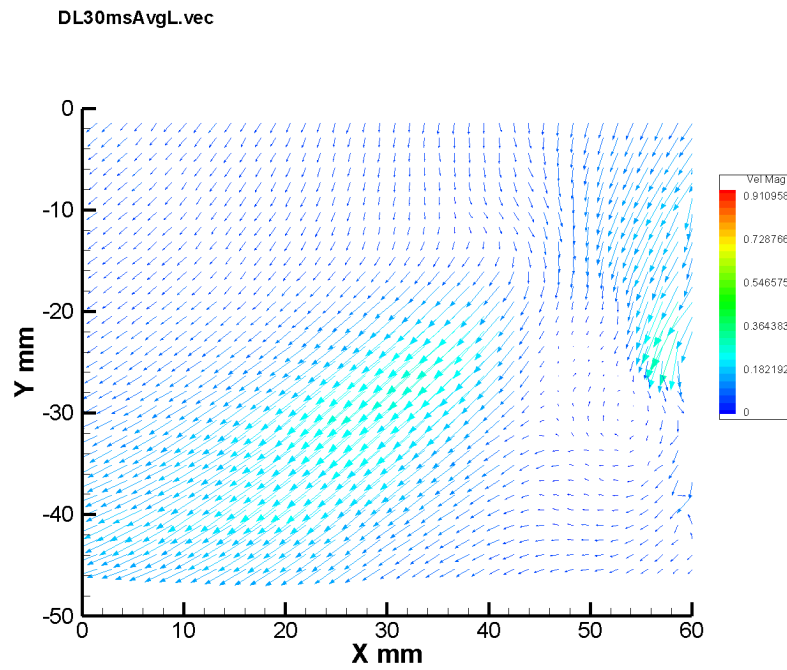
Σχήμα 6.104: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 25 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



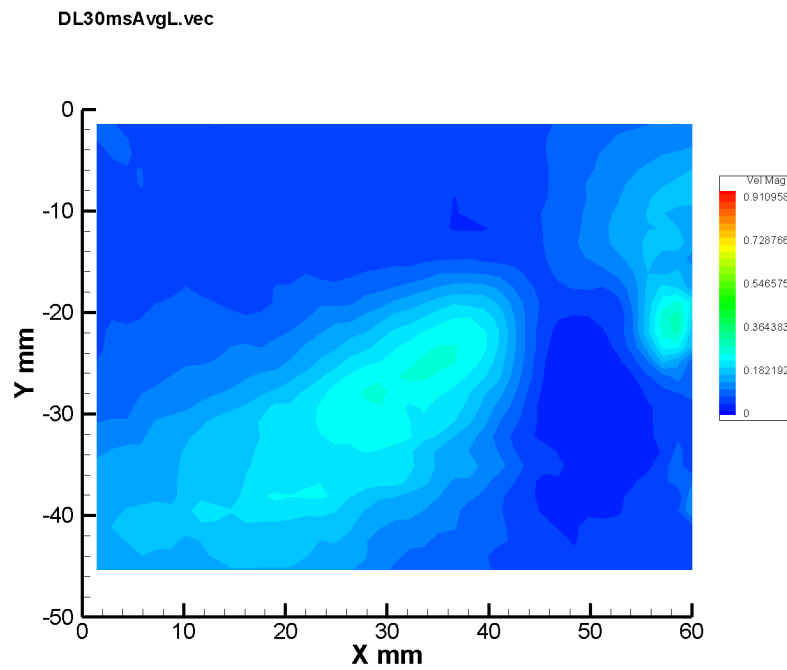
Σχήμα 6.105: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 25 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



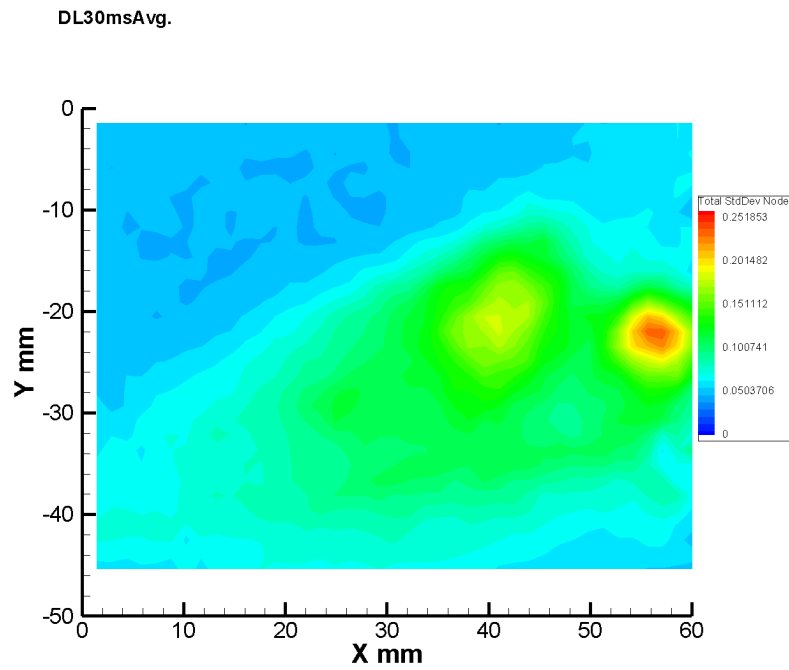
Σχήμα 6.106: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 25 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



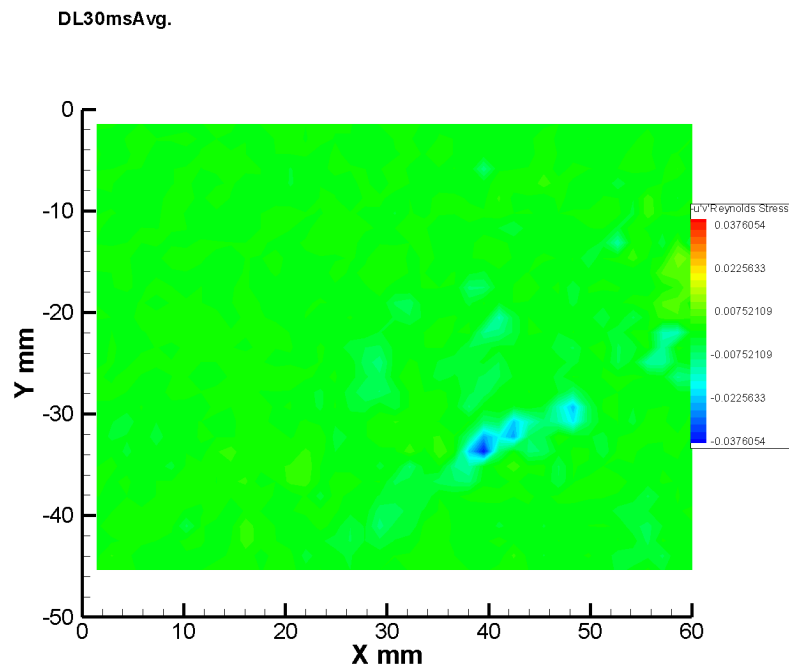
Σχήμα 6.107: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



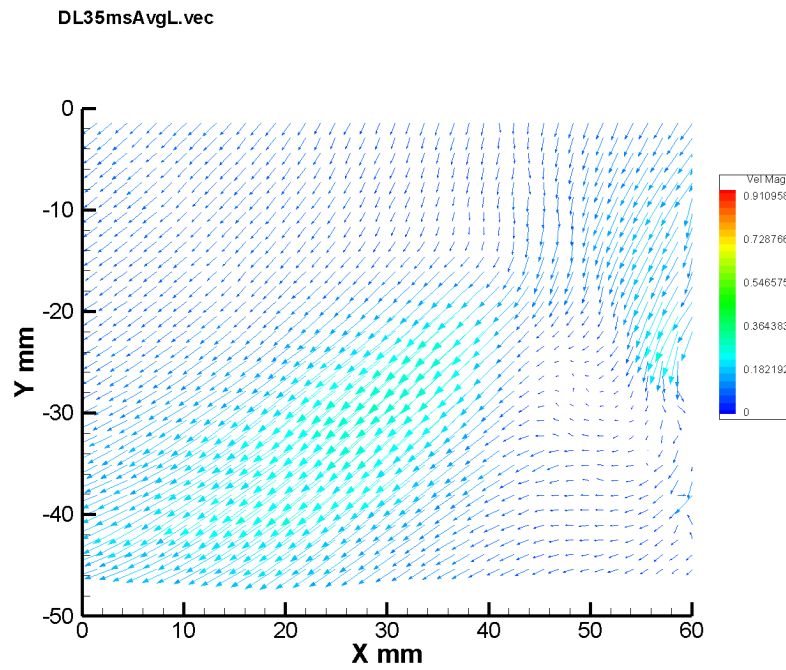
Σχήμα 6.108: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



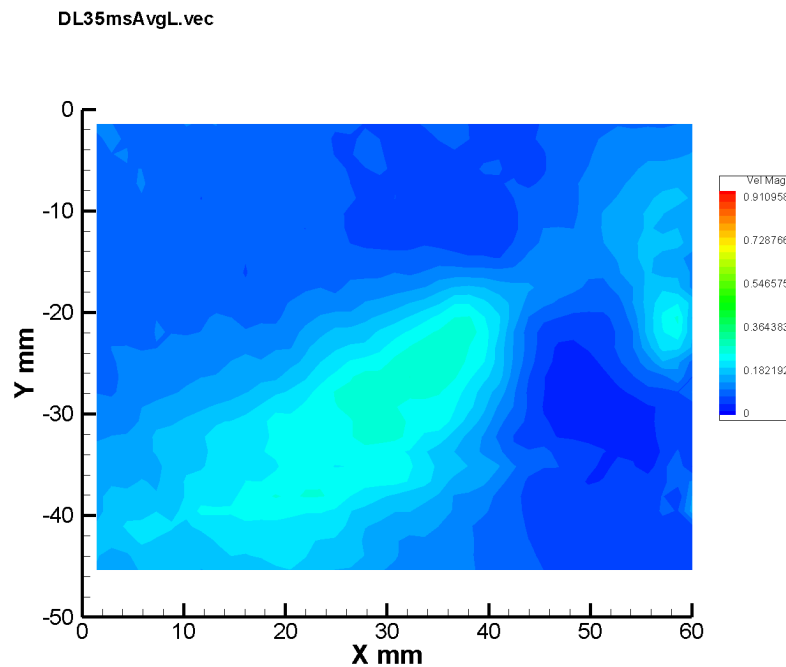
Σχήμα 6.109: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



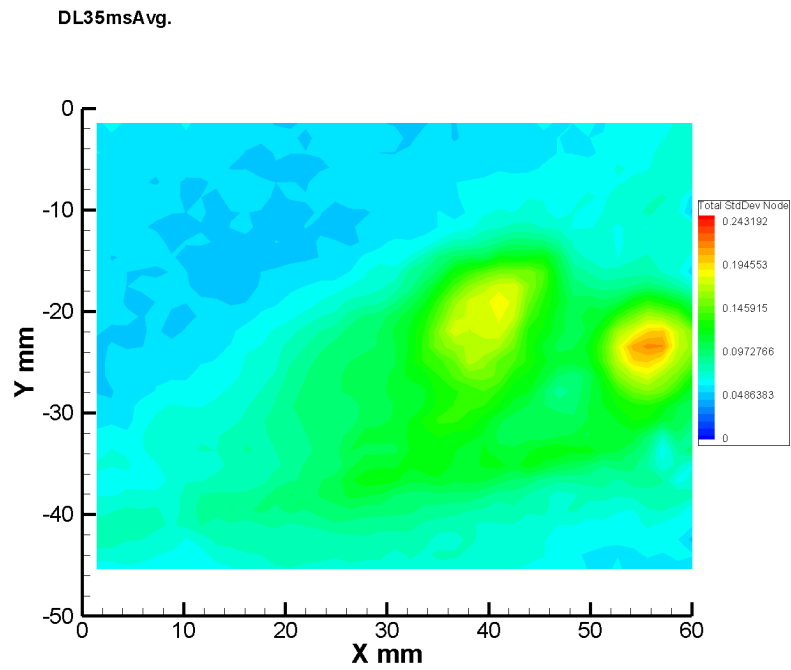
Σχήμα 6.110: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



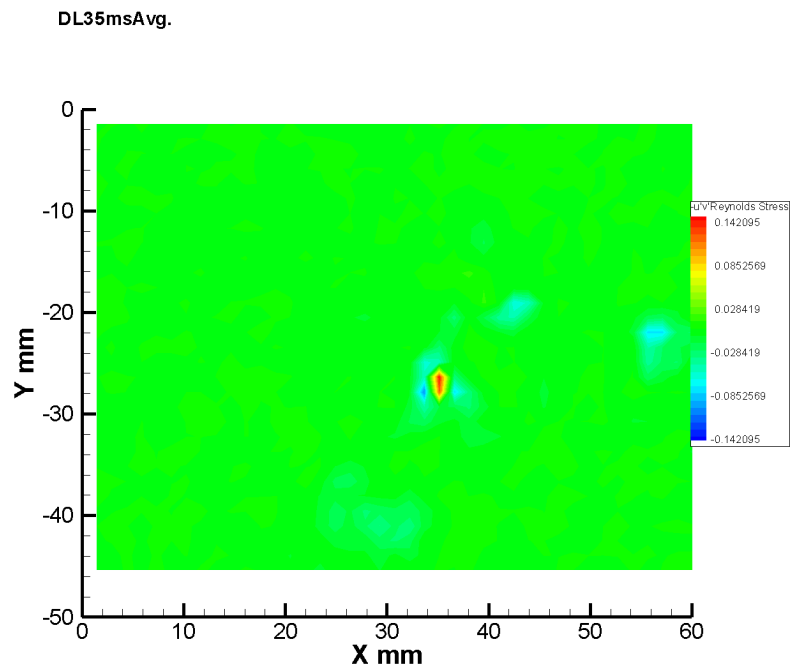
Σχήμα 6.111: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 35 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



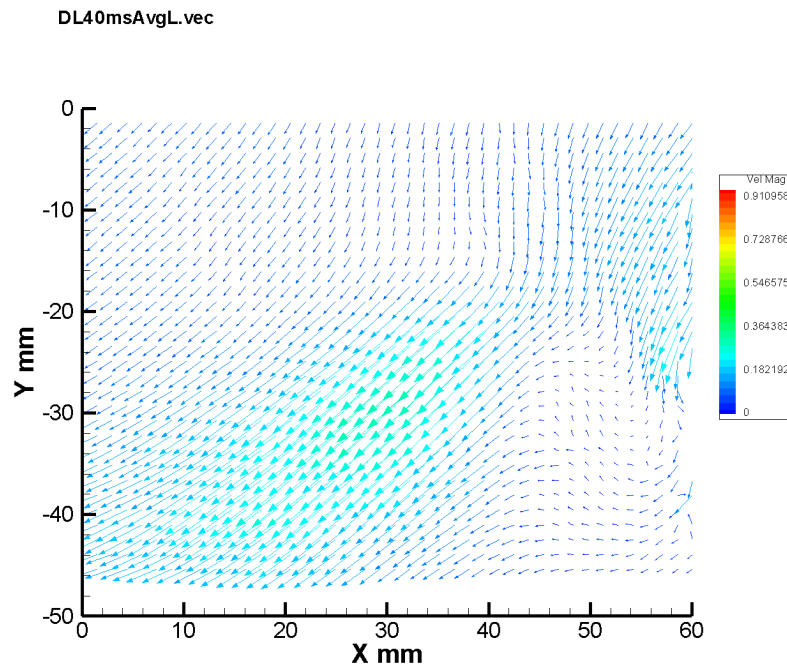
Σχήμα 6.112: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 35 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



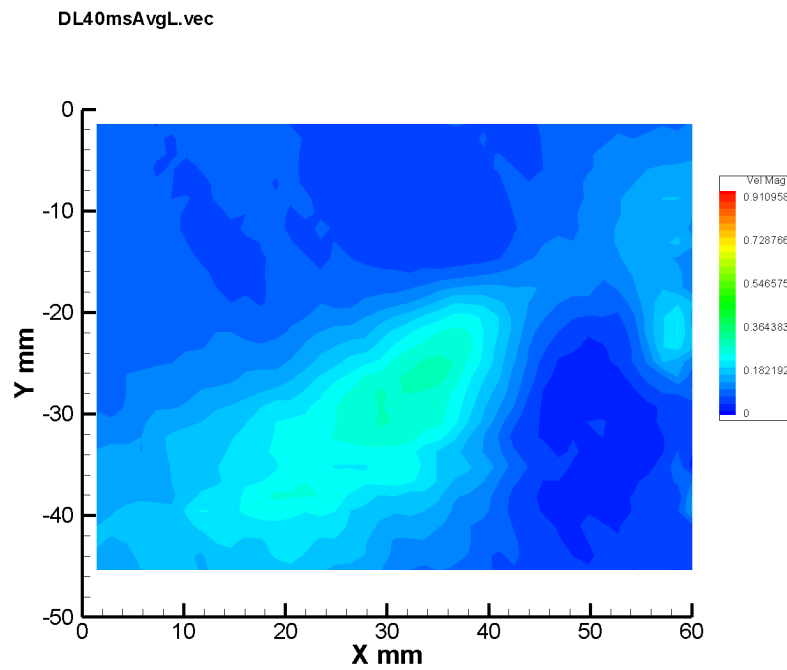
Σχήμα 6.113: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 35 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



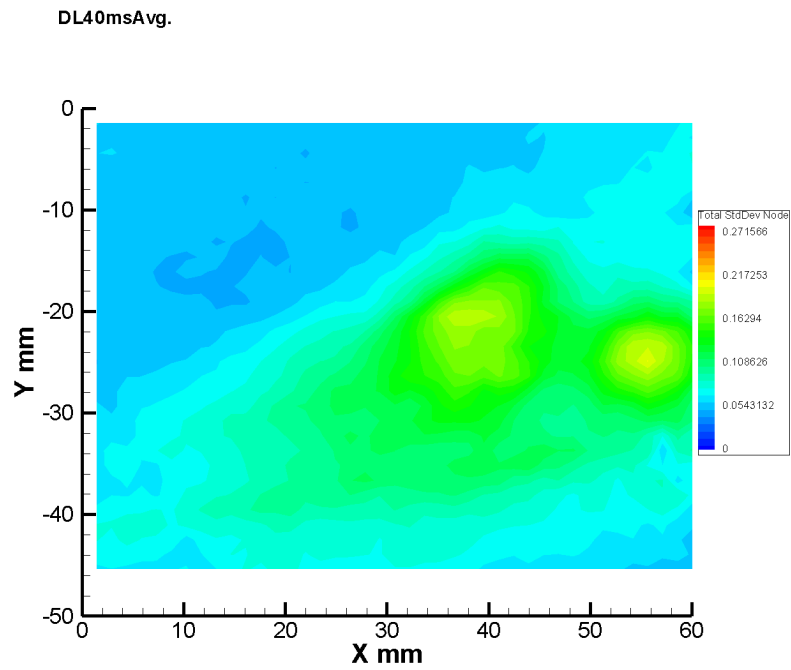
Σχήμα 6.114: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 35 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



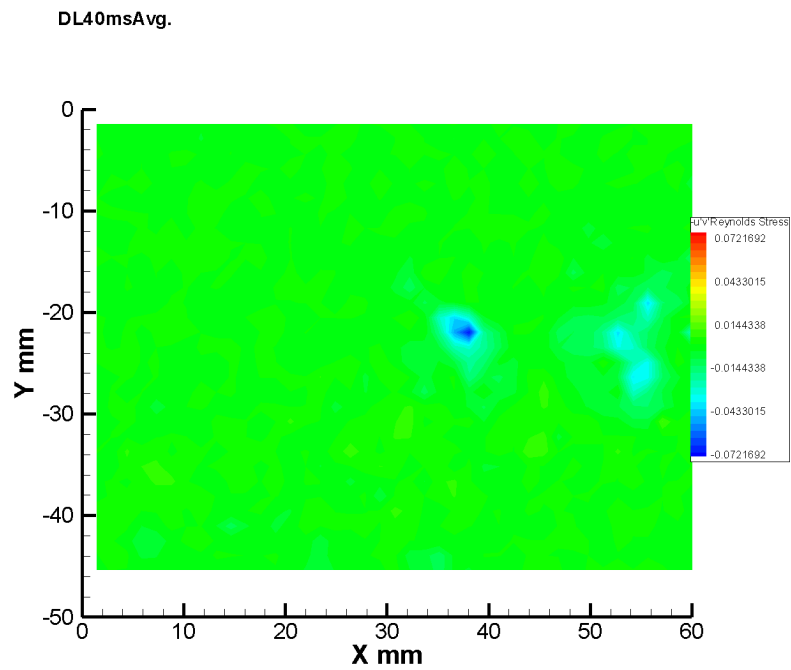
Σχήμα 6.115: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



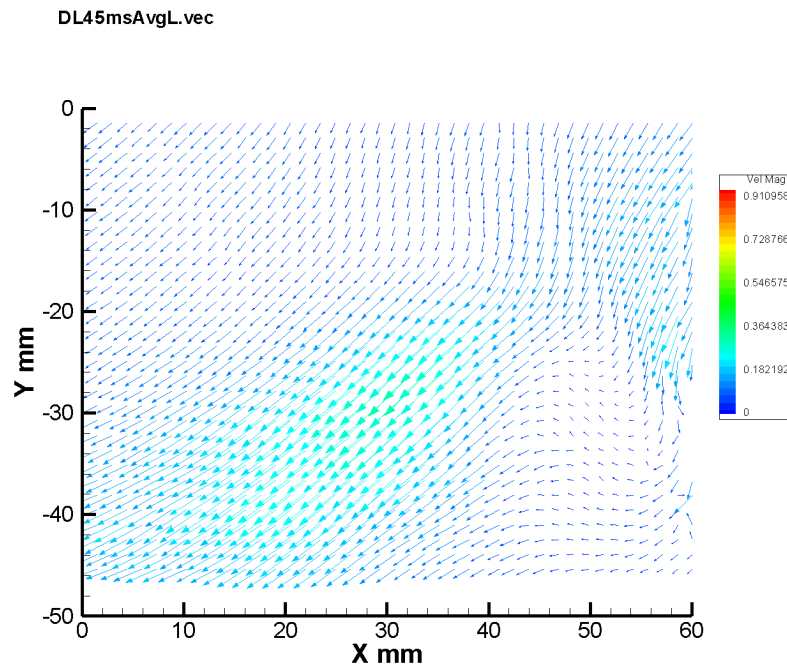
Σχήμα 6.116: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



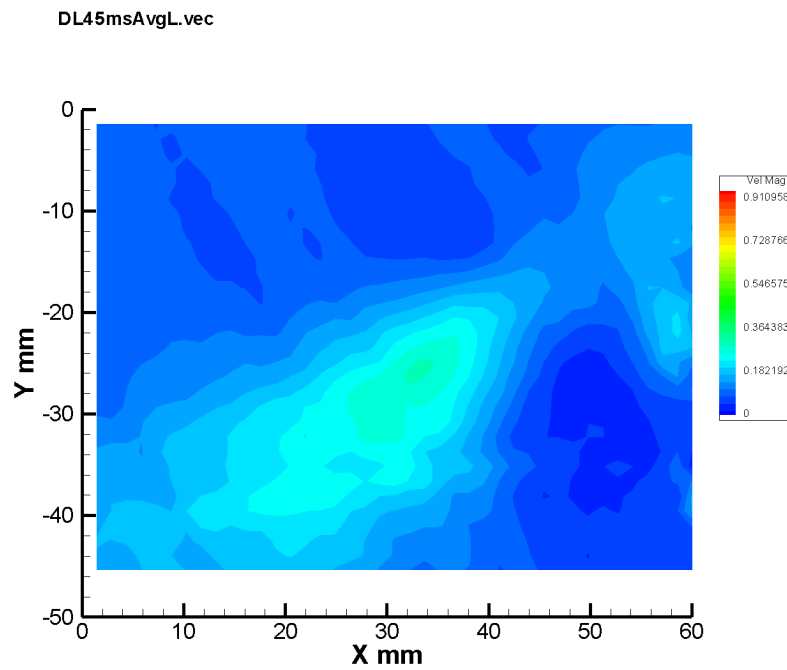
Σχήμα 6.117: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



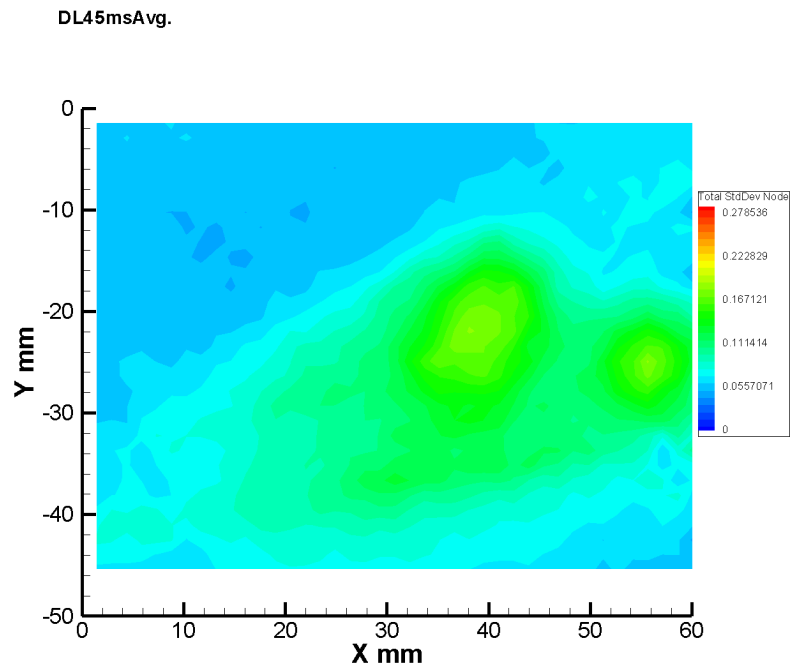
Σχήμα 6.118: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



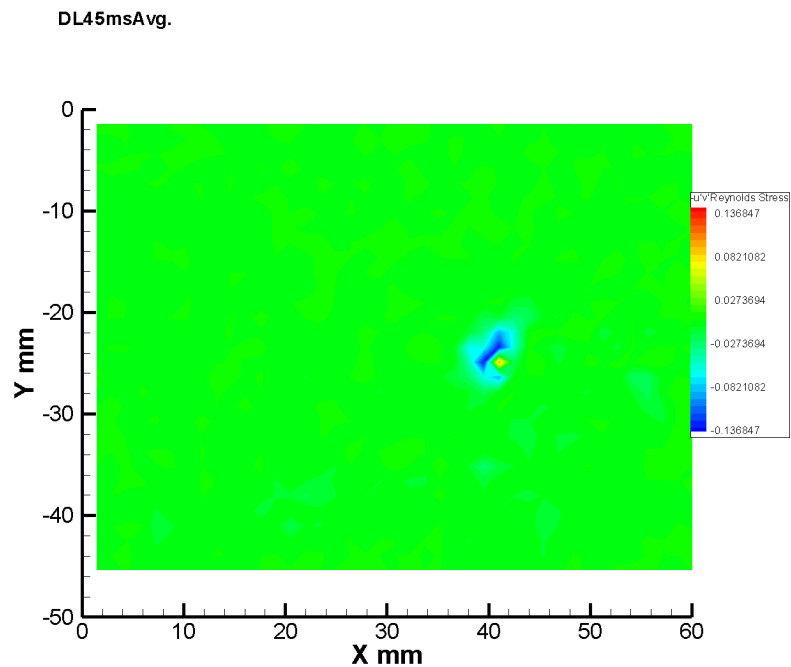
Σχήμα 6.119: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



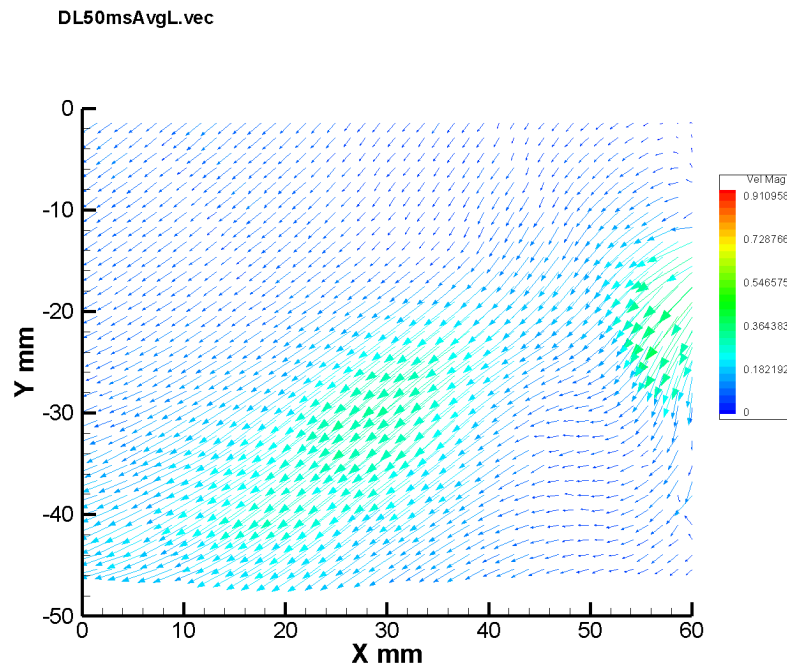
Σχήμα 6.120: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



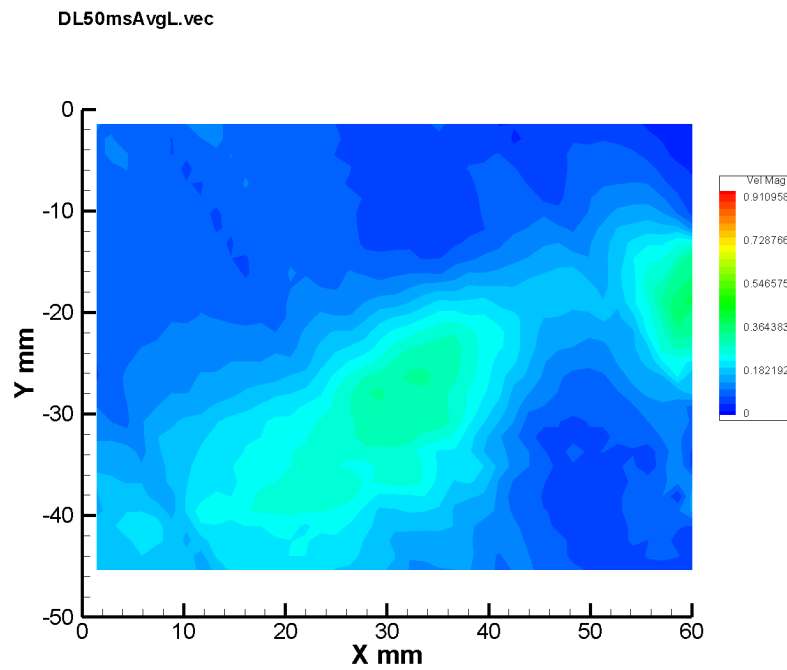
Σχήμα 6.121: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



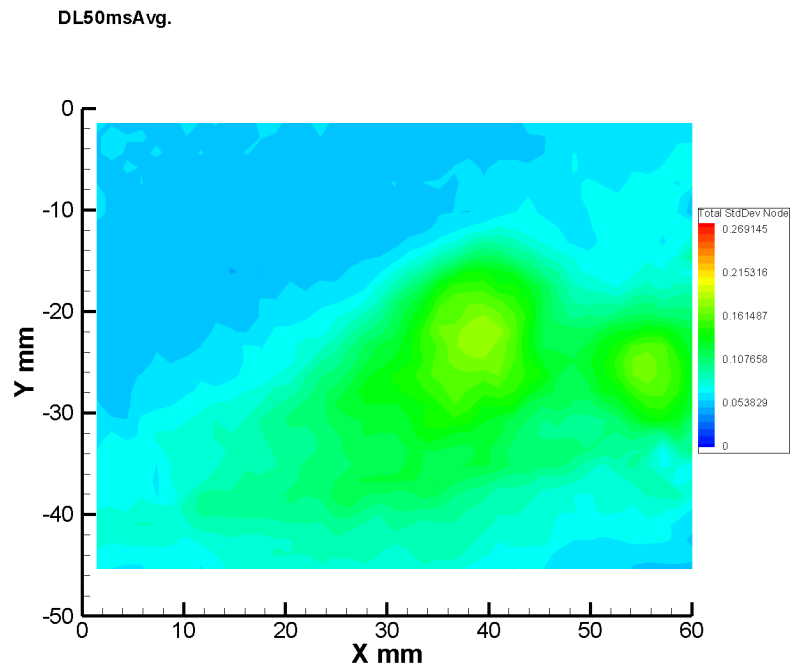
Σχήμα 6.122: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 45 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



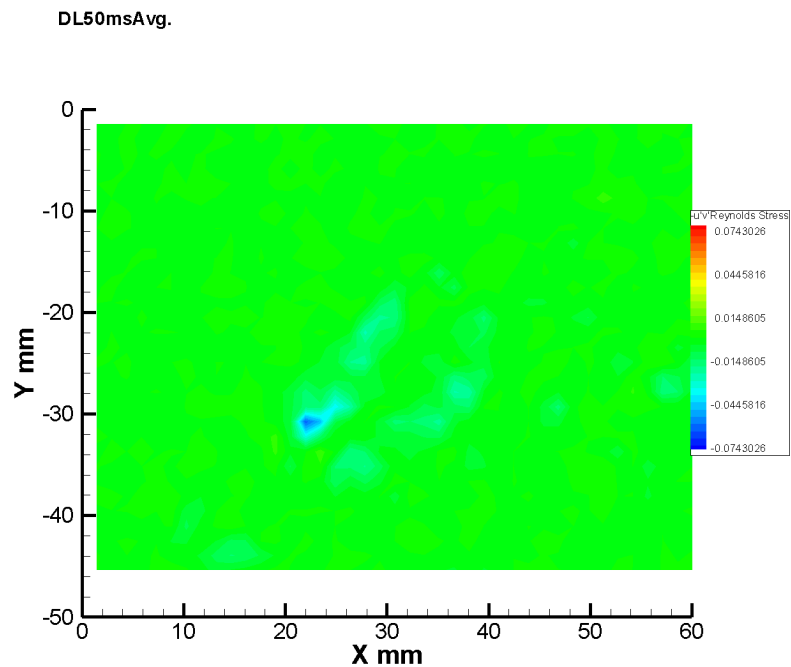
Σχήμα 6.123: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



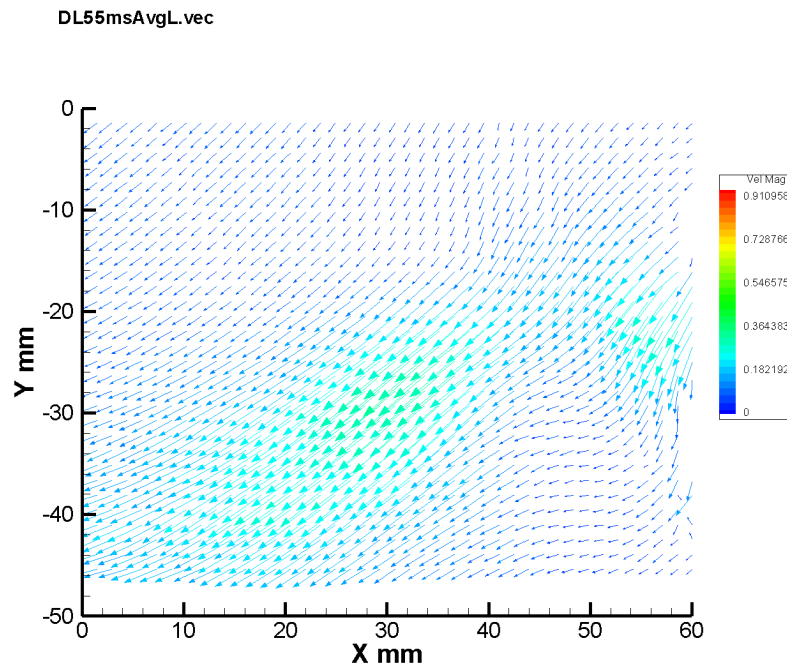
Σχήμα 6.124: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



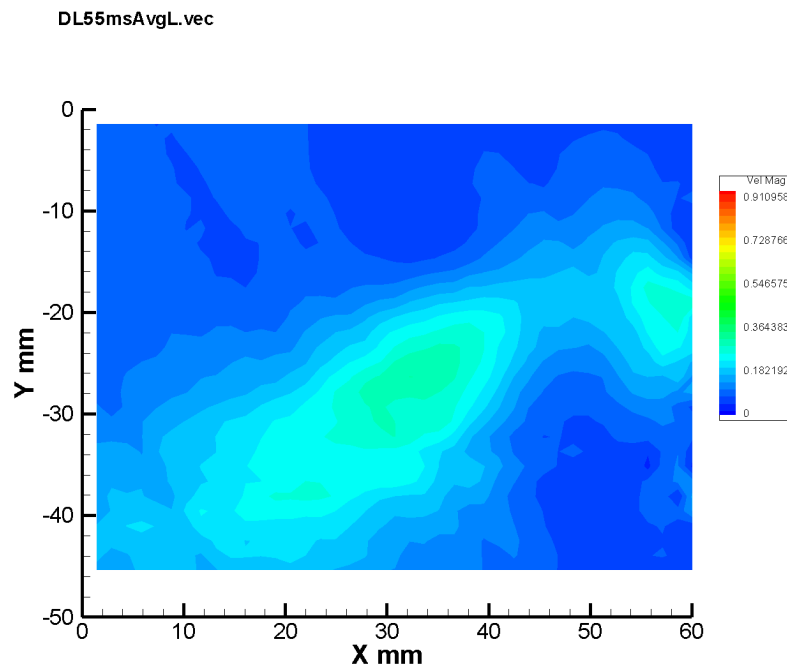
Σχήμα 6.125: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



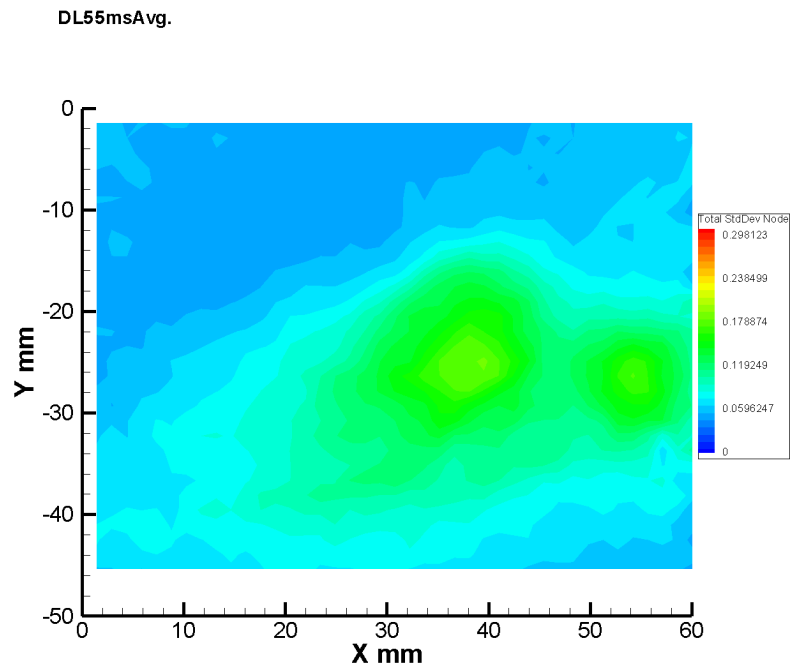
Σχήμα 6.126: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



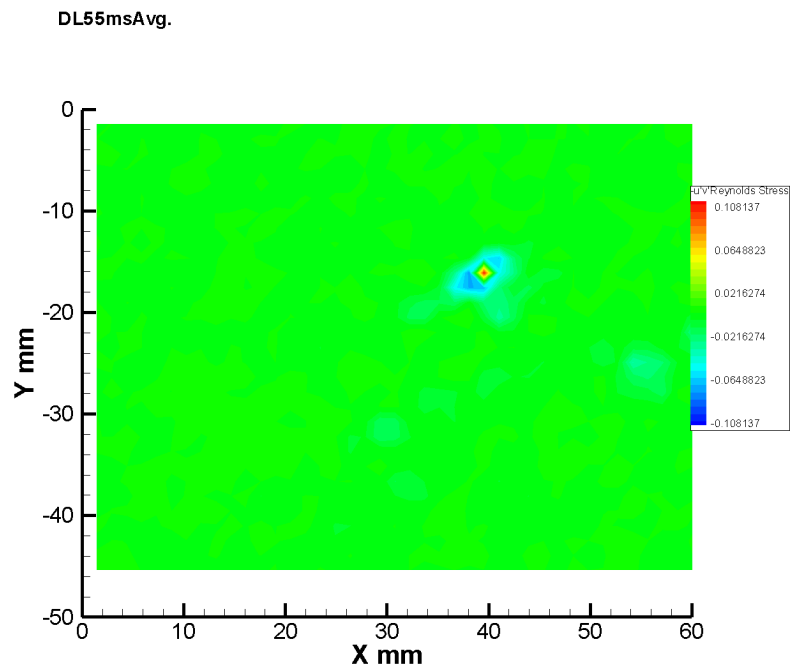
Σχήμα 6.127: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 55 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.128: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 55 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.129: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 55 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.130: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 55 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.

Ασύγχρονες μετρήσεις με ελεύθερο ρεύμα

Το ελεύθερο ρεύμα ενεργοποιείται ξανά, ο σκανδαλισμός του λέιζερ και της κάμερας ορίζεται σε εσωτερικός και γίνονται καταγραφές με τις ίδιες ρυθμίσεις, δηλαδή $T = 60ms$ και $D_{jet} = 20ms$.

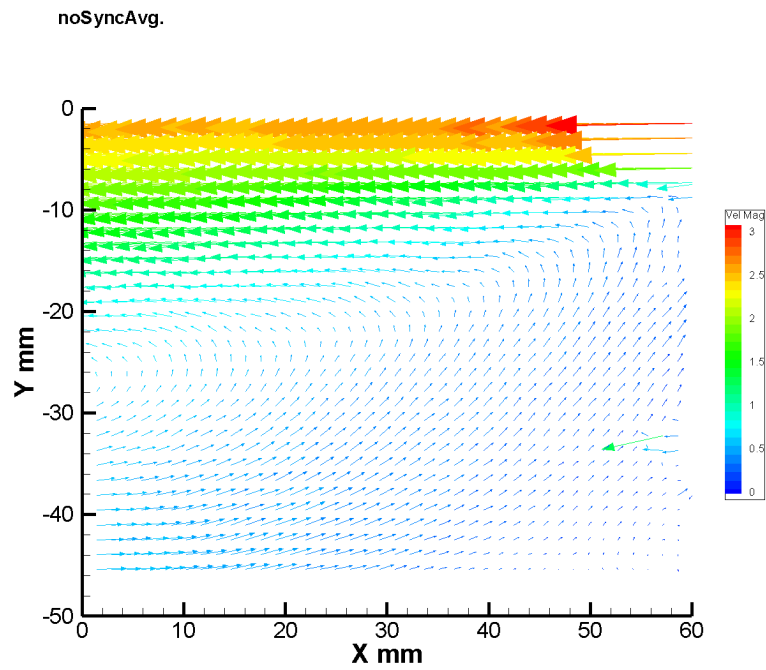
Στο διάγραμμα του μέσου διανυσματικού πεδίου ταχυτήτων υπάρχουν δύο κυρίως δομές στη ροή:

1. Μια κύρια περιοχή ανακυκλοφορίας, η οποία καταλαμβάνει όλο σχεδόν το οπτικό πεδίο, εκτός μιας μικρής περιοχής στα άκρα του διαγράμματος. Έχει ανθωρολογιακή φορά (port) και κατά y εκτείνεται μέχρι το ύψος της απότομης διεύρυνσης κοντά στην αρχή των αξόνων. Παρατηρώντας και τα διαγράμματα 6.21 και 6.79, δηλαδή τα άλλα δύο παράθυρα λήψης για την περίπτωση των ασύγχρονων μετρήσεων με περίοδο δέσμης 60 ms, μπορεί να καθοριστεί το μέγεθος και η μορφή της κύριας αυτής περιοχής. Κατά τον άξονα x εκτείνεται μέχρι 161 mm ή 4H από την απότομη διεύρυνση περίπου. Το ύψος της είναι κοντά στην απότομη διεύρυνση ίσο με το ύψος του δοκιμίου και σιγά σιγά ελαττώνεται μέχρι να μηδενιστεί στο σημείο ανακυκλοφορίας.
2. Μια δευτερεύουσα περιοχή ανακυκλοφορίας, η οποία έχει ωρολογιακή φορά (port) και εκτείνεται κατά x μέχρι από 0 έως 20 mm ή 0.5H και κατά y από -30 έως -41 mm ή 0.25H από τον πυθμένα.

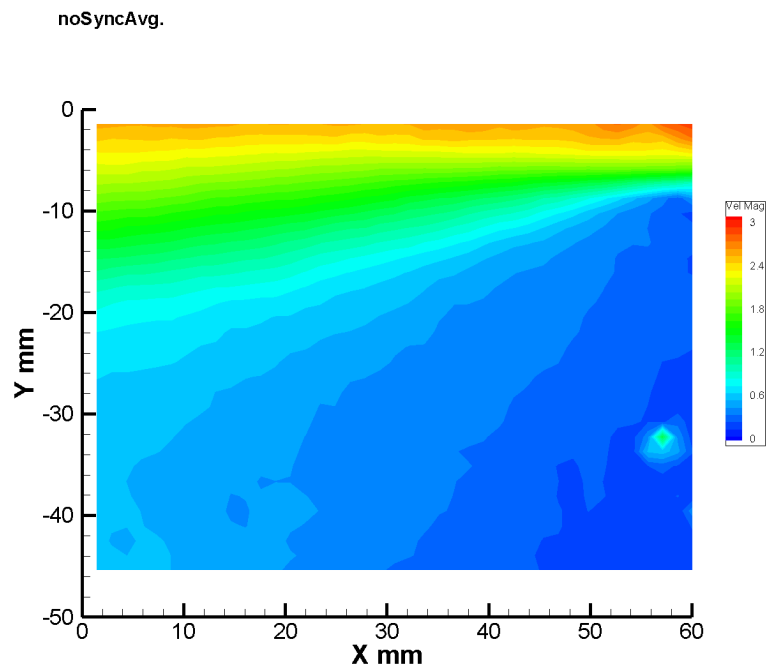
Η μορφή αυτή είναι χαρακτηριστική της ροής απότομης διεύρυνσης, βλ. [60], [116], [57], ενώ υπάρχει μεγάλη πληθώρα εργασιών που παρατηρεί αυτές τις δομές.

Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης της U_x συνιστώσας παρατηρείται μια σταδιακή μείωση της τιμής της από το άνω αριστερό άκρο μέχρι το κάτω δεξιό άκρο. Η αυξημένη τιμή στο σημείο $(x, y) = (3, -33)$ στο διάγραμμα, οφείλεται μάλλον σε ένα αυλάκι που υπάρχει στη βάση του δοκιμίου, καθώς στο διάγραμμα 6.131 υπάρχει μια περιοχή όπου οι ταχύτητες ξαφνικά διαφέρουν πολύ και έχουν άλλη φορά από αυτήν της τοπικής ροής. Η ροή εισέρχεται στο αυλάκι, αλλάζει κατεύθυνση και δημιουργεί αναταράξεις

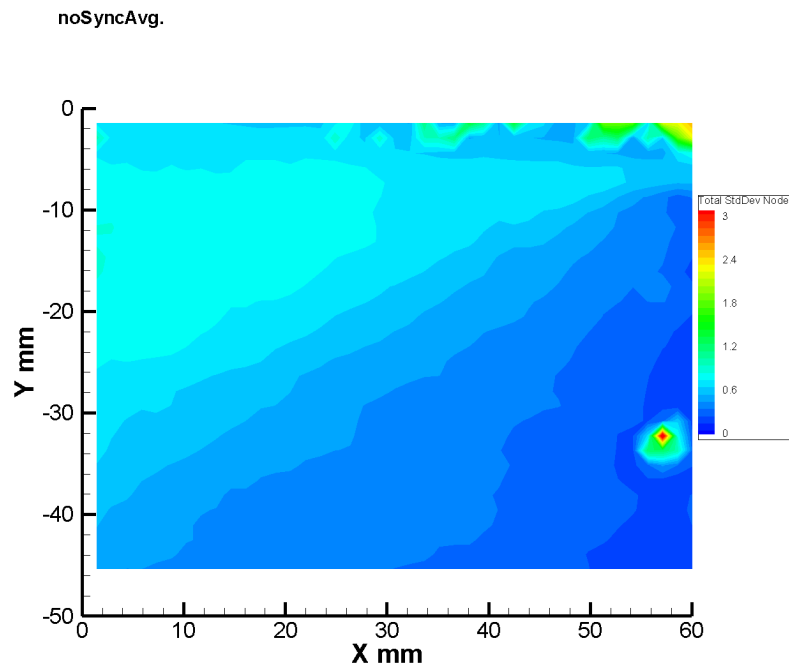
Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα έχουν μηδενικές τιμές σε όλο το οπτικό πεδίο, εκτός από μια περιοχή με ελαφρά αυξημένες απόλυτες τιμές στο μέσον και αριστερά (30 mm ή 0.73H από την απότομη διεύρυνση και 20 mm ή 0.5H περίπου από το κάτω τοίχωμα).



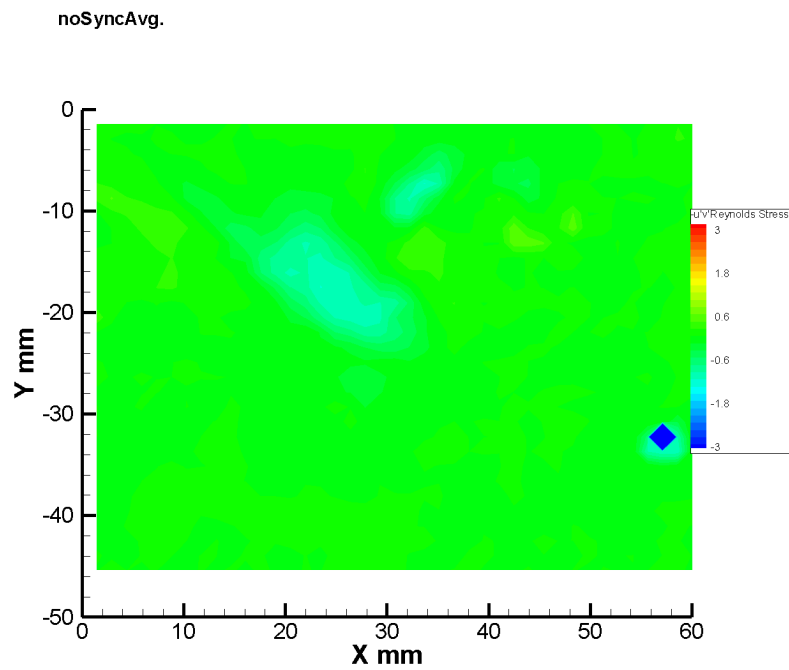
Σχήμα 6.131: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.132: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.133: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, ασύγχρονες μετρήσεις.



Σχήμα 6.134: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα για περίοδο 60 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, ασύγχρονες μετρήσεις.

Συγχρονισμένες μετρήσεις με ελεύθερο ρεύμα

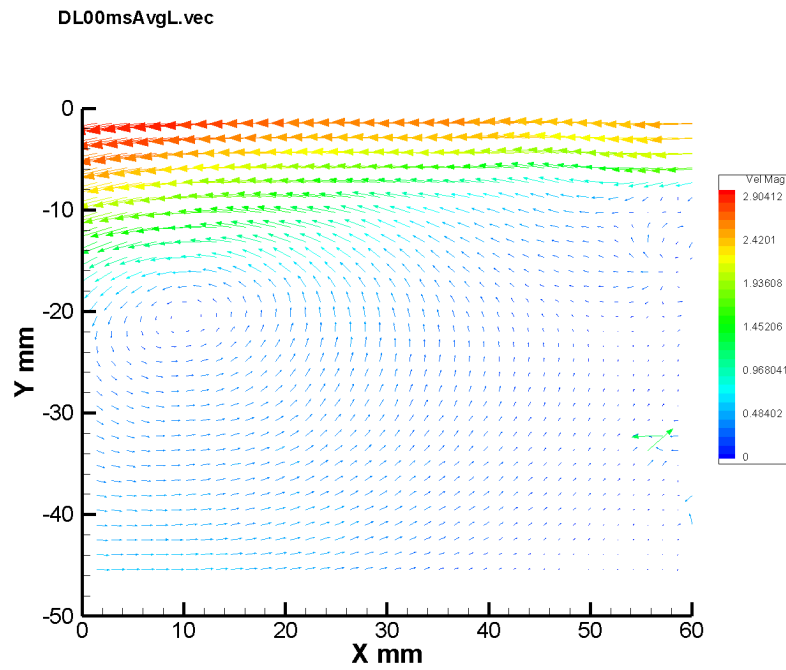
Ο σκανδαλισμός ορίζεται σε εξωτερικός και οι καταγραφές γίνονται με καθυστέρηση 0,10,20,30,40,50 ms μέσα στην περίοδο της δέσμης. Οι ρυθμίσεις για την περίοδο παραμένουν ίδιες.

Η κύρια παρατήρηση από τη εμπορεία των διαγραμμάτων είναι ότι υπάρχει μια δίνη που εκλύεται, κοντά στο ύψος της άνω ακμής του δοκιμίου της απότομης διεύρυνσης και ταξιδεύει μέσα στην περίοδο. Μια τέτοια παρατήρηση έχει γίνει και στην εργασία [3]. Ο κύκλος ζωής της θα περιγραφεί με την μεταβολή της απόστασης του κέντρου της από την απότομη διεύρυνση κατά x και από τον πυθμένα κατά y . Έχει λοιπόν ως εξής, βλ. σχ. 6.135 έως 6.155:

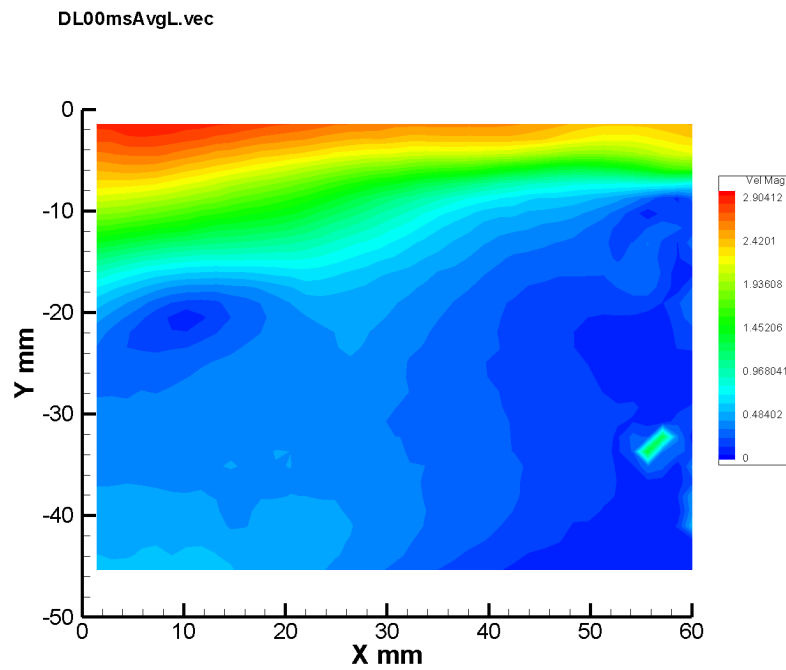
1. Για καθυστέρηση 0 ms το κέντρο της βρίσκεται στη θέση $(x, y) = (10, -21) = (1.2H, 0.7H)$, ενώ κοντά στην ακμή του δοκιμίου, $(x, y) = (60, -9) = (0, 0.95H)$, έχει αρχίσει να γεννιέται μια νέα.
2. Για καθυστέρηση 10 ms η παλιά δίνη έχει αρχίσει να μετακινείται προς τα κάτω, $(x, y) = (2, -22) = (1.5H, 0.7H)$, εκτός οπτικού πεδίου και η νέα είναι πλέον εμφανής, $(x, y) = (58, -9) = (0.05H, 0.9H)$.
3. Για καθυστέρηση 20 ms η παλιά έχει σχεδόν εξαφανιστεί και το κέντρο της νέας βρίσκεται στο σημείο $(x, y) = (48, -13) = (0.3H, 0.85H)$.
4. Για καθυστέρηση 30 ms το κέντρο της νέας βρίσκεται στο $(x, y) = (38, -15) = (0.53H, 0.8H)$.
5. Για καθυστέρηση 40 ms το κέντρο της νέας βρίσκεται στο $(x, y) = (30, -17) = (0.73H, 0.75H)$.
6. Για καθυστέρηση 50 ms, μόλις ενεργοποιείται η δέσμη αέρα, το κέντρο της νέας βρίσκεται στο $(x, y) = (20, -18) = (H, 0.7H)$.

Η δίνη, αφού σχηματιστεί, κινείται με σταθερή σχεδόν ταχύτητα $U_x \simeq 10\text{mm}/10\text{ms} = 1\text{m/s} = 0.33U_\infty$ και μέση ταχύτητα $\overline{U}_y \simeq -2.6/10 = -0.26\text{m/s} = -0.09U_\infty$ και κατευθύνεται προς την περιοχή επανακόλλησης της ροής. Κατά την κίνησή της μεγαλώνει και επεκτείνεται στο χώρο. Θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον να μελετηθεί σε μελλοντικές εργασίες η εξέλιξη της δίνης και στα άλλα δυο παράθυρα. Επειδή σε αυτή την εργασία δόθηκε βάρος στην περιοχή επανακόλλησης της ροής και στην περιοχή της απότομης διεύρυνσης, δεν έγιναν συγχρονισμένες μετρήσεις για το μεσαίο παράθυρο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να εξαχθούν σχετικά συμπεράσματα.

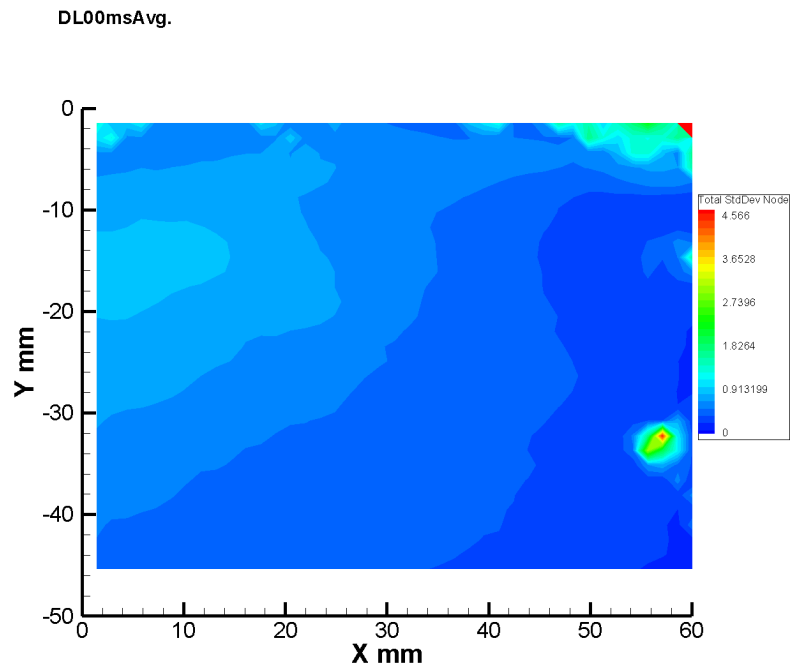
Όσον αφορά την τυπική απόκλιση της U_x συνιστώσας, αυτή μειώνεται κατά στρώματα όσο πλησιάζει κανείς στο τοίχωμα της απότομης διεύρυνσης. Οι τάσεις Reynolds/πυκνότητα παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή για όλα τα διαγράμματα. Οι τιμές είναι κοντά στο 0 για τις περιπτώσεις καθυστέρησης 0,10,50, ενώ αυξάνονται κατά μια τάξη μεγέθους στις περιπτώσεις 20,30,40 ms. Μέγιστη τιμή λαμβάνουν στην περίπτωση των 40 ms, βλ. σχ. 6.146. 6.150, 6.154. Οι αυξημένες τιμές αυτές πιθανόν να οφείλονται στη διάδοση των διαταραχών από την επέκταση της δίνης στο χώρο.



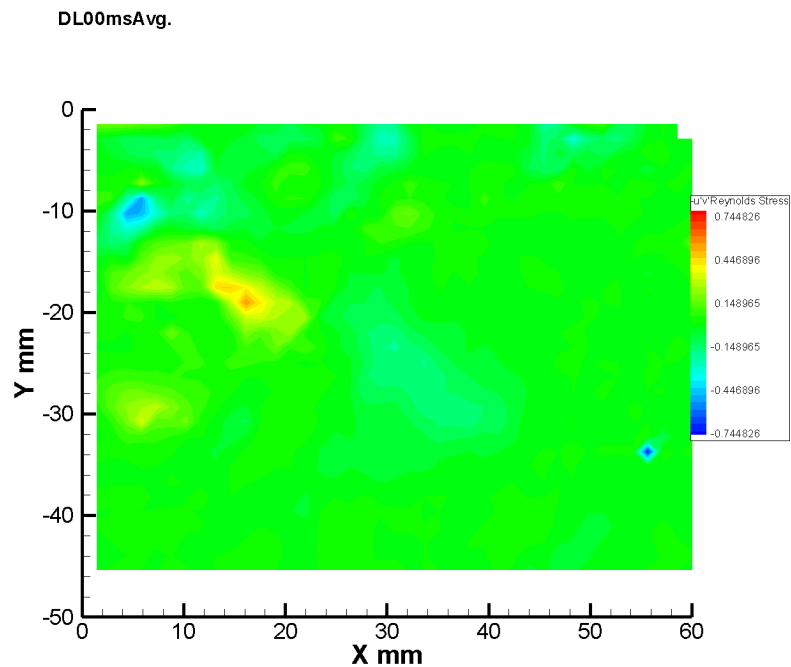
Σχήμα 6.135: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



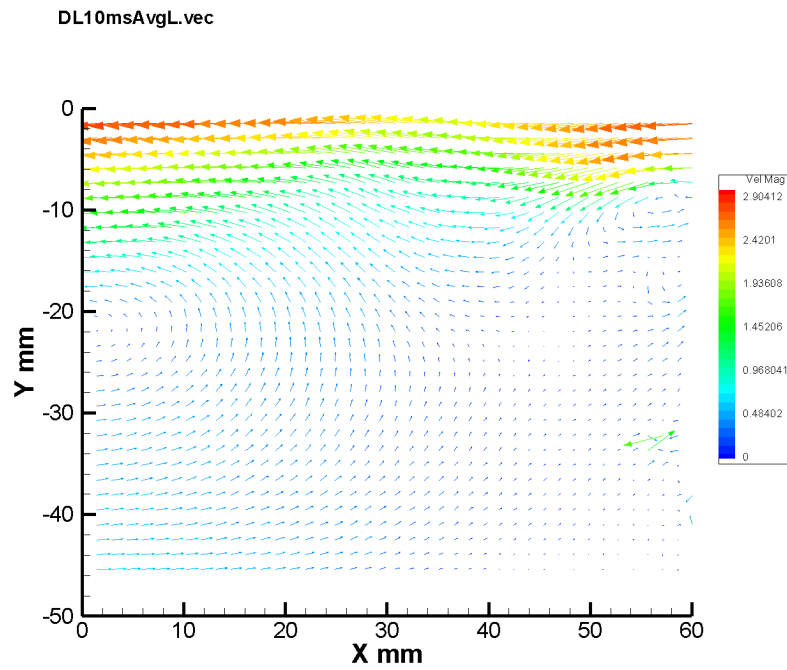
Σχήμα 6.136: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



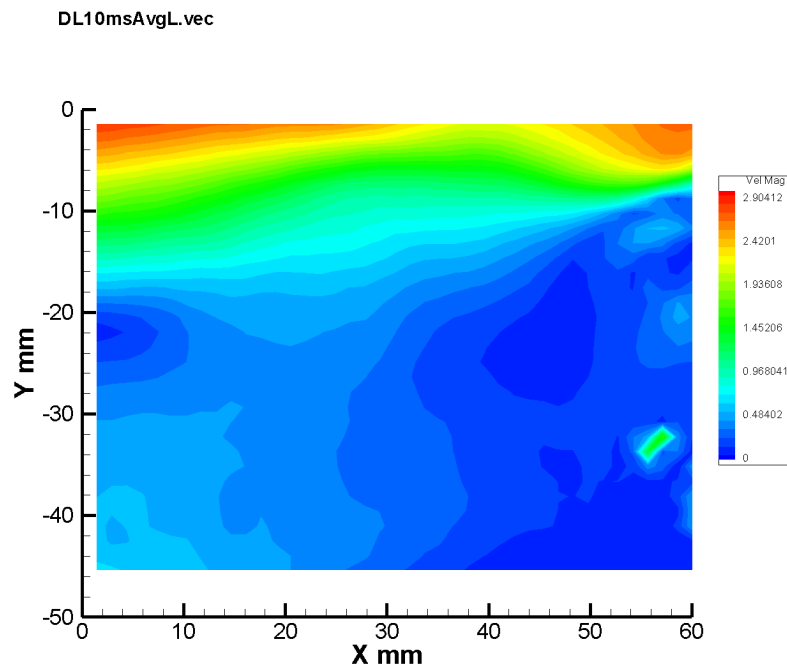
Σχήμα 6.137: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



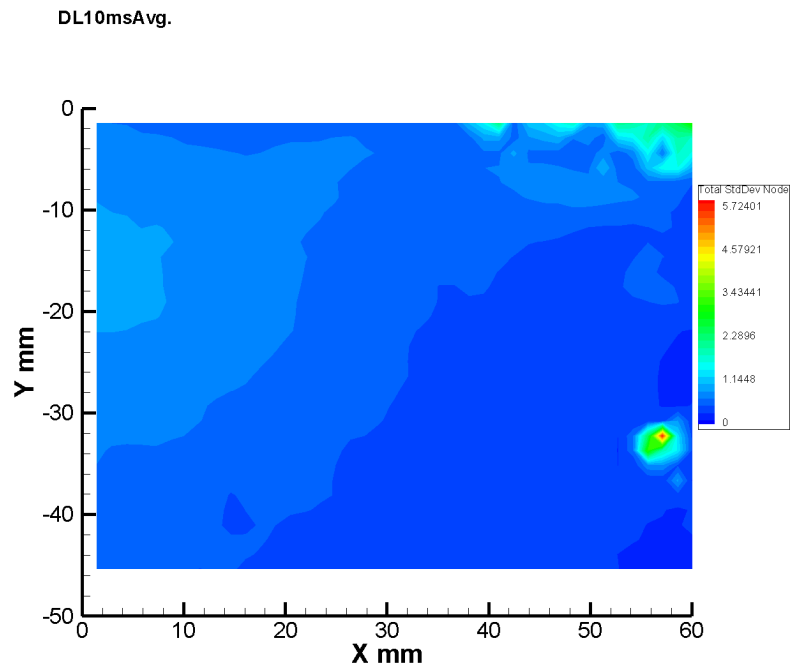
Σχήμα 6.138: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 0 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



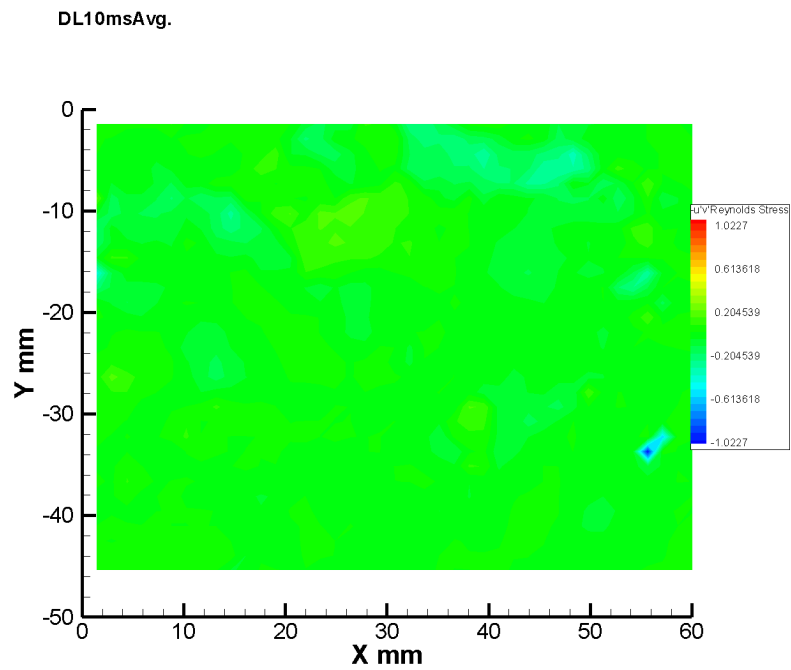
Σχήμα 6.139: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



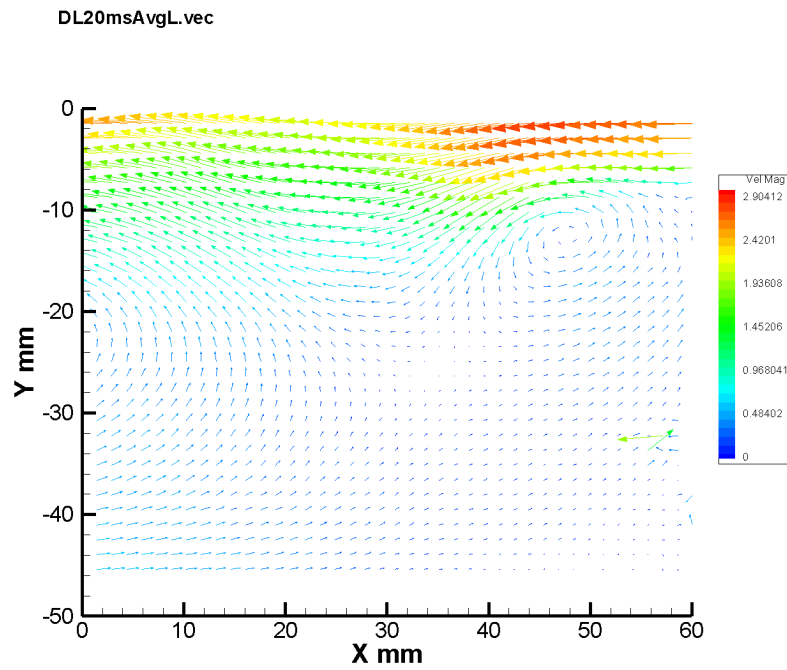
Σχήμα 6.140: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



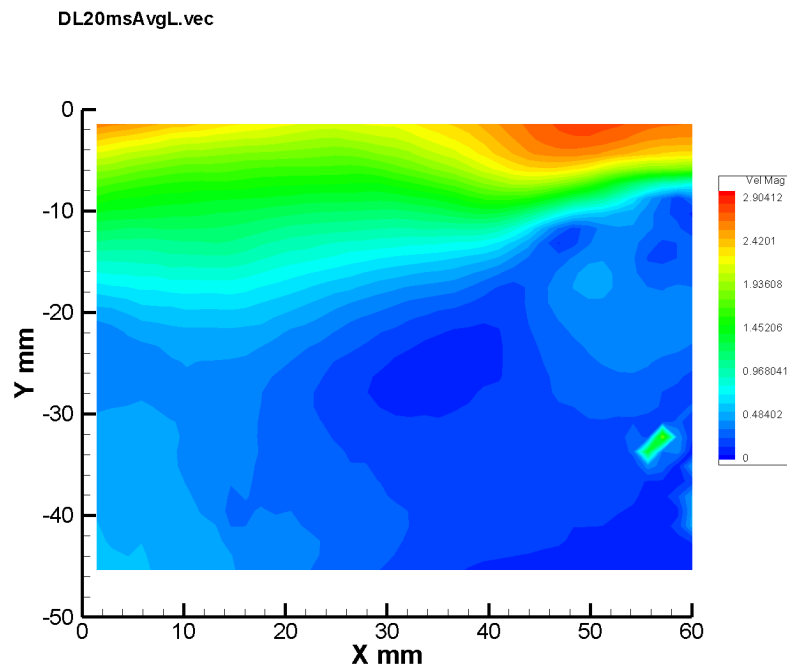
Σχήμα 6.141: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



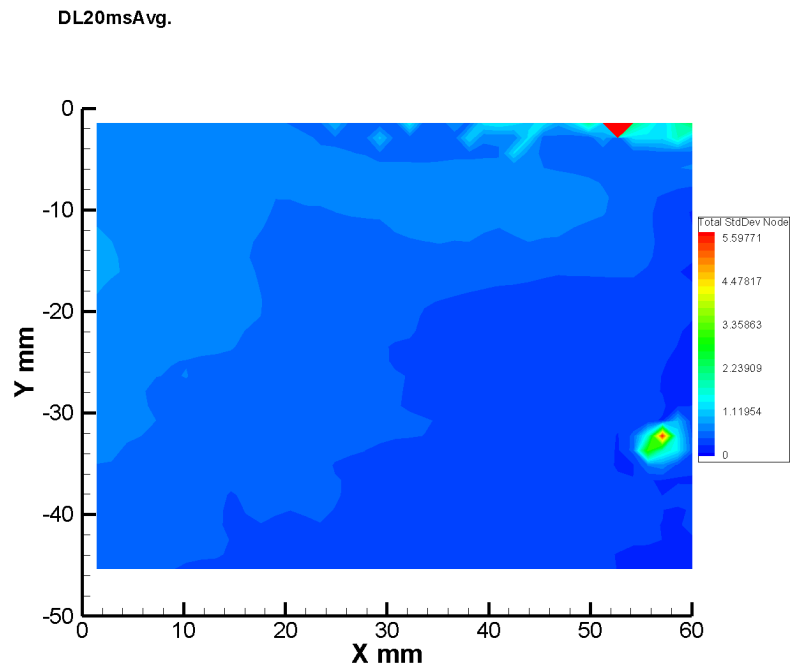
Σχήμα 6.142: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 10 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



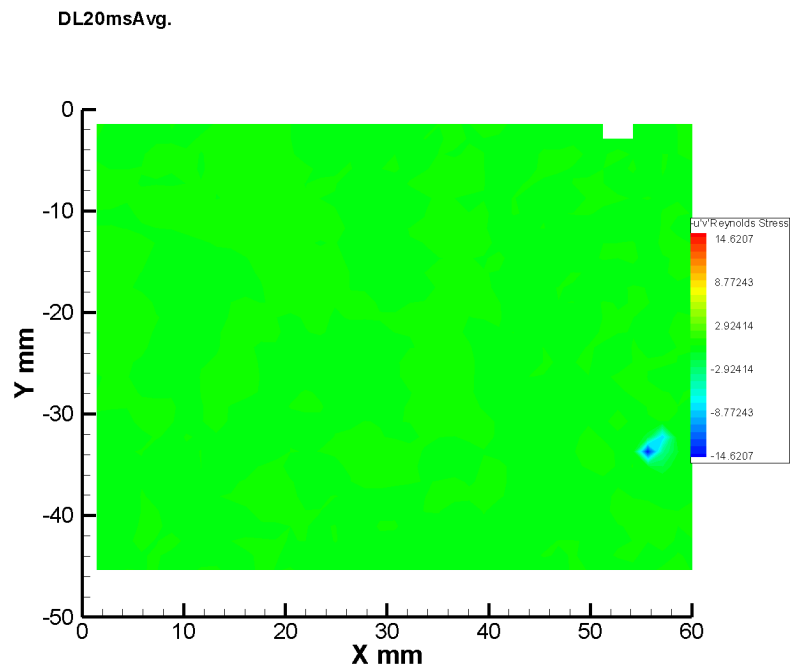
Σχήμα 6.143: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



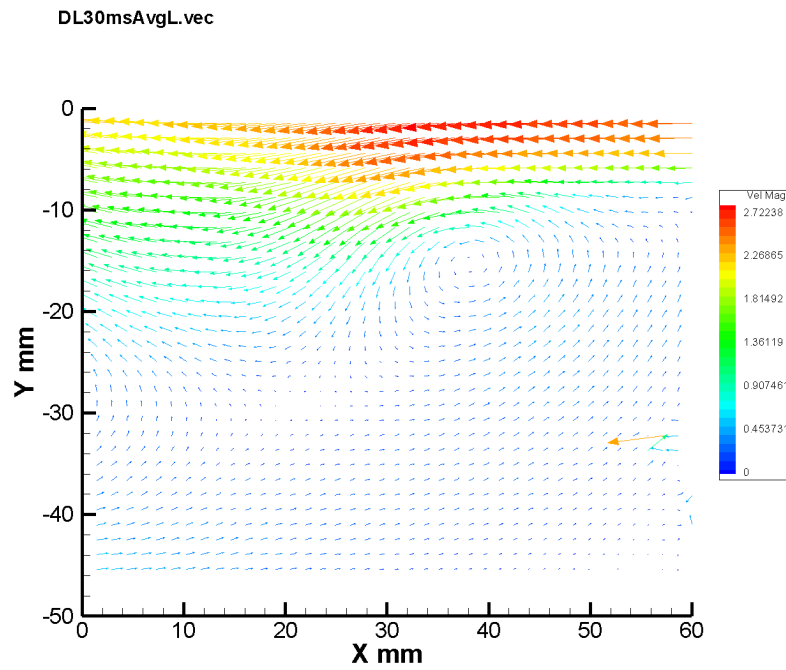
Σχήμα 6.144: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



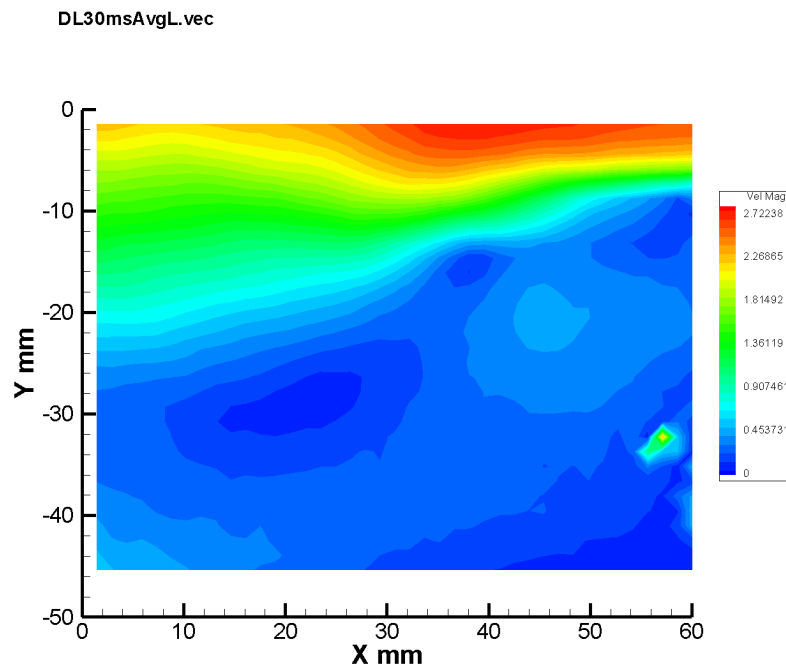
Σχήμα 6.145: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



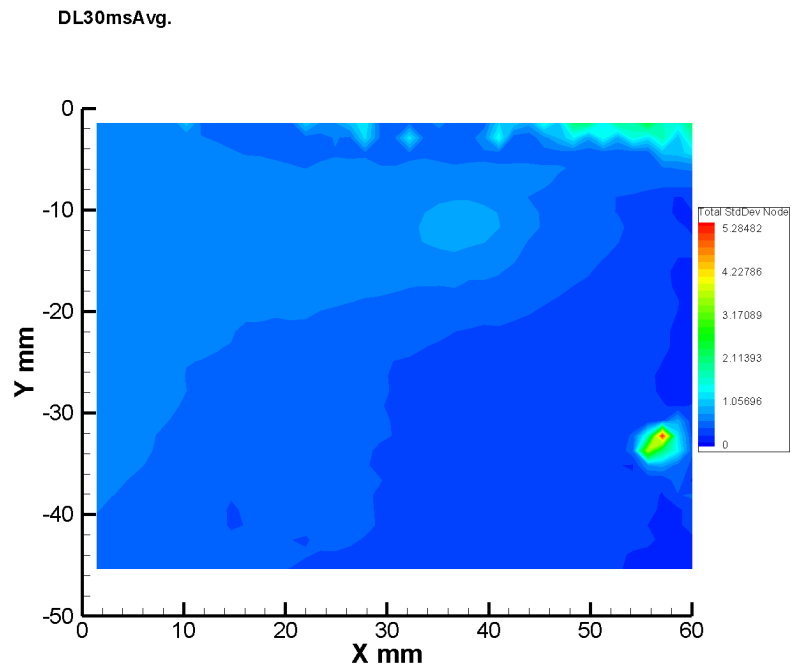
Σχήμα 6.146: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 20 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



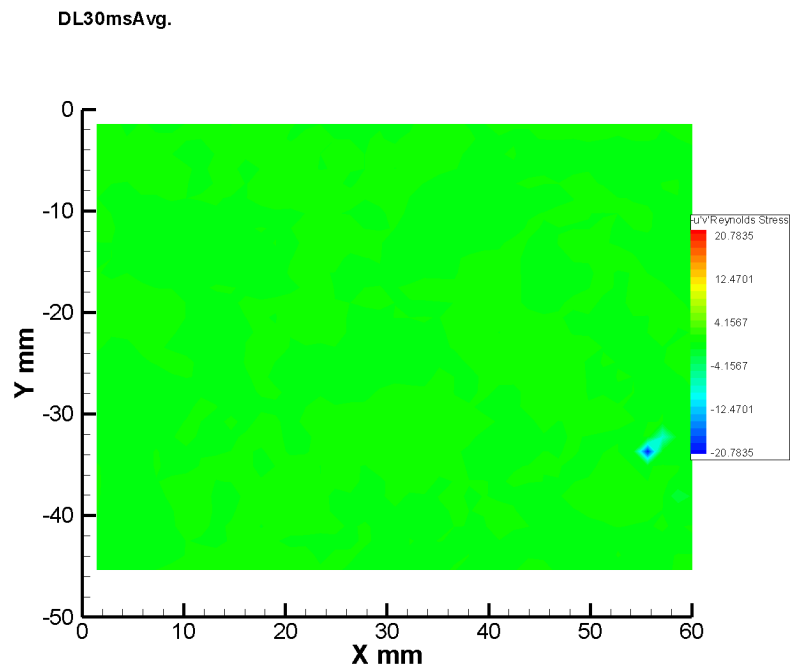
Σχήμα 6.147: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



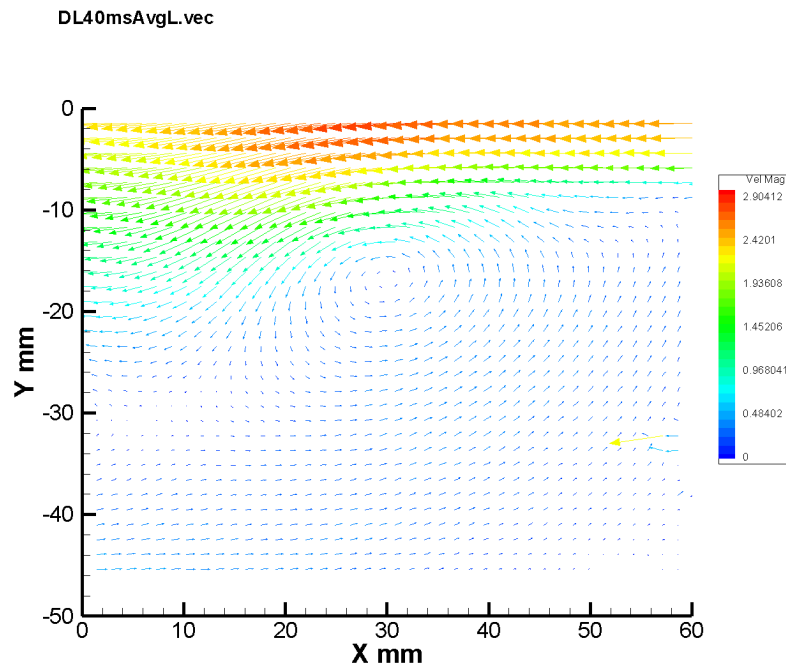
Σχήμα 6.148: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



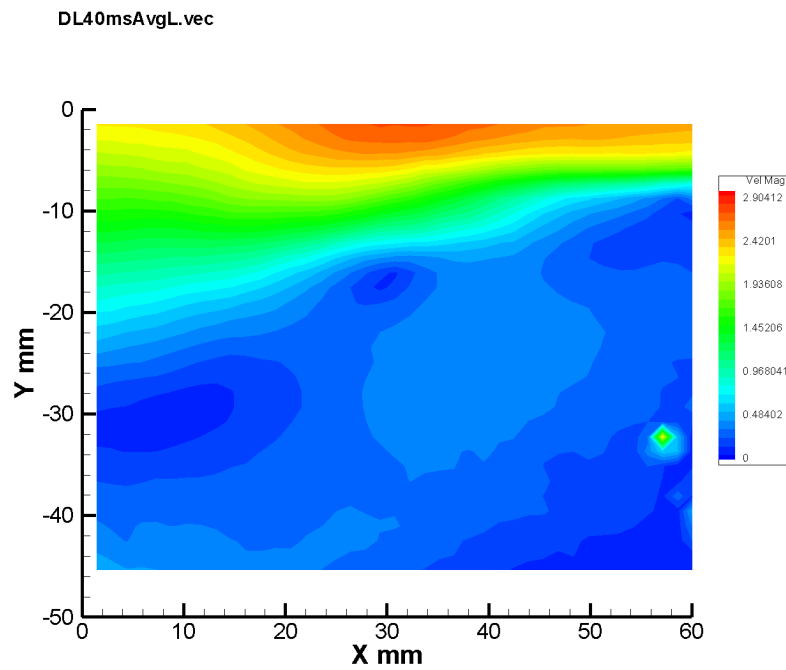
Σχήμα 6.149: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



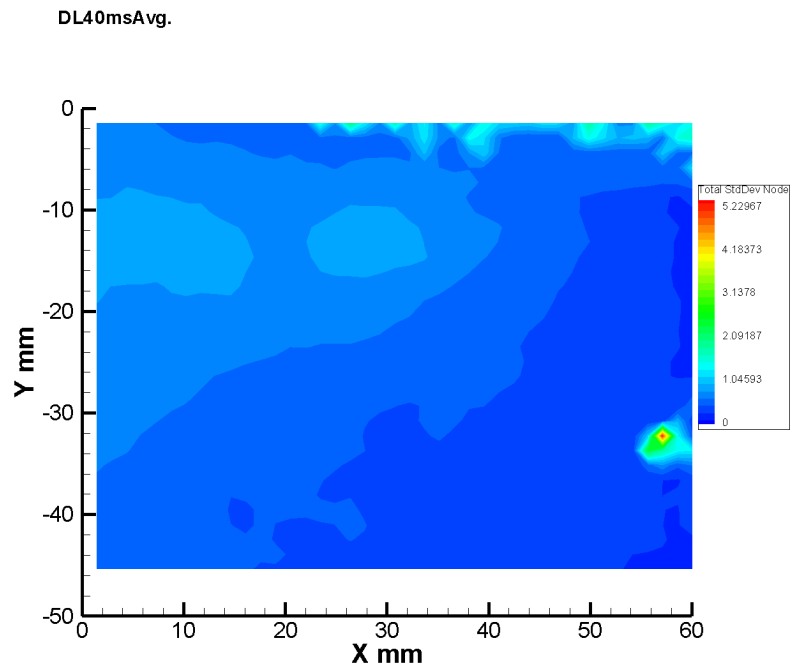
Σχήμα 6.150: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 30 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



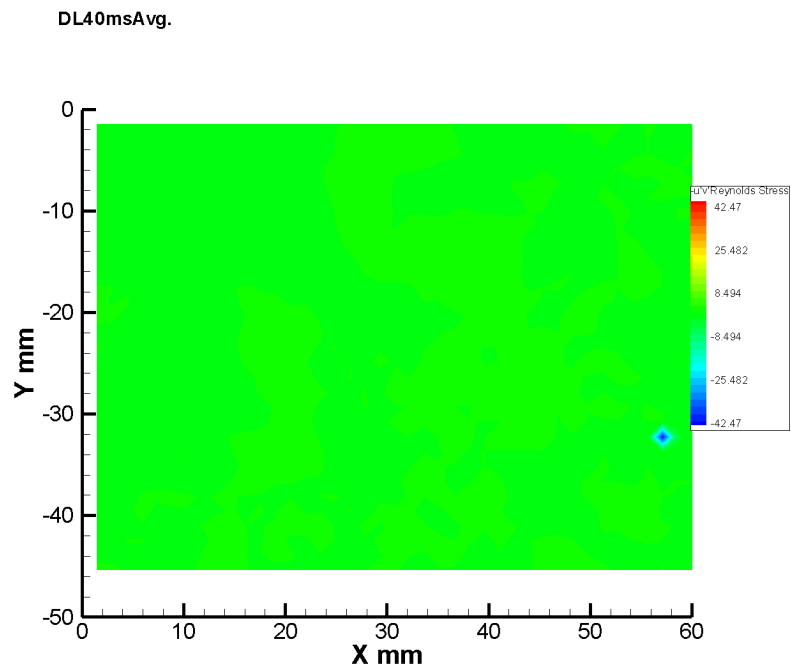
Σχήμα 6.151: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



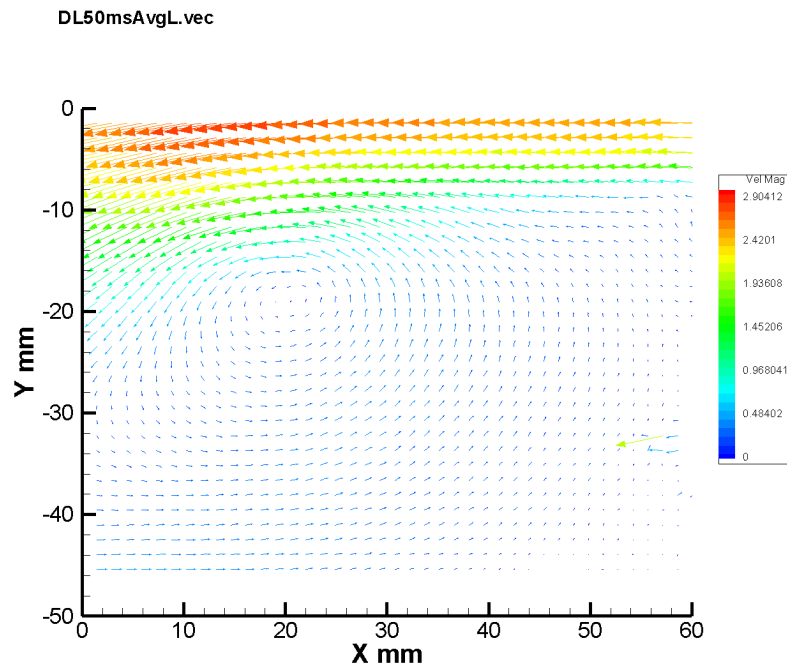
Σχήμα 6.152: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



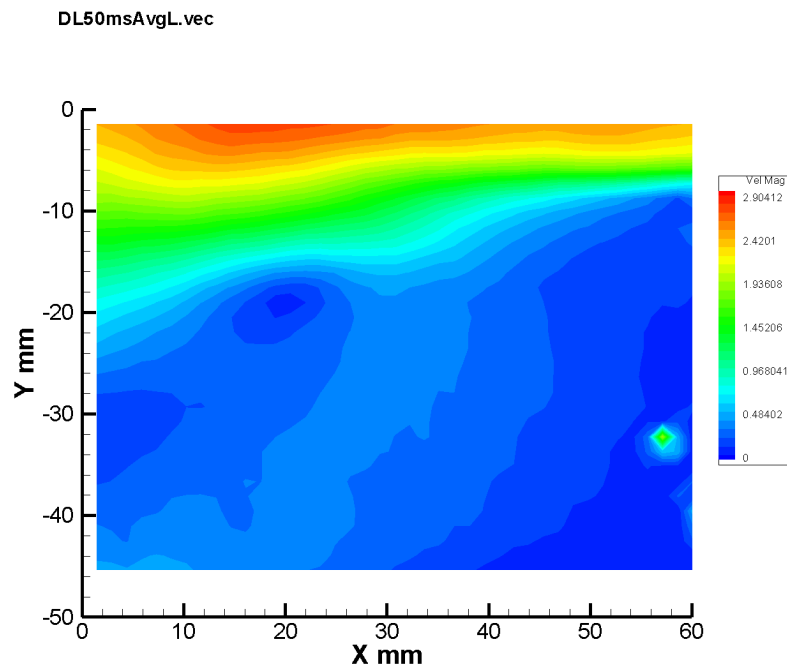
Σχήμα 6.153: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



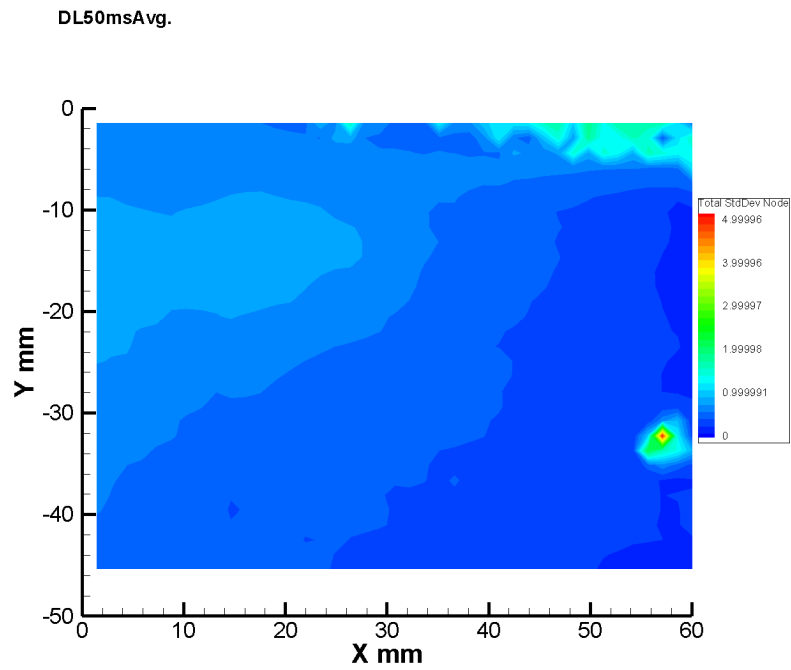
Σχήμα 6.154: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 40 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



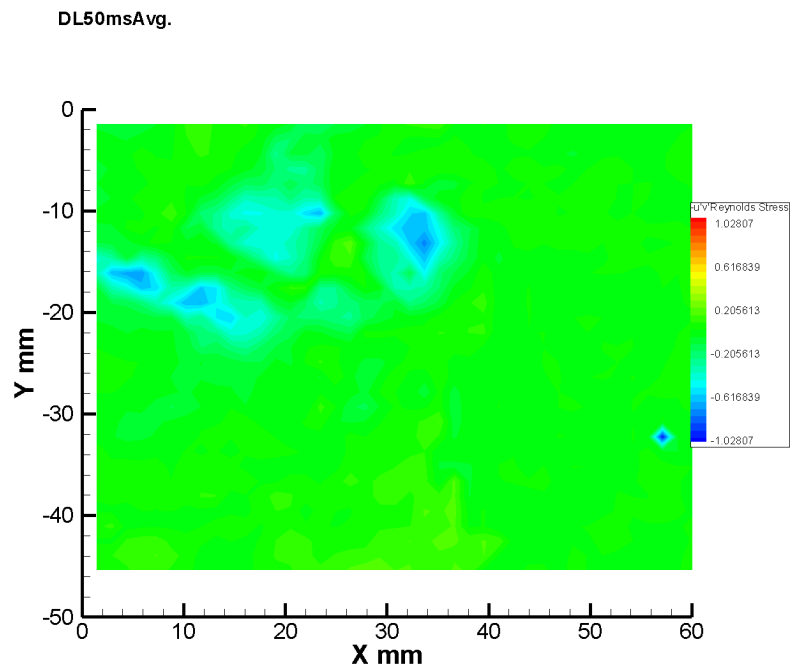
Σχήμα 6.155: Μέσο διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.156: Μέση κατανομή τιμών πεδίου ταχυτήτων της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.157: Τυπική απόκλιση των διαταραχών της U_x συνιστώσας για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.



Σχήμα 6.158: Μέση κατανομή τάσεων Reynolds/πυκνότητα της ροής για καθυστέρηση καταγραφής 50 ms και ροή από δεξιά προς τα αριστερά. Παράθυρο 1, συγχρονισμένες μετρήσεις.

Κεφάλαιο 7

Κυριότερα Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα από την διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

1. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στη ροή σχηματίζονται δύο περιοχές ανακυκλοφορίας, μια κύρια ανθρωρολογιακής φοράς (port όπως την αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που κινείται μαζί με το ελεύθερο ρεύμα), η οποία εκτείνεται από την περιοχή της άνω ακμής της απότομης διεύρυνσης μέχρι το σημείο επανακόλλησης και μια δευτερεύουσα, η οποία είναι ωρολογιακής φοράς (port), βρίσκεται στην περιοχή της κάτω ακμής της απότομης διεύρυνσης και είναι πολύ μικρότερη της πρώτης.
2. Το σημείο επανακόλλησης για την περίπτωση χωρίς έλεγχο βρίσκεται κοντά στα $5H$ από την αρχή των αξόνων, όπου H είναι το ύψος του δοκιμίου της απότομης διεύρυνσης. Το μήκος επανακόλλησης διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση και επηρεάζεται από παράγοντες όπως το είδος ελέγχου και κυρίως τον αριθμό Re . Τα ευρήματα αυτής της εργασίας βρίσκονται κοντά σε αυτά άλλων ερευνητών που διεξήγαγαν παρόμοια πειράματα.
3. Για την περίπτωση με έλεγχο το μήκος επανακόλλησης μεταβάλλεται με τη συχνότητα των δεσμών, ενώ υπάρχει μια συχνότητα στην οποία το μήκος γίνεται ελάχιστο. Όταν η ροή διεγείρεται με τη βέλτιστη συχνότητα, ώστε ο αδιάστατος αριθμός Strouhal με βάση το ύψος του δοκιμίου να είναι $St = 0.22$, το μήκος επανακόλλησης μειώνεται κατά 21% περίπου του μήκους χωρίς έλεγχο. Παρατηρήθηκε μια δεύτερη συχνότητα, για την οποία ισχύει $St = 0.14$, στην οποία η καμπύλη μήκους επανακόλλησης-περιόδου δέσμης παρουσιάζει επίσης ελάχιστο. Αυτός ο αριθμός Strouhal διαφέρει σημαντικά από αυτούς που βρήκαν άλλοι ερευνητές για παρόμοια πειράματα και για αυτό το λόγο δεν μελετήθηκε περαιτέρω. Ωστόσο πρέπει να γίνουν νέα πειράματα σε μεγαλύτερο εύρος περιόδων δέσμης για την επαλήθευση αυτής της παρατήρησης.
4. Συγχρονισμένες μετρήσεις μέσα στην περίοδο της δέσμης, έδειξαν ότι το μήκος επανακόλλησης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου και η όλη διαδικασία είναι ένα ασταθές δυναμικό φαινόμενο. Την ίδια παρατήρηση έχουν κάνει και άλλοι ερευνητές.
5. Συγχρονισμένες μετρήσεις που έγιναν στο παράθυρο λήψης της απότομης διεύρυνσης έδειξαν την ύπαρξη μιας δίνης, η οποία εκλύεται από το ύψος της άνω ακμής του δοκιμίου της απότομης και ταξιδεύει επεκτεινόμενη μέσα στην περίοδο προς το σημείο επανακόλλησης. Η ταχύτητά της U_x βρέθηκε περίπου σταθερή και ίση με $0.33U_\infty$ και η $\overline{U}_\psi \simeq 0.09U_\infty$ περίπου.

Μέρος III
Παράρτημα

Στο παράρτημα παρατίθεται ο κώδικας Matlab, ο οποίος συντάχθηκε για την επεξεργασία και παρουσίαση των δεδομένων της σειράς πειραμάτων θερμού νήματος. Ο μετασχηματισμός Fourier έγινε για τη μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων.

```

Program for plotting data
close all
s=uiigetfile('*.dat','Select the Dat-file');
A=sscanf(s,'jet%d-%d.dat');
d=load(s);
x=d(:,1);
y=d(:,2);
figure(1);
subplot(3,1,1);plot(x,y,'r');xlim([min(x) max(x)]);ylim([0 4.5])
title(sprintf('Hot Wire response for a period of T= %d ms and %d ms closed valve',A));
xlabel('Sampling time (Real time enviroment)');
ylabel('Volts (V)');
%first plot higher x axis resolution%
figure(1)
subplot(3,1,2);plot(x,y,'g');xlim([mean(x)-0.5 mean(x)+0.5]);ylim([0 4.5])
title(sprintf('Hot Wire response for a period of T= %d ms and %d ms closed valve',A));
xlabel('Sampling time (Real time enviroment)');
ylabel('Volts (V)');
%Program for fourrier analysis%
format long
x1=d(:,2);
y1=abs(fft(x1));
f=(1000/5000)*(1:2500);
Y=y1(1:2500);
F=f';
figure(1)
subplot(3,1,3);plot(f,y1(1:2500));xlim([0 100]);ylim([ 0 2500]);
title('Jet frequency performing Fourier Analysis')
xlabel('Frequency(Hz)')
ylabel('Arbitrary Units')
FY=[F,Y];

```

Βιβλιογραφία

- [1] *Cameras for PIV, PLIF, GSV*.
- [2] *MAC VALVES Catalogue*.
- [3] Κυνηγαλάκης Μύρων. Ελεγχος της ροής μέσω παλλόμενων δεσμών αέρα σε απότομη διερεύνηση. Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2003.
- [4] *Boundary Layer and Flow Control*, chapter The History of Boundary Layer Control Research in the United States of America. Pergamon Press, Oxford, England, 1961.
- [5] *Boundary Layer and Flow Control-Its Principle and Applications*, chapter Shock Induced Separation and Its Prevention by Design and Boundary Layer Control. Pergamon Press, Oxford, England, 1961.
- [6] *Viscous Drag Reduction*. Plenum Press, New York, 1969.
- [7] *Compressed air distribution*. Atlas Copco AB, Stockholm, 1975.
- [8] *Design theory of fluidic components*. Academic Press, New York, San Francisco, London, 1975.
- [9] *Flow Visualization*. New York: Academic, 1987.
- [10] *Die Aerodynamische Versuchsanstalt in Göttingen, ein Werk Ludwig Prandtls*. Vandenhoeck & Ruprecht, 1990.
- [11] *Natural Laminar Flow and Laminar Flow Control*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [12] *Aircraft flight control actuation system design – Alternate command systems*. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale PA, 1993.
- [13] *Speckle Metrology*, chapter Particle image velocimetry. 1993.
- [14] *Selected papers on particle image velocimetry SPIE Milestone Series MS 99*. SPIE Optical Engineering Press, 1994.
- [15] *Bibliography of particle velocimetry using imaging methods: 1917–1995*. TSI Inc., 1996.
- [16] *Developments in Laser Techniques in Fluid Mechanics*, chapter Molecular Tagging Diagnostics for the Study of Kinematics and Mixing in Liquid Phase Flows. Springer-Verlag, New York, 1997.
- [17] *A primer on pneumatic valves and controls*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1997.
- [18] *Flow control: Fundamentals and Practices*, chapter Introduction to Flow Control. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [19] *Flow control: Fundamentals and Practices*, chapter Frontiers of Flow Control. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [20] *Particle image velocimetry, a practical guide*. Springer, 1998.
- [21] *Particle image velocimetry, a practical guide*, chapter 9. Springer, 1998.
- [22] *Proceedings of the 3rd international workshop on particle image velocimetry*, 1999.

- [23] *Fluid power with applications*. Prentice Hall International Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2000.
- [24] *Proceedings of the 4th international symposium on particle image velocimetry*, 2001.
- [25] *Druckluft Handbuch*. Vulkan, Essen, 2003.
- [26] Δ.Σ. Μαθιουλάκης, *Τεχνικές μέτρησης ρευστομηχανικών μεγεθών*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 2005.
- [27] *Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control*, chapter Pressure Control Valves. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [28] *Pneumatic Drives: System Design, Modelling and Control*, chapter Electro-Mechanical Converters. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [29] Huppertz A. and Janke G. Some new results on the control of the flow over a backward-facing step. In *Euromech Colloquium 361- Active Control of Turbulent Shear Flows*.
- [30] Vakili A.D. Review of vortical flow utilization. *AIAA Paper, New York*, 1990.
- [31] McLachlan B.G. Study of a circulation control airfoil with leading/trailing-edge blowing. *J. Aircraft*, 1989.
- [32] Scheelke B. Bhattacharjee S. and Troutt T.R. Modification of vortex interactions in a reattaching separated flow. *AIAA Paper, New York*, 1985.
- [33] Cantwell B.J. Organized motion in turbulent flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1981.
- [34] Brücker C. Spatial correlation analysis for 3-d scanning piv: simulation and application of dual-color light-sheet scanning. In *Proc. 89th Intl. Symp. on Laser Techniques to Fluid Mechanics*.
- [35] Brücker C. 3-d piv via spatial correlation in a color-coded light sheet. *Exp. Fluids*, 1996.
- [36] Shi Ying Z. Chen D. Control of separation in diffusers using forced unsteadiness. *AIAA Paper, New York*, 1989.
- [37] Greenblatt D. and Wygnanski I. The control of flow separation by periodic excitation. *Progress in Aerospace Sciences*, 2000.
- [38] Compton D.A. and Johnston J.P. Streamwise vortex development by pitched and skewed jets in a turbulent boundary layer. *AIAA Paper, New York*, 1991.
- [39] J.M. Delery. Shock wave/turbulent boundary layer interaction and its control. *Prog. Aerospace Science*, 1985.
- [40] Bushnell D.M. and Heffner J.N. Viscous drag reduction in boundary layers. *Progress in Astronautics & Aeronautics, AIAA, Washington D.C.*, 1990.
- [41] Rao D.M. and Kariya T.T. Boundary-layer submerged vortex generators for separation control-an exploratory study. *AIAA Paper, New York*, 1985.
- [42] Hart D.P. Piv error correction. *Exp. Fluids*, 2000.
- [43] Mohamed Gad el Hak. Interactive control of turbulent boundary layers: A futuristic overview. *AIAA*, 1994.
- [44] Mohamed Gad el Hak. Compliant coatings: A decade of progress. *Appl. Mech. Rev.*, 1996.
- [45] Mohamed Gad el Hak. Modern developments in flow control. *Appl. Mech. Rev.*, 1996.
- [46] Berrier F.C. Ely W.L. Performance of steady and intermittent blowing jet flaps and spanwise upper surface slots. Technical report, Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1975.
- [47] André Giovannini Emmanuel Creusé and Iraj Mortazavi. Vortex simulation of active control strategies for transitional backward-facing step flows. *J. of Computers and Fluids*, 2008.
- [48] Hough G.R. Viscous flow drag reduction. *Progress in Astronautics & Aeronautics, AIAA, New York*, 1980.

- [49] Elliot G.S. and Beutner T.J. Molecular filter based planar doppler velocimetry. *Prog. Aero. Sci.*, 1999.
- [50] Royer H. and Stanislas M. Stereoscopic and holographic approaches to get the third velocity component in piv. In *Lecture Series 1996–03, Particle Image Velocimetry*.
- [51] Schramm H. Die hydraulik stand pate - einsatzbereiche eines pneumatischen proportional-druckregelventils. *F, Fluid*.
- [52] Wang J.J. Huang H.T., Fiedler H.E. Limitation and improvement of piv, part ii. limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns. *Exp. Fluids*, 1994.
- [53] Grant I. Particle image velocimetry: A review. In *Proceedings Institute of Mechanical Engineers*.
- [54] Röhle I. Three-dimensional doppler global velocimetry in the flow of a fuel spray nozzle and in the wake region of a car. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997.
- [55] Cheeseman I.C. and Seed A.R. The application of circulation control by blowing to helicopter rotors. *J. Royal Aeronautical Society*, 1967.
- [56] Wada A. Iguchi M. Okamoto K.-Yamamoto F. Ishikawa M., Murai Y. A novel algorithm for particle tracking velocimetry using the velocity gradient tensor. *Exp. Fluids*, 2000.
- [57] Eaton J. and Johnston J. A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA J.*, 1981.
- [58] Kukainis J. Effects of three-dimensional boundary layer control devices on a quasi-two-dimensional swept wing at high subsonic speeds. Technical report, Arnold Engineering Development Center, 1969.
- [59] Westerweel J. *Digital particle image velocimetry – Theory and application*. PhD thesis, Delft University, 1993.
- [60] J. Soria J. Kostas and M.S. Chong. Particle image velocimetry measurements of a backward-facing step flow. *Experiments in Fluids*, 2002.
- [61] Kentfield J.A.C. Drag reduction of controlled separated flows. *AIAA Paper, New York*, 1985.
- [62] Kentfield J.A.C. Short, multi-step, afterbody fairings. *J Aircraft*, 1985.
- [63] Wimpenny J.C. Vortex generators. *U.S. Patent*, 1970.
- [64] Meyers J.F. and Komine H. Doppler global velocimetry – a new way to look at velocity. In *Proc. ASME Fourth International Conference on Laser Anemometry*.
- [65] Nishi M. Johnston J. Vortex generator jets-a means for passive and active control of boundary layer separation. *AIAA Paper, New York*, 1989.
- [66] Horstmann K.-H. and Quast A. Widerstandsverminderung durch blasturbulatoren. Technical report, DFVLR, Braunschweig, Federal Republic of Germany, 1981.
- [67] Wygnanski I. Katz Y., Nishri B. The delay of turbulent boundary layer separation by oscillatory active control. *AIAA Paper, New York*, 1989.
- [68] Wygnanski I. Katz Y., Nishri B. The delay of turbulent boundary layer separation by oscillatory active control. *Phys. of Fluids*, 1989.
- [69] Hinsch K.D. Three-dimensional particle velocimetry. *Meas. Sci. Tech.*, 1995.
- [70] Hinsch K.D. Holographic particle image velocimetry. *Meas. Sci. Tech.*, 2002.
- [71] Zhong Y. Keane R.D., Adrian R.J. Super-resolution particle imaging velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 1995.
- [72] Wikoff D. Kidd J.A. and Cottrell C.J. Drag reduction by controlling flow separation using stepped afterbodies. *J. Aircraft*, 1990.

- [73] P. Randt L. Proc. verhandlungen des iii. internationalen mathematiker - kongresses. In *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung*.
- [74] Gratzler L.B. Analysis of transport applications for high lift schemes. In *AGARD Course on Assessment of Lift Augmentation Devices*.
- [75] Trinite M. Lecordier B. Advanced piv algorithms with image distortion—validation and comparison from synthetic images of turbulent flow. In *Particle image velocimetry: recent improvements*.
- [76] Wood N.J. Lee C.S., Tavella D.A. and Roberts L. Flow structure of lateral wing-tip blowing. *AIAA Paper, New York, 1986*.
- [77] Samimy M. and Wernet M.P. Review of planar multiple component velocimetry in highspeed flows. *AIAA Journal, 2000*.
- [78] Zaman K.B.M.Q. Mangalam S.M, Bar-Sever A. and Harvey W.D. Transition and separation control on a low-reynolds number airfoil. In *Proc. Int. Conf. on Aerodynamics at Low Reynolds Numbers*.
- [79] Goodman W.L. McInville R.M., Hassan H.A. Mixing layer control for tangential slot injection in turbulent flows. *AIAA Paper, New York, 1985*.
- [80] Chow J.H. Miao J.J., Chen M.H. Flow structures of a vertically oscillating plate immersed in a flat-plate turbulent boundary layer. In *Proc. Eleventh Biennial Symp. on Turbulence*.
- [81] Wood N.J. and Nielsen J. N. Circulation control airfoils—past, present, future. *AIAA Paper, New York, 1985*.
- [82] Cornelius K. C. Novak C.J. and Roads R.K. Experimental investigations of the circular wall jet on a circulation control airfoil. *AIAA Paper, New York, 1987*.
- [83] Schmidl W.D. Okamoto K., Hassan Y.A. New tracking algorithm for particle image velocimetry. *Exp. Fluids, 1995*.
- [84] Palmer W.E. Oyler T.E. Exploratory investigation of pulse blowing for boundary layer control. Technical report, Columbus Aircraft Division, North American Rockwell Corp., 1972.
- [85] Brassart P. and Scavarda S. Modelling a pneumatic braking system. In *Proc. 5th Scandinavian Int. Conf. on Fluid Power*.
- [86] Moin P. and Bewley T. Feedback control of turbulence. *Appl. Mech. Rev., 1994*.
- [87] Viswanath P.R. Shockwave-turbulent boundary layer interaction and its control: A survey of recent developments. *Sadhana, 1988*.
- [88] Lindken R. and Merzkirch W. A novel piv technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Exp. Fluids, 2002*.
- [89] Meynard R. *Mesure de champs de vitesse d'écoulements fluides par analyse de suites d'images obtenues par diffusion d'un feuillet lumineux*. PhD thesis, Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles, 1983.
- [90] Wallis R.A and Stuart C.M. On the control of shock induced boundary layer separation with discrete jets. Technical report, Aeronautical Research Council, London, England, 1958.
- [91] Keane R.D. and Adrian R.J. Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Applied Scientific Research, 1992*.
- [92] Mehta R.D. Effect of a longitudinal vortex on a separated turbulent boundary layer. *AIAA Paper, New York, 1985*.
- [93] Koga D. J. Reischel P.H., Nagib H.M. Control of separated flows using forced unsteadiness. *AIAA Paper, New York, 1985*.

- [94] Johnston J.P. Hesselink L. Powell D.J.-Roberts L. Kroo E. Reynolds W.C., Eaton J.K. Flow control for unsteady and separated flows and turbulent mixing. Technical report, AFOSR Technical Report, Washington, D.C., 1988.
- [95] Adrian R.J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow – a review. *Int. Journal of Heat and Fluid Flow*, 1986.
- [96] Adrian R.J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1991.
- [97] Kind R.J. *A Proposed Method of Circulation Control*. PhD thesis, Cambridge University, 1967.
- [98] Kegelman J.T. Roos F.W. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers. *AIAA J.*, 1986.
- [99] Erika Y. Rendon-Fraga Eduardo N. Salas-Cabrera Ruben Salas-Cabrera, Jonathan C. Mayo-Maldonado and Aaron Gonzalez-Rodriguez. On the real time implementation of a controller for an electromechanical system. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*.
- [100] Wereley S.T.-Beebe D.J. Adrian R.J. Santiago J.C., Meinhart C.D. A particle image velocimetry system for microfluidics. *Exp Fluids*, 1998.
- [101] Simpson R.L. Saripalli K.R. Investigation of blown boundary layers with an improved wall jet system. Technical report, NASA Contractor, 1980.
- [102] Robinson S.K. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1991.
- [103] Iguchi M.-Murai Y. Song X., Yamamoto F. New tracking algorithm of piv and removal of spurious vectors using delaunay tessellation. *Exp. Fluids*, 1999.
- [104] Wilkinson S.P. Interactive wall turbulence control. *Progress in Astronautics & Aeronautics, AIAA, Washington D.C.*, 1990.
- [105] Etoh G.T. Takehara K., Adrian R.J. and Christensen K.T. A kalman tracker for super-resolution piv. *Exp. Fluids*, 2001.
- [106] Lee C.S. Tavella D.A. and Wood N.J. Influence of wing tip configuration on lateral blowing efficiency. *AIAA Paper, New York*, 1986.
- [107] Lee C.S. Tavella D.A., Wood N.J. and Roberts L. Two blowing concepts for roll and lateral control of aircraft. Technical report, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1986.
- [108] Pěnkavová V. και Pantzali M. Tihon J. The effect of inlet pulsations on the backward-facing step flow. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2010.
- [109] Pavel J. Uruba V. and Mazur O. Control of a channel-flow behind a backward-facing step by suction/blowing. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, 2007.
- [110] Bhat M.K. Vakili A.D., Wu J.M. High angle of attack aerodynamics of excitation of the locked leeside vortex. In *Society of Automotive Engineers*.
- [111] Lauterborn W. and Vogel A. Modern optical techniques in fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1984.
- [112] Harvey W.D. Low-reynolds number aerodynamics research at nasa langley research center. In *Proc. Int. Conf. on Aerodynamics at Low Reynolds Numbers*.
- [113] Paterson R.W. Werle M.J. and Presz W.M. Jr. Trailing-edge separation/stall alleviation. *AIAA J.*, 1987.
- [114] VaJdli A.D. Wu J.M. and Gilliam F.T. Aerodynamic interactions of wingtip flow with discrete wingtip jets. *AIAA Paper, New York*, 1984.
- [115] Vakili A.D. Wu J.M. and Chen Z.L. Investigation on the effects of discrete wingtip jets. *AIAA Paper, New York*, 1983.

- [116] Ohi S. Yoshioka S. and S. Masuda. Turbulence statistics of periodically perturbed seperated flow over a backward-facing step. *Int. J. of Heat and Flow*, 2000.
- [117] Sheng C Zhang F. A prediction method for optimum velocity ratio of air jet vortex generator. *J. Aerospace Power*, 1987.