

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ
ΝΕΡΟΥ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ
ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑ PHASE DOPPLER**

ΕΥΑΓΕΛΛΟΣ Β. ΠΑΠΑΛΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΒΟΛΟΣ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία περιγράφει το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης, και την ολοκλήρωση πειραματικών μετρήσεων και μελέτης ενός έτους. Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου, ομότιμο καθηγητή Νικόλαο Βλάχο, για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα. Για την ανεκτίμητη συνεισφορά του μέσω των πολύτιμων συμβουλών του και την καθοδήγησή του σε όλα τα κρίσιμα σημεία αυτής της εργασίας, συνεισφορά ή οποία διαμόρφωσε καθορίστηκα το τελικό αποτέλεσμα.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Κωνσταντίνο Τσάνη καθώς στον μεταπτυχιακό φοιτητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Αθανάσιο Παπαλό για τη συμβολή τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Βέργο μηχανοτεχνίτη του Τμήματος, η συμβολή του οποίου ήταν κρίσιμη στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων κατά την διάρκεια του προετοιμασίας της διάταξης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Βάϊο και Ιωάννα, για την υλική και ηθική συμπαράστασή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Βόλος – Οκτώβριος 2011

Ευάγγελος Β. Παπαλός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διατριβή εξετάζεται πειραματικά η κατανομή ταχύτητας και μεγέθους σωματιδίων σε τυρβώδη διφασική ροή νερού-σωματιδίων σε αγωγό. Οι διφασικές ροές ρευστού-σωματιδίων παρουσιάζουν έντονο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, λόγω της πολυπλοκότητας των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, αλλά και γιατί συναντώνται σε πολλά συστήματα που περιλαμβάνουν βιολογικές, μηχανολογικές, χημικές και πυρηνικές εφαρμογές. Η καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται σε αυτές τις ροές, οδηγεί στην πιο αποδοτική και ποιοτική λειτουργία των βιομηχανικών συσκευών, καθώς και άλλων συναφών διεργασιών.

Στο πείραμά μας, η διφασική ροή αναπτύσσεται σε κατακόρυφο αγωγό από Plexiglas ορθογωνικής διατομής (60X15mm) και μήκους 1,6m. Το νερό εισέρχεται από το πάνω μέρος του αγωγού και περνάει από ειδικά σχεδιασμένο κατανεμητή που είναι ενσωματωμένος στον αγωγό για να εξασφαλίζεται ότι η ροή στη περιοχή μετρήσεων είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Αφού το νερό εξέλθει από το κάτω μέρος του αγωγού συλλέγεται σε ένα δοχείο και με τη βοήθεια αντλίας προωθείται στο άνω δοχείο, το οποίο βρίσκεται σε ύψος περίπου 2m από το κάτω δοχείο, με σκοπό την επανεισαγωγή του στον αγωγό.

Το σύστημα ανεμομετρίας Phase Doppler (PDPA) που διαθέτει το εργαστήριο Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών, επιτρέπει να διερευνηθεί η κατανομή της ταχύτητας και μεγέθους των σωματιδίων εντός του αγωγού. Έγιναν μετρήσεις της κατανομής της ταχύτητας και του μεγέθους των σωματιδίων σε διάφορες θέσεις του αγωγού.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σχετικά υψηλή συγκέντρωση σωματιδίων επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενώ για σχετικές μικρές συγκεντρώσεις σωματιδίων η ροή δεν επηρεάζεται. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ότι τα σωματίδια των μεγαλύτερων διαστάσεων τείνουν να κινούνται προς τα τοιχώματα του αγωγού, ενώ αυτά των μικρότερων διαστάσεων προς το πυρήνα της ροής.

Τέλος, γίνεται μια σειρά προτάσεων για την βελτίωση του πειράματος με συμβουλές ως προς την εξέλιξη της πειραματικής διάταξης αλλά και την μεθοδολογία με σκοπό την επίτευξη ταχύτερων και ακριβέστερων μετρήσεων.

ABSTRACT

This thesis examines the distribution of velocity and size of particles in turbulent two-phase flow of water-particles in a duct. The two-phase fluid-particle flows are strong scientific and technological interest because of the complexity of the phenomena that take place, but also because they occur in many systems, including biological, mechanical, chemical and nuclear applications. A better understanding of the phenomena observed in these flows leads to more efficient and quality operation of industrial equipment and other related processes.

In our experiment the two-phase flow develops in a Plexiglas vertical duct of rectangular cross-section (60X15mm) and 1,6m height. The fluid enters from the top of the duct and passes through a specially designed distributor embodied in the duct to ensure that the flow in the measurement region is fully developed. After the water exits from the bottom of the duct it is collected in a container and it is pumped to the upper reservoir, located at a height of about 2m above the container. From there the water enters again the upper section of the duct.

The Phase Doppler anemometry (PDPA) system of the laboratory of Fluid Mechanics & Turbomachinery, allows investigation of the velocity and size distribution of the particles in the duct. Measurements of velocity and size distribution of particles in various positions of the duct were carried out.

The results show that a relatively high concentration of particles affects the flow characteristics whereas for low particle concentrations the associated flow is not much affected. An interesting result is that the larger particles tend to move close to the walls of the duct, while those of smaller size move towards the core of the flow.

Finally, a series of proposals is made for improving the experiment with suggestions on further development of the experimental apparatus and the methodology in order to obtain faster and more accurate measurements.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ, ΕΙΚΟΝΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Αντικείμενο και Στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας.....	17
1.2 Δομή της μεταπτυχιακής.....	17
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Ροής Υγρού-Σωματιδίων σε Αγωγούς.....	18
1.4 Στοιχεία Καινοτομίας.....	25
2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	
2.1 Εξισώσεις Συνεχούς Φάσης.....	26
2.1.1 Επιμερισμός Reynolds σε Χρονικά Μέσες Τιμές.....	26
2.1.2 Εξίσωση της Συνέχειας.....	27
2.1.3 Εξισώσεις Navier-Stokes.....	28
2.2 Εξισώσεις Κίνησης Σωματιδίων.....	28
2.2.1 Δυνάμεις Επιτάχυνσης.....	29
2.2.2 Δύναμη οπισθέλκουσας.....	30
2.2.3 Δύναμη Basset.....	32
2.2.4 Δυνάμεις ανύψωσης.....	32
2.2.5 Η εξίσωση Basset-Boussinesq-Oseen.....	33
2.2.6 Επίδραση της τύρβης.....	33
2.2.7 Απόσταση μεταξύ σωματιδίων.....	33
2.2.8 Χρόνος απόκρισης.....	35
2.2.9 Αριθμός Stokes.....	36
2.2.10 Αραιές και πυκνές διφασικές ροές.....	36
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	
3.1 Το Μετρητικό Σύστημα PDA.....	38
3.1.1 Ελεγκτής κινητήρα του PDA.....	41
3.1.2 Επεξεργαστής σήματος.....	42
3.2 Περιγραφή της διάταξης ροής.....	43
3.2.1 Ο αγωγός.....	43
3.2.2 Δοχεία νερού.....	44

3.2.3	Αντλία νερού.....	45
4	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ PHASE DOPPLER	
4.1	Εισαγωγή.....	46
4.1.1	Χαρακτηριστικά Δεσμών Laser.....	47
4.1.2	Κατηγορίες Συσκευών Laser	48
4.1.3	Εφαρμογές Συσκευών Laser	49
4.2	Το Φαινόμενο Doppler	50
4.2.1	Θεωρία Ανεμομετρίας Phase Doppler	53
4.3	Ο Όγκος Ελέγχου.....	61
4.3.1	Γεωμετρία του Όγκου Ελέγχου	61
4.3.2	Διαστάσεις Όγκου Ελέγχου	65
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
5.1	Εισαγωγή.....	67
5.1.1	Επαναληψιμότητα και Αριθμός δειγμάτων	68
5.1.2	Διάμετρος σωματιδίων.....	68
5.1.3	Μήκος ανάπτυξης ροής.....	69
5.1.4	Συγκέντρωση σωματιδίων	70
5.1.5	Μεθοδολογία Μετρήσεων	71
5.2	Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις.....	73
5.2.1	Σειρά-1: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt	73
5.2.2	Σειρά - 2: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 5μm Σωματίδια	76
5.2.3	Σειρά-3: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 2gr 5μm Σωματίδια	79
5.2.4	Σειρά-4: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 2gr 20μm Σωματίδια	82
5.2.5	Σειρά - 5: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 4gr 20μm Σωματίδια	86
5.2.6	Σειρά-6: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 21,1gr 50μm Σωματίδια	90
5.2.7	Σειρά Μετρήσεων - 7: Απιονισμένο Νερό Συνολικού Όγκου 64lt+41,1gr 50μm.	93
5.2.8	Σειρά-8: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 20μm και 0,5gr 5μm Σωματίδια....	96
5.2.9	Σειρά-9: Απιονισμένο Νερό 64lt με 1gr 20μm, 0,5gr 5μm και 8gr 50μm Σωματίδια	100
5.2.10	Σειρά-10: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 5μm και 20gr 50μm Σωματίδια	103
5.2.11	Σειρά-11: Απιονισμένο Νερό 64lt με 1gr 20μm και 10gr 50μm Σωματίδια	107
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
6.1	Συμπεράσματα	112
6.2	Προτάσεις.....	113

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114
-------------------	-----

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα2-1: Εξάρτηση του συντελεστή οπισθέλκουσας σφαίρας από τον αριθμό Reynolds	30
Σχήμα2-2: Σύστημα συντεταγμένων για ροή Stokes γύρω από σφαίρα.....	31
Σχήμα 2-3: Η εξάρτηση του συντελεστή οπισθέλκουσας με τον αριθμό Reynolds.....	31
Σχήμα 2-4: Απόσταση μεταξύ σωματιδίων	33
Σχήμα 2-5: Ο όγκος ελέγχου με τα σωματίδια της διακριτής φάσης	34
Σχήμα 2-6: Συγκρούσεις μεταξύ σωματιδίων.....	37
Σχήμα 3-1: Πομπός δέσμης Laser (Μοντέλο XTM – 1100)	39
Σχήμα 3-2: Οπτικό διάγραμμα πομπού δέσμης Laser (Μοντέλο XTM – 1100)	39
Σχήμα 3-3: Αποδέκτης Δέσμης Μοντέλο RCV – 2100.....	40
Σχήμα 3-4: Το οπτικό φίλτρο όπως φαίνεται από το οπτικό άνοιγμα	40
Σχήμα 3-5: Διάγραμμα διαμόρφωσης φακών στον αποδέκτη	40
Σχήμα 3-6: Διαμόρφωση Πομπού –Αποδέκτη για μπροστινή σκέδαση σε γωνία 30^0	41
Σχήμα 3-7: Ελεγκτής του κινητήρα του PDA.....	41
Σχήμα 3-8: Επεξεργαστής σήματος	42
Σχήμα3-9: Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής	42
Σχήμα 3-10: Παλμογράφος	42
Σχήμα 3-11: Ποιότητα σήματος ανάλογα με την ευθυγράμμιση και τον κορεσμό.....	43
Σχήμα 3-12: Διάταξη σύνδεσης των τμημάτων του PDA	43
Σχήμα 3-13: Ο κατακόρυφος ορθογωνικός αγωγός.....	44
Σχήμα 3-14 : Δοχείο τοποθετημένο ψηλά	44
Σχήμα 3-15 : Δοχείο τοποθετημένο χαμηλά	44
Σχήμα 3-16: Η αντλία του συστήματος, Kraft SP 250	45
Σχήμα 4-1: Συσκευή Phase Doppler Anemometer	46
Σχήμα 4-2: Laser Ηλίου – Νέον.....	47
Σχήμα 4-3: Επέκταση και εστίαση της δέσμης	48
Σχήμα 4-4: Τυπική διάταξη Laser αερίου	49
Σχήμα 4-3: Εκτομή παλμού Laser οργανικής χρωστικής ουσίας.....	49
Σχήμα 4-4: Laser σταθεράς κατάστασης ημιαγωγού	49
Σχήμα 4-5: Μετατόπιση Doppler του σκεδαζόμενου φωτός από ένα κινούμενο σωματίδιο.....	50
Σχήμα 4-6: Διάταξη των ακτινών του συστήματος PDA.....	51
Σχήμα 4-7: Διάταξη της μεθόδου διαφοράς συχνότητας Doppler (διπλό σύστημα ακτινών PDA).....	52
Σχήμα 4-8: Οπτική διάταξη για LDA και PDA	53
Σχήμα 4-9: Προβολή κροσσών συμβολής.....	54
Σχήμα 4-10: Υπολογισμένο Μοντέλο Κροσσών	54
Σχήμα 4-11: Ένταση Σήματος Doppler.....	56
Σχήμα 4-12: Φίλτραρισμένα Σήματα από τα τρία Κανάλια	56
Σχήμα 4-13: Καμπύλη Απόκρισης του Οργάνου.....	56
Σχήμα 4-14: Διάθλαση και ανάκλαση δέσμης Laser κατά την διέλευση σωματιδίου.....	57
Σχήμα 4-15: Οπτική διάταξη ενός ανεμόμετρου phase-Doppler δύο ανιχνευτών	58

Σχήμα 4-17: Γωνιακή κατανομή έντασης διαφορετικών μοντέλων σκέδασης ($\lambda = 632.8\text{nm}$, $D = 30\text{ }\mu\text{m}$, (a) $m = 0.75$, (b) $m = 1.128$, (c) $m = 1.52$)	59
Σχήμα 4-18: Υπολογισμός των σχέσεων φάσης-μεγέθους για διαφορετικές γωνίες σκέδασης μεταξύ 30° και 80° ..	60
Σχήμα 4-19: Απεικόνιση της επίδρασης της Γκαουσσισιανής ακτίνας με συνέπεια την ασάφεια τροχιάς	61
Σχήμα 4-20: Ο όγκος ελέγχου που σχηματίζεται από την τομή των δύο ακτίνων του PDA.....	62
Σχήμα 4-21: Η διάμετρος της γκαουσσισιανής ακτίνας Laser ορίζεται στα σημεία έντασης $I_{\max}(x)/e^2$. Στο $X = 0$, η διάμετρος είναι ελάχιστη και αναφέρεται ως μέση διάμετρος ακτίνων (waist).	62
Σχήμα 4-22: Τροχιά σωματιδίου μέσω του όγκου ελέγχου	63
Σχήμα 4-23: Όγκος ελέγχου που σχετίζεται με ένα σωματίδιο που κινείται κατά μήκος της περιοχής ανίχνευσης κατά τη διάρκεια του χρόνου μέτρησης Δt	63
Σχήμα 4-24: Η εικόνα που απεικονίζεται στην σχισμή του φακού – δέκτη, των ακτίνων laser	64
Σχήμα 4-25 : Γεωμετρία του απεικονιζόμενου όγκου μέτρησης του PDA.....	64
Σχήμα 4-26: Διαστάσεις του όγκου ελέγχου του PDA.....	65
Σχήμα 4-27: Γεωμετρία του απεικονιζόμενου όγκου μέτρησης του PDA	66
Σχήμα 5-1: Σωματίδια των 5, 20 και 50 μm	68
Σχήμα 5-2: Σωματίδια των 50 μm σε ανάλυση στο μικροσκόπιο πριν την είσοδο τους στη ροή (α) και μετά την είσοδο τους στη ροή (β).....	69
Σχήμα 5-3: Κατανομές μέσων ταχυτήτων (α) $Z=50\text{cm}$, (β) $Z=70\text{cm}$, (γ) $Z=90\text{cm}$	70
Σχήμα 5-4: Ο όγκος ελέγχου για μεσαίες συγκεντρώσεις σωματιδίων	71
Σχήμα 5-6: Θέσεις μετρήσεων ως προς Y	72
Σχήμα 5-6: Θέσεις μετρήσεων ως προς X.....	72
Σχήμα 5-5: Θέσεις μετρήσεων στην διατομή του αγωγού	73
Σχήμα 5-8: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	73
Σχήμα 5-9: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	73
Σχήμα 5-10: Ένταση τύρβης για $Y=-25\text{mm}$	74
Σχήμα 5-11: Μέση διάμετρος σωματιδίων, $Y=-25\text{mm}$	74
Σχήμα 5-12: Μέση ταχύτητα για $Y=-15\text{mm}$	74
Σχήμα 5-13: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15\text{mm}$	74
Σχήμα 5-14: Ένταση τύρβης για $Y=-15\text{mm}$	74
Σχήμα 5-15: Μέση διάμετρος σωματιδίων, $Y=-15\text{mm}$	74
Σχήμα 5-16: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	75
Σχήμα 5-17: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	75
Σχήμα 5-18: Ένταση τύρβης για $Y=0$	75
Σχήμα 5-19: Μέση διάμετρος σωματιδίων για $Y=0$	75
Σχήμα 5-20: Μέση ταχύτητα για $Y=+15\text{mm}$	75
Σχήμα 5-21: Διακύμανση ταχύτητας, $Y=+15\text{mm}$	75
Σχήμα 5-22: Ένταση τύρβης για $Y=+15\text{mm}$	75
Σχήμα 5-23: Ένταση τύρβης για $Y=+15\text{mm}$	75
Σχήμα 5-24: Μέση ταχύτητα για $Y=+25\text{mm}$	76
Σχήμα 5-25: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25\text{mm}$	76

Σχήμα 5-26: Ένταση τύρβης για $Y=+25\text{mm}$	76
Σχήμα 5-27: Μέση διάμετρος για $Y=+25\text{mm}$	76
Σχήμα 5-28: Μέση ταχύτητα για $Y=-25\text{mm}$	76
Σχήμα 5-29: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25\text{mm}$	76
Σχήμα 5-30: Ένταση τύρβης για $Y=-25\text{mm}$	77
Σχήμα 5-31: Μέση διάμετρος για $Y=-25\text{mm}$	77
Σχήμα 5-32: Μέση ταχύτητα για $Y=-15\text{mm}$	77
Σχήμα 5-33: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15\text{mm}$	77
Σχήμα 5-34: Ένταση τύρβης για $Y=-15\text{mm}$	77
Σχήμα 5-35: Μέση διάμετρος για $Y=-15\text{mm}$	77
Σχήμα 5-36: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	78
Σχήμα 5-37: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	78
Σχήμα 5-38: Ένταση τύρβης για $Y=0$	78
Σχήμα 5-39: Διάμετρος σωματιδίων για $Y=0$	78
Σχήμα 5-40: Μέση ταχύτητα για $Y=+15\text{mm}$	78
Σχήμα 5-41: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15\text{mm}$	78
Σχήμα 5-42: Ένταση τύρβης για $Y=+15\text{mm}$	78
Σχήμα 5-43: Μέση διάμετρος σωματιδίων $Y=+15\text{mm}$	78
Σχήμα 5-44: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	79
Σχήμα 5-45: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	79
Σχήμα 5-46: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	79
Σχήμα 5-47: Μέση διάμετρος για $Y=+25\text{mm}$	79
Σχήμα 5-48: Μέση ταχύτητα για $Y=-25\text{mm}$	80
Σχήμα 5-49: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25\text{mm}$	80
Σχήμα 5-50: Ένταση τύρβης για $Y=-25\text{mm}$	80
Σχήμα 5-51: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	80
Σχήμα 5-52: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	80
Σχήμα 5-53: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	80
Σχήμα 5-54: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	80
Σχήμα 5-55: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	80
Σχήμα 5-56: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	81
Σχήμα 5-57: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	81
Σχήμα 5-58: Ένταση τύρβης για $Y=0$	81
Σχήμα 5-59: Μέση διάμετρος για $Y=0$	81
Σχήμα 5-60: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	81
Σχήμα 5-61: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	81
Σχήμα 5-62: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	81
Σχήμα 5-63: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	81
Σχήμα 5-64: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	82
Σχήμα 5-65: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	82

Σχήμα 5-66: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	82
Σχήμα 5-67: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	82
Σχήμα 5-68: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	83
Σχήμα 5-69: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	83
Σχήμα 5-70: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	83
Σχήμα 5-71: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	83
Σχήμα 5-72: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	83
Σχήμα 5-73: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	83
Σχήμα 5-74: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	84
Σχήμα 5-75: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	84
Σχήμα 5-76: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	84
Σχήμα 5-77: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	84
Σχήμα 5-78: Ένταση τύρβης για $Y=0$	84
Σχήμα 5-79: Μέση διάμετρος για $Y=0$	84
Σχήμα 5-80: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	85
Σχήμα 5-81: Διακύμανση ταχύτητας $Y=+15$	85
Σχήμα 5-82: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	85
Σχήμα 5-83: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	85
Σχήμα 5-84: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	85
Σχήμα 5-85: Διακύμανση ταχύτητας $Y=+25$	85
Σχήμα 5-86: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	86
Σχήμα 5-87: Μέση διάμετρος για $Y=+25$, $Z=900$	86
Σχήμα 5-88: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	86
Σχήμα 5-89: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	86
Σχήμα 5-90: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	86
Σχήμα 5-91: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	86
Σχήμα 5-92: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	87
Σχήμα 5-93: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	87
Σχήμα 5-94: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	87
Σχήμα 5-95: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	87
Σχήμα 5-96: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	87
Σχήμα 5-97: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	87
Σχήμα 5-98: Ένταση τύρβης για $Y=0$	88
Σχήμα 5-99: Μέση διάμετρος για $Y=0$	88
Σχήμα 5-100: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	88
Σχήμα 5-101: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	88
Σχήμα 5-102: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	88
Σχήμα 5-103: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	88
Σχήμα 5-104: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	89
Σχήμα 5-105: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	89

Σχήμα 5-106: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	89
Σχήμα 5-107: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	89
Σχήμα 5-108: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	90
Σχήμα 5-109: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	90
Σχήμα 5-110: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	90
Σχήμα 5-111: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	90
Σχήμα 5-112: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	90
Σχήμα 5-113: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	90
Σχήμα 5-114: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	91
Σχήμα 5-115: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	91
Σχήμα 5-116: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	91
Σχήμα 5-117: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	91
Σχήμα 5-118: Ένταση τύρβης για $Y=0$	91
Σχήμα 5-119: Μέση διάμετρος για $Y=0$	91
Σχήμα 5-120: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	92
Σχήμα 5-121: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	92
Σχήμα 5-122: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	92
Σχήμα 5-123: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	92
Σχήμα 5-124: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	92
Σχήμα 5-125: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	92
Σχήμα 5-126: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	93
Σχήμα 5-127: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	93
Σχήμα 5-128: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	93
Σχήμα 5-129: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	93
Σχήμα 5-130: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	93
Σχήμα 5-131: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	93
Σχήμα 5-132: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	94
Σχήμα 5-133: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	94
Σχήμα 5-134: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	94
Σχήμα 5-135: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	94
Σχήμα 5-136: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	94
Σχήμα 5-137: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	94
Σχήμα 5-138: Ένταση τύρβης για $Y=0$	95
Σχήμα 5-139: Μέση διάμετρος για $Y=0$	95
Σχήμα 5-140: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	95
Σχήμα 5-141: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	95
Σχήμα 5-142: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	95
Σχήμα 5-143: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	95
Σχήμα 5-144: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	96
Σχήμα 5-145: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	96

Σχήμα 5-146: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	96
Σχήμα 5-147: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	96
Σχήμα 5-148: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	97
Σχήμα 5-149: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	97
Σχήμα 5-150: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	97
Σχήμα 5-151: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	97
Σχήμα 5-152: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	97
Σχήμα 5-153: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	97
Σχήμα 5-154: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	98
Σχήμα 5-155: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	98
Σχήμα 5-156: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	98
Σχήμα 5-157: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	98
Σχήμα 5-158: Ένταση τύρβης για $Y=0$	98
Σχήμα 5-159: Μέση διάμετρος για $Y=0$	98
Σχήμα 5-160: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	99
Σχήμα 5-161: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	99
Σχήμα 5-162: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	99
Σχήμα 5-163: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	99
Σχήμα 5-164: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	99
Σχήμα 5-165: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	99
Σχήμα 5-166: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	100
Σχήμα 5-167: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	100
Σχήμα 5-168: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	100
Σχήμα 5-169: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	100
Σχήμα 5-170: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	100
Σχήμα 5-171: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	100
Σχήμα 5-172: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	101
Σχήμα 5-173: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	101
Σχήμα 5-174: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	101
Σχήμα 5-175: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	101
Σχήμα 5-176: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	101
Σχήμα 5-177: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	101
Σχήμα 5-178: Ένταση τύρβης για $Y=0$	102
Σχήμα 5-179: Μέση διάμετρος για $Y=0$	102
Σχήμα 5-180: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	102
Σχήμα 5-181: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	102
Σχήμα 5-182: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	102
Σχήμα 5-183: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	102
Σχήμα 5-184: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	103
Σχήμα 5-185: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	103

Σχήμα 5-186: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	103
Σχήμα 5-187: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	103
Σχήμα 5-188: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	104
Σχήμα 5-189: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	104
Σχήμα 5-190: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	104
Σχήμα 5-191: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	104
Σχήμα 5-192: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	104
Σχήμα 5-193: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	104
Σχήμα 5-194: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	105
Σχήμα 5-195: Μέση διάμετρος για $Y=-15$	105
Σχήμα 5-196: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	105
Σχήμα 5-197: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	105
Σχήμα 5-198: Ένταση τύρβης για $Y=0$	105
Σχήμα 5-199: Μέση διάμετρος για $Y=0$	105
Σχήμα 5-200: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	106
Σχήμα 5-201: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	106
Σχήμα 5-202: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	106
Σχήμα 5-203: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	106
Σχήμα 5-204: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	106
Σχήμα 5-205: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	106
Σχήμα 5-206: Ένταση τύρβης για $Y=+25$	107
Σχήμα 5-207: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	107
Σχήμα 5-208: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$	108
Σχήμα 5-209: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$	108
Σχήμα 5-210: Ένταση τύρβης για $Y=-25$	108
Σχήμα 5-211: Μέση διάμετρος για $Y=-25$	108
Σχήμα 5-212: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$	108
Σχήμα 5-213: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$	108
Σχήμα 5-214: Ένταση τύρβης για $Y=-15$	109
Σχήμα 5-215: Μέση διάμετρος σωματιδίων για $Y=-15$	109
Σχήμα 5-216: Μέση ταχύτητα για $Y=0$	109
Σχήμα 5-217: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$	109
Σχήμα 5-218: Ένταση τύρβης για $Y=0$	109
Σχήμα 5-219: Μέση διάμετρος για $Y=0$	109
Σχήμα 5-220: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$	110
Σχήμα 5-221: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$	110
Σχήμα 5-222: Ένταση τύρβης για $Y=+15$	110
Σχήμα 5-223: Μέση διάμετρος για $Y=+15$	110
Σχήμα 5-224: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$	110
Σχήμα 5-225: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$	110

Σχήμα 5-226: Ένταση τύρβης για $Y=+255$	111
Σχήμα 5-227: Μέση διάμετρος για $Y=+25$	111

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2-1 Συγκεντρωτικές τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας.....	32
Πίνακας 3-1:Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας.....	45
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικές γωνίες σκέδασης για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.....	60
Πίνακας 5.1: Περιπτώσεις της παραμετρικής μελέτης.....	72
Πίνακας 5-2: Σημεία μετρήσεων	72

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

U_{mean}	Μέση ταχύτητα
U_{rms}	Διακύμανση ταχύτητας
D_{10}	Μέση αριθμητική διάμετρος
M_p	Μάζα σωματιδίων
N_p	Αριθμός σωματιδίων
Re	Αριθμός Reynolds
$C_{psp} X_{\mu m}(Y_{gr})$	Συγκέντρωση σωματιδίων X διαμέτρου Y γραμμαρίων
D_{20}	Μέση διάμετρος ως προς περιοχή
D_{30}	Μέση διάμετρος ως προς όγκο
D_{32}	Μέση διάμετρος
ρ	Πυκνότητα
ν	Κινηματικό ιξώδες
C_d	Συντελεστής οπισθέλκουσας
d_D	Διάμετρος σωματιδίου
f	Συχνότητα ακτίνας Laser
D_h	Υδραυλική Διάμετρος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και Στόχοι της Μεταπτυχιακής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της τυρβώδους διφασικής ροής υγρού-στερεού σε κατακόρυφο σωλήνα ορθογωνικής διατομής με χρήση της ανεμομετρίας Phase Doppler. Ειδικότερα διερευνήθηκε πειραματικά η επίδραση της συγκέντρωσης σωματιδίων σε σχέση με τον αριθμό Reynolds, την μέση διάμετρο των σωματιδίων και την ταχύτητα του ρευστού. Ο στόχος ήταν, καταρχήν, η πιστοποίηση του συστήματος PDPA του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής & Στροβιλομηχανών καθώς και η δημιουργία της απαραίτητης πειραματικής διάταξης και η συλλογή μετρήσεων με την χρήση του PDPA.

Οι διφασικές ροές ρευστού-σωματιδίων παρουσιάζουν έντονο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, λόγω της πολυπλοκότητας των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, αλλά και γιατί συναντώνται σε πολλά συστήματα που περιλαμβάνουν βιολογικές, μηχανολογικές, χημικές και πυρηνικές εφαρμογές. Η καλύτερη κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται σε αυτές τις ροές, οδηγεί στην πιο αποδοτική και ποιοτική λειτουργία των βιομηχανικών συσκευών, καθώς και άλλων συναφών διεργασιών.

Οι εφαρμογές όπου συναντώνται οι διφασικές ροές ρευστού-σωματιδίων, διακρίνονται στα παρακάτω συστήματα:

- α. Συστήματα υγρού-αέριων φυσαλίδων που απαντώνται σε εφαρμογές όπως η ομογενοποίηση και η γαλακτωματοποίηση.
- β. Συστήματα αερίου-στερεών σωματιδίων, όπως είναι τα συστήματα πνευματικής μεταφοράς, οι συλλέκτες σκόνης, οι ρευστοποιημένες κλίνες και τα συστήματα καύσης άνθρακα.
- γ. Συστήματα υγρού-στερεών σωματιδίων, που εμφανίζονται σε εφαρμογές όπως η ρευστοποιημένη κλίση, οι μέθοδοι διαχωρισμού ορισμένων μειγμάτων και η ιζηματογένεση.
- δ. Συστήματα αερίου-υγρών σταγονιδίων, όπως είναι ο ξηραντήρας, οι απορροφητήρες, οι συσσωρευτές και τον ψεκασμό σταγονιδίων σε αεροστρόβιλους.

1.2 Δομή της μεταπτυχιακής

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής: Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται το αντικείμενο της μεταπτυχιακής. Επίσης στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται και η σχετική

βιβλιογραφία όσων αφορά την παρούσα μελέτη αλλά και παραπλήσιες μελέτες σε διφασικές ροές. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται το φυσικό πρόβλημα με την παρουσίαση όλων των εξισώσεων που διέπουν την συνεχή φάση (νερό) καθώς και την διακριτή φάση (σωματίδια). Στην συνέχεια στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη με το σύστημα της ροής και το μετρητικό σύστημα PDA. Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρεται όλη σχετική θεωρία του συστήματος PDA για την μέτρηση σωματιδίων και των δυνατοτήτων που έχει ανάλογα με τις διάφορες συνθήκες ροής που επικρατούν. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η παρουσίαση της πειραματικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων καθώς και η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας που πραγματοποιήθηκαν και γίνονται ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της πειραματικής διάταξης και για μελλοντικές πειραματικές μελέτες.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Ροής Υγρού-Σωματιδίων σε Αγωγούς

Η ύλη γύρω μας υπάρχει σε τρεις φάσεις, την αέρια, υγρή και στερεή κατάσταση. Πολυφασική ροή είναι η ταυτόχρονη ροή διαφόρων φάσεων. Διφασική ροή είναι η απλούστερη περίπτωση της πολυφασικής ροής. Στις τρεις γνωστές φάσεις ή καταστάσεις της ύλης έχει προστεθεί, σχετικά πρόσφατα, και μια τέταρτη, το πλάσμα. Οι τρεις καταστάσεις, υγρή, αέρια και πλάσμα, χαρακτηρίζονται γενικά ως ρευστά επειδή παραμορφώνονται σε μεγάλη κλίμακα με εφαρμογή ακόμη και μικρών εξωτερικών δυνάμεων. Είναι όμως δυνατόν, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να χαρακτηριστεί με τον όρο ρευστό και η στερεή φάση. Αυτό συμβαίνει όταν, για παράδειγμα η περίπτωση που μελετούμε, ένας μεγάλος αριθμός μικρών στερεών σωματιδίων ρέει σε ένα ρευστό, η ταχύτητα του οποίου είναι αρκετά μεγάλη. Επειδή η δυναμική συμπεριφορά αυτών των σωματιδίων είναι παρόμοια με αυτήν ενός συνήθους ρευστού, μπορούμε να θεωρήσουμε τα στερεά αυτά σωματίδια σαν ένα ‘ψευδορευστό’. Έτσι, υπό κατάλληλες συνθήκες, προβλήματα ροής στερεών (ψευδορευστά), υγρών, αερίων και/ή πλάσματος αντιμετωπίζονται γενικά σαν ροϊκά προβλήματα ρευστών.

Η διφασική ροή εμφανίζεται τόσο στο φυσικό κόσμο (π.χ. ομίχλη, καπνός, βροχή, σύννεφα, ανεμοθύελλες κτλ.), όσο και στο χώρο της τεχνολογίας (π.χ. εξάτμιση και συμπύκνωση στις ψυκτικές εγκαταστάσεις, στους σταθμούς παραγωγής ισχύος και σε διάφορες βιομηχανίες όπου γίνεται μεταφορά των διαφόρων υλών με τη βοήθεια ρευστών κτλ.). Η διφασική ροή υπακούει σε όλους τους βασικούς νόμους της μηχανικής των ρευστών, με τη διαφορά ότι οι εξισώσεις είναι περισσότερο πολύπλοκες από αυτές της μονοφασικής ροής. Για τη διερεύνηση της διφασικής ροής έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, τα οποία

ενώ δεν υπεισέρχονται στις λεπτομέρειες της ροής δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι τυρβώδεις διφασικές ροές παρουσιάζουν έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον και αυτό φαίνεται από το μεγάλο αριθμό μελετών σε αυτό το γνωστικό αντικείμενο. Φαινόμενα όπως η επίδραση των σωματιδίων πάνω στην τύρβη της συνεχούς φάσης, η αλληλεπίδραση της διφασικής ροής με τοιχώματα, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων δεν έχουν πλήρως αποσαφηνιστεί και προσελκύουν των ενδιαφέρον των ερευνητών.

Οι μελέτες της διφασικής ροής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) σε εργασίες όπου δίνονται αναλυτικές λύσεις ή γίνεται χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, και (β) πειραματικές εργασίες. Στην πρώτη κατηγορία, επιλύονται οι εξισώσεις Navier-Stokes για τη συνεχή φάση, ενώ τα σωματίδια υπολογίζονται συνήθως από την εξίσωση κίνησης του Νεύτωνα. Στην δεύτερη κατηγορία, οι διφασικές ροές μελετώνται βάση κάποιας πειραματικής μεθόδου. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η χρήση συστήματος LDA και ανεμομετρίας θερμού σύρματος (HWA) με τα οποία είναι εφικτή η μέτρηση ταχυτήτων της συνεχούς φάσης σε μία διφασική ροή. Με την μέθοδο Phase Doppler Anemometry (PDA) εκτός από τα χαρακτηριστικά της συνεχούς φάσης μπορούν να μετρηθούν επίσης και στοιχεία για την διακριτή φάση (σωματίδια), όπως η διάμετρος των σωματιδίων και ο αριθμός πυκνότητας των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου.

Οι Choi & Chung (1983) ανέλυσαν την τυρβώδη διφασική ροή σε σωλήνα με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα ήταν σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Οι Gooray et al. (1985) μελέτησαν την τυρβώδη ροή σε βαθμίδες και σωλήνες με διεύρυνση υπολογιστικά κάνοντας χρήση του μοντέλου k-ε.

Οι Kullick et al. (1994) μελέτησαν την επίδραση των σωματιδίων και την μεταβολή της στροβιλότητας σε κανάλι πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής. Μετρήθηκαν ταχύτητες σωματιδίων και ρευστού για τρεις κατηγορίες σφαιρικών σωματιδίων. Παρουσιάστηκαν κατανομές ταχυτήτων σωματιδίων που ήταν σχετικά επίπεδες λόγω της εγκάρσιας μίξης (σε συμφωνία με τις μελέτες σε στρογγυλούς σωλήνες), όμως δεν υπήρξε επίδραση στην κατανομή ταχυτήτων του ρευστού. Η ένταση της διακύμανσης της ταχύτητας των σωματιδίων βρέθηκε να ξεπερνάει την ένταση της τύρβης στην κατεύθυνση του ρευστού αλλά ήταν μικρότερη στην εγκάρσια κατεύθυνση, εξαιτίας της επίδρασης των διασταυρούμενων τροχιών και της διαφορετικής ταχύτητας του ρευστού στις δύο διευθύνσεις. Τα σωματίδια βρέθηκαν να μειώνουν την στροβιλότητα με αυξανόμενο αριθμό Stokes. Οι μειώσεις στην ένταση της στροβιλότητας ήταν μεγαλύτερες στην εγκάρσια από ότι στην κατεύθυνση της ροής, που οφείλεται κυρίως στην δυσκολία των σωματιδίων να

αποκριθούν καλά στις υψηλές συχνότητες διακύμανσης της στροβιλότητας στην εγκάρσια κατεύθυνση.

Οι Sato & Hishida (1996) μελέτησαν την τυρβώδη διφασική ροή σε κατακόρυφο σωλήνα με χρήση DPIV. Μέτρησαν τις ταχύτητες του νερού και των σωματιδίων γυαλιού 340 μm και 500 μm και κυτταρίνης 420 μm . Παράλληλα, πραγματοποίησαν και υπολογιστική προσομοίωση του ίδιου προβλήματος. Παρατήρησαν ότι η ύπαρξη σωματιδίων με μέγεθος της τάξης της κλίμακας μήκους του Kolmogorov και με μεγάλη σταθερά χρόνου, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας της τύρβης. Αντίθετα σωματίδια με μικρή σταθερά χρόνου έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της τύρβης.

Οι Fan (1997) και Cen (1998) έκαναν πειραματικές μετρήσεις σε ροές γύρω από κυλίνδρους μελετώντας την αλληλεπίδραση των σωματιδίων και της συνεχούς φάσης. Ο Liao et al. (1997) μελέτησε επίσης υπολογιστικά τη ροή σε σωλήνες με απότομη διεύρυνση και εξήγαγε συμπεράσματα για την αλληλεπίδραση τύρβης και σωματιδίων. Τα σωματίδια τα αντιμετώπισαν με αντίστοιχο τρόπο προς την αέρια φάση χρησιμοποιώντας το μοντέλο δύο ρευστών (two fluid model). Οι Founti & Klipfel (1997) ερεύνησαν πειραματικά και υπολογιστικά τις επιδράσεις των συγκρούσεων των σωματιδίων στα χαρακτηριστικά της κίνησης των σωματιδίων σε μια κατακόρυφη ροή προς τα κάτω με απότομη διεύρυνση. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τροποποίηση της τύρβης. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια των σωματιδίων μειώνεται σε περιοχές διάτμησης, όπου η τυρβώδης κινητική ενέργεια της συνεχούς φάσης παρουσιάζει μέγιστο. Οι Oliveira & Pinho (1997) μέτρησαν την πτώση πίεσης σε στρωτή ροή σε αξονοσυμμετρική διεύρυνση. Οι Ahmadi & Chen (1998) έλαβαν υπόψη στις προσομοιώσεις τους την επίδραση της ανυψωτικής δύναμης, και μελέτησαν την διασπορά και την εναπόθεση των σωματιδίων σε τυρβώδη ροή σε σωλήνα με διεύρυνση.

Ο Kashdan et al. (1999) έκαναν σύγκριση μεταξύ δύο μεθόδων που μετρούν το μέγεθος των σταγονιδίων. Η ανάλυση με Phase Doppler Anemometer (PDA) και Particle Droplet Imaging Analysis (PDIA) εφαρμόστηκε σε έναν κοίλο κώνο ψεκασμού καυσίμων υπό μερικώς σταθερές συνθήκες. Οι μετρήσεις του αριθμητικού μέσου όρου (D10) και του μέσου όρου του όγκου ελέγχου (D30) έγιναν σε τρεις θέσεις της περιοχής του ψεκασμού. Η πρώτη θέση καλούμενη «περιοχή διάσπασης» σε άτομα σε απόσταση $Z=5\text{mm}$ από την έξοδο του ακροφυσίου βρέθηκε να αποτελείται από μεγάλη συνοχή και κυρίως από μη-σφαιρικά υγρά σωματίδια. Αν και οι εικόνες αποκάλυψαν την παρουσία ενός μικρού αριθμού σταγονιδίων σε αυτήν την περιοχή, οι υψηλές ταχύτητές τους (μέχρι 40m/s) προκάλεσαν σημαντική θόλωση στην απεικόνιση της κίνησης τους και έτσι η μέθοδος PDIA ήταν ανεπαρκής για τις

μετρήσεις. Σε απόσταση $Z=10\text{mm}$ και χωρίς εφαρμογή οποιωνδήποτε περιορισμών της μορφής στα στοιχεία του PDIA, μια σύγκριση των μέσων διαμέτρων του όγκου ελέγχου παρουσίασαν καλή ταύτιση για το χωρικό μέσο (D_{30}) κάνοντας εκτιμήσεις μεταξύ του PDIA ($D_{30}=30.9\text{mm}$) και PDA ($D_{30}=32.5\text{mm}$). Η εφαρμογή των σταδιακά πιο αυστηρών περιορισμών μορφής με PDIA είχε την επίδραση της μείωσης των D_{10} και D_{30} καθώς μικρότερα (και επομένως περισσότερο σφαιρικά) σταγονίδια μετρήθηκαν στο μέγεθος. Στην περιοχή διασποράς του ψεκασμού σε απόσταση $Z=20\text{mm}$, η πλειοψηφία της υγρής μάζας ήταν υπό μορφή σφαιρικών σταγονιδίων με μια σημαντικά χαμηλότερη συγκέντρωση σταγονιδίων. Σε αυτήν την θέση, χωρίς εφαρμογή μιας DOF διόρθωσης, μια σύγκριση των δεδομένων ($D_{30}=24.3\text{mm}$) του PDIA ($D_{30}=25.0\text{mm}$) και του PDA παρουσίασε πάλι καλή ταυτοποίηση. Ο Dai et al. (1999) έκανε χρήση του PDA και μέτρησε την ακτινική και την αξονική ταχύτητα καθώς και το μέγεθος των σωματιδίων σε έναν υδροκυκλώνα και ανέλυσε τον μηχανισμό διαχωρισμού των σωματιδίων.

Με τη βοήθεια του PDA, οι Zhou & Mathiesen (2000) μελέτησαν την δομή της τύρβης σε διφασική ροή σε ρευστοποιημένη κλίνη. Ο Chiang (2000) μελέτησε υπολογιστικά την επίδραση των τοιχωμάτων στη δομή της στρωτής ροής σε επίπεδη διεύρυνση, για μία σειρά αριθμών διεύρυνσης. Παρατήρησε ότι σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds υπάρχει κάποια κρίσιμη τιμή του λόγου διεύρυνσης πέρα από την οποία δεν υφίσταται συμμετρία. Ο Zhou (2000) μελέτησε την επίδραση της περιδίνησης σε διφασικές ροές σε σωλήνες με διεύρυνση με τη χρήση του PDA, για μία σειρά αριθμών περιδίνησης. Μέτρησε την αξονική και την περιφερειακή συνιστώσα της ταχύτητας και τις διακυμάνσεις αυτών για την συνεχή φάση και για τα σωματίδια. Μέτρησε επίσης, την συγκέντρωση των σωματιδίων. Από τα αποτελέσματα φάνηκε η επίδραση της περιδίνησης στις κατανομές των ταχυτήτων και στο επίπεδο της τύρβης.

Ο Ziema et al. (2000) έκαναν μια σειρά μετρήσεων της διαμέτρου, ταχύτητας και συγκέντρωσης σωματιδίων μεταξύ δύο διακριτών φάσεων ροής μέσα σε υγρό. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις αναγνώρισης της διαμέτρου των σωματιδίων για διαφορετικούς μηχανισμούς σκέδασης φωτός των σωματιδίων, χρησιμοποιήθηκε ένα εκτεταμένο σύστημα Phase Doppler Anemometer κάνοντας επεξεργασία σήματος που προέκυπτε από την διαφορά του σήματος της κάθε φάσης. Η διάκριση μεταξύ των δύο διακριτών φάσεων πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση νερού (συνεχή φάση) και φυσαλίδες αέρα καθώς και σωματιδίων γυαλιού (δύο διακριτές φάσεις) μέσα σε ένα ιδιαίτερα εξελιγμένο τριφασικό κανάλι ροής. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή ταυτοποίηση στην

κατανομή μεγέθους μεταξύ φυσαλίδων και σωματιδίων γυαλιού τα οποία μετρήθηκαν ξεχωριστά αλλά και ταυτόχρονα.

Ο Gillandt (2001) χρησιμοποίησε ένα PDA για την μελέτη διφασικής δέσμης αέρα. Μέτρησε ταυτόχρονα την ταχύτητα του αέρα και των σωματιδίων και την διακύμανση της ταχύτητας της δέσμης. Τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διάμετρο από 1 μm έως 160 μm . Εξαιτίας του εύρους των σωματιδίων, βρήκαν διάφορες επιδράσεις των σωματιδίων πάνω στην τύρβη του αέρα, που ήταν σε άμεση σχέση με την τοπική θέση στην δέσμη. Παράλληλα, πρότεινε μια μέθοδο για την αύξηση της ευαισθησίας του μετρητικού συστήματος PDA. Ο Mc Andrew (2001) μελέτησε την επίδραση των σωματιδίων στην τύρβη της συνεχούς φάσης σε ροή σε βαθμίδα, χρησιμοποιώντας LDA. Ο Sun et al. (2001) πραγματοποίησαν μετρήσεις για την αξονική ταχύτητα διφασικής ροής φυσαλίδων αέρα σε νερό σε κατακόρυφο κυκλικό σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 101.6 mm κάνοντας χρήση Laser Doppler Anemometer (LDA) και Hot-Film Anemometer (HFA). Οι προσεγγίσεις των μετρήσεων για την ταχύτητα του ρευστού σε διφασική ροή ήταν ταυτόσημες. Τα πειράματα σε μονοφασική ροή έδειξαν ταύτιση αποτελεσμάτων μεταξύ των (LDA), (HFA) και του μαγνητικού μετρητή ροής. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι και τα δύο συστήματα (LDA) και (HFA) είχαν την τάση να υποτιμούν την τοπική ταχύτητα του ρευστού. Η μέση σχετική ταχύτητα μεταξύ αέρας και υγρής φάσης ήταν 0.31 m/s.

Ο Goz et al. (2001) εφάρμοσαν προσομοίωση για διφασική ροή φυσαλίδων αέρα σε ρευστό με τις μεθόδους παράλληλης πεπερασμένης διαφοράς της εμπρόσθιας ανίχνευσης. Πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της ροής σε μια τριπλά περιοδική κυβική περιοχή. Η αριθμητική μέθοδος χρησιμοποιεί ένα πεπερασμένο σχήμα διαφορών για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes στο πεδίο ροής και εμπρόσθια μέθοδος ανίχνευσης για την ανάλυση της κίνησης των ευμετάβλητων φάσεων των σταγονιδίων. Σκοπός των μεθόδων είναι να κατανοηθεί σε μικροσκοπικό επίπεδο την συμπεριφορά των ροών με σταγονίδια. Οι διφασικές ροές με σφαιρικά σταγονίδια έχουν ένα μικρό λόγο μεγέθους δύο, μεταξύ μεγάλων και μικρών σταγονιδίων και παρόμοια συμπεριφορά με μονοφασικές ροές. Αντίθετα ροές μεταξύ μεγάλων ευμετάβλητων και μικρών σφαιρικών σταγονιδίων με λόγο μεγέθους οκτώ παρουσιάζουν νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα όσον αφορά την κίνηση των σταγονιδίων και την τύρβη της ροής.

Ο Sommerfeld et al. (2001) έκαναν ανάλυση των επιδράσεων μεταφοράς τυρβώδους ροής αερίου – σωματιδίων σε οριζόντιο κανάλι ροής. Μελετήθηκε η συμπεριφορά συμπαγών σφαιρικών σωματιδίων χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους βασισμένες στην προσέγγιση Lagrange. Αποδείχτηκε ότι για μικρά σωματίδια, η τραχύτητα του τοιχώματος

προκαλεί σημαντική μείωση της συχνότητας συγκρούσεων με το τοίχωμα, ενώ παρουσιάζεται δραστική αύξηση αυτής της χαρακτηριστικής τιμής για σωματίδια με χρόνους απόκρισης μεγαλύτερους από τα 50ms. Επομένως, η τραχύτητα του τοιχώματος έχει σημαντική επίδραση στην μέση οριζόντια ταχύτητα των σωματιδίων.

Οι Bröder & Sommerfeld (2001) πραγματοποίησαν πειραματικές μελέτες υδροδυναμικής σε μια στήλη φυσαλίδων με απεικόνιση PIV – PTV. Οι στήλες φυσαλίδων χρησιμοποιούνται ευρέως στη χημική βιομηχανία και τη βιοτεχνολογία. Η ροή και η στροβιλότητα σε μια τέτοια διάταξη προκαλούνται από την άνοδο φυσαλίδων και η συμπεριφορά τους επηρεάζεται έντονα από πυκνή ροή με φυσαλίδες (δηλ. αλληλεπίδραση μεταξύ φυσαλίδων). Για την ανάλυση της συμπεριφοράς των φυσαλίδων σε πυκνή ροή με φυσαλίδες και ταυτόχρονα την αξιολόγηση της δομής της ροής και της στροβιλότητας εφαρμόστηκε σε μια στήλη φυσαλίδων διαμέτρου 140 mm. και ύψους 650 mm απεικόνιση με σύστημα (PIV). Η στήλη φυσαλίδων αερίστηκε με σχετικά μικρές φυσαλίδες με κατανομή μεγέθους μεταξύ περίπου 0.3 και 4.0 mm. Το σύστημα μέτρησης εξετάστηκε και εφαρμόστηκε στην στήλη φυσαλίδων για να παρέχει στοιχεία για την επικύρωση των αριθμητικών προσομοιώσεων. Οι συγκρίσεις μεταξύ PDA–LDA και του νέου διφασικού συστήματος PIV παρουσίασαν καλή ταυτοποίηση για τις μετρημένες ταχύτητες ρευστού και φυσαλίδων.

Ο Lain (2002) έκανε μία σειρά από πειραματικές μετρήσεις καθώς επίσης και υπολογιστικές προσομοιώσεις σε τυρβώδη διφασική ροή σε οριζόντιο σωλήνα. Με τη χρήση του LDA μέτρησε μέσες ταχύτητες και διακυμάνσεις που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να συγκριθούν με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Από την σύγκριση προέκυψε καλή συμφωνία. Ο Aisa (2002), μελέτησε επίσης την επίδραση των σωματιδίων στην ροή δέσμης αέρα, κάνοντας χρήση συστήματος PDA. Μέτρησε την κατανομή των σωματιδίων σε διάφορες αποστάσεις από την έξοδο της δέσμης. Παρατήρησε ότι κοντά στην έξοδο της δέσμης υπάρχει έντονη ακτινική μεταφορά των σωματιδίων. Ο Guo (2002) προσομοίωσε υπολογιστικά τη ροή σε σωλήνα με διεύρυνση και περιδίνηση, χρησιμοποιώντας την μέθοδο LES και το μοντέλο k-ε.

Οι Qiu & Hsu (2002), μελέτησαν την επίδραση υψηλής τάξης διάθλασης για μικροφυσαλίδες με Phase Doppler Anemometer (PDA) σε πολυφασικές ροές. Παρατηρήθηκε ότι η υψηλής τάξης διάθλαση έχει μεγάλη επίπτωση στην μέτρηση μεγέθους σωματιδίων με το PDA, ιδιαίτερα όταν ο σχετικός δείκτης διάθλασης του μέσου είναι μικρότερος από τη μονάδα. Πραγματοποιήθηκε μια περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος PDA αποδεδειγμένη από το φαινόμενο επίδρασης του όγκου ελέγχου για την μέτρηση φυσαλίδων. Η μέθοδος

αυτή μπορεί να εξαλείψει αποτελεσματικά το φαινόμενο του όγκου ελέγχου καθώς και το ελάττωμα της γκαουσιανής δέσμης Laser κάνοντας χρήση ενός συστήματος PDA με τέσσερις ανιχνευτές. Αυτό το νέο εξελιγμένο σύστημα είναι κατάλληλο για την μέτρηση μεγέθους σωματιδίων με δείκτη διάθλασης μικρότερο της μονάδας.

Οι Bröder & Sommerfeld (2002), πραγματοποίησαν πειραματικές μελέτες της αλληλεπίδρασης φυσαλίδων με σωματίδια άνθρακα σε τυρβώδη ροή χρησιμοποιώντας ένα σύστημα PIV-PTV. Προκειμένου να υπάρξει πιο αξιόπιστο μοντέλο της επεξεργασίας των σωματιδίων άνθρακα σε τυρβώδεις ροές με σταγονίδια, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε έναν αντιδραστήρα διπλού βρόχου. Το εύρος της διαμέτρου των φυσαλίδων θεωρήθηκαν ότι ήταν περίπου από 2 έως 4 mm. Περιορισμένου εύρους, κατανομές μεγέθους φυσαλίδων δημιουργήθηκαν από τριχοειδείς συσκευές εμπλουτισμού σε διοξείδιο του άνθρακα. Για τις ταυτόχρονες μετρήσεις του μεγέθους και της ταχύτητας των φυσαλίδων και της ταχύτητας του ρευστού, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε ένα συνδυασμένο σύστημα PIV και PTV. Προκειμένου να εκτελεσθούν οι μετρήσεις της ταχύτητας του ρευστού η ροή τροφοδοτήθηκε με σωματίδια από πολυαμίδιο με μέση διάμετρο 50 μm . Το σύστημα μέτρησης που συνδυάζει την απεικόνιση PIV και PTV είναι ικανό να προσλάβει πολύ σημαντικές παραμέτρους σε μια διφασική ροή. Επομένως, παρέχει την δυνατότητα να δημιουργηθούν λεπτομερή σύνολα δεδομένων για την πιστοποίηση αριθμητικών μοντέλων.

Ο Furuichi (2003) μελέτησε πειραματικά την ροή σε αξονοσυμμετρική διεύρυνση και μέτρησε κατανομές της ταχύτητας σε διάφορους αριθμούς Reynolds. Ο Caraman et al. (2003) μελέτησαν την επίδραση των συγκρούσεων με διακύμανση της διακριτής φάσης σε μια αραιή ροή μέσα σε σωλήνα. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της επίδρασης των σωματιδίων και της στροβιλότητας σε μια πλήρως αναπτυγμένη ροή με χαμηλό αριθμό Reynolds. Τα δεδομένα λήφθηκαν με τη χρησιμοποίηση δύο συστημάτων PDA. Οι μετρήσεις έγιναν σε μια απόσταση 0.2 διαμέτρων μετά την έξοδο του σωλήνα. Σε αυτήν την θέση, η ροή φέρει όλες τις ιδιότητες της στροβιλότητας που αναπτύσσεται στον σωλήνα. Η πύκνωση της ροής με σωματίδια είναι μέτρια (11%). Η κλίση της μέσης ταχύτητας προέκυψε από τη μέση διαμήκη ισορροπία ορμής στο κέντρο του σωλήνα. Αναλύθηκε επίσης η ακτινική ισορροπία των διαμηκών και ακτινικών τάσεων των σωματιδίων. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα είναι ότι η ακτινική μεταφορά της στροβιλότητας των κυμαινόμενων ακτινικών και διαμηκών τάσεων είναι πολύ υψηλότερη για τα σωματίδια σε σχέση με την συνεχή φάση.

Είναι αδύνατο στα πλαίσια της διατριβής αυτής να αναφέρουμε όλα τα επί μέρους πεδία και τους ερευνητές των διφασικών ή πολυφασικών ροών. Από τις πιο πάνω όμως γραμμές πιστεύουμε ότι έγινε αντιληπτό τόσο το ευρύ φάσμα της επιστημονικής αυτής περιοχής όσο

και η σπουδαιότητα των ερευνητών και των εργασιών τους. Μικρή και μόνο συμβολή στο σπουδαίο αυτό πεδίο πιστεύουμε ότι μπορεί να αποτελέσει η παρούσα διατριβή.

1.4 Στοιχεία Καινοτομίας

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η εξακρίβωση της επίδρασης των σωματιδίων σε ροή αναλόγως της συγκέντρωσης των σωματιδίων μέσα στο ρευστό, μελετώντας στη πρωτότυπη διάταξη που κατασκευάσαμε τα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής. Ακόμη έγινε προσπάθεια να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των σωματιδίων κοντά στο τοίχωμα του αγωγού.

Στη πρώτη φάση της διατριβής πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες μελέτες και υπολογισμοί με σκοπό την δημιουργία μίας νέας πρωτότυπης πειραματικής διάταξης όπου θα μας επέτρεπε να μελετήσουμε με όσον το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής.

Στη δεύτερη φάση της διατριβής διεξήχθησαν πολλαπλά πειράματα σε ένα αρχικό σωλήνα μικρότερου μήκους, με σκοπό την ευθυγράμμιση της ροής, την βελτιστοποίηση της πειραματικής διάταξης και την εξοικείωση με το σύστημα μέτρησης (λογισμικό και μηχανήματα).

Στη τρίτη φάση της διατριβής αφού έχει ήδη πιστοποιηθεί η ακρίβεια/ποιότητα και επαναληψιμότητα των μετρήσεων, καταγράφηκαν όλες οι ιδιότητες (Re , U_{mean} , U_{rms} , Μέση διάμετρος) μεγάλου αριθμού διαλυμάτων διαφόρων συγκεντρώσεων σωματιδίων αλλά και διαμέτρων αυτών. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η ύπαρξη υψηλού αριθμού σωματιδίων είναι ικανά να επηρεάσουν τη ροή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Ακόμη από τις συνδυασμένες μετρήσεις (ταυτόχρονη ύπαρξη σωματιδίων διαφόρων διαμέτρων μέσα στο ρευστό) φαίνεται η επιλογή των μεγαλύτερων σωματιδίων να κινούνται κοντά στα τοιχώματα ενώ των μικρότερων προς το κέντρο της ροής.

2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΦΑΣΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΥΓΡΟΥ-ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

2.1 Εξισώσεις Συνεχούς Φάσης

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή της συνεχούς φάσης σε αγωγό ορθογωνικής διατομής για ασυμπίεστο ρευστό, είναι η εξίσωση της συνέχειας και οι εξισώσεις Navier-Stokes σε καρτεσιανές συντεταγμένες συντεταγμένες.

2.1.1 Επιμερισμός Reynolds σε Χρονικά Μέσες Τιμές

Λόγω τις ιδιαίτερης σημασίας που έχουν οι μέσες χρονικές τιμές των διαφόρων μεταβλητών στην τυρβώδη ροή, ο Reynolds διατύπωσε κάποιους κανόνες για τον υπολογισμό τους που είναι γνωστοί ως επιμερισμός του Reynolds. Έστω ότι έχουμε δύο συνεχείς φυσικές μεταβλητές \tilde{u} και \tilde{v} κάθε μια από τις οποίες μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της μέσης τιμής και της διακύμανσης :

$$\tilde{u} = U + u \quad \text{και} \quad \tilde{v} = V + v \quad (2.1)$$

όπου με κεφαλαία συμβολίζονται οι μέσες χρονικές τιμές των μεταβλητών ενώ με μικρά οι διακυμάνσεις.

Οι κανόνες του Reynolds, εφαρμοζόμενοι σε ένα πρόβλημα τυρβώδους ροής, έχουν την ακόλουθη διατύπωση :

- Η μέση χρονική τιμή των μεταβλητών θεωρείται σταθερή ποσότητα :

$$\overline{\tilde{u}} = U \quad \text{και} \quad \overline{\tilde{v}} = V \quad (2.2)$$

- Η μέση χρονική τιμή της διακύμανσης των μεταβλητών είναι μηδέν :

$$\overline{u} = 0 \quad \text{και} \quad \overline{v} = 0 \quad (2.3)$$

- Η μέση χρονική τιμή του τετραγώνου της διακύμανσης των μεταβλητών δεν είναι μηδέν :

$$\overline{u^2} \neq 0 \quad \text{και} \quad \overline{v^2} \neq 0 \quad (2.4)$$

Το ίδιο ισχύει, γενικά, και για τη μέση χρονική τιμή του γινομένου των διακυμάνσεων των δύο μεταβλητών u και v , δηλαδή :

$$\overline{u \cdot v} \neq 0 \quad (2.5)$$

- Η μέση χρονική τιμή του αθροίσματος ή της διαφοράς των \tilde{u} και \tilde{v} είναι ίση με το άθροισμα ή τη διαφορά των μέσων χρονικών τιμών τους, δηλαδή :

$$\overline{\tilde{u} \pm \tilde{v}} = U \pm V \quad (2.6)$$

- Η μέση χρονική τιμή του γινομένου μιας σταθεράς a και μιας μεταβλητής είναι ίση με το γινόμενο της σταθεράς a και της μέσης χρονικής τιμής της μεταβλητής, δηλαδή :

$$\overline{a\tilde{u}} = aU \quad \text{και} \quad \overline{a\tilde{v}} = aV \quad (2.7)$$

- Η μέση χρονική τιμή του γινομένου των μεταβλητών \tilde{u} και \tilde{v} είναι ίση με το άθροισμα του γινομένου των μέσων χρονικών τιμών U και V και της μέσης χρονικής τιμής του γινομένου των όρων διακύμανσης u' και v' , δηλαδή :

$$\overline{\tilde{u} \cdot \tilde{v}} = U \cdot V + \overline{u' \cdot v'} \quad (2.8)$$

- Η μέση χρονική τιμή της μερικής παραγώγου μιας μεταβλητής ως προς μια χωρική συντεταγμένη (πχ, συντεταγμένη x), είναι ίση με τη μερική παράγωγο της μέσης χρονικής τιμής της μεταβλητής ως προς τη χωρική συντεταγμένη, δηλαδή :

$$\frac{\partial \overline{\tilde{u}}}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x} \quad \text{και} \quad \frac{\partial \overline{\tilde{v}}}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.9)$$

2.1.2 Εξίσωση της Συνέχειας

Η διαφορική εξίσωση της συνέχειας 2.10 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (2.10)$$

ισχύει για στιγμιαίες ιδιότητες της στρωτής και της τυρβώδους ροής. Για ασυμπίεστη ροή, η Εξίσωση 2.10 απλοποιείται σε :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.11)$$

Αντικαθιστώντας την ταχύτητα \vec{u} με το άθροισμα της μέσης χρονικής τιμής \vec{U} και της διακύμανσης \vec{u}' , η Εξίσωση 2.11 λαμβάνει τη μορφή :

$$\nabla \cdot \vec{U} + \nabla \cdot \vec{u}' = 0 \quad (2.12)$$

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ορίζοντας σαν u , v και w τις συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x , y και z , αντίστοιχα, η Εξίσωση 2.12 γράφεται :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

Λαμβάνοντας τη μέση χρονική τιμή της Εξίσωσης 2.13 και έχοντας υπόψη τον επιμερισμό του Reynolds, Εξισώσεις 2.2 έως 2.8, προκύπτει ότι :

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z}} = 0 &\Leftrightarrow \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{W}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'}}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

ή σε ανυσματικό συμβολισμό :

$$(2.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0$$

Επίσης, από το συνδυασμό των Εξισώσεων 2.13 και 2.14 προκύπτει ότι :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

ή σε ανυσματικό συμβολισμό :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.17)$$

2.1.3 Εξισώσεις Navier-Stokes

Η γενικευμένη διανυσματική εξίσωση Navier-Stokes έχει την μορφή:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (2.18)$$

Οι εξισώσεις Navier-Stokes σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι:

$$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \quad (2.20)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (2.21)$$

2.2 Εξισώσεις Κίνησης Σωματιδίων

Σε ένα σωματίδιο που βρίσκεται σε ροή ρευστού ασκούνται πολλές δυνάμεις διαφορετικής έντασης. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από τις εσωτερικές ιδιότητες των διακριτών και συνεχών φάσεων και από το πεδίο ροής γύρω από το σωματίδιο. Έχουν διαφορετικές επιδράσεις στην κίνηση, όπως για παράδειγμα οι δυνάμεις επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης, καθώς και οι ανυψωτικές δυνάμεις. Αν η διαφασική ροή είναι πολύ αραιή, το σωματίδιο θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με άλλα στοιχεία της φάσης. Η κίνηση του σωματιδίου προσδιορίζεται από τον νόμο του Νεύτωνα σε ένα σχήμα κατά Lagrange:

$$\rho_p V_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F} \quad (2.21)$$

όπου, ρ_p και V_p είναι η πυκνότητα και ο όγκος των σωματιδίων, αντίστοιχα και \mathbf{F} είναι το άθροισμα των δυνάμεων που δρουν πάνω στο σωματίδιο. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο είναι δυνάμεις βαρύτητας, άνωσης, οπισθέλκουσας, επιτάχυνσης (εικονικής ή

προστιθέμενης μάζας), η δύναμη Basset, η κλίση πίεσης, (Saffman και Magnus) και φυγόκεντρες δυνάμεις .

2.2.1 Δυνάμεις Επιτάχυνσης

Οι δυνάμεις που οφείλονται στην επιτάχυνση εξαιτίας της σχετικής ταχύτητας σωματιδίου-ρευστού μπορούν να οφείλονται στην εικονική ή φαινομενική της μάζας και την δύναμη Basset. Όταν ένα σωματίδιο επιταχύνεται μέσα σε ένα ρευστό υπάρχει μια επιτάχυνση απόκρισης του ρευστού η οποία οφείλεται στην κατανάλωση του έργου που γίνεται από το σωματίδιο. Αυτό το επιπρόσθετο έργο σχετίζεται με την πραγματική επίδραση μάζας. Για μια σφαίρα σε ένα ρευστό, η ολική κινητική ενέργεια του ρευστού που περιβάλλει την σφαίρα είναι:

$$KE = \frac{1}{2} \rho \int_V u^2 dV \quad (2.22)$$

όπου το ολοκλήρωμα λαμβάνεται για όλη την ροή.

Θεωρούμε ότι το ρευστό δεν έχει ιξώδες και είναι ασυμπίεστο (ιδανικό ρευστό) και επομένως η ταχύτητα μπορεί να εκφραστεί ως η παράγωγος μιας συνάρτησης δυναμικού:

$$u = \nabla \phi \quad (2.23)$$

Η συνάρτηση δυναμικού για μια σφαίρα που κινείται με σχετική ταχύτητα u μέσα στο ρευστό είναι:

$$\phi = -\frac{ua^3}{2r^2} \cos \theta \quad (2.24)$$

όπου θ η γωνία μεταξύ ταχύτητας και ακτινικής συνιστώσας και a η ακτίνα της σφαίρας. Η ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας είναι:

$$u_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{ua^3}{r^3} \cos \theta \quad (2.25)$$

το οποίο στην επιφάνεια της σφαίρας μειώνεται σε:

$$u_r = u \cos \theta \quad (2.26)$$

Ο ρυθμός του έργου που χρειάζεται για την μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι:

$$uF_{um} = \frac{dKE}{dt} \quad (2.27)$$

όπου, F_{um} είναι η δύναμη της φαινομενικής μάζας.

Η επιτάχυνση του ρευστού σε σχέση με του σωματιδίου είναι $\dot{u} - \dot{v}$. Αν το ρευστό βρισκόταν σε ηρεμία, τότε η δύναμη της φαινομενικής μάζας στο σωματίδιο θα πρέπει να

είναι σε διεύθυνση αντίθετη της επιτάχυνσης του σωματιδίου. Η δράση της φαινομενικής μάζας στο σωματίδιο δίνεται από την Σχέση (2.26):

$$F_{um} = \frac{\rho_c V_d}{2} \left(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{v}} \right) \quad (2.28)$$

όπου ρ_c η πυκνότητα του σωματιδίου και V_d η ταχύτητα του.

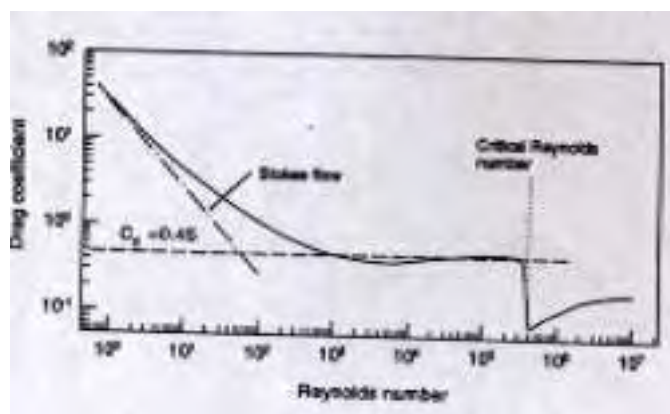
2.2.2 Δύναμη οπισθέλκουσας

Η δύναμη οπισθέλκουσας δρα πάνω στο σωματίδιο και προσδιορίζεται ποσοτικά από τον συντελεστή οπισθέλκουσας:

$$F = \frac{1}{2} \rho_f C_D A |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (2.29)$$

όπου, ρ_f η πυκνότητα της συνεχούς φάσης, C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας, A η μετωπική επιφάνεια του σωματιδίου και \mathbf{u}, \mathbf{v} οι ταχύτητες της συνεχούς φάσης και του σωματιδίου, αντίστοιχα.

Γενικά, ο συντελεστής οπισθέλκουσας εξαρτάται από το σχήμα του σωματιδίου και τον προσανατολισμό του σε σχέση με την ροή, όπως επίσης και από τις παραμέτρους της ροής (π.χ. αριθμό Reynolds). Η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας με τον αριθμό Reynolds για μη περιστρεφόμενες σφαίρες φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Για χαμηλές τιμές Re ισχύει ο νόμος του Stokes και ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι αντίστροφα ανάλογος του αριθμού Reynolds. Με την αύξηση του Re , ο συντελεστής οπισθέλκουσας πλησιάζει σχεδόν την σταθερή τιμή $C_D = 0.445$.



Σχήμα2-1: Εξάρτηση του συντελεστή οπισθέλκουσας σφαίρας από τον αριθμό Reynolds

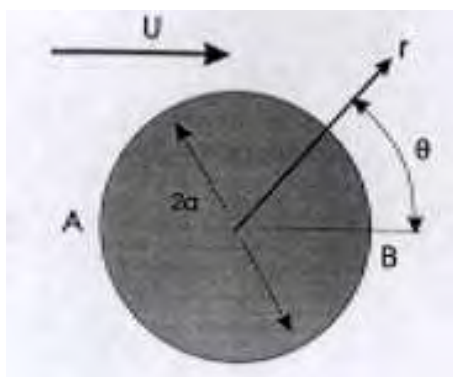
Για περαιτέρω αύξηση του Reynolds, η ροή γίνεται κρίσιμη και παρατηρείται απότομη μείωση του συντελεστή. Στον κρίσιμο αριθμό Reynolds ($Re = 3 \times 10^5$) το οριακό στρώμα γίνεται τυρβώδες και το σημείο διαχωρισμού μετακινείται, ελαττώνοντας απότομα την τιμή της οπισθέλκουσας και μειώνοντας τον συντελεστή της οπισθέλκουσας. Αυτό το φαινόμενο

οφείλεται στις επιδράσεις του οριακού στρώματος. Αν η επιφάνεια του σωματιδίου είναι τραχεία, η μετάβαση στην τύρβη συμβαίνει σε χαμηλότερες τιμές Reynolds.

Η ροή Stokes ($Re < 1$), θεωρείται ως έρπουσα στην οποία οι αδρανειακοί όροι στις εξισώσεις Navier-Stokes δεν είναι σημαντικοί. Έτσι η εξίσωση που ισχύει είναι:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.30)$$

Η εφαρμογή αυτής της εξίσωσης για ροή πάνω από σφαίρα έγινε αρχικά από τον C.G. Stokes το 1851 σε σφαιρικές συντεταγμένες, Σχήμα 2-2.



Σχήμα2-2: Σύστημα συντεταγμένων για ροή Stokes γύρω από σφαίρα

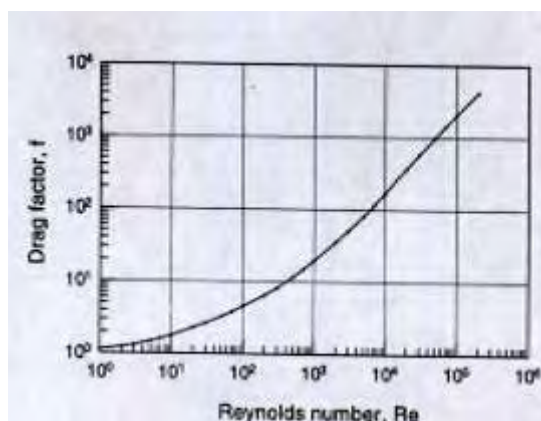
Η εξίσωση της κίνησης για ένα σωματίδιο ή σταγονίδιο με την χρήση του συντελεστή οπισθέλκουσας εκφράζεται ως εξής:

$$m \frac{dv}{dt} = 3\pi\mu Df(\mathbf{u} - \mathbf{v}) + m\mathbf{g} \quad (2.31)$$

όπου το \mathbf{g} είναι η επιτάχυνση που οφείλεται στην βαρύτητα και f είναι ο παράγοντας της οπισθέλκουσας ή ο λόγος του συντελεστή οπισθέλκουσας στον Stokes.

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (2.32)$$

Η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας με τον αριθμό Re φαίνεται στο Σχήμα 2-3:



Σχήμα 2-3: Η εξάρτηση του συντελεστή οπισθέλκουσας με τον αριθμό Reynolds

Πίνακας 2-1 Συγκεντρωτικές τιμές συντελεστή οπισθέλκουσας

Τιμή Re	Νόμος	Τιμή C _D
Re _p < 1	Stokes	C _D =24 Re _p ⁻¹
1 < Re _p < 10 ³	Van Allen	C _D =24 Re _p ⁻¹ (1+0.15 Re _p ^{0.687})
10 ³ < Re _p	Newton	C _D =0.44

2.2.3 Δύναμη Basset

Η δύναμη Basset σχετίζεται με την επιτάχυνση του σωματιδίου, και αντιπροσωπεύει μια αντίσταση στις αλλαγές της ταχύτητας. Αυτή η δύναμη αναφέρεται στην αλληλεπίδραση ανάμεσα στην στιγμιαία επιτάχυνση και στο τροποποιημένο πεδίο της ροής. Η δύναμη Basset λαμβάνει υπόψη της την επίδραση του ιξώδους του ρευστού και οφείλεται στην προσωρινή καθυστέρηση της ανάπτυξης του οριακού στρώματος καθώς η σχετική ταχύτητα αλλάζει με τον χρόνο. Η δύναμη Basset είναι ίση με:

$$F_{Basset} = \frac{3}{2} D^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \int_0^t \frac{\dot{u} - \dot{v}}{\sqrt{t - t'}} dt' \quad (2.33)$$

όπου ο όρος $t - t'$ εκφράζει την χρονική διαφορά από την στιγμή της επιτάχυνσης του σωματιδίου μέχρι την παρούσα στιγμή και μ το ιξώδες.

Στην περίπτωση όπου υπάρχει μια αρχική ταχύτητα, ο όρος γίνεται:

$$F_{Basset} = \frac{3}{2} D^2 \sqrt{\pi \rho \mu} \left[\int_0^t \frac{\dot{u} - \dot{v}}{\sqrt{t - t'}} dt' + \frac{(u - v)_0}{\sqrt{t}} \right] \quad (2.34)$$

όπου, το $(u - v)_0$ είναι η διαφορά των αρχικών ταχυτήτων του σωματιδίου και του ρευστού.

2.2.4 Δυνάμεις ανύψωσης

Σε αυτή την κατηγορία δυνάμεων περιλαμβάνονται δύο επιφανειακές δυνάμεις (Saffman και Magnus) που δρουν στην κατακόρυφη διεύθυνση της κίνησης του σωματιδίου και για αυτό ονομάζεται δυνάμεις ανύψωσης. Η δύναμη Saffman στις κλίσεις της ταχύτητας του ρευστού γύρω από το σωματίδιο, που του δίνει την τάση να περιστραφεί αλλά επίσης επιφέρει διαφορές ακτινικής πίεσης. Η δύναμη Saffman δίδεται από την σχέση:

$$F_{saf} = 1.6 \rho_f d_p^2 (\gamma \nu_f)^{1/2} u \quad (2.35)$$

όπου ρ_f και ν_f είναι η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού, d_p η διάμετρος του σωματιδίου, γ μια σταθερά και u είναι η ταχύτητα του ρευστού.

2.2.5 Η εξίσωση Basset-Boussinesq-Oseen

Εισάγοντας όλες τις δυνάμεις στην εξίσωση της κίνησης του σωματιδίου προκύπτει η εξίσωση Basset-Boussinesq-Oseen (BBO):

$$m \frac{dv}{dt} = 3\pi\mu D(u-v) + V_d(-\nabla p + \nabla \tau) + \frac{\rho_c}{2} \left(\dot{u} - \dot{v} \right) + \frac{3}{2} D^2 \sqrt{\pi\rho\mu} \left[\int_0^t \frac{\dot{u} - \dot{v}}{\sqrt{t-t'}} dt' + \frac{(u-v)_0}{\sqrt{t}} \right] + mg \quad (2.36)$$

2.2.6 Επίδραση της τύρβης

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της επίδρασης της τύρβης του ρευστού στην οπισθέλκουσα του σωματιδίου χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι. Η μία είναι η σχετική ένταση της τύρβης και η άλλη η αναλογία της κλίμακας της τύρβης προς το μέγεθος του σωματιδίου. Η σχετική ένταση της τύρβης ορίζεται ως εξής:

$$I_r = \frac{\sqrt{u'^2}}{|v-v'|} \quad (2.37)$$

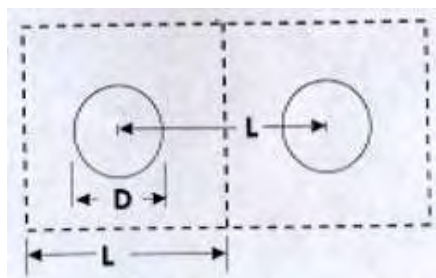
όπου, $\sqrt{u'^2}$ είναι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας. Είναι προφανές ότι η σχετική ένταση της τύρβης αυξάνεται καθώς η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο ρευστό και το σωματίδιο μειώνεται. Η σχετική ένταση της τύρβης και ο κρίσιμος αριθμός Reynolds συσχετίζονται ως εξής:

$$I_r, Re = 45 \quad (2.38)$$

2.2.7 Απόσταση μεταξύ σωματιδίων

Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης της διακριτής φάσης σε μια διαφασική ροή εξαρτάται σημαντικά από τον μέσο όρο της απόστασης ανάμεσα στα σωματίδια της διακριτής φάσης. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική για να καθοριστεί αν ένα σωματίδιο ή ένα σταγονίδιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μονωμένο στοιχείο. Θεωρούμε σωματίδια διαμέτρου D , Σχήμα 2-4, τα οποία βρίσκονται μέσα σε κύβους με μήκος πλευράς L , η οποία είναι η απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των σωματιδίων. Το κλάσμα όγκου της διακριτής φάσης είναι:

$$a_d = \frac{\pi D^3}{6L^3} \quad (2.39)$$



Σχήμα 2-4: Απόσταση μεταξύ σωματιδίων

Εάν τα σωματίδια που είναι σε επαφή με αυτό το σχηματισμό είχαν διάμετρο L , το κλάσμα του όγκου της διακριτής φάσης θα είναι $\frac{\pi}{6}$. Η απόσταση των σωματιδίων ή σταγονιδίων σχετίζεται με το κλάσμα του όγκου ως εξής:

$$\frac{L}{D} = \left(\frac{\pi}{6a_d} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.40)$$

Για κλάσμα όγκου 10% η απόσταση αυτή είναι 1,7 και υποδεικνύει ότι τα σωματίδια της διακριτής φάσης είναι πολύ κοντά για να θεωρούνται μονωμένα. Επομένως, η μάζα, ορμή και μεταφορά θερμότητας για κάθε στοιχείο επηρεάζεται από τα γειτονικά στοιχεία. Το κλάσμα όγκου της διακριτής φάσης μπορεί να εκφραστεί με όρους συγκέντρωσης μάζας της διακριτής φάσης και με το λόγο πυκνότητας. Το κλάσμα του όγκου της διακριτής φάσης δίνεται από τη σχέση:

$$a_d = \frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d} = \frac{\bar{\rho}_d}{\bar{\rho}_c} \frac{\bar{\rho}_c}{\rho_c} \frac{\rho_c}{\rho_d} \quad (2.41)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

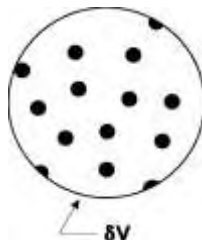
$$a_d = Ca_c \frac{\rho_c}{\rho_d} \quad (2.42)$$

όπου a_d και a_c είναι το κλάσμα του όγκου της διακριτής φάσης και της συνεχούς φάσης αντίστοιχα, που ορίζονται ως εξής:

$$a_d = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^0} \frac{\delta V_d}{\delta V} \quad (2.43)$$

$$a_c = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^0} \frac{\delta V_c}{\delta V} \quad (2.44)$$

όπου δV_d και δV_c είναι οι όγκοι της διακριτής και συνεχούς φάσης στον όγκο ελέγχου, αντίστοιχα, Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5: Ο όγκος ελέγχου με τα σωματίδια της διακριτής φάσης

Επειδή : $a_d + a_c = 1$, από την σχέση (2.42) προκύπτει:

$$a_d = \frac{\kappa}{1 + \kappa} \quad (2.45)$$

Όπου το $\kappa = C\rho_c / \rho_d$.

Κατά συνέπεια η απόσταση ανάμεσα στα στοιχεία της διακριτής φάσης μιας διφασικής ροής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{L}{D} = \left(\frac{\pi}{6} \frac{1+\kappa}{\kappa} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.46)$$

Για της περισσότερες ροές αερίου-σωματιδίων και αερίου-σταγονιδίων ο λόγος των υλικών πυκνοτήτων, ρ_c / ρ_d είναι της τάξης του 10^{-3} , επομένως η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων είναι $L/D \approx 10$.

2.2.8 Χρόνος απόκρισης

Ο χρόνος απόκρισης ενός σωματιδίου στις αλλαγές της ταχύτητας είναι σημαντικός για την σύσταση των αδιάστατων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη διφασική ροή. Ο χρόνος απόκρισης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για ένα σωματίδιο να ανταποκριθεί στην αλλαγή της ταχύτητας. Η εξίσωση κίνησης για ένα σωματίδιο μέσα σε ρευστό, αγνοώντας όλες τις δυνάμεις εκτός από την οπισθέλκουσα, δίνεται από την σχέση:

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \frac{\pi D^2}{4} \rho_c (\mathbf{u} - \mathbf{v}) |\mathbf{u} - \mathbf{v}| \quad (2.47)$$

όπου \mathbf{v} είναι η ταχύτητα του σωματιδίου και \mathbf{u} η ταχύτητα της συνεχούς φάσης.

Ο αριθμός Reynolds για τη διακριτή φάση ορίζεται ως:

$$\text{Re} = \frac{\rho D |\mathbf{u} - \mathbf{v}|}{\mu} \quad (2.48)$$

διαιρώντας με την μάζα του σωματιδίου από την (2.47) θα προκύψει:

$$\frac{du}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_d D^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (2.49)$$

όπου, μ είναι το ιξώδες του ρευστού.

Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds (π.χ. ροή Stokes) ο παράγοντας $C_D \text{Re}/24$ πλησιάζει την μονάδα. Ο πρώτος παράγοντας έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου και ορίζει τον χρόνο απόκρισης, ο οποίος είναι:

$$\tau_v = \frac{\rho_d D^2}{18\mu} \quad (2.50)$$

Έτσι η εξίσωση (2.49) μπορεί να γραφεί:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{1}{\tau_v} (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (2.51)$$

Η λύση της εξίσωσης (2.51) για σταθερή ταχύτητα ρευστού και μηδενική αρχική ταχύτητα σωματιδίου είναι:

$$v = u(1 - e^{-t/\tau_v}) \quad (2.52)$$

Κατά συνέπεια ο χρόνος απόκρισης είναι της που απαιτείται για να φθάσει ένα σωματίδιο από την ηρεμία στην τιμή $\frac{e-1}{e} = 63\%$ της ελεύθερης ταχύτητας της ροής. Για παράδειγμα ο χρόνος απόκρισης για ένα σταγονίδιο νερού διαμέτρου 100 μικρών στον αέρα, υπό κανονικές συνθήκες είναι 30 ms.

2.2.9 Αριθμός Stokes

Ο αριθμός Stokes είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στις ροές ρευστού-σωματιδίου. Σχετίζεται με την ταχύτητα του σωματιδίου και ορίζεται ως:

$$St_v = \frac{\tau_v}{\tau_F} \quad (2.53)$$

όπου τ_F είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος ροής και τ_v ο χρόνος απόκρισης του σωματιδίου.

Εάν $St_v \ll 1$, ο χρόνος απόκρισης των σωματιδίων είναι πολύ μικρότερος από τον χαρακτηριστικό χρόνο που σχετίζεται με το πεδίο ροής. Έτσι τα σωματίδια θα έχουν ικανό χρόνο να ανταποκριθούν της αλλαγής της ταχύτητας του ρευστού. Κατά συνέπεια το σωματίδιο και οι ταχύτητες του ρευστού θα είναι σχεδόν ίσες. Εάν $St_v \gg 1$, τότε το σωματίδιο δεν θα έχει ουσιαστικά χρόνο να ανταποκριθεί της αλλαγής της ταχύτητας του ρευστού και η ταχύτητά του θα επηρεάζεται λιγότερο κατά την κίνησή του ρευστού.

2.2.10 Αραιές και πυκνές διφασικές ροές

Αραιή διφασική ροή είναι αυτή στην οποία η κίνηση του σωματιδίου ελέγχεται κυρίως από τις δυνάμεις του ρευστού, ενώ πυκνή ροή, είναι αυτή κατά την οποία η κίνηση του σωματιδίου ελέγχεται και από τις συγκρούσεις με άλλα σωματίδια. Ένας ποιοτικός υπολογισμός της φύσης αυτών των ροών μπορεί αν γίνει με την σύγκριση του λόγου του χρόνου απόκρισης της ορμής ενός σωματιδίου προς τον χρόνο ανάμεσα στις συγκρούσεις. Έτσι η ροή μπορεί να θεωρηθεί αραιή εάν:

$$\frac{\tau_v}{\tau_c} < 1 \quad (2.54)$$

όπου, τ_c είναι ο μέσος όρος του χρόνου ανάμεσα στις συγκρούσεις σωματιδίων, διότι τα σωματίδια έχουν συγκεκριμένο χρόνο να ανταποκριθούν στις τοπικές δυνάμεις του ρευστού πριν την επόμενη σύγκρουση.

Εάν έχουμε:

$$\frac{\tau_v}{\tau_c} > 1 \quad (2.55)$$

τότε το σωματίδιο δεν έχει χρόνο να ανταποκριθεί στις δυνάμεις του ρευστού πριν την επόμενη σύγκρουση και η ροή χαρακτηρίζεται πυκνή.

Ο χρόνος ανάμεσα στις συγκρούσεις μπορεί να υπολογιστεί από εξισώσεις σχετικές με τη συχνότητα της σύγκρουσης. Εάν μια ομάδα σωματιδίων με ενιαία διάμετρο D όπως φαίνεται στο Σχήμα.2-6, μέσω της οποίας ένα σωματίδιο ταξιδεύει με σχετική ταχύτητα v_r σε σχέση με τα άλλα σωματίδια. Σε χρόνο δt , το ένα σωματίδιο θα εμποδίσει όλα τα άλλα σωματίδια στον αγωγό με ακτίνα $2D$ και μήκος $v_r \delta t$. Ο αριθμός των σωματιδίων στον σωλήνα είναι:

$$\delta N = n\pi D^2 v_r \delta t \quad (2.56)$$

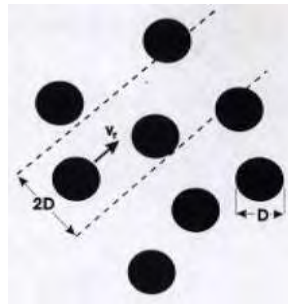
όπου n είναι ο αριθμός πυκνότητας των σωματιδίων.

Έτσι η συχνότητα σύγκρουσης είναι:

$$f_c = n\pi D^2 v_r \quad (2.57)$$

και ο χρόνος ανάμεσα στις συγκρούσεις είναι:

$$\tau_c = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{n\pi D^2 v_r} \quad (2.58)$$



Σχήμα 2-6: Συγκρούσεις μεταξύ σωματιδίων

Έτσι, ο λόγος του χρόνου τ_v / τ_c εκφράζεται ως:

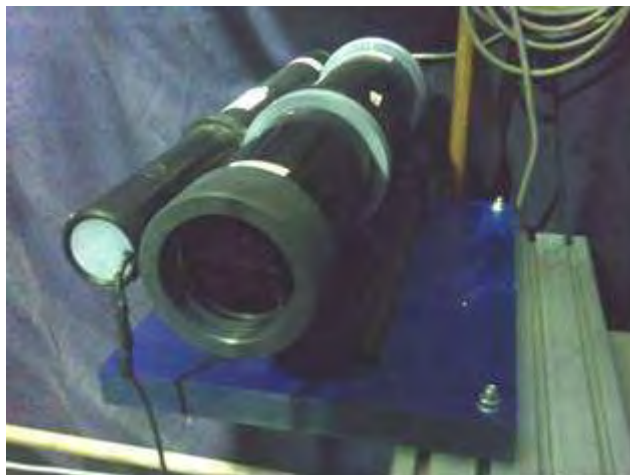
$$\frac{\tau_v}{\tau_c} = \frac{n\pi \rho_d D^4 v_r}{18\mu} \quad (2.59)$$

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

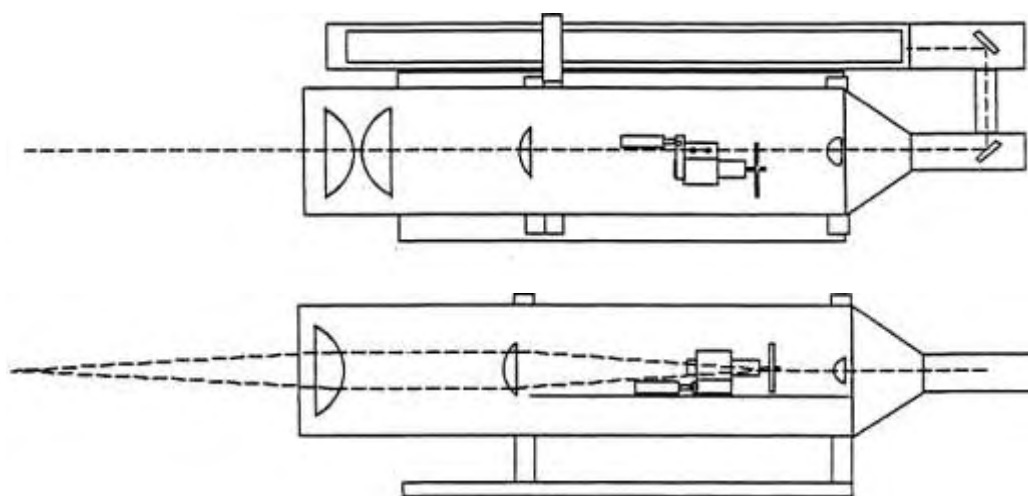
3.1 Το Μετρητικό Σύστημα PDA

Το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το σύστημα ανεμομέτρου Phase Doppler (PDA). Αποτελείται από πέντε σημαντικά μέρη ως εξής: το οπτικό σύστημα εκπομπής δέσμης Laser, το δέκτη, τον επεξεργαστή σημάτων, το τμήμα ελέγχου της συσκευής αποστολής σημάτων (πομπού), και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό το σύστημα καταγραφής ενσωματώνει και επεκτείνει τη δυνατότητα μέτρησης της ταχύτητας σωματιδίων σε σχέση με το συμβατικό ανεμόμετρο Laser Doppler (LDA) με την πρόσθετη δυνατότητα της μέτρησης του μεγέθους των σωματιδίων. Τα σχεδόν σφαιρικά σωματίδια που κυμαίνονται σε διάμετρο από 0,5 έως και πάνω από 3000 μm μπορούν να μετρηθούν πέρα από ένα δυναμικό εύρος μεγέθους 100 με μια ενιαία οπτική ρύθμιση. Ταυτόχρονα, ταχύτητες σωματιδίων πάνω από 100 m/s μπορούν να μετρηθούν ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και την οπτική ρύθμιση.

Ο πομπός της δέσμης Laser στο Σχήμα 3-1 (μοντέλο XTM-1100-4S) είναι σχεδιασμένος για να παράγει δύο ίσης έντασης ακτίνες Laser και να τις εστιάζει σε ένα σημείο τομής που διαμορφώνει την περιοχή μέτρησης και ονομάζεται όγκος ελέγχου. Ο πομπός περιέχει μια δέσμη Laser He-Ne (Spectra-Physics, μοντέλο SP-106), ισχύος 10 mW με διάμετρο 0.68mm. Οι φακοί μέσα στην συσκευή χρησιμεύουν για να εστιάσουν, διαχωρίσουν και ενώσουν την δέσμη. Η διάταξη των φακών στην συσκευή φαίνεται στο Σχήμα 3-2. Ο διαχωριστής ακτίνας (beam separator) είναι ένα ακτινικό φράγμα περίθλασης που έχει τρεις χωριστές διαμορφώσεις για να δώσει τρία διαφορετικά ανοίγματα ακτίνων (3 tracks). Η περίθλαση της εκπεμπόμενης δέσμης Laser σε πολλαπλές ακτίνες θα εμφανιστεί είτε ο διαμορφωτής περιστρέφεται είτε όχι. Ο διαμορφωτής περίθλασης είναι τοποθετημένος πάνω στον άξονα ενός υψηλής ταχύτητας, συνεχούς ρεύματος κινητήρα. Η περιστροφή του παράγει μια διαφορά συχνότητας μεταξύ των διαχωρισμένων ακτίνων που χρησιμοποιείται για να παραγάγει μια μετατόπιση συχνότητας στα σήματα των μετρούμενων σωματιδίων. Ένας δεύτερος κινητήρας συνεχούς ρεύματος (track select motor) χρησιμοποιείται για να προωθήσει τη γραμμική διάδοση των ακτίνων και να επιτρέψει την επιλογή οποιουδήποτε από τους τρεις διαμορφωτές περιθλάσεως (select tracking).



Σχήμα 3-1: Πομπός δέσμης Laser (Μοντέλο XTM – 1100)

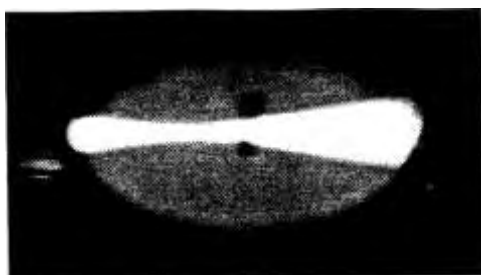


Σχήμα 3-2: Οπτικό διάγραμμα πομπού δέσμης Laser (Μοντέλο XTM – 1100)

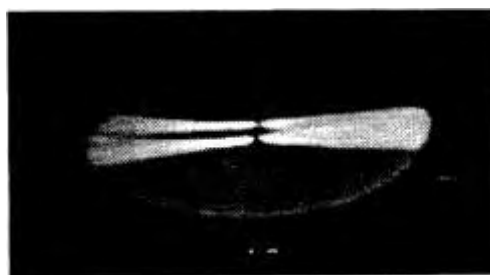
Οι αποκλίνουσες ακτίνες από τον διαχωριστή γίνονται παράλληλες με ένα δεύτερο φακό ο οποίος επίσης κάνει παράλληλη την κάθε δέσμη. Αυτός ο φακός σε συνδυασμό με τον φακό διαχωριστή παράγει ένα άνοιγμα ακτινών της αρχικής δέσμης του Laser που στην συνέχεια οδηγούνται στο φακό εστίασης ο οποίος δημιουργεί και τον τελικό όγκο ελέγχου. Στην συνέχεια έχουμε τον αποδέκτη της δέσμης του Laser το μοντέλο (κωδικός RCV-2100), Σχήμα 3-3, όπου είναι ένα σύστημα συλλογής σκεδασμένου φωτός και είναι σχεδιασμένο με σκοπό να παρέχει ακριβώς τις μετατοπίσεις της φάσης σημάτων που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του μεγέθους του σωματιδίου. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από ένα ιδιαίτερα αποδοτικό σύστημα φακών για συλλογή φωτός, “ένα χωρικό φίλτρο” για τον ακριβή καθορισμό του όγκου ελέγχου, μία διαμόρφωση πρισμάτων για τον διαχωρισμό του φωτός, και πολλούς ανιχνευτές συνδυαζόμενους με προενισχυτές. Το τυποποιημένο χωρικό φίλτρο είναι μια σχισμή πλάτους 100 μm και μήκους 1mm. Το Σχήμα 3-4 παρουσιάζει το χωρικό φίλτρο όπως φαίνεται μέσα από το οπτικό άνοιγμα.



Σχήμα 3-3: Αποδέκτης Δέσμης Μοντέλο RCV – 2100



Αντικείμενο εκτός σημείου διασταύρωσης



Αντικείμενο εκτός εστίασης & διασταύρωσης



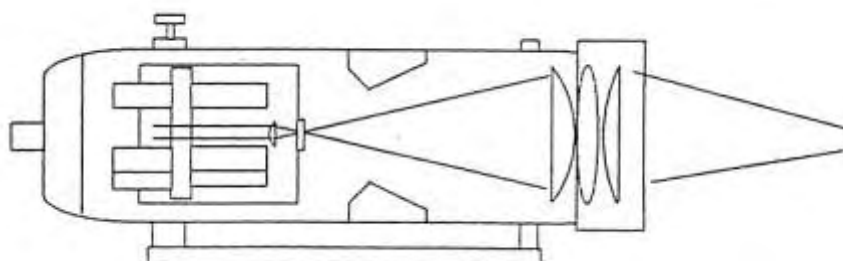
Αντικείμενο που δεν είναι κεντραρισμένο



Αντικείμενο τέλεια κεντραρισμένο

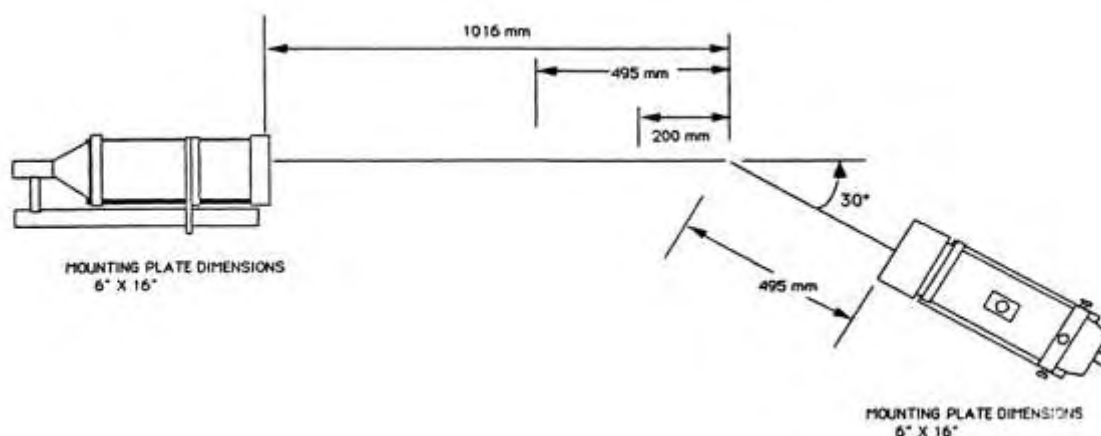
Σχήμα 3-4: Το οπτικό φίλτρο όπως φαίνεται από το οπτικό άνοιγμα

Το οπτικό άνοιγμα εξέτασης περιέχει έναν φακό απεικόνισης για την ευκολία στην εξέταση και εξετάζει οπίσθια μια γωνία 45 μοιρών επάνω στην επιφάνεια ενός τοποθετημένου δίσκου που περιέχει τη σχισμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-5 για το διάγραμμα οπτικής διαμόρφωσης του αποδέκτη.



Σχήμα 3-5: Διάγραμμα διαμόρφωσης φακών στον αποδέκτη

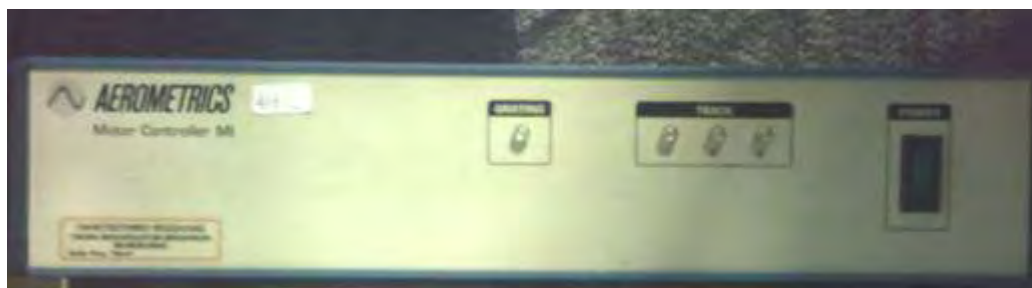
Ο προσανατολισμός του αποδέκτη σε σχέση με τον πομπό της δέσμης του Laser είναι για μπροστινή σκέδαση σωματιδίων, για διαπερατά σωματίδια σε γωνία 30^0 από την ευθεία εκπομπής της δέσμης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6: Διαμόρφωση Πομπού –Αποδέκτη για μπροστινή σκέδαση σε γωνία 30^0

3.1.1 Ελεγκτής κινητήρα του PDA

Ο ελεγκτής του κινητήρα του PDA (μοντέλο MCB-7100-1) στο Σχήμα 3-7 έχει σχεδιαστεί για να ελέγχει τη συχνότητα μετατόπισης του κινητήρα εκπομπής των δεσμών και τον κινητήρα επιλογής για μία από τις τρεις δέσμες του PDA (tracks).



Σχήμα 3-7: Ελεγκτής του κινητήρα του PDA

Ο μπροστινός πίνακας ελέγχου της συσκευής παρέχει τις απλές πληροφορίες για τη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα μέσα στον πομπό. Τα λαμπάκια του κινητήρα επιλογής δεσμών (track) είναι συνδεδεμένα απευθείας με τον κωδικοποιητή του κινητήρα. Συνεπώς, όταν λειτουργεί ο κινητήρας (grating), το πράσινο λαμπάκι φωτίζεται. Η κονσόλα ελέγχου με τα λαμπάκια παρέχει τις πληροφορίες για το πιο άνοιγμα δεσμών (beam spacing) του PDA χρησιμοποιείται. Το λαμπάκι (1) ανταποκρίνεται στο πιο μικρό άνοιγμα της δέσμης (track 1) ενώ το (3) στο πιο μεγάλο άνοιγμα της δέσμης (track 3).

3.1.2 Επεξεργαστής σήματος

Ο επεξεργαστής αναλογικών/ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας (μοντέλο PDP3100) στο Σχήμα 3-8 δέχεται τα ενισχυμένα σήματα από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Στην μπροστινή του κονσόλα περιέχει δύο σειρές από (3) λαμπάκια. Η πρώτη σειρά από λαμπάκια όταν φωτίζονται (κόκκινο χρώμα) υποδηλώνουν ότι το σήμα είναι κορεσμένο. Από το 50% των φορών που φωτίζονται μόνο το 1% αυτών είναι πραγματικοί κορεσμοί. Όταν φωτίζονται τα πράσινα λαμπάκια και τα τρία ταυτόχρονα δηλώνουν ότι έχουμε καλό μη-κορεσμένο σήμα και ότι οι μετρήσεις έχουν καλή αξιοπιστία. Με την βοήθεια αυτών γίνεται και η ευθυγράμμιση του φακού αποδέκτη κατά την διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα 3-8: Επεξεργαστής σήματος

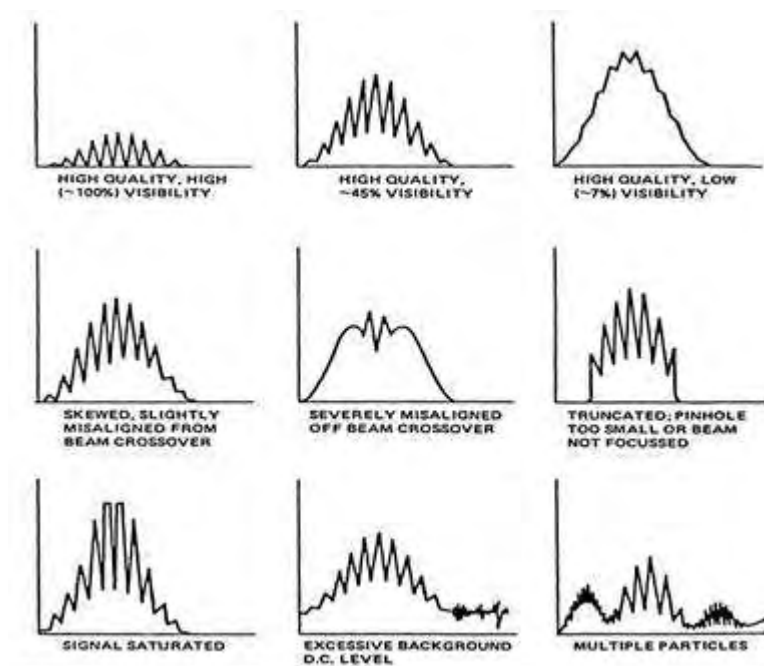
Τέλος όσον αφορά το μετρητικό τμήμα του PDA αναφέρουμε τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που περιέχει το λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων (Σχήμα 3-9) καθώς και τον παλμογράφο για την παρακολούθηση της ποιότητας του σήματος κατά την διάρκεια των μετρήσεων, Σχήμα 3-10. Το Σχήμα 3-11 παρουσιάζει διάφορες μορφές ανάλογα με την ποιότητα του σήματος και την ευθυγράμμιση του οπτικού φίλτρου όπως φαίνεται στον παλμογράφο, και το Σχήμα 3-12 μια εικόνα της διάταξης των τμημάτων που το αποτελούν.



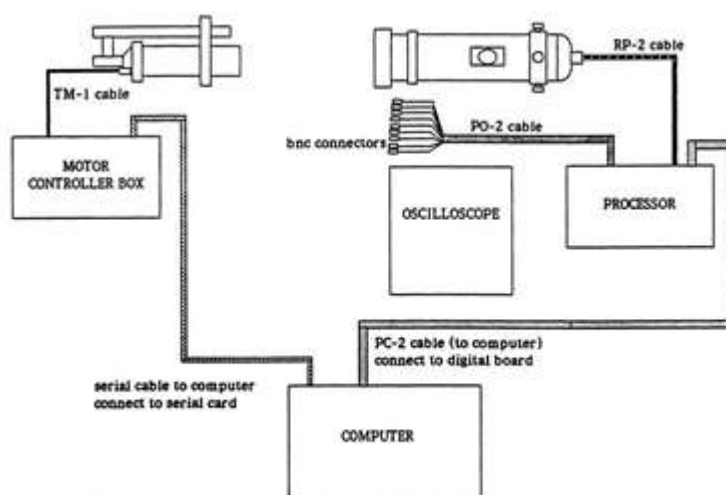
Σχήμα 3-9: Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής



Σχήμα 3-10: Παλμογράφος



Σχήμα 3-11: Ποιότητα σήματος ανάλογα με την ευθυγράμμιση και τον κορεσμό



Σχήμα 3-12: Διάταξη σύνδεσης των τμημάτων του PDA

3.2 Περιγραφή της διάταξης ροής

Το σύστημα της παρούσας ροής αποτελείται από ένα αγωγό ορθογωνικής διατομής, μία αντλία, δύο δοχεία, τρία φίλτρα, και πέντε(5) περίπου μέτρα λαστιχένιου σωλήνα ο οποίος συνδέει μεταξύ τους τα παραπάνω τμήματα της ροής.

3.2.1 Ο αγωγός

Ο κατακόρυφα τοποθετημένος αγωγός, Σχήμα 3-13, μέσω του οποίου διέρχεται η δέσμη του Laser με σκοπό να γίνουν οι μετρήσεις είναι κατασκευασμένος από Plexiglas και έχει ορθογωνική διατομή διαστάσεων 15mmX60mm και μήκος 1,60m. Στο πάνω μέρος η ροή εισέρχεται από σωλήνα διατομής 10mm και το πάχος του Plexiglas είναι 3mm.



Σχήμα 3-13: Ο κατακόρυφος ορθογωνικός αγωγός

3.2.2 Δοχεία νερού

Το δοχείο που είναι τοποθετημένο ψηλά, Σχήμα 3-14, τροφοδοτεί τον αγωγό με νερό. Είναι στερεωμένο σε μια σταθερή αλουμινένια βάση και ουσιαστικά αποτελείται από δύο δοχεία που καταλήγουν σε κοινή οπή. Το εξωτερικό όπου γίνεται υπερχειλίση έχει χωρητικότητα 40 λίτρα ενώ το εσωτερικό 30 λίτρα. Το εσωτερικό δοχείο τροφοδοτεί τον γυάλινο σωλήνα με νερό. Το εξωτερικό είναι συνδεδεμένο με ένα αλφαδολάστιχο ώστε η υπερχειλίση να καταλήγει στο κάτω δοχείο όπως και το νερό από τον αγωγό. Η χρησιμότητα των δύο δοχείων, το ένα μέσα στο άλλο, έχει ως σκοπό τη δημιουργία σταθερής ροής, καθώς με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η σταθερότητα της στάθμης στο πάνω δοχείο. Το κάτω δοχείο, Σχήμα 3-15, έχει και αυτό χωρητικότητα περίπου 40 λίτρα.



Σχήμα 3-14 : Δοχείο τοποθετημένο ψηλά



Σχήμα 3-15 : Δοχείο τοποθετημένο χαμηλά

3.2.3 Αντλία νερού

Η αντλία νερού που χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία του, Σχήμα 3-16, είναι η Kraft SP 250 με μέγιστη παροχή 4200 lt/h και η ισχύς της είναι 0.35 Hp. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στο Πίνακα 3-1. Η συγκεκριμένη αντλία είναι τύπου «βυθού» και έχει τοποθετηθεί στο πάτο του κάτω δοχείου. Η αντλία στέλνει το ρευστό απευθείας στο δοχείο που είναι τοποθετημένο ψηλά όπως προαναφέραμε μέσω αλφαδολάστιχου. Τέλος, να σημειωθεί ότι η αντλία διαθέτει σύστημα αυτόματης διακοπής λειτουργίας εάν η στάθμη του κάτω δοχείου πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο σημείο. Επιπλέον να σημειωθεί ότι η αντλία μπορεί να δεχθεί σωματίδια έως 5mm χωρίς να τα καταστρέφει.



Σχήμα 3-16: Η αντλία του συστήματος, Kraft SP 250

Πίνακας 3-1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αντλίας

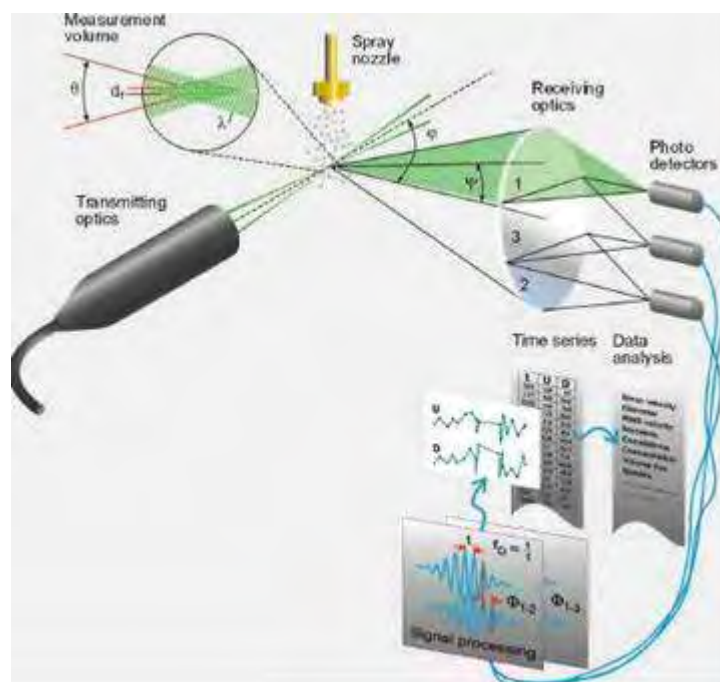
FORCE:	0.35 HP
CABLE:	10 m
MANOMETRIC:	6 m (max)
SIZE OF PARTICLES:	5 mm (max)
BENEFIT max.:	4200 lt / h
ORIFICE:	1' - 1' 1/ 4
TYPE:	SP 250
TENDENCY (Volt/Hz):	230 / 50

4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑΣ PHASE DOPPLER

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του PDA για την μέτρηση της ταχύτητας και του μεγέθους των σωματιδίων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά δεσμών Laser. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στο φαινόμενο Doppler και στον υπολογισμό της ταχύτητας και διαμέτρου των σωματιδίων. Περιγράφονται οι πιθανές διατάξεις του PDA και η επίδραση διαφόρων παραγόντων στον όγκο ελέγχου και την ποιότητα μέτρησης. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές των συσκευών Laser.

Το ανεμόμετρο Phase Doppler (Aerometrics) στο Σχήμα 4-1 είναι ένα εξελιγμένο όργανο που χρησιμοποιεί το φως που διασκορπίζεται από σωματίδια (π.χ. σταγόνες, φυσαλίδες, στερεές σφαίρες) για να λάβει ταυτόχρονες μετρήσεις μεγέθους και ταχύτητας. Οι μετρήσεις μπορεί να γίνουν χωρίς εξωτερικές παρεμβολές και διαταραχές της ροής. Το όργανο είναι επέκταση του πιο γνωστού ανεμόμετρου Laser Doppler (LDA). Τα τμήματα των δύο οργάνων, η λειτουργία, και οι απαιτήσεις είναι επίσης παρόμοιες. Το PDA είναι ιδιαίτερα ευέλικτο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες βιομηχανικές και εργαστηριακές εφαρμογές. Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα πομπό της δέσμης Laser και ένα δέκτη του σήματος Doppler. Οι συσκευές μπορεί να τοποθετηθούν σε μια ενιαία βάση για τις μετρήσεις γύρω από το τμήμα δοκιμής. Συνήθως χρησιμοποιείται εμπρόσθια ή οπίσθια ανίχνευση της δέσμης Laser.



Σχήμα 4-1: Συσκευή Phase Doppler Anemometer

4.1.1 Χαρακτηριστικά Δεσμών Laser

Μια συσκευή Laser αποτελείται από ένα φθορίζον υλικό μέσα σε μία κατάλληλη οπτική κοιλότητα με δύο κάτοπτρα το ένα απέναντι στο άλλο. Τα ηλεκτρόνια των ατόμων του φθορίζοντος υλικού εξαναγκάζονται σε κατάσταση διέγερσης από μία πηγή ενέργειας. Έπειτα διεγείρονται από εξωτερικά πρωτόνια ώστε να εκπέμψουν την αποθηκευμένη ενέργεια τους με μορφή φωτονίων. Η ενίσχυση του φωτός επιτυγχάνεται με την παλινδρομική κίνηση των φωτονίων μεταξύ των δύο παραλλήλων κατόπτρων προκαλώντας νέες «εξαναγκασμένες εκπομπές». Το ισχυρής έντασης κατευθυνόμενο μονοχρωματικό φως διαδίδεται κατά μήκος του άξονα που ορίζεται από τα δύο κάτοπτρα και διαπερνά τελικά ένα από αυτά, το οποίο είναι μερικά επαργυρωμένο.

Οι ακτίνες Laser που χρησιμοποιούνται για αισθητήρες καταγραφής ταχυτήτων περιέχουν συνήθως ευγενή αέρια στο σωλήνα του πλάσματος: He - Ne ακτίνα Ηλίου-Νέου, Σχήμα 4-2 με κύρια εκπομπή σε μήκος κύματος $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ (ερυθρό χρώμα). Η ισχύς μιας δέσμης He - Ne μπορεί να είναι από 1 έως 100 mw.



Σχήμα 4-2: Laser Ηλίου – Νέον

Οι δέσμες αυτές είναι κυλινδρικές και ακολουθούν κανονική (Gaussian) κατανομή έντασης φωτός.

$$I(r) = I_0 e^{-8r^2/D^2} \quad (4.1)$$

όπου I_0 είναι η μέγιστη ένταση του εκπεμπόμενου φωτός και D είναι η διάμετρος της δέσμης.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ακτινών Laser είναι η μονοχρωματική τους φύση, δηλαδή η εκπομπή σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος για μια χρονική στιγμή. Η μεγάλη ταχύτητα του φωτός έχει σαν αποτέλεσμα ότι η δέσμη παραμένει συνεκτική για ένα σημαντικό τμήμα της διαδρομής της. Έχει αποδειχτεί ότι η διατομή μιας δέσμης Laser διευρύνεται κατά την διαδρομή της, Σχήμα 4-3α σύμφωνα με την σχέση:

$$d_2 = d_w \{ 1 + (4\lambda x / \pi d_w^2) \} \quad (4.2)$$

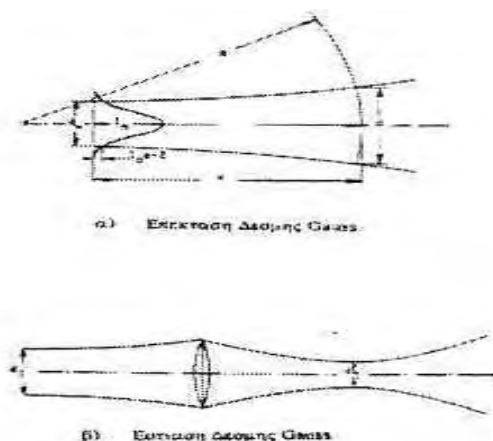
όπου d_w είναι η διάμετρος του λαιμού της δέσμης, λ είναι το μήκος κύματος της δέσμης και x είναι η απόσταση της δέσμης από τον λαιμό της δέσμης. Μια δέσμη λέιζερ που εστιάζεται

μέσα από ένα φακό όπως στο Σχήμα 4-3β, σχηματίζει ένα λαιμό στην περιοχή του εστιακού πεδίου του φακού με διάμετρο:

$$d_2 = 4LF/pd_1 \quad (4.3)$$

όπου F είναι η εστιακή απόσταση του φακού και d_1 η διάμετρος του λαιμού της δέσμης.

Κατά συνέπεια η δέσμη Laser μπορεί να εστιασθεί σε μια πολύ μικρή διάμετρο με την βοήθεια αντικειμενικών φακών μικροσκοπίου (μικρή εστιακή απόσταση).

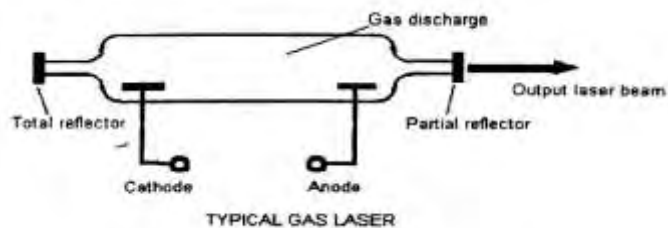


Σχήμα 4-3: Επέκταση και εστίαση της δέσμης

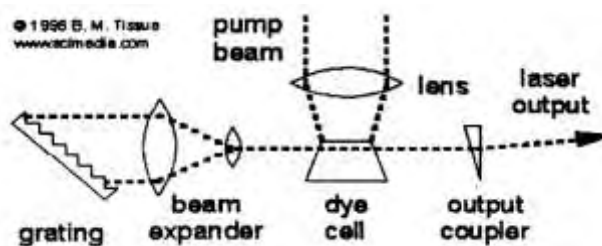
Οι ξεχωριστές ιδιότητες και η υψηλή λαμπρότητα της δέσμης Laser την κάνουν να διαφέρει από το κοινό φως. Οι λόγοι της διαφοράς μπορεί να εξηγηθεί εστιάζοντας στη διαφορετική ατομική δομή, την διαδικασία του φθορισμού, την εξαναγκασμένη εκπομπή και την «αναστροφή του πληθυσμού».

4.1.2 Κατηγορίες Συσκευών Laser

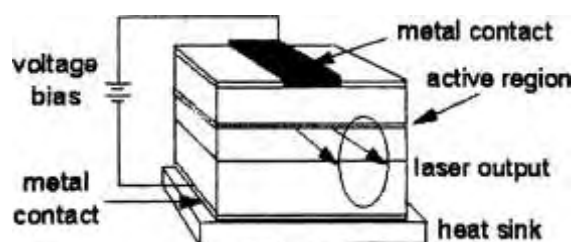
Στην πρώτη κατηγορία έχουμε τα Laser στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιούν υλικό διασκορπισμένο σε ένα καλούπι και στην δεύτερη έχουμε τα Laser αερίου, Σχήμα 4-4, που χρησιμοποιούν ένα αέριο ή ένα μίγμα αερίων μέσα σε ένα σωλήνα. Στην συνέχεια έχουμε τα Laser οργανικών χρωστικών, Σχήμα-4.5, όπου το ενεργό μέσο είναι μία σύνθετη οργανική χρωστική σε υγρή αιώρηση ή διάλυμα. Επίσης είναι η κατηγορία των Laser ημιαγωγών, Σχήμα 4-6, που περιέχουν δύο στρώματα ημι-αγωγίμου υλικού ενωμένα μαζί. Είναι γενικά μικρών διαστάσεων και μέτριας ισχύος. Τέλος τα Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούν ακτίνες ηλεκτρονίων αποχωρισμένων από τα άτομα που περιστρέφονται γύρω από τις γραμμές των μαγνητικών πεδίων για την παραγωγή ακτινοβολίας Laser.



Σχήμα 4-4: Τυπική διάταξη Laser αερίου



Σχήμα 4-5: Εκπομπή παλμού Laser οργανικής χρωστικής ουσίας



Σχήμα 4-6: Laser σταθεράς κατάστασης ημιαγωγού

4.1.3 Εφαρμογές Συσκευών Laser

Οι συσκευές Laser βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στην βιομηχανία για κοπές, συγκολλήσεις και επιφανειακή κατεργασία (μαρκάρισμα, γραφή, λείανση). Laser μεγάλης ισχύος μπορούν, εστιάζοντας σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενός υλικού (μετάλλου, ορυκτού) με μεγάλη θέρμανση, λιώσιμο ή ακόμα και εξάχνωση υλικού με χαρακτηριστική ευκολία και μεγάλη ακρίβεια μπορούν να επιτύχουν διάτρηση και επεξεργασία διαμαντιών, να κατεργαστούν με ευκολία μέταλλα και άλλα υλικά ή να κατασκευάσουν chips ημιαγωγών.

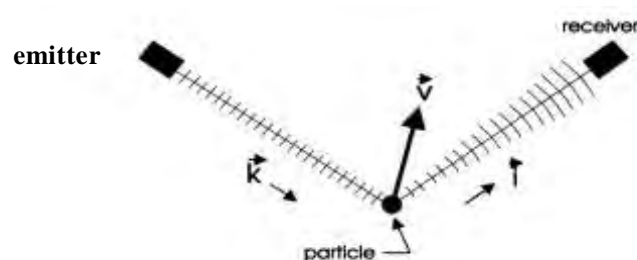
Τα Laser είναι επίσης αποτελεσματικοί ανιχνευτές των ρύπων της ατμόσφαιρας (LIDAR system). Επιτρέπουν επιπλέον την ακριβή μέτρηση αποστάσεων, όπως αυτής της γης από την σελήνη. Ακόμη μεγάλη είναι και η χρήση τους για την επιτάχυνση σωματιδίων και σε τεχνικές επιβράδυνσης ατόμων, μπορούν επίσης να προκαλέσουν ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη. Η αρχή λειτουργίας της περιστρεφόμενης ακτίνας χρησιμοποιείται και στην επιθεώρηση της ποιότητας επιφανείας (ρωγμές, χαράξεις, τραύματα), όπου δεν αξιοποιείται η σκιά αλλά η ανακλώμενη ακτίνα.

Μεγάλες επίσης είναι και οι εφαρμογές τους στην μελέτη ρευστομηχανικών πεδίων (μέτρηση ταχύτητας και μεγέθους σωματιδίων LDA - PDA), στην χημική ανάλυση και στην φωτοχημεία. Στην συνέχεια υπάρχει και ο τομέας των τηλεπικοινωνιών. Εξαιτίας της υψηλής του συχνότητας μπορεί για παράδειγμα να μεταφέρει 1000 φορές πιο γρήγορα τα τηλεοπτικά σήματα, που σήμερα μεταφέρονται με μικροκύματα. Τα λέιζερ επίσης είναι ιδανικά για επικοινωνίες στο διάστημα.

Σημαντικός τομέας όμως είναι και η ιατρική και η οδοντιατρική. Ακτίνες Laser μπορούν να κόψουν και να καυτηριάσουν συγκεκριμένους ιστούς του οργανισμού του ανθρώπου, σε κλάσματα του δευτερολέπτου, χωρίς να καταστρέψουν τους περιβάλλοντες υγιείς ιστούς στην περιοχή της επέμβασης. Τα Laser έχουν σημαντικές εφαρμογές και στην πολεμική βιομηχανία. Συστήματα λέιζερ αυτόματης καθοδήγησης πυραύλων, αεροσκαφών και δορυφόρων μελετώνται και κατασκευάζονται σήμερα από την πολεμική βιομηχανία.

4.2 Το Φαινόμενο Doppler

Η βασική αρχή των συστημάτων LDA και PDA είναι το φαινόμενο Doppler, που συνδέει την αλληλεπίδραση των ηχητικών ή φωτεινών κυμάτων με έναν κινούμενο παρατηρητή ή τη διαμόρφωση των ηχητικών ή φωτεινών κυμάτων που προσλαμβάνονται από έναν στάσιμο παρατηρητή όταν έχουμε ένα κινούμενο πομπό. Στο PDA αυτή η αρχή χρησιμοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ένα Laser εκπέμπει φωτεινά κύματα που διαβιβάζονται από έναν κινούμενο πομπό, το σωματίδιο. Ως εκ τούτου, η συχνότητα ή το μήκος κύματος του φωτός που λαμβάνεται από το σωματίδιο είναι ήδη διαμορφωμένο. Δεδομένου ότι το κινούμενο σωματίδιο σκεδάζει το φως στο χώρο, εμφανίζεται μια πρόσθετη μετατόπιση Doppler όταν παραλαμβάνεται το σκεδαζόμενο φως από έναν στάσιμο παρατηρητή όπως στο Σχήμα 4-17.

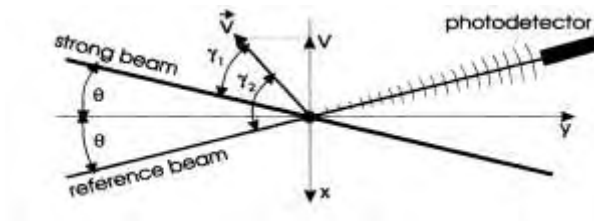


Σχήμα 4-3: Μετατόπιση Doppler του σκεδαζόμενου φωτός από ένα κινούμενο σωματίδιο

Η συχνότητα του φωτός στον φωτοανιχνευτή καθορίζεται από την σχέση:

$$f_r = f_e \frac{1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{l}}{c}}{1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{k}}{c}} \quad (4.4)$$

όπου το f_e είναι η συχνότητα της πηγής λέιζερ (πομπός), το \vec{u} είναι η ταχύτητα του κινούμενου σωματιδίου, το c είναι η ταχύτητα του φωτός, και \vec{k}, \vec{l} , είναι διανύσματα μονάδων στην κατεύθυνση όπως καθορίζεται στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-4: Διάταξη των ακτινών του συστήματος PDA

Η συχνότητα του σκεδασμένου φωτός f_r , είναι, εντούτοις, πάρα πολύ υψηλή για να επιτρέψει την άμεση ανίχνευση από έναν φωτοανιχνευτή. Επομένως, δύο διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται έτσι ώστε η συχνότητα του φωτός που ανιχνεύεται να μειώνεται αρκετά: η μέθοδος ακτινών αναφοράς και η μέθοδος με διαφορά συχνότητας Doppler.

Με την μέθοδο των ακτινών αναφοράς, με τον φωτισμό του σωματιδίου με μια ισχυρή φωτεινή ακτίνα και παρεμποδίζοντας το τελικό σκεδασμένο φως με μια αδύναμη ακτίνα αναφοράς από την πηγή φωτός λέιζερ στον φωτοανιχνευτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6. Υπολογίζεται αφαιρώντας την συχνότητα της ακτίνας αναφοράς f_e δίνεται η συχνότητα διαφοράς Doppler f_D από την σχέση:

$$f_D = f_r - f_e \quad (4.5)$$

Από την σχέση (4.4) καθώς και $\vec{u} \cdot \vec{k} = -|\vec{u}| \cos \gamma_1$ και $\vec{u} \cdot \vec{l} = -|\vec{u}| \cos \gamma_2$ προκύπτει:

$$f_D = f_e \frac{1 + \frac{|\vec{u}|}{c} \cos \gamma_1}{1 + \frac{|\vec{u}|}{c} \cos \gamma_2} - f_e \quad (4.6)$$

$$f_D = \frac{1}{\lambda_e} \left(\frac{|\vec{u}| (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2)}{1 + \frac{|\vec{u}|}{c} \cos \gamma_2} \right) \quad (4.7)$$

Το μέτρο της ταχύτητας κάθετης στο σημείο τομής των δύο ακτινών είναι:

$$u = -|\vec{u}| \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (4.8)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής σχέσης:

$$\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2 = -2 \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} \quad (4.9)$$

τελικά προκύπτει από τις σχέσεις (4.7), (4.8), (4.9):

$$f_D = \frac{1}{\lambda_e} \left[\frac{2u \sin \theta}{1 + \frac{u}{c} \sin \theta} \right] \quad (4.10)$$

όπου $\theta = \frac{1}{2}(\gamma_1 - \gamma_2)$. Γενικά ισχύει, $u \ll c$ οπότε η (4.10) γίνεται:

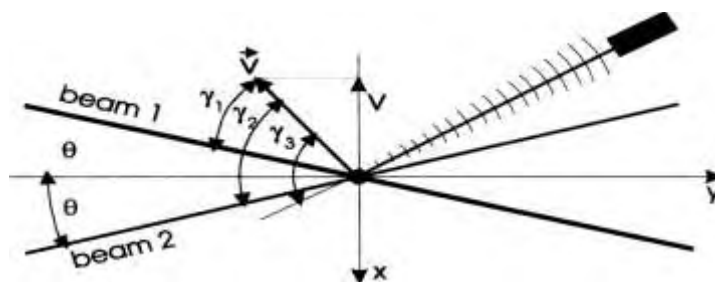
$$f_D = \frac{2u \sin \theta}{\lambda_c} \quad (4.11)$$

Η σχέση (4.11) μας δείχνει τη συχνότητα διαφοράς του φαινομένου Doppler σε σχέση με την ταχύτητα του σωματιδίου, τη γωνία των τεμνόμενων ακτινών και το μήκος κύματος του φωτός. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη των ακτινών αναφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μια καθορισμένη γωνία παρατήρησης που συμπίπτει με τη γωνία των ακτινών αναφοράς θ . Επιπλέον, η σταθερή γωνία για τη συλλογή του φωτός είναι προσδιορισμένη για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις συνοχής, δηλ., το ποσό του σκεδαζόμενου φωτός που συλλέγεται είναι περιορισμένο.

Η μέθοδος διαφοράς συχνότητας Doppler χρησιμοποιείται συχνότερα για τις μετρήσεις με το PDA. Το κινούμενο σωματίδιο φωτίζεται από δύο ακτίνες λέιζερ από διαφορετικές κατευθύνσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7. Σε αυτήν την περίπτωση, η συχνότητα του σκεδαζόμενου φωτός λαμβάνεται από τη διαφορά των δύο αντίστοιχων ακτινών:

$$f_D = f_{r1} - f_{r2} \quad (4.12)$$

όπου f_{r1} η συχνότητα της μιας εκπεμπόμενης ακτίνας του Laser και f_{r2} της δεύτερης.



**Σχήμα 4-5: Διάταξη της μεθόδου διαφοράς συχνότητας Doppler
(διπλό σύστημα ακτινών PDA)**

Χρησιμοποιώντας, άλλη μια φορά, την εξίσωση (4.4) και τις συνιστώσες της ταχύτητας στις κατευθύνσεις των δύο ακτινών, προκύπτει:

$$f_D = f_e \left(\frac{1 + (|\vec{u}|/c) \cos \gamma_1}{1 + (|\vec{u}|/c) \cos \gamma_3} - \frac{1 + (|\vec{u}|/c) \cos \gamma_2}{1 + (|\vec{u}|/c) \cos \gamma_3} \right) = \frac{|\vec{u}|}{\lambda_e} \frac{(\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2)}{1 + (|\vec{u}|/c) \cos \gamma_3} \quad (4.13)$$

με γ_1 η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας του σωματιδίου και της πρώτης ακτίνας του Laser, γ_2 η γωνία του διανύσματος της ταχύτητας και της δεύτερης ακτίνας και γ_3 η γωνία του διανύσματος με την συνολική γωνία τομής των δύο ακτινών, Σχήμα 4-7.

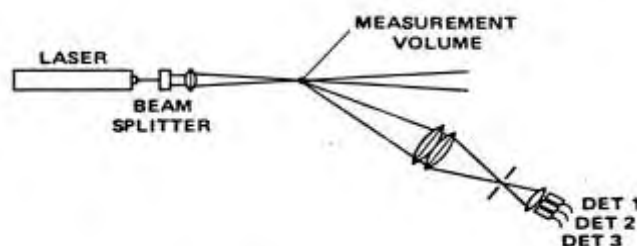
Για την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας στο σημείο τομής των δύο ακτινών και με $u \ll c$ η προηγούμενη εξίσωση γίνεται :

$$f_D = \frac{2u \sin \theta}{\lambda_c} \quad (4.14)$$

Αυτή η έκφραση είναι ίδια με αυτήν που πήραμε για τη μέθοδο των ακτινών αναφοράς. Εντούτοις, η γωνία παρατήρησης μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα στην μέθοδο διαφοράς Doppler. Αυτό σημαίνει ότι η γωνία παρατήρησης και η σταθερή γωνία συλλογής του σκεδαζόμενου φωτός μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή.

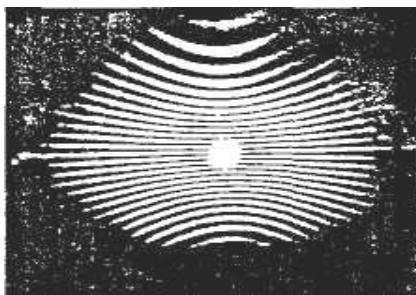
4.2.1 Θεωρία Ανεμομετρίας Phase Doppler

Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα οπτικό σύστημα που είναι το ίδιο που απαιτείται για ένα συμβατικό Laser Doppler Anemometer (LDA) εκτός από το ότι τρεις ανιχνευτές βρίσκονται σε επιλεγμένα διαστήματα πίσω από το άνοιγμα των δεκτών, Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-6: Οπτικό διάταξη για LDA και PDA

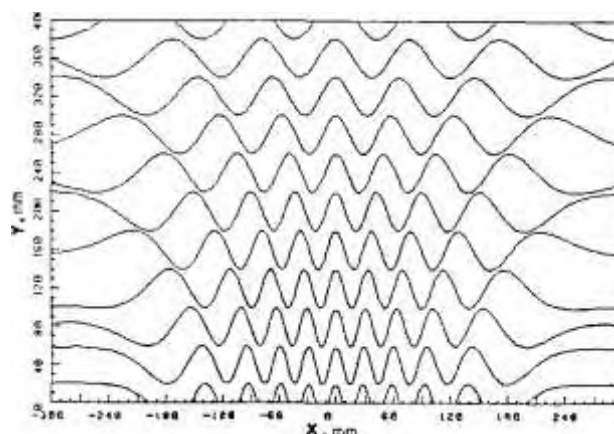
Τα σταγονίδια που περνούν μέσα από τη διασταύρωση των δύο ακτινών σκεδάζουν το φως σε ένα πλέγμα κροσσών συμβολής, όπου είναι το πεδίο αναφοράς της μέτρησης, Σχήμα 4-9. Το διάστημα μεταξύ αυτών των προβαλλόμενων κροσσών είναι άμεσα ανάλογο προς τη διάμετρο της σταγόνας αλλά εξαρτάται επίσης από το μήκος κύματος του φωτός, τη γωνία διασταύρωσης των ακτινών, τον δείκτη διάθλασης της σταγόνας (εκτός αν το ανακλώμενο φως μετρείται), και τη θέση του δέκτη. Το PDA λαμβάνει μετρήσεις από τα διαστήματα των κροσσών ή της προβολής του. Καθώς τα σωματίδια κινούνται μέσα από τους κροσσούς με μια διαφορά συχνότητας εξαιτίας του φαινομένου Doppler, παράγουν ίδια σήματα αλλά με διαφορά φάσης ανάλογη προς το διάστημα των κροσσών.



Σχήμα 4-7: Προβολή κροσσών συμβολής

Η μέτρηση του μεγέθους ενός σωματιδίου μπορεί να ληφθεί από την ακριβή μέτρηση της χωρικής συχνότητας των κροσσών συμβολής. Υπάρχουν τρεις περιοχές σκέδασης πρακτικού ενδιαφέροντος: α) εμπρόσθια σκέδαση ($30^\circ < \Theta < 50^\circ$), β) οπίσθια σκέδαση ($130^\circ < \Theta < 170^\circ$), και γ) πλευρική σκέδαση ($90^\circ < \Theta < 125^\circ$), όπου το Θ η γωνία με βάση την κατεύθυνση των εκπεμπόμενων ακτινών. Η σκέδαση φωτός από έναν συνδυασμό διάθλασης και αντανάκλασης με παρόμοια ένταση θα εμφανιστεί σε μερικές γωνίες και υπό ορισμένους όρους. Όπου αυτό εμφανίζεται, η εικόνα των κροσσών συμβολής δεν είναι πλέον παραλλαγή μιας καθαρής ημιτονοειδούς έντασης λόγω των πολλών συστατικών παρέμβασης. Δηλαδή η πρόσθετη παρέμβαση μεταξύ των διαθλασμένων και ανακλασμένων ακτινών θα εμφανίσει και θα παράγει σημαντικά λάθη στην φάση λήψης και υπολογισμού δεδομένων. Τέτοια λάθη μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να εξαλειφτούν με την κατάλληλη επιλογή της γωνίας ανίχνευσης, την πόλωση, τη διάμετρο των ακτινών, και τις μεθόδους επεξεργασίας.

Ένα παράδειγμα υπολογισμένου μοντέλου κροσσών συμβολής που διαμορφώνεται από το φως σκέδασης παρουσιάζεται στο, Σχήμα 4-10. Μόνο το πάνω μισό του συμμετρικού μοντέλου κροσσών συμβολής έχει αναπαραχθεί. Οι κροσσοί συμβολής είναι υπερβολικές καμπύλες που δείχνουν την μείωση της συχνότητας της απόστασης με την απόσταση από τους άξονες των ακτινών $x=0$ και $y=0$. Το μοντέλο είναι συμμετρικό ως προς $x=0$. Έτσι η χωρική συχνότητα των κροσσών εξαρτάται από που γίνονται οι μετρήσεις.



Σχήμα 4-8: Υπολογισμένο Μοντέλο Κροσσών

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει την χωρική συχνότητα των κροσσών συμβολής απαιτεί την χρήση δύο ή περισσότερων ξεχωριστών ανιχνευτών, που ταιριάζουν στις αποστάσεις τους. Καθώς το σωματίδιο περνά διαμέσου της τομής των δεσμών, οι κροσσοί συμβολής φαίνονται να κινούνται πίσω από τον αποδέκτη της διαφοράς συχνότητας Doppler. Η ένταση του σήματος Doppler παρόμοια με αυτό στο Σχήμα 4-11 θα παραχθεί από κάθε ανιχνευτή αλλά με διαφορά φάσης ανάμεσα σε αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 4-12. Τα σήματα σε αυτό το σχήμα έχουν φιλτραριστεί οι υψηλές συχνότητες για να αποσπάσουν το βασικό στοιχείο. Το βασικό στοιχείο είναι το χαμηλότερο στοιχείο του σήματος, το οποίο είναι το αποτέλεσμα της κανονικής κατανομής (Gaussian) έντασης της δέσμης. Ένα σφαιρικό διαπερατό σωματίδιο που είναι τοποθετημένο μέσα στο μοντέλο των κροσσών θα δράσει σαν μέρος των φακών και θα προβάλει το φως από τις ακτίνες στον χώρο. Το διάστημα των κροσσών σε μια απόσταση f_r από το σωματίδιο δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta_s \approx (f_r - f) \frac{df}{f} \quad (4.15)$$

όπου d_f είναι η απόσταση των κροσσών συμβολής στον όγκο ελέγχου. Το μήκος εστίασης του σωματιδίου δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{m}{m-1} \frac{D}{4} \quad (4.16)$$

όπου m είναι ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου.

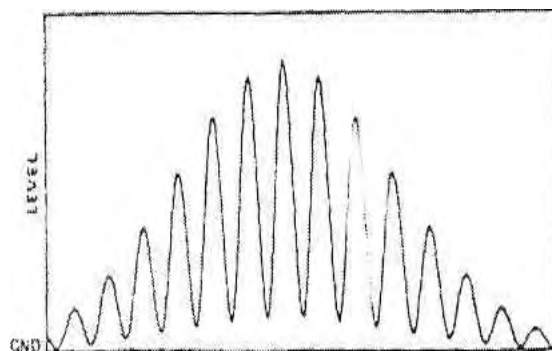
Η διαφορά φάσης ($\Delta\Phi$) των φιλτραρισμένων σημάτων μεταξύ των δύο φωτο-ανιχνευτών καθορίζεται μετρώντας τον χρόνο υστέρησης (Δt) ανάμεσα σε μηδενικό αριθμό περασμάτων των σημάτων από τους ανιχνευτές 1 και 2, διαιρώντας τον με την υπολογισμένη περίοδο (T) ενός κύκλου του σήματος. Έτσι προκύπτει η εξίσωση (4.17):

$$\Delta\Phi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad (4.17)$$

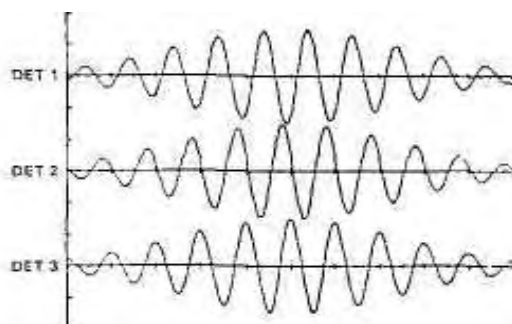
όπου ο μέσος όρος των μετρήσεων υπολογίζεται από όλους τους κύκλους της έντασης των σημάτων. Οι μετρήσεις της διαφοράς φάσης σχετίζονται με το μέγεθος του σωματιδίου χρησιμοποιώντας μια γραμμική σχέση (4.18), που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-13.

$$D = \frac{\lambda}{2\pi m_m} \frac{1}{\Phi} \Delta\Phi \quad (4.18)$$

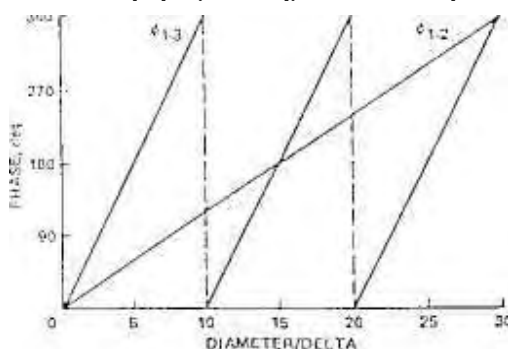
όπου D η διάμετρος του σωματιδίου, λ το μήκος κύματος της δέσμης του Laser και m_m ο δείκτης διάθλασης του σωματιδίου.



Σχήμα 4-9: Ένταση Σήματος Doppler



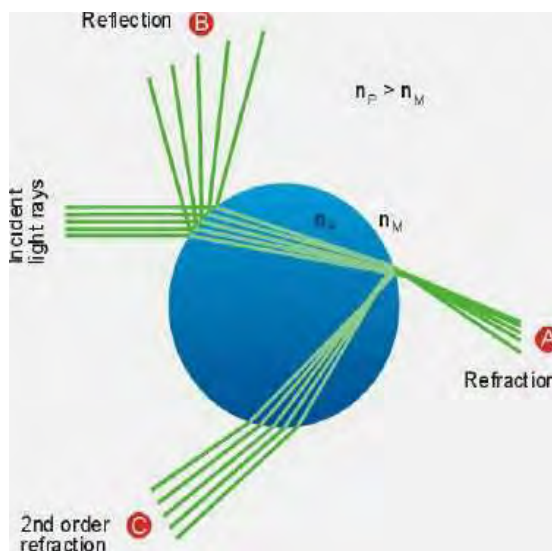
Σχήμα 4-10: Φιλτραρισμένα Σήματα από τα τρία Κανάλια



Σχήμα 4-11: Καμπύλη Απόκρισης του Οργάνου

Ο προσανατολισμός και η σειρά των τριών ανιχνευτών είναι κρίσιμη για την αξιόπιστη μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων. Όταν ένα σωματίδιο περνά μέσα από τον όγκο ελέγχου, παράγει ένα δείγμα (pattern) κροσσών συμβολής, που περιέχει πληροφορίες για το μέγεθος και την ταχύτητα του σωματιδίου. Η συχνότητα του μετρούμενου σήματος είναι ανάλογη της ταχύτητας του σωματιδίου στο επίπεδο που σχηματίζουν οι δέσμες και κάθετα στη διχοτόμο των δεσμών. Η χωρική συχνότητα των κροσσών συμβολής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του σωματιδίου. Καθώς το δείγμα συμβολής κινείται κατά μήκος των ανιχνευτών, κάθε αντίστοιχη πλευρά της συμβολής των κροσσών χρονομετρείται μεταξύ των ανιχνευτών 1 και 2 και 1 και 3.

Στο Σχήμα 4-14, η επίδραση της αλλαγής των οπτικών παραμέτρων που περιέχουν την γωνία τομής των ακτινών Laser, της γωνίας συλλογής, του δείκτη διαθλάσεως του σωματιδίου, το μήκος κύματος της δέσμης και της σκέδασης που ανιχνεύτηκε είναι απλά η αλλαγή της κλίσης της γραμμικής απόκρισης των καμπύλων. Έτσι, μόνο η κλίμακα μεγέθους αλλάζει για το ίδιο εύρος της φάσης των γωνιών καθώς οι καμπύλες πρέπει να περάσουν από το μέσο της πηγής. Η σωστή επιλογή των διαστημάτων του ανιχνευτή γίνεται με δύο ευαίσθητα φάσματα που φαίνονται σαν καμπύλες 1-2 και 1-3 στο Σχήμα 4-14.



Σχήμα 4-12: Διάθλαση και ανάκλαση δέσμης Laser κατά την διέλευση σωματιδίου

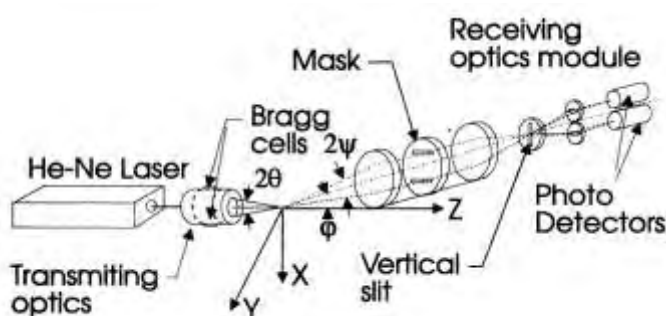
Για μικρά σωματίδια, η διάθλαση έχει ιδιαίτερα σημαντική συνεισφορά στην διασπορά του φωτός που μπορεί να έχει επίδραση και να διαταράξει τη μέτρηση φάσης. Επομένως, πρέπει να εφαρμοστεί η γενικότερη θεωρία Mie για να καθορίσει τα χαρακτηριστικά σκέδασης για ένα σωματίδιο οποιουδήποτε δεδομένου μεγέθους. Η θεωρία Mie στηρίζεται στην άμεση λύση των εξισώσεων Maxwell για την περίπτωση της σκέδασης ενός μήκους κύματος φωτός από ένα ομοιογενές σφαιρικό σωματίδιο για αυθαίρετο μέγεθος και δείκτη διάθλασης.

Προκειμένου να υπολογιστεί το πεδίο σκέδασης ενός PDA, είναι απαραίτητο να προστεθούν οι συνεισφορές των δύο συναφών ακτινών και ο μέσος όρος πέραν από το άνοιγμα του φακού-δέκτη λαμβάνοντας υπόψη την πόλωση και την φάση της κάθε ακτίνας. Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να καθοριστεί η ένταση, η ορατότητα και η φάση για αυθαίρετες οπτικές ρυθμίσεις. Οι υπολογισμοί βασισμένοι στη γεωμετρική οπτική εκτελούνται για ένα σημείο - όπως το άνοιγμα, ενώ οι υπολογισμοί Mie αποτελούν την ολοκλήρωση πέραν από ένα ορθογώνιο άνοιγμα με τις δεδομένες μισές γωνίες στις οριζόντιες (δ_h) και τις κάθετες (δ_u) διευθύνσεις όσον αφορά το επίπεδο Y-Z όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-15. Να σημειωθεί ότι η

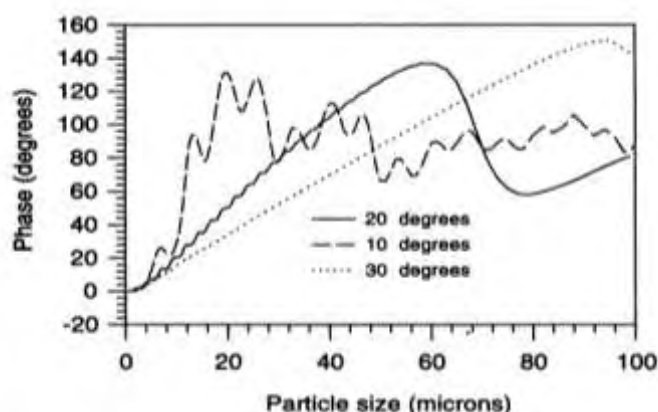
ολοκλήρωση του σκεδαζόμενου φωτός πέρα από το λαμβάνον άνοιγμα είναι σημαντική για τη λήψη μιας γραμμικής σχέσης φάσης-μεγέθους, σχέση (4.18).

Για τελείως ανακλαστικά ή ισχυρώς απορροφητικά σωματίδια, οποιαδήποτε γωνία σκέδασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός από την κοντινή-πρόσθια κλίμακα σκέδασης όπου η διάθλαση θα καταστρέψει τη γραμμικότητα της σχέσης φάσης-μεγέθους, σχέση (4.2). Αυτή η επίδραση είναι διευκρινισμένη, Σχήμα 4-16, που παρουσιάζει σχέση φάσης-μεγέθους για τρεις γωνίες σκέδασης, 10, 20 και 30 μοίρες. Είναι προφανές ότι η σχέση φάσης-μεγέθους για τις μικρές γωνίες σκέδασης παρουσιάζει ισχυρές διακυμάνσεις ενώ μια σχεδόν γραμμική σχέση λαμβάνεται για τη μεγαλύτερη γωνία σκέδασης.

Τα διαπερατά σωματίδια μπορεί να διακριθούν μεταξύ εκείνων που έχουν έναν δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο ή μικρότερο από το περιβάλλον μέσο. Υγρά σταγονίδια ή σωματίδια γυαλιού στον αέρα έχουν έναν σχετικό δείκτη διάθλασης που κυμαίνεται στην κλίμακα από 1.3 έως 1.5, ενώ φυσαλίδες σε υγρό έχουν έναν σχετικό δείκτη διάθλασης λιγότερο από την παραπάνω κλίμακα.

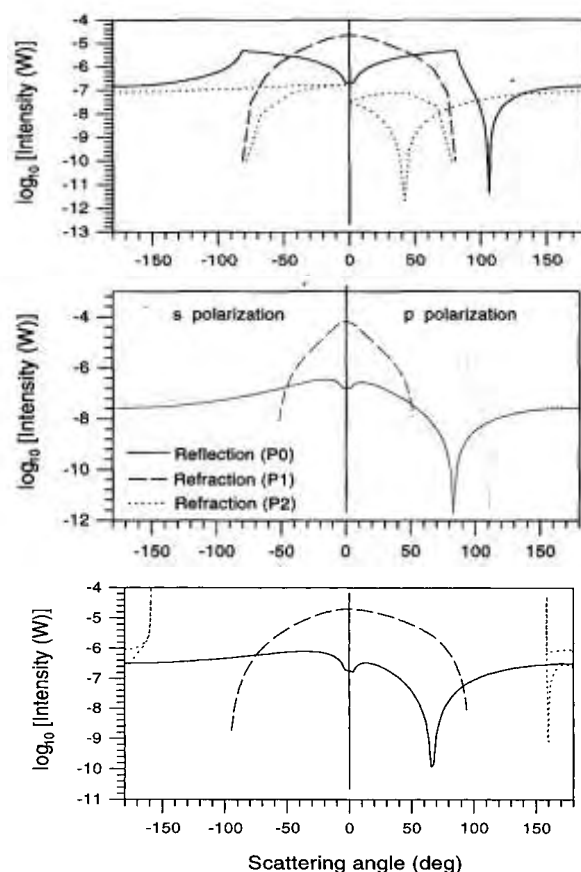


Σχήμα 4-13: Οπτική διάταξη ενός ανεμόμετρου phase-Doppler δύο ανιχνευτών



Σχήμα 4-14: Σχέση φάσης-μεγέθους από τη θεωρία Mie για διάφορες εκτός άξονα γωνίες συλλογής ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, p πόλωση, $\theta = 2.77^\circ$, $\Psi = 1.85^\circ$, $\delta_h = 5.53^\circ$, $\delta_u = 1.85^\circ$)

Η επιλογή βέλτιστης οπτικής διαμόρφωσης βασίζεται κυρίως στον τρόπο σκέδασης των σωματιδίων λαμβάνοντας υπόψη την αντανάκλαση, διάθλαση ή δεύτερης-τάξης διάθλαση. Οι σχετικές εντάσεις των διαφορετικών μοντέλων σκέδασης καθορίζονται με τη χρησιμοποίηση υπολογισμών βασισμένων σε γεωμετρικά οπτικά όπου ταυτόχρονα και η παράλληλη (p) και η κάθετη (σ) πόλωση εξετάζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17.



Σχήμα 4-15: Γωνιακή κατανομή έντασης διαφορετικών μοντέλων σκέδασης

($\lambda = 632.8\text{nm}$, $D = 30\text{ }\mu\text{m}$, (a) $m = 0.75$, (b) $m = 1.128$, (c) $m = 1.52$)

Το διαθλώμενο φως καλύπτει ολόκληρο το εύρος γωνιών για δείκτες διάθλασης κάτω και επάνω από το εύρος 1.3 έως 1.5. Εντούτοις, υπάρχει ένα ευδιάκριτο ελάχιστο για την παράλληλη πόλωση το οποίο αποκαλείται γωνία Brewster που δίνεται από την σχέση:

$$\varphi_B = 2\text{tan}^{-1} (1/m) \quad (4.19)$$

Η γωνία Brewster μειώνεται με αύξηση του λόγου του δείκτη διάθλασης. Η πρώτη τάξης διάθλαση εστιάζεται στην εμπρόσθια περιοχή σκέδασης και φτάνει μέχρι την κρίσιμη γωνία που για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης n_p και n_m , $m=n_p / n_m$ δίνεται από τις σχέσεις:

$$\varphi_c = 2\text{cos}^{-1} (m), \quad m < 1 \quad (4.20)$$

$$\varphi_c = 2\text{cos}^{-1} (1/m), \quad m > 1 \quad (4.21)$$

Η κρίσιμη γωνία αυξάνει με το σχετικό δείκτη διάθλασης και η πρώτη τάξης διάθλαση γίνεται κυρίαρχη πέραν από μια ευρύτερη περιοχή γωνιών.

Η δεύτερης τάξης διάθλαση καλύπτει ολόκληρη την περιοχή γωνιών για ένα σχετικό δείκτη διάθλασης μικρότερο από 1.3 έως 1.5. Για m μεγαλύτερο από αυτό το εύρος, η δεύτερης τάξης διάθλαση επικεντρώνεται στο οπίσθιο εύρος σκέδασης, καθορίζεται από την σχέση (4.22) και περιορίζεται από την γωνία τόξου (Φ_R) που φαίνεται στο Σχήμα 4-17.

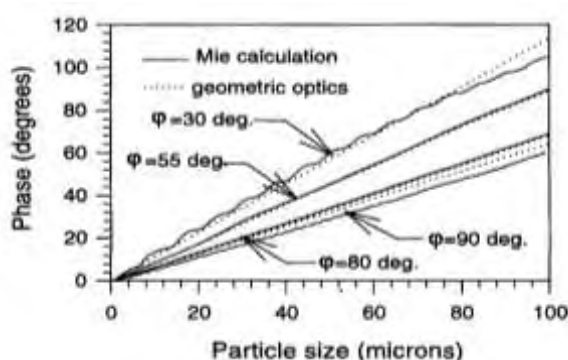
$$\Phi_R = \cos^{-1} \left[\frac{2}{m^4} \left(\frac{4 - m^2}{3} \right)^3 - 1 \right] \quad (4.22)$$

Οι χαρακτηριστικές γωνίες σκέδασης που δίνονται από τις σχέσεις (4.19), (4.20), (4.21) και (4.22) συνοψίζονται στον Πίνακα 4-1, για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικές γωνίες σκέδασης για διαφορετικούς δείκτες διάθλασης

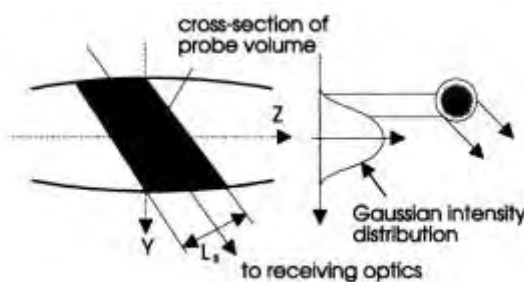
Flow	$m=n_p/n_m$	Φ_B	Φ_c	Φ_R
Air bubbles in water	1.0/1.33	106.12	82.49	-
Water droplets in oil	1.33/1.5	96.88	55.09	-
Oil droplets in water	1.5/1.33	83.12	55.09	94.10
Water droplets in air	1.33/1.0	83.12	82.49	137.48
Diesel droplets in air	1.46/1.0	68.82	93.54	153.34
Glass particles in air	1.52/1.0	66.68	97.72	158.92

Η βέλτιστη γωνία σκέδασης για φυσαλίδες σε νερό περιορίζεται μεταξύ 70° και 85° όπου η αντανάκλαση είναι κυρίαρχη για κάθε μία περίπτωση πόλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17α. Η σχέση (4.18) φάσης-μεγέθους παρουσιάζει γραμμικότητα σε αυτό το εύρος, αλλά μια γωνία σκέδασης των 55° επίσης δίνει μια γραμμική λειτουργικότητα, Σχήμα 4-18. Εξαιτίας της ισχυρής παρεμβολής με το διαθλώμενο φως η σχέση (4.26) γίνεται μη γραμμική (για γωνία 30°). Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν για σταγονίδια νερού ή σωματίδια γυαλιού σε λάδι.



Σχήμα 4-16: Υπολογισμός των σχέσεων φάσης-μεγέθους για διαφορετικές γωνίες σκέδασης μεταξύ 30° και 80°

Όπως περιγράφεται παραπάνω, η σωστή εφαρμογή του PDA απαιτεί ότι μία μέθοδος σκέδασης είναι ουσιαστική και πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη γωνία για να καθοριστεί το μέγεθος του σωματιδίου από την μετρούμενη φάση. Εντούτοις, σε ορισμένες τροχιές το σωματίδιο μέσω της Γκαουσσισιανής ακτίνας, ο λανθασμένος μηχανισμός σκέδασης επικρατεί και μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις μεγέθους. Αυτό το λάθος καλείται ασάφεια τροχιάς και απεικονίζεται στο Σχήμα 4-19. Είναι προφανές από το Σχήμα 4-19 ότι η ασάφεια τροχιάς είναι ενδεχομένως πολύ σημαντική για τα μεγάλα μόρια των οποίων το μέγεθος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις του όγκου ελέγχου.



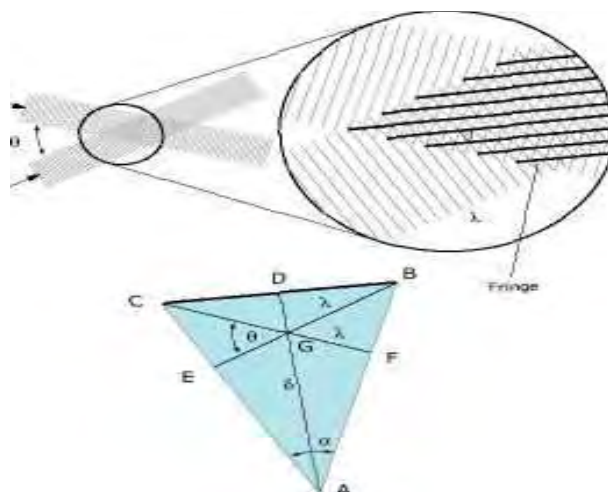
Σχήμα 4-17: Απεικόνιση της επίδρασης της Γκαουσσισιανής ακτίνας με συνέπεια την ασάφεια τροχιάς

4.3 Ο Όγκος Ελέγχου

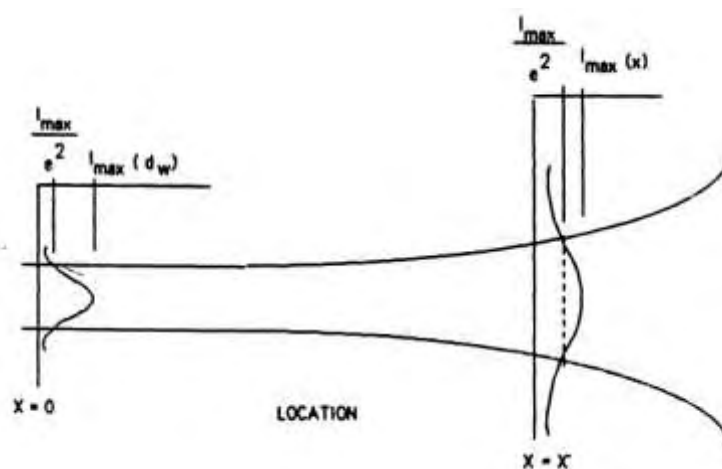
4.3.1 Γεωμετρία του Όγκου Ελέγχου

Οι διαστάσεις του όγκου ελέγχου του PDA επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το μήκος κύματος της δέσμης του Laser, οι φακοί που χρησιμοποιούνται σε πομπό και δέκτη καθώς και η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των τεμνόμενων δεσμών που σχηματίζουν τον όγκο ελέγχου. Στο όργανο PDA χρησιμοποιείται η εκτός άξονα ανίχνευση του σκεδαζόμενου φωτός για τον καλύτερο καθορισμό του όγκου ελέγχου.

Ο τύπος του Laser που χρησιμοποιείται στο PDA παράγει μια ακτίνα με κανονική (Gaussian) κατανομή έντασης, Σχήμα 4-21. Η διάμετρος μιας ακτίνας Laser αναφέρεται συχνά ως μέση (waist) και περιγράφεται ως η διάμετρος στην οποία η ένταση ακτινών έχει μειωθεί στο $1/e^2$ της μέγιστης έντασης. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ως μια γενική περιγραφή της ακτίνας. Εντούτοις, η πραγματική διάμετρος της ακτίνας όσον αφορά το ανιχνεύσιμο σήμα από σωματίδια διάφορων μεγεθών αλλάζει. Τα μικρά σωματίδια θα πρέπει να περάσουν την ακτίνα κοντά στη μέγιστη ένταση της για να παραγάγουν ένα ανιχνεύσιμο σήμα, ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια πρέπει να περάσουν πιο έξω στα άκρα της κανονικής (Gaussian) ακτίνας για να ανιχνευθούν.



Σχήμα 4-18: Ο όγκος ελέγχου που σχηματίζεται από την τομή των δύο ακτίνων του PDA



Σχήμα 4-19: Η διάμετρος της γκαουσιανής ακτίνας Laser ορίζεται στα σημεία έντασης $I_{\max}(x) / e^2$.

Στο $X = 0$, η διάμετρος είναι ελάχιστη και αναφέρεται ως μέση διάμετρος ακτίνων (waist).

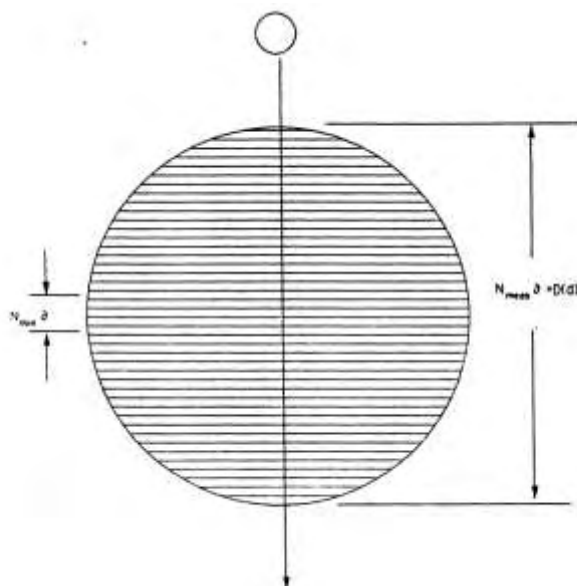
Το PDA έχει ενσωματώσει μεθόδους για να εκτιμά την διάμετρο του όγκου ελέγχου. Το PDA καταγράφει το μήκος κάθε τροχιάς σωματιδίου μέσω του όγκου ελέγχου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-22. Μετά από έναν στατιστικά σημαντικό αριθμό καταγραφών για κάθε κατηγορία μεγέθους, η πιο μακρά τροχιά αντιπροσωπεύει τη διάμετρο του όγκου ελέγχου. Το πλάτος των ακτίνων μέτρησης για κάθε κατηγορία μεγέθους σωματιδίων καθορίζεται από:

$$D(d) = d_f \times [N_{\max}(d) - N_{\min}(d)]^{1/2} \quad (4.23)$$

όπου το d_f είναι η απόσταση των κροσσών συμβολής και δίνεται από την σχέση (4.32):

$$d_f = \frac{\lambda_e}{2 \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4.24)$$

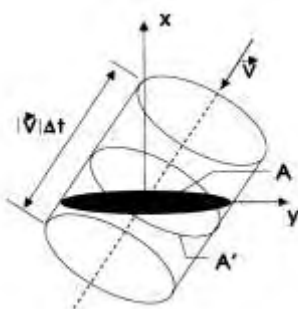
με λ_e το μήκος κύματος της ακτίνας του Laser, θ η γωνία τομής των ακτίνων και $N_{\min}(d)$ και $N_{\max}(d)$ είναι οι εκτιμώμενοι μέγιστοι και ελάχιστοι μετρούμενοι κύκλοι σήματος όπως περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 4-20: Τροχιά σωματιδίου μέσω του όγκου ελέγχου

Δεδομένου ότι το PDA επιτρέπει τη μέτρηση του μεγέθους των σωματιδίων και της ταχύτητας τους, είναι επίσης δυνατό να υπολογιστεί η συγκέντρωση αριθμού ή μάζας σωματιδίων και η μαζική ροή σωματιδίων. Για κάθε σωματίδιο πρέπει να καθοριστεί ο όγκος του ρευστού που περνά μέσω του όγκου ελέγχου κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μέτρησης Δt_s . Ο όγκος εξαρτάται από την ταχύτητα του σωματιδίου V και την διατομή του όγκου ελέγχου κάθετη στην ταχύτητα. Δηλαδή $Vol = A' |V| \Delta t_s$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-23. Επιπλέον, η ουσιαστική διατομή του όγκου ελέγχου είναι συνάρτηση του μεγέθους του σωματιδίου οπότε $A = A(a_k, D_i)$ με a_k η γωνία τροχιάς του σωματιδίου για κάθε ξεχωριστό δείγμα και D_i η διάμετρος του σωματιδίου τάξης μεγέθους i . Έτσι η συγκέντρωση για ένα σωματίδιο είναι :

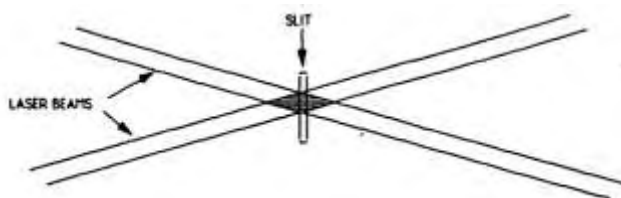
$$n = \frac{1}{Vol} = \frac{1}{|V| A'(a_k, D_i) \Delta t_s} \quad (4.25)$$



Σχήμα 4-21: Όγκος ελέγχου που σχετίζεται με ένα σωματίδιο που κινείται κατά μήκος της περιοχής ανίχνευσης κατά τη διάρκεια του χρόνου μέτρησης Δt

Η άλλη διάσταση του όγκου ελέγχου που μετρίεται κατά μήκος της ακτίνας σκιαγραφείται από το άνοιγμα των σχισμών στο δέκτη. Το Σχήμα 4-24 δείχνει πώς η εικόνα της σχισμής προβάλλεται από τις ακτίνες Laser. Από το σχήμα έχουμε τα εξής:

$$t = sw \times \left(\frac{RL1}{RL2} \right) \quad (4.26)$$



Σχήμα 4-22: Η εικόνα που απεικονίζεται στην σχισμή του φακού – δέκτη, των ακτινών laser

όπου, sw = slit width = Άνοιγμα σχισμών

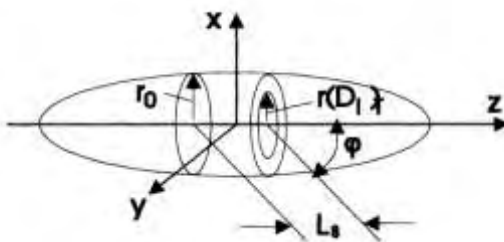
$RL1$ = φακοί N_{o1} - μήκος εστίασης (receiver lens 1 focal length)

$RL2$ = φακοί N_{o2} - μήκος εστίασης (receiver lens 2 focal length)

L_s = Μέγιστο πλάτος ακτίνας (maximum beam width)

$$\text{Probe area} = \frac{L_s t}{\sin \Theta} \quad (\text{Περιοχή απεικόνισης}) \quad (4.27)$$

Δεδομένου ότι αυτός ο προσδιορισμός της διάστασης του όγκου ελέγχου γίνεται κατά την διάρκεια της απόκτησης δεδομένων χρησιμοποιώντας τα πραγματικά, έγκυρα σήματα, τα αποτελέσματα της έντασης του Laser, η μείωση και η παρεμπόδιση των ακτινών και η μη καθαριότητα των οπτικών πρέπει να λαμβάνονται υπ όψιν για τυχόν λανθασμένα αποτελέσματα. Οι διαστάσεις όγκου ελέγχου υπολογίζονται για κάθε τάξη μεγέθους και αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να ομαλοποιήσουν τις αριθμήσεις των σωματιδίων σε όλες τις τάξεις μεγέθους στο ίδιο μέγεθος όγκου ελέγχου. Το μέγεθος του όγκου ελέγχου που χρησιμοποιείται και αναφέρεται στην οθόνη είναι το μεγαλύτερο μέγεθος όγκου ελέγχου που υπάρχει, ως εκ τούτου, όλες οι διορθώσεις σωματιδίων για μικρότερα μεγέθη όγκων ελέγχου εμπεριέχουν μια αύξηση στην αριθμηση της διαμέτρου των σωματιδίων.



Σχήμα 4-23 : Γεωμετρία του απεικονιζόμενου όγκου μέτρησης του PDA

4.3.2 Διαστάσεις Όγκου Ελέγχου

Η χωρική ανάλυση της μέτρησης της ταχύτητας εξαρτάται από τις διαστάσεις του όγκου ελέγχου του PDA που καθορίζεται από την αρχική διάμετρο της ακτίνας λέιζερ, τη γωνία τομής των ακτινών (που καθορίζεται από το αρχικό διάστημα των ακτινών και το μήκος εστίασης των φακών του πομπού), το μήκος εστίασης του φακού δέκτη και τη γωνία διόπτρευσης του φακού δέκτη. Το άνοιγμα της διαμέτρου των ακτινών δίνεται από την σχέση :

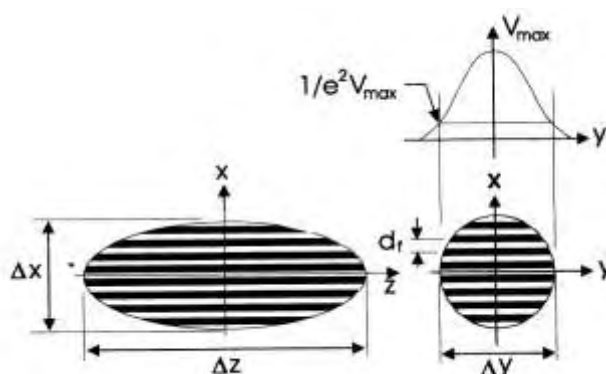
$$d_m = \frac{4f_e \lambda_e}{\pi d_0} \quad (4.28)$$

όπου d_0 είναι η $1/e^2$ διάμετρος της μη εστιασμένης ακτίνας Laser, f_e το μήκος εστίασης του φακού του πομπού και λ_e το μήκος κύματος του Laser. Ο όγκος ελέγχου σχηματίζεται από τέμνουσες δέσμες και έχει ελλειψοειδές σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-26. Οι διαστάσεις της $1/e^2$ έλλειψης, που αντιστοιχούν στο Σχήμα 4-19, δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Delta x = \frac{d_m}{\cos \theta} \quad (4.29)$$

$$\Delta y = d_m \quad (4.30)$$

$$\Delta z = \frac{d_m}{\sin \theta} \quad (4.31)$$



Σχήμα 4-24: Διαστάσεις του όγκου ελέγχου του PDA

Ο αριθμός των κροσσών στον $1/e^2$ όγκο ελέγχου καθορίζεται από τον τύπο:

$$N_f = \frac{8}{\pi} \frac{f_e}{d_0} \tan \theta = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta b}{d_0} \quad (4.32)$$

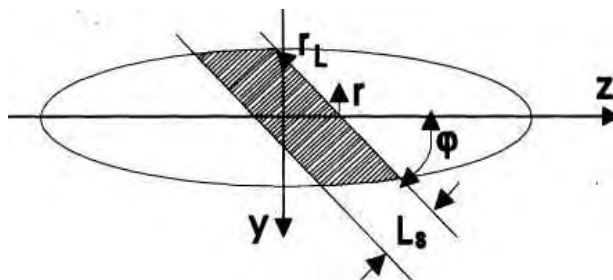
Όπου Δb είναι το αρχικό άνοιγμα μεταξύ των εκπεμπόμενων ακτινών.

Η γωνία συμβολής των ακτινών δίνεται από την σχέση :

$$\tan \theta = \frac{\Delta b}{2f_e} \quad (4.33)$$

και ο όγκος ελέγχου του PDA όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-27 υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_m = \frac{\pi}{4} d_m^2 L_s \text{ σε κυβικά μικρά (}\mu\text{m}^3\text{)} \quad (4.34)$$



Σχήμα 4-25: Γεωμετρία του απεικονιζόμενου όγκου μέτρησης του PDA

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση του συστήματος PDPA για την μελέτη της τυρβώδους ροής νερού-σωματιδίων σε κατακόρυφο αγωγό. Σκοπός των πειραμάτων είναι η μελέτη διαλυμάτων νερού και σωματιδίων διαφόρων μεγεθών και συγκεντρώσεων. Για τον λόγο αυτό, διεξήχθησαν πειράματα με αριθμό Reynolds περίπου 10.000 με βάση την μέση ταχύτητα και την υδραυλική διάμετρο του αγωγού. Τα σωματίδια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαμέτρους $d_p = 5, 20$ και $50\mu\text{m}$. Τα σωματίδια είναι κατασκευασμένα από πολυαμίδιο 12 (Dantec - Polyamide Seeding Particles), έχουν πυκνότητα $1,03\text{gr/cm}^3$ και παρουσιάζουν διασπορά μεγέθους $1-10\mu\text{m}$, $5-35\mu\text{m}$ και $30-70\mu\text{m}$, αντίστοιχα. Η διάμετρος των σωματιδίων είναι υπολογισμένη με βάση τη σχέση:

$$\bar{D}_N = \frac{\sum_{i=1}^N N_i \bar{D}_{pi}}{\sum_{i=1}^N N_i} = \frac{\sum_{i=1}^N N_i \bar{D}_{pi}}{N_T} \quad (0.1)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός σωματιδίων, d_i η διάμετρος της αντίστοιχης κατηγορίας i .

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την μέση ταχύτητα και τη διακύμανσή της στη διεύθυνση της ροής και την διάμετρο των σωματιδίων, σε διάφορες τομές του αγωγού και σε συγκεκριμένη κατακόρυφη θέση. Το ενδιαφέρον εστιάστηκε στη μελέτη της πλήρους ανεπτυγμένης τυρβώδους διφασικής ροής, και για αυτό το λόγο όλες οι μετρήσεις έγιναν σε μεγάλη απόσταση από την είσοδο του αγωγού. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν σειρές προκαταρκτικών πειραμάτων σε αγωγό ίδιων διαστάσεων (κοντότερου κατά 40cm) προκειμένου να ευθυγραμμιστεί η ροή και να βρεθεί σε ποια διατομή του αγωγού θα γίνονταν οι μετρήσεις ούτως ώστε να είναι βέβαιο ότι μετράμε σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Ακόμη διασφαλίστηκε η αξιοπιστία και επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Η θεωρητική ταύτιση του φυσικού προβλήματος με το πείραμα δεν είναι εύκολη, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων που δεν είναι εύκολο να ρυθμιστούν και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις πειραματικές μετρήσεις. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται όλες εκείνες οι παραμέτροι που εστίασαμε κατά την προκαταρκτική πειραματική δραστηριότητα που πραγματοποιήθηκε όπως προαναφέραμε. Παράμετροι όπως: Επαναληψιμότητα, Αριθμός δειγμάτων, Επιλογή διαμέτρου σωματιδίων, Υπολογισμός μήκους ανάπτυξης ροής.

5.1.1 Επαναληψιμότητα και Αριθμός δειγμάτων

Η πρώτη συνθήκη που θέλαμε να εξασφαλίσουμε ήταν η επαναληψιμότητα των μετρήσεων, προκειμένου τα πειράματα να είναι περισσότερο αξιόπιστα. Επιπλέον, σε αυτή την βάση, η επαναληψιμότητα επιβεβαιώνει ότι οι συνθήκες ροής μπορούν να ρυθμιστούν ικανοποιητικά στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό.

Ένα άλλο σημείο που εξετάστηκε είναι η επίδραση των δειγμάτων που χρησιμοποιεί το PDPA για να εκτελέσει τη στατιστική επεξεργασία. Στα ίδια σημεία όπως προηγουμένως έγιναν μετρήσεις χρησιμοποιώντας 500, 1000, 1500, 2000 και 2500 δείγματα. Αυξάνοντας τον αριθμό των δειγμάτων, η ταχύτητα συνέκλινε σε μία τιμή. Στα πειράματα που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκαν 2000 δείγματα για τη στατιστική επεξεργασία, και 2500 δείγματα στα πιο πυκνά διαλύματα για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων μέσα σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο.

5.1.2 Διάμετρος σωματιδίων

Για την μελέτη της διφασικής ροής χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέραμε σωματίδια διαμέτρων 5, 20 και 50 μm (Σχήμα 5.1) Το PDPA έχει την δυνατότητα να υπολογίζει τη διάμετρο των σωματιδίων και αποτελεί το επόμενο σημείο που εξετάστηκε. Λαμβάνοντας υπόψη τα πειράματα των παλαιότερων διπλωματικών στη συγκεκριμένη διάταξη, αποφασίστηκε να χρησιμοποιήσουμε απιονισμένο νερό του εμπορίου για να εξασφαλίσουμε μεγαλύτερη καθαρότητα και συνεπώς λιγότερα ανεπιθύμητα σωματίδια. Παρόλα αυτά τελικώς αποδείχθηκε ότι και αυτό περιέχει πολλά σωματίδια, επηρεάζοντας τις μετρήσεις.

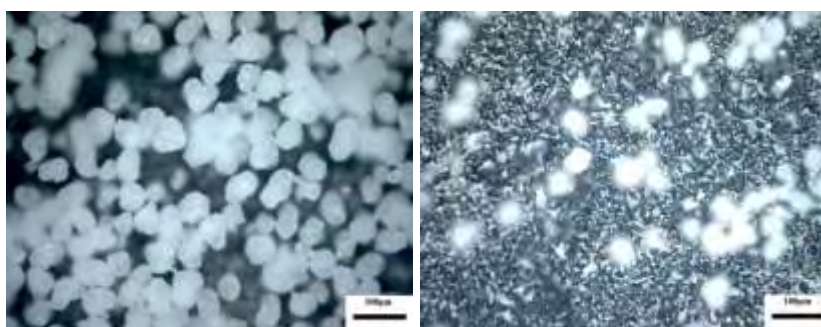


Σχήμα 5-1: Σωματίδια των 5, 20 και 50 μm

Κατά την διάρκεια των αρχικών μετρήσεων εξαλείψαμε πλήρως την ύπαρξη φυσαλίδων στη ροή, εξαιτίας ατελών συνδέσεων στο σύστημα ροής κάτι που παρατηρήθηκε σε όλες τις μέχρι τώρα διπλωματικές εργασίες με στη συγκεκριμένη διάταξη. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν κατά τη μέτρηση της διαμέτρου σωματιδίων 50 μm , καθώς η μέση αριθμητική διάμετρος που προέκυπτε ήταν περίπου 20 μm . Αυτό συμβαίνει διότι ο

υπολογισμός της διαμέτρου των σωματιδίων γινόταν ως προς τον όγκο. Όπως έχουμε ήδη προαναφέρει τα σωματίδια έχουν ονομαστική διάμετρο, επίσης δεν είναι εντελώς σφαιρικά. Αυτό αλλά και το γεγονός ότι στο νερό υπάρχουν πολλά σωματίδια μικρού κυρίως μεγέθους είναι λογικό να επηρεάζουν τη τιμή της μέσης αριθμητικής διαμέτρου. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων τους (σε σχέση με τα 5 και 20 μm) υπόκεινται σε μεγαλύτερη φθορά από τη φτερωτή της αντλίας (Σχήμα 5.2).

Η σφαιρικότητα των σωματιδίων, τουλάχιστον πριν την είσοδό τους στη ροή κρίνεται ικανοποιητική για τα δεδομένα που απαιτεί το PDPA. Ωστόσο, μετά τη χρήση τους διαπιστώθηκε ότι είχαν χάσει τη σφαιρικότητά τους σε βαθμό που ίσως να δημιουργεί πρόβλημα στις μετρήσεις για τον υπολογισμό της διαμέτρου κυρίως και όχι για τη μέση ταχύτητα και τη διακύμανσή της. Συσσωματώσεις αλλά και διασπάσεις των σωματιδίων είναι περισσότερο πιθανές εξαιτίας των μεγαλύτερων της κυκλοφορίας τους στο σύστημα της ροής και συγκρούσεων με τη φτερωτή της αντλίας και τα τοιχώματα, αλλά και μεταξύ τους.

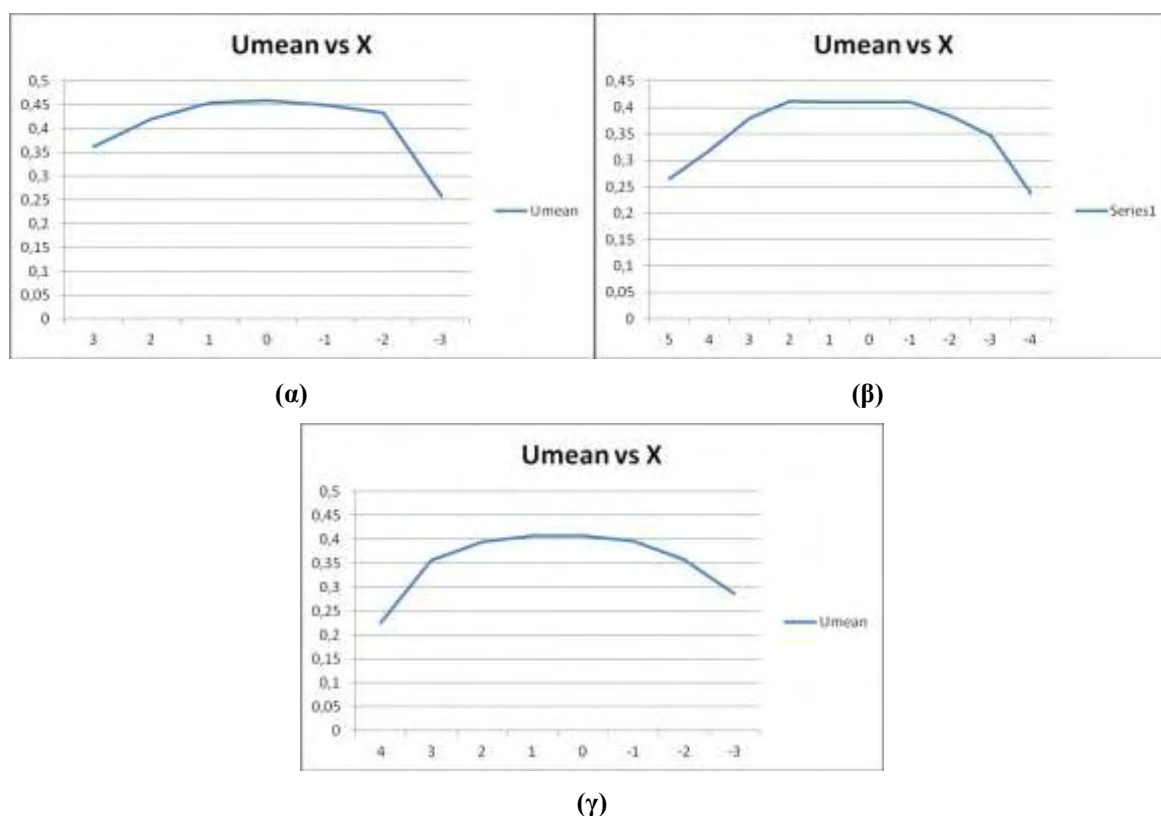


Σχήμα 5-2: Σωματίδια των 50 μm σε ανάλυση στο μικροσκόπιο πριν την είσοδο τους στη ροή (α) και μετά την είσοδο τους στη ροή (β)

5.1.3 Μήκος ανάπτυξης ροής

Ένας σημαντικός στόχος των προκαταρκτικών πειραμάτων ήταν η εξακρίβωση του μήκους ανάπτυξης της ροής, και αυτό γιατί μας ενδιαφέρει η πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης διφασική ροή. Προφανώς το μήκος ανάπτυξης πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια του αγωγού. Το ενεργό μήκος όπου ο τρισδιάστατος μηχανισμός στήριξης της διάταξης μας επέτρεπε να κινηθούμε για τις μετρήσεις, κατά μήκος του αγωγού ήταν $L=90\text{cm}$. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην κατά μήκος διεύθυνση ανά 20cm, σε τρεις κατακόρυφες θέσεις. Μία κοντά στην είσοδο του αγωγού, όπου ήταν και το υψηλότερο σημείο που μπορούσαμε να μετρήσουμε ($z=50\text{cm}$), μία σε ενδιάμεση θέση ($z=70\text{cm}$) και μία κοντά στην έξοδο της ροής ($z=90\text{cm}$), όπου ήταν και θέση αναφοράς μας. Έγιναν μετρήσεις για τη συνεχή φάση και για σωματίδια των 5 μm . Τα αποτελέσματα αφορούν την μέση ταχύτητα καθώς σε αυτή τη φάση ενδιαφερόμαστε να διαπιστώσουμε από ποιο μήκος και μετά η ροή είναι όσο το δυνατόν πιο συμμετρική.

Στα Σχήματα 5-3(α,β,γ) παρουσιάζεται η κατανομή της μέσης ταχύτητας για τα σωματίδια των 5 μm , σε 3 κατακόρυφες θέσεις (50, 70 και 90cm). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη στην θέση ($Z=90\text{cm}$) όπου και πραγματοποιήθηκε το σύνολο των μετρήσεων. Παρατηρούμε ότι κοντά στην είσοδο της ροής ($Z=50\text{cm}$) η κατανομή της ταχύτητας είναι ασύμμετρη, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια δεν εισέρχονται στον αγωγό ομοιόμορφα. Στην ενδιάμεση κατακόρυφη θέση ($Z=70\text{cm}$), η ταχύτητα παρουσιάζει σχετικά καλή συμμετρία, αλλά κοντά στην θέση ($Z=90\text{cm}$) εμφανίζει πολύ καλή συμμετρία, ένδειξη ότι η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως.



Σχήμα 5-3: Κατανομές μέσων ταχυτήτων (α) $Z=50\text{cm}$, (β) $Z=70\text{cm}$, (γ) $Z=90\text{cm}$

5.1.4 Συγκέντρωση σωματιδίων

Τέλος, είναι άξιο αναφοράς ότι η συγκέντρωση των σωματιδίων περιορίζεται από τις δυνατότητες μέτρησης του PDPA. Δηλαδή το όργανο δυσκολεύεται να μετρήσει σε υψηλές, αλλά και πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Σε όλο το εύρος των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε σταθερός όγκος νερού, 64 λίτρα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για συγκέντρωση $C_{\text{psp}5\mu\text{m}(2\text{gr})} = 31,25 \text{ gr/m}^3$ (συνολικά 2gr σωματιδίων διαμέτρου 5 μm) οι μετρήσεις ήταν οριακά εφικτές γιατί για συγκέντρωση μεγαλύτερη από αυτή η μέτρηση των μεγεθών δεν είναι δυνατή. Επίσης σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις (μικρότερες από $C_{\text{psp}5\mu\text{m}(1\text{gr})} = 15,625 \text{ gr/m}^3$) η διφασική ροή εξισωνόταν με αυτή του νερού, καθώς υπήρχαν ελάχιστα σωματίδια.

Το PDPA είχε τη δυνατότητα να διακρίνει και ελάχιστα σωματίδια, αλλά οι μετρήσεις δυσχεραίνονται λόγω της μεγάλης χρονικής διάρκειας, αλλά και γιατί τα σωματίδια που περιείχε το νερό έπαιζαν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα. Αντίθετα σε ενδιάμεσες συγκεντρώσεις (15,625 έως 31,25 gr/m³) σωματιδίων, όπου μπορούν να ληφθούν μετρήσεις από το σύστημα του PDPA ο όγκος ελέγχου είναι σε μεγάλο βαθμό ευδιάκριτος και η ροή δεν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις (κορεσμού) με αποτέλεσμα η δέσμη του Laser να είναι διαπερατή στο προς εξέταση σημείο της ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4.



Σχήμα 5-4: Ο όγκος ελέγχου για μεσαίες συγκεντρώσεις σωματιδίων

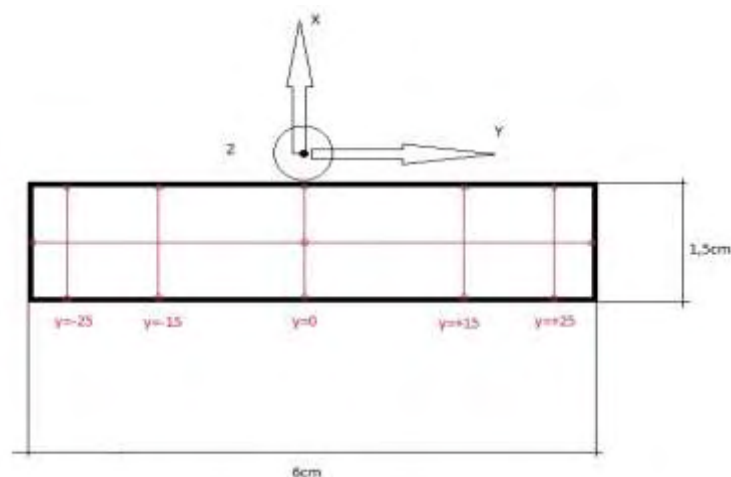
5.1.5 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Συνολικά έγιναν δώδεκα σειρές μετρήσεων, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

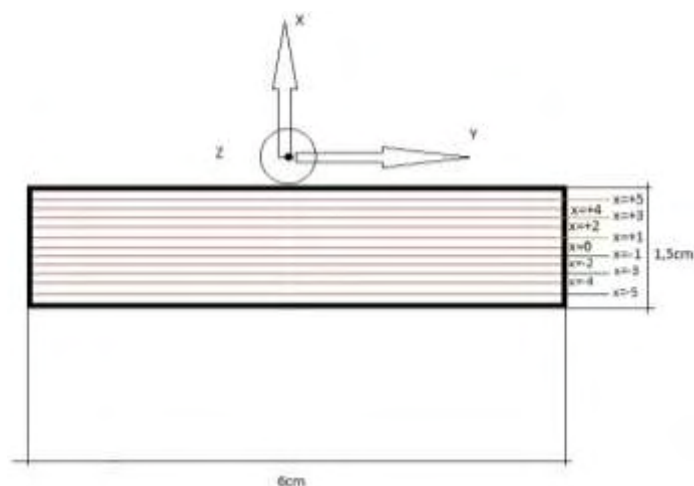
Πίνακα 5.1: Περιπτώσεις της παραμετρικής μελέτης

Σειρά	Νερό (Lt)	Σωματίδια	
		Ποσότητα (gr)	Διάμετρος (μm)
1	64	0	-
2	64	1	5
3	64	2	5
4	64	21.1	50
5	64	41.1	50
6	64	56.1	50
7	64	1 & 20	5 & 50
8	64	2	20
9	64	4	20
10	64	0.5 & 1	5 & 20
11	64	0.5, 1 & 8	5, 20 & 50
12	64	1 & 10	20 & 50

Σε όλες τις μετρήσεις δόθηκε ιδιαίτερη σημασία ώστε η στάθμη του άνω και κάτω δοχείου να είναι πάντοτε σταθερή και η ποσότητα του νερού πάντοτε η ίδια. Έχοντας την συγκέντρωση σωματιδίων ως μοναδική παράμετρο μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα. Ελήφθησαν συνολικά 5 τομές στη διεύθυνση του Y (βλ. Σχήμα 5-5) στις εξής θέσεις: Y = -25, -15, 0, +15, +25. Σε κάθε τομή του Y ελήφθησαν μετρήσεις σε 10 X-θέσεις με βήμα 1mm (Σχήμα 5-6) ως εξής: X = +5, +4, +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3, -4, -5



Σχήμα 5-5: Θέσεις μετρήσεων ως προς Y



Σχήμα 5-6: Θέσεις μετρήσεων ως προς X

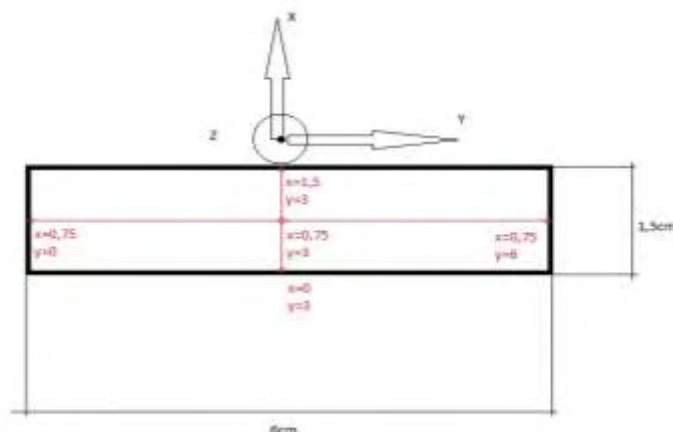
Με τη παραπάνω μεθοδολογία καταφέραμε να πάρουμε ένα πυκνό πλέγμα για τη κάθε σειρά μετρήσεων στα σημεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα (5-2).

Πίνακας 5-2: Σημεία μετρήσεων

Y =	-25	-15	0	+15	+25
X =	+5	+5	+5	+5	+5
	+4	+4	+4	+4	+4
	+3	+3	+3	+3	+3
	+2	+2	+2	+2	+2
	+1	+1	+1	+1	+1
	0	0	0	0	0
	-1	-1	-1	-1	-1
	-2	-2	-2	-2	-2
	-3	-3	-3	-3	-3
	-4	-4	-4	-4	-4
	-5	-5	-5	-5	-5

5.2 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διάφορες τομές του αγωγού στην θέση ($Z=90\text{cm}$) όπως φαίνονται στο Σχήμα 5-7. Χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια 5, 20 και $50\mu\text{m}$, ξεχωριστά αλλά και μαζί, σε διάφορες συγκεντρώσεις. Τα αποτελέσματα αφορούν την μέση ταχύτητα, την διακύμανση αυτής, την ένταση της τύρβης και την μέση διάμετρο σε κάθε σημείο.



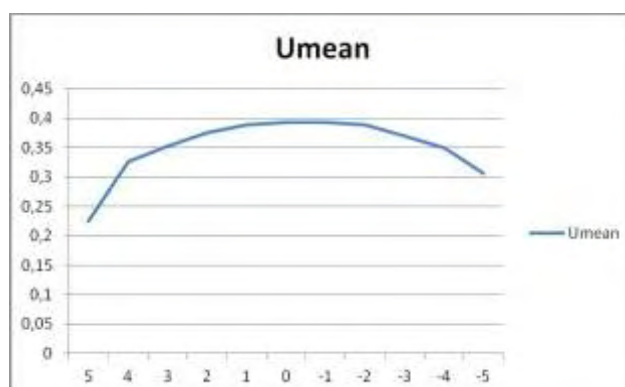
Σχήμα 5-7: Θέσεις μετρήσεων στην διατομή του αγωγού

Όπως προαναφέρθηκε, όλες οι μετρήσεις έγιναν στην οριζόντια διατομή ($Z=900\text{mm}$) στα σημεία που αναφέρονται στον Πίνακα 5-7.

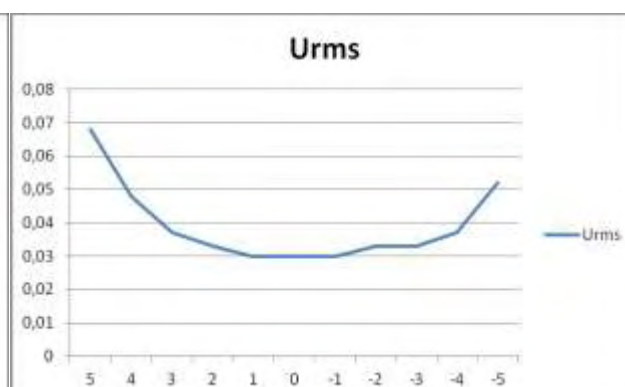
5.2.1 Σειρά-1: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt

Για την πρώτη σειρά μετρήσεων, παρουσιάζονται στα Σχήματα 5-8 έως 5-27 η μέση ταχύτητα και η διακύμανσή της, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για ροή απιονισμένου νερού με αριθμό Reynolds $Re=10.512$ ($U=0,438\text{m/s}$).

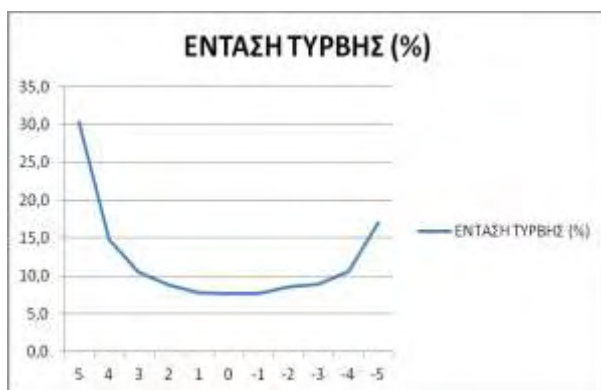
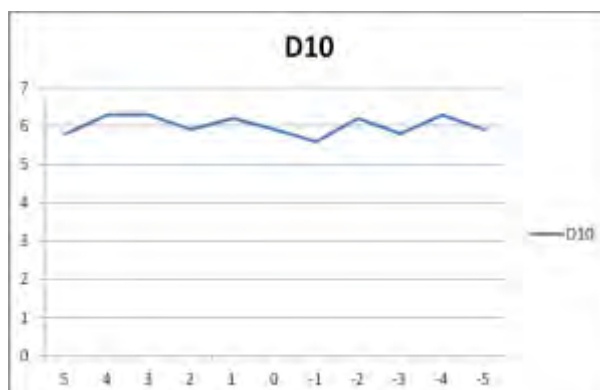
Θέση $Y=-25\text{mm}$



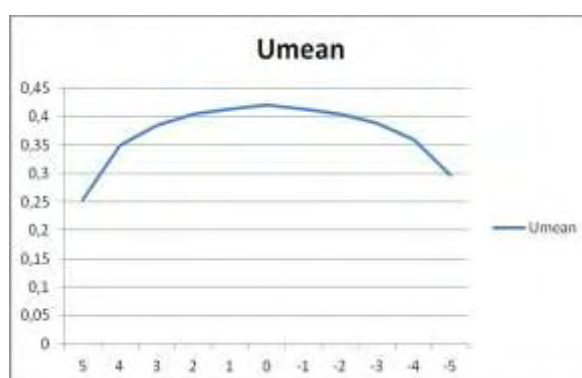
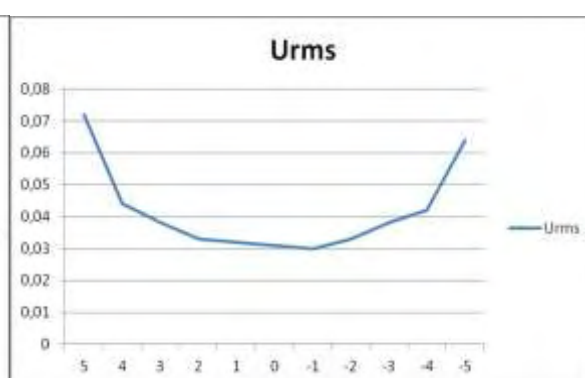
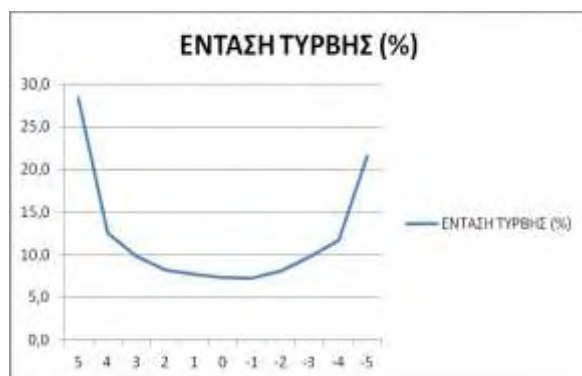
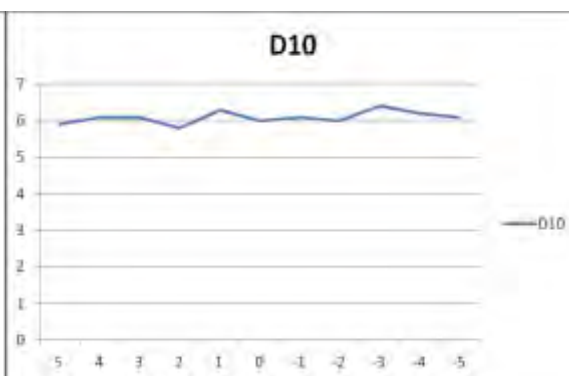
Σχήμα 5-8: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$



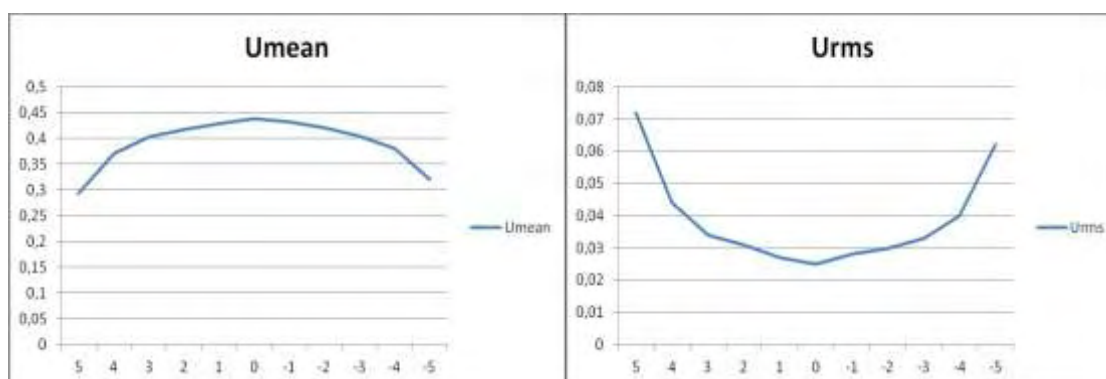
Σχήμα 5-9: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$

Σχήμα 5-10: Ένταση τύρβης για $Y=-25\text{mm}$ Σχήμα 5-11: Μέση διάμετρος σωματιδίων, $Y=-25\text{mm}$

Θέση $Y=-15\text{mm}$

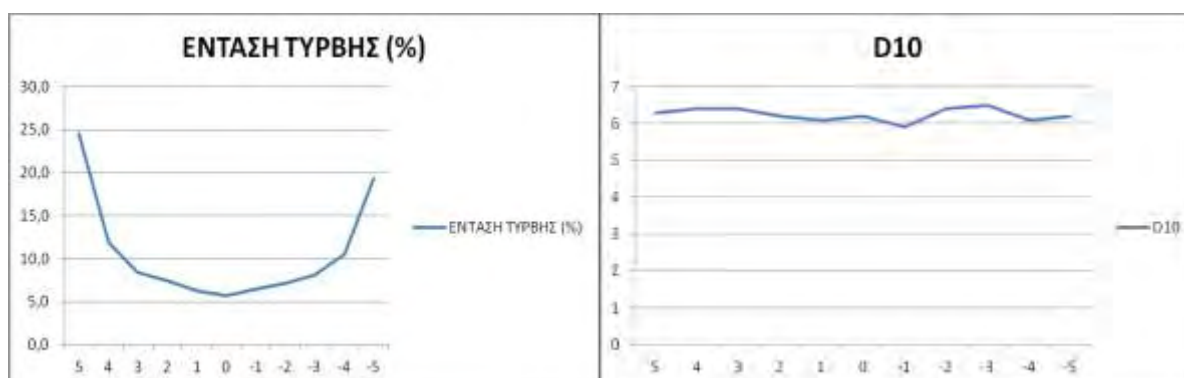
Σχήμα 5-12: Μέση ταχύτητα για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-13: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-14: Ένταση τύρβης για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-15: Μέση διάμετρος σωματιδίων, $Y=-15\text{mm}$

Θέση $Y = 0\text{mm}$



Σχήμα 5-16: Μέση ταχύτητα για $Y=0$

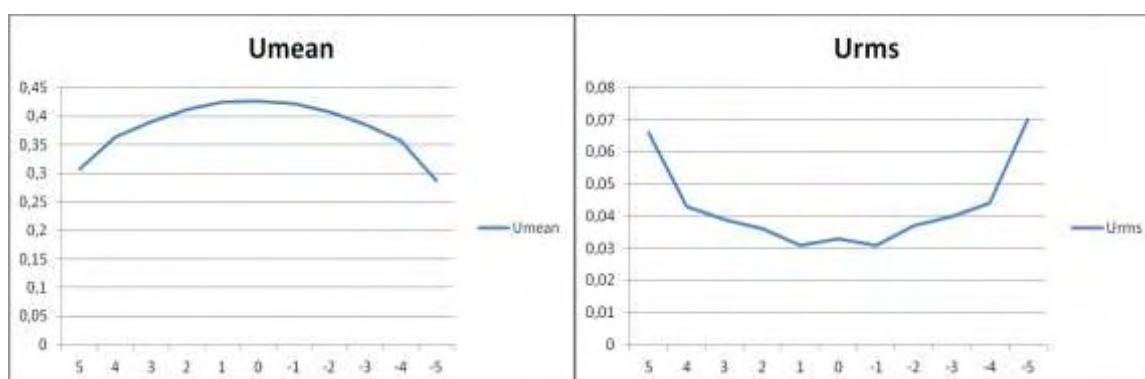
Σχήμα 5-17: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$



Σχήμα 5-18: Ένταση τύρβης για $Y=0$

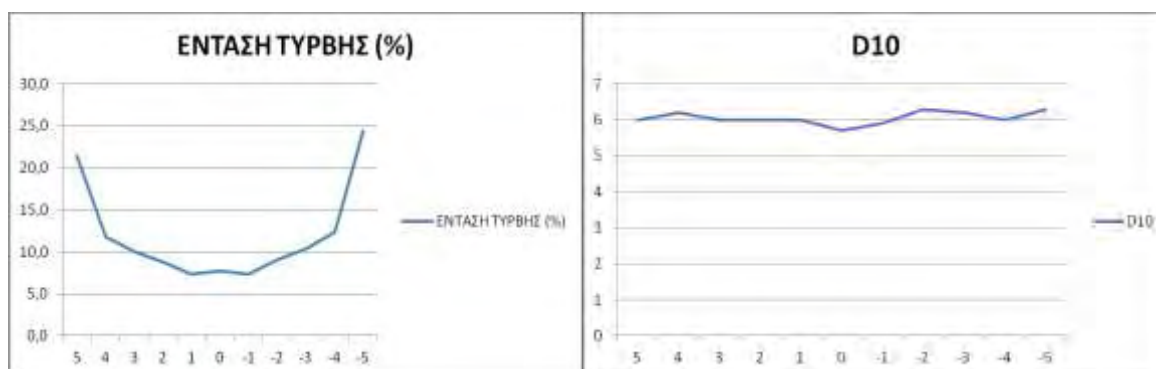
Σχήμα 5-19: Μέση διάμετρος σωματιδίων για $Y=0$

Θέση $Y = +15\text{mm}$



Σχήμα 5-20: Μέση ταχύτητα για $Y=+15\text{mm}$

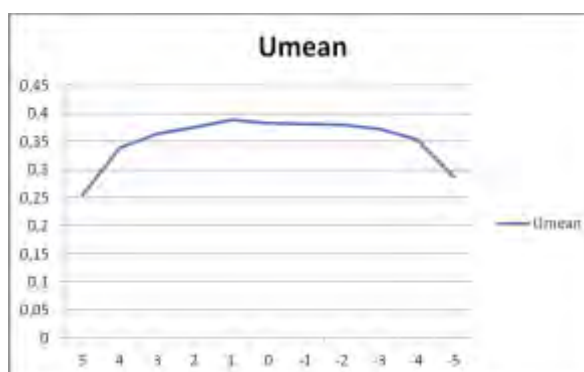
Σχήμα 5-21: Διακύμανση ταχύτητας, $Y=+15\text{mm}$



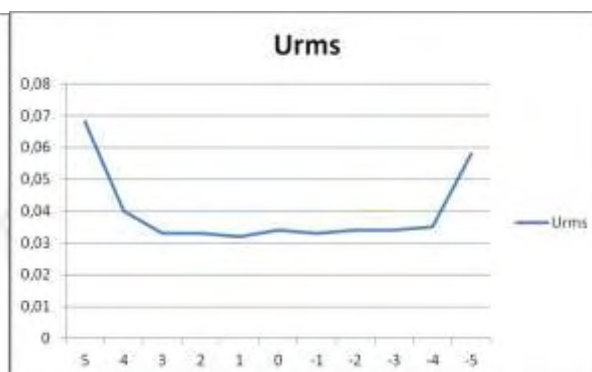
Σχήμα 5-22: Ένταση τύρβης για $Y=+15\text{mm}$

Σχήμα 5-23: Ένταση τύρβης για $Y=+15\text{mm}$

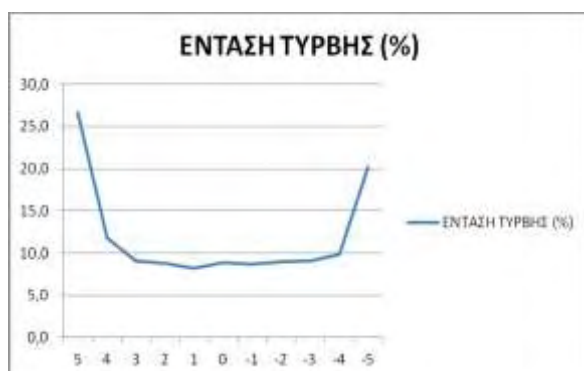
Θέση $Y = +25mm$



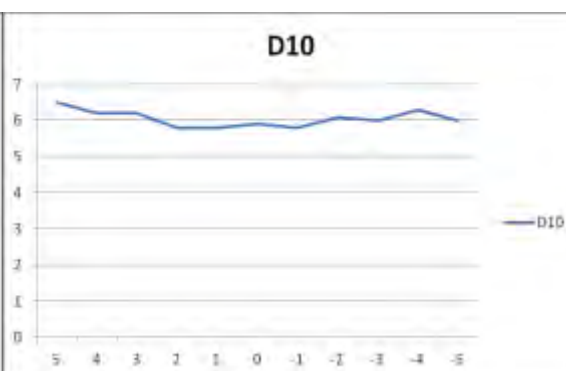
Σχήμα 5-24: Μέση ταχύτητα για $Y=+25mm$



Σχήμα 5-25: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25mm$



Σχήμα 5-26: Ένταση τύρβης για $Y=+25mm$



Σχήμα 5-27: Μέση διάμετρος για $Y=+25mm$

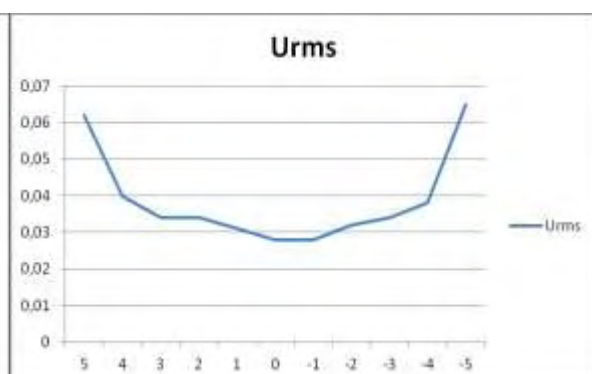
5.2.2 Σειρά - 2: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 5μm Σωματίδια

Για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων, στα Σχήματα 5-28 έως 5-47 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανσή της, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για ροή διαλύματος απιονισμένου νερού όγκου 64lt με 1gr σωματίδια διαμέτρου 5μm και με $Re=10512$ ($U=0,438m/s$, $C_{psp5\mu m}(1gr)=15,625gr/m^3$, $Np=624.137.559$).

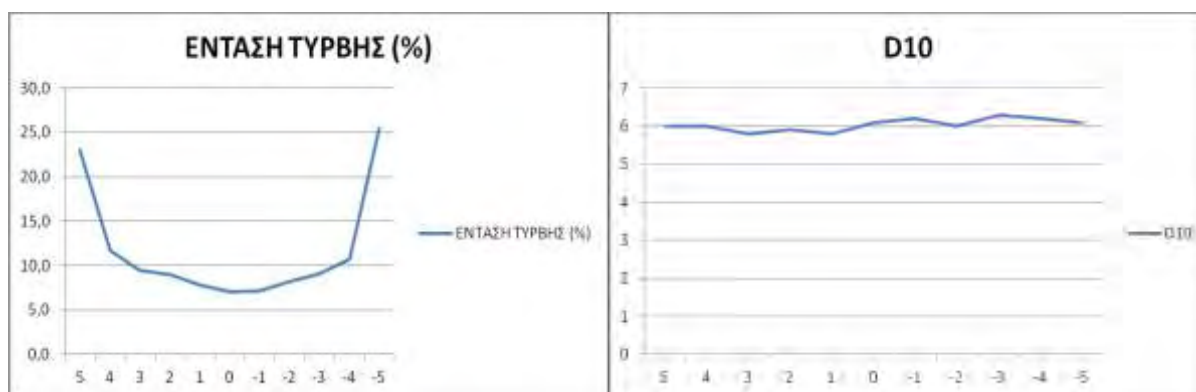
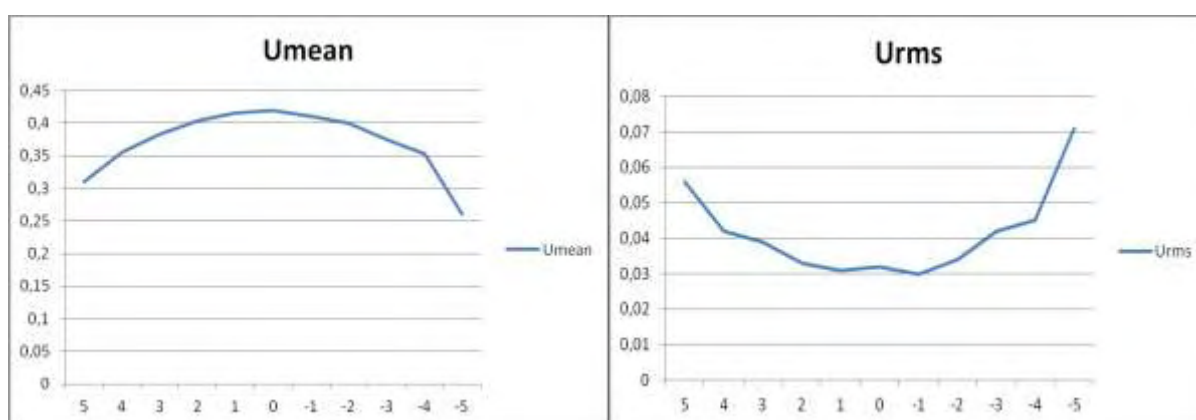
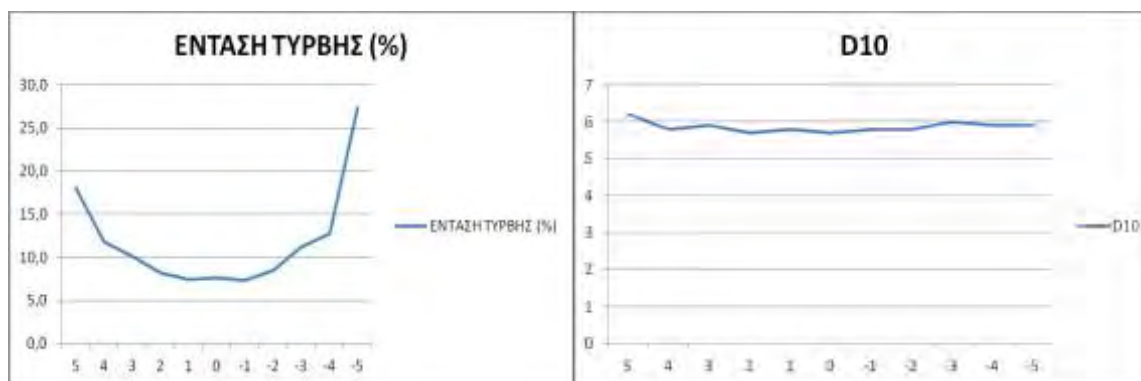
Θέση $Y = -25 mm$



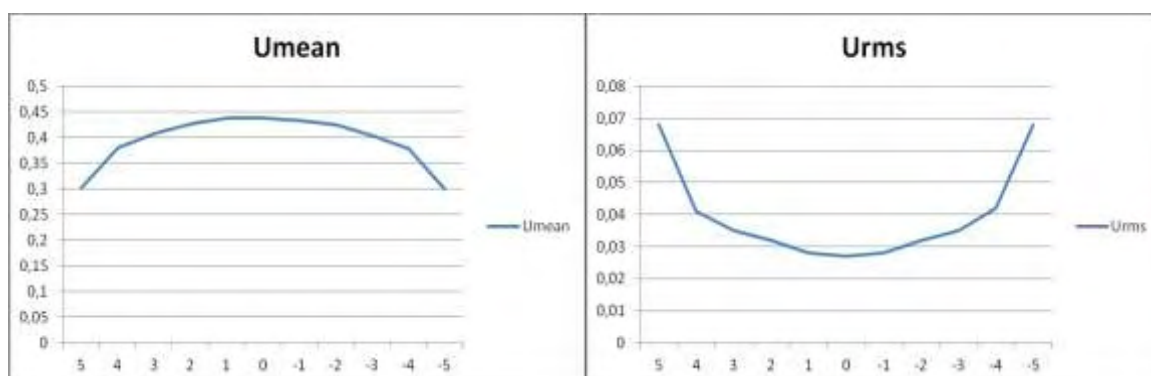
Σχήμα 5-28: Μέση ταχύτητα για $Y=-25mm$



Σχήμα 5-29: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25mm$

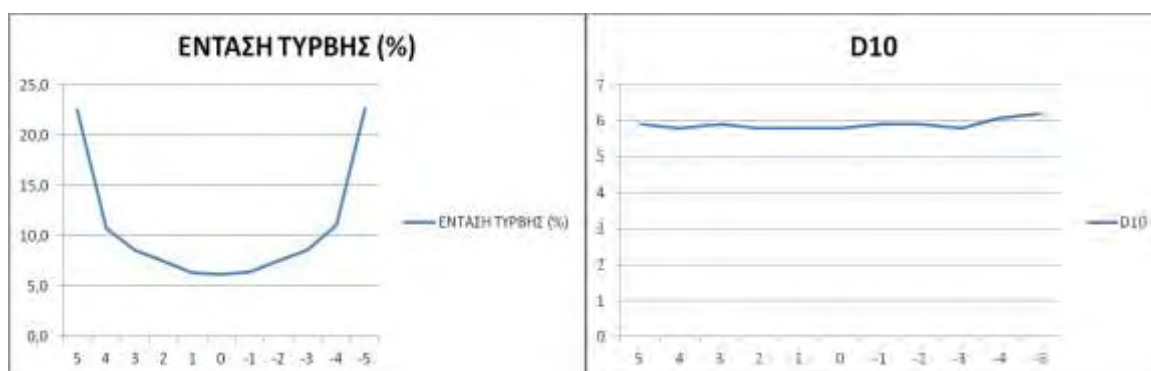
Σχήμα 5-30: Ένταση τύρβης για $Y=-25\text{mm}$ Σχήμα 5-31: Μέση διάμετρος για $Y=-25\text{mm}$ Θέση $Y=-15\text{ mm}$ Σχήμα 5-32: Μέση ταχύτητα για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-33: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-34: Ένταση τύρβης για $Y=-15\text{mm}$ Σχήμα 5-35: Μέση διάμετρος για $Y=-15\text{mm}$

Θέση $Y = 0$



Σχήμα 5-36: Μέση ταχύτητα για $Y=0$

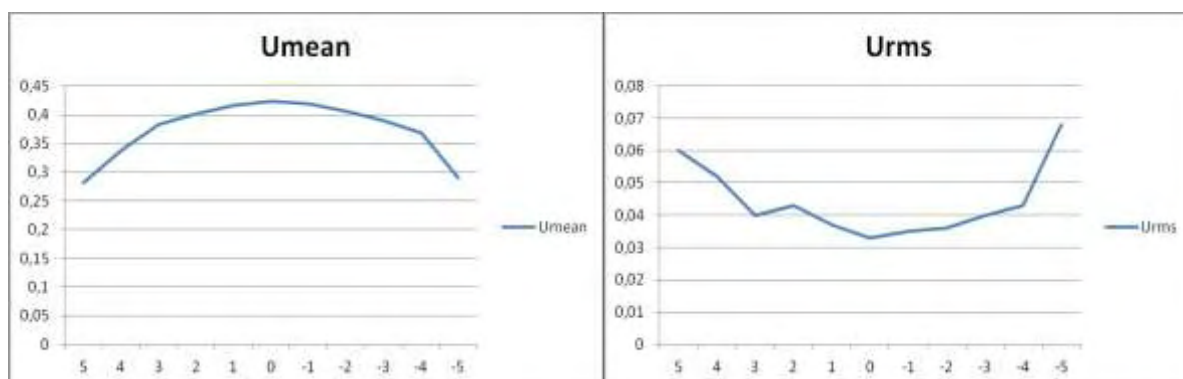
Σχήμα 5-37: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$



Σχήμα 5-38: Ένταση τύρβης για $Y=0$

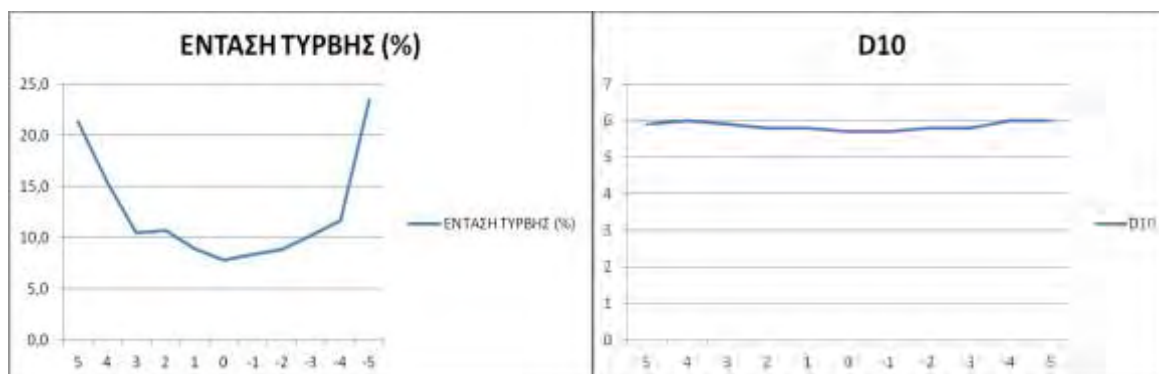
Σχήμα 5-39: Διάμετρος σωματιδίων για $Y=0$

$Y = +15 \text{ mm}$



Σχήμα 5-40: Μέση ταχύτητα για $Y=+15 \text{ mm}$

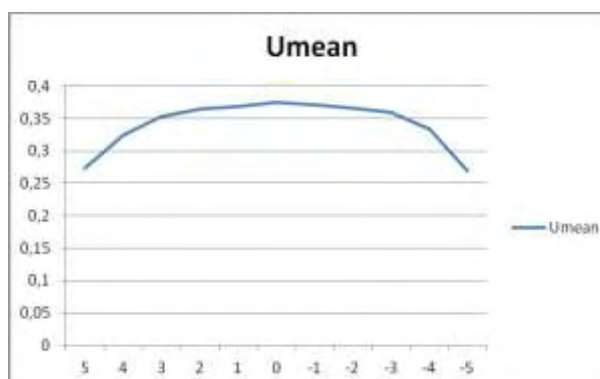
Σχήμα 5-41: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15 \text{ mm}$



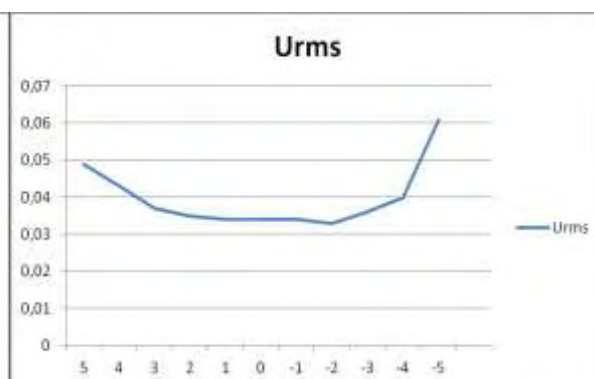
Σχήμα 5-42: Ένταση τύρβης για $Y=+15 \text{ mm}$

Σχήμα 5-43: Μέση διάμετρος σωματιδίων $Y=+15 \text{ mm}$

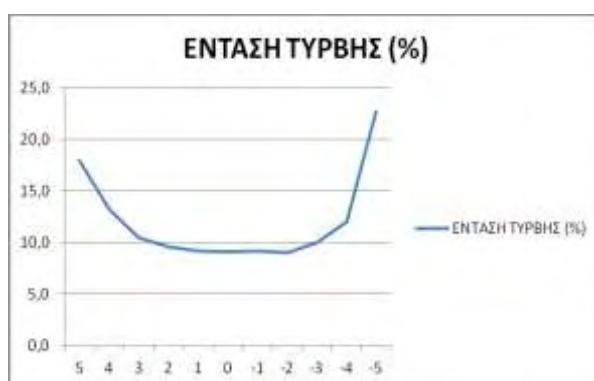
$Y=+25mm$



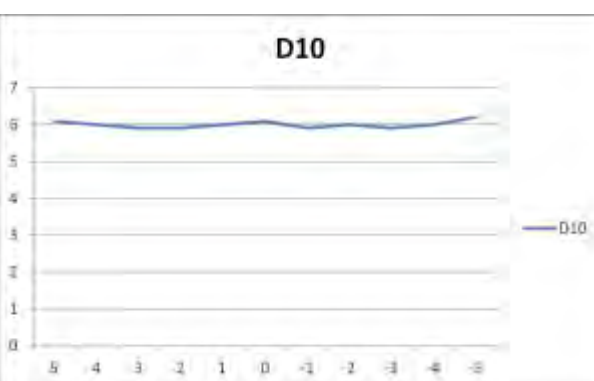
Σχήμα 5-44: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$



Σχήμα 5-45: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-46: Ένταση τύρβης για $Y=+25$



Σχήμα 5-47: Μέση διάμετρος για $Y=+25mm$

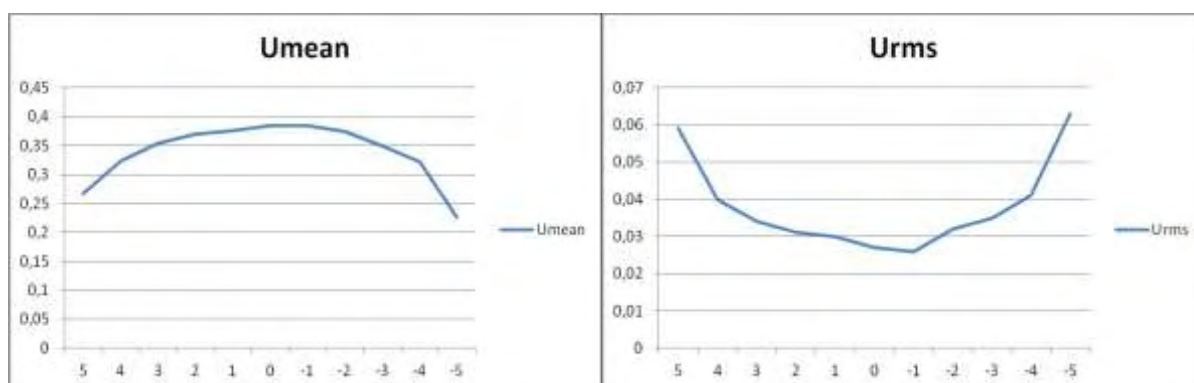
Παρατηρήσεις στις σειρές μετρήσεων 1 & 2:

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η ταχύτητα στο κέντρο της ροής δεν επηρεάζεται καθώς και στις δύο σειρές μετρήσεων η ταχύτητα παρέμεινε ίδια. Καθώς όμως πλησιάζουμε προς τα τοιχώματα παρατηρείται μια μικρή πτώση της U της τάξεως 4,4%. Αυτό είναι λογικό καθώς το ρευστό που περιέχει σωματίδια δυσκολεύεται να κινηθεί στις περιοχές κοντά στα τοιχώματα. Ακόμη από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η μετρούμενη μέση διάμετρος των σωματιδίων αυξάνεται λίγο καθώς κινούμαστε προς τα τοιχώματα.

5.2.3 Σειρά-3: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 2gr 5μm Σωματίδια

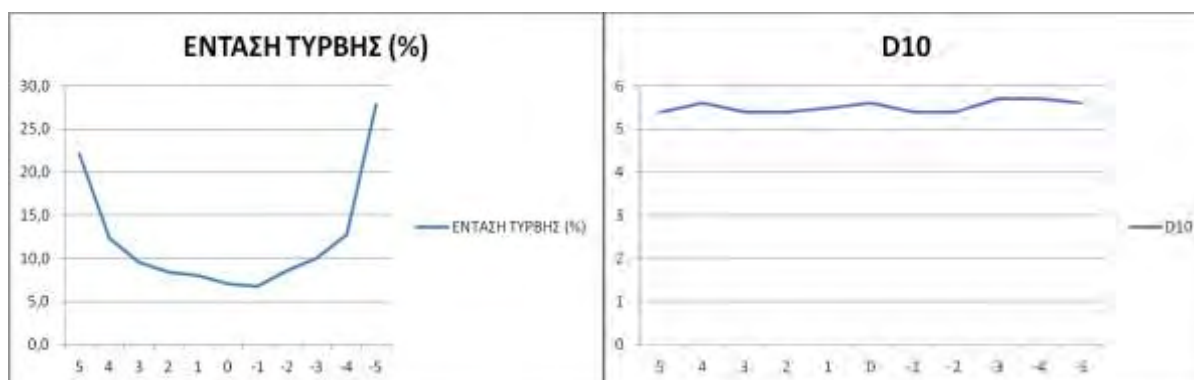
Στη τρίτη σειρά μετρήσεων, στα Σχήματα 5-48 έως 5-67, παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για ροή διαλύματος απιονισμένου νερού όγκου 64lt με 2gr σωματίδια διαμέτρου 5μm και $Re=9816$ ($U=0,409m/s$ $C_{psp5\mu m}(2gr)=31,25\text{ gr}/m^3$, $Np=1.248.275.118$).

$Y = -25\text{mm}$



Σχήμα 5-48: Μέση ταχύτητα για $Y = -25\text{mm}$

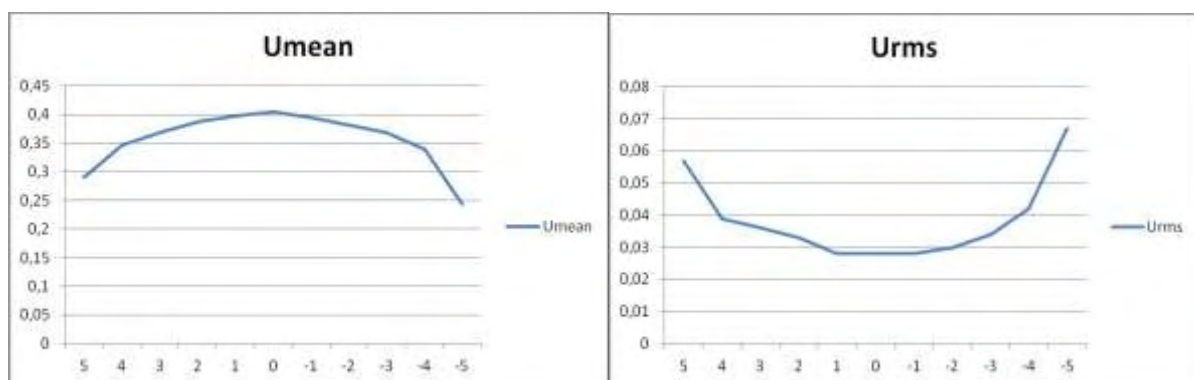
Σχήμα 5-49: Διακύμανση ταχύτητας για $Y = -25\text{mm}$



Σχήμα 5-50: Ένταση τύρβης για $Y = -25\text{mm}$

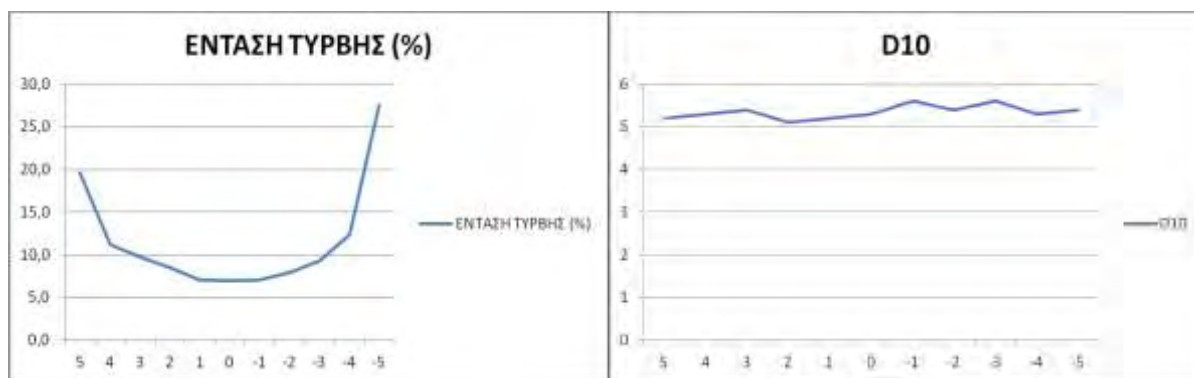
Σχήμα 5-51: Μέση διάμετρος για $Y = -25$

$Y = -15\text{mm}$



Σχήμα 5-52: Μέση ταχύτητα για $Y = -15$

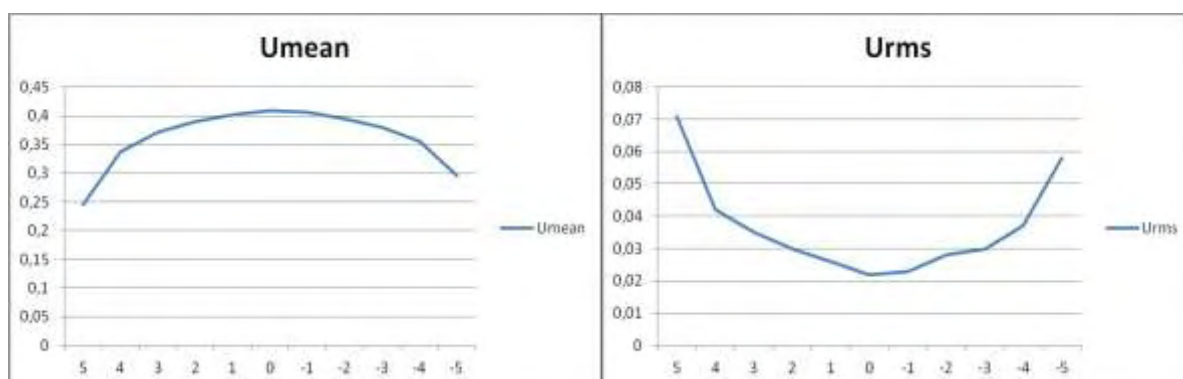
Σχήμα 5-53: Διακύμανση ταχύτητας για $Y = -15$



Σχήμα 5-54: Ένταση τύρβης για $Y = -15$

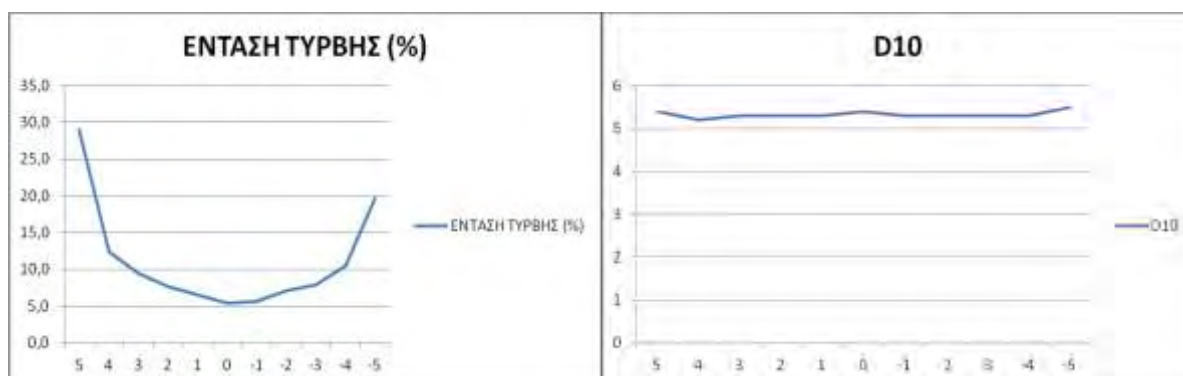
Σχήμα 5-55: Μέση διάμετρος για $Y = -15$

$Y=0$



Σχήμα 5-56: Μέση ταχύτητα για $Y=0$

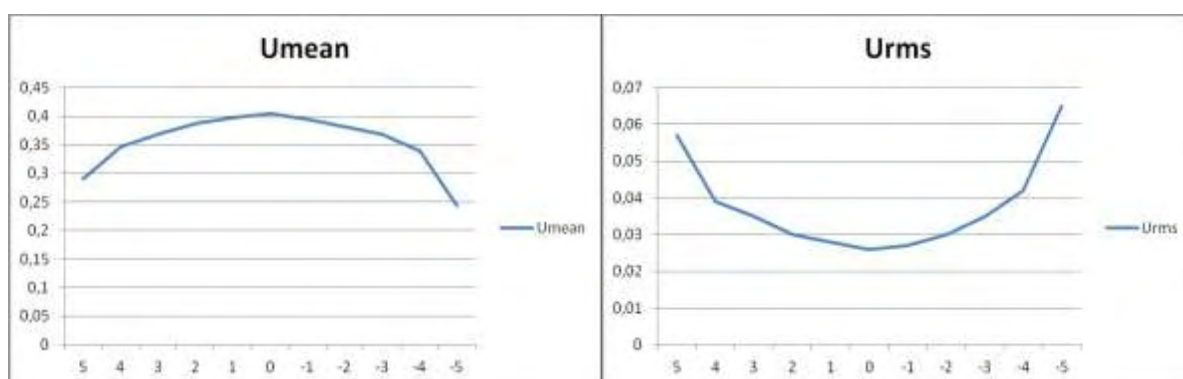
Σχήμα 5-57: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$



Σχήμα 5-58: Ένταση τύρβης για $Y=0$

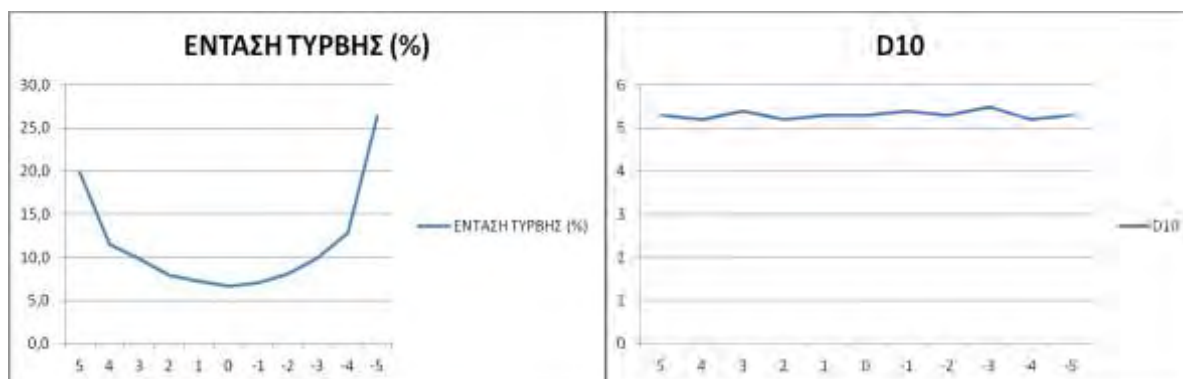
Σχήμα 5-59: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15$



Σχήμα 5-60: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

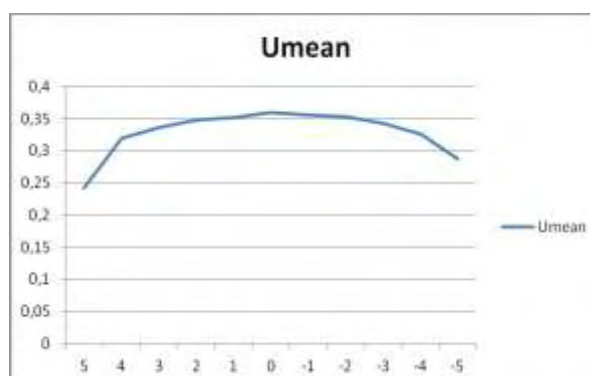
Σχήμα 5-61: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$



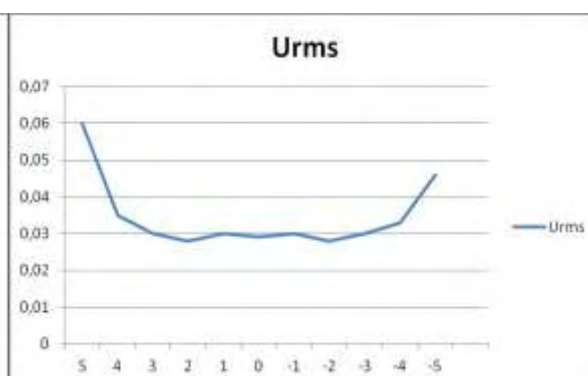
Σχήμα 5-62: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

Σχήμα 5-63: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

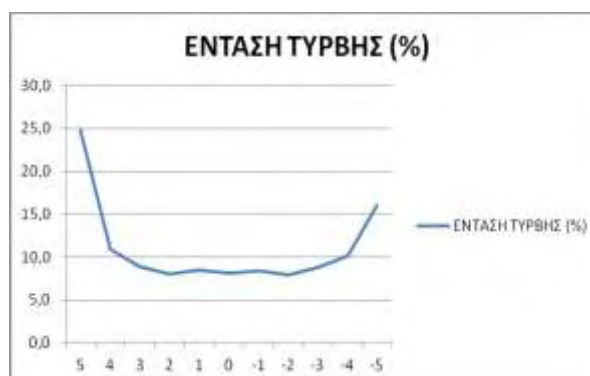
Y=+25



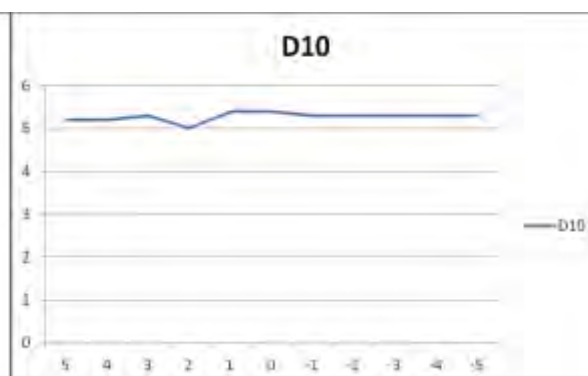
Σχήμα 5-64: Μέση ταχύτητα για Y=+25



Σχήμα 5-65: Διακύμανση ταχύτητας για Y=+25



Σχήμα 5-66: Ένταση τύρβης για Y=+25



Σχήμα 5-67: Μέση διάμετρος για Y=+25

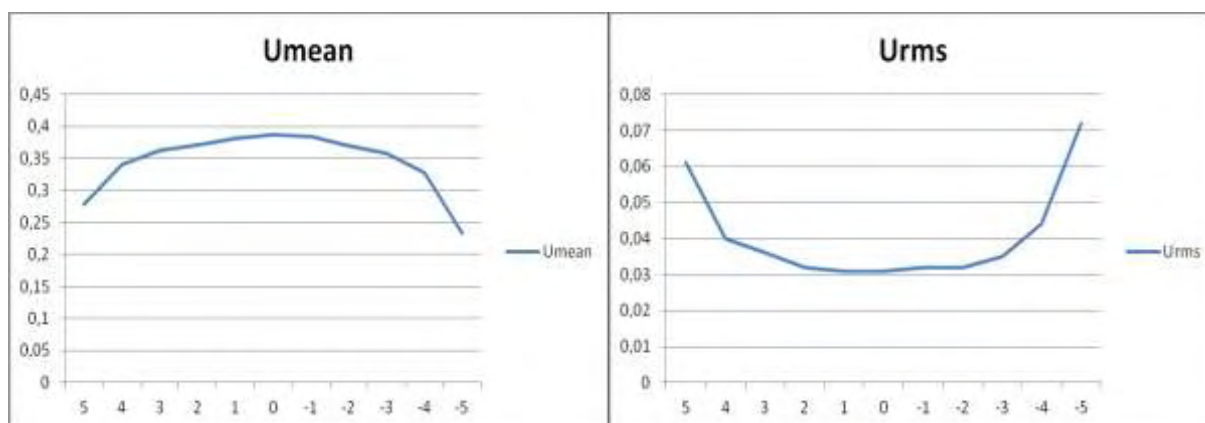
Παρατηρήσεις στη σειρά μετρήσεων - 3:

Σημειώνεται σημαντική πτώση της ταχύτητας (έως 6,6%), αλλά και της διαμέτρου. Αυτά είναι αναμενόμενα καθώς τα σωματίδια δημιουργούν αντιστάσεις στη κίνηση του ρευστού, γι' αυτό και η μειωμένη ταχύτητα. Επιπλέον με την προσθήκη ακόμη περισσότερων σωματιδίων η μέση διάμετρος είναι λογικό να πλησιάσει τις τιμές των 5μm ακόμη πιο πολύ.

5.2.4 Σειρά-4: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 2gr 20μm Σωματίδια

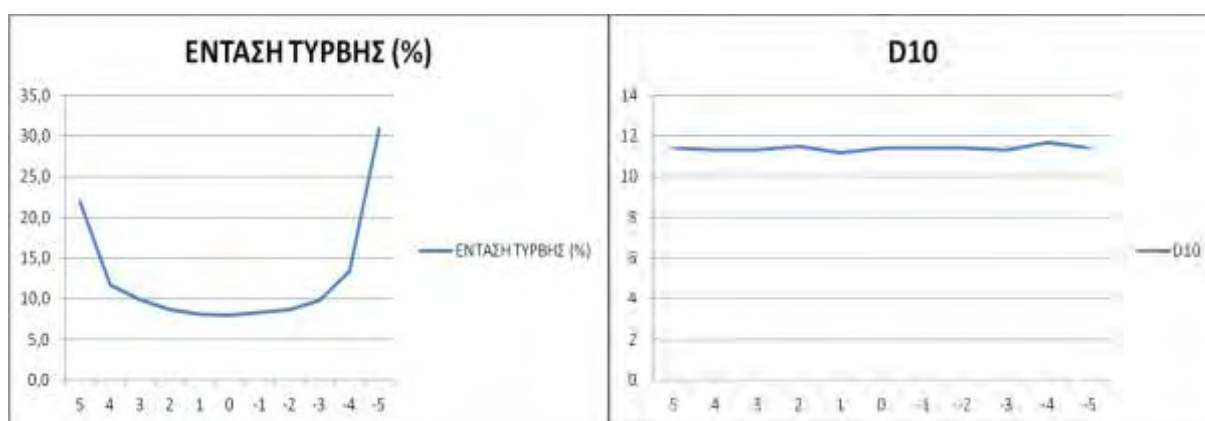
Για την τέταρτη σειρά μετρήσεων, στα Σχήματα 5-68 Έως 5-87 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανσή της, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για διάλυμα απιονισμένου νερού όγκου 64lt+ 2gr 20μm με $Re=10344$ ($U=0,431m/s$, $C_{sp20\mu m}(2gr)=31,25gr/m^3$, $N_p=19.504.299$).

$Y=-25mm$



Σχήμα 5-68: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$

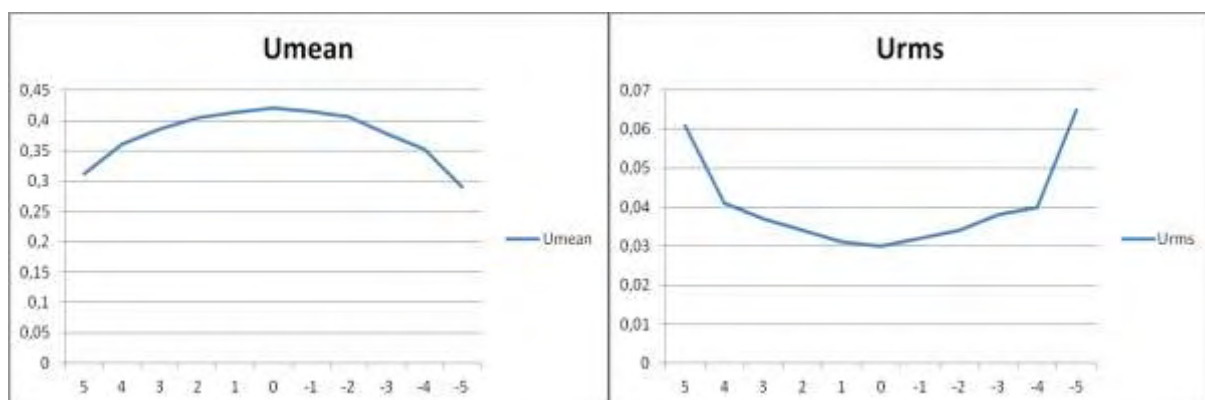
Σχήμα 5-69: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$



Σχήμα 5-70: Ένταση τύρβης για $Y=-25$

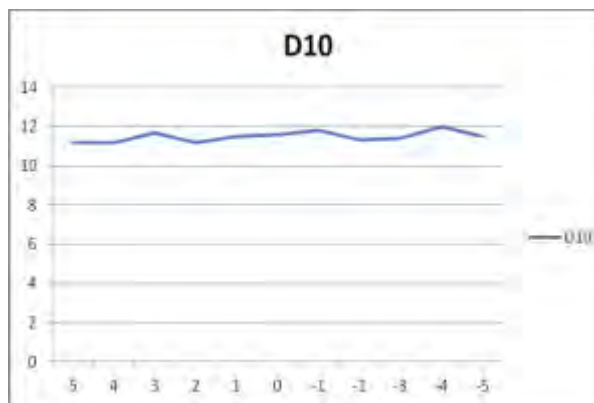
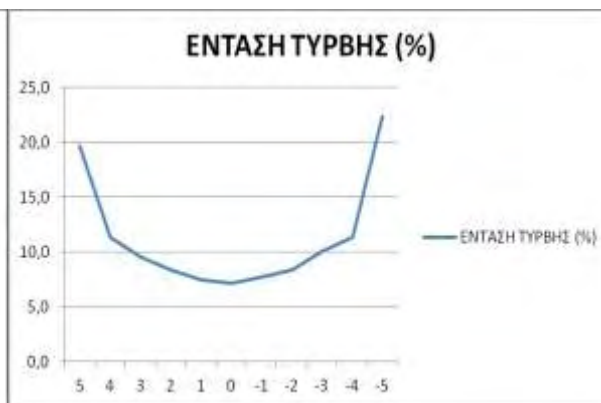
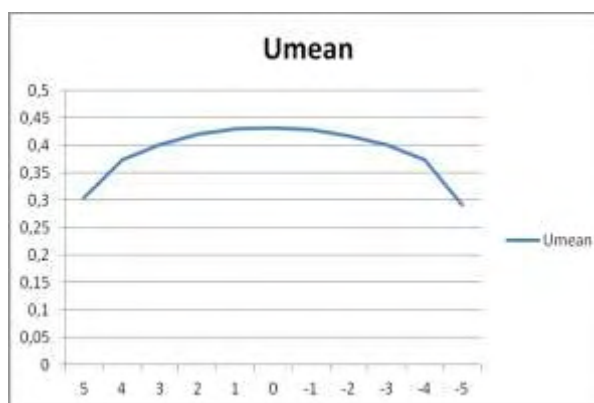
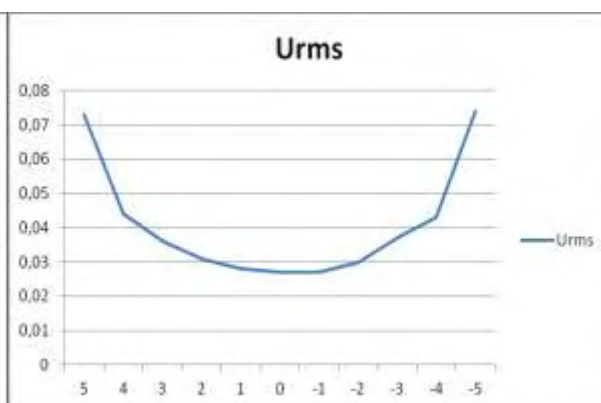
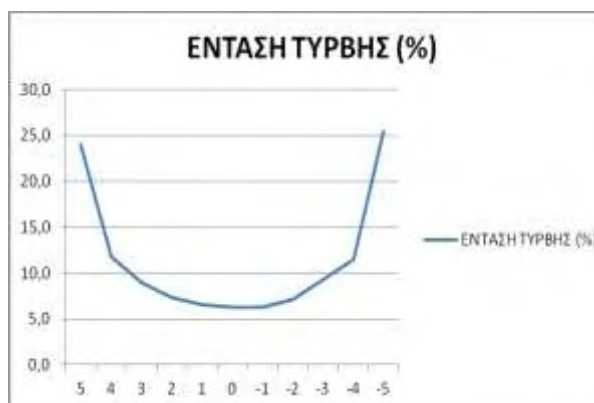
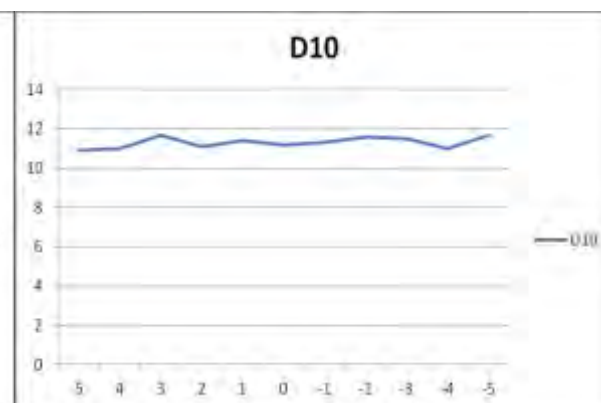
Σχήμα 5-71: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15mm$

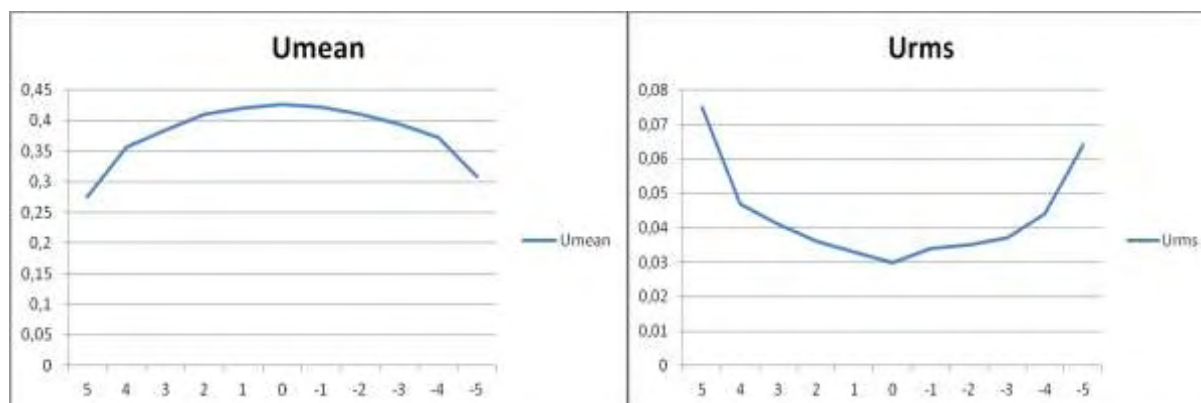


Σχήμα 5-72: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$

Σχήμα 5-73: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$

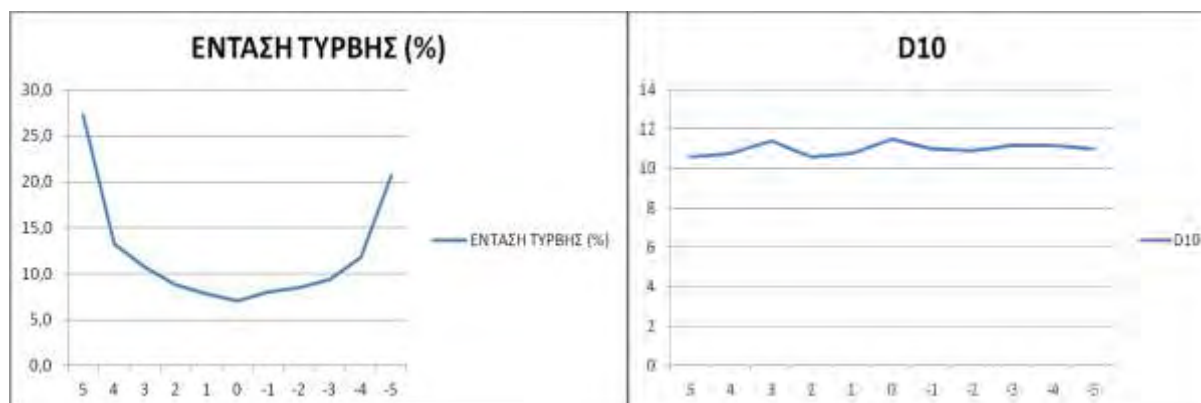
Σχήμα 5-74: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-75: Μέση διάμετρος για $Y=-15$ $Y=0$ Σχήμα 5-76: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-77: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$ Σχήμα 5-78: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-79: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15mm$



Σχήμα 5-80: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

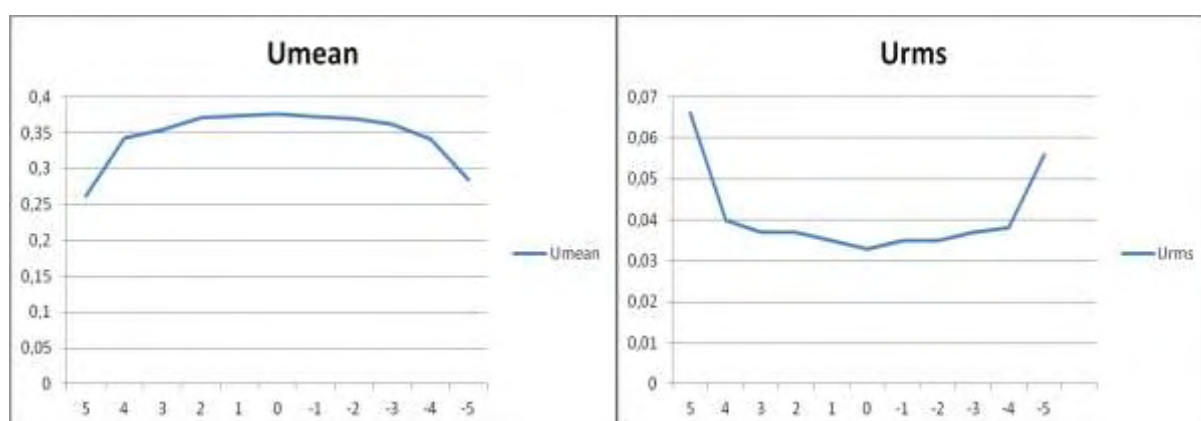
Σχήμα 5-81: Διακύμανση ταχύτητας $Y=+15$



Σχήμα 5-82: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

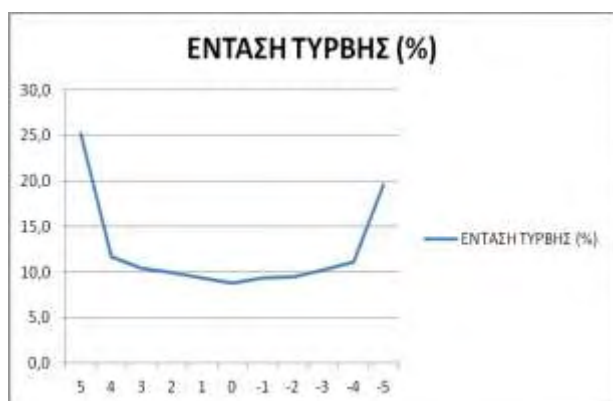
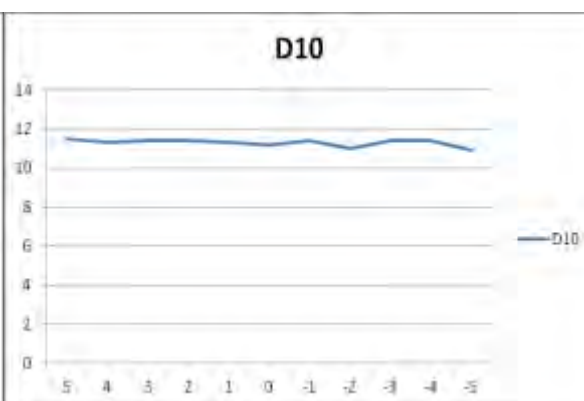
Σχήμα 5-83: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25mm$



Σχήμα 5-84: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

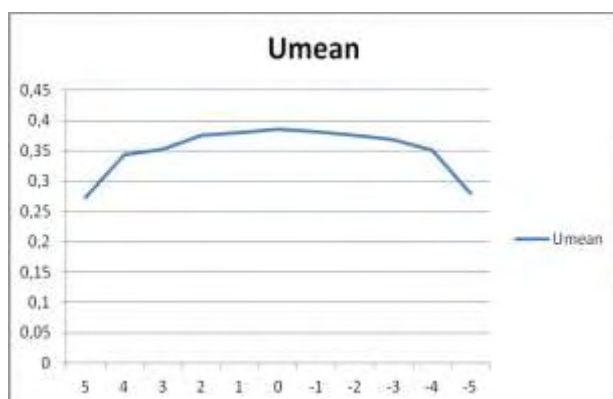
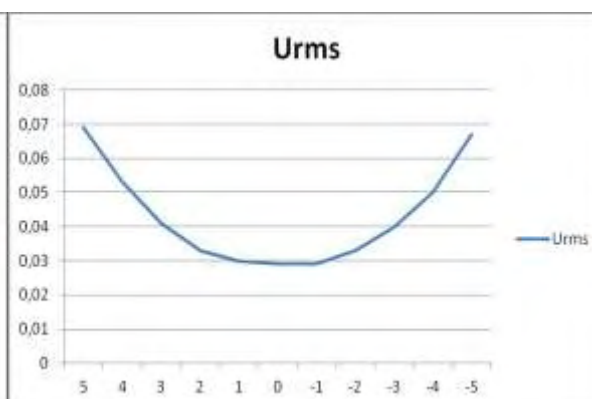
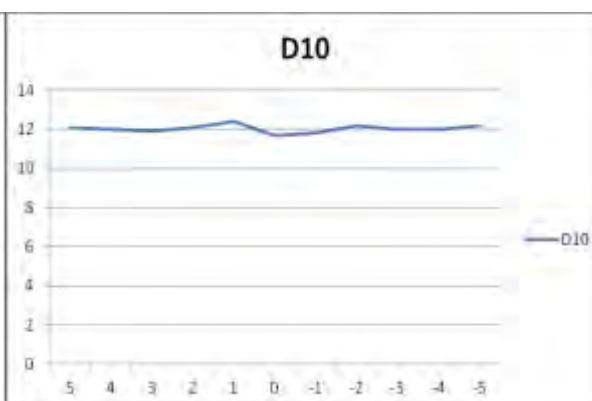
Σχήμα 5-85: Διακύμανση ταχύτητας $Y=+25$

Σχήμα 5-86: Ένταση τύρβης για $Y=+25$ Σχήμα 5-87: Μέση διάμετρος για $Y=+25, Z=900$

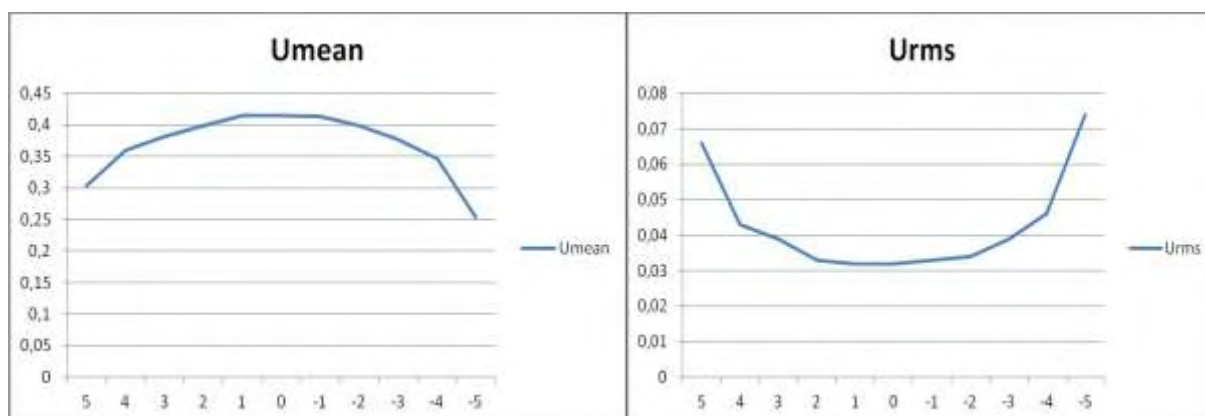
5.2.5 Σειρά - 5: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 4gr 20μm Σωματίδια

Στη πέμπτη σειρά μετρήσεων, στα Σχήματα 5-88 έως 5-107 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανσή της, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για διάλυμα: απιονισμένο νερό όγκου 64lt+ 4gr 20μm με $Re=10584$. ($U=0,441\text{m/s}$, $C_{psp20\mu m}(2gr)=62,5\text{gr/m}^3$, $Np=39.008.597$).

$Y=-25\text{mm}$

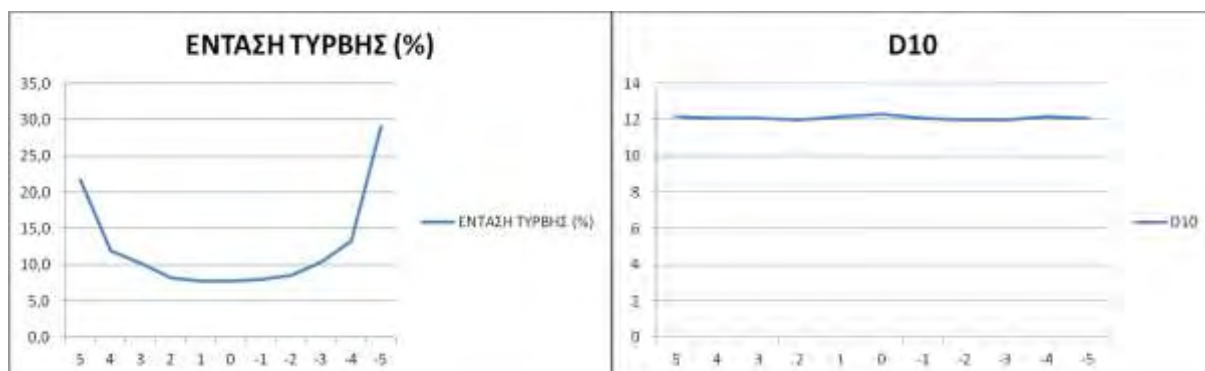
Σχήμα 5-88: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$ Σχήμα 5-89: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$ Σχήμα 5-90: Ένταση τύρβης για $Y=-25$ Σχήμα 5-91: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15mm$



Σχήμα 5-92: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$

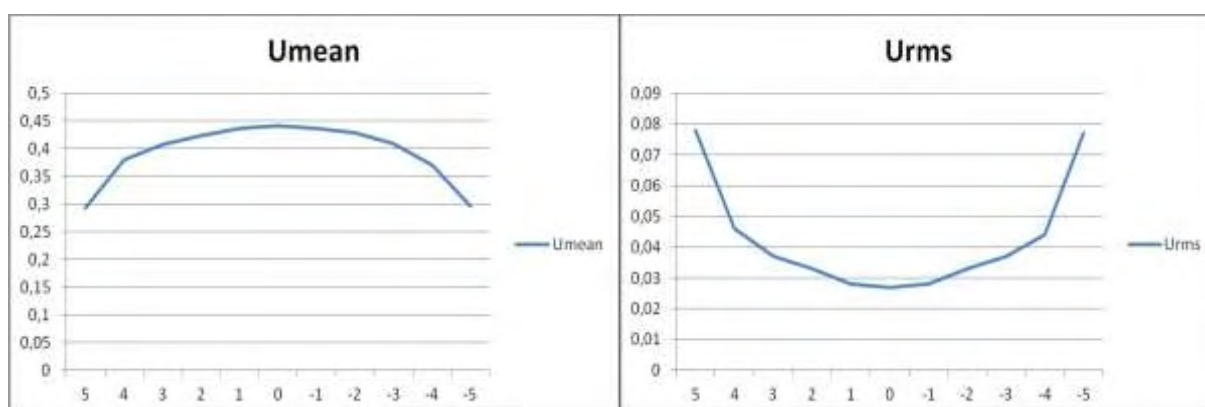
Σχήμα 5-93: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$



Σχήμα 5-94: Ένταση τύρβης για $Y=-15$

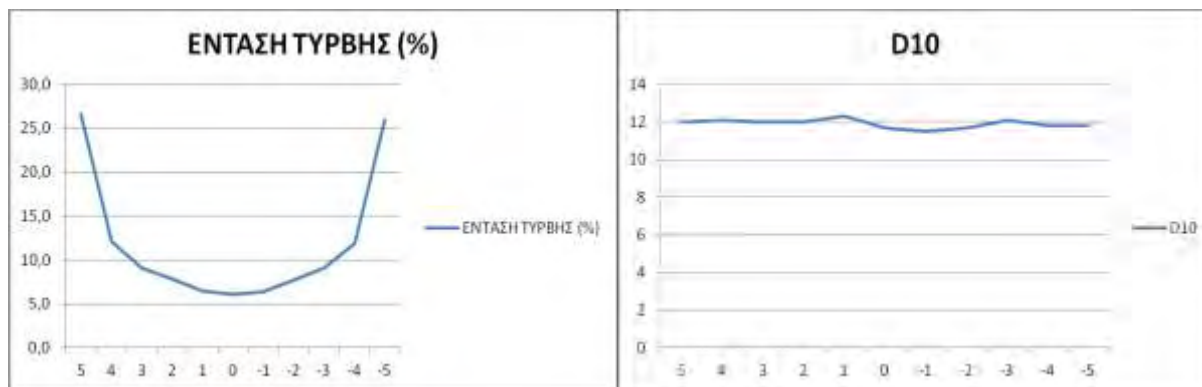
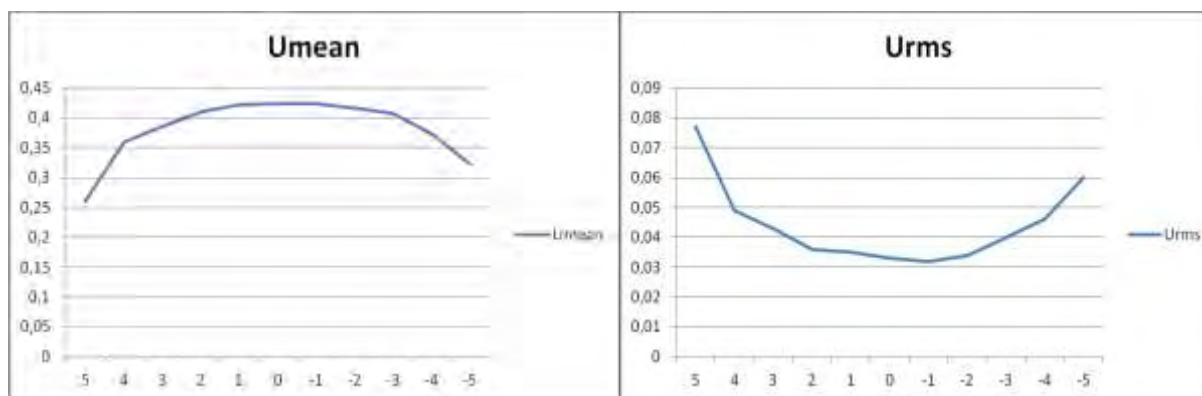
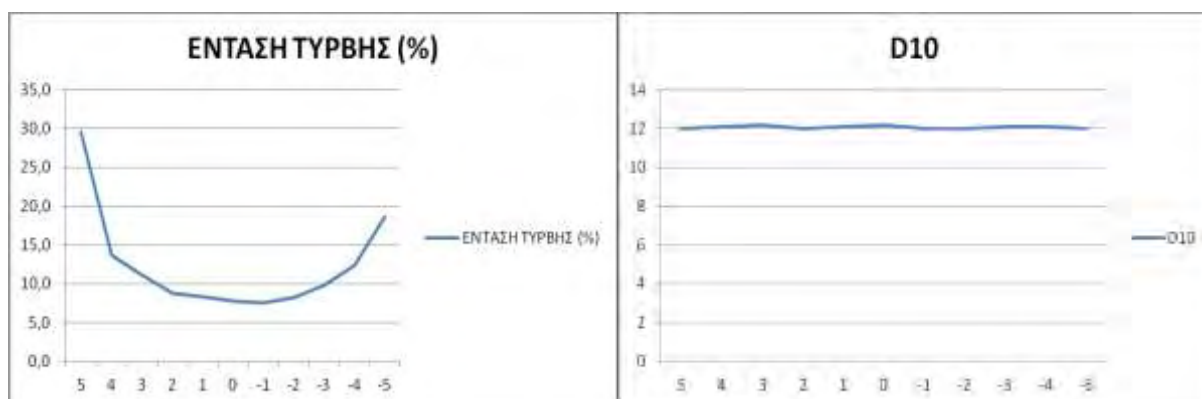
Σχήμα 5-95: Μέση διάμετρος για $Y=-15$

$Y=0mm$

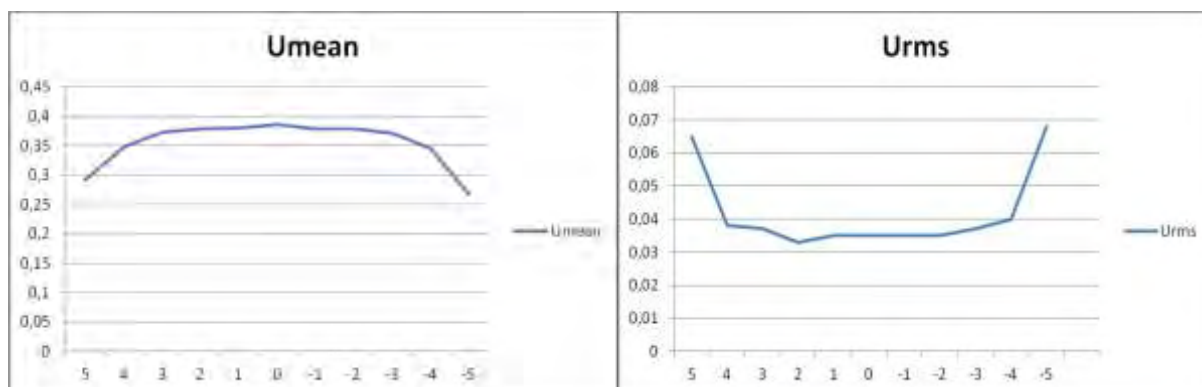


Σχήμα 5-96: Μέση ταχύτητα για $Y=0$

Σχήμα 5-97: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$

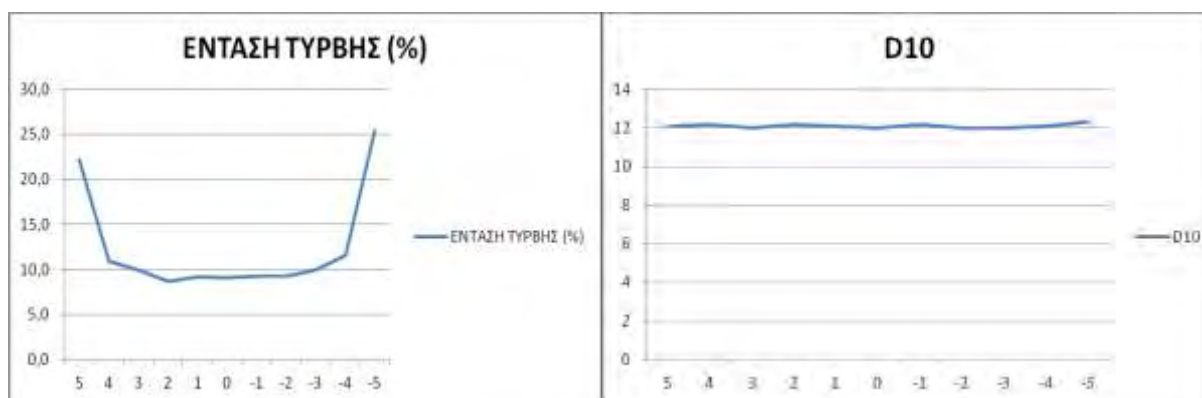
Σχήμα 5-98: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-99: Μέση διάμετρος για $Y=0$ $Y=+15mm$ Σχήμα 5-100: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$ Σχήμα 5-101: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$ Σχήμα 5-102: Ένταση τύρβης για $Y=+15$ Σχήμα 5-103: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25mm$



Σχήμα 5-104: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

Σχήμα 5-105: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-106: Ένταση τύρβης για $Y=+25$

Σχήμα 5-107: Μέση διάμετρος για $Y=+25$

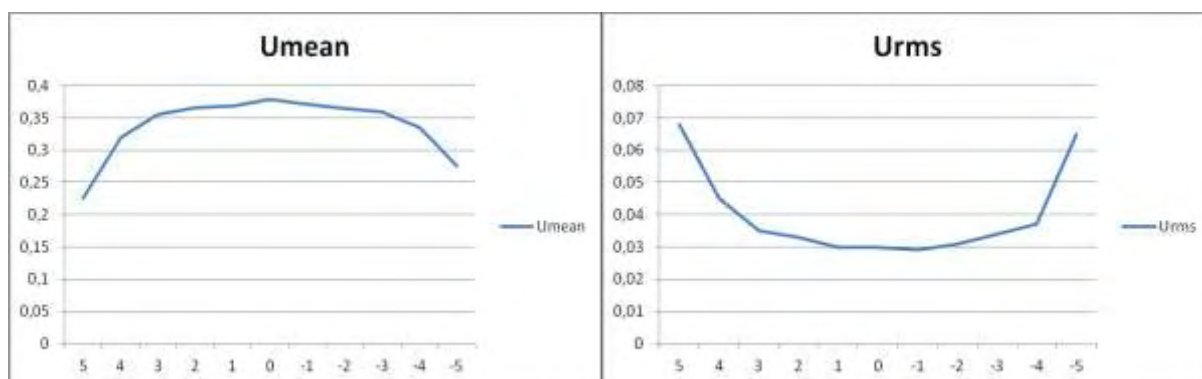
Παρατηρήσεις στις σειρές μετρήσεων 4 & 5

Οι μέσες διαμέτροι που μετρήθηκαν ήταν της τάξης των 11-12 μm . Να τονίσουμε εδώ ότι στις μετρήσεις των 5 μm είχαμε $D_{10}=5,5$ περίπου. Ενώ για τα 50 μm είχαμε μετρήσει περίπου 19-20 συνεπώς η $D_{10}=12$ που μετρήσαμε είναι απολύτως αποδεκτό. Για τις δύο συγκεντρώσεις δε παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στη ταχύτητα. Υπάρχουν κάποιες διαφορές αναλόγως την τομή αλλά δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Το μέγεθος που παρουσιάζει αύξηση είναι η μέση διάμετρος (1 μm), πράγμα αναμενόμενο καθώς διπλασιάζεται η συγκέντρωση των σωματιδίων.

5.2.6 Σειρά-6: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 21,1gr 50 μ m Σωματίδια

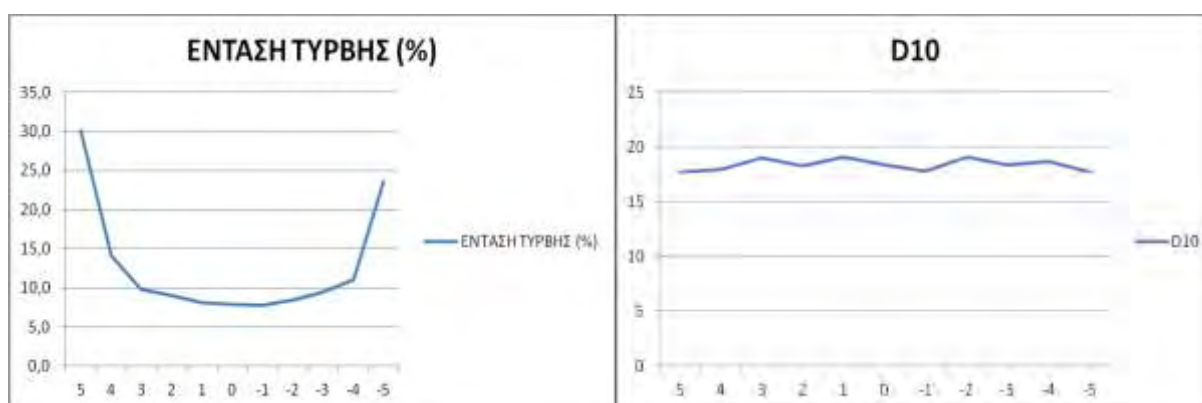
Στην έκτη σειρά μετρήσεων, στα σχήματα 5-108 έως 5-127 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για διάλυμα: απιονισμένο νερό συνολικού όγκου 64lt+21,1gr 50 μ m και με $Re=10464$. ($U=0,436$ m/s, $C_{psp50\mu m}(21,1gr)=329,6875$ gr/m³, $Np=13.169.302$)

$Y=-25$ mm



Σχήμα 5-108: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$

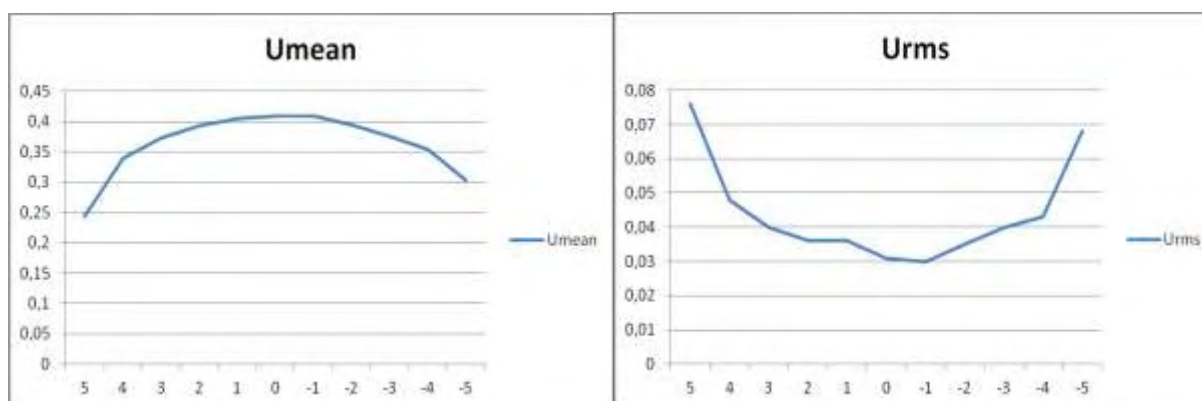
Σχήμα 5-109: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$



Σχήμα 5-110: Ένταση τύρβης για $Y=-25$

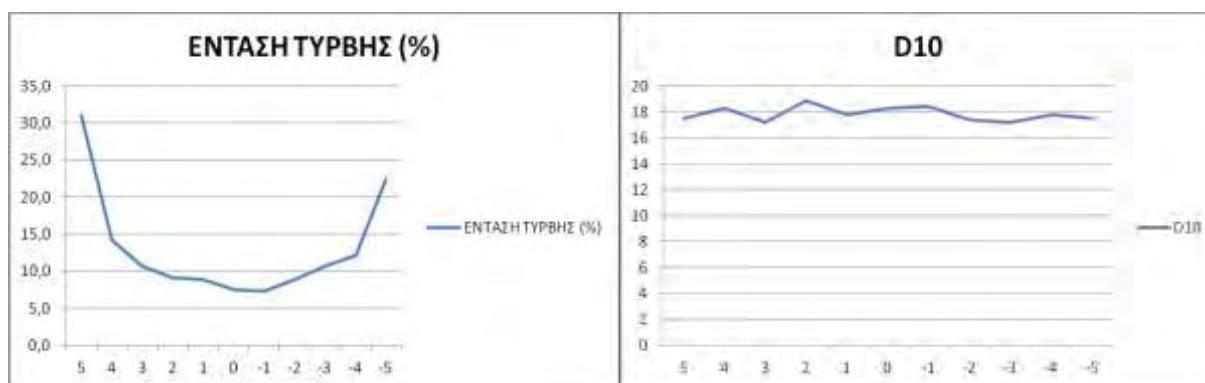
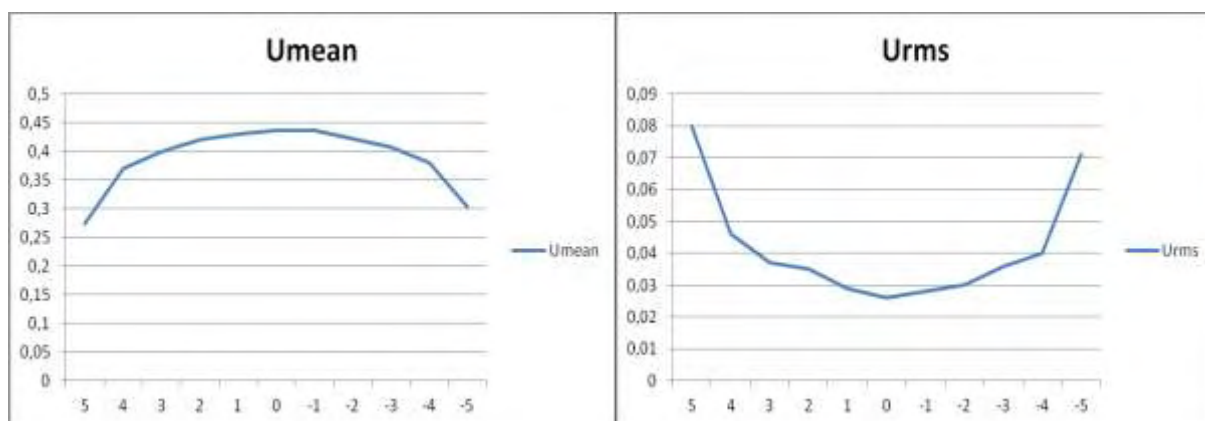
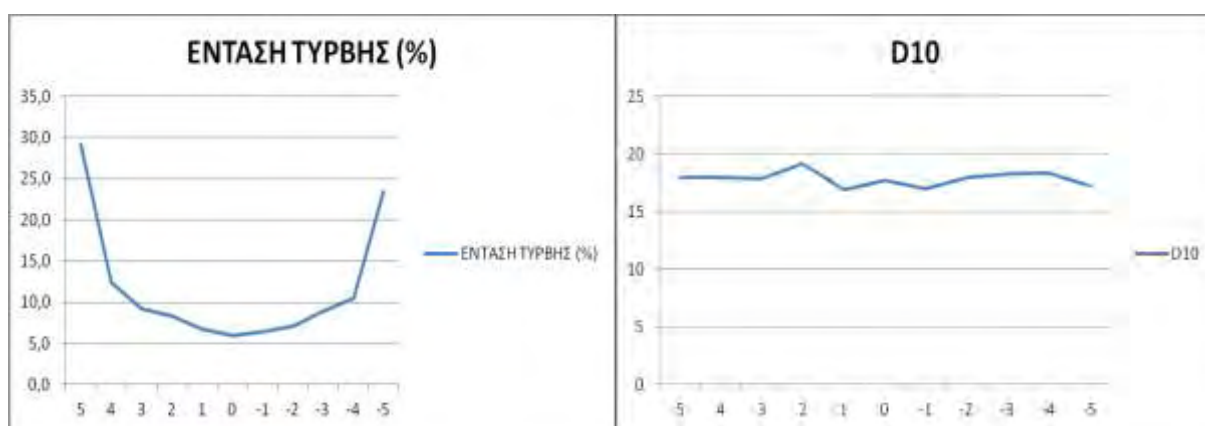
Σχήμα 5-111: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15$ mm

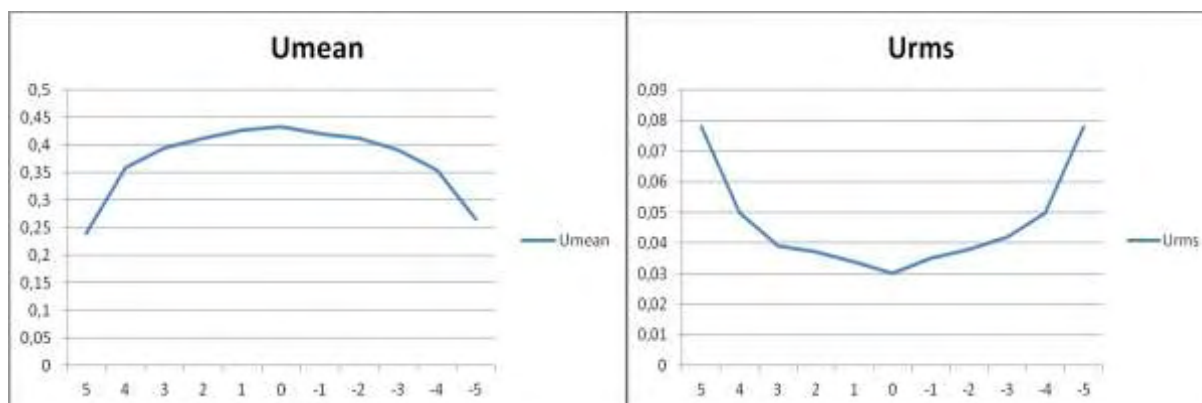


Σχήμα 5-112: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$

Σχήμα 5-113: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$

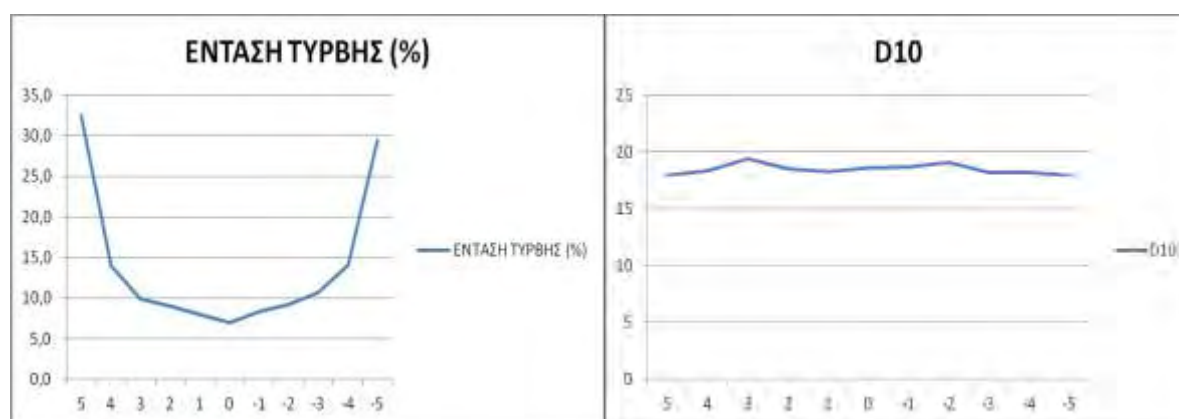
Σχήμα 5-114: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-115: Μέση διάμετρος για $Y=-15$ $Y=0mm$ Σχήμα 5-116: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-117: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$ Σχήμα 5-118: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-119: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15mm$



Σχήμα 5-120: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

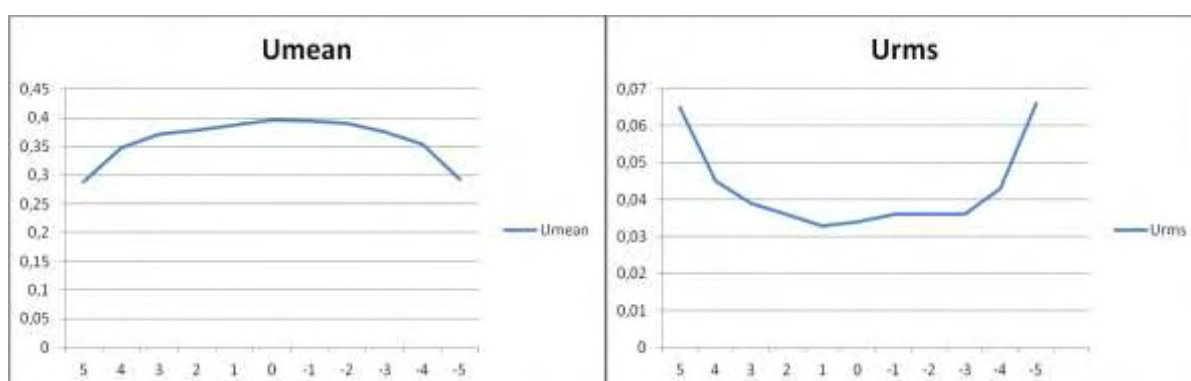
Σχήμα 5-121: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$



Σχήμα 5-122: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

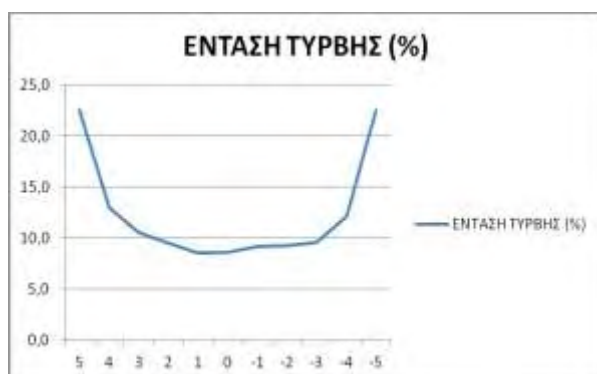
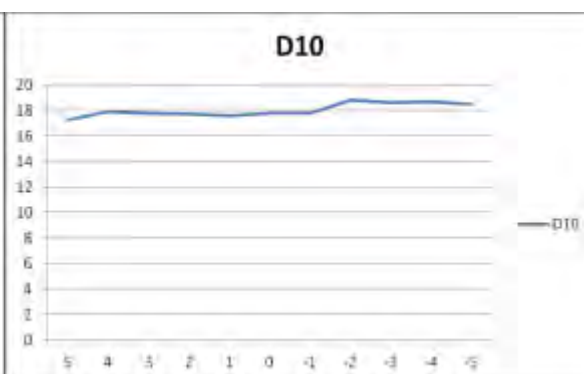
Σχήμα 5-123: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25mm$



Σχήμα 5-124: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

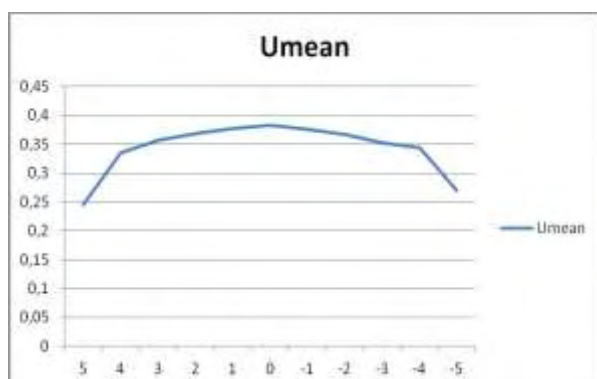
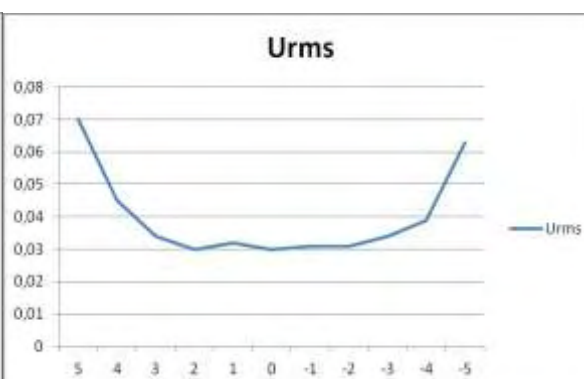
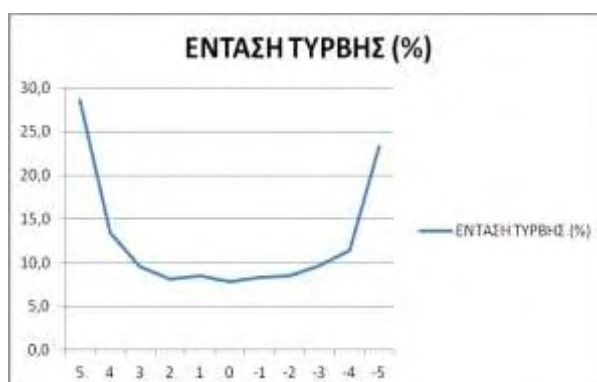
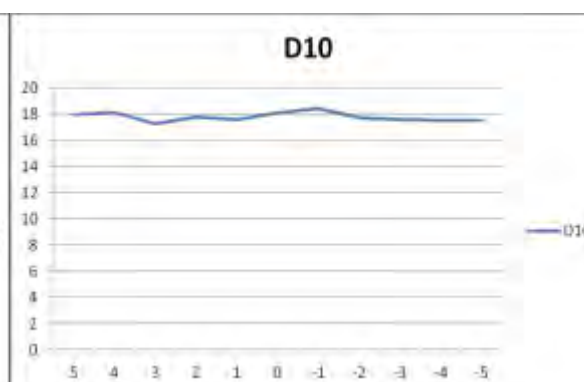
Σχήμα 5-125: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$

Σχήμα 5-126: Ένταση τύρβης για $Y=+25$ Σχήμα 5-127: Μέση διάμετρος για $Y=+25$

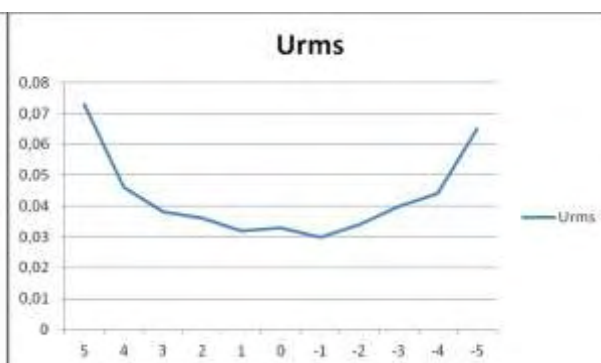
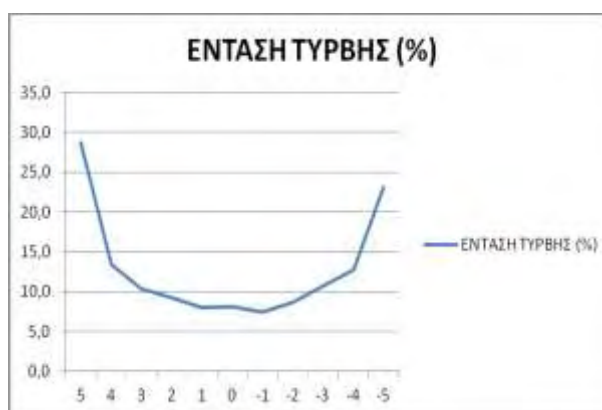
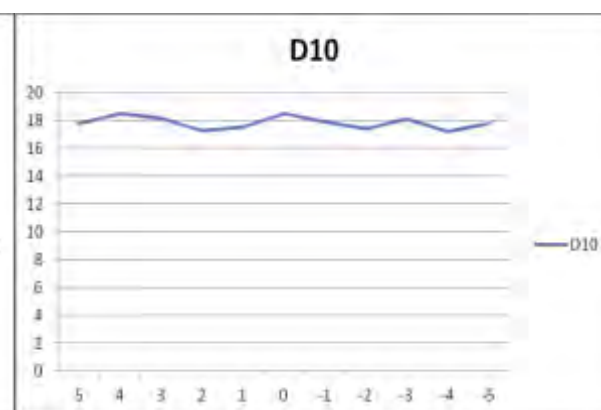
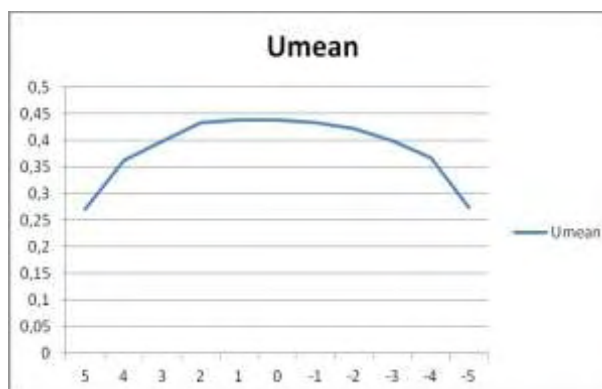
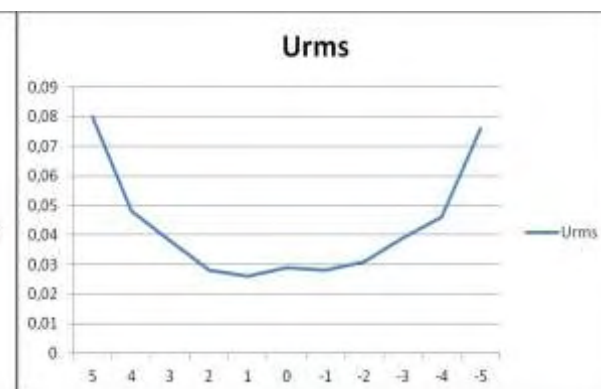
5.2.7 Σειρά Μετρήσεων - 7: Απιονισμένο Νερό Συνολικού Όγκου 64lt+41,1gr 50μm

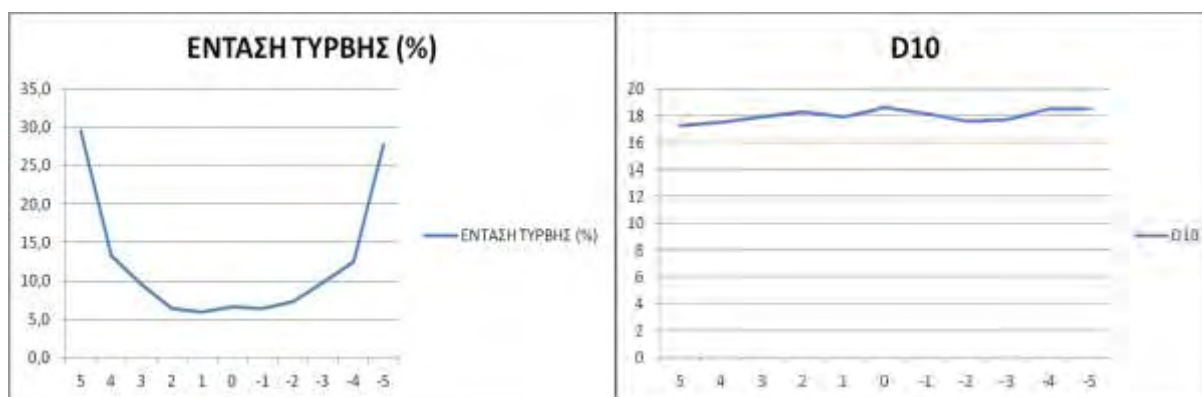
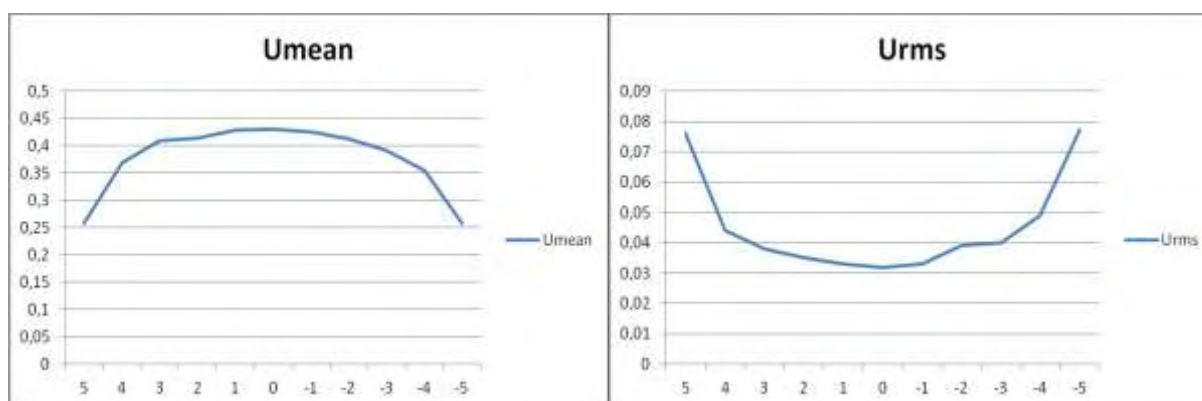
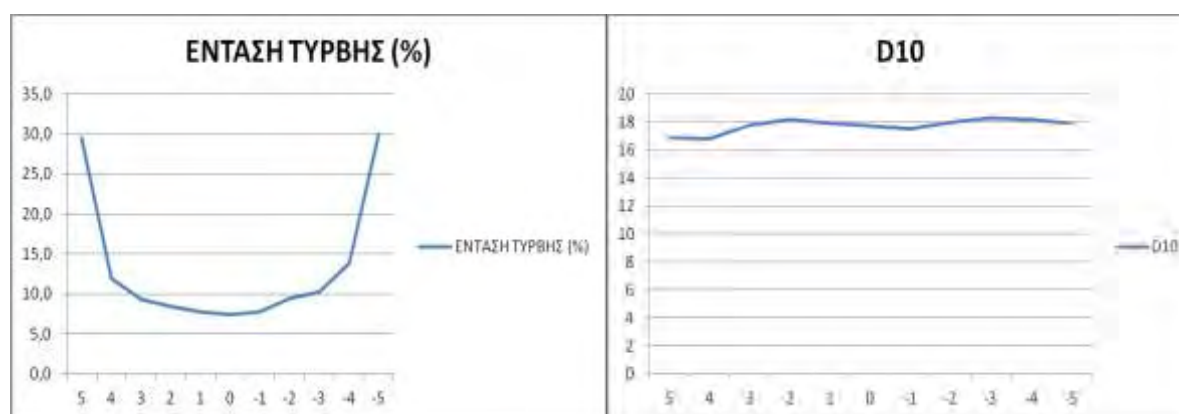
Στην έβδομη σειρά μετρήσεων, στα σχήματα 5-128 έως 5-147 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για διάλυμα: απιονισμένο νερό συνολικού όγκου 64lt+41,1gr 50μm, σε κάθε τομή του αγωγού ($U=0,438\text{m/s}$, $C_{psp50\mu\text{m}}(41,1\text{gr})=642,1875\text{gr/m}^3$, $N_p=25.652.054$, $Re=10512$).

$Y=-25\text{mm}$

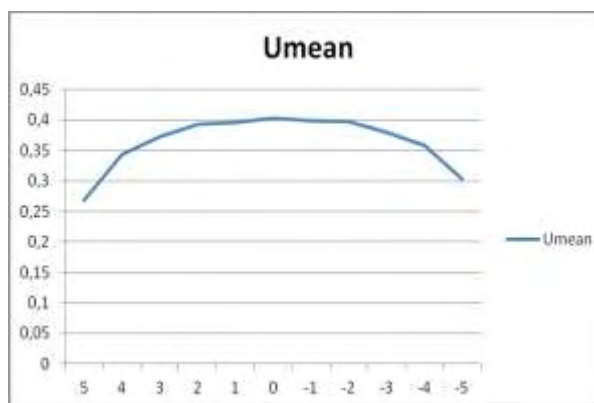
Σχήμα 5-128: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$ Σχήμα 5-129: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$ Σχήμα 5-130: Ένταση τύρβης για $Y=-25$ Σχήμα 5-131: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15\text{mm}$

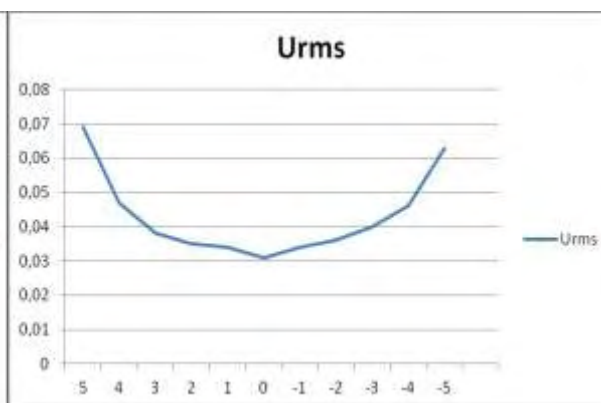
Σχήμα 5-132: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$ Σχήμα 5-133: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$ Σχήμα 5-134: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-135: Μέση διάμετρος για $Y=-15$ $Y=0$ Σχήμα 5-136: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-137: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$

Σχήμα 5-138: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-139: Μέση διάμετρος για $Y=0$ $Y=+15mm$ Σχήμα 5-140: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$ Σχήμα 5-141: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$ Σχήμα 5-142: Ένταση τύρβης για $Y=+15$ Σχήμα 5-143: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

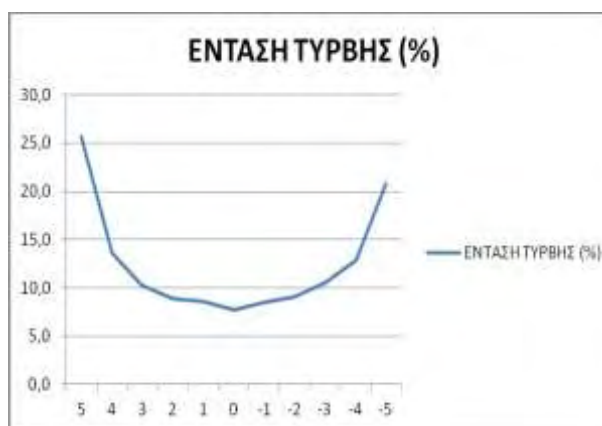
$Y=+25\text{ mm}$



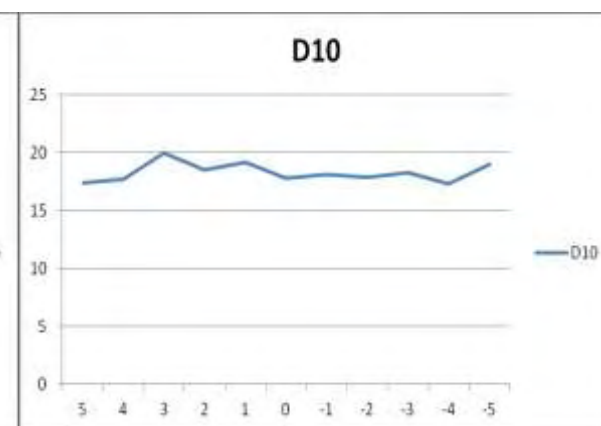
Σχήμα 5-144: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$



Σχήμα 5-145: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-146: Ένταση τύρβης για $Y=+25$



Σχήμα 5-147: Μέση διάμετρος για $Y=+25$

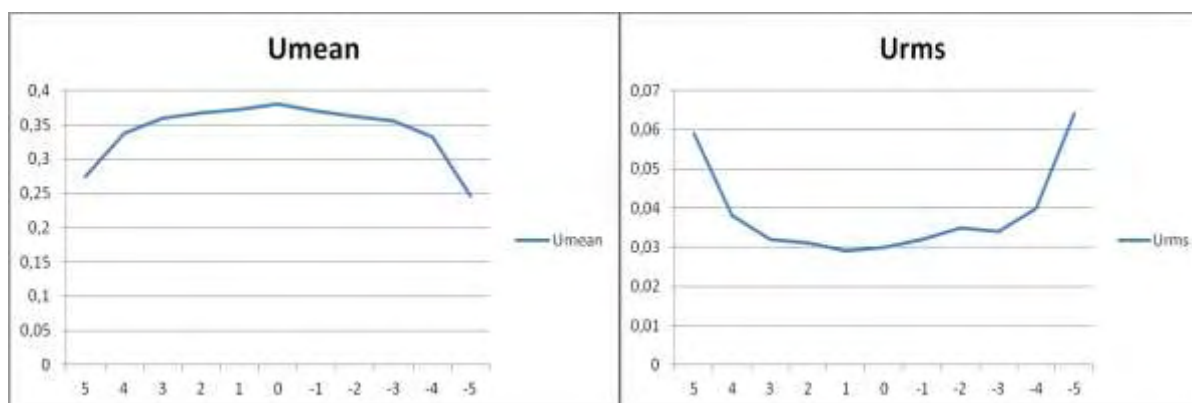
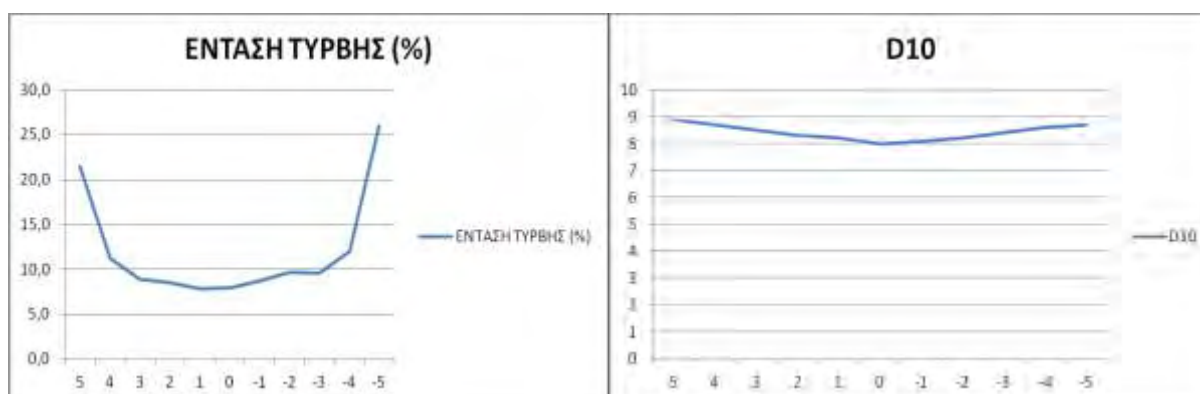
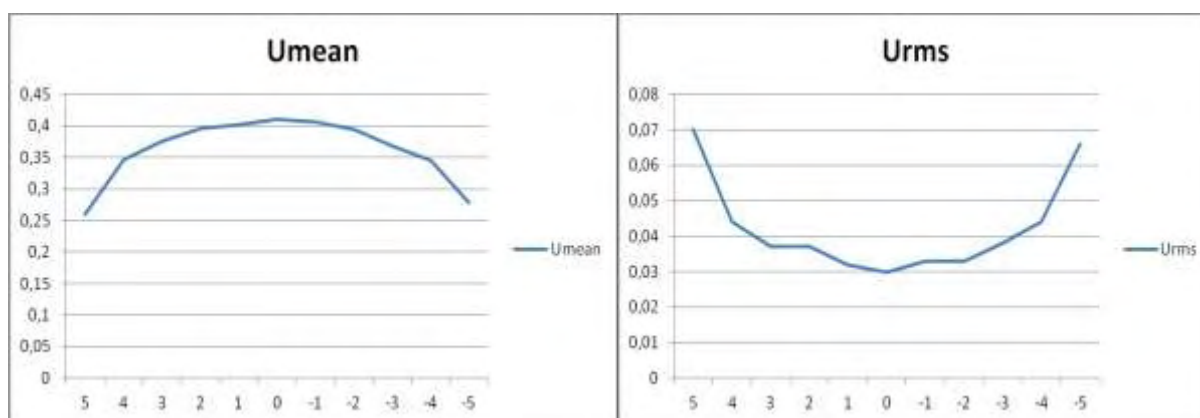
Παρατηρήσεις στις σειρές μετρήσεων 6 & 7:

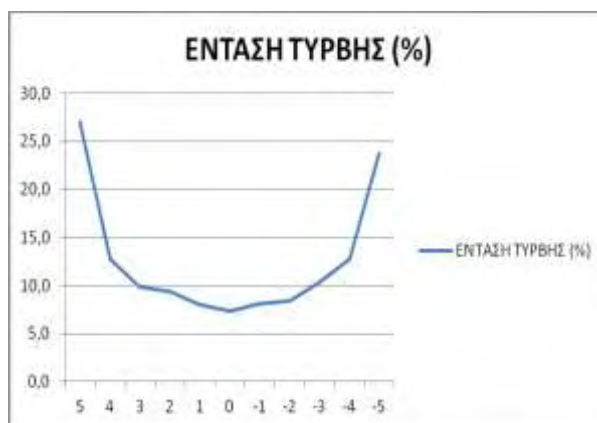
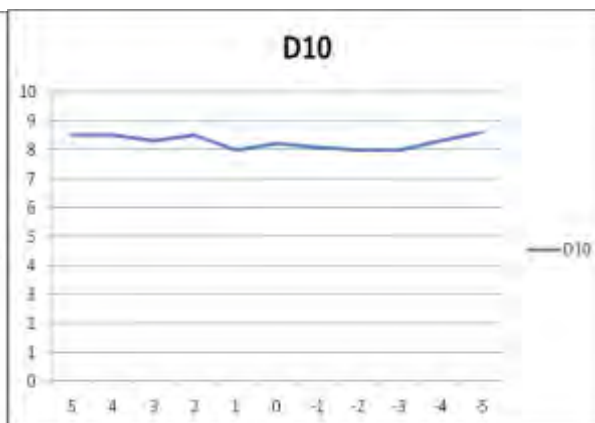
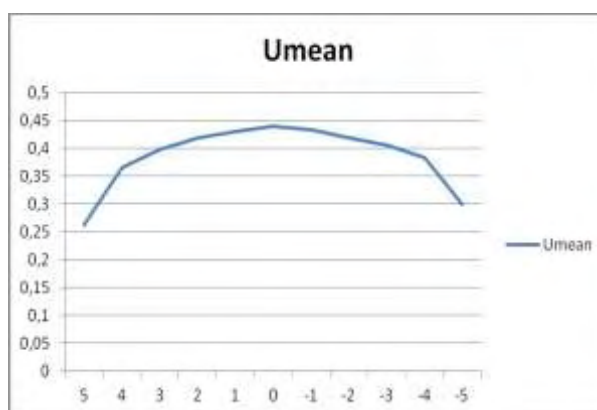
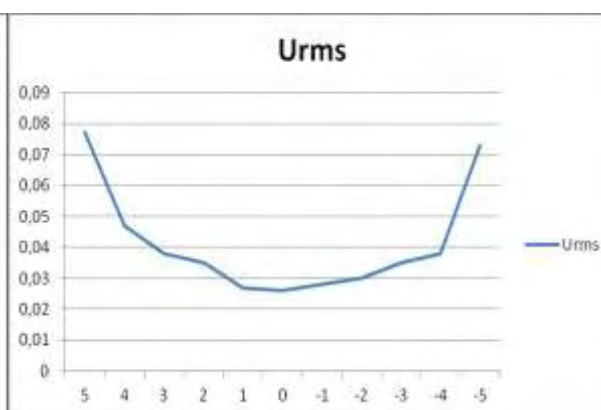
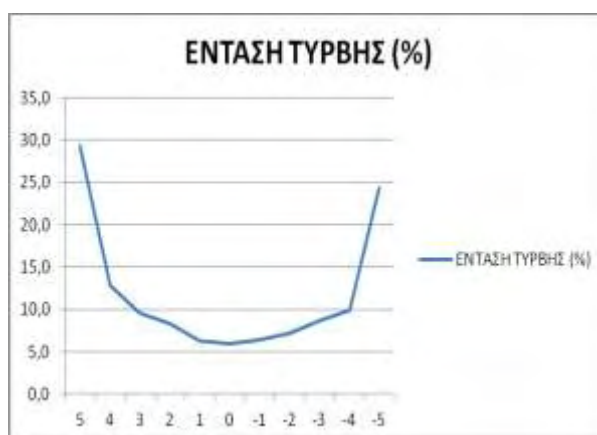
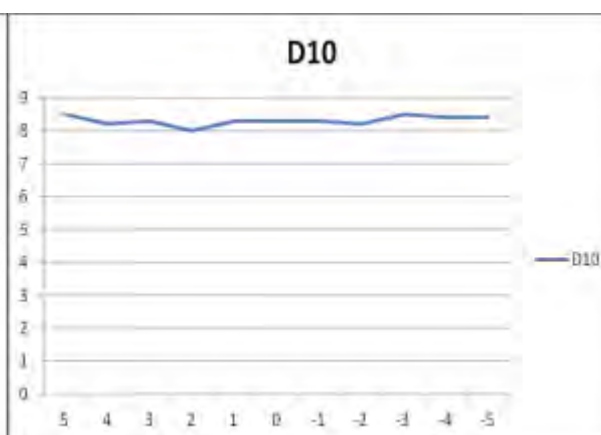
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μεγάλα σωματίδια δεν επηρεάζουν την ταχύτητα καθώς έχουμε βρει τιμές πολύ κοντά στο καθαρό νερό και στις μετρήσεις της Σειράς 2 (1gr, 5μm) και στις δύο περιπτώσεις συγκεντρώσεων. Αυτό είναι λογικό καθώς στις ποσότητες που μπορώ να διαλύσω στο νερό του συστήματος εμπεριέχονται πολύ λιγότερα σωματίδια σε σχέση με το διάλυμα των 5μm. Συνεπώς δεν επηρεάζουν την ροή.

5.2.8 Σειρά-8: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 20μm και 0,5gr 5μm Σωματίδια

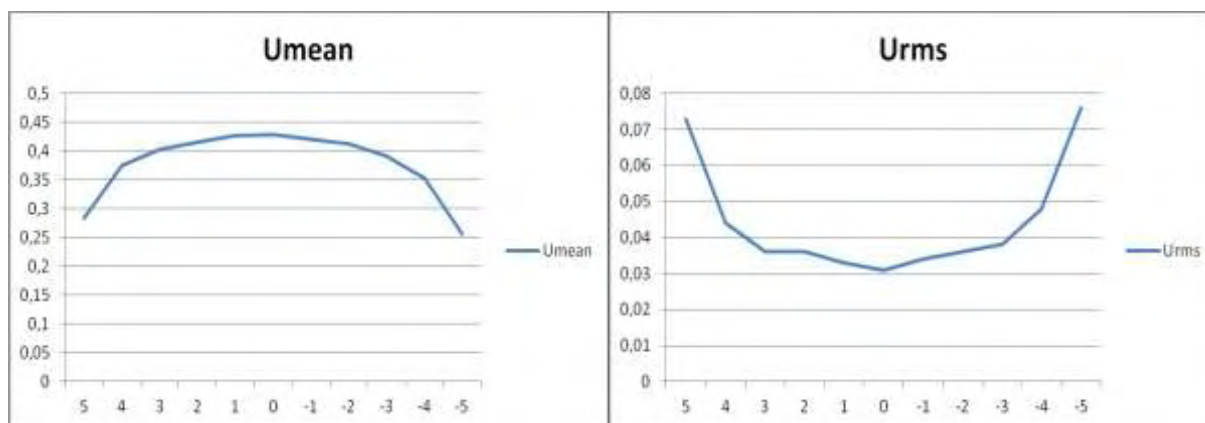
Για την όγδοη σειρά μετρήσεων, στα Σχήματα 5-148 έως 5-167 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για το διάλυμα: απιονισμένο νερό όγκου 64lt+1gr 20μm+0,5gr 5μm με $Re=10536$ ($U=0,439\text{m/s}$, $C_{\text{sp}}(5+20)\mu\text{m}(1,5\text{gr}) = 23,4375\text{ gr/m}^3$, $N_p = 321.820.928$).

$Y=-25\text{mm}$

Σχήμα 5-148: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$ Σχήμα 5-149: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$ Σχήμα 5-150: Ένταση τύρβης για $Y=-25$ Σχήμα 5-151: Μέση διάμετρος για $Y=-25$ $Y=-15mm$ Σχήμα 5-152: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$ Σχήμα 5-153: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$

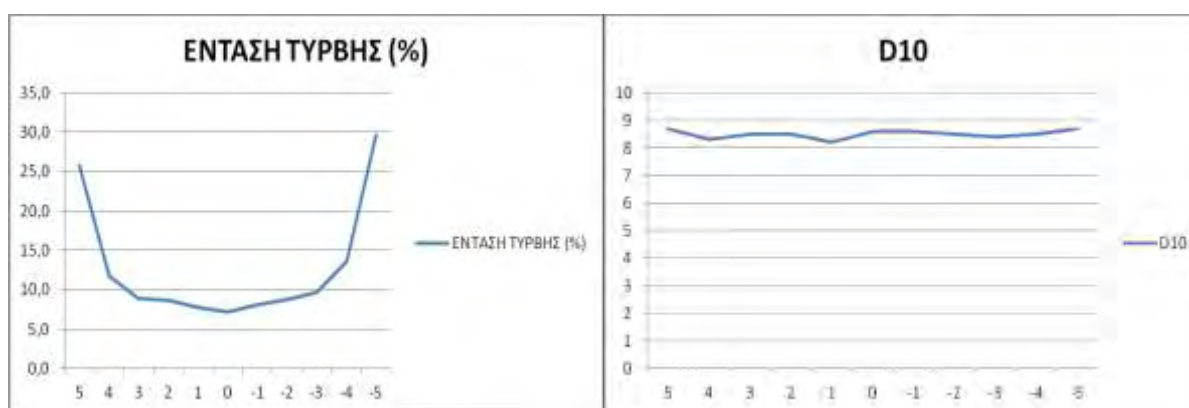
Σχήμα 5-154: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-155: Μέση διάμετρος για $Y=-15$ $Y=0 \text{ mm}$ Σχήμα 5-156: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-157: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$ Σχήμα 5-158: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-159: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15\text{ mm}$



Σχήμα 5-160: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

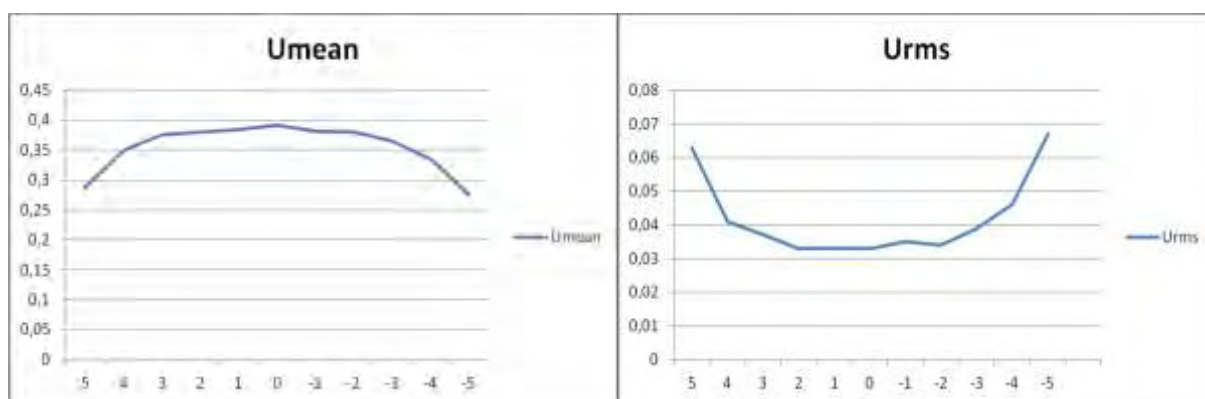
Σχήμα 5-161: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$



Σχήμα 5-162: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

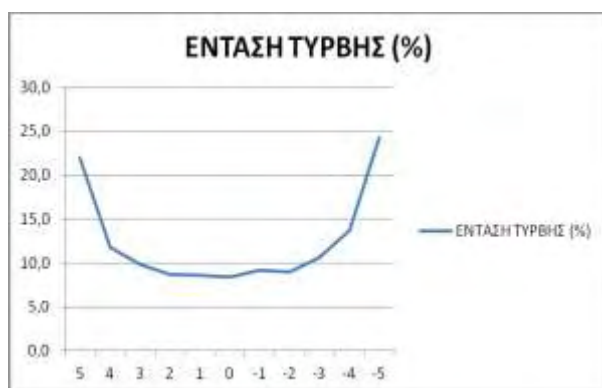
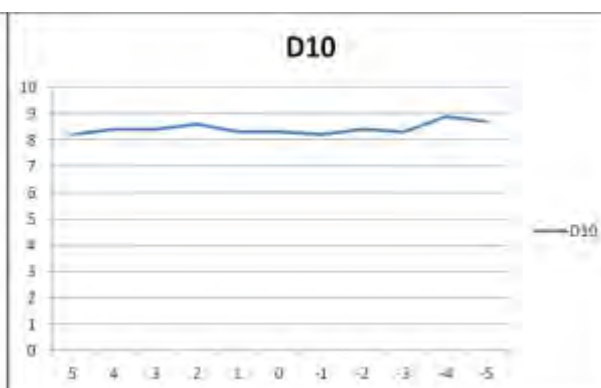
Σχήμα 5-163: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25\text{ mm}$



Σχήμα 5-164: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

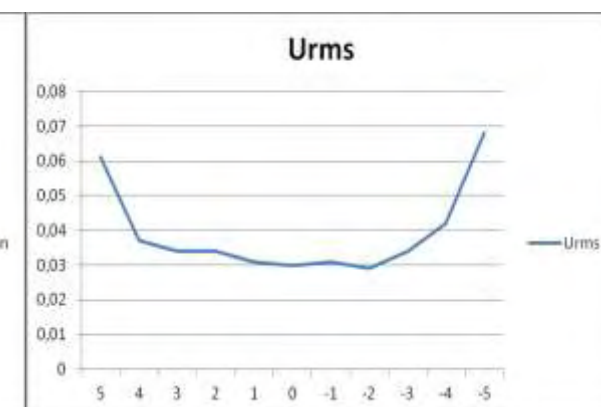
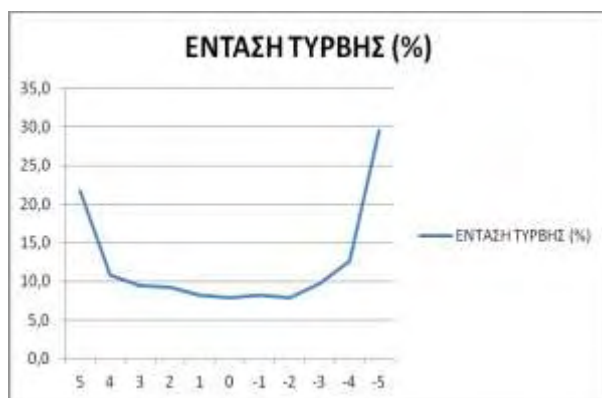
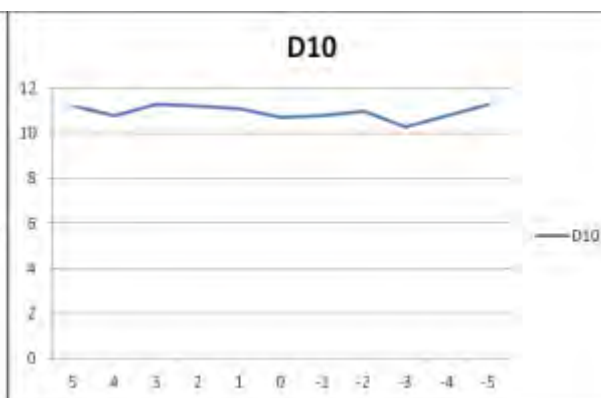
Σχήμα 5-165: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$

Σχήμα 5-166: Ένταση τύρβης για $Y=+25$ Σχήμα 5-167: Μέση διάμετρος για $Y=+25$

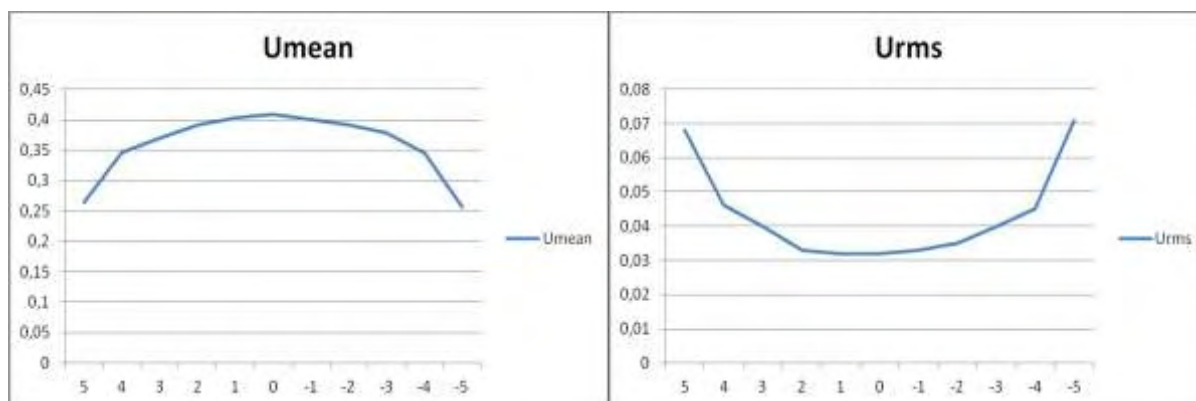
5.2.9 Σειρά-9: Απιονισμένο Νερό 64lt με 1gr 20 μ m, 0,5gr 5 μ m και 8gr 50 μ m Σωματίδια

Στην ένατη σειρά μετρήσεων, στα σχήματα 5-168 έως 5-187 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για το διάλυμα απιονισμένο νερό όγκου 64lt+1gr 20 μ m+0,5gr 5 μ m+8gr 50 μ m και με $Re=10512$ ($U=0,438$ m/s, $C_{psp}(5+20+50)\mu m(9,5gr) = 148,4375$ gr/m³, $Np= 326.814.028$)

$Y=-25$ mm

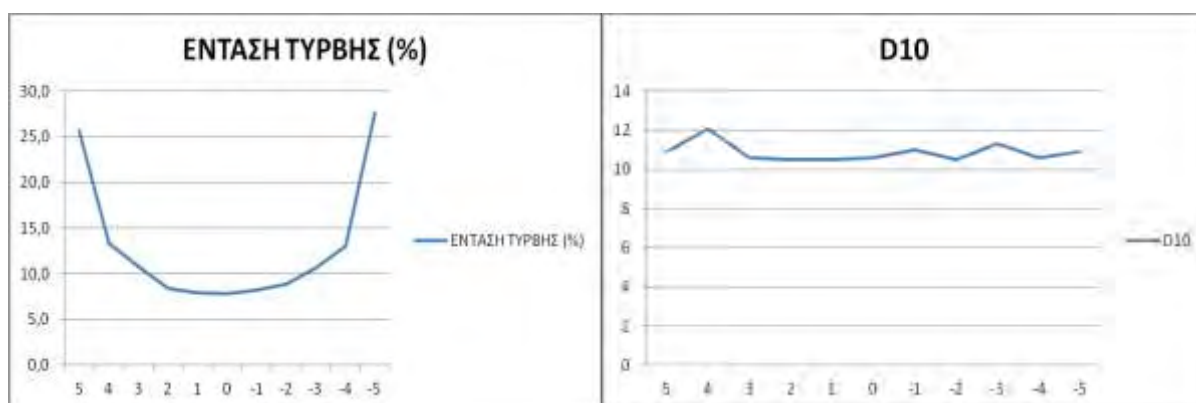
Σχήμα 5-168: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$ Σχήμα 5-169: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$ Σχήμα 5-170: Ένταση τύρβης για $Y=-25$ Σχήμα 5-171: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15\text{ mm}$



Σχήμα 5-172: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$

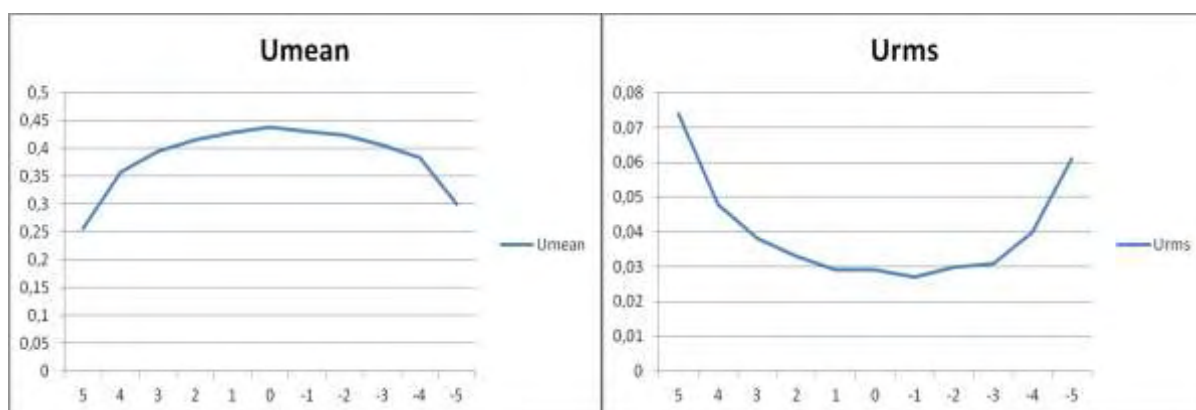
Σχήμα 5-173: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$



Σχήμα 5-174: Ένταση τύρβης για $Y=-15$

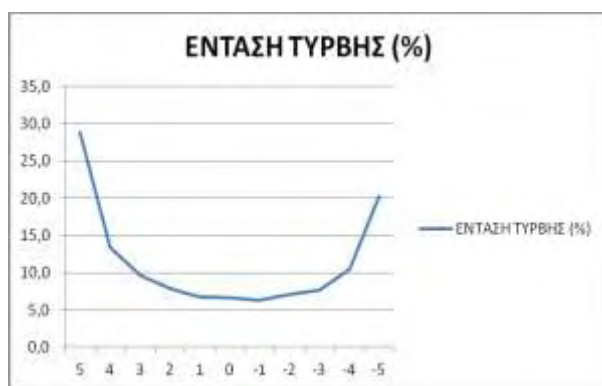
Σχήμα 5-175: Μέση διάμετρος για $Y=-15$

$Y=0\text{ mm}$

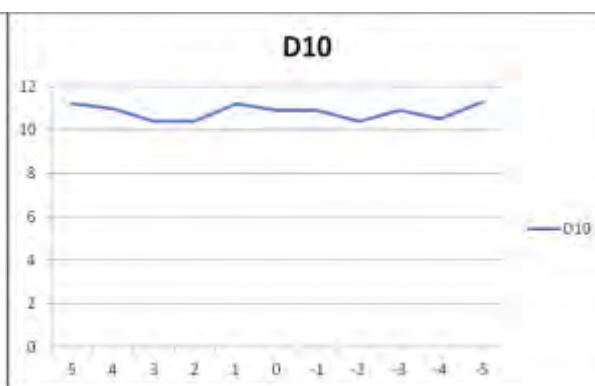


Σχήμα 5-176: Μέση ταχύτητα για $Y=0$

Σχήμα 5-177: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$

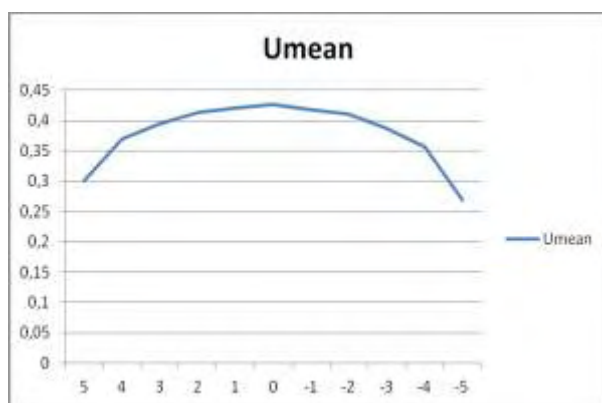


Σχήμα 5-178: Ένταση τύρβης για Y=0

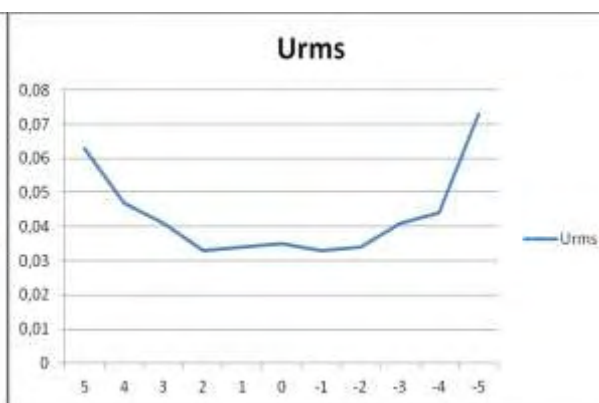


Σχήμα 5-179: Μέση διάμετρος για Y=0

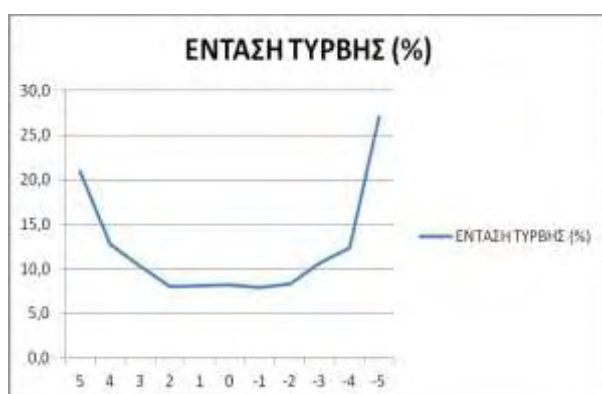
Y=+15 mm



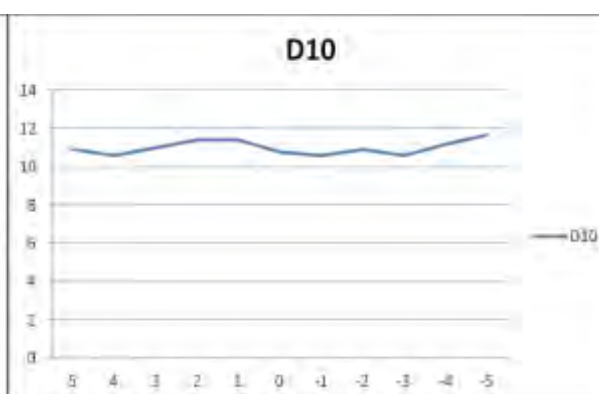
Σχήμα 5-180: Μέση ταχύτητα για Y=+15



Σχήμα 5-181: Διακύμανση ταχύτητας για Y=+15

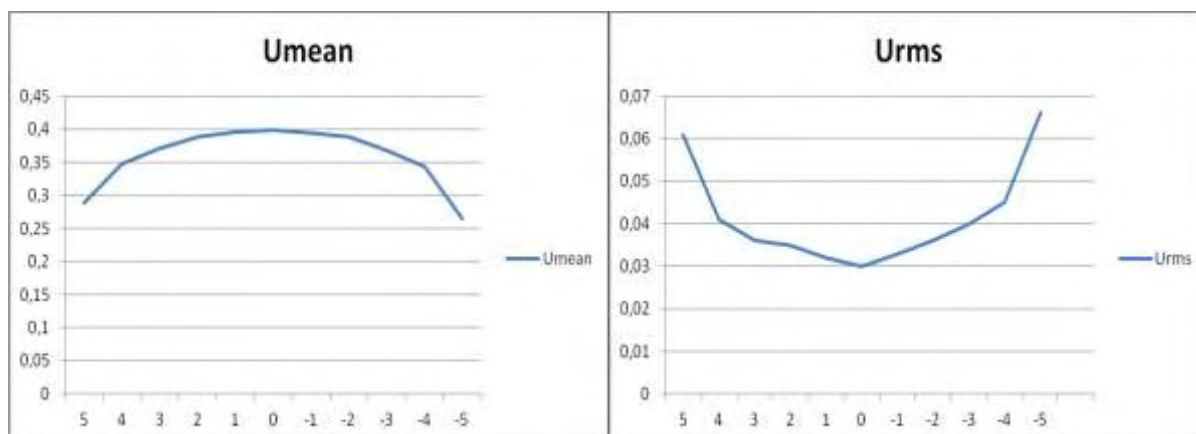


Σχήμα 5-182: Ένταση τύρβης για Y=+15



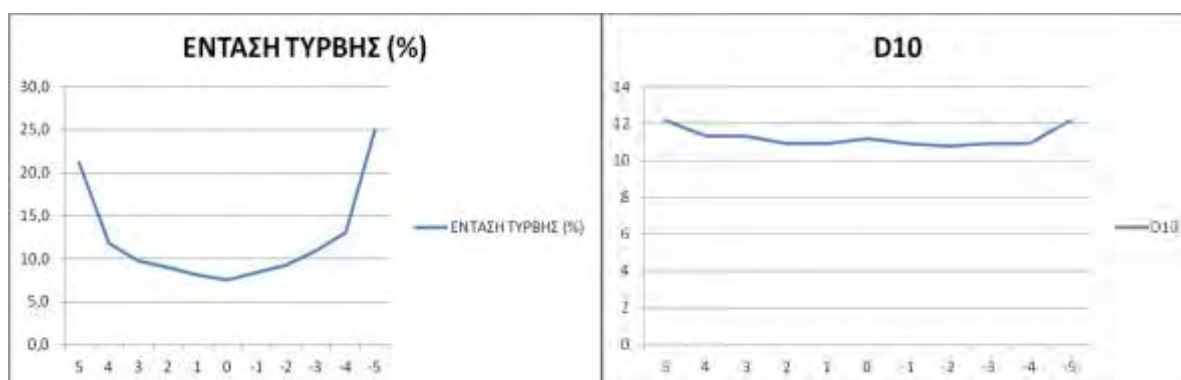
Σχήμα 5-183: Μέση διάμετρος για Y=+15

$Y=+25mm$



Σχήμα 5-184: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

Σχήμα 5-185: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-186: Ένταση τύρβης για $Y=+25$

Σχήμα 5-187: Μέση διάμετρος για $Y=+25$

Παρατηρήσεις στις σειρές μετρήσεων 8 & 9:

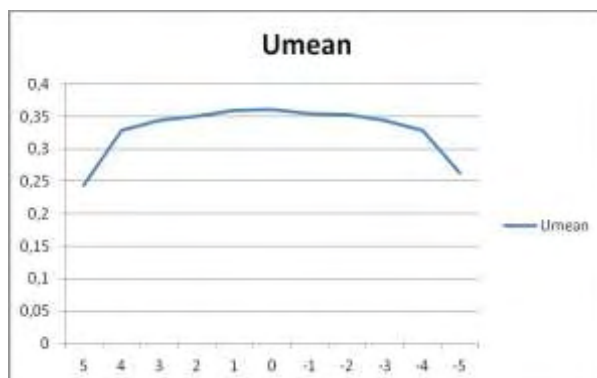
Οι μέσες διάμετροι ήταν της τάξης των 8μm περίπου για την σειρά μετρήσεων 8 και 11μm για την σειρά 9. Οι τιμές είναι απολύτως αποδεκτές. Για τις δύο συγκεντρώσεις που μετρήσαμε δε παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη διαφορά στη ταχύτητα. Υπάρχουν κάποιες διαφορές αναλόγως την τομή αλλά δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Το ενδιαφέρον είναι ότι σχεδόν σε κάθε τομή όσο πλησιάζουμε στο τοίχωμα φαίνεται να αυξάνεται η μέση διάμετρος. Ακόμη στη σειρά 9 η ροή είναι σχετικά ασύμμετρη (ως προς Y). Γενικότερα από όλα τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι σε κάθε φορά που έχουμε αυξημένες συγκεντρώσεις σωματιδίων (σ.σ. Στη σειρά 9 έχουμε επιπλέον τα 50άρια σε σχέση με την σειρά 8) η ροή προκύπτει ελαφρώς ασύμμετρη ως προς τη Y διεύθυνση.

5.2.10 Σειρά-10: Απιονισμένο Νερό Όγκου 64lt με 1gr 5μm και 20gr 50μm Σωματίδια

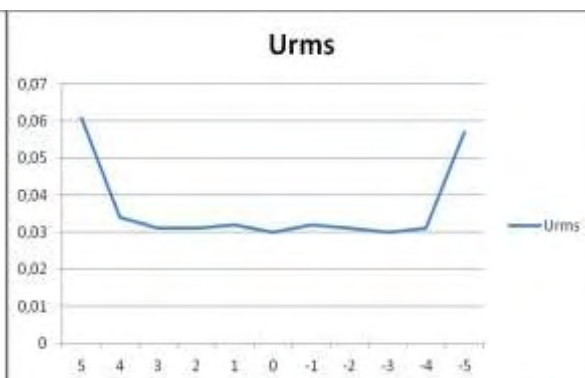
Στην δέκατη σειρά μετρήσεων, στα σχήματα 5-188 έως 5-207 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της

τύρβης για το διάλυμα: απιονισμένο νερό συνολικού όγκου 64lt+1gr 5 μ m+20gr 50 μ m , και με $Re=10392$ ($U=0,433$ m/s, $C_{psp}(5+50)\mu m(21gr) = 328,125$ gr/m³, $N_p= 636.620.310$).

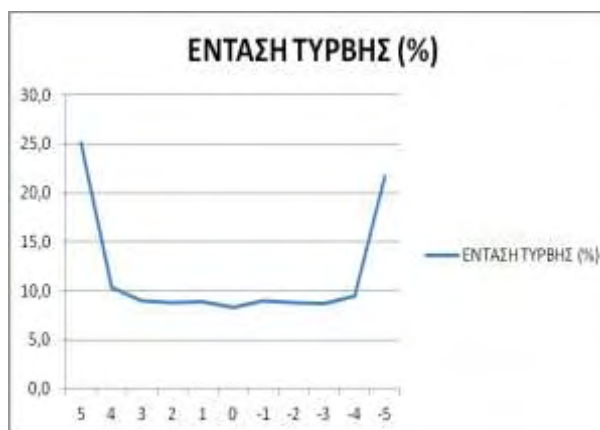
$Y=-25$ mm



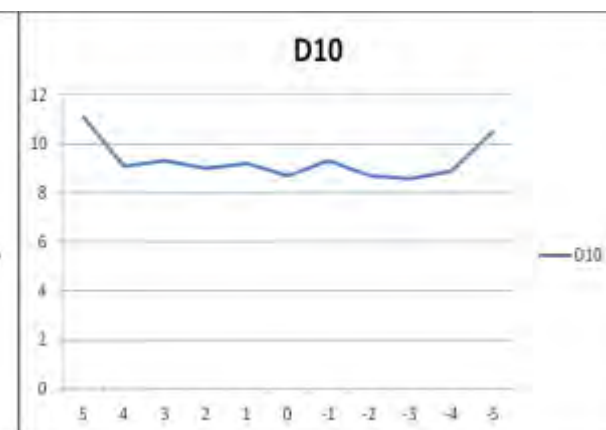
Σχήμα 5-188: Μέση ταχύτητα για Y=-25



Σχήμα 5-189: Διακύμανση ταχύτητας για Y=-25

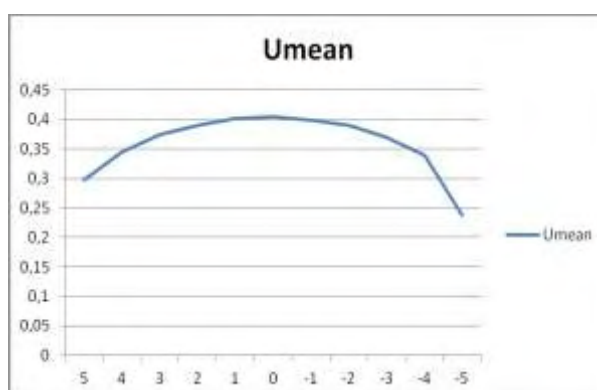


Σχήμα 5-190: Ένταση τύρβης για Y=-25

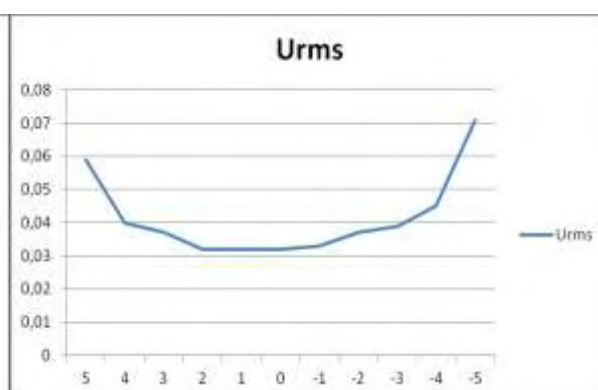


Σχήμα 5-191: Μέση διάμετρος για Y=-25

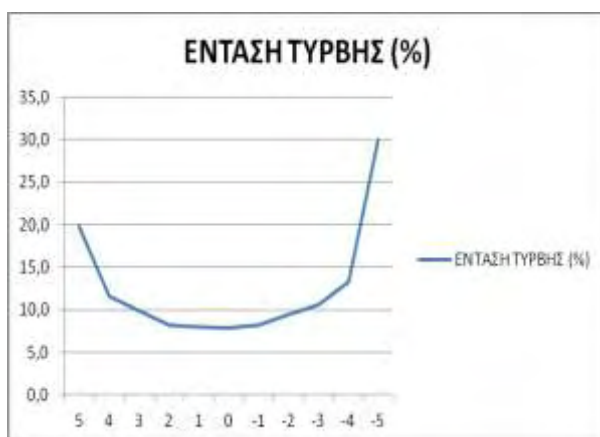
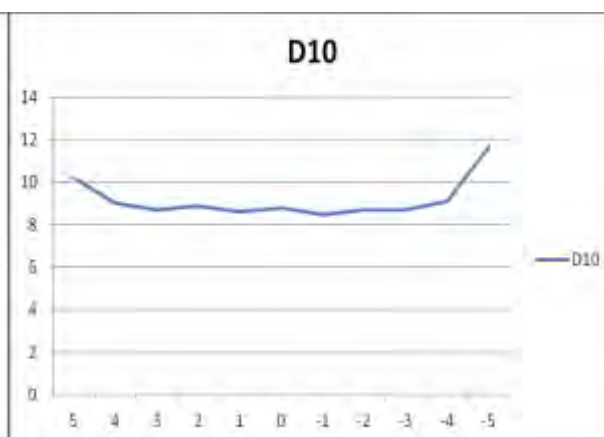
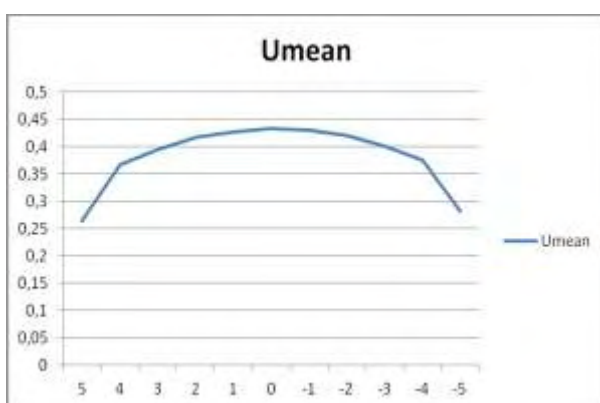
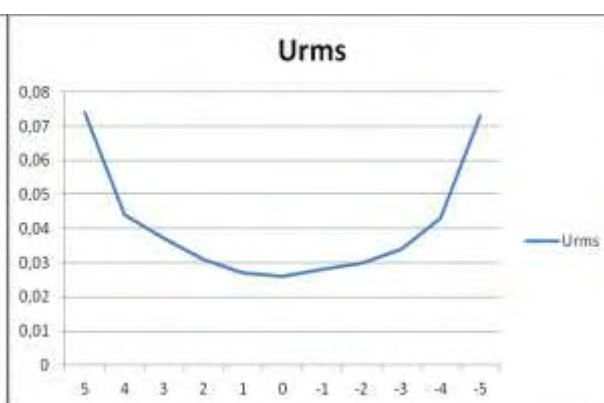
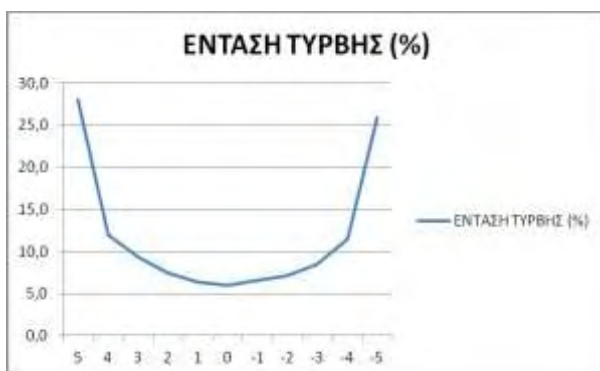
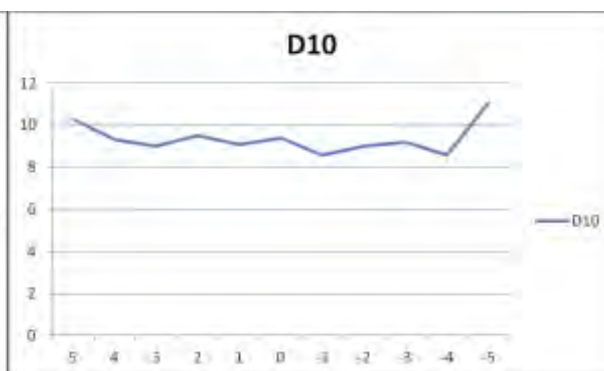
$Y=-15$ mm



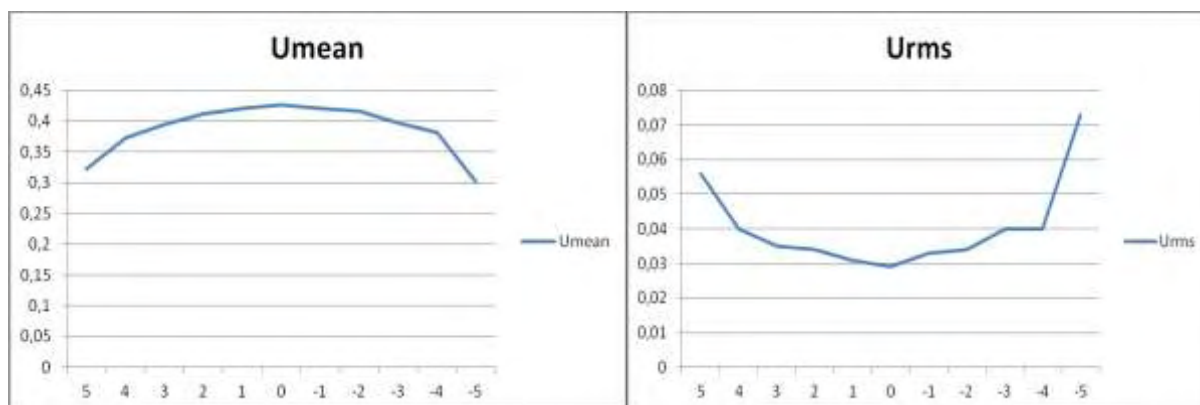
Σχήμα 5-192: Μέση ταχύτητα για Y=-15



Σχήμα 5-193: Διακύμανση ταχύτητας για Y=-15

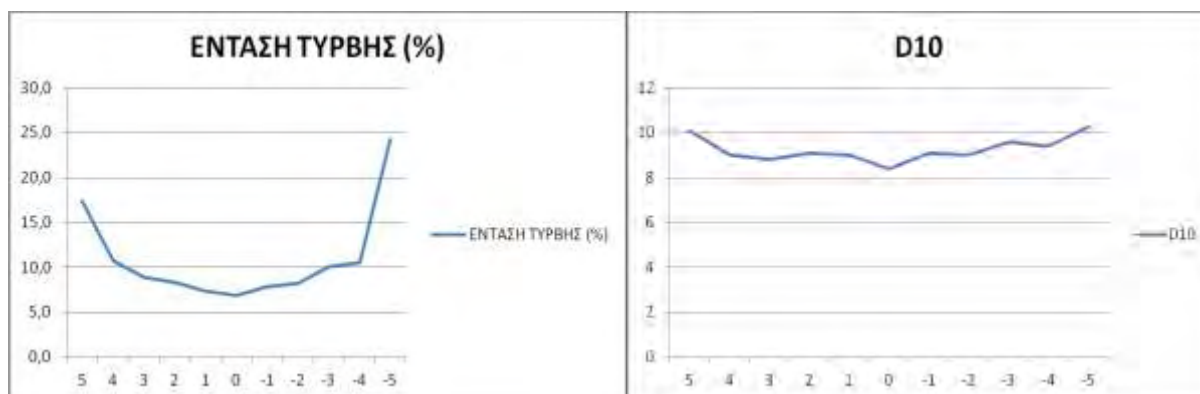
Σχήμα 5-194: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-195: Μέση διάμετρος για $Y=-15$ $Y=0$ mmΣχήμα 5-196: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-197: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$ Σχήμα 5-198: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-199: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15mm$



Σχήμα 5-200: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

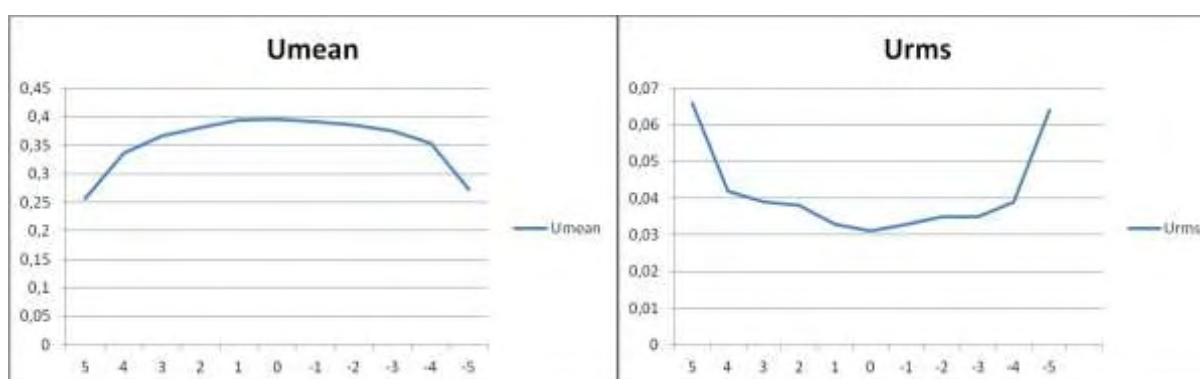
Σχήμα 5-201: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$



Σχήμα 5-202: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

Σχήμα 5-203: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25 mm$

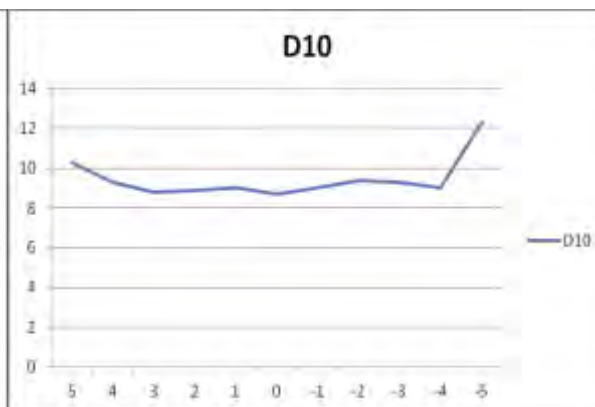


Σχήμα 5-204: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

Σχήμα 5-205: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-206: Ένταση τύρβης για Y=+25



Σχήμα 5-207: Μέση διάμετρος για Y=+25

Παρατηρήσεις στη σειράς μετρήσεων - 10:

Στη ροή με σωματίδια 5 και 50μm παρατηρήθηκαν ως προς την U_{mean} τα ακόλουθα:

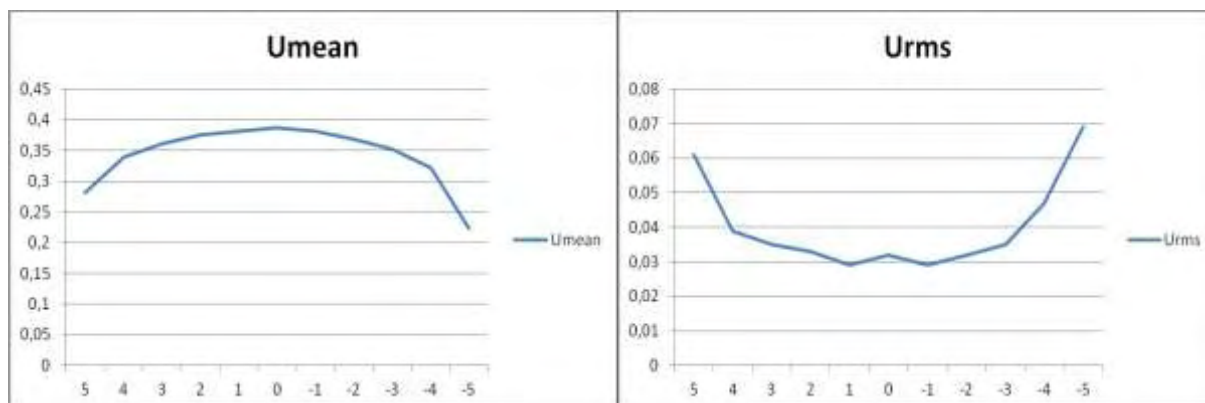
α) μείωση στο αριστερό μέρος του αγωγού στις τομές $Y=-25$ και $Y=-15$, β) η κάμψη σχεδόν μηδενίζεται στις τομές $Y=0$ και $Y=+15$, και γ) στο $Y=+25$ εμφανίζεται ελαφρώς ενισχυμένη. Οι μέσες διαμέτροι ήταν της τάξης των 9-10μm. Να τονιστεί εδώ ότι στις μετρήσεις των 5μm είχαμε (D-10) 5,5 περίπου. Ενώ για τα 50μm είχαμε μετρήσει περίπου 19-20, συνεπώς το (D-10) των 9-10 είναι απολύτως αποδεκτό. Επίσης να σημειωθεί ότι το πλήθος των σωματιδίων με διάμετρο 5μm κυριαρχεί έναντι των 50μm.

Ακόμη αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όσο απομακρυνόμαστε από το $Y=0$, $X=0$ είτε προς τα '+' είτε προς τα '-' (ανεξάρτητα αν κινούμαστε στο X ή Y) παρουσιάζεται άνοδος της μέσης διαμέτρου. Ιδιαίτερα για τις μετρήσεις κοντά στο τοίχωμα ($X=+5$). Φαίνεται ότι το πλήθος των μεγαλύτερων σωματιδίων είναι αυξημένο όσο πλησιάζουμε στα τοιχώματα του αγωγού ενώ αντίθετα το πλήθος των μικρότερων σωματιδίων μεγαλύτερο όσο πλησιάζουμε το κέντρο της ροής.

5.2.11 Σειρά-11: Απιονισμένο Νερό 64lt με 1gr 20μm και 10gr 50μm Σωματίδια

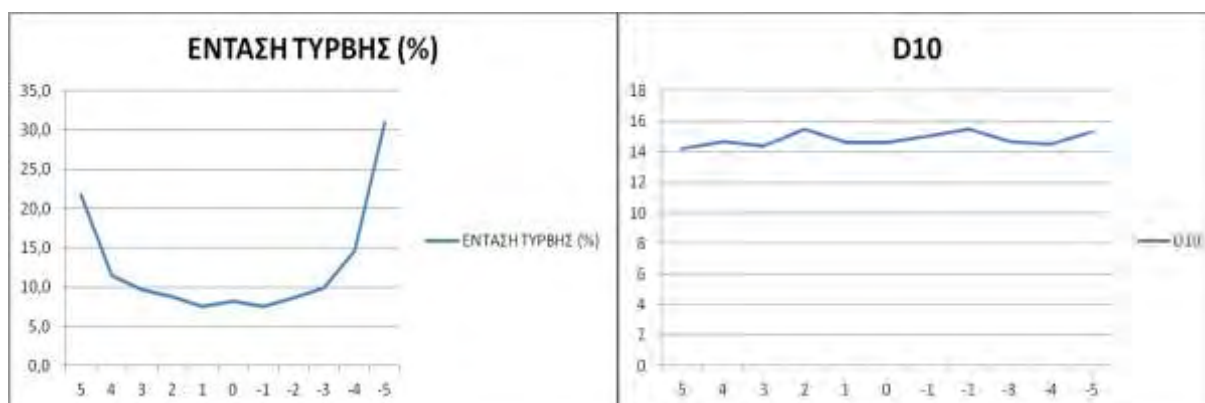
Στην ενδέκατη σειρά μετρήσεων, στα σχήματα 5-208 έως 5-227 παρουσιάζονται η μέση ταχύτητα και η διακύμανση αυτής, η μέση διάμετρος των σωματιδίων και η ένταση της τύρβης για το διάλυμα απιονισμένο νερό συνολικού όγκου 64lt+1gr 20μm+10gr 50μm με $Re=10584$ ($U=0,441m/s$, $C_{psp}(20+50)\mu m(11gr) = 171,875 gr/m^3$, $N_p= 16.617.662$).

$Y=-25mm$



Σχήμα 5-208: Μέση ταχύτητα για $Y=-25$

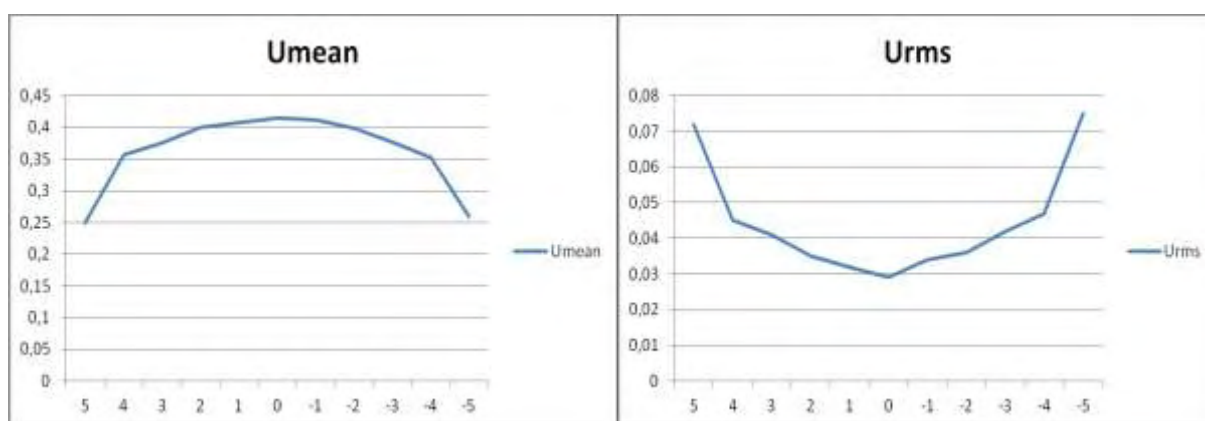
Σχήμα 5-209: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-25$



Σχήμα 5-210: Ένταση τύρβης για $Y=-25$

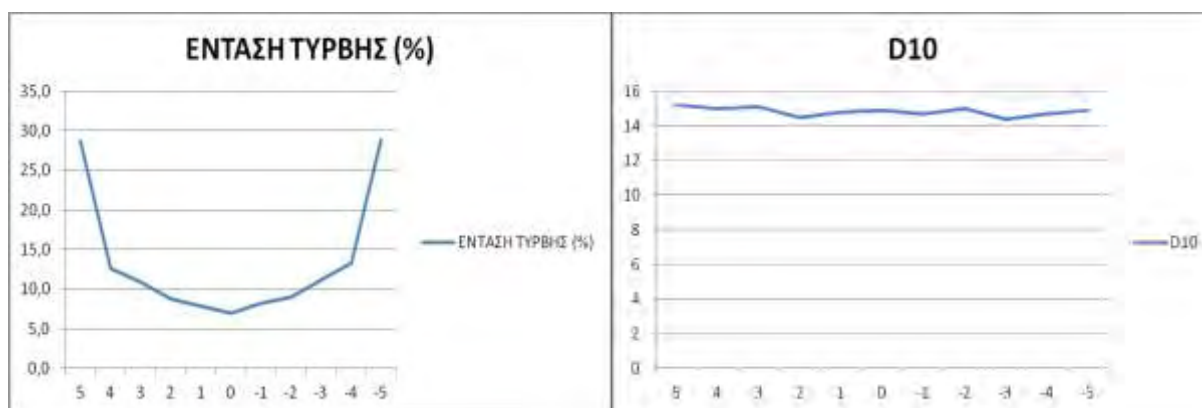
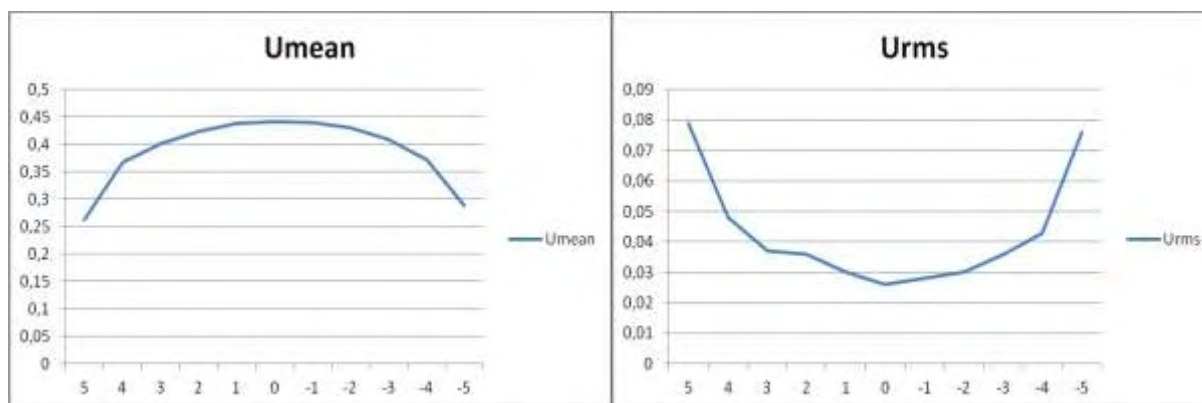
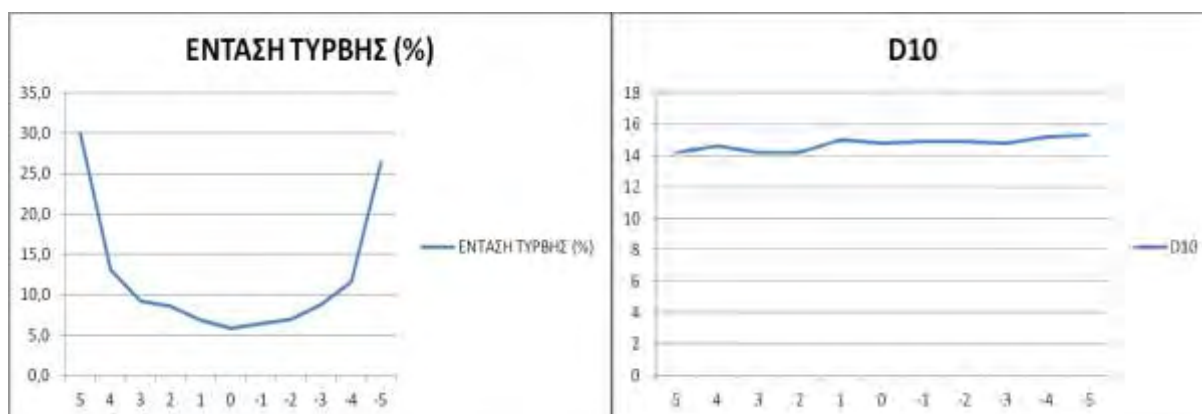
Σχήμα 5-211: Μέση διάμετρος για $Y=-25$

$Y=-15mm$

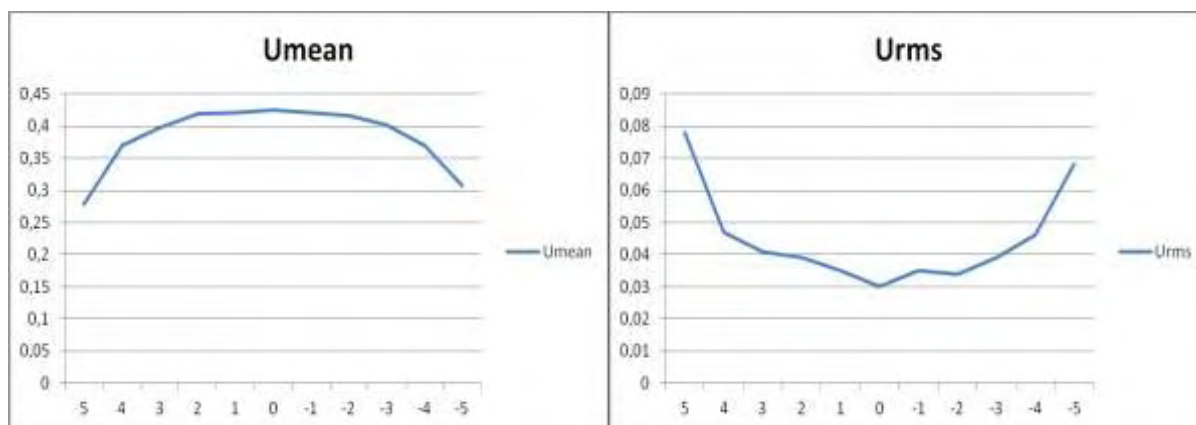


Σχήμα 5-212: Μέση ταχύτητα για $Y=-15$

Σχήμα 5-213: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=-15$

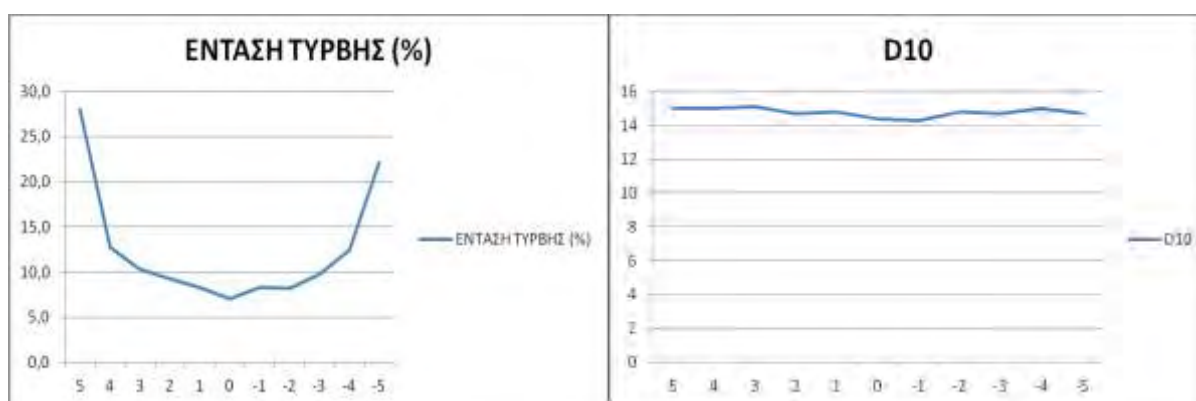
Σχήμα 5-214: Ένταση τύρβης για $Y=-15$ Σχήμα 5-215: Μέση διάμετρος σωματιδίων για $Y=-15$ $Y=0 \text{ mm}$ Σχήμα 5-216: Μέση ταχύτητα για $Y=0$ Σχήμα 5-217: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=0$ Σχήμα 5-218: Ένταση τύρβης για $Y=0$ Σχήμα 5-219: Μέση διάμετρος για $Y=0$

$Y=+15\text{ mm}$



Σχήμα 5-220: Μέση ταχύτητα για $Y=+15$

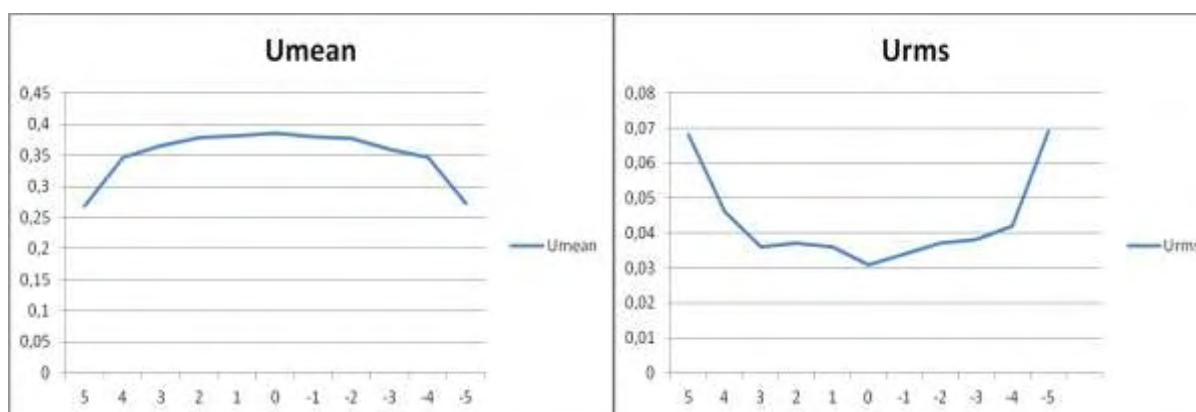
Σχήμα 5-221: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+15$



Σχήμα 5-222: Ένταση τύρβης για $Y=+15$

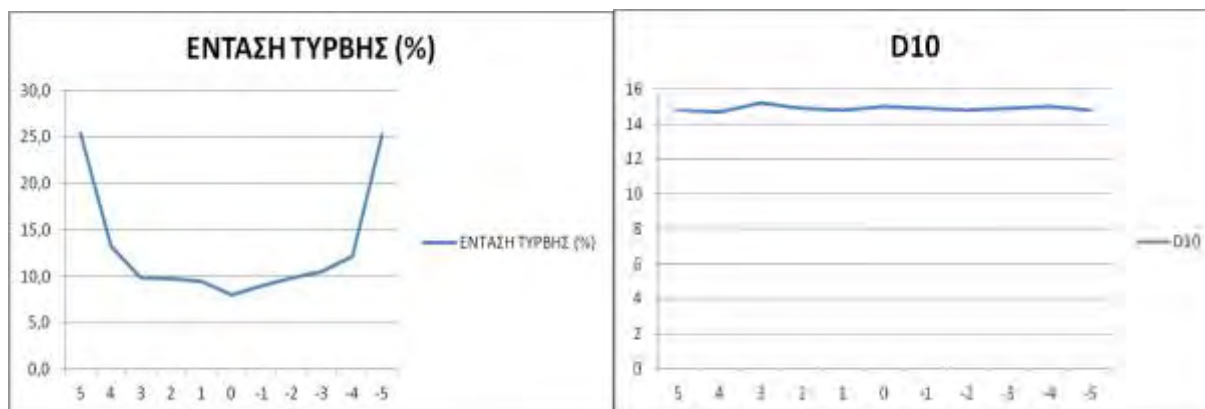
Σχήμα 5-223: Μέση διάμετρος για $Y=+15$

$Y=+25\text{ mm}$



Σχήμα 5-224: Μέση ταχύτητα για $Y=+25$

Σχήμα 5-225: Διακύμανση ταχύτητας για $Y=+25$



Σχήμα 5-226: Ένταση τύρβης για Y=+25

Σχήμα 5-227: Μέση διάμετρος για Y=+25

Παρατηρήσεις στη σειρά μετρήσεων - 11:

Η ταχύτητα του ρευστού κατά μήκος των τομών δεν φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερη διαφοροποίηση σε σχέση με τις ταχύτητες στη περίπτωση ροής νερού (Σειρά 1). Η διαφορά της $U_{1η \text{ σειρά}(0,0)}=0,438\text{m/s}$ από την $U_{12η \text{ σειρά}(0,0)}=0,441\text{m/s}$ είναι 0,68%. Επίσης στη συγκεκριμένη μέτρηση η ροή εμφανίζεται πλήρως συμμετρική (κατά μήκος των X και Y). Συνεπώς στη περίπτωση αυτή το συνολικό πλήθος των σωματιδίων ($N=16.617.662$) δεν είναι ικανό να επηρεάσει την κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος της διεύθυνσης του αγωγού.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική μελέτη που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην συνέχεια προτείνονται βελτιώσεις της πειραματικής διάταξης και ιδέες για μελλοντική έρευνα.

6.1 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα ερευνητική εργασία συνοψίζονται ως εξής:

1. Πιστοποιήθηκε το σύστημα του συστήματος PDPA έτσι ώστε οι μετρήσεις να έχουν ένα υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας.
2. Εξελέχθηκε περαιτέρω η παρούσα πειραματική διάταξη με την βελτίωση στήριξης του συστήματος PDPA και την καλύτερη οριζοντίωση των δύο τμημάτων του (πομπός Laser, αποδέκτης σήματος). Με τη κατασκευή νέου αγωγού ορθογωνικής διατομής μπορέσαμε και μετρήσαμε με ακρίβεια κοντά στα τοιχώματα και εξαλείψαμε πλήρως την ύπαρξη φυσαλίδων στο κύκλωμα.
3. Για τις παρούσες συγκεντρώσεις, τα σωματίδια των 5μm παρουσιάζουν σχεδόν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της ροής, ακολουθώντας την σε μεγάλο βαθμό, καθώς οι ταχύτητες και η διακύμανσή τους δε διαφέρουν μεταξύ τους. Λόγω του μικρού μεγέθους και χρόνου απόκρισης, η αδράνειά τους είναι πολύ μικρή και κατά συνέπεια αντιδρούν σε ένα μεγάλο εύρος των κλιμάκων της ροής. Επιπλέον, η οριακή τους ταχύτητα είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα η βαρύτητα να μην επιδρά σημαντικά στην κίνησή τους μέσα στο ρευστό.
4. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και για την ροή με τα σωματίδια των 20μm.
5. Τα σωματίδια των 50μm επηρεάζουν σημαντικά τη ροή, ενώ η διακύμανση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη. Σχεδόν σε όλα τα πειράματα με τα σωματίδια των 50μm η ροή προκύπτει ασύμμετρη. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου τους, έχουν εξίσου μεγάλους χρόνους απόκρισης, και η αδράνειά τους ενεργεί ως φίλτρο των διαταραχών της ροής. Κατά συνέπεια λαμβάνουν μικρότερη ορμή από τη συνεχή φάση, και η κίνησή τους είναι ανεξάρτητη σε μεγάλο βαθμό από αυτή.
6. Τα σωματίδια των 50μm παρουσιάζουν μία προτίμηση να συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες περιοχές της ροής, όπου η στιγμιαία ταχύτητα είναι μικρότερη από τη μέση χρονική τιμή της ροής (preferential concentration), με αποτέλεσμα να αποκτούν μικρότερες ταχύτητες.

7. Με την αύξηση της συγκέντρωσης δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αλλαγές στην κατανομή της ταχύτητας των σωματιδίων και της διακύμανσής τους, αλλά οι τάσεις που αναφέρθηκαν γίνονται περισσότερο έντονες.

8. Η επίδραση των συγκρούσεων, δεν μπορεί να διευκρινιστεί πλήρως με τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας. Πιθανόν οι συγκρούσεις να οδηγούν σε περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στον αγωγό, αναγκάζοντας ενδεχομένως τα σωματίδια να κινηθούν προς τα τοιχώματα, αυξάνοντας σημαντικά τα επίπεδα διακύμανσης της ταχύτητας.

9. Στις συνδυασμένες μετρήσεις σωματιδίων, παρατηρείται αύξηση της μέσης διαμέτρου όσο πλησιάζουμε στα τοιχώματα.

10. Επιθυμητή θα ήταν η προσθήκη ενός υδροκυκλώνα ώστε να γίνεται με άμεσο και εύκολο τρόπο η απομάκρυνση των σωματιδίων από τη ροή.

6.2 Προτάσεις

Στην ενότητα αυτή παραθέτουμε κάποιες προτάσεις που αφορούν την βελτίωση της πειραματικής διάταξης καθώς και κάποιες σκέψεις για μελλοντική έρευνα.

1. Το τραπέζι κίνησης (X-Y-Z) στο οποίο εδράζονται τα δύο μέρη του PDA θα ήταν σκόπιμο να αλλαχθεί με ένα καλύτερης ακρίβειας και μεγαλύτερης σταθερότητας κατά την κίνηση του.

2. Προτείνεται η αγορά και χρήση μίας πνευματικής αντλίας, η οποία δε καταστρέφει τα σωματίδια που κυκλοφορούν στη ροή.

3. Απαραίτητη αλλαγή θεωρείται η τοποθέτηση του πάνω δοχείου του νερού στην ίδια ευθεία με τον κατακόρυφο αγωγό ούτως ώστε να μην εισέρχεται η ροή με τα σωματίδια ανομοιόμορφα σε αυτόν.

4. Η ενσωμάτωση θερμομέτρου στο σύστημα ροής (κάτω δοχείο) για τη μέτρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, ώστε να μελετηθεί πως η αλλαγή της επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

5. Προτείνεται να γίνει αλλαγή του ηλεκτρονικού υπολογιστή με έναν καινούργιο σύγχρονης τεχνολογίας με δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων.

6. Κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή νέου πλαισίου στήριξης των δοχείων και του αγωγού μικρότερου μεγέθους και η επινόηση ενός τρόπου ευθυγράμμισης του πλαισίου με το τραπέζι κίνησης (X,Y,Z).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βλάχος, Ν., 'Οπτικοί αισθητήρες Laser για μετρήσεις ροών', Αισθητήρες '93, Ημερίδα TEE, Αθήνα 1993
2. Ζ. Δουλγεράκης, 'Μελέτη της επίδρασης του αριθμού Reynolds στην τυρβώδη διφασική ροή νερού-σωματιδίων σε κατακόρυφο σωλήνα με τη χρήση ανεμομετρίας Phase Doppler', Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο P&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2006
3. Π. Κουμουνδούρος, 'Πειραματική μελέτη της κατανομής σωματιδίων σε τυρβώδη διφασική ροή νερού-σωματιδίων με ανεμομετρία Phase Doppler', Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο P&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2004
4. Μ. Παντζαλής, 'Μελέτη Συμπαγών Εναλλακτών Θερμότητας', Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009
5. Α.Θ. Παπαιωάννου, 'Μηχανική των Ρευστών', Εκδόσεις Κοράλι, 1996
6. Β. Σαμαράς, 'Διερεύνηση Ροϊκού Πεδίου Τριφασικής Ροής Αερίων-Υγρών-Στερεών σε υδροπνευματικές Αντλίες', Εργ. Μηχανικής Ρευστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005
7. Θ. Σαραλιώτης, 'Σύστημα Μέτρησης Ταχυτήτων Ροής', Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο P&Σ, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2000
8. Aerometrics Inc., Phase Doppler Particle Analyzer, 'Operations Manual', USA, 1987
9. Ahmadi G. & Q. Chen, 'Dispersion and deposition of particles in a turbulent pipe flow with sudden expansion' Journal of Aerosol Science, Vol. 29, pp. 1097-1116, 1998
10. Aisa L., Garcia J.A., Cerecedo L.M., Garcia Palacin I. & E. Calvo, 'Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet', International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, pp. 301-324, 2002
11. Caraman N., Borée J. & O. Simonin, 'Effect of collisions on the dispersed phase fluctuation in a dilute tube flow: Experimental and theoretical analysis', Physics of Fluids, Vol.15.
12. Cen K., Qiu K., Liang S., Yan J., Shen Y., Pan G., Li X. & M. Ni, 'To characterize two-phase flows around a finned tube using the three-dimensional particle dynamics analyzer (PDA) and numerical calculation', Powder Technology, Vol. 95, pp. 129-135, 1998
13. Chiang T.P., Sheu T.W.H. & S.K. Wang, 'Side wall effects on the structure of laminar flow over a plane-symmetric sudden expansion', Computers and Fluids, Vol. 29, pp. 467-492, 2000

14. Choi Y.D. & W.K. Chung, 'Analysis of turbulent gas-solid suspension flow in a pipe', ASME Journal of Fluids Engng., Vol. 105, pp. 329-334, 1983
15. Cole D.R. & Glauser M.N., 'Flying hot-wire measurements in an axisymmetric sudden expansion', Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 18, pp 150-167, 1998
16. Dai G.Q., Chen W.M., Li J.M. & L.Y. Chu, 'Experimental study of solid-liquid two-phase flow in a hydrocyclone', Journal of Chemical Engng., Vol. 74, pp. 211-216, 1999
17. Fan J., Shi J., Zheng Y. & K. Cen, 'Particle-turbulence interactions in the turbulent boundary layer for cross flow over a tube', Journal of Chemical Engng., Vol. 66, pp. 201-206, 1997
18. Founti M. & A Klipfel, 'Experimental and computational investigations of nearly dense two-phase sudden expansion flows', Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 17, pp. 27-36, 1998
19. Furuichi N., Takeda Y. & M. Kumada, 'Spatial structure of the flow through an axisymmetric sudden expansion', Experiments in Fluids, Vol. 34, pp. 643-650, 2003
20. Gilliandt I., Fritsching U. & K. Bauckhage, 'Measurement of phase interaction in dispersed gas/particle two-phase flow', Multiphase Flow Journal, Vol. 27, pp. 1313-1332, 2001
21. Gooray A.M., Watkins C.B. & W. Aung, 'Turbulent heat transfer computations for rearward-facing steps and sudden pipe expansions', ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 70-76, 1985
22. Guo B., Langrish T.A.G. & D.F. Fletcher, 'CFD simulation of precession in sudden expansion flows with a low inlet swirl', Applied Mechanics Modelling, Vol. 26, pp. 1-15, 2002
23. Kulick J.D., Fessler J.R. & J.K. Eaton, 'Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow', Journal Fluid Mechanics, Vol.277, pp. 109-134, 1994
24. Lain S., Sommerfeld M. & J. Kussin, 'Experimental studies and modelling of four-way coupling in particle-laden horizontal channel flow', Vol. 23, pp. 647-656, 2002
25. Liao CM., Lin W.Y. & L.X. Zhou, 'Simulation of particle-fluid turbulence interaction in sudden expansion flows', Powder Technology, Vol. 90, pp. 29-38, 1997
26. McAndrew D., Coppen S. & C.B. Rogers, 'Measurement of fluid turbulence along the path of a heavy particle in a backward-facing step flow', International Journal of Multiphase Flow, Vol. 27, pp. 1517-1532, 2001
27. Oliveira P.J. & F.T. Pinho, 'Pressure drop coefficient of laminar Newtonian flow in axisymmetric sudden expansions', International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 18, pp. 518-52, 1997

28. Qiu H.-H. & C.T. Hsu, 'The impact of high order refraction on optical microbubble sizing in multiphase flows', Experiments in Fluids, Vol.36, pp.100-107, 2004
29. Sato Y. & K. Hishida, 'Transport process of turbulence energy in particle-laden turbulent flow' International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 17, pp. 202-210, 1996
30. Stevenson W.H., Thompson H.D. & R.R. Graig, 'Laser Velocimeter Measurements in Highly Turbulent Recirculation Flows', ASME Journal of Fluids Engng., Vol.106, pp. 173-180, 1984
31. Vlachos, N.S. 'Measurements and calculation of flow in small diameter ducts; particularly in venules', PhD thesis, Imperial College, London University, 1977
32. Xu M., Yuan J., Han C. & C. Zheng, 'Investigation of particle dynamics and pulverized coal combustion in a cavity bluff-body burner', Fuel, Vol. 12, pp. 1913-1917, 1995
33. Zhou H., Lu J. & L. Lin, 'Turbulence structure of the solid phase in transition region of a circulating fluidized bed', Chemical Engng. Science, Vol. 55, pp. 839-847, 2000
34. Zhou L.X., Chen T. Li T. & Y Xu, 'Studies on the effect of swirl numbers on strongly swirling turbulent gas-particle flows using a phase Doppler particle anemometer', Powder Technology, Vol. 112, pp. 79-86, 2000
35. www.dantecdynamics.com
36. <http://www.silver-colloids.com/Tutorials/psintro.html>
37. http://en.wikipedia.org/wiki/Two-phase_flow