

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ ΤΥΠΟΥ CORIOLIS ΥΠΟ ΔΙΦΑΣΙΚΗ
ΡΟΗ ΝΕΡΟΥ-ΑΕΡΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Σπουδαστή της Σχολής

Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π

Επίβλεψη : Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Π. Χίνης

Συνεργασία : Δρ. Α.Α. Νικόγλου

Αθήνα 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) πραγματοποιείται μελέτη της συμπεριφοράς μεταλλάκτη μέτρησης παροχής μάζας τύπου Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρα με σκοπό την διόρθωση των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ελεγχόμενη διάταξη και μετρητική διάταξη απευθείας συνδεδεμένη σε Η/Υ υπό το ΛΣ Windows XP με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού LabVIEW. Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έγινε με χρήση του ελεύθερου λογισμικού R. Το εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π διαθέτει μακροχρόνια εμπειρία και τεχνογνωσία στη χρήση διάφορων τύπων μεταλλακτών, καθώς και στην απευθείας σύνδεση τους σε Η/Υ για λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Αν. Καθ. Ε.Π. Χίνη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναλαμβάνοντας το ρόλο του επιβλέποντα στην εργασία μου και επέβλεπε σχεδόν σε καθημερινή βάση την πρόοδο τόσο του πειραματικού όσο και του θεωρητικού μέρους της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέλος Ε.ΔΙ.Π του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας, Δρ Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π, Α.Α. Νικόγλου για τη γόνιμη συνεργασία μας σε κάθε στάδιο της εργασίας μέχρι την τελική μορφοποίηση του κειμένου. Τέλος, οι ευχαριστίες μου εκτείνονται στα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Αν. Καθ. Μ.Ι. Αναγνωστάκη, Επ. Καθ. Ν.Π. Πετρόπουλο¹ και την Λέκτορα Π.Κ. Ρούνη.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

¹ Εξαιτίας του αιφνίδιου θανάτου του επιβλέποντος καθηγητή Ε.Π. Χίνη στις 07 Φεβρουαρίου 2018, η επίβλεψη της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ανατέθηκε από 12 Φεβρουαρίου 2018 στον Επίκουρο Καθηγητή του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας Ν. Π. Πετρόπουλο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΜΑΖΑΣ CORIOLIS	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Πλεονεκτήματα	8
2.3 Πρακτικές εφαρμογές.....	9
2.4 Αρχή λειτουργίας	11
2.5 Τύποι Ροομέτρων Coriolis ανάλογα με τον σχεδιασμό τους	13
2.6 CoriolisMaster FCB350/FCT350.....	18
2.6.1 Γενικά στοιχεία	18
2.6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά	19
2.6.3 Εγκατάσταση	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ.....	24
3.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά ροόμετρα	24
3.2 Μαγνητικό ροόμετρο EUROPIK - 567.....	26
3.3 Διαβαθμονόμηση μαγνητικού ροομέτρου EUROPIK -567	28
3.3.1 Διαδικασία διαβαθμονόμησης	30
3.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων	31
3.3.3 Στατιστική ανάλυση μετρήσεων	32
3.3.4 Έλεγχος διαβαθμονόμησης MFM.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ – ΚΛΑΣΜΑ ΚΕΝΟΥ	38
4.1 Εισαγωγή στη διφασική ροή	38
4.2 Κλάσμα Κενού – Gas Void Fraction.....	39
4.3 Μοτίβα ροής.....	41
4.3.1 Ροή φυσαλίδων (Bubbly flow).....	42
4.3.2 Ροή σφαιριδίων - Slug flow	44
4.3.3 Στρωματοποιημένη ροή - Stratified flow.....	44
4.3.4 Δακτυλιοειδής ροή - Annular flow	45
4.3.5 Διακοπτόμενη ροή - Intermittent flow	47
4.3.6 Χάρτες μοτίβων ροής.....	48
4.4 Μελέτη συμπεριφοράς των μετρητών Coriolis στη διφασική ροή	50
4.4.1 Πειραματική έρευνα διόρθωσης σφαλμάτων	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΝΕΡΟΥ-ΑΕΡΑ	58
5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	58
5.2 Προγραμματισμός σε περιβάλλον LabVIEW	63
5.3 Data Acquisition /DAQNavi	66
5.4 Λήψη μετρήσεων παροχής - Πείραμα 1.....	70
5.4.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων	70
5.4.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων	76
5.5 Λήψη μετρήσεων από τα ροόμετρα – Πείραμα 2	77
5.5.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων	78
5.5.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων	80
5.6 Λήψη μετρήσεων από τα ροόμετρα – Πείραμα 3	81
5.6.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων	82
5.6.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ	
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	85
6.1 Πείραμα 1	86
6.2 Πείραμα 2	90
6.3 Πείραμα 3	95
6.4 Συμπεράσματα, μελλοντικές προοπτικές έρευνας.	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση της παροχής ρευστών εντός σωληνώσεων αποτελούσε ανέκαθεν αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος ερευνητικών, βιομηχανικών και άλλων εφαρμογών. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί πλήθος τεχνικών οι οποίες εκμεταλλεύονται-εφαρμόζουν διαφορετικές φυσικές αρχές όπως η διαφορική πίεση, οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις, οι ιδιότητες συνεκτικότητας των ρευστών κατά την περιδίνηση (von Karman street), η διάδοση υπερηχητικών κυμάτων, οι δυνάμεις Coriolis κ.α.. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικούς περιορισμούς και διαφορετικά πλεονεκτήματα, κατ' επέκταση και οι αντίστοιχοι μεταλλάκτες που κατασκευάζονται, και η βέλτιστη επιλογή εξαρτάται όχι μόνο από το μετρητικό όργανο αλλά και από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα ροόμετρα τύπου Coriolis αποτελούν έναν από τους δημοφιλέστερους μεταλλάκτες μέτρησης παροχής, τόσο σε πειραματικές – ερευνητικές εφαρμογές όσο και σε βιομηχανικές – εμπορικές, κυρίως λόγω του πλεονεκτηματός τους να μετρούν απ' ευθείας την παροχή μάζας. Το πλεονέκτημα αυτό αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε περιπτώσεις όπου το μετρούμενο ρευστό αποτελείται από περισσότερες από μία φάσεις.

Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. (ΕΠΤ-ΕΜΠ) από το 1990 λειτουργεί θερμοϋδραυλική εγκατάσταση στην οποία μελετώνται φαινόμενα διφασικής ροής νερού-ατμού υπό διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Στην εγκατάσταση αυτή πρόκειται να προσαρμοσθεί ροόμετρο τύπου Coriolis και να διασυνδεθεί με το σύστημα επιτήρησης και συλλογής πειραματικών δεδομένων πραγματικού χρόνου. Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας (ΔΕ) είναι η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του υπόψη ροομέτρου κατά τη μέτρηση διφασικής ροής νερού-αέρα σε κατακόρυφη διεύθυνση και φορά προς τα άνω. Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιηθούν τόσο για την επιλογή της χρήσης του ροομέτρου στην θερμοϋδραυλική εγκατάσταση όσο και για το σχεδιασμό μελλοντικών πειραμάτων. Η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα ροόμετρα μάζας τύπου Coriolis. Πρόκειται για μεταλλάκτες, πλεονέκτημα των οποίων είναι η απευθείας μέτρηση παροχής μάζας και συνεπώς η ανεξαρτησία των μετρήσεων από τους παράγοντες της θερμοκρασίας, της πίεσης, του ιξώδους και της σύστασης του ρευστού που επηρεάζουν την πυκνότητα και άρα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται εν συντομία τα πλεονεκτήματα τους έναντι άλλων μεταλλακτών μέτρησης παροχής ρευστού, οι πρακτικές τους εφαρμογές στη βιομηχανία, η αρχή λειτουργίας τους και ο διαχωρισμός τους ανάλογα με τον σχεδιασμό τους. Τέλος, περιγράφεται το προς μελέτη ροόμετρο Coriolis και ο ελεγκτής του, αμφότερα της εταιρείας ABB, με τις εμπορικές ονομασίες FCB350 και FCT350 αντιστοίχως.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η περιγραφή της αρχής λειτουργίας και των βασικών χαρακτηριστικών ενός μαγνητικού ροομέτρου (Magnetic Flow Meter ή MFM). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μαγνητικό ροόμετρο με την εμπορική ονομασία EUROPIK -567 το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της ελεγχόμενης διάταξης της παρούσας ΔΕ. Ακολουθεί η ανάλυση της διαδικασίας διαβαθμονόμησης του MFM σε σχέση με το ροόμετρο Coriolis καθώς και η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 δίνονται στον αναγνώστη οι απαραίτητες γνώσεις και ορισμοί, σε βασικά θέματα όπως είναι η διφασική ροή, το Κλάσμα Κενού ενώ στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των δημοφιλέστερων μοτίβων ροής ρευστού που συναντώνται υπό διφασική ροή μίγματος υγρού-αερίου που ρέει μέσα σε σωλήνα. Ακολουθεί η παράθεση και ανάλυση ερευνών που έχουν ήδη διεξαχθεί και μελετούν αντικείμενο συναφές με αυτό της παρούσας ΔΕ, με σκοπό την ευρύτερη προσέγγιση του αντικειμένου της ΔΕ.

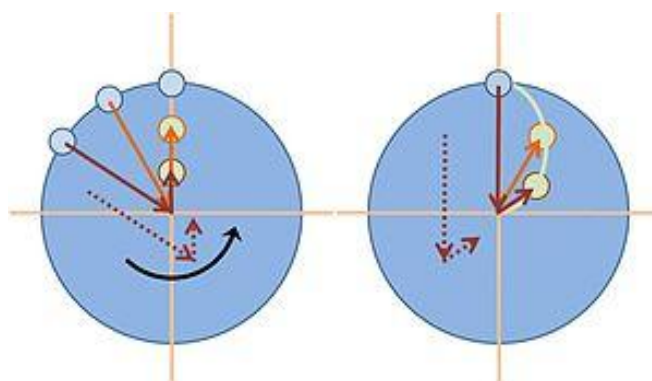
Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ για τη μελέτη του ροομέτρου Coriolis και παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματά της όπως το σύστημα δημιουργίας της διφασικής ροής, το σύστημα συλλογής δεδομένων κ.α.. Εν συνεχεία γίνεται περιληπτική περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του αναλογοψηφιακού μετατροπέα (Analog to Digital Converter ή ADC) που χρησιμοποιήθηκε και η εισαγωγή του αναγνώστη στις βασικές λειτουργίες του προγράμματος LabVIEW. Τέλος, ακολουθεί η εκτενής παρουσίαση των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν μαζί με τα προγράμματα που συντάχθηκαν σε περιβάλλον LabVIEW για τις ανάγκες τους και την εκάστοτε διαδικασία που ακολουθήθηκε. Για τη μελέτη του Coriolis πραγματοποιήθηκαν συνολικά τρία πειράματα. Στο πρώτο το ροόμετρο Coriolis επιστρέφει την τιμή της παροχής μάζας του ρευστού, ενώ στο δεύτερο και στο τρίτο επιστρέφει την τιμή της πυκνότητας του ρευστού.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η στατιστική επεξεργασία αυτών, μέσω προγράμματος που συντάχθηκε σε πρόγραμμα R, καθώς και ο εκτενής σχολιασμός τους όσον αφορά τα σφάλματα μέτρησης παροχής μάζας και πυκνότητας. Μετά από τη μελέτη στο τέλος του Κεφαλαίου αυτού συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, αξιολογούνται τα ευρήματα της εργασίας και παρουσιάζεται η σχέση διόρθωσης των σφαλμάτων της πυκνότητας στις μετρήσεις του ροομέτρου Coriolis καθώς και η εκτίμηση του Κλάσματος Κενού μέσω μέτρησης της πυκνότητας του μείγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΡΟΟΜΕΤΡΟ ΜΑΖΑΣ CORIOLIS

2.1 Εισαγωγή

Η δύναμη Coriolis ορίζεται ως μια αδρανειακή δύναμη που δρα σε αντικείμενα τα οποία βρίσκονται σε κίνηση σε σχέση με ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς. Στο σύστημα αναφοράς αυτό, με δεξιόστροφη περιστροφή, η δύναμη δρα στα αριστερά της κίνησης του αντικειμένου. Και αντιστοίχως με αριστερόστροφη περιστροφή, η δύναμη δρα προς τα δεξιά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Η εκτροπή, τελικώς, ενός αντικειμένου λόγω της δύναμης Coriolis ονομάζεται φαινόμενο Coriolis (ή Coriolis Effect).



Σχήμα 2-1 Σχηματική απεικόνιση παραδείγματος φαινομένου Coriolis, για ευθύγραμμη κίνηση σφαίρας επί περιστρεφόμενου δίσκου²

Το φαινόμενο αυτό συναντάται ευρέως σε ποικίλες επιστημονικές εφαρμογές. Μία από αυτές είναι ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν τα ροόμετρα μάζας Coriolis ο οποίος και θα αναλυθεί στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου. Ωστόσο, παρατηρείται ακόμα στη μοριακή φυσική, τη βιολογία, τη μετεωρολογία, την αστροφυσική, τη γεωλογία. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι δυνάμεις Coriolis παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλούς κλάδους της επιστήμης. Στην παρούσα ΔΕ θα επικεντρωθούμε και θα αναλύσουμε την πρακτική εφαρμογή του φαινομένου στα ροόμετρα μάζας Coriolis.

Το φαινόμενο Coriolis είναι αυτό στο οποίο στηρίζεται η λειτουργία του ροομέτρου Coriolis, ενός οργάνου που μετράει τη ροή μάζας και την πυκνότητα ρευστού που ρέει μέσα σε σωλήνα. Εναλλακτικά η παροχή μάζας μπορεί να εκτιμηθεί από τη μέτρηση της παροχής όγκου και της θερμοκρασίας του ρευστού, βάσει της οποίας εκτιμάται η πυκνότητα αυτού ή της απ' ευθείας μέτρησης της πυκνότητας του ρευστού. Σε αυτή την περίπτωση όμως η εκτίμηση της παροχής μάζας συνοδεύεται από μεγαλύτερο σφάλμα καθώς εμπεριέχει τόσο το σφάλμα μέτρησης της παροχής

² https://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_force

όγκου αλλά και της θερμοκρασίας ή της πυκνότητας. Είναι κατανοητό ότι παράγοντες όπως η πτώση πίεσης, η μεταφορά θερμότητας και η μεταβολή της θερμοκρασίας του υπό μέτρηση ρευστού αυξάνει το τυχαίο σφάλμα μέτρησης.

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό το πλεονέκτημα ενός ροόμετρου το οποίο θα μετρά απευθείας τη ροή μάζας με ακρίβεια χωρίς να υπάρχουν επιρροές από άλλα μεγέθη ώστε να μειωθούν τα σφάλματα. Η υλοποίηση ενός μεταλλάκτη ροής ο οποίος θα εκμεταλλευόταν το φαινόμενο Coriolis θα μπορούσε να μετρήσει απευθείας την παροχή μάζας του ρευστού περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό σφάλμα της μέτρησης. Η εμπορική εφαρμογή ενός τέτοιου ροόμετρου εμφανίστηκε περίπου το 1970. Από εκείνη τη στιγμή έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και έχει μελετηθεί εις βάθος ως προς τη λειτουργία του και έχει εξελιχθεί σημαντικά ως προς το σχεδιασμό του [1] [2]. Ειδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει καθιερωθεί στις διάφορες βιομηχανίες και θεωρείται το ακριβέστερο και δημοφιλέστερο όργανο μέτρησης παροχής μάζας.

2.2 Πλεονεκτήματα

Παρακάτω αναφέρονται κάποια από τα πλεονεκτήματα που διαθέτει ένα ροόμετρο Coriolis έναντι άλλων μεταλλακτών μέτρησης παροχής όπως είναι το ροόμετρο μέτρησης διαφορικής πίεσης (differential pressure flow meter), το ροόμετρο θετικής μετατόπισης (positive displacement flow meter), το ροόμετρο ανοιχτού καναλιού (open channel flow meter), το ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο κ.α.

- Έχει συμπαγή σχεδίαση, κάτι που το κάνει εύκολα προσαρμόσιμο σε οποιαδήποτε εγκατάσταση.
- Δεν υπόκειται σε μεγάλες φθορές κατά τη χρησιμοποίησή του και το πέρασμα του χρόνου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει κινούμενα μέρη. Οπότε και δεν έχει μεγάλο κόστος συντήρησης.
- Προκαλεί αμελητέα πτώση πίεσης στη ροή του μετρούμενου ρευστού της τάξεως των 10mbar.
- Δεν απαιτεί εκ νέου βαθμονόμηση όταν θέλουμε να μετρήσουμε διαφορετικό ρευστό.
- Το κυριότερο πλεονέκτημα του είναι ότι σε αντίθεση με τα ροόμετρα που μετρούν ογκομετρική ροή ρευστού, τα ροόμετρα Coriolis μετρούν απευθείας την παροχή μάζας. Το γεγονός αυτό τα καθιστά πολύ σημαντικά στη βιομηχανία διότι παρουσιάζουν ανεξαρτησία των μετρήσεων τους από τους παράγοντες της θερμοκρασίας, της πίεσης, του ιξώδους, και γενικά της σύστασης του ρευστού που επηρεάζουν την πυκνότητα και εν τέλει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Αν και θεωρείται ένα από τα ακριβότερα ροόμετρα που έχουν κατασκευαστεί, το ροόμετρο Coriolis βρίσκει πολλούς πελάτες να προτιμούν τη χρήση του λόγω των

παραπάνω πλεονεκτημάτων έναντι των άλλων ροομέτρων και κατ' επέκταση της ευρύτητας του πεδίου εφαρμογών του.

2.3 Πρακτικές εφαρμογές

Τα ροόμετρα Coriolis χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές βιομηχανίες όπως είναι οι πυρηνικές, οι χημικές, οι πετρελαϊκές, οι πετροχημικές, οι φαρμακευτικές, οι βιομηχανίες τροφίμων και ποτών αλλά και οι βιομηχανίες ηλεκτροπαραγωγής. Για παράδειγμα, τα ροόμετρα τύπου Coriolis αντικαθιστούν τους δοσομετρικούς μετρητές ροής (batching flow meters) στο υποσύστημα ανάμιξης βορικού οξέως με το νερό του κυρίως ψυκτικού κυκλώματος στους πυρηνικούς αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR). Το διάλυμα βορικού οξέως, στο ψυκτικό μέσο αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον έλεγχο της κρισιμότητας του πυρήνα του αντιδραστήρα και συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι η ποσότητα του θα πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια [3]. Φυσικά τα ροόμετρα Coriolis τα οποία χρησιμοποιούνται στην πυρηνική βιομηχανία έχουν υψηλές προδιαγραφές αντοχής και ασφάλειας και συνήθως χρησιμοποιείται ο τύπος ευθύγραμμου σωλήνα, ο οποίος λόγω κατασκευής ενδείκνυται για περιπτώσεις εφαρμογών υψηλής πίεσης.

Στην περίπτωση των πετρελαιοειδών και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις 'βαρέων' κλασμάτων πετρελαίου, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα και συνεκτικότητα, το μετρούμενο ρευστό, πέραν της υγρής φάσης περιέχει και ένα σημαντικό ποσοστό αέριας, η οποία είναι δύσκολο να διαχωριστεί και να αφαιρεθεί. Στις περιπτώσεις αυτές στόχος είναι η ακριβής μέτρηση της μάζας του διφασικού μίγματος, αντικείμενο με το οποίο καταπιάνεται και η παρούσα ΔΕ.

Γενικά λόγω της ευελιξίας του, της συμπαγής σχεδίασης και του γεγονότος ότι μετράει απευθείας τη ροή μάζας ρευστού, το ροόμετρο Coriolis χρησιμοποιείται ευρέως για τις διαδικασίες ελέγχου, δΟΣΟΛΗΨΙΑΣ, απογραφής, πλήρωσης δοχείων ή κοντέινερ, και μεταφοράς με μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

Οι χημικές αντιδράσεις στηρίζονται σε εξισώσεις ισοζυγίου μάζας, η καύση βασίζεται στη ροή μάζας του οξειδωτικού, η ακριβής ανάμειξη είναι μία ισορροπία μάζας και συνεπώς, σε βιομηχανίες χημικών διεργασιών, η τιμή της ροής μάζας είναι η σημαντική παράμετρος.

Οι μετρητές ροής μάζας χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά από τους διανομείς κοντέινερ συμπιεσμένου φυσικού αερίου (compressed natural gas, CNG) σε όλο τον κόσμο. Ο λόγος είναι ότι ο όγκος του αερίου αλλάζει δραματικά μέσω μεταβολών της πίεσης και της θερμοκρασίας, έτσι η μέτρηση απευθείας της ροής μάζας είναι ο μόνος τρόπος να γίνει αξιόπιστη μέτρηση του CNG.

Περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 2-1:

Πίνακας 2-1 Βιομηχανικές εφαρμογές του ροομέτρου Coriolis [2]

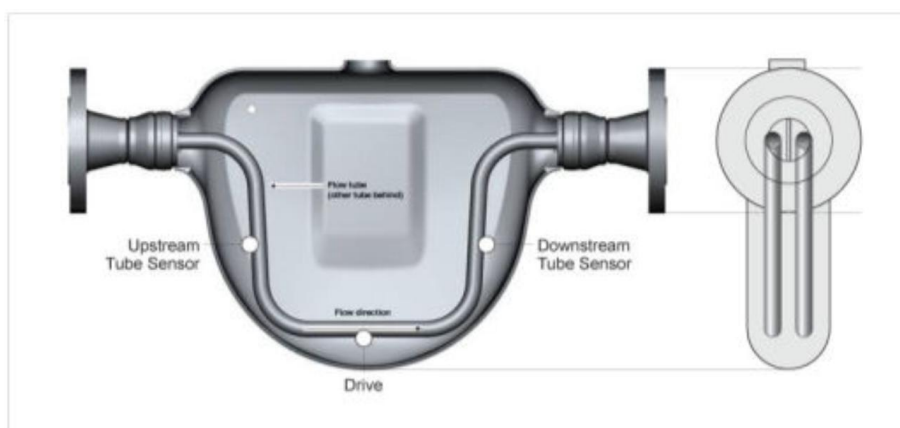
Table 2

Examples of common Coriolis flowmeter applications

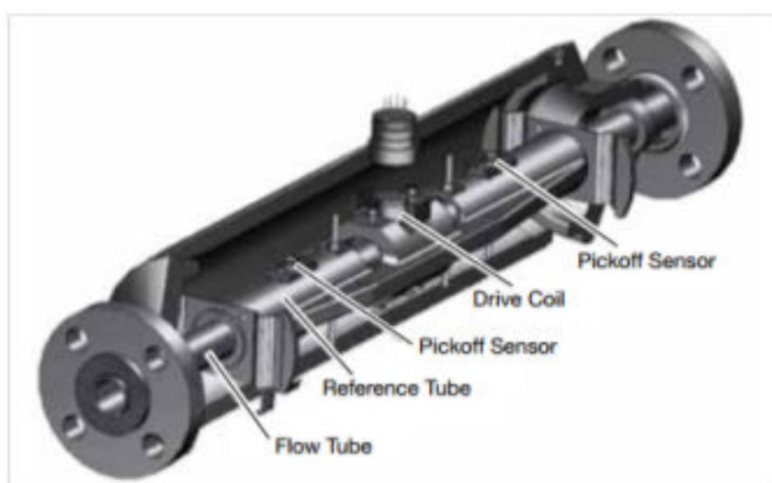
Food and beverage		Chemical and petrochemical		Petroleum products
Beer, Soda		Adhesives	Hydrogen peroxide	Asphalt
Chocolate		Alcohol	Latex	Bunker C
Fruit juice		Ammonia	Nitric acid	Crude oil
Honey		Catalysts	Phosgene	Diesel fuel
Ice cream		Caustic	Phosphoric acid	Fuel oil
Margarine		Cyclohexane	Polyol	Gasoline
Milk		Ethylene	Propylene	Hydraulic oil
Molasses		Formaldehyde	Resins	Jet fuel
Peanut butter		Freon	Solvents	Kerosene
Pet food		Glycerine	Styrene	Lube oil blending
Tomato paste		Glycol	Sulphuric acid	Oil/water emulsion
Animal, vegetable fat		Hydrochloric acid	Toluene	Tar
Pharmaceutical	Pulp and paper	Other	Gases	
Alcohols	Anti-foaming agents	Dyes	Compressed gases: nitrogen, helium, carbon dioxide, CNG	
IV bag filling	Black liquor	Ink	Hydrogen	
Palm oil	Cellulose slurry	Magnetic tape coating	Oxygen	
Perfume	Paper pulp	Paint	Liquidified gases: Carbon dioxide, LPG, LNG	
Pill Coatings	Red liquor	Photographic emulsion		
Soap	Titanium dioxide	Wax		
Sodium methylate		Filling airbags (Automobile industry)		
Talc powder				
Vitamins				

2.4 Αρχή λειτουργίας

Στη συνέχεια, για λόγους κατανόησης, θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο μετράει απευθείας τη ροή μάζας και την πυκνότητα ο μεταλλάκτης τύπου Coriolis. Ένα ροόμετρο Coriolis περιλαμβάνει έναν ή και περισσότερους σωλήνες οι οποίοι είναι είτε καμπυλωμένοι (Σχήμα 2-2) είτε ευθύγραμμοι (Σχήμα 2-3) και έχουν την ικανότητα να ταλαντώνονται ημιτονικά. Το προς μέτρηση ρευστό περνάει μέσα από αυτούς τους σωλήνες και εξαιτίας της ταλάντωσης αυτών αναπτύσσονται δυνάμεις Coriolis οι οποίες τείνουν να τους παραμορφώσουν.

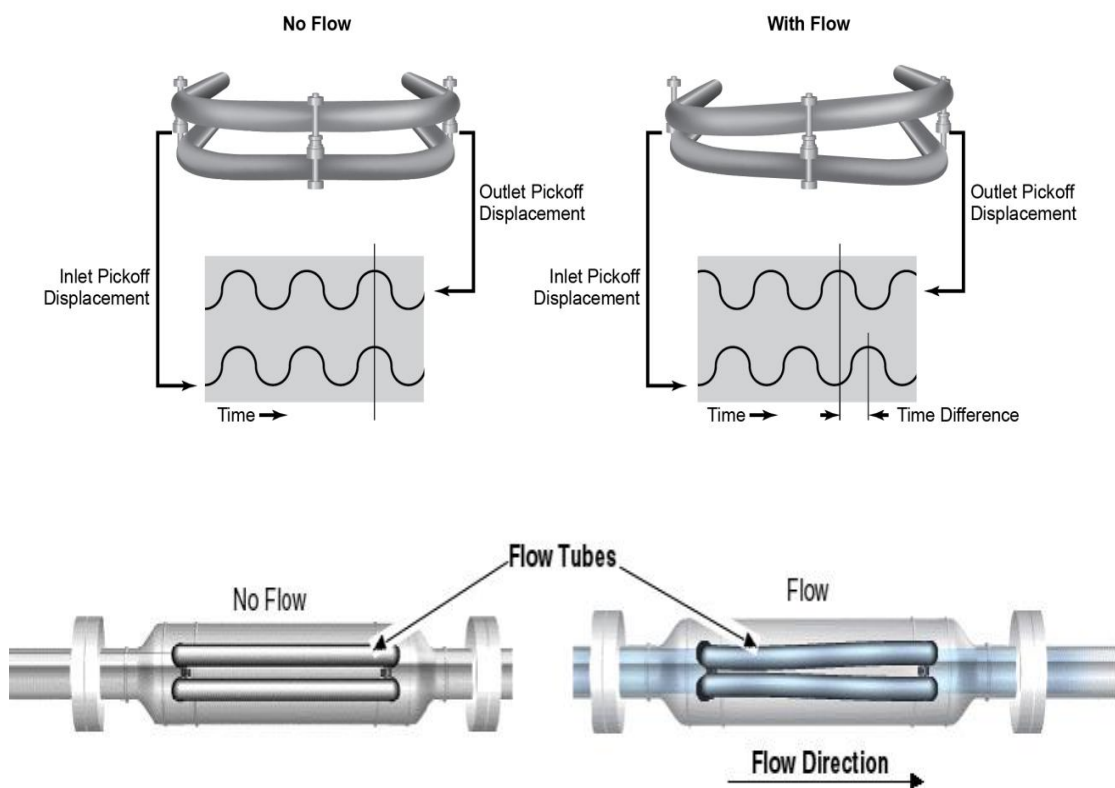


Σχήμα 2-2 Παράδειγμα Ροομέτρου Coriolis με δύο καμπυλωμένους σωλήνες



Σχήμα 2-3 Παράδειγμα Ροομέτρου Coriolis με έναν ευθύγραμμο σωλήνα

Θα πρέπει λοιπόν να επιβληθεί ταλάντωση στους σωλήνες και με κατάλληλα τοποθετημένους αισθητήρες (pickoff sensors) στην είσοδο και την έξοδο του ρευστού να ανιχνεύεται η συχνότητα ταλάντωσης τους. Όταν το ρευστό μένει ακίνητο μέσα στους σωλήνες τότε αυτοί ταλαντώνονται συγχρονισμένα, ή αλλιώς έχουν ίδια φάση. Όταν το ρευστό αρχίζει και κινείται με σταθερή ταχύτητα ροής τότε οι σωλήνες εξαναγκάζονται σε παραμόρφωση του σχήματος τους και σε ταλάντωση με διαφορά φάσης η οποία ανιχνεύεται από τους αισθητήρες (Σχήμα 2-4). Αυτή η παραμόρφωση των σωλήνων και εν τέλει η μεταβολή στη διαφορά φάσης είναι ευθέως ανάλογη της παροχής μάζας του ρευστού.



Σχήμα 2-4 Σχηματική απεικόνιση αρχής λειτουργίας ροομέτρου τύπου Coriolis με δύο καμπυλωμένους σωλήνες

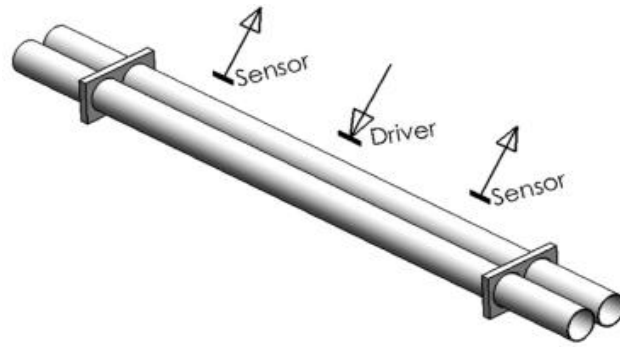
Εφόσον, οι σωλήνες διεγείρονται με σταθερή δύναμη λόγω της σταθερής ταχύτητας του ρευστού, η συχνότητα ταλάντωσης τους εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του ρευστού. Από τη συχνότητα αυτή το όργανο μετράει απευθείας την πυκνότητα του ρευστού.

2.5 Τύποι Ροομέτρων Coriolis ανάλογα με τον σχεδιασμό τους

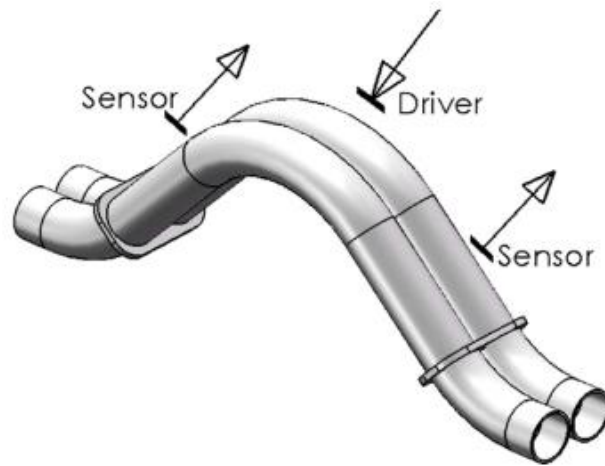
Ανάλογα με το σχεδιασμό τους, τα ροόμετρα θα μπορούσε να πει κανείς ότι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: I Σχεδιασμός διπλού σωλήνα, II Σχεδιασμός μονού σωλήνα, III Σχεδιασμός πολλαπλού σωλήνα [1]. Το πιο κοινό υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι σωλήνες αυτοί είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας. Ωστόσο μεγάλη εμπορικότητα διαθέτουν το κράμα C-22, το τιτάνιο, το ζirkόνιο και το ταντάλιο. Επίσης σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ μέτρια θερμοκρασία ρευστού) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το γυαλί.

- I. Ο σχεδιασμός διπλού σωλήνα περιλαμβάνει τέλεια συμμετρία των δύο σωλήνων οι οποίοι μπορούν να ταλαντώνονται και σε διαφορετική φάση έκαστος. Η συμμετρία τους δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην πυκνότητα, τη θερμοκρασία, την πίεση ή το ιζώδες του ρευστού. Αν και η ροή δεν διαιρείται εντελώς συμμετρικά στους δυο σωλήνες, εντούτοις η ανισοκατανομή της ροής δεν εισάγει σφάλμα στη μέτρηση καθώς οι αισθητήρες εγγύτητας καταγράφουν τις παραμορφώσεις και μετατοπίσεις κάθε σωλήνα ξεχωριστά. Ως εκ τούτου, το σήμα αυτό είναι ανεξάρτητο της κατανομής ροής του ρευστού εντός των σωλήνων και κατ' επέκταση της διαφορετικής φάσης ταλάντωσης του κάθε σωλήνα.

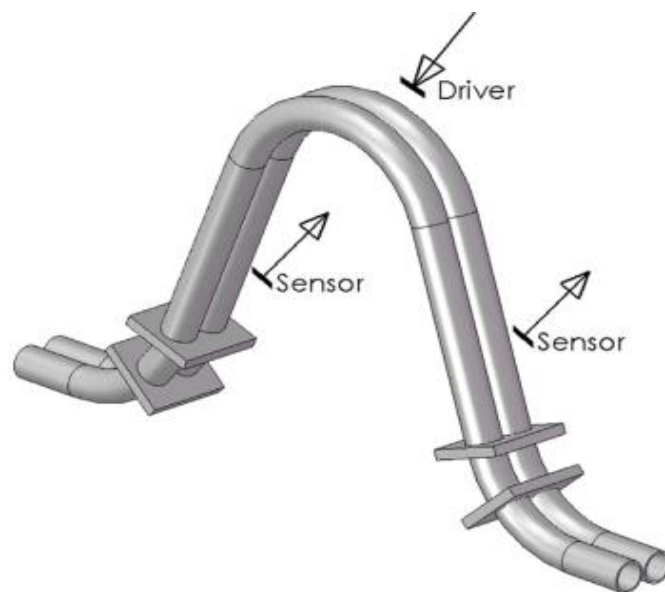
Αξίζει να αναφερθεί πως η πλειονότητα των κατασκευαστών των εμπορικών ροομέτρων Coriolis χρησιμοποιούν αυτόν τον σχεδιασμό διπλού σωλήνα λόγω της καλύτερης ακρίβειας αποτελεσμάτων. Ωστόσο, ο σχεδιασμός αυτός απαιτεί διαχωριστές ροής ρευστού οι οποίοι δεν συνιστώνται σε κάποιες βιομηχανίες. Μία τέτοια είναι η βιομηχανία τροφίμων όπου προτιμάται ο σχεδιασμός με ένα σωλήνα. Στα ακόλουθα σχήματα (Σχήμα 2-5, Σχήμα 2-6, Σχήμα 2-7, Σχήμα 2-8, Σχήμα 2-9) φαίνεται ξεκάθαρα η ποικιλία της γεωμετρίας που περιλαμβάνει ο σχεδιασμός διπλού σωλήνα.



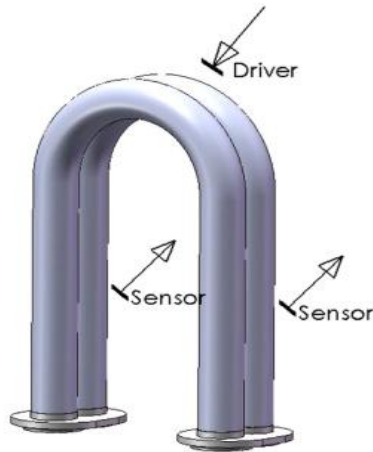
Σχήμα 2-5 Σχεδιασμός διπλού ευθύ σωλήνα [1]



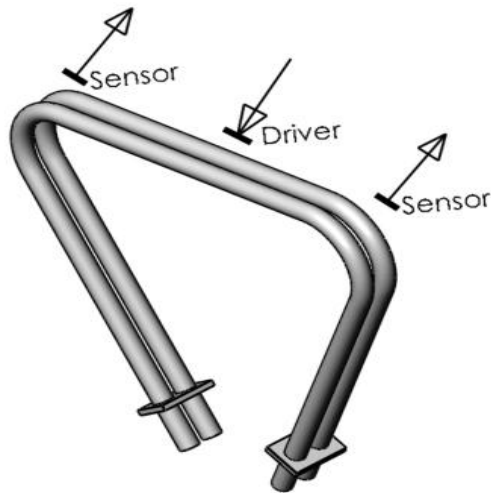
Σχήμα 2-6 Σχεδιασμός διπλού σωλήνα τύπου αβαθή V [1]



Σχήμα 2-7 Σχεδιασμός διπλού σωλήνα τύπου βαθύ V [1]

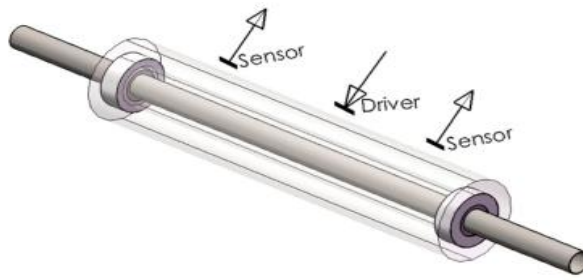


Σχήμα 2-8 Σχεδιασμός διπλού σωλήνα τύπου U [1]

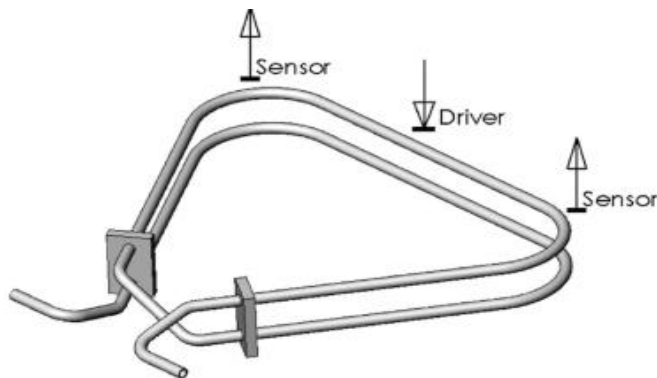


Σχήμα 2-9 Σχεδιασμός διπλού σωλήνα τύπου Ω [1]

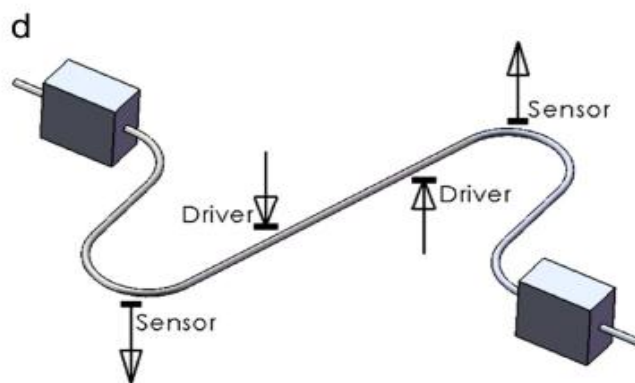
- II. Γενικά, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί σχεδιασμοί μονού σωλήνα. Στην πρώτη και περισσότερη κοινή περίπτωση, το ροόμετρο περιλαμβάνει έναν ευθύγραμμο ή ελαφρώς λυγισμένο σωλήνα (Σχήμα 2-10). Οι ελαφρώς λυγισμένοι σωλήνες έχουν το πλεονέκτημα ότι προσφέρουν ένα ευρύτερο εύρος θερμοκρασιών σε σχέση με τους απόλυτα ευθείς σωλήνες. Στη δεύτερη περίπτωση, ο σωλήνας λυγίζεται ώστε να δημιουργηθεί ένας πολλαπλός βρόχος (Σχήμα 2-11). Ο σχεδιασμός είναι παρόμοιος με αυτόν διπλού σωλήνα με την έννοια ότι παρέχει τα ίδια πλεονεκτήματα και επίσης δεν υπάρχει το πρόβλημα των διαχωριστών ροής. Ωστόσο επειδή το μήκος του σωλήνα ουσιαστικά πολλαπλασιάζεται έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσης πίεσης. Επιπλέον, λόγω της ύπαρξης βρόχου καθίσταται δύσκολη η αποστράγγιση του οργάνου. Η τρίτη και τελευταία περίπτωση είναι ο σωλήνας που λαμβάνει τη μορφή του S (Σχήμα 2-12).



Σχήμα 2-10 Σχεδιασμός μονού ευθύγραμμου σωλήνα [1]

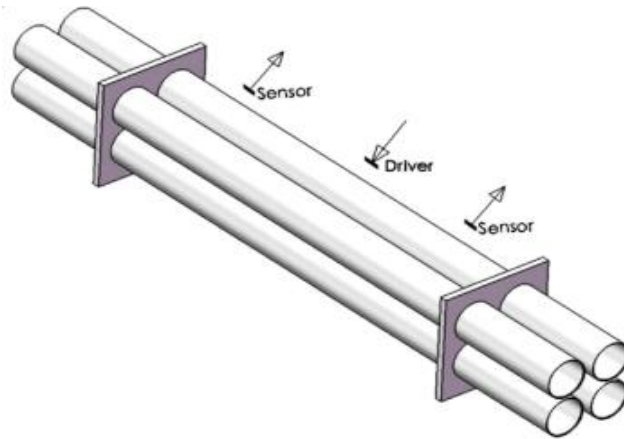


Σχήμα 2-11 Σχεδιασμός μονού σωλήνα πολλαπλού βρόγχου τύπου Ω [1]

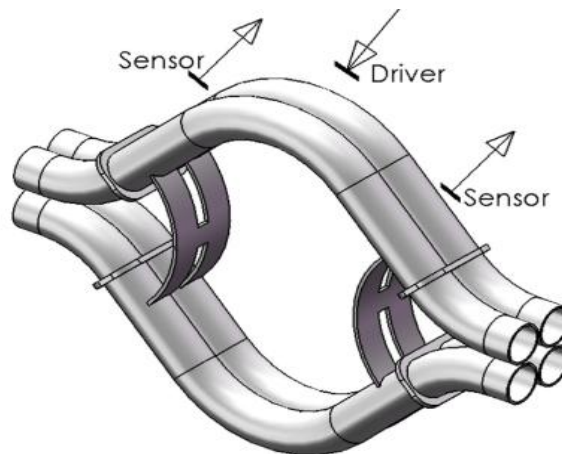


Σχήμα 2-12 Σχεδιασμός μονού σωλήνα τύπου S [1]

III. Ο σχεδιασμός πολλαπλού σωλήνα συναντάται πολύ πιο σπάνια λόγω της πολυπλοκότητας κατασκευής (περισσότεροι διαχωριστές ροής, αισθητήρες και οδηγοί). Κάποια παραδείγματα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2-13, Σχήμα 2-14).



Σχήμα 2-13 Σχεδιασμός πολλαπλού ευθύ σωλήνα [1]



Σχήμα 2-14 Σχεδιασμός πολλαπλού σωλήνα τύπου αβαθή V [1]

Ένα από τα πλεονεκτήματα που έχει ο καμπυλωμένος –οποιοδήποτε τύπου– σωλήνας είναι σχετικά χαμηλές τάσεις στις οποίες καταπονείται υπό μη ομοιόμορφες κατανομές της θερμοκρασίας του ρευστού. Όταν ρέει ξαφνικά ρευστό χαμηλότερης ή μεγαλύτερης θερμοκρασίας από την αντίστοιχη του περιβάλλοντος σε ευθείς σωλήνες, προκαλούνται παραμορφώσεις λόγω συμπίεσης ή εφελκυσμού. Αυτό συμβαίνει διότι ο σωλήνας είναι περιορισμένος ως προς τη διαστολή και τη συστολή του. Όταν υπάρξει σοβαρή θερμική καταπόνηση, τότε αυτές ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένος ο σωλήνας. Έτσι, όσο πιο καμπυλωμένος είναι ο σωλήνας τόσο μικρότερη η καταπόνηση του.

2.6 CoriolisMaster FCB350/FCT350

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναλυτική παρουσίαση του ροομέτρου που χρησιμοποιήθηκε και μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ. Το όργανο αυτό μετράει τη ροή μάζας, την πυκνότητα και τη θερμοκρασία του ρευστού.

2.6.1 Γενικά στοιχεία

Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των χαρακτηριστικών του ροομέτρου CoriolisMaster FCB350/FCT350 της εταιρείας ABB [4] που διαθέτει το εργαστήριο ΕΠΤ-ΕΜΠ και χρησιμοποιείται στην παρούσα ΔΕ. Πρόκειται για μοντέλο ροομέτρου το οποίο έχει αποσπώμενη σχεδίαση. Αυτό σημαίνει ότι ο αισθητήρας και ο μετατροπέας κίνησης είναι ξεχωριστά όργανα με κωδικούς FCB350 και FCT350 αντίστοιχα. Το όργανο απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 2-15:

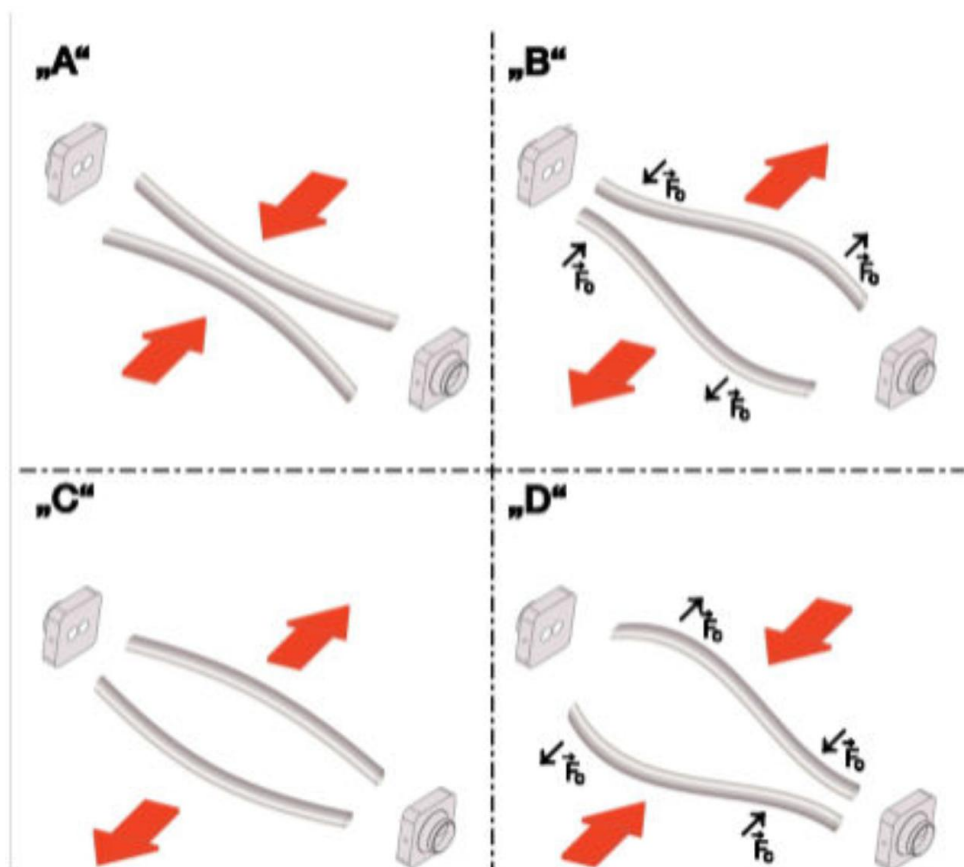


Σχήμα 2-15 Ροόμετρο ABB FCB350 και μετατροπέας μέτρησης FCT350 [4]

Το όργανο αυτό έχει συμπαγή σχεδίαση και σχετικά μικρό μέγεθος (μήκους 385mm). Για το λόγο αυτό υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί σε μικρές και περιορισμένου χώρου εγκαταστάσεις όπως συμβαίνει στα πλαίσια της παρούσης ΔΕ αλλά και σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

Η αρχή λειτουργίας του ροομέτρου έχει αναλυθεί σε προηγούμενη παράγραφο (§2.4). Να προστεθεί στο σημείο αυτό, ότι στο εσωτερικό του συγκεκριμένου ροομέτρου υπάρχουν δύο σωλήνες με τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-6. Στο παρακάτω Σχήμα 2-16, έχει γίνει η απλοποιημένη απεικόνιση των δυνάμεων Coriolis και πως

αυτές επιδρούν πάνω στους σωλήνες του οργάνου. Στα σχήματα A, C βλέπουμε την επίδραση των δυνάμεων αυτών στην περίπτωση του ακίνητου ρευστού, ενώ στα σχήματα B, D την επίδραση των δυνάμεων όταν το ρευστό κινείται με σταθερή ταχύτητα.



Σχήμα 2-16 Απλοποιημένη απεικόνιση δυνάμεων Coriolis πάνω στους σωλήνες του οργάνου [4]

2.6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Παρακάτω θα αναφερθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να γνωρίζει κάποιος που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο μοντέλο ροομέτρου Coriolis [4].

Τα όρια λειτουργίας του συγκεκριμένου ροομέτρου σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία είναι 0 έως 8 tn/h. Επειδή το σφάλμα του οργάνου αυξάνει τις περιπτώσεις χαμηλών παροχών προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία η περιοχή λειτουργίας 5÷100 % της μέγιστης παροχής. Δηλαδή, 0.4÷8 tn/h, ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται μετρήσεις παροχής μικρότερης του 1% της μέγιστης παροχής που αντιστοιχεί σε 0.08 tn/h.

Στους πίνακες που ακολουθούν αναφέρονται τα τεχνικά στοιχεία ξεχωριστά για τον αισθητήρα (Πίνακας 2-2) και τον μετατροπέα μέτρησης (Πίνακας 2-3) :

Πίνακας 2-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα ροομέτρου FCB350

Ροόμετρο FCB350	
Συνδέσεις	Φλάντζα DN15/PN40
Υλικό κατασκευής(αυτό που έρχεται σε επαφή με το ρευστό)	Ανοξείδωτος χάλυβας Κράμα νικελίου C4/C22
Βαθμός προστασίας (EN 60529)	IP 65/67
Ακρίβεια μετρήσεων:	
<i>Ροή μάζας</i>	0.1% και 0.15%
<i>Ογκομετρική ροή</i>	0.15%
<i>Πυκνότητα</i>	0.002kg/lt
<i>Θερμοκρασία</i>	5K
Επιτρεπτή θερμοκρασία υλικού μέτρησης	-50°C...200°C
Q_{max}	80 tn/h

Πίνακας 2-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέα μέτρησης FCT350

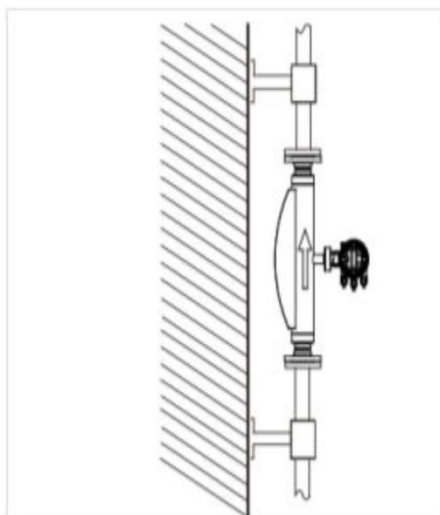
Μετατροπέας μέτρησης FCT350	
Τροφοδοσία	100...230 V AC
Έξοδος ρεύματος	Έξοδος 1: ενεργή,0/4...20mA ή παθητική 4...20mA Έξοδος 2: παθητική 4...20mA
Βαθμός προστασίας (EN 60529)	IP 67
Έξοδος παλμού	Ενεργή ή παθητική
Ανίχνευση άδειου σωλήνα	Με προρυθμισμένο συναγερμό πυκνότητας <0.5 kg/lt

2.6.3 Εγκατάσταση

Το ροόμετρο όπως έχει ήδη αναφερθεί έχει μεγάλη ευελιξία ως προς την εγκατάσταση του και μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις.

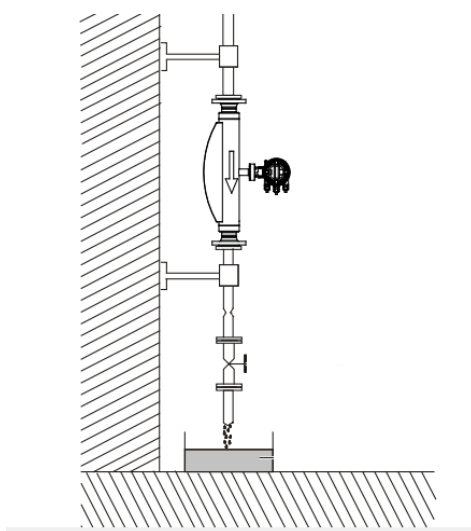
Ο αισθητήρας μέτρησης έχει τη δυνατότητα τοποθέτησης σε κάθετο και οριζόντιο προσανατολισμό ανάλογα με το ρευστό και τις συνθήκες ροής. Η φορά εισόδου – εξόδου του ρευστού μπορεί να καθοριστεί σύμφωνα με τις ανάγκες της διαδικασίας που ακολουθεί. Το όργανο ωστόσο, έχει προκαθορισμένη φορά λειτουργίας και αναγράφεται με τη μορφή βέλους στο σώμα του οργάνου.

Ανάλογα αν το ρευστό είναι υγρό ή αέριο ο προσανατολισμός αλλάζει. Ο προτιμώμενος προσανατολισμός της εγκατάστασης του όμως γενικά είναι ο κάθετος με τη ροή προς τα πάνω. Με αυτόν τον προσανατολισμό, όταν δεν υπάρχει ροή, τα στερεά που έχουν εισαχθεί θα βυθιστούν προς τα κάτω, ενώ τα αέρια θα μπορούν να διαφύγουν προς τα άνω. Έτσι, ο σωλήνας μπορεί να αποστραγγισθεί τελείως μέχρι την επόμενη χρήση του(αυτόματη εκκένωση). Αυτός ο τρόπος εγκατάστασης προτιμάται και στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ και φαίνεται στο Σχήμα 2-17.



Σχήμα 2-17 Κατακόρυφη τοποθέτηση με ροή προς τα άνω [4]

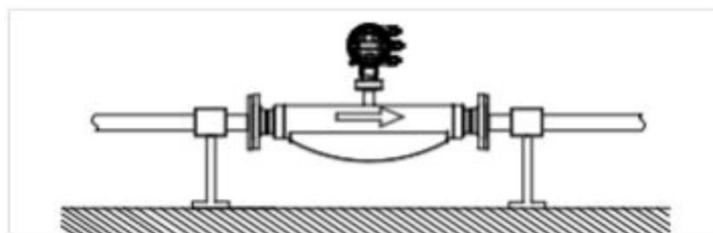
Η αντίστροφη τοποθέτηση δηλαδή ο αισθητήρας να τοποθετηθεί κατακόρυφα με τη φορά προς τα κάτω (Σχήμα 2-18) δεν είναι απαγορευτική. Σε αυτή την περίπτωση όμως, θα πρέπει να εξασφαλισθεί ότι η παροχή που διέρχεται από το όργανο θα είναι επαρκής έτσι ώστε οι σωλήνες εσωτερικά του οργάνου να παραμένουν πλήρως γεμάτοι με το μετρούμενο ρευστό προς ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης.



Σχήμα 2-18 Κατακόρυφη τοποθέτηση με ροή προς τα κάτω [4]

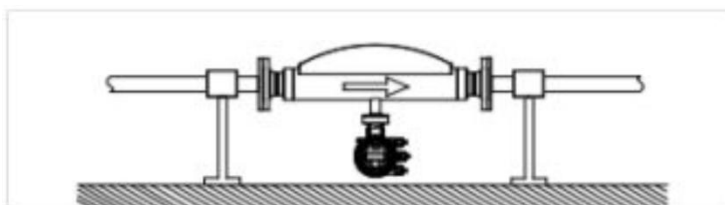
Στην περίπτωση οριζόντιας εγκατάστασης η κατασκευαστική εταιρεία ABB προτείνει δύο ξεχωριστές εγκαταστάσεις του οργάνου ανάλογα με τη φύση του ρευστού.

- Αν το εργαζόμενο μέσο είναι υγρό τότε η προτεινόμενη θέση είναι με τα κοίλα προς τα πάνω (Σχήμα 2-19), ενώ θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ο αισθητήρας να μην εγκατασταθεί στο υψηλότερο σημείο της εγκατάστασης με σκοπό την αποφυγή συσσώρευσης φυσαλίδων στο σωλήνα και κατ' επέκταση την αποφυγή σφαλμάτων.



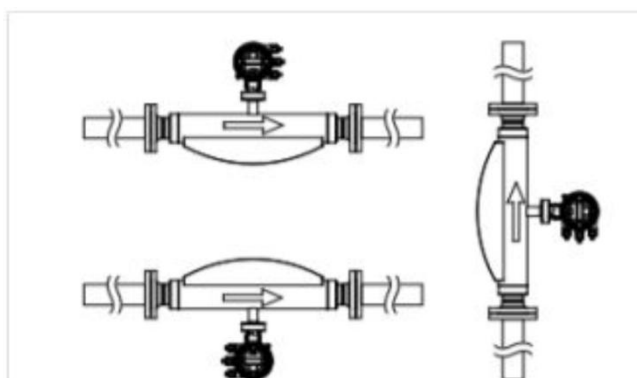
Σχήμα 2-19 Οριζόντια τοποθέτηση για εργαζόμενο μέσο υγρό [4]

Αν το εργαζόμενο μέσο είναι αέριο τότε η προτεινόμενη θέση είναι με τα κοίλα προς τα κάτω (Σχήμα 2-20).

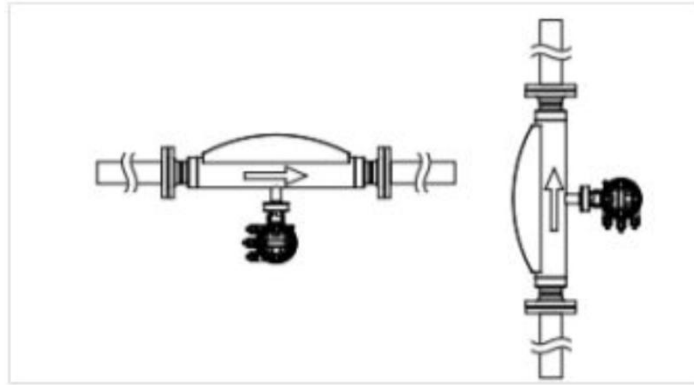


Σχήμα 2-20 Οριζόντια τοποθέτηση για εργαζόμενο μέσο αέριο [4]

Για λόγους πληρότητας αναφέρονται παρακάτω και οι θέσεις που προτιμώνται ανάλογα με τη θερμοκρασία του μετρούμενου ρευστού (Σχήμα 2-21, Σχήμα 2-22).



Σχήμα 2-21 Τοποθέτηση για μέση θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου $T_{Μέση} - 50...120^{\circ}C$ [4]



Σχήμα 2-22 Τοποθέτηση για μέση θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου $T_{Μέση}$ - 50...200°C [4]

Τέλος ο μετατροπέας μέτρησης θα πρέπει να βρίσκεται σε θέση που να μην υπόκειται σε κραδασμούς και να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 10 m από τον αισθητήρα για την περίπτωση του καλωδίου τύπου LI@YCY PiMF με διαστάσεις 5x2x0,5 mm².

Αναλυτικότερη παρουσίαση του οργάνου ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας ΔΕ και για περισσότερες πληροφορίες προτείνεται στον αναγνώστη το εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρείας ABB [4] και η Μεταπτυχιακή Εργασία (ΜΕ) [5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΡΟΟΜΕΤΡΟ

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της αρχής λειτουργίας καθώς και των βασικών χαρακτηριστικών του μαγνητικού ροομέτρου (MFM), που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων της παρούσης ΔΕ. Έπειτα, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαβαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στο ροόμετρο αυτό σε σχέση με το ροόμετρο Coriolis στο πλαίσιο του περιαματικού μέρους της εργασίας. Πρόκειται για ροόμετρο της εταιρείας Heinrichs³.

3.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά ροόμετρα

Το μαγνητικό ροόμετρο (γνωστό και ως ηλεκτρομαγνητικό ή επαγωγικό) αποτελεί ένα από τα πιο ευέλικτα και καθολικά εφαρμόσιμα διαθέσιμα συστήματα μέτρησης της ροής υγρού. Παρέχει τη μέτρηση της ροής χωρίς περιορισμούς, καθώς είναι σχεδόν ανεξάρτητο των ιδιοτήτων του ρευστού. Τα ροόμετρα αυτά είναι ιδανικά για τη μέτρηση άκρως διαβρωτικών υγρών, σκληρών χημικών ουσιών και γενικά υγρά τα οποία είναι δύσκολα μετρήσιμα. Μαγνητικά ροόμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες αποβλήτων, χαρτιού, χημικές, τροφίμων κ.α.

Στην ουσία, το μαγνητικό ροόμετρο παρέχει την μέτρηση της ροής με ένα σήμα που είναι εγγενώς γραμμικό με τη μέση ογκομετρική ροή, ανεξάρτητο από την θερμοκρασία, την πίεση, την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι το υγρό που το διαρρέει θα πρέπει να είναι αγωγίμο και μη μαγνητικό.

Η αρχή λειτουργίας του μαγνητικού ροομέτρου βασίζεται στο νόμο της επαγωγής του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο: *ευθύγραμμος αγωγός κινούμενος εντός μαγνητικού πεδίου, κάθετα στις μαγνητικές γραμμές αυτού, εμφανίζει ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ' επαγωγής στα άκρα του η οποία είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου, του μήκους του αγωγού και της ταχύτητας κίνησης του* (Σχέση 3-1). Στην περίπτωση των μαγνητικών ροομέτρων ο αγωγός είναι το ίδιο το μετρούμενο ρευστό, ενώ το μήκος του (l) ισούται με την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα (D) από τον οποίο διέρχεται το ροόμετρο και ο οποίος διαπερνάται από τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου κάθετα προς τον άξονα του. Λόγω της κίνησης του αγωγίμου ρευστού και σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (Η.Ε.Δ) η οποία συνδέεται με την ταχύτητα του ρευστού κατά τη Σχέση 3-2. Η Η.Ε.Δ. αυτή μετρείται από ζεύγος ηλεκτροδίων τα οποία εφάπτονται στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα, χωρίς όμως να εισέρχονται στη ροή του ρευστού. Είναι κατασκευασμένα από ανθεκτικά μέταλλα όπως πλατίνα, ταντάλιο, hastelloy κ.α, ενώ εξυπακούεται ότι είναι ηλεκτρικά

³ <http://www.heinrichs.eu/>

μονωμένα ως προς το τοίχωμα του σωλήνα, το οποίο κατασκευάζεται συνήθως από Teflon, Ertalon, ή άλλα μη αγώγιμα υλικά. Στο Σχήμα 3-1 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας του μαγνητικού ροομέτρου. Στο σχήμα αυτό με V συμβολίζεται η ταχύτητα του αγώγιμου ρευστού, με B η μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής πεδίου, με E η αναπτυσσόμενη Η.Ε.Δ και με D η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα ροής

$$E = B \cdot V \cdot l \quad \text{Σχέση 3-1}$$

.ή στην περίπτωση των μαγνητικών ροομέτρων

$$E = B \cdot V \cdot D \quad \text{Σχέση 3-2}$$

Όπου:

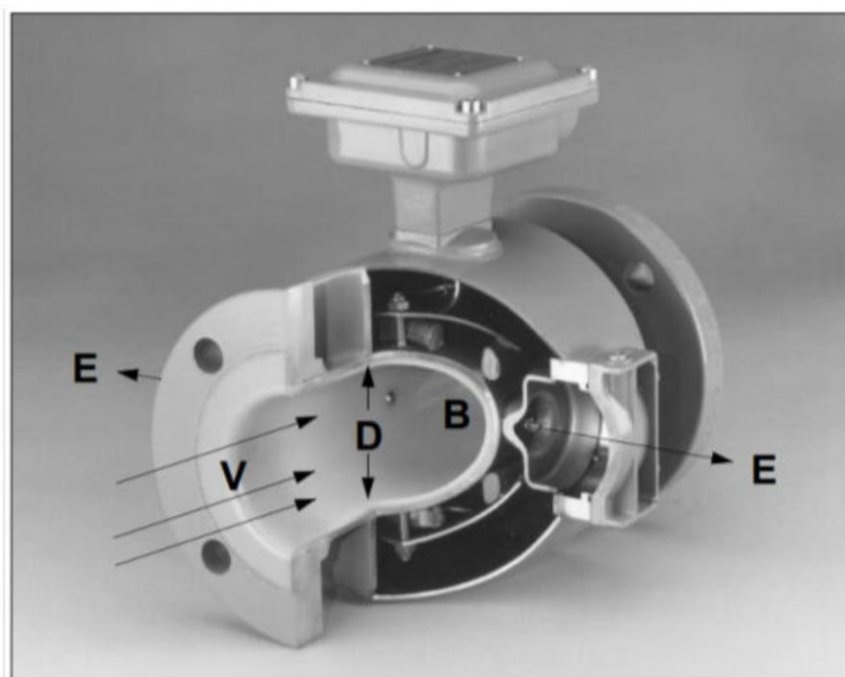
E : ΗΕΔ από επαγωγή (V)

B : Μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής (T ή Wb/m^2 ή $\text{V}\cdot\text{s/m}^2$)⁴

V : Μέση ταχύτητα ροής ρευστού (m/s)

l : Μήκος του αγωγού (m)

D : Εσωτερική διάμετρος σωλήνα (m)



Σχήμα 3-1 Τομή μαγνητικού ροομέτρου⁵

⁴ $1 \text{ T} = 1 \text{ V}\cdot\text{s/m}^2$

⁵ Μαγνητικό ροόμετρο με εμπορική ονομασία Model 8705 Magnetic Flowmeter Tube. Rosemount Inc «Magnetic Flowmeter Fundamentals,» September 1995

Από την τιμή της Η.Ε.Δ σύμφωνα με τη Σχέση 3-2, εκτιμάται η μέση ταχύτητα του ρευστού (V) από την οποία για τη γνωστή διατομή (A) του σωλήνα ροής προκύπτει η παροχή όγκου του ρευστού (Σχέση 3-3).

$$Q = V \cdot A \quad \text{Σχέση 3-3}$$

Όπου

Q : παροχή όγκου (m³/s)

A : Διατομή του σωλήνα (m²)

V : Μέση ταχύτητα ροής ρευστού (m/s)

Έτσι η ενσωμάτωση του όρου Q κάνει πρακτική την Σχέση 3-2 για μέτρηση της ροής (Σχέση 3-4):

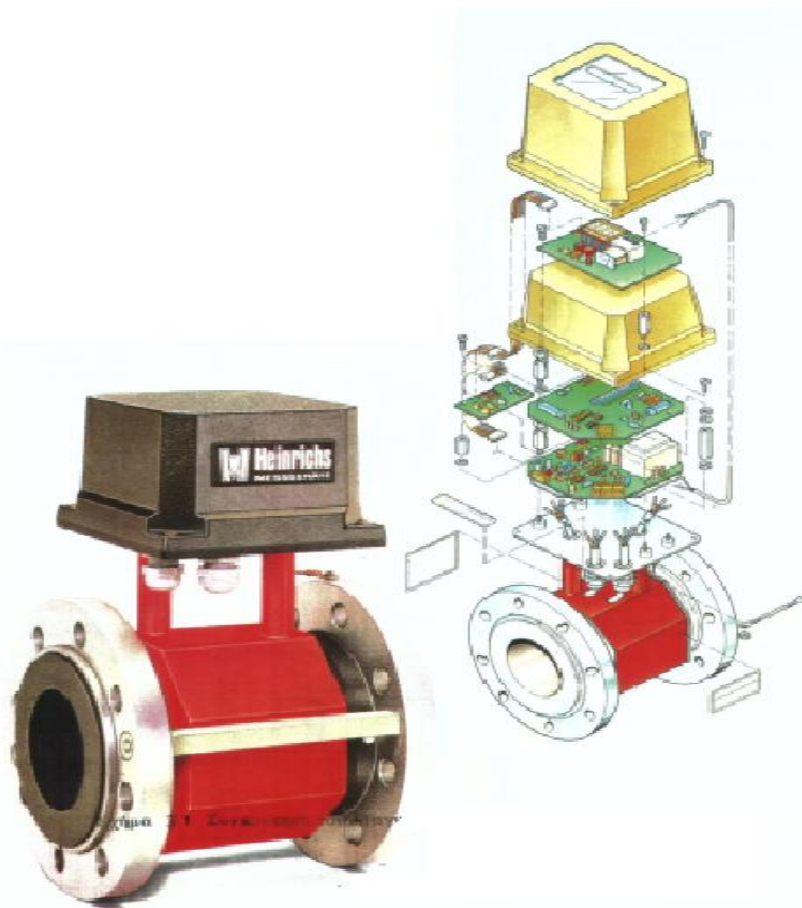
$$E = \frac{B \cdot D \cdot Q}{A} \quad \text{Σχέση 3-4}$$

Οι εξισώσεις αυτές εξηγούν με απλά λόγια την αρχή λειτουργίας του μαγνητικού ροομέτρου και την εγγενώς γραμμική σχέση της μέσης ταχύτητας ροής και της επαγόμενης τάσης.

3.2 Μαγνητικό ροόμετρο EUROPIK - 567

Το μαγνητικό ροόμετρο που χρησιμοποιείται στην παρούσα ΔΕ είναι ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρομαγνητικό ροόμετρο σε περίβλημα πολυπροπυλενίου ενώ τα ηλεκτρόδια του είναι κατασκευασμένα από το υλικό hastelloy C. Η ονομασία του είναι EUROPIK – 567. Υπακούει στην αρχή λειτουργίας των μαγνητικών ροομέτρων που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα §3.1. Το ροόμετρο έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτηθεί με συνεχές (DC) είτε με εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα και συγκεκριμένα δέχεται τις εξής τάσεις τροφοδοσίας : 250, 125, 220, 110, 24 V AC & 24 V DC.

Στην έξοδο του το όργανο επιστρέφει σήμα εντάσεως ή/και ηλεκτρικούς παλμούς. Για την περίπτωση του σήματος εντάσεως ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις περιοχές 0÷20 mA ή 4÷20 mA.



Σχήμα 3-2 Μαγνητικό ροόμετρο EUROPIK – 567 [6]

Το συγκεκριμένο ροόμετρο αποτελείται από το σωλήνα μετρήσεων όπου ρέει το προς μέτρηση ρευστό και ένα μεταλλικό κιβώτιο προσαρμοσμένο πάνω από τον σωλήνα μετρήσεων όπου και βρίσκονται τα ηλεκτρονικά του ροομέτρου. Τα ηλεκτρονικά αυτά περιλαμβάνουν μονάδα (U32) που μετατρέπει τη ροή της παροχής σε αναλογικό σήμα, μονάδα PCB⁶ που κάνει μετατροπή σε παλμούς και όλα τα βοηθητικά ηλεκτρονικά που χρειάζονται. Το τροφοδοτικό είναι κοινό για όλα τα επί μέρους όργανα του ροομέτρου.

Ο χρήστης μπορεί να εκμεταλλευτεί είτε την αναλογική έξοδο είτε την έξοδο των παλμών. Στην περίπτωση της αναλογικής εξόδου χρειάζεται είτε ένα βολτόμετρο, είτε έναν αναλογηφιακό μετατροπέα (ADC) για να διαβάσει την ένδειξη. Στην περίπτωση εξόδου παλμών χρειάζεται ένας μετρητής παλμών PCB για την μέτρηση τους. Στην παρούσα ΔΕ επιλέχθηκε η αναλογική έξοδος, δηλαδή η αναλογική πληροφορία θα οδηγηθεί σε έναν ADC. Σε αυτήν την περίπτωση δεν μας χρειάζεται η έξοδος παλμών, γι' αυτό και δεν ασχολούμαστε με τη μονάδα του μετρητή παλμών PCB. Μας ενδιαφέρει μόνο η μονάδα του μετατροπέα U32. Όλες οι ρυθμίσεις λειτουργίας και ο προγραμματισμός του ροομέτρου αναφέρονται στη ΔΕ [6] και πραγματοποιήθηκαν με βάση το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

⁶ PCB : Pulse Converter Board

Το ροόμετρο είναι ρυθμισμένο στην περιοχή λειτουργίας:

$$0 < Q < 41.67, L/min$$

Το αναλογικό σήμα εξόδου του ροομέτρου είναι ρεύμα εντάσεως στην περιοχή 0÷20 mA. Για να είναι διαθέσιμη η ένδειξη της παροχής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή παρεμβάλλονται με τη σειρά τα ακόλουθα στοιχεία :

- Ωμική αντίσταση 500 Ω
- Αναλογηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter ή ADC)
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (H/Y)

Ο λόγος που παρεμβάλλεται η ωμική αντίσταση είναι για να μετατρέψει το σήμα ρεύματος σε σήμα τάσης, όπως απαιτείται για να τροφοδοτηθεί στον ADC. Δηλαδή :

$$V = I \cdot R \quad \text{Σχέση 3-5}$$

Όπου

$$R = 500 \Omega$$

$$\text{Για } I = 0 \text{ mA} \quad - \quad V = 0 \text{ Volt}$$

$$\text{Για } I = 20 \text{ mA} \quad - \quad V = 10 \text{ Volt}$$

Ο ADC μετατρέπει το αναλογικό σήμα τάσεως με το οποίο τροφοδοτείται σε ψηφιακό σήμα και το προωθεί στον H/Y για περαιτέρω επεξεργασία. Ο ADC που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι τύπου USB – 4704. Η περιγραφή και τα βασικά του χαρακτηριστικά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5.

3.3 Διαβαθμονόμηση μαγνητικού ροομέτρου EUROPIK -567

Πριν την έναρξη του εργαστηριακού πειράματος πραγματοποιήθηκε διαβαθμονόμηση του μαγνητικού ροομέτρου EUROPIK -567 σε σχέση με το ροόμετρο Coriolis FCB350 ώστε να μην υπάρχει αμφιβολία για την ορθότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η βαθμονόμηση αυτή έγινε αποκλειστικά για τις ανάγκες της παρούσης ΔΕ, ενώ η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε καθώς και το πρόγραμμα το οποίο συντάχθηκε σε περιβάλλον LabVIEW περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

Γενικά το ροόμετρο Coriolis είναι όργανο με αρκετά καλύτερη ακρίβεια μετρήσεων, σαφώς πολύ νεότερο τεχνολογικά και με πολύ λιγότερες ώρες λειτουργίας σε σχέση με το MFM. Επιπλέον, το ροόμετρο Coriolis συνοδεύεται από πιστοποιητικό βαθμονόμησης της κατασκευάστριας εταιρείας ABB ενώ έχει πραγματοποιηθεί και έλεγχος της βαθμονόμησης του ροομέτρου για δύο περιοχές λειτουργίας στο πλαίσιο

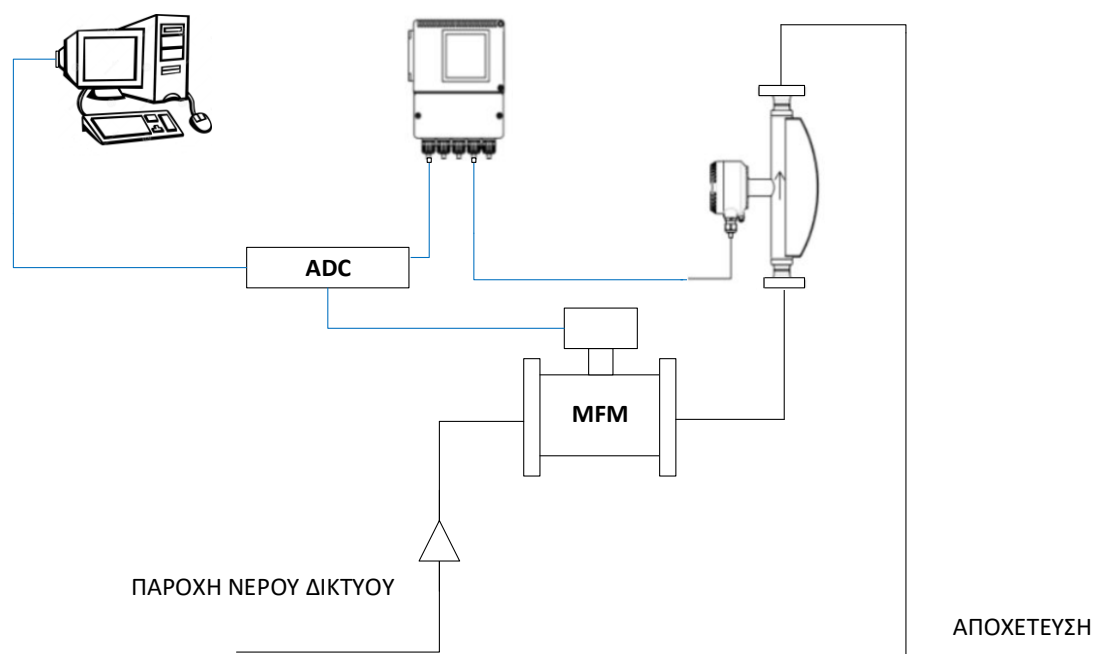
της ΜΕ [5]. Η πρώτη περιοχή περιλαμβάνει παροχές 0 ± 80 kg/h και επιλέχθηκε δεδομένου ότι το ροόμετρο επρόκειτο να τοποθετηθεί στη θερμοϋδραυλική εγκατάσταση του ΕΠΤ–ΕΜΠ για την παροχή κεκορεσμένου ατμού μέγιστης παροχής 80 kg/h. Η δεύτερη περιοχή, δεδομένου ότι το ροόμετρο έχει δυνατότητα μέτρησης μέγιστης παροχής νερού έως 8 tn/h, επιλέχθηκε με σκοπό να καλύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος της περιοχής αυτής. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη παροχή περιορίστηκε στα 1500 kg/h, σύμφωνα με τη δυναμικότητα του δικτύου ύδρευσης του εργαστηρίου. Από τον έλεγχο αυτής της βαθμονόμησης του Coriolis συμπεραίνουμε σε κάθε περίπτωση την ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του πιστοποιητικού βαθμονόμησης της ABB.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το ροόμετρο Coriolis θεωρήθηκε ακριβές και ήταν αυτό σύμφωνα με το οποίο βαθμονομήθηκε το MFM.

Για τη βαθμονόμηση του MFM χρησιμοποιήθηκαν:

- Η/Υ
- MFM EUROPIK - 567
- Ροόμετρο Coriolis
- ADC

Τα δύο ροόμετρα συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και στη συνέχεια συνδέονται με διαφορική σύνδεση με τον ADC. Το Σχήμα 3-3 απεικονίζει τη σύνδεση ολόκληρης της πειραματικής διάταξης βαθμονόμησης.



Σχήμα 3-3 Πειραματική διάταξη για τη διαβαθμονόμηση του MFM

Ο ADC όπως αναλύθηκε παραπάνω λαμβάνει τα σήματα τάσεως και τα προωθεί στον Η/Υ όπου τα επεξεργαζόμαστε μέσω του προγράμματος LabVIEW.

3.3.1 Διαδικασία διαβαθμονόμησης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία της διαβαθμονόμησης του μαγνητικού ροομέτρου στην περιοχή λειτουργίας παροχών $1 \div 20$ L/min.

1. Αρχικά ενεργοποιείται το πρόγραμμα GVF_01.vi σε περιβάλλον LabVIEW.
2. Ανοίγει η παροχή νερού του δικτύου του ΕΜΠ και ρυθμίζεται στην επιθυμητή τιμή. Η τιμή αυτή διαβάζεται από την ένδειξη του ροομέτρου Coriolis στην οθόνη του ελεγκτή του ροομέτρου (display) ξεκινώντας με 1 L/min.
3. Αφού σταθεροποιηθεί η τιμή αυτή, ενεργοποιείται το πλήκτρο **Λήψη Μετρήσεων** του προγράμματος το οποίο αρχίζει να καταγράφει τις μετρήσεις της παροχής του νερού του ροομέτρου Coriolis και του MFM σε αρχείο κειμένου.
4. Η καταγραφή των μετρήσεων έχει διάρκεια 20 δευτερολέπτων. Με κατάλληλη ρουτίνα του προγράμματος υπολογίζεται η μέση τιμή τους ανά δευτερόλεπτο και στη συνέχεια υπολογίζεται η τελική μέση τιμή τους ανά παροχή. Τέλος, διακόπτεται η Λήψη Μετρήσεων πατώντας το αντίστοιχο πλήκτρο διακοπής.
5. Ακολουθούμε τα βήματα 2,3,4 μέχρις ότου η τιμή της παροχής του δικτύου φτάσει 20 L/min με βήμα 1 L/min κάθε φορά.
6. Τέλος, επιλέγεται το πλήκτρο **Stop** για το κλείσιμο του εφαρμογής του προγράμματος.

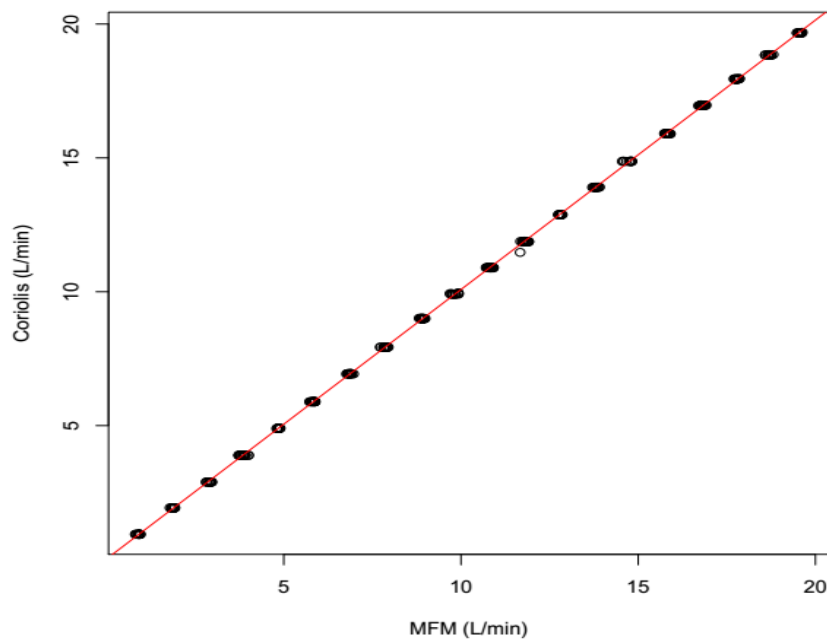
3.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποθηκεύονται σε αρχείο κειμένου. Τυπικό παράδειγμα των μετρήσεων που κατέγραψε το πρόγραμμα παρουσιάζεται στον Πίνακας 3-1 που ακολουθεί :

Πίνακας 3-1 Αποτελέσματα μετρήσεων διαβαθμονόμησης

α/α	CORIOLIS (L/min)	MFM (L/min)
1	0.9050	1.1250
2	1.9008	2.0100
3	2.9077	2.9954
4	3.9033	4.0008
5	4.9117	5.0300
6	5.9608	6.0717
7	6.9592	7.1275
8	7.9064	7.9736
9	8.8967	8.9983
10	9.9046	9.9623
11	10.9069	11.0538
12	11.9117	11.9425
13	12.9585	12.9777
14	13.8831	13.8715
15	14.8938	14.9538
16	15.8808	15.8615
17	16.9044	16.9261
18	17.9500	17.9073
19	18.9092	18.7869
20	19.6921	19.5979

Τα πειραματικά δεδομένα φαίνονται και διαγραμματικά στο παρακάτω Σχήμα 3-4:



Σχήμα 3-4 Coriolis = f (MFM)

Όπως παρατηρούμε υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών την οποία και θα εκτιμήσουμε στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου.

3.3.3 Στατιστική ανάλυση μετρήσεων

Η εκτίμηση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ της ένδειξης του Coriolis, η οποία θεωρείται η εξαρτημένη μεταβλητή, και της ένδειξης του MFM, η οποία θεωρείται ανεξάρτητη μεταβλητή πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη εφαρμογής σε περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος R η οποία εκτελεί ανάλυση παλινδρόμησης με έναν παράγοντα.

Στόχος της διαβαθμονόμησης είναι να προκύψει μια γραμμική συνάρτηση αναδρομής της μορφής :

$$y = a + b \cdot x \quad \text{Σχέση 3-6}$$

ή

$$Q_{CORIOLIS} = a + b \cdot Q_{MFM} \quad \text{Σχέση 3-7}$$

Όπου ,

$Q_{CORIOLIS}$: Τιμή της παροχής σύμφωνα με την ένδειξη του Coriolis

Q_{MFM} : Τιμή της παροχής σύμφωνα με την ένδειξη του MFM

a, b : Παράμετροι αναδρομής

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων της συνάρτησης αναδρομής χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (Σχέση 3-8, Σχέση 3-9):

$$b = \frac{\sum x_i \cdot y_i - n \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2} \quad \text{Σχέση 3-8}$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad \text{Σχέση 3-9}$$

Όπου $x_i = Q_{MFM}$

$$y_i = Q_{CORIOLIS}$$

Μετά τον υπολογισμό της ευθείας αναδρομής ακολουθούν υπολογισμοί ώστε να διαπιστωθεί πόσο καλή είναι η προσαρμογή της ευθείας στα πειραματικά σημεία. Έτσι υπολογίστηκαν οι παρακάτω δείκτες αξιοπιστίας:

- Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού R^2

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Σχέση 3-10}$$

Όπου,

$\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2$: Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων γύρω από τη μέση τιμή εξαιτίας της προσαρμογής ή αλλιώς ερμηνεύσιμη διακύμανση.

$\sum(y_i - \bar{y})^2$: Το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων του υπολογιζόμενου μεγέθους γύρω από τη μέση τιμή ή αλλιώς ολική διακύμανση.

Αξιίζει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής αυτός λαμβάνει τιμές από 0...1, ενώ όσο πιο κοντά βρίσκεται στη μονάδα τόσο καλύτερα αντιστοιχούν τα πειραματικά σημεία στην ευθεία αναδρομής.

- Μη ερμηνεύσιμη διακύμανση (SSE)

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{Σχέση 3-11}$$

Ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων περί της ευθείας αναδρομής του μεγέθους y.

- Μεταβλητότητα αναδρομής s^2

$$s^2 = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{n - 2} \quad \text{Σχέση 3-12}$$

Όπου n είναι το μέγεθος του δείγματος.

- Σφάλματα παραμέτρων αναδρομής

$$Se(b) = \frac{s}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Σχέση 3-13}$$

$$Se(a) = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad \text{Σχέση 3-14}$$

Τα αποτελέσματα της ρουτίνας βιβλιοθήκης, `lm` του προγράμματος R, έτσι όπως αυτά επιστρέφονται από την εντολή `summary` παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2:

Πίνακας 3-2 Συνοπτικός πίνακας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παλινδρόμησης, έτσι όπως αυτός προέκυψε από την R με χρήση της εντολής summary

```
Call:
lm(formula = Coriolis ~ MFM)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.162654 -0.042883  0.002178  0.041122  0.195522

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.186574   0.009179  -20.32  <2e-16 ***
MFM          1.012376   0.000754 1342.74  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.07024 on 261 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9999,    Adjusted R-squared:  0.9999
F-statistic: 1.803e+06 on 1 and 261 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Τελικά η συνάρτηση αναδρομής προκύπτει :

$$y = -0.186574 + 1.012376 \cdot x \quad \text{Σχέση 3-15}$$

ή

$$Q_{CORIOLIS} = -0.186574 + 1.012376 \cdot Q_{MFM} \quad \text{Σχέση 3-16}$$

Ακολουθεί ο στατιστικός έλεγχος των παραμέτρων a,b της αναδρομής με test student.

- Στατιστικός έλεγχος a

Οι εξεταζόμενες υποθέσεις είναι οι εξής :

$H_0 : a = 0$, μηδενική υπόθεση

$H_1 : a \neq 0$, εναλλακτική υπόθεση

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί τιμή σύγκρισης t_0 σύμφωνα με τη Σχέση 3-17.

$$t_0 = \frac{a - 0}{se(a)} \quad \text{Σχέση 3-17}$$

Επομένως, $t_0 = - 20.32$

- Στατιστικός έλεγχος b

Οι εξεταζόμενες υποθέσεις είναι οι εξής :

$H_0 : b = 1$, μηδενική υπόθεση

$H_1 : b \neq 1$, εναλλακτική υπόθεση

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί τιμή του t_0 σύμφωνα με τη Σχέση 3-18.

$$t_0 = \frac{b - 1}{se(b)} \quad \text{Σχέση 3-18}$$

Επομένως, $t_0 = 16.41$

Μας ενδιαφέρει η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης και για το λόγο επιλέγουμε επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 5\%$.

Η κρίσιμη τιμή t_c για $v = N-2 = 261$ βαθμούς ελευθερίας (όπου $N=263$ ο αριθμός του δείγματος των μετρήσεων) και επίπεδο εμπιστοσύνης $1-\alpha$ είναι:

$$t_{c,0,975} = 1.96$$

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις ισχύει ότι $|t_0| > t_c$ και επομένως οι μηδενικές υποθέσεις απορρίπτονται. Εφόσον απορρίπτονται σε επίπεδο σημαντικότητας 5%, θα ελεγχθούν ξανά σε επίπεδο σημαντικότητας 1%. Η νέα κρίσιμη τιμή, για $v = 261$ βαθμούς ελευθερίας λαμβάνει την τιμή:

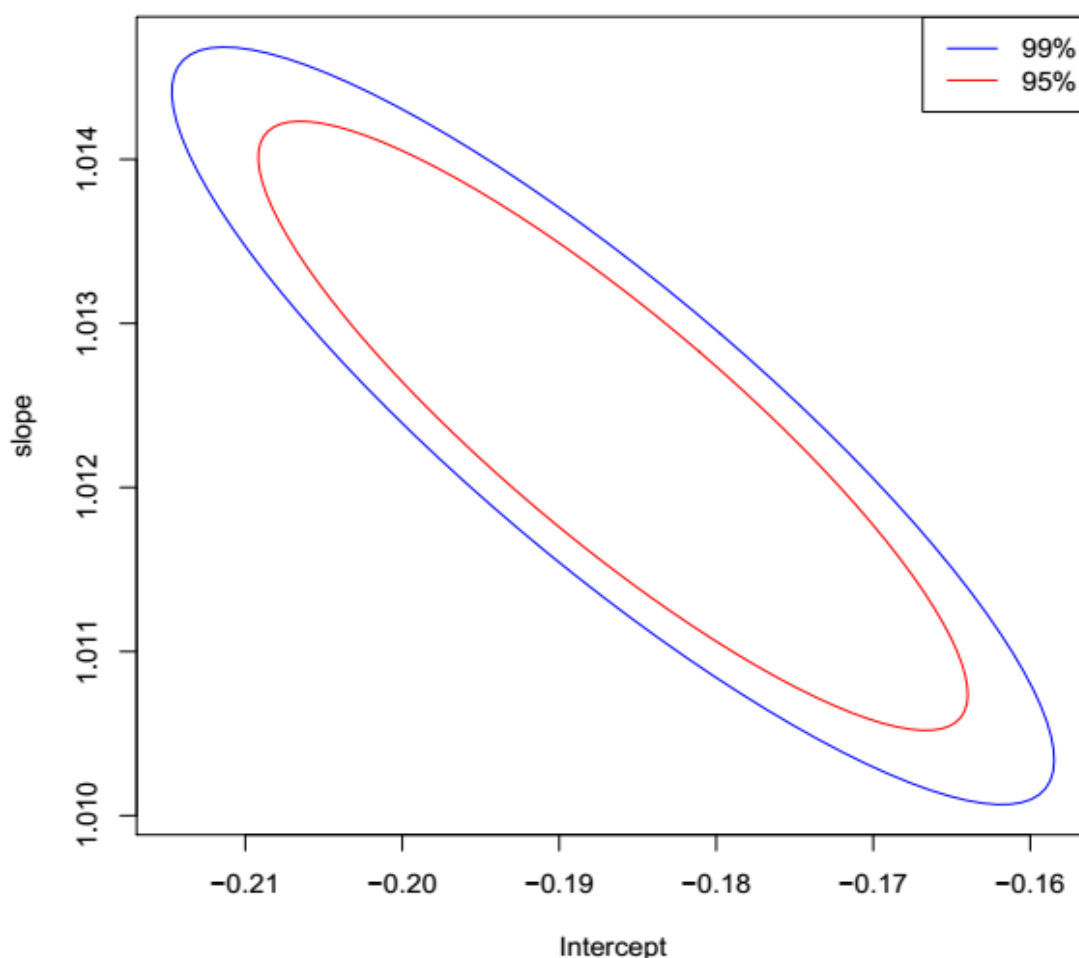
$$t_{c,0,995} = 2.59$$

Και σε αυτή την περίπτωση ισχύει $|t_0| > t_c$ και κατά συνέπεια οι μηδενικές υποθέσεις απορρίπτονται οριστικά. Συμπερασματικά η συνάρτηση αναδρομής θα εισαχθεί κανονικά στις μετρήσεις της αναλογικής εισόδου του MFM Heinrichs.

Στο σημείο αυτό είναι γόνιμο να ειπωθεί ότι η ρουτίνα της R η οποία πραγματοποιεί ανάλυση παλινδρόμησης εκτελεί και στατιστικό έλεγχο σημαντικότητας των παραμέτρων της αναδρομής. Παρατηρούμε στον Πίνακα 3-2 ότι έχουν υπολογισθεί οι τιμές σύγκρισης t_0 για τις δύο παραμέτρους και το p-value αυτών. Τέλος η σημαντικότητα των παραμέτρων ανάλογα του επιπέδου εμπιστοσύνης συμβολίζεται εποπτικά με έναν έως τέσσερις αστερίσκους (*).

Τέλος, έγινε η χρήση της ρουτίνας βιβλιοθήκης `ellipse` του προγράμματος R, ώστε να υπολογιστεί η έλλειψη εμπιστοσύνης των συντελεστών της Σχέση 3-7.

Στο παρακάτω Σχήμα 3-5 παρουσιάζονται οι ελλείψεις εμπιστοσύνης των δύο συντελεστών a , b για τα επίπεδα εμπιστοσύνης 95%, 99% στα οποία ελέγχθηκαν.



Σχήμα 3-5 Ελλείψεις εμπιστοσύνης συντελεστών a , b σε επίπεδα σημαντικότητας $\alpha=5\%$ και $\alpha=1\%$

Παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο από τα στατιστικά τεστ των παραμέτρων, ότι το σημείο $(0,1)$ δεν εμπεριέχεται εντός των ελλείψεων για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% και 99% αντίστοιχα.

3.3.4 Έλεγχος διαβαθμονόμησης MFΜ

Εν συνεχεία προκειμένου να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα της πειραματικής διαδικασίας και να επαληθευθεί η διαβαθμονόμηση του MFΜ, επαλαμβάνουμε το πείραμα εισάγοντας τη διορθωτική σχέση που εκτιμήσαμε.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το νέο πείραμα, έτσι όπως αυτά επιστρέφονται από τη συνάρτηση `summary` της R παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3 Συνοπτικός πίνακας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παλινδρόμησης, έτσι όπως αυτός προέκυψε από την R με χρήση της εντολής summary για το νέο πείραμα ελέγχου της διαβαθμολογίας

```
Call:
lm(formula = Coriolis ~ MFM)

Residuals:
Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.293131 -0.039744 -0.003203  0.035990  0.208400

Coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 0.0182923  0.0071147    2.571  0.0106 *
MFM          1.0064129  0.0006309 1595.100 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.06175 on 328 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9999,    Adjusted R-squared:  0.9999
F-statistic: 2.544e+06 on 1 and 328 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Παρατηρούμε ότι ο σταθερός όρος της συνάρτησης αναδρομής εμπίπτει οριακά εντός της περιοχής αβεβαιότητας, ως προς τη σημαντικότητα, ενώ και σε αυτήν την περίπτωση η κλίση της αναδρομής παραμένει στατιστικά διάφορη της μονάδος. Το γεγονός ότι δεν γίνονται αποδεκτές οι μηδενικές υποθέσεις, αποδίδεται στη διακύμανση του MFM, σε σχέση με το ροόμετρο Coriolis, αλλά και στα πολύ χαμηλά σφάλματα των παραμέτρων. Συμπερασματικά, η συμπεριφορά των οργάνων κρίνεται ικανοποιητική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ – ΚΛΑΣΜΑ ΚΕΝΟΥ

4.1 Εισαγωγή στη διφασική ροή

Γενικά, η διφασική ροή ορίζεται ως η ταυτόχρονη διέλευση δύο εκ των τριών διακριτών φάσεων (στερεά, υγρή, αέρια) οποιασδήποτε ουσίας ή και συνδυασμού ουσιών. Οι δύο φάσεις ενδεχομένως να είναι διαφορετικών συστατικών ενώ ενδέχεται να υπάρχει αλλαγή φάσης εξ' αιτίας της ατμοποίησης ή της συμπύκνωσης ενός ρευστού.

Το φαινόμενο της διφασικής ροής έχει τεράστια σημασία για έναν μηχανικό καθώς εμφανίζεται είτε εκούσια είτε ακούσια σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, όσον αφορά την εκούσια εφαρμογή διφασικής ροής, η εγκατάσταση καναλιών διφασικού μίγματος έχει αποδειχθεί οικονομική λύση στη μεταφορά πετρελαίου καθώς μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη ταχύτητα ροής του μίγματος και άρα να μειώσει αισθητά το χρόνο μεταφοράς τους. Προτείνονται ακόμα και στον καθαρισμό της ατμόσφαιρας και την σωστή εκμετάλλευση των αποβλήτων των βιομηχανιών. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η αποτελεσματικότητα της διφασικής ροής να μεταφέρει ενέργεια και θερμότητα από μία θέση σε μία άλλη, παρέχοντας μία απλή μέθοδο για τη δημιουργία περιοχών μεγάλης επιφάνειας ώστε να επιτρέπονται αντιδράσεις μεταξύ αερίων και υδατοδιαλυτών ενώσεων.

Αντίθετα, διφασική ροή εμφανίζεται ακούσια σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικών δραστηριοτήτων (σε ατμοποιητές, συμπυκνωτές, λέβητες, αντλίες αερίων κ.α) κάτι που την καθιστά ανεπιθύμητη και εν τέλει πρόβλημα το οποίο χρήζει άμεσης μελέτης και διόρθωσης. Αποτελεί γενικό πρόβλημα στις βιομηχανίες καθώς δυσκολεύουν την διαδικασία μέτρησης της παροχής μάζας και της πυκνότητας του υγρού δημιουργώντας σφάλματα όσον αφορά την ακρίβεια της μέτρησης από τους μεταλλάκτες ροής. Έτσι, λόγω της συνήθους ύπαρξης του φαινομένου σε βιομηχανίες έχει μελετηθεί εκτενώς όλα αυτά τα χρόνια.

Η ροή ρευστού δύο φάσεων συναντάται κατά κόρον σε συστήματα πυρηνικής ενέργειας. Σε αντιδραστήρες νερού υπό πίεση (Pressurized Water Reactors ή PWR) ο ατμοποιητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας ο οποίος παράγει τον ατμό που χρειάζεται ο στρόβιλος για να μπει σε λειτουργία. Η ροή του ρευστού λοιπόν που υπάρχει μέσα στον ατμοποιητή όπως γίνεται κατανοητό γίνεται εξαιρετικά περίπλοκη και θα πρέπει να προβλέπεται με ακρίβεια προκειμένου να καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας καθώς και σε παροδικές και σύνθετες συνθήκες.

Ομοίως συμβαίνει και για τους Αντιδραστήρες Ζέοντος Ύδατος (Boiling Water Reactors ή BWR) όπου ο ατμός παράγεται στον ίδιο τον πυρήνα του αντιδραστήρα.

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο φάσεις στον πυρήνα. Η δυνατότητα καθορισμού της διφασικής ροής στις περιοχές της δέσμης των ράβδων και στα μεγάλων διαμέτρων κανάλια είναι εξαιρετικά σημαντική για την πρόβλεψη της ασφάλειας και των χαρακτηριστικών αυτών των αντιδραστήρων.

Η παρούσα ΔΕ ασχολείται με την ακούσια εφαρμογή της διφασικής ροής νερού-αέρα και πραγματεύεται τη συμπεριφορά του ροομέτρου Coriolis FCB-350 υπό διφασική ροή νερού-αέρα με σκοπό την διόρθωση των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις μετρήσεις της παροχής μάζας και της πυκνότητας που λαμβάνονται στο πλαίσιο πειραμάτων στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου, παρουσιάζονται γενικά χαρακτηριστικά της διφασικής ροής υγρού-αερίου όπως προκύπτουν από τη διεθνή βιβλιογραφία και παραθέτονται επιστημονικές μελέτες με σκοπό την βαθύτερη κατανόηση του αναγνώστη πάνω στο φαινόμενο της διφασικής ροής και της προβληματικής συμπεριφοράς των ροομέτρων υπό τις συνθήκες αυτές [7] [8] [9] [10] [11].

4.2 Κλάσμα Κενού – Gas Void Fraction

Το κλάσμα κενού ή αλλιώς Gas Void Fraction (GVF) ορίζεται γενικά ως το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο στο μίγμα υπό διφασική ροή υγρού-αερίου και ως εκ τούτου πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος. Πρόκειται για θεμελιώδη και ζωτικής σημασίας συντελεστή που βοηθά στη λεπτομερειακή μελέτη μίας διφασικής ροής. Είναι απαραίτητο για τους υπολογισμούς πολλών άλλων μεγεθών όπως είναι η πυκνότητα, το ιξώδες του μίγματος των δύο φάσεων, η πραγματική μέση ταχύτητα ροής κάθε φάσης ξεχωριστά του μίγματος, η πτώση πίεσης, η μεταφορά θερμότητας. Είναι απαραίτητο να κατανοηθεί πλήρως η έννοια του κλάσματος κενού και να διαχωριστεί συνειδητά από την έννοια της ποιότητας του μίγματος.

Υπάρχουν διάφοροι γεωμετρικοί ορισμοί που σχετίζονται με την έννοια του GVF όπως είναι : a) το τοπικό κλάσμα κενού (local void fraction), b) το κλάσμα κενού διατομής (cross sectional void fraction), c) το ογκομετρικό κλάσμα κενού (volumetric void fraction). Οι ορισμοί αυτοί σχετίζονται βασικά με την τεχνική μέτρησης του κλάσματος κενού.

- a) Ο ορισμός του τοπικού κλάσματος κενού ή ϵ_{local} αντιπροσωπεύει το GVF σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο (ή πολύ μικρό όγκο όταν αναφερόμαστε σε πειραματικές μελέτες) στο εσωτερικό σωλήνα στον οποίο ρέει το διφασικό μίγμα νερού-αέρα. Συνεπώς ισχύει ότι $\epsilon_{local} = 0$ όταν το μίγμα περιλαμβάνει μόνο υγρό στοιχείο και αντίστοιχα $\epsilon_{local} = 1$ υπάρχει μόνο αέριο.

- b) Ο ορισμός του κλάσματος κενού διατομής ή ε_{c-s} έχει να κάνει με το GVF σε οποιαδήποτε διατομή του σωλήνα στον οποίο ρέει το διφασικό μίγμα. Πειραματικά καθορίζεται ως εξής (Σχέση 4-1) :

$$\varepsilon_{c-s} = \frac{A_G}{A_G + A_L}, \quad [0,1] \quad \text{Σχέση 4-1}$$

Όπου A_G η περιοχή της διατομής του σωλήνα που καταλαμβάνεται από αέρια φάση και A_L αντίστοιχα αυτή η περιοχή που καταλαμβάνεται από υγρή φάση.

- c) Ο ορισμός του ογκομετρικού κλάσματος κενού ή ε_{vol} όπως είναι κατανοητό αναφέρεται στο GVF σε οποιοδήποτε όγκο στο εσωτερικό του σωλήνα. Αυτός πειραματικά καθορίζεται ως εξής (Σχέση 4-2):

$$\varepsilon_{vol} = \frac{V_G}{V_G + V_L}, \quad [0,1] \quad \text{Σχέση 4-2}$$

Όπου V_G ο όγκος του σωλήνα που καταλαμβάνεται από αέρια φάση και V_L αντίστοιχα ο όγκος που καταλαμβάνεται από την υγρή φάση.

Η ποιότητα ενός μίγματος (static quality ή x_S) ορίζεται ως ο λόγος της ροής μάζας της αέριας φάσης ως προς τη ροή μάζας ολόκληρου του διφασικού μίγματος και λαμβάνει τιμές κι αυτή από 0 έως 1. Πολλές φορές κατά λάθος συγχέεται με τον ορισμό του κλάσματος κενού. Αν και οι ορισμοί συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα, είναι διαφορετικοί. Η ποιότητα του μίγματος εκφράζεται σε όρους μάζας και είναι συνάρτηση της πυκνότητας και του GVF. Πειραματικά μπορούμε να πούμε ότι ισχύει η Σχέση 4-3:

$$x_S = \frac{M_G}{M_G + M_L}, \quad [0,1] \quad \text{Σχέση 4-3}$$

Όπου

$M_G = \rho_G \cdot V_G$, η μάζα της αέριας φάσης

$M_L = \rho_L \cdot V_L$, η μάζα της υγρής φάσης

Λόγω της πολυπλοκότητας και της δυσκολίας κατανόησης της φυσικής του προβλήματος της κατανομής φάσης στη διφασική ροή υγρού-αερίου, η πλειονότητα των αναλύσεων που πραγματοποιούνται, στηρίζονται σε θεωρητικά μοντέλα και ακόμα περισσότερο σε εμπειρικές ή ημι-εμπειρικές συσχετίσεις του GVF με διάφορα μεγέθη αναλόγως τις ανάγκες της πειραματικής διεργασίας (π.χ όγκος του αερίου, ιξώδες υγρού, υγρασία στο μίγμα μεταξύ άλλων). Για λόγους απλότητας, τόσο τα θεωρητικά μοντέλα όσο και οι εμπειρικές συσχετίσεις που συλλέγονται από τη βιβλιογραφία αναφέρονται ως συσχετίσεις του GVF (Gas Void Fraction correlations)⁷.

Ένας Μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος με το δύσκολο εγχείρημα της επιλογής της σωστής συσχέτισης μεταξύ της πληθώρας των διαθέσιμων στη βιβλιογραφία συσχετίσεων. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί εξαιρετικά σημαντική ανησυχία καθώς οι περισσότερες από τις συσχετίσεις έχουν κάποια μορφή περιορισμών.

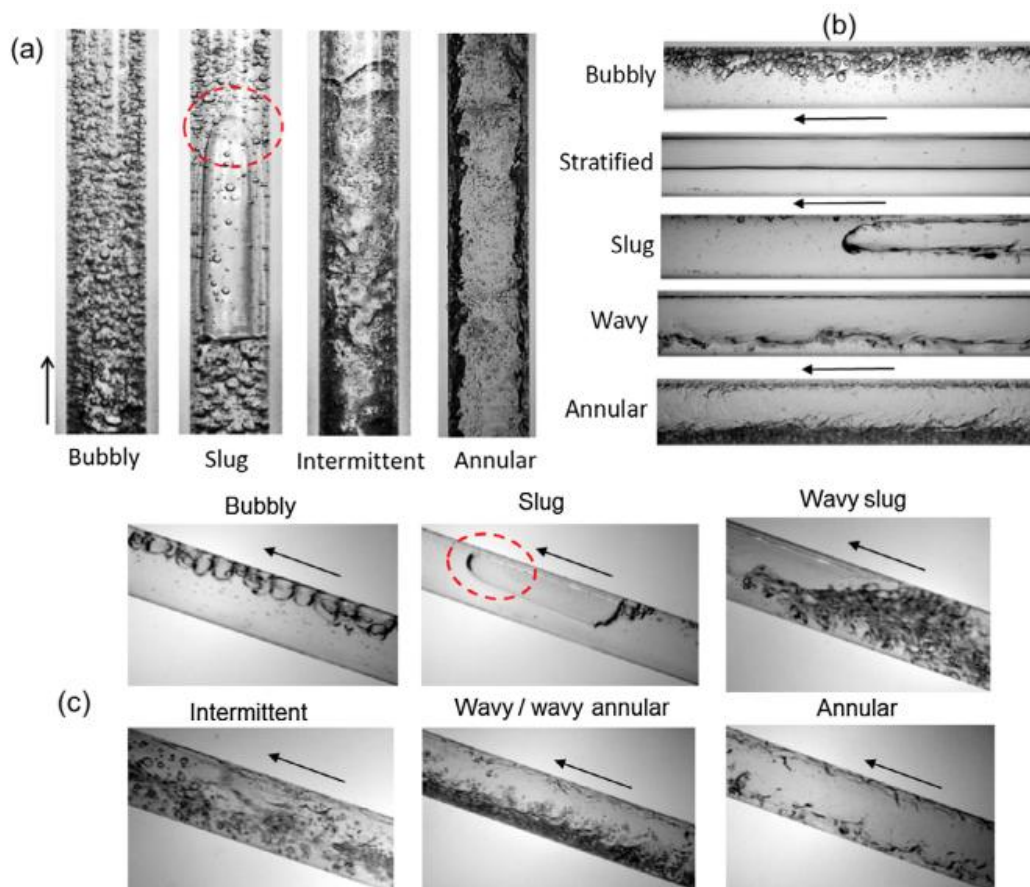
Η πλειονότητα των συσχετίσεων έχουν αναπτυχθεί περισσότερο για οριζόντια ροή ρευστού αν και υπάρχουν μερικές για κάθετη και επικλινή ροή. Στην έρευνα [12], μπορεί ο αναγνώστης να βρει 68 διαφορετικές συσχετίσεις ανάλογα με τους περιορισμούς που τίθενται. Οι βασικότεροι είναι ο προσανατολισμός του σωλήνα ροής και οι συνθήκες ροής του ρευστού (μοτίβο ροής, πυκνότητα, ιξώδες, αριθμός Reynolds)

4.3 Μοτίβα ροής

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πολυπλοκότητα της διφασικής ροής, δεν οφείλεται μόνο στις πολλές μεταβλητές που εμπλέκονται μέσα σε αυτήν (Κλάσμα κενού, πτώση πίεσης, ποιότητα, πυκνότητα, μέση ταχύτητα, μεταφορά θερμότητας του μίγματος) αλλά και στα διαφορετικά μοτίβα ροής που διαμορφώνονται ανάλογα με την ταχύτητα της ροής και τις ιδιότητες των δύο ρευστών που εμπλέκονται (πυκνότητα, συμπίεσιμότητα, ιξώδες) , τον προσανατολισμό του σωλήνα στον οποίο ρέουν ταυτόχρονα (κάθετος, οριζόντιος, υπό κλίση) καθώς και τις διαστάσεις του.

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι να γίνει η παρουσίαση της φυσικής δομής των βασικών μοτίβων της διφασικής ροής νερού-αέρα και οι μορφολογικές παραλλαγές αυτών ανάλογα με την ταχύτητα της ροής του κάθε ρευστού και τον προσανατολισμό του σωλήνα. Στο παρακάτω Σχήμα 4-1 απεικονίζονται τα βασικότερα μοτίβα ροής τα οποία αναλύονται στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

⁷ Συσχέτιση του GVF : Από εδώ και πέρα στην εργασία θα αναφέρεται ως συσχέτιση.



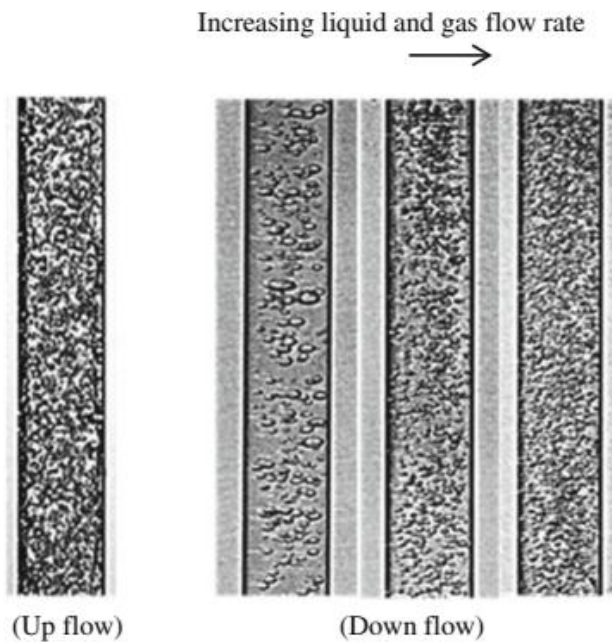
Σχήμα 4-1 Πραγματική απεικόνιση μοτίβων ροής στη διφασική ροή νερού-αέρος, (a) Κατακόρυφη ροή προς τα άνω, (b) οριζόντια ροή, (c) ροή σε κλίση προς τα άνω [11]

4.3.1 Ροή φυσαλίδων (Bubbly flow)

Το μοτίβο ροής φυσαλίδων *bubbly flow* παρατηρείται σε διφασικό μίγμα όπου υπάρχουν μεγάλες παροχές υγρού και μικρές παροχές αέρα και πρόκειται για το επιθυμητό μοτίβο ροής. Χαρακτηρίζεται από τη ροή μικρών αλλά διακριτών φυσαλίδων αέρα διασκορπισμένων σε συνεχή ροή υγρού. Το μέγεθος τους είναι πολύ μικρότερο από τη διάμετρο του σωλήνα, το σχήμα τους τυπικά σφαιρικό, και η κατανομή τους σχετικά ομοιόμορφη κατά το μήκος και πλάτος του σωλήνα.

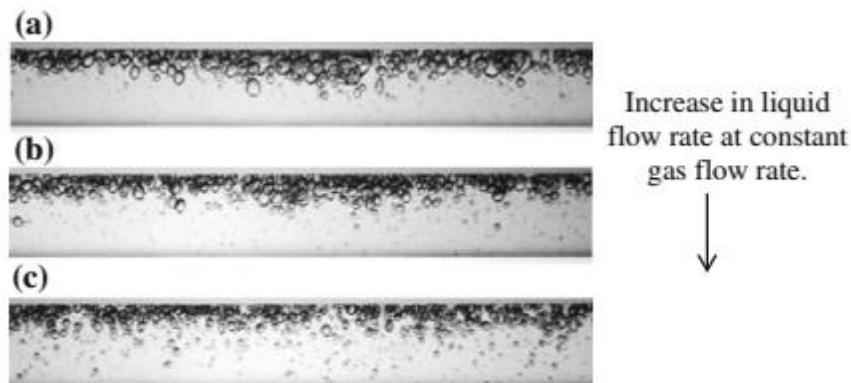
Φυσικά, όλα αυτά εξαρτώνται και αλλάζουν άμεσα από τη γεωμετρία του σωλήνα και τον προσανατολισμό του σωλήνα, καθώς και από την τιμή της παροχής του μίγματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1 οι φυσαλίδες μπορεί να έχουν εντελώς ασύμμετρη κατανομή και να είναι ανομοιόμορφες σε περιπτώσεις όπου ο σωλήνας δεν είναι εντελώς κάθετος. Αντίθετα όμως ενδέχεται να έχουν ομοιομορφία και συμμετρική κατανομή στο σωλήνα σε περιπτώσεις όπου αυτός είναι είτε εντελώς κάθετος είτε βρίσκεται σε κλίση αλλά η ροή υγρού βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα. Στο Σχήμα 4-2 απεικονίζεται το μοτίβο ροής *bubbly flow* για κάθετη ροή προς τα πάνω και προς τα

κάτω και μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε πως όσο πιο μεγάλες είναι η παροχή αερίου και η παροχή νερού στο μίγμα τόσο πιο μικρές και πυκνές γίνονται οι φυσαλίδες που δημιουργούνται.



Σχήμα 4-2 Φυσική απεικόνιση του μοτίβου *Bubbly flow* σε κατακόρυφη ροή προς τα άνω (αριστερά) και προς τα κάτω (δεξιά) [10]

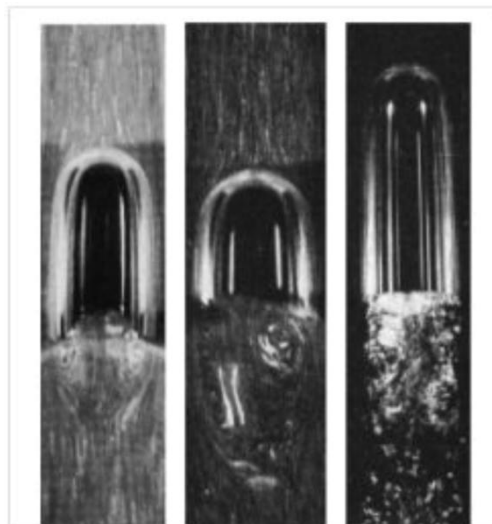
Τέλος, στο παρακάτω Σχήμα 4-3, απεικονίζονται οι φυσαλίδες αέρα που δημιουργούνται μέσα στη ροή του νερού για οριζόντιο προσανατολισμό του σωλήνα και ορισμένη τιμή της παροχής του αέρα, αυξάνοντας μόνο την τιμή της παροχής του νερού. Παρατηρείται πως οι φυσαλίδες αέρα στην περίπτωση αυτή έχουν στενή διεπαφή μεταξύ τους καθώς και με το άνω μέρος του σωλήνα ροής. Όσο αυξάνεται η ροή υγρού βλέπουμε ότι οι φυσαλίδες συρρικνώνονται και αραιώνουν μεταξύ τους διατηρώντας όμως επαφή με το άνω τοίχωμα του σωλήνα.



Σχήμα 4-3 Φυσική απεικόνιση του *Bubbly flow* σε οριζόντια ροή [10]

4.3.2 Ροή σφαιριδίων - Slug flow

Το μοτίβο ροής *slug flow* χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ροής σφαιριδίων (slugs) υγρού και αερίου κατά μήκος της ροής του ρευστού και εμφανίζεται για μικρές παροχές αερίου και μικρές έως μέτριες παροχές υγρού. Για ορισμένη γεωμετρία του σωλήνα και διαφασική ροή νερού-αέρος, το σχήμα τους είναι στη μορφή της σφαίρας όπλου δηλαδή επιμηκυμένο σφαιρίδιο με ημισφαιρική μύτη και αμβλεία ουρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4. Σε αυτό το μοτίβο ροής, το μέγεθος και η συχνότητα των slugs εξαρτώνται κυρίως από τη συνολική παροχή του μίγματος και δευτερευόντως από την κλίση του σωλήνα. Οι απεικονίσεις του μοτίβου αυτού στο Σχήμα 4-1 μας δείχνουν ότι για οριζόντια και γενικά μη κάθετη κλίση σωλήνα με ροή προς τα άνω, το slug αέρα σχεδόν προσκολλάται στο άνω τοίχωμα, ενώ στην περίπτωση της κάθετης κλίσης σωλήνα είναι συμμετρικά κατανομημένο γύρω από τον άξονα του. Εδώ, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι διαφορετικές μορφές του μοτίβου και τα διαφορετικά σχήματα των slugs επηρεάζουν σημαντικά την πτώση πίεσης και την μεταφορά θερμότητας.

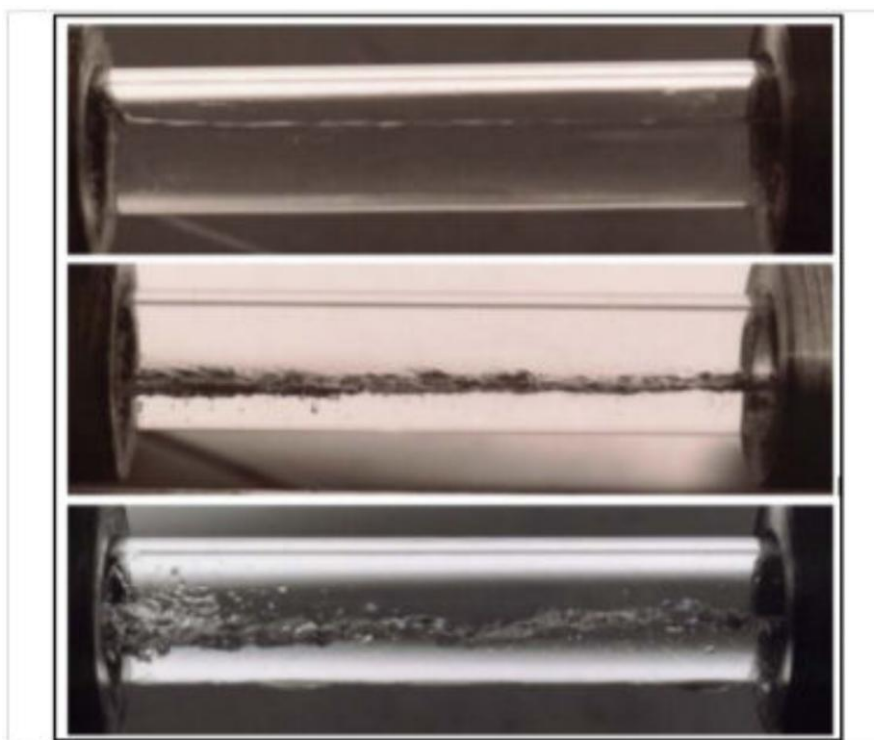


Σχήμα 4-4 Απεικόνιση μοτίβου ροής *Slug flow* σε όλο και αυξανόμενες ροές αερίου ξεκινώντας από τα αριστερά του σχήματος σε κατακόρυφη ροή προς τα άνω

4.3.3 Στρωματοποιημένη ροή - Stratified flow

Στο μοτίβο στρωματοποιημένης ροής stratified flow σχηματίζονται δύο στρώματα σε οριζόντια ροή του ρευστού, ένα στρώμα υγρού και ένα αερίου, τα οποία ρέουν παράλληλα μεταξύ τους έτσι ώστε το κάτω μέρος του σωλήνα να βρίσκεται πάντα σε επαφή με την υγρή φάση και ως αποτέλεσμα το πάνω μέρος του με την αέρια φάση. Αυτή η ροή μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο υποκατηγορίες: στην ομαλή στρωματοποιημένη ροή (smooth stratified flow) και στην κυματώδη

στρωματοποιημένη ροή (wavy stratified flow) (Σχήμα 4-5). Η ομαλή ροή σχηματίζεται για χαμηλές παροχές υγρού και αερίου, ενώ χαρακτηρίζεται από τον πλήρη διαχωρισμό των δύο φάσεων έχοντας ωστόσο ομαλή και σταθερή διεπαφή. Σε αντίθεση, σε υψηλές παροχές αερίου, σχηματίζεται η κυματώδης ροή η οποία χαρακτηρίζεται από την κυματοειδή και ανώμαλη διεπαφή των δύο φάσεων. Σε σχετικά υψηλές τιμές παροχής υγρού και αερίου η διεπιφανειακή αστάθεια προκαλεί κύματα διαταραχής μεταξύ τους που αναπτύσσονται και τείνουν να αγγίζουν τα τοιχώματα του σωλήνα.



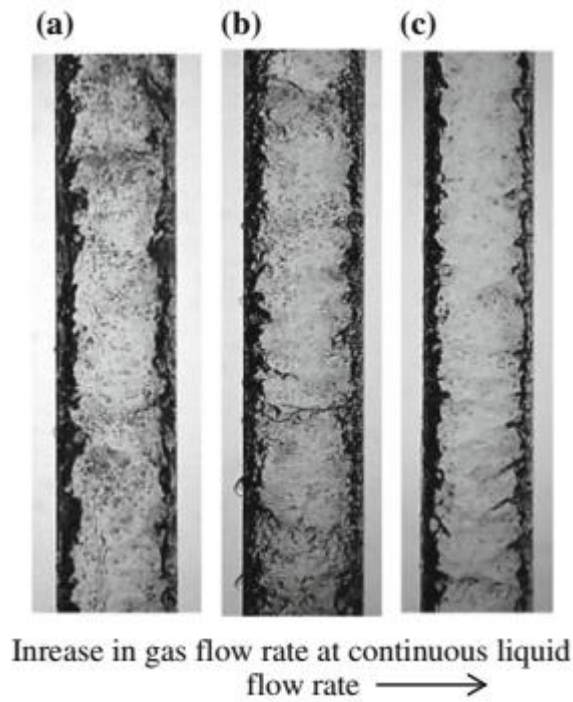
Σχήμα 4-5 Απεικόνιση μοτίβου ροής: (πάνω) Ομαλή, (μεσαία και κάτω) Κυματώδης στρωματοποιημένη ροή⁸

4.3.4 Δακτυλιοειδής ροή - Annular flow

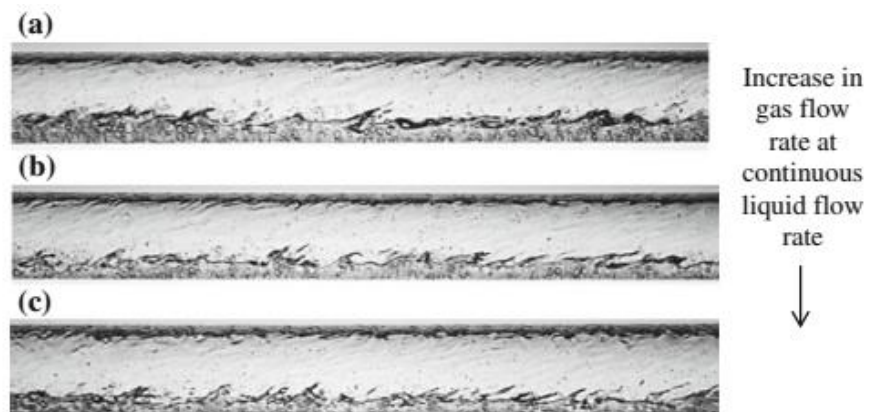
Το μοτίβο δακτυλιοειδούς ροής *Annular flow* πρόκειται για ένα από τα πιο μελετημένα μοτίβα βιβλιογραφικά όσον αφορά τη διφασική ροή. Σχηματίζεται κυρίως για χαμηλές παροχές υγρού και υψηλές παροχές αερίου. Περιγράφεται ως η ροή υγρού φιλμ που βρίσκεται σε επαφή με το τοίχωμα του σωλήνα και περιβάλλει τον κεντρικό πυρήνα του αερίου που ρέει διατηρώντας μία συνεχόμενη, καθορισμένη

⁸ WOLVERINE TUBE, INC., «Chapter 12: Two-Phase Flow Patterns,» *Engineering Data Book III*, Updated in 2007

διεπαφή μεταξύ των δύο αυτών φάσεων (Σχήμα 4-6). Για μη κάθετους προσανατολισμούς, το πάχος του υγρού φιλμ στο κάτω τοίχωμα του σωλήνα, είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό που έρχεται σε επαφή με το άνω τοίχωμα (Σχήμα 4-7).



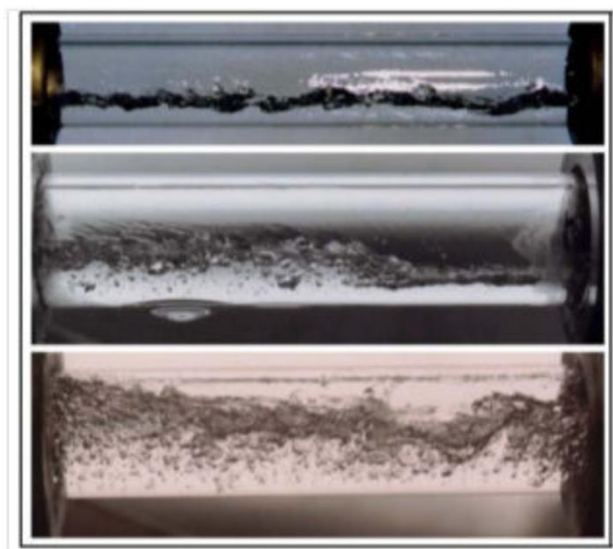
Σχήμα 4-6 Φυσική απεικόνιση μοτίβου ροής *Annular flow* σε κατακόρυφη ροή προς τα άνω σε όλο και αυξανόμενες παροχές αερίου [10]



Σχήμα 4-7 Μοτίβο ροής *Annular flow* σε οριζόντια ροή ρευστού για όλο και αυξανόμενες παροχές αερίου σε σταθερή ροή υγρού [10]

4.3.5 Διακοπτόμενη ροή - Intermittent flow

Το μοτίβο διακοπτόμενης ροής *Intermittent flow* που τυπικά σχηματίζεται για μέτριες παροχές υγρού και αερίου, πρόκειται για μία αναπαράσταση διφασικής ροής έχοντας αόριστα χαρακτηριστικά. Στην ουσία θα μπορούσε να πει κανείς πως αυτό το μοτίβο προκύπτει αν ‘συνυπάρξουν’ όλα τα υπόλοιπα μοτίβα ροής μαζί και τα οποία παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Δημιουργήθηκε από ερευνητές ώστε να μειωθεί η ασάφεια και η αβεβαιότητα όσον αφορά τον προσδιορισμό των ορίων μετάβασης μεταξύ ενός μοτίβου σε ένα άλλο. Στο παρακάτω Σχήμα 4-8 απεικονίζεται ενδεικτικά αυτό το μοτίβο ροής



Σχήμα 4-8 Απεικόνιση μοτίβου ροής *Intermittent flow* σε οριζόντια ροή για όλο και αυξανόμενες ταχύτητες ρευστού ξεκινώντας από πάνω⁹

Πέρα από τα μοτίβα ροής που αναλύθηκαν και πρόκειται για τα πιο σημαντικά, υπάρχουν και μερικά τα οποία είναι λίγο πιο σύνθετα και συνήθως βρίσκονται μεταξύ δύο μοτίβων ροής. Η ροή *plug flow* είναι ένα μοτίβο ροής του οποίου η μορφή βρίσκεται ανάμεσα στη ροή *bubbly flow* και *stratified flow*. Εμφανίζεται σε οριζόντια ροή ρευστού για μέτριες παροχές υγρού και χαμηλές παροχές αερίου, ενώ με αύξηση της παροχής του αερίου η ροή μεταβαίνει πια στη ζώνη της ροής *slug flow*.

Παρόμοια ακολουθία εμφάνισης των μοτίβων ροής έχουμε και στην περίπτωση της κάθετης ροής. Το μοτίβο ροής *churn flow* που επίσης δεν έχει αναλυθεί είναι μία πολύ διαταραγμένη διφασική ροή υγρού-αερίου και εμφανίζεται σε κάθετη ροή ρευστού προς τα πάνω. Χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός πολύ παχύ και

⁹ WOLVERINE TUBE, INC., «Chapter 12: Two-Phase Flow Patterns,» *Engineering Data Book III*, Updated in 2007

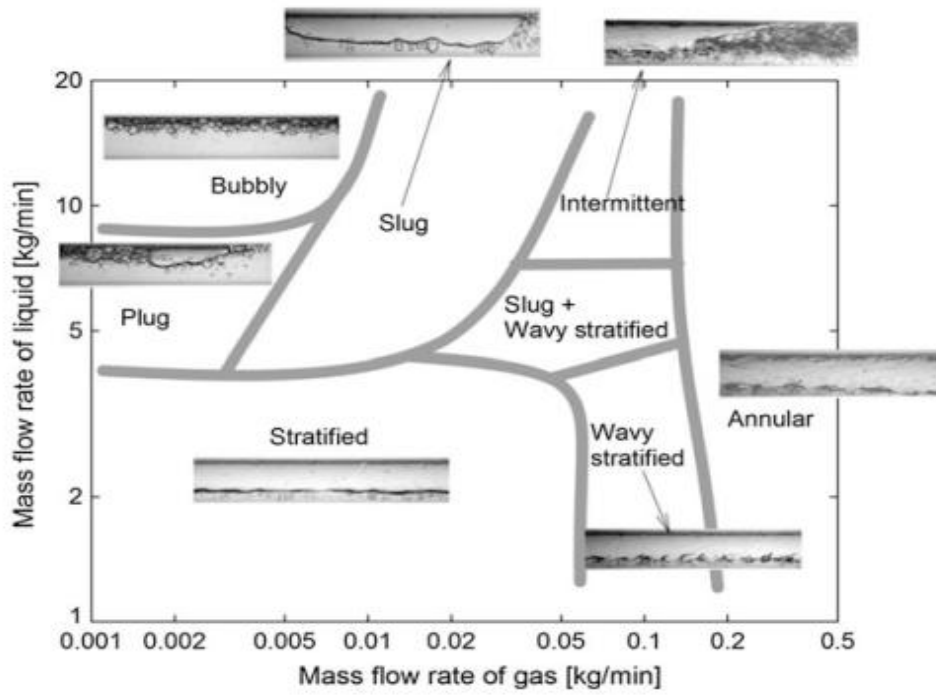
ασταθούς υγρού φιλμ - δηλαδή οι φυσαλίδες αερίου που σχηματίζονται έχουν στενή επαφή μεταξύ τους με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται- στο εσωτερικό του σωλήνα στον οποίο ρέει. Εμφανίζεται μόνο σε κάθετες ή σχεδόν κάθετες ροές ρευστού όταν υπάρχει χαμηλή παροχή υγρού και μεσαία παροχή αερίου, και βρίσκεται κοντά με τα μοτίβα ροής *slug flow* και *annular flow*. Σε αντίθεση με αυτά τα δύο μοτίβα ροής που έχουν καθορισμένη δομή, η ροή *churn flow* είναι χαοτική και μία από τις λιγότερο κατανοητές μορφές διφασικής ροής υγρού-αερίου.

Το μοτίβο ροής *froth flow* εμφανίζεται για κάθετες ροές προς τα άνω και κάτω. Είναι παρόμοιο με το μοτίβο *churn flow* στην περίπτωση της κάθετης προς τα άνω ροής ρευστού, αλλά εμφανίζεται σε μεγαλύτερες παροχές υγρού και ελαφρώς μεγαλύτερες παροχές αερίου.

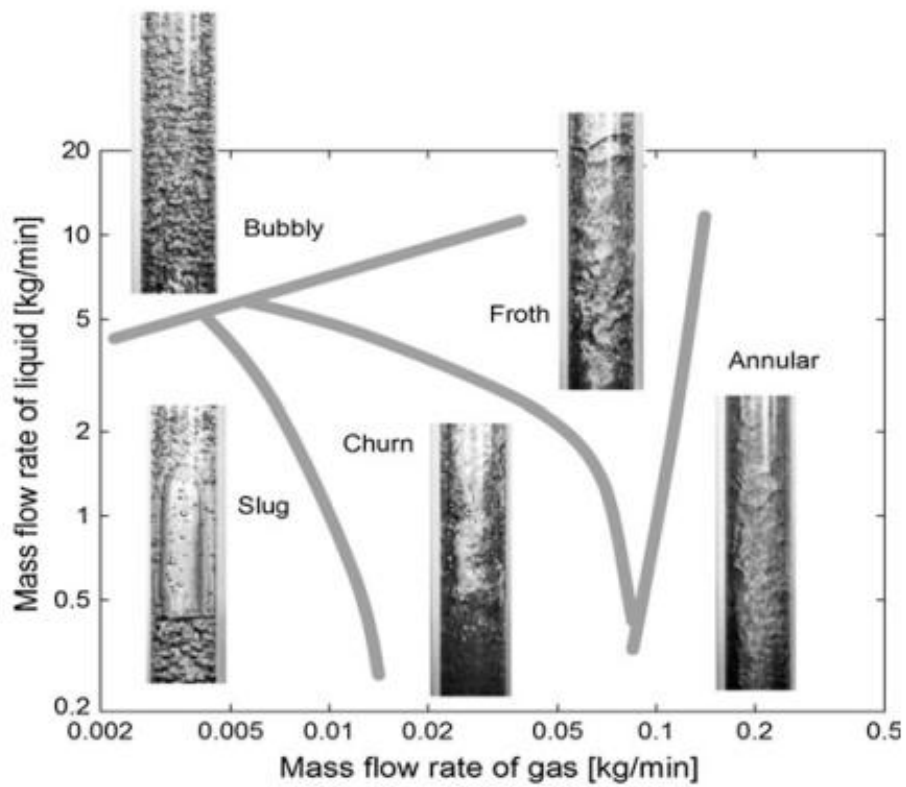
Τέλος, το μοτίβο ροής *falling film* εμφανίζεται σε κάθετη προς τα κάτω ροή ρευστού και σχηματίζεται για μέτριες παροχές νερού και μέτριες προς υψηλές παροχές αέρα.

4.3.6 Χάρτες μοτίβων ροής

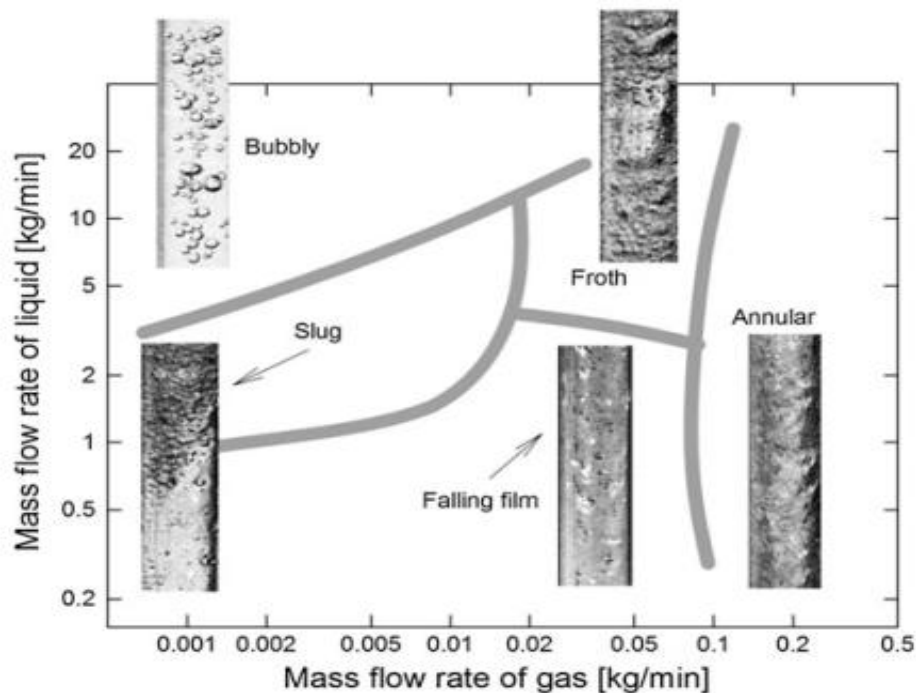
Η ακολουθία και η μετάβαση των προαναφερθέντων μοτίβων ροής από το ένα στο άλλο σε οριζόντιο, κάθετο με ροή προς τα άνω, κάθετο με ροή προς τα κάτω προσανατολισμό του σωλήνα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10, Σχήμα 4-11) και λαμβάνουν τον όρο, σύμφωνα με την επιστημονική κοινότητα, χάρτες μοτίβων ροής (flow pattern maps). Οι συγκεκριμένοι χάρτες ισχύουν για εύρος παροχής υγρού $1 \div 20$ kg/min και εύρος παροχής αερίου $0,001 \div 0,5$ kg/min.



Σχήμα 4-9 Χάρτης μοτίβων ροής σε οριζόντια ροή ρευστού [10]



Σχήμα 4-10 Χάρτης μοτίβων ροής σε κάθετη προς τα άνω ροή ρευστού [10]



Σχήμα 4-11 Χάρτης μοτίβων ροής σε κάθετη προς τα κάτω ροή ρευστού [10]

Από τους χάρτες μοτίβων ροής μπορούμε να βγάλουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα. Ένα από αυτά είναι πως στην οριζόντια ροή ρευστού, σε αντίθεση με την κάθετη (είτε προς τα άνω είτε προς τα κάτω), η ροή *bubbly flow* που είναι και η επιθυμητή όπως έχει αναφερθεί, καταλαμβάνει μόνο ένα μικρό κομμάτι του χάρτη. Αυτό σημαίνει ότι πολλές φορές εμφανίζονται προβλήματα και δυσκολία στον καθορισμό της διαφασικής ροής λόγω των πολλών μεταβάσεων. Εμφανίζεται σε πιο υψηλές παροχές υγρού σε σχέση με την κάθετη ροή, και μετατρέπεται στη ροή *slug flow* όταν η παροχή αερίου φτάσει την τιμή ~ 0.08 kg/min. Στην περίπτωση της κάθετης ροής προς τα άνω (Σχήμα 4-10), η ροή *slug flow* παρατηρείται ότι εμφανίζεται σε χαμηλότερες παροχές ρευστού σε σχέση με την οριζόντια και την κάθετη προς τα κάτω ροή. Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω του γεγονότος ότι στην καθαρά ανοδική ροή βοηθάει στην άνοση των slugs αερίου οπότε και απαιτείται η εμφάνιση συγκριτικά χαμηλότερων τιμών παροχής αερίου. Όπως διαπιστώνεται, η επιθυμητή ροή *bubbly flow* σχηματίζεται για αρκετά χαμηλές τιμές παροχής αερίου, ενώ για υψηλές τιμές αντίστοιχα εμφανίζονται διαφορετικά μοτίβα ροής τα οποία δυσκολεύουν την μέτρηση του ρευστού από τους μεταλλάκτες.

4.4 Μελέτη συμπεριφοράς των μετρητών Coriolis στη διαφασική ροή

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου θα παρατεθούν ορισμένες σημαντικές επιστημονικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί στα πλαίσια της διερεύνησης της διαφασικής ροής νερού αέρος καθώς και του κλάσματος κενού [7] [9] [13]. Η διαφασική ροή, λόγω της

πολυπλοκότητας της και της σημαντικής επίδρασής της στους μηχανισμούς μεταφοράς μάζας και θερμότητας εμφανίζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Πλήθος μελετών, τόσο θεωρητικών όσο και πειραματικών έχουν δημοσιευθεί σχετικά με την συμπεριφορά της διαφασικής ροής. Η πολυπλοκότητα της ροής δύο φάσεων δεν οφείλεται μόνο στις πολλές μεταβλητές που εμπλέκονται μέσα σε αυτήν, αλλά και στα διαφορετικά μοτίβα ροής που σχηματίζονται όπως είδαμε.

Γενικά η διαφασική ροή αποτελεί καθολικό πρόβλημα για σχεδόν όλους τους μετρητές ροής, ειδικά για τους μετρητές ογκομετρικής ροής όπως οι vortex, turbine, ultrasonic, mag meters κ.α, οι οποίοι εκτιμούν τη ροή πολλαπλασιάζοντας την μετρούμενη ταχύτητα του ρευστού με την καθορισμένη επιφάνεια διατομής του σωλήνα στον οποίο ρέει. Όπως γίνεται κατανοητό, τη στιγμή που το ρευστό δεν αποτελείται μόνο από υγρό στοιχείο και εισέρχονται έστω και μικροί όγκοι αερίου, επηρεάζονται οι μετρήσεις ανάλογα με το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει το αέριο σε σχέση με τον συνολικό όγκο του μίγματος.

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία των αισθητήρων που διαθέτουν οι συσκευές μέτρησης Coriolis, παράγει απευθείας μετρήσεις της μάζας, της πυκνότητας και της θερμοκρασίας του ρευστού. Όταν το αέριο εισρέει σε ροή υγρού, καταλαμβάνει όγκο. Είναι σημαντικό όμως να γίνει κατανοητό ότι αυτή η εισροή αερίου δεν έχει την ίδια επίδραση στις μετρήσεις μάζας και στις μετρήσεις όγκου. Αυτό συμβαίνει διότι, σε μία διαφασική ροή υγρού-αερίου η μέτρηση της συνολικής μάζας λαμβάνει τη μέτρηση της μάζας του υγρού και αντίστοιχα του αερίου. Δεδομένου ωστόσο ότι η μάζα του αερίου είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μάζα του υγρού στο μίγμα, θεωρητικά η μέτρηση της συνολικής παροχής μάζας προσεγγίζει αρκετά τη μέτρηση της παροχής μάζας μόνο του υγρού (Σχέση 4-4).

$$\dot{m}_{Coriolis} = \dot{m}_{υγρού} + \dot{m}_{αερίου} \approx \dot{m}_{υγρού} \quad \text{Σχέση 4-4}$$

Η πραγματική πυκνότητα του μίγματος προκύπτει από πρόσθεση της πυκνότητας του αερίου πολλαπλασιασμένη με τον όγκο του αερίου στο μίγμα συν της πυκνότητας του υγρού πολλαπλασιασμένη με τον όγκο που καταλαμβάνει στο ρευστό όπως φαίνεται από τη Σχέση 4-5.

$$d_{Coriolis} = d_{αερίου} \cdot GVF + d_{υγρού} \cdot (1 - GVF) \quad \text{Σχέση 4-5}$$

Βέβαια, η τιμή της πυκνότητας που υπάρχει στην ένδειξη του Coriolis διαφέρει από την πραγματική εξαιτίας του σφάλματος που δημιουργείται λόγω της ύπαρξης αερίου στο ρευστό και εν τέλει την πτώση πίεσης.

Παρομοίως, η μέτρηση της ογκομετρικής ροής του μίγματος από τον μετρητή Coriolis προκύπτει από την πρόσθεση της παροχής όγκου του αερίου και της παροχής όγκου του υγρού (Σχέση 4-6).

$$\dot{V}_{Coriolis} = \dot{V}_{υγρού} + \dot{V}_{αερίου} \quad \text{Σχέση 4-6}$$

Ως συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί πως τα βασικά ζητήματα είναι η διατήρηση της λειτουργίας των σωλήνων που ταλαντώνονται, η μοντελοποίηση και διόρθωση των σφαλμάτων που προκαλούνται από τις μετρήσεις της πυκνότητας και της ροής μάζας του ρευστού. Τα πειραματικά δεδομένα των ερευνών μέχρι στιγμής δείχνουν ότι τα σφάλματα αυτά ποικίλλουν κυρίως ανάλογα με το GVF και τη ροή μάζας του υγρού (τιμή, κατεύθυνση), ωστόσο ρόλο παίζουν επίσης και άλλοι παράγοντες όπως η γεωμετρία (διαστάσεις) και ο προσανατολισμός του σωλήνα (κάθετος, οριζόντιος, επικλινή), οι ιδιότητες του μίγματος. Απώτερο στόχο όλων των ερευνητών αποτελεί ένα καθολικό μοντέλο διόρθωσης των σφαλμάτων της παροχής μάζας και της πυκνότητας, όμως κανείς δεν έχει καταφέρει προς το παρόν να εξηγήσει την πληθώρα των συμπεριφορών των ροομέτρων στη διαφασική ροή υγρού-αερίου και κατ' επέκταση τη διόρθωση τους για το σύνολο των ροομέτρων Coriolis. Κάθε ροόμετρο Coriolis, λόγω γεωμετρίας, διαστάσεων και διαφορετικών χρήσεων παρουσιάζει μία διαφορετική συμπεριφορά υπό διαφασική ροή υγρού αερίου η οποία για να καθοριστεί πλήρως θα πρέπει να μελετηθεί εις βάθος.

Εν συντομία, είναι τεχνικώς δύσκολο να διατηρηθεί η ταλάντωση που απαιτείται για την ανίχνευση των μεγεθών (ροή μάζας, πυκνότητα) κατά τη διαφασική ροή, καθώς προκαλείται πολύ υψηλή και ταχέως αναπτυσσόμενη απόσβεση (έως και 3 φορές μεγαλύτερη από ότι στη μονοφασική ροή). Όταν λοιπόν ο μεταδότης (transmitter) δεν είναι σε θέση να διατηρήσει την ταλάντωση, τότε ο μετρητής καλείται στάσιμος (stalled) και καμία μέτρηση δεν μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη. Ακόμα όμως και να φύγει από την κατάσταση στασιμότητας, οι επόμενες μετρήσεις ενδεχομένως να περιέχουν πολύ μεγάλα σφάλματα στην πυκνότητα και τη ροή μάζας.

Στην παρούσα ΔΕ θεωρούμε πως διατηρείται συνεχής ταλάντωση του transmitter του οργάνου μέσω συνεχούς ροής μέσα στους σωλήνες του. Σκοπός είναι η μοντελοποίηση και η διόρθωση των σφαλμάτων της ροής μάζας και της πυκνότητας στη διαφασική ροή νερού-αέρα. Στην παρακάτω υποενότητα πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση πειραματικής έρευνας πάνω στη μελέτη της συμπεριφοράς ροομέτρου Coriolis η οποία αποτελεί παράδειγμα που σκοπό έχει την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη όσον αφορά τον τελικό στόχο της παρούσας ΔΕ.

4.4.1 Πειραματική έρευνα διόρθωσης σφαλμάτων

Η ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων για επεξήγηση της συμπεριφοράς του οργάνου στη διασική ροή και εν τέλει για διόρθωση των σφαλμάτων θεωρείται πολύπλοκη. Για παράδειγμα, στην έρευνα [7] συναντάμε ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για να προβλέψει τα σφάλματα πυκνότητας και ροής μάζας τόσο σε διασική ροή βαρύ πετρελαίου (heavy oil)–αέρα μετρούμενα με τη χρήση μετρητή Coriolis. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε αρχικά από τους Hemp και Sultan, ονομάζεται ‘bubble model’ προβλέπει μονοτονικά αρνητικά σφάλματα τα οποία είναι συνάρτηση μόνο του GVF όπως φαίνεται στη Σχέση 4-7 και στη Σχέση 4-8:

$$\frac{\dot{m}_{\text{ενδεικνύμενο}} - \dot{m}_{\text{πραγματικό}}}{\dot{m}_{\text{πραγματικό}}} = \frac{-2\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{Σχέση 4-7}$$

Όπου \dot{m} η τιμή της ροής μάζας και α είναι το GVF σε κλίμακα 0...1.

$$\frac{\rho_{\text{ενδεικνύμενο}} - \rho_{\text{πραγματικό}}}{\rho_{\text{πραγματικό}}} = -3\alpha \quad \text{Σχέση 4-8}$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού.

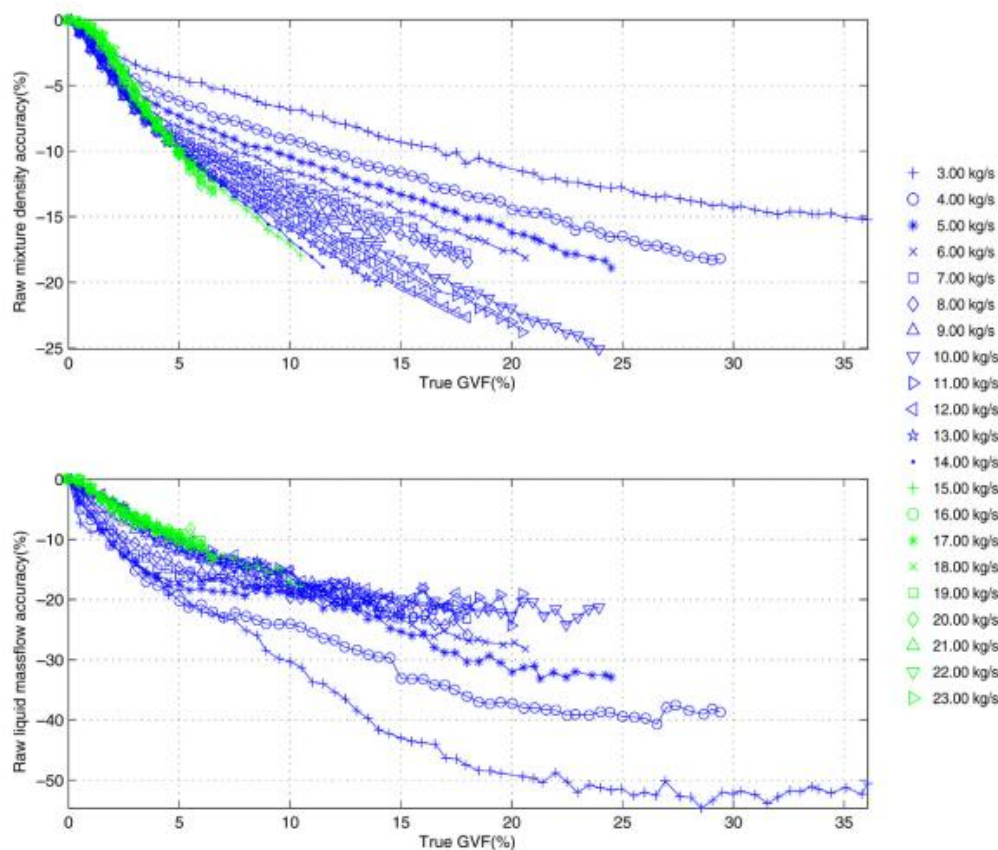
Για λόγους σαφήνειας, πρέπει να κατανοηθεί πλήρως πως η μάζα του αερίου θεωρείται αμελητέα και συνεπώς η ροή μάζας του μίγματος θεωρείται ίση με τη ροή μάζας μόνο της υγρής φάσης. Ωστόσο, κατά την εκτίμηση του σφάλματος της πυκνότητας είναι χρήσιμο να αναφερθεί πως το όργανο μετράει την πυκνότητα του μίγματος και όχι του υγρού μόνο.

Αναφέρεται επίσης πως αν και για ρευστά χαμηλού ιξώδους τα αρνητικά σφάλματα που προβλέπονται από το μοντέλο ‘bubble flow’ αποτελούν μία καλή πρώτη προσέγγιση των παρατηρούμενων πειραματικών σφαλμάτων, υπάρχουν και επιπρόσθετοι παράγοντες επιρροής εκτός του GVF τους οποίους αποκλείει. Για παράδειγμα, οι υποθέσεις που δίνει το μοντέλο αυτό, ισχύει για το μοτίβο ροής ‘bubbly flow’ (§4.3.1), δηλαδή για εισερχόμενες φυσαλίδες αερίου σε ροή υγρού οι οποίες δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση ούτε μεταξύ τους ούτε όμως και με το τοίχωμα του σωλήνα. Δεν ισχύει όμως για το μοτίβο ροής slug flow (§4.3.2).

Στην ίδια έρευνα [7] παρατίθεται μία μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διερεύνησης και διόρθωσης των σφαλμάτων διασικής ροής από ομάδα επιστημόνων του πανεπιστημίου της Οξφόρδης, χρησιμοποιώντας διάφορους σχεδιασμούς σωλήνων και ρευστά διαφορετικών ιδιοτήτων. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας για διασική ροή νερού–αέρα αξίζει να αναφερθούν.

Μία παρατήρηση που έγινε σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα είναι ότι ακόμα και σε σχετικά χαμηλές τιμές του GVF όπου το μοντέλο φυσαλίδων θεωρητικά είναι

κοντά στο μοτίβο *bubbly flow*, υπάρχει μεγάλη εξάρτηση του σφάλματος ροής μάζας από την τιμή της παροχής του μίγματος. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4-12, όπου δείχνει συγκεντρωτικά τα παρατηρούμενα σφάλματα ροής μάζας και πυκνότητας ανάλογα με την ταχύτητα του νερού και το GVF σε κατακόρυφη ροή υγρού σε σωλήνα διαμέτρου 75 mm.

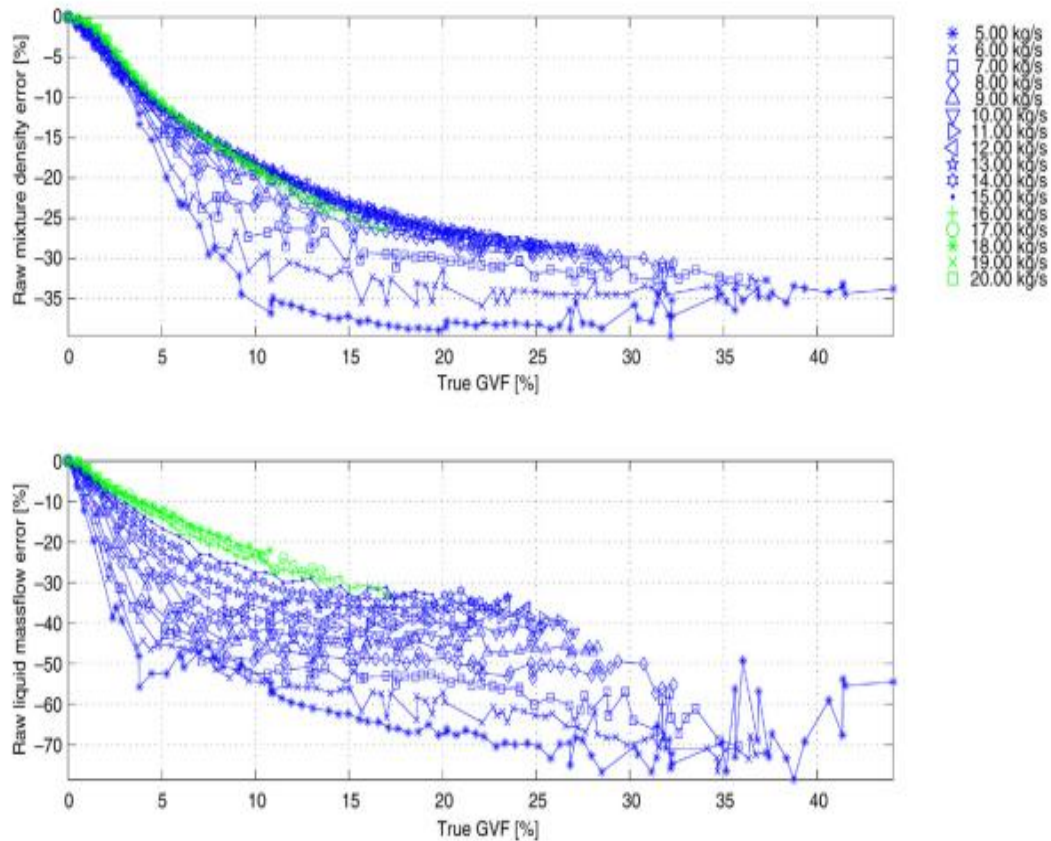


Σχήμα 4-12 Σφάλματα ροής μάζας και πυκνότητας σε κατακόρυφη ροή ρευστού προς τα άνω και διαφασική ροή νερού αέρα [7]

Όπως παρατηρείται, ακόμα και σε χαμηλές τιμές του GVF ~5%, το σφάλμα της ροής μάζας κυμαίνεται από -9% μέχρι και -20% καθώς η τιμή της παροχής ξεκινάει από 23 kg/s και φτάνει μέχρι τα 3 kg/s.

Άλλοι παράγοντες εκτός από το GVF και την παροχή του υγρού που επηρεάζουν τα σφάλματα μετρήσεων είναι :

- Η αλλαγή του προσανατολισμού του σωλήνα (οριζόντια και κατακόρυφη τοποθέτηση) οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες σφαλμάτων. Η ίδια έρευνα παρουσιάζει πειράματα τα οποία διεξήχθησαν με σκοπό την ανάδειξη των σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τον ίδιο σωλήνα, στις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος και το ίδιο μίγμα μόνο που τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση (Σχήμα 4-13).



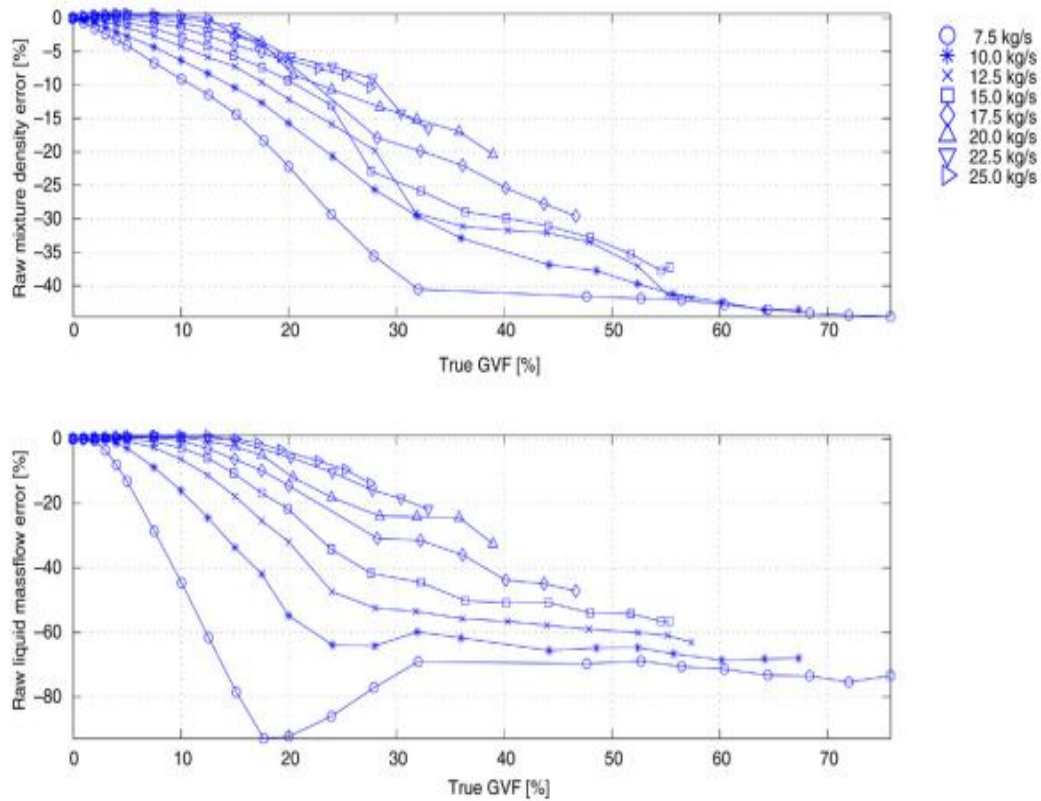
Σχήμα 4-13 Σφάλματα ροής μάζας και πυκνότητας σε οριζόντια ροή ρευστού [7]

Αν και οι βασικές τάσεις στις καμπύλες των σφαλμάτων φαινομενικά είναι παρόμοιες υπάρχουν σαφείς διαφορές. Για διαφορετικές παροχές υγρού, παρατηρείται μία μεγαλύτερη εξάπλωση σφαλμάτων πυκνότητας και ροής μάζας στην οριζόντια τοποθέτηση. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε το GVF ίσο με 20%. Στο Σχήμα 4-12 τα σφάλματα πυκνότητας κυμαίνονται από -16% μέχρι και -23% ενώ τα σφάλματα ροής μάζας από περίπου -20% μέχρι και -30% αν λάβουμε υπόψιν το εύρος των παροχών 5-20 kg/s. Στο Σχήμα 4-13 (οριζόντιος προσανατολισμός) από την άλλη, τα σφάλματα πυκνότητας κυμαίνονται από -26% μέχρι -40% ενώ τα σφάλματα ροής μάζας από -32% μέχρι -68% για το ίδιο εύρος παροχών.

Μία άλλη παρατήρηση είναι πως στην περίπτωση του κάθετου προσανατολισμού, τα σφάλματα ροής μάζας και πυκνότητας είναι επαναλαμβανόμενα και έχουν ομαλή συμπεριφορά ακόμα και σε μικρό εύρος παροχών, κάτι που δε συμβαίνει στον οριζόντιο προσανατολισμό όπου η συμπεριφορά σε χαμηλές παροχές είναι ελαττωματική. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κάθετος προσανατολισμός με κάθετη ροή προς τα πάνω είναι ο προτεινόμενος.

- Οι διαφορετικές γεωμετρίες και διαστάσεις σωλήνων παρουσιάζουν κάπως διαφορετικές καμπύλες σφαλμάτων. Στο Σχήμα 4-14, φαίνονται οι καμπύλες

των σφαλμάτων πυκνότητας και ροής μάζας της ίδιας έρευνας στις ίδιες συνθήκες χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο σωλήνα 100 mm για λιγότερα πειραματικά σημεία (εύρος παροχών 7.5-25.0 kg/s με βήμα 2.5 kg/s).



Σχήμα 4-14 Σφάλματα ροής μάζας και πυκνότητας σε οριζόντια ροή ρευστού σε διαφορετικό σωλήνα 100 mm [7]

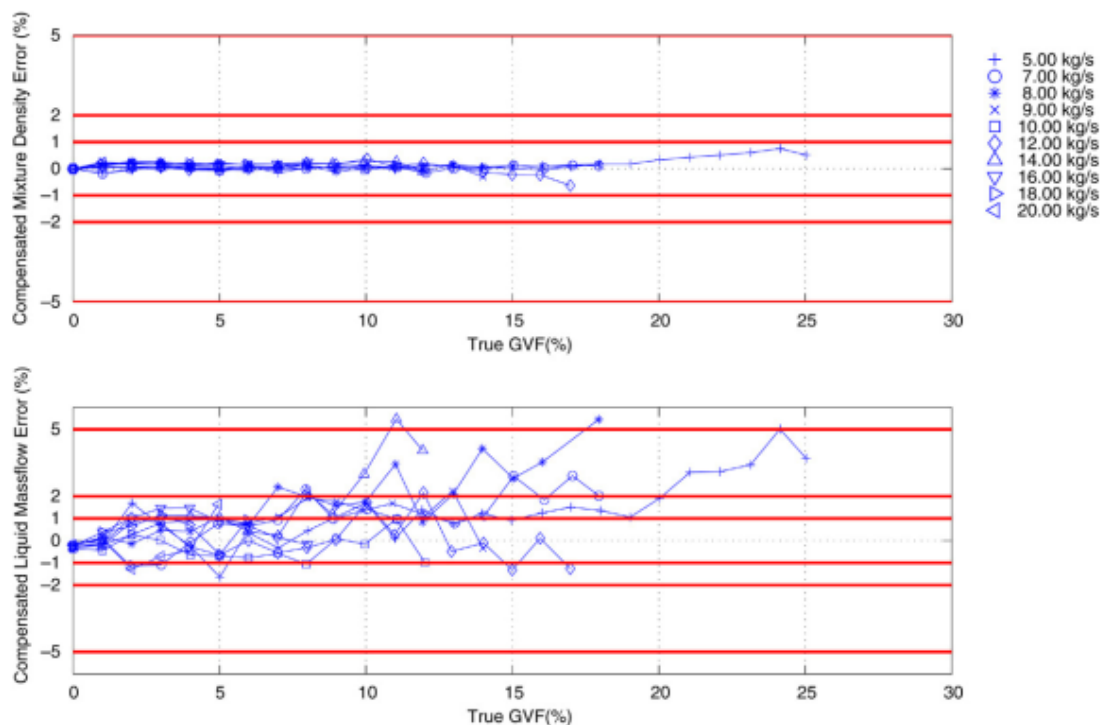
Εδώ παρατηρούνται και πάλι αρνητικά σφάλματα αλλά υπάρχουν σαφείς διαφορές. Σε υψηλές παροχές, τα σφάλματα πυκνότητας και μάζας είναι σχεδόν μηδενικά για GVF μέχρι 10%, αλλά για χαμηλές παροχές είναι μεγαλύτερα από ότι στην περίπτωση του μικρότερου σωλήνα.

- Το ιξώδες του ρευστού είναι ένας επιπλέον σημαντικός παράγων που επηρεάζει τις καμπύλες, όπως ενδεχομένως και άλλες ιδιότητες του ρευστού όπως είναι η πίεση εισόδου, ή πιο συγκεκριμένα η αναλογία της πίεσης εισόδου με την πτώση πίεσης κατά μήκος του σωλήνα ο οποίος όμως δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις καμπύλες.

Σε αυτό το σημείο που έχουν πραγματοποιηθεί οι πειραματικές μετρήσεις, σειρά έχει η διόρθωση των σφαλμάτων πυκνότητας και ροής μάζας που έχουν προκύψει κατά το πείραμα. Η διόρθωση αυτή βασίζεται αποκλειστικά στα πειραματικά δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας [7]. Περιλαμβάνει με λίγα λόγια ένα μοντέλο το οποίο θα μπορεί, με βάση τα πειραματικά σημεία και τις επιλεγμένες σταθερές τιμές των παραμέτρων (ονομαστικές τιμές πυκνότητας, ροής μάζας νερού, αερίου), να

προβλέπει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τις απαιτούμενες διορθώσεις που χρειάζονται στις αρχικές μετρήσεις.

Όπως έχει τονισθεί, ένα καθολικό μοντέλο διόρθωσης σφαλμάτων για οποιοδήποτε ροόμετρο Coriolis ανεξαρτήτως γεωμετρίας του εσωτερικά και εξωτερικά, και για οποιοδήποτε ρευστό ανεξαρτήτως ιδιοτήτων θα ήταν ιδανικό όμως η μέχρι τώρα γνώση και μελέτη δεν το επιτρέπει. Ωστόσο, για συγκεκριμένη γεωμετρία του ροομέτρου και συγκεκριμένο ρευστό σε ένα λογικό εύρος συνθηκών για εφαρμογή και πείραμα, υπάρχει η δυνατότητα εύρεσης μοντέλου διόρθωσης των αρχικών μετρήσεων. Υπάρχουν πολλοί ερευνητές που έχουν ασχοληθεί με τη συμπεριφορά διάφορων ροομέτρων στη διασική ροή (Coriolis [9] [14], V-cone[15], Venturi [16] κ.α) και ρευστά διάφορων ιδιοτήτων (νερό-αέρας, βαρύ πετρέλαιο-αέρας [7], λάδι-αέρας [17], νερό-ατμός κ.α) και προσεγγίζουν ένα μοντέλο διόρθωσης. Στην εργασία στην οποία αναφερόμαστε στο Κεφάλαιο αυτό [7], πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη μεθοδολογία, και στο παρακάτω Σχήμα 4-15, απεικονίζονται τα σφάλματα διορθωμένα για διασική ροή νερού-αέρα, σωλήνα διαμέτρου 75 mm, και κατακόρυφη ροή ρευστού.



Σχήμα 4-15 Σχετικά σφάλματα πυκνότητας και ροής μάζας με διόρθωση σε κατακόρυφη ροή ρευστού [7]

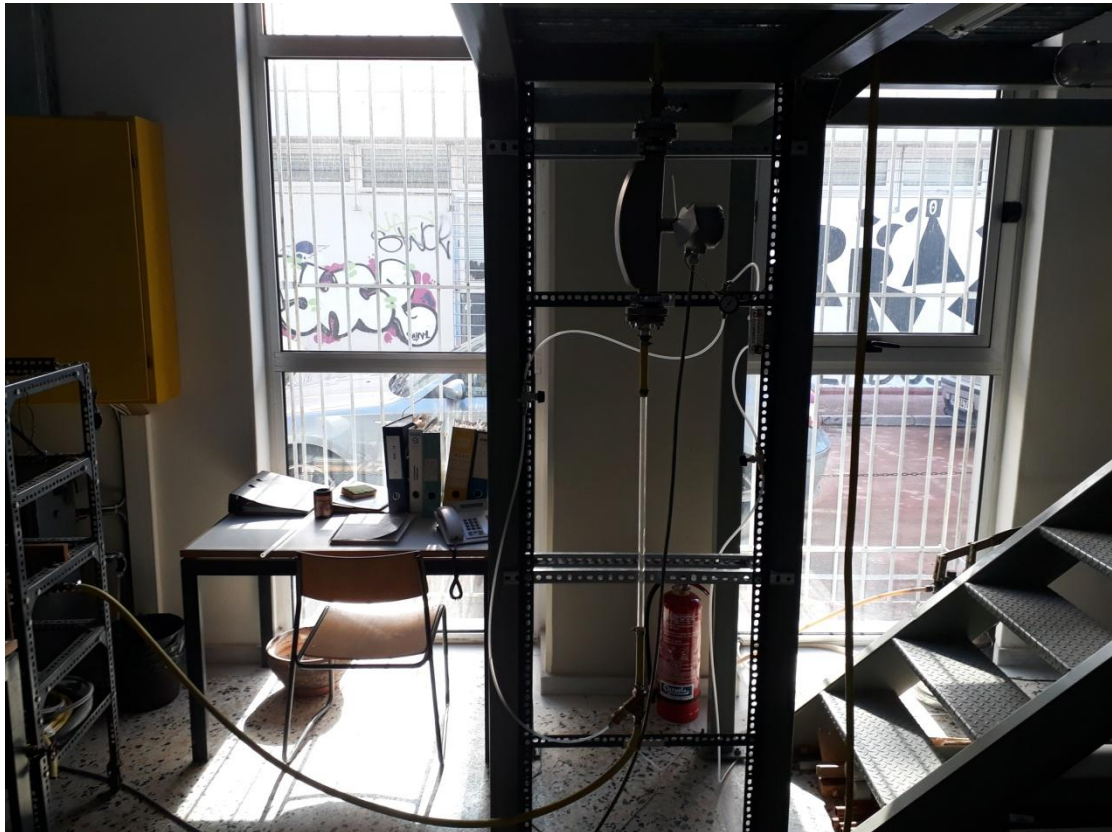
Στην περίπτωση του σωλήνα 75 mm, για τον οποίο τα σφάλματα από τις αρχικές μετρήσεις φαίνονται στο Σχήμα 4-12, το μοντέλο διόρθωσης αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε. Τα σφάλματα μετά τη διόρθωση λοιπόν φαίνονται στο Σχήμα 4-15 για την ίδια εγκατάσταση. Όπως διακρίνεται, η πυκνότητα αποδείχτηκε ιδιαίτερα επιδεκτική διόρθωσης του σφάλματος της, ενώ η ροή μάζας παρουσιάζει υψηλότερο εύρος σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΟ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΝΕΡΟΥ-ΑΕΡΑ

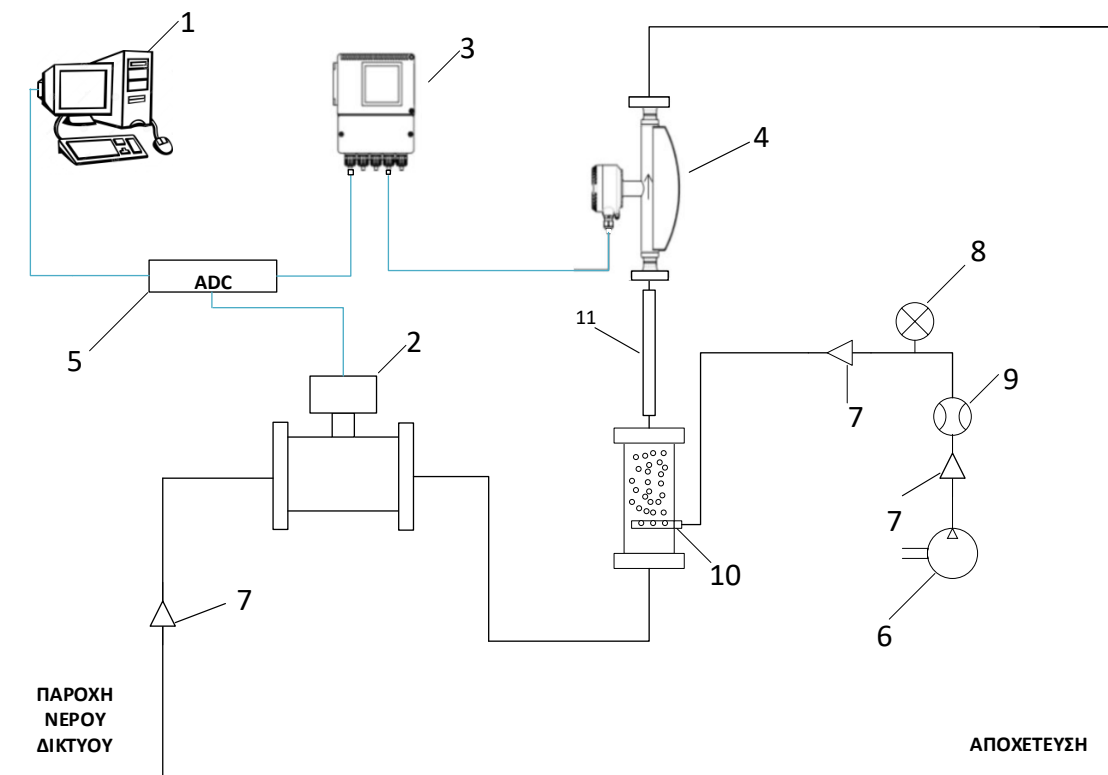
Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του ροομέτρου Coriolis, τύπου FCB350 της εταιρείας ABB [5] κατά τη μέτρηση παροχής μάζας και πυκνότητας σε περίπτωση διφασικής ροής νερού-αέρα. Για το λόγο αυτό συγκροτήθηκε πειραματική εγκατάσταση στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, και μετρητική διάταξη για τη λήψη και καταγραφή των πειραματικών δεδομένων, με χρήση του λογισμικού LabVIEW, υπό το ΛΣ Windows XP. Η εγκατάσταση, το πρόγραμμα καθώς και η διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων που διεξήχθησαν παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη, η οποία συγκροτήθηκε εξολοκλήρου στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ απεικονίζεται στο μονογραμμικό Σχήμα 5-2, ενώ φωτογραφία του βασικού μέρους της διάταξης στο ΕΠΤ-ΕΜΠ απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1 Φωτογραφία του βασικού μέρους της πειραματικής διάταξης στον χώρο του ΕΠΤ-ΕΜΠ



Σχήμα 5-2 Μονογραμμικό διάγραμμα πειραματικής εγκατάστασης

Τα επιμέρους τμήματα της πειραματικής εγκατάστασης έχουν ως εξής :

1. Η/Υ.
2. Μαγνητικό Ροόμετρο νερού (MFM).
3. Ελεγκτής (controller) ροομέτρου Coriolis FCT350.
4. Ροόμετρο Coriolis FCB350.
5. Αναλογηφιακός μετατροπέας (ADC) τύπου USB 4704 της εταιρείας Advantech.
6. Συμπιεστής αέρος του ΕΠΤ-ΕΜΠ.
7. Ρυθμιστικές βαλβίδες παροχής αέρα και νερού.
8. Μανόμετρο.
9. Ροόμετρο πλωτήρα αέρος εύρους παροχής 0 ~ 10 L/min της εταιρείας KOBOLD.
10. Πορώδης διασκορπιστής αέρος (Airstone).
11. Διάφανος σωλήνας plexiglass για οπτική παρατήρηση της διφασικής ροής.

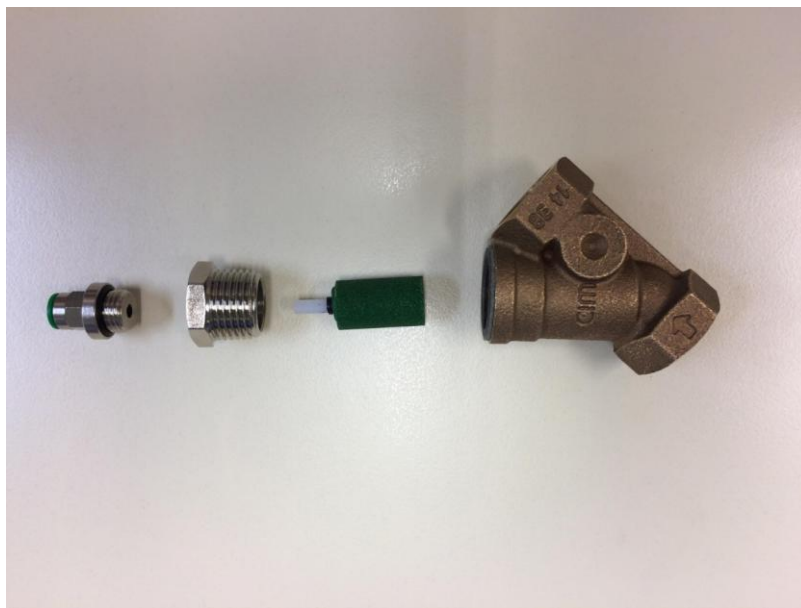
Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-2, για τη δημιουργία του διφασικού μίγματος νερού-αέρα χρησιμοποιείται νερό από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης και αέρας από αεροθάλαμο συμπιεστή του Εργαστηρίου. Για τη μέτρηση της παροχής της υγρής φάσης χρησιμοποιείται μαγνητικό ροόμετρο (2) απ' ευθείας συνδεδεμένο με τον Η/Υ (1), ενώ για τη μέτρηση της αέριας φάσης χρησιμοποιείται ροόμετρο πλωτήρος (9). Η ρύθμιση της παροχής του νερού γίνεται μέσω δύο εν σειρά σφαιρικών διακοπών ενώ για τη ρύθμιση της παροχής του αέρα χρησιμοποιείται κατάλληλη ρυθμιστική βαλβίδα. Η ανάμιξη των δύο φάσεων γίνεται με κατάλληλη διάταξη την οποία κατασκευάσαμε και για την οποία θα αναφέρουμε περισσότερα στη συνέχεια. Για τις περιπτώσεις μονοφασικής ροής υγρού και προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή νερού στον κλάδο του αέρα μεταξύ του σημείου ανάμιξης και του ροομέτρου πλωτήρος τοποθετήθηκε στραγγαλιστική βαλβίδα (7). Αντίθετα για τις περιπτώσεις διφασικής ροής η βαλβίδα αυτή (7) παραμένει 100% ανοικτή και ο στραγγαλισμός – ρύθμιση της παροχής γίνεται αποκλειστικά από τη ρυθμιστική βαλβίδα που υπάρχει πριν το ροόμετρο πλωτήρος (7).

Εν συνεχεία το διφασικό μίγμα ρέει κατακόρυφα με ροή προς τα άνω και εισέρχεται εντός του ροομέτρου Coriolis το οποίο είναι και αυτό τοποθετημένο κατακόρυφα και συνδεδεμένο μέσω του ελεγκτή του με τον Η/Υ. Μεταξύ της εξόδου της διάταξης ανάμιξης και του Coriolis παρεμβάλλεται διάφανος σωλήνας από plexiglass (11), προκειμένου να γίνεται οπτική παρατήρηση της διφασικής ροής. Τέλος το διφασικό μίγμα εξέρχεται του ροομέτρου Coriolis και αποχετεύεται.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι η διάταξη ανάμιξης, το ροόμετρο Coriolis και το ενδιάμεσο τμήμα σωλήνωσης είναι εν σειρά συνδεδεμένα, και απόλυτα κατακόρυφα τοποθετημένα, προκειμένου να αποφεύγονται σημεία καμπής τα οποία θα ευνοούσαν τη συγκέντρωση και συσσωμάτωση των φυσαλίδων αέρα σε φυσαλίδες μεγαλύτερου όγκου, μεταβάλλοντας το επιθυμητό μοτίβο της διφασικής ροής από bubble flow σε slug flow, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην §4.3. Υπενθυμίζεται ότι το μοτίβο της διφασικής ροής έχει σημαντικές επιπτώσεις στο σφάλμα μέτρησης της παροχής και της πυκνότητας από τα ροόμετρα τύπου Coriolis, γι' αυτό και αποτελεί ενεργό αντικείμενο μελέτης κατά το σχεδιασμό της γεωμετρίας των σωλήνων στο εσωτερικό των οργάνων αυτών. Το ροόμετρο FCB350 διαθέτει γεωμετρία τύπου αβαθή V, (βλ. §2.5) η οποία αποτρέπει την εμφάνιση slug flow βελτιώνοντας τη συμπεριφορά του ροομέτρου υπό συνθήκες διφασικής ροής.

Τα airstones είναι πορώδεις πέτρες οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευση του αέρα διαμέσου των πόρων τους. Στην πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να γίνει διασπορά του αέρα στο νερό, υπό τη μορφή νέφους ομοιόμορφων φυσαλίδων (bubble flow), οι οποίες ισοκατανέμονται στη μάζα του ρέοντος νερού (βλ. §4.3.1). Το airstone συνδέεται με την παροχή του αέρα, ο οποίος εν συνεχεία διαρρέει από τους επιφανειακούς πόρους δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο πολλές μικρές εστίες φυσαλίδων. Τα airstones διατίθενται σε διάφορους τύπους σχήματος και γεωμετρίας πορώδους. Για την εφαρμογή μας χρησιμοποιήθηκε

κυλινδρικού τύπου, προκειμένου να εφαρμόσει σε υδραυλικό εξάρτημα φίλτρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3. Η καταλληλότητα του πορώδους διαπιστώθηκε με οπτικό έλεγχο της διαφασικής ροής. Για το σκοπό αυτό μεταξύ του σημείου ανάμιξης και της εισόδου του ροομέτρου Coriolis, τοποθετήθηκε διάφανος σωλήνας κυλινδρικής διατομής και διαμέτρου 16 mm προκειμένου να υπάρχει οπτική παρατήρηση του διαφασικού μίγματος νερού-αέρα που δημιουργούμε. Προκαταρτικές δοκιμές διαφασικού μίγματος νερού-αέρα για παροχή νερού από 10 έως 19 L/min και αέρα από 1 έως 5 L/min αντίστοιχα κρίθηκαν απολύτως ικανοποιητικές ως προς την ποιότητα του μοτίβου της ροής και κατ' επέκταση του πορώδους του airstone που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 5-3 Φωτογραφία της διάταξης ανάμιξης νερού-αέρα, που χρησιμοποιήθηκε.

Για τη διασύνδεση του ελεγκτή του ροομέτρου Coriolis με τον Η/Υ, χρησιμοποιήθηκε αναλογοψηφιακός μετατροπέας (ADC) τύπου USB-4704 της εταιρείας Advantech¹⁰. Η διασύνδεση αφορά μόνο στη λήψη πειραματικών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο (real time data acquisition), μέσω κατάλληλης εφαρμογής η οποία αναπτύχθηκε σε περιβάλλον LabVIEW και η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά σε επόμενο εδάφιο του παρόντος Κεφαλαίου. Η παραμετροποίηση του ροομέτρου Coriolis πραγματοποιείται απ' ευθείας από τον ελεγκτή. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο εγχειρίδιο του κατασκευαστή [18].

¹⁰ <http://www.advantech.com>



Σχήμα 5-4 Αναλογοψηφιακός μετατροπέας USB-4704 [18]

Ο ADC διαθέτει εσωτερικό πολυπλέκτη (multiplexer) έτσι ώστε να μπορεί να δέχεται περισσότερα του ενός κανάλια και να ψηφιοποιεί αυτό που επιλέγεται από το λογισμικό ελέγχου.

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 5-1:

Πίνακας 5-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά USB-4704

ADC USB-4704	
Αναλογικά κανάλια εισόδου (AI 0,...,7)	8 απλά (single ended) 4 διαφορικά (differential)
Αναλογικά κανάλια εξόδου (AO 0,1)	2
Ψηφιακά κανάλια εισόδου (DI 0,...,7) / εξόδου (DO 0,...,7)	8/8
Διακριτική ικανότητα	Απλά κανάλια : 13 bit Διαφορικά : 14bit
Μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας	48 kS/s (Hz)
Περιοχή λειτουργίας	Απλά κανάλια : ±10V Διαφορικά κανάλια : (±1, ±1.25, ±2, ±2.5, ±4, ±5, ±10, ±20) V
Συχνότητα ρυθμοδότη/ χρονομέτρου	5 MHz max

Ο συγκεκριμένος ADC διαθέτει 8 αναλογικά και 4 διαφορικά κανάλια. Σε περίπτωση σύνδεσης σε απλό κανάλι χρειάζεται ένα καλώδιο ανά κανάλι και η μετρούμενη τάση στην έξοδο είναι αποτέλεσμα συσχέτισης με τη γείωση αναφοράς του μετατροπέα. Αντίθετα, τα διαφορικά κανάλια μετρούν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ακροδεκτών. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τα διαφορικά κανάλια μειώνεται ο αριθμός τους στα μισά των απλών. Στην παρούσα εφαρμογή το ροόμετρο Coriolis και το Μαγνητικό ροόμετρο διασυνδέθηκαν μέσω διαφορικής σύνδεσης στα κανάλια κανάλια AI4–AI5 και AI6–AI7 αντίστοιχα. Η σύνδεση του ADC με τον Η/Υ γίνεται μέσω θύρας USB.

Το αναλογικό σήμα εξόδου του ροομέτρου Coriolis όπως έχει αναφερθεί μπορεί να είναι ρεύμα έντασης : $0 \div 20 \text{mA}$ ή $4 \div 20 \text{mA}$. Στην παρούσα εφαρμογή έχει επιλεχθεί η δεύτερη περίπτωση. Προκειμένου να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε το ηλεκτρικό σήμα εντάσεως του μεταλλάκτη και να το «διαβάσουμε» με τον ADC, χρησιμοποιούμε μία ωμική αντίσταση 510Ω η οποία συνδέεται παράλληλα στο κανάλι αναλογικής εισόδου του ADC. Η ωμική αντίσταση μεγέθους 510Ω μετατρέπει το σήμα ρεύματος εντάσεως $4 \div 20 \text{mA}$ σε σήμα τάσης $2,04 \div 10,2 \text{V}$ που αντιλαμβάνεται ο ADC. Αναλυτικότερα :

$$V = I \cdot R \quad \text{Σχέση 5-1}$$

$$I = 4 \text{mA} \quad V = (4 \text{mA} \cdot 510 \Omega) = 2.04 \text{V}$$

$$I = 20 \text{mA} \quad V = (20 \text{mA} \cdot 510 \Omega) = 10.2 \text{V}$$

Ο ADC με τη σειρά του μεταφέρει το ψηφιακό πλέον σήμα στον H/Y.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι για τον συγκεκριμένο ADC έχει πραγματοποιηθεί πρόσφατα έλεγχος της βαθμονόμησής του και συγκεκριμένα στο πλαίσιο της ME[5], στην οποία ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Τα αποτελέσματα του ελέγχου κατέδειξαν ότι ο ADC λειτουργεί με ακρίβεια και κατά συνέπεια κρίνεται ασφαλής η χρήση του για τη συλλογή δεδομένων. Λόγω του ότι ο έλεγχος της βαθμονόμησης έγινε σχετικά πρόσφατα δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να επαναληφθεί.

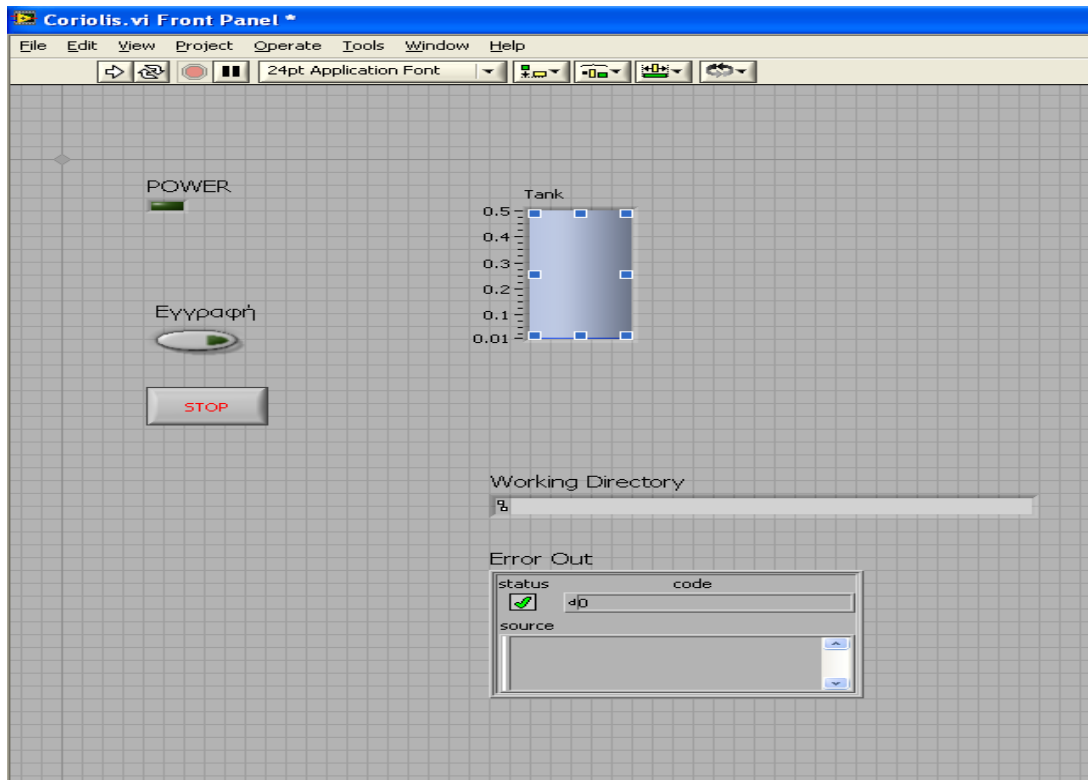
5.2 Προγραμματισμός σε περιβάλλον LabVIEW

Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) δημιουργήθηκε από την εταιρεία National Instruments¹¹. Βασίζεται σε μία γλώσσα προγραμματισμού σε γραφικό περιβάλλον, τη G language.

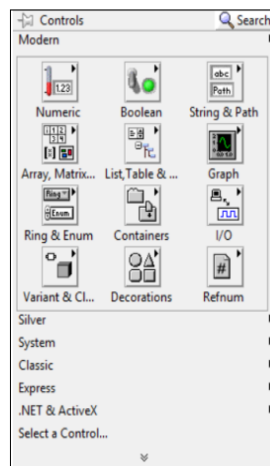
Το περιβάλλον του χωρίζεται σε δύο μέρη: το Front Panel (εμπρόσθια επιφάνεια) και το Block diagram (δομικό διάγραμμα ροής). Ο χρήστης δημιουργεί εν τέλει το εικονικό όργανο VI (Virtual Instrument), το οποίο αποτελείται από τα μέρη που προαναφέρθηκαν. Παρακάτω αναλύεται εν συντομία η διαδικασία προγραμματισμού με τη χρήση του LabVIEW. Για περισσότερες πληροφορίες προτείνεται στον αναγνώστη η ακόλουθη βιβλιογραφία [19].

¹¹ <http://www.ni.com>

Το Front panel (Σχήμα 5-5) είναι η διεπιφάνεια (interface) επικοινωνίας του χρήστη με το πρόγραμμα, το οποίο του δίνει τη δυνατότητα να αλληλοεπιδρά με το πρόγραμμα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω έτοιμων βιβλιοθηκών-παλετών που περιέχουν ρουτίνες σε μορφή σχημάτων ή πινάκων για τη διευκόλυνση του χρήστη. Για παράδειγμα, από την βιβλιοθήκη-παλέτα Controls γίνεται η επιλογή διάφορων εικονικών συσκευών ελέγχου των παραμέτρων του προγράμματος, η οποία είναι διαμορφωμένη σε υποκατηγορίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-6.

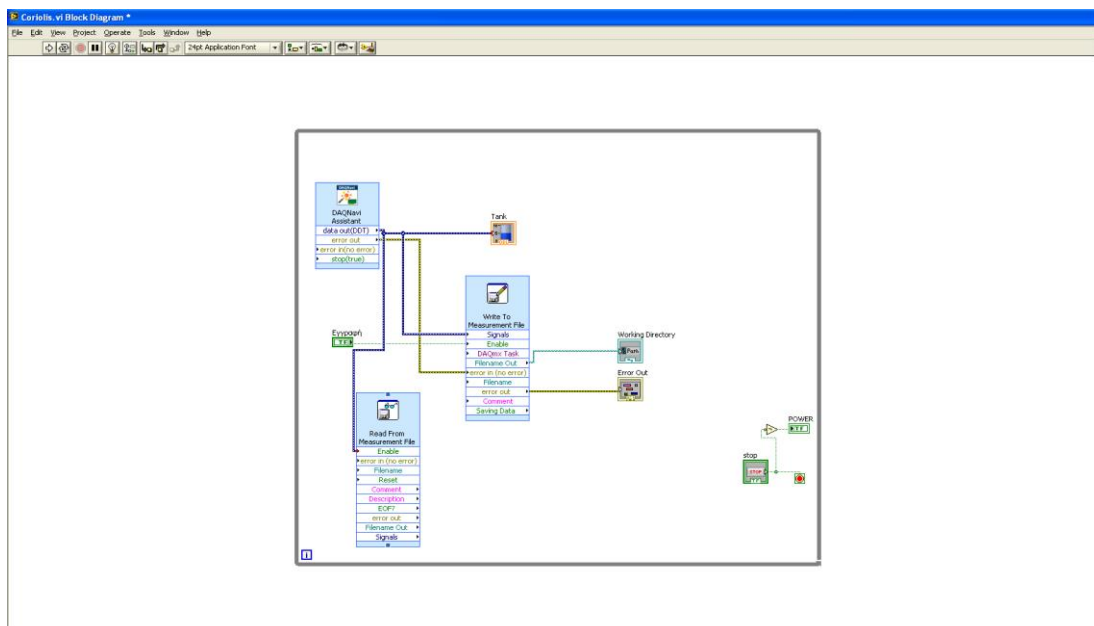


Σχήμα 5-5 Εμπρόσθια επιφάνεια (Front panel)

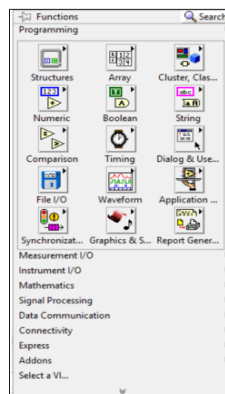


Σχήμα 5-6 Παλέτα Controls

Ακολουθεί το block diagram (Σχήμα 5-7), δηλαδή η επιφάνεια στην οποία ο προγραμματιστής αναπτύσσει το δομικό διάγραμμα ροής. Εδώ δημιουργείται στην ουσία ο κώδικας σε γραφικό περιβάλλον όπου ο προγραμματιστής τοποθετεί και συνδέει στη συνέχεια τα επί μέρους στοιχεία του προγράμματος στη λογική του δομημένου προγραμματισμού. Κι εδώ υπάρχουν στη διάθεση του χρήστη βιβλιοθήκες-παλέτες, όπως η παλέτα Functions (Σχήμα 5-8), που περιέχουν τις βασικές προγραμματιστικές δομές (while, for, if κ.α), υπορουτίνες αριθμητικών καθώς και λογικών πράξεων. Γίνεται κατανοητό ότι οι τα δύο αυτά μέρη (Front panel, Block diagram) αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Θα μπορούσαμε παραστατικά να πούμε ότι οι δύο αυτές επιφάνειες εργασίας αποτελούν τις δύο όψεις του ίδιου νομίσματος η μία από την πλευρά του χρήστη και η άλλη από την πλευρά του προγραμματιστή.



Σχήμα 5-7 Επιφάνεια δομικού διαγράμματος ροής Block diagram



Σχήμα 5-8 Παλέτα Functions

5.3 Data Acquisition /DAQNavi

Για την επικοινωνία του αναλογοψηφιακού μετατροπέα (ADC) της εταιρείας Advantech, η ίδια η εταιρεία έχει αναπτύξει σχετική βιβλιοθήκη για το LabVIEW, με το όνομα DAQNavi, η οποία διατίθεται δωρεάν. Η βιβλιοθήκη DAQNavi διαθέτει πλήθος ρουτινών τόσο για τη συλλογή δεδομένων, όσο και για την παραμετροποίηση του ίδιου του ADC.

Το εικονίδιο που απεικονίζεται στο LabVIEW και αντιστοιχεί στο DAQNavi φαίνεται παρακάτω (εικόνα). Μέσω λοιπόν αυτής της παλέτας παραμετροποιείται η λειτουργία του ADC, όπου για την περίπτωση της παρούσας εφαρμογής έχει ως εξής:

- Η λειτουργία (function), όπου υπάρχουν οι επιλογές αναλογικής εισόδου/εξόδου, ψηφιακής εισόδου/εξόδου και μετρητή. Επιλέγεται η αναλογική είσοδος.



Σχήμα 5-9 DAQNavi Assistant _function

- Το είδος απόκρισης (scenario), που επιλέγουμε να είναι σε πραγματικό χρόνο (Instant AI).



Σχήμα 5-10 DAQNav Assistant_scenario

- Η συσκευή (device) που θα χρησιμοποιηθεί που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο μετατροπέας ADC USB-4704.



Σχήμα 5-11 DAQNav Assistant_device

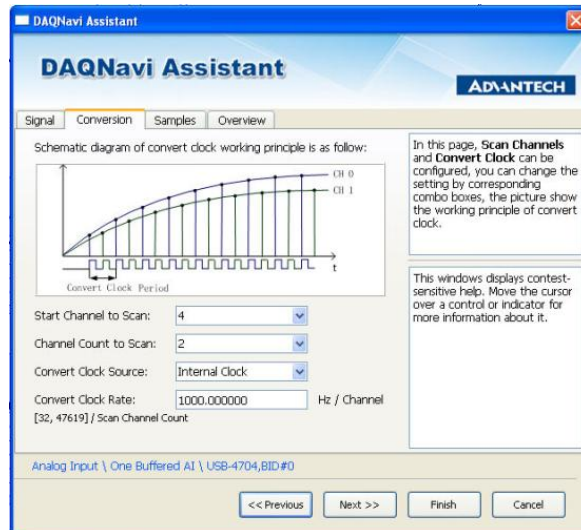
- Το σήμα (signal), που επιλέγουμε το κανάλι που χρησιμοποιείται, καθώς και ο τρόπος διασύνδεσης του (διαφορική ή απλή σύνδεση) και η περιοχή λειτουργίας του. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκαν διαφορικά κανάλια και η περιοχή λειτουργίας +/-20 V. Στην περίπτωση της διαφορικής σύνδεσης,

δεσμεύονται δύο θέσεις High και Low αφού μετριέται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών.



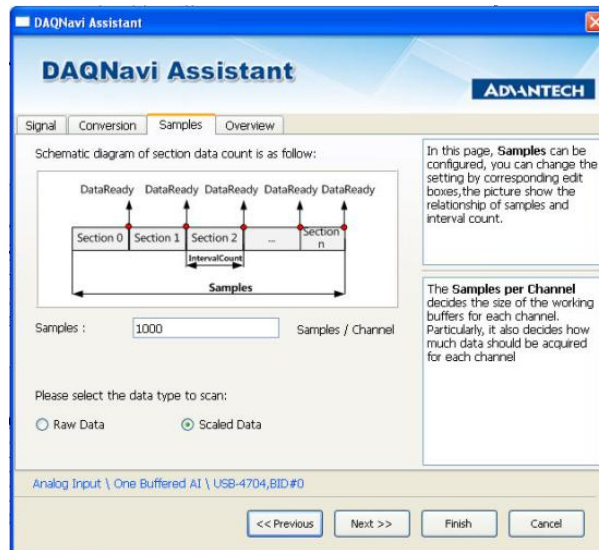
Σχήμα 5-12 DAQNav Assistant_signal

- Το κανάλι (Scan channel), από το οποίο ο ADC θα αρχίσει να διαβάζει το σήμα, το πλήθος των καναλιών που θα διαβάζει και η συχνότητα δειγματοληψίας.



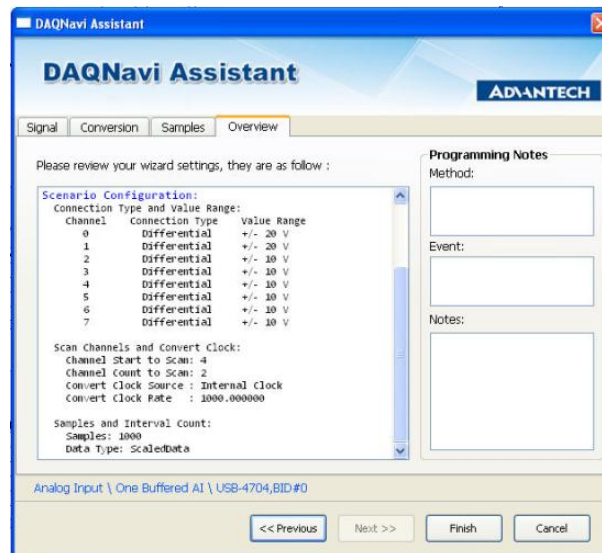
Σχήμα 5-13 DAQNav Assistant_Conversion

- Τα δείγματα (Samples) τα οποία θα λαμβάνει κάθε κανάλι. Στο προκείμενο πρόγραμμα έχουν επιλεγθεί 1000 δείγματα/κανάλι (samples/Channel).



Σχήμα 5-14 DAQNavi Assistant_Samples

- Το παράθυρο Overview στο οποίο απεικονίζονται όλες οι επιλογές που έχουν γίνει από το χρήστη.



Σχήμα 5-15 DAQNavi Assistant_Overview

5.4 Λήψη μετρήσεων παροχής - Πείραμα 1

Στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ, συντάχθηκε πρόγραμμα σε περιβάλλον LabVIEW με σκοπό τη λήψη και καταγραφή μετρήσεων από τα δύο ροόμετρα. Όπως έχει αναφερθεί σκοπός της ΔΕ είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του ροομέτρου Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρα και πιο συγκεκριμένα η μελέτη και διόρθωση των σφαλμάτων που προκύπτουν από τις καταγραφόμενες μετρήσεις παροχής μάζας και πυκνότητας.

Στο πείραμα αυτό η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αναφέρθηκε παραπάνω (βλ. §5.1), ενώ συντάχθηκε πρόγραμμα αποκλειστικά για τις ανάγκες του πειράματος αυτού με σκοπό τη λήψη μετρήσεων από τα δύο ροόμετρα. Το πρόγραμμα αυτό αναλύεται στη συνέχεια. Όσον αφορά την παροχή όγκου του νερού, το εύρος των τιμών της ήταν $10 \div 18$ L/min, ενώ το εύρος της παροχής όγκου του αέρα ήταν $1 \div 4$ L/min.

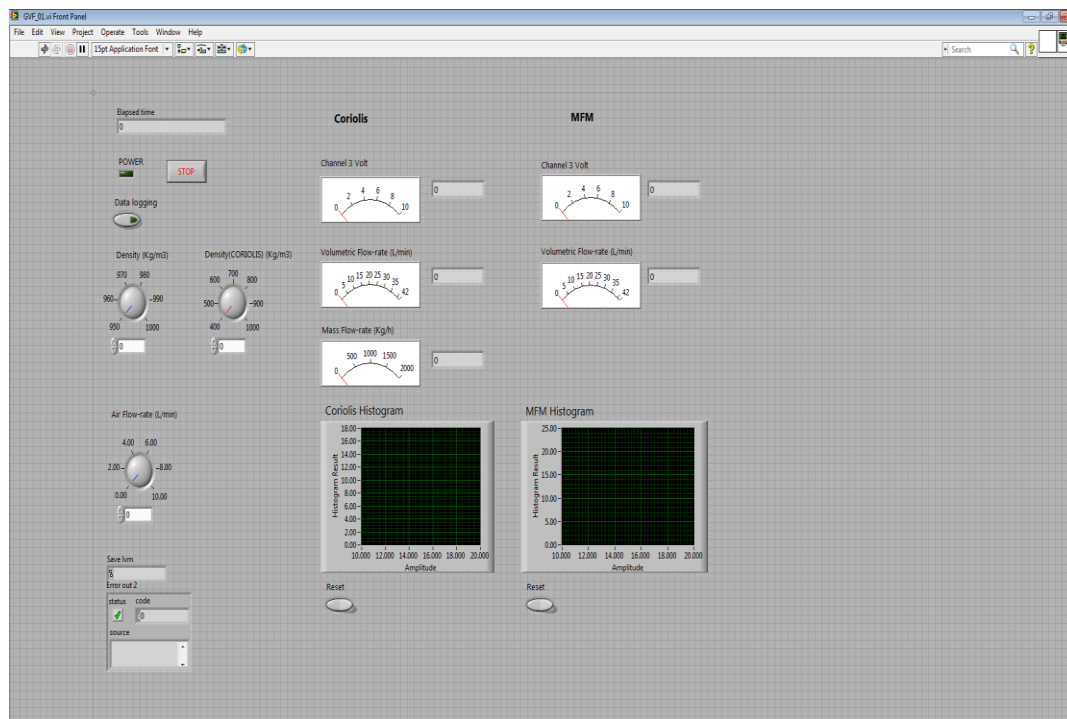
5.4.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων

Στο Σχήμα 5-16, παρουσιάζεται το Front Panel του προγράμματος «GVF_1.vi». Το συνταχθέν πρόγραμμα είναι υπεύθυνο για τη λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων σε αρχείο κειμένου ascii χαρακτήρων. Ξεκινώντας από τα αριστερά του φύλλου (Front panel) υπάρχει ένα εικονόργανο λυχνίας με την ένδειξη «POWER» το οποίο εισήχθη για να ενημερώνει το χρήστη εάν το πρόγραμμα είναι ενεργοποιημένο ή όχι. Στην περίπτωση όπου το πρόγραμμα είναι ενεργό η λυχνία χρώματος πράσινου είναι αναμμένη ενώ σε αντίθετη περίπτωση είναι σβηστή. Ο χρήστης μπορεί να διακόψει όποτε επιθυμεί τη λειτουργία του προγράμματος, πατώντας το πλήκτρο «Stop».

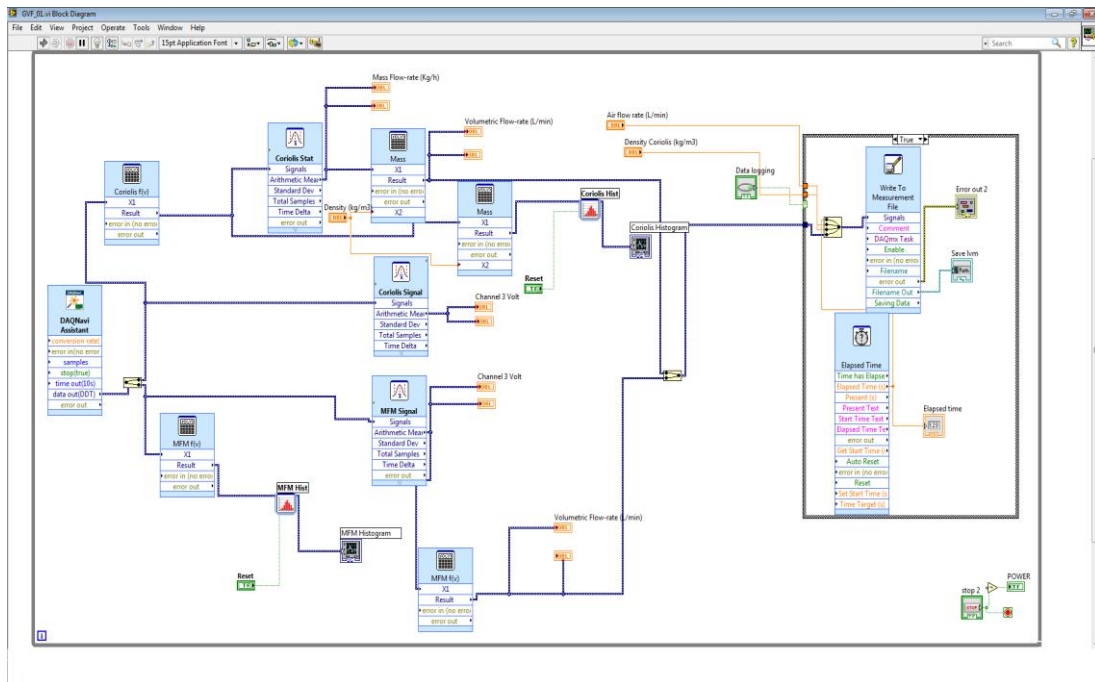
Με την ενεργοποίηση του προγράμματος παρέχονται στο χρήστη, σε πραγματικό χρόνο, μέσω εικονοργάνων οι εξής πληροφορίες: Οι τιμές της τάσης που επιστρέφουν οι μεταλλάκτες παροχής της πειραματικής διάταξης, δηλαδή το μαγνητικό ροόμετρο και το ροόμετρο Coriolis, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές παροχής όγκου και μάζας αντίστοιχα, έτσι όπως αυτές προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές εξισώσεις των οργάνων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει την τιμή της πυκνότητας του μετρούμενου υγρού, βάσει της οποίας εκτιμάται η παροχή όγκου από τις μετρήσεις παροχής μάζας του Coriolis. Οι εκτιμήσεις της παροχής όγκου από τους δύο μεταλλάκτες παρουσιάζονται εποπτικά στο Front panel μέσω ιστογραμμάτων.

Επειδή, όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της ελεγχόμενης διάταξης, η παροχή του αέρα για τη δημιουργία του διφασικού μίγματος μετράται με χρήση ροομέτρου πλωτήρος και όχι μεταλλάκτη παροχής και επειδή αποτελεί μέγεθος το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό του κλάσματος κενού, οι τιμές της ένδειξης του ροομέτρου εισάγονται στο πρόγραμμα χειροκίνητα από το χρήστη. Επίσης, ο χρήστης εισάγει την τιμή της πυκνότητας που παρατηρείται στην οθόνη (display) του Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρα.

Στην περίπτωση όπου ο χρήστης θέλει να καταγράψει τα παραπάνω μεγέθη σε ηλεκτρονικό αρχείο ενεργοποιεί την καταγραφή επιλέγοντας το εικονόργανο – διακόπτη με την ένδειξη «Data logging». Το εικονόργανο αυτό διαθέτει και λυχνία η οποία για την περίπτωση καταγραφής γίνεται πράσινη, έτσι ώστε να γίνεται άμεσα αντιληπτό πότε γίνεται συλλογή δεδομένων και πότε απλά εποπτεία της ελεγχόμενης διάταξης. Επιπλέον για την περίπτωση συλλογής δεδομένων το πρόγραμμα επιστρέφει σε πραγματικό χρόνο τη χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας σε δευτερόλεπτα (s).



Σχήμα 5-16 Front Panel για το Πείραμα 1

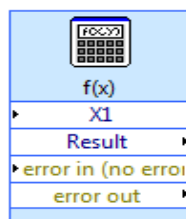


Σχήμα 5-17 Block diagram για το Πείραμα 1

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, πέραν της εμπρόσθιας επιφάνειας (Front panel) μέσω της οποίας η εφαρμογή αλληλεπιδρά με τον χρήστη, η εφαρμογή αναπτύσσεται και στο περιβάλλον του δομικού διαγράμματος ροής (Block diagram). Στο περιβάλλον αυτό αναπτύσσεται κυρίως το υπολογιστικό μέρος το οποίο δεν ενδιαφέρει άμεσα τον χρήστη της εφαρμογής. Το Block diagram της παρούσας εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 5-17 και οι κυριότερες συνιστώσες – υπο-ρουτίνες του αναλύονται στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

- **Configure formula**

Δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μία μαθηματική συνάρτηση (Σχήμα 5-18). Χρησιμοποιήθηκε για να εισαχθεί η χαρακτηριστική εξίσωση κάθε μεταλλάκτη, δηλαδή ο μαθηματικός τύπος μετατροπής της τάσης (V) που λαμβάνει ο ADC σε παροχή μάζας (kg/h) όσον αφορά το ροόμετρο Coriolis και σε παροχή όγκου όσον αφορά το μαγνητικό ροόμετρο (L/min). Όπου X1 η μεταβλητή εισόδου της ρουτίνας η οποία παίρνει τις τιμές της τάσης που διαβάζει ο ADC. Η έξοδος της ρουτίνας μετά την εφαρμογή της μαθηματικής φόρμουλας δίνεται από τη μεταβλητή εξόδου με όνομα «Result».



Σχήμα 5-18 Configure formula

Η συνάρτηση μετατροπής για το ροόμετρο Coriolis ανάλογα με το εύρος παροχών στο οποίο λειτουργεί, δηλαδή 0÷8.000 kg/h και το εύρος της αναλογικής εξόδου του ηλεκτρικού σήματος (βλ. §5.1), δηλαδή 4-20 mA, μετά την μετατροπή του σήματος εντάσεως σε σήμα τάσεως με χρήση ωμικής αντίστασης 510 Ω δίνεται από τη Σχέση 5-2:

$$Result = 980.3921569 \cdot X1 - 2000 \quad \text{Σχέση 5-2}$$

Αντίστοιχα για το ροόμετρο MFM ανάλογα με το εύρος παροχών στο οποίο λειτουργεί, δηλαδή 0÷41,67 L/min και το εύρος αναλογικής εξόδου που επιλέχθηκε (βλ. §3.2), δηλαδή 0-20 mA, μετά την μετατροπή του σήματος εντάσεως σε σήμα τάσεως με χρήση ωμικής αντίστασης 500 Ω, η συνάρτηση μετατροπής είναι:

$$Result = 4.167 \cdot X1 \quad \text{Σχέση 5-3}$$

Όμως, εισάγοντας την συνάρτηση διαβαθμονόμησης του MFM σε σχέση με το Coriolis (βλ. §3.3) η συνάρτηση μετατροπής παίρνει τη μορφή:

$$Result = 4.167 \cdot 1.0123476 \cdot X1 - 0.186574 \quad \text{Σχέση 5-4}$$

Η ρουτίνα αυτή χρησιμοποιείται και για την μετατροπή της παροχής μάζας (kg/h) του Coriolis σε παροχή όγκου (L/min) χρησιμοποιώντας την πραγματική πυκνότητα του νερού ως εξής :

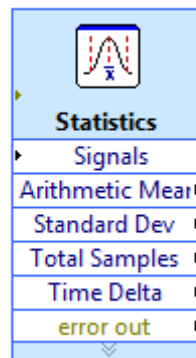
Ως πρώτη μεταβλητή εισόδου X1 λαμβάνει τις τιμές της παροχής μάζας του Coriolis που είναι ουσιαστικά το Result από την προηγούμενη χρήση της ρουτίνας. Ως δεύτερη μεταβλητή εισόδου X2 επιλέγεται η τιμή της πραγματικής πυκνότητας του νερού που ορίζεται από το χρήστη σύμφωνα με την ένδειξη της οθόνης του ροομέτρου Coriolis για μονοφασική ροή νερού θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η πυκνότητα μετράται κάθε φορά στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας. Έτσι, η συνάρτηση μετατροπής γίνεται:

$$Result = X1 / (60 \cdot X2 / 1000) \quad \text{Σχέση 5-5}$$

- **Configure Statistics**

Η ρουτίνα αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του αριθμητικού μέσου. Στο Σχήμα 5-19, φαίνονται οι δυνατότητες επεξεργασίας των δεδομένων που διαθέτει ο χρήστης. Η είσοδος της ρουτίνας είναι μεταβλητή «signals» η οποία στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύει τις τιμές της παροχής μάζας όσον αφορά το Coriolis και τις τιμές της παροχής όγκου όσον αφορά το MFM . Το αποτέλεσμα που επιλέγουμε εμείς να έχει σαν έξοδο είναι ο αριθμητικός μέσος 1000 δειγμάτων. Δεδομένου ότι η

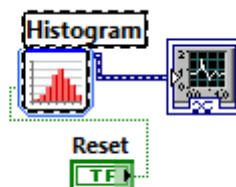
συλλογή δεδομένων γίνεται με συχνότητα 1 kHz γίνεται κατανοητό ότι ο ρυθμός ανανέωσης (refresh rate) των ενδείξεων των εικονοργάνων είναι 1 s.



Σχήμα 5-19 Configure Statistics

- Histogram

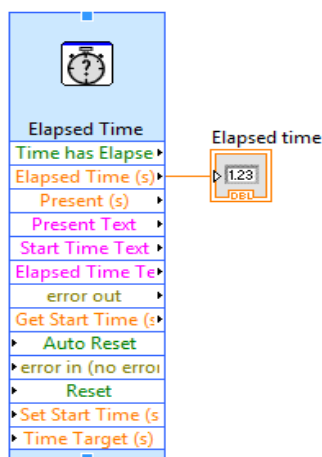
Το ιστόγραμμα είναι η γραφική απεικόνιση στατιστικών συχνοτήτων περιοχών τιμών ενός μεγέθους. Η ρουτίνα αυτή, Σχήμα 5-20, επιτρέπει στο χρήστη να εμφανίσει το ιστόγραμμα των μετρήσεων στην επιφάνεια του Front Panel. Σαν είσοδο λαμβάνει όλες τις μετρήσεις της παροχής μάζας και της παροχής όγκου όπως προκύπτουν από την συνάρτηση μετατροπής των τιμών τάσης για το Coriolis και το MFM αντίστοιχα και σαν έξοδο επιστρέφει το ιστόγραμμα για κάθε περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά προστέθηκαν προκειμένου να έχει ο χρήστης την εποπτική εικόνα των μετρήσεων των μεταλλακτών. Υπό σταθερές συνθήκες αναμένεται μικρή διασπορά των μετρήσεων περί τη μέση τιμή και ομοσκεδαστικότητα. Είναι κατανοητό ότι το ιστόγραμμα έχει νόημα να απεικονίζεται και να αξιολογείται για σταθερές συνθήκες. Επειδή όμως κατά την πειραματική διαδικασία θέλουμε να ρυθμίζουμε την παροχή του νερού σε διαφορετικές τιμές και να λαμβάνουμε μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επανεκκίνησης της δημιουργίας των ιστογραμμάτων, έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες ροής.



Σχήμα 5-20 Histogram

- Elapsed time

Επειδή η εφαρμογή δεν χρησιμοποιείται μόνο για τη συλλογή δεδομένων αλλά και για την επιτήρηση της λειτουργίας της ελεγχόμενης διάταξης και επειδή μας ενδιαφέρει το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας προστέθηκε η ρουτίνα με όνομα: «Elapsed time», το εικονόργανο της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 5-21 . Η ρουτίνα ενεργοποιείται τη στιγμή εκκίνησης της δειγματοληψίας και τερματίζει τη λειτουργία της τη στιγμή που απενεργοποιείται η καταγραφή των δεδομένων.



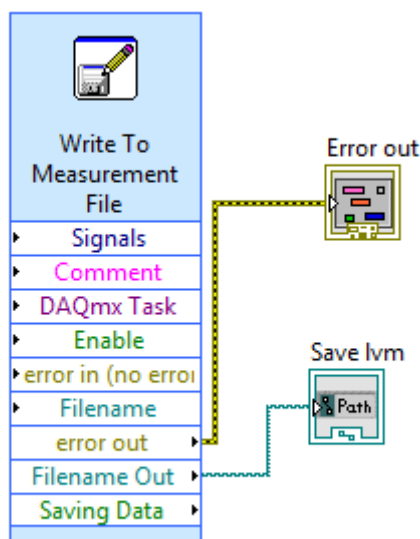
Σχήμα 5-21 Elapsed time

- Write to measurement file

Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται για την καταγραφή των μετρήσεων σε ηλεκτρονικό αρχείο κειμένου (Σχήμα 5-22). Στην παρούσα εφαρμογή καταγράφονται τα εξής μεγέθη:

1. Ο χρόνος δειγματοληψίας (Elapsed time) σε s
2. Η πυκνότητα του ροομέτρου Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρος σε kg/m^3
3. Οι μετρήσεις της παροχής όγκου του νερού του ροομέτρου Coriolis σε L/min
4. Οι μετρήσεις της παροχής όγκου του νερού του μαγνητικού ροομέτρου σε L/min
5. Η παροχή όγκου του αέρα σε L/min

Το όνομα του αρχείου καταγραφής είναι «test.lvm» και βρίσκεται στον προεπιλεγμένο (default) κατάλογο «\LabVIEW Data». Σε περίπτωση όπου στον φάκελο εγγραφής προϋπάρχει αρχείο με το ίδιο όνομα τότε στο όνομα του νέου αρχείου προστίθεται ακέραιος αριθμός ο οποίος υποδηλώνει τον αύξοντα αριθμό του αρχείου.



Σχήμα 5-22 Write to measurement file

5.4.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το εύρος παροχής του νερού είναι 10÷18 L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα είναι 1÷4 L/min με βήμα 0.5 L/min σε κάθε επανάληψη.

Η διαδικασία για τη λήψη των μετρήσεων στο Πείραμα 1 έχει ως εξής:

- 1) Εκκινούμε την εφαρμογή «GVF_1.vi» και ενεργοποιούμε τη λήψη μετρήσεων από το πλήκτρο «Run» του Front panel.
- 2) Ανοίγουμε την παροχή νερού του δικτύου και ρυθμίζουμε στην επιθυμητή τιμή, σύμφωνα με την ένδειξη στο αντίστοιχο εικονόργανο, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Εισάγουμε την τιμή της πυκνότητας του νερού που ενδείκνυται στο display του Coriolis.
- 3) Ανοίγουμε την παροχή του αέρα και με τη βοήθεια του ροομέτρου πλωτήρος ρυθμίζουμε την παροχή, μέσω στραγγαλιστικής βαλβίδας, στην επιθυμητή παροχή. Εν συνεχεία εισάγουμε την τιμή της παροχής όγκου του αέρα και την αναγραφόμενη τιμή της πυκνότητας στο display του Coriolis στην εφαρμογή.

- 4) Ενεργοποιούμε την καταγραφή των μετρήσεων σε αρχείο κειμένου πατώντας το πλήκτρο data logging. Με την ενεργοποίηση η εικονική λυχνία ανάβει με πράσινο χρώμα.
- 5) Μετά την πάροδο του επιθυμητού χρόνου δειγματοληψίας απενεργοποιούμε την καταγραφή επιλέγοντας και πάλι το πλήκτρο data logging. Με την απενεργοποίηση η εικονική λυχνία σβήνει.
- 6) Διατηρώντας σταθερή την παροχή της υγρής φάσης ρυθμίζουμε την παροχή της αέριας φάσης σε νέα τιμή και λαμβάνουμε νέο δείγμα μετρήσεων (βήματα 4 & 5). Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για όλο το εύρος παροχής αέρα.
- 7) Κλείνουμε την παροχή του αέρα και ρυθμίζουμε την παροχή του νερού δικτύου σταθεροποιώντας τη στην επόμενη επιθυμητή τιμή και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 έως 6 όσες φορές απαιτείται ώστε να καλυφθεί το εύρος παροχής νερού που έχουμε επιλέξει.
- 8) Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και εφόσον δεν επιθυμούμε την επιτήρηση της ελεγχόμενης διάταξης τερματίζεται η εφαρμογή επιλέγοντας το πλήκτρο Stop.

5.5 Λήψη μετρήσεων από τα ροόμετρα – Πείραμα 2

Το πρόγραμμα που συντάχθηκε για το δεύτερο πείραμα ονομάστηκε «GVF_2.vi». Η βασική δομή και λειτουργία είναι παρόμοια με το πρόγραμμα «GVF_1.vi». Η ουσιαστική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι σε αυτή την περίπτωση το ροόμετρο Coriolis στην έξοδο του επιστρέφει την τιμή της πυκνότητας και όχι της παροχής μάζας όπως στην προηγούμενη περίπτωση.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι ο ελεγκτής δεν έχει τη δυνατότητα να επιστρέψει την παροχή σε διαφορετικό κανάλι εξόδου και κατά συνέπεια δεν είναι εφικτό να έχουμε ταυτόχρονη καταγραφή και των δύο μεγεθών, δηλαδή της παροχής μάζας και της πυκνότητας. Η ρύθμιση του μετρούμενου μεγέθους του καναλιού εξόδου γίνεται από το menu του ελεγκτή, για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται στην ΜΕ [5] και στο εγχειρίδιο χρήσης του κατασκευαστή [4].

Όσον αφορά το μαγνητικό ροόμετρο, εκ των πραγμάτων δεν έχει τη δυνατότητα μέτρησης άλλου μεγέθους πλην της παροχής όγκου (L/min) και κατά συνέπεια δεν υπάρχει καμία μεταβολή σε σχέση με το προηγούμενο Πείραμα 1.

Στο πείραμα αυτό η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παραμένει ως έχει, ενώ συντάχθηκε πρόγραμμα αποκλειστικά για τις ανάγκες του πειράματος αυτού με σκοπό τη λήψη μετρήσεων από τα δύο ροόμετρα. Το πρόγραμμα αυτό αναλύεται στη συνέχεια. Όσον αφορά την παροχή όγκου του νερού, το εύρος των τιμών της ήταν $10 \div 20$ L/min, ενώ το εύρος της παροχής όγκου του αέρα ήταν $0 \div 4$ L/min.

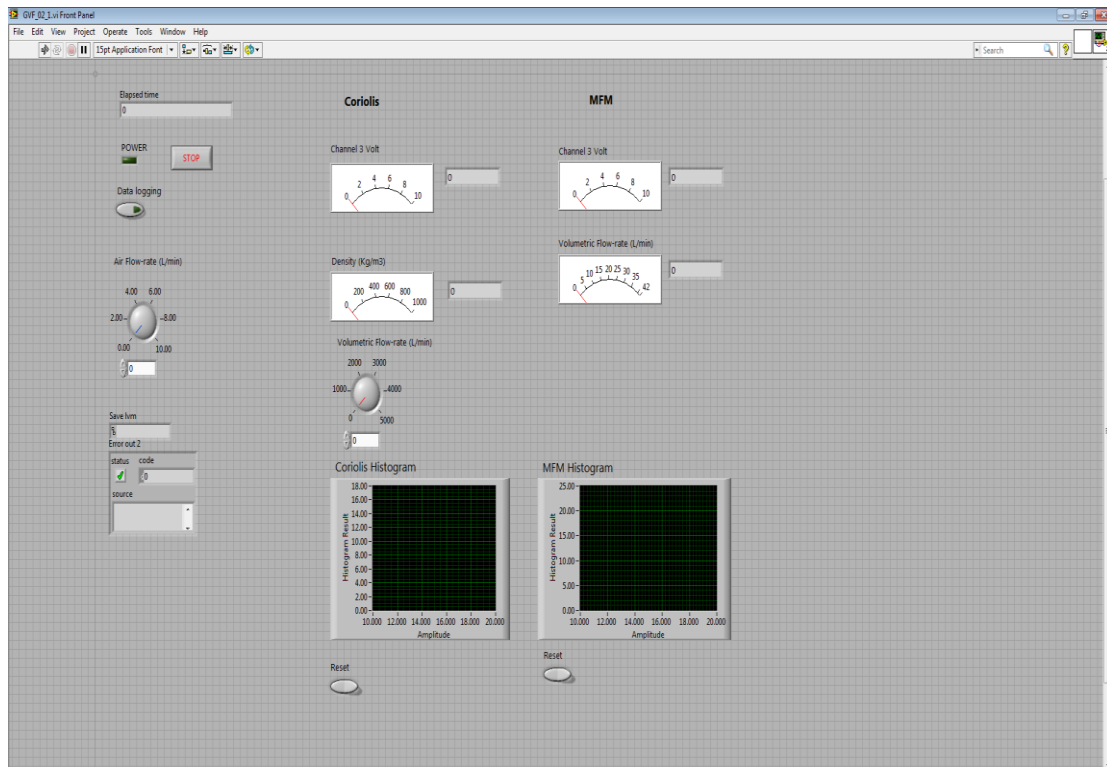
5.5.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων

Στο Σχήμα 5-23, παρουσιάζεται το Front Panel του προγράμματος «GVF_2.vi». Η δομή του είναι, όπως αναφέρθηκε, παρόμοια με αυτή του Πειράματος 1. Με την ενεργοποίηση του προγράμματος παρέχονται στο χρήστη, σε πραγματικό χρόνο, μέσω εικονοργάνων οι εξής πληροφορίες: Οι τιμές της τάσης που επιστρέφουν οι μεταλλάκτες παροχής της πειραματικής διάταξης, δηλαδή το μαγνητικό ροόμετρο και το ροόμετρο Coriolis, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές παροχής όγκου και πυκνότητας αντίστοιχα, έτσι όπως αυτές προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές εξισώσεις των οργάνων. Επιπλέον οι εκτιμήσεις της παροχής όγκου και της πυκνότητας από τους δύο μεταλλάκτες παρουσιάζονται εποπτικά στο Front panel μέσω ιστογραμμάτων.

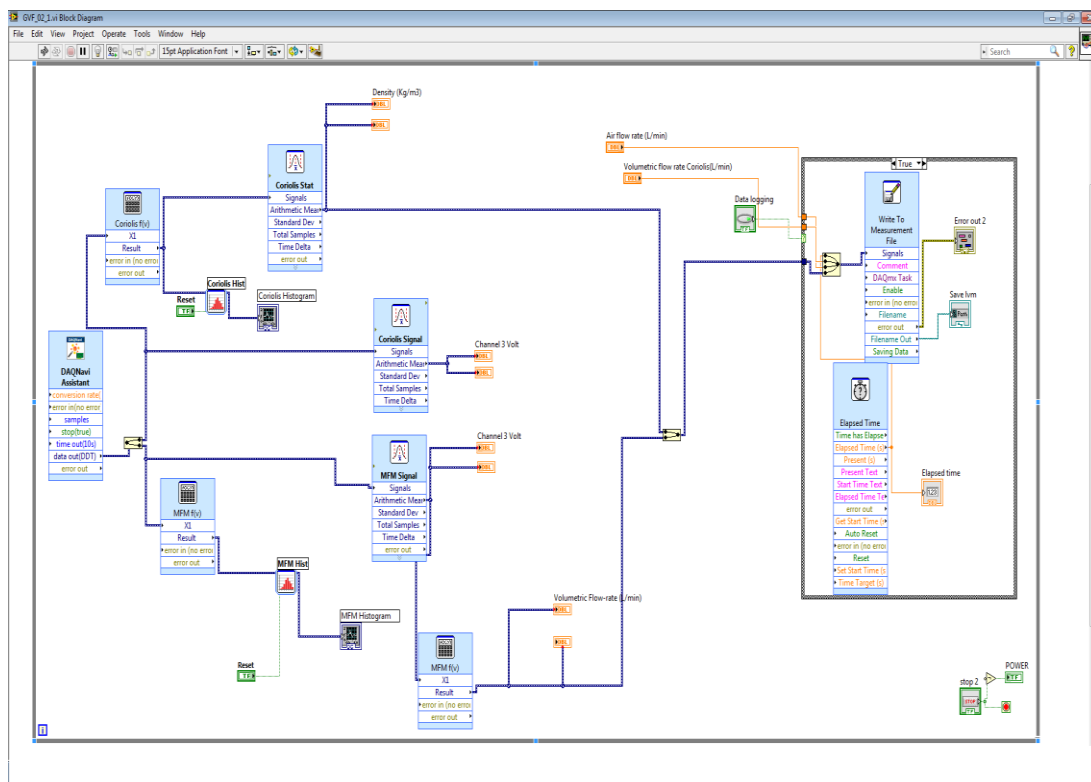
Η παροχή του αέρα για τη δημιουργία του διφασικού μείγματος μετράται με χρήση ροομέτρου πλωτήρα όπως και προηγουμένως, ενώ οι τιμές της ένδειξης του ροομέτρου εισάγονται στο πρόγραμμα χειροκίνητα από το χρήστη. Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει την τιμή της παροχής όγκου η οποία αναγράφεται στο display του Coriolis.

Στην περίπτωση όπου ο χρήστης θέλει να καταγράψει τα παραπάνω μεγέθη σε ηλεκτρονικό αρχείο ενεργοποιεί την καταγραφή επιλέγοντας και πάλι το εικονόργανο – διακόπτη με την ένδειξη «Data logging». Τέλος, όπως και πριν, για την περίπτωση συλλογής δεδομένων το πρόγραμμα επιστρέφει σε πραγματικό χρόνο τη χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας σε δευτερόλεπτα (s).

Το Block diagram της παρούσας εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 5-24 .



Σχήμα 5-23 Front Panel για το Πείραμα 2



Σχήμα 5-24 Block diagram για το Πείραμα 2

Οι υπορουτίνες που διαφοροποιούνται είναι οι εξής:

- **Configure formula**

Χρησιμοποιήθηκε για να εισαχθεί η χαρακτηριστική εξίσωση κάθε μεταλλάκτη, δηλαδή ο μαθηματικός τύπος μετατροπής της τάσης (V) που λαμβάνει ο ADC σε πυκνότητα (kg/m^3) όσον αφορά το ροόμετρο Coriolis και σε παροχή όγκου όσον αφορά το μαγνητικό ροόμετρο (L/min). Όπου X1 η μεταβλητή εισόδου της ρουτίνας η οποία παίρνει τις τιμές της τάσης που διαβάζει ο ADC.

Η νέα συνάρτηση μετατροπής για το ροόμετρο Coriolis ανάλογα με το εύρος της πυκνότητας που διαθέτει, δηλαδή 500-3500 kg/m^3 , και το εύρος της αναλογικής εξόδου που επιλέχθηκε για το Coriolis, δηλαδή 4-20 mA, μετά την μετατροπή του σήματος εντάσεως σε σήμα τάσεως με χρήση ωμικής αντίστασης 510 Ω δίνεται από τη Σχέση 5-6, είναι:

$$\text{Result} = 367.6470588 \cdot X1 - 250 \quad \text{Σχέση 5-6}$$

Ενώ για το ροόμετρο MFM η συνάρτηση μετατροπής παραμένει η ίδια (Σχέση 5-4):

$$\text{Result} = 4.167 \cdot 1.0123476 \cdot X1 - 0.186574 \quad \text{Σχέση 5-7}$$

- **Write to measurement file**

Στην παρούσα εφαρμογή καταγράφονται τα εξής μεγέθη:

1. Ο χρόνος δειγματοληψίας (Elapsed time) σε s
2. Η τιμή της παροχής όγκου του ροομέτρου Coriolis σε L/min
3. Οι μετρήσεις της πυκνότητας του ροομέτρου Coriolis σε kg/m^3
4. Οι μετρήσεις της παροχής όγκου του μαγνητικού ροομέτρου σε L/min
5. Η παροχή όγκου του αέρα σε L/min

Οι υπόλοιπες υπορουτίνες παραμένουν ως έχουν, χωρίς κάποια ουσιαστική διαφορά.

5.5.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Στο σημείο να σημειωθεί ότι το εύρος παροχής του νερού είναι 10÷20 L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα παραμένει 1÷4 L/min με βήμα 0.5 L/min σε κάθε επανάληψη.

Η διαδικασία για τη λήψη των μετρήσεων στο Πείραμα 1 έχει ως εξής:

- 1) Εκκινούμε την εφαρμογή «GVF_2.vi» και ενεργοποιούμε τη λήψη μετρήσεων από το πλήκτρο «Run» του Front panel.
- 2) Ανοίγουμε την παροχή νερού του δικτύου και ρυθμίζουμε στην επιθυμητή τιμή, σύμφωνα με την ένδειξη στο αντίστοιχο εικονόργανο, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.
- 3) Ανοίγουμε την παροχή του αέρα και με τη βοήθεια του ροομέτρου πλωτήρος ρυθμίζουμε την παροχή, μέσω στραγγαλιστικής βαλβίδας, στην επιθυμητή παροχή. Εν συνεχεία εισάγουμε στην εφαρμογή, την τιμή της παροχής όγκου του αέρα και την αναγραφόμενη τιμή της παροχής όγκου στο display του Coriolis.
- 4) Ενεργοποιούμε την καταγραφή των μετρήσεων σε αρχείο κειμένου πατώντας το πλήκτρο data logging. Με την ενεργοποίηση η εικονική λυχνία ανάβει με πράσινο χρώμα.
- 5) Μετά την πάροδο του επιθυμητού χρόνου δειγματοληψίας απενεργοποιούμε την καταγραφή επιλέγοντας και πάλι το πλήκτρο data logging. Με την απενεργοποίηση η εικονική λυχνία σβήνει.
- 6) Διατηρώντας σταθερή την παροχή της υγρής φάσης ρυθμίζουμε την παροχή της αέριας φάσης σε νέα τιμή και λαμβάνουμε νέο δείγμα μετρήσεων (βήματα 4 & 5). Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για όλο το εύρος παροχής αέρα.
- 7) Κλείνουμε την παροχή του αέρα και ρυθμίζουμε την παροχή του νερού δικτύου σταθεροποιώντας τη στην επόμενη επιθυμητή τιμή και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 έως 6 όσες φορές απαιτείται ώστε να καλυφθεί το εύρος παροχής νερού που έχουμε επιλέξει.
- 8) Μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και εφόσον δεν επιθυμούμε την επιτήρηση της ελεγχόμενης διάταξης τερματίζεται η εφαρμογή επιλέγοντας το πλήκτρο Stop.

5.6 Λήψη μετρήσεων από τα ροόμετρα – Πείραμα 3

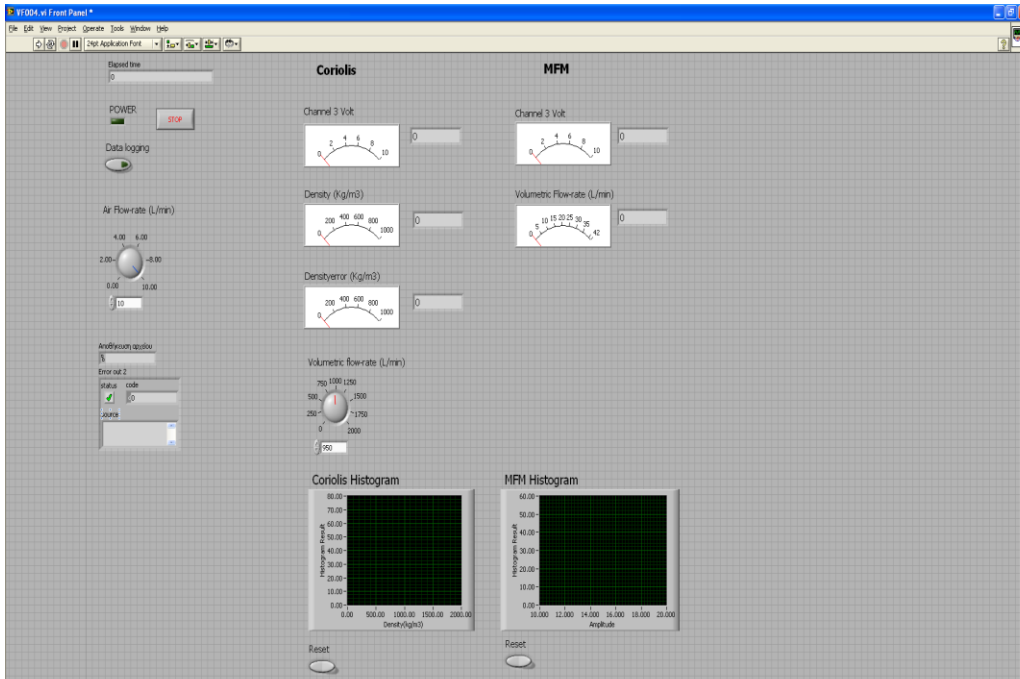
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις καταγραφόμενες μετρήσεις του Πειράματος 2 και που αναλύονται στο επόμενο Κεφάλαιο 6, υπολογίσθηκε η

σχέση αναδρομής της πυκνότητας που μετράει το ροόμετρο Coriolis και της πραγματικής πυκνότητας. Οπότε, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε νέο πείραμα στο οποίο λήφθηκε υπόψη η σχέση αυτή και υπολογίστηκε το σφάλμα σε κάθε μέτρηση της πυκνότητας του ροομέτρου Coriolis.

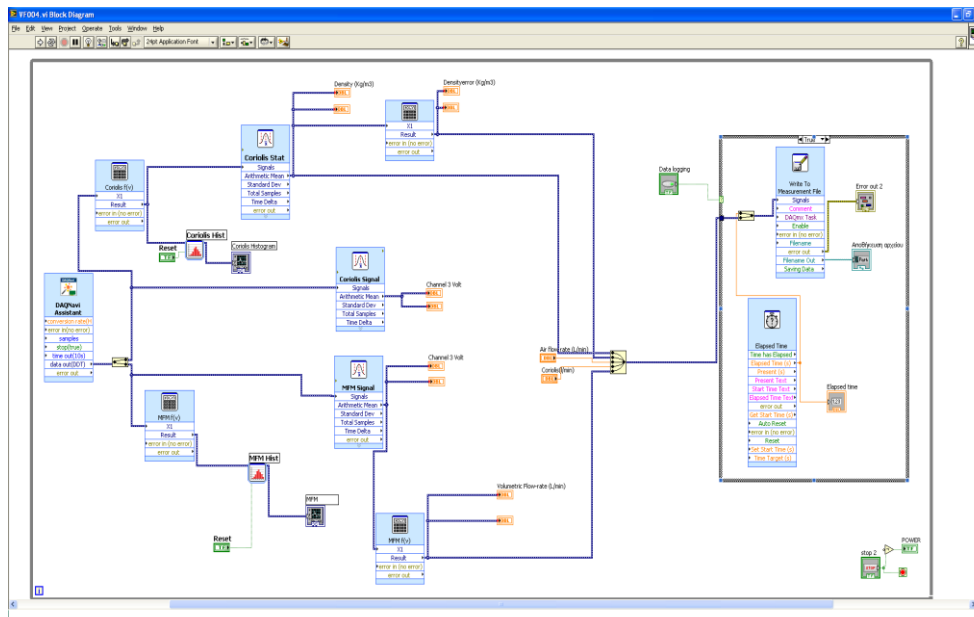
5.6.1 Πρόγραμμα λήψης μετρήσεων

Στο Σχήμα 5-25, παρουσιάζεται το Front Panel του προγράμματος «GVF_3.vi». Η δομή του είναι σχεδόν ίδια με αυτή του Πειράματος 2. Με την ενεργοποίηση του προγράμματος παρέχονται στο χρήστη, σε πραγματικό χρόνο μέσω εικονοργάνων οι εξής πληροφορίες: Οι τιμές της τάσης που επιστρέφουν οι μεταλλάκτες παροχής της πειραματικής διάταξης καθώς και οι αντίστοιχες τιμές παροχής όγκου και πυκνότητας. Και εδώ, οι εκτιμήσεις της παροχής όγκου και της πυκνότητας από τους δύο μεταλλάκτες παρουσιάζονται εποπτικά στο Front panel μέσω ιστογραμμάτων. Η διαφορά στο πείραμα αυτό είναι παρέχεται στο χρήστη και η τιμή του σφάλματος της πυκνότητας (d_error) του ροομέτρου Coriolis, όπως αυτή υπολογίζεται μέσω κατάλληλης συνάρτησης η οποία είναι αποτέλεσμα της επεξεργασίας των δεδομένων του Πειράματος 2.

Το Block diagram της παρούσας εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα 5-26.



Σχήμα 5-25 Front Panel για το Πείραμα 3



Σχήμα 5-26 Block diagram για το Πείραμα 3

Οι υπορουτίνες που διαφοροποιούνται σε σχέση με το Πείραμα 2 είναι οι εξής:

- **Configure formula**

Χρησιμοποιήθηκε για να εισαχθεί η χαρακτηριστική εξίσωση κάθε μεταλλάκτη, δηλαδή ο μαθηματικός τύπος μετατροπής της τάσης (V) που λαμβάνει ο ADC σε πυκνότητα (kg/m^3) όσον αφορά το ροόμετρο Coriolis και σε παροχή όγκου όσον

αφορά το μαγνητικό ροόμετρο (L/min). Όπου X1 η μεταβλητή εισόδου της ρουτίνας η οποία παίρνει τις τιμές της τάσης που διαβάζει ο ADC.

Η συνάρτηση μετατροπής για το ροόμετρο Coriolis είναι η ίδια (Σχέση 5-6):

$$Result = 367.6470588 \cdot X1 - 250 \quad \text{Σχέση 5-8}$$

Ενώ για το ροόμετρο MFM η συνάρτηση μετατροπής παραμένει επίσης η ίδια με αυτή των Πειράματος 1 και 2 (Σχέση 5-4):

$$Result = 4.167 \cdot 1,0123476 \cdot X1 - 0.186574 \quad \text{Σχέση 5-9}$$

Επιπλέον, η ρουτίνα χρησιμοποιήθηκε ώστε να εισαχθεί ο τύπος υπολογισμού του σφάλματος της πυκνότητας για κάθε μέτρηση του ροομέτρου Coriolis (d_{error}) και ο οποίος είναι:

$$Result = d_{error} = 6.908e - 04 \cdot X1 - 6.943e - 01 \quad \text{Σχέση 5-10}$$

Όπου X1 η μεταβλητή εισόδου της ρουτίνας η οποία λαμβάνει τις τιμές της πυκνότητας όπως προκύπτουν από τη Σχέση 5-8.

- Write to measurement file

Στην παρούσα εφαρμογή καταγράφονται τα εξής μεγέθη:

1. Ο χρόνος δειγματοληψίας (Elapsed time) σε s
2. Η τιμή της παροχής όγκου του ροομέτρου Coriolis σε L/min
3. Οι μετρήσεις της πυκνότητας του νερού του ροομέτρου Coriolis σε kg/m^3
4. Οι μετρήσεις της παροχής όγκου του νερού του μαγνητικού ροομέτρου σε L/min
5. Η παροχή όγκου του αέρα σε L/min
6. Η τιμή του σφάλματος της πυκνότητας d_{error}

Οι υπόλοιπες υπορουτίνες παραμένουν ως έχουν, χωρίς κάποια ουσιαστική διαφορά.

5.6.2 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Στο σημείο να σημειωθεί ότι το εύρος παροχής του νερού είναι $10 \div 19$ L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα παραμένει $1 \div 4$ L/min με βήμα 0,5 L/min σε κάθε επανάληψη.

Η διαδικασία για τη λήψη των μετρήσεων στο Πείραμα 3 είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του Πειράματος 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Τα Πειράματα 1, 2 και 3 των οποίων η διαδικασία αναλύθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 5, διεξήχθησαν με σκοπό την εκτενή μελέτη της συμπεριφοράς του ροομέτρου Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρα και τελικά τη διόρθωση των σφαλμάτων των μετρήσεων παροχής και πυκνότητας που προκύπτουν. Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα αυτά. Η μελέτη και η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με αποκλειστική χρήση του προγράμματος R.

Οι κοινές βασικές παράμετροι και τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία των μετρήσεων σε όλα τα πειράματα είναι οι εξής :

- Η πυκνότητα του αέρα (d_{air}) η οποία λήφθηκε ίση με 1kg/m^3
- Η πυκνότητα του νερού (d_{water}), η οποία μετρήθηκε από το ροόμετρο Coriolis για περιπτώσεις μονοφασικής ροής νερού υπό σταθερές συνθήκες. Η μέση τιμή για την πυκνότητα προέκυψε ίση με 998.5 kg/m^3
- Η θερμοκρασία του νερού (T_w) μετρήθηκε και αυτή από το ροόμετρο Coriolis υπό σταθερές συνθήκες μονοφασικής ροής νερού. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας προέκυψε ίση με 20.7°C .
- Η συνολική παροχή του όγκου του μίγματος νερού και αέρα (\dot{V}_{mix}) υπολογίστηκε με βάση τη Σχέση 6-1.

$$\dot{V}_{mix} = \dot{V}_{air} + \dot{V}_{MFM} \quad \left(\frac{L}{\text{min}}\right) \quad \text{Σχέση 6-1}$$

Όπου :

\dot{V}_{air} : Η μετρούμενη παροχή όγκου του αέρα έτσι όπως προκύπτει από το ροόμετρο πλωτήρος σε L/min .

\dot{V}_{MFM} : Η μετρούμενη παροχή όγκου του νερού έτσι όπως προκύπτει από τις μετρήσεις του μαγνητικού ροομέτρου MFM σε L/min

- Το Κλάσμα Κενού (GVF) υπολογίστηκε με βάση τη Σχέση 6-2 :

$$GVF = \dot{V}_{air}/\dot{V}_{mix} \quad \text{Σχέση 6-2}$$

6.1 Πείραμα 1

Όπως αναφέραμε και στην ενότητα §5.4 αντικειμενικός σκοπός του πειράματος αυτού είναι η καταγραφή μετρήσεων παροχής μάζας του ροομέτρου Coriolis υπό διφασική ροή νερού-αέρα.

Αναλυτικότερα οι πειραματικές συνθήκες έχουν ως εξής: το εύρος παροχής του νερού είναι 10÷18 L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα είναι 1÷4 L/min με βήμα 0.5 L/min σε κάθε επανάληψη. Το νερό και ο αέρας είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ~20°C ενώ η πίεση στο υδραυλικό κύκλωμα μετρήθηκε από 1 έως 1.5 bar. Υπενθυμίζεται ότι το ροόμετρο Coriolis μετρά την παροχή μάζας του νερού σε kg/h, ενώ το μαγνητικό ροόμετρο την παροχή όγκου σε L/min. Προκειμένου να υπάρχει άμεση εποπτεία και σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ Coriolis και MFM οι μετρήσεις της παροχής μάζας μετατρέπονται σε παροχής όγκου μέσω της πυκνότητας του νερού, η οποία μετρήθηκε στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι για τη μετατροπή λάβαμε υπόψη την πυκνότητα του νερού και όχι του μίγματος νερού-αέρα δεδομένου ότι ο λόγος των πυκνοτήτων είναι περίπου 1:1000 και κατά συνέπεια η διαφορά κρίνεται πρακτικά αμελητέα.

Στο παράρτημα A, παρουσιάζονται ενδεικτικές μετρήσεις όπως καταγράφηκαν από το πρόγραμμα GVF_01.vi σε περιβάλλον LabVIEW.

Οι επιπλέον παράμετροι που εισήχθησαν αποκλειστικά για τις ανάγκες του παρόντος πειράματος είναι οι εξής :

- Η πραγματική πυκνότητα του μίγματος (d_{mix}) υπολογίστηκε με βάση τη Σχέση 6-3:

$$d_{mix} = (1 - GVF) \cdot d_{water} + GVF \cdot d_{air} \quad \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad \text{Σχέση 6-3}$$

- Η τελική παροχή μάζας του μίγματος (M_{mix}) υπολογίστηκε σύμφωνα με τη Σχέση 6-4:

$$\dot{M}_{mix} = \frac{\dot{V}_{MFM} \cdot d_{water}}{1000} + \frac{\dot{V}_{air} \cdot d_{air}}{1000} \quad \left(\frac{kg}{min}\right) \quad \text{Σχέση 6-4}$$

- Το σφάλμα της παροχής όγκου του νερού (\dot{V}_{error}) υπολογίστηκε ως εξής (Σχέση 6-5):

$$\dot{V}_{error} = \frac{\dot{V}_{Coriolis} - \dot{V}_{mix}}{\dot{V}_{mix}} \quad \text{Σχέση 6-5}$$

Όπου :

$\dot{V}_{Coriolis}$: Η μετρούμενη παροχή όγκου του νερού σε L/min έτσι όπως εκτιμάται από τις μετρήσεις παροχής μάζας του Coriolis και την πυκνότητα του νερού.

- Το σφάλμα της παροχής μάζας του νερού (\dot{M}_{error}) υπολογίσθηκε ως εξής (Σχέση 6-6):

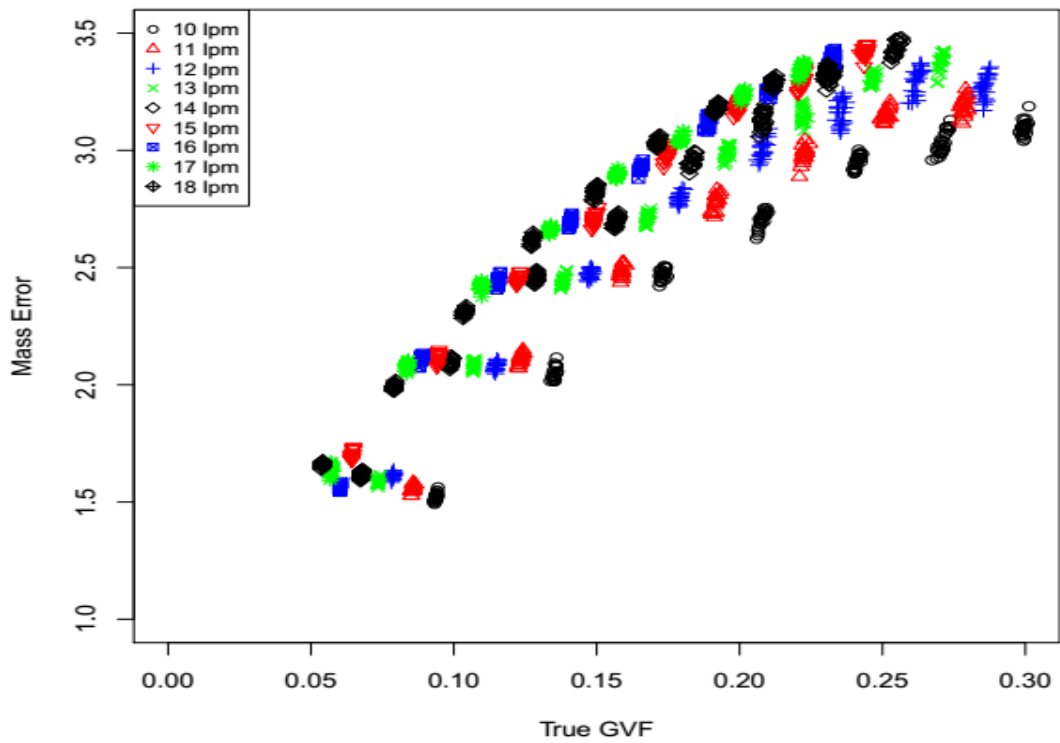
$$\dot{M}_{error} = \frac{\dot{M}_{Coriolis} - \dot{M}_{mix}}{\dot{M}_{mix}} \quad \text{Σχέση 6-6}$$

Όπου :

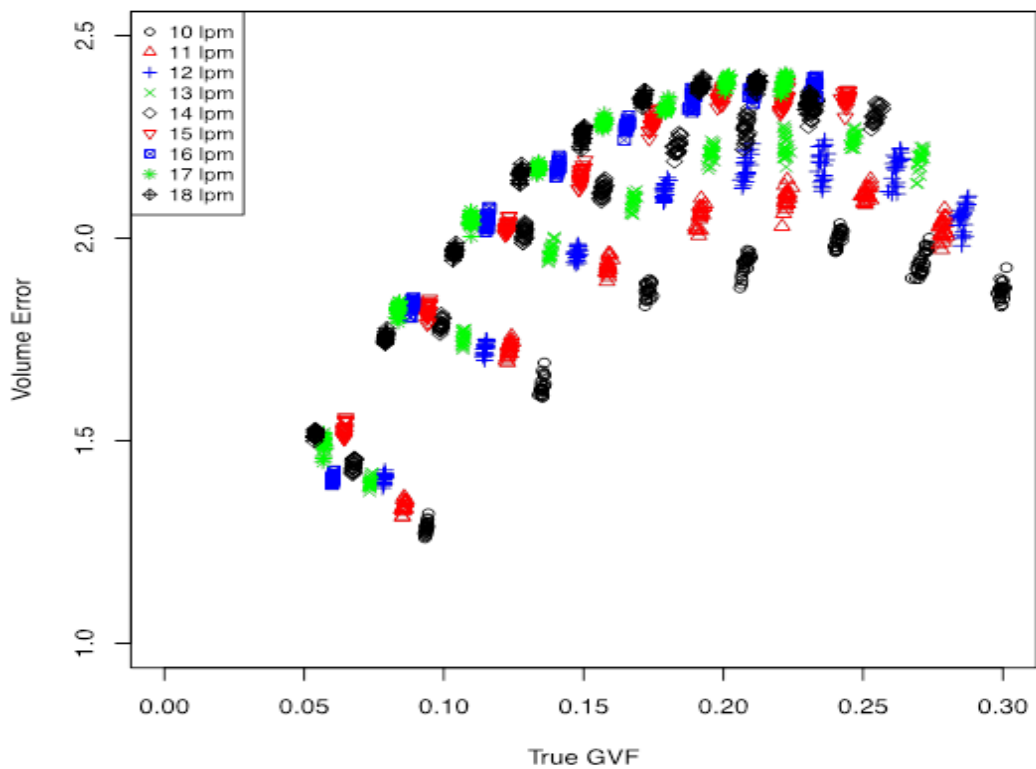
$\dot{M}_{Coriolis}$: Η παροχή μάζας του νερού έτσι όπως προκύπτει από τις μετρήσεις του ροομέτρου Coriolis σε kg/min. Δίνεται από τη Σχέση 6-7:

$$\dot{M}_{Coriolis} = \frac{\dot{V}_{Coriolis} \cdot d_{water}}{1000} \quad \left(\frac{kg}{min}\right) \quad \text{Σχέση 6-7}$$

Τα σφάλματα των μετρήσεων της παροχής μάζας και της παροχής όγκου σε σχέση με το κλάσμα κενού (GVF), καλύπτοντας το συνολικό εύρος των παροχών νερού και αέρα, απεικονίζονται αντίστοιχα στο Σχήμα 6-1 και στο Σχήμα 6-2:



Σχήμα 6-1 Σφάλματα ροής μάζας συναρτήσει του πραγματικού GVF για εύρος παροχής νερού 10÷18 L/min και εύρος παροχής αέρα 1÷4 L/min



Σχήμα 6-2 Σφάλματα ροής όγκου συναρτήσει του GVF για εύρος παροχής νερού 10÷18 L/min και εύρος παροχής αέρα 1÷4 L/min

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 6-1, Σχήμα 6-2), τα σφάλματα που προκύπτουν είναι θετικά ενώ και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ένδειξη θετικής συσχέτισης μεταξύ των σφαλμάτων και του κλάσματος κενού. Επιπλέον μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι το σφάλμα μέτρησης εξαρτάται από την τιμή του κλάσματος κενού αλλά και την παροχή της υγρής φάσης, και κατ' επέκταση του διφασικού μίγματος. Για παράδειγμα παρατηρούμε ότι για την τιμή του GVF περίπου 10%, το σφάλμα παροχής όγκου, για παροχή νερού 10, 14 και 18 L/min προκύπτει περίπου 1.25, 1.75 και 1.90 αντίστοιχα.

Γίνεται κατανοητό ότι η διαφορά στην τιμή του σφάλματος της παροχής όγκου και της παροχής μάζας αποδίδεται στο ότι το GVF επηρεάζει σημαντικά την τιμή της παροχής όγκου του διφασικού μίγματος, ενώ αντίθετα έχει αμελητέα επίδραση στη συνολική παροχή μάζας λόγω της μεγάλης διαφοράς πυκνοτήτων υγρής και αέριας φάσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για υψηλές τιμές της παροχής της υγρής φάσης το σφάλμα της μέτρησης γίνεται ανεξάρτητο της παροχής. Παρατηρούμε δηλαδή μία πύκνωση των καμπυλών των σφαλμάτων αυξανόμενης της ταχύτητας των δύο φάσεων. Για παράδειγμα παρατηρούμε ότι για την τιμή του GVF περίπου 10% το σφάλμα παροχής όγκου, για παροχή νερού 16, 17 και 18 L/min δεν διαφέρει σημαντικά και προκύπτει ίσο με 1.90 περίπου σε κάθε περίπτωση.

Τέλος σαν γενικό συμπέρασμα μπορούμε να ισχυριστούμε πως σε αυτό το Πείραμα, το ροόμετρο Coriolis έχει πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές της παροχής μάζας και όγκου, της τάξης του 200%. Όμως θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα πειράματα που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ αφορούν ιδιαίτερα υψηλές τιμές του κλάσματος κενού. Επιπλέον στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει και η γενικότερη συμπεριφορά του μεταλλάκτη τύπου Coriolis και όχι μόνο η τιμή του σφάλματος του.

6.2 Πείραμα 2

Όπως αναφέρθηκε και κατά την περιγραφή των ροομέτρων τύπου Coriolis, αυτά τα ροόμετρα έχουν τη δυνατότητα μέτρησης και της πυκνότητας του εργαζόμενου μέσου. Σκοπός λοιπόν του δεύτερου πειράματος, το οποίο περιγράψαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, είναι η μελέτη των σφαλμάτων μέτρησης της πυκνότητας κατά τη διασπαστική ροή νερού-αέρα. Στο πείραμα αυτό, ρυθμίζουμε το ροόμετρο Coriolis έτσι ώστε στην αναλογική έξοδο $4\div 20$ mA να επιστρέφει την τιμή της μετρούμενης πυκνότητας του εργαζόμενου μέσου σε kg/m^3 . Οι πειραματικές συνθήκες έχουν ως εξής: το εύρος παροχής του νερού είναι $10\div 20$ L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα είναι $0\div 4$ L/min με βήμα 0,5 L/min σε κάθε επανάληψη. Το νερό και ο αέρας είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $\sim 20^\circ\text{C}$ ενώ η πίεση στο υδραυλικό κύκλωμα μετρήθηκε από 1 έως 1.5 bar. Υπενθυμίζεται ότι το μαγνητικό ροόμετρο μετρά την παροχή όγκου σε L/min.

Στο παράρτημα Α, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από το πρόγραμμα GVF_02.vi σε περιβάλλον LabVIEW.

Πέραν των βασικών παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην αρχή του παρόντος Κεφαλαίου, για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων του 2^{ου} πειράματος χρειάστηκε να υπολογισθούν επιπλέον τα εξής κάτωθι μεγέθη:

- Η πραγματική πυκνότητα του μίγματος (d_{mix} ή d_{true}) υπολογίστηκε βάσει του κλάσματος κενού, και τις τιμές των πυκνοτήτων νερού και αέρα για θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\sim 20^\circ\text{C}$) σύμφωνα με τη Σχέση 6-8:

$$d_{\text{mix}} = (1 - GVF) \cdot d_{\text{water}} + GVF \cdot d_{\text{air}} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \quad \text{Σχέση 6-8}$$

- Το σφάλμα της πυκνότητας του νερού (d_{error}) υπολογίστηκε ως εξής (Σχέση 6-9):

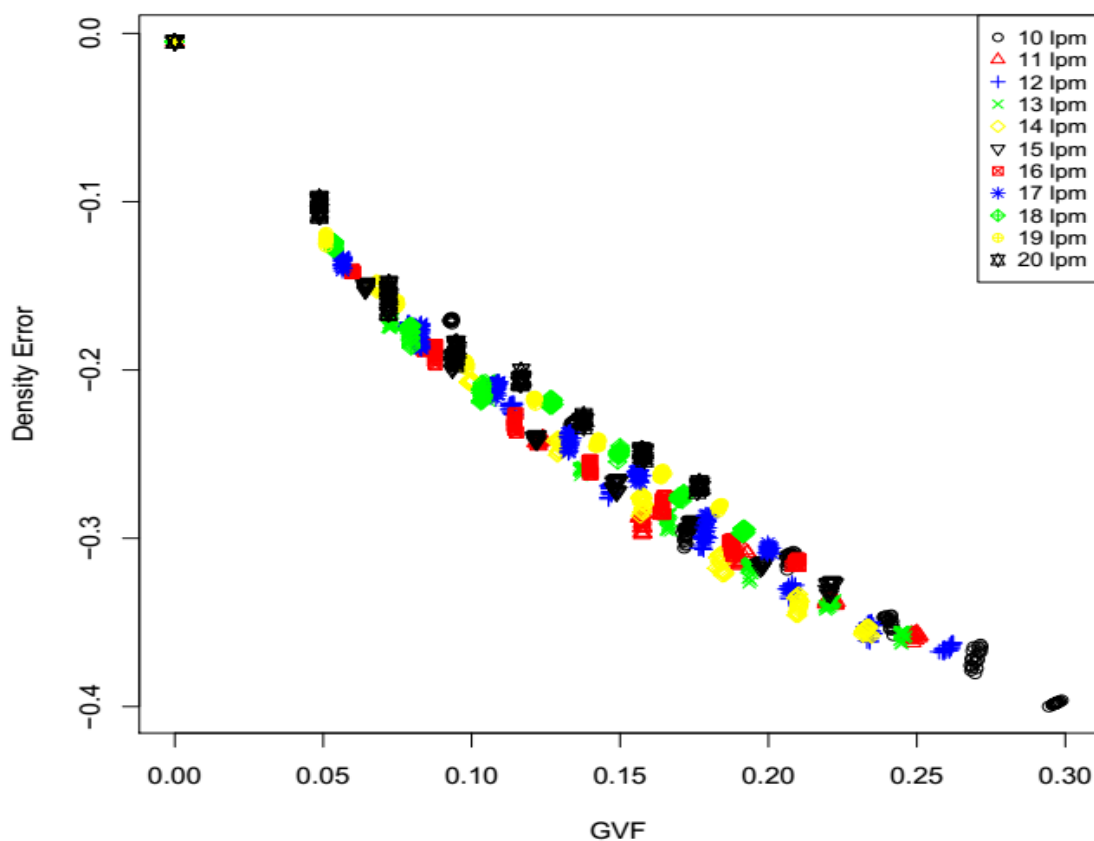
$$d_{\text{error}} = \frac{d_{\text{Coriolis}} - d_{\text{true}}}{d_{\text{true}}} \quad \text{Σχέση 6-9}$$

Όπου :

d_{Coriolis} : Η μετρούμενη πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου (μείγμα νερού-αέρα) έτσι όπως προκύπτει από τις μετρήσεις του ροομέτρου Coriolis σε kg/m^3 .

d_{true} : Η πραγματική πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου για γνωστό κλάσμα κενού σε kg/m^3 .

Για το Πείραμα 2, τα σφάλματα των μετρήσεων της πυκνότητας από το Coriolis σε σχέση με το Κλάσμα Κενού (GVF), καλύπτοντας το συνολικό εύρος των παροχών νερού και αέρα, απεικονίζονται στο Σχήμα 6-3:



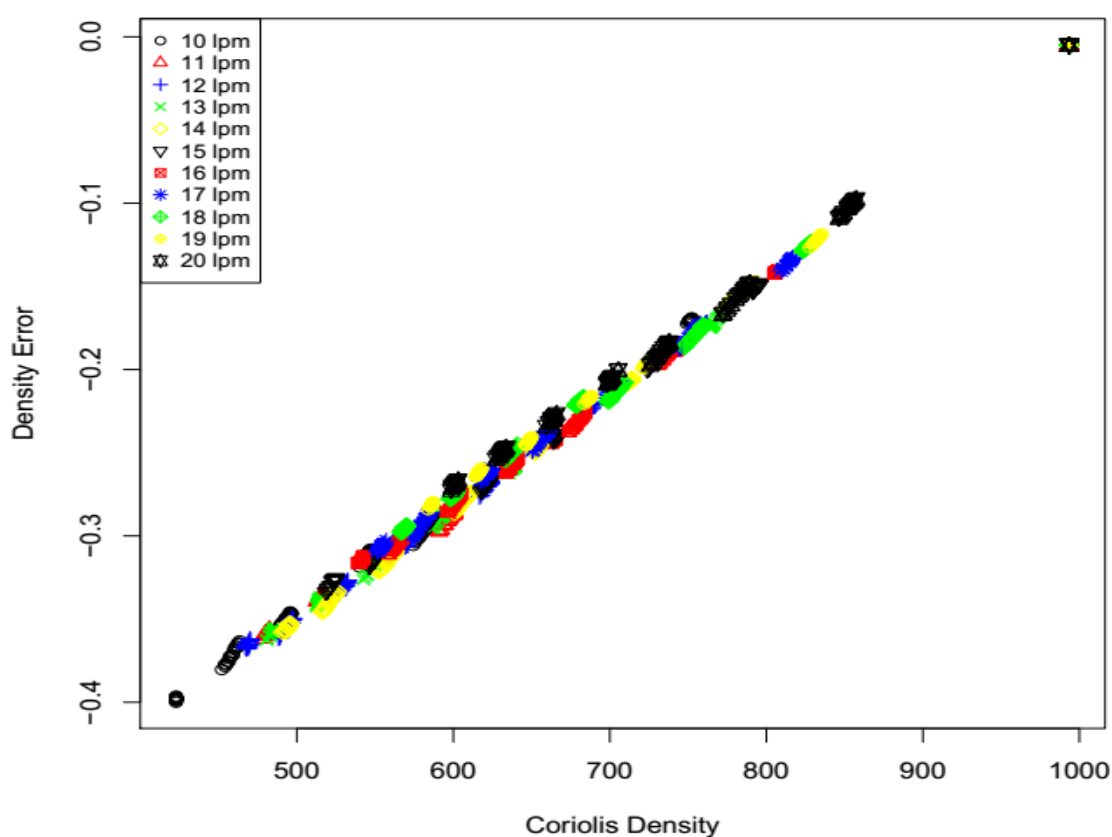
Σχήμα 6-3 Σφάλμα μετρούμενης πυκνότητας σε σχέση με το GVF για εύρος παροχής νερού 10-20 L/min και παροχής αέρα 0-4 L/min

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 6-3, τα σφάλματα της πυκνότητας που προκύπτουν από τις μετρήσεις του ροομέτρου Coriolis είναι αρνητικά, ενώ παρατηρείται αρνητική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των σφαλμάτων και του κλάσματος κενού. Για μηδενική τιμή του GVF παρατηρείται σχεδόν μηδενικό σφάλμα μετρήσεων το οποίο είναι απολύτως αναμενόμενο καθώς διαμέσου της εγκατάστασης ρέει αποκλειστικά νερό και επομένως το σφάλμα της μέτρησης του Coriolis είναι της τάξης του 2kg/m^3 . Από εκεί και έπειτα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει η τιμή του GVF αυξάνει και το σφάλμα κατά απόλυτη τιμή.

Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι στην περίπτωση αυτή, το σφάλμα μέτρησης εξαρτάται κυρίως από την τιμή του κλάσματος κενού. Πρόκειται για μία σημαντική διαφορά σε σχέση με τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος κατά το οποίο μετρούμενο μέγεθος του Coriolis ήταν η παροχή μάζας. Βλέπουμε δηλαδή ότι το

σφάλμα μέτρησης της πυκνότητας εξαρτάται κυρίως μόνο από ένα μέγεθος, το GVF, ενώ είναι ανεξάρτητο της παροχής. Για παράδειγμα παρατηρούμε ότι για την τιμή του GVF περίπου 10%, το σφάλμα της πυκνότητας για όλες τις παροχές νερού κυμαίνεται γύρω από την τιμή -0.2. Επομένως, μπορούμε να ισχυριστούμε πως το ροόμετρο Coriolis έχει διαφορετική συμπεριφορά όταν πραγματοποιεί μετρήσεις πυκνότητας από ότι παροχής μάζας. Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω παρατηρήσεις θα προχωρήσουμε στην εκτίμηση ενός γραμμικού μοντέλου συσχέτισης μεταξύ του σφάλματος και της μετρούμενης πυκνότητας από το ροόμετρο Coriolis.

Στο παρακάτω Σχήμα 6-4, απεικονίζονται τα σφάλματα των μετρήσεων της πυκνότητας σε σχέση με την μετρούμενη πυκνότητα του Coriolis καλύπτοντας όλο το εύρος της παροχής του νερού και του αέρα.



Σχήμα 6-4 Σφάλμα μετρούμενης πυκνότητας σε σχέση με την μετρούμενη πυκνότητα από το Coriolis για όλο το εύρος της παροχής νερού και αέρα

Από το παραπάνω Σχήμα 6-4, υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι το σφάλμα της πυκνότητας είναι ανεξάρτητο της παροχής του νερού και εξαρτάται μονάχα από το κλάσμα κενού της διασπικτικής ροής. Αντικειμενικός σκοπός του πειράματος αυτού είναι η εύρεση σχέσης αναδρομής μεταξύ του σφάλματος και της μετρούμενης πυκνότητας. Εν ολίγοις, στόχος μας είναι να προκύψει μία γραμμική συνάρτηση αναδρομής της μορφής:

$$y = a + b \cdot x \quad \text{Σχέση 6-10}$$

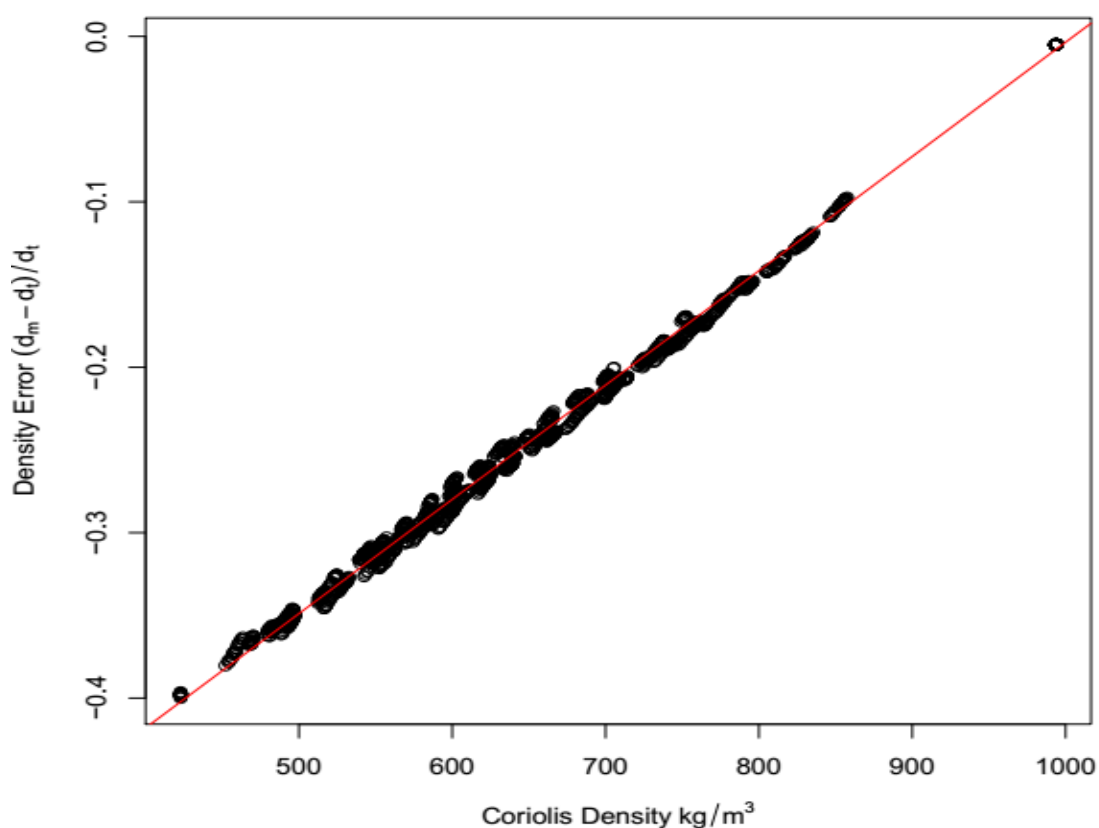
ή

$$d_{error} = a + b \cdot d_{Coriolis} \quad \text{Σχέση 6-11}$$

Όπου ,

a , b : Παράμετροι αναδρομής

Στο παρακάτω Σχήμα 6-5, παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία, χωρίς χρωματικό κώδικα ανάλογα της παροχής της υγρής φάσης, καθώς και η ευθεία αναδρομής που προέκυψε.



Σχήμα 6-5 Γραμμική συσχέτιση του σφάλματος της πυκνότητας και της μετρούμενης πυκνότητας από το Coriolis

Η εκτίμηση της γραμμικής συσχέτισης του σφάλματος, που θεωρείται ανεξάρτητη μεταβλητή και της μετρούμενης πυκνότητας, που αντίστοιχα θεωρείται η εξαρτημένη μεταβλητή πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η στατιστική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη εφαρμογής σε περιβάλλον του υπολογιστικού προγράμματος R η οποία εκτελεί ανάλυση παλινδρόμησης με έναν παράγοντα.

Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα R φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Συνοπτικός πίνακας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης παλινδρόμησης, έτσι όπως αυτός προέκυψε από την R με χρήση της εντολής summary

```
Call:
lm(formula = d_error ~ d_coriolis)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0116591 -0.0037069 -0.0002469  0.0031367  0.0112742

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.943e-01  4.827e-04   -1439  <2e-16 ***
d_coriolis   6.908e-04  6.876e-07    1005  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.004515 on 1861 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9982,    Adjusted R-squared:  0.9982
F-statistic: 1.009e+06 on 1 and 1861 DF,  p-value: < 2.2e-
```

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η ρουτίνα της R η οποία πραγματοποιεί ανάλυση παλινδρόμησης εκτελεί και στατιστικό έλεγχο σημαντικότητας των παραμέτρων της αναδρομής. Παρατηρούμε στον Πίνακα 6-1 ότι έχουν υπολογισθεί οι τιμές σύγκρισης t_0 για τις δύο παραμέτρους και το p-value αυτών. Επιπλέον, η σημαντικότητα των παραμέτρων ανάλογα του επιπέδου εμπιστοσύνης συμβολίζεται εποπτικά με έναν έως τέσσερις αστερίσκους (*). Η προσαρμογή του γραμμικού μοντέλου κρίνεται εξαιρετική, καθώς η τιμή του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 προέκυψε ίση με 99.82%. Η υψηλή τιμή του συντελεστή R^2 επιβεβαιώνει τις ενδείξεις των γραφικών παραστάσεων (Σχήμα 6-4, Σχήμα 6-5), ότι δηλαδή το σφάλμα στην μέτρηση της πυκνότητας εξαρτάται μόνο από το κλάσμα κενού της ροής και όχι από την παροχή της.

Τελικά η συνάρτηση αναδρομής προκύπτει:

$$y = -6.943e - 01 + 6.908e - 04 \cdot x \quad \text{Σχέση 6-12}$$

ή

$$d_{error} = -6.943e - 01 + 6.908e - 04 \cdot d_{Coriolis} \quad \text{Σχέση 6-13}$$

Όπου η πυκνότητα δίνεται σε kg/m^3 και το σφάλμα ως αδιάστατο ποσοστό της πραγματικής πυκνότητας.

6.3 Πείραμα 3

Για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας της συμπεριφοράς του ροομέτρου Coriolis (Σχέση 6-13), πραγματοποιήθηκε νέο πείραμα, το Πείραμα 3, του οποίου η διαδικασία εκτέλεσης και οι πειραματικές συνθήκες είναι όμοιες με αυτές του Πειράματος 2. Για τις ανάγκες του πειράματος αυτού στο πρόγραμμα συλλογής έχει προσαρμοσθεί το γραμμικό μοντέλο για το σφάλμα μέτρησης, το οποίο εκτιμήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, σύμφωνα και με όσα αναφέραμε στην ενότητα §6.2.

Αναλυτικότερα, οι πειραματικές συνθήκες έχουν ως εξής: το εύρος παροχής του νερού είναι 10÷19 L/min με βήμα 1 L/min σε κάθε επανάληψη, ενώ το εύρος παροχής του αέρα είναι 0÷4 L/min με βήμα 0.5 L/min σε κάθε επανάληψη. Κατά τη διάρκεια του παρόντος πειράματος, το μετρούμενο μέγεθος του ροομέτρου Coriolis, είναι η πυκνότητα του νερού σε kg/m³, ενώ το μετρούμενο μέγεθος του μαγνητικού ροομέτρου είναι η παροχή όγκου σε L/min.

Στο παράρτημα ΑΙΙΙ, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μετρήσεις που καταγράφηκαν από το πρόγραμμα GVF_03.vi σε περιβάλλον LabVIEW.

Πέρα από τα βασικά μεγέθη που παρουσιάστηκαν στην αρχή του παρόντος Κεφαλαίου, χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα εξής κάτωθι μεγέθη :

- Η πραγματική πυκνότητα του μίγματος (d_{mix} ή d_{true}) υπολογίστηκε βάσει του κλάσματος κενού, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, σύμφωνα με τη Σχέση 6-14:

$$d_{mix} = (1 - GVF) \cdot d_{water} + GVF \cdot d_{air} \quad \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad \text{Σχέση 6-14}$$

- Αντίστοιχα, το σφάλμα της πυκνότητας του νερού (d_{error}) υπολογίστηκε ως εξής (Σχέση 6-15):

$$d_{error} = \frac{d_{Coriolis} - d_{true}}{d_{true}} \quad \text{Σχέση 6-15}$$

- Η πραγματική πυκνότητα του μείγματος μπορεί να εκτιμηθεί από τη Σχέση σφάλματος, και τις εκτιμήσεις του μοντέλου του προηγούμενου πειράματος. Επιλύοντας την Σχέση 6-15 ως προς την πραγματική πυκνότητα προκύπτει η Σχέση 6-16:

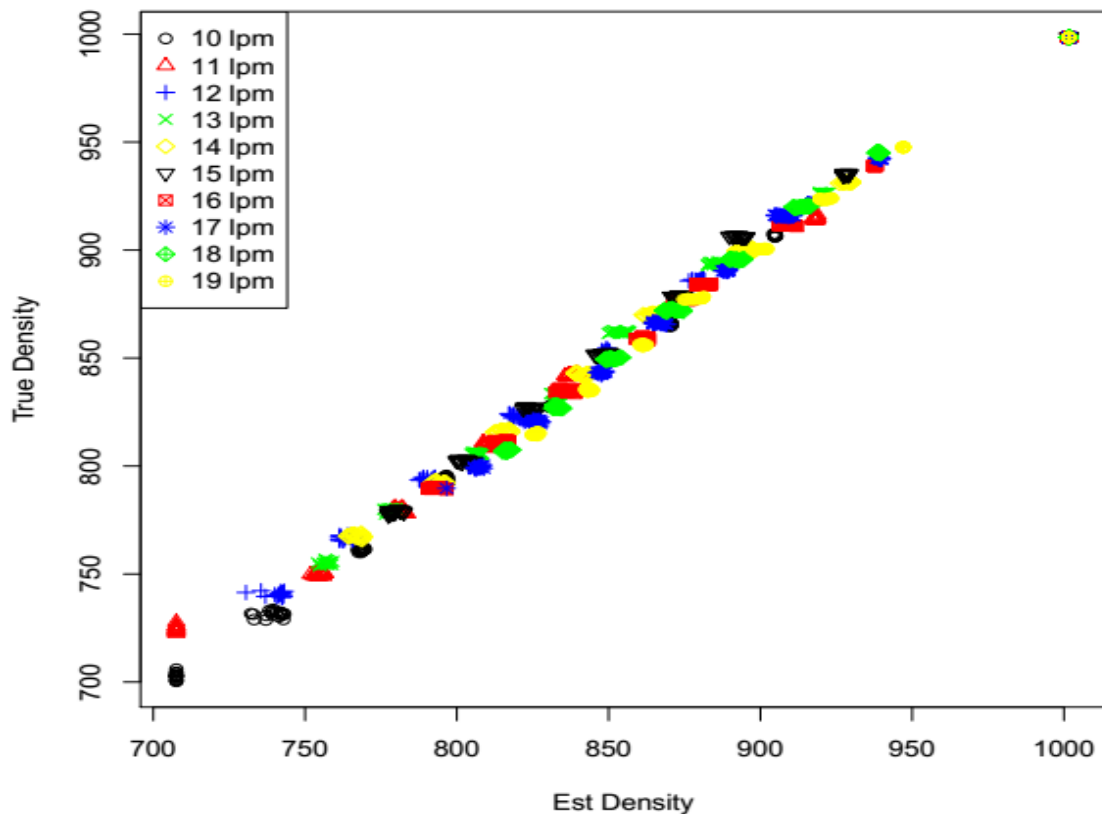
$$d_{est} = \frac{d_{Coriolis}}{1 + d_{error_est}} \quad \text{Σχέση 6-16}$$

Όπου :

d_{error_est} : Το υπολογιζόμενο σφάλμα της πυκνότητας του νερού έτσι όπως προκύπτει από τη γραμμική συσχέτιση του σφάλματος της πυκνότητας και της μετρούμενης πυκνότητας από το Coriolis του Πειράματος 2 (Σχέση 6-17):

$$d_{error_est} = -6,943e - 01 + 6,908e - 04 \cdot d_{Coriolis} \quad \text{Σχέση 6-17}$$

Στο παρακάτω Σχήμα 6-6, παρουσιάζεται το διάγραμμα στο οποίο στον άξονα y είναι το μέγεθος της πραγματικής πυκνότητας d_{mix} και στον άξονα x η υπολογιζόμενη πυκνότητα d_{est} όπως προκύπτει από τη Σχέση 6-16, για όλες τις παροχές του διαφασικού μίγματος.



Σχήμα 6-6 Πραγματική πυκνότητα συναρτήσεως της υπολογιζόμενης πυκνότητας για όλο το εύρος των παροχών υγρής και αέριας φάσης

Από το Σχήμα 6-6, υπάρχει η ένδειξη ότι η διορθωτική σχέση που εισάγαμε (Σχέση 6-17) με σκοπό την εκτίμηση της πυκνότητας βάσει των πειραματικών μετρήσεων (εκτιμώμενη πυκνότητα ή d_{est}), είναι ικανοποιητική. Τα αποτελέσματα της γραμμικής προσαρμογής μεταξύ των δύο μεγεθών, έτσι όπως αυτά προκύπτουν με χρήση των συναρτήσεων `lm` και `summary` της R, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2.

Πίνακας 6-2 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων της γραμμικής προσαρμογής

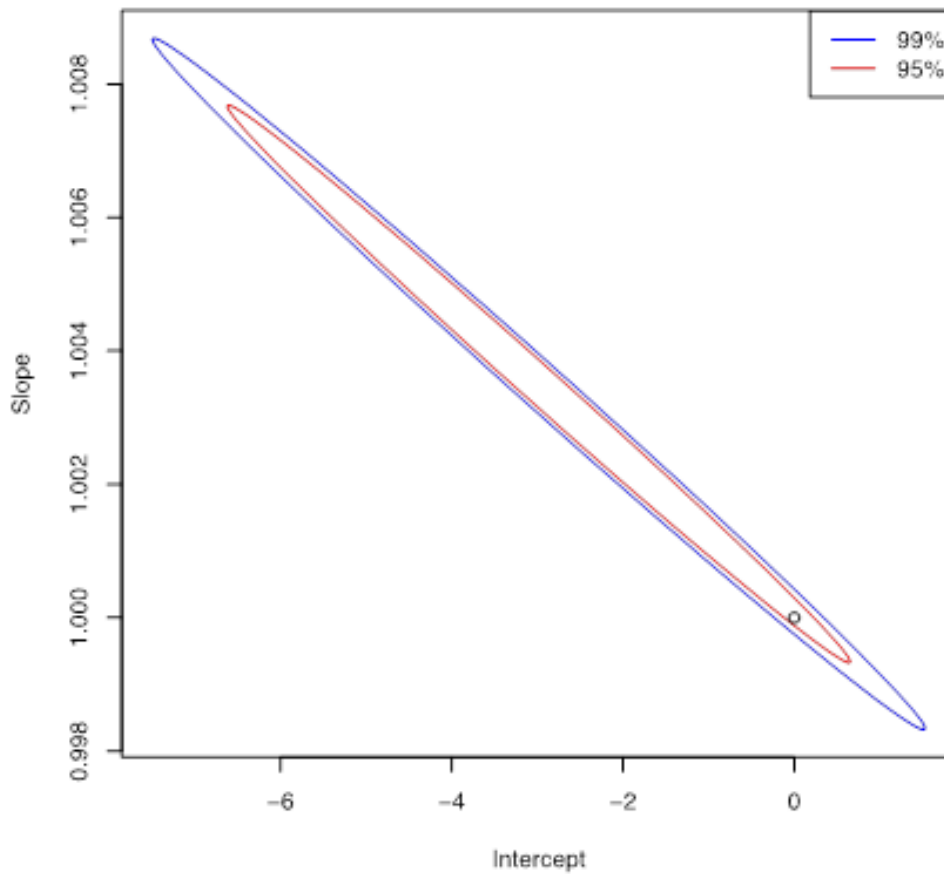
```
Call:
lm(formula = d_true ~ d_est)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-13.5178  -3.6075  -0.0918   3.2097  20.7083

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.983959   1.484268   -2.01  0.0446 *
d_est        1.003504   0.001705  588.44 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.035 on 1519 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9956,    Adjusted R-squared:  0.9956
F-statistic: 3.463e+05 on 1 and 1519 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

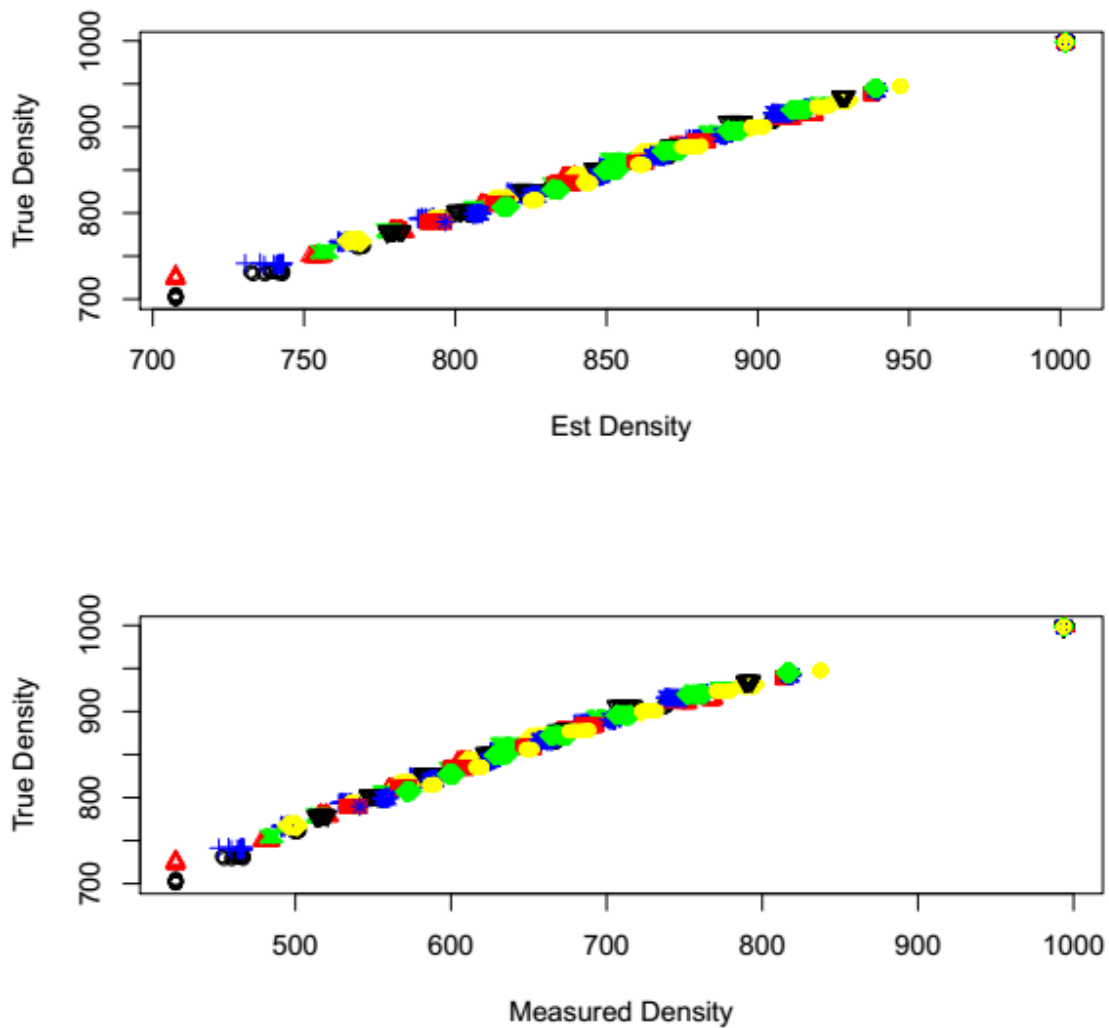
Από τον Πίνακα 6-2, διαπιστώνουμε ότι η προσαρμογή είναι πάρα πολύ καλή με τον συντελεστή συσχέτισης R^2 να έχει τιμή 99.56%. Ο συντελεστής κλίσης της ευθείας αναδρομής, όπως ήταν αναμενόμενο, υπολογίζεται πολύ κοντά στη μονάδα και συγκεκριμένα ίσος με 1.003 ± 0.001 . Τέλος ο σταθερός όρος της αναδρομής υπολογίζεται ίσος με -3.0 ± 1.5 ενώ ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας του εμπίπτει οριακά εντός της περιοχής αβεβαιότητας. Ενδεχομένως αυτό να μπορεί να αποδοθεί σε μη συστηματικό σφάλμα της πειραματικής διαδικασίας, και συγκεκριμένα κατά τις μετρήσεις με παροχή νερού 11 L/min, οι οποίες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-6 αποκλίνουν της γενικότερης συμπεριφοράς των υπολοίπων μετρήσεων. Οι ελλείψεις εμπιστοσύνης για επίπεδο σημαντικότητας 5% και 1% δίνονται στο Σχήμα 6-7 από το οποίο προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα.



Σχήμα 6-7 Ελλείψεις εμπιστοσύνης των παραμέτρων προσαρμογής για επίπεδο σημαντικότητας 5% και 1%

Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι το σφάλμα του ροομέτρου Coriolis εμφανίζει επαναληψιμότητα και μπορεί με ακρίβεια να εκτιμηθεί βάσει των μετρούμενων τιμών.

Στο Σχήμα 6-8, παρουσιάζονται συγκριτικά τα διαγράμματα της πραγματικής πυκνότητας του διφασικού μίγματος (True Density ή d_{true}) συναρτήσει της υπολογιζόμενης πυκνότητας (Est Density ή d_{est}) στο πάνω μέρος του σχήματος και της πραγματικής πυκνότητας του διφασικού μίγματος συναρτήσει της μετρούμενης πυκνότητας (Measured density ή $d_{Coriolis}$) αντίστοιχα στο κάτω μέρος του σχήματος.



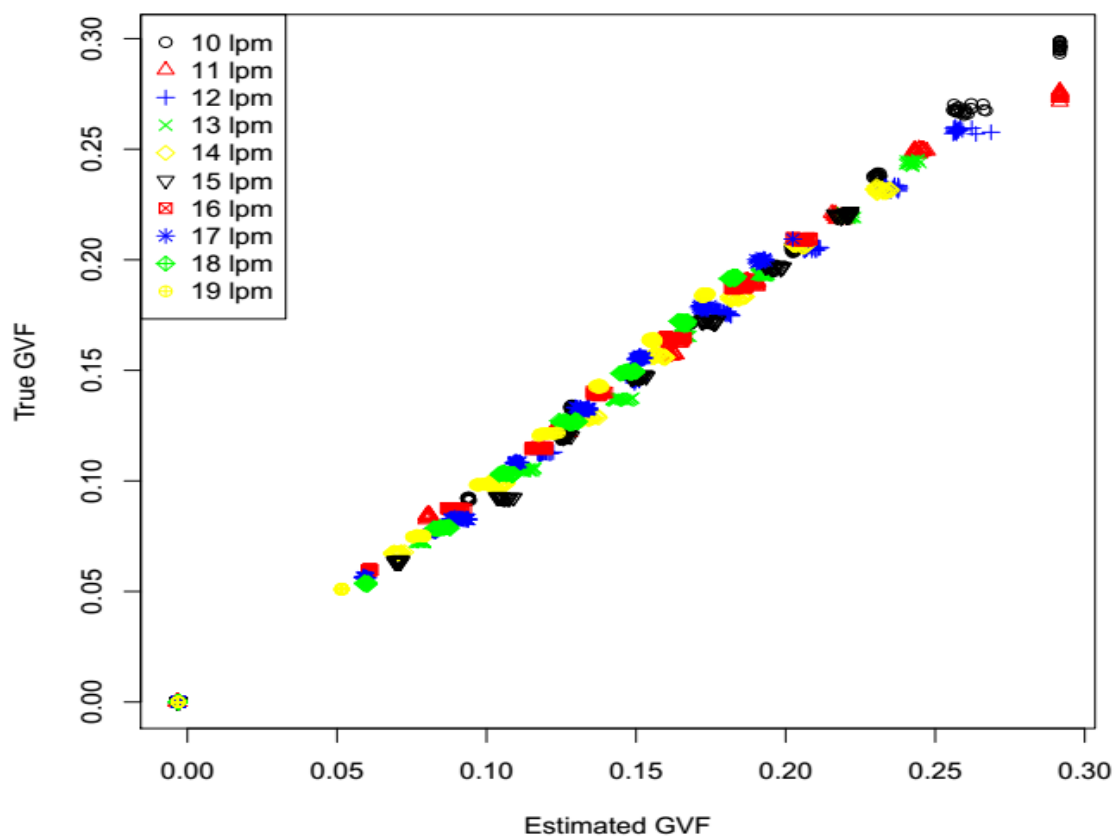
Σχήμα 6-8 Πάνω: Πραγματική πυκνότητα d_{mix} συναρτήσει της υπολογιζόμενης πυκνότητας d_{est} , Κάτω : Πραγματική πυκνότητα d_{mix} συναρτήσει της μετρούμενης πυκνότητας $d_{Coriolis}$

Στο Σχήμα 6-8 φαίνεται η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων και των διορθωμένων μετρήσεων της πυκνότητας.

Εκτιμώντας λοιπόν την τιμή της πραγματικής πυκνότητας από το γραμμικό μοντέλο διόρθωσης (Σχέση 6-17) και γνωρίζοντας τις δύο φάσεις του μίγματος, υγρή και αέρια, καθώς και τις συνθήκες ροής, πίεση και θερμοκρασία, από τη Σχέση 6-14 μπορούμε να εκτιμήσουμε την τιμή του κλάσματος κενού της ροής.

$$GVF_{est} = \frac{(d_{water} - d_{est})}{(d_{water} - d_{air})} \quad \text{Σχέση 6-18}$$

Τέλος, στο παρακάτω Σχήμα 6-9 απεικονίζεται το διάγραμμα μεταξύ του πραγματικού GVF -έτσι όπως προέκυψε από τη Σχέση 6-2- και του εκτιμώμενου GVF -έτσι όπως προέκυψε από τη Σχέση 6-18 - καλύπτοντας όλες τις παροχές του νερού και του αέρα.



Σχήμα 6-9 Πραγματικό κλάσμα κενού (GVF) συναρτήσει του εκτιμώμενου κλάσματος κενού ($G_{VF_{est}}$)

Από το παραπάνω Σχήμα 6-9, παρατηρείται ότι το τελικό εκτιμώμενο GVF το οποίο λαμβάνει υπόψη την εκτιμώμενη πυκνότητα d_{est} σύμφωνα με τη Σχέση 6-18, είναι πολύ κοντά στο πραγματικό GVF ανεξάρτητα από την παροχή του νερού.

Κλείνοντας το Κεφάλαιο αυτό και συνοψίζοντας τα συμπεράσματά μας διαπιστώνουμε ότι τα σφάλματα μέτρησης της παροχής μάζας και της παροχής όγκου εξαρτώνται από δύο παράγοντες: (α) Το Κλάσμα Κενού ή GVF και (β) την τιμή της παροχής μάζας του νερού. Αντίθετα, το σφάλμα μέτρησης της πυκνότητας εξαρτάται μόνο από την τιμή του Κλάσματος Κενού. Για την εκτίμηση του κλάσματος κενού προτιμήθηκε η επιλογή διόρθωσης της πυκνότητας έναντι της διόρθωσης της παροχής διότι στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο είναι απλούστερο, καθώς έχει μόνο έναν παράγοντα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών και τα διαγράμματα που προέκυψαν (Σχήμα 6-6, Σχήμα 6-8, Σχήμα 6-9), καταλήξαμε πως η σχέση διόρθωσης της

πυκνότητας κρίνεται ορθή. Ως συμπέρασμα, μπορούμε να ισχυριστούμε πως για το συγκεκριμένο μεταλλάκτη Coriolis FCB350/FCT350, για παροχές νερού 10~20 L/min, και παροχές αέρα 0~4 L/min, θερμοκρασία υγρής και αέριας φάσης περίπου 20°C και πίεση 1 έως 1.5 bar, η μετρούμενη πυκνότητα όπως προκύπτει από το ροόμετρο διορθώνεται με βάση την τελική σχέση διόρθωσης (Σχέση 6-17).

6.4 Συμπεράσματα, μελλοντικές προοπτικές έρευνας.

Στην παρούσα ΔΕ μελετήθηκε πειραματικά η συμπεριφορά ροομέτρου Coriolis, για την περίπτωση διφασικής ροής νερού – αέρα, θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ~20°C και υπό πίεση 1.0 έως 1.5 bar. Για τη μέτρηση της παροχής όγκου της υγρής και της αέριας φάσης χρησιμοποιήθηκε μαγνητικό ροόμετρο και ροόμετρο πλωτήρος αντίστοιχα. Επιλέχθηκε εύρος παροχών από 10 έως 20 L/min περίπου για την υγρή φάση και 1 έως 4 L/min για την αέρια. Συνδυασμοί των παραπάνω παροχών οδήγησαν στη δημιουργία διφασικού μίγματος με κλάσμα κενού 10 έως 30% περίπου. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην εισαγωγή της αέριας στην υγρή φάση, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφο νέφος φυσαλίδων σφαιρικού σχήματος ίδιων διαστάσεων.

Μελετήθηκε η συμπεριφορά του ροομέτρου τόσο ως προς τη μέτρηση παροχής μάζας, όσο και προς τη μέτρηση της πυκνότητας του μίγματος. Στην πρώτη περίπτωση διαπιστώσαμε ότι η μέτρηση επηρεάζεται αφενός από την τιμή του κλάσματος κενού αλλά και αφετέρου από την παροχή της υγρής φάσης. Στη δεύτερη περίπτωση διαπιστώσαμε ότι η μέτρηση της πυκνότητας είναι σχεδόν ανεξάρτητη της παροχής της υγρής φάσης ενώ εμφανίζει ισχυρή γραμμική συσχέτιση ως προς το κλάσμα κενού του μίγματος. Η επαναληψιμότητα της συμπεριφοράς αυτής επιτρέπει την εφαρμογή διορθωτικού μοντέλου πυκνότητας, τα αποτελέσματα του οποίου κρίθηκαν πλήρως ικανοποιητικά.

Τέλος ο γράφων πιστεύει ότι η παρούσα μελέτη μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω και συγκεκριμένα θα πρότεινε τα εξής:

- I. Εξέλιξη της υπάρχουσας πειραματικής εγκατάστασης, με προσθήκη μεταλλακτών για τη μέτρηση της παροχής της αέριας φάσης, της πίεσης και της θερμοκρασίας του διφασικού μίγματος.
- II. Πειραματική μελέτη για τιμές του κλάσματος κενού χαμηλότερες από 10%, τιμές οι οποίες απαντώνται με μεγαλύτερη συχνότητα στις διάφορες εφαρμογές.
- III. Πειραματική μελέτη υπό διαφορετικές γωνίες και διευθύνσεις ροής, π.χ. οριζόντια διεύθυνση, υπό κλίση 45° με ροή εκ των άνω ή/και εκ των κάτω κ.λ.π..
- IV. Πειραματική μελέτη με διαφορετικά μίγματα ρευστών, π.χ. διφασική ροή νερού – ατμού σε διάφορες πιέσεις, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον

λόγω της θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης του ΕΠΤ-ΕΜΠ και των συναφών αντικειμένων που θεραπεύει ο Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Wang και R. Baker, «Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 40, pp. 99-123, 2014.
- [2] M. Anklin, W. Drahm και A. Rieder, «Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 17, pp. 317-323, 2006.
- [3] T. Wang και Y. Husain, «Coriolis flowmeters for Nuclear Applications,» 2011.
- [4] A. A. P. Gmbh, «Operating Instructions OI/FCB300/FCT300-EN Rev. F,» 2014.
- [5] Α. Μουτσίκια, «Απευθείας σύνδεση μεταλλακτών σε H/Y σε περιβάλλον LabVIEW με χρήση αναλογιοψηφιακού μετατροπέα σε USB θύρα. Εφαρμογή σε ροόμετρο τύπου Coriolis,» 2015.
- [6] Ζ. Χατζηνικολάου, «Βαθμονόμηση μαγνητικού ροομέτρου νερού θερμοκρασίας 20-80°C,» 1994.
- [7] M. Henry, M. Tombs, M. Duta, F. Zhou, R. Mercado, F. Kenyery, J. Shen, M. Morles, C. Garcia και R. Langansan, «Two phase flow metering of heavy oil using a Coriolis flow meter: A case study,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 17, pp. 399-413, 2006.
- [8] S. Bhagwat, «Study of flow patterns and void fraction in vertical downward two phase flow,» 2008.
- [9] R. Lin, M. Fuent, M. Henry και M. Duta, «A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital coriolis mass flowmeter,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 12, pp. 53-63, 2000.
- [10] L. Cheng, *Frontiers and Progress in Multiphase Flow I*, Springer, 2014.
- [11] S. M. Bhagwat και A. J. Ghajar, «Experimental investigation of non-boiling gas-liquid phase flow in upward inclined pipes,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, αρ. 79, pp. 301-318, 2016.
- [12] M. A. Woldesemayat και A. J. Ghajar, «Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes,» *International Journal of Multiphase Flow*, αρ. 33, pp. 347-370, 2006.
- [13] M. Henry, H. Yeung, W. Mattar, M. Duta και M. Tombs, «How a Coriolis Mass Flow Meter can operate in Two Phase (gas/liquid) Flow,» *The Instrumentation, Systems and Automation Society, Presented at ISA Show Technical Conference*,

2004.

- [14] N. T. Basse, «A review of the theory of Coriolis flowmeter measurements errors due to entrained particles,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 37, pp. 107-118, 2014.
- [15] X. Zheng, X. Sun και B. Bai, «Flow rate measurement of low GVF gas-liquid two-phase flow with a V-Cone meter,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, αρ. 91, pp. 175-183, 2017.
- [16] G. Monni, M. De Salve και B. Panella, «Two-phase flow measurements at high-void fraction by a Venturi meter,» *Progress in Nuclear Energy*, αρ. 77, pp. 167-175, 2014.
- [17] M. Tombs, F. Zhou και M. Henry, «Two-phase coriolis mass flow metering with high viscosity oil,» *Flow Measurement and Instrumentation*, αρ. 59, pp. 23-27, 2017.
- [18] L. Advantech. Co., «USB-4704 48kS/s, 14-bit, USB Multifunction Module, User Manual,» 2010.
- [19] R. Larsen, «LabVIEW for engineers».

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

I. Χαρακτηριστικές εγγραφές του προγράμματος συλλογής δεδομένων για το Πείραμα 1

```
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator.
Multi_Headings No
X_Columns No
Time_Pref Absolute
Operator Evangelou
Date 2017/10/18
Time 13:40:14.46875
***End_of_Header***
```

```
Channels 5
Samples 1 1 1 1 1
Date 2017/10/18 2017/10/18 2017/10/18 2017/10/18
2017/10/18
Time 13:40:14.765625 13:40:14.765625 13:40:14.765625
13:40:14.765625 13:40:14.765625
X_Dimension Time Time Time Time Time
X0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+
Delta_X1.000000 1.000000 1.000000 0.001000 0.00100
***End_of_Header***
```

Time (s)	Coriolis dens	Air flow	Coriolis	MFM
0.000000	740.000000	1.000000	24.289978	9.725023
1.062500	740.000000	1.000000	24.197133	9.665941
2.109375	740.000000	1.000000	24.247219	9.637309
3.156250	740.000000	1.000000	24.468360	9.613302
4.218750	740.000000	1.000000	24.234667	9.586786
5.281250	740.000000	1.000000	24.259230	9.627232
6.343750	740.000000	1.000000	24.444058	9.652568
7.406250	740.000000	1.000000	24.574516	9.590046
8.468750	740.000000	1.000000	24.425761	9.666420
9.515625	740.000000	1.000000	24.246278	9.726841
10.578125	740.000000	1.000000	24.409867	9.625867

II. Χαρακτηριστικές εγγραφές του προγράμματος συλλογής δεδομένων για το Πείραμα 2

```
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator.
```

```

Multi_Headings  No
X_Columns      No
Time_Pref      Absolute
Operator       Evangelou
Date           2017/10/26
Time           13:33:09.671875
***End_of_Header***

```

```

Channels        5
Samples         1      1      1      1      1
Date            2017/10/26 2017/10/26 2017/10/26 2017/10/2
                2017/10/26
Time            13:33:10.71875 13:33:10.71875 13:33:10.7187
                13:33:10.71875 13:33:10.71875
X_DimensionTime Time Time Time Time Time
X0              0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0 0.000E+0
Delta_X1.000000 0.001000 1.000000 1.000000 0.001000

```

End_of_Header

Time(s)	Coriolis dens	Air flow	Coriolis flow	MFM flow
0.000000	993.462506	0.000000	10.000000	9.896377
1.046875	993.461609	0.000000	10.000000	9.872441
2.078125	993.475970	0.000000	10.000000	9.814086
3.125000	993.449940	0.000000	10.000000	9.803390
4.171875	993.535659	0.000000	10.000000	9.827912
5.218750	993.445004	0.000000	10.000000	9.835204
6.265625	993.445452	0.000000	10.000000	9.905533
7.312500	993.435130	0.000000	10.000000	9.776828
8.359375	993.466545	0.000000	10.000000	9.695742
9.406250	993.444555	0.000000	10.000000	9.777858
10.437500	993.461609	0.000000	10.000000	9.860988

III. Χαρακτηριστικές εγγραφές του προγράμματος συλλογής δεδομένων για το Πείραμα 3

```

LabVIEW Measurement
Writer_Version  2
Reader_Version  2
Separator       Tab
Decimal_Separator.
Multi_Headings  No
X_Columns      No
Time_Pref      Absolute
Operator       Evangelou
Date           2017/11/24
Time           13:27:48.1875
***End_of_Header***

```

```

Channels        6
Samples         1      1      1      1      1

```

```

Date 2017/11/24 2017/11/24 2017/11/24 2017/11/24
2017/11/24 2017/11/24
Time 13:28:04.375      13:28:04.375      13:28:04.375
      13:28:04.375      13:28:04.375      13:28:04.375
X_DimensionTime  Time  Time  Time  Time  Time
X0      0.000E+0  0.000E+0  0.000E+0  0.000E+0  0.000E+0
      0.000E+0
Delta_X1.000000  0.001000  0.001000  1.000000  1.000000
      0.001000
***End_of_Header***

```

Time(s)	Coriolis	dens	d_error	Air flow	Coriolis flow	MFM flow
0.000000	995.882820	-0.006344	0.000000	10.050000	9.975331	
1.046875	995.879229	-0.006347	0.000000	10.050000	9.993396	
2.093750	995.862624	-0.006358	0.000000	10.050000	10.017872	
3.140625	995.865317	-0.006356	0.000000	10.050000	9.965727	
4.187500	995.874741	-0.006350	0.000000	10.050000	9.864578	
5.234375	995.872497	-0.006351	0.000000	10.050000	9.946024	
6.281250	995.847814	-0.006368	0.000000	10.050000	9.963358	
7.328125	995.568668	-0.006561	0.000000	10.050000	10.031245	
8.359375	995.841531	-0.006373	0.000000	10.050000	10.003252	
9.406250	995.856790	-0.006362	0.000000	10.050000	10.041848	
10.453125	995.890000	-0.006339	0.000000	10.050000	10.019906	