Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική εργασία με θέμα:

Έλεγχος/Ρύθμιση θερμοϋδραυλικού δικτύου με ηλεκτρονικά μέσα

Μπικάκης Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Τζιβανίδης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Φεβρουάριος, 2017

Ευχαριστίες

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου κ. Χ. Τζιβανίδη, και τον καθηγητή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων κ. Ε. Παριώτη για την καθοδήγηση στην προσπάθεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μία προσπάθεια παρουσίασης ενός τρόπου καταγραφής των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν ένα θερμοϋδραυλικό δίκτυο. Για την επίτευξη του παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε πειραματική μονάδα που περιείχε όλα τα συνηθισμένα μέρη ενός θερμοϋδραυλικού δικτύου. Αρχικά, έγινε περιγραφή σε θέματα μετάδοσης θερμότητας αλλά και εξισορρόπησης ενός δικτύου και ακολούθησε μια ανάλυση στους βασικότερους τύπους μετρητικών διατάξεων σε θέματα ροής, θερμοκρασίας, πίεσης, όπως επίσης και μια σύντομη προσέγγιση στα μετρητικά σφάλματα. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφτηκε αναλυτικά η πειραματική μονάδα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο έγινε τοποθέτηση της μετρητικής διάταξης. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του Arduino καθώς και αισθητήρες συμβατοί με αυτό. Στο τελευταίο κεφάλαιο έγιναν κάποιες εφαρμογές σε μια προσπάθεια σύνδεσης ενός θεωρητικού υπόβαθρου με τα πραγματικά δεδομένα του δικτύου.

Abstract

This thesis aims to present a way of recording the parameters that define a thermohydraulic system. In order to achieve this, an experimental unit comprising all the common components of a thermohydraulic system was used. Initially, various matters of heat transfer and system balancing were described. Later on, the major types of devices used to measure flow, temperature and pressure were analyzed. Then, measurement errors were briefly described. In the following chapters, the experimental unit and the arrangement of the measurement devices were examined in detail. It must be noted here that I used the Arduino software in conjunction with compatible sensors. In the final chapter, some applications were made in an effort to connect the theoretical background with the real data of the system.

Περιεχόμενα

1.Βασικές Αρχές Εξισορρόπηση Θερμοϋδραυλικών Δικτύων 10
1.1Εισαγωγή 10
1.2 Παροχή νερού και μετάδοση θερμότητας 10
1.3 Σχεδίαση δικτύου ικανού να εξισορροπηθεί 13
1.4 Προετοιμασία εξισορρόπησης δικτύου 14
1.4.1 Κατανόηση και ανάλυση της διάταξης και της λειτουργίας του δικτύου 14
1.4.2 Έλεγχος δικτύου 14
1.5 Επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξισορρόπησης 15
1.6 Βαλβίδες εξισορρόπησης δικτύων 17
1.6.1 Εισαγωγή 17
1.6.2 Τύποι ρυθμιστικών βαλβίδων και μετρητών παροχής 18
1.6.3 Ο αριθμός Kv 20
1.6.4 Προσδιορισμός παροχής με διαφορικό μανόμετρο 21
2. Τεχνολογία Μετρήσεων 23
2.1. Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων 23
2.1.1 Εισαγωγή 23
2.1.2 Ανιχνευτές 28
2.1.3 Κατηγορίες αισθητήρων 28
2.1.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων 29
2.1.5 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού φαινομένου 38
2.1.6 Μετατροπέας σήματος τάσης σε ρεύμα 39
2.1.7 Μετατροπέας σήματος ρεύματος σε τάση 40
2.2 Μέτρηση βασικών μεγεθών σε ρευστά 41
2.2.1 Μέτρηση παροχής 41
2.3.1 Μέτρηση πίεσης 49
2.3 Μετρήσεις και σφάλματα 54
2.3.1 Εισαγωγή 54
2.3.2 Απόλυτο σφάλμα 55
2.3.3. Σχετικό σφάλμα 55
2.3.4 Συστηματικά και τυχαία σφάλματα 56

2.3.5 Μέση τιμή 57
2.3.6 Τυπική απόκλιση 58
3. Περιγραφή-παρουσίαση πειραματικής εγκατάστασης 60
3.1Εισαγωγή 60
3.2 Προετοιμασία της εγκατάστασης 62
3.2.1 Καθαρισμός δικτύου 62
3.2.2 Σύστημα λήψεις πιέσεων 62
3.3.3 Αντικατάσταση Ρυθμιστικής Βαλβίδας Oventrop 64
3.3.4 Κυάθια θερμομέτρων 65
3.3.5 Αντικατάσταση Παροχόμετρου- Τοποθέτηση βαλβίδας με στένωση (orifice plate) 66
3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων 69
3.4.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κυκλοφορητή, Ρυθμιστικής Βαλβίδας και Βαλβίδας με στένωση 69
3.4.2 Περεταίρω τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων 73
4. Περιγραφή συστήματος λήψης και καταγραφής μετρήσεων 74
4.1 Εισαγωγή 74
4.2 Μερικά πράγματα για το Arduino 74
4.3 Λόγοι επιλογής Arduino 74
4.4 Περιγραφή του Arduino 75
4.4.1 Το περιβάλλον ανάπτυξης 75
4.4.2 Δομή προγράμματος 76
4.4.3 Μεταβλητές 76
4.4.4 Σταθερές 77
4.4.5 Πίνακες – Arrays 77
4.4.6 Αριθμητικοί τελεστές 77
4.5 Ρεύμα λειτουργίας 77
4.6 Θύρες εισόδου/εξόδου (Pins) 77
4.7 Χρήση breadboard για συνδέσεις και βραχυκυκλώσεις 78
4.8 Μεταφόρτωση προγράμματος στη μονάδα μας 79
4.9 Περιγραφή αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν 80
4.9.1 Μέτρηση θερμοκρασίας 80
4.9.2 Μέτρηση Παροχής 81
4.9.3 Μέτρηση Διαφορικής Πίεσης 82

4.10 Περιγραφή γενικής συνδεσμολογίας των μετρητικών οργάνων 83
4.11 Προγραμματισμός πλακέτας Arduino 85
4.12 Πρόγραμμα καταγραφής δεδομένων σε Excel 88
Βιβλιογραφία 89
5. Καταγραφή και Σχολιασμός παραμέτρων λειτουργίας του θερμοϋδραυλικού δικτύου .. 90
5.1 Διακρίβωση στραγγαλιστικής βαλβίδας CIM 90
5.2 Διακρίβωση βαλβίδας με στένωση (orifice plate) 92
5.3 Σχέση παροχής-μετάδοσης θερμότητας 93
5.4 Πτώση πίεσης σε αγωγό 98
5.5 Ενεργειακός ισολογισμός σε εναλλάκτη θερμότητας 102
5.6 Αποδοτικότητα εναλλάκτη θερμότητας 106
Ανάλυση βαθμού αποδοτικότητας 106
Εφαρμογή 109

1.Βασικές Αρχές Εξισορρόπηση Θερμοϋδραυλικών Δικτύων

1.1Εισαγωγή

Με τον όρο εξισορρόπηση ενός δικτύου νοείται μία διαδικασία η οποία, όταν εφαρμοστεί σε ένα θερμοϋδραυλικό δίκτυο, θα μας εξασφαλίσει ότι σε κάθε πιθανή κατάσταση, το κάθε μέρος του δικτύου θα λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχει καθορίσει ο σχεδιαστής. Πιο συγκεκριμένα ότι ο κάθε κλάδος, θερμαντικό σώμα φυσικής κυκλοφορίας , fan coil, αερόθερμο κ.ά. θα τροφοδοτείται με την απαραίτητη παροχή νερού στα πλαίσια πάντα των απαραίτητων ανοχών που υφίστανται κατά την σχεδίαση.

Ο σχεδιαστής ενός δικτύου είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των απαιτούμενων ανοχών (αποκλίσεων) που μπορεί να έχει η πραγματική παροχή από την παροχή σχεδίασης και επιπλέον πρέπει να λάβει υπ όψιν ότι όσο πιο μικρές είναι οι επιθυμητές αποκλίσεις τόσο αυξάνεται το κόστος της υδραυλικής εγκατάστασης . Πρακτικά, μία καλή απόκλιση της παροχής τόσο σε δίκτυα θέρμανσης όσο και σε ψύξης είναι ±10% από την παροχή σχεδίασης όμως τιμές κάτω από ±5% αυξάνουν υπερβολικά το κόστος της εγκατάστασης.

1.2 Παροχή νερού και μετάδοση θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας από ένα τερματικό στο περιβάλλον λαμβάνει χώρα κατά βάση με συναγωγή. Η συναγωγή είναι ένας από τους τρεις τρόπους μετάδοσης της θερμότητας από ένα σώμα/σύστημα μεγαλύτερης θερμοκρασίας σε ένα άλλο μικρότερης θερμοκρασίας. Η συναγωγή συμβαίνει ανάμεσα σε ένα στερεό και ένα ρευστό, και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μια επιφάνεια στερεού. Δεν μπορεί να συμβεί μεταξύ δύο στερεών όπου εκεί η θερμότητα μεταδίδεται μέσω αγωγής. Άλλωστε όταν δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή πραγματοποιείται ανάμιξη των ουσιών (δηλαδή πιο πολύπλοκο φαινόμενο που περιλαμβάνει και μεταφορά θερμότητας και μεταφορά μάζας).

Ο μηχανισμός της μεταφοράς της θερμότητας είναι η γρήγορη διάχυση της στο ρευστό λόγω της αυξημένης διάχυσης της ορμής του. Δηλαδή η θερμότητα αφού μεταφερθεί στο ρευστό διαχέεται σε μεγαλύτερη έκταση του ρευστού και έτσι οι θερμοκρασιακές διαφορές επιφάνειας-ρευστού μένουν αυξημένες. Η τριβή που δημιουργεί η κίνηση του ρευστού καθιστούν στην αγωγή μεγαλύτερη θερμοροή λόγω της καλύτερης επαφής της επιφάνειας με το ρευστό. Έτσι γενικά η συναγωγή είναι ένας τρόπος μετάδοσης που περιλαμβάνει και το φαινόμενο της αγωγής και τα φαινόμενα της διάχυσης ορμής του ρευστού.

Η συναγωγή είναι εκείνος ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας που μπορεί να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες θερμότητας σε μικρό χρονικό διάστημα σε αντίθεση με την αγωγή και την ακτινοβολία, σε μικρές θερμοκρασίες. Είναι εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο. Κατά τη μοντελοποίηση της και για την εξαγωγή των εξισώσεων που δίνουν την θερμοροή συχνά πρέπει να ληφθεί υπόψη και να επιλυθεί και το πρόβλημα ροής των ρευστών.

Η θερμοροή στην συναγωγή δίνεται από την σχέση :

$$Q=h\cdot A\cdot \Delta T \qquad (1.1)$$

όπου:

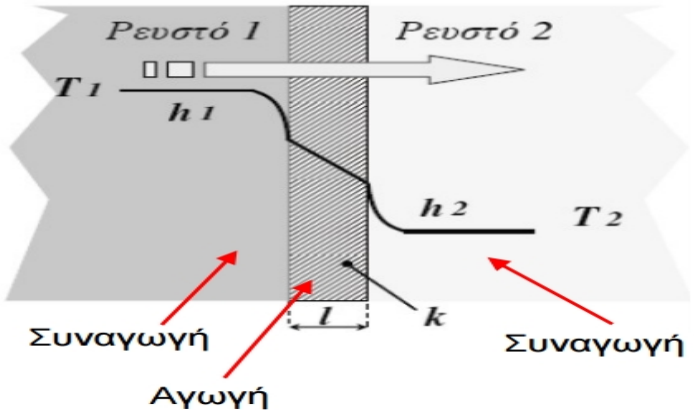
- A: το εμβαδόν της επιφάνειας,
- ΔT: η μέση θερμοκρασιακή διαφορά
- h: ο συντελεστής συναγωγής.

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις με κατάλληλο συντελεστή μεταφοράς, ο οποίος προκύπτει από πειραματικά δεδομένα για διάφορες περιπτώσεις και διαφορετικές γεωμετρίες προβλημάτων συναγωγής. Η εύρεση του συντελεστή μεταφοράς h γίνεται με την αδιάστατη μορφή του που είναι ο αριθμός Nusselt (Nu) ο οποίος υπολογίζεται συναρτήσει των αριθμών Reynolds (Re) και Prantl (Pr).

Ο συντελεστής συναγωγής h (W/m^2K) είναι συνάρτηση της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας, του δυναμικού ιξώδους, της πυκνότητας, της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση του ρευστού, των γεωμετρικών συνθηκών.

Ο αριθμός Nusselt (Nu) = $\frac{h\,L}{\lambda}$ εξαρτάται από τους αριθμούς Reynolds (Re) και Prantl (Pr). Ο αριθμός Reynolds (Re) = $\frac{\rho\,u\,d}{\mu}$ και ο αριθμός Prantl (Pr) = $\frac{\mu\,C}{\lambda}$,όπου λ ο συντελεστής αγωγιμότητας του ρευστού, βλέπουμε ότι μαρτυρούν την σύνδεση του συντελεστή συναγωγιμότητας h με την ταχύτητα (παροχή) του ρευστού.

Παρακάτω στο σχήμα 1 βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνει χώρα η μεταφορά θερμότητας σε ένα θερμαντικό σώμα φυσικής ροής νερού-αέρα.



Σχήμα 1. Σχηματική απεικόνιση μετάδοσης θερμότητας μεταξύ δύο ρευστών.[1]

Το ρεύμα θερμότητας είναι:

$$Q = \frac{T1-T2}{\frac{1}{h1A}+\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{h2A}} = \frac{T1-T2}{R1+R2+R3} \qquad (1.2)$$

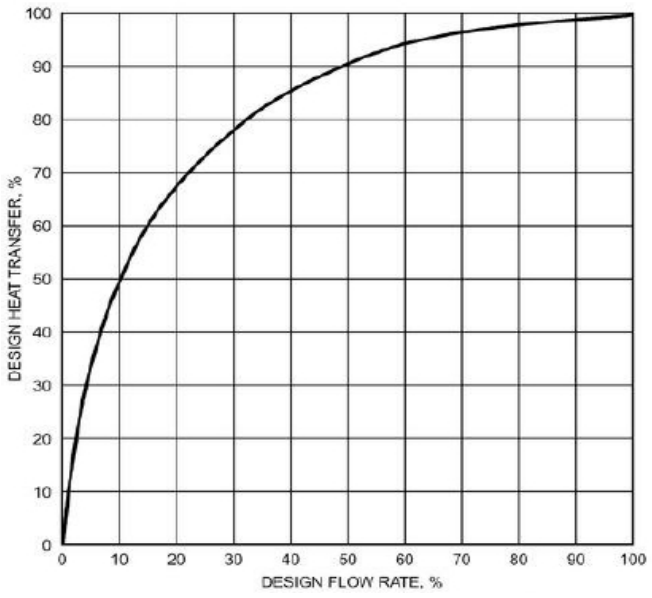
και αν θέσουμε $UA = \frac{1}{R1+R2+R3}$ (1.3)

Τότε $Q = U\,A\,\Delta T_{lm}$ (1.4)

Ο συντελεστής U [W/m2K] ονομάζεται ειδική θερμική διαπερατότητα και αναφέρεται σε συγκεκριμένη επιφάνεια, την επιφάνεια αναφοράς η οποία θα πρέπει να ορίζεται για κάθε περίπτωση που εξετάζεται.

Βλέπουμε λοιπόν, ότι ο συντελεστής U εξαρτάται από τον συντελεστή h και κατ΄επέκταση από τον αριθμός Re και την παροχή. Θα περιγράψουμε κάποια χαρακτηριστικά της σχέσης παροχής - μεταφορά θερμότητας βασιζόμενοι στη παραπάνω ανάλυση.

Η μετάδοση θερμότητας από τα τερματικά ενός δικτύου στον περιβάλλοντα χώρο εξαρτάται κατά βάση από τις παροχές των ρευμάτων. Έχει ενδιαφέρον ότι το φαινόμενο δεν παρουσιάζει μία γραμμική συμπεριφορά. Για παράδειγμα, μείωση της παροχής στο 20% της παροχής σχεδίασης, έχει συνέπεια μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας στο 65% από αυτή της σχεδίασης. Το φαινόμενο παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 2.



Σχήμα 2. Μετάδοση θερμότητας - παροχή. [6]

Η αιτία της παραπάνω συμπεριφοράς του δικτύου είναι ότι στον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας πρωτεύον λόγο έχει ο συντελεστής συναγωγής από τη πλευρά του αέρα.

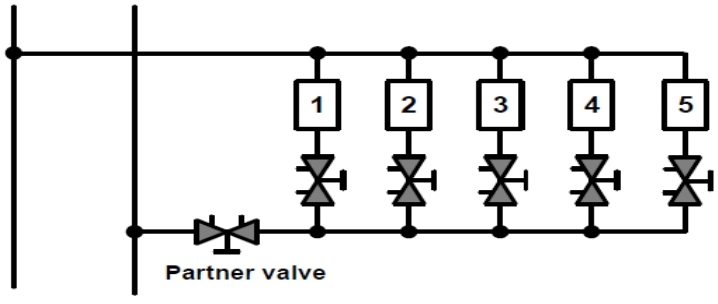
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της παροχής δεν πρέπει να αυξάνεται πάνω από την τιμή σχεδίασης σε μια προσπάθεια να αυξηθεί η μεταφερόμενη θερμότητα. Έχει αποδειχθεί ότι αυξάνοντας την παροχή στο 200% από αυτή της σχεδίασης αυξάνεται η μεταφερόμενη θερμότητα μόνο κατά 6%. Από θεωρία όμοιων αντλιών είναι γνωστό ότι $\frac{Q1}{Q2} = \frac{n1}{n2}$ και $\frac{N1}{N2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^3$. Άρα $\frac{N1}{N2} = \left(\frac{Q1}{Q2}\right)^3$ όπου Q η παροχή, N η ισχύς και η ο αριθμός στροφών. Επίσης ξέρουμε ότι ο απώλειες πίεσης σε αγωγό δίδονται από τον τύπο της εξίσωσης (1.5)

$$h = \frac{f \cdot L \cdot u^2}{d \cdot 2 \cdot g}. \qquad (1.5)$$

Άρα ο διπλασιασμός της παροχής οδηγεί σε αύξηση απωλειών δικτύου κατά 4 φορές και κατανάλωση ισχύος κατά 8 φορές.

1.3 Σχεδίαση δικτύου ικανού να εξισορροπηθεί

Ανεξάρτητα από τον τρόπο εξισορρόπησης ενός δικτύου είναι απαραίτητο η σχεδίαση του δικτύου να πληροί κάποιες προϋποθέσεις όπως η ύπαρξη των απαραίτητων σημείων μέτρησης διαφορικής πίεσης, η προσβασιμότητα αυτών των σημείων, η ύπαρξη όλων των λειτουργικών στοιχείων έτοιμα προς χρήση από τους μετέπειτα μηχανικούς που πιθανώς ασχοληθούν με την βελτίωση της εγκατάστασης κ.ά. Η σχεδίαση ενός δικτύου θα πρέπει να βασίζεται στη φιλοσοφία των hydraulic module. Κάθε hydraulic module αποτελείται από σωληνώσεις σε σχεδίαση δισωλήνιου συστήματος , έχοντας επίσης μία κεντρική βαλβίδα εξισορρόπησης , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.



Typical hydraulic module

Σχήμα 3. Υδραυλικός κλάδος. [6]

1.4 Προετοιμασία εξισορρόπησης δικτύου

Κατά τη φάση της προετοιμασίας εκτελούνται όλα τα απαραίτητα βήματα ώστε το αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό καθώς και το κόστος της διαδικασίας να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα. Παρακάτω θα περιγραφούν τα βασικότερα βήματα στη διαδικασία της προετοιμασίας

1.4.1 Κατανόηση και ανάλυση της διάταξης και της λειτουργίας του δικτύου

Στο αρχικό στάδιο της προετοιμασίας είναι απαραίτητη η κατανόηση της λειτουργίας του δικτύου, όλων των εξαρτημάτων που το αποτελούν καθώς και τυχόν ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει. Για τον παραπάνω σκοπό πάντα βοηθάει ένα καλό σκαρίφημα που θα περιέχει όλα τα στοιχεία όπως αντλίες, δίκτυα, θερμαντικά σώματα, fan coils, ρυθμιστικές βαλβίδες κ.α. Στην περίπτωση που μιλάμε για δίκτυο τεσσάρων σωληνώσεων (ψύξη/ θέρμανση) τότε καλό θα ήταν να δημιουργήσουμε δύο σκαριφήματα.

Επίσης πρέπει να καταγραφούν οι τιμές των παροχών σε κάθε ρυθμιστική βαλβίδα όπως επίσης να επιβεβαιωθεί ότι η παροχή σε κάθε κλάδο είναι το άθροισμα όλων των καταναλωτών που προσπίπτουν στον κλάδο αυτόν. Το ίδιο πρέπει να συμβεί και για το συνολικό άθροισμα των κλάδων.

1.4.2 Έλεγχος δικτύου

Κατά την προετοιμασία εξισορρόπησης πρέπει να διαπιστωθεί ότι όλα τα φίλτρα του δικτύου είναι καθαρά, ότι στο δίκτυο έχει γίνει η απαραίτητη εξαέρωση καθώς και ότι έχει την απαιτούμενη πίεση ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα σπηλαίωσης στον κυκλοφορητή, ή ακόμα και αναρρόφησης αέρα από το περιβάλλον(παλαιά δίκτυα). Τέλος όσον αφορά τον κυκλοφορητή σημαντικός είναι ο έλεγχος για σωστή παροχή ισχύος και ταχύτητα-φορά περιστροφής

Επίσης, οπτικός έλεγχος του δικτύου είναι απαραίτητος ώστε να διαπιστωθεί ότι όλες οι βάνες είναι στις κανονικές τους θέσεις (κλειστές, ανοιχτές), ότι οι βαλβίδες εξισορρόπησης έχουν τα χαρακτηριστικά (διάμετρος, μοντέλο, θέση) που αναφέρονται και στα σχέδια του σχεδιαστή και ότι αν υπάρχουν ελεγκτές διαφορικής πίεσης ότι αυτοί λειτουργούν ικανοποιητικά.

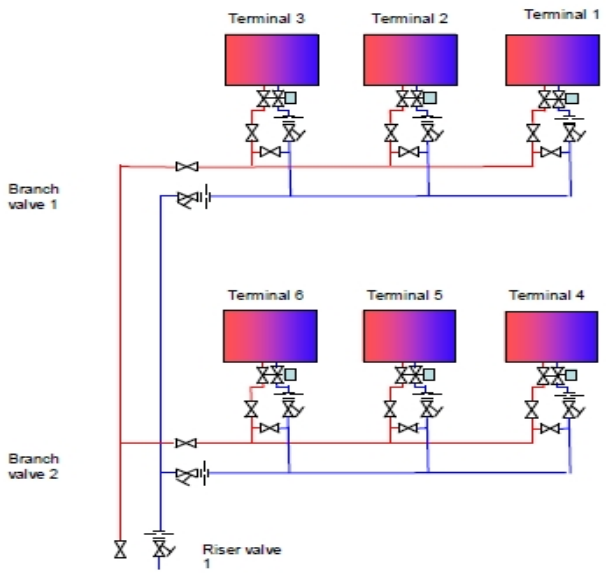
1.5 Επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου εξισορρόπησης

Η ανάγκη εξισορρόπησης ενός δικτύου απορρέει από το γεγονός ότι, όταν πολλοί καταναλωτές (terminals) είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο δίκτυο οποιαδήποτε μεταβολή σε ένα από αυτούς μεταβάλει αναλογικά την παροχή και στους άλλους καταναλωτές.

Παρακάτω θα περιγράψουμε συνοπτικώς μερικά χαρακτηριστικά από τις μεθοδολογίες εξισορρόπησης.

The Pre-setting Method: Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μικρά δίκτυα και κατά βάση στηρίζεται σε υπολογισμούς για την ανάγκη παροχής σε κάθε κλάδο και κάθε καταναλωτή (terminal). Δεν χαρακτηρίζεται από ακρίβεια στο τελικό αποτέλεσμα.

Proportional Balancing: Για την εξισορρόπηση του δικτύου με αυτή τη μέθοδο θα χρησιμοποιήσουμε την Σχήμα 4 στην οποία παρουσιάζεται μία απλοποιημένη μορφή ενός θερμοϋδραυλικού δικτύου.



Σχήμα 4. Σύνηθες θερμοϋδραυλικό δίτκυο.[6]

Έχοντας ολοκληρώσει την προετοιμασία της εξισορρόπησης, θεωρούμε ότι στο παραπάνω σύστημα έχει τοποθετηθεί αντλία στη βάση του κάθετου αγωγού, και κάθε τερματικό έχει σχεδιαστεί να έχει την ίδια παροχή με τα υπόλοιπα. Επίσης, θα θεωρήσουμε ότι η αντλία μπορεί να δώσει λίγο παραπάνω παροχή από αυτή της σχεδίασης. Η παροχή που έχει το κάθε τερματικό την ορίζουμε στα 0.1 l/sec (0.6 ltr/sec συνολικά) και οι βαλβίδες εξισορρόπησης που είναι όλες ίδιες έχουν ένα kv=2.2. Τα βήματα λοιπόν είναι τα εξής:

- Ανοίγουμε πλήρως όλες τις βαλβίδες του δικτύου, και βλέπουμε ποιο τερματικό έχει τη μικρότερη παροχή. Κατά βάση θα την έχει το κομμάτι που είναι πιο μακριά από την αντλία χωρίς αυτό να είναι πάντα αληθές. Για το λόγο αυτό, μετράμε σε όλα τα πιθανά τερματικά. Στο παράδειγμα μας μετράμε το 1,2 και 4.
- Το τερματικό με την μικρότερη παροχή το ονομάζουμε κύριο τερματικό. Αν το δίκτυο μας έχει όμοιες βαλβίδες εξισορρόπησης (δηλαδή ίδιο kv) τότε προφανώς το κύριο τερματικό θα είναι αυτό με τη μικρότερη ΔΡ πίεση.
- Έστω ότι το τερματικό 1 είναι το κύριο μας σε αυτό το παράδειγμα, και η μέτρηση της παροχής μας δίνει 0.096 l/sec δηλαδή 96% από αυτή της σχεδίασης. Το γεγονός ότι επεμβαίνοντας στη ρυθμιστική βάνα η ροή μόνο θα στραγγαλίζεται, αποκλίνοντας και άλλο από τη παροχή σχεδίασης, δεν πρέπει να μας ανησυχεί.
- Έπειτα παίρνουμε μία μέτρηση στο τερματικό 2 και έστω ότι είναι 0.098 l/sec. Τότε στραγγαλίζουμε τη βάνα του σε τρόπο ώστε η παροχή να πάει στο 96% όπως στο τερματικό 1.
- Συνεχίζουμε τις μετρήσεις στο τερματικό 3 όπου εκεί έστω η μετρούμενη παροχή είναι 0.102 l/sec, ήτοι 102%. Στραγγαλίζουμε τη βαλβίδα της ώστε να επιτύχουμε την ίδια παροχή με τα δύο πρώτα τερματικά.

Σημείωση! Αξίζει να τονίσουμε σε αυτό το σημείο ότι τη στιγμή που στραγγαλίσαμε τη ροή στο τερματικό 3, αναπόφευκτα, πιθανώς να αυξήθηκε η ροή στα προηγούμενα τερματικά. Έτσι μία γρήγορη μέτρηση στο τερματικό 2 και ρύθμιση της βαλβίδας στο τερματικό 3 μας οδηγούν σε όμοια ποσοστά στους 3 αυτούς κλάδους.

- Τώρα λοιπόν, έχουμε ένα κλάδο με τρία τερματικά εξισορροπημένα και παροχή στο 96%.
- Συνεχίζοντας στον επόμενο κλάδο έστω ότι μετρήσαμε στο τερματικό 4 παροχή 114%. Εξισορροπούμε τα υπόλοιπα δύο τερματικά με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω.
- Παίρνουμε μέτρηση στην βαλβίδα εξισορρόπησης του κλάδου 1 (branch valve 1) και έστω ότι η παροχή έχει αυξηθεί στο 98% της παροχής σχεδίασης. Έχουμε λοιπόν, ένα κλάδο (branch 1) με 98% και ένα άλλο (branch 2) με 114%.
- Εξισορροπούμε τον κλάδο 2 σε παροχή ίση με αυτή του κλάδου 1. Ίσως χρειαστούν περισσότερες από δύο δοκιμές ώστε οι δύο κλάδοι να έχουν την ίδια παροχή. Τελικώς καταλήγουμε σε μία παροχή 106 % σε όλους τους κλάδους και τα τερματικά.

- Τέλος συνδέοντας το μανόμετρο στη θέση της βαλβίδας εξισορρόπησης του κατακόρυφου κλάδου (riser) εμφανίζεται η αναμενόμενη παροχή στο 106%. Ρυθμίζουμε την βαλβίδα αυτή ώστε η παροχή να καταλήξει σε μία παροχή ίση με το 100% της παροχής σχεδίασης.

Η παραπάνω ανάλυση αποτέλεσε μία απλουστευμένη εκδοχή εξισορρόπηση, η οποία σπάνια εμφανίζεται στη πράξη! Παρόλα αυτά, η διαδικασία είναι ακριβώς η ίδια σε οποιαδήποτε περίπτωση και βασίζεται στην ομαδοποίηση τμημάτων του δικτύου.

The Compensated Method: Η μέθοδος αυτή έχει τη ίδια μεθοδολογία με την αναλογική μέθοδο, που περιγράφτηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι κάθε ρυθμιστική βάνα ρυθμίζεται μόνο μία φορά σε όλη τη διαδικασία της εξισορρόπησης, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο όταν οι βάνες δεν είναι εύκολα προσβάσιμες. Το βασικό μειονέκτημά της είναι η ανάγκη δύο μετρητικών οργάνων και τριών ατόμων για την εκτέλεση της.

Methods based on mathematical simulation of the system as built: Είναι η πιο ακριβής και αποδοτική μέθοδος. Στη μέθοδο αυτή οι μετρήσεις της παροχής και της διαφορικής πίεσης που λαμβάνονται από τις ρυθμιστικές βαλβίδες τοποθετούνται σε κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής δίνει την τελική θέση που πρέπει να έχει κάθε ρυθμιστική βαλβίδα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εκτελεστεί από ένα μόνο άνθρωπο και με μόνο ένα μετρητικό όργανο. Η μέθοδος αυτή είναι 25% οικονομικότερη από τις υπόλοιπες.

1.6 Βαλβίδες εξισορρόπησης δικτύων

1.6.1 Εισαγωγή

Πριν από την ανάλυση των βαλβίδων εξισορρόπησης, αξίζει να αναφέρουμε τον τρόπο που συνδέεται η παροχή του νερού με την ανάγκη σε ψύξη ή θέρμανση ενός χώρου. Κατά τη σχεδίαση ενός χώρου από κάποιον μηχανικό προσδιορίζονται όλες οι απαιτούμενες ανάγκες αυτού σε ψύξη και θέρμανση, σε συνάρτηση βέβαια πρώτων των εξωτερικών συνθηκών και δεύτερον της επιθυμητής θερμοκρασίας στον εσωτερικό χώρο. Οι απαιτήσεις αυτές μεταφράζονται σε ενέργεια και κατ επέκταση σε kW. Η μεταφορά ενέργειας λαμβάνει χώρα από το ρευστό που στις περισσότερες εφαρμογές είναι το νερό. Η απόδοση ενέργειας στο χώρο γίνεται μέσω κάποιων καταναλωτών (terminals) που μπορεί να είναι σώματα φυσικής ροής, fan coil κ.α.

Η βασική μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τη διαδικασία είναι Q=m*Cp*ΔT όπου Cp η ειδική θερμοχωρητικότητα σε $\frac{k}{k}$, m η παροχή μάζας σε $\frac{k}{s}$ και ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ρευστού στην είσοδο με την έξοδο του τερματικού.

Από την παραπάνω μαθηματική εξίσωση βλέπουμε ότι ο μόνος τρόπος να επηρεάσουμε την ποσότητα απόδοσης θερμότητας στο χώρο είναι η μεταβολή της παροχής. Το βασικότερο εξάρτημα σε ένα δίκτυο για τον παραπάνω σκοπό είναι η βαλβίδα εξισορρόπησης.

1.6.2 Τύποι ρυθμιστικών βαλβίδων και μετρητών παροχής

Όπως θα δούμε παρακάτω τέσσερις είναι οι βασικότερες κατηγορίες ρυθμιστικών βαλβίδων και μετρητών παροχής

1. **Double regulating valves (DRV)**

Εικόνα 1. Double regulating valve .[5]

Βαλβίδες τύπου «Y» με χαρακτηριστικές καμπύλες παροχής – πτώσης πίεσης, ανάλογα με την ρύθμισή τους, κατάλληλες για την ρύθμιση της ροής σε δίκτυα νερού, σε εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης και κλιματισμού .Η βαλβίδα φέρει χειροτροχό με ένδειξη της θέσης της βαλβίδας (αριθμό πλήρων περιστροφών και δεκάτων της περιστροφής του χειροτροχού) και έχει δυνατότητα ασφάλισης της ρύθμισης, με ειδικό κλειδί, για ταυτόχρονη χρήση της βαλβίδας σαν δικλείδα απομόνωσης . Κατά τη χρήση κάποιου ηλεκτρονικού μανομέτρου διαφορικής πίεσης δεν είναι δυνατόν να βρεθούν στοιχεία για αυτές τις βαλβίδες μέσα στη μνήμη του οργάνου καθώς δεν έχουν θέσεις για λήψη διαφορική πίεσης.

2. Flow measurement devices

Εικόνα 2. Flow measurement devices. [2]

Βαλβίδες με στένωση (orifice plate), με χαρακτηριστική καμπύλη παροχής – πτώσης πίεσης, κατάλληλες για μέτρηση της ροής σε δίκτυα νερού, σε εγκαταστάσεις κεντρικής θέρμανσης και κλιματισμού . Στο σώμα των βαλβίδων εκατέρωθεν της στένωσης, υπάρχουν σημεία λήψης πίεσης, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της εκάστοτε διαφορικής πίεσης και, κατ' αντιστοιχία, της παροχής . Για την λήψη της πίεσης χρησιμοποιούνται βελονοειδείς σύνδεσμοι που εισέρχονται στα ειδικά ελαστικά πώματα που υπάρχουν στα σημεία λήψης της πίεσης και διασφαλίζουν την στεγανότητα προς το περιβάλλον. Η ακρίβεια μέτρησης της παροχής, για την περιοχή λειτουργίας των βαλβίδων είναι +/-3% της πραγματικής παροχής .

3. Double regulating valves combined with flow measurement devices(FODRV)

Εικόνα 3. Double regulating valves combined with flow measurement devices(FODRV) .[2]

Οι παραπάνω βαλβίδες αποτελούν ένα συνδυασμό των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Οι χαρακτηριστική καμπύλη του orifice , το οποίο εδράζεται στη μία πλευρά της βαλβίδας, περιέχεται στα περισσότερα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης διαφορικής πίεσης οπότε ο μελετητής μπορεί να εξάγει άμεσα τόσο την διαφορική πίεση όσο και την παροχή.

4. **Double regulating valves with integral flow measurement facility (VODRV)**

Εικόνα 4. Double regulating valves with integral flow measurement facility (VODRV) .[3]

Οι βαλβίδες αυτού του τύπου διαφέρουν στο γεγονός ότι η μέτρηση της παροχής είναι συνέπεια της μέτρησης διαφορικής πίεσης στα άκρα της βαλβίδας. Έτσι η μέτρηση επηρεάζεται από τη θέση του χειροστροφάλου κατά συνέπεια πρέπει να λαμβάνεται υπόψην η θέση του στη μέτρηση με ηλεκτρονικά μανόμετρα.

1.6.3 Ο αριθμός Kv

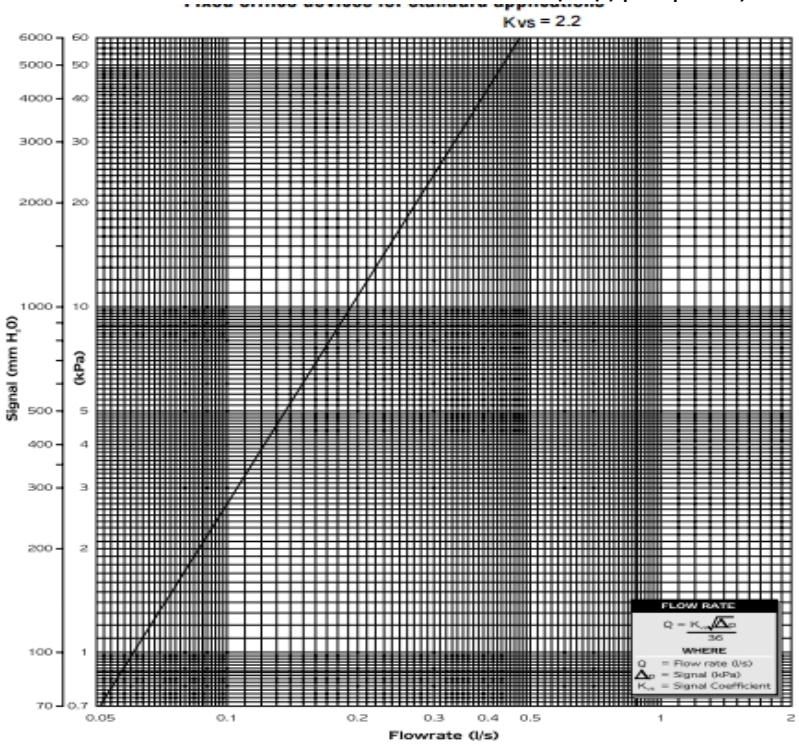
Ο αριθμός Kv η kvs (οι Αμερικάνοι τον συμβολίζουν Cv) χαρακτηρίζει πλέον κάθε εξάρτημα ή βαλβίδα και γενικώς οτιδήποτε προκαλεί τοπική πτώση πίεσης. Έχει πλέον καθιερωθεί και δεν είναι τυχαίο πού οι κατασκευαστές τέτοιων εξαρτημάτων τον δίνουν απαραίτητα στα τεχνικά τους στοιχεία. Συνδέει την παροχή του νερού G που περνά μέσα από την βαλβίδα με την πτώση πίεσης στα άκρα της ΔP και μας βοηθά να εξάγουμε πόσα m^3/h πρέπει να περάσουν για να εμφανισθεί πτώση πίεσης ίση με 1 Bar (ΔP=1 Bar). Δεχόμενοι (για κάποιο συγκεκριμένο

εξάρτημα) ότι ο λόγος $\frac{G}{\sqrt{\Delta}}$ είναι πάντα σταθερός, τότε εύκολα καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση: $\frac{G}{\sqrt{\Delta}}=\frac{k}{\sqrt{1}}$ (1.7) και ακολούθως ΔP= $(\frac{G}{k})^2$ (1.8)
Η σχέση αυτή ισχύει για το συγκεκριμένο ζεύγος μονάδων: G (m³/h), ΔP (Bar)

1.6.4 Προσδιορισμός παροχής με διαφορικό μανόμετρο

Στο σημείο αυτό θα αναλύσουμε τον τρόπο προσδιορισμού της παροχής με χρήση ενός διαφορικού μανόμετρου. Κατά βάση σε διαδικασίες εξισορρόπησης η λήψη της διαφορικής πίεσης θα λαμβάνει χώρα είτε πάνω σε κάποια ρυθμιστική βαλβίδα είτε σε κάποια βαλβίδα με στένωση (orifice plate) όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.5.2.

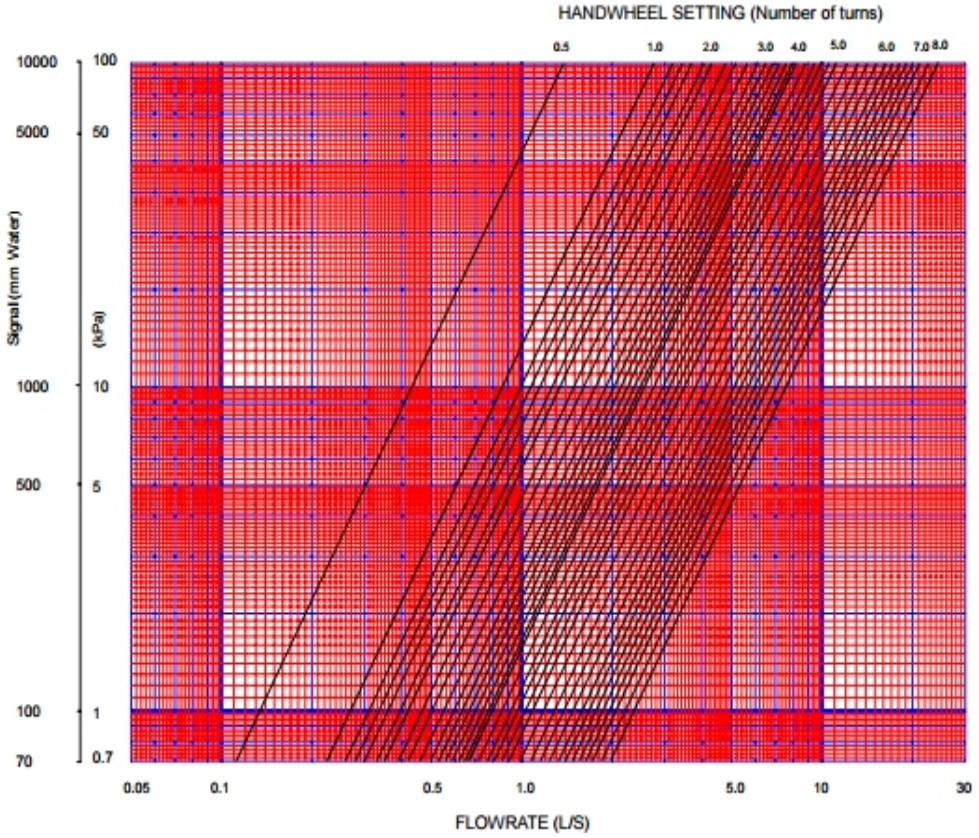
Στην περίπτωση μέτρησης πάνω σε βαλβίδα με στένωση τα πράγματα είναι απλά. Ένας αριθμός kv χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο εξάρτημα και κατά συνέπεια η εξίσωση Q=kv*$\sqrt{\Delta}$,όπου ΔP σε Bar και Q σε m^3/h, μας δίδει την απαιτούμενη παροχή. Εξίσου ίδιο αποτέλεσμα, χωρίς τη χρήση της εξίσωσης, θα δώσει και το διάγραμμα 1 το οποίο δίδεται από τον κατασκευαστή της βαλβίδας.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα Παροχής - Διαφορικής Πίεσης βαλβίδας με στένωση.[2]

Στην περίπτωση τώρα μέτρησης σε ρυθμιστική βαλβίδα VODRV τα πράγματα είναι λίγο πιο περίπλοκα. Αυτό συμβαίνει διότι σε κάθε θέση του χειροστροφάλου αντιστοιχεί και ένα διαφορετικό kv. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει κάποιες τιμές για μία βαλβίδα τέτοιου τύπου. Εφόσον λοιπόν ξέρουμε τη θέση του χειροστροφάλου και κατά συνέπεια το kv με χρήση της εξίσωσης Q=kv*$\sqrt{\Delta}$

προσδιορίζουμε την παροχή. Στο διάγραμμα 2 παρουσιάζεται ο τρόπος προσδιορισμού της παροχής χωρίς τη χρήση της εξίσωσης.



Διάγραμμα 2. Διάγραμμα Παροχής - Διαφορικής Πίεσης βαλβίδας VODRV.[3]

Πίνακας 1. Kvs values

Handwheel position	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
Kvs Value	5.0	10.0	12.5	15.0	19	23	29	39	57	74	85

Τέλος πρέπει να τονίσουμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα σύγχρονα ηλεκτρονικά μανόμετρα διαφορικής πίεσης έχουν την δυνατότητα ένδειξης και παροχής από τη στιγμή που έχουν αποθηκευμένα στη μνήμη του στοιχεία από του περισσότερους κατασκευαστές ρυθμιστικών βαλβίδων.

Βιβλιογραφία

1. Ξ. Κακάτσιος. “Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης”. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα, 2006.
2. http://www.chryssafidis.com/files/el/data_sheets/2701xxA.pdf
3. http://www.chryssafidis.com/files/el/data_sheets/2705xxA.pdf
4. http://www.chryssafidis.gr/items.php?page=2&ipp=20&catid=210
5. http://www.chryssafidis.gr/items.php?page=1&ipp=20&catid=210
6. ASHRAE Standard 111-1988: Practices for Measurement, Testing, Adjusting and Balancing of Building Heating

2. Τεχνολογία Μετρήσεων

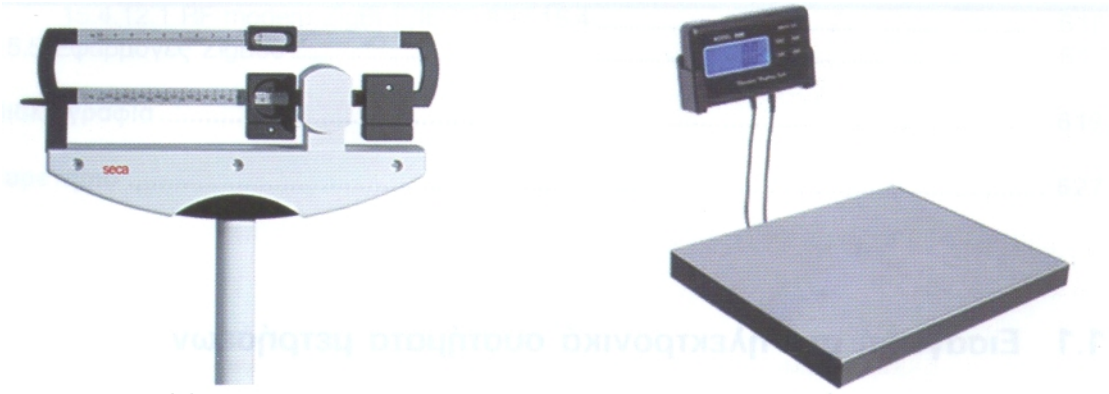
2.1. Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων

2.1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο *Μέτρηση* αναφερόμαστε στην απόκτηση πληροφορίας για τον προσδιορισμό του μέτρου ενός φυσικού μεγέθους που θέλουμε να ανιχνεύσουμε σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με τον όρο *Ηλεκτρονικό Σύστημα* αναφερόμαστε στις μονάδες ή βαθμίδες που φέρουν ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία μας παρέχουν δυνατότητες όπως: τη μετατροπή ενός αναλογικού συστήματος σε ψηφιακό, την ενίσχυση του σήματος, την προσαρμογή του σήματος σε επιθυμητά επίπεδα κ.α.. Η σχεδίαση και ανάπτυξη ηλεκτρονικών διατάξεων για την πραγματοποίηση μετρήσεων φυσικών και τεχνικών μεγεθών ορίζει τα *Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων.* Η χρήση ηλεκτρονικών διατάξεων σε συστήματα μετρήσεων έχει συντελέσει στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών μετρητικών συστημάτων τα οποία προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία των μετρήσεων με:

- υψηλό βαθμό ευαισθησίας για την ανίχνευση ασθενών σημάτων,
- υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας,
- προσαρμοστικότητα με την πηγή μέτρησης του μεγέθους,
- ταχύτατη απόκριση, δηλαδή ανίχνευση και μέτρηση σημάτων με υψηλή συχνότητα,
- ενσύρματη ή ασύρματη μετάδοση, δίχως απώλειες πληροφοριών του μετρήσιμου σήματος,
- ποικιλία μεθόδων μέτρησης και εφαρμογής επεξεργασίας του μετρήσιμου μεγέθους, και
- μικρή κατανάλωση για τη φορητότητα του μετρητικού συστήματος.

Για παράδειγμα, αναφέρουμε την περίπτωση μέτρησης του φορτίου με μηχανικό όργανο όπως αυτό του σχήματος 1. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μέτρησης εξαρτάται από τα μηχανικά στοιχεία του οργάνου ενώ ο βαθμός επαναληψιμότητας και ανάγνωσης της μέτρησης εξαρτάται από την ικανότητα του χρήστη να πραγματοποιεί τη μέτρηση. Η ανάπτυξη ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης με χρήση αισθητήρα φορτίου και ηλεκτρονική μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας και απεικόνισης παρέχει αξιόπιστη μέτρηση του μεγέθους με υψηλό βαθμό επαναληψιμότητας.



Σχήμα 1. α) Μηχανικό, και β) ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης βάρους. . [3]

Καθώς η τεχνολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων και διατάξεων συνεχώς θα προοδεύει, ο βαθμός απόδοσης όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών θα αυξάνεται, ενώ θα δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης νέων μεθόδων αντιμετώπισης ενός προβλήματος μέτρησης.

Επίσης, η χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να συνδυάζει διαφορετικά συστήματα μετρήσεων , για τη μέτρηση πολλαπλών μεγεθών τα οποία μπορούν να αφορούν το ίδιο ή και διαφορετικά συστήματα τα οποία μέσω ηλεκτρονικής διασύνδεσής τους βάση πρωτοκόλλου επικοινωνίας όπως: RS232, GPIB, USB, ProfiBUS, κ.α. να είναι σε θέση να επισκοπεί κάθε μέγεθος μέσα από μια κεντρική οθόνη. Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα φέρουμε το δωμάτιο ελέγχου των μηχανών ενός τάνκερ, στο οποίο όλες οι μετρήσεις οδηγούνται στο πάνελ ελέγχου για την επιτήρηση και την αξιολόγηση από το μηχανικό της βάρδιας (Σχήμα 2).

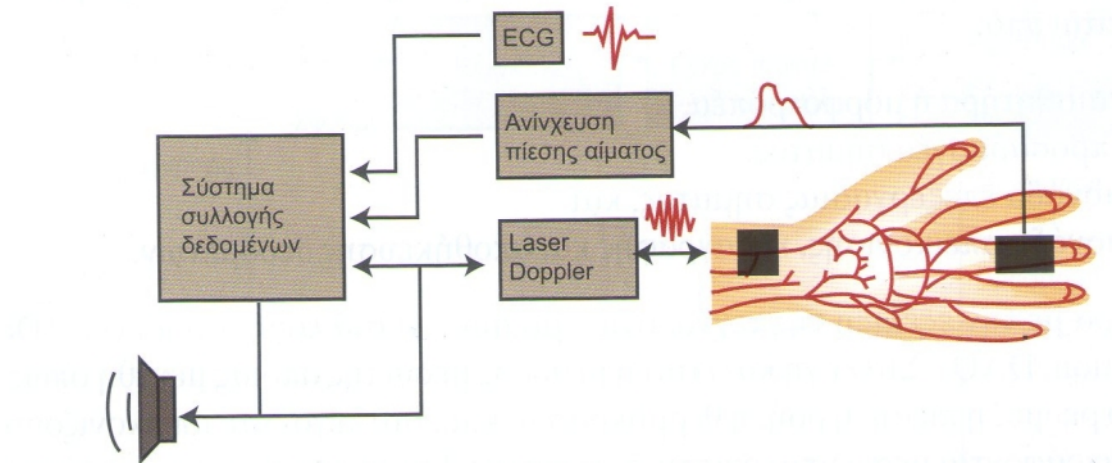
Ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων συναντάμε σε όλους τους τομείς των εφαρμοσμένων επιστημών. Για παράδειγμα ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης απαιτείται για τον έλεγχο στροφών των τροχών ενός οχήματος σε σύστημα αντι-ολίσθησης (anti-blog).

Στο χώρο της βιομηχανίας κάθε ηλεκτρομηχανική εργασία απαιτεί για την υποστήριξή της ένα μικρό ή μεγάλης κλίμακας ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης, όπως για παράδειγμα, η σύνθεση παράγωγων πετρελαίου απαιτεί μετρήσεις μεγεθών όπως πίεσης, θερμοκρασίας και ροής.

Σχήμα 2. α) Αναλογικά συστήματα μέτρησης και επιτήρησης σε δωμάτιο ελέγχου μηχανής (1960) και β) ψηφιακό ηλεκτρονικό σύστημα σε σύγχρονο τάνκερ. . [3]

Στον τομέα της ρομποτικής η κίνηση και ανίχνευση αντικειμένων από ένα ρομποτικό χέρι απαιτεί εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων θέσης, ταχύτητας και όρασης.

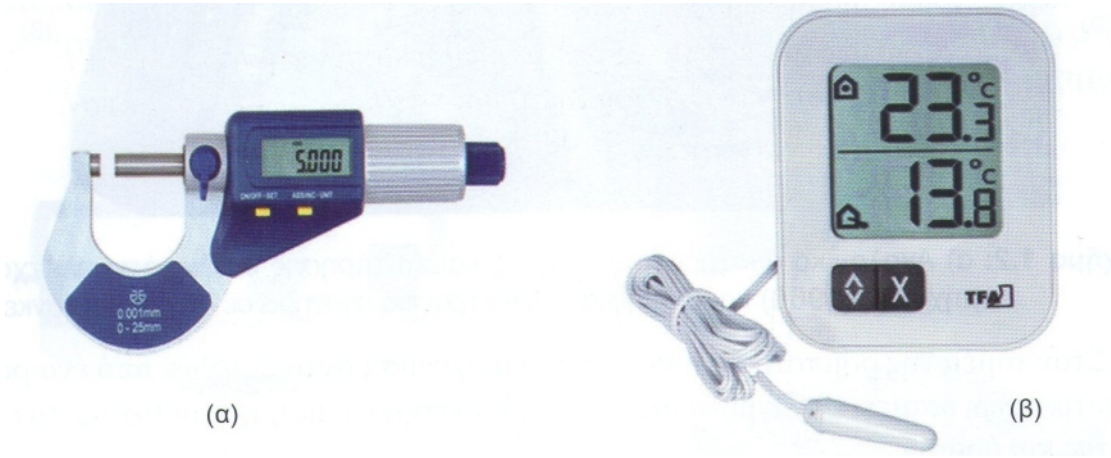
Επίσης, στον ιατρικό τομέα ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης παροχής ποσότητας οξυγόνου και της μέτρησης καταγραφής καρδιακών παλμών χρησιμοποιούνται κατά της διάρκεια μιας χειρουργικής επέμβασης ή κατά την εντατική παρακολούθηση του ασθενούς. Στο σχήμα 3 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης ζωτικών παραμέτρων σε ασθενή εντατικής παρακολούθησης.



Σχήμα3. Λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης ζωτικών παραμέτρων σε ασθενή. . [3]

Μια μέτρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε *άμεσα* (direct)στο προς μέτρηση μέγεθος, όπως για παράδειγμα, τη μέτρηση του μήκους ενός αντικειμένου τοποθετώντας αυτό σε έναν μετρητικό κανόνα, είτε *έμμεσα* (indirect), ανάγοντας τη φυσική μεταβλητή σε νέο άλλο μετρήσιμο μέγεθος, όπως για παράδειγμα η μέτρηση της θερμοκρασίας του χώρου με τη χρήση ενός υδραργυρικού θερμομέτρου στο οποίο η μετατόπιση του υδραργύρου σε έναν κατάλληλο

βαθμονομημένο άξονα αποδίδει την τιμή της θερμοκρασίας του χώρου. Ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διακρίνουμε και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρονικό μικρόμετρο ή ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής θερμομέτρου (Σχήμα 4) αποτελούν παραδείγματα ηλεκτρονικών συστημάτων.



Σχήμα 4. Ηλεκτρονικό σύστημα: α) μέτρησης μήκους, και β) μέτρησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος . [3]

Η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων μπορεί να αποτελεί ένα πολύπλοκο σχεδιαστικό πρόβλημα ο βαθμός του οποίου εξαρτάται από το μοντέλο του συστήματος. Η δομή ενός ηλεκτρονικού συστήματος μετρήσεων ακολουθεί το λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 5.

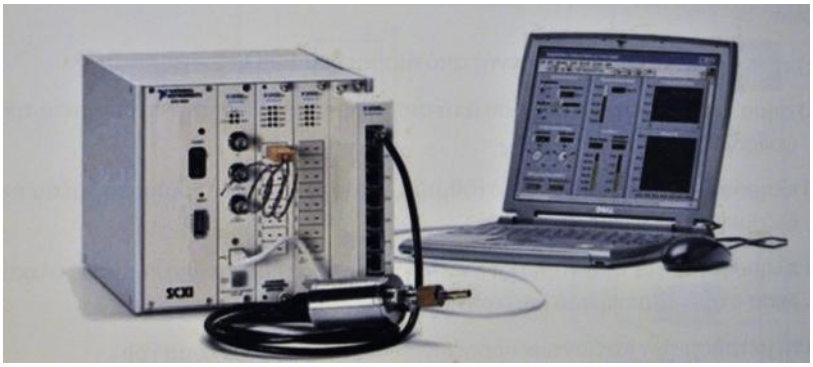
Σχήμα 5. Βασικό λειτουργικό διάγραμμα συστήματος μετρήσεων. . [3]

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5 ένα τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα μετρήσεων αποτελείται από:

- τον αισθητήρα ή μορφοτροπέα,
- τον προσαρμογέα συστήματος
- την μονάδα επεξεργασίας σήματος, και
- τη μονάδα απεικόνισης, καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων.

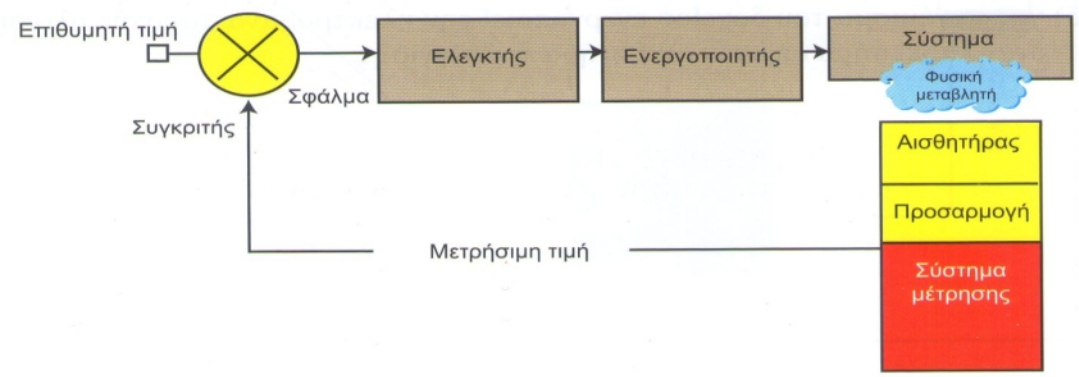
Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας μιλάμε για συλλογή δεδομένων (DataAcquisition, DAQ). Συλλογή καλείται η μέθοδος μέσω της οποίας μεγέθη όπως: η τάση, το ρεύμα, η πίεση, η ροή, η θερμοκρασία κ.α., συλλέγονται, απεικονίζονται,

και καταγράφονται μέσω υπολογιστικής μονάδας. Για το σκοπό αυτό ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (DataAcquisitionSystem)μετατρέπει το εισερχόμενο σήμα σε ψηφιακό δεδομένο. Υπεύθυνο για την επεξεργασία των αποκτημένων πληροφοριών είναι το λογισμικό που φέρει το σύστημα DAQμέσω του οποίου εκτελούνται διεργασίες όπως: μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών, ανάλυση σήματος στο πεδίο της συχνότητας/χρόνου, στατιστική ανάλυση σήματος και πλήθος άλλως επεξεργασιών. Με τη χρησιμοποίηση μονάδων υψηλής τεχνολογίας, και λογισμικών επεξεργασίας σημάτων, όπως το LabVIEWτης NationalInstrumentμπορεί να επιτευχθεί με υψηλή ακρίβεια μέτρησης και ελέγχου της πληροφορίας του σήματος σε εργαστηριακή ή βιομηχανική εφαρμογή (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Ολοκληρωμένα συστήματα συλλογής δεδομένων της NationalInstruments. . [3]

Τα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων αποτελούν ένα από τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος ελέγχου διότι σε έναν μεγάλο βαθμό η ευστοχία του συστήματος αποτελεί συνάρτηση της ακρίβειας των μετρήσιμων μεγεθών. Η θέση στην οποία τοποθετείτε το ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης σε ένα σύστημα αποτελεί είσοδο στον συγκριτή (comparator) του συστήματος από τον οποίον προκύπτει το μετρήσιμο σφάλμα για το οποίο θα πρέπει ο ελεγκτής να διορθώσει παραμέτρους του συστήματος. (Σχήμα 7)



Σχήμα 7. Θέση ηλεκτρονικού συστήματος μέτρησης σε σύστημα ελέγχου. [3]

2.1.2 Ανιχνευτές

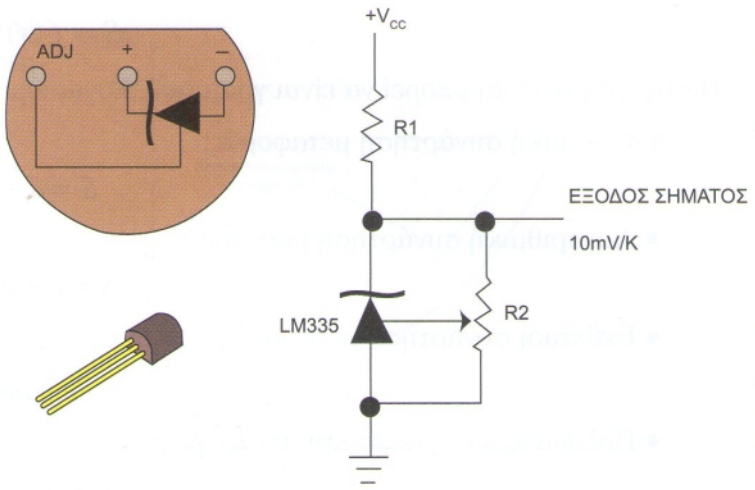
Ως **ανιχνευτής** (detector) ορίζεται μια δομή η οποία έχει ως σκοπό την ανίχνευση διακριτού επιπέδου της τιμής ενός φυσικού μεγέθους. Ένας ανιχνευτής χρησιμοποιεί κατάλληλους αισθητήρες και ηλεκτρονικές διατάξεις για την ανίχνευση του φυσικού φαινομένου παράγοντας στην έξοδό του μια διακριτή τιμή τάσης (Boolean) ανάλογα με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυκλωμάτων υποστήριξης του ανιχνευτή. Για παράδειγμα ένας ανιχνευτής θερμοκρασίας προσδιορίζει εάν η θερμοκρασία μέσα σε ένα δωμάτιο είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τους 15^{o}C για να εκκινήσει τη λειτουργία ενός θερμικού αντιστάτη ή ενός καυστήρα θέρμανσης. Οι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανίχνευσης διακριτών επιπέδων στη βιομηχανία και σε συστήματα ασφάλειας.

2.1.3 Κατηγορίες αισθητήρων

2.1.3.1 Παθητικοί και ενεργοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται σε παθητικούς (passive)και ενεργούς (active). Οι ενεργοί αισθητήρες παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα ως απόκριση σε κάποιο ερέθισμα χωρίς να απαιτούν ηλεκτρική ισχύ, μετατρέποντας την ενέργεια του εισερχόμενου ερεθίσματος στην μορφή του εξερχόμενου σήματος (π.χ. θερμοζεύγος).

Σε αντίθεση με τους ενεργούς, οι παθητικοί αισθητήρες προκειμένου να παράγουν το σήμα εξόδου απαιτούν κατανάλωση ενέργειας η οποία προέρχεται από εξωτερική πηγή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αισθητήρας θερμοκρασίας I.M. 335 ο οποίος απαιτεί τάση τροφοδοσίας για τη λειτουργία του (Σχήμα 8)



Σχήμα 8. Ολοκληρωμένος ενεργός αισθητήρας LM335 (NationalSemiconductor)και τυπικό κύκλωμα πόλωσής του. . [1]

2.1.3.2 Απόλυτοι και σχετικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες διαχωρίζονται επίσης σε απόλυτους (absolute) και σχετικούς (relative). Το κριτήριο αποτελεί την αναφορά της μέτρησης του αισθητήρα σε κάποια κλίμακα, δηλαδή, απόλυτος χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας του οποίου το σήμα παραγωγής αναφέρεται σε μία απόλυτη ακριβή φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης, όπως στην περίπτωση ενός μετρητή της πίεσης με αναφορά το κενό. Σχετικός αισθητήρας χαρακτηρίζεται εκείνος ο οποίος παράγει σήμα που αναφέρεται σε μια ειδική κλίμακα τιμών, όπως στην περίπτωση του μανόμετρου.

2.1.4 Χαρακτηριστικά αισθητήρων

Κατά τη σχεδίαση ή την επιλογή ενός αισθητήρα ο μηχανικός θα πρέπει να ορίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που απαιτεί να έχει ο αισθητήρας που πρόκειται να χρησιμοποιήσει σε ένα σύστημα μέτρησης ή ελέγχου. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζουμε σε έναν αισθητήρα είναι:

1. η συνάρτηση μεταφοράς,
2. η κλίμακα εισόδου,
3. το εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου,
4. το εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου,
5. η ακρίβεια και η ακρίβεια προσέγγισης,
6. η βαθμονόμηση,
7. το σφάλμα βαθμονόμησης,
8. η υστέρηση,
9. η μη γραμμικότητα,

10. η διακριτική ικανότητα,
11. η επαναληψιμότητα,
12. ο συντελεστής κορεσμού,
13. η νεκρή ζώνη,
14. η σύνθετη αντίσταση εξόδου,
15. η διέγερση,
16. η αξιοπιστία,
17. το ελάχιστο σήμα κατωφλίου,
18. ο χρόνος απόκρισης,
19. ο θόρυβος,
20. η ολίσθηση, και
21. ο χρόνος προθέρμανσης

2.1.4.1 Συνάρτηση μεταφοράς

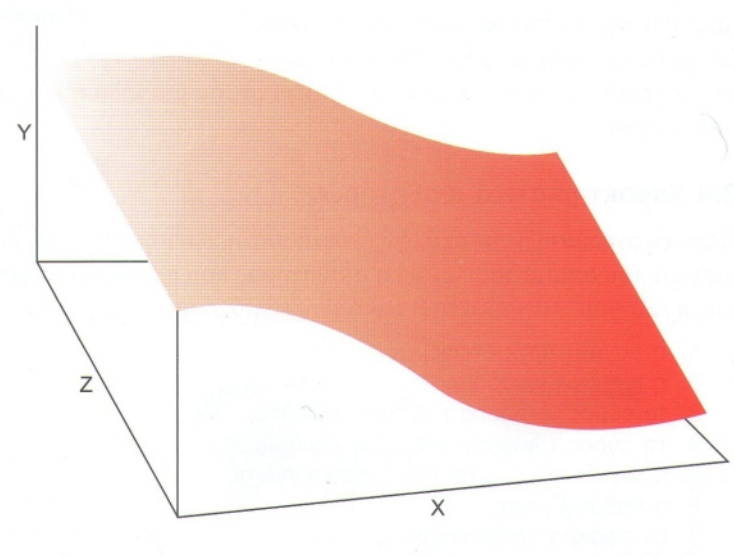
Ένας ιδανικά σχεδιασμένος και κατασκευασμένος αισθητήρας, παράγει σήμα εξόδου και αντιπροσωπεύει την πραγματική τιμή του ερεθίσματος. Η συνάρτηση του σήματος εξόδου αποτελεί την ταυτότητα του αισθητήρα ή της μετρικής διάταξης. Η σχέση εξόδου / εισόδου χαρακτηρίζεται από την αποκαλούμενη συνάρτηση μεταφοράς (transferfunction). Μέσω της συνάρτησης μεταφοράς σχεδιάζονται οι μονάδες προσαρμογής του σήματος. Αυτή η συνάρτηση καθορίζει την εξάρτηση μεταξύ του ηλεκτρικού σήματος S που παράγεται από τον αισθητήρα και του ερεθίσματος sπου αποτελεί την είσοδο του αισθητήρα:

$$S = f(s) \qquad (2.1)$$

Η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι γραμμική, λογαριθμική εκθετική ή πολυωνυμική.

- Γραμμική συνάρτηση μεταφοράς: S = a+ bs
- Λογαριθμική συνάρτηση μεταφοράς: S = a + blns
- Εκθετική συνάρτηση μεταφοράς: $S = ae^{ks}$
- Πολυωνυμική συνάρτηση μεταφοράς: $S = a_0 + a_1 s^k$
  όπου k: σταθερά

Πολλοί αισθητήρες παρουσιάζουν συνάρτηση μεταφοράς η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως για παράδειγμα η επίδραση της ανίχνευσης θερμικού φαινομένου σε σχέση με τη θερμοκρασία του ίδιου του στοιχείου, μια παράμετρος η οποία είναι αλληλένδετη με τους θερμικούς ανιχνευτές ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση μεταφοράς δεν παρουσιάζεται σε δισδιάστατη γραφική απεικόνιση (XYZ) όπως η απόκριση του Σχήματος 9. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται λογισμικά ή υλικά συστήματα αντιστάθμισης.



Σχήμα 9. Γραφική παράσταση συνάρτησης μεταφοράς του αισθητήρα θερμικής ακτινοβολίας. . [1]

2.1.4.2 Περιοχή τιμών εισόδου

Περιοχή τιμών εισόδου (Range) καλούμε το πεδίο τιμών του ερεθίσματος που δέχεται ο αισθητήρας ή ο μορφομετατροπέας ως διέγερση:

$$\text{Range} = (x_{min}, x_{max})$$

Για παράδειγμα, αισθητήρας πίεσης φέρει κλίμακα εισόδου 10 έως 120psi.

2.1.4.3 Εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου

Το εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου (Span – InputFullScale, IFS) ενός αισθητήρα ή μορφομετατροπέα, αποτελεί η αλγεβρική διαφορά της μέγιστης (x_{max}) από την ελάχιστη (x_{min}) τιμή του ερεθίσματος, και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Span} = x_{max} - x_{min.} \qquad (2.2)$$

Για παράδειγμα, αισθητήρας πίεσης με κλίμακα εισόδου $(10, 200)_{psi}$ έχει εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:

$$\text{Span} = x_{max} - x_{min} = 200 - 10 = 190\text{psi}$$

Επίσης, μορφομετατροπέας φέρει πεδίο τιμών εισόδου από -100 έως 250 ^{o}C. Δηλαδή έχει εύρος πλήρους κλίμακας εισόδου:

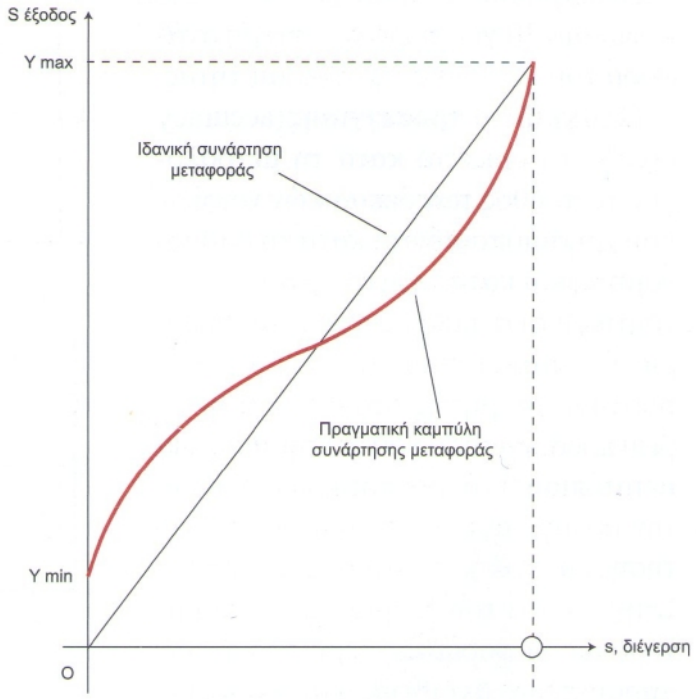
$$\text{Span} = x_{max} - x_{min} = 250 - (-100) = 350^{o}\text{C}$$

2.1.4.4 Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου

Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου (Σχήμα 10), FSO (FullScaleOutput, FSO) αποτελεί η αλγεβρική διαφορά μεταξύ του μέγιστου (y_{max})και του ελάχιστου (y_{min}) σήματος εξόδου σε όλο το πεδίο εισόδου του ερεθίσματος s του αισθητήρα ή του μορφομετατροπέα, δηλαδή ισχύει ότι:

$$FSO = y_{max} - y_{min} \qquad (2.3)$$

Το εύρος εξόδου του αισθητήρα ή του μορφομετατροπέα δίνεται σε μονάδες μέτρησης του σήματος εξόδου.



Σχήμα 10. Εύρος πλήρους κλίμακας εξόδου σε καμπύλη συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα. [1]

2.1.4.5 Ακρίβεια

Η ακρίβεια μιας διεργασίας ελέγχου η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από τον απλό έλεγχο της στάθμης μέσα σε μία δεξαμενή μέχρι τον έλεγχο της ταχύτητας σωματιδίων σε μία σήραγγα προσδιορίζεται από την ακρίβεια που διαθέτει ο αισθητήρας ή ο μορφομετρατροπέας του συστήματος. Η ακρίβεια ενός συστήματος υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Ως ακρίβεια ενός αισθητήρα ορίζεται η διαφορά που παρουσιάζει το σήμα εξόδου σε σχέση με την πραγματική

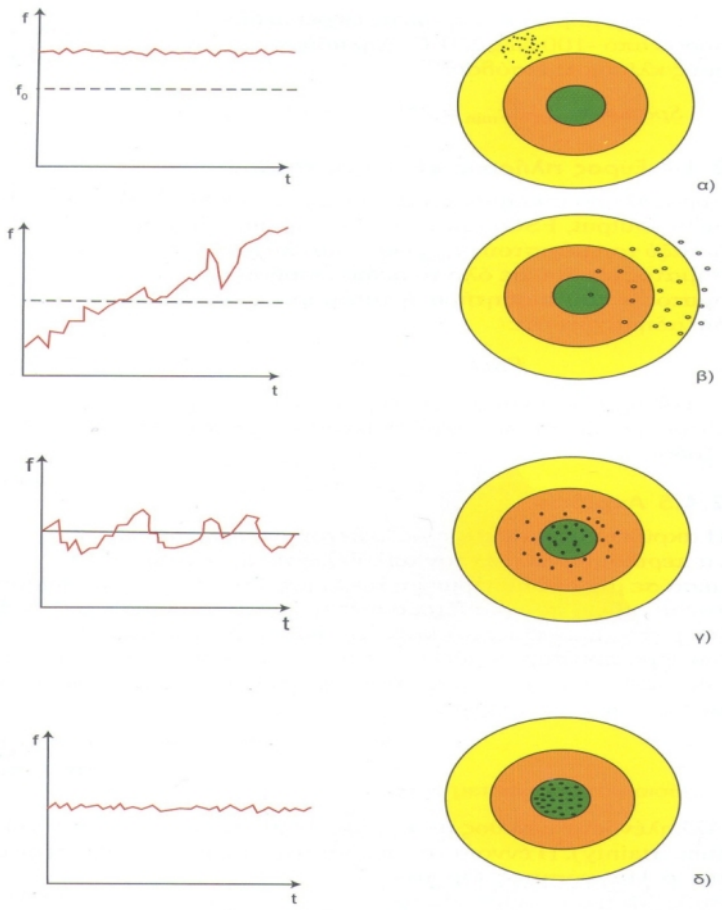
τιμή του μεγέθους, αποδίδουμε την ακρίβεια μέσω σχετικού σφάλματος με την παρακάτω σχέση:

e_{res} = (μετρούμενη τιμή – πραγματική τιμή)/ πραγματική τιμή) (2.4)

Αλληλένδετο μέγεθος με την ακρίβεια είναι η εκτίμηση του σφάλματος. Η οποία καλείται αβεβαιότητα (Uncertainty). Η έννοια της αβεβαιότητας εμφανίστηκε στη μετεωρολογία πρόσφατα, ενώ έχει δημιουργηθεί ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μέτρων (InternationalOrganizationforStandards, ISO), ο οποίος καθορίζει πρότυπα, για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η έννοια της αβεβαιότητας πολλές φορές συγχέεται με την έννοια του σφάλματος. Το σφάλμα αναφέρεται στην πραγματική διαφορά μεταξύ της μέτρησης και της εικονιζόμενης τιμής της, ενώ η αβεβαιότητα στρέφεται στο κατά πόσο σωστή είναι η μετρήσιμη τιμή του μεγέθους.

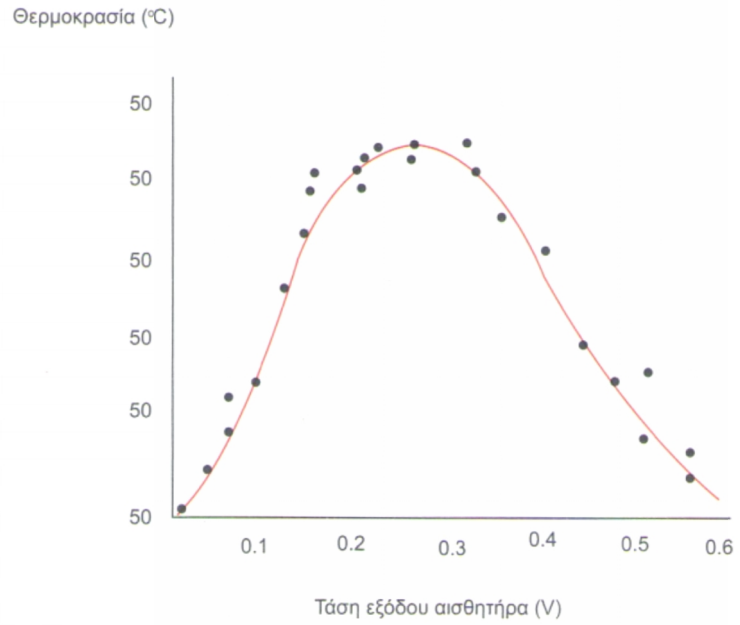
Ως **ακρίβεια προσέγγισης** (accuracyprecision) ορίζεται κατά τη μετρολογία το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων που χρησιμοποιούνται κατά τη βαθμονόμηση και κατά τη λειτουργία του μετρητικού συστήματος ή ενός αισθητήρα. Στην εικόνα του σχήματος 11 παρατηρούμε διαφορετικές περιπτώσεις των παραμέτρων ακρίβειας και ακρίβειας προσέγγισης γύρω από την πραγματική τιμή του μεγέθους. Στο σχήμα 11α το σήμα παρουσιάζει υψηλή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή, μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης η οποία όμως σε σχέση με την ακρίβεια έχει μεγάλο σφάλμα.

Στο σχήμα 11β το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή, μετρήσιμες τιμές πέρα από την τιμή μέτρησης η οποία παρουσιάζει μικρή ακρίβεια. Στο σχήμα 11γ το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή, μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης η οποία παρουσιάζει σχετικά καλή ακρίβεια. Στο σχήμα 11δ το σήμα παρουσιάζει πολύ υψηλή ακρίβεια προσέγγισης, δηλαδή μετρήσιμες τιμές γύρω από την τιμή μέτρησης, και υψηλή ακρίβεια.



Σχήμα 11. Παραδείγματα διαφοροποίησης εννοιών ακρίβειας και προσέγγισης . [1]

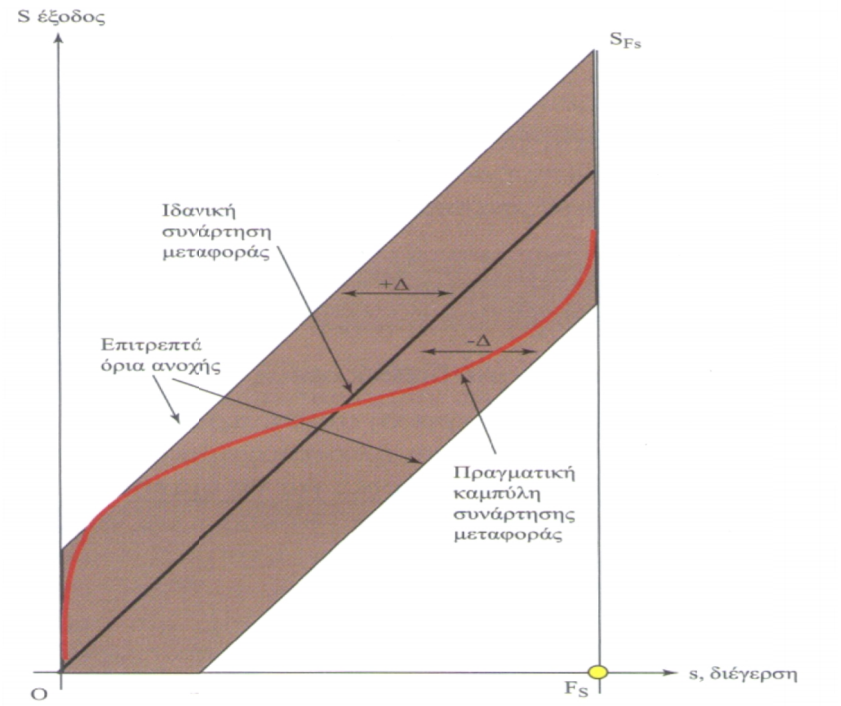
Όπως αναφέραμε, η ακρίβεια ενός συστήματος υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Στο σχήμα 12 απεικονίζεται η ακρίβεια εξόδου ενός αισθητήρα θερμοκρασίας μέσω διαγράμματος απόκλισης (deviationplot).



Σχήμα 12. Διάγραμμα καμπύλης απόκλισης. [1]

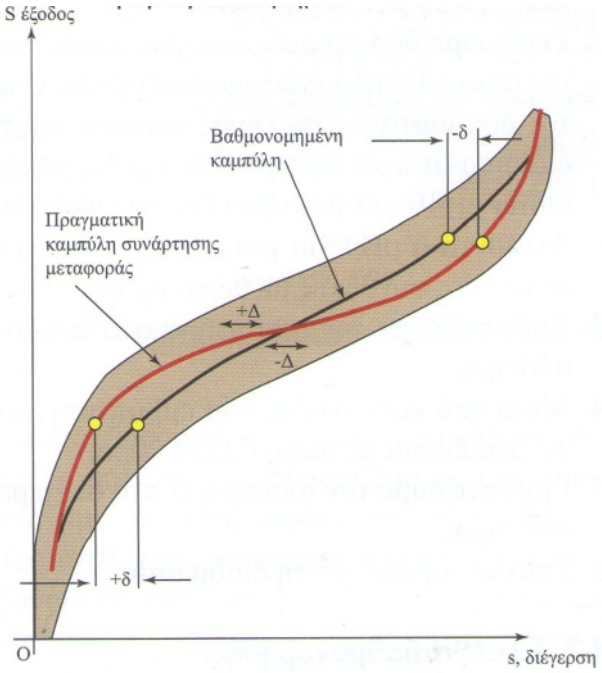
Το Σχήμα 13 παρουσιάζει την ιδανική καθώς και την πραγματική συνάρτηση μεταφοράς ενός αισθητήρα. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα, η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα αποκλίνει από την ιδανική. Η απόκλιση αυτή οδηγεί σε μη γραμμικά φαινόμενα τα οποία θα πρέπει μέσω λογισμικού ή υλικού να αντισταθμιστούν. Λόγω των μη ιδανικών υλικών η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς θα πρέπει να φέρει μικρή απόκλιση από την ιδανική συνάρτηση του μοντέλου αισθητήρα.

Τα όρια της ακρίβειας συνήθως δηλώνουν το μέγεθος του σφάλματος της χρήσης του αισθητήρα σε ένα σύστημα για το οποίο η ακρίβεια είναι αυστηρή.



Σχήμα 13. Ιδανική και πραγματική συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα. [1]

Στο σχήμα 14 παρουσιάζεται απόκλιση +-Δ ενός δεύτερου αισθητήρα ο οποίος σε σχέση με τη γραφική παράσταση του πρώτου ακολουθεί πιο στενά την πραγματική συνάρτηση μεταφοράς. Η απεικόνιση αυτή τον θέτει πιο αξιόπιστο από τον πρώτο και βρίσκει εφαρμογή στο σύστημα με μικρότερα σφάλματα κατά την διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα 14. Ιδανική και πραγματική συνάρτηση μεταφοράς αισθητήρα. [1]

2.1.4.6 Βαθμονόμηση

Ο όρος βαθμονόμηση, καλιμπράρισμα (calibration) χρησιμοποιείται από τη μετρολογία για την απόδοση της ακρίβειας των φυσικών προτύπων σε σχέση με τον αισθητήρα ή τον μορφομετατροπέα που μετρά το μέγεθος. Οι διαδικασίες της βαθμονόμησης μπορούν να ελέγξουν την κατάσταση ενός αισθητήρα, ενός μορφομετατροπέα ή ενός μετατρητικού συστήματος, ώστε να εξασφαλίσουν τη σωστή λειτουργία του στοιχείου και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

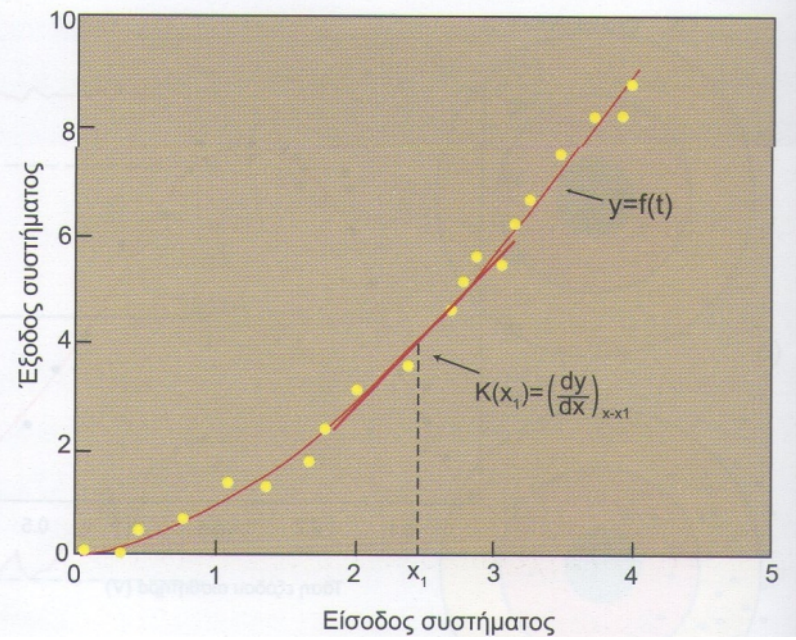
Η διαδικασία της βαθμονόμησης απαιτεί ακριβή έλεγχο των παραμέτρων, για τις οποίες ο προς πιστοποίηση αισθητήρας ή μορφομετατροπέας θα πιστοποιηθεί. Το πιστοποιητικό βαθμονόμησης που συνοδεύει κάθε αισθητήρα ή όργανο πιστοποιεί ότι το στοιχείο λειτουργεί σωστά και μετρά ορθά.

Στη μετρολογία διακρίνουμε δύο τύπους βαθμονόμησης, τη **στατική** και τη **δυναμική**. Κατά τη στατική βαθμονόμηση οι τιμές εισόδου – ερεθίσματα δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο. Αντίθετα στη δυναμική βαθμονόμηση οι τιμές εισόδου – ερεθίσματα μεταβάλλονται στο χρόνο.

Στο σχήμα 15 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης ενός αισθητήρα. Η κλίση της καμπύλης προσδιορίζει την στατική ευαισθησία ή το κέρδος του αισθητήρα απέναντι στο ερέθισμα. Η κλίση της καμπύλης δίνεται από τη σχέση:

$$K= dy/dx \qquad (2.5)$$

Όσο μεγαλύτερη μεταβολή παρουσιάζει ο συντελεστής της στατικής βαθμονόμησης, τόσο ο αισθητήρας ή το σύστημα μέτρησης παρουσιάζει φαινόμενα μη γραμμικότητας τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

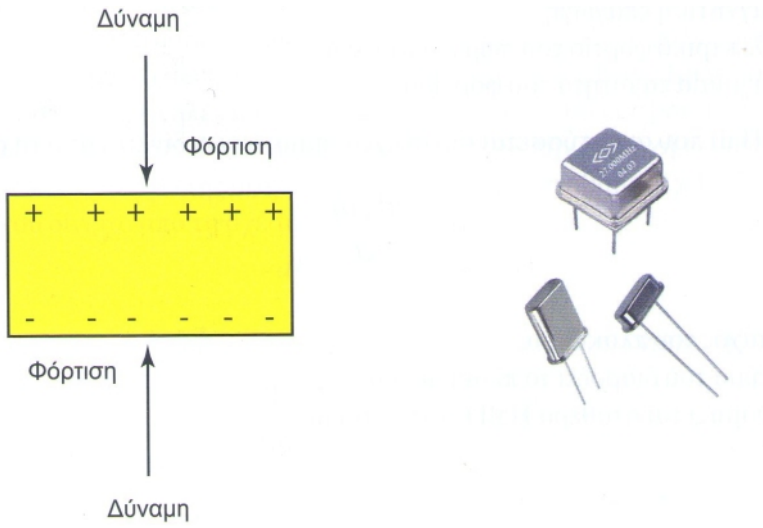


Σχήμα 15. Τυπική καμπύλη στατικής βαθμονόμισης. [1]

Η διαδικασία βελτίωσης της ακρίβειας ενός οργάνου ή ενός συστήματος μέτρησης με ένα πρότυπο όργανο γνωστής ακρίβειας καλείται **διακρίβωση**.

2.1.5 Αρχή λειτουργίας αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του στοιχείου χαλαζία όταν σε αυτόν ασκείται απότομη μηχανική δύναμη παράγεται ηλεκτρικό φορτίο στα άκρα σχήμα 16. Η εφαρμογή στατικής δύναμης πάνω στον πιεζοκρύσταλλο προκαλεί εκθετική εξασθένηση του παραγόμενου ηλεκτρικού φορτίου έως ότου μηδενιστεί. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ειδικά σχεδιασμένοι να μετρούν μη στατικές ταλαντούμενες δυνάμεις, κρούσεις ή απότομες δυνάμεις συμπίεσης/αποσυμπίεσης.

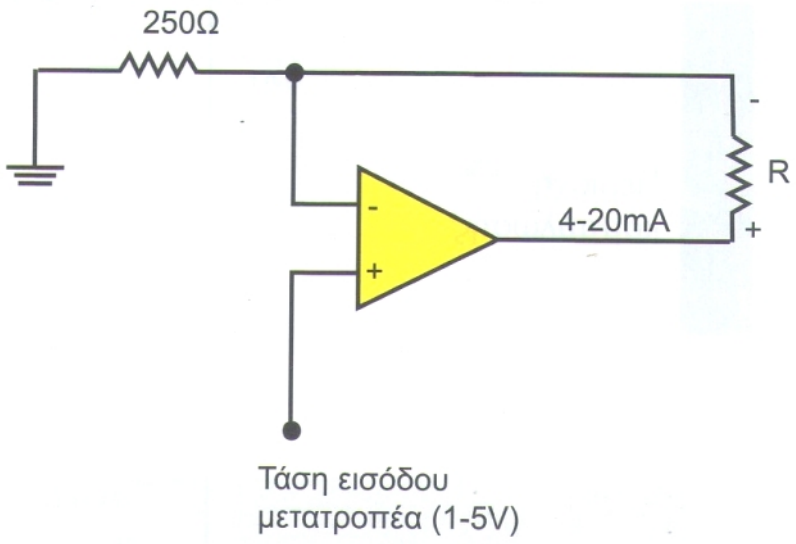


Σχήμα 16. Τυπικά δείγματα πιεζοκρυστάλλων. . [3]

2.1.6 Μετατροπέας σήματος τάσης σε ρεύμα

Για να αποφύγουμε τη χρήση μεγάλης καλωδίωσης όταν μεταφέρουμε το σήμα ενός αισθητήρα τοποθετημένου μακριά από την μονάδα καταγραφής, χρησιμοποιούμε κυκλώματα μετατροπέων τάσης σε ρεύμα με ενεργό στοιχείο σχήμα 1 γιατί απαιτείται μόνος ένας αρωγός μεταφοράς σήματος και όχι ένα ζεύγος καλωδίου. Τα κυκλώματα αυτά ενεργούν ως γραμμικές διατάξεις.

Το κύκλωμα του σχήματος 17 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση σήματος από αισθητήρα με έξοδο τάσης σε συστήματα μέτρησης το οποίο φέρει είσοδο προτύπου 4-20mA.



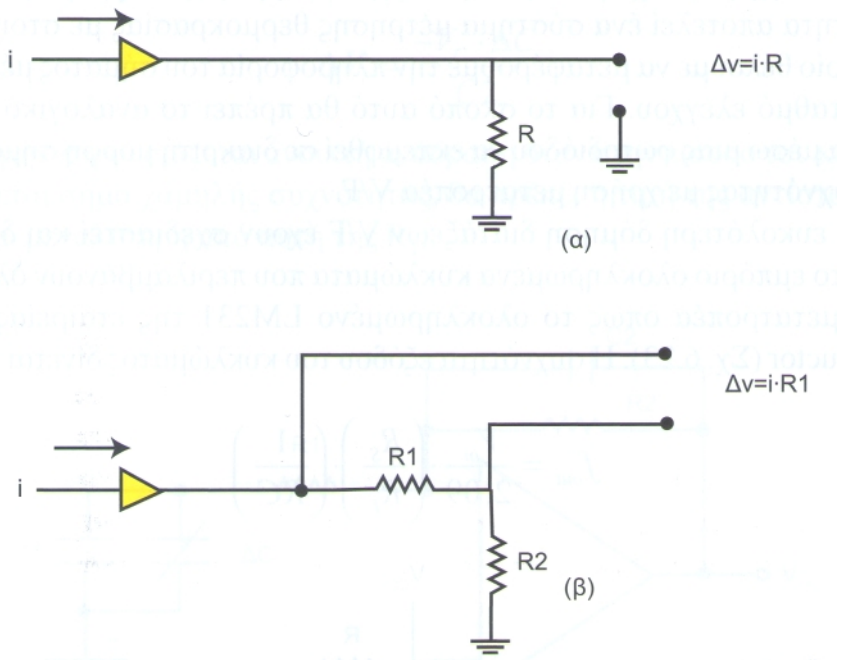
Σχήμα 17. Κύκλωμα μετατροπέα τάσης σε ρεύμα. . [3]

2.1.7 Μετατροπέας σήματος ρεύματος σε τάση

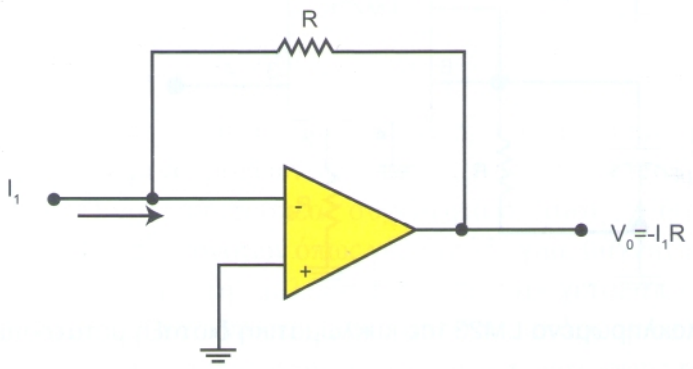
Το σήμα εξόδου των περισσότερων εμπορικών αισθητήρων κυμαίνεται σε ένα πεδίο τιμών από 4-20mA Για να μπορέσει ωστόσο να γίνει η επεξεργασία ενός τέτοιου σήματος από έναν μετατροπέα ADC, θα πρέπει να γίνει μετατροπή του ρεύματος σε τάση, Αυτό μπορει να γίνει με χρήση ενός κυκλώματος μετατροπής του ρεύματος σε τάση που λειτουργεί ως γραμμική διάταξη.

Ένα κύκλωμα μετατροπής του ρεύματος σε τάση μπορεί να είναι παθητικό ή ενεργό. Σε ένα παθητικό κύκλωμα η μετατροπή του ρεύματος σε τάση γίνεται μέσω ωμικών αντιστάσεων των οποίων η τιμή ανοχής είναι μικρότερη από 1%. Το πεδίο τιμών του ρεύματος στην έξοδο του αισθητήρα καθορίζει ανάλογα και την τιμή της αντίστασης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 18.

Ένα ενεργό κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση περιλαμβάνει διατάξεις τελεστικών ενισχυτών. Στα κυκλώματα αυτά η μετατροπή του ρεύματος σε τάση γίνεται λόγω της πολύ υψηλής αντίστασης εισόδου του ενισχυτή Σχήμα 19. Η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα καθορίζεται από το κέρδος του μετατροπέα.



Σχήμα 18. Διάταξη παθητικού μετατροπέα ρεύματος σε τάση με: α) μονοπολική, και β) με διαφορετική έξοδο. . [3]



Σχήμα 19. Κύκλωμα ενεργού μετατροπέα ρεύματος σε τάση με τελεστικό ενισχυτή. . [3]

2.2 Μέτρηση βασικών μεγεθών σε ρευστά

2.2.1 Μέτρηση παροχής

2.2.1.1 Γενικά

Οι διενεργούμενες τυπικές μετρήσεις σε πεδία ροής ενός ρευστού αναφέρονται εναλλακτικά:

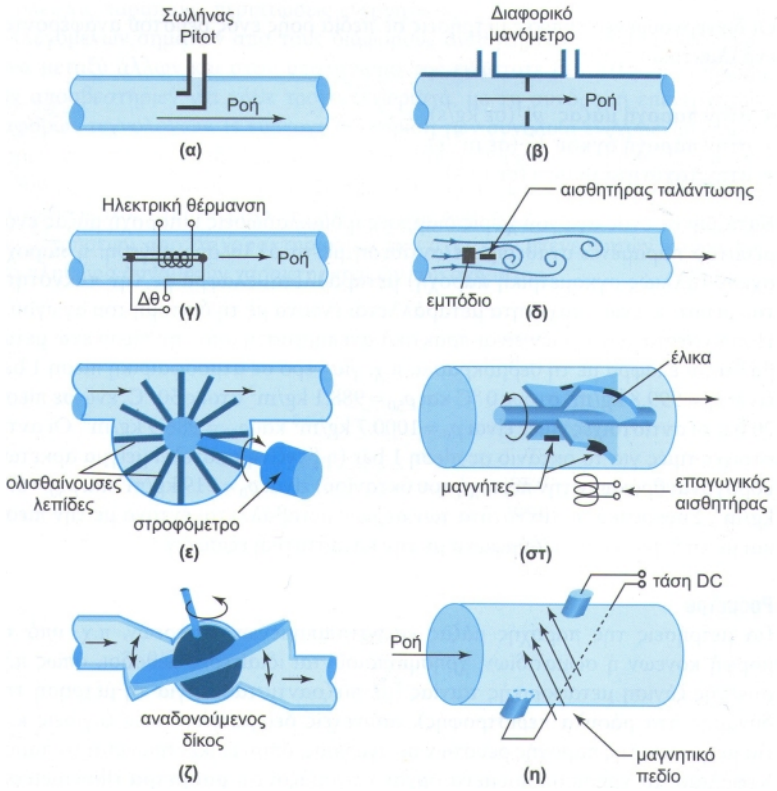
- στην παροχή μάζας m(σε kg/s),
- στην παροχή όγκου V(σεm^3/s),
- στην ταχύτητα ροής υ (σε m/s).

Κατά μήκος ενός αγωγού χωρίς διαρροές ή διακλαδώσεις η παροχή μάζας ενός ρευστού παραμένει σταθερή, σε αντίθεση με τα άλλα δύο μεγέθη: η παροχή όγκου (αλλιώς ογκομετρική παροχή) μεταβάλλεται ελαφρά με την πυκνότητα του ρευστού, ενώ η ταχύτητα μεταβάλλεται έντονα με τη διατομή του αγωγού. Η πυκνότητα των υγρών είναι πρακτικά ανεπηρέαστη από την πίεση ενώ μεταβάλλεται ελαφρά με τη θερμοκρασία: π.χ. για νερό σε ατμοσφαιρική πίεση ενώ μεταβάλλεται ελαφρά με τη θερμοκρασία: π.χ. για νερό σε ατμοσφαιρική πίεση 1 bar είναι ρ_0 =999.8kg/m^3 στους 0^{o}C και ρ_{50} =988.1kg/m^3 στους 50^{o}C, ενώ σε πίεση 20bar οι αντίστοιχες τιμές είναι ρ_o=1000.7kg/m^3 και ρ_{50}=988.9kg/m^3.Οι αντίστοιχες τιμές για το οκτάνιο σε πίεση είναι 1bar (η βενζίνη αποτελεί μείγμα αρκετών υδρογονανθράκων στην περιοχή του οκτανίου) είναιρ_0=719kg/m^3 και ρ_{50}=678kg/m^3.Συγκριτικά, η πυκνότητα των αερίων μεταβάλλεται έντονα με την πίεση και με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση.

2.2.1.2 Ροόμετρα

Για μετρήσεις της παροχής μάζας «ρευστοποιημένων» στερεών, π.χ. υπό τη μορφή κόνεων ή σωματιδίων, χρησιμοποιούνται ιδιαίτερες μέθοδοι, όπως π.χ. συνεχής ζύγιση μεταφορικής ταινίας (με πιεζοαντιστάσεις για τη μέτρηση της δύναμης στα ράουλα περιστροφής), ασυνεχείς δειγματοληπτικές ζυγίσεις κ.α. Για μετρήσεις της παροχής ρευστών σε αγωγούς, όπου επικεντρώνεται το παρόν εδάφιο, τα χρησιμοποιούμενα όργανα ονομάζονται **ροόμετρα** (flowmeters), διακρινόμενα σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **πρωτεύοντα** ροόμετρα, που βασίζονται στην άμεση μέτρηση του χρόνου διέλευσης μιας προκαθορισμένης ποσότητας του ρέοντος ρευστού, συνήθως χειροκίνητα, διακρίνοντας: α) ροόμετρα σταθερού όγκου, και β) ροόμετρα σταθερής μάζας (ή βάρους).
- **δευτερεύοντα** ροόμετρα, που βασίζονται στην έμμεση μέτρηση της παροχής μέσω επίδρασής της σε άλλο μέγεθος, όπως πίεση, ταχύτητα, θερμοκρασία, τάση, ταλάντωση κ.ά., η τιμή του οποίου συμμεταβάλλεται με την παροχή σύμφωνα με την υποκειμενική αρχή λειτουργίας του οργάνου.



Σχήμα 20. Σχηματική απεικόνιση συνήθων τύπων δευτερευόντων ροομέτρων: α) σωλήνας Πιτώ, β) διάφραγμα, γ) θερμικό, δ) δινών, ε) θετικής εκτόπισης, στ) έλικας, ζ) αναδονούμενου δίσκου, η) μαγνητικό.[2]

Προϋποθέτοντας σωστή χρήση, τα πρωτεύοντα όργανα παρουσιάζουν γενικά καλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία από εκείνη των δευτερευόντων, γι' αυτό χρησιμοποιούνται ως όργανα αναφοράς για τη ρύθμιση των δεύτερων. Το βασικό μειονέκτημά των πρωτευόντων οργάνων είναι η δυσκολία χρήσης και το ότι δεν επιδέχονται εύκολα αυτοματοποίηση. Γι' αυτό άλλωστε αναπτύχθηκαν οι διάφοροι πιο εύχρηστοι τύποι δευτερευόντων ροομέτρων, μια αντιπροσωπευτική ομάδα των οποίων εμφανίζεται στο σχήμα 20. Για ορθή λειτουργία του ροομέτρου απαιτείται η εγκατάστασή του σε τμήμα της ροής αδιατάρακτο από τύρβη, στροβιλισμούς κτλ., πολλά μάλιστα όργανα διαθέτουν στην είσοδο σχετικές διατάξεις εξομάλυνσης της ροής. Διακρίνονται οι ακόλουθες 4 κατηγορίες δευτερευόντων ροομέτρων, επισημαίνοντας ότι τα ροόμετρα των κατηγοριών (α), (β) και (γ) μετρούν παροχή όγκου ενώ της κατηγορίας (δ) μετρούν παροχή μάζας:

α. **διαφορικής πίεσης**, όπου η μεταβολή του προφίλ ταχυτήτων στο εσωτερικό ενός αγωγού προκαλεί ανάλογη μεταβολή πιέσεων, ήτοι αναλυτικά: διαφράγματος σωλήνα Ventouri, ακροφυσίου, σωλήνα Pitot, καμπύλου αγωγού, μεταβλητής διατομής, ροτάμετρο, κινητού πτερυγίου.

β. **θετικής εκτόπισης**, ήτοι αναλυτικά: παλινδρομούντος εμβόλου, περιστρεφομένων γραναζιών έκκεντρων δίσκων ή λεπίδων κ.ά.

γ. **ταχύτητας**, ήτοι αναλυτικά: έλικας, δινών, μαγνητικά, υπερήχων

δ. **μάζας**, ήτοι αναλυτικά: θερμού σύρματος, δυνάμεων Coriolis, θερμορροής κ.ά.

2.2.1.3 Ταχυτόμετρα

Είναι αξιοσημείωτο ότι τα περισσότερα από τα ροόμετρα των παραπάνω τεσσάρων κατηγοριών βασίζονται στη μέτρηση της **γραμμικής ταχύτητας** του ρέοντος ρευστού, δηλ. του ρυθμού μεταβολής της γραμμικής μετατόπισης των μορίων του. Οι περισσότερες τεχνολογίες ροομέτρων που εξετάζονται στις επόμενες παραγράφους μπορούν συνεπώς να αξιοποιηθούν και για την κατασκευή οργάνων μέτρησης της ταχύτητας ρευστών, που ονομάζονται στο παρόν σύγγραμμα **ταχυτόμετρα** (velocitymeters), προς αποφυγή σύγχυσης με τα ταχόμετρα/ταχύμετρα που χρησιμοποιούνται για μέτρηση της ταχύτητας οχημάτων όντας στη φύση τους στροφόμετρα. Αναλυτικότερα, για την κατασκευή ταχυμέτρων αξιοποιούνται οι ακόλουθες τεχνολογίες:

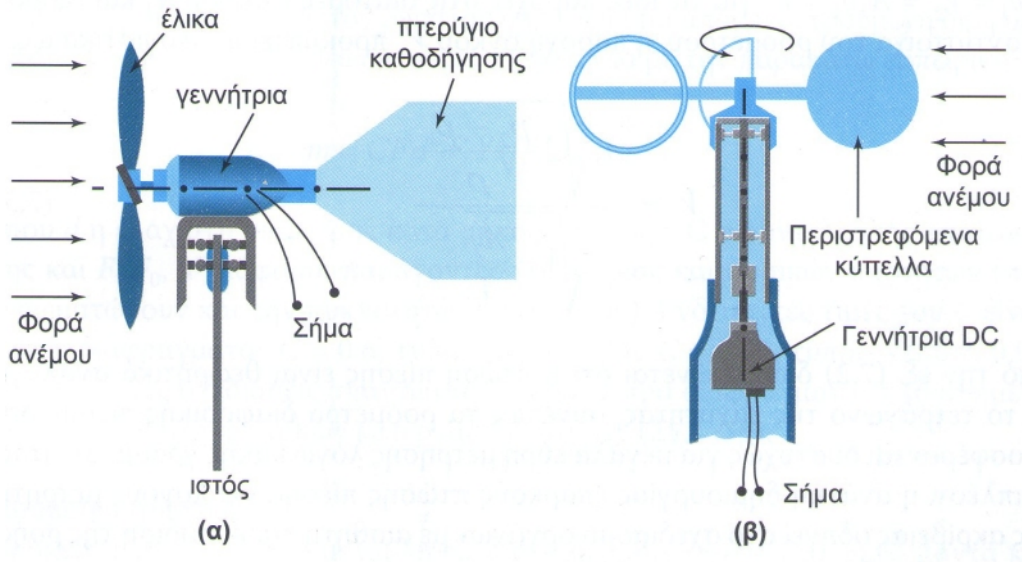
- τεχνολογίες ροομέτρων διαφορικής πίεσης,
- όλες οι τεχνολογίες ροομέτρων ταχύτητας,
- τεχνολογίες ροομέτρων θερμού σύρματος,

❖ η μαθηματική διαφόριση της μετατόπισης

Μολονότι οι διάφορες μετρήσεις ροής θα έπρεπε ιδανικά να πραγματοποιούνται ανεμπόδιστα, αμφότερα τα ροόμετρα και τα ταχυτόμετρα παρακωλύουν σε κάποιο βαθμό τη ροή, εισάγοντας ταυτόχρονα αλλοιώσεις του ροϊκού πεδίου και τοπικές πτώσεις πίεσης. Ειδικότερα, η υλοποίηση ταχυτομέτρων των πρώτων τριών κατηγοριών παρουσιάζει ασφαλώς κάποιες κατασκευαστικές διαφοροποιήσεις και απλοποιήσεις συγκριτικά με τα ομόλογα ροόμετρα, δεδομένου ότι είναι αναγκαία η οδήγηση όλης της μάζας του ρέοντος ρευστού στον αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας αλλά μόνο μιας αντιπροσωπευτικής ποσότητάς του. Π.χ. η προσαρμογή μιας έλικας οριζοντίου άξονα σχήμα 21α ή μιας διάταξης κοίλων κυπέλων κατακόρυφου άξονα σχήμα 21β σε κατάλληλο εξωτερικό ιστό συνιστούν αμφότερα διατάξεις μέτρησης της ταχύτητας του πλέοντος ανέμου με εξειδικευμένα ταχυτόμετρα, που ονομάζονται **ανεμόμετρα.**

Τα ταχυτόμετραδιαφόρισης βασίζονται στο μαθηματικό ορισμό της ταχύτητας υ ως η μεταβολή της γραμμικής μετατόπισης της Δχως προς το χρόνο Δt, ήτοι υ=Δx/Δt

Η χρονική διαφόριση της μετρούμενης γραμμικής μετατόπισης μπορεί να συντελεστεί μαθηματικά ή ηλεκτρικά, σε αμφότερες όμως τις περιπτώσεις αυξάνεται ο θόρυβος σήματος, αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της διαφόρισης. Για αυτό η μέθοδος συνδυάζεται με διάφορα φίλτρα αποθορυβοποίησης.



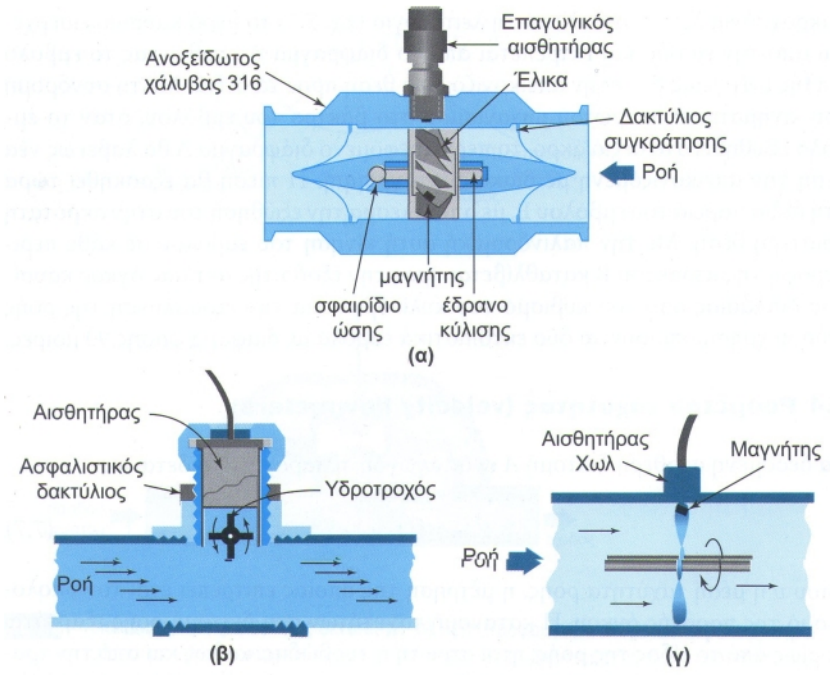
Σχήμα 21. Ανεμόμετρα τύπου: α) περιστρεφόμενης έλικας και β) περιστρεφόμενων κυπέλλων. [2]

2.2.1.4 Ροόμετρο ταχύτητας (velocityfloemeters)

Για δεδομένη σταθερή διατομή Α ενός αγωγού, η παροχή V δίδεται ως V = A υ όπου υ η μέση ταχύτητα ροής, η μέτρηση της οποίας επιτρέπει έτσι τον υπολογισμό της παροχής όγκου. Η κατανομή ταχυτήτων στη διατομή ροής εξαρτάται κυρίως από το είδος της ροής, ήτοι στρωτή ή τυρβώδης, καθώς και από την τραχύτητα των τοιχωμάτων και την εν γένει γεωμετρία του αγωγού. Με κατάλληλη βαθμονόμηση, συνήθως για τυρβώδη ροή, επιτυγχάνεται γραμμικότητα του οργάνου για εκτεταμένο εύρος μετρήσεων. Έχει αναπτυχθεί πληθώρα ροομέτρωνταχύτητας διαφορετικών τεχνολογιών και αρχών μέτρησης.

2.2.1.5 Ροόμετρα έλικας (turbineflowmeters)

Το γνωστό ανεμόμετρο των μετεωρολογικών σταθμών είναι μια τυπική μορφή ταχυτομέτρου έλικας σχήμα 21α, που περιστρέφεται σε ελεύθερο πεδίο ροής ανταλλάσσοντας ορμή και κινητική ενέργεια με τον πνέοντα άνεμο. Με εγκλωβισμό της έλικας σε αγωγό κυκλικής διατομής προκύπτει ροόμετρο (σχήμα 22), όπου η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα είναι ανάλογη με τη μέση ταχύτητα του ρευστού. Συνεπώς, γνωρίζοντας την κυκλική διατομή Α του οργάνου, υπολογίζεται για το συγκεκριμένορευστό η ογκομετρική παροχή , ενώ για άλλο ρευστό απαιτείται νέα βαθμονόμηση.



Σχήμα 22. Ροόμετρα έλικας με παλμική απαρίθμηση στροφών α) με επαγωγικό αισθητήρα β) εναλλακτική μορφή με επίπεδα πτερύγια τύπου υδροτροχού σε εγκάρσιο άξονα γ) με αισθητήρα Χωλ. [2]

Για την επίτευξη γραμμικότητας του ροόμετρου σε μια ευρεία περιοχή παροχών απαιτείται ειδική σχεδίαση των πτερυγίων της έλικας. Ειδικές μορφές έλικας μικρής αντίστασης στη ροή χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ακάθαρτων ροών,για ανθεκτικότητα στην πρόσκρουση κινούμενων σωματιδίων. Η απλοποιημένη κατασκευαστικά μορφή επίπεδων πτερυγίων τύπου υδροτροχού εγκάρσιου άξονα (impellerorpaddlewheel)παρουσιάζει μειωμένη ακρίβεια μέτρησης (σχήμα 22β), γι' αυτό χρησιμοποιείται σε μετρήσεις περιορισμένης ακρίβειας, σε μικρές ροές και ως δείκτης ροής.

Σε μηχανικά ροόμετρα έλικας π.χ. σε οικιακά υδρόμετρα, καταμετράται αθροιστικά ο διερχόμενος όγκος ρευστού, καθώς η περιστροφή μεταδίδεται υποπολλαπλασιασμένη με διαδοχικούς οδοντωτούς τροχούς σχηματίζοντας την ένδειξη με περιστρεφόμενα δεκαδικά ψηφία (παρόμοια με πληθώρα άλλων αθροιστικών μετρητών, π.χ. το συμβατικό οδόμετρο ενός οχήματος). Σε σύγχρονα όργανα ένα πτερύγιο της έλικας εφοδιάζεται με μόνιμο συμπεριστρεφόμενο μαγνήτη, κατά την περιοδική γειτνίαση του οποίου με εξωτερικό αισθητήρα, εναλλακτικά πηνίο (σχήμα 22α), αισθητήρας Χωλ (Σχήμα 22γ) ή αισθητήρας Wiegand, επάγεται ένας παλμός τάσης, που υφίσταται στη συνέχεια αθροιστική επεξεργασία. Συχνά πριν και μετά την έλικα τοποθετούνται πτερύγια εξομάλυνσης (straighteningvanes) της ροής. Ως μειονεκτήματα αναφέρονται ότι η έλικα παύει να περιστρέφεται κάτω από μια ελάχιστη παροχή λόγω της αντίστασης στατικής τριβής των εδράνων του ρότορα, καθώς και η ανάγκη συντήρησης του κινηματικού μηχανισμού, ιδιαίτερα σε ροές με έντονη απόθεση αλάτων ή διαβρωτικές. Τα ροόμετρα έλικας δεν προσφέρονται για ροές με σκληρά φερτά σωματίδια ούτε για ροές υψηλών θερμοκρασιών. Τα ροόμετρα έλικας δεν χρησιμοποιούνται σε οχήματα, κυρίως λόγω της ευπάθειάς των στους έντονους κραδασμούς και της έντονης παρεμπόδισης ροής.

2.2.1.6 Υπερηχητικό ροόμετρο Doppler

Τα Υπερηχητικά ροόμετρά Doppler αξιοποιούν το φαινόμενο Doppler. Τα υπερηχητικά ροόμετρά Doppler εκπέμπουν κύματα στο φάσμα των υπερήχων, υπό γωνία θ πάνω στο ρευστό που κινείται και λαμβάνουν την ανάκλαση των κυμάτων αυτών

Ένα μέρος της εκπεμπόμενης ενέργειας ανακλάται πάνω σε στερεά σωματίδια που υπάρχουν μέσα στο ρευστό ή στις διαχωριστικές επιφάνειες που δημιουργούν οι φυσαλίδες αέρα μέσα σε αυτό. Η ανακλώμενη ενέργεια ανιχνεύεται από τον δέκτη υπερήχων και στη συνέχεια μετριέται η διαφορά στη συχνότητα μεταξύ του εκπεμπόμενου και του λαμβανόμενου σήματος (γνωστή ως συχνότητα Doppler) η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας της ροής. Η ταχύτητα του ρευστού δίνεται από τη σχέση:

$$V=c(f_T-f_R)/2f_T\cos\theta \qquad (2.6)$$

όπου

f_T: η εκπεμπόμενη συχνότητα

f_R: η λαμβανόμενη συχνότητα

ϑ: η γωνία εκπομπής, και

c: η ταχύτητα του ήχου.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι αλλαγές του προφίλ της ταχύτητας της ροής επηρεάζουν σημαντικά το ροόμετρο. Το ροόμετρο Dopplerέχει ακρίβεια που της τάξης του +_ 4%, που θεωρείται μικρή. Τα ροόμετρα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της ροής στα αέρια ή πολύ καθαρά υγρά, διότι είναι ανεπαρκής ο αριθμός σωματιδίων ή φυσαλίδων με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανακλαστεί ο υπέρηχος.

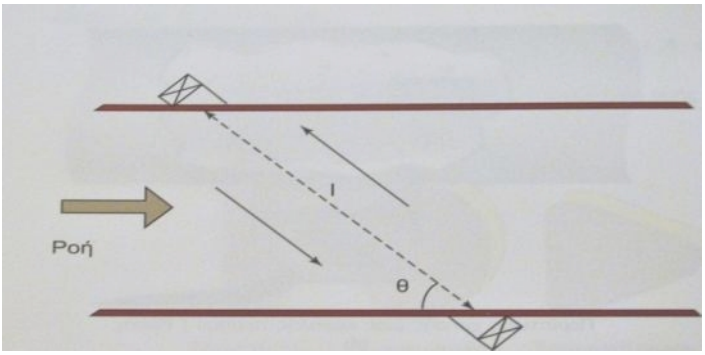
2.2.1.7 Ροόμετρο υπερηχητικού χρόνου διέλευσης

Στο σχήμα 23 απεικονίζεται η βασική αρχή λειτουργίας του υπερηχητικού ροόμετρου χρονικής διέλευσης. Κατά μήκος της πλευράς του σωλήνα τοποθετούνται δύο υπερηχητικές διατάξεις (πομπός και δέκτης) έτσι ώστε ο υπέρηχος να μπορεί να διαδοθεί κατά μήκος του ρευστού που ρέει το σωλήνα, υπό γωνία ϑ. Ο χρόνος ΔΤ που απαιτείται για ένα παλμό του υπερήχου να διαδοθεί από τον μεταδότη Α στον μεταδότη Β και αντίθετα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta T= 2lv\cos\vartheta/c^2 - v^2\cos^2\vartheta \qquad (2.7)$$

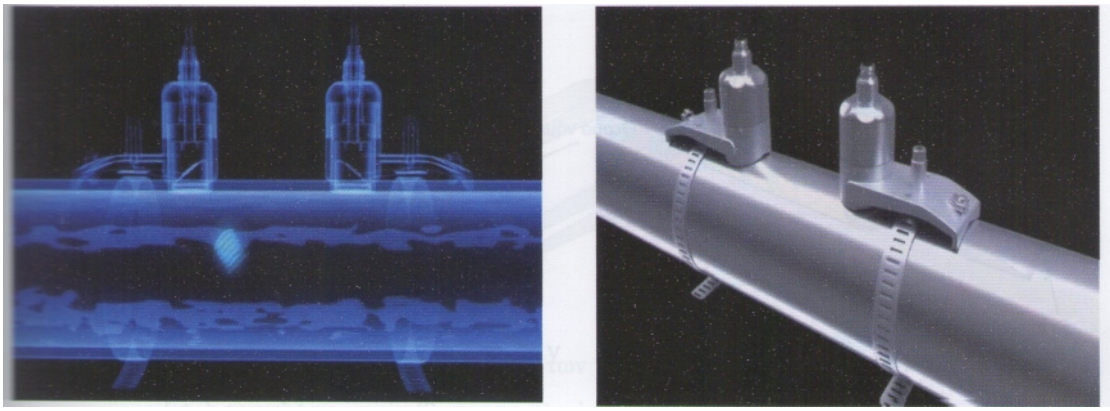
Καθώς η ταχύτητα του ήχου μέσα στο ρευστό, c, είναι πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ρευστού v, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί για τους σκοπούς της εφαρμογής και να γίνει:

$$\Delta T = 2lv\cos\vartheta/c^2 \qquad (2.8)$$



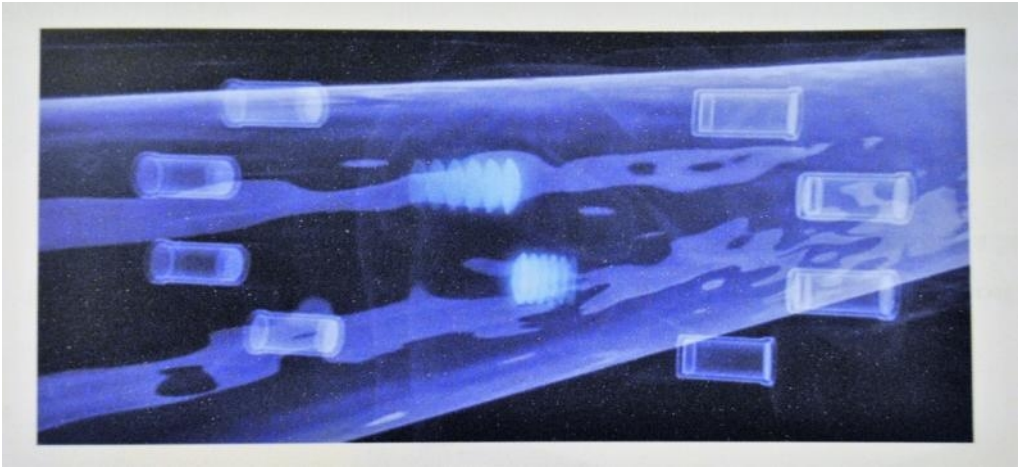
Σχήμα 23. Ροομετρικό υπερηχητικό χρόνου διέλευσης. [1]

Αυτό σημαίνει πως αν η ταχύτητα του ήχου στο ρευστό είναι σταθερή, τότε υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ ΔΤ και v. Αν και αυτή η μέθοδος είναι απλή, στην πράξη υπάρχουν δυσκολίες δεδομένου ότι ο παράγοντας ΔΤ απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ από κάποιο μικροϋπολογιστικό σύστημα. Τα υπερηχητικά ροόμετρα χρονικής διέλευσης με ένα κανάλι παρουσιάζουν σφάλματα της τάξης του +- 1%. Εναλλακτικές διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους πομποδέκτες, όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση τους σε διάταξη V, στην οποία ο υπέρηχος που εκπέμπεται από τον μεταδότη Α ανακλάται στην επιφάνεια του σωλήνα και επιστρέφει στον μεταδότη Β (Σχήμα 24)



Σχήμα 24. Ροόμετρο υπερηχητικό χρόνου διέλευσης σε διάταξη V. . [2]

Τα ροόμετρα υπερήχων μη διεισδυτικού τύπου V, περισσότερο γνωστά ως Clamponαναπτύχθηκαν για τη μέτρησης ροής χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση (διακοπή, διάτρηση, τροποποίηση κτλ.) στον αγωγό μεταφοράς για την εγκατάσταση του ροόμετρου. Η ταχύτητα της ροής v, η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, είναι η μέση ταχύτητα κατά μήκος της διαδρομής του υπέρηχου μεταξύ των δύο μετατροπέων. Συνήθως, για μέτρηση ροής με μεγάλη διακριτική ικανότητα και ακρίβεια, χρησιμοποιούμε τα ροόμετρα πολλαπλής δέσμης (Σχήμα 25). Στα ροόμετρα πολλαπλής δέσμης η μέτρηση της ταχύτητας του ρευστού από ένα σύνολο μετρήσεων αποδίδει τη μέση τιμή σε πραγματικό χρόνο. Τα σημεία που εξετάζουμε μεταξύ των ροομέτρων Vortex για την επιλογή του καταλληλότερου στην εφαρμογή μας είναι: το πεδίο τιμών της υπό μέτρησης ροής, εάν το ροόμετρο διαθέτει ενσωματωμένο καταγραφικό, η μορφή του σήματος μετάδοσης (αναλογικό ή ψηφιακό) καθώς και το πρωτόκολλο ή η μορφή του σήματος μετάδοσης (4-10mA, 0-10V) .



Σχήμα 25. Ροόμετρο υπερηχητικό χρόνου διέλευσης πολλαπλής δέσμης. . [2]

2.3.1 Μέτρηση πίεσης

2.3.1.1 Γενικά

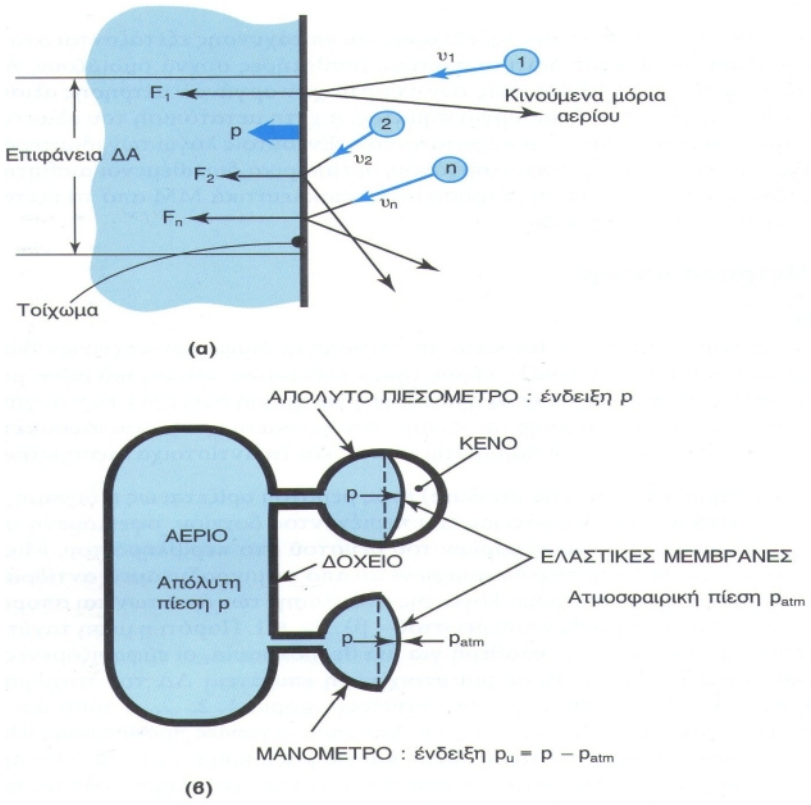
Οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία διάφορων τεχνικών διατάξεων κυμαίνονται σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, ενδεικτικά από μερικά mbar μέχρι χιλιάδες bar. Από αυτό προκύπτει η απαίτηση για χρήση διαφορετικών οργάνων σε διάφορες περιοχές μέτρησης της πίεσης, που γενικά ονομάζονται **πιεσόμετρα**. Αναλυτικότερα, ορίζονται οι παρακάτω πιέσεις και τα αντίστοιχα πιεσόμετρα:

α. Η **απόλυτη πίεση** (absolute pressure) ενός ρευστού ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται στη μονάδα επιφάνειας του περιέχοντος δοχείου, οφειλόμενη στην αέναη χαοτική πρόσπτωση μορίων του ρευστού στο περίβλημά του. Μικροσκοπικά, η απόλυτη πίεση p διαμορφώνεται από τις μικροδυνάμεις αντίδρασης που εξασκούνται στο τοίχωμα λόγω της ανάκλασης των άτακτων και σποραδικών προσπτώσεων μορίων του ρευστού –βλ. σχήμα 26α. Παρότι η μέση ταχύτητα κίνησης των μορίων είναι σταθερή για μια θερμοκρασία, οι εμφανιζόμενες μικροδυνάμειςF1, F2,…,Fnσε μια στοιχειώδη επιφάνεια ΔΑ του τοιχώματος εξαρτώνται πιθανοκρατικά για τα αντίστοιχα μόρια 1,2, …, n τόσο από τις τρέχουσες ταχύτητες $υ_1$, $υ_2$, …,$υ_n$όσο και από τις γωνίες πρόσπτωσης. Παρά την παραπάνω στοχαστικότητα, ακόμη και για μια μικρή επιφάνεια ΔΑ ο αριθμός των μοριακών ανακλάσεων n ανά πάσα στιγμή είναι πάρα πολύ μεγάλος και πρακτικά σταθερός, έτσι η επιφάνεια θα υφίσταται μακροσκοπικά ως μέση απόλυτη πίεση παρακάτω τιμή:

$$p=\Sigma F_i/A \qquad (2.9)$$

Η απευθείας μέτρηση απόλυτων πιέσεων πραγματοποιείται με το **απόλυτο πιεσόμετρο**, το ελαστικό στοιχείο του οποίου παραμορφώνεται καθώς εκτίθεται

από τη μια πλευρά στη μετρούμενη πίεση και από την άλλη στο κενό –πρόκειται για την ελαστική μεμβράνη στο σχήμα 26β.



Σχήμα 26 α) Σχηματική παράσταση των μικροδυνάμεων αντίδρασης F_1, F_2 …, F_nπου αναπτύσσονται σε στοιχειώδη επιφάνεια ΔΑ λόγω της ακανόνιστης πρόσπτωσης των μορίων 1,2, …, n ενός ρευστού, β) αρχή λειτουργίας του απόλυτου πιεσομέτρου και του μανομέτρου . [2]

β. Η απόλυτη ατμοσφαιρική πίεση p_{atm} καλείται **βαρομετρική πίεση** (barometric pressure)και μετριέται με **βαρόμετρο**, αντιστοιχώντας στο βάρος της υπερκείμενης στήλης ατμοσφαιρικού αέρα –πιο δόκιμα θα έχει ονομαστεί «αεροστατική», σε αντιστοιχία με την ομόλογη υδροστατική πίεση. Διατίθενται βαρόμετρα στήλης υγρού, σωλήνα Bourdon, πυκνωτικές διατάξεις κ.ά. Παρότι η βαρομετρική πίεση μεταβάλλεται καθημερινά στη σχετικά στενή περιοχή 990-1030 mbar περίπου, επηρεαζόμενη από διάφορα μετεωρολογικά φαινόμενα, ως τιμή αναφοράς στο επίπεδο της θάλασσας λαμβάνεται p_{atm}=1013 mbar, ενώ για υπολογισμούς μέσης ακρίβειας μπορεί να λαμβάνεται p_{atm} = 1 bar χωρίς καν μέτρηση της τρέχουσας τιμής.

γ. Επειδή η δημιουργία και η διατήρηση του κενού παρουσιάζει σοβαρές τεχνικές δυσχέρειες, τα απόλυτα πιεσόμετρα απαντώνται σπάνια. Στην πράξη για τη μέτρηση της πίεσης ρευστών που περιέχονται σε κλειστές διατάξεις χρησιμοποιείται το **μανόμετρο**, η ελαστικήμετρητική επιφάνεια του οποίου υφίσταται από τη μια πλευρά τη μετρούμενη πίεση p και από την άλλη

ατμοσφαιρική πίεση p_{atm}–βλ. σχήμα 26β . Η ένδειξη του μανομέτρου p_uαποκαλείται **μανομετρική πίεση**(gaugepressure) και αντιστοιχεί σε υπερπίεση, δηλαδή στη διαφορά της απόλυτης πίεσης p και της βαρομετρικής πίεσης p_{atm}:

$$p_u = p - p_{atm} \qquad (2.10)$$

όπου η βαρομετρική πίεση λαμβάνεται p_{atm}=1013 mbar = 1.013 bar

Η απόλυτη πίεση υπολογίζεται συνεπώς αθροιστικά ως:

$$p = p_u + p_{atm} \qquad (2.11)$$

δ. Εφαρμογές άμεσης μέτρησηςτης διαφοράς άμεσης πίεσης μεταξύ των δύο χώρων κατασκευάζονται πιεσόμετρα διαφορικής πίεσης, τα αποκαλούμενα **διαφορικά πιεσόμετρα**. Τα πιεσόμετρα αυτά διαθέτουν δύο εισόδους για την προσαγωγή των δύο πιέσεων των αντίστοιχων χώρων σε αισθητήρα διπλής ενέργειας, π.χ. εκατέρωθεν των παρειών ενός ελαστικού διαφράγματος, συνεπώς η ένδειξη αντιστοιχεί στη διαφορά των πιέσεων.

Στη συνέχεια εξετάζονται διάφορα πιεσόμετρα, που με κριτήριο την αρχή λειτουργίας του μετατροπέα κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. **στήλης υγρού** (υδραυλικοί μετατροπείς)
2. **ελαστικής παραμόρφωσης** (ελαστομηχανικοί μετατροπείς), και
3. **ηλεκτρομηχανικά** (διάφοροι μετατροπείς)

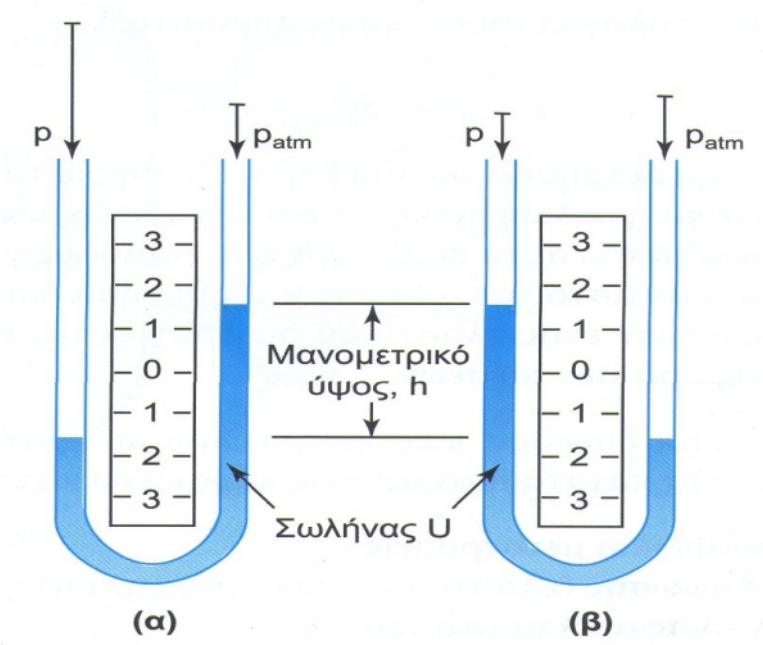
2.3.1.2 Μανόμετρα στήλης υγρού

Για μέτρηση μικρών υπερπιέσεων ή υποπιέσεων χρησιμοποιούνται τα μανόμετρα στήλης υγρού. Αυτά απαντώνται συνήθως με τη μορφή βαθμονομημένου **σωλήνα U** σταθερής διατομής, το ένα άκρο του οποίου επικοινωνεί ελεύθερα με την ατμόσφαιρα πίεσης p_{atm}ενώ το άλλο συνδέεται με το χώρο μέτρησης της πίεσης p. Το περιεχόμενο υγρό στο σωλήνα U πρέπει να είναι μη πτητικό (ειδικά για τη μέτρηση υποπιέσεων) και χρωματισμένο για εύκολη ανάγνωση. Με βάση τη θετική (ή αρνητική) διαφορά μανομετρικού ύψους hτων δύο σταθμών του υγρού στο σωλήνα U του σχήματος 27 προκύπτει η μανομετρική πίεση p_u (κατά περίπτωση υπερπίεση ή υποπίεση) ως:

$$p_u = p - p_{atm} = \rho g h \qquad (2.12)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υγρού του βαθμονομημένου σωλήνα και g= 9.81 m/s^2η επιτάχυνση βαρύτητας. Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, για νερό (ρ=1000kg/m^3)προκύπτει:

- στήλη ύψους 10m αντιστοιχεί σε πίεση $0.981 \cdot 10^5$ Pa ή 0.981 bar (προσεγγιστικά, 1bar),
- στήλη ύψους 1mm αντιστοιχεί σε πίεση 9.81 Pa.



Σχήμα 27. Μανόμετρο στήλης υγρού: α) θετική μανομετρική πίεση $p_u = p > p_{atm}$ β) αρνητική μανομετρική πίεση p_u $(p < p_{atm})$. [2]

Τα μανόμετρα στήλης υγρού δεν προσφέρονται πρακτικά για μετρήσεις πιέσεων πάνω από 1 bar, ακόμη και με στήλη υδραργύρου. Η χρήση τους για μέτρηση πιέσεων μικρότερων των 50 Pa παρουσιάζει επίσης προβλήματα μειωμένης ακρίβειας, λόγω μικρού μανομετρικού ύψους. Στην τελευταία περίπτωση η αναγνωσιμότητα μπορεί να βελτιωθεί με κεκλιμένη βαθμονομημένη κλίμακα. Για λόγους αναγνωσιμότητας το υγρό εκλέγεται με κριτήριο την πυκνότητα του ως εξής: μεγάλη πυκνότητα για πιέσεις μεγαλύτερες από 100 mbar(πχ. νερό, αλκοόλ κ.ά.).

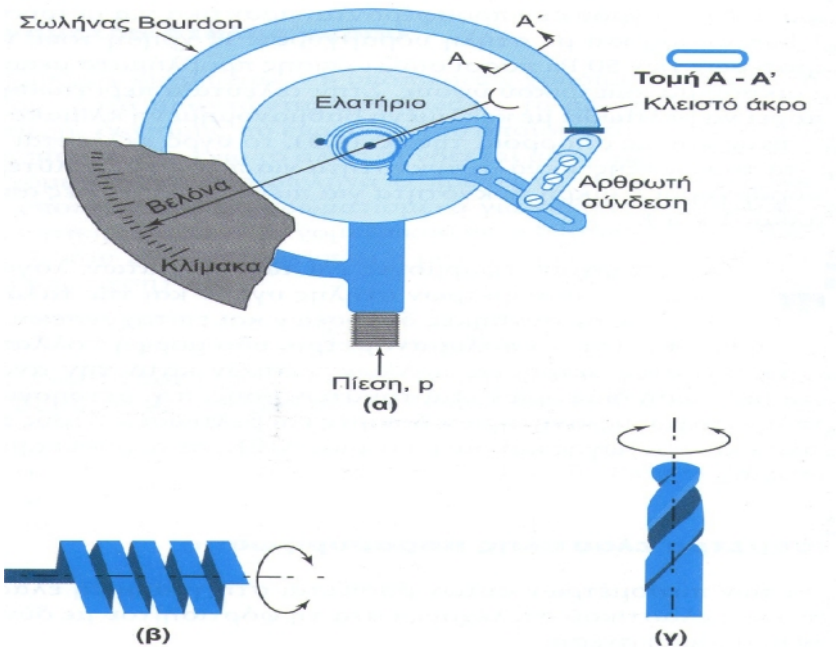
Δεν υπάρχουν εφαρμογές επί των οχημάτων, λόγω της ευπάθειας των μανομέτρων στήλης υγρού και της ταλάντωσης της ένδειξης σε συνθήκες δονήσεων και επιταχύνσεων. Εκτός οχήματος όμως χρησιμοποιείται το **πολυμανόμετρο**, υπό μορφή πολλαπλών σωλήνων U, για ταυτόχρονες μετρήσεις πολλών πιέσεων κατά την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τη βελτίωση διάφορων εξαρτημάτων ροής, πχ. μετρήσεις υποπίεσης εισαγωγής κινητήρων, δοκιμές και βελτιώσεις στους αεραγωγούς εισαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων μιας ΜΕΚ, σε αεροδυναμικές μελέτες αμαξωμάτων κ.ά.

2.3.1.3 Πιεσόμετρα ελαστικής παραμόρφωσης

Η λειτουργία των πιεσόμετρων αυτών βασίζεται στη γραμμική ελαστική παραμόρφωση Δl ενός ελαστικού στελέχους κατά τη φόρτισή του με δύναμη F, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: Δl=SF

όπου η σταθερά αναλογίας του οργάνου συνδέεται με την αντιστοιχούσα σταθερά ελατηρίου k με τη σχέση : S = 1/k. Ο πιο βασικός τύπος πιεσόμετρων ελαστικής παραμόρφωσης είναι τύπου σωλήνα Bourdon (Bourdon tube)

Διαθέτουν ένα μεταλλικό σωλήνα ελλειπτικής ή παρόμοιας διατομής, σε σχήμα κυκλικού τόξου (Σχήμα 28α) ή συνεστραμμένης ταινίας (Σχήμα 28γ). Ο σωλήνας είναι κλειστός στο ελεύθερο άκρο ενώ το άλλο είναι πακτωμένο και συγκοινωνεί με το χώρο μέτρησης. Η εφαρμοζόμενη υπερπίεση είναι τείνει να αυξήσει την ακτίνα καμπυλότητας του σωλήνα, δηλ. να τον «ανοίξει». Η σχετικά μικρή μετατόπιση του ελεύθερου άκρου του σωλήνα ενισχύεται συχνά με κινηματικό σύστημα μοχλών, κρεμαγιέρας και οδοντωτού τροχού, για να καταστεί τελικά ορατή ως περιστροφή της βελόνας του οργάνου σε βαθμονομημένη κλίμακα. Για μεγαλύτερη ευαισθησία η γωνία περιέλιξης του σωλήνα Bourdon μπορεί να υπερβαίνει την τιμή 2π δηλ. ο σωλήνας περιελίσσεται σε περισσότερες από μία σπείρες (σπιράλ): οι σπείρες μπορεί να είναι ομοεπίπεδες, π.χ. σε βαρόμετρα ή όχι (Σχήμα 28β). Η σημαντικά ενισχυμένη γωνιακή παραμόρφωση μπορεί τότε να μεταμορφωθεί άμεσα σε δευτερεύοντα μηχανισμό μέτρησης, όπως μηχανική βελόνα, ποτενσιόμετρο



Σχήμα 28 Κατασκευαστική διαμόρφωση μανομέτρου τύπου Bourdon α) κυκλικού τόξου β) σπειροειδούς ταινίας γ) συνεστραμμένης ταινίας. [2]

2.3 Μετρήσεις και σφάλματα

2.3.1 Εισαγωγή

Κάθε μέτρηση είναι μια διαδικασία που επηρεάζεται από πολλούς ενδογενείς αλλά και εξωγενείς προς τη μετρητική διάταξη και διαδικασία παράγοντες. Για τον λόγο αυτό, κάθε μέτρηση είναι μοναδική και είναι εξαιρετικά δύσκολο να επαναληφθεί επακριβώς γιατί είναι πολύ πιθανό οι παράγοντες που την επηρεάζουν να έχουν μεταβληθεί συν τω χρόνο. Στη συνέχεια, η αναφορά στον όρο μέτρηση παραπέμπει σε μια συγκεκριμένη μέτρηση ή σειρά μετρήσεων που πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένης μετρητικής διάταξης και διαδικασίας και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και δίνει ως αποτέλεσμα την εκτίμηση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους.

Κάθε φορά που γίνεται μια μέτρηση ενός μεγέθους είναι πολύ πιθανό η μετρούμενη τιμή να περιέχει κάποιο σφάλμα, δηλαδή να απέχει από την πραγματική τιμή του μεγέθους. Τα σφάλματα στις μετρήσεις εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Η εύρεση της πραγματικής τιμής μπορεί να είναι επίπονη εργασία και τις περισσότερες φορές δεν είναι εφικτή. Έτσι όταν γίνεται αναφορά στο αποτέλεσμα της μέτρησης κάποιου μεγέθους, αναφέρεται η βέλτιστη εκτίμηση για την τιμή του μεγέθους, συνοδευόμενη από το περιθώριο σφάλματος για τη μέτρηση αυτή και φυσικά από τις μονάδες που εκφράζουν το μέγεθος.

Έστω ότι μετράται με τη χρήσης κάποιας μετρητικής διάταξης και κάποιας μετρητικής διαδικασίας το μέγεθος x, και έστω ότι η βέλτιστη εκτίμηση για την τιμή του μεγέθους χείναι η τιμή $x_{\beta,}$ τότε μια τυπική αναφορά στο αποτέλεσμα της μέτρησης θα είναι της μορφής:

$$x=x_{\beta}\pm\delta x \quad (2.13)$$

όπου,

x_{β}= η βέλτιστη εκτίμηση για την τιμή του x, και

δx = η εκτίμηση του σφάλματος επί της βέλτιστης εκτίμησης του x, με $\delta x \geq 0$

Στην πράξη, η αναφορά της μέτρησης όπως προηγουμένως, διατυπώνει ότι το μετρούμενο μέγεθος έχει τιμή που βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές

$x_{\beta}+\delta x$ που είναι η ανώτερη εκτιμούμενη από τη μέτρηση τιμή, και $x_{\beta}-\delta x$ που είναι η ελάχιστη.

Συνοπτικά, σε κάθε αναφορά αποτελέσματος μέτρησης θα πρέπει να αναφέρονται:

- η x_{β} , δηλαδή η βέλτιστη εκτίμηση της τιμής του μεγέθους x,
- το δx, δηλαδή η εκτίμηση, του σφάλματος επί της βέλτιστης εκτίμησης του μεγέθους x, που εξ ορισμού είναι ένας θετικός αριθμός,
- και οι μονάδες που εκφράζουν το μέγεθος x.

2.3.2 Απόλυτο σφάλμα

Ως απόλυτο σφάλμα δx μιας μέτρησης, ορίζεται η απόλυτη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή x αι τη βέλτιστη εκτίμηση x_{β} της τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Δηλαδή, $\delta x = |x_{\beta} - x|$

Και άρα, $x = x_{\beta} \pm \delta x$

Το απόλυτο σφάλμα είναι πάντα $\delta x \geq 0$.

Το απόλυτο σφάλμα φέρει τις μονάδες του μεγέθους που μετράται.

Εδώ να πρέπει να γίνει μια σημαντική παρατήρηση. Κατά τη διαδικασία της μέτρησης, αυτό που αναζητείται είναι ιη πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η μετρούμενη ποσότητα ενός μεγέθους μπορεί να διαφέρει από την πραγματική τιμή, x_{π}. Η μέτρηση αναφέρει το αποτέλεσμα της εκτίμησης της πραγματικής τιμής του μεγεθους x και μια εκτίμηση για το σφάλμα δx επί της βέλτιστης εκτίμησης x_{β} της πραγματικής τιμής x_{π}. Η αναφορά ότι η τιμή του x€ $(x_{\beta} - \delta x, x_{\beta} + \delta x)$ δεν σημαίνει απαραιτήτως και x_{π}€ $(x_{\beta} - \delta x, x_{\beta} + \delta x)$.

2.3.3. Σχετικό σφάλμα

Ως σχετικό σφάλμα ε_x της μέτρησης ορίζεται ο λόγος του απόλυτου σφάλματος δx προς την απόλυτη τιμή της βέλτιστης εκτίμησης x_{β} της τιμής του μετρούμενου μεγέθους.

Δηλαδή, $$\varepsilon x = \frac{\delta}{|x\beta|} \qquad (2.14)$$

Και άρα, $$x = x_{\beta}(1 \pm \delta x / |x_{\beta}|) \qquad (2.15)$$

Το σχετικό σφάλμα είναι πάντα $\varepsilon x \geq 0$.

Το σχετικό σφάλμα είναι αδιάστατο μέγεθος,καθώς από το λόγο εx = δx/$|x_\beta|$απαλείφονται οι μονάδες.

Επίσης, το σχετικό σφάλμα μπορεί να δίνεται και ως ποσοστό % της τιμής της βέλτιστης εκτίμησης, x_β, δηλαδή:

$$εx\% = 100xδx / |x_\beta| \qquad (2.16)$$

Το *σχετικό σφάλμα* συχνά αναφέρεται ως *σχετική αβεβαιότητα* ή *σχετική ακρίβεια* ή *ανακρίβεια* της μέτρησης. Στη συνέχεια, όταν γίνεται αναφορά στο σχετικό σφάλμα θα χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο ο όρος *σχετικό σφάλμα*.

2.3.4 Συστηματικά και τυχαία σφάλματα

Τα σφάλματα στις μετρήσεις διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία:

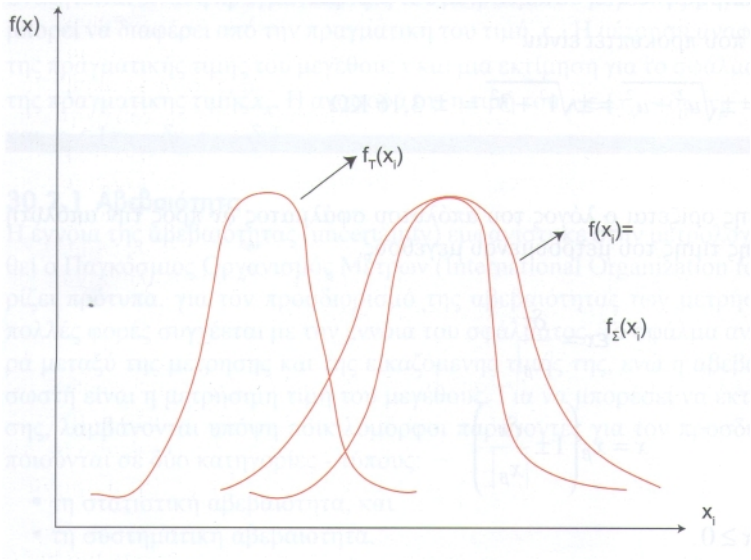
- συστηματικά καλούνται τα σφάλματα που πηγάζουν από ενδογενείς στη μετρητική διάταξη και διαδικασία παράγοντες και ως εκ τούτου, μπορούν να προβλεφθούν και, εάν είναι επιθυμητό, και εφικτό, να εκμηδενισθούν.
- Τυχαία καλούνται τα σφάλματα που δεν μπορούν να προβλεφθούν γιατί οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες κατά τη διαδικασία μέτρησης, και έτσι είναι δύσκολο να εκμηδενιστούν, εάν και είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση τους, αλλά όχι και ο εκμηδενισμός τους.

Έτσι, το συνολικό σφάλμα στη μέτρηση αποτελείται από δύο συνιστώσες, το συστηματικό και το τυχαίο σφάλμα. Άρα, ο ορισμός για το απόλυτο σφάλμα μπορεί να αναλυθεί ως :

$$δx = δx_Σ + δx_T \qquad (2.17)$$

Εάν γίνει η υπόθεση ότι τόσο το συστηματικό όσο και το τυχαίο σφάλμα ακολουθούν την κανονική (Γκαουσιανή) κατανομή πυκνότητας πιθανότητας, τότε για μια σειρά άπειρων μετρήσεων κάποιου μεγέθους θα έχουμε την κατανομή συχνότητας εμφάνισης των μετρήσεων f(x) όπως στο Σχήμα 29.

Υπό την υπόθεση της κανονικής κατανομής των τιμών άπειρων μετρήσεων μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τιμές των τυχαίων σφαλμάτων αλληλοαναιρούνται, καθώς τα πρόσημά τους και τα μέτρα τους θα έδιναν αθροιζόμενα το αποτέλεσμα 0, χωρίς έτσι να επιδρούν στη μέση τιμή της μέτρησης. Αυτό όμως δεν ισχύει για τα συστηματικά σφάλματα που εμφανίζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να έχουν είτε θετικά είτε αρνητικά πρόσημα, μεταφέροντας την κανονική κατανομή είτε προς τα δεξιά είτε προς αριστερά στον οριζόντιο άξονα, επηρεάζοντας έτσι τη μέση τιμή.



Σχήμα 29. Κανονική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας μετρήσεων . [1]

2.3.5 Μέση τιμή

Ορίζεται ως μέση τιμή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του μεγέθους χπου πραγματοποιούνται με την ίδια μετρητική διάταξη και διαδικασία για N > 0 το πλήθος μετρήσεις, με αποτέλεσμα τιμών x_1, x_2…x_N , οαριθμητικός μέσος των αποτελεσμάτων αυτών των μετρήσεων, δηλαδή:

$$\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x \qquad (2.18)$$

Υπό την ισχύ της υπόθεσης ότι η κατανομή των πιθανοτήτων των τιμών του χακολουθεί Γκαουσιανή κατανομή η μέση τιμή ταυτίζεται με τη βέλτιστη εκτίμηση x_β της τιμής του x.

$$\bar{x}=x_\beta \qquad (2.19)$$

Για τον υπολογισμό του σφάλματος της συνολικής ακολουθίας των x_1, x_2…x_Nμετρήσεων θα πρέπει να εκτιμηθεί το σφάλμα κάθε μιας από αυτές τις μετρήσεις. Δεδομένου ότι x = x_βτότε το σφάλμα της i-οστής μέτρησης θα δίνεται από τη σχέση:

$$\delta x_i=|\bar{x}-x_i| \qquad (2.20)$$

Δηλαδή, το αποτέλεσμα της μέτρησης χδιαφέρει από τη μέση τιμή x κατά τη δx. Το δx είναι εξ ορισμού θετικός πραγματικός αριθμός αλλά η διαφορά x –

x_iμπορεί να λάβει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές. Εάν αντί του σφάλματος $δx_i$λαμβανόταν η διαφορά της i-οστής μέτρησης από τη μέση τιμή x, δηλαδή:

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i \qquad (2.21)$$

τότε οι διαφορές $Δx_i$θα λάμβαναν είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές. Υπό την υπόθεση της Γκαουσιανής κατανομής το άθροισμα τους.

$$\sum_{i=1}^{N} \Delta x = 0 \qquad (2.22)$$

Θα ήταν ίσο με το 0, καθιστώντας τη μέση τιμή των σφαλμάτων όλων των N μετρήσεων και πάλι ίση με το 0.

Άρα, η κατ' αντιστοιχία με τη βέλτιστη εκτίμηση μέσω της μέσης τιμής χωρίς εύρεση και του σφάλματος των N μετρήσεων με τη χρήση του αριθμητικού του μέσου όρου, δεν θα έδινε αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, επιλέγεται η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών των μετρήσεων από τη μέση τιμή.

2.3.6 Τυπική απόκλιση

Ορίζεται ως *τυπική απόκλιση* $σ_x$μιας ακολουθίας N πλήθους μετρήσεων x_1, x_2…x_N ενός μεγέθους x, η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών $Δx_i$= x - x_iτων μετρήσεων x_1, x_2…x_N από τη μέσητιμή x.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\Delta x)^2} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{N}^{1}(\bar{x} - \chi_ι)^2} \qquad (2.23)$$

Συχνά, η μέση τετραγωνική απόκλιση αναφέρεται και ως μέση *τετραγωνική ρίζα*ή και απλά ως *απόκλιση.* Ο ορισμός της τυπικής απόκλισης παρουσιάζει τιμή $σ_x$= 0 . για την ακραία περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση για την εκτίμηση του σφάλματος μιας ακολουθίας μετρήσεων κατά την οποία γίνεται μόνο μία μέτρηση (N = 1). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος του ορισμού, χρησιμοποιείται για την τυπική απόκλιση η σχέση:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\bar{x} - x)^2} \qquad (2.24)$$

Με τη χρήση αυτής της σχέσης και χωρίς βλάβη της γενικότητας του ορισμού, ορίζεται η τυπική απόκλιση ως μέτρο της εκτίμησης του σφάλματος της ακολουθίας των N μετρήσεων.

Άρα, με τη χρήση της μέσης τιμής $\bar{x}$ και της τυπικής απόκλισης σ_x δίνεται η σχέση της εκτίμησης της βέλτιστης εκτίμησης τιμής του σφάλματος της ακολουθίας $x_1, x_2 \ldots x_N$ μετρήσεων όπως στη σχέση: $x = \bar{x} \pm \sigma_x$

όπου: $\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x$, $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\bar{x} - x_\iota)^2}$ (2.25)

<u>Βιβλιογραφία</u>

1. Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου, 2η Έκδοση- Νέα βελτιωμένη έκδοση, Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, Νικόλαος Κατέβας, TZIOLAS PUBLICATIONS
2. Τεχνολογία μετρήσεων- Αρχές και εφαρμογές, Δ. Πράπας, TZIOLAS PUBLICATIONS
3. Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων, Τεχνικές & Διατάξεις, Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, TZIOLAS PUBLICATIONS

3. Περιγραφή-παρουσίαση πειραματικής εγκατάστασης

3.1Εισαγωγή

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται μία εργαστηριακή μορφή ενός θερμορμουδραυλικού δικτύου τοποθετημένη και στερεωμένη σε ένα τροχήλατο πλαίσιο. Η εγκατάσταση περιέχει όλα τα βασικά εξαρτήματα που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μία θερμουδραυλική εγκατάσταση όπως ηλεκτρική αντίσταση για μεταφορά θερμότητας στο νερό του δικτύου, δοχείο διαστολής, κυκλοφορητή, θερμοστατική βαλβίδα, εναλλάκτη με ανεμιστήρα για απαγωγή θερμότητας από το δίκτυο στον περιβάλλοντα χώρο, ασφαλιστική βαλβίδα (2.5bar), εξαεριστικό και στραγγαλιστική βαλβίδα. Η μονάδα αρκεί να πληρωθεί με νερό μία φορά και έπειτα δεν χρειάζεται κάποια πλήρωση.

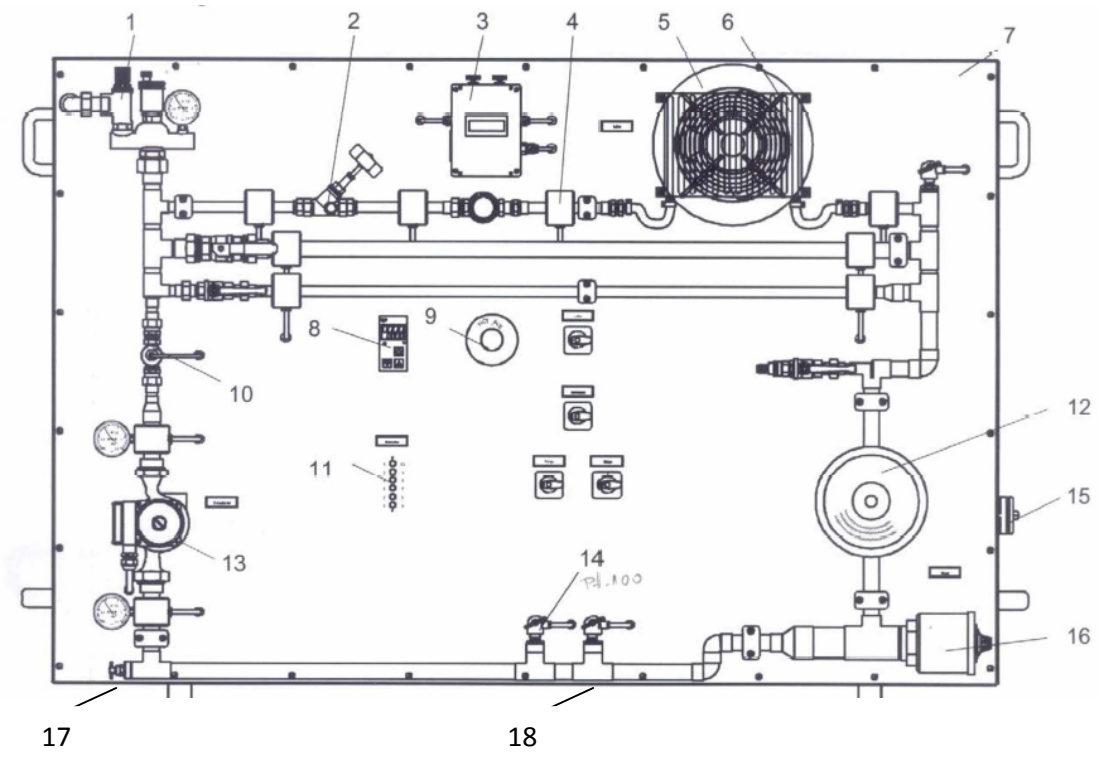
Η ύπαρξη δέκα σημείων λήψης μέτρησης πιέσεων μας βοηθά να μετρήσουμε πτώση πίεσης στα εξαρτήματα της εγκατάστασης. Επίσης, η εγκατάστασή μας έχει τρεις διακλαδώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα γεγονός που μας επιτρέπει την μέτρηση της πτώσης πίεσης σε κλάδους με διαφορετικές διαστάσεις σωλήνωσης.

Η θερμοκρασία του νερού στο δίκτυο μπορεί να παραμείνει σταθερή σε μία προκαθορισμένη τιμή μέσω ενός ελεγκτή PID. Καθορίζοντας την τιμή που επιθυμούμε ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται η ηλεκτρική αντίσταση. Επιπλέον μέτρηση θερμοκρασίας μπορεί να γίνει σε τρία σημεία. Ένα πριν την εισαγωγή του νερού στο ψυγείο (εναλλάκτης θερμότητας) ένα στην εξαγωγή του και ένα στην εξαγωγή του νερού από την αντίσταση.

Η μέτρηση παροχής γίνεται με παροχόμετρο στην κατάθλιψη του κυκλοφορητή.

Τέλος πρέπει να τονίσουμε ότι για την εγκατάσταση έχουν επιλεγεί και τοποθετηθεί εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές υδραυλικές εγκαταστάσεις.

Εικόνα 1. Πειραματική Εγκατάσταση



Σκαρίφημα 1. Σκαριφηματική διάταξη θερμοϋδραυλικής εγκατάστασης. [1]

Τα εξαρτήματα της εικόνας ένα αριθμούνται ως εξής:

1. Ασφαλιστική βαλβίδα
9. Emergency stop switch

2. Στραγγαλιστική βαλβίδα
3. Διαφορικό μανόμετρο
4. Σημείο μέτρησης πίεσης
5. Ανεμιστήρας
6. Εναλλάκτης θερμότητας
7. Πλαίσιο τροχήλατο
8. PID controller θερμοκρασίας
10. Παροχόμετρο
11. Επιλογέας σημείων μέτρησης διαφ. πίεσης
12. Δοχείο διαστολής
13. Κυκλοφορητής
14. PT-100 θερμόμετρο
15. Γενικός διακόπτης
16. Ηλεκτρική αντίσταση

3.2 Προετοιμασία της εγκατάστασης

Κατά την προετοιμασία διεξαγωγής των πειραματικών διαδικασιών διαπιστώθηκαν αρκετές αδυναμίες στο υπάρχον σύστημα, λόγω του αυτοματοποιημένου μέσω υπολογιστή χαρακτήρα του. Για αυτό το λόγο προχωρήσαμε σε κάποιες τροποποιήσεις όπως αυτές αναφέρονται παρακάτω.

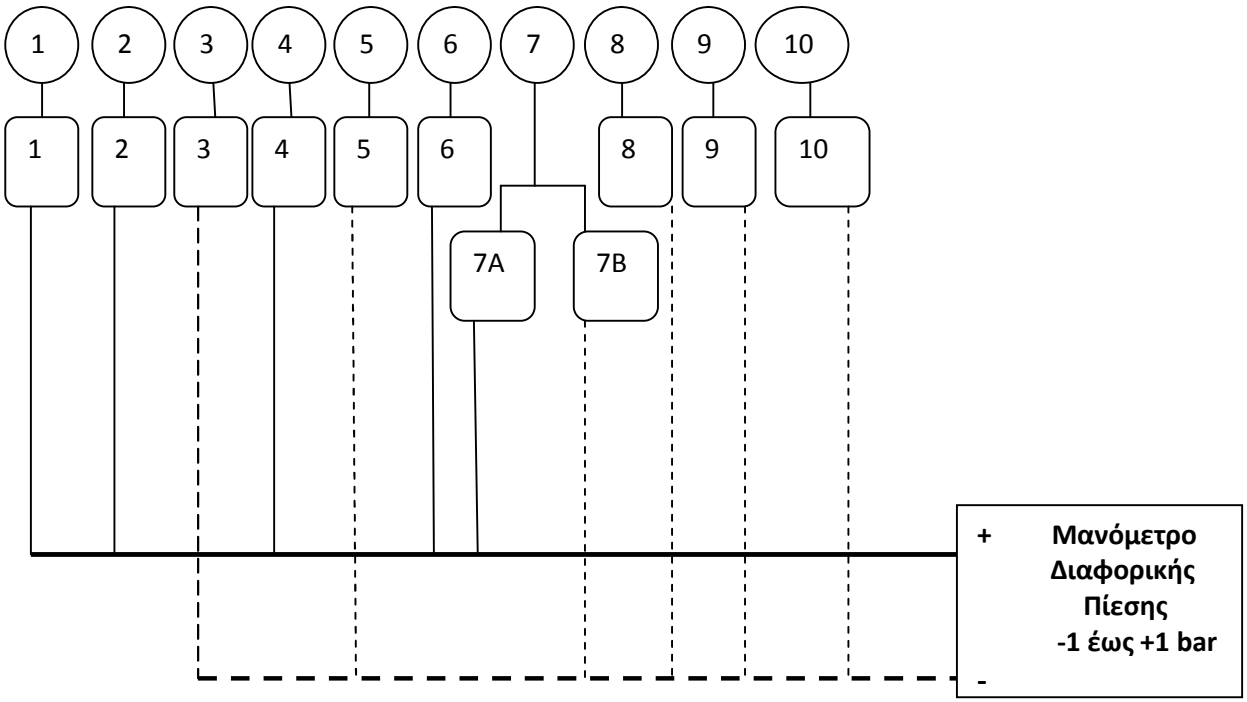
3.2.1 Καθαρισμός δικτύου

Αρχικά, ήταν απαραίτητος ο καθαρισμός εσωτερικά των σωληνώσεων του δικτύου λόγω ύπαρξης αρκετών επικαθήσεων, γεγονός που αποτρέπει την βέλτιστη ακρίβεια των τιμών παροχής, θερμοκρασίας, και πίεσης. Για τον καθαρισμό του δικτύου έγινε χρήση του χημικού Rust cleaner KL641 με χημική σύνθεση ορθοφωσφορικό οξύ 85% και βουτ-2-ινο-1,4-διόλη. Τοποθετήθηκαν από το ανώτερο σημείο της διάταξης 400ml του παραπάνω χημικού και κατόπιν έγινε πλήρωση της μονάδας με νερό μέχρι τα 2 bar. Ενεργοποιήθηκε ο κυκλοφορητής στις μέγιστες στροφές του (θέση III) και μετά την πάροδο τριών λεπτών εκκενώθηκε το σύστημα από τη βαλβίδα αποστράγγισης (17,Σκαρ. 1). Η διαδικασία εκτελέστηκε μία φορά ακόμη.

3.2.2 Σύστημα λήψεις πιέσεων

Αξίζει να αναφερθούμε εκτενώς στο τρόπο με τον οποίο αρχικά η μονάδα λάμβανε μετρήσεις διαφορικής πίεσης καθώς και οι μετέπειτα τροποποιήσεις που έγιναν. Όπως βλέπουμε στο σκαρίφημα 1 στη θέση 11 υπάρχουν έξι κομβία. Το καθένα από αυτά μας επιτρέπει τη λήψη της διαφορικής πίεσης σε δύο από τα δέκα συνολικά που υπάρχουν στην διάταξη μας. Κατά το πάτημα ενός κομβίου από τα έξι, εσωτερικά του πίνακα στέλνεται ηλεκτρικό σήμα σε δύο ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες οι οποίες ανοίγουν και επιτρέπουν στο νερό να διέλθει και να πάει στα δύο άκρα του διαφορικού μανομέτρου. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι για τη βελτίωση της εγκατάστασης καθώς οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες λόγω παλαιότητας δεν παρουσίαζαν αξιόπιστη λειτουργία παρακάμφθηκαν και το δίκτυο

λήψης πιέσεων επανασχεδιάστηκε καθώς τοποθετήθηκαν χειροκίνητες βάνες 1/8΄ σε κάθε ένα από τα δέκα σημεία λήψης πίεσης του δικτύου.



Σκαρίφημα 2. Δίκτυο λήψης πιέσεων

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το σκαρίφημα της διάταξης λήψης πιέσεων. Με κυκλικό σχήμα βλέπουμε τα σημεία λήψης του δικτύου ενώ με ορθογώνιο τις βάνες απομόνωσης. Έχουμε τη δυνατότητα να ανοίξουμε δύο βάνες κάθε φορά οι οποίες όμως δεν θα πρέπει να δίνουν νερό στον ίδιο (θετικό ή αρνητικό) κλάδο. Αξίζει να σημειωθεί το τέχνασμα που δημιουργήσαμε στο σημείο 7. Θα μας βοηθήσει το σκαρίφημα 2. Ας υποθέσουμε ότι δεν είχαμε δύο βάνες στη θέση 7 αλλά μία η οποία κατέληγε στον αρνητικό κλάδο. Εάν επιχειρούσαμε να μετρήσουμε τη διαφορική πίεση στα σημεία 6 και 7 τότε αυτό θα ήταν εφικτό. Αν όμως με την ίδια συνδεσμολογία επιθυμούσαμε τη μέτρηση μεταξύ των σημείων 7 και 8 τότε διαπιστώνουμε ότι και τα δύο σημεία οδηγούνται στον αρνητικό κλάδο. Έτσι η τοποθέτηση δύο βανών 7Α και 7Β μας απαλλάσσει από το παραπάνω πρόβλημα. Σε κανένα άλλο σημείο δεν απαιτείται η ύπαρξη δύο βανών. Τέλος αντικαταστήθηκαν όλα τα σωληνάκια με νέα της ίδιας διαμέτρου Φ6mm.

3.3.3 Αντικατάσταση Ρυθμιστικής Βαλβίδας Oventrop

Η στραγγαλιστική βαλβίδα που φαίνεται στην Εικόνα 2 διαπιστώθηκε έπειτα από ελέγχους ότι δεν λειτουργούσε ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, η παροχή που μετρούταν σε μία συγκεκριμένη θέση δεν αντιστοιχούσε στην θεωρητική παροχή που προέκυπτε από το kv στη θέση αυτή και το ΔP μεταξύ των σημείων 6 και 7. Για το λόγο αυτό, αντικαταστήθηκε με νέα βαλβίδα Cimberio DN20 787, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3

Εικόνα2. Βεβλαμμένη ρυθμιστική βαλβίδα εγκατάστασης

Εικόνα 3. Νέα στραγγαλιστική βαλβίδα

3.3.4 Κυάθια θερμομέτρων

Για τις απαιτήσεις των πειραμάτων αντικαταστάθηκαν τα κυάθια θερμομέτρων (Εικόνα 4) με δύο νέα, τα οποία είχαν εσωτερική οπή μεγαλύτερης διαμέτρου (6mm) από τα προηγούμενα, με σκοπό να προσαρμόζονται οι αισθητήρες θερμοκρασίας που θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια. Έγινε και τοποθέτηση ενός νέου κυαθίου στο σημείο πριν τον εναλλάκτη θερμότητας (ενεργειακός ισολογισμός) όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Έτσι λοιπόν έχουμε δύο κυάθια προ και μετά το εναλλάκτη θερμότητας καθώς και ένα τρίτο ακριβώς μετά την ηλεκτρική αντίσταση (18,Σκαρ. 1).

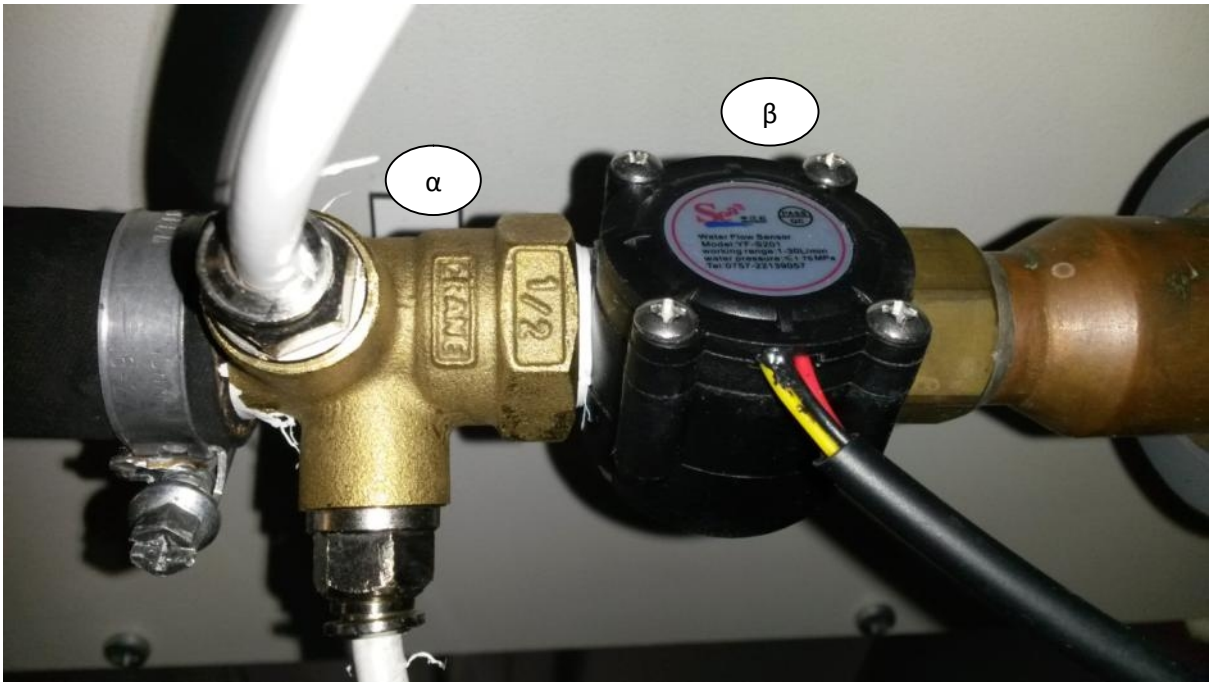
Εικόνα 4. Κυάθιο θερμομέτρου

Εικόνα 5. Κυάθιο στην εισαγωγή του εναλλάκτη

3.3.5 Αντικατάσταση Παροχόμετρου- Τοποθέτηση βαλβίδας με στένωση (orifice plate)

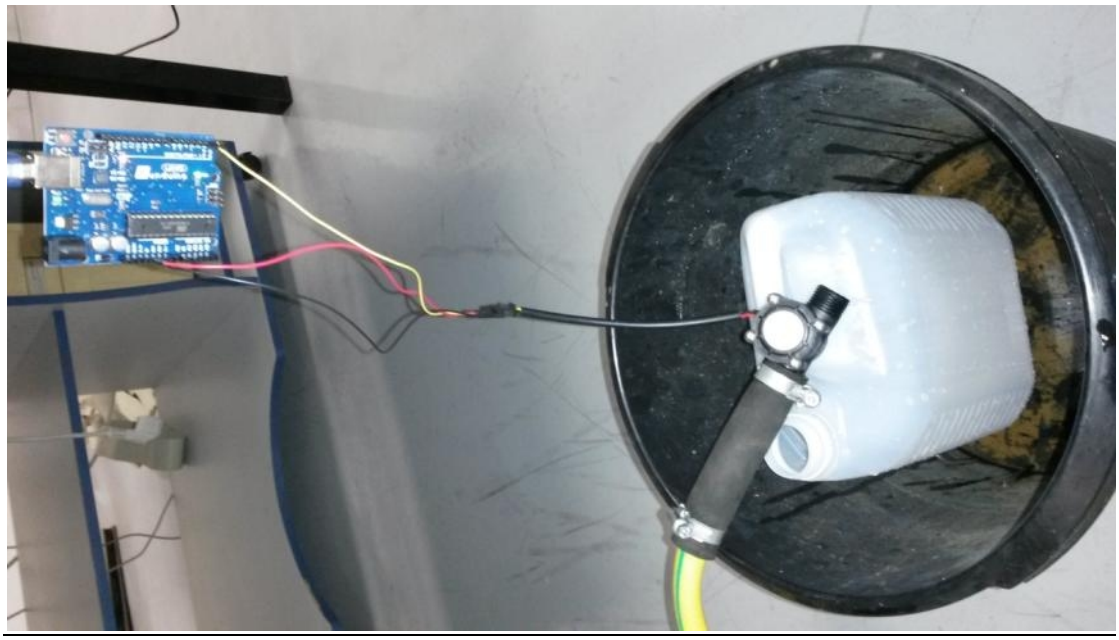
Για την μέτρηση της παροχής κάναμε αντικατάσταση του υπάρχοντος παροχόμετρου (Εικόνα 6), το οποίο βρισκόταν στη κατάθλιψη του κυκλοφορητή, με νέο (Εικόνα 7α) ώστε να είναι συμβατό με την ηλεκτρονική κάρτα και το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματά μας. Επιπλέον, για λόγους αξιοπιστίας της μέτρησης τοποθετήθηκε και μία βαλβίδα με στένωση (Εικόνα 7β) στην οποία η μέτρηση ενός ΔΡ στα δύο σημεία μεταξύ του διαφράγματος, που υφίσταται εσωτερικά, παράγει(μέσω του kv=2.2) μία τιμή της παροχής.

Εικόνα. 6 Παροχόμετρο προηγούμενης εγκατάστασης



Εικόνα 7. α) Βαλβίδα με στένωση β) Νέο Παροχόμετρο

Επιπλέον εκτελέστηκε και βαθμονόμηση του παροχόμετρου ώστε να βεβαιωθεί η ορθή απεικόνιση της παροχής. Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας (range 0-5kg)(Εικόνα 9)και ένα χρονόμετρο. Το παροχόμετρο συνδέθηκε με κατάλληλη διάταξη στο δίκτυο ύδρευσης ενώ ταυτόχρονα ήταν συνδεδεμένο στον υπολογιστή όπως φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8. Διάταξη βαθμονόμησης παροχόμετρου

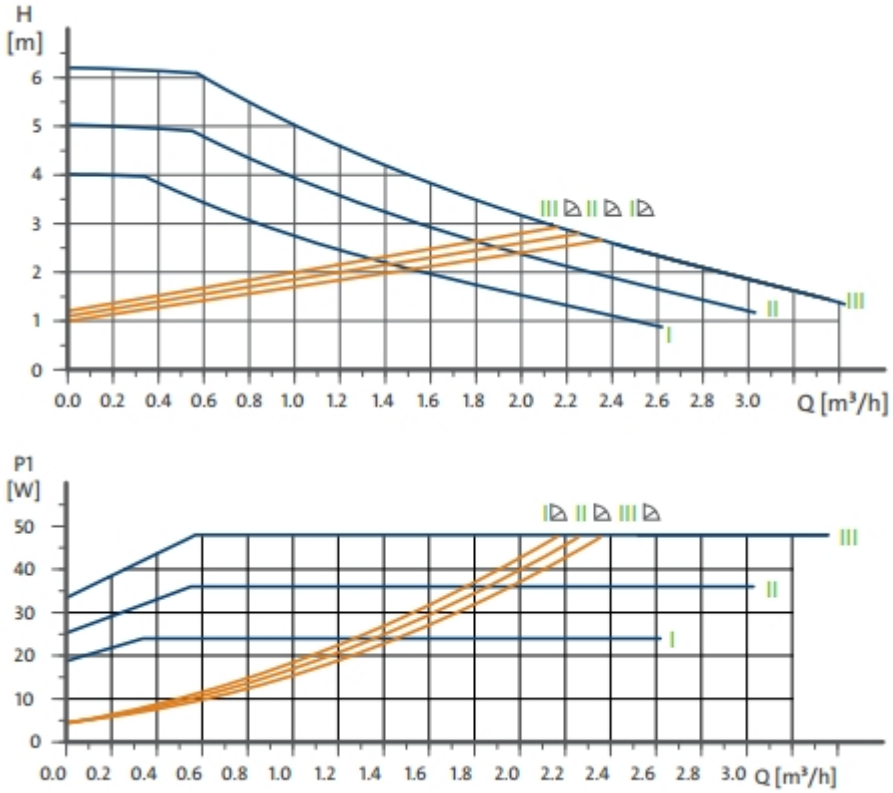
Εικόνα 9. Ζυγαριά ακριβείας

Ενεργοποιώντας την παροχή από το δίκτυο και μετά την πάροδο λίγων δευτερολέπτων στον υπολογιστή εμφανίζεται η τιμή της παροχής. Την ίδια στιγμή τοποθετούμε τη ροή από το παροχόμετρο σε ένα δοχείο το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο στη ζυγαριά ακριβείας, με ταυτόχρονη ενεργοποίηση του χρονομέτρου μας. Έτσι έχω μία τιμή για το βάρος του νερού σε ορισμένο χρόνο. Θεωρούμε πυκνότητα νερού ίση με 1kg/litre.

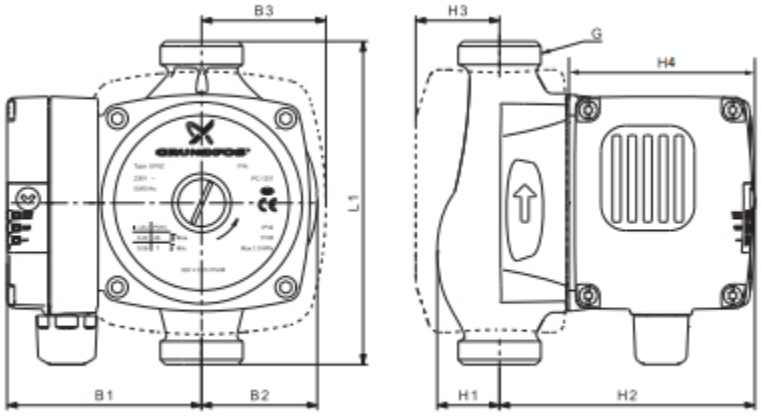
3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων

3.4.1 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κυκλοφορητή, Ρυθμιστικής Βαλβίδας και Βαλβίδας με στένωση

Κυκλοφορητής



Σχήμα 1. Χαρακτηριστικές καμπύλες κυκλοφορητή.[2]

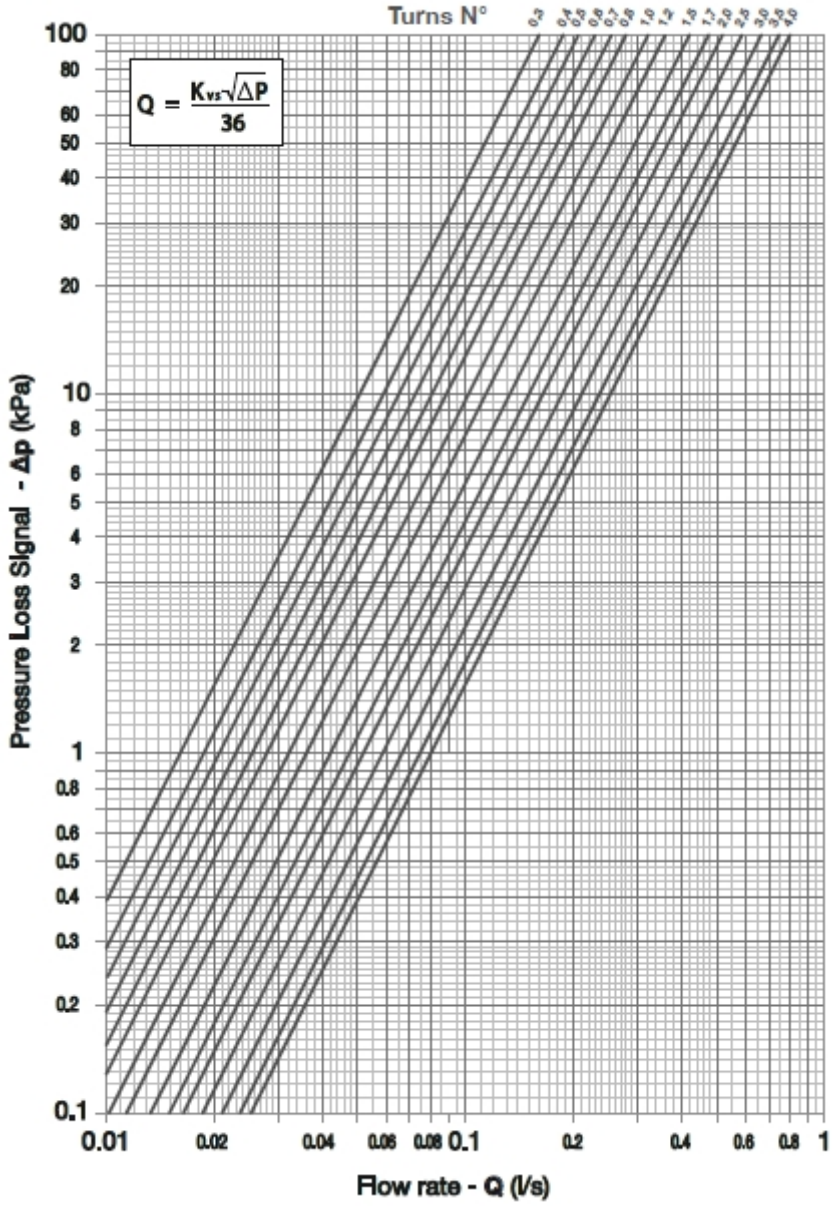


Pump type	Dimensions [mm]										Weights [kg]		Ship. vol. [m³]
	EEI ≤	L1	B1	B2	B3	H1	H2	H3	H4	G	Net	Gross	
UPS2 25-40/60	0.23	180	79	47	75	29	102	60	76	1 1/2	2.7	2.9	0.004

Speed	P1 [W]	$I_{1/1}$ [A]
Min.	7	0.06
Max.	48	0.42

Σχήμα 2. Διαστάσεις κυκλοφορητή.[2]

ΡυθμιστικήΒαλβίδα

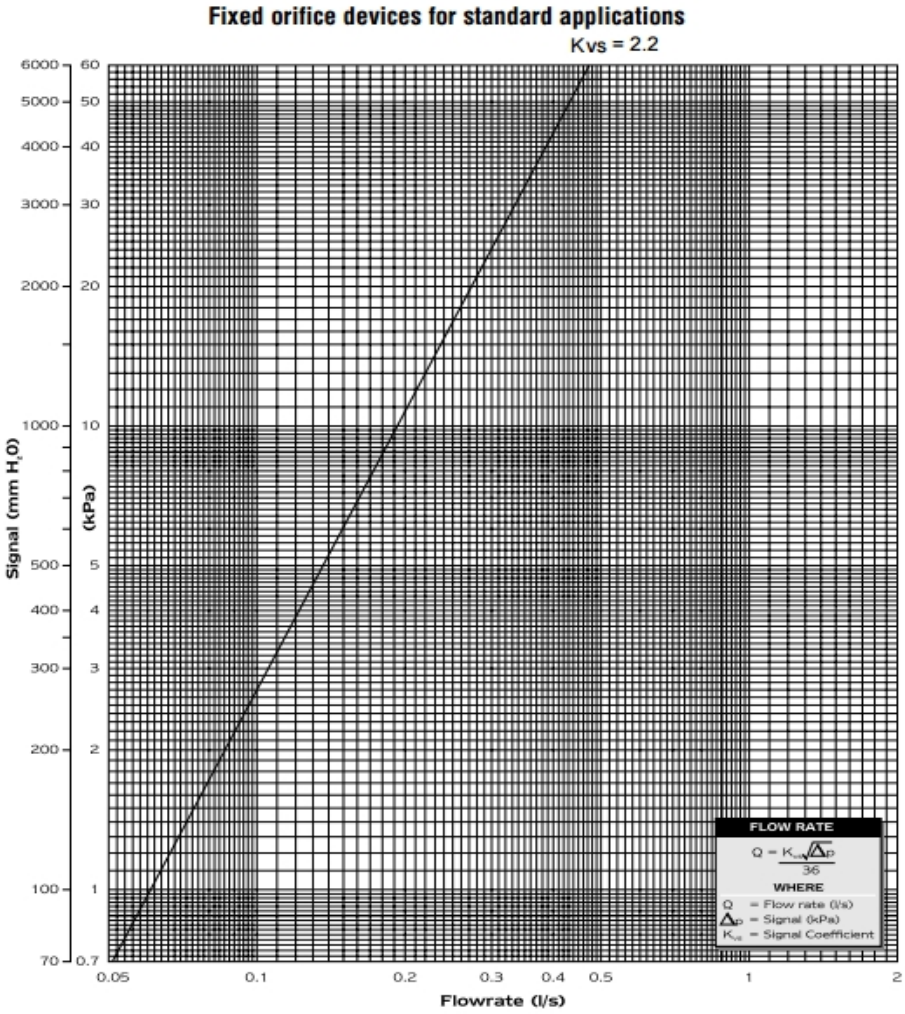


Σχήμα 3.Χαρακτηριστική καμπύλη στραγγαλιστικής . [3]

Πίνακας 1. Τιμή kv στις διάφορες θέσεις της ρυθμιστικής βαλβίδας

Kv-Kvs (Flow rate in m³/h @ 1 bar pressure drop)										
Full turn		Tenths of turn								
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	-	-	0.44	0.56	0.67	0.74	0.82	0.91	1.00	1.08
1	1.16	1.24	1.31	1.38	1.44	1.52	1.62	1.70	1.77	1.83
2	1.89	1.94	1.99	2.04	2.09	2.13	2.18	2.22	2.29	2.35
3	2.42	2.47	2.53	2.59	2.65	2.71	2.74	2.77	2.80	2.84
4	2.87									

Βαλβίδα με στένωση



Σχήμα 4. Χαρακτηριστική βαλβίδας με στένωση . [4]

3.4.2 Περεταίρω τεχνικά χαρακτηριστικά εξαρτημάτων

Κυκλοφορητής	Grundfoss UPS 25-45/60 Τροφοδοσία 220V, 50 Hz
Ηλεκτρική Αντίσταση	Ισχύς: 2000W
Ελεγκτής/ Ρυθμιστής θερμοκρασίας	Τύπος: Phillips KS 40 Resistance thermometer PT 100 Set temperature range: 0-100
Διαφορικό Μανόμετρο	Unik 5072-TA-A1-CA Εύρος μέτρησης -1 έως 1 bar
Θερμοστατική βαλβίδα	Oventrop DN 15
Ασφαλιστική Βαλβίδα	Εκτόνωση στα 2,5 bar
Παροχόμετρο	YF-S201 Τάση λειτουργίας: 5 to 18VDC Μέτρηση παροχής: 1 to 30 Liters/Minute Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας: -25 to 80°C Μέγιστη πίεση: 2.0 MPa 1/2" NPS nominal pipe connections, 0.78" outer diameter, 1/2" of thread Μέγεθος: 2.5" x 1.4" x 1.4"
Αισθητήρες θερμοκρασίας	DS18B20 Τάση λειτουργίας 3.0V- 5.5V Θερμοκρασιακό εύρος –55° έως+125°C ±0.5°C ακρίβεια από –10°C έως +85°C
Υλικά σωληνώσεων και διαστάσεις	Section I: Cu pipe 18x1mm (bottom measurement section) Section II: Cu pipe 28x1mm (middle measurement section) Other pipe: Cu pipe 28x1mm

Βιβλιογραφία

1. Instruction Manual Gunt HL 630 Heating SystemTraining Panel with PC control
2. Grundfoss UPS 25-45/60 Manual Specification
3. http://www.chryssafidis.com/files/el/data_sheets/2968xxA.pdf
4. http://www.chryssafidis.com/files/el/data_sheets/2701xxA.pdf

4. Περιγραφή συστήματος λήψης και καταγραφής μετρήσεων

4.1 Εισαγωγή

Κατά την παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια απλοποίησης της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων. Σκοπός είναι να πετύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα, όσον αφορά την ποιότητα των μετρήσεων, χωρίς όμως αυτό να εκτοξεύει το κόστος των οργάνων μέτρησης. Από τη στιγμή που το κόστος στις μέρες έχει ιδιαίτερη σημασία, μία οικονομική προσέγγιση στους αισθητήρες αλλά και στα καταγραφικά όργανα θα ήταν ότι καλύτερο.

Για τους παραπάνω λόγους το βασικό περιβάλλον στο οποίο εκτελέστηκε η παρούσα διπλωματική είναι το περιβάλλον του Arduino.

4.2 Μερικά πράγματα για το Arduino

Το Arduino είναι ένας μικροελεγκτής ο οποίος περιλαμβάνει ένα chip ATmega. Με λίγα λόγια διαθέτει εισόδους και εξόδους που αντιδρούν βάση του προγραμματισμού που κάναμε και που φορτώσαμε στο chip με τη βοήθεια του υπολογιστή. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιεί είναι η Wiring, η οποία είναι αρκετά εύκολη στη σύνταξη και διατίθεται σε πλατφόρμες Linux, MAC και Windows με αδεια χρησης GPL. Αυτό όμως που κάνει το Arduino ακόμα ποιο σημαντικό είναι ότι όλο το κύκλωμα της πλακέτας διατίθεται με άδεια χρήσης Creative Commons, πράγμα που σημαίνει ότι ο καθένας μπορεί να κατασκευάσει την δική του πλακέτα όπως αυτός θέλει. Φυσικά για τους αρχάριους το να κατασκευάσουν την πλακέτα μόνοι τους, ίσως ακουστεί λίγο τραβηγμένο, οπότε είναι ευκολότερο να αγοράσουν μια μια έτοιμη πλακέτα Arduino από το διαδίκτυο η οποία διατιθεται σε πάρα πολύ προσιτή τιμή.

Αν και μικροσκοπικό (7x5 cm) οι δυνατότητες που προσφέρει είναι πάρα πολλές. Μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε σε εφαρμογές ρομποτικής και γενικότερα σε αυτοματισμούς καταφέρνοντας έτσι πάρα πολλά όπως: την κίνηση servo, stepper και DC κινητήρων, τη λήψη πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες (θερμοκρασίας, υγρασίας, υπερύθρων κ.α), την αμφίδρομη σειριακή επικοινωνία μεταξύ Arduino και PC χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού (όπως Java και python), όπως επίσης την αναπαραγωγή και αντίληψη ήχων.

4.3 Λόγοι επιλογής Arduino

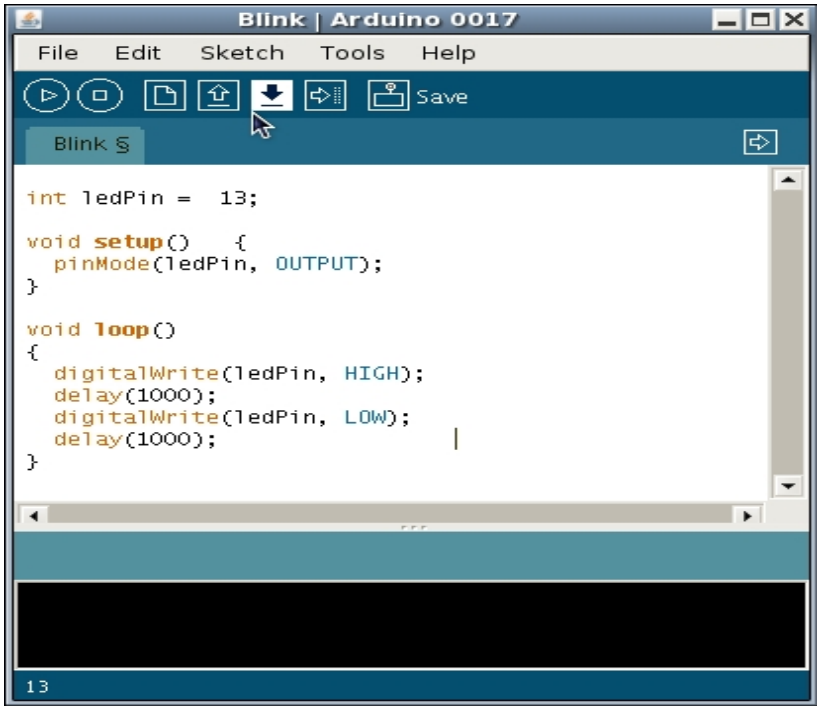
Υπάρχει πληθώρα μικροελεγκτών και αναπτυξιακών εφαρμογών στο εμπόριο για να παράξει κάποιος εφαρμογές. Το Arduino διαφέρει γιατί απλοποιεί ιδιαίτερα την διαδικασία ανάπτυξης εφαρμογών με μικροελεγκτές, και παρέχει επιπλέον πλεονεκτήματα που ενδείκνυνται για χρήση από άτομα έξω από το χώρο της πληροφορικής. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι:

- **Χαμηλό κόστος**. Τόσο το hardware που είναι από τα οικονομικότερα της αγοράς όσο και το software που είναι δωρεάν αλλά και σε μεγάλη πληθώρα καθιστούν το Arduino βέλτιστη επιλογή
- **Συμβατό με όλα τα λειτουργικά συστήματα.** Διαθέσιμο και σε Windows, Linux.Macintosh OSX
- **Απλό, ξεκάθαρο περιβάλλον προγραμματισμού.** Μπορεί να γίνει χρήση από αρχάριους χωρίς να εμποδίζεται το παραπάνω βήμα σε προχωρημένους χρήστες
- **Ανοιχτού λογισμικού που επεκτείνεται και παραμετροποιείται** το software Arduino διανέμεται με τη μορφή εργαλείων ανοιχτού λογισμικού και είναι διαθέσιμο προς επέκταση. Η γλώσσα προγραμματισμού του μπορεί να επεκταθεί μέσω βιβλιοθηκών της C++ και της AVR C που είναι για τον προγραμματισμό των Atmel μικροελεγκτών, γλώσσες στις οποίες βασίζεται το Arduino

4.4 Περιγραφή του Arduino

4.4.1 Το περιβάλλον ανάπτυξης

Το περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) (Εικόνα 1) του Arduino είναι μία πολυπλατφορμική εφαρμογή γραμμένη σε Java και βασίζετε στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Processing



Εικόνα 1. Περιβάλλον ανάπτυξης Arduino . [2]

4.4.2 Δομή προγράμματος

Ένα τυπικό πρόγραμμα του Arduino έχει την εξής δομή:

```
// δηλώσεις μεταβλητών

void setup() {
// αρχικοποιήσεις
}

void loop() {
// ...

}
```

Όπως βλέπουμε υπάρχουν δυο βασικές συναρτήσεις σε ένα τυπικό πρόγραμμα. Η συνάρτηση setup() εκτελείται στην αρχή του προγράμματος και για μία μόνο φορά. Χρησιμοποιείται για τις αρχικοποιήσεις των μεταβλητών, τις δηλώσεις των pin (αν θα είναι είσοδος ή έξοδος) και τις αρχικοποιήσεις των βιβλιοθηκών. Η συνάρτηση loop() κάνει αυτό που λέει και το όνομά της, Ο κώδικας που γράφεται μέσα στη συνάρτηση αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς δίνοντας την δυνατότητα στο πρόγραμμα μας να αλλάζει τιμές και το Arduino να ανταποκρίνεται ανάλογα.

4.4.3 Μεταβλητές

Μεταβλητή στις γλώσσες προγραμματισμού γενικά ονομάζουμε ένα γλωσσικό αντικείμενο που μπορεί να λάβει διάφορες τιμές, μία κάθε φορά. Οι τιμές μιας μεταβλητής περιορίζονται συνήθως σε ένα τύπο δεδομένων.

Οι βασικοί τύποι δεδομένων στο Arduino είναι:

1. byte: αποθηκεύει μια αριθμητική τιμή 8-bit χωρίς δεκαδικά ψηφία, παίρνουν τιμές από 0 μέχρι
255.
2. int: ακραίοι, παίρνουν τιμές από -32,768 μέχρι 32767.
3. long: μεγάλου μεγέθους ακαριαίοι, παίρνουν τιμές από -2,147,483,648 μέχρι 2,147,483,647
4. float: πραγματικοί αριθμοί, παίρνουν τιμές από 3.4×10^{-38} μέχρι 3.4×10^{38}

Τις μεταβλητές μπορούμε να τις δηλώσουμε στην αρχή του προγράμματός μας:

```
int myvariable;
```

Μπορούμε επίσης να δώσουμε αρχική τιμή στη μεταβλητή ταυτόχρονα με τη δήλωσή της:

```
int myvariable = 47;
```

4.4.4 Σταθερές

Σταθερές είναι αντικείμενα τα οποία παίρνουν μόνο μία τιμή, και δηλώνονται μαζί με τις μεταβλητές:
#define ledPin 13

4.4.5 Πίνακες – Arrays

Πίνακα ονομάζουμε διάταξη δεδομένων μιας ή περισσοτέρων διαστάσεων η οποία είναι συγκεκριμένου τύπου δεδομένων. Για παράδειγμα αν έχουμε ένα πίνακα ακραίων 5 θέσεων τον οποίο ονομάζουμε myarray τον δηλώνουμε όπως βλέπουμε παρακάτω:
int myarray[5];
Για να δώσουμε τιμή στο τέταρτο στοιχειό του πίνακα myarray γραφτούμε:
myarray[3] = 12;
επίσης μπορούμε να γεμίσουμε τον πίνακα ταυτόχρονα με την δήλωση του:
int myarray[] = {12, 45, 32, 61, 55};

4.4.6 Αριθμητικοί τελεστές

Οι αριθμητικοί τελεστές καλύπτουν τις βασικές πράξεις: πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό, διαίρεση (+, -, *, /). Για παράδειγμα μπορούμε να κάνουμε την πρόσθεση δύο ακέραιων και το αποτέλεσμά να εκχωρηθεί σε μία μεταβλητή: sum = 458 + 954;

4.5 Ρεύμα λειτουργίας

Το Arduino μπορεί να δουλέψει με ρεύμα από τη USB θύρα του υπολογιστή σας ή με αυτόνομη παροχή ρεύματος από μπαταρία. Η μονάδα παρέχει σταθερά τάση 5V στις εξόδους της. Για παροχή ρεύματος στη μονάδα από εξωτερική πηγή δέχεται τροφοδοσία από εξωτερικό βύσμα - συνιστώμενη παρεχόμενη τάση λειτουργίας είναι στα 7V έως 12V, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει και να δώσει σταθερά τα 5V στην έξοδο. Στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένη η μονάδα σας μόνιμα με θύρα USB τότε δουλεύει χωρίς πρόβλημα με τα 5V που παρέχει η USB θύρα.

4.6 Θύρες εισόδου/εξόδου (Pins)

Το Arduino Uno R3 έχει 14 ψηφιακές θύρες εισόδου ή εξόδου (digital input/outpit pins) και έξι αναλογικές εισόδους (analog input pins). Οι 14 ψηφιακές θύρες οονομάζονται με νούμερα από το 0 έως το 13, ενώ οι έξι αναλογικές με το γράμμα Α ακολουθούμενο από ένα νούμερο από 0 μέχρι το 5 (π.χ. A3). Στην έξοδο τα pins μπορούν να δώσουν 0 έως και 5V τάση. Από τις 14 ψηφιακές θύρες οι έξι, και ειδικότερα οι 3, 5, 6, 9, 10, 11, είναι και PWM θύρες (Pulse Width Modulation), δηλαδή μπορούν να προσομοιώσουν αναλογικές εξόδους.

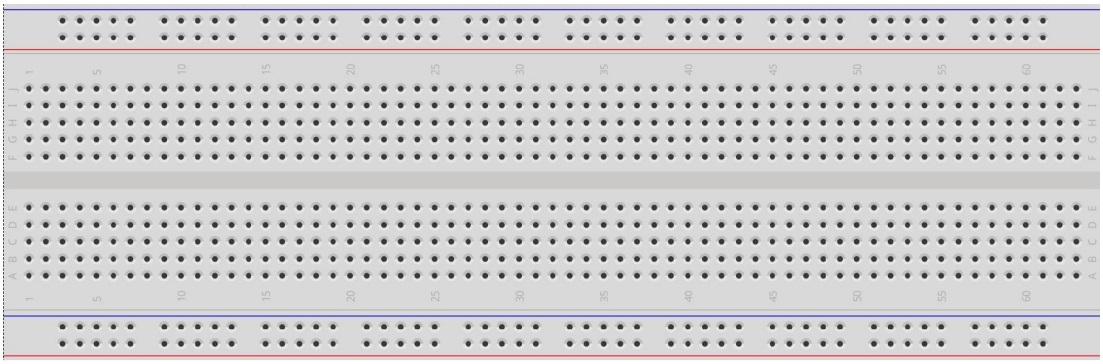
Έτσι, συνοπτικά για την είσοδο και έξοδο έχουμε:

- Για **ψηφιακή είσοδο**, χρησιμοποιούμε τις 14 ψηφιακές 0..13. Όταν δουλεύουν ψηφιακά, η είσοδος μπορεί να είναι ή 0 ή 5V, με τον χαρακτηρισμό LOW ή HIGH όπως θα δούμε παρακάτω.
- Για **ψηφιακή έξοδο**, χρησιμοποιούμε τις 14 ψηφιακές 0..13. Όταν δουλεύουν ψηφιακά, η έξοδος μπορεί να είναι 0 ή 5V, με τον χαρακτηρισμό LOW ή HIGH όπως θα δούμε παρακάτω.
- Για **αναλογική είσοδο**, δηλαδή να διαβάσουμε τιμές ρεύματος στο διάστημα 0 έως 5V, χρησιμοποιούμε τις έξι αναλογικές θύρες A0..A5.
- Για **αναλογική έξοδο**, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις έξι PWM ψηφιακές θύρες (3, 5, 6, 9, 10, 11), οι οποίες θα μας δώσουν ρεύμα εξόδου όποιας τιμή θέλουμε στο διάστημα από 0 έως 5V

Γράφοντας κώδικα θα πρέπει να αρχικοποιήσουμε τις θύρες που χρησιμοποιούμε με τη συνάρτηση pinMode(), δηλαδή να δίνουμε την πληροφορία για όποιες χρησιμοποιήσουμε αν θα είναι για είσοδο ή για έξοδο. Η συνάρτηση αυτή αναλύεται στην επόμενη ενότητα. Όταν χρησιμοποιείται η σειριακή οθόνη παρακολούθησης της επικοινωνίας με τον υπολογιστή, χρησιμοποιούνται τα pins 0 και 1 για αυτό, οπότε προτείνουμε να μην τα χρησιμοποιείτε στις εφαρμογές σας, εκτός αν αυτό είναι απαραίτητο (π.χ. δεν μας φτάνουν τα υπόλοιπα 12 pins για την εφαρμογή μας). Επίσης, στη θύρα 13 υπάρχει συνήθως συνδεδεμένο ήδη ένα Led πάνω στην πλακέτα Arduino Uno, κι έτσι μπορούμε να το χρησιμοποιούμε για σχετικές λειτουργίες.

4.7 Χρήση breadboard για συνδέσεις και βραχυκυκλώσεις

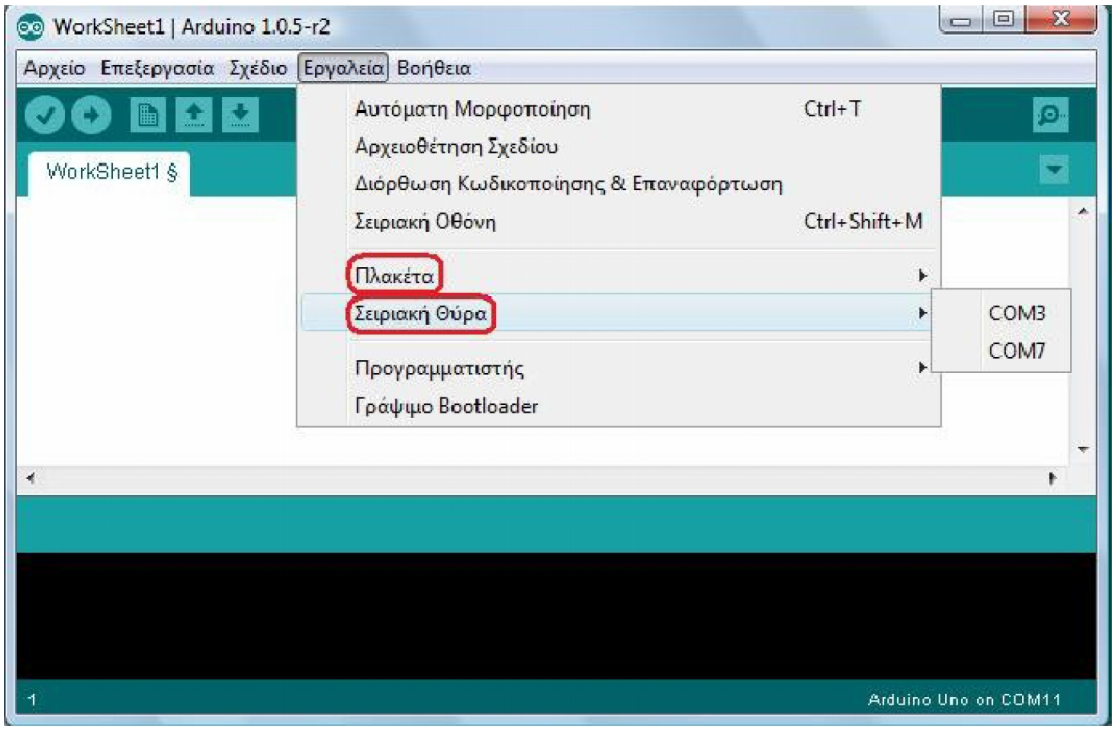
Επειδή τα κυκλώματα συνήθως περιλαμβάνουν αρκετά στοιχεία (καλώδια, leds, αισθητήρες, αντιστάσεις κτλ) προτείνεται να χρησιμοποιείται κάποια breadboard (Εικόνα 2) ώστε άνετα να συνδέονται μέσω αυτής τα στοιχεία. Επίσης, λειτουργικά η breadboard μπορεί να βραχυκυκλώνει μεταξύ τους καλώδια, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο όταν έχουμε πολλά καλώδια για βραχυκύκλωση διαφορετικά άλλωστε δεν υπάρχουν τόσες ελεύθερες είσοδοι ή έξοδοι στην πλακέτα μας. Στην παρακάτω εικόνα βλέπετε μια τυπική breadboard. Προσέξτε ότι οι οριζόντιες γραμμές + και - σε κάθε μεριά (πάνω και κάτω, με κόκκινο και μπλε χρώμα όπως την βλέπουμε) είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους, ενώ στις στήλες (που είναι συνήθως αριθμημένες από το 1 μέχρι το 30) είναι βραχυκυκλωμένες οι πέντε κάθετες υποδοχές (συνήθως με γράμματα a, b, c, d, e καθώς και f, g, h, i, j) μεταξύ τους σε κάθε στήλη όπως κοιτάμε. Έτσι, για παράδειγμα μπορούμε να συνδέσουμε στο – το GND του Arduino και στο breadboard να συνδέουμε όλες τις επιστροφές GND των κυκλωμάτων μας. Επίσης, μέσω των βραχυκυκλωμένων γραμμάτων (5 σε κάθε στήλη όπως κοιτάμε), μπορούμε να συνδέουμε τα μέρη του κυκλώματός μας.



Εικόνα 2. Breadboard. [1]

4.8 Μεταφόρτωση προγράμματος στη μονάδα μας

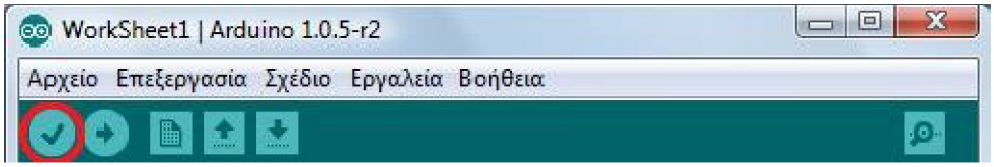
Για να μεταφορτώσουμε το πρόγραμμά μας στη μονάδα θα πρέπει να τη συνδέσουμε με ένα USB καλώδιο στον υπολογιστή. Ο υπολογιστής μας θα αναγνωρίσει τη μονάδα Arduino μας ως σειριακή θύρα, κάτι που μπορείτε να επιβεβαιώσετε και από τον πίνακα ελέγχου του Η/Υ σας.



Εικόνα 3. Επιλογή πλακέτας και θύρας. [1]

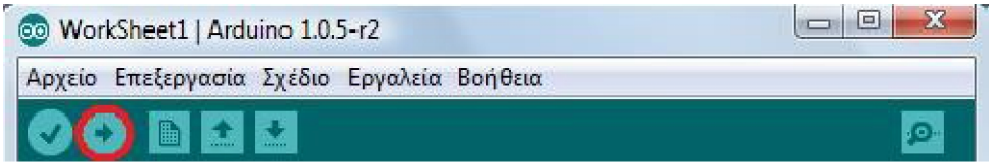
Από το μενού Εργαλεία του Arduino επιλέγουμε δύο πράγματα (Εικόνα 3):

- **Πλακέτα** - διαλέγουμε τον τύπο της μονάδας μας. π.χ. Arduino Uno
- **Σειριακή θύρα** - είναι η σειριακή θύρα που έχει αντιστοιχίσει το λειτουργικό σας στην πλακέτα Arduino που συνδέεται μέσω του USB καλωδίου. Αν χρησιμοποιείτε Windows αυτή θα είναι της μορφής COMX (π.χ. COM3, COM11), ενώ στο Linux η θύρα θα εμφανιστεί ως /dev/ttyXXX.



Εικόνα 4. Πλήκτρο μεταγλώττισης. [1]

Ακολούθως, πατάμε το πλήκτρο της μεταγλώττισης(Εικόνα 4) το οποίο θα ελέγξει το πρόγραμμά μας για λάθη και θα το προετοιμάσει για τη μεταφόρτωση στην πλακέτα. Αν τυχόν υπάρξουν λάθη, αυτά εμφανίζονται με μορφή μηνυμάτων με κόκκινο χρώμα στο κάτω μέρος της οθόνης.



Εικόνα 5. Πλήκτρο φόρτωσης προγράμματος. [1]

Τέλος, εφόσον έχουμε επιτυχώς εκτελέσει όλα τα παραπάνω, δηλαδή έχουμε συνδέσει τη μονάδα μας, έχουμε επιλέξει τον τύπο της και τη θύρα που είναι συνδεδεμένη, έχουμε γράψει κάποιο πρόγραμμα και το έχουμε μεταγλωττίσει χωρίς λάθη, μπορούμε πατώντας το πλήκτρο της φόρτωσης να μεταφορτώσουμε το πρόγραμμα πλέον στη μονάδα και αυτό να αρχίσει να τρέχει πλέον σε πραγματικό περιβάλλον. Η διαδικασία της μεταγλώττισης επαναλαμβάνεται αυτόματα στο βήμα αυτό, όπως θα δείτε.

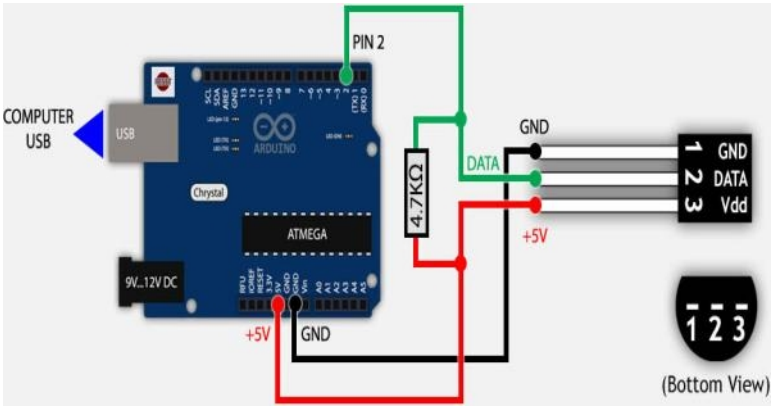
4.9 Περιγραφή αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν

4.9.1 Μέτρηση θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας κατά τις εργαστηριακές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες DS18B20 όπως φαίνονται στην εικόνα 6. Το DS18B20 είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας που παρέχει 9-bit έως 12-bit μετρήσεις στην κλίμακα Κελσίου και επικοινωνεί μέσω του 1-Wire διαύλου, ο οποίος εξ' ορισμού απαιτεί μόνο μια γραμμή, με ένα κεντρικό μικροελεγκτή. Έχει εύρος τιμών από τους - 55 έως +125 °C και ακρίβεια ±0.5 °C όταν βρίσκεται ανάμεσα στους -10 έως +85 °C. Μπορεί, επιπλέον, να λειτουργήσει παρασιτικά στο κύκλωμα (δεν επιλέγεται αυτή η σύνδεση στα δικά μας πειράματα), τροφοδοτούμενο από την γραμμή δεδομένων, με αποτέλεσμα να μην χρειαστεί εξωτερική τροφοδοσία.

Εικόνα 6. Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20. [8]

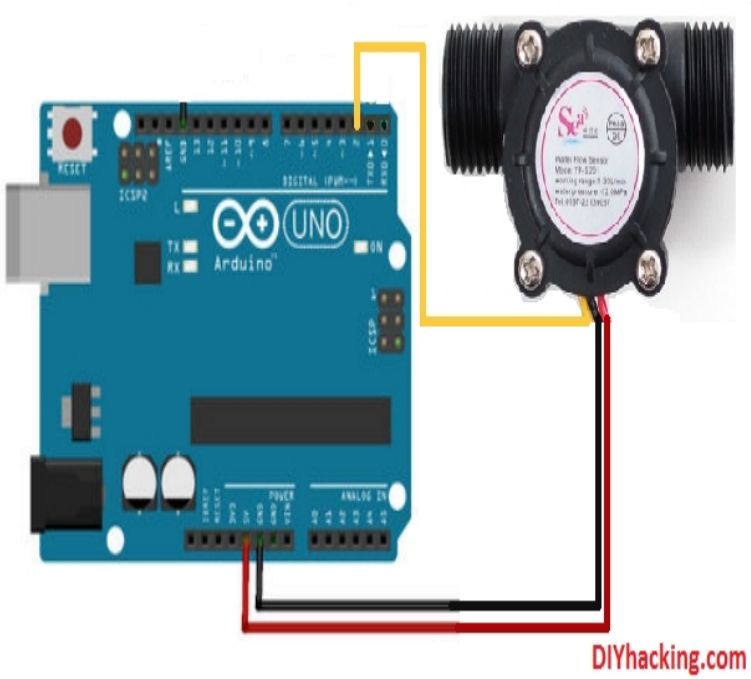
Ο παραπάνω αισθητήρας συνδέεται στην πλακέτα του Arduino κάνοντας χρήση εκτός της πλακέτας Arduino Uno, επιπλέον μίας αντίστασης 4,7kΩ όπως φαίνεται στην εικόνα 7



Εικόνα 7. Σύνδεση αισθητήρα θερμοκρασίας με την πλακέτα. [8]

4.9.2 Μέτρηση Παροχής

Η μέτρηση της παροχής στο δίκτυο εκτελέστηκε μέσω ενός παροχόμετρου που χρησιμοποιείται κατεξοχήν σε συστήματα που χρησιμοποιούν το Arduino. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μετάδοση παλμών κατά την περιστροφή μίας μικρής φτερωτής που υπάρχει στο εσωτερικό του. Η φτερωτή έχει σε κάποιο σημείο της ένα μικρό μαγνήτη ο οποίος κατά την περιστροφή του στέλνει παλμούς μέσω του καλωδίου Data (κίτρινο καλώδιο) στην πλακέτα του Arduino, και κατά συνέπεια προσδιορίζεται η ταχύτητα περιστροφής. Το πρόγραμμα που έχει φορτωθεί στην πλακέτα περιέχει τη συνάρτηση μεταφοράς για εξαγωγή της παροχής σε l/min. Η συνδεσμολογία που απαιτείται φαίνεται στην εικόνα 7.



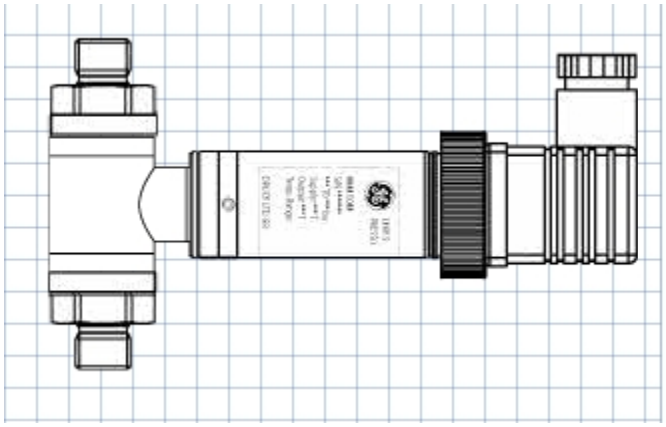
Εικόνα 7. Σύνδεση παροχόμετρου. [7]

Επιπλέον της παραπάνω διάταξης τοποθετήθηκε σε σειρά με το παροχόμετρο και μία βαλβίδα με στένωση (orifice plate), όπως αυτή περιγράφτηκε στην ενότητα 1.6.2. Η βαλβίδα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 8, συνδέεται υδραυλικά με το μανόμετρο διαφορικής πίεσης και εξάγεται επιπλέον του παροχόμετρου μία τιμή της παροχής.

Εικόνα 8. Σύνδεση βαλβίδας με στένωση για μέτρηση παροχής

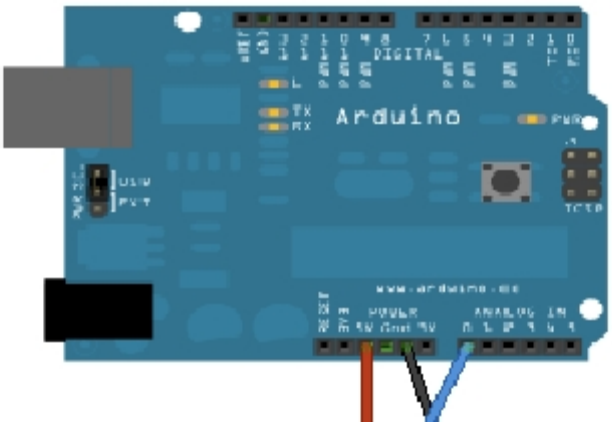
4.9.3 Μέτρηση Διαφορικής Πίεσης

Για την μέτρηση της διαφορικής πίεσης στα διάφορα σημεία της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας διαφορικής πίεσης της εταιρίας UNIK και συγκεκριμένα το μοντέλο UNIK ptx 5072 (εικόνα 9). Το μετρικό εύρος είναι από -1 έως 1 bar, και η έξοδος κατά γραμμικό τρόπο είναι 4-20mA.

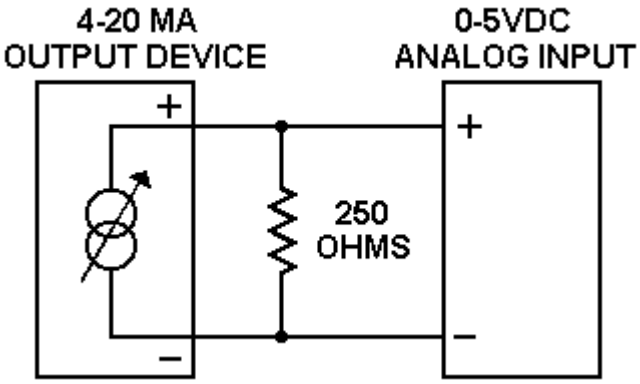


Εικόνα 9. Διαφορικό μανόμετρο UNIK ptx 5072. [6]

Η σύνδεση του στη πλακέτα του Arduino (Εικόνα 10) είναι απλή και η μόνη μικρή ιδιαιτερότητα είναι στο πρόγραμμα που θα εισαχθεί στην πλακέτα, το οποίο όμως θα αναλύσουμε εκτενώς παρακάτω, όπως επίσης και η ύπαρξη ενός μετατροπέα 4-20mA σε 0-5Volt (Εικόνα 11)



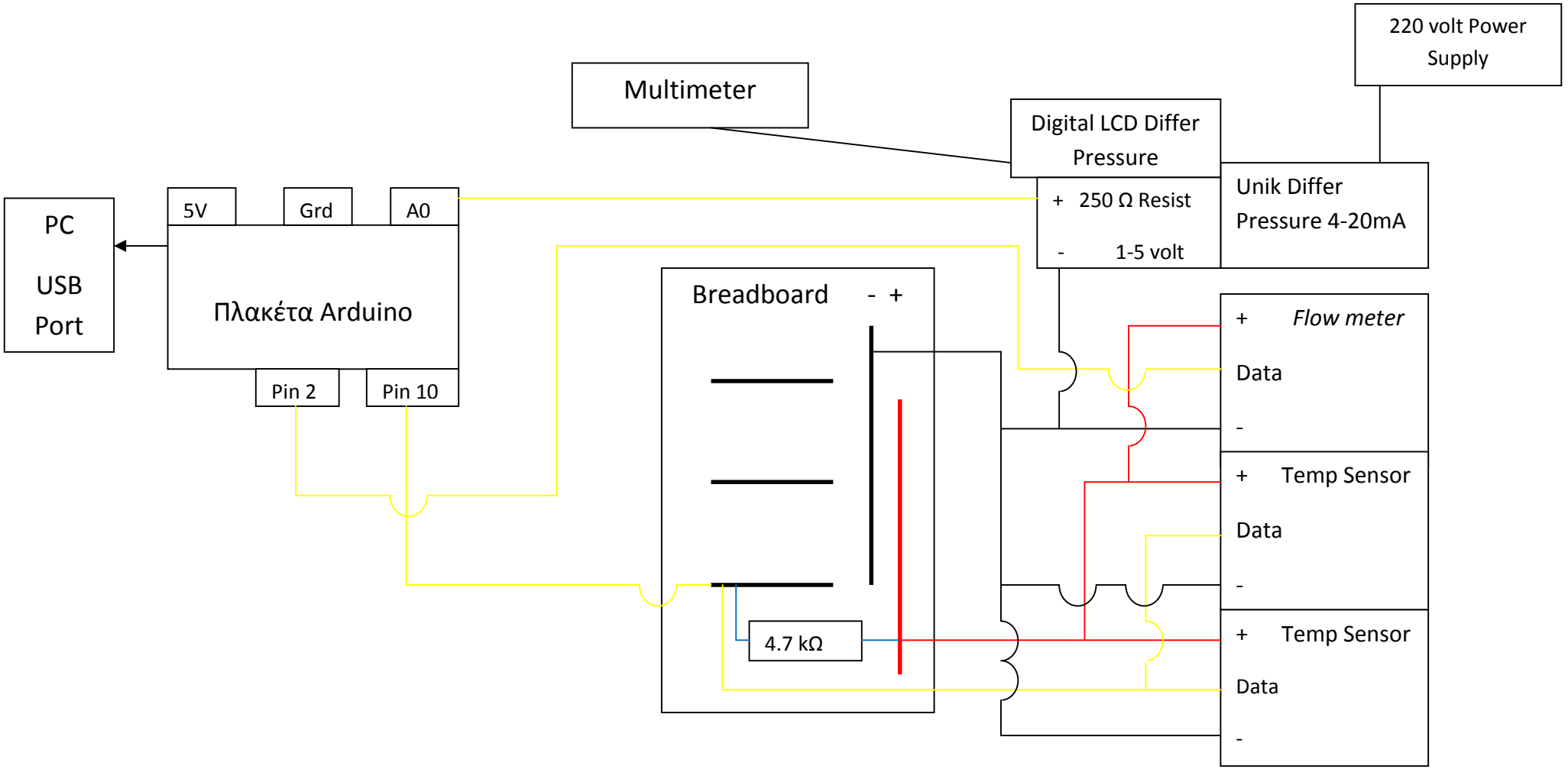
Εικόνα 10. Σύνδεση μανομέτρου. [9]



Εικόνα 11. Μετατροπή ρεύματος σε τάση. [9]

4.10 Περιγραφή γενικής συνδεσμολογίας των μετρητικών οργάνων

Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε τη συνδεσμολογία του hardware των μετρητικών οργάνων. Στο παρακάτω σκαρίφημα φαίνεται η διάταξη της συνδεσμολογίας. Η συνδεσμολογία των επιμέρους αισθητήρων έγινε με τη βοήθεια μιας Breadboard.



Σκαριφηματική Διάταξη Συνδεσμολογίας Αισθητήρων

4.11 Προγραμματισμός πλακέτας Arduino

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι αποτέλεσμα σύνθεσης επιμέρους προγραμμάτων τα οποία εξυπηρετούσαν κάθε αισθητήρα ξεχωριστά. Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν βρέθηκαν στο https://www.arduino.cc και http://www.hobbytronics.co.uk ενώ αρκετές τροποποιήσεις έλαβαν χώρα ώστε το πρόγραμμα να λειτουργεί ικανοποιητικά. Παρακάτω παρουσιάζεται το πρόγραμμα και με κόκκινη γραφή σχολιάζονται τα βασικότερα σημεία.

Δήλωση μεταβλητών

```
byte statusLed    = 13;
byte sensorInterrupt = 0;  // 0 = digital pin 2
byte sensorPin       = 2;
// The hall-effect flow sensor outputs approximately 4.5 pulses per second per
// litre/minute of flow.
float calibrationFactor = 7; //δήλωση μεταβλητής και εκχώρηση τιμής. Αποτελεί το
συντελεστή ώστε να γίνει βαθμονόμηση του παροχόμετρου
volatile byte pulseCount; // μεταβλητή μέτρησης παλμών παροχόμετρου
float flowRate; //μεταβλητή παροχής σε ltr/sec
float paroxi; //
unsigned int flowMilliLitres; //παροχή σε mltr/sec
unsigned long totalMilliLitres; //συνολική παροχή

unsigned long oldTime; //καταγραφή χρόνου
int k;
float y;

void setup() // αυτή η δομή θα εκτελεστή μία φορά
{
Serial.begin(38400); // bits per sec επικοινωνία με το pc
Serial.println("CLEARDATA"); //εντολές PLX-DAQ
Serial.println("LABEL,time,paroxi,highT,lowT,millibar,voltage,orifice");//εντολές
PLX-DAQ
pulseCount        = 0; // ορισμός τιμών σε μεταβλητές
flowRate          = 0.0; // ορισμός τιμών σε μεταβλητές
flowMilliLitres   = 0; / / ορισμός τιμών σε μεταβλητές
totalMilliLitres  = 0; // ορισμός τιμών σε μεταβλητές
oldTime           = 0; // ορισμός τιμών σε μεταβλητές
k=1; // ορισμός τιμών σε μεταβλητές
```

Έναρξη επαναληπτικής διαδικασίας

```
void loop()// αυτή η δομή θα εκτελείται συνεχώς
{
  byte i;
  byte present = 0;
  byte type_s;
  byte data[12];
  byte addr[8];
  float celsius;
  int count = 16;
```

```
 int bag = 0;
 for (int i=0; i< count; i++) bag += analogRead(A0);//ανάγνωση της αναλογικής
θύρα(μανόμετρο)
 bag = bag / count;
 float voltage = 5.0 * bag / 1035; //μετατροπή της αναλογικής εισόδου σε τάση
 float millibar = mapFloat(voltage, 3.011,5.000, 0.0,1000);// μετατροπή τάσης σε
mbar
 if ( !ds.search(addr)) {
  Serial.println("No more addresses.");
  Serial.println();
  ds.reset_search();
  delay(250);
  return;
 }
 Serial.print("ROM =");
 for( i = 0; i < 8; i++) {
  Serial.write(' ');
  Serial.print(addr[i], HEX);
 }
 if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {
    Serial.println("CRC is not valid!");
    return;
 }
 Serial.println();
  switch (addr[0]) {
  case 0x10:
    Serial.println("  Chip = DS18S20");  // or old DS1820
    type_s = 1;
    break;
  case 0x28:

    Serial.println("  Chip = DS18B20");

    type_s = 0;
   break;
  case 0x22:
    Serial.println("  Chip = DS1822");
    type_s = 0;
    break;
  default:
    Serial.println("Device is not a DS18x20 family device.");
    return;

 }
 ds.reset();
 ds.select(addr);
 ds.write(0x44, 1);
 delay(1000);
 present = ds.reset();
 ds.select(addr);
 ds.write(0xBE);
```

Έναρξη διαδικασίας λήψης θερμοκρασιών

```
Serial.print("  Data = ");
Serial.print(present, HEX);
Serial.print(" ");
for ( i = 0; i < 9; i++) {
  data[i] = ds.read();
  Serial.print(data[i], HEX);
  Serial.print(" ");
}
Serial.print(" CRC=");
Serial.print(OneWire::crc8(data, 8), HEX);
Serial.println();
```

Καταγραφή ψηφιακής ταυτότητας θερμοκρασίας

```
int16_t raw = (data[1] << 8) | data[0];
if (type_s) {
  raw = raw << 3; // 9 bit resolution default
  if (data[7] == 0x10) {
    // "count remain" gives full 12 bit resolution
    raw = (raw & 0xFFF0) + 12 - data[6];
  }
} else {
  byte cfg = (data[4] & 0x60);
     if (cfg == 0x00) raw = raw & ~7;  // 9 bit resolution, 93.75 ms
  else if (cfg == 0x20) raw = raw & ~3; // 10 bit res, 187.5 ms
  else if (cfg == 0x40) raw = raw & ~1; // 11 bit res, 375 ms
    }
celsius = (float)raw / 16.0;
```

Εξαγωγή θερμοκρασίας

```
 if ((millis() - oldTime) > 1000)     {
  detachInterrupt(sensorInterrupt);
 flowRate=0.06* (((1000.0 / (millis() - oldTime)) * pulseCount) / calibrationFactor);
    oldTime = millis();
  flowMilliLitres = (flowRate / 60) * 1000;
  paroxi = ((-0.046*((flowRate)*(flowRate)))+ (flowRate*0.78)+0.168);

  // Add the millilitres passed in this second to the cumulative total
  totalMilliLitres += flowMilliLitres;
  unsigned int frac;
  Serial.print("Flow rate: ");
  Serial.print(int(flowRate));
  Serial.print(".");
  frac = (flowRate - int(flowRate)) * 10;
  Serial.print(frac, DEC) ;
  Serial.print("L/min");
  // Print the number of litres flowed in this second
  Serial.print("  Current Liquid Flowing: ");
  Serial.print(flowMilliLitres);
  Serial.print("mL/Sec");
  Serial.print("  Output Liquid Quantity: ");
  Serial.print(totalMilliLitres);
  Serial.println("mL");
  float orifice;
```

Υπολογισμός παροχής

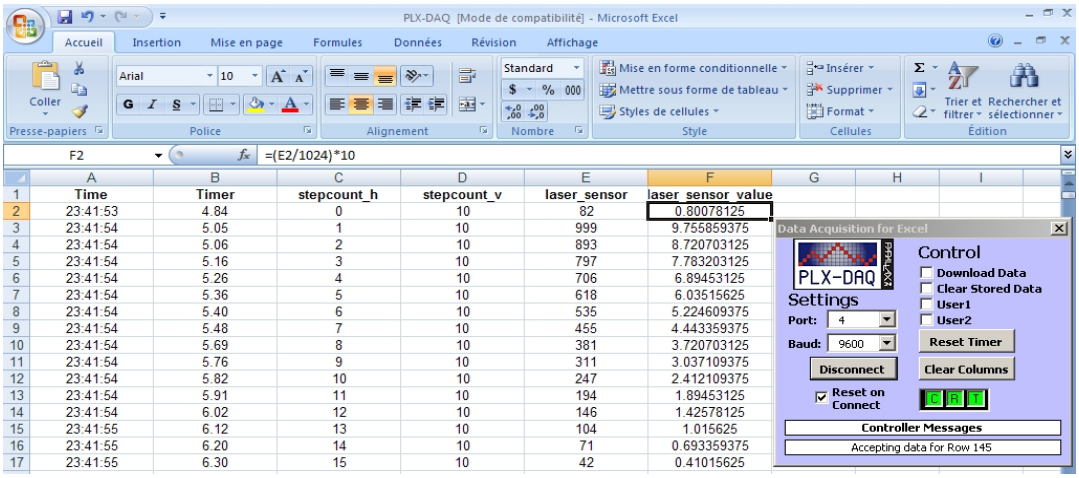
```
   orifice = (0.22*(sqrt(millibar / 10)));


 if (k==0){

 Serial.print("DATA,TIME,");Serial.print(paroxi,4); Serial.print(",");
 Serial.print(celsius);Serial.print(",");Serial.print(y);Serial.print(",");
 Serial.print(millibar);Serial.print(",");Serial.print(voltage);Serial.print(",");
 Serial.println(orifice,4);//PLX-DAQ
    k=1;
   }
   else {
   y=celsius;
   k=0;
   }
   pulseCount = 0;
 attachInterrupt(sensorInterrupt, pulseCounter, FALLING);
  }
  Serial.println(millibar);
}
void pulseCounter()
{
  pulseCount++;
}
float mapFloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)
{
  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;
}
```

Σημείο εξαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα PLX-DAQ για εμφάνιση δεδομένων στο Excel

Ορισμός πεδίου τιμών τάσης-πίεσης μανόμετρου

4.12 Πρόγραμμα καταγραφής δεδομένων σε Excel

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων. Οι μετρήσεις καταγράφονταν σε πραγματικό χρόνο και αποθηκεύονταν σε αρχεία Excel με τη βοήθεια του προγράμματος PLX-DAQ. Είναι προφανές ότι η αποθήκευση των δεδομένων βοηθά στην επεξεργασία τους και τον σχολιασμό τους και σε μετέπειτα χρόνους από τη στιγμή του πειράματος, όπως επίσης και στη σύγκρισή τους με παλαιότερα δεδομένα. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ένα screenshot από καταγραφή δεδομένων σε φύλλο excel από το PLX-DAQ. Με την εγκατάσταση του προγράμματος το μόνο που καθορίζει ο χρήστης είναι η θύρα που θα επικοινωνεί με το Arduino καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων Baud. Με το πέρας των μετρήσεων του επιλέγει αποσύνδεση και έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε οποιοδήποτε αρχείο Excel. Τέλος, η διαφοροποίηση στο κώδικα ενός προγράμματος Arduino ώστε να υπάρχει επικοινωνία με το PLX-DAQ είναι οι εντολές με πράσινη σήμανση στον κώδικα που σχολιάσαμε προηγουμένως. Στην εντολή Serial.println("LABEL…..) δημιουργεί τις στήλες στο excel, πράγμα που συμβαίνει μία φορά και στην εντολή Serial.print("DATA,TIME,");Serial.print(paroxi,4)……); τοποθετεί την εκάστοτε τιμή της μεταβλητής στο αντίστοιχο κελί.



Εικόνα 8. Καταγραφή δεδομένων σε Excell. [4]

Βιβλιογραφία

1. Πουλάκης , Ε. (2015). Προγραμματίζοντας με τον μικροελεγκτή Arduino Ηράκλειο Κρήτης
2. Χατζηκυριακού Γεώργιος (2009) Μάθετε το Arduino. Μέρος πρώτο
3. https://www.arduino.cc/
4. http://homepages.ihug.com.au/~npyner/Arduino/GUIDE_2PLX.pdf
5. http://www.hobbytronics.co.uk
6. https://sensorpros.com/products/ge-druck-unik5000-ptx5072-pressure-transmitter?variant=5489664065
7. https://diyhacking.com/arduino-flow-rate-sensor/
8. http://www.tweaking4all.com/hardware/arduino/arduino-ds18b20-temperature-sensor/
9. http://forum.arduino.cc/index.php?topic=263154.0

5. Καταγραφή και Σχολιασμός παραμέτρων λειτουργίας του θερμοϋδραυλικού δικτύου

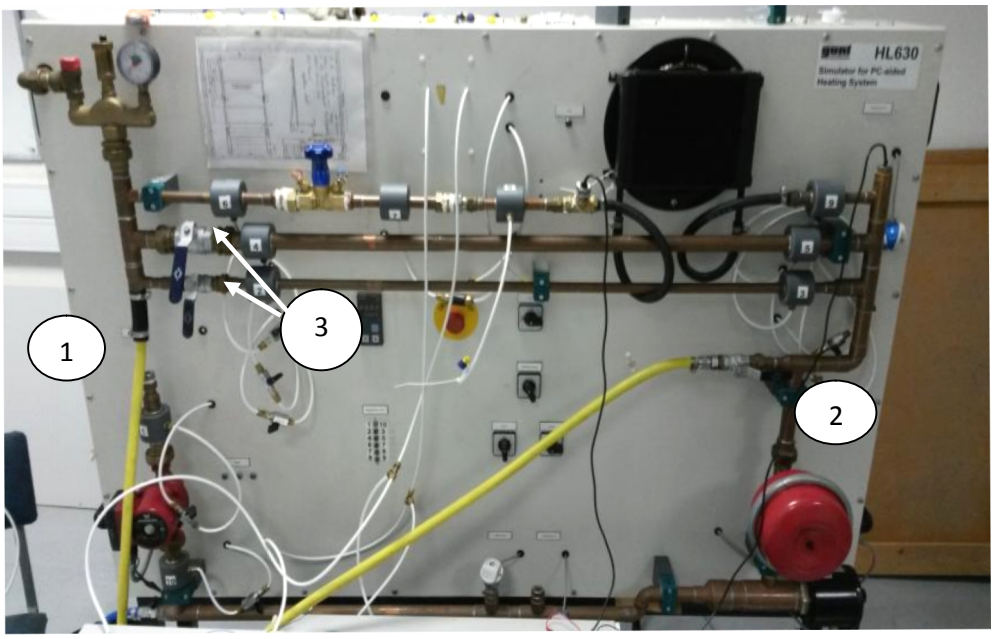
5.1 Διακρίβωση στραγγαλιστικής βαλβίδας CIM

Για την βελτιστοποίηση της ποιότητας των εξαγόμενων μετρήσεων και κατ' επέκταση συμπερασμάτων κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος της ακρίβειας του αριθμού Kv στις διάφορες θέσεις της.

Αρχικά τροποποιήθηκε η εγκατάσταση (Εικόνα 1) με την εισαγωγή νερού (δίκτυο ύδρευσης) από τη θέση 1, εξαγωγή από τη θέση 2 και κλειστές τις βάνες θέσεις 3. Σκοπός είναι, η μέτρηση της παροχής του δικτύου να συγκριθεί με την θεωρητική παροχή που προκύπτει από τον τύπο

$$Q = \frac{k \cdot \sqrt{\Delta}}{3} \qquad (5.1)$$

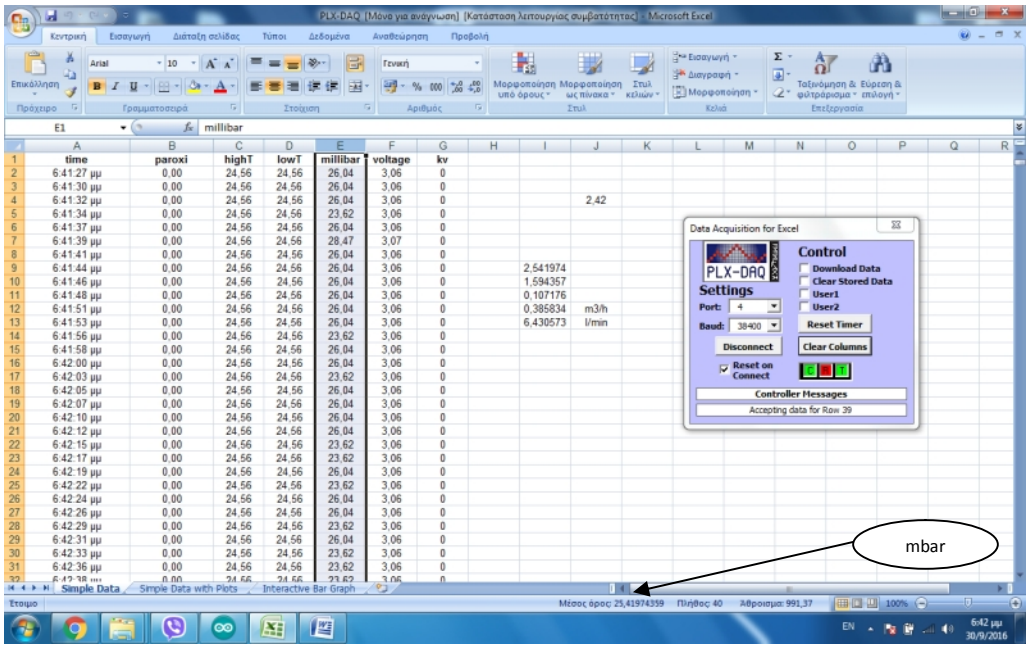
όπου Q σε ltr/sec και ΔP (στα άκρα της βαλβίδας) σε kPa.



Εικόνα 1. Τροποποίηση εγκατάστασης προς εξαγωγής Kv ρυθμιστικής βαλβίδας

Η μέτρηση της πραγματικής παροχής εκτελέστηκε με την χρήση κάνιστρου βαθμονομημένου (Εικόνα 2) καθώς και με τη χρήση χρονομέτρου. Για κάθε θέση της στραγγαλιστικής βαλβίδας μετρήθηκαν δύο διαφορετικές παροχές. Το ΔP στα άκρα της βαλβίδας είναι αποτέλεσμα μέσου όρου σαράντα μετρήσεων, όπως καταγράφηκαν από το πρόγραμμα PLX-DAQ, όπως φαίνεται στην εικόνα 3

Εικόνα 2. Μέτρηση πραγματικής παροχής με βαθμονομημένο κάνιστρο



Εικόνα 3. Αποτελέσματα μετρήσεων ΔΡ στα άκρα της ρυθμιστικής βαλβίδας

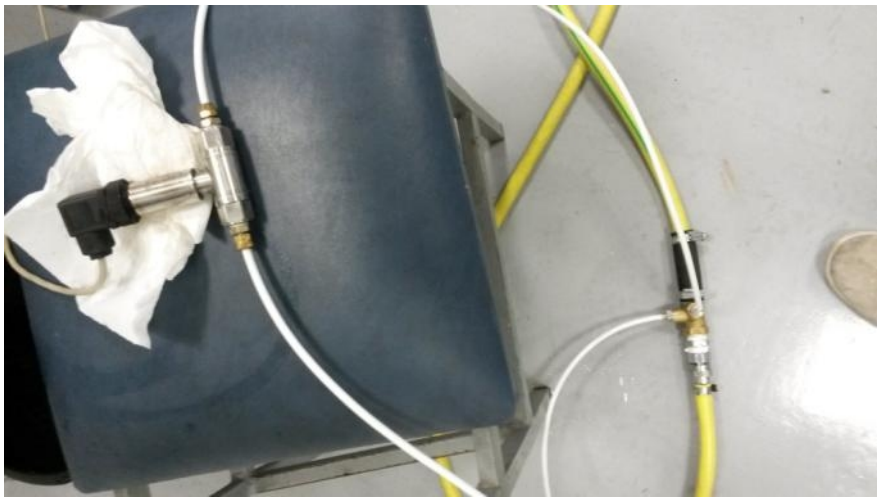
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στο Πίνακα 1

Πίνακας 1. Διακρίβωση ρυθμιστικής βαλβίδας

Θέση Βαλβίδας	kv	ΔP (kPa)	Μέτρηση 1 sec/3ltr	Μέτρηση 2 sec/3ltr	Μέτρηση 3 sec/3ltr	V_dot_Μέτρηση με κάνιστρο (l/s)	V_dot_Θεωρητικός υπολογισμός (l/s)	Σφάλμα %
4	2,87	5,139	17,5	17,66	17,67	0,170357751	0,180725196	5,73
4	2,87	15,234	10,12	10,1	10,2	0,295857988	0,311161869	4,91
3	2,42	17,27	10,5	10,35	10,55	0,286624204	0,279356663	-2,60
3	2,42	2,541	29,44	29,31	29,38	0,102121865	0,10715568	4,69
2	1,89	4,343	28,3	28,5	28,8	0,105140187	0,109409295	3,90
2	1,89	29,3	10,82	10,43	10,66	0,282043247	0,284179741	0,75
1	1,16	61,9	11,1	11,15	11,66	0,265408434	0,253513338	-4,69
1	1,16	11	27,03	27,77	27,45	0,109422492	0,106869021	-2,38
0,5	0,74	24,346	28,3	28,1	27,8	0,106888361	0,101424536	-5,38
0,5	0,74	88,76	15,1	14,8	15,3	0,199115044	0,193659081	-2,81

5.2 Διακρίβωση βαλβίδας με στένωση (orifice plate)

Με την παραπάνω διαδικασία διακριβώθηκε και η βαλβίδα με στένωση η οποία χρησιμοποιήθηκε ως παροχόμετρο, καθώς η μέτρηση ενός ΔP στα άκρα της εξάγει, μέσω γνωστού kv , τη σχετική παροχή. Το kv=2.2 από στοιχεία κατασκευαστή και με την συνδεσμολογία της εικόνας 4 προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 2



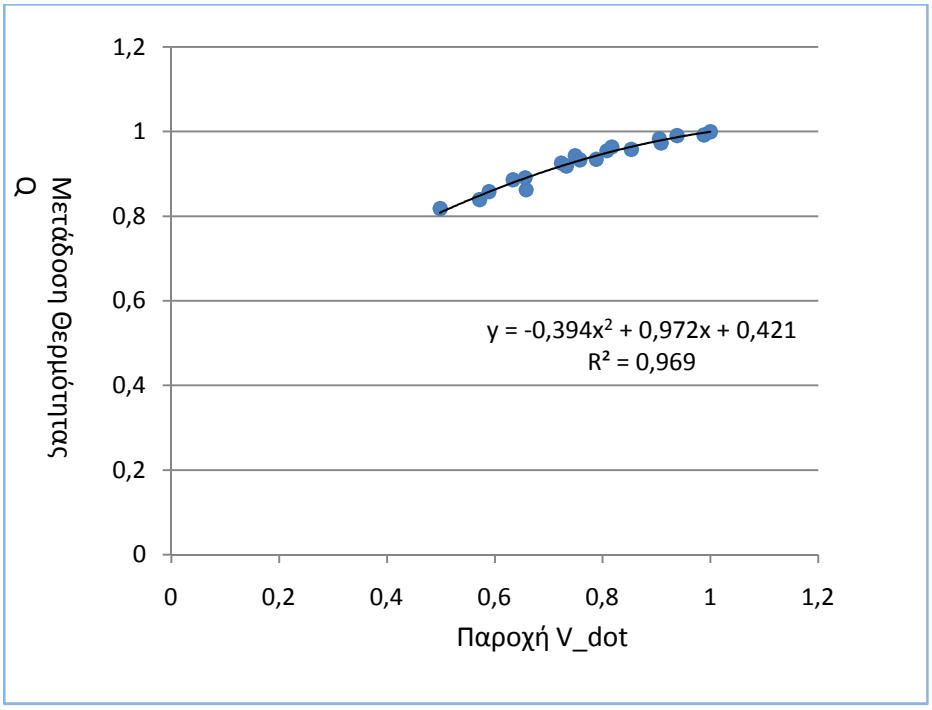
Εικόνα 4. Συνδεσμολογία προς διακρίβωση βαλβίδας με στένωση

Πίνακας 2. Διακρίβωση βαλβίδας με στένωση

ΔP orifice(kPa)	V_dot_orifice ltr/sec	V_dot_κάνιστρο	sec/3ltr	Σφάλμα %
26,1	0,312205417	0,297029703	10,1	4,86
6	0,14969104	0,153846154	19,5	-2,78
13,5	0,22453656	0,230769231	13	-2,78
2,56	0,097777778	0,096742986	31,01	1,06

5.3 Σχέση παροχής-μετάδοσης θερμότητας

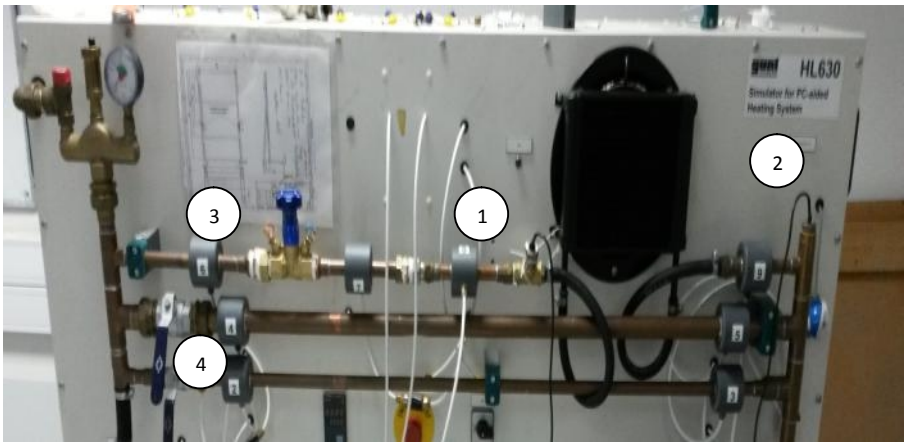
Όπως σχολιάστηκε στην παράγραφο 1.2 του παρόντος κειμένου, η σχέση μεταξύ της παροχής και της μετάδοσης θερμότητας σε ένα εναλλάκτη θερμότητας δεν είναι γραμμική. Στο πείραμα μας το γεγονός αυτός καταγράφτηκε και αποτυπώθηκε στο διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1. Μετάδοση θερμότητας εναλλάκτη – Παροχή νερού

Για την εξαγωγή του γραφήματος ήταν αναγκαία για κάθε παροχή η μέτρηση του ΔΤ στα σημεία 1 και 2 (θερμοκρασίες νερού προ και μετά εναλλάκτη (Εικόνα 5). Η παροχή μετρήθηκε μέσω του ΔP στο orifice plate. Έπειτα από τη γνωστή σχέση $Q = m$, προσδιοριζόταν η τιμή του Q. Για την ύπαρξη αρκετών σημείων (Q, V_dot), σε κάθε μία από τις τρεις ταχύτητες του κυκλοφορητή ελήφθησαν μετρήσεις για τις θέσεις της στραγγαλιστικής (4, 3, 2, 1, 0.7 και 0.4) με εξαίρεση την ταχύτητα ΙΙΙ όπου ελήφθησαν μετρήσεις και στην θέση 0.8. Το νερό κυκλοφορούσε

μόνο στο επάνω κλάδο (θέση 3 εικόνα 5) και οι βάνες των υπολοίπων ήταν κλειστές (θέση 4 εικόνα 5). Η απαίτηση στο PID controller για θερμοκρασιακή παροχή νερού ήταν 60^{o}C. Η μεγάλη ποσότητα λήψεων μετρήσεων θερμοκρασίας και παροχής εξασφάλισε την ορθότητα των συμπερασμάτων



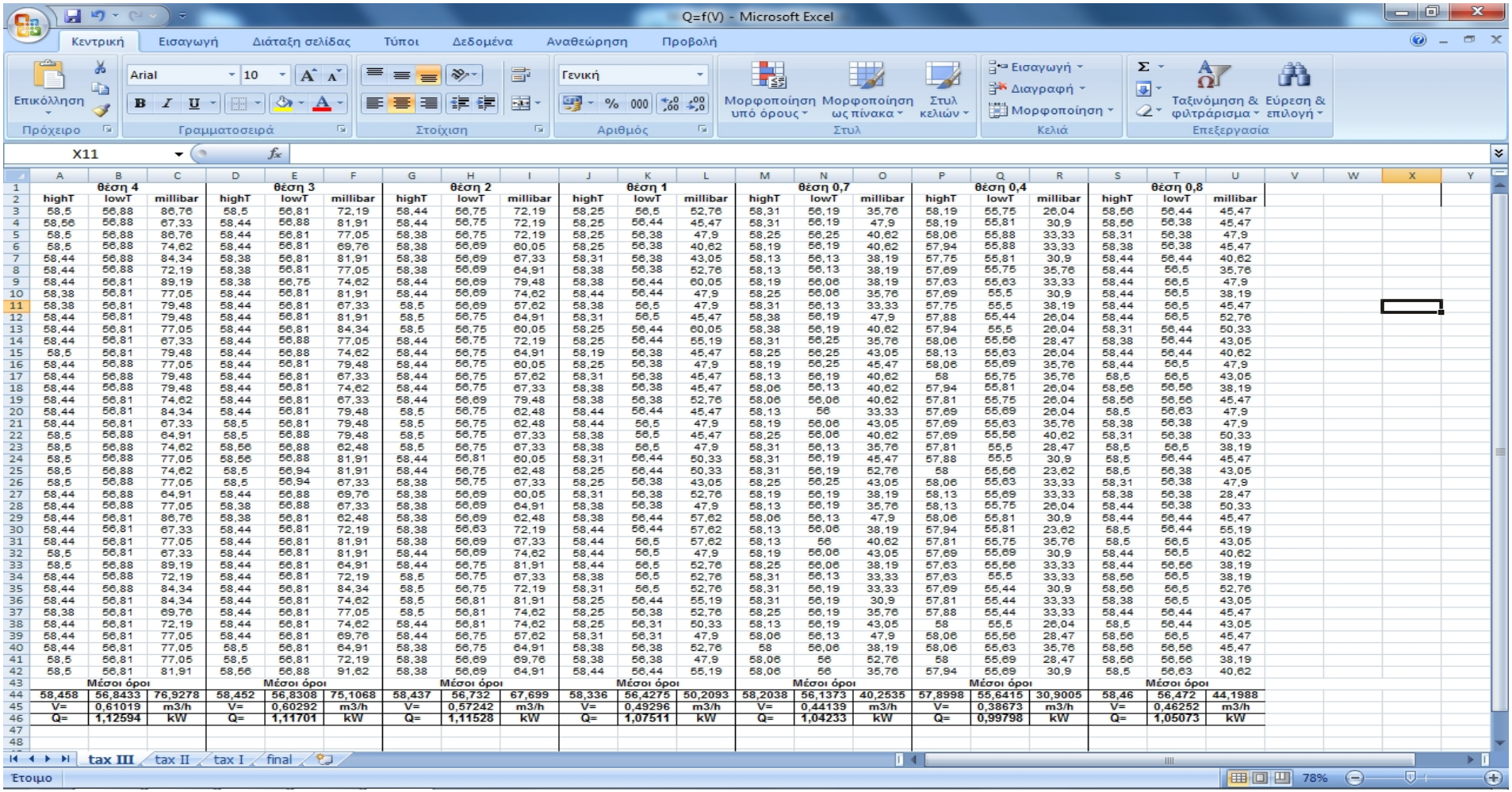
Εικόνα 5. Εγκατάσταση κατά τη λήψη μετρήσεων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως καταγράφηκαν στο excel, τα οποία συνοψίζοντας τα στον πίνακα 3, μας δίδουν το διάγραμμα 1.

Πίνακας 3. Μετάδοση θερμότητας Q σε διάφορες παροχές V_dot

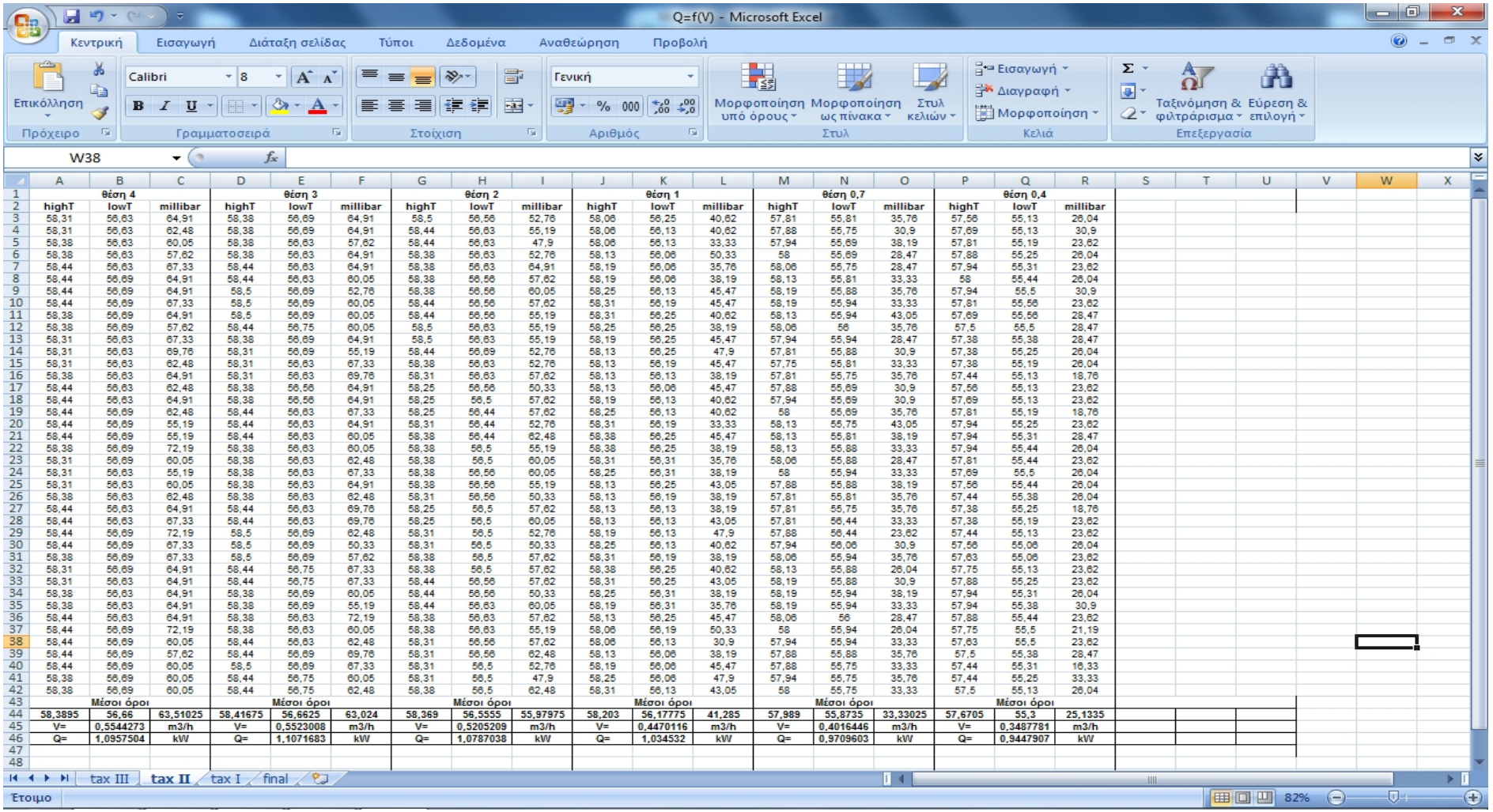
V_dot (m3/h)	Q (kW)
0,6102	1,126
0,6029	1,117
0,5724	1,115
0,4930	1,075
0,4414	1,042
0,3867	0,998
0,5544	1,096
0,5523	1,107
0,5205	1,079
0,4625	1,051
0,4470	1,035
0,4016	0,971
0,3488	0,945
0,4986	1,085
0,4809	1,052
0,4571	1,062
0,4005	1,003
0,3596	0,966
0,3042	0,921

Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως καταγράφηκαν στο πρόγραμμα PLX-DAQ για την Q=f(V) για τις τρεις ταχύτητες του κυκλοφορητή, πριν τοποθετηθούν συνολικά στο Πίνακα 3.



	θέση 4			θέση 3			θέση 2			θέση 1			θέση 0,7			θέση 0,4			θέση 0,8		
	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar
1	58,5	56,88	86,76	58,5	56,81	72,19	58,44	56,75	72,19	58,25	56,5	52,76	58,31	56,19	35,76	58,19	55,75	26,04	58,56	56,44	45,47
2	58,56	56,88	67,33	58,44	56,88	81,91	58,44	56,75	72,19	58,25	56,44	45,47	58,31	56,19	47,9	58,19	55,81	30,9	58,56	56,38	45,47
3	58,5	56,88	86,76	58,44	56,81	77,05	58,38	56,75	72,19	58,25	56,38	47,9	58,25	56,25	40,62	58,06	55,88	33,33	58,31	56,38	47,9
4	58,5	56,88	74,62	58,44	56,81	69,76	58,38	56,69	60,05	58,25	56,38	40,62	58,19	56,19	40,62	57,94	55,88	33,33	58,38	56,38	45,47
5	58,44	56,88	84,34	58,38	56,81	81,91	58,38	56,69	67,33	58,31	56,38	43,05	58,13	56,13	38,19	57,75	55,81	30,9	58,44	56,44	40,62
6	58,44	56,88	72,19	58,38	56,81	77,05	58,38	56,69	64,91	58,38	56,38	52,76	58,13	56,13	38,19	57,69	55,75	35,76	58,44	56,5	35,76
7	58,44	56,81	89,19	58,38	56,75	74,62	58,44	56,69	79,48	58,38	56,44	60,05	58,19	56,06	38,19	57,63	55,63	33,33	58,44	56,5	47,9
8	58,38	56,81	77,05	58,44	56,81	81,91	58,44	56,69	74,62	58,44	56,44	47,9	58,25	56,06	35,76	57,69	55,5	30,9	58,44	56,5	38,19
9	58,38	56,81	79,48	58,44	56,81	67,33	58,5	56,69	57,62	58,38	56,5	47,9	58,31	56,13	33,33	57,75	55,5	38,19	58,44	56,5	45,47
10	58,44	56,81	79,48	58,44	56,81	81,91	58,5	56,75	64,91	58,31	56,5	45,47	58,38	56,19	47,9	57,88	55,44	26,04	58,44	56,5	52,76
11	58,44	56,81	77,05	58,44	56,81	84,34	58,5	56,75	60,05	58,25	56,44	60,05	58,38	56,19	40,62	57,94	55,5	26,04	58,31	56,44	50,33
12	58,44	56,81	67,33	58,44	56,88	77,05	58,44	56,75	72,19	58,25	56,44	55,19	58,31	56,25	35,76	58,06	55,56	28,47	58,38	56,44	43,05
13	58,5	56,81	79,48	58,44	56,88	74,62	58,44	56,75	64,91	58,19	56,38	45,47	58,25	56,25	43,05	58,13	55,63	26,04	58,44	56,44	40,62
14	58,44	56,88	77,05	58,44	56,81	79,48	58,44	56,75	60,05	58,25	56,38	47,9	58,19	56,25	45,47	58,06	55,69	35,76	58,44	56,5	47,9
15	58,44	56,88	79,48	58,44	56,81	67,33	58,44	56,75	57,62	58,31	56,38	45,47	58,13	56,19	40,62	58	55,75	35,76	58,5	56,5	43,05
16	58,44	56,88	79,48	58,44	56,81	74,62	58,44	56,75	67,33	58,38	56,38	45,47	58,06	56,13	40,62	57,94	55,81	26,04	58,56	56,56	38,19
17	58,44	56,81	74,62	58,44	56,81	67,33	58,44	56,69	79,48	58,38	56,38	52,76	58,06	56,06	40,62	57,81	55,75	26,04	58,56	56,56	45,47
18	58,44	56,81	84,34	58,44	56,81	79,48	58,5	56,75	62,48	58,44	56,44	45,47	58,13	56	33,33	57,69	55,69	26,04	58,5	56,63	47,9
19	58,44	56,81	67,33	58,5	56,81	79,48	58,5	56,75	62,48	58,44	56,5	47,9	58,19	56,06	43,05	57,69	55,63	35,76	58,38	56,38	47,9
20	58,5	56,88	64,91	58,5	56,88	79,48	58,5	56,75	67,33	58,38	56,5	45,47	58,25	56,06	40,62	57,69	55,56	40,62	58,31	56,38	50,33
21	58,5	56,88	74,62	58,56	56,88	62,48	58,5	56,75	67,33	58,38	56,5	47,9	58,31	56,13	35,76	57,81	55,5	28,47	58,5	56,5	38,19
22	58,5	56,88	77,05	58,56	56,88	81,91	58,44	56,81	60,05	58,31	56,44	50,33	58,31	56,19	45,47	57,88	55,5	30,9	58,5	56,44	45,47
23	58,5	56,88	74,62	58,5	56,94	81,91	58,44	56,75	62,48	58,25	56,44	50,33	58,31	56,19	52,76	58	55,56	23,62	58,5	56,38	43,05
24	58,5	56,88	77,05	58,5	56,94	67,33	58,38	56,75	67,33	58,25	56,38	43,05	58,25	56,25	43,05	58,06	55,63	33,33	58,31	56,38	47,9
25	58,44	56,88	64,91	58,44	56,88	69,76	58,38	56,69	60,05	58,31	56,38	52,76	58,19	56,19	38,19	58,13	55,69	33,33	58,38	56,38	28,47
26	58,44	56,88	77,05	58,38	56,88	67,33	58,38	56,69	64,91	58,38	56,38	47,9	58,13	56,19	35,76	58,13	55,75	26,04	58,44	56,38	50,33
27	58,44	56,81	86,76	58,38	56,81	62,48	58,38	56,69	62,48	58,38	56,44	57,62	58,06	56,13	47,9	58,06	55,81	30,9	58,44	56,44	45,47
28	58,44	56,81	67,33	58,44	56,81	72,19	58,38	56,63	72,19	58,44	56,44	57,62	58,13	56,06	38,19	57,94	55,81	23,62	58,5	56,44	55,19
29	58,44	56,81	77,05	58,44	56,81	81,91	58,38	56,69	67,33	58,44	56,5	57,62	58,13	56	40,62	57,81	55,75	35,76	58,5	56,5	43,05
30	58,5	56,81	67,33	58,44	56,81	81,91	58,44	56,69	74,62	58,44	56,5	47,9	58,19	56,06	43,05	57,69	55,69	30,9	58,44	56,5	40,62
31	58,5	56,88	89,19	58,44	56,81	64,91	58,44	56,75	81,91	58,44	56,5	52,76	58,25	56,06	38,19	57,63	55,56	33,33	58,44	56,56	38,19
32	58,44	56,88	72,19	58,44	56,81	72,19	58,5	56,75	67,33	58,38	56,5	52,76	58,31	56,13	33,33	57,63	55,5	33,33	58,56	56,5	38,19
33	58,44	56,88	84,34	58,44	56,81	84,34	58,5	56,75	72,19	58,31	56,5	52,76	58,31	56,19	33,33	57,69	55,44	30,9	58,56	56,5	52,76
34	58,44	56,81	84,34	58,44	56,81	74,62	58,5	56,81	81,91	58,25	56,44	55,19	58,31	56,19	30,9	57,81	55,44	33,33	58,38	56,5	43,05
35	58,38	56,81	69,76	58,44	56,81	77,05	58,5	56,81	74,62	58,25	56,38	52,76	58,25	56,19	35,76	57,88	55,44	33,33	58,44	56,44	45,47
36	58,44	56,81	72,19	58,44	56,81	74,62	58,44	56,81	74,62	58,25	56,31	50,33	58,13	56,19	43,05	58	55,5	26,04	58,5	56,44	43,05
37	58,44	56,81	77,05	58,44	56,81	69,76	58,44	56,75	57,62	58,31	56,31	47,9	58,06	56,13	47,9	58,06	55,56	28,47	58,56	56,5	45,47
38	58,44	56,81	77,05	58,5	56,81	64,91	58,38	56,75	64,91	58,38	56,38	52,76	58	56,06	38,19	58,06	55,63	35,76	58,56	56,56	45,47
39	58,5	56,81	77,05	58,5	56,81	72,19	58,38	56,69	69,76	58,38	56,38	47,9	58,06	56	52,76	58	55,69	28,47	58,56	56,56	38,19
40	58,5	56,81	81,91	58,56	56,88	91,62	58,38	56,69	64,91	58,44	56,44	55,19	58,06	56	35,76	57,94	55,69	30,9	58,5	56,63	40,62
41	Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι		
42	58,458	56,8433	76,9278	58,452	56,8308	75,1068	58,437	56,732	67,699	58,336	56,4275	50,2093	58,2038	56,1373	40,2535	57,8998	55,6415	30,9005	58,46	56,472	44,1988
43	V=	0,61019	m3/h	V=	0,60292	m3/h	V=	0,57242	m3/h	V=	0,49296	m3/h	V=	0,44139	m3/h	V=	0,38673	m3/h	V=	0,46252	m3/h
44	Q=	1,12594	kW	Q=	1,11701	kW	Q=	1,11528	kW	Q=	1,07511	kW	Q=	1,04233	kW	Q=	0,99798	kW	Q=	1,05073	kW

Q=f(V) για ταχύτητα κυκλοφορητή III



Q=f(V) - Microsoft Excel

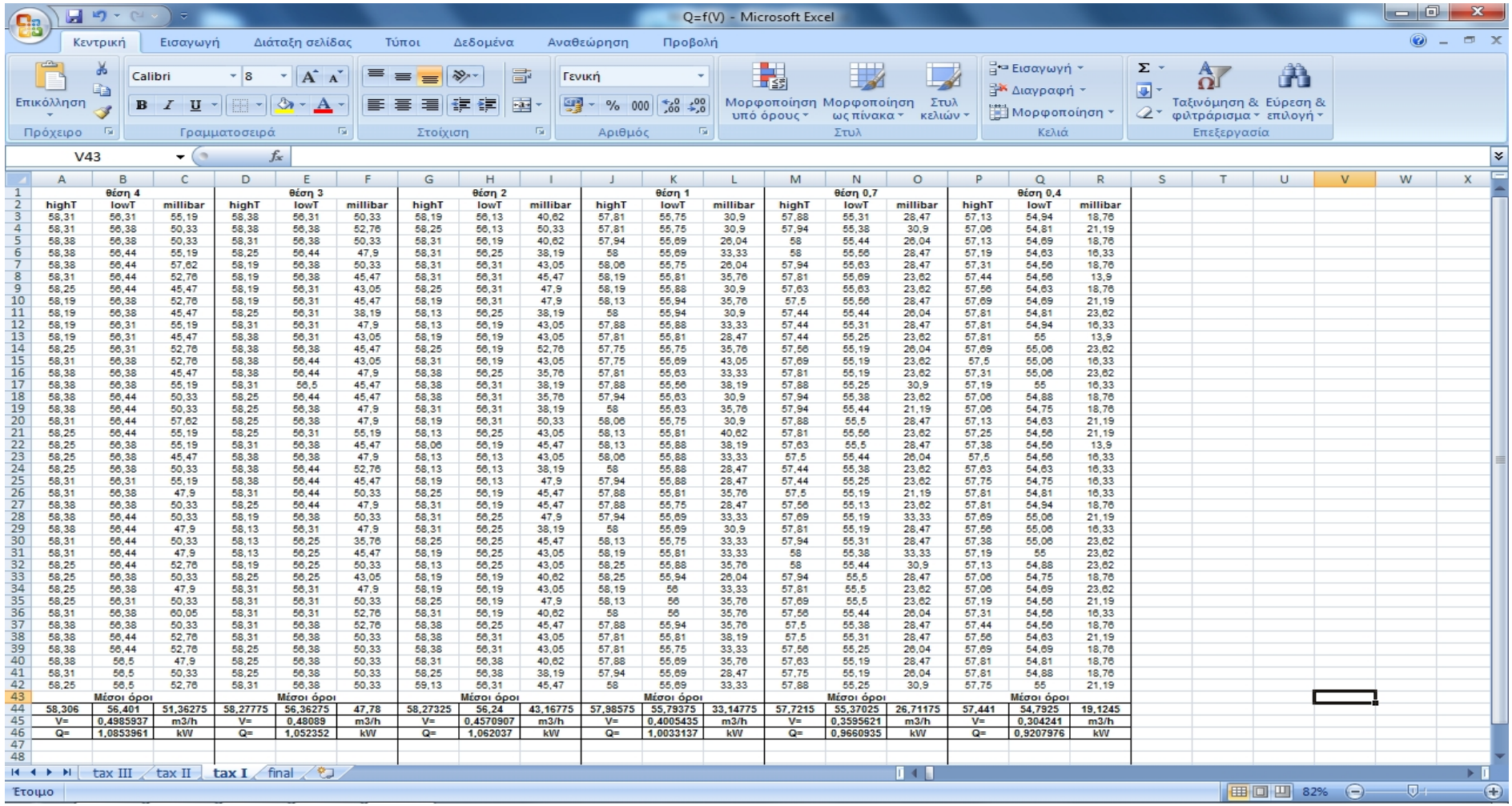
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1		θέση 4			θέση 3			θέση 2			θέση 1			θέση 0,7			θέση 0,4	
2		highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar
3		58,31	56,63	64,91	58,38	56,69	64,91	58,5	56,56	52,76	58,06	56,25	40,62	57,81	55,81	35,76	57,56	55,13	26,04
4		58,31	56,63	62,48	58,38	56,69	64,91	58,44	56,63	55,19	58,06	56,13	40,62	57,88	55,75	30,9	57,69	55,13	30,9
5		58,38	56,63	60,05	58,38	56,63	57,62	58,44	56,63	47,9	58,06	56,13	33,33	57,94	55,69	38,19	57,81	55,19	23,62
6		58,38	56,63	57,62	58,38	56,63	64,91	58,38	56,63	52,76	58,13	56,06	50,33	58	55,69	28,47	57,88	55,25	26,04
7		58,44	56,63	67,33	58,44	56,63	64,91	58,38	56,63	64,91	58,19	56,06	35,76	58,06	55,75	28,47	57,94	55,31	23,62
8		58,44	56,69	64,91	58,44	56,63	60,05	58,38	56,56	57,62	58,19	56,06	38,19	58,13	55,81	33,33	58	55,44	26,04
9		58,44	56,69	64,91	58,5	56,69	52,76	58,38	56,56	60,05	58,25	56,13	45,47	58,19	55,88	35,76	57,94	55,5	30,9
10		58,44	56,69	67,33	58,5	56,69	60,05	58,44	56,56	57,62	58,31	56,19	45,47	58,19	55,94	33,33	57,81	55,56	23,62
11		58,38	56,69	64,91	58,5	56,69	60,05	58,44	56,56	55,19	58,31	56,25	40,62	58,13	55,94	43,05	57,69	55,56	28,47
12		58,38	56,69	57,62	58,44	56,75	60,05	58,5	56,63	55,19	58,25	56,25	38,19	58,06	56	35,76	57,5	55,5	28,47
13		58,31	56,63	67,33	58,38	56,69	64,91	58,5	56,63	55,19	58,19	56,25	45,47	57,94	55,94	28,47	57,38	55,38	28,47
14		58,31	56,63	69,76	58,31	56,69	55,19	58,44	56,69	52,76	58,13	56,25	47,9	57,81	55,88	30,9	57,38	55,25	26,04
15		58,31	56,63	62,48	58,31	56,63	67,33	58,38	56,63	52,76	58,13	56,19	45,47	57,75	55,81	33,33	57,38	55,19	26,04
16		58,38	56,63	64,91	58,31	56,63	69,76	58,31	56,63	57,62	58,13	56,13	38,19	57,81	55,75	35,76	57,44	55,13	18,76
17		58,44	56,63	62,48	58,38	56,56	64,91	58,25	56,56	50,33	58,13	56,06	45,47	57,88	55,69	30,9	57,56	55,13	23,62
18		58,44	56,63	64,91	58,38	56,56	64,91	58,25	56,5	57,62	58,19	56,13	40,62	57,94	55,69	30,9	57,69	55,13	23,62
19		58,44	56,69	62,48	58,44	56,63	67,33	58,25	56,44	57,62	58,25	56,13	40,62	58	55,69	35,76	57,81	55,19	18,76
20		58,44	56,69	55,19	58,44	56,63	64,91	58,31	56,44	52,76	58,31	56,19	33,33	58,13	55,75	43,05	57,94	55,25	23,62
21		58,44	56,69	55,19	58,44	56,63	60,05	58,38	56,44	62,48	58,38	56,25	45,47	58,13	55,81	38,19	57,94	55,31	28,47
22		58,38	56,69	72,19	58,38	56,63	60,05	58,38	56,5	55,19	58,38	56,25	38,19	58,13	55,88	33,33	57,94	55,44	26,04
23		58,31	56,69	60,05	58,38	56,63	62,48	58,38	56,5	60,05	58,31	56,31	35,76	58,06	55,88	28,47	57,81	55,44	23,62
24		58,31	56,63	55,19	58,38	56,63	67,33	58,38	56,56	60,05	58,25	56,31	38,19	58	55,94	33,33	57,69	55,5	26,04
25		58,31	56,63	60,05	58,38	56,63	64,91	58,38	56,56	55,19	58,13	56,25	43,05	57,88	55,88	38,19	57,56	55,44	26,04
26		58,38	56,63	62,48	58,38	56,63	62,48	58,31	56,56	50,33	58,13	56,19	38,19	57,81	55,81	35,76	57,44	55,38	26,04
27		58,44	56,63	64,91	58,44	56,63	69,76	58,25	56,5	57,62	58,13	56,13	38,19	57,81	55,75	35,76	57,38	55,25	18,76
28		58,44	56,63	67,33	58,44	56,63	69,76	58,25	56,5	60,05	58,13	56,13	43,05	57,81	56,44	33,33	57,38	55,19	23,62
29		58,44	56,69	72,19	58,5	56,69	62,48	58,31	56,5	52,76	58,19	56,13	47,9	57,88	56,44	23,62	57,44	55,13	23,62
30		58,44	56,69	67,33	58,5	56,69	50,33	58,31	56,5	50,33	58,25	56,13	40,62	57,94	56,06	30,9	57,56	55,06	26,04
31		58,38	56,69	67,33	58,5	56,69	57,62	58,38	56,5	57,62	58,31	56,19	38,19	58,06	55,94	35,76	57,63	55,06	23,62
32		58,31	56,69	64,91	58,44	56,75	67,33	58,38	56,5	57,62	58,38	56,25	40,62	58,13	55,88	26,04	57,75	55,13	23,62
33		58,31	56,63	64,91	58,44	56,75	67,33	58,44	56,56	57,62	58,31	56,25	43,05	58,19	55,88	30,9	57,88	55,25	23,62
34		58,38	56,63	64,91	58,38	56,69	60,05	58,44	56,56	50,33	58,25	56,31	38,19	58,19	55,94	38,19	57,94	55,31	26,04
35		58,38	56,63	64,91	58,38	56,69	55,19	58,44	56,63	60,05	58,19	56,31	35,76	58,19	55,94	33,33	57,94	55,38	30,9
36		58,44	56,63	64,91	58,38	56,63	72,19	58,38	56,63	57,62	58,13	56,25	45,47	58,06	56	28,47	57,88	55,44	23,62
37		58,44	56,69	72,19	58,38	56,63	60,05	58,38	56,63	55,19	58,06	56,19	50,33	58	55,94	26,04	57,75	55,5	21,19
38		58,44	56,69	60,05	58,44	56,63	62,48	58,31	56,56	57,62	58,06	56,13	30,9	57,94	55,94	33,33	57,63	55,5	23,62
39		58,44	56,69	57,62	58,44	56,69	69,76	58,31	56,56	62,48	58,13	56,06	38,19	57,88	55,88	35,76	57,5	55,38	28,47
40		58,44	56,69	60,05	58,5	56,69	67,33	58,31	56,5	52,76	58,19	56,06	45,47	57,88	55,75	33,33	57,44	55,31	16,33
41		58,38	56,69	60,05	58,44	56,75	60,05	58,31	56,5	47,9	58,25	56,06	47,9	57,94	55,75	35,76	57,44	55,25	33,33
42		58,38	56,69	60,05	58,44	56,75	62,48	58,38	56,5	62,48	58,31	56,13	43,05	58	55,75	33,33	57,5	55,13	26,04
43		Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι		
44		58,3895	56,66	63,51025	58,41675	56,6625	63,024	58,369	56,5555	55,97975	58,203	56,17775	41,285	57,989	55,8735	33,33025	57,6705	55,3	25,1335
45		V=	0,5544273	m3/h	V=	0,5523008	m3/h	V=	0,5205209	m3/h	V=	0,4470116	m3/h	V=	0,4016446	m3/h	V=	0,3487781	m3/h
46		Q=	1,0957504	kW	Q=	1,1071683	kW	Q=	1,0787038	kW	Q=	1,034532	kW	Q=	0,9709603	kW	Q=	0,9447907	kW
47																			
48																			

tax III | tax II | tax I | final

Έτοιμο

82%

Q=f(V) για ταχύτητα κυκλοφορητή II



Q=f(V) - Microsoft Excel

	θέση 4			θέση 3			θέση 2			θέση 1			θέση 0,7			θέση 0,4		
	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar	highT	lowT	millibar
3	58,31	56,31	55,19	58,38	56,31	50,33	58,19	56,13	40,62	57,81	55,75	30,9	57,88	55,31	28,47	57,13	54,94	18,76
4	58,31	56,38	50,33	58,38	56,38	52,76	58,25	56,13	50,33	57,81	55,75	30,9	57,94	55,38	30,9	57,06	54,81	21,19
5	58,38	56,38	50,33	58,31	56,38	50,33	58,31	56,19	40,62	57,94	55,69	26,04	58	55,44	26,04	57,13	54,69	18,76
6	58,38	56,44	55,19	58,25	56,44	47,9	58,31	56,25	38,19	58	55,69	33,33	58	55,56	28,47	57,19	54,63	16,33
7	58,38	56,44	57,62	58,19	56,38	50,33	58,31	56,31	43,05	58,06	55,75	26,04	57,94	55,63	28,47	57,31	54,56	18,76
8	58,31	56,44	52,76	58,19	56,38	45,47	58,31	56,31	45,47	58,19	55,81	35,76	57,81	55,69	23,62	57,44	54,56	13,9
9	58,25	56,44	45,47	58,19	56,31	43,05	58,25	56,31	47,9	58,19	55,88	30,9	57,63	55,63	23,62	57,56	54,63	18,76
10	58,19	56,38	52,76	58,19	56,31	45,47	58,19	56,31	47,9	58,13	55,94	35,76	57,5	55,56	28,47	57,69	54,69	21,19
11	58,19	56,38	45,47	58,25	56,31	38,19	58,13	56,25	38,19	58	55,94	30,9	57,44	55,44	26,04	57,81	54,81	23,62
12	58,19	56,31	55,19	58,31	56,31	47,9	58,13	56,19	43,05	57,88	55,88	33,33	57,44	55,31	28,47	57,81	54,94	16,33
13	58,19	56,31	45,47	58,38	56,31	43,05	58,19	56,19	43,05	57,81	55,81	28,47	57,44	55,25	23,62	57,81	55	13,9
14	58,25	56,31	52,76	58,38	56,38	45,47	58,25	56,19	52,76	57,75	55,75	35,76	57,56	55,19	26,04	57,69	55,06	23,62
15	58,31	56,38	52,76	58,38	56,44	43,05	58,31	56,19	43,05	57,75	55,69	43,05	57,69	55,19	23,62	57,5	55,06	16,33
16	58,38	56,38	45,47	58,38	56,44	47,9	58,38	56,25	35,76	57,81	55,63	33,33	57,81	55,19	23,62	57,31	55,06	23,62
17	58,38	56,38	55,19	58,31	56,5	45,47	58,38	56,31	38,19	57,88	55,56	38,19	57,88	55,25	30,9	57,19	55	16,33
18	58,38	56,44	50,33	58,25	56,44	45,47	58,38	56,31	35,76	57,94	55,63	30,9	57,94	55,38	23,62	57,06	54,88	18,76
19	58,38	56,44	50,33	58,25	56,38	47,9	58,31	56,31	38,19	58	55,63	35,76	57,94	55,44	21,19	57,06	54,75	18,76
20	58,31	56,44	57,62	58,25	56,38	47,9	58,19	56,31	50,33	58,06	55,75	30,9	57,88	55,5	28,47	57,13	54,63	21,19
21	58,25	56,44	55,19	58,25	56,31	55,19	58,13	56,25	43,05	58,13	55,81	40,62	57,81	55,56	23,62	57,25	54,56	21,19
22	58,25	56,38	55,19	58,31	56,38	45,47	58,06	56,19	45,47	58,13	55,88	38,19	57,63	55,5	28,47	57,38	54,56	13,9
23	58,25	56,38	45,47	58,38	56,38	47,9	58,13	56,13	43,05	58,06	55,88	33,33	57,5	55,44	26,04	57,5	54,56	16,33
24	58,25	56,38	50,33	58,38	56,44	52,76	58,13	56,13	38,19	58	55,88	28,47	57,44	55,38	23,62	57,63	54,63	16,33
25	58,31	56,31	55,19	58,38	56,44	45,47	58,19	56,13	47,9	57,94	55,88	28,47	57,44	55,25	23,62	57,75	54,75	16,33
26	58,31	56,38	47,9	58,31	56,44	50,33	58,25	56,19	45,47	57,88	55,81	35,76	57,5	55,19	21,19	57,81	54,81	16,33
27	58,38	56,38	50,33	58,25	56,44	47,9	58,31	56,19	45,47	57,88	55,75	28,47	57,56	55,13	23,62	57,81	54,94	18,76
28	58,38	56,44	50,33	58,19	56,38	50,33	58,31	56,25	47,9	57,94	55,69	33,33	57,69	55,19	33,33	57,69	55,06	21,19
29	58,38	56,44	47,9	58,13	56,31	47,9	58,31	56,25	38,19	58	55,69	30,9	57,81	55,19	28,47	57,56	55,06	16,33
30	58,31	56,44	50,33	58,13	56,25	35,76	58,25	56,25	45,47	58,13	55,75	33,33	57,94	55,31	28,47	57,38	55,06	23,62
31	58,31	56,44	47,9	58,13	56,25	45,47	58,19	56,25	43,05	58,19	55,81	33,33	58	55,38	33,33	57,19	55	23,62
32	58,25	56,44	52,76	58,19	56,25	50,33	58,13	56,25	43,05	58,25	55,88	35,76	58	55,44	30,9	57,13	54,88	23,62
33	58,25	56,38	50,33	58,25	56,25	43,05	58,19	56,19	40,62	58,25	55,94	26,04	57,94	55,5	28,47	57,06	54,75	18,76
34	58,25	56,38	47,9	58,31	56,31	47,9	58,19	56,19	43,05	58,19	56	33,33	57,81	55,5	23,62	57,06	54,69	23,62
35	58,25	56,31	50,33	58,31	56,31	50,33	58,25	56,19	47,9	58,13	56	35,76	57,69	55,5	23,62	57,19	54,56	21,19
36	58,31	56,38	60,05	58,31	56,31	52,76	58,31	56,19	40,62	58	56	35,76	57,56	55,44	26,04	57,31	54,56	16,33
37	58,38	56,38	50,33	58,31	56,38	52,76	58,38	56,25	45,47	57,88	55,94	35,76	57,5	55,38	28,47	57,44	54,56	18,76
38	58,38	56,44	52,76	58,31	56,38	50,33	58,38	56,31	43,05	57,81	55,81	38,19	57,5	55,31	28,47	57,56	54,63	21,19
39	58,38	56,44	52,76	58,25	56,38	50,33	58,38	56,31	43,05	57,81	55,75	33,33	57,56	55,25	26,04	57,69	54,69	18,76
40	58,38	56,5	47,9	58,25	56,38	50,33	58,31	56,38	40,62	57,88	55,69	35,76	57,63	55,19	28,47	57,81	54,81	18,76
41	58,31	56,5	50,33	58,25	56,38	50,33	58,25	56,38	38,19	57,94	55,69	28,47	57,75	55,19	26,04	57,81	54,88	18,76
42	58,25	56,5	52,76	58,31	56,38	50,33	59,13	56,31	45,47	58	55,69	33,33	57,88	55,25	30,9	57,75	55	21,19
43		Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι			Μέσοι όροι	
44	58,306	56,401	51,36275	58,27775	56,36275	47,78	58,27325	56,24	43,16775	57,98575	55,79375	33,14775	57,7215	55,37025	26,71175	57,441	54,7925	19,1245
45	V=	0,4985937	m3/h	V=	0,48089	m3/h	V=	0,4570907	m3/h	V=	0,4005435	m3/h	V=	0,3595621	m3/h	V=	0,304241	m3/h
46	Q=	1,0853961	kW	Q=	1,052352	kW	Q=	1,062037	kW	Q=	1,0033137	kW	Q=	0,9660935	kW	Q=	0,9207976	kW
47																		
48																		

tax III | tax II | tax I | final

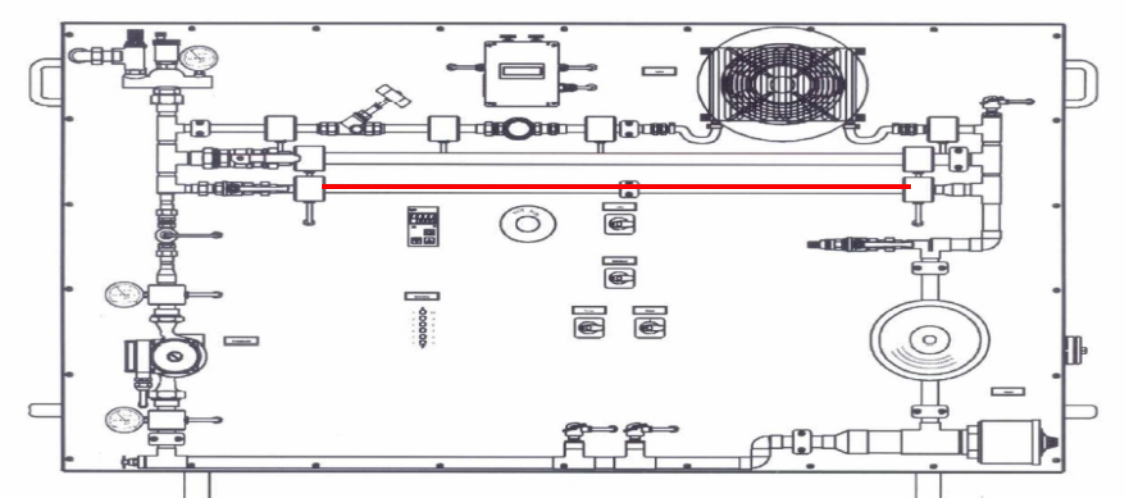
Έτοιμο

82%

Q=f(V) για ταχύτητα κυκλοφορητή I

5.4 Πτώση πίεσης σε αγωγό

Στο παρόν εδάφιο θα γίνει μια προσπάθεια καταγραφής της πτώσης πίεσης σε αγωγό της εγκατάστασης, και ταυτόχρονη σύγκριση της τιμής αυτής με μία θεωρητική, η οποία προκύπτει από το πρόγραμμα υδραυλικών υπολογισμών Engineering Equation Solver, EES.



Εικόνα 6. Αγωγός στον οποίο μετρήθηκε πτώση πίεσης. . [2]

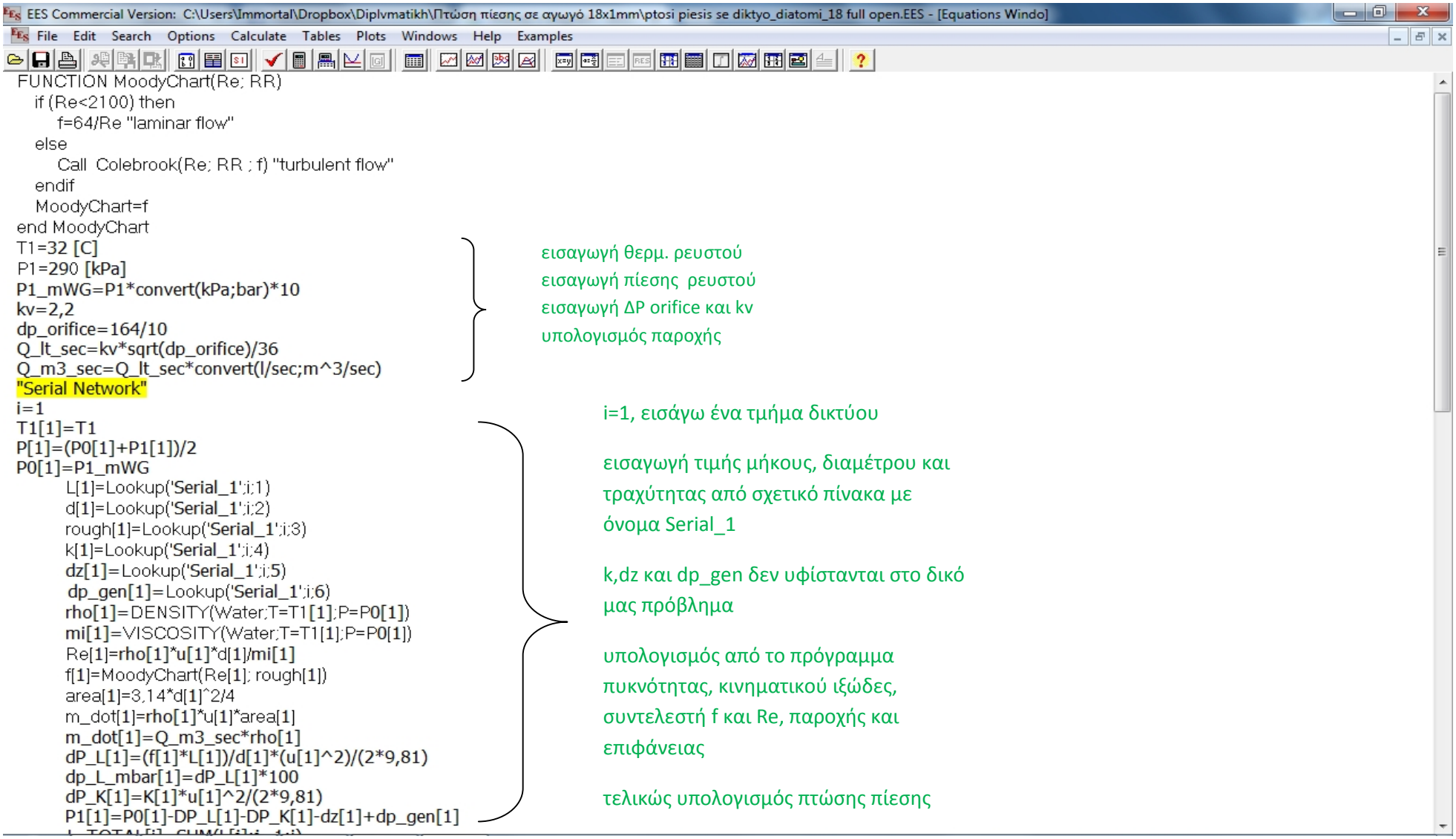
Η επιλογή του αγωγού φαίνεται στην εικόνα 6 (κόκκινο χρώμμα) και αποτελεί τον τρίτο αγωγό της εγκατάστασης. Έχει εξωτερική διάμετρο 18mm και πάχος 1mm,ενώ το υλικό κατασκευής είναι χαλκός. Η μετρήσεις θα γίνουν για δύο θέσεις της βάνας (ball valve) η οποία βρίσκεται στην είσοδο του αγωγού. Αυτές θα είναι full open και 45 degr closed. Η λήψη μετρήσεων με το μανόμετρο διαφορικής πίεσης έγινε στα άκρα του αγωγού από δύο σημεία απόστασης 1 m μεταξύ τους, ενώ η τιμή της παροχής προσδιορίστηκε από το orifice plate.

Στον Πίνακα 4 βλέπουμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την λήψη μετρήσεων διαφορικής πίεσης στα άκρα του αγωγού αλλά και στα άκρα της βαλβίδας με στένωση, τιμές οι οποίες προήλθαν από το μέσο όρο 30 τιμών με συχνότητα δειγματοληψίας περίπου 1Hz. Η τιμή του ΔP στα άκρα της βαλβίδας με στένωση είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της παροχής (αφού ξέρω το kv)και κατ επέκταση τον προσδιορισμό της ταχύτητας (προσδιορισμός Re) του ρευστού από το πρόγραμμα EES.

Το EES αποτελεί ένα πολύ καλό εργαλείο υδραυλικών υπολογισμών στο οποίο εισάγεται ένας κώδικας και τα απαραίτητα δεδομένα σε μορφή πίνακα, ώστε αυτό πλέον, κάνοντας χρήση μιας μεγάλης βιβλιοθήκης δεδομένων (διάγραμμα moody, χαρακτηριστικά ρευστών , κα) εξάγει τις ζητούμενες τιμές.

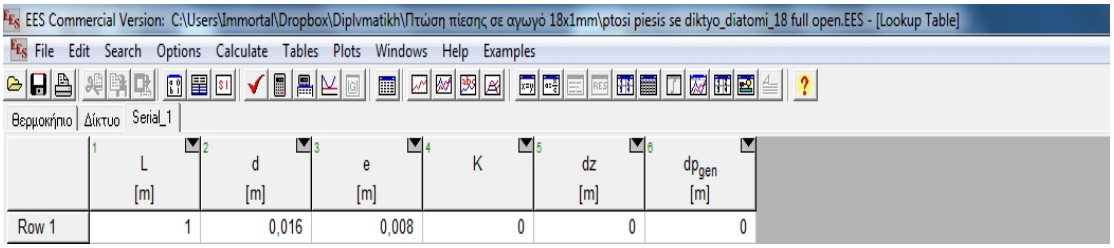
Πίνακας 4. Αποτελέσματα ΔP στη βαλβίδα με στένωση (ΔP orif) αλλά και στα άκρα αγωγού (ΔP αγωγ)

Full open valve					45deg closed				
ΔPαγωγ (mbar)	**ΔPorif (mbar)**				**ΔPαγωγ (mbar)**	**ΔPorif (mbar)**			
21,19	174,2				13,9	94,05			
16,33	159,63				13,9	111,05			
16,33	174,2	**ΔPorif**	164,0017	mbar	11,47	94,05	**ΔPorif**	97,208	mbar
21,19	181,49	**ΔPorif**	16,40017	kPa	13,9	101,34	**ΔPorif**	9,7208	kPa
18,76	159,63	**ΔPαγωγ**	19,165	mbar	13,9	86,76	**ΔPαγωγ**	12,442	mbar
16,33	171,77	**ΔPαγωγ**	1,9165	kPa	11,47	113,48	**ΔPαγωγ**	1,2442	kPa
18,76	162,06				9,04	98,91			
18,76	164,49				11,47	94,05			
18,76	166,92				9,04	103,77			
16,33	176,63				16,33	91,62			
18,76	152,34				13,9	103,77			
16,33	166,92				9,04	89,19			
18,76	147,49				11,47	96,48			
21,19	157,2				16,33	91,62			
18,76	166,92				6,61	106,2			
18,76	166,92				9,04	96,48			
21,19	164,49				9,04	89,19			
21,19	157,2				13,9	86,76			
21,19	164,49				13,9	96,48			
21,19	157,2				13,9	98,91			
16,33	171,77				18,76	94,05			
21,19	169,34				11,47	101,34			
21,19	181,49				11,47	108,62			
18,76	162,06				13,9	103,77			
18,76	162,06				13,9	98,91			
18,76	157,2				11,47	86,76			
18,76	157,2				16,33	89,19			
21,19	149,91				13,9	98,91			
21,19	157,2				9,04	96,48			
18,76	159,63				11,47	94,05			



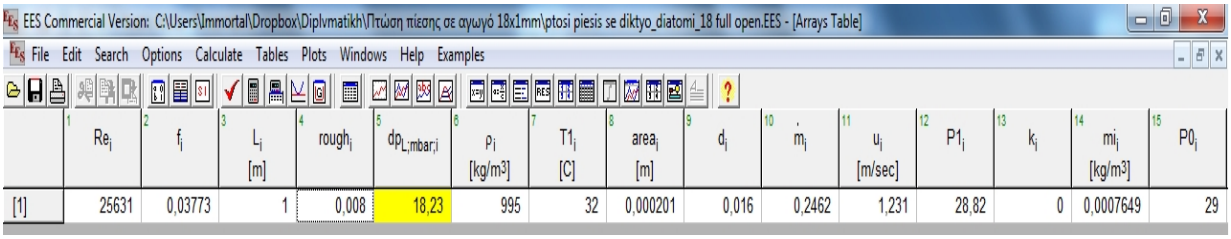
Εικόνα 7. Θεωρητικός υπολογισμός πτώσης πίεσης στον αγωγό από το EES

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται ο κώδικας που ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα, καθώς και επεξηγηματικά σχόλια. Στο παραπάνω πρόγραμμα οι τιμές του μήκους, της εσωτερικής διαμέτρου και της τραχύτητας του αγωγού τοποθετήθηκαν μέσω πίνακα, εικόνα 8.



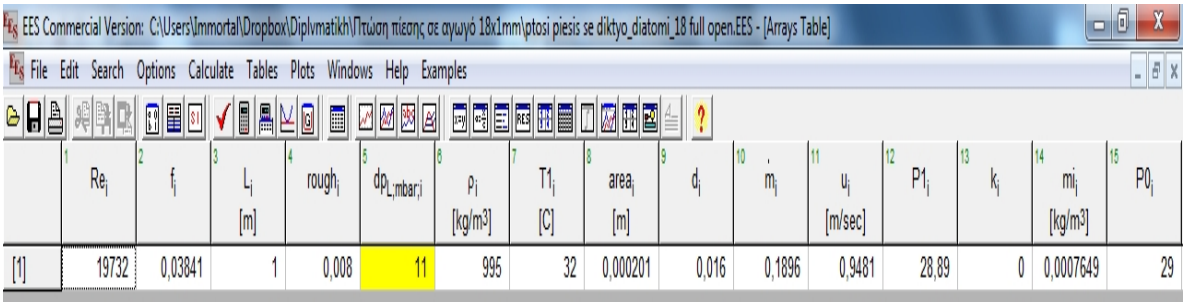
Εικόνα 8. Εισαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών αγωγού στο EES

Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9



Εικόνα 9. Αποτέλεσμα υπολογισμού για ΔΡ από το EES (full open valve)

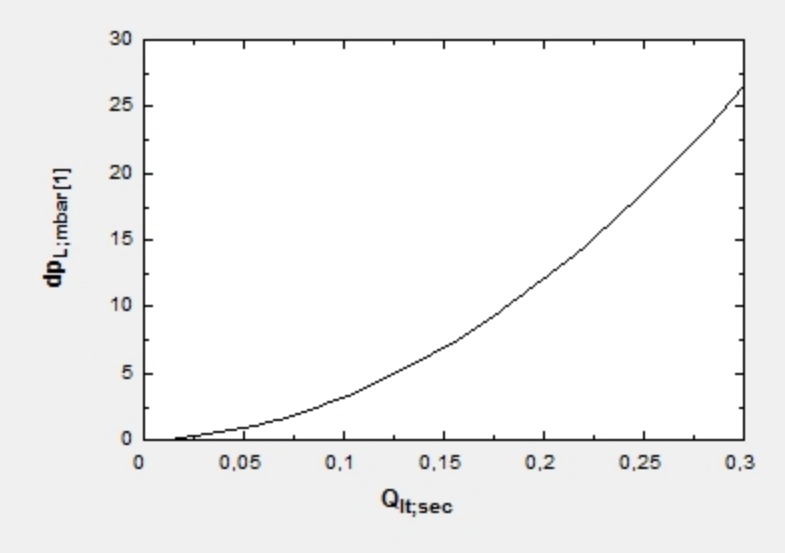
Βλέπουμε λοιπόν ότι για full open valve, η τιμή ΔΡαγωγ=18,23mbar που εξάγει το πρόγραμμα, είναι πολύ κοντά στην τιμή ΔΡαγωγ=19,165mbar που δίδει το διαφορικό μανόμετρο.



Εικόνα 10. Αποτέλεσμα υπολογισμού για ΔΡ από το EES (45degr closed valve)

Αντίστοιχα για την περίπτωση 45 degr closed valve παρατηρούμε ότι η τιμή ΔΡαγωγ=11 mbar που εξάγει το πρόγραμμα, είναι πολύ κοντά στην τιμή ΔΡαγωγ=12,44 mbar που δίδει το διαφορικό μανόμετρο. Το μόνο που διαφοροποιήθηκε είναι η εισαγωγή διαφορετικής παροχής μέσω διαφορετικού ΔΡ orifice.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το διάγραμμα 2. Με τη βοήθεια του EES σχηματίστηκε ένα διάγραμμα που μαρτυρά τη συμπεριφορά της πτώσης πίεσης σε σχέση με την αύξηση της παροχής.



Διάγραμμα 2. Πτώση πίεσης στον αγωγό σε σχέση με την αύξηση της παροχής

5.5 Ενεργειακός ισολογισμός σε εναλλάκτη θερμότητας

Κατά την εκτέλεση ενεργειακού ισολογισμού στον εναλλάκτη θερμότητας της εγκατάστασης είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός βασικών παραμέτρων των δύο ρευστών, όπου στη προκειμένη περίπτωση είναι ο αέρας και το νερό.

Η βασικότερη εξίσωση είτε από την πλευρά του αέρα είτε από την πλευρά του νερού είναι

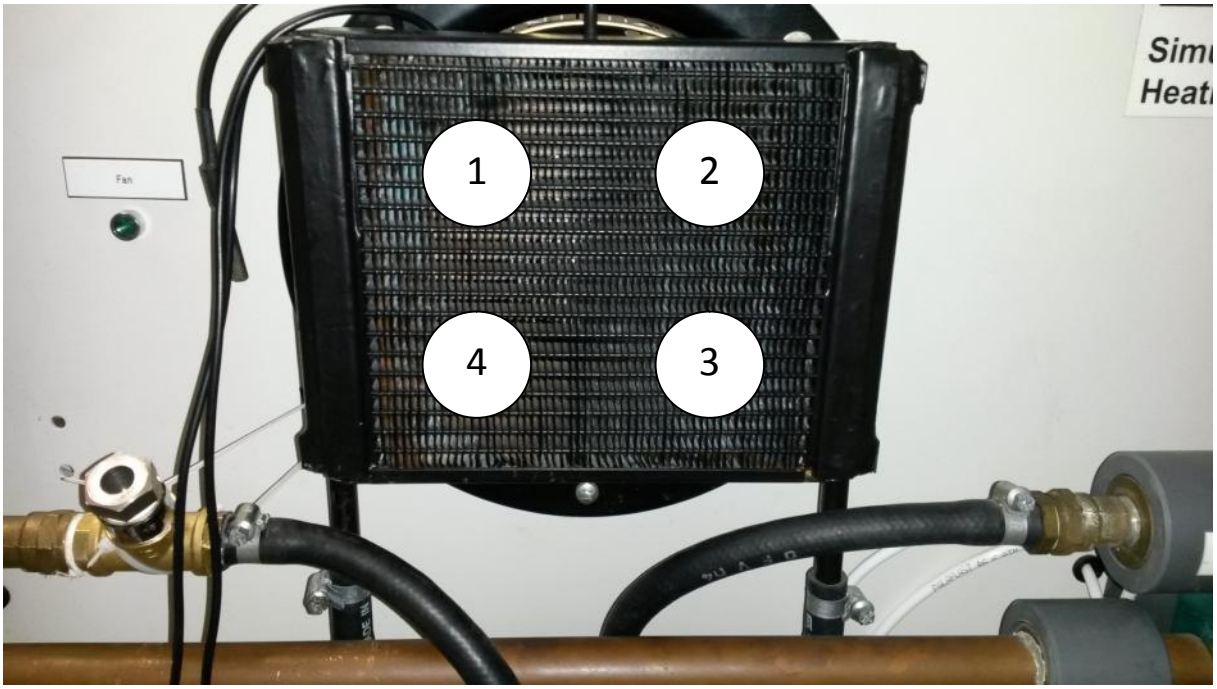
$$Q = m \cdot C \quad \cdot \Delta \qquad (5.2)$$

. Για τον καθορισμό των τιμών πυκνότητας (ρ) και θερμοχωρητικότητας (Cp) στις εκάστοτε τιμές των θερμοκρασιών, έγινε χρήση του προγράμματος Engineering Equation Solver, EES.

Εκτελέστηκε ενεργειακός ισολογισμός στον ψυγείο για την ταχύτητα I και ταχύτητα III του κυκλοφορητή. Η διαδικασία δεν διαφέρει σε κάποιο σημείο είτε για την ταχύτητα I είτε για την ταχύτητα III (Πίνακας 5 και Πίνακας 6). Αρχικά ενεργοποιήθηκε η εγκατάσταση και τοποθετήθηκε η επιθυμητή θερμοκρασία στους 60^{o}C. Παρέμενε σταθερή με τη χρήση του PID controller. Μετρήσεις ελήφθησαν μετά την πάροδο τριάντα λεπτών ώστε να βεβαιωθεί ότι όλα τα μέρη έχουν λάβει τις απαιτούμενες θερμοκρασίες, και γενικότερα ότι το σύστημα έχει έρθει σε κάποια ισορροπία.

Από τη πλευρά του νερού η μέτρηση θερμοκρασίας έγινε από τα κυάθια προ και μετά του εναλλάκτη θερμότητας. Η μέτρηση της παροχής έγινε από τη βαλβίδα στένωσης (orifice plate) και η πυκνότητα ρ και η θερμοχωρητικότητα Cp προσδιορίστηκαν από το EES για τη μέση θερμοκρασία.

Από την πλευρά του αέρα τα πράγματα είναι σχετικώς πιο σύνθετα. Ο εναλλάκτης θερμότητας χωρίστηκε σε τέσσερα ίσα τμήματα όπως δείχνει η εικόνα 11.



Εικόνα 11.Διαίρεση του εναλλάκτη σε τέσσερα νοητά ίσα τμήματα

Με τη χρήση των δύο θερμομέτρων που είχαμε στη διάθεσή μας, μετρήθηκαν 4 θερμοκρασίες εισαγωγής καθώς και 4 θερμοκρασίες εξαγωγής αέρα. Δεν έγινε εξαγωγή μέσου όρου αλλά για κάθε σημείο υπολογίστηκε ένα ποσό ισχύς κάνοντας χρήση του τύπου

$$Q = \sum_1^4 A \cdot U \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta \ , \qquad (5.3)$$

όπου Α είναι το $\frac{1}{4}$ της συνολικής επιφάνειας της πρόσοψης του ψυγείου, U η ταχύτητα του αέρα στο σημείο αυτό μετρούμενη με ψηφιακό όργανο μέτρησης ταχύτητας, ρ η πυκνότητα του αέρα και Cp η θερμοχωρητικότητα του αέρα στη μέση θερμοκρασία ανάμεσα σε Tin και Tout, και ΔT=Tout-Tin.

Πίνακας 5. Ενεργειακός ισολογισμός για ταχύτητα ΙΙΙ κυκλοφορητή.

high T	lowT	ΔT	millibar	υπολογισμένη παροχη m3/h	Cp * πυκνοτ/3600	Ισχύς Νερου	Final Q water		θέση στραγγαλιστικής	1			
58,5	57	1,5	77,05	0,6107	1,1434285	1,047392	1,09638	kW	kv σε αυτή τη θέση	2,2			
58,5	57	1,5	77,05	0,6107	1,1434285	1,047392			Μέσος όρος ΔP	79,92731	mbar		
58,56	57	1,56	72,19	0,5911	1,1434285	1,054374				0,079927	bar		
58,56	57	1,56	96,48	0,6833	1,1434285	1,218919			Παροχή Water	0,621971	m3/h		
58,56	57	1,56	79,48	0,6202	1,1434285	1,106331	Απόλκιση	1,00	%				
58,63	57,06	1,57	77,05	0,6107	1,1434285	1,09627	επιφανεια ψυγειου	0,0306	0,0306	m^2			
58,63	57,06	1,57	69,76	0,5811	1,1434285	1,043121							
58,63	57,06	1,57	84,34	0,6389	1,1434285	1,14696							
58,63	57,06	1,57	89,19	0,6570	1,1434285	1,179477	Final Q	air	1,085403118	kW			
58,56	57,06	1,5	86,76	0,6480	1,1434285	1,111432							
58,56	57,06	1,5	91,62	0,6659	1,1434285	1,142137		-	-				
58,56	57,06	1,5	89,19	0,6570	1,1434285	1,126889							
58,56	57,06	1,5	67,33	0,5709	1,1434285	0,9791	Ταχύτητα ροής αέρα			T_out_air	Cp_air kJ/kgk	ρ air kg/m3	εμβαδον	T_in_air
58,63	57,06	1,57	69,76	0,5811	1,1434285	1,043121	Σημείο 1	4,01	m/sec	26	1,007	1,148	0,00765	35,1
58,63	57,06	1,57	81,91	0,6296	1,1434285	1,130316	Σημείο 2	3,92	m/sec	26	1,007	1,146	0,00765	36,1
58,63	57,06	1,57	94,05	0,6747	1,1434285	1,211186	Σημείο 3	4,35	m/sec	26	1,007	1,153	0,00765	32,49
58,63	57,13	1,5	69,76	0,5811	1,1434285	0,996612	Σημείο 4	4,16	m/sec	26	1,007	1,157	0,00765	30,38

- Υπάρχουν και άλλες μετρήσεις ώστε να εξαχθεί ο μέσος όρος στις τρεις πρώτες στήλες

Πίνακας 6. Ενεργειακός ισολογισμός για ταχύτητα Ι κυκλοφορητή.

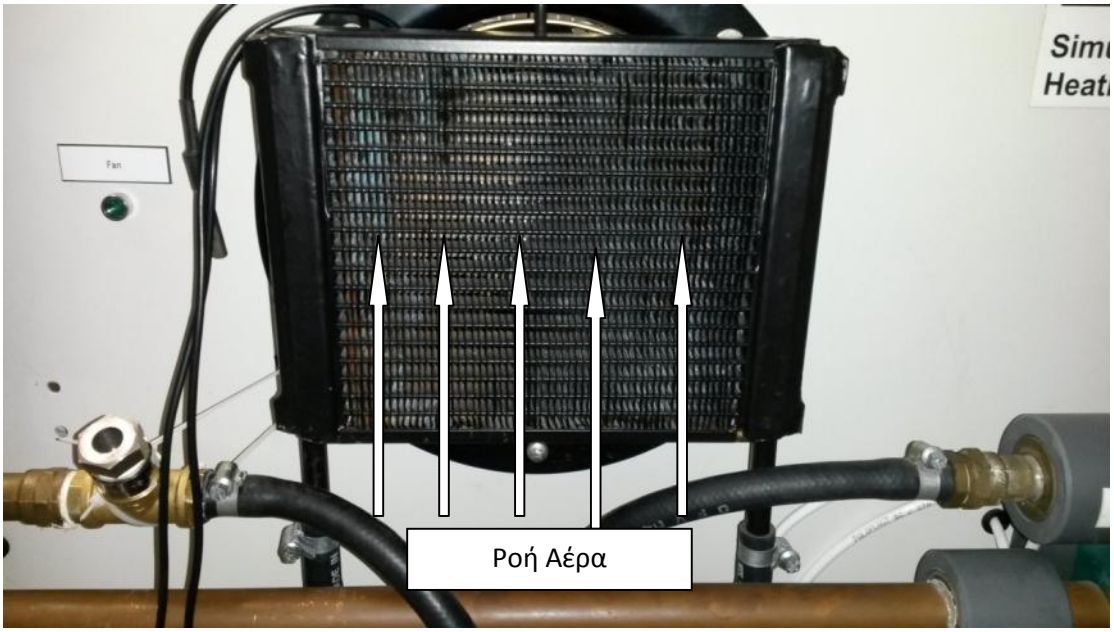
highT	lowT	ΔT	millibar	υπολογισμένη παροχη m3/h	Cp * πυκνοτ/3600	Ισχύς Νερου kW	Final Q water		θέση στραγγαλιστικής	1				
58,31	56,63	1,68	57,62	0,5281	1,14366	1,014649	1,0329193	kW	kv σε αυτή τη θέση	2,2				
58,25	56,56	1,69	52,76	0,5053	1,14366	0,976695			Μέσος όρος ΔP	52	mbar			
58,25	56,5	1,75	55,19	0,5168	1,14366	1,034399				0,05	bar			
58,31	56,5	1,81	50,33	0,4936	1,14366	1,021673			Παροχή	0,5	m3/h			
58,38	56,5	1,88	50,33	0,4936	1,14366	1,061185								
58,44	56,5	1,94	60,05	0,5391	1,14366	1,196129		Απόλκιση	3,95	%				
58,44	56,56	1,88	67,33	0,5709	1,14366	1,227389								
58,5	56,63	1,87	57,62	0,5281	1,14366	1,129401	επιφανεια ψυγειου	0,0306	0,0306	m^2				
58,44	56,63	1,81	50,33	0,4936	1,14366	1,021673								
58,44	56,63	1,81	52,76	0,5053	1,14366	1,046046								
58,38	56,63	1,75	52,76	0,5053	1,14366	1,011371	Final Q	air	0,992152	kW				
58,31	56,63	1,68	55,19	0,5168	1,14366	0,993023								
58,31	56,56	1,75	43,05	0,4565	1,14366	0,913576		-	-					
58,31	56,56	1,75	50,33	0,4936	1,14366	0,987806								
58,38	56,5	1,88	52,76	0,5053	1,14366	1,086501	Ταχύτητα ροής αέρα			T_out_air	Cp_air kJ/kgk	ρ air kg/m3	εμβαδον	T_in_air
58,38	56,5	1,88	47,9	0,4815	1,14366	1,035251	Σημείο 1	4,01	m/sec	26	1,007	1,149	0,00765	33
58,44	56,56	1,88	47,9	0,4815	1,14366	1,035251	Σημείο 2	3,92	m/sec	26	1,007	1,147	0,00765	35,31
58,5	56,63	1,87	55,19	0,5168	1,14366	1,105329	Σημείο 3	4,35	m/sec	26	1,007	1,154	0,00765	31,81
58,56	56,63	1,93	45,47	0,4691	1,14366	1,035475	Σημείο 4	4,16	m/sec	26	1,007	1,155	0,00765	31,31

- Υπάρχουν και άλλες μετρήσεις ώστε να εξαχθεί ο μέσος όρος στις τρεις πρώτες στήλες

5.6 Αποδοτικότητα εναλλάκτη θερμότητας

Ανάλυση βαθμού αποδοτικότητας

Στην πειραματική εγκατάσταση όπως έχει ήδη περιγραφτεί, υπάρχει ένας εναλλάκτης θερμότητας (νερό - αέρας) σταυρωτής μη αναμειγνυόμενης ροής (Εικόνα 12).



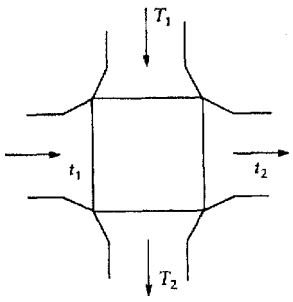
Εικόνα 12. Εναλλάκτης νερού - αέρα

Ο ανεμιστήρας που βρίσκεται στο πίσω μέρος του εναλλάκτη εξαναγκάζει τον αέρα σε ροή από την επιφάνεια που φαίνεται στην εικόνα 12 προς τα μέσα, όπως δείχνουν τα βέλη.

Η γενική εξίσωση που χαρακτηρίζει τη μεταφορά θερμότητας σε ένα εναλλάκτη είναι

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta \ \ln \qquad (5.4)$$

όπου q είναι η μεταφερόμενη θερμότητα, U είναι ο συνολικός συντελεστής (συναγωγής) μεταφοράς θερμότητας, A η επιφάνεια συναλλαγής, F ο συντελεστής διόρθωσης και ΔT_{lm} η λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



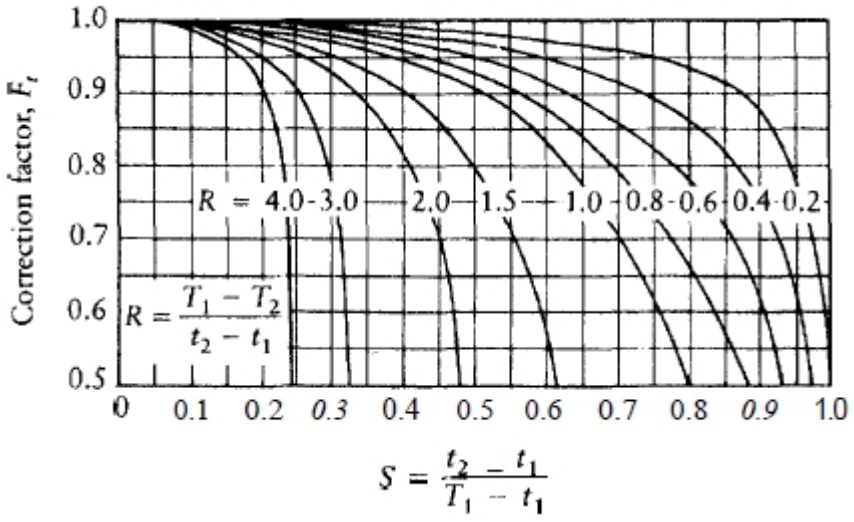
Εικόνα 13. Εναλλάκτης σταυρωτής ροής. [1]

Έστω ότι T_1 η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο και T_2 η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του ψυγείου. Επίσης, t_1 η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο και t_2 η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του ψυγείου. Ισχύει ότι $T_1 > T_2$ και $t_1 < t_2$.

Τότε ισχύει $\Delta\ ln\ = \frac{(T1-t2)-(T2-t1)}{\ln\{\frac{T1-t2}{T2-t1}\}}$. (5.5)

Ο προσδιορισμός του συντελεστή διόρθωσης γίνεται από το διάγραμμα 3, όπου

$$S = \frac{t2-t1}{T1-t1} \quad (5.6) \quad \text{και } R = \frac{T1-T2}{t2-t1} \quad (5.7)$$

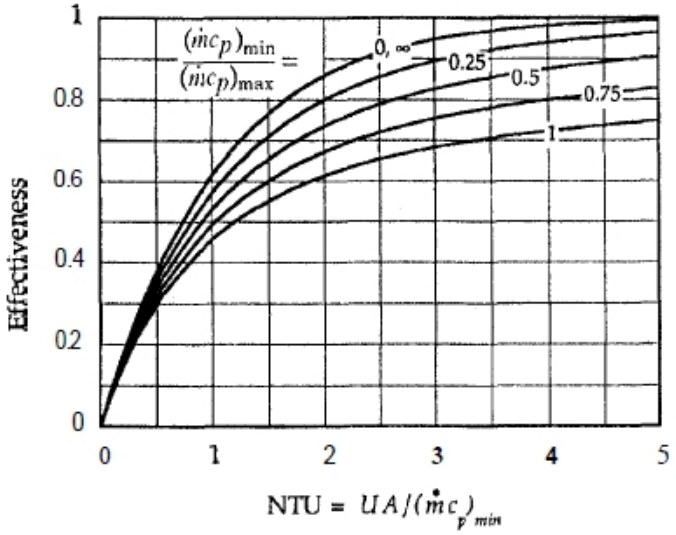


Διάγραμμα 3. Προσδιορισμός συντελεστή διόρθωσης F. [1]

Ο προσδιορισμός της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας A δεν είναι εύκολος, καθώς το ψυγείο αποτελείται από πολλά μικρά τμήματα ακαθόριστων διαστάσεων. Το ίδιο ισχύει και για τον συντελεστή U, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό του ψυγείου, την ταχύτητα των ρευστών κ.α.

Στο πείραμα του θερμικού ισολογισμού, που έλαβε χώρα, είναι εύκολο να προσδιοριστεί το γινόμενο UA μιας και είναι γνωστές οι θερμοκρασίες όπως επίσης και η συνολική μεταφερόμενη θερμότητα q.

Ο παραπάνω προσδιορισμός θα μας βοηθήσει να καθορίσουμε, μέσω γραφικής λύσης από το διάγραμμα 4, τον βαθμό αποτελεσματικότητας του ψυγείου. Αρκεί ο προσδιορισμός του NTU (αριθμός μονάδων μεταφοράς) που δίδεται από τη σχέση $N \quad = \frac{U}{(m \cdot Cp)m}$ (5.8). Στην περίπτωση του δικού μας πειράματος $(mCp)_{min}$ είναι αυτό του αέρα. Επίσης για την επιλογή της κατάλληλης καμπύλης του διαγράμματος 4 προσδιορίζουμε και το λόγο $\frac{(m \quad)m}{(m \quad)m}$



Διάγραμμα 4. Βαθμός αποτελεσματικότητας ψυγείου. [1]

Εξίσου ορθή είναι η προσέγγιση του βαθμού αποδοτικότητας μέσω της σχέσης $\varepsilon = \frac{t2-t1}{T1-t1}$ (5.9). Η σχέση αυτή προκύπτει από τον ορισμό του βαθμού αποδοτικότητας, οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της θερμότητας που εναλλάχτηκε προς τη μέγιστη θερμότητα που θεωρητικώς θα μπορούσε να είχε εναλλαχτεί. $\varepsilon = \frac{q}{q}$ (5.10) όπου $q = qw \quad = m \cdot C \quad \cdot (T1 - T2)$ (5.11) όμως $q_{water}=q_{air}$ άρα

$$\varepsilon = \frac{(m \quad)m \quad \cdot(t2-t1)}{(m \quad)m \quad \cdot(T1-t1)} = \frac{t2-t1}{T1-t1} \qquad (5.12)$$

Εφαρμογή

Η εφαρμογή των παραπάνω διαδικασιών θα γίνει με τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί από το θερμικό ισολογισμό στον εναλλάκτη για την ταχύτητα I του κυκλοφορητή. Για τις θερμοκρασίες ως t ή T θα ληφθεί ο μέσος όρος των τεσσάρων σημείων στα οποία ελήφθησαν θερμοκρασίες.

Πίνακας 7. Δεδομένα εναλλάκτη

T1	58,41	^{o}C	Είσοδος Νερού
T2	56,61	^{o}C	Έξοδος Νερού
t1	26,00	^{o}C	Είσοδος Αέρα
t2	33,80	^{o}C	Έξοδος Νερό
q	1,02	kW	
(mCp)min	0,1458	kW/K	Αέρα
(mCp)max	0,5739	kW/K	Νερό
min/max	0,2540		

Έχω ότι $S = \frac{t2-t1}{T1-t1} = \frac{3\ .8-2}{5\ .4\ -2} = 0.24$ και $R = \frac{T1-T2}{t2-t1} = \frac{5\ .4\ -5\ .6}{3\ .8-2} = 0.23$

και από διάγραμμα 3 έχω ότι Συντελεστής F =0,98

Επίσης $\Delta\ li\ = \frac{(T1-t2)-(T2-t1)}{li\left\{\frac{T1-t2}{T2-t1}\right\}} =$ 27,5

και από εξίσωση (5.4) έχω UA = 37.8 W/K

Από εξίσωση (5.8) NTU = 0,149 και $\frac{(m\quad)m}{(m\quad)m} = 0{,}254$

Το διάγραμμα 4 μας δίνει βαθμό αποτελεσματικότητας Effectiveness = 0,17

Επίσης από εξίσωση (5.9) ο βαθμός αποδοτικότητας του εναλλάκτη είναι ε=0,24

Βιβλιογραφία

1. William S. Janna Engineering Heat Transfer, Third Edition CRC press
2. Instruction Manual Gunt HL 630 Heating SystemTraining Panel with PC control