

Κεφάλαιο 6^ο

Μέτρηση άλλων φυσικών μεγεθών

6.1 Μέτρηση θερμοκρασίας

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί αναφορικά με το τι είναι θερμοκρασία. Σαν παράδειγμα, θερμοκρασία είναι αυτό που μας δείχνει αν κάτι είναι κρύο ή ζεστό. Σε μικροσκοπική κλίμακα, η θερμοκρασία ενός συστήματος σχετίζεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων που αποτελούν το σύστημα. Τέλος, σε μακροσκοπική κλίμακα, θερμοκρασία είναι μια φυσική ποσότητα που καθορίζει την διεύθυνση ροής της θερμότητας.

Οι πλέον συνηθισμένες κλίμακες για την μέτρηση θερμοκρασίας είναι οι: Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$), Φαρενάιτ ($^{\circ}\text{F}$) και Κέλβιν (K), που συνδέονται με τις σχέσεις:

$$^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9}{5}\right) \times ^{\circ}\text{C} + 32 \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad (6.1)$$

Η κλίμακα Κέλβιν έχει θερμοδυναμική προσέγγιση και είναι απόλυτη. Σαν σημείο αναφοράς θεωρεί το τριπλό σημείο του νερού (273 K). Οι άλλες δύο κλίμακες είναι σχετικές και βασίζονται σε γνωστά σημεία διαφόρων υλικών όπως:

Σημείο βρασμού νερού $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Τριπλό σημείο νερού $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Σημείο τήξης Ag $1235,08 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Σημείο τήξης Au $1337,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Υπάρχει πληθώρα τύπων αισθητήρων θερμοκρασίας, με κύριους τους: θερμόμετρα διαστολής, θερμοζεύγη, θερμόμετρα αντίστασης, θερμίστορ, διμεταλλικά θερμόμετρα και πυρόμετρα. Η λειτουργία του θερμόμετρου αντίστασης βασίζεται στην μεταβολή της τιμής της αντίστασης ωμικού αντιστάτη σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Αν R_0 η αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), R_T η αντίσταση σε θερμοκρασία T , γενικά ισχύει:

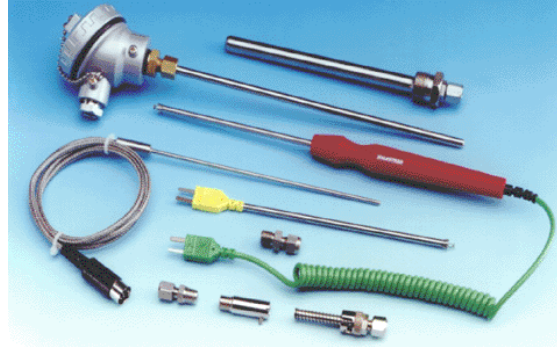
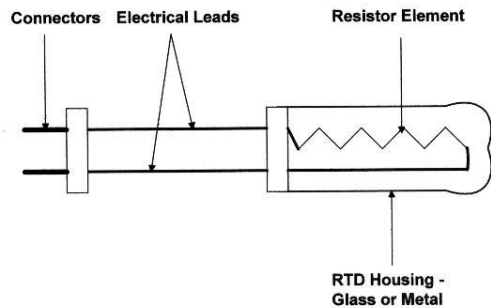
$$R_T = R_0 \left[1 + \alpha \Delta T + \beta (\Delta T)^2 + \gamma (\Delta T)^3 + \dots \right] \quad (6.2)$$

όπου α , β , γ κλπ συντελεστές και $\Delta T = T - T_{\text{ανα}}$. Σε πρώτη προσέγγιση (χαμηλές θερμοκρασίες) ισχύει:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha \Delta T] \quad (6.3)$$

με α το γνωστό θερμικό συντελεστή αντίστασης ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Τυπικές τιμές αντίστασης στους 0 °C είναι: Pt 100 Ω, Ni 120 Ω, Cu 12 Ω και Ni-Fe 604 Ω. Τυπικές τιμές θερμικού συντελεστή αντίστασης είναι: Pt 0.0039 °C⁻¹, Ni 0.0067 °C⁻¹, Cu 0.0042 °C⁻¹ και Ni-Fe 0.0052 °C⁻¹.



Σχήμα 6.1 Λειτουργία και διάφοροι τύποι θερμομέτρου αντίστασης

Τυπικά, τα θερμομέτρα αντίστασης μπορούν να λειτουργήσουν από -200 °C έως 1000 °C. Όμως, η μεταβολή δεν είναι γραμμική για όλα τα μέταλλα. Η πλέον γραμμική συμπεριφορά παρουσιάζεται στην πλατίνα Pt. Αντίστοιχα, η μεγαλύτερη μεταβολή με την αντίσταση παρουσιάζεται στο νικέλιο Ni.

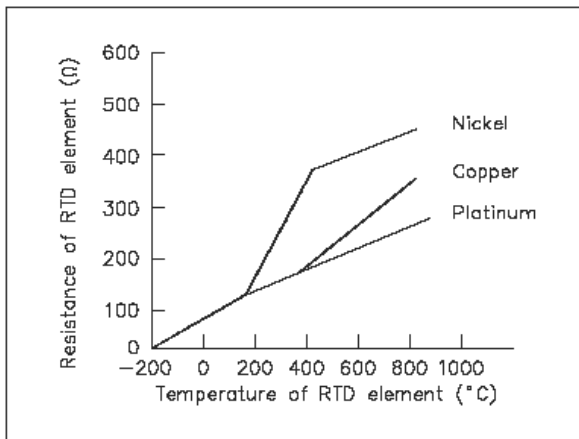
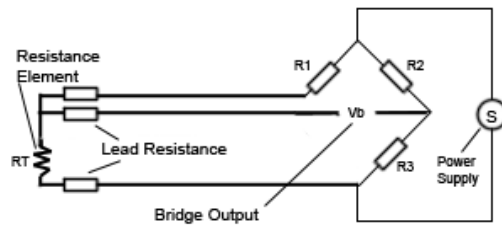


Figure 1 Electrical Resistance-Temperature Curves



Σχήμα 6.2 Σύνδεση θερμομέτρου αντίστασης και χαρακτηριστικές καμπύλες

Τα θερμομέτρα αντίστασης όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γέφυρα Wheatstone παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ακρίβεια. Λειτουργούν άνετα σε μη φιλικό περιβάλλον και χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία. Έχουν όμως αργή απόκριση.

Παράδειγμα: Έστω θερμομέτρο αντίστασης Pt (R_1) συνδεδεμένο στη γέφυρα Wheatstone του παρακάτω σχήματος, η οποία ισορροπεί στους 0 °C, με τις

αντιστάσεις να είναι 200 Ω. Αν $\alpha=0.004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, ποια η μεταβολή στην τάση εξόδου για $\Delta T=1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Γνωρίζουμε ότι:

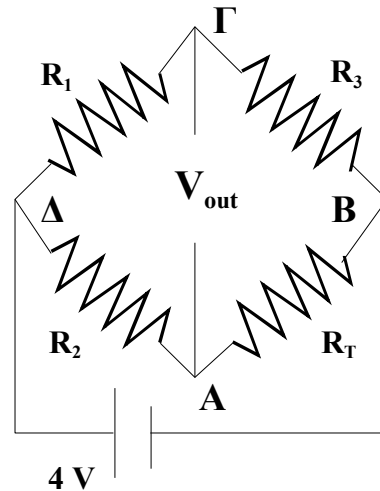
$$(\alpha) R_T = R_0 [1 + \alpha \Delta T]$$

$$(\beta) \Delta V = E \frac{\Delta R_T}{R_T + R_2}$$

Από (α) έχουμε: $\Delta R = \alpha R_0 \Delta T = 0,004 \times 200 \times 1 = 0,8 \text{ } \Omega$

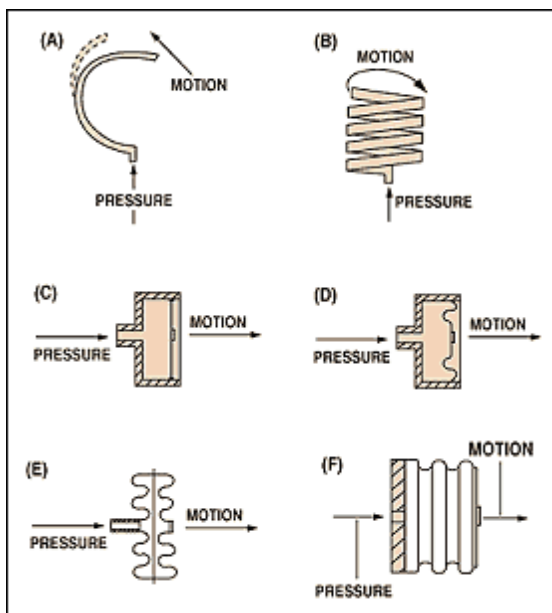
$$\text{Από (β) έχουμε: } \Delta V = 4 \frac{0,8}{400} = 8 \text{ mV}$$

Άρα έχω 8 mV μεταβολή της τάσης στην έξοδο της γέφυρας για αλλαγή της θερμοκρασίας κατά 1 °C.



6.2 Μέτρηση πίεσης

Πίεση ονομάζουμε την δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που ασκεί ο περιβάλλον χώρος σε μία επιφάνεια. Επομένως, πίεση και μηχανική τάση έχουν τον ίδιο ορισμό και την ίδια φυσική σημασία. Μονάδα πίεσης είναι το N/m^2 , που ονομάζεται Pascal (Pa), το οποίο όμως είναι πολύ μικρό σαν μονάδα. Για παράδειγμα, η πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας (1 atm ή 1 bar ή 760 mm Hg) αντιστοιχεί σε 98100 Pa. Άλλες μονάδες είναι το Torr, με 1 Torr να αντιστοιχεί σε 1 mm Hg και το psi, με 1 psi να αντιστοιχεί σε 6890 Pa.

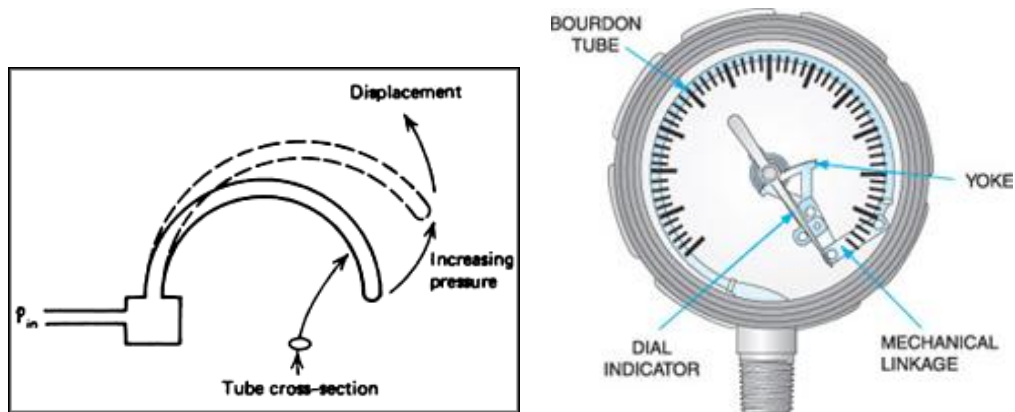


Σχήμα 6.3 Διάφοροι τύποι αισθητήρων πίεσης

Όλοι οι αισθητήρες πίεσης που χρησιμοποιούνται, μετρούν μία πίεση σε σχέση με μία πίεση αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτό υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές μέτρησης:

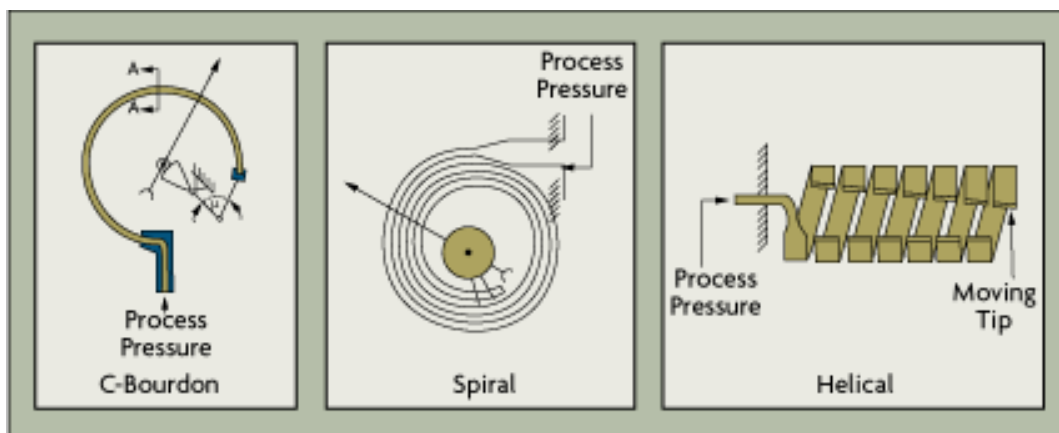
- Μέτρηση σχετικής πίεσης ως προς την ατμοσφαιρική
- Μέτρηση σχετικής πίεσης ως προς άλλη πίεση αναφοράς
- Μέτρηση απόλυτης πίεσης (ως προς το κενό)
- Μέτρησης διαφορικής πίεσης (διαφορά δύο άγνωστων πιέσεων)

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας, υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρα πίεσης με βασικότερους τους: (α) αυτούς που βασίζονται στη σύγκριση δύναμης και (β) αυτούς που βασίζονται σε ελαστική παραμόρφωση. Υπάρχουν τρία είδη αισθητήρα πίεσης που βασίζονται σε ελαστική παραμόρφωση: ο σωλήνας Bourdon, ο αισθητήρας με



Σχήμα 6.4 Λειτουργία σωλήνα Bourdon τύπου C

διάφραγμα και ο αισθητήρας με φουσητήρα. Ο σωλήνας Bourdon αποτελεί μία απλή μορφή αισθητήρα πίεσης, ο οποίος μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, με βασικές μορφές όμως το C και την ελικοειδή.



Σχήμα 6.5 Διάφοροι τύποι σωλήνα Bourdon

Η διατομή του σωλήνα Bourdon τύπου C είναι ελλειπτική ή οβάλ, με το ένα άκρο του να είναι κλειστό, ενώ το άλλο ανοικτό και υποδέχεται την υπό μέτρηση πίεση. Όλος ο σωλήνας είναι εξωτερικά στην πίεση αναφοράς. Αν αυξηθεί η πίεση στην είσοδο του ανοικτού άκρου, ο σωλήνας θα αποκλίνει και θα τείνει να ευθυγραμμιστεί (για μεγάλες πιέσεις). Η κίνηση του άκρου είναι ανάλογη της πίεσης και μπορεί να μεταφερθεί με κατάλληλο μηχανισμό σε δείκτη που κινείται σε βαθμολογημένη κλίμακα. Σε άλλες εκδοχές, ο σωλήνας Bourdon μπορεί να έχει σχήμα σπирάλ ή έλικα. Στην περίπτωση αυτή, η διακριτική ικανότητα και η ευαισθησία είναι

καλύτερη, όμως είναι μικρότερη η κλίμακα. Σε κάθε περίπτωση, η σωστή λειτουργία ενός σωλήνα Bourdon απαιτείται αντιστάθμιση για τις μετακινήσεις του άκρου που προκαλούνται από αλλαγές θερμοκρασίας. Οι σωλήνες Bourdon αποτελούν φτηνές λύσεις για αισθητήρες πίεσης, είναι κατάλληλοι και για υγρά και για αέρια και έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι σωλήνες τύπου C χρησιμοποιούνται για πιέσεις έως και 1000 bar, ενώ οι σπειροειδούς τύπου έως και 100 bar. Αν συνδυαστούν με αισθητήρα γραμμικής μετατόπισης δίνουν την δυνατότητα ηλεκτρικής εξόδου. Χρησιμοποιούνται για μέτρηση πίεσης σε πνευματικά συστήματα, μηχανήματα, εργαλεία, ελαστικά αυτοκινήτων αλλά και για τον έλεγχο των σωληνώσεων σε εργοστάσια.

6.3 Μέτρηση δύναμης

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρα δύναμης (αλλά και βάρους/ροπής) που βασίζονται σε διαφορετικές φυσικές διαδικασίες όπως: (α) Εξισορρόπηση δύναμης από γνωστό βάρος (η γνωστή ζυγαριά), (β) η μετατροπή δύναμης σε πίεση ρευστού και (γ) η παραμόρφωση ελαστικού στοιχείου.

Ο βασικός αισθητήρας δύναμης τύπου παραμόρφωσης ελαστικού στοιχείου είναι η πιεζοαντίσταση. Η αρχή λειτουργίας της είναι σχετικά απλή καθώς βασίζεται στην αλλαγή των διαστάσεων ενός αγωγίμου ή ημιαγωγίμου σύρματος (κύρια του μήκους του) λόγω της παραμόρφωσης του, που έχει σαν αποτέλεσμα μία αλλαγή στην τιμή της αντίστασης του. Για να περιγράψουμε το φαινόμενο αυτό ορίζουμε τον συντελεστή πιεζοαντίστασης G που δίνεται από την σχέση:

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (6.4)$$

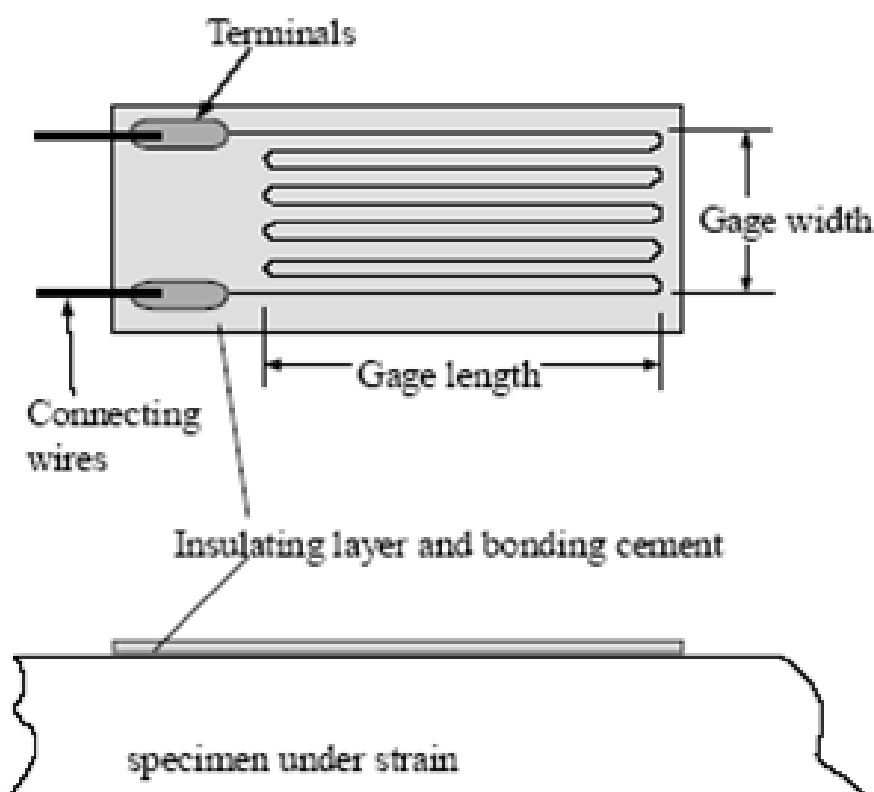
Ο συντελεστής αυτός μας καθορίζει την σχετική μεταβολή της αντίστασης ως προς την μεταβολή του μήκους του σύρματος. Αντίστοιχα, για να περιγράψουμε τις τάσεις που προκαλούν οι δυνάμεις, ορίζουμε την μηχανική τάση ε που ορίζεται από:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.5)$$

Σαν αποτέλεσμα, όταν μιλάμε για μηχανική τάση 10 με, αναφερόμαστε σε δύναμη που προκαλεί μεταβολή του μήκους του σύρματος $\Delta L = 10 \times 10^{-6} \times L$. Συνήθως, η πιεζοαντίσταση αποτελεί τον ένα βραχίονα σε γέφυρα Wheatstone, έτσι ώστε η μεταβολή της αντίστασης να μετατρέπεται σε μεταβολή τάσης.

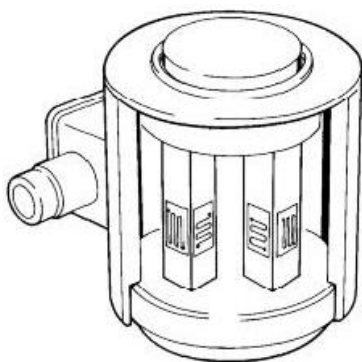
Η πιεζοαντίσταση υπάρχει σε δύο τύπους: την προσκολλημένη σε ελαστικό αντικείμενο και την ελεύθερη. Η πιεζοαντίσταση η προσκολλημένη σε ελαστικό

αντικείμενο αποτελείται από λεπτό σύρμα (0,03 mm διατομή) ή λεπτή επίστρωση αγωγίμου υλικού (όπως κράματα χαλκού-νικελίου ή χρωμίου-νικελίου) που σχηματίζουν ζιγκ-ζαγκ. Το σύρμα ή η επίστρωση είναι κολλημένο σε μονωτικό υλικό, όπως χαρτί, ενώ το όλο σύστημα είναι μόνιμα προσκολλημένο σε ελαστική επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις μπορούν να μεταβάλλονται λόγω εξωτερικής δύναμης.



Σχήμα 6.6 Διάταξη προσκολλημένης πιεζοαντίστασης

Η παραπάνω διάταξη μπορεί να παρακολουθεί δυνάμεις σε ένα άξονα (οριζόντιο), ενώ αν συνδυαστεί με δύο ή περισσότερες, μπορεί να καταγράφει δυνάμεις σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Η πιεζοαντίσταση αυτή όμως προσκολλάται μόνο μία φορά. Η αντίσταση της έχει τιμή $100 \Omega - 1 \text{ K}\Omega$, παρακολουθεί άνετα παραμορφώσεις 10-1000 με, ενώ με κατάλληλο σχεδιασμό η διακριτική της ικανότητα φτάνει τα 0,1 με. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από το πόσο καλή είναι η τοποθέτηση και η προσκόλληση του σύρματος ή της επίστρωσης. Αντίστοιχα, η ευαισθησία της εξαρτάται από την θερμοκρασία, η μεταβολή της οποίας επηρεάζει το αποτέλεσμα. Τέλος, έχει πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά καθώς μετρά μέχρι μερικές δεκάδες kHz, ενώ μπορεί να μετρήσει μέχρι μερικούς τόνους.



Για την δημιουργία αισθητήρα δύναμης μεγάλης ακρίβειας και ευαισθησίας, η λειτουργία του οποίου δεν θα επηρεάζεται από την εφαρμογή της δύναμης, έχουν αναπτυχθεί οι κυψελίδες φόρτισης (βλέπε διπλανό σχήμα). Αποτελούνται από ελαστικό άξονα (ή ελαστικούς άξονες), οι οποίοι δέχονται το φορτίο της δύναμης, πάνω στον οποίο υπάρχουν τέσσερις πιεζοαντιστάσεις, η κατεύθυνση των οποίων διαφέρει 90° (έχουν διεύθυνση ως προς την εφαρμογή της δύναμης 0°, 90°, 180°, 270°). Αποτελούν διατάξεις ακριβείας, άριστης γραμμικότητας και μεγάλης ευαισθησίας.

6.4 Μέτρηση ροής

Με τον όρο ροή αναφερόμαστε στην ποσότητα υγρού ή αερίου που περνά από μία διατομή στη μονάδα του χρόνου. Υπάρχουν τρία μεγέθη με τα οποία μπορεί να περιγραφεί η ροή:

- Ογκομετρικός ρυθμός ροής ή παροχή Q (l/s)
- Ρυθμός ροής μάζας (συνδέεται με το Q μέσω ρ)
- Ταχύτητα ροής v . Ισχύει: $Q=vS$, όπου S διατομή του σωλήνα ροής

Υπάρχει πληθώρα τύπων αισθητήρων ροής, με κύριους τους:

- Τύπου στένωσης (πτώση πίεσης)
- Ηλεκτρομαγνητικό (επαγόμενη ΗΕΔ)
- Περιστρεφόμενου τμήματος (αριθμός περιστροφών)
- Υπερήχων (χρόνος ταξιδιού)
- Σωλήνα Pitot (πίεση λόγω ροής)

Η λειτουργία του αισθητήρα ροής τύπου στένωσης μπορεί να περιγραφεί με το γενικό φορμαλισμό που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κίνησης ρευστών, δηλαδή την:

- Εξίσωση Bernoulli (που αφορά ασυμπίεστο ρευστό χωρίς τριβές)

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{σταθερό} \quad (6.6)$$

p : στατική πίεση

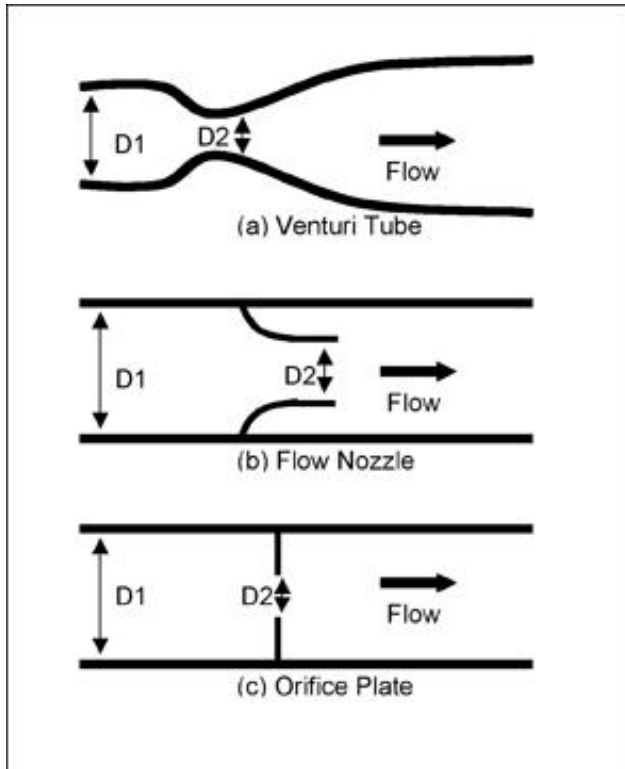
ρgh : πίεση στάθμης υγρού

$\frac{1}{2} \rho v^2$: πίεση λόγω ροής

- Εξίσωση συνέχειας (που αφορά ασυμπίεστο ρευστό, ομοιόμορφη ταχύτητα)

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (6.7)$$

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι σε στένωμα ενός σωλήνα έχουμε αύξηση της ταχύτητας ροής, ενώ παρουσιάζεται ελάττωση της στη περίπτωση διαπλάτυνσης. Παράλληλα, λόγω της εξίσωσης Bernouli, αύξηση της ταχύτητας ροής έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της στατικής πίεσης.



Για την λειτουργία ενός αισθητήρα ροής τύπου στένωσης, στην διαδρομή της ροής δημιουργείται ένα στένωμα το οποίο προκαλεί μία πτώση της στατικής πίεσης (λόγω της αύξησης της ταχύτητας στη στένωση), πτώση η οποία είναι ανάλογη της παροχής. Υπάρχουν τρεις τύποι αισθητήρα ροής τύπου στένωσης (όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα), ο σωλήνας Venturi, το ακροφύσιο και το διάφραγμα.

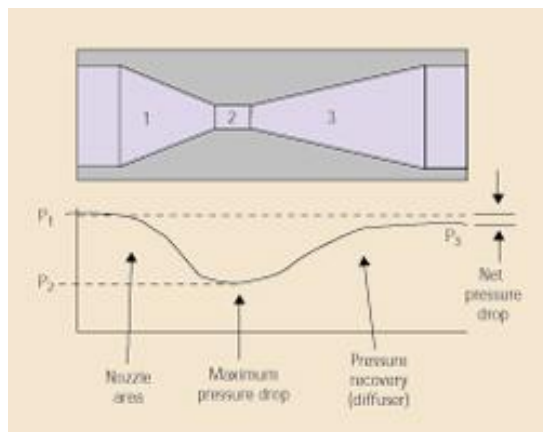
Γενικά, σε ένα αισθητήρα ροής τύπου στένωσης και για υγρά ασυμπίεστα χωρίς τριβές, θα ισχύει η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση Bernouli. Αν θεωρήσουμε ότι πριν και μετά το στένωμα οι ταχύτητες και οι διατομές ροής είναι v_1 , v_2 , $S_{1\rho}$ και $S_{2\rho}$ αντίστοιχα, τότε αποδεικνύεται ότι ισχύει για την ιδανική περίπτωση:

$$Q_{ιδαν} = \frac{S_{2\rho}}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_{2\rho}}{S_{1\rho}} \right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad (6.8)$$

όπου ρ η πυκνότητα του υγρού και p_2 , p_1 οι στατικές πιέσεις πριν και μετά το στένωμα. Οι αναφερόμενες διατομές ροής δεν έχουν απλή γεωμετρική σημασία καθώς επηρεάζονται από την ακριβή κατασκευή του αισθητήρα, το είδος του υγρού και τυχόν υπάρχουσες τριβές. Πρακτικά, η πραγματική ροή δίνεται από μία εξίσωση:

$$Q_{πραγ} = C \times Q_{ιδαν}$$

όπου C ο συντελεστής εκροής που είναι μικρότερος της μονάδας και υπολογίζεται εμπειρικά. Οι αισθητήρες ροής στένωσης τύπου ακροφύσιου και Venturi εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή εκροής αλλά και μικρότερη απώλεια πίεσης από αυτόν με διάφραγμα.



Η μεταβολή της πίεσης σε ένα αισθητήρα τύπου στένωσης φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Μακριά από την στένωση η πίεση είναι μέγιστη p_1 , ακριβώς στη θέση της στένωσης ελάχιστη, αλλά μετά την στένωση υπάρχει μία μόνιμη πτώση πίεσης.

Επειδή ο αισθητήρας ροής τύπου στένωσης προκαλεί πτώση πίεσης, η μέτρηση της ροής απαιτεί τη χρήση ενός αισθητήρα διαφορικής πίεσης. Τα μειονεκτήματα του αισθητήρα ροής τύπου στένωσης είναι η απώλεια πίεσης, η μικρή περιοχή μέτρησης, τα σφάλματα που δημιουργούνται λόγω εναπόθεσης/διάβρωσης αλλά και η απαίτηση ηλεκτρονικών για την τετραγωνική ρίζα. Τα πλεονεκτήματά τους είναι το μικρό κόστος, η απουσία κινούμενων τμημάτων και η χρήση σε πολλά είδη.