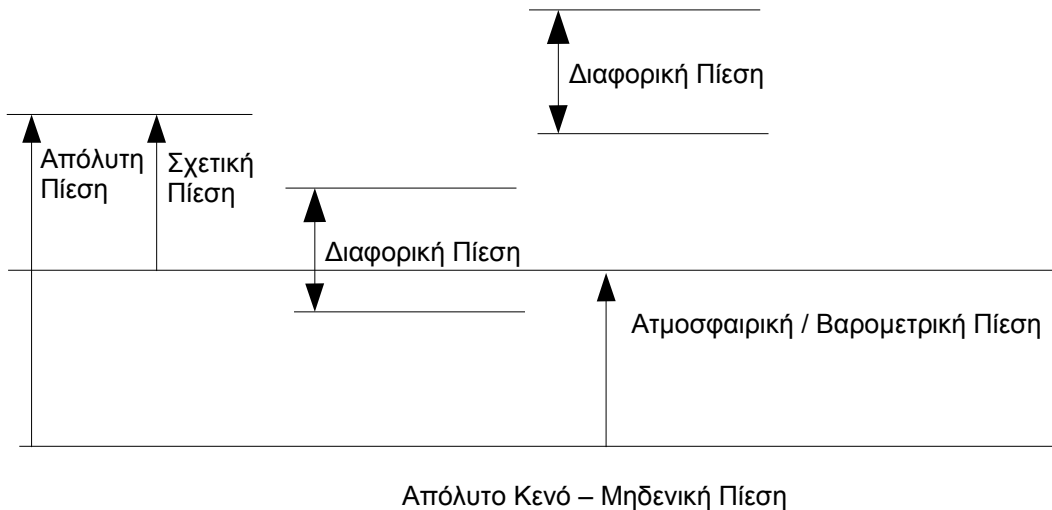


Κεφάλαιο 2 – Πίεση, Παραμόρφωση

2.1 Πίεση

2.1.1 Γενικά

Αν σε στοιχειώδη επιφάνεια ds , ασκείται δύναμη dF , τότε η πίεση ισούται με το λόγο $p = dF / ds$. Η μέτρηση της πίεσης γίνεται πάντα ως προς κάποια πίεση αναφοράς. Ως τέτοια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ατμοσφαιρική πίεση, η πίεση στο εσωτερικό κάποιας σφραγισμένης κοιλότητας στο εσωτερικό του αισθητήρα, ή η πίεση σε κάποιο άλλο σημείο. Στο σχ. 2.1, δίνονται ορισμοί πιέσεων.



Σχ. 2.1.1 Ορισμοί Πιέσεων

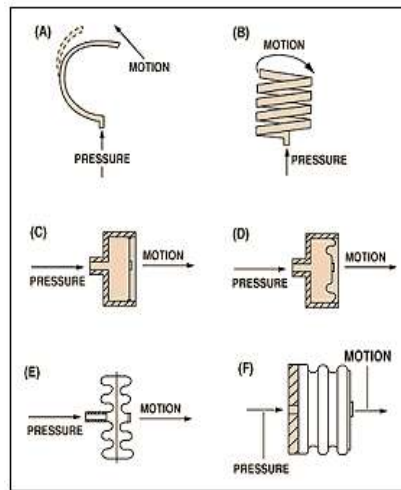
Η μηδενική πίεση είναι αυτή του απόλυτου κενού. Η απόλυτη πίεση μετράται ως προς το απόλυτο κενό. Οι αισθητήρες που μετρούν την απόλυτη πίεση αναφέρονται σε σφραγισμένη κοιλότητα στο εσωτερικό τους, στην οποία έχει δημιουργηθεί κενό. Από τον ορισμό της, η απόλυτη πίεση είναι πάντα υπερπίεση, δηλαδή λαμβάνει μόνο θετικές τιμές. Η σχετική πίεση μετριέται ως προς την ατμοσφαιρική πίεση, οπότε αυτή μπορεί να λάβει είτε αρνητικές (υποπίεση) είτε θετικές (υπερπίεση) τιμές. Η διαφορική πίεση μετράται ως προς μία τυχαία αναφορά. Όπως και η σχετική πίεση και η διαφορική μπορεί να είναι είτε θετική, είτε αρνητική. Ονομάζουμε κανονική πίεση, την πίεση της κανονικής ατμόσφαιρας, η οποία λαμβάνεται ίση με 1013,25 hPa (1 h = 1 hecto = 10^2).

Στον πίνακα που ακολουθεί, δίνονται διάφορες μονάδες πίεσης καθώς και οι μεταξύ τους σχέσεις.

Μονάδες πίεσης								
	PSI	Pascal	Bar	mbar	mmHg	mmH ₂ O	kg/cm ²	Pascal
PSI	1	0.00014504	14.504	0.014504	0.019337	0.0014223	14.696	14.223
Pascal	6894.6	1	100000	100	133.32	9.8068	101320	98067
Bar	0.068946	0.00001	1	0.001	0.0013332	9.8068E-05	1.0132	0.98068
mbar	68.946	0.01	1000	1	1.3332	0.098068	1031.2	980.68
mmHg	51.714	0.0075006	750.06	0.75006	1	0.073558	760	735.59
mmH ₂ O	703.05	0.10197	10197	10.197	13.595	1	10332	10000
ATM	0.068045	9.8692E-06	0.98692	0.00098692	0.0013158	9.6788E-05	1	0.9678
kg/cm ²	0.070305	1.0197E-05	1.0197	0.0010197	0.0013595	0.0001	1.0332	1

Οι μετρήσεις πίεσης, όπως και άλλων φυσικών μεγεθών, γίνονται είτε σε μόνιμες (σταθερές) είτε σε χρονικώς μεταβαλλόμενες (δυναμικές) συνθήκες. Οι μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες γίνονται όταν ενδιαφέρουν μόνο συνθήκες ισορροπίας, ή τα φαινόμενα μεταβάλλονται αργά με το χρόνο. Όταν ενδιαφέρουν οι μεταβολές της πίεσης συναρτήσει του χρόνου, τότε οι μετρήσεις είναι δυναμικές. Η δυναμική μέτρηση της πίεσης παρουσιάζει περισσότερες δυσκολίες σε σχέση με τις μετρήσεις υπό σταθερές συνθήκες. Στη δυναμική μέτρηση, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η απόκριση του αισθητήρα (το πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται σε δεδομένη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους), η επίδραση του χώρου μέσα στον οποίο γίνεται η μέτρηση, καθώς επίσης και η διαταραχή του μετρούμενου συστήματος που ενδεχομένως να προκαλείται από τον ίδιο τον εξοπλισμό μέτρησης.

Οι αισθητήρες πίεσης διακρίνονται σε μηχανικούς και ηλεκτρομηχανικούς. Στην ενότητα αυτή θα ασχοληθούμε μόνο με τους ηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες. Οι ηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες διαθέτουν μηχανικές διατάξεις των οποίων κάποια διάσταση μεταβάλλεται με την πίεση (σχ. 2.1.2). Οι διατάξεις αυτές μπορεί να είναι πλάκες, κελύφη ή σωλήνες. Η μεταβολή της διάστασης προκαλεί μηχανική κίνηση, η οποία μεταφέρεται σε ηλεκτρική διάταξη και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

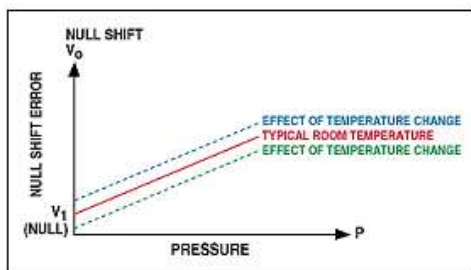


Σχ. 2.1.2 Βασικά αισθητήρια πίεσης [6].

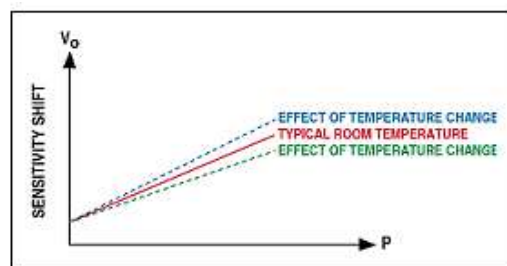
Το σήμα εξόδου ενός ηλεκτρομηχανικού αισθητήρα αποδίδεται μαθηματικά ως εξής:

$$V = k_0 + k_1 P \quad (2.1)$$

όπου V η τάση εξόδου, P η μετρούμενη πίεση, k_0 η μετατόπιση από το μηδέν και k_1 η ευαισθησία του αισθητήρα σε Volt / μονάδα πίεσης. Γενικά τα k_0 και k_1 δεν είναι σταθερές αλλά συντελεστές εξαρτώμενοι από τη θερμοκρασία (σχ. 2.1.3).



(α)

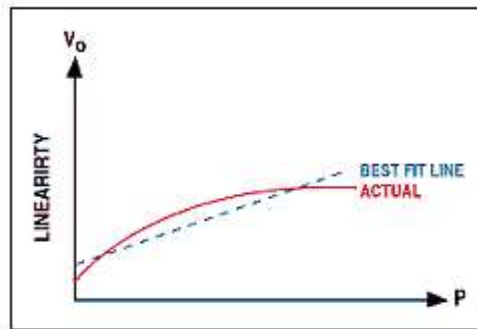


(β)

Σχ. 2.1.3 Εξάρτηση της μετατόπισης (α) και της ευαισθησίας από τη θερμοκρασία [6].

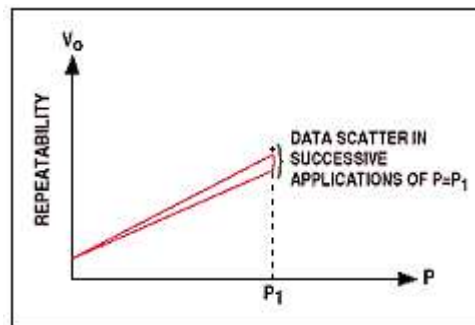
Οι αισθητήρες χαρακτηρίζονται επίσης από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Γραμμικότητα: Αναφέρεται στην απόκλιση της συμπεριφοράς του αισθητήρα από την ευθεία της εξίσωσης (2.1) (σχ. 2.1.4).



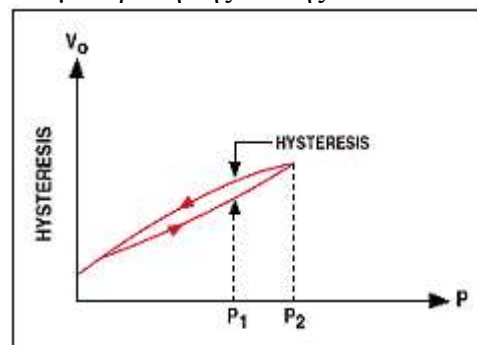
Σχ. 2.1.4 Απόκλιση από τη γραμμική συμπεριφορά [6].

- Επαναληψιμότητα: Εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να δώσει την ίδια τιμή όταν εφαρμόζεται σ' αυτόν διαδοχικά την ίδια τιμή πίεσης.



Σχ. 2.1.5 Επαναληψιμότητα [6].

- Υστέρηση: Εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να δώσει τις ίδιες τιμές πίεσης κατά την αύξουσα και κατόπιν φθίνουσα μεταβολή της πίεσης.



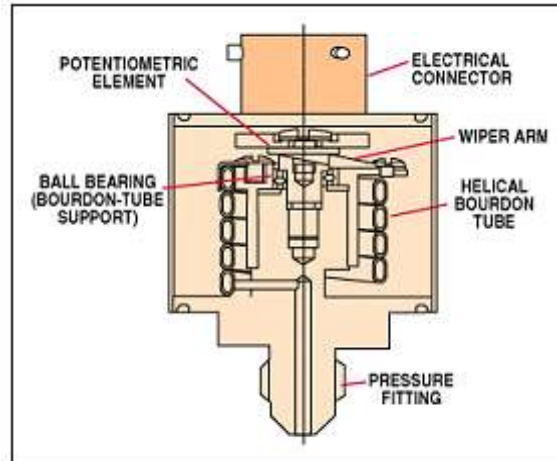
Σχ. 2.1.6 Υστέρηση [6].

- Ευαισθησία (gauge factor): Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρικού μεγέθους σε όλο το εύρος των μετρούμενων πιέσεων, προς την τιμή του για μηδενική πίεση. Αν π.χ. το μεταβαλλόμενο μέγεθος είναι η ηλεκτρική αντίσταση, τότε η ευαισθησία ορίζεται ως $\Delta R/R$, όπου R η αντίσταση όταν δεν εφαρμόζεται πίεση και ΔR η μεταβολή της αντίστασης όταν εφαρμοστεί η μέγιστη δυνατή πίεση.

2.1.2 Είδη αισθητήρων πίεσης

Ποτενσιομετρικοί

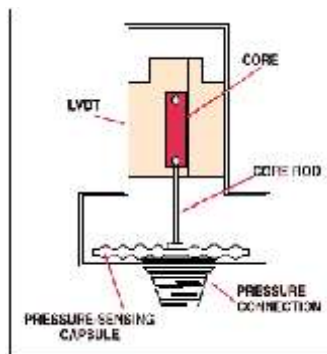
Χρησιμοποιούν μηχανική διάταξη, η παραμόρφωση της οποίας κινεί το δρομέα ενός ποτενσιομέτρου. Για να λειτουργεί αξιόπιστα πρέπει ο δρομέας να συνδέεται με τη μηχανική διάταξη αρκετά ισχυρά, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα υστέρησης και επαναληψιμότητας. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές περιορισμένων απαιτήσεων, όπως π.χ. για τη μέτρηση της πίεσης του λιπαντικού του κινητήρα των αυτοκινήτων.



Σχ. 2.1.7 Ποτενσιομετρικός αισθητήρας [6].

Επαγωγικοί

Η μηχανική κίνηση μετακινεί τον σπλισμό ενός ηλεκτρομαγνήτη. Απαιτούν εξωτερική διέγερση εναλλασσομένου ρεύματος. Αντί για ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιείται και ο λεγόμενος γραμμικός μεταβαλλόμενος διαφορικός μετασχηματιστής, του οποίου ο σπλισμός μετακινούμενος μεταβάλλει την επαγωγική ζεύξη πρωτεύοντος – δευτερεύοντος. Η απόκριση αυτών των αισθητήρων είναι σχετικά αργή.



Σχ. 2.1.8 Επαγωγικός αισθητήρας με γραμμικό μεταβαλλόμενο διαφορικό μετασχηματιστή [6].

Χωρητικοί

Οι χωρητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα λεπτό διάφραγμα ως σπλισμό ενός πυκνωτή. Η εφαρμοζόμενη πίεση παραμορφώνει το διάφραγμα, μεταβάλλοντας τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Η μεταβολή της χωρητικότητας μπορεί να είναι γραμμική ή μή και είναι της τάξης μερικών pF (piko Farad) για συνολική χωρητικότητα της τάξης των 50 – 100 pF.

Πιεζοηλεκτρικοί

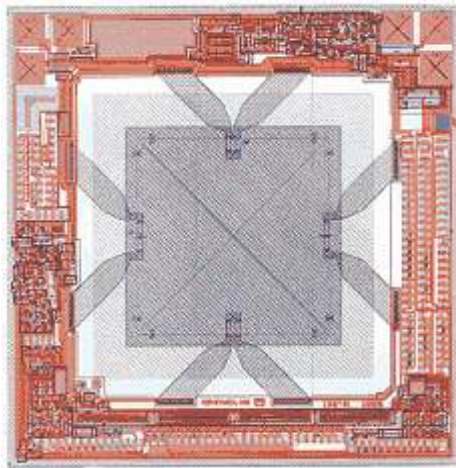
Αποτελούνται από κρύσταλλο χαλαζία ή άλλα κεραμικά υλικά. Είναι σημαντικό να θυμηθούμε ότι η πιεζοηλεκτρική τάση εμφανίζεται όσο διαρκεί η εφαρμοζόμενη μεταβολή της πίεσης. Γι' αυτό τους χρησιμοποιούμε για τη μέτρηση μεταβολών πίεσης.

Τάσης

Η μέτρηση της πίεσης είναι δυνατή και με αισθητήρες παραμόρφωσης (strain), τους οποίους θα εξετάσουμε στην ενότητα 2.2.

Πιεζοηλεκτρικοί ολοκληρωμένοι ημιαγωγοί

Χρησιμοποιούνται οι τεχνικές δημιουργίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για το σχηματισμό πιεζοαντιστάτων στην επιφάνεια ενός wafer πυριτίου (σχ. 2.1.9).



Σχ. 2.1.9. Κατασκευή ολοκληρωμένου πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης [6].

Ως μηχανική διάταξη μέτρησης της πίεσης χρησιμοποιείται διάφραγμα, πάνω στο οποίο τοποθετούνται τέσσερις πιεζοαντιστάτες, δύο για τη μέτρηση των εφαπτομενικών και οι άλλοι δύο για τη μέτρηση των ακτινικών παραμορφώσεων, που αναπτύσσονται όταν ασκηθεί πίεση στο διάφραγμα. Οι τέσσερις αντιστάτες συνδέονται ως γέφυρα. Η εικόνα ενός τέτοιου αισθητήρα δίνεται στο σχ. 2.1.10.



Σχ. 2.1.10 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης, διαστάσεων μήκους 1,32 cm, πλάτους 1,12 cm και ύψους 2,54 cm, συμπεριλαμβανομένης της θύρας επικοινωνίας [6].

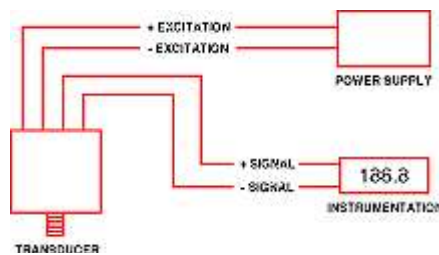
Τα κυκλώματα ενίσχυσης, αντιστάθμισης θερμοκρασίας και βαθμονόμησης, μπορούν να ενσωματωθούν στο ίδιο ολοκληρωμένο στοιχείο. Οι αισθητήρες μπορούν να κατασκευασθούν για ευρεία περιοχή πιέσεων, μεταβάλλοντας κατάλληλα το πάχος του διαφράγματος, ενώ για πολύ χαμηλές πιέσεις τη διάμετρό του. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση όλων των πιέσεων (απόλυτης, διαφορικής και σχετικής). Λόγω των μικρών του διαστάσεων έχει ταχεία απόκριση και

χρησιμοποιείται για δυναμική μέτρηση της πίεσης.

2.1.3 Εγκατάσταση και χρήση

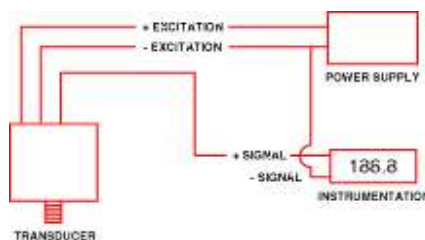
Το σήμα εξόδου των αισθητήρων πίεσης μπορεί να είναι τάση (mV ή V) ή ρεύμα (mA). Η επιλογή του κατάλληλου σήματος εξόδου, εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Θα εξετάσουμε στη συνέχεια τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς και τη συνδεσμολογία για κάθε μία από αυτές τις τρεις περιπτώσεις.

Οι αισθητήρες που έχουν σήμα εξόδου τάση της τάξης των mV χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακές εφαρμογές. Είναι φθηνοί, μικροί σε μέγεθος και απαιτούν εξωτερική τροφοδοσία. Επειδή το σήμα εξόδου είναι χαμηλό, δεν μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις – η ανώτερη απόσταση μεταξύ αισθητήρα και συστήματος μέτρησης είναι περίπου 60 m. Επίσης είναι ευαίσθητο σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές από γειτονικά ηλεκτρικά σήματα (άλλα όργανα, γραμμές υψηλής τάσης, κ.λ.π.). Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο σχ. 2.1.11.



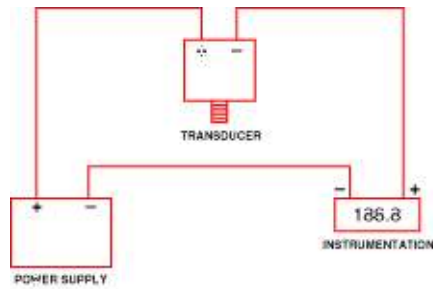
Σχ. 2.1.11 Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης – σήμα εξόδου: τάση (mV) [8].

Οι αισθητήρες με ενισχυμένο σήμα εξόδου χρησιμοποιούνται σε ήπια βιομηχανικά περιβάλλοντα ή σε συνδυασμό με υπολογιστικά συστήματα, όπου απαιτούνται υψηλότερα συνεχή σήματα. Επειδή η ενισχυτική διάταξη εμπεριέχεται στον αισθητήρα, το κόστος και το μέγεθός τους είναι μεγαλύτερα απ' ό,τι αυτό των αισθητήρων που έχουν ως σήμα εξόδου mV. Η απόσταση μεταξύ αισθητήρα και συστήματος μέτρησης μπορεί να είναι μεγαλύτερη και είναι καλύτερα προστατευμένοι ως προς τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο σχ. 2.1.12.



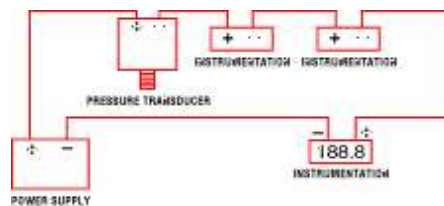
Σχ. 2.1.12 Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης – σήμα εξόδου: τάση (V) [8].

Οι αισθητήρες των οποίων το σήμα εξόδου είναι ρεύμα (mA), χρησιμοποιούνται σε βαριά βιομηχανικά περιβάλλοντα και είναι ο συνηθέστερος τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιούμε σε εφαρμογές ελέγχου διεργασιών. Η διάταξη μετατροπής του σήματος σε ρεύμα είναι ενσωματωμένη στον αισθητήρα. Για το λόγο αυτό και αυτού του είδους οι αισθητήρες είναι μεγαλύτεροι και ακριβότεροι, σε σχέση με εκείνους των οποίων το σήμα εξόδου είναι mV. Οι αισθητήρες αυτής της κατηγορίας είναι προστατευμένοι από παρεμβολές. Το σήμα τους μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Η συνδεσμολογία τους φαίνεται στο σχ. 2.1.13.



Σχ. 2.1.13 Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης – σήμα εξόδου: ρεύμα (mA) [8].

Βασικό πλεονέκτημα του αισθητήρα πίεσης με έξοδο ρεύμα, είναι η δυνατότητά του να συνδεθεί με περισσότερες από μία συσκευές, ιδιαίτερα απλά. Η συνδεσμολογία φαίνεται στο σχ. 2.1.14.



Σχ. 2.1.13 Συνδεσμολογία αισθητήρα πίεσης με σήμα εξόδου ρεύμα (mA) με περισσότερα του ενός όργανα [8].

Ο μόνος περιορισμός που τίθεται είναι η τροφοδοσία του αισθητήρα. Εστω ότι έχουμε έναν αισθητήρα πίεσης (4 – 20 mA) του οποίου η τάση τροφοδοσίας είναι 12 – 30 VDC. Ο αισθητήρας συνδέεται με όργανο ψηφιακής ένδειξης, εμπέδησης 10 Ω, ένα καταγραφικό εμπέδησης 25 Ω και υπολογιστή εμπέδησης 200 Ω. Δίνεται επίσης ότι η ολική αντίσταση των χρησιμοποιούμενων αγωγών είναι 5 Ω. Η ελάχιστη τάση τροφοδοσίας υπολογίζεται από το νόμο του Ohm, λαμβάνοντας υπόψη ότι θα πρέπει να είναι ίση με την ελάχιστη τάση διέγερσης του αισθητήρα (εδώ 12 VDC) συν την πτώση τάσης στις επί μέρους συσκευές (για τη μέγιστη ένταση του σήματος εξόδου δηλαδή 20 mA):

$$V_{\min} = V_{\text{αισ},\min} + i_{\max} R_{\text{ολ}} = 12 \text{ V} + 0,02 \text{ A} \times (10 + 25 + 200 + 5)\Omega = 16,8 \text{ V}.$$

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη χρήση των αισθητήρων με σήμα εξόδου ρεύμα, είναι το πώς θα συνδυαστούν με τα διάφορα όργανα, δεδομένου ότι τα περισσότερα απ' αυτά δέχονται στην είσοδό τους τάσεις. Αυτό γίνεται παρεμβάλλοντας μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου του οργάνου έναν αντιστάτη, η τιμή της αντίστασης του οποίου καθορίζει τη σχέση μετατροπής του ρεύματος σε τάση. Αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιήσουμε έναν αντιστάτη των 500 Ω, τότε η έξοδος των 4 - 20 mA του αισθητήρα μετατρέπεται (εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm) σε τάση εξόδου 2 – 20 V.

2.1.4 Κέρας κριού

Κατά τη χρήση των αισθητήρων πίεσης, εμφανίζεται ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο ονομάζεται κέρας κριού (waterhammer). Πρόκειται για στιγμιαία, αλλά πολύ μεγάλη μεταβολή της πίεσης που προκαλείται κατά την απότομη, κυρίως διακοπή, ή και την έναρξη της ροής του ρευστού σ' ένα υδραυλικό κύκλωμα. Όταν σταματίσουμε τη ροή μίας φλέβας νερού που ρέει στο εσωτερικό ενός

αγωγού, τότε τα στοιχεία του νερού που κινούνται πριν τον διακόπτη, συγκρούονται το ένα με το άλλο. Επειδή το νερό είναι ασυμπίεστο, δημιουργούνται κρουστικά κύματα και αναπτύσσονται τεράστιες πιέσεις. Το φαινόμενο παρομοιάζεται με ένα τρένο του οποίου η μηχανή πέφτει σε ένα τοίχο και ακινητοποιείται, ενώ τα βαγόνια που ακολουθούν συνθλίβονται λόγω της αδράνειας.

Οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι τόσο μεγάλες ώστε να μπορούν να καταστρέψουν τον αισθητήρα. Η καταστροφή προέρχεται από τη μόνιμη παραμόρφωση της μηχανικής διάταξης του αισθητήρα στην οποία εφαρμόζεται η πίεση. Αποτέλεσμα εμφάνισης του κέρατος κριού είναι ο έντονος ήχος που προέρχεται από τις υδραυλικές εγκαταστάσεις, όταν κλείνουμε απότομα μία βρύση. Σε συστήματα ελέγχου διεργασιών, το κέρατος κριού δημιουργείται κατά τη λειτουργία διαφόρων ηλεκτροβανών που περιλαμβάνονται στα υδραυλικά κυκλώματα, στα οποία, αν υπάρχουν αισθητήρες πίεσης, μπορεί να καταστραφούν. Για το λόγο αυτό θα πρέπει σε τέτοια κυκλώματα οι αισθητήρες να τοποθετούνται αφού παρεμβληθούν ειδικές προστατευτικές διατάξεις.

2.2 Παραμόρφωση

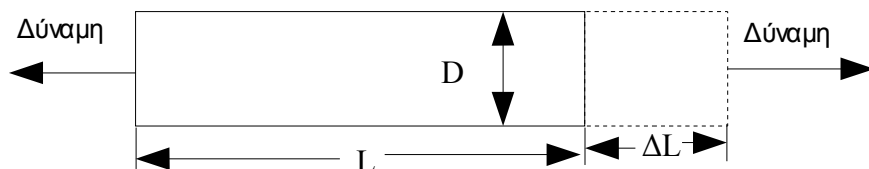
2.2.1 Γενικά

Η παραμόρφωση (strain), είναι η μεταβολή των διαστάσεων ενός σώματος, εξ αιτίας της εφαρμογής μίας δύναμης. Ως ποσότητα, η παραμόρφωση (ε) ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του μήκους (ΔL) προς το αρχικό μήκος (L):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

Η διάσταση L είναι αυτή κατά τη φορά της οποίας εφαρμόζεται η δύναμη.

Η παραμόρφωση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Αν και αδιάστατο μέγεθος, η παραμόρφωση δίνεται έχοντας ως μονάδες το λόγο δύο μηκών (συνήθως mm / mm). Στην πράξη, η μετρούμενη παραμόρφωση είναι πολύ μικρή. Για το λόγο αυτό εκφράζεται συνήθως ως μικροπαραμόρφωση, δηλαδή $\varepsilon \times 10^{-6}$.



Σχ. 2.2.1 Ορισμός της παραμόρφωσης.

Όταν μία ράβδος επιμηκύνεται υπό την επίδραση μίας διαμήκουσ δύναμης, όπως στο σχ. 2.2.1, τότε η άλλη της διάσταση D (η κάθετη προς τη φορά της εφαρμοζόμενης δύναμης) μικραίνει. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται παραμόρφωση Poisson. Το μέγεθος της μεταβολής της διάστασης D , εξαρτάται από το λόγο Poisson, ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε υλικό και ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της παραμόρφωσης ως προς τον άξονα τον κάθετο προς τη δύναμη που την προκαλεί (ε_T), προς την παραμόρφωση στον άξονα εφαρμογής της δύναμης (ε):

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

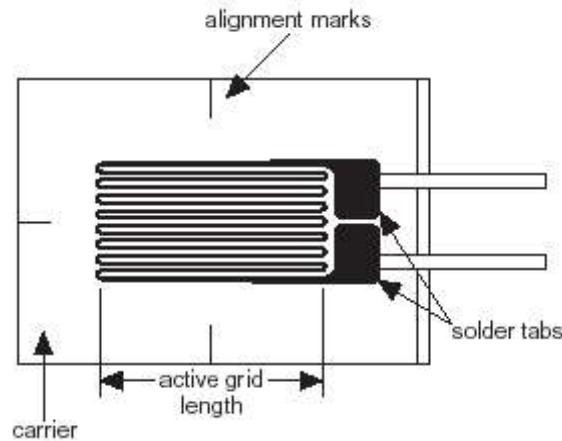
Για παράδειγμα, ο λόγος Poisson του χάλυβα κυμαίνεται μεταξύ 0.25 και 0.30.

2.2.2 Ο αισθητήρας παραμόρφωσης

Πρόκειται για διάταξη της οποίας η ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται την παραμόρφωση την οποία υφίσταται. Για παράδειγμα, ο πιεζοαντιστατικός (piezoresistive) αισθητήρας παραμόρφωσης είναι ένας ημιαγωγός, του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται – μη γραμμικά – με την παραμόρφωση.

Ο περισσότερο διαδεδομένος αισθητήρας παραμόρφωσης είναι ο μεταλλικός. Αυτός αποτελείται από ένα πολύ λεπτό μεταλλικό στοιχείο (σύρμα, ή συνήθως λεπτό μεταλλικό φύλλο) (σχ. 2.2.2). Η παραμόρφωση εφαρμόζεται παράλληλα προς την επιφάνειά του. Η διατομή του μεταλλικού στοιχείου επιλέγεται να είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με το μήκος του, ώστε να ελαχιστοποιείται η

επίδραση από την εμφάνιση της παραμόρφωσης Poisson. Το μεταλλικό στοιχείο προσκολλάται σε μία λεπτή επιφάνεια, που ονομάζεται φορέας. Ο φορέας προσαρμόζεται στο σώμα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την παραμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό, η αναπτυσσόμενη στο σώμα παραμόρφωση, μεταφέρεται στον αισθητήρα, ο οποίος αποκρίνεται μεταβάλλοντας γραμμικά την ηλεκτρική του αντίσταση. Η ονομαστική αντίσταση των αισθητήρων που διατίθενται στο εμπόριο, κυμαίνονται μεταξύ 30 ως 3 000 Ω. Οι πιό συνηθισμένες τιμές είναι 120, 350 και 1 000 Ω.



Σχ. 2.2.2 Μεταλλικός αισθητήρας παραμόρφωσης [7].

Προσοχή απαιτείται στην τοποθέτηση του αισθητήρα πάνω στο δοκίμιο, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή μεταφορά της παραμόρφωσης από το δοκίμιο στο φορέα και στη συνέχεια στο μεταλλικό στοιχείο.

Βασική παράμετρος των αισθητήρων παραμόρφωσης είναι η ευαισθησία τους (gauge factor). Ο ορισμός της ευαισθησίας διαφέρει εδώ από εκείνο των αισθητήρων πίεσης. Ορίζεται ως ο λόγος της σχετικής μεταβολής της ηλεκτρικής του αντίστασης προς τη σχετική μεταβολή του μήκους:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2.4)$$

Η συνήθης τιμή της ευαισθησία των μεταλλικών αισθητήρων παραμόρφωσης είναι 2.

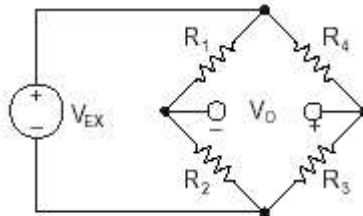
Ιδανικά θα θέλαμε η ηλεκτρική αντίσταση να μεταβάλλεται μόνο συναρτήσει της παραμόρφωσης. Το μεταλλικό όμως στοιχείο καθώς και το μετρούμενο δοκίμιο επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες υφίστανται επεξεργασία κατά την κατασκευή τους, ώστε να αντισταθμίζονται οι όποιες επιδράσεις της θερμοκρασίας στο μετρούμενο δοκίμιο. Παρ' όλα αυτά, δεν είναι δυνατόν να εξαλειφθεί τελείως η επίδραση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, έστω αισθητήρας ο οποίος διαθέτει αντιστάθμιση για το αλουμίνιο, του οποίου η εξάρτηση από τη θερμοκρασία είναι 23 ppm / °C. Αν η ονομαστική του αντίσταση είναι 1 000 Ω και η ευαισθησία του 2, το σφάλμα στην παραμόρφωση θα είναι 11,5 με / °C. Αρα απαιτείται καλύτερη αντιστάθμιση θερμοκρασίας.

2.2.3 Πρακτικές μέτρησης

Στην πράξη, η τάξη μεγέθους των παραμορφώσεων είναι $\varepsilon \times 10^{-3}$. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση της παραμόρφωσης απαιτεί πολύ ακριβείς μετρήσεις μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης. Εστω, για

παράδειγμα, ένα δοκίμιο το οποίο υφίσταται σημαντική παραμόρφωση ίση με 500 με. Η ηλεκτρική αντίσταση αισθητήρα ευαισθησίας 2, θα μεταβληθεί κατά 2 (500×10^{-6}) = 0,1%. Αν η ονομαστική του αντίσταση είναι 120 Ω, η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης θα είναι 0,12 Ω.

Για να μετρήσουμε τόσο μικρές μεταβολές τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, με ταυτόχρονη αντιστάθμιση της θερμοκρασίας, όπως αναφέραμε προηγουμένως, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διάταξη γέφυρας, με πηγή τάσης ή ρεύματος. Μιά τυπική διάταξη γέφυρας Wheatstone φαίνεται στο σχ. 2.2.3.

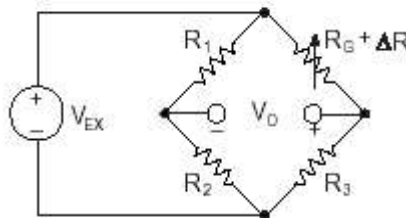


Σχ. 2.2.3 Γέφυρα Wheatstone [7].

Η τάση εξόδου της γέφυρας δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] V_{EX} \quad (2.5)$$

Από τη σχέση αυτή είναι προφανές ότι όταν $R_1/R_2 = R_4/R_3$, η τάση V_o θα είναι μηδενική. Στην περίπτωση αυτή η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία. Οποιαδήποτε μεταβολή της αντίστασης σε οποιοδήποτε σκέλος της γέφυρας θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μιάς τάσης V_o μη μηδενικής. Επομένως, αν αντικαταστήσουμε την αντίσταση R_4 του σχ. 2.2.3, με έναν αισθητήρα παραμόρφωσης, ονομαστικής αντίστασης R_G (σχ. 2.2.4), η τάση εξόδου της γέφυρας θα είναι μη μηδενική, για οποιαδήποτε μεταβολή της ονομαστικής αυτής αντίστασης.



Σχ. 2.2.4 Γέφυρα με αισθητήρα παραμόρφωσης [7].

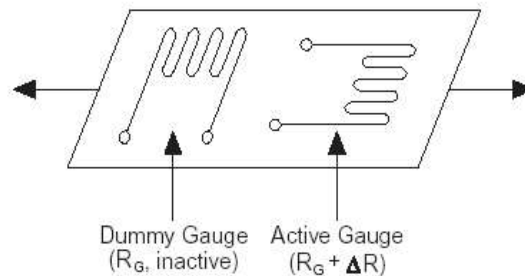
Αν μία παραμόρφωση μεταβάλλει την ονομαστική αντίσταση του αισθητήρα κατά ΔR , αυτή η μεταβολή μπορεί να γραφτεί ως εξής: $\Delta R = R_G GF \varepsilon$. Υποθέτοντας ότι $R_1=R_2$ και $R_3=R_G$, η εξίσωση της γέφυρας (2.5), μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = \frac{GF \varepsilon}{4} \left[\frac{1}{1 + GF \frac{\varepsilon}{2}} \right] \quad (2.6)$$

Στη σχ. (2.6), ο όρος μέσα στην αγκύλη δηλώνει ότι η τάση εξόδου της γέφυρας δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση.

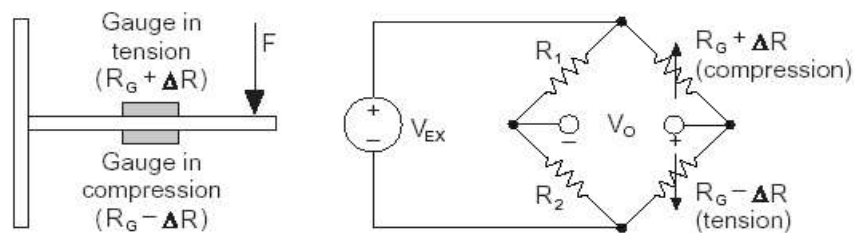
Η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας στη γέφυρα έναν επιπλέον αισθητήρα παραμόρφωσης, της ίδιας ονομαστικής αντίστασης. Στο σχ. 2.2.5 φαίνεται η διάταξη δύο αισθητήρων, όπου ο ένας είναι ενεργός ($R_G + \Delta R$) και ο δεύτερος είναι τοποθετημένος

εγκάρσια ως προς την εφαρμοζόμενη παραμόρφωση. Ο δεύτερος ονομάζεται και *ψευδοαισθητήρας* (dummy gauge), γιατί η εφαρμοζόμενη παραμόρφωση δεν μεταβάλλει την ηλεκτρική του αντίσταση. Η ηλεκτρική αντίσταση όμως και των δύο αισθητήρων θα μεταβληθεί με τον ίδιο τρόπο εφόσον αλλάξει η θερμοκρασία, οπότε ο λόγος των αντιστάσεών τους δεν θα μεταβληθεί, άρα ούτε και η τάση εξόδου V_o της γέφυρας. Με το τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στη μέτρηση.



Σχ. 2.2.5 Χρήση ανενεργού αισθητήρα για αντιστάθμιση των θερμοκρασιακών μεταβολών [7].

Εναλλακτικά, μπορούμε να διπλασιάσουμε την ευαισθησία της γέφυρας, χρησιμοποιώντας και τους δύο αισθητήρες ως ενεργούς. Στο σχ. 2.2.6 δίνεται το παράδειγμα δύο αισθητήρων, από τους οποίους ο ένας μετρά έκταση (tension) και ο άλλος συμπίεση (compression). Στο ίδιο σχήμα δίνεται και η αντίστοιχη διάταξη της γέφυρας.



Σχ. 2.2.6 Διάταξη δύο ενεργών αισθητήρων [7].

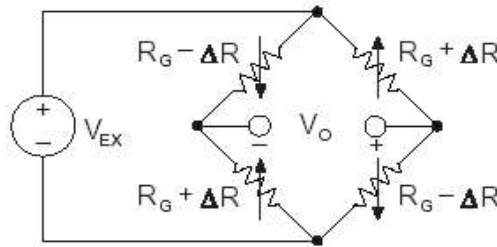
Η τάση εξόδου αυτής της διάταξης αποδεικνύεται ότι είναι γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης και δίνεται από την έκφραση:

$$\frac{V_o}{V_{EX}} = \frac{GF \epsilon}{2} \quad (2.7)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (2.6) και (2.7), παρατηρούμε ότι για δεδομένη τάση διέγερσης V_{EX} , η τάση εξόδου της γέφυρας είναι περίπου διπλάσια στην περίπτωση των δύο ενεργών αισθητήρων.

Τέλος, είναι δυνατόν να αυξηθεί περισσότερο η ευαισθησία του κυκλώματος, αντικαθιστώντας το σύνολο των αντιστατών της γέφυρας με ενεργούς αισθητήρες παραμόρφωσης, από τους οποίους οι δύο θα μετρούν έκταση και οι δύο συμπίεση. Το σχετικό κύκλωμα φαίνεται στο σχ. 2.2.7 και η τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

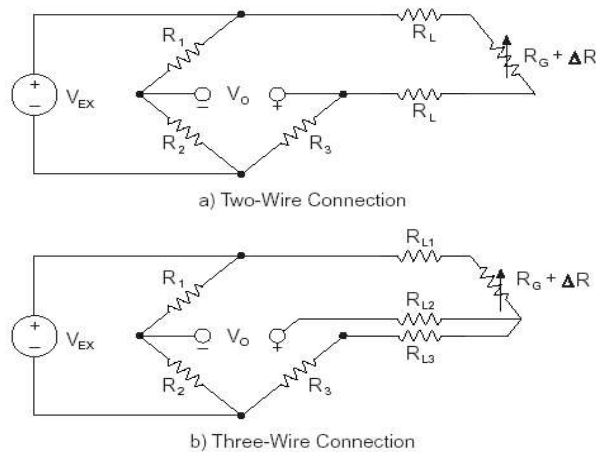
$$\frac{V_o}{V_{EX}} = -GF \varepsilon \quad (2.8)$$



Σχ. 2.2.7 Γέφυρα τεσσάρων αισθητήρων παραμόρφωσης [7].

Οι μαθηματικές σχέσεις (2.5) έως (2.8) που δίνουν την τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone, βασίζονται στην υπόθεση ότι η γέφυρα είναι σε ισορροπία, δηλαδή ότι η τάση της είναι μηδενική όταν δεν εφαρμόζεται παραμόρφωση. Στην πράξη όμως, οι ανοχές στην τιμή των αντιστάτων καθώς και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων στα δοκίμια, έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μη μηδενικής τάσης V_o . Ο μηδενισμός της μπορεί να γίνει είτε προβλέποντας μία μεταβλητή αντίσταση στο κύκλωμα της γέφυρας, είτε μέσω του λογισμικού μέτρησης.

Επίσης στις πύ πάνω σχέσεις αγνοήσαμε τις αντιστάσεις των αγωγών των αισθητήρων παραμόρφωσης. Αυτό έγινε για να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία τους, καθώς και τη χρήση τους μέσω της γέφυρας. Αγνοώντας όμως τις αντιστάσεις αυτές στην πράξη εισάγουμε στη μέτρησή μας σημαντικά σφάλματα. Εστω, για παράδειγμα, η συνδεσμολογία του σχ. 2.2.8 (α).



Σχ. 2.2.8 Επίδραση της αντίστασης των αγωγών [7].

Ο αισθητήρας παραμόρφωσης ενώνεται με τη γέφυρα, μέσω δύο αγωγών μήκους 15 m ο καθένας και αντίστασης 1 Ω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο σκέλος της γέφυρας να εμφανίζει πρόσθετη αντίσταση ίση με 2 Ω. Εκτός από τη μη μηδενική τάση ισορροπίας, η ύπαρξη της πρόσθετης αυτής αντίστασης μειώνει την ευαισθησία της γέφυρας. Αποδεικνύεται ότι η μείωση αυτή ισούται με $(1 + R_L / R_G)$. Το εισαγόμενο σφάλμα διορθώνεται αν μετρήσουμε την αντίσταση

R_L των αγωγών και εισάγουμε την τιμή της στις σχετικές εξισώσεις. Δυσκολότερο πρόβλημα όμως, είναι αυτό του υπολογισμού της μεταβολής της αντίστασης των αγωγών λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας. Παίρνοντας υπόψη μας ότι ο θερμοκρασιακός συντελεστής μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του χαλκού ισούται με $0.0068 \Omega \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, βλέπουμε ότι ακόμη και μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας, οδηγούν σε σφάλματα αρκετών με. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας τη συνδεσμολογία των τριών αγωγών (σχ. 2.2.8 b). Στην περίπτωση αυτή οι αντιστάσεις R_{L1} και R_{L3} εμφανίζονται σε διαδοχικά σκέλη της γέφυρας, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές τους λόγω της θερμοκρασίας να αλληλοαναιρούνται. Η αντίσταση R_{L2} παρεμβάλεται στην έξοδο της γέφυρας. Το ρεύμα που τη διαρρέει είναι πολύ μικρό, με αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές της τιμής της να είναι αμελητέες.

Κεφάλαιο 3 – pH

3.1 Γενικά

Το pH είναι μία παράμετρος με την οποία ποσοτικοποιείται ο βαθμός οξύτητας των διαλυμάτων. Το κατά πόσο ένα διάλυμα είναι όξινο ή αλκαλικό εξαρτάται από τη συγκέντρωση σε αυτό του ιόντος οξονίου (H_3O^+). Αν είναι μεγαλύτερη των $10^{-7} \text{ mol.l}^{-1}$, τότε το διάλυμα είναι όξινο, ενώ αν είναι μικρότερη της τιμής αυτής, τότε το διάλυμα είναι αλκαλικό. Δηλαδή αν το pH είναι ίσο με 7, τότε το διάλυμα είναι ουδέτερο. Αν κυμαίνεται μεταξύ 0 – 7, τότε είναι όξινο ενώ αν είναι μεταξύ 7 – 14, τότε είναι αλκαλικό.

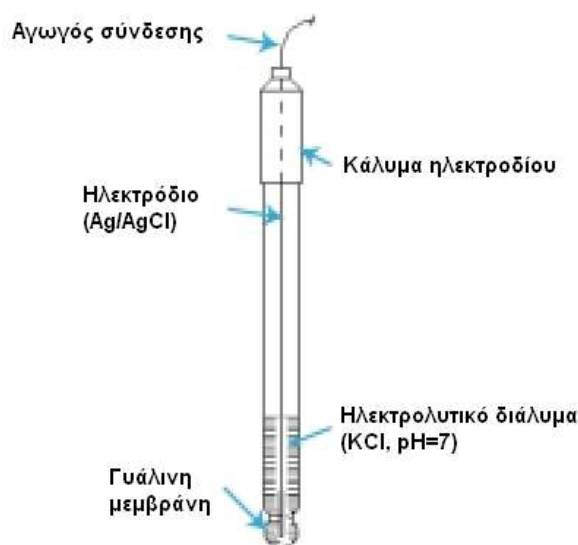
3.2 Μέθοδοι μέτρησης

Η σύγχρονη μέθοδος μέτρησης του pH βασίζεται στην κατασκευή γαλβανικών στοιχείων. Μετρείται δηλαδή η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ημιστοιχείων, η οποία οφείλεται στο οξόνιο. Για να γίνει αυτό απαιτούνται τα εξής:

- Ένας μετρητής pH, ο οποίος μετρά με ακρίβεια και μετατρέπει την τάση η οποία προκαλείται από το οξόνιο, σε τιμή του pH.
- Ένα ηλεκτρόδιο pH υάλου (ονομάζεται γενικά ενδεικτικό ηλεκτρόδιο), του οποίου το δυναμικό εξαρτάται από τη συγκέντρωση του οξονίου.
- Ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το οποίο έχει χρονικά σταθερό δυναμικό και ανεξάρτητο της συγκέντρωσης του οξονίου.

Ο μετρητής pH μετρά τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του ηλεκτροδίου pH (το οποίο ανιχνεύει τα ιόντα οξονίου) και του ηλεκτροδίου αναφοράς (του οποίου το σήμα είναι ανεξάρτητο από τη σύσταση του διαλύματος). Πρόκειται ουσιαστικά για έναν ενισχυτή μεγάλης εμπέδησης, ο οποίος μετρά τη διαφορά δυναμικού και εμφανίζει το αποτέλεσμα είτε σε ψηφιακή είτε σε αναλογική μορφή.

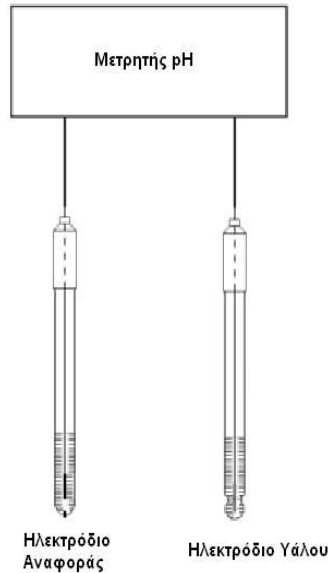
Το δυναμικό του ηλεκτροδίου pH μεταβάλλεται με τη συγκέντρωση των ιόντων οξονίου. Ένα τέτοιο ηλεκτρόδιο απεικονίζεται στο σχ. 3.1.1.



Σχ. 3.1.1 Ηλεκτρόδιο υάλου [3].

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει ανάλογη κατασκευή με το ενδεικτικό ηλεκτρόδιο.

Το pH προκύπτει από τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ηλεκτροδίου pH υάλου και ηλεκτροδίου αναφοράς. (σχ. 3.1.2).



Σχ. 3.1.2 Διάταξης μέτρησης pH [3].

Στα σύγχρονα συστήματα, τα δύο ηλεκτρόδια – αναφοράς και υάλου – ενσωματώνονται σε ένα συνδυασμένο ηλεκτρόδιο.

Η προκύπτουσα διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, συνδέεται με τη συγκέντρωση του οξονίου, άρα και με το pH, μέσω της σχέσης του Nernst:

$$U = U_0 + \frac{2,303 R T}{(z_i F)} \log [H_3O^+] \quad (3.1.1)$$

όπου U η μετρούμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, U_0 μία σταθερή τάση εξαρτώμενη από το ηλεκτρόδιο αναφοράς, R η σταθερά των ιδανικών αερίων ($8,31441 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$), T η απόλυτη θερμοκρασία του διαλύματος, z_i η (αλγεβρική) τιμή του φορτίου το οξονίου (+1), F η σταθερά Faraday ($96\,484,56 \text{ }^\circ\text{C}$). Όπως βλέπουμε από την εξίσωση (3.1.1), η τιμή του pH εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, τα σύγχρονα pH-μετρα έχουν ενσωματωμένους και αισθητήρες θερμοκρασίας. Η τάση U είναι της τάξης μεγέθους των mV.

Θεωρητικά ένα pH-μετρο κατασκευάζεται έτσι ώστε να παράγει τάση 0 mV, όταν το μετρούμενο pH είναι 7. Η τιμή αυτή ονομάζεται μηδενικό δυναμικό του ηλεκτροδίου. Το μηδενικό δυναμικό είναι ένα από τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτροδίου. Το δεύτερο είναι η απόκριση κατά Nernst του ηλεκτροδίου, η οποία μας δίνει τη διαφορά του μετρούμενου δυναμικού μεταξύ δύο διαλυμάτων των οποίων το pH διαφέρει κατά 1, σε σχέση με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή (από τη σχέση Nernst). Η θεωρητική τιμή της είναι $59,16 \text{ mV.pH}^{-1}$ στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν αποκλίσεις, οι οποίες υπολογίζονται μέσω της βαθμονόμησης του ηλεκτροδίου.

Βιβλιογραφία

Συγγράμματα

1. Fritschen, L.J., Gay, L.W., Environmental Instrumentation, Springer-Verlag, 1979.
2. Καραγιάννη Μ.Ι., Χημική Οργανολογία – Εισαγωγικά Μαθήματα, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 1992.
3. Metrohm Ltd., The backgrounds of pH measurement and hints for your daily work, 1999.
4. OMEGA, The Pressure, Strain and Force Handbook, Omega Engineering Inc., 1992.
5. OMEGA, The pH and Conductivity Handbook, Omega Engineering Inc., 1992.

Ιστοσελίδες

6. Bicking R.E., 1998, Fundamentals of Pressure Sensor Technology, www.sensormag.com
7. National Instruments, 1998, Strain gauge measurements – A tutorial, Application Note 078. www.ni.com.
8. Omegadyne, Pressure Transducers – Installation & Use, www.omegadyne.com
9. Omegadyne, Waterhammer – A complex phenomenon with a simple solution, www.omegadyne.com
10. Wilson J., 2002, Fundamentals of Pressure Sensing, www.sensormag.com
11. Wilson J.S., 2003, Pressure measurements – Principles and Practice, www.sensormag.com