

τηγορία ποιοτικών χαρακτηριστικών σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές. Στην εικόνα του Σχήματος 3.34β παρουσιάζεται εφαρμογή μέτρησης του πάχους ελάσματος χαλκού από έξοδο κυλίνδρων εξέλασης. Η μέτρηση της μετατόπισης από τον άνω και κάτω αισθητήρα LVDT προσδιορίζει τη μέτρηση του πάχους του χαλκού για τον έλεγχο της διεργασίας τάνυσης.

Στο Σχήμα 3.35 χρησιμοποιείται στοιχείο LVDT για τον προσδιορισμό της θέσης του εμβόλου βάνας ροής ρευστού.

### 3.2.8 Πιεζοαντίσταση

#### Πιεζοαντίσταση

Το φαινόμενο της πιεζοαντίστασης ανακαλύφθηκε από τον λόρδο Kelvin το 1856. Σύμφωνα με το φαινόμενο, η αντίσταση ενός αγωγού μπορεί να μεταβληθεί όταν σε αυτόν ασκηθεί κάποιο μέτρο παραμόρφωσης είτε με τη μέθοδο εφελκυσμού είτε με συμπίεση (Σχ. 3.36).

Η αντίσταση ενός αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

όπου,

$l$ : το μήκος του αγωγού,

$A$ : η διατομή του αγωγού, και

$\rho$ : η ειδική αντίσταση του υλικού.

Επίσης, ισχύει για την αντίσταση ενός αγωγού (σύρματος):

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Από την παραπάνω σχέση εύκολα συμπεραίνουμε ότι αν ασκηθεί εφελκυσμός στον αγωγό με μήκος  $l$  τότε η συνολική του αντίσταση  $R$  μπορεί να μεταβληθεί λόγω αύξησης του μήκους κατά  $\Delta l$ .

Ο λόγος  $\frac{\Delta l}{l}$  καλείται παραμόρφωση ή ειδική μήκυνση και συμβολίζεται με το γράμμα 'ε'.

Ο λόγος  $\frac{\Delta d}{d}$  καλείται εγκάρσια παραμόρφωση 'ε<sub>T</sub>'. (μεταβολή της διαμέτρου με μεταβολή του  $\Delta l$ )

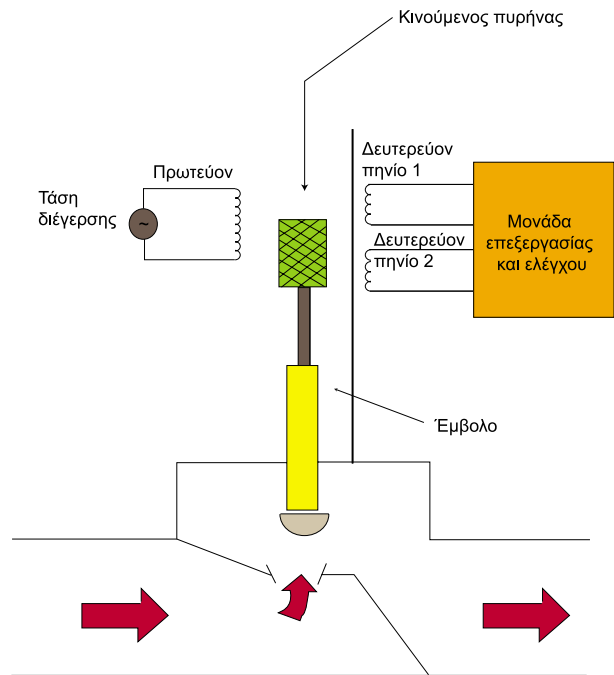
Η επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του αγωγού σε σχέση με τη μεταβολή του μήκους δίνεται:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \Rightarrow \frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}$$

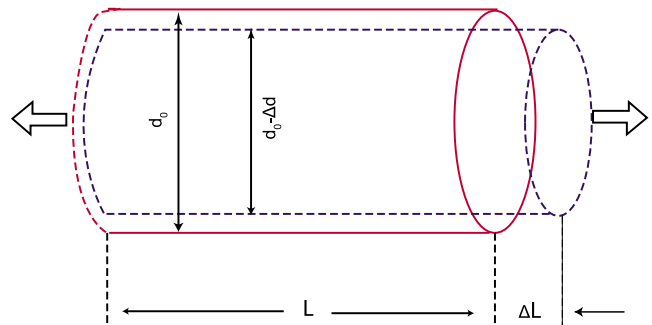
Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης που οφείλεται στη μεταβολή του όγκου αποδεικνύεται:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c_B (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l}, \quad c_B = \text{σταθερά Bridgman}$$

Ο λόγος της ειδικής μήκυνσης 'ε' και της εγκάρσιας παραμόρφωσης 'ε<sub>T</sub>' καλείται συντελεστής Poisson (Poisson's ratio) με συνήθη τιμή 0,3. Ισχύει ότι:



Σχήμα 3.35: Παράδειγμα χρήσης αισθητήρα LVDT στον έλεγχο βάνας.



Σχήμα 3.36: Παραμόρφωση αγωγού λόγω εφελκυσμού και συμπίεσης.

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \text{ ή } \varepsilon_T = -\nu \varepsilon \text{ οπότε η εξίσωση } \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \text{ μπορεί να γραφτεί ως:}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\nu)$$

Καθώς η αντίσταση του στοιχείου μεταβάλλεται λόγω μήκυνσης, ορίζεται ο παράγοντας μετατροπής (gage factor, GF) που δίνεται από τη σχέση:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

όπου αντικαθιστώντας στην εξίσωση  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon(1 + 2\nu)$  λαμβάνουμε ότι:

$$GF = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\varepsilon}$$

Ο παράγοντας μετατροπής GF εξαρτάται από το υλικό του στοιχείου που είναι κατασκευασμένη η πιεζοαντίσταση με τυπική τιμή 2 για τα συνήθη χρησιμοποιούμενα μέταλλα κατασκευής.

### 3.2.8.1 Μεταλλικά μηκυνσιόμετρα

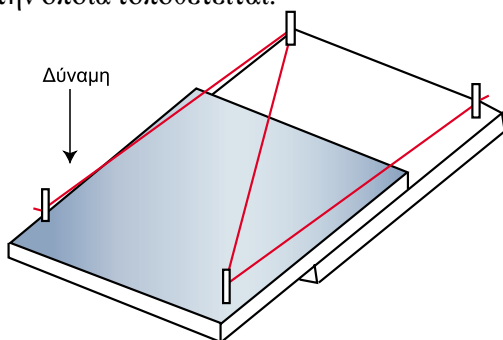
Τα μηκυνσιόμετρα είναι μεταλλικοί αγωγοί που ανιχνεύουν πολύ μικρές αλλαγές στις διαστάσεις τους. Κατασκευάζονται από κράμα χαλκού-νικελίου παρέχοντας συντελεστή μετατροπής  $GF = 2,1$ , νικελίου-χρωμίου αποδίδοντας  $GF = 2,1$ , κ.ά.. Τα μηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση πολύ μικρής μετατόπισης σε εφαρμογές διατάξεων αισθητήρων πίεσης, κυπέλης φορτίου κ.α.. Συνήθεις τυπικές τιμές ονομαστικής αντίστασης των μηκυνσιομέτρων είναι  $120\Omega$  και  $350\Omega$ , με την τυπική διάμετρο σύρματος να κυμαίνεται σε πεδίο τάξης μερικών  $\mu\text{m}$ . Στη κατηγορία των αισθητήρων μεταλλικής πιεζοαντίστασης ή μηκυνσιομέτρων διακρίνουμε:

- τους αισθητήρες συγκολλημένου τύπου ή επαφής (bonded), και
- τους αισθητήρες μη συγκολλημένου τύπου ή μη επαφής (unbonded).

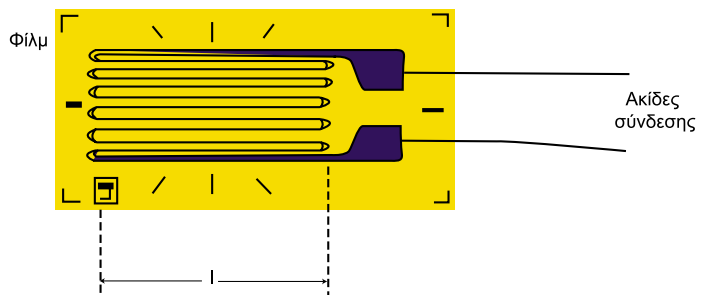
Στα μηκυνσιόμετρα μη συγκολλημένου τύπου ή μη επαφής (unbonded) χρησιμοποιούνται μεταλλικοί αγωγοί των οποίων το ένα άκρο στηρίζεται σε ένα σταθερό οπλισμό, ενώ το άλλο άκρο του αγωγού στο τμήμα που μετατοπίζεται για εφαρμογή εφελκυσμού στον αγωγό του στοιχείου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.37.

Στα μηκυνσιόμετρα συγκολλημένου τύπου ή επαφής (bonded), το στοιχείο έρχεται σε επαφή με το σώμα στο οποίο θέλουμε να ανιχνεύσουμε τη μετατόπιση. Κατασκευαστικά ένα μηκυνσιόμετρο συγκολλημένου τύπου αποτελείται από ένα στρώμα film πάνω στο οποίο μεταλλικός αγωγός επικολλάται όπως στο Σχήμα 3.38 για να υπάρχει μεγάλο  $l$ . Για την σύνδεση της μεταλλικής πιεζοαντίστασης ή του μηκυνσιομέτρου το σύρμα καταλήγει σε μεταλλικούς ακροδέκτες.

Ένα μηκυνσιόμετρο μετρά την παραμόρφωση προς μια κατεύθυνση. Για τη μέτρηση παραμόρφωσης σε μια επιφάνεια απαιτείται ο συνδυασμός τριών μηκυνσιομέτρων σε ορθογώνια διάταξη, όπως στο Σχήμα 3.39, στην οποία τοποθετείται:

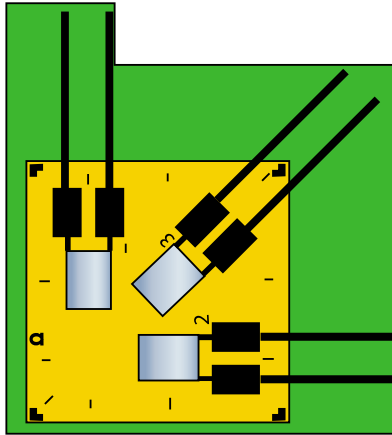


**Σχήμα 3.37:** Μηκυνσιόμετρο μη συγκολλημένου τύπου ή μη επαφής.

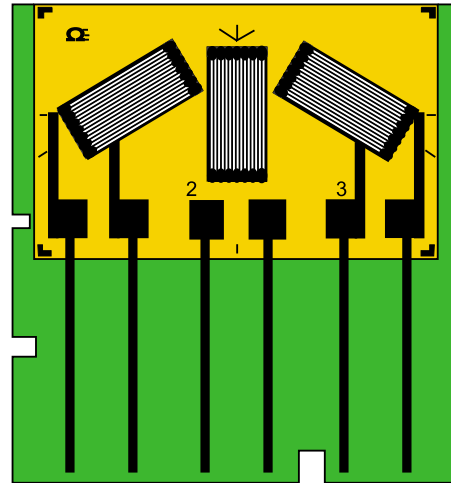


**Σχήμα 3.38:** Μηκυνσιόμετρο συγκολλημένου τύπου ή επαφής.

Σχεδιάστε με τον ενισχυτή οργανολογίας INA125 ένα σύστημα μέτρησης ζυγαριάς με το στοιχείο BF350-3AA (strain gauge).



**Σχήμα 3.39:** Μηκυνσιόμετρο της OMEGA σε ορθώγνια διάταξη.



**Σχήμα 3.40:** Μηκυνσιόμετρο της εταιρείας OMEGA σε ισογώνια διάταξη.

1. ένα μηκυνσιόμετρο κατά τη διεύθυνση  $x$ ,
2. ένα μηκυνσιόμετρο κατά τη διεύθυνση  $y$ , και
3. ένα μηκυνσιόμετρο κατά τη διεύθυνση  $xy$  με γωνία  $45^\circ$ .

Επίσης, ένας άλλος τύπος συνδυασμού μηκυνσιομέτρων για μέτρηση παραμόρφωσης επιφάνειας είναι η διάταξη ισογώνιας ροζέτας κατά την οποία τα μηκυνσιόμετρα τοποθετούνται σε γωνίες  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $120^\circ$  (Σχ. 3.40).

Για να μετρήσουμε την μεταβολή της αντίστασης ενός μηκυνσιομέτρου τοποθετούμε αυτό ως στοιχείο σε μία γέφυρα Wheatstone με σταθερά στοιχεία  $R$ , όπως στο Σχήμα 3.41.

Η τάση εξόδου της γέφυρας δίνεται από τη σχέση από τη σχέση:

$$V_o = \frac{\varepsilon(V_{EXT} \cdot GF \cdot R \cdot R_s)}{(R + R_s)^2}$$

### Παράδειγμα 3.2

Ένα μηκυνσιόμετρο με ονομαστική αντίσταση  $R_s = 100 \Omega$  αποτελεί στοιχείο γέφυρας Wheatstone, όπως στο Σχήμα 3.41. Να υπολογίσετε το μέγεθος της τάσης εξόδου της γέφυρας, όταν στο μηκυνσιόμετρο ασκηθεί μήκυνση  $2000 \mu\text{strain}$ . Δίνεται  $GF = 2$ , και τάση διέγερσης της γέφυρας  $V_{EXT} = 4\text{V}$  και τιμή των σταθερών αντιστάσεων της γέφυρας ίση με  $100\Omega$ .

### Λύση

Με αντικατάσταση των τιμών στη σχέση  $V_o = \frac{\varepsilon(V_{EXT} \cdot GF \cdot R \cdot R_s)}{(R + R_s)^2}$

υπολογίζουμε ότι η τιμή της τάσης εξόδου είναι  $V_o = 4\text{mV}$ .

### Παράδειγμα 3.3

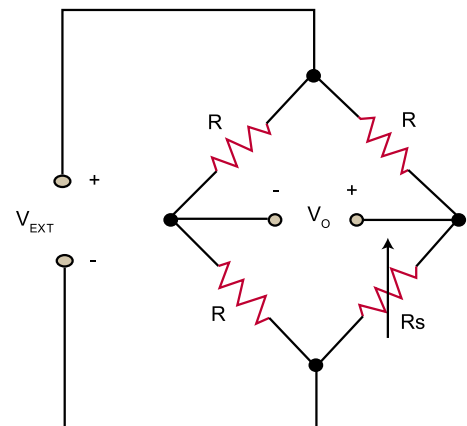
Συνδέουμε ένα μηκυνσιόμετρο με αντίσταση  $R_s = 100 \Omega$  σε μία γέφυρα Wheatstone που παράγει τάση εξόδου  $V_o = 10,5\text{mV}$  και σταθερές αντιστάσεις  $R = 100 \Omega$ . Να υπολογιστεί η μήκυνσή του εάν ο παράγοντας μετατροπής είναι  $GF = 2,04$ . Δίνεται  $V_{EXT} = 2\text{V}$ .

### Λύση

$$\varepsilon = \frac{V_o (R + R_s)^2}{(V_{EXT} GF \cdot R \cdot R_s)} = 10294 \mu\text{strain}$$

Προκειμένου να μετρήσουμε τη μεταβολή της αντίστασης ενός μηκυνσιομέτρου χρησιμοποιούμε:

- (α) μία γέφυρα Wheatstone
- (β) μία γέφυρα πλήρους ανόρθωσης
- (γ) μία γέφυρα ημι-ανόρθωσης

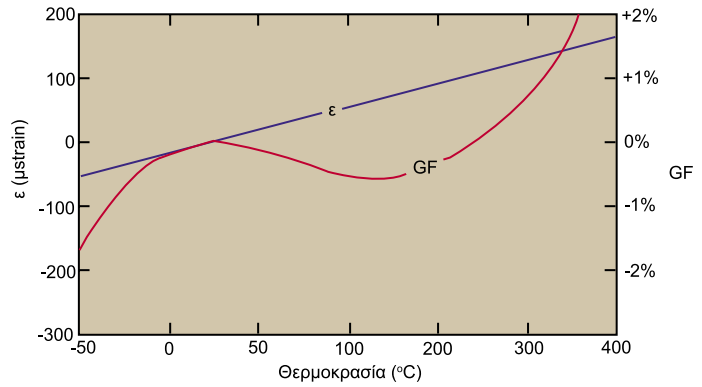


**Σχήμα 3.41:** Μηκυνσιόμετρο ( $R_s$ ) συνδεδεμένο σε γέφυρα Wheatstone.

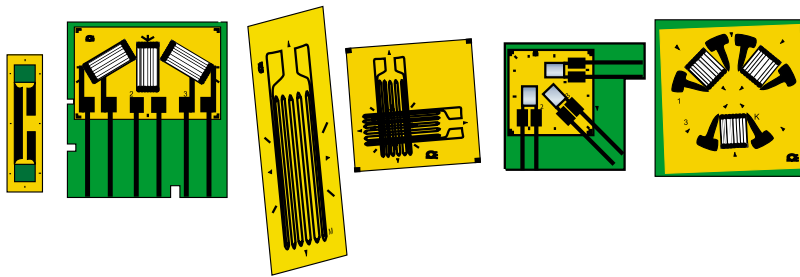
Μεγάλη επίδραση στον παράγοντα μετατροπής και στον συντελεστή παραμόρφωσης ενός μηκυνσιόμετρου φέρει η μεταβολή της θερμοκρασίας, όπως απεικονίζεται στο γράφημα του Σχήματος 3.42, ενός τυπικού μηκυνσιόμετρου. Συνεπώς, στην ολική μεταβολή της αντίστασης σε ένα μηκυνσιόμετρο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μεταβολή της αντίστασής του λόγω θερμοκρασίας:

$$\Delta R_{TOTAL} = \Delta R_s + \Delta R_{TEMP}$$

Ανάλογα του είδους της μέτρησης, του μεγέθους, και της κατεύθυνσης της ευαισθησίας που θέλουμε να έχουμε από ένα μηκυνσιόμετρο κατασκευάζονται στοιχεία που φέρουν διαφορετικές τοπολογίες στη μορφή του σύρματός τους, όπως μερικά τυπικά δείγμα της εταιρείας OMEGA που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.43.



**Σχήμα 3.42:** Μεταβολή των παραγόντων GF και ε με τη θερμοκρασία.



**Σχήμα 3.43:** Τύποι μηκυνσιόμετρων της εταιρείας OMEGA.

Ποιός από τους ακόλουθους παράγοντες επιφέρει μεγάλη επίδραση στον παράγοντα μετατροπής και στον συντελεστή παραμόρφωσης ενός μηκυνσιόμετρου;

- (α) η μεταβολή της θερμοκρασίας.
- (β) το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το μηκυνσιόμετρο.
- (γ) η τάση διέγερσης της γέφυρας.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση των μηκυνσιόμετρων με το υλικό μετάδοσης της φόρτισης. Εάν δεν υπάρχει απόλυτη επαφή μεταξύ του μηκυνσιόμετρου και του υλικού, μπορούν να εμφανιστούν σφάλματα κατά τη μετάδοση της φόρτισης από το σημείο επαφής προς το μηκυνσιόμετρο. Στο Σχήμα 3.44 απεικονίζονται τα βήματα τοποθέτησης μηκυνσιόμετρου σε δοκό.

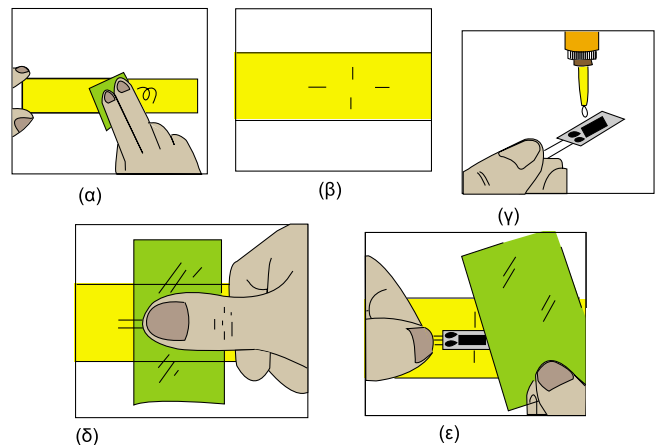
### 3.2.8.2 Ημιαγωγικές πιεζοαντιστάσεις

Εκτός των μεταλλικών μηκυνσιόμετρων κατασκευάζονται και μηκυνσιόμετρα από ημιαγωγικά στοιχεία τύπου p και n τα οποία παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία από τα μεταλλικά στοιχεία. Η αρχή λειτουργίας των ημιαγωγικών μηκυνσιόμετρων στηρίζεται στο φαινόμενο μεταβολής του μήκους του ημιαγωγού κάτω από μηχανική πίεση.

### 3.2.8.3 Οπτικοί Κωδικοποιητές

Οι οπτικοί κωδικοποιητές είναι αισθητήρες με τους οποίους μπορεί να μετρηθεί η γραμμική και η περιστροφική μετατόπιση (Σχ. 3.45).

Η αρχή λειτουργίας των οπτικών κωδικοποιητών βασίζεται στην διέλευση ή όχι της φωτεινής ακτινοβολίας διαμέσου κατάλληλα διαμορφωμένων επιφανειών και τη μετατροπή της σε ηλεκτρικούς παλμούς. Στην τυπική τους διάταξη οι οπτικοί κωδικοποιητές χρησιμοποιούν φωτοδιακόπτες. Η κίνηση, που μπορεί να είναι



**Σχήμα 3.44** Βήματα τοποθέτησης μηκυνσιόμετρου σε ράβδο: α) καθαρίζουμε την επιφάνεια στην οποία θα τοποθετήσουμε το μηκυνσιόμετρο, β) σημαδεύουμε το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί το μηκυνσιόμετρο, γ) στάζουμε μια σταγόνα ισχυρής κόλλας στο φιλμ του μηκυνσιόμετρου, δ) πιέζουμε σφικτά με χρήση λείας επιφάνειας το μηκυνσιόμετρο στο σημείο τοποθέτησής του, και ε) το μηκυνσιόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ύστερα από το χρόνο συγκόλλησης που μας προσδιορίζει η κόλλα.