

2. ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Με τον όρο «μετρολογία» αναφερόμαστε, γενικά, στην επιστήμη και την τεχνολογία των μετρήσεων. **Μηχανουργική μετρολογία**⁺ (engineering metrology) είναι ο κλάδος της μετρολογίας που αφορά στη μέτρηση μεγεθών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών (διαστάσεις, γωνίες, πάχος, κωνικότητα, κυμάτωση κλπ) που υπεισέρχονται στην κατασκευαστική μηχανολογία (manufacturing).

Ως **μέτρηση** ορίζεται, σύμφωνα με το πρότυπο BS 5233 (1975), η δραστηριότητα εκείνη που σκοπό έχει τον καθορισμό της τιμής ενός μεγέθους. Η διαδικασία της μέτρησης προσδίδει έναν αριθμό σ' ένα χαρακτηριστικό του μεγέθους, με χρήση μιας (κοινά) συμφωνημένης τιμής μονάδας, με τέτοιο τρόπο ώστε ο αριθμός αυτός να αντιπροσωπεύει πιστά τις ιδιότητες αυτού του χαρακτηριστικού του μεγέθους.

Τα όργανα ή/και ο συνδυασμός οργάνων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των μετρήσεων αποτελούν τα μετρητικά όργανα ή/και τα μετρητικά συστήματα. Ο εξοπλισμός μετρήσεων διακρίνεται σε **μετρητικά όργανα (measuring instruments)** και **ελεγκτήρες (gaging instruments ή gages)**. Ο εξοπλισμός αυτός διακρίνεται επίσης σε εξοπλισμό ακριβείας (precision instruments) και κοινό (non-precision instruments). Η **ακρίβεια της μέτρησης** ενός οργάνου (**precision of measurement**) είναι η μικρότερη αύξηση του μεγέθους που μπορεί να μετρηθεί με το όργανο αυτό. Με αναφορά στις μετρήσεις μήκους (ιδιαίτερα διαδεδομένες στη μηχανουργική τεχνολογία), όργανο ικανό να μετρήσει/διακρίνει 0,002 mm (ή 0,001 in αντίστοιχα) ή λιγότερο, συνήθως θεωρείται μετρητικό όργανο ακριβείας. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται στις λεγόμενες μετρήσεις ακριβείας.

Οι μετρήσεις ακριβείας είναι κατ' αρχήν απαραίτητες για κατασκευαστικούς λόγους. Οι ανοχές εξαρτημάτων που κατασκευάζονται σήμερα με τις μηχανουργικές κατεργασίες έχουν ανοχές διαστάσεων της τάξης των 25 μm. Οι ανοχές αυτές προφανώς είναι δυνατόν να επιτευχθούν και πρέπει να μετρηθούν ή να ελεγχθούν. Οι μετρήσεις υψηλής ακριβείας είναι επίσης ουσιώδους σημασίας για τον έλεγχο της παραγωγής αλλά και για ερευνητικούς σκοπούς (νέες τεχνολογίες, καινοτομικά προϊόντα κλπ).

⁺ Αντίστοιχα με τον όρο «μετροτεχνία» αναφερόμαστε στην πρακτική εφαρμογή των μετρολογικών αρχών. Η πλήρης κατανόηση των γνώσεων του παρόντος κεφαλαίου δεν είναι δυνατή χωρίς την ύπαρξη (και την εξάσκηση των σπουδαστών σ' αυτό) ενός «μετροτεχνικού εργαστηρίου».

Επισημαίνεται ότι η *μέτρηση* είναι ποσοτική σύγκριση ενός φυσικού μεγέθους με ένα ομοειδές πρότυπο, τη μονάδα. Πραγματοποιείται με τα μετρητικά όργανα και ως αποτέλεσμα της μέτρησης προκύπτει η τιμή μέτρησης. Ο *έλεγχος* ενός μεγέθους είναι η σύγκρισή του με κάποιο πρότυπο. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με χρήση ελεγκτήρων και το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι «ποιοτικό», δηλαδή «αποδεκτό» ή «μη αποδεκτό».

Συνοπτικά η μετρολογία ασχολείται με την ανάπτυξη και αξιολόγηση συστημάτων μέτρησης που μετρούν χαρακτηριστικά αντικειμένων, ουσιών ή φαινομένων και με την εκτίμηση των μεγεθών των σφαλμάτων που συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων μέτρησης με σκοπό να προσδιοριστεί η αξιοπιστία μιας διαδικασίας μέτρησης με ποσοτικούς όρους. Η μετρολογία επανασχεδιάζει ή ρυθμίζει τη βέλτιστη ικανότητα μετρήσεων μιας διαδικασίας για να ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα μέτρησης. Στο πλαίσιο της σημερινής ανάπτυξης της τεχνολογίας αλλά και των απαιτήσεων της παραγωγής και της οικονομίας η μετρολογία συνιστά έναν διεπιστημονικό κλάδο ζωτικής σημασίας για την εξέλιξη της τεχνολογίας. Σήμερα διαχωρίζουμε την μετρολογία σε δύο κατηγορίες, την «επιστημονική» και την «νομική» μετρολογία. Η έκδοση «*Metrology in short*» της EURAMET, παρέχει μια πλήρη εισαγωγική πληροφόρηση για τους δύο αυτούς κλάδους της μετρολογίας και τα θεμελιώδη μεγέθη και χαρακτηριστικά με τα οποία αυτή ασχολείται.

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου θα ασχοληθούμε κυρίως με μετρητικά όργανα μεγεθών της μηχανουργικής τεχνολογίας. Για εξειδικευμένα μετρολογικά θέματα ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία, βλέπε *Farago and Curtis, 1994* και *Winchell, 1996*, ενώ για εισαγωγή στη μετρολογία και τη διακρίβωση βλέπε *Λουλούδης, 1999* και *EURAMET, 2008*.

2.2 Πρότυπα μέτρησης

Όπως προαναφέρθηκε, η μέτρηση γενικά αποτελεί μια προσπάθεια να διαπιστώσουμε πόσες φορές μία άγνωστη ποσότητα ενός μεγέθους περιέχει μία συγκεκριμένη ομοειδή ποσότητα, που ονομάζεται μονάδα μέτρησης. Οι μονάδες μέτρησης των κύριων τεχνικών μεγεθών θεωρούνται γνωστές από προηγούμενες θεμελιώδεις γνωστικές περιοχές (Φυσική, Μηχανική κλπ). Εδώ επισημαίνεται ότι οι κατασκευασμένες αναπαραστάσεις τους είναι γνωστές ως *πρότυπα μέτρησης* (Λουλούδης, 1999).

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η διάκριση μεταξύ των εννοιών του προτύπου μέτρησης και του προτύπου προδιαγραφών.

Πρότυπο μέτρησης είναι ένα όργανο ή συσκευή, το οποίο ορίζει, αντιπροσωπεύει φυσικά, διατηρεί ή αναπαράγει τη μονάδα μέτρησης ενός φυσικού μεγέθους, έτσι ώστε να τη μεταφέρει σε άλλα μετρητικά όργανα μέσω σύγκρισης (π.χ. πρότυπο μήκους).

Πρότυπο προδιαγραφών είναι ένα έγγραφο καθιερωμένο με συναίνεση και εγκεκριμένο από αναγνωρισμένο φορέα που παρέχει για κοινή και επαναλαμβανόμενη χρήση κανόνες, κατευθυντήριες γραμμές ή χαρακτηριστικά για συγκεκριμένη δραστηριότητα ή αποτέλεσμά της. Τα πρότυπα αποσκοπούν στην επίτευξη του βέλτιστου βαθμού τάξης εντός συγκεκριμένου πλαισίου εφαρμογής, εκδίδονται από τους φορείς τυποποίησης (εθνικούς, ευρωπαϊκούς, διεθνείς) και εφαρμόζονται κατά την παραγωγή προϊόντων, την παροχή υπηρεσιών κατά τις εργαστηριακές δοκιμές κλπ (π.χ. πρότυπο ISO 9001:2000).

Τα πρότυπα μέτρησης ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Διεθνές πρότυπο μέτρησης
- Εθνικό πρότυπο μέτρησης
- Πρωτεύον πρότυπο μέτρησης
- Δευτερεύον πρότυπο μέτρησης
- Πρότυπο αναφοράς
- Πρότυπο εργασίας

Κατ' αντιστοιχία με τα πρότυπα μέτρησης υπάρχουν και τα λεγόμενα πιστοποιημένα υλικά αναφοράς (certified reference materials / CRM) που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξοπλισμό χημικών αναλύσεων, για σκοπούς ελέγχου και διακρίβωσης.

2.3 Όργανα μέτρησης: ορισμοί και μετρολογικά χαρακτηριστικά

2.3.1 Ορισμοί

Η μετρολογία χρησιμοποιεί μία απολύτως εξειδικευμένη και αυστηρή ορολογία, η οποία κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί συνοπτικά πριν την αναφορά στα μετρητικά όργανα της μηχανουργικής τεχνολογίας.

Μετρητικό σύστημα είναι ένα λειτουργικό σύνολο συσκευών με τις οποίες είναι δυνατό να μετρηθεί ένα τεχνικό μέγεθος, ώστε να αποκτηθούν δεδομένα

(μετρήσεις), τα οποία εν συνεχεία μεταδίδονται σε όργανα καταγραφής ή ένδειξης ή και αποθηκεύονται. Τα βασικά υποσύνολα ενός μετρητικού συστήματος είναι τρία:

- α. Ένας αισθητήρας ή σένσορας (sensor) με ένα μετατροπέα (transducer)
- β. Μία μονάδα επεξεργασίας σήματος (signal processing unit)
- γ. Μία συσκευή ένδειξης (readout/display) ή ένα καταγραφικό (strip chart/recorder).

Η δομή ενός τυπικού μετρητικού συστήματος παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.1. Επισημαίνεται ότι συνήθως τα υποσύνολα ενός μετρητικού συστήματος περιλαμβάνονται μέσα στο ίδιο το μετρητικό όργανο, το οποίο αφ' εαυτού αποτελεί ένα μετρητικό σύστημα. Σε πολύπλοκα όργανα, όμως, τα υποσύνολα αυτά είναι διακριτά και αρκετές φορές βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 2.1: Δομή ενός τυπικού μετρητικού συστήματος

Δεδομένου ότι ο όρος «απόλυτα αληθής τιμή» αναφέρεται σε μια ιδεατή τιμή ενός μεγέθους που δεν (μπορεί να) είναι γνωστή, στην πράξη χρησιμοποιείται ο όρος «συμβατική αληθής τιμή» ή απλούστερα **«αληθής τιμή»** που ορίζεται ως η τιμή του μεγέθους που προσεγγίζει, με ασήμαντη διαφορά, την απόλυτα αληθή (πραγματική) τιμή του.

Σφάλμα μέτρησης ονομάζεται η διαφορά της αληθούς τιμής ενός μεγέθους από τη μετρούμενη (προσεγγιστική) τιμή του. Γενικά, κάθε μέτρηση υπόκειται σε ανακρίβειες και αβεβαιότητες που έχουν ως συνισταμένη το μετρητικό σφάλμα. Οι

τύποι σφαλμάτων που υπάρχουν και η μαθηματική ανάλυσή τους συζητούνται στην ενότητα 2.5.

Διακρίβωση (calibration) ενός μετρητικού οργάνου είναι η διαδικασία που σκοπό έχει τον προσδιορισμό των τιμών σφάλματος του οργάνου όπως και τον προσδιορισμό των υπολοίπων μετρολογικών χαρακτηριστικών του. Η διακρίβωση συνήθως περιλαμβάνει τη ρύθμιση και επαναφορά των τυχόν εκτός ορίων ενδείξεων μέσα στα προβλεπόμενα όρια ή την κατάταξη του οργάνου σε συγκεκριμένη τάξη ακρίβειας.

Η διακρίβωση πραγματοποιείται με τη σύγκριση του οργάνου με κάποιο πρότυπο μεγαλύτερης ακριβείας (5-10 φορές) από το δοσμένο όργανο, με ειδικές τεχνικές και σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Βαθμονόμηση οργάνου είναι η εγγραφή ενδείξεων στην κλίμακα του οργάνου με βάση ένα γνωστής ακριβείας μέγεθος της ιδιότητας που μετρά το όργανο. Η βαθμονόμηση εμπεριέχεται στη διακρίβωση.

Επαλήθευση μετρητικού οργάνου είναι η επιβεβαίωση κατόπιν εξέτασης και παροχής αντικειμενικών αποδείξεων ότι ικανοποιούνται οι προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις ακριβείας του οργάνου. Η επαλήθευση ενός οργάνου πραγματοποιείται συγκρίνοντάς το με άλλο, ίδιας ακριβείας, που έχει ήδη διακριβωθεί.

2.3.2 Μετρολογικά χαρακτηριστικά

Ακρίβεια (trueness) ενός οργάνου είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα που περιγράφει την ικανότητα του οργάνου να παρέχει ενδείξεις κατά τη μέτρηση όσο το δυνατόν πλησιέστερες προς την αληθή τιμή του μεγέθους που μετράει. Η ακρίβεια είναι συνδυασμός της ορθότητας (accuracy) και της πιστότητας (precision) του οργάνου*.

Εύρος μέτρησης (range) ενός οργάνου είναι τα όρια μεταξύ των οποίων αυτό μπορεί να μετρήσει ένα μέγεθος. Συνήθως εκφράζεται με την «πλήρη απόκλιση κλίμακας» (full scale deflection).

Επαναληψιμότητα (repeatability) ενός οργάνου είναι η ικανότητά του να δίνει τις ίδιες ενδείξεις για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της ίδιας τιμής του μεγέθους που

* Προφανώς υφίσταται ένα θέμα απόδοσης της δόκιμης αγγλικής τεχνικής ορολογίας στα ελληνικά. Είναι γνωστό ότι οι όροι accuracy και precision στα ελληνικά τυπικά αποδίδονται και οι δυο ως «ακρίβεια». Ωστόσο, από τη «σκοπιά» της μετρολογίας, μία μέτρηση για να είναι «σωστή», δηλαδή με την έννοια που ορίστηκε στα παραπάνω, *ακριβής* πρέπει να χαρακτηρίζεται ταυτόχρονα από accuracy και precision. Συνοπτικά ο όρος accuracy μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει τη συμφωνία (στατιστικά) μεταξύ μετρούμενης και αληθούς τιμής ενώ ο όρος precision εκφράζει το βαθμό επαναληψιμότητάς της μέτρησης. Μία μέτρηση μπορεί να είναι “accurate but not precise”, “precise but not accurate”, ενώ πρέπει να είναι “precise and accurate”, βλέπε χαρακτηριστικά Schey, p.76, 1987.

μετρίεται, κάτω από τις ίδιες συνθήκες, τις ίδιες μεθόδους μέτρησης και με τον ίδιο χειριστή, σε μετρήσεις που επαναλαμβάνονται σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

Αναπαραγωγισιμότητα (reproducibility) ενός οργάνου είναι η ικανότητά του να δείχνει τις ίδιες ενδείξεις για μετρήσεις της ίδιας τιμής του μεγέθους που μετρίεται, κάτω από τις ίδιες συνθήκες και μεθόδους μέτρησης, αλλά από άλλον χειριστή σε μετρήσεις που γίνονται σε διαφορετικά εργαστήρια.

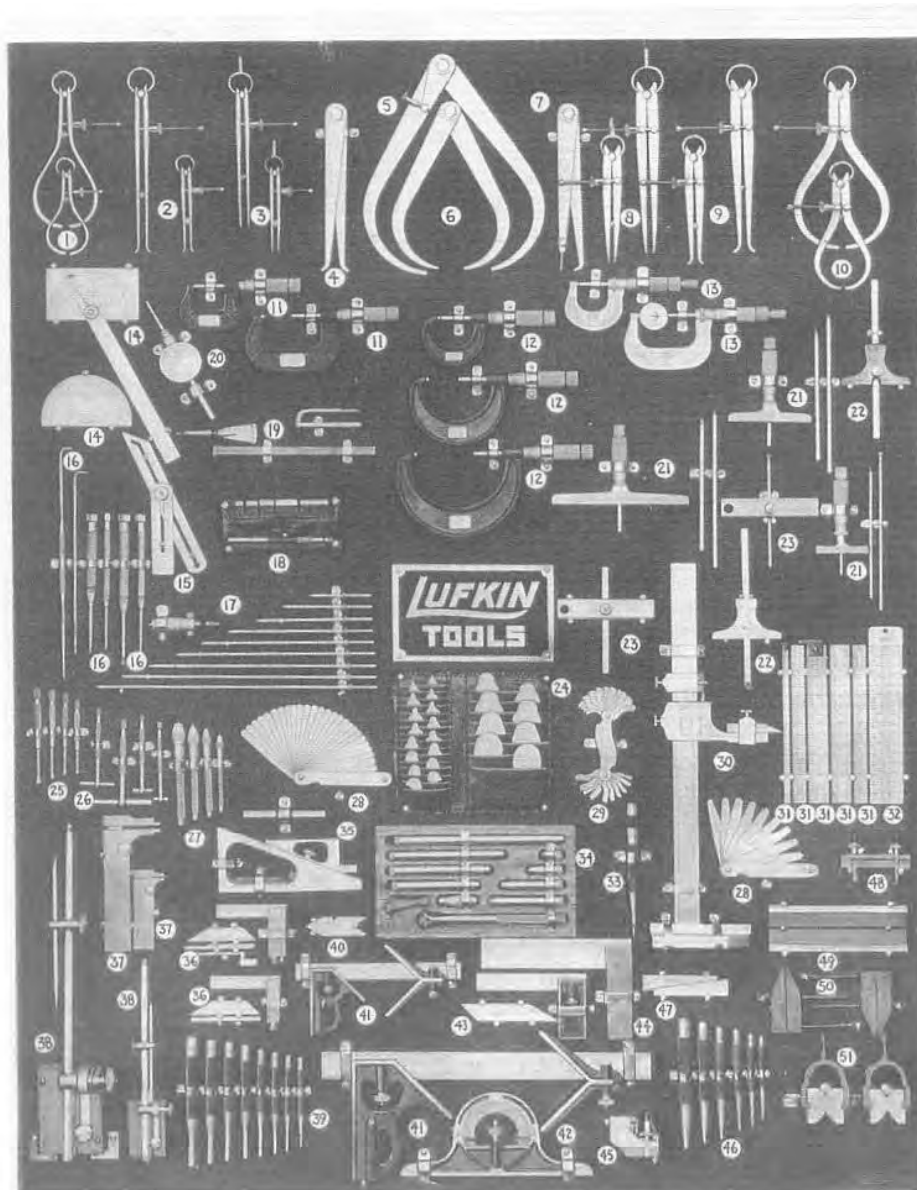
Διακριτική ικανότητα (resolution/discrimination) είναι το ελάχιστο ποσό μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους, το οποίο μπορεί να αναγνωρισθεί από το μετρητικό όργανο. Η μεταβολή στο μετρούμενο μέγεθος πρέπει να προκαλεί αναγνώσιμη αλλαγή της ένδειξης του οργάνου. Σημειώνεται ότι η διακριτική ικανότητα δεν είναι κατ' ανάγκη σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας ενός οργάνου.

Ευαισθησία (sensitivity) είναι ο λόγος της μεταβολής της ένδειξης του οργάνου προς τη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους. Όταν το όργανο συμπεριφέρεται «γραμμικά», τότε η ευαισθησία του είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας του.

Αξιοπιστία (reliability) ενός οργάνου είναι η πιθανότητα αυτό να λειτουργεί (σε ένα αποδεκτό και συμφωνημένο επίπεδο λειτουργικότητας) υπό καθορισμένες συνθήκες χρήσης (π.χ. για καθορισμένη χρονική περίοδο κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες).

2.4 Είδη μετρητικών οργάνων

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η συζήτηση στο πλαίσιο του παρόντος συγγράμματος, όσο αφορά τα μετρητικά όργανα, θα περιορισθεί σε όργανα (και ελεγκτήρες) μήκους, γωνιών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Ακόμη και με τον περιορισμό αυτό υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός οργάνων που αφορούν στη Μηχανουργική Μετρολογία. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται τα συνηθέστερα. Η αναφορά στο κείμενο που ακολουθεί περιορίζεται, αναγκαστικά, στα κυριότερα από αυτά.



Standard measuring instruments: (1) outside spring calipers, round leg; (2) inside spring calipers; (3) spring dividers; (4) inside firm joint caliper; (5) outside firm joint caliper with adjusting screw; (6) outside firm joint caliper; (7) firm joint hermaphrodite caliper; (8) spring divider; (9) inside spring caliper; (10) outside spring caliper; (11) outside micrometer calipers, medium weight; (12) outside micrometer calipers, heavy duty; (13) outside micrometer calipers with lock nut and ratchet stop; (14) steel protractors; (15) universal bevel; (16) scribers; (17) inside micrometer set, solid rods; (18) steel rule set and holder; (19) universal indicator; (20) dial test indicator; (21) micrometer depth gages; (22) depth rules; (23) depth gage; (24) radius gage set; (25) small hole gages; (26) telescoping gages; (27) pin vises; (28) thickness gages; (29) screw pitch gage; (30) vernier height gage; (31) steel rules; (32) mechanics' reference table; (33) automatic center punch; (34) inside micrometer set, tubular; (35) planer and shaper gage; (36) diemakers' squares; (37) slide calipers; (38) universal surface gages; (39) drive pin punches; (40) center gage; (41) combination square; (42) bevel protractor; (43) double squares; (44) steel square; (45) right-angle rule clamps; (46) center punches; (47) tapered parallels; (48) rule clamps; (49) hold-down parallels; (50) toolmakers' parallel clamps; (51) V-blocks and clamps.

Σχήμα 2.2: Τυπικά μηχανουργικά μετρητικά όργανα.
(προέλευση: Doyle et al., 1985)

2.4.1 Όργανα μέτρησης μήκους

2.4.1.1 Μεταλλικοί κανόνες

Οι μεταλλικοί κανόνες είναι τα απλούστερα και πλέον εύχρηστα μετρητικά εργαλεία του μηχανουργού. Στο σχήμα είναι όμοιοι με τους κανόνες (χάρακες) που χρησιμοποιούνται στο τεχνικό σχέδιο αλλά είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα εργαλείων. Για να είναι δυνατή η μέτρηση και στα δύο μετρητικά συστήματα, η μία πλευρά φέρει υποδιαιρέσεις (χαραγές) σε χιλιοστά (mm) και η άλλη σε ίντσες (in).

Οι μεταλλικοί κανόνες διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και με διαφορετικό τρόπο βαθμονόμησης. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι στα μηχανουργεία έχουν μήκος 150 mm (6 in) και βαθμονόμηση 1 mm, 0,5 mm και 1/16", 1/32", 1/64" στα δύο μετρητικά συστήματα αντίστοιχα. Περιοδικά πρέπει να ελέγχονται και αν διαπιστωθεί φθορά μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη αντικαθίστανται, δεδομένου ότι δεν επισκευάζονται.

2.4.1.2 Παχύμετρα

Το παχύμετρο (vernier caliber) είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μετρητικό όργανο στο μηχανουργείο. Ένα κοινό παχύμετρο με δυνατότητα μέτρησης και στα δύο συστήματα εικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Αποτελείται από δύο κύρια μέρη, το σταθερό Α και το κινητό Β. Το σταθερό είναι ουσιαστικά ένας μεταλλικός κανόνας με βαθμονόμηση 1 mm, 1/16" ή 1/40" και καταλήγει σε δύο σιαγόνες (ράμφη) διαμετρικά αντίθετες. Το κινητό τμήμα ολισθαίνει επί του σταθερού, έχει επίσης δύο σιαγόνες διαμετρικά αντίθετες και λεπτή ράβδο (ουρά) για μετρήσεις βάθους φέρει δε και αυτό βαθμονομημένη κλίμακα, την γνωστή ως **κλίμακα βερνιέρου**.



Σχήμα 2.3: Παχύμετρο με δυνατότητα μέτρησης και στα δύο συστήματα.

Ο βερνιέρος, δηλαδή ο συνδυασμός δύο διαφορετικά βαθμονομημένων κλιμάκων χαραγμένων σε δύο κανόνες που κινούνται παράλληλα μεταξύ τους και προς την ευθεία μέτρησης, προσδίδει στο παχύμετρο τη διακριτική του ικανότητα. Οι υποδιαίρεσεις του βερνιέρου συνδέονται με τις υποδιαίρεσεις της κύριας κλίμακας με τη σχέση:

$$\delta_{\beta} = \delta_{\kappa} (n-1)/n \quad (2-1)$$

όπου δ_{β} : το μήκος των υποδιαίρεσεων του βερνιέρου

δ_{κ} : το μήκος των υποδιαίρεσεων της κύριας κλίμακας

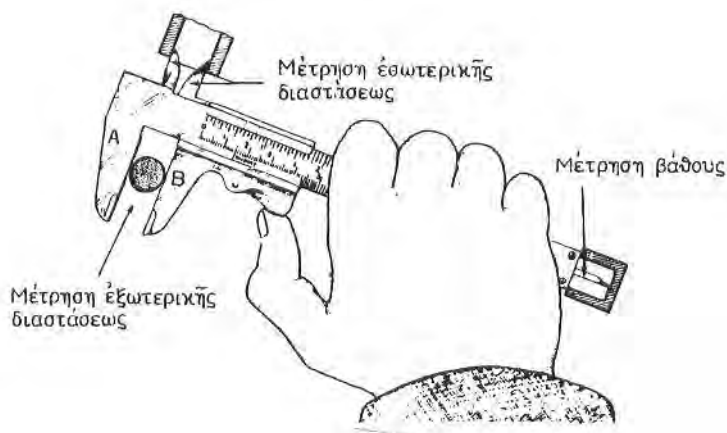
n : ο αριθμός των υποδιαίρεσεων του βερνιέρου

Η τιμή μήκους που διαβάζεται στον βερνιέρο είναι: $a = \delta_{\kappa} - \delta_{\beta}$ (2-2)

και η προηγούμενη σχέση (2-1) δίδει: $a = \delta_{\kappa} / n$ (2-3)

Ενδεικτικά για παχύμετρο διακριτικής ικανότητας 1/10 mm σε 10 υποδιαίρεσεις του βερνιέρου πρέπει να αντιστοιχούν 9 υποδιαίρεσεις της κύριας κλίμακας, ώστε να ισχύει η σχέση (2-1), δηλαδή $10 \delta_{\beta} = 9 \delta_{\kappa}$.

Η αρχή λειτουργίας του παχύμετρου βασίζεται στην ικανότητα της όρασης να διακρίνει δύο γραμμές σε ταύτιση. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται το παχύμετρο για εξωτερικές ή εσωτερικές μετρήσεις ή μετρήσεις βάθους. Κατά τη μέτρηση με την πρώτη γραμμή της κλίμακας του βερνιέρου μετρούμε τα mm, κατόπιν βλέπουμε ποια γραμμή της κλίμακας βερνιέρου συμπίπτει με γραμμή της κύριας κλίμακας και μετρούμε τα δέκατα του mm (για παχύμετρο διακριτικής ικανότητας 1/10 mm), βλέπε Σχήμα 2.5. Εκτός από τα παχύμετρα 1/10 mm κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται παχύμετρα διακριτικής ικανότητας 1/20 mm και 1/50 mm που λειτουργούν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.



Σχήμα 2.4: Δυνατές θέσεις μέτρησης με παχύμετρο.

Βερνιέρος	Θέση σύρτη	Ενδειξη
$\frac{1}{10}$		=4,27
$\frac{1}{20}$		=63,25
$\frac{1}{50}$		=73,38

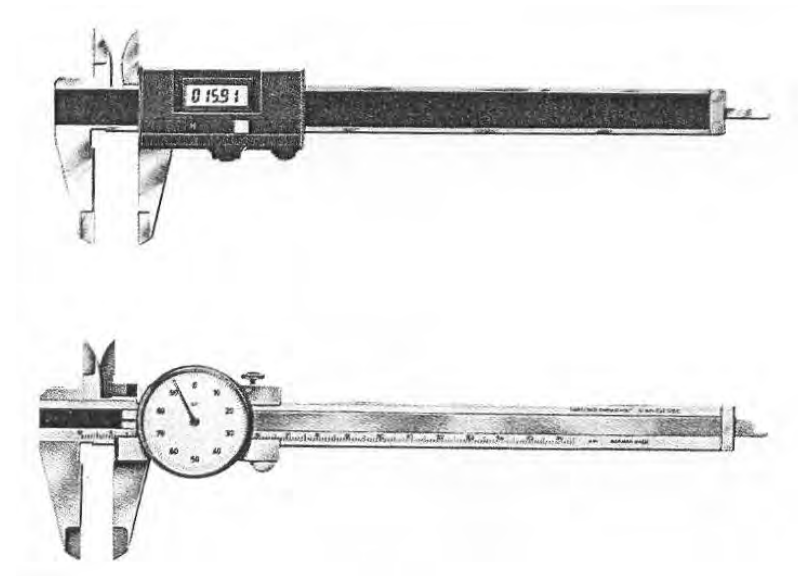
Σχήμα 2.5: Ανάγνωση ενδείξεων παχύμετρου (μετρικό σύστημα).

Για τις μετρήσεις στο αγγλοσαξονικό σύστημα χρησιμοποιούνται παχύμετρα δύο βαθμών ακριβείας, $\frac{1}{128}$ in και 0,001 in. Στην πρώτη περίπτωση η κύρια κλίμακα φέρει υποδιαίρεσεις $\frac{1}{16}$ " ενώ η κλίμακα βερνιέρου προκύπτει με διαίρεση των $\frac{7}{16}$ " της κύριας κλίμακας σε 8 ίσα μέρη, είναι δηλαδή μικρότερη κατά $\frac{1}{128}$ " από κάθε υποδιαίρεση της κύριας κλίμακας. Στα παχύμετρα ακριβείας 0,001 in η κύρια κλίμακα φέρει υποδιαίρεσεις $\frac{1}{40}$ in (0,025 in). Εδώ μήκος $\frac{24}{40}$ in της κύριας κλίμακας διαιρούνται σε 25 ίσα μέρη και προκύπτει η διακριτική ικανότητα (Σημ: στη μηχανουργική «διάλεκτο» αρκετά συχνά, εσφαλμένα αποκαλείται «ακρίβεια») του 0,001 in. Ενδείξεις παχύμετρων αγγλοσαξονικού συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Ανάγνωση ενδείξεων παχύμετρου (αγγλοσαξονικό σύστημα).

Σήμερα διατίθενται παχύμετρα με οθόνη ψηφιακών ενδείξεων (digital reading caliber) ή με ωρολογιακού τύπου δείκτη για ευκολότερη (και ακριβέστερη χρήση) και ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων, βλέπε Σχήμα 2.7. Τα ψηφιακά παχύμετρα έχουν συνήθως διακριτική ικανότητα 0,01 mm ή 0,0005 in.



Σχήμα 2.7: Ψηφιακά και ωρολογιακά παχύμετρα.

2.4.1.3 Μικρόμετρα

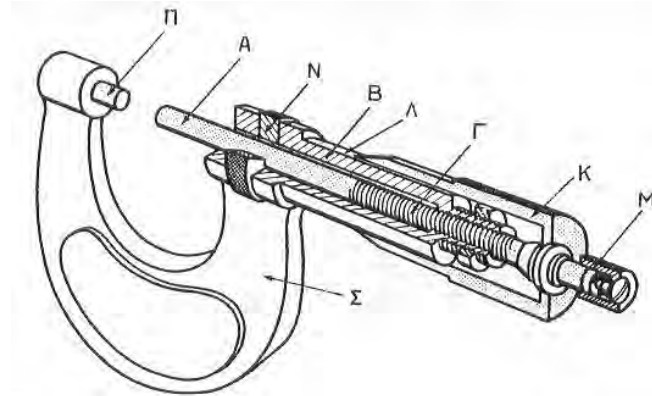
Το **μικρόμετρο (micrometer caliper)** είναι μετρητικό όργανο μήκους, μεγαλύτερης ακρίβειας από το παχύμετρο. Είναι το «απολύτως απαραίτητο» όργανο για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Τα τυπικά μικρόμετρα διαθέτουν διακριτική ικανότητα 0,01 mm στο μετρικό και 0,001 in στο αγγλοσαξονικό σύστημα. Η λειτουργία των μικρομέτρων βασίζεται στην αρχή της σχετικής κίνησης κοχλία – περικοχλίου καθώς, κατά τα γνωστά, μία περιστροφή του κοχλία αντιστοιχεί σε μετακίνησή του σχετικά με το περικόχλιο κατά μήκος ίσο με ένα βήμα του σπειρώματος.

Ένα τυπικό μικρόμετρο παρουσιάζεται σε τομή στο Σχήμα 2.8. Αποτελείται από δύο κύρια μέρη, ένα σταθερό και ένα κινητό:

- το σκελετό Σ με σχήμα πετάλου, του οποίου η δεξιά κυλινδρική προέκταση διαμορφώνεται σε περικόχλιο Β.
- τον κινητό κοχλία Γ (π.χ. με βήμα 0,5 mm), του οποίου προέκταση αποτελεί ο κινητός επαφάς Α. Ενσωματωμένος στον κοχλία Γ είναι ο κάλυκας Κ, ο οποίος περιβάλλει το περικόχλιο Β.

Όταν βιδώνεται ή ξεβιδώνεται ο κοχλίας, ο κινητός επαφάς Α πλησιάζει ή απομακρύνεται από τον σταθερό επαφά - πέλμα Π. Το βίδωμα ή το ξεβίδωμα του κοχλία γίνεται με την περιστροφή του κάλυκα Κ, ο οποίος περιστρέφει και ταυτόχρονα μετατοπίζει και τον επαφά Α. Στην εξωτερική επιφάνεια Λ του περικοχλίου, που διαμορφώνεται σε κυλινδρικό κανόνα, είναι χαραγμένες σε διαμήκη γενέτειρά του

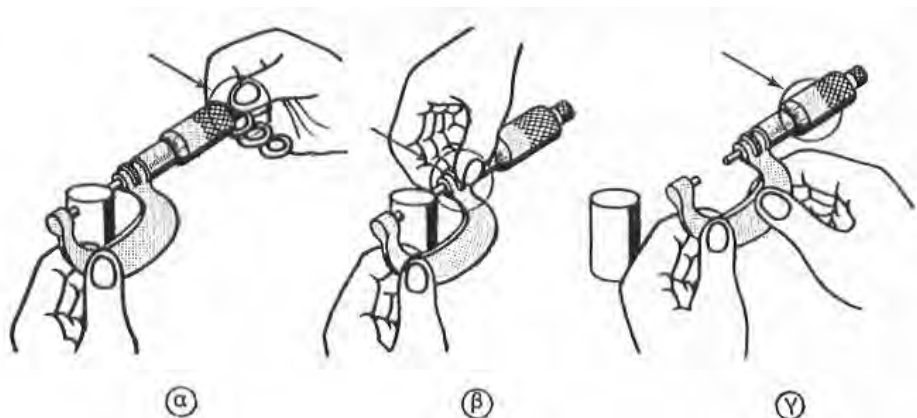
υποδιαίρέσεις σε χιλιοστά (mm) ή σε υποπολλαπλάσια in (π.χ. βαθμονόμηση ανά 0,5 mm). Ο ρικνωτός ασφαλιστικός δακτύλιος N χρησιμεύει για τη σταθεροποίηση του κινητού επαφά A. Ο μηχανισμός M στην άκρη του κάλυκα φέρει αναστολέα (καστάνια) και ελατήριο με ορισμένη τάση. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμεύει για να πιέζονται μεταξύ των επαφών οι επιφάνειες που πρόκειται να μετρηθούν με μικρή και συγκεκριμένη πίεση. Αυτό συντελεί στην ακρίβεια των μετρήσεων δεδομένου ότι αποφεύγεται η άσκηση υπερβολικής ροπής και οι συνεπακόλουθες παραμορφώσεις.



Σχήμα 2.8: Παράσταση τυπικού μικρομέτρου.

Η διαδικασία μέτρησης με μικρόμετρο περιλαμβάνει τρία στάδια, βλέπε Σχήμα 2.9:

- α) Τοποθέτηση του μικρομέτρου και κανονική σύσφιξη του προς μέτρηση αντικειμένου μεταξύ των επαφών με χρήση του αναστολέα.
- β) Ακινητοποίηση του κινητού επαφά με χρήση του ασφαλιστικού δακτυλίου.
- γ) Απομάκρυνση του μικρομέτρου και ανάγνωση της ένδειξης (βλέπε στη συνέχεια).



Σχήμα 2.9: Διαδικασία μέτρησης με μικρόμετρο.

Όπως προαναφέρθηκε, διακρίνουμε μικρόμετρα μετρικού συστήματος και μικρόμετρα αγγλοσαξονικού συστήματος. Ανάλογα με το είδος της μετρούμενης διάστασης διακρίνουμε:

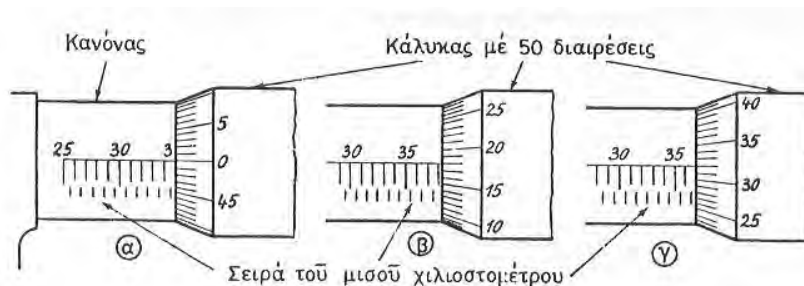
- μικρόμετρα για εξωτερικές διαστάσεις
- μικρόμετρα για εσωτερικές διαστάσεις
- μικρόμετρα βάθους.

Η πολυτυπία αυτή των μικρομέτρων πρέπει να αντιπαραβληθεί με την απλότητα των παχύμετρων, όπου με το ίδιο όργανο είναι δυνατή η μέτρηση σύμφωνα με τα δύο μετρητικά συστήματα και για τα τρία διαφορετικά είδη διαστάσεων. Εξ αντιθέτου, η διακριτική ικανότητα του παχύμετρου είναι υποπολλαπλάσια αυτής του μικρόμετρου. Σημειώνεται ότι η απαιτούμενη ακρίβεια για τα διάφορα είδη μικρόμετρων καθορίζεται στη σειρά προτύπων DIN 863 (1999) και για τα διάφορα είδη παχύμετρων στο πρότυπο DIN 862 (1988).

Η διαδικασία μέτρησης και η ορθή ανάγνωση των ενδείξεων κατά τη μικρομέτρηση είναι σαφώς θέμα πρακτικής άσκησης (training) σε Μετροτεχνικό Εργαστήριο. Για την πληρότητα ωστόσο του θέματος επιχειρείται μία συνοπτική παρουσίαση στη συνέχεια με αναφορά κυρίως σε μικρόμετρο εξωτερικών διαστάσεων μετρικού συστήματος.

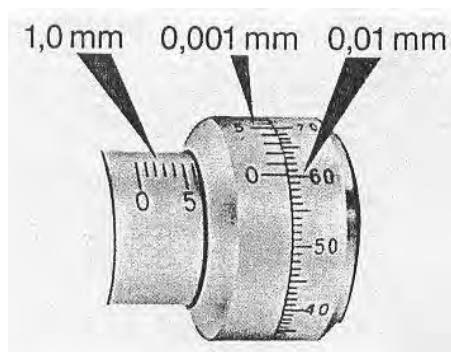
Κατ' αρχήν επισημαίνεται ότι τα μικρόμετρα κλιμακώνονται κατά μεγέθη: 0-25, 25-50, 50-75 (mm) κ.ο.κ. ή 0-1, 1-2, 2-3 (in) κ.ο.κ. Τα μικρόμετρα με άνοιγμα μεγαλύτερο από 25 mm (ή 1 in) συνοδεύονται και από πρότυπο μήκος ίσο με τη μικρότερη διάσταση που μετρούν (π.χ. μικρόμετρο 50-75 mm συνοδεύεται από πρότυπο μήκος 50 mm).

Η βασική μεθοδολογία της ανάγνωσης είναι η ακόλουθη: στη γενέτειρα του κανόνα γίνεται η ανάγνωση των mm (ή in) ενώ στις υποδιαίρέσεις του κάλυκα γίνεται η ανάγνωση των εκατοστών του mm (ή χιλιοστών in), με την ταύτιση υποδιαίρεσης του κάλυκα με τη γραμμή του κανόνα. Ενδεικτικά, ως παράδειγμα, στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές ενδείξεις από μετρήσεις με μικρόμετρο. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν οι μετρήσεις αυτές είναι 35,00 mm, 38,18 mm και 36,82 mm αντίστοιχα.



Σχήμα 2.10: Ενδείξεις μετρήσεων με μικρόμετρο.

Σήμερα κατασκευάζονται μικρόμετρα που διαθέτουν και βερνιέρο (vernier micrometer caliper), όπως τα παχύμετρα. Τα μικρόμετρα αυτά έχουν διακριτική ικανότητα 0,001 mm (1 μ m) ή 0,0001 in. Η συγκρότηση και ο τρόπος ανάγνωσης της ένδειξης σε μικρόμετρα αυτού του τύπου εικονίζονται στο Σχήμα 2.11. Διατίθενται επίσης μικρόμετρα με οθόνη ψηφιακών ενδείξεων (digital reading micrometer) ή με ωρολογιακού τύπου δείκτη για ευκολότερη (και ακριβέστερη χρήση) και ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.11: Ανάγνωση της ένδειξης σε μικρόμετρο με βερνιέρο.

Το σφάλμα μέτρησης με μικρόμετρο είναι το άθροισμα των ακόλουθων επί μέρους σφαλμάτων.

- Σφάλμα μικρομετρικού κοχλία.
- Σφάλμα παραλληλότητας των επαφών.
- Σφάλμα κάμψης του πετάλου.
- Σφάλμα βαθμονόμησης των κλιμάκων.

Η διακρίβωση των μικρόμετρων γίνεται με πρότυπα πλακίδια για το μήκος μέτρησης και στη συνέχεια ελέγχεται η παραλληλότητα μεταξύ κινητής και σταθερής επαφής και η επιπεδότητα των επαφών με χρήση οπτικών πλακιδίων (optical flats).

2.4.1.4 Πρότυπα πλακίδια

Τα πρότυπα πλακίδια, ως κατασκευές, είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, των οποίων δύο παράλληλες έδρες είναι κατεργασμένες με μέγιστη ακρίβεια, επίπεδες, παράλληλες και λείες. Η απόσταση που υπάρχει ανάμεσα στις δύο αυτές έδρες (επιφάνειες αναφοράς) του πλακιδίου είναι το οριζόμενο από κάθε πλακίδιο μήκος ή η **ονομαστική διάσταση** του πλακιδίου. Η επιλογή τους οφείλεται στο Σουηδό επιθεωρητή οπλισμού S. Johansson, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και για αυτό πολλές φορές ονομάζονται και πλακίδια Johansson. Τα πλακίδια Johansson κατασκευάζονται από υλικά που αντέχουν στη φθορά και στη διάβρωση και χαρακτηρίζονται από μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής (χρωμιούχος χάλυβας ή κεραμικό υψηλής σταθερότητας). Η απαιτούμενη σκληρότητα, επιφανειακή τραχύτητα και διαστατική σταθερότητα επιτυγχάνονται με μία σειρά ειδικών κατεργασιών. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, βλέπε ενδεικτικά VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 17 (1991), προδιαγράφονται τέσσερις διαφορετικές ποιότητες (κατηγορίες ακρίβειας) για τα πρότυπα πλακίδια.

- Κατηγορία (Grade) 0 - μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα μήκους $\pm (0,1 + L/500)$ μm
 - Κατηγορία (Grade) I - μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα μήκους $\pm (0,2 + L/200)$ μm
 - Κατηγορία (Grade) II - μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα μήκους $\pm (0,5 + L/100)$ μm
 - Κατηγορία (Grade) III - μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα μήκους $\pm (1,0 + L/50)$ μm
- (L είναι το ονομαστικό μήκος του πλακιδίου σε mm)

Τα πρότυπα πλακίδια της υψηλότερης κατηγορίας 0 χρησιμοποιούνται ως Πρότυπα Αναφοράς των εργαστηρίων διακρίβωσης, ενώ για τις συνήθεις βιομηχανικές εφαρμογές (τμήμα ποιοτικού ελέγχου ή μετρολογικό εργαστήριο μιας βιομηχανίας κατεργασιών) τα πρότυπα πλακίδια κατηγορίας II είναι επαρκή ως πρότυπα εργασίας.

Η διακρίβωση των πρότυπων πλακιδίων γίνεται με τη σύγκρισή τους με πρότυπα πλακίδια ανώτερης κατηγορίας σε ειδική συσκευή και απαιτείται έλεγχος τόσο της επιπεδότητας όσο και της παραλληλότητας της επιφάνειάς τους.

Τα πρότυπα πλακίδια διατίθενται στο εμπόριο σε συλλογές τόσο στο μετρικό όσο και στο αγγλοσαξονικό σύστημα μονάδων. Στον Πίνακα 2.1 παρατίθεται η σύνθεση δύο τυπικών συλλογών από πρότυπα πλακίδια κατά το μετρικό και αγγλοσαξονικό σύστημα αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1: Σύνθεση τυπικών συλλογών πρότυπων πλακιδίων.
(προέλευση: Πετρόπουλος, 1991)

Αριθμός πλακιδίων	Κλιμάκωση ονομαστικής διαστάσεως [mm]	Περιοχή ονομαστικής διαστάσεως [mm]	Αριθμός πλακιδίων	Κλιμάκωση ονομαστικής διαστάσεως [in]	Περιοχή ονομαστικής διαστάσεως [in]
1. Μετρικό σύστημα			2. Αγγλοσαξονικό σύστημα		
9	0,001	1,001- 1,009	9	0,0001	0,1001-0,1009
49	0,010	1,010- 1,490	49	0,001	0,101 -0,149
49	0,500	0,500- 24,500	19	0,050	0,050 -0,950
4	25,000	25,000-100,000	4	1,000	1,000 -4,000
2*	—	2,000	2*	—	0,050

* Πλακίδια αντιφθοράς από σκληρομέταλλο.

Η κύρια χρήση των πρότυπων πλακιδίων είναι ο συνδυασμός τους για τη δημιουργία (σύνθεση) συγκεκριμένων (πρότυπων) διαστάσεων με πολύ στενές ανοχές. Για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης πρότυπης διάστασης ακολουθούνται τα ακόλουθα βήματα:

- Επιμελής καθαρισμός των επιφανειών μέτρησης των πλακιδίων
- Τοποθέτηση των πλακιδίων το ένα πάνω στο άλλο σταυροειδώς
- Ολίσθηση και στροφή των πλακιδίων με σύγχρονη άσκηση ελαφριάς πίεσης για την τοποθέτηση των πλακιδίων σε κανονική θέση. Με τον τρόπο αυτό εκδιώκεται ο αέρας που υπάρχει ανάμεσα στις εφαιπόμενες επιφάνειες και επιτυγχάνεται η πλήρης πρόσφυση των πλακιδίων.

Πρακτικά κατά τη σύνθεση μιας διάστασης με καλώς προσφύμενα πλακίδια μπορεί να θεωρηθεί ότι η στήλη των πλακιδίων έχει διάσταση πρακτικά ίση με το άθροισμα των ονομαστικών διαστάσεων των πλακιδίων που συνιστούν τη στήλη αυτή. Η διαδικασία επιλογής πλακιδίων για τη σύνθεση δεδομένης διάταξης απαιτεί τεχνική εμπειρία και αποτελεί αντικείμενο Εφαρμοσμένης Μετροτεχνίας.

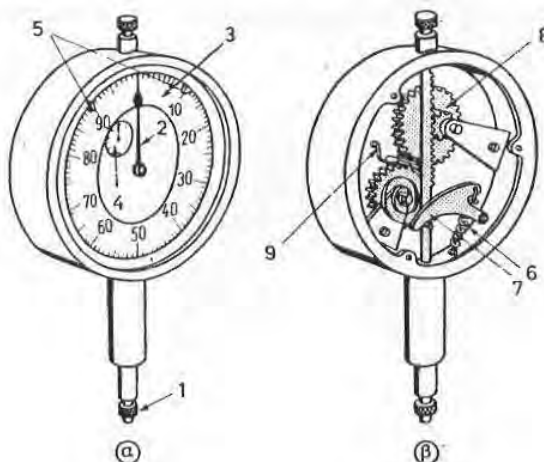
Ανάλογα με την ποιότητά τους τα πρότυπα πλακίδια χρησιμοποιούνται σε διάφορες μετροτεχνικές εφαρμογές, βλέπε ενδεικτικά Πετρόπουλος, 1991.

Τα πρότυπα πλακίδια ανήκουν σε μια κατηγορία μετρολογικού εξοπλισμού που αναφέρεται με το όνομα **πρότυπα βιομηχανικά μήκη**. Τα πρότυπα βιομηχανικά μήκη χρησιμοποιούνται τόσο στον έλεγχο διαστάσεων κατά τη μορφοποίηση μηχανουργικών προϊόντων όσο και στη διακρίβωση οργάνων και μέσων μέτρησης μικρότερης ακρίβειας. Στα πρότυπα βιομηχανικά μήκη εκτός από τα πρότυπα πλακίδια ανήκουν οι

πρότυποι κανόνες σφαιρικών άκρων, οι πρότυποι κανόνες κυλινδρικών άκρων, οι πρότυποι δίσκοι και οι πρότυποι δακτύλιοι, βλέπε ενδεικτικά Πετρόπουλος, 1991.

2.4.1.5 Ωρολογιακοί ενδείκτες (dial indicators)

Οι ωρολογιακοί ενδείκτες (μετρητικά ρολόγια) παρουσιάζονται ως τυπικά όργανα της κατηγορίας των *συγκριτικών* οργάνων. Τα όργανα αυτά χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αποκλίσεων από ένα καθορισμένο μήκος, ή από μία καθορισμένη εσωτερική ή εξωτερική διάμετρο και για τη μέτρηση ομοκεντρότητας επιφανειών κλπ. Η εξωτερική όψη και ο εσωτερικός μηχανισμός ενός μετρητικού ρολογιού (dial indicator) εικονίζονται στο Σχήμα 2.12. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον πολλαπλασιασμό μίας γωνίας στροφής μέσω οδοντωτών τροχών (γρاناζιών). Το ρολόι αποτελείται από ένα κινητό στέλεχος με μία επαφή, η οποία καθώς μετατοπίζεται γραμμικά, μεταδίδει την κατακόρυφη κίνησή της σ' έναν οδοντωτό κανόνα σταθερά συνδεδεμένο με αυτήν. Η γραμμική αυτή κίνηση μετατρέπεται σε περιστροφική στα γρανάζια, τα οποία, με κατάλληλη σχέση μετάδοσης, κινούν τη βελόνα (δείκτη) της βαθμονομημένης πλάκας.

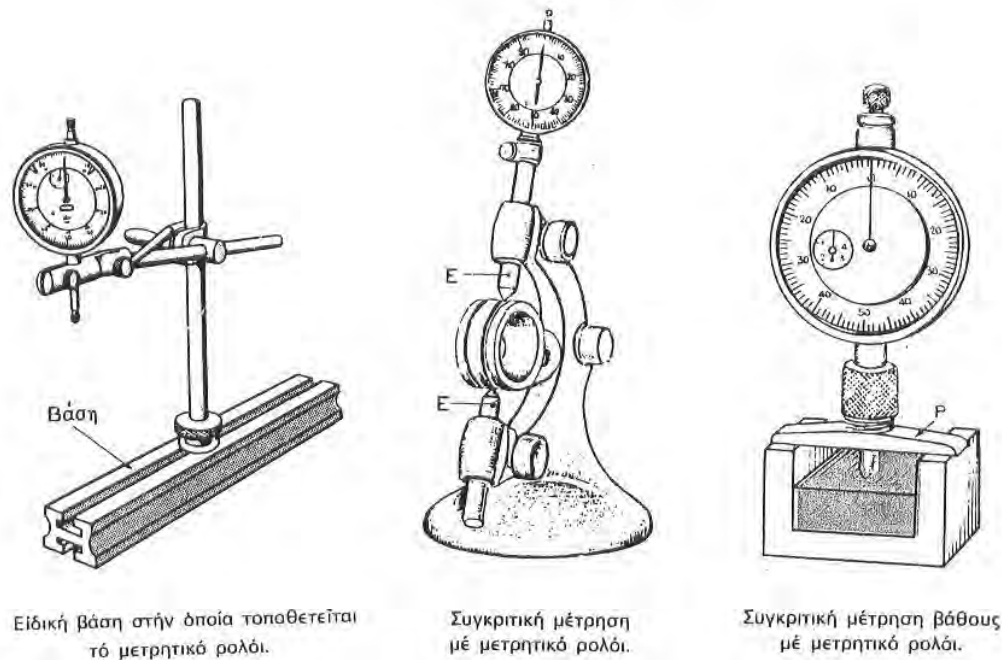


α) 'Εξωτερική όψη μετρητικού ρολογιού. β) 'Εσωτερικό του μηχανισμού του με άφαιρση της πλάκας. 1) Μετρητικό στέλεχος. 2) Δείκτης. 3) 'Η πλάκα με τις διαιρέσεις. 4) Κλίμακα για τα πλήρη χιλιοστόμετρα. 5) Κινητά όρια άνοχων. 6) 'Ελατήριο. 7) Μοχλίσκος 8) 'Οδοντωτός τροχός. 9) Σπειροειδές ελατήριο για να εμποδίζει το «παίξιμο των γρاناζιών».

Σχήμα 2.12: Εξωτερική όψη και εσωτερικός μηχανισμός μετρητικού ρολογιού. (πρόελευση: Λαζαρίδης, 1991)

Οι λειτουργικές απαιτήσεις και η ακρίβεια για τα διάφορα είδη μετρητικών ρολογιών καθορίζονται στο πρότυπο DIN 878 (1983). Η διακριτική ικανότητα είναι συνήθως 0,01 mm ή 0,001 mm και 0,00001 in αντίστοιχα.

Το μετρητικό ρολόι χρειάζεται μία βάση στήριξης τόσο κατά τη διεξαγωγή των συγκριτικών μετρήσεων όσο και κατά τη διακρίβωσή του. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές με χρήση μετρητικού ρολογιού. Τα μετρητικά ρολόγια χρησιμοποιούνται επίσης ευρύτατα και ως ελεγκτήρες.

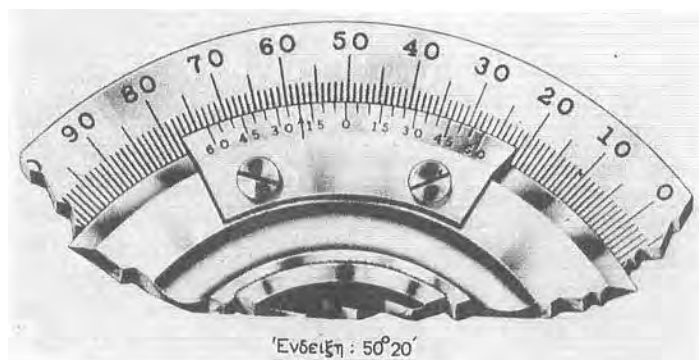


Σχήμα 2.13: Εφαρμογές με χρήση μετρητικού ρολογιού.
(προέλευση: Λαζαρίδης, 1991)

2.4.2 Όργανα μέτρησης γωνιών

2.4.2.1 Μοιρογνομόνια

Τα μοιρογνομόνια είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του μεγέθους και τον έλεγχο γωνιών. Το κοινό (μηχανουργικό) μοιρογνομόνιο είναι μεταλλικό και παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στα Μαθηματικά και το Τεχνικό Σχέδιο. Το κοινό μοιρογνομόνιο (plain protractor) έχει συνήθως διακριτική ικανότητα $0,5^\circ$. Για τη μέτρηση γωνιών με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιείται μοιρογνομόνιο εφοδιασμένο με κλίμακα βερνιέρου (vernier protractor). Στην περίπτωση αυτή η διακριτική ικανότητα αυξάνεται σε $1/12$ της μοίρας ($5'$). Ο τρόπος ανάγνωσης της ένδειξης σε μοιρογνομόνια αυτού του τύπου εικονίζεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.13: Ανάγνωση ένδειξης σε μοιρογνωμόνιο με βερνιέρο.

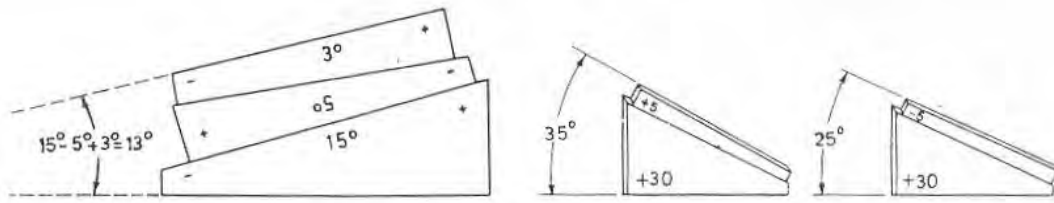
Πολλές φορές στις μηχανουργικές κατασκευές χρειάζεται να μετρηθεί το άνοιγμα γωνιών και κυρίως να ελεγχθεί ή να «σημαδευθεί» γωνία συγκεκριμένου ανοίγματος (90° , 60° , 120° κλπ). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα, η *γωνιά* (για ορθές γωνίες) και η *φαλτσογωνιά* (για οξείες ή αμβλείες γωνίες). Για να ελεγχθεί η γωνία ενός εξαρτήματος εφαρμόζεται πάνω στο εξάρτημα η αντίστοιχη γωνιά-ελεγκτήρας και εξετάζεται η εφαρμογή των πλευρών της γωνιάς στις πλευρές του εξαρτήματος. Η εφαρμογή είναι σωστή (αποδεκτή) όταν σε όλο το μήκος επαφής διακρίνεται μια ισοπαχής φωτεινή γραμμή (αρμός φωτός).

2.4.2.2 Πρότυπα γωνιακά πλακίδια

Τα πρότυπα γωνιακά πλακίδια, όπως και τα πρότυπα πλακίδια μήκους, χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση συγκεκριμένων γωνιών με μεγάλη ακρίβεια.

Κάθε πρότυπο πλακίδιο που συμμετέχει στο σχηματισμό μιας γωνίας χαρακτηρίζεται από την ονομαστική του γωνία. Η γωνία, την οποία συνθέτει ένας συνδυασμός γωνιακών πλακιδίων, είναι εκείνη που σχηματίζεται ανάμεσα στις ακραίες επιφάνειές τους. Κάθε πλακίδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δύο θέσεις: είτε με πρόσθεση της ονομαστικής του γωνίας στο συνδυασμό των προηγούμενων πλακιδίων είτε με αφαίρεση, αν αντιστραφούν τα άκρα του. Η σύνθεση γωνιών με πρότυπα γωνιακά πλακίδια παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14.

Τα πρότυπα γωνιακά πλακίδια διατίθενται στο εμπόριο σε συλλογές μέσα σε κατάλληλες θήκες. Ο αριθμός των πλακιδίων κάθε συλλογής εξαρτάται από την επιθυμητή περιοχή μετρήσεων γωνιών και από το ελάχιστο επιθυμητό βήμα κλιμάκωσης των γωνιών.



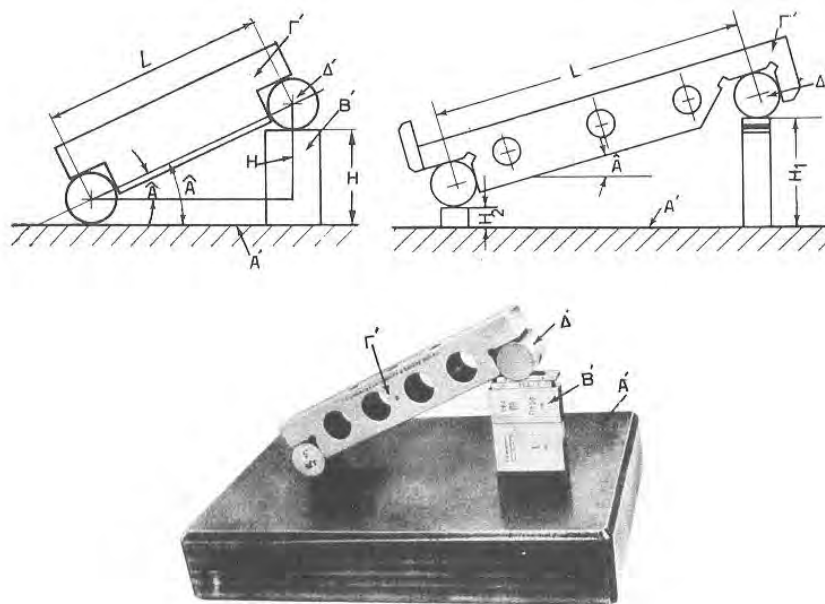
Σχήμα 2.14: Σύνθεση γωνιών με πρότυπα γωνιακά πλακίδια.

2.4.2.3 Ράβδος ημίτονου

Η ράβδος ημίτονου αποτελεί ουσιαστικά μια τριγωνομετρική μέθοδο ελέγχου και μέτρησης γωνιών.

Η εφαρμογή της μεθόδου εικονίζεται στο σχήμα 2.16. Απαιτούνται μία οριζόντια επίπεδη επιφάνεια A' , πρότυπα πλακίδια B' , με τα οποία συνθέτουμε την κάθετη πλευρά του ορθογωνίου τριγώνου, ένας ειδικός πρότυπος κανόνας ή μία ράβδος Γ' , ο λεγόμενος κανόνας ή ράβδος ημίτονου μαζί με δυο μετρητικούς κυλίνδρους Δ' , της ίδιας διαμέτρου και μεγάλης ακρίβειας κατασκευής. Ο κανόνας ημίτονου αποτελεί την υποτείνουσα του ορθογωνίου τριγώνου ενώ με τη στήλη των πρότυπων πλακιδίων και την οριζόντια επίπεδη πλάκα υλοποιούμε την ορθή γωνία του τριγώνου. Κατά τα γνωστά, η γωνία A προκύπτει ως :

$$\eta\mu A = H/L \quad \text{ή} \quad A = \text{τοξ}\eta\mu(H/L) \quad \text{είτε} \quad \eta\mu A = H_1 - H_2/L \quad \text{ή} \quad A = \text{τοξ}\eta\mu(H_1 - H_2/L) \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.16: Εφαρμογή της ράβδου ημίτονου για τον καθορισμό δεδομένης γωνίας. (προέλευση: Πετρόπουλος, 1991)

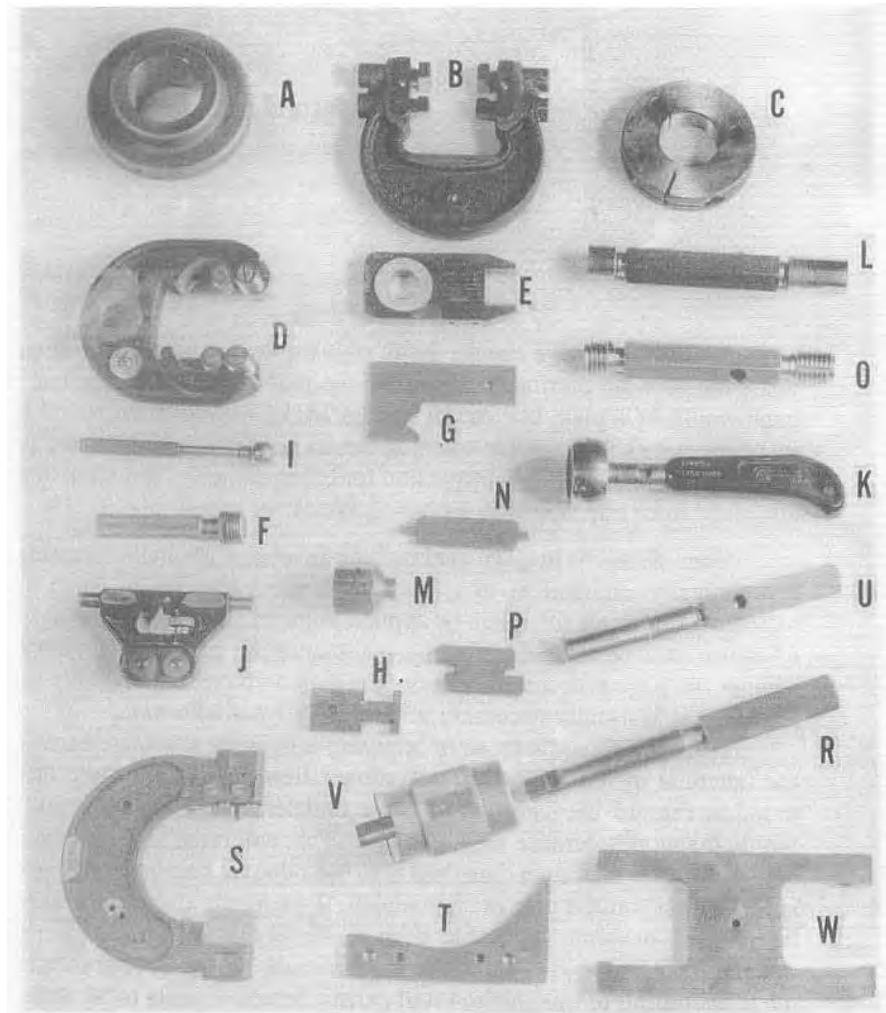
2.4.3 Ελεγκτήρες

Με τον όρο **ελεγκτήρας (gage)** αναφερόμαστε σε κάθε μετροτεχνικό όργανο που σκοπό έχει να διαπιστώνει εάν ένα μέγεθος (π.χ. η εσωτερική διάμετρος ενός δακτυλίου) βρίσκεται εντός προδιαγεγραμμένων τιμών (ορίων) χωρίς, κατ' αρχή, να ενδιαφέρει η απόλυτη τιμή του μεγέθους.

Ο ελεγκτήρας είναι είτε σταθερός, όποτε ελέγχει μόνο μία τιμή/κατάσταση του μεγέθους, είτε ρυθμιζόμενος, οπότε χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μιας περιοχής τιμών.

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διάφοροι (κοινοί μηχανικοί) μηχανουργικοί ελεγκτήρες. Σημειώνεται ότι οι «ελεγκτήρες ορίου» που αφορούν τον έλεγχο των ανοχών (διαστάσεων) εξετάζονται στην ενότητα 3.5

Σε αντίθεση με τους μηχανικούς ελεγκτήρες, οι **ηλεκτρονικοί ελεγκτήρες** (electronic gages) ανιχνεύουν την κίνηση του μοχλού/αισθητήρα επαφής μέσω αλλαγών στην αντίσταση ηλεκτρομηκυνσιομέτρων ή την χωρητικότητα ή την επαγωγή κατάλληλων κυκλωμάτων και μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα σε ένδειξη μεταβολής μήκους. Ένας ιδιαίτερα διαδεδομένος ελεγκτήρας αυτού του τύπου είναι το λεγόμενο *LVDT (linear variable differential transformer)* που χρησιμοποιείται ευρύτατα για τον έλεγχο μικρών μετατοπίσεων. Οι ηλεκτρονικοί ελεγκτήρες είναι, γενικά, ακριβότεροι από τους μηχανικούς αλλά διαθέτουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα: εύκολη λειτουργία, γρήγορη απόκριση, ψηφιακή ένδειξη, μικρότερη πιθανότητα εισαγωγής ανθρώπινου σφάλματος και τη δυνατότητα να ενταχθούν λειτουργικά σε αυτόματα συστήματα ελέγχου (automated inspection).



Typical gages: (A) plain ring gage; (B) adjustable limit progressive thread snap gage; (C) adjustable thread ring gage; (D) fixed-limit progressive thread snap gage; (E) fixed-limit ring-snap gage; (F) tapered thread plug gage; (G) form gage; (H) fixed-limit snap gage; (I) single end ball plug gage; (J) adjustable limit inside diameter or length gage; (K) single-end spherical plug gage; (L) cylindrical double-end plug gage; (M) flush pin gage; (N) double-end slot-width gage; (O) double-end thread plug gage; (P) double-end step gage; (R) taper plug gage; (S) adjustable-limit progressive snap gage; (T) form gage; (U) cylindrical progressive plug gage; (V) tapered ring gage; (W) fixed-limit double-end snap gage.

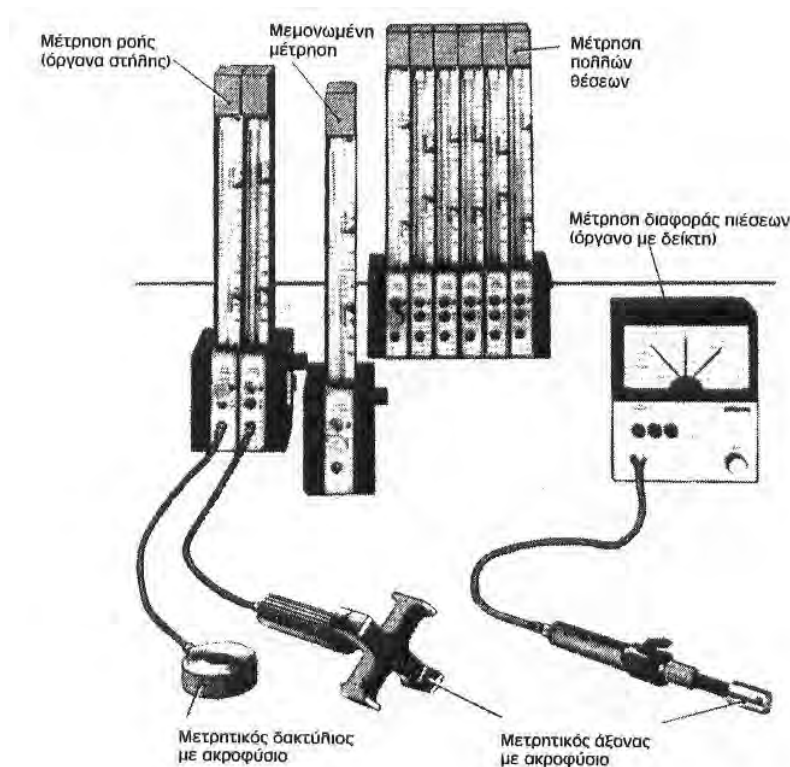
Σχήμα 2.17: Κοινοί μηχανουργικοί ελεγκτήρες.
(προέλευση: Doyle et al., 1985)

2.4.4 Άλλα όργανα μέτρησης

Τα μετρητικά όργανα που παρουσιάσθηκαν στις προηγούμενες ενότητες χαρακτηρίζονται ως μηχανικά. Ο εξοπλισμός μετρήσεων ακριβείας περιλαμβάνει και άλλες κατηγορίες οργάνων, όπως τα πνευματικά, τα οπτικά και ηλεκτρικά.

Τα **πνευματικά όργανα** (pneumatic instruments) χρησιμοποιούν ως μέσο μέτρησης τον πεπιεσμένο αέρα με πίεση 0,75-2 bar. Τα όργανα αυτά αποτελούνται από

τον μετρητικό υποδοχέα (μορφής άξονα ή δακτυλίου με ακροφύσιο) και το όργανο ένδειξης το οποίο έχει μορφή στήλης ή κλίμακα ενδείξεων, βλέπε Σχήμα 2.18. Τα πνευματικά όργανα μέτρησης/ελέγχου μετατρέπουν σε αναγνώσιμη ένδειξη την αλλαγή στη ροή ή την πίεση του αέρα μεταξύ του υποδοχέα και του προς μέτρηση αντικειμένου. Το κύριο μειονέκτημα των πνευματικών οργάνων είναι η απαίτηση ύπαρξης διακριτού υποδοχέα εξαρτώμενου από τη μορφή του αντικειμένου. Για το λόγο αυτό τα πνευματικά όργανα χρησιμοποιούνται κυρίως στη μαζική παραγωγή. Επιπρόσθετες πληροφορίες δίδονται στη σχετική βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά *Brown et al., 1996*, και *Doyle et al., 1985*.



Σχήμα 2.18: Πνευματικά όργανα μετρήσεων.
(προέλευση: Brown et al., 1996)

Τα **οπτικά όργανα (optical measuring instruments)** βασίζονται στις γνωστές από τη Φυσική αρχές της μεγέθυνσης ή της συμβολής του φωτός, βλέπε ενδεικτικά *Πετρόπουλος χ.χ.* και *Black et al., 1996*. Με βάση την αρχή της μεγέθυνσης λειτουργούν ο **μεγεθυντικός φακός**, οι **οπτικοί συγκριτές (optical comparators)** που μεγεθύνουν πολύπλοκης γεωμετρίας ή μικρών διαστάσεων 3-D αντικείμενα και το **μετρητικό ή μηχανουργικό μικροσκόπιο (toolmaker's microscope)**. Με βάση την αρχή της

συμβολής λειτουργούν τα **οπτικά πλακίδια (optical flats)** και τα **συμβολόμετρα (interferometers)**.

Το μηχανουργικό μικροσκόπιο είναι το πλέον εύχρηστο οπτικό μεγεθυντικό όργανο και συνήθως είναι εφοδιασμένο με βάση τοποθέτησης του αντικειμένου που κινείται μικρομετρικά σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Η τυπική του διακριτική ικανότητα ανέρχεται σε 25 μm (10 μin). Πολλές φορές συνδυάζονται με ψηφιακούς ενδείκτες για την άμεση ανάγνωση/καταγραφή των μετρούμενων τιμών. Ένα σύγχρονο μηχανουργικό μικροσκόπιο εφοδιασμένο με ψηφιακή μονάδα ανάγνωσης εικονίζεται στο Σχήμα 2.19.

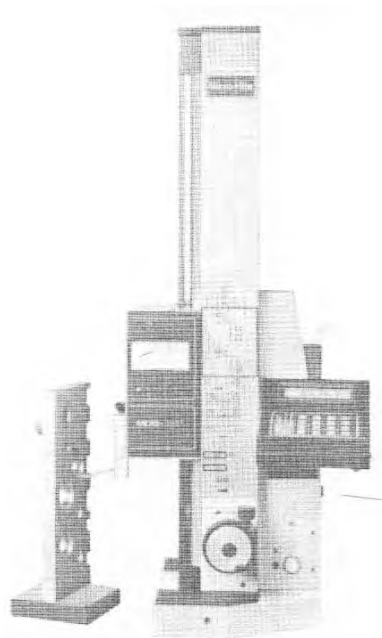


Σχήμα 2.19: Σύγχρονο μηχανουργικό μικροσκόπιο.

Τα ηλεκτρονικά όργανα λειτουργούν με οπτικοηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διαδρομής. Κοινή βάση των περισσότερων τέτοιων συστημάτων αποτελεί ένας γυάλινος κανόνας με μία κεφαλή-αισθητήρα. Κατά την κίνηση της μετρητικής κεφαλής οι αδιαφανείς χαραγές του αισθητήρα φράσσουν ή αφήνουν το φως να προσπέσει στις ανακλώσες χαραγές του γυάλινου κανόνα. Η αλλαγή στην ένταση του ανακλώμενου φωτός δημιουργεί ψηφιακά σήματα, που οδηγούνται σε κατάλληλους

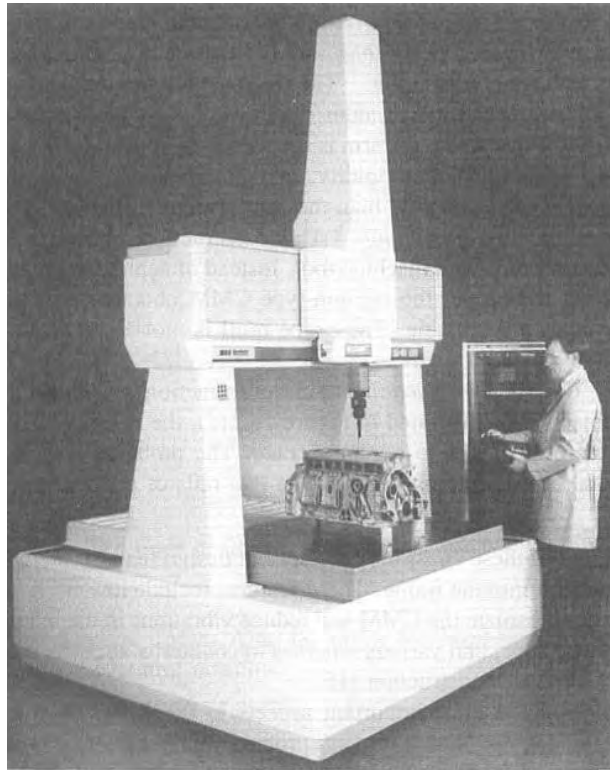
μορφοτροπείς και καταγράφονται ή/και αποθηκεύονται σε Η/Υ. Τα οπτικοηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διαδρομής αποτελούν τον «πυρήνα» για τους κατακόρυφους μετρητές ύψους και τις λεγόμενες μετρητικές μηχανές.

Οι **κατακόρυφοι ηλεκτρονικοί μετρητές ύψους** (microprocessor based height gage) είναι εξέλιξη των μικρομέτρων ύψους και περιέχουν ένα κατάλληλο οπτικοηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης διαδρομής τοποθετημένο στην κατακόρυφη στήλη, βλέπε Σχήμα 2.20. Είναι όργανα πολλαπλών λειτουργιών (multifunction gage) αφού εκτός από μετρήσεις μήκους επιτρέπουν και την μέτρηση/έλεγχο γεωμετρικών χαρακτηριστικών (απόσταση μεταξύ κέντρων, επιπεδότητα, καθετότητα κτλ). Η διακριτική ικανότητά τους είναι, συνήθως, 0,001 mm ή 0,0001 in.



Σχήμα 2.20: Κατακόρυφος προγραμματιζόμενος μετρητής ύψους.
(προέλευση: Doyle et al., 1985)

Η **μετρητική μηχανή (coordinating measuring machine/CMM)** αποτελείται από μια βάση στήριξης (που μετακινείται σε δύο οριζόντιους άξονες ή/και στρέφεται) όπου τοποθετείται το προς μέτρηση/έλεγχο αντικείμενο και από μια ακίδα προσαρτημένη σε κεφαλή που κινείται επίπεδα και κάθετα επιτρέποντας την εκτέλεση πολλαπλών μετρήσεων και ελέγχων, βλέπε Σχήμα 2.21. Η μετρητική μηχανή διαθέτει ψηφιακούς ενδείκτες για την ανάγνωση των μετρήσεων και καθοδηγείται από μικροϋπολογιστή. Η ευαισθησία των μετρήσεων που λαμβάνονται βρίσκεται στην τάξη των 25 μm (10 μin).



Σχήμα 2.21: Μετρητική μηχανή (coordinating measuring machine).

Η μετρητική μηχανή αποτελεί, σήμερα, το πλέον αναπτυγμένο σύστημα τρισδιάστατης μετρολογίας (3-D metrology) που διατίθεται για βιομηχανική χρήση και χρησιμοποιείται για τον άμεσο έλεγχο των παραγομένων εξαρτημάτων (on-line inspection) και, σε διασύνδεση με Ε/Μ CNC σε συστήματα αυτοματοποιημένης παραγωγής (automated production / CIM). Επιπρόσθετες πληροφορίες για τους τύπους των μηχανών CMM, τη δομική τους συγκρότηση και τα χαρακτηριστικά τους δίδονται στη βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά *Groover, 1987* και σε καταλόγους κατασκευαστών. Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τις δυνατότητες που προσφέρει μια μηχανή CMM στον τομέα της μετρολογίας και του ποιοτικού ελέγχου.

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε παρουσίαση μόνο των οργάνων μέτρησης μήκους. Τα κύρια χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων τέτοιου μετρητικού εξοπλισμού συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.2: Δυνατότητες μετρήσεων σε μετρητική μηχανή CMM
(προέλευση: Groover, 1987)

<i>Dimensions.</i>	A dimension of a part can be determined by taking the difference between the two surfaces defining the dimension.
<i>Hole location and diameter.</i>	By measuring three points around the surface of a circular hole, the “best-fit” center coordinates of the hole and its diameter can be computed.
<i>Cylinder axis and diameter.</i>	This is similar to the preceding problem except that the calculation deals with an outside surface rather than an internal (hole) surface.
<i>Sphere center and diameter.</i>	By measuring four points on the surface of a sphere, the best-fit center coordinates and the radius (or diameter) can be calculated.
<i>Definition of a plane.</i>	Based on a minimum of three contact points on a plane surface, the best-fit plane is determined.
<i>Flatness.</i>	By measuring more than three contact points on a supposedly plane surface, the deviation of the surface from a perfect plane can be determined.
<i>Angle between two planes.</i>	The angle between two planes can be found by defining each of two planes using the plane definition method above, and calculating the angle between them.
<i>Parallelism between two planes.</i>	This is an extension of the previous function. If the angle between two planes is zero, the planes are parallel. The degree to which the planes deviate from parallelism can be determined.
<i>Angle and point of intersection between two lines.</i>	Given two lines known to intersect (e.g., two edges of a part that meet in a corner), the point of intersection and the angle between the lines can be determined based on two points measured for each line (a total of four points).

Πίνακας 2.3: Κύριοι τύποι μετρητικού εξοπλισμού (προέλευση: DeGarmo et al., 1988)

Method	Typical Accuracy	Major Applications	Comments
Air	0.5–10 microinches or 2% to 3% of scale range	Gaging holes and shafts using a calibrated difference in air pressure or airflow, with magnifications of 20,000–40,000 to 1; also used for machine control, sorting, and classifying.	High precision and flexibility; can measure out-of-round, taper, concentricity, camber, squareness, parallelism, and clearance between mating parts; noncontact principle good for delicate parts.
Optical light energy	0.5–2 microinches or better with laser interferometry 0.5–1 second of arc in autocollimation optical comparators	Interferometry; checking flatness and size of gage blocks; finding surface flaws; measuring spherical shapes, flatness of surface plates, accuracy of rotary index tables; includes all light microscopes and devices common on plant floor.	Largest variety of measuring equipment; autocollimators are used for making precision angular measurements; lasers are used to make precision in-process measurements; laser scanning.
Electron energy	100 Angstroms (Å)	Precision measurement in scanning electron microscopes of microelectronic circuits and other small precision parts.	Part size restricted by vacuum chamber size; electron beam can be used for processing and part testing of electronic circuits.
Electronic	0.5–10 microinches	Widely used for machine control, on-line inspection, sorting, and classification; OD's, ID's, height, surface, and geometrical relationships, profile tracing for roundness, surface roughness, contours, etc.; most devices are comparators with movement of stylus or spindle producing an electronic signal that is amplified electronically; commonly connected to microprocessors and minicomputers for process adjustment.	Electronic gages come in many forms but usually have a sensory head or detector combined with an amplifier; capable of high magnification with resolution limited by size or geometry of sensory head; readouts commonly have multiple magnification steps; solid-state, digital electronics make these devices small, portable, stable, and extremely flexible, with extremely fast response time.
Mechanical	1–10 microinches	Large variety of external and internal measurements using dial indicators, micrometers, calipers, and the like; commonly used for bench comparators for gage calibration work.	Moderate cost and ease of use make many of these devices the workhorses of the shop floor; highly dependent on workers' skill and often subject to problems of linkages.

Ωστόσο για την κατασκευαστική τεχνολογία είναι προφανώς απαραίτητες οι μετρήσεις (και οι έλεγχοι) πολλών άλλων μεγεθών. Ενδεικτικά αναφέρονται η πίεση, η δύναμη και η ροπή, η θερμοκρασία, η μάζα κ.α. Τα αντίστοιχα μετρητικά όργανα, κατά σύμβαση, δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της Μηχανουργικής Τεχνολογίας.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν εξετάζονται εδώ εξειδικευμένα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση συγκεκριμένων τεχνικών χαρακτηριστικών (π.χ. μέτρηση βήματος σπειρώματος, κυκλικότητα διατομής, μέτρηση χαρακτηριστικών οδοντωτού τροχού κ.α.). Για τους τύπους μετρητικών οργάνων πληροφόρηση παρέχει η ειδική βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά, *Timings*, 1995 και *Winchell*, 1996.

2.5 Σφάλματα μετρήσεων

2.5.1 Κατηγορίες και αιτίες σφαλμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε μέτρηση υπόκειται σε ανακρίβειες και αβεβαιότητες που έχουν ως συνισταμένα το μετρητικό σφάλμα. (Απόλυτο) **σφάλμα μέτρησης** ορίσθηκε η διαφορά της αληθούς τιμής ενός μεγέθους από τη μετρούμενη τιμή.

$$\Delta x = x - x_T \quad (2.5)$$

όπου Δx : το απόλυτο σφάλμα

x : η μετρούμενη τιμή (ένδειξη οργάνου)

x_T : η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους

Σχετικό σφάλμα ορίζεται το πηλίκο του απόλυτου σφάλματος δια της αληθούς τιμής.

$$\delta = \Delta x / x_T \quad (2.6)$$

Πρακτικά, κατά τις μετρήσεις το απόλυτο σφάλμα εκφράζεται ως

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (2.7)$$

όπου $\bar{x}$ μια συμβατικά επιλεγμένη τιμή, συνήθως η μέση τιμή των μετρήσεων x_i .

Οι αιτίες (πηγές) των μετρητικών σφαλμάτων είναι ποικίλες. Οι σπουδαιότερες συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 2.3: Αιτίες σφαλμάτων

Πηγές σφαλμάτων	Αιτίες
Μετρητικό όργανο	Κακή ρύθμιση του οργάνου Κακή επιλογή σημείου αναφοράς Αδράνεια ή υστέρηση του οργάνου Φθορά των μηχανικών μερών του οργάνου Ασυνέχεια στη μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό
Πρότυπο μέτρησης	Σφάλματα στη διακρίβωση του προτύπου Φθορά του προτύπου
Περιβάλλον μέτρησης	Διαταραχές του οργάνου λόγω αλλαγής συνθηκών περιβάλλοντος
Μέθοδος μέτρησης	Λανθασμένη μέθοδος μέτρησης Λανθασμένη τοποθέτηση ή χρήση του οργάνου Λανθασμένη διάταξη μέτρησης
Ανθρώπινοι παράγοντες	Κακή θέση ανάγνωσης του οργάνου Σφάλμα χειριστή

Τα σφάλματα ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες, σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα.

Συστηματικό σφάλμα (assignable/systematic error) είναι το σφάλμα, το οποίο σε μια σειρά επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παραμένει σταθερό ή μεταβάλλεται κατά προβλεπόμενο τρόπο με τις αιτίες του, γνωστές ή άγνωστες.

Το συστηματικό σφάλμα είμαστε σε θέση να το λάβουμε υπόψη και αν επιφέρουμε τις αναγκαίες διορθώσεις, ώστε αυτό να μειωθεί ή να εξαλειφθεί. Ο όρος συστηματικό σφάλμα παραπέμπει σε είδος σφάλματος που οφείλεται στο σύστημα μέτρησης.

Τυχαίο σφάλμα (random error) είναι το σφάλμα, το οποίο σε μία σειρά επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, μεταβάλλεται κατά μη προβλεπόμενο τρόπο. Το τυχαίο σφάλμα οφείλεται σε αναπόφευκτους αστάθμητους παράγοντες που δεν μπορούν να εξουδετερωθούν.

Τα συστηματικά σφάλματα υπολογίζονται, γενικά, με την εφαρμογή γνωστών φυσικών σχέσεων. Τα τυχαία σφάλματα μπορούν μόνο να εκτιμηθούν με βάση τη

θεωρία των πιθανοτήτων, δηλαδή με εφαρμογή στατιστικών μεθόδων. Σημειώνεται ότι στα συστηματικά σφάλματα εντάσσονται τα λεγόμενα παρασιτικά σφάλματα, τα οποία προκύπτουν από εσφαλμένη εκτέλεση μιας μέτρησης (π.χ. λανθασμένη ανάγνωση μιας ένδειξης, χρήση ελαττωματικού οργάνου κ.α.).

Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να προκύψουν από διάφορες αιτίες. Οι κυριότερες είναι οι ακόλουθες:

- Σφάλματα από διαφορά θερμοκρασίας
- Σφάλματα από πίεση του δοκιμίου (σύνθλιψη)
- Σφάλματα παρατήρησης και ανάγνωσης
- Σφάλματα από κάμψη
- Σφάλματα λόγω κακής τοποθέτησης του οργάνου

Αναλυτική παρουσίαση των σφαλμάτων αυτών γίνεται στις βιβλιογραφικές παραπομπές *Πετρόπουλος, χ.χ. και Λουλούδης, 1999*. Σημειώνεται ότι οι αιτίες που αναφέρθηκαν είναι ενδεικτικές. Στην πράξη, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρουσιάζονται περισσότερες. Πρέπει να επισημανθεί ότι τα συστηματικά σφάλματα είναι περισσότερα όσο το όργανο μέτρησης είναι πολυπλοκότερο. Κατά συνέπεια σε κάθε περίπτωση πρέπει να προτιμώνται τα απλούστερα όργανα με την προϋπόθεση, βέβαια, ότι η «ακρίβειά» τους καλύπτει τις τεθείσες μετρολογικές απαιτήσεις.

2.5.2 Στατιστική κατανομή σφαλμάτων

Είναι γενικά παραδεκτό ότι η κανονική κατανομή αποτελεί ένα ικανοποιητικό πρότυπο για την περιγραφή πολλών μετρήσιμων μεγεθών. Με το πρότυπο αυτό περιγράφεται, συνήθως με επάρκεια, και η κατανομή των σφαλμάτων μέτρησης. Όταν τα σφάλματα είναι τυχαία, τα αποτελέσματα x_i ενός μεγάλου αριθμού n συνεχόμενων μετρήσεων έχουν μία διασπορά γύρω από την αληθινή τιμή x_T , με τα μισά περίπου από αυτά πάνω και τα μισά κάτω από την τιμή x_T .

Κατά τα γνωστά, η μέση τιμή $\bar{X}$ και η τυπική απόκλιση σ προσδιορίζουν πλήρως μία διαδικασία δοκιμών στην περίπτωση, που ακολουθείται η κανονική κατανομή. Στην πράξη όμως, οι προηγούμενες παράμετροι δεν είναι γνωστές και δεν είναι δυνατόν να υπολογισθούν από πεπερασμένο αριθμό μετρήσεων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην εύρεση της μέσης τιμής ($\bar{x}$) δείγματος n τυχαίων μετρήσεων ως εκτίμησης της μέσης τιμής του πληθυσμού και αντιστοίχως της εκτίμησης της τυπικής απόκλισης του πληθυσμού μέσω της τυπικής απόκλισης του δείγματος.

Η μέση τιμή των n μετρήσεων είναι:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.8)$$

Η τιμή αυτή είναι η καλύτερη εκτιμήτρια της αληθινής τιμής x_T . Για ένα πολύ μεγάλο αριθμό μετρήσεων δηλαδή, όταν $n \rightarrow \infty$ τότε, $\bar{x} \rightarrow x_T$.

Αναφέρθηκε ήδη, βλέπε (εξισ. 2.8), ότι ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά της μέσης τιμής των παρατηρήσεων από μια δεδομένη παρατήρηση.

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x}$$

Η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων ενός δείγματος μετρήσεων θα είναι:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (2.9)$$

Εάν εκτελεσθεί ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων, τότε όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα θα ακολουθούν την κανονική κατανομή, που κατά τα γνωστά εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\phi(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{x}}{s} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

Εάν ως αρχή των συντεταγμένων ληφθεί η μέση τιμή $\bar{x}$ τότε οι τετμημένες θα είναι $\varepsilon = x - \bar{x}$ και η προηγούμενη σχέση μετασχηματίζεται στη σχέση:

$$\phi(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{s} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό του σφάλματος, στην περίπτωση αυτή κάθε σημείο του άξονα των τετμημένων παριστάνει το αντίστοιχο σφάλμα ε_i . Η καμπύλη πιθανοτήτων, κατά συνέπεια, αντιπροσωπεύει τώρα την καμπύλη ή κατανομή σφάλματος.

Εάν εισάγουμε την αδιάστατη μεταβλητή z

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} = \frac{\varepsilon}{s} \quad (2.12)$$

προκύπτει κατά τα γνωστά η ανηγμένη κανονική κατανομή σφάλματος με μέση τιμή ίση με 0 και τυπική απόκλιση ίση με 1.

2.5.3 Παράμετροι της κατανομής σφαλμάτων

(α) Μέσο αριθμητικό σφάλμα

Το μέσο αριθμητικό σφάλμα ορίζεται ως

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (2.13)$$

(β) Πιθανό σφάλμα

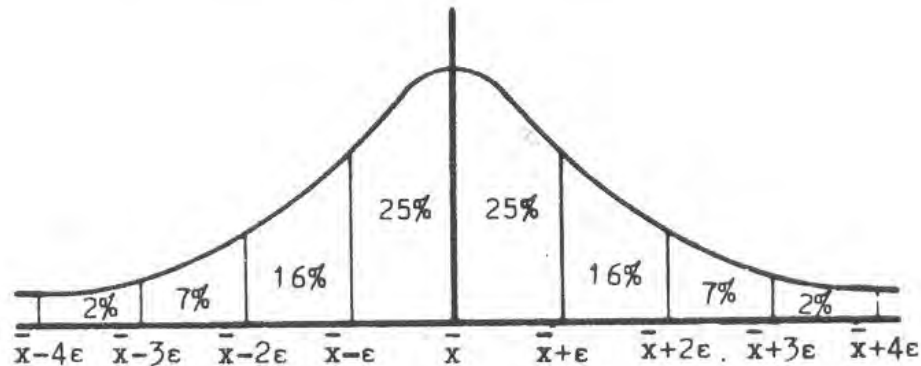
Το **πιθανό σφάλμα** ορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_p = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \phi(x) dx = \frac{1}{2} \quad (2.14)$$

Εξ' ορισμού το πιθανό σφάλμα είναι εκείνη η τιμή $\varepsilon = \varepsilon_p$, για την οποία υπάρχει ίδια πιθανότητα να βρεθεί τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από $\varepsilon = \varepsilon_p$. Προκύπτει (από την εφαρμογή στοιχειώδους στατιστικής) ότι:

$$\varepsilon_p = 0,6745 \sigma \quad (2.15)$$

Τα ποσοστά της επιφάνειας μεταξύ της καμπύλης σφάλματος και του άξονα $-x$, για τιμές $x = \pm \varepsilon$, $x = \pm 2\varepsilon$, $x = \pm 3\varepsilon$ κλπ δίδονται, κατά προσέγγιση, στο Σχήμα 2.22. Σημειώνεται ότι το σχήμα αυτό και η γνώση της τιμής του πιθανού σφάλματος, επιτρέπουν την προσεγγιστική λύση προβλημάτων ποιοτικού ελέγχου με ιδιαίτερα απλό τρόπο (χωρίς χρήση πινάκων πιθανοτήτων)



Σχήμα 2.22: Κατανομή ποσοστού σφάλματος μεταξύ συγκεκριμένων ορίων $x = \varphi(\varepsilon)$.

(γ) Μέγιστο πιθανό σφάλμα

Από την καμπύλη σφάλματος προκύπτει ότι η πιθανότητα να ευρεθεί σφάλμα εκτός του διαστήματος $x = \pm 4\varepsilon$ ισούται προς 0,007. Πρακτικά δύναται να θεωρηθεί ότι εντός του διαστήματος $x = \pm 4\varepsilon$ βρίσκεται το σύνολο των τιμών. Με βάση την παραδοχή αυτή ορίζεται ως **μέγιστο πιθανό (τυχαίο) σφάλμα** το μέγεθος:

$$\varepsilon_{p/\max} = 4\varepsilon_p \quad (2.16)$$

(δ) *Τυπικό σφάλμα μέσης τιμής δείγματος n μετρήσεων :*

Το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής δείγματος n μετρήσεων (ή οποία μέση τιμή, όπως προαναφέρθηκε προσεγγίζει την αληθή τιμή) θα δίδεται από την σχέση:

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.17)$$

2.5.3 Έλεγχος ακρίβειας μετρήσεων

Η ακρίβεια μιας μέτρησης καθορίζεται από το πιθανό σφάλμα. Επειδή το πιθανό σφάλμα εξαρτάται από την ικανότητα του χειριστή του μετρητικού οργάνου , έπεται ότι και η ακρίβεια των μετρήσεων θα πρέπει να προσδιορίζεται για κάθε χειριστή. Η ακρίβεια μέτρησης, αν γίνει μία μόνον μέτρηση, ισούται με την «ακρίβεια» (= διακριτική ικανότητα) του οργάνου. Για να αυξηθεί η ακρίβεια μέτρησης πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των εκτελούμενων μετρήσεων.

Θεωρούμε ένα σύνολο n μετρήσεων ενός φυσικού μεγέθους με το ίδιο μετρητικό όργανο και τον ίδιο χειριστή, έστω $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Ζητείται να προσδιορισθεί τιμή $\bar{x}$ πλησιέστερη προς την αληθή τιμή. Για την εύρεση της τιμής αυτής εφαρμόζεται η αρχή των ελαχίστων τετραγώνων κατά Gauss, που ορίζει ότι η πιθανότερη τιμή κάποιου μεγέθους είναι εκείνη για την οποία το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων των επί μέρους μετρήσεων είναι ελάχιστο. Η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση είναι προφανώς:

$$\sum \varepsilon_i^2 = \min \quad (2.18)$$

Παραγωγή της εξισ. (2.18) οδηγεί στην σχέση

$$2(x_1 - \bar{x}) + 2(x_2 - \bar{x}) + 2(x_3 - \bar{x}) + 2(x_n - \bar{x}) = 0 \quad (2.19)$$

και εν συνεχεία στη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.20)$$

Από τις σχέσεις (2.8) και (2.20) αποδεικνύεται ότι η πιθανότερη τιμή είναι η μέση τιμή των n μετρήσεων. Η διαφορά $(x_n - \bar{x})$ ονομάζεται πιθανό σφάλμα. Εύκολα αποδεικνύεται ότι το άθροισμα των πιθανών σφαλμάτων είναι ίσο με μηδέν.

Παλαιότερα, εσφαλμένα, ως μέτρο ακρίβειας μιας σειράς μετρήσεων εθεωρείτο ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των πιθανών σφαλμάτων, το λεγόμενο κατά μέσο όρο σφάλμα, (t) .

$$t = \pm \frac{\sum |\varepsilon_i|}{n} \quad (2.21)$$

Κατά Gauss ως μέτρο της ακρίβειας των μετρήσεων θεωρείται η σχέση (2.18) οπότε το αντιπροσωπευτικό **μέσο σφάλμα μεμονωμένης μέτρησης** δίδεται από την σχέση:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n-1}} \quad (2.22)$$

Με δεδομένο το μέσο σφάλμα μεμονωμένης μέτρησης (m), με βάση τη σχέση (2.17), το μέσο σφάλμα που αντιστοιχεί στον μέσο όρο μιας σειράς μετρήσεων είναι

$$M = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}} \quad (2.23)$$

Από τη σχέση (2.23) διαπιστώνεται ότι η ακρίβεια υπολογισμού της μέσης τιμής αυξάνει με τον αριθμό των μετρήσεων n αλλά ανάλογα του $\sqrt{n}$, δηλαδή πάνω από ένα αριθμό μετρήσεων, το κέδρος στην ακρίβεια του $\bar{x}$ είναι μικρό, ενώ επιπλέον, με αύξηση του αριθμού των μετρήσεων υπάρχει κίνδυνος να υπεισέλθουν συστηματικά σφάλματα, τα οποία δεν ακολουθούν τους νόμους των πιθανοτήτων.

Κατά συνέπεια η αληθής τιμή του υπό μέτρηση μεγέθους κυμαίνεται μεταξύ

$$x - M < x_T < x + M \quad (2.24)$$

2.5.3 Σύνθετα σφάλματα σε έμμεση μέτρηση

Πολλές φορές στην πράξη ένα μέγεθος δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί άμεσα αλλά η τιμή του υπολογίζεται έμμεσα, από άλλα μεγέθη από τα οποία εξαρτάται συναρτησιακά. Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα στη μέτρηση του «συνιστάμενου» μεγέθους εξαρτάται από τα σφάλματα των «συνιστώντων» μεγεθών και ονομάζεται **σύνθετο σφάλμα**. Στην ενότητα αυτή εξετάζουμε τους τρόπους υπολογισμού του σύνθετου σφάλματος⁺.

(α) Σύνθετα συστηματικά σφάλματα

Τα συστηματικά σφάλματα λειτουργούν αθροιστικά. Εάν ένα μέγεθος Y είναι συνάρτηση n μεγεθών $x_1, x_2, \dots, x_n$, δηλαδή, $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ και τα μεγέθη $x_1, x_2, \dots, x_n$,

⁺ Στις ενότητες που ακολουθούν το συστηματικό σφάλμα δηλώνεται με τον δείκτη s (systematic) και το τυχαίο με τον δείκτη r (random).

υπόκεινται σε συστηματικά σφάλματα $\varepsilon_{sx_1}, \varepsilon_{sx_2}, \dots, \varepsilon_{sx_n}$, τότε το **σύνθετο συστηματικό σφάλμα** του μεγέθους Y είναι:

$$\varepsilon_{sY} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_{sx_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_{sx_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \varepsilon_{sx_n} \quad (2.25)$$

Το **μέγιστο σύνθετο συστηματικό σφάλμα** του μεγέθους Y προκύπτει από το άθροισμα των απολύτων τιμών των μερικών διαφορικών της προηγούμενης σχέσης, ως:

$$\varepsilon_{sY/\max} = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_{sx_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_{sx_2} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \varepsilon_{sx_n} \right| \quad (2.26)$$

Για να ισχύει η σχέση (2.25) και εν συνεχεία η (2.26) θα πρέπει τα σφάλματα να έχουν μικρή τιμή και μάλιστα της ίδιας τάξης μεγέθους.

(β) Σύνθετα τυχαία σφάλματα

Εάν ένα μέγεθος Y είναι συνάρτηση n μεγεθών $x_1, x_2, \dots, x_n$, δηλαδή, $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ και τα μεγέθη $x_1, x_2, \dots, x_n$, υπόκεινται σε τυχαία σφάλματα $\varepsilon_{rx_1}, \varepsilon_{rx_2}, \dots, \varepsilon_{rx_n}$, τότε το **πιθανό σύνθετο τυχαίο σφάλμα** του μεγέθους Y είναι:

$$\varepsilon_{rY} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_{rx_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_{rx_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \varepsilon_{rx_n} \right)^2} \quad (2.27)$$

Η τυπική απόκλιση του σύνθετου τυχαίου σφάλματος του μεγέθους Y είναι:

$$s_{rY} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} s_{rx_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} s_{rx_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} s_{rx_n} \right)^2} \quad (2.28)$$

(γ) Συνδυασμός συστηματικών και τυχαίων σφαλμάτων

Γενικά, σε μία μέτρηση εμφανίζονται τόσο συστηματικά, όσο και τυχαία σφάλματα. Κατά συνέπεια το συνολικό σφάλμα θα έχει «συνιστώσες» και από τις δύο κατηγορίες σφαλμάτων. Εάν $y_{s1/\max}, y_{s2/\max}, \dots, y_{sv/\max}$ είναι οι μέγιστες τιμές των υπαρχόντων συστηματικών σφαλμάτων οφειλομένων στα αίτια 1,2, ...,v, και $\varepsilon_{p/\max} = 4\varepsilon_p$, είναι το μέγιστο πιθανό (τυχαίο) σφάλμα, τότε το **μέγιστο ολικό απόλυτο σφάλμα**, οφειλόμενο σε τυχαία και συστηματικά αίτια θα είναι:

$$y_{tot/\max} = |y_{s1/\max}| + |y_{s2/\max}| + \dots + |y_{sv/\max}| + \varepsilon_{p/\max} \quad (2.29)$$

Το **μέγιστο ολικό πιθανό σφάλμα** θα είναι:

$$\varepsilon_{r/tot} = \sqrt{(y_{1/\max})^2 + (y_{2/\max})^2 + \dots + (y_{v/\max})^2 + (\varepsilon_{p/\max})^2} \quad (2.30)$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A) Συγγράμματα-Δημοσιεύσεις

- Βαξεβανίδης, Ν.Μ., *Μηχανολογική Σχεδίαση*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (Ε.Α.Π.), Πάτρα, 2003.
- Brown, H. et al., *Μετροτεχνία*, Βιβλιοθήκη του Μηχανολόγου, εκδ. ΕΤΕ, Περιστέρι, 1996.
- Καραχάλιου, Χ., Μανσούρ, Γ., *Διαστατική μετρολογία*, εκδ. Ζήτη, 2007.
- Λαζαρίδης, Π.Ε., *Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο II – τεύχος Β*, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1991.
- Μπεργελές, Γ., Παπαντώνης, Δ., Τσαγγάρης, Σ., *Τεχνικές μετρήσεις ρευστο-μηχανικών μεγεθών*, εκδ. Συμεών, Αθήνα, 1998.
- Λουλούδης, Α.Α., *Τεχνικές Ελέγχου Ποιότητας*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (Ε.Α.Π.), Πάτρα, 1999.
- Παπάς, Α.Ι., *Μηχανουργική Τεχνολογία – τόμος 1- Έλεγχος μηχανουργικών προϊόντων*, 2^η εκδ., Αθήνα, 1964.
- Πετρίδης, Β., *Συστήματα Μετρήσεων*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη, 1986.
- Πετρόπουλος, Π.Γ., *Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας – Μετροτεχνία*, εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, χ.χ.
- Πετρόπουλος, Π.Γ., *Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο II – τεύχος Α*, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 1991.
- Σιμόπουλος, Σ.Ε., *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, 2^η εκδ., ΕΜΠ, Αθήνα, 1987.
- Bertoline, G.R., Wiebe, E.N., Miller, C.L., Mohler, J.L., *Technical Graphics Communication*, WCB Mc-Graw Hill, 2nd ed., Boston, 1997.
- Black, S.C., Chiles, V., Lissaman, A.J., Martin, S.J., *Principles of Engineering Manufacture*, Arnold, 3rd ed., London, 1996.
- Doyle, L.E., Keyser, C.A., Leach, J.L., Schrader, G.F., Singer, M.B., *Manufacturing Processes and Materials for Engineers*, Prentice Hall, 3rd ed., N. Jersey, 1985.
- Farago, F.T., Curtis, C.A., *Handbook of Dimensional Measurement*, Industrial Press, 3rd ed., 1994.
- Groover, M.P., *Automation, Production Systems, and CIM*, Prentice-Hall, London, 1987.
- EURAMET project 1011, *Metrology in short*, 3rd ed., Albertslund, 2008.
- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Pearson/Prentice Hall, 5th ed., 2008.
- Meadows, J.D., *Geometrical Dimensions and Tolerancing*, MarkelDekker, New York, 1995.
- Roth, E.S., *Gaging, Practical Design and Application*, 2nd ed., SME, 1983.
- Schey, J.A., *Introduction to Manufacturing Processes*, Mc-Graw Hill, 2nd ed., New York, 1987.
- Timings, R.L., *Manufacturing Technology - vol. 1*, Longman, 2nd ed., Essex, 1992.
- Timings, R.L., *Manufacturing Technology - vol. 2*, Longman, Essex, 1993.
- Warnecke, H.J., Dutschke, W. (eds), *Metrology in Manufacturing Technology*, Springer, Berlin, 1984.

- Winchell, W., *Inspection and Measurement in Manufacturing*, SME, 1996.

B) Προδιαγραφές

- DIN 862 (1988): *Vernier calipers; requirements and testing.*
- DIN 863-1 (1999): *Verification of geometrical parameters - Micrometers - Part 1: Standard design micrometer calipers for external measurement; concepts, requirements, testing.*
- DIN 863-2 (1999): *Verification of geometrical parameters - Micrometers - Part 2: Micrometer calipers heads, Depth micrometer; concepts, requirements, testing.*
- DIN 863-3 (1999): *Verification of geometrical parameters - Micrometers - Part 3: Special design micrometer calipers for external measurement; characteristics, requirements, testing.*
- DIN 863-4 (1999): *Verification of geometrical parameters - Micrometers - Part 4: Internal micrometers; concepts, requirements, testing.*
- DIN 878 (1983): *Dial gauges.*
- DIN 1319-2 (1980): *Basic concepts in metrology; Terminology relating to the use of measuring instruments.*
- DIN 2257-1 (1982): *Terminology used in dimensional metrology; Units, activities, checking instruments; Metrological concepts.*
- DIN-Taschenbuch 11, *Längenprüftechnik*, 2000.
- ISO 3599 (1976): *Vernier callipers reading to 0,1 and 0,05 mm.*
- ISO 6906 (1984): *Vernier callipers reading to 0,02 mm.*
- ISO 3611 (1978): *Micrometer callipers for external measurement.*
- ISO 7863 (1984): *Height setting micrometers and riser blocks.*
- ISO 3650 (1998): *Geometrical Product Specifications (GPS) - Length standards - Gauge blocks.*
- ISO/TR 16015 (2003): *Geometrical product specifications (GPS) - Systematic errors and contributions to measurement uncertainty of length measurement due to thermal influences.*
- ISO 14253-1 (1998): *Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications.*
- ISO/TS 14253-2 (1999): *Geometrical Product Specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification.*
- ISO 10360-1 (2000): *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 1: Vocabulary.*
- ISO 5725-1 (1994): *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions.*
- ISO 5725-2 (1994): *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.*
- ISO/R 463 (1965): *Dial gauges reading in 0.01 mm, 0.001 in and 0.0001 in.*
- VDI/VDE 2617 Blatt 1 (1986): *Accuracy of coordinate measuring machines; characteristics and their checking; generalities.*
- VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 6 (1991): *Depth micrometers.*

- VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 7 (1991): *Micrometer callipers for wall-thickness measurement.*
- VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 17 (1991): *Gauge blocks.*
- VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 9.1 (2001): *Inspection of measuring and test equipment - Test instructions for callipers for external, internal and depth dimensions.*

Προτεινόμενη (προαιρετική) βιβλιογραφία εμβάθυνσης

- Καραχάλιου, Χ., Μανσούρ, Γ., *Διαστατική μετρολογία*, εκδ. Ζήτη, 2007.
- Πετρόπουλος, Π.Γ., *Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας – Μετροτεχνία*, εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη, χ.χ.
- Σιμόπουλος, Σ.Ε., *Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*, 2^η εκδ., ΕΜΠ, Αθήνα, 1987.
- EURAMET project 1011, *Metrology in short*, 3rd ed., Albertslund, 2008.
- Farago, F.T., Curtis, C.A., *Handbook of Dimensional Measurement*, Industrial Press, 3rd ed., 1994.
- Winchell, W., *Inspection and Measurement in Manufacturing*, SME, 1996.

Πηγές στο Διαδίκτυο (Internet)

➤ <http://www.eim.gr>

Ο δικτυακός τόπος του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας.

➤ http://nuclear.ntua.gr/ses/ses_yliko.html

Η ιστοσελίδα που περιέχει το «Υποστηρικτικό Υλικό Μαθημάτων» του καθηγητή ΕΜΠ. Σ.Ε. Σιμόπουλου. Περιλαμβάνονται εκτενείς σημειώσεις (παρουσιάσεις) του μαθήματος «Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών»

➤ http://resource.npl.co.uk/international_office/metrologyinshort.pdf

➤ http://www.dfm.dtu.dk/fileadmin/user_upload/pdf/Metrology-InShort3rd.pdf

Στις δύο παραπάνω διευθύνσεις υπάρχει διαθέσιμο για αναπαραγωγή το πλήρες κείμενο της μελέτης «*Metrology in short*» της EURAMET (2008).

➤ <http://www.physics.smu.edu/~scalise/apparatus/caliper/>

Οδηγίες λειτουργίας και χρήσης των παχύμετρων. Περιλαμβάνει και interactive tutorial.

➤ <http://www.starrett.com>

Ο δικτυακός τόπος ενός από τους παλαιότερους (1880) και πλέον έγκυρους κατασκευαστές μετρητικών οργάνων ακριβείας. Περιέχεται πλήρης on-line product catalogue.

➤ <http://www.sheffieldmeasurement.com/>

Η σελίδα εισόδου στον δικτυακό τόπο ενός γνωστού κατασκευαστή μηχανών CMM (Sheffield Measurement /Hexagon Metrology).