



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ &
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μέθοδος Μέτρησης Διαμέτρου Δακτυλίων Continuous
Scanning σε Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (CMM):
Μελέτη επίδρασης στην ακρίβεια λόγω αλλαγής θέσεως
και μεγέθους μετρούμενου αντικειμένου.**

Επιμέλεια : Παπαδόπουλος Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Β.Ι.Ν. Λεώπουλος

Αθήνα 2011

Ευχαριστίες

Με μεγάλη χαρά εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους, οι οποίοι συνέβαλαν σημαντικά και με διάφορους τρόπους στην δημιουργία αυτής της διπλωματικής.

Έτσι, εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Β.Ι.Ν. Λεώπουλο, Επίκουρο καθηγητή του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Είμαι ευγνώμων στον κ. Γεώργιο Χατζηστέλιο, Υπεύθυνο Ποιότητας Μετροτεχνικού Εργαστηρίου και διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις του, αλλά και το ενδιαφέρον του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Γεράσιμο Λούντζη, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, για την σημαντική συμμετοχή του στην υλοποίηση της εργασίας και για τις συμβουλές του.

Τέλος, με ευγνωμοσύνη αναγνωρίζω την υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την υπομονή της οικογένειάς μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

0	ΠΡΟΛΟΓΟΣ	8
1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1.	Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	10
1.2.	ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	10
1.3.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ.....	12
1.4.	ΓΕΝΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	14
1.5.	ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	15
1.6.	ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	18
1.7.	Η ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	20
1.8.	ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΑ.....	21
1.9.	ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ.....	22
2	ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	24
2.1.	ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	24
2.2.	ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ	25
2.2.1.	Πρότυπα πλακίδια (gage block ή slip gage)	25
2.2.2.	Πρότυποι κανόνες.....	30
2.2.3.	Ειδικά πρότυπα (master gage)	31
2.2.4.	Ελεγκτήρες ορίου (limit gages)	32
2.3.	ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΚΩΝ	37
2.3.1.	Μετρητικοί κανόνες (rules)	37
2.3.2.	Παχύμετρο (vernier caliper)	39
2.3.3.	Μικρόμετρο (micrometer)	44
2.4.	ΟΡΓΑΝΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΗΚΩΝ.....	49

2.4.1.	Μετρητικό ρολόι (dial indicator)	50
2.4.2.	Μετρητικός βραχίονας (lever gauge).....	53
2.4.3.	Ηλεκτρικά μετρητικά όργανα	54
2.4.4.	Ηλεκτρονικά μετρητικά όργανα	55
2.4.5.	Οπτικός συγκριτής (optical comparator)	57
2.4.6.	Πνευματικά μετρητικά όργανα	58
3	ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	61
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	61
3.2.	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ CMM.....	62
3.3.	ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ CMM	64
3.3.1.	Φορητές CMM.....	64
3.3.2.	Σταθερές CMM.....	67
3.4.	ΤΥΠΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	70
3.4.1.	Αισθητήρες με επαφή	71
3.4.2	Αισθητήρες χωρίς επαφή	77
3.4.3.	Σύστημα συλλογής, ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων	79
3.4.4.	Λογισμικό CMM.....	81
4	ΜΗΧΑΝΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ	
	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ Ε.Μ.Π.....	83
4.1.	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ CMM ΣΕΙΡΑΣ GLOBAL.....	83
4.2.	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ RENISHAW ΤΗΣ CMM	86
4.3.	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PC-DMIS	91
4.4.	ΥΠΟΛΟΙΠΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	92
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ Ε.Μ.Π.	95

5.1. ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ	95
5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ.....	95
5.3. ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	99
6 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	105
6.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ.....	105
6.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	106
6.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της μέτρησης	107
6.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την επεξεργασία της μέτρησης.....	113
7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΜΕ CMM ΣΤΟ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Ε.Μ.Π	119
7.1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	119
7.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	120
7.2.1. Προετοιμασία μηχανής.....	120
7.2.2. Εκκίνηση μηχανής.....	122
7.2.3. Καθορισμός εργαλείου μέτρησης.....	123
7.2.4. Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα (calibration).....	126
7.2.5. Καθορισμός αρχής των αξόνων.....	128
7.2.6. Κατασκευή προγράμματος μέτρησης.....	131
7.2.7. Κατασκευή κύκλου από νέφος σημείων.....	136
7.2.8. Διαστασιολόγηση και εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	138

7.3.	ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ	
	ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .	139
7.3.1.	Παράγοντες που εξετάζονται κατά τη μέτρηση.....	139
7.3.2.	Μελέτη αποτελεσμάτων της μέτρησης.....	143
7.4.	ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	145
8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	146
8.1.	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ ...	146
8.2.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	152
8.2.1.	Μελέτη χαρακτηριστικών κατανομής μετρημένων τιμών.....	163
8.2.2.	Έλεγχος συμβατότητας αποτελεσμάτων μέτρησης με αντίστοιχες τιμές του ΕΙΜ (Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας).....	180
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	197
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	200

0 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή μεθόδου μέτρησης δακτυλίων, συγκεκριμένα μέτρησης διαμέτρου, με χρήση της μηχανής μέτρησης συντεταγμένων (CMM) του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με σκοπό εύρεσης αν και κατά πόσο επηρεάζει την ακρίβεια της μέτρησης, το μετρούμενο μέγεθος εξαρτήματος και θέση στην *τράπεζα μέτρησης (table)* . Παράλληλα, μέσω της στατιστικής ανάλυσης και παρατηρήσεων επί των μετρημένων τιμών, καθορίζεται η βέλτιστη τιμή των παραμέτρων της μέτρησης, των μεταβλητών δηλαδή τις οποίες ο χειριστής της μηχανής έχει τη δυνατότητα να καθορίσει .

Πιο συγκεκριμένα στο κάθε κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας αναφέρονται τα ακόλουθα :

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η έννοια της μέτρησης, επίσης περιγράφεται γένεση και επέκταση του Μετρικού Συστήματος με παράλληλη εισαγωγή στην μετρολογία , τις βασικές έννοιες και αρχές που θα μας χρειαστούν αργότερα για την κατανόηση πιο σύνθετων εννοιών . Γίνεται αναφορά στα πρότυπα μετρήσεων και στα όργανα μέτρησης. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στην ιεραρχία συσχετισμού ακρίβειας .

Στο Κεφάλαιο 2 αναπτύσσονται μετρολογικές έννοιες , γίνεται αναφορά στα πρότυπα και πως τα χρησιμοποιούμε αλλά και στα όργανα μέτρησης που υπάρχουν γύρο μας , σε εργαστήρια και βιομηχανικούς χώρους .

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των Μηχανών Τρισδιάστατων Μετρήσεων CMM. Αναφέρονται οι διάφοροι τύποι μηχανών και αισθητήρων, ενώ γίνεται και λεπτομερειακή ανάδειξη του τρόπου μέτρησης και επικοινωνίας με το συνοδευτικό λογισμικό της μηχανής .

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή Μηχανής Τρισδιάστατων Μετρήσεων Μετροτεχνικού Εργαστηρίου Ε.Μ.Π. της σειράς Global με αισθητήρες Renishaw και υπόλοιπο εξοπλισμό της CMM. Επίσης παρουσιάζεται λογισμικό PC-DMIS με μεγάλο εύρος εφαρμογών που δίνει πολλές δυνατότητες μέτρησης στη μηχανή CMM.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται περιγραφή του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου , δηλαδή του χώρου όπου έγιναν οι μετρήσεις των δακτυλίων . Καταγράφονται ο εξοπλισμός και οι χώροι του εργαστηρίου και γίνεται μια λεπτομερή αναφορά στο Χώρο Ελεγχόμενων Συνθηκών.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται μέθοδος μέτρησης διαμέτρου του δακτυλίου, με πολλούς παράγοντες που μπορεί να επιλέξει χειριστής, καθώς επίσης και παράγοντες που διαμορφώνουν το αποτέλεσμα μέτρησης .

Στο Κεφάλαιο 7 αναφέρεται διάταξη και συνθήκες μέτρησης διαμέτρου του δακτυλίου , καθώς επίσης και η διαδικασία μέτρησης του δακτυλίου. Περιγράφεται σενάριο μέτρησης με παράλληλο καθορισμό παραγόντων στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας .

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται μετρήσεις που πήραμε, ακολουθεί επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων διαμέτρου.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζουμε συμπεράσματα και προτάσεις που μπορούν να αποτελέσουν στοιχεία είτε προσπάθειας για καθορισμό μιας πρότυπης μεθόδου μέτρησης με τη συγκεκριμένη μηχανή , είτε για μελλοντική πιο εκτεταμένη διερεύνηση των παραγόντων που επιδρούν στη μέτρηση .

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Η Μέτρηση είναι από τα πρώτα πράγματα που ανακάλυψε ο άνθρωπος. Από την αρχή ο άνθρωπος δημιούργησε στοιχειώδεις μονάδες μέτρησης για να μετρήσει απλά πράγματα.

Τυπικά όμως η Μέτρηση ως έννοια είναι η σύγκριση δύο ομοειδών μεγεθών. Για να μετρήσουμε ένα μέγεθος για παράδειγμα το ύψος χρειαζόμαστε ένα πρότυπο για να συγκρίνουμε το ύψος με το πρότυπο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα από την Αρχαιότητα να δημιουργηθεί μια σειρά προτύπων μονάδων. Όμως δεν είναι πολύ εύκολο μια και μπορεί να εμπεριέχει σφάλμα.

Έτσι μετά από χρόνια και με την βοήθεια της τεχνολογίας κατασκευάστηκαν συσκευές μετρήσεως, οι οποίες ανέλαβαν την μέτρηση των μεγεθών. Με την πάροδο των χρόνων και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας οι συσκευές έγιναν πιο αξιόπιστες, πιο εύκολες στην χρήση και πιο γρήγορες στη συλλογή των αποτελεσμάτων.

Οι μετρήσεις παίζουν μεγάλο ρόλο στην βιομηχανία μια και αυτός ο κλάδος είναι αρκετά ευαίσθητος και δεν έχει περιθώρια για λάθη σε τέτοια μεγέθη. Για παράδειγμα σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο ή σε ένα αεροπλάνο τα όργανα μετρήσεων είναι το άλφα και το ωμέγα και τυχών λάθη στην ακρίβεια των οργάνων θα είχε δυσάρεστα αποτελέσματα.

1.2. ΓΕΝΕΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σήμερα, οι περισσότερες χώρες του κόσμου έχουν συμφωνήσει να κάνουν μετρήσεις με ένα κοινό τρόπο.

Στο εμπορικό αλλά και στο επιστημονικό και τεχνολογικό επίπεδο, οι διάφορες χώρες χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα μετρήσεως, δηλαδή χρησιμοποιούν τις ίδιες μονάδες: το Μέτρο, το Χιλιόγραμμο, το Δευτερόλεπτο, κλπ. Αυτό το σύστημα λέγεται « Διεθνές Σύστημα Μονάδων ».

Η χρήση ενός μόνο συστήματος μετρήσεως διευκολύνει αποφασιστικά τις διεθνείς εμπορικές, επιστημονικές και τεχνολογικές ανταλλαγές.

Η σημερινή κατάσταση είναι το προϊόν μιας μακρόχρονης και δύστοκης ιστορικής διαδικασίας που άρχισε στην Ευρώπη τον 18ο αιώνα. Ως τότε, οι χρησιμοποιούμενες μονάδες μέτρησης των αποστάσεων, των επιφανειών, των βαρών κλπ. διαφέρανε όχι μόνο από χώρα σε χώρα και από επαρχία, αλλά καμιά φορά, και από πόλη σε πόλη της ίδιας επαρχίας. Στη Γαλλία, στο τέλος του 17ου αιώνα, χρησιμοποιούνταν πάνω από οκτακόσιες διαφορετικές μονάδες. Ήταν μια φεουδαρχική κληρονομιά, εμπόδιο στην εμπορική και βιομηχανική ανάπτυξη της Ευρώπης.

Η ιστορία της ενοποίησής των συστημάτων μέτρησης είναι η ιστορία του δεκαδικού «Μετρικού Συστήματος» (του συστήματος που έχει ως βάση το «Μέτρο») που δημιουργήθηκε κατά τη Γαλλική Επανάσταση και επεκτάθηκε αργότερα σε ολόκληρο τον κόσμο.

Η εισαγωγή του Μετρικού Συστήματος πραγματοποιήθηκε οριστικά στην Ελλάδα το 1959. Οι προσπάθειες όμως του Ελληνικού Κράτους να εισαγάγει το δεκαδικό Μετρικό Σύστημα είχαν αρχίσει 120 περίπου χρόνια νωρίτερα, επί Όθωνα.

Διεθνώς έχουν επικρατήσει δύο συστήματα : το **Μετρικό** και το **Αγγλοσαξονικό**. Το μετρικό σύστημα ανήκει εξ'ολοκλήρου στο δεκαδικό σύστημα και βασίζεται κυρίως σε μονάδες που οι επιστήμονες ανέπτυξαν τον δέκατο-ένατο και τον εικοστό αιώνα . Το αγγλοσαξονικό σύστημα είναι μερικός δεκαδικός και περιέχει μονάδες μέτρησης που καθιερώθηκαν κατά τη βιομηχανική επανάσταση. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα πολλά κράτη, που χρησιμοποιούσαν το αγγλοσαξονικό ή άλλα συστήματα, άρχισαν να υιοθετούν το μετρικό. Στις αρχές του 1970 όλες οι βιομηχανικές χώρες , με μοναδική εξαίρεση το Ενωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες, είτε είχαν υιοθετήσει είτε είχαν πάρει απόφαση να υιοθετήσουν το μετρικό σύστημα. Σε καθαρά τεχνολογική βάση το μετρικό σύστημα θεωρείται προτιμότερο του αγγλοσαξονικού. Η σταδιακή μετατροπή συνεχίζεται και εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί στο μέλλον.

Σήμερα σχεδόν όλες οι χώρες του κόσμου έχουν υιοθετήσει το ίδιο σύστημα μέτρησης πρόκειται για το λεγόμενο **Διεθνές Σύστημα Μονάδων** , γνωστό υπό τα αρχικά « **S.I.** » . Οι μονάδες του “Systeme Internationale” ή SI συστήματος βασίζονται στις μετρικές μονάδες .

Η πραγματικότητα που περιγραφόταν με τις λέξεις «Μέτρα και Σταθμά», ονομάζεται σήμερα Μετρολογία, δηλ. τέχνη των μετρήσεων. Η μεγάλη πρόκληση που αντιμετωπίζει η σύγχρονη μετρολογία είναι η **κατάκτηση της ακρίβειας**. Η ακρίβεια στη μέτρηση του μήκους, π.χ. έχει γίνει **δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη τα τελευταία εκατό χρόνια** Αυ-

τή η κατάσταση της ακρίβειας στις μετρήσεις αποτελεί βασικό γνώρισμα της επιστημονικής και τεχνολογικής επανάστασης της εποχής μας.

1.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ

Είναι αναμφίβολο ότι η διεξαγωγή πειραμάτων είναι εργασία σημαντική και απαραίτητη σε πολλές φάσεις της μηχανολογίας, έτσι προκύπτει η ανάγκη εξοικείωσης τόσο με τις μεθόδους μέτρησης, όσο και με τις τεχνικές αναλύσεως, ερμηνείας και παρουσιάσεων των αποτελεσμάτων μετρήσεων ή πειραμάτων.

Κάθε ερευνητική εργασία, ανάλογα με την φύση της εμπίπτει σε μία από τις δύο κατηγορίες:

1. Βασική Έρευνα : όπου μελετώνται τα φυσικά φαινόμενα και μετά από μετρήσεις κατάλληλη επεξεργασία τους διατυπώνεται η αναλυτική μορφή τους και οι νόμοι που τα διέπουν.
2. Εφαρμοσμένη Έρευνα : όπου αναλύονται ήδη γνωστά από προηγούμενη εμπειρία φυσικά φαινόμενα, προκειμένου είτε να μελετηθεί η συμπεριφορά ή ο βαθμός επίδρασης διαφόρων παραγόντων ή συνθηκών, είτε να βελτιωθούν ήδη γνωστές τεχνικές.

Θα πρέπει να αναφερθούμε ακόμα ότι η ικανότητα μέτρησης ορισμένων φυσικών μεγεθών δεν είναι πάντα ικανοποιητική. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποκτούν μεγαλύτερη αξιοπιστία αν συνοδεύονται από ένα «δείκτη». Ο δείκτης αυτός είναι η *ακρίβεια* με την οποία προκύπτει το αποτέλεσμα της μέτρησης ή καλύτερα το σφάλμα που την συνοδεύει.

Τα σφάλματα διακρίνονται σε :

- Συστηματικά: που υπεισέρχονται στην μέτρηση λόγω του τρόπου λειτουργίας ή του τρόπου χρήσεως των οργάνων μέτρησης.
- Τα τυχαία: τα οποία υπολογίζονται ή εκτιμώνται.

Τα σφάλματα που συνοδεύουν μια μέτρηση αντιμετωπίζονται με γνώση αρχικά του τρόπου λειτουργίας των μετρητικών συσκευών και τη λήψη κατάλληλων μέτρων.

Είναι επίσης σημαντικό να τονισθεί ότι εκτός από την μέτρηση των φυσικών μεγεθών, μας απασχολεί ακόμα και ή έννοια της *ρύθμισης* τους. Άρα δεν νοείται μέτρηση χωρίς ρύθμιση ή ρύθμιση χωρίς μέτρηση. Αυτά μαζί καλούνται *έλεγχος*. Η ακρίβεια με την οποία λειτουργεί ένα σύστημα εξαρτάται από την ακρίβεια της μέτρησης, την δυνατότητα του οργάνου και τις επικρατούσες συνθήκες.

1.4. ΓΕΝΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Μέτρηση

Η έννοια *μέτρηση* είναι αλληλένδετη με την έννοια *μέγεθος*. Έτσι λοιπόν ως *Μέγεθος ή φυσικό μέγεθος* ορίζεται κάθε φυσική ή άλλη ιδιότητα ή χαρακτηριστικό το οποίο επιτρέπει διαβάθμιση, κατάταξη ή τέλος το οποίο υπόκειται σε μέτρηση.

Μέτρηση είναι η διαδικασία της συγκρίσεως ενός μεγέθους με ένα άλλο, που ονομάζουμε «αρχέτυπο» ή «πρότυπο» (Standard), το οποίο συνήθως λαμβάνεται σαν μονάδα. Το «αποτέλεσμα» μιας μέτρησης είναι ένας αριθμός που προκύπτει ως ο λόγος της τιμής του μετρούμενου μεγέθους προς την τιμή του προτύπου.

Το αντικείμενο μετρήσεως : είναι ένα δοκίμιο, το μέγεθος του οποίου μπορεί να υφίσταται ή μέτρηση. Π.χ. η μέτρηση των προτύπων πλακιδίων, έχει να σχολιάσει την χαρακτηριστική τους ιδιότητα, το μήκος.

Τα πρότυπα μετρήσεως τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες :

Πρωτεύοντα πρότυπα : τα οποία είτε αποτελούν αντικείμενα «μοναδικά» φυλασσόμενα σε κάποιο διεθνές γραφείο ή οργανισμό, είτε αποτελούν «φυσικές έννοιες», όπως π.χ. το πρότυπο του μεγέθους «μήκος» που ορίζεται συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας του ισότοπου Kr-86.

Δευτερεύοντα πρότυπα : τα οποία αποτελούν αντίγραφα των πρωτευόντων προτύπων – αντικειμένων, είτε κατασκευάζονται αυστηρά με βάση τις φυσικές έννοιες των προτύπων. Π.χ. ένα δευτερεύον πρότυπο μετρήσεως του μήκους είναι ένας κανόνας μήκους ίσου προς το $1/1\,650\,763,73$ του μήκους κύματος της πορτοκαλοκόκκινης (orange – red) ακτινοβολίας του Kr-86, που είναι μήκους 1m.

Η σύγκριση, η οποία συνεπάγεται μια μέτρηση, είναι δυνατόν να γίνει κατά δύο τρόπους, οι οποίοι καθορίζουν και το είδος της μέτρησης :

- *Άμεση σύγκριση* του μετρουμένου μεγέθους με ένα πρότυπο, πρωτεύον ή δευτερεύον. Π.χ. με ένα δευτερεύον πρότυπο μετρήσεων του μήκους, δηλαδή ένα μεταλλικό μετρώ, είναι δυνατόν να μετρηθεί μια απόσταση.

- *Έμμεση σύγκριση* με την βοήθεια κατάλληλα κατασκευασμένης «μετρητικής συσκευής» η οποία πραγματοποιεί την σύγκριση και δίνει απευθείας το αποτέλεσμα. Για να μπορεί να επιτελεί την εργασία αυτή η μετρητική συσκευή ή το όργανο μέτρησης πρέπει να είναι κατάλληλα βαθμονομημένο, εργασία στην οποία θα αναφερθούμε.

1.5. ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα πρότυπα των μετρήσεων (standards) έχουν καθαρισθεί σε διάφορες διεθνείς συναντήσεις και συνέδρια, συχνά δε υφίσταται η ανάγκη επανακαθορισμού τους για διάφορους λόγους οι κυριότεροι των οποίων είναι :

-Η κατά προσοδοφόρο τρόπο αναπαραγωγή του προτύπου.

-Η διαπίστωση ότι το ήδη υφιστάμενο πρότυπο «πάσχει» είτε ως φυσικό αντικείμενο είτε ως φυσική έννοια.

Τα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη είναι : Μήκος, Μάζα, Χρόνος, Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, θερμοκρασία, γραμμομόριο και φωτεινή ένταση. Αυτά καθορίστηκαν από το 11^ο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και σταθμών (1960), το οποίο υιοθέτησε το ισχύον σήμερα Διεθνές Σύστημα Μονάδων (S.I) πήρε την τελική του διατύπωση το έτος 1972, από τον Διεθνή Οργανισμό προτύπων, ως Διεθνές Πρότυπο 1000 (International Standard 1000).

Πρότυπα Μήκους

Ως πρότυπο του μήκους έχει αρχικά καθορισθεί το 1/40 000 000 του μήκους του Ισημερινού της Γης. Με βάση αυτό το πρότυπο χαράχθηκε σε ράβδο από ιριδιούχο λευκόχρυσο το Διεθνές Πρότυπο Μέτρο, το πρότυπο αυτό φυλάσσεται σε κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες, στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών, στις Σέβρες - Γαλλία. Το 1960 το 11^ο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών θέσπισε το πρότυπο μήκους ως :

1 μέτρο = 1 650 763.73 μήκη κύματος στο κενό της πορτοκαλί-κόκκινης ακτινοβολίας του ισοτόπου Kr-86

ή

1 μέτρο = Η απόσταση που διανύει το φως σε 1/299 792 458 του sec.

Πρότυπα Μάζας

Ως πρότυπο μάζας έχει καθορισθεί το διεθνές Πρότυπο Χιλιόγραμμα (η μάζα του ισούται με την μάζα 1lt H₂O σε θερμοκρασία 4^ο C). Το πρότυπο αυτό έχει κατασκευασθεί από ιριδιούχο λευκόχρυσο και φυλάσσεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών στις Σέβρες. Με βάση το πρωτεύον, έχουν κατασκευασθεί αρκετά δευτερεύοντα που φυλάσσονται σε εθνικά γραφεία προτύπων.

Πρότυπα Χρόνου

Μέχρι το έτος 1956 ως πρότυπο χρόνου ορίζεται το :

1 δευτερόλεπτο (1s) = 1/86 400 της μέσης ηλιακής ημέρας .

Η μέση ηλιακή ημέρα ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η γη να εκτελέσει μια πλήρη περιστροφή περί τον άξονα της, ή το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων του ήλιου από ένα μεσημβρινό.

Το διάστημα αυτό ποικίλλει από τόπο σε τόπο και ανάλογα με την εποχή του έτους. Έτσι ορίστηκε το ηλιακό έτος ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η γη να εκτελέσει μια περιστροφή γύρω από τον ήλιο και η μέση ηλιακή ημέρα η κατά μέσον όρο διάρκεια της περιστροφής της γης περί τον άξονα της στο υπόψη διάστημα.

Το πιο πάνω πρότυπο πάσχει λόγω του ότι υπάρχει μια προοδευτική ελάττωση της περιστροφικής ταχύτητας της γης (περίπου 0,001s/αιώνα). Έτσι το 1956 καθορίστηκε ως πρότυπο χρόνου :

$1 \text{ sec} = 1/31\,556\,925,9747$ του χρονικού διαστήματος για μια πλήρη περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο, κατά το έτος 1900.

Μετά το 13^ο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών καθορίστηκε ως πρότυπο χρόνου :

$1 \text{ sec} = 9\,192\,631\,770$ περίοδοι της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάπτωση μεταξύ των δύο υπέρλεπτων σταθμών της θεμελιώδους καταστάσεως του Cs-133.

Το πρότυπο αυτό ισχύει μέχρι σήμερα.

Πρότυπα Θερμοκρασίας

Η απόλυτη θερμοκρασιακή κλίμακα , που προετάθη από τον Λόρδο Kelvin το 1854 αποτελεί την βάση των προτύπων θερμοκρασίας. Το ισχύον σήμερα πρότυπο θεσπίστηκε το 1958 από το 13^ο Γενικό Συνέδριο Μέτρων και Σταθμών και φέρει την ονομασία «Διεθνής Πρακτική Θερμοκρασιακή Κλίμακα του έτους 1968»

Η βασική μονάδα θερμοκρασίας , το Kelvin (K) ορίζεται ως :

$1 \text{ K} = 1/273,16$ της θερμοδυναμικής Θερμοκρασίας του τριπλού σημείου ύδατος.

Παρακάτω παραθέτουμε για λόγους πληρότητας 11 πρωτεύοντα σημεία που καθορίζουν την θερμοκρασιακή κλίμακα IPTS-68 .

Σημείο	Θερμοκρασία K	°C
Τριπλό σημείο υδρογόνου	13,81	-259,34
Σημείο βρασμού υδρογόνου υπό πίεση 3333,6 N/m ²	17,042	-256,108
Σημείο βρασμού υδρογόνου υπό κανονική πίεση	20,28	-252,87
Σημείο βρασμού νέου	27,102	-246,048
Τριπλό σημείο οξυγόνου	54,361	-218,789
Σημείο βρασμού οξυγόνου	90,188	-182,962
Τριπλό σημείο ύδατος	273,16	0,01
Σημείο βρασμού ύδατος	373,15	100
Σημείο πήξεως ψευδαργύρου	692,73	419,58
Σημείο τήξεως αργύρου	1235,08	961,93
Σημείο τήξεως χρυσού	1337,58	1064,43

1.6. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Όπως ήδη έχει αναφερθεί με την βοήθεια των οργάνων μέτρησης γίνεται έμμεση σύγκριση μετρούμενου μεγέθους και προτύπου, παρεχόμενου απευθείας υπό του οργάνου του αποτελέσματος της συγκρίσεως.

Καταρχάς τα όργανα μετρήσεων μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες , ανάλογα με τον τρόπο που παρέχουν το αποτέλεσμα της μέτρησης, και πιο συγκεκριμένα :

- *Αναλογικά* : ονομάζονται τα όργανα μέτρησης που φέρουν δείκτη κινούμενο επί βαθμονομημένης κλίμακας, παρέχοντας έτσι συνεχείς τιμές του μετρούμενου μεγέθους.

- *Ψηφιακά* : ονομάζονται τα όργανα μέτρησης που παρέχουν το αποτέλεσμα υπό ψηφιακή μορφή, παρέχοντας έτσι βηματικές ή ασυνεχείς τιμές του μετρούμενου μεγέθους.

Ακολουθούν οι έννοιες μερικών λειτουργικών χαρακτηριστικών των οργάνων μετρήσεων :

Η *διακριτική ικανότητα* (resolution) ορίζεται ως το ελάχιστο ποσό μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους, το οποίο μπορεί να ευαισθητοποιήσει το όργανο και κατά συνέπεια διακρίνεται από αυτό. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η διακριτική ικανότητα δεν είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας ενός οργάνου.

Η *ευαισθησία* (sensitivity) ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής της ενδείξεως του οργάνου, προς την μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους. Όταν το όργανο συμπεριφέρεται

«γραμμικά» τότε η ευαισθησία του είναι σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας του.

Η *ακρίβεια του οργάνου* (accuracy) δείχνει την απόκλιση της ενδείξεως του οργάνου από την αληθινή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ακρίβεια του οργάνου δίνεται συνήθως ως επί τοις εκατό της μέγιστης ενδείξεως του και εν γένει δεν είναι σταθερή, σε όλη την περιοχή λειτουργίας του.

Ο *χρόνος αποκρίσεως* (response time) είναι ο χρόνος που παρέχεται από την στιγμή που το όργανο ερεθισθεί από το μετρούμενο μέγεθος, μέχρι ότου ηρεμήσει. Επιθυμητό είναι ο χρόνος αποκρίσεως ενός οργάνου να είναι κατά το δυνατόν ελάχιστος.

Ένα όργανο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση θα πρέπει να είναι κατάλληλα βαθμονομημένο. Η εργασία της *βαθμονομήσεως* (calibration) ουσιαστικά συνίσταται στον καθορισμό της κλίμακας του οργάνου, με βάση τις τιμές του μετρούμενου μεγέθους. Η βαθμονόμηση γίνεται χρησιμοποιώντας είτε πρότυπα, πρωτεύοντα ή δευτερεύοντα, είτε παράγοντας ακριβώς γνωστές τιμές του μετρούμενου μεγέθους, είτε τέλος χρησιμοποιώντας άλλα βαθμονομημένα όργανα. Μολονότι η εργασία της βαθμονόμησης γίνεται από τους κατασκευαστές των οργάνων, ο χρήστης του οργάνου πρέπει να είναι σε θέση να επαναλαμβάνει την εργασία της βαθμονομήσεως, για τους εξής κυρίως λόγους :

-Να μπορεί να επαληθεύει το υπό του κατασκευαστή χορηγούμενο πιστοποιητικό βαθμονομήσεως.

-Να ελέγχει, περιοδικά το όργανο ώστε να προλαβαίνει τυχόν σφάλματα του.

-Να μπορεί να χρησιμοποιεί όργανα για πολλαπλές λειτουργίες, εφόσον είναι εφικτό. Π.χ. ένα milli-βολτόμετρο συνεχούς ρεύματος και ένα κατάλληλο θερμοστοιχείο μπορεί να γίνει μέτρηση θερμοκρασίας, εφόσον το milli-βολτόμετρο βαθμονομηθεί κατάλληλα.

Τέλος ο χρήστης υποχρεωτικά κάνει βαθμονόμηση των μετρητικών διατάξεων που ο ίδιος συγκροτεί από διάφορα όργανα μέτρησης και λοιπές συσκευές.

1.7. Η ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για να είναι μια μέτρηση χρήσιμη, θα πρέπει να είναι αξιόπιστη. Το να διαθέτει κανείς εσφαλμένες πληροφορίες είναι πολύ χειρότερο από ότι να μην τις διαθέτετε καθόλου. Είναι εξίσου σημαντικό για τον μηχανικό να έχει άποψη επί του αποτελέσματος των μετρήσεων του ώστε να αποφασίνεται για την αξιοπιστία τους. Είναι επίσης απαραίτητο να δίνονται μαζί με τα αποτελέσματα ενδείξεις της *βεβαιότητας* (certainty) με την οποία έχουν προκύψει.

Φυσικά εδώ η έννοια του σφάλματος κυριαρχεί.

Σφάλμα (error) είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής ενός μεγέθους από την "αληθινή" του τιμή. Η αληθινή αυτή τιμή δεν είναι σχεδόν ποτέ γνωστή, για τον λόγο αυτό συνήθως συνοδεύουμε τα αποτελέσματά μας με μια εκτίμηση του σφάλματος που ονομάζεται και *αβεβαιότητα* (uncertainty).

Δυο ειδών σφάλματα υπεισέρχονται σε μία μέτρηση :

- *Συστηματικά σφάλματα* (systematic errors) ή σταθερά σφάλματα (fixed errors) τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα, επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους ενός αντικειμένου μετρήσεως κάτω από τις ίδιες συνθήκες, να απέχουν όλες σταθερά από την αληθινή τους τιμή κατά το ίδιο ποσοστό π.χ. σφάλμα ακρίβειας οργάνου.
- *Τυχαία σφάλματα* που οφείλουν την ύπαρξή τους σε τυχαίους παράγοντες που εμφανίζονται σε μια μέτρηση και τα οποία ποικίλουν από μέτρηση σε μέτρηση, π.χ. σφάλμα ανάγνωσης αναλογικών ενδείξεων.

1.8. ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΜΑ

Παρουσιάζονται σε συντομία τα βασικά στοιχεία του ισχύοντος διεθνούς συστήματος μέτρησης SI (International System of Unit)

Βασικές μονάδες		
Μεγέθη	Ονόματα	Σύμβολα
Μήκος	meter	m
Μάζα	kilogram	kg
Χρόνος	second	s
Ηλεκτρικού ρεύματος	ampere	A
Θερμοκρασίας	kelvin	K
Μέτρηση στοιχείου	mole	mol
Φωτεινή ένταση	candela	cd

Μεγέθη	Ονόματα	Σύμβολα	Σχέσεις το SI με τις Βασικές μονάδες
Μέτρηση Γωνιών	radian	rad	1 rad = 1 m/m 1 rad = 57,295 779 51ο
Συχνότητες	hertz	Hz	1 Hz = 1 s ⁻¹
Δύναμη	newton	N	1 N = 1m kg s ⁻²
Πίεση	pascal	Pa	1 Pa = 1m ⁻¹ kg s ⁻²
Ισχύς	watt	W	1 W = 1m ² kg s ⁻³
Ηλεκτρική τάση	volt	V	1 V = 1m ² kg s ⁻³ A ⁻¹

Μονάδες	Σύμβολα	m	cm	mm	μm	nm
Χιλιόμετρο	km	1000		1000000		
Μέτρο	m	1	100	1000	1000000	
Δεκατόμετρο	dm	0,1	10	100	100000	
Εκατοστόμετρο	cm	0,01	1	10	10000	
Χιλιοστόμετρο	mm	0,001	0,1	1	1000	1000000
Δέκατα χιλιοστού		0,0001		0,1	100	100000
Εκατοστό χιλιοστού		0,00001		0,01	10	10000
Μικρόμετρο	μm	0,000001		0,001	1	1000
Δέκατα μικρομέτρου		0,0000001		0,0001	0,1	100
Εκατοστά μικρομέτρου		0,00000001		0,00001	0,01	10
Νανόμετρο	nm	0,000000001		0,000001	0,001	1

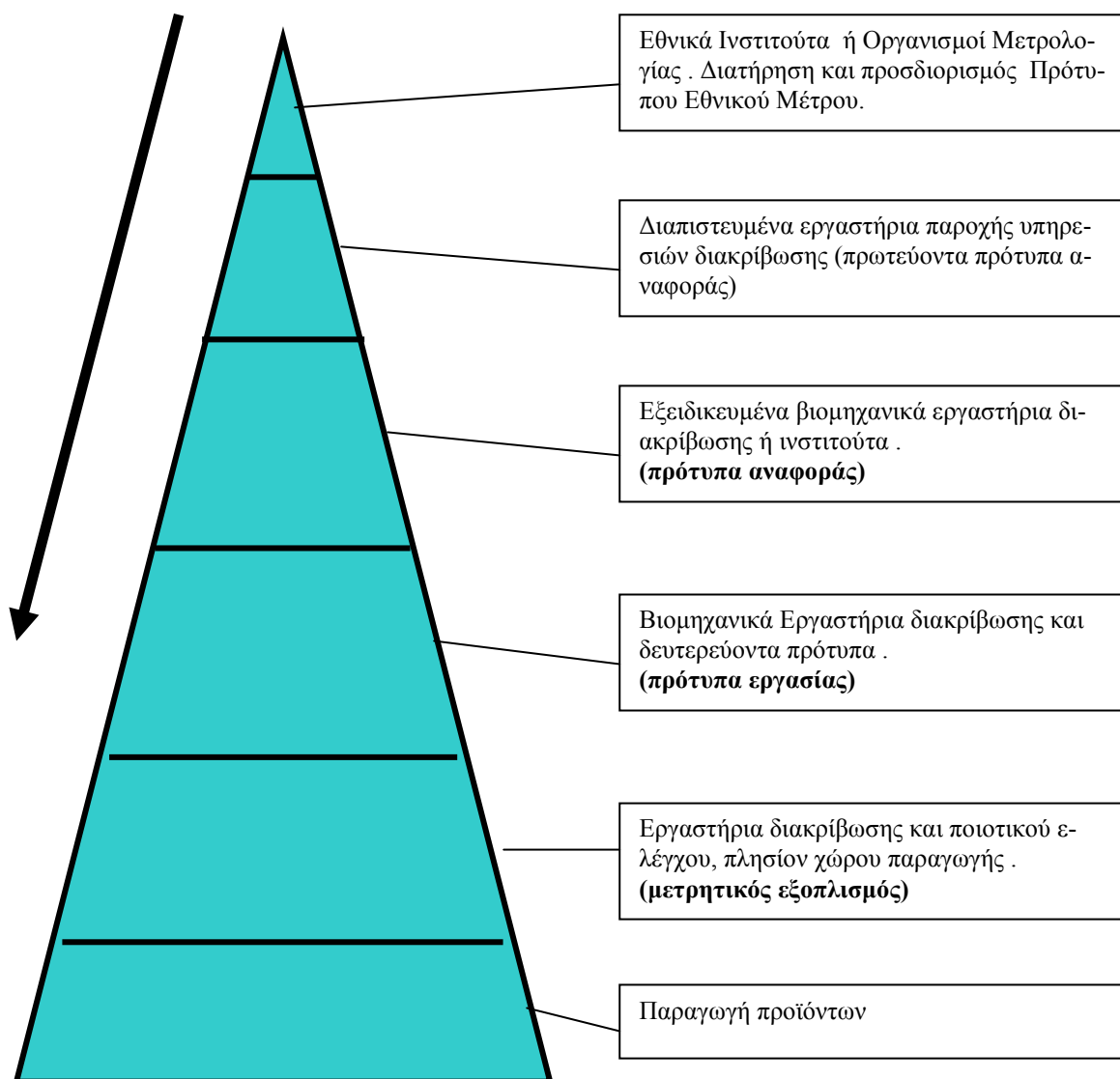
1.9. ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΥ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Όλος ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιείται για την παραγωγική διαδικασία είναι ανιχνεύσιμος από τα εθνικά πρότυπα τυποποίησης ή αναφοράς. Ο εξοπλισμός αυτός, διαμέσου του διοικητικού συστήματος της ποιότητας διακριβώνετε σε τακτά χρονικά διαστήματα .

Η ανιχνευσιμότητα υφίσταται από την ανάγκη ελέγχου του αποτελέσματος της βαθμονόμησης των οργάνων μέτρησης. Τα στοιχεία διακρίβωσης πιστοποιούν την διαχρονική εγκυρότητα της ικανότητας μέτρησης του οργάνου. Τα στοιχεία αυτά δικαιολογούν την αναγκαιότητα τήρησης των προτύπων μεγεθών.

Η αναπαράσταση αυτών φαίνεται από την ιεραρχία Συσχετισμού Ακρίβειας καθώς και την αλυσίδα ανιχνευσιμότητας . Κάθε τυποποιημένο μέγεθος είναι εφοδιασμένο με ένα πιστοποιητικό διακρίβωσης , το οποίο εκδίδεται από ένα διαπιστευμένο εργαστήριο, πιστοποιημένο από το Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης (Ε.ΣΥ.Δ.).

Ιεραρχία Συσχετισμού Ακρίβειας



2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

2.1. ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Για την περιγραφή των διαφόρων οργάνων μέτρησης μήκους, πρέπει να αναφερθούμε στα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας, των οργάνων και των αποτελεσμάτων μέτρησης.

- ✓ *Μετρούμενο μέγεθος*: είναι το μήκος ή η γωνία που πρόκειται να μετρηθεί.
- ✓ *Ρύθμιση σημείου αναφοράς* (setting) : είναι η ρύθμιση μιας συσκευής μέτρησης σε μια θέση αναφοράς , βάσει προτύπων αναφοράς. Η θέση αυτή πολλές φορές είναι μηδενική (zero setting). Η ρύθμιση σημείου αναφοράς γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στα όργανα μέτρησης, όπου υπάρχει αυτή δυνατότητα .
- ✓ *Μετρημένη τιμή* (measured value) είναι η τιμή που προκύπτει μετά από μία μέτρηση. Έχει αριθμητική τιμή, μονάδα, πρόσημο και αβεβαιότητα μέτρησης.
- ✓ *Εύρος ανάγνωσης ή εύρος ένδειξης* (reading range) είναι η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης δυνατότητας ένδειξης που έχει το όργανο.
- ✓ *Εύρος μέτρησης* (measuring range) τα όρια μεταξύ των οποίων το όργανο μπορεί να μετρήσει ένα μέγεθος.
- ✓ *Δύναμη μέτρησης* (measuring force) είναι η δύναμη, που ασκείται στο μετρούμενο εξάρτημα από συσκευή μέτρησης κατά τη διάρκεια μέτρησης. Η δύναμη αυτή πρέπει να είναι περιορισμένη (π.χ. 2pounds). Αν ασκήσουμε μεγαλύτερη ή μικρότερη δύναμη από αυτή που χρειάζεται θα πάρουμε λανθασμένο αποτέλεσμα .
- ✓ *Οδηγίες μέτρησης* (measuring instruction) είναι η συνθήκες μέτρησης και βήματα της μετρητικής διαδικασίας .

- ✓ *Αρχή Abbe* (Abbe principle) μας λέει ότι μέγιστη ακρίβεια επιτυγχάνεται μόνον όταν το πρότυπο βρίσκεται στην ίδια ευθεία με τον άξονα (γραμμή μέτρησης) του υπό μέτρηση αντικειμένου.

2.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΜΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Τα βιομηχανικά πρότυπα υπολείπονται των προτύπων αναφοράς , έχουν μορφή χαραγμένης κλίμακας ή μεταλλικών πλακιδίων ή κυλίνδρων ορισμένου μήκους. Επηρεάζονται από την θερμοκρασία , το ονομαστικό τους μήκος αναφέρεται στη θερμοκρασία ορισμού (20 ° C). Ξεχωρίζουν σε *πρότυπα χαραγών* (line standard), όταν το οριζόμενο μήκος καθορίζεται μεταξύ χαραγών και σε *πρότυπα ακρών* (end standard), όταν το οριζόμενο μήκος είναι το μεταξύ των δύο ακραίων επιφανειών του προτύπου. Σε τμήματα παραγωγής διαστατικός έλεγχος γίνεται με πρότυπα άκρων και χρήση συγκριτικών οργάνων .

2.2.1. Πρότυπα πλακίδια (*gage block ή slip gage*)

Σήμερα αυτά είναι τα πιο εύχρηστα πρότυπα βιομηχανικά μήκη. Είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (εικόνα 2.1), των οποίων δύο επιφάνειες είναι τελείως λείες και παράλληλες, η μεταξύ τους απόσταση είναι το οριζόμενο από το πλακίδιο μήκος. Το μήκος αυτό είναι η απόσταση μιας επιφάνειας από βοηθητικό επίπεδο όμοιου με το πλακίδιο υλικού. Προϋπόθεση η επιφάνεια επαφής να στηρίζεται με το βοηθητικό επίπεδο με μοριακή πρόσφυση.



Εικόνα 2.1: Πρότυπα πλακίδια μήκους (Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ Βιομηχανικός Εξοπλισμός)

Συλλογές πλακιδίων υπάρχουν ποικίλες. Μια πλήρη σειρά περιλαμβάνει:

Ονομαστικό μήκος (mm)	Βήμα (mm)	Πλήθος τεμαχίων
1,005	-	1
1,001-1,009	0,001	9
1,01-1,49	0,01	49
0,5-24,5	0,5	49
25-100	25	4

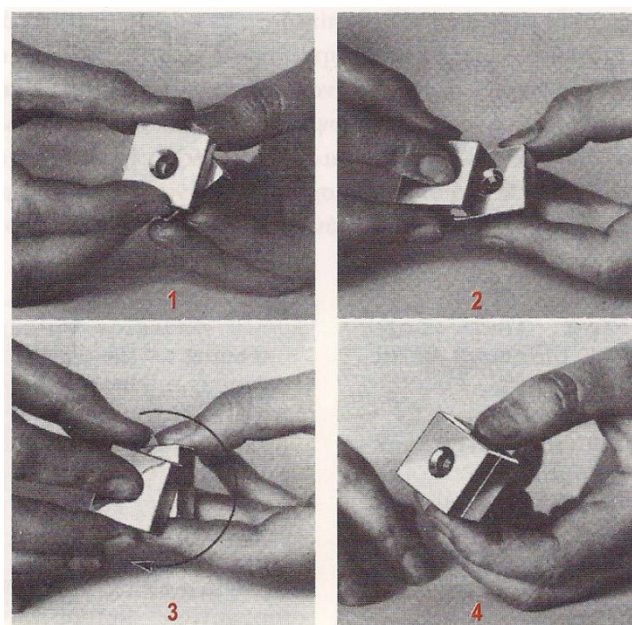
Κατασκευάστηκαν πρώτη φορά από τον Σουηδό επιθεωρητή όπλων Carl Johansson στην Σουηδία .

Το υλικό κατασκευής τους είναι χάλυβας εργαλείων υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (C) για να αντέχουν στην φθορά. Επεξεργάζονται με ολοκληρωτική βαθή, ακολουθεί τεχνική γήρανση για εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων και γενικός επαναφορά της ομογένειας του υλικού του πλακιδίου. Αυτή η κατεργασία μας εξασφαλίζει ότι δεν θα μεταβληθούν με των χρόνο , οι διαστάσεις, το σχήμα και συντελεστής διαστολής του πλακιδίου. Η προμήθεια τέτοιων πλακιδίων θα πρέπει να γίνεται μόνο από ανεγνωρισμένους κατασκευαστές και να συνοδεύονται από πιστοποιητικά διακρίβωσης.

Χαρακτηριστικά η σύνθεση του σουηδικού χάλυβα πλακιδίων είναι:

Άνθρακας	C	1,2%
Μαγγάνιο	Mn	0,11%
Νικέλιο	Ni	0,39%
Θείο	S	0,012%
Χρώμιο	Cr	1,22%
Πυρίτιο	Si	0,24%
Φώσφορος	P	0,026%

Είναι δυνατή η δημιουργία διάστασης από συνδυασμό προτύπων πλακιδίων διαφόρων ονομαστικών μηκών. Κατά τον συνδυασμών αυτών δημιουργείται ισχυρή πρόσφυση έως 40 kp/cm^2 . Αυτή η πρόσφυση οφείλεται ότι η λείανση των επιφανειών είναι τόσο τέλεια που τα μόρια του ενός πλακιδίου οδηγούνται κοντά στα μόρια του άλλου, έτσι έλξη μεταξύ αυτών, γίνεται αισθητή. Η διαδικασία που ακολουθείται για την επίτευξη της πρόσφυσης δύο πλακιδίων παρουσιάζεται στην (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Τεχνική πρόσφυσης προτύπων πλακιδίων
(Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Η προσαρμογή πλακιδίων για σχηματισμό ενδιάμεσων μηκών πραγματοποιείται αφού αρχικά καθαριστούν επιμελώς οι επιφάνειες και τοποθετούνται σταυροειδώς ή μία στην άλλη. Μετά με ολίσθηση και στροφή οδηγούνται παράλληλα ώστε να εκδιωχθεί ο αέρας που είναι έγκλειστος μεταξύ των προς σύζευξη επιφανειών .

Τα πλακίδια πρέπει να καθαρίζονται προσεκτικά και να μην πλένονται με αιθέρα ή άλλο παρόμοιο υγρό, επειδή η επιφάνεια πρέπει να φέρει ένα λεπτό στρώμα λιπαρότητας διαφορετικά μένουν μόρια αέρα και πρόσφυση δεν επιτυγχάνεται.

Κατασκευάζονται πλακίδια με διαστάσεις και δωδεκαδικές ή δεκαδικές υποδιαίρεσεις αυτής. Έχει καθορισθεί η τιμή $1\text{in} = 25,4\text{ mm}$, είναι εύκολο και με συλλογή πλακιδίων σε χιλιοστά να κατασκευαστεί μια οποιαδήποτε διάσταση της ίντσας.

Συχνά οι συλλογές περιέχουν δύο πλακίδια αντιφθοράς, που τοποθετούνται στα άκρα της σύνθετης διάστασης.

Πλεονέκτημα των πλακιδίων είναι ότι το ζητούμενο μήκος μπορεί να σχηματισθεί από συνδυασμό πλακιδίων. Αυτό γίνεται όταν η διάσταση είναι εύχρηστη, ή δεν έχει γίνει έλεγχος φθοράς των χρησιμοποιούμενων πλακιδίων και δεν υπάρχει ελεγκτική σειρά. Παράδειγμα η διάσταση 6,985 μπορεί κατασκευασθεί με πολλούς συνδυαστικούς τρόπους :

$$6,985 = 1,005 + 1,48 + 4,5$$

$$6,985 = 1,005 + 1,08 + 1,9 + 3$$

$$6,985 = 1,005 + 1,08 + 1,4 + 3,5$$

$$6,985 = 1,005 + 1,08 + 1,2 + 1,7 + 2$$

$$6,985 = 1,005 + 1,01 + 1,07 + 1,2 + 1,7 + 1$$

Προτιμότερος συνδυασμός είναι αυτός με τα λιγότερα πλακίδια , επειδή το συνιστάμενο σφάλμα είναι πάντα μεγαλύτερο από το σφάλμα του πλακιδίου.

Τα άκρα των επιφανιών δεν χρησιμοποιούνται για μετρήσεις, γιατί δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια.

Η ποιότητα των πλακιδίων εξαρτάται από :

1. Την ακρίβεια της κύριας διαστάσεως, δηλαδή η διάσταση να είναι ίση με το οριζόμενο και αναγραφόμενο μήκος. Η διάσταση αυτή για τα μικρά μήκη είναι το πάχος του πλακιδίου, για τα μεγαλύτερα είναι το μήκος τους.
2. Την ποιότητα του υλικού.
3. Την παραλληλότητα των κύριων επιφανειών .
4. Τον βαθμό λείανσης αυτών.

Οι κατασκευαστές μέτρων ακρίβειας κατασκευάζουν πλακίδια διαφόρων ποιότητων. Ο κανονισμός DIN 861 καθορίζει για τα πρότυπα πλακίδια τις ακόλουθες ποιότητες με τα αντίστοιχα μέγιστα σφάλματα:

Ποιότητα	Μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα
0	$\pm (0,1 + L/500) \mu\text{m}$
I	$\pm (0,2 + L/200) \mu\text{m}$
II	$\pm (0,5 + L/100) \mu\text{m}$
III	$\pm (1,0 + L/50) \mu\text{m}$

το L είναι το ονομαστικό μήκος σε mm.

Για την συντήρηση επαλείφονται τα πλακίδια ελαφρώς με βαζελίνη απαλλαγμένης τε-
λείως από οξέα.

Στον βιομηχανικό χώρο θα πρέπει να υπάρχουν πλακίδια τριών διαβαθμίσεων ακρί-
βειας :

- Τα πλακίδια της πρώτης διαβάθμισης, που είναι τα πρότυπα μήκη του εργοσ-
τασίου .
- Τα πλακίδια της δεύτερης διαβάθμισής, θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο
των αντελεκτών, ελεγκτών και οργάνων μέτρησης.

- Τα πλακίδια της τρίτης διαβάθμισης, θα χρησιμεύσουν ως ελεγκτήρες για εργασίες χαράξεως ή εξαρμώσεως για ρυθμίσεις εργαλειομηχανών και κάθε εργασία εργοστασίου.

Τα χρησιμοποιούμενα πλακίδια πρέπει να ελέγχονται περιοδικά με πλακίδια υψηλότερης ποιότητας, ενώ τα πλακίδια της ανώτατης ποιότητας διακριβώνονται με συμβολόμετρο.

Η ποιότητα, η ακρίβεια και το σφάλμα που πρέπει να έχουν τα πλακίδια διαβαθμίσεως εξαρτάται από την ακρίβεια και τις απαιτήσεις των κατασκευαστών. Η χρήση τους είναι σημαντική τόσο σε ρυθμίσεις εργαλειομηχανών, έλεγχο ελεγκτήρων και οργάνων μέτρησης, όσο και σε εργασίες χάραξης, κοπής.

2.2.2. Πρότυποι κανόνες

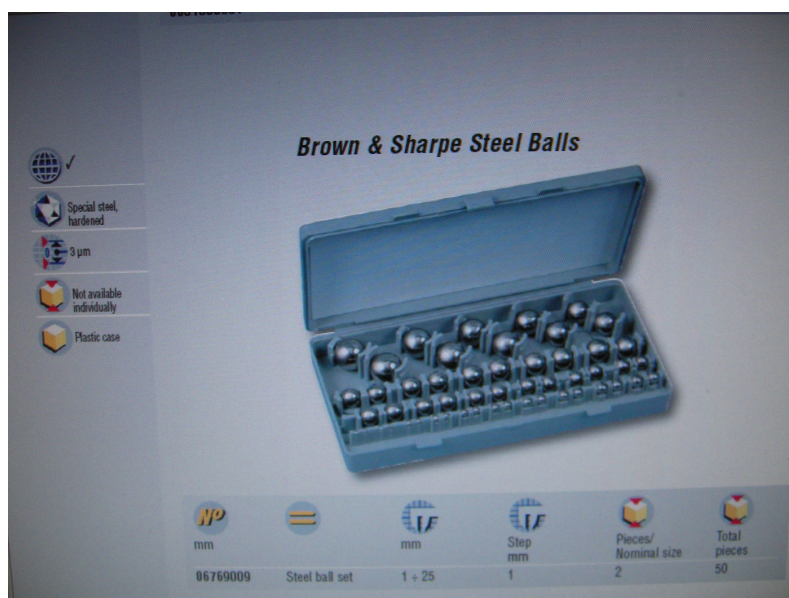
Πρότυποι κυλινδρικοί κανόνες με διάφορους βαθμούς ποιότητας, κατασκευάστηκαν για μήκη μεγαλύτερα των 200 mm. Υπάρχουν διάφορες συλλογές. Π. χ. μια συλλογή με 11 πρότυπους κυλινδρικούς κανόνες με ονομαστικά μήκη από 25 mm έως 200 mm και βήμα 25 mm και κανόνες των 375,575 και 775 mm αντίστοιχα. Με συνδυασμό πρότυπων κανόνων και πρότυπων πλακιδίων μπορεί να γίνει μήκος μη πολλαπλάσιο του 25.



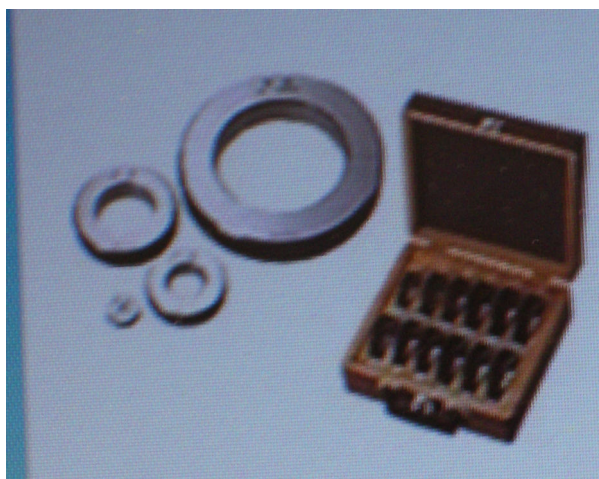
Εικόνα 2.3: Πρότυποι κυλινδρικοί κανόνες

2.2.3. Ειδικά πρότυπα (master gage)

Είναι φυσικά πανομοιότυπα των αντικειμένων που πρόκειται να ελέγξουν (π.χ. δακτύλιοι, δίσκοι, σφαίρες, κ.α.), αλλά με τα χαρακτηριστικά τους στις πρότυπες διαστάσεις και αποτελούν μία μορφή προτύπων αναφοράς για ρύθμιση, έλεγχο και διακρίβωση διαφόρων τύπων μετρητικών οργάνων. Ειδικά πρότυπα πρέπει να βρίσκονται σε υψηλό βαθμό ποιότητας, ανάλογα από την εφαρμογή. Μερικές φορές περιέχονται στον εξοπλισμό των οργάνων μέτρησης, αλλά υπάρχουν και σε συλλογές διαφόρων διαστάσεων, όπως τα πρότυπα πλακίδια. Παρακάτω παρουσιάζονται εικόνες με ειδικά πρότυπα.



Εικόνα 2.4: Πρότυπες σφαίρες (DIRECT INDUSTRY Catalogues)

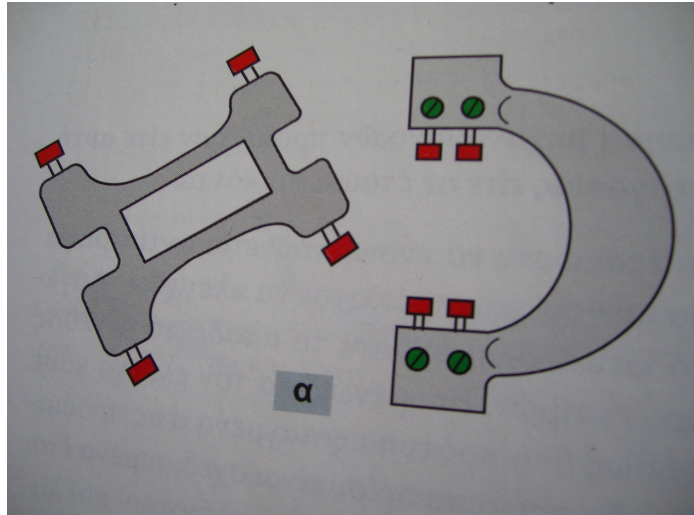


Εικόνα 2.5: Συλλογή πρότυπων δακτυλίων (YAMATO VENTURES, INC. JAPAN)

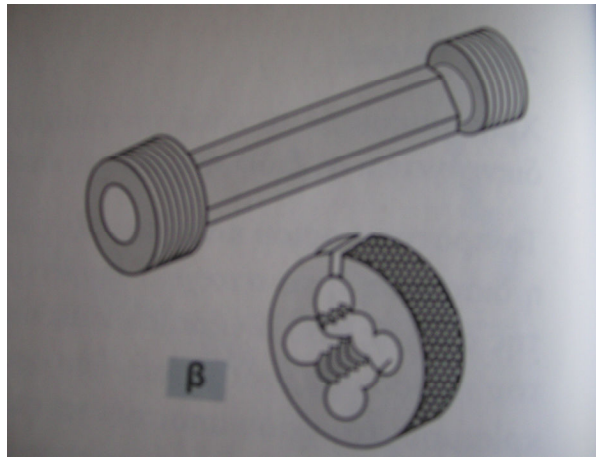
2.2.4. Ελεγκτήρες ορίου (*limit gages*)

Ελεγκτήρες ορίου χρησιμοποιούνται στην επιθεώρηση προϊόντων είτε αυτή γίνεται σε διάφορες φάσεις κατεργασίας είτε σε έτοιμα προϊόντα. Από την εμπειρία μου στο μηχανουργείο έχω μάθει, ότι ο τορναδόρος δουλεύοντας στη τελευταία φάση κατεργασίας (π.χ. ενός άξονα) , φτάνοντας στην διάσταση που απαιτείται, δεν μετράει πλέον με μικρόμετρο, αλλά κάνει έλεγχο με πρότυπο ορίου. Το πρότυπο ορίου πρέπει να περνάει τον μετρούμενο διάμετρο του άξονα με ελάχιστη δύναμη. Έτσι ο τορναδόρος καταλαβαίνει αν πρέπει να συνεχίσει την κατεργασία ή ο άξονας είναι έτοιμος.

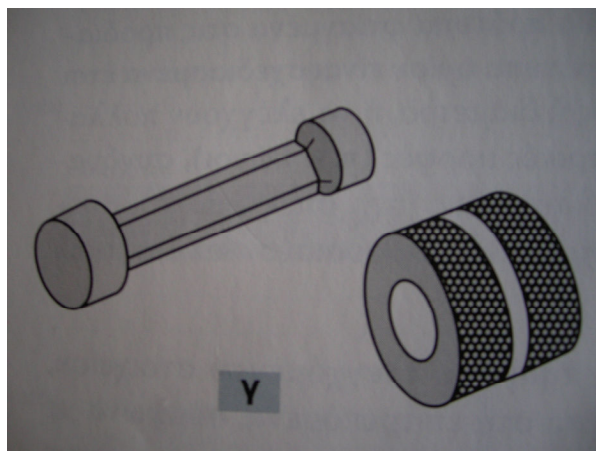
Ελεγκτήρες ορίου κατασκευάζονται έτσι ώστε να ενσωματώνεται αντίστροφα ή διάσταση ή το στοιχείο του αντικειμένου που πρόκειται να ελεγχθεί. Λόγω της ανοχής που δίνεται σε κάθε υπό κατασκευή προϊόν, το αποδεκτό μέγεθος του προσδιορίζεται μεταξύ δύο οριακών τιμών. Άρα για τον έλεγχο στοιχείου απαιτούνται δύο πρότυπα φτιαγμένα στις προδιαγραφμένες οριακές τιμές του στοιχείου. Συναντάμε διάφορα πρότυπα ορίου που μπορούν να ελέγχουν μία απλή διάσταση , μήκος ή διάμετρο , ή να ελέγχουν πολλαπλές διαστάσεις που μπορεί να είναι γεωμετρικές μορφές (π.χ. κώνοι), συνδυασμός μορφών και διαστάσεων , πολλαπλές διαστάσεις (π.χ. σπειρώματα), αποστάσεις οπών, ομοαξονικότητα κ.α. Στης παρακάτω εικόνας υπάρχουν διάφοροι τύποι προτύπων ορίου.



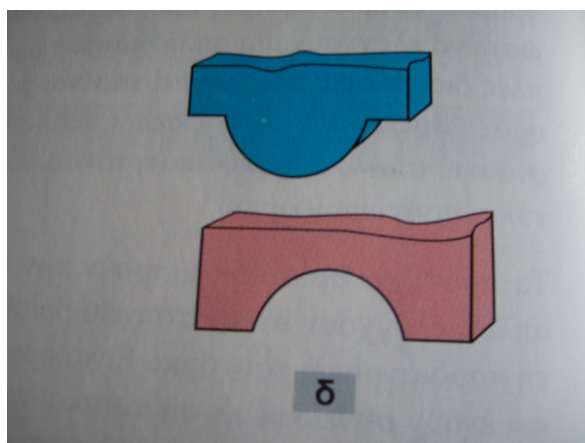
Εικόνα 2.6: Ρυθμιζόμενοι ελεγκτήρες ορίου για έλεγχο εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων αντίστοιχα (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)



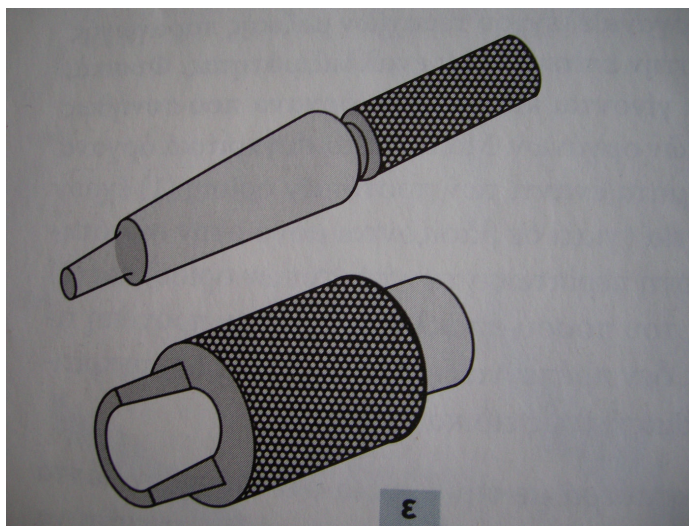
Εικόνα 2.7: Ελεγκτήρες πολλαπλών διαστάσεων (έλεγχος εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων αντίστοιχα)



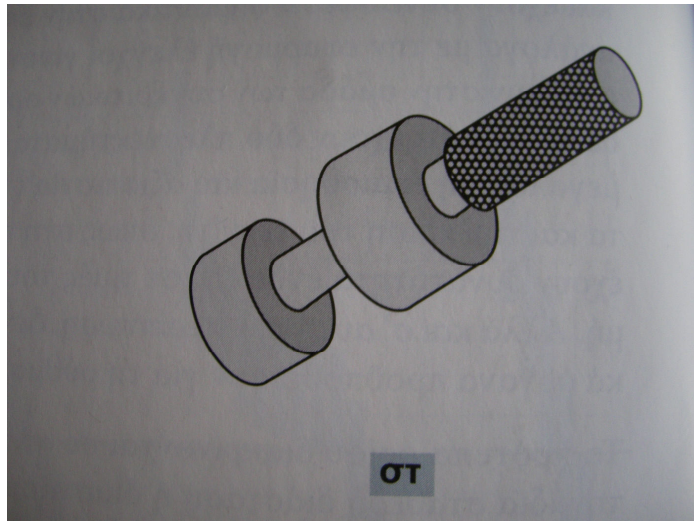
Εικόνα 2.8: Κυλινδρικός και μορφής δακτυλίου ελεγκτήρας ορίου



Εικόνα 2.9: Ελεγκτήρες μορφής



Εικόνα 2.10: Ελεγκτήρες γεωμετρικών μορφών (έλεγχος εσωτερικών και εξωτερικών κώνων αντίστοιχα)



Εικόνα 2.11: Ελεγκτήρας ομοαξονιμότητας οπών

Ελεγκτήρες ορίου ελέγχουν αν το στοιχείο βρίσκεται μέσα στα επιτρεπόμενα, σύμφωνα με τη προδιαγραφή του, όρια. Ελέγχουν τεμάχια μαζικής παραγωγής. Βέβαια έλεγχοι γίνονται και με άλλα όργανα που συνήθως ανήκουν στην ομάδα των συγκριτικών οργάνων.

Υπάρχουν σταθερά και ρυθμιζόμενα πρότυπα ορίου. Σταθερά ελέγχουν μόνο την ίδια σταθερή διάσταση. Ρυθμιζόμενα έχουν δυνατότητα να ρυθμίζονται ώστε να ελέγχουν διαστάσεις εντός στενών ορίων.

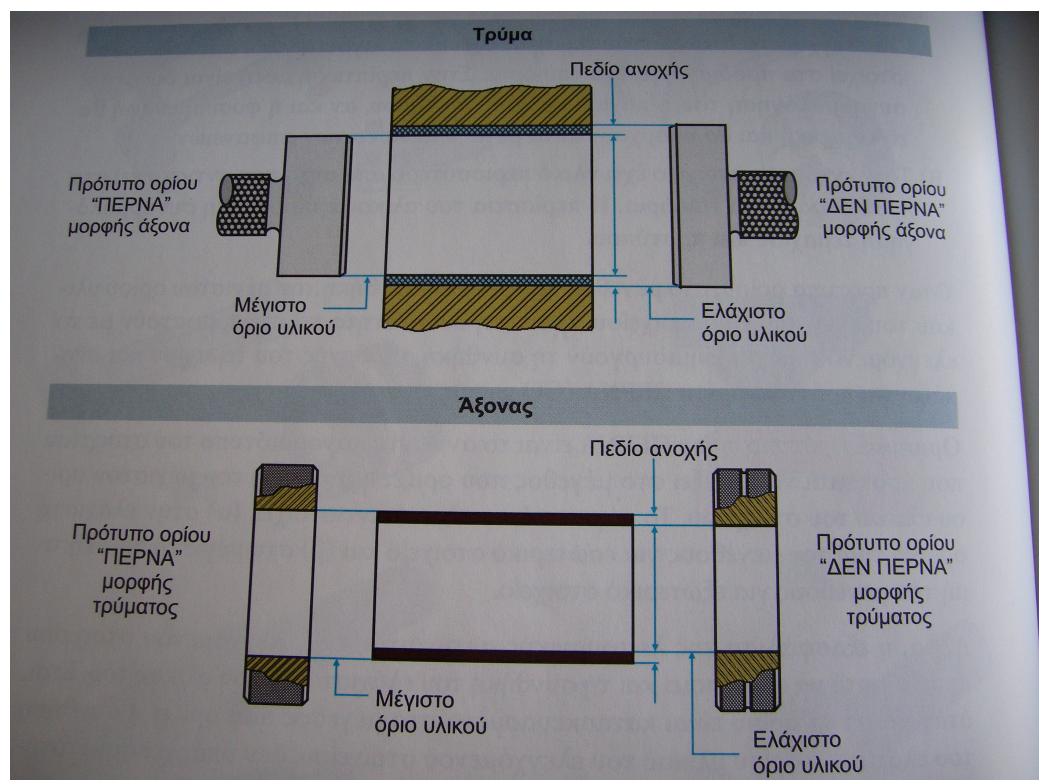
Οι ελεγκτήρες κατασκευάζονται από χάλυβα αντοχής στη φθορά, γιατί χρησιμοποιούνται συχνά στον έλεγχο μεγάλου αριθμού τεμαχίων που παράγονται μαζικά. Κατεργάζονται με σειρά κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, για να παρουσιάζουν σταθερότητα διαστάσεων. Η ακρίβεια κατασκευής των προτύπων είναι δέκα φορές μεγαλύτερη των τεμαχίων που πρόκειται να ελέγξουν.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην χρήση των ελεγκτήρων. Οι συνθήκες πρέπει να είναι αυτές που δηλώνει κατασκευαστής (κοντά στις εργαστηριακές). Π.χ. το τεμάχιο αμέσως μετά την κατεργασία έχει υψηλή θερμοκρασία και για αυτό το λόγο θα παρουσιάσει θερμική διαστολή, με αποτέλεσμα αλλαγής διαστάσεων του. Και αν ελέγξουμε εκείνη την στιγμή θα πάρουμε λανθασμένο αποτέλεσμα. Πρέπει να το αφήσουμε να κρυώσει και μετά να ελέγξουμε.

Οι επιφάνειες επαφής των ελεγκτήρων σκληρύνονται με βαφή για την ελάττωση της φθοράς. Η σκληρότητα όμως δεν πρέπει να είναι μεγάλη, διότι τότε πάλι η φθορά είναι ταχύτερη. Κατά των έλεγχο μαλακών μετάλλων η φθορά των επιφανειών επαφής είναι μεγαλύτερη. Μεγάλη βαρύτητα επικεντρώνουν οι κατασκευαστές ελεγκτήρων στην λε-

ίανση (ποιότητα) των επιφανειών επαφής, τις εποξειδωτικές βαφές του σώματος του οργάνου και στο υλικό. Προσοχή δίνεται στην συντήρηση και στην τακτική διακρίβωση των ελεγκτήρων από υπεύθυνο διαπιστευμένο φορέα. Έτσι εξασφαλίζουμε αξιοπιστία κατασκευής και οικονομία.

Τα πρότυπα ορίου κατασκευάζονται σε δύο μεγέθη, που είναι οι οριακές τιμές του υπό έλεγχο στοιχείου. Έλεγχος με πρότυπα ορίου παρουσιάζεται σχηματικά, με εφαρμογή σε κυλινδρικά χαρακτηριστικά στην εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Παράσταση αρχής λειτουργίας προτύπων ορίου
(Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Τα μεγέθη του πρότυπου ορίου ταυτίζονται με ένα από τα όρια υλικού του ελεγχόμενου στοιχείου: στο πρότυπο ορίου «ΠΕΡΝΑ» με αυτά του μεγίστου ορίου υλικού στο πρότυπο ορίου «ΔΕΝ ΠΕΡΝΑ» με αυτά ελάχιστου ορίου υλικού.

Για να γίνει η αποδοχή, το υπό έλεγχο αντικείμενο πρέπει να ελεγχθεί και για τα δύο προδιαγραφμένα όρια της διάστασής του με τη χρήση διαδοχικών ελεγκτήρων ΠΕΡΝΑ και ΔΕΝ ΠΕΡΝΑ.

Οι ελεγκτήρες κατασκευάζονται με τη δική τους ανοχή. Η ανοχή των ελεγκτήρων ΠΕΡΝΑ και ΔΕΝ ΠΕΡΝΑ πρέπει να κατέχει το 5% και ποτέ πάνω από το 10% της προδιαγραφμένης ανοχής της προδιαγραφμένης ανοχής της ελεγχόμενης διάστασης. Μέσα σε αυτήν την ανοχή πρέπει να περιλαμβάνεται και το σφάλμα λόγω φθοράς των ελεγκτήρων.

2.3. ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΚΩΝ

2.3.1. Μετρητικοί κανόνες (rules)

Είναι τα απλούστερα όργανα μετρήσεως μήκους. Κατασκευάζονται από χάλυβα ορθογωνικής διατομής, μήκους έως 5m και με υποδιαίρεσεις στο μετρικό σύστημα το πολύ ανά 0,5 mm. Στο αγγλοσαξονικό σύστημα έχουν μήκη από κλάσματα της ίντσας έως αρκετά πόδια και με υποδιαίρεσεις από 1/8 in έως 1/64 in. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή αλλά δεν κάνουν για έλεγχο παραγωγής. Κατασκευάζονται κατά DIN 866 σε δύο ποιότητες:

- Ποιότητα I : το πάχος των διαιρέσεων είναι $0,08 \div 0,12$ mm και το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα είναι $\pm (20 + L/50)$ μm .
- Ποιότητα II : το πάχος των διαιρέσεων είναι $0,12 \div 0,2$ mm και το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα είναι $\pm (20 + L/20)$ μm .

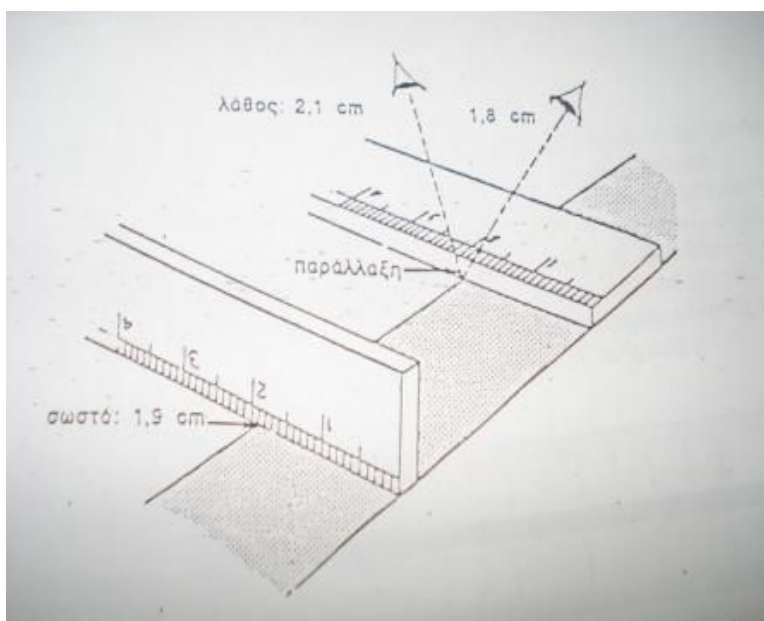
Όπου το L μετρούμενο μέγεθος σε mm.

Με τη χρήση των μετρητικών κανόνων υπάρχουν τρεις κυριότερες πηγές σφάλματος:

1. Το σφάλμα του οργάνου (εξαρτάται από ποιότητα κανόνα).
2. Το σφάλμα του παρατηρητή (π.χ. σφάλμα παράλλαξης εικόνα 2.13).

Για να μειώσουμε το σφάλμα αυτό, τοποθετούμε όσο γίνεται πιο κοντά στο μετρούμενο μέγεθος και η οπτική ακτίνα να είναι κάθετη στη γραμμή μέτρησης στο μετρούμενο σημείο.

3. Το σφάλμα λανθασμένης χρήσης (λανθασμένη τοποθέτηση μετρητικού κανόνα ή μετρούμενου εξαρτήματος σε σχέση με κανόνα, επιλογή μη κατάλληλου κανόνα για την μέτρηση).



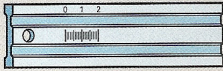
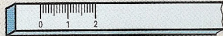

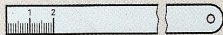
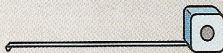
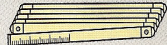
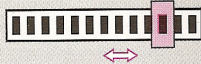
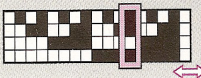
Εικόνα 2.13: Τρόπος μέτρησης μήκους (σφάλμα παράλλαξης) (ΜΕΤΡΗΣΗ ΜΗΚΟΥΣ-ΕΜΒΑΔΟΥ-ΟΓΚΟΥ Κυρισκοζογλου Ουράνια)

Στην (εικόνα 2.14) απεικονίζεται μετρητικός κανόνας ή μηχανολογικός κανόνας. Συνήθως διαθέτει δύο διαγραμμίσεις, η μία είναι σύμφωνη με το μετρικό σύστημα σε mm η άλλη σύμφωνη με το αγγλοσαξονικό σύστημα σε ίντσες in.



Εικόνα 2.14: Μετρητικός κανόνας

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται βασική κανόνες με αντίστοιχες επιτρεπόμενες αποκλίσεις και τη χρήση τους .

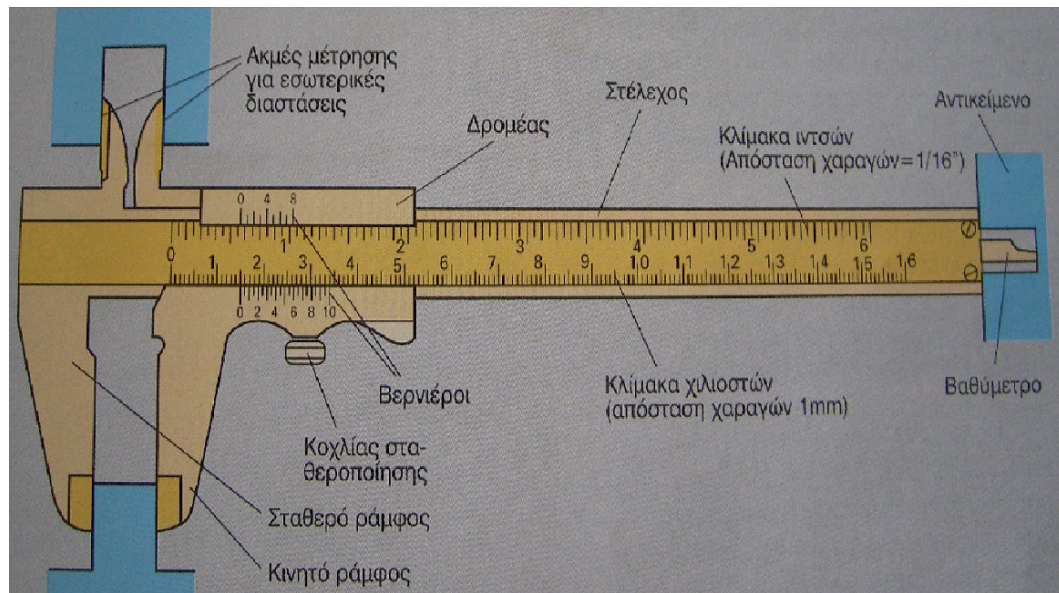
Είδη	Επιτρεπόμενη απόκλιση σε μm στα 500 mm	Ανάγνωση	Χρήση
Πρότυπος κανόνας	 $\pm 0,1...4$	Μικροσκόπιο (60 x)	Έλεγχος υλοποιημένων διαστάσεων, τοποθέτηση σε εργαλειομηχανές και μετρητικές διατάξεις
Κανόνας σύγκρισης	$\pm 7,5$	Μικροσκόπιο (30 x)	
Κανόνας ελέγχου	 ± 15	Φακός (8 x)	
Κανόνας εργασίας	 ± 30	Άμεση χωρίς οπτική μεγέθυνση	Απλές μετρήσεις στην κατασκευή
Εύκαμπτος χαλύβδινος κανόνας	 ± 75		
Μετροταινία	 ± 100		
Σπαστό μέτρο	 ± 1000	Ενδείξεις ψηφίων ανάλογα με τη διανυθείσα απόσταση	Μέτρηση διαδρομής σε μετρητικές διατάξεις, εργαλειομηχανές και ιδιοσυσκευές
Τμηματικός κανόνας (Κανόνας παλμών)	 $\pm 0,5...20$		
Απόλυτος κανόνας (κωδικοποιημένος)			

Πίνακας 2.1: Κανόνες (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Οι μετρητική κανόνες και οι ταινίες χρησιμοποιούνται ευρέως, επειδή είναι απλά όργανα και δίνουν άμεσα αποτελέσματα. Δεν χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό για τη χρήση τους και αν δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια το αποτέλεσμα δεν χρειάζεται να φιλτραριστεί από περαιτέρω μετρήσεις με άλλα όργανα.

2.3.2. Παχύμετρο (vernier caliper)

Το παχύμετρο είναι βασικό μετρητικό όργανο στον τομέα κατεργασιών. Έχει πολλές δυνατότητες χρήσης, απλή κατασκευή και ευκολία χειρισμού του. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για ταχεία μέτρηση, γιατί μπορεί κανείς να μετρήσει εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις και βάθος ενός κοιλώματος. Στην (εικόνα 2.15) απεικονίζεται απλό παχύμετρο. Όπως βλέπουμε υπάρχει δυνατότητα μέτρησης σε ίντσες και χιλιοστά. Παχύμετρο αποτελείται από τον κανόνα με υποδιαιρέσεις και ένα σταθερό ράμφος, το οποίο σχηματίζει ορθή γωνία με τον κανόνα. Βερνιέρος είναι το κινούμενο τμήμα, έχει επίσης υποδιαιρέσεις. Η απόσταση των χαραγών της κλίμακας του βερνιέρου είναι μικρότερη από την απόσταση των χαραγών της κύριας κλίμακας. Η κύρια κλίμακα είναι με υποδιαιρέσεις ανά 1 mm. Η κλίμακα του βερνιέρου έχει μήκος 9 mm και χωρίζεται σε 10 ίσες υποδιαιρέσεις.



Εικόνα 2.15: Κλασικό παχύμετρο (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Η απόσταση δύο διαδοχικών χαραγών της κλίμακας του βερνιέρου είναι κατά $1/10$ μικρότερη της αντίστοιχης απόστασης της κύριας κλίμακας. Έτσι, ο βερνιέρος επιτρέπει να διακρίνεται απόσταση ίση με το $1/10$ της υποδιαίρεσης της κύριας κλίμακας. Αυτή η απόσταση δείχνει την ακρίβεια μέτρησης του οργάνου αρχής βερνιέρου. Η αρχή αυτή ισχύει για οποιαδήποτε κύρια κλίμακα μήκους υποδιαίρεσης δ_K . Το μήκος υποδιαίρεσης του βερνιέρου δ_B προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\delta_B = (v - 1)\delta_K/v$$

όπου v το πλήθος υποδιαίρεσεων της κλίμακας βερνιέρου.

Η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να διαβαστεί και επομένως η ακρίβεια του οργάνου αρχής βερνιέρου είναι :

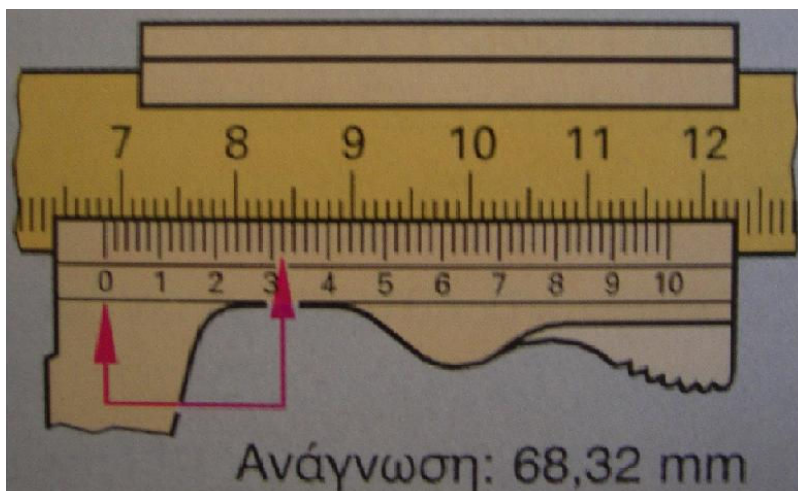
$$\alpha = \delta_K - \delta_B = \delta_K - (v - 1)\delta_K/v = \delta_K/v$$

Τα παχύμετρα με αναλογική κλίμακα έχουν δυνατότητα μέτρησης μήκους από 0 έως 2000 mm και με ακρίβεια 0,1 – 0,05 – 0,02 mm.

Στο μετρικό σύστημα η κύρια κλίμακα έχει υποδιαιρέσεις 1 mm:

- Βερνιέρος ακριβείας 0,1 mm: μήκος 9 υποδιαιρέσεων της κύριας κλίμακας (9 mm) διαιρείται σε 10 υποδιαιρέσεις βερνιέρου ($\alpha = \delta_k/v = 1/10 = 0,1 \text{ mm}$).
- Βερνιέρος ακριβείας 0,02 mm: μήκος 49 υποδιαιρέσεων της κύριας κλίμακας (49 mm) διαιρείται σε 50 υποδιαιρέσεις βερνιέρου ($\alpha = \delta_k/v = 1/50 = 0,02 \text{ mm}$).

Με το βερνιέρο του 1/50, φθάνουμε πλέον στο όριο της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου οφθαλμού, αυτό δημιουργεί πολλές φορές σφάλματα στην ανάγνωση (εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.16: Βερνιέρος του 1/50 (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Στην ανάγνωση, θεωρούμε τη γραμμή μηδέν του βερνιέρου σαν κόμμα . Αριστερά από το μηδέν και στην κλίμακα των mm αναζητούμε τα ακέραια mm, ενώ δεξιά του μηδενός, εκείνη τη χαραγή του βερνιέρου, η οποία ταυτίζεται με μία χαραγή της κλίμακας των mm. Το πλήθος των αποστάσεων των χαραγών δίνει, ανάλογα με το βερνιέρο, τα εικοστά ή τα πενήτηκοστά σε mm.

Τα παχύμετρα με κυκλική κλίμακα διαβάζονται πιο εύκολα και είναι ασφαλέστερα (εικόνα 2.17). Πολλαπλασιάζουν την κίνηση του κινητού ράμφους σε κίνηση ενός δείκτη με λόγο 10:1, 20:1 και 50:1 με τιμές ανάγνωσης 0,1 mm, 0,05 mm και 0,02 mm.



Εικόνα 2.17: Ελβετικό ωρολογιακό παχύμετρο ακριβείας 0.02 mm (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι παχυμέτρων, ένα από αυτά είναι παχύμετρο με ψηφιακή ένδειξη. Έχει δυνατότητα μέτρησης μήκους από 0 έως 1000 mm και ακρίβεια μέτρησης 0,01 mm (εικόνα 2.18).



Εικόνα 2.18: Ψηφιακό παχύμετρο 150 mm

Ψηφιακά παχύμετρα έχουν τρία πλεονεκτήματα σε σχέση με αναλογικά :

1. Δείχνουν τα ακέραια χιλιοστά , τα δέκατα και τα εκατοστά με φωτεινά ψηφία. Έτσι, αποκλείονται σχεδόν τα σφάλματα ανάγνωσης.
2. Υπάρχει δυνατότητα συνδέσεις με ηλεκτρονικό υπολογιστή με τεκμηρίωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μέτρησης.
3. Ο μηδενισμός της ένδειξης σε οποιαδήποτε θέση αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα . Η εφαρμοζόμενη μέτρηση είναι μια μέτρηση διαφορών και μειώνει τα συστηματικά σφάλματα έναντι της απόλυτης μέτρησης. Αυτή η ιδιότητα έχει πολλές εφαρμογές που διευκολύνει μηχανικό να κάνει πιο γρήγορα και πιο αξιόπιστα μετρήσεις.

Τα παχύμετρα κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής μη οξειδωμένου. Ιδιαίτερη σημασία καταβάλλεται στην συναρμογή και την καθετότητα ράβδων και κανόνων του οργάνου.

Για σωστή μέτρηση πρέπει, γραμμή μέτρησης να είναι η συντομότερη απόσταση του σημείου αναφοράς και του μετρούμενου σημείου. Η γραμμή μέτρησης πρέπει να βρίσκεται στο επίπεδο του οργάνου , να είναι παράλληλη με την κλίμακα του οργάνου και υπό μέτρηση αντικείμενο να βρίσκεται όσο δυνατόν πιο κοντά στον κανόνα.

Το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα των αναλογικών ταχυμέτρων ακριβείας 0,1 και 0,05 mm είναι:

$$G = 20 + L/10 \mu\text{m} \geq 50 \mu\text{m}$$

Ενώ των αναλογικών και ψηφιακών με ακρίβεια 0,02 mm είναι:

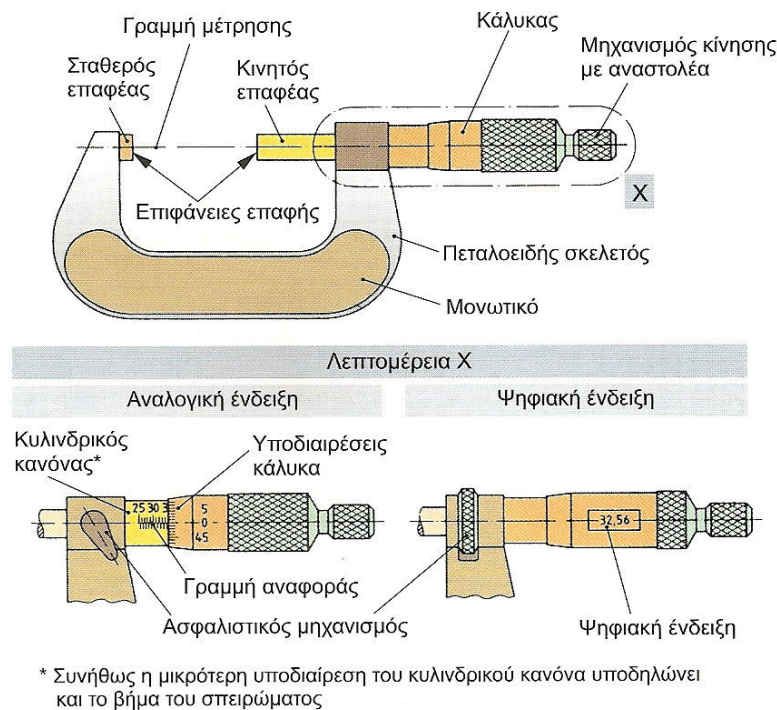
$$G = 22 + L/50 \mu\text{m},$$

Όπου το L το μετρούμενο μήκος σε mm.

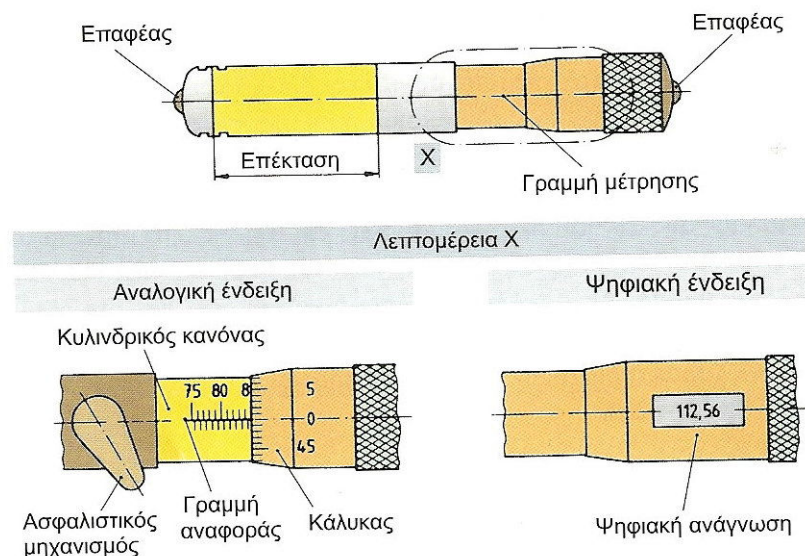
Η ακρίβεια κάθε παχύμετρου ελέγχεται περιοδικά με μετρήσεις ειδικών πρότυπων πλακιδίων διαφόρων μορφών (DIN 861 ΚΑΙ 2250). Επίσης ένας πρόχειρος τρόπος ελέγχου ακρίβειας παχύμετρου είναι η εξής: όταν έχουμε κλίσει το παχύμετρο η γραμμή μηδέν του βερνιέρου πρέπει να ταυτίζεται με τη γραμμή μηδέν του κανόνα της κλίμακας των mm. Κύριες αιτίες πηγής σφαλμάτων είναι η απόκλιση από την παραλληλότητα και την επιπεδότητα των ακμών επαφής των ραμφών των ταχυμέτρων, λόγω φθοράς ή δυνατό χτυπήματος .

2.3.3. Μικρόμετρο (micrometer)

Όπως είδαμε τα παχύμετρα έχουν τη δυνατότητα να μετρούν με τη βοήθεια βερνιέρου διαστάσεις με ακρίβεια μέχρι και 0,05 mm ή 0,001 inch. Για μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια είναι απαραίτητο να μεταχειρισθούμε ακριβέστερα όργανα τα λεγόμενα μικρόμετρα. Τα όργανα αυτά μεταχειρίζονται μικρομετρικούς κοχλίες και βερνιέρους για να μετρήσουν διαστάσεις μέχρι 0,01 mm = 0,00001 m = 10 μ ή 0,0001 inch. Στην (εικόνα 2.19) είναι μικρόμετρο εξωτερικών διαστάσεων και στην (εικόνα 2.20) μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων.



Εικόνα 2.19: Μικρόμετρο εξωτερικών διαστάσεων (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)



Εικόνα 2.20: Μικρόμετρο εσωτερικών διαστάσεων (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

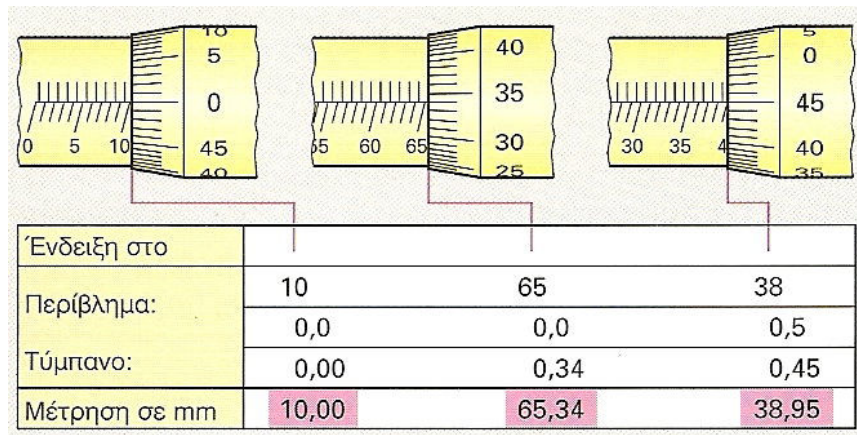
Το πλέον συνηθισμένο βήμα του κοχλία είναι 0,5 mm και για αυτόν το λόγο το περιστρεφόμενο τύμπανο του οργάνου φέρει περιφερειακά 50 υποδιαίρεσεις. Αν το τύμπανο περιστραφεί κατά μία υποδιαίρεση, τότε μετατοπίζεται αξονικά ο κοχλίας κατά 0,5: 50 = 0,01 mm.

Κάθε υποδιαίρεση στο μικρόμετρο είναι κατά κανόνα 0,01 mm .

Στην (εικόνα 2.21) δίνονται παραδείγματα υπολογισμού διαστάσεως σε mm. Τα ακέραια και τα μισά χιλιοστά διαβάζονται στο σταθερό κυλινδρικό περίβλημα, ενώ τα εκατοστά του χιλιοστού στο περιστρεφόμενο τύμπανο.

Μερικά μικρόμετρα είναι εφοδιασμένα με βερνιέρο οπότε η ακρίβεια τους μεγαλώνει, στην (εικόνα 2.22) μικρόμετρο έχει ακρίβεια 0,001 mm.

Για σωστή μέτρηση το μετρούμενο εξάρτημα πρέπει να δέχεται συγκεκριμένη δύναμη από 5 N έως 10 N. Αυτό γίνεται με την βοήθεια του μηχανισμού κίνησης με αναστολέα, με την προϋπόθεση ότι η περιστροφή της ατράκτου θα γίνεται αργά . Έτσι αποφεύγουμε παραμόρφωση μετρούμενου εξαρτήματος και κάμψη της γέφυρας λόγω δυνάμεων κατά τη μέτρηση.



Εικόνα 2.21: Παραδείγματα ενδείξεων (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)



Εικόνα 2.22: Μικρόμετρο μετρικού συστήματος με βερνιέρο (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)

Τα μικρόμετρα μετρούν διαστάσεις έως 500 mm ή 20 in, με εύρος μέτρησης ανά 25 mm ή 1 in. Είναι κατασκευασμένα από χάλυβα ή ελατό χυτοσίδηρο, ενώ οι δύο επαφείς του από

κράμα χάλυβα ή άλλου σκληρού υλικού, του οποίου η σκληρότητα πρέπει να είναι τουλάχιστον 760 HV1 (~62 HRC) και τραχύτητα $Rz \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Η ύπαρξη ασφαλιστικού μηχανισμού χρησιμεύει για την αναστολή της κινήσεως κατά την χρησιμοποίηση του μικρομέτρου σαν ελεγκτήρα .

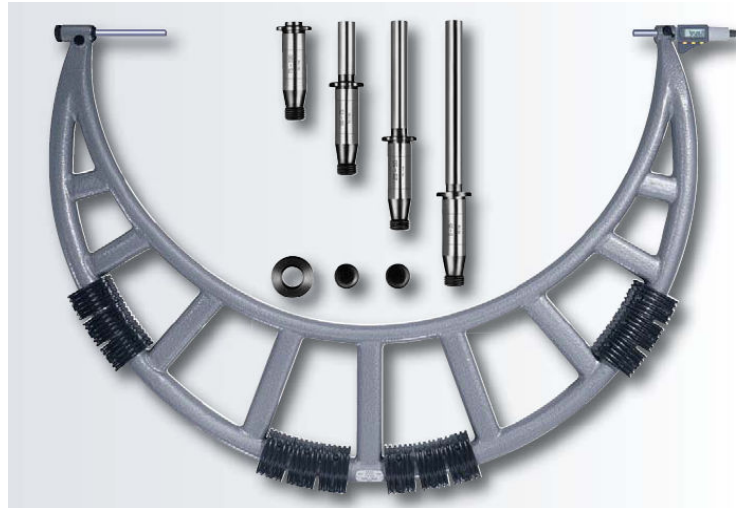
Το σφάλμα του οργάνου είναι η συνισταμένη των σφαλμάτων :

1. Βήμα του μικρομετρικού κοχλία.
2. Η παραλληλότητα των επαφών.
3. Η διάμετρος των πλευρών του κοχλία.
4. Η κάμψη του πετάλου.
5. Η χάραξη των διαιρέσεων.
6. Η εκκεντρότητα του τύμπανου, η οποία είναι πολύ δύσκολο να γίνει μικρότερη των 2 μm , αφού μόνο το σφάλμα του βήματος είναι 2 μm .

Ο έλεγχος του σφάλματος ανάγνωσης των μικρομέτρων γίνεται με χρήση προτύπων πλακιδίων. Έλεγχος περιλαμβάνει συνδυασμούς προτύπων πλακιδίων, έτσι οι μετρήσεις γίνονται για διάφορες γωνίες περιστροφής του κοχλία οπότε είναι δυνατόν να εντοπιστούν τυχόντα περιοδικά σφάλματα. Ο περιοδικός έλεγχος των μικρομέτρων εξαρτάται από τη συχνότητα και της συνθήκες χρήσης.

Ο κανονισμός DIN 863 τυποποιεί δύο ποιότητες μικρομέτρων με μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα $\pm (5 + L/50) \mu\text{m}$ και $\pm (2 + L/100) \mu\text{m}$ αντίστοιχα, όπου L το μετρούμενο μήκος σε mm.

Για την μέτρηση εσωτερικών διαστάσεων χρησιμοποιούνται μικρόμετρα άνευ πετάλου. Για μέτρηση πάχους σωλήνα, ο ακίνητος επαφείας είναι σφαιρικός για να επιτευχθεί επαφή σημείου. Για κάθε χρήση υπάρχουν και ειδικά διαμορφωμένοι επαφής. Για μετρήσεις υψηλότερης ακρίβειας χρησιμοποιείται βάθρο στήριξης. Παρακάτω απεικονίζονται μερικές εικόνες των διαφόρων τύπων μικρομέτρων.





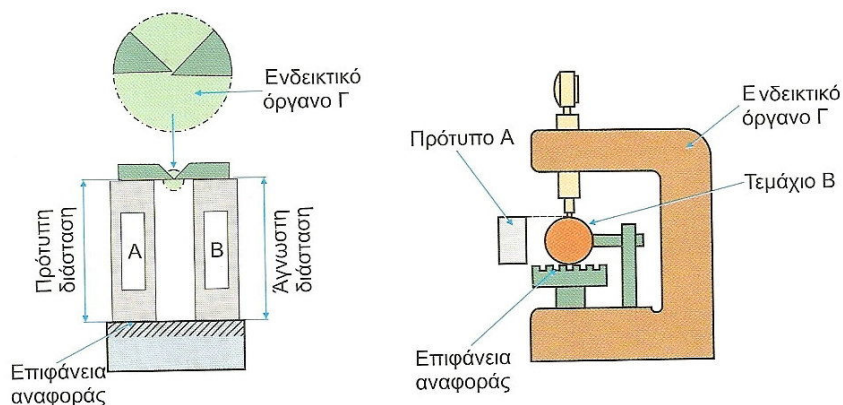
Εικόνα 2.23: Διάφοροι τύποι μικρομέτρων (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)

2.4. ΟΡΓΑΝΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΗΚΩΝ

Τα ενδεικτικά όργανα αυτά ανιχνεύουν, μεγεθύνουν και παρουσιάζουν μετατοπίσεις. Ο στόχος τους είναι :

1. Να ανιχνεύουν διαφοροποιήσεις σε μια συγκεκριμένη απόσταση, όπως αυτή ορίζεται από ένα επίπεδο αναφοράς σε συγκεκριμένη θέση ως προς το όργανο και από ένα σημείο μετρήσεως στην επιφάνεια του αντικειμένου.
2. Να παρουσιάζουν σε μια οθόνη αναλογική, με βαθμονόμηση ή σε μία ψηφιακή την μεγεθυμένη εκδοχή των ανιχνευμένων διαφοροποιήσεων της διάστασης.

Στην (εικόνα 2.24) παρουσιάζεται το βασικό σχήμα ενός οργάνου σύγκρισής μηκών. Υπάρχουν διάφορα όργανα μηχανικά, ηλεκτρικά, οπτικά και πνευματικά για τη σύγκριση μηκών καθώς και μορφών.

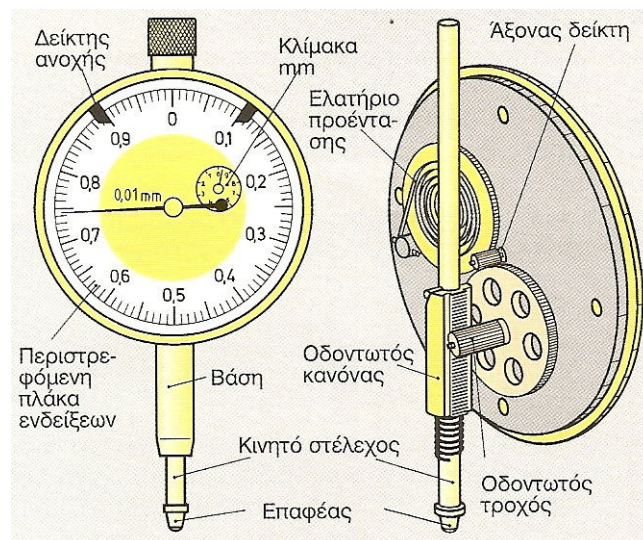


Εικόνα 2.24: Συγκριτική μέτρηση (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)

2.4.1. Μετρητικό ρολόι (dial indicator)

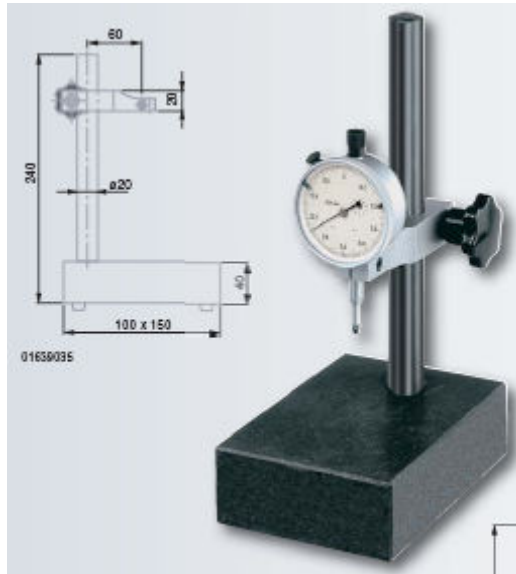
Βασικό όργανο σε πολλές συσκευές σύγκρισης μεγάλης ακρίβειας είναι το μετρητικό ρολόι. Το όργανο αυτό με τη βοήθεια μηχανικών διατάξεων μοχλών και οδοντωτών τροχών μετατρέπει τη μεταφορική κίνηση ενός ωστηρίου σε περιστροφική ενός δείκτη. Το εύρος μετρήσεων του οργάνου αυτού κυμαίνεται συνήθως από 2 έως 50 mm και από 0,003 έως 2 inch. Η διακριτική ικανότητα των οργάνων κυμαίνεται από 0,002 έως 0,01 mm, ή 0,00005 έως 0,001 inch. Η αυξημένη διακριτική ικανότητα οφείλεται στη μεγέθυνση (ή πολλαπλασιασμό) μιας γωνίας στροφής, που πραγματοποιείται με τη βοήθεια οδοντοτροχών σε σύμπλεξη .

Στην (εικόνα 2.25) παρουσιάζεται η διάταξη ενός μετρητικού ρολογιού.

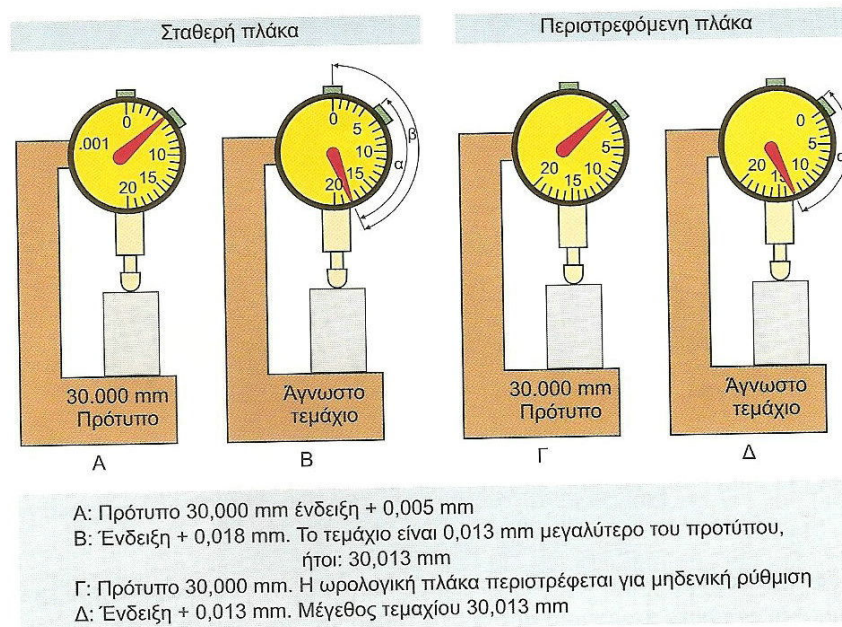


Εικόνα 2.25: Μετρητικό ρολόι (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με κάποιο υποστήριγμα (τράπεζα ακριβείας) ή είναι ενσωματωμένο σε κάποιο μετρητικό όργανο για να μπορεί να μετράει έχοντας σταθερή βάση (εικόνα 2.26). Και με βοήθεια προτύπων πλακιδίων δεδομένου πάχους καθορίζεται με ακρίβειά το ύψος του ωστηρίου από την επιφάνεια της τράπεζας. Στην (εικόνα 2.27) παρουσιάζεται μέτρηση και υπολογισμός μήκους αγνώστου τεμαχίου.



Εικόνα 2.26: Μετρητικό ρολόι με βάση στηρίξεως (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)



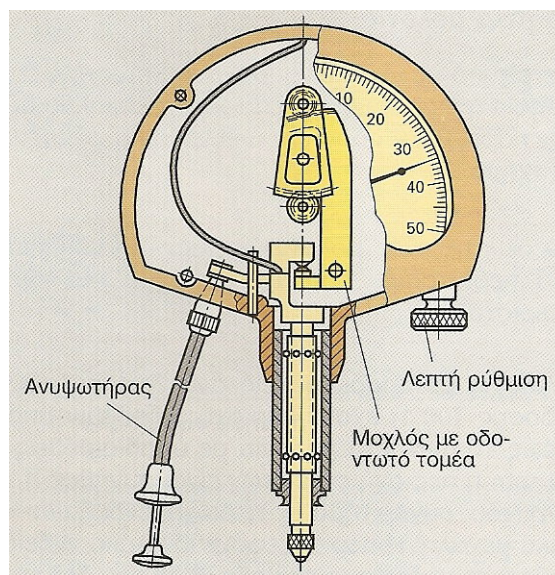
Εικόνα 2.27: Ρύθμιση σημείου αναφοράς – μηδενική ρύθμιση μετρητικού ρολογιού (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Για να μειωθεί συστηματικό σφάλμα του οργάνου, πρέπει ο δείκτης του να βρίσκεται σε μικρή περιοχή γύρο από το μηδέν. Όσο η ένδειξη απομακρύνεται από αυτό, τόσο ελαττώνεται αναλογικά η αξιοπιστία των μετρήσεων.

Το μετρητικό ρολόι χρησιμοποιείται για :

1. Έλεγχο διαστάσεων έτοιμων μηχανουργικών προϊόντων μαζικής παραγωγής.
2. Έλεγχο και ρύθμιση τεμαχίων, εργαλείων, ιδιοσυσκευών και εργαλειομηχανών.
3. Έλεγχο ομοκεντρότητας περιστρεφόμενων τεμαχίων, επιπεδότητας και παραλληλίας των επιφανειών.
4. Έλεγχο της φθοράς εξαρτημάτων λόγω χρήσης κ.τ.λ.

Ένας διαφορετικός τύπος μετρητικών ρολογιών είναι συγκριτήρας (εικόνα 2.28)

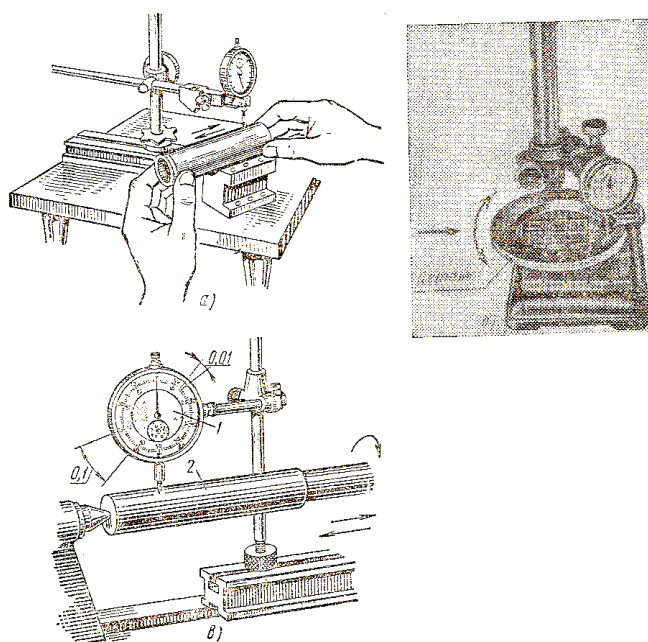


Εικόνα 2.28: Συγκριτήρας (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Οι συγκριτήρες είναι τα ακριβέστερα μηχανικά όργανα μέτρησης μηκών. Έχουν, συνήθως, υποδιαίρεσεις ανά 1 μm . Σε αντίθεση με τα μετρητικά ρολόγια, οι συγκριτήρες δεν έχουν οδοντωτό κανόνα, αλλά ένα σύστημα μοχλών, το οποίο μέσω οδοντωτών τομέων και τροχών, μεταφέρει την κίνηση του αισθητήρα στο δείκτη. Έτσι δεν είναι δυνατή μια πλήρης περιστροφή του δείκτη. Η περιοχή ενδείξεων είναι συνήθως 50 ή 100 μm .

Κατά την συντήρηση των οργάνων είναι φρόνιμο να αποφεύγεται η λίπανση των επαφών, διότι σε μια τέτοια περίπτωση το λίπος σε αυτά επιτρέπει την προσκόλληση σκόνης και είναι αιτία για κακή λειτουργία των οργάνων.

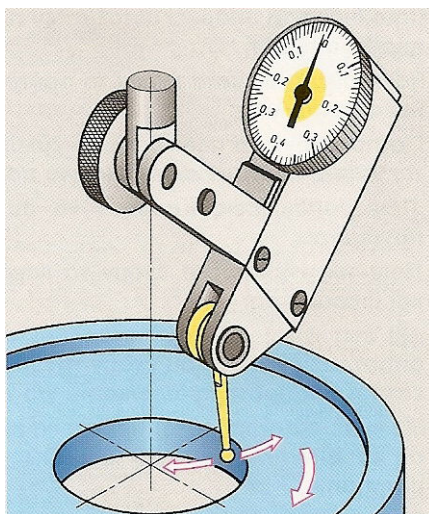
Έχει ευρεία χρήση σε τμήματα παραγωγής για παρακολούθηση της επιθυμητής διάστασης ως τμήμα εργαλειομηχανής. Ακολουθεί (εικόνα 2.29) με χρήσεις του μετρητικού ρολογιού.



Εικόνα 2.29: Χρήση μετρητικού ρολογιού με μετακίνηση εξαρτημάτων (Ν. Ι. ΜΑ-ΚΙΕΝΚΟ “SLESARNOE DELO S OSNOBAMI MATERIALOBEDENIA” MOSKBA 1973)

2.4.2. Μετρητικός βραχίονας (lever gauge)

Για μετρήσεις σε θέσεις μη προσιτές από άλλα όργανα συνήθως χρησιμοποιείται μετρητικός βραχίονας (εικόνα 2.30). Το στέλεχος, που φέρει τον σφαιρικό επαφέα, έχει δυνατότητα περιστροφικής κίνησης η οποία μεταφέρεται με τη βοήθεια κατάλληλου μηχανικού συστήματος σε δείκτη, που περιστρέφεται πάνω στη βαθμονομημένη ωρολογιακή πλάκα. Το στέλεχος κινείται σε σχέση με το αρχικό σημείο αναφοράς σε δύο αντίθετες κατευθύνσεις. Έτσι τα όργανα χρησιμοποιούνται και για της δύο κατευθύνσεις. Έχουν συνήθως ακρίβεια 0,01 mm και εύρος μέτρησης 0,80 mm ή ακρίβεια 0,0005 in και εύρος 0,030 in. Γενικός για της ρυθμίσεις ισχύει ότι και στο μετρητικό ρολόι.



Εικόνα 2.30: Μετρητικό όργανο με μοχλό - αισθητήρα (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Τα μετρητικά όργανα με μοχλό - αισθητήρα χρησιμοποιούνται λόγω του κινητού αισθητήρα για μετρήσεις διαφορών, π.χ. για έλεγχους κυκλικότητας, για προετοιμασία και κέντρωση τεμαχίων.

Για τη δυνατότητα άμεσης ανάγνωσης της τιμής, πρέπει ο άξονας του μοχλού επαφής να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο παράλληλος προς την ελεγχόμενη επιφάνεια. Οι αποκλίσεις των μετρήσεων αντιστοιχούν προς εκείνες του μετρητικού ρολογιού.

2.4.3. Ηλεκτρικά μετρητικά όργανα

Με τη βοήθεια ηλεκτρικών σημάτων που στέλνονται από μηχανικούς αισθητήρες γίνεται ηλεκτρική μέτρηση μηκών των μετρουμένων μεγεθών.

Τα μετρητικά όργανα με επαγωγικό μετρητικό σύστημα αποτελούνται από τον μετρητικό αισθητήρα, τον ενισχυτή και τη συσκευή ενδείξεων όπως στην (εικόνα 2.31).



Εικόνα 2.31: Έλεγχος κυλινδρικότητας (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Τα πλεονεκτήματα ηλεκτρικών μετρητικών οργάνων :

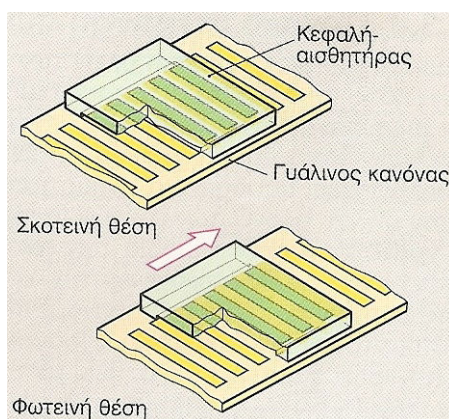
1. Κάθε υποδιαίρεση είναι από $0,01 \mu\text{m}$ έως $1 \mu\text{m}$. Άρα, υψηλή ευαισθησία.
2. Σχετικά μεγάλη περιοχή ενδείξεων (από $0,003 \text{ mm}$ έως 2 mm).
3. Μικρές αποκλίσεις μέτρησης (από $0,01 \mu\text{m}$ έως $0,25 \mu\text{m}$).
4. Μπορούν να μετρήσουν σε δυσπρόσιτες από άλλα όργανα θέσεις.
5. Εκτός από τις μεμονωμένες μετρήσεις, υπάρχει η δυνατότητα της σύγκρισης δύο τιμών με τη δημιουργία του αθροίσματος ή της διαφοράς τους.
6. Διαλογή και κατάταξη κατά ομάδες ανοχών.

Λόγω της αλλαγής της ευαισθησίας των οργάνων παρατηρούνται αποκλίσεις μέτρησης. Αυτά πρέπει να διορθώνονται κατά χρονικά διαστήματα με νέα ρύθμιση των οργάνων.

2.4.4. Ηλεκτρονικά μετρητικά όργανα

Τα ηλεκτρονικά όργανα μετρήσεων λειτουργούν με οπτικοηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διαδρομής. Αφετηρία είναι ένας γυάλινος κανόνας με μία κεφαλή-αισθητήρα, ο οποίος μετρά τη διανυθείσα απόσταση της μετρητικής κεφαλής μέσω των συλλαμβανομένων σημάτων. Κατά την κίνηση της μετρητικής κεφαλής, οι αδιαφανείς χαραγές του αισθητήρα φράζουν ή αφήνουν το φως να προσπέσει στις ανακλώσες χαραγές του γυάλινου

κανόνα. Η ένταση του ανακλώμενου φωτός αλλάζει και έτσι δημιουργούνται ψηφιακά σήματα (εικόνα 2.32).



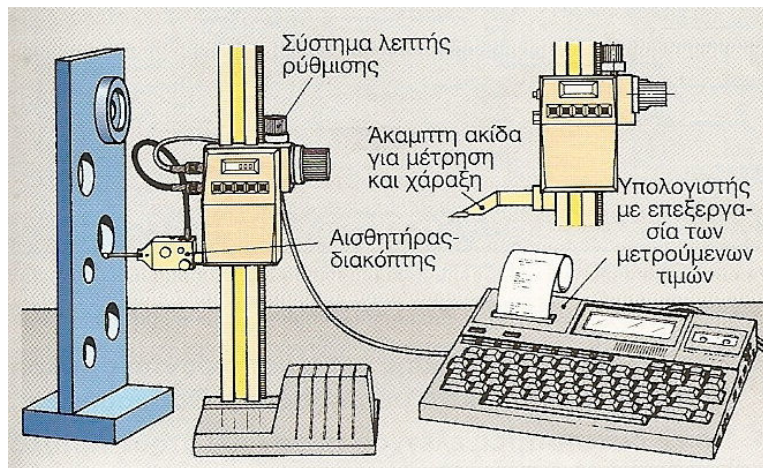
Εικόνα 2.32: Σύστημα μέτρησης διαδρομής (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, είναι:

- ✓ Η περιοχή ενδείξεων περιορίζεται μόνον από το μήκος του γυάλινου κανόνα.
- ✓ Σε μία ευρεία περιοχή μετρήσεων μπορούν οι μετρούμενες τιμές να θεωρηθούν ως απόλυτες τιμές.
- ✓ Βήμα της ένδειξης είναι 1 μm .
- ✓ Η ένδειξη μπορεί σε κάθε θέση να κρατηθεί σταθερή, να απομνημονευθεί ή να μηδενιστεί.

Τα οπτικοηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης διαδρομής είναι η βάση για τις μετρήσεις διαδρομών στις συσκευές μέτρησης συντεταγμένων και στις μηχανές.

Στην (εικόνα 2.33) απεικονίζεται κατακόρυφος μετρητής μηκών. Είναι μετρητικό όργανο μίας συντεταγμένης, διότι μέσα στην κατακόρυφη στήλη έχει τοποθετηθεί οπτικοηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης της διαδρομής. Χρησιμοποιούνται σε εργασίες με πλάκες. Επίσης στους ελέγχους για αποκλίσεις μορφής ή θέσης, όπως κυκλικότητα, επίπεδη κίνηση, ευθυγραμμία και παραλληλότητα.



Εικόνα 2.33: Ηλεκτρονική συσκευή για μετρήσεις υψών και χαράξεις (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Τέλος, οι ηλεκτρομηχανικοί και ηλεκτρονικοί συγκριτές μηκών χρησιμοποιούνται ευρέως σε μαζική παραγωγή τεμαχίων υψηλής ακρίβειας, όπου απαιτείται γρήγορος και αξιόπιστος έλεγχος για τη διαλογή των εκτός ανοχών τεμαχίων.

2.4.5. Οπτικός συγκριτής (optical comparator)

Μεγεθύνει το εξάρτημα υπό έλεγχο, λειτουργώντας ως μικροσκόπιο. Προβάλλει στην οθόνη το περίγραμμα του εξαρτήματος. Στην οθόνη υπάρχει εκτός της κλίμακας και η ονομαστική μορφή με της ανοχές του ελεγχόμενου τεμαχίου, αυτό επιτρέπει άμεση σύγκριση. Ο οπτικός συγκριτής χρησιμοποιείται ευρέως στα εργαστήρια βαθμολόγησης . Είναι επίσης μια καλή επιλογή για την εργασία δωματίων εργαλείων γενικού σκοπού για να μετρήσει τις σύνθετες μορφές . Για έλεγχο σπειρωμάτων, οδοντωτών τροχών και κοπτικών εργαλείων μορφής (εικόνα 2.34).



Εικόνα 2.34: Οπτικός συγκριτής υψηλής ακρίβειας (CARMAR TECHNOLOGY CO., LTD)

2.4.6. Πνευματικά μετρητικά όργανα

Τα πνευματικά όργανα κάνουν μετρήσεις με τον πεπιεσμένο αέρα με χαμηλή πίεση $P < 0,1 \text{ bar}$, όταν τα τοιχώματα του ελεγχόμενου τεμαχίου είναι λεπτά (για αποφυγή παραμόρφωσης και λανθασμένου αποτελέσματος). Όταν το ελεγχόμενο τεμάχιο έχει αρκετά χοντρά τοιχώματα, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πνευματικά όργανα με τον πεπιεσμένο αέρα με υψηλή πίεση με $P \geq 0,5 \text{ bar}$. Στην (εικόνα 2.35) απεικονίζονται τα όργανα που αποτελούνται από το μετρητικό υποδοχέα που είναι άξονας ή δακτύλιος με ακροφύσιο και το όργανο ένδειξης, το οποίο μπορεί να είναι μορφής στήλης ή με δείκτη.



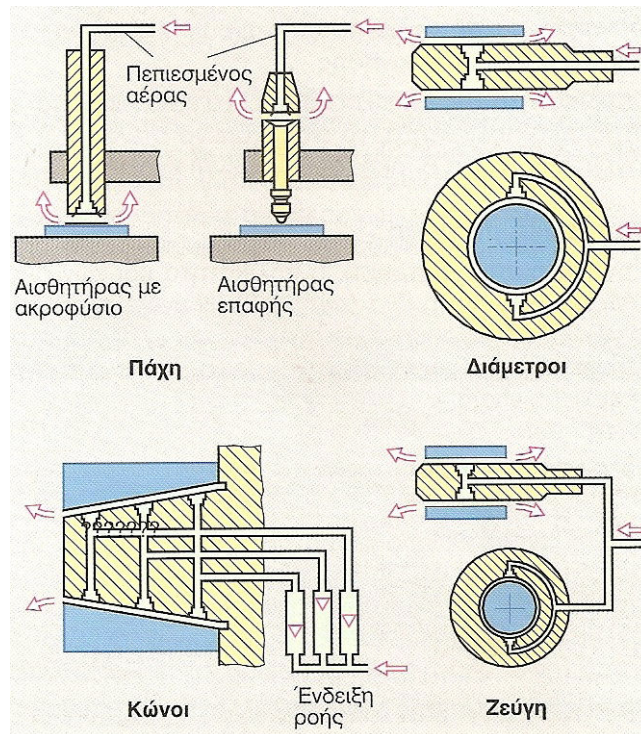
Εικόνα 2.35: Πνευματικά όργανα μετρήσεως (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)

Διακρίνονται δύο ειδών αισθητήρες των οργάνων για τη μέτρηση των μεταβλητών κατά τον έλεγχο δοκιμών :

1. Αισθητήρες με ακροφύσιο που λειτουργούν χωρίς να έρχονται σε επαφή με την ελεγχόμενη επιφάνεια.
2. Αισθητήρες επαφής που έρχονται σε επαφή με την ελεγχόμενη επιφάνεια.

Αισθητήρας επαφής χρησιμοποιείται στις μετρούμενες επιφάνειες με βάθη τραχύτητας μεγαλύτερα των 6 μm ή μεγάλες διαφορές τραχύτητας .

Πριν κάνουμε την μέτρηση, πρέπει να ρυθμίσουμε το ρεύμα του αέρα στο όργανο με τέτοιο τρόπο ώστε ο δείκτης να δείχνει μηδέν όταν ο υποδοχέας βρίσκεται σε επαφή με τον κατάλληλο ελεγκτήρα. Εδώ διαφαίνεται μειονέκτημα ,διότι για κάθε αντικείμενο που θα ελεγχθεί απαιτείται ιδιαίτερος υποδοχέας και ιδιαίτερος ελεγκτήρας, σύμφωνα με την μορφή του αντικειμένου. Έτσι τα πνευματικά όργανα χρησιμοποιούνται κυρίως στη μαζική παραγωγή. Στην (εικόνα 2.36) απεικονίζεται έλεγχος με επαφέα και χωρίς .



Εικόνα 2.36: Έλεγχος με όργανο χωρίς επαφέα και με επαφέα (ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ Ανδρόνικος Φιλίος - Ιωάννης Βελαώρας, 2003)

Από τα πλεονεκτήματα της πνευματικής μέτρησης μηκών, έχουμε :

1. Δεν ασκείται δύναμη και επαφή στο εξάρτημα.
2. Η μέτρηση μπορεί να γίνει με το αντικείμενο επάνω στην εργαλειομηχανή. Χωρίς επαφή δεν απομακρύνονται ξένα σωματίδια , ψυκτικό υγρό ή λάδι και δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα.
3. Ορισμένες μετρήσεις αποκλίσεων οπών γίνονται μόνο με αυτή τη μέθοδο.
4. Οι μετρητικοί υποδοχείς μπορούν να διαταχθούν ο ένας παραπλεύρως του άλλου, ενώ τα όργανα να τοποθετηθούν αλλού .

3 ΜΗΧΑΝΕΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Μηχανές Τρισδιάστατων Μετρήσεων ονομάζονται διαφορετικά και Μηχανές Μέτρησης Συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machines, CMM) κάνουν μετρήσεις ακριβείας και υποστηρίζουν εργασίες ποιοτικού ελέγχου, σχεδιασμού. Τα συμβατικά όργανα μέτρησης όπως π.χ. παχύμετρα, μικρόμετρα, κυλινδρόμετρα, αλφάδια κ.α. πολύ συχνά αδυνατούν να καλύψουν τις ανάγκες διαστασιολογικών μετρήσεων σε εύρος και ακρίβεια μετρήσεων. Επιπλέον φυσικά, αδυνατούν να καλύψουν την ανάγκη για σύνθετες μετρήσεις σε δύο ή και τρεις άξονες όπως για παράδειγμα μέτρηση επιπεδότητας, ομοαξονικότητας, παραλληλίας, καθετότητας, κωνικότητας κ.α. Το τεχνολογικό αυτό κενό έρχονται να καλύψουν οι Μετρητικές Μηχανές Συντεταγμένων. Επίσης με χρήση της CMM περιορίζεται στο ελάχιστο το σφάλμα ανθρώπου κατά τη διεξαγωγή και ανάγνωση των ενδείξεων. Μόνο με CMM μπορούμε να κάνουμε Αντίστροφο Σχεδιασμό (Αντιγραφή) με την παραγωγή τεχνικών δεδομένων.

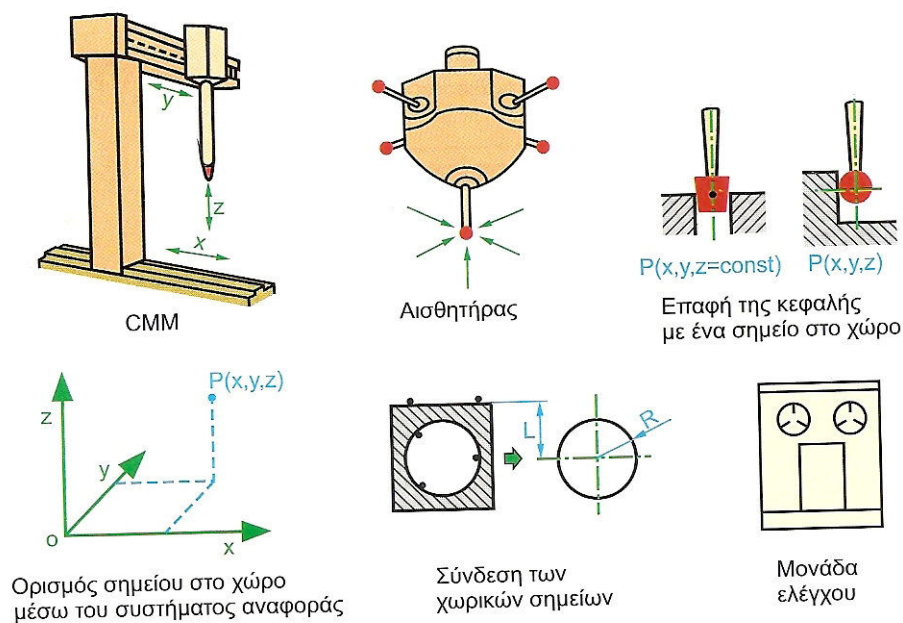


Εικόνα 3.1: Μηχανή τρισδιάστατων μετρήσεων με κυρίως σώμα, αλλά και ο υπόλοιπος εξοπλισμός (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Στην (εικόνα 3.1) απεικονίζεται σημερινή CMM με ακρίβεια της τάξης του $0,001 \text{ mm} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ και σε ειδικές περιπτώσεις $0,5 \text{ }\mu\text{m}$. Οι μετρητικές μηχανές CMM εργάζονται είτε με μηχανική επαφή (Mechanical Contact Measurement) είτε σε οπτική ανάγνωση (Non-Contact Measurement). Λόγω των υψηλών απαιτήσεων ακριβείας, προδιαγράφονται ειδικές συνθήκες χώρου εγκατάστασης. Αν όμως δεν έχουμε τέτοια δυνατότητα, δεν αποκλείεται και εγκατάστασή σε χώρους παραγωγής.

3.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ CMM

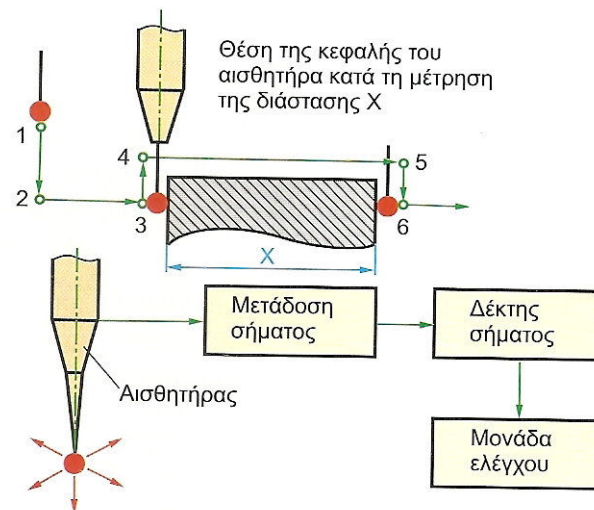
Υπερευαίσθητος επαφίας – αισθητήρας (touch probe) διατρέχει την επιφάνεια του προς μέτρηση τεμαχίου. Η σχετική μετατόπιση της βάσης του αισθητήρα ως προς σύστημα αναφοράς, που έχει προκαθοριστεί, αντιστοιχεί σε μεταβολή τάσης. Για κάθε σημείο επαφής του αισθητήρα με το τεμάχιο, καταγράφονται οι συντεταγμένες (καρτεσιανές, πολικές και σφαιρικές) του σημείου ως προς το σύστημα αναφοράς (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Αρχή λειτουργίας CMM (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Η αναλογική μεταβολή τάσης μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα μέσω ειδικών ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που είναι συνδεδεμένα με το σύστημα και στη συνέχεια με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού γίνεται απεικόνιση των θέσεων των σημείων στο χώρο. Έτσι αποτυπώνονται το σχήμα και οι διαστάσεις του αντικειμένου. Οι CMM συνδέονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή ή άλλες εξειδικευμένες μηχανές καταγραφής για λήψη, ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που αντλούνται από τις μετρήσεις με τη χρήση ειδικού λογισμικού.

Η μετακίνηση του αισθητήρα (προσέγγιση στο σημείο μέτρησης) με τους μετρητικούς βραχίονες από τη μία θέση στην άλλη γίνεται αυτόματα, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που υποστηρίζεται από τη μετρητική μηχανή (εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: Διαδικασία μέτρησης διάστασης (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Τη στιγμή κατά την οποία ο επαφάς-αισθητήρας αγγίζει το σημείο μέτρησης, δημιουργείται σήμα ελέγχου, με βάση το οποίο το σύστημα κίνησης διακόπτει την κίνηση του αισθητήρα στο συγκεκριμένο άξονα μέτρησης. Ταυτόχρονα το σήμα μεταφέρεται, μέσω της μονάδας ελέγχου, στο μετρητικό σύστημα θέσης της μηχανής, όπου αναγνωρίζεται η τιμή των συντεταγμένων του σημείου μέτρησης. Τα αποτελέσματα μεταφέρονται στον υπολογιστή και υπολογίζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (π.χ. η διάσταση X του ελεγχόμενου αντικειμένου).

Πριν διαδικασία μέτρησης γίνεται διακρίβωση με τη βοήθεια προτύπου υψηλής ακριβείας.

3.3. ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ CMM

Οι τύποι των CMM ποικίλουν, αλλά όλοι παρέχουν τη δυνατότητα να κινήσουν τον αισθητήρα στους τρεις κάθετους άξονες : X, Y και Z, όπου κάθε άξονας εγκαθίσταται με μια κλίμακα ακριβείας (μετρητική συσκευή). Σε πολλές περιπτώσεις μια μικρή άρθρωση βοηθά να γίνεται μέτρηση σε δυσπρόσιτα σημεία. Τα μέγιστα όρια μετακίνησης των αξόνων σχηματίζουν τον όγκο μέτρησης (work envelope) της μετρητικής μηχανής.

Οι μετρητικές μηχανές CMM ξεχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ,**σταθερές** και **φορητές**.

3.3.1. Φορητές CMM

Οι **Φορητές** CMM τύπου Αρθρωτού Βραχίονα με ακρίβεια μέτρησης από 0.025 mm βρίσκουν την θέση τους στον χώρο της διαστασιολογικής μετρολογίας όπως φαίνεται στην (εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Συγκριτική θέση ακριβείας μετρήσεων (Τεχνικό Γραφείο Δ. Βρέκωσης, 2010)

Υστερώντας από τις Σταθερές CMM σε ότι αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων αλλά και την έλλειψη δυνατότητας αυτοματοποιημένων μετρήσεων οι Φορητές CMM έχουν μια σειρά από πολύ σοβαρά πλεονεκτήματα να αντιπαραβάλουν που τις καθιστούν μια αρκετά αξιόλογη πρόταση στον χώρο των CMM και στην επίλυση διαστασιολογικών προβλημάτων.

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Αριστος λόγος τιμής / απόδοσης.	Σχετικά περιορισμένη ακρίβεια μέτρησης (από 0,025mm)
Φορητότητα. Εύκολη & γρήγορη τοποθέτηση.	Έλλειψη αυτοματοποιημένων μετρήσεων Ανάγκη ανθρώπινης παρουσίας καθ' όλη την διαδικασία των μετρήσεων
Ταχύτατη & ποιοτική αντιγραφή μέσω 3D LASER SCANNERS	
Ευελιξία, με πρόσβαση σε σημεία τα οποία δεν είναι προσβάσιμα με χρήση συμβατικών ή οπτικών οργάνων.	
Μεγάλο εύρος μέτρησης, το οποίο μπορεί να επεκταθεί μέσω της τεχνολογίας leap-frog αλλά και επιπλέον αξόνων, όπως η ράγας μέτρησης.	
Ελαφριά & Ανθεκτική κατασκευή προσαρμοσμένη για τον χώρο της παραγωγής.	

ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Μια Φορητή Μετρητική Μηχανή Συντεταγμένων Αρθρωτού Βραχίονα καταγράφει την θέση ενός σημείου στον χώρο με την ίδια αρχή λειτουργίας ενός βιομηχανικού ρομπότ. Ο χρήστης μετακινεί χειροκίνητα την κεφαλή μέτρησης – σαν το δάκτυλο που καταλήγει το ανθρώπινο χέρι – και το τοποθετεί στο σημείο που θέλει να μετρήσει ή να αντιγράψει και έτσι καταγράφει τις συντεταγμένες X,Y,Z του ζητούμενου σημείου στον χώρο.

Ο βραχίονας αποτελείται από μια σειρά σωλήνων ενωμένων με συνδέσμους οι οποίοι αποτελούν τους άξονες. Οι περισσότερες μηχανές διαθέτουν 6 άξονες οι οποίοι καταλήγουν σε μια σταθερή βάση. Η βάση στήριξης μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα και γρήγορα πάνω σε ένα τρίποδο, σε ένα σταθερό τραπέζι ή ακόμα και πάνω στο υλικό που πρόκειται να μετρηθεί. Οι σύνδεσμοι είναι κατασκευασμένοι από υψηλής ποιότητας ρουλεμάν με σκοπό να διασφαλιστεί η περιστροφή 360⁰ γύρω από τον άξονα. Επίσης κάθε σύνδεσμος διαθέτει ένα γωνιακό κωδικοποιητή μεγάλης ακριβείας για να μετρήσει την απόλυτη γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι άξονες. Διαθέτοντας 6 τουλάχιστον βαθμούς ελευθερίας μια Μετρητική Μηχανή Συντεταγμένων Αρθρωτού Βραχίονα καταγράφει τη θέση ενός σημείου στον χώρο με βάση τις γωνίες που σχηματίζουν οι άξονες του βραχίονα .

Αναφορικά με την κεφαλή και τον αισθητήρα μετρήσεων, η οποία τοποθετείται στο τέλος του βραχίονα, ο χρήστης διαθέτει τις κάτωθι επιλογές:

A.) Κεφαλή Σημειακών Μετρήσεων	B.) Κεφαλή Σάρωσης Laser Scanning	Γ.) Κεφαλή Ελέγχου & Αντιγραφής Σωληνώσεων
		

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι Φορητές CMM βρίσκουν εφαρμογή σε οποιοδήποτε τεμάχιο ή κατασκευή, μεγέθους μέχρι και 6 μέτρα για το οποίο απαιτείται τρισδιάστατη μέτρηση ή αντιγραφή . Επιπροσθέτως με την χρήση κατάλληλου λογισμικού και σημείων αναφοράς το εύρος μέτρησης αυξάνεται απεριόριστα.

Οι πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές βρίσκονται κυρίως στους κάτωθι τομείς (εικόνα 3.5).

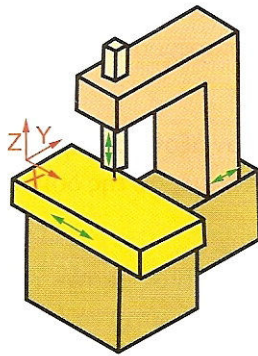


Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικές εφαρμογές (Τεχνικό Γραφείο Δ. Βρέκοσης, 2010)

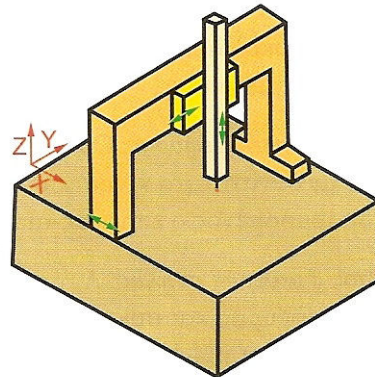
3.3.2. Σταθερές CMM

3.3.2.1. Τύποι Σταθερών CMM

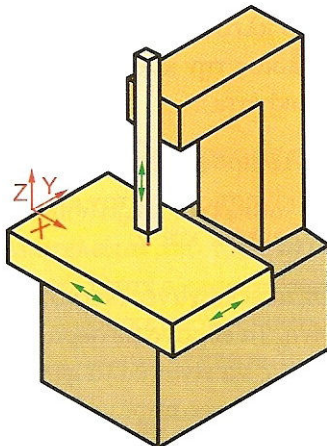
Υπάρχουν διαφορετικοί τυποποιημένοι τύποι CMM. Οι πιο συνήθεις είναι στην (ε-
ικόνα 3.6).



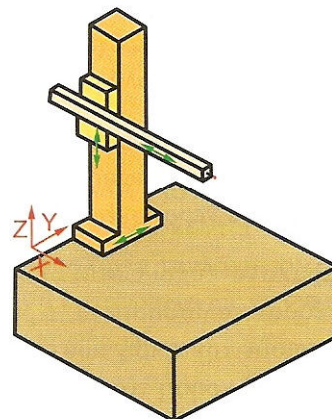
Τύπος κινητής τράπεζας και στήλης



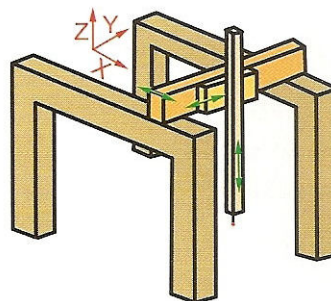
Τύπος κινητής γέφυρας



Τύπος σταθερής στήλης



Τύπος κινητής στήλης και βραχίονα



Τύπος γερανογέφυρας

Εικόνα 3.6: Οι πέντε βασικοί τύποι μετρητικών μηχανών CMM
(Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

- ❖ *Τύπος κινητής τράπεζας και στήλης* : Ο άξονας του αισθητήρα έχει την κατεύθυνση Z . Ο αισθητήρας, με δυνατότητα κίνησης στην κατεύθυνση αυτή, στηρίζεται σε βραχίονα που κινείται κατά τον άξονα Y . Η τράπεζα κινείται κατά άξονα X . Υπάρχει ευκολία πρόσβασης στην περιοχή εργασίας και παρέχεται σχετικά μεγάλος όγκος μέτρησης.
- ❖ *Τύπος κινητής γέφυρας* : Οριζόντια γέφυρα με κίνηση στον άξονα X φέρει κάθετη δοκό με δυνατότητα κίνησης στους άξονες Y – Z . Στο κάτω μέρος της δοκού είναι προσαρμοσμένος ο επαφέας – αισθητήρας.
- ❖ *Τύπος σταθερής στήλης* : είναι παρόμοιος με τον τύπο κινητής γέφυρας και συχνά αναφέρεται ως γενική μετρητική μηχανή (universal measurement machine). Η κατασκευή της έχει εξαιρετική στιβαρότητα και μεγάλη ακρίβεια .
- ❖ *Τύπος κινητής στήλης και βραχίονα* : Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μηχανής είναι ότι παρέχει μεγάλο όγκο μέτρησης ο οποίος την καθιστά κατάλληλη για μέτρηση πολύ μεγάλων κομματιών (π.χ. αυτοκίνητα) .
- ❖ *Τύπος γερανογέφυρας* : Δεν υπάρχει τράπεζα μηχανής. Το προς μέτρηση κομμάτι τοποθετείται στο έδαφος.

3.3.2.2. Κυρίως σώμα μηχανής

Το κυρίως σώμα της μηχανής αποτελείται από την τράπεζα μέτρησης (table) , τη στήλη (column) ή τη γέφυρα (bridge) ή το ικρίωμα (gantry) , ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, και το βραχίονα (ram) . Τα παραπάνω συνήθως βρίσκονται πάνω σε βάση από χάλυβα ή γρανίτη. Επίσης στο κυρίως σώμα τοποθετούνται οι κλίμακες μέτρησης (scales) , το σύστημα κίνησης (transmission) και οι μεταλλάκτες μετατόπισης (displacement transducers), ο μηχανισμός δηλαδή που μετατρέπει τη μετατόπιση σε αλλαγή τάσης .

Η στιβαρή **βάση μηχανής** συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα και βρίσκεται πάνω σε αντικραδασμικά πέλματα . Στη βάση τοποθετούνται οι κλίμακες μέτρησης , το σύστημα κίνησης , και άλλα συστήματα (π.χ. αισθητήρας θερμοκρασίας) . Πάνω από τη βάση τοποθετείται η τράπεζα μέτρησης .

Η **τράπεζα μέτρησης** αρχικά κατασκευαζόταν από χάλυβα . Καθώς όμως τα μέταλλα οξειδώνονται, ενώ λόγω των πολυάριθμων επαφών , αλλά και λόγω εξάσκησης δυνάμεων, κάμπτονται , τελικά το υλικό που προτιμάται για την κατασκευή της τράπεζας είναι ο γρανίτης . « Ο γρανίτης δεν οξειδώνεται και επηρεάζεται ελάχιστα από τις εξωτερικές συνθήκες, καθώς και τις δυνάμεις που δέχεται . Ακόμα και αν σε κάποιο σημείο θρυμματιστεί (π.χ. στην άκρη της τράπεζας), το υπόλοιπο τμήμα του παραμένει ανεπηρέαστο». (Yang, 2000). Επίσης η χρήση του γρανίτη ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες παραμόρφωσης της βάσης λόγω διαφορετικής θερμικής διαστολής. Αρκετές εταιρείες παραγωγής CMM κατασκευάζουν τράπεζες από γρανίτη με εσωτερική κοχλίωση, ώστε να διευκολύνουν τη σύσφιξη και την τοποθέτηση των τεμαχίων.



Εικόνα 3.7: Τράπεζα από γρανίτη, τοποθετημένη πάνω στη βάση, της εταιρίας DEA.
(Measureup, 2009)

Στην γρανιτένια πλάκα αυτή εδράζεται με αεροέδρανα ένα σύμπλεγμά υποσυνόλων που επιτρέπει την κίνηση στις τρεις διαστάσεις, μέσα στο «ωφέλιμο χώρο» της μηχανής του μηχανικού αισθητήρα επαφής . Τα έδρανα με αέρα ελαχιστοποιούν την τριβή των στοιχείων. Ο αέρας πρέπει να είναι καλά φιλτραρισμένος, για ομαλή λειτουργία μηχανής . Σερβοκινητήρες είναι υπεύθυνοι για την κίνηση στους άξονες X-Y-Z , ενώ με τη χρήση κατάλληλων μεταλλακτών μετατόπισης (displacement transducers) προσαρμοσμένων συνήθως σε γραμμικές οπτικές κλίμακες (optical linear scales) είναι δυνατή σε κάθε θέση η κα-

ταγραφή των συντεταγμένων του κέντρου της ακίδας (tip) του μηχανικού αισθητήρα . Ο αισθητήρας αυτός μπορεί να παρέχει δύο επιπλέον «βαθμούς ελευθερίας» (pitch & roll angles) ενώ με τη χρήση επεκτάσεων και κατάλληλης μορφής ακίδων διευκολύνεται η πρόσβαση σε εσωτερικά ή δυσπρόσιτα σημεία των μετρούμενων εξαρτημάτων .

3.4. ΤΥΠΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τύπων και μορφών αισθητήρων. Πρέπει να επιλέγουμε τον αισθητήρα που καλύπτει καλύτερα τις απαιτήσεις της μέτρησης.

Οι αισθητήρες ανήκουν σε δύο γενικές κατηγορίες :

1. Αισθητήρας με επαφή (contact probe).
2. Αισθητήρας χωρίς επαφή (non contact probe).

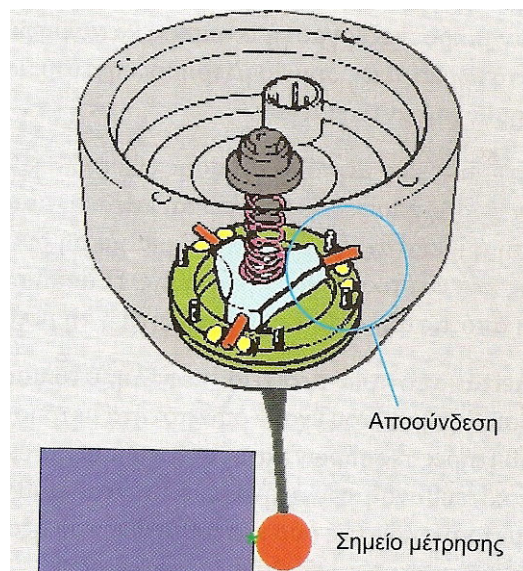


Εικόνα 3.8: Αισθητήρας με επαφή (Μετροτεχνικό Εργαστήριο ΕΜΠ)

Στην (εικόνα 3.8) απεικονίζεται αισθητήρας με επαφή, είναι ο πιο κοινός τύπος αισθητήρα. στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες στιγμιαίας επαφής και οι αισθητήρες συνεχούς επαφής. Αισθητήρες χωρίς επαφή είναι οι αισθητήρες Laser και οι τηλεοπτικοί αισθητήρες (video probe).

3.4.1. Αισθητήρες με επαφή

Ο αισθητήρας στιγμιαίας επαφής αποτελείται από τρεις ηλεκτρικές συνδεσμολογίες που βρίσκονται συνέχεια σε επαφή (εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9: Αισθητήρας με επαφή κατά τη μέτρηση (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)

Όταν ο επαφέας εφάπτεται με το κομμάτι στο σημείο μέτρησης, μία συνδεσμολογία τουλάχιστον χάνει επαφή. Η μηχανή καταγράφει τις συντεταγμένες X, Y, Z του κέντρου της ακίδας τη στιγμή της επαφής .

Ο αισθητήρας συνεχούς επαφής διατηρεί συνεχώς την επαφή του με την επιφάνεια την οποία ιχνηλατεί και παίρνει μέτρηση ανά καθορισμένη διακριτή απόσταση. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση πολύπλοκων επιφανειών και στη συγκέντρωση στοιχείων στον αντίσ-

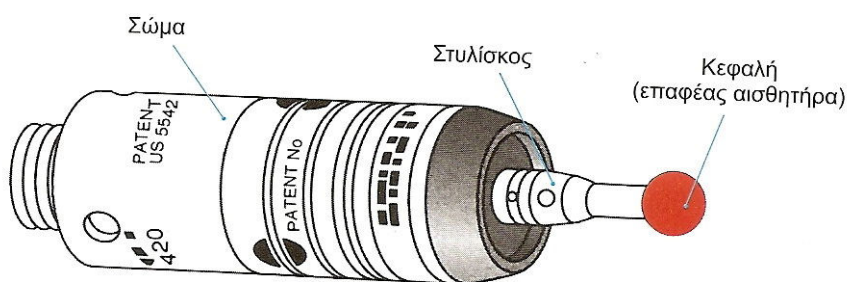
τροφο σχεδιασμό αντικειμένων. Σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα αποδίδει 10 έως 50 φορές περισσότερα στοιχεία από έναν αισθητήρα με στιγμιαία επαφή.

Ο αισθητήρας ασκεί δύναμη (ένα γραμμάριο ή περισσότερο) στο σημείο επαφής στο προς μέτρηση κομμάτι. Η δύναμη αυτή μπορεί να προκαλέσει ζημία σε εύκαμπτα ή εύθραυστα στοιχεία. Εδώ είναι κατάλληλη η χρήση ενός αισθητήρα χωρίς επαφή.

Τελευταία, έχει εξελιχθεί αισθητήρας επαφής που χρησιμοποιεί στυλίσκο υψηλής συχνότητας με δύναμη επαφής μικρότερη των 10 mg. Το στέλεχος του αισθητήρα περιέχει έναν κρύσταλλο που δημιουργεί μια δόνηση στο στυλίσκο. Ο αισθητήρας συντονίζεται σε συχνότητα 20 – 25 KHz. Όταν ο στυλίσκος έρθει σε επαφή με το προς μέτρηση κομμάτι, η ταλάντωση αλλάζει. Αυτή η αλλαγή ανιχνεύεται από έναν μικροεπεξεργαστή ο οποίος καταγράφει την αλλαγή ως επαφή. Η επαφή καταχωρείται ως σημείο μέτρησης προτού να εμφανιστεί οποιαδήποτε εκτροπή ή ζημία του αντικειμένου.

Η ταλάντωση στον αισθητήρα αυτόν περιορίζει επίσης ένα άλλο κοινό πρόβλημα των ψεύτο-επαφών. Οι ψεύτο-επαφές εμφανίζονται κατά τη μετακίνηση του αισθητήρα, όπου η δόνηση ή η επιτάχυνση προκαλεί μία μικρή δύναμη επαφής και αυτό καταγράφεται ως ένα ψεύτικο σημείο μέτρησης. Η δόνηση στο νέο αισθητήρα δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην ταχύτητα ή τη μετακίνηση.

Ένας αισθητήρας αποτελείται από : κεφαλή, στυλίσκο και σώμα (εικόνα 3.10).



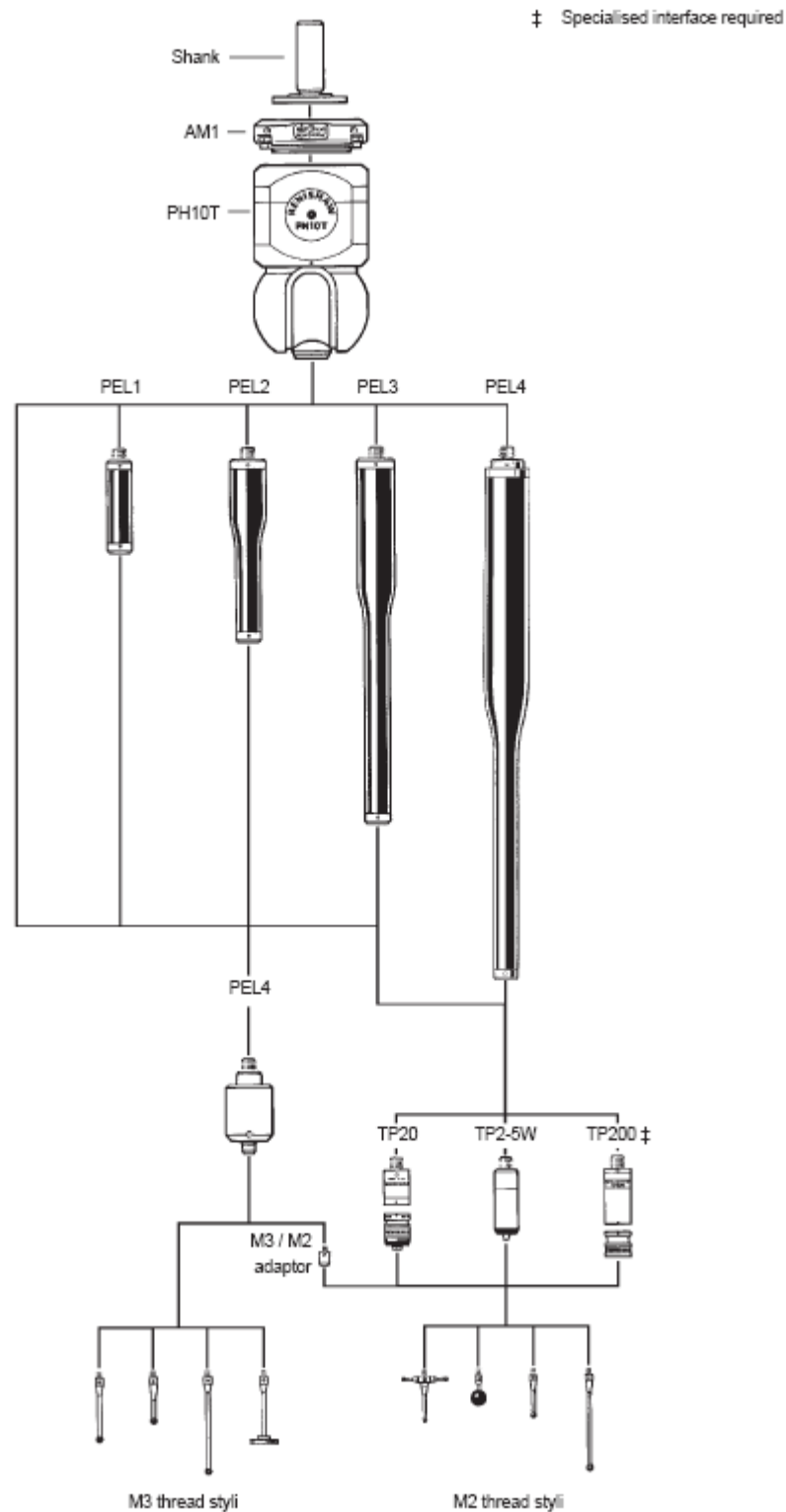
Εικόνα 3.10: Αισθητήρας CMM (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)



Στην (εικόνα 3.11) απεικονίζονται διάφοροι τύποι αισθητήρων (ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ Δ.ΒΡΕΚΟΣΙΣ)

Κάθε αισθητήρας έχει ορισμένη δυνατότητα μέτρησης κατά τους άξονες X, Y, Z. Έτσι ο αισθητήρας που έχει δυνατότητα μέτρησης κατά τους άξονες X, Y ονομάζεται αισθητήρας τεσσάρων κατευθύνσεων. Αν έχει δυνατότητα μέτρησης και σε μία κατεύθυνση του άξο-

να Z ,ονομάζεται αισθητήρας πέντε κατευθύνσεων. Ενώ όταν μετράει και στις δύο κατευθύνσεις του άξονα Z ,καλείται αισθητήρας έξη κατευθύνσεων.



Εικόνα 3.12: Τύποι προεκτάσεων στυλίσκων αισθητήρα (RENISHAW, 2010)

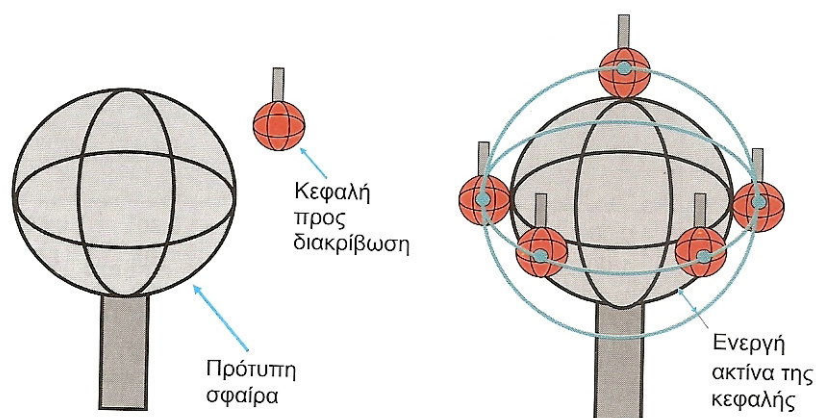


Εικόνα 3.13: Τύποι στυλίσκων αισθητήρα (RENISHAW, 2010)

Διάφοροι τύποι στυλίσκων και προεκτάσεις της θέσεις της κεφαλής που προστίθενται, φαίνονται στις (εικόνες 3.12, 3.13). Οι κεφαλές μπορούν να περιστραφούν χειροκίνητα ή αυτόματα. Ο χειριστής πρέπει να επιλέξει τον κατάλληλο στυλίσκο για κάθε τύπο μέτρησης. Έτσι θα αυξήσει την ακρίβεια μέτρησης.

3.3.2.3. Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα

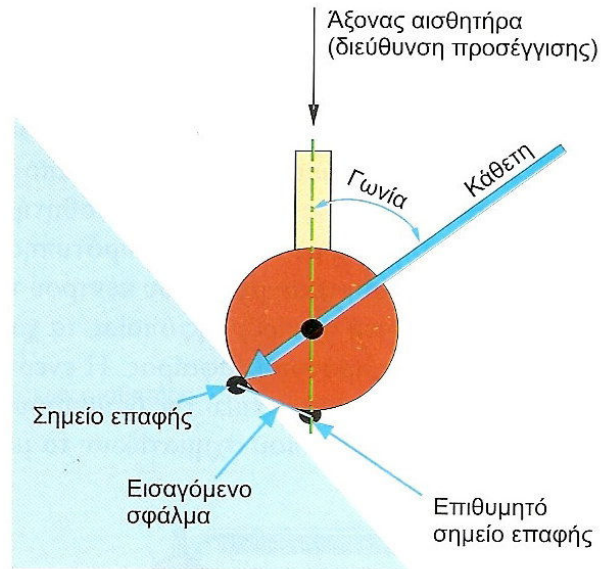
Τα πλεονεκτήματα των CMM είναι ότι ακόμη και αν αλλάξει η κατεύθυνση της κεφαλής του αισθητήρα δεν μειώνεται η ακρίβεια της μέτρησης. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να γίνεται διακρίβωση της κεφαλής του αισθητήρα κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Η ακρίβεια μέτρησης εξαρτάται από την ακρίβεια της διακρίβωσης. Κατά τη διακρίβωση της κεφαλής του αισθητήρα καθορίζεται το κέντρο και η ακτίνα του αισθητήρα με τη βοήθεια πρότυπης σφαίρας που συνοδεύει τη μηχανή. Οι μετρημένες συντεταγμένες του κέντρου της κεφαλής στα διάφορα σημεία σχηματίζουν νοητή σφαίρα, της οποίας τα χαρακτηριστικά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της πρότυπης σφαίρας. Η ενεργή διάμετρος της κεφαλής υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της διαμέτρου της πρότυπης σφαίρας και της διαμέτρου της σφαίρας που σχηματίζουν τα μετρημένα σημεία (εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.14: Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

Για την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων , πρέπει :

1. Να χρησιμοποιείται όσο γίνεται κοντός δύσκαμπτος στυλίσκος .
2. Να εφαρμόζεται η μικρότερη δύναμη επαφής .
3. Η διακρίβωση να γίνεται με γνωστή πρότυπη σφαίρα .
4. Η απόκλιση του άξονα του αισθητήρα από την κάθετο στην μετρούμενη επιφάνεια, να είναι ελάχιστη προς αποφυγή σφαλμάτων μέτρησης (εικόνα 3.15).
5. Να έρχεται σε επαφή με το σημείο μέτρησης η κεφαλή του αισθητήρα και όχι η προέκτασή της.
6. Να ελέγχεται η σταθερότητα του στυλίσκου.



Διάμετρος κεφαλής	0,5 mm	1,00 mm	2,00 mm	3,00 mm	4,00 mm	6,00 mm
Γωνία	Σφάλμα σε μm					
1,0°	0,00	0,10	0,20	0,20	0,30	0,50
5,0°	1,00	1,90	3,80	5,70	7,60	11,50
10,0°	3,90	7,70	15,40	23,10	30,90	46,30
15,0°	8,80	17,60	35,30	52,90	70,90	105,80
20,0°	16,00	32,10	64,20	96,30	128,4	192,50

Εικόνα 3.15: Μέγεθος σφάλματος που οφείλεται στην απόκλιση του άξονα του αισθητήρα από την κάθετο στην επιφάνεια μέτρησης (Μανσούρ & Καραχάλιου, 2007)

3.4.2 Αισθητήρες χωρίς επαφή

Σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αισθητήρες επαφής, χρησιμοποιούνται αισθητήρες χωρίς επαφή. Ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν διαχωρίζονται σε αισθητήρες **laser (laser probes)** και **τηλεοπτικούς αισθητήρες (video probes)**. Επίσης, είναι ταχύτεροι στις μετρήσεις.

Αισθητήρας **Laser** (εικόνα 3.16) εκτοξεύει ακτίνα φωτός επάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η απόσταση της κεφαλής του αισθητήρα Laser από το σημείο της μέτρησης είναι γνωστή ως δρώσα απόσταση *standoff*. Κατά την πρόσπτωση της ακτίνας η θέση του σημείου μέτρησης αναγνωρίζεται τριγωνομετρικά με τη βοήθεια φακού, που είναι ενσωμα-

τωμένος στο δέκτη του αισθητήρα . Οι αισθητήρες Laser έχουν δυνατότητα ανάγνωσης μέχρι 200 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο και ακρίβεια μέτρησης μέχρι 2,54 μm .



Εικόνα 3.16: Αισθητήρας Laser (Laser Design, Inc. 2010)

Τηλεοπτικός αισθητήρας (εικόνα 3.17) βασίζεται στην υψηλή ανάλυση της εικόνας του μετρούμενου αντικειμένου . Η εικόνα ενισχύεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρονική μορφή. Τα χαρακτηριστικά μετριοούνται από τις ψηφίδες της ηλεκτρονικής εικόνας (pixels). Η κάμερα μπορεί να συλλέξει πλήθος μετρημένων σημείων με μία μόνο λήψη .



Εικόνα 3.17: Τηλεοπτικός αισθητήρας (Hexagon Metrology Vision, 2010)

3.4.3. Σύστημα συλλογής, ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων

Το σύστημα ελέγχου, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία για την πραγματοποίηση των παραπάνω διαδικασιών . Κάθε μηχανή CMM διαθέτει *χειριστήριο ελέγχου (Jog Box)* , με το οποίο ο χειριστής μπορεί να μετακινεί τον αισθητήρα, να παίρνει χειροκίνητα τις συντεταγμένες των μετρούμενων σημείων, να ορίζει τον αλγόριθμο που θα ακολουθήσει η CMM σε αυτοματοποιημένη διαδικασία, να ρυθμίζει τον αισθητήρα με χρήση της πρότυπης σφαίρας, κ.α . Επίσης , κάθε μηχανή CMM συνοδεύεται από μηχανήμα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

Αυτό αποτελείται από έναν ειδικό αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα ή πιο απλά *ελεγκτή (controller)*, ώστε να μετατρέπεται η μεταβολή τάσης σε ψηφιακό σήμα, και από ένα σύστημα επεξεργασίας των δεδομένων, το οποίο συνήθως είναι κοινός επιτραπέζιος υπολογιστής, στον οποίο είναι εγκατεστημένο το εξειδικευμένο λογισμικό για τη χρήση της CMM.

Σε περίπτωση που το σύστημα της CMM παράγει απ' ευθείας ψηφιακό σήμα και πάλι είναι απαραίτητη η ύπαρξη του ελεγκτή. Ωστε να διαβιβάζονται σωστά οι πληροφορίες της μέτρησης στο λογισμικό του υπολογιστή και αντίστροφα (κατά τον προγραμματισμό της μεθόδου μέτρησης να μεταφέρονται οι πληροφορίες κίνησης της μηχανής). Αλλά και να συνδέεται σ' αυτόν το χειριστήριο της CMM, έτσι ώστε να «μεταφράζονται» οι οδηγίες του χειριστή στην κίνηση της μηχανής. Ο ελεγκτής δηλαδή στην ουσία «μεταφράζει» τη ροή πληροφοριών από και προς τη μηχανή και καθορίζει την κίνησή της, μέσω των ηλεκτρικών σημάτων που δίνει. Επιπλέον του ελεγκτή της CMM υπάρχει και ο *ελεγκτής κεφαλής αισθητήρα (probe head controller)*, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τη μηχανή μέσω του ελεγκτή και ελέγχει την κίνηση του αισθητήρα. Οι εντολές κατεύθυνσης είναι δυνατό να προέρχονται είτε από το χειριστήριο της CMM (computer aided measurement), είτε από την ίδια τη CMM (direct computer control). Ο ελεγκτής κεφαλής ελέγχει και αναφέρει τη θέση της κεφαλής, καθώς επίσης και σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την κίνηση (π.χ. εμπόδιο κατά την κίνηση, αποτυχία να φθάσει στην επιθυμητή θέση, κ. α.).



Εικόνα 3.18: Απομακρυσμένα τερματικά μηχανής CMM (Remote Terminals) (Hexagon Metrology, DEA 2010)

Ο επιτραπέζιος υπολογιστής και χειριστήριο (Jog Box) ονομάζονται “απομακρυσμένα τερματικά”, γιατί σε περίπτωση που θα χαλάσουν ή θα δίνουν λανθασμένες εντολές στη μηχανή CMM, υπάρχουν διακόπτες της μηχανής για άμεση διακοπή λειτουργίας της. Έτσι με τη βοήθεια των διακοπών αυτών μπορούμε να αποφύγουμε εργατικά ατυχήματα και πρόκληση ζημιάς στην μηχανή CMM.

3.4.4. Λογισμικό CMM

Ο προγραμματισμός της μετρητικής μηχανής CMM ή το λογισμικό της, της επιτρέπει να εξαντλήσει τις δυνατότητες ακριβείας και ταχύτητας της. Υπάρχουν δύο γενικότεροι τύποι λογισμικών για CMM. Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται *σύστημα μέτρησης υποβοηθούμενης από υπολογιστή (Computer Aided Measurement – CAM)* και απαιτεί από το χρήστη να φέρει χειροκίνητα τον αισθητήρα στα σημεία που θα μετρηθούν. Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται *σύστημα άμεσου ελέγχου από υπολογιστή (Direct Computer Control)* και, ό-

πως δηλώνει και η ονομασία του , προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης αυτοματοποιημένων αλγορίθμων , όπου το λογισμικό , αφού καθοριστούν οι βασικές μεταβλητές της μέτρησης (σχήμα τεμαχίου , ονομαστικό μέγεθος , ή έστω το αρχικό σημείο της μέτρησης), πραγματοποιεί τη μέτρηση αυτόματα .

Καθώς τα λογισμικά έχουν εξελιχθεί αρκετά , πλέον κυκλοφορούν κυρίως συστήματα DCC , τα οποία παράλληλα προσφέρουν και δυνατότητα χειροκίνητης μέτρησης . « Γενικά, ένα πακέτο λογισμικού CMM περιέχει όλες ή μερικές από τις ακόλουθες δυνατότητες :

1. Επιλογή συστήματος μέτρησης και μετατροπή μεταξύ μετρικού και αγγλοσαξονικού συστήματος .
2. Μετατροπή από καρτεσιανό σε πολικό σύστημα συντεταγμένων και αντιστρόφως .
3. Επιλογή βαθμού διακριτοποίησης ανά άξονα .
4. Ορισμός μηδενικού σημείου στο προς μέτρηση κομμάτι .
5. Επιλογή πλήθους στοιχείων μέτρησης για καθορισμό γεωμετρικών στοιχείων .
6. Αποθήκευση και επαναφορά προηγούμενης αρχής συντεταγμένων .
7. Σάρωση αντικειμένων και δημιουργία νέφους σημείων επιφανειών .
8. Σύγκριση στοιχείων μέτρησης με τα αντίστοιχα CAD .
9. Εισαγωγή ανοχών .
10. Υπολογισμός αποκλίσεων από τα όρια ανοχών .» (Μανσούρ & Καραχάλιου,2007)

Εκτός των παραπάνω τα σημερινά λογισμικά προσφέρουν και πολλές επιπλέον διευκολύνσεις ως προς τη μέτρηση , όπως υπολογισμό σφαλμάτων κυκλικότητας , φιλτράρισμα των μετρημένων τιμών (π.χ. Gaussian Filters), χρήση διάφορων μαθηματικών μοντέλων για κατασκευή γεωμετρικών στοιχείων από πλήθος τιμών (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, μέθοδος ελαχίστου περιγεγραμμένου κύκλου, κ.α.). Περισσότερες πληροφορίες για το λογισμικό των CMM, δίνονται στο κεφάλαιο περιγραφής του πειραματικού εξοπλισμού, καθώς αναλύεται η μέθοδος μέτρησης με χρήση ενός τέτοιου λογισμικού (PC-DMIS).

4 ΜΗΧΑΝΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ Ε.Μ.Π.

Η μηχανή CMM του εργαστηρίου ανήκει σε σειρά GLOBAL της εταιρίας DEA, που είναι μέλος του ομίλου Hexagon Metrology. Είναι η εταιρία με τις περισσότερες πωλήσεις CMM παγκοσμίως . Η DEA Global είναι μία γρήγορη και αξιόπιστη Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων, η οποία προσφέρει πρώτης τάξης ακρίβεια και ευελιξία για πολλούς διαφορετικούς τύπους μετρήσεων.

4.1. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ CMM ΣΕΙΡΑΣ GLOBAL

Η DEA Global μπορεί να πραγματοποιήσει μετρήσεις στιγμιαίας επαφής, μετρήσεις σάρωσης και μετρήσεις χωρίς επαφή (τηλεοπτικός αισθητήρας, αισθητήρας Laser) με αντίστοιχους αισθητήρες. Επίσης , είναι συμβατή είτε με σταθερή, είτε με αρθρωτή κεφαλή .

Το *σύστημα κίνησης* είναι τοποθετημένο στη βάση της μηχανής , απομακρυσμένο από τους άξονες μέτρησης . Έτσι έχουμε μείωση της μετακινούμενης μάζας, δημιουργώντας μικρότερες ανεπιθύμητες δυνάμεις κατά την κίνηση και η ελάχιστη δυνατή συναλλαγή θερμότητας από τους κινητήρες προς το πεδίο μέτρησης και τους άξονες μέτρησης.

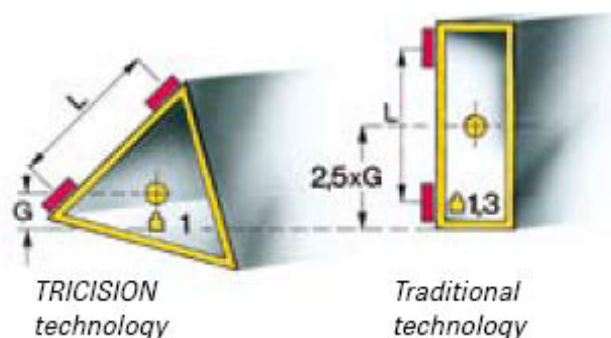
Το σύστημα FLY (μέθοδος παρεμβολής κατά τη συνεχή κίνηση και δυνατότητα υπολογισμού τρισδιάστατων διανυσμάτων), εξασφαλίζει ομαλή κίνηση, εξαλείφοντας τις επιπλέον γωνίες και τις στάσεις των αξόνων μέτρησης, πέρα από τις απαραίτητες .

Με τη συνάρτηση OBSERVER, κατά τη σάρωση προκαθορισμένου δρόμου υπάρχει ανάδραση του συστήματος ελέγχου της κίνησης , βάσει δεδομένων που δέχεται από τον αισθητήρα . Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται μικρότερος χρόνος μέτρησης και μικρότερη αβεβαιότητα, καθώς ο αισθητήρας μετρά όσο το δυνατό πιο κοντά στο τεμάχιο .

Με το σύστημα 3D-VFO (3D VECTOR FORCE OPTIMIZATION) εξασφαλίζει αντιστάθμιση σε κάθε μεταβολή δύναμης, βάρους ή απόστασης αισθητήρα σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας σταθερές και βέλτιστες συνθήκες κατά τη μέτρηση.

Οι οδηγοί των ιμάντων κίνησης είναι ενισχυμένοι με χάλυβα, ενώ η ακριβής κατασκευή τους με χρήση προφίλ ελλειπτικού οδόντος (elliptical tool profile) μειώνει τις δονήσεις της μηχανής σε υψηλές ταχύτητες σάρωσης.

Η άτρακτος ολίσθησης κατά τον X άξονα (γέφυρα), η οποία έχει τριγωνικό σχήμα, αντίθετα με το παραδοσιακό ορθογώνιο, εξασφαλίζει επιπλέον σταθερότητα και ακρίβεια κατά την κίνηση της μηχανής.



Εικόνα 4.1: Τριγωνική μορφή της ατράκτου του άξονα X,
(Hexagon Metrology, DEA 2010)

Η άτρακτος του Z άξονα κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου υψηλής σκληρότητας και σε συνδυασμό με το κατάλληλο μέγεθος του, εξασφαλίζει σταθερότητα, ακόμα και σε μετρήσεις με μεγάλου μήκους αισθητήρες κατά τον άξονα Z.

Η τράπεζα μέτρησης είναι κατασκευασμένη ενιαία από γρανίτη, δημιουργώντας σταθερότητα σε δονήσεις. Επίσης έχουν κατασκευαστεί με μεγάλη ακρίβεια υποδοχείς συνδέσεων-αρμολογίες (πίνακας με εσωτερική κοχλίωση για στηρίξεις τεμαχίων), ώστε να εξασφαλίζεται σταθερότητα κατά τη μέτρηση και δημιουργία προϋποθέσεων για μεγάλη επαναληψιμότητα.

Η υψηλής ανάλυσης κλίμακες (METALLUR), με επίσημη πιστοποίηση του συντελεστή θερμικής διαστολής τους διασφαλίζουν την υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων.

Η CMM DEA Global διαθέτει το σύστημα CLIMA, το οποίο διορθώνει τις αποκλίσεις της μηχανολογικής δομής της μηχανής, λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας, προσφέροντας έτσι δυνατότητα μέτρησης μεγάλης ακρίβειας σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος (16-26°C).

Η CMM του μετροτεχνικού εργαστηρίου Ε.Μ.Π. είναι μοντέλο Global Advantage 07.07.05. Ο ωφέλιμος όγκος μέτρησης είναι 700x700x500mm .



Εικόνα 4.2: CMM του μετροτεχνικού εργαστηρίου

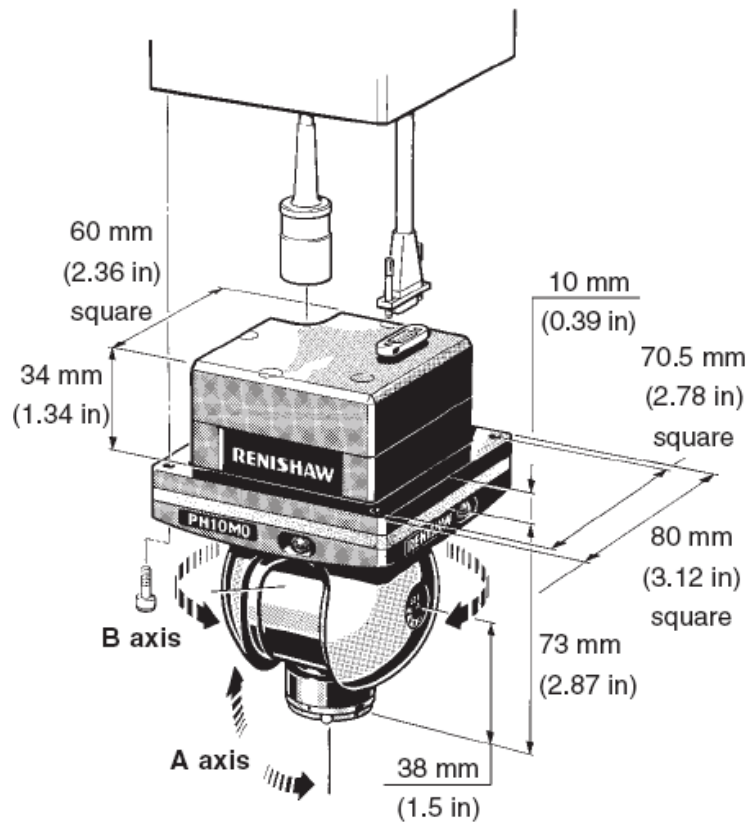
Έχει επίσημα πιστοποιηθεί το Μέγιστο Επιτρεπτό Σφάλμα (Maximum Permissible Error – MPE) της μηχανής, το οποίο είναι: $MPE = 1,50 + L/333.00 (\mu m)$. Διαθέτει ενσύρματο χειριστήριο (Jog Box) και είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο του συμπιεστή του εργαστηρίου (απαιτεί αέρα πίεσης περίπου 0,47 MPa), καθώς και με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή (μέσω του ελεγκτή) για την επεξεργασία των δεδομένων και το χειρισμό του λογισμικού που τη συνοδεύει. Επίσης τη μηχανή συνοδεύει η πρότυπη σφαίρα (της εταιρίας Spheric-trafalgar ltd) για ρύθμιση των επαφών με διακριβωμένη τιμή 15,87549 mm και απόκλιση κυκλικότητας 0,102 μm (η διακρίβωση έγινε στο EIM-2009).

4.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ RENISHAW ΤΗΣ CMM

Η Renishaw είναι η εταιρεία που δημιούργησε τον εύκαμπτο αισθητήρα στιγμιαίας επαφής, μια μεγάλη καινοτομία ως προς τη λογική βελτιστοποίησης της ποιότητας μετρήσεων με CMM. Πλέον προσφέρει μια τεράστια ποικιλία σε αισθητήρες για CMM.

■ Κεφαλή

Η κεφαλή (εικόνα 4.3) του εργαστηρίου συνδέεται απευθείας με το βραχίονα της CMM και η ακρίβεια των κατευθύνσεων -γωνιών που λαμβάνει είναι εξαιρετική, λόγω της χρήσης έξι σημείων αναφοράς, προσφέροντας έτσι μεγάλη επαναληψιμότητα. Είναι το μοντέλο PH10MQ της σειράς PH10 της Renishaw. Πρόκειται για μηχανοκίνητη αυτόματη κεφαλή με τη δυνατότητα λήψης γωνιών (720 διαφορετικές κατευθύνσεις). Στην κεφαλή PH10MQ μπορούν να προσαρμοστούν διάφοροι τύποι στελεχών και κατ' επέκταση και επαφών, έτσι ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν τόσο μετρήσεις με επαφή (στιγμιαίας ή συνεχούς), όσο και μετρήσεις χωρίς επαφή. Επίσης, με τη μέθοδο autojoint, είναι δυνατή η γρήγορη και εύκολη εναλλαγή στελεχών, χωρίς να χρειάζεται νέα ρύθμιση της μηχανής.

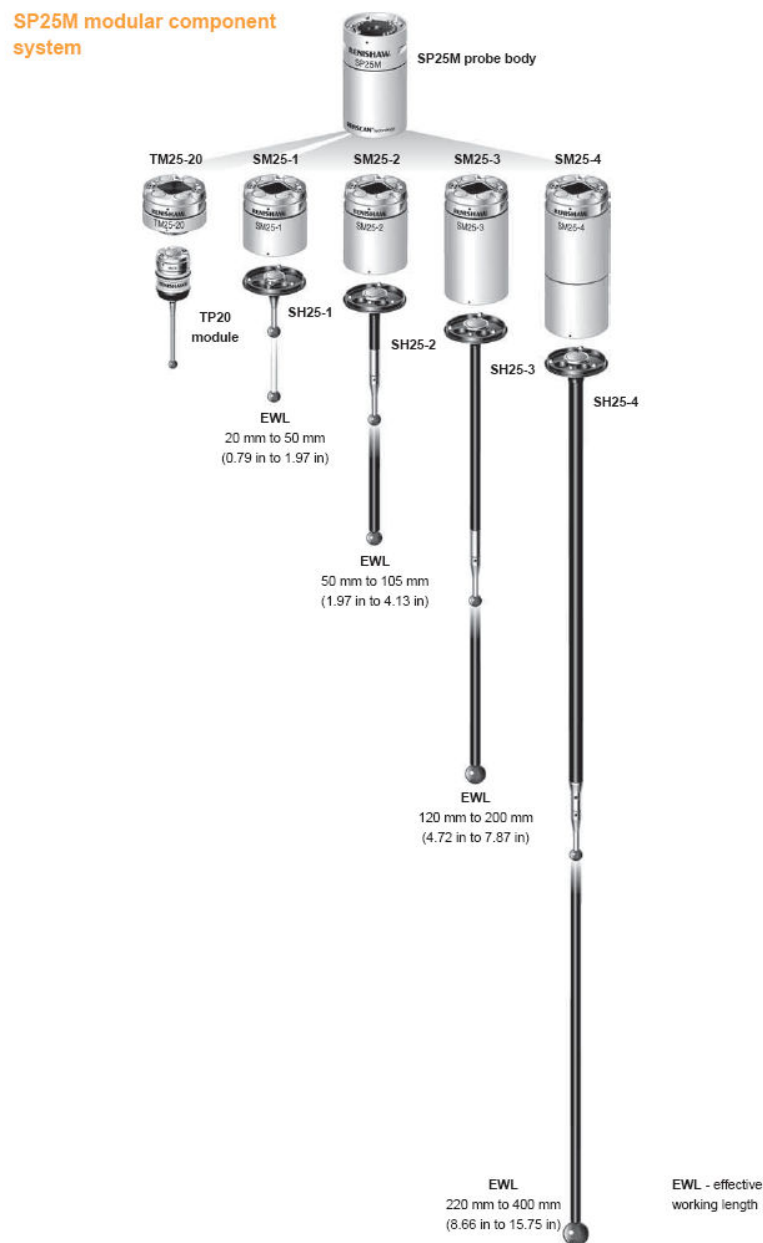


Εικόνα 4.3: Κεφαλή PH10MQ με κατασκευαστικά στοιχεία (Renishaw,2003)

■ Σώμα

✓ Στέλεχος

Το **στέλεχος** (εικόνα 4.4), μοντέλο SP25M, προσφέρει σταθερότητα, αλλά και μεγάλο εύρος επιλογών ως προς τη μέτρηση, καθώς πάνω του μπορούν να προσαρμοστούν τόσο επαφείς σάρωσης, όσο και επαφείς στιγμιαίας επαφής. Η διάμετρός του είναι 25 mm και το μήκος του 45,55 mm. Δέχεται προεκτάσεις έως και 100 mm, ενώ διατηρεί τη μεγάλη ακρίβεια του, ακόμα και με στυλίσκους μήκους έως 400 mm.



Εικόνα 4.4: Στέλεχος με τα πιθανά προσαρτήματα, συνδέσμους και επαφείς (RENISHAW, 2010)

✓ Προσαρτήματα-Σύνδεσμοι στήριξης επαφών

Το εργαστήριο διαθέτει τα προσαρτήματα SM25-1, SM25-2 και SM25-3, τα οποία δέχονται τους συνδέσμους SH25-1, SH25-2 και SH25-3 αντίστοιχα. Τα παραπάνω προσφέρουν δυνατότητα τόσο σάρωσης, όσο και μετρήσεις στιγμιαίας επαφής.

Η διαφορά τους αφορά στο μήκος τους, καθώς και το μέγιστο μήκος στυλίσκου που υποστηρίζουν, ώστε να διατηρείται η ακρίβεια της μέτρησης, όπως φαίνεται στον παρακάτω (πίνακα 4.5) .







ΤΥΠΟΣ ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΑ- ΤΟΣ	ΜΗΚΟΣ(mm)	ΕΥΡΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΥΠΟΣ- ΤΗΡΙΖΟΜΕΝΟΥ ΣΤΥ- ΛΙΣΚΟΥ(mm)
SM25-1	26,25	20-50
SM25-2	33,85	20-100
SM25-3	48,05	20-200

Πίνακα 4.5: Διάφοροι τύποι προσαρτημάτων αισθητήρων του
Μετροτεχνικού εργαστηρίου

Σε κάθε προσάρτημα συγκρατείται ο αντίστοιχος σύνδεσμος, ο οποίος μπορεί πολύ εύκολα με μία κίνηση να αφαιρεθεί, ώστε να αλλαχθεί ο επαφάς και στην συνέχεια να προσαρτηθεί και πάλι.

■ Επαφάς

Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο διαθέτει την κασετίνα A-5003-6151 της Renishaw, με επαφείς τύπου M3 κατάλληλους για τύπο σώματος SM25M/SM25-1/SH25-1 . Η κασετίνα περιλαμβάνει έξι στυλίσκους με σφαιρικούς επαφείς και ένα εργαλείο για αλλαγή και σφίξιμο του στυλίσκου (μαζί με τον επαφάς) στο σύνδεσμο συγκράτησης . Τα τεχνικά χαρακτηριστικά βρίσκονται στον παρακάτω (πίνακα 4.6).

ΣΤΥΛΙΣΚΟΙ-ΕΠΑΦΕΙΣ ΚΑΣΕΤΙΝΑΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΕΠΑΦΕΑ (mm)	ΜΗΚΟΣ ΣΤΥΛΙΣΚΟΥ (mm)	ΥΛΙΚΟ ΣΦΑΙΡΑΣ
1 	3	21	Synthetic ruby
2 	4	21	Synthetic ruby
3 	4	21	Silicon ni- tride
4 	4	31	Synthetic ruby
5 	4	40	Synthetic ruby
6 	5	50	Synthetic ruby

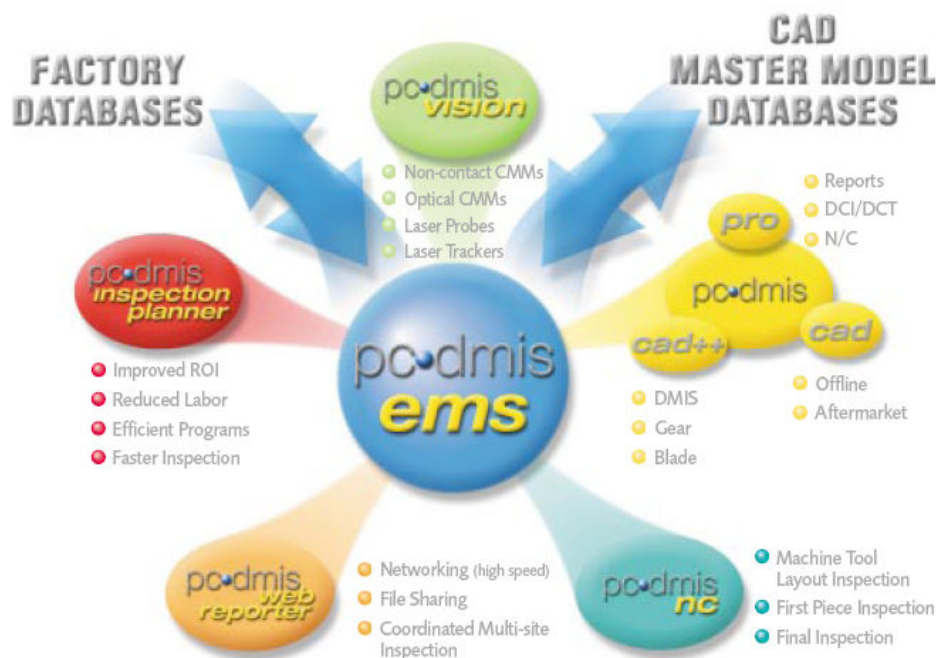
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά των στυλίσκων και των επαφών της κασετίνας του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου

Το συνθετικό ρουμπίνι (synthetic ruby), είναι το πιο συνηθισμένο υλικό για κατασκευή σφαιρικών επαφών. Είναι κατά 99% καθαρό οξείδιο του αλουμινίου και μετά την επεξεργασία της η σφαίρα είναι εξαιρετικά λεία, με μεγάλη αντοχή στη συμπίεση και στη μηχανική διάβρωση. Οι σφαίρες από νιτρίδιο σιλικόνης (silicon nitride) χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις σάρωσης σε τεμάχια από αλουμίνιο, λόγω της εμφάνισης του φαινομένου της συγκόλλησής αλουμινίου από την επιφάνεια του τεμαχίου στη σφαίρα (φαινόμενο adhesive wear).

4.3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PC-DMIS

Το λογισμικό μέτρησης με CMM και επεξεργασίας δεδομένων, PC-DMIS, είναι ίσως το περισσότερο χρησιμοποιούμενο και παγκοσμίως αναγνωρίσιμο λογισμικό για CMM. Πρόκειται για ένα DCC λογισμικό, το οποίο προσφέρει και τη δυνατότητα της χειροκίνητης μέτρησης. Το συγκεκριμένο λογισμικό ήταν το πρώτο που εισήγαγε πολύ χρήσιμες καινοτομίες, όπως η χρησιμοποίηση μοντέλων CAD στον έλεγχο ποιότητας, η απευθείας σύνδεση συστημάτων CAD με το λογισμικό μέτρησης, η δημιουργία ολοκληρωμένου συστήματος ρουτινών μέτρησης εξαρτημάτων για την αυτοκινητοβιομηχανία, κ.α .

Το λογισμικό υπάρχει στη γενική του έκδοση, αλλά και σε ειδικότερες εκδόσεις, καθεμιά από τις οποίες εστιάζει στα αντικείμενα που πρόκειται να μετρηθούν με CMM, καθώς και στην απαιτούμενη επεξεργασία τους (π.χ. PC-DMIS Gear, PC-DMIS Tool, PC-DMIS Planner κ.α.).



Εικόνα 4.7: Διαφοροποιήσεις του λογισμικού PC-DMIS ανάλογα με την εφαρμογή
(Brown and Sharpe, 2003)

Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο χρησιμοποιεί το PC-DMIS CAD++ 4.1. Το περιβάλλον του λογισμικού είναι φιλικό προς το χρήστη, ενώ η εξοικείωση με το πρόγραμμα είναι αρκετά εύκολη. Προσφέρει πολλές αυτοματοποιημένες λειτουργίες, όπως σάρωση ανοιχτού ή κλειστού βρόχου, ή σάρωση κύκλου, όπου ο χρήστης καταχωρεί μόνο τις απαραίτητες επιθυμητές παραμέτρους για τη μέτρηση, ενώ κάθε κίνηση του αισθητήρα της CMM αποτυπώνεται στο παράθυρο γραφικών (Graphics Display Window). Επίσης, κατά την επεξεργασία των μετρήσεων προσφέρει πολλά χρήσιμα εργαλεία, όπως η αντιστοίχιση νέφων σημείων σε γεωμετρικό σχήμα, με επιλογή μεθόδου αντιστοίχισης και δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων, ο άμεσος υπολογισμός διαστάσεων και σφαλμάτων μορφής και η εξαγωγή αποτελεσμάτων τόσο σε μορφή αναφοράς, όσο και σε γραφική μορφή.

Συνοψίζοντας, το λογισμικό PC-DMIS είναι σε θέση να προσφέρει εύκολο και γρήγορο καθορισμό της διαδικασίας μέτρησης (για απλές εφαρμογές μετρήσεων), όσο και πλήρη παραμετροποίηση της διαδικασίας και των παραγόντων της μέτρησης, για χρήση σε πολύπλοκα εξαρτήματα ή σε ερευνητικά προγράμματα.

4.4. ΥΠΟΛΟΙΠΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

■ Ελεγκτής

Χρησιμοποιείται ο ελεγκτής (εικόνα 4.8) της DEA που συνοδεύει τη CMM. Σε αυτόν είναι συνδεδεμένο το χειριστήριο της CMM. Επίσης χρησιμοποιείται ο ελεγκτής κεφαλής PHC 10-2 της Renishaw. Το σύστημα του ελεγκτή συμπληρώνει η διασυνδεδετική διάταξη αισθητήρα (probe interface) PI 200 της Renishaw, η οποία συνδέεται με την AC3 κάρτα του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

■ Ηλεκτρονικός υπολογιστής

Είναι επιτραπέζιος ηλεκτρονικός υπολογιστής που έχει εγκατεστημένο το λογισμικό PC-DMIS, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε δίκτυο με τη μηχανή CMM, αλλά και συνδεδεμένος στο server του εργαστηρίου, για γρήγορη αποστολή των δεδομένων και για αναζήτηση πιθανών στοιχείων στο Internet.



Εικόνα 4.8: Ο ελεγκτής κεφαλής της CMM του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου

■ Εργαλεία στήριξης

Πρόκειται για διάφορα εργαλεία σταθερής στήριξης των τεμαχίων πάνω στο γρανιτένιο πίδακα της CMM (εικόνα 4.9). Επειδή ανάλογα με το μετρούμενο τεμάχιο διαφέρει και ο βέλτιστος τρόπος στήριξης, υπάρχουν διάφοροι τύποι στηρίξεων (ελάσματα συγκράτησης, στηρίγματα-μαγνήτες, απλές βιδωτές προεξοχές από σκληρό πλαστικό, κ.α.).

■ Ahlborn Almemo

Πρόκειται για συσκευή ακριβείας μέτρησης επιφανειακής θερμοκρασίας με τρία κανάλια εισόδου και δυνατότητα διαφόρων λειτουργιών, όπως μέτρηση αποκλίσεων θερμοκρασίας, εξαγωγή μέσου όρου θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα ή ορισμένες τιμές, σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή και με συγκεκριμένα λογισμικά μετρητικών μηχανών για τροφοδότησή τους με τις τιμές θερμοκρασίας του δοκιμίου ή της τράπεζας μέτρησης, κ.α.. Στη CMM χρησιμοποιείται για μέτρηση θερμοκρασίας του δοκιμίου, ώστε να ελέγχονται οι μεταβολές της και να συσχετίζεται με τα αποτελέσματα .



Εικόνα 4.9: Βαλιτσάκι με το συνοδευτικό εξοπλισμό της CMM



Εικόνα 4.10: Ahlborn Almemo που διαθέτει το Μετροτεχνικό Εργαστήριο

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ Ε.Μ.Π.

5.1. ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο (ΜΕ) αποτελεί οργανωτική μονάδα του ΕΜΠ από το 1962 οπότε και ιδρύθηκε. Αρχικά εγκαταστάθηκε στα Κτίρια του ΕΜΠ στην Πατησίων, ενώ το 1997 μετεγκαταστάθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο αποτελεί επί σειρά ετών το σύνδεσμο μεταξύ της ακαδημαϊκής διδασκαλίας και της πρακτικής εφαρμογής των όσων διδάσκονται στα Μαθήματα του Κύκλου Σποδών του Μηχανικού Παραγωγής της Σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Παράλληλα, το Μετροτεχνικό Εργαστήριο δραστηριοποιήθηκε από την ίδρυσή του στην διεξαγωγή ερευνητικού έργου και στην παροχή υπηρεσιών σε επιχειρήσεις και οργανισμούς του ιδιωτικού και του δημοσίου τομέα .

Το Μετροτεχνικό Εργαστήριο έχει πολύχρονη παρουσία στον χώρο των μετρήσεων ακριβείας και μεγάλο ερευνητικό έργο. Το 2007 η υποδομή του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου ενισχύθηκε σημαντικά με την κατασκευή αίθουσας ελεγχόμενων συνθηκών. Το εργαστήριο διαπιστεύθηκε κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005 και μπορεί να παρέχει υπηρεσίες δοκιμών στην βιομηχανία . Έτσι προσφέρονται στην ελληνική βιομηχανία υπηρεσίες ελέγχου ποιότητας του εργαστηρίου , με τον έλεγχο του συνόλου των διαστατικών και γεωμετρικών ανοχών, σε κάθε τύπο και μορφή βιομηχανικών και μηχανουργικών προϊόντων. Με την διαπίστευση το ΜΕ φιλοδοξεί να αποτελέσει κομβικό σημείο υποστήριξης των επιχειρήσεων που επιθυμούν να πιστοποιούν τα συστήματα ποιότητας που εφαρμόζουν κατά τα πρότυπα της σειράς ISO 9000.

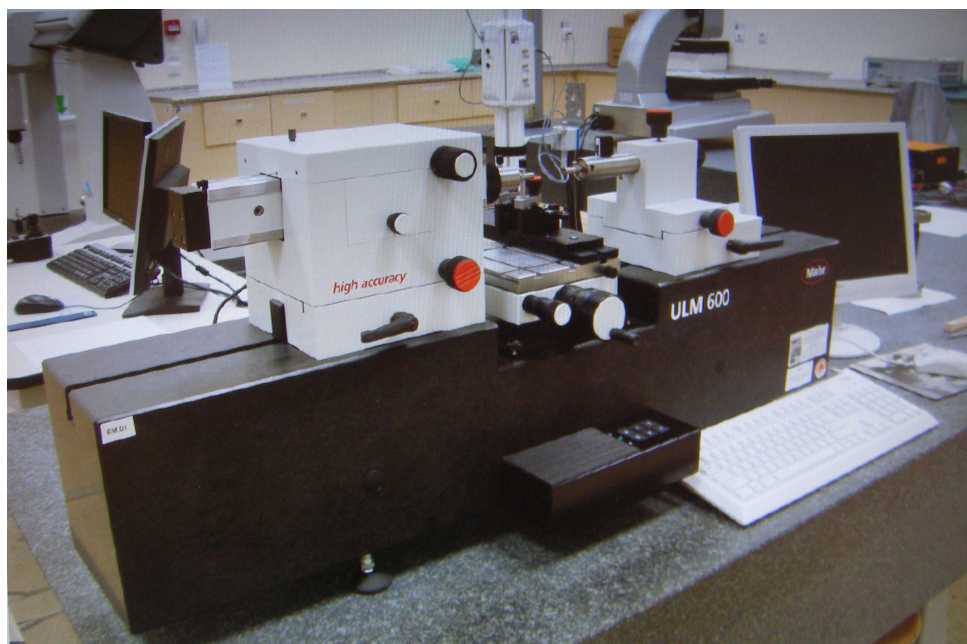
5.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ

Το εργαστήριο παρέχει: Μετρήσεις εξωτερικών διαστάσεων $0 \div 600$ mm, Μετρήσεις εσωτερικών διαστάσεων $0,5 \div 450$ mm, Μετρήσεις εσωτερικών και εξωτερικών σπειρωμάτων σύμφωνα με το ISO 286, Μετρήσεις ελεγκτήρων αξόνων, Μετρήσεις ελεγκτήρων

τρυμμάτων, Μετρήσεις ελεγκτήρων σπειρωμάτων σύμφωνα με ANSI/ASME B1.2, BS 84, BS 919, DIN 13, ISO 228-1, DIN 40431.

Στην αίθουσα ελεγχόμενων συνθηκών, υπάρχουν οι παρακάτω συσκευές μέτρησης :

1. Μετρητική μηχανή τύπου Universal Μεγάλης Ακρίβειας (Mahr ULM OPAL 600), με Απόλυτη μέτρηση (absolute measurement) (0-100) mm, Συγκριτική μέτρηση (differential measurement) (100-640) mm (εικόνα 5.1).

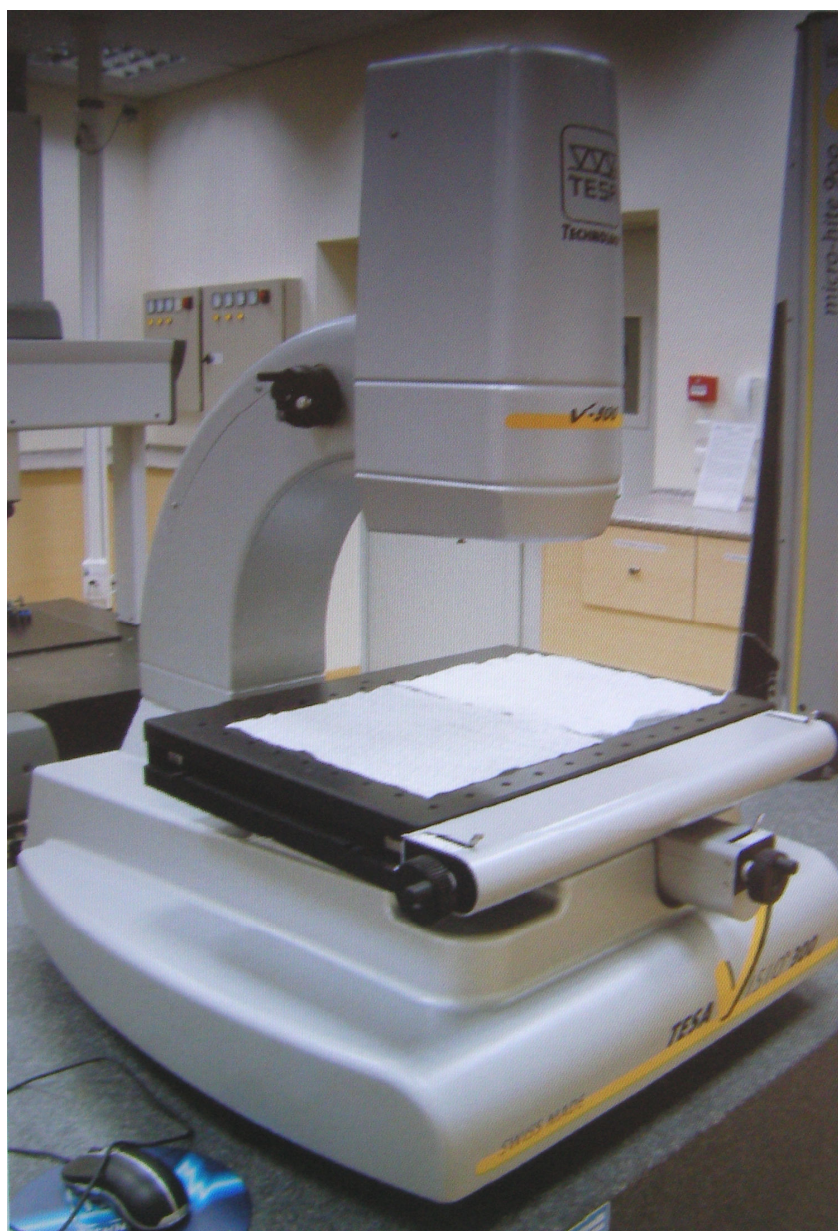


Εικόνα 5.1: Μηχανή Mahr ULM OPAL 600 του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου

2. Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων (εικόνα 5.2) DEA Global Advantage.
3. TESA UPC Gage Block Comparator.
4. TESA-Hite 600 (0-600) mm measuring range, 0.020 mm accuracy.
5. TESA VISIO 300 vision (εικόνα 5.3) μετρητικό σύστημα (300x200) mm (X-Y), 150 mm (Z).



Εικόνα 5.2: Μηχανή CMM DEA Global Advantage του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου



Εικόνα 5.3: Μηχανή TESA VISIO 300 του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου

5.3. ΧΩΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η Αίθουσα Ελεγχόμενων Συνθηκών κατασκευάστηκε σύμφωνα με Γερμανική Προδιαγραφή για χώρους μετρήσεων VDI/VDE 2627 Blatt 1, που είναι η μοναδική προδιαγραφή για χώρους μετρήσεων στον κόσμο. Ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί στον έλεγχο των δύο βασικότερων περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τις διαστατικές μετρήσεις: τη θερμοκρασία και τις ταλαντώσεις, ενώ οι απαιτούμενες συνθήκες που προέκυψαν είναι:

- **Σταθερή θερμοκρασία** ρυθμίζεται από αυτόματο σύστημα κλιματισμού (εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Μηχάνημα κλιματισμού βρίσκεται σε ειδικό χώρο έξω από την αίθουσα ελεγχόμενων συνθηκών

Η θερμοκρασία διατηρείται στους 20 °C με όριο δυνατών αποκλίσεων $\pm 0,5$ °C . Η εισαγωγή και εξαγωγή θερμού ή ψυχρού αέρα γίνεται από το δάπεδο και την οροφή με πολύ μικρή ταχύτητα για την αποφυγή στροβιλισμών που συνεπάγεται την ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο. Ακριβή θερμομέτρα έχουν τοποθετηθεί σε διάφορα σημεία του χώρου μετρήσεων για έλεγχο του αυτόματου συστήματος ρύθμισης της θερμοκρασίας. Υπάρχει προθάλαμος εισόδου με σύστημα air lock στην αίθουσα, με σκοπό την διατήρηση των ελεγχόμενων συνθηκών μετρήσεων. Οι τοίχοι, τα δάπεδα και η οροφή είναι κατάλληλα θερμομονωμένοι για αποφυγή μετάδοσης θερμότητας. Επίσης έχουν λευκό χρώμα , με αυτόν τον τρόπο το πλήθος των φωτεινών πηγών και η συναρτήσει αυτών αύξηση θερμότητας περιορίζεται στο ελάχιστο. Υπάρχει έμμεσος φωτισμός στην αίθουσα , μέσω κατόπτρων.

■ **Έλεγχος υγρασίας αέρα** γίνεται μέσω κλιματιστικής μονάδας , με δυνατότητα ρύθμισης επιπέδου υγρασίας στα επιθυμητά . Αν η σχέση υγρασίας αέρος υπερβαίνει το $50 \pm 2\%$ τότε τα μηχανήματα θα διαβρωθούν. Επίσης μεταβολές της υγρασίας αέρος μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές του όγκου και των ιδιοτήτων των αντικειμένων μέτρησης (π.χ. από πλαστική ύλη).

■ **Φιλτράρισμα αέρα** πραγματοποιείται από το σύστημα κλιματισμού που έχει ενσωματωμένα φίλτρα καθαρισμού ώστε να αφαιρείται η σκόνη. Ακόμα στην είσοδο έχει τοποθετηθεί αντιστατικό πατάκι, έτσι ώστε να μη εισέρχεται πρόσθετη σκόνη με την είσοδο των ερευνητών, ενώ τηρείται συχνός καθαρισμός των τεμαχίων και των προτύπων από τους ερευνητές.

■ **Απαλλαγή από ταλαντώσεις** πετυχαίνεται με τοποθέτηση αντικραδασμικού δαπέδου 4x4 m (εικόνα 5.5), το οποίο είναι ανεξάρτητο από το υπόλοιπο κτίριο και έχει βάση μεγάλης μάζας. Πάνω στο αντικραδασμικό δάπεδο τοποθετήθηκαν πάγκοι από γρανίτη διαστάσεων (3x1x0,3) m, πάνω στους οποίους τοποθετήθηκαν οι συσκευές μέτρησης, για πρόσθετη σταθερότητα . Περιμετρικά του αντικραδασμικού δαπέδου υπάρχει διάδρομος, ώστε να εξασφαλίζεται η άνετη εργασία των ερευνητών, χωρίς να δημιουργούνται επιπλέον δονήσεις στις συσκευές. Ενώ υπάρχουν επιπλέον πάγκοι με αρκετό ύψος, έτσι ώστε μπορεί κανείς να δουλέψει άνετα . Χώρος κάτω από τους πάγκους χρησιμοποιείται ως

αποθηκευτικός χώρος για τα εξαρτήματα των συσκευών, τα πρότυπα και τα προς μέτρηση τεμάχια.



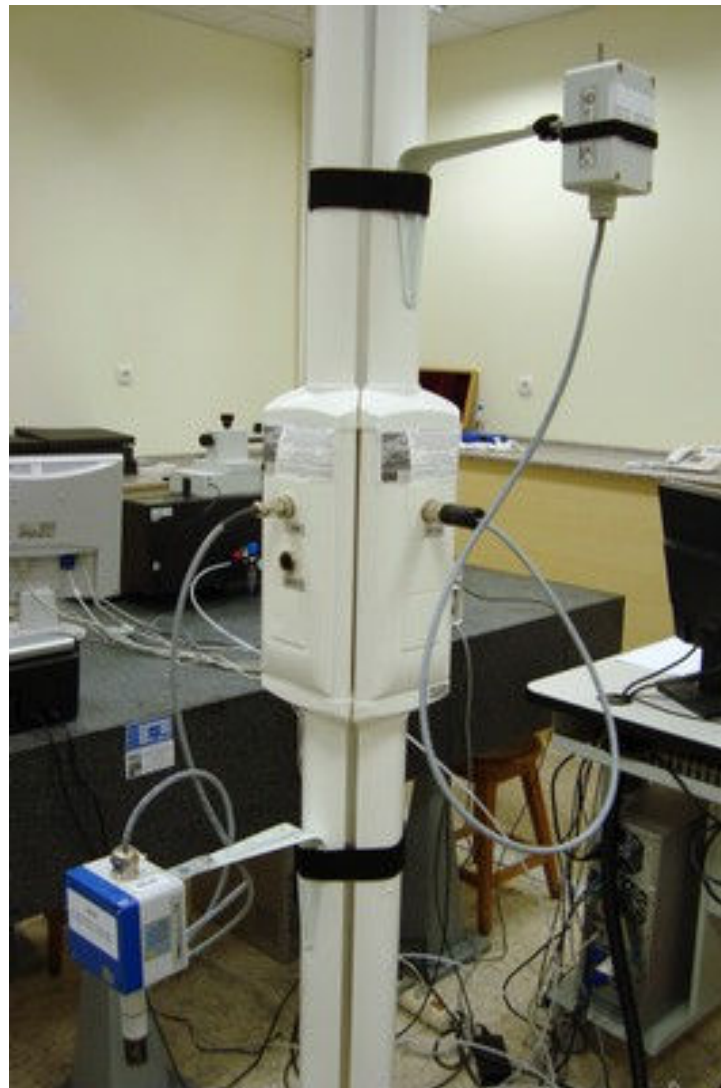
Εικόνα 5.5: Η αίθουσα ελεγχόμενων συνθηκών

■ **Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων** το οποίο δέχεται πληροφορίες από μία σειρά αισθητήρων κατάλληλα τοποθετημένων στο χώρο. Οι αισθητήρες αυτοί περιλαμβάνουν :

- ✓ Τρία επιταχυνσιόμετρα μεγάλης ευαισθησίας, τοποθετημένα επί της πλάκας εφαρμογής, ένα σε κάθε μία από τις τρεις διαστάσεις, για τον έλεγχο των ταλαντώσεων.
- ✓ Δέκα θερμόμετρα ακριβείας τύπου θερμοαντίστασης, τοποθετημένα κοντά στο πάτωμα και στην οροφή του θαλάμου, για τον έλεγχο της κατανομής της θερμοκρασίας στο χώρο και την οδήγηση του συστήματος κλιματισμού.
- ✓ Ένα σύστημα θερμομέτρου μεγάλης ακρίβειας τύπου θερμοαντίστασης, τοποθετημένα στο κέντρο του χώρου, για τον έλεγχο και την οδήγηση του συστήματος κλιματισμού και το μηδενισμό (ρύθμιση) των λοιπών αισθητήρων θερμοκρασίας χώρου.
- ✓ Ένα αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας του εισερχόμενου αέρα .

- ✓ Έναν αισθητήρα ατμοσφαιρικής σχετικής υγρασίας.
- ✓ Έναν αισθητήρα ατμοσφαιρικής πίεσης.

Το σύστημα καταγραφής δεδομένων είναι παράλληλης και υψηλού ρυθμού καταγραφής και συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή (τύπου server), ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση και η επεξεργασία των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 5.6: Κεντρική στήλη αισθητήρων. Υπάρχουν και άλλες στήλες με αισθητήρες περιμετρικά του χώρου.



Εικόνα 5.7: Σύστημα συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων (data logger) του ΜΕ

Τέλος , υπάρχει δίκτυο τροφοδοσίας πεπιεσμένου αέρα για τη σωστή λειτουργία των μηχανών. Αεροσυμπιεστής (εικόνα 5.8) βρίσκεται αρκετά μακριά από την αίθουσα ελεγχόμενων συνθηκών, έτσι αποφεύγονται ταλαντώσεις και θόρυβος (αεροσυμπιεστής παράγει στάθμη θορύβου πάνω από 65 dB). Επίσης οι πρωτοποριακοί αεροσυμπιεστές της Atlas Copco έχουν σχεδιαστή για την παροχή με οικονομικό τρόπο της υψηλότερης δυνατής ποιότητας αέρα και την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων ποιότητας σε εφαρμογές, όπου δεν είναι αποδεκτό το παραμικρό ίχνος λαδιού.



Εικόνα 5.8: Αεροσυμπιεστής με δίκτυο τροφοδοσίας πεπιεσμένου αέρα του ΜΕ

6 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Η λειτουργία της CMM δίνει τη δυνατότητα , μέσω και του λογισμικού της , για γρήγορο και σχετικά απλό ως διαδικασία υπολογισμό διαμέτρου τεμαχίων. Ανάλογα με τον τρόπο αισθητήρα που χρησιμοποιείται, καθορίζεται και ο τρόπος μέτρησης.

□ **Μέτρηση με αισθητήρα στιγμιαίας επαφής (touch trigger probe)** απαιτεί λήψη πολλών σημείων στην περίμετρο του κύκλου που μετρείται, είτε χειροκίνητα με χρήση Jog Box, είτε αυτόματα μέσω αλγορίθμου που δημιουργείται στο λογισμικό της CMM. Τα σημεία πρέπει να είναι όσο το δυνατό ισοκατανεμημένα σε όλο τον κύκλο. Είναι προφανές, ότι όσο περισσότερα σημεία ληφθούν, τόσο περισσότερη αξιοπιστία θα έχει το αποτέλεσμα . Η ανάγκη για λήψη μεγάλου αριθμού σημείων, καθιστά τη διαδικασία υπολογισμού διαμέτρου αρκετά χρονοβόρα . Εφόσον ληφθούν τα σημεία , στη συνέχεια με χρήση λογισμικού γίνεται η επεξεργασία τους, δηλαδή δημιουργείται ο κύκλος και υπολογίζεται διάμετρος.

□ **Μέτρηση με αισθητήρα συνεχούς επαφής** προσφέρει πολύ μεγάλο πλεονέκτημα έναντι των αισθητήρα στιγμιαίας επαφής. Για αυτό στην πειραματική διαδικασία της εργασίας χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας σάρωσης (scan probe).

Αφού καθοριστεί το επίπεδο της μέτρησης και το κέντρο του κύκλου, επιλέγεται ο αλγόριθμος που διαθέτει το λογισμικό για μέτρηση κυκλικών διατομών και καθορίζονται οι μεταβλητές της μέτρησης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σάρωση της διατομής. Η σάρωση εξάγει ως αποτέλεσμα διακριτά σημεία , με μεγάλη πυκνότητα και πλήρως ισοκατανεμημένα . Οι συντεταγμένες των σημείων δίνονται ως προς το κέντρο του κύκλου, το οποίο πρέπει να έχει καθοριστεί με ακρίβεια . Στη συνέχεια με χρήση του λογισμικού γίνεται προσαρμογή κύκλου στα σημεία, ενώ υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων στις μετρήσεις, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα του αποτελέσματος και να γίνει εστίαση στο φαινόμενο που ενδιαφέρει, συγκεκριμένα η διάμετρος. Το λογισμικό υπολογίζει τη διάμετρο,

ενώ εξάγει και σχηματικό αποτέλεσμα-απεικόνιση των αποκλίσεων για παρατήρηση και εντοπισμό των σημείων του τεμαχίου που παράγουν τις αποκλίσεις.

CMM και το λογισμικό της, δίνει στον χειριστή τη δυνατότητα να επέμβει και να διαφοροποιήσει αρκετούς παράγοντες που συμβάλλουν στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Παρακάτω αναλύονται οι βασικότεροι, αφού διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, τους:

1. Παράγοντες-μεταβλητές που επηρεάζουν την ίδια τη μέτρηση .
2. Παράγοντες-μεταβλητές που επηρεάζουν την επεξεργασία των στοιχείων της μέτρησης.

Και οι δύο κατηγορίες μπορούν να συμβάλλουν στο αποτέλεσμα της μέτρησης, αλλά και στην αξιοπιστία του αποτελέσματος. Η ανάλυση εστιάζει στη μέτρηση της διαμέτρου.

6.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΝΟΥΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Στην εξέταση των τιμών των παραμέτρων που εξάγουν το βέλτιστο αποτέλεσμα σε μια διαδικασία μέτρησης, «πρώτα κατηγοριοποιούνται οι παράμετροι σε τρεις κατηγορίες: τους μη ρυθμίσιμους παράγοντες, τους παράγοντες περιορισμένου εύρους ρύθμισης και τους μεταβλητούς παράγοντες.» (Schmitt & Nisch,2009)

■ **Μη ρυθμίσιμοι παράγοντες (Non-adjustable parameters)** καθορίζονται κατά την κατασκευή της CMM και ο χρήστης δεν μπορεί να επέμβει σε αυτούς, θα πρέπει όμως να εξετάζεται η επίδρασή τους στο αποτέλεσμα . Τέτοιοι παράγοντες είναι η ακρίβεια των κλιμάκων μέτρησης, ο μέγιστος αριθμός λαμβανόμενων σημείων ανά δευτερόλεπτο, κάποια κινηματικά χαρακτηριστικά της μηχανής, κ.α .

■ **Παράγοντες περιορισμένου εύρους ρύθμισης (Limited adjustable parameters)** μπορούν να λάβουν λίγες διαφορετικές τιμές ή και μόνο μία τιμή, και συνήθως ο καθορισμός τους προηγείται στη διαδικασία μέτρησης του καθορισμού των μεταβλητών παραγόντων. Π.χ. ο τύπος του αισθητήρα μέτρησης, η κατεύθυνση της μέτρησης, κ.α .

■ **Μεταβλητοί παράγοντες (Variable parameters)** έχουν σχετικά μεγάλο εύρος διαφορετικών τιμών, οι οποίες καθορίζονται από το χρήστη. Παραδείγματα αποτελούν ο αριθμός ληφθέντων σημείων, η ταχύτητα της μέτρησης, η δύναμη μέτρησης, κ.α. Η διερεύνηση ως προς τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ουσιαστικά αφορά στην επιλογή των βέλτιστων τιμών για τους παράγοντες περιορισμένου εύρους ρύθμισης και τους μεταβλητούς παράγοντες. Μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και ανάλογα με την τιμή του καθενός, υπάρχουν συσχετίσεις, κάποιες από τις οποίες είναι ισχυρές.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικότεροι παράγοντες (μεταβλητοί και περιορισμένου εύρους ρύθμισης) που μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα και την ποιότητα μέτρησης. Τους διαχωρίζουμε σε δύο κατηγορίες:

1. Παράγοντες-μεταβλητές που επηρεάζουν την ίδια την μέτρηση.
2. Παράγοντες-μεταβλητές που επηρεάζουν την επεξεργασία των στοιχείων μέτρησης.

6.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της μέτρησης

6.2.1.1. Πυκνότητα σημείων μέτρησης

Η πυκνότητα των σημείων μέτρησης (points density), αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον υπολογισμό αποκλίσεων μορφής. Όσο περισσότερα σημεία μετριοούνται σε ένα τεμάχιο, τόσο πιο αξιόπιστη είναι η προσαρμογή, τόσο του κύκλου αναφοράς, όσο και ο υπολογισμός των αποκλίσεων μορφής, καθώς με τη μέτρηση περισσότερων σημείων το αποτέλεσμα πλησιάζει περισσότερο στην πραγματική μορφή του τεμαχίου.

Η επιλογή της πυκνότητας σημείων μέτρησης συσχετίζεται και με άλλες μεταβλητές για την επεξεργασία των μετρήσεων, όπως η μέθοδος προσαρμογής του κύκλου αναφοράς, αλλά και η εφαρμογή φίλτρου αποκοπής συχνοτήτων. Η αξιοπιστία της πρώτης επηρεάζεται σαφώς από τον αριθμό των σημείων (ακτίνα κύκλου, κέντρο κύκλου).

Ο μεγαλύτερος αριθμός σημείων είναι πιθανόν να σημαίνει πιο χρονοβόρα διαδικασία, άρα πιο μεγάλο κόστος. Επομένως ο αριθμός σημείων μέτρησης πρέπει να ελαχιστοποιείται, όμως πληρώνοντας τις προϋποθέσεις για αξιόπιστη μέτρηση και επεξεργασία .

Στον πίνακα δίνεται ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός σημείων σε συνάρτηση με το φίλτρο που πρόκειται να εφαρμοστεί.

Filter transmitting from 1 UPR to	Minimum number of sample points
15	105
50	350
150	1050
1500	10500

Πίνακας 6.1: Ελάχιστος αριθμός απαιτούμενων σημείων μέτρησης , σε συνάρτηση με το φίλτρο και αντίστοιχο UPR (Marxer & Keferstein,2007)

6.2.1.2. Διάμετρος κεφαλής επαφής

Η διάμετρος κεφαλής του αισθητήρα μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της μέτρησης. Σύμφωνα με τα πρότυπα, το ιδανικό σύστημα μέτρησης γεωμετρικών αποκλίσεων είναι: η σφαιρική κεφαλή επαφής με διάμετρο 0,5 mm και δύναμη μέτρησης 0 N.

Όσο μικρότερη διάμετρο έχει η κεφαλή επαφής , τόσο πλησιάζουν οι μετρήσεις στην πραγματική μορφή του τεμαχίου. Επειδή κεφαλή μικρής διαμέτρου εισχωρεί σε μικρότερες εσοχές, αποτυπώνοντας καλύτερα τις μεγαλύτερης τάξης γεωμετρικές αποκλίσεις του τεμαχίου. Όμως η χρήση μικρής διαμέτρου έχει και μειονεκτήματα . Με τη χρήση μικρής διαμέτρου, είναι δυνατό να «βρίσκει» ο στυλίσκος στο τεμάχιο, με αποτέλεσμα την αλλοίωση της μέτρησης και τη φθορά του στυλίσκου. Μικρή διάμετρος κεφαλής επαφής απαιτεί πιο λεπτό στυλίσκο. Έτσι διευρύνεται το σφάλμα μέτρησης, καθώς προκαλούνται πολύ περισσότερες ταλαντώσεις στον εύκαμπο στυλίσκο, όταν η κεφαλή εισχωρεί συνεχώς σε εσοχές διαφορετικού βάθους. Το φαινόμενο αυτό μεγιστοποιείται όταν χρησι-

μποιείται μεγάλη ταχύτητα σάρωσης, οπότε καλό να είναι να αποφεύγεται η χρήση και των δύο παραμέτρων ταυτόχρονα .

Από την άλλη, με χρήση κεφαλών μεγαλύτερων διαμέτρων δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μικρών αποκλίσεων που συμβάλλουν κυρίως στην τραχύτητα της επιφάνειας. Όμως η χρήση τους προσφέρει το πλεονέκτημα της πρόληψης έναντι της φθοράς του στυλίσκου και μεγαλύτερη ταχύτητα σάρωσης.

Μέγεθος κεφαλής μπορεί να συσχετιστεί και με άλλες παραμέτρους, όπως ο αριθμός κυματισμών ανά περιστροφή (undulations per rotation-UPR), ή η διάμετρος του εξεταζόμενου τεμαχίου. Στον (πίνακα 6.2) δίνεται επιλογή της ακτίνας της κεφαλής επαφής, σε συνάρτηση με τη διάμετρο του τεμαχίου.

$D < 0.4 \text{ mm}$	$R \leq d/3$
$0.4 \text{ mm} \leq D < 1.3 \text{ mm}$	0.15 mm
$1.3 \text{ mm} \leq D < 4.0 \text{ mm}$	0.5 mm
$4 \text{ mm} \leq D$	1.5 mm

Πίνακας 6.2: Επιλογή της κεφαλής επαφής, σε συνάρτηση με τη διάμετρο τεμαχίου (Marxer & Keferstein,2007)

Τέλος η επιλογή της διαμέτρου πρέπει να γίνεται, αφού πρώτα καθοριστεί ο στόχος της μέτρησης, το φαινόμενο στο οποίο θέλει να εστιάσει, η ακρίβεια του μηχανήματος και η δυνατότητα επεξεργασίας των τιμών. Για μετρήσεις ως προς την τραχύτητα, επιβάλλεται η χρήση κεφαλών πολύ μικρής διαμέτρου. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται σχετικά μικρή διάμετρος κεφαλής, αν δεν είναι επιθυμητό το μηχανικό φιλτράρισμα. Για παρατηρήσεις ως προς την κυμάτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν κεφαλές μεγαλύτερης διαμέτρου.

6.2.1.3. Ταχύτητα σάρωσης αισθητήρα

















Η ταχύτητα σάρωσης του αισθητήρα επηρεάζει το αποτέλεσμα της μέτρησης, αλλά και την βαρύτητα άλλων μεταβλητών. Η επιλογή της ταχύτητας σάρωσης σχετίζεται άμεσα με το προς μέτρηση τεμάχιο, από αποκλίσεις μορφής που το χαρακτηρίζουν και τη συχνότητά τους.

Συγκεκριμένα «Όσο περισσότερες αποκλίσεις μορφής παρουσιάζει ένα τεμάχιο, τόσο περισσότερο αυξάνεται το μετρούμενο εύρος τους με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Επίσης με την αύξηση της ταχύτητας μέτρησης, αυξάνεται το εύρος κυρίως πιο υψίσυχνων αποκλίσεων μορφής» (Schmitt & Nisch,2009), δηλαδή αποκλίσεων τραχύτητας.

Τα παραπάνω οφείλονται στις ταλαντώσεις του αισθητήρα (probe vibration), οι οποίες προκαλούνται εξαιτίας των αποκλίσεων μορφής της επιφάνειας, αλλά και λόγω του μηχανισμού κίνησης της ίδιας της CMM . Είναι φανερό ότι όσο πιο γρήγορα κινείται ο αισθητήρας, τόσο περισσότερες ταλαντώσεις θα δημιουργούνται, θα υπάρχει ακόμα και σύνθεσή τους, καθώς δεν θα υπάρχει χρόνος για να «ηρεμήσει» ο αισθητήρας. Έτσι υπάρχει η πιθανότητα οι αποκλίσεις να μεταφέρονται και σε γειτονικά σημεία, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία της μέτρησης. Σε περιπτώσεις μέτρησης εξωτερικού δακτυλίου, «αν στη ταχύτητα σάρωσης δοθεί μια κρίσιμη τιμή, τότε η φυγόκεντρος δύναμη υπερκεράζει τη δύναμη μέτρησης και ο αισθητήρας δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια, δίνοντας λανθασμένα μικρότερο σφάλμα μορφής .» (Schmitt & Nisch,2009).

Η ταχύτητα σάρωσης επηρεάζεται και επηρεάζει τη βαρύτητα άλλων μεταβλητών. Επίσης, «η βαρύτητα κάποιων μεταβλητών ως προς το αποτέλεσμα της μέτρησης, όπως η πυκνότητα των σημείων και η δύναμη του αισθητήρα, διαφοροποιείται λόγω της μεταβολής της ταχύτητας σάρωσης του τεμαχίου και συγκεκριμένα αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας. Επίσης κάποιες άλλες μεταβλητές, όπως ο προσανατολισμός του τεμαχίου και η θέση του στην τράπεζα μέτρησης, των οποίων η επίδραση στο αποτέλεσμα είναι ελάχιστη σε χαμηλές ταχύτητες σάρωσης, αποκτούν πολύ σημαντική επίδραση σε μεγάλες ταχύτητες.» (Schmitt & Nisch,2009). Στον (πίνακα 6.3) φαίνεται η διαφοροποίηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων με την αλλαγή της ταχύτητας σάρωσης. Οι παράγοντες είναι κατά σειρά: Πυκνότητα σημείων (Point density), Μέγεθος τεμαχίου (Dimension), Δύναμη μέτρησης (Measuring Force), Σκληρότητα στύλίσκου αισθητήρα (Probe stiffness), Χαρακτηριστικά επιφάνειας (Surface characteristics), Προσανατολισμός τε-

μαχίου (Orientation) και Θέση τεμαχίου (Position). Στην αριστερή στήλη βρίσκεται η επίδραση των παραγόντων με μικρή ταχύτητα σάρωσης και στη δεξιά με μεγάλη. Το ποσοστό πληρότητας του κύκλου (μαύρο χρώμα) αναπαριστά το βαθμό επίδρασης της μεταβλητής.

Parameter	slow scanning	
	fast scanning	
Point density		
dimension		
Measuring force		
Probe stiffness		
Surface characteristics		
Orientation		
Position		
 Negligible coherence between parameter and result  Strong coherence between parameter and result		

Πίνακας 6.3: Μεταβολή της επίδρασης διαφόρων παραγόντων, λόγω της μεταβολής της ταχύτητας σάρωσης (Schmitt & Nisch,2009)

6.2.1.4. Υπόλοιποι παράγοντες

■ **Δύναμη μέτρησης αισθητήρα (measuring force)** που εξασκεί ο αισθητήρας της CMM στο μετρούμενο τεμάχιο αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο αποτέλεσμα της μέτρησης και συσχετίζεται με τη βαρύτητα άλλων σημαντικών παραγόντων. Η άσκηση μεγάλης δύναμης μέτρησης μειώνει τον αριθμό και το εύρος των ταλαντώσεων του αισθητήρα ,

όμως μπορεί να δημιουργήσει παραμορφώσεις στο τεμάχιο και στον αισθητήρα . Αν χρησιμοποιήσουμε μηδενική δύναμη, τότε θα μηδενίσουμε τριβή και παραμόρφωση, όμως η κατακόρυφη ταλάντωση (λόγω των αποκλίσεων μορφής) θα προκαλούσε την καταγραφή “ψευτο-επαφών”. Σήμερα έχουν κατασκευαστεί αισθητήρες υψηλής συχνότητας , οι οποίοι δεν δημιουργούν “ψευτο-επαφές” και διατηρούν σταθερή δύναμη επαφής με το τεμάχιο. Έτσι ακολουθούμε προτάσεις του κατασκευαστή της CMM και των αισθητήρων, προτιμώντας η άσκηση όσο το δυνατόν μικρότερης δύναμης στο τεμάχιο ($0,02 \div 0,5 \text{ N}$).

■ **Η θέση και ο προσανατολισμός του δοκιμίου** δεν είναι οι βασικότεροι παράγοντες, όμως μπορεί να επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Καλό είναι το τεμάχιο να τοποθετείται έτσι, ώστε η μέτρηση να πραγματοποιείται χωρίς κίνηση και στους τρεις άξονες (π.χ. ο άξονας Z να παραμένει σταθερός), έτσι αποφεύγεται το επιπλέον σφάλμα της μηχανής. Άρα, με την αλλαγή στον προσανατολισμό του τεμαχίου, μπορεί να ελεγχθεί αν το σφάλμα μορφής που εμφανίζει το τεμάχιο είναι πραγματικό ή οφείλεται σε σφάλμα της μηχανής κατά την κίνηση. Αν οι απεικονίσεις των σφαλμάτων μορφής μετά από κάθε μέτρηση συμπίπτουν, το σφάλμα οφείλεται στη CMM, ενώ αν παρουσιάζονται στο ίδιο τμήμα του τεμαχίου (παρά την αλλαγή του προσανατολισμού), τότε το σφάλμα μορφής είναι πραγματικό.

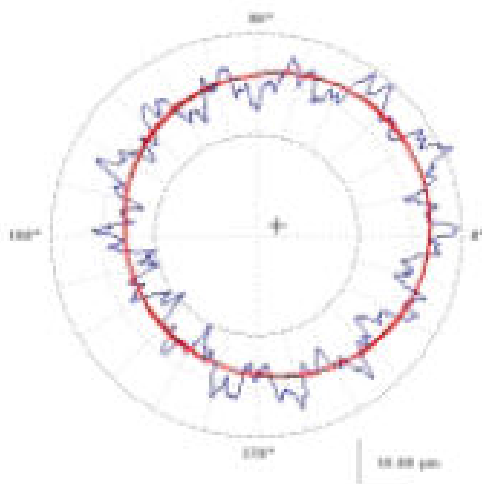
Όλοι παράγοντες που εξετάσαμε είναι οι βασικότεροι ως προς διαμόρφωση του αποτελέσματος της μέτρησης και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας μέτρησης. Η βαρύτητα του κάθε παράγοντα , δεν μπορεί να λάβει καθολικό χαρακτήρα , αλλά εξαρτάται από το μοντέλο της μηχανής, το χώρο στον οποίο γίνεται η μέτρηση, τις ιδιότητες των μετρούμενων τεμαχίων κ.α . Επομένως , αν και οι παραπάνω προτάσεις για τη βέλτιστη επιλογή των τιμών των παραγόντων ισχύουν, για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών τους, πρέπει να πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις σε συγκεκριμένη μηχανή και σε συγκεκριμένο χώρο.

6.2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την επεξεργασία της μέτρησης

6.2.2.1. Κύκλοι αναφοράς

Μετά από κάθε μέτρηση σάρωσης με CMM προκύπτει ένα νέφος σημείων-συντεταγμένων. Για το μετασχηματισμό του στην επιθυμητή μορφή αποτελέσματος (διάμετρος, κυκλικότητα, κλπ) είναι απαραίτητη η επεξεργασία του με το διαθέσιμο λογισμικό της CMM. Συγκεκριμένα, κατά τη μέτρηση κυκλικών τεμαχίων, για να βρεθεί η διάμετρος, πρέπει να οριστεί ο κύκλος, ή οι κύκλοι αναφοράς. Ως **κύκλο αναφοράς** ορίζουμε τον τέλειο κύκλο που θεωρείται ότι αναπαριστά με τη μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική διάσταση του τεμαχίου. Βάσει του κύκλου αναφοράς υπολογίζεται το μέγεθος διαμέτρου. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι για την κατασκευή των κύκλων αναφοράς είναι οι παρακάτω:

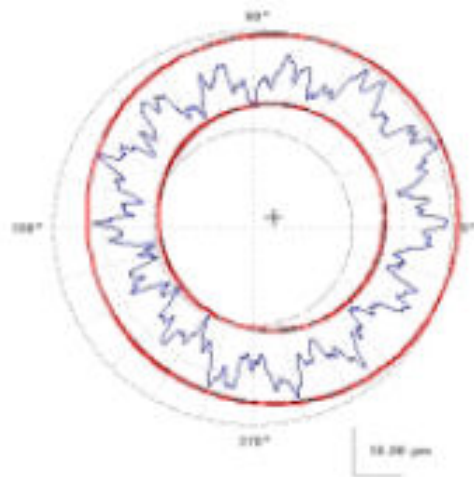
1. **Κύκλος αναφοράς των ελαχίστων τετραγώνων (Least squares reference circle)** κατασκευάζεται έτσι, ώστε το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των μετρημένων σημείων από αυτόν να είναι το ελάχιστο δυνατό.



Εικόνα 6.4: Κύκλος αναφοράς (κόκκινο χρώμα) με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Φαίνονται αποκλίσεις της πραγματικής μορφής του μετρημένου τεμαχίου.

Ο κύκλος των ελαχίστων τετραγώνων είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος κύκλος αναφοράς.

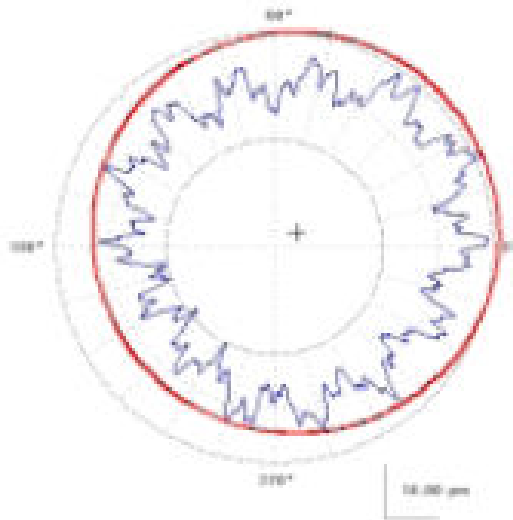
2. **Κύκλοι αναφοράς της ελάχιστης ζώνης (Minimum zone reference circles)** είναι δύο ομόκεντροι κύκλοι που εμπεριέχουν το μετρημένο προφίλ (σημεία), έτσι ώστε η απόκλιση μεταξύ των ακτινών τους να είναι η ελάχιστη δυνατή.



Εικόνα 6.5: Κύκλοι αναφοράς (κόκκινο χρώμα) με την μέθοδο της ελάχιστης ζώνης

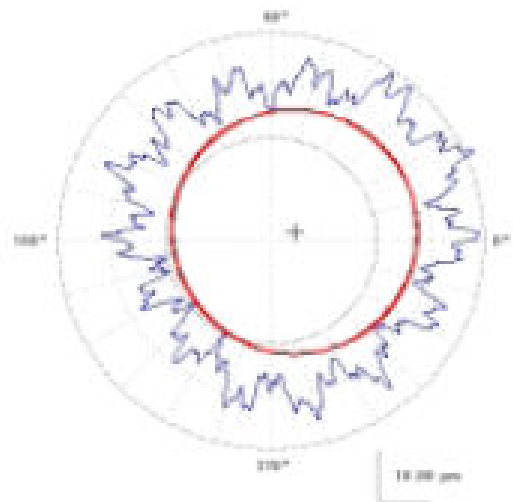
Η διάμετρος του δοκιμίου υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των διαμέτρων των δύο κύκλων.

3. **Ελάχιστος περιγεγραμμένος κύκλος αναφοράς (Minimum circumscribed reference circle)** ορίζεται ως ο κύκλος που εμπεριέχει όλα τα σημεία του προφίλ και έχει ελάχιστη δυνατή ακτίνα.



Εικόνα 6.6: Ελάχιστος περιγεγραμμένος κύκλος αναφοράς

4. **Μέγιστος εγγεγραμμένος κύκλος (Maximum inscribed circle)** ορίζεται ως ο κύκλος που περιέχεται μέσα στο μετρημένο προφίλ και έχει τη μεγαλύτερη δυνατή ακτίνα .



Εικόνα 6.7: Μέγιστος εγγεγραμμένος κύκλος αναφοράς

6.2.2.2. Απομακρυσμένα σημεία

Τα ακραία σημεία (outliers), τα οποία βρίσκονται στις άκρες «κανονικής κατανομής» των σημείων, είναι πιθανό να επηρεάζει την επεξεργασία και εξαγωγή του αποτελέσματος. Τα σημεία αυτά προκύπτουν, είτε από κατασκευαστικές ατέλειες του μετρούμενου τεμαχίου, είτε από σφάλμα μετρούμενης μηχανής (π.χ. ταλαντώσεις του αισθητήρα, ψευτο-επαφές κ.α.). Όμως υπάρχει η δυνατότητα αποκοπής τους και υπολογισμού των στοιχείων του τεμαχίου, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν.

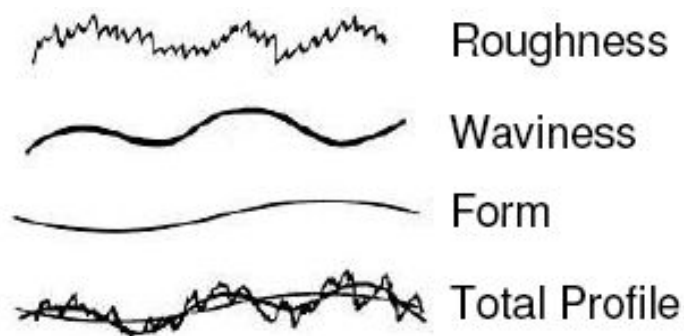
Οι προαναφερθέντες κύκλοι αναφοράς επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό από τα ακραία σημεία. Λόγω της μεθόδου κατασκευής, ο κύκλος ελαχίστων τετραγώνων επηρεάζεται ελάχιστα, ενώ ο μέγιστος εγγεγραμμένος και ο ελάχιστος περιγεγραμμένος μπορούν να επηρεαστούν πολύ ή και καθόλου (ανάλογα με τη θέση του ακραίου σημείου). Ο κύκλος της ελάχιστης ζώνης επηρεάζεται σε κάθε περίπτωση, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

Τα ακρότατα είναι δυνατό να επηρεάζουν το αποτέλεσμα και των φίλτρων αποκοπής συχνοτήτων.

Για τους παραπάνω λόγους συνήθως επιλέγεται η αποκοπή αυτών των ακραίων σημείων, με την επιλογή cut-off outliers στο λογισμικό της CMM. Επειδή κάθε διαδικασία μέτρησης έχει διαφορετικές απαιτήσεις, υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού του ορίου (ως τυπική απόκλιση) πάνω από το οποίο ένα σημείο θεωρείται ακραίο.

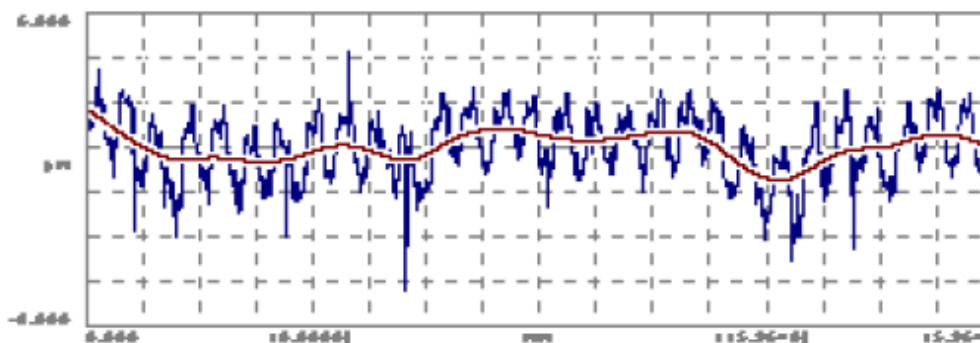
6.2.2.3. Φίλτρα αποκοπής συχνοτήτων

Σε κάθε τεμάχιο υπάρχουν αποκλίσεις μορφής διαφόρων τάξεων (σφάλμα μορφής, κυμάτωση και τραχύτητα), η σύνθεση των οποίων αποτελεί την επιφάνεια του τεμαχίου. Κατά τη σάρωση του τεμαχίου με τη CMM αποτυπώνεται η μορφή της επιφάνειάς του, η οποία εμπεριέχει όλες τις αποκλίσεις μορφής του τεμαχίου. Αυτό δεν είναι επιθυμητό, αν θέλουμε να εξετάσουμε μόνο ως προς συγκεκριμένη απόκλιση μορφής (π.χ. κυμάτωση).



Εικόνα 6.8: Σύνθεση των διαφόρων τάξεων αποκλίσεων μορφής στο αποτέλεσμα-επιφάνεια ενός τεμαχίου (Nugent, 2008)

Εξαιτίας των παραπάνω αναπτύχθηκαν συστήματα διαχωρισμού των διαφόρων ειδών αποκλίσεων, έτσι ώστε να μελετάται κάθε φορά εκείνη που ενδιαφέρει. Τα τελευταία χρόνια έχουν επικρατήσει τα Gaussian φίλτρα (Gaussian filters). Τα οποία ουσιαστικά λειτουργούν σαν ένας κινούμενος μέσος όρος (moving average), αποτυπώνοντας την τάση των πραγματικών σημείων.



Εικόνα 6.9: Φαίνεται η πραγματική κατανομή των τιμών και η τάση της με χρήση Gaussian φίλτρων (Malburg, 2002)

Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν από τη χρήση των Gaussian φίλτρων, όπως η παραμόρφωση στα άκρα του μετρούμενου προφίλ (αν δεν είναι το κυκλικό το προφίλ) και η ευαισθησία τους σε ακραίες τιμές, αντιμετωπίστηκαν και πλέον έχουν κυκλοφορήσει βελτιωμένες μορφές τους. Τα Spline Gaussian φίλτρα δεν παρουσιάζουν παραμόρφωση στα άκρα του ανοιχτού προφίλ, ενώ τα Robust φίλτρα δεν παρουσιάζουν ευαισθησία σε ακραίες τιμές.

Το χαρακτηριστικό μέγεθος των φίλτρων είναι ο αριθμός UPR (undulations per revolution), δηλαδή το αποδεκτό όριο εναλλαγών της κυμάτωσης ανά περιστροφή. Έτσι για μικρές τιμές UPR, προκύπτει μια ξεκάθαρη εικόνα του προφίλ του τεμαχίου, αλλά με μικρότερη ακρίβεια στις ακτινικές μεταβολές. Αντίθετα για μεγάλες τιμές UPR η ακρίβεια των μεταβολών είναι μεγαλύτερη, αλλά δεν αποτυπώνεται ευκρινώς το προφίλ (σφάλμα μορφής), καθώς σε αυτό μπορεί να συμπεριλαμβάνονται και αποκλίσεις μεγαλύτερης τάξης.



Εικόνα 6.10: Η μορφή που προκύπτει για τεμάχιο, εξαρτάτε από επιλογή του αριθμού UPR (Nugent, 2008)

Η χρήση του φίλτρου δεν επηρεάζει τον υπολογισμό της διαμέτρου του τεμαχίου, επειδή αυτή προκύπτει κατά τον καθορισμό του κύκλου αναφοράς, ο οποίος προηγείται της εφαρμογής φίλτρων.

Οι παραπάνω παράγοντες δεν επηρεάζουν την ίδια την μέτρηση, αλλά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η βέλτιστη επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας εξαρτάται από τις επιλογές που παρέχει το λογισμικό της CMM, καθώς και το ζητούμενο της μέτρησης.

7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΜΕ CMM ΣΤΟ ΜΕΤ- ΡΟΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Ε.Μ.Π

7.1. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Η μέτρηση δακτυλίου με CMM στο Μετροτεχνικό Εργαστήριο περιλαμβάνει την ίδια τη διαδικασία της μέτρησης και την επεξεργασία των σημείων για διαστασιολόγηση. Δηλαδή εξαγωγή αποτελέσματος διαμέτρου δακτυλίου. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων απαιτούνται:

✓ Η μηχανή CMM με τον υπόλοιπο εξοπλισμό που τη συνοδεύει, όπως περιγράφεται σε παραπάνω κεφάλαια.

Οι απαιτούμενες συνθήκες μέτρησης εξασφαλίζονται με τη χρήση της αίθουσας ελεγχόμενων συνθηκών του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου. Πιο συγκεκριμένα:

✓ Η μονάδα κλιματισμού της αίθουσας παραμένει σε λειτουργία για τουλάχιστον ένα εικοσιτετράωρο πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων, έτσι ώστε οι παράγοντες που ελέγχει να έχουν σταθεροποιηθεί στις επιθυμητές τιμές.

✓ Τα μετρούμενα δοκίμια παραμένουν και αυτά στην αίθουσα ελεγχόμενων συνθηκών, πάνω στην τράπεζα μέτρησης της CMM για τουλάχιστον εικοσιτέσσερις ώρες πριν τη μέτρηση, ώστε να μην υπάρχουν διακυμάνσεις στη θερμοκρασία τους κατά τη μέτρηση και να χρειάζονται την ελάχιστη δυνατή μετατόπιση-επαφή με τον ερευνήτη (λόγω επαφής υπάρχει μετάδοση θερμότητας). Προτού τοποθετηθούν στην τράπεζα μέτρησης, τα δοκίμια καθαρίζονται καλά με αιθυλική αλκοόλη και ένα λινό πανάκι, ιδιαίτερα στην εσωτερική τους επιφάνεια, που πρόκειται να μετρηθεί.

✓ Για επαλήθευση-έλεγχο της θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια της μέτρησης η τιμή της θερμοκρασίας των δοκιμών μετριέται με τη χρήση του Almemo, ώστε να εξακριβώνεται ότι παραμένει στα επιθυμητά όρια ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

7.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ

Για τη δημιουργία της μεθόδου μέτρησης χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο η διαπιστευμένη οδηγία «Διεξαγωγή μέτρησης αντικειμένων σε τρεις διαστάσεις με τη μηχανή DEA CMM», με τις απαιτούμενες τροποποιήσεις.

7.2.1. Προετοιμασία μηχανής

- 1) Εκκινούμε το αεροσυμπιεστή που βρίσκεται στο χώρο X.8 πριν την είσοδο του εργαστηρίου. Τον αφήνουμε να δουλέψει λίγο και μετά κάνουμε εξαέρωση, για να φύγει νερό που μπορεί να έχει μαζευτεί στο κάτω μέρος του αεροσυμπιεστή.
- 2) Εκκινούμε τον H/Y της μηχανής DEA CMM.
- 3) Ενεργοποιούμε την μηχανή DEA CMM ως εξής: Ανοίγουμε την παροχή αέρα στο πίσω μέρος μηχανής (κόκκινος διακόπτης) και στρέφουμε το διακόπτη **On/Off** που βρίσκεται επάνω στον **Controller**.



Εικόνα 7.1: Σύστημα εισαγωγής συμπιεσμένου αέρα με τον κόκκινο διακόπτη

- 4) Ελέγχουμε ότι η πίεση στο μανόμετρο στο πίσω μέρος της μηχανής βρίσκεται περίπου στα 0,47 MPa.
- 5) Πατούμε από το **Jog Box** το πλήκτρο **machine start** (μόλις το led του μείνει σταθερά σβηστό) για 2 δευτερόλεπτα, μέχρι το led να σταθεροποιηθεί στο πράσινο χρώμα .



Εικόνα 7.2: Χειριστήριο ελέγχου (Jog Box)

6) Ελέγχουμε ότι τα led των **Controllers** της Renishaw και της κεφαλής είναι αναμμένα .



Εικόνα 7.3: Controllers της Renishaw.

7.2.2. Εκκίνηση μηχανής

7) Εκκινούμε από την επιφάνεια εργασίας το λογισμικό PC-DMIS.

Προσοχή: Τα βήματα 8) και 9) εκτελούνται μόνο εφόσον αμέσως πριν έχει πραγματοποιηθεί εκκίνηση του **Controller**.

8) Αφού βεβαιωθούμε ότι η κεφαλή είναι ελεύθερη να κινηθεί στο χώρο, πατούμε **OK** στο μήνυμα που εμφανίζεται και ζητά να κινηθεί η μηχανή στο **Home Position**.

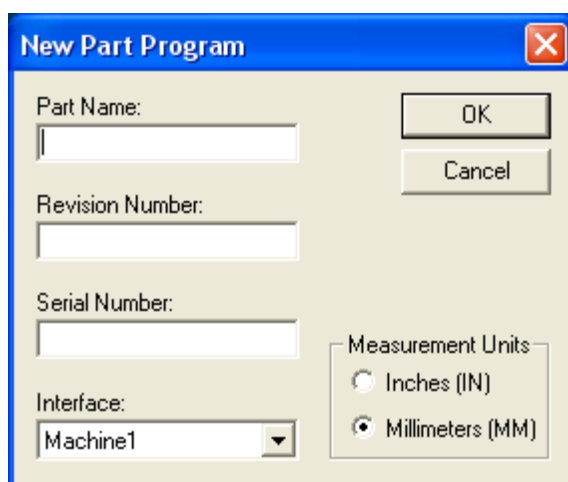
9) Η μηχανή κινείται στο **Home Position**. Όταν ολοκληρώσει την κίνηση ελέγχουμε στο κάτω δεξιά μέρος της οθόνης του λογισμικού ότι οι συντεταγμένες X, Y, Z είναι περίπου μηδέν.

10) Αν εμφανιστεί προτροπή για άνοιγμα αποθηκευμένου προγράμματος μέτρησης στο παράθυρο που ανοίγει αυτόματα, πατούμε **Cancel**.

11) Από το Menu του λογισμικού επιλέγουμε **file-new** και συμπληρώνουμε τα απαραίτητα πεδία που αφορούν τη μέτρηση μας:

- **Part name:** Ονομασία δοκιμίου
- **Revision number:** Αριθμός υπόθεσης
- **Serial number:** Κωδικός δοκιμίου
- **Measurement units:** mm
- **Interface:** Machine 1

Πατούμε **OK** για να ολοκληρώσουμε.



Εικόνα 7.4: Παράθυρο New Part Program

7.2.3. Καθορισμός εργαλείου μέτρησης

12) Τοποθετούμε στην κεφαλή **PH10MQ** την προέκταση **SP25M**, το στέλεχος **SM25-1** και το στυλίσκο **SH25-1/TIP4BY21MM** που θα χρησιμοποιήσουμε για τη μέτρηση των δοκιμίων.

Σημείωση: Χρησιμοποιήσαμε την μικρότερη δυνατή διαμόρφωση για την κεφαλή και μικρού μήκους στυλίσκο, για μείωση ταλαντώσεων κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

13) Εφόσον έχει εμφανιστεί αυτόματα το παράθυρο **Probe Utilities** επιλέγω **Cancel**.

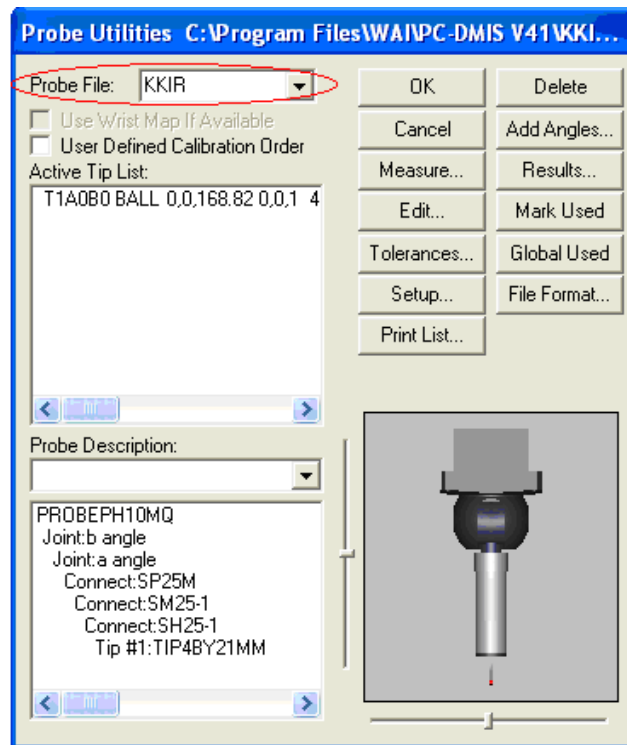
14) Επιλέγω διαδοχικά από το Menu: **Edit – Preferences – Setup**. Στην καρτέλα **Dimension** επιλέγουμε στο **Number of Decimal Places** το 5 και πατούμε **OK**.



Εικόνα 7.5: Καρτέλα **Dimension** για επιλογή παραμέτρων

15) Από το Menu επιλέγουμε **Insert – Hardware definition – Probe** για να εισέλθουμε στο παράθυρο **Probe Utilities**.

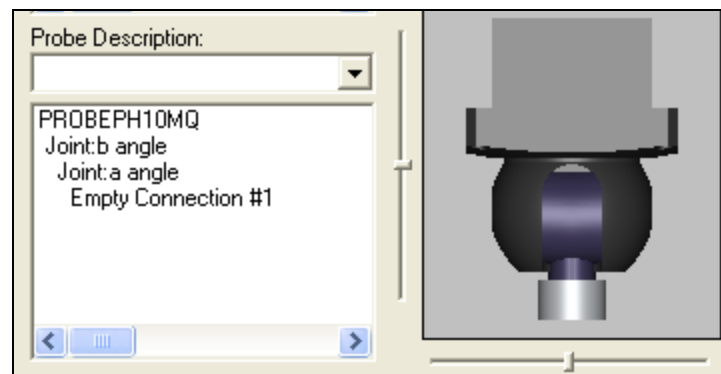
16) Στο πεδίο **Probe File** δίνουμε όνομα στο probe (αρχείο εργαλείων - Probe File) που θα χρησιμοποιήσουμε.



Εικόνα 7.6: Παράθυρο Probe Utilities

17) Στο πλαίσιο κάτω από το **probe description**, επιλέγουμε **Empty Connection #1**.

18) Στο πεδίο **Probe Description** επιλέγουμε με τη σειρά από την κυλιόμενη λίστα τα αντίστοιχα εργαλεία που έχουμε προσαρμόσει στην κεφαλή **PH10MQ** (π.χ. **SP25M** / **SM25-1** / **SH25-1** / **TIP4BY21MM**). Παρατηρούμε ότι στο διπλανό παράθυρο σχηματίζεται εικονικά το εργαλείο που δημιουργούμε. Για οποιαδήποτε διόρθωση μπορούμε να αναιρέσουμε κάθε εισαγωγή με **Delete**.



Εικόνα 7.7: Παράθυρο Probe Utilities (Probe Description)

19) Μετά το παραπάνω βήμα εμφανίζεται συμπληρωμένη η λίστα με τα διαθέσιμα εργαλεία για μέτρηση (**Active tip list**). Ο αστερίσκος μπροστά από την ονομασία δηλώνει ότι δεν έχει γίνει calibration στο συγκεκριμένο εργαλείο. Μπορούμε να προσθέσουμε επιπλέον εργαλεία μεταβάλλοντας τις γωνίες α και β της κεφαλής. Από το **Active tip list** επιλέγουμε το εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε.

7.2.4. Διακρίβωση κεφαλής αισθητήρα (calibration)

20) Από το παράθυρο **Probe Utilities** και εφόσον έχουμε επιλέξει το επιθυμητό εργαλείο, πατάμε το κουμπί **Measure** οπότε και ανοίγει το παράθυρο **Measure Probe**.

21) Στο παράθυρο **Measure Probe** (εικόνα 7.8) επιλέγουμε τις παραμέτρους του **Calibration**.

Σημείωση: Οι παράμετροι που θα επιλέξουμε (**Prehit/ Retract, Move Speed, Touch Speed**) πρέπει να έχουν ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες που θα καθοριστούν αργότερα στις επιλογές σάρωσης.

Measure Probe

Number of Hits: 5 Measure Cancel

Prehit / Retract: 2

Move Speed: 10 %

Touch Speed: 2 %

☐ Manual
 ☐ Man+DCC
 ☐ DCC
 ☒ DCC+DCC

Type of Operation

☒ Calibrate Tips
 ☐ Qualification Check
☐ Calibrate the Unit
 ☐ Home the Unit
☐ Calibrate NC-100 Artifact

Calibration Mode

☒ Default Mode
 ☐ User Defined

Number of Levels: 2

Start Angle: 0.0

End Angle: 90.0

Wrist Calibration

	Start	End	Increment
A:	-140.0	140.0	10.0
B:	-180.0	180.0	10.0

☐ Create New Map
 ☒ Replace Closest Map
 View / Delete Maps

☐ Shank Qual
 Number Shank Hits: 4
 Shank Offset: 5

Parameter Sets

Name: Save Delete

☐ Tool Mounted on Rotary Table

List of Available Tools:

sfera	SPHERE	0,0,1	15.8752	0	0,0,0	0	0
-------	--------	-------	---------	---	-------	---	---

Add Tool...
Delete Tool
Edit Tool...

Εικόνα 7.8: Παράθυρο Measure Probe

22) Αφού συμπληρώσουμε τα απαιτούμενα πεδία επιλέγουμε **Measure** για να ξεκινήσει η διαδικασία του **Calibration**. Στο 1^ο μήνυμα που εμφανίζεται πατούμε **YES** και στο 2^ο μήνυμα πατούμε **OK** (αναφορικά με τα εργαλεία που θέλουμε να σετάρουμε).

23) Το λογισμικό μας ζητά να πάρουμε ένα σημείο στην κορυφή της πρότυπης σφαίρας (ανώτατο σημείο). Λαμβάνουμε χειροκίνητα με το **Jog Box** το ζητούμενο σημείο, έχοντας ενεργοποιημένο το κουμπί **Slow** του χειριστηρίου για αργή κίνηση του αισθητήρα, ώστε να μην προσκρούσει με δύναμη στην πρότυπη σφαίρα. Στη συνέχεια πατάμε το κουμπί **Done** από το **Jog Box** ή το **Continue** από την οθόνη του λογισμικού. Η διαδικασία του **Calibration** ξεκινά αυτόματα.

24) Όταν ολοκληρωθεί η αυτόματη διαδικασία του **Calibration**, από το παράθυρο **Probe Utilities** επιλέγουμε **Result** οπότε και ανοίγει το παράθυρο με τα αποτελέσματα του **Calibration**. Στο παράθυρο ελέγχουμε τις παραμέτρους **Prb Rdn** και **Std Dev** να αποκλίνουν το πολύ σε 4^ο δεκαδικό ψηφίο. Αν αποκλίνουν περισσότερο επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία του **Calibration**.

25) Επιστρέφουμε στο **Probe Utilities** και πατούμε **OK**.

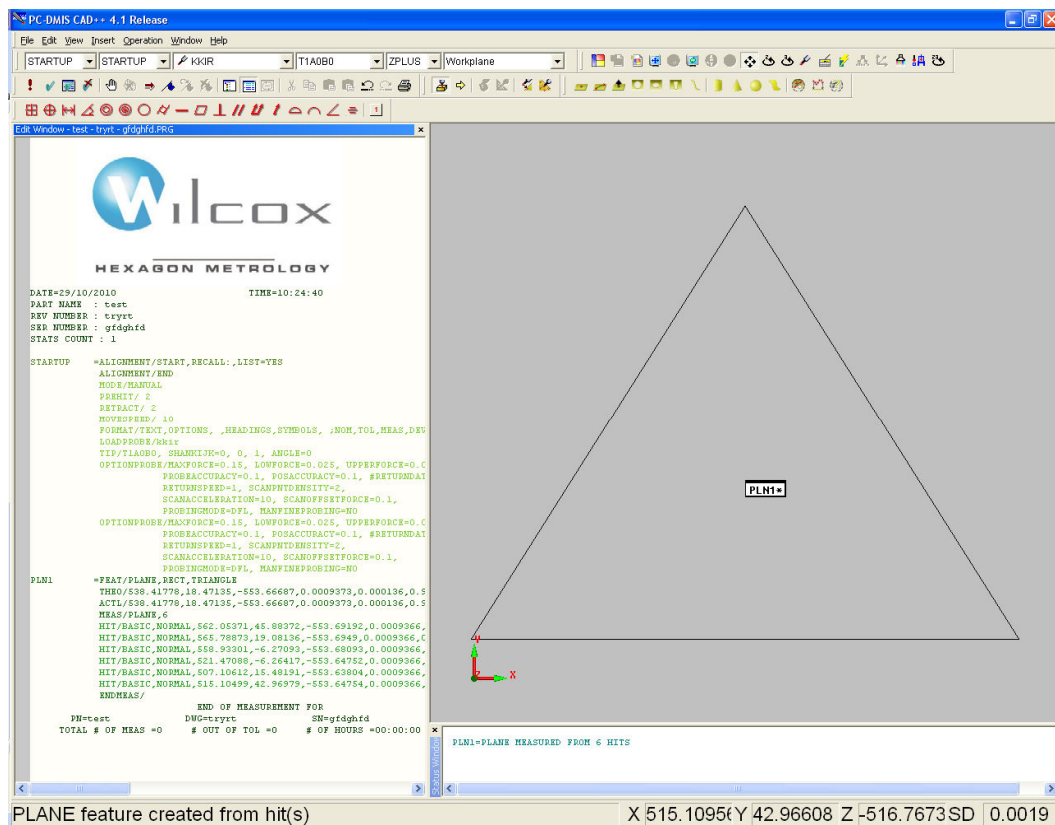
26) Από το **Menu** επιλέγουμε **Insert – Parameter Change – Probe – Probe Options**.

7.2.5. Καθορισμός αρχής των αξόνων

27) Για να ορίσουμε το επίπεδο, λαμβάνουμε χειροκίνητα με το **Jog Box** (έχοντας ενεργοποιημένο το κουμπί **Slow**) 6 - 7 σημεία, στην πάνω επιφάνεια του δακτυλίου και στη συνέχεια πατάμε το κουμπί **Done**. Στο παράθυρο γραφικών (**Graphics Display Window**) παρατηρούμε ότι τα σημεία τελικά αναγνωρίζονται ως **PLN 1** (Plane 1).

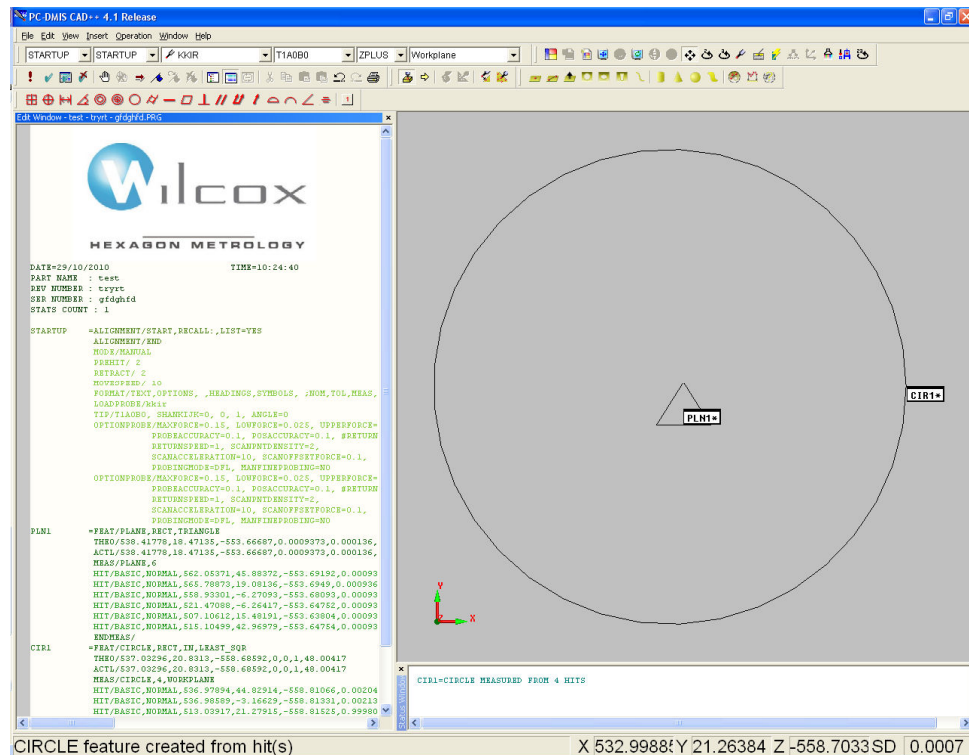
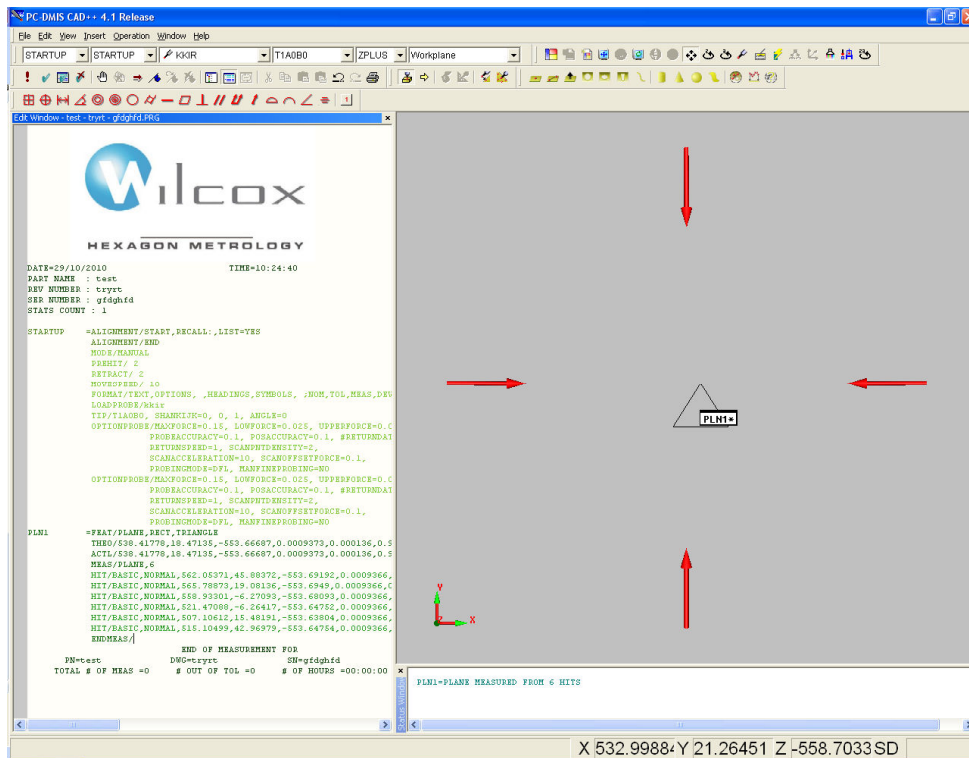


Εικόνα 7.9: Στο Jog Box διακρίνονται τα κουμπιά Slow και Done.



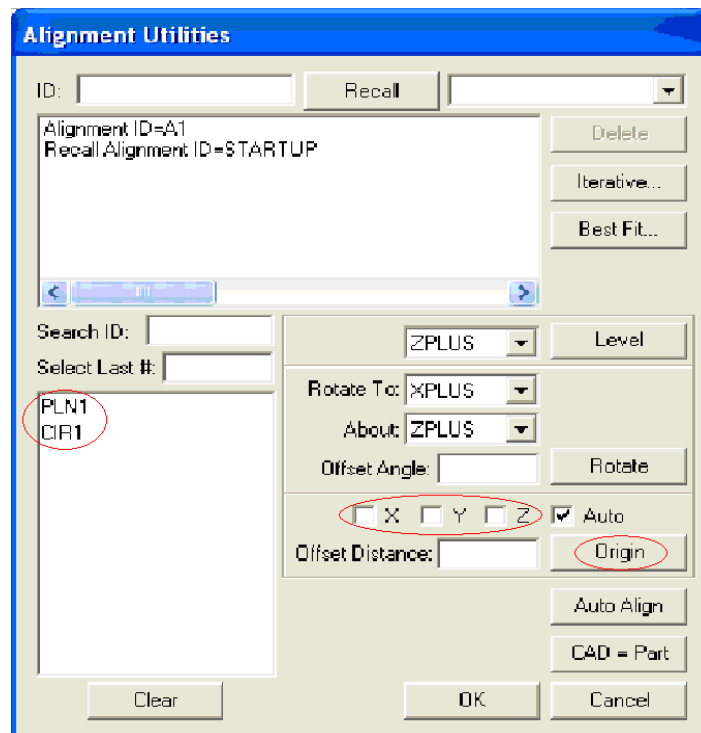
Εικόνα 7.10: Παραπάνω φαίνεται το παράθυρο Graphics Display Window, ενώ έχουν ληφθεί τα σημεία για τον καθορισμό της αρχής του άξονα Z και αφού πατήσουμε το κουμπί Done.

28) Για να ορίσουμε το σημείο, λαμβάνουμε χειροκίνητα 4 αντιδιαμετρικά σημεία στον εσωτερικό δακτύλιο του κύκλου ως εξής: Χαμηλώνουμε την κεφαλή έτσι ώστε η ακίδα να βρίσκεται λίγο πιο μέσα από το άνω επίπεδο του κύκλου και σχεδόν στο κέντρο του. Στη συνέχεια κλειδώνουμε την κατακόρυφη κίνηση στο **Jog Box** πατώντας το αντίστοιχο κουμπί, και λαμβάνουμε τα τέσσερα σημεία. Στο τέλος πατάμε το κουμπί **Done**. Τα σημεία αναγνωρίζονται ως **CIR 1** (Circle 1).



Εικόνα 7.11: Παραπάνω φαίνεται το παράθυρο Graphics Display Window, ενώ έχουν ληφθεί τα σημεία για τον καθορισμό της αρχής των αξόνων X, Y πριν και αφού πατήσουμε το κουμπί Done.

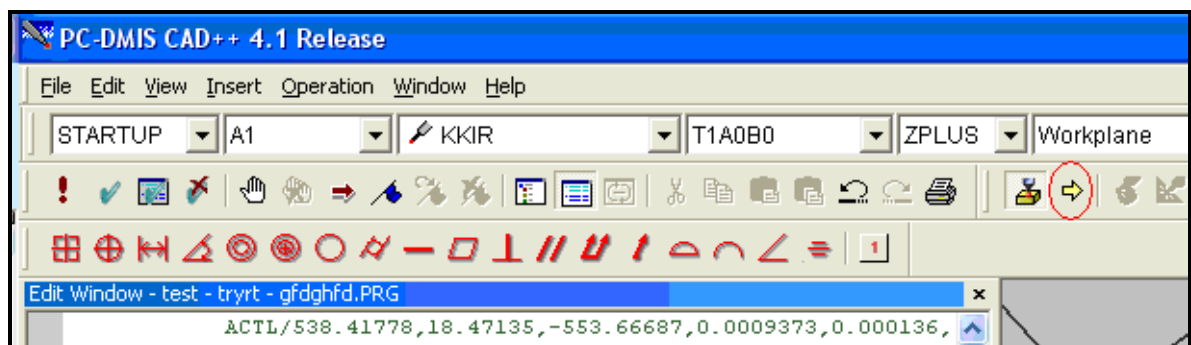
29) Από το **Menu** επιλέγουμε **Insert – Alignment - New**. Στο παράθυρο **Alignment Utilities** που εμφανίζεται, επιλέγουμε τα **X** και **Y**, καθώς και το **CIR 1** και πατάμε το κουμπί **Origin**. Στην συνέχεια επιλέγουμε το **Z** και το **PLN 1** και πατάμε ξανά **Origin**. Μετακινούμε χειροκίνητα την κεφαλή, ώστε να βρίσκεται περίπου στο μηδέν (0,0,0) και ελέγχουμε στο κάτω δεξιά τμήμα του παραθύρου του λογισμικού, αν οι τιμές των **X, Y, Z** είναι κοντά στο 0. Αν αυτό ισχύει τότε πατάμε **OK** στο παράθυρο.



Εικόνα 7.12: Παράθυρο Alignment Utilities

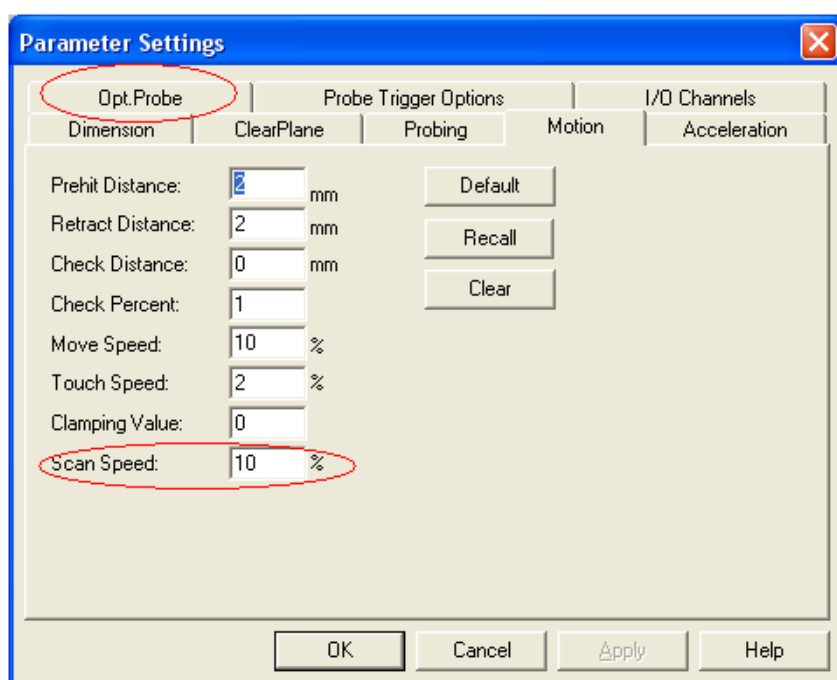
7.2.6. Κατασκευή προγράμματος μέτρησης

30) Επιλέγουμε **mode DCC**, από το εικονίδιο της γραμμής εργαλείων **Probe Mode**.



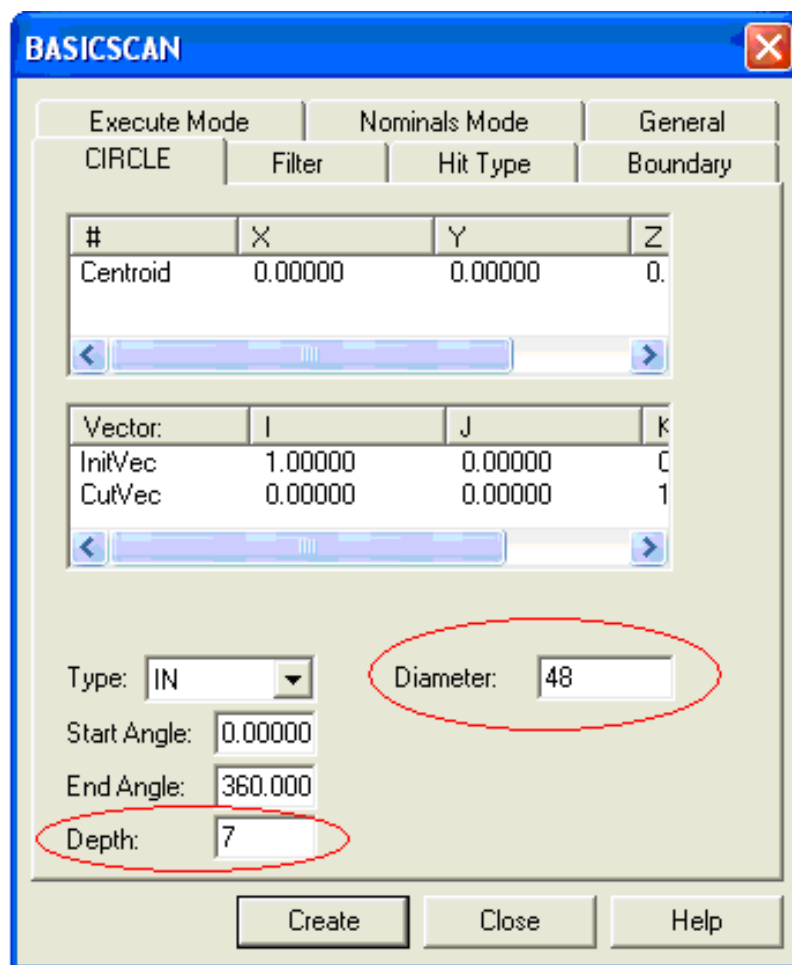
Εικόνα 7.13: Το κουμπί **mode DCC**, όπως φαίνεται στη γραμμή εργαλείων **Probe Mode**

31) Κάνουμε κλικ με το ποντίκι στο παράθυρο **Edit Window**, στη γραμμή **Mode DCC** και πατάμε **F 10**. Εμφανίζεται το παράθυρο **Parameter Settings**. Στην καρτέλα **Motion** επιλέγουμε τις τιμές ως προς την κίνηση του αισθητήρα (πρέπει να είναι ίδιες με αυτές που ορίστηκαν κατά το **Calibration**) και επιλέγουμε την ταχύτητα της σάρωσης (**Scan Speed**). Στην καρτέλα **Opt. Probe** στο πεδίο **Point Density** επιλέγουμε την πυκνότητα των σημείων κατά τη σάρωση (σε point/mm). Αφού βεβαιωθούμε ότι έχουν οριστεί σωστά οι επιθυμητές μεταβλητές πατάμε **Apply** και **OK**.



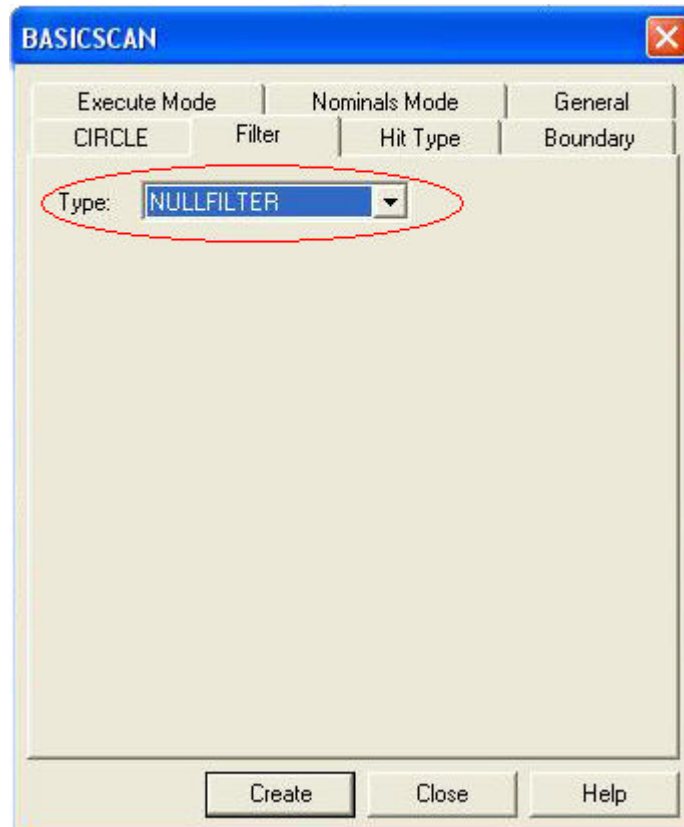
Εικόνα 7.14: Παράθυρο Parameter Settings με ανοιχτή καρτέλα Motion

32) Επιλέγουμε από το μενού **Insert – Scan - Circle**. Στο παράθυρο **BASICSCAN** που εμφανίζεται, στην καρτέλα **CIRCLE**, στο πεδίο **Diameter** καταχωρούμε την ονομαστική διάμετρο του δακτυλίου και στο πεδίο **Depth** καταχωρούμε το βάθος από το επίπεδο $Z = 0$, στο οποίο θέλουμε να γίνει η μέτρηση. Τα υπόλοιπα στοιχεία πρέπει να είναι όπως φαίνονται στην (εικόνα 7.15).



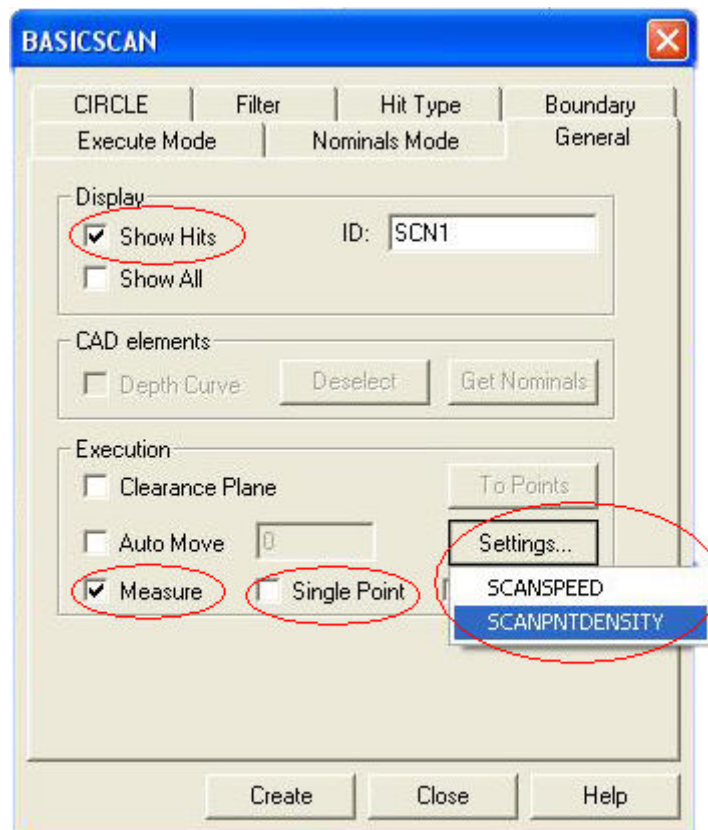
Εικόνα 7.15: Παράθυρο BASICSCAN, με ανοιχτή καρτέλα CIRCLE

33) Επιλέγουμε την καρτέλα **Filter** και στο πεδίο **Type** επιλέγουμε **NULLFILTER**.



Εικόνα 7.16: Παράθυρο BASICSCAN, με ανοιχτή καρτέλα Filter

34) Πατάμε στην καρτέλα **General** και βεβαιωνόμαστε ότι οι επιλογές είναι όπως στην (εικόνα 7.17). Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις επιλογές **Measure** (πρέπει να είναι επιλεγμένη) και **Single Point** (ΔΕΝ πρέπει να είναι επιλεγμένη). Αν δεν θέλουμε να προβάλλονται μετά τη μέτρηση οι συντεταγμένες των ληφθέντων σημείων στο παράθυρο **Edit Window** (αρκετά μεγάλος όγκος δεδομένων), απενεργοποιούμε το πεδίο **Show Hits**. Πατώντας το κουμπί **Setting** επιλέγοντας **SCANPNTDENSITY** ανοίγει το παράθυρο **Parameter Setting** (ίδια με το Βήμα 31, αλλά αποτελείται μόνο από τη ζητούμενη καρτέλα **Opt. Probe**), όπου μπορούμε στο πεδίο **Point Density** να ελέγξουμε πόσα σημεία /mm επιθυμούμε να μετρήσει η κεφαλή (αν θελήσουμε να αλλάξουμε κατά τη διάρκεια διαδοχικών scan την πυκνότητα των σημείων). Αντίστοιχα, επιλέγοντας **SCANSPEED** μπορούμε να επιλέξουμε την ταχύτητα σάρωσης (παράθυρο **Parameter Setting**, μόνο καρτέλα **Motion**). Στη συνέχεια πατάμε **OK**, για να επιστρέψουμε στην καρτέλα **General**.



Εικόνα 7.17: Παράθυρο BASICSCAN, με ανοιχτή καρτέλα General

35) Για να πραγματοποιηθεί η σάρωση (scan) του δακτυλίου πατάμε το κουμπί **Create**, που βρίσκεται στην προηγούμενη καρτέλα **General**. Αφού πραγματοποιηθεί το scan το παράθυρο εμφανίζεται και πάλι, ενώ στο παράθυρο **Edit Window** του λογισμικού έχουν προστεθεί τα δεδομένα **SCAN 1...ENDSCAN** . Αν θέλουμε να πραγματοποιήσουμε και άλλο διαδοχικό scan πατάμε και πάλι το κουμπί **Create** της καρτέλας **General** (στο **Edit Window** εμφανίζεται **SCAN 2...ENDSCAN**, κ.ο.κ.).

36) Μόλις πραγματοποιήσουμε όλα τα scan πατάμε το κουμπί **Close** στην καρτέλα **General** και επιστρέφουμε στο **Edit Window** .

7.2.7. Κατασκευή κύκλου από νέφος σημείων

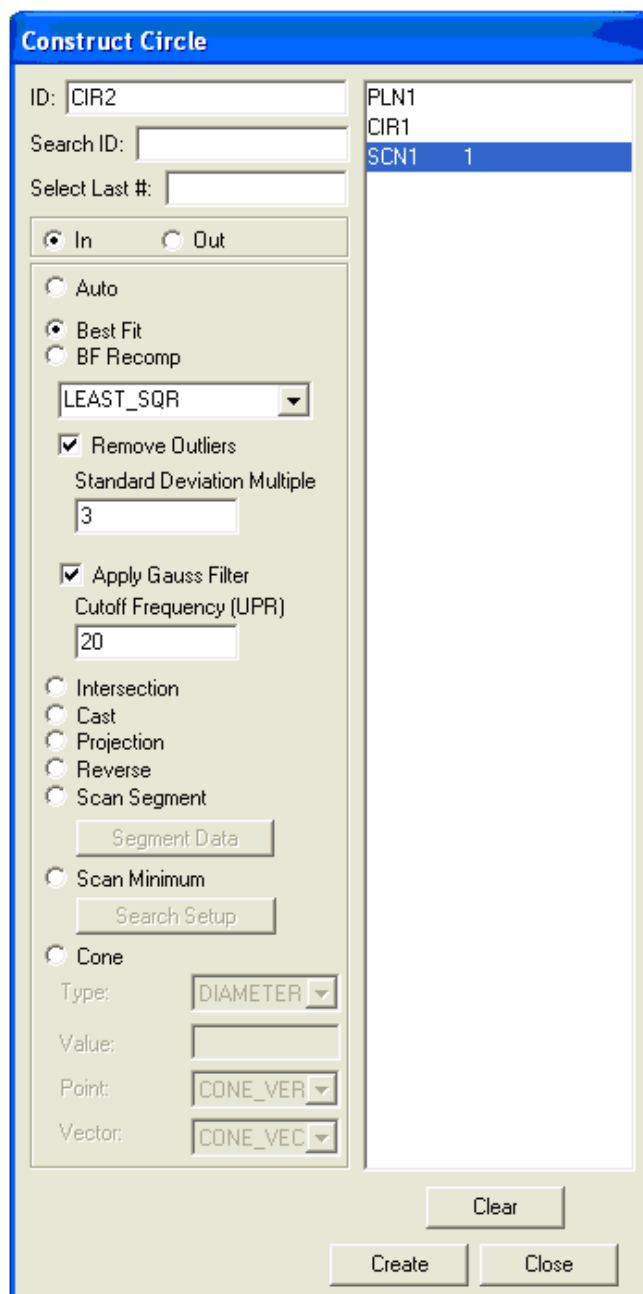
37) Από την εργαλειοθήκη **Constructed Features** πατάμε το κουμπί **Constructed Circle**.



Εικόνα 7.18: Εργαλειοθήκη Constructed Features, με σημειωμένο το κουμπί Constructed Circle

38) Στο παράθυρο **Construct Circle** που εμφανίζεται, αρχικά επιλέγουμε από το δεξί τμήμα του το **SCN 1**, το νέφος σημείων δηλαδή από το οποίο θέλουμε να κατασκευάσουμε τον κύκλο (το επιλεγμένο νέφος σημείων αποκτά μπλε φόντο). Επιλέγουμε την επιλογή **In**, εφόσον πρόκειται για εσωτερικό δακτύλιο. Στη συνέχεια ενεργοποιούμε την επιλογή **Best Fit** και στο αμέσως πιο κάτω πεδίο επιλέγουμε τη μέθοδο κατασκευής του κύκλου **LEAST_SQR**. Είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Επιλέγουμε την εντολή **Remove Outliers**, με την οποία αφαιρούνται τα ακραία σημεία του νέφους τιμών (βάση τυπικής απόκλισης). Στο πεδίο **Standard Deviation Multiple** καθορίζουμε το πολλαπλάσιο της τυπικής απόκλισης στο (**3**), πάνω από τα οποία τα σημεία θα αφαιρούνται (δεν θα λαμβάνονται υπόψιν κατά την κατασκευή του κύκλου). Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική, δηλαδή επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτείται, ώστε να παραμείνουν τελικά μόνο αποδεκτές τιμές στο νέφος. Επίσης επιλέγουμε εφαρμογή φίλτρων Gauss με την εντολή **Apply Gauss Filter** και καθορίζουμε τον αριθμό **UPR** να είναι **20** στο πεδίο **Cutoff Frequency**. Οι υπόλοιπες επιλογές παραμένουν απενεργοποιημένες. Αφού καθορίσουμε τα παραπάνω πατάμε το κουμπί **Create** και δημιουργείται ο κύκλος. Αν επιθυμούμε να κατασκευάσουμε κύκλο από άλλο νέφος τιμών (σε περίπτωση διαδοχικών scan) επιλέγουμε το επόμενο νέφος (π.χ. **SCN 2**) και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία.

Παρατήρηση: Από το **SCN 1** δημιουργείται ο κύκλος **CIR 2**, από το **SCN 2** ο κύκλος **CIR 3**, κ.ο.κ. Αυτό συμβαίνει διότι έχει οριστεί ήδη ο κύκλος **CIR 1** κατά τον καθορισμό της αρχής των αξόνων.



Εικόνα 7.19: Παράθυρο Construct Circle

39) Όταν κατασκευάσουμε όλους τους ζητούμενους κύκλους πατάμε το κουμπί **Close** και επιστρέφουμε στο παράθυρο **Edit Window**.

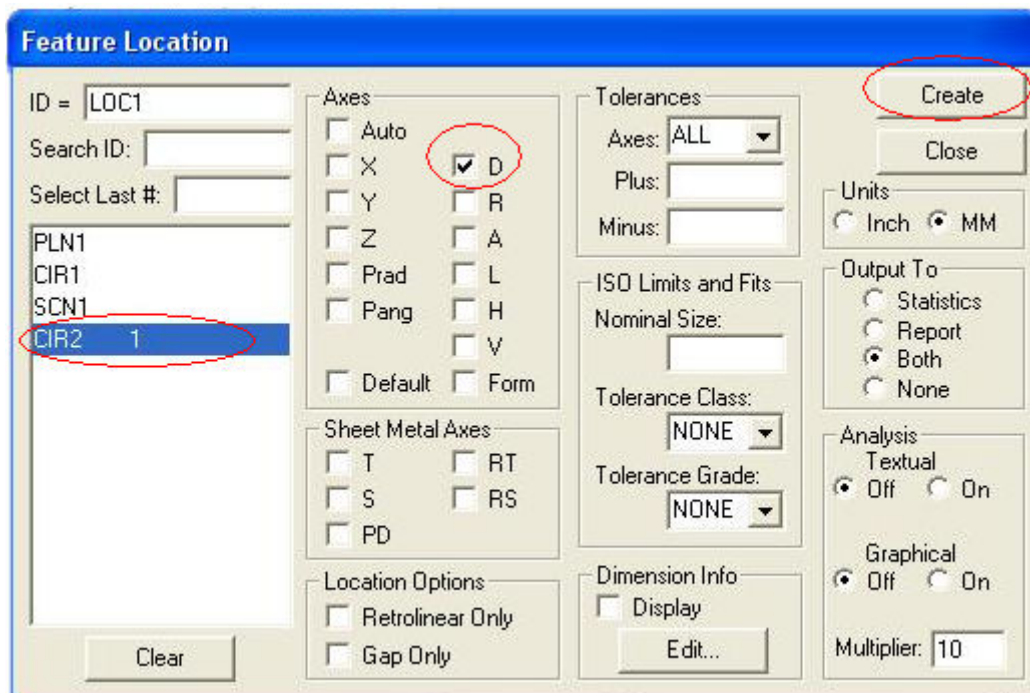
7.2.8. Διαστασιολόγηση και εξαγωγή αποτελεσμάτων

40) Από την εργαλειοθήκη **Dimension** πατάμε το κουμπί **Location Dimension**.



Εικόνα 7.20: Εργαλειοθήκη Dimension, με σημειωμένο το κουμπί Location Dimension

41) Στο παράθυρο **Feature Location** που εμφανίζεται, επιλέγουμε από το αριστερό τμήμα με τη σειρά όλους τους κύκλους, των οποίων θέλουμε να υπολογίσουμε τη διάμετρο (π.χ. **CIR 2**, **CIR 3**, **CIR 4**, κτλ), ενώ στις επιλογές **Axes** επιλέγουμε **D** (διάμετρος), όπως φαίνεται και στην (εικόνα 7.21). Στη συνέχεια πατάμε το κουμπί **Create**.



Εικόνα 7.21: Παράθυρο Feature Location

42) Πατάμε το κουμπί **Close** στο προηγούμενο παράθυρο και επιστρέφουμε στο παράθυρο **Edit Window**, όπου η διάμετρος εμφανίζεται με μωβ χρώμα χαρακτήρων κάτω από τη λέξη **MEAS** (measured δηλαδή μετρημένος). Αν έχουν διαστασιολογηθεί περισσότεροι κύκλοι, τα στοιχεία τους εμφανίζονται διαδοχικά.


```

DIM LOC1= LOCATION OF CIRCLE CIR2 UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX      NOMINAL      +TOL      -TOL      MEAS      DEV      OUTTOL
D      48.00000      0.02540      0.02540      47.99987      -0.00013      0.00000
END OF DIMENSION LOC1

```

Εικόνα 7.22: Τα στοιχεία που εμφανίζονται για ένα διάμετρο μετά από τη διαδικασία Location Dimension

43) Επιλέγουμε και μεταφέρουμε (με copy-paste) την τιμή της διαμέτρου στο αρχείο Excel , όπου πρόκειται να αποθηκευτούν οι διαστάσεις του δακτυλίου.

44) Η διαδικασία της μέτρησης ολοκληρώθηκε . Επιλέγουμε από το menu **File – Exit** και, εφόσον επιθυμούμε να πραγματοποιήσουμε νέο κύκλο μετρήσεων επιλέγουμε εκ νέου **File – New** (βήμα 11) και συνεχίζουμε τη διαδικασία μέτρησης από εκεί .

7.3. ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

7.3.1. Παράγοντες που εξετάζονται κατά τη μέτρηση

Οι παράγοντες που είναι πιθανό να συμβάλλουν τόσο στη μέτρηση, όσο και στη διαδικασία επεξεργασίας των ληφθέντων σημείων και την εξαγωγή αποτελέσματος , αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράγοντες-μεταβλητές που κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί η μεταβολή τους ως προς το αποτέλεσμα , στο πλαίσιο των μετρήσεων για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας . Επίσης αναφέρονται οι τιμές που τους δίνονται, σύμφωνα με τις θεωρητικές προτάσεις, αλλά και με τις δυνατότητες του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου.

■ Σταθεροί παράγοντες:

Βασιζόμενοι στη προηγούμενη διπλωματική εργασία με τίτλο: «Μέτρηση Διαμέτρου Δακτυλίων με Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων: Ανάπτυξη Μεθόδου Continuous Scanning και βελτιστοποίηση παραμέτρων μέτρησης» του συναδέλφου φοιτητή Αλέξανδρου Καλαττά, από πειραματικά δεδομένα επιλέγουμε βέλτιστες τιμές μεταβλητών παραμέτρων που μας δίνουν μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις των δακτυλίων. Εφόσον οι παράγοντες έχουν ίδιες τιμές κατά διάρκεια των μετρήσεων μας ,μπορούμε να τους αποκαλούμε ως σταθερούς παράγοντες , και είναι οι εξής :

- ✓ **Πυκνότητα σημείων μέτρησης (points density)**, επιλέγεται 2 points/mm το οποίο είναι ικανοποιητικό από πλευράς απαίτησης των ελαχίστων σημείων για διαστασιολόγηση.
- ✓ **Ταχύτητα σάρωσης (scan speed)** ,επιλέγεται 10% που είναι η default ρύθμιση της μηχανής CMM .
- ✓ **Διάμετρος κεφαλής του στυλίσκου επαφής (ball tip diameter)**, είναι 4 mm με μήκος στυλίσκου 21 mm και υλικό σφαίρας (Synthetic ruby).
- ✓ **Μέθοδος κατασκευής κύκλου**, επιλέγεται μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (LEAST_ SQR). Πρόκειται για παράγοντα που επηρεάζει την επεξεργασία των μετρήσεων. Η μέθοδος κατασκευής κύκλου επιλέγεται από το λογισμικό PC-DMIS κατά της επεξεργασίας του νέφους σημείων.
- ✓ **Εφαρμογή φίλτρου Gauss με αριθμό UPR** να λαμβάνει τιμή 20. Από προηγούμενες μετρήσεις στο Μετροτεχνικό Εργαστήριο με CMM διαπιστώθηκε ότι τιμή 20 του αριθμού UPR δίνει καλύτερα αποτελέσματα για μετρήσεις εσωτερικού διαμέτρου του δακτυλίου.
- ✓ **Δύναμη μέτρησης κατά τη σάρωση (measuring force)**: Όπως αναφέρθηκε και κατά την ανάπτυξη των παραγόντων σε προηγούμενο κεφάλαιο η δύναμη μέτρησης είναι δυνατό να επηρεάζει το αποτέλεσμα , αλλά επίσης η αλλαγή της μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά στον αισθητήρα .Για αυτό και διατηρείται η default ρύθμιση της μηχανής, με δύναμη κατά τη σάρωση : 0,1 N, τιμή ικανοποιητική ως προς τις θεωρητικές προτάσεις .
- ✓ **Ακραία σημεία (Outliers)**: Επιλέγεται η απομάκρυνση των ακραίων σημείων με εντολή (Remove Outliers) κατά την επεξεργασία με το PC-DMIS για δύο λόγους .

1. Τα μετρούμενα τεμάχια είναι πρότυποι δακτύλιοι με εξαιρετική ποιότητα επιφανειών και πολύ μικρή τραχύτητα . Έτσι τα ακραία σημεία είναι πολύ πιθανό να αποτελούν ψευτο-επαφές λόγω της κίνησης της μηχανής.
2. Τα τεμάχια εξετάζονται ως προς τη διάμετρο και για αυτό δεν είναι επιθυμητή η αλλοίωση του αποτελέσματος από μεμονωμένα ακραία σημεία ,τα οποία ακόμα και να είναι πραγματικά , αποτελούν στοιχεία τραχύτητας .

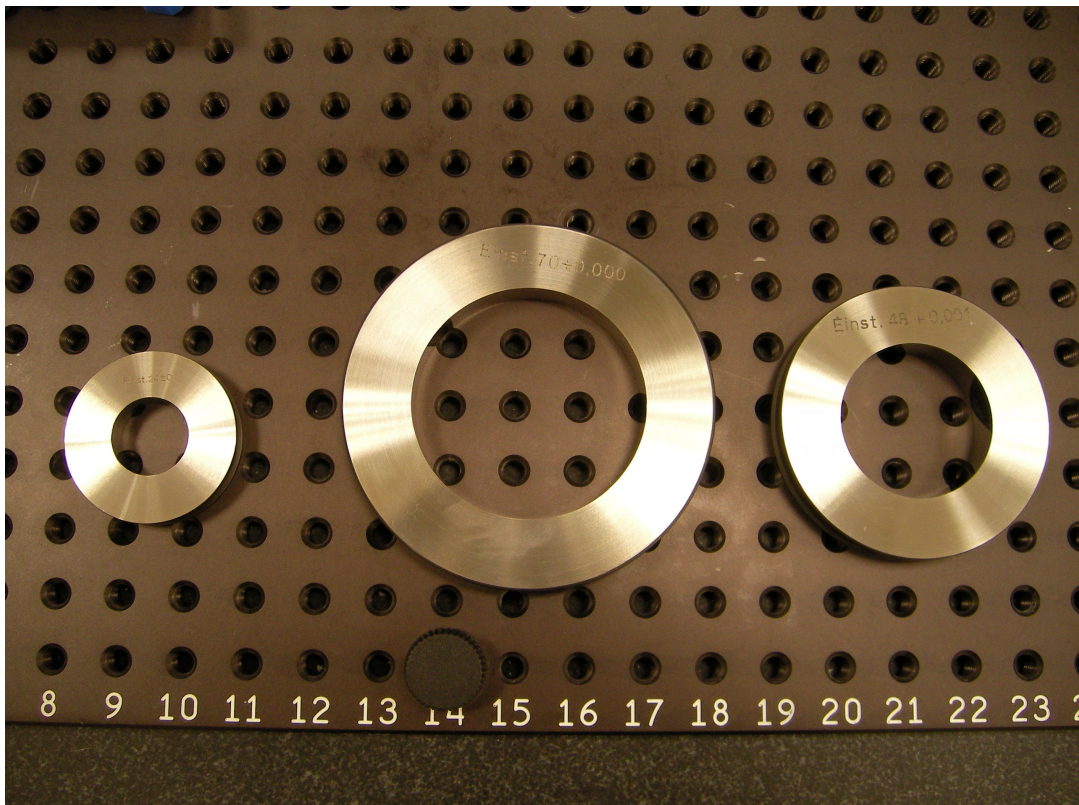
■ Μεταβλητοί παράγοντες:

✓ **Μέγεθος δακτυλίου :** Αν και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μεταβλητός παράγοντας στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της μεθόδου μέτρησης, καθώς αφορά το μετρούμενο τεμάχιο και όχι τη μηχανή μέτρησης , εντούτοις καλό είναι να εξεταστεί η συσχέτιση μεταξύ της ποιότητας του αποτελέσματος και του μεγέθους του δακτυλίου (διάμετρος), ώστε να είναι δυνατό να εξεταστεί μελλοντικά το εύρος εφαρμογής της μεθόδου (αν υπάρχει συσχέτιση).

Τα μετρούμενα τεμάχια είναι τρεις πρότυποι δακτύλιοι με διακριβωμένη τιμή από Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (2008). Τα χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα .

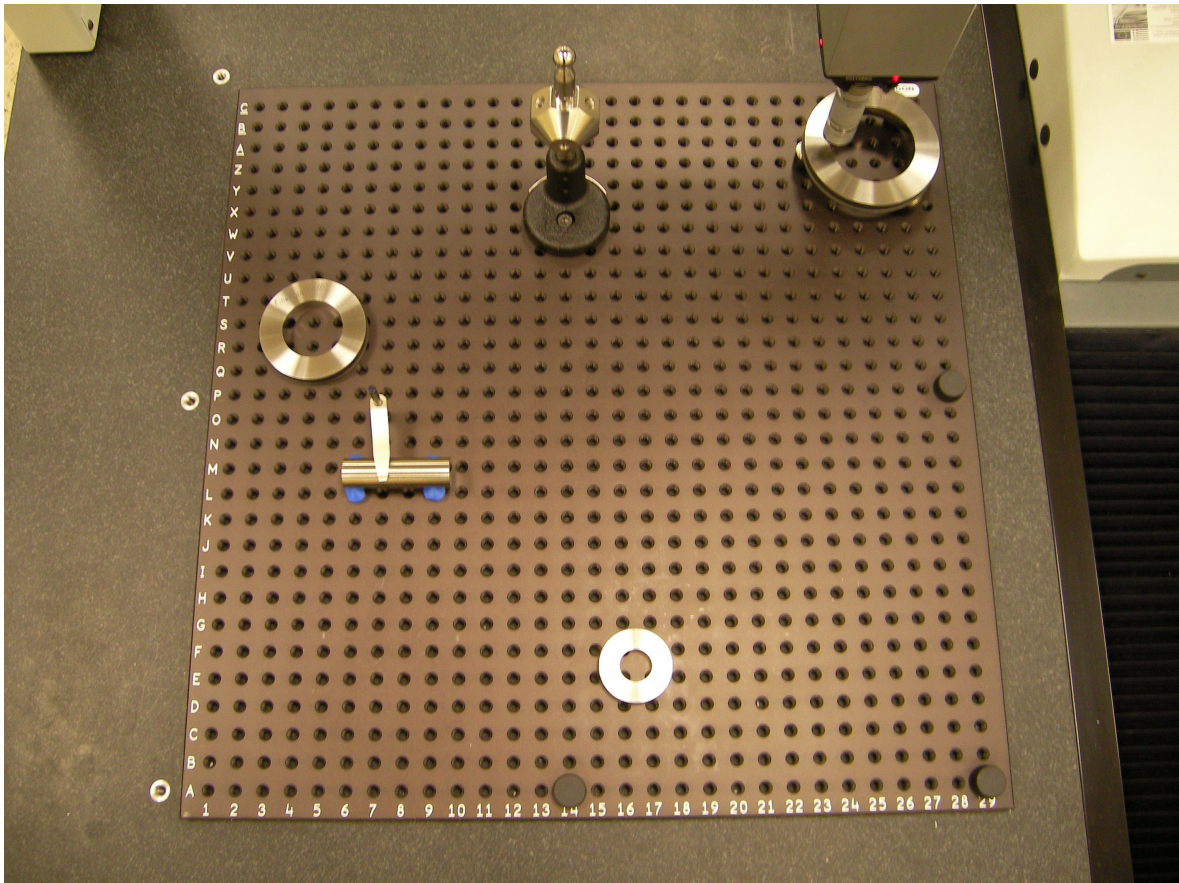
ΚΩΔΙΚΟΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ (mm)	ΔΙΑΚΡΙΒΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ (mm)	ΒΑΘΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ (mm)
ΠΑ06	24	23,99897	5
ΠΑ07	48	47,99924	7
ΠΑ08	70	69,99868	7

Πίνακας 7.23: Χαρακτηριστικά των προτύπων δακτυλίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση



Εικόνα 7.24: Πρότυπων δακτυλίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των εργαστηριακών μετρήσεων

✓ **Τοποθέτηση-Προσανατολισμός (Location-Orientation):** Επιλέγεται τοποθέτηση των δοκιμίων στις πέντε θέσεις (A1, A29, Z1, Z29 και O15) της τράπεζας μέτρησης, και με σταθερό προσανατολισμό, ώστε να μην μεταβάλλεται αυτός ο παράγοντας. Στην (εικόνα 7.25) απεικονίζεται μέτρηση του δακτυλίου στη θέση Z29. Χρησιμοποιώντας αγγλικά γράμματα ως γραμμές και αριθμούς ως στήλες, μπορούμε να προσδιορίσουμε την θέση του δοκιμίου πάνω στην τράπεζα μέτρησης (νοητά τέμνοντας γραμμή με στήλη). Έτσι καλύπτουμε όλες τις πιθανές θέσεις, όπου μπορεί να γίνει μέτρηση και πιθανή διαφοροποίηση συμπεριφοράς της μηχανής CMM όσον αφορά την ακρίβεια της μέτρησης, εξαρτώμενη από την θέση του δακτυλίου πάνω στην τράπεζα μέτρησης.



Εικόνα 7.25: Πραγματοποίηση μέτρησης στη θέση Z29

7.3.2. Μελέτη αποτελεσμάτων της μέτρησης

Αποτελέσματα της μέτρησης είναι η μετρημένη διάμετρος των δακτυλίων. Για την στατιστική ανάλυση τους και εξαγωγή ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων πρέπει να μετασχηματιστούν μέσω Excel, καθώς και να προστεθούν και κάποια άλλα στοιχεία. Έτσι τα προς ανάλυση αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα παρακάτω.

■ Πραγματική διαφορά διακριβωμένης τιμής διαμέτρου από τη μετρημένη τιμή:

Πρόκειται για την στάθμη της αριθμητικής τιμής του αποτελέσματος, ποσοτικό μέγεθος. Επειδή όμως τα μετρούμενα τεμάχια είναι τρεις δακτύλιοι διαφορετικής διαμέτρου, δεν θα μπορούσαν να εξετασθούν συνολικά τα αποτελέσματα βάσει της ίδιας της μετρημένης τιμής. Έτσι εξετάζεται η διαφορά της διακριβωμένης τιμής του κάθε δακτυλίου από τη μετρημένη, εξετάζεται δηλαδή η στάθμη της τιμής της μέτρησης ως προς τη στάθμη της διακριβωμένης τιμής. Ο προσδιορισμός πραγματική σημαίνει ότι η διαφορά μπορεί να έ-

χει θετικές και αρνητικές τιμές. Η ανάλυση του αποτελέσματος μπορεί να υποδείξει μόνο ποσοτική συσχέτιση μεταξύ της τιμής της διαμέτρου και των μεταβλητών, χωρίς να δίνει τη δυνατότητα αξιόπιστης ποιοτικής ανάλυσης. Θα είναι δηλαδή μία απόδειξη του κατά πόσο εξαρτάται η στάθμη του αποτελέσματος από τους παράγοντες που εξετάζονται, χωρίς όμως να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά (π.χ. ακρίβεια, διασπορά). Όμως η γνώση του βαθμού συσχέτισης αφενός θα επιβεβαιώσει, η θα διαψεύσει, τη βαρύτητα των εξεταζόμενων παραγόντων ως προς τη διαμόρφωση του αποτελέσματος, ενώ μπορεί να είναι χρήσιμη σε μελλοντικές μετρήσεις. Παραδείγματος χάριν, έστω ότι εξετάζεται μεγάλος διάμετρος ενός δακτυλίου, και έχει διαπιστωθεί ότι στη θέση O15 της τράπεζας μέτρησης, έχουμε τιμή πιο κοντινή στην πραγματική. Τότε καλό είναι να χρησιμοποιηθεί η θέση O15, ως μια επιπλέον διασφάλιση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Συνοψίζοντας, η πραγματική διαφορά της διακριβωμένης τιμής από τη μετρημένη, κατά τη στατιστική ανάλυση είναι σε θέση να υποδείξει την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ ποσοτικών χαρακτηριστικών του αποτελέσματος και των παραγόντων-μεταβλητών που εξετάζονται. Η γνώση αυτή είναι επιθυμητή, αλλά δεν είναι σε θέση να παρέχει ολοκληρωμένη αξιολόγηση του αποτελέσματος, καθώς δεν είναι σε θέση να αξιολογήσει αξιόπιστα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του.

■ Απόλυτη απόκλιση μεταξύ μετρημένης και διακριβωμένης τιμής διαμέτρου :

Η απόλυτη απόκλιση τους και η στατιστική ανάλυσή της, πρόκειται να υποδείξει τη συσχέτιση μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών και ποιοτικού χαρακτηριστικού του αποτελέσματος της μέτρησης και συγκεκριμένα της ακρίβειας της μέτρησης. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό μιας μεθόδου μέτρησης και το πιο ισχυρό κίνητρο για τη βελτιστοποίηση της. Εφόσον αποδειχθεί συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και της ακρίβειας της μέτρησης, θα ακολουθήσει και η πρόταση για βελτιστοποίηση της μεθόδου μέτρησης διαμέτρου δακτυλίων.

■ Τυπική απόκλιση μετρημένων τιμών διαμέτρου :

Κάνοντας μετρήσεις για κάθε θέση στη τράπεζα μέτρησης και ανά δακτύλιο παίρνουμε δέκα αποτελέσματα διαμέτρου. Μαζί με τις τιμές της διαμέτρου εξάγεται στο φύλλο μετρήσεων και η τυπική απόκλιση μεταξύ αυτών των μετρήσεων. Με τη στατιστική ανάλυση της τυπικής απόκλισης των μετρήσεων διαμέτρου πρόκειται να περιγραφούν και πάλι πο-

ιστικά χαρακτηριστικά του αποτελέσματος και συγκεκριμένα η διασπορά και η επαναληψιμότητα. Το μέγεθος της τυπικής απόκλισης χαρακτηρίζει τόσο τη διασπορά των μετρήσεων (απόκλιση επιμέρους τιμών), όσο και την επαναληψιμότητα της μεθόδου, δηλαδή πόσο αξιόπιστα και επαναλήψιμα μπορούν να θεωρηθούν τα αποτελέσματα. Άρα, αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και της τυπικής απόκλισης, θα αποτελέσει τον επόμενο παράγοντα, ως προς τη βαρύτητα, βάσει του οποίου θα καθοριστεί η βέλτιστη μέθοδος μέτρησης.

7.4. ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Εργαστηριακή διεξαγωγή μετρήσεων θεωρείται ολοκληρωμένη, όταν καλύπτει όλες τις πιθανές περιπτώσεις συνδυασμών των διάφορων τιμών των μεταβλητών, ώστε να εξεταστεί η σημαντικότητα ανεξάρτητων μεταβλητών ως προς το αποτέλεσμα. Έτσι καθορίζουμε στρατηγική διεξαγωγής μετρήσεων, ώστε να μη διαφύγει κάποια περίπτωση.

Έχουμε επιλέξει πέντε σημεία στη τράπεζα μέτρησης της μηχανής CMM, καλύπτοντας πιθανές τοποθεσίες, όπου μπορεί να γίνει μέτρηση. Επίσης μετράμε τρία δακτύλια με διαμέτρους των 24, 48 και 70 mm σε κάθε θέση, με αυτόν των τρόπο καλύπτουμε μετρήσεις σε μικρού, μεσαίου και μεγάλου διαμέτρου δακτυλίου.

Η μέτρηση ξεκινάει στη θέση A1, γίνονται μετρήσεις και των τριών δακτυλίων εκεί. Μετά ακολουθεί θέση A29, Z1, Z29 και O15.

Η μέτρηση γίνεται με διατυπωμένη μέθοδο μέτρησης δακτυλίου που έχουμε περιγράψει στη (§ 7.2). Σε κάθε θέση για κάθε δακτύλιο γίνονται 10 μετρήσεις και καταχωρείται η τιμή της μέτρησης στο αντίστοιχο πεδίο του Microsoft Excel.

Το Excel υπολογίζει το μέσο όρο των δέκα μετρήσεων διαμέτρου, καθώς επίσης και την τυπική απόκλιση των τιμών της διαμέτρου. Τα αντιγράφει στο επίσημο φύλλο μετρήσεων ως αποτελέσματα που αφορούν ένα συγκεκριμένο δακτύλιο σε μια συγκεκριμένη θέση. Επίσης στο φύλλο μετρήσεων του Excel γίνεται και ο μετέπειτα μετασχηματισμός των τιμών, ώστε να υπάρχουν τα απαιτούμενα δεδομένα για τη στατιστική ανάλυση.

8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

8.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

ΘΕΣΗ	Α/Α	ΔΟΚΙΜΙΟ					
		24		48		70	
		τιμές (mm)	τυπική απόκλιση	τιμές (mm)	τυπική απόκλιση	τιμές (mm)	τυπική απόκλιση
A1	1	23,99900	0,00004	47,99930	0,00006	69,99861	0,00006
	2	23,99892		47,99921		69,99865	
	3	23,99889		47,99919		69,99857	
	4	23,99894		47,99938		69,99868	
	5	23,99900		47,99920		69,99868	
	6	23,99904		47,99928		69,99875	
	7	23,99897		47,99918		69,99875	
	8	23,99898		47,99925		69,99874	
	9	23,99899		47,99924		69,99868	
	10	23,99897		47,99918		69,99866	
A29	1	23,99909	0,00005	47,99980	0,00006	69,99866	0,00004
	2	23,99908		47,99983		69,99866	
	3	23,99914		47,99983		69,99867	
	4	23,99904		47,99986		69,99870	
	5	23,99911		47,99971		69,99870	
	6	23,99918		47,99976		69,99875	
	7	23,99900		47,99983		69,99865	
	8	23,99906		47,99974		69,99864	
	9	23,99912		47,99968		69,99875	
	10	23,99905		47,99973		69,99875	

ΘΕΣΗ	Α/Α	ΔΟΚΙΜΙΟ					
		24		48		70	
		τιμές (mm)	τυπική απόκλιση	τιμές (mm)	τυπική απόκλιση	τιμές (mm)	τυπική απόκλιση
Z1	1	23,99949	0,00003	47,99991	0,00005	69,99898	0,00005
	2	23,99940		47,99999		69,99893	
	3	23,99942		47,99999		69,99890	
	4	23,99948		47,99997		69,99890	
	5	23,99948		48,00002		69,99889	
	6	23,99948		47,99989		69,99889	
	7	23,99947		47,99996		69,99889	
	8	23,99952		48,00001		69,99887	
	9	23,99948		48,00007		69,99880	
	10	23,99945		48,00000		69,99881	
Z29	1	23,99943	0,00005	47,99993	0,00007	69,99909	0,00005
	2	23,99939		47,99994		69,99910	
	3	23,99938		47,99989		69,99908	
	4	23,99935		47,99997		69,99902	
	5	23,99935		47,99983		69,99906	
	6	23,99938		47,99984		69,99909	
	7	23,99935		48,00001		69,99914	
	8	23,99941		48,00003		69,99899	
	9	23,99935		47,99987		69,99902	
	10	23,99949		47,99994		69,99900	
O15	1	23,99950	0,00003	47,99991	0,00004	69,99879	0,00008
	2	23,99948		47,99993		69,99896	
	3	23,99944		47,99988		69,99903	
	4	23,99945		47,99993		69,99900	
	5	23,99943		47,99989		69,99896	
	6	23,99948		47,99986		69,99894	
	7	23,99941		47,99985		69,99891	
	8	23,99942		47,99986		69,99886	
	9	23,99942		47,99990		69,99893	
	10	23,99944		47,99997		69,99882	

Πίνακας 8.1: Μετρημένες τιμές και τυπική απόκλιση των προτύπων δακτυλίων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση

Η τυπική απόκλιση (s) βρίσκουμε με την συνάρτηση STDEV της εφαρμογής Microsoft Excel. Η οποία υπολογίζει την τυπική απόκλιση ενός πληθυσμού βάσει δείγματος . Η τυπική απόκλιση αποτελεί μέτρο της διασποράς των τιμών σε σχέση με την τιμή του αριθμητικού μέσου όρου .

ΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ		
	24	48	70
	Τυπική απόκλιση (mm)		
A1	0,00004	0,00006	0,00006
A29	0,00005	0,00006	0,00004
Z1	0,00003	0,00005	0,00005
Z29	0,00005	0,00007	0,00005
O15	0,00003	0,00004	0,00008
τιμές αναφοράς	0,00025	0,00025	0,00025

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωμένες τιμές της τυπικής απόκλισης των προτύπων δακτυλίων

ΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ		
	24	48	70
	Μέσες τιμές (mm)		
A1	23,99897	47,99924	69,99868
A29	23,99909	47,99978	69,99869
Z1	23,99947	47,99998	69,99889
Z29	23,99939	47,99993	69,99906
O15	23,99945	47,99990	69,99892
τιμές αναφοράς	23,99956	47,99986	69,99898

Πίνακας 8.3: Συγκεντρωμένες μέσες τιμές των προτύπων δακτυλίων και διακριβωμένες τιμές τους

Η μέση τιμή βρίσκουμε με τη συνάρτηση AVERAGE της εφαρμογής Microsoft Excel.

ΘΕΣΗ	Α/Α	ΔΟΚΙΜΙΟ		
		24	48	70
		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (mm)		
Α1	1	0,00056	0,00056	0,00037
	2	0,00064	0,00065	0,00033
	3	0,00067	0,00067	0,00041
	4	0,00062	0,00048	0,00030
	5	0,00056	0,00066	0,00031
	6	0,00052	0,00058	0,00023
	7	0,00059	0,00068	0,00023
	8	0,00058	0,00061	0,00024
	9	0,00057	0,00062	0,00030
	10	0,00059	0,00068	0,00032
Α29	1	0,00047	0,00006	0,00032
	2	0,00048	0,00003	0,00032
	3	0,00042	0,00003	0,00031
	4	0,00052	0,00000	0,00028
	5	0,00045	0,00015	0,00028
	6	0,00038	0,00010	0,00023
	7	0,00056	0,00003	0,00033
	8	0,00050	0,00012	0,00034
	9	0,00044	0,00018	0,00023
	10	0,00051	0,00013	0,00023
Ζ1	1	0,00007	-0,00005	0,00000
	2	0,00016	-0,00013	0,00005
	3	0,00014	-0,00013	0,00008
	4	0,00008	-0,00011	0,00008
	5	0,00008	-0,00016	0,00009
	6	0,00008	-0,00003	0,00009
	7	0,00009	-0,00010	0,00009
	8	0,00004	-0,00015	0,00011
	9	0,00008	-0,00021	0,00018
	10	0,00011	-0,00014	0,00017

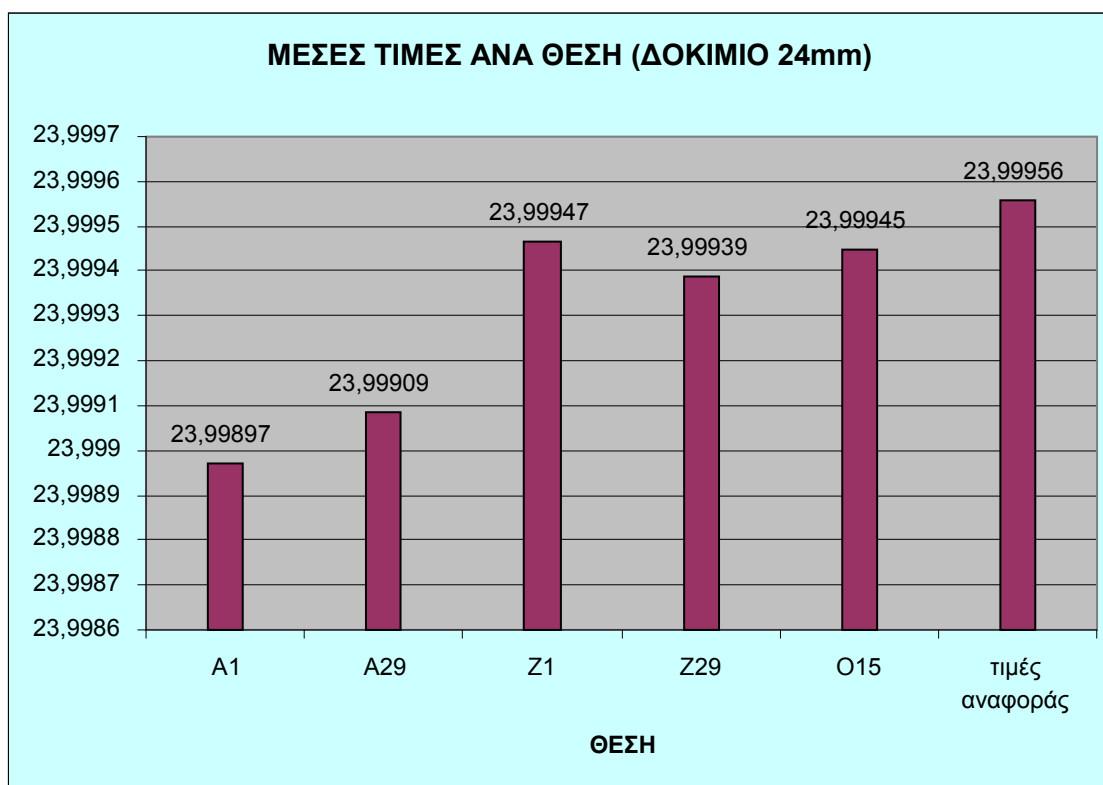
ΘΕΣΗ	Α/Α	ΔΟΚΙΜΙΟ		
		24	48	70
		ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (mm)		
Z29	1	0,00013	-0,00007	-0,00011
	2	0,00017	-0,00008	-0,00012
	3	0,00018	-0,00003	-0,00010
	4	0,00021	-0,00011	-0,00004
	5	0,00021	0,00003	-0,00008
	6	0,00018	0,00002	-0,00011
	7	0,00021	-0,00015	-0,00016
	8	0,00015	-0,00017	-0,00001
	9	0,00021	-0,00001	-0,00004
	10	0,00007	-0,00008	-0,00002
O15	1	0,00006	-0,00005	0,00019
	2	0,00008	-0,00007	0,00002
	3	0,00012	-0,00002	-0,00005
	4	0,00011	-0,00007	-0,00002
	5	0,00013	-0,00003	0,00002
	6	0,00008	0,00000	0,00004
	7	0,00015	0,00001	0,00007
	8	0,00014	0,00000	0,00012
	9	0,00014	-0,00004	0,00005
	10	0,00012	-0,00011	0,00016

Πίνακας 8.4: Πραγματική απόκλιση των διακριβωμένων τιμών από μετρημένες τιμές των προτύπων δακτυλίων

Η πραγματική απόκλιση βρίσκουμε με την αφαιρέσει κάθε μετρημένης τιμής διαμέτρου από αντίστοιχη διακριβωμένη τιμή.

8.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

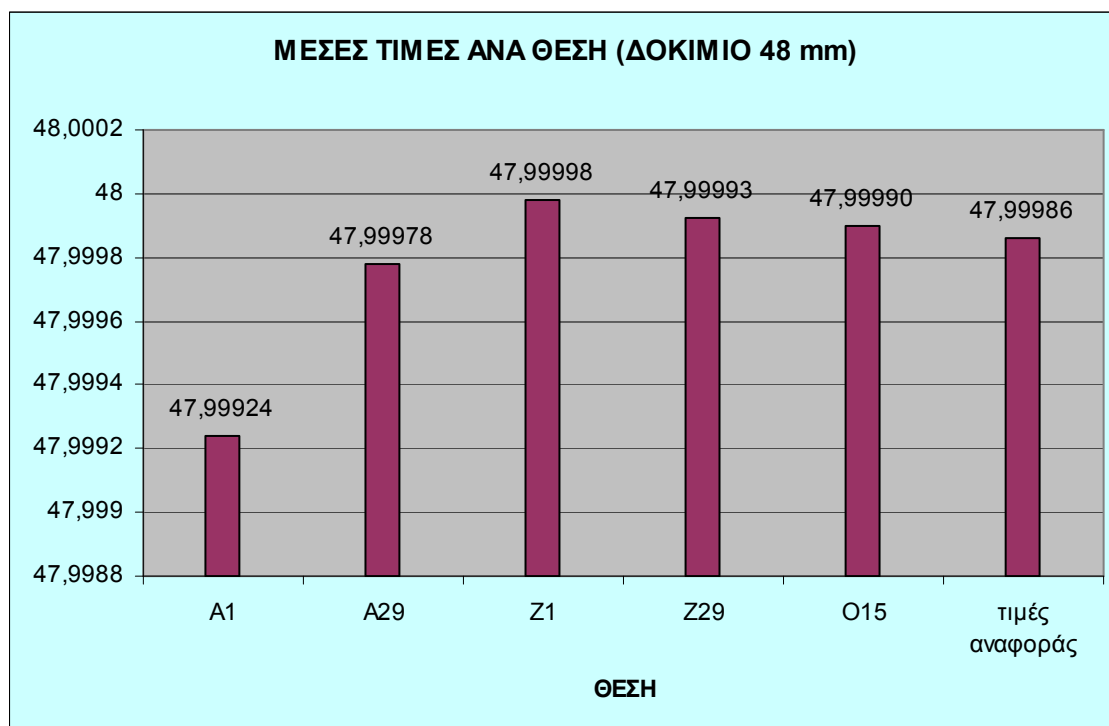
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε γραφήματα, ενώ κάτω από το καθένα γίνεται επεξήγηση των βασικών του στοιχείων.



Γράφημα 8.5: Μέση τιμή ανά θέση του δοκιμίου 24^{ov} χιλιοστών

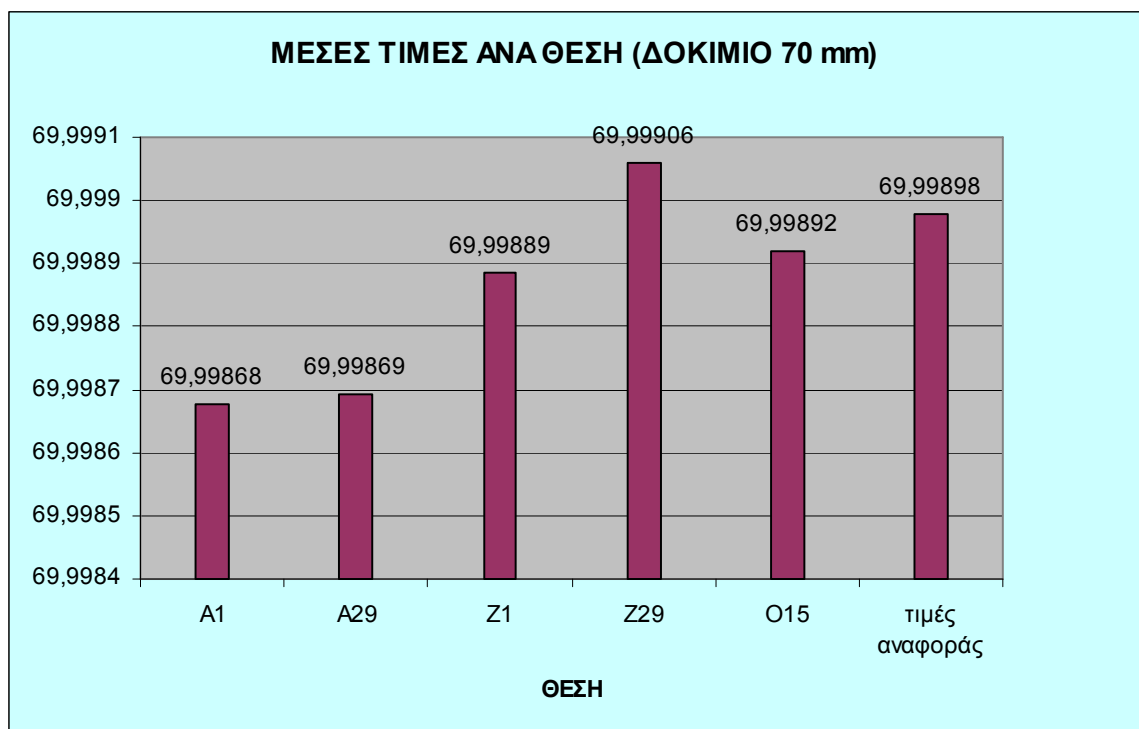
Η μέση τιμή είναι η καλύτερη εκτίμηση της πραγματικής τιμής. Έτσι εμείς κάνουμε εκτιμήσεις στα αποτελέσματα που έχουμε στη διάθεση μας.

Στο γράφημα αυτό παρατηρούμε, ότι κάνοντας μετρήσεις στις θέσεις Z1, O15 και Z29 έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια σε σχέση με τις θέσεις A29 και A1. Επίσης όλες μετρήσεις παρουσιάζουν τιμές διαμέτρων μικρότερες σε σχέση με την τιμή αναφοράς. Μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζει θέση Z1, ακολουθεί O15 και Z29.



Γράφημα 8.6: Μέση τιμή ανά θέση του δοκιμίου των 48^ο χιλιοστών

Στο γράφημα αυτό για το δοκίμιο των 48^ο χιλιοστών παρατηρούμε, ότι κάνοντας μετρήσεις στις θέσεις O15, Z29, Z1 και A29 έχουμε καλή ακρίβεια. Στις θέσεις Z1, Z29 και O15 οι μετρήσεις έχουν μεγαλύτερη τιμή διαμέτρου σε σχέση με τιμή αναφοράς, ενώ στις θέσεις A29 και A1 έχουν μικρότερη τιμή από τη τιμή αναφοράς. Επίσης στη θέση A1 παρατηρείται μικρότερη ακρίβεια μέτρησης.



Γράφημα 8.7: Μέση τιμή ανά θέση του δοκιμίου 70 χιλιοστών

Εδώ βλέπουμε ότι στις θέσεις O15, Z1 και Z29 έχουμε καλή ακρίβεια . Στις θέσεις O15, Z1, A1 και A29 οι μετρήσεις έχουν μικρότερη τιμή διαμέτρου σε σχέση με τιμή αναφοράς, ενώ στη θέση Z29 παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή από τη τιμή αναφοράς . Χειρότερη ακρίβεια έχουν θέσεις A1 και A29.

Παρακάτω παρουσιάζουμε συγκεντρωτικό πίνακα με απόλυτη απόκλιση μετρημένης μέσης τιμής κάθε διαμέτρου από αντίστοιχη τιμή αναφοράς.

ΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ		
	24	48	70
	ΑΠΟΛΥΤΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ (mm)		
A1	0,00059	0,00062	0,00030
A29	0,00047	0,00008	0,00029
Z1	0,00009	0,00012	0,00009
Z29	0,00017	0,00006	0,00008
O15	0,00011	0,00004	0,00006

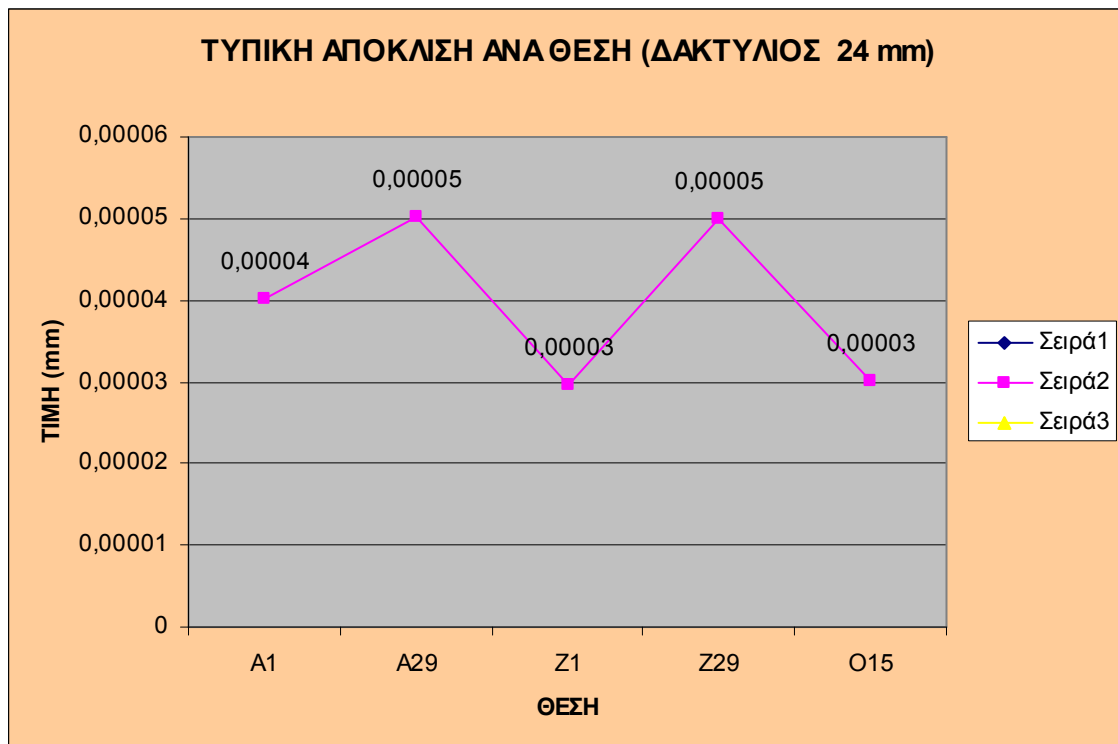
Πίνακας 8.8: Απόλυτες αποκλίσεις μέσω των τιμών των προτύπων δακτυλίων

Στον πίνακα παρατηρούμε ότι μερικοί αριθμοί έχουν κόκκινο χρώμα αυτό οφείλεται στο ότι έχουν αρνητικό πρόσημο στην πραγματική απόκλιση. Επίσης στη θέση A1 και στους τρεις διαμέτρους έχουμε μεγαλύτερη απόλυτη απόκλιση, για αυτό το λόγο το χρωματίζω με κίτρινο χρώμα . Αντίθετα με το πράσινο χρώμα έχουμε σημειώσει μικρότερες απόλυτες αποκλίσεις και είναι στη θέση Z1 για διάμετρο των 24 mm, στη θέση O15 για διαμέτρους των 48 mm και 70 mm .

Τυπική απόκλιση (s).

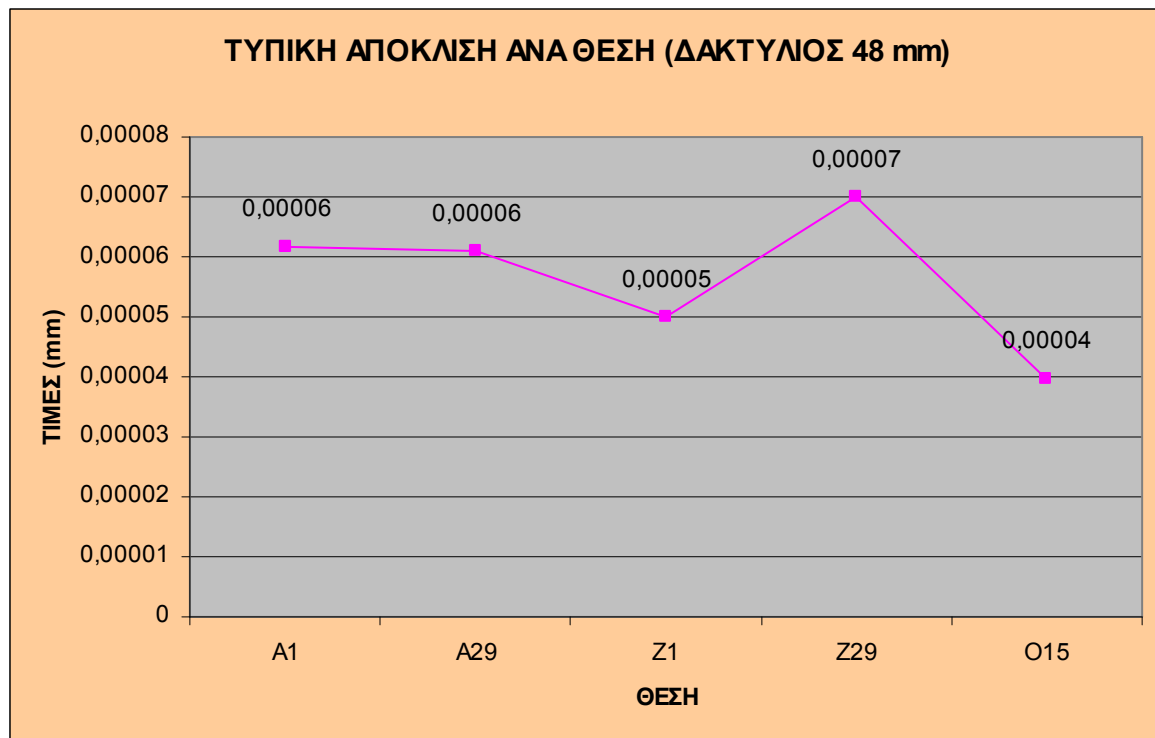
Η εκτίμηση της διακύμανσης των μεμονωμένων τιμών x_i από τη μέση τιμή τους , γίνεται με την τυπική απόκλιση (s) . Το πλήθος των μετρήσεων N προσδιορίζει και την αξιοπιστία της αριθμητικής τιμής της τυπικής απόκλισης.

Από το Πίνακα 8.2 στη σελίδα 148, δημιουργούμε γραφήματα τυπικών αποκλίσεων για να εξετάσουμε τα δεδομένα , συγκεκριμένα αποκλίσεις ανά θέση μέτρησης και μέγεθος δοκιμίου.



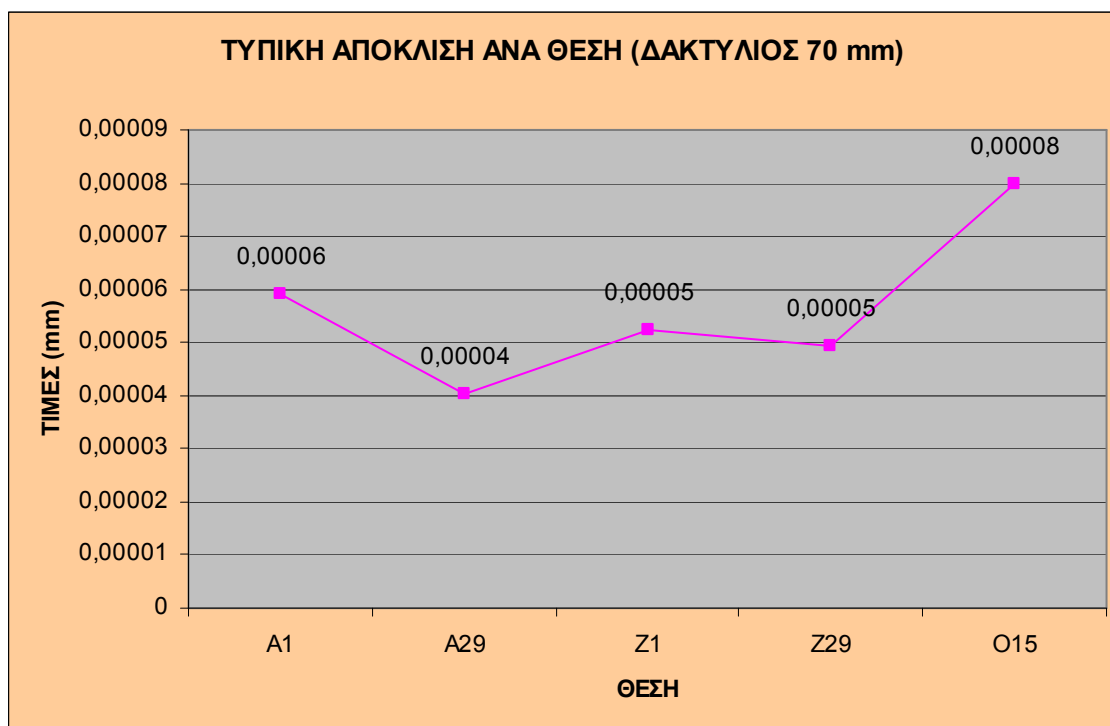
Γράφημα 8.9: Τυπική απόκλιση στις θέσεις A1, A29, Z1, Z29 και O15 του δακτυλίου 24^{ov} χιλιοστών

Στο (γράφημα 8.9) παρατηρούμε ότι για δακτύλιο των 24 χιλιοστών η μηχανή CMM δίνει μέγιστη τυπική απόκλιση 0,00005 mm και αντίστοιχα ελάχιστη 0,00003 mm . Οι θέσεις Z1 και O15 έχουν μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με άλλες θέσεις μέτρησης .



Γράφημα 8.10: Τυπική απόκλιση στις θέσεις A1, A29, Z1, Z29 και O15 του δακτυλίου των 48 χιλιοστών

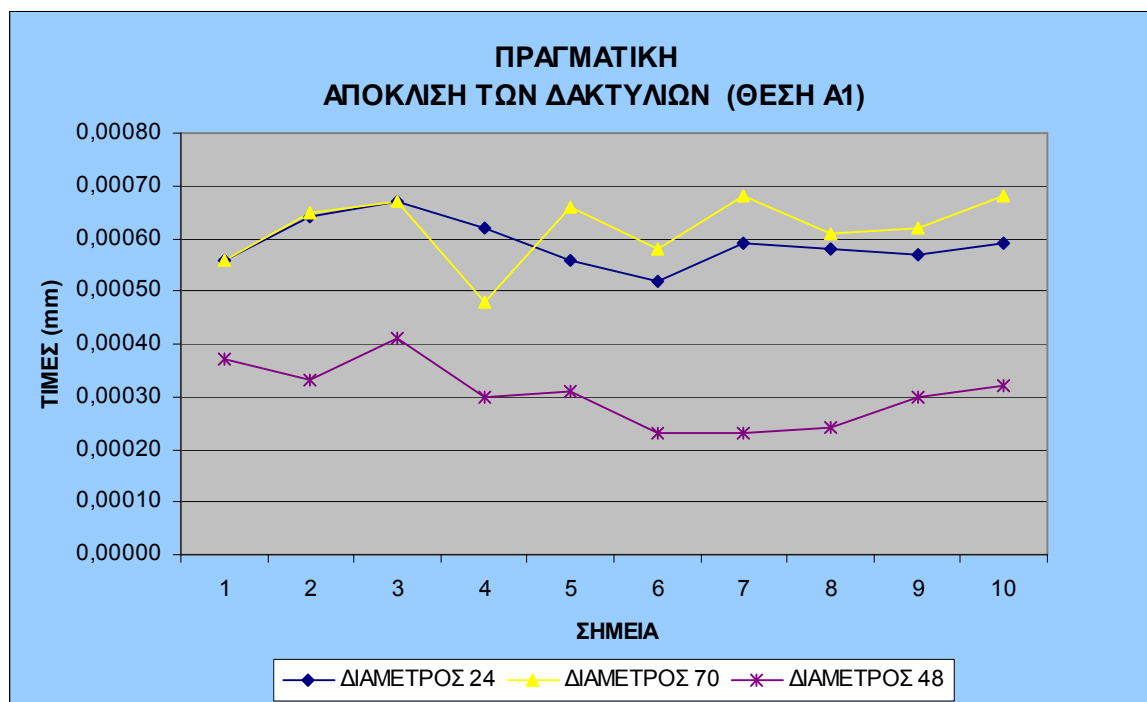
Στο (γράφημα 8.10) παρατηρούμε ότι για δακτύλιο των 48 χιλιοστών η μηχανή CMM δίνει μέγιστη τυπική απόκλιση 0,00007 mm και αντίστοιχα ελάχιστη 0,00004 mm . Οι θέσεις Z1 και O15 έχουν μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με άλλες θέσεις μέτρησης .



Γράφημα 8.11: Τυπική απόκλιση στις θέσεις A1, A29, Z1, Z29 και O15 του δακτυλίου των 70 χιλιοστών

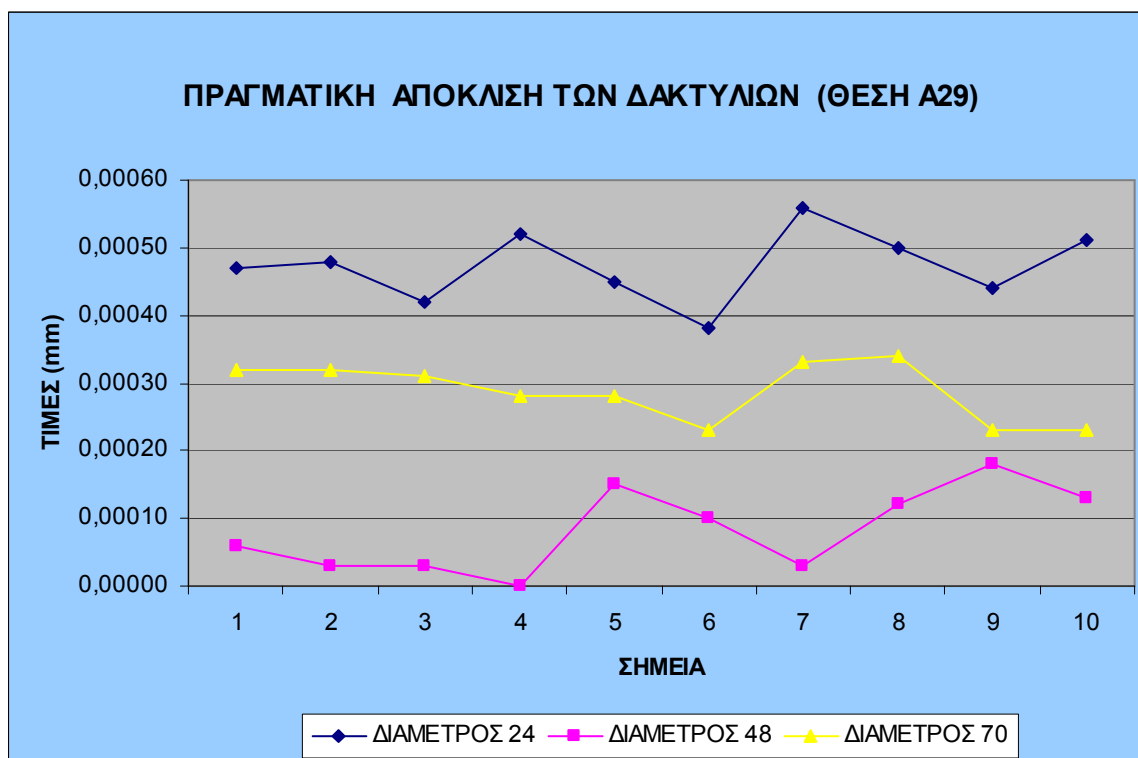
Στο (γράφημα 8.11) παρατηρούμε ότι για δακτύλιο των 70 χιλιοστών η μηχανή CMM δίνει μέγιστη τυπική απόκλιση 0,00008 mm και αντίστοιχα ελάχιστη 0,00004 mm . Οι θέσεις A29, Z1 και Z29 έχουν μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με άλλες θέσεις μέτρησης .

Είναι ενδιαφέρον να δούμε συμπεριφορά Μηχανής Μέτρησης Συντεταγμένων κατά διάρκεια της μέτρησης ανά θέση τράπεζας μέτρησης . Έτσι φτιάχνουμε γραφήματα πραγματικών αποκλίσεων όλων μετρούμενων τιμών από διακριβωμένες τιμές κάθε δακτυλίου αντίστοιχα , παίρνοντας στοιχεία από το Πίνακα 8.4 στη σελίδα 151 .



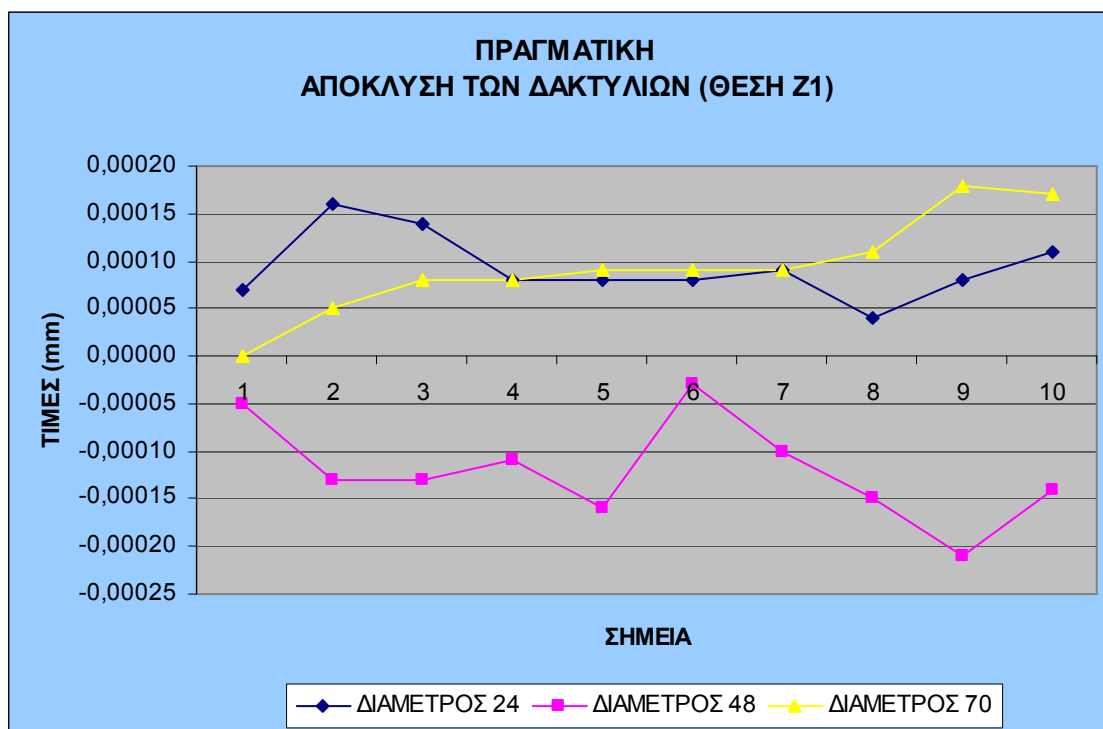
Γράφημα 8.12: Πραγματική απόκλιση των δακτυλίων στη θέση Α1

Διαπιστώνουμε ότι στη θέση Α1 μικρότερη απόκλιση παρατηρείται για μεσαίο διάμετρο των 48 mm, ενώ μικροί και μεγάλοι διάμετροι μέτρησης έχουν μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με τον μεσαίο διάμετρο. Επίσης όλες οι αποκλίσεις είναι με θετικό πρόσημο, που σημαίνει ότι μηχανή μετράει μικρότερο διάμετρο από το διακριβωμένο. Ακόμη βλέπουμε σχετικά μικρές διακυμάνσεις στις τιμές αποκλίσεων και των τριών δακτυλίων, δηλαδή οι καμπύλες δεν έχουν απότομες μεταβολές.



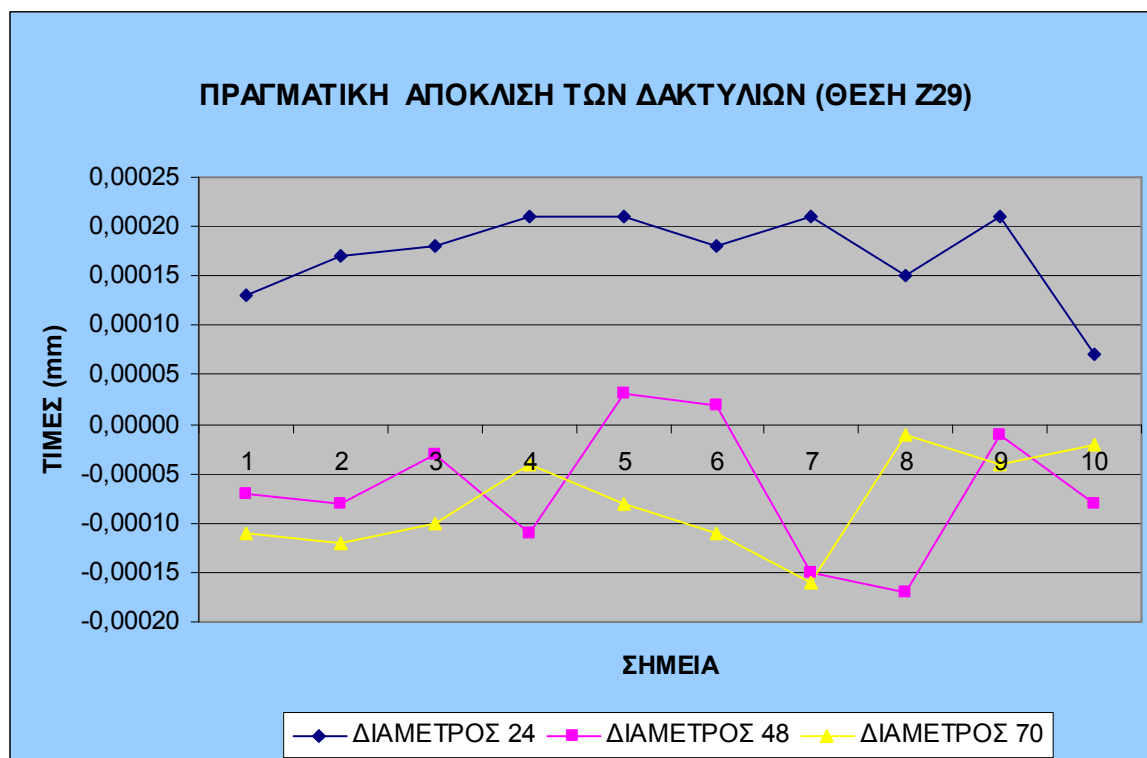
Γράφημα 8.13: Πραγματική απόκλιση των δακτυλίων στη θέση A29

Σε αυτό το γράφημα (θέση 29) παρατηρούμε εξαιρετικά μικρή απόκλιση για διάμετρο των 48 mm . Πιο μεγάλη απόκλιση έχει διάμετρος των 24 mm και μεσαία των 70 mm . Επίσης όλες οι αποκλίσεις είναι με θετικό πρόσημο, που σημαίνει ότι μηχανή μετράει μικρότερο διάμετρο από το διακριβωμένο . Ακόμη βλέπουμε σχετικά μικρές διακυμάνσεις στις τιμές αποκλίσεων και των τριών δακτυλίων, δηλαδή οι καμπύλες δεν έχουν απότομες μεταβολές .



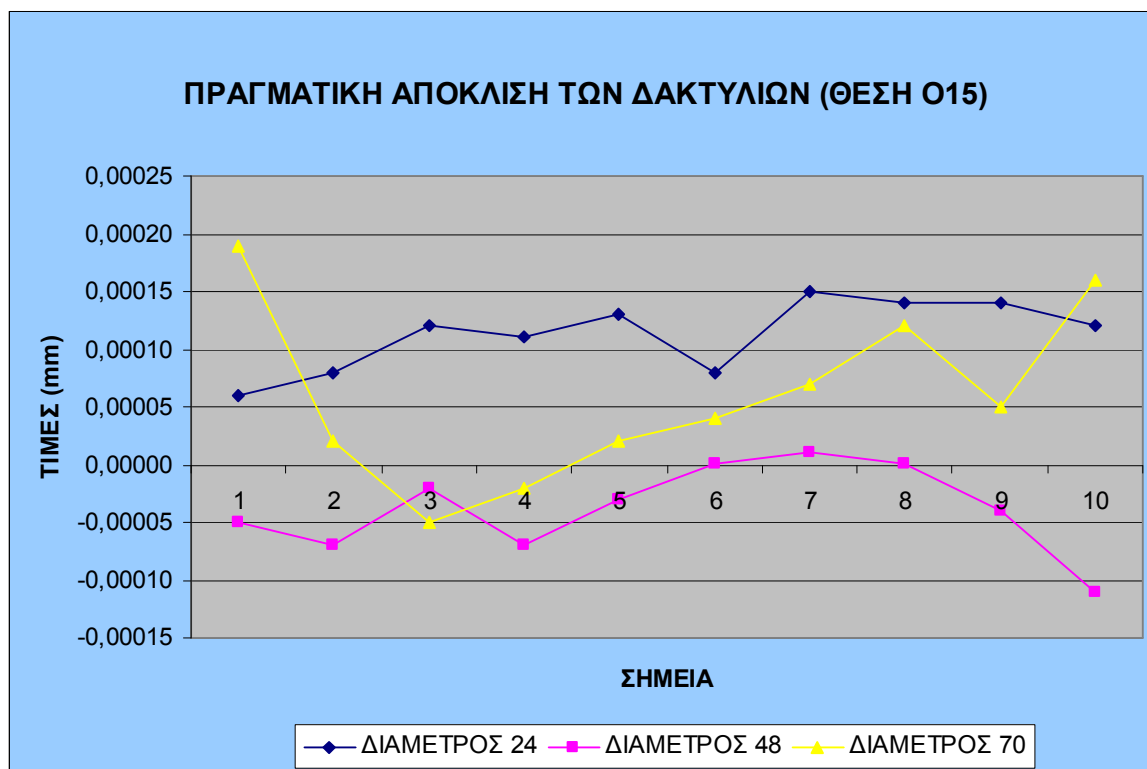
Γράφημα 8.14: Πραγματική απόκλιση των δακτυλίων στη θέση Z1

Στη θέση Z1 φαίνονται οι διάμετροι των 70 και 24 mm να έχουν μικρή και θετική απόκλιση με μικρές διακυμάνσεις τιμών . Για το διάμετρο των 48 χιλιοστών παρατηρούμε αρνητική απόκλιση και διακύμανση τιμών . Αρνητική απόκλιση σημαίνει ότι μηχανή δίνει μεγαλύτερο διάμετρο σε σχέση με διακριβωμένο και διακύμανση τιμών δίνει μεγάλο εύρος αποκλίσεων .



Γράφημα 8.15: Πραγματική απόκλιση των δακτυλίων στη θέση Z29

Στη θέση Z29 για διάμετρο των 24 mm έχουμε θετική απόκλιση μεσαίας τάξεως και μικρής μεταβλητότητας. Για διάμετρο των 48 mm καμπύλη δίνει θετικά και αρνητικά σημεία με μεγάλη διακύμανση, αλλά με μικρή απόκλιση. Επίσης διάμετρος των 70 mm έχει αρνητική και μικρή απόκλιση με σχετικά μικρή διακύμανση τιμών.



Γράφημα 8.16: Πραγματική απόκλιση των δακτυλίων στη θέση Ο15

Στη θέση Ο15 για διάμετρο των 24 mm έχουμε θετική απόκλιση μεσαίας τάξεως και μικρής μεταβλητότητας. Για διάμετρο των 48 mm καμπύλη δίνει θετικά και αρνητικά σημεία με μικρή διακύμανση, αλλά με μικρή απόκλιση. Επίσης διάμετρος των 70 mm έχει δύο τιμές αρνητικές και υπόλοιπες θετικές με μεγάλη διακύμανση τιμών και μεσαίας τάξεως ακρίβεια.

8.2.1. Μελέτη χαρακτηριστικών κατανομής μετρημένων τιμών

Για την μελέτη κανονικότητας κατανομής μετρημένων τιμών θα χρησιμοποιείται «Έλεγχος των Shapiro-Wilk για την κανονική κατανομή», είναι πολύ γνωστός έλεγχος καλής προσαρμογής για την κανονική κατανομή. Εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει ότι αυτός ο έλεγχος έχει υψηλή ισχύ σε πολλές περιπτώσεις σε σύγκριση με πολλούς άλλους ελέγχους της σύνθετης υπόθεσης της κανονικότητας, περιλαμβανομένου και του ελέγχου του Lilliefors και του ελέγχου χ^2 .

Έστω X_1, X_2, \dots, X_n δείγμα (n) παρατηρήσεων πάνω στην τυχαία μεταβλητή X , της οποίας η άγνωστη συνάρτηση κατανομής είναι

$$F_X(x), x \in \mathbb{R}.$$

Οι προς έλεγχο υποθέσεις είναι οι εξής:

H_0 : η $F_X(x)$ είναι η συνάρτηση κατανομής της κανονικής κατανομής με άγνωστη μέση τιμή και άγνωστη διασπορά

H_1 : η $F_X(x)$ είναι η συνάρτηση κατανομής μίας μη κανονικής κατανομής.

Η στατιστική συνάρτηση για τον έλεγχο των υποθέσεων αυτών είναι η

$$T_3 = \frac{\left[\sum_{i=1}^k \alpha_i (X^{(n-i+1)} - X^{(i)}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2},$$

όπου $X^{(i)}$ είναι η i παρατήρηση του διατεταγμένου κατά αύξουσα τάξη μεγέθους δείγματος, k είναι ένας ακέραιος αριθμός περίπου ίσος με

$n/2$ και α_i , $i = 1, 2, \dots, k$ είναι σταθεροί συντελεστές. Εξαρτάται, δηλαδή, η T_3 τόσο από τις τετραγωνικές αποκλίσεις των παρατηρήσεων $\bar{X}^{(i)}$ από τον μέσο τους \bar{X} , όσο και από τις αποκλίσεις που έχουν στο διατεταγμένο δείγμα η πρώτη (ελάχιστη) παρατήρηση από την τελευταία (μέγιστη) παρατήρηση, η δεύτερη από την προτελευταία

κ.ο.κ.

Η στατιστική συνάρτηση T_3 συχνά συμβολίζεται με W και ο έλεγχος συχνά ονομάζεται έλεγχος W .

Παρατηρούμε ότι οι μικρές τιμές της στατιστικής συνάρτησης T_3 είναι εκείνες οι οποίες αποτελούν ένδειξη ότι η μηδενική υπόθεση δεν είναι αληθής. Επομένως, ο κανόνας απόφασης είναι ο εξής:

Η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται σε επίπεδο σημαντικότητας α εάν η τιμή της στατιστικής συνάρτησης T_3 είναι μικρότερη από το α -ποσοστιαίο σημείο της κατανομής της.

Παρατήρηση: Χρήση του ελέγχου W επιτρέπεται μόνο στην περίπτωση που $n \leq 50$. Για την περίπτωση $n > 50$, έχουν μελετηθεί εναλλακτικοί και παρόμοιας φύσης έλεγχοι από τους D'Agostino (1971) και από τους Shapiro και Francia (1972).

Παρακάτω γίνεται έλεγχος κανονικότητας κατανομής μετρημένων τιμών χρησιμοποιώντας τον «Έλεγχο των Shapiro-Wilk για την κανονική κατανομή». Για κάθε διάμετρο των δοκιμίων και για διάφορες θέσεις τράπεζας μέτρησης χωριστά. Έτσι για τρεις διαμέτρους των δοκιμίων 24, 48 και 70 (mm) στις θέσεις A1, A29, Z1, Z29 και O15 συνολικά έχουμε 15 ελέγχους.

Χρησιμοποιώντας online εφαρμογή για έλεγχο κανονικότητας από την ιστοσελίδα <http://dittami.gmxhome.de/shapiro/> υπολογίζουμε τιμές με στατιστικό κριτήριο το «Shapiro-Wilk Normality Test».

1. Στην θέση A1 για δοκίμιο των 24 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

. S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", [Biometrika 52: 59](#)
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

23,99900
23,99892
23,99889
23,99894
23,99900
23,99904
23,99897
23,99898
23,99899
23,99897

CalculateClear all

Results:

```
n = 10
Mean = 23.99897
SD = 0.00004346134936818885
W = 0.9653615854782598

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> H0 accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> H0 accepted
```

--> Your data seems normal

Είναι 10 μετρημένες τιμές της διαμέτρου 24 (mm) , n = 10.

Μέση τιμή 23,99897 mm και τυπική απόκλιση 0,00004346 mm .

Η τιμή του Threshold για ($p = 0,05$) είναι μεγαλύτερη από 0,05, άρα μπορούμε να δεχτούμε ότι η κατανομή προσεγγίζει την κανονική κατανομή με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Μάλιστα στο τέλος εμφανίζει και μήνυμα ότι κατανομή φαίνεται κανονική (Your data seems normal).

2. Στην θέση A29 για δοκίμιο των 24 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

23,99909
23,99908
23,99914
23,99904
23,99911
23,99918
23,99900
23,99906
23,99912
23,99905

Calculate Clear all

Results:

n = 10
Mean = 23.999087
SD = 0.000052715167541293535
W = 0.9946008446683183

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted

--> Your data seems normal

3. Στην θέση Z1 για δοκίμιο των 24 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

23,99949

23,99940

23,99942

23,99948

23,99948

23,99948

23,99947

23,99952

23,99948

23,99945

Calculate

Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 23.999466999999995
SD = 0.000034976182371732765
W = 0.9001453705104727

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

4. Στην θέση Z29 για δοκίμιο των 24 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

23,99943
23,99939
23,99938
23,99935
23,99935
23,99938
23,99935
23,99941
23,99935
23,99949

CalculateClear all

Results:

```
n = 10
Mean = 23.999387999999996
SD = 0.000045411696976414174
W = 0.8340162080138884

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO rejected
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO rejected
```

--> Your data is not normally distributed $p < 0.05$

Η τιμή του Threshold για ($p = 0,05$) είναι μικρότερη από 0,05 , άρα φαίνεται ότι η κατανομή δεν προσεγγίζει την κανονική κατανομή με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Μάλιστα στο τέλος εμφανίζει και μήνυμα ότι τα δεδομένα σας δεν διανέμονται κανονικά (Your data is not normally distributed $p < 0,05$). Όμως η τιμή του Threshold για ($p = 0,01$) είναι μεγαλύτερη από 0,01 , άρα μπορούμε να δεχτούμε ότι η κατανομή προσεγγίζει την κανονική κατανομή με επίπεδο εμπιστοσύνης 99%. Πρέπει να είμαστε προσεχτικοί στο συμπέρασμα, γιατί βρισκόμαστε σε ενδιαμέση περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται ως «περιοχή αβεβαιότητας» εντός της οποίας οποιοδήποτε συμπέρασμα είναι ενδεχόμενο να οδηγήσει σε αξιόλογο κίνδυνο κάποιου τύπου.

Σύμφωνα με «Κεντρικό Οριακό Θεώρημα» αν αυξήσουμε το μέγεθος του δείγματος N, θα έχουμε κατανομή που προσεγγίζει καλύτερα την κανονική κατανομή. Άρα μπορούμε να δεχτούμε ότι κατανομή προσεγγίζει την κανονική κατανομή.

5. Στην θέση O15 για δοκίμιο των 24 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", [Biometrika 52](#).
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

23,99950
23,99948
23,99944
23,99945
23,99943
23,99948
23,99941
23,99942
23,99942
23,99944

CalculateClear all

Results:

```
n = 10
Mean = 23.999447
SD = 0.000030203016773080732
W = 0.9153872601732735

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> H0 accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> H0 accepted
```

--> Your data seems normal

6. Στην θέση A1 για δοκίμιο των 48 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
47,99930
47,99921
47,99919
47,99938
47,99920
47,99928
47,99918
47,99925
47,99924
47,99918
```

Calculate Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 47.999241
SD = 0.00006419588079534701
W = 0.8818985094982673
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

7. Στην θέση A29 για δοκίμιο των 48 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

47,99980
47,99983
47,99983
47,99986
47,99971
47,99976
47,99983
47,99974
47,99968
47,99973

Calculate Clear all

Results:

n = 10
Mean = 47.999777
SD = 0.00006111010100245607
W = 0.9301962973931739

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> H0 accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> H0 accepted

--> Your data seems normal

8. Στην θέση Z1 για δοκίμιο των 48 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
47,99991
47,99999
47,99999
47,99997
48,00002
47,99989
47,99996
48,00001
48,00007
48,00000
```

Calculate Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 47.999981
SD = 0.000052376839665458556
W = 0.9590544359094534
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> H0 accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> H0 accepted
```

--> Your data seems normal

9. Στην θέση Z29 για δοκίμιο των 48 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
47,99993
47,99994
47,99989
47,99997
47,99983
47,99984
48,00001
48,00003
47,99987
47,99994
```

Calculate Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 47.999925000000005
SD = 0.00006770032003895626
W = 0.9567080267466799
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

10. Στην θέση O15 για δοκίμιο των 48 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", [Biometrika 52](#).
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

47,99991
47,99993
47,99988
47,99993
47,99989
47,99986
47,99985
47,99986
47,99990
47,99997

CalculateClear all

Results:

```
      n = 10
Mean = 47.999897999999995
SD   = 0.00003794733192154098
W    = 0.9500607413872784

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

11. Στην θέση A1 για δοκίμιο των 70 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
69,99861
69,99865
69,99857
69,99868
69,99868
69,99875
69,99875
69,99874
69,99868
69,99866
```

Calculate Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 69.998677
SD = 0.00005926400443959247
W = 0.9260618286127187
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

12. Στην θέση A29 για δοκίμιο των 70 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

69,99866
69,99866
69,99867
69,99870
69,99870
69,99875
69,99865
69,99864
69,99875
69,99875

Calculate Clear all

Results:

n = 10
Mean = 69.998693
SD = 0.000043728963197312564
W = 0.8563743625693216

Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> H0 accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> H0 accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> H0 rejected

--> Your data is not normally distributed $p < 0.10$

13. Στην θέση Z1 για δοκίμιο των 70 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
69,99898  
69,99893  
69,99890  
69,99890  
69,99889  
69,99889  
69,99889  
69,99887  
69,99880  
69,99881
```

Results:

```
n = 10  
Mean = 69.998886000000001  
SD = 0.000052323778320759324  
W = 0.9185265473690986
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted  
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted  
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

14. Στην θέση Z29 για δοκίμιο των 70 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52.
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

```
69,99909
69,99910
69,99908
69,99902
69,99906
69,99909
69,99914
69,99899
69,99902
69,99900
```

Calculate Clear all

Results:

```
n = 10
Mean = 69.999059
SD = 0.00004931756504594444
W = 0.9387231102276314
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

15. Στην θέση O15 για δοκίμιο των 70 (mm), έχουμε:

Shapiro-Wilk Normality Test

S. and Wilk, M. B. (1965). "Analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika* 52
Online version implemented by [Simon Dittami](#) (2009)

Paste data here: (results below)

69,99879
69,99896
69,99903
69,99900
69,99896
69,99894
69,99891
69,99886
69,99893
69,99882

CalculateClear all

Results:

```
n = 10
Mean = 69.99892
SD = 0.0000765941686219365
W = 0.9579802826083038
```

```
Threshold (p=0.01) = 0.781000018119812 --> HO accepted
Threshold (p=0.05) = 0.8420000076293945 --> HO accepted
Threshold (p=0.10) = 0.8690000176429748 --> HO accepted
```

--> Your data seems normal

Μελετώντας κανονικότητα κατανομής μετρημένων τιμών με την βοήθεια «Ελέγχου των Shapiro-Wilk για την κανονική κατανομή», διαπιστώσαμε ότι κατανομές έχουν καλή προσαρμογή στην κανονική κατανομή. Εφόσον τα δείγματα προέκυψαν αρκετά κανονικά, σύμφωνα με τον έλεγχο, είναι δυνατή η χρήση εργαλείων που απαιτούν συνθήκες κανονικής κατανομής, αλλά με επαλήθευση μέσω μη παραμετρικών αναλύσεων.

8.2.2. Έλεγχος συμβατότητας αποτελεσμάτων μέτρησης με αντίστοιχες τιμές του EIM (Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας)

Σύμφωνα με αποτέλεσμα προηγούμενου παραγράφου μπορούμε να εφαρμόσουμε , έλεγχο του βαθμού της ισοδυναμίας των αποτελεσμάτων μέτρησης με τη μέθοδο που αναπτύσσεται παρακάτω. Η περαιτέρω ανάπτυξη του ελέγχου αυτού βρίσκεται στη Βιβλιογραφία ([28], [29], [30], [31] και [32]).

Ο έλεγχος συμβατότητας γίνεται ανάμεσα σε δύο τιμές αναφοράς του EIM και μίας μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης κάθε δακτυλίου που μετρήσαμε και για διάφορες θέσεις τράπεζας μέτρησης χωριστά . Έτσι για τρεις διαμέτρους των δακτυλίων 24, 48 και 70 (mm) στις θέσεις A1, A29, Z1, Z29 και O15 συνολικά έχουμε 15 ελέγχους .

Για κάθε δακτύλιο η μέση τιμή της διαμέτρου, είναι ($x_i = d_i$) και η αβεβαιότητα αυτής ($u(d_i)$).

Η τιμή αναφοράς (x_{ref}) της διαμέτρου υπολογίσθηκε χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων κάθε διαμέτρου χωριστά ανά θέση τράπεζας μέτρησης και υπολογίζοντας σταθμισμένο όρο (weighted-mean) των αποτελεσμάτων αυτών :

$$x_{ref} = d_{ref} = \frac{\sum_i (1/u_i)^2 x_i}{\sum_i (1/u_i)^2} \quad (1)$$

Η αβεβαιότητα της τιμής αναφοράς δίνεται από:

$$u(x_{ref}) = u(d_{ref}) = \left(\sum_i (1/u_i)^2 \right)^{-1} \quad (2)$$

Για τον έλεγχο του βαθμού της ισοδυναμίας των αποτελεσμάτων (degree of equivalence) υπολογίζεται στη συνέχεια η διαφορά:

$$\delta_i = d_i - d_{ref} \quad (3)$$

όπου η αβεβαιότητα $u(\delta_i)$ αφού λάβουμε υπόψη και την συσχέτιση μεταξύ x_i και x_{ref} δίνεται από:

$$u(\delta_i) = [u^2(d_i) - u^2(d_{ref})]^{1/2} \quad (4)$$

Τα αποτελέσματα μεταξύ των εργαστηρίων θεωρούνται συμβατά μεταξύ τους με βεβαιότητα ~95%, όταν

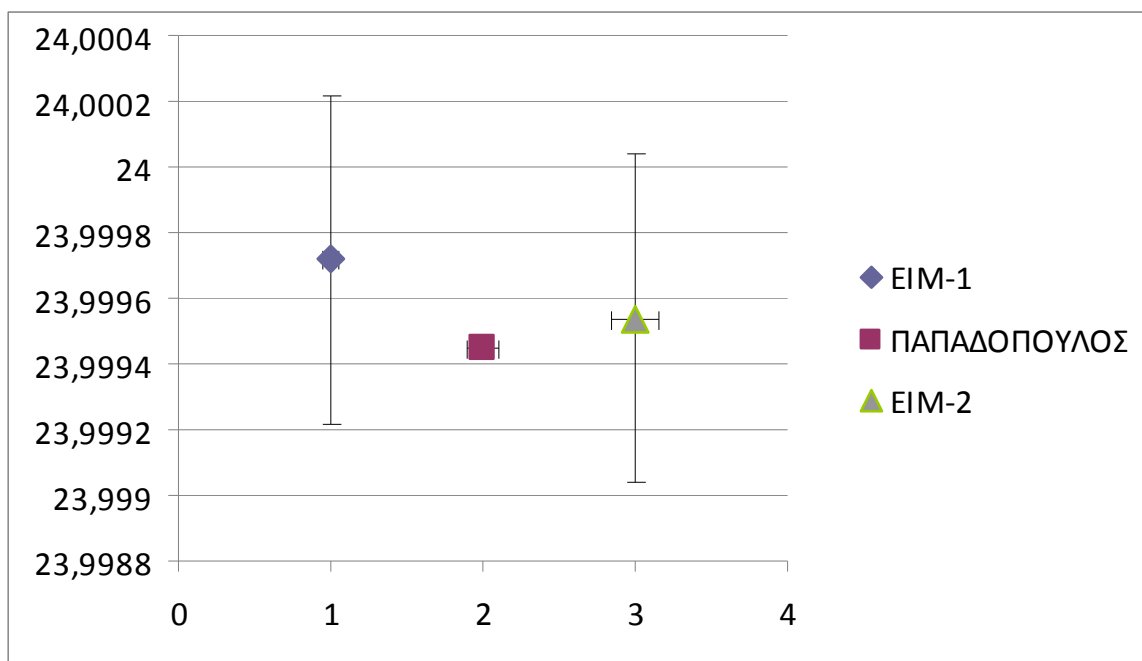
$$|E_j| = \left| \frac{d_j}{ku(d_j)} \right| < 1, \text{ για } k=2 \quad (5)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται στους πίνακες και στα διαγράμματα τα αποτελέσματα που αφορούν την τιμή της διαμέτρου των δακτυλίων σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση για κάθε πρότυπο δακτύλιο αντίστοιχα. Στους πίνακες και στα σχήματα για λόγους απλότητας και παρουσίασης αντί για τις τυπικές αβεβαιότητες αναφέρονται οι διευρυμένες αβεβαιότητες $U_i = ku_i$, για $k = 2$.

Για κάθε σημείο η διευρυμένη αβεβαιότητα ($k = 2$) απεικονίζεται στα διαστήματα σφάλματος, $\pm U_i$.

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	23,99972	23,99945	23,99954
U(d) (μm)	0,5	0,03	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,015	0,25
d_{ref} (mm)	23,99945	23,99945	23,99945
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00022	0,00022	0,00022
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,269	-0,001	0,089
U(δ) (μm)	0,500	0,030	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,537	-0,043	0,177

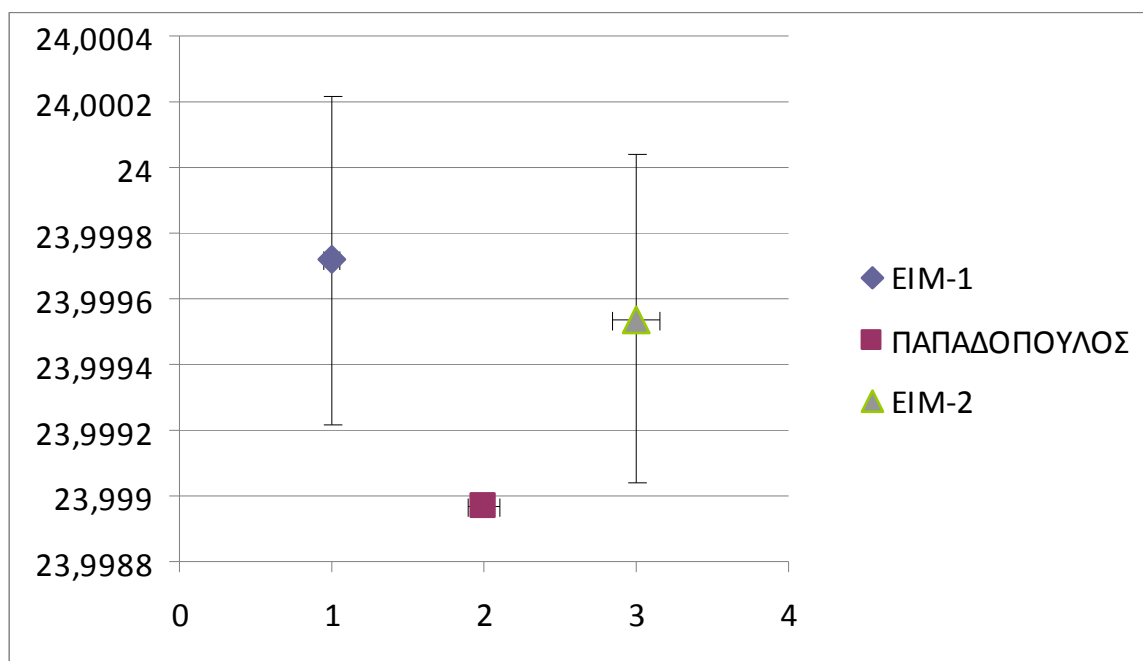
Πίνακας 8.17: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση O15



Διάγραμμα 8.18: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση O15

	EIM-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	EIM-2
d (mm)	23,99972	23,99897	23,99954
U(d) (μm)	0,5	0,04	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,02	0,25
d_{ref} (mm)	23,99898	23,99898	23,99898
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00039	0,00039	0,00039
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,742	-0,008	0,562
U(δ) (μm)	0,500	0,040	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	1,483	-0,209	1,123

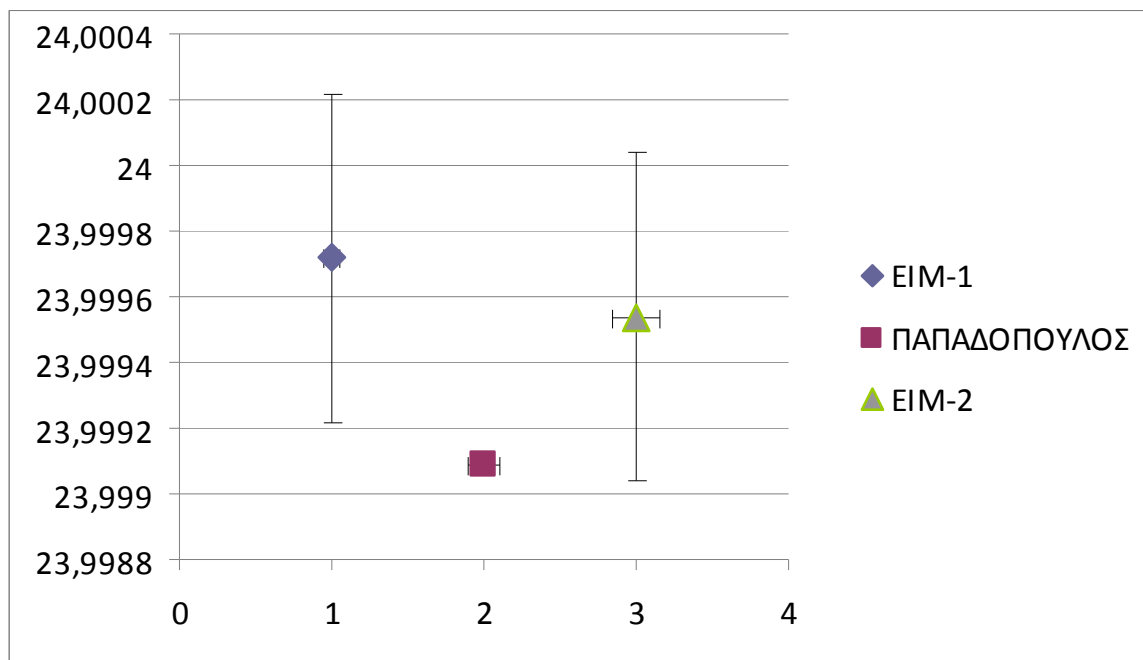
Πίνακας 8.19: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση A1



Διάγραμμα 8.20: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση A1

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	23,99972	23,99909	23,99954
U(d) (μm)	0,5	0,05	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,025	0,25
d_{ref} (mm)	23,99910	23,99910	23,99910
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00061	0,00061	0,00061
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,619	-0,011	0,439
U(δ) (μm)	0,500	0,050	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	1,239	-0,212	0,879

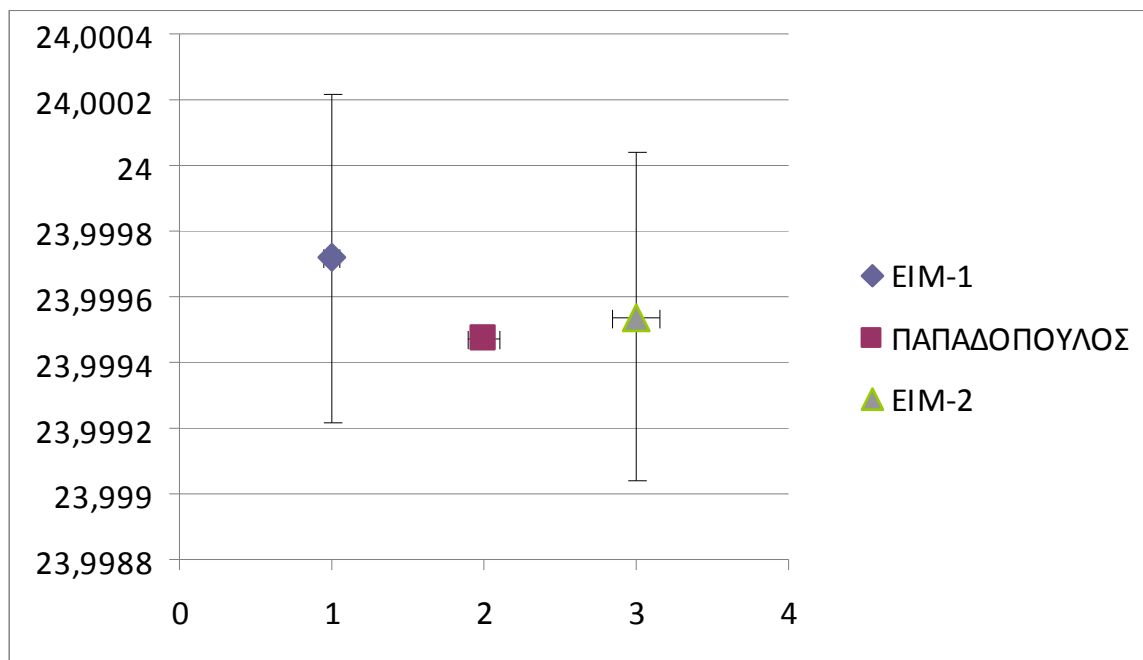
Πίνακας 8.21: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Α29



Διάγραμμα 8.22: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Α29

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	23,99972	23,99947	23,99954
$U(d)$ (μm)	0,5	0,03	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,015	0,25
d_{ref} (mm)	23,99947	23,99947	23,99947
$u(d_{\text{ref}})$ (μm)	0,00022	0,00022	0,00022
$\delta = d - d_{\text{ref}}$ (μm)	0,249	-0,001	0,069
$U(\delta)$ (μm)	0,500	0,030	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,498	-0,038	0,138

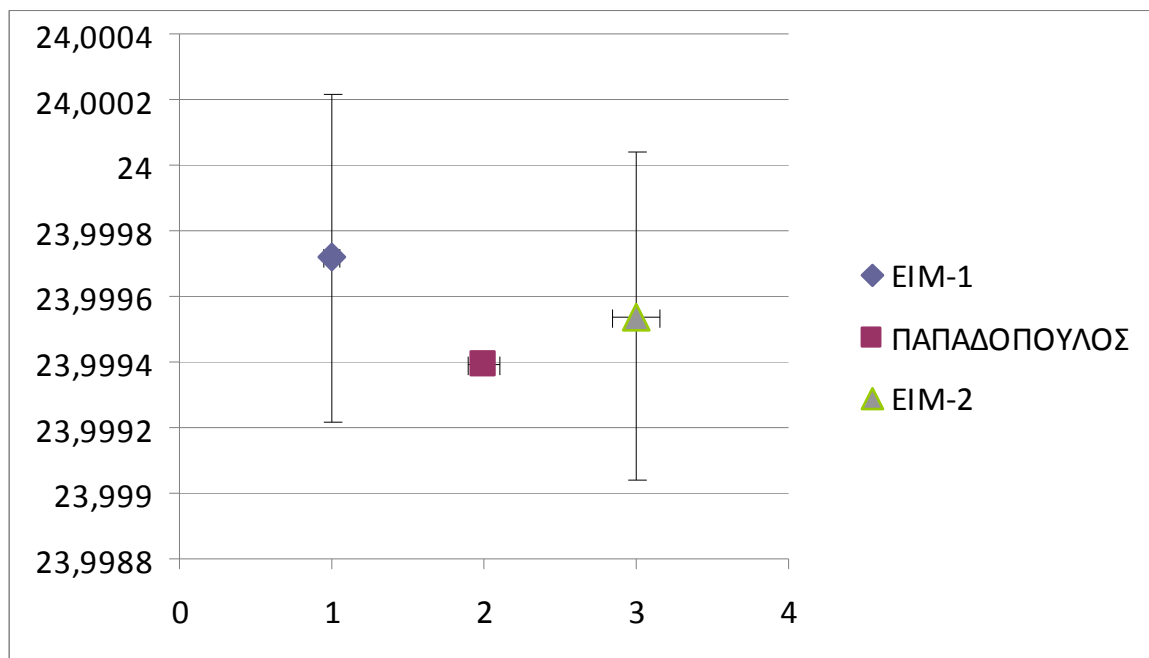
Πίνακας 8.23: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Z1



Διάγραμμα 8.24: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Z1

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	23,99972	23,99939	23,99954
U(d) (μm)	0,5	0,05	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,025	0,25
d_{ref} (mm)	23,99939	23,99939	23,99939
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00061	0,00061	0,00061
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,325	-0,005	0,145
U(δ) (μm)	0,500	0,050	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,651	-0,094	0,291

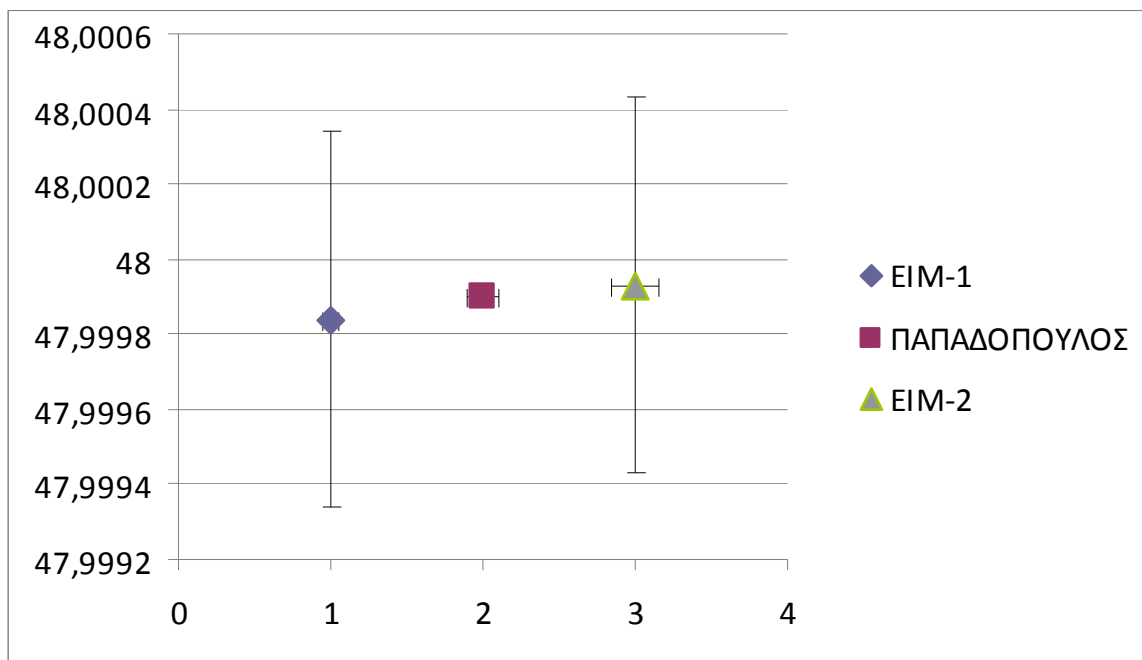
Πίνακας 8.25: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Z29



Διάγραμμα 8.26: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 24 mm στη θέση Z29

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	47,99984	47,9999	47,99993
U(d) (μm)	0,5	0,04	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,02	0,25
d_{ref} (mm)	47,99990	47,99990	47,99990
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00039	0,00039	0,00039
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	-0,060	0,000	0,030
U(δ) (μm)	0,500	0,040	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	-0,120	0,005	0,060

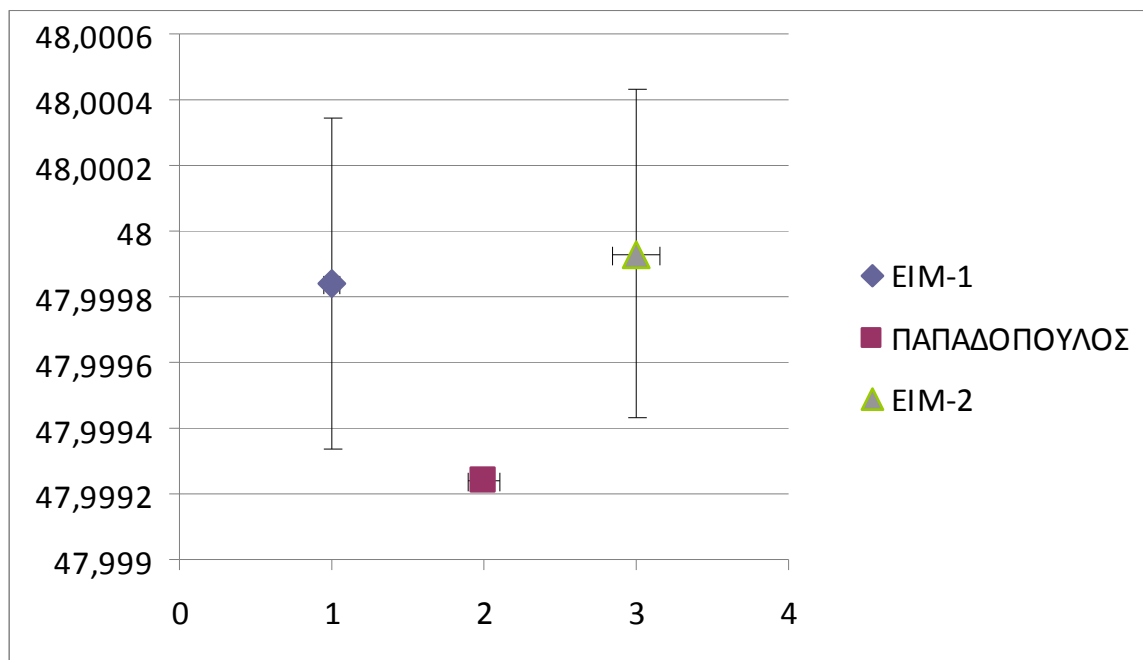
Πίνακας 8.27: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση O15



Διάγραμμα 8.28: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση O15

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	47,99984	47,99924	47,99993
$U(d)$ (μm)	0,5	0,06	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,03	0,25
d_{ref} (mm)	47,99926	47,99926	47,99926
$u(d_{\text{ref}})$ (μm)	0,00087	0,00087	0,00087
$\delta = d - d_{\text{ref}}$ (μm)	0,582	-0,018	0,672
$U(\delta)$ (μm)	0,500	0,060	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	1,164	-0,301	1,344

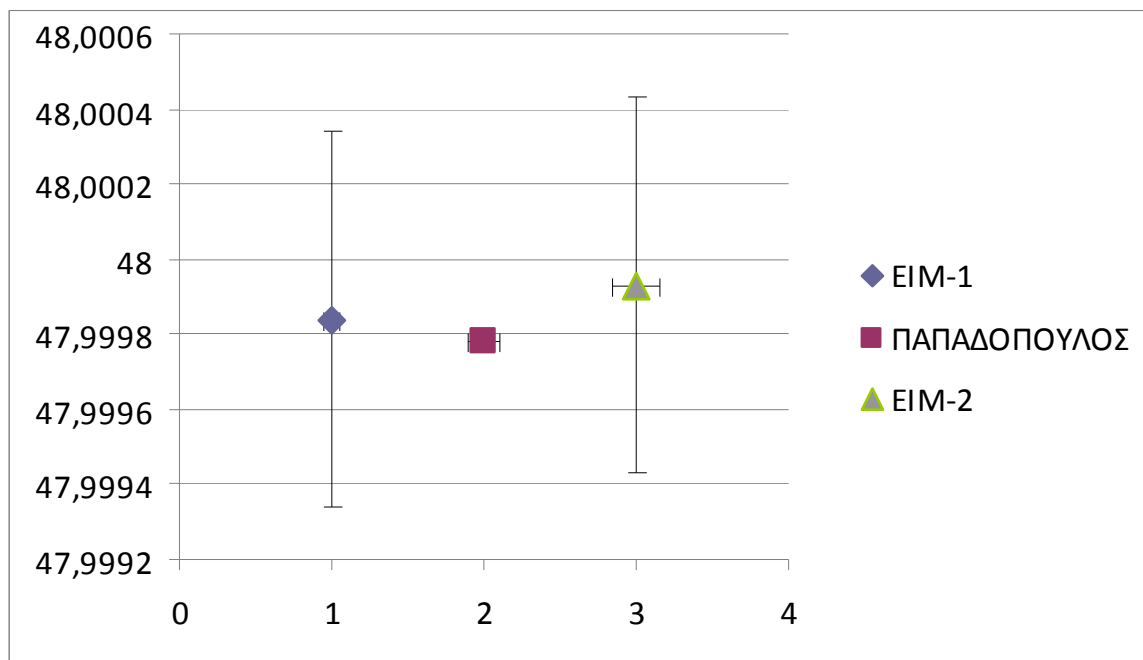
Πίνακας 8.29: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Α1



Διάγραμμα 8.30: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Α1

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	47,99984	47,99978	47,99993
U(d) (μm)	0,5	0,06	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,03	0,25
d_{ref} (mm)	47,99978	47,99978	47,99978
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00087	0,00087	0,00087
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,057	-0,003	0,147
U(δ) (μm)	0,500	0,060	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,114	-0,049	0,294

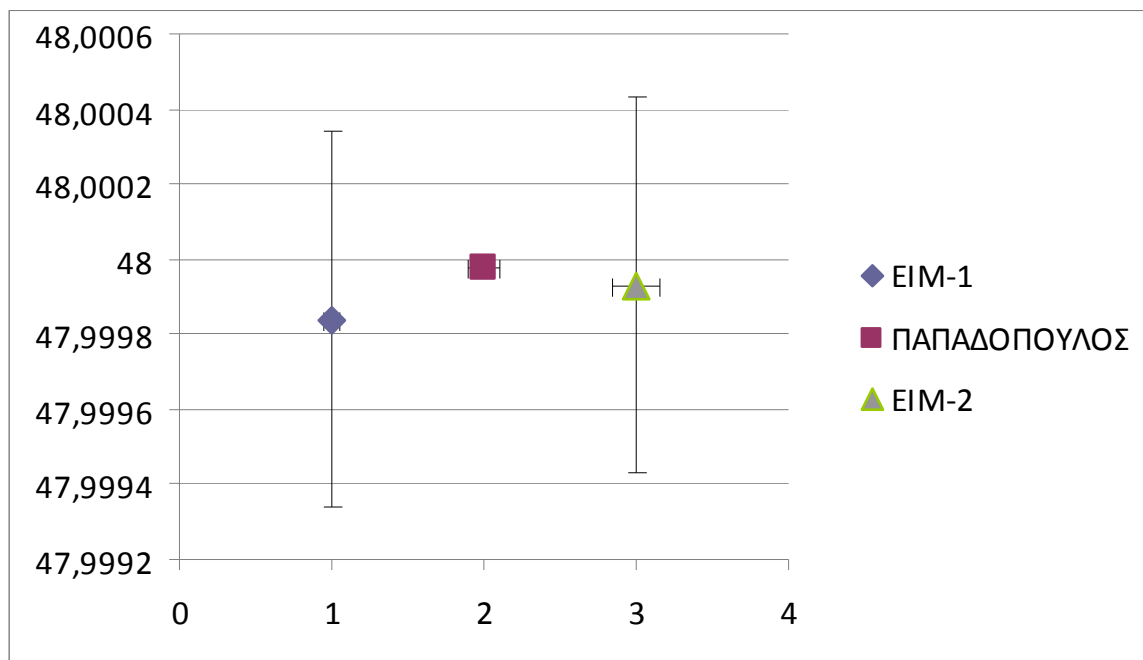
Πίνακας 8.31: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Α29



Διάγραμμα 8.32: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Α29

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	47,99984	47,99998	47,99993
$U(d)$ (μm)	0,5	0,05	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,025	0,25
d_{ref} (mm)	47,99998	47,99998	47,99998
$u(d_{\text{ref}})$ (μm)	0,00061	0,00061	0,00061
$\delta = d - d_{\text{ref}}$ (μm)	-0,138	0,002	-0,048
$U(\delta)$ (μm)	0,500	0,050	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	-0,276	0,037	-0,096

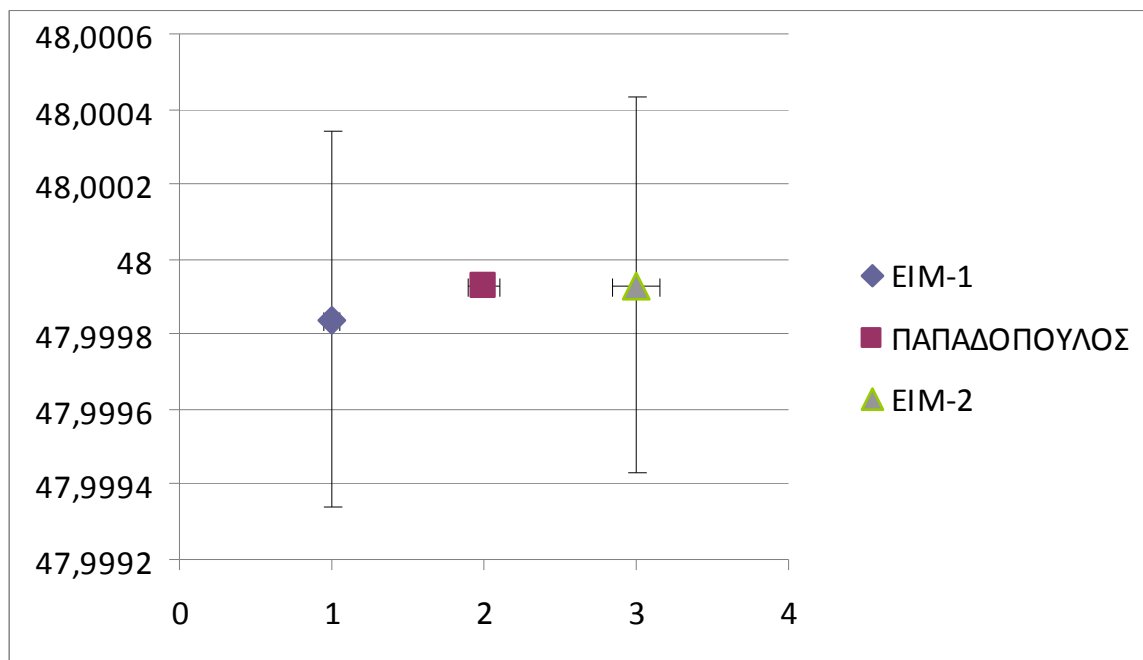
Πίνακας 8.33: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Z1



Διάγραμμα 8.34: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Z1

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	47,99984	47,99993	47,99993
U(d) (μm)	0,5	0,07	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,035	0,25
d_{ref} (mm)	47,99993	47,99993	47,99993
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00118	0,00118	0,00118
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	-0,088	0,002	0,002
U(δ) (μm)	0,500	0,070	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	-0,177	0,024	0,003

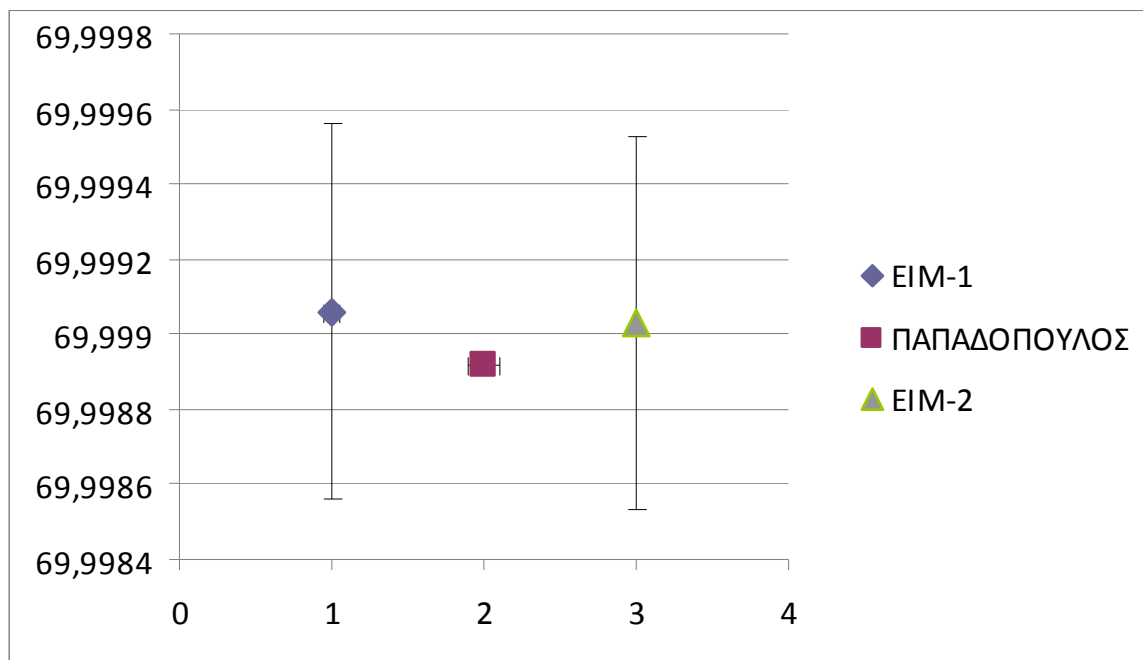
Πίνακας 8.35: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Z29



Διάγραμμα 8.36: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 48 mm στη θέση Z29

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	69,99906	69,99892	69,99903
U(d) (μm)	0,5	0,08	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,04	0,25
d_{ref} (mm)	69,99893	69,99893	69,99893
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00152	0,00152	0,00152
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,134	-0,006	0,104
U(δ) (μm)	0,500	0,080	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,268	-0,076	0,208

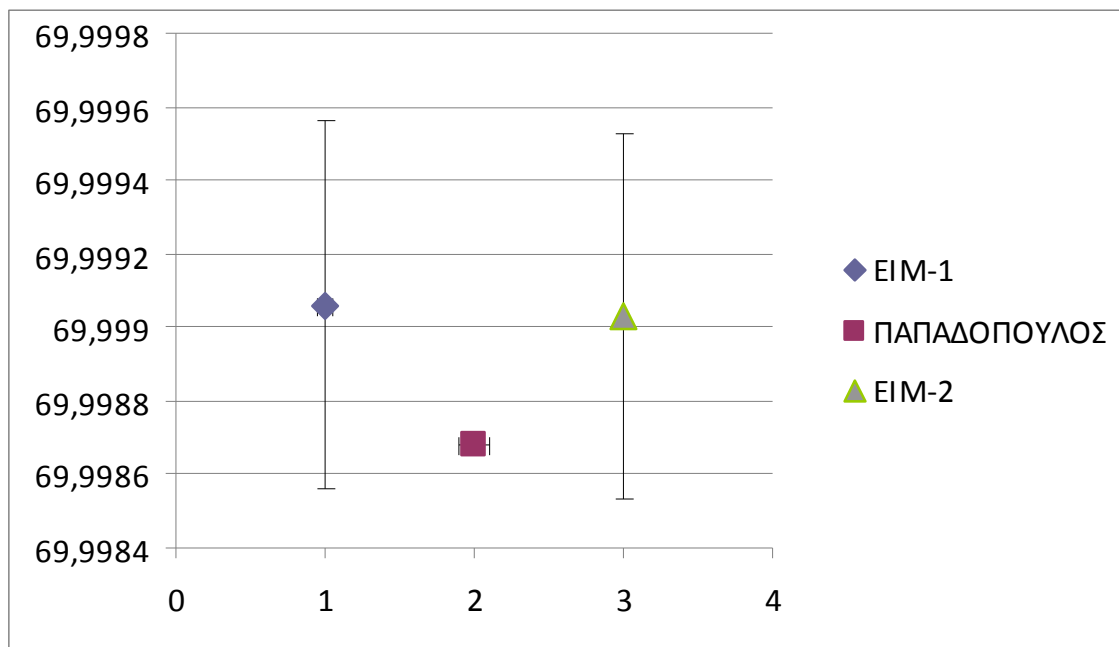
Πίνακας 8.37: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση O15



Διάγραμμα 8.38: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση O15

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	69,99906	69,99868	69,99903
U(d) (μm)	0,5	0,06	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,03	0,25
d_{ref} (mm)	69,99869	69,99869	69,99869
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00087	0,00087	0,00087
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,370	-0,010	0,340
U(δ) (μm)	0,500	0,060	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,740	-0,170	0,680

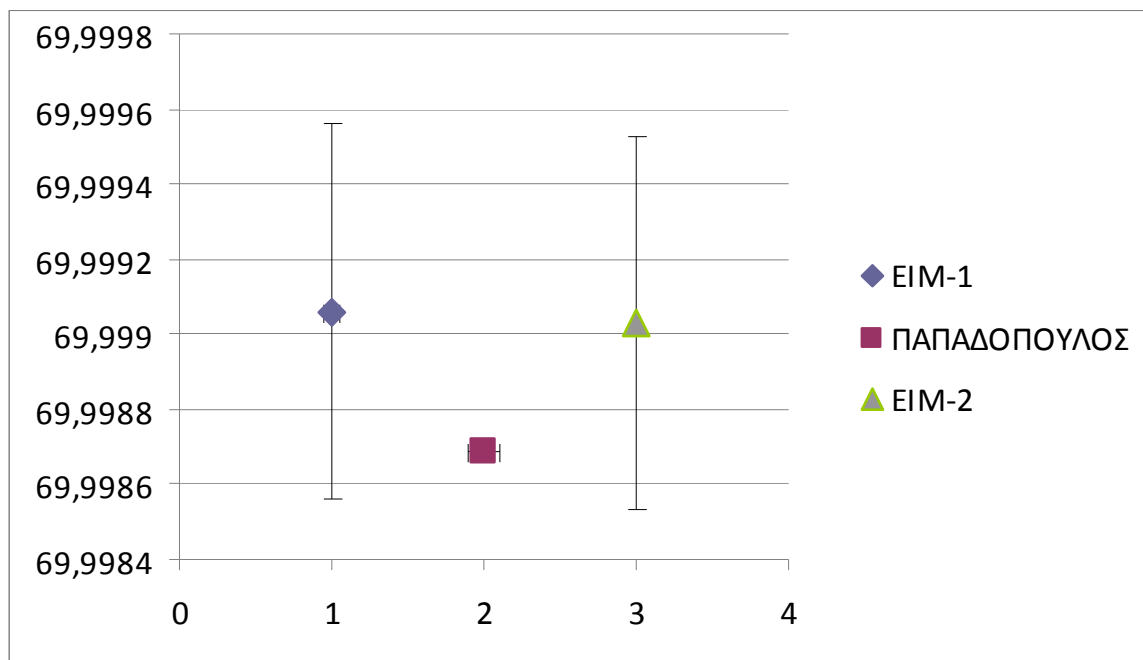
Πίνακας 8.39: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Α1



Διάγραμμα 8.40: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Α1

	EIM-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	EIM-2
d (mm)	69,99906	69,99869	69,99903
U(d) (μm)	0,5	0,04	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,02	0,25
d_{ref} (mm)	69,99869	69,99869	69,99869
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00039	0,00039	0,00039
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,366	-0,004	0,336
U(δ) (μm)	0,500	0,040	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,731	-0,112	0,671

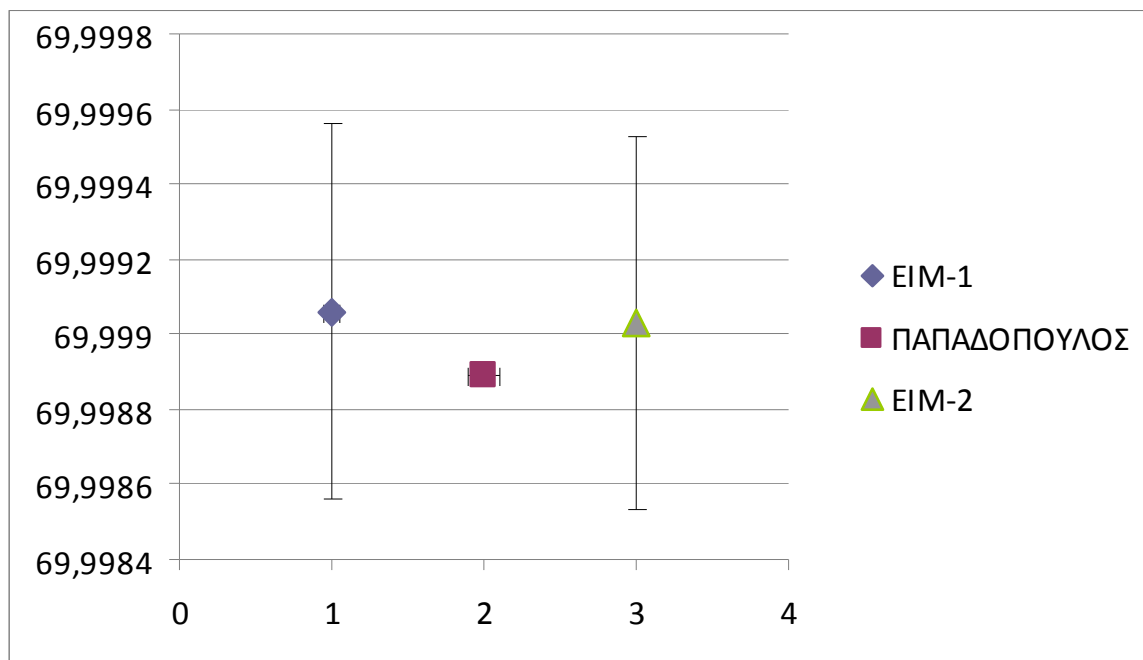
Πίνακας 8.41: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση A29



Διάγραμμα 8.42: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση A29

	ΕΙΜ-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΙΜ-2
d (mm)	69,99906	69,99889	69,99903
U(d) (μm)	0,5	0,05	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,025	0,25
d_{ref} (mm)	69,99889	69,99889	69,99889
$u(d_{ref})$ (μm)	0,00061	0,00061	0,00061
$\delta = d - d_{ref}$ (μm)	0,167	-0,003	0,137
U(δ) (μm)	0,500	0,050	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,334	-0,061	0,274

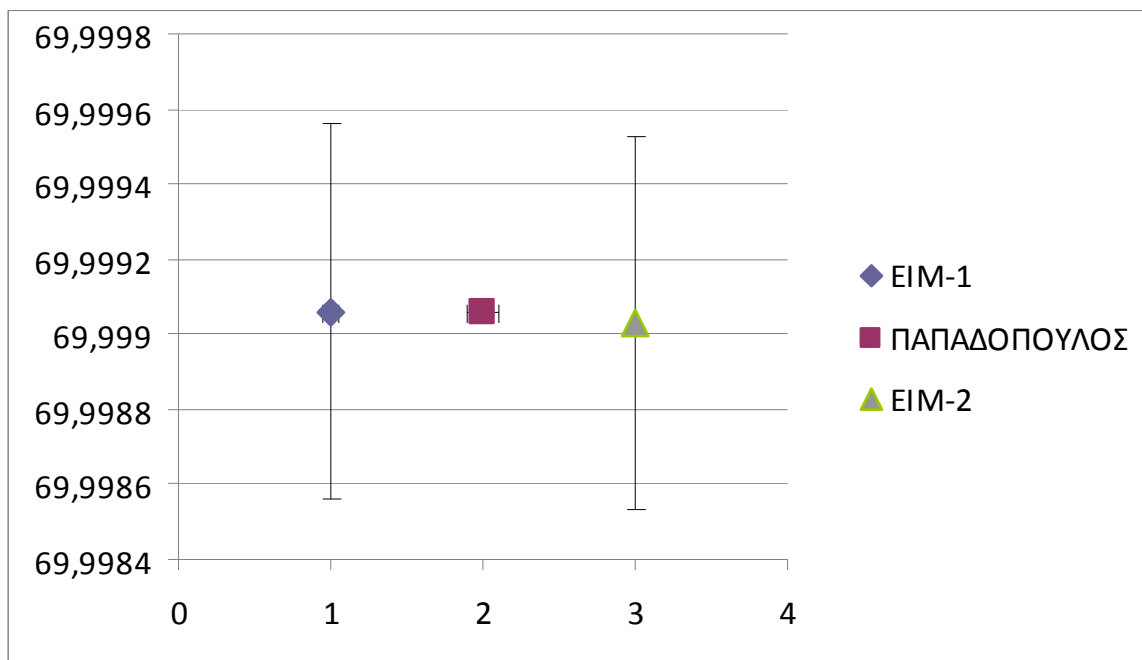
Πίνακας 8.43: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Z1



Διάγραμμα 8.44: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Z1

	EIM-1	ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ	EIM-2
d (mm)	69,99906	69,99906	69,99903
$U(d)$ (μm)	0,5	0,05	0,5
$u_c(d) = U(d)/2$ (μm)	0,25	0,025	0,25
d_{ref} (mm)	69,99906	69,99906	69,99906
$u(d_{\text{ref}})$ (μm)	0,00061	0,00061	0,00061
$\delta = d - d_{\text{ref}}$ (μm)	0,000	0,000	-0,030
$U(\delta)$ (μm)	0,500	0,050	0,500
$E_j = \delta / U(\delta)$	0,001	0,006	-0,059

Πίνακας 8.45: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Z29



Διάγραμμα 8.46: Αποτελέσματα πρότυπου δακτυλίου των 70 mm στη θέση Z29

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις διαμέτρου, ανεξαρτήτως της επιλογής των τιμών των παραγόντων, ήταν πολύ ικανοποιητικές ως προς την ποιότητα . Χαρακτηριστικό είναι ότι μέγιστη απόκλιση από τη διακριβωμένη τιμή προέκυψε $0,68 \mu\text{m}$, ενώ το θεωρητικό μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα της μηχανής είναι $1,67 \mu\text{m}$.

Από τη στατιστική ανάλυση προέκυψε ότι όλοι οι εξεταζόμενοι παράγοντες μέτρησης επηρεάζουν στατιστικά σημαντικά το αποτέλεσμα της μέτρησης . Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως έγινε ορθά η επιλογή των παραγόντων προς διερεύνηση. Ως βασική εξαρτημένη μεταβλητή θεωρείται η ακρίβεια της μέτρησης (απόλυτη απόκλιση διαμέτρων) και δευτερεύουσα η τυπική απόκλιση μεταξύ όμοιων μετρήσεων, δηλαδή μετρήσεων των ίδιων δακτυλίων.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης σε σημαντικό βαθμό είναι η διάμετρος δακτυλίου (μη ελεγχόμενη μεταβλητή) και η θέση μέτρησης πάνω στη τράπεζα μέτρησης . Σύμφωνα με στατιστική ανάλυση η CMM εξάγει στη θέση A1 μετρήσεις με πιο μεγάλη απόκλιση από διακριβωμένες τιμές σε σχέση με τις άλλες θέσεις και για τους τρεις δακτύλους . Έτσι για να κάνουμε μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια πρέπει να αποφεύγουμε την θέση A1. Επίσης χρήζει περεταίρω διερεύνηση η συμπεριφορά της μηχανής CMM στην θέση αυτή. Στις μετρήσεις των διαμέτρων 24 και 70 mm στην θέση A29 έχουμε μεγάλη απόκλιση, με συμπέρασμα ότι για την διάμετρο των 48 mm οι παράγοντες που είχαμε είναι αρκετή για μέτρηση με αρκετή ακρίβεια , ενώ για τους διαμέτρους μικρού και μεγάλου μεγέθους πρέπει να γίνει περεταίρω έρευνα για αυτούς παράγοντες .

Για το δακτύλιο των 24 mm η θέση Z1 εξάγει πιο ακριβή αποτελέσματα . Για τους δακτύλους των 48 και 70 mm η θέση O15 είναι η πιο κατάλληλη.

Η τυπική απόκλιση εκφράζει τη διασπορά των μετρήσεων , ενώ παράλληλα αποτελεί και ένα μέτρο επαναληψιμότητας της μεθόδου μέτρησης . Όσον αφορά τυπική απόκλιση βρήκαμε ότι όσο αυξάνεται μετρούμενος διάμετρος , τόσο αυξάνεται ανάλογα και η τυπική απόκλιση. Πράγμα που είναι απολύτως φυσιολογικό επειδή όσο αυξάνεται διάμετρος,

τόσο αυξάνεται και ο αριθμός σημείων επαφής που λαμβάνει μηχανή, άρα και εύρος τιμών που καταγράφεται. Εδώ μπορεί να γίνει μείωση λαμβανόμενων σημείων επαφής για διαμέτρους μεσαίου και μεγάλου μεγέθους . Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί τυπική απόκλιση και θα μειωθεί χρόνος διεξαγωγής μέτρησης ,που είναι σημαντικός , όταν γίνονται πολλές μετρήσεις.

Εξετάζοντας καμπύλες στα γραφήματα πραγματικών αποκλίσεων των δακτυλίων εξάγουμε συμπέρασμα ότι στη θέση A1 όλες οι καμπύλες είναι ομαλές (χωρίς απότομες μεταβολές), αυτό σημαίνει ότι μηχανή λειτουργεί σωστά , όμως κάποιος παράγοντας χαμηλώνει σταθερά την μετρημένη τιμή . Προτείνω να γίνει περεταίρω διερεύνηση του φαινομένου αυτού.

Για τη θέση Z1 η καμπύλη μέτρησης της διαμέτρου των 48 mm , έχει δύο σημεία που χρήζουν προσοχή :

- 1) Η καμπύλη δίνει αρνητική απόκλιση, άρα μόνο για μεσαίου μεγέθους διαμέτρους πρέπει να υπάρχει μικρή διόρθωση αποτελέσματος προς τα πάνω ,
- 2) Η καμπύλη έχει αρκετή διακύμανση με μια μικρή τάση απορύθμισης της μηχανής CMM.

Προτείνω για αυτό το διάμετρο να γίνουν πειραματικές αλλαγές στους παράγοντες που είχαμε ορίσει ως σταθερούς.

Για τη θέση O15 η καμπύλη μέτρησης της διαμέτρου των 70 mm παρουσιάζει έντονη διακύμανση με τη τάση της μηχανής στην αρχή να προσεγγίζει την διακριβωμένη τιμή και μετά να κάνει σταδιακή απομάκρυνση από αυτή . Αυτή συμπεριφορά ίσως να προκύπτει από το λογισμικό της μηχανής CMM . Προτείνω να γίνει διερεύνηση κατά πιο βαθμό μπορεί να βελτιωθεί το υπάρχον λογισμικό της CMM.

Από τον έλεγχο συμβατότητας αποτελεσμάτων μέτρησης με αντίστοιχες τιμές του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας προκύπτει το εξής συμπέρασμα . Για τον δακτύλιο των 24 mm στη θέση A1 και A29 τα αποτελέσματα δεν είναι συμβατά , δηλαδή η περιοχή

τιμών που μετρήσαμε δεν καλύπτεται από αντίστοιχες περιοχές τιμών του EIM όπως φαίνονται στα διαγράμματα , αλλά και οι τιμές του E είναι μεγαλύτερες του 1. Για το διάμετρο των 48 mm οι τιμές στη θέση A1 και πάλι δεν είναι συμβατά , όμως για το ίδιο διάμετρο οι τιμές στη θέση A29 είναι συμβατές και έχουν τιμές της E αρκετά μικρότερες της μονάδας (όσο περισσότερο η τιμή της E πλησιάζει 0 , τόσο μεγαλύτερη συμβατότητα έχουν τιμές μέτρησης με τις τιμές αναφοράς). Για το διάμετρο των 70 mm οι τιμές στη θέση A1 και A29 είναι συμβατές .Το συμπέρασμα είναι , ότι όσο μεγαλώνει μετρούμενος διάμετρος δακτυλίου , τόσο μεγαλώνει η ακρίβεια με την οποία μετράει CMM .Στις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης O15, Z1 και Z29 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι συμβατά .

Αποτέλεσμα αυτής μελέτης απέδειξε τελικά ότι CMM μετράει με διαφορετική ακρίβεια σε διαφορετικές θέσεις τράπεζας μέτρησης , επίσης η ακρίβεια εξαρτάτε από το μέγεθος του δακτυλίου που μετράμε . Το αίτιο του αποτελέσματος πιθανών να οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετρήσεις στις θέσεις A1 και A29 έγιναν πριν τη διακρίβωση και ρύθμιση της CMM . Για αυτό προτείνω να γίνει επανάληψη μετρήσεων με τους ίδιους διαμέτρους στις θέσεις A1 και A29 . Σε περίπτωση που θα έχουμε συμβατά αποτελέσματα με τις τιμές της EIM και για τους τρεις διαμέτρους των 24, 48 και 70 mm, θα είναι προφανές ότι η CMM κάνει μετρήσεις με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία (εφόσον η μηχανή διακριβώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή). Στην άλλη περίπτωση που θα έχουμε μη συμβατά αποτελέσματα θα πρέπει να αναζητήσουμε άλλη αιτία που το προκαλεί.

Τέλος προτείνω να γίνει μελέτη επίδρασης στην ακρίβεια μετρήσεων της CMM από αλλαγή προσανατολισμού μετρούμενου τεμαχίου (π.χ. τοποθέτηση κάθετα ως προς τραπέζι μετρήσεων). Επίσης να γίνει μελέτη εξάρτισης ακρίβειας αποτελέσματος από διαφοροποίηση στηριγμάτων που συγκρατούν πάνω στη τράπεζα μέτρησης μετρούμενα εξαρτήματα, ανάμεσα σε στηρίγματα που συγκρατούν εξαρτήματα με τη δύναμη του μαγνήτη και μηχανικών στηριγμάτων. Πιθανών τα μαγνητικά πεδία να έχουν κάποια επίδραση στο αποτέλεσμα των μετρήσεων.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) ΜΕΤΡΑ . ΣΤΑΘΜΑ . ΠΡΟΤΥΠΑ χθες & σήμερα Υ.Β.Ε.Τ._ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Αθήνα 1987
- 2) TESA TECHNOLOGY: ‘INSTRUMENTS AND SYSTEMS FOR QUALITY ASSURANCE’ BROWN & SHARPE, SCS 051 TESA CALIBRATION LABORATORY 2001
- 3) Σ . Ε . ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ Αθήνα 1989
- 4) ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ” ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ” Παχυλάκης Μανόλης Αθήνα 2007
- 5) ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ <http://www.vrecossis.gr/categories.asp?catid=30>
- 6) ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑ Χαρίκλεια Καραχάλιου & Γκαμπριέλ Μανσούρ Εκδόσεις ΖΗΤΗ Θεσσαλονίκη (2007)
- 7) ΒΑΣΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ , Braun, Herwig aut Dobler, Hans-Dieter aut Doll, Werner aut . Βούλγαρις, Μελέτιος Δ. trl. Φιλίος, Ανδρόνικος . edt Βελαώρας, Ιωάννης Χ. edt Fisher, Ulrich edt. 2^η εκδ. , ΑΘΗΝΑ: ΙΩΝ, C 2003.
- 8) DIRECT INDUSTRY http://pdf.directindustry.com/pdf/tesa/tesa-general-catalogue/24600-90828-_311.html
- 9) YAMATO VENTURES, INC. JAPAN
<http://www.yamatoventures.co.jp/html/sk4.html>
- 10) ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΟ medilab.pme.duth.gr/book/kefalaio_8/8_4_mikrometro.pdf
- 11) N. I. MAKIENKO “SLESARNOE DELO S OSNOBAMI MATERIALOBEDENIA” MOSKBA 1973
- 12) CARMAR TECHNOLOGY CO., LTD <http://www.carmar-tech.com/en/company/>
- 13) BROWN & SHARPE is a brand of: Hexagon Metrology, Inc.
<http://brownandsharpe.com/>
- 14) HOW A GLOBAL CMM IS PRODUCED. Measureup , pp. 8-11 (January,2009)
- 15) Yang, H. (2000) *Jayaraman Raja project resources: The William States Lee College of Engineering*. Retrieved November 2009, from The William States Lee College of Engineering Web Site:
http://www.coe.uncc.edu/~jrja/ProjectResources/Basics_CMM_II.pdf

- 16) Τεχνικό Γραφείο Δ Βρέκοσις Γ. Καισαρλής
www.vrecossis.gr/datafiles/files/Bibliothiki/2Arthro
- 17) RENISHAW Company, 2010 <http://www.renishaw.com/en/renishaw-touch-probes-rotary-encoders-linear-encoders-angle-encoders-laser-calibration-dental-cad-cam-raman-spectroscopy-and-surgical-robots--1030>
- 18) Laser Design, Inc. 2010 <http://www.laserdesign.com/products/>
- 19) Hexagon Metrology Vision GmbH Optiv Division, Germany
http://www.hexagonmetrology.com/optiv_530.htm
- 20) DEA – Serving Metrology Worldwide http://www.dea.it/headquarters_648.htm
- 21) Γερμανική Προδιαγραφή για χώρους μετρήσεων VDI/VDE 2627 Blatt 1
- 22) Schmitt. R & Nisch. S. (2009) Knowledge-based optimisation of the tactile scanning process on CMM. *XIX Imeco World Congress Fundamental and Applied Metrology. Lisbon.*
- 23) Marxer, M. & Keferstein, C. (2007). Form Measurements with Coordinate Measuring Machines. Test and Measurement Conference. Johannesburg.
- 24) Nugent, P. (April, 2008) Technical Partners: Metrology Center. Retrieved January, 2010 from Metrology Center Web site: <http://www.metrologycenter.com/Open%20House/Form%20Measurement%20Fundamentals.pdf>
- 25) Malburg, M (2002) Fitting, Filtering and Analysis: Feature Extraction in Dimensional Metrology Applications. International Dimensional Workshop 2002, Tennessee: Digital Metrology Solutions, Lnc.
- 26) Ο Έλεγχος των Shapiro-Wilk για την Κανονική Κατανομή
<http://stat-athens.aueb.gr/gr/prop/notes/np433.pdf>
- 27) Εφαρμογή για έλεγχο κανονικότητας «Shapiro-Wilk Normality Test»
<http://dittami.gmxhome.de/shapiro/>
- 28) ISO, Guide to the expression of uncertainty in measurement. (International Organization for Standardization, 1995).
- 29) K. Beissner, On a measure of consistency in comparison measurements, *Metrologia* 39, 59 (2002).
- 30) G. Ratel, Evaluation of the uncertainty of the degree of equivalence, *Metrologia* 42, 140 (2005).

- 31) C. M. Wang and H. K. Iyer, Detection of influential observations in the determination of the weighted-mean KCRV, *Metrologia* 42, 262 (2005).
- 32) ISO 3650, Geometrical product specification (GPS) – Length standards – Gauge blocks (International Organization for Standardization, 1998).