

Usporedba rezultata mjerenja unutarnjih promjera ostvarenih različitim ručnim mjerilima duljine

Polak, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:050181>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Polak

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing.

Student:

Matej Polak

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se:

Mentorici doc.dr.sc. Gorani Baršić na pomoći tokom pisanja ovog završnog rada, svim korisnim savjetima i pruženim materijalima koji su mi omogućili i olakšali izradu ovog rada,

Tehničkom suradniku Tomislavu Habeku na pomoći tokom laboratorijskih mjerenja, svim pripremljenim potrebnim materijalima te svim stručnim sugestijama,

Svim svojim prijateljima, naročito onima sa Fakulteta strojarstva i brodogradnje, koji smo si bili podrška i pomoć tokom svih ovih godina studiranja, a naročito u onim najtežim trenucima studija,

Posebna i najveća zahvala mojim roditeljima i obitelji koji su mi omogućili studiranje te bili u svakom trenutku uz mene kao najveća podrška i potpora.

Matej Polak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATEJ POLAK**

Mat. br.: 0035187161

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Usporedba rezultata mjerenja unutarnjih promjera ostvarenih
različitim ručnim mjerilima duljine**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Analysis of measurement results of internal diameters using different
hand measuring instruments**

Opis zadatka:

1. Opisati sustav rada Nacionalnog laboratorija za duljinu na području mjerenja unutarnjih promjera.
2. Dati pregled konstrukcijskih i tehničkih karakteristika mjerila za unutarnja mjerenja koja se najčešće koriste u industrijskoj praksi.
3. Temeljem raspoložive opreme u Nacionalnom laboratoriju za duljinu, provesti mjerenja unutarnjih promjera korištenjem odabranih ručnih mjerila duljine.
4. Provesti usporedbu ostvarenih rezultata mjerenja te donijeti zaključke o prednostima i nedostacima korištenih ručnih mjerila duljine u postupku mjerenja unutarnjih promjera.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

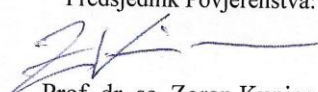
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Gorana Baršić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

Sadržaj.....	I
Popis slika	IV
Popis tablica	VI
Popis oznaka.....	VII
Sažetak	VIII
Summary	IX
1. Uvod.....	1
2. Mjerila za mjerenje unutarnjih promjera.....	2
2.1. Pomična mjerila	2
2.1.1. Klasično pomično mjerilo	2
2.1.1.1. Pomično mjerilo s mjernom urom.....	3
2.1.1.2. Digitalno pomično mjerilo	3
2.2. Mikrometri.....	4
2.2.1. Klasični mikrometri za unutarnja mjerenja	4
2.2.1.1. Dvostrani mikrometri	5
2.2.1.2. Digitalni mikrometri za unutarnja mjerenja	5
2.2.2. Štapni mikrometri s nastavcima	6
2.2.2.1. Digitalni štapni mikrometri s nastavcima.....	6
2.2.3. Klasični trokraki mikrometri	7
2.2.3.1. Digitalni trokraki mikrometri	8
2.3. Subita.....	9
2.3.1. Mitutoyo	9
2.3.1.1. Standardni subito.....	9
2.3.1.2. Subita za vrlo male promjere	10
2.3.1.3. Subita za male promjere	10
2.3.1.4. Subita sa mikrometarskom glavom	11
2.3.1.5. Subita za slijepe provrte	11
2.3.1.6. Kratki subito	12
2.3.1.7. Digitalni subito ABSOLUTE.....	12
2.3.2. Oskar Schwenk.....	13
2.3.2.1. Subita - Serija SU	13

2.3.2.2.	Subita - Serija SW	14
2.3.2.3.	Subita - Serija Vario SV/SVS	14
2.3.2.4.	Subita – Serija SMT	15
2.3.2.5.	Subita – Serija SE.....	15
2.3.2.6.	Subita – Serija SS	15
2.3.2.7.	Subito – Serija SUS.....	16
2.3.2.8.	Subito – Serija SL	16
2.3.3.	Mahr	17
2.3.3.1.	Subito serije 844 K.....	17
2.3.3.2.	Subito serije 844 N.....	17
2.3.4.	INSIZE	18
2.3.4.1.	Subito sa zakretnom glavom	18
2.4.	Mjerala s iglom za male promjere	19
2.5.	Unimaster.....	19
3.	Nacionalni laboratorij za duljinu	21
3.1.	O Laboratoriju	21
3.2.	Akreditirana područja umjeravanja	21
3.3.	Mjerala za mjerenja unutarnjih promjera dostupna u Nacionalnom laboratoriju za duljinu	26
3.3.1.	Mikrometar za male provrte	26
3.3.2.	Štapni mikrometar	26
3.3.3.	Trokraki mikrometar	26
3.3.4.	Subita.....	27
4.	Provedba i rezultati mjerenja.....	28
4.1.	Mjerni kontrolni prsteni promjera \varnothing 18 mm, \varnothing 19 mm i \varnothing 20 mm	28
4.1.1.	Korištena ručna mjerala	28
4.1.1.1.	Digitalno pomično mjerilo	29
4.1.1.2.	Digitalni trokraki mikrometar	29
4.1.1.3.	Subito	29
4.1.2.	Rezultati mjerenja.....	30
4.1.2.1.	Mjerni kontrolni prsten promjera \varnothing 18 mm	30
4.1.2.2.	Mjerni kontrolni prsten promjera \varnothing 19 mm	32
4.1.2.3.	Mjerni kontrolni prsten promjera \varnothing 20 mm	33

4.2. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 50$ mm.....	34
4.3. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 60$ mm.....	36
4.4. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 100$ mm	37
5. Analiza rezultata mjerenja.....	40
5.1. Faktor slaganja E_n	40
5.2. Birgeov kriterij.....	41
5.3. Referentne vrijednosti i računanje njihovih mjernih nesigurnosti.....	42
5.4. Analiza mjerenja pojedinih prstena	42
5.4.1. Prsten promjera $\varnothing 18$ mm.....	43
5.4.2. Prsten promjera $\varnothing 19$ mm.....	45
5.4.3. Prsten promjera $\varnothing 20$ mm.....	46
5.4.4. Prsten promjera $\varnothing 50$ mm.....	48
5.4.5. Prsten promjera $\varnothing 60$ mm.....	49
5.4.6. Prsten promjera $\varnothing 100$ mm	50
6. Zaključak.....	52
7. LITERATURA.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1.	Klasično pomično mjerilo sa sastavnim dijelovima.....	2
Slika 2.	Pomično mjerilo za mjerenje unutarnjih promjera.....	2
Slika 3.	Pomično mjerilo s mjernom urom.....	3
Slika 4.	Digitalno pomično mjerilo sa keramičkim dodirnim čeljustima.....	3
Slika 5.	Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 1. izvedba čeljusti.....	4
Slika 6.	Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 2. izvedba čeljusti.....	4
Slika 7.	Mikrometar sa dvostranim čeljustima.....	5
Slika 8.	Digitalni mikrometar.....	5
Slika 9.	Štapni mikrometar tvrtke INSIZE.....	6
Slika 10.	Digitalni štapni mikrometar tvrtke Mitutoyo.....	6
Slika 11.	Klasični trokraki mikrometar za unutarnja mjerenja.....	7
Slika 12.	Set trokrakih mikrometara sa pripadajućim komponentama.....	7
Slika 13.	Digitalni trokraki mikrometar.....	8
Slika 14.	"Pištolj" izvedba digitalnog trokrakog mikrometra tvrtke SYLVAC.....	8
Slika 15.	Digitalni trokraki mikrometar visoke točnosti tvrtke SYLVAC.....	9
Slika 16.	Standardna verzija subita tvrtke Mitutoyo.....	9
Slika 17.	Subito za mjerenje vrlo malih provrta.....	10
Slika 18.	Subito za male promjere.....	10
Slika 19.	Mjerni nastavci.....	11
Slika 20.	Subito sa mikrometarskom glavom.....	11
Slika 21.	Subito za slijepe provrte.....	11
Slika 22.	Kratki subito.....	12
Slika 23.	Digitalni subito ABSOLUTE.....	12
Slika 24.	Standardna SU serija subita.....	13
Slika 25.	Određivanje ispravnog kontrolnog položaja.....	13
Slika 26.	Subito serije SW.....	14
Slika 27.	Subita serije Vario SV/SVS.....	14
Slika 28.	Subito serije SMT.....	15
Slika 29.	Subito serije SE.....	15
Slika 30.	Subito serije SS.....	16
Slika 31.	Subito serije SUS.....	16

Slika 32.	Subito serije SL	16
Slika 33.	Subito 844 K.....	17
Slika 34.	Subito serije 844 N	17
Slika 35.	Subito sa zakretnom glavom	18
Slika 36.	Primjer načina mjerenja.....	18
Slika 37.	Mjerilo za male promjere s iglom	19
Slika 38.	Unimaster proizvođača Tesa	19
Slika 39.	Unimaster set.....	20
Slika 40.	Mikrometar za male provrte	26
Slika 41.	Štapni mikrometar	26
Slika 42.	Trokraki mikrometri	27
Slika 43.	Subito set	27
Slika 44.	Mjerni kontrolni prsteni promjera \varnothing 18 mm, \varnothing 19 mm i \varnothing 20 mm	28
Slika 45.	Digitalno pomično mjerilo tvrtke Mitutoyo	29
Slika 46.	Digitalni trokraki mikrometar tvrtke Mitutoyo	29
Slika 47.	Subito tvrtke Mitutoyo	30
Slika 48.	Subito korišten za mjerenje kontrolnog prstena promjera \varnothing 50 mm	34
Slika 49.	Kontrolni prsten promjera \varnothing 60 mm s trokrakim mikrometrom.....	36
Slika 50.	Trokraki mikrometar s kontrolnim prstenom promjera \varnothing 100 mm na granitnoj ploči.....	38
Slika 51.	Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 18 mm	43
Slika 52.	Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 18 mm bez pomičnog mjerila	45
Slika 53.	Grafički prikaz rezultata mjerenja prstena promjera \varnothing 19 mm.....	46
Slika 54.	Grafički prikaz rezultata mjerenja prstena promjera \varnothing 20 mm.....	47
Slika 55.	Grafički prikaz rezultata mjerenja prstena promjera \varnothing 50 mm.....	48
Slika 56.	Grafički prikaz rezultata mjerenja prstena promjera \varnothing 60 mm.....	50
Slika 57.	Grafički prikaz rezultata mjerenja prstena promjera \varnothing 100 mm.....	51

POPIS TABLICA

Tablica 1.	HAA akreditirano područje umjeravanja [14].....	22
Tablica 2.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 18 mm.....	30
Tablica 3.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 19 mm.....	32
Tablica 4.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 20 mm.....	33
Tablica 5.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 50 mm.....	35
Tablica 6.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 60 mm.....	36
Tablica 7.	Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 100 mm.....	38
Tablica 8.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 18 mm.....	43
Tablica 9.	Ponovljena analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 18 mm	44
Tablica 10.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 19 mm.....	45
Tablica 11.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 20 mm.....	46
Tablica 12.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 50 mm.....	48
Tablica 13.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 60 mm.....	49
Tablica 14.	Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera \varnothing 100 mm.....	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	-	Razina povjerenja
k	-	Faktor pokrivanja
\varnothing	mm	Promjer
\bar{x}	mm	Aritmetička sredina
s	mm	Procijenjeno standardno odstupanje
U	mm	Proširena mjerna nesigurnost
E_n	-	Faktor slaganja
x_{rm}	mm	Rezultat mjerenja pojedinog ručnog mjerila
x_{ref}	mm	Rezultat referentne vrijednosti
$u(x_{rm})$	mm	Mjerna nesigurnost pojedinog ručnog mjerila
$u(x_{ref})$	mm	Mjerna nesigurnost referentne vrijednosti
R_B	-	Birgeov kriterij (koeficijent)
u_{ext}	mm	Eksterna mjerna nesigurnost
u_{int}	mm	Interna mjerna nesigurnost

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je izvršiti mjerenja unutarnjih promjera zadanih prstena pomoću različitih ručnih mjerila duljine u Nacionalnom laboratoriju za duljinu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje te nakon toga usporediti dobivene rezultate u svrhu prepoznavanja prednosti i nedostataka pojedinih ručnih mjerila.

Na samom početku rada dan je generalni pregled i karakteristike pojenih mjerila koja se danas najčešće koriste u industrijskoj praksi za mjerenje unutarnjih promjera nakon čega su pobliže opisani uređaji i mjerila koja posjeduje Nacionalni laboratorij za duljinu pomoću kojih su sama mjerenja i izvršena.

Nakon prikazanih rezultata mjerenja pristupljeno je njihovoj analizi nakon čega su doneseni zaključci o prikladnosti korištenih ručnih mjerila duljine, odnosno njihovim prednostima i nedostacima pri provedbi unutarnjih mjerenja.

Ključne riječi: unutarnji promjer, ručna mjerila duljine, analiza rezultata mjerenja

SUMMARY

Purpose of this thesis was to make the internal measurements of specified rings using different hand measuring instruments in the National Laboratory for Length at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture and to compare given results for estimating advantages and disadvantages of used hand measuring instruments.

At the beginning some general informations and characteristics of today's industry mostly used hand measuring instruments for measuring internal diameters were given and later as also characteristics of hand measuring instruments which were used and are property of the National Laboratory for Length.

After the given results analysis of measurement results was made on which base certain conclusions had been done about used hand measuring instruments and their advantages and disadvantages in the internal measuring process.

Key words: internal diameter, hand measuring instruments, measurement results analysis

1. UVOD

Mjerenje je jedna od aktivnosti koju svakodnevno susrećemo u našem životu, od mjerenja pojedinih predmeta ili prostora čije dimenzije želimo saznati do mjerenja raznih nagiba, kutova i slično. Takvi postupci u svom osnovnom obliku zadovoljavaju potrebe široke populacije, no oni su u svojoj srži puno kompleksniji i rigorozniji kada su u pitanju industrijska ili laboratorijska mjerenja.

U današnjim laboratorijima postoje mnogi sofisticirani i skupi mjerni uređaji za iznimno precizna mjerenja koja se odvijaju u strogo određenim uvjetima te zahtjevaju adekvatan nadzor i vremenski period potreban za određenu izmjeru. Međutim, u industrijskoj praksi često puta je potrebno izvršiti brze kontrolne mjere te se u tim slučajevima pribjegava bržim, jeftinijim i manje točnim mjernim uređajima i mjerilima.

Svrha ovog rada je bila izmjeriti i usporediti rezultate mjerenja unutarnjih promjera mjerenih pomoću različitih ručnih mjerila duljine.

Takvi uređaji mogu biti npr. razna pomična mjerila, mikrometri, subita itd. u svojim različitim izvedbama, ovisno o predmetu mjerenja, prilagođeni za mjerenja poput dugih provrta, iznimno malih provrta itd. Odlikuju se različitim mjernim rezolucijama uz određeni mjerni raspon. Uz klasične analogne danas se sve više teži digitaliziranim mjerilima kako bi se pojednostavilo očitavanje rezultata, odnosno mjerenje. Naravno, svi takvi uređaji opet sami po sebi imaju svoje određene prednosti i nedostatke uz dodatne greške koje se prilikom mjerenja javljaju usred različitih atmosferskih uvjeta, neiskustva mjeritelja i njegove nezadovoljavajuće provedbe mjerenja, odnosno rukovanja samim uređajima i mjerilima. U daljnjem tekstu upravo će se te prednosti i nedostaci podrobnije opisati u ovisnosti o mjernim rezultatima i samom procesu mjerenja te međusobno usporediti s drugim korištenim ručnim mjerilima duljine.

2. MJERILA ZA MJERENJE UNUTARNJIH PROMJERA

2.1. Pomična mjerila

2.1.1. Klasično pomično mjerilo

Klasično pomično mjerilo jedno je od najčešće korištenih ručnih mjerila za mjerenje raznih unutarnjih i vanjskih karakteristika. Služi za mjerenje kako standardnih duljina tako i unutarnjih i vanjskih promjera te dubina. Osnovu mu predstavlja mjerna letva s kljunom na koju je ugravirana milimetarska skala te klizač s kljunom koji klizi po letvi uz mjerne šiljke i izbočenja za mjerenje unutarnjih karakteristika, odnosno dubina. Izrađuju se u rezoluciji očitavanja (0,1; 0,05; 0,02) mm, a preciznijem očitavanju pomaže kočni mehanizam, odnosno najčešće je to vijak kojim se klizač pričvrsti za letvu. Izrađuju se u različitim veličinama pa im se i prema tome mjerni raspon kreće od (150-3000) mm. Materijal izrade najčešće je čelik, ali može biti i plastika ili drvo [3].



Slika 1. Klasično pomično mjerilo sa sastavnim dijelovima



Slika 2. Pomično mjerilo za mjerenje unutarnjih promjera

2.1.1.1. Pomično mjerilo s mjernom urom

Pomično mjerilo s mjernom urom na identičan način može mjeriti sve karakteristike kao i klasično pomično mjerilo uz razliku gdje se rezultati mjerenja očitavaju na mjernoj uri. Isto tako može biti i specijalno prilagođeno samo za mjerenje unutarnjih karakteristika. Mjerni raspon je najčešće od (0-300) mm, a sama rezolucija očitavanja od (0,01-0,02) mm. Materijal izrade je najčešće čelik.



Slika 3. Pomično mjerilo s mjernom urom

2.1.1.2. Digitalno pomično mjerilo

Uporaba digitalnih pomičnih mjerila danas postaje sve učestalija. Mjerni raspon im se kreće od (0-1000) mm, ovisno o samom modelu, a očitavanja se vrše na digitalnom ekranu. Rezolucija je najčešće 0,01 mm. Materijal izrade je obično nehrđajući čelik, a moguće su i vodootporne izvedbe, izvedbe otporne na prašinu ili sa napajanjem pomoću solarne energije. Same kontaktne čeljusti mogu biti npr. izrađene od karbida ili keramike.



Slika 4. Digitalno pomično mjerilo sa keramičkim dodirnim čeljustima

2.2. Mikrometri

Mikrometri su uređaji, odnosno mjerila koja se isto kao i pomična mjerila mogu koristiti za mjerenje različitih unutarnjih i vanjskih karakteristika, dubina provrta, profila navoja i zupčanika, ovisno o svojoj izvedbi. Klasični mikrometri obično imaju rezoluciju očitavanja od oko 0,01 mm, dok su oni digitalni precizniji i ta se rezolucija kreće oko 0,001 mm. Mjerni raspon najčešće iznosi (0-200) mm, dok se kod onih sa ekstenzivnim nastavcima taj raspon kreće i do 5000 mm.

2.2.1. Klasični mikrometri za unutarnja mjerenja

Klasični mikrometri za unutarnja mjerenja mogu imati više izvedbi, ovisno o samom obliku mjernih čeljusti. Slika 5. prikazuje jedan oblik moguće izvedbe čeljusti mikrometra tvrtke INSIZE sa rezolucijom očitavanja 0,01 mm te mjernim rasponom od (25-50) mm. Mjerni raspon ove serije mikrometara se kreće od (5-300) mm, izrađen je od nehrđajućeg čelika, a same dodirne površine čeljusti su izrađene od karbida.



Slika 5. Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 1. izvedba čeljusti

Slika 6. prikazuje mikrometar sa rezolucijom očitavanja 0,01 mm uz mjerni raspon od (5-30) mm pri čemu su dodirne mjerne površine izrađene od karbida.



Slika 6. Klasični mikrometar za unutarnja mjerenja - 2. izvedba čeljusti

2.2.1.1. Dvostrani mikrometri

Predstavljaju kombinaciju prethodna dva oblika mjernih čeljusti. Slika 7. prikazuje jedan takav mikrometar sa rezolucijom očitavanja od 0,01 mm uz dodirne čeljusne površine izrađene od karbida. Raspon mjerenja prikazanog modela se kreće od (5-200) mm [5].



Slika 7. Mikrometar sa dvostranim čeljustima

2.2.1.2. Digitalni mikrometri za unutarnja mjerenja

Slika 8. prikazuje digitalni mikrometar tvrtke INSIZE sa rezolucijom očitavanja 0,001 mm. Materijal izrade je nehrđajući čelik, a dodirne površine čeljusti su od karbida. Moguće je spajanje na računalo te prenošenje izmjerenih podataka na taj način. Mjerni raspon ove serije digitalnih mikrometara je od (5-100) mm.



Slika 8. Digitalni mikrometar

2.2.2. Štapni mikrometri s nastavcima

Postoji više oblika štapnih mikrometara ovisno o proizvođaču koji dolaze sa štapnim nastavcima kako bi pokrili širok mjerni raspon. Takvi mikrometri u pravilu imaju mjerni raspon od (25-5000) mm uz rezoluciju očitavanja od 0,01 mm. Slika 9. prikazuje štapni mikrometar tvrtke INSIZE koja ima raspon mjerenja od (1000-5000) mm uz rezoluciju 0,01 mm. Kao i kod većine mikrometara dodirne točke su načinjene od otpornog karbida.



Slika 9. Štapni mikrometar tvrtke INSIZE

2.2.2.1. Digitalni štapni mikrometri s nastavcima

Kako postoje klasični tako postoje i digitalni štapni mikrometri. Rezolucija očitavanja im je bolja te se kreće obično oko 0,001 mm, a mjerni raspon ovisno od proizvođača od (150-2000) mm. Digitalni štapni mikrometar tvrtke Mitutoyo prikazan ispod (Slika 10.) ima rezoluciju od 0,001 mm uz mjerni raspon od (200-2000) mm.



Slika 10. Digitalni štapni mikrometar tvrtke Mitutoyo

2.2.3. Klasični trokraki mikrometri

Klasični trokraki mikrometri za unutarnja mjerenja služe za mjerenje kako klasičnih tako i slijepih provrta, a izrađeni su najčešće od nehrđajućeg čelika. Mjerni raspon ovakvih mikrometara iznosi od (3-300) mm, a rezolucija očitavanja 0,005 mm, dok za niže mjerne raspone ona može iznositi i 0,001 mm. Kao što im i samo ime kaže posjeduju 3 kraka, odnosno mjerna ticala koja su samocentrirajuća te se pokreću pomoću navojnog mjernog vretena.



Slika 11. Klasični trokraki mikrometar za unutarnja mjerenja

Takvi mikrometri se mogu prodavati pojedinačno za određeni mjerni raspon uz pripadajući prsten za podešavanje te štapani produžetak određene duljine. Najčešće se ipak radi o cijelim setovima koji pokrivaju određene mjerne raspone pri čemu takvi setovi sadrže od dva do šest mikrometara sa jednim do tri prstena za podešavanje. Takvi setovi se prodaju za mjerne raspone od (3-200) mm, ovisno o proizvođaču.



Slika 12. Set trokrakih mikrometara sa pripadajućim komponentama

2.2.3.1. Digitalni trokraki mikrometri

Isto kao i klasični trokraki mikrometri i digitalni se mogu prodavati zasebno prilagođeni za mjerenje u određenom mjernom rasponu te u setovima. Mjerni raspon kod individualnih se kreće od (3-300) mm, a kod mjernih setova od (3-100) mm uz što standardno dolaze prsteni za podešavanje te štapni nastavci. Rezolucija je bolja te iznosi 0,001 mm. Kontakne površine mogu biti od tvrdog metala, prevučene titan nitridom i slično.



Slika 13. Digitalni trokraki mikrometar

Uz klasični postoji i "pištolj verzija" [7] koja služi za brza mjerenja uz mjerni raspon od (2-200) mm te rezoluciju očitavanja 0,001 mm pri čemu su dodirne površine otporne na trošenje uz što dolaze i kontrolni prsteni te postoji mogućnost spajanja na računalo.



Slika 14. "Pištolj" izvedba digitalnog trokrakog mikrometra tvrtke SYLVAC

Isto tako tvrtka SYLVAC proizvodi i digitalne trokrake mikrometre visoke točnosti (Slika 15.) koji se odlikuju rezolucijom očitavanja od 0,0001 mm uz mjerni raspon od (2-100) mm uz svu dodatnu opremu u vidu kontrolnih prstena, otpornih dodirnih površina te računalnog povezivanja.



Slika 15. Digitalni trokraki mikrometar visoke točnosti tvrtke SYLVAC

2.3. Subita

Subita su mjerni uređaji koji na svome vrhu imaju mjernu uru odnosno komparator, a njime se mogu mjeriti različiti unutarnji promjeri, od izrazito malih provrta sve do raznih slijepih i sferičnih provrta. Sa samim subitima dolaze i mjerni nastavci kojih može biti po desetak, ovisno o samom subitu. Postoji mnoštvo proizvođača subita i sam njihov izgled varira od jednog do drugog proizvođača. Njihovo rukovanje je jednostavno, a sama očitavanja su izrazito točna, ovisno o samoj rezoluciji uređaja. Ispod su navedeni značajniji proizvođači subita u svijetu sa nekim od svojih tipičnih subita za različite vrste unutarnjih mjerenja.

2.3.1. Mitutoyo

Japanska međunarodna tvrtka specijalizirana za proizvodnju mjernih uređaja i mjernu tehnologiju.

2.3.1.1. Standardni subito

Rezolucija očitavanja 0,01 mm i 0,001 mm uz preciznost od 2 μ m. Karbidne dodirne površine uz štapne i mjerne nastavke (5-13 nastavaka) za duboke provrte sa mjernim rasponom od (18-400) mm.



Slika 16. Standardna verzija subita tvrtke Mitutoyo

2.3.1.2. *Subita za vrlo male promjere*

Kao što im i samo ime kaže prilagođeni su za mjerenje vrlo malih promjera koji iznose od (0,95-18) mm, ovisno o samoj seriji subita koje su prilagođene za pojedine mjerne raspone u tom intervalu. Radijalni pomak kontaktne površine na vrhu se pretvara u aksijalni pomak na samom mjernom štapu koji se zatim očitava na mjernoj uri. Sama subita ovisno o seriji ne dolaze uvijek sa tom mjernom urom, a kod serija gdje dolaze rezolucije očitavanja iznose 0,01 mm, 0,001 mm i 0,005 mm. Preciznost im iznosi 4 μm te dolaze sa 6-9 mjernih nastavaka, a same dubine na kojima je moguće izvršiti mjerenja su od (11,5-62) mm.



Slika 17. *Subito za mjerenje vrlo malih provrta*

2.3.1.3. *Subita za male promjere*

Raspon njihova mjerenja iznosi od (6-18,5) mm uz rezoluciju očitavanja od 0,01 mm i 0,001 mm. Ove serije tvrtke Mitutoyo dolaze sa 9 mjernih nastavaka koji su izrađeni od nehrđajućeg čelika, a sama preciznost iznosi 5 μm .



Slika 18. *Subito za male promjere*



Slika 19. Mjerni nastavci

2.3.1.4. Subita sa mikrometarskom glavom

Kod subita sa mikrometarskom glavom mjerni nastavci se postavljaju na mikrometru koji se nalazi na vrhu mjernog štapa. Kontaktne površine su standardno otporne na trošenje i izrađene su od karbida. Na sam subito mogu se dodavati štapni nastavci koji omogućuju mjerenje promjera kod dubljih provrta, a sam mjerni raspon iznosi od (60-800) mm. Ovisno o seriji dolaze dva do tri mjerna nastavka. Rezolucije očitavanja su 0,01 mm i 0,001 mm uz preciznost od 2 μ m.



Slika 20. Subito sa mikrometarskom glavom

2.3.1.5. Subita za slijepo provrte

Rezolucija očitavanja 0,01 mm i 0,001 mm uz preciznost 5 μ m. Dolaze standardno sa mjernim nastavcima te se mjerni raspon kreće od (15-150) mm.



Slika 21. Subito za slijepo provrte

2.3.1.6. *Kratki subito*

Laganiji i kompaktniji u odnosu na standardnu verziju zbog skraćenog štapnog dijela ispod držača. Rezolucije očitavanja su 0,01 mm i 0,001 mm uz preciznost 5 μm te mjerni raspon od (18-160) mm. Ove serije subito dolaze sa 6 do 14 nastavaka. Karbidne kontaktne površine.



Slika 22. *Kratki subito*

2.3.1.7. *Digitalni subito ABSOLUTE*

Digitalni subito jednostavan je za korištenje i olakšava očitavanje rezultata mjerenja koji se prikazuju na LCD ekranu. Otporan je na prašinu te vodootporan. Mjerni raspon mu se kreće od (45-160) mm uz rezoluciju očitavanja od 0,001 mm te preciznost od 3 μm . Na njega se dodatno mogu postaviti 4 štapna nastavka duljine 250 ili 500 mm. Zaslona očitavanja i držač je moguće rotirati za 320 stupnjeva oko vertikalne osi i za 90 stupnjeva oko horizontalne osi.



Slika 23. *Digitalni subito ABSOLUTE*

2.3.2. Oskar Schwenk

Njemačka tvrtka u privatnom vlasništvu aktivna na području proizvodnje mjerne opreme s naglaskom na mjernu opremu za unutarnja mjerenja. Njihovi uređaji mjere od klasičnih, slijepih i stepenastih provrta neovisno bili oni cilindrični, poligonalni ili eliptični do njihovih tolerancijskih okvira i mehaničke stabilnosti. Provrte mjere u 2 točke, a centriraju se u 3 točke. Preciznost im iznosi 0,01 mm i 0,001 mm.

2.3.2.1. Subita - Serija SU

Predstavlja standardnu seriju subita koja mjerenje provrta vrši u 2 točke uz visoku mjernu točnost i preciznost. Mjerni raspon iznosi od (4,5-800) mm te mogućnost standardnih mjerenja do mjernih dubina od 3000 mm. Unutar ove serije postoji mnoštvo varijacija samih subita koja su prilagođena mjernju vrlo dubokih provrta, sfernih provrta i slično koji će biti detaljnije opisani u nastavku. Njihova aplikacija je široka, a korištenje jednostavno gdje se subito sam postavlja u centar otvora preko poprečnog naslona za centriranje. Ponovljivost kod ove serije subita se kreće u intervalu od (0,5-1,5) μm , a greške linearnosti od (2-3) μm , ovisno o mjernom rasponu samog subita. Mjerni nastavci mogu biti izrađeni od volframova karbida ili rubina. Standardna verzija sa skraćenom drškom se naziva Serija SK.



Slika 24. Standardna SU serija subita



Slika 25. Određivanje ispravnog kontrolnog položaja

2.3.2.2. *Subita - Serija SW*

Služe za mjerenje teško dostupnih provrta te im je vrh postavljen pod kutem. Mjerni raspon im je također (4,5-800) mm uz ponovljivost od (1-2,5) μm te lineranu grešku od (4-5) μm , ovisno o mjernom rasponu.



Slika 26. *Subito serije SW*

2.3.2.3. *Subita - Serija Vario SV/SVS*

Ova serija pokriva širok mjerni raspon ovisno o potrebama na temelju zamjenjivih nastavnih mjernih glava, a on iznosi od (6-800) mm. SVS serija predstavlja samo dodatak koji u sebi sadrži dodatno još 2 nastavne mjerne glave prevučene volframovim karbidom za mjerenje slijepih provrta čije je mjerenje moguće 1,5 mm od samog dna provrta. Kao dodaci se još mogu naručiti štapne ekstenzije za veće dubine mjerenja te kutni nastavci za teže dostupne provrte. Mjerni raspon za SVS se kreće od (18-160) mm. Ponovljivost cijele Vario serije iznosi od (0,5-1,5) μm , a linearna greška (2-3) μm .



Slika 27. *Subita serije Vario SV/SVS*

2.3.2.4. *Subita – Serija SMT*

Za mjerne raspone od (4,5-510) mm te dubina do 4000 mm pri čemu pružaju bolju stabilnost i točnost nego klasična subita sa štapnim nastavcima.



Slika 28. *Subito serije SMT*

2.3.2.5. *Subita – Serija SE*

Služe za mjernja iznimno dubokih provrta, do 12 m dubine. Mjerni raspon im je od (35-1300) mm. Preciznost im iznosi 1 μm , čak i na dubini od 12 m.



Slika 29. *Subito serije SE*

2.3.2.6. *Subita – Serija SS*

Za mjerenje slijepih provrta u mjernom rasponu od (20-600) mm. Same kontaktne mjerne površine mogu biti izrađene od volframova karbida, rubina ili keramike. Mjerenje je moguće na 1 mm od samog dna provrta. Koristi za mjerenje ne tako dubokih slijepih provrta, do 90 mm.



Slika 30. Subito serije SS

2.3.2.7. Subito – Serija SUS

Posebna serija subita za mjerenje sfernih promjera u rasponu od (14-330) mm. Posjeduje 2 krajnje bočne površine koje mu omogućuju precizno pozicioniranje za samo mjerenje.



Slika 31. Subito serije SUS

2.3.2.8. Subito – Serija SL

Koriste se kad je potrebno izmjeriti promjer nekog provrta u slučaju kada u samom provrtu postoji određena prepreka, npr. puni oblik promjera D koji prolazi cijelom dužinom samog provrta. Ovakva subita mogu mjeriti u rasponu od (25-500) mm, a dubina im je ograničena između 12 i 30 mm.



Slika 32. Subito serije SL

2.3.3. Mahr

Njemački proizvođač mjerne opreme i instrumenata.

2.3.3.1. *Subito serije 844 K*

Subita ove serije služe za mjerenje promjera kao i za pravilnosti samih oblika, poput zaobljenosti i koničnosti. Mjerno područje im je (0,47-18,6) mm te posjeduje kromirane oplatae zbog čega su kontaktne površine otporne na trošenje. Zbog ugrađene opruge sila koje se primjenjuje je konstantna te se na taj način uklanja utjecaj mjeritelja [1].



Slika 33. *Subito 844 K*

2.3.3.2. *Subito serije 844 N*

Uz samo mjerenje promjera i pravilnosti oblika ova serija subita može mjeriti i udaljenost planparalelnih površina. Uz pomoć širokog mosta za centriranje osigurano je automatsko centriranje u samom provrtu. Mjerno područje iznosi od (18-800) mm uz ponovljivost od (0,5-1,5) μm .



Slika 34. *Subito serije 844 N*

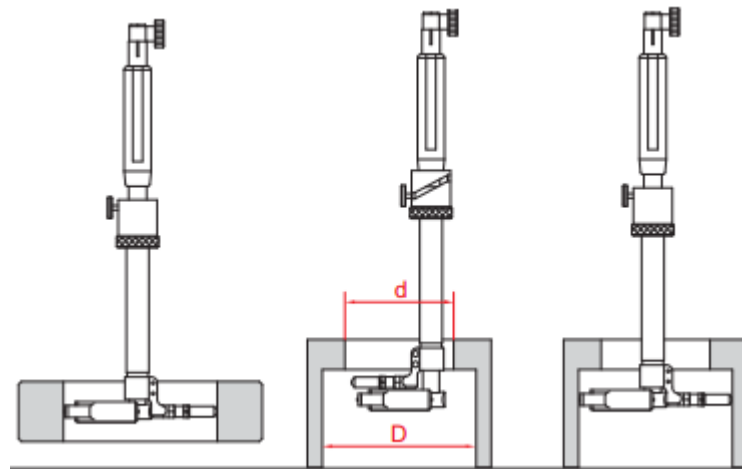
2.3.4. INSIZE

2.3.4.1. Subito sa zakretnom glavom

Subito sa zakretnom glavom služi za mjerenje provrta do kojih se dolazi na način da se prije toga mora proći manji provrt da bi se moglo pristupiti većemu. Mjerni raspon iznosi od (80-150) mm, a rezolucija očitavanja 0,01 mm ili 0,001 mm. Usred same fizičke ograničenosti manji promjer mora biti veći od 57 mm. Preciznost ovakvog subita iznosi 2 μm , a ponovljivost 1 μm [9].



Slika 35. Subito sa zakretnom glavom



Slika 36. Primjer načina mjerenja

2.4. Mjerila s iglom za male promjere

Posjeduju 2 prstenasta dijela, tzv.igle čiji je promjer nešto manji od samog promjera provrta. Ticala su koničnog oblika, a sam kontakt ticala i provrta se ostvaruje preko koničnog čepa u unutarnjem dijelu mjernog uređaja. Prilikom pomicanja ručke za produljenje/skraćivanje ticala taj se dio aksijalno pomiče kroz mjerni uređaj. Ticala su osigurana oprugom te konični dio gura ticala u jednom smjeru, a opruge ih vraćaju u suprotni. Na taj način se na komparatoru pokazuje sam rezultat mjerenja, odnosno smjer promjene dimenzije provrta u odnosu na one zadane [1]. Slika 37. prikazuje takvo mjerilo tvrtke INSIZE sa mjernim rasponom od (0,95-20,6) mm. Preciznost iznosi (3-4) μm , a ponovljivost 1 μm .



Slika 37. Mjerilo za male promjere s iglom

2.5. Unimaster

Unimaster je mjerni uređaj koji je namjenjen za mjerenje izuzetno velikih unutarnjih i vanjskih dimenzija. Precizan je te je njime jednostavno rukovati. Može se postaviti horizontalno ili okomito i pritom održavati konstantnu mjernu silu. Slika 38. prikazuje Unimaster koji može mjeriti unutarnje dimenzije u rasponu od (250-1475) mm te vanjske u rasponu od (225-1450) mm. Rezolucija očitavanja je 0,01 mm.



Slika 38. Unimaster proizvođača Tesa

Sam uređaj dolazi u setu sa raznim nastavcima ovisno o mjernom rasponu te dodacima za pozicioniranje [11].



Slika 39. Unimaster set

3. NACIONALNI LABORATORIJ ZA DULJINU

3.1. O Laboratoriju

Nacionalni laboratorij za duljinu je utemeljen 1959. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu pod nazivom Laboratorij za precizna mjerenja dužina (LFSB). Od utemeljenja Laboratorij provodi mjerenja duljine, kuta i hrapavosti površina s visokom točnošću.

Laboratorij je nositelj državnog etalona za duljinu od 1998. godine što je ujedno bio i prvi proglašeni državni etalon u Hrvatskoj s obzirom da je Laboratorij u to vrijeme jedini imao međunarodnu akreditaciju sukladno zahtjevima norme ISO 17025 što je bio jedan od temeljnih uvjeta za proglašenje državnog etalona [13].

Državni etalon za duljinu RH sastoji se od:

- 121 planparalelne granične mjerke, duljine od 0,5 mm do 100 mm, proizvođača MAHR, model 409, serijski broj 908973;
- Deset dugih planparalelnih graničnih mjerki, duljina od 125 mm do 700 mm, proizvođača Koba;
- **Dva referentna prstena nazivnih promjera \varnothing 13,9983 mm i \varnothing 50,0004 mm**, proizvođača Joint, serijski broj NO 0313;
- Precizne staklene mjerne skale, duljine 100 mm, proizvođača NPL, serijski broj SM.

3.2. Akreditirana područja umjeravanja

Prvu međunarodnu akreditaciju Laboratorij je dobio 1994. godine od strane SIT-a (Servizio di taratura in Italia). Akreditacija SIT-a (kasnije ACREDIA) je održavana do 2013. godine kada Laboratorij sukladno pravilima EA prelazi na Hrvatsku akreditacijsku agenciju (HAA). Danas je akreditirano 35 postupaka umjeravanja radi cjelovitog ispunjavanja zahtjeva te potreba samog gospodarstva za umjeravanjem mjernih sredstava duljine. Pored usluga umjeravanja pod HAA akreditacijom Laboratorij pruža usluge mjerenja, odnosno provjere kvalitete vrlo zahtjevnih proizvoda i njihovih sastavnih dijelova.

Svih 35 postupaka umjeravanja za koje Laboratorij posjeduje akreditaciju navedeni su u tablici ispod .

Napomene vezane uz tablicu:

* Iskazano kao proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$);

** Metoda umjeravanja se provodi u laboratoriju i na terenu;

Sve vrijednosti mjerene veličine L su u m;

Vrijednosti Ra i Rz se uvrštavaju u μm .

Tablica 1. HAA akreditirano područje umjeravanja [14]

Red. br.	Mjerna veličina/ Mjerilo	Mjerno područje	Mjerna sposobnost* (CMC)	Metode umjeravanja
1.	Planparalelene granične mjerke / centralna duljina	(0,5 - 100) mm	$Q [30, 0,5*L]$ nm	Apsolutna (Interferencijska)
2.	Planparalelna granična mjerka / centralna duljina	(0,5 - 100) mm	$(0,05 + 1,1*L)$ μm	Usporedbena (diferencijska)
3.	Duga planparalelna granična mjerki / centralna duljina	(10 - 500) mm	$(0,35 + 1,0*L)$ μm	Usporedbena (diferencijska)
4.	Etalon hrapavosti / ISO 5436-1 tip C, D	$Ra = (0,025 - 30)$ μm $Rz = (0,10 - 100)$ μm	$(12 + 38*Ra)$ nm $(22 + 46*Rz)$ nm	Direktna (izravna)
5.	Precizna mjerna skala / podjela skale	(0 - 300) mm	$(0,15 + 1*L)$ μm	Direktna (izravna)
6.	Kružnost	± 3 μm	0,16 μm	Direktna (izravna)

8.	Unutarnji cilindar (prsten) / promjer	(8 - 150) mm	$(0,6 + 0,7 * L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
9.	Vanjski cilindar (osovina) / promjer	(0,1 – 100) mm (100 – 200) mm	0,7 μm 1 μm	Direktna (izravna)
10.	Cilindrični navojni čep / srednji promjer	(1 – 60) mm	3 μm	Direktna (izravna)
11.	Cilindrični navojni prsten / srednji promjer	(4 – 60) mm	3 μm	Direktna (izravna)
12.	Uređaj za ispitivanje hrapavosti /mjerna pogreška	-	12,80 %	Direktna (izravna) **
13.	1D mjerni uređaj / mjerna pogreška	(0 - 3000) mm	$(0,2 + 3,8 * L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna) **
14.	2D mjerni uređaj / mjerna pogreška	(0 - 3000) mm	$(0,2 + 3,6 * L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna) **
15.	Uređaj za umjeravanje mjernih ura / mjerna pogreška	(0 - 25) mm	$(1,1 + 4,8 * L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
16.	Elektronski komparator / mjerna pogreška	od $\pm 0,3 \mu\text{m}$ do $\pm 100 \mu\text{m}$	20 nm	Direktna (izravna)

17.	Visinomjer / mjerna pogreška	(0 - 1000) mm	$(10 + 9*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
18.	Dubinomjer / mjerna pogreška	dubinomjer (0 - 700) mm	$(10 + 9*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
		mikrometarski dubinomjer (0 - 300) mm	$(7 + 8*L) \mu\text{m}$	
		dubinomjer s mjernom urom (0 - 210) mm	$(7 + 8*L) \mu\text{m}$	
19.	Mikrometar za vanjska mjerenja / mjerna pogreška	(0 - 500) mm	$(1,2 + 5*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
20.	Štapni mikrometar / mjerna pogreška	(0 - 3000) mm	$(1,6 + 8,5*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
21.	Trokraki mikrometar / mjerna pogreška	(0 - 200) mm	$(1,5 + 4*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
22.	Pomično mjerilo / mjerna pogreška	(0 - 1000) mm	$(10 + 9*L) \mu\text{m}$	Direktna (izravna)
23.	Mjerna ura / mjerna pogreška	(0 - 10) mm	1 μm	Direktna (izravna)
		(0 - 100) mm	$(1 + 2*L) \mu\text{m}$	
24.	Subito / mjerna pogreška	-	5 μm	Direktna (izravna)
25.	Komparator / mjerna pogreška	(0 - 1) mm	0,7 μm	Direktna (izravna)

26.	Komparator sa zakretnim ticalom / mjerna pogreška	(0,1 - 2) mm	0,8 μm	Direktna (izravna)
27.	Mjerilo debljine s mjernom urom / mjerna pogreška	vanjska mjerenja: (0 - 100) mm unutarnja mjerenja: (2,5 – 200) mm	2,4 μm 5,6 μm	Direktna (izravna)
28.	Kutnik / okomitost	600 mm x 400 mm	Vanjski kut: (3,5 + 0,8*L) μm Unutarnji kut: (4,1 + 0,8*L) μm	Direktna (izravna)
29.	Kutomjer / mjerna pogreška	0° - 360°	4'	Direktna (izravna)
30.	Libela / mjerna pogreška	± 10 mm/m	0,01 mm/m	Direktna (izravna)
31.	Lineal / pravocrtnost	(0 - 1000) mm	(1,5 + 0,3*L) μm	Direktna (izravna)
32.	Mjerna ploča / ravnost	(3 x 3) m ²	35*L μm	Direktna (izravna) **
33.	Etaloni debljine / duljina	(0,01 – 100) mm	(0,8 + 7,5*L) μm	Direktna (izravna)
34.	Mjerne letve / podjela skale	(0 - 5000) mm	(1,2 + 6,3*L) μm	Direktna (izravna)
35.	Savitljivo mjerilo duljine s podjelom / podjela skale	(0 - 50000) mm	(16 + 60*L) μm	Direktna (izravna)

Za mjerenja unutarnjih promjera koji su fokus ovog završnog rada bitne su akreditacije koje su osjenčane plavom bojom, odnosno pod rednim brojevima 8, 20, 21, 22 i 24.

3.3. Mjerila za mjerenja unutarnjih promjera dostupna u Nacionalnom laboratoriju za duljinu

3.3.1. Mikrometar za male provrte

Mikrometar za male provrte ima mjerni opseg od (3-10) mm, a rezolucija očitavanja mu iznosi 0,01 mm.



Slika 40. Mikrometar za male provrte

3.3.2. Štapni mikrometar

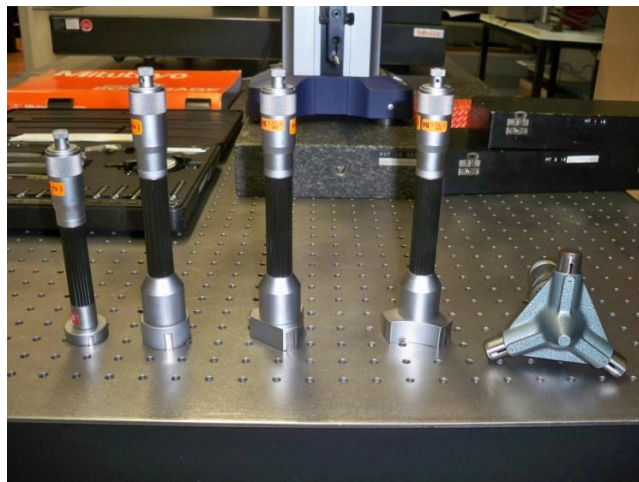
Štapni mikrometar sa mjernim područjem od (50-150) mm te rezolucijom očitavanja 0,01 mm.



Slika 41. Štapni mikrometar

3.3.3. Trokraki mikrometar

Trokraki mikrometri dostupni u Laboratoriju imaju mjerni opseg u rasponu od (35-125) mm dok im rezolucija očitavanja iznosi 0,01 mm.



Slika 42. Trokraki mikrometri

3.3.4. Subita

U Laboratoriju se nalazi set subita s mjernom urom proizvođača *Mitutoyo*. Mjerni opseg subita iznosi od (18-100) mm, a rezolucija očitavanja je 0,01 mm [1].



Slika 43. Subito set

4. PROVEDBA I REZULTATI MJERENJA

Za provedbu mjerenja unutarnjih promjera izabrana su 3 različita ručna mjerila duljine, a to su pomično mjerilo, trokraki mikrometar i subito. Uzorci na kojima su vršena mjerenja činilo je 6 kontrolnih prstena različitih unutarnjih promjera ($\varnothing 18$ mm, $\varnothing 19$ mm, $\varnothing 20$ mm, $\varnothing 50$ mm, $\varnothing 60$ mm i $\varnothing 100$ mm) gdje se ovisno o promjeru pristupilo mjerenju sa klasičnim ili digitalnim izvedbama ručnih mjerila duljine čiji je mjerni raspon bio prikladan pojedinom prstenu. Svakim se pojedinim ručnim mjerilom izvršilo 30 mjerenja na odabranim kontrolnim prstenima nakon čega su izračunate vrijednosti aritmetičke sredine i proširenih mjernih nesigurnosti čije će vrijednosti poslužiti u daljnjoj analizi.

4.1. Mjerni kontrolni prsteni promjera $\varnothing 18$ mm, $\varnothing 19$ mm i $\varnothing 20$ mm



Slika 44. Mjerni kontrolni prsteni promjera $\varnothing 18$ mm, $\varnothing 19$ mm i $\varnothing 20$ mm

4.1.1. Korištena ručna mjerila

Za mjerenja navedena 3 kontrolna prstena čije će detaljnije značajke biti iznešene kasnije (4.1.2.1, 4.1.2.2, 4.1.2.3) korištena su 3 ista ručna mjerila duljine.

4.1.1.1. Digitalno pomično mjerilo

Digitalno pomično mjerilo korišteno prilikom mjerenja je mjerilo tvrtke Mitutoyo. Njegova rezolucija očitavanja iznosi 0,01 mm, a mjerni raspon iznosi od (0-150) mm. Ono je jedino ručno mjerilo koje je korišteno za mjerenja svih 6 kontrolnih prstena koji su bili predmetom mjerenja, odnosno jedina korištena verzija pomičnog mjerila.



Slika 45. Digitalno pomično mjerilo tvrtke Mitutoyo

4.1.1.2. Digitalni trokraki mikrometar

Korišten digitalni trokraki mikrometar je također od tvrtke Mitutoyo, a karakterizira ga rezolucija očitavanja od 0,001 mm te mjerni raspon od (16-20) mm.



Slika 46. Digitalni trokraki mikrometar tvrtke Mitutoyo

4.1.1.3. Subito

Sva mjerila korištena za mjerenja navedenih kontrolnih prstena su mjerila tvrtke Mitutoyo pa tako i subito čiji mjerni raspon iznosi od (18-35) mm, a rezolucija očitavanja 0,01 mm.



Slika 47. Subito tvrtke Mitutoyo

4.1.2. Rezultati mjerenja

4.1.2.1. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 18$ mm

Podaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0211-0229/15**, broj naljepnice **0215**:

Nazivni promjer prstena: **18mm** ^{-1 μ m}

Izmjereni promjer prstena: **17,9994 mm**

Proizvođač: **mcm**

Interna oznaka prstena: **RET 169 - 394**

Tablica 2. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 18$ mm

sve vrijednosti u mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	Subito
1	17,96	17,996	18,002
2	17,96	17,996	18,001
3	17,97	17,996	18,003
4	17,96	17,996	18,003
5	17,96	17,996	18,003
6	17,98	17,999	18,002
7	17,97	17,996	18,002
8	17,98	17,996	18,002
9	17,97	17,997	18,002
10	17,97	17,999	18,002
11	17,97	17,997	18,003
12	17,97	17,995	18,002
13	17,97	17,995	18,002
14	17,97	17,995	18,003
15	17,96	17,997	18,003
16	17,97	17,997	18,002

17	17,97	17,995	18,002
18	17,96	17,997	18,002
19	17,96	17,997	18,003
20	17,96	17,997	18,002
21	17,98	17,998	18,002
22	17,96	17,997	18,003
23	17,96	17,997	18,002
24	17,96	17,999	18,002
25	17,97	17,997	18,002
26	17,97	17,999	18,002
27	17,96	17,998	18,002
28	17,97	17,998	18,002
29	17,97	17,998	18,002
30	17,97	17,998	18,002
\bar{x}	17,97	17,997	18,002
s	0,007	0,0012	0,0005
Proširena mjerna nesigurnost U (u μm)	15	3,1	5,1

Proširena mjerna nesigurnost U koja predstavlja veličinu koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini [2] te se računa prema dolje navedenim izrazima koji vrijede za računanje proširenih mjernih nesigurnosti svih korištenih ručnih mjerila kod svih mjerenih kontrolnih prstena.

Izrazi za računanje proširenih mjernih nesigurnosti U :

$$\text{Pomično mjerilo:} \quad U = (15 + 9 * L) \mu\text{m} \quad (1)$$

$$\text{Trokraki mikrometar:} \quad U = (3 + 4 * L) \mu\text{m} \quad (2)$$

$$\text{Subito:} \quad U = (5 + 4 * L) \mu\text{m} \quad (3)$$

Napomene:

Vrijednosti L se uvrštavaju u metrima; $P = 95\%$; $k = 2$

4.1.2.2. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 19$ mmPodaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0211-0229/15**, broj naljepnice **0217**:Nazivni promjer prstena: **19mm**Izmjereni promjer prstena: **19,0009 mm**Proizvođač: **mcm**Interna oznaka prstena: **RET 170 - 395**Tablica 3. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 19$ mm

sve vrijednosti u mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	Subito
1	18,98	18,999	19,001
2	18,97	18,999	19,001
3	18,97	18,998	19,002
4	18,99	18,999	19,002
5	18,98	18,998	19,002
6	18,98	18,999	19,002
7	18,98	18,998	19,002
8	18,99	18,999	19,002
9	18,97	18,998	19,002
10	18,99	18,998	19,002
11	18,99	18,998	19,002
12	18,99	18,998	19,001
13	18,99	18,998	19,001
14	18,98	18,998	19,001
15	19,00	18,998	19,002
16	18,99	18,998	19,002
17	19,00	18,998	19,003
18	19,00	18,999	19,002
19	19,00	18,998	19,001
20	18,99	18,998	19,001
21	18,99	18,998	19,002
22	18,99	18,998	19,002
23	18,98	18,998	19,002
24	19,00	18,998	19,002
25	18,99	18,998	19,002
26	18,99	18,998	19,002
27	18,99	18,999	19,001
28	18,99	18,999	19,002
29	18,99	18,998	19,001
30	18,99	18,998	19,002
\bar{x}	18,99	18,998	19,002
s	0,009	0,0005	0,0005
Proširena mjerna nesigurnost U (u μm)	15	3,1	5,1

Proširene mjerne nesigurnosti u Tablici 3. izračunate su na temelju izraza (1), (2) i (3).

4.1.2.3. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 20$ mm

Podaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0211-0229/15**, broj naljepnice **0222**:

Nazivni promjer prstena: **20 mm** ^{+3 μ m}

Izmjereni promjer prstena: **20,0029 mm**

Proizvođač: **mcm**

Interna oznaka prstena: **RET 171 - 396**

Tablica 4. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 20$ mm

sve vrijednosti u mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	Subito
1	20,00	19,998	20,005
2	20,00	19,999	20,004
3	20,00	20,000	20,004
4	20,00	19,999	20,005
5	19,98	19,999	20,005
6	19,99	20,000	20,006
7	19,99	20,000	20,005
8	20,00	19,999	20,006
9	19,99	20,000	20,006
10	20,00	20,000	20,005
11	19,99	20,001	20,005
12	20,00	20,001	20,005
13	20,00	20,001	20,005
14	20,00	20,000	20,003
15	19,99	20,001	20,005
16	20,01	20,001	20,005
17	20,00	20,002	20,005
18	19,99	20,002	20,005
19	19,99	20,001	20,005
20	20,00	20,002	20,004
21	20,00	20,002	20,005
22	20,00	20,001	20,004
23	20,00	20,001	20,004
24	20,00	20,001	20,004
25	19,99	20,002	20,005
26	20,00	20,002	20,005
27	20,00	20,001	20,005
28	20,00	20,002	20,004

29	20,00	20,000	20,004
30	20,00	20,001	20,004
\bar{x}	20,00	20,001	20,005
s	0,006	0,0011	0,0007
Proširena mjerna nesigurnost U (u μm)	15	3,1	5,1

Proširene mjerne nesigurnosti u Tablici 4. izračunate su na temelju izraza (1), (2) i (3).

4.2. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 50$ mm

Podaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0230-0277/15**, broj naljepnice **0256**:

Nazivni promjer prstena: **50 mm** ^{+1 μm}

Izmjereni promjer prstena : **49,9999 mm**

Proizvođač: **C.ZEISS**

Interna oznaka prstena: **RET 61 - 141**

Za mjerenje je uz digitalno pomično mjerilo korišten i klasični trokraki mikrometar tvrtke Mahr rezolucije 0,01 mm uz mjerni raspon od (50-60) mm te subito uz mjerni raspon (35-60) mm i rezoluciju 0,01 mm.



Slika 48. Subito korišten za mjerenje kontrolnog prstena promjera $\varnothing 50$ mm

Tablica 5. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 50$ mm

sve vrijednosti u mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	Subito
1	49,98	49,998	50,002
2	49,99	49,998	50,002
3	49,99	49,999	50,002
4	49,99	49,999	50,002
5	49,98	50,000	50,002
6	49,99	49,998	50,003
7	49,99	50,000	50,002
8	50,00	49,999	50,003
9	50,00	49,998	50,002
10	50,00	50,000	50,002
11	50,00	49,998	50,003
12	50,00	49,999	50,003
13	50,00	49,998	50,003
14	49,99	49,999	50,003
15	49,99	49,999	50,003
16	49,99	49,999	50,002
17	50,00	50,000	50,002
18	49,99	50,000	50,003
19	50,00	49,998	50,002
20	49,99	49,999	50,002
21	50,00	49,998	50,003
22	50,00	49,999	50,003
23	49,99	50,000	50,002
24	50,00	49,998	50,003
25	49,99	49,998	50,002
26	50,00	50,000	50,003
27	50,00	49,999	50,002
28	50,00	50,000	50,003
29	49,99	49,999	50,003
30	49,99	50,000	50,003
\bar{x}	49,99	49,999	50,003
s	0,006	0,0008	0,0005
Proširena mjerna nesigurnost U (u μm)	16	3,2	5,2

Proširene mjerne nesigurnosti u Tablici 5. izračunate su na temelju izraza (1), (2) i (3).

4.3. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 60$ mm

Podaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0230-0277/15**, broj naljepnice **0264**:

Nazivni promjer prstena: **60 mm** $^{-1\mu\text{m}}$

Izmjereni promjer prstena: **60,0005 mm**

Proizvođač: **C.MAHR**

Interna oznaka prstena: **RET 128 - 354**

Uz digitalno pomično mjerilo za mjerenje je korišten klasični trokraki mikrometar tvrtke Mahr rezolucije 0,01 mm i mjernog raspon (60-70) mm te subito rezolucije 0,01 mm.



Slika 49. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 60$ mm s trokrakim mikrometrom

Tablica 6. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 60$ mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	sve vrijednosti u mm
			Subito
1	59,99	60,002	59,998
2	59,98	60,002	59,998
3	59,99	60,002	59,999
4	59,98	60,003	60,001
5	59,99	60,003	59,999
6	59,99	60,003	59,999

7	59,98	60,002	59,998
8	59,99	60,002	59,999
9	59,99	60,004	60,000
10	59,99	60,003	60,001
11	59,99	60,003	60,001
12	59,98	60,003	60,000
13	59,98	60,003	60,001
14	59,99	60,003	60,001
15	59,98	60,003	60,002
16	59,98	60,003	60,002
17	59,99	60,003	60,002
18	59,99	60,002	60,002
19	59,99	60,004	60,002
20	60,00	60,003	60,002
21	59,99	60,003	60,002
22	60,00	60,003	60,002
23	59,99	60,002	60,002
24	59,98	60,002	60,002
25	59,99	60,002	60,003
26	60,00	60,003	60,003
27	59,99	60,003	60,002
28	59,98	60,002	60,003
29	59,98	60,003	60,003
30	59,99	60,002	60,003
\bar{x}	59,99	60,003	60,001
s	0,006	0,0006	0,0016
Proširena mjerna nesigurnost U (u μm)	16	3,2	5,2

Proširene mjerne nesigurnosti u tablici 6. izračunate su na temelju izraza (1), (2) i (3).

4.4. Mjerni kontrolni prsten promjera $\varnothing 100$ mm

Podaci iz važeće **Potvrde o umjeravanju br. 0278-0299/15**, broj naljepnice **0289**:

Nazivni promjer prstena: **100 mm** ^{-3 μm}

Izmjereni promjer prstena: **100,0025 mm**

Proizvođač: **MASSI**

Interna oznaka prstena: **RET 78 - 158**

Uz digitalno pomično mjerilo korišten je klasični trokraki mikrometar rezolucije 0,01 mm uz subito istovjetne rezolucije sa odgovarajućim mjernim rasponom.



Slika 50. Trokraki mikrometar s kontrolnim prstenom promjera $\varnothing 100$ mm na granitnoj ploči

Tablica 7. Rezultati mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 100$ mm

Mjerenje broj	Pomično mjerilo	Trokraki mikrometar	sve vrijednosti u mm
			Subito
1	99,99	100,000	100,002
2	100,01	99,999	100,001
3	99,99	100,004	100,002
4	99,99	100,001	100,001
5	100,02	100,003	100,002
6	99,99	100,000	100,002
7	99,99	99,999	100,003
8	100,00	100,004	100,003
9	99,99	100,004	100,002
10	99,99	100,004	100,003
11	99,99	100,002	100,002
12	99,99	100,003	100,004
13	100,00	100,003	100,003
14	100,01	100,003	100,004
15	99,99	100,005	100,003
16	99,99	100,004	100,003
17	99,99	100,004	100,004

18	99,98	100,003	100,002
19	99,99	100,005	100,003
20	99,99	100,005	100,005
21	100,00	100,004	100,003
22	99,99	100,005	100,002
23	99,99	100,002	100,003
24	99,99	100,005	100,002
25	99,98	100,003	100,004
26	99,98	100,003	100,004
27	100,00	100,003	100,003
28	99,99	100,003	100,003
29	99,99	100,004	100,002
30	99,98	100,005	100,005
\bar{x}	99,99	100,003	100,003
s	0,009	0,0017	0,0010
Proširena mjerna nesigurnost U u μm)	16	3,4	5,4

Proširene mjerne nesigurnosti u Tablici 7. izračunate su na temelju izraza (1), (2) i (3).

5. ANALIZA REZULTATA MJERENJA

Za samu analizu i usporedbu rezultata mjerenja postoji više različitih metoda. U ovom završnom zadatku za usporedbu rezultata mjerenja unutarnjih promjera mjerenih pomoću različitih ručnih mjerila duljine odabrana je metoda koja se temelji na izračunu faktora slaganja i Birgeovog kriterija. Takva metoda zahtjeva izračun referentne vrijednosti za čiji se izračun također može odabrati više metoda kao npr. računanje aritmetičkih sredina ili težinskih aritmetičkih sredina, međutim u ovom završnom radu za referentne vrijednosti će biti postavljene izmjerene vrijednosti promjera koje su navedene u važećim Potvrdama o umjeravanju za svaki pojedinačni kontrolni prsten.

5.1. Faktor slaganja E_n

Faktor slaganja E_n služi kao mjerilo konzistentnosti individualnih rezultata mjerenja u odnosu na referentnu vrijednost [16]. Računa se za svako ručno mjerilo posebno prema sljedećem izrazu:

$$E_n = \frac{x_{rm} - x_{ref}}{k * \sqrt{u^2(x_{rm}) - u^2(x_{ref})}}; k = 2 \quad (4)$$

Gdje su:

E_n - faktor slaganja

x_{rm} - rezultat mjerenja pojedinog ručnog mjerila

x_{ref} - rezultat referentne vrijednosti

$u(x_{rm})$ - mjerna nesigurnost pojedinog ručnog mjerila

$u(x_{ref})$ - mjerna nesigurnost referentne vrijednosti

k - faktor pokrivanja

Da bi se rezultat smatrao konzistentnim vrijednost faktora slaganja E_n treba biti manja od 1, odnosno što je vrijednost faktora slaganja E_n bliža nuli to je konzistentnost rezultata bolja. Ako vrijednost ima pozitivan predznak to znači da je rezultat mjerenja određenog ručnog

mjerila veći od referentne vrijednosti, a ukoliko je manji onda će se to odraziti kao vrijednost prikazana sa negativnim predznakom.

5.2. Birgeov kriterij

Kako bi se vrijednost faktora slaganja E_n mogla smatrati valjanom potrebno je zadovoljiti Birgeov kriterij koji predstavlja test cjelokupne kompatibilnost svih rezultata mjerenja [16], a računa se prema sljedećem izrazu:

$$R_{Bdop} < \sqrt{1 + \sqrt{\frac{8}{n-1}}} \quad (5)$$

Birgeov koeficijent se računa prema sljedećem izrazu:

$$R_B = \frac{u_{ext}}{u_{int}} \quad (6)$$

Eksterna i interna mjerna nesigurnost se računaju prema izrazima:

$$u_{ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{x_{rm} - x_{ref}}{u(x_{rm})} \right]^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n u^{-2}(x_{rm})}} \quad (7)$$

$$u_{int} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n u^{-2}(x_{rm})}} \quad (8)$$

Gdje je:

n – broj ručnih mjerila

Cjelokupni mjerni rezultati se smatraju kompatibilnima tek kada je izračunati Birgeov koeficijent prema prikazanim formulama manji od granične vrijednosti, odnosno od Birgeovog kriterija. U našem slučaju to za 3 korištena ručna mjerila predstavlja vrijednost od $\sqrt{3}$, odnosno zaokruženo i prikazano decimalno Birgeov koeficijent mora biti manji od 1,732.

Ukoliko nije zadovoljen Birgeov kriterij rezultati se smatraju nekompatibilnima te se u tom slučaju iz razmatranja izbacuje rezultat mjerenja ručnog mjerila sa najvećim iznosom faktora

slaganja E_n . Tada se novi faktor slaganja E_n opet računa prema formuli (4) za sva ručna mjerila osim onog čiji je rezultat izbačen iz razmatranja.

Za ručno mjerilo čiji je rezultat izbačen koristi se sljedeći izraz:

$$E_n = \frac{x_{rm} - x_{ref}}{k * \sqrt{u^2(x_{rm}) + u^2(x_{ref})}}; k = 2 \quad (9)$$

Takav postupak se ponavlja sve dok Birgeov kriterij nije zadovoljen.

5.3. Referentne vrijednosti i računanje njihovih mjernih nesigurnosti

Kao što je navedeno i ranije za referentne vrijednosti bit će postavljene izmjerene vrijednosti unutarnjih promjera kontrolnih prstena navedene u važećim Potvrdama o umjeravanju za svaki pojedinačni prsten.

Mjerne nesigurnosti referentnih vrijednosti računat će se prema sljedećem izrazu, također navedenom u važećim Potvrdama o umjeravanju:

$$u(x_{ref}) = (0,6 + 0,7 * L) \mu m \quad (10)$$

L u m; $P = 95\%$; $k = 2$

5.4. Analiza mjerenja pojedinih kontrolnih prstena

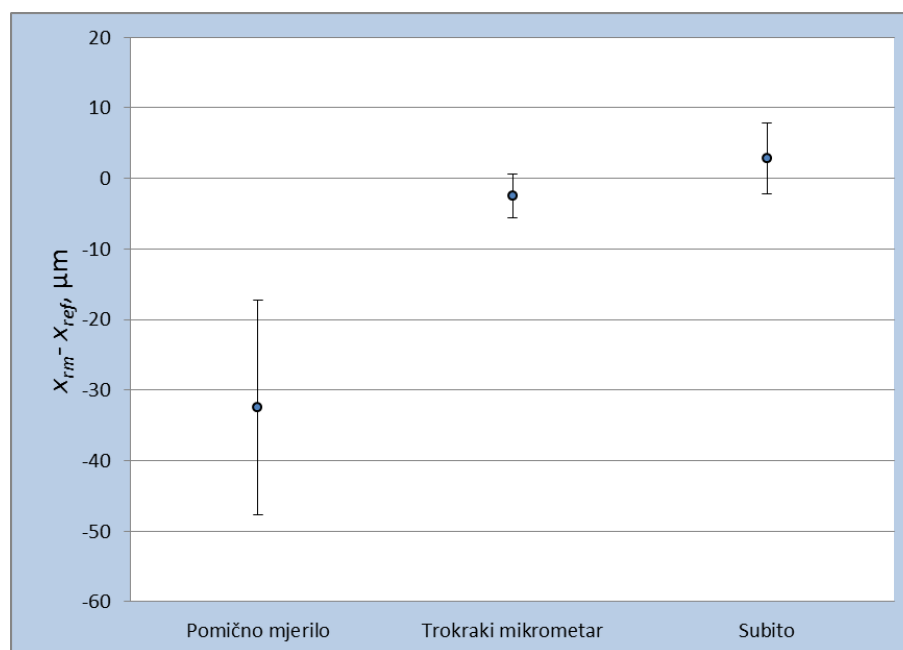
Prilikom analize mjerenja pojedinih kontrolnih prstena u tablicama će biti prikazane sve izračunate prethodno navedene veličine te dan grafički prikaz rezultata mjerenja. Rezultati referentnih vrijednosti i pripadajuće mjerne nesigurnosti prstena preuzete su iz važećih Potvrda o umjeravanju. Kontrolni prsteni su umjeravani na univerzalnom jednoosnom uređaju (interna oznaka uređaja: RET 44 – 421) u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. Sljedivost rezultata umjeravanja kontrolnih prstena ostvarena je preko državnog etalona za duljinu (referentni prsteni internih oznaka: RET 179-424 i RET 180-425).

5.4.1. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 18$ mm

Tablica 8. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 18$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm}), k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref}), k = 2$ μm
Pomično mjerilo	17,97	15	-2,13	-32	15
Trokraki mikrometar	17,997	3,1	-0,80	-2,5	3,1
Subito	18,002	5,1	0,55	2,8	5,1
Broj ručnih mjerila					
3					
x_{ref} , mm					
17,9994					
$u(x_{ref}), k = 2$, μm					
0,61					
R_B					
1,812					
R_{Bdop}					
1,732					

Na Slici 51. se nalazi grafički prikaz rezultata mjerenja sa odstupanjima pojedinih ručnih mjerila od referentne vrijednosti, uz pridružene proširene mjerne nesigurnosti, nakon prvog koraka analize.



Slika 51. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 18$ mm

Iz priložene tablice se vidi kako je izračunati Birgeov koeficijent veći od dopuštenog, odnosno Birgeov kriterij nije zadovoljen što znači da rezultati nisu kompatibilni te se mora

pristupiti izbacivanju rezultata mjerenja jednog ručnog mjerila. Kao što je rečeno izbacuje se ručno mjerilo sa najvećim iznosom faktora slaganja E_n što u ovom slučaju znači da se iz daljnje analize izbacuje rezultat mjerenja pomičnog mjerila nakon čega se opet pristupa proračunu sa rezultatima mjerenja preostalih ručnih mjerila dok se Birgeov kriterij ne zadovolji.

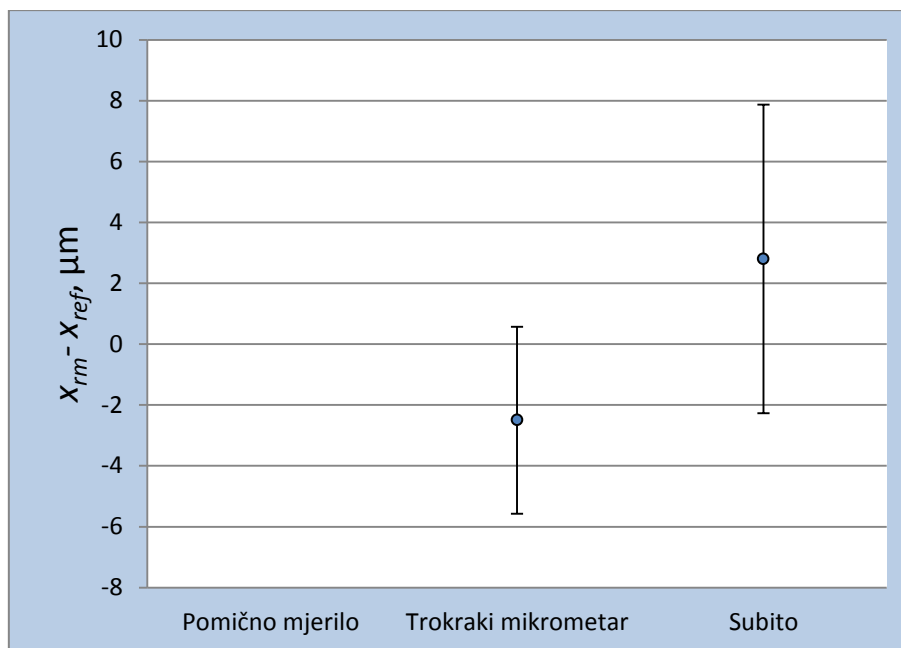
Izbacivanje rezultata mjerenja pomičnog mjerila je u ovom slučaju i sasvim logično jer uz danu najveću mjernu nesigurnost ima i daleko najveće odstupanje od referentne vrijednosti.

Tablica 9. Ponovljena analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 18$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm}), k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref}), k = 2$ μm
Trokraki mikrometar	17,997	3,1	-0,80	-2,5	3,1
Subito	18,002	5,1	0,55	2,8	5,1
Broj ručnih mjerila	2				
x_{ref} , mm	17,9994				
$u(x_{ref}), k = 2$, μm	0,61				
R_B	0,914				
R_{Bdop}	1,957				

Nakon izbacivanja rezultata mjerenja ostvarenog pomičnim mjerilom izračunata je nova vrijednosti Birgeova koeficijenta koji sada zadovoljava Birgeov kriterij što ukazuje na kompatibilnost mjernih rezultata.

Iako subito ima manji faktor slaganja E_n (apsolutno) možemo primjetiti kako je odstupanje rezultata trokrakog mikrometra od referentne vrijednosti manje nego kod subita uz manju mjernu nesigurnost što govori da zaključke ne treba vaditi samo na temelju iznosa faktora slaganja već i grafičkog prikaza podataka sa pripadajućim referentnim vrijednostima i mjernim nesigurnostima te samim odstupanjima rezultata pojedinih ručnih mjerila od istih.



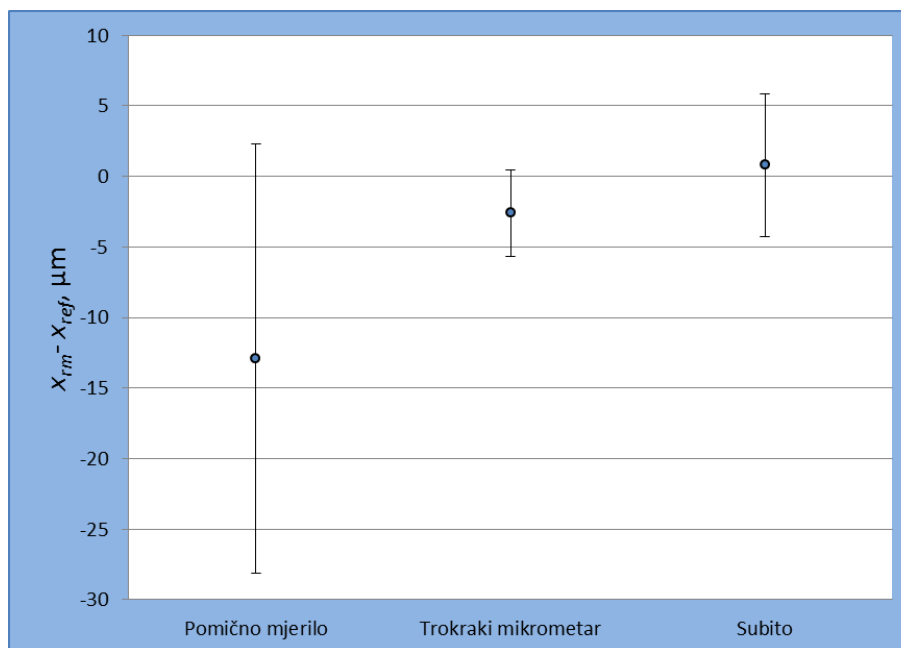
Slika 52. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 18$ mm bez mjerenja pomičnog mjerila

5.4.2. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 19$ mm

Tablica 10. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 19$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm})$, $k = 2$ µm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ µm	$U(x_{rm} - x_{ref})$, $k = 2$ µm
Pomično mjerilo	18,99	15	-0,85	-13	15
Trokraki mikrometar	18,998	3,1	-0,83	-2,6	3,1
Subito	19,002	5,1	0,16	0,8	5,1
Broj ručnih mjerila	3				
x_{ref} , mm	19,0009				
$u(x_{ref})$, $k = 2$, µm	0,61				
R_B	0,756				
R_{Bdop}	1,732				

Iz tablice je vidljivo da je Birgeov kriterij zadovoljen te da su rezultati sva 3 ručna mjerila kompatibilni. Najmanja vrijednost faktora slaganja je kod subita što ukazuje da su njegovi rezultati najkonzistentniji u odnosu referentnu vrijednost.



Slika 53. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 19$ mm

Potvrdu tome daje i grafički prikaz gdje se vidi da je rezultat mjerenja subita najbliži referentnoj vrijednosti. Rezultat trokrakog mikrometra također ne odstupa značajno od referentne vrijednosti, a njegova mjerna nesigurnost je manja nego kod subita što znači da smo sigurniji u sam rezultat, iako se u ovom slučaju rezultat mjerenja subita pokazao kao najbliži referentnoj vrijednosti. Gledajući same faktore slaganja E_n opet bi se dalo krivo naslutiti kako su rezultati trokrakog mikrometra i pomičnog mjerila pojednako konzistentni u odnosu na referentnu vrijednost, međutim grafički prikazano vidimo kako rezultat pomičnog mjerila daleko najviše odstupa od referentne vrijednosti uz također najveći iznos mjerne nesigurnosti čemu svakako pridonosi manja mjerna rezolucija samog uređaja te značajna ovisnost o samoj mjernoj sili.

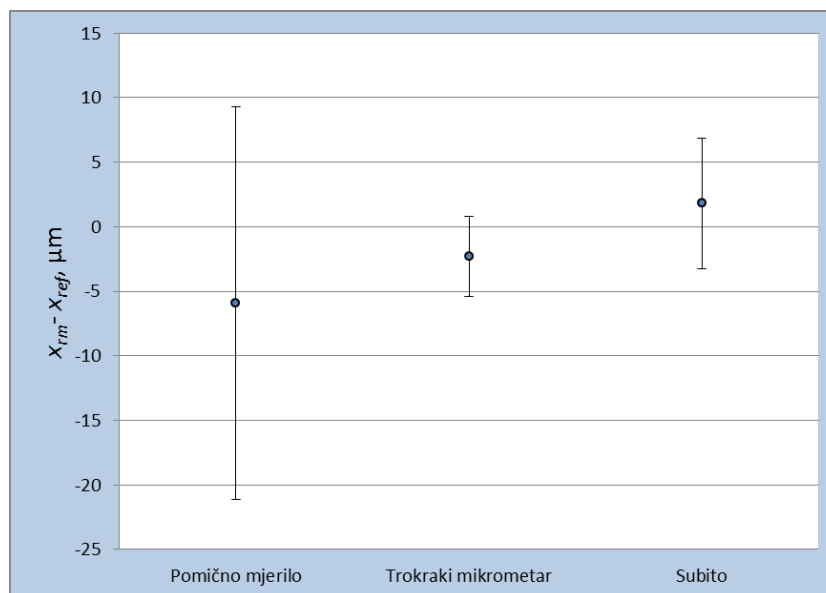
5.4.3. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 20$ mm

Tablica 11. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 20$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm})$, $k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref})$, $k = 2$ μm
Pomično mjerilo	20,00	15	-0,39	-6	15
Trokraki mikrometar	20,001	3,1	-0,73	-2,3	3,1
Subito	20,005	5,1	0,35	1,8	5,1

Broj ručnih mjerila	3
x_{ref} , mm	20,0029
$u(x_{ref})$, $k = 2$, μm	0,61
R_B	0,616
R_{Bdop}	1,732

I kod kontrolnog prstena promjera $\varnothing 20$ mm Birgeov kriterij je zadovoljen bez odbacivanja rezultata ijednog ručnog mjerila što znači da su oni kompatibilni.



Slika 54. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 20$ mm

Kao i kod prošlog kontrolnog prstena rezultat subita i u ovom slučaju najmanje odstupa od referentne vrijednosti. Subito i pomično mjerilo imaju bliske faktore slaganja, no opet moramo u obzir uzeti veću mjernu nesigurnost pomičnog mjerila te veće odstupanje rezultata od referentne vrijednosti koje je ipak manje nego kod prošlih prstena što upućuje na bolju ponovljivost rezultata mjerenja.

Trokraki mikrometar uz gotovo duplo veći faktor slaganja od ostalih ručnih mjerila ne odstupa značajno od referentne vrijednosti uz opetovanu najmanju mjernu nesigurnost. Razlog tomu je svakako činjenica kako digitalna verzija trokrakog mikrometra koja je korištena prilikom mjerenja ovog i ranije navedenih prstena ima najbolju rezoluciju od svih usporednih mjerila te se isto tako za razliku od njih pozicionira u 3 točke uz konstantnu mjernu silu dok se ostala mjerila pozicioniraju u 2 točke.

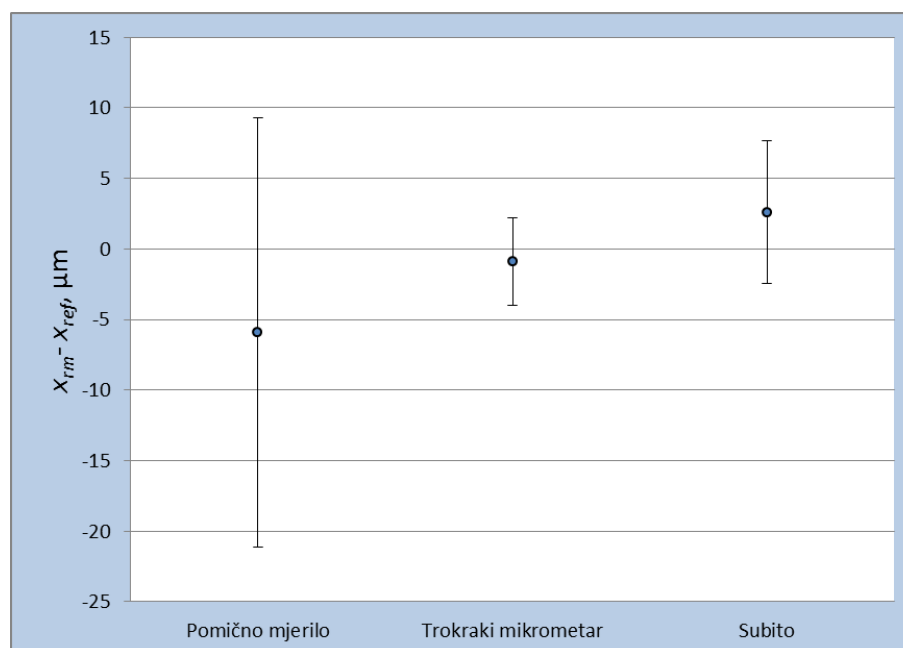
Sam subito ima najmanje rasipanje vrijednosti (Tablica 4.), ali očitavanja koja vode tome ovise uvelike o samom mjeritelju zbog same rezolucije uređaja i njegove procjene.

5.4.4. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 50$ mm

Tablica 12. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 50$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm})$, $k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref})$, $k = 2$ μm
Pomično mjerilo	49,99	16	-0,38	-6	16
Trokraki mikrometar	49,999	3,2	-0,28	-0,9	3,3
Subito	50,003	5,2	0,50	2,6	5,2
Broj ručnih mjerila	3				
x_{ref} , mm	49,9999				
$u(x_{ref})$, $k = 2$, μm	0,64				
R_B	0,561				
R_{Bdop}	1,732				

Kod kontrolnog prstena promjera $\varnothing 50$ mm također je zadovoljen Birgeov kriterij.



Slika 55. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 50$ mm

Trokraki mikrometar u ovom slučaju ima najmanji iznos faktora slaganja što bi značilo i najbolju konzistentnost što potvrđuje i grafički prikaz gdje se vidi njegovo najmanje odstupanje rezultata od referentne vrijednosti. Prilikom mjerenja ovog kontrolnog prstena

koristio se klasični trokraki mikrometar koji uz najmanje odstupanje od referentne vrijednosti te najmanju mjernu nesigurnost sada ima i najmanje rasipanje vrijednosti (Tablica 5.) što se može pripisati mjeriteljskoj procjeni.

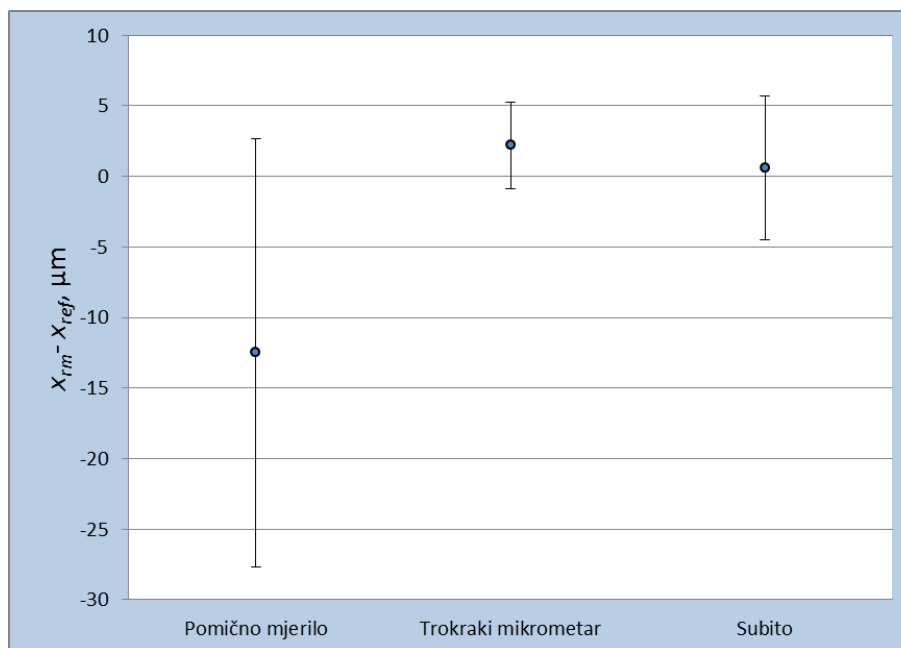
Rezultat subita ne odstupa značajno od referentne vrijednosti kao ni rezultat pomičnog mjerila prema čijim se rezultatima mjerenja može reći da su ona dobro provedena jer uz ranije navedena ograničenja ne odstupa značajnije od referentne vrijednosti kao što je to npr. bio slučaj kod mjernih kontrolnih prstena promjera $\varnothing 18$ mm i $\varnothing 19$ mm.

5.4.5. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 60$ mm

Tablica 13. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 60$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm})$, $k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref})$, $k = 2$ μm
Pomično mjerilo	59,99	16	-0,81	-13	16
Trokraki mikrometar	60,003	3,2	0,67	2,2	3,3
Subito	60,001	5,2	0,11	0,6	5,3
Broj ručnih mjerila	3				
x_{ref} , mm	60,0005				
$u(x_{ref})$, $k = 2$, μm	0,64				
R_B	0,769				
R_{Bdop}	1,732				

Kod kontrolnog prstena promjera $\varnothing 60$ mm zadovoljen je Birgeov kriterij te su rezultati kompatibilni.



Slika 56. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 60$ mm

Pomično mjerilo i trokraki mikrometar imaju slične faktore slaganja, no uz manje odstupanje rezultata trokrakog mikrometra od referentne vrijednosti, njegovu manju mjernu nesigurnost i daleko manje rasipanje vrijednosti (Tablica 6.).

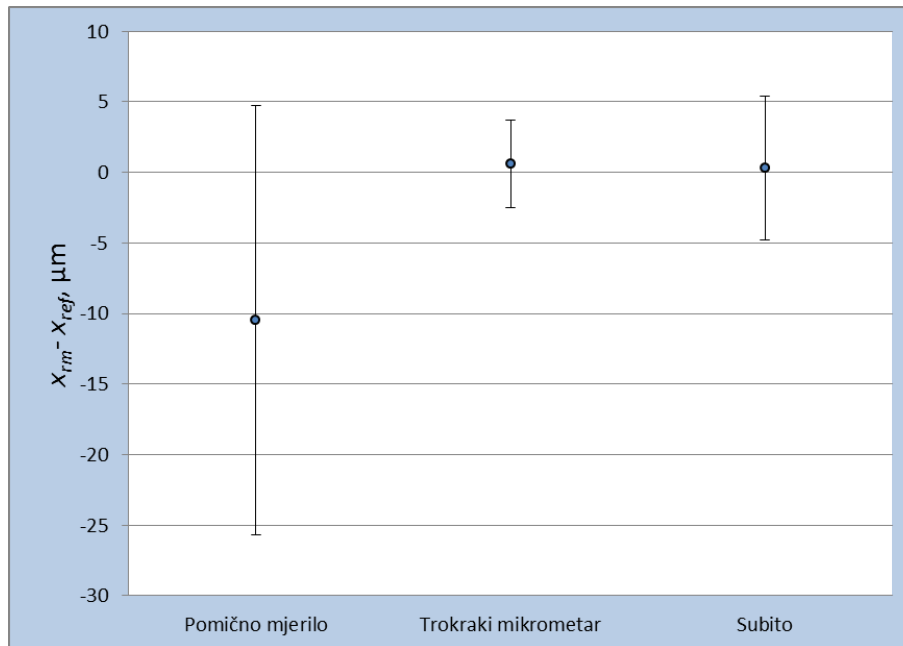
Subito uz najmanji faktor slaganja ima najmanje odstupanje od referentne vrijednosti.

5.4.6. Kontrolni prsten promjera $\varnothing 100$ mm

Tablica 14. Analiza rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 100$ mm

Ručna mjerila duljine	x_{rm} , mm	$U(x_{rm})$, $k = 2$ μm	E_n	$x_{rm} - x_{ref}$ μm	$U(x_{rm} - x_{ref})$, $k = 2$ μm
Pomično mjerilo	99,99	16	-0,66	-11	16
Trokraki mikrometar	100,003	3,4	0,17	0,6	3,5
Subito	100,003	5,4	0,06	0,3	5,4
Broj ručnih mjerila	3				
x_{ref} , mm	100,0025				
$u(x_{ref})$, $k = 2$, μm	0,67				
R_B	0,558				
R_{Bdop}	1,732				

Birgeov kriterij zadovoljen je i kod kontrolnog prstena promjera $\varnothing 100$ mm.



Slika 57. Grafički prikaz rezultata mjerenja kontrolnog prstena promjera $\varnothing 100$ mm

Pomično mjerilo ima najveći apsolutni iznos faktora slaganja E_n uz standardno najveću mjernu nesigurnost te odstupanje od referentne vrijednosti.

Subito u ovom slučaju ima izrazito nizak faktor slaganja što odgovara skoro pa savršenom mjernom konzistentnošću što potvrđuje grafički prikaz odstupanja mjerene vrijednosti od referentne vrijednosti.

Trokraki mikrometar uslijed identične rezolucije očitavanja i prednosti poput kontaktnih mjernih površina pozicioniranih u 3 točke u ovom slučaju pokazuje neznatno lošije rezultate, odnosno veća odstupanja od referentne vrijednosti u odnosu na subito. Razlog tomu može opet ležati u mjeriteljskoj procjeni očitavanja ili uslijed lošijeg pozicioniranja kontaktnih površina trokrakog mikrometra te njihove dotrajalosti.

6. ZAKLJUČAK

Na tržištu danas postoje mnogi mjerni uređaji i mjerila različitih proizvođača prilagođeni za različite vrste mjerenja pa tako i oni posebno namjenjeni za mjerenje različitih unutarnjih karakteristika, odnosno promjera. Njihova primjena i same karakteristike variraju te su takvi uređaji prilagođeni za razna područja djelovanja, od laboratorijskih i industrijskih mjerenja pa sve do onih uređaja namjenjenih širokoj potrošnji. Za razliku od laboratorijskih mjerenja koja zahtjevaju najviše standarde što često puta iziskuje puno potrebnog vremena da bi se izvršila određena izmjera u današnjoj industrijskoj praksi gdje je vrijeme novac i bitna stavka koja određuje i ograničava mnoštvo stvari vrijeme predstavlja luksuz. Upravo zbog tog razloga u industrijskog praksi se konstantno teži kompromisu, odnosno najboljoj kombinaciji vremena potrebnog za izvršavanje određene izmjere i točnosti koja se takvom izmjerom može postići, uz adekvatnu cijenu. Postavlja se pitanje, koji uređaj ili uređaji najbolje odgovaraju traženim zahtjevima?

Da bi se pokušalo odgovoriti na to pitanje u ovom završnom radu su od mnoštva uređaja i instrumenata za mjerenja korištena možda i 3 najčešća mjerna instrumenta u današnjoj praksi kada se radi o mjerenju unutarnjih promjera, a to su pomično mjerilo, trokraki mikrometar i subito, s ranije navedenim karakteristikama i izvedbama dostupnim u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. Nakon što je izmjereno 6 različitih kontrolnih prstena sa pripadajućim promjerima, svaki po 30 puta sa zadanim ručnim mjerilom, pristupilo se analizi rezultata mjerenja koja se temeljila na izračunu faktora slaganja E_n za svako pojedino ručno mjerilo u svrhu ocjene konzistentnosti rezultata mjerenja u odnosu na referentnu vrijednost i na temelju Birgeova kriterija kao cjelokupnog testa kompatibilnosti svih mjernih rezultata. Za referentne vrijednosti postavljene su vrijednosti izmjerenih promjera navedene u važećim Potvrdama o umjeravanju za svaki pojedini kontrolni prsten koji je bio predmetom mjerenja. Na temelju tih izračuna i samih grafičkih prikaza uz određena zapažanja prilikom samih mjerenja došlo se do određenih zaključaka.

Rezultati ostvareni pomičnim mjerilom tokom svih mjerenja iznosom najznačajnije odstupaju od referentnih vrijednosti uz najveći iznos pridružene mjerne nesigurnosti. Razlog takvim odstupanjima od referentne vrijednosti kod svih mjerenih prstena svakako leži u činjenici da je ono bilo ograničene rezolucije očitavanja (0,01 mm) u usporedbi s ostalim ručnim mjerilima, odnosno, iako je i sam subito (kasnije i trokraki mikrometar) bio istovjetne rezolucije kod

njega je dodatno još postojala mogućnost procjene vrijednosti mikrometra dok pomično mjerilo u svojoj digitalnoj verziji nije imalo tu mogućnost. Isto tako kod pomičnog mjerila značajna je ovisnost o samoj mjernoj sili koju primjenjuje mjeritelj što se očituje većim ili manjim očitanjima vrijednosti mjerenja te se i na taj način unosi pogreška. Kada tomu nadodamo rukovanje sa većim i težim predmetima mjerenja poput mjerenog kontrolnog prstena \varnothing 100 mm sama provedba mjerenja nije jednostavna i stvara se dodatni prostor za pogrešku. Upravo zbog svih tih razloga pomičnom mjerilu je i pridružena najveća mjerna nesigurnost.

U suštini pomično mjerilo nije najadekvatnije mjerilo kada se radi o točnosti mjerenja. Zbog same konstrukcije javlja se greška 1. reda gdje predmet mjerenja nije u produžetku mjerne skale (Abbeov princip) što unosi značajnu grešku. Tada je, premda mjerne površine pomičnog mjerila nisu najprikkladnije za provedbu unutarnjih mjerenja, moguće da one nisu bile sasvim paralelne što se odražavalo kao rezultat mjerenja koji je uvijek bio u minusu u odnosu na referentnu vrijednost što se pokazalo kod svih rezultata obavljenih mjerenja. Unatoč svemu tome pomično mjerilo se može smatrati zadovoljavajućim mjerilom ukoliko su mjerni zahtjevi za točnošću blaži gdje njegova najveća prednost proizlazi iz toga što se vrlo brzo mogu provesti mjerenja kako vanjskih i unutarnjih karakteristika tako i dubine.

Trokraki mikrometar je mjerilo posebno namijenjeno za mjerenje unutarnjih promjera te se uz subito pokazalo kao najbolji izbor gdje su njegovi rezultati mjerenja bili bolji ili tek neznatno lošiji od subita u vidu odstupanja od referentne vrijednosti. Uz konstantnu mjernu silu koja se ostvaruje okretanjem "čegrtaljke" on se jedini pozicionira u 3 kontaktne točke (ostala ručna mjerila u 2 točke). Zbog svega toga mjerna nesigurnost trokrakog mikrometra je najmanja od svih korištenih ručnih mjerila što znači da smo u njegov rezultat mjerenja sigurniji nego kod ostalih ručnih mjerila. Kasnijim korištenjem klasične verzije trokrakog mikrometra u odnosu na početnu digitalnu mjeritelj je morao procijeniti vrijednost mikrometarskog decimalnog mjesta rezultata uslijed manje rezolucije čime se unijela određena pogreška, ali se to nije previše odrazilo na samu analizu, dapače, rezultati su bili i bolji što svakako ne mora biti i nije pravilo. Prilikom mjerenja se svakako mora obratiti pažnja na pravilno postavljanje i nalijeganje kontaktnih površina sa mjernim površinama te općenito voditi briga o njihovoj dotrajalosti kako bi rezultati mjerenja bili što točniji.

Trokraki mikrometar općenito možda zahtjeva malo duže vrijeme izmjere, pažljivije rukovanje te je skuplji od pomičnog mjerila, ali za mjerenje unutarnjih promjera se svakako nameće svim svojim kvalitetama kao logičan i pravi izbor.

Prilikom analize mjerenja svih kontrolnih prstena subito se pokazao kao najbolje ručno mjerilo duljine, odnosno njegov iznos mjerenja u najviše je slučajeva (na četiri od šest mjerenih kontrolnih prstena) najmanje odstupao od referentne vrijednosti. Subito se odlikuje izrazitom točnošću mjerenja, ali iako se pokazao kao "najbolje" ručno mjerilo duljine prilikom mjerenja unutarnjih promjera u pogledu samih odstupanja od referentne vrijednosti u usporedbi s ostalim ručnim mjerilima njegova mjerna nesigurnost je veća nego kod trokrakog mikrometra. Razloga za to ima više. Sve korištene verzije subita su imale rezoluciju očitavanja 0,01 mm te je vrijednost mikrometarskog decimalnog mjesta procjenjivao sam mjeritelj čime se odmah unosila određena pogreška. Isto tako sam subito, za razliku od trokrakog mikrometra, prije početka mjerenja treba postaviti na nazivnu vrijednost mjenog promjera jer on ne mjeri sam iznos promjera već njegovo odstupanje od nazivne vrijednosti prilikom čega opet do izražaja dolazi procjena mjeritelja prilikom postavljanja. Prilikom samog mjerenja treba biti pažljiv i oprezno rukovati sa subitom kako ne bi došlo da određenih udaraca koji mogu uzrokovati pomicanje mjerne skale te uzrokovati kriva očitavanja. Sama očitavanja se vrše brzo jednom nakon što je mjerilo postavljeno na nazivnu vrijednost.

Kao konačni zaključak nameće se da su trokraki mikrometar i subito daleko prikladniji za mjerenje unutarnjih promjera od pomičnog mjerila što im uostalom i je primarna namjena. Provedena analiza upućuje da rezultati mjerenja unutarnjih promjera subitom najmanje odstupaju od referentnih vrijednosti. Rezultati mjerenja svih ručnih mjerila mogu dakako biti još i bolji ukoliko se koriste ručna mjerila još bolje rezolucije očitavanja gdje su procjene mjeritelja svedene na minimum, međutim sva korištena ručna mjerila korištena prilikom izrade ovog rada su se pokazala zadovoljavajućim za potrebe same analize i usporedbe mjernih rezultata.

7. LITERATURA

- [1] Mrvoš M.: Postupak umjeravanja mjerila za unutarnja mjerenja [FSB, Diplomski rad (2013.)]
- [2] Predavanja iz kolegija "Teorija i tehnika mjerenja" prof. Biserke Runje
- [3] Pomično mjerilo https://hr.wikipedia.org/wiki/Pomi%C4%8Dna_mjerka
- [4] Mjerenje i kontrola u alatničarstvu
<https://tolerancije.files.wordpress.com/2011/01/3-mjerenje-i-kontrola.pdf>
- [5] <http://www.measureshop.biz/en/>
- [6] Mitutoyo mjerni instrumenti
<http://ecatalog.mitutoyo.com/Inside-Measuring-Instruments-C1330.aspx>
- [7] Tehnoalat – mikrometri
<http://www.tehnoalat.rs/merni-alati/trokraki-mikrometri>
- [8] Metal-kovis mjerni alati
<http://web-trgovina.metal-kovis.hr/kategorije.asp?cat=mjerni-alat>
- [9] INSIZE mjerni instrumenti
<http://www.insize.com/products/products.php>
- [10] Schwenk mjerni instrumenti
<http://www.schwenk-lmt.de/home/?locale=en>
- [11] Tesa Unimaster
http://swissinstruments.com/downloads/metrology_large_dimensions.pdf
- [12] Schwenk katalog
http://obergverktoy.no/sites/default/files/schwenk_mg_blank_e.pdf
- [13] Baršić G.: Priručnik o kvaliteti (166. izdanje), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Potvrda o akreditaciji br. 2434, HAA, Zagreb, 2014.
- [15] Nacionalni laboratorij za duljinu (FSB)
<https://www.fsb.unizg.hr/zzk/lfsb/index.html>
- [16] Predavanja iz kolegija "Mjeriteljstvo" prof. Biserke Runje

Zadnji datum pristupa www izvorima: 21.12.2015.