

## INFLUENCE OF CENTRICITY OF FORCE-PROVING INSTRUMENT ON CALIBRATION RESULTS

### UTJECAJ CENTRIČNOSTI PRIJENOSNOG ETALONA SILE NA REZULTATE UMJERAVANJA

Danko Ćorić<sup>1</sup>, Krešimir Meštrović<sup>1</sup>, Tomislav Rodinger<sup>1</sup>, Sanja Šolić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> University North, Department of Mechanical Engineering, J. Križanića 31b, Varaždin, Hrvatska

*Expert paper / Stručni rad*

#### Abstract

That the values of mechanical properties would be valid, the force measurement must be accurate and reliable, ie. the testing machine must be calibrated with a force-proving instrument, and it must be traceable to the device of a higher metrology level. This creates a continuous chain of comparisons, ie. the traceability of the measuring device up to the national standard. For proper calibration of the force-proving instrument, its correct positioning on the reference standard is important. The calibration of the force-proving instrument type Z4A/100 kN at different distances from the axial load axis (0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm) was performed. The measurement results were processed and analyzed, which shows that the values of the characteristic errors increase with distance from the axial axis. This primarily refers to the reproducibility error, which increases by  $\approx 0.04\%$  at all measuring points, and to a lesser extent to the reversibility error, for which an increase of  $\approx 0.02\%$  was recorded at lower force values.

**Keywords:** Calibration, force-proving instrument, repeatability, reproducibility, hysteresis.

#### Sažetak

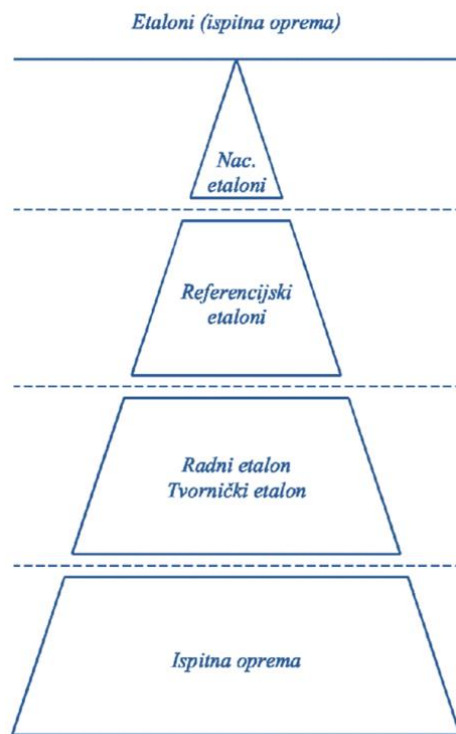
Da bi vrijednosti mehaničkih svojstava bile valjane mjerenje sile mora biti točno i pouzdano odnosno kidalica mora biti umjerena prijenosnim etalom sile koji mora biti sljediv prema mjerilu više mjeriteljske razine. Time se ostvaruje neprekinuti lanac usporedbi tj. sljedivost mjerila sve do nacionalnog etalona. Za valjano umjeravanje prijenosnog etalona sile važno je njegovo pravilno pozicioniranje na referentnom etalonu. U radu je provedeno umjeravanje prijenosnog etalona sile vrste Z4A/100 kN na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećenja (0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm). Rezultati mjerenja su obrađeni i analizirani iz čega je vidljivo da se udaljavanjem od aksijalne osi vrijednosti karakterističnih grešaka povećavaju. To se ponajprije odnosi na grešku obnovljivosti koja se povećava za  $\approx 0,04\%$  na svim mjernim točkama te u manjoj mjeri i na grešku reverzibilnosti za koju je zabilježeno povećanje od  $\approx 0,02\%$  pri nižim vrijednostima sile.

**Cljučne riječi:** Umjeravanje, prijenosni etalon sile, ponovljivost, obnovljivost, histereza.

## 1. UVOD

Mjerenje sile je osnova za određivanje mehaničkih svojstava nekog materijala ili proizvoda. Mehanička svojstva materijala zauzimaju posebno mjesto među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima, budući da se na osnovu njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. S pomoću mehaničkih svojstava može se objektivno ocijeniti kvaliteta materijala u prijamnoj kontroli poluproizvoda, te u završnoj kontroli proizvoda [1].

Samo ispitivanje sile provodi se na uređajima za mjerenje sile, a najčešće su to kidalice različitih tipova i oblika. Tijekom uporabe ovi uređaji gube na preciznosti, a razlozi mogu biti različiti od intenzivne uporabe sve do oštećenja i kvarova određenih sklopova. Zbog toga se provodi sistematska periodična kontrola ili provjera (umjeravanje) uređaja za mjerenje sile. Time se ostvaruje sljedivost mjerila odnosno neprekinuti lanac usporedbi sve do nacionalnog etalona. U piramidi sljedivosti etaloni i mjerni uređaji posloženi su hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći, slika 1. Pomoću etalona više razine umjerava se etalon niže razine i tako sve do mjerila i ispitne opreme kao što su primjerice kidalice.

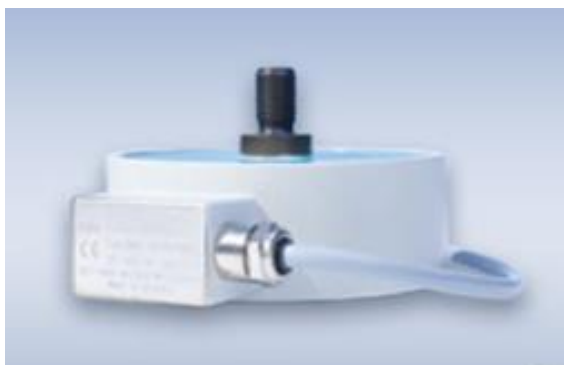


**Slika 1:** Piramida sljedivosti [2]

Umjeravanje podrazumijeva određivanje i dokumentiranje odstupanja mjerila od dogovorene "istinite" vrijednosti mjerene veličine. To je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Osnovni razlog umjeravanja je postizanje ujednačenosti mjerenja u tvrtki proizvođača proizvoda i kupca koji taj proizvod ugrađuje, odnosno mora postojati jamstvo da proizvođač i kupac mjere "istom mjerom" [2].

## 2. POSTUPAK UMJERAVANJA

U radu je provedeno umjeravanje prijenosnog etalona sile tipa Z4A nazivne vrijednosti 100 kN, slika 2a, zajedno s mjernim pojačalom MGCplus, slika 2b, proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH Njemačka.



a)



b)

**Slika 2:** Umjeravano mjerilo: a) prijenosni etalon sile; b) mjerno pojačalo

Promjenu deformacije elastičnog elementa uslijed djelovanja opterećenja električno pojačalo pretvara u mjerni signal promjene napona u mV/V. Umjeravanje je provedeno tlačnim opterećivanjem i to u aksijalnoj osi djelovanja opterećenja referentnog etalona sile te na udaljenosti 20 mm, 40 mm i 60 mm od centra opterećenja.

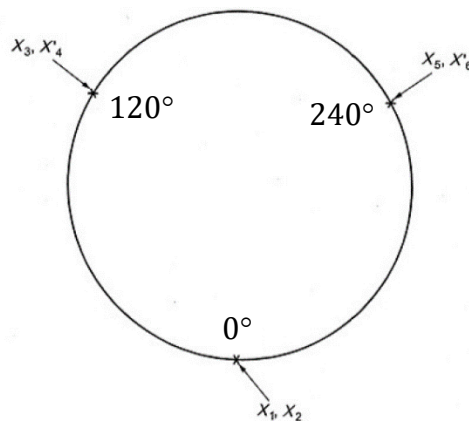
Za umjeravanje je korišten referentni etalon proizvođača Gassmann Theiss Messtechnik, Njemačka, vrsta K – BNME, slika 3, instaliran u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.



**Slika 3:** Referentni etalon sile

Ispitivani prijenosni etalon sile je tri puta predopterećen maksimalnom silom i to u početnoj poziciji, zakrenut za 120° odnosno 240°. Nakon toga je izmjereno ukupno šest

nizova:  $X_1, X_2, X_3$  i  $X_5$  za rastuće vrijednosti sile te  $X_4'$  i  $X_6'$  za padajuće vrijednosti sile. Nakon niza  $X_2$  etalon je rotiran za  $120^\circ$ , a nakon niza  $X_4$  za  $240^\circ$ , slika 4.



**Slika 4:** Pozicije mjernih nizova [3]

Pauza nakon svakog predopterećenja iznosila je 60 sekundi, a nakon mjernog niza 180 sekundi. Umjeravanje je načinjeno u 10 mjernih točaka pravilno raspoređenih unutar mjernog područja 10 kN do 100 kN, a promjena napona bilježila za svaku promjenu sile. Temperatura tijekom umjeravanja kretala se u rasponu  $20,4\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  u svakom mjernom nizu.

Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona sile, sukladno normi HRN EN ISO 376:2012 [3], jesu sljedeći:

- relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom,
- relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativna pogreška nule,
- relativna pogreška histereze.

Relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom ( $b$ ) računa se za svaku ispitnu silu prema izrazu:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \right| \times 100, \% \quad (1)$$

gdje su  $X_{\max}$  (mV/V) i  $X_{\min}$  (mV/V) najveća odnosno najmanja vrijednost mjernog signala u nizovima 1, 3 i 5, a  $\bar{X}_r$  srednja vrijednost očitavanja za uzlazne mjerne nizove s rotacijom:

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}, \text{ mV/V} \quad (2)$$

pri čemu su  $X_1, X_3$  i  $X_5$  (mV/V) vrijednosti signala očitane kod rastuće sile u nizovima 1, 3 i 5.

Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije ( $b'$ ) također se određuje za svaku točku umjeravanja sukladno izrazu:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \times 100, \% \quad (3)$$

gdje su  $X_1, X_2$  (mV/V) očitavanja kod rastuće sile u nizovima 1, 2, a  $\bar{X}_{wr}$  (mV/V) njihova srednja vrijednost:

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}, \text{ mV/V} \quad (4)$$

Relativna pogreška interpolacije ( $f_c$ ) izračunava se na temelju polinoma 3. stupnja koji određuje ovisnost između vrijednosti mjernog signala i pripadajuće sile. Na osnovi intrepolacijske pogreške može se procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Relativno interpolacijsko odstupanje slijedi iz jednadžbe:

$$f_c = \frac{\bar{X}_r - X_a}{X_a} \times 100, \% \quad (5)$$

gdje je  $\bar{X}_r$  (mV/V) srednja vrijednost signala za uzlazne nizove 1, 3 i 5, a  $X_a$  (mV/V) interpolirana vrijednost očitavanja.

Relativno odstupanje nul vrijednosti ( $f_o$ ) dobiva se iz vrijednosti signala prije  $i_o$  (mV/V) i poslije  $i_f$  (mV/V) svakog predopterećenja odnosno svakog mjernog niza:

$$f_o = \frac{i_f - i_o}{X_N} \times 100, \% \quad (6)$$

gdje je  $X_N$  (mV/V) očitavanje kod nazivne vrijednosti sile.

Kod klasifikacije etalona u razmatranje se uzima najveća vrijednost ove pogreške.

Relativna pogreška histereze ( $v$ ) računa se za susjedne mjerne nizove ( $X_3, X_4' / X_5, X_6'$ ) iz razlike signala pri padajućoj i rastućoj sili na istoj mjernoj točki:

$$v_1 = \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| \times 100, \% \quad (7)$$

$$v_2 = \left| \frac{X_6' - X_5}{X_5} \right| \times 100, \% \quad (8)$$

a njihova aritmetička sredina predstavlja konačnu pogrešku histereze:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}, \% \quad (9)$$

Klasifikacija mjernog područja umjeravanog etalona provodi se tako da se razmatra svaka mjerna točka, počevši od najveće prema najmanjoj i raspon klasifikacije završava kod zadnje ispitne sile za koju su još zadovoljeni traženi uvjeti. Područje u kojem se etalon klasificira mora iznositi barem od 50 % do 100 % nazivne sile ( $F_N$ ).

U tablici 1 dane su granične vrijednosti razmatranih pogrešaka s obzirom na klasu prijenosnog etalona.

**Tablica 1.** Karakteristike prijenosnog etalona sile

Klasa	Relativna pogreška, %				
	$b$	$b'$	$f_c$	$f_o$	$v$
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50

Nakon provedenih umjeravanja izračunate su vrijednosti relativnih pogrešaka za svaku mjernu točku i dobiveni podaci su obrađeni i analizirani.

### 3. REZULTATI I RASPRAVA

Tijekom predopterećenja umjeravanog etalona zabilježena su očitavanja kod nazivne vrijednosti ( $X_N$ ) te ona prije opterećenja ( $i_o$ ) i nakon rasterećenja ( $i_f$ ). Početna vrijednost mjernog signala ( $i_o$ ) iznosila je 0 mV/V. U tablici 2 prikazani su rezultati ovih mjerenja s pripadajućom vrijednošću relativne pogreške nule za tri ugradbena položaja (0°, 120°, 240°) i različite udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja.

**Tablica 2:** Vrijednosti mjernog signala i relativna pogreške nule kod predopterećenja za umjeravanja na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost, mm	Pozicija, °	$X_N$ , mV/V	$i_f$ , mV/V	$f_o$ , %
0	0	1,99932	0,00005	0,0025
	120	1,99949	0,00003	0,0015
	240	1,99944	0,00002	0,0010
20	0	1,99916	0,00004	0,0020
	120	1,99938	0,00001	0,0005
	240	1,99942	0,00001	0,0005
40	0	1,99884	0,00003	0,0015
	120	1,99943	0,00001	0,0005
	240	1,99946	0,00003	0,0015
60	0	1,99873	0,00007	0,0035
	120	1,99952	0,00004	0,0020
	240	1,99950	0,00003	0,0015

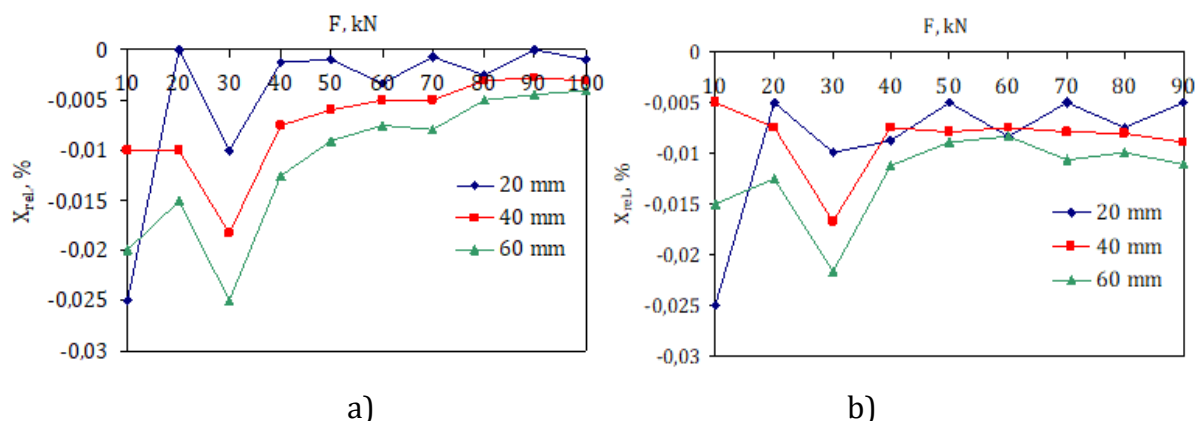
Vrijednosti mjernog signala zabilježene tijekom umjeravanja u centru opterećenja te one izmjerene za udaljenosti 20 mm, 40 mm i 60 mm sažeto su navedene u tablici 3. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki uzlazni niz sadrži 10 mjernih točaka, a na njegovom početku i kraju očitane su i vrijednosti nul signala.

**Tablica 3:** Vrijednosti mjernog signala kod umjeravanja na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost, mm	F, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
		X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	10	0,20003	0,20001	0,20000	0,20007	0,20000	0,20008
	20	0,39995	0,39994	0,40000	0,40001	0,40000	0,40001
	30	0,59990	0,59991	0,60000	0,59995	0,60000	0,59995
	40	0,79976	0,79978	0,7998	0,79984	0,7998	0,79986
	50	0,99969	0,99969	0,99970	0,99976	0,99970	0,99978
	60	1,19961	1,19962	1,19970	1,19969	1,19970	1,19972
	70	1,39952	1,39955	1,39960	1,39962	1,39960	1,39964
	80	1,59952	1,59954	1,59960	1,59959	1,59960	1,59963
	90	1,79948	1,7995	1,79950	1,79954	1,79960	1,79959
	100	1,99946	1,99947	1,99950	-	1,99960	-
0	0,00003	0,00004	-	0,00006	-	0,00005	
20	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	10	0,19999	0,20002	0,19992	0,20002	0,19997	0,20005
	20	0,39997	0,39999	0,39988	0,39997	0,39995	0,40001
	30	0,59989	0,59993	0,59977	0,59985	0,59986	0,59994
	40	0,79981	0,79985	0,79967	0,79972	0,79977	0,79983
	50	0,99973	0,99977	0,99958	0,99967	0,99968	0,99977
	60	1,19964	1,19967	1,19948	1,19955	1,19958	1,19966
	70	1,39961	1,39964	1,39946	1,39950	1,39954	1,39963
	80	1,59956	1,59960	1,59942	1,59943	1,59950	1,59955
	90	1,79961	1,79964	1,79941	1,79941	1,79952	1,79954
	100	1,99956	1,99959	1,99935	-	1,99948	-
0	0,00004	0,00005	-	0,00007	-	0,00006	
40	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	10	0,20002	0,20002	0,19995	0,20005	0,20000	0,20009
	20	0,39994	0,39995	0,39982	0,39993	0,39994	0,40003
	30	0,59985	0,59987	0,59969	0,59977	0,59984	0,59992
	40	0,79977	0,79980	0,79958	0,7997	0,79977	0,79987
	50	0,99969	0,99972	0,99946	0,99958	0,99968	0,99979
	60	1,19964	1,19967	1,19937	1,19948	1,19963	1,19974
	70	1,39957	1,39959	1,39927	1,39937	1,39957	1,39967
	80	1,59959	1,59961	1,59924	1,59931	1,59959	1,59965
	90	1,79957	1,79959	1,79917	1,7992	1,79958	1,7996
	100	1,99953	1,99956	1,99912	-	1,99957	-
0	0,00005	0,00005	-	0,00006	-	0,00006	
60	0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
	10	0,20000	0,20001	0,19991	0,20002	0,19999	0,20008
	20	0,39993	0,39993	0,39977	0,39988	0,39993	0,40004
	30	0,59981	0,59982	0,59960	0,59971	0,59983	0,59993
	40	0,79976	0,79975	0,79948	0,79961	0,79977	0,79992
	50	0,99969	0,99968	0,99936	0,99950	0,99972	0,99987
	60	1,19964	1,19965	1,19924	1,19939	1,19968	1,19982
	70	1,39955	1,39956	1,39912	1,39922	1,39961	1,39973
	80	1,59959	1,59958	1,59908	1,59917	1,59965	1,59974
	90	1,79957	1,79956	1,79900	1,79904	1,79965	1,79968
	100	1,99955	1,99955	1,99895	-	1,99967	-
0	0,00005	0,00006	-	0,00007	-	0,00007	

Usporedbom izmjerenih vrijednosti proizlazi da se mjerni signal u rastućim, ali i padajućim nizovima sila smanjuje s povećanjem udaljenosti od aksijalne osi opterećivanja i to za svaku mjernu točku u razmatranom području od 10 kN do 100 kN. Također je očito da vrijednost izlaznog signala za padajući niz sile nadmašuje veličinu signala u rastućem nizu i to pri svim točkama od 10 kN do 70 kN, dok je za mjerne točke 80 kN i 90 kN odnos signala obrnut te su rastućem nizu zabilježene veće vrijednosti.

Relativna promjena signala po mjernim točkama za različite udaljenosti (20 mm, 40 mm, 60 mm) u odnosu na signal u centru opterećenja prikazana je na slikama 5a i 5b za rastuće i padajuće nizove sila.



**Slika 5:** Relativna promjena mjernog signala pri rastućem (a) i padajućem (b) nizu sila

Evidentno je da se promjena signala smanjuje s porastom sile, dok s povećanjem udaljenosti od osi opterećenja relativno odstupanje raste pri čemu su najveće vrijednosti zabilježene za udaljenost 60 mm i to na svim mjernim točkama u rasponu od 20 do 100 kN.

Metodom najmanjih kvadrata određena je interpolacijska jednadžba u obliku polinoma 3. stupnja općenitog oblika:

$$X_a = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X, \text{ mV/V} \quad (10)$$

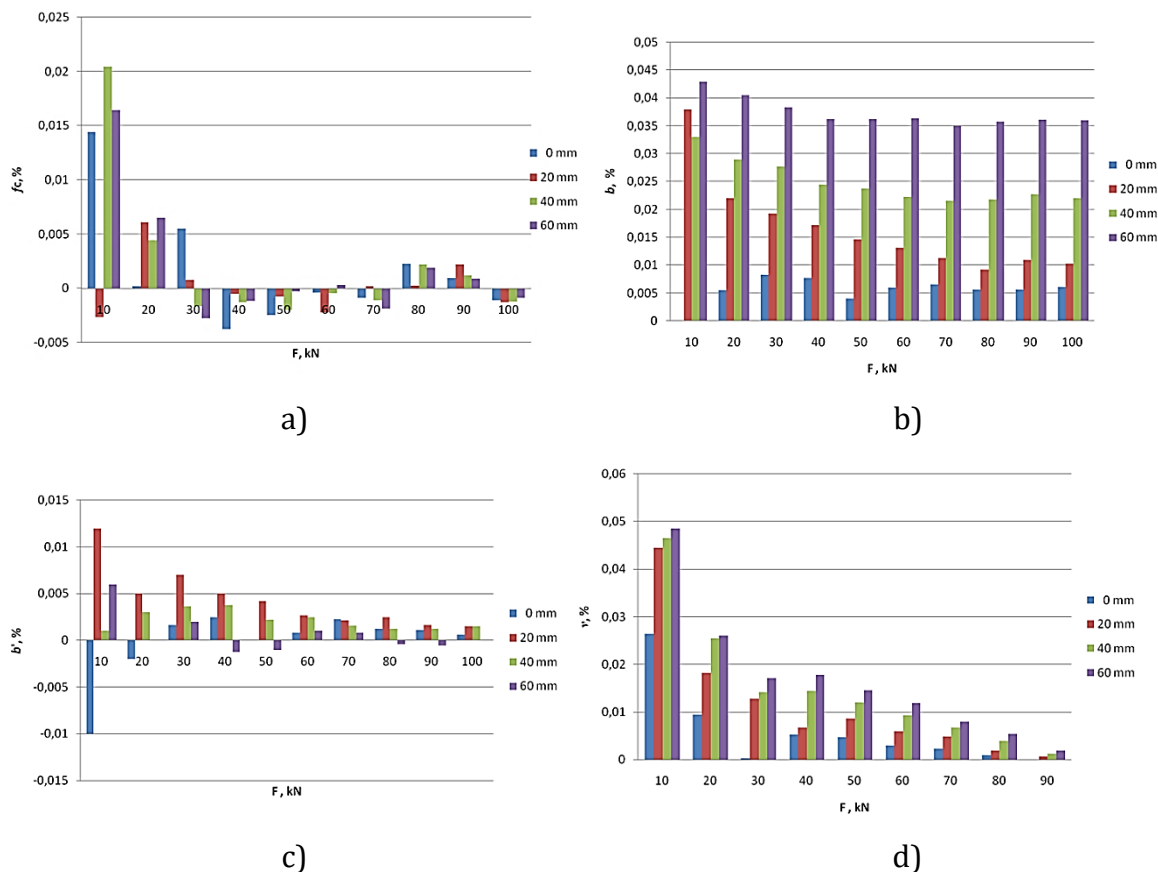
kojom su određene interpolirane vrijednosti očitavanja ( $X_a$ ) za veći broj mjernih točaka. Koeficijenti jednadžbe umjeravanja A, B, C sažeti su u tablici 4.

**Tablica 4:** Vrijednost koeficijenata interpolacijske krivulje za umjeravanja na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost, mm	Koeficijent	Vrijednost
0	A	1,5579831453E-09
	B	-2,1914922289E-07
	C	0001755313E-02.
20	A	1,1627445875E-09
	B	-1,4636327869E-07
	C	1,9997875153E-02
40	A	1,0622791519E-09
	B	-1,2497678081E-07
	C	1,9996187416E-02
60	A	9,2933270736E-10
	B	-9,5688530682E-07
	C	1,9994338628E-02



Na temelju danih vrijednosti izračunata je relativna interpolacijska pogreška ( $f_c$ ) kao i ostale veličine presudne za klasifikaciju: relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom ( $b$ ), relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije ( $b'$ ), relativno odstupanje nul vrijednosti ( $f_o$ ), relativna pogreška histereze ( $v$ ). Vrijednosti  $f_c$ ,  $b$ ,  $b'$  i  $v$  za različite udaljenosti od centra opterećenja grafički su prikazane na slici 6, dok su vrijednosti  $f_o$  za mjerne nizove  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_{3/4}$  i  $X_{5/6}$  sažete u tablici 5.



**Slika 6:** Karakteristike prijenosnog etalona sile za umjeravanja na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja: relativna interpolacijska pogreška (a), relativna pogreška obnovljivosti s rotacijom (b), relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije (c), relativna pogreška histereze (d)

Iz slike 6a jasno je vidljivo da se vrijednosti relativne interpolacijske pogreške smanjuju pri većim ispitnim silama što je slučaj i sa relativnom pogreškom obnovljivosti, koja se međutim značajno pogoršava s povećanjem udaljenosti od centra opterećenja, slika 6b.

Grafički prikazi 6c i 6d ukazuju da relativna pogreška ponovljivosti opada porastom sile kao i relativna pogreška histereze za koju je očito da se udaljavanjem etalona od centra opterećenja vrijednosti povećavaju.

**Tablica 5:** Vrijednosti relativne pogreške nule u mjernim nizovima za umjeravanja na različitim udaljenostima od aksijalne osi opterećivanja

Udaljenost, mm	$f_0, \%$			
	$X_1$	$X_2$	$X_{3/4}'$	$X_{5/6}'$
0	0,0015	0,0020	0,0030	0,0025
20	0,0020	0,0025	0,0035	0,0030
40	0,0025	0,0025	0,0030	0,0030
60	0,0025	0,0030	0,0035	0,0035

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je umjeravanje prijenosnog etalona sile na različitim udaljenostima od centra djelovanja opterećenja (0 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm) i analizirana promjena karakterističnih pogrešaka. Razmatranjem vrijednosti mjernog signala po mjernim točkama generalno proizlazi da se njegova vrijednost smanjuje udaljavanjem etalona od aksijalne osi opterećivanja. Ovo smanjenje izraženo je kako kod rastuće tako i padajuće sile, ali treba istaknuti da su u najvećem dijelu mjernog područja sve do 70 kN vrijednosti izmjerene u padajućem nizu veće od onih u rastućem nizu.

Analiziranjem karakterističnih pogrešaka umjeravanog etalona može se zaključiti da on zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN i to za sva četiri umjeravanja na različitim udaljenosti od centra djelovanja opterećenja, no međutim njegovim udaljavanjem ipak se postepeno pogoršavaju razmatrani parametri. To se ponajprije odnosi na pogrešku obnovljivosti koja raste za  $\approx 0,04 \%$  na svim mjernim točkama te u nešto manjoj mjeri i na pogrešku reverzibilnosti za koju je zabilježeno povećanje od  $\approx 0,02 \%$  pri nižim vrijednostima sile. Time se vrijednosti ovih pogrešaka značajno približavaju graničnim za klasu 00 što može biti opasno kod etalona lošijih mjeriteljskih karakteristika čije će neodgovarajuće pozicioniranje vrlo vjerojatno rezultirati kategorizacijom u nižu klasu.

#### LITERATURA

- [1] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
- [2] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, autorizirana predavanja, FSB, 2007.
- [3] HRN EN ISO 376:2012 Metalni materijali – Umjeravanje instrumenata za mjerenje sile koji se upotrebljavaju za provjeravanje ispitnih uređaja s jedosnim opterećivanjem