

UDK 681.5:528.541.82-187.4:528.722.81:528.088:006.44ISO(497.5)

Izvorni znanstveni članak

Automatizacija ispitivanja preciznosti nivelira i umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi

Mladen ZRINJSKI, Đuro BARKOVIĆ, Ivan RAZUMOVIĆ – Zagreb¹

SAŽETAK. Određivanje visina metodom geometrijskog nivelmana spada u najpreciznija geodetska mjerenja. U radu su navedene sve pogreške koje utječu na mjerenja u geometrijskom nivelmanu. Detaljno je opisan postupak ispitivanja preciznosti nivelira prema potpunom testu norme HRN ISO 17123-2:2004 (HRN ISO 2004b). Za ispitivanje preciznosti nivelira prema toj normi izrađen je program Nivelir_ISO. Pogreške koje se ne mogu eliminirati u terenskim uvjetima rada jesu pogreška mjerila letve, pogreška neravnomjerno nanesene podjele letve i pogreška određivanja temperaturnoga koeficijenta istezanja invara. Te se pogreške mogu odrediti jedino ispitivanjem i umjeravanjem na komparatoru u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Postupak umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi provodi se prema normi HRN ISO 12858-1:2004 (HRN ISO 2004a). Za automatizaciju umjeravanja na komparatoru izrađen je program KOMPA. Kao izlazni rezultat umjeravanja invarne nivelmanske letve dobije se Izuješće o komparaciji. Obavljena mjerenja u preciznom nivelmanu visoke točnosti potrebno je korigirati za vrijednosti koje su dobivene umjeravanjem para invarnih nivelmanskih letava na komparatoru.

Ključne riječi: automatizacija, precizni nivelir, komparator, inkrementalni mjerni sustav, umjeravanje, invarna nivelmanska letva, mjerna nesigurnost.

1. Uvod

Današnja tehnologija izrade geodetskih instrumenata i pribora za mjerenje osnovnih veličina u geodeziji (duljina i kut) dosegla je zavidnu razinu. U području geometrijskog nivelmana, kao najpreciznije metode određivanja ortometrijskih visina točaka, laserskom tehnikom nanose se vrlo precizno slojevi boje na invarne trake s mjernom nesigurnošću od 10 do 50 μm . Te su trake radno mjerilo na in-

¹Dr. sc. Mladen Zrinjski, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: mladen.zrinjski@geof.hr,

Prof. dr. sc. Đuro Barković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: djuro.barkovic@geof.hr,

Ivan Razumović, dipl. ing. geod., Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, e-mail: razumi@geof.hr.

varnim nivelmanskim letvama. Suvremenim preciznim nivelirima (optičkim ili digitalnim) može se očitati najmanji podatak na invarnoj nivelmanskoj letvi s mjernom nesigurnošću od 0,01 mm. Iz toga proizlazi da pri preciznom nivelmanu visoke točnosti, zbog utjecaja sustavnih pogrešaka mjerila nivelmanske letve i njezine neravnomjerno nanosene podjele, invarne nivelmanske letve moraju biti umjerene s etalonom mjerne nesigurnosti od nekoliko mikrometara, što se obavlja na komparatoru. Kako podatak očitani preciznim nivelirima na invarnoj nivelmanskoj letvi ne bi bio opterećen pogreškama, potrebno je ispitati tri uvjeta nivelira (posebno glavni uvjet) te preciznost nivelira u terenskim uvjetima.

2. Izvori pogrešaka u geometrijskom nivelmanu

Svako mjerenje u geometrijskom nivelmanu opterećeno je pogreškama iz različitih izvora. U tablici 1 prikazane su različite vrste izvora pogrešaka te načini njihova određivanja i eliminacije (Činklović 1978, Činklović 1983, Feil 1984, Rožić 1995).

Tablica 1. Izvor i naziv pogreške, način određivanja i eliminacije.

Izvor/Naziv pogreške	Vrsta pogreške	Određivanje i eliminacija pogreške
1. Pogreške instrumenta		
Pogreška vertikalne osi nivelira	sustavna	ispitivanje + određivanje
Pogreška kompenzacije, libele i elevacijskog vijka	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
Pogreška optičkog mikrometra	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
Pogreška nepravilnog dioptriranja nitnoga križa	sustavna	ispitivanje + metoda dioptriranja
Pogreška nepravilnog izoštravanja objekta	sustavna	ispitivanje + metoda izoštravanja
Mrtvi hod vijka optičkog mikrometra	sustavna	pravila za okretanje mikrometra
2. Pogreške letve		
Pogreška određivanja mjerila letve	sustavna	umjeravanje u laboratoriju
Pogreška neravnomjerno nanosene podjele letve	sustavna	umjeravanje u laboratoriju
Pogreška određivanja temperaturnoga koeficijenta istežanja invara	sustavna	umjeravanje u laboratoriju
Savijenost letve	sustavna	ispitivanje, ne koristiti te letve
Pogreška nule letve za par letava	sustavna	ispitivanje + određivanje
Pogreška obrade i oslonca temeljne pločice letve	sustavna	ispitivanje + korištenje prstena

nastavak na sljedećoj stranici

nastavak s prethodne stranice

3. Pogreške pri ispitivanju instrumenta i letve		
Pogreška podjele optičkog mikrometra	sustavna	ispitivanje + određivanje
Pogreška “runa” optičkog mikrometra	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
Određivanje pogreške vizurne osi (glavni uvjet nivelira)	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
4. Pogreške rektifikacije		
Pogreške derektifikacije u transportu	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
Pogreške derektifikacije tijekom mjerenja	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
5. Pogreške pri mjerenju		
Pogreška zbog neprilagođenosti instrumenta uvjetima rada	slučajna	prije mjerenja instrument izložiti vanjskim uvjetima rada (oko pola sata)
Pogreške zbog izlaganja instrumenta i stativa izravnom sunčevu zračenju	slučajna	instrument i stativ zaštititi od direktnih sunčevih zraka (suncobran)
Utjecaj vjetra	slučajna	brzina vjetra ne bi smjela biti veća od 3m/s
Zamagljenost i nestabilnost zračnih slojeva	slučajna	izbjegavati takve uvjete rada
Pogreška zbog slijevanja stativa	sustavna	metoda očitanja
Pogreška nevertikalnosti letve	sustavna	ispitivanje + rektifikacija libele letve + koristiti držače
Pogreška slijevanja podmetača letve (papuče)	sustavna	metoda očitanja + izbor terena
Pogreška viziranja	sustavna	metoda ponavljanja očitanja
Pogreška koincidiranja mikrometrom	sustavna	pravila za okretanje vijka mikrometra + ponavljanje koincidiranja
Vibriranje terena	slučajna	izbjegavati takve uvjete rada
6. Pogreške zbog atmosferskih uvjeta		
Derektifikacija instrumenta zbog utjecaja temperature	sustavna	ispitivanje + rektifikacija
Uvijanje stativa ili postolja nivelira zbog naglih razlika u temperaturi	slučajna	izbjegavati takve uvjete rada
Promjena mjerila letve zbog razlike temperature	sustavna	mjeriti temperaturu na terenu
Nejednaka vidljivost podjela letvi	slučajna	izbjegavati takve uvjete rada
Utjecaj nivelitičke refrakcije zraka	sustavna	izborom metode mjerenja
Zamagljenost i promjene (kolebanje) u zraku, vjetar	slučajna	izbjegavati takve uvjete rada
Titranje zraka	slučajna	izborom doba dana

Gotovo sve navedene pogreške mogu se u najvećem dijelu eliminirati ispitivanjem i rektifikacijom instrumenta, izborom najpovoljnijih vanjskih uvjeta rada, odabirom doba dana i godine te metodom mjerenja (Benčić i Solarić 2008). Pogreške koje se ne mogu eliminirati u terenskim uvjetima rada jesu:

- pogreška mjerila letve
- pogreška neravnomjerno nanесene podjele letve
- pogreška određivanja temperaturnoga koeficijenta istezanja invara.

Te se pogreške mogu odrediti isključivo u laboratorijskim uvjetima umjeravanjem na komparatoru (Barković 2002).

3. Automatizacija ispitivanja preciznosti nivelira

Ispitivanje preciznosti nivelira provodi se prema normi HRN ISO 17123-2:2004 (HRN ISO 2004b). U toj normi opisana su dva različita načina ispitivanja preciznosti nivelira, a to su jednostavni i potpuni test. Za precizna geodetska mjerenja preporuča se provesti potpuni test. Uz ta dva testa, u normi su opisana i tri statistička testa koja se uglavnom preporučuju uz potpuni test. Slijedi detaljan prikaz terenskog postupka ispitivanja preciznosti nivelira prema potpunom testu te su dani svi matematički izrazi koji se koriste u numeričkoj obradi mjernih podataka.

3.1. Test područje

Kako bi se smanjio utjecaj refrakcije, ispitivanje treba provesti na horizontalnom terenu. Nivelir treba zakloniti suncobranom kako bi tijekom mjerenja bio zaštićen od izravnih sunčevih zraka. Dvije visinski dobro definirane točke (A i B) treba postaviti na udaljenost od približno $\Delta = 60$ m. Nivelir se postavi približno na sredinu između točaka A i B ($\Delta/2 = 30 \text{ m} \pm 3 \text{ m}$) kako bi se smanjili utjecaj refrakcije i pogreška vizurne osi.

3.2. Mjerenja

Prije početka mjerenja nivelir treba ostaviti da se aklimatizira na temperaturu okoline. Za to je potrebno vrijeme od oko $2 \text{ min}/^{\circ}\text{C}$ temperaturne razlike. Osim toga, prije mjerenja treba ispitati pogrešku vizurne osi (glavni uvjet nivelira).

Treba obaviti dva seta mjerenja. Prvi set mjerenja sastoji se od 20 parova očitavanja, pri čemu jedan par čine dva očitavanja: zadnje očitavanje letve $x_{A,j}$ na točki A i prednje očitavanje letve $x_{B,j}$ na točki B, ($j = 1, \dots, 20$). Između svakog para očitavanja potrebno je malo promijeniti visinu i položaj nivelira. Nakon prvih 10 parova očitavanja ($x_{A,1}, x_{B,1}, \dots, x_{A,10}, x_{B,10}$), zamijeni se redoslijed zadnjeg i prednjeg očitavanja te se izvede drugih 10 parova očitavanja ($x_{B,11}, x_{A,11}, \dots, x_{B,20}, x_{A,20}$).

Za drugi set mjerenja, letve na točkama A i B zamijene mjesta. Cijeli postupak mjerenja obavlja se na isti način kao i u prvom setu, te ga čini prvih 10 parova očitavanja ($x_{A,21}, x_{B,21}, \dots, x_{A,30}, x_{B,30}$) i drugih 10 parova očitavanja ($x_{B,31}, x_{A,31}, \dots, x_{B,40}, x_{A,40}$).

3.3. Računanje

Prvo se izračuna:

$$d_j = x_{A,j} - x_{B,j}; \quad j = 1, \dots, 40, \quad (1)$$

gdje je d_j visinska razlika između zadnjeg očitavanja $x_{A,j}$ i prednjeg očitavanja $x_{B,j}$.

Slijedi računanje:

$$\bar{d}_1 = \frac{\sum_{j=1}^{20} d_j}{20}, \quad (2)$$

gdje je \bar{d}_1 aritmetička sredina visinskih razlika d_j prvog seta mjerenja.

Također se izračuna:

$$\bar{d}_2 = \frac{\sum_{j=21}^{40} d_j}{20}, \quad (3)$$

gdje je \bar{d}_2 aritmetička sredina visinskih razlika d_j drugog seta mjerenja.

Razlika:

$$\delta = \bar{d}_1 - \bar{d}_2 \quad (4)$$

nema utjecaj na empirijsko standardno odstupanje, već pokazuje da korišteni par letava ima različite pogreške nule letve (ako je $\delta \neq 0$).

Računaju se reziduali:

$$r_j = \bar{d}_1 - d_j; \quad j = 1, \dots, 20 \quad (5)$$

$$r_j = \bar{d}_2 - d_j; \quad j = 21, \dots, 40, \quad (6)$$

gdje je r_j rezidual odgovarajuće mjerene visinske razlike d_j između dviju nivel-manskih točaka A i B.

Kao kontrola aritmetičkih sredina mora biti zadovoljeno da je suma reziduala prvog, odnosno drugog seta mjerenja jednaka nuli:

$$\sum_{j=1}^{20} r_j = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{j=21}^{40} r_j = 0. \quad (8)$$

Slijedi računanje:

$$\sum_{j=1}^{40} r_j^2 = \sum_{j=1}^{20} r_j^2 + \sum_{j=21}^{40} r_j^2, \quad (9)$$

gdje je $\sum_{j=1}^{40} r_j^2$ suma kvadrata svih reziduala r_j .

Broj stupnjeva slobode v računa se prema izrazu:

$$v = 2 \cdot (20 - 1) = 38. \quad (10)$$

Empirijsko standardno odstupanje s vrijedi za visinsku razliku na duljini od 60 m:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{40} r_j^2}{v}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{40} r_j^2}{38}}. \quad (11)$$

Empirijsko standardno odstupanje za 1 km obostranog (dvostrukog) niveliranja $s_{\text{ISO-LEV}}$ računa se prema izrazu:

$$s_{\text{ISO-LEV}} = \frac{s}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{1000 \text{ m}}{60 \text{ m}}} \approx 2,89 \cdot s. \quad (12)$$

3.4. Statistički testovi

Statistički testovi preporučuju se samo za ispitivanje prema potpunom testu.

Za interpretaciju rezultata u statističkim se testovima koristi:

- empirijsko standardno odstupanje s visinske razlike mjerene na test području
- razlika δ pogrešaka nule letve za par nivelmanskih letvi i njezino empirijsko standardno odstupanje s_δ ,

kako bi se dobili odgovori na sljedeća pitanja (tablica 2):

- a) Je li izračunato empirijsko standardno odstupanje $s_{\text{ISO-LEV}}$ manje od odgovarajuće vrijednosti σ koja je deklarirana od proizvođača instrumenta?
- b) Pripadaju li dva empirijska standardna odstupanja $s_{\text{ISO-LEV}}$ i $\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}$ određena iz dvije različite serije mjerenja istom uzorku, pod pretpostavkom da obje serije imaju isti broj stupnjeva slobode v ?

Empirijska standardna odstupanja $s_{\text{ISO-LEV}}$ i $\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}$ mogu se dobiti:

- iz dvije serije mjerenja s istim instrumentom, ali s različitim opažaćima
- iz dvije serije mjerenja s istim instrumentom u različito vrijeme
- iz dvije serije mjerenja s različitim instrumentima.

- c) Je li razlika δ pogrešaka nule letve za par nivelmanskih letvi jednaka nuli?

Za testove koji slijede, razina je pouzdanosti $1 - \alpha = 0,95$ i broj stupnjeva slobode $v = 38$ (vidi izraz 10).

Tablica 2. *Statistički testovi.*

Pitanje	Nulta hipoteza	Alternativna hipoteza
a)	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
b)	$\sigma = \tilde{\sigma}$	$\sigma \neq \tilde{\sigma}$
c)	$\delta = 0$	$\delta \neq 0$

3.4.1. Pitanje a)

Nulta se hipoteza prihvaća ako je $s \leq \sigma$, tj. ako je zadovoljeno:

$$s_{\text{ISO-LEV}} \leq \sigma \cdot \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v)}{v}} \quad (13)$$

$$s_{\text{ISO-LEV}} \leq \sigma \cdot \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(38)}{38}} \quad (14)$$

$$\chi_{0,95}^2(38) = 53,38 \quad (15)$$

$$s_{\text{ISO-LEV}} \leq \sigma \cdot \sqrt{\frac{53,38}{38}} \quad (16)$$

$$s_{\text{ISO-LEV}} \leq 1,19 \cdot \sigma. \quad (17)$$

U suprotnome prihvaća se alternativna hipoteza.

3.4.2. Pitanje b)

Za dvije različite serije mjerenja, test pokazuje pripadaju li empirijska standardna odstupanja $s_{\text{ISO-LEV}}$ i $\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}$ istom uzorku. Nulta hipoteza $\sigma = \tilde{\sigma}$ prihvaća se ako je zadovoljeno:

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(v, v)} \leq \frac{s_{\text{ISO-LEV}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v, v) \quad (18)$$

$$\frac{1}{F_{0,975}(38, 38)} \leq \frac{s_{\text{ISO-LEV}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}^2} \leq F_{0,975}(38, 38) \quad (19)$$

$$F_{0,975}(38, 38) = 1,91 \quad (20)$$

$$0,52 \leq \frac{s_{\text{ISO-LEV}}^2}{\tilde{s}_{\text{ISO-LEV}}^2} \leq 1,91. \quad (21)$$

U suprotnome prihvaća se alternativna hipoteza.

3.4.3. Pitanje c)

Nulta hipoteza $\delta = 0$ prihvaća se ako je zadovoljeno:

$$|\delta| \leq s_\delta \cdot t_{1-\alpha/2}(v) \quad (22)$$

$$|\delta| \leq s_\delta \cdot t_{0,975}(38) \quad (23)$$

$$s_\delta = \frac{s}{\sqrt{10}} \quad (24)$$

$$t_{0,975}(38) = 2,02 \quad (25)$$

$$|\delta| \leq 2,02 \cdot \frac{s}{\sqrt{10}} \quad (26)$$

$$|\delta| \leq 0,64 \cdot s. \quad (27)$$

U suprotnome prihvaća se alternativna hipoteza.

Broj stupnjeva slobode v te odgovarajuće fraktile $\chi_{1-\alpha}^2(v)$, $F_{1-\alpha/2}(v, v)$ i $t_{1-\alpha/2}(v)$ podložni su promjenama ako se analizira broj mjerenja različit od broja navedenog u ovom radu.

Fraktile $\chi_{1-\alpha}^2(v)$, $F_{1-\alpha/2}(v, v)$ i $t_{1-\alpha/2}(v)$, uz odabrani nivo signifikantnosti $\alpha = 0,05$, uzimaju se iz statističkih tablica (Pavlić 1970, Feil 1990).

3.5. Ispitivanje preciznosti nivelira Leica NA2

Za automatizaciju ispitivanja preciznosti nivelira prema potpunom testu norme HRN ISO 17123-2:2004, izrađen je računalni program Nivelir_ISO u programskom paketu Microsoft Office Excel 2003.

Ispitivanje preciznosti nivelira Leica NA2 s planparalelnom pločom provedeno je prema pravilima i uputama navedenim u normi HRN ISO 17123-2:2004. Prema tehničkoj specifikaciji nivelir Leica NA2 s planparalelnom pločom ima deklarirano standardno odstupanje za 1 km obostranog (dvostrukog) niveliranja do 0,3 mm (Leica 1999).

U tablici 3 dan je prikaz rezultata ispitivanja preciznosti nivelira za prvu seriju mjerenja, koju je obavio opažatelj Ivan Razumović 20. veljače 2010. u dvorištu Geodetskog fakulteta. U tablici 4 dan je prikaz rezultata ispitivanja preciznosti nivelira za drugu seriju mjerenja, koju je obavio opažatelj Mladen Zrinjski istoga dana na istome mjestu. U tablici 5 prikazani su rezultati statističkog testiranja za tri statistička testa.

Prije i nakon obavljenih mjerenja, ispitan je nivelir, posebno njegov glavni uvjet. Rezultati ispitivanja pokazuju da je nivelir Leica NA2 (Ser. No. 5048229) ispravan i zadovoljava točnost koja je potrebna za mjerenja u generalnom nivelmanu I. i II. reda ili drugim preciznim geodetskim mjerenjima.

Tablica 3. Ispitivanje preciznosti nivelira prema potpunom testu – prva serija mjerenja.

Potpuni test za nivelire prema normi HRN ISO 17123-2:2004 (prva serija mjerenja)

Mjerenja obavio: Tip i serijski broj instrumenta:
 Datum mjerenja: Vremenske prilike:

Prvi set mjerenja						Drugi set mjerenja					
Broj mjerenja j	Očitanje zadnje letve x _{Aj} [mm]	Očitanje prednje letve x _{Bj} [mm]	Visinska razlika d _j [mm]	Rezidual r _j [mm]	Kvadrat reziduala r _j ² [mm ²]	Broj mjerenja j	Očitanje zadnje letve x _{Aj} [mm]	Očitanje prednje letve x _{Bj} [mm]	Visinska razlika d _j [mm]	Rezidual r _j [mm]	Kvadrat reziduala r _j ² [mm ²]
1	1682.6	1658.7	23.9	0.03	0.0009	21	1720.4	1696.4	24.0	-0.01	0.0002
2	1651.0	1627.2	23.8	0.13	0.0169	22	1728.6	1704.6	24.0	-0.01	0.0002
3	1695.9	1671.9	24.0	-0.07	0.0049	23	1751.0	1727.1	23.9	0.08	0.0072
4	1682.6	1658.7	23.9	0.03	0.0009	24	1774.2	1750.1	24.1	-0.12	0.0132
5	1645.9	1622.0	23.9	0.03	0.0009	25	1761.2	1737.3	23.9	0.08	0.0072
6	1685.7	1661.7	24.0	-0.07	0.0049	26	1742.8	1718.7	24.1	-0.11	0.0132
7	1688.7	1664.8	23.9	0.03	0.0009	27	1724.5	1700.6	23.9	0.08	0.0072
8	1672.4	1648.6	23.8	0.13	0.0169	28	1732.6	1708.6	24.0	-0.01	0.0002
9	1670.4	1646.4	24.0	-0.07	0.0049	29	1745.9	1721.9	24.0	-0.01	0.0002
10	1686.7	1662.8	23.9	0.03	0.0009	30	1750.0	1726.1	23.9	0.08	0.0072
11	1665.3	1641.4	23.9	0.03	0.0009	31	1759.2	1735.4	23.8	0.19	0.0342
12	1662.2	1638.2	24.0	-0.07	0.0049	32	1753.1	1729.2	23.9	0.09	0.0072
13	1673.4	1649.6	23.8	0.13	0.0169	33	1740.8	1716.7	24.1	-0.09	0.0132
14	1674.4	1650.4	24.0	-0.07	0.0049	34	1766.3	1742.4	23.9	0.09	0.0072
15	1665.3	1641.4	23.9	0.03	0.0009	35	1755.0	1730.9	24.1	-0.11	0.0132
16	1684.7	1660.7	24.0	-0.07	0.0049	36	1739.8	1715.8	24.0	-0.01	0.0002
17	1690.8	1666.9	23.9	0.03	0.0009	37	1745.9	1721.8	24.1	-0.12	0.0132
18	1662.2	1638.1	24.1	-0.17	0.0289	38	1757.1	1733.2	23.9	0.09	0.0072
19	1668.3	1644.4	23.9	0.03	0.0009	39	1727.5	1703.5	24.0	-0.01	0.0002
20	1683.6	1659.6	24.0	-0.07	0.0049	40	1734.7	1710.6	24.1	-0.12	0.0132
Σ	33492.1	33013.5	478.6	0.00	0.1220	Σ	34910.6	34430.9	479.7	0.00	0.1655

Aritmetička sredina visinskih razlika prvog seta mjerenja, \bar{d}_1 , **Kontrole za prvi set mjerenja:**
 Aritmetička sredina visinskih razlika drugog seta mjerenja, \bar{d}_2 , $\Sigma x_{A1} - \Sigma x_{B1} = \Sigma d_1$
 Razlika aritmetičkih sredina $\Sigma r_1 = 0$
 Suma kvadrata reziduala oba seta mjerenja **Kontrole za drugi set mjerenja:**
 Broj stupnjeva slobode $\Sigma x_{A2} - \Sigma x_{B2} = \Sigma d_2$
 Empirijsko standardno odstupanje, s $\Sigma r_2 = 0$
 Emp. stand. odstupanje za 1 km dvostrukog niveliranja, s_{ISO-LEV}

Tablica 4. Ispitivanje preciznosti nivelira prema potpunom testu – druga serija mjerenja.

Potpuni test za nivelire prema normi HRN ISO 17123-2:2004 (druga serija mjerenja)

Mjerenja obavio: Tip i serijski broj instrumenta:
 Datum mjerenja: Vremenske prilike:

Prvi set mjerenja						Drugi set mjerenja					
Broj mjerenja j	Očitanje zadnje letve x _{Aj} [mm]	Očitanje prednje letve x _{Bj} [mm]	Visinska razlika d _j [mm]	Rezidual r _j [mm]	Kvadrat reziduala r _j ² [mm ²]	Broj mjerenja j	Očitanje zadnje letve x _{Aj} [mm]	Očitanje prednje letve x _{Bj} [mm]	Visinska razlika d _j [mm]	Rezidual r _j [mm]	Kvadrat reziduala r _j ² [mm ²]
1	1531.0	1523.4	7.6	-0.05	0.0030	21	1566.6	1559.1	7.5	-0.01	0.0000
2	1500.3	1492.9	7.4	0.15	0.0210	22	1574.5	1566.9	7.6	-0.10	0.0110
3	1542.8	1535.3	7.5	0.04	0.0020	23	1597.2	1589.8	7.4	0.09	0.0090
4	1531.0	1523.4	7.6	-0.05	0.0030	24	1619.1	1611.6	7.5	-0.01	0.0000
5	1495.1	1487.6	7.5	0.04	0.0020	25	1607.1	1599.5	7.6	-0.10	0.0110
6	1533.9	1526.4	7.5	0.04	0.0020	26	1589.3	1581.8	7.5	-0.01	0.0000
7	1536.9	1529.5	7.4	0.14	0.0210	27	1571.5	1563.9	7.6	-0.10	0.0110
8	1521.1	1513.5	7.6	-0.05	0.0030	28	1579.4	1571.9	7.5	-0.01	0.0000
9	1519.1	1511.7	7.4	0.15	0.0210	29	1592.1	1584.7	7.4	0.10	0.0090
10	1534.9	1527.4	7.5	0.04	0.0020	30	1596.2	1588.6	7.6	-0.11	0.0110
11	1514.2	1506.5	7.7	-0.16	0.0240	31	1605.1	1597.7	7.4	0.10	0.0090
12	1511.1	1503.7	7.4	0.15	0.0210	32	1599.2	1591.7	7.5	-0.01	0.0000
13	1522.1	1514.5	7.6	-0.05	0.0030	33	1587.3	1579.9	7.4	0.10	0.0090
14	1523.1	1515.5	7.6	-0.05	0.0030	34	1612.1	1604.6	7.5	-0.01	0.0000
15	1514.2	1506.5	7.7	-0.16	0.0240	35	1600.2	1592.8	7.4	0.09	0.0090
16	1533.0	1525.4	7.6	-0.05	0.0030	36	1585.4	1577.9	7.5	-0.01	0.0000
17	1538.9	1531.4	7.5	0.04	0.0020	37	1592.3	1584.8	7.5	-0.01	0.0000
18	1512.2	1504.5	7.7	-0.16	0.0240	38	1603.2	1595.8	7.4	0.09	0.0090
19	1518.1	1510.5	7.6	-0.05	0.0030	39	1574.5	1566.9	7.6	-0.10	0.0110
20	1532.0	1524.5	7.5	0.04	0.0020	40	1581.4	1573.9	7.5	-0.01	0.0000
Σ	30485.0	30314.1	150.9	0.00	0.1895	Σ	31833.7	31683.8	149.9	0.00	0.1095

Aritmetička sredina visinskih razlika prvog seta mjerenja, \bar{d}_1 , **Kontrole za prvi set mjerenja:**
 Aritmetička sredina visinskih razlika drugog seta mjerenja, \bar{d}_2 , $\Sigma x_{A1} - \Sigma x_{B1} = \Sigma d_1$
 Razlika aritmetičkih sredina $\Sigma r_1 = 0$
 Suma kvadrata reziduala oba seta mjerenja **Kontrole za drugi set mjerenja:**
 Broj stupnjeva slobode $\Sigma x_{A2} - \Sigma x_{B2} = \Sigma d_2$
 Empirijsko standardno odstupanje, s $\Sigma r_2 = 0$
 Emp. stand. odstupanje za 1 km dvostrukog niveliranja, s_{ISO-LEV}

Tablica 5. *Rezultati statističkog testiranja za tri statistička testa.***Statistički testovi****Test br. 1.**

Test usporedbe izračunatog empirijskog standardnog odstupanja (s) i odgovarajuće vrijednosti (σ) deklarirane od proizvođača instrumenta.

Hipoteze:

Nulta hipoteza (H_0): $s \leq \sigma$

Alternativna hipoteza (H_1): $s > \sigma$

Odabrani nivo signifikantnosti $\alpha = 0,05$.

Prva serija mjerenja:

Izračunato empirijsko standardno odstupanje za 1 km dvostrukog niveliranja, $s_{ISO-LEV}$ 0,25 mm

Vrijednost standardnog odstupanja dana od proizvođača, σ 0,30 mm

Uz 95% vjerojatnosti: Test se prihvaća, tj. izračunato empirijsko standardno odstupanje manje je od deklariranog standardnog odstupanja. Mjerenja su obavljena s predviđenom točnošću.

Druga serija mjerenja:

Izračunato empirijsko standardno odstupanje za 1 km dvostrukog niveliranja, $s_{ISO-LEV}$ 0,26 mm

Vrijednost standardnog odstupanja dana od proizvođača, σ 0,30 mm

Uz 95% vjerojatnosti: Test se prihvaća, tj. izračunato empirijsko standardno odstupanje manje je od deklariranog standardnog odstupanja. Mjerenja su obavljena s predviđenom točnošću.

Test br. 2.

Test usporedbe dvaju empirijskih standardnih odstupanja (s i \hat{s}), dobivenih iz različitih mjerenja s istim brojem stupnjeva slobode.

Hipoteze:

Nulta hipoteza (H_0): $s = \hat{s}$

Alternativna hipoteza (H_1): $s \neq \hat{s}$

Izračunato empirijsko standardno odstupanje za prvu seriju mjerenja, $s_{ISO-LEV}$ 0,25 mm

Izračunato empirijsko standardno odstupanje za drugu seriju mjerenja, $\hat{s}_{ISO-LEV}$ 0,26 mm

Granice obostranog testa: $0,52 \leq s^2/\hat{s}^2 \leq 1,91$

Omjer kvadrata empirijskih standardnih odstupanja, s^2/\hat{s}^2 0,96

Uz 95% vjerojatnosti: Test se prihvaća, tj. empirijska standardna odstupanja potječu iz istog uzorka.

Test br. 3.

Test usporedbe aritmetičkih sredina visinskih razlika dvaju setova mjerenja.

Hipoteze:

Nulta hipoteza (H_0): $\delta = 0$

Alternativna hipoteza (H_1): $\delta \neq 0$

Odabrani nivo signifikantnosti $\alpha = 0,05$.

Prva serija mjerenja:

Izračunato empirijsko standardno odstupanje, s 0,09 mm

Apsolutna vrijednost razlike aritmetičkih sredina 0,06 mm

Uz 95% vjerojatnosti: Test se prihvaća, tj. razlika pogrešaka nula letvi, za par letvi, jednaka je nuli.

Druga serija mjerenja:

Izračunato empirijsko standardno odstupanje, s 0,09 mm

Apsolutna vrijednost razlike aritmetičkih sredina 0,05 mm

Uz 95% vjerojatnosti: Test se prihvaća, tj. razlika pogrešaka nula letvi, za par letvi, jednaka je nuli.

4. Automatizacija umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi

Suvremenim preciznim nivelirima (optičkim ili digitalnim) može se očitati najmanji podatak na invarnoj nivelmanskoj letvi s mjernom nesigurnošću od 0,01 mm. Stoga pri preciznom nivelmanu visoke točnosti, zbog utjecaja sustavnih pogrešaka mjerila nivelmanske letve i njezine neravnomjerno nanosene podjele, invarne nivelmanske letve moraju biti komparirane s etalonom mjerne nesigurnosti od nekoliko mikrometara. Iako je danas pri preciznom umjeravanju linearnih veličina naglasak na laserskim interferometrijskim sustavima, na Geodetskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, u svrhu komparacije invarnih nivelmanskih letava, konstruiran je komparator s etalonom na osnovi inkrementalnoga mjernog sustava, mjerne nesigurnosti $U_{95\%} = (2 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu\text{m}$, L u mm (Barković 2002, FSB 2004). Odabrana je upravo ta metoda zbog njezine visoke točnosti, jednostavnosti i ekonomičnosti.

4.1. Utjecaj pogreške podjele letve pri preciznom mjerenju visinske razlike

Komparaciju invarnih nivelmanskih letava potrebno je, pri preciznim geodetskim mjerenjima, napraviti prije i nakon mjerenja. Utjecaj pogreške podjele letve može se izračunati matematičkim izrazom u kojem su osnovni elementi za izjednačenje dobiveni na osnovi komparacije letve te izmjerene temperature pri komparaciji i temperature pri mjerenju na terenu. Osnovni je izraz za izjednačenje (Maurer 2000, Vodopivec i Kogoj 2001):

$$L = L' \cdot [1 + (m_0 + \alpha_t \cdot (T - T_0)) \cdot 10^{-6}], \quad (28)$$

gdje su:

L – popravljeno očitavanje letve u [m]

L' – očitavanje letve u [m]

m_0 – faktor mjerila (mjerilo letve) dobiven pri komparaciji letve (koeficijent smjera regresijskog pravca) u [μm]

α_t – temperaturni koeficijent istezanja invara [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$]

T – temperatura letve pri mjerenju na terenu u [$^\circ\text{C}$]

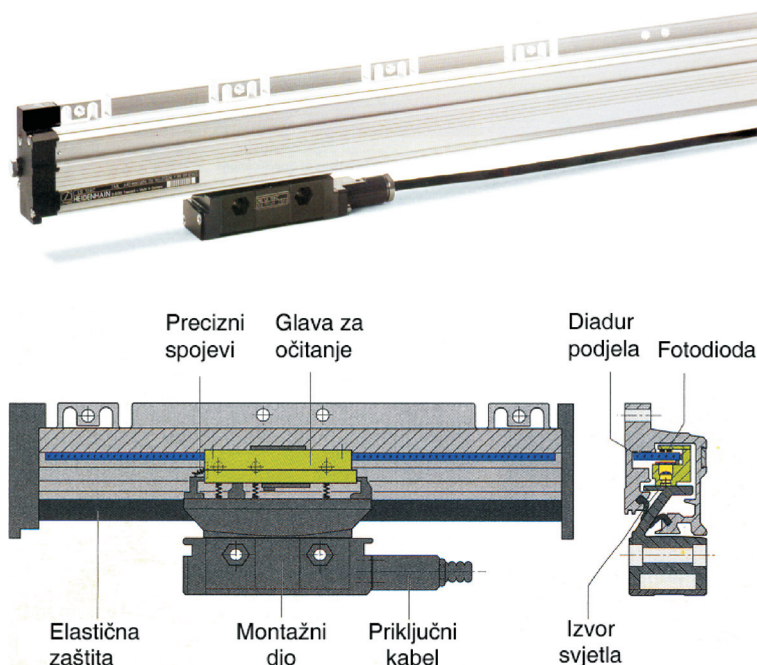
T_0 – temperatura letve pri komparaciji u [$^\circ\text{C}$].

Komparacija invarnih (ali i svih drugih) nivelmanskih mjernih letvi obavlja se na komparatoru.

4.2. Etalon komparatora

Komparator u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izrađen je na osnovi inkrementalnoga mjernog sustava (Barković 2002). Kao etalon komparatora primijenjen je zatvoreni linearni inkrementalni mjerni sustav LS 106C, mjerne duljine 3,04 m, tvrtke Heidenhain (slika 1). Uzimajući u obzir mjernu nesigurnost etalona prema certifikatu ($U_{\text{cert}} = 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$) i standardnu mjernu nesigurnost mjerila m_0 podjele invarnih

nivelmanskih letava na osnovi razlika dobivenih komparacijom u Zagrebu i Münchenu ($U_{\Delta m_0} = 0,39 \mu\text{m/m}$), prvotna procjena standardne mjerne nesigurnosti određivanja mjerila letve m_0 s pomoću inkrementalne mjerne letve iznosi $U_{95\%} = (2 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot L) \mu\text{m}$, L u mm. Na gornjem dijelu slike 1 vidi se izgled etalona s aluminijskim kućištem na kojem su otvori za ugradnju, te pomični dio s priključnim kabelom. Na donjem dijelu slike 1 prikazan je uzdužni presjek linear- nog inkrementalnoga mjernog sustava LS 106C.



Slika 1. Linearni inkrementalni mjerni sustav LS 106C upotrijebljen kao etalon komparatora Geodetskoga fakulteta.

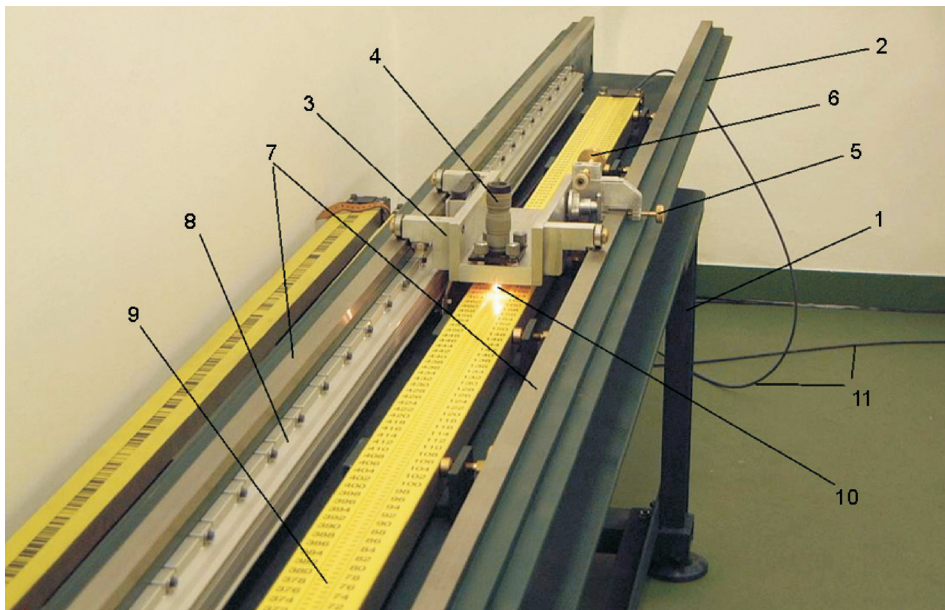
U zatvorenim linearnim inkrementalnim mjernim sustavima, podjela, glava za očitavanje i drugi osjetljivi dijelovi zaštićeni su aluminijskim kućištem i štite sustav od krhotina, prašine i kapljica vode. Glava za očitavanje, tj. skeniranje, putuje na vodilici unutar samoga kućišta i povezana je s vanjskim dijelom za montažu. Priključni kabel povezuje inkrementalni mjerni sustav s računalom uz pomoć PC kartice IK 220. Uz karticu postoji driver i softver koji radi pod operativnim sustavom Windows, te primjeri osnovnih funkcija koji su pripremljeni u programskim jezicima: VISUAL C++, VISUAL BASIC i BORLAND DELPHI.

4.3. Konstrukcija komparatora

Od početne ideje do realizacije izrade kompletnoga komparatora proteklo je vrijeme od oko tri godine. U postupku realizacije izrade komparatora zadani su bili osnovni konstrukcijski kriteriji koje komparator treba zadovoljiti:

- stabilnost uređaja
- kvaliteta izrade tijela komparatora
- preciznost obrade pojedinih dijelova tijela komparatora
- geometrijski odnosi između pojedinih dijelova komparatora.

Osim konstrukcijskih kriterija potrebno je zadovoljiti i ostale uvjete pri mjernom procesu, a to su prije svega vanjski utjecaji. U prostoriji u kojoj je smješten komparator ugrađen je profesionalni klima-uređaj kojim se održava stalnost temperature i vlažnosti zraka pri mjernom procesu. Stabilnosti komparatora pridodnosi i njegova ukupna masa od oko 250 kg. Tijelo komparatora postavljeno je na čelični nosač (postolje) koji ga podupire u dvije Eulerove točke. Na jednom kraju tijelo komparatora pričvršćeno je za nosač, dok je drugi kraj slobodan, ali poduprt u odgovarajućem ležištu. Tako postavljeno tijelo komparatora oslobođeno je od naprezanja i deformacija zbog promjene temperature, vlage i eventualnih de-



- | | |
|----------------------------|---|
| 1 - postolje komparatora | 7 - vodilice |
| 2 - tijelo komparatora | 8 - inkrementalna mjerna letva (etalon) |
| 3 - pomična kolica | 9 - invarna nivelmanska mjerna letva |
| 4 - mikroskop za viziranje | 10 - osvjetljenje |
| 5 - vijak kočnice | 11 - priključni kabeli |
| 6 - vijak za fini pomak | |

Slika 2. Komparator s popisom glavnih dijelova.

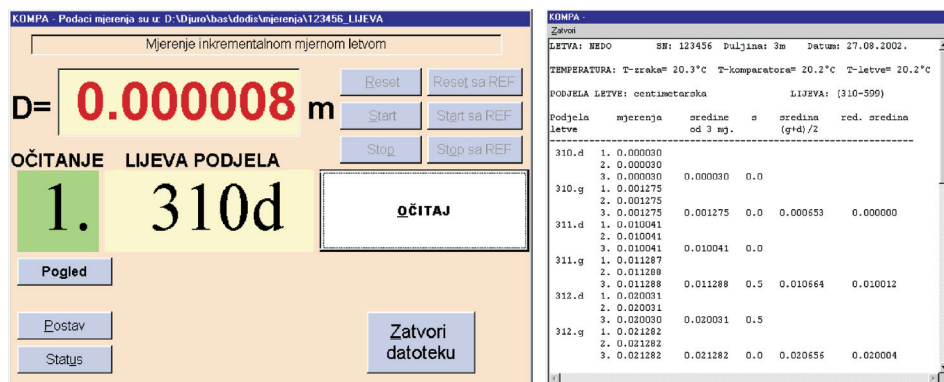
formacija podloge (betonskog poda). Lakše i preciznije navođenje niti mikroskopa na pojedinu crticu podjele na letvi omogućava dosta veliko povećanje mikroskopa (32x). Na slici 2 prikazan je komparator u Laboratoriju za mjerenja i mjerne tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, s popisom glavnih dijelova.

Komparacija nivelmanskih letava sastoji se u tome da:

- po vodilicama putuju kolica na osam kugličnih ležaja
- na kolicima je ugrađen mikroskop kojim se vizira svaka crtica podjele letve
- kolica su spojena s pomičnim dijelom (glava za očitavanje) inkrementalne mjerne letve, tako da se pri svakom viziranju, tj. pomaku mikroskopa, pomiče i glava za očitavanje
- vrijednost položaja automatski se dobije na računalu uz pomoć priključnoga kabela i programa KOMPA, koji potpuno upravlja mjernim procesom.

4.4. Program KOMPA

Kompariranje nivelmanskih letava provodi se uz primjenu vlastito razvijenog programa KOMPA (Barković 2002), koji upravlja mjernim procesom. Program KOMPA napisan je kao Windows aplikacija u Visual Basicu 6.0 Professional. Nakon što su uneseni osnovni parametri o letvi, temperaturi i vlažnosti zraka, pojavljuje se prozor koji se vidi na slici 3a i prisutan je do kraja postupka komparacije. Na slici 3b prikazana je datoteka s mjerenim podacima tijekom komparacije na komparatoru.


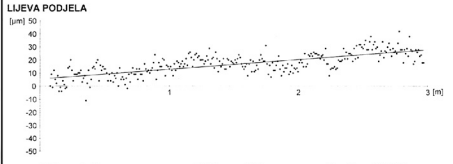
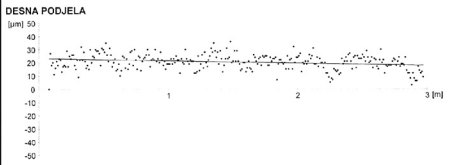
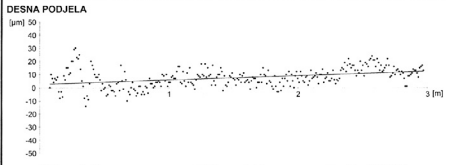


Slika 3. a) Prozor za mjerenje nakon aktiviranja kontrole Start i Očitaj, b) prikaz datoteke s mjerenim podacima tijekom komparacije.

Neposredno nakon komparacije iz pohranjene datoteke svi mjereni podaci s izračunatim faktorom mjerila letve i grafičkim prikazom mjerenja prikazuju se na zaslonu računala te po želji ispisuju na papiru u obliku Izvješća o komparaciji (slika 4).

4.5. Umjeravanje para invarnih nivelmanskih letava

Na komparatoru u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta umjerene su dvije invarne nivelmanske letve Wild s centimetarskom podjelom (br. 5362 i 5367, slika 4), prema normi HRN ISO 12858-1:2004 (HRN ISO 2004a).

IZVJEŠĆE O KOMPARACIJI Prema međunarodnoj normi ISO 12858-1		IZVJEŠĆE O KOMPARACIJI Prema međunarodnoj normi ISO 12858-1	
Komparator: Inkrementalna mjerna letva HEIDENHAIN Podatak: 0.001 mm Nesigurnost: 0.003 mm		Komparator: Inkrementalna mjerna letva HEIDENHAIN Podatak: 0.001 mm Nesigurnost: 0.003 mm	
Datum: 15.02.2010. Položaj letve pri komparaciji: HORIZONTALAN Redni broj: 00000		Datum: 15.02.2010. Položaj letve pri komparaciji: HORIZONTALAN Redni broj: 00000	
Letva: WILD Duljina: 3 m		Letva: WILD Duljina: 3 m	
Broj: 5362		Broj: 5367	
Podjela: centimetarska Lijevo: (310-599) Desno: (8-297)		Podjela: centimetarska Lijevo: (310-599) Desno: (8-297)	
LJEVA PODJELA  Faktor mjerila: $m_0 = -2.02$ $s = 0.41$ ppm pri $T_0 = +20.0$ °C		LJEVA PODJELA  Faktor mjerila: $m_0 = +7.54$ $s = 0.41$ ppm pri $T_0 = +20.2$ °C	
DESNA PODJELA  Faktor mjerila: $m_0 = -1.81$ $s = 0.39$ ppm pri $T_0 = +20.0$ °C		DESNA PODJELA  Faktor mjerila: $m_0 = +3.30$ $s = 0.47$ ppm pri $T_0 = +20.2$ °C	
Izjednačenje duljine: $L = L' [1 + (m_0 + \alpha (T - T_0)) \cdot 10^{-6}]$		Izjednačenje duljine: $L = L' [1 + (m_0 + \alpha (T - T_0)) \cdot 10^{-6}]$	
L' [m] - izmjerena duljina letve α [ppm/°C] - temp. koeficijent istezanja invara T [°C] - temperatura letve pri mjerenju		L' [m] - izmjerena duljina letve α [ppm/°C] - temp. koeficijent istezanja invara T [°C] - temperatura letve pri mjerenju	
Mjerilo: M.P. U Zagrebu: Pročelnik Zavoda:		Mjerilo: M.P. U Zagrebu: Pročelnik Zavoda:	
Voditelj Laboratorija:		Voditelj Laboratorija:	
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - GEODETSKI FAKULTET - UNIVERSITY OF ZAGREB - FACULTY OF GEODESY Kačićeva 26, 10000 Zagreb, HR-CROATIA, tel: ++385(0)1 45 61 222, fax: ++385(0)1 48 28 081		SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - GEODETSKI FAKULTET - UNIVERSITY OF ZAGREB - FACULTY OF GEODESY Kačićeva 26, 10000 Zagreb, HR-CROATIA, tel: ++385(0)1 45 61 222, fax: ++385(0)1 48 28 081	

Slika 4. Ispis Izvješća o komparaciji para invarnih nivelmanskih letvi Wild s centimetarskom podjelom: a) letva br. 5362, b) letva br. 5367.

Konačan rezultat komparacije je Izvješće o komparaciji koje se ispisuje na papiru, a u kojem se nalaze svi relevantni podaci o letvi, izmjerenim vrijednostima i podacima za izjednačenje očitavanja letve prema izrazu (28). Osim odstupanja od nominalnih vrijednosti pojedinih crtica na podjeli letve, komparatorom se može ispitati i utvrditi pogreška nule letve (indeks letve). Izvješće o komparaciji usklađeno je s normom za invarne nivelmanske letve HRN ISO 12858-1:2004.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je par invarnih nivelmanskih letvi s centimetarskom podjelom ispravan i zadovoljavaju točnost potrebnu za precizna mjerenja u geometrijskom nivelmanu.

5. Zaključak

Određivanje visina metodom geometrijskog nivelmana spada u najpreciznija geodetska mjerenja. Svako pojedino mjerenje opterećeno je pogreškama iz velikog broja različitih izvora. Međutim, gotovo sve navedene pogreške mogu se ispitivanjem i rektifikacijom instrumenta, izborom najpovoljnijih vanjskih uvjeta rada, doba dana i godine te metodom mjerenja gotovo u potpunosti eliminirati. Kako bi se osigurala velika preciznost u geometrijskom nivelmanu, važno je ispitati ispravnost preciznog nivelira i invarnih nivelmanskih letava, koji se koriste u mjerenjima.

Prije i nakon obavljenih mjerenja treba ispitati ispravnost nivelira, posebno njegov glavni uvjet. Ispitivanje preciznosti nivelira potrebno je provesti, prije i nakon mjerenja, prema potpunom testu norme HRN ISO 17123-2:2004. Za ispitivanje preciznosti nivelira prema toj normi izrađen je program Nivelir_ISO. Kao ulazne vrijednosti upišu se podaci mjerenja, a kao izlazne vrijednosti dobiju se ocjene točnosti ispitivanja nivelira te podaci statističkog testiranja za tri statistička testa.

Preostale pogreške koje se ne mogu eliminirati u terenskim uvjetima rada jesu pogreška mjerila letve, pogreška neravnomjerno nanasene podjele letve i pogreška određivanja temperaturnoga koeficijenta istezanja invara. Te se pogreške mogu odrediti isključivo umjeravanjem na komparatoru u Laboratoriju za mjerenja i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, obavezno prije i nakon mjerenja. Postupak umjeravanja invarnih nivelmanskih letvi provodi se prema normi HRN ISO 12858-1:2004. Za automatizaciju umjeravanja na komparatoru izrađen je program KOMPA. Kao izlazni rezultat umjeravanja invarne nivelmanske letve dobije se Izvješće o komparaciji. Za svaku umjerenu letvu moguće je provesti izjednačenje svakog pojedinog očitavanja, koje je dobiveno mjerenjem, prema izrazu (28).

Rezultati ispitivanja pokazuju da su nivelir Leica NA2 (Ser. No. 5048229) i par invarnih nivelmanskih letvi Wild s centimetarskom podjelom tvrtke (br. 5362 i 5367) ispravni i zadovoljavaju točnost potrebnu za mjerenja u preciznom nivelmanu visoke točnosti ili drugim preciznim geodetskim mjerenjima.

Literatura

- Barković, Đ. (2002): Komparacija nivelmanskih letava pomoću inkrementalne mjerne letve, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Benčić, D., Solarić, N. (2008): Mjerni instrumenti i sustavi u geodeziji i geoinformatici, Školska knjiga, Zagreb.
- Činklović, N. (1978): Analiza i prethodna ocena tačnosti metoda preciznih geodetskih merenja, Institut za geodeziju Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd.
- Činklović, N. (1983): Metode preciznih geodetskih merenja, Naučna knjiga, Beograd.

- Feil, L. (1984): Prilog razmatranju modela ocjene točnosti u nivelmanu visoke točnosti, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Feil, L. (1990): Teorija pogrešaka i račun izjednačenja – drugi dio, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- FSB (2004): Potvrda o umjeravanju br. 0134/04, Laboratorij za precizna mjerenja dužina, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- HRN ISO (2004a): HRN ISO 12858-1:2004 – Optika i optički instrumenti – Pomoćni uređaji za geodetske uređaje – 1. dio: Invarske nivelmanske letve (ISO 12858-1:1999).
- HRN ISO (2004b): HRN ISO 17123-2:2004 – Optika i optički instrumenti – Terenski postupci za ispitivanje geodetskih instrumenata i instrumenata izmjere – 2. dio: Niveliri (ISO 17123-2:2001).
- Leica (1999): Leica NA2/NAK2, User Manual, Leica Geosystems AG, Heerbrugg.
- Maurer, W. (2000): Kalibrierung von Nivellierlatten und Digitalen Nivelliersystemen, Seminar, Weimar.
- Pavlič, I. (1970): Statistička teorija i primjena, Tehnička knjiga, Zagreb.
- Rožić, N. (1995): Ispitivanje slučajnih i sistematskih pogrešaka u geometrijskom nivelmanu, doktorska disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Vodopivec, F., Kogoj, D. (2001): Ein neuer Komparator für die Kalibrierung von Nivellierlatten auf der Basis eines optischen Encodersystems, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN, Vol. 108, No. 8–9, 296–301.

Automation of Testing the Precision of Levels and Calibration of Invar Levelling Staves

ABSTRACT. The determination of heights by means of the method of geometric levelling belongs to the most precise geodetic measurements. In the paper there are all errors described influencing the measurements in geometric levelling. The procedure of testing the precision of levels according to the complete test of the standard HRN ISO 17123-2:2004 (HRN ISO 2004b) is described in details. For the purpose of testing the precision of levels according to this standard there has been the programme Nivelir_ISO developed. The errors that cannot be eliminated in field conditions are staff scale error, the error of irregularly defined staff scale and the error of determining the invar temperature coefficient. These errors can be determined only by testing and calibrating on the comparator in the Laboratory for Measurements and Measuring Techniques at the Faculty of Geodesy, University of Zagreb. The procedure of calibrating the invar levelling staves is carried out according to the standard HRN ISO 12858-1:2004 (HRN ISO 2004a). For the purpose of automating the calibration on the comparator the programme KOMPA has been developed. As the output result of calibrating the invar levelling staff we obtain the Comparison Report. The performed measurements in precise levelling of high accuracy have to be corrected for the values obtained by calibrating a pair of invar levelling staves on the comparator.

Keywords: automation, precise level, comparator, incremental measuring system, calibration, invar levelling staff, measuring uncertainty.

Prihvaćeno: 2010-10-12