

POGREŠKA KOMPENZACIJE NIVELIRA S AUTOMATSKIM HORIZONTIRANJEM I NJENO ISPITIVANJE

Gorana NOVAKOVIĆ, Jelena BEBAN-BRKIĆ — Zagreb*

1. UVOD

Funkcija je kompenzatora kod nivelira s automatskim horizontiranjem da kod nagiba vertikalne osi instrumenta, unutar područja kompenzacije, postavlja vizurnu liniju u horizontalan položaj. Ako zbog nesavršenosti u radu kompenzatora to nije u potpunosti ostvareno, dolazi do pogreške u položaju geodetske vizurne osi uzrokovane pogreškom kompenzacije. Uz pretpostavku da općenito vizurna linija i pri vertikalnom položaju glavne osi nije horizontalna, već da postoji pogreška geodetske vizurne osi (pogreška nultog položaja), to će se *pogreška kompenzacije* definirati kao promjena pogreške geodetske vizurne osi uslijed promjene nagiba vertikalne osi.

Pogreška kompenzacije nastaje uslijed toga što nagibom vertikalne osi dolazi do promjene optičke duljine (kod durbin sa unutrašnjim izoštravanjem to je optički razmak između glavne točke pozitivnog člana objektiva i nitnog križa), zatim do promjene položaja kompenzatora i promjene faktora kompenzacije.

Pogreška kompenzacije sistematskog je karaktera, a po svojoj veličini i smjeru različita je kod pojedinih konstrukcija. Općenito joj je predznak suprotan kod mjerenja nazad i naprijed, pa u dvostrukom iznosu utječe na pogrešku visinske razlike, no može imati i isti predznak. Osim toga, po apsolutnoj veličini ne mora biti jednaka kada se durbin za isti iznos digne ili spusti. Pogreška ovisi i o veličini i smjeru nagiba vertikalne osi (sl. 6). Sve ovo ukazuje na nužnost njenog ispitivanja posebno kod preciznih nivelira (Benčić, 1989).

2. ISPITIVANJE POGREŠKE KOMPENZACIJE

Budući da pogreška kompenzacije nastaje nagibom vertikalne osi nivelira, odredit ćemo je opažanjem vizurne marke kod vertikalne, a zatim za određeni iznos nagnute glavne osi instrumenta. Ovaj postupak može se provesti različitim metodama (Gresch, 1969):

* Mr. Gorana Novaković i mr. Jelena Beban-Brkić, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Kačićeva 26.

1) Cilj na konačnoj udaljenosti

Ovdje se koristi:

- a) vizurna marka na konačnoj udaljenosti; ispitivanje se može izvršiti na dva načina:
 - vizurna marka je fiksna; za viziranje i očitavanje služi mikrometar s plan-paralelnom pločom,
 - instrument je fiksna; viziranje se izvodi pomičnom vizurnom markom čiji se pomak očita na mjernoj uri,
- b) na instrumentu smještena vizurna marka koja se vizira preko ravnog zrcala (pseudo — autokolimacija),

2) Viziranje na cilj u neizmjernosti — pomoću kolimatora.

Metode ispitivanja razlikuju se po brzini i točnosti, a koja će se primjeniti ovisi o zahtjevanoj točnosti dobivanja rezultata.

U ovom radu prikazat ćemo rezultate ispitivanja pogreške kompenzacije dobivene metodom »cilj na konačnoj udaljenosti«, gdje se kao cilj koristila pomična vizurna marka. Ispitivanja su pokazala da je ova metoda najdugotrajnija ali i najtočnija (Gresch, 1969), (Novaković, 1988), pa se primjenjuje za ispitivanje vrlo preciznih nivelira.

3. POSTUPAK S CILJEM NA KONAČNOJ UDALJENOSTI

Kod ovog postupka opaža se vizurna marka postavljena na određenoj udaljenosti od nivelira kod vertikalne, a zatim za određeni iznos nagnute glavne osi nivelira. Iz razlike očitavanja, te poznavajući udaljenost vizurne marke od instrumenta, može se izračunati pogreška kompenzacije:

$$\gamma'' = \rho'' \frac{o_2 - o_1}{s}, \quad (1)$$

gdje je:

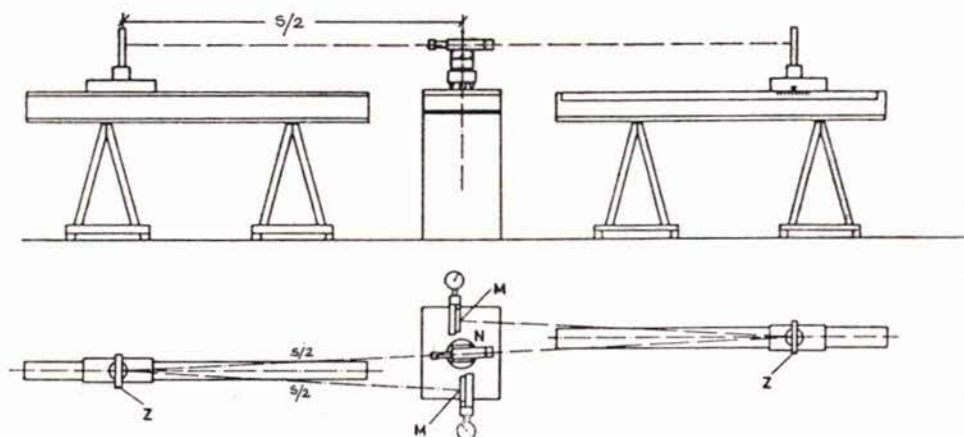
- γ — pogreška kompenzacije
- o_1 — očitavanje kod vertikalne glavne osi
- o_2 — očitavanje kod nagnute glavne osi
- s — udaljenost vizurne marke od nivelira.

Točnost postavljanja vizurne marke na određenu udaljenost od instrumenta, ovisi o zahtjevanoj točnosti određivanja γ .

Za primjenu ove metode ispitivanja potrebna je specifična laboratorijska oprema bez koje se ne bi mogla izvršiti mjerenja s potrebnom točnošću i ustanoviti moguće promjene koje nastaju pri nagibu vertikalne osi instrumenta. Vizurna marka može se postaviti na stativ, ali je njenu stabilnost potrebno stalno kontrolirati pomoću teodolita (Gresch, 1969).

Kod naših ispitivanja taj veliki nedostatak uklonjen je upotrebom jednog vrlo stabilnog uređaja za ispitivanje mjernog durbin; optičke klupe s kliznom stazom (Benčić i dr., 1981), (sl. 1), koja se nalazi u Laboratoriju Geodetskog

fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Na betonskom stupu, pored nivelira, nalazi se mikrometrički pomična marka M, koja se vizira preko vertikalno postavljenog ravnog zrcala Z smještenog na polovini zahtjevane udaljenosti s . Za očitavanje položaja zrcala nalazi se, bočno duž klizne staze, čelična letvica — lineal s mm podjelom. Nagib vertikalne osi se izvodio podnožnim vijkom nivelira, u određenim intervalima, duž čitavog područja kompenzacije.



Sl. 1. Optička klupa s kliznom stazom

Korištenje optičke klupe s kliznom stazom, uz dodatne, za ovu svrhu prilagođene uređaje, od velikog je značaja za primjenu ove metode ispitivanja. Osim što svojom konstrukcijom osigurava potrebnu stabilnost instrumenta i mjernih uređaja, upotrebom zrcala mjerno područje, ograničeno dimenzijama laboratorija, znatno je povećano. Osim toga, upotrebom pomične marke ne mora se, kod očitavanja, mehanički djelovati na nivelir, što također povećava točnost ispitivanja.

Računanje pogreške kompenzacije po formuli (1), a iz podataka mjerenja dobivenih ovom metodom, bilo bi ispravno samo u slučaju da pri nagibu durbinna analaktička točka kompenzacije* zadrži svoju visinu. Međutim, potrebno je upozoriti da nagibom durbinna analaktička točka kompenzacije mijenja svoj položaj u vertikalnom smislu pa dolazi do pomaka horizonta. Dakle, kod postupka gdje se opaža vizurna marka na konačnoj udaljenosti rezultati mjerenja moraju se korigirati za taj pomak da u protivnom ne dođemo do pogrešnih zaključaka o veličini pogreške kompenzacije. (U slučaju da ne postoji pogreška kompenzacije razlika očitavanja kod vertikalne i nagnute glavne osi predstavlja bi veličinu vertikalnog pomaka točke U).

Računanje korekcije čini dodatni značajni problem kod primjene ove metode. U postojećoj literaturi ili nije poklonjena pažnja ovom problemu što je

* Analaktička točka kompenzacije — još se naziva ishodišna, početna ili okretna točka geodetske vizurne osi — je točka iz koje proizlaze geodetske vizurne osi horizontalno u prostoru pri svakom nagibu durbinna u području kompenzacije. (Radi kratkoće pisanja, u nastavku ćemo je označavati sa U).

dovelo do krivih rezultata, ili je problem analiziran samo djelomično. Zbog toga će se u nastavku detaljnije objasniti način na koji se dolazi do korekcije rezultata i kako se ona računa.

4. ODREĐIVANJE VELIČINE VERTIKALNOG POMAKA ANALAKTIČKE TOČKE KOMPENZACIJE

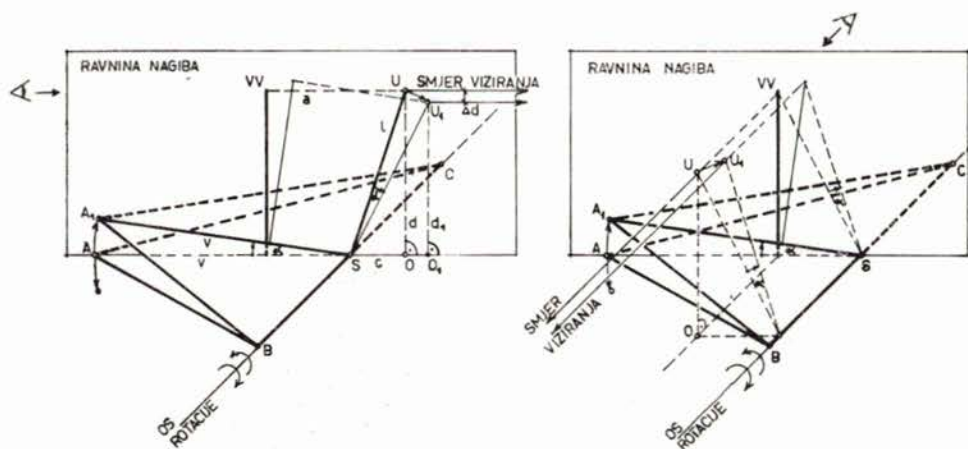
Veličina i smjer vertikalnog pomaka točke U ($\pm \Delta d$) ovisi o veličini nagiba vertikalne osi nivelira (α), o smjeru njenog nagiba i položaju točke U u odnosu na nju (a).

Nagib glavne osi, pri ispitivanjima, izvodio se podnožnim vijkom nivelira, i to u dva osnovna smjera:

Uzdužni nagib — nagib u smjeru viziranja. U ovom se slučaju objektiv durбина »diže« ili »spušta« u odnosu na točku cilja (sl. 2a).

Poprečni nagib — glavna os nivelira naginje se u ravnini okomitoj na smjer viziranja tj. objektiv se naginje »lijevo« ili »desno« u odnosu na točku cilja (sl. 2b).

Os podnožnog vijka A kojim se izvodi nagib nalazi se također u ravnini nagiba vertikalne osi instrumenta. Spojnica dodirnih točaka preostala dva podnožna vijka B i C predstavlja os oko koje se, kod nagiba, vrši rotacija vertikalne osi nivelira, i prema tome je okomita na ravninu nagiba (sl. 2a, 2b).



Sl. 2a. Uzdužni nagib

Sl. 2b. Poprečni nagib

Položaj točke U u odnosu na vertikalnu os instrumenta (VV) nije kod svih nivelira identičan; može se izračunati poznavajući konstruktivna svojstva durbi-na nivelira čija se pogreška kompenzacije ispituje.

Za određivanje korekcije Δd rezultata mjerenja, potrebno je poznavati:

- α — veličinu kuta nagiba vertikalne osi.
- $v/3$ — udaljenost vertikalne osi od osi rotacije (v -visina istostraničnog trokuta kojeg čine spojnice dodirnih točaka podnožnih vijaka),

- a — udaljenost točke U od vertikalne osi instrumenta,
 d — udaljenost točke U od horizontalne ravnine položene dodirnim točkama podnožnih vijaka A, B, C,

Veličine d i $v/3$ mogu se direktno izmjeriti, a dovoljno ih je poznavati, kao i veličinu a, na cm.

Ostale oznake na sl. 2a, 2b:

- U_1 — položaj točke U kod nagiba vertikalne osi za kut α ,
 A_1 — položaj podnožnog vijka A kod nagiba vertikalne osi za kut α ,
 d_1 — udaljenost točke U_1 od horizontalne ravnine položene dodirnim točkama podnožnih vijaka.

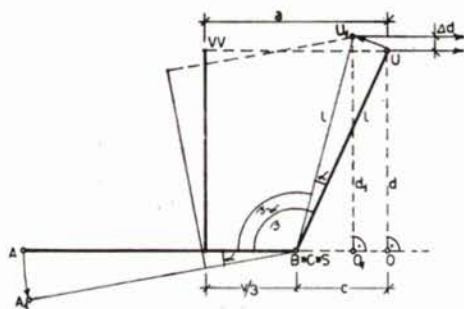
U nastavku prikazat ćemo različite slučajeve određivanja korekcije Δd u ovisnosti od smjera nagiba durbina i položaja točke U.

4.1. Analaktička točka kompenzacije (U) nalazi se na određenoj proizvoljnoj udaljenosti (a) od vertikalne osi

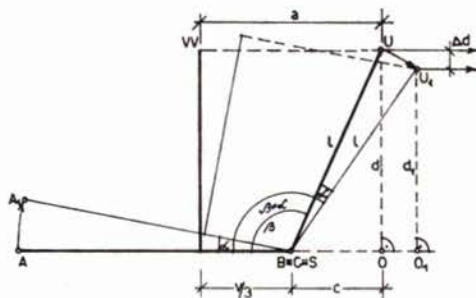
4.1.1. Uzdužni nagib

Kod toga pretpostavimo:

- a)
 — podnožni vijak A nalazi se ispod okulara durbina (na strani opažača),
 — nagib vertikalne osi uzet će se kao pozitivan kad se objektiv durbina »diže« u odnosu na točku cilja.



Sl. 3a. Uzdužni pozitivni nagib



Sl. 3b. Uzdužni negativni nagib

$$\sphericalangle SO_1U_1 \Rightarrow \sin [180^\circ - (\beta \mp \alpha)] = \sin (\beta \mp \alpha) = d_1/l$$

$$\sphericalangle SOU \Rightarrow 1 = \sqrt{d^2 + c^2}$$

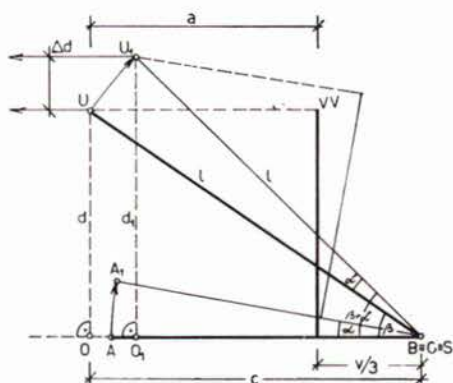
$$c = a - v/3, \quad \sin \beta = d/l$$

$$d_1 = l \sin (\beta \mp \alpha)$$

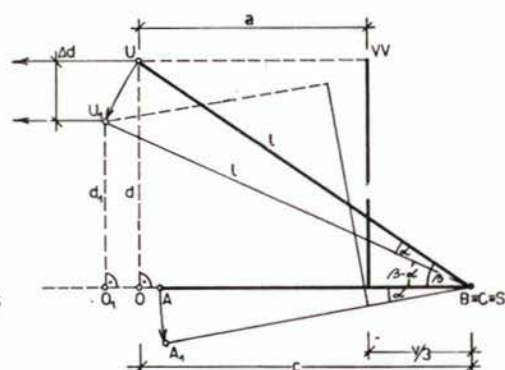
$$\Delta d = d - d_1 = d - l \sin (\beta \mp \alpha).$$

U zagradi se predznak — odnosi na pozitivni, a predznak + na negativni nagib vertikalne osi.

b) pretpostavimo sada da se podnožni vijak A nalazi ispod objektiva durbina (na strani vizurne marke). Predznak nagiba vertikalne osi isti kao i u prethodnom slučaju.



Sl. 3c. Uzdužni pozitivni nagib



Sl. 3d. Uzdužni negativni nagib

$$b. SO_1U_1 \Rightarrow \sin(\beta \pm \alpha) = d_1/l$$

$$b. SOU \Rightarrow l = \sqrt{d^2 + c^2}$$

$$c = a + v/3, \quad \sin \beta = d/l$$

$$d_1 = l \sin(\beta \pm \alpha)$$

$$\Delta d = d - d_1 = d - l \sin(\beta \pm \alpha)$$

U zagradi se predznak + odnosi na pozitivni, a predznak — na negativni nagib vertikalne osi. Vidimo da kod izračunavanja korekcije Δd moramo voditi računa o tome da li je podnožni vijak A na strani opažaća ili vizurne marke.

4.1.2. Poprečni nagib

Kod poprečnog nagiba sve točke koje se nalaze na geodetskoj vizurnoj osi, pa tako i točka U, promijene položaj u vertikalnom smislu za isti iznos. Prema tome ovdje nije važna udaljenost točke U od vertikalne osi; korekcija će se računati kao da se točka U nalazi u vertikalnoj osi.

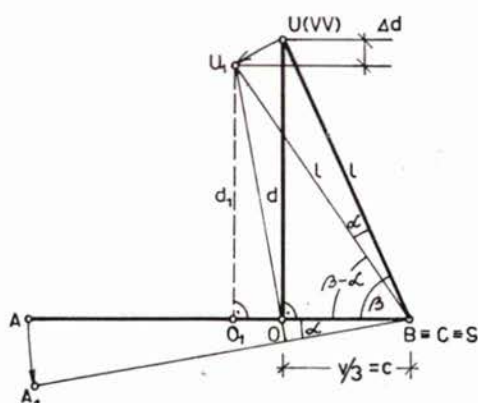
Pretpostavimo:

a)

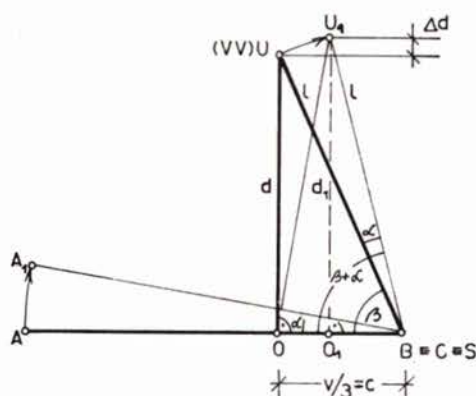
- podnožni vijak A nalazi se desno od durbina nivelira,
- nagib je pozitivan ako se objektiv durbina nagnije na »desno« u odnosu na točku cilja.

$$b. SO_1U_1 \Rightarrow \sin(\beta \mp \alpha) = d_1/l$$

$$b. SOU \Rightarrow l = \sqrt{d^2 + c^2}$$



Sl. 4a. Poprečni pozitivni nagib



Sl. 4b. Poprečni negativni nagib

$$c = v/3, \quad \sin \beta = d/l$$

$$d_1 = l \sin (\beta \mp \alpha)$$

$$\Delta d = d - d_1 = d - l \sin (\beta \mp \alpha)$$

U zagradi predznak — odnosi se na pozitivni, a predznak + na negativni nagib vertikalne osi.

b) pretpostavimo sada da se podnožni vijak A nalazi lijevo od durbina nivelira. Predznak nagiba isti kao i u prethodnom slučaju.

Kod pozitivnog nagiba durbina korekcija će se računati na isti način kao kod negativnog nagiba prethodnog slučaja (sl. 4b) i obrnuto. Dakle radi predznaka korekcije nije svejedno da li se podnožni vijak A nalazi lijevo ili desno u odnosu na durbina nivelira.

4.2. Analaktička točka kompenzacije nalazi se u vertikalnoj ravnini položenoj osi rotacije ($a=v/3$)

U ovom slučaju formula za računanje korekcije Δd nešto je jednostavnija nego u prethodnom primjeru.

4.2.1. Uzdužni nagib

Pretpostavke kao kod 4.1.1.a).

Računanje korekcije za pozitivni nagib:

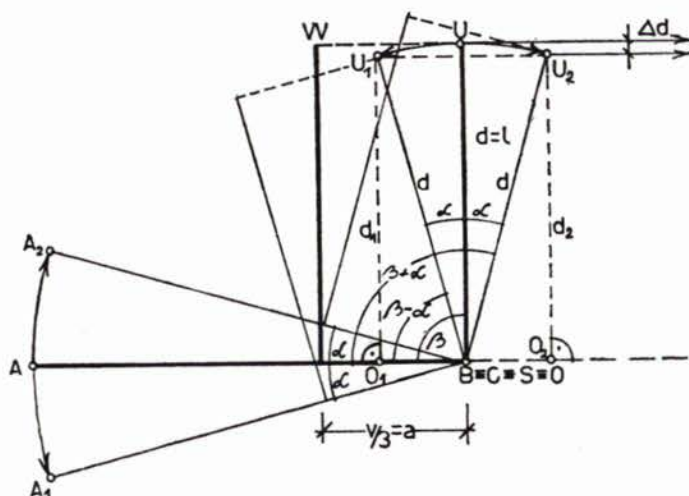
$$\triangle SO_1 U_1 \Rightarrow \sin (\beta - \alpha) = d_1/l$$

$$l = d, \quad \beta = 90^\circ, \quad c = 0$$

$$\sin (90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$$

$$d_1 = d \cos \alpha$$

$$\Delta d = d - d_1 = d (1 - \cos \alpha)$$



Sl. 5. Uzdužni pozitivni i negativni nagib

Kod negativnog nagiba korekcija Δd je po smjeru i veličini ista kao i kod pozitivnog nagiba (sl. 5), budući da je:

$$\sin(90^\circ + \alpha) = \sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha \Rightarrow d_2 = d \cos \alpha$$

$$\Delta d = d - d_2 = d(1 - \cos \alpha).$$

Korekcija će biti ista i uz pretpostavke pod 4.1.1.b).

4.2.2. Poprečni nagib

Korekcija Δd računa se na isti način kao i kod 4.1.2.

4.3. Analaktička točka kompenzacije nalazi se u vertikalnoj osi instrumenta ($a = 0$)

4.3.1. Uzdužni nagib

Usvojimo li pretpostavke pod 4.1.1.a), bit će to identičan slučaj (uz izuzetak smjera viziranja) kao onaj prikazan na slikama 4a (ovdje odgovara uzdužnom pozitivnom nagibu), i 4b (ovdje odgovara uzdužnom negativnom nagibu), pa će se i korekcija računati analogno tome.

Uz pretpostavke pod 4.1.1.b), korekcija će se, za pozitivni nagib računati prema slici 4b., a za negativni prema slici 4a.

4.3.2. Poprečni nagib

Korekcija Δd računa se na isti način kao i kod 4.1.2. Možemo zaključiti da ukoliko se točka U nalazi u vertikalnoj osi, korekcija Δd bit će, za određeni nagib vertikalne osi, jednaka kod uzdužnog i poprečnog nagiba.

Računanju korekcije Δd moramo pažljivo pristupiti da ne »pokvarimo« umjesto popravimo rezultate mjerenja. Još jednom treba naglasiti da se korekcija može izračunati samo u slučaju da je poznat položaj analaktičke točke kompenzacije u odnosu na vertikalnu os, što se može izračunati poznaju li se tehnički podaci durbina. Ako to nije slučaj, pogreška kompenzacije može se dobiti mjerenjem na dvije udaljenosti cilja; razlikom očitavanja eliminira se utjecaj pomaka točke U, ali se time znatno produžava mjerenje.

Primjer računanja korekcije Δd :

Kod nivelira Zeiss KONI 007 analaktička točka kompenzacije nalazi se u vertikalnoj osi instrumenta (slučaj 4.3). Udaljenost osi rotacije od vertikalne osi — $v/3 = 3$ cm, dok je $d = 28$ cm. Usvojimo li pretpostavke pod 4.1.1a) za uzdužni i 4.1.2.a) za poprečni nagib, to ćemo, prema sl. 4a i sl. 4b, izračunati slijedeće, za oba nagiba jednake korekcije Δd :

$+\alpha'$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δd (μm)	+9	+18	+26	+35	+44	+53	+62	+71	+80	+89
$-\alpha'$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Δd (μm)	-9	-17	-26	-35	-43	-52	-60	-69	-78	-86

5. REZULTATI ISPITIVANJA POGREŠKE KOMPENZACIJE

Metodom »cilj na konačnoj udaljenosti« ispitana je pogreška kompenzacije ovih nivelira:

Zeiss KONI 007	— br. 500785
Zeiss NI 025	— br. 513301
Zeiss Opton NI 2	— br. 142603
Wild NA 2	— br. 382060.

Za nivelire Koni 007 i Ni 025 korištena je jedna udaljenost cilja ($s = 8$ m), jer se zbog poznatih tehničkih podataka durbina mogla izračunati korekcija Δd . Za nivelire Na 2 i Ni 2 mjerilo se na dvije udaljenosti cilja ($s = 4$ m, $s = 8$ m). Pogreška kompenzacije određivana je kod nagiba vertikalne osi (uzdužnog i poprečnog) od: $\pm 1'$, $\pm 2'$, $\pm 3'$, $\pm 4'$, $\pm 6'$, $\pm 8'$ i $\pm 10'$. Broj mjerenja utvrđen je primjenom metoda matematičke statistike, naime određen je potreban broj mjerenja kod kojeg se razlika između aritmetičkih sredina dvaju uzoraka (mjerenje kod vertikalne i nagnute glavne osi) pokazuje sig-nifikantnom. Prosječna temperatura kod mjerenja iznosila je oko 25°C , i tokom rada nije se značajnije mijenjala.

Rezultati ispitivanja prikazani su na sl. 6. (Novaković, 1988).

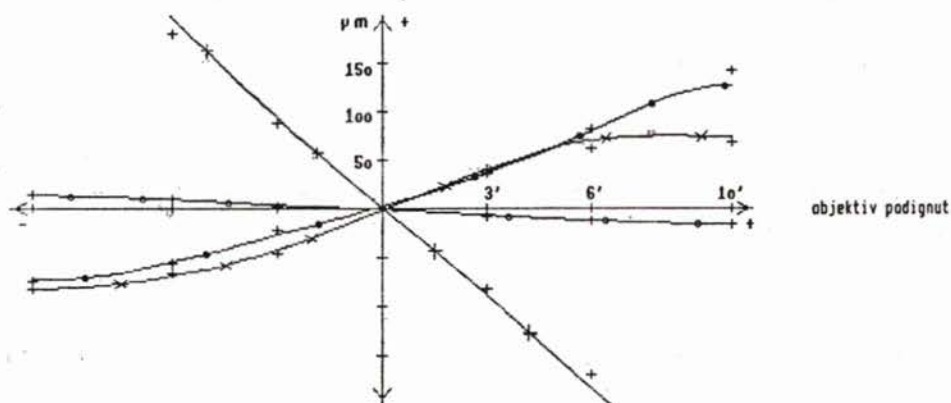
Funkcionalna veza između pogreške kompenzacije i nagiba vertikalne osi prikazana je uz pomoć izgladujućih kubičnih splajnova.

Za nivelire kod kojih možemo izračunati korekciju Δd , pogreška kompenzacije može se prikazati i na taj način da u grafikon ucrtamo funkciju »treba« koja predstavlja ovisnost veličine korekcije Δd od nagiba vertikalne osi. Zatim se nanese vrijednosti dobivene mjerenjem, što predstavlja funkciju »ima«.

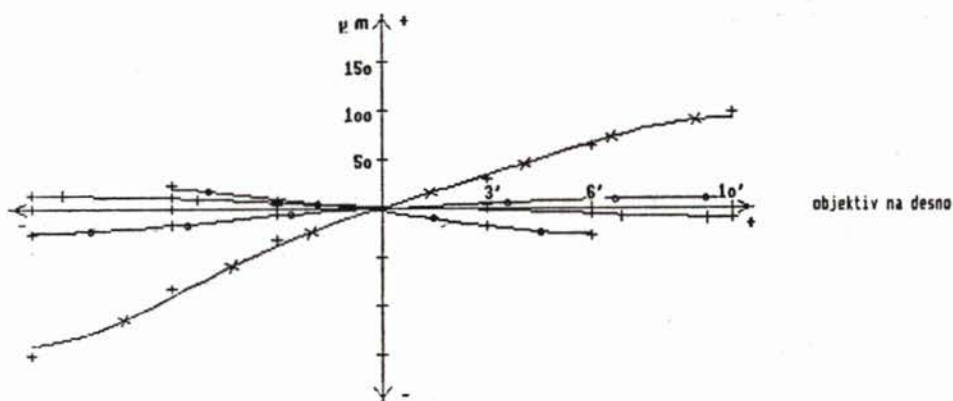
Razlikom funkcija »ima« i »treba« za određeni nagib, dobit ćemo traženu pogrešku kompenzacije.

Uzdužni nagib

$$s = 8 \text{ m}$$



Poprečni nagib



- o Koni 007 - br. 500785
- + Ni 025 - br. 513301
- Ni 2 - br. 142603
- × Na 2 - br. 382060

Sl. 6. Pogreška kompenzacije ispitanih nivelira

6. ZAKLJUČCI

Pogreška kompenzacije jedna je od instrumentalnih pogrešaka nivelira s automatskim horizontiranjem, a vezana je uz osnovnu funkciju kompenzatora. Sistematskog je karaktera i potrebno ju je ispitati radi li se o preciznim nivelirima. Postoji više metoda za njeno ispitivanje, a o zahtjevanoj točnosti dobivanja rezultata ovisi koja će se primjeniti. U ovom radu opisana je metoda »cilj na konačnoj udaljenosti«, gdje je kao cilj poslužila pomična vizurna marka. Kod ovog postupka neophodno je, tokom mjerenja, osigurati dobru stabilnost instrumenta i mjernog pribora. Dodatni je problem što kod ove metode dolazi do izražaja vertikalni pomak analaktičke točke kompenzacije koji nastaje nagibom vertikalne osi instrumenta, pa se stoga rezultati mjerenja moraju korigirati. Za izračunavanje korekcije potrebno je poznavati tehničke podatke durbina ispitivanog nivelira.

Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da se najmanja pogreška kompenzacije očitovala kod nivelira Koni 007 i to kod uzdužnog i poprečnog nagiba vertikalne osi. Najveća pogreška, pri uzdužnom nagibu, izmjerena je kod Ni 025, a pri poprečnom kod Na 2. Približno jednake pogreške, kod uzdužnog nagiba imaju niveliri Ni 2 i Na2, a kod poprečnog Koni 007 i Ni 025. Možemo zaključiti da od ispitanih nivelira Ni 025 ne bi zadovoljio za mjerenje visoke točnosti.

Da se umanjuje utjecaj pogreške kompenzacije na rezultate mjerenja visinskih razlika, glavnu os instrumenta potrebno je postaviti što točnije vertikalno u prostoru, što je opet ograničeno osjetljivošću dozne libele. Za precizne nivelire preporučljiva bi bila upotreba osjetljivih libela za prethodno horizontiranje. Međutim, provode li se mjerenja visinskih razlika određenom metodičnošću (Rudl i dr., 1969), moguće je postići da pogreška kompenzacije poprimi karakter slučajne pogreške; npr. prema G. Förstneru — dozna libela prije očitavanja vrhuni se uvijek prema *istoj* letvi.

LITERATURA:

- Benčić, D. (1989): Geodetski instrumenti (u tisku), Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- Benčić, D., Lasić, Z., Novaković, G., Rašpica, M., Šimičić, K. (1981): Geodetska vizurna linija i pogreška vizurnog pravca, Zbornik radova, Niz A, br. 32, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1981.
- Gresch, E. (1969): Instrumentenbedingte Fehler beim arbeiten mit Kompensator-nivellieren, Nationalkomitee für Geodasie und Geophysik der Deutschen Demokratischen Republik bei der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, III/15, Dissertation, Berlin, 1969.
- Novaković, G. (1988): Instrumentalne pogreške nivelira s automatskim horizontiranjem vizurne osi, magistarski rad, Geodetski fakultet, Zagreb, 1988.
- Rudl, F., Mravlje D. (1969): Mogućnost primjene preciznih automatskih nivelira za radove na nivelmanu visoke točnosti, Institut za geodeziju i fotogrametriju u Ljubljani, Ljubljana, 1969.

SAŽETAK

U radu je izložena jedna metoda određivanja pogreške kompenzacije nivelira s automatskim horizontiranjem. Posebna pažnja posvećena je računanju korekcije rezultata mjerenja. U literaturi, gdje se obrađuje ova problematika, ta korekcija ili nije uzeta u obzir, ili nije dovoljno razrađena. Prikazani su i rezultati ispitivanja pogreške kompenzacije nekih nivelira, određeni ovom metodom.

ABSTRACT

The paper presents a method for determining the compensator error of automatic levels. A special attention is paid to the calculation of the correction of measured data. The literature dealing with the subject either does not take into account this correction, or the correction is not sufficiently elaborated. For several levels, the results for the compensation error obtained by the described method are displayed as well.

Primljeno: 1989-05-19