

UDK 528.521.08:681.783.23:519.2
Izvorni znanstveni članak

Pogreška kompenzacije kompenzatora teodolita

Gorana NOVAKOVIĆ – Zagreb*

SAŽETAK. U ovom je radu definirana jedna od pogrešaka funkcije kompenzatora teodolita – pogreška kompenzacije. Opisane su metode njezina određivanja u laboratoriju. Uz rezultate istraživanja izvršena je, primjenom metoda matematičke statistike, usporedba metoda s obzirom na njihovu točnost i brzinu, pri čemu su korišteni i neki novi kriteriji. Također su dane određene preporuke kako da se smanji utjecaj pogreške kompenzacije pri mjerenju.

Ključne riječi: teodolit, pogreška kompenzacije, mjerna ponovljivost

1. Uvod

Visokoprecizna mjerenja koja se danas primjenjuju, postala su sve složenija, a time dolaze do izražaja sve brojnija sustavna odstupanja. Znatan broj tih odstupanja, gledajući pojedinačno, mogu se činiti beznačajnima s obzirom na ukupnu točnost mjerenja, iz čega se zaključuje da se mogu zanemariti. Međutim, njihov zbroj može imati značajan utjecaj, pa bi njihovo odbacivanje bilo pogrešno. Mnoga sustavna odstupanja koja se javljaju tokom mjerenja vezana su uz kvalitetu instrumentarija, njegova ispitivanja i rektifikacije. Automatizacijom mjernog procesa, kao što je npr. uvođenje kompenzatora kod nivelira i teodolita, skraćeno je vrijeme mjerenja i isključene su pogreške vezane uz libelu, ali su se pojavile nove pogreške vezane uz funkciju kompenzatora.

Kompenzator se prvi put primijenio kod nivelira, za automatsko horizontiranje vizurne linije. Kada su se razvojem pojavila ne samo različita konstruktivna rješenja već su se postigle i tako visoke točnosti da je nivelir s kompenzatorom primjenjivan za najpreciznija mjerenja, pojavila se potreba za definiranjem i ispitivanjem pogrešaka vezanih uz djelovanje kompenzatora. Postoje mnoga značajna istraživanja na tom polju, od kojih treba istaknuti ona koja je proveo Gresch (Gresch 1969), koji definira pojedine pogreške i uvodi neke metode za njihovo ispitivanje u laboratoriju. Nakon uspješne primjene kod nivelira, kompenzator je uveden i kod teodolita, za automatsku stabilizaciju indeksa vertikalnoga kruga. I

* Dr.sc. Gorana Novaković, Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, Kačićeva 26, 10 000 Zagreb.

tu postoje pogreške funkcije kompenzatora, nastale zbog različitih uzroka, međutim nisu poznata neka značajnija istraživanja u tom smislu. Stoga su, u okviru istraživanja pogrešaka funkcije kompenzatora, definirane i ispitane pogreške vezane uz funkciju kompenzatora teodolita te utvrđene neke metode za njihovo određivanje.

Budući da se pogreške kompenzatora ne mogu ukloniti metodom mjerenja, moguće ih je učiniti neutjecajnim, odnosno zanemarivim, zadavanjem njihovih dopuštenih vrijednosti za traženu točnost mjerenja. Dopuštene granice pogrešaka potrebno je odrediti s određenom sigurnošću, što ovisi o točnosti metode kojom su ispitane, a to nam mogu osigurati samo laboratorijske metode ispitivanja, koje zahtijevaju vrlo kvalitetnu pripremu. Na osnovi teoretskih razmatranja treba prvo definirati pojedine pogreške, zatim je potreban pravilan izbor mjernog postupka i pomoćnih uređaja za njihovo ispitivanje, a također i pravilan način mjerenja radi uklanjanja ili redukcije poznatih utjecaja na točnost mjerenja. Budući da su pogreške funkcije kompenzatora vrlo male, trebalo ih je odrediti iz većeg broja mjerenja, što znači i duže vrijeme mjerenja, u toku kojeg se može pojaviti djelovanje dodatnih utjecajnih veličina koje mogu poremetiti stabilnost preciznosti mjerenja. Stoga je tokom mjerenja trebalo stalno kontrolirati i time osigurati stabilnost preciznosti, za što su bile potrebne različite provjere uz statističke analize.

2. Pogreške funkcije kompenzatora teodolita

Za očitavanje vertikalnih kuteva teodoliti imaju vertikalni ili visinski krug i odgovarajući uređaj za očitavanje. Za razliku od horizontalnog, za mjerenje vertikalnoga kuta potrebno je samo jedno očitavanje kruga, jer je drugi krak kuta određen orijentacijom vertikalnog limba u odnosu na indeks za očitavanje. Zbog toga na točnost mjerenoga kuta vrlo značajno može utjecati promjena položaja indeksa pri rotaciji alhidade zbog nagiba glavne osi teodolita (Benčić 1990). Dakle, prije očitavanja vertikalnoga kuta potrebno je izvršiti korekciju položaja indeksa, što se kod teodolita s kompenzatorom postiže automatski.

Dvije su osnovne pogreške vezane uz rad kompenzatora teodolita:

- 1) pogreška kompenzacije
- 2) pogreška stabilizacije kompenzatora.

U ovom radu bit će definirana samo pogreška kompenzacije i opisane metode za njezino ispitivanje, dok će se o drugoj pogrešci pisati u nekom od sljedećih radova.

3. Pogreška kompenzacije (PK)

Uloga je kompenzatora da unutar njegova područja djelovanja automatski stabilizira indeks za očitavanje vertikalnoga kruga bez obzira na nagib vertikalne osi teodolita. Ako se pojavljuje neispravnost kompenzacije u čitavom radnom području, nastaje *pogreška kompenzacije*. Potrebno je istražiti njezinu veličinu i smjer kod različitih nagiba vertikalne osi (unutar područja kompenzacije). Nagibe vertikalne osi

treba izvoditi ne samo u vizurnoj ravnini nego i u karakterističnim ravninama koje su pod određenim kutom prema vizurnoj ravnini (kod različitih komponenti nagiba vertikalne osi u vizurnoj ravnini).

3.1. Postupci određivanja pogreške kompenzacije

Praktična su istraživanja provedena u Laboratoriju za mjerenje i mjernu tehniku Geodetskog fakulteta u Zagrebu. Koristeći se mjernim priborom koji je stajao na raspolaganju, trebalo je pronaći metode ispitivanja i pomoću njih odrediti definiranu pogrešku. Tokom istraživanja došlo se do različitih ideja za metode ispitivanja, pa su za svaku od njih provedena probna mjerenja radi pronalaženja najoptimalnije. U nastavku opisati će se one metode za koje je zaključeno da svojom preciznošću i brzinom najbolje rješavaju postavljene zadatke.

Metode se mogu klasificirati prema vrsti upotrebljenog mjernog pribora:

- 1) cilj na konačnoj udaljenosti
 - na optičkoj klupi, pomoću mikrometrički pomičnih vizurnih marki
- 2) cilj u ∞
 - pomoću kolimatora.

3.1.1. Postupak s ciljem na konačnoj udaljenosti

Mjerenja su izvršena na *optičkoj klupi s kliznom stazom*, gdje se nalazilo okretno zrcalo na njihalu (prema konstrukciji Seltmanna), a preko kojeg se opažala pomična vizurna marka smještena pokraj instrumenta (Novaković 1996).

Pri istraživanju pogreške kompenzacije potrebno je ustanoviti da li se očitavanja vertikalnog kruga kod nagnute glavne osi instrumenta signifikantno razlikuju od očitavanja pri vertikalnoj glavnoj osi. Nagib vertikalne osi za određeni iznos izvodio se pomoću podnožnog vijka instrumenta. Zahtijevani nagib mogao se vrlo točno namjestiti pomoću očitavanja na vertikalnom krugu. Za dobivanje ispravnih rezultata kod nultog položaja (vertikalne glavne osi) potrebno je vrlo točno horizontirati instrument, što je ovdje omogućeno činjenicom da instrument ima kompenzator za automatsku stabilizaciju indeksa vertikalnoga kruga (Benčić 1990).

Nagib vertikalne osi za kut $\pm \alpha$ provodi se na sljedeći način: kod usmjerenog durbina koji se treba nalaziti u karakterističnoj ravnini (ravnini u kojoj se izvodi nagib), namjesti se mikrometrom očitavanje $90^\circ \pm \alpha$ i izvrši koincidencija na mikrometru podnožnim, mjernim vijkom T (pri tom treba paziti da li je T ispod okulara ili objektiva, što je bitno pri računanju korekcije rezultata zbog vertikalnog pomaka ishodišne točke vizurne linije nastalog nagibom vertikalne osi). Mikrometar se vrati na 0, a vijkom za fini pomak durbina izvrši se ponovno koincidencija; očitavanje na vertikalnome krugu je ponovno 90-00-00. Ovim postupkom namješten je nagib vertikalne osi za željeni iznos.

Mjerenje pri ishodišnom (nultom) položaju vertikalne osi: kod horizontiranog instrumenta namjesti se na vertikalnom krugu očitavanje 90-00-00. Preko zrcala vizira se pomična vizurna marka. Pomakom marke, djelovanjem na vijak mjernog

uređaja, uvizira se horizontalna nit nitnog križa instrumenta; očitavanje na mjernoj uri – o_1 .

Mjerenje pri nagibu vertikalne osi: na gore opisani način izvrši se nagib vertikalne osi za određeni iznos, pomakom vizurne marke uvizira se horizontalna nit nitnoga križa instrumenta i izvrši očitavanje na mjernoj uri – o_2 . Razlika očitavanja $o_2 - o_1$ korigira se za pomak ishodišne točke koji je nastao nagibom vertikalne osi. Pogreška kompenzacije može se izračunati po formuli:

$$\gamma'' = \rho'' \frac{(o_2 - o_1) \pm \Delta d}{d},$$

gdje su:

γ – pogreška kompenzacije

o_1 – očitavanje kod vertikalne glavne osi teodolita

o_2 – očitavanje kod nagnute glavne osi teodolita

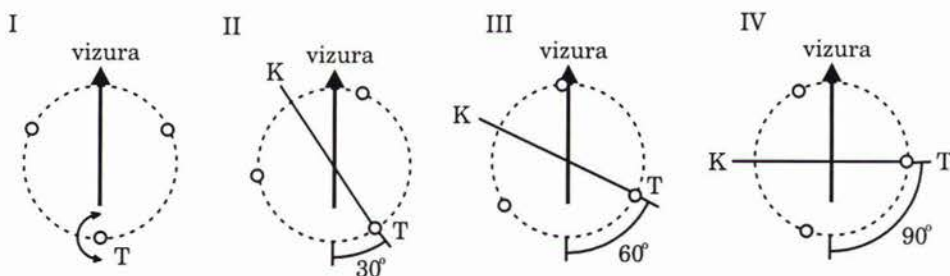
Δd – korekcija za pomak ishodišne točke

d – udaljenost teodolita od vizurne marke.

Rečeno je da kod nagiba vertikalne osi instrumenta dolazi do *visinskog pomaka ishodišne točke*, za koji je potrebno izvršiti korekciju rezultata. Konstruktivnim putem ishodišna točka vizurne linije dovedena je približno u vertikalnu os, pa se pri zakretu vertikalne osi mora voditi računa o visinskom pomaku ishodišne točke. Os rotacije nije horizontalna os durbina; korekcija se računa kao i kod nivelira (Novaković, Beban-Brkić 1989).

Što se tiče *predznaka* uzeli smo da je nagib pozitivan kad je očitavanje na vertikalnom krugu je $90^\circ + \alpha$, odnosno negativan kad je očitavanje $90^\circ - \alpha$.

Ispitivanja su se izvodila i kad vertikalna os nije bila nagnuta u vizurnoj ravnini već i za druge položaje vizurne ravnine u odnosu na karakterističnu, tj. kad je vizurna ravnina zatvarala s njom kut od 30° , 60° i 90° . Namjera je bila ispitati PK kod različitih komponenti nagiba vertikalne osi u vizurnoj ravnini. Dakle, mjerenja su izvršena po sljedećoj shemi:



Slika 1. – Položaj karakterističnih ravnina (TK) prema vizurnoj ravnini

3.1.2. Postupak s ciljem u ∞

Kod ovog postupka korišten je *kolimator* kod kojeg se vrhunjenjem njegove libele postiže horizontalna mjerna os. Taj kolimator detaljno je opisan u (Novaković 1996).

I ovdje se nagib vertikalne osi, za različite iznose i u različitim položajima vizurne ravnine u odnosu na karakterističnu ravninu, izvodio na način opisan u 3.1.1.

Postupak određivanja pogreške kompenzacije: kod horizontiranog instrumenta (nulti položaj) namjesti se na vertikalnom krugu očitavanje 90-00-00. Zatim se vijkom za fini pomak durbina uvizira horizontalna nit nitnoga križa kolimatora, mikrometrom instrumenta izvrši se koincidencija na skali mikrometra i očita; očitavanje $-o_1$. Kod usmjerenog durbina preko mjernog vijka T, namjesti se mikrometrom očitavanje $90^\circ \pm \alpha$ i izvrši koincidencija na skali mikrometra vijkom T (time se vertikalna os nagnula za $\pm \alpha$). Mikrometar se vrati na 0, a vijkom za fini pomak durbina izvrši se koincidencija. Očitavanje je na vertikalnom krugu 90-00-00. Ako postoji pogreška kompenzacije, horizontalna nit nitnoga križa instrumenta neće pogadati horizontalnu nit nitnoga križa kolimatora. Vijkom za fini pomak durbina izvrši se viziranje. Mikrometrom se koincidira i očita taj pomak na skali; očitavanje $-o_2$. Razlika očitavanja $o_2 - o_1$ pogreška je kompenzacije.

Kod ove metode nije potrebno korigirati rezultate mjerenja za pomak ishodišne točke, jer kod ∞ dalekih vizura taj pomak ne dolazi do izražaja.

To je metoda kojom je definitivno određena PK pomoću kolimatora. Međutim, postoji mogućnost (koja je isprobana) da se umjesto viziranja nitnoga križa kolimatora i očitavanja na vertikalnom krugu instrumenta, viziranje izvrši pomoću Gaussovog okulara kolimatora kao dodatka, a očitavanje da se izvrši na mjerneji uri Gaussovog okulara. Uspoređivanjem preciznosti rezultata ustanovilo se da je potonja metoda nešto preciznija, ali zato mnogo dugotrajnija (opažać se stalno mora premještati od instrumenta, gdje namješta nagib vertikalne osi, do okularnog dijela kolimatora, gdje se vrši viziranje i očitavanje). Kad se mjerenja obavljaju u dužem vremenskom razdoblju, postoji mogućnost djelovanja utjecajnih veličina koje mogu poremetiti stabilnost preciznosti mjerenja. Zato je odabrana metoda kod koje se vizira i očitava teodolitom, gdje opažać tokom čitava mjernog procesa ostaje na jednom mjestu.

4. Rezultati istraživanja pogreške kompenzacije uz statističku analizu

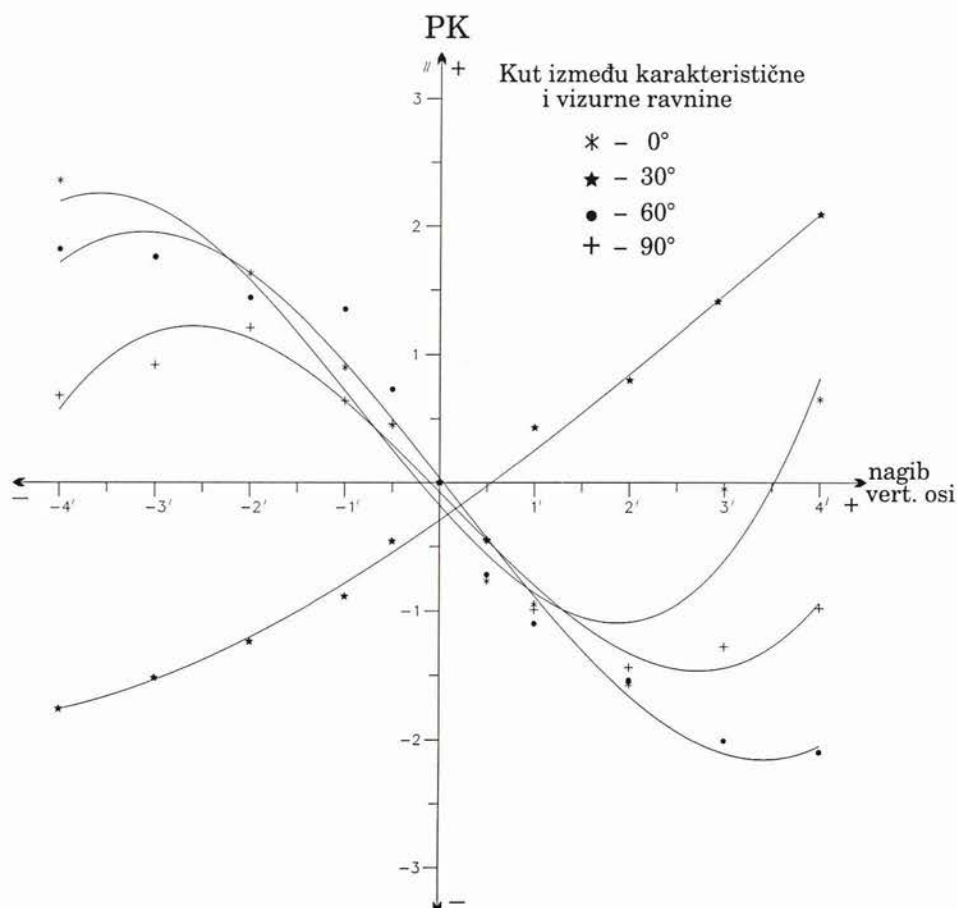
Pravu vrijednost pogreške kompenzacije ne možemo egzaktno odrediti, budući da je nemoguće izvršiti beskonačno mnogo mjerenja. U tom se slučaju osnovne karakteristike izračunavaju iz podataka samo jednog dijela osnovnog skupa – uzorka. Pri određivanju veličine uzorka treba ustanoviti koliko mjerenja treba izvršiti da bi se dana *razlika između aritmetičkih sredina* dvaju uzoraka (mjerenja kod nagnute glavne osi i mjerenja kod vertikalne glavne osi) pokazala signifikantnom. Za usporedbu aritmetičkih sredina uzoraka upotrebljava se, kod nepoznatih ali jednakih standardnih odstupanja, t-test (Serdar, Šošić 1981). Osim za određivanje veličine uzorka test je poslužio i za utvrđivanje postojanja pogreške kompenzacije. Naime, treba utvrditi da li su razlike u rezultatima mjerenja nastale zbog slučajnih pogrešaka mjerenja ili je ta razlika nastala zbog sustavnog utjecaja – pogreške kompenzacije. Također je t-test upotrebljen i pri ispitivanju signifikantnosti razlike rezultata dobivenih različiti-

tim metodama. U ovom radu bit će prikazano kako se na mnogo jednostavniji i brži način mogu izvršiti navedene analize; pomoću kriterija mjerne ponovljivosti odnosno kompatibilnosti rezultata (Benčić, Dusman 1995a, 1995b).

Pri ispitivanju pogreške kompenzacije u laboratoriju, korišteno je nekoliko teodolita. U ovom radu će biti prikazani rezultati mjerenja kod teodolita Theo 010B – br. 100309. Kod ovog instrumenta primjenjena je konstrukcija kompenzatora kao njihala sa prisilnim otklonom, odnosno kompenzator je optički sistem za preslikavanje podjele vertikalnog limba, na njihalu. Područje kompenzacije iznosi $\pm 4'$. Pogreška je određivana pri nagibu vertikalne osi instrumenta od: $\pm 0,5'$, $\pm 1'$, $\pm 2'$, $\pm 3'$ i $\pm 4'$, prema shemi prikazanoj na slici 1.

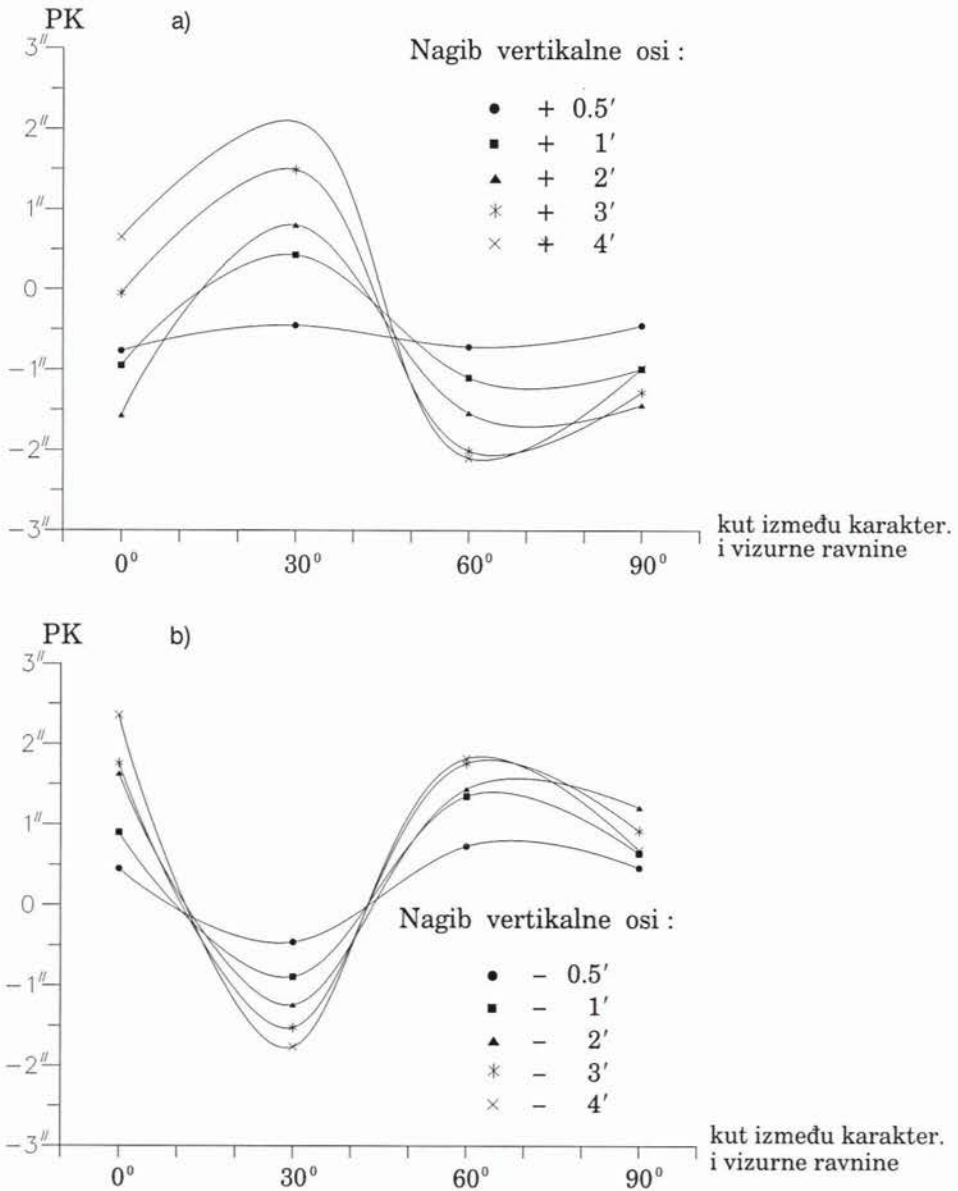
Rezultati ispitivanja PK prikazani su na više načina.

Na slici 2. prikazana je pogreška, određena pomoću kolimatora, ovisno o nagibu vertikalne osi, za različite kutove između karakteristične i vizurne ravnine.



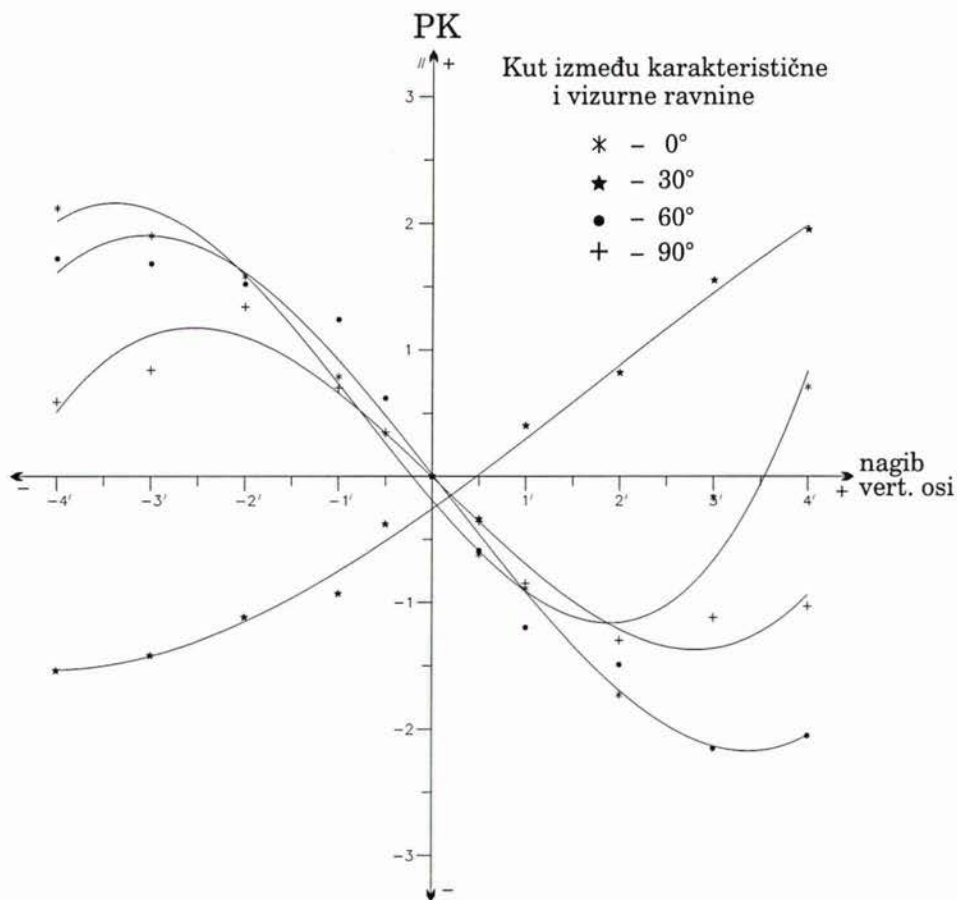
Slika 2. – Pogreška kompenzacije u ovisnosti o nagibu vertikalne osi, za različite kutove između karakteristične i vizurne ravnine – određivanje pomoću kolimatora

Na slici 3. prikazana je pogreška kompenzacije ovisno o kutu između karakteristične i vizurne ravnine za različite nagibe vertikalne osi (pozitivne i negativne).

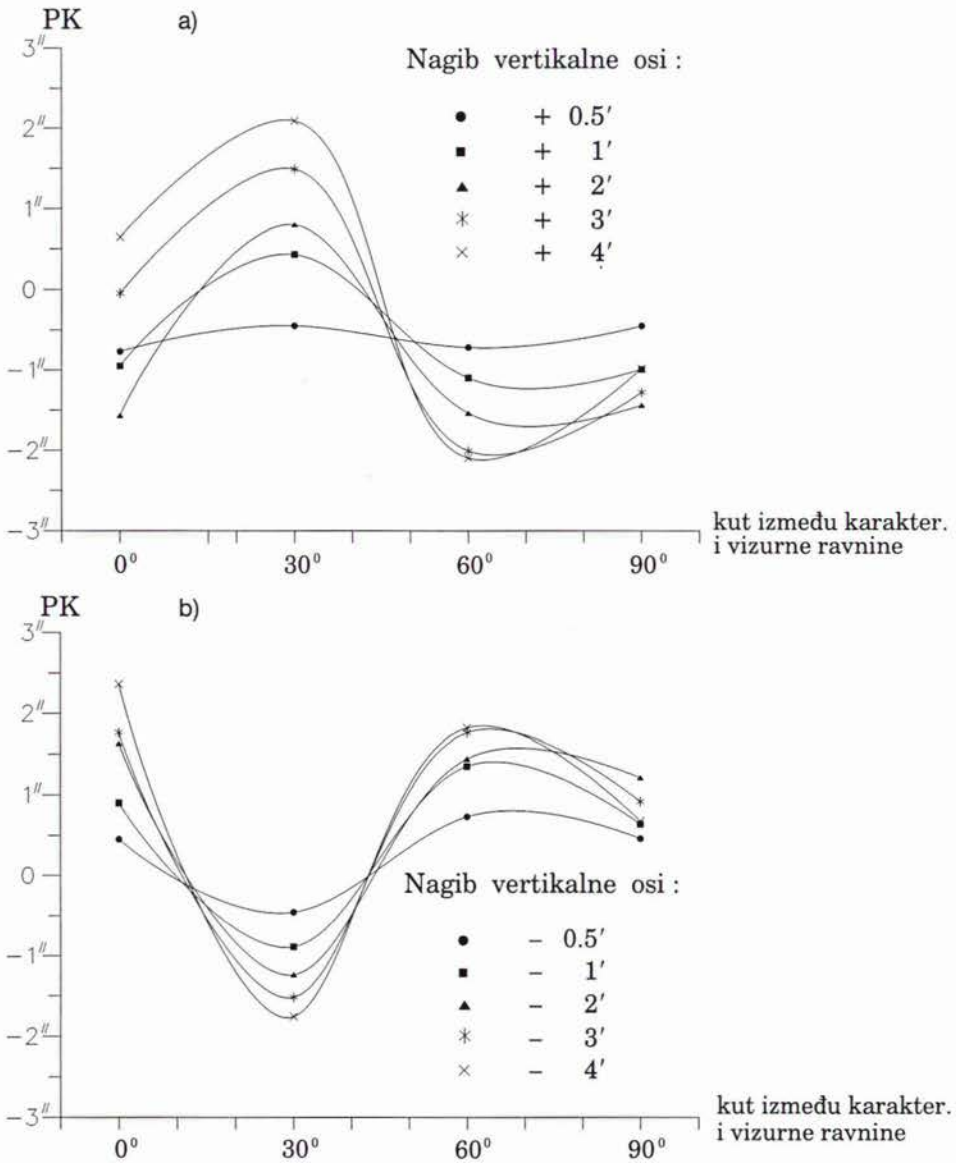


Slika 3. - Pogreška kompenzacije ovisno o kutu između karakteristične i vizurne ravnine za različite nagibe vertikalne osi (a) pozitivne, b) negativne) - određivanje pomoću kolimatora

Na slici 4. i slici 5. na iste je načine prikazana pogreška, ali određena na optičkoj klupi (udaljenost instrument – vizurna marka $d = 8\text{m}$). Rezultati su preračunati u kutne sekunde.

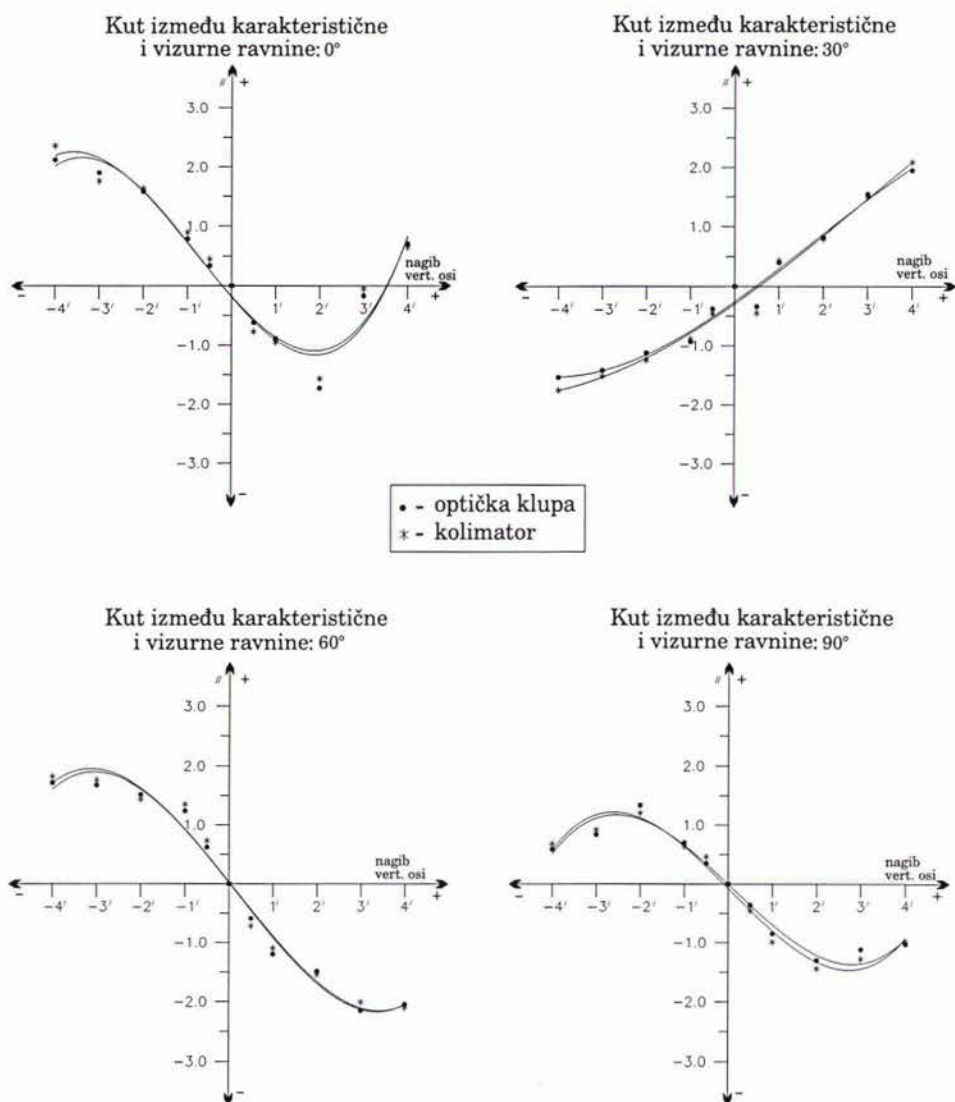


Slika 4. – Pogreška kompenzacije u ovisnosti o nagibu vertikalne osi, za različite kutove između karakteristične i vizurne ravnine – određivanje pomoću mikrometrički pomične vizurne marke



Slika 5. – Pogreška kompenzacije ovisno o kutu između karakteristične i vizurne ravnine, za različite nagibe vertikalne osi (a) pozitivne, b) negativne) – određivanje pomoću mikrometrički pomične vizurne marke

Radi preglednosti usporedbe metoda, na slici 6. posebno je prikazana pogreška kompenzacije ovisno o nagibu vertikalne osi za različite kutove između karakteristične i vizurne ravnine, određena objema metodama.



Slika 6. – Pogreška kompenzacije ovisno o nagibu vertikalne osi za različite kutove između karakteristične i vizurne ravnine – određena objema metodama

Funkciju koja najbolje povezuje zavisne veličine prikazane na grafovima, najbolje je izabrati promatranjem na ekranu računala. Za praktične svrhe dovoljno je poznavati najjednostavniji, linearni oblik, jer se tako može najbrže odrediti pogreška kompenzacije kod nagiba koji nas zanima. Za primjer, u tablici 1. (odnosi se na sliku 6.), uz funkcionalnu vezu ovisnih veličina prikazanih na grafovima, dana je i jednadžba pravca koji najbolje aproksimira danu funkciju.

Tablica 1. – Pogreška kompenzacije – funkcionalna veza (obje metode – sl.6.)

Kut karakt. ravnine	M E T O D E			
	VIZURNA MARKA		KOLIMATOR	
	Na grafu	Jednadžba pravca	Na grafu	Jednadžba pravca
0°	Poly 3	$y = -0,341x + 0,366$	Poly 3	$y = -0,349x + 0,401$
30°	Poly 3	$y = -0,464x - 0,091$	Poly 3	$y = 0,493x - 0,137$
60°	Poly 3	$y = -0,589x - 0,063$	Poly 3	$y = -0,597x - 0,034$
90°	Poly 3	$y = -0,323x - 0,076$	Poly 3	$y = -0,341x - 0,112$

Poly 3 – polinom trećeg stupnja

Sada možemo provjeriti:

- 1) Razlikuje li se PK kod pojedinih nagiba signifikantno za različite metode ili su razlike u pogrešci slučajne?
- 2) Razlikuju li se mjerenja PK kod pojedinog nagiba signifikantno od mjerenja kad nije bilo nagiba, tj. da li postoji pogreška ili je razlika slučajna?

Odgovore na ta pitanja možemo dobiti na dva načina:

- a) testiranjem hipoteze o razlici između aritmetičkih sredina dvaju uzoraka pomoću t-testa,
- b) pomoću kriterija mjerne ponovljivosti, odnosno kompatibilnosti rezultata.

Za primjer (tablica 2.) poslužiti ćemo se podacima ispitivanja koji su grafički prikazani na slici 6.

- 1) Ispitivanje signifikantnosti razlika između metoda određivanja PK:

Tablica 2. – Pogreška kompenzacije određena objema metodama

Nagib	0°		30°		60°		90°	
	Viz. marka	Kolimator	Viz. marka	Kolimator	Viz. marka	Kolimator	Viz. marka	Kolimator
- 4'	2,12"	2,36"	- 1,54"	- 1,76"	1,72"	1,88"	0,59"	0,68"
- 3'	1,90	1,76	- 1,42	- 1,52	1,68	1,76	0,84	0,92
- 2'	1,58	1,63	- 1,12	- 1,24	1,52	1,44	1,34	1,21
- 1'	0,79	0,90	- 0,93	- 0,89	1,24	1,35	0,70	0,64
- 0.5'	0,34	0,45	- 0,38	- 0,46	0,62	0,73	0,35	0,46
+0.5'	- 0,62	- 0,77	- 0,34	- 0,45	- 0,59	- 0,72	- 0,36	- 0,45
+1'	- 0,89	- 0,95	0,40	0,43	- 1,20	- 1,10	- 0,85	- 0,99
+2'	- 1,73	- 1,57	0,82	0,80	- 1,49	- 1,54	- 1,30	- 1,44
+3'	- 0,17	- 0,05	1,55	1,49	- 2,15	- 2,01	- 1,12	- 1,28
+4'	0,71	0,65	1,95	2,09	- 2,05	- 2,10	- 1,03	- 0,89

Pri svakom položaju vertikalne osi instrumenta izvršeno je $n=30$ mjerenja. Za svaki mjerni niz izračunata je varijanca, odnosno izračunata je:

$s_1 = 0,46''$ – standardna nesigurnost mjerenja PK dobivena metodom pomoću pomične vizurne marke,

$s_2 = 0,52''$ – standardna nesigurnost mjerenja PK dobivena metodom pomoću kolimatora.

a) pomoću t – testa ispitat će se da li se ove dvije metode određivanja PK razlikuju signifikantno. Prije upotrebe t-testa treba, pomoću F-testa provjeriti da li se varijance dobivene iz mjerenja različitim metodama signifikantno razlikuju.

Utvrđeno je da se varijance ne razlikuju signifikantno, pa se može koristiti t – test.

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_d}$$

gdje je:

$$s_d^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}$$

Slučajna varijabla t distribuirana je po Studentovoj t-razdiobi sa stupnjem slobode: $k = n_1 + n_2 - 2$.

Pritom su:

\bar{x}_1, \bar{x}_2 – aritmetičke sredine uzoraka,

n_1, n_2 – broj elemenata u uzorcima,

s_1^2, s_2^2 – nepristrane procjene varijanci osnovnih skupova na bazi njihovih uzoraka.

Tablica 3. – *Određivanje signifikantnosti između metoda određivanja PK (viz. marka – kolimator)*

Nagib	0°					30°					60°					90°				
	t	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	sign.	Vis. sig.	t	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	sign.	Vis. sig.	t	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	sign.	Vis. sig.	t	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	sign.	Vis. sig.
-4'	2,54	1,96	2,58	da	ne	2,33	1,96	2,58	da	ne	1,06	1,96	2,58	ne	ne	0,95	1,96	2,58	ne	ne
-3'	1,48			ne	ne	1,06			ne	ne	0,85			ne	ne	0,85			ne	ne
-2'	0,53			ne	ne	1,27			ne	ne	0,85			ne	ne	1,38			ne	ne
-1'	1,16			ne	ne	0,42			ne	ne	1,16			ne	ne	0,63			ne	ne
-0,5'	1,16			ne	ne	0,85			ne	ne	1,16			ne	ne	1,16			ne	ne
+0,5'	1,59			ne	ne	1,16			ne	ne	1,38			ne	ne	0,95			ne	ne
+1'	0,63			ne	ne	0,32			ne	ne	1,06			ne	ne	1,48			ne	ne
+2'	1,69			ne	ne	0,21			ne	ne	0,53			ne	ne	1,48			ne	ne
+3'	1,27			ne	ne	0,63			ne	ne	1,48			ne	ne	1,69			ne	ne
+4'	0,63			ne	ne	1,48			ne	ne	0,53			ne	ne	0,53			ne	ne

Vidimo da se rezultati određivanja pogreške tim dvijema metodama signifikantno ne razlikuju.

- b) do istih zaključaka može se doći brže i jednostavnije ako razlike rezultata provjeravamo pomoću kriterija ponovljivosti, odnosno kompatibilnosti rezultata. Rezultati su kompatibilni ako vrijedi:

$$C_r D(|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|) \leq k_u (|C_1| + |C_2|), \quad (1)$$

gdje je k_u – koeficijent kompatibilnosti, a C_i – procijenjena nepouzdanost srednje vrijednosti pojedinog mjernog niza, koja se računa prema izrazu:

$$C_i = t_i \frac{s_i}{\sqrt{n_i}}. \quad (2)$$

U ovom primjeru ($n_1 = n_2 = 30$, $P = 95\%$): $C_1 = 0,167$, $C_2 = 0,189$.

Kad je $C_1 \approx C_2 \Rightarrow k_u = 0,71$, pa se uvrštavanjem tih vrijednosti u formulu (1) dobije:

$$\begin{aligned} C_r D(|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|) &\leq 0,71 (0,167 + 0,189) \\ &\leq 0,25'' \end{aligned}$$

Ako uporedimo rezultate PK u tablici 2 vidimo da ni jedna razlika (vizurna marka – kolimator), kod svih nagiba i u svim karakterističnim ravninama, ne prelazi kritičnu razliku od $0,25''$, pa možemo zaključiti da su te dvije metode određivanja PK kod teodolita kompatibilne.

- 2) Odredimo do koje se vrijednosti PK ne razlikuju signifikantno od nule (nema PK).

- a) određivanje pomoću t-testa: na temelju standardnih odstupanja s_1 i s_2 i broja mjerenja, izračuna se, za svaku metodu posebno s_d . Zatim se u brojnik $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ (gdje je \bar{x}_1 aritmetička sredina niza mjerenja kod vertikalne glavne osi, a \bar{x}_2 pri nagnutoj glavnoj osi) probom uvrštavaju pojedine vrijednosti, dok ne dobijemo kvocijent koji je manji ili najviše jednak veličini t . Vrijednost u brojniku dat će iznos do kojeg se vrijednosti PK ne razlikuju signifikantno od nule. Te su vrijednosti:

- za pomičnu vizurnu marku do $0,23''$
- za kolimator do $0,25''$.

- b) računamo li sada pomoću kriterija ponovljivosti, odnosno kompatibilnosti rezultata koristeći formule (1) i (2), dobit ćemo sljedeće vrijednosti:

- za pomičnu vizurnu marku do $0,24''$
- za kolimator do $0,27''$.

Zaključujemo da se za sve izmjerene vrijednosti iznad tih veličina može potvrditi signifikantnost PK.

Usporedbom rezultata, pomoću metoda matematičke statistike, utvrđeno je da se te dvije metode određivanja pogreške kompenzacije signifikantno ne razlikuju, odnosno metode su kompatibilne. Dakle, što se tiče preciznosti, svejedno je koja se metoda koristi za tu vrstu ispitivanja. Upotrijebit će se ona koja je jednostavnija i brža, odnosno izbor ovisi o pomoćnom priboru koji nam stoji na raspolaganju.

Što se tiče rezultata ispitivanja pogreške kompenzacije kompenzatora teodolita Theo 010B-br. 100309 može se vidjeti (slika 3. i slika 5.) da pri pozitivnom nagibu vertikalne osi u karakterističnoj ravnini koja sa vizurnom ravninom zatvara kut od približno 45° , praktički nema pogreške kompenzacije. Isti je slučaj i pri negativnom nagibu u karakterističnim ravninama koje sa vizurnom zatvaraju kut od oko 10° i 45° . Kod ostalih teodolita čija je pogreška kompenzacije ispitivana rezultati su različiti od ovih, što znači da je za svaki instrument potrebno ispitati njegovu pogrešku kompenzacije.

5. Zaključak

Osnovni je zaključak da je prije primjene svakog geodetskog mjernog instrumenta, pri mjerenjima visoke točnosti, neophodno izvršiti provjeru njegovih funkcija, posebno ako su automatizirane, kao npr. funkciju kompenzatora. Ove pogreške su vrlo male, no njihov utjecaj na točnost mjerenja može biti značajan. Današnje stanje mjerne tehnike omogućuje mjerenje kuteva sa standardnim odstupanjem $0,1$ mgon ($0,3''$) (Brys 1995). Ako npr. dozvolimo sistematsku pogrešku kompenzacije od $0,1''$, dozvoljeni nagib vertikalne osi ne bi smio biti veći od $\approx 5''$. Budući da je osjetljivost alhidadne libele kod npr. ispitivanog instrumenta $20''$ (nesigurnost horizontiranja $\approx \pm 4''$), bilo bi preporučljivo, prije mjerenja vertikalnih kuteva ovim instrumentom, horizontiranje izvršiti pomoću kompenzatora. Prije svakog ponovljenog mjerenja kutova korisno je prema tome, pri mjerenjima visoke točnosti, izvršiti ponovno horizontiranje teodolita. Posebnu pažnju treba ovoj pogrešci pokloniti prilikom trigonometrijskog nivelmana najviše točnosti, kada se npr. kod približno horizontalne vizure i istovremenom obostranom mjerenju zenitnih kuteva pri povoljnim meteorološkim uvjetima, postiže visinska razlika s nesigurnošću od $\pm 0,3$ do $\pm 0,5$ mm na 200 m (to je $\pm 0,3'' - 0,5'' / 200$ m).

Pogrešku kompenzacije potrebno je ispitati u laboratoriju. Preporučuje se ispitivanja izvršiti metodom pomoću kolimatora, jer kod ∞ dalekog cilja ne dolazi do izražaja vertikalni pomak ishodišne točke nastao nagibom vertikalne osi, pa nije potrebno računati korekcije rezultata kao što je to slučaj pri ispitivanju na optičkoj klupi pomoću mikrometrički pomične vizurne marke. Osim toga, nije potrebno precizno namještanje zrcala na određenu udaljenost ni preračunavanje rezultata mjerenja iz linearnih u kutne veličine.

Pri analizi rezultata ispitivanja pogreške kompenzacije mogu se koristiti različiti statistički testovi. Preporučuje se primjeniti kriterije mjerne ponovljivosti i kompatibilnosti, jer su jednostavniji i brži od uobičajenih statističkih analiza.

LITERATURA

- Benčić, D. (1990): Geodetski instrumenti. Školska knjiga, Zagreb.
- Benčić, D., Dusman, F. (1995a): Pojam i značenje mjerne ponovljivosti i obnovljivosti. Geodetski list, 2, 107-120.
- Benčić, D., Dusman, F. (1995b): Mjerna kompatibilnost i usporedivost mjernih rezultata. Geodetski list, 4, 275-288.
- Brys, H. (1995): Theoretische Grundlagen der Refraktion beim trigonometrischen Nivellement höchster Genauigkeit. AVN, 2, 59-64.
- Gresch, E. (1969): Instrumentenbedingte Fehler beim arbeiten mit Kompensatornivelieren, Nationalkomitee für Geodasie und Geophysik der Deutschen Demokratischen Republik bei der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, III/15. Dissertation, Berlin.
- Novaković, G., Beban-Brkić, J. (1989): Pogreška kompenzacije nivelira s automatskim horizontiranjem i njeno ispitivanje. Geodetski list, 7-9, 255-266.
- Novaković, G. (1996): Ispitivanje funkcije kompenzatora geodetskih instrumenata. Disertacija, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Serdar, V., Šošić, I. (1981): Uvod u statistiku. Školska knjiga, Zagreb.

Compensation Error of Theodolite Compensator

ABSTRACT. This paper defines one of the errors in compensator function of the theodolite-compensation error. It also describes the methods for its determination in the laboratory. Along with results of testing, the comparison of methods referring to their accuracy and speed has been made by means of applying mathematical statistics, and some new criteria have also been used. The recommendations are given as well about possibilities of reducing the compensation error influence in measurement.

Key words: theodolite, compensation error, repeatability criterion

Primljeno: 1999-03-11