

TERENSKE METODE ISPITIVANJA GLAVNOG UVJETA NIVELIRA S KOMPENZATOROM

Gorana NOVAKOVIĆ — Zagreb*

SAŽETAK. U radu su opisane neke terenske metode ispitivanja, te rektifikacija glavnog uvjeta nivelira s kompenzatorom. Postavljen je opći izvod za metodu koja se najčešće primjenjuje. Ukazano je i na dodatne pogreške koje se pojavljuju pri ispitivanju, a predložena je i metoda određivanja jedne od njih.

1. UVOD

Kako bi se postigla određena točnost koja se zahtijeva pri mjerenju neke veličine, potrebno je, osim izbora instrumentarija, odabrati i metodu mjerenja kojom se ta točnost objektivno može postići. Analizom metode potrebno je otkriti sve izvore pogrešaka koji se pritom pojavljuju, a koji mogu utjecati na točnost mjerenja. To se naročito odnosi na mjerenja određenih veličina po metodi preciznih i visokopreciznih mjerenja. Postoje tzv. dominantne pogreške koje izravno određuju točnost mjerenja, odnosno ograničuju je, i one koje se mogu otkloniti: metodom rada, postavljanjem određenih uvjeta pri mjerenju, uvođenjem popravaka i određivanjem potrebne točnosti ispitivanja i rektifikacije instrumenta i pribora. Ako se traži veća točnost mjerenja, dolazi do izražaja i veći broj izvora pogrešaka. Pri procjeni može li pojedina pogreška imati nekog utjecaja na točnost mjerenja, treba imati na umu zajednički utjecaj svih pogrešaka. Naime, znatan broj sistematskih pogrešaka, gledajući pojedinačno, mogu se činiti beznačajne u odnosu na ukupnu točnost mjerenja, iz čega se zaključuje da se mogu odbaciti. Međutim, njihov zbroj može imati znatan utjecaj, pa bi njihovo odbacivanje bilo pogrešno (Činklović, 1983).

U nivelmanu, prvenstveno preciznom i nivelmanu visoke točnosti, od velikog je značenja utjecaj pogrešaka koje ovise o kvaliteti nivelira i njegovog ispitivanja i rektifikacije. Te pogreške moguće je učiniti neutjecajnim zadavanjem njihovih dopuštenih vrijednosti za traženu točnost niveliranja. Kako bi pogreške bile u dopuštenim granicama, potrebno ih je odrediti s određenom sigurnošću, što opet ovisi o točnosti metode kojom su ispitane.

* Mr. Gorana Novaković, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb.

U ovom radu ograničit ćemo se na prikaz pojedinih terenskih metoda određivanja jedne od pogrešaka vezanih uz nivelir i njegovu rektifikaciju, i to pogreške geodetske vizurne linije. Pritom, ukazat će se i na dodatne izvore pogrešaka koji, tokom rektifikacije, utječu na promjenu pogreške vizurne linije. Te pogreške također možemo ispitati i iz rezultata ukloniti uvođenjem popravaka ili postavljanjem određenih uvjeta točnosti.

2. GLAVNI UVJET NIVELIRA

Horizontalnost geodetske vizurne linije, pri vertikalnoj glavnoj osi, osnovni je uvjet nivelira. Odstupanje od tog uvjeta uzrokuje pogrešku ishodišnog položaja vizurne linije, odnosno pogrešku vizurne osi (PVO), koja, uz ostale pogreške, smanjuje točnost određivanja visinske razlike, naročito pri nejednakim udaljenostima nivelira od mjernih letava. Zato je neophodna kontrola instrumenta prije odlaska na teren, po mogućnosti u laboratoriju, a radi li se o mjerenjima veće točnosti i prije samog mjerenja, na terenu.

Teoretska osnova za analizu glavnog uvjeta nivelira s kompenzatorom iznesena je u članku (Novaković, 1992). U nastavku će se prikazati pojedine metode određivanja PVO, a koja će se od njih primijeniti u konkretnom slučaju, ovisi o zahtijevanoj točnosti mjerenja.

3. METODE ISPITIVANJA POGREŠKE VIZURNE OSI

Metode ispitivanja PVO možemo općenito podijeliti na one koje se primjenjuju:

- na terenu,
- u laboratoriju.

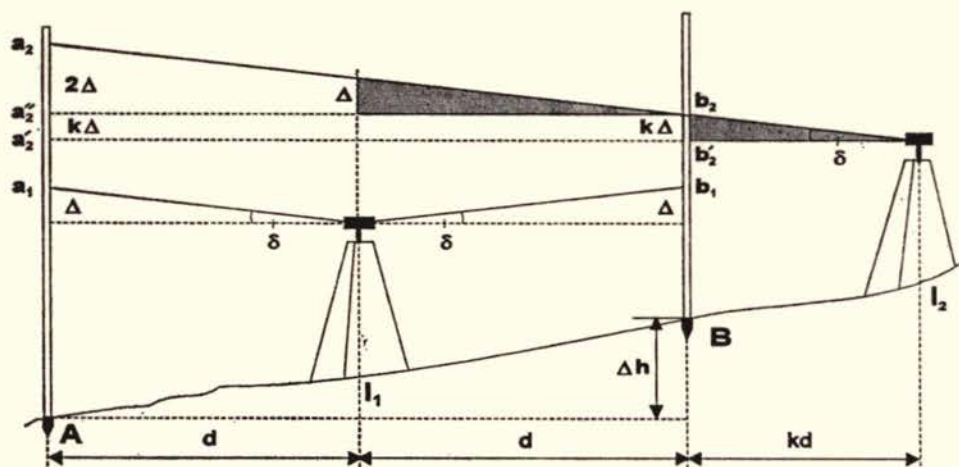
Kao što je već rečeno u uvodu, ovdje ćemo prikazati samo terenske metode, dok će laboratorijske biti opisane u jednom od sljedećih radova.

3.1. Metode ispitivanja i rektifikacija PVO na terenu

U udžbenicima i ostaloj literaturi u kojoj se prikazuju metode ispitivanja glavnog uvjeta nivelira obavezno se spominje metoda tzv. niveliranja »iz sredine« i »sa strane«. Među autorima (Macarol, 1961; Deumlich, 1982; Schofield, 1984; Benčić, 1990), prikazi metode donekle se razlikuju, i to najčešće ovisno o točnosti s kojom se želi odrediti PVO. Međutim, na temelju tih različitih primjera, može se postaviti jedan općeniti izvod koji će vrijediti za sve pojedinačne slučajeve.

Za primjenu tog postupka potrebna su dva »cilja« (mjerne letve). Na terenu se iskolče točke A i B, na udaljenosti $2d$ (40 do 60 m), na koje se postavljaju letve (sl. 1).

Nivelir se najprije postavi »u sredinu« (stajalište I_1), gdje se obave očitavanja a_1 i b_1 . Zatim se nivelir premjesti »sa strane« na udaljenosti kd (stajalište I_2), gdje je k proizvoljna veličina, i obave očitavanja a_2 i b_2 . Potrebno je ustanoviti postoji li PVO, izračunati njezinu veličinu i , ako je potrebno, obaviti rektifikaciju.



Slika 1. Niveliranje »iz sredine« i »sa strane«

Stvarna visinska razlika bit će:

$$\Delta h = (a_1 - \Delta) - (b_1 - \Delta) = a_1 - b_1 \quad \text{niveliranje iz sredine,}$$

gdje je Δ linearna pogreška očitavanja na udaljenosti d .

Zatim se izračuna:

$$\Delta h' = a_2 - b_2 \quad \text{niveliranje sa strane,}$$

pa ako je $\Delta h' \neq \Delta h$, znači da postoji PVO, koja uzrokuje linearnu pogrešku očitavanja na udaljenosti $2d$ (sl. 1):

$$2\Delta = a_2 - a_2',$$

gdje je:

$$a_2' = b_2 + \Delta h,$$

pa slijedi da je:

$$2\Delta = \Delta h' - \Delta h. \quad (1)$$

Pogreška vizurne osi je:

$$\delta = (\Delta/d) \rho. \quad (1a)$$

Rektifikacija: želimo li ukloniti PVO, potrebno je, za namještanje nitnoga križa na ispravno očitavanje, prvo izračunati veličinu odsječka $b_2 b_2'$. Na osnovi sličnosti zatamnjenih trokuta slijedi:

$$b_2 b_2' : kd = \Delta : d$$

$$b_2 b_2' = k\Delta$$

odnosno

$$k\Delta = (kd/d) \Delta. \quad (2)$$

Sa stajališta I_2 namjestimo očitavanje na mjernoj letvi A:

$$a'_2 = a_2 - (2\Delta + k\Delta). \quad (3)$$

Radi kontrole postupak se ponavlja. Da bi justaža bila što bolja, vizurne duljine pri ispitivanju trebaju biti približno jednake kao i one pri niveliranju. Ako su te udaljenosti između 20 i 40 m, i rektifikaciju treba provesti na toj udaljenosti.

Za preciznije određivanje PVO potrebno je uzeti u obzir utjecaj zakrivljenosti Zemlje i atmosfere refrakcije (Fialovsky, 1991; Benčić, 1990; Deumlich, 1982). Prema Kukkamäkiju, korekcija očitavanja letve (u metrima) dobije se prema izrazu:

$$\delta_{s,r} = -\Omega (d^2/2) = -d^2 \cdot 0,168 \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

gdje je Ω razlika između zakrivljenosti površine Zemlje $1/\rho_s$ i zakrivljenosti krivulje refrakcije $1/\rho_r$, a d je udaljenost mjerne letve u metrima. Zakrivljenost krivulje refrakcije sastoji se od dvaju dijelova; jedan dio $1/\rho_t$ ovisi o vertikalnom temperaturnom gradijentu dt/dh , a drugi dio $1/\rho_B$ o vertikalnom gradijentu barometrijskog pritiska dB/dh . Ukupna razlika zakrivljenosti iznosi:

$$\Omega = \frac{1}{\rho_s} - \left(\frac{1}{\rho_t} + \frac{1}{\rho_B} \right). \quad (5)$$

Kada su zakrivljenosti istog smisla, predznak zakrivljenosti krivulje refrakcije je pozitivan, a suprotnog smisla negativan. Zakrivljenosti se mogu izračunati po formulama:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_s} &= 0.157 \cdot 10^{-6} \\ \frac{1}{\rho_t} &= 0.933 \cdot 10^{-6} \frac{dt}{dh} \\ \frac{1}{\rho_B} &= 0.385 \cdot 10^{-6} \frac{dB}{dh} \end{aligned} \quad (6)$$

Prema podacima koje je dao Kukkamäki, ako se srednja dnevna vrijednost $dt/dh = -0.23^\circ \text{C/m}$ na 1,5 m iznad terena uzme kao temperaturni gradijent, a $dB/dh = -1 \text{ mm/11 m}$ kao gradijent pritiska, tada se iz jednadžbe (5) dobije numerička vrijednost iz jednadžbe (4). Ako se uzme da je gradijent pritiska $dB/dh = -1 \text{ mbar/8,25 m}$, tada se faktor s kojim se množi u izrazu za $1/\rho_B$ u jednadžbi (6) uzima kao $-0.289 \cdot 10^{-6}$.

U tablici 1. pokazane su neke vrijednosti korekcije $\delta_{s,r}$ (u mm), kojom moramo popraviti očitavanja na letvi prije određivanja pogreške vizurne osi. Temperaturni gradijent ovisi o lokalnim geografskim uvjetima i o vremenskoj promjeni meteoroloških uvjeta, pa prema tomu korekcija $\delta_{s,r}$ može nešto odstupiti od navedenih vrijednosti. Osim tog popravka, potrebno je također, ako su to precizna mjerenja, a pri manjim udaljenostima d , uvesti popravak zbog razlike između geodetske vizurne linije i njene asimptote

Tablica 1. Korekcije očitavanja zbog zakrivljenosti Zemlje i atmosfere refrakcije

d (m)	10	20	30	40	50	60	70	80
δ_s (mm)	-0.01	-0.03	-0.07	-0.13	-0.20	-0.28	-0.38	-0.50
δ_r (mm)	-0.01	-0.04	-0.08	-0.14	-0.22	-0.32	-0.44	-1.07
$\delta_{s,r}$ (mm)	-0.02	-0.07	-0.15	-0.27	-0.42	-0.60	-0.82	-1.57

(Novaković, 1992). Kod nivelira srednje i male točnosti nije potrebno uvesti prethodne korekcije.

Nakon obavljene rektifikacije, tj. namještanja očitavanja dobivenog po formuli (3), za kontrolu bi očitavanje na bližoj letvi B trebalo biti:

$$b'_2 = b_2 - k\Delta.$$

Međutim, može se dogoditi da to nije slučaj, a razlog je u sljedećem; kod durbina s teleobjektivom vizurna linija je, u općenitom slučaju, grana hiperbole čija zakrivljenost ovisi o veličini odstupanja nitnoga križa od pravca pomaka glavne točke leće za izoštravanje. Ako se rektifikacija izvodi pomakom nitnoga križa (što je najčešće), posljedica je promjena zakrivljenosti hiperbole, odnosno oblika vizurne linije, pa na bližoj letvi ne dobijemo izračunato očitavanje. Zato se ne preporuča pomicati nitni križ, a i zbog toga što vertikalne korekcijske vijke, kojima se pomak izvodi, treba oprezno odvijati i pravilno stegnuti, pa s vremenom, tim operacijama, može doći do njihovog oštećenja, te više ne bi osiguravali stabilan položaj nitnoga križa (Benčić, 1990). Zato se kod nekih nivelira justaža izvodi okretanjem zaštitnog stakla, u obliku klina, koji se nalazi ispred objektiva (npr. Zeiss — Opton Ni1, VEB Zeiss—Ni002), ili posebnim vijkom, pomakom kojeg se može promijeniti osnovni položaj kompenzatora ili položaj jednog od optičkih elemenata smještenih unutar optičkog puta (npr. Wild Na2). Međutim, i taj način ima jedan nedostatak. Naime, ako se pri rektifikaciji pomiče bilo koji optički element između pozitivnog člana objektiva i nitnoga križa, može doći do promjene u položaju i obliku vizurne linije. Ti utjecaji nisu dovoljno istraženi. Postoji mogućnost za takva ispitivanja, i to u laboratoriju, pomoću kolimatora s pomičnom markom.

Osim utjecaja promjene položaja nitnoga križa na oblik vizurne linije, treba napomenuti i to da ako se pri izoštravanju negativna leća ne kreće po pravcu, vizurna linija neće biti hiperbola nego nepravilna krivulja, pa je to dodatni razlog što na bližoj letvi ne dobijemo izračunato očitavanje. Zato je, nakon rektifikacije, potrebno ispitati oblik vizurne linije, o čemu će biti govora nešto kasnije. Što se tiče točnosti justiranja instrumenta, s obzirom na a priori zadanu točnost niveliranja, vidjeti Novaković (1992).

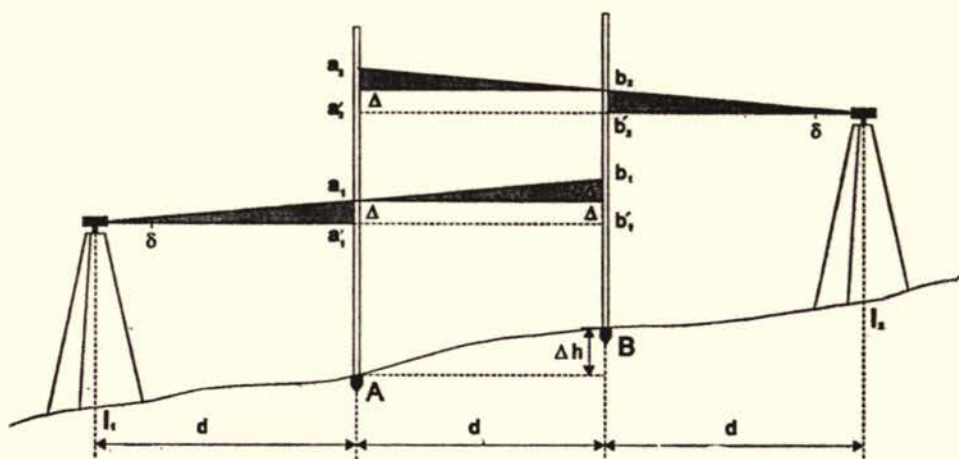
Veličinu k u navedenom izvodu biramo po volji, međutim ona je obično $0 < k \leq 1$. Kukkamäki (po kojemu se taj postupak najčešće i naziva) uzeo je za $k = 1$, pa je $k\Delta = \Delta$, odnosno pri rektifikaciji namješta se očitavanje $a'_2 = a_2 - 3\Delta$. Kod Schofielda (1984) veličina $k = d/2$, pa je $k\Delta = 0.5\Delta$,

tj. pri rektifikaciji se namješta očitavanje $a_2' = a_2 - 2.5\Delta$. Taj autor spominje i »pravilo za smjer« PVO koje glasi: ako je »pogrešna« visinska razlika (mjerenje sa strane) veća nego »prava« (mjerenje iz sredine), tada je smjer PVO prema gore i obrnuto. Međutim, ako u formulu (1), odnosno (2). uvrstimo izračunate veličine s odgovarajućim predznacima, za rektifikaciju, po formuli (3), uvijek ćemo dobiti ispravno očitavanje koje namještamo na letvi, pa »pravilo za smjer« nije potrebno pamtiti. Ukratko se može rezimirati; razlika između »pogrešne« i »prave« visinske razlike predstavlja linearnu pogrešku vizurne osi na udaljenosti $2d$. Za rektifikaciju se toj vrijednosti (2Δ) dodaje izračunata vrijednost $k\Delta$, i taj zbroj oduzme od očitavanja dobivenog na daljnjoj letvi pri mjerenju »sa strane«.

U slučaju u kojemu je $k = 0$ (što je moguće samo teoretski), a koji se najčešće spominje u udžbenicima, pri niveliranju »sa strane« instrument se postavlja vrlo blizu letve i u računanju zanemaruje utjecaj pogreške na očitavanje b_2 , što uz (u ovom slučaju) najveće promjene položaja leće pri izoštravanju smanjuje točnost određivanja PVO, pa se ta metoda primjenjuje tamo gdje se ne zahtijeva velika točnost. Shepherd (1983) spominje metodu tzv. recipročnog niveliranja. Tamo nema promjene u izoštravanju, što je prednost u odnosu na ostale metode, ali je veliki nedostatak u tomu što se mora mjeriti visina instrumenta, a što se može postići s ograničenom točnošću. Zato se i ta metoda koristi ondje gdje se ne zahtijeva velika točnost određivanja PVO.

Analizirajući te primjere, može se zaključiti da bi, što se tiče pogreške nastale zbog promjene položaja leće pri izoštravanju, najpogodniji bio slučaj u kojemu se ta promjena događa između d i $2d$. Takvu metodu (niveliranje samo »sa strane«) možemo naći kod Deumlich (1982).

Iskolči se duljina 45 do 60 m i podijeli na tri jednaka dijela. Mjerne letve postavse na središnje točke A i B, dok krajnje točke I_1 i I_2 služe kao stajališta instrumenta (sl. 2). Obave se očitavanja sa stajališta I_1 : a_1 i b_1 i sa stajališta I_2 : a_2 i b_2 .



Slika 2. Niveliranje »sa strane«

Budući da su zatamnjeni trokuti jednaki, stvarna visinska razlika između točaka A i B bit će:

$$\Delta h = (a_1 - \Delta) - (b_1 - 2\Delta) = (a_2 - 2\Delta) - (b_2 - \Delta),$$

a linearna pogreška očitavanja na udaljenosti d:

$$\Delta = 1/2 [(a_2 - b_2) + (b_1 - a_1)].$$

Želimo li ukloniti pogrešku vizurne osi, potrebno je namjestiti očitavanje:

$$a'_2 = a_2 - 2\Delta,$$

jednim od navedenih načina.

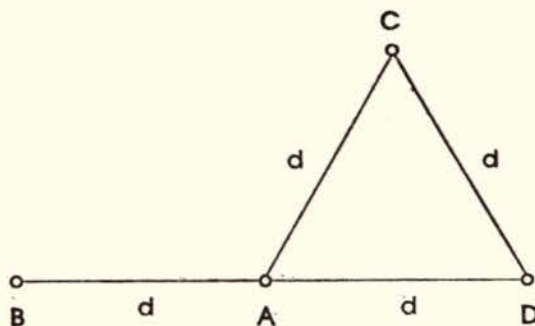
Ne želimo li računati Δ , iz prethodnih relacija uočavamo da je:

$$a_2 = a_1 - b_1 + b_2 + 2\Delta,$$

pa slijedi da je:

$$a'_2 = a_1 - b_1 + b_2.$$

Pogreška nastala zbog nepravilnog hoda leće za izoštravanje može se ispitati metodom Krasovskog (Činklović, 1983; Benčić, 1990; Fialovszky, 1991), kod koje se taj utjecaj određuje između različitih udaljenosti. Želimo li konkretno odrediti pogrešku nastalu zbog promjene u izoštravanju između d i 2d, možemo postupiti na sljedeći način: iskolče se četiri točke čiji je međusobni položaj pokazan na slici 3. Mjerenja moraju biti obavljena pod relativno konstantnim vanjskim uvjetima.



Slika 3. Ispitivanje hoda leće za izoštravanje između d i 2d

Najprije se, sa stajališta A, izmjeri visinska razlika između točaka B i C. Zbog jednakih udaljenosti mjernih letava od instrumenta nije potrebno pomicati leću za izoštravanje. Zatim se ponovno izmjeri visinska razlika između točaka B i C, ali sa stajališta D, s time da očitavanja moraju biti korigirana zbog utjecaja refrakcije i zakrivljenosti Zemlje (jednadžba 4), jer duljine vizura nisu jednake. Odstupanje tako dobivene visinske razlike od one dobivene mjerenjem sa stajališta A visinska je pogreška uzrokovana nepravilnim vođenjem leće za izoštravanje od udaljenosti d do 2d.

Do promjene PVO dolazi i promjenom temperature, pa treba nastojati da temperatura pri mjerenju bude približna onoj pri rektifikaciji. I pogreška kompenzacije, koja nastaje nagibom vertikalne osi nivelira, uzrokuje promjenu PVO, pa je potrebno što preciznije horizontirati instrument, odnosno pri niveliranju primijeniti postupak kojim se ta pogreška može eliminirati.

4. ZAKLJUČAK

Od svih izvora pogrešaka što se pojavljuju pri mjerenju geometrijskim nivelmanom određeni broj odnosi se na instrument i njegovo ispitivanje i rektifikaciju. Po definiciji geometrijskog nivelmana neophodno je zadovoljiti glavni uvjet nivelira. Za poznatu metodu ispitivanja glavnog uvjeta, tzv. niveliranje »iz sredine« i »sa strane«, koja se u pojedinim autora ponešto razlikuje, može se postaviti općeniti izvod.

Nehorizontalnost vizurne osi, koja ostane nakon obavljene rektifikacije, predstavlja pogrešku kod određenih nivelmanskih radova gdje udaljenosti prednje i zadnje letve od nivelira nisu jednake. Pogreška se može učiniti zanemarivom na taj način da se odredi njena dopuštena vrijednost za zadanu točnost niveliranja.

Pri ispitivanju i rektifikaciji glavnog uvjeta nivelira pojavljuju se dodatne pogreške koje utječu na promjenu pogreške vizurne osi. To su:

- pomakom nitnoga križa može se promijeniti oblik vizurne linije, pa se taj način rektifikacije ne preporuča;
- razlika između geodetske vizurne linije i geodetske vizurne osi izvor je pogreške pri kratkim udaljenostima (do 10 — 15 m) nivelira od mjerne letve. Otklanja se uvođenjem popravaka;
- nepravilni hod leće za izoštravanje predstavlja pogrešku samog instrumenta, a dolazi do izražaja pri nejednakim udaljenostima nivelira od mjernih letava. Metodom ispitivanja »sa strane« moguće je odrediti tu pogrešku i popravkom je otkloniti iz rezultata. Za danu točnost niveliranja može se odrediti dopuštena vrijednost promjene PVO uslijed nepravilnog hoda leće za izoštravanje;
- promjena PVO uslijed promjene temperature; s promjenom temperature dolazi do deformacije i derektifikacije nivelira, što se u prvom redu odražava na pogrešku vizurne osi, koja se mijenja približno razmjerno promjeni temperature. Pogreška se ispituje za svaki nivelir posebno, a može se učiniti zanemarivom tako da se odredi dopuštena vrijednost razlike između temperature pri mjerenju i pri određivanju PVO;
- atmosferska refrakcija i Zemljina zakrivljenost otklanjaju se uvođenjem korekcija očitavanja na letvi prije određivanja PVO;
- pogreška kompenzacije djeluje na promjenu PVO uslijed promjene nagiba vertikalne osi nivelira, tj. izražava nedovoljnu kompenzaciju utjecaja nagnute vertikalne osi. Zato je pri ispitivanju PVO potrebno što bolje vrhuniti doznu libelu. Ta je pogreška jedna od dominantnih, ali pri niveliranju može poprimiti karakter slučajne pogreške metodom rada koju predlaže Förstner (Benčić, 1990).

Osim tih pogrešaka, na točnost određivanja PVO utječe, kao uostalom i pri svim mjerenjima gdje se obavlja opažanje, slučajna i sistematska po-

greška viziranja. Slučajna pogreška viziranja je dominantna pogreška o kojoj izravno ovisi preciznost metode ispitivanja. Sistematska pogreška viziranja ovisi o određenim osobinama oka opažača, a konstantna je za jednake uvjete pri viziranju, pa se može učiniti zanemarivom tako da uvjeti pri viziranju na jednu i drugu letvu budu približno jednaki.

Za račun utjecaja tih pogrešaka a priori postoje formule po kojima se može izračunati udio svake pojedine na ukupnu srednju pogrešku mjerne veličine (Činklović, 1983).

LITERATURA

- Benčić, D. (1990): Geodetski instrumenti, školska knjiga, Zagreb.
Činklović, N. (1983): Metode preciznih geodetskih merenja, Građevinski fakultet, Beograd.
Deumlich, F. (1982): Surveying instruments, Berlin, New York.
Fialovszky, L. (1991): Surveying instruments and their operational principles, Akadémiai Kiadó, Budapest.
Macarol, S. (1961): Praktična geodezija, Tehnička knjiga, Zagreb.
Novaković, G. (1992): Teoretska osnova rektifikacije glavnog uvjeta nivelira s kompenzatorom. Geodetski list, 4, 489—496.
Schofield, W. (1984): Engineering Surveying 1, Borough Green, Sevenoaks, KENT TN 158 PH, England.
Shepherd, F. A. (1983): Engineering surveying, Thomson Litho Ltd, East Kilbride, Scotland.

FIELD TECHNIQUES OF DETERMINING THE PRINCIPAL CONDITION OF THE AUTOMATIC LEVELS

Some field techniques, used to determine and rectify the error of the line of sight, are described. The general derivation for mostly used method is made. The additional errors appearing during the rectification have been pointed at, together with the suggestion of the method used to determine one of the mentioned errors.

Primljeno: 1993-04-07