

UDK 528.482.3

Originalan znanstveni rad

## MJERENJE HORIZONTALNIH POMAKA NA VISOKIM OBJEKTIMA

Dr Zvonimir NAROBÉ — Zagreb\*

Geodetske metode mjerenja deformacija građevinskih objekata nalaze veću praktičnu primjenu uglavnom u poslijeratnom razdoblju. Postupci mjerenja sve se više i detaljnije razrađuju i u domaćoj stručnoj literaturi s područja inženjerske geodezije. Pri tome, nešto više prostora daje se opažanju vertikalnih pomaka (slijeganje). Međutim općenito, u mjerenju deformacija, pojavljuju se poteškoće veće pri opažanju horizontalnih pomaka. Na ovom području, sa širom praktičnom primjenom geodetskih metoda raste i potreba njihove daljnje obrade i usavršavanja.

Pri mjerenju horizontalnih deformacija u praksi se pojavljuju dva specijalna ekstremna slučaja, ovisno o međusobnom položaju točaka za koje se određuju pomaci. Jedan je kada se opažane točke nalaze približno na istom nivou u pravcu. U tom slučaju za mjerenje pomaka redovito se koristi poznata metoda aliniranja i pri direktnim opažanjem linearnog pomaka na pomičnu signalnu značku ili posredno opažanjem horizontalnog paralaktičkog kutnog otklona od nekog stabilnog orijentirajućeg pravca. Drugi je slučaj, koji će se ovdje detaljnije razmotriti, kada se opažane točke nalaze približno na istoj vertikali.

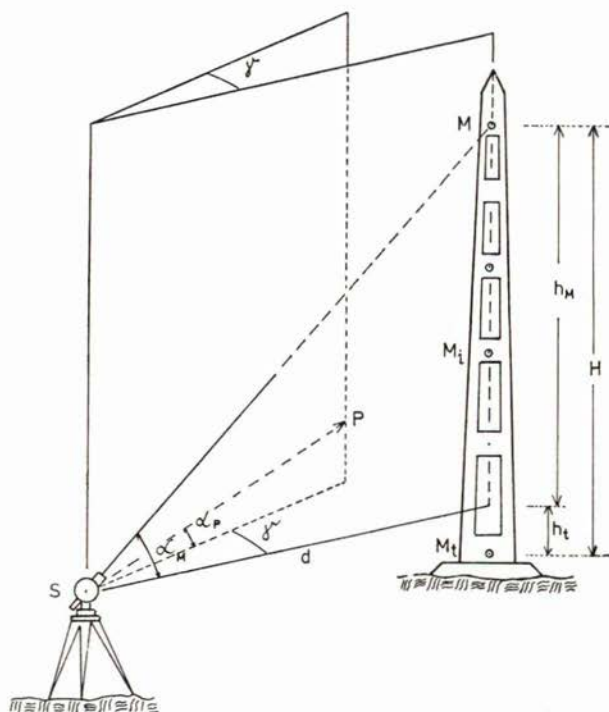
Mjerenje horizontalnih pomaka na visokim konstrukcijama (televizijski i drugi tornjevi, dalekovodni stupovi, dimnjaci i sl.) ili kontrola njihove vertikalnosti (određivanja nagiba) izvodi se prilikom izgradnje i prilikom tehničkog prijema, pa i u toku eksploatacije objekta sistematskim praćenjem deformacija. Određivanje horizontalnog pomaka sastoji se u mjerenju promijenjenog položaja točke na objektu pod djelovanjem različitih sila (npr. pokusna opterećenja) ili tokom vremena. Kontrola odnosno mjerenje (ne)vertikalnosti konstrukcije sastoji se u određivanju međusobnog položaja točaka koje se prema projektu trebaju nalaziti na istoj vertikali.

Kako su visoke konstrukcije redovito nepristupačnije, linearni pomaci na karakterističnim mjestima najčešće se mjere posredno, opažanjem kutnih otklona sa stabilnih točaka (S) koje se nalaze na stanovitoj udaljenosti od objekta. Postupak je sljedeći: teodolitom na točki S opaža se horizontalni kut  $\gamma$  između neke udaljene točke P i signalizirane točke (marke) M na objektu; opažanjem istog kuta  $\gamma$  pri promijenjenim uvjetima ili nakon nekog većeg vremenskog intervala dobiva se kutni otklon  $\Delta\gamma$  (sl. 1). Komponenta horizontalnog linearnog pomaka marke M, u smjeru okomito na kolimacionu ravninu instrumenta, računa se, zbog male vrijednosti pomaka, po formuli,

$$q = \frac{\Delta\gamma'' d}{q''} \quad (1)$$

\* Adresa autora: Prof. dr Zvonimir Narobe, Geodetski fakultet, Zagreb, Kačićeva ul. 26.

gdje je  $d$  — horizontalna udaljenost od instrumenta do opažane marke  $M$ .



Sl. 1

Da bi se dobio potpuni rezultat pomaka, treba ga izmjeriti s dva međusobno okomita stajališta instrumenta i izračunati po pravilu paralelograma:

$$Q = \sqrt{q_1^2 + q_2^2}. \quad (2)$$

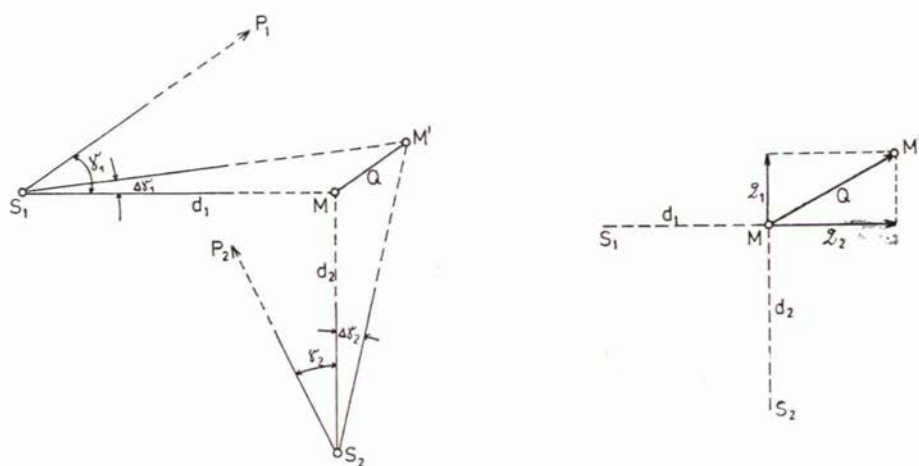
Pri ispitivanju vertikalnosti, na osnovi izmjenog međusobnog položaja dviju točaka, od kojih je jedna blizu vrha ( $M$ ) a druga kod temelja ( $M_t$ ), komponente i rezultirajući nagib konstrukcije određuju se po formulama,

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{q_1}{H}; \quad \operatorname{tg} \omega_2 = \frac{q_2}{H}; \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{H} \quad (3)$$

gdje je  $H$  — vertikalna udaljenost između opažanih točaka. Međutim, u praksi se rijetko mogu odabrati takve dvije točke, koje prema projektu trebaju biti na istoj vertikali, a da budu također i dobro vidljive sa stajališta instrumenta. Tada se signaliziraju točke koje prema projektu trebaju biti u istoj vertikalnoj ravnini. Postupak određivanja (ne)vertikalnosti je tada identičan, jedino treba stajalište instrumenta odabrati tako da se kolimaciona ravnina teodolita podudara s dotičnom vertikalnom ravninom.

Prilikom detaljnijih ispitivanja visokih konstrukcija, pomaci se mjere na više nivoa. Vizurne marke  $M_i$  postavljaju se na karakterističnim mjestima po cijeloj vi-

sini konstrukcije, pa se na taj način dobivaju i potpuniji podaci o deformacijama objekta. Kutovi  $\gamma$  se prilikom opažanja ne mjere odvojeno nego se orijentacioni i svi pravci na vizurne marke na objektu uključuju u jedan girus. Prikaz takvih mjerenja horizontalnih pomaka na praktičnom primjeru pokusnog opterećenja dalekovodnih stupova publiciran je u [1]. Poblježe će se razmotriti točnost te metode mjerenja horizontalnih pomaka, sa stanovništva njene praktične primjene (sl. 2)



Sl. 2

Na osnovi izraza (1) srednja pogreška izmjenenog linearnog pomaka bit će:

$$m_q^2 = \left(\frac{d}{\rho}\right)^2 m_{d\gamma}^2 + \left(\frac{q}{d}\right)^2 m_d^2 \quad (4)$$

gdje je  $m_{d\gamma}$  — srednja pogreška izmjenenog kutnog otklona  $\Delta\gamma$ ;  $m_d$  — srednja pogreška mjerenja dužine  $d$ . Budući da je veličina pomaka  $q$  veoma malena u odnosu na dužinu  $d$ , to se utjecaj posljednjeg člana u izrazu (4) može zanemariti. U praktičnim primjenama će redovito zadovoljiti točnost mjerenja dužine optičkim opažanjem na vertikalnu letvu (nitni daljinomjer). Srednja pogreška izmjenenog linearnog pomaka bit će dakle,

$$m_q = \frac{d m_{d\gamma}''}{\rho''} \quad (5)$$

Ako je npr. pomak opažan s udaljenosti  $d \doteq 50$  met., a srednja pogreška izmjenenog kutnog otklona iznosi  $m_{d\gamma} = \pm 4''$ , dobiva se  $m_q = \pm 1,0$  mm. Međutim utjecaj dužine  $d$  i točnosti mjerenja kutova  $m_\gamma$  na pogrešku pomaka detaljnije će se analizirati.

Jedna od pogrešaka pri ponovljenom opažanju kuta  $\gamma$  je razlika u centriranju teodolita. Ona dolazi do izražaja kada se ciklusi opažanja ostvaruju u većem vremenskom intervalu dok u nekim drugim praktičnim primjenama, npr. [1], nije prisutna. Međutim općenito, to je pogreška koja se izborom načina centriranja instrumenta (obični visak, optičko ili prisilno centriranje) može smanjiti do minimalnih iznosa.

Ovdje treba jedino napomenuti da na pogrešku pomaka  $m_q$  utiče samo komponenta ekscentriciteta u smjeru okomito na dužinu  $d$  i to s istim iznosom bez obzira na udaljenost do promatranog objekta.

Kako je poznato, instrumentalne pogreške pri mjerenju kutova eliminiraju se opažanjem u dva položaja durbina. Jedini izuzetak je pogreška uslijed nagiba vertikalne osi teodolita. Osobito za strmih vizura, ova pogreška može znatno uticati na točnost mjerenja, a to je slučaj razmatranoj primjeni. Drugi osnovni izvor pogrešaka pri mjerenju horizontalnih kutova jesu osobne (vlastite) pogreške opažanja i to pogreške viziranja čitanja.

Nagib verikalne osi teodolita ( $v$ ) uzrokuje pogrešku očitnog horizontalnog pravca u iznosu  $v \operatorname{tg} \alpha$ , gdje je  $\alpha$  vertikalni kut vizure. Zbog malog vertikalnog kuta  $\alpha$ , za udaljenu točku, pogreška se može zanemariti. Ako se dalje nagib  $v$  zamijeni sa srednjom pogreškom horizontiranja teodolita  $m_h$ , to će srednja pogreška razlike kutova  $\Delta\gamma$ , uzimajući u proračun dva spomenuta prevladavajuća izvora pogrešaka biti,

$$m_{\Delta\gamma}^2 = m_h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_M + m_0^2 \quad (6)$$

gdje je  $m_0$  — srednja pogreška vlastitog opažanja za razliku dvaju mjerenih kutova  $\gamma$ . Ako se gornji izraz uvrsti u (5) dobiva se,

$$m_q^2 = \frac{d^2}{\rho^2} m_h^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_M + \frac{d^2}{\rho^2} m_0^2 \quad (7)$$

Šira geodetska praksa, u pogledu točnosti instrumenata, najviše poptrebljava dvije bitno različite klase teodolita: sekundne teodolite s optičkim mikromentrom i minute teodolite sa skalom za očitovanje uz mogućnost procjene do  $0,1''$ . Osnovne tehničke karakteristike sekundnih teodolita jesu (prosječno): povećanje durbina  $V = 30 \times$ , vrijednost parsu (2 mm) alhidadne libele  $\tau = 20''$  a srednja pogreška opažanog pravca u dva položaja durbina iznosi približno  $m_p = \pm 2''$ . Kod minutnih teodolita  $V = 25 \times$ ,  $\tau = 30''$ ,  $m_p = \pm 5''$ . Pretpostavit će se daljnje razmatranje da se, u uvjetima praktične primjene, horizontiranje teodolita ostvaruje približno s točnošću od  $\pm 0,5\tau$ .

Princip jednakih utjecaja pogrešaka na rezultat u izrazu (7) dovodi do jednakosti:

$$0,5\tau \operatorname{tg} \alpha_M = 2m_p \quad (8)$$

Za opažanje horizontalnih kutova u jednom girusu, dobivaju se na osnovi navedenih podataka slijedeći vertikalni kutovi odnosno udaljenosti instrumenta od objekta:

sekundni teodoliti,  $\alpha_M \doteq 22^\circ$ ;  $d = 2,5 h_M$ ;

minutni teodoliti,  $\alpha_M \doteq 34^\circ$ ;  $d = 1,5 h_M$ ;

Razumljivo je da ovi rezultati, na osnovi usvojenih orijentacionih parametara, mogu poslužiti samo za uopćene zaključke. Osnovno je da pri mjerenju pomaka teodolitima manjeg podatka čitanja, ili u više girusa, stajalište treba odabrati na većoj udaljenosti od objekta.

Ovdje treba naročito upozoriti, da princip jednakih utjecaja daje samo informaciju o teoretski najpovoljnijem prirastu pogrešaka. Naime izraz (7) ipak ukazuje na oportunist daljnje smanjivanja dužine  $d$  pri mjerenju pomaka. Zato bi se navedene udaljenosti, sračunate na principu jednakih utjecaja, mogle smatrati gornjim granicama.

Lako je ustanoviti da prvi član s desne strane jednadžbe (7), po svojoj veličini, ostaje isti za svaku dužinu  $d$ . Smanjivanje ukupne pogreške proizlazi samo utjecajem drugog člana. Zbog karaktera priraštaja pogrešaka nije to neko znatnije povećanje točnosti mjerenja pomaka ali se ipak postiže stanoviti efekt skraćivanjem dužine to oko 20—30%. Osim toga, za veće vertikalne kutove, drugi član izraza (7) treba o bi precizirati. U pogreški  $m_v$  uključena je pogreška viziranja  $m_v$ , ovisna (u kutnoj mjeri) od povećanja durbina  $V$ :

$$m_v = \frac{30''}{V}. \quad (9)$$

U linearnoj mjeri pogreška viziranja proporcionalna je dužini vizure pa bi na izmjereni pomak djelovala s iznosom.

$$\frac{30''}{V} \frac{d}{\cos a}. \quad (10)$$

Dalje, zbog neudobnosti pri opažanju strmih vizura ima razloga da se pretpostavi, da će kutna pogreška viziranja (9) i pogrešaka čitanja biti veće, pa sve to upućuje da veoma strme vizure također treba izbjegavati. Uostalom i gabarit teodolita redovito dozvoljava opažanja s vertikalnim kutovima do oko 40°. U slučaju još strmijih vizura potreban je za opažanje instrument sa slomljenim okularom.

Na osnovi gornjih razmatranja, u praktičnoj primjeni mjerenja pomaka na visokim objektima, najpovoljnije udaljenosti instrumenta jesu od 1,2 h do 2,0 h, što odgovara vertikalnim kutovima između 27° i 40°.

Srednja pogreška horizontiranja  $m_h$  je u izraze (6) i (7) uvedena uz pretpostavku da postoji jednaka vjerojatnost za nagib vertikalne osi teodolita  $v$  u svim smjerovima. Međutim nije teško ustanoviti da rezultirajući utjecaj ima samo komponenta nagiba u smjeru okomito na kolimacionu ravninu kroz SM. Ovo proizlazi i iz poznate formule za pravu (istinitu) pogrešku kuta izmjenjenog između dvije točke (P i M):

$$w = v (\sin u_p \operatorname{tg} a_p - \sin u_M \operatorname{tg} a_M) \quad (11)$$

gdje su sa »u« obilježeni kutovi između kolimacione ravnine durbina i horizontalne projekcije (nagnute) vertikalne osi teodolita. Dakle osobito treba pripaziti na horizontiranje instrumenta u položaju kad je durbin usmjeren prema objektu (alhidadna libela redovito je ugrađena okomito na kolimacionu ravninu). Iz formule (11) slijede još dvije preporuke: povoljnije je da kut  $\gamma$  (vidi sliku) bude manji, dakle orijentacionu točku valja izabrati bliže smjera prema objektu, pri čemu naravno treba voditi računa i o mogućnosti djelovanja bočne refrakcije zbog blizine građevine; kod manjeg kuta  $\gamma$  bolje je da i orijentaciona točka bude neka udaljena visoka točka.

Kako je već na početku istaknuto, razmatranje je ograničeno na širu praktičnu primjenu mjerenja horizontalnih pomaka. Ipak je iz provedene analize vidljivo da će se bolji rezultati dobivati primjenom kraćih dužina uz upotrebu teodolita sa osjetljivijim alhidadnim ili jahaćim libelama. Najtočniji postupak bio bi uvođenje korektura za opažane pravce sa strmim vizurama, prema očitanoj položaju mjehura libele. Međutim takva razmatranja prelaze okvire ovog članka.

## LITERATURA

- [1] V. Medić: Geodetski radovi pri ispitivanju dalekovodnih stupova — Materijali IV. Kongres SGIGJ, Sarajevo 1968.
- [2] Z. Narobe: Mjerenja deformacija građevinskih objekata pomoću teodolita — Zbornik radov JUREMA 1976 svezak IV, mjerenja u građevinarstvu.
- [3] P. J. Brait: Geodezičeskie metodi izmerenija deformacij osnovanij i sooruzenij — Moskva 1965.
- [4] G. P. Levčuk: Kurs inženernoje geodezii — Moskva 1970.

## SAŽETAK

U članku se razmatra metoda mjerenja horizontalnih linearnih pomaka posrednim putem, opažanjem kutnih otklona. Sa stanovišta praktične primjene prikazan je postupak i točnost mjerenja pomaka točaka na visokim građevinskim konstrukcijama. Primjenom instrumenata različite točnosti, ukazuje se na najpovoljniju udaljenosti teodolita ozirom na vrijednost vertikalnog kuta vizure.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im diesem Aufsatz betrachtet man Bestimmung der linearen Verschiebungen mittels Winkelmesungen. Von der Standpunkt praktischen Anwendung wurde das Verfahren wie die Genauigkeitbestimmung der Punkte auf hohen Baukonstruktionen dargestellt. Durch die Anwendung der Geräte mit verschiedenen Präzisionsmöglichkeiten, werden die günstigsten Entfernungen von Standpunkt des Teodolites zur beobachteten Punkte, in bezug auf vertikale Winkel gegeben.

Primljeno: 1980—02—22