

TOČNOST MJERENJA POMAKA I DEFORMACIJA GRAĐEVINA

Zvonimir NAROBÉ, Zdravko KAPOVIĆ — Zagreb*

Trajnost i solidnost građevinskih objekata povezana je s veličinama njihovih deformacija. Zato je praćenje pomaka prisutno kod gotovo svih velikih građevina. Ako se radi o nosivim konstrukcijama, vrijednosti vertikalnih pomaka su najmjerodavniji pokazatelji izdrživosti i sigurnosti građevine.

Ispitivanje i izučavanje pomaka u prirodnim uvjetima eksploatacije objekta, jedan je od najefikasnijih putova do novih, savršenijih i smjelijih projektnih rješenja. Pri tome uporedno rastu složenost, obim pa i zahtjevi točnosti mjerenja pomaka.

Za određivanje pomaka i deformacija danas se široko primjenjuju metode mjerenja razrađene u inženjerskoj geodeziji. Njihova je velika prednost da se pomaci mogu opažati i u najtežim uvjetima, kada je pristup do mjernih mjesta otežan ili uopće nemoguć.

Mjerenje pomaka građevinskih objekata nesumnjivo spada među najtočnije geodetske operacije. Unatoč stanovitih specifičnosti, za ove radove ne postoje neki univerzalniji pravilnici kao za većinu klasičnih geodetskih područja. U praksi se najviše osjeća nedostatak normativa točnosti. Kao posljedica toga, u mnogim se primjenama traži točnost mjerenja koja nema dovoljno opravdanja. Govoreći općenito, prisutni su i različiti pristupi ovoj problematici pa i proturječni zahtjevi.

Pored površnih ili nestručno definiranih kriterija, u razmatranjima o potrebnosti točnosti, pojavljuju se i krajnosti. Prema jednoj, pomake treba mjeriti maksimalno mogućom točnošću. Prema drugoj, stupanj točnosti geodetskih mjerenja poistovjećuje se sa dozvoljenim odstupanjem pomaka (ili progiba) od njegove proračunske (očekivane) vrijednosti; ne upuštajući se u nepreciznost formulacije, takvo rezoniranje može dovesti i do ozbiljnih posljedica. Kompromisni i mnogo realniji zahtjev jest da — pogreške mjerenja trebaju biti zanemarivo male u odnosu na veličinu pomaka (kriterij beznačajnih utjecaja).

Opažanje pomaka na velikim građevinama izvodi se za praktične potrebe i u naučno-istraživačke svrhe. Kad se radi o naučno-istraživačkim ciljevima, zahtjevi točnosti su redovito veći. Međutim ovdje treba napomenuti da se eventualna prednost takve podjele, kad se radi o praktičnim ciljevima, rijetko ostvaruje. Naime isti rezultati mjerenja često se koriste u obje svrhe.

* Adresa autora: Prof. dr Zvonimir Narobe — Zdravko Kapović, dipl. inž. Geodetski fakultet Zagreb, Kačićeva ul. 26.

Praktičnim potrebama bit će uglavnom udovoljeno ako se na dotičnoj građevini ne pojavljuju kritično velike vrijednosti pomaka i deformacija. Naučno-istraživačkim ciljevima će se udovoljiti time da rezultati mjerenja istovremeno posluže za nove predodžbe o ponašanju takvih ili sličnih objekata. Potpunija saznanja o »radu« konstrukcije jesu najbolja podloga novih projekata, a empirijskim putem realnije se mogu ustanoviti i granice dozvoljenih veličina pomaka i deformacija.

Nesumnjivo, pitanje neophodne točnosti mjerenja pomaka je veoma važno. Potrebnu točnost treba utvrditi prema karakteru zadatka koji se riješava analizom izmjerenih pomaka. Pretjerano visoka točnost dovodi do neadekvatnog izbora instrumenata i metoda mjerenja, redovito skupljih i složenijih; to odmah povlači sa sobom i veće troškove i više vremena za izvršenje radova. S druge strane, nedovoljna točnost može obezvrijediti rezultate i u tolikoj mjeri da su oni praktički neupotrebivi.

Već iz gornjeg kraćeg izlaganja proizlazi da je pitanje optimalne točnosti određivanja pomaka kompleksnije naravi. Kod konkretnih primjena potrebno je, u datim uvjetima, uz ograničena sredstva i obim opažanja iskazati iznose pomaka uz istovremenu ocjenu njihove točnosti.

Posljednjih godina, problematici vezanoj uz točnost mjerenja pomaka i deformacija, prilazi se sa stanovišta teorije vjerojatnosti.

Neka je sa f označena apsolutna vrijednost pomaka. Za neophodnu točnost (donju granicu), svrsishodan je zahtjev da granična pogreška (dopušteno odstupanje) njenog određivanja Δ_f bude manja tj.

$$\Delta_f < f \quad (1)$$

Ako se dopušteno odstupanje Δ_f izrazi u jedinicama standardne devijacije odnosno srednje pogreške pomaka m_f , treba dakle biti udovoljeno nejednakosti

$$m_f \varepsilon < f \quad (2)$$

U ovom izrazu, ε je koeficijent koji zavisi o obliku distribucije i granicama pouzdanosti odnosno stupnju vjerojatnosti.

Poznato je da za pogreške mjerenja u geodeziji vrijedi zakon normalne razdiobe a interval pouzdanosti izražava se u obliku $+t m_f$, $-t m_f$, gdje je t koeficijent normalne razdiobe. Budući da u razmatranom slučaju treba računati sa obje strane distribucije to je $\varepsilon = 2 t$, pa će biti,

$$\frac{m_f}{f} < \frac{1}{2t} \quad (3)$$

Izbor intervala pouzdanosti zavisi o važnosti rezultata tj. potrebnoj vjerojatnosti za zaključke koji proizlaze interpretacijom podataka mjerenja. Što su zahtjevi veći to veći treba biti i stupanj vjerojatnosti odnosno interval pouzdanosti.

Pri mjerenju pomaka i deformacija, za najnižu vjerojatnost uzima se $P = 0,955$ što odgovara koeficijentu $t = 2$, ili prema (3) srednjoj relativnoj pogrešci određivanja pomaka,

$$\frac{m_f}{f} < \frac{1}{4} \quad (4a)$$

Posebno treba upozoriti na znak nejednakosti u izrazu (4a) tj. naglasiti da je to najniža potrebna točnost određivanja pomaka. Naime suglasno gornjem razmatranju, kod relativne točnosti 1 : 4, izmjereni pomak još uvijek bi se mogao interpretirati i kao pogreška mjerenja. Prema tome ako npr. stvarni pomak iznosi oko 6 mm to bi srednja pogreška njegova određivanja trebala biti manja od 1,5 mm.

Kod većih zahtjeva, za širi interval pouzdanosti, dosta često se koristi vjerojatnost $P = 0,997$ jer odgovara okrugloj vrijednosti koeficijenta $t = 3$. U tom slučaju, srednja relativna pogreška određivanja pomaka, prema (3), treba biti,

$$\frac{m_r}{f} < \frac{1}{6} \quad (4b)$$

Ukoliko se pomaci mjere na građevinama s novim projektnim rješenjima, onda interval pouzdanosti u pravilu treba odgovarati većoj vjerojatnosti P , kako bi pomak izvan njenih granica bio malo vjerojatan. Međutim kod već prije provjeravanih istih ili sličnih tipova konstrukcije, dopuštena odstupanja pomaka mogu se odrediti statističkom obradom rezultata. Sa više informacija o ponašanju takvih konstrukcija, također i interval pouzdanosti može biti preciznije utvrđen. Pri tome, prikupljanjem statističkog materijala, interval pouzdanosti se u pravilu sužava.

Kod određivanja vertikalnih pomaka, njihova se vrijednost dobiva po formuli

$$f = H_1 - H_i \quad (5)$$

gdje je H_1, H_i — visina marke (mjernog mjesta na građevini) u prvom odnosno i — tom ciklusu opažanja. Gornja formula se može prikazati i u obliku,

$$f = (H_0 + h_1) - (H_0 + h_i) \quad (6)$$

ili

$$f = h_1 - h_i \quad (7)$$

gdje su sada H_0 — visina početnog (nultog, stabilnog) repera izvan zone mogućih pomaka; h_1, h_i — visinska razlika između početnog repera i mjerne marke u prvom odnosno i — tom ciklusu opažanja.

Srednja pogreška određivanja pomaka bit će, prema teoriji pogrešaka,

$$m_f^2 = m_{h_1}^2 + m_{h_i}^2 \quad (8)$$

gdje su m_{h_1}, m_{h_i} — srednje pogreške izmjerenih visinskih razlika. Budući da je u svim ciklusima točnost mjerenja redovito ista,

$$m_{h_1}^2 = m_{h_i}^2 = m_h^2 \quad (9)$$

dobiva se

$$m_f = m_h \sqrt{2} \quad (10)$$

Povezujući dobiveni odnos pogrešaka sa izrazom (3), neophodna točnost mjerenja visinskih razlika u pojedinim ciklusima, treba biti,

$$m_h < \frac{f}{2t\sqrt{2}} \quad (11)$$

Uz prije navedene vjerojatnosti $P = 0,955$ i $P = 0,997$, odgovarajući izrazi za (4a) i (4b) sada su, za

$$t = 2, \quad m_h < 0,18 f \quad (12a)$$

$$t = 3, \quad m_h < 0,12 f \quad (12b)$$

Obzirom na točnost mjerenja, važno je razlikovati ravnomjerne od neravnomjernih pomaka. U prvom slučaju, ako se npr. radi o slijegavanju, građevina se kao cjelina premiješta u vertikalnom smislu; takvi pomaci obično ne izazivaju deformacije pa i ne utječu bitno na stabilnost objekta. Suprotno tome, kod neravnomjernih pomaka može doći do nagiba građevine, pojave pukotina, narušavanja stanovitog tehnološkog procesa i drugih neželjenih posljedica svojstvenih deformacijama.

Neravnomjernost je određena razlikom pomaka između dva mjerna mjesta (A i B) na građevini:

$$\Delta f = f_A - f_B \quad (13)$$

Prema teoriji pogrešaka

$$m_{\Delta f}^2 = m_{f_A}^2 + m_{f_B}^2 \quad (14)$$

uz

$$m_{f_A}^2 = m_{f_B}^2 = m_f^2 \quad (15)$$

bit će

$$m_{\Delta f} = m_f \sqrt{2} \quad (16)$$

a uzimajući u obzir (10),

$$m_{\Delta f} = 2 m_h \quad (17)$$

Po analogiji sa (3), za razliku pomaka vrijedilo bi

$$\frac{m_{\Delta f}}{\Delta f} < \frac{1}{2t} \quad (18)$$

što sa (17) daje,

$$m_h < \frac{\Delta f}{4t} \quad (19)$$

a odgovarajući izrazi za (12) sada su

$$t = 2, \quad m_h < 0,12 \Delta f \quad (20a)$$

$$t = 3, \quad m_h < 0,08 \Delta f \quad (20b)$$

Iz provedenog razmatranja proizlazi da je, polazeći sa stanovišta teorije vjerojatnosti, kao kriterij točnosti pri određivanju pomaka i deformacija, pogodno koristiti srednju relativnu pogrešku. Na takav zaključak, osim toga, upu-

čuju i neki tehnički propisi u građevinarstvu; npr. kod ispitivanja nosivih konstrukcija, dozvoljena odstupanja od teoretskih vrijednosti progiba i dozvoljene veličine zaostalih deformacija, iskazuju se u procentualnim iznosima progiba, dakle također u relativnom obliku.

Još jednom treba napomenuti da se izvedeni izrazi odnose na neophodnu točnost mjerenja pomaka. Prema tome, ako se umjesto (4a) i (4b) usvoji jednoznačni kriterij, to bi sa srednjom relativnom pogreškom

$$\frac{m_f}{f} = \frac{1}{5} \quad (21)$$

bila ustanovljena neophodna, dakle najniža točnost određivanja pomaka.

Međutim, tolerancije za odstupanja izmjerenih pomaka od njihove standardne (prosječne ili teoretske) vrijednosti odnosno, tzv. kritična odstupanja, uglavnom su manja od brojčane vrijednosti jednog cijelog pomaka. Neka se ta dozvoljena disperzija pomaka, obzirom na vrstu građevine, kreće između $50\% f$ i $25\% f$. Nije teško zaključiti da bi tada u izrazu (21), umjesto f trebalo uvrstiti $f/2$ odnosno $f/4$, čime se dobiva,

$$\frac{1}{20} < \frac{m_f}{f} < \frac{1}{10} \quad (22)$$

Ovim granicama bila bi sada ustanovljena optimalna (rentabilna) točnost određivanja pomaka. Odmah se može konstatirati da bi mjerenje pomaka s relativnom pogreškom

$$\frac{m_f}{f} < \frac{1}{20} \quad (23)$$

zadovoljavalo i najveće zahtjeve točnosti.

Zbog ispravnog tretmana, pojmovi neophodne i optimalne točnosti povezano s izvedenim kriterijima, detaljnije će se razmotriti.

Pomaci izmjereni neophodnom (najnižom) točnošću, a koji bi se prema zakonima teorije vjerojatnosti mogli interpretirati i kao pogreške mjerenja, najčešće, s aspekta sigurnosti dotične građevine, nisu problematični. Naime u tom slučaju očito se radi o pomacima koji su manji od njihove standardne vrijednosti; takvi pomaci redovito nisu sporni. Naprotiv, sumnju izazivaju pomaci koji su (znatno) veći od prosjeka, dakle samo oni sa jednog (a ne oba) kraja distribucije. Već samo ova okolnost dozvoljava primjenu nešto užeg intervala pouzdanosti ili veće relativne pogreške mjerenja, uz isti stupanj (namjenske) upotrebljivosti rezultata.

Druga okolnost u istom smislu proizlazi iz činjenice da je, na kapitalnim građevinama, mjerenje pomaka periodično. Na taj način, često će se već i prije pojave enormnog pomaka ova tendencija uočiti. Osim toga vrijednost sumnjivo velikog pomaka može se ponovljenim mjerenjem provjeriti.

Konačno, (pre)veliki pomaci redovito se ne pojavljuju izolirano. Na dotičnoj građevini ili njenom dijelu, povećani pomaci će se izmjeriti i na susjednim markama.

Gornje razmatranje upućuje na zaključak da je upotrebljivost podataka izmjerenih pomaka, osobito ako se radi o praktičnim potrebama, znatno veća. Dakle granice optimalne točnosti realno su niže od (22). Opravdana je konstatacija da se već sa srednjom relativnom pogreškom između

$$\frac{1}{5} > \frac{m_f}{f} > \frac{1}{10} \quad (24)$$

uz spomenute predostrožnosti, dobivaju kvalitetni podaci i da će takva točnost zadovoljiti u većem broju primjena.

Ukoliko se spomenutim postupcima poveća vrijednost izmjerenih pomaka, korisno se mogu upotrebiti i rezultati koji su po točnosti i ispod doljnje granice (21). Također, veći broj istovrsnih podataka, makar i manje točnosti, pogodan je materijal za analize i testove razrađene u matematičkoj statistici.

Usvajanjem srednje relativne pogreške kao parametra točnosti slijedi da,

- po veličini male pomake treba mjeriti apsolutno točnije a,
- veći pomaci mogu se mjeriti manjom apsolutnom točnošću.

Lako je zaključiti da će tražena relativna točnost u praktičnim primjenama biti lakše ili teže ostvariva. Lako ostvariva kad se radi o većim a teže ostvariva kad se radi o manjim pomacima. Npr. kod vertikalnih pomaka, točnost 1 : 10 lako je postići kad se radi o centimetarskim vrijednostima a veoma teško ako su pomaci manji od milimetra.

Nadalje, u praksi nisu rijetki slučajevi da se, na nekoj građevini, pojavljuju po veličini znatno različiti pomaci; ne samo periodično već i u istim ciklusima opažanja. Npr. kod nosivih elemenata konstrukcije, pomaci na sredini nosača mogu biti višestruko veći od pomaka na ležajevima.

Razumljivo da primjenu različite točnosti, dakle i različite postupke pri opažanju pomaka na istoj građevini, osobito u istim ciklusima mjerenja, treba izbjegavati. Isto tako ne bi bilo racionalno sva opažanja uskladiti sa točnošću koja proizlazi iz zahtjeva za najmanje pomake. Odgovore na ova pitanja treba potražiti u najpovoljnijem praktičnom rješenju.

Ukoliko se veća točnost mjerenja može postići bez teškoća, sa istim instrumentima i bez osjetnog gubitka vremena, tada je treba i primijeniti. Drugim riječima, ako rentabilnost i efikasnost radova to dozvoljava, pomaci će se mjeriti točnije, također kada to i gdje to nije neophodno.

Izuzetno, kod manjeg broja osobito važnih mjesta na građevini, takvi će se pomaci izmjeriti odvojeno, u posebnim ciklusima. Prikladnija mjesta za stajališta instrumenata, kraće vizure, manji broj mjernih mjesta, vremenski kraći ciklusi opažanja i sl. stvaraju povoljnije uvjete za veću točnost mjerenja.

Na kraju treba još napomenuti da pomaci manji od 1 mm najčešće nisu praktično značajni tj. nisu meritorni u pogledu sigurnosti građevine. Zbog toga, neka vrlo visoka apsolutna točnost mjerenja, koja bi rezultirala iz ovih razmatranja, za minimalne pomake, nije racionalna pa se i ne će primijenjivati.

LITERATURA

- [1] Mihelev D. Š. Runov I. V. Golubcov A. I.: Geodezičeskie izmerenija pri izučeníi deformacij krupnih inženernih sooruzenij, Nedra — Moskva 1977.
- [2] Boljšakov V. D. Levčuk G. P.: Spravočnoe rukovodstvo po inženerno-geodezičeskim rabotam, Nedra — Moskva 1980.
- [3] Narobe Z.: Mjerenje pomaka i deformacija građevinskih konstrukcija u svrhu provjere njihove tehničke ispravnosti, SGIG Naučno-tehničko savetovanje Inženjerska geodezija, Zbornik radova, druga knjiga — Mostar 1974.

SAŽETAK

Metode određivanja pomaka i deformacija razrađene u inženjerskoj geodeziji, danas se široko primjenjuju. Budući da za ovo područje ne postoje univerzalnije službene instrukcije i normativi, u praksi se često primjenjuje točnost mjerenja koja nema dovoljno opravdanja.

U članku se točnost određivanja pomaka građevina razmatra polazeći sa stanovišta teorije vjerojatnosti. Kao najprikladniji parametar točnosti koristi se srednja relativna pogreška. Ukazuje se na različite zahtjeve kad se radi o praktičnim svrhama ili naučno-istraživačkim ciljevima. Također, odvaja se neophodna (najniža potrebna), od optimalne (racionalne) točnosti mjerenja.

ZUSAMMENFASSUNG

Methoden über die Bestimmung Verschiebungen und Deformationen in der Ingenieurgeodesie werden heutzutage sehr breit angewandt. Da auf diesem Gebiet keine allgemeine amtliche Instruktionen und Normen gegeben sind, in der Praktik wird sehr oft mit Genauigkeit gemessen, die keine Rechtfertigung haben.

Genauigkeit der Bestimmung von Bauwerkverschleibungen ist hir von Standpunkt der Wahrscheinlichkeitstheorie betrachtet. Als zweckmässige Parameter für Genauigkeit ist mittlere relative Fehler angenommen. Weiter ist an die verschiedene Forderungen, ob sich um die praktische oder wissenschaftlich-vorschende zweke handelt angegangen. Ausserdem ist die notwendige (kleinsterforderliche) von optimalen (rationellem) Messunggenauigkeit getrennt.

Primljeno: 1983-08-15