

ANALIZA VISINSKOG OSMATRANJA VISOKIH KONSTRUKCIJA**ANALYSIS OF HEIGHT MONITORING OF TALL STRUCTURES**Milijana Stevanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast –GEODEZIJA I GEOMATIKA**

Kratak sadržaj – U radu su opisani geodetski radovi u postupku građenja i praćenja u eksploataciji visokih objekata i matematički model projektovanja i realizacije geodetskih mikromreža. Eksperimentalni dio rada odnosi se na primjenu metode Pelcera na podatke dobijene geodetskim osmatranjem visokog objekta „Kula Beograd”, u okviru projekta „Beograd na vodi”.

Ključne riječi: *Deformaciona analiza, metoda Pelcera, geodetska mreža, osmatranje*

Abstract – *This paper describes geodetic works in the process of construction and monitoring during exploitation of tall buildings, and mathematical model of design and realization of geodetic micro-networks. The experimental part refers to applying of the Pelzer method on data that have been measured by geodetic surveying of tall building “Kula Beograd” within the project “Beograd na vodi”.*

Keywords: *Deformation analysis, Pelzer method, geodetic network mreža, surveying*

1. UVOD

Zemljina površ i objekti, koji su na njoj izgrađeni, izloženi su stalnim većim ili manjim promjenama. Ukoliko te promjene, odnosno izazvane deformacije budu veće od dozvoljenih, može doći do narušavanja normalnog korištenja objekta, pa čak i do njegovog rušenja. Kako bi se spriječile negativne posledice, neophodno je vršiti geodetsko osmatranje objekta.

U posljednje vrijeme u svijetu, ali i kod nas sve češće se grade složeni građevinski objekti koji zahtjevaju primjenu geodezije u građevinarstvu. Osmatranje visokih objekata predstavlja poseban izazov s obzirom da se najčešće grade u užim gradskim područjima gdje je izgrađen veći broj objekata koji otežavaju geodetske radove.

2. VISOKI OBJEKTI I GEODETSKI RADovi U POSTUPKU GRAĐENJA I EKSPLOATACIJE VISOKIH OBJEKATA

U generalnom urbanistučkom planu grada Beograda, visokim objektima se smatraju svi komercijalni, poslovni i stambeni objekti viši od 32 m (maks. visina dozvoljena Generalnim planom Beograda 2021.). Van centra, gdje je izgrađeno tkivo manjih visina, visokim se smatraju objekti čija je visina dva ili više puta veća od okolnih [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Zoran Sušić, vanr. prof.

2.1. Geodetski radovi u postupku građenja i praćenja u eksploataciji visokih objekata

Prilikom izgradnje objekata, osnovni cilj inženjerskih radova je njihovo prostorno lociranje (pozicioniranje) i obezbjeđivanje da geometrija izgrađenog objekta bude saglasna projektovanoj u granicama tolerancije građenja i montaže [2].

Geodetski radovi za potrebe projektovanja i izgradnje objekata izvršavaju se u nekoliko faza:

- izrada programa geodetskih radova,
- izrada projekta geodetskih radova,
- realizacija projekta geodetskih radova i
- izrada elaborata o realizaciji projekta geodetskih radova.

Geodetski stručnjaci su osposobljeni da koristeći stečena znanja izvršavaju raznovrsne geodetske radove u inženjstvu (za potrebe projektovanja, izgradnje i eksploatacije raznih objekata), koji se mogu grupisati kao:

- uspostavljanje geodetske mreže objekta,
- prikupljanje podataka o zemljišnim oblicima i objektima i izrada geodetskih podloga za projektovanje,
- eksproprijacija zemljišta za potrebe izgradnje objekta,
- obilježavanje projektovane geometrije objekta,
- geodetska kontrola geometrije konstruktivnih elemenata,
- geodetska kontrola geometrije objekta u toku eksploatacije,
- geodetsko osmatranje objekta,
- oblikovanje građevinskog zemljišta projektovanim površinama,
- organizacija geodetskih radova i
- geodetsko snimanje izvedenog stanja [2].

Za svaki tip objekata postoje određeni inženjersko-geodetski radovi, koji zahtjevaju od geodetskog stručnjaka dobro teorijsko znanje i sposobnost kvalitetnog izvršavanja geodetskih mjerenja sa zahtjevanom tačnošću, obradu mjerenja i prezentovanje dobijenih rezultata. Prilikom gradnje visokih objekata, geodetski radovi se dijele na geodetske radove kod izgradnje podzemnog dijela objekata i geodetske radove kod izgradnje nadzemnog dijela objekata.

Geodetski radovi kod izgradnje podzemnog dijela zgrada i objekata su [2]:

- obilježavanje i kontrola geometrije temeljne jame,
- prenošenje i kontrola osa i visina u temeljnu jamu,
- obilježavanje i kontrola geometrije temelja, podruma i podzemnih spratova,
- prenošenje i kontrola osa na nulti montažni horizont,
- izrada geodetske mreže na nultom montažnom horizontu,
- obilježavanje i kontrola instalacija u podzemnom dijelu zgrada i objekata.

Geodetski radovi kod izgradnje nadzemnog dijela zgrada i objekata su:

- projektovanje geodetske mreže sa nultog na montažni horizont,
- prenošenje i kontrola osa sa nultog horizonta na aktuelni montažni horizont,
- obilježavanje i kontrola tačaka osnovnih i glavnih osa konstrukcije ili njenih elemenata sa geodetske mreže na tom horizontu,
- detaljno obilježavanje karakterističnih tačaka konstrukcije ili njenih elemenata sa fiksiranih osa ili sa geodetske mreže na tom horizontu [2].

3. MATEMATIČKI MODEL PROJEKTOVANJA I REALIZACIJE GEODETSKIH MIKROMREŽA

3.1. Ocjena tačnosti mjerenih veličina

Nakon što su završena mjerenja i izvršene popravke i redukcije mjerenih veličina u geodetskoj mreži, neophodno je da prije izravnjanja bude izvršena analiza tačnosti mjerenih veličina.

Na taj način je moguće otkriti i otkloniti veće grube greške, pa čak i sistematske. Za ocjenu tačnosti postoji nekoliko metoda, ali najčešću primjenu imaju:

- metoda ocjene varijansi iz istinitih grešaka i
- metoda ocjene iz odstupanja ponovljenih mjerenja [3].

3.2. Matematički model izravnjanja geodetskih mreža

U praktičnim primjenama najčešće se koriste sljedeće metode izravnjanja po metodi: posrednih mjerenja, uslovnih mjerenja, uslovnih mjerenja sa nepoznatim parametrima i posrednih mjerenja kada su parametri u određenim matematičkim uslovima [4].

3.2.1. Metod najmanjih kvadrata

Metod najmanjih kvadrata je metod na kome se zasniva izravnjanje geodetskih mreža. Osnovne komponente izravnjanja su: mjerene veličine, stohastički model, funkcionalni model, algoritam izravnjanja – primjena MNK, ocjene parametara, ocjena tačnosti i kontrola kvaliteta.

Tabela 1. Linearni funkcionalni i stohastički model posrednog izravnjanja

Linearni funkcionalni model	$v = A \cdot \hat{x} + f$
Stohastički model	$K_l = \sigma_0^2 \cdot Q_l$

Primjenom metode najmanjih kvadrata dobiće se:

- Normalne jednačine: $N\hat{x} + n = 0$;
- Matrica koeficijenata normalnih jednačina: $N = A^T P_l A$;
- Vektor koeficijenata slobodnih članova normalnih jednačina: $n = A^T P_l f$;
- Vektor ocjene nepoznatih parametara:

$$\hat{x} = -N^{-1}n = -Q_{\hat{x}}n[4].$$

Defekt geodetske mreže predstavlja nedostajući broj parametara, potreban za definisanje datuma geodetske mreže i zavisi od vrste mjerenih veličina. Datum geodetske mreže predstavlja minimalan broj parametara potrebnih za definisanje mreže u prostoru ili relativnog položaja mreže u odnosu na neki ranije definisani koordinatni sistem. Datum geodetske mreže definiše koordinatni sistem koji je određen koordinatnim početkom, orijentacijom koordinatnih osa i razmjerom. Osnovni datumski parametri mreže (stepeni slobode) su: translacije po koordinatnim osama (t_x, t_y, t_z), rotacije koordinatnih osa (r_x, r_y, r_z) i faktor razmjere (s). Prema načinu definisanja datuma, razlikuju se klasično definisan datum i datum definisan minimalnim tragom matrice kofaktora [3].

3.3. Metode identifikovanja grubih grešaka

Nakon izravnjanja, statističkim testovima se utvrđuje da li su u mjerenjima prisutne grube greške manjeg iznosa, tako što se uz neku unaprijed zadatu vjerovatnoću, potvrđuje, odnosno odbacuje postavljena hipoteza. U cilju uspješne identifikacije eventualnih grubih grešaka u mjerenim veličinama u geodetskim mrežama primjenjuju se globalni i lokalni statistički testovi [3].

4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U eksperimentalnom dijelu rada je izvršena deformaciona analiza nivelmanske mikromreže uspostavljene za potrebe geodetskog osmatranja visokog objekta „Kula Beograd“ u okviru kompleksa „Beograd na vodi“, prikazanog na sl. 1.



Slika 1. Planirani izgled objekta „Kula Beograd“ u okviru kompleksa „Beograd na vodi“

Nivelmansku mikromrežu čini 16 repera. Reperi R1, R2, R3, R4, R8, R9, R10, R11, OP11, OP12 i OP13 su postavljeni u podnožju stubova mikromreže, reperi SSLN i SSLU su postavljeni na ploči objekta koji se gradi, dok R32, R1962 i R5468 predstavljaju repere date geodetske mreže u blizini radilišta.

Na osnovu raspoloživih podataka mjerenja prvo je izvršeno izravnjanje geodetske mreže u tri epohe mjerenja, za mjesece februar, mart i april [5]. Izravnjanje mreže je sprovedeno po funkcionalnom i stohastičkom modelu posrednog izravnjanja primjenom metode najmanjih kvadrata. Za *a priori* standardno odstupanje usvojena je vrijednost $\sigma_0 = 1$. Prilikom izravnjanja, datum je definisan minimalnim tragom na repere R32, R1962, R5468, R2, R4, R8, R9, R10, R1, OP12, OP13. Deformaciona analiza je izvršena primjenom Pelcerove metode.

5.1. Ispitivanje stabilnosti repera metodom Pelcera za epohe februar – mart

Nakon utvrđivanja homogene tačnosti mjerenih veličina u obje epohe, ustanovljeno je da mreža nije podudarna, te da u skupu repera osnovne mreže postoje nestabilni reperi, kao i u skupu repera koji su stabilizovani na objektu. Rezultati procesa lociranja i pomjeranja osnovnih repera su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2. Lokalizacija nestabilnih repera i pomjeranja osnovnih repera mreže

Iteracija	1.	2.	3.	4.	Pomjeranje
Oznaka repera	θ_j^2	θ_j^2	θ_j^2	θ_j^2	d_i [mm]
R32	0,0	0,0	0,0	0,0	1,337
R1962	11,5	11,5	11,5	11,5	1,091
R5468	4,2	4,2	4,2	4,2	1,030
R2	278,7	2,5	16,6	-	-0,993
R4	68,9	3,1	3,1	3,1	-1,105
R8	91,1	5,4	5,4	5,4	-0,227
R9	14,1	14,1	14,1	14,1	1,337
R10	1,9	1,9	1,9	1,9	-0,002
R11	1,8	1,8	0,8	0,8	-0,227
OP12	0,4	0,4	0,4	0,4	-0,168
R1	616,9	-	-	-	-6,305
R3	15,8	15,8	-	-	-2,067
OP11	9,3	9,3	9,3	9,3	-0,369

Rezultati procesa lokalizacije i pomjeranja nestabilnih repera na objektu i repera osnovne mreže koji su prethodno već identifikovani kao nestabilni prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Lokalizacija nestabilnih repera na objektu i repera osnovne mreže koji su identifikovani kao nestabilni i magnitude njihovog pomjeranja

Iteracija	1.	2.	3.	4.	5.	Pomjeranje
Oznaka repera	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	d_i [mm]
R2	278,7	0,1	5,6	5,6	-	-0,993
R9	14,1	14,1	14,1	-	-	1,337
R1	622,6	-	-	-	-	-6,305
R3	15,8	15,8	-	-	-	-2,067
SSLN	13,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-1,805
SSLU	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	-1,905

U tabelama 2 i 3, posebno su istaknuti reperi sa maksimalnom vrijednošću srednjeg neuklapanja (θ_o^2) po iteracijama, odnosno reperi koji su identifikovani kao nestabilni.

Nakon pete iteracije izvršeno je ispitivanje podudarnosti preostalih repera mreže, te je ustanovljeno, da je i preostali reper na objektu SSLN nestabilan. Pretpostavka uzroka pomjeranja jeste da navedeni reper nije bio adekvatno zaštićen na gradilištu.

5.2. Ispitivanje stabilnosti repera metodom Pelcera za epohe februar – april

Kao i u prethodno sprovedenoj analizi, izvršeno je utvrđivanje homogenosti tačnosti opažanja u dvije epohe, te je, takođe, ustanovljeno da mreža nije podudarna. Utvrđeno je da postoje reperi koji su nestabilni u skupu repera osnovne mreže, ali i u skupu repera postavljenim na objektu.

Rezultati procesa lociranja i pomjeranja osnovnih repera su prikazani u tabeli 4, a rezultati procesa lokalizacije i pomjeranja nestabilnih repera na objektu i repera osnovne mreže koji su prethodno već identifikovani kao nestabilni, prikazani su u tabeli 5.

Tabela 4. Lokalizacija nestabilnih repera i pomjeranja osnovnih repera mreže

Iteracija	1.	2.	3.	4.	Pomjeranje
Oznaka repera	θ_j^2	θ_j^2	θ_j^2	θ_j^2	d_i [mm]
R32	0,0	0,0	0,0	0,000	1,351
R1962	11,5	11,5	11,5	11,5	1,106
R5468	4,2	4,2	4,2	4,2	1,044
R2	278,7	2,4	16,2	-	-0,979
R4	85,9	5,1	5,1	5,1	-1,235
R8	91,1	5,2	5,2	5,2	-0,213
R9	14,1	14,1	14,1	14,1	1,4
R10	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0
R11	1,8	1,8	0,8	0,8	-0,2
OP12	0,4	0,4	0,4	0,4	-0,2
R1	633,4	-	-	-	-6,3
R3	15,8	15,8	-	-	-2,0
OP11	9,3	9,3	9,3	9,3	-0,4

Tabela 5. Lokalizacija nestabilnih repera na objektu i repera osnovne mreže koji su identifikovani kao nestabilni i magnitude njihovog pomjeranja

Iteracija	1.	2.	3.	4.	5.	Pomjeranje
Oznaka repera	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	θ_o^2	d_i [mm]
R2	278,7	0,0	4,1	4,1	-	-0,979
R9	14,1	14,1	14,1	-	-	1,351
R1	639,2	-	-	-	-	-6,290
R3	15,8	15,8	-	-	-	-2,052
SSLN	13,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-1,886
SSLU	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	-2,000

U tabeli 4 i tabeli 5, posebno su istaknuti reperi sa maksimalnom vrijednošću srednjeg neuklapanja (θ_o^2) po iteracijama, odnosno reperi koji su identifikovani kao nestabilni.

Takođe, ustanovljeno je da je i preostali reper na objektu SSLN nestabilan.

5.2. Ispitivanje stabilnosti repera metodom Pelcera za epohe mart–april

Poslije sprovedenog utvrđivanja homogenosti tačnosti opažanjau obje epohe, ustanovljeno je da je mreža podudarna, odnosno da su svi reperi mreže u vremenskom periodu mart-april zadržali svoj položaj.

5.3. Analiza dobijenih rezultata deformacione analize

U okviru ovog poglavlja analizirani su rezultati dobijeni primjenom metode Pelcera za potrebe deformacione analize sprovedene za serije mjerenja februar-mart, februar-april i mart-april.

Prilikom prve dvije analize, za epohe februar-mart i februar-april, kao nestabilni reperi identifikovani su reperi R1, R2, R3 i R9 kao reperi osnovne mreže, te reperi SSLN i SSLU koje se nalaze na objektu. Najveće pomjeranje je ustanovljeno za reper R1 ($d=6$ mm) koji se nalazi u neposrednoj zoni gradilišta, kao i ostali nestabilni reperi. Za repere koji se nalaze na objektu SSLN i SSLU, i koje predstavljaju glavni fokus praćenja, ustanovljeno je pomjeranje od 2 mm. Pri sprovođenju treće analize, za vremenski period mart-april, utvrđeno je da je mreža podudarna u obje epohe, odnosno da u tom periodu nije došlo do znatnih pomjeranja repera.

6. ZAKLJUČAK

Deformaciona mjerenja i analiza geodetskim metodama važne su u ocjeni stabilnosti objekata u toku građenja i eksploatacije. Deformaciona analiza je naučna oblast koja se zasniva na ispitivanju pomjeranja kako različitih građevinskih struktura kao što su brane, mostovi, tuneli, visoki objekti, tako i površi Zemljine kore. Postala je neizostavan proces prilikom gradnje objekata. Periodično geodetsko osmatranje je veoma značajno, kako bi se na vrijeme identifikovala pomjeranja, te samim tim, pravovremenim reagovanjem spriječila oštećenja ili čak rušenje objekta.

U ovom radu prikazana je obrada geodetskih radova koji se sprovode u postupku građenja i praćenja u eksploataciji visokih objekata kao i matematički model projektovanja i realizacije geodetskih mikromreža.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazan je postupak utvrđivanja pomjeranja repera 1D mreže, postavljenih na visokom objektu „Kula Beograd” u okviru projekta „Beograd na vodi”, primjenom metode Pelcera.

Za tri serije mjerenja za mjesece februar, mart i april 2020. godine urađeno je izravnjanje mreže, te je zatim izvršena deformaciona analiza za vremenske periode februar-mart, februar-april i mart-april. Za vremenski period od februara do marta ustanovljeno je da je došlo do pomjeranja 6 repera mreže, od čega su 4 repera osnovne mreže i 2 repera koji se nalaze na objektu. Kao nestabilni, identifikovani su reperi osnovne mreže R1, R2, R3 i R9, te reperi SSLN i SSLU stabilizovani na objektu. Nakon izvršene analize za period od marta do aprila ispostavilo se da su svi reperi mreže stabilni, te samim tim da je i objekat stabilan, jer u tom periodu nisu identifikovana pomjeranja repera koji su postavljeni na objektu.

7. LITERATURA

- [1] Generalni urbanistički plan Beograda, Službeni list grada Beograda, (7.mart 2016.)
- [2] Ašanin, S. (2003): *Inženjerska geodezija 1*, Ageo d.o.o., Beograd.
- [3] Ninkov, T. (2012): *Projektovanje geodetskih mreža u inženjerskoj geodeziji (skripta)*, FTN, Novi Sad.
- [4] Mihailović, K., Aleksić, I. (2008): *Koncepti mreža u geodetskom premeru*, Privredno društvo za kartografiju Geokarta d.o.o., Beograd.
- [5] Geogis Konsultanti 2020: Geodetska mjerenja u postupku kontrole objekta „Kula“ u okviru projekta „Beograd na vodi“.

Kratka biografija:



Milijana Stevanović rođena je 1994. godine u Bijeljini. Diplomski rad na temu „Analiza efekata komasacije u K.O. Rastina“ na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu odbranila je 2017. godine