

**DEFORMACIONA ANALIZA BRANE „ŠELEVRENAC“**  
**DEFORMATION ANALYSIS OF THE „ŠELEVRENAC“ DAM**Tamara Stevanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – GEODEZIJA I GEOMATIKA**

**Kratak sadržaj** – U okviru rada teorijski su obrađene oblasti vezane za metode i koncepciju tehničkog osmatranja brana, uzročnike i vrste deformacija građevinskih objekata, formiranje deformacionog modela brane i deformacionu analizu. Eksperimentalni deo ovog rada zasnovan je na analizi deformacionih pojava, koja je vršena na bazi vektora pomeranja u vertikalnoj ravni.

**Cljučne reči:** Analiza deformacija, brana.

**Abstract** – In this project, areas referring to methods and conception of dam observation from a technical viewpoint are being theoretically revised including causes and types of construction structures buckling and compilation of a deformation dam model and deformation analysis. Experimental part of this project is based on deformation cases analysis samples which have been conducted taking into consideration movement vectors in vertical planes.

**Keywords:** Deformation analysis, Dam.

**1. UVOD**

Deformacija objekta jeste rezultat nekog procesa. Tehnike merenja sa kojima se danas raspolaze omogućuju merenje i analizu takvih procesa u svim njegovim aspektima. Važnost takvog pristupa saglasna je postojećem trendu u oblasti inženjerskog osmatranja hidrotehničkih objekata od koga se zahteva ocena ne samo geometrijskih promena objekta već dinamike procesa koja podrazumeva povezivanje uzroka pomeranja i fizičkih osobina objekta. Geodetske metode određivanja pomeranja tačaka na objektu se zasnivaju na upoređenju geodetskih merenja realizovanih u različitim vremenskim epohama [1].

**2. BRANE**

Brane (ili vodojaže), kao najveći i najznačajniji hidrotehnički objekti predstavljaju veštačke pregrade reka radi zadržavanja vode, zadržavanje nanosa i drugo. Brane i vodojaže ubrajaju se u usporne građevine. Vodojaža, pored usporavanja vode u smislu izdizanja nivoa vode, treba da stvori akumulacioni prostor (veštačka jezera) u kome se skladišti voda da bi poslužila za dopunu deficita u vodi u nekom intervalu vremena. U tim jezerima zadržava se voda koja bi inače oticala normalno [2].

**2.1. Glavne osobine brane**

Glavne osobine hidrotehničkih objekata po kojima se razlikuju od ostalih objekata visokogradnje i niskogradnje

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Zoran Sušić, docent.**

su: stalno ili povremeno delovanje vode na objekat, projektovanje ovih konstrukcija je složenije i zahteva detaljne istražne radove i podloge, izgradnja ovih objekata je znatno složenija jer zahteva kvalitetno izvođenje u otežanim uslovima kao što je građenje pod vodom i to vrlo često tekućom (reka), građenje u oblastima gde nema saobraćaja i ostale komunikacije, građenje u krajevima sa nepovoljnim klimatskim uslovima. Ovi radovi se često izvode više godina. Statička i funkcionalna sigurnost mora biti velika, jer posledice od njihovog rušenja mogu da budu katastrofalne a u pogledu ekonomskih zahteva, ovi objekti su vrlo skupi [3].

**2.2 Osnovni elementi brane**

Osnovni elementi brane su: temelj, telo brane, temeljni isput, neprelivni deo, evakuacioni organ, umirivač energije, kruna brane, drenažni sistem, zastor, nanos i akumulacioni basen [4].

**2.3 Klasifikacija brana na tipove**

Prema načinu prenošenja opterećenja, brane mogu biti gravitacione, lučne ili kontraforne. Lučne prenose opterećenje na bokove stena, za razliku od gravitacionih koje najvećim delom prenose na podlogu. Dok kontraforne prenose opterećenje preko ploča i lukova na vertikalne kontrafore a zatim na podlogu. Brana je stabilnija i otpornija ako ima veću masu. Prema materijalu od kog su sagrađene, delimo ih na nasute zemljane brane, drvene brane, brane od kamenog nabačaja, betonske brane, armirano–betonske brane, metalne brane itd. [5].

**2.4 Nasute brane**

Nasute brane se sastoje od potpornog tela i sistem za ostvarenje vododrživosti. Grade se od priručnog materijala (prahovi, glina, pesak, šljunak, drobljeni kamen/stena) [7].

**2.5. Vrste deformacija**

Osnovni pokazatelji za interpretaciju rezultata merenja su karakter, smer i veličina pomeranja i deformacija. Delimo ih prema karakteru na ravnomerna i neravnomerna pomeranja, te elastične i plastične deformacije, prema promeni smera na horizontalne i vertikalne, a prema veličini na neopasne, tolerantne, ozbiljne i kritične [3]. Deformacije objekta mogu biti: kratkotrajne, srednje ili dugotrajne zatim reverzibilne ili nereverzibilne i kombinacije prethodnih [7].

**3. VISINSKA OSNOVA – REPERI ZA PRAĆENJE SLEGANJA I DEFORMACIJE OBJEKTA**

Reperi, tokom dužeg niza godina, usled dugogodišnjeg sleganja tla, menjaju svoj visinski položaj [6]. U praksi za merenje visinske osnove koriste se osnovni i radni reperi [3].

### 3.1. Osnovni reperi

Osnovni reperi se postavljaju van buduće zone deformacija tla, na stabilnom tlu u cilju da im se obezbedi postojanost visinskog položaja. Uspešni rezultati merenja sleganja i deformacije objekta zavise od stepena nepomerljivosti polaznih repera [3]. Očuvanost osnovnih repera može se obezbediti primenom materijala kao što su: armirani beton, metalne cevi zaštićene antikoroziivnim sredstvima itd. Pri izboru temelja za repera najveća prednost daje se stenama [7].

### 3.2. Radni reperi

Radni reperi obezbeđuju prave informacije o ponašanju brane, a ako je potrebno i okolnog terena. Tačke objekta moraju biti dostupne za merenje konvencionalnim geodetskim metodama. Reperi za osmatranje vertikalnih pomeranja po pravilu se postavljaju:

1. U kruni brane (najmanje tri) ili u određenom broju profila;
2. Na svakoj bankini u određenom broju profila;
3. Na terenu uz bokove brane u pravcu bankine na 1 m horizontalnog rastojanja od kontakta brane sa terenom [3].

## 4. MERENJE VERTIKALNIH POMERANJA

Za određivanje vertikalnih pomeranja primenjuje se: geometrijski nivelman, hidrostatički nivelman, trigonometrijski nivelman, fotogrametrijski i stereofotogrametrijski metod [3]. Hidrostatičkim nivelmanom se dobija veća tačnost nego nivelmanom visoke tačnosti ali se iz ekonomskih razloga ne nalazi u široj primeni [3].

Geometrijskim nivelmanom određuju se visinske razlike između dva bliska repera, pomoću horizontalne vizure koja se ostvaruje nivelmanskim instrumentom (nivelirom) i čitanjem odsečaka na dvema vertikalno postavljenim letvama. Razlika između čitanja letvi, rezultira visinskom razlikom između dve tačke dok suma ovako dobijenih visinskih razlika, rezultira visinskom razlikom ( $\Delta H$ ) između stalnih nivelmanskih tačaka (repera) [16]. Nivelmansku mrežu čine nivelmanski vlakovi koji povezuju repera postavljene na terenu van očekivanog uticaja napona i deformacija, sa reperima postavljenim na samom telu objekta i njegovoj neposrednoj okolini [3].

### 4.1 Tehnički nivelman povećane tačnosti

Ovaj metod se može primeniti za objekat čija prosečna brzina sleganja prelazi 5 mm mesečno. Iz ovog proizilazi da se ovaj metod ne može primeniti kada se objekat preda eksploataciji, jer je tada prosečna brzina sleganja znatno manja. Opažanja objekata imaju svrhu da se: odredi stvarna veličina sleganja i njene promene tokom vremena kako u periodu građenja tako u periodu eksploatacije. Pošto su na ovakvim terenima brzine sleganja velike primenjuju se dve vrste nivelmana. Najpre tehnički nivelman povećane tačnosti sve dok ne nastupi period uslovne stabilizacije (<5mm/mesec). Dalje se nastavlja sa preciznim nivelmanom sve do pune stabilizacije (1-2 mm/godinu) [3].

### 4.2. Nivelman visoke tačnosti i precizni nivelman sa kratkim vizurama

Nivelman visoke tačnosti primenjuje se prvenstveno u onim slučajevima, kada se mere sleganja monumentalnih i naročito odgovornih zgrada i objekata, kao i kada je

neophodno da se u kratkom roku vremena (1-3 meseca) odredi brzina sleganja objekta na kome su se pojavile naprsline ili druge deformacije. Dok se precizni nivelman koristi kada deformacije nisu velike (nekoliko milimetara u godini). Visinski položaj repera na koje se oslanja merenje sleganja kratkim vizurama treba da su praktično nepomerljivi u toku celokupnog vremena opažanja. Njihovu postojanost treba proveriti pri svakom ciklusu nivelanja, a naročito u proleće i jesen. Za naročito tačna merenja visinska osnova mora da se sastoji od najmanje tri osnovna repera [3].

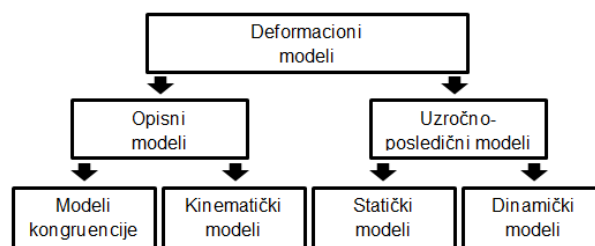
### 4.3 Način stabilizacije tačaka deformacionog modela

Geodetska merenja daju kompletniju sliku nastalih deformacija ukoliko je postavljen što veći broj tačaka i ako su pravilno raspoređene na očekivanoj deformabilnoj površini. Takođe, treba postaviti i drugu skupinu pravilno raspoređenih tačaka, koje će za ceo period ovog merenja biti „apsolutno“ stabilne. Stabilizacija geodetske kontrolne mreže bi se trebala izvršiti dosta pre početka merenja, kako bi se sopstvena pomeranja svela na minimum [6]. Stabilnost stuba za opažanje ili repera je utoliko veća, ukoliko se on fundira u stenu, ukoliko je dubina postavljana veća i ukoliko su bolje fizičko – mehaničke osobine tla temelja [8]. Na postojanost i stabilnost tačaka mogu bitno uticati i konstruktivne osobine belege i stuba, kvalitet izrade i kvalitet materijala uređaja za prisilno centrisanje instrumenta ili repera. Ovi uređaji ili reperi moraju biti izrađeni od nerđajućeg čelika ili mesinga [10].

## 5. PREGLED METODA DEFORMACIONE ANALIZE

### 5.1. Klasifikacija modela u deformacionoj analizi

Kod dinamičkih sistema objekat se može posmatrati kao dinamički sistem izložen uticaju spoljašnjih sila. Sistem je definisan ulaznim signalom – uzrok pojavljivanja deformacija, procesom prenosa signala kroz sistem i izlaznim signalom, kao posledicom [13]. Prema teoriji sistema postoje dve grupe deformacionih modela, odnosno četiri kategorije modela za procenu i identifikaciju deformacija (Slika 1.) [9].



Slika 1. Hijerarhija modela u deformacionoj analizi.

### 5.2. Konvencionalna deformaciona analiza

Tradicionalna geodetska procedura podrazumeva modeliranje i opažanje nekog objekta u vremenu i prostoru.

Analiza deformacija, u vremenu i prostoru u principu se izvršava pomoću dva klasična modela: model kongruencije – testira se identitet ili podudarnost geometrije objekta u dve (ili više) epohe i kinematički model – deformacije se opisuju na osnovu datih ili pretpostavljenih funkcija vremena odnosno brzina i ubrzanja [12].

### 5.3. Metoda Pelcera

Metoda je bazirana na ispitivanju podudarnosti koordinata tačaka, dobijenih izravanjem geodetske mreže u dve epohe.

Pri tome, svaka epoha merenih veličina izravnava se nezavisno [11]. Metoda se realizuje kroz sledeće korake:

1. Utvrđivanje homogenosti merenja u obe epohe;
2. Ispitivanje podudarnosti mreže u dve epohe;
3. Ispitivanje podudarnosti osnovnih tačaka mreže;
4. Lokalizacija nestabilnih osnovnih tačaka;
5. Ispitivanje podudarnosti tačaka na objektu;
6. Lokalizacija nestabilnih tačaka na objektu.

### 5.4. Metoda Karlsrue

U prvoj fazi nezavisno se izravnavaju merene veličine nulte i kontrolne epohe po metodi najmanjih kvadrata. U drugoj fazi obavlja se zajedničko izravanjanje merenih veličina nulte i kontrolne epohe [11].

Na osnovnu kvadratnih formi dobijenih iz izravanjanja nulte i kontrolne epohe i njihovog zajedničkog izravanjanja, vrši se ispitivanje stabilnosti uslovno stabilnih tačaka. Ako u skupu uslovno stabilnih tačaka ima nestabilnih tačaka, potrebno je identifikovati koje su to tačke.

U tom slučaju ponavljaju se zajednička izravanjanja iz kojih se sukcesivno izostavlja po jedna tačka.

Ovakvih izravanjanja biće koliko ima tačaka u skupu uslovno stabilnih tačaka, a u svakom od njih biće izostavljena samo po jedna tačka i to uvek različita. Na kraju se vrši lokalizacija deformacija koja se obavlja za svaku tačku.

### 5.5 Modifikovana Karlsrue metoda

Metoda se sastoji od slobodnog izravanjanja nulte epohe merenja po MNK sa minimalizacijom dela traga koji odgovara pretpostavljenim stabilnim tačkama. Izravanjanje kontrolne epohe merenja se takođe obavlja po MNK minimalizacijom dela traga koji odgovara pretpostavljenim stabilnim tačkama, tako da se izravnate koordinate nulte epohe merenja usvajaju kao približne koordinate kontrolne epohe merenja [13].

Kontrola stabilnosti tačaka se vrši po metodi Unimodalne transformacije.

U slučaju otkrivanja nestabilnih tačaka potrebno je realizovati nova izravanjanja. Nakon izravanjanja vrši se lokalizacija deformacija [11].

### 5.6. Helmertova transformacija

Helmertovom transformacijom se transformišu koordinate tačaka iz jednog koordinatnog sistema u drugi, pri čemu je razmera geodetske mreže promenljiva a oblik ostaje nepromenjen [14].

Metoda se bazira na transformaciji koordinata tačaka kontrolne epohe u nultu epohu merenja. Određuju se razlike između transformisanih koordinata kontrolne epohe i koordinata nulte epohe (pomaci tačaka).

Lokalizacija nestabilnih tačaka se vrši tako što se kontroliše da li su razlike koordinata (pomaci) tačaka u granicama dvostrukih standarda koordinata iz izravanjanja kontrolne epohe.

## 6. DEFORMACIONA ANALIZA BRANE ŠELEVRENAC

### 6.1. Osobine brane Šelevrenac

Brana Šelevrenac je u eksploataciji od 1986. godine. Na tromedi između Krušedolskog Prnjavora, Krušedol sela i Maradika nalazi se prirodni rezervat, jezero Maradik koje nazivaju i Šelevrenac. Površina jezera je blizu 65 hektara, a samo jezero je nastalo veštačkom akumulacijom kanala Šelevrenac, po kome je i dobilo ime.

### 6.2 Tačnost određivanja vertikalnih pomeranja

Zbog uslovljene tačnosti određivanja srednje greške visinske razlike, merenje se vrši preciznim nivelirom u dva smera sa invarskim letvama istog proizvođača čiji je i nivelir (instrument). Letve imaju svoje postolje i postavljaju se direktno na reper, a preko centričnih libela vrši se kontrola njihove vertikalnosti. Dužina vizure ne sme biti veća od 20 m. Potrebna tačnost određivanja deformacije u visinskom pogledu je:  $m_h = 5mm$ . Izravanjanje nivelmanske mreže izvršeno je po metodi posrednog izravanjanja, a paralelno sa izravanjanjem izvršena je ocena tačnosti kao i analiza pouzdanosti 1D mreže.

### 6.3 Dinamika geodetskog osmatranja

Nakon postavljanja tačaka, kompletiranja mreže za osmatranje, pravilnog odležavanja betonskih konstrukcija od kojih su tačke napravljene, bilo je potrebno realizovati nultu epohu merenja. Nakon realizacije nulte epohe merenja neophodno je bilo realizovati prvu epohu merenja. Ukoliko dođe do znatnije promene nivoa vode u jezeru ili kakve druge pojave značajne za stabilnost i ponašanje brane, prvu epohu merenja vršiti odmah nakon te značajne promene.

U zavisnosti od rezultata, tj. upoređenja nulte i prve epohe merenja određuje se kad vršiti naredno merenje. Za slučaj da rezultati budu u dozvoljenim, očekivanim, granicama drugu epohu merenja treba izvršiti naredne godine u periodu godine kad i prvu epohu merenja.

### 6.4 Geodetska mreža brane Šelevrenac

Referenti reperi postavljeni su van zone očekivanih deformacija brane. Sa leve strane brane nalaze se reperi R1, R2, R3, R4 a sa desne strane brane smešteni su reperi R5, R6 i R7. Takođe, još pet repera ugrađeno je u betonske stubove, i to: ST1, ST2, ST4, ST5 i ST6. Reperi na objektu nalaze se duž krune brane, uzvodna kosina, uzvodna kruna, zatvaračica temeljnog ispusta, na nizvodnoj kosini, na prelivu, na crpnoj stanici i slapištu preliva i ima ih ukupno 38. Na slici 2. prikazana je skica mikro-nivelmanske mreže.

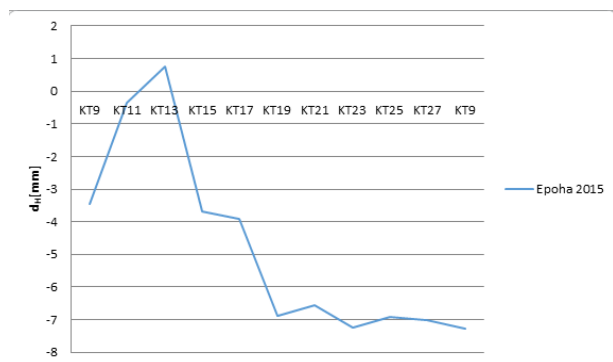


Slika 2. Skica mikro-nivelmanske mreže

## 6.5 Analiza i interpretacija deformacija brane

Obrada podataka niveliranja i izravnjanje visinskih razlika izvršeno je u softveru MatGeo [15]. Pri određivanju pomeranja tačaka osnovne mreže između dve epohe premeri se i izravna geodetska osnovna mreža u obe epohe, nultoj i tekućoj. Mreža se izravna kao slobodna, pri čemu je datum definisan minimalnim tragom matrice kofaktora na repere R1, R2, R3, R5, R6, R7, R8, ST1, ST2, ST4, ST5, ST6. Analiza grubih grešaka u postupku izravnjanja sprovedena pomoću Globalnog testa na grube greške.

Deformacione analiza geodetske mreže izvršena je primenom Pelcerove metode. Kroz devet iteracija pokazalo je da su stabilni reperi R2, R3 i R8. Kada su identifikovani stabilni reperi osnovne mreže izvršeno je izravnjanje nulte i kontrolne epohe merenja po metodi najmanjih kvadrata sa minimizacijom dela traga matrice koji se odnosi na stabilne repere. Nakon izravnjanja ocenjeni su vektori pomeranja kao razlike apsolutnih visina repera iz nulte i prve epohe merenja.



Slika 3. Profil uzvodne kosine

Na uzvodnoj kosini brane stabilizovano je 11 kontrolnih repera. Sleganja ovih repera pripadaju intervalu od -0,346 mm (reper KT11) do -7,291 mm (reper KT29) u odnosu na epohu iz 2014 godine pri čemu je na reperu KT13 uočeno blago izdizanje za 0,764 mm (Slika 3.).

## 7. ZAKLJUČAK

Dobijene vrednosti deformacija u vertikalnoj ravni su u okvirima očekivanih granica. Ne postoje reperi na objektu na kojima su uočene drastične promene pomeranja. Preduslov efikasnoj primeni različitih metoda deformacione analize odnosi se na mogućnost postavljanja što više osnovnih tačaka na geološki stabilnom terenu. Veoma važan faktor, pored pouzdanosti informacija o pomeranju tla i objekata, odnosi se na određivanje najmanjeg intenziteta pomeranja, koje se za dati nivo značajnosti i moć kriterijuma, može sigurno otkriti.

Ako se na geološki stabilnom terenu, odnosno van zone očekivanih deformacija, nalaze bar četiri datumske tačke koje nisu promenile svoj položaj između dve epohe merenja, pouzdanost primene metoda deformacione analize se znatno povećava.

## 8. LITERATURA

- [1] Ašanin S. Božić B. Dinamičko praćenje deformacionih struktura u realnom vremenu. Vodoprivreda. [Internet]. Dostupno na: <http://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2014/08/dinamicko.pdf> [pristupljeno na dan 30. mart 2018].
- [2] Ninkov T. Sušić Z. (2014) Inženjerska geodezija 3 (prezentacija: Geodetski radovi pri projektovanju hidrotehničkih objekata). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka;
- [3] Cvetković Č. Primena geodezije u inženjerstvu. Beograd: Građevinska knjiga.; 1970. 580 str.
- [4] Joksimović M. Brane. Beograd: Rad; 1948. str.34-56
- [5] Stojić P. Hidrotehničke građevine. Split: Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu; 1997. 481 str.
- [6] Kujundžić B. Osmatranje visokih brana u FNRJ. Beograd: Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“; 1960.
- [7] Anon (2009) . Hidrotehničke građevine. (3. dio).Sveučilište u Splitu. Split [Internet] Dostupno na: [http://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/hidrotehnicke\\_gradevine/nastavni\\_materijali/Dio2/Nasutebrane%20i%20dalje.pdf](http://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/hidrotehnicke_gradevine/nastavni_materijali/Dio2/Nasutebrane%20i%20dalje.pdf) [pristupljeno na dan 06. april 2018].
- [8] Ninkov T. Projektovanje geodetskih mreža u inženjerskoj geodeziji (pisano predavanje). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka; 2012 str. 51-94
- [9] Slobodan A, Branko B. Dinamičko praćenje deformacionih struktura u realnom vremenu. Institut za geodeziju, Građevinski fakultet, Beograd. Str. 24-28 Dostupno na: <http://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2014/08/dinamicko.pdf> [pristupljeno na dan 15. april 2018]. Str. 377-384
- [10] Slobodan A. (2003). Inženjerska geodezija 1. Beograd: Ageo; Str. 90-92
- [11] Mihajlović K., Aleksić I. (2008). Koncepti mreža u geodetskom premeru. Beograd. Monting. str. 605-674
- [12] Mihailović, K. i Aleksić, I. (1994). Deformaciona analiza geodetskih mreža. Beograd: Građevinski fakultet u Beogradu. Str 76-94
- [13] Ninkov, T. (1985). Deformaciona analiza i njena praktična primena. Geodetski list. 39 (7-9), str. 167-178.
- [14] T. Ninkov (n.d.) Deformaciona merenja, geodetske mreže, inženjerska geodezija i tačnost merenja (skripta). Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka; 2012
- [15] Batilović M. (2015) Identifikacija pomeranja primenom različitih metoda deformacione analize. Master Rad. Novi Sad. Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu str. Str. 33- 44
- [16] Perović G. Precizna geodetska merenja (Monografija 2). Beograd: Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu; 2007. 216 str.

### Kratka biografija:



**Tamara Stevanović** rođena je 1992. godine u Loznicima. Diplomski –Bachelor rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Geodezije i geomatike odbranila je 2015. godine.