

INTEGRIRANO TUMAČENJE GEOTEHNIČKOG MONITORINGA AKTIVNOG KLIZIŠTA U ZONI AKUMULACIJE: ANALIZA INKLINOMETARA, PIEZOMETARA I RAZINE VODE NA PRIMJERU KLIZIŠTA „MANDIĆI“ (RHE BAJINA BAŠTA)

MILAN TUMARA ¹, MARKO BELOTIĆ ¹

¹ Energoprojekt-Hidroinženjering, Srbija

Sažetak

Klizište „Mandići“ nalazi se u zoni hidroakumulacije „Lazići“ u sustavu RHE „Bajina Bašta“ i, zbog svoje veličine (iznad akumulacije oko 32,5 ha) i položaja, predstavlja jedno od najznačajnijih klizišta u regiji. Nakon njegove aktivacije 30.03.2019. godine provedeni su istražni radovi, uspostavljen je sustav monitoringa te je izvršena detaljna analiza uzroka događaja, kao i procjena utjecaja na sigurnost akumulacije i brane. U radu su prikazani rezultati analiza raspoloživih podataka iz razdoblja neposredno prije aktivacije 2019. godine, kao i rezultati integriranog tumačenja geotehničkog monitoringa provedenog u razdoblju 2019.–2024. godine. Monitoring obuhvaća inklinometarska i piezometarska mjerenja, geodetska opažanja mreže repera i satne podatke o razini akumulacije. Inklinometarska mjerenja u bušotinama IB-2, IB-3 i IB-4 dokumentiraju izražene dubinske zone smicanja, kao i fenomen skraćivanja bušotina (najizraženiji u IB-4), što upućuje na daljnju aktivnost klizišta i nastavak deformacija u padini iznad akumulacije. Piezometarski podaci ukazuju na sezonske promjene razine podzemnih voda. Analizirani su seizmički uvjeti, geološko-geotehničke i hidrogeološke karakteristike terena, režim padalina te dinamika promjene razine akumulacije. Utvrđeno je da neposredno prije pokretanja klizišta nije registriran relevantan seizmički događaj, već da je aktivacija rezultat koincidencije više drugih nepovoljnih čimbenika koji su u sadejstvu s kontinuiranim i intenzivnim smanjenjem razine akumulacije identificirani kao uvjeti za pokretanje klizišta. Izvršena je analiza s ciljem identifikacije kritičnih uvjeta koji su prethodili aktivaciji te provjere jesu li se takvi uvjeti ponovili u petogodišnjem razdoblju nakon 2019. godine. Rezultati analize omogućili su pouzdanije razumijevanje ponašanja klizišta i definiranje operativnih smjernica za siguran rad akumulacije u sustavu reverzibilne hidroelektrane „Bajina Bašta“.

Ključne riječi

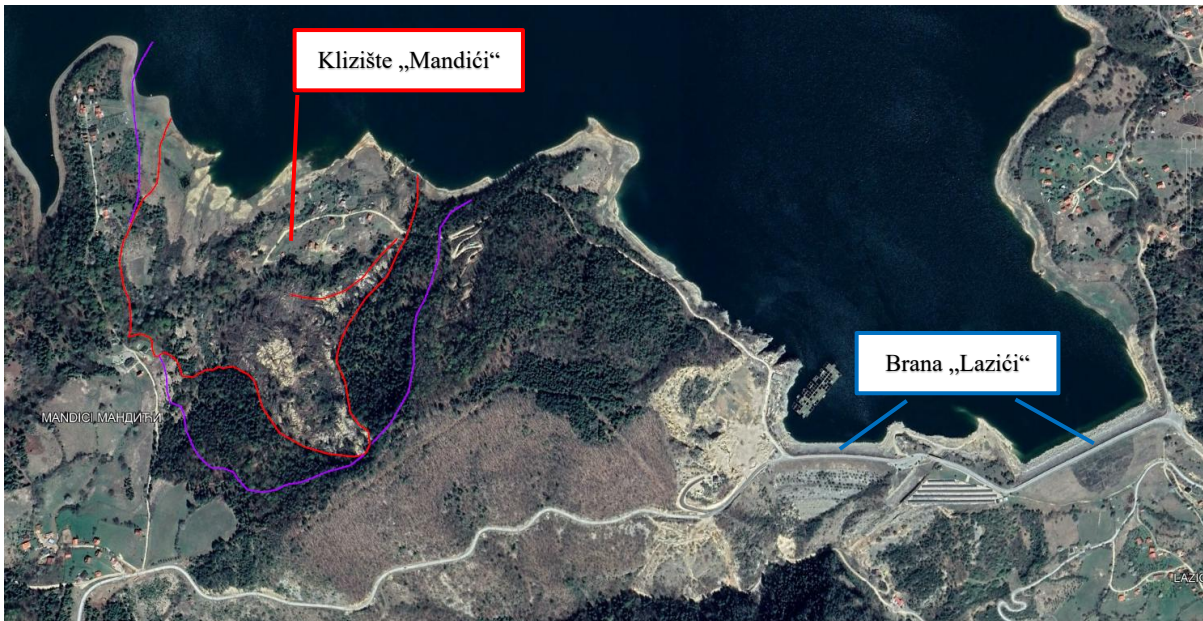
geotehnički monitoring, inklinometarska mjerenja, piezometarske razine, razina akumulacije; klizište

1. Uvod

Klizišta u zoni hidroakumulacija koje se koriste za proizvodnju električne energije predstavljaju specifičan inženjerskogeološki problem zbog promjenjivog hidrauličkog režima i njegove interakcije s geološkom građom padine. Promjene razine akumulacije mogu utjecati na raspodjelu površinskih tlakova i efektivnih naprežanja, čime se mijenjaju uvjeti stabilnosti kliznih tijela.

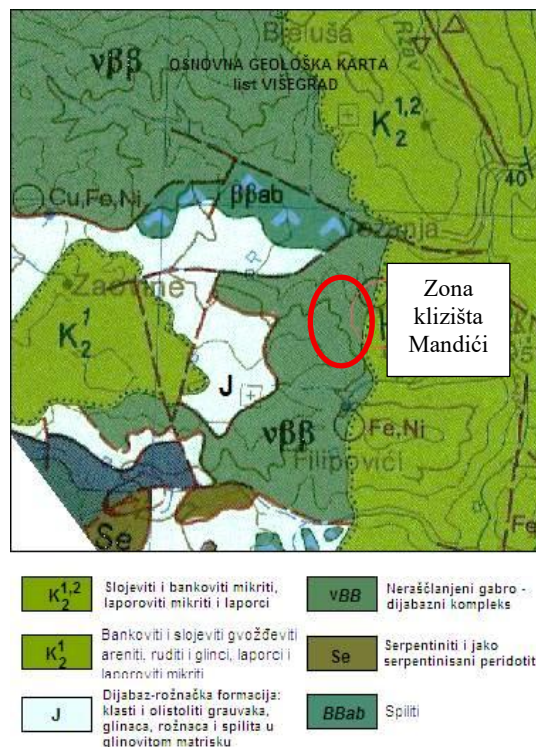
Klizište „Mandići“, razvijeno uz akumulaciju brane „Lazići“ visine 120 m u sustavu RHE „Bajina Bašta“, registrirano je još 1994. godine, dok je nova izraženija aktivacija zabilježena 2019. godine. Nakon tog događaja provedena su dodatna istraživanja i kontinuirano praćenje ponašanja klizišta kroz inklinometarska (3

inklinometra), piezometarska (5 piezometara) i geodetska mjerenja, uz paralelnu analizu režima rada akumulacije. Klizište je udaljeno 1,2 km od brane.



Slika 1. Prikaz lokacije klizišta „Mandići“ u odnosu na branu „Lazići“

Klizište je formirano u zoni kontakta gabro-dijabaznog kompleksa, u kojem su zastupljeni pretežno dijabazni tipovi stijena koji su u površinskom dijelu alterirani i degradirani, i krednih sedimenata koji su predstavljeni bazalnom serijom laporaca i glinaca s pojavama proslojaka vapnenaca, a koji leže preko mikrokonglomerata i pješćanih glinaca. Iznad ove serije nalaze se slojeviti do bankoviti vapnenci (mikriti, laporoviti mikriti, pješćano-glinoviti i fosilonosni mikriti).



Slika 2. Regionalna geološka građa terena sa označenom zonom klizišta

2. Metode

Prikupljeni su službeni podaci, podaci mjerenja službe održavanja objekata RHE Bajina Bašta, podaci istražnih radova na klizištu i podaci mjerenja sustava monitoringa, nakon čega je izvršena pojedinačna i komparativna analiza.

2.1 Geološko-inženjerskogeološki model

Geološko-geotehničkim istraživanjima 2020.–2021. godine utvrđeno je da se u osnovi klizišta nalaze plavičasti laporci, lokalno raspadnuti do laporovitih glina, proslojeni laporovitim vapnencima, preko kojih su razvijeni masivni do slojeviti vapnenci. Slojevitost je subhorizontalna (oko 5°), lokalno s padom prema akumulaciji, dok je stijenska masa u zaleđu razdvojena krupnim rupturama padnih kutova 45–60°.

Tijelo klizišta ima oslonac na laporovitim, slabovodopropusnim stijenama, dok se vapnenački masiv u zaleđu ponaša kao hidrogeološki provodnik, omogućujući prihranjivanje klizišta podzemnim vodama.

2.2 Seizmički podaci

Seizmički podaci preuzeti su sa stanice Republičkog seizmološkog zavoda locirane uz branu „Lazići“. Analizirani su svi registrirani potresi u razdoblju prije i nakon aktivacije 2019. pa do 2024. godine, s posebnim osvrtom na magnitudu, udaljenost i dubinu žarišta.

2.3 Meteorološki podaci i podaci o razinama akumulacije

Meteorološke podatke i promjene razine akumulacije bilježi služba održavanja brane „Lazići“. Meteorološki podaci obuhvatili su oborine, snježni pokrivač i temperaturni režim, s ciljem analize eventualnog utjecaja topljenja snijega i intenzivnih oborina na hidrogeološke uvjete u klizištu.

Za potrebe analize korišteni su satni podaci razine akumulacije. Ovi podaci omogućili su utvrđivanje brzine promjene razine (cm/h), promjene razine u razdoblju aktivacije klizišta kao i analizu režima i utjecaja.

2.4 Geodetski monitoring

Geodetsko praćenje vršeno je mjerenjem mreže geodetskih repera sa stabilnih geodetskih stupova dva puta godišnje. Nakon 2019. godine, kada je većina repera uništena, uspostavljena je nova mreža repera radi preciznijeg praćenja kretanja. Ova mjerenja uspostavljena su nakon prvog značajnog pokretanja klizišta i obavljaju se od 1995. godine, što je omogućilo povijesni pregled podataka.

2.5 Inklinometarska mjerenja

Inklinometri (IB-2, IB-3, IB-4) instalirani su 2020. godine u srednjem i desnom dijelu klizišta. Mjerenja su vršena periodično, do 10 puta godišnje, uz analizu kumulativnih pomaka i identifikaciju zona smicanja.

2.6 Piezometarska mjerenja

Piezometri su instalirani 2020. godine. Piezometarska mjerenja korištena su za praćenje razine podzemnih voda i analizu njihove korelacije s režimom rada akumulacije, kao i vremenskog odnosa između promjena razine akumulacije i odziva podzemnih voda.

3. Rezultati analiza

3.1 Seizmički utjecaji

U razdoblju prije aktivacije registrirana su dva potresa 2019. godine, oba male magnitude M_w 1,7 (28.01.2019.) i 1,8 (19.03.2019.) na udaljenosti oko 10 km. Drugi potres dogodio se kada je akumulacija bila na razini 849 m n.m.

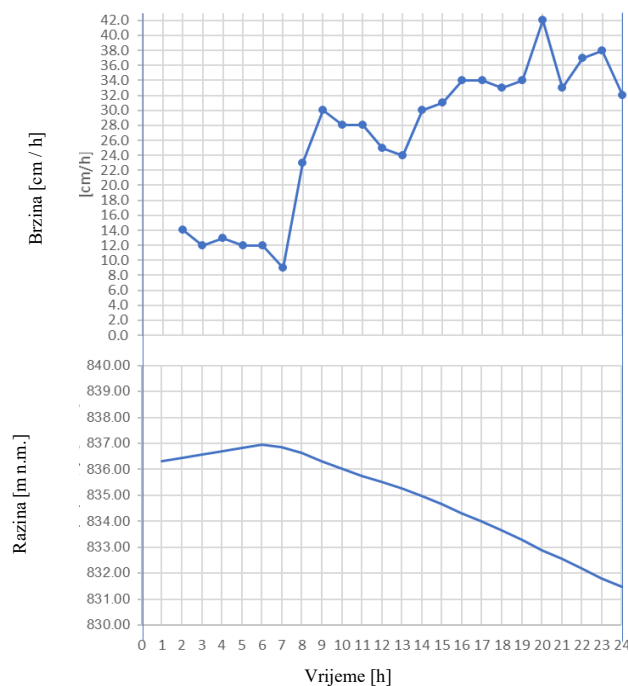
U razdoblju od 2019.–2024. svi potresi bili su malih magnituda (najviše do $M_w = 2,8$) i plitki po dubini žarišta. Kao rezultat induciranih seizmičkih događaja češće su registrirani potresi manjih magnituda tijekom punjenja akumulacije nego tijekom pražnjenja. Ocijenjeno je da nijedan od njih nije bio od inženjerskog značaja.

3.2 Režim promjene razine akumulacije prije aktivacije 2019.

Aktivaciji klizišta 30.03.2019. prethodio je period kontinuiranog spuštanja razine akumulacije u trajanju od približno 20 dana. U večernjim satima 30.03.2019. razina akumulacije smanjivana je s 836,31 m n.m. na 831,24 m n.m., dok je minimalna kota od 831,17 m n.m. dostignuta 31.03.2019., nakon čega je pražnjenje obustavljeno.

Analiza podataka pokazala je da su u razdoblju neposredno prije aktivacije registrirane brzine promjene razine akumulacije u rasponu 30–42 cm/h, u trajanju od oko 10 sati, pri kotama 839,57–831,17 m n.m. (ukupna promjena od približno 8,4 m). Uočeno je da se prosječna brzina spuštanja povećavala s opadanjem razine jezera.

Gornji dijagram na slici 3 ukazuje na skokovite promjene brzine razine akumulacije, što se tumači utjecajem morfologije akumulacijskog prostora jer je brzina protoka vode kroz turbinu elektrane konstantna. Utvrđeno je da je brzina 30–42 cm/h nastupala u trajanju od 10 h, pri kotama 839,57–831,17 m n.m. (–8,4 m). Uočeno je da se prosječna brzina promjene razine povećava s pražnjenjem jezera te da je aktivacija klizišta nastupila pri maksimalnim prosječnim brzinama većim od 34 cm/h.



Slika 3. Usporedni dijagram podataka mjerenja razine akumulacije 30.03.2019.: 1/ dijagram brzine promjene razine akumulacije u cm/h, 2/ izmjerena razina akumulacije u m n.m.

3.3 Rezultati geodetskih mjerenja

Prije aktivacije 2019. godine geodetska mjerenja ukazivala su na postojanje malih godišnjih pomaka reda veličine do 10 cm/god.

Nakon 2019. godine mjerenja nove geodetske mreže potvrdila su nastavak sporih kretanja pojedinih repera, bez naglih progresivnih deformacija karakterističnih za fazu aktivacije. Prema tim mjerenjima, kretanja pojedinačnih geodetskih repera su zasebna, ali s jasnim trendom prema akumulaciji.

3.4 Rezultati mjerenja horizontalnih pomaka u inklinometrima

Inklinometarska mjerenja provodila su se od 2019. do 2024. godine, uz analizu kumulativnih pomaka i identifikaciju zona smicanja. Inklinometri su postavljeni u srednjem do desnom dijelu klizišta, a mjerenja su obavljana periodično, i do 10 puta godišnje. Ova mjerenja pokazala su da je došlo do skraćivanja sva tri inklinometra po dubini (IB-4 s 45,50 na 31,25 m, IB-3 s 50,50 na 40,45 m, IB-2 s 45,00 na 42,5 m), što upućuje na deformacije masiva po dubini do oko 45,5 m te postojanje aktivnog smicanja na dubinama oko 15–22 m.

Pomaci po toj ravnini su mali, s trendom općenito prema sjeverozapadu, a deformacije su djelomično elastične (povratne), što je uočeno nakon punjenja akumulacije, odnosno potvrđen je utjecaj akumulacije. Na temelju rezultata mjerenja može se razlikovati dugoročno sporo kretanje klizišta, koje predstavlja osnovni deformacijski trend, od kratkotrajnih deformacijskih epizoda koje se povremeno registriraju u sustavu monitoringa (npr. prekid inklinometra IB-4 na dubini od 31 m između dvije serije mjerenja).

3.5 Režimska osmatranja

Piezometarski odzivi analizirani su prema sezonskim i događajnim promjenama, uz usporedbu s raspoloživim zapisima razine akumulacije. Posebno su analizirane brzine obaranja razine akumulacije tijekom razdoblja koje je prethodilo velikoj aktivaciji klizišta 2019. godine, kao i usporedba s razdobljem monitoringa 2019.–2024. radi procjene mogućeg „triggering“ efekta.



Slika 4. Dijagrami režimskih opažanja za razdoblje neposredno prije aktivacije klizišta (2019. god.) i sličan period 2021./2022. godine

Razdoblje prije aktivacije klizišta 2019. godine obilježila su prva dva mjeseca s obilnijim snježnim padalinama (u siječnju 55 cm, u veljači 32 cm), nakon čega je uslijedio ožujak s razdobljem naglog porasta temperature zraka u rasponu 10–20 °C, što je doprinijelo brzom topljenju snijega.

Mjerenja piezometarskih razina pokazuju zadržavanje visokih razina podzemnih voda u klizištu i nakon značajnog spuštanja razine akumulacije, što upućuje na snažno prihranjivanje iz zaleđa klizišta.

Vizualnim opažanjima klizišta, počevši od 2019. godine, konstatirani su stalni površinski priljevi vode u zaleđu klizišta, pri čemu vodotok nije uspostavljen, a filtracija se odvija kroz površinske dijelove klizišta. Zadržavanje vode na padini, odnosno nemogućnost uspostavljanja toka i prirodnog dreniranja padine, upućuju na razloge stalno visokih razina podzemnih voda utvrđenih piezometarskim mjerenjima.

3.6 Analiza kontrolnog perioda 2019–2024.

U razdoblju nakon aktivacije klizišta 30.03.2019. godine provedena je kontinuirana analiza režima rada akumulacije, meteoroloških uvjeta i odziva sustava monitoringa, s ciljem utvrđivanja jesu li se ponovili uvjeti analogni onima koji su prethodili aktivaciji.

Usporedbe su provedene na razdobljima sa sličnim sezonskim i hidrološkim uvjetima (zimsko-proljetni periodi

s prisutnim snježnim pokrivačem i naglim porastom temperatura), uz dodatnu analizu podataka iz drugih dijelova godine kako bi se dobila pouzdanija slika o ponašanju klizišta tijekom cijele hidrološke godine.

Analizom satnih podataka razine akumulacije u razdoblju 2019.–2024. godine utvrđeno je da nisu registrirane kontinuirane brzine spuštanja razine u rasponu 30–42 cm/h u trajanju i dinamici kakva je zabilježena neposredno prije događaja 2019. godine. Nakon definiranja preporuka za ograničenje brzine pražnjenja akumulacije, režim rada je prilagođen te ekstremne vrijednosti brzine promjene razine nisu ponavljane.

Usporedna analiza piezometarskih i inklinometarskih podataka u istom razdoblju nije ukazala na pojavu novih progresivnih deformacija niti na naglo povećanje pornih tlakova u uvjetima rada akumulacije.

Geodetska mjerenja potvrđuju nastavak sporih, dugoročnih kretanja bez karakteristika ubrzane destabilizacije. Na temelju navedenog može se konstatirati da u razdoblju 2019.–2024. godine nisu ponovljeni kombinirani uvjeti koji su prethodili aktivaciji klizišta 2019. godine.

5. Zaključak

Integrirana analiza geološko-geotehničkih karakteristika, režima rada akumulacije i rezultata višegodišnjeg monitoringa pokazala je da aktivacija klizišta „Mandići“ 30.03.2019. godine nije bila povezana s registriranim seizmičkim događajima, već sa specifičnom kombinacijom nepovoljnih uvjeta.

Analizirani su ključni elementi, prirodni i tehnogeni, koji su prethodili aktivaciji klizišta, a obuhvatili su dugotrajno i intenzivno spuštanje razine akumulacije, visoke razine podzemnih voda u tijelu klizišta i postojanje prethodno razvijenih dubinskih zona smicanja. Instrumentalna mjerenja (inklinometarska i piezometarska) potvrdila su da klizište reagira na promjene hidrauličkog režima, pri čemu su registrirane i djelomično povratne deformacije tijekom faza punjenja akumulacije.

Aktivacija klizišta 2019.godine može se tumačiti kao rezultat nepovoljne koincidencije dugotrajnog i intenzivnog spuštanja razine akumulacije, povišenih razina podzemnih voda u tijelu klizišta te postojanja prethodno razvijenih dubinskih zona smicanja.

Analiza kontrolnog razdoblja 2019.–2024. godine pokazala je da se uvjeti analogni onima iz 2019. godine nisu ponovili te da u istom razdoblju nisu registrirane nove progresivne destabilizacije.

U tom razdoblju primijenjene su preporuke za ograničenje brzine punjenja i pražnjenja akumulacije, utvrđene su sigurne razine punjenja i pražnjenja te je uspostavljen novi program monitoringa, čime je režim rada akumulacije prilagođen geotehničkim zahtjevima. Ovi rezultati ukazuju na važnost kontroliranog režima punjenja i pražnjenja akumulacije u skladu s geološko-geotehničkim uvjetima i mogućim utjecajem nestabilnih padina u priobalnom pojasu akumulacije.

Rezultati su pokazali da integrirano tumačenje podataka kombiniranog monitoringa omogućuje identifikaciju uvjeta koji mogu dovesti do aktivacije akumulacijskog klizišta te predstavlja osnovu za definiranje operativnih režima rada akumulacije s ciljem smanjenja rizika.

Kako uvjeti za siguran operativni režim akumulacije podrazumijevaju ograničavanje režima punjenja i pražnjenja akumulacije, a time i proizvodnje električne energije, u cilju dugoročnog rješenja potrebno je provesti geotehničke mjere kojima bi se utjecalo na stabilizaciju klizišta i ograničenje njegovog utjecaja na akumulaciju.

Literatura

- ICOLD (2002) *Reservoir landslides: investigation and management. Guidelines and case histories*. Bulletin 124. Paris: International Commission on Large Dams.
- Kopecký, M., Ondrašik, M. and Antolová, D. (2014) 'Geotechnical Monitoring of Landslides on Slopes of Water Reservoirs', *Slovak Geological Magazine*, 14(1), pp. 115–125.
- Stark, T.D. and Choi, H. (2008) 'Slope inclinometers for landslides', *Landslides*, 5, pp. 339–350. doi:10.1007/s10346-008-0126-3.
- Uhlemann, S., Smith, A., Chambers, J., Dixon, N., Dijkstra, T. and Mackay, J. (2016) 'Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations', *Geomorphology*, 253, pp. 438–451. doi:10.1016/j.geomorph.2015.10.027.
- Auflič, M.J. et al. (2023) 'Landslide monitoring techniques in the Geological Surveys of Europe', *Landslides*, 20, pp. 951–965. doi:10.1007/s10346-022-02007-1.
- Babović, N., Aleksić, D. and Miladinović, A. (2024) 'Monitoring of the Active Landslide during Excavation of Slopes for the Svračkovo Dam Stilling Basin', in: *Proceedings of the 6th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, ReSyLAB2024*, Belgrade, pp. 121–126.
- Tumara, M. et al. (2022) 'Landslides on the shore of existing reservoirs and potential hazards for embankment dams – A case study of Mandići landslide in the Reservoir Zaovine', *Izgradnja*, 9–12, pp. 223–230.