

Važnost dugotrajnog monitoringa zemljanih brana

Goran Grget¹, izv. prof. dr. sc. **Mario Bačić²**

¹Geokon – Zagreb d.d., Goran.Grget@geokon.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, mario.bacic@grad.unizg.hr

Sažetak

Kao konstrukcije visokog rizika, s katastrofalnim posljedicama u slučaju prekoračenja graničnih stanja, brane je nužno kontinuirano pratiti kako bi se pravovremeno identificirali potencijalni problemi te pravovremeno poduzele preventivne mjere očuvanja strukturalnog integriteta brana. Ovo je naročito slučaj kod zemljanih brana koje su izrazito osjetljive na sveprisutne promjene klimatskih obrazaca. U radu se daje prikaz tehnika dugotrajnog monitoringa zemljanih brana te se daje sažeti prikaz moguće primjene opreme. Kroz primjer brane Butoniga u Istri, prikazana je važnost dugotrajnog monitoringa kao vitalnog dijela funkcionalnosti i sigurnosti brane. Monitoring brane Butoniga, ukupne visine 23 m i volumena akumulacije od 20 milijuna m³, je započeo za vrijeme gradnje 1979. do 1986. godine i nastavio se u eksploataciji sve do danas, pri čemu je sustav monitoringa kontinuirano nadograđivan.

Ključne riječi: zemljana brana, brana Butoniga, dugotrajni monitoring, pomaci

Importance of long-term monitoring of the earth dams

Abstract

As structures of high risk, with catastrophic consequences in case of exceeding the limit states, dams must be continuously monitored in order to timely identify potential problems and to take preventive measures to preserve the structural integrity of the dams. This is especially the case with earth dams, which are extremely sensitive to ubiquitous changes in climate patterns. The paper describes the techniques of long-term monitoring of earth dams and gives a summary of the possible monitoring equipment used. Through the example of the Butoniga dam in Istria, the importance of long-term monitoring, as a vital part of the dam's functionality and safety, is demonstrated. Monitoring of the Butoniga dam, with a total height of 23 m and a reservoir volume of 20 million m³, began during construction from 1979 to 1986 and continued in operation until today, with the monitoring system being continuously upgraded.

Key words: embankment dam, Butoniga dam, long-term monitoring, displacements

1 Uvod

Brane su građevine za zadržavanje i usmjeravanje vode čime omogućuju kontrolu vodostaja rijeka, sprječavaju poplave, osiguravaju vodu za piće i poljoprivredu te mogu biti dio sustava za proizvodnju električne energije. Prema definiciji Međunarodne komisije za velike brane (ICOLD), velike brane su one koje imaju građevinsku visinu mjerenu od temelja veću od 15 m ili brane visine između 5 i 15 m ako je kapacitet akumulacije veći od 5 milijuna kubnih metara [1]. Prema odredbama za sigurnost brana Svjetske banke [2], u velike brane spadaju još i brane između 10 i 15 m ako imaju složene projektne zahtjeve kao što su npr. neuobičajeni zahtjevi za upravljanje velikim vodama, lokacije u područjima visoke seizmičnosti, složeni uvjeti i zahvati na temeljenju ili zadržavanje toksičnih materijala.

Brane predstavljaju kritične infrastrukturne elemente, sukladno [3], koji imaju važnu ulogu u održivom upravljanju vodenim resursima, ali s obzirom na njihovu važnost spadaju u građevinske konstrukcije koje sa sobom uvijek nose određeni rizik, s katastrofalnim posljedicama u slučaju prekoračenja graničnih stanja. Kao jedna od vrsta brana, zemljane brane su izuzetno osjetljive na klimatske utjecaje. U mnogim dijelovima Europe, pa tako i u Hrvatskoj, klimatski scenariji upućuju na promjenu obrasca padalina, gdje se može očekivati manje padalina [4], ali one će biti intenzivnije uzrokujući brzo opterećenje i povećanje vjerojatnosti sloma. Osim toga, razdoblja intenzivnih oborina slijede nakon dužih sušnih razdoblja. To znači da su zemljane brane pod utjecajem događaja kao što su sušenje i pucanje tla blizu površine tijekom sušnih razdoblja, što omogućuje brzu infiltraciju vode tijekom padalina, smanjenje čvrstoće tla i prekoračenje graničnih stanja. Istodobno, intenzivniji oborinski događaji i povećana erozija tla mogu povećati rizik od erozije brana što može dovesti do osipanja materijala i smanjenja stabilnosti brane.

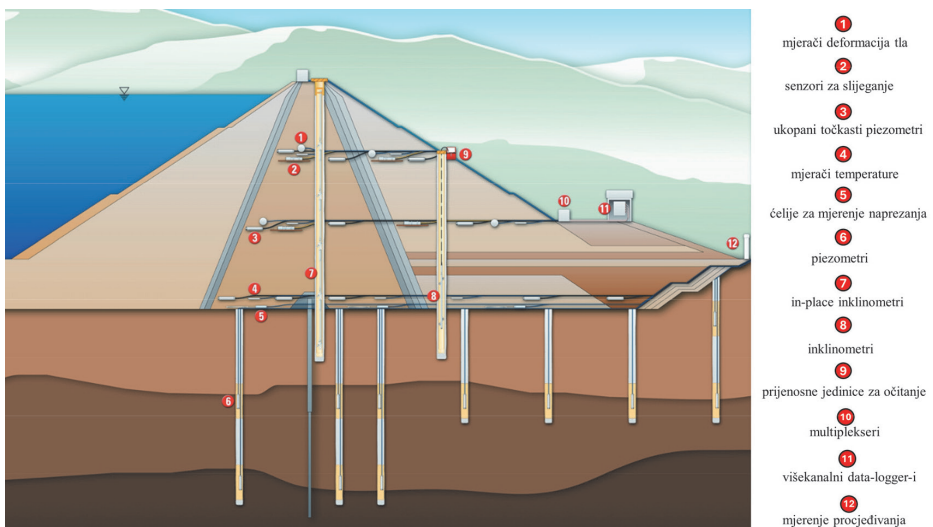
Stoga, danas je više nego ikada izražena potreba za kontinuiranim praćenjem ponašanja ovih kapitalnih građevinskih konstrukcija tijekom njihove eksploatacije kako bi se pravovremeno identificirali potencijalni problemi te poduzele preventivne mjere očuvanja strukturalnog integriteta, a time spriječile katastrofalne havarije koje bi mogle ugroziti ljudske živote i imovinu. Ovim radom se daje pregledni prikaz mogućih sustava za monitoring zemljanih brana na primjeru dugogodišnjeg monitoringa brane Butoniga u Istri s fokusom na mjerenja pomaka brane. Monitoring je započeo u vrijeme gradnje brane 1979. do 1986. g. i kontinuirano se provodi do danas.

2 Monitoring ponašanja zemljanih brana

Mjerenja tijekom izgradnje brane obično se provode kako bi se verificirale projektne pretpostavke, kako bi radna okolina bila sigurna te kako bi se osigurala sigurnost susjednih građevina i okoliša. Nakon izvedbe, zemljana brana se prati kako bi se evaluirale promjene mjerenih parametara kao što su naprezanje, deformacija, pomak, porni tlak, brzina vode, temperatura tla te iste usporedile s projektnim pretpostavkama. Ova usporedba je važna i za određivanje mjera koje treba poduzimati u narednom razdoblju. Tipična oprema za monitoring obuhvaća navedeno u tablici 1, dok je na slici 1 prikazan karakteristični presjek zemljane brane s položajem ugrađene mjerne opreme. Pri tome treba naglasiti da se monitoring provodi u karakterističnim fazama sukladno dinamici danoj projektom ili prema zahtjevu investitora (gradnja, kraj gradnje, punjenje/praznjenje akumulacije, izvanredni događaji, periodična mjerenja itd.)

Tablica 1. Oprema i ciljevi monitoringa zemljanih brana

Oprema	Cilj monitoringa
Mjerači deformacije tla	Mjerenje deformacija u tijelu brane
Piezometri	Mjerenje tlaka vode u brani i u temeljnom tlu
Mjerači temperature	Mjerenje temperature u tijelu brane
Čelije za mjerenje naprezanja	Mjerenje naprezanja na kontaktu brane i temeljnog tla
Inklinometri	Mjerenje horizontalnog pomaka po dubini brane
Geodetski reperi	Mjerenje prostornog pomaka točke na površini brane
Mjerači procjeđivanja	Mjerenje brzine procjedne vode kroz branu i ispod brane



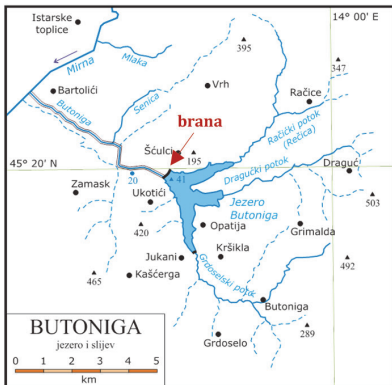
Slika 1. Karakteristični presjek zemljane brane s položajem opreme za monitoring, modificirano iz [5]

3 Primjer dugogodišnjeg monitoringa: brana Butoniga u Istri

3.1 Lokacija i karakteristike brane

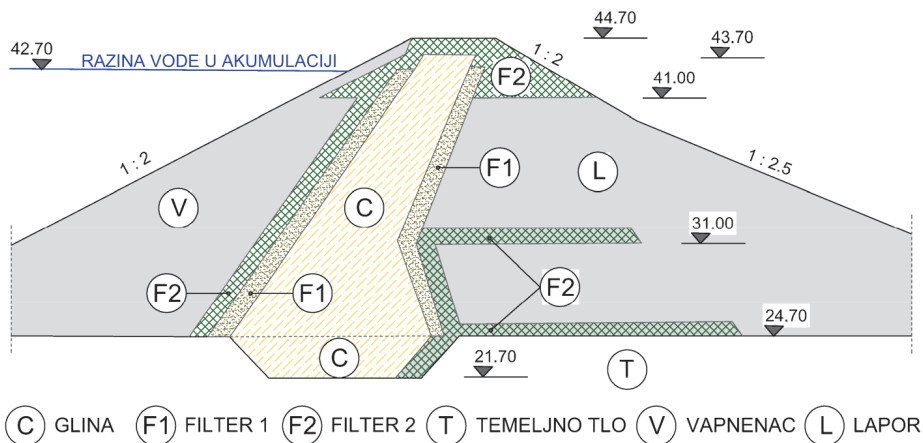
Akumulacija Butoniga se nalazi u središnjem dijelu Istre, slika 2, i višenamjenska je građevina koja služi za zadržavanje visokih voda rijeka Butonige i Mirne, korištenje vode za vodoopskrbu te osiguranje biološkog minimuma rijeke Mirne. Sliv pokriva površinu od 73 km². Gradnja je trajala 7 godina. Brana je završena 1986. godine. Kapacitet temeljnog ispusta pri normalnom vodostaju (41,00 m n.m.) je 88,00 m³/s. Dotok akumulacije iznosi od 120 m³/s za povratni period od 100 godina te 260 m³/s za povratni period od 10.000 godina. Podaci o dotoku su iz hidroloških podloga tijekom projektiranja i izgradnje, a trenutno se rade nove hidrološko-hidrauličke analize za rekonstrukciju brane u kojima će se obuhvatiti visokovodni događaji iz 2019. i 2022. godine.

Brana je projektirana i izvedena kao zonirana brana visine 23 m, asimetričnog presjeka s nagnutom glinenom jezgrom s uzvodne strane. Tijelo brane na uzvodnoj strani čini lomljeni vapnenac, a na nizvodnoj laporoviti materijal, s izvedenim filtarskim i drenažnim slojevima kako je naznačeno na slici 3. Prosječna širina jezgre iznosi 7,5 m, a najveća dubina temeljnog klina iznosi 3 m. Prirodna kota terena je 25 m n.m., a kruna brane je na visini od 44,7 m n.m., što je 2 m više od visine najvećeg uspora u akumulaciji. Širina brane u dnu je 95 m, dok je kruna širine 6 m. Nagib uzvodnog pokosa je 1:2, a nizvodnog 1:2,5. Duljina brane je 576 m a njezin volumen 510.000 m³.



Slika 2. Lokacija brane Butoniga (lijevo) i pogled na jezero Butoniga (desno), preuzeto iz [6]

Temeljno tlo je glina niske do srednje plastičnosti prosječne debljine 19 m. Ispod tog sloja nalazi se glinoviti šljunak (krš) do najveće dubine od 31,5 m ispod dna brane te lapor u podini koji je sa strane brane presvučen glinovitim pokrovom ili vapnencem.



Slika 3. Karakteristični poprečni presjek brane Butoniga

3.2 Program monitoringa brane

Sastavni dio programa monitoringa brane Butoniga obuhvaća sljedeće navedeno:

- vizualni pregled brane
- mjerenje razine vode u akumulaciji
- mjerenje procjedne vode
- mjerenje tlaka vode u piezometrima
- mjerenje pomaka geodetskih kontrolnih točaka
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane
- ostala mjerenja (oborine, temperatura vode, temperatura zraka, onečišćenje vode u akumulaciji).

Osoblje brane Butoniga svakodnevno pregledava branu i ostale objekte povezane s branom. Glavni ciljevi vizualnog opažanja su uočavanje nedostataka na konstrukciji, opažanje vidljivih pojava koje ukazuju na procese koji eventualno mogu oštetiti branu ili evakuacijske građevine te preliminarno utvrđivanje uzroka uočenih pojava i definiranje mjera za njihovo otklanjanje, uključivo mjere pojačanog monitoringa.

Mjerenja razine vode u akumulaciji se također obavlja svakodnevno. Ukoliko dođe do pojave bujica ili aktiviranja preljeva ili visokog vodnog vala koji prolazi kroz akumulaciju, podaci se prikupljaju i dostavljaju projektantima brane na daljnju obradu. Mjerenje količine procjedne vode provodi se svakodnevno na lokaciji lijevog i desnog drenažnog kanala kao i na lokaciji sabirnog kanala u nizvodnoj nožici. Količina i kakvoća oborina mjeri se svakodnevno kako bi se utvrdio utjecaj oborina na punjenje akumulacije. Statistička obrada izmjerenih podataka u dužem raz-

doblju potrebna je za izradu projekcije korištenja pitke vode u budućnosti. Tijekom izgradnje brane ugrađena su četiri piezometra u dva profila za mjerenje razine podzemne vode. Mjerenja se provode svakodnevno. Izgrađena je i mreža elektroakustičkih mjerača za mjerenje pornog tlaka u temeljnom tlu i glinenoj jezgri, ali se ova mreža pokazala nepouzdanom od samog početka monitoringa te su takva mjerenja naposljetku obustavljena. Već u izvještaju o godišnjem monitoringu za 1991. godinu dio mjerača nije bio ispravan, dva mjerača su očitavala veće pritiske u odnosu na maksimalnu vodu u jezeru, a nekoliko mjerača je izmjerilo vrijednosti skoro identične prethodnom mjerenju unatoč realnoj promjeni uvjeta u jezeru i brani. U izvještaju za 1997. godinu preostala su samo 2 ispravna elektroakustična mjerača pornog tlaka i to jedan pri samoj kruni brane te su ta mjerenja obustavljena. Tijekom obnove i proširenja opažačke mreže 2007. godine su dodana dva mjerna profila sa 17 novih piezometara.

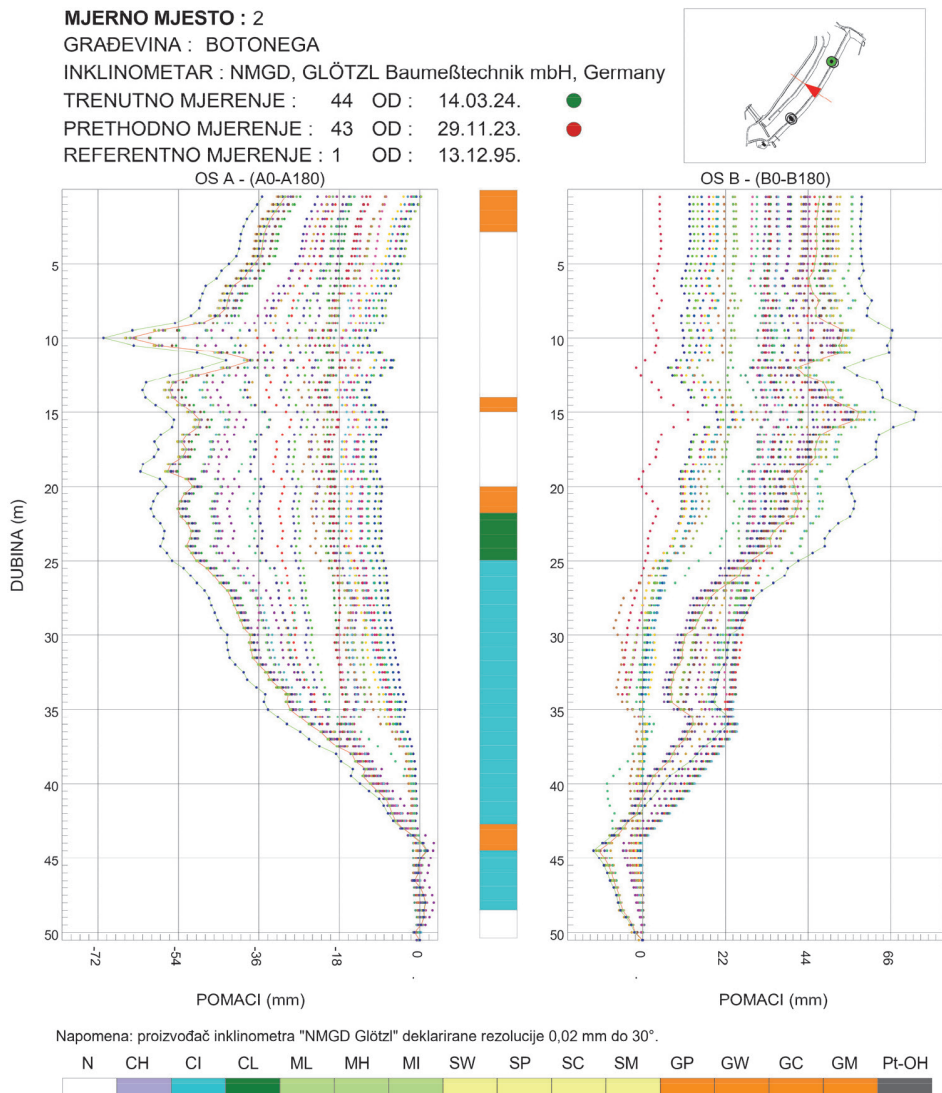
Vrlo važan dio programa monitoringa brane Butoniga su i mjerenja pomaka na koje se stavlja naglasak u ovom radu. Geodetska mjerenja provode se na ukupno 65 geodetskih točaka postavljenih na preljevu, umirujućem bazenu i na kruni brane. Pri tome se mjerenja pomaka na geodetskim točkama obavljaju svake godine za što se izrađuje i godišnji elaborat, a rezultati se prikazuju kumulativno, ovisno o vremenu, za sva mjerenja od kraja izgradnje i ugradnje mjerne opreme. Jednako tako, godišnje se prikupljaju i podaci o horizontalnim pomacima na četiri inklinometra ugrađena u tijelu brane. Duljina inklinometra varira od 40 do 50 m, a raspoređeni su u dva mjerna profila. Osim na godišnjoj razini, mjerenja pomaka na brani se provode po potrebi i tijekom izvanrednih događaja, primjerice za vrijeme i nakon visokog vodostaja u akumulaciji, nakon potresa magnitude veće od 5 prema Richteru i zbog drugih neočekivanih pojava.

3.3 Prikaz nekih rezultata monitoringa pomaka brane u vremenu

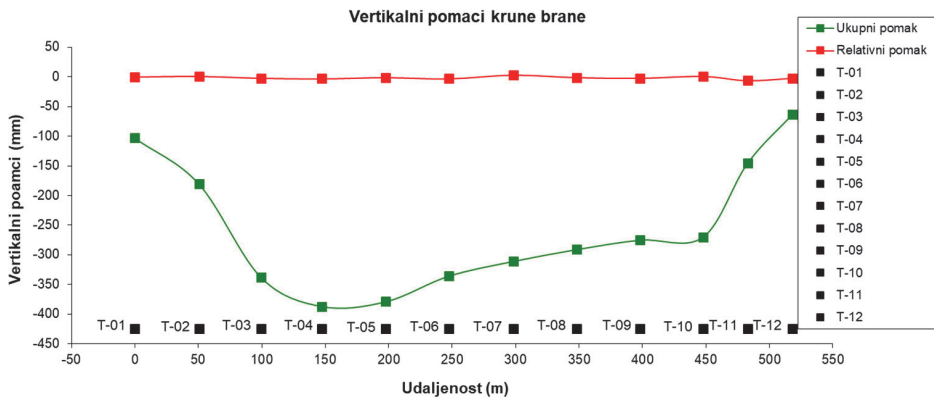
Na slici 4 su prikazani rezultati mjerenja na jednom od 4 ugrađena inklinometra čija je pozicija naznačena na samoj slici. Mjerenja horizontalnih pomaka su izvršena u dvije okomite osi te se može uočiti da najveći pomak u osi A (okomito na branu) u odnosu na referentno mjerenje iznosi 70,74 mm na dubini od 10 m, dok najveći pomak u osi B (uzdužno na branu) u odnosu na referentno mjerenje iznosi 72,68 mm na dubini od 15 m.

Bez ulaženja u korelaciju izmjerenih pomaka s uvjetima opterećenja same brane, što je van opsega ovog rada, jasno je da ovakvi podaci mogu biti itekako vrijedni da se stekne uvid u horizontalno pomicanje brane ovisno o uvjetima opterećenja. Pri tome se iz izmjerenih horizontalnih pomaka brane, provedenih do danas, može uočiti elastično ponašanje tijela brane pri promjenama vodostaja u akumulaciji, a isto tako u slučaju progresije pomaka može se pravovremeno pokrenuti pojačano održavanje i sanacija brane.

Na slici 5 je prikaz mjerenja relativnih (između posljednja 2 uzastopna mjerenja) i apsolutnih (od početka mjerenja) pomaka u vertikalnoj ravnini za sve kontrolne točke na brani, mjereno na geodetskim točkama. Vertikalni pomaci posljedica su slijeganja tijela brane i slijeganja temeljnog tla na kojem je brana izgrađena. Kumulativno, ukupni vertikalni pomaci kontrolnih točaka na kruni brane kreću se od 63,0 mm (točka 12) do 387,0 mm (točka 04) u smjeru slijeganja. Ukupna vrijednost slijeganja u ovom trenutku iznosi oko 1,5 % visine brane što je ispod prosjeka vrijednosti slijeganja za nasute građevine ovoga tipa [8] koje se kreće oko 5 % za povoljne uvjete ugradnje i kvalitetni materijal.



Slika 4. Rezultati mjerenja horizontalnih pomaka brane Butoniga na jednom ugrađenom inklinometru



Slika 5. Slijeganje brane Butoniga geodetskim mjerenjem kontrolnih točaka na kruni brane [7]

4 Zaključak

Monitoring velikih zemljanih brana je od ključne važnosti za kontinuirano praćenje njihovog ponašanja ovisno o uvjetima opterećenja u kojima se nalaze. Ovo je naročito važno u uvjetima sveprisutnih klimatskih promjena uzimajući u obzir izrazitu osjetljivost zemljanih brana na promjene obrazaca padalina i pojave dužih sušnih razdoblja. Stoga se širok raspon opreme za monitoring može koristiti u svim fazama projektnog vijeka brane, tijekom izvedbe i tijekom eksploatacije, uključivo mjerače deformacije tla, piezometre, mjerače procjeđivanja vode kroz branu i kroz temeljno tlo, mjerače temperature, ćelije za mjerenje naprežanja, kao i mjerenje pomaka primjenom geodetskih repera i inklinometara. Za potonje je u radu prikazan primjer dugogodišnjeg mjerenja prostornih pomaka na geodetskim reperima i horizontalnih pomaka po dubini brane kroz monitoring brane Butoniga u Istri. Voda iz sustava jezera Butonige distribuirana se prema potrošačima u Pazinu, Poreču i Rovinju, a upravo je zemljana brana ključni element sustava. Mjerenja pomaka se obavljaju na godišnjoj bazi, a po potrebi dodatno i u izvanrednim slučajevima. Mjerenja slijeganja brane pokazuju da je ukupna vrijednost slijeganja u ovom trenutku oko 1,5 % visine brane što je ispod prosjeka vrijednosti slijeganja za nasute građevine ovoga tipa [8] koja se kreću oko 5 %, dok mjerenja horizontalnih pomaka na 4 ugrađena inklinometra upućuju na elastično ponašanje tijela brane pri promjenama vodostaja u akumulaciji. Ovakav sustav monitoringa brane omogućava sustavno planiranje održavanja brane i produljenje njenog radnog vijeka te rano upozorenje na moguća oštećenja ili posljedice elementarnih nepogoda.

Literatura

- [1] ICOLD (International Organization on Large Dams). Constitution Statuts, ICOLD, Paris, France, 2011.
- [2] IUCN (The World Conservation Union & the World Bank Group). Large dams: Learning from the past, looking at the future, Workshop proceedings, Gland, Switzerland, 1997.
- [3] Mitrevska, M., Mileski, T., Mikac, R. Critical infrastructure : concept and security challenges, Friedrich Ebert Foundation, Skopje, North Macedonia, 2019
- [4] Kovačević, M.S., Bačić, M., Stipanović, I., Gavin, K. Categorization of the Condition of Railway Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory“, Applied Sciences-Basel, 9 (2019) 23, do: 10.3390/app9235089
- [5] URL: www.geokon.com, Miscellaneous Items, Dam Monitoring Instrumentation (Accessed on May 10th 2024)
- [6] URL: www.hr.wikipedia.org/wiki/Butoniga_%28jezero%29 (Accessed on May 5th 2024)
- [7] Geokon – Zagreb. Godišnji izvještaj o redovitom tehničkom promatranju brane Butoniga, tehničko promatranje, Geokon – Zagreb d.d., 2022.
- [8] Water Resources Division, Department of Primary Industries and Water. Guidelines for the construction of earth-fill dams, Hobart, Tasmania, 2008.