

dr. Mateja Klun, mag. inž. ok. grad.
mateja.klun@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Dejan Zupan, univ. dipl. inž. mat.
dejan.zupan@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.
andrej.kryzanowski@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



SPREMLJANJE KONDICIJSKEGA STANJA BETONSKIH TEŽNOSTNIH PREGRAD STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE GRAVITY DAMS

Znanstveni članek
UDK 627.82:69.059.4

Povzetek

V Sloveniji se vse bolj soočamo s problemom staranja pregradnih objektov, saj povprečna starost slovenskih pregrad že presega 40 let. Hkrati pa se spoprijemamo tudi s spremenjenimi razmerami, na primer s spremembami v režimih obratovanja na pregradah, namenjenih za hidroenergetsko izrabo. Te spremembe lahko dodatno prispevajo k procesu staranja in k zmanjšanju obratovalne varnosti pregrad. Pregrade so strateško zelo pomembni infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne ekonomske (energetika, vodno gospodarstvo, kmetijstvo, turizem) kot tudi družbene koristi (razvojne možnosti v regiji, spodbude gospodarskega razvoja). V primeru tehničnih okvar in porušitev (delnih ali popolnih) pa predstavljajo nevarnost za dolvodna območja. Zagotavljanje dobrega kondicijskega stanja starajočih se pregrad predstavlja enega ključnih izzivov pregradnega inženirstva ne zgolj v Sloveniji, temveč tudi drugod po svetu. V prispevku predstavljamo metodologijo za spremljanje kondicijskega stanja betonskih pregrad s spremljanjem vibracij v kombinaciji z računsko analizo konstrukcije. Metodologija temelji na uporabi nekontaktnih in kontaktnih meritev z beleženjem ambientalnih vibracij. Eksperimentalno delo smo izvajali na pregradi Brežice, ki smo jo pričeli spremljati že med gradnjo in v prvem letu obratovanja.

Ključne besede: vibracije, pregrada, meritve, spremljanje kondicijskega stanja, metoda končnih elementov

Summary

In Slovenia, we are increasingly confronted with the problem of aging dam structures as the average age of Slovenian dams is already over 40 years. At the same time, we are also facing changes in other factors, especially significant changes in time-dependent loads and new patterns in turbine operation manoeuvres, with multiple starts and stops on a daily basis. These changes can lead to a decrease in structural and operational safety of dams. Dams are built to serve for a long time and require safe and reliable operation. They also play an important role in society, as they bring numerous benefits, i.e., in addition to electrical generation, also water storage, irrigation, flood control. However, in the event of their technical or structural failure (partial or total), they pose a threat to downstream areas. The ageing of dams, the preservation of their functionality and the preservation of structural health are currently the greatest challenges in dam engineering in Slovenia and abroad. This article presents a novel methodology to monitor structural health of concrete dams using the noncontact and contact measurements of ambient vibrations in combination with computational structural analysis. We present the in-situ experiment at Brežice dam initiated already during the construction and continued into the first year of operation.

Key words: vibration, concrete dam, measurements, structural health monitoring, finite element analysis

1 UVOD

V svetu se letno zgradi približno 200 pregrad različnih tipov, ki presegajo konstrukcijsko višino 15 m in se po tem kriteriju uvrščajo med velike pregrade [Bernstone, 2006]. Intenzivnost gradnje pa je bila še večja v sredini prejšnjega stoletja. Po podatkih Slovenskega nacionalnega komiteja za velike pregrade (SLOCOLD) smo v Sloveniji pred letom 1980 zgradili 60 % pregrad. Podobna situacija je tudi drugod po svetu, na primer v ZDA so pred letom 1979 zgradili več kot 80 % pregrad, v Avstraliji pa pred letom 1969 več kot polovico [ANCOLD, 2018], [SLOCOLD, 2021], [USBR, 2018]). Tako lahko predvidevamo, da je večina pregrad, ki bodo v razvitem svetu obratovalne v 21. stoletju, že zgrajenih. To pomeni, da bodo upravljalci objektov vse pogostejše soočeni s problemom staranja pregrad, njihove funkcionalnosti in tudi s problematiko ohranjanja dobrega kondicijskega in zanesljivega obratovalnega stanja objektov. Poudariti moramo, da so pregrade zelo pomembni infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne ekonomske in družbene koristi. Hkrati pa vsaka pregrada pomeni tudi tveganje [Zhang, 2016]. Zaradi razgibane topografije in razpršenosti gradnje v Sloveniji se veliko urbanih površin nahaja v vplivnem območju pod pregradami, zato moramo poskrbeti, da so naše pregrade v dobrem stanju ter da se z njimi učinkovito in varno gospodari.

V prispevku predstavljamo rezultate analize vplivov obratovanja na kondicijsko stanje betonskih masivnih pregrad. Pri tem smo se osredotočili na spremljanje vibracij betonske konstrukcije zaradi običajnih obratovalnih manevrov z elektro-strojno in hidromehansko opremo pri proizvodnji električne energije in zaradi prelivanja vode čez pregrado v primeru evakuacije poplavnih voda. Eksperimentalni del, kjer smo merili dinamični odziv na jezovni zgradbi hidroelektrarne Brežice, smo uporabili za validacijo računskega modela strojnice in prelivnih polj. Betonsko konstrukcijo pregrade Brežice smo pričeli spremljati že v času gradnje in tako zabeležili referenčno stanje objekta z dejanskimi začetnimi karakteristikami, ki je služilo za osnovo nadaljnjih raziskav na objektu. Glavnino eksperimentalnega dela smo opravili v času zagonskih testov elektrostrojne in hidromehanske opreme. V raziskavi smo se osredotočili na betonsko konstrukcijo, ki je zaradi obratovanja hidroelektrarne izpostavljena stalnim vibracijam. Beton je zaradi heterogene sestave in začetne zaloge mikro razpok v svoji strukturi občutljiv za delovanje vibracij, še zlasti če je izpostavljenost betonske konstrukcije vibracijam stalna. Pričakovana projektna doba pregrad je zelo dolga in presega obdobje 50 let. V tem času se na hidroenergetskih pregradah zamenja vsa elektrostrojna in hidromehanska oprema, nekatera celo večkrat [Letcher, 2019]. Menjava betonske konstrukcije je precej zahtevnejši poseg, zato je vzdrževanje in zagotavljanje dolge življenjske dobe toliko pomembnejše. Pri gradnji pregrad uporabljamo masivne hidrotehnične betone, za katere veljajo posebni pogoji v primerjavi z običajnimi konstrukcijskimi betoni (večja karakteristična zrna agregata, uporaba nizkohidratacijskih cementov, vgradnja v večjih količinah, nizka toplota hidratacije). Na ta način želimo omejiti pojav mikro razpok, vendar pa se mu ne moremo povsem izogniti. Za vsak beton, tudi če je vgrajen v optimalnih pogojih, se razvije začetno stanje mikro razpok. Te se razvijejo zaradi pojava nateznih napetosti med agregatnimi zrni in vezivom v času strjevanja. Masivni hidrotehnični betoni so še

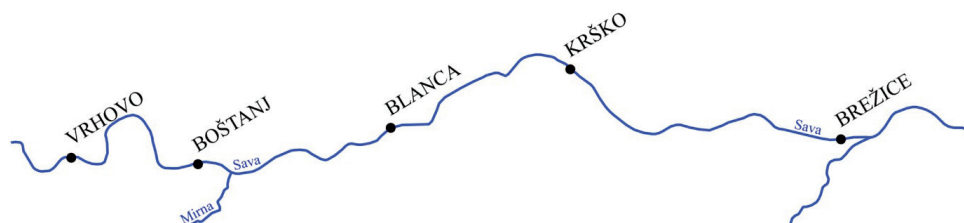
posebej podvrženi pojavu zgodnjega mikro razpokanja ([Minashi, 2004], [Sriravindrarajah, 1989]). Proces tvorjenja razpok se razlikuje glede na tip betona. Pri običajnih konstrukcijskih betonih nižje in srednje trdnosti se te tvorijo v cementnem kamnu in na stični površini zrn agregata. Pri hidrotehničnih betonih pa je situacija nekoliko bolj kompleksna, saj se zaradi prisotnosti večjih frakcij agregatnih zrn razpoke tvorijo tudi v agregatnih zrnih, te pa se nato združujejo z razpokami na stični površini med cementnim kamnom in zrni agregata. Zaradi naštetega pa so hidrotehnični betoni bolj izpostavljeni procesom zgodnjega staranja ([ACI Committee 207, 2009], [FIB, 1999]).

Z izrazom staranje pregrad opisujemo vse materialne spremembe, ki nastajajo ob izpostavljenosti časovno odvisnim vplivom [Zenz, 2008]. O staranju pregrad govorimo po preteku 5 let od pričetka obratovanja, poškodbe, ki se pojavijo prej, pa so povezane z napakami pri zasnovi in vgradnji [ICOLD Committee on Dam Ageing, 1994]. Glavni vzroki za pospešeno staranje betonskih pregrad so alkalna agregatna reakcija, kemični napad (sulfati, kloridi), abrazija, kavitacija, spiranje, volumske deformacije betona, temperaturni cikli ter vibracije zaradi obratovanja hidroelektrarne. Vibracije pri obratovanju hidroelektrarn predstavljajo dodatno ciklično obtežbo konstrukcije, ki povzroča utrujanje materiala in posledično pospešuje staranje konstrukcije. Utrujanje lahko razdelimo v 3 skupine: (i) utrujanje z nizkim številom ciklov ($N_f \leq 10^3$) in visokimi amplitudami napetosti; (ii) utrujanje z velikim številom ciklov ($10^3 \leq N_f \leq 10^7$) in nizkimi amplitudami napetosti; ter (iii) utrujanje z zelo velikim številom ciklov ($N_f \geq 10^7$) in z zelo nizkimi amplitudami napetosti [Shah, 1970]. Primer utrujanja materiala z nizkim številom ciklov predstavlja primer potresne obtežbe. Primer utrujanja materiala z velikim številom ciklov pa predstavljajo obtežbe zaradi vetra, prometa ali obratovanja strojev in opreme. Slednje je tipično za hidroenergetske objekte s posledicami tako na elektrostrojno opremo kot na betonski konstrukciji. Zaradi heterogene sestave in posledic procesa hidratacije se že v mladem betonu v času strjevanja pojavijo prve mikro razpoke, kar je z vidika odpornosti materiala proti utrujanju manj ugodno, saj se pri stalno prisotni ciklični obtežbi ter začetne razpoke širijo, se medsebojno povezujejo in povečujejo razpokanost konstrukcije, kar posledično vpliva na pospešeno staranje materiala [Courtney, 2005]. S povečanjem deleža razpokanosti hidrotehničnih betonov na mikro ravni še ni nujno ogrožena strukturna varnost, pojavijo pa se težave pri zagotavljanju vodotesnosti. S stalno izpostavljenostjo cikličnim obremenitvami se razpoke vse bolj širijo, pri tem pa je treba upoštevati še izpostavljenost stalnemu hidrostatskemu tlaku in spremljajoče se hidrodinamične procese, ki proces tvorbe razpok dodatno pospešijo, s tem pa tudi procese staranja konstrukcije. Ob tem se poveča izpostavljenost konstrukcije za kemični napad in zmanjša odpornost proti temperaturnim nihanjem, kar še dodatno vpliva na proces staranja.

2 METODE

2.1 Pregrada Brežice

Hidroelektrarna Brežice je peta elektrarna v nizu hidroelektrarn na spodnji Savi in leži v neposredni bližini mesta Brežice (slika 1).



Slika 1. Pregrade na spodnji Savi.

To je kombinirana težnostna pregrada, ki jo sestavlja osrednja betonska pregrada, na katero se priključujeta visokovodna nasipa, ki omejujeta območje zadrževalnika (slika 2). Skupna dolžina objektov je več kot 14 km. Uradno se je gradnja pregrade Brežice pričela leta 2014, leta 2018 pa je bilo izdano uporabno dovoljenje za jezovno zgradbo HE Brežice [HESS, 2022]. Koncesija za hidroenergetsko izrabo je podeljena za obdobje 50 let z možnostjo podaljšanja, rok pa je začel teči z dnem, ko je bilo izdano veljavno gradbeno dovoljenje ([UL RS, 2011], [UL RS, 2012]).

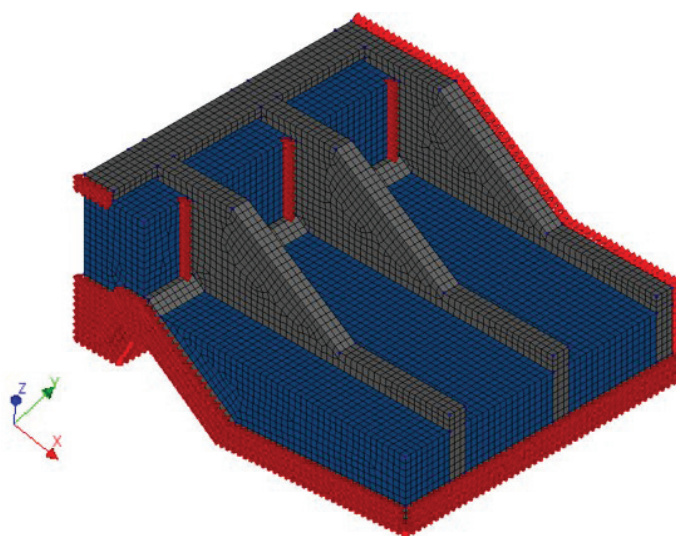


Slika 2. Pregrada Brežice iz zraka [HESS, 2022].

Jezovno zgradbo skupne dolžine 160 m in z maksimalno konstrukcijsko višino 36,5 m sestavljajo pogonski objekt (blokovi tip strojnice) in prelivni del s petimi prelivnimi polji. V strojnici so nameščene tri vertikalne, dvojno regulirane Kaplanove turbine s posamično močjo 15,2 MW in z načrtovano srednjo letno proizvodnjo 161 GWh. HE Brežice obratujejo kot pretočna elektrarna z omejeno možnostjo izkoriščanja kapacitet zadrževalnika. Prostornina akumulacije znaša več kot 19 milijonov m³, maksimalna dovoljena obratovalna denivelacija pa znaša 1,1 m. Prelivna polja so široka 15 m, vsako je opremljeno s segmentno zapornico z zaklopko in lahko prevaja pretok približno 1000 m³/s. Obratovalni režim prelivnih polj je zasnovan tako, da se v času visokih voda zapornice na prelivnih poljih dvignejo in se v reki vzpostavi naravno gladinsko stanje. Reka Sava ima hudourniški značaj, maksimalni zabeleženi pretok v profilu Save pri Brežicah je iz leta 2010 in znaša 3680 m³/s, ocenjena stoletna poplavna voda pa 3750 m³/s. V času poplavnih voda so potopljene tudi najnižji deli stebrov, ki razmejujejo posamezna prelivna polja. Elektrarna pa preneha obratovati, ko pretoki v reki dosežejo 800 m³/s. Strojnica elektrarne je umeščena na levo brežino reke Save ([Bombač, 2012], [IBE, 2016], [INFRA, 2012], [Rak, 2012]).

2.2 Numerični model

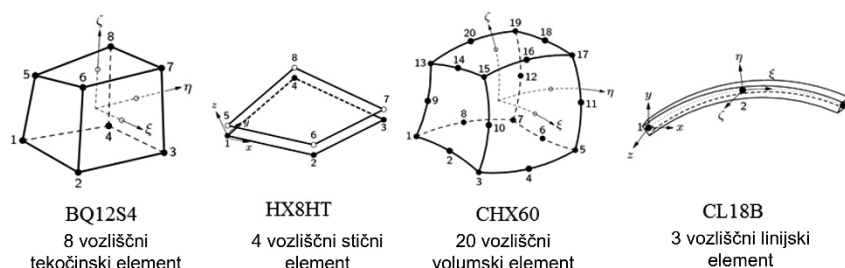
Obnašanje konstrukcije smo ocenili s sodobnimi programskimi orodji. Ta orodja smo uporabili tudi za določanje primernih merilnih mest za eksperimentalni del in oceno vpliva sprememb v konstrukciji na dinamično obnašanje le-te. V programskem orodju Diana 10.2 [DIANA FEA, 2017] smo izdelali dva ločena numerična modela: model prelivnih polj in model strojnice. Pri izdelavi modela prelivnih polj smo upoštevali načelo simetrije in modelirali zgolj polovico segmenta, kjer simetrijsko os predstavlja sredinska črta v smeri gorvodno-dolvodno (v modelu v smeri globalne osi X po sredini 3. prelivnega polja), kar sovpada tudi s statično zasnovo konstrukcije (slika 3). Prelivno območje pregrade sestavlja pet prelivnih polj, razdeljenih s stebri širine 2,7 m, dolžine 51,15 m ter spremenljive višine, ki je najvišja na gorvodni strani (22,9 m) in najnižja na skrajno dolvodni točki (15 m). Vsako prelivno polje je široko 15 m. Fiksni del prelivnega praga je v najvišji točki 11,3 m nad najnižjo točko globine podslapja. Vpliv segmentnih zapornic smo modelirali preko robnih pogojev. Razbijačev in galerije nismo vključili v model.



Slika 3. Model prelivnih polj.

V modelu smo definirali tudi tekočinske elemente in stični element na mestu stika fluidnega elementa s konstrukcijskimi elementi. Slika 4 prikazuje uporabljene končne elemente.

Za beton smo predpostavili linearni materialni model. Vodo smo modelirali kot nestisljivo, preprečili smo pojav površinskih valov. Na spodnjem robu modela so preprečeni pomiki v smeri



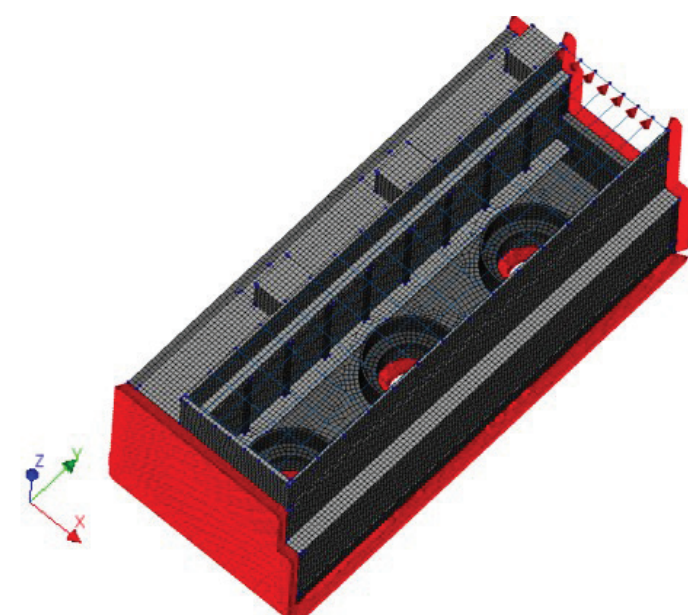
Slika 4. Uporabljeni končni elementi [DIANA FEA, 2017].

osi X, Y in Z, vpliv objekta strojnice je na boku nadomeščen s podporami v smeri osi Y. Definirali smo fazni model, ki je omogočal izračune brez dodane vode v akumulaciji in podslapju in z njo.

pogoj smo postavili, da pri odzivu sodeluje vsaj 90 % mase v modelu. V skladu z SIST EN 1992-1-1 smo preverili tudi odpornost betonske konstrukcije proti utrujanju [SIST, 2004]. Stara nje objekta smo simulirali s spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti betona. Predpostavili smo globalno znižanje vrednosti modula elastičnosti v območju do približno 10 %, nato smo izvedli večje število analiz.

2.3 Dopolnitev programa opazovanja pregrade

Približno 2 leti po pričetku gradnje objekta, leta 2016, smo na objektu začeli periodične meritve vibracij. Namen teh meritev je bila določitev referenčnega stanja novozgrajenega objekta, ki služi za podlago za nadaljnja opazovanja in ocene kondicijskega stanja na pregradi Brežice kot tudi na sorodnih objektih na spodnjesavski verigi. Slika 6 prikazuje stanje betonske konstrukcije v času začetnih meritev pred preusmeritvijo Save. Gradbišče je bilo organizirano v suhi gradbeni jami. Gradbena dela na konstrukciji prelivnega dela in zgradbe strojnice so bila v večini zaključena, v teku so bila montažna dela elektrostrojne in hidromehanske opreme. Konstrukcija jezovne zgradbe še ni bila izpostavljena delujočim obtežbam zaradi obratovanja elektrarne, kar je predstavljalo edinstveno referenčno začetno stanje pregrade za spremljanje vplivov dinamičnih obremenitev na konstrukcijo. Meritve vibracij na konstrukciji jezovne zgradbe lahko razdelimo na obdobje v času gradnje z namenom določitve lastnih nihajnih oblik konstrukcije in obdobje

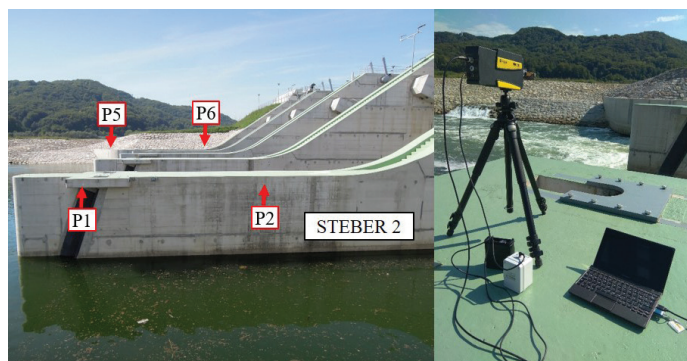


Slika 5. Model strojnice.

Pri določitvi velikosti končnih elementov smo predpisali maksimalno velikost stranice elementa (1 m na modelu prelivnih polj ter 0,5 m na modelu strojnice). Izvedli smo modalno analizo z namenom določitve lastnih nihajnih oblik. Pri modelu strojnice smo določili prvih 200 lastnih nihajnih oblik, pri modelu prelivnih polj pa prvih 100 lastnih nihajnih oblik. Za



Slika 6. Meritve v času gradnje.



Slika 7. Nekontaktne meritve vibracij stebrov v prelivnih poljih.

v času zagonskih poskusov delovanja elektrostrojne in hidromehanske opreme, ki je glede obremenitev na konstrukcijo referenčno obratovalno stanje z namenom določitve tipičnih nihanj, vzbujenih zaradi obratovanja elektrarne.

Meritve smo v začetnem obdobju v času poteka gradbenih del v suhi gradbeni jami izvajali s pomočjo prenosnega laserskega vibrometra [Polytec, 2016]. Vir nihanj so bila gradbena in montažerska dela na gradbišču, del meritev pa smo izvedli tudi v popoldansko večernem času, ko je bila na lokaciji minimalna količina ambientalnega vzbujanja z namenom odprave eventualnih neugodnih vplivov, ki bi utegnili vplivati na določitve lastnih nihajnih časov in lastnih nihajnih oblik konstrukcije. Temu obdobju so sledile meritve vibracij konstrukcije v času testov elektrostrojne in hidromehanske opreme pred pričetkom poskusnega obratovanja HE Brežice. V tem obdobju smo izmerili vibracije objekta med različnimi prehodnimi pojavi v procesu poskusov delovanja elektrostrojne in hidromehanske opreme, kot so hitre in redne zapore agregata, zagon, sinhronizacija. V obdobju testnih preskusov je intenzivnost teh pojavov večja kot pri normalnem obratovanju. Upoštevati pa je treba dolgoročnost teh pojavov, ki so na hidroenergetskih objektih stalno prisotni in na dolgi rok predstavljajo enega najpomembnejših vzrokov za utrujanje betonskih konstrukcij. Pri postavitvi poskusne opreme za spremljanje vibracij smo morali rešiti problem vpliva nihanja stojišča merske naprave, kar smo kompenzirali z namestitvijo pospeškomerov na mersko napravo za izločitev šuma, ki ga povzroča nihanje opreme. Dodatno smo namestili pospeškomere in hitrostne doze tudi na samo konstrukcijo in na turbinsko in generatorsko ohišje. S tem smo zajeli vse potrebne parametre, ki so pomembni za interpreta-

cijo meritev [Klun, 2019]. Primer meritve v prelivnem polju z uporabo nekontaktnih metod je prikazan na sliki 7. Objektu ne vsiljujemo dodatnih vibracij, saj je ob običajnem obratovanju na objektu že prisotnega dovolj vzbujanja. Glavna prednost takšnih meritev je, da ne povzročajo motenj v rednem obratovanju ter da je izmerjeni odziv dejanski odziv konstrukcije na obratovalno obtežbo. Vzpostavljeni sistem dinamičnega opazovanja tako dopolnjuje obseg rednih aktivnosti monitoringa na pregradi.

3 ANALIZA IN REZULTATI

V tem poglavju so predstavljeni rezultati modalne analize numeričnega modela. Rezultati meritev na pregradi HE Brežice so obširno predstavljeni v članku, objavljenem v reviji Journal of Civil Structural Health Monitoring ter doktorski nalogi prve avtorice tega članka ([Klun, 2020a], [Klun, 2020b]). Rezultati modalne analize modela prelivnih polj so prikazani na sliki 8. Prikazani sta prva in druga lastna nihajna oblika stebra 2 za suho stanje, pri katerem se prva nihajna oblika nahaja v frekvenčnem spektru pri 10,9 Hz in druga nihajna oblika pri 15,8 Hz. Z upoštevanjem vpliva vode v računskem modelu pa vrednosti prve in druge lastne frekvence pričakovano padejo na 10,6 Hz in 14,9 Hz. Na istem stebru smo izvajali tudi meritve, izmerjene vrednosti so: 10,8 Hz za prvo nihajno obliko in 16,8 Hz za drugo. Odstopanja med računsko in izmerjeno vrednostjo so 3 % pri prvi lastni frekvenci in 6 % pri drugi ([Klun, 2020a], [Klun, 2020b]). S primerjavo slik 7 in 8 lahko razberemo še, da je lokacija merilnih ročk na mestih, kjer je jasno možno spremljati spremembe prve in druge lastne frekvence.

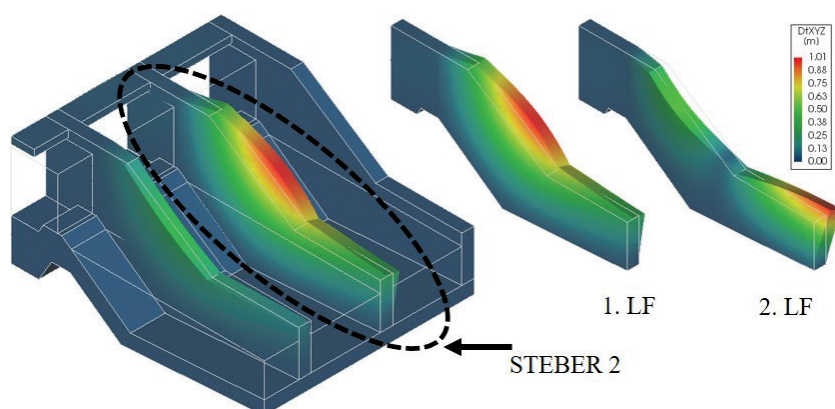
S spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti smo nato simulirali staranje konstrukcije. Staranje betona je kompleksen proces, povezan tudi s povečanjem razpokanosti betona. Za opis fenomena staranja smo se odločili za pristop, ki se v pregradnem inženirstvu uporablja pogosto, staranje betonske konstrukcije smo opisali s spreminjajočimi se vrednostmi modula elastičnosti betona ([Chen, 2019], [Gogoi, 2007], [Nahar, 2020]). Rezultati analize so prikazani v preglednicah 1 in 2. Zmanjševanje vrednosti modula elastičnosti se odraža v mehčanju konstrukcije, vrednosti tako prve kot tudi druge lastne frekvence padajo sorazmerno s padcem modula elastičnosti. Zmanjšanje modula elastičnosti za 10 % povzroči 5-% zmanjšanje vrednosti obeh lastnih frekvenc ne glede na to, ali gre za suho ali za potopljeno stanje konstrukcije.

Modul elastičnosti	[$\cdot 10^7$ kN/m ²]	3,10	3,07	3,03	2,99	2,96	2,92	2,89	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	10,98	10,93	10,85	10,78	10,72	10,65	10,60	10,53	10,48	10,42
2. lastna frekvenca	[Hz]	15,81	15,73	15,63	15,52	15,45	15,34	15,26	15,16	15,08	14,99

Preglednica 1. Lastne frekvence na modelu prelivnih polj.

Modul elastičnosti	[$\cdot 10^7$ kN/m ²]	3,10	3,07	3,03	2,99	2,96	2,92	2,89	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	10,58	10,53	10,46	10,39	10,34	10,27	10,22	10,15	10,09	10,04
2. lastna frekvenca	[Hz]	14,86	14,78	14,69	14,59	14,52	14,42	14,34	14,25	14,17	14,09

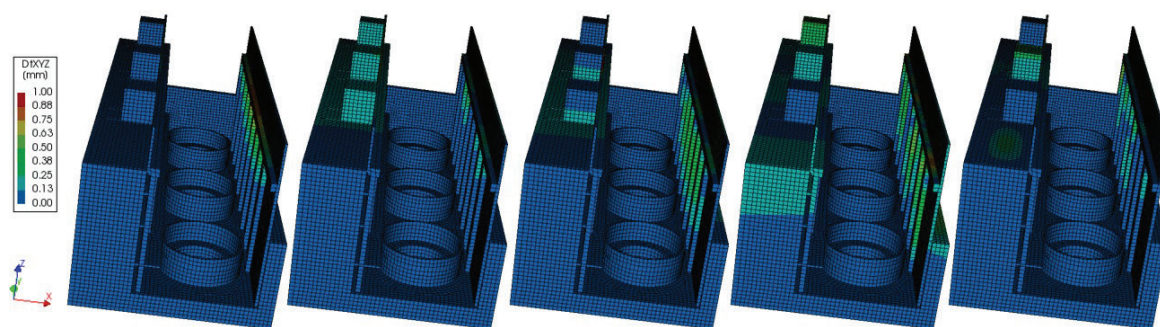
Preglednica 2. Lastne frekvence na modelu prelivnih polj z dodano vodo v modelu.



Slika 8. Prva in druga nihajna oblika modela prelivnih polj.

Na sliki 9 prikazujemo prvih 5 nihajnih oblik za model strojnice, dobljenih z računskim modelom strojnice, prvih 5 lastnih frekvenc se nahaja pri vrednostih 5,8 Hz, 8,2 Hz, 10,6 Hz, 14,1 Hz, 20,1 Hz. Lastne frekvence, izmerjene na objektu, se od izračunanih razlikujejo za 1–9 %, za primerjavo navajamo še merjene vrednosti: 6 Hz, 8,3 Hz, 11,5 Hz, 14,5 Hz in 21,4 Hz [Klun, 2020a].

mi boljšimi materialnimi lastnostmi od projektnih. V preglednici 3 prikazujemo rezultate simulacij za prvih 5 lastnih frekvenc. Tudi na tem modelu opazimo pojav mehčanja pri padanju vrednosti modula elastičnosti. Pri spremembi modula elastičnosti za približno 3 % pride do spremembe vrednosti lastnih frekvenc za približno 1 %. Predpostavljeno 10-% zmanjšanje



Slika 9. Prvih 5 nihajnih oblik modela strojnice.

Tudi na tem modelu smo simulirali staranje s spreminjanjem vrednosti modula elastičnosti. Izvedli pa smo še dodatno simulacijo modela strojnice, kjer smo predpostavili višjo vrednost modula elastičnosti od projektnih vrednosti. Znano je, da se vrednosti modula elastičnosti mladega betona spreminjajo s časom, da je smiselno sklepati, da v času, ko smo bili prisotni na objektu, proces hidratacije še ni bil povsem zaključen, kar bi lahko pomenilo, da se bodo materialne lastnosti betona še nekoliko izboljšale, preden se bo beton začel starati. V ta namen je bila izvedena še dodatna simulacija s predpostavljeni-

modula elastičnosti zaradi staranja pomeni približno 4-% spremembo vrednosti lastnih frekvenc strojnice.

S pomočjo rezultatov numeričnega modela smo preverili tudi odpornost na utrujanje po SIST-EN 1992-1-1 na območjih z maksimalnimi tlačnimi napetostmi ($\sigma_{c,max}$) [SIST, 2004]. Območja z maksimalnimi tlačnimi napetostmi se pojavljajo na dnu turbinskih jaškov, maksimalna vrednost znaša 10,9 MPa. Odpornost na utrujanje se določi ob upoštevanju vrednosti maksimalnih tlačnih napetosti, časa od vgradnje do pričetka

Modul elastičnosti	[10^7 kN/m ²]	3,2	3,1	3,03	2,96	2,92	2,85	2,82	2,79
1. lastna frekvenca	[Hz]	5,79	5,71	5,66	5,61	5,57	5,52	5,49	5,46
2. lastna frekvenca	[Hz]	8,18	8,12	8,08	8,03	8,01	7,96	7,94	7,93
3. lastna frekvenca	[Hz]	10,56	10,42	10,32	10,24	10,20	10,13	10,10	10,07
4. lastna frekvenca	[Hz]	14,09	13,90	13,77	13,64	13,56	13,42	13,36	13,29
5. lastna frekvenca	[Hz]	20,11	19,81	19,60	19,39	19,26	19,05	18,95	18,86

Preglednica 3. Vpliv modula elastičnosti na lastne frekvence strojnice.

obratovanja, končnega števila ciklov in projektnih vrednosti betona. Ocenili smo, da je od vgradnje betona do pričetka zagonskih preskusov, ko je bila konstrukcija izpostavljena vibracijam preteklo približno eno leto ($t_0 = 400$ dni). Z uporabo enačb (1) in (2) smo določili

$$f_{cd,fat} = k_1 \beta_{cc}(t_0) f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (1)$$

$$\beta_{cc} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

projektno trdnost betona $f_{cd,fat}$ odporne proti utrujanju, ki znaša 15,3 MPa. Za vrednost parametra k_1 smo privzeli 0,85, kar je priporočena vrednost za število ciklov $N = 10^6$, s predstavlja koeficient za tip cementa (0,25 za razred N), f_{cd} projektna tlačna trdnost betona, f_{ck} karakteristična tlačna trdnost betona, t starost betona v dneh. V enačbi (2) smo za vrednost t privzeli $t = t_0$. Ocenili smo, da je razmerje $\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} = 0,71 < 0,9$. To pomeni, da konstrukcija ustreza pogoju odpornosti na utrujanje po SIST-EN 1992-1-1.

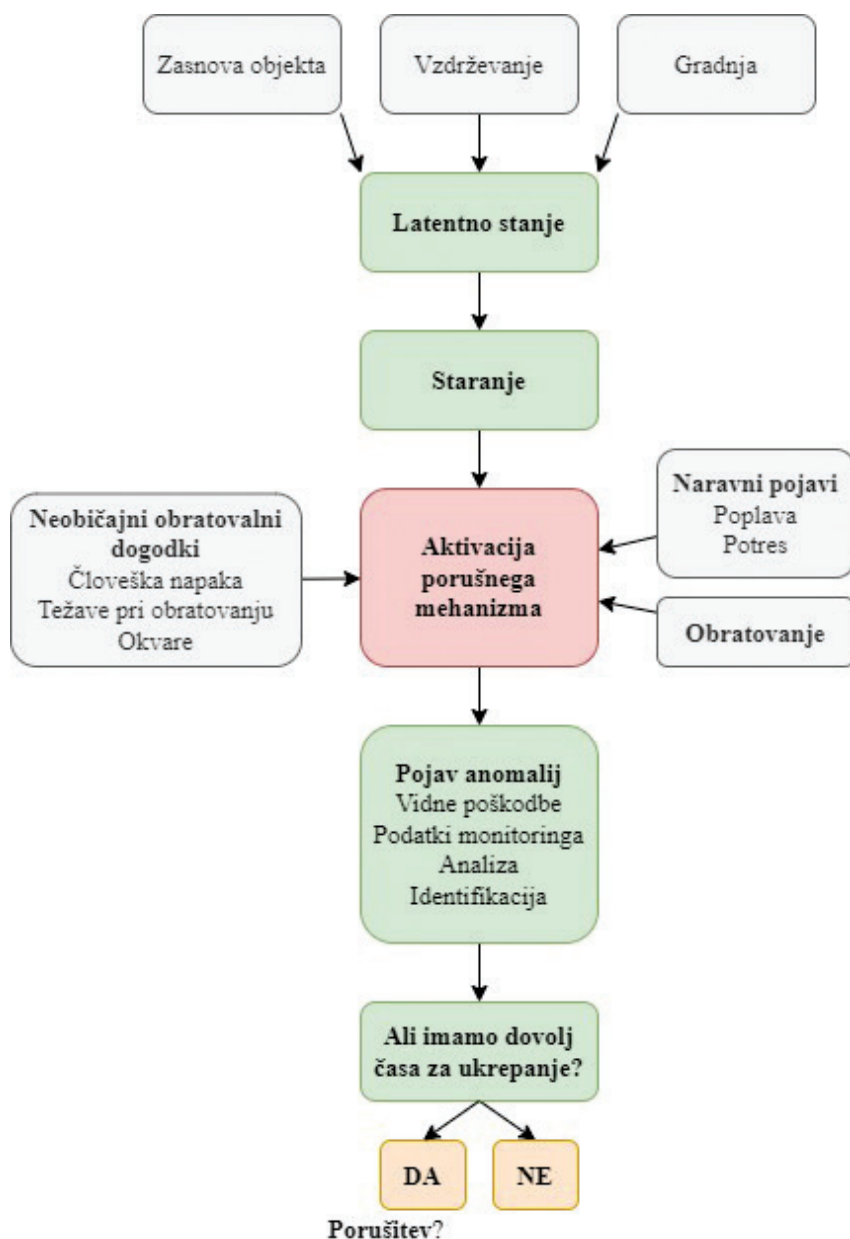
4 DISKUSIJA

Analiza objekta z vidika vibracij je pomembna iz dveh razlogov, prvi je izboljšanje možnosti vpogleda v proces staranja konstrukcije, drugi pa prepoznavanje posledic dinamičnih procesov in vplivov delovanja turbin na konstrukcijo. Poleg meritev na objektu smo izvedli tudi meritve neposredno na ohišju turbin z namenom določitve glavnih vzbujalnih frekvenc v strojnici zaradi obratovalnih manevrov in izmerili naslednje frekvence: 1,8 Hz, 3,6 Hz, 7,2 Hz, 21,4 Hz, 35,7 Hz in 42,9 Hz. Vibracije so posledica vrtenja agregatov (nazivna hitrost znaša 107 obr/min), pojava višjih harmonikov in pulzacij vodnega toka pri prehodu čez turbinski trakt. Vzbujanje je bolj intenzivno pri prehodnih pojavih, kot so zagon, zaustavitev, proces sinhronizacije pred vklopom na mrežo, krmljenje in prilagajanje med obratovanjem. Z vidika betonske konstrukcije je optimalno obratovanje v nazivnem območju, torej v območju, kjer ima agregat najboljši izkoristek. Pri obratovanju agregatov želimo, da je obratovanje čim bolj enakomerno; vsakršne nenadne spremembe pri obratovanju (spremembe obremenitve agregatov, zaustavitve in zagoni ...), ki povzročijo odklik od točke optimalnega izkoristka, pa ne povzročajo le poškodb na agregatu, ampak tudi vplivajo na staranje nosilne konstrukcije. Iz literature so znani primeri, ko so povečani zagonski cikli, ki so presežali načrtovane vrednosti, vodili v odpovedi nosilne konstrukcije [Lopez, 2003]. Večini hidroenergetskih pregrad v Sloveniji je bila namenjena drugačna vloga in niso bile zasnovane za to, da prevzemajo vlogo sistemskih elektrarn, za katere so značilni obratovalni režimi, ki se nenehno prilagajajo trenutnim potrebam elektroenergetskega sistema. Prav tako niso bili upoštevani vplivi podnebnih sprememb, ki tudi vplivajo na obratovalne režime hidroenergetskih objektov. Vloga pretočnih elektrarn v verigi se je danes povsem spremenila. Njihova hitra odzivnost in zmožnost zagotavljanja sistemskih rezerv in storitev jih postavlja med najbolj fleksibilne vire električne energije. Posledično sprejemajo tudi vlogo sistemskih elektrarn pri zagotavljanju stabilnosti v sistemu in vzdrževanju ravnovesja med porabo in proizvodnjo energije. To predstavlja spremembo glede na načrtovanje njihove vloge v preteklosti, saj

so bile elektrarne zasnovane kot pretočne, ki obratujejo zgolj po pretoku blizu optimalnih pogojev. Iz literature lahko zasedimo oceno, da vsak zagon in zaustavitev turbine na njej povzročita poškodbe, ki so enakovredne tistim pri 15 do 20 ur rednega obratovanja [Trivedi, 2013]. V naši raziskavi smo prvi analizirali vplive obratovanja na nosilno konstrukcijo in glede na izvedene rezultate meritev lahko z gotovostjo pričakujemo, da podobne ugotovitve kot za strojno opremo veljajo tudi za betonske konstrukcije. Za razliko od jeklenih konstrukcij so poškodbe na betonski konstrukciji težje opazne, ker se procesi večinoma odvijajo v notranjosti. Ko poškodbe postanejo vidne na površini, je konstrukcija praviloma že kočno oslabiljena. Zveze med dinamičnimi lastnostmi in stanjem konstrukcije so premalo poznane pri masivnih vodnih objektih, kjer je pozornost usmerjena v dokazovanje obnašanja pri pojavu potresa, malo ali nič analiz pa je namenjenih problematiki vplivov zaradi običajnega obratovanja objektov. Meritve in analize na pregradi Brežice so pokazale, da so frekvence vzbujanja zaradi obratovanja elektrarne in lastne frekvence objekta dokaj blizu, kar glede na način obratovanja predstavlja resno težavo. Prve tri lastne frekvence strojnice so pri 5,8 Hz, 8,2 Hz, 10,6 Hz, nedaleč stran pa sta druga in tretja lastna frekvenca objekta: 3,6 Hz in 7,2 Hz, kar je skrb zbujajoče. Glede na navedeno lahko ugotovimo, da obstaja velika verjetnost, da je konstrukcija pregrade zaradi vsiljenega nihanja izpostavljena bistveno večjim obremenitvam, kot bi pričakovali. Glede na konstrukcijsko podobnost objektov na spodnji Savi lahko pričakujemo podobne razmere na vseh objektih. To pomeni, da bo treba nameniti tudi ustrezno pozornost opazovanju objektov in spremljati procese staranja v sklopu rednega opazovanja objektov.

S periodičnimi meritvami vibracij na objektu je mogoče spremljati staranje betonske konstrukcije, saj se na primer pojav mehčanja odraža v spremembah lastnih frekvenc, kar smo pokazali z računskim modelom. Proces tako lahko prepoznamo pred pojavom vidnih poškodb, kar občutno izboljša obratovalno varnost objekta, dolgoročno zniža stroške vzdrževanja ter pomaga podaljševati življenjsko dobo pregrad. Vzpostavitev sistema opazovanja pregrad je zakonska obveza upravljavca. Pogoji za uspešno spremljanje staranja objekta in interpretacijo kondicijskega stanja pa je nujen, da se na objektu poleg spremljanja vibracij izvajajo vse aktivnosti rednega monitoringa. Ključno je, da objekt spremljamo na dolgi rok in ne šele po pojavu poškodb. Slika 10 prikazuje shematsko zakritost latentnih stanj konstrukcije, ki navidezno mirujejo (ker jih ne spremljamo) do pojava aktivacijskega dogodka. Po pojavu poškodb pa proces napreduje hitreje in je za ukrepanje manj časa, sledijo lahko prisilne zaustavitve, dolgi remont, v skrajnem primeru pa odstranitev objekta. Pri načrtovanju novih pregrad je vpliv vibracij treba vključiti že v fazi načrtovanja objektov in objekt začeti spremljati že v času gradnje. Spoznanja s pregrade Brežice pa lahko služijo za izboljšanje varnosti in vzdrževanja vseh konstrukcij sorodnih objektov pri nas, tako obstoječih kot tistih, ki so še v fazi načrtovanja.

Računski modeli so pomembno orodje pri analizi hidrotehničnih objektov. Pri modeliranju časovno odvisnih procesov in pojava ter vpliva poškodb pa je zelo pomembno to,



Slika 10. Proces pri staranju pregrad.

kakšna izhodišča so bila privzeta. Pri modeliranju časovno odvisnih procesov ni dovolj, da privzamemo samo projektno vrednost, temveč tudi to, da vključimo čim več informacij na podlagi spremljanja dejanskega stanja objektov. Pri modeliranju pregrad imamo opraviti s precej spremenljivkami, zato je nujno, da vključujemo rezultate monitoringa, brez katerih kalibracija modela niti ni možna. Prednost našega pristopa je tudi v tem, da je bil model umerjen na referenčno stanje konstrukcije, ki še ni bila izpostavljena zunanjim vplivom. Kot tak se lahko model uporabi kot referenčni za spremljanje staranja, saj imamo poznano izhodiščno stanje konstrukcije in materialnih parametrov, ki jih običajno pri klasičnih analizah, ki jih največkrat izvedemo šele po nastanku poškodb, ne poznamo in v tem primeru lahko sklepamo o materialnih parametrih zgolj na pod-

lagi projektnih vrednosti. Na pregradi Brežice smo v času gradnje izmerili referenčno stanje, ta meritev je ključna za izvajanje nadaljnjega spremljanja objekta, v omejenem obsegu pa bo možen tudi prenos na objekte s podobnimi konstrukcijskimi lastnostmi. Zato je pomembno, da se v sklop rednega monitoringa čim prej vključi spremljanje dinamičnih parametrov tudi na drugih pregradah na reki Savi in da se izdelajo analize stanja pregrad in napovedi procesov staranja ter na osnovi tega predvidijo ustrezni korekcijski ukrepi.

5 ZAKLJUČEK

Namen te raziskave je prva podrobna in celovita obravnava vsiljenih dinamičnih obremenitev pregrad in s tem povezanega problema staranja betonskih hidroenergetskih pregrad. Opisana problematika za zdaj ne predstavlja večjih težav pri novejših objektih. Ker pa je povprečna starost hidroenergetskih pregrad v Sloveniji že višja od 40 let, bodo posledice utrujanja in vsiljenih vibracij v daljšem časovnem obdobju postale vse bolj aktualna težava upravljavcev teh objektov. Kondicijsko stanje pregradnega objekta vpliva tudi na zanesljivost proizvodnje in trajnost, kar bo v luči energetske neodvisnosti in nadaljnjega zagotavljanja sistemskih storitev, ki pogosto zahtevajo obratovanje na način, ki povzroča pospešeno staranje konstrukcije, pomemben dejavnik obratovanja in varnosti pregrad. V okviru raziskave smo na pregradi Brežice vzpostavili sodoben monitoring že v času gradnje objekta in ga nadaljevali vse do časa poskusnega obratovanja. Izdelali smo računski model pregrade, simulirali staranje objekta ter njegov vpliv na vrednosti lastnih frekvenc. Računske vrednosti smo validirali z eksperimentalnimi rezultati. Z uvedbo spremljanja dinamičnih procesov v sklopu rednega monitoringa in uvedbo numeričnih modelov pri analizi procesov lahko izdelamo napovedi procesov staranja v prihodnje in predlog korektivnih ukrepov za izboljšanje stanja pregrad.

6 ZAHVALA

Delo je nastalo v okviru doktorskega študija prve avtorice in je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

7 LITERATURA

ACI Committee 207, Guide to Mass Concrete ACI 207.1R-05. Farmington Hills, MI, 2009.

ANCOLD, spletna stran, Register of Large Dams in Australia, https://www.ancold.org.au/?page_id=24, ANCOLD, datum vpogleda 12. 6. 2018, 2018.

Bernstone, C., Automated performance monitoring of concrete dams. Engineering Geology, Lund University, Lund, 2006.

Bombač, M., Hydraulic research of the construction pit of HPP Brežice on a physical model, Acta Hydrotechnica, 25(42), 1-16, 2012.

Courtney, T. H., Mechanical Behaviour of materials (2nd ed.). Long Grove, Illinois: Waveland press, Inc., 2005.

DIANA FEA, User's Manual - Release 10.2. Diana FEA BV. Delft, Netherlands, 2017.

HESS, spletna stran, <https://www.he-ss.si/he-brezice-fotogalerija.html>, HESS d.o.o., Brežice, datum vpogleda 7. 5. 2022, 2022.

IBE, Projektna dokumentacija HE Brežice (Interno gradivo HESS). Ljubljana, 2016.

ICOLD Committee on Dam Ageing, Ageing of dams and appurtenant works Review and recommendations Bulletin 93. Paris: ICOLD - CIGB, 1994.

INFRA, Program izvedbe objektov vodne, državne in lokalne infrastrukture ter objektov Vodne in energetske infrastrukture v nedeljivem razmerju za izgradnjo Novelacija št. 1 HE Brežice, Brežice, 2012.

International federation for structural concrete (FIB), Structural Concrete Textbook on behavior, design and performance, Vol. 1, 1999.

Klun, M., Zupan, D., Lopatič, J., Kryžanowski, A., On the application of laser vibrometry to perform structural health monitoring in non-stationary conditions of a hydropower dam. Sensors, 19(17):3811, <https://doi.org/10.3390/s19173811>, 2019.

Klun, M., Zupan, D., Kryžanowski, A., Vibrations of a hydropower plant under operational loads, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10(1), 29-42, doi: 10.1007/s13349-019-00367-2, 2020a.

Klun, M., Analysis of Concrete Gravity Dam Conditions using State-of-the-art Experimental and Numerical Methods, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, doktorska naloga, 2020b.

Letcher, T. M. (Ed.), Managing Global Warming An Interface of Technology and Human Issues. Academic Press, <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>, 2019.

Lopez, F., Restrepo Velez, L., Assessment and structural rehabilitation with post-tensioning and CFRP of a mass concrete structure subjected to dynamic loading, In FIB Symposium Concrete Structures in Seismic Regions. Athens, Greece, 2003.

Mihashi, H., Leite, J. P. D. B., State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 2(2), 141-154, <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>, 2004.

Polytec, Portable Digital Vibrometer PDV-100 High Resolution Digital Velocity Measurement, 1-3, 2016.

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F., Use of hybrid hydraulic models in the process of hydropower plants design on the lower Sava, Acta Hydrotechnica 25/42, 25(42), 59-70, 2012.

Shah, S. P., Chandra, S., Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading, ACI Materials Journal, 67(10), 816-827, 1970.

SIST, SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje konstrukcij. Del 1-1, Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004.

SLOCOLD, spletna stran, Seznam velikih pregrad v Sloveniji, http://www.slocold.si/pregrade_seznam.htm, SLOCOLD - Slo-

venski nacionalni komite za velike pregrade, datum vpogleda
20. 3. 2022, 2022.

Sriravindrarajah, R., Swamy, R. N., Load effects on fracture of concrete, *Materials and Structures*, 22(1), 15-22, <https://doi.org/10.1007/BF02472690>, 1989.

Trivedi, C., Gandhi, B., Michel, C. J., Effect of transients on Francis turbine runner life: A review, *Journal of Hydraulic Research*, 51(2), 121-132, <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.732971>, 2013.

UL RS, Uredba o državnem prostorskem načrtu za območje hidroelektrarne Brežice, Uradni list RS št. 50/12 in 69/13, Uradni list Republike Slovenije, 2012.

UL RS, Zakon o pogojih koncesije za izkoriščanje energetskega potenciala Spodnje Save (ZPKEPS-1), Uradni list RS, št. 87/11, 25/14 – ZSDH-1, 50/14, 90/15, 67/17 in 65/20, Uradni list Republike Slovenije, 2011.

USBR, spletna stran, National Inventory of Dams Dataset, <http://nid.usace.army.mil/>, USBR, datum vpogleda 12. 6. 2018, 2018.

Zenz, G., Long Term Behaviour of Dams – Earthquake Loading Design, In Z. Yueming (Ed.), *Proceedings of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams* (pp. 1-13). Nanjing, China: Hohai University Press, 2008.

Zhang, L., Peng, M., Chang, D., Xu, Y., *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*. Singapore: Wiley, 2016.