

SEIZMIČNOST POBUĐENA AKUMULACIJAMA NA PRIMERU BRANE MRATINJE

Aleksandar Božović¹

REZIME

U izveštaju se daje sažeti pregled zastupljenosti i fenomenologija seizmičnosti pobuđene akumulacijama (SPA) i kvalitativna predstava prirode ove pojave i razvoja njene interpretacije, kao i procene rizika koji ona predstavlja za sigurnost brana kao i infrastrukturnih objekata i zgrada u zoni akumulacije.

Na primeru brane Mratinje pokazuje se kako je ova pojava praćena pre, tokom i posle punjenja akumulacije, putem kontinualne akvizicije podataka o seizmičkim pojavama malih i manjih magnituda, kao i preko instrumenata za jake potrese postavljenih na branu, koji su registrovali najjače među pobuđenim potresima.

Podaci su dobijeni osmatranjima koje je vršio Seizmološki zavod Crne Gore (početna osmatranja jednom kratkoperiodičnom stanicom i kasnija osmatranja nizom telemetrijski povezanih stanica u široj oblasti akumulacije Mratinje) i Seizmološki Institut iz Skopja, Makedonija (monitoring jakih potresa na brani).

Dobijeni i interpretirani podaci u potpunosti se uklapaju i potvrđuju savremeno gledanje na SPA fenomene. Osmatranje ovih pojava u vezi sa punjenjem i eksploatacionim oscilacijama akumulacionog jezera brane Mratinje dali su značajan doprinos sagledavanju ove kompleksne pojave.

Osnovni zaključak u vezi sa SPA je da te pojave ne mogu ugroziti sigurnost brane ako je stepen seizmičkog hazarda za mesto brane valjano sagledan jer SPA

¹ Energoprojekt, Beograd

interakcija punjenjem akumulacije ne može povećati potresni kapacitet uzročnih raseda (logičnije je očekivati izvesnu fragmentaciju). Međutim, za objekte infrastrukture i zgrade u zoni akumulacije treba proveriti na koje bi se potresne uticaje moglo računati, uzevši u obzir postojeći rasedni sklop i činjenicu da dosadašnje SPA pojave, globalno gledano, ne prelaze magnitude reda veličine 6,3 [1], [31].

Takođe se zaključuje da je opremanje svake visoke brane potrebnim instrumentima i uređajima za njenu seizmičku oskultaciju, uključujući i praćenje pobuđene seizmičnosti, neizostavan uslov za valjano osmatranje, što treba da bude pokriveno odgovarajućom regulativom.

1. UVOD

Problem seizmičkih pojava koje su povezane sa stavljanjem pod uspor akumulacionih jezera i oscilacijama nivoa tih akumulacija, postao je šire poznat tokom tridesetih godina prošloga veka, kada su takve pojave zabeležene u vezi sa punjenjem akumulacije Lake Mead (USA). Sa širenjem izgradnje brana povećavao se i broj sličnih slučajeva, od kojih je nekoliko bilo povezano sa većim magnitudama i znatnim štetama. Stoga je problem postao predmet pojačanog stručnog interesovanja na nizu foruma (UNESCO, ICOLD, USSD i razni nacionalni komiteti Međunarodne komisije za visoke brane) i preko mnoštva publikacija. Pojavi su davani razni nazivi, najčešće indukovana seizmičnost. ICOLD je 1999. zvanično usvojio naziv RTS (Reservoir Triggered Seismicity) pa se u ovom tekstu upotrebljava ekvivalent SPA (Seizmičnost pobuđena akumulacijama) kao formulacija koja najbolje odgovara prirodi pojave. U raznim bazama podataka navodi se preko stotinu slučajeva SPA.

Definicija pojave pobuđene seizmičnosti, koja je danas široko prihvaćena glasi da do nje može doći ukoliko su u procesu prirodne savremene tektonike potencijalni uzročni rasedi u zoni uticaja akumulacije već napregnuti do u blizinu sloma, tako da uticaji koje izaziva punjenje akumulacije (trenutno dejstvo dodatnih gravitacionih sila i propagacija pornih pritisaka u dubinu, sa vremenski odloženim dejstvom) mogu odigrati ulogu okidača i pobuditi energetske emisije duž uzročnih raseda. A to onda znači da pojave pobuđene seizmičnosti ne mogu ugroziti sigurnost brane koja je u pitanju ukoliko je valjano sagledana rasedna tektonika i seizmički hazard u zoni brane. Ukoliko do toga ipak dođe, to samo znači da seizmotektonski uslovi nisu bili dovoljno dobro sagledani. U nekoliko klasičnih slučajeva, gde su izvršeni zamašni rehabilitacioni radovi zbog oštećenja brana pobuđenom seizmikom, originalni projekti brana rađeni su, na bazi analize istorijskih podataka, za uslove minimalne seizmičnosti. Naknadna ispitivanja po pravilu ukazuju na postojanje uzročnih raseda i seizmičkog potencijala koji su u skladu sa nastalim pojavama.

Razvoj pojava pobuđene seizmičnosti uglavnom karakterišu sledeće okolnosti:

- Instrumentalno beleženi seizmički događaji postaju osetno učestaliji po broju i izraženiji po magnitudama u odnosu na stanje pre početka punjenja akumulacije. Da bi se ova okolnost rasvetlila, neophodno je da postoji bar par godina osmatranja pre ujezeravanja.
- Interakcija sa uzročnim rasedima je osetljiva i na nagle promene nivoa u akumulaciji, koje mogu da prate značajni pobuđeni udari.
- Vreme nastanka i tok pobuđenih udara jako zavisi od hidrauličke provodljivosti podzemlja, odnosno od toka propagacije pornih pritisaka, tako da se vremenski tok pojave može otežati godinama.
- P_o pravilu, posle maksimalno izražene pobude dolazi do smirivanja i utapanja pobuđenih pojava u pozadinsko seizmičko polje.

Međutim, opisanu sekvencu treba shvatiti kao opšti utisak, od kojeg su moguća značajna odstupanja. Nije nikakvo čudo ako se uzme u obzir kompleksnost prilika koje vladaju u seizmogenim zonama, o kojima mi raspoložemo samo indirektnim i izvedenim informacijama. Karakterističan je slučaj dugogodišnjih osmatranja pobuđene aktivnosti na brani Koyna, gde akumulacija dugi niz godina oscilira u ritmu monsunskih perioda, a to je praćeno u prilično ustaljenom vidu emisijom udara reda veličine $M=5$. Slično ponašanje nije poznato kod drugih brana kao ni specifični uzroci koji stoje iza njega.

Zbog prirode pojave skopčane sa mogućim rizicima, osmatranje pobuđene seizmičnosti treba da bude u programu svake visoke brane, pri čemu obim instrumentalnog opremanja i odgovarajući raspored treba prilagoditi nalazima prethodne seizmotektonske analize.

Karakteristike izložene u ovom sažetom uvodu objašnjavaju zašto je koncept moguće seizmičnosti pobuđene stavljanjem akumulacija pod uspor od trajnog interesa za projektovanje i osmatranje brana.

2. UČESTALOST POBUĐENE SEIZMIČNOSTI

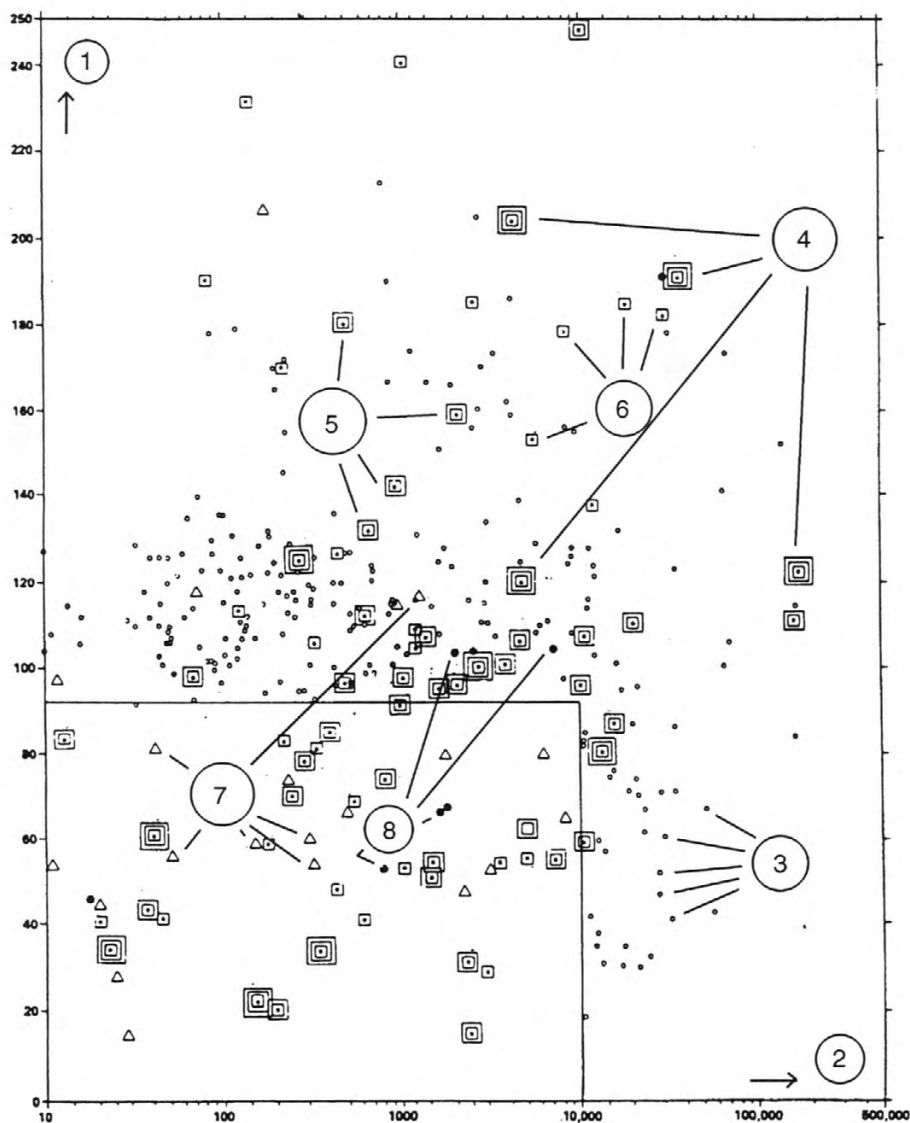
Tačan broj epizoda pobuđene seizmičnosti nije pouzdano poznat zbog teškoća oko dobijanja uverljivih podataka osmatranja kao i zbog činjenice da je najverovatnije priličan broj slučajeva sa nižim maksimalnim magnitudama promakao zbog odsustva instrumentalnog monitoringa. U obimnoj literaturi figurišu baze podataka sa po preko stotinu navedenih slučajeva. Kao relevantna informacija daje se tabelarno niz češće citiranih slučajeva (USSD;1997) [31].

Tabela 1: Lista češće citiranih SPA slučajeva, (USSD, 1997), [31]

Akosombo	Ghana	109	148,000	MMI V	1
Almendra	Spain	185	2,649	3.2	1
Aswan	Egypt	90	160,000	5.2	3
Benmore	New Zealand	96	2,040	5.0	3
Blowering/Taibingo	Australia	142	2,559	3.5	3
Camarillas	Spain	43	37	4.1	3
Canelles	Spain	132	678	4.7	1
Capivara	Brazil	60	10,500	4.4	1
Cenajo	Spain	97	472	4.2	4
Danjianangkou	China	97	16,000	4.7	4
El Grado	Spain	85	400	MMI IV	1
Eucumbene	Australia	106	4,761	5.0	3
Furnas	Brazil	111	22,950	MMI V	4
Grandval	France	78	292	MMI V	1
Hoover	USA	191	36,703	5.0	3
Jocassee	USA	107	1,431	3.8	3
Kariba	Zambia	122	160,368	6.25	2
Kastraki	Greece	91	100	4.6	2
Khoa Laem	Thailand	80	7,000	4.5	2
Koyna	India	100	2,780	6.3	3
Kremasta	Greece	120	4,750	6.3	3, 5
Kurobe	Japan	180	199	4.9	1
Manicouagan 3	Canada	96	10,423	4.1	2
Marathon	Greece	60	41	5.75	4
Monteynard	France	125	275	MMI VII	4
Mossyrock	USA	124	1,957	4.3	4
Nurek	Tajikistan	285	11,000	4.5	2
Oroville	USA	204	4,400	5.7	2 or 3
Paraibuna/Paraitinga	Brazil	102	4,740	3.2	4
Piastra	Italy	84	13	MMI V	4
Preve Di Cadore	Italy	98	69	MMI V	4
Porto Columbia/ Voltagrande	Brazil	50	3,760	5.1	4
Pukaki	New Zealand	108	10,500	4.6	4
Shenwo	China	75	790	4.8	4
Swift	USA	116	932	5.0	4
Srinagarind	Thailand	133	17,745	5.9	3
Vouglans	France	112	605	4.4	4
Hsingfengkiang	China	105	13,896	6.0	3
Zhelin	China	62	7,170	3.2	4

Primedbe: 1) bez lokalne seizmičke studije 2) seizmička studija pre i posle usporavanja 3) seizmička studija posle usporavanja 4) status seizmičke studije nepoznat 5) glavni SPA udar dublji od 20 km

Takođe je od interesa jedan obuhvatni prikaz (Beacher&Keeney, 1982, preuzeto iz USSD, 1997 [31]) sa grafičkom distribucijom SPA slučajeva. Danas dopunjen, taj prikaz izgledao bi slično.



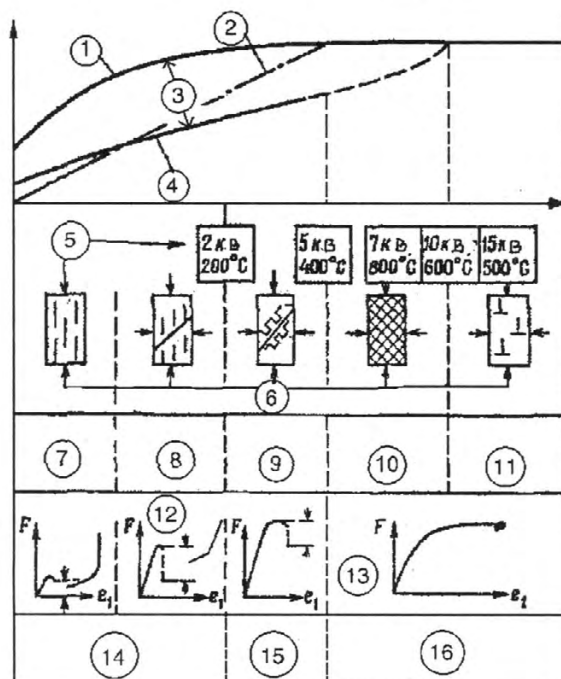
Slika 1. Grafikon rasturanja SPA slučajeva (USSD, 1997) [31]

- | | |
|--|---|
| 1) dubina vode (m) | 2) zapremina jezera (10^6 m^3 u log skali) |
| 3) duboka i/ili vrlo velika jezera | 4) potvrđeni SPA slučajevi, $M > 5$ |
| 5) potvrđeni SPA slučajevi $3 < M < 5$ | 6) potvrđeni SPA slučajevi, $M < 3$ |
| 7) nesigurni SPA slučajevi | 8) bez SPA fenomena |

3. MEHANIZAM POBUĐENE SEIZMIČNOSTI I REOLOGIJA SEIZMOGENIH OBLASTI ZEMLJINE KORE

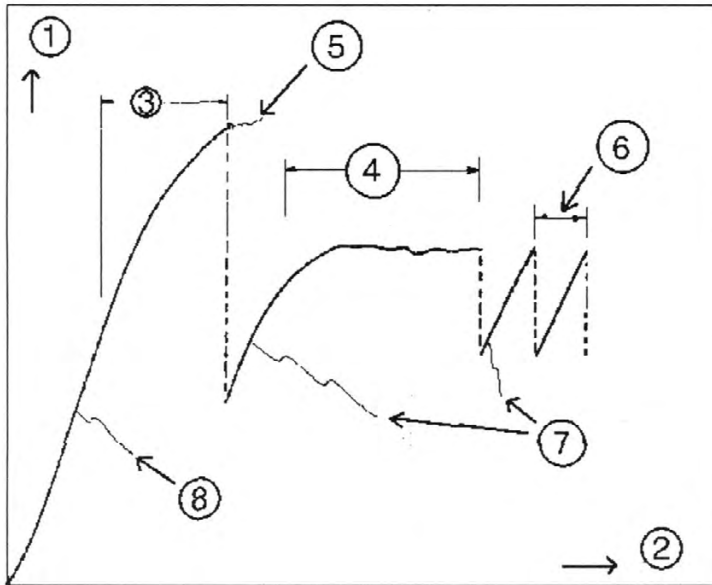
Pobuđena seizmičnost manifestuje se kao energetska emisija koja nastupa prilikom sloma duž raseda u seizmogenom delu zemljine kore, kada smičuće sile (uz interakciju sa efektima punjenja akumulacija) postanu veće od čvrstoće raseda. Pri tome se radi o istim zakonomernostima koje važe i za efekte ambijentalne tektonike.

Pošto su efekti punjenja akumulacija poznati (dodatna težina i propagacija dodatnih pornih pritisaka), problematični su geometrija uzročnih raseda i reologija materijala na seizmogenim dubinama. Seizmogene dubine su praktično nedostupne za direktna ispitivanja osobina materijala na tim dubinama. Međutim, laboratorijska merenja vršena tokom proteklih nekoliko decenija pokazala su da je reologija stenskog materijala pri temperaturama i pritiscima koje vladaju na seizmogenim dubinama slična onima koje poznajemo na površini. Tek posle povećanja pritiska iznad 500 MPa i temperature iznad 400°C dolazi do početka plastifikacije stenskog materijala čime se gasi seizmički potencijal. Kvalitativan prikaz rezultata pomenutih laboratorijskih ispitivanja [6] daje se na sledećoj slici :



Slika 2. Uopštena predstava reoloških osobina zemljine kore na seizmogenim dubinama. (Nikolajevski, 1982) [22] 1) anvelopa sloma; 2) suvo trenje; 3) zona dilatansije; 4) granica elastičnosti; 5) granit; 6) mehanizam sloma; 7) vertikalne frakture; 8) kosu frakturu; 9) lokalizovane deformacije; 10) pseudoplastičnost; 11) plastičnost; 12) pad napona; 13) odsustvo pada napona; 14) krti lom; 15) oblast proklizavanja; 16) plastično tečenje

Od posebnog je interesa pojava diskontinualnog toka smicanja, kada pritisci prelaze 200 MPa a temperatura 200°C. Tada se javlja fenomen proklizavanja, čiji je tok kvalitativno prikazan na sledećoj slici:



Slika 3. Generalizovana predstava ponašanja stene pri konfiniranoj kompresiji a pod uslovima koji vladaju na seizmogenim dubinama (prema F.W. Brace, 1974, [6])
1) smičući naponi; 2) sažimanje 3) rast pukotina, dilatansija; 4) stabilno klizanje; 5) frakturacija; 6) proklizavanje; 7) rased zakočen; 8) zona elastičnog ponašanja

Rezultati niza laboratoriskih ispitivanja, koji su kvalitativno predstavljeni na prethodnim slikama, omogućuju da se čvrstoća raseda u seizmogenoj zoni predstavi poznatom vezom između sila koje deluju duž uzročnog raseda :

$$t = t_0 + s(N_n - p)$$

gde je t smičući napon sloma (odnosno čvrstoća raseda), t_0 kohezija, s = koeficijent trenja koji odgovara vrsti stena, N_n = normalna sila i p = porni pritisak.

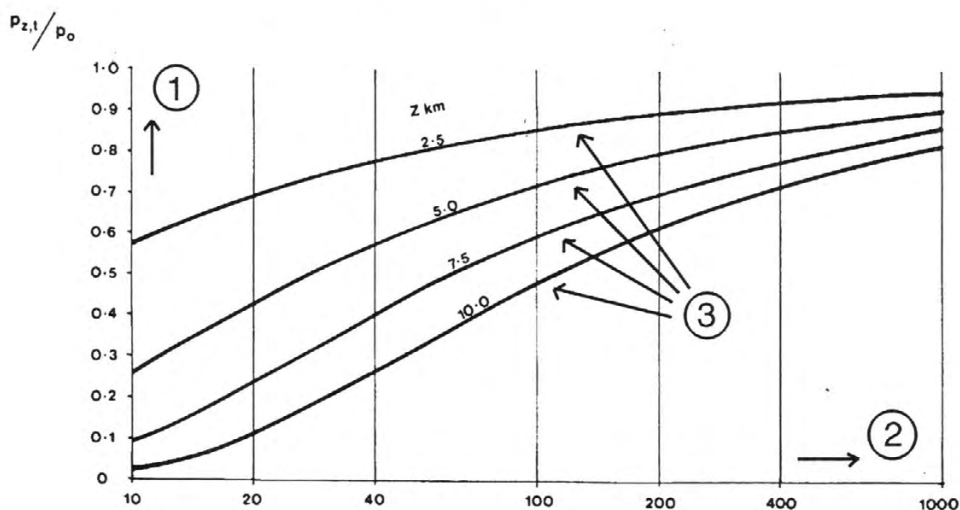
Do sloma duž raseda, odnosno do pojave pobuđene seizmičnosti može doći samo ako pre aplikacije dodatne težine vode i dodatnog pornog pritiska već vlada stanje napona blisko slomu, odnosno čvrstoći raseda. Prema novijim istraživanjima [35] generalne prilike u izrasedanom seizmogenom delu Zemljine kore su upravo takve da je dovoljna mala promena smičućih napona (čak reda 0,01 MPa) pa da usledi seizmički pad napona reda 1 MPa odnosno da se pobudi seizmička emisija. Smatra se da su takve prilike slične u zonama savremeno aktivne tektonike i u tektonski stabilnim zonama (daleko od kontura tektonskih ploča) [35]. Prema ovom stanovištu, ne treba unapred isključivati mogućnost pojave pobuđene seizmike ni

za koju novu visoku branu, bez obzira na stepen savremene seizmičke aktivnosti. A pogotovo za prilike koje vladaju u zemljama Balkana, može se zaključiti da nijedna nova visoka brana nije imuna od mogućnosti pojave pobuđene seizmičnosti.

Vremenski razvoj pobuđene seizmičnosti uslovljen je činjenicama da se dodatna težina akumulacije prenosi u seizmogenu zonu bez odlaganja dok je za propagaciju pornih pritisaka potrebno vreme. Zavisno od prilika u Zemljinoj kori, ponekad je potreban niz godina da se pobudni efekat propagacije pornih pritisaka ostvari. To je jedan od uzroka velike raznovrsnosti na koju se nailazi prilikom realizacije pojava pobuđene seizmičnosti.

Za ilustraciju fenomena propagacije pornih pritisaka, na Sl. 4 daju se rezultati jednodimenzionalne analize difuzije [13], iz kojih se vidi da je vremensko zaostajanje porasta osetno.

Navedene predstave rezultata laboratoriskih ispitivanja i rezultati osmatranja pojava pobuđene seizmičnosti čine osnovu, na kojoj je koncept pobuđene seizmičnosti široko prihvaćen kao mogućnost koja se realizuje kod manjeg broja visokih brana i o kojoj se mora generalno voditi računa



Slika 4. Vreme difuzije do površinskog dodatnog pritiska na raznim dubinama [13]
1) odnos dubinskog i pripovršinskog nadpritiska; 2) dani; 3) tok difuzije dubinskog natpritiska

4. IMPLIKACIJE MOGUĆNOSTI POJAVE POBUĐENE SEIZMIČNOSTI U VEZI SA PROJEKTOVANJEM I OSMATRANJEM BRANA

Iz dosadašnjeg izlaganja jasno je da je pojava pobuđene seizmičnosti mogućnost koja se mora uzeti u obzir kod projektovanja i tokom osmatranja svake nove visoke brane.

Sumarni efekat ovakvih pojava (preko stotinu slučajeva koji se navode u bazama podataka) na ukupan broj brana (koji danas iznosi oko 45 000) ne predstavlja drastičan učinak. Ipak su to efekti koji mogu ugroziti branu (ukoliko seizmički hazard nije ispravno sagledan) i koji mogu predstavljati hazard za postojeće zgrade i infrastrukturu u oblasti akumulacije.

Brana koja je ispravno projektovana i proverena, uzimajući u obzir maksimalni projektni zemljotres u datom tektonskom sklopu, po definiciji je sigurna u odnosu na SPA pojave.

Međutim, postojeća infrastruktura i zgrade u zoni uticaja akumulacije mogu biti projektovane za manji nivo seizmičkih uticaja. Takvi objekti su onda već ugroženi objektivno postojećim hazardom. No, SPA pojave znače raniju realizaciju tog hazarda, što za sobom može da povuče odgovornost ukoliko takva mogućnost nije sagledana i prihvaćena, eventualno uz širu raspodelu upravljanja rizikom.

Pitanje koje se paralelno postavlja jeste i moguća maksimalna magnituda pobuđenog zemljotresa. Na to pitanje nema besprekorno ubedljivog odgovora ni za prirodnu seizmiku, već se o gornjoj granici izvodi zaključak na bazi realno osmotrenog niza, uzimajući maksimum reda veličine $M = 8$.

U nizu dosada pojavljenih i citiranih slučajeva imamo četiri sa magnitudama većim od 6 (Tabela 1) a maksimalno 6,3. Razmatrajući to pitanje, R.C. Allen , 1976 [1] je smatrao da je razumno prihvatiti takav nivo kao maksimum, koji za savremene brane ne bi trebao da predstavlja problem, ali bi to mogao biti za postojeće zgrade i infrastrukturu.

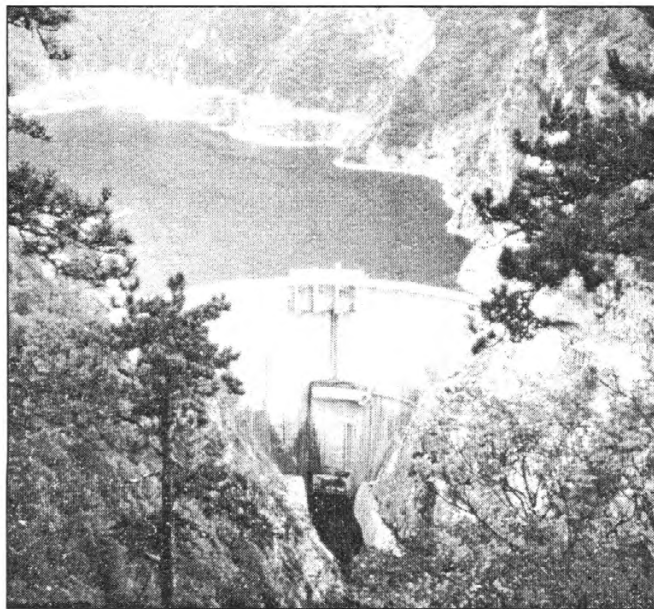
Što se tiče postojećih zgrada i infrastrukture u zoni akumulacije, u sklopu projektnih sagledavanja treba, svakako, izraditi seizmotektonsku studiju i proučiti postojeće rasede u zoni akumulacije, proveravajući da li njihove dimenzije podržavaju visoke magnituda i u kojoj meri (Wells and Coppersmith, 1994, [33]). Na takvoj bazi je razumno sagledati rizik za postojeće zgrade i infrastrukturu i odrediti kakvo je upravljanje tim rizikom optimalno.

Sledeći aspekt problema je potrebno osmatranje seizmičkih pojava. Za svaku visoku branu potrebno je odrediti instrumentaciju za monitoring jakih potresa, što je razrađena tema i ne treba je ovom prilikom dalje razvijati. A za osmatranje zone akumulacije i brane, imajući u vidu SPA pojave, treba na bazi seizmološke i

seizmotektonske studije uraditi projekat mreže seizmičkih stanica, već prema lokalnim uslovima (oko 5 stanica, telemetrijski povezanih). Osmatranje treba početi odmah sa građenjem, pri čemu bi radi dokumentovanja pozadinske seizmike bilo korisno za početak imati bar jednu stanicu, iako ne izgleda ubedljivo da vredi štedeti odlaganjem ulaganja, jer to može izazvati probleme a ionako se ulaganje mora realizovati. Seizmičko osmatranje visokih brana treba smatrati kao atribut njihovog postojanja, kao što je to slučaj sa nizom drugih instrumenata, optičkih, električnih i mehaničkih, koji se koriste za osmatranja brana.

5. SEIZMIČKA AKTIVNOST POBUĐENA AKUMULACIJOM BRANE MRATINJE

Brana Mratinje je betonska lučna konstrukcija visoka 220 m, izgrađena na reci Pivi i locirana u unutrašnjim Dinaridima u 1500 m dubokom kanjonu Pive. Akumulacija se, duž celih 60 km pružanja, nalazi u masivnim trijaskim krečnjacima, mehanički kompetentnim ali ekstremno karstifikovanim. Tektonika je oštro izražena, pa tako jedan značajan rased prolazi bliskim zaleđem (na oko 1 km) od desnoga boka brane i pruža se duž akumulacije nastavljajući u masiv Volujaka. Seizmičnost ove oblasti je studirana i ocenjena kao umerena. Tokom projektovanja, obraćena je pažnja na mogućnost pojave pobuđene seizmičnosti pošto se radi o ekstremno visokoj brani i dubokoj akumulaciji, pri čemu je stenska masa ekstremno karstifikovana i tektonski razuđena. Ovakvi uslovi su već na početku razmatranja ukazivali na potencijal za pobuđivanje seizmičnosti. Potvrda ovakve procene nije izostala.

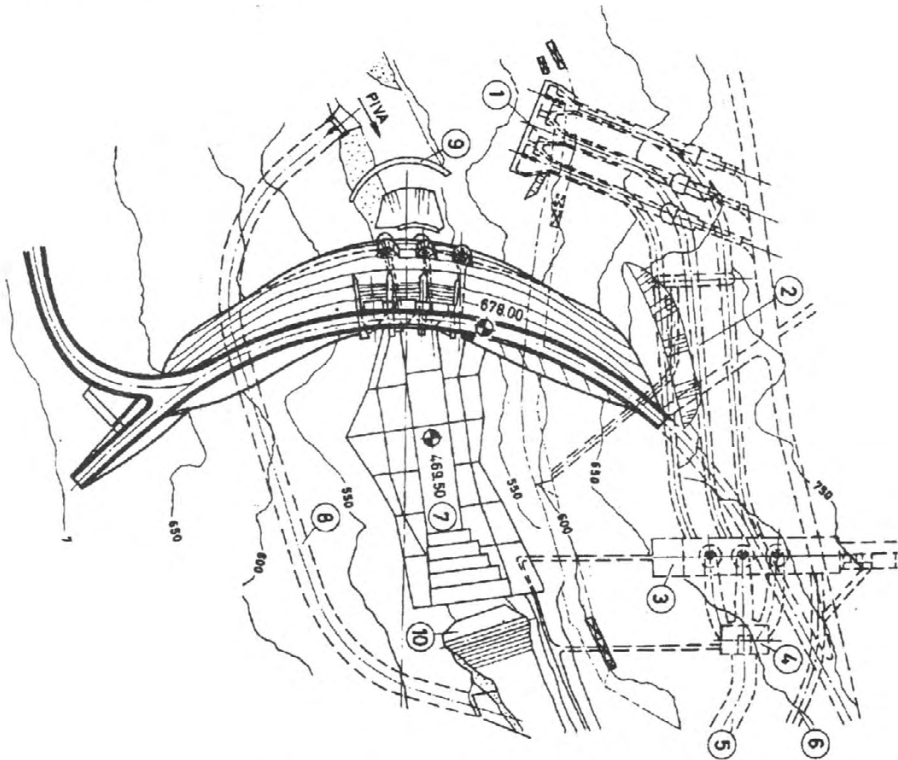


Slika 5. Pogled na branu Mratinje

Na profilu brane Mratinje postavljena je jedna trokomponentna kratkoperiodična stanica 3,5 godina pre punjenja akumulacije (koje je počelo sredinom 1976. godine), radi osmatranja i dokumentovanja pozadinske, ambijentalne seizmičnosti, i ostala je u pogonu 20 godina. Ova stanica je zabeležila razvoj seizmičnosti pobuđen punjenjem i naglim oscilacijama u akumulaciji.

Dopunski sistem od tri kratkoperiodična instrumenta, sa radiovezom na centralnu stanicu i integrisan u regionalnu seizmološku mrežu, uveden je 1982. godine.

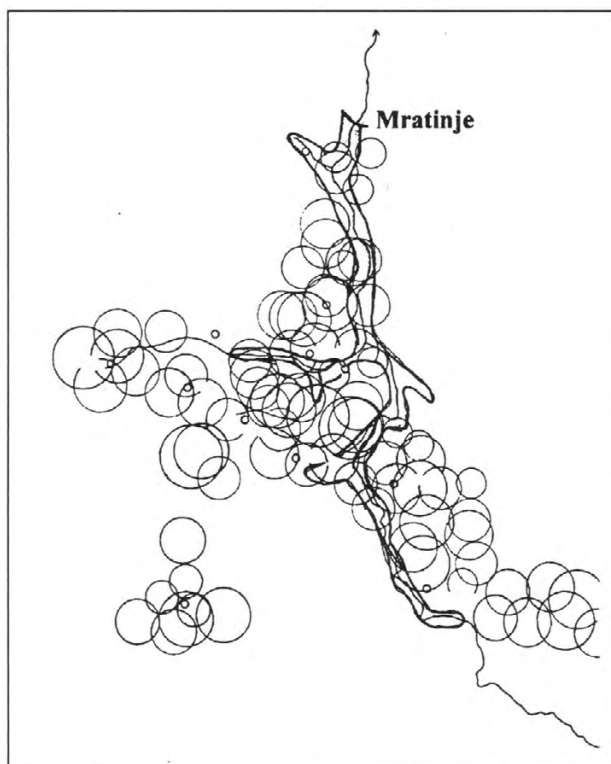
U početnoj fazi osmatranja bio je aktivan samo jedan pomenuti kratkoperiodični seizmograf i ukupni podaci o pozadinskoj seizmičnosti i pobuđenoj seizmičnosti tokom punjenja akumulacije baziraju na radu tog instrumenta, koji se pokazao kao sasvim pouzdan.



Slika 6. Situacija brane Mratinje

Lociranje epicentara i hipocentralnih dubina sa samo jednom stanicom nužno je bilo nedovoljno precizno. Ipak, veliki broj podataka pokazao je gomilanje epicentara u najdubljem delu akumulacije i duž glavnih tektonskih linija, što je dosta logično.

Međutim, glavna i velika vrednost osmatranja jednom stanicom, pre i tokom punjenja akumulacije, sastoji se u tome što je pouzdano utvrđen nivo pozadinske seizmičnosti pre punjenja i jasan, gotovo dramatičan porast učestalosti i magnituda tokom punjenja akumulacije. Time je ispunjena glavna namena ovih merenja i nepobitno je dokumentovana pojava pobuđene seizmičnosti kao i red veličine maksimalne magnituda. Pošto je paralelno vršeno i osmatranje na pet instrumenata za jake potrese duž centralne konzole brane, zabeleženo je dvadesetak epizoda jakih potresa a među njima i za glavni pobuđeni udar, što ukupno daje vrednu dokumentaciju pobuđene seizmičke aktivnosti, a to je i bila namena poduhvata.



Slika 7. Epicentri locirani tokom faze punjenja akumulacije [24]

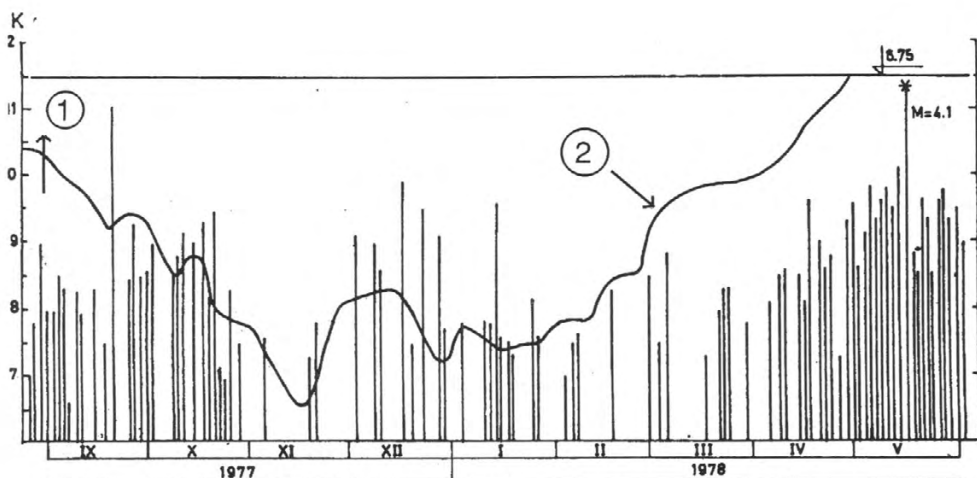
Kasnije uvedeni sistem niza radiopovezanih stanica, dao je mnogo preciznije podatke i u realnom vremenu. Takav sistem treba obezbediti kroz čitav životni vek brane Mratinje jer to zahteva njen značaj i veličina, kao i činjenica da seizmičko osmatranje brane daje i dalje vrlo interesantne podatke jer je akumulacija pobudno osetljiva na izražene oscilacije nivoa jezera u eksploataciji.

Međutim, za shvatanje i dokumentovanje celine pobuđene seizmičnosti, bilo je dragoceno osmatranje sa jednom stanicom, koja je otpočela rad dovoljno dugo pre početka punjenja akumulacije.

	72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81
N	102	77	98	129	273	475	358	247	122
M	2,55	2,8	3,0	3,5	3,5	4,1*	3,8	3,6	3,1
b				0,68	1,03	1,07	1,05	1,03	0,98
		①							

Slika 8. SPA aktivnost tokom prvih godina punjenja i korišćenja akumulacije Mratinje (prema podacima Seizmološkog zavoda, Podgorica) [24]: N) broj zabeleženih potresa; M) maksimalna zabeležena amplituda; 1) punjenje akumulacije

Slika 9 pokazuje vremensku sekvencu nivoa vode u akumulaciji i seizmičkih energetske emisija ($K = \log E$ u džulima) za godine 1977/78, kada je SPA aktivnost kulminirala posle naglog pražnjenja i forsiranog podizanja nivoa akumulacije.



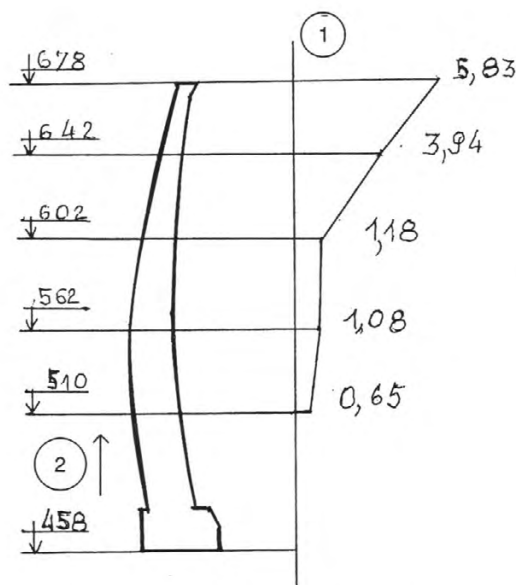
Slika 9. Vremenska istorija SPA procesa na Mratinju, u periodu maksimalne aktivnosti (prema Seizmološkom zavodu, Podgorica) [24]

Maksimum SPA emisije u maju 1975. zabeležili su i instrumenti za jake potrese na brani (pet duž centralne konzole i šesti na desnom boku). Akcelerometri su startovali grupno i dali su vremenske istorije odgovora brane na SPA pobudu.

Ubrzanja su osetno amplitificirana u blizini krune. No treba imati u vidu da za ovako nizak energetski nivo pobude, amortizacija tokom dinamičkog procesa ostaje na niskom nivou. Za jače potrese treba očekivati značajniju internu amortizaciju.

Posle vršnog perioda SPA nastupilo je povlačenje prema pozadinskom seizmičkom nivou. Međutim, 1994. godine, posle 16 godina eksploatacije, ponovila se iz energetskih razloga epizoda naglog pražnjenja i punjenja akumulacije,

slična onoj iz 1978. godine ali sa još oštrijom oscilacijom. Ponovila se i SPA pobuda, vrhuneći sa magnitudom 3,8, što je nešto niže od pobude iz 1978 ($M=4,1$). Ovakvo ponašanje ukazuje da se SPA fenomeni mogu obnovljati pri pojačanoj pobudi (prekoračenje maksimalnog nivoa vode ili amplitude oscilacija), što ima presedana u ponašanju brana.



Slika 10. Maksimalna ubrzanja duž centralne konzole pri vršnom SPA događaju (prema Institutu IZIIS, Skoplje, 1987) [25] 1) ubrzanje u % g; 2) visinske kote brane (m)

6. ZAVRŠNE NAPOMENE

U slučaju brane Mratinje pobuđena seizmičnost bila je očekivana i tokom projektovanja brane učinjen je napor da se sistem osmatranja osposobi kako bi bio u stanju da dokumentuje tok SPA pojava, ukoliko do njega dođe. Taj zadatak je sa uspehom izvršen zato što je dokumentovan nivo ambijentalne seizmičnosti pre punjenja akumulacije, jasan porast SPA aktivnosti i period sa maksimalnim SPA pojavama i ponavljanje SPA pojava kada je došlo do prekoračenja ranijih amplituda oscilacija nivoa u akumulaciji, posle dugog perioda eksploatacije. Slika koja se dobila seizmosmatranjem uklapa se u generalnu sliku SPA pojava i predstavlja značajan doprinos njihovom tumačenju, koje je ocrtano u prvom delu ovog referata.

Na slici ima i senki. Kada bi se danas poduhvat ponovio, trebalo bi pred punjenje jezera već imati operativan i radiopovezan sistem stanica, slično onome koji je kasnije sproveo Seizmološki zavod Crne Gore. Tada bi mogli SPA proces dovesti u vezu sa uzročnim rasedima koji se i površinski manifestuju i imati puniju sliku zbivanja.

Pitanje odgovornosti koje za sobom povlači mogućnost pojave SPA je osetljivo i nije jasno definisano u stručnoj literaturi. Ta činjenica verovatno ima udela što kontroverznost u tumačenjima SPA u širim krugovima još uvek opstaje. Međutim, kako je pokazano u 4. poglavlju ovog izveštaja, principijelno ne bi trebalo da bude teškoća. Naime, rizik sa konstrukciju brane pokriven je seizmotektonskom analizom koja definiše maksimalni projektni zemljotres, čime je brana po definiciji zaštićena i od SPA pojava. Sa druge strane, iskustvo prošloga veka i ipak ogroman broj izgrađenih brana pokazuje da nijedna SPA pojava nije prešla magnitudu 6,3 pa bi bilo razumno računati sa takvom mogućnošću kao ekstremom. Ipak, takva magnituda bi mogla ugrožavati postojeće zgrade i infrastrukturu u zoni akumulacije, pa stoga za zonu akumulacije treba razmotriti rizik od mogućih uzročnih raseda, vodeći računa i o pomenutom iskustvenom ograničenju SPA pojava [1].

U svetu sve više sazreva gledanje da je seizmički hazard bitan, pa i najbitniji, kada se govori o dugoročnoj sigurnosti brana i da seizmičko osmatranje ima karakter stalnog procesa i delatnosti u životu brane.

U sklopu opštih prilika u Srbiji i Crnoj Gori postoje objektivne teškoće da se sistemi osmatranja brana održe na potrebnom nivou, a to se posebno odnosi na seizmički monitoring. Akceleroграфи za jake potrese, koji su tako uspešno beležili SPA seizmičke udare na Mratinju, preživeli su svoj vek, a i mrežu za dalji monitoring SPA pojava treba rehabilitovati. Vreme je da se o svemu tome pobrinemo, i ne samo na Mratinju.

REFERENCE

- [1] Allen, C.R., 1979. "Reservoir-induced Earthquakes and Engineering Policy", *Proceedings of Research Conference on Intro-Continental Earthquakes*, Ohrid, Yugoslavia, 1979.
- [2] Baecher, G.N. and Keeney, R.L., 1982. "Statistical Examination of Reservoir-Induced Seismicity", *Seismological Society of America Bulletin*, v. 72
- [3] Bell, M.L. and Nur, A., 1978, "Stress Changes Due to Reservoir-Induced Pore Pressure and Stresses, and Application to Lake Oroville", *Journal of Geophysical Research*, v.83
- [4] Božović, A., 1974. "Review and appraisal of Case Histories Related to Seismic Effects of Reservoir Impounding", *Engineering Geology*, Vol. 8, No.1/2
- [5] Božović, A., Tucović I., Dungar., 1979, "Seismic analysis of Poehos dam spillway headworks" *13th Congress of ICOLD*, Q.51, R.21
- [6] Brace, W.F., 1974., "Experimental Studies of Seismic Behaviour of Rocks under Crustal Conditions", *Engineering Geology*, Vol. 8, No. ½.
- [7] Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1970., "California Earthquake: Why Only Shallow Focus?", *Science*, 168
- [8] Byerlee, J.D., 1966., "The Frictional Characteristics of Westerly Granite" *Thesis M.I.T.*
- [9] Byerlee, J.D., 1968., "Brittle-Ductile Transition in Rock". *Journal of Geophysical Research*, 73

- [10] Gupta, H. K., Rastogi B.K., 1976. "Dams and Earthquakes". *Elsevier, Amsterdam*.
- [11] Gupta, H.K., 1992. "Reservoir-Induced Earthquakes". *Elsevier, Amsterdam*
- [12] Handin, J. et alia, 1963,. "Experimental Deformation of Sedimentary Rocks Under Confining Pressure: Pore Pressure Tests". *Bulletin of the American Society for Petrology and Geology*. v. 47
- [13] Howells, D.A., 1976., "The Time for a Significant Change of Pore Pressure", *Engineering Geology, Vol. 8, No. ½*
- [14] Hsu Tsung-ho, 1975. "Strong Motion Observation of Water-Induced Earthquakes at Hsingfengkiang Reservoir in China", *Academia Sinica, Beijing, China*
- [16] ICOLD, 1984. World Register of Dams.
- [17] ICOLD, Bulletin 112, 1998, Neotectonics and Dams.
- [18] Judd, W.R., (editor), 1974. "Seismic Effects of Reservoir Impounding". *Engineering Geology, Vol. 8, No. ½*
- [19] Kisslinger, C.,1976. "A Review of Theories of Mechanisms of Induced Seismicity" *Engineering Geology, Vol. 10. No. 2/4*
- [20] Logani, K. L., 1979. "Reservoir Induced Seismicity" 13th Congress of ICOLD, Vol. 5, p.p. 625-630
- [21] Milne, W. G. (editor), 1976. "Induced Seismicity", *Engineering Geology, Vol. 10, No. 2/4*
- [22] Nikolayevskiy, V.N., 1982. "Earth Crust, Dilatancy and Earthquakes", section of book on "Focal Mechanics of Earthquakes", *Mir Publishers, Moscow*
- [23] Perman, R.C., Packer, D., Coppersmith and Kneupfer, P.L., 1983. "Collection of Data Bank on Reservoir-Induced Seismicity", *USGS Contract No. 14-08-0001-19132*
- [24] "Yearly Reports on Monitoring of Seismic Activity at Mratinje Storage covering 1974 – 1981 period". *Seismological Institute of Montenegro*.
- [25] " *Seismic Monitoring of Mratinje Dam*", Seismological Institute Skopje, 1973
- [27] Shen Shonggang et al., "Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and their Effects on Hsingfengkiang Dam", *Scientia Sinica, Vol. 17, No 2, China*
- [28] Simpson, D. W., 1976. "Seismicity Changes Associated with Reservoir Loading", *Engineering Geology, Vol. 10 No. 2/4*
- [29] Simpson, D.W., 1988 "Two Types of Reservoir Induced Seismicity", *Bulletin of the Seismological Society of America*
- [30] Stesky, R. M. et alia, 1974. "Friction in Faulted Rock at High Temperature and Pressure". *Tectonophysics*.
- [31] USCOLD 1997., "Reservoir Triggered Seismicity"
- [32] Wang Miao-yueh et al., 1975. "Mechanism of the Reservoir Impounding Earthquakes at Hsinfengkiang and a Preliminary Endeavour to Discuss their Cause", *Academia Sinica, Beijing, China*
- [33] Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994. "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement". *Bulletin Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4*.
- [34] Westergaard, H. M. and Atkins, A.W., 1934. "Deformation of the Earth Surface Due to Weight of the Boulder Reservoir". *Bureau of Reclamation, T.M. No. 422*
- [35] McGarr A, Simpson D, Seeber L, 2002. "Case Histories of Induced and Triggered Seismicity", from "International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology"