

# LOKALNI POTRESI IZAZVANI PROMJENAMA TLAKA FLUIDA U STIJENSKOJ MASI

Prof. dr. sc. Tanja Roje-Bonacci  
Dr. sc. Ognjen Bonacci, prof. emeritus

## 1. UVOD

Prije dvadesetak godina na hrvatskom je jeziku objavljena knjiga „Potresi izazvani akumuliranom vodom“ (Stojić i Lalić, 1994.). Knjiga je tiskana kao udžbenik Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Splitu te je prije svih namijenjena studentima, ali i inženjerima građevinarstva. U njoj se razmatra interdisciplinarna pojava koja ne spada prvenstveno, a još manje isključivo, u područje inženjerstva. Vjerujemo da nismo pogriješili ako ustvrdimo da je tada prvi put kod nas sustavnije, u pisanom obliku, razmatrana ova pojava prvenstveno sa stanovišta građevinskih inženjera. Materijali izneseni u njoj su ukazali na potrebu holističkog pristupa objašnjavanja i rješavanja ove složene i u cijelom svijetu, pa tako i kod nas, sve prisutnije problematike. Istine radi treba naglasiti da je još prije 35 godina objavljen rad pod naslovom: „Uticaj akumulacija na promjenu seizmičkih karakteristika okoline“ (Stojić 1978.). U tom je radu napomenuto da su prvi potresi uzrokovani akumulacijom bili utvrđeni nakon izgradnje 221 m visoke brane Hoover (SAD) i početka punjenja njom formirane akumulacije Lake Mead (Boulder). Autor je izlaganje završio slijedećom znakovitom izrekom Laplace-a: „Ono što znamo je tako malo, ono što ne znamo je beskrajno“.

Treba naglasiti i to da su hrvatski geofizičari, prije svih seizmolozi i geolozi-speleolozi, više od 30 godina ukazivali na postojanje utjecaja fluida na lokalne potrese. Cvijanović (1981.) je u Hrvatskoj prvi izvijestio o povezanosti oborina i potresa. Poslije toga su Garašić i Cvijanović (1984.; 1985.; 1986.; 1987.) detaljno argumentirali ovu problematiku. Izučavajući problematiku u prostoru Dinarskog krša, oni su iznijeli hipotezu da su potresi i speleološki objekti povezani s rasjednim zonama, odnosno tektonskim procesima koji se u njima događaju. Stoga su smatrali da je za očekivati uvjetno-posljedičnu vezu među njima. Pri tome naglašavaju da je područje Dinarskog krša tipičan primjer za spomenuti međuodnos. Posebno ukazuju na činjenicu da orijentacija i veličina speleoloških objekata u tom prostoru govori tome u prilog. Njihov je konačni

zaključak da se lokalni potresi i njima praćena neugodna tutnjava iz podzemlja češće javljaju u kišnim razdobljima ili neposredno poslije njih te da se zbog toga u prostoru Dinarskog krša seizmičke aktivnosti češće javljaju u ranu jesen, kasnu zimu i rano proljeće. U kršu se ponekad kao posljedica nagle oscilacije razina podzemne vode usporedo s induciranim lokalnim potresima, a možda i kao njihova posljedica, javlja i urušavanje dolina (Roje-Bonacci, 1995.; 1997.).

Roje-Bonacci (1995.) je ukazala na moguću vezu između promjena stanja naprezanja u stijenskoj masi uzrokovanih promjenom piezometarskih tlakova kao posljedice funkcioniranja velikih akumulacija koje induciraju seizmičnost u lokalnom okruženju.

U uvodnom izlaganju treba spomenuti da su prvi registrirani primjeri pojave potresa uzrokovanih izgradnjom brana i nastankom akumulacijskih jezera (Stojić i Lalić, 1994.), tzv. inducirane seizmičnosti (*induced seismicity*) (Milanović, 2002.) primijećeni tijekom tridesetih godina dvadesetog stoljeća na branama: 1) Maraton (Grčka); 2) Qued Fodda (Alžir); 3) Hoover (SAD); 4) Nevada (SAD). Milanović (2002.) navodi da je ista pojava bila opažena tijekom prvog punjenja sljedeće dvije velike brane u Dinarskom kršu: 1) Grančarevo; i 2) Mratinje. Magnitude dva potresa koji su se tada pojavili bile su  $M=4,5$  kod Grančareva i  $M=4,1$  kod Mratinja. Isti autor spominje da su identične pojave dokumentirane na raznim područjima planete te da su neke od njih bile uzrokom velikih materijalnih šteta i gubitaka ljudskih života. Kao primjeri navode se: 1) Xinfengjiang (Kina),  $M=6,1$ ; 2) Kremasta (Grčka),  $M=6,3$ ; 3) Koyona (Indija),  $M=6,5$ . Gupta (2002.) je dao detaljna objašnjenja da potresi mogu biti uzrokovani izgradnjom brana, odnosno pomoću njih stvorenih umjetnih jezera, odnosno akumulacija. U svojim istraživanjima otkrio je preko 100 slučajeva potresa za koje znanstvenici vjeruju da su izazvani na taj način.

Šest godina poslije objavljivanja rada Milanovića (2002.) dogodio se potres s daleko najtragičnijim

posljedicama, vrlo vjerojatno uzrokovan izgradnjom brane i punjenjem pripadne akumulacije. Potres se dogodio na dan 12. svibnja 2008. u Sichuan-u (Kina). Magnituda tog potresa bila je  $M=8,0$ . Posljedice su bile doslovno katastrofalne. Procijenjeno je da je poginulo 80.000 ljudi te da je oko 5 milijuna ljudi ostalo bez domova (Fan Xiao, 2012.). Potres je povezan s branom Zipingpu (središnja Kina) visine 156,0 m. Brana je završena 2006. godine. Kineski i američki znanstvenici vjeruju da je u ovom slučaju tlaka vode i njeno prodiranje u stijensku masu mogla uzrokovati pritisak u rasjednoj liniji koja se nalazi ispod brane i akumulacije čime je došlo do otvaranja sustava pukotina, a što je pak uzrokovalo pojavu potresa visokog intenziteta s katastrofalnim posljedicama.

Danas su saznanja o složenoj i još uvijek kontraverznoj problematici međusobnog utjecaja vode (oborinske, podzemne kao i površinske) i potresa (prirodnih kao i induciranih) postala mnogobrojnija, iako se ne može reći da su stvari u cijelosti shvaćene i objašnjene. U svijetu se o ovoj pojavi sve češće objavljuju radovi, ali se kod nas o tome relativno malo piše. Na pisanje ovog stručnog prikaza neposredno nas je potakao rad pod nazivom: „Odnos između seizmičkih i aseizmičkih pokreta potaknutih silom ubrizganog fluida“ objavljen u časopisu „Hydrological Processes“, jednom od vodećih svjetskih časopisa iz područja hidrogeologije (Cornet, 2012.). Nastavno će stoga iz njega biti prenesena (većim dijelom prevedena u poglavljima 2. do 5.) glavnina teksta koji će ujedno biti i nadopunjen primjerima iz brojne druge literature (u poglavljima 6. do 10.) .

## 2. ODNOS IZMEĐU SEIZMIČKIH I ASEIZMIČKIH POKRETA POTAKNUTIH SILOM UBRIZGANOG FLUIDA

Cornet (2012.), koji se ovom problematikom bavi već niz godina (Cornet i sur., 1997.) pod izrazom „fluidom potaknuto kretanje stijena“ (*fluid-induced rock motion*) podrazumijeva kretanje stijena generirano silom tečenja fluida u geološkim formacijama, bez obzira na to je li ga uzrokovala ljudska aktivnost ili se radi o prirodnoj pojavi. Koncept „fluidom uzrokovano kretanje stijena“ (*fluid-induced rock motion*) razlikuje se od koncepta „fluidom izazvanog kretanja stijena“ (*fluid-triggered rock motion*) koje se odnosi na kretanje stijenske mase koje se javlja nezavisno od tečenja fluida, ali je njime ubrzano. Mossop i Segall (1999.) su mjerenjima u geotermalnom polju u sjevernoj Kaliforniji, na osnovi 17 godina mjerenja, utvrdili snažnu korelativnu vezu između injektiranja fluida i inducirane seizmičnosti.

Da bi potaknuo kretanje fluida u stijenskoj masi, tlak fluida mora biti povećan, u određenoj zapremini do te mjere da generira mikrosezmičke aktivnosti.

Manje su poznata aseizmička kretanja uzrokovana silom toka fluida, tj. kretanja koja se javljaju pri brzinama nedovoljnim da uzrokuju primjetne dinamičke signale u stijenama. Ova aseizmička kretanja uzrokuju velike

promjene u opterećenom polju. Ove promjene moraju biti shvaćene posebno u slučajevima ako se želi držati pod kontrolom seizmičnost koja je opažena po završetku ubrizgavanja fluida.

## 3. IZVORI POTRESA GENERIRANIH UBRIZGAVANJEM FLUIDA

Već je dugo vremena poznato da povećanje pornih tlakova može potaknuti određene mikrosezmičke aktivnosti (Healy i sur., 1968.; Gupta i sur., 1969. itd.). Činjenica je da obje navedene pojave uzrokuju nagle promjene piezometarskih tlakova u određenim dijelovima stijenske mase. Izvor mehanizma pridruženog povećanju ovih tlakova općenito se uzima u obzir pri pojavi čistog smicanja. Pojava smicanja je jednostavno objašnjena Coulomb-ovim mehanizmom sloma, kod kojeg smanjenje efektivnog naprezanja, koje djeluje okomito na postojeće oslabljene plohe, dovodi do klizanja na kritičnim plohama u sustavu, u odnosu na smjerove glavnih naprezanja.

U posljednje je vrijeme ustanovljeno da, kada je tlak injektiranja dovoljno visok da izazove hidrauličko raspucavanje, mnoge pojave sadrže sastavnice neovisne o smicanju. Kao posljedica toga, s obzirom da je sustav seizmičkog promatranja ispravno konstruiran, danas su istraživanja usmjerena k analizama tenzora cjelovitog momenta kako bi se odredila komponenta čistog dvostrukog para, izotropna komponenta i komponenta kompenzirajućeg linearnog dipolnog vektora (Cornet, 2012.). Razumijevanje značenja tih različitih komponenti u mehanizmu sloma na izvoru opažanih mikrosezmičkih pojava omogućuje bolje razumijevanje porasta seizmičkih oblaka povezanih s difuznim procesima.

## 4. MEHANIZMI KOJI NADZIRU PORAST SEIZMIČKIH OBLAKA

Cornet (2012.) opisuje četiri različita mehanizma kojima se objašnjava povećanje seizmičkih oblaka vezanih uz tečenje fluida. Oni odgovaraju različitim stupnjevima tlaka fluida u odnosu na veličinu manjeg glavnog naprezanja u stijenskoj masi.

### 4.1 Hidraulička difuzija u elastičnoj, poroznoj sredini

Kada tlak naraste u dijelu bušotine s otvorima (pukotinama u stijenskoj masi), fluid se procjeđuje kroz stijensku masu u ovisnosti o njezinoj difuznosti (Wang, 2000.). To rezultira porastom pornih tlakova koji se mijenjaju u vremenu, što za posljedicu ima kolebanja u efektivnim naprezanjima u stijenskoj masi. Kao posljedica toga omjer, između najveće razlike naprezanja ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) i najmanjeg efektivnog naprezanja ( $\sigma_3 - P_0$ ) na promatranom mjestu ( $\sigma_1$  i  $\sigma_3$  su veće odnosno manje glavno naprezanje, a  $P_0$  porni tlak u promatranju

točki), raste s vremenom ovisno o udaljenosti između promatrane točke i mjesta izvora fluida pod tlakom.

Iz laboratorijskih je pokusa poznato da kada osni pritisak na uzorak stijene raste, pri spriječenom bočnom širenju javljaju se izvjesni zvučni učinci iako uzorak stijene ostaje u području elastičnosti. To je poznato kao Kaiser-ov učinak (Holcomb, 1993.). Kako promjene pornih tlakova u stijenskoj masi ovise o njenoj difuznosti, mnogi autori predlažu da se brzina povećanja seizmičkog oblaka objasni hidrauličkom difuznošću (Talwani i Acree, 1984.; Shapiro i sur. 2002.). Međutim, Cornet i sur. (2007.) su utvrdili da ta pretpostavka vrijedi tako dugo dok stijena ostaje u elastičnom području. Veće promjene tlaka izazivaju opsežan mehanizam mikroskopskih lomova, brzina rasta koja upravlja seizmičkim oblacima.

#### 4.2 Klizanje duž velikih potencijalnih kliznih ploha

Kada porni tlak postane dovoljno velik, Coulomb-ovo stanje efektivnog naprezanja na velikoj potencijalnoj kritičnoj kliznoj plohi ne može više zadovoljiti uvjete stabilnosti. Klizanje se događa duž te potencijalne kritične plohe. Razlika od prethodnog slučaja je u veličini klizne plohe koja u pojedinom slučaju može dostići stotine metara. To bitno mijenja lokalnu difuznost stijenske mase, a time i geometriju i brzinu porasta seizmičkih oblaka. Fehler i sur. (1987.) predlažu tzv. metodu triju točaka za određivanje geometrije tih oštećenih zona ili pak oblika seizmičkih oblaka.

#### 4.3 Razvoj novih kliznih područja

U području Soultz sous Forêts u sjeveroistočnoj Francuskoj, na pokusnom geotermalnom polju izvedeno je niz hidrauličkih pobuda u velikom mjerilu. Pri prvom pokusu izvršenom 1993. godine u bušotini GPK1 dubokoj 3,6 km, seizmički oblak, koji je nastao duž pretežnog dijela injektiranog raspona, bio je nagnut više od 20° u odnosu na smjer glavnih naprezanja i taj je nagib značajno stabilan (22°). Na osnovi te činjenice Cornet i sur. (2007.) su pretpostavili da se ne radi o potencijalnim postojećim lomovima i pukotinama, već o novim područjima smicanja, čija geometrija ovisi o regionalnom polju naprezanja. Taj razvoj novih područja smicanja potvrđen je detaljnim analizama brzine rasta seizmičkih oblaka tijekom pobude u bunaru GPKw dubine 4,5 km 2000. godine (Calo i sur., 2011.). Za pojavu novih područja smicanja potrebno je da komponenta efektivnog naprezanja, koja se javlja u kriteriju loma smicanjem, a svojstvena je ukupnoj stijenskoj masi, dostigne kritičnu vrijednost prije nego porni tlak fluida ( $P_0$ ) dosegne veličinu najmanjeg glavnog naprezanja ( $\sigma_3$ ) u stijenskoj masi. Tada, kada se razvije novo područje smika, ono kontrolira brzinu porasta seizmičkog oblaka, a ne kontrolira ga difuzija unutar elastične stijenske mase.

#### 4.4 Hidrauličko raspucavanje

Kada porni tlak postane jednak veličini najmanjeg glavnog naprezanja, ( $P_0 = \sigma_3$ ) nastaje tzv. hidrauličko raspucavanje, okomito na smjer manjeg glavnog naprezanja, a rast seizmičkog oblaka je pod kontrolom brzine porasta hidrauličkog raspucavanja i procjeđivanja fluida kroz stjenke pukotina. Sileny i sur. (2009.) su, međutim, otkrili postojanje izvora ponovljenih vlačnih dipola daleko od ruba seizmičkog oblaka, što vodi k pretpostavci da su neke hidrauličke raspukline sastavljene od mreže pukotina I. vrste (čisti vlak) povezanih s malim posmičnim pukotinama, nešto slično „Hill” modelu pukotina za vulkanske kosine (Hill, 1977.). Rezultirajuća geometrija prostrane zone tečenja združena s mrežom Hill pukotina je blago nagnuta, oko 10° u odnosu na smjer manjih glavnih naprezanja.

### 5. ASEIZMIČKI POKRETI ZDRUŽENI S INJEKTIRANJEM FLUIDA

Na lokaciji Le Mayet de Montagne (središnja Francuska) ispitivane su različite hidrauličke pobude na maloj dubini (800 m) da bi se utvrdile tehnike potrebne za razvoj geotermalnih spremnika u području Hot Dry Rocks na većim dubinama. Za tu namjenu provedena su detaljna mjerenja u bušotinama prije i nakon hidrauličke pobude (Cornet i Yin, 1995.). Usporedbom profila naprezanja opisanog područja, pokazala se heterogenost naprezanja nakon hidrauličke pobude. Ove nepravilnosti u naprezanjima mogle su se modelirati klizanjem jednog od opažanih seizmičkih područja. Međutim, pad naprezanja, izmjeren u tom području klizanja, podrazumijeva da su svojstva klizanja mnogo veća od vrijednosti koje odgovaraju veličini opaženih seizmičkih pojava ili događanja. Zaključeno je da se to klizanje događa aseizmički duž tih područja tijekom injektiranja (Scotti i Cornet, 1994.).

Značajna rasprostranjenost ovih aseizmičkih pokreta primijećena je, također nedavno, na tomografskim snimkama P-valova (Calo i sur., 2011.) pri pobudi provedenoj na oko 4,5 km dubokom bunaru GPK2. Injektiranje je izazvalo mikrosezmičke pojave koje su korištene za kartiranje brzine rasprostiranja P- valova,  $V_p$ , i njihove promjene u vremenu. U obzir je uzeto četrnaest različitih razdoblja injektiranja, neka u stacionarnom stanju, a neka neposredno nakon promjene količine protoka. Tijekom stacionarnog injektiranja primijećeno je lagano smanjenje brzine blizu stijenci, što je protumačeno učinkom perkolacije vode. Međutim, za korak br. 3, neposredno nakon porasta tlaka u bušotini, nepravilnost brzine najednom je nestala da bi se zatim postupno ponovno vraćala. Trenutna promjena u polju, brzina  $V_p$  objašnjena je promjenom efektivnih naprezanja u stijenskoj masi uzrokovane masovnim aseizmičkim klizanjem duž svježih (novih) kliznih područja ograničenih prostorom inducirane seizmičnosti.

Stoga je, tijekom injektiranja, zapremina stijenske mase reda veličine 1 km<sup>3</sup> podnijela promjenu naprezanja reda veličine nekoliko mega paskala [MPa] zbog aseizmičkog klizanja. Nova ravnoteža, postignuta pri injektiranju, poremećena je uslijed pada pornog tlak koji je primijećen u trenutku prestanka injektiranja, a koji je rezultirao promjenom efektivnih naprezanja u blizini postojećih pukotina nastalih seizmičkim klizanjem.

Predloženi mehanizam se zasniva na ideji da je zakon sloma za svježe pukotine različit od onog za postojeće zbog različite hrapavosti za različite vrste površina sloma.

Masovno injektiranje uzrokuje oba, seizmičke i aseizmičke pokrete u tlu (Cornet, 2012.). Iskustvo pokazuje da se često potresi najveće magnitude opaze nakon što je prestalo injektiranje. Smatra se da, ako se tijekom injektiranja pojavi aseizmičko klizanje i postigne privremena ravnoteža u suglasju s raspodjelom pornih tlakova u stijenskoj masi za vrijeme klizanja, ta ravnoteža bude poremećena uslijed pada tlaka zbog prestanka injektiranja. Moguće je da su svojstva postojećih pukotina različita od onih u novo nastalim pukotinama (glade klizne površine), stoga je slom duž postojećih pukotina seizmički dok je slom duž svježih kliznih područja aseizmički. Ove je pretpostavke potrebno vrednovati i provjeriti na modelima. Takvo će modeliranje zahtijevati jasno razumijevanje utjecaja normalnih naprezanja i temperature na razvoj koeficijenta smicanja, kao i na stanje promjenjivih koje karakteriziraju kliznu površinu.

## 6. SEKVESTRACIJA UGLJIČNOG DIOKSIDA

Kao jedna od najprihvatljivijih mjera za smanjivanje koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi, dakle kao bitna mjera za smanjivanje globalnog zagrijavanja, nudi se geološko skladištenje ili sekvestracija CO<sub>2</sub> (Levi, 2008.; Bonacci, 2009.). Radi se o tehnologiji koja podrazumijeva odvajanje CO<sub>2</sub> i njegovo skladištenje duboko u unutrašnjost Zemlje s ciljem sprječavanja prodora u atmosferu. Razmatra se niz varijanti skladištenja. Jednom od njih CO<sub>2</sub> se pod tlakom ubacuje u napuštene rudnike ugljena iz kojeg potiskuje metan CH<sub>4</sub>, koji je također staklenički plin pa ga je potrebno iskoristiti kao gorivo. Druga metoda skladišti CO<sub>2</sub> pod tlakom u geološkom sloju zasićenom slanom vodom, dok treća metoda CO<sub>2</sub> pod tlakom ubacuje u naftne bušotine čime se poboljšava mogućnost crpljenja nafte. Postoje i brojni drugi prijedlozi (Kramer 2012.). U biti radi se o injektiranju CO<sub>2</sub> pod velikim tlakom na razne dubine, koje se kreću u rasponu od oko stotina metara do više od 1,6 km, što zavisi o geološkoj strukturi terena.

Kako se injektiranje ugljičnog dioksida mora vršiti pod visokim tlakom, neki su znanstvenici ukazali na potencijalnu mogućnost da taj proces bude uzročnikom izazivanja potresa. Kramer (2012.) daje vrlo detaljan prikaz polemike koja se razvila vezana s tom problematikom. Dok jedni stručnjaci inducirane potrese uzrokovane

injektiranjem CO<sub>2</sub> (primjenu postupka sekvestracije) smatraju neizbježnom pojavom te ukazuju da bi ona mogla utjecati i na povećanje opasnosti i razornosti prirodnih potresa, drugi ne negiraju da će potresi biti inducirani, ali isključuju mogućnost da će oni uzrokovati iole ozbiljnije posljedice na okoliš.

Ako se želi objektivno procijeniti postoji li ili ne opasnost od induciranih potresa uslijed primjene sekvestracije, te kolika je ona, velika ili mala, ne smije se zanemariti činjenica kojoj „strani“ pripada pojedina skupina stručnjaka. Na potencijalno veliku opasnost ukazuju nezavisni znanstvenici, dok nju negiraju stručnjaci koji rade za velike korporacije koje se bave razvojem tehnologija sekvestracije i stoga od tog posla očekuju velike profite za kompanije čiji su zaposlenici. Bez obzira na sve nejasnoće i dileme, problem postoji i sve je veći. Pandorina kutija je otvorena i čovječanstvo se nalazi pred novim velikim izazovom. Njega je moguće riješiti jedino na takav način da se stvari detaljno izučavaju te da se na osnovi znanstvenih i nezavisnih istraživanja dođe do pravog zaključka.

## 7. SEIZMIČNOST U KRŠU IZAZVANA INTENZIVNIM OBORINAMA

Talijanski seizmolog Bragato (2012.) se bavi seizmičnošću koja se javlja prilikom tečenja vode u krškim predjelima. Ispitivao je seizmičke i zvučne učinke na koje je upozoren od stanovnika malih krških dolina smještenih na sjeveru Italije u blizini krškog masiva Cansiglio. Mjerenjima na mreži od 6 seizmografa je zabilježeno više stotina potresa malih amplituda. Izvori seizmičnosti (epicentri potresa) bili su oko 700 m ispod razine mora ili oko 1000 m ispod površine terena. Svima njima prethodile su intenzivne oborine koje su prethodno pale na to područje. Talijanski seizmolozi klasificirali su ovu vrstu potresa kao „kišom izazvanu seizmičnost“. Idenični fenomeni već su prije uočeni i dokumentirani u krškim područjima Njemačke i Francuske.

Bragato (2012.) je mjerenjima otkrio da u javljanju ovih potresa postoje pravilnosti u prostoru i magnitudi. Događaji sa sličnom energijom su najčešće locirani u istom mjestu ili na bliskim lokacijama. Oni nisu bili jednoliko raspodijeljeni u rasponu magnituda, nego su se grupirali u određenim skupinama. Takvo ponašanje nije svojstveno kod normalnih prirodnih potresa čije je ponašanje slučajno. Stoga je zaključeno da su izučavani potresi u ovoj krškoj regiji u odnosu s mehanizmom koji zavisi o protoku podzemne vode. Prilikom tih potresa javljaju se i neugodni zvučni učinci koje mjesno stanovništvo opisuje kao udarce čekićem po zidu. Iz tog opisa zaključeno je da se vjerojatno radi o učinku vodnog udara. Kao jedno od mogućih objašnjenja Bragato (2012.) pretpostavlja da u danom krškom masivu postoje sifoni (Bonacci i Bojanić, 1991.) čije djelovanje uzrokuje potrese koji su popraćeni tutnjavom.

Chen i sur., (1995.) su izučavali mehaničke utjecaje kompresije zraka i vode u krškim provodnicima. Oni su zaključili da eksplozije komprimiranog zraka mogu biti uzroci seizmičkih pojava.

## 8. ZATVARANJE POVREMENOG KRŠKOG IZVORA OBOD

Milanović (2002.) spominje da analize određenih potresa ukazuju na utjecaj krških svojstava masiva na genezu seizmičkih šokova. One ukazuju da su eksplozije možda posljedice zbijanja zraka tijekom naglog punjenja akumulacije praćenog isto tako naglim podizanjem razine podzemne vode u okolnom krškom vodonosniku. Pritisak zraka zarobljenog u krškim provodnicima i sifonima značajno se i naglo povećava. Zarobljeni „zračni jastuci“ se oslobađaju stvarajući snažne eksplozije koje mogu biti zabilježene na obližnjim seizmološkim stanicama. Radi se općenito o lokalnom prostoru, ali posljedice mogu biti vrlo neugodne.

Negativne posljedice zatvaranja povremenog, ali vrlo izdašnog krškog vrela Obod u Fatničkom polju (Bosna i Hercegovina) opisan je u mnogim radovima (npr. Milanović, 2000.; 2002.; Bonacci, 2004. itd). Protok izvora mijenja se od 0 m<sup>3</sup>/s do najviše 60 m<sup>3</sup>/s. Na spomenutom izvoru primijećeno je da se i u prirodnom, neporemećenom stanju pojavljuju lokalne trešnje praćene podzemnom tutnjavom. Lokalno stanovništvo je uočilo da se 15 do 30 sati prije aktiviranja izvora javljaju periodični jaki seizmički udari.

S namjerom da se smanji plavljenje Fatničkog polja, pokušalo se smanjiti najveći protok izvora od 60 m<sup>3</sup>/s na 12 m<sup>3</sup>/s. To je načinjeno tako da je izlaz iz izvora u Fatničko polje (radi se o prostranom krškom provodniku) začepljen masivnim betonskim čepom visokim 10 m i u prosjeku širokim 3,5 m. Vrlo kratko vrijeme poslije završetka ovih radova pala je iznimno velika količina oborina, više od 200 mm u 24 sata. Došlo je do naglog podizanja razine podzemne vode u krškom masivu te porasta tlaka vode za više od 10,6 bara. Na pokosima Fatničkog polja, 80 do 100 m iznad kote izvora Obod, pojavilo se desetak novih snažnih izvora čija je protoka procijenjena na oko 11 m<sup>3</sup>/s. Voda je izbijala u nizu kuća praveći goleme štete na cjelokupnoj infrastrukturi u području.

Iznimno brzo punjenje vodom nezasićenog dijela (zrakom ispunjenog područja) krškog masiva uzrokovalo je pojavu eksplozija zračnih čepova zarobljenih u velikim krškim provodnicima i kavernama, praćeno jakim lokalnim potresima. Kao posljedica navedenog došlo je do pojave klizišta, tako da su mnogi objekti udaljeni 250 m do 300 m od začepljenog izvora bili oštećeni. Situacija je riješena tako da je betonski čep eksplozivom dignut u zrak.

## 9. PRESUŠIVANJA RIJEKA I IZVORA U KRŠU USLIJED POTRESA

U ovom poglavlju bit će prikazan jedan nešto drugačiji fenomen odnosa kretanja fluida u krškoj regiji i potresa. Radi se o posljedicama koje prirodni potres može uzrokovati na tečenje vode u krškom podzemlju, ali i u otvorenom vodotoku.

Brenčić (2010.) i Gosar i Brenčić (2013.) su izvijestili o presušivanju rijeke lške (Slovenija) na vodomjernoj postaji lška Vas dana 23. rujna 2010. i ponovnoj pojavi vode na tom vodomjernom profilu 25. rujna 2010. Površina sliva do spomenute vodomjerne postaje iznosi 69,7 km<sup>2</sup>, a srednji godišnji protok izmjeren u posljednjih deset godina iznosio je 1,35 m<sup>3</sup>/s. Tijekom intenzivnih i obilnih oborina, koje su pale u razdoblju od 17. do 19. rujna 2010., veliko područje Slovenije bilo je poplavljeno. Poplave su se javile i u slivu rijeke lške kod koje je tijekom 48 sati protok porastao od oko stotinu litara u sekundi na maksimalnih 59,3 m<sup>3</sup>/s. Ovaj se protok javio u ponoć 20. rujna 2010. Dana 21. rujna 2010. u 2 sata i 19 minuta, kad su protoci bili u opadanju te su bili niži od 5 m<sup>3</sup>/s, u blizini lška Vasi javila su se dva mala potresa unutar jedne minute. Magnitude su im iznosile  $M_1=0,6$  i  $M_2=0,2$ . Potresi su bili praćeni tutnjavom iz krškog masiva. Opadanje protoka izvora nastavilo se do 23. rujna u 16 sati i 30 minuta kada je izmjeren protok od 0,093 m<sup>3</sup>/s. Nakon tog trenutka vodotok lška je presušio na dužini korita od više od 4 km. Na profilu lška Vas voda se ponovo pojavila tek poslije 41,5 sati u iznosu od 0,33 m<sup>3</sup>/s. Presušivanje rijeke lške na potezu kod lška Vasi je vrlo rijedak događaj. Posljednji zabilježeni slučaj zbio se na toj lokaciji prije više od sedamdeset godina.

Pregledom korita poslije prolaska vala velike vode ustanovljeno je da je na dionici, na kojoj je došlo do presušivanja, poplavni val velike vode erodirao dno i bokove korita u iznosu od nekoliko desetaka centimetara do jednog metra (Brenčić, 2010.; Gosar i Brenčić, 2013.). Odnosen je zaglinjeni površinski sloj koji je vršio funkciju nepropusnog ili barem slabo propusnog sloja za vodu koja je tekla vodotokom.

Pažljivim pregledom hidrograma na profilu lška Vas uočljiv je nagli lom na hidrogramu recesije koji se pojavio 21. rujna u 12 sati i 30 minuta, deset sati po pojavi potresa. Od tog trenutka intenzitet opadanja protoka se jako povećao u odnosu na prethodno stanje. Brenčić (2010.) i Gosar i Brenčić (2013.) smatraju da je vrlo vjerojatno presušivanje rijeke lške povezano s dva spomenuta potresa čiji su epicentri bili vrlo blizu površine i u neposrednoj blizini lška Vasi. Na tom su području potresi izrazito rijetki. Češće se javljaju oko 15 kilometra nizvodno i na mnogo većoj dubini (2 km i više). Kako su njihovi epicentri bili u neposrednoj blizini presušenog dijela korita, zaključeno je da su ga vjerojatno oni uzrokovali. U neposrednoj se blizini

nalazi rasjed. Stoga je moguće pretpostaviti da je nagla promjena hidrogeološkog i hidrološkog režima praćena promjenama pritiska i naprezanja u njegovoj blizini uzrokovala pojavu dva potresa. Tektonski pokreti su vjerojatno povezani s otvaranjem postojećih pukotina u karstificiranom dnu riječne doline. Hidrogram velikih voda erodirao je slabo propusni sloj na dnu korita vodotoka Iška. Istovremeno je došlo do naglog podizanja razine podzemne vode te ispiranja finih nepropusnih taložina u epikrškoj i vadoznoj zoni. Time je došlo do velikog povećanja intenziteta infiltracije vode s površine u krško podzemlje te kao posljedica toga presušivanja tečenja u koritu.

Činjenica je da su prethodno iznesena objašnjenja logična i prihvatljiva, ali je isto tako činjenica da su ostala još mnogobrojna otvorena pitanja. Riječ je o vrlo složenom međudjelovanju brojnih čimbenika. Kako su mjerenja nedostatna, neka će pitanja ostati neodgovorena. Međutim, ovaj je slučaj vrlo važno upozorenje da se na prostorima krša mogu dogoditi brojna i neočekivana iznenađenja. To upućuje na neophodnost sustavnog izučavanja procesa međudjelovanja tečenja fluida i potresa kako onih prirodnih tako i onih induciranih.

Treba naglasiti da su i kod nas u Hrvatskoj primijećene slične pojave, ali, nažalost, one nisu bile sustavno motrene niti opisane sa stručnog stanovišta. Bonacci (2004.) je izvijestio da je 23. svibnja 2004. u 17 sati i

19 minuta potres magnitude 5,5 stupnjeva s epicentrom između južne Hrvatske i zapadne Hercegovine izazvao nagle, ali kratkotrajne promjene u hidrogeološkom i hidrološkom režimu u regiji. Razina vode u svim krškim vodotocima u regiji se snizila (čak i za 180 cm), a neki su izvori presušili. Poslije otprilike desetak sati hidrološka situacija se vratila na onu koja je bila prije potresa.

## 10. ZAVRŠNE NAPOMENE

Želja nam je bila da se u ovom radu da pregled nekih novijih istraživanja te da ih se poveže s postojećim iskustvima u cilju da se veza odnosa kretanja vode i pojave induciranih potresa započne u Hrvatskoj razmatrati i izučavati sustavno i interdisciplinarno. U takvim interdisciplinarnim studijama neizbježno i najmanje trebaju učestvovati geotehničari i hidrotehničari raznih specijalnosti kao npr: seizmolozi (geofizičari), geolozi (osobito oni koji se bave potresnim inženjersvom i speleologijom), hidrogeolozi i inženjeri građevinarstva koji se bave mehanikom stijena, injektiranjima i mehanikom tla.

Osobito treba naglasiti činjenicu da se u literaturi navodi da se ovi fenomeni posebno često javljaju na području krša. To samo po sebi znači da je za poduzimanje inženjerskih zahvata u našim krškim terenima od bitnog značaja pratiti dostignuća u ovom snažno razvijajućem interdisciplinarnom području inženjersva i geofizike.

## LITERATURA:

- Bragato, P. L. (2012.): Privatna e-mail komunikacija.
- Brenčić, M. (2011.): Zakaj je izginula reka Iška? Slovenski Vodar 23-24: 80-83.
- Bonacci O (2004.) Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. Natural Hazards and Earth System Sciences 4 (5-6): 655-661.
- Bonacci, O. (2009.): Globalno zagrijavanje i geoinženjerske (klimatsko inženjerske) mjere za ublažavanje njegovih posljedica. Gospodarstvo i okoliš XVII (97): 142-147.
- Bonacci, O., Bojanić, D. (1991.): Rhythmic karst springs. Hydrological Sciences Journal 36(1): 35-47.
- Calo, M., Dorbath, C., Cornet, F.H., Cuenot, N. (2011.): Large scale aseismic motion identified through 4D P-wave tomography. Geophysical Journal International 186: 1295-1314.
- Chen, J., Thomas, G., Jones, I. (1995.): Mechanical impacts of air and water compression in karst conduits. In: Beck B (ur.) Karst GeoHazards. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Cornet, F.H. (2012.): The relationship between seismic and aseismic motions induced by forced fluid injections. Hydrogeology Journal 20(8): 1463-1466.
- Cornet, F.H., Bernard, T., Bourouis, S. (2007.): How close to failure is a natural granite rock mass. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44: 47-66.
- Cornet, F.H., Helm, J., Poitrenaud, H., Etchecopar, A. (1997.): Seismic and aseismic slips induced by large-scale fluid injections. Pure Applied Geophysics 150: 563-583.
- Cornet, F.H., Yin, J. (1995.): Analyses of induced seismicity for stress fields determination and pore pressure mapping. PAGEOPH 145: 677-700.
- Cvijanović, D. (1981.): Oborine i potresi. Zbornik radova 5. simpozija jugoslavenskog društva za mehaniku stijena i podzemne radove, Knjiga I., Split: 355-360.
- Fan, X. (2012.): Did the Zipingpu Dam Trigger China's 2008. Earthquake? The Scientific Case. Probe International. 34 str.
- Fehler, M., House, L., Kaieda, L. (1987.): Determining planes along which earthquakes occur: method and application to earthquakes accompanying hydraulic fracturing. Journal of Geophysical Research 92: 9407-9414.
- Garašić, M., Cvijanović, D. (1984.): Uzročna veza između pojave lokalnih potresa i speleoloških pojava u kršu. Zbornik predavanja 9. jugoslavenskog speleološkog kongresa, Karlovac 17.-20. X. 1984.: 431-444.
- Garašić, M., Cvijanović, D. (1985.): Speleološke pojave i seizmičke aktivnosti u krškim poljima. Simpozij "Čovjek i krš". Kupres 7.-9.VI. 1985. Naš Krš 18-19: 103-109.
- Garašić, M., Cvijanović, D. (1986.): Speleological phenomena and seismic activity in Dinaric karst area in Yugo-

- slavia. Proceedings of 9<sup>th</sup> Congreso Internacional de Espeleología, Barcelona 1.-7.VIII.1986. Vol.I: 94-97.
- Garašić, M., Cvijanović, D. (1987.): Neke karakteristike pojave serije potresa i tutnjava u području krša od Stona do Dubrovnika. Naš Krš 28-29: 67-75.
- Gosar, A., Brenčič, M. (2013.): Possible relation between the sudden sinking of river Iška and the sequence of weak earthquakes in September-October 2010 near Iška vas (central Slovenia). Acta Carsologica (prihvaćen za tiskanje).
- Gupta, H.K. (2002.): A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. Earth-Science Reviews 58(3-4): 279-310.
- Gupta, H.K., Narim, H., Rastogi, B.K., Moham, I. (1969.): A study of the Koyna earthquake of December 10, 1967. Bulletin of Seismological Society of America 59: 1149-1162.
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T., Raleigh, C.B. (1968.): The Denver earthquakes. Science 161: 1301-1310.
- Hill, D.P. (1977.): A model for earthquake swarms. Journal of Geophysical Research 82: 1347-1352.
- Holcomb, D.J. (1993.): General theory of the Kaiser effect. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 36: 163-181.
- Kramer, D. (2012.): Scientists poke holes in carbon dioxide sequestration. Physics Today 65(8): 22-24.
- Levi, B.G. (2008.): Will desperate climate call for desperate geoengineering measures? Physics Today 61(11): 54-55.
- Milanović, P. (2000.): Geological Engineering in Karst. Zebra Pbl. Co., Beograd. 347 str.
- Milanović, P. (2002.): The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst regions. Episode 25(1): 13-21.
- Mossop, A.P., Segall, P. (1999.): Induced Seismicity in Geothermal Fields II – Correlation and Interpretation at the Geysers. Stanford University Report.
- Roje-Bonacci, T. (1995.): Piezometarski pritisci, efektivna naprezanja, inducirani potresi Zbornik Radova 1. Hrvatske Konferencije o Vodama, Dubrovnik 24.-27. V. 1995.: 107-113.
- Roje Bonacci, T. (1997.): Influence of the fluctuation of groundwater levels upon the formation of sinkholes. In: Marinos PG, Koukis GC, Tsiambaos GC, Stournaras GC Engineering Geology and the Environment. A. A. Balkema, Rotterdam: 997-1002.
- Scotti, O., Cornet, F.H. (1994.): In situ evidence for fluid induced aseismic slip events along fault zones. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 31: 347-358.
- Shapiro, S.A., Rothert, E., Rath, V., Rindschwentner, J. (2002.): Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced seismicity. Geophysics 67: 212-220.
- Sileny, J., Hill, D.P., Eisner, L., Cornet, F.H. (2009.): Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced by hydraulic fracturing. Journal of Geophysical Research 114: B08307.
- Stojić, P. (1978.): Uticaj akumulacija na promjenu seizmičkih karakteristika okoline. Saopštenja „Simpozijum o uticaju veštačkih jezera na čovekovu sredinu“, Trebinje 15.-18. III.1978.: 35-39.
- Stojić, P., Lalić, R. (1994.): Potresi izazvani akumuliranom vodom. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu. 116 str.
- Talwani, P., Acree, S. (1984.): Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. PAGEOPH 122: 947-965.
- Wang, H. (2000.): Theory of Linear Poroelasticity. Princeton University Press, Princeton. 287 str.