

KVANTITET APRIORNIH SEIZMOLOŠKIH INFORMACIJA U FUNKCIJI KVALITETA SEIZMOGENOG MODELA REGIONA NA PRIMJERU JUŽNIH DINARIDA

Branislav Glavatović¹

SUMMARY

According to the national seismic codes based on the seismic hazard map for the return period of 500 years, dated in 1984, a wide spectrum of buildings in Montenegro was aseismically designed. In the paper it was analyzed the influence of enormous change of the level of seismological data as a result of establishing a new seismological telemetry network in Montenegro, consisting of 10 short-period stations at the end of 1982. The analysis was performed on the elements of the basic content of every seismogenetic model of the region – the coefficients of Gutenberg-Richter relation, bought in spatial and temporal domain. According to the results of data analysis, it was noticed that it is necessary to make recalculation and innovation of all seismological maps with a long-term prediction content, such as seismic hazard map and all the maps that serve as a base for aseismic building design in the region, according to the new seismological data base.

UVOD

Za proračun parametara seizmičkog hazarda i sadržaja drugih seizmoloških podloga sa elementima dugoročne prognoze seizmičnosti, u inženjersko-seizmološkoj praksi se koristi veći broj numeričkih metoda, sa različitim pristupima i uslovima neophodnim za njihovu realizaciju (na primjer: [1], [2], [3], [7], [8], [10], [11], [12], [13] i drugi). Izbor određene metodologije obrade primarno mora biti uslovljen karakteristikama ulaznih podataka koje čine relevantni elementi registrovane seizmičnosti posmatranog regiona, kao i očekivane seizmogeneze definisane seizmogenim potencijalom neotektonskih elemenata tog prostora.

¹ Republički seizmološki zavod, Podgorica, e-mail: seismocg@cg.yu

U ovom radu je analiziran efekat gustine informacija o dogođenoj seizmičnosti regiona na sadržaj karata seizmičkog hazarda za prostor Crne Gore, kroz poređenje oblika Gutenberg-Rihterove relacije tokom XX i XXI vijeka, u funkciji količine i kvaliteta informacija o seizmičnosti teritorije Crne Gore i susjednih, seizmički uticajnih regiona.

Učinjen je poseban osvrt na sadržaj Seizmološke karte sa povratnim periodom od 500 godina [14], koja predstavlja sastavni dio "*Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*" (Službeni list SFRJ br. 31/81 sa izmjenama br. 49/82, 29/83, 21/88 i 52/90). Naime, kao što je poznato, ova karta još uvijek predstavlja seizmološku osnovu za potrebe projektovanja objekata II i III kategorije u seizmičkim područjima na prostoru Državne zajednice Srbija i Crna Gora. Međutim, u projektantskoj praksi više puta je ukazivano na neadekvatnost ove podloge za projektovanje, prije svega zbog zastarjelosti sadržaja i vrste podataka koje sadrži (očekivani intenzitet zemljotresa), zatim zbog značajne razlike u metodologiji njene izrade na teritorijama dvaju entiteta Državne zajednice, kao i zbog predimenzionisanosti parametara intenziteta na znatnom dijelu teritorije Srbije.

ANALIZA SEIZMOGENOG POTENCIJALA REGIONA

Sadržaj karata seizmičkog hazarda, kao i svih ekvivalentnih seizmoloških podloga sa elementima dugoročne prognoze, generalno posmatrano, određuju se realizacijom sljedećih generalnih procedura:

- definisanjem efektivnog seizmogenog potencijala relevantnih tektonskih, rupturnih i neotektonskih struktura regiona koje su seizmički aktivne ili potencijalno aktivne;
- utvrđivanjem frekventnih karakteristika seizmičnosti svih aktivnih i potencijalnih seizmogenih zona užeg i šireg regiona (parametri seizmičkog režima regiona opisanih Gutenberg-Rihterovim relacijama);
- utvrđivanjem zakonitosti atenuacije seizmičkih parametara (očekivanog maksimalnog horizontalnog ubrzanja i maksimalnog intenziteta zemljotresa) i spektralnih atenuacionih relacija ubrzanja na regionalnom nivou i
- proračunom numeričkih parametara seizmičkog hazarda integrisanjem svih seizmičkih uticaja svih potencijalnih žarišta regiona - primjenom odgovarajućih metoda i statističkih modela.

Očigledno, jedan od najznačajnijih koraka u proceduri konstrukcije modela seizmogeneze regiona i samom proračunu seizmičkog hazarda (kao i svih drugih ekvivalentnih seizmoloških podloga), predstavlja postupak utvrđivanja seizmogenog potencijala regiona kroz identifikovanje parametara seizmičkog režima svih pojedinačnih relevantnih seizmogenih zona.

Geodinamički procesi, kao neposredan generator tektogeneze i seizmogeneze, uslovljeni su veoma sporim kretanjem tektonskih ploča (milimetarskih i centimetarskih dimenzija na godišnjem nivou). U uslovima vrlo kompleksne geološke građe zemljine kore, u kojoj se akumuliraju tektonski naponi, neophodno je izvoditi dugotrajno kvalitetno multidisciplinarno opserviranje tektonskih posljedica tih geodinamičkih procesa, radi spoznaje njihove cjelovite prirode i konstrukcije adekvatnog reprezentativnog kinematskog modela, odnosno modela seizmogeneze tog regiona. Za prostor Crne Gore, južnih Dinarida i cijelog sjevernog oboda Mediterana, prve informacije o seizmičnosti datiraju sa početka XX vijeka. Međutim, zbog veoma rijetke mreže seizmoloških stanica u tom regionu, praktično sve do instaliranja seizmoloških telemetrijskih mreža u Crnoj Gori i Albaniji, osamdesetih godina prošlog vijeka, kvantitet i kvalitet seizmoloških informacija o savremenim tektogenim procesima regiona, bio je vrlo skroman. Priprema prognoznih seizmoloških karata 1987. godine [14] za niz povratnih perioda vremena, bila je bazirana na tako formiranom fondu podataka.

POSTOJEĆA SEIZMOLOŠKA KARTA ZA POVATNI PERIOD OD 500 GODINA

Kao što je rečeno u Uvodu, "Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima" (Službeni list SFRJ br. 31/81 sa izmjenama br. 49/82, 29/83, 21/88 i 52/90), u članu 2 u izmjenama Pravilnika iz 1990. godine (Sl. list 52/90) navedeno je: "Za projektovanje objekata visokogradnje svrstanih u II i III kategoriju koristi se seizmološka karta SFRJ izrađena za povratni period zemljotresa od 500 godina."

Istim Pravilnikom propisana je kategorizacija objekata, u okviru koje je definisano da II kategoriju objekata čine: stambene zgrade, hoteli, restorani, javne i industrijske zgrade (koje nijesu svrstane u prvu kategoriju), dok trećoj kategoriji pripadaju pomoćne proizvodne zgrade i agrotehnički objekti. Dakle, II i III kategorija obuhvataju široku i značajnu lepezu objekata, što implicira važnost relevantnog, savremenog i pouzdanog definisanja očekivanog **projektnog i maksimalnog seizmičkog dejstva** i adekvatne aseizmičke zaštite takvih objekata u periodu njihove eksploatacije.

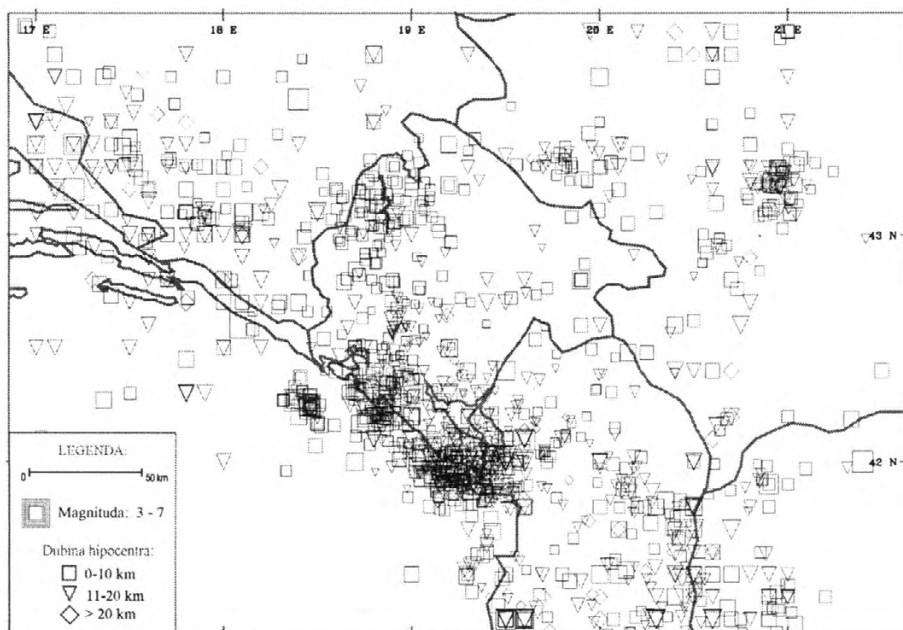
Na slici 1 prikazana je Seizmološka karta teritorije Crne Gore i neposredne okoline, za povratni period vremena od 500 godina, sa sadržajem očekivanog maksimalnog intenziteta zemljotresa u uslovima tzv. čvrstog tla koja je označena kao sastavni dio Pravilnika o tehničkim normativima. Ova karta sadrži rezultat obrade svih raspoloživih podataka o seizmičnosti koja je registrovana na tom prostoru, dominantno od početka XX vijeka pa do kraja 1984. godine, kao i efekte determinisanih potencijalnih seizmogenih žarišta regiona. Za period od srednjeg vijeka do XX vijeka, ovom kartom su obuhvaćene i sve relevantne informacije o razornim i katastrofalnim zemljotresima u širem regionu.



Slika 1. Očekivani maksimalni intenziteti u periodu od 500 godina (1987. god.) kao osnovna seizmološka podloga za projektovanje objekata II i III kategorije, prema citiranom Pravilniku o tehničkim normativima

Slika 2 reprezentuje praktičan sadržaj baze podataka o seizmičnosti regiona u obliku karte epicentara, koja je predstavljala osnovu za proračun seizmičkog hazarda i utvrđivanje sadržaja karte na slici 1.

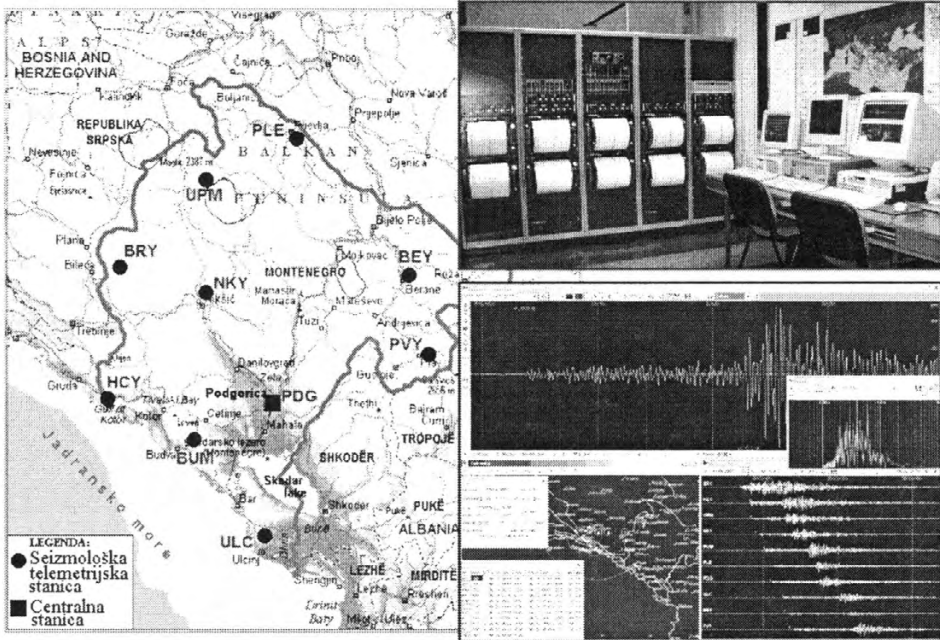
Krajem decembra 1982. godine, u okviru međunarodnog regionalnog projekta “Smanjenje seizmičnosti na Balkanu” (UNDP/UNESCO), na teritoriji Republike Crne Gore je instalirana seizmološka mreža sa 9 (sada 10) telemetrijskih stanica (slika 3). Mreža je koncipirana [4] kao analogna radio-telemetrijska, sa tzv. dual-gain amplifikacijom seizmičkih signala i FM modulisanim radio prenosom do centralne Opservatorijske stanice u Podgorici. Sve seizmološke stanice su opremljene kratkoperiodičnim seizmometrima tipa S-13, “Teledyne Geotech”. Krajem 1990. godine, uveden je i sistem automatskog digitalnog on-line registrovanja na PC računarima i digitalna obrada seizmičkih signala, čime je praktična opservacija seizmičke aktivnosti teritorije Crne Gore i okoline izdignuta na visoki evropski nivo [5].



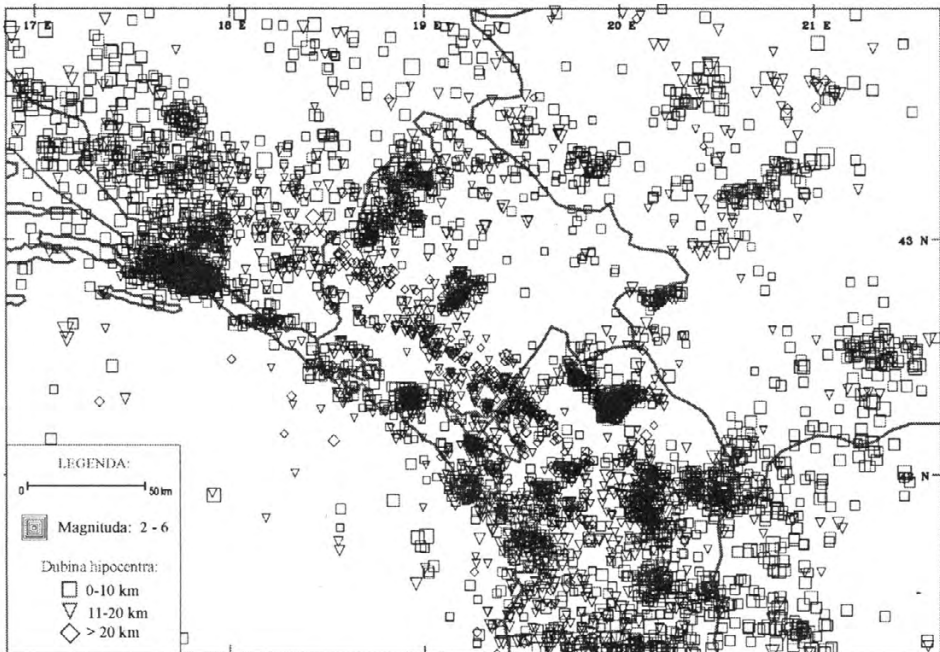
Slika 2. Zemljotresi realizovani u periodu od 1900. do kraja 1984. godine na području Crne Gore i seizmički uticajne okoline (magnituda zemljotresa iznad 3.0)

Na taj način, od 1983. godine, seizmološka baza podataka počela je da poprima novu dimenziju, a kvalitet i količina informacija o seizmičnosti regiona do danas, praktično su neuporedivi sa dotadašnjom bazom. Naime, obim informacija tokom posljednjih 20 godina efektivno je uvećan za preko 17 puta na jedinicu vremena. Istovremeno, kvalitet registrovanih i obrađenih podataka o žarištima zemljotresa višestruko je poboljšan, s obzirom da je tačnost determinisanja koordinata hipocentra svedena na oko 3% od dubine žarišta, što se može smatrati veoma pouzdanim i u svjetskim okvirima.

Slika 4 sadrži položaj epicentara zemljotresa (iznad magnitude 2.0) koji su locirani na teritoriji Crne Gore i neposredne okoline u periodu nakon izrade citirane Seizmološke karte za povratni period od 500 godina. Kao što je evidentno, sadržaj koji prikazuje ova karta samo za devetnaestogodišnji period, jasno indicira nova seizmogeno žarišta, koja su u prethodnom periodu (slika 2) samo marginalno bila poznata ili je njihova aktivnost ostvarivana na nivou ispod praga detektibilnosti nekadašnje seizmološke mreže.



Slika 3. Seizmološka telemetrijska mreža Crne Gore (lijevo) sa analognim i digitalnim sistemom registrovanja i digitalnom analizom i obradom podataka (desno)



Slika 4. Zemljotresi registrovani od početka 1985. godine do aprila 2004. godine na području Crne Gore i okoline (magnituda zemljotresa iznad 2.0)

ANALIZA SEIZMOGENOG POTENCIJALA REGIONA JUŽNIH DINARIDA U SVJETLU NOVIH PODATAKA

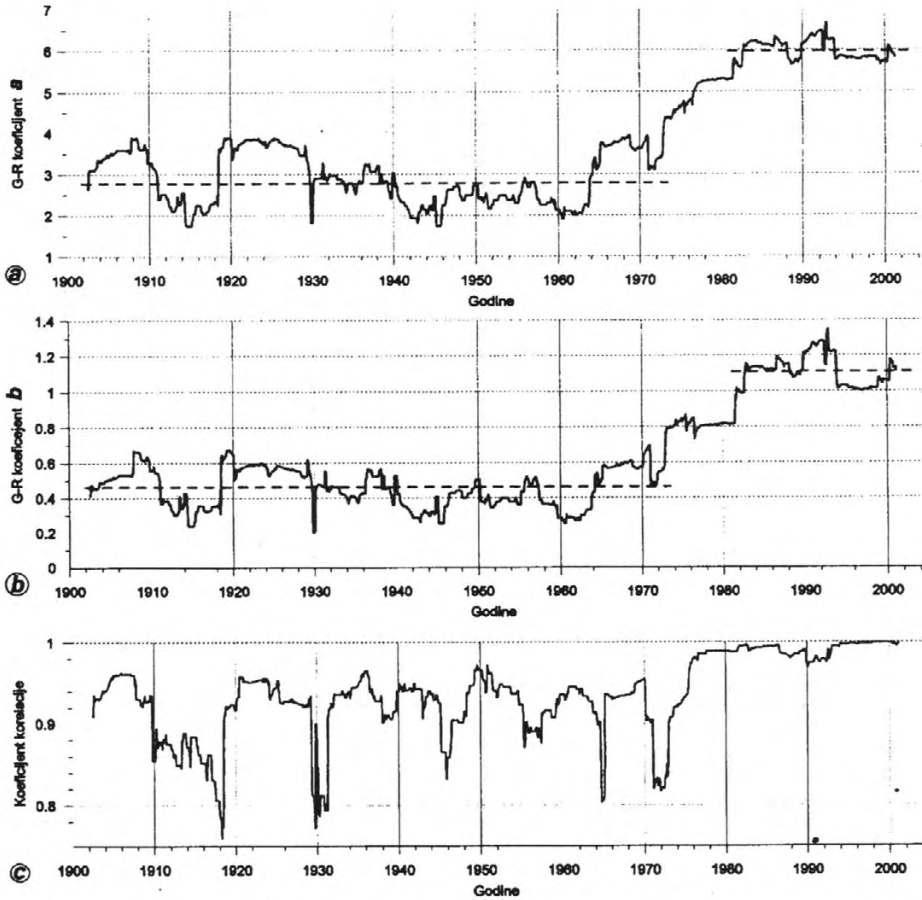
Kao što je poznato, seizmogeni potencijal žarišta (ili regiona u cjelini) na bazi prethodne seizmičnosti, uspješno se reprezentuje Gutenberg-Rihterovom relacijom oblika:

$$\log(N) = a + b \cdot M$$

pri čemu N predstavlja kumulativni broj zemljotresa iznad magnitude M u posmatranom periodu vremena u analiziranoj seizmogenoj zoni (ili regionu). Koeficijenti a i b određuju se empirijski - na osnovu elemenata poznate istorijske seizmičnosti. Koeficijent b u Gutenberg-Rihterovoj (tzv. G-R) relaciji dominantno izražava karakter seizmičkog režima seizmogene zone ili regiona koji ta relacija reprezentuje. Uobičajene vrijednosti koeficijenta b u svjetskim okvirima, nalaze se u granicama 0.6 – 1.2 (Stein i Wysseson, 2003, Lee i dr. 2002, Lay i Wallace 1995. i dr.). Odnos ova dva koeficijenta (a/b) definiše maksimalni potencijal seizmogene zone izražen najvećom mogućom magnitudom koja će se dogoditi (ili se dogodila) u okviru vremena koje je jednako vremenu osmatranja realne seizmičnosti u regionu.

Na slici 5 prikazan je rezultat proračuna koeficijenata a i b u funkciji vremena, na bazi raspoloživih podataka o dogođenoj seizmičnosti u periodu od 1900. do aprila 2004. godine. Primjenjen je tzv. vremenski prozor od 5 godina, sa korakom translacije od 30 dana. Lako se može uočiti značajna promjena nivoa vrijednosti ovih parametara u periodima 1900-1975. godina, zatim 1976-1982. godina i najzad 1983-2004. godina. Sva tri perioda korespondiraju sa različitim stanjem seizmološke opreme na prostoru Crne Gore i regiona, kao i stepenom njene detektibilnosti zemljotresa. Naime, do kraja 1974. godine, Seizmološki zavod je raspolagao samo sa par mehaničkih seizmografa velike mase tipa "Mainka", koja su se karakterisala vrlo skromnom osjetljivošću. Tokom 1975. godine u Podgorici je instaliran sistem sa tri trokomponentna kratkoperiodična i dugoperiodična elektromagnetska seizmografa, čime je detektibilnost (tada još uvijek jedine seizmološke stanice u regionu) znatno uvećana. Najzad, krajem 1982. godine, kao što je već istaknuto, instaliranjem mreže sa 10 automatskih telemetrijskih seizmoloških stanica na prostoru cijele Crne Gore, postignuta je visoka rezolucija seizmoloških opservacija svih zemljotresa iznad nivoa magnitude 2.0 u regionalnim razmjerama.

Sadržaj slike 5 jasno ukazuje da su vrijednosti koeficijenta a i b Gutenberg-Rihterove relacije, tokom posljednjih 20 godina znatno ustaljene, kao i da je, sudeći po visokoj vrijednosti koeficijenta korelacije proračuna ovih koeficijenata (vrlo blizu 1.0), kvalitet podataka koji determiniše seizmičnost regiona južnih Dinarida, veoma visok i da predstavlja znatno poboljšanje u odnosu na prethodno stanje.

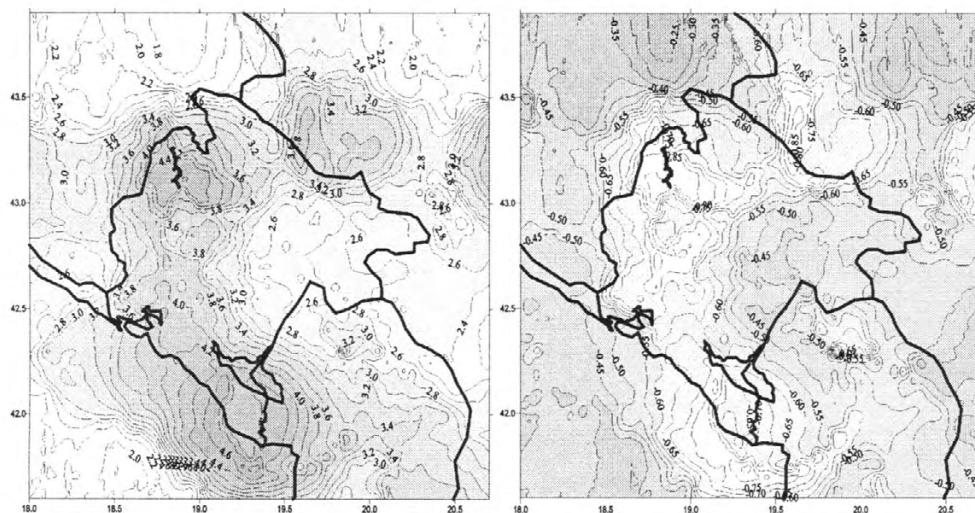


*Slika 5. Prividna promjena koeficijenata G-R relacije (a i b) tokom vremena (period od 1900. do 2004. godine) kao posljedica promjene stepena detektibilnosti seizmološke mreže stanica regiona: a) koeficijent *a* G-R relacije; b) koeficijent *b* (apsolutne vrijednosti), c) koeficijent korelacije numeričke aproksimacije*

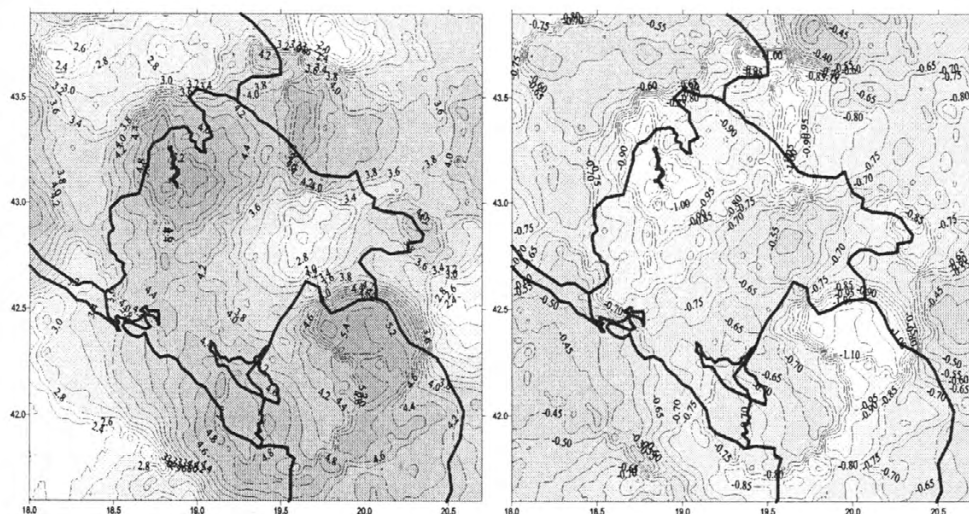
Radi analize prostorne distribucije koeficijenata G-R relacije, odnosno seizmogenih karakteristika regiona, na slici 6 i 7 su prikazani rezultati proračuna ovih koeficijenata za stanje baze seizmoloških podataka zaključno sa 1984. godinom (slika 6) i zaključno sa sredinom aprila 2004. godine (slika 7), respektivno na cijelom prostoru južnih Dinarida.

Visoke vrijednosti koeficijenta *b* (u apsolutnom iznosu) na slici 6 u zoni akumulacije Mratinje, ukazuju na značajno lokalno uvećanje seizmičnosti u tom dijelu (pretežno izražavajući efekat zemljotresa manje energije), nastalo kao posljedica induktivnih seizmogenih procesa koji su uslovljeni hidrodinamičkim i hidrostatičkim efektom dubokog vještačkog akumulacionog jezera, formiranog

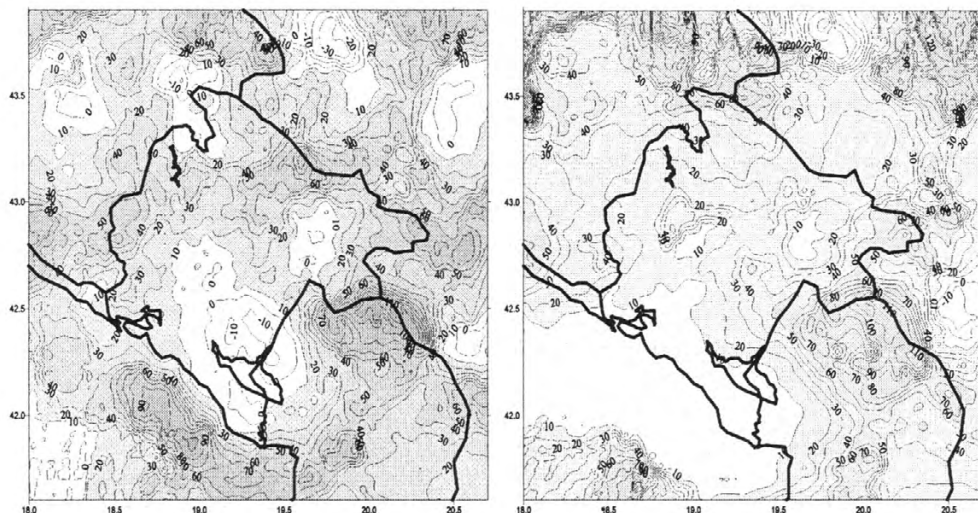
1978. godine. Ova manifestacija je indikativna i na slici 7 (za koeficijent b), na kojoj je lako uočljiv efekat vještačkog akumulacionog jezera Fierza, na krajnjem sjeveroistoku Albanije. Niske vrijednosti (u apsolutnom iznosu) oba koeficijenta G-R relacije u oba posmatrana vremenska presjeka (slike 6 i 7) u primorskom regionu – na potezu od Tivta do Dubrovnika ukazuju na relativno dugotrajno odsustvo značajne seizmičke aktivnosti u ovom regionu.



Slika 6. Koeficijent *a* (lijevo) i *b* (desno) Gutenberg-Rihterove relacije za period od 1900. do kraja 1984. godine



Slika 7. Koeficijent *a* (lijevo) i *b* (desno) Gutenberg-Rihterove relacije za period od 1900. do aprila 2004. godine

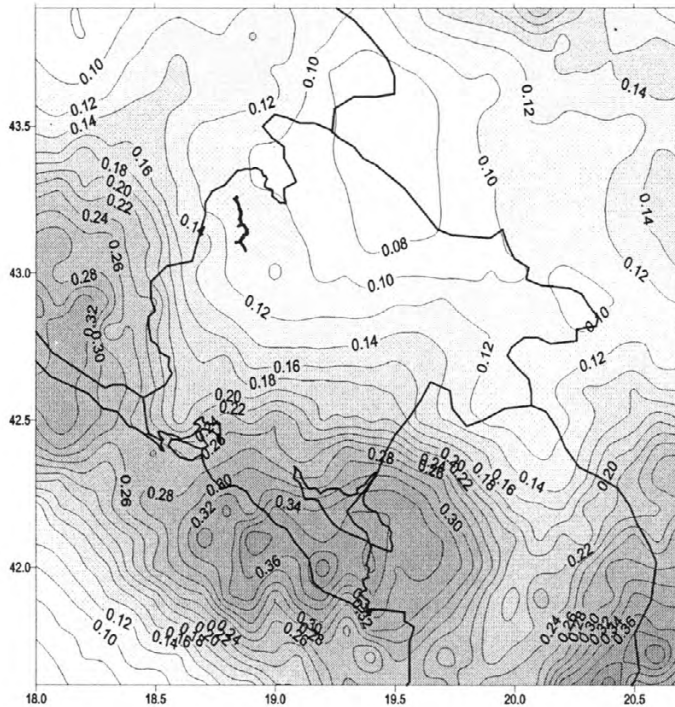


Slika 8. *Relativna razlika (u %) koeficijenta a (lijevo) Gutenberg-Rihterove relacije i koeficijenta b (desno) za period do aprila 2004. godine i do kraja 1984. godine (normiran sa stanjem do kraja 1984. godine). Zone u kojima su promjene koeficijenta za analizirana dva perioda bile manje od 10 %, označene su površima bez šrafure*

Radi indikovanja promjene u stanju koeficijenata G-R relacije na cijelom prostoru južnih Dinarida u uslovima različitih kapaciteta baza seizmoloških podataka - do zaključno 1984. godine (u vrijeme izrade serije prognoznih karata [14]) i do aprila 2004. godine, na slici 8 je grafički prikazana relativna razlika (u procentima) ovih koeficijenata. Pri tome je izostavljena šrafura u dijelovima u kojima se specificirani koeficijent u periodu između dva posmatrana vremenska presjeka promijenio za manje od 10 % (u apsolutnom iznosu). Dobijeni rezultat ukazuje da je na preko 80 % teritorije južnih Dinarida u periodu od 1985. do danas količina prikupljenih informacija o seizmičnosti znatno upotpunila sliku o seizmogenom potencijalu tog prostora, izraženu kroz sadržaj Gutenberg-Rihterove relacije, kao relevantne komponente seizmogenog modela regiona.

Imajući u vidu značaj kvaliteta i reprezentativnosti determinisanog seizmogenog modela na cjelokupan dalji tok procedure bilo koje metodologije proračuna elemenata seizmičkog hazarda, izraženog u bilo kojem obliku, opravdano je zaključiti da je na osnovu nove baze seizmoloških podataka regiona južnih Dinarida, neophodno izvršiti inoviranje svih grafičkih i numeričkih podloga u čiju izradu je ugrađen seizmogeni model kreiran na bazi seizmoloških opservacija tog regiona. Radi prezentovanja efekta primjene inoviranog seizmogenog modela regiona, na slici 9 je prikazan primjer karte seizmičkog hazarda za parametar očekivanog maksimalnog horizontalnog ubrzanja tla (u uslovima osnovne stijene) koja je sačinjena po jednoj od brojnih razrađenih metoda proračuna [6]. Očigledno je da sadržaj ove karte znatno detaljnije izražava aspekt očekivane seizmičnosti od

sadržaja karte na slici 1, te kao takav može da predstavlja pouzdaniju osnovu za projektovanje objekata II i III kategorije objekata deklariranih u Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima.



Slika 9. Karta seizmičkog hazarda Crne Gore i okoline (očekivano maksimalno horizontalno ubrzanje tla u dijelovima sile teže) u okviru povratnog perioda vremena od 475 godina (EUROCOD 8) sa vjerovatnoćom od 70 % ne-prevazilaženja događaja

ZAKLJUČAK

Izvedena je detaljna analiza efekta promjene kvantiteta seizmoloških informacija na stanje i reprezentativnost seizmogenog model regiona, u poređenju sa stanjem baze seizmoloških podataka u savremenim uslovima. Posebno je apostrofirani efekat povećanja količine informacija o seizmičnosti u regionu južnih Dinarida tokom posljednjih 20 godina - nakon instaliranja seizmološke telemetrijske mreže stanica u Crnoj Gori. Analiza je izvedena na elementima osnovnog sadržaja svakog seizmogenog modela – koeficijentima Gutenberg-Rihterove relacije, u vremenskom i prostornom domenu. Pouzdano je indicirano znatno poboljšanje kvaliteta,

sadržaja i reprezentativnosti modela seizmogeneze regiona -proporcionalno obimu i kvalitetu baze seizmoloških podataka.

Iz tih razloga, konstatovano je da je neophodno potrebno izvršiti inoviranje sadržaja svih seizmoloških podloga koje predstavljaju rezultat primjene numeričkog seizmogenog modela, kao što su sve karte seizmičkog hazarda, karte seizmičke rejonizacija teritorije Republike, ali i karte seizmičke mikrorejonizacije urbanih prostora svih opština Crne Gore. Kako se, saglasno odredbama Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, kao osnovna podloga za aseizmičko projektovanje šireg spektra objekata u Crnoj Gori koristi Seizmološka karta za povratni period od 500 godina, takođe je neophodno izvršiti i inoviranje njenog sadržaja saglasno novim seizmološkim podacima i novom sadržaju seizmogenog modela regiona južnih Dinarida.

LITERATURA

- [1] ANDERSON J.C. i TRIFUNAC M.D. 1980. *Application of Seismic Risk Procedures to Problems in Microzonation*. Publ. Civil Eng. USC, Los Angeles.
- [2] CORNELL A. C. 1968. *Engineering Seismic Risk Analysis*. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 58/5.
- [3] DESSOKEY M. 1984. *Statistical Models of the Seismic Hazard Analysis for Mining Tremors and Natural Earthquakes*. Publ. Inst. Geophys., Plysh Acad. Sc. A-15 (174).
- [4] GLAVATOVIĆ B. (1984) *Nova analogna telemetrijska seizmološka mreža Crne Gore*. Acta Seismologica Yugoslavica, Vol. 10.
- [5] GLAVATOVIĆ B. (1992) *Digital Seismic Data Acquisition and Processing Using Montenegro Seismic Telemetry Network*. Simpozijum "Local and National Seismic Networks: On Line Data Processing With Microcomputer Facilities", Luxembourg.
- [6] GLAVATOVIĆ B. 1998. *Model seizmogeneze i seizmički hazard južnih Dinarida*. Zbornik radova sa I Kongresa geofizičara Jugoslavije, Beograd, 19-20. novembar 1998.
- [7] HAND F. i HOSKINS J. 1981. *Seismic Risk Analysis of the Tva Service Region. Proceedings of Earthquakes and Earthquake Engineering: the eastern US Kuoxvele, Tennessee*.
- [8] KANAI K. 1983. *Engineering Seismology*. University of Tokio Press.
- [9] LAY T. i WALLACE T. 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press.
- [10] LEE W., KANAMORI H., JENNINGS P. i KISLINGER C. 2002. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A*. Academic Press.
- [11] LOMNITZ C. i ROSENBLUETH E. 1976. *Seismic Risk and Engineering Decisions*. Elsv. Sc. Publ. Comp., Amsterdam
- [12] STEIN S. i WYSESSION M. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- [13] UNESCO: *Survey of the Seismicity of the Balkan Region: 1975. Seismic Risk Evaluation of the Balkan Region*.
- [14] ZSSFRJ Zajednica za seizmologiju SFRJ, grupa autora, 1987. *Seizmološke karte SFRJ za povratne periode 50, 100, 200, 500, 1.000 i 10.000 godina*.