

Tumač dopunjenih karata seizmičkog hazarda

Dejan Dragojević
oktobar 2018.

Opšte

Prethodna verzija karata seizmičkog hazarda, izrađena je od strane Republičkog seizmološkog zavoda 2013. godine (Slavica Radovanović sa saradnicima). Karte su nastale kao rezultat BSHAP projekta i obuhvatale su zemljotrese sa prostora 18-24°E geografske dužine i 41-47°N geografske širine. Ovim kartama nije obuhvaćena zona Vranče sa srednje dubokim zemljotresima, obzirom da je ova seizmička zona bila van zadatog opsega projekta BSHAP. U inoviranim kartama, izvršena je dopuna proračuna uključivanjem seizmičke zone Vranča, zadržavajući rezultate proračuna plitkih zemljotresa (bazirane na vrednostima ubrzanja) iz prethodnih karata.

Kao i u prethodnoj verziji karata, seizmički hazard je na kartama predstavljen putem jednog parametra – ubrzanja (za karte maksimalnog horizontalnog ubrzanja na tlu tipa A u skladu sa EN 1998-1), odnosno stepenima makroseizmičkog intenziteta. Karte su izrađene za povratne periode od 95, 475 i 975 godina.

Karte prikazane na veb-sajtu Republičkog seizmološkog zavoda su informativnog karaktera. Za projektovanje i planiranje mogu se koristiti isključivo karte važećih propisa i standarda.

Karte maksimalnog horizontalnog ubrzanja na tlu tipa A

Inovirane karte seizmičkog hazarda izračunate za vrednosti maksimalnog horizontalnog ubrzanja predstavljaju dopunjenu verziju prethodnih karata uticajem seizmičke zone Vranča. Za metodologiju izrade prethodnih karata pogledati tumač: „Karte seizmičkog hazarda Srbije“ (S. Radovanović) [1].

U inoviranim kartama su zadržani rezultati prethodnog proračuna bazirani na vrednostima ubrzanja (izrađenim od strane Slavice Radovanović sa saradnicima), a koji su dopunjeni uticajem seizmičke zone Vranča (srednje dubokim zemljotresima). Seizmička zona Vranča je modelovana u svemu prema [2], pri čemu je proračunom obuhvaćena nesigurnost maksimalne magnitude i b faktora.

Karte maksimalnih vrednosti horizontalnog ubrzanja su izrađene u skladu sa zahtevima Evrokoda 8 (EN 1998-1) [3]. Pod terminom maksimalne vrednosti horizontalnog ubrzanja podrazumevaju se vršne vrednosti horizontalnog ubrzanja, odnosno najveće apsolutne vrednosti horizontalnog ubrzanja tla. U skladu sa zahtevima Evrokoda 8, teritorija Srbije je podeljena na zone u kojima je usvojeno da je seizmički hazard konstantan i prikazan je jednom (maksimalnom) vrednošću ubrzanja za celu zonu, odnosno jednom bojom na karti. Mesta koja se nalaze na samoj granici zona pripadaju zoni sa većom vrednosti ubrzanja.

Vrednosti ubrzanja prikazane na karti se odnose na površinu tla tipa A. Prema definiciji EN 1998-1, tlo tipa A je stena ili stenska geološka formacija, koja uključuje najviše 5 m slabijeg materijala na površini, pri čemu je zadovoljen uslov da je prosečna brzina smičućih talasa u prvih 30 m dubine veća od 800 m/s ($v_{s,30} > 800$ m/s).

Za tipove tla različitih od tipa tla A, za određivanje maksimalnog horizontalnog ubrzanja na površini lokalnog tla, u skladu sa EN 1998-1 potrebno je vrednosti sa karte pomnožiti odgovarajućim faktorom tla (za tipove tla B, C, D i, E), odnosno neophodno je studijom mikrorejonizacije odrediti faktor tla (za tipove tla S₁ i S₂). Svakako je moguće i za tipove tla B-E studijom mikrorejonizacije odrediti faktore tla, ukoliko se želi tačniji podatak od preporučenih vrednosti.

Predviđeno je da karta sa vrednostima ubrzanja za povratni period od 475 godina bude sastavni deo je Nacionalnog priloga za EN 1998-1. Ovaj povratni period odgovara verovatnoći prekoračenja vrednosti sa karte od 10% u periodu od 50 godina, odnosno odgovara verovatnoći od 90% da u istom periodu vrednosti neće biti prekoračene.

Karte makroseizmičkog intenziteta

Karte makroseizmičkog intenziteta su izrađene na osnovu izračunatih vrednosti ubrzanja za tlo tipa A koje su pomnožene faktorom tla za odgovarajuću proračunsku tačku kako bi se obuhvatilo dejstvo zemljotresa na lokalnom tlu. Za faktore tla su usvojene vrednosti koje propisuje Evrokod 8. Tipovi tla su kategorisani prema nagibu terena izračunatog na osnovu digitalnog elevacionog modela terena sa rezolucijom od 30 m. Za svaku proračunsku tačku usvojene su maksimalne vrednosti faktora tla u odgovarajućem proračunskom kvadrantu. Ovako dobijeni rezultati su korigovani (velike vodene površine, stenovite visoravni...), koristeći Inženjersko-geološku kartu SRJ [4] i Preliminarnu kartu seizmičke rejonizacije teritorije Srbije [5].

Vrednosti makroseizmičkog intenziteta su izračunate na osnovu veze ubrzanja i intenziteta Faenza – Micheline [6]. Relacija [6] se odnosi na MCS skalu, ali se sa dovoljnom tačnošću može smatrati da se isti intenziteti očekuju i prema EMS-98 skali [7].

Karte makroseizmičkog intenziteta su informativnog karaktera i ne predstavljaju zamenu za seizmološku kartu [8], koja kao deo Pravilnika o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima [9] ostaje na snazi do dana važenja Pravilnika.

Citirana literatura:

- [1] S. Radovanović, Karte seizmičkog hazarda Srbije – objavljeno na veb-sajtu RSZ.
- [2] F. PAVEL, R. VACAREANU, J. DOUGLAS, M. RADULIAN, C. CIOFLAN and A. BARBAT, An Updated Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania and Comparison with the Approach and Outcomes of the SHARE Project, *Pure and Applied Geophysics* (2016). 173, 1881-1905
- [3] SRPS EN 1998-1:2015 Evrokod 8 – Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija – Deo 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade
- [4] M. Lazić, B. Božović, Inženjersko-geološka karta SR Jugoslavije, Geozavod 1995.
- [5] Preliminarna karta seizmičke rejonizacije teritorije Srbije prema kriterijumima EC- 8, Geološki institut Srbije, 2010.
- [6] Licia Faenza, Alberto Michellini; Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its application in ShakeMap, *Geophysical Journal International*, Volume 180, Issue 3, 1 March 2010, Pages 1138–1152
- [7] Roger M. W. Musson, Gottfried Grunthal, Max Stucchi. The comparison of macroseismic intensity scales. *Journal of Seismology*, Springer Verlag, 2009, 14 (2), pp.413-428.
- [8] Seizmološka karta SFRJ sa tumačem, Zajednica za seizmologiju SFRJ, Beograd, 1987
- [9] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima, "Službeni list SFRJ" br. 31/81, 49.82, 29/83, 21/88 i 52/90

KARTE SEIZMIČKOG HAZARDA SRBIJE

Mr Slavica Radovanović
2013.godina

UVOD

Zemljotresi predstavljaju opasnost u mnogim delovima sveta a smanjenje rizika od zemljotresa podrazumeva korišćenje znanja, metoda, i podataka iz različitih oblasti, uključujući geonauku, inženjering, planiranje za vanredne situacije, odgovor na katastrofe, osiguranje i ekonomiju. Opasnost od zemljotresa je kvantifikacija različitih efekata terena, na određenom mestu izazvanih zemljotresom, i verovatnoća da će ovi efekti premašiti određeni nivo. Jednostavno rečeno, to je predstava o tome kako će se snažno zemlja tresti i koliko često je verovatno da to se to dogodi. Seizmička hazard je specifičan za lokaciju, to jest, on je različit na svakoj pojedinačnoj lokaciji, a u zavisnosti od lokacije terena i svojstava tla na samoj lokaciji. Karte seizmičkog hazarda su osnovna podloga za inženjere, urbaniste i druge stručnjake za aktivnosti smanjenja, odnosno upravljanje, seizmički rizikom.

Tokom poslednjih decenija ostvareno je mnogo novih saznanja o seizmogenim svojstvima teritorije Srbije što je delimično izmenilo sliku o potencijalnoj opasnosti od zemljotresa, takođe je registrovan veliki broj zemljotresa a neophodnost izrade nove karte seizmičkog hazarda potencirana je i procesom prilagođavanja evropskom standardu ES8.

ZAKONSKA REGULATIVA

Osnova za projektovanje po JUS standardu, važećoj zakonskoj regulativi u Srbiji, je seizmički intenzitet prikazan na Seizmološkoj karti za povratni period od 500 godina prema propisu: Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima (Sl.list SFRJ 31/81,49/82,29/83,21/88 i 52/90). Na kartama su prikazani očekivani makroseizmički intenziteti na površini terena za karakteristično tlo. Pojam karakterističnog tla nije detaljno definisan ali se na osnovu primenjene metodologije u izradi karte može zaključiti da su u okviru ovog pojma predstavljena sva tla, različitih geomehaničkih svojstava, koja u smislu amplifikacionog uticaja zemljotresa uzrokuju ekvivalentan efekat.

Po EN1998-1 ulazni parametri za seizmičku analizu izvedeni su iz uslova da se objekat, prosečnog veka eksploatacije od 50 godina, ne sruši, što odgovara seizmičkom dejstvu sa verovatnoćom prevazilaženja od 10% u periodu od 50 godina. Ovaj zemljotres ima povratni period dogañanja od $T_{NCR} = 475$ godina. Drugi uslov sadržan je u zahtevu da se ograničena oštećenja mogu javiti samo kao posledica dejstva zemljotresa za koji postoji verovatnoća da bude prevaziñen od 10% u periodu od 10 godina odnosno zemljotresom koji ima prosečan povratni period od 95 godina.

Proračun hazarda izvodi se metodama verovatnoće. Seizmički hazard se predstavlja preko maksimalnog horizontalnog ubrzanja -PGA a seizmičko dejstvo preko referentnog maksimalnog horizontalnog ubrzanje osnovnog tla a_{gR} koje ogovara povratnom periodu T_{NCR} seizmičkog dejstva od 475 godina. Seizmički hazard je prikazan na kartama zoniranja seizmičkog hazarda na osnovnom tlu. Osnovno tlo pri tome odgovara tlu tipa A po EN1998-1, pa je to tlo koje u poslednjih 30m do površine terena ima prosečnu brzinu prostiranja smičućih elastičnih talasa od $v_{s,30} = 800$ m/s.

IZRADA KARTE SEIZMIČKOG HAZARDA

Za potrebe proračuna seizmičkog hazarda i izrade mapa hazarda sastavljen je katalog glavnih potresa, nezavisnih događaja, za prostor ograničen koordinatama geografske dužine 18° - 24° i širine 41° - 47° ; Kompletan katalog je analizirana po parametrima unificirane magnitude zemljotresa i perioda događanja. Kompletan katalog je deklasterizovan a na osnovu njega definisani su parametri ponovljivosti zemljotresa. Izvršeno je prostorno i statističko definisanje seizmičke aktivnosti u seizmičkim zonama. Maksimalna horizontalna ubrzanja, na lokaciji, definisana su na osnovu odabranih predikcionih modela kretanja tla i sračunat je odgovarajući seizmički hazard.

Kompilacija kataloga

U uslovima visoke seizmičke aktivnosti koja se ispoljava u znatnom broju žarišnih zona, sa velikom gustom rasednih struktura, korelacija hipocentra sa postojećim aktivnim rasedima, izdvajanje seizmogenih blokova i tektonskih jedinica i detaljno istraživanje seizmičnosti regiona zahteva definisanje glavnih parametara zemljotresa visokom tačnošću.

Jedan od osnovnih činilaca tačnosti definisanja seizmičkog hazarda je kvalitet kataloga zemljotresa. Najčešći uzroci netačnosti kataloga su:

1. nekompletanost podataka na određenom magnitudnom nivou
2. nepouzdanost u određivanju magnitude odnosno intenziteta zemljotresa

Prvi katalog sastavljen za prostor Balkana pa i teritorije Srbije je Katalog zemljotresa načinjen u toku UNDP/UNESKO projekta 1970. godine. U katalogu je za zemljotrese pre 1940.godine magnituda zemljotresa računata iz procenjenog intenziteta a on je pak procenjivan na osnovu različitih makroseizmičkih skala. Pri proceni intenziteta je dolazilo do nedovoljno precizne primene skale pa su za neke zemljotrese intenziteti procenjeni.

Sveobuhvatna istrživanjima proteklih godina, na obimnoj bazi internih kataloga (kombinacija parametarskih i detaljno citiranih i izvornih podataka o zemljotresima i njihovim manifestacijama) i podataka o registraciji zemljotresa na seizmološkim stanicama regiona sprovedena su sa ciljem revizije kataloga zemljotresa .

Reinterpretacija zemljotresa

Na osnovu podataka o makroseizmičkim efektima za 235 zemljotresa sa teritorije Srbije za period 1740-1964 godina, primenom kriterijuma skale EMS-98 definisani su makroseizmički intenziteti, a preko empirijske relacije za vezu I-Mm sračunate su makroseizmičke magnitude i prikazane u katalogu. U procesu redefinisavanja intenziteta zemljotresa uz primenu savremenih kriterijuma seizmičkih skala, korišćeni su i svi raspoloživi pisani izveštaji, novinarski izveštaji, i fotografije o zemljotresima kao i pojave seizmodeformacija i likvefakcije. Za većinu registrovanih seizmodeformacija izvršen je obilazak lokaliteta u cilju definisanja lokalnih uslova tla koji su mogli doprineti njihovoj pojavi. Pri proceni intenziteta razmatrana je i osetljivost objekata (vulnerability) i specifičnost gradnje u pojedinim epohama. Kao rezultat preko 400 stotine zemljotresa sa intenzitetom $3 < I_{max} < 9$, sa teritorije Srbije i graničnih prostora je reinterpretirano primenom jedinstvenih kriterijuma i definisane su makroseizmičke Mm magnitude.

Instrumentalno registrovani zemljotresi za period 1970-2000. godina relocirani su seizmičkim modelima definisanim za prostor Srbije a njihova magnituda je redefinisana na osnovu svih raspoloživih podataka.

Unifikacija magnituda

Katalog je homogenizovan po parametru magnitude M_w . Magnituda je izvorno publikovana kao magnituda različitog tipa m_b , M_s , M_w , M_L i M_d za svaki od katalogiziranih seizmičkih događaja. Konverzija magnituda omogućila je sistematsko prevođenje publikovanih magnituda u homogenizovanu M_w magnitudu za svaki od zemljotresa a primenom sledećih relacija:

$$\begin{aligned} M_w &= 0.324 + 0.963 M_L && \text{(Kuka i Duni, 2010)} \\ M_s &= 0.63 \times M_w + 2.097 && \text{(Radovanović 2011)} \\ M_s &= 1.263 m_b - 1.505 && \text{(Radovanović, 2009)} \\ M_{SK} & \text{ u } M_w && \text{(Scordilis (2006):)} \end{aligned}$$

Kompletnost kataloga

Kompletnost kataloga M_c je čvrsto regulisana postojanjem podataka o zemljotresima, što je u tesnoj vezi sa geografskim regionom i posmatranim vremenski intervalom. Katalog treba da obuhvata skoro sve događene zemljotrese definisane najmanje magnitude kompletnosti M_c . Utvrđeno je primenom metode maksimalne zakrivljenosti da se minimalna magnituda kompletnosti kataloga ((Wiemer, S., and M. Wyss, 2000) za istraživani prostor menjala tokom vremena.

Deklasterizacija kataloga

Filtriranje zavisnih događaja iz analize seizmičkog hazarda, foršokova i afteršokova t.j. prethodnih i naknadnih potresa, izvršeno je u postupku deklasterizacije. Primenjena je modifikovana relacija Heraka (2009) kojom su svi zemljotresi događeni pre i posle zemljotresa sa magnitudom M_m (magnituda main – glavnog zemljotresa) u radijusu r i vremenu t izvojeni kao klasterizovani ili zavisni događaji:

$$\begin{aligned} r &= \exp(1.8677 + 0.376 M_m), \\ t_{win} &= \exp(0.452 + 0.922 M_m) \end{aligned}$$

Metod je zasnovan na fizičkoj suštini događanja zemljotresa, da svaki zemljotres generiše promenu u naponskom stanju u svojoj okolini koja može da pokrene dalje događanje zemljotresa. Prostor i vreme na koje se ovaj proces može proširiti naziva se zona interakcije a njene dimenzije su u realciji sa magnitudom glavnog zemljotresa.

Seizmotektonski model

Definisana geografska distribucija seizmičkih izvora i specifikacija svih izvornih karakteristika potrebnih za analizu seizmičkog hazarda se naziva seizmotektonski model. Seizmotektonski model pruža kompletan opis pojave zemljotresa u vremenu i prostoru i na udaljenoj lokaciji od inženjerskog interesa.

Seizmička zona je prostor koju karakterišu iste seizmotektonske, seizmološke i neotektonske karakteristike. To je prostor čija se ponovljivost zemljotresa može opisati jedinstvenom relacijom magnitude i frekvencije događanja zemljotresa.

Okonturivanje seizmičkih zona je ključni postupak u definisanju seizmičkog hazarda. Zajedničke karakteristike u seizmičkoj zoni čine podjednako verovatnim događanje zemljotresa bilo gde u zoni.

Na prostoru Srbije i susednih zemalja, na bazi seizmotektonskih karakteristika izdvojeno je 19 seizmičkih zona. Svaka od zona je opisana geografskim koordinatama prostora koji je okonturuje, maksimalnom magnitudom i parametrom ponovljivosti zemljotresa “b”, predominantnim tektonskim režimom (s- horizontalno rasedanje, t- reversno rasedanje i n- gravitaciono rasedanje) orijentacijom-pružanjem rasedne ravni kao i težinom koja je proporcionalna zastupljenosti konkretnog načina rasedanja.

Za statističko definisanje parametara ponovljivosti primenjen je modifikovani GR (Gutenberg-Rihter) model dvostruko ograničene eksponencijalne funkcije ponovljivosti zemljotresa, kojim se bolje odlikava fizička suština ograničenosti kapaciteta prostora da generiše zemljotrese sa velikim povratnim periodima. Maksimalna magnituda M_{max} kao i a , b λ su sračunati globalno, za ceo istraživani prostor, i za svaku zonu pojedinačno

Predikcioni model kretanja tla-Predictive Ground Motion Models PGM, tla je empirijski numerički ekvivalent kojim se opisuju parametri kretanja tla (ubrzanje, brzina i pomeranje) na lokaciji koja su generisana događanjem zemljotresa magnitude M_w na hipocentralnom rastojanju D , pri čemu su uslovi lokalnog tla na lokaciji opisani sa brzinom V_{s30} za zadati vremenski period. Pri modelovanju parametara seizmičkog hazarda, analizirane su publikovane empirijske relacije atenuacije maksimalnog horizontalnog ubrzanja a odabrani su modeli Berge-Thierry *et al.* (2003), Bindi *et al.* (2009), Akkar & Bommer, 2010, Boore & Atkinson 2008 (NGA, EERI 2008).

PRORAČUN NUMERIČKIH VREDNOSTI HAZARDA

Metodologija za procenu verovatnoće seizmičkog hazarda izrasla je iz inženjerske potrebe za boljim dizajnom u kontekstu pouzdanosti struktura a u konačnom bezbednosti ljudi, jer se takve procene najčešće i vrše u cilju smanjenja seizmičkog rizika. Puasonov model se tradicionalno koristi u procenu proračuna seizmičkog hazarda. (Cornell,1968).Ovaj model verovatnoće događanja služi kao razumna pretpostavka u većini inženjerskih aplikacija, osim u retkom slučajevima kada jedan seizmički izvor može da dominantno utiče na seizmičku opasnost na lokaciji a način događanja zemljotresa u njemu nije stacionaran proces.

Metoda prostorno osrednjenog hazarda (Frankel, 1995) je metoda za proračun seizmičkog hazarda “bez zona ‘zoneless. methodology ” Osnovu za proračun hazarda po ovoj metodi čini katalog zemljotresa. Unapređenje su razvili slovenački seizmolozi (Lapajne i dr. 2003) uvođenjem osrednjavanja po eliptičnom prostoru orijentisanom u pravcu pružanja seizmogenih raseda u različitim tektonskim režimima. Očekivani broj zemljotresa ($M_0=4.5$) definiše se preko modifikovanog oblika Gutenberg-Rihtera relacije – dvostruko ograničene raspodele. Uprosečavanje broja zemljotresa na jediničnoj ćeliji vrši se Gausovom cirkularnom 2D funkcijom sa radijusom od $3 \times 5 \text{ km} = 15 \text{ km}$. Greška definisanja položaja epicentra je usvojena sa vrednošću 7km u čitavom domenu kataloga zemljotresa.

Numeričke vrednosti seizmičkih hazarda sračunate su po mreži tačaka ($7 \text{ km} \times 6 \text{ km}$). Granice integracije hazarda su za opseg magnituda $M_w = 4.3 - M_{max}$. Izolinije seizmičkog hazarda po parametru maksimalnog horizontalnog ubrzanja-PGA, konstruisane su Kriging metodom i prikazane na kartama za povratne periode od 95, 475 i 975 godina.