

Тумач допуњених карата сеизмичког хазарда

Дејан Драгојевић
октобар 2018.

Опште

Претходна верзија карата сеизмичког хазарда, израђена је од стране Републичког сеизмолошког завода 2013. године (Славица Радовановић са сарадницима). Карте су настале као резултат BSHAP пројекта и обухватале су земљотресе са простора 18-24°Е географске дужине и 41-47°N географске ширине. Овим картама није обухваћена зона Вранче са средње дубоким земљотресима, обзиром да је ова сеизмичка зона била ван задатог опсега пројекта BSHAP. У иновираним картама, извршена је допуна прорачуна укључивањем сеизмичке зоне Вранча, задржавајући резултате прорачуна плитких земљотреса (базиране на вредностима убрзања) из претходних карата.

Као и у претходној верзији карата, сеизмички хазард је на картама представљен путем једног параметра – убрзања (за карте максималног хоризонталног убрзања на тлу типа А у складу са EN 1998-1), односно степенима макросеизмичког интензитета. Карте су израђене за повратне периоде од 95, 475 и 975 година.

Карте приказане на веб-сајту Републичког сеизмолошког завода су информативног карактера. За пројектовање и планирање могу се користити искључиво карте важећих прописа и стандарда.

Карте максималног хоризонталног убрзања на тлу типа А

Иновирани карте сеизмичког хазарда израчунате за вредности максималног хоризонталног убрзања представљају допуњену верзију претходних карата утицајем сеизмичке зоне Вранча. За методологију израде претходних карата погледати тумач: „Карте сеизмичког хазарда Србије“ (С. Радовановић) [1].

У иновираним картама су задржани резултати претходног прорачуна базирани на вредностима убрзања (израђеним од стране Славице Радовановић са сарадницима), а који су допуњени утицајем сеизмичке зоне Вранча (средње дубоким земљотресима). Сеизмичка зона Вранча је моделована у свему према [2], при чему је прорачуном обухваћена несигурност максималне магнитуде и b фактора.

Карте максималних вредности хоризонталног убрзања су израђене у складу са захтевима Еврокода 8 (EN 1998-1) [3]. Под термином максималне вредности хоризонталног убрзања подразумевају се вршне вредности хоризонталног убрзања, односно највеће апсолутне вредности хоризонталног убрзања тла. У складу са захтевима Еврокода 8, територија Србије је подељена на зоне у којима је усвојено да је сеизмички хазард константан и приказан је једном (максималном) вредношћу убрзања за целу зону, односно једном бојом на карти. Места која се налазе на самој граници зона припадају зони са већом вредности убрзања.

Вредности убрзања приказане на карти се односе на површину тла типа А. Према дефиницији EN 1998-1, тло типа А је стена или стенска геолошка формација, која укључује највише 5 m слабијег материјала на површини, при чему је задовољен услов да је просечна брзина смичућих таласа у првих 30 m дубине већа од 800 m/s ($v_{s,30} > 800$ m/s).

За типове тла различитих од типа тла А, за одређивање максималног хоризонталног убрзања на површини локалног тла, у складу са EN 1998-1 потребно је вредности са карте помножити одговарајућим фактором тла (за типове тла В, С, D и, Е), односно неопходно је студијом микрорејонизације одредити фактор тла (за типове тла S₁ и S₂). Свакако је могуће и за типове тла В-Е студијом микрорејонизације одредити факторе тла, уколико се жели тачнији податак од препоручених вредности.

Предвиђено је да карта са вредностима убрзања за повратни период од 475 година буде саставни део је Националног прилога за EN 1998-1. Овај повратни период одговара вероватноћи прекорачења вредности са карте од 10% у периоду од 50 година, односно одговара вероватноћи од 90% да у истом периоду вредности неће бити прекорачене.

Карте макросеизмичког интензитета

Карте макросеизмичког интензитета су израђене на основу израчунатих вредности убрзања за тло типа А које су помножене фактором тла за одговарајућу прорачунску тачку како би се обухватило дејство земљотреса на локалном тлу. За факторе тла су усвојене вредности које прописује Еврокод 8. Типови тла су категорисани према нагибу терена израчунатог на основу дигиталног елевационог модела терена са резолуцијом од 30 m. За сваку прорачунску тачку усвојене су максималне вредности фактора тла у одговарајућем прорачунском квадранту. Овако добијени резултати су кориговани (велике водене површине, стеновите висоравни...), користећи Инжењерско-геолошку карту СРЈ [4] и Прелиминарну карту сеизмичке рејонизације територије Србије [5].

Вредности макросеизмичког интензитета су израчунате на основу везе убрзања и интензитета Faenza – Michèlini [6]. Релација [6] се односи на MCS скалу, али се са довољном тачношћу може сматрати да се исти интензитети очекују и према EMC-98 скали [7].

Карте макросеизмичког интензитета су информативног карактера и не представљају замену за сеизмолошку карту [8], која као део Правилника о техничким нормативима за изградњу објеката високоградње у сеизмичким подручјима [9] остаје на снази до дана важења Правилника.

Цитирана литература:

- [1] С. Радовановић, Карте сеизмичког хазарда Србије – објављено на веб-сајту РСЗ.
- [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 Еврокод 8 – Пројектовање сеизмички отпорних конструкција – Део 1: Општа правила, сеизмичка дејства и правила за зграде
- [4] М. Лазић, Б. Божовић, Инжењерско-геолошка карта СР Југославије, Геозавод 1995.
- [5] Прелиминарна карта сеизмичке рејонизације територије Србије према критеријумима ЕС-8, Геолошки институт Србије, 2010.
- [6] Licia Faenza, Alberto Michelini; 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] Сеизмолошка карта СФРЈ са тумачем, Заједница за сеизмологију СФРЈ, Београд, 1987
- [9] Правилник о техничким нормативима за изградњу објеката високоградње у сеизмичким подручјима, “Службени лист СФРЈ” бр. 31/81, 49.82, 29/83, 21/88 и 52/90

КАРТЕ СЕИЗМИЧКОГ ХАЗАРДА СРБИЈЕ

Мр Славица Радовановић
2013. година

УВОД

Земљотреси представљају опасност у многим деловима света а смањење ризика од земљотреса подразумева коришћење знања, метода, и података из различитих области, укључујући геонауку, инжењеринг, планирање за ванредне ситуације, одговор на катастрофе, осигурање и економију. Опасност од земљотреса је квантификација различитих ефеката терена, на одређеном месту изазваних земљотресом, и вероватноћа да ће ови ефекти премашити одређени ниво. Једноставно речено, то је представа о томе како ће се снажно земља трести и колико често је вероватно да то се то догоди. Сеизмичка hazard је специфичан за локацију, то јест, он је различит на свакој појединачној локацији, а у зависности од локације терена и својстава тла на самој локацији. Карте сеизмичког hazard су основна подлога за инжењере, урбанисте и друге стручњаке за активности смањења, односно управљање, сеизмички ризиком.

Током последњих деценија остварено је много нових сазнања о сеизмогеним својствима територије Србије што је делимично изменило слику о потенцијалној опасности од земљотреса, такође је регистрован велики број земљотреса а неопходност израде нове карте сеизмичког hazard потенцирана је и процесом прилагођавања европском стандарду ЕС8.

ЗАКОНСКА РЕГУЛАТИВА

Основа за пројектовање по ЈУС стандарду, важећој законској регулативи у Србији, је сеизмички интензитет приказан на Сеизмолошкој карти за повратни период од 500 година према пропису: Правилник о техничким нормативима за изградњу објеката високоградње у сеизмичким подручјима (Сл.лист СФРЈ 31/81,49/82,29/83,21/88 и 52/90). На картама су приказани очекивани макросеизмички интензитети на површини терена за карактеристично тло. Појам карактеристичног тла није детаљно дефинисан али се на основу примењене методологије у изради карте може закључити да су у оквиру овог појма представљена сва тла, различитих геомеханичких својстава, која у смислу амплификационог утицаја земљотреса узрокују еквивалентан ефекат.

По EN1998-1 улазни параметри за сеизмичку анализу изведени су из услова да се објекат, просечног века експлоатације од 50 година, не сруши, што одговара сеизмичком дејству са вероватноћом превазилажења од 10% у периоду од 50 година. Овај земљотрес има повратни период догађања од $T_{NCR} = 475$ година. Други услов садржан је у захтеву да се ограничена оштећења могу јавити само као последица дејства земљотреса за који постоји вероватноћа да буде превазиђен од 10% у периоду од 10 година односно земљотресом који има просечан повратни период од 95 година.

Прорачун hazard изводи се методама вероватноће. Сеизмички hazard се представља преко максималног хоризонталног убрзања $-PGA$ а сеизмичко дејство преко референтног максималног хоризонталног убрзање основног тла a_{gR} које оговара повратном периоду T_{NCR} сеизмичког дејства од 475 година. Сеизмички hazard је приказан на картама зонирања сеизмичког hazard на основном тлу. Основно тло при томе одговара тлу типа А по EN1998-1, па је то тло које у последњих 30m до површине терена има просечну брзину простирања смичућих еластичних таласа од $v_{s30} = 800$ m/s.

ИЗРАДА КАРТЕ СЕИЗМИЧКОГ ХАЗАРДА

За потребе прорачуна сеизмичког хазарда и израде мапа хазарда састављен је каталог главних потреса, независних догађаја, за простор ограничен координатама географске дужине 18° - 24° и ширине 41° - 47° ; Комплетност каталога је анализирана по параметрима унифициране магнитуде земљотреса и периода догађања. Комплетан каталог је декластеризован а на основу њега дефинисани су параметри поновљивости земљотреса. Извршено је просторно и статистичко дефинисање сеизмичке активности у сеизмичким зонама. Максимална хоризонтална убрзања, на локацији, дефинисана су на основу одабраних предикционих модела кретања тла и срачунат је одговарајући сеизмички хазард.

Компилација каталога

У условима високе сеизмичке активности која се испољава у знатном броју жаришних зона, са великом густином раседних структура, корелација хипоцентра са постојећим активним раседима, издвајање сеизмогених блокова и тектонских јединица и детаљно истраживање сеизмичности региона захтева дефинисање главних параметара земљотреса високом тачношћу.

Један од основних чинилаца тачности дефинисања сеизмичког хазарда је квалитет каталога земљотреса. Најчешћи узроци нетачности каталога су:

1. некомплетаност података на одређеном магнитудном нивоу
2. непоузданост у одређивању магнитуде односно интензитета земљотреса

Први каталог састављен за простор Балкана па и територије Србије је Каталог земљотреса начињен у току УНДП/УНЕСКО пројекта 1970. године. У каталогу је за земљотресе пре 1940.године магнитуда земљотреса рачуната из процењеног интензитета а он је пак процењиван на основу различитих макросеизмичких скала. При процени интензитета је долазило до недовољно прецизне примене скале па су за неке земљотресе интензитети прецењени.

Свеобухватна истраживањима протеклих година, на обимној бази интерних каталога (комбинација параметарских и детаљно цитираних и изворних података о земљотресима и њиховим манифестацијама) и података о регистрацији земљотреса на сеизмолошким станицама региона спроведена су са циљем ревизије каталога земљотреса .

Реинтерпретација земљотреса

На основу података о макросеизмичким ефектима за 235 земљотреса са територије Србије за период 1740-1964 година, применом критеријума скале ЕМС-98 дефинисани су макросеизмички интензитети, а преко емпиријске релације за везу $I \sim M_m$ срачунате су макросеизмичке магнитуде и приказане у каталогу. У процесу редефинисања интензитета земљотреса уз примену савремених критеријума сеизмичких скала, коришћени су и сви расположиви писани извештаји, новинарски извештаји, и фотографије о земљотресима као и појаве сеизмодеформација и ликвефакције. За већину регистрованих сеизмодеформација извршен је обилазак локалитета у циљу дефинисања локалних услова тла који су могли допринети њиховој појави. При процени интензитета разматрана је и осетљивост објеката (*vulnerability*) и специфичност градње у појединим епохама. Као резултат преко 400 стотине земљотреса са интензитетом $3 < I_{max} < 9$, са територије Србије и граничних простора је реинтерпретирано применом јединствених критеријума и дефинисане су макросеизмичке M_m магнитуде.

Инструментално регистровани земљотреси за период 1970-2000. година релоцирани су сеизмичким моделима дефинисаним за простор Србије а њихова магнитуда је редефинисана на основу свих расположивих података.

Унификација магнитуда

Каталог је хомогенизован по параметру магнитуде M_w . Магнитуда је изворно публикована као магнитуда различитог типа m_b , M_s , M_w , M_L и M_d за сваки од каталогизираних сеизмичких догађаја. Конверзија магнитуда омогућила је систематско превођење публикованих магнитуда у хомогенизовану M_w магнитуду за сваки од земљотреса а применом следећих релација:

$$\begin{aligned}M_w &= 0.324 + 0.963 M_L && (\text{Kuka i Duni, 2010}) \\M_s &= 0.63 \times M_w + 2.097 && (\text{Radovanović 2011}) \\M_s &= 1.263 + 0.054 m_b - 1.505 && (\text{Radovanović, 2009}) \\M_{sk} & \text{ у } M_w && (\text{Scordilis (2006):})\end{aligned}$$

Комплетност каталога

Комплетност каталога M_c је чврсто регулисана постојањем података о земљотресима, што је у тесној вези са географским регионом и посматраним временски интервалом. Каталог треба да обухвата скоро све догођене земљотресе дефинисане најмање магнитуде комплетности M_c . Утврђено је применом методе максималне закривљености да се минимална магнитуда комплетности каталога ((Wiemer, S., and M. Wyss, 2000) за истраживани простор мењала током времена.

Декластеризација каталога

Филтрирање зависних догађаја из анализе сеизмичког хазарда, форшокова и афтершокова т.ј. претходних и накнадних потреса, извршено је у поступку декластеризације. Примењена је модификована релација Херака (2009) којом су сви земљотреси догођени пре и после земљотреса са магнитудом M_m (magnituda main – главног земљотреса) у радијусу r и времену t извојени као кластеризовани или зависни догађаји:

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

Метод је заснован на физичкој суштини догађања земљотреса, да сваки земљотрес генерише промену у напонском стању у својој околини која може да покрене даље догађање земљотреса. Простор и време на које се овај процес може проширити назива се зона интеракције а њене димензије су у реалцији са магнитудом главног земљотреса.

Сеизмотектонски модел

Дефинисана географска дистрибуција сеизмичких извора и спецификација свих изворних карактеристика потребних за анализу сеизмичког хазарда се назива сеизмотектонски модел. Сеизмотектонски модел пружа комплетан опис појаве земљотреса у времену и простору и на удаљеној локацији од инжењерског интереса.

Сеизмичка зона је простор коју карактеришу исте сеизмотектонске, сеизмолошке и неотектонске карактеристике. То је простор чија се поновљивост земљотреса може описати јединственом релацијом магнитуде и фреквенције догађања земљотреса.

Оконтуривање сеизмичких зона је кључни поступак у дефинисању сеизмичког хазарда. Заједничке карактеристике у сеизмичкој зони чине подједнако вероватним догађање земљотреса било где у зони.

На простору Србије и суседних земаља, на бази сеизмотектонских карактеристика издвојено је 19 сеизмичких зона. Свака од зона је описана географским координатама простора који је оконтурјује, максималном магнитудом и параметром поновљивости земљотреса “b”, преобладајућим тектонским режимом (s- хоризонтално раседање, t- реверсно раседање и n- гравитационо раседање) оријентацијом-пружањем раседне равни као и тежином која је пропорционална заступљености конкретног начина раседања.

За статистичко дефинисање параметара поновљивости примењен је модификовани GR (Гутемберг-Рихтер) модел двоструко ограничене експоненцијалне функције поновљивости земљотреса, којим се боље одсликава физичка суштина ограничености капацитета простора да генерише земљотресе са великим повратним периодима. Максимална магнитуда M_{max} као и a , b и λ су срачунати глобално, за цео истраживани простор, и за сваку зону појединачно

Предикциони модел кретања тла-Predictive Ground Motion Models PGM, тла је емпиријски нумерички еквивалент којим се описују параметри кретања тла (убрзање, брзина и померање) на локацији која су генерисана догађањем земљотреса магнитуде M_w на хипоцентралном растојању D , при чему су услови локалног тла на локацији описани са брзином V_{s30} за задати временски период. При моделовању параметара сеизмичког хазарда, анализирани су публиковане емпиријске релације атенуације максималног хоризонталног убрзања а одабрани су модели Berge-Thierry *et al.* (2003), Bindi *et al.* (2009), Akkar & Bommer, 2010, Boore & Atkinson 2008 (NGA, EERI 2008).

ПРОРАЧУН НУМЕРИЧКИХ ВРЕДНОСТИ ХАЗАРДА

Методологија за процену вероватноће сеизмичког хазарда израсла је из инжењерске потребе за бољим дизајном у контексту поузданости структура а у коначном безбедности људи, јер се такве процене најчешће и врше у циљу смањења сеизмичког ризика. Пуасонов модел се традиционално користи у процену прорачуна сеизмичког хазарда. (Cornell,1968). Овај модел вероватноће догађања служи као разумна претпоставка у већини инжењерских апликација, осим у ретком случајевима када један сеизмички извор може да доминантно утиче на сеизмичку опасност на локацији а начин догађања земљотреса у њему није стационаран процес.

Метода просторно осредњеног хазарда (Frankel, 1995) је метода за прорачун сеизмичког хазарда “без зона” *zoneless. methodology* ” Основу за прорачун хазарда по овој методи чини каталог земљотреса. Унапређење су развили словеначки сеизмолози (Лапајне и др. 2003) увођењем осредњавања по елиптичном простору оријентисаном у правцу пружања сеизмогених раседа у различитим тектонским режимима. Очекивани број земљотреса ($M_0=4.5$) дефинише се преко модификованог облика Гутемберг-Рихтера релације – двоструко ограничене расподеле. Упросечавање броја земљотреса на јединичној ћелији врши се Гаусовом циркуларном 2Д функцијом са радијусом од $3 \times 5 \text{ km} = 15 \text{ km}$. Грешка дефинисања положаја епицентра је усвојена са вредношћу 7км у читавом домену каталога земљотреса.

Нумеричке вредности сеизмичког хазарда срачунате су по мрежи тачака (7kmx6km). Границе интеграције хазарда су за опсег магнитуда $M_w = 4.3 - M_{max}$. Изолиније сеизмичког хазарда по параметру максималног хоризонталног убрзања-PGA, конструисане су Кригинг методом и приказане на картама за повратне периоде од 95, 475 и 975 година.