

КАРТЕ СЕИЗМИЧКОГ ХАЗАРДА СРБИЈЕ

Мр Славица Радовановић

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 EC8.

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 елестичних таласа од $v_{s,30} = 800$ 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 сеизмогенних 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-Mm 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 Mm 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:

$$\begin{aligned}M_w &= 0.324 + 0.963 M_L && (\text{Kuka i Duni, 2010}) \\M_s: M_w &= 0.63 \times M_s (+/-0.04) + 2.097 (+/-0.189) && (\text{Radovanović 2011}) \\M_s &= 1.263 (+/-0.054) m_b - 1.505 (+/-0.244) && (\text{Radovanović, 2009}) \\M_{SK} & \text{ у } M_w && (\text{Scordilis (2006):})\end{aligned}$$

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 оконтуре, максималном магнитудом и параметром поновљивости земљотреса “b”, преобладајућим тектонским режимом (s- хоризонтално раседање, t- реверсно раседање и п- 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, анализиране 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.