

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ – ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ
– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

LECTURE SERIES

Book 5

GEOHAZARD IN SERBIA
IN THE 21st CENTURY

– KNOWLEDGE IS THE BEST BASTION
AGAINST THE NATURAL DISASTERS

Accepted at the 4th meeting of the Department of Mathematics,
Physics and Geosciences on 24 May 2019

Editor
VLADICA CVETKOVIĆ
Corresponding Member of SASA

BELGRADE 2019

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЦИКЛУС ПРЕДАВАЊА

Књига 5

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ
У 21. ВЕКУ

– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ
ПРОТИВ СТИХИЈЕ

Примљено на IV скупу Одељења за математику, физику и гео-науке
од 24. маја 2019. године

Уредник
ВЛАДИЦА ЦВЕТКОВИЋ
дописни члан САНУ

БЕОГРАД 2019

Издаје
Српска академија наука и уметности
Београд, Кнеза Михаила 35

Лектура и коректура
Невена Ђурђевић
Снежана Крсчић-Букарица

Превод резимеа
Аутори

Технички уредник
Никола Стевановић

Тираж 350 примерака

Штампа
ЈП *Службени гласник*

ISBN 978-86-7025-844-0

© Српска академија наука и уметности 2019

САДРЖАЈ

Владица Цветковић, <i>Уводна реч</i>	7
Ана Младеновић, Славица Радовановић, <i>Сеизмички hazard у Србији</i>	11
Ana Mladenović, Slavica Radovanović, <i>Seismic hazard in Serbia</i>	22
Зоран Стевановић, <i>Процена ризика од несигурности воде за пиће у Србији</i>	25
Zoran Stevanović, <i>Risk assessment of drinking water shortage in Serbia</i>	44
Славиша Трајковић, <i>Просторно-временске карактеристике суша у Србији</i>	45
Slaviša Trajković, <i>Spatiotemporal characteristics of droughts in Serbia</i>	64
Биљана Аболмасов, <i>Hazard од клизашница у Србији у 21. веку</i>	65
Biljana Abolmasov, <i>Landslide hazard in Serbia in the 21st century</i>	87
Видојко Јовић, <i>Загађење земљишта – узроци и последице</i>	89
Vidojko Jović, <i>Soil pollution – causes and consequences</i>	97

Дејан Прелевић, <i>Да ли је вулкански хазард ђрејња за ђодручје Балканској ђолуосјрва?</i>	99
Dejan Prelević, <i>Is volcanic hazard a threat for the area of Balkan Peninsula?</i>	119
Слободан Марковић, <i>Климајске ђромене – ђеојерсјекјива</i>	121
Slobodan Marković, <i>Climate changes – geoperspective</i>	129

УВОДНА РЕЧ

Зборник радова под насловом: „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ представља резултат истоименог циклуса предавања, који је у периоду од априла до јуна 2018. године одржан у Српској академији наука и уметности. Посебним циклусима предавања САНУ показује жељу да појача своју друштвену улогу тиме што би, поред великог броја активности у којима се промовишу искључиво врхунски научни резултати, организовала скупове посвећене неким од најважнијих проблема савременог српског друштва. Садржај предавања ових посебних циклуса подједнако је усмерен како експертима тако и широком аудиторијуму, другим речима, најсавременија научна знања пласирају се на начин да њихов значај за заједницу буде највидљивији.

У оквиру циклуса „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ одржано је укупно седам предавања. Њима су тематски обухваћени ако не сви, онда сигурно најважнији геолошки хазарди с којима се наш простор може суочити у овом веку. Неки од ових геохазарда су нам нажалост и „блиски“ и познати, попут земљотреса и клизишта, неки нам тек „куцају на врата“, као што су проблеми недостатка квалитетне воде или озбиљног загађења земљишта, док неке од приказаних гео-опасности доживљавамо мање узнемирујућима зато што су (само привидно) далеко од нас, било у простору, на пример вулкани, или у времену, као што су глобалне промене климе.

У првом раду Зборника, А. Младеновић и С. Радовановић приказују најважније аспекте сеизмичког хазарда у Србији. На разумљив, али научно савремен начин, у раду се објашњава зашто се код нас догађају релативно јаки земљотреси, премда подручје Србије није близу места генерисања највеће количине тектонске енергије у региону. Посебна пажња поклања се чињеници да је штета коју ови земљотреси праве несразмерно велика. Рад пружа и осврт на проблеме у дефинисању сеизмичког хазарда на територији наше земље, наглашавајући притом који се стандарди морају поштовати при прикупљању података и примењивању методологије за ваљану процену хазарда.

У раду „Процена ризика од несташице воде за пиће у Србији“ аутор З. Стевановић описује тренутно стање водних ресурса у Србији, при чему многе податке приказује и у историјском контексту. На тај начин из рада је могуће сазнати не само какав је *status preasens* већ и о каквим трендовима је реч, као што је, на пример, дуготрајно повећање капацитета централизованог водоснабдевања у последњих шездесет година или осетно смањење учешћа подземних вода у снабдевању водом у Србији. Аутор закључује да Србија „припада групи земаља Европе са довољним ресурсима подземних и површинских вода за дугорочно задовољавање потреба становништва у пијаћој води, као и потреба у области индустрије, енергетике, наводњавања пољопривредних површина.“

Вода је и у фокусу трећег прилога у овом Зборнику. У оригиналном раду „Просторно-временске карактеристике суша у Србији“ аутор С. Трајковић истиче да су штете од суше по правилу веће од оних које настају другим природним хазардима у Србији. На пример, штета од суше из 2012. године процењена је на милијарду и осамсто милиона евра, што за сто милиона евра надмашује ону изазвану колосалним поплавама из 2014. године. Аутор приказује резултате вишегодишњих истраживања на развоју хидроинформационог система за праћење и правовремену најаву суше. На основу приказаних података, у Србији су издвојена три региона: северни, западни и јужни, који се међусобно разликују према угрожености од суше, као и по мерама за ублажавање последица суше.

Четврти прилог се бави клизиштима. У свом прегледном раду под насловом „Хазард од клизишта у Србији у XXI веку“ ауторка Б. Аболмасов даје процену „да је 16–20% територије Србије под активним или умиреним процесом клижења“, при чему детаљно образлаже најважније узроке ових природних појава. У раду се даје критички осврт на тренутну праксу која се тиче уношења података у национални катастар клизишта, и изводи закључак да због незадовољавајућег стања у вези с катастром, тренутно није ни могуће дати најтачнију процену хазарда од клизишта у Србији.

Рад „Загађење земљишта – узроци и последице“ академика Видојка Јовића тиче се све присутнијег проблема загађења земљишта у нашем подручју. У раду су приказане информације о основним узроцима и типовима загађења (рударство, индустрија и друго) и дати примери угроженог земљишта у различитим подручјима Србије.

У прилогу под насловом „Да ли је вулкански хазард претња за подручје Балканског полуострва?“ Д. Прелевић најпре пружа основне информације о унутрашњој динамици наше планете, а затим, без непотребних детаља, али уз излагање најважнијих научних чињеница, објашњава како вулкани настају и зашто се појављују само у (геолошки) одређено време и на одређеном месту. Из ових информација следи приказ тренутне ситуације хазарда од вулканских ерупција за подручје Србије, да би у закључном делу била описана три могућа сценарија по којима би подручје Балканског полуострва могло да буде угрожено вулканским ерупцијама.

Последњи рад у Зборнику носи наслов: „Климатске промене – геоперспектива“, а његов аутор је С. Б. Марковић, дописни члан САНУ. У свом прегледном раду аутор анализира климатске варијабилности на нашој планети у односу на концентрацију гасова који изазивају такозвани ефекат стаклене баште, и то за читав период кенозоика (последњих 65,5 милиона година). Аутор закључује да се „тренутно налазимо у последњој топлој фази (интергласијалу) квартарног леденог доба, која је још увек далеко хладнија од палеоценско-еоценског климатског максимума“. У својим закључним поглављима аутор даје и низ личних осврта на тренутне проблеме у сагледавању будућих климатских промена.

Према свему што је садржано у наведеним прилозима овај Зборник у потпуности испуњава мисију посебних циклуса предавања у САНУ. У њему су разматрана научна питања од чијих одговора не зависи само напредак једне струке нити читаве науке, већ опстанак свих нас, и зато то знање никако не сме да остане само експертима. На тај начин, САНУ доприноси путу Србије ка модерној заједници, у којој научници слушају једни друге и раде заједно на најважнијим питањима, а знање до којих они долазе бива употребљено на прави начин.

Два аспекта овог Зборника желим посебно да истакнем. Први се тиче његове актуелности. Довољан је и летимичан поглед на неко од средстава информисања да би се видело да је оно што наши најпозванији научници тематизују у овом Зборнику најтешње повезано с нашим свакодневним животом. О томе сведоче наслови, попут: „Zrenjanin: Zašto je voda žuta?“ (<https://www.danas.rs/drustvo/zrenjanin-zasto-je-voda-zuta/>), „Klimatske promene: Nivo mora porašće za dva metra“ (<https://www.bbc.com/serbian/lat/svet-48349291>) или „Italijanski vulkan Etna se ponovo aktivirao“ (<https://www.slobodnaevropa.org/a/29976226.html>). Чак и када узмемо у обзир да вести у данашњој, интернетом контролисаној медијској комуникацији, имају увек нешто драматичнији тон, остаје утисак изражене актуелности. Најзад, истовремено с приређивањем за штампу овог зборника у којем се као пример подручја угроженог клизиштима приказује карта Крупња (стр. 74, слика 2), исто подручје бива поново директно погођено бујичним поплавама, а на територији Крупња је на снази ванредна ситуација и влада непрестана опасност од активирања клизишта.

Други аспект је везан за чињеницу да се Зборник одликује високим нивоом критичког мишљења. Осим тога што се у многим радовима указује на лоше стање у Србији када је реч о предусловима за процену хазарда, Зборник доноси и контрастне погледе на једну од данас најосетљивих друштвено-научних тема као што је човеков утицај на климатске промене.

Иако ни као научници нисмо у стању да спречимо, па ни да у детаљима предвидимо велике поплаве и земљотресе, постоји велики број чињеница које су нам веома добро познате, на пример, да се не сме градити свуда и на било који начин. Знамо да ће и вода и обрадиво земљиште бити стратешки ресурси у блиској будућности и да се то мора узети у обзир у одлукама које

доносимо данас, а чије ћемо последице осетити већ сутра. Познато нам је да у Србији нема вулкана који могу бити активни у наредним миленијумима, али истовремено знамо шта се може очекивати од веома јаких ерупција у свету, које ће неминовно уследити. Од седам великих ерупција од последњег леденог доба до данас само се једна догодила када је на земљи живело више од једне милијарде људи, а постоје предвиђања да ће само до краја овог века на земљи живети 12 милијарди људи. Ако би се поновила само једна колосална ерупција, попут оне на месту данашњег језера Тоба на Суматри од пре око 74 хиљаде година, то би људску расу могло да врати на предцивизацијски ниво.

Све што знамо као научници и истраживачи мора бити што пре усвојено од стране целокупне заједнице. Овај Зборник представља само једну од многих активности Српске академије наука и уметности које имају за циљ да научна знања што пре допру до свих, а нарочито до оних који доносе најважније одлуке за читаво друштво.

Владица Цветковић,
дописни члан САНУ

СЕИЗМИЧКИ ХАЗАРД У СРБИЈИ

АНА МЛАДЕНОВИЋ*, СЛАВИЦА РАДОВАНОВИЋ**

А п с т р а к т. – У овом раду разматрани су проблеми дефинисања сеизмичког хазарда у Србији. Иако се Србија налази у централном делу Балканског полуострва и није близу месту где се генерише највећа количина тектонске енергије у региону, у нашој земљи се ипак дешавају релативно јаки земљотреси. Без обзира на то што се земљотреси магнитуде преко 5, који се за унутрашњи део континента могу сматрати релативно јаким, у нашем подручју дешавају у просеку једном у десетак година, штета коју они праве је несразмерно велика. Због тога је у овом раду начињен осврт на податке које је неопходно поседовати, као и на методологију коју треба применити за тачно дефинисање сеизмичког хазарда на територији наше земље.

Кључне речи: земљотрес, магнитуда, расед, сеизмотектонске карактеристике, фокални механизам

1. УВОД

Балканско полуострво представља подручје на коме су се током последњег века десили неки од најјачих и најдеструктивнијих земљотреса у Европи. То су, пре свега, били земљотреси који су се дешавали на обали Јадранског мора, као и у њеном непосредном залеђу – у близини Бара у Црној Гори, као и у Дубровнику, Стону и Имотском у Хрватској. Ипак, јаки земљотреси су се неретко дешавали и даље од обала, у унутрашњости, при чему су њихови ефекти били несразмерно већи од оних који су за та подручја били предвиђани и очекивани. Примери таквих земљотреса су земљотрес у Скопљу из 1963. године, као и земљотрес у Бањој Луци из 1969. године. Сви горе поменути земљотреси, као и штета која је настала услед њиховог дешавања, пробудили су интересовање шире јавности за проучавање и разумевање сеизмичности нашег подручја. Штета на грађевинским објектима која је настала током дешавања ових јаких земљотреса санирана је годинама, па и деценијама након њих, а људе који одлучују о изградњи објеката навела је да поставе веома значајна питања – због чега се у ширем подручју наше земље дешавају земљотреси, како можемо да предвидимо сеизмичку активност и да ли је могућа заштита од земљотреса? Управо су ово питања на која треба одговорити да би се разумео сеизмички хазард.

* Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, имејл: ana.mladenovic@rgf.bg.ac.rs

** SEISMO SR д.о.о., Булевар ослобођења 122, Београд

Шта је, заправо, сеизмички хазард? Он представља вероватноћу да ће се земљотрес десити на неком подручју у одређеном периоду времена, а да ће притом бити превазиђена дефинисана граница интензитета померања тла. Сеизмички хазард приказује се картама сеизмичког хазарда. Да би се правилно израчунао, потребно је познавање три основна фактора који на њега утичу, а то су: (1) постојећи сеизмогени раседи и догођени земљотреси у датом подручју истраживања; (2) ефекти кретања сеизмичких таласа кроз потповршину (модел брзина), и (3) блископовршински услови тла на локалитетима од интереса.

2. ЗЕМЉОТРЕСИ

Тектонске плоче на Земљи налазе се у сталном покрету, а енергија која настаје услед тог кретања акумулира се на границама плоча или дуж површи које одвајају мање блокове унутар плоча. Ове површи се зову раседи. Свака стена може да акумулира само одређену количину тектонске енергије, то јест напона, а када напон постане јачи, дешава се нагло кретање и ослобађа се енергија која је довољна да се плоче врате у равнотежно стање. Земљотрес представља управо овај процес ослобађања енергије кретањем тектонских блокова дуж раседа. Енергија која је ослобођена током раседања наставља да се шири кроз стенску масу у виду деформације, односно у виду сеизмичких таласа.

Једна од најважнијих концептуалних теорија која објашњава настанак земљотреса назива се теорија еластичног одскока. Према овој теорији, тачке које се налазе на различитим блоковима раседа, на подједнакој удаљености од раседне површи, кретаће се једна у односу на другу. Међутим, њих задржава трење блокова дуж раседне површи, које на тај начин онемогућава кретање дуж раседа. У једном тренутку, сила (енергија) која се акумулира у стенској маси постаје већа него што стенска маса може да издржи, тако да стена пуца, дешава се кретање по раседу и на тај начин настаје земљотрес. Теорија еластичног одскока представља само један део процеса који се назива сеизмички циклус, а чије је разумевање од круцијалног значаја код проучавања сеизмичког хазарда било ког подручја. Сеизмички циклус је процес који може трајати и више стотина или више хиљада година, а састоји се из четири важне фазе: интерсеизмичке, пресеизмичке, косеизмичке и постсеизмичке.

Током **интерсеизмичке фазе**, која уједно чини и највећи (најдужи) део циклуса, у подручјима која су удаљена од раседа дешавају се стабилна кретања блокова, док је сам расед „закључан“. Ипак, током ове фазе, дуж раседа се могу дешавати одређена кретања веома малих размера, која се називају асеизмичко кретање (енгл. *aseismic creep*). Асеизмичко кретање дуж раседа је од великог значаја, јер ма колико мало било то кретање, уколико траје дужи временски

период, може да ослободи значајну количину акумулиране енергије, те на тај начин смањи шансу за дешавање јачег земљотреса. Непосредно пре самог раседања може се издвојити **пресеизмичка фаза**, која се огледа у дешавању претходних земљотреса малих магнитуда (енгл. *foreshock*), или неког другог прекурсора земљотреса. Сам земљотрес чини **косеизмичку фазу**, током које се дешава брзо кретање дуж раседа, које генерише сеизмичке таласе. Током тих неколико секунди (до неколико минута код веома јаких земљотреса), дуж раседа се могу догодити и метарска кретања, чиме се надокнађују кретања малих размера која су се дешавала током интерсеизмичке фазе у подручјима која су релативно удаљена од самог раседа. Коначно, након земљотреса се издваја **постсеизмичка фаза**, која се огледа у дешавању накнадних земљотреса (енг. *aftershock*) и накнадног кретања. Ова фаза може потрајати и неколико година, све док се расед не врати у првобитно стање интерсеизмичке фазе, то јест у стање најниже енергије.

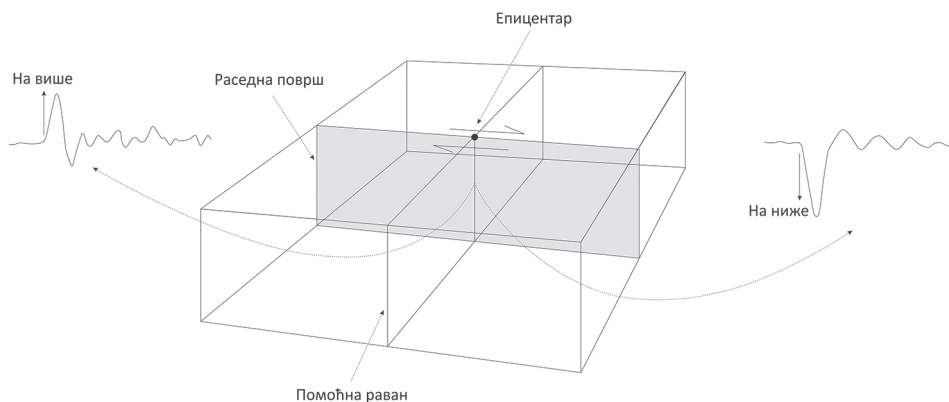
Проучавање сеизмичког циклуса је веома тешко и компликовано, због тога што он траје стотинама година, тако да је немогуће имати довољно опсервација процеса који су у вези са овим циклусом. Један од највећих проблема представља дефинисање фазе сеизмичког циклуса у коме се проучавано подручје налази. Да би се то утврдило, морају се познавати активни раседи у проучаваном подручју, односно имати увид у размере кретања тектонских блокова дуж ових раседа, као и у то где су се у прошлости дешавали земљотреси и колики је њихов повратни период за дато подручје. До ових информација долази се посредним путем, проучавањем механизма раседања током земљотреса, као и формирањем доброг и свеобухватног каталога земљотреса.

3. АКТИВНИ РАСЕДИ

Активни раседи на неком подручју, поготово на терену какав је данашња Србија, који није претерано сеизмички активан, детектују се управо на основу земљотреса који се на њима дешавају. Ипак, проучавање раседања које генерише земљотресе представља инверзан проблем, што значи да је о раседима могуће донети само оне закључке на које упућује кретање сеизмичких таласа од хипоцентра земљотреса радијално кроз потповршину. Сеизмички таласи рефлектују геометрију раседа и начин кретања дуж њега, па на тај начин могу дати добру слику како о кинематици тако и о динамици раседања.

Проучавање геометрије раседања током дешавања земљотреса врши се помоћу **фокалних механизма** земљотреса. Наиме, кретање сеизмичких таласа који настају услед дешавања земљотреса зависи од геометрије раседа, то јест, записи њиховог простирања кроз стенску масу (сеизмограми) неће бити исти на различитим сеизмолошким станицама, већ ће директно зависити од положаја станица у односу на епицентар земљотреса.

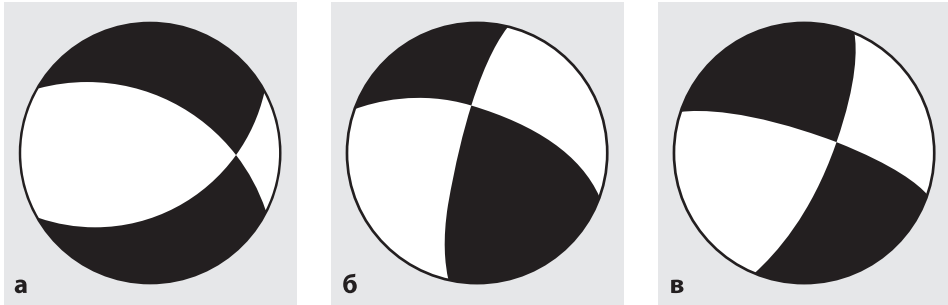
Основна идеја решавања фокалних механизма земљотреса јесте да поларитет првих наилазака сеизмичких таласа на сеизмолошку станицу варира у односу на локацију станице у односу на епицентар земљотреса. На слици 1 приказан је овај концепт за случај вертикалног транскурентног раседа. Први наилазак може бити компресиони, у случају станица које су лоциране тако да се тачке близу раседа крећу „према“ станици, или дилатациони, када се кретање врши „од“ станице. Компресиони или дилатациони наиласци сеизмичких таласа на вертикалној компоненти сеизмометра региструју се као позитивни или негативни поларитет.



Слика 1. Први наиласци сеизмичких таласа забележени на сеизмолошким станицама које се налазе на различитим позицијама у односу на епицентар земљотреса (према Stein and Wysession, 2003)

Фокални механизми земљотреса стандардно се приказују стереографском пројекцијом на доњој хемисфери, и то тако што се компресиони квадранти обоје неком бојом, док дилатациони квадранти остају бели (слика 2). Оса тензије налази се у средишњем делу компресионог квадранта, док се оса компресије налази у тензионом (дилатационом) квадранту. На овај начин се релативно лако може утврдити којег кинематског типа је одређени расед – нормалног, реверсног или транскурентног типа.

Ипак, само на основу фокалног механизма није могуће утврдити која од две равни на приказу фокалног механизма заиста представља раседну раван. Да би се ово утврдило, неопходне су додатне информације које се добијају другим геолошким истраживањима тектонског склопа проучаваног подручја, а које би могле да укажу на положај (оријентацију), геометрију и кинематику активних раседа.



Слика 2. Три основна типа раседања приказана фокалним механизмима: а) нормални расед, б) реверсни расед, в) транскурентни расед

4. КАТАЛОГ ЗЕМЉОТРЕСА

За потребе прорачуна сеизмичког hazardа неопходно је да постоји свеобухватан, тачан и хомоген каталог земљотреса, који ће дати информације о локацијама и времену дешавања потреса, њиховој магнитуди и дубини хипоцентра. Магнитуде земљотреса у каталогу морају бити хомогенизоване, то јест, сведене на момент магнитуду (M_w). Осим тога, мора бити извршена и декластеризација каталога, односно раздвајање зависних и независних догађаја, а неопходно је и дефинисати комплетност каталога. Једино такав каталог, поред информација о активним раседима, може да послужи као основа за дефинисање сеизмичких зона, на чему се заснива и прорачун сеизмичког hazardа одређеног подручја.

Каталози земљотреса који се користе за прорачун сеизмичког hazardа углавном се састоје из двају основних типова података: (1) о историјским земљотресима догођеним пре инсталирања сеизмолошких станица, и (2) о инструментално регистрованим земљотресима. Сеизмолошке станице су конструисане и почеле су да се инсталирају тек на самом крају 19. и почетком 20. века, тако да се сви земљотреси догођени пре тог периода сматрају историјским. Подаци о историјским земљотресима углавном су изведени на основу макросеизмичких података, то јест, на основу забележених информација о штети коју су ови земљотреси проузроковали. Сходно томе, јасно је да се из групе историјских земљотреса у каталогу налазе углавном само земљотреси јачих магнитуда.

4.1. Унификација магнитуда

Унификација магнитуда земљотреса у каталогу представља неопходан корак како би земљотреси могли директно да се пореде, и да се на основу тога

правилно дефинише сеизмогени потенцијал датог подручја. Унификација магнитуда земљотреса једног каталога обично се врши свођењем на момент магнитуду (M_w). Момент магнитуда је тип магнитуде која најтачније одражава величину земљотреса, а кључна одлика ове скале јесте да не показује сатурацију с великим магнитудама као све остале скале. Због тога је момент магнитуда, као мера јачине земљотреса, најчешћа, скоро искључива основа за свођење свих типова магнитуда на једниствен ниво. Други разлог за избор момент магнитуде јесте што су многи савремени предикциони модели кретања тла, на којима се заснива прорачун сеизмичког хазарда, дефинисани управо преко ове магнитуде.

Процес свођења различитих типова магнитуда на момент магнитуду заснива се на дефинисању различитих типова релација за конверзију сваког појединачног типа магнитуде у момент магнитуду. Већина ових релација веома је добра за земљотресе магнитуда већих од 4, а може имати ограничења за земљотресе магнитуде између 2 и 4. Основно ограничење примене ових релација на слабије магнитуде везано је за методологију дефинисања момент магнитуде (M_w) преко момент тензора. Рутинска примена дефинисања момент тензора за земљотресе магнитуда мањих од 4 је ретка, па су тако и изведене релације из малог броја података релативно непоуздане.

4.2. Декластеризација каталога

У основи анализе поновљивости земљотреса, као једног од параметара сеизмичности на којима се темељи и дефинисање сеизмичког хазарда, лежи претпоставка да су земљотреси независни догађаји и да је сеизмичност стационаран процес. Декластеризација је поступак којим се врши дефинисање зависних и независних догађања земљотреса. Метод је заснован на физичкој суштини дешавања земљотреса, према којој сваки земљотрес генерише промену у напонском стању у својој околини која може да покрене даље догађање земљотреса. Идентификација зависних и независних догађаја је везана за њихово груписање у простору и времену, а не за физичке (динамичке) различитости међу њима, па су тако и димензије просторно-временске зоне интеракције у вези с магнитудом главног земљотреса.

За декластеризацију каталога, засновану на анализи догађања земљотреса у временско-просторном прозору пре и после догађања главног земљотреса стандардно се користи неколико алгоритама, као на пример Gardner and Knopoff (1974), Van Stiphout et al. (2012), Uhrhammer (1986).

4.3. Анализа комплетности каталога земљотреса

Каталог земљотреса треба да обухвати скоро све догођене земљотресе који су дефинисани магнитудом комплетности (M_c). Комплетност каталога условљена је постојањем података о земљотресима, што је уско везано за

подручје проучавања, као и проучаваним временским интервалом. Генерално гледано, у историјском периоду претежно су евидентирани и описани само најјачи земљотреси, и то углавном они који су се догађали у близини насеља. Крајем 19. и почетком 20. века започиње развој инструменталне сеизмологије, а расте и интересовање за земљотресе након догађања јаких и катастрофалних земљотреса, па почиње и систематско прикупљање макросеизмичких података. Тако су све чешћи подаци и о умереним и slabим земљотресима, што доприноси већој комплетности каталога. Развојем сеизмолошких мрежа средином 20. века долази до значајног снижења магнитуде комплетности каталога.

Поуздано дефинисање магнитуде комплетности каталога је од кључног значаја у процесу прорачуна поновљивости земљотреса и сеизмичког hazardа. Због тога су развијене различите методе за дефинисање магнитуде комплетности. Једна група метода заснована је на претпоставци да је сеизмичност на довољно великом простору у дугом временском периоду стационарна. Поједностављен приступ (Mulargia et al., 1987) подразумева визуелни преглед графика кумулативног броја земљотреса у функцији времена, где се промена магнитуде комплетности огледа у промени нагиба криве на графику. Друга група метода заснива се на аналитичком приступу, који је базиран на дефинисању одступања средње вредности поновљивости земљотреса за задати опсег магнитуде (M_w) и временски интервал догађања (Stepp, 1973). Трећа група метода заснована је на детектовању магнитуде максималне закривљености оценом границе (M_c) иза које кумулативна расподела фреквенције магнитуде одступа од Гутенберг-Рихтеровог закона појаве земљотреса за велике магнитуде (Weimer and Wyss, 2000).

4.4. Максимална магнитуда

Максимална магнитуда се у сеизмолошкој пракси најчешће описује на три начина, као: (1) максимални регионални (могући) земљотрес, (2) максимално очекивани (веродостојан) земљотрес, и (3) максимално догођени историјски земљотрес.

Максимални регионални земљотрес, односно максимални могући земљотрес који може да се догоди у задатом тектонском режиму, представља горњу границу јачине земљотреса као последице генерисања земљотреса у региону. Сваки истраживани простор, у зависности од положаја у савременим тектонским процесима, има горњу границу магнитуде коју може да генерише.

Максимално очекивани земљотрес везан је за догађање земљотреса у одређеном временском периоду или простору.

Максимални историјски земљотрес је максимални догођени земљотрес који је везан за одређену сеизмотектонску зону, о коме постоје архивски, историјски или инструментални подаци.

4.5. Поновљивост земљотреса

Поновљивост земљотреса дефинише се као време за које се земљотрес одређене магнитуде поново догађа у истој области. За прорачун поновљивости земљотреса могу се користити различите релације, али треба имати на уму да период екстраполације максималних магнитуда не може бити бесконачан и да зависи од периода комплетности података. Другим речима, ако је период комплетности података око 100 година, што би одговарало периоду инструменталног бележења земљотреса, онда време за које се прорачунава поновљивост земљотреса не сме бити веће од око 500 година.

5. СЕИЗМОТЕКТОНСКО ЗОНИРАЊЕ

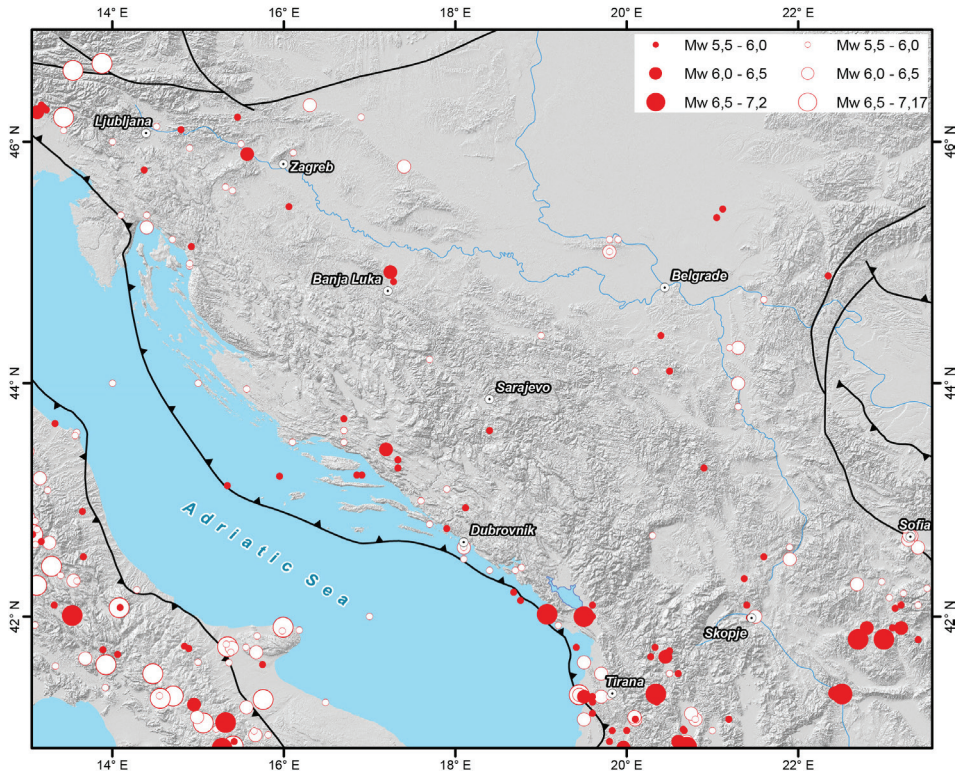
У идеалном случају, оконтуривање сеизмотектонских зона захтева широку базу података о сеизмичности, тектоници, геологији, палеосеизмологији и неотектоници истражног простора. У подручјима у којима се врши константан мониторинг активних раседа, GPS (енг. *Global Positioning System*) кретања, у којима се рачуна брзина кретања блокова дуж раседа и где постоји добра сеизмолошка мрежа, дефинисање сеизмотектонских зона не би требало да буде проблематично. Ипак, на просторима као што је подручје Србије, где нема систематских истраживања активне тектонике, дефинисање сеизмотектонских зона врши се на основу три главна критеријума: сеизмичности, тектонике (положаја раседа и евентуално њихове кинематике) и фокалних механизма земљотреса.

Сеизмотектонска зона представља главну основу за прорачун сеизмичког хазарда, заједно с подацима о својствима локалног тла за које се сеизмички хазард прорачунава. За сваку сеизмотектонску зону, према већ описаним критеријумима, неопходно је дефинисати податке о просторној дистрибуцији параметара поновљивости земљотреса, њиховој густини, као и укупно ослобођеној сеизмичкој енергији земљотреса. Само уколико се ови параметри тачно дефинишу, израчунати сеизмички хазард указиваће на реално стање сеизмичности проучаваног подручја.

6. СЕИЗМИЧКИ ХАЗАРД У СРБИЈИ

Сеизмичност територије Србије описује се као умерена али константна. Земљотреси на територији наше земље генеришу се услед регионално значајног тектонског процеса који је представљен сударањем Јадранске микроплоче и Динарида. На граничном делу ове две велике тектонске јединице ствара се

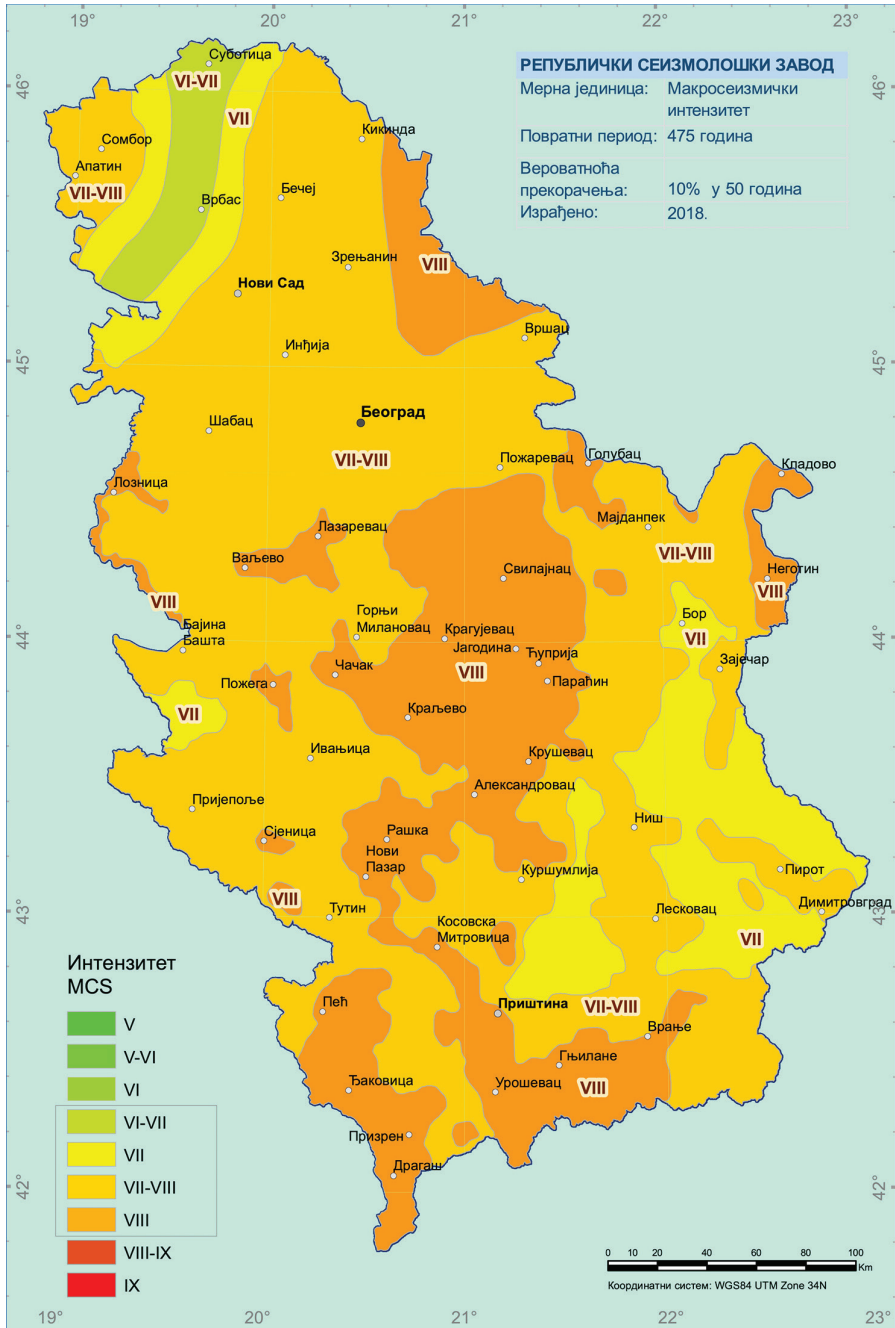
велика количина напона која се преноси у унутрашњост континента, где утиче на генерисање земљотреса. На слици 3, где су приказани најјачи земљотреси који су се догодили на подручју Балканског полуострва, може се уочити да су се најјачи земљотреси дешавали углавном дуж границе Јадранске микроплоче и Динарида.



Слика 3. Карта догођених земљотреса са момент магнитудом (M_w) већом од 5,5 за историјско (бели кружићи) и инструментално (црвени кружићи) време (према каталогу пројекта SHARE)

На територији Србије дешавали су се тек појединачни земљотреси виших магнитуда, а они су углавном везани за територију централне Србије, где се издвајају три главна сеизмогена подручја: Копаоник, Краљево–Рудник и Ваљево–Мионица. Ван ових подручја, издваја се и подручје околине Вршца, где су такође забележени јачи земљотреси. Осим тога, у историјском периоду забележени су и јачи земљотреси на подручју Свилајнца, као и на подручју Фрушке Горе.

На основу података каталога земљотреса Републичког сеизмолошког завода Србије, дефинисане су сеизмотектонске зоне и на основу њих је израчунат сеизмички hazard приказан Картом сеизмичког hazardа на слици 4.



Слика 4. Карта сеизмичког хазарда Републике Србије, где је хазард изражен у степенима макросеизмичког интензитета за повратни период од 475 година (Републички сеизмолошки завод Србије, 2018)

На основу ове карте може се уочити да је сеизмички hazard највећи на подручју централне Србије, где су се и током историјског и током инструменталног сеизмолошког периода дешавали неки од најјачих земљотреса у Србији. Ту се, пре свега, мисли на већ поменута подручја: Копаоник, Краљево–Рудник и Ваљево–Мионица, али и на подручје Свилајнца и Лазаревца. Све поменуте сеизмичке зоне способне су да генеришу земљотресе магнитуде преко 5. На основу Карте сеизмичког hazardа (слика 4) види се да је у задатом периоду од 475 година на овим подручјима могуће достићи макросеизмичке интензитете од VIII степени, са вероватноћом прекорачења од 10% у 50 година.

Ипак, код процене сеизмичког hazardа и читања овакве карте мора се увек водити рачуна и о сеизмотектонским карактеристикама подручја за које се рачуна сеизмички hazard. Уобичајено је да се сеизмички hazard рачуна на основу претходно дефинисаних сеизмотектонских зона, што је углавном резултат недовољне количине података о сеизмотектонским карактеристикама подручја истраживања, при чему је највећи проблем дефинисање активних раседа – њиховог положаја, геометрије и кинематике. Ако се сеизмотектонска зона схвати као подручје истих сеизмолошких и неотектонских карактеристика чија се сеизмичност може описати јединственом релацијом магнитуде и фреквенције догађања земљотреса, то би значило да је вероватноћа за дешавање земљотреса одређене магнитуде подједнака у било којој тачки сеизмотектонске зоне. То, ипак, не може бити тачно, због тога што су земљотреси недвосмислено везани за активност раседа, и тамо где нема раседа који су активни у рецентно време не може бити ни земљотреса. Због тога је важно познавати положај активних раседа у проучаваном подручју. Познавање геометрије и кинематике раседа неопходно је због израчунавања максималне очекиване магнитуде земљотреса – раседна површ веће површине и већи износ помака по њој порузроковаће земљотрес веће магнитуде, док ће кинематски тип раседа утицати и на начин кретања сеизмичких таласа који настају током догођеног земљотреса. Сви ови подаци су веома важни код прорачуна сеизмичког hazardа, и тек ако су све ове чињенице познате, и ако се поседује добар каталог земљотреса, могуће је правилно дефинисање сеизмичког hazardа које ће водити и ка правилном прорачуну ризика од земљотреса на појединачним микролокацијама.

7. ЗАКЉУЧАК

Подручје Србије припада унутрашњем делу европског континента, који се налази релативно далеко од места где се генерише највећа количина тектонске енергије. Због тога је за наше подручје веома компликовано правилно дефинисати сеизмички hazard. Једна група разлога лежи у чињеници да се на овом подручју суперпонирају утицаји различитих сеизмичких

зона, те да се земљотреси дешавају дуж раседа који су повољно оријентисани у односу на правац максималног притиска, и не нужно на местима где су се земљотреси дешавали и раније. Да би сеизмички hazard могао да се дефинише само на основу каталога земљотреса, било би неопходно поседовати каталог за много дужи временски период од периода у коме се врши инструментално регистровање земљотреса било где у свету, па и у нашој земљи. С друге стране, геолошки подаци на основу којих је могуће дефинисати сеизмотектонске карактеристике, а то су подаци о положају и кинематици рецентно активних раседа, углавном не постоје или су јако ретки, што прорачун сеизмичког hazardа додатно усложњава. Иако имамо ту срећу да су јаки земљотреси на територији наше земље ретки, проблему дефинисања сеизмичког hazardа треба посветити много више пажње, јер се тиче свих људи који овде живе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gardner, J. K., Knopoff, L., 1974. *Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?* Bull. Seismol. Soc. Am. 64, 1363–1367.
- [2] Mulargia F., Gasperini P., Tinti S., 1987. *Contour Mapping Of Italian Seismicity*. Tectonophysics, 142: 203–216.
- [3] Stein S., Wysession M., 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing. 498 pp. ISBN 0-86542-078-5.
- [4] Stepp, J. C., 1973. *Analysis of completeness of the earthquake sample in the Puget Sound area*. In: Harding ST (ed.) Seismic Zoning. NOAA Tech. Report ERL 267-ESL30, Boulder Colorado.
- [5] Uhrhammer, R., 1986. *Characteristics of Northern and Central California Seismicity*. Earthquake Notes 57, 21.
- [6] Van Stiphout, T., Zhuang, J., Marsan, D., 2012. Seismicity declustering, *Community online resource for statistical seismicity analysis*, Available at <http://www.corssa.org>.
- [7] Wiemer, S. and M. Wyss., 2000. *Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States and Japan*, Bull. Seismol. Soc. Am. 90, 859–869.
- [8] PC3 Србије, 2018: http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda.htm

Ana Mladenović, Slavica Radovanović

SEISMIC HAZARD IN SERBIA

S u m m a r y

This paper looks into the issues related to the determination of seismic hazard in Serbia. Even though Serbia is situated in the central part of the Balkan Peninsula and is not near the zone where the largest amount of tectonic energy in the region is generated, relatively strong earthquakes occur in our country. Regardless of the fact that earthquakes measuring magnitude 5 or greater, which may be considered relatively strong for the inner parts of the continent, occur in our region once every ten years, on average, they cause a *disproportionately large* amount of *damage*. Given that, this paper provides an overview of data that one must have access to, as well as of methodology that has to be applied so as to precisely determine seismic hazard on the territory of our country.