

Balkansko poluostrvo predstavlja područje u kome su se tokom poslednjeg veka desili neki od najjačih i najdestruktivnijih zemljotresa u Evropi. To su bili, pre svega, zemljotresi koji su se dešavali na obali Jadranskog mora, kao i u njenom neposrednom zaleđu – u blizini Bara u Crnoj Gori, kao i u Dubrovniku, Stonu i Imotskom u Hrvatskoj. Ipak, jaki zemljotresi su se neretko dešavali i u unutrašnjosti kontinenta, a njihovi efekti su bili nesrazmerno veći od onih koji su za ta područja predviđani i očekivani. Primeri takvih zemljotresa su zemljotres u Skoplju iz 1963. godine, kao i zemljotres u Banja Luci iz 1969. godine. Svi gore pomenuti zemljotresi, kao i šteta koja je nastala usled njihovog dešavanja, probudili su interesovanje šire javnosti za proučavanje i razumevanje seizmičnosti našeg područja. Šteta na građevinskim objektima koja je nastala tokom dešavanja ovih jakih zemljotresa sanirana je godinama, pa i decenijama nakon njih, ali je ljude koji odlučuju o izgradnji objekata navela da postave veoma značajna pitanja – zbog čega se u širem području naše zemlje dešavaju zemljotresi, kako možemo da predvidimo seizmičku aktivnost i, konačno, da li je moguće zaštititi se od zemljotresa?

Zašto nastaju zemljotresi?

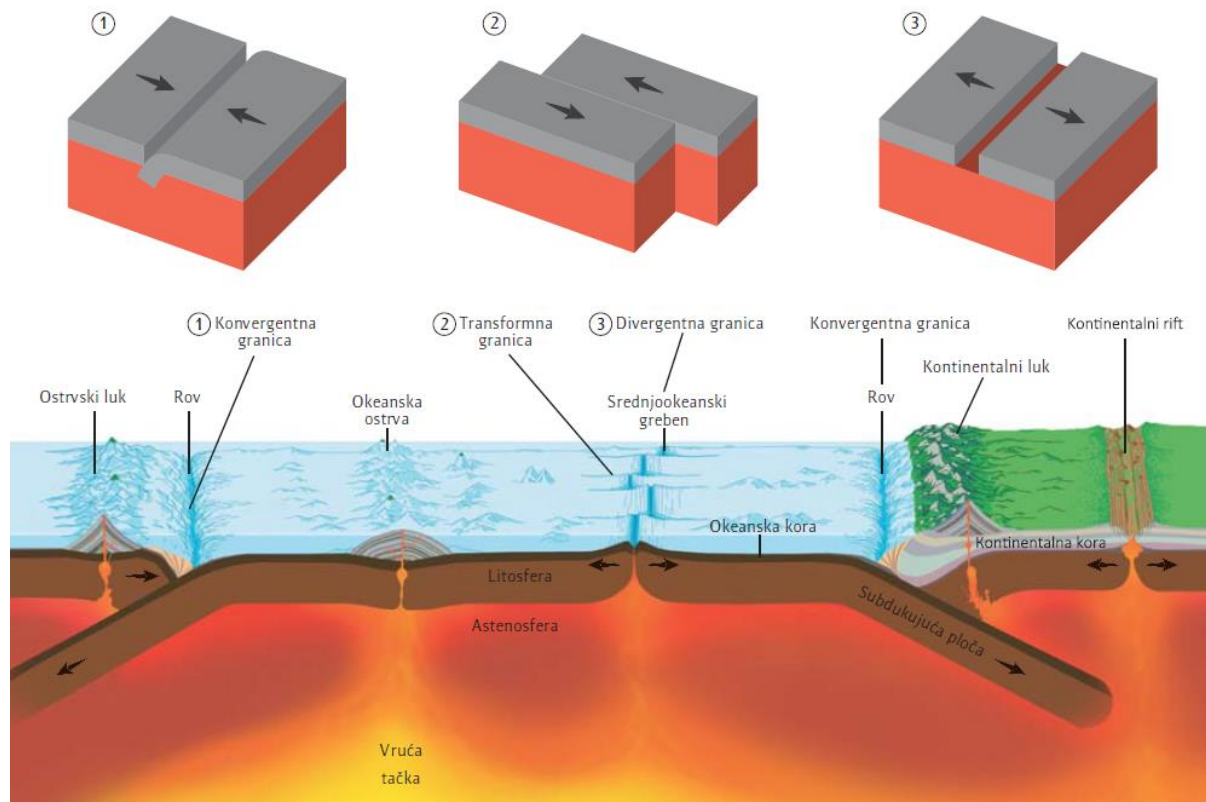
Zemljina kora izdeljena je na tektonske ploče, kojih ima, doduše različitih veličina, više od 20 (slika 1).



Slika 1. Karta geografskog rasporeda najvećih tektonskih ploča na Zemlji (preuzeto iz Cvetković i dr. 2019; modifikovano prema: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>)

Tektonske ploče nalaze se u stalnom pokretu, one se sudaraju, razilaze ili mimoilaze (slika 2). Energija koja nastaje usled tog kretanja akumulira se na granicama ploča, ili duž površi koje odvajaju manje blokova unutar ploča, tj. raseda. Svaka stena može da akumulira samo određenu količinu tektonske energije, tj. napona, a kada napon postane jači, dešava se naglo

kretanje i oslobađa se energija koja je dovoljna da se ploče vrate u ravnotežno stanje, odnosno stanje najmanje energije. **Zemljotres predstavlja upravo ovaj proces oslobađanja energije kretanjem tektonskih blokova duž raseda.** Energija koja je oslobođena tokom rasedanja nastavlja da se širi kroz stensku masu u vidu deformacije, to jest u vidu seizmičkih talasa.

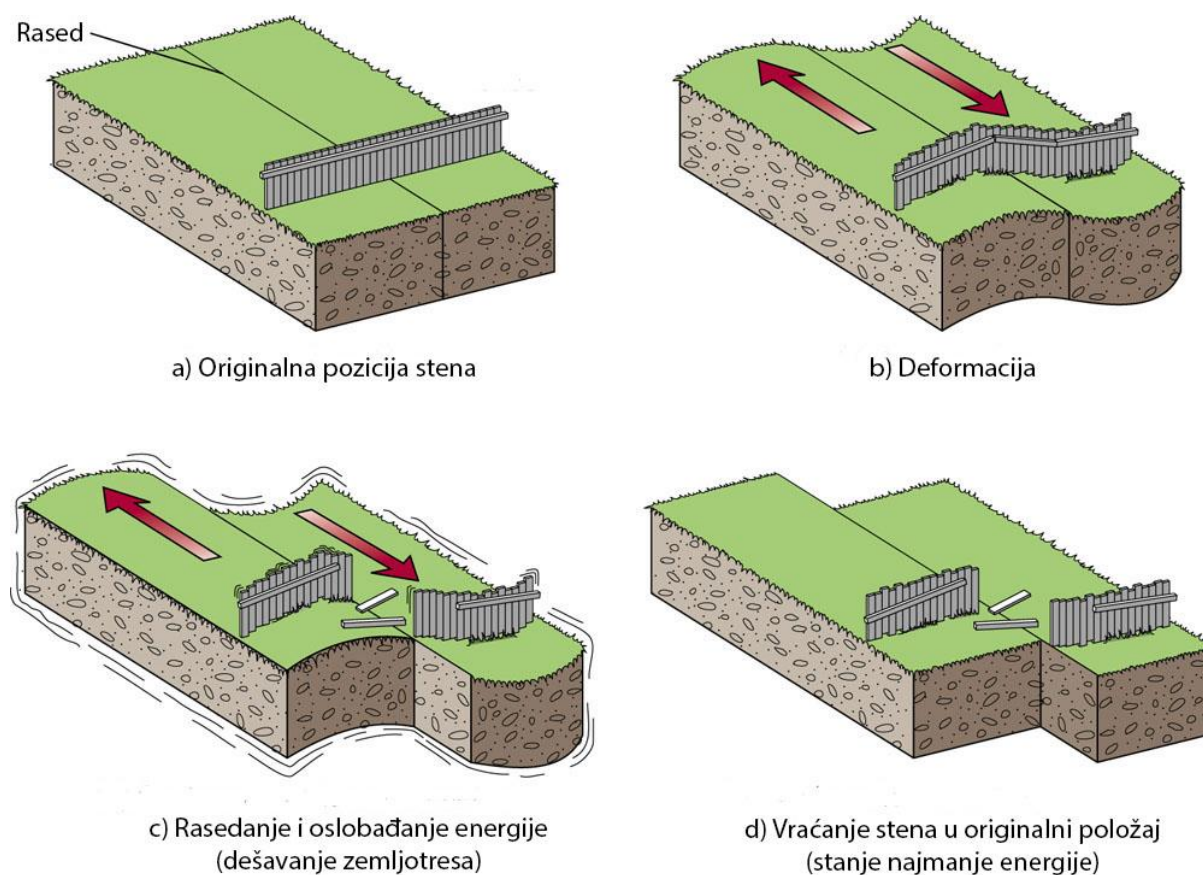


Slika 2. Šematski profil kroz površinske slojeve Zemlje (nije u razmeri), na kojem su ilustrovana mesta najvažnijih geodinamičkih događaja koje predviđa teorija tektonike ploča (preuzeto iz Cvetković i dr. 2019; modifikovano prema: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/Vigil.html>)

Jedna od najvažnijih teorija koja objašnjava nastanak zemljotresa, naziva se teorija elastičnog odskoka (slika 3). Prema ovoj teoriji, tačke koje se nalaze na različitim blokovima raseda (slika 3a), na podjednako udaljenosti od rasedne površi, kreću se jedna u odnosu na drugu (slika 3b). Međutim, njih zadržava trenje blokova duž rasedne površi, i na taj način onemogućava kretanje duž raseda. U jednom trenutku, sila (energija) koja se akumulira u stenskoj masi postaje veća nego što stena može da izdrži, tako da stena puca, dešava se kretanje po rasedu i na taj način nastaje zemljotres (slika 3c). Teorija elastičnog odskoka predstavlja samo jedan deo procesa koji se naziva seizmički ciklus, a čije razumevanje je od krucijalnog značaja kod proučavanja seizmičnosti nekog područja. Seizmički ciklus je proces koji može trajati i više stotina ili više hiljada godina, a sastoji se iz 4 važne faze: interseizmičke, preseizmičke, koseizmičke i postseizmičke.

Tokom **interseizmičke faze**, koja ujedno čini i najveći (najduži) deo ciklusa, u područjima koja su udaljena od raseda, dešavaju se stabilna kretanja blokova, dok je sam rased „zaključan“. Ipak, tokom ove faze se duž raseda mogu dešavati određena kretanja veoma malih razmera,

koja se nazivaju aseizmičko kretanje. Aseizmičko kretanje duž raseda je od veoma velikog značaja, jer ma koliko malo to kretanje bilo, ukoliko traje duži vremenski period, može da oslobodi značajnu količinu akumulirane energije, te na taj način da smanji šansu za dešavanje jačeg zemljotresa. Neposredno pre samog rasedanja može se izdvojiti **preseizmička faza**, koja se ogleda u dešavanju prethodnih zemljotresa malih magnituda (eng. *foreshock*), ili nekog drugog prekursora zemljotresa. Sam zemljotres čini **koseizmičku fazu**, tokom koje se dešava brzo kretanje duž raseda, koje generiše seizmičke talase. Tokom tih nekoliko sekundi (do nekoliko minuta kod veoma jakih zemljotresa), duž raseda se mogu dogoditi i metarska kretanja, koja nadoknađuju kretanja malih razmera koja su se dešavala tokom interseizmičke faze u područjima koja su relativno udaljena od samog raseda. Konačno, nakon zemljotresa se izdvaja **postseizmička faza**, koja se ogleda u dešavanju naknadnih zemljotresa (eng. *aftershock*) i naknadnog kretanja. Ova faza može potrajati i nekoliko godina, sve dok se rased ne vrati u prvobitno stanje interseizmičke faze, tj. stanje najniže energije.



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Slika 3. Faze seizmičkog ciklusa prema teoriji elastičnog odskoka (Brooks/Cole – Thomson, 2006)

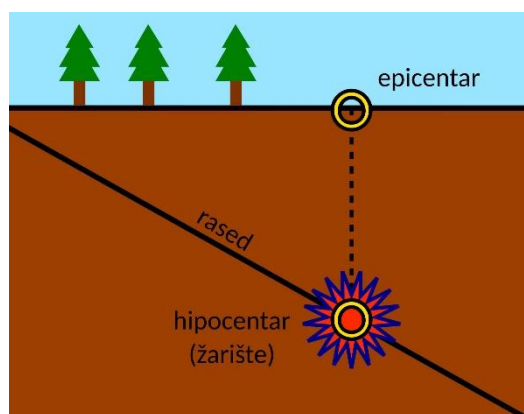
Proučavanje seizmičkog ciklusa je veoma komplikovano, zbog toga što on može da traje i stotinama godina, tako da je nemoguće imati dovoljno opservacija procesa koji su u vezi sa ovim ciklusom. Jedan od najvećih problema je, zapravo, definisati u kojoj se fazi seizmičkog ciklusa proučavano područje trenutno nalazi. Da bi se to utvrdilo, moraju se poznavati aktivni

rasedi u proučavanom području, razmera kretanja tektonskih blokova duž ovih raseda, ali i to gde su se u prošlosti dešavali zemljotresi i koliki je njihov povratni period za dato područje. Do ovih informacija se dolazi posrednim putem, proučavanjem mehanizma rasedanja tokom dešavanja zemljotresa, kao i formiranjem dobrog i sveobuhvatnog kataloga zemljotresa.

Osnovni elementi zemljotresa

Kada se dogodi zemljotres, seizmolozi obično objavljuju tri parametra – koordinate epicentra zemljotresa, dubinu hipocentra zemljotresa i magnitudu zemljotresa. Često se, mada ne obavezno, pojavljuje i četvrti parametar, a to je procenjeni intenzitet u epicentralnoj oblasti. Šta, zapravo, predstavljaju ovi termini?

Hipocentar ili žarište zemljotresa predstavlja mesto gde zemljotres nastaje (slika 4). To je područje na rasednoj površi duž koje se vršilo kretanje blokova stena, i odakle je krenula da se širi deformacija, tj. seizmički talasi, dalje u Zemlju. Epicentar je tačka (ili, bolje rečeno, područje) na površini Zemlje gde se zemljotres najviše osetio (slika 4). Najčešće, mada ne nužno, epicentar predstavlja direktnu vertikalnu projekciju hipocentra na Zemljinu površinu, mada je u zavisnosti od geološke građe, pa ta tačka može biti i pomerena u odnosu na mesto hipocentra.



Slika 4. Osnovni elementi zemljotresa (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Epicenter_Diagram.svg)

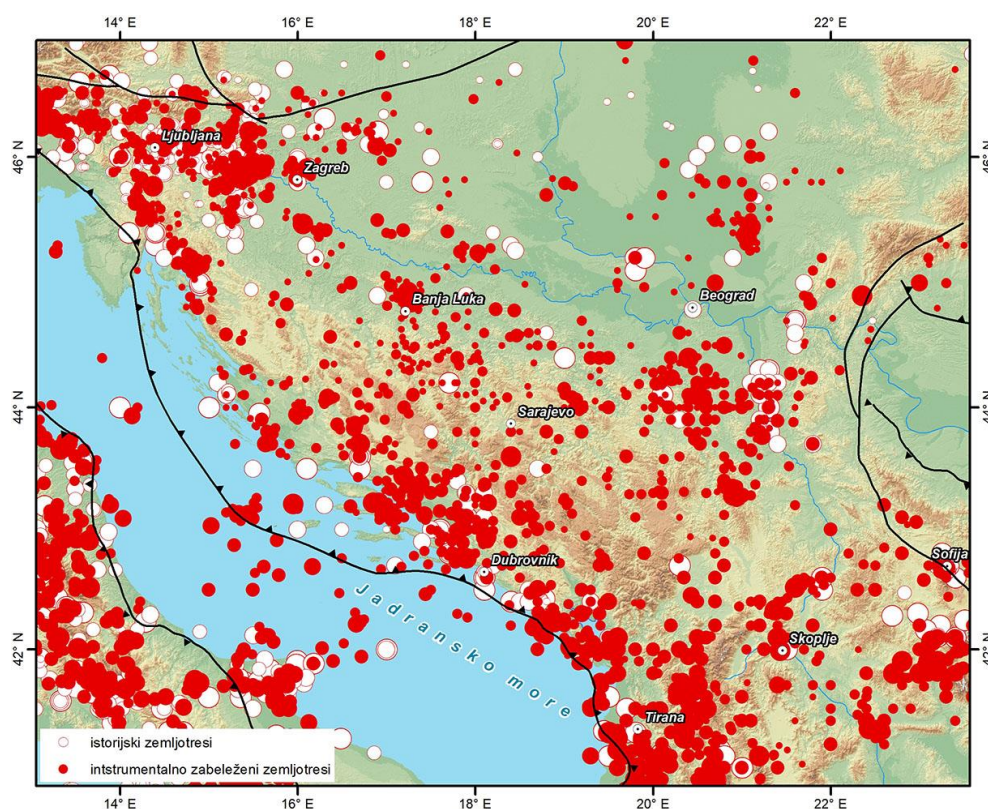
Magnituda zemljotresa predstavlja meru količine oslobođene energije u hipocentru prilikom nastanka zemljotresa. Često se označava Rihterovom skalom magnitude, koja je još poznata i kao skala lokalne magnitude, M_L . To je logaritamska skala, određena na osnovu proračuna logaritma horizontalne amplitude najvećeg pomeraja (u odnosu na definisani nulti pomeraj) na horizontalnom torzionom seizmometru tipa Vud-Anderson. Iako je Rihterova skala definisana sa 9 jedinica, ona je zapravo otvorena sa obe strane (dakle, moguće je da zemljotres ima magnitudu i veću od 9). Razlika u amplitudi pomeraja između dve susedne jedinice magnitude iznosi 10 puta, dakle zemljotres magnitude 5 jedinica Rihterove skale ima amplitudu pomeraja koja je 10 puta veća od amplitude potresa magnitude 4. Granica određivanja lokalne magnitude je oko 6.8. Zbog toga, iako se Rihterova skala i dalje koristi, zamenjena je skalom moment-magnitude, M_W .

Intenzitet zemljotresa predstavlja meru rušilačkog dejstva zemljotresa, a najčešće se izražava Merkalijevom skalom (tj. MCS – Merkali – Kankani – Zibergovom skalom). Ova skala definiše pojave i promene koje zemljotresi izazivaju kod ljudi i životinja, uz ocenu veličine štete na objektima i sagledavanje promena u prirodi, koje nastaju kao posledice zemljotresa. Često se definiše samo za epicentralnu oblast, gde je rušilačko dejstvo zemljotresa najjače, ali se, posebno kod zemljotresa veće magnitude koji su izazvali i u udaljenijim područjima, intenzitet može definisati i za ta područja.

Zemljotres može imati samo jednu magnitudu, jer se ona izražava preko energije koja je oslobođena u njegovom žarištu, a više intenziteta, jer intenzitet zavisi od rušilačkog dejstva zemljotresa, i opada idući dalje od epicentra.

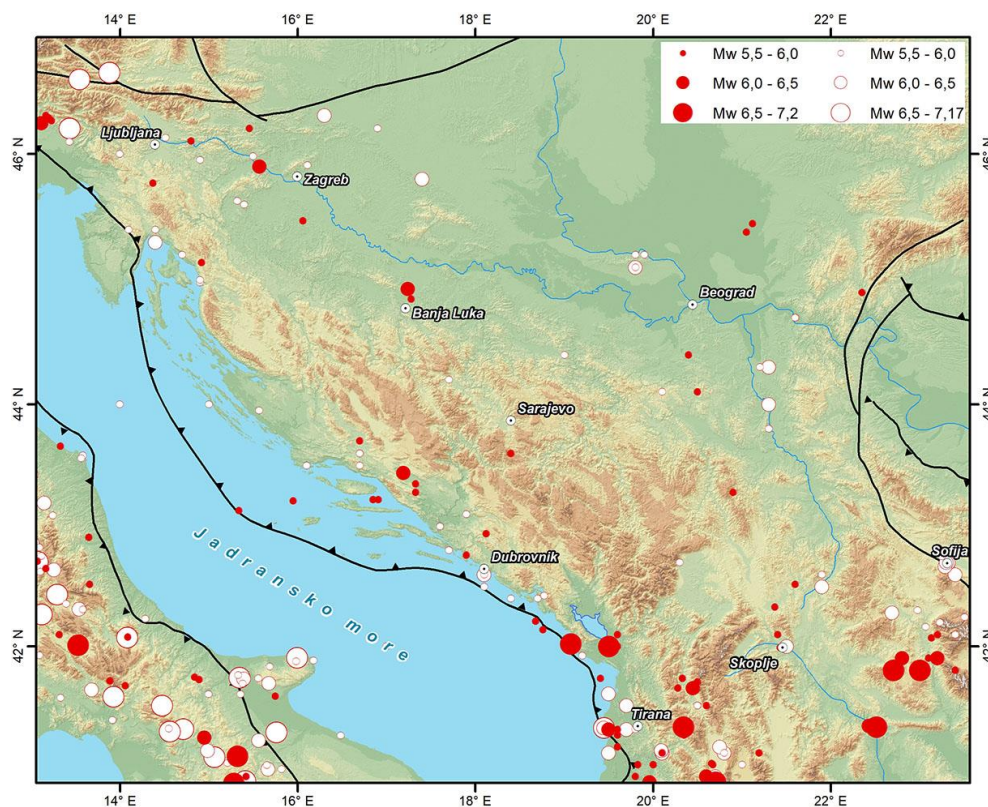
A šta je sa zemljotresima u Srbiji?

Seizmičnost teritorije Srbije opisuje se kao umerena, ali konstantna. Teritorija Srbije nalazi se u području Balkanskog poluostrva, koje je sa svih strana ograničeno tektonski veoma aktivnim zonama. Glavni razlog nastanka zemljotresa na teritoriji naše zemlje je regionalno značajan tektonski proces, koji je predstavljen sudaranjem Jadranske mikroploče i Dinarida. Na graničnom delu ove dve velike tektonske jedinice stvara se velika količina napona, koji se prenosi i u unutrašnjost kontinenta. Zbog toga su zemljotresi u priobalnom području Hrvatske, Crne Gore i Albanije najjači (slika 5).



Slika 5. Seizmičnost severnog dela Balkanskog poluostrva, prikazani su zemljotresi magnitude više od 3.5 koji su se dogodili u istorijsko vreme (1000 – 1899), kao i instrumentalno registrovani zemljotresi (1900 – 2006) (podaci projekta SHARE)

Iako, prema karti na slici 5, deluje kao da je teritorija Srbije veoma seizmična, u poređenju sa okolnim područjima njena seizmičnost je značajno slabija. To se bolje vidi na karti epicentara zemljotresa na slici 6, gde su prikazani samo zemljotresi čija je magnituda M_w veća od 5.5, koja pokazuje da su se u Srbiji dešavali tek pojedinačni zemljotresi viših magnituda.



Slika 6. Karta dogođenih zemljotresa sa moment magnitudom M_w većom od 5.5 za istorijsko (1000 – 1899) i instrumentalno vreme (1900 – 2006) (podaci projekta SHARE)

U centralnoj Srbiji izdvajaju se tri glavna seizmogeno područja: Kopaonik, Kraljevo – Rudnik i Valjevo – Mionica. Van ovog područja izdvaja se i područje okoline Vršca, gde su takođe zabeleženi jači zemljotresi. Osim toga, u istorijskom period zabeleženi su i jači zemljotresi u području Svilajнца. Čitavo ovo područje se, statistički gledano, karakteriše u proseku dešavanjem jednog zemljotresa magnitude veće od 5 na oko 10 – 15 godina.

Najjači instrumentalno zabeležen zemljotres na teritoriji Srbije dogodio se na Kopaoniku, 18. maja 1980. godine, a imao je magnitudu M_w 5.7.

A zašto baš područje centralne Srbije? Iako nemamo mnogo podataka o aktivnim rasedima, zapravo za sada verujemo da smo uspeli da definišemo i parametrizujemo tek dva aktivna raseda (i to oba na teritoriji Kraljeva), geološka građa ovog prostora može da nam da neke pokazatelje i za aktivnu tektoniku. Geološki gledano, čitavo ovo područje nalazi se veoma blizu stare tektonske granice, koja sada predstavlja granicu između Dinaridskog i Karpato-

balkanskog orogena. To područje bi trebalo da se odlikuje postojanjem fundamentalnih raseda, uz koje je razvijeno i mnogo manjih raseda, koji se mogu aktivirati uz pogodan prinos tektonske energije. Koliko ovi stari rasedi imaju uticaja – ne znamo, ali mehanički gledano, logično je da će se kretanje pre vršiti duž već postojećih ruptura, jer je za stvaranje nove rupture potrebno više energije.

Seizmički hazard u Srbiji

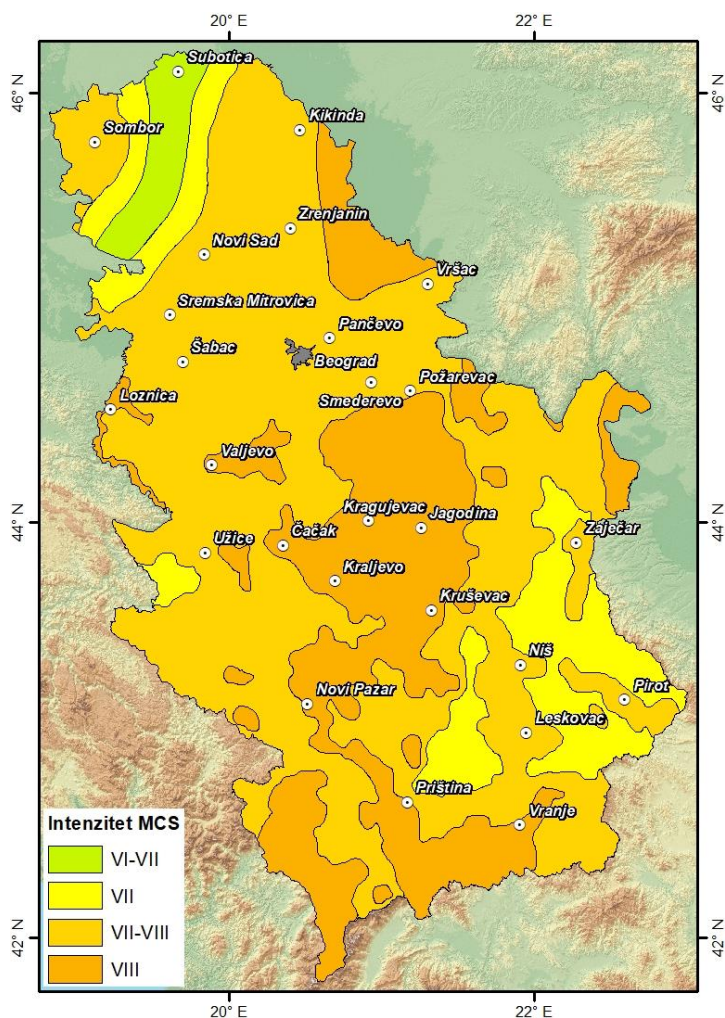
Seizmički hazard predstavlja verovatnoću da će se zemljotres desiti na nekom području u određenom periodu vremena, a da će pri tom biti prevaziđena definisana granica intenziteta pomeranja tla. Seizmički hazard prikazuje se kartama seizmičkog hazarda. Da bi se seizmički hazard pravilno izračunao, potrebno je poznavanje tri osnovna faktora koji na njega utiču: (1) postojeći seizmogeni rasedi i dogođeni zemljotresi u datom području istraživanja; (2) efekti kretanja seizmičkih talasa kroz potpovršinu (model brzina), i (3) bliskopovršinski uslovi tla na lokalitetima od interesa.

Na osnovu podataka kataloga zemljotresa Republičkog seizmološkog zavoda Srbije (<https://seismo.gov.rs/Seizmicnost/Katalog-zemljotresa.pdf>), definisane su seizmotektonske zone i na osnovu njih izračunat seizmički hazard prikazan Kartom seizmičkog hazarda na slici 7.

Na osnovu ove karte može se uočiti da je seizmički hazard najveći u području centralne Srbije, gde su se i tokom istorijskog i tokom instrumentalnog perioda dešavali neki od najjačih zemljotresa u Srbiji. Tu se, pre svega, misli na područje Kopaonika, Kraljeva, Rudnika i Valjeva – Mionice, ali i na područja Svilajнца i Lazarevca. Sve pomenute seizmičke zone sposobne su da generišu zemljotrese magnitude preko 5. Na osnovu Karte seizmičkog hazarda (slika 7) vidi se da je u zadatom periodu od 475 godina u ovim područjima moguće dostići makroseizmičke intenzitete od VIII stepeni, sa verovatnoćom prekoračenja od 10% u 50 godina.

Ipak, kod procene seizmičkog hazarda i čitanja ovakve karte mora se uvek voditi računa i o seizmotektonskim karakteristikama područja za koje se računa seizmički hazard. Uobičajeno je da se seizmički hazard računa na osnovu prethodno definisanih seizmotektonskih zona, što je uglavnom rezultat nedovoljne količine podataka o seizmotektonskim karakteristikama područja istraživanja, pri čemu je najveći problem definisanje aktivnih raseda – njihovog položaja, geometrije i kinematike. Ako se seizmotektonska zona shvati kao područje istih seizmoloških i neotektonskih karakteristika, čija se seizmičnost može opisati jedinstvenom relacijom magnitude i frekvencije događanja zemljotresa, to bi značilo da je verovatnoća za dešavanje zemljotresa određene magnitude podjednaka u bilo kojoj tački seizmotektonske zone. To, ipak, nije tačno, zbog toga što su zemljotresi nedvosmisleno vezani za aktivnost raseda, i tamo gde nema raseda koji su aktivni u recentno vreme ne može biti ni zemljotresa. Zbog toga je važno poznavati položaj aktivnih raseda u proučavanom području. Poznavanje geometrije i kinematike raseda neophodno je zbog izračunavanja maksimalne očekivane magnitude zemljotresa – rasedna površ veće površine i veći iznos pomaka po njoj prouzrokuje veći zemljotres veće magnitude, dok će kinematski tip raseda uticati i na način kretanja seizmičkih talasa koji nastaju tokom dogođenog zemljotresa. Svi ovi podaci su veoma

važni kod proračuna seizmičkog hazarda i tek ako su sve ove činjenice poznate, i ako se poseduje dobar katalog zemljotresa, moguće je pravilno definisanje seizmičkog hazarda, koje će voditi i ka pravilnom proračunu rizika od zemljotresa na pojedinačnim mikrolokacijama.



Slika 7. Karta seizmičkog hazarda Republike Srbije. Hazard je izražen u stepenima makroseizmičkog intenziteta za povratni period od 475 godina, verovatnoća prekoračenja 10% u 50 godina (https://seismo.gov.rs/Seizmicnost/SH_2018_Intenzitet_cyr_475_WGS84.pdf)

Na kraju, šta nam preostaje u vezi sa zemljotresima u Srbiji? S jedne strane, nema previše razloga za brigu, jer nas ne može pogoditi scenario sa zemljotresom magnitude veće od 6, koja bi za naše područje bila katastrofalna, imajući u vidu kako se grade objekti. S druge strane, ne treba se ni potpuno opustiti, pogotovo ako se ima u vidu da se poslednji jači zemljotres dogodio pre više od 10 godina (3. novembra 2010. godine u Kraljevu), kao i da skorašnja seizmička aktivnost ukazuje na to da je seizmička energija u Šumadiji generalno na višem nivou, te da se očekuje dešavanje jačeg zemljotresa u širem području Šumadije.



Autor teksta:
dr Ana Mladenović, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet
oblast ekspertize: strukturna geologija, tektonika,
seizmotektonika