

Procjena seizmičkog hazarda na području Hrvatske primjenom programskog paketa OHAZ

Matušić, Nikolina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:071699>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Nikolina Matušić

PROCJENA SEIZMIČKOG HAZARDA NA
PODRUČJU HRVATSKE PRIMJENOM
PROGRAMSKOG PAKETA OHAZ

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Nikolina Matušić

Diplomski rad

**PROCJENA SEIZMIČKOG HAZARDA NA
PODRUČJU HRVATSKE PRIMJENOM
PROGRAMSKOG PAKETA OHAZ**

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić na ideji i savjetima, te neizmjernom strpljenju i susretljivosti tijekom pisanja ovog rada. Hvala i mr. sc. Ines Ivančević na grafičkom prikazu rezultata.

Sažetak

Procjena seizmičkog hazarda na području Hrvatske primjenom programskog paketa OHAZ

Nikolina Matušić

U ovom radu provedena je procjena seizmičkog hazarda na širem prostoru Hrvatske. Proračunu se pristupilo probabilističkom metodom i korištenjem programskog paketa za proračun hazarda OHAZ. Softverom OHAZ moguće je uz dobro definirane ulazne parametre izračunati sve faze proračuna hazarda. Za potrebe proračuna preuzeti su i pripremljeni katalog glavnih potresa, seizmotektonika područja i atenuacijske relacije prikladne za istraživano područje. Procjena sadrži sve potrebne elemente proračuna hazarda: seizmičku aktivnost, godišnje stope premašivanja niza referentnih vrijednosti površinskog gibanja, te vršne akceleracije tla pri povratnim periodima od 95, 475 i 1000 godina, tj. vjerojatnosti premašivanja površinskog gibanja od 10% u razdoblju od 10, 50 i 100 godina. Dobivena prostorna raspodjela PGA odgovara raspodjeli jakih potresa ($M > 4$) na istraživanom području, a vrijednosti su unutar očekivanih. Rezultati PGA usporedivi su s rezultatima dobivenim u projektu BSHAP u kojem je analiziran seizmički hazard na prostoru zapadnog Balkana: područja pojačanog potresnog djelovanja se podudaraju, a vrijednosti su istog reda veličine, iako su u ovom radu nešto veće od onih dobivenih projektom BSHAP.

Ključne riječi: seizmički hazard, Hrvatska, seizmička aktivnost, godišnja stopa premašivanja

Abstract

Seismic hazard assessment for the Croatian territory using OHAZ software

Nikolina Matušić

A probabilistic seismic hazard assessment was carried out for the territory of Croatia and parts of neighbouring countries using OHAZ software. Given well-defined input parameters, all stages of the hazard assessment can be calculated using OHAZ software. For that purpose, a catalogue of main events was specified, along with the seismotectonic setting of the area and the attenuation relationships best suited for the observed area. The analysis contains all the necessary steps of the hazard assessment: seismic activity, annual rate of exceedance for a range of reference ground motion levels and peak ground acceleration for the return periods of 95, 475 and 1000 years, i.e. the 10% probability of exceedance in 10, 50 and 100 years. The obtained spatial PGA distribution corresponds well to the distribution of strong earthquakes ($M > 4$) in the observed area, and the output values fall within the expected range. The results of the assessment are comparable to the PGA obtained in the BSHAP project, which analysed seismic hazard in the Western Balkan Region - the values, although somewhat higher here than in the BSHAP project, are of the same order of magnitude, and the areas of higher seismic activity match as well.

Keywords: seismic hazard, Croatia, seismic activity, annual exceedance rate

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Teorijska pozadina	3
2.1	Osnovni koraci metode PSHA	3
2.2	Ulazni parametri i relacije u PSHA	8
2.2.1	Seizmogene zone	8
2.2.2	Relacije učestalosti	9
2.2.3	Donja i gornja granična magnituda	10
2.2.4	Pomak tla	12
2.2.5	Račun seizmičkog hazarda s pretpostavkom nepouzdanosti modela	13
2.3	Prednosti i nedostaci metode PSHA	14
3	Program OHAZ i analiza podataka	16
3.1	O programu OHAZ	16
3.2	Korišteni podaci	23
4	Rezultati i diskusija	29
5	Zaključak	42
6	Literatura	43

1 Uvod

Potresi su nepredvidive pojave koje mogu izazvati razorne posljedice na površini Zemlje. Kako bi se izbjegla šteta koja može nastati od jakog potresa, potrebno je poznavati ugroženost područja, odnosno seizmički rizik, i u skladu s njim definirati norme i uvjete gradnje građevina, infrastrukture, tvornica, elektrana. Da bi se odredio rizik, tj. vjerojatnost pojave nepovoljnih posljedica izazvanih potresom, potrebno je na istraživanom području poznavati vjerojatnost da bi se razoran potres mogao i dogoditi. Vjerojatnost da će se na istraživanoj lokaciji u nekom vremenskom periodu dogoditi potres koji će izazvati gibanje tla veće od neke unaprijed definirane referentne vrijednosti naziva se seizmičkim hazardom i od izuzetne je važnosti za inženjere koji se bave protupotresnom gradnjom, a i za svakoga tko živi na potresima ugroženom području.

Kako bi se na nekom području odredio seizmički hazard razvijeno je niz metoda analize podataka. Proračun seizmičkog hazarda općenito podrazumijeva dobro poznavanje karakteristika istraživanog područja: potreban je zapis svih potresa koji su se dogodili na istraživanom području i šire, poznavanje geoloških karakteristika područja, odnosno položaja i smjera aktivnih rasjeda, potrebno je definirati matematičke relacije koje prikladno opisuju pojavu potresa i njihove karakteristike na razmatranom području, te niz drugih važnih parametara. Danas se najčešće primjenjuje probabilistički pristup procjeni hazarda koji se sastoji od niza koraka u kojima se potresi analiziraju s obzirom na njihovu jačinu i efekt, a dobivene vrijednosti se dodatno obrađuju i normaliziraju, što rezultira procjenom vjerojatnosti premašivanja neke vrijednosti površinskog gibanja na istraživanom području u traženom vremenu.

Za izračun pojedinih koraka analize najprikladnije je koristiti računalne programe koji će uz dobro definirane ulazne podatke dati precizne rezultate. Jedan od takvih softvera je program OHAZ (Zabukovec i sur., 2007) koji je razvijen suradnjom seizmologa s područja jugoistoka Europe za proračun seizmičkog hazarda prvenstveno na ovim područjima. Kako bi se uz pomoć OHAZ-a mogao izračunati hazard, potrebno je pripremiti niz ulaznih podataka: katalog glavnih potresa, seizmotektonski opis područja, atenuacijske relacije, tj. matematičke izraze koji daju prikladnu procjenu razine gibanja tla prouzročenog potresom, te mnoge druge parametre koji opisuju razmatrano područje. OHAZ kao izlazne vrijednosti uz hazard daje i sve korake proračuna: seizmičku aktivnost područja, godišnje stope premašivanja niza vrijednosti površinskog gibanja, te naposljetku i samu vjerojatnost premašivanja zadanog parametra površinskog gibanja.

U ovom radu provest će se probabilistička procjena seizmičkog hazarda pomoću programa OHAZ na području Hrvatske i bliže okolice, u svrhu čega su pripremljeni i proučeni svi potrebni ulazni podatci. Cilj ovog rada je pokazati da se uz dobro definirane karakteristike nekog područja korištenjem softvera OHAZ može dobiti dobra procjena potresne opasnosti na nekom području. Pritom će se voditi računa o razlozima odabira pojedinih parametara, o karakteristikama podataka i samog softvera i razumijevanju svih koraka proračuna, bez čega bi analiza rezultata bila nepotpuna.

2 Teorijski uvod

Seizmički hazard, tj. potresna opasnost, predstavlja vjerojatnost pojave potresa koji može uzrokovati štetu (Reiter, 1990). Izražava se kao učestalost premašivanja neke veličine, obično nekog parametra površinskog gibanja poput akceleracije, u nekom vremenu i na nekom području. Procjeni hazarda može se pristupiti na dva načina: determinističkom metodom DSHA (eng. *deterministic seismic hazard assessment*) i probabilističkom metodom PSHA (eng. *probabilistic seismic hazard assessment*).

U determinističkom pristupu koriste se diskretni, jednoznačni događaji i modeli kako bi se proizveo relativno jednostavan opis potresne opasnosti na nekoj lokaciji. Ovakva analiza zahtijeva definiranje samo nekoliko veličina, a to su: izvor potresa (primjerice rasjed), kontrolni potres neke jačine (određene primjerice najvećom očekivanom magnitudom) i način određivanja hazarda, tj. neki parametar površinskog gibanja (primjerice vršna akceleracija) na određenoj udaljenosti od lokacije za koju se hazard računa.

U probabilističkom pristupu, s druge strane, modeli su kontinuirani, a račun obuhvaća sve potrese za koje se smatra da mogu imati utjecaja na lokaciju koja se analizira. Pritom se razmatra vjerojatnost pojave potresa različitih magnituda, a u obzir se može uzeti i više različitih modela i njihove nepouzdanosti. Takva analiza rezultira procjenom vjerojatnosti premašivanja neke vrijednosti zadanog parametra površinskog gibanja na istraživanoj lokaciji u traženom vremenu, što omogućava uvođenje seizmičkog hazarda u procjenu seizmičkog rizika, odnosno vjerojatnosti pojave nepovoljnih posljedica na istraživanoj lokaciji.

Budući da se u ovom radu primjenjuje vjerojatnosni (probabilistički) pristup procjeni potresne opasnosti, slijedi detaljniji opis postupka probabilističke analize seizmičkog hazarda.

2.1 Osnovni koraci metode PSHA

Metodologiju koja se koristi u probabilističkoj analizi seizmičkog hazarda prvi je definirao Cornell (1968). Osnovni koraci probabilističke analize (Reiter, 1990), u načelu analogni koracima determinističke analize, prikazani su na slici 1.

Prvi korak analize je definiranje izvora potresa, odnosno seizmogenih zona. Mjesta nastanka potresa mogu biti raznolika: od jasno definiranih rasjeda, preko tek grubo opisanih geoloških struktura, sve do hipotetskih velikih seizmotektonskih područja. Prema

konfiguraciji izvori se dijele na točkaste, linijske, plošne i volumne. U probabilističkoj analizi sve izvore obilježava uniformni potresni potencijal, tj. pretpostavka da je mogućnost pojave potresa određene jakosti podjednaka na cijelom izvoru.

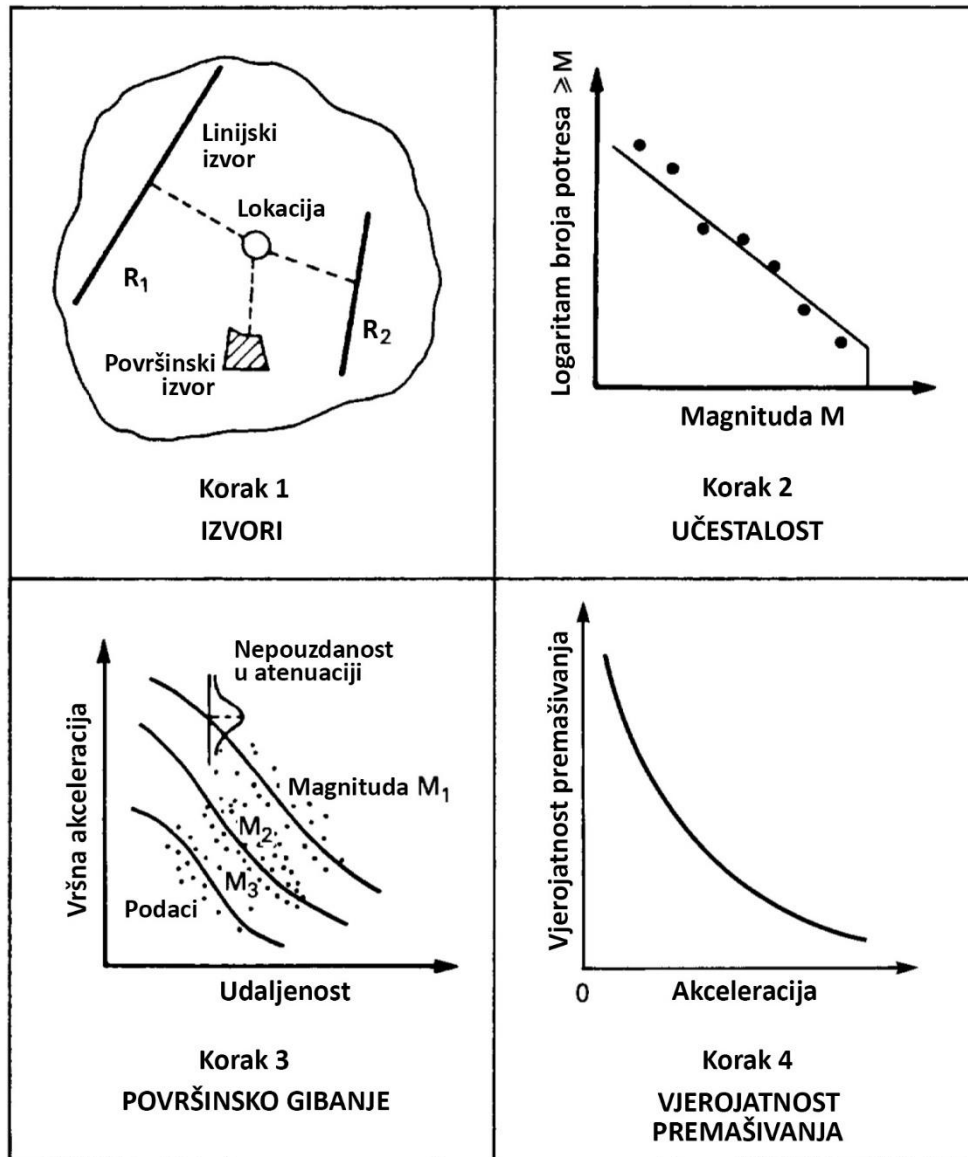
Drugi korak je definiranje *relacije učestalosti pojavljivanja potresa* (eng. *recurrence relationship*), odnosno karakteristike seizmičnosti izvora. Relacija učestalosti predstavlja mogućnost pojave potresa neke jakosti bilo gdje u izvoru potresa tijekom određenog vremenskog perioda, obično jedne godine. Svakom izvoru pridjeljuje se potres maksimalne jačine (magnituda ili intenziteta) koji predstavlja najjači potres koji se za taj izvor uzima u obzir, odnosno gornji limit magnituda (ili intenziteta) koji ulazi u analizu. Kao relacija učestalosti za pojedini izvor obično se pretpostavlja Gutenberg-Richterova relacija, koja je grafički prikazana pravcem na slici 1 (korak 2), a glasi:

$$\log N = A - BM, \quad (2.1)$$

pri čemu je N kumulativni broj potresa magnituda veće ili jednake magnitudi M za koji se očekuje da će se dogoditi u nekom vremenskom periodu, A je logaritam broja potresa magnituda veće ili jednake nuli koji se očekuje u tom istom vremenskom periodu, a B je nagib krivulje koji prikazuje odnos između broja velikih i malih potresa. U praksi se često postavlja i donji limit magnituda veći od nule. Ponekad je relaciju učestalosti prikladno prikazati u nekumulativnoj, inkrementalnoj formi, u kojem slučaju je N jednak broju potresa u zadanom pojasu magnituda oko magnituda M .

Sljedeći korak je određivanje efekta potresa na istraživanoj lokaciji, što se obično izražava nekom vrstom površinskog gibanja. Za to služi model predviđanja površinskog gibanja, PGM (eng. *predictive ground motion*) model, odnosno atenuacijska relacija (eng. *attenuation relationship*) koja daje procjenu razine gibanja tla prouzročenog potresom neke magnituda, na različitim udaljenostima od izvora potresa, a pomoću krivulje prilagođene opaženim podacima. Budući da se razmatra širok raspon jačina potresa, za analizu je potreban i niz atenuacijskih krivulja od kojih svaka povezuje zadani parametar površinskog gibanja (primjerice vršnu akceleraciju) i udaljenost od mjesta nastanka potresa za pojedinu magnitudu potresa. Atenuacijske krivulje shematski su prikazane na slici 1 zajedno s nepouzdanosću prilagodbe krivulje danom setu podataka.

Završni korak analize je određivanje potresne opasnosti na zadanoj lokaciji. Kako bi se odredio hazard, svi efekti potresa različitih jačina koji su se dogodili na različitim mjestima u različitim izvorima i uz različite vjerojatnosti događanja integriraju se u jednu krivulju koja pokazuje vjerojatnost premašivanja različitih razina zadanog parametra



Slika 1. Osnovni koraci probabilističke analize seizmičkog hazarda (preuzeto i prilagođeno iz Reiter, 1990).

površinskog gibanja, na istraživanoj lokaciji u određenom vremenskom periodu. Ovo se shematski može zapisati kao:

$$E(z) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \int_{m_o}^{m_u} \int_{r=0}^{r=\infty} f_i(m) f_i(r) P(Z > z|m, r) dr dm, \quad (2.2)$$

pri čemu je $E(z)$ očekivani broj premašivanja razine površinskog gibanja z tijekom određenog vremenskog perioda t , α_i srednja stopa pojavljivanja potresa magnitude između donjeg i gornjeg limita (m_o i m_u) u i -tom izvoru, $f_i(m)$ je razdioba gustoće vjerojatnosti pojavljivanja različitih magnituda u i -tom izvoru (tj. relacija učestalosti), $f_i(r)$ razdioba

gustoće vjerojatnosti različitih epicentralnih ili žarišnih udaljenosti između mjesta nastanka potresa u i -tom izvoru i lokacije za koju se računa hazard, a $P(Z > z|m, r)$ je vjerojatnost da će potres magnitude m i epicentralne (ili žarišne) udaljenosti r premašiti razinu gibanja tla z .

Pri provođenju probabilističke analize seizmičkog hazarda obično se pretpostavlja da potresi nemaju 'memoriju', odnosno da se potres pojavljuje neovisno o bilo kojem drugom potresu. Ovakvo ponašanje pokazuju samo glavni potresi (eng. *main shock*), pa se analiza ne može provesti na setu podataka koji sadrži i one potrese koji prethode glavnom (eng. *foreshock*) i naknadne potrese (eng. *aftershock*). Posebnu pažnju zahtijevaju slučajevi kada je za neki izvor moguće definirati vremenski i prostorni odnos između pojedinih potresa.

Prepostavka da potresi nemaju 'memoriju' naziva se *Poissonovim modelom*. Poissonov model se često koristi u opisivanju rijetkih događaja, a definiran je Poissonovom razdiobom (Stein i Wyssession, 2003). Pretpostavljamo dakle da je vjerojatnost pojavljivanja n glavnih potresa u nekom izvoru tijekom vremena t :

$$P(n, t, \tau) = (t/\tau)^n e^{-t/\tau} / n!, \quad (2.3)$$

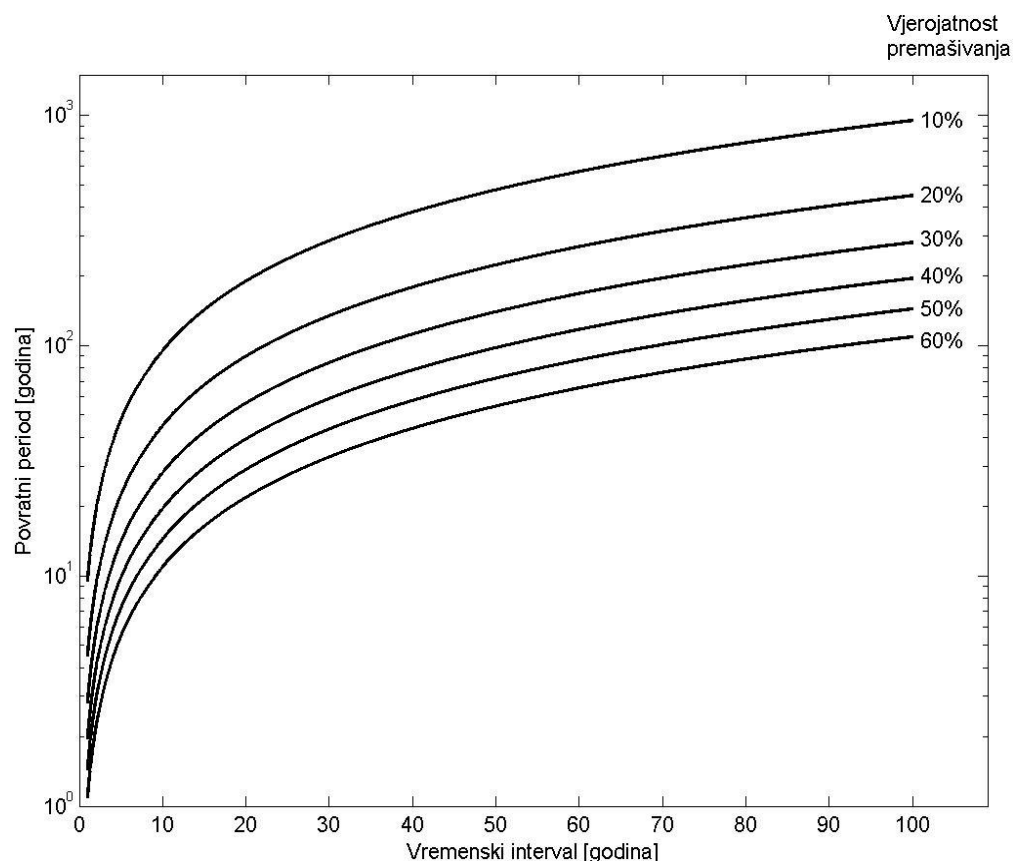
pri čemu je $1/\tau = \lambda$ učestalost događaja, tj. broj očekivanih potresa u godini prema Gutenberg-Richterovoj razdiobi učestalosti, a τ srednje vrijeme ponavljanja potresa, odnosno *povratni period*. Vjerojatnost da će se dogoditi jedan ili više potresa, tj. kumulativna razdioba potresa, može se dobiti pomoću vjerojatnosti da se neće dogoditi niti jedan potres $P(0, t, \tau)$:

$$P(n \geq 1, t, \tau) = 1 - P(0, t, \tau) = 1 - e^{-t/\tau}. \quad (2.4)$$

Budući da u ovakvom pristupu nema potresa koji bi imali prioritet u bilo kojoj godini, povratni period nekog potresa (izražen u godinama) koji izaziva premašivanje određene razine površinskog gibanja može se definirati kao recipročna vrijednost godišnje stope učestalosti $\tau = 1/\lambda$. Ako je cilj analize seizmičkog hazarda procijeniti vjerojatnost premašivanja neke razine površinskog gibanja u konačnom vremenskom intervalu T , može se pokazati da je povratni period koji je ekvivalentan toj vjerojatnosti jednak:

$$\tau = -T / \ln(1 - P(Z > z)), \quad (2.5)$$

gdje je $P(Z > z)$ tražena vjerojatnost premašivanja u vremenu T . Odnos između povratnog perioda τ , poredbenog vremenskog intervala T i vjerojatnosti premašivanja neke razine površinskog gibanja $P(Z > z)$ prikazan je na slici 2. Na slici se primjerice može opaziti da je uz najčešće primjenjivanu vjerojatnost premašivanja nekog površinskog gibanja od 10%



Slika 2. Odnos između povratnog perioda, poredbenog intervala i vjerojatnosti premašivanja površinskog gibanja tijekom zadanog intervala za Poissonov model (preuzeto i prilagođeno iz Reiter, 1990).

za interval od 10 godina povratni period jednak 95 godina, za interval od 50 godina 475 godina, a za 100 godina povratni period je 1000 godina. Za povratne periode koji su mnogo veći od vremenskog intervala od interesa, vjerojatnost $P(Z > z)$ je približno jednaka vremenskom intervalu podijeljenom povratnim periodom.

U analizi seizmičkog hazarda posebno je potrebno obratiti pozornost na nepouzdanost ulaznih parametara i modela. Raspodjela nepouzdanosti za atenuacijski model sugerira da bez obzira na to koliko su dobro poznati magnituda i udaljenost nekog potresa, uvijek će postojati određena nesigurnost u predviđanju površinskog gibanja. Uzrok ove nesigurnosti je u tome da se svojstva izvora potresa i put koji valovi prevale mogu definirati samo u ograničenoj mjeri, pa ih je moguće opisati samo uz uvažavanje nasumičnih varijacija. Probabilistički proračuni hazarda pretpostavljaju da se distribucije *nasumičnih nepouzdanosti* mogu definirati i inkorporirati u krivulje hazarda, te tako pridonijeti cjelokupnoj procjeni vjerojatnosti premašivanja površinskog gibanja.

Osim nasumične nepouzdanosti, postoji i *nepouzdanost modela*, odnosno *nepouzdanost sustava*, koja se može podijeliti na znanstvenu nepouzdanost, tj. nesigurnost u razumijevanju pojava, i informacijsku nepouzdanost, odnosno nepouzdanost uzrokovanu nepotpunim podacima o fizičkim aspektima pojava (Electric Power Research Institute, 1986). Kako bi se u račun hazarda uvela nepouzdanost sistema, potrebno je u analizu uključiti niz različitih scenarija i modela za prva tri ranije spomenuta koraka analize, što bi rezultiralo u nizu diskretnih krivulja hazarda. Dobiven rezultat pojednostavljuje se i obično se prikazuje kao jedna krivulja koja predstavlja centralnu vrijednost ili kao set krivulja koje opisuju centralnu vrijednost i gornji i donji limit.

Centralna vrijednost seizmičkog hazarda može biti srednjak ili medijan vjerojatnosti premašivanja neke razine površinskog gibanja. Srednjak vjerojatnosti je prosječna vrijednost, a medijan pedeseti percentil dobiven iz cijelog seta krivulja hazarda. Nepouzdanost u procjeni seizmičkog hazarda prati logaritamsko-normalnu raspodjelu, odnosno logaritmi vrijednosti hazarda su simetrično, tj. normalno raspodijeljeni oko neke centralne vrijednosti. Srednjak hazarda može dakle biti bitno drukčiji od medijana. Na srednjak hazarda jako utječu vrlo konzervativni ili ekstremni modeli, pa vrijednosti fluktuiraju ne u ovisnosti o promjeni većine modela, nego zbog ekstremnih slučajeva. Medijan, s druge strane, nije osjetljiv ni na jedan specifičan model, već je relativno stabilan, ali ne pruža nikakav uvid u širinu nepouzdanosti vezanu uz procjenu hazarda.

2.2 Ulazni parametri i relacije u PSHA

2.2.1 Seizmogene zone

Kao što je već ranije spomenuto, u analizi seizmičkog hazarda najprije je potrebno definirati seizmogene izvore. Za potrebe probabilističke analize seizmogene zona, tj. zona izvora potresa definira se kao takva prostorna konfiguracija (točka, linija, površina ili volumen) u kojoj se potresi pojavljuju s istom učestalosti s obzirom na jačinu, odnosno magnitudu, a bez obzira na stvarno mjesto nastanka. Vjerojatnost pojave potresa u nekom izvoru računa se dakle kao srednjak seizmičnosti cijele zone. Definicija seizmičkih izvora zasniva se na interpretaciji geoloških, geofizičkih i seizmoloških podataka. Razina detalja koja je pritom ostvariva ovisi o kvaliteti dostupnih podataka, mogućnostima sustava kojima se analiziraju ti podatci i o potrebama same analize hazarda. U računu hazarda može se iskoristiti i više modela seizmogenih zona ako je to potrebno za detaljniju analizu systemske nepouzdanosti.

2.2.2 Relacije učestalosti

Relacije učestalosti uvelike ovise o samim podacima, pa su karakteristike baza podataka, a posebno uniformnost, vrlo važni za račun. Baze podataka, tj. katalozi potresa pomoću kojih se definiraju relacije učestalosti sastoje se od povijesno i instrumentalno zabilježenih potresa. Jačina potresa može se zabilježiti na više načina, pa je razumno očekivati da će katalozi potresa sadržavati i različite zapise jačine, tj. intenzitet i različite skale magnituda. Kako bi se postigla uniformnost kataloga u pogledu jačine potresa, potrebno je provesti konverzije pojedinih veličina pomoću relacija konverzije koje su u načelu svojstvene pojedinom području. Pritom se u obzir može uzeti i nepouzdanost jednadžbi konverzije.

Drugi problem vezan uz katalog potresa je uklanjanje onih potresa koji ovise o glavnom potresu, odnosno potresa koji prethode glavnom i naknadnih potresa. Iako potresi koji prethode glavnom mogu biti važni za uvjetno predviđanje nekih budućih potresa, a naknadni potresi za definiciju geometrije izvora i drugih karakteristika glavnih potresa, ti potresi nisu prikladni u analizi hazarda. Zavisni potresi mogu se iz kataloga ukloniti na više načina, primjerice pomoću ručnog pregledavanja i uklanjanja iz baze podataka ili pomoću prikladnih računalnih programa.

Vjerojatno najvažniji problem vezan uz katalog potresa je problem *potpunosti kataloga*. Potpunost se može definirati kao mjera do koje su svi potresi iz određenog raspona magnituda i vremenskog perioda zabilježeni u katalogu potresa. Za instrumentalne zapise odlučujući faktor je opažачka sposobnost, a za povijesne podatke gustoća naseljenosti i vođenje evidencije. Ako se ne tretira ispravno, nepotpunost kataloga može uzrokovati izobličenje krivulje učestalosti.

Postoji više načina na koji se može tretirati problem potpunosti, a najčešći je empirijska metoda koju je predložio Stepp (1972). Ideja metode je pronaći vremenski raspon u kojem su nastali potresi određene magnitude koji se koriste u definiranju relacije učestalosti koji bi bio dovoljno kratak da isključi vrijeme u kojem evidencija nije potpuna, a istovremeno i dovoljno dug da se omogućí uspostava stabilne stope pojavljivanja potresa. Budući da se statistički procijenjene standardne devijacije stabilnog seta podataka smanjuju proporcionalno s povećanjem seta podataka, metoda Stepp (1972) koristi činjenicu da se standardna devijacija stope pojavljivanja potresa određene magnitude smanjuje s povećanjem vremenskog perioda tijekom kojeg su ti potresi bilježeni. Tako nađen maksimalni vremenski period bilježenja potresa određene magnitude definira

maksimalno vrijeme za koje je katalog potpun za tu magnitudu. Potresi zabilježeni prije tog perioda ne uzimaju se u obzir pri određivanju srednje stope pojavljivanja potresa.

Jednom kad se dobije katalog koji koristi konzistentne procjene magnituda potresa, iz kojeg su izdvojeni potresi koji prethode glavnom i naknadani potresi i koji je kompletan za različite raspone magnituda, može se odrediti relacija učestalosti. Ta je relacija obično Gutenberg-Richterova polulogaritamska jednadžba (2.1). Parametar A iz jednadžbe (2.1) predstavlja prosječni broj potresa magnitude veće ili jednake nuli. Budući da katalog potresa praktički ne može biti kompletan za magnitude bliske nuli, prikladnije je parametar A smatrati *stopom seizmičke aktivnosti* čija veličina opisuje cjelokupnu stopu pojavljivanja potresa. Parametar B , tj. nagib pravca regresije, opisuje odnos velikih i malih potresa. Mala vrijednost parametra B (mali nagib pravca) sugerira veći udio velikih potresa nego što bi bio slučaj za veliku vrijednost B (veliki nagib pravca). Parametar A znatno varira od područja do područja ovisno o seizmičnosti, dok je parametar B općenito približno jednak vrijednosti 1.0, iako i on, naravno, ponešto varira u ovisnosti o području.

Parametri A i B mogu se izračunati pomoću metode najmanjih kvadrata, no može se primijeniti i metoda *najveće vjerodostojnosti* (eng. *maximum likelihood*; Aki, 1965). Metoda najmanjih kvadrata tretira svaki pojas magnituda podjednako, bez obzira na broj opaženih potresa ili na to postoje li praznine u podacima. Metoda najveće vjerodostojnosti tretira svaki potres podjednako, i to tako da se izabere takva vrijednost parametra B da maksimizira produkt vjerojatnosti opažanja svakog zapisanog potresa. U metodi najveće vjerodostojnosti procijenjene vrijednosti parametra B manje ovise o rijetkim potresima koji su sadržani u višim pojasima magnituda. Osim ovih postoji i treća metoda određivanja vrijednosti parametra B i ostalih parametara koji opisuju seizmičnost, a to je *teorija ekstremnih vrijednosti* (eng. *extreme value theory*; Gumbel, 1959). Ova metoda ovisi samo o najvećem potresu u nekoj godini ili nekom drugom periodu, pa nepotpunost kataloga za male magnitude ne predstavlja problem. Budući da u obzir uzima samo najveće potrese, producira znatne pogreške u procjenama, pa se ranije opisane metode smatraju primjerenijima za procjenu parametara A i B .

2.2.3 Donja i gornja granična magnituda

Za izračun seizmičkog hazarda prema jednadžbi (2.2) potrebno je odrediti gornju i donju graničnu magnitudu. Definicija ovih veličina može imati velik utjecaj na izračunat seizmički hazard. Donjom granicom, tj. minimalnom magnitudom naziva se granična

jačina potresa ispod koje nema inženjerskog interesa ili nema dovoljno podataka. Gornja granica, tj. maksimalna magnituda označava najjači potres koji se uzima u obzir u nekoj seizmogenoj zoni.

Vjerojatnost da će potresi malih magnituda izazvati znatno površinsko gibanje je relativno mala, pa se za minimalnu magnitudu obično odredi neka unaprijed dogovorena najmanja vrijednost za koju se pretpostavlja da može imati negativan utjecaj na građevine na istraživanom području. Za razliku od minimalne magnitute, maksimalna magnituda uvelike ovisi o području za koje se provodi analiza, od velike je važnosti za inženjerske zahvate i često se pronalazi ekstrapolacijom iz relativno oskudnih podataka, pa ju je i mnogo zahtjevnije odrediti. Kao gornja granična magnituda odabire se magnituda najvećeg mogućeg potresa koji se može dogoditi u vremenskom intervalu od interesa, a s obzirom na seizmički režim odgovarajuće seizmogene zone. Maksimalni povijesni potres, tj. najjači potres vezan za neku seizmogenu zonu za koji postoji povijesni ili instrumentalni dokaz, obično određuje donju granicu maksimalnih mogućih potresa.

Problem odabira gornje granice magnitute vezan je i uz primjerenost jednostavne linearne regresije u jednadžbi (2.1) za opis potresa velikih magnituda jer je vrlo vjerojatno da će u području viših magnituda biti relativno malo podataka, a jednadžba (2.1) podjednako tretira i male i velike magnitute.

Postojanje gornjeg limita magnitute znači da su svi potresi magnitute manje ili jednake maksimalnoj magnitudi, pa je stoga vjerojatnost da će magnituda potresa biti iz tog raspona jednaka 1.0 (Cornell i Vanmarcke, 1969). Implementiranjem ovog zaključka u Gutenberg-Richterovu relaciju (2.1) dobiva se *ograničena eksponencijalna relacija učestalosti* (eng. *truncated exponential recurrence relationship*):

$$N(m) = N(m_0)Km_u(e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_u-m_0)}), \quad (2.6)$$

pri čemu je

$$Km_u = (1 - e^{-\beta(m_u-m_0)})^{-1}, \quad \text{za } m_0 \leq m \leq m_u.$$

Ovdje je $N(m)$ broj potresa magnitute m ili veće, m_0 i m_u su donja i gornja granična magnituda, $N(m_0)$ je broj potresa magnitute veće ili jednake donjoj graničnoj magnitudi m_0 , a β je parametar ekvivalentan parametru B iz jednadžbe (2.1), ali definiran pomoću prirodnog logaritma, a ne logaritma s bazom 10, tj. $\beta = B \ln 10$. Relacija se asimptotski približava gornjoj granici magnitute, tako da je za $m = m_u$, $N(m) = 0$. Berrill i Davis (1980) su pokazali da je ograničena relacija učestalosti ona distribucija koja najbolje

odgovara principu maksimalne entropije, odnosno nepouzdanosti, i najmanje je pristrana u slučaju nedostatka informacija kad je potrebno pretpostaviti gornju granicu magnitude.

Analize seizmičkog hazarda često se provode s pretpostavkom konstantne seizmičnosti u seizmogenim zonama koje se proučavaju, pa povećanje gornje granične magnitude rezultira u povećanju hazarda. Također, budući da seizmički hazard na nekoj lokaciji ovisi o doprinosu više izvora, povećanje gornje granične magnitude na jednom izvoru povećat će cjelokupni seizmički hazard onoliko koliko taj izvor doprinosi ukupnom hazardu.

2.2.4 Pomak tla

Utjecaj odabira modela površinskog gibanja, odnosno atenuacijske relacije, na analizu seizmičkog hazarda je značajan, ali zbog same prirode probabilističke analize, njezine sveobuhvatnosti, taj se utjecaj može ocijeniti samo nakon razmatranja rezultata analize i pripadnih nepouzdanosti.

Nasumična nepouzdanost ranije je definirana kao inherentna nesigurnost u procjeni razine površinskog gibanja s obzirom na pojavu potresa određene jakosti i na određenoj udaljenosti. Za nasumičnu nepouzdanost može se pretpostaviti da prati logaritamsko-normalnu raspodjelu čiju širinu opisuje *standardna devijacija* σ . Ako je model površinskog gibanja dobiven pomoću regresijske relacije, σ je jednak *standardnoj pogreški procjene* s , tj. parametru koji opisuje raspršenost podataka oko regresijske krivulje. Logično je i relativno jednostavno objediniti nasumičnu nepouzdanost i vjerojatnost pojave potresa u sveukupnu vjerojatnost premašivanja neke razine gibanja tla. Ako se u analizu ne uključi nasumična nepouzdanost, to može izazvati znatno smanjenje proračunatog hazarda.

Ako je za analizu posebno bitno razmatranje nepouzdanosti, sistemska nepouzdanost može se uključiti u analizu kombiniranjem više modela, tj. definiranjem primjerice više konfiguracija seizmogenih zona. Za takvu detaljnu analizu bitna je i veličina nasumične nepouzdanosti. Općenito za aleatornu nepouzdanost vrijedi da je nije moguće potpuno ukloniti, ali budući da nepouzdanost zapravo sadrži i značajke izvora i puta rasprostiranja valova, uz dodatne podatke i istraživanja tih značajki nepouzdanost bi se mogla donekle smanjiti. Bez dodatnog razumijevanja navedenih svojstava, procjene aleatorne nepouzdanosti sadrže nedefiniranu kombinaciju prave nasumičnosti i nedostatka znanja.

Drugi važni aspekt u analizi površinskog gibanja u probabilističkom računu je vjerojatnost pojave vrlo velikog površinskog gibanja. Očito je da mora postojati fizički limit jačine gibanja tla koju potres može izazvati. Budući da se logaritamsko-normalna raspodjela nepouzdanosti u teoriji proteže u beskonačnost, a karakteristika probabilističke analize je da u obzir uzima i gibanja s vrlo malom vjerojatnošću, potrebno je razmotriti vrijednosti i način na koji se može ograničiti raspon gibanja tla. Jedan od načina, čest u inženjerskoj primjeni, je pomoću definiranja *efektivne akceleracije*, odnosno one vršne akceleracije koja rezultira u maksimalnom površinskom gibanju pri frekvencijama bitnim za građevine, i to za svaki model seizmogenih zona. Gibanje tla izračunato za pojedini model u tom slučaju ne može premašivati efektivnu akceleraciju vezanu uz taj model (Philadelphia Electric Company, 1983). Drugi način uvođenja gornje granice akceleracije je limitiranjem broja standardnih devijacija korištenih u računu površinskog gibanja jer je prava vjerojatnost pojave gibanja tla pri 2σ , 3σ ili više zapravo vrlo mala.

Budući da je pitanje ograničenja površinskog gibanja često vezano uz inženjersku primjenu analize, u tu je svrhu površinsko gibanje pogodnije prikazati pomoću *uniformnog spektra odziva* (eng. *uniform hazard response spectrum*). Kako bi se dobio uniformni spektar odziva potrebno je provesti probabilističku analizu za neki parametar površinskog gibanja i to pri različitim periodima, zatim za neku izabranu stopu premašivanja površinskog gibanja odrediti za svaki od perioda pri kojima je proveden račun odgovarajući iznos parametra pomaka tla, te prikazati tako određene vrijednosti u ovisnosti o periodima za koje su izračunate. Za analizu hazarda u inženjerske svrhe važni su i utjecaji lokacije (eng. *site effects*). Račun hazarda obično se provodi uz pretpostavku da je tlo čvrsto, odnosno čvrsta stijena. Ako je potrebno, to se naknadno može korigirati kako bi se u obzir uzelo pravo stanje tla na lokaciji.

2.2.5 Račun seizmičkog hazarda s pretpostavkom nepouzdanosti modela

Kako bi se u račun seizmičkog hazarda uvela analiza nepouzdanosti modela, u obzir se uzima više različitih vrijednosti pojedinih ulaznih parametara navedenih u jednadžbi (2.2) i prikazanih na slici 1. Kombiniranjem ovih vrijednosti nastaju brojni 'scenariji' koje je potrebno na neki način uvesti u račun. Najčešće korištena metoda za kombiniranje ovih ulaznih parametara naziva se *metodom logičkog stabla*. Logičko stablo može se opisati kao tijek odlučivanja koji se sastoji od čvorova i grana (Coppersmith i Youngs, 1986). Svaka grana predstavlja diskretni odabir parametra i svakoj je pridijeljena

određena vjerojatnost ostvarenja. Čvorovi su točke koje spajaju ulazne parametre, primjerice konfiguraciju zona, maksimalnu magnitudu i gibanje tla, prema općenitom logičnom slijedu pretpostavki i zahtjeva pojedinih grana. Suma vjerojatnosti svih grana spojenih u jednom čvoru jednaka je 1.0. Vjerojatnost da će se neki od scenarija ostvariti je produkt vjerojatnosti vezanih uz svaku granu koja tvori taj scenarij.

Logičko stablo predstavlja prikladan način prezentiranja ulaznih parametara, dostupnih opcija i vjerojatnosti povezanih sa svakom pojedinačnom odlukom i scenarijem odluka. Analiza se može jednostavno rastaviti na scenarije i račun hazarda se može provesti na bilo kojem čvoru kako bi se odredio efekt svakog parametra na krajnji rezultat. S druge strane, povećavanjem broja grana i čvorova raste i broj kalkulacija koji može postati izrazito velik. Također, budući da se logička stabla sastoje od diskretnih grana, parametri koji se bolje mogu opisati kontinuiranim distribucijama moraju biti diskretizirani.

Drugi način uključivanja razmatranja nepouzdanosti modela u probabilističku analizu, a koji pokušava riješiti probleme modela logičkog stabla, je pomoću Monte-Carlo simulacije (Bernreuter i sur., 1989). Pritom se koriste nasumični uzorci iz cijelog skupa ulaznih parametara (i diskretnih i kontinuiranih) i pripadne težine kako bi se dobio niz simulacija koje se koriste u konačnom proračunu hazarda. Svaka od tih simulacija predstavlja kompletan scenarij.

Objе metode daju slične rezultate pod uvjetom da u metodi logičkog stabla diskretizacija ulaznih parametara adekvatno zamjenjuje kontinuirane distribucije, a u pristupu koji koristi Monte-Carlo simulacije da broj simulacija prikladno prezentira opseg ulaznih parametara i postiže stabilan rezultat.

2.3 Prednosti i nedostaci metode PSHA

Probabilistički pristup određivanju hazarda uzima u obzir širok spektar informacija i njima pridružene nepouzdanosti, za razliku od determinističkog pristupa u kojem se razmatraju samo diskretni događaji i koji nema formalnog načina uvođenja nepouzdanosti u analizu. Rezultat probabilističke analize je procjena vjerojatnosti pojave potresa koji može izazvati štetu na istraživanoj lokaciji, što bolje izražava razinu znanja o seizmičnosti razmatranog područja od rezultata determinističke analize, a na temelju takvog rezultata može se procijeniti i potresna ugroženost te lokacije. S druge strane, u takvom sveobuhvatnom rezultatu ne mogu se jasno razlučiti utjecaji pojedinih elemenata koji ga tvore, a zbog svoje kvantitativne prirode može navesti na pomisao da je postignuta veća

preciznost nego što to ulazni podaci dopuštaju. Dok deterministički pristup pruža jasnu i relativno jednostavnu metodu procjene hazarda čije su pretpostavke i parametri lako razlučivi u krajnjem rezultatu, probabilistički pristup zahjeva pažljivu pripremu i analizu ulaznih podataka, poznavanje pridruženih nepouzdanosti, dobro razumijevanje raznih procesa i metoda koje račun koristi i kritičku analizu krajnjeg rezultata.

3 Program OHAZ i analiza podataka

3.1 O programu OHAZ

'Oriented HAZard', skraćeno OHAZ, računalni je softver namijenjen probabilističkoj procjeni seizmičkog hazarda (Zabukovec i sur., 2007). Program omogućava pristup razmatranju seizmičnosti pomoću prostornog izgladivanja, koji je od posebne važnosti na područjima gdje se većina potresa ne može pripisati pojedinim rasjedima. Pristup seizmičnosti primjenom prostornog izgladivanja prvi je razvio Frankel (1995), a kasnije ga je poboljšala agencija ARSO (Agencija za okoliš Republike Slovenije Ministarstva za okoliš i prostorno planiranje; Lapajne i sur., 1997 i 2003; Lapajne, 2000; Šket Motnikar i sur., 2000; Poljak i sur., 2000). Program računa stopu aktivnosti, godišnju stopu i seizmički hazard na nekoj mreži koordinata ili na određenoj lokaciji. Pri računu hazarda moguće je koristiti i standardni pristup pomoću zona izvora potresa koji je razvio Cornell (1968.). U konačnoj verziji program su razvile agencije ARSO i ISA (Institut za seizmologiju Akademije znanosti Albanije).

Izračun seizmičkog hazarda podijeljen je u tri faze: najprije se računa seizmička aktivnost, zatim godišnja stopa premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja te naposljetku sam hazard. Za izračun seizmičke aktivnosti potreban je katalog potresa koji sadrži samo glavne potrese opisane godinom u kojoj se pojedini potres dogodio, geografskom dužinom i širinom epicentra i magnitudom potresa. Program dozvoljava ograničavanje kataloga na određen interval magnituda i na određen vremenski period, a moguće je i definirati potpunost kataloga. Također, ako se u analizi u obzir uzimaju seizmogene zone, moguće je u izračun uključiti i potrese koji se nalaze izvan pojedinih zona, do neke zadane udaljenosti. Osim kataloga potrebno je definirati područje na kojem će se obaviti analiza, tj. zadati rubove mreže i veličinu ćelija.

Seizmička aktivnost nekog područja definirana je kao broj potresa čije magnitude premašuju neku zadanu magnitudu, a koji su se dogodili na razmatranom području u nekom vremenskom periodu. Računa se prebrojavanjem potresa u svakoj ćeliji mreže koordinata generirane za zadano područje, a dobiveni broj se zatim normalizira. Rezultat predstavlja broj potresa iznad zadane normalizirajuće magnitude u pojedinoj ćeliji za koje se očekuje da će se dogoditi u nekom periodu (primjerice 100 godina) podijeljenom s ukupnim brojem godina koje katalog pokriva (prema shemi: završna godina – početna godina +1). Osim prebrojavanjem, učestalost potresa može se dobiti i iz oslobođene seizmičke energije, što je posebno prikladno pri proučavanju jakih potresa, a za područja u kojima epicentri nisu dobro definirani može se pretpostaviti i uniformna seizmičnost.

Ukupna seizmička aktivnost zadanog područja može se po potrebi i normalizirati kako bi odgovarala nekoj referentnoj aktivnosti.

Program nudi dva pristupa *izglađivanju* (eng. *smoothing*) stope seizmičke aktivnosti: pristup koji se bazira na seizmogenim zonama i pristup pomoću prostornog izglađivanja koji se može izvršiti pod pretpostavkom nesigurnosti položaja epicentara, tj. kao *kružno izglađivanje* (eng. *circular smoothing*), zatim na temelju seizmotektonike područja, tj. kao *eliptično izglađivanje* (eng. *elliptical smoothing*), ili pak kao kombinacija kružnog i eliptičnog izglađivanja. Seizmotektonika zadanog područja definira se nezavisno o programu, u dokumentu u kojem su seizmogene zone na koje je područje podijeljeno opisane imenom, koordinatama poligona, zatim tipom, orijentacijom i težinom, odnosno procjenama utjecaja pojedinog rasjeda unutar zone, vrijednošću koeficijenta b iz Gutenberg-Richterove relacije i vrijednošću maksimalne magnitude zabilježene u zoni (Poljak i sur., 2000).

U pristupu izglađivanju koji koristi samo seizmogene zone za svaku se zonu računa uniformna seizmička aktivnost koja se zatim usrednji. Ako je tektonika područja nepoznata, tj. ako se izglađivanju aktivnosti pristupa pod pretpostavkom nesigurnosti položaja epicentra, primjenjuje se samo kružno izglađivanje pomoću kružne Gaussove funkcije radijusa $3C$, gdje je C korelacijska udaljenost, što je jednako maksimalnoj procijenjenoj pogreški u položaju epicentra u kompletnom katalogu. Ako se u obzir uzimaju seizmotektonske karakteristike područja, primjenjuje se eliptično izglađivanje seizmičke aktivnosti koje se temelji na pretpostavljenom smjeru seizmogenih rasjeda u različitim tektonskim područjima. Velika os elipse definirana je kao produkt očekivane duljine pukotine i omjera osi i pukotine. Očekivana duljina pukotine računa se pomoću relacije koja povezuje duljinu pukotine s magnitudom potresa pri kojem dolazi do pucanja (eng. *rupture-magnitude relationship*) i pomoću očekivane magnitude. Duljina pukotine i magnituda potresa povezane su relacijom $\log L = a + bM$, pri čemu je L duljina pukotine, M magnituda potresa, a vrijednosti koeficijenata a i b definirane su prema tipu rasjeda: rasjed s pomakom po pružanju, navlaka, normalni i reversni rasjed, te općeniti tip (eng. *all-slip-type*). OHAZ koristi relacije dane u tablici 3.1 (Wells i Coppersmith, 1994), koje opisuju navedene tipove rasjeda, pri čemu se za navlake koriste koeficijenti za reversne rasjede, i to i za površinski i za podzemni slučaj rasjedanja. Relacije koriste momentnu magnitudu M_w .

Tablica 3.1. Koeficijenti a i b relacija Wells i Coppersmith (1994) za podzemno i površinsko rasjedanje.

	podzemno rasjedanje		površinsko rasjedanje	
tip rasjeda	a	b	a	b
s pomakom po pružanju	-2.57	0.62	-3.55	0.74
navlaka	-2.42	0.58	-2.86	0.63
reversni	-2.42	0.58	-2.86	0.63
normalni	-1.88	0.50	-2.01	0.50
općeniti tip	-2.44	0.59	-3.22	0.69

PGM model, tj. atenuacijski model, definiran je kao površinsko gibanje na određenoj lokaciji u ovisnosti o magnitudi potresa, udaljenosti lokacije od epicentra ili hipocentra potresa, i nizu drugih parametara (npr. tipu rasjeda, tipu tla, itd.). PGM model za medijanski parametar površinskog gibanja Y (npr. spektralna akceleracija SA ili vršno ubrzanje tla PGA) općenito se može zapisati na sljedeći način:

$$\ln Y = f_m(M) + f_d(r, M) + f_f(F) + f_s(S) + \varepsilon \times \sigma_T, \quad (3.1)$$

pri čemu je f_m funkcija skaliranja magnitude, f_d funkcija udaljenosti, f_s funkcija lokalne amplifikacije površinskog gibanja, a f_f faktor povezan s mehanizmom nastanka potresa. Varijable su: magnituda M , udaljenost lokacije od izvora potresa r , kategorija tla ili ekvivalentna prosječna brzina transverzalnih valova do dubine od 30 m S , te tip rasjeda F (opcionalna varijabla koja može biti i dio funkcije skaliranja magnitude). ε je broj standardnih devijacija jedne predviđene vrijednosti parametra $\ln Y$, a σ_T globalna aleatorna nepouzdanost koja se računa prema jednadžbi:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}, \quad (3.2)$$

gdje je σ statistička nepouzdanost vezana uz sam potres, a τ statistička nepouzdanost između pojedinih potresa. Za prva dva člana jednadžbe (3.1), $f_m(M) + f_d(r, M)$, koriste se različiti regresijski modeli, a OHAZ ih nudi četiri:

$$1) \ln y = b_1 + b_2 M + b_3 \ln(r + r_0) + b_4(r + r_0) \quad (3.3)$$

(prema Ambraseys i sur., 1996, Sabeta i Pugliese, 1996, Berge-Thierry i sur., 2003, Bindi i sur., 2009, Cauzzi i Faccioli, 2008);

$$2) \ln y = b_1 + b_2(M - M_{ref}) + b_3(M - M_{ref})^2 + [b_4 + b_5(M - M_{ref})] \ln r \quad (3.4)$$

(prema Ambraseys i sur. 2005, Akkar i Bommer 2007, Akkar i Bommer 2010, Bindi i sur. 2009);

$$3) \ln y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_4r + \ln r \quad (3.5)$$

(prema Boore i sur. 1997);

$$4) \ln y = f_m(M) + f_d(r, M), \quad (3.6)$$

$$f_m(M) = \begin{cases} e_5(M - M_h) + e_6(M - M_h)^2, & M \leq M_h \\ e_7(M - M_h) + e_8(M - M_h)^2, & M > M_h \end{cases}$$

$$f_d(R, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln R/R_{ref} + c_3(R - R_{ref}) + c_4(M - M_{ref})(R - R_{ref})$$

(prema Boore i Atkinson, 2008),

pri čemu je $r = \sqrt{d^2 + h_0^2}$, gdje je d udaljenost do epicentra, a h_0 fiksna dubina žarišta potresa. Parametri r_0 i h_0 , te b , c i e su koeficijenti regresije. Udaljenost d može se mjeriti na različite načine, a OHAZ koristi epicentralnu udaljenost e , udaljenost od površinske projekcije rasjeda f (Joyner i Boore, 1981), te hipocentralnu udaljenost h . U modelu (3.6) magnituda M_h označava parametar koji određuje način skaliranja magnitude, a R Joyner – Booreovu udaljenost R_{JB} , odnosno udaljenost od projekcije rasjeda na površini.

Utjecaj tipa rasjeda u svim PGM modelima može se prikazati sljedećom jednačinom:

$$f_f(F) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_5T, \quad (3.7)$$

gdje su U , SS , NS , RS , T zamjenske varijable koje predstavljaju tipove rasjeda, redom: neodređeni rasjed, rasjed s pomakom po pružanju, normalni rasjed, reversni rasjed i navlaku (tablica 3.2).

Tablica 3.2. Vrijednosti zamjenskih varijabli za različite tipove rasjeda.

tip rasjeda	U	SS	NS	RS	T
nedefiniran	1	0	0	0	0
s pomakom po pružanju	0	1	0	0	0
normalni	0	0	1	0	0
reversni	0	0	0	1	0
navlaka	0	0	0	0	1

Utjecaj lokalne amplifikacije površinskog gibanja može se razmotriti pomoću nekog od sljedećih modela:

1) diskretni model:

$$f_s(S) = b_{SA}SA + b_{SB}SB + b_{SC}SC + b_{SD}SD, \quad (3.8)$$

2) linearni model:

$$f_s(V_{S30}) = b_{lin} \ln(V_{S30}/V_{ref}), \quad (3.9)$$

3) općeniti model:

$$f_s(S) = F_{lin} + F_{NL}. \quad (3.10)$$

U jednadžbi (3.8) SA , SB , SC i SD su zamjenske varijable koje označavaju kategorije tla A, B, C i D (tablica 3.3). Varijable b su odgovarajući regresijski koeficijenti, a u slučaju diskretnog modela koeficijent b_{SA} , koji odgovara tipu tla A (stijena), sadržan je u koeficijentu b_1 u jednadžbama (3.3), (3.4) i (3.5), dok ostali koeficijenti označavaju razliku u odnosu na kategoriju A. Umjesto kategorija tla, neki PGM modeli koriste linearni model i kontinuiranu varijablu V_{S30} , tj. prosječnu brzinu transversalnih valova u gornjih 30 m kore. Općeniti model lokalne amplifikacije sastoji se od linearnog F_{lin} i nelinearnog F_{NL} dijela.

Tablica 3.3. Vrijednosti zamjenskih varijabli za različite kategorije tla.

kategorija tla	SA	SB	SC	SD
A (stijena)	1	0	0	0
B (čvrsto tlo)	0	1	0	0
C (meko tlo)	0	0	1	0
D (vrlo meko tlo)	0	0	0	1

Statističke nepouzdanosti σ i τ često su ovisne o magnitudi i mogu se izračunati pomoću jednadžbi $\sigma = c_0 + c_1M$ i $\tau = d_0 + d_1M$, gdje su c i d regresijski koeficijenti. OHAZ koristi tri modela za opisivanje statističke nepouzdanosti:

$$1) \sigma = c_0, \text{ tj. konstantna vrijednost neovisna o magnitudi,} \quad (3.11)$$

$$2) \sigma = c_0 + c_1M, \text{ tj. vrijednost ovisna o magnitudi,} \quad (3.12)$$

$$3) \sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}, \text{ pri čemu je } \sigma = c_0 + c_1M \text{ i } \tau = d_0 + d_1M. \quad (3.13)$$

OHAZ koristi vlastitu bazu PGM modela kojima su definirani svi potrebni ulazni parametri (parametar površinskog gibanja, prigušenje, period, korišten matematički model (jednadžbe 3.3 - 3.6), mehanizam nastanka potresa, regresijski koeficijenti). Atenuacijske jednadžbe mogu opisivati sljedeće parametre površinskog gibanja: vršna brzina pomaka tla PGV (eng. *peak ground velocity*), vršna akceleracija tla PGA (eng. *peak ground acceleration*), spektralna akceleracija SA (eng. *spectral acceleration*), te makroseizmički intenzitet I . Ako se koristi više od jednog PGM modela, potrebno je svakom pridijeliti težinu w , a zbroj svih težina mora biti jednak 1.0.

Nakon odabira PGM modela potrebno je izračunati godišnje stope premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja (eng. *annual rates*) iz kojih se zatim dobiju finalne vrijednosti površinskog gibanja, odnosno hazard. Godišnja stopa na nekoj lokaciji

definirana je kao očekivani godišnji broj potresa koji će izazvati gibanje tla veće od nekog unaprijed definiranog referentnog gibanja. Finalne vrijednosti površinskog gibanja za zadani povratni period (npr. 475 ili 1000 godina) računaju se interpoliranjem dobivenih godišnjih stopa premašivanja niza referentnih gibanja tla. Prije finalnog izračuna potrebno je definirati parametre integracije: početnu i završnu magnitudu, iznos povećanja magnitude u integraciji (npr. 0.1 ili 0.2), vrijednost parametra b u Gutenberg-Richterovoj relaciji i maksimalnu udaljenost lokacije od epicentra potresa, tj. udaljenost do koje se seizmička aktivnost pojedinih ćelija mreže koordinata uzima u obzir u računu, a koju je potrebno definirati jer se može pretpostaviti da je doprinos seizmičke aktivnosti udaljenijih područja zanemariv. Vrijednost parametra b moguće je izračunati pomoću samog programa, za što je potrebno zadati katalog potresa, granice područja za koje se parametar računa, minimalnu i maksimalnu magnitudu te korak povećanja magnitude. Za proračun hazarda potrebno je odabrati i oblik Gutenberg-Richterove relacije.

Naime, umjesto uobičajene logaritamsko-linearne Gutenberg-Richterove relacije:

$$\log N(m) = a' - b'm, \quad (3.14)$$

pri čemu je $N(m)$ godišnji broj potresa magnitude veće ili jednake m , OHAZ koristi eksponencijalni oblik relacije učestalosti pojavljivanja potresa:

$$l_m = e^{a-bm}, \quad (3.15)$$

gdje je $l_m = N(m)$, $a = a' \ln 10$ i $b = b' \ln 10$.

Ovakvi standardni prikazi Gutenberg-Richterove relacije zapravo sadrže beskonačan raspon magnituda potresa, pa se pojavljuju i takve magnitude koje nisu fizikalno moguće. U relaciju se stoga uvode ograničenja magnitude kako bi se eliminirali utjecaji vrlo malih i nerealistično velikih magnituda potresa.

Kao donji limit raspona magnituda uvodi se donja granična magnituda m_0 . Za potrese magnitude manje od m_0 pretpostavlja se da imaju zanemariv utjecaj na građevine. Gutenberg-Richterova relacija za magnitude $m > m_0$ glasi:

$$l_m = l_{m_0} e^{-b(m-m_0)}, \quad (3.16)$$

pri čemu je $l_{m_0} = e^{a-bm_0}$ broj potresa magnitude veće ili jednake m_0 . Ova relacija naziva se eksponencijalnom relacijom učestalosti ograničenom s donje strane (eng. *low bounded exponential recurrence relationship*).

Ako Gutenberg-Richterovu relaciju ograničimo i s gornje strane gornjom graničnom magnitudom m_{max} , odnosno maksimalnom magnitudom koja se može pojaviti u izvoru potresa, dobijemo relaciju koja odgovara jednadžbi (2.6) i glasi:

$$l_m = l_{m_0} \frac{e^{-b(m-m_0)} - e^{-b(m_{max}-m_0)}}{1 - e^{-b(m_{max}-m_0)}}, \quad (3.17)$$

pri čemu je $m_0 < m < m_{max}$. Ova jednadžba poznata je kao eksponencijalna relacija učestalosti ograničena s obje strane (eng. *doubly-truncated exponential recurrence relationship*).

Odgovarajuće funkcije gustoće vjerojatnosti za Gutenberg-Richterovu relaciju ograničenu s donje strane i relaciju ograničenu s obje strane su:

$$f_M(m|m_0) = be^{-b(m-m_0)}, m_0 \leq m \quad (3.18)$$

i

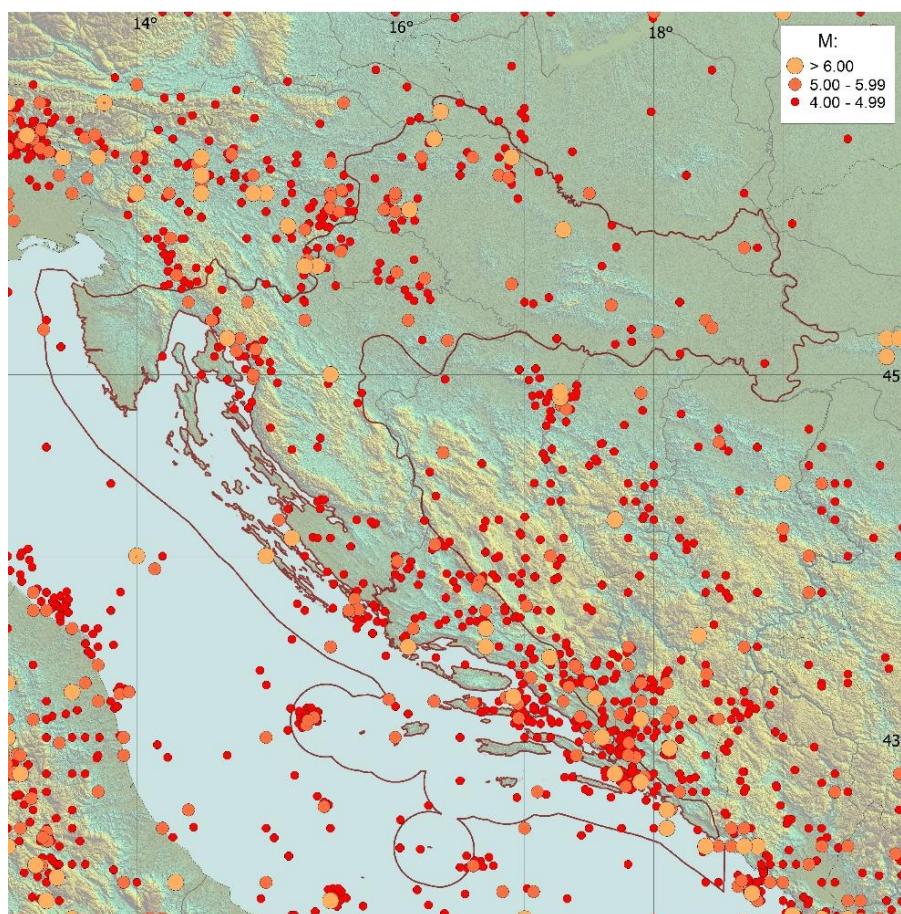
$$f_M(m|m_0, m_{max}) = \frac{be^{-b(m-m_0)}}{1 - e^{-b(m_{max}-m_0)}}, m_0 \leq m \leq m_{max}. \quad (3.19)$$

3.2 Korišteni podaci

Za izračun seizmičke aktivnosti, godišnje stope premašivanja niza razina površinskog gibanja te hazarda pomoću programa OHAZ (Zabukovec i sur., 2007) potreban je katalog glavnih potresa, precizno definirana seizmotehnikna područja, te niz unaprijed definiranih ulaznih parametara i uvjeta. Dobro definirani ulazni podaci uvjetuju pokretanje računa čiji se tijek može pratiti u kontrolnom prozoru programa. Na kraju izračuna rezultati pojedinih faza zapisani su u unaprijed definiranim dokumentima u numeričkom obliku: pojedinim koordinatama mreže pridružene su pripadne izračunate vrijednosti. Za grafički prikaz rezultata korišten je program MapInfo.

Područje za koje je proveden račun hazarda obuhvaća cijeli prostor Hrvatske i bližu okolicu, između 13° i 20° E geografske dužine i 42° i 47° N geografske širine. Stoga je osnova bio Hrvatski katalog potresa (Croatian Earthquake Catalogue, CEC), korigirana i nadopunjena verzija publiciranog kataloga za razdoblje 1908-1992 (Herak i sur., 1996) koji se nalazi u Arhivi Geofizičkog odsjeka PMF-a. Kako bi se povećala potpunost kataloga na rubnim područjima unutar gore navedenih koordinata, Hrvatski katalog je nadopunjen podacima ISC kataloga (International Seismological Center Catalogue; ISC, 2016) i SHEEC kataloga (The SHARE European Earthquake Catalogue; Giardini i sur., 2013, Stucchi i sur., 2012 i Grünthal i Wahlström, 2012). Za potrebe proračuna iz kataloga su izdvojeni glavni potresi pomoću prostornog i vremenskog intervala oko glavnog potresa, veličine ovisne o magnitudi glavnog potresa, kojim su eliminirani naknadni potresi i potresi koji prethode glavnom (Herak i sur., 2009). Kako bi se definiralo zadano područje generirana je mreža koordinata međusobno udaljenih 10 km u smjeru sjever-jug (jedan stupaj iznosi 111 km) i isto toliko u smjeru istok-zapad (OHAZ automatski određuje broj kilometara u jednom stupnju ovisno o zadanom geografskom području).

Potresi iz kataloga glavnih potresa opisani su godinom, koordinatama, dubinom žarišta (koja nije uzeta u obzir u izračunu) i momentnom magnitudom M_w . Minimalna magnituda uzeta u obzir u analizi kataloga je $M_{min} = 4.0$, jer kasnija integracija po magnitudi potrebna za izračun hazarda započinje od $M = 4.0$, a kao maksimum uzeta je vrijednost $M_{max} = 7.5$, jer maksimalna magnituda zabilježena u katalogu iznosi 7.43. Na slici 3.1 prikazani su potresi magnitude $M > 4.0$ iz kataloga glavnih potresa na razmatranom području. Uočljiva je koncentracije jakih potresa na potezu sjeverozapad - jugoistok, odnosno na području od Alpa, preko Slovenije do Sjeverozapadne Hrvatske i Kvarnera, te na području Dalmacije, posebno Južne, juga Bosne i Hercegovine i Crne Gore.



Slika 3.1. Prikaz potresa magnitude $M > 4.0$ iz kataloga glavnih potresa.

Koncentracija je veća i na razmatranom dijelu Italije, dok je u Slavoniji, na istoku i zapadu Bosne i u Panonskom bazenu relativno mala. S obzirom na logičnu povezanost magnitude i prostorne raspodjele zabilježenih potresa sa seizmičkim hazardom, može se očekivati da će seizmička aktivnost i vršne akceleracije svih povratnih perioda reflektirati raspodjelu i jakost glavnih potresa.

Za izračun je potrebno odrediti i potpunost kataloga, koja je za magnitude veće od 4.0 prikazana u tablici 3.4 (preuzeto iz Mihaljević i sur., 2017). Potpunost kataloga određena je na temelju promjene nagiba pravca u grafičkom prikazu odnosa kumulativnog broja potresa magnitude veće ili jednake referentnoj magnitudi M_c i vremena (Mulargia i sur., 1987). Naime, može se prepostaviti da se posljednja promjena nagiba pravca regresije dogodi onda kada podaci postanu kompletni za magnitude veće ili jednake magnitudi M_c (Gasperini i Ferrari, 2000). Stopa seizmičke aktivnosti izračunata je bez normalizacije (faktor normalizacije postavljen je na 1), prebrojavanjem potresa magnitude veće od 4 u periodu od 100 godina u svakoj ćeliji mreže koordinata. Izračunata je također i stopa aktivnosti za intervale magnituda veličine 0.5 od magnitude 4.0 do 7.5 (7 klasa magnituda).

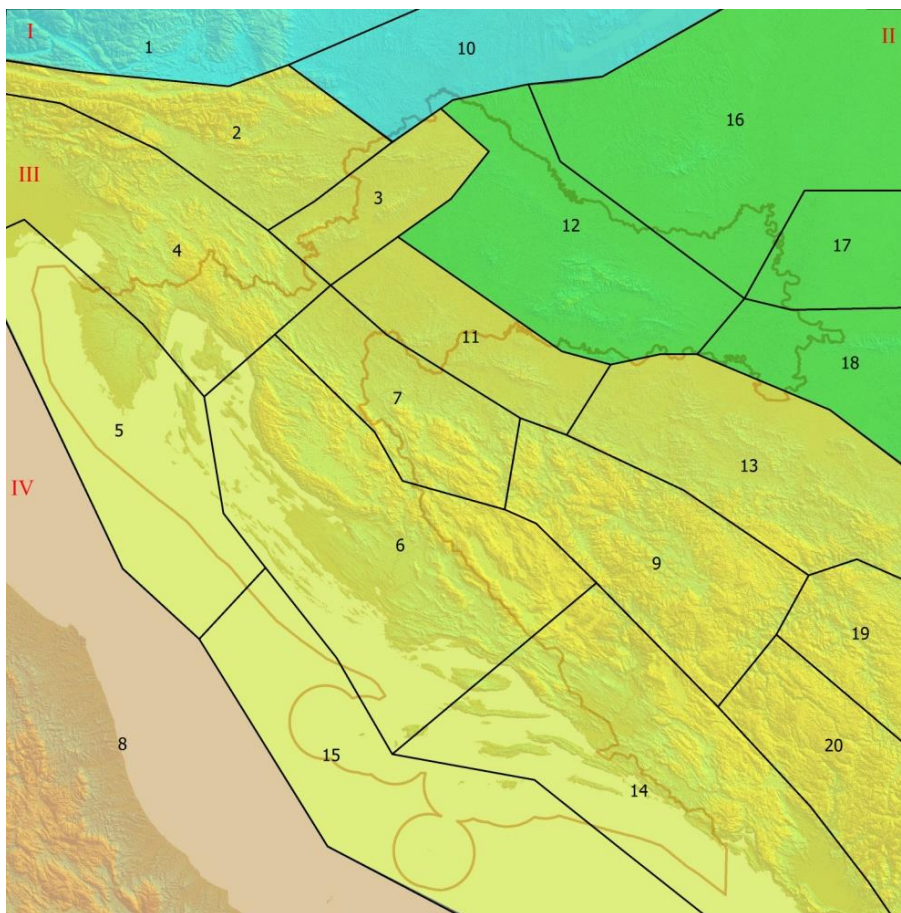
Tablica 3.4. Potpunost kataloga glavnih potresa za magnitude M_c u rasponu 4.0 – 7.5 (preuzeto iz Mihaljević i sur., 2017).

M_c	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Godina	1920	1890	1850	1740	1600	1300	1300

Budući da je seizmotektonika područja poznata, provedene su obje moguće faze prostornog izgladivanja seizmičke aktivnosti. U prvoj fazi, tj. u kružnom izgladivanju, za iznos korelacijske udaljenosti C preuzeta je u programu unaprijed dodijeljena vrijednost od 10 km. Sljedeća faza, tj. eliptično izgladivanje, također koristi unaprijed zadane vrijednosti: velika os elipse L jednaka je duljini podzemne pukotine (1 km), a mala os zadana je kao $L/5 = 0.2$ km. Kao relacija koja povezuje duljinu pukotine s magnitudom potresa korištena je relacija Wells i Coppersmith (1994) za podzemni slučaj rasjedanja (tablica 3.1). Kao maksimalna magnituda korištena u izgladivanju zadržana je u programu unaprijed dodijeljena i sugerirana vrijednost $M_w = 6.8$, a ne maksimalna računska magnituda $M = 7.5$, kako područje izgladivanja ne bi postalo neprikladno veliko.

Prostor Hrvatske i njezine neposredne okolice može se s obzirom na seizmotektonske karakteristike podijeliti na četiri velike zone - *superzone*: zona Alpa, zona Panonije, zona Dinarida i zona Italije (slika 3.2). Veći dio centralne Hrvatske, od sjeverozapada do jugoistoka, pripada Dinaridskoj seizmotektonskoj zoni koju obilježavaju reversni rasjedi smjera sjeverozapad-jugoistok i nagiba prema sjeveroistoku. Sjeveroistok Hrvatske pripada Panonskoj zoni obilježenoj rasjedima s pomakom po pružanju smjera zapad-istok i normalnim rasjedima smjera sjeverozapad-jugoistok i nagiba prema sjeveroistoku, dok manji dio na samom sjeveru Hrvatske pripada Alpskoj seizmotektonskoj zoni u kojoj prevladavaju rasjedi s pomakom po pružanju smjera zapad-istok. U obzir je uzet i utjecaj Talijanske zone koju obilježavaju pretežno normalni i reversni rasjedi smjera sjeverozapad-jugoistok i nagiba prema sjeveroistoku, te rasjedi s pomakom po pružanju smjera istok-zapad.

Velike seizmotektonske zone mogu se podijeliti na niz manjih i time preciznije opisanih zona: Dinaridska superzona podijeljena je na 13 malih zona, Panonska superzona na 4 male zone, Alpska na dvije, dok je Talijanska superzona nepodijeljena (slika 3.2). Ovih 20 zona, iskorištenih pri računu seizmičkog hazarda, definirano je karakterističnim vrstama rasjeda, njihovim azimutima i težinama, zatim Gutenberg-Richterovim



Slika 3.2. Seizmotektonske zone: male zone označene su brojevima 1-20, a superzone rimskim brojevima i bojom (I, plavo – Alpska zona; II, zeleno – Panonska zona; III, žuto – Dinaridska zona; IV, narančasto – Talijanska zona).

koeficijentom b , maksimalnom magnitudom zabilježenom u pojedinoj zoni i dubinom rasjedanja koja je u svim zonama postavljena na vrijednost od 15 km.

Kao parametar površinskog gibanja odabran je parametar vršnog ubrzanja tla PGA izražen u jedinicama gravitacijskog ubrzanja g , a za PGM modele odabrano je 6 relacija koje su zajedno s pripadnim težinama w , udaljenostima do epicentra d i korištenim jednadžbama dane u tablici 3.5. Svi modeli odnose se na horizontalne komponente površinskog gibanja, a kao maksimalna udaljenost do koje su modeli valjani preuzeta je u programu zadana vrijednost 100 km. Sve relacije koriste momentnu magnitudu M_w , osim relacije Sabetta i Pugliese (1996) koja upotrebljava magnitudu površinskih valova M_s . Naime, potresi u katalogu glavnih potresa opisani su momentnom magnitudom M_w , a sučelje programa ne nudi opciju podešavanja magnitude za pojedinačnu atenuacijsku relaciju, odnosno mogućnost konvertiranja magnitude u drugi oblik, pa je u relaciji Sabetta i Pugliese (1996), za koju se pretpostavlja da prikladno opisuje istraživano područje,

primijenjena momentna magnituda M_w . Primijenjene PGM relacije koriste ranije opisane matematičke forme (3.3) – (3.5), modele utjecaja lokalne amplifikacije površinskog gibanja (3.8) i (3.9) i modele za opisivanje statističke nepouzdanosti σ (3.11) i (3.13), a neke koriste i jednačbu (3.7) za opis utjecaja tipa rasjeda. Za vrstu tla koja definira lokalnu amplifikaciju na zadanom području određena je kategorija tla A (čvrsta stijena), što je ekvivalentno prosječnoj brzini transverzalnih valova u gornjih 30 m kore $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ koju koristi jednačba Boore i sur. (1997).

Naposljetku su definirani i parametri za računanje godišnje stope premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja te parametri za računanje samog hazarda pomoću godišnjih stopa. Za donji rub integracije postavljena je vrijednost $M = 4.0$ jer površinsko gibanje koje nastaje od potresa magnituda $M < 4.0$ obično ne izaziva štetu na građevinama. Gornja granica integracije jednaka je ranije definiranom računskom maksimumu magnitude $M = 7.5$, a korak povećanja magnitude potreban za numeričku integraciju iznosi 0.1. Kao maksimalna udaljenost do koje je za svaku koordinatu proveden izračun površinskog gibanja određena je vrijednost od 150 km. Za integraciju je potrebna i normalizirajuća vrijednost Gutenberg-Richterova parametra b koja je postavljena na $b = 0.84$. Parametar b izračunat je pomoću samog programa, za zadano područje i katalog potresa te korak povećanja magnitude iznosa 0.5. Za oblik relacije učestalosti odabrana je Gutenberg-Richterova relacija ograničena s obje strane. Kao referentne vrijednosti površinskog gibanja korištene su vrijednosti: 0.01, 0.05, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.22, 0.24, 0.26, 0.28, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.00 g, odnosno

Tablica 3.5. PGM modeli, pripadne težine, tip udaljenosti do epicentra i korištene jednačbe matematičkog modela, lokalne amplifikacije, tipa rasjedanja i statističke nepouzdanosti σ .

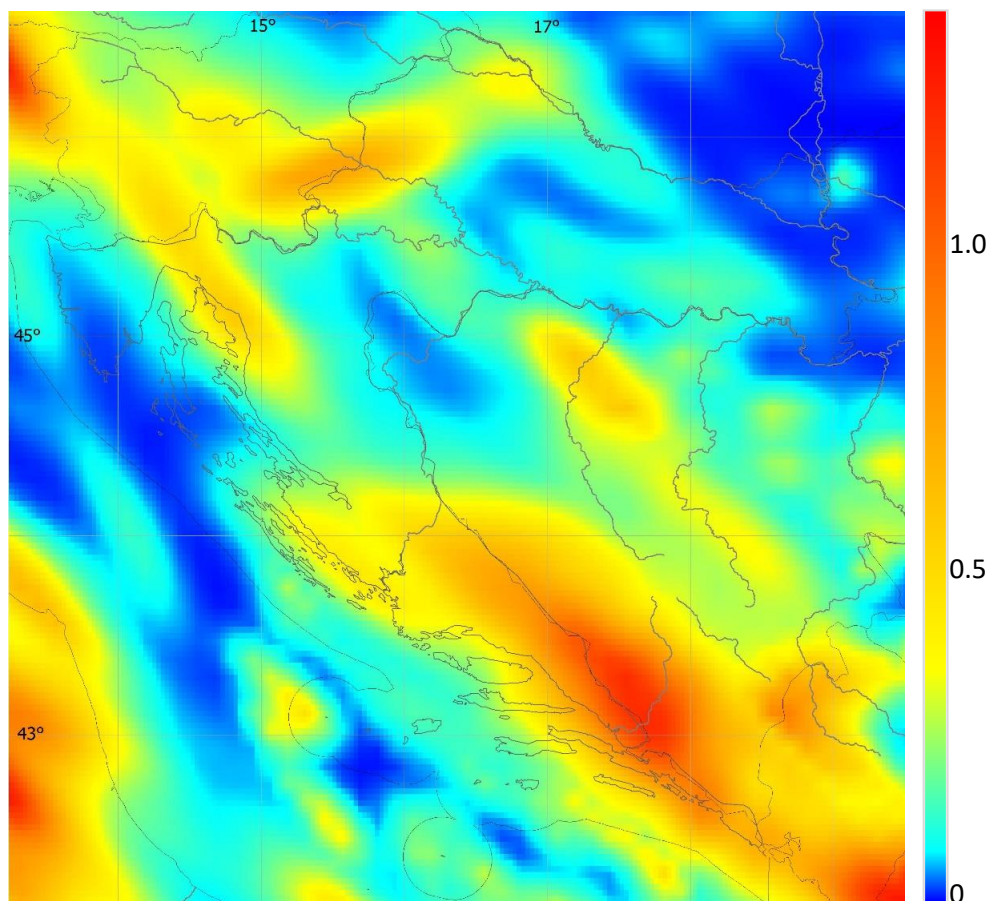
PGM modeli	w	d	matematički model	tip rasjeda	lokalna amplifikacija	σ
Akkar i Bommer, 2010	0.25	f	(3.4)	(3.7)	(3.8)	(3.13)
Bindi i sur., 2009	0.25	e	(3.4)	-	(3.8)	(3.11)
Cauzzi i Faccioli, 2008	0.10	h	(3.3)	-	(3.8)	(3.11)
Ambraseys i sur., 2005	0.15	f	(3.4)	(3.7)	(3.8)	(3.13)
Boore i sur., 1997	0.15	f	(3.5)	(3.7)	(3.9)	(3.11)
Sabetta i Pugliese, 1996	0.10	e	(3.3)	-	(3.8)	(3.11)

vrijednosti koje pokrivaju cijeli mogući raspon gibanja tla na zadanom području (0.01 – 1.00 g). Kao povratni periodi za koje se računa vršno ubrzanje tla zadane su vrijednosti od 95, 475 i 1000 godina, odnosno vjerojatnost premašivanja površinskog gibanja od 10% u poredbenom razdoblju od 10, 50 i 100 godina.

4. Rezultati i diskusija

Na temelju ranije opisanih ulaznih podataka programom OHAZ uspješno su izračunate sve faze proračuna seizmičkog hazarda: ukupna seizmička aktivnost, seizmička aktivnost po intervalima magnituda, godišnje stope premašivanja niza referentnih vrijednosti površinskog gibanja, te sam hazard, odnosno vršno ubrzanje tla za povratne periode od 95, 475 i 1000 godina. Od ukupno 36723 potresa iz kataloga glavnih potresa u analizi je razmotreno njih 1003, od kojih je 994 zaista i pridruženo mreži koordinata koja pokriva istraživano područje s 56×56 čvorova. U grafičkom su obliku na sljedećim stranicama prikazani rezultati: ukupna seizmička aktivnost (slika 4.1), aktivnost po intervalima magnituda veličine 0.5 od magnitude 4.0 do 7.5 (slike 4.2 – 4.5), zatim 11 reprezentativnih godišnjih stopa premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja (0.01, 0.05, 0.10, 0.14, 0.18, 0.24, 0.35, 0.45, 0.60, 0.80 i 1.00 g, na slikama 4.6 – 4.11), te vršno ubrzanje tla PGA za povratne periode od 95, 475 i 1000 godina, odnosno vjerojatnost premašivanja od 10% u 10, 50 i 100 godina (slike 4.12 – 4.14). Vrijednosti su na karti istraživanog područja naznačene spektrom boja, od tamnoplave koja predstavlja vrlo malu ili zanemarivu aktivnost, do tamnocrvene koja označava vrlo jako djelovanje, a vršne akceleracije tla prikazane su i izolinijama s rezolucijom od 0.02 g. Analiza numeričkih rezultata provedena je programom Matlab.

Karte koje prikazuju seizmičku aktivnost po intervalima i godišnje stope premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja predstavljaju zapravo korake u analizi, dok su karte ukupne aktivnosti i PGA njihova sinteza. Na slikama se unutar razmatranog područja ističu 4 zone s izraženim potresnim djelovanjem: najjača je aktivnost na jugu Dalmacije i Hercegovine u području koje se pruža SZ - JI, slabija aktivnost uočena je na sjeverozapadu Hrvatske i jugoistoku Slovenije oko Žumberačke gore i pruža se gotovo u smjeru I - Z, sljedeće područje po jačini je na sjeveru Bosne, opet u smjeru SZ - JI, dok se po aktivnosti još slabije, ali ipak prepoznatljivo područje pruža SZ - JI duž Kvarnera i juga Slovenije. Velika potresna aktivnost uočava se i na rubovima zadanog područja: područje Alpa i zapadne Slovenije na sjeverozapadu, na jugozapadu područje Italije, te na jugoistoku područje Crne Gore. Na rubu karte, njezinom sjeveroistoku, nalazi se i područje najmanje aktivnosti unutar zadanih granica – područje Slavonije, Mađarske i Vojvodine, odnosno jugozapada Panonske nizine. Ovakva prostorna raspodjela koncentracija odgovara raspodjeli potresa po magnitudama sa slike 3.4 jer područja izražene aktivnosti korespondiraju područjima s čestim i jakim potresima. Sukladno tome



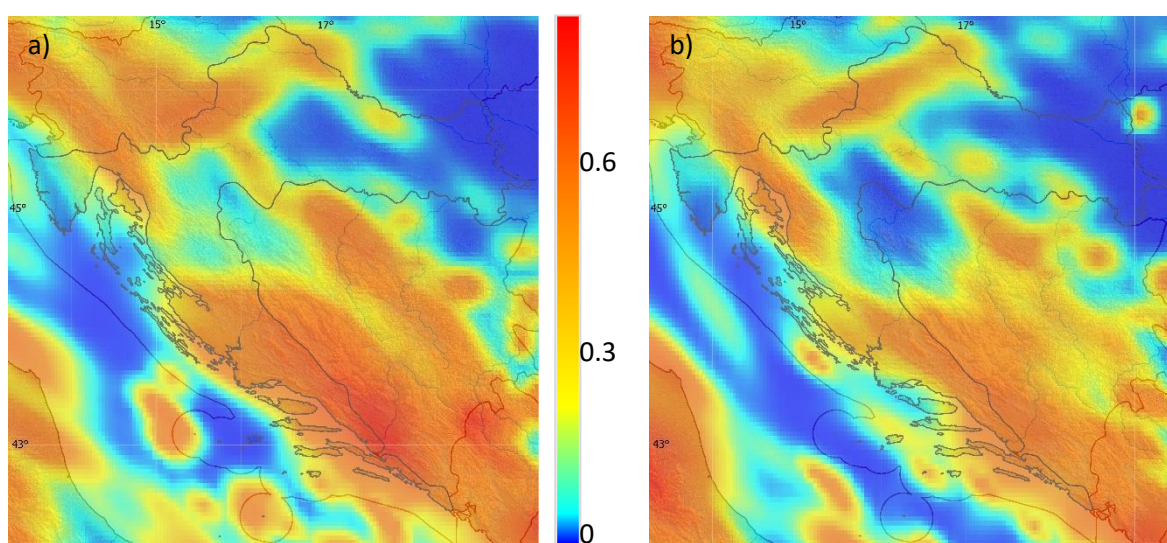
Slika 4.1. Ukupna seizmička aktivnost na prostoru Hrvatske. Vrijednosti su bezdimenzionalne i u rasponu od 0 do 1.3.

uočava se slaganje i sa seizmotektonikom područja, što je uočljivo u smjeru pružanja aktivnih područja: najistaknutije koncentracije pružaju se SZ - JI duž Dinarida, u smjeru u kojem se i pružaju rasjedi i navlake tog područja. Paralelno i južnije od tog područja nalazi se relativno neaktivno područje Jadrana, a opet paralelno tome vrlo aktivno područje Italije. Na sjeveru je seizmotektonika drukčija, pa se aktivnost, kao i rasjedi, pruža približno u smjeru I - Z, dok su na tektonski neaktivnom sjeveroistoku aktivnosti minimalne.

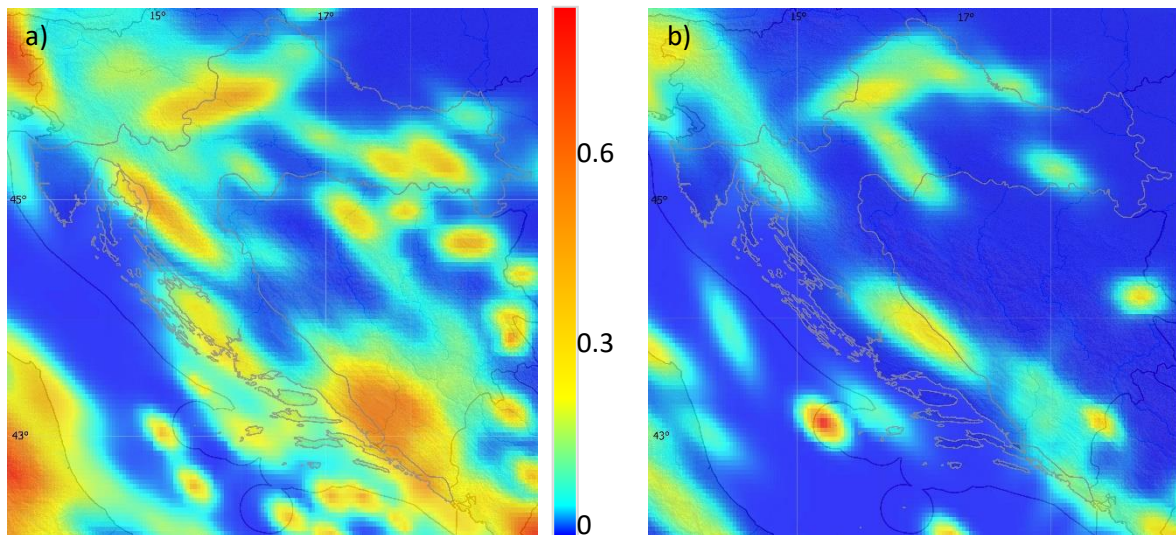
Rezultat prvog koraka proračuna, odnosno ukupna seizmička aktivnost proučavanog područja prikazana je na slici 4.1. Karta predstavlja godišnji broj potresa magnitude veće od 4.0, a vrijednosti se kreću između 0.00 na području Vojvodine i 1.69 u Crnoj Gori. Maksimalne vrijednosti seizmičke aktivnosti po ranije spomenutim područjima izražene koncentracije djelovanja dane su u tablici 4.1. Ukupna aktivnost može se razložiti na aktivnost po intervalima magnituda na kojima je moguće pratiti promjenu prostorne raspodjele aktivnosti s povećanjem magnitude.

Aktivnost po intervalima magnituda opisuje dakle broj i položaj potresa iz pojedinog intervala magnituda na istraživanom području: potresi magnituda 4.0 – 4.5 i 4.5

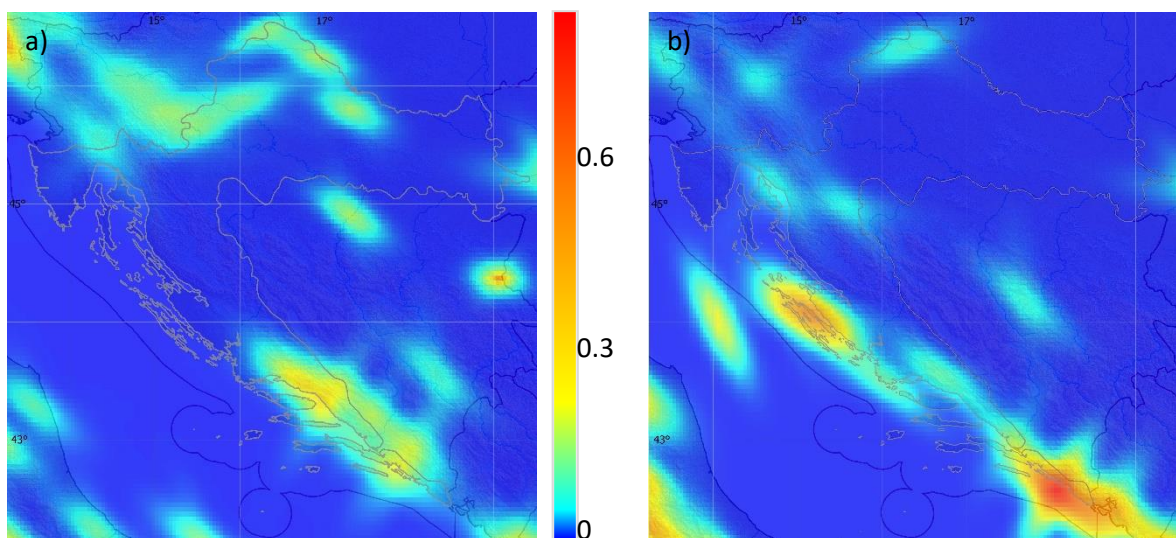
– 5.0 su relativno brojni i raspodijeljeni su oko očekivanih područja koncentracija, iako u dosta širem obuhvatu, pri intervalima većih magnituda, 5.0 – 5.5, 5.5 – 6.0, 6.0 – 6.5 i 6.5 – 7.0, područja na kojima su nastali jaki potresi su sve uža, sve do intervala vrlo velikih magnituda, 7.0 – 7.5, pri kojem praktički nigdje nema aktivnosti. Budući da je ukupna seizmička aktivnost jednaka zbroju aktivnosti po svim intervalima, može se uočiti utjecaj pojedinih intervala magnituda na ukupnu aktivnost. Naime, prema Gutenberg – Richterovoj relaciji (2.1) potresi manjih magnituda su češći od jakih potresa, pa na raspodjelu ukupne aktivnosti veći utjecaj imaju potresi manjih magnituda, 4.0 – 4.5, 4.5 – 5.0 i 5.0 – 5.5, na kojima se jasno ocrtavaju spomenute prostorne koncentracije, dok će potresi većih magnituda, 5.5 – 6.0, 6.0 – 6.5, 6.5 – 7.0 i 7.0 – 7.5, imati manji utjecaj. Pri većim magnitudama su osim tragova osnovnih koncentracija uočljiva i odstupanja i nove koncentracije, primjerice u Jadranskom moru u blizini otoka Visa za interval magnituda 5.5 – 6.0, u istočnoj Bosni za interval 6.0 – 6.5, na području oko Dubrovnika pri intervalu 6.5 – 7.0 te na području na sjeveru Slovenije uz granicu s Italijom pri 7.0 – 7.5. Iako sugeriraju postojanje vrlo jakih zabilježenih potresa, kao što je i vidljivo na karti potresa magnituda $M > 4$ (slika 3.4), ove koncentracije nemaju znatan utjecaj na ukupnu aktivnost razmatranog područja. Uočena raspodjela ukupne aktivnosti i aktivnosti po intervalima magnituda sugerira da su za prostornu raspodjelu seizmičkog hazarda od vrlo rijetkih i izuzetno jakih potresa ipak važniji češći potresi manjih magnituda, ali ipak dovoljno velikih da mogu prouzročiti štetu ($M > 4$).



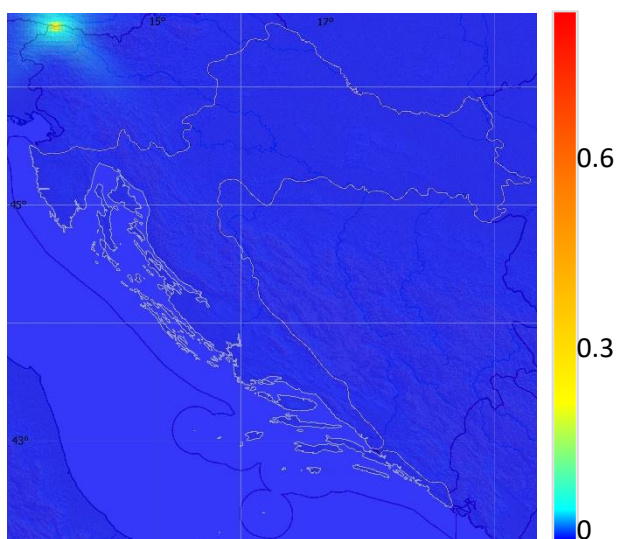
Slika 4.2. Seizmička aktivnost za intervale magnituda 4.0 – 4.5 (a) i 4.5 – 5.0 (b).



Slika 4.3. Seizmička aktivnost za intervale magnituda 5.0 – 5.5 (a) i 5.5 – 6.0 (b).

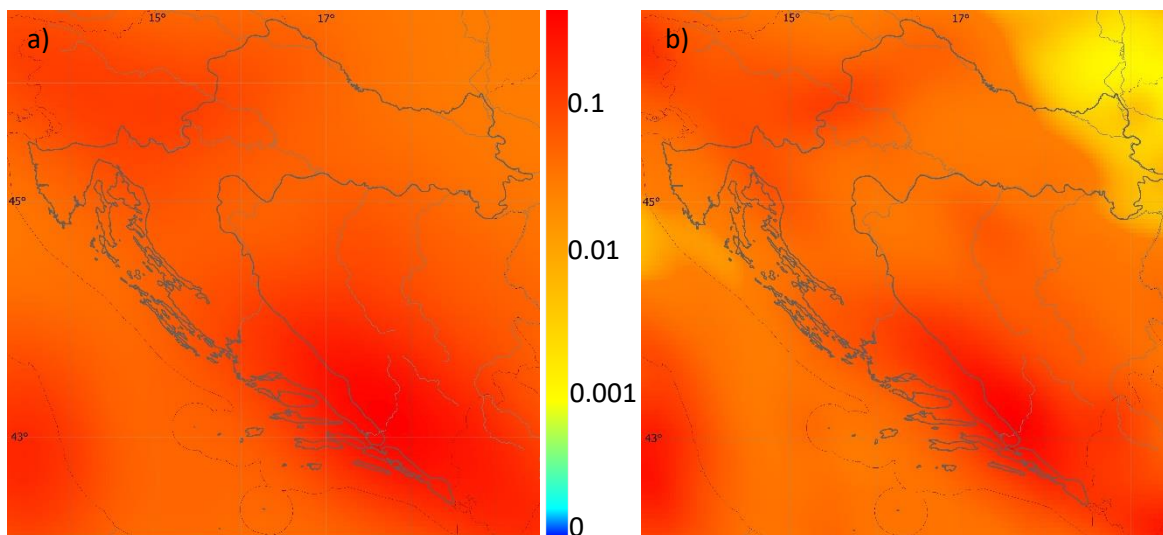


Slika 4.4. Seizmička aktivnost za intervale magnituda 6.0 – 6.5 (a) i 6.5 – 7.0 (b).

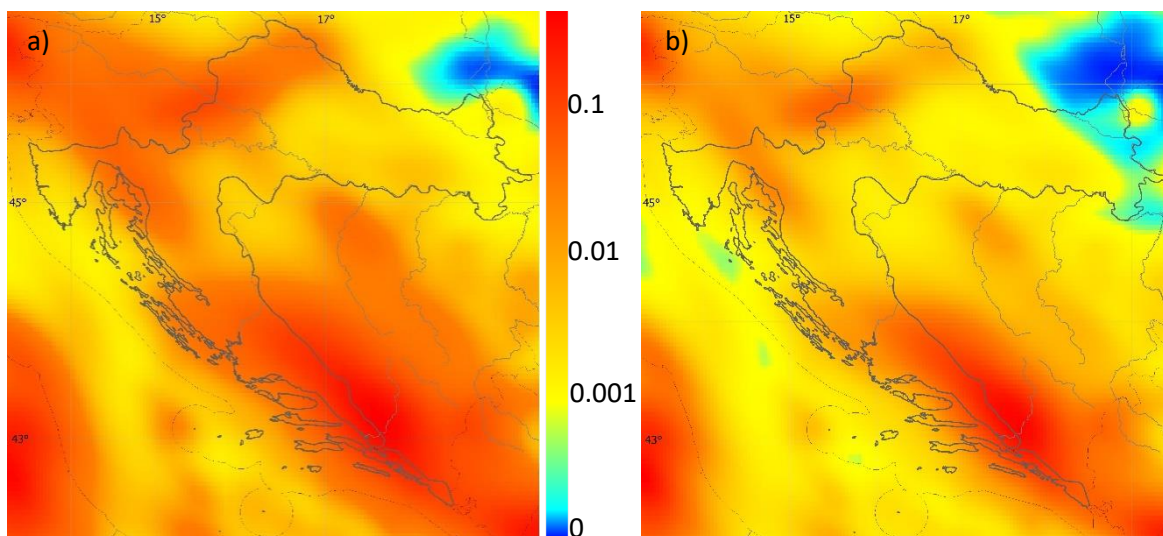


Slika 4.5. Seizmička aktivnost za intervale magnituda 7.0 – 7.5.

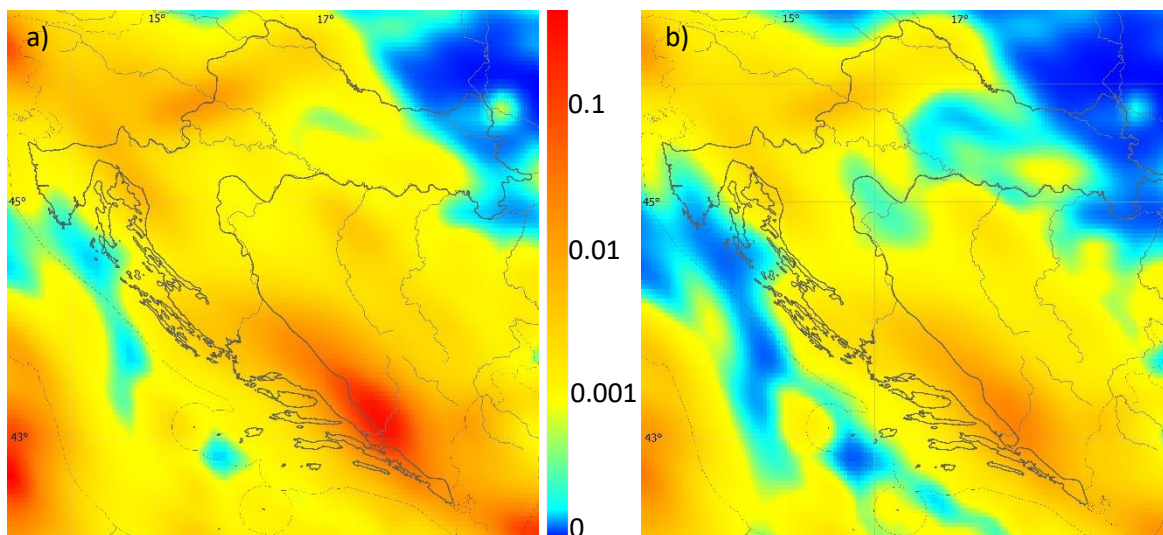
Sljedeći korak proračuna su godišnje stope premašivanja referentnih vrijednosti površinskog gibanja i prikazane su na slikama 4.6 – 4.11. Kao i aktivnost po intervalima magnituda i godišnje stope pokazuju logičan trend u efektima potresa na tlo. Naime, referentne vrijednosti od 0.01 i 0.05 g premašene su na cijelom području, a pri vrijednostima od 0.10 i 0.14 g počinju se isticati područja na kojima te vrijednosti neće biti premašene te se naziru i područja s izraženijom stopom premašivanja. Područja s velikom stopom su na vrijednostima od 0.18 i 0.24 g još izraženija, a zatim počinje obratni trend: područja na kojima vrijednosti od 0.35, 0.45 te 0.60 g neće biti premašene se šire, dok su vrlo aktivna područja sve koncentriranija. Referentne vrijednosti na drugom kraju spektra, 0.80 i 1.00 g, neće biti premašene gotovo nigdje.



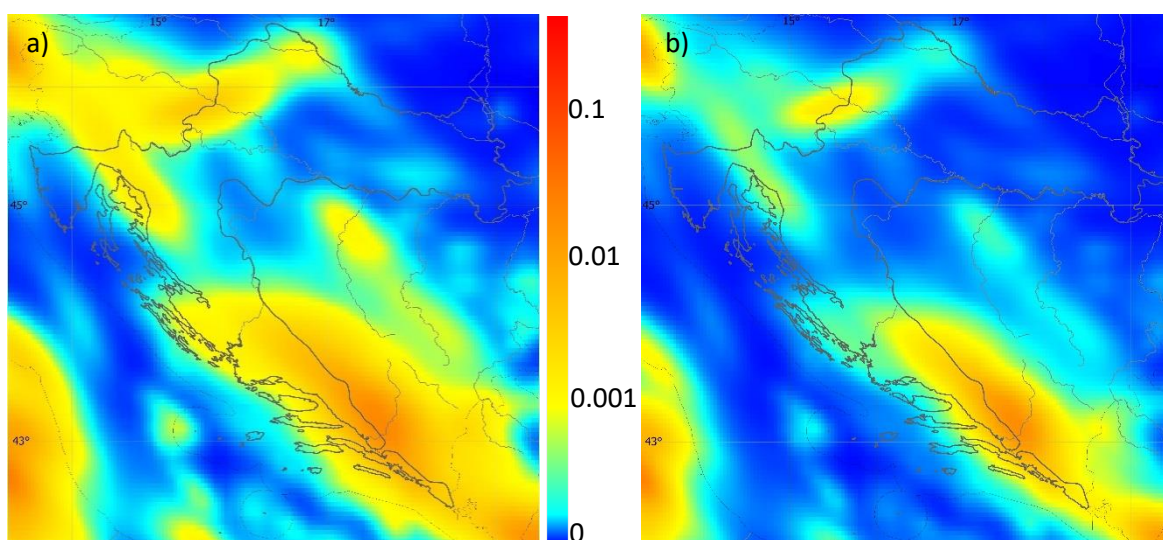
Slika 4.6. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 0.01 g (a) i 0.05 g (b) površinskog gibanja.



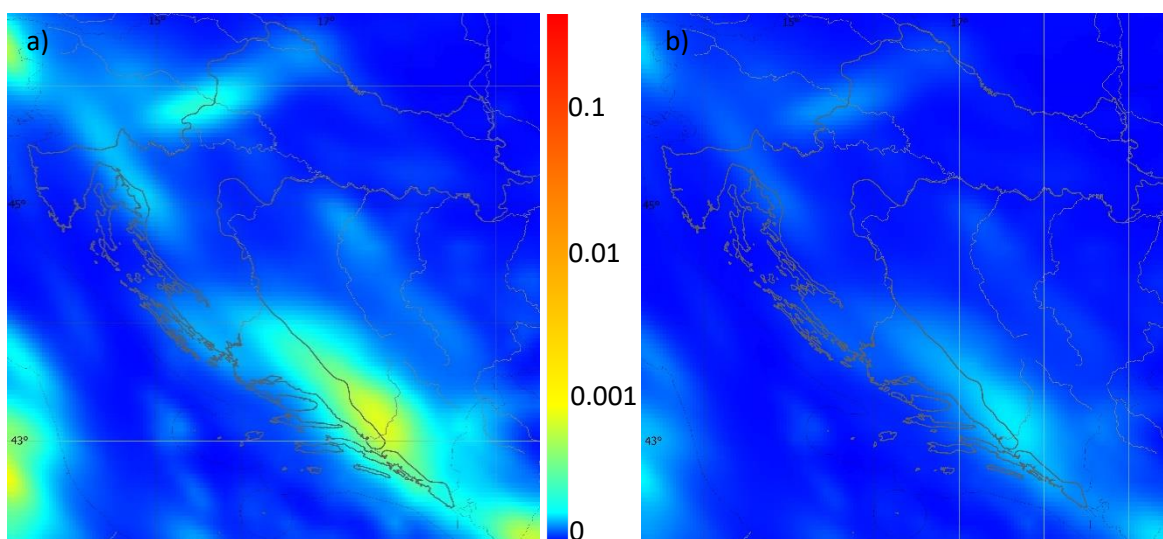
Slika 4.7. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 0.10 g (a) i 0.14 g (b) površinskog gibanja.



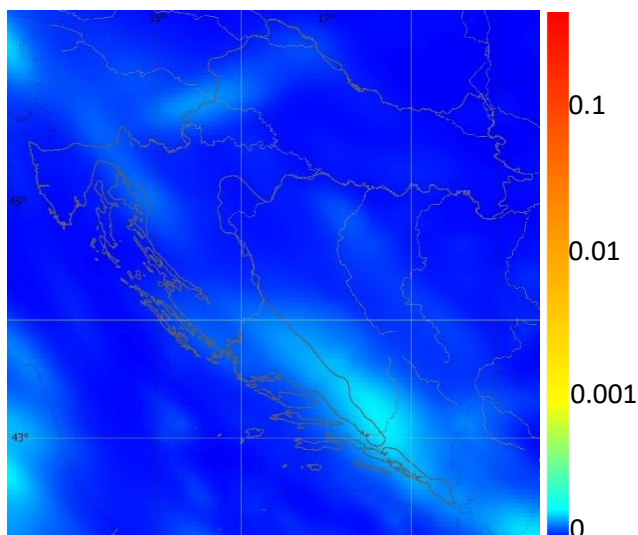
Slika 4.8. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 0.18 g (a) i 0.24 g (b) površinskog gibanja.



Slika 4.9. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 0.35 g (a) i 0.45 g (b) površinskog gibanja.



Slika 4.10. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 0.60 g (a) i 0.80 g (b) površinskog gibanja.

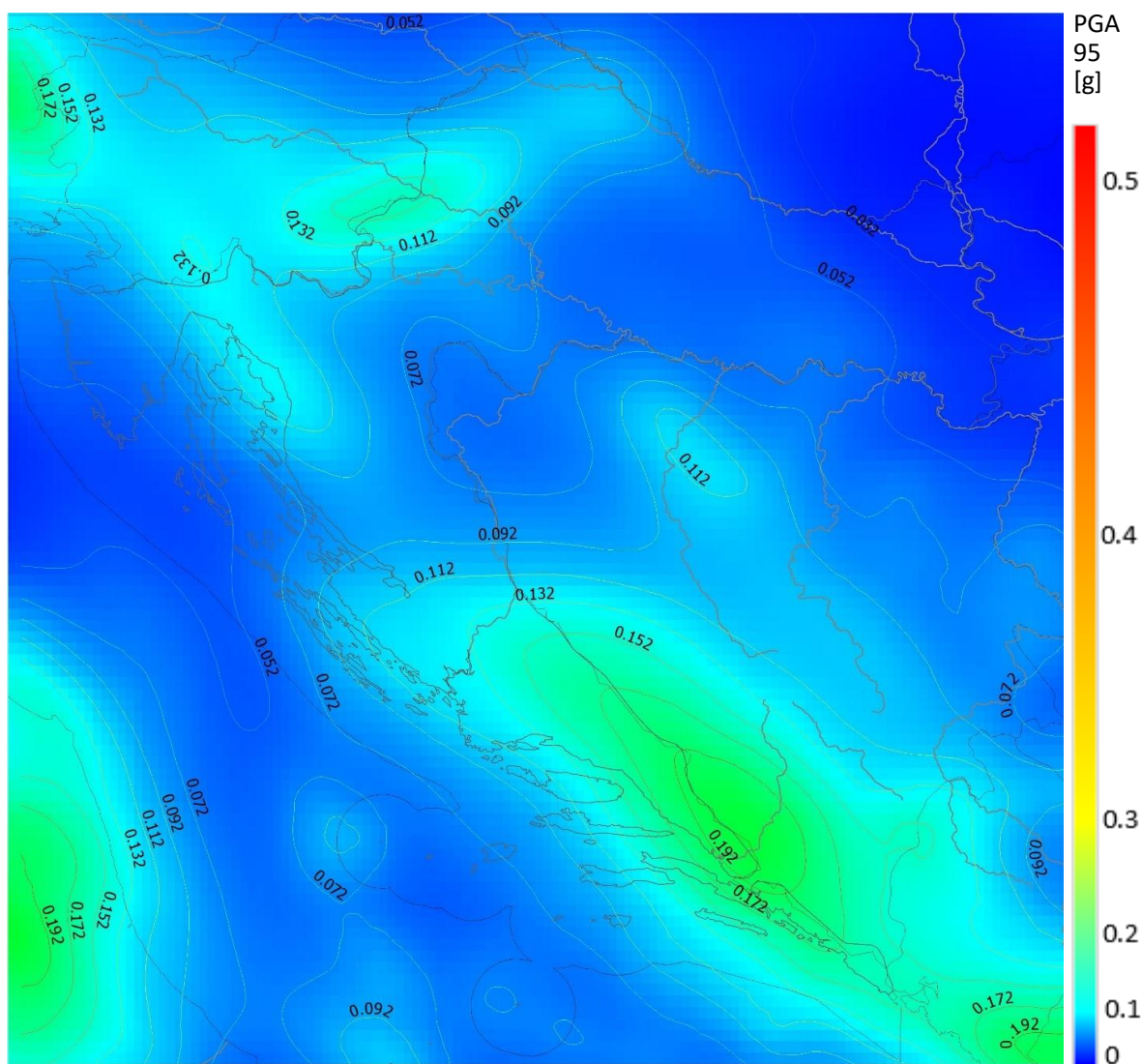


Slika 4.11. Godišnja stopa premašivanja vrijednosti 1.00 g površinskog gibanja.

Završni korak proračuna, tj. sinteza svih prethodnih koraka analize, je vršno ubrzanje tla PGA za povratni period od 95, 475 i 1000 godina, odnosno vjerojatnost premašivanja površinskog gibanja od 10% u poredbenom razdoblju od 10, 50 i 100 godina, a prikazano je na slikama 4.12, 4.13 i 4.14. Logično je očekivati da će se s povećanjem povratnog perioda, odnosno poredbenog razdoblja, na cijelom istraživanom području povećati i vjerojatnosti premašivanja površinskog gibanja dok će prostorna raspodjela ostati približno ista. To je zaista i uočljivo u rezultatima: u PGA za period od 95 godina

Tablica 4.1. Naziv područja izražene koncentracije djelovanja, raspon zemljopisne širine φ i dužine λ protezanja, te maksimumi seizmičke aktivnosti i vršnog ubrzanja tla PGA za periode od 95, 475 i 1000 godina.

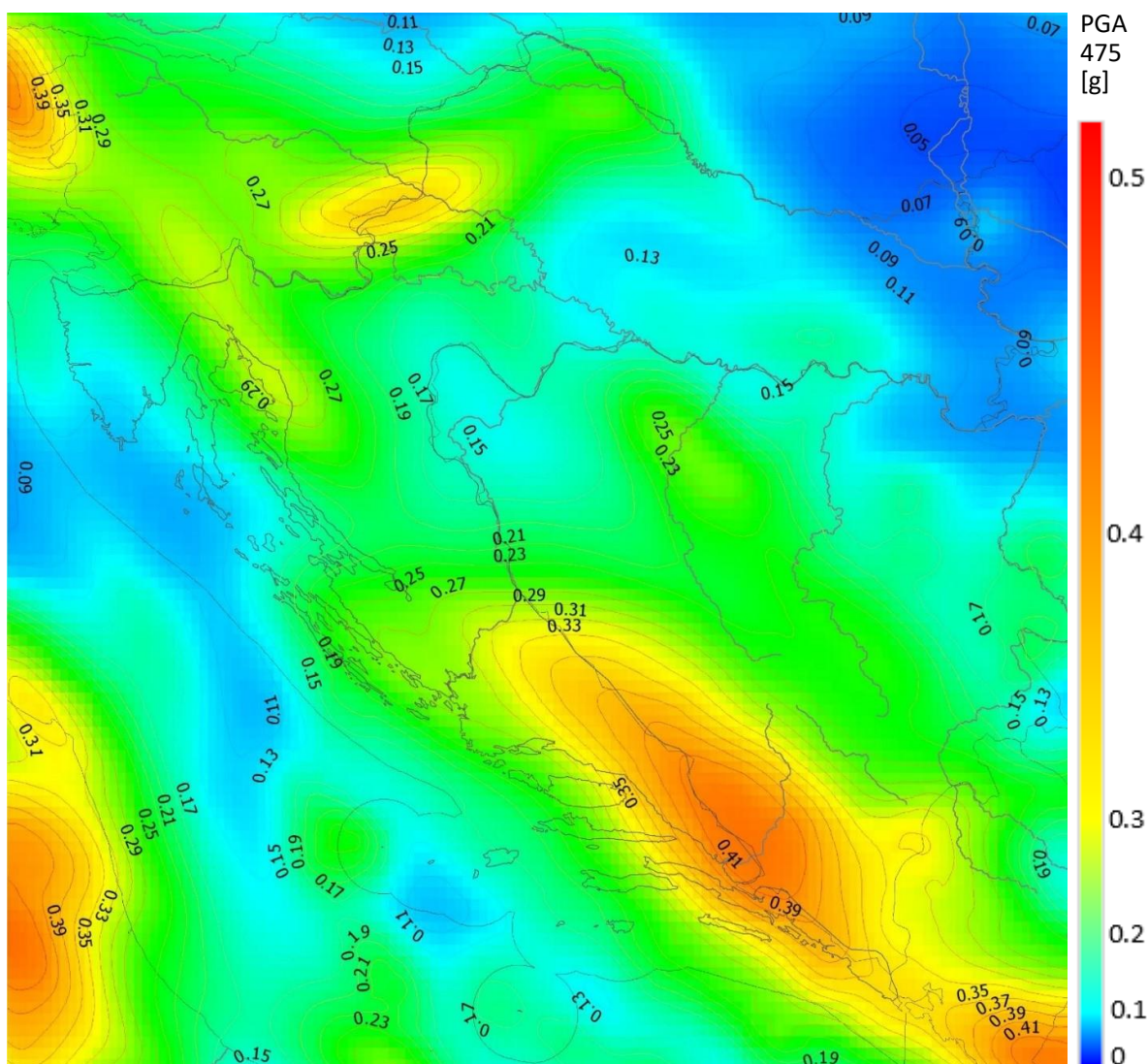
područje	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	aktivnost	PGA95	PGA475	PGA1000
Dalmacija	42.5° - 44.0°	16.0° - 18.5°	1.187328	0.209012	0.438898	0.588327
Žumberak	45.5° - 46.0°	15.0° - 16.0°	0.757564	0.157814	0.354101	0.486792
Kvarner	44.2° - 45.2°	14.0° - 15.2°	0.578594	0.132385	0.305587	0.426041
Bosna	44.5° - 45.0°	17.0° - 17.8°	0.596762	0.118336	0.267228	0.370006
Alpe	46.0° - 46.5°	13.0° - 14.0°	1.412871	0.197216	0.432142	0.583530
Italija	42.0° - 44.0°	13.0° - 14.0°	1.301692	0.213917	0.453763	0.606516
Crna Gora	42.0° - 42.5°	19.0° - 20.0°	1.686015	0.197167	0.432142	0.568512



Slika 4.12. Vršno ubrzanje tla PGA za povratni period od 95 godina (vjerojatnost premašivanja od 10% u 10 godina). Vrijednosti su prikazane u rasponu od 0.01 do 0.55 g. Iznosi PGA prikazani su bojom i izolinijama s rezolucijom od 0.02 g.

vrijednosti su relativno male i kreću se između 0.01 g i 0.21 g, u PGA pri periodu od 475 godina vrijednosti su veće i kreću se između 0.03 g i 0.45 g, dok su za PGA perioda od 1000 godina vrijednosti najveće: između 0.04 g i 0.61 g. Ekstremi vrijednosti opaženi su u koncentracijama djelovanja na samom rubu istraživanog područja.

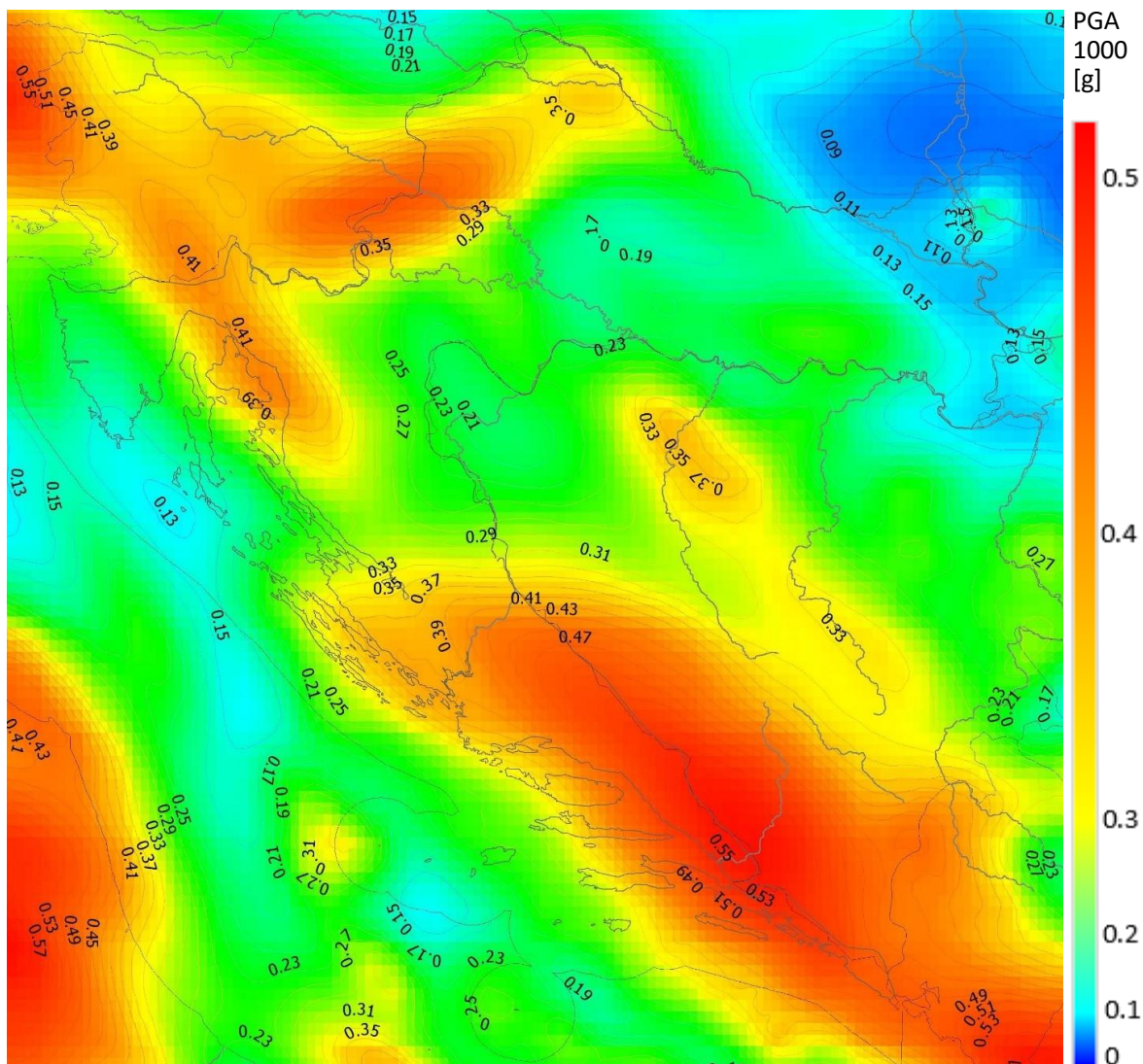
Ranije opisane koncentracije djelovanja uočljive su na svim kartama PGA, na kojima se s povećanjem povratnog perioda područja izražene aktivnosti pojačavaju i šire. Maksimalne vrijednosti po pojedinim područjima koncentracije djelovanja dane su u tablici 4.1. Na svim kartama posebno je izraženo područje južne Dalmacije, gdje se i nalaze najveće vrijednosti PGA unutar karte: za PGA povratnog perioda od 95 godina to je vrijednost od 0.21 g, za PGA perioda od 475 godina 0.44 g, a za PGA perioda od 1000



Slika 4.13. Vršno ubrzanje tla PGA za povratni period od 475 godina (vjerojatnost premašivanja od 10% u 50 godina). Vrijednosti su prikazane u rasponu od 0.01 do 0.55 g. Iznosi PGA prikazani su bojom i izolinijama s rezolucijom od 0.02 g.

godina čak 0.59 g. Osim južne Dalmacije, unutar karte je pri svim povratnim periodima izraženo i područje Žumberka, dok su koncentracije na području Kvarnera i sjeverne Bosne jasnije pri periodima od 475 i 1000 godina. Na rubovima karte su pri svim povratnim periodima vrlo izražene koncentracije u Alpama, Italiji i Crnoj Gori, a također je istaknuto i područje minimalnih vrijednosti u Panonskom bazenu.

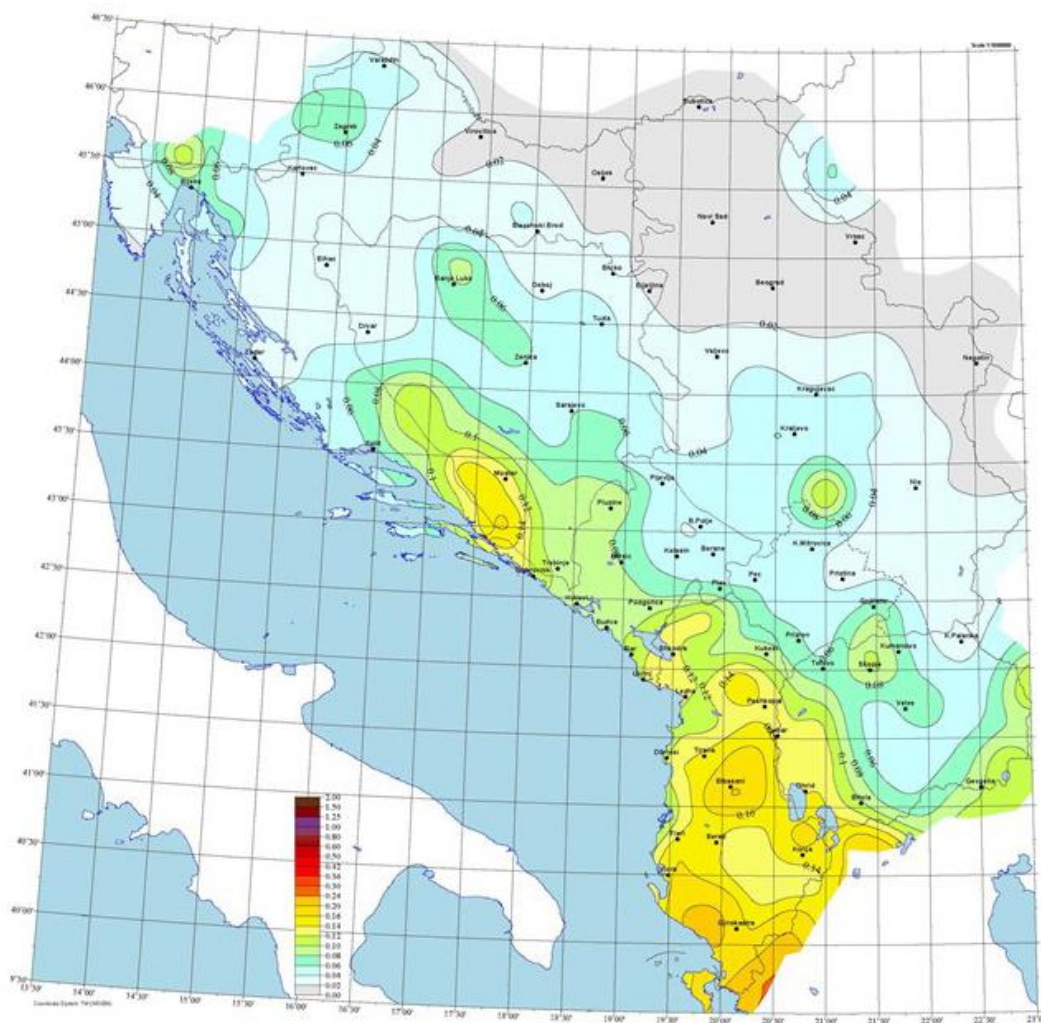
Seizmički hazard na prostoru Hrvatske i okolice dobiven u ovom radu usporediv je s rezultatima probabilističke analize seizmičkog hazarda na području zapadnog Balkana provedene u projektu BSHAP (Kuka i sur., 2018), također pomoću softvera OHAZ. Slike 4.15 i 4.16 prikazuju vršna ubrzanja tla za povratne periode od 95 i 475 godina izračunata



Slika 4.14. Vršno ubrzanje tla PGA za povratni period od 1000 godina (vjerojatnost premašivanja od 10% u 100 godina). Vrijednosti su prikazane u rasponu od 0.01 do 0.55 g. Iznosi PGA prikazani su bojom i izolinijama s rezolucijom od 0.02 g.

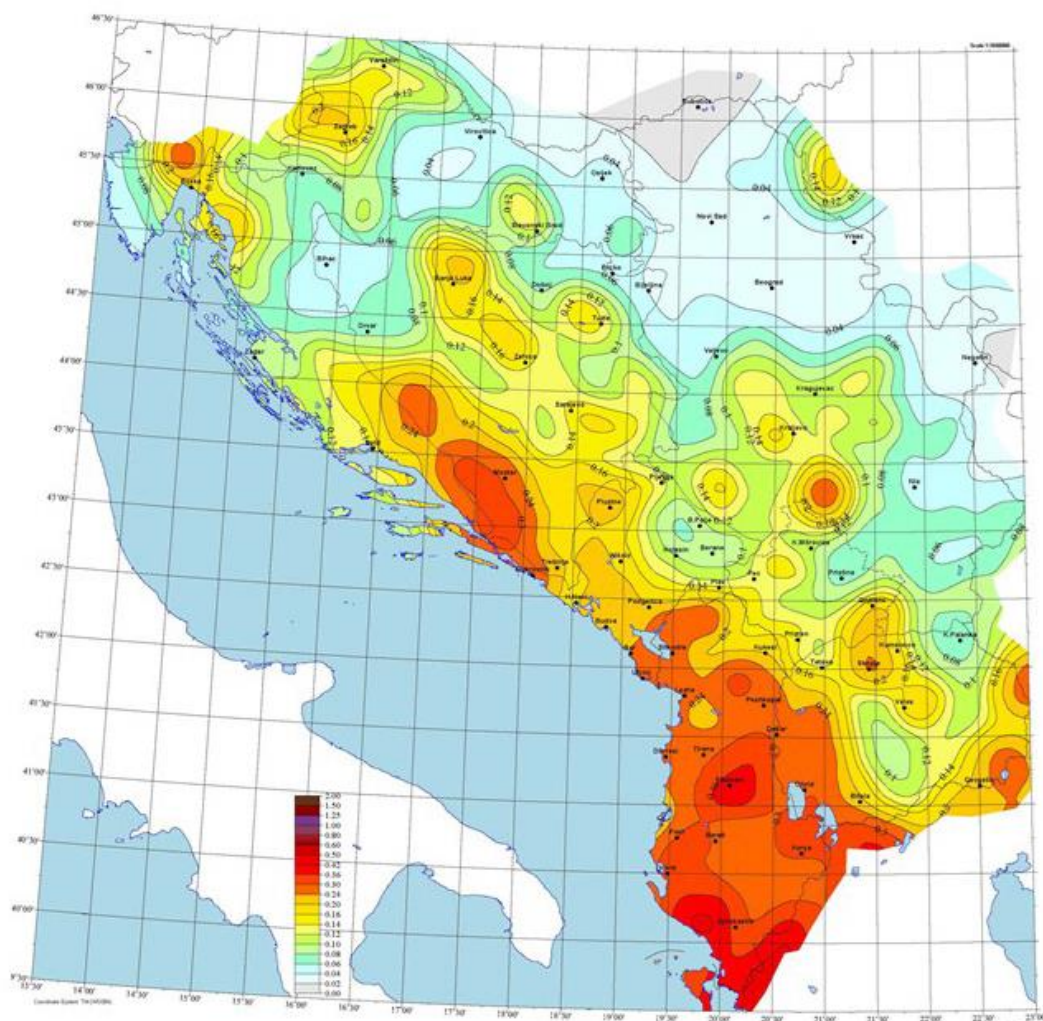
na temelju ulaznih parametara dobivenih usklađivanjem podataka iz pojedinih zemalja sudionica projekta (Hrvatska, Bosna i Hercegovina, Srbija, Crna Gora, Albanija, Makedonija). Za potrebe proračuna sastavljeni su regionalni katalog glavnih potresa, baza mehanizama pomaka u žarištu potresa (eng. *fault plane solution*), seizmotektonski model i baza jakog gibanja (eng. *strong motion*), te su odabrane prikladne atenuacijske relacije (Boore i sur., 2014; Chiou i Youngs, 2014; Akkar i sur., 2014; Bindi i sur., 2014).

Promatranjem sjeverozapada područja istraženog projektom BSHAP, odnosno područja koje odgovara onom razmatranom u ovom radu, može se uočiti



Slika 4.15. Karta seizmičkog hazarda prema projektu BSHAP: vršno ubrzanje tla za povratni period od 95 godina (vjerojatnost premašivanja od 10% u 10 godina). Vrijednosti su prikazane u rasponu do 2.00 g s izolinijama i gradacijom boja: od sive do zelene boje vrijednosti 0.00 – 0.10, žute boje su vrijednosti 0.12 – 0.20, narančasto do tamno crveno su 0.22 – 2.00 (preuzeto iz Kuka i sur., 2018).

kvalitativna i kvantitativna sličnost krajnjih rezultata. Na kartama vršnih akceleracija projekta BSHAP uočljiva su područja izražene aktivnosti koja približno odgovaraju prostornoj raspodjeli koncentracija dobivenoj u ovom radu, dok su vrijednosti općenito manje. Najjače je izraženo područje na jugu Dalmacije i Bosne, gdje vrijednosti iznose oko 0.16 g za povratni period od 95 godina, odnosno 0.30 g za period od 475 godina, što je poprilično manje od vrijednosti dobivenih u ovom radu (0.19 g za PGA perioda od 95 godina i 0.41 g za PGA perioda od 475 godina). Uočljiva je i koncentracija u području Žumberka, ali bez izraženog smjera protezanja i sa znatno manjom aktivnošću (oko 0.06 g za period od 95 godina, tj. 0.20 g za period od 475 godina), zatim koncentracija na



Slika 4.16. Karta seizmičkog hazarda prema projektu BSHAP: vršno ubrzanje tla za povratni period od 475 godina (vjerojatnost premašivanja od 10% u 50 godina). Vrijednosti su prikazane u rasponu do 2.00 g s izolinijama i gradacijom boja: od sive do zelene boje vrijednosti 0.00 – 0.10, žute boje su vrijednosti 0.12 – 0.20, narančasto do tamno crveno su 0.22 – 2.00 (preuzeto iz Kuka i sur., 2018).

području Kvarnera (oko 0.10 g za period od 95 godina, tj. 0.24 g za period od 475 godina), koja također nema izražen smjer protezanja, te koncentracija u sjevernoj Bosni (oko 0.08 g za period od 95 godina, tj. 0.20 g za period od 475 godina).

Jugoistočno od razmatranih koordinata nalazi se veliko područje vrlo izražene aktivnosti (s maksimumom u Albaniji), čiji sjeveroistočni rub odgovara koncentraciji aktivnosti u Crnoj Gori dobivenoj u ovom radu, iako su vrijednosti od oko 0.10 - 0.12 g za period od 95 godina, tj. 0.20 - 0.24 g za period od 475 godina znatno manje od onih dobivenih u ovom radu. Područje Crne Gore, kao i raspodjela koncentracije na istoku Bosne, te minimalne vrijednosti u Panonskoj nizini sugeriraju slaganje vršne akceleracije

dobivene u ovom radu sa širim regionalnim trendovima. Razlike u rezultatima, odnosno razlika u vrijednostima vršnih akceleracija i položaju koncentracija, posebno onih na sjeverozapadnom rubu područja u istraživanju BSHAP (Žumberak i Kvarner), zacijelo su posljedica različitih i s različitom preciznošću definiranih ulaznih parametara i granica područja.

Na temelju prethodne analize može se zaključiti da je proračun hazarda na prostoru Hrvatske i bliže okolice pomoću programa OHAZ bio uspješan jer su prostorne raspodjele sukladne očekivanjima, a vrijednosti smislene, iako ponešto veće od očekivanih. Prostorna raspodjela aktivnosti i vršnih akceleracija slaže se s raspodjelom potresa magnituda $M > 4$ iz kataloga glavnih potresa, a samim time i sa seizmotektonikom područja, jer područja s izraženim vrijednostima aktivnosti i vršnog ubrzanja odgovaraju područjima s pojačanom koncentracijom potresa. Rezultati su usporedivi i s istraživanjem na višoj razini – BSHAP jer je uočljivo podudaranje zona izraženih vršnih akceleracija, a same vrijednosti, iako su u ovom radu općenito veće, istog su reda veličine.

Uz dobro definirane ulazne podatke program će račun provesti s matematičkom preciznošću, tako da pogreške, odnosno utjecaje na rezultat, možemo očekivati u samim ulaznim podacima. Pogreška pri unosu podataka praktički je nemoguća jer se softver ne može pokrenuti s pogrešno upisanim parametrima. Među ulaznim parametrima koje je za proračun potrebno odabrati najočitiji utjecaj na hazard imat će zasigurno atenuacijske relacije. Relacije korištene u ovom proračunu odabrane su s obzirom na svoju prikladnost za promatrano područje, uz definiranje udjela pojedine relacije u izračunu, ali bez preciznijeg definiranja karakteristika jednadžbi. Relacije i sugestije ponuđene u programu radi jednostavnosti i jasnoće računa općenito nisu mijenjane, pa bi uz detaljniju analizu potrebnih parametara te karakteristika područja, ali i mogućnosti samog softvera zasigurno bilo moguće postići realniji rezultat.

5. Zaključci

U ovom radu proveden je proračun seizmičkog hazarda na prostoru Hrvatske i bliže okolice pomoću računalnog programa OHAZ. Analiza hazarda primjenom metode PSHA uključila je definiranje niza ulaznih parametara, kataloga glavnih potresa te seizmotektonike područja, zatim izračun seizmičke aktivnosti područja, godišnje stope premašivanja niza referentnih vrijednosti površinskog gibanja, te vršne akceleracije tla pri povratnim periodima od 95, 475 i 1000 godina, tj. vjerojatnosti premašivanja površinskog gibanja od 10% u razdoblju od 10, 50 i 100 godina. Dobiveni numerički rezultati analizirani su i prikazani grafički.

Na prikazima rezultata mogu se uočiti koncentracije potresnog djelovanja koje odgovaraju prostornoj raspodjeli jakih potresa ($M > 4$) na zadanom području. Na kartama seizmičke aktivnosti i vršnih akceleracija tla uočljive su zone povećane aktivnost, odnosno potresne opasnosti, koje odgovaraju prostorima na kojima su se često pojavljivali jaki potresi: šire područje Dalmacije, Žumberka, Kvarnera i sjeverne Bosne, te uz rub razmatranog prostora područje Crne Gore, Alpa i Italije. Rezultati PGA usporedivi su s rezultatima dobivenim u projektu BSHAP u sklopu kojeg je analiziran seizmički hazard na prostoru zapadnog Balkana jer se zone koncentracija djelovanja podudaraju, dok su vrijednosti PGA u ovom radu nešto veće, ali istog reda veličine kao i one iz projekta BSHAP. Ukupna seizmička aktivnost može se razložiti na aktivnost po intervalima magnituda između 4.0 i 7.5 s korakom od 0.5: pri nižim intervalima aktivna područja su vrlo rasprostranjena, dok pri višim magnitudama postaju sve koncentriranija. Godišnja stopa premašivanja niza referentnih vrijednosti površinskog gibanja pokazuje slično ponašanje: niske referentne vrijednosti bit će premašene gotovo svugdje, s povećanjem referentnih vrijednosti izdvajaju se i izoštravaju koncentracije jačeg djelovanja potresa, a vrlo visoke referentne vrijednosti bit će premašene samo na posebno aktivnim područjima.

Dobiveni rezultati dobro ocrtavaju efekte potresa na razmatranom području jer koncentracije aktivnosti i vršnog ubrzanja tla odgovaraju raspodjeli potresa velikih magnituda, a vrijednosti su usporedive s rezultatima istraživanja višeg stupnja, iako su ponešto veće. Programom OHAZ moguće je, dakle, izračunati seizmički hazard nekog područja ukoliko je za to područje sastavljen katalog glavnih potresa i procijenjena njegova kompletnost, te ako je poznata seizmotektonika i prikladne atenuacijske relacije. Naravno, što su karakteristike područja i potresa bolje proučene i preciznije definirane, to će i rezultati bolje odgovarati realnom seizmičkom hazardu.

6 Literatura

- [1] Aki, K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a + bM$ and its confidence limits. // Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 43 (1965), str. 237-239.
- [2] Akkar, S.; Bommer, J.J. Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region and the Middle East. // Seismological Research Letters, Vol. 81 (2009), str. 195-206.
- [3] Akkar, S.; Kale, O.; Ansari, A.; Durgaryan, R.; Askan Gundogan, A.; Hamzehloo, H.; Harmandar, E.; Tsereteli, N.; Waseem, M.; Yazjeen, T.; Yilmaz, M. T. EMME strong-motion database serving for predictive model selection to EMME ground-motion logic-tree applications. // Second European conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul, Turkey, 2014, Abstract No. 3220.
- [4] Algermissen, S. T.; Perkins, D. L.; Thenhaus, P. C.; Hanson, S. L.; Bender, B. L. Probabilistic Estimates of Maximum Acceleration and Velocity in Rock in the Contiguous United States. // U. S. Geological Survey Open-File Report, 82-1033 (1982).
- [5] Ambraseys, N. N.; Douglas, J.; Sarma, S. K.; Smit, P. M. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration. // Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 3, 1 (2005), str. 1-53.
- [6] Ambraseys, N. N.; Simpson, K. A.; Bommer, J. J. Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe. // Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, Vol. 25, str. 371-400.
- [7] Berge-Thierry, C.; Cotton, F.; Scotti, O.; Griot-Pommeray, G. A.; Fukushima, Y. New Empirical Response Spectral Attenuation Laws For Moderate European Earthquakes. // Journal of Earthquake Engineering, 2003, Vol. 7, str. 193-222.
- [8] Bernreuter, D. L.; Savy, J. B.; Mensing, R. W.; Chen, J. C. Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Power Plant Sites East of the Rocky Mountains. // U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1989. NUREG/CR-5250.
- [9] Berrill, J. B.; Davis, R. O. Maximum entropy and the magnitude distribution. // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 70, 5 (1980), str. 1823-1831.

- [10] Bindi D., Luzi L., Massa M., Pacor F. Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA) // Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 8, 5 (2009), str. 1209-1230.
- [11] Bindi, D.; Massa, M.; Luzi, L.; Ameri, G.; Pacor, F.; Puglia, R.; Augliera, P. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. // Bulletin of Earthquake Engineering, 2014. DOI: 10.1007/s10518-013-9525-5.
- [12] Boore, D. M.; Joyner, W. B.; Fumal, T. E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. // Seismological Research Letters, Vol. 68, 1 (1997), str. 128-153.
- [13] Boore, D. M.; Stewart, J. P.; Seyhan, E.; Atkinson, G. M. NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes. // Earthquake Spectra 30 (2014), str. 1057–1085.
- [14] Brian, S.; Chiou, J.; Youngs, R. R. Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. // Earthquake Spectra, Vol. 30 (2014), br. 3, str. 1117-1153.
- [15] Cauzzi, C.; Faccioli, E. Broadband (0.05 to 20s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. // Journal of Seismology, Vol. 12 (2008), str. 453-475.
- [16] Coppersmith, K. J.; Youngs, R. R. Capturing uncertainty in probabilistic seismic hazard assessments within intraplate tectonic environment. // Proceedings of the Third U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Charleston, South Carolina, vol. 1, str. 301-312 (1986).
- [17] Cornell, C. A. Engineering seismic risk analysis. // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 58 (1968), str. 1583 -1606.
- [18] Cornell, C. A.; Vanmarcke, E. H. The major influences on seismic risk : Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, vol. 1 (1969). Santiago, Chile. Str. 69-93.
- [19] Cornell, C. A.; Winterstein, S. R. Temporal and magnitude dependence in earthquake recurrence models. // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 78, 24 (1988), str. 1522-1537.
- [20] Electric Power Research Institute. Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States. // EPRI, (1986), NP-4726.

- [21] Frankel, A. Mapping seismic hazard in the Central and Eastern United States // Seismological Research Letters. Vol. 66, 4 (1995), str. 8-21.
- [22] Gasperini, P.; Ferrari, G. Deriving numerical estimates from descriptive information: the computation of earthquake parameters. // Annals of Geophysics, Vol. 43 (2000), str.729–746.
- [23] Giardini, D. i sur. Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource, <http://portal.share-eu.org:8080/jetspeed/portal/>, doi: 10.12686/SED-00000001-SHARE (2013).
- [24] Grünthal, G.; Wahlström, R. The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. // Journal of Seismology, Vol. 16 (2012), 3, str. 535-557.
- [25] Gumbel, E. J. Statistics of Extremes. New York: Columbia University Press, 1959.
- [26] Herak, M.; Herak, D.; Markušić, S. Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992. // Terra Nova 8 (1996), str. 86-94.
- [27] Joyner, W.B.; Boore, D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California earthquake. // Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 71 (1981), str. 2011-2038.
- [28] Kuka, N.; Gülerce, Z.; Milutinović, Z.; Mihaljević, J.; Šalić, R.; Duni, L.; Markušić, S.; Kovačević, S. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Western Balkans. // Bulletin of Earthquake Engineering (UNDER REVIEW).
- [29] Lapajne, J. K. Some features of the spatially smoothed seismicity approach. // Proceedings of Workshop : Seismicity modeling in seismic hazard mapping, Poljče, May 22-24th, 2000. Ljubljana : Geophysical Survey, 2000.
- [30] Lapajne, J. K.; Šket Motnikar, B.; Zabukovec, B.; Župančič, P. Spatially-smoothed seismicity modelling of seismic hazard in Slovenia. // Journal of Seismology. Vol. 1, 1 (1997), str. 73-85.
- [31] Lapajne, J. K.; Šket Motnikar, B.; Župančič, P. Probabilistic Seismic Hazard Assessment Methodology for Distributed Seismicity. // Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 93, 6 (2003), str. 2502-2515.
- [32] Mihaljević, J.; Zupančič, P.; Kuka, N.; Kaluđerović, N.; Koči, R.; Markušić, S.; Šalić, R.; Dushi, E.; Begu, E.; Duni, L.; Živčić, M.; Kovačević, S.; Ivančić, I.; Kovačević, V.; Milutinović, Z.; Vakilinezhad, M.; Fiket, T.; Gülerce, Z. BSHAP Seismic Source Characterization Models for the Western Balkan Region. // Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 15(10), 2017, str. 3963-3985.

- [33] Mulargia, F.; Gasperini, P.; Tinti, S. Contour mapping of Italian seismicity. // *Tectonophysics*, Vol. 142 (1987), str. 203-216.
- [34] Philadelphia Electric Company. Severe Accident Risk Assessment for the Limerick Generating Station. 1983.
- [35] Poljak, M.; Zupančič, P.; Lapajne, J. K.; Šket Motnikar, B. Seismotectonic input for spatially smoothed seismicity approach. // *Proceedings of Workshop : Seismicity modeling in seismic hazard mapping*, Poljče, May 22-24th, 2000. Ljubljana : Geophysical Survey, 2000.
- [36] Reiter, L. *Earthquake Hazard Analysis : issues and insights*. New York : Columbia University Press, 1990.
- [37] Sabetta, F.; Pugliese, A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. // *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 86, 2 (1996), str. 337-352.
- [38] Stein, S.; Wysession, M. *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Oxford : Blackwell Publishing Ltd., 2003.
- [39] Stepp, J. C. Analysis of completeness in the earthquake sample in the Puget Sound area and its effect on statistical estimates of earthquake hazard. // *Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*, 1972, br. 2, str. 897-910.
- [40] Stucchi i sur. The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899. // *Journal of Seismology*, Vol. 17 (2013), 2, str. 523–544.
- [41] Šket Motnikar, B.; Lapajne, J. K.; Zupančič, P.; Zabukovec, B. Application of the spatially smoothed seismicity approach for Slovenia. // *Proceedings of Workshop : Seismicity modeling in seismic hazard mapping*, Poljče, May 22-24th, 2000. Ljubljana : Geophysical Survey, 2000.
- [42] Wells, D. L.; Coppersmith, K. J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84, 4 (1994), str. 974-1002.
- [43] Zabukovec, B.; Kuka, N.; Šoštarić, M.; Šket Motnikar, B.; Šuler, T. *OHAZ : Computer Program for Seismic Hazard Calculation, User Manual*, Environmental Agency of Slovenia and Institute of Seismology of Albania, 2007.