

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geofizički odsjek



**SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA U SKLOPU PROJEKTA
„PROCJENA POTRESNOG RIZIKA GRADA ZAGREBA“
(faza 1)**

dr. sc. Ivica Sović
izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić
Tomislav Fiket, dipl. ing
mr. sc. Ines Ivančić
Krešimir Kuk, dipl. ing.
dr. sc. Kristina Šariri
Josip Ivančić, mag. ing. et comm. techn.

Zagreb, rujan 2023.

Prirodoslovno matematički fakultet, Geofizički odsjek, Zagreb:

Elaborat izradili:

dr. sc. Ivica Sović Ivica Sović

izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić Snježana Markušić

Suradnici:

Tomislav Fiket, dipl. ing

mr. sc. Ines Ivančić

Krešimir Kuk, dipl. ing.

dr. sc. Kristina Šariri

Josip Ivančić, mag. ing. et comm. techn.

Voditelj studije:

dr. sc. Ivica Sović Ivica Sović

Dekan PMF-a:

prof. dr. sc. Mirko Planinić

Mirko Planinić



SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	KATALOG POTRESA	2
2.1	MAGNITUDA POTRESA U PROŠIRENOM KATALOGU POTRESA CEC2021	4
3	OPIS SEIZMIČNOSTI	6
3.1	LOKALNA SEIZMIČNOST	6
3.2	REGIONALNA SEIZMIČNOST	13
3.3	SEIZMIČKA POVIJEST LOKACIJE	17
4	SEIZMIČKI HAZARD	19
4.1	OSNOVNI KORACI METODE PSHA	20
4.2	ULAZNI PARAMETRI ZA PSHA	23
4.2.1	Seizmički izvori	23
4.2.2	Značajke seizmičnosti	23
4.2.3	Pretpostavka nepouzdanosti modela	24
4.3	IZRAČUN SEIZMIČKOG HAZARDA ZA PODRUČJE GRADA ZAGREBA	25
5	REZULTATI	27
5.1	KARTE SEIZMIČKOG HAZARDA	27
5.2	KRIVULJE HAZARDA	29
5.3	UHS – SPEKTRI JEDNOLIKOG HAZARDA	33
6	LITERATURA	40

1. UVOD

U okviru projekta "Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa" je i dio "Potresni rizik Grada Zagreba" koji će poslužiti kao pilot-projekt za određivanje potresnog rizika u drugim dijelovima Hrvatske. Zbog toga će u ovom radu težište biti na razvoju metoda za procjenu potresnog rizika, definiranju seizmičkog hazarda i proračunu potresnog rizika za područje Grada Zagreba. Ovo izvješće je prva faza elaborata seizmičkih aktivnosti projekta "Potresni rizik Grada Zagreba".

Prvi korak u računanju seizmičkog rizika (potresne ugroženosti) je računanje seizmičkog hazarda (potresne opasnosti) na osnovnoj stijeni. Seizmički hazard je vjerojatnost da će određeno svojstvo potresa (npr. najveća akceleracija ili intenzitet) premašiti određenu vrijednost u nekom periodu, a osnovna stijena je sredstvo u kojem su brzine transverzalnih valova veće ili jednake 800 m/s. Moguće ga je dobro izračunati samo ako se raspolaže podacima o dugom nizu potresa unutar kruga radijusa 200 km oko lokacije koja se istražuje. Budući da su jaki potresi rijetki događaji, za što točnije računanje seizmičkog hazarda potreban je katalog potresa koji sadrži što je moguće dulji niz potresa. Zbog toga je za potrebe projekta "Potresni rizik Grada Zagreba" napravljen katalog čija je osnova katalog Geofizičkog odsjeka PMF-a CEC2021 u kojem se nalaze i podaci o potresima od 22. 3. 2020. i 29. 12. 2020. Taj je katalog proširen podacima iz kataloga susjednih zemalja.

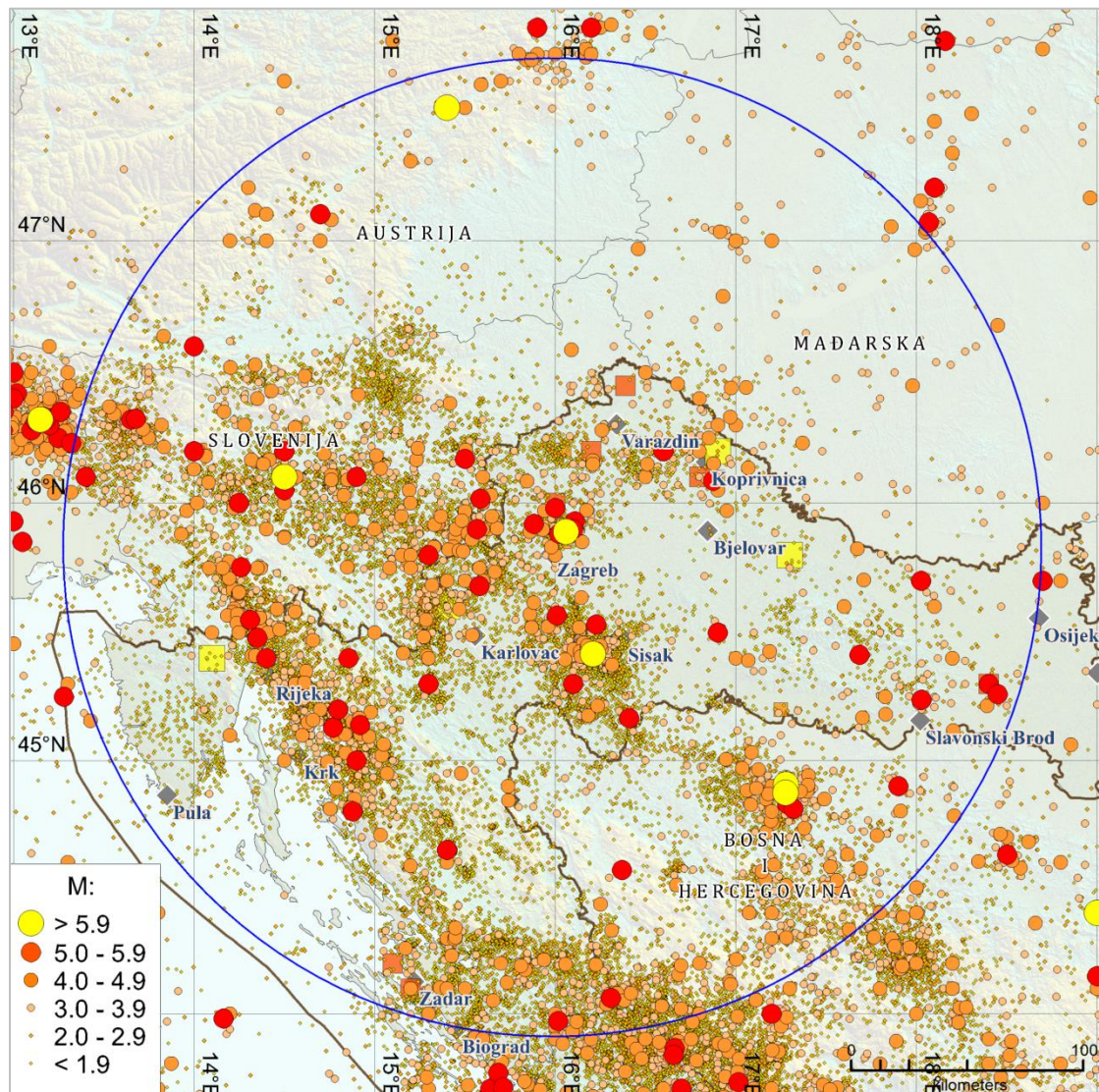
2. KATALOG POTRESA

Područje Grada Zagreba udaljeno je manje od 200 km od granica susjednih zemalja: Slovenije, Austrije, Mađarske, Bosne i Hercegovine i Italije. Zbog toga se Hrvatski katalog potresa (Croatian Earthquake Catalogue, CEC2021), koji uz potrese na području Hrvatske sadrži i podatke o potresima u graničnom području susjednih država, morao proširiti i podacima o potresima koji su se dogodili u susjedstvu, te su mu dodani podaci iz kataloga potresa međunarodnih seizmoloških centara.

Prvi katalog potresa za područje Hrvatske napravljen je u sklopu projekta UNDP/UNESCO „Istraživanje seizmičnosti Balkanskog područja“ (Shebalin i sur., 1974) te je kontinuirano ispravljan i dopunjavan novim podacima. Hrvatski katalog potresa CEC2021 sadrži osnovne podatke za više od 150.000 potresa koji su se dogodili od 178. godine pr. Kr. do kraja 2021. godine u Hrvatskoj i susjednim područjima. Za izradu kataloga potresa korišteni su svi dostupni povijesni makroseizmički podaci, instrumentalni podaci hrvatskih seizmoloških postaja, kao i postaja susjednih država (Slovenije, Austrije, Mađarske, Bosne i Hercegovine i Italije), dobiveni uobičajenom razmjenom seizmoloških podataka, neobjavljeni podaci iz Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a i podaci međunarodnih seizmoloških centara (ISC, CSEM-EMSC, NEIC-USGS, INGV i dr.). Katalog potresa za Hrvatsku i susjedna područja za potrebe ovog istraživanja ponovo je pregledan i dopunjen, te su posebno pažljivo provjereni podaci o povijesnim potresima, jer su pouzdani podaci o potresima za što dulji vremenski period ključni za točno računanje seizmičkog hazarda

Za potrebe istraživanja seizmičnosti u krugu od 200 km oko istraživane lokacije Hrvatski katalog potresa CEC2021 proširen je podacima o potresima u susjednim državama (kontinuirano nadopunjavana verzija kataloga potresa za RH objavljena u Herak i sur. (1996), Markušić i sur. (1998), Ivančić i sur. (2002, 2006 i 2018)). Za područje Mađarske i Austrije dodani su podaci ISC (International Seismological Center) kataloga, (ISC, 2023) i SHEEC (The SHARE European Earthquake Catalogue) kataloga, (Stucchi i sur., 2013; Grünthal i Wahlström, 2012). Podaci ISC kataloga su revidirani za razdoblje od 1900. do 2013. godine (Bondár i Storchak, 2011; Storchak i sur., 2017; Storchak i sur., 2020), dok su za razdoblje od 2014. do 2021. godine preuzeti najnoviji podaci iz ISC-ova biltena dostupnog preko mrežne stranice (ISC, 2023). Podacima iz ISC kataloga dodani su podaci iz SHEEC kataloga za razdoblje od 1000. do 1900. godine. ISC katalog je dopunjen podacima SHEEC kataloga za

razdoblje od 1900. odine uz dva kriterija: ako je epicentralna udaljenost dva potresa između ISC i SHEEC kataloga manja od 40 km i ako je razlika u hipocentralnom vremenu manja od 90 s potres se, uz ručnu kontrolu i uz usporedbu magnituda smatra istim, i podatak za taj potres uzima se iz ISC kataloga. Karta epicentara potresa prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1. Epicentri potresa ($M_w \geq 1.0$) u dopunjenom katalogu CEC2021. Pouzdano locirani povijesni potresi koji su se dogodili prije 1850. g. prikazani su kvadratićima, a kružićima potresi locirani u razdoblju od 1850. do 2021. godine. Magnituda potresa označena je bojom prema legendi na lijevoj strani slike. Plavi krug je polumjera od 200 km, a središte mu je na Trgu bana Josipa Jelačića.

Katalog potresa sadrži osnovne podatke za pojedini potres: datum i hipocentralno vrijeme po UTC (za potrese koji su se dogodili prije 1972. godine po GMT), geografske koordinate epicentra, dubinu žarišta u km, magnitudu i epicentralni ili najveći makroseizmički intenzitet, te referencu izvora podataka.

S obzirom na vremenski period u kojem su se događali potresi koje sadrži katalog CEC2021, metoda lociranja potresa za sve potrese nije ista. Za potrese prije 1908. godine, kad je Andrija Mohorovičić postavio prvi pravi seizmograf u Zagrebu, epicentar potresa se procjenjivao na temelju makroseizmičkih podataka. Krajem sedamdesetih godina i uvođenjem elektroničkih računala, koordinate hipocentara i hipocentralna vremena počela su se računati Geigerovom metodom (Geiger, 1910), a od kraja osamdesetih ti se parametri računaju pretraživanjem 4D prostora parametara (grid search metoda, Sambridge i Kennett, 1986) programom HYPOSEARCH (Herak, 1989).

2.1 MAGNITUDA POTRESA U PROŠIRENOM KATALOGU POTRESA CEC2021

Za potrese koji su se dogodili u predinstrumentalno vrijeme, prije 1900. godine, postoje samo podaci o intenzitetu potresa. Lokalna magnituda M_L tih potresa koja se nalazi u katalogu potresa izračunata je iz intenziteta u epicentru I_0 i dubine žarišta h potresa po relaciji (Herak, 1995):

$$M_L = 0.721 I_0 + 1.283 \log h - 1.130 \quad (2.1)$$

pri čemu je za potrese s nepoznatom dubinom žarišta uzeta vrijednost dubine od 12 km, što je srednja žarišna dubina instrumentalno zabilježenih potresa na području Hrvatske (Herak i sur., 1996).

Katalog potresa SHEEC za svaki potres navodi momentnu magnitudu M_W , ali u ISC katalogu nalaze se različite magnitude potresa : mb , M_L , M_S , M_d ili M_W . Zbog toga je trebalo ujednačiti magnitude preračunavanjem na momentnu magnitudu M_W . Pri tome se slijedilo proceduru i koristilo relacije iz Markušić i sur. (2016).

Momentna magnituda M_{hW} je izračunata iz lokalne magnitude M_L u katalogu CEC2021 na sljedeći način:

$$\text{ako je } M_L < 4.0 \text{ onda je } M_{hW} = M_L. \quad (2.2)$$

ako je $M_L \geq 4.0$ onda je $M_{hW} = 1.011 M_L - 0.11$ (2.3)

S obzirom na to da su u korištenim katalogima potresa dane različite vrijednosti za magnitude potresa, za prošireni katalog CEC2021 izračunata je momentna magnituda M_{hW} po relacijama :

$$M_{hW} = \exp(-0.044 + 0.227M_S) + 2.26 \quad (2.4)$$

$$M_{hW} = \exp(-1.401 + 0.458m_b) + 2.28 . \quad (2.5)$$

3. OPIS SEIZMIČNOSTI

3.1 LOKALNA SEIZMIČNOST

Grad Zagreb smješten je u kontinentalnom dijelu Hrvatske u dodirnom području dviju manjih tektonskih jedinica, Dinarida i Panonskog bazena. Seizmičnost ovog područja je umjerena, praćena relativno rijetkim snažnim potresima što je svojstveno seizmičnosti unutar tektonske ploče, ali i umjereno jaki potresi mogu biti razorni i imati značajan utjecaj na potresnu opasnost i potresnu ugroženost. Slika 3.1 prikazuje prostornu razdiobu epicentara potresa iz kataloga potresa CEC2021 u razdoblju od prije nove ere do 31. prosinca 2021. godine za potrese magnituda $M_L \geq 2.0$ i dubine žarišta $h \leq 30$ km.

Potresi su u ovom području uglavnom koncentrirani u središtima i u rubnim dijelovima otočnih gora poput Žumberka, Medvednice, Ivanščice i Kalnika. Detaljnije je proučeno područje do 45 km oko Trga bana Jelačića (slika 3.1), što obuhvaća područje Zagrebačke i Krapinsko – zagorske županije, te dijelove Varaždinske, Koprivničko-križevačke, Bjelovarsko-bilogorske, Sisačko-Moslavačke, i Karlovačke županije, kao i dio Republike Slovenije. Posebna pažnja posvećena je potresima unutar kruga radijusa 25 km kojim je obuhvaćeno cijelo područje grada Zagreba.

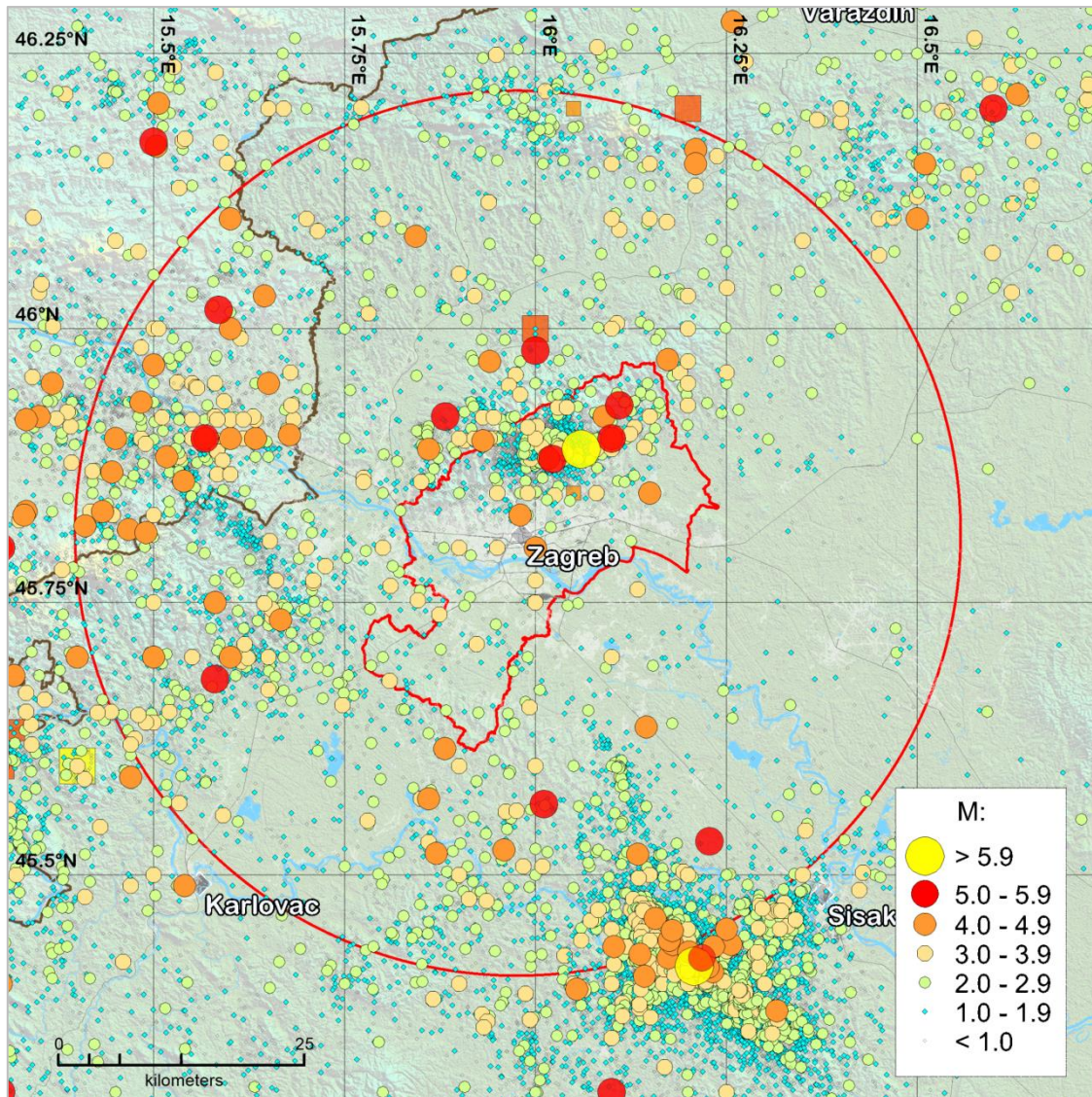
U neposrednoj blizini Zagreba nalaze se tri važna epicentralna područja: Medvednica, Brežice – Krško i Pokuplje – Banovina. Za računanje seizmičkog hazarda u Zagrebu je najznačajnije epicentralno područje Medvednice koje je omeđeno Sjevernim rubnim medvedničkim rasjedom i Kašinskim rasjedom. Potresi koji se događaju na tim rasjedima imaju epicentre u samom gradu.

Od pouzdanih povijesnih potresa najstariji potres na području Medvednice dogodio se 13. listopada 1775. u 6:30 GMT (Greenwich Mean Time). Epicentar mu je bio između Bedekovčine i Gornje Stubice ($\varphi = 45.93^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.11^\circ\text{E}$), a intenzitet u epicentru VII–VIII °MCS (Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica). Magnituda izračunata iz makroseizmičkih podataka mu je iznosila $M_m = 5.7$. Naročito velika šteta je bila u Krapini, Belcu, Pregradi, Zlataru, Zaboku i Svetom Križu Začretju. Crkva svete Barbare u Bedekovčini toliko je bila oštećena u potresu da su ju morali srušiti i novu sagraditi (Kišpatić, 1891). Od ostalih povijesnih potresa s epicentrima na Medvednici koji su se dogodili prije 1880. treba

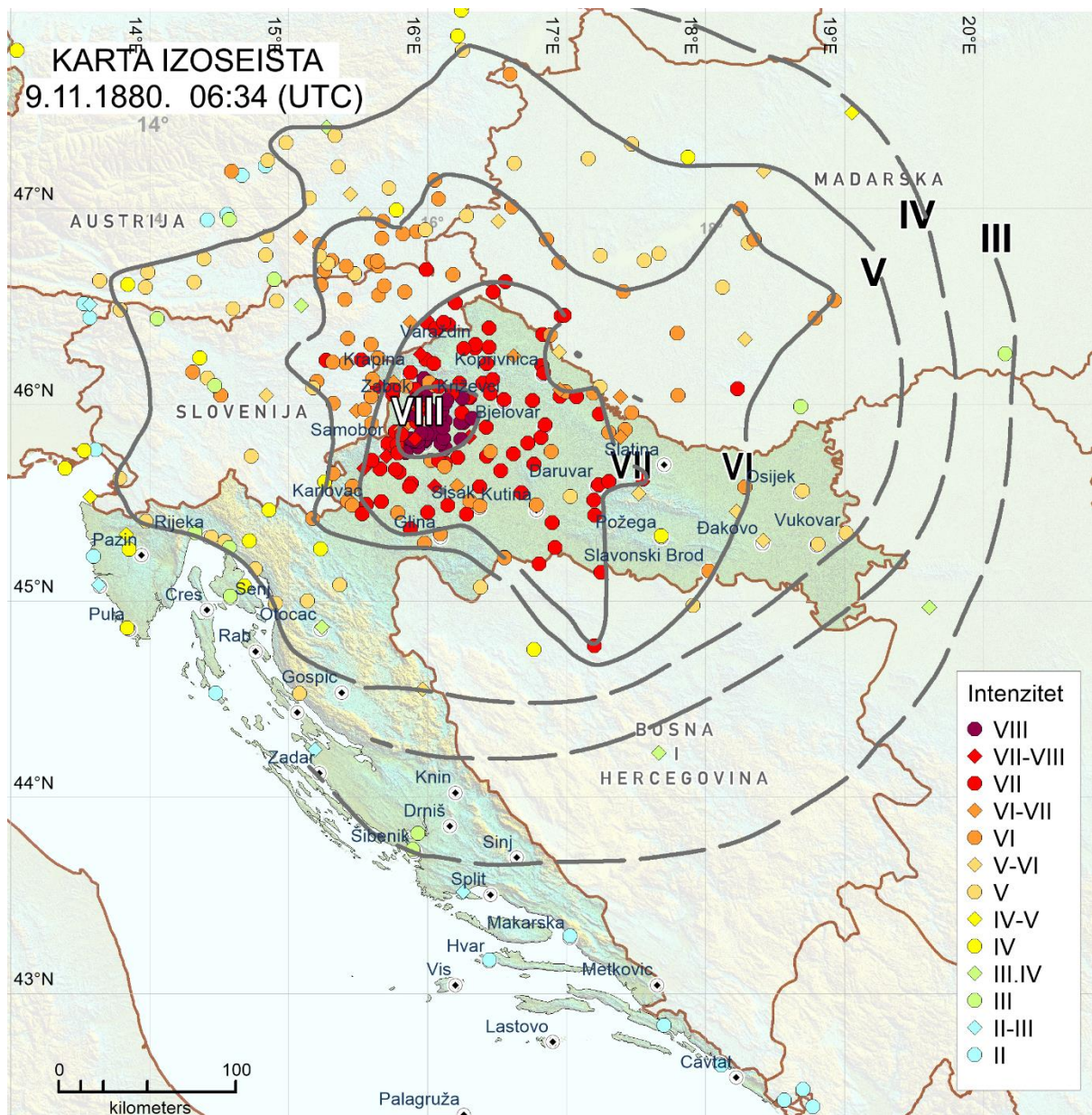
spomenutu potrese koji su se dogodili 22. rujna 1837. u 11:03 GMT ($\varphi = 45.90^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.00^\circ\text{E}$) i 24. prosinca 1858. u 18:30 GMT ($\varphi = 45.90^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.10^\circ\text{E}$). Obadva potresa su imala intenzitet u epicentru $I_0 = \text{VII}^\circ\text{MCS}$ i magnitude izračunate na temelju makroseizmičkih podataka $M_m = 5.3$.

U medvedničkom epicentralnom području najjači i najvažniji potres dogodio se 9. studenoga 1880. u 6:34 GMT. Taj je potres odlično dokumentiran, ne samo opisima šteta koje je objavila Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti u Izvješću o zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880. Josipa Torbara, nego i na snimkama fotografa Standla. U potresu je smrtno stradalo troje ljudi. U Zagrebu od oko 30000 stanovnika poginula su dvojica, dok je jedan radnik poginuo u Granešini (Torbar, 1882; Hantken von Prudnik, 1882). Od 2843 stambene zgrade i 1187 gospodarskih objekata, oštećenja 2. i 3. stupnja pretrpjele su 1754 zgrade (45.8%), dok je teško oštećeno (oštećenje 4. i 5. stupnja) 485 zgrada (12.6%). Teško je oštećena i stara zagrebačka katedrala, koja je nakon potresa temeljito obnovljena u neogotičkom slogu. U Zagrebu se potres osjetio intenzitetom od VIII^oMSK ljestvice, a osjetio se i u 235 km udaljenom Vukovaru intenzitetom V^oMSK ljestvice, dok su u Češkim Budjeovicama stale dvije ure njihalice i ura na crkvenom tornju (slika 3.2).

Potres su osjetili i u Dubrovniku koji je od epicentra udaljen 397 km i u Salzburgu, dok je u Senju udaljenom samo 123 km trešnja bila lagana, skoro nezamjetna. Ukupna materijalna šteta procijenjena je na oko 50 milijuna kruna, što je iznosilo polovicu tadašnjeg godišnjeg državnog proračuna. Magnituda procijenjena iz makroseizmičkih podataka iznosi $M_m = 6.1$, a epicentar je bio između Čučerja i Planine Gornje kod Kašine ($\varphi = 45.89^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.06^\circ\text{E}$). Potres je potaknuo seriju naknadnih slabijih potresa koja je bila posebno izražena sljedećih šest mjeseci. Najjači naknadni potres dogodio se dva dana nakon glavnog, 11. studenoga 1880. u 10:26 GMT, magnitude $M_m = 5.3$, a postoje izvješća da je srušio crkvu u Kraljevu Vrhu.



Slika 3.1. Karta epicentara lokalnih potresa epicentralnih udaljenosti do 45 km od središta grada Zagreba iz Hrvatskog kataloga potresa do kraja 2021. godine (crvena kružnica označava područje radijusa 45 km od Trga Bana Josipa Jelačića). Administrativne granice Grada Zagreba označene su crvenom linijom. Pouzdano locirani povijesni potresi koji su se dogodili prije 1850. g. prikazani su kvadratićima, a kružićima potresi locirani u razdoblju od 1850. do 2021. godine.

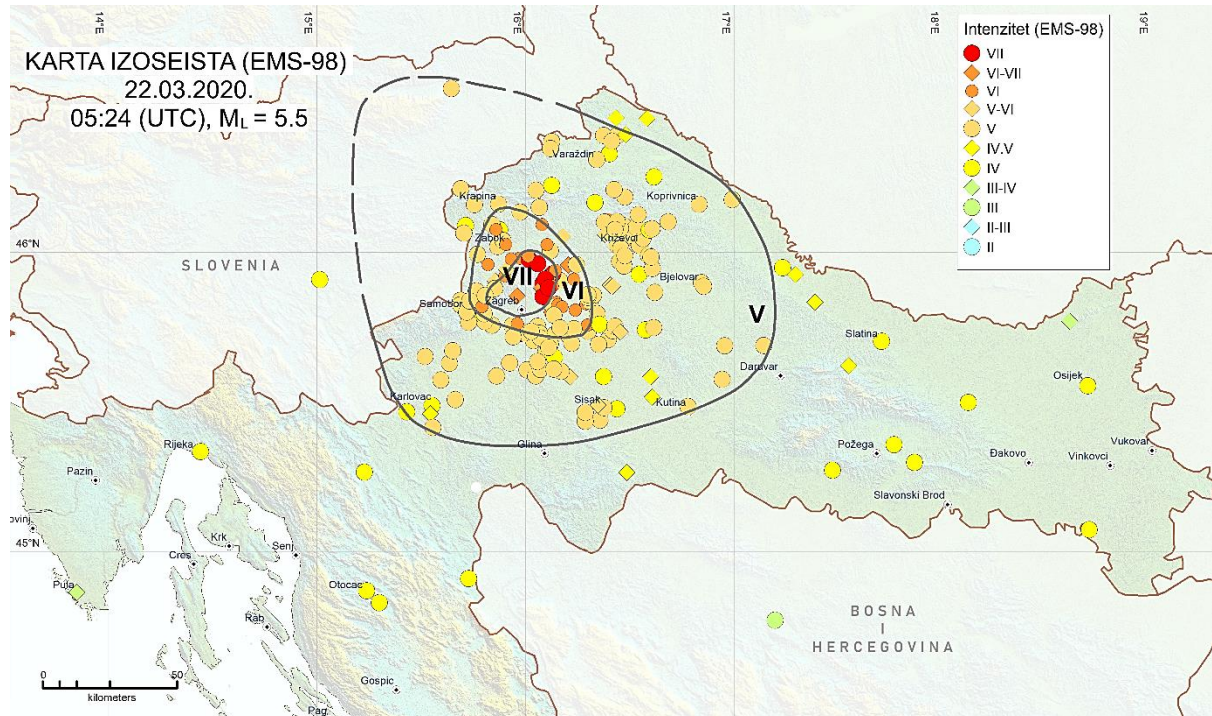


Slika 3.2. Karta izoseista potresa od 9. studenog 1880. godine s epicentrom kod Planine Gornje (autor I. Sović).

Početak dvadesetog stoljeća dogodila su se u blizini Zagreba dva jaka potresa, 17. prosinca 1905. u 22:16 GMT ($\varphi = 45.92^{\circ}\text{N}$, $\lambda = 16.09^{\circ}\text{E}$) i 2. siječnja 1906. u 4:26 GMT ($\varphi = 45.93^{\circ}\text{N}$, $\lambda = 16.11^{\circ}\text{E}$), s epicentrima u blizini Prekvršja i Kašine. Najveći intenzitet potresa iz 1905. godine bio je VII–VIII EMS, dok je intenzitet u Zagrebu ocijenjen na VI EMS. Intenzitet potresa koji se dogodio u siječnju 1906. ocijenjen je na temelju kumulativnog učinka tog potresa i potresa iz prosinca 1905. godine. Kumulativni intenzitet tih potresa je iznosio VII–VIII EMS, dok je intenzitet u Zagrebu bio za stupanj niži, VI–VII EMS. Magnituda potresa od

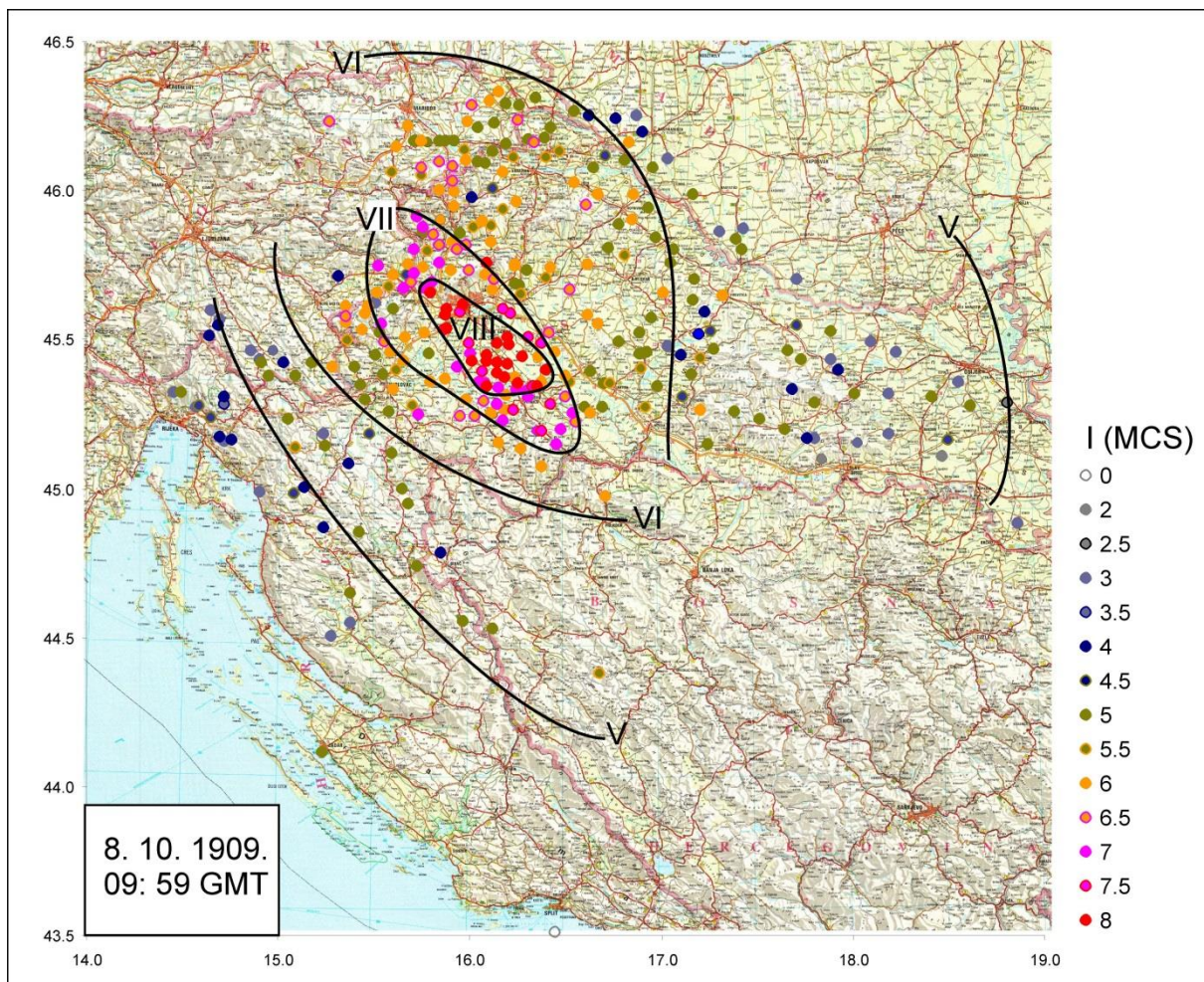
17. prosinca 1905 je iznosila $M_L = 4.7$, dok je magnituda potresa od 2. siječnja 1906. bila $M_L = 5.3$.

U novije vrijeme, najsnažniji potres na Medvednici dogodio se 22. ožujka 2020. u 5:24 UTC. Potres je bio lokalne magnitude $M_L = 5.5$ i momentne magnitude $M_W = 5.4$, s epicentrom u Markuševcu ($\varphi = 45.882^\circ\text{N}$, $\lambda = 16.022^\circ\text{E}$) i žarištem na dubini od 7.4 km. Za razliku od prethodnih umjereno snažnih do snažnih potresa koji su se dogodili u zagrebačkom epicentralnom području, ovaj potres je zabilježen instrumentalno, lokalnom mrežom digitalnih seizmografa. Najveći intenzitet je bio VII-VIII EMS u Markuševcu koji je u epicentru, a u središnjem dijelu Zagreba intenzitet je iznosio VII EMS. Potres se osjetio u čitavoj Sloveniji, te dijelovima Austrije, Mađarske, Češke i Bosne i Hercegovine (slika 3.3). U središtu grada Zagreba smrtno je stradala jedna osoba. Oštećenja na zgradama su nastala kumulativnim učinkom glavnog i niza naknadnih potresa od kojih je najjači imao magnitudu $M_L = 4.9$, a uslijedio je 37 minuta nakon glavnog potresa. Dodatna šteta na zgradama nastala je i od potresa koji se dogodio 29. 12. 2020. s epicentrom kod Petrinje koji se u Zagrebu osjetio intenzitetom VI EMS. U dvije godine nakon glavnog potresa na području Medvednice je locirano više od 3500 naknadnih potresa.



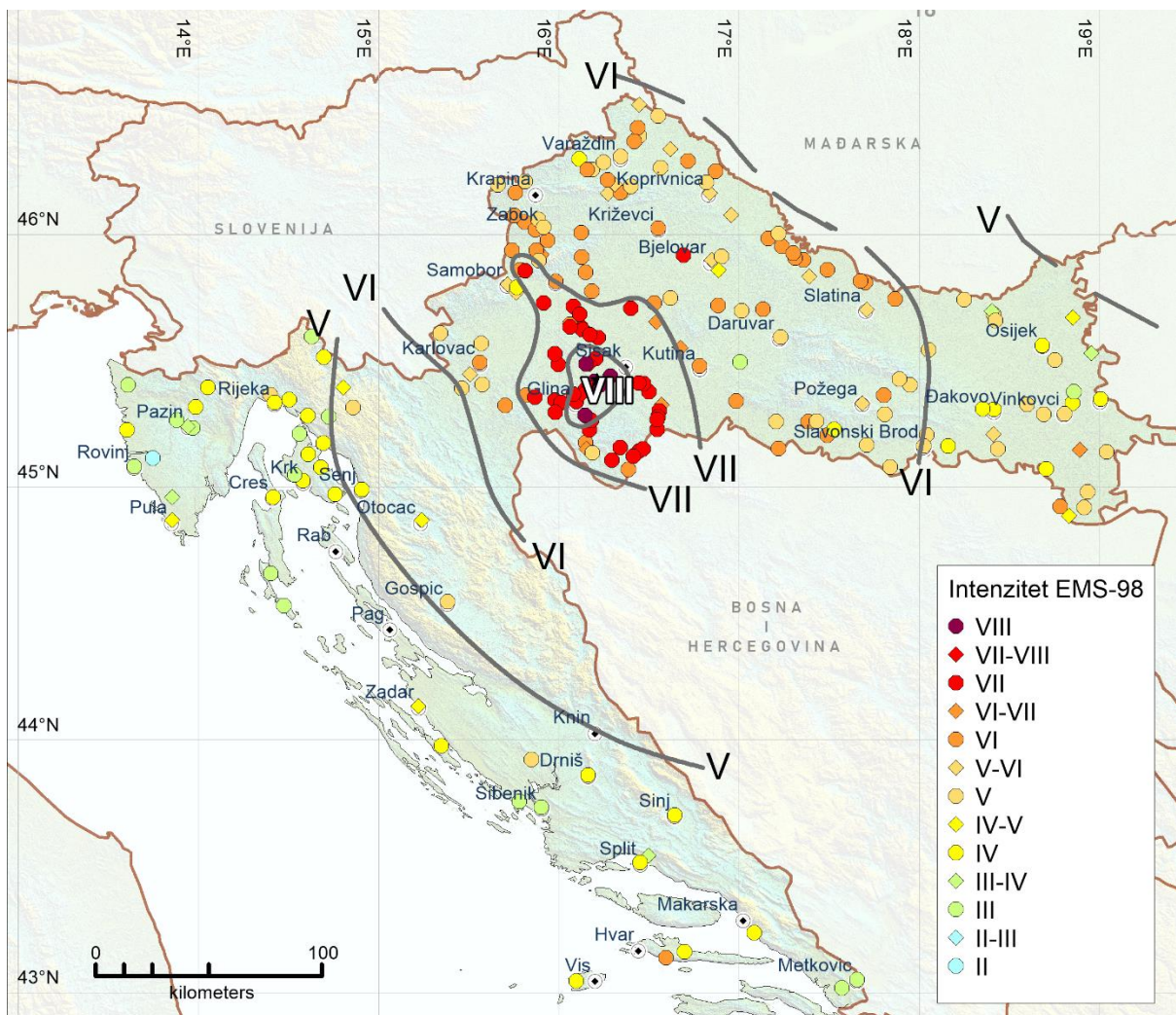
Slika 3.3. Karta izoseista potresa od 22. ožujka 2020. godine s epicentrom kod Markuševca (autor I. Sović).

Južno od Zagreba, u dolini rijeke Kupe, dogodio se 8. listopada 1909. u 9:59 GMT godine potres s epicentrom četiri kilometra jugozapadno od Kravarskog (Mohorovičić, 1910). To je jedan od najznačajnijih potresa u svjetskim razmjerima jer je analizom zapisa tog potresa Andrija Mohorovičić dokazao da je Zemlja slojevite građe. Potres je bio magnitude površinskih valova $M_S = 5.8$ i najvećeg intenziteta $I_{max} = VIII$ °MCS, a žarište mu je bilo na dubini od 14 km. Poginulo je dvoje ljudi, mnogo ih je ranjeno, a materijalna šteta bila je velika. U vodom saturiranom tlu je došlo do likvefakcije, pojave blatnih vulkana i pješčanih kratera. Potres se osjetio i u Zagrebu intenzitetom VII °MCS, gdje je srušio mnogo dimnjaka. Osjetili su ga i na području Slovenije, Bosne i Hercegovine, Srbije, Italije, Austrije i Mađarske (slika 3.4). Od serije naknadnih potresa locirano je 50 do kraja 1910. godine. Najjači naknadni potres se dogodio 28. siječnja 1910. u 23:57 GMT, s epicentrom tri kilometra sjeveroistočno od Letovanića. Magnituda mu je bila $M_L=5.3$, dubina žarišta devet kilometara, a intenzitet u epicentru $I_o = VII-VIII$ °MCS.



Slika 3.4. Karta izoseista potresa od 8. listopada 1909. u 9:59 GMT (autor I. Savić).

Potres koji se dogodio 29. prosinca 2020. u 11:27 UTC je najjači instrumentalno zabilježen potres u kontinentalnoj Hrvatskoj. Lokalna magnituda mu je iznosila $M_L = 6.2$, a momentna magnituda $M_W = 6.4$. Epicentar mu je bio kod mjesta Gora između Petrinje i Gline. Prethodio mu je potres od 28. prosinca 2020. u 5:28 UTC lokalne magnitude $M_L = 5.1$ i momentne magnitude $M_W = 4.9$, koji se osjetio u većem dijelu središnje Hrvatske. Glavni potres se osjetio najvećim intenzitetom VIII EMS u Petrinji i okolici, dok je intenzitet u Zagrebu bio VI EMS (slika 3.5). Potres je na mnogim mjestima uz Kupu i Savu uzrokovao likvefakciju koja je uzrokovala dodatne štete na građevinama (slika 3.6).



Slika 3.5. Karta izoseista potresa od 29. prosinca 2020. u 11:19 UTC (autor I. Sović)

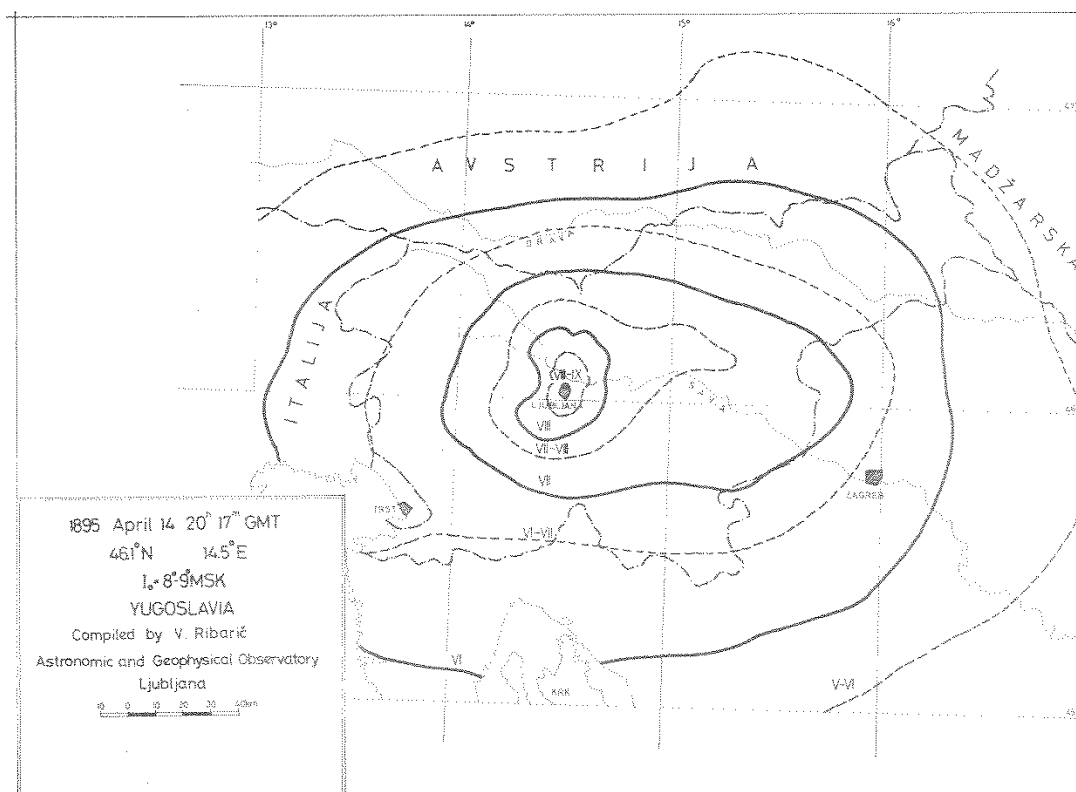


Slika 3.6. Likvefakcija uzrokovana potresom od 29. prosinca 2020. u mjestu Brest (snimio I. Sović).

3.2 REGIONALNA SEIZMIČNOST

Unutar kružnice od 200 km oko Zagreba izrazitom seizmičkom aktivnoću se izdvajaju područja: okolica Ljubljane, od Ilirske Bistrice u Sloveniji do Senja, Banja Luka i Slavonski Brod.

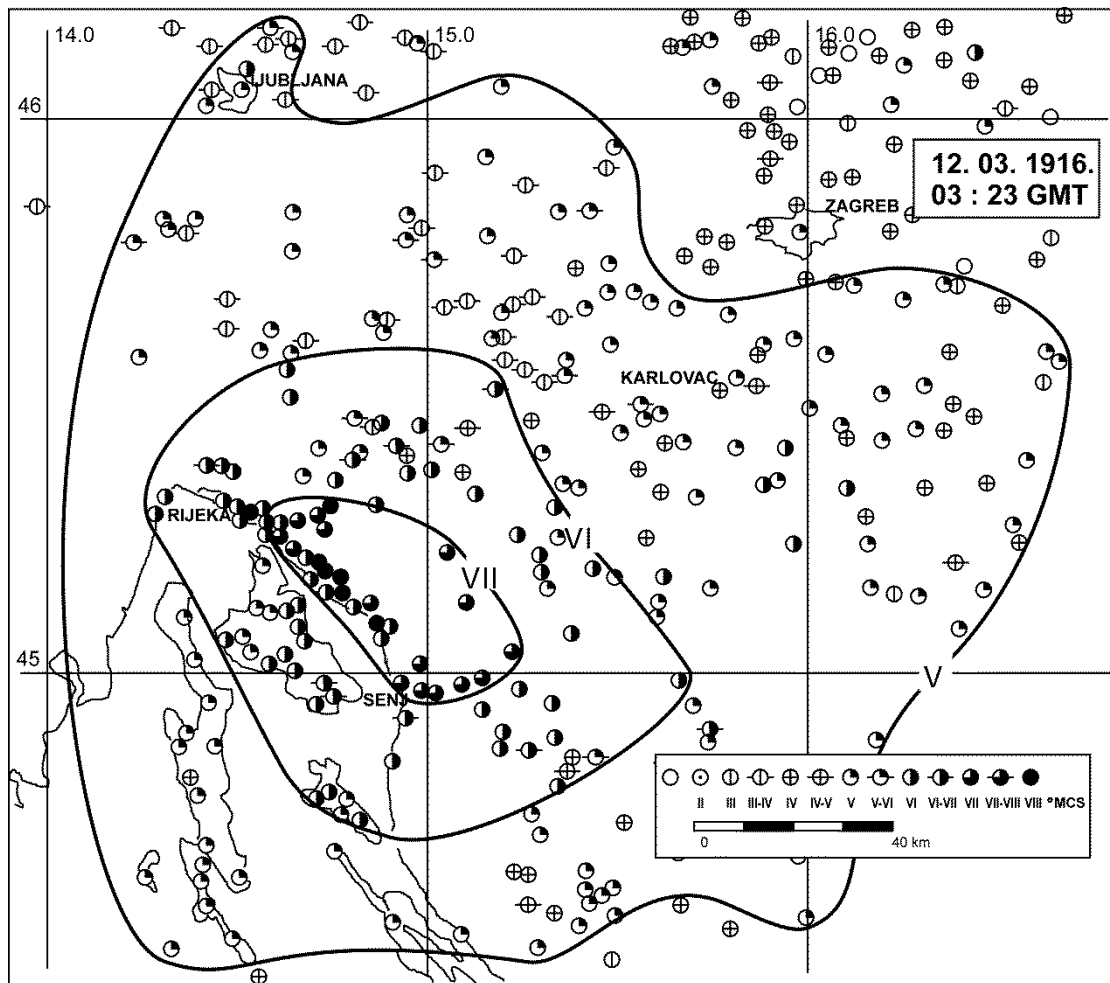
Ljubljanu i cijelu središnju Sloveniju zatresao je 14. travnja 1895. razoran potres magnitude $M_w = 6.1$ i maksimalnog intenziteta $I_{max} = VIII-IX$ EMS-98. Prouzročio je mnogo materijalne štete u Ljubljani i okolici, a osjetio se skoro u cijeloj Hrvatskoj. Nakon tog potresa uslijedila je serija naknadnih od kojih se najjači, magnitude $M_w = 5.0$ i maksimalnog intenziteta $I_{max} = VII$ EMS-98, dogodio dvije godine kasnije, 15. srpnja 1897. (Cecić, 1996., Jukić i sur., 2023.). Potres od 14. travnja 1895. osjetio se u dijelu Hrvatskog zagorja intenzitetom VII °MSK, a u Zagrebu intenzitetom VI °MSK (slika 3.7).



Slika 3.7. Karta izoseista potresa od 14. travnja 1895. s epicentrom kod Ljubljane, magnitude $M_w = 6.1$ (Shebalin, 1974).

Područje **od Ilirske Bistrice u Sloveniji do Senja** seizmički je vrlo aktivno (slika 2.1). Kroz povijest su se tu događali snažni potresi, no za najstarije, nažalost, ne postoje pouzdani podaci. Pouzdani makroseizmički podaci o potresima u tom području postoje tek od sredine 18. stoljeća pa se moglo odrediti parametre za tri potresa iz predinstrumentalnog razdoblja seizmologije. Najjači potres dogodio se 17. prosinca 1750. godine s epicentrom kod Bakra. Maksimalni intenzitet mu je bio VIII °MCS ljestvice, a na temelju intenziteta procijenjena magnituda $M = 6.0$. Teško je oštetio crkve u Grobniku, Cerniku, Majuru, Bakru, Grižanama i Belgradu. Rijeka je bila tako teško oštećena da su se mnogi stanovnici selili u barake na obali. U vrijeme kad je postojala dovoljno gusta mreža seizmografa dogodio se 12. ožujka 1916. desetak kilometara istočno od Novog Vinodolskog potres maksimalnog intenziteta VIII °MCS ljestvice. i magnitude $M_L = 5.8$. Najjače se osjetio u 17 km udaljenim Grižanama gdje je oštetio preko stotinu kuća od čega je dvadesetak bilo neupotrebljivo za stanovanje. Pukle su neke vodovodne cijevi, a cesta u Blaškoviću se raspucala. Napravio je štete i u Bribiru, Blaškoviću, Senju, Baški,

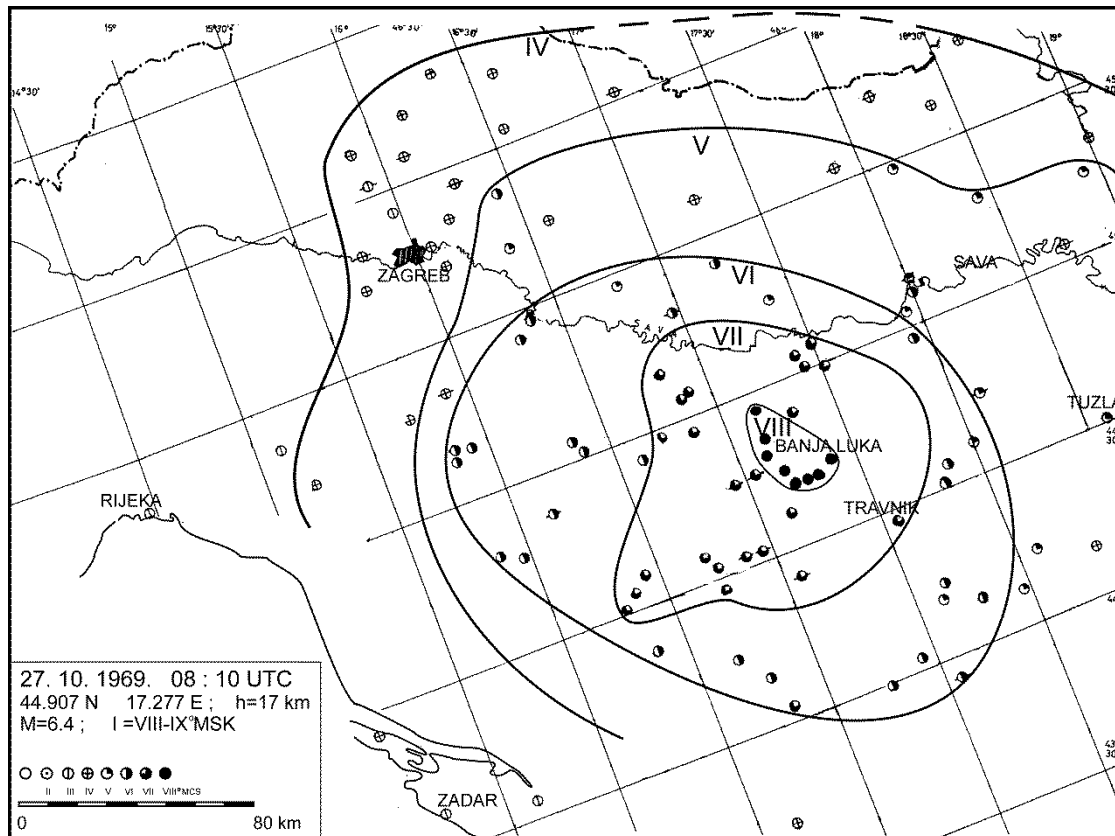
Brinju, Fužinama, Liču, Vratima, Drežnici i drugim mjestima. Osjetio se u Istri, Primorju, Karlovcu, Zagrebu, Sloveniji. Karta intenziteta i izoseista prikazana je na slici 3.8.



Slika 3.8. Karta izoseista potresa od 12. ožujka 1916. godine (autor I. Sović)

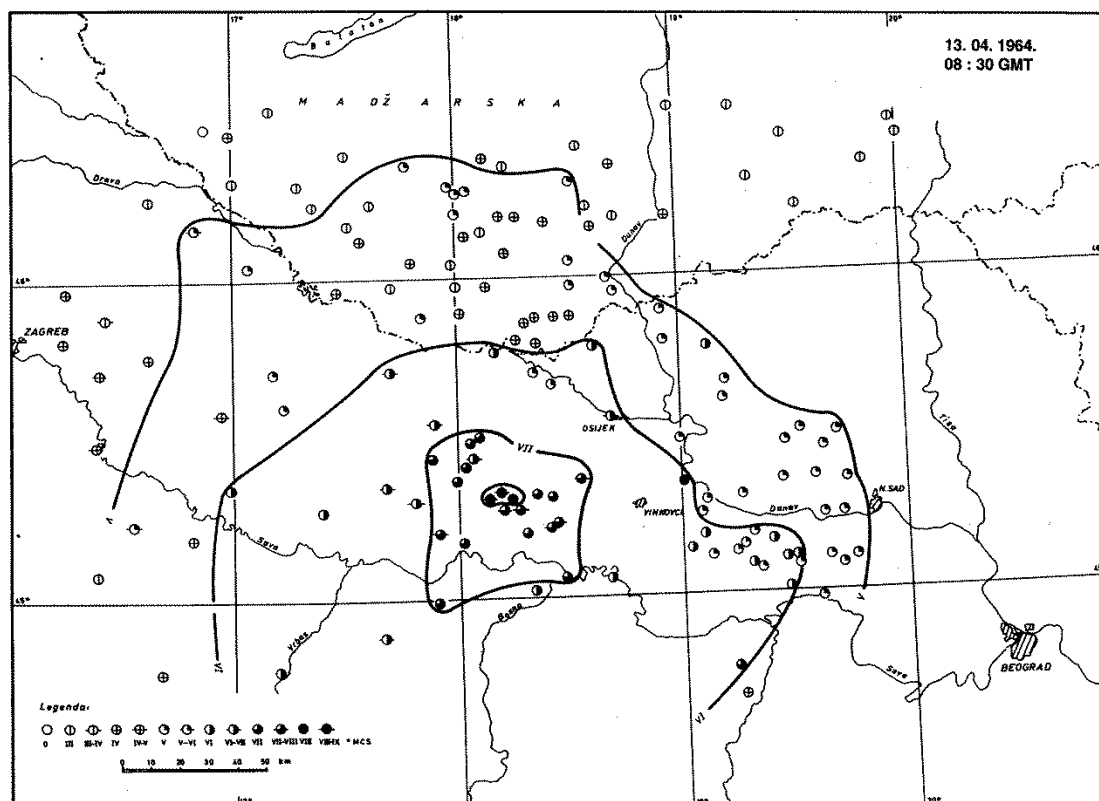
Područje Banja Luke je šezdesetih godina dvadesetog stoljeća bilo seizmički izuzetno aktivno. Izrazita seizmička aktivnost započela je 26. listopada 1969. u 16 sati i 36 minuta jakim potresom magnituda $M_L = 6.0$ i epicentralnog intenziteta VII–VIII °MCS ljestvice. Epicentar mu je bio tri kilometra sjeverozapadno od Laktaša. Taj potres je, uz devet slabijih, magnituda manjih od $M \leq 4.0$, bio prethodni potres potresu koji se dogodio 27. listopada 1969. u 9 sati i 10 minuta, magnituda $M_L = 6.4$ i epicentralnog intenziteta $I_0 = \text{VIII–IX}$ °MCS ljestvice. Epicentar mu je bio tri kilometra sjeverozapadno od Laktaša. Oba potresa su prouzročila ljudske žrtve i veliku materijalnu štetu. Poginulo je 15 ljudi, a 1117 je bilo povrijeđenih. U okolnim selima Bistrici i Kozarcu pucala je zemlja, a porasla je i razina vode u nekim bunarima do 1.5 m kao i temperatura vode u termalnim izvorima. U toplom izvoru Slatina temperatura

vode je, prema podacima iz arhiva Seizmološke službe RH, porasla sa 42 °C na 45 °C. S obzirom da su se dva potresa magnituda većih ili jednakih $M \geq 6.0$ dogodila praktički na istom mjestu u razmaku od samo jedan dan, a ocijenjeni intenziteti unutar izoseiste VI stupnja su u stvari kumulativni intenziteti oba potresa (slika 3.9).



Slika 3.9. Karta izoseista potresa od 27. listopada 1969. (autor I. Sović)

Najjači potres u području **Slavonskog Broda** dogodio se 13. travnja 1964. u 09 sati i 30 minuta. Epicentar mu je bio na središnjem dijelu Dilj gore, oko 10 km sjeverozapadno od Slavonskog Broda. Imao je magnitudu $M = 5.7$ i maksimalni intenzitet $I_{max} = \text{VIII-IX}^\circ\text{MCS}$ ljestvice. Prema izjavama očevidaca, u selima uz Savu od potresa su ovce padale s nogu što je, najvjerojatnije, posljedica snažne amplifikacije na mekom aluviju saturiranom vodom. Karta izoseista tog potresa prikazana je na slici 3.10.



Slika 3.10. Karta izoseista potresa od 13. travnja 1964. s epicentrom na Dilj gori (Shebalin, 1974).

3.3 SEIZMIČKA POVIJEST LOKACIJE

Poznavanje seizmičke povijesti važno je zbog jednostavne činjenice da ako se u nekom mjestu dogodio potres određenog intenziteta, vrlo je vjerojatno da će se potres takvog intenziteta ponoviti. Osim toga, poznavajući seizmičku povijest moguće je procijeniti u kakvom se stanju nalaze starije građevine s obzirom na moguća oštećenja u prošlosti.

Na slici 3.11 prikazani su intenziteti potresa na lokaciji Trga bana Josipa Jelačića u Zagrebu. Za potrese za koje ne postoje podaci o intenzitetima na toj lokaciji, intenziteti su računati iz podataka u proširenom katalogu CEC2021 pomoću Kövesligethyve relacije za atenuaciju makroseizmičkog intenziteta (Kövesligethy, 1906) uz pretpostavku srednjeg tla, hipocentralne dubine od 10 km i koeficijenta atenuacije $\alpha = 0.005$ °/km.

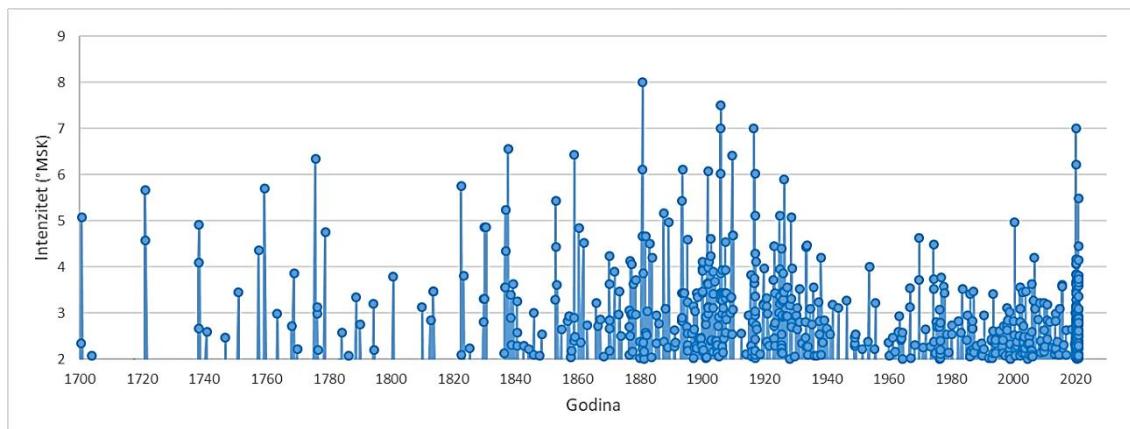
$$I = I_0 - 3 \log (r/h) - 3 \mu \alpha (r - h), \quad (3.1)$$

gdje je I_0 intenzitet u epicentru, r hipocentralna udaljenost u kilometrima, h dubina žarišta u kilometrima, koeficijent atenuacije $\alpha = 0.005$ °/km i $\mu = \log(e) = 0.4343$. Vidi se da je izračunati intenzitet na lokaciji 17 puta bio veći ili jednak $I = VI$ °MSK u razdoblju koje pokriva katalog (tablica 3.1 i slika 3.11).

Tablica 3.1. Osnovni parametri potresa za koje je procijenjeno da su se na Trgu bana Josipa Jelačića osjetili intenzitetom većim ili jednakim VI °MSK.

God.	Mj.	D	S	Min.	Sek.	N (°)	E(°)	h.(km)	M	I_0 (MSK)	D (km)	Intenzitet na lokaciji ^(*) (MSK)
566	12	31	0	0	0	45.600	15.300		6.7	9	58	6.4
1096	12	31	0	0	0	45.600	15.300		6.7	9	58	6.4
1459	5	20	0	0	0	46.300	16.300		6.7	9	59	6.3
1775	10	13	6	30	0	46.000	16.000		5.7	7-8	21	6.3
1837	9	22	11	30	0	45.900	16.000		5.3	7	10	6.6
1858	12	24	18	30	0	45.900	16.100		5.3	7	13	6.4
1880	11	9	6	34	0	45.890	16.060	17	6.1	8	10	8.0
1880	11	11	10	26	0	45.980	16.000		5.3	7	18	6.1
1893	10	11	4	25	0	45.800	16.000		4.6	6	2	6.1
1901	12	17	14	12	14	45.830	15.980	4	4.6	7	2	6.1
1905	12	17	22	16	37	45.920	16.090	10	4.7	7	14	7.0
1906	1	2	4	26	36	45.930	16.110	18	5.3	7-8	16	7.5
1906	1	4	4	25	0	45.800	16.000	9	4.5	6	2	6.0
1909	10	8	9	59	12	45.565	16.011	14	5.8	8	28	6.4
1917	1	29	8	22	55	45.900	15.567	13	5.7	8	33	6.0
2020	3	22	5	24	3.1	45.881	16.022	7.3	5.5	7-8	7	7.0
2020	3	22	6	1	19.5	45.882	16.017	8.1	4.9	0	8	6.2
2020	12	29	11	19	53.6	45.416	16.208	13.6	6.2	8	48	6.1

* prema relaciji (3.1)



Slika 3.11. Potresna povijest lokacije Trg bana Josipa Jelačića u Zagrebu u razdoblju od 1700. do 2021. godine računata pomoću relacija (2.1) i (3.1) uz $\alpha = 0.005$ °/km i $h = 10$ km.

4. SEIZMIČKI HAZARD

Potresi su nepredvidive pojave koje mogu izazvati razorne učinke na površini Zemlje. Štete koje nastaju zbog jakih potresa mogu se umanjiti ako se građevinske norme, posebno norme za građenje kapitalnih objekata kao što su visoke brane, elektrane, i objekti u kojima se okuplja veliki broj ljudi, donesu na temelju poznavanja seizmičke ugroženosti nekog područja (seizmički rizik). Zbog toga su seizmički hazard i rizik vrlo važni inženjerima koji se bave protupotresnom gradnjom, osiguravateljima, kao i svakom tko živi na potresima ugroženom području.

Seizmički rizik je vjerojatnost pojave štetnih posljedica potresa na objekte, ljude i ekonomiju, a glavni parametar za procjenu je seizmički hazard. Seizmički hazard je vjerojatnost da će određeni parametar gibanja tla, na primjer vršna akceleracija, u određenom vremenskom rasponu premašiti neku graničnu vrijednost.

Procedure računanja seizmičkog hazarda i rizika razvijene su za potrebe građevinskih inženjera. U početku se seizmički hazard računao za makroseizmički intenzitet (Cornell, 1968) jer makroseizmički intenzitet, po definiciji, opisuje učinke potresa i može se direktno primijeniti pri procjeni rizika. Do prijelaza s intenziteta na vršnu akceleraciju dolazi, između ostalog, i zato što je makroseizmički intenzitet pseudofizikalna veličina (Peruzza, 1996) dok su drugi parametri gibanja tla, akceleracija, brzina i pomak, fizikalne veličine koje je moguće direktno koristiti pri projektiranju.

Seizmički hazard nekog područja moguće je procijeniti na nekoliko načina. Može se procijeniti determinističkom DSHA (Deterministic Seismic Hazard Assessment), probabilističkom PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) i SHA (Seismic Hazard Assessment, Wang 2006, 2007) metodom, no PSHA metoda je praktički prihvaćena kao glavna metoda računanja hazarda. U ovoj studiji će se primijeniti PSHA pristup procjeni potresne opasnosti.

Pri računanju seizmičkog hazarda parametri kao što su referentno vremensko razdoblje t_{ref} i granična vjerojatnost premašaja p odabiru se tako da seizmički rizik bude prihvatljiv. Prihvatljivost rizika ovisi o mogućim socijalnim i ekonomskim posljedicama potresa na nekoj lokaciji. Potrebno je dobro poznavati geološke karakteristike šireg i istraživanog područja, najčešće do udaljenosti od 200 km od istraživanog područja, mada ta udaljenost može biti i veća, ovisno o svrhi istraživanja. To uključuje poznavanje položaja, nagiba i pružanja aktivnih

rasjeda i načine rasjedanja na pojedinim rasjedima. Nužan je što dulji katalog potresa s pouzdanim lokacijama epicentara i magnitudama. Osim toga, potrebno je definirati atenuacijske funkcije koje opisuju gibanje površine tla za vrijeme potresa, i niz drugih parametara.

U prvom koraku procjene seizmičkog rizika računa se seizmički hazard na osnovnoj stijeni. Da bi se dobile vrijednosti hazarda na površini, što je nužno za procjenu rizika, moraju se detaljno poznavati svojstva tla na lokaciji za koju se računa hazard. Zbog toga je poželjno prije računanja seizmičkog rizika provesti detaljno seizmičko mikrozoniranje istraživanog područja.

4.1 OSNOVNI KORACI METODE PSHA

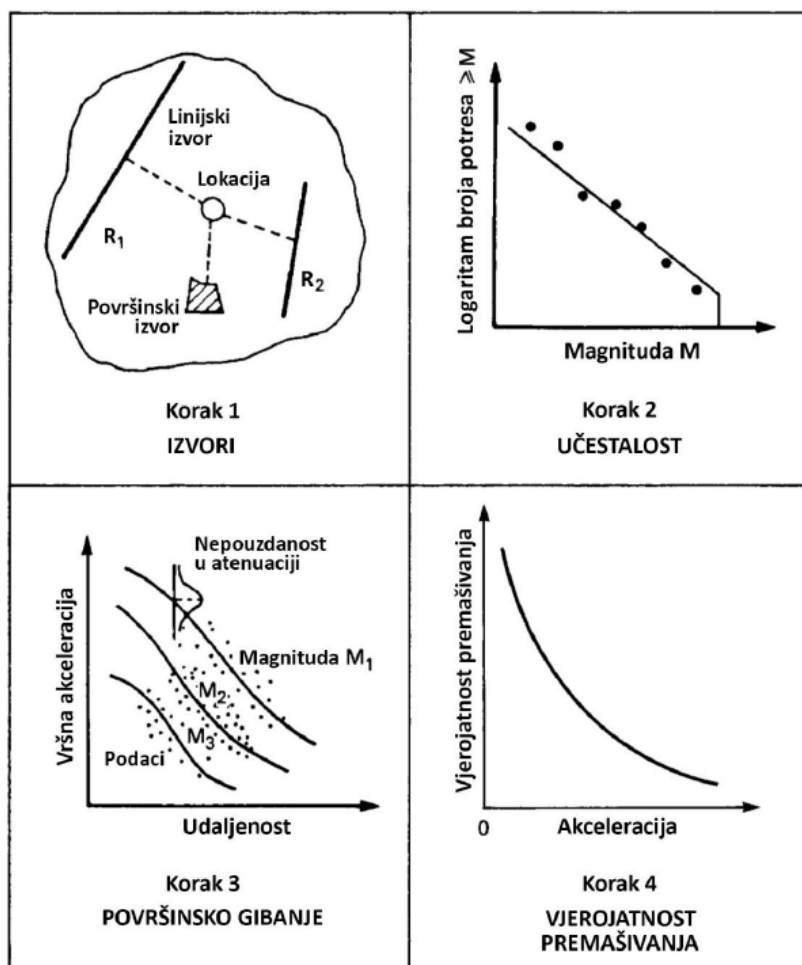
Cornell je 1968. godine objavio prvi članak o računanju seizmičkog hazarda PSHA metodom. Osnovni koraci probabilističke analize, prema Reiteru (1991.) prikazani su na slici 4.1.

U prvom koraku se definiraju seizmički izvori i seizmogene zone. Potresi nastaju na jasno definiranim rasjedima, no seizmogene zone mogu biti i grubo opisane geološke strukture, pa i velika seizmotektonska područja. Seizmički izvori mogu biti točkasti, linijski, plošni i volumni. U probabilističkoj analizi svi izvori imaju uniformni potresni potencijal, što znači da je u cijelom izvoru jednaka mogućnost pojave potresa.

Drugi korak je računanje relacije između broja i magnitude potresa (eng. recurrence relationship) za pojedine seizmičke izvore. Svakom izvoru pridjeljuje se potres maksimalne magnitude koji se u tom izvoru može dogoditi. Ovisnost broja potresa o magnitudi je logaritamska i opisana je Gutenberg-Richterovom relacijom:

$$\log N = a - bM, \quad (4.1)$$

gdje je N kumulativni broj potresa magnitude veće ili jednake magnitudi M , a je odsječak na ordinati a b nagib pravca (Gutenberg i Richter, 1944.).



Slika 4.1. Osnovni koraci probablističke analize seizmičkog hazarda (preuzeto i prilagođeno iz Reiter, 1991).

U trećem koraku se računaju parametri gibanja tla na istraživanoj lokaciji pomoću relacija predviđanja gibanja tla (eng. Ground Motion Prediction Equation – GMPE, ili atenuacijske relacije). Za analizu je potreban niz atenuacijskih krivulja koje daju ovisnost zadanih parametara površinskog gibanja o hipocentralnoj udaljenosti. Atenuacijske krivulje shematski su prikazane na slici 4.1. zajedno s nepouzdanošću prilagodbe krivulje danom setu podataka.

Na kraju se računa seizmički hazard na istraživanoj lokaciji tako da se efekti svih potresa različitih magnituda koji su se dogodili u definiranim seizmičkim izvorima, uz pridijeljene im vjerojatnosti događanja, integriraju u jednu krivulju koja pokazuje vjerojatnost da će parametar gibanja tla za koji se račun provodi, na primjer vršna akceleracija, u određenom vremenskom rasponu premašiti neku graničnu vrijednost.

Osnovna pretpostavka probabilističke analize seizmičkog hazarda je da se potres događa neovisno o bilo kojem drugom potresu, to jest, da potresi slijede Poissonovu distribuciju (Stein i Wyssession, 2003). Ta pretpostavka vrijedi samo za glavn potres, jer su prethodni i naknadni potresi nužno povezani s glavnim potresom prostorno i vremenski. Zbog toga se iz analize moraju isključiti potresi koji prethode glavnom, kao i naknadni potresi.

Posebnu pozornost treba obratiti na nepouzdanost ulaznih podataka i modela.

Do nepouzdanosti ulaznih podataka dolazi zbog nekoliko razloga. Svi potresi koji se nalaze u katalogu locirani su s određenom nesigurnosti jer svako mjerenje, pa tako i mjerenje nastupnih vremena faza na temelju kojih se računaju parametri potresa, nužno unosi slučajnu pogrešku. Osim toga, metode lociranja su takve da asimptotski vode najvjerojatnijem rješenju, što unosi drugu vrstu pogreške. Osim toga, magnitude potresa se računaju kao srednjak ili medijan niza magnituda različitih postaja koje su korištene za lociranje potresa.

Osim nepouzdanosti zbog slučajne pogreške postoji i nepouzdanost modela. Niti jedan model ne uključuje sve fizikalne aspekte problema zbog nedovoljnog razumijevanja pojava, i nepotpunih podataka o fizičkim aspektima pojava (EPRI, 1989). Zato se pri računanju seizmičkog hazarda umanjuje nepouzdanost tako da se računaju krivulje hazarda za niz različitih scenarija, te se, na taj način dobiveni niz krivulja hazarda, usrednjuje. Rezultat je jedna krivulja hazarda i standardna devijacija.

Umjesto srednje vrijednosti seizmičkog hazarda može se prikazati medijan vjerojatnosti premašivanja neke razine površinskog gibanja. Srednjak vjerojatnosti je srednja vrijednost, a medijan pedeseti percentil seta krivulja hazarda. Nepouzdanost u procjeni seizmičkog hazarda prati logaritamsko - normalnu razdiobu, dok nepouzdanost srednjaka daje standardna devijacija, a medijana percentili.

Referentno vremensko razdoblje t_{ref} i granična vjerojatnost premašaja p odabiru se tako da seizmički rizik bude prihvatljiv. Prihvatljivost rizika ovisi o mogućim socijalnim i ekonomskim posljedicama potresa na nekoj lokaciji. Za objekt koji je dizajniran da traje $t_{ref} = 50$ godina, uz vjerojatnost premašaja $p = 10\%$, povratni period u skladu s jednadžbom (4.2) iznosi $T = 475$ godina:

$$p = 100 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^{t_{ref}} \right] \quad (4.2)$$

Za potrebe ove studije računat je PSHA za područje Zagreba za povratne periode 95 i 475 godina.

4.2 ULAZNI PARAMETRI ZA PSHA

4.2.1 Seizmički izvori

Da bi se analizirao seizmički hazard potrebno je definirati seizmičke izvore. Za potrebe PSHA se seizmički izvor definira kao točka, linija, površina ili volumen u kojoj se događaju potresi, a određuju se na temelju geoloških, geofizičkih i seizmoloških podataka. Razina detalja koja je pritom ostvariva ovisi o kvaliteti dostupnih podataka, mogućnostima sustava kojima se analiziraju ti podaci i o potrebama same analize hazarda. U računu hazarda može se iskoristiti i više modela seizmogenih zona ako je to potrebno za detaljniju analizu epistemičke nepouzdanosti.

4.2.2 Značajke seizmičnosti

Katalozi potresa pomoću kojih se definiraju značajke seizmičnosti sastoje se od povijesnih i instrumentalno zabilježenih potresa. S obzirom na to da katalozi potresa sežu i u predinstrumentalno vrijeme, potresi su kvantizirani ne samo magnitudom već i učinkom na površini ocijenjenim raznim makroseizmičkim ljestvicama. Kako bi se uniformirao katalog u pogledu jačine potresa, potrebno je provesti konverzije pojedinih veličina pomoću relacija konverzije. 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 prethodnih i naknadnih potresa. Uklanjaju se da bi potresi zadovoljili Poissonovu razdiobu.

Bitan parametar kataloga potresa je potpunost kataloga. Potpunost je magnitudni prag iznad kojeg katalog sadrži sve potrese te magnitude i većih koji su se dogodili. S obzirom da količina potresa koje je moguće locirati i izračunati im magnitudu ovisi o mnogo faktora kao što su gustoća mreže, tipovi instrumenata, vrsta programa za obradu itd, a tehnička baza se s vremenom unapređuje, katalog potresa nije u svim periodima potpun za istu magnitudu.

Kad katalog sadrži konzistentne procjene magnituda potresa, bez prethodnih i naknadnih potresa i kad je potpun iznad određenog magnitudnog praga, može se primijeniti Gutenberg-

Richterove relacije (4.1) za računanje parametara a i b određenog seizmičkog izvora. Parametar a je prosječni broj potresa magnitude veće ili jednake pragu potpunosti kataloga. Parametar b je tangens kuta nagiba pravca regresije i opisuje odnos velikih i malih potresa.

Za računanje seizmičkog hazarda potrebno je odrediti gornju i donju graničnu magnitudu. Donja granična magnituda potresa je magnituda ispod koje nema inženjerskog interesa. Gornja granična magnituda je najveća moguća magnituda u nekoj seizmogenoj zoni. Vjerojatnost da će potresi malih magnituda izazvati znatne učinke na površini je relativno mala, pa se za minimalnu magnitudu obično odredi najmanja magnituda za koju se pretpostavlja da može imati negativan utjecaj na građevine na istraživanom području. Za razliku od minimalne magnitude, maksimalna magnituda ovisi o području za koje se provodi analiza. Bitna je za graditeljstvo i mnogo ju je teže odrediti. Gornja granična magnituda je magnituda najjačeg mogućeg potresa koji se može dogoditi u nekoj seizmogenoj zoni. Najjači potres koji se dogodio u nekoj seizmogenoj zoni određuje donju granicu najjačih mogućih potresa. Seizmički hazard se računa uz pretpostavku konstantne seizmičnosti u seizmogenim zonama koje su unutar kruga radijusa 200 km (za neke potrebe i većeg radijusa) oko istraživane lokacije, pa povećanje gornje granične magnitude rezultira povećanim hazardom. Seizmički hazard na nekoj lokaciji ovisi o doprinosu više izvora, pa povećanje gornje granične magnitude jednog od izvora povećava cjelokupni seizmički hazard istraživanog područja onoliko koliko taj izvor doprinosi ukupnom hazardu.

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

4.2.3 Pretpostavka nepouzdanosti modela

Nepouzdanost analize seizmičkog hazarda ima dvije komponente: epistemičku nepouzdanost i aleatornu nepouzdanost, mada postoji nezanemariv broj znanstvenika koji govore da je sva nepouzdanost u seizmičkom hazardu u stvari epistemična (Bommer, 2003).

Epistemička nepouzdanost je nepouzdanost koja se može samo procijeniti, na primjer, nepouzdanost najveće moguće magnitude pojedinog izvora.

Aleatorna nepouzdanost je nepouzdanost koju je moguće mjeriti, a nastaje zbog slučajne pogreške. Kao primjer aleatorne nepouzdanosti može se navesti rasap atenuacijskih funkcija.

Nepouzdanosti se u računanje seizmičkog hazarda uvode variranjem različitih vrijednosti pojedinih ulaznih parametara, a rezultati su scenariji za pojedini set ulaznih parametara.

Za slaganje seta ulaznih parametara najčešće se koristi metoda logičkog stabla (Coppersmith i Youngs, 1986). Logičkim stablom se donošenje odluka može prikazati kao niz grana i čvorova pri čemu svaka grana predstavlja diskretni odabir parametra određene vjerojatnosti realizacije. Čvorovi spajaju ulazne parametre prema logičnom slijedu pretpostavki i zahtjevima pojedinih grana. Svaki čvor mora biti realiziran, pa je suma vjerojatnosti svih grana spojenih u jednom čvoru jednaka 1.0. Produkt vjerojatnosti niza grana koje tvore određeni scenarij je vjerojatnost za ostvarenje tog scenarija. Korištenjem logičkog stabla se jednostavno može pratiti računanje pojedinog scenarija, a variranjem parametara pojedinog čvora može se izračunati učinak svakog parametra na krajnji rezultat. Povećavanjem broja grana i čvorova raste i broj računskih operacija što traži mnogo računalnog vremena i može biti vrlo zahtjevno za računalo. U logičko stablo ulaze diskretizirani podaci jer se sastoji od diskretnih grana, pa zato parametri koji se bolje mogu opisati kontinuiranim distribucijama moraju biti diskretizirani što unosi pogrešku.

Drugi način uvođenja nepouzdanosti u probabilističku analizu je pomoću Monte-Carlo metode. Koriste se nasumični uzorci iz skupa ulaznih parametara uz odgovarajuće težine kako bi se dobio niz simulacija koje se koriste u konačnom računu hazarda. Svaka od tih simulacija je jedan scenarij.

Objе metode daju slične rezultate ako su prilikom primjene logičkog stabla kontinuirane distribucije adekvatno diskreditirane. a u Monte-Carlo metodi broj simulacija dobro prezentira opseg ulaznih parametara.

4.3 IZRAČUN SEIZMIČKOG HAZARDA ZA PODRUČJE GRADA ZAGREBA

Računanje seizmičkog hazarda ovisi o brojnim parametrima. Najbitniji su seizmički izvori definirani na temelju kataloga potresa iz kojeg se vidi seizmička aktivnost te geološke i tektonske strukture iz kojih se može procijeniti najveće moguće magnitude. Za svaku pojedinu zonu treba izračunati prosječne dubine žarišta, vrijednosti parametara a i b iz Gutenberg-Richterove relacije (4.1), te procijeniti maksimalnu moguću magnitudu potresa. Uz računanje karakterističnih žarišnih mehanizama, potrebno je i odabrati set relacija koje predviđaju pomake tla (eng. Ground Motion Prediction Equation – GMPE) reprezentativnih za istraživano

područje. Ako se računa seizmički hazard na površini moraju se znati parametri koji opisuju lokalne uvjete tla.

Za potrebe ove studije seizmički hazard unutar administrativnih granica Grada Zagreba je računat korištenjem OpenQuake programskog paketa (Pagani i sur., 2014; Silva i sur., 2014) za izračun seizmičkog hazarda i rizika, čiji razvoj i održavanje vodi Global Earthquake Model Foundation (GEM). Napisan je u Pythonu i podržan je na Linux, MacOS, Windows i platformama u oblaku. Sam programski paket je proizašao iz projekta iz 2010. godine s ciljem razvoja otvorenog i transparentnog mehanizma za izračun hazarda i rizika.

Karte hazarda, krivulje hazarda i spektri jednolikog hazarda (UHS) računati su probabilističkim postupkom procjene seizmičkog hazarda (eng. Probabilistic Seismic Hazard Assessment – PSHA), kako su predložili Field i sur. (2003). Radi se o uobičajenom pristupu, koji je usvojen u regionalnoj/nacionalnoj procjeni seizmičkog hazarda, kao i u studijama za specifičnu lokaciju.

Za potrebe računanja seizmičkog hazarda za Grad Zagreb priređen je katalog potresa na osnovu kojega je definirano 11 seizmičkih izvora unutar epicentralnih udaljenosti od 200 km oko središnje lokacije istraživanog područja. Za svaki izvor su određeni statistički parametri koji definiraju njegovu karakterističnu seizmičnost. Kako bi se u obzir uzele epistemičke nepouzdanosti, svakom seizmičkom izvoru je pridijeljeno od dva do pet karakterističnih žarišnih mehanizama s različitim težinskim faktorima. Na osnovi provedene analize odabrano je šest reprezentativnih GMPE ralicija (Abrahamson i sur., 2014; Akkar i sur., 2014; Bindi i sur., 2014; Cauzzi i sur., 2015; Chiou i Youngs, 2014; Kotha i sur., 2016), kojima su također pridijeljeni težinski faktori. Navedeno je kreiralo strukturu logičkog stabla, a koja je integralni dio PSHA modela.

5. REZULTATI

Seizmički hazard opisuje se maksimalno očekivanim (vršnim) vrijednostima ubrzanja na površini za različite povratna razdoblja (return period, povratni period) te spektralnim vrijednostima ubrzanja za različite periode ili odgovarajuće frekvencije. Jedan od pojmova u seizmologiji koji se najčešće pogrešno shvaća je povratni period T_{ret} . Povratni period (razdoblje) nije vrijeme između dva potresa, već je to recipročna vrijednost godišnje čestine premašenja zadane granične vrijednosti i zbog toga može biti veći od duljine kataloga na temelju kojeg se računa.

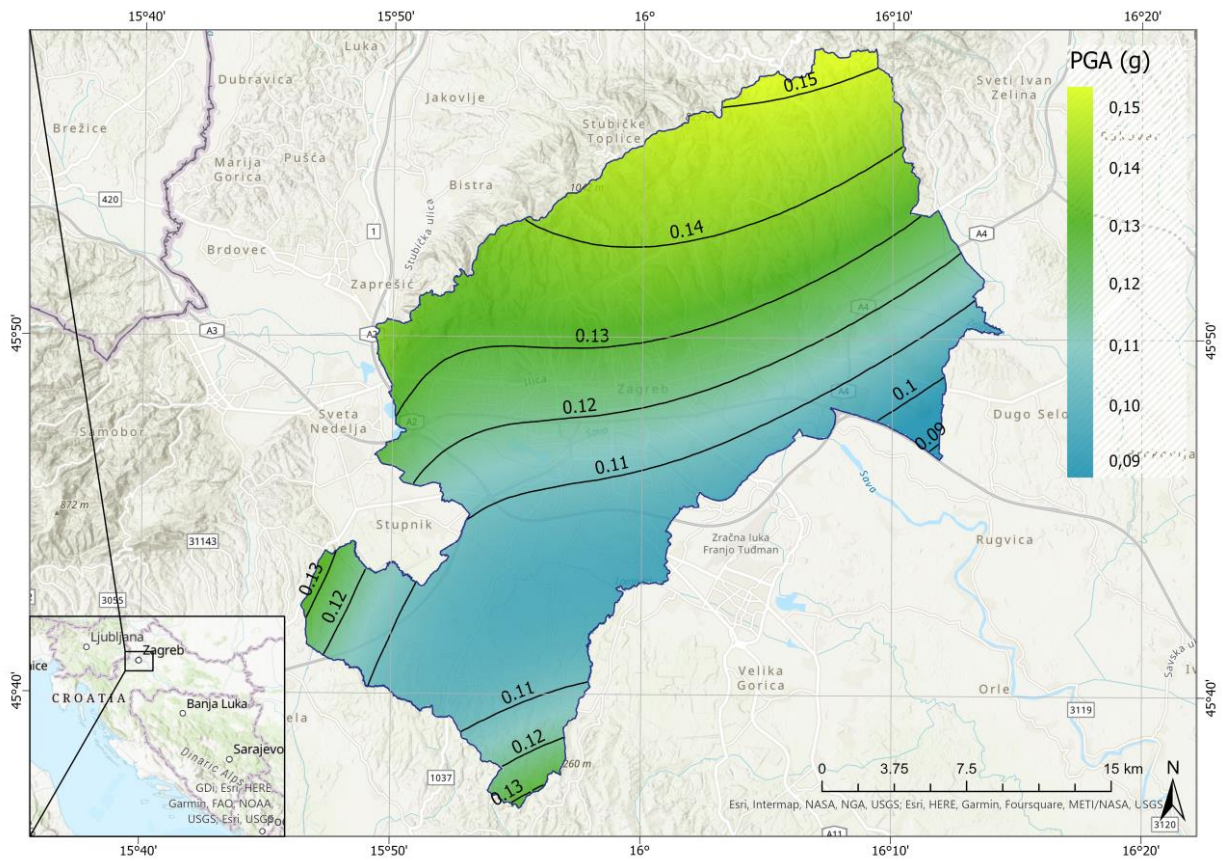
Vrijednosti pomaka tla dane su u smislu vjerojatnog prekoračenja, odnosno vjerojatnosti prekoračenja ubrzanja ili brzine tijekom određenog razdoblja, a čime je definiran povratni period. Npr. povratno razdoblje od 475 godine je definirano vjerojatnošću prekoračenja od 10% tijekom 50 godina. To znači da tijekom razdoblja od 50 godina postoji vjerojatnost od 10% da će potres uzrokovati pomicanje tla veće od zadane očekivane vrijednosti.

5.1 KARTE SEIZMIČKOG HAZARDA

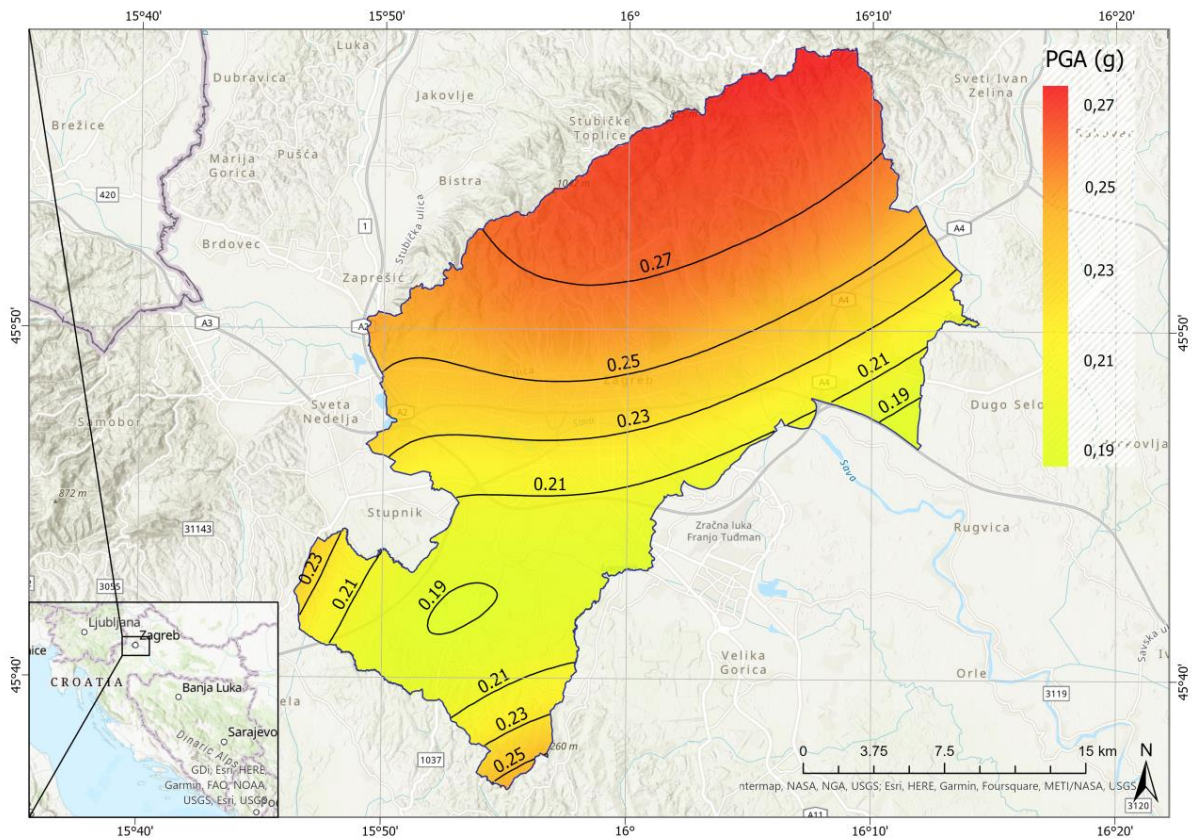
Rezultati računa seizmičkog hazarda najčešće se prikazuju u obliku karata seizmičkog hazarda koje pokazuju prostornu razdiobu parametara gibanja tla (npr. PGA).

Primjenom programskog paketa OpenQuake za područje Grada Zagreba izračunati su parametri seizmičkog hazarda za povratna razdoblja od 95 i 475 godina uz rezoluciju od 100 m. U ovoj studiji rezultati se odnose na osnovnu stijenu, što znači da nisu u obzir uzeti lokalni uvjeti tla na istraživanom području unutar administrativnih granica Grada Zagreba.

Na slikama 5.1. i 5.2. prikazana je prostorna razdioba vršnog ubrzanja tla (PGA) za povratna razdoblja od 95 i 475 godina, odnosno vjerojatnost premašivanja površinskog gibanja od 10% u poredbenom razdoblju od 10 i 50 godina za osnovnu stijenu. PGA vrijednosti za povratno razdoblje od 95 godina je u rasponu od 0.09 do 0.16 g, a za 475 godine u rasponu od 0.17 do 0.29 g.



Slika 5.1. Karta seizmičkog hazarda za područje Grada Zagreba - prikazana je srednja vrijednost PGA (u jedinicama g) za povratno razdoblje od 95 godina (vjerojatnost prekoračenja od 10% tijekom 10 godina), na osnovnoj stijeni.



Slika 5.2. Karta seizmičkog hazarda za područje Grada Zagreba - prikazana je srednja vrijednost PGA (u jedinicama g) za povratno razdoblje od 475 godina (vjerojatnost prekoračenja od 10% tijekom 50 godina), na osnovnoj stijeni.

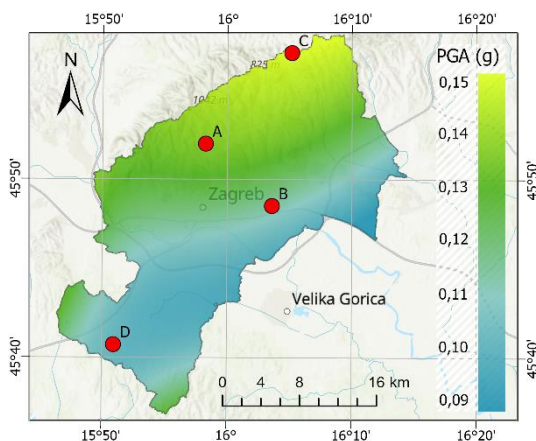
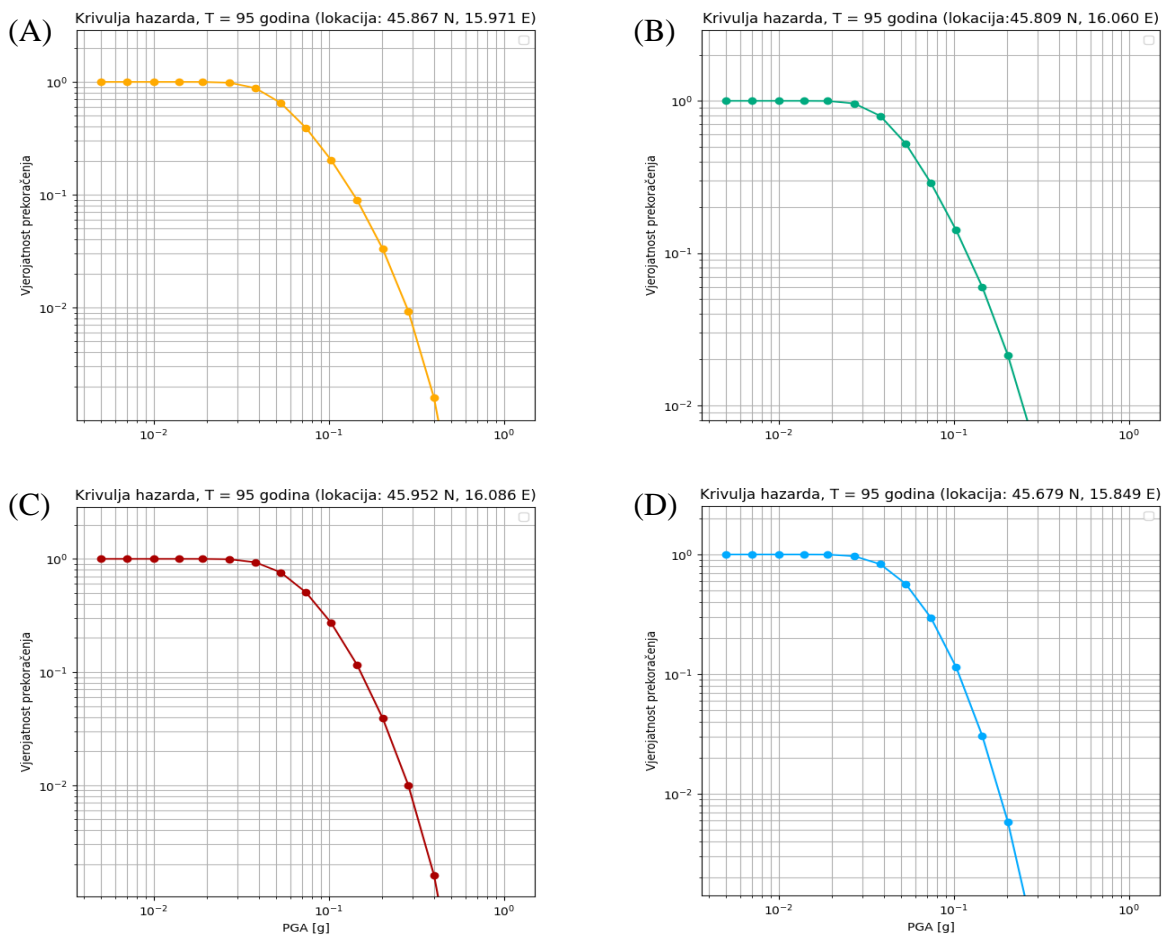
5.2 KRIVULJE HAZARDA

Krivulja hazarda je graf na kojem je prikazana vjerojatnost da će vrijednost određenog parametra gibanja tla (PGA, PGV..) u godini dana premašiti graničnu vrijednost. Svaka krivulja hazarda odgovara jednoj lokaciji, jednom parametru gibanja (npr. PGA) i lokalnim uvjetima tla ako se ne računa hazard samo za osnovnu stijenu.

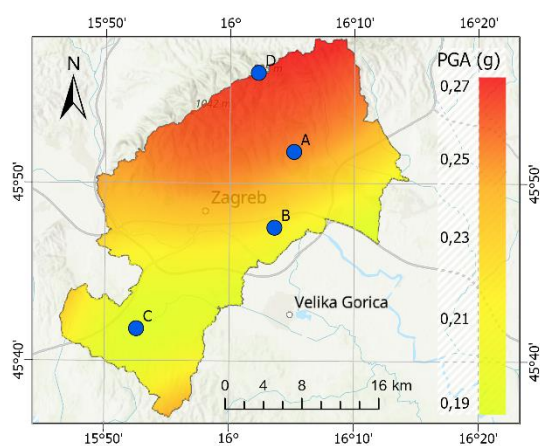
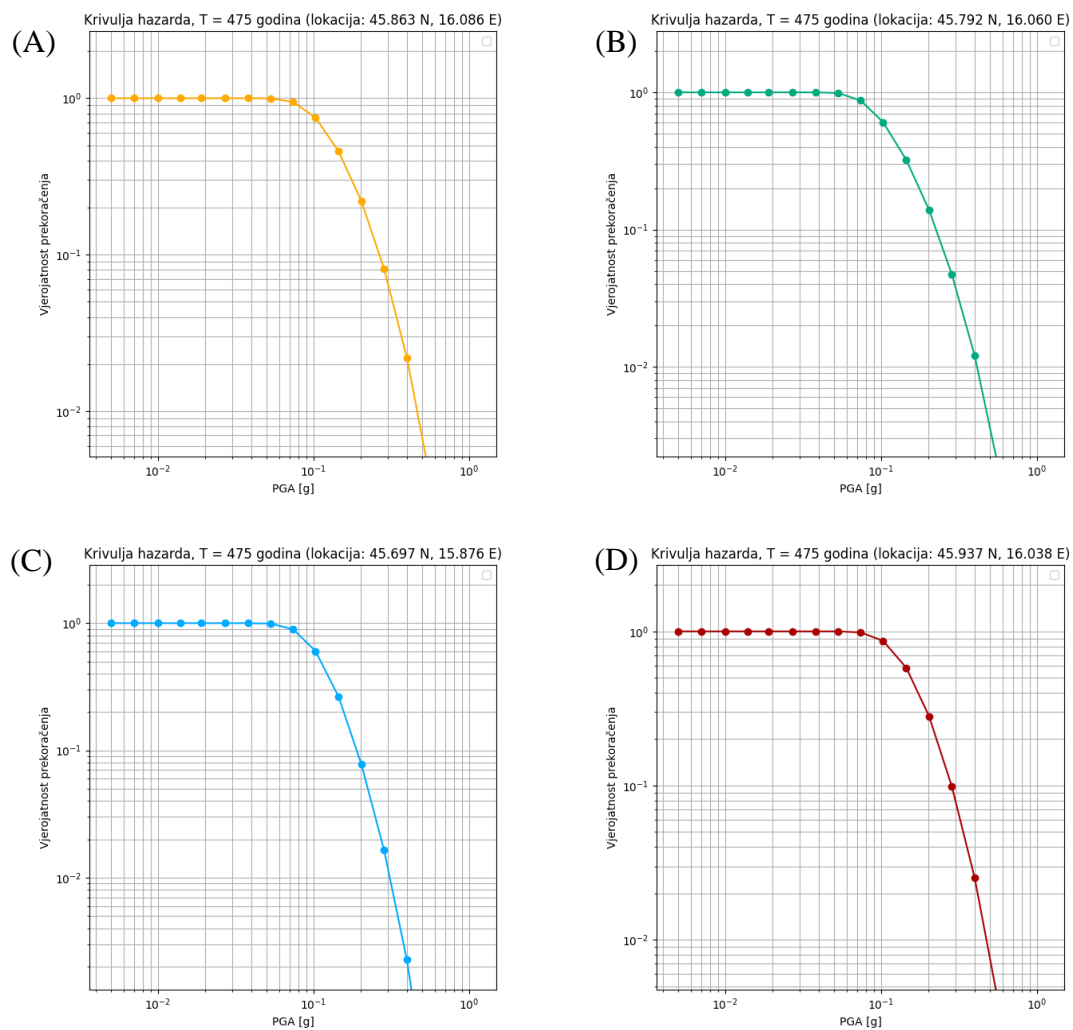
PSHA metodom se računaju krivulje hazarda za svaki parametar gibanja tla i za svaku realizaciju modela na pojedinoj lokaciji. Ako je M broj krajnjih grana logičkog stabla modela izvora, a N je broj krajnjih grana logičkog stabla površinskog gibanja tla tada model ima $M \times N$ realizacija,. Sve realizacije zajedno omogućuju procjenu nepouzdanosti vjerojatnosti za parametre gibanja tla na istraživanoj lokaciji. Srednja krivulja hazarda računa se iz

pojedinačnih vjerojatnosti realizacije uzimajući u obzir težinske faktore povezanih krajnjih grana logičkog stabla. Kvantili se računaju interpolacijom između vrijednosti realizacija, odgovarajućim uzorkovanjem.

Na slikama 5.3. i 5.4. su prikazane krivulje seizmičkog hazarda za nekoliko lokacija unutar istraživanog područja.



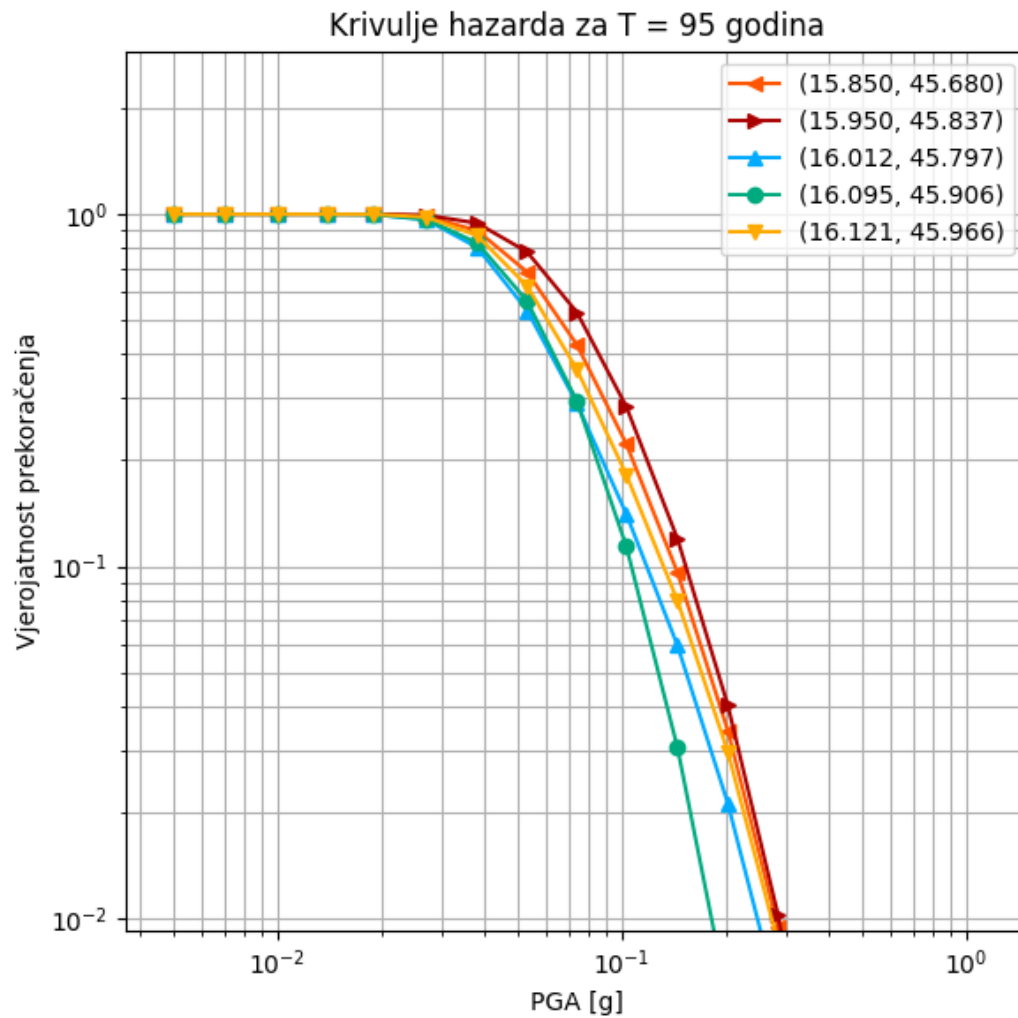
Slika 5.3. Krivulje hazarda u smislu prekoračenja za PGA za četiri odabrane lokacije na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 95 godina. Odabrane lokacije prikazane su na karti lijevo.



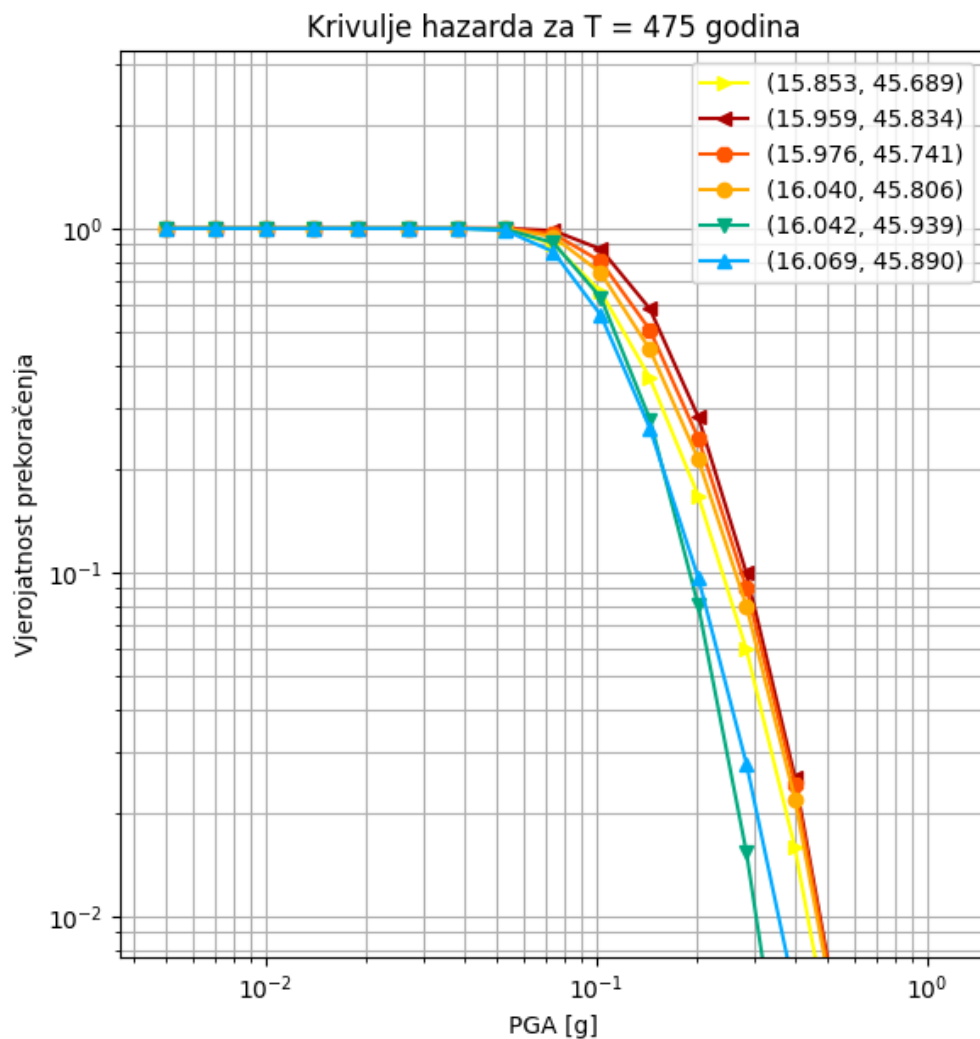
Slika 5.4. Krivulje hazarda u smislu prekoračenja za PGA za četiri odabrane lokacije na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 475 godina. Odabrane lokacije prikazane su na karti lijevo.

Za usporedbu oblika krivulja hazarda i izračunatih vrijednosti PGA su na istom grafu prikazane srednje krivulje hazarda na osnovnoj stijeni za nekoliko lokacija na područjima za koja su

izračunate različite vrijednosti PGA (slike 5.5. i 5.6.) i to na slici 55. za povratno razdoblje od 95 godina, a na slici 5.6. za povratno razdoblje od 475 godina.



Slika 5.5. Krivulje hazarda (srednje) u smislu prekoračenja za PGA za pet točaka s različitim vrijednosti PGA (slika 5.1.) na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 95 godina. Koordinate točaka su dane na slici.



Slika 5.6. Krivulje hazarda (srednje) u smislu prekoračenja za PGA za šest točaka s različitim vrijednosti PGA (slika 5.1.) na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 475 godina. Koordinate točaka su dane na slici.

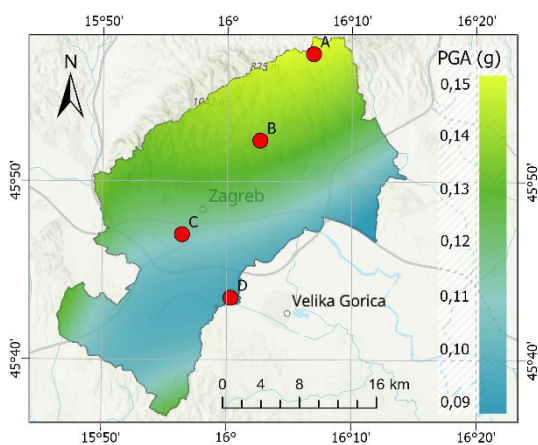
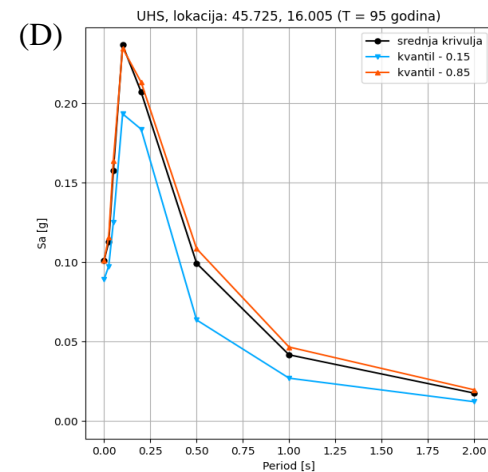
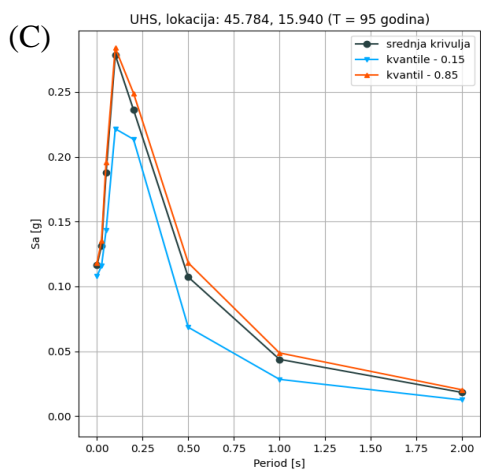
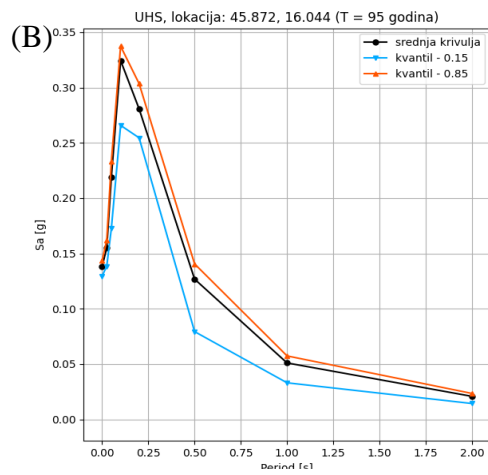
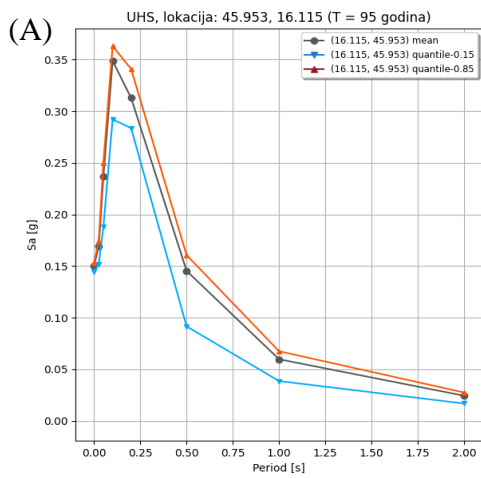
5.3 UHS – SPEKTRI JEDNOLIKOG HAZARDA

Uobičajena metoda za razvijanje projektnog spektra odziva temeljena na probabilističkom pristupu je korištenjem spektara jednolikog hazarda (eng. Uniform Hazard Spectra – UHS).

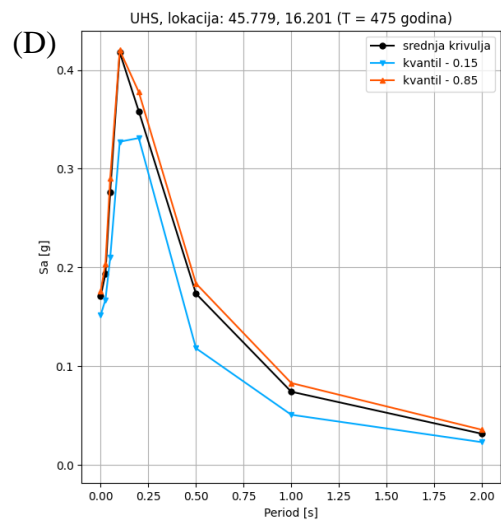
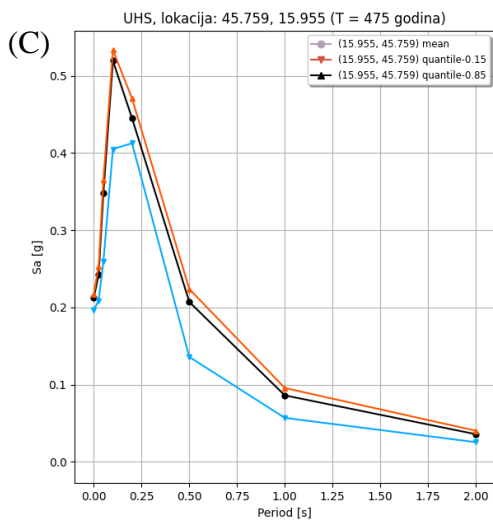
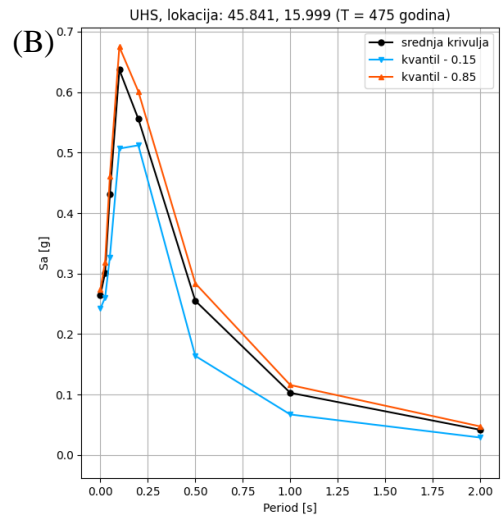
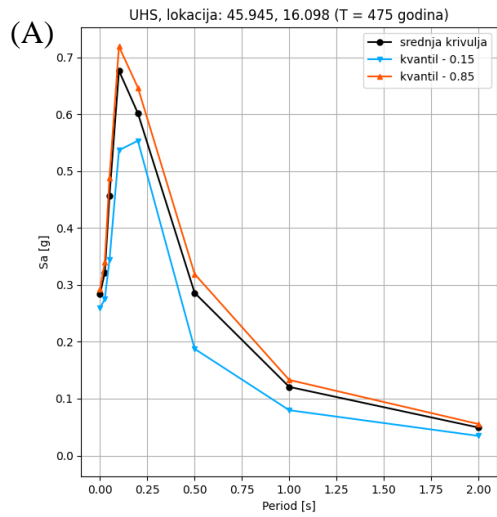
UHS se dobiva tako da se prvo izračuna hazard za niz frekvencija. Zatim se za određeno povratno razdoblje gibanje na osnovnoj stijeni (ili površinsko gibanje tla, uz uključene parametre lokalnih uvjeta tla) određuje na osnovi krivulja hazarda za pojedinu frekvenciju. Izraz "spektar jednolikog hazarda" koristi se zato što postoji jednaka vjerojatnost prekoračenja gibanja tla za bilo koju frekvenciju, odnosno, odgovarajući period. Budući da se hazard računa neovisno za svaki spektralni period, UHS ne predstavlja spektar niti jednog pojedinačnog potresa.

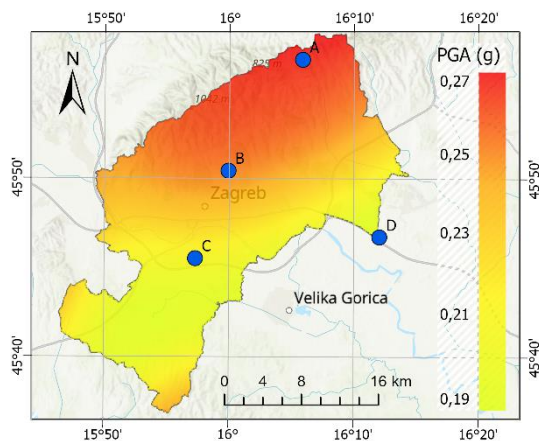
Vrijednost spektralnog ubrzanja (S_a) jednaka je vršnom ubrzanju tla (PGA) pri $T = 0$ s (tj. za krute strukture), a za velike periode (tj. za vrlo fleksibilne strukture) ona asimptotski teži u nulu.

Na slikama 5.7. i 5.8. je prikazan UHS za nekoliko lokacija unutar istraživanog područja, a koje karakteriziraju različite izračunate vrijednosti PGA (na osnovnoj stijeni) za povratne periode 95 i 475 godine.



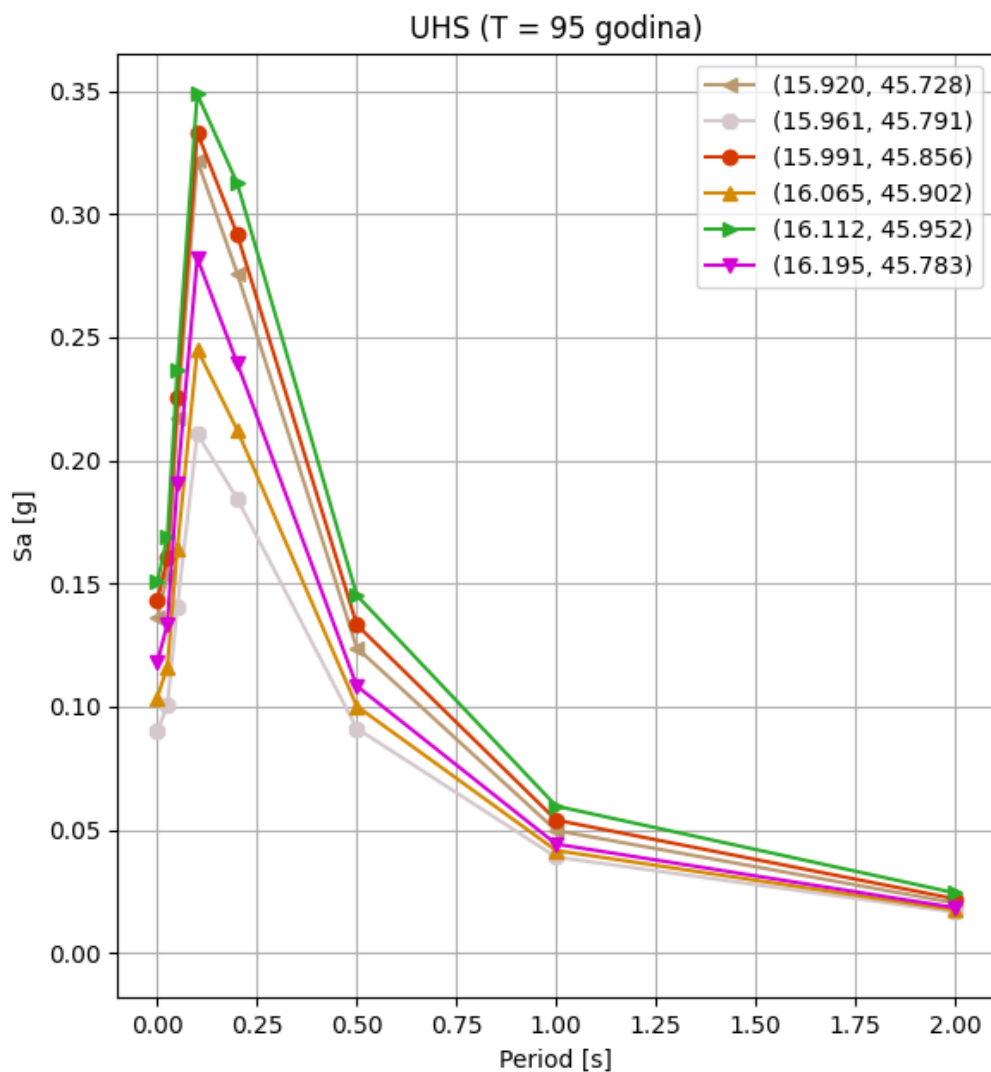
Slika 5.7. UHS spektri za odabrane lokacije na području Grada Zagreba (za osnovnu stijenu) za povratni period od 95 godina. Uz krivulju za srednje vrijednosti naznačene su i krivulje za kvantile 0.15 i 0.85 (odabrane lokacije prikazane su na karti lijevo).



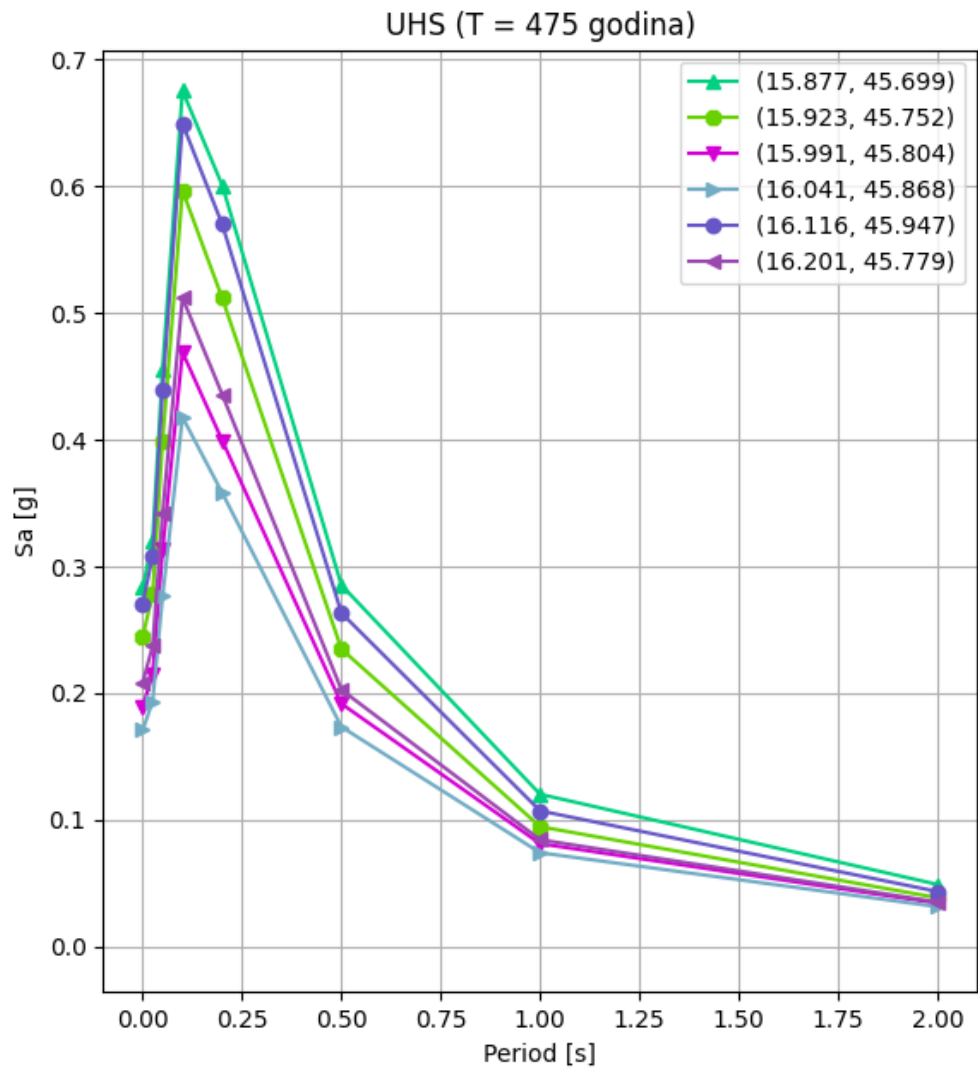


Slika 5.8. UHS spektri za odabrane lokacije na području Grada Zagreba (za osnovnu stijenu) za povratni period od 475 godina. Uz krivulju za srednje vrijednosti naznačene su i krivulje za kvantile 0.15 i 0.85 (odabrane lokacije prikazane su na karti lijevo).

Za usporedbu, kao i u slučaju krivulja hazarda, su na istom grafu prikazani spektri jednolikog hazarda (UHS) za nekoliko lokacija (na osnovnoj stijeni) na područjima za koja su izračunate različite vrijednosti PGA (slike 5.1. i 5.2.) i to na slici 5.9. za povratni period od 95 godina, a na slici 5.10. za povratni period od 475 godina.



Slika 5.9. UHS spektri jednolikog hazarda za niz odabranih lokacija (za koje su izračunate različite vrijednosti PGA, slika 5.1.) na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 95 godina.



Slika 5.10. UHS spektri jednolikog hazarda za niz odabranih lokacija (za koje su izračunate različite vrijednosti PGA, slika 5.2.) na području Grada Zagreba na osnovnoj stijeni za povratni period od 475 godina.

Za sve lokacije i oba povratna perioda spektri jednolikog hazarda imaju maksimum na frekvenciji od približno 10 Hz (period od 0.1 s), a na svakoj od frekvencija je iznos seizmičkog hazarda veći za veće povratno razdoblje (475 godina). Oblici krivulja UHS-a za različite lokacije na području grada Zagreba ne razlikuju se značajno.

6. ZAKLJUČAK

Za potrebe projekta "Potresni rizik Grada Zagreba" koji je dio projekta "Multisenzorsko zračno snimanje Republike Hrvatske za potrebe procjene smanjenja rizika od katastrofa" izračunat je seizmički hazard na osnovnoj stijeni za cijelo područje Grada Zagreba i povratna razdoblja od 95 i 475 godina. Rezultati su prikazani na dvije karte seizmičkog hazarda, četiri grafa krivulja hazarda i četiri grafa UHS spektara. Karte hazarda za oba povratna razdoblja pokazuju povećani hazard za područje Medvednice, zapadnog ruba Grada Zagreba na obroncima Žumberka i na području Vukomerečkih gorica. Projekt "Potresni rizik Grada Zagreba" će poslužiti kao pilot-projekt za određivanje potresnog rizika u drugim dijelovima Hrvatske.

7. LITERATURA

Abrahamson, N.A., Silva, W.J. and R. Kamai (developed within the PEER West 2 Project) (2014): Summary of the ASK14 Ground Motion Relation for Active Crustal Regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.

Akkar, S., Sandikkaya, M.A. and J.J. Bommer (2014): Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 359-387.

Arhiva Geofizičkog odsjeka PMF-a, Sveučilište u Zagrebu

Bindi, D., Mossa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R. and P. Angliera (2014): Pan-European ground motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV and 5%-damped PSA at spectral periods of up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), 391-340.

Bommer, J., J. (2003). Uncertainty about the uncertainty in seismic hazard analysis. *Engineering Geology* 70, 165-168. doi: 10.1016/S0013-7952(02)00278-8

Bondar, I. and D. Storchak (2011). Improved location procedures at the International Seismological Centre, *Geophys. J. Int.* (2011) 186, 1220–1244, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x

Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M. and A. Bianchini (2015): Updated predictive equations for broadband (0.01 – 10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 1587-1612. DOI: 10.1007/s10518-014-9685-y.

Cecić, I. (1996). The April 14, 1895 Ljubljana earthquake - intensity estimates in EMS scale. Conference paper. XXV General Assembly of the European Seismological Commission At: Reykjavik, Iceland.

Chiou, B.S-J. and R.R. Youngs (2014): Update of the Chiou and Youngs NGA mode for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117-1153.

Coppersmith, K.J. and R.R. Youngs (1986): 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, 301-312.

Cornell, C.A. (1968): Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, 1583 -1606.

EPRI, NP-4726-CCML (1989): *Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States*. Research Projects P101-46, -47, 2356, Volume 3, Revision 1, Risk Engineering Inc., Colorado, p. 430.

- Field, N., Jordan, T.A. and C.A. Cornell (2003): OpenSHA: A developing community-modeling environment for seismic hazard analysis. *Seismological Research Letters*, 74/4, 406–419.
- Geiger, L. (1910). Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 331-349. (In 1912 translated to English by Peebles, F. W. L., and Corey, A. H.: Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bulletin St. Louis University*, 8, 60-71).
- Grünthal, G. and R. Wahlström (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, 16, 535–570. DOI: 10.1007/s10950-012-9302-y
- Gutenberg, B., C. F. Richter (1944), "Frequency of Earthquakes in California", p. 186, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 34, iss. 4, pp. 185–188
- Hantken von Prudnik, M. (1882). Das Erdbeben von Agram im Jahre 1880. *Mittheilungen aus dem Jahrbuche der Kön. Hungarian geological institute* 6 (3).
- Herak, M. (1989): HYPOSEARCH—an earthquake location program. *Computers & Geosciences*, 15/7, 1157-1162.
- Herak, D. (1995): Razdioba brzina prostornih valova i seizmičnost šireg područja Dinare. *Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu*, p.141.
- Herak, M., Herak, D. and S. Markušić (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992. *Terra Nova*, 8, 86-94.
- Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2002): Seismicity of Croatia in the period 1997–2001. *Geofizika*, **18–19**, 17–29.
- Ivančić, I., Herak, D., Markušić, S., Sović, I., Herak, M. (2006): Seismicity of Croatia in the period 2002–2005. *Geofizika*, **23**(2), 87–103.
- Ivančić, I., Herak, D., Herak, M., Allegretti, I., Fiket, T., Kuk, K., Markušić, S., Prevolnik, S., Sović, I., Dasović, I., Stipčević, J. (2018): Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. *Geofizika*, **35**(1), 69–98, <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.2>
- ISC (2023): International Seismological Centre, On-line Bulletin, <https://doi.org/10.31905/D808B830>, <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin>
- Jukić, I., F. Pettenati, L. Sirovich, I. Cecić, G. Costa, P. Suhadolc (2023). The Ljubljana 1895 earthquake: source parameters from the inversion of macroseismic data. *J Seismol* (2018) 22:927–941, <https://doi.org/10.1007/s10950-018-9743-z>
- Kotha, S.R., Bindi, P. and F. Cotton (2016): Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and the Middle-East. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, 1245-1263.
- Kišpatić, M. (1981): Potresi u Hrvatskoj, *Rad Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti*, 13, 81–164.

Kövesligethy, R. D. (1906): A makroszeizmikus rengések feldolgozása. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő*, Vol. 24, 349-368.

Markušić, S., Herak, D., Ivančić, I., Sović, I., Herak, M., Prelogović, E. (1998): Seismicity of Croatia in the period 1993-1996 and the Ston-Slano earthquake of 1996. *Geofizika*, 15, 83–101.

Markušić, S., Gullerice, Z., Kuka, N., Duni, L., Ivančić, I., Radovanović, S., Glavatović, B., Milutinović, Z., Akkar, S., Kovačević, S., Mihaljević, J. and R. Šalić (2016): An updated and unified earthquake catalogue for the Western Balkan Region. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, 321-343. DOI: 10.1007/s10518-015-9833-z.

Mohorovičić, A. (1910). Potres od 8. X. 1909. Godišnje izvješće Zagrebačkog meteorološkog opservatorija za godinu 1909. Zagreb.

Pagani, M., Monell, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M. and D. Viganò (2014): OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters*, 85/3, 692-702. DOI: 10.1785/0220130087.

Peruzza, L. (1996): Attenuating intensities. *Annali di Geofisica*, 39, 1079-1093.

Reiter, L. (1991): *Earthquake Hazard Analysis : issues and insights*. Columbia University Press, New York, p. 254.

Sambridge, M. S. and B.L.N. Kennett (1986): A novel method of hypocentre location. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 87, 679-697.

Shebalin (ed.), (1974): *Catalogue of earthquakes, Part III, Atlas of isoseismal maps, UNDF-UNESCO Survey of the seismicity of the Balkan region*, Skopje.

Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli D. and R. Pinho (2014): Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 72(3), 1409-1427. DOI: 10.1007/s11069-013-0618-x.

Stein, S. and M. Wysession (2003): *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, p. 498.

Storchak, D.A., Harris, J., Brown, L. et al. (2017): Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC), part 1: 1964–1979. *Geosci. Lett.* 4, 32. DOI: 10.1186/s40562-017-0098-z

Storchak, D.A., Harris, J., Brown, L. et al. (2020): Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC)—part 2: 1980–2010. *Geosci. Lett.* 7, 18. DOI: 10.1186/s40562-020-00164-6 Stucchi, M., A. Rovida, A. A. Gomez Capera, P. Alexandre, T. Camelbeeck, M. B. Demircioglu, P. Gasperini, V. Kouskouna, R. M. W. Musson, M. Radulian, K. Sesetyan, S. Vilanova, D. Baumont, H. Bungum, D. Fäh, W. Lenhardt, K. Makropoulos, J. M. Martinez Solares, O. Scotti, M. Živčić, P. Albini, J. Batllo, C. Papaioannou, R. Tatevossian, M. Locati, C. Meletti, D. Viganò, D. Giardini (2013): The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899. *Journal of Seismology*, 17, 523–544.

Torbar, J. (1882). Izvješće o Zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880. JAZU, Knjiga I, Zagreb.