

# Odabir atenuacijskih relacija gibanja tla reprezentativnih za područje Hrvatske

---

**Andrić, Tomislav**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:758096>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Tomislav Andrić

ODABIR ATENUACIJSKIH RELACIJA  
GIBANJA TLA REPREZENTATIVNIH ZA  
PODRUČJE HRVATSKE

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA; SMJER:  
SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

**Tomislav Andrić**

Diplomski rad

**ODABIR ATENUACIJSKIH RELACIJA  
GIBANJA TLA REPREZENTATIVNIH  
ZA PODRUČJE HRVATSKE**

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

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo:

1. Izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić \_\_\_\_\_

2. Prof. dr. sc. Marijan Herak \_\_\_\_\_

3. Doc. dr. sc. Ivana Herceg Bulić \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2018.

Iskreno zahvaljujem izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić na ustupljenim podacima, poticaju na samostalan rad, svesrdnoj pomoći i susretljivosti bez koje ovaj rad ne bi ugledao svjetlo dana.

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Zoranu Pasariću na pomoći s prijevodima statističkih termina u radu te prof. Kaleu i prof. Akkaru (Bogazici University, Istanbul) i prof. Šalić (IZIIS, Skopje) na ustupljenim člancima i materijalima.

## Sažetak

Atenuacijske relacije gibanja tla (eng. *ground motion prediction equation* – GMPE) povezuju parametre gibanja tla (npr. vršnu površinsku akceleraciju – eng. *peak ground acceleration* – PGA, spektralnu akceleraciju – eng. *spectral acceleration* – SA) sa skupom nezavisnih varijabli koje opisuju izvor potresa, propagaciju valova i lokalne uvjete tla. Te nezavisne varijable su magnituda potresa, udaljenost od žarišta potresa, parametrizacija lokalnih uvjeta tla, način rasjedanja...

Usklađivanje karata seizmičke opasnosti za područje Zapadnog Balkana provedeno je u okviru projekta BSHAP (Albanija, Hrvatska, Makedonija, Crna Gora, Slovenija i Srbija) financiranog od strane NATO-a. Iz BSHAP baze akceleroograma u ovom radu je izdvojeno 158 akceleroograma od 89 potresa registriranih na 38 postaja na širem području Hrvatske (Hrvatska, BiH, djelovi Slovenije i Crne Gore). Ti podaci su korišteni kako bi se odabrale reprezentativne GMPE u svrhu poboljšanja probabilističke procjene potresne opasnosti (eng. *probabilistic seismic hazard assessment* – PSHA). Znači da se važnost dobivenih rezultata ogleda u mogućnosti bolje procjene hazarda, samim time i rizika, što može pomoći nacionalnim vlastima, javnim i privatnim institucijama, civilnim agencijama za hitne slučajeve, za urbanističko planiranje, smanjenje seizmičke ugroženosti i pripremu za prirodne katastrofe kako bi se doprinijelo sigurnosti građana.

Provjerena je usklađenost atenuacijskih relacija gibanja tla u odnosu na magnitudu potresa, udaljenost od potresa i vrstu tla za PGA i SA za period od 1 s. Ukupno je testirano osam relacija koje se najčešće koriste na Euro-mediteranskom području. Promatraju se razlike prirodnih logaritama stvarnog gibanja i gibanja predviđenog atenuacijskom relacijom. Ukupni ostatak (rezidual) se rastavlja na tri dijela. Prvi dio je srednje odstupanje, drugi dio ostatka dolazi od varijabilnosti među događajima (potresima), a treći od varijabilnosti unutar pojedinih događaja. Analizom reziduala dobiveni su pokazatelji na osnovu kojih su izračunate težine koje se mogu direktno implementirati u PSHA.

Reziduali među događajima su crtani u ovisnosti o magnitudi potresa, dok su reziduali unutar događaja crtani u ovisnosti o udaljenosti od potresa i tipu tla (karakterizirano srednjom brzinom transverzalnih valova u prvih 30 m od površine –  $V_{S30}$ ). Testirane atenuacijske relacije dobro procjenjuju stvarno gibanje na širem području Hrvatske te je definirana atenuacijska relacija gibanja tla koja najbolje opisuje akceleroگرامe na širem području Hrvatske (Akkar i sur., 2014) i još dvije koje su za naše područje reprezentativne (Abrahamson i sur., 2014 i Bindi i sur., 2014).

*Ključne riječi: akceleroogram, Hrvatska, regresijska analiza, atenuacijske relacije gibanja tla, seizmička opasnost*

## Abstract

# Selection of the most suitable GMPEs for the area of Croatia

Tomislav Andrić

Ground motion prediction equations (GMPEs) relate a ground-motion parameter (e.g., peak ground acceleration – PGA, spectral acceleration – SA) to a set of independent variables describing the earthquake source, wave propagation path and local site conditions. These independent variables include magnitude, source-to-site distance, some parameterization of local site conditions, and style-of-faulting (mechanism).

The Harmonization of Seismic Hazard Maps in the Western Balkan Countries was accomplished through BSHAP project (Albania, Croatia, Macedonia, Montenegro, Slovenia and Serbia) funded by NATO. In this work, out of BSHAP strong motion database, 158 accelerograms are extracted, using 89 events (earthquakes) registered on 38 stations in the wider area of Croatia (Croatia, Bosnia and Herzegovina, parts of Slovenia and Montenegro). These data were used to select representative GMPEs to improve the probabilistic seismic hazard assessment (PSHA). So the importance of the obtained results is reflected in a better assessment of the hazard, therefore also of the risk, which can help the national authorities, public and private institutions, civil emergencies agencies, etc., for urban planning, seismic hazard mitigation and disaster preparedness which contributes to the safety of the citizens.

The compatibility of GMPEs in terms of magnitude, distance, and site amplification scaling for PGA and SA 1 s is evaluated. Altogether, the eight most commonly used GMPEs in Euro-mediterranean area were tested. Differences between natural logarithms of actual motion and motion predicted by GMPEs are observed. Total residual is decomposed into three parts: mean offset, between-and within-event residuals. Analysing the residuals scores are obtained and based on these scores weights of GMPEs are calculated. These weights can be directly implemented in the PSHA analysis.

Between-event residuals are plotted with respect to magnitude and within-event residuals are plotted with respect to distance and shear-wave velocity for the top 30 m ( $V_{S30}$ ). Tested GMPEs estimate well actual ground motion in the wider area of Croatia and GMPE, which describes the best accelerograms in the wider area of Croatia, is selected (Akkar et al.,

2014) and two more which may be considered as representative for this area (Abrahamson et al., 2014 and Bindi et al., 2014).

*Keywords: accelerogram, Croatia, regression analysis, GMPEs, seismic hazard*

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Seizmotektonika Hrvatske.....	4
3. Atenuacijske relacije gibanja tla.....	7
4. Podaci.....	10
5. Metoda.....	22
6. Rezultati i diskusija .....	26
7. Zaključci .....	38
Literatura .....	39
Dodatak 1.....	I
Dodatak 2.....	X



## 1 Uvod

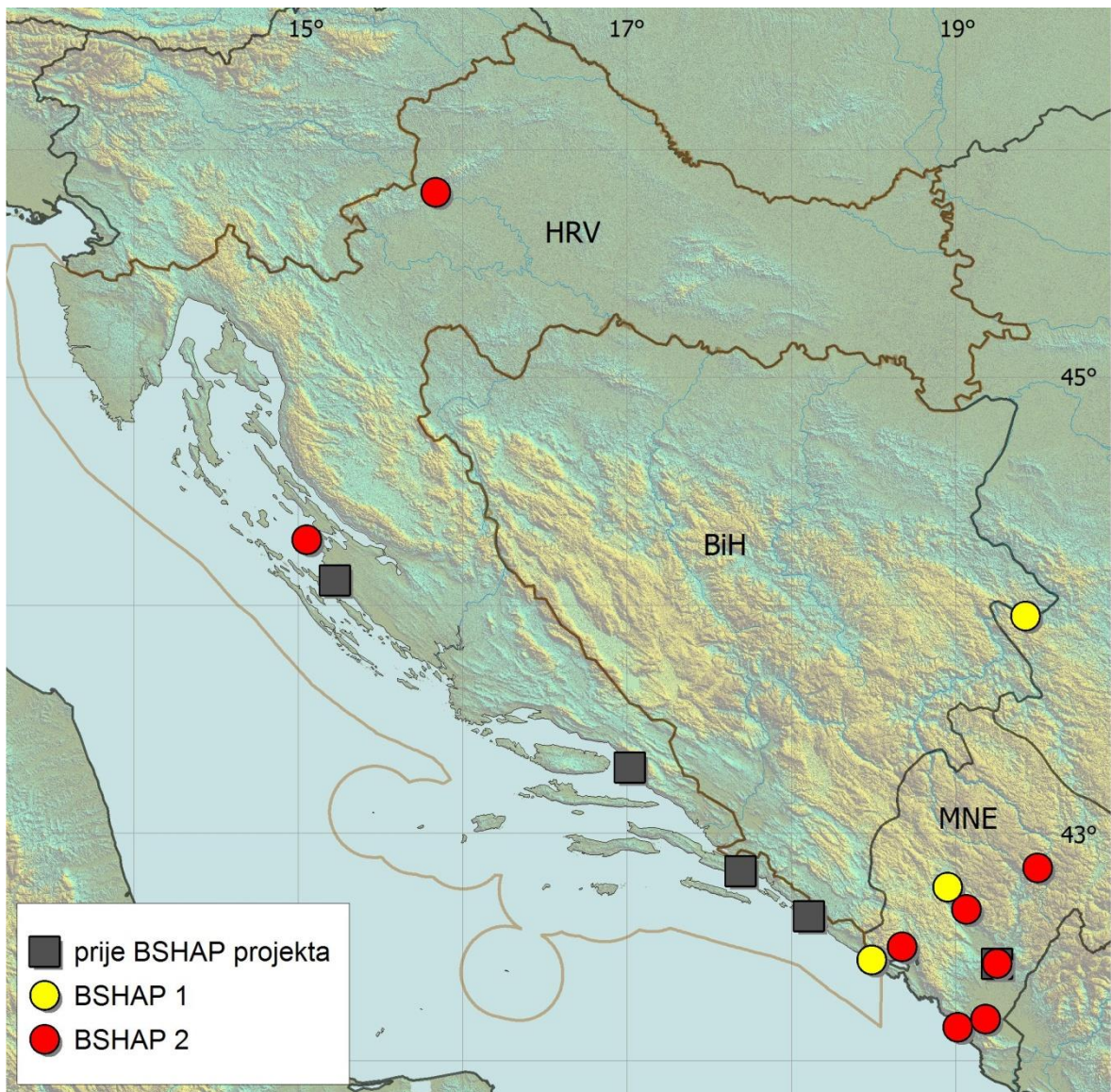
Atenuacijske relacije gibanja tla (eng. *ground motion prediction equation*; GMPE) predviđaju gibanje tla na nekoj lokaciji na osnovi magnitude potresa, udaljenosti od žarišta potresa, lokalnim uvjetima tla, žarišnom mehanizmu... Najčešće mjere jakosti potresa koje se koriste u GMPE-u su vršna gibanja tla: vršna površinska akceleracija gibanja tla (eng. *peak ground acceleration* – PGA), vršna brzina gibanja tla (eng. *peak ground velocity* – PGV) i različite komponente spektara odziva akceleracije i brzine. GMPE povezuje mjere intenziteta gibanja tla s varijablama koje opisuju potres.

Usklađivanje karata seizmičke opasnosti za područje Zapadnog Balkana provedeno je u okviru projekta BSHAP koji je financiran od strane NATO-vog programa Znanost za mir (eng. *Science for Peace*). Države učesnice BSHAP-a (Albanija, Hrvatska, Makedonija, Crna Gora, Slovenija i Srbija) većinom leže na području Jadransko-euroazijske kolizije karakterizirane reversnim mehanizmima rasjedanja. Tektonska kompresija proteže se od smjera sjeveroistok-jugozapad do smjera sjever-jug. U istočnoj Albaniji i Makedoniji prisutna je ekstenzija.

Jedan od važnijih rezultata BSHAP projekta je ažurirani i jedinstveni katalog potresa za područje Zapadnog Balkana. Također su postavljeni novi akcelerografi te je uz postojeće akcelerografe baza akcelerografskih zapisa potresa vidno obogaćena. Baza se sastoji od ranijih, većinom analognih, zapisa i novih digitalnih zapisa dobivenih tijekom i nakon BSHAP projekta (Gülerce i sur., 2016). Tijekom same provedbe projekta korištena su 34 akcelerografa i 5 širokopojasnih seizmografa na području država učesnica (Šalić i sur., 2016). Na Slici 1 je mreža digitalnih akcelerografa instaliranih prije i tijekom BSHAP projekata (radilo se o dva uzastopna projekta) na širem području Hrvatske. BSHAP baza akcelerograma sastoji se od 672 akcelerograma dobivenih od 358 potresa registriranih na 121 postaji. Povezana je s BSHAP katalogom potresa (Markušić i sur., 2015) kako bi se dobili neophodni metapodaci o potresima. Iz BSHAP baze akcelerograma u ovom radu korišteno je 158 akcelerografskih zapisa dobivenih od 89 potresa registriranih na 38 postaja smještenih na širem području Hrvatske (Hrvatska, BiH, djelovi Slovenije i Crne Gore). Ti podaci koriste se za odabir reprezentativnih GMPE relacija za poboljšanje probabilističke procjene potresne opasnosti (eng. *Probabilistic Seismic Hazard Assessment* – PSHA). To se provodi usporedbom prikupljenih akcelerograma s predviđenim gibanjima dobivenim pomoću atenuacijskih relacija gibanja tla. Ovakvo istraživanje još nije provedeno za područje Hrvatske. Važnost dobivenih rezultata ogleda se u mogućnosti bolje procjene hazarda, a samim tim i rizika, što može pomoći nacionalnim vlastima, javnim i privatnim institucijama, civilnim agencijama za hitne slučajeve, za urbanističko planiranje, smanjenje seizmičke ugroženosti i pripremu za prirodne katastrofe kako bi se doprinijelo sigurnosti građana.

Analizom baze akcelerograma BSHAP za šire područje Hrvatske uočava se nedostatak zapisa potresa srednjih i velikih magnituda te malih udaljenosti od postaje do potresa. S obzirom na to, takva baza akcelerograma nije dobra za razvoj novih GMPE-a, jer ima

problem s nestabilnošću prilikom ekstrapolacije na tim rasponima navedenih parametara (Gülerce i sur., 2016). Stoga se navedena baza koristi za provjeru usklađenosti atenuacijskih relacija u odnosu na magnitudu potresa, udaljenost od potresa i tip tla. Atenuacijske relacije koje su testirane u ovom radu su: ASK14 (Abrahamson i sur., 2014), CB14 (Campbell i Bozorgnia., 2014), CY14 (Chiou i Youngs, 2014), Aetal14 (Akkar i sur., 2014), Betal14 (Bindi i sur., 2014), Cetal15 (Cauzzi i sur., 2015), AR3 (Chiou i sur., 2008) i AR4 (Zhao i sur., 2006). Promatraju se razlike logaritama stvarnog gibanja i gibanja predviđenog atenuacijskom relacijom. Pomoću postupka opisanog u Abrahamson i Youngs (1992) ukupni ostatak (rezidual) se rastavlja na tri dijela. Prvi dio je srednje odstupanje, drugi dio ostatka dolazi od varijabilnosti među događajima (potresima), a treći od varijabilnosti unutar pojedinih događaja (nakon što se od svakog ukupnog reziduala za pojedini zapis odbije pripadni prvi i drugi dio). U radu su posljednja dva dijela ostatka zvaní rezidualima među događajima te rezidualima unutar događaja (Al Atik i sur., 2010). Potom su analizirani reziduali slijedeći proceduru opisanu u Scassera i sur. (2009) i Gülerce i sur. (2016) te su evaluirane GMPE s obzirom na magnitudu potresa, udaljenost od potresa i tip tla (tj. brzinu transverzalnih S-valova u gornjih 30 m,  $V_{S30}$ ). Na kraju su atenuacijske relacije gibanja tla rangirane računanjem težina na osnovu pokazatelja LLH (Scherbaum i sur., 2009) koji se računa na osnovu metode logaritamske vjerodostojnosti i EDR (Kale i Akkar, 2013) koji se računa na osnovu euklidske udaljenosti. Euklidska udaljenost je u ovom istraživanju definirana kao korijen sume razlika kvadrata prirodnih logaritama stvarnih i procjenjenih gibanja. Navedeni pokazatelji govore o mogućnosti atenuacijskih relacija da produciraju opažene podatke o gibanju.



Slika 1: Prostorna raspodjela digitalnih akceleroografa instaliranih prije i tijekom BSHAP projekata na širem području Hrvatske. Crni kvadratići su stanice instalirane prije BSHAP projekata (5 postaja), žuti krugovi su stanice instalirane pod BSHAP-1 projektom (3 postaje), a crveni krugovi su stanice instalirane pod BSHAP-2 projektom (8 postaja).

## 2 Seizmotektonika Hrvatske

U procesu zatvaranja oceana Neotetisa u konvergentnoj zoni Afričke i Euroazijske ploče nastao je Alpsko-dinaridsko-karpatski orogeni sustav (Schmid i sur., 2008; Ustaszewski i sur., 2008). Ispred Afričke ploče je Jadranska mikroploča koja je migrirala prema sjeveroistoku i kolizijom s blokom Tisa uzdigli su se Dinaridi na sjeveroistoku. Blok Tisa je odlomljen od Euroazijske ploče vjerojatno u miocenu (Csontos i Vörös, 2004). Zbog rotacijske komponente gibanja Jadranske mikroploče u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu zbila se lateralna ekstruzija u Istočnim Alpama, izdigli su se Karpati te se otvorio Panonski bazen.

Područje istraživanja u ovom radu obuhvaća jugozapadni dio Panonskog bazena i Dinaride te uključuje područja Hrvatske i Bosne i Hercegovine te dijelove Slovenije i Crne Gore. U tektonskom smislu istraživanje uključuje Dinaride, središnji i sjeveroistočni dio Jadranske mikroploče i jugozapadni dio bloka Tisa.

Subdukcijom i kasnije kolizijom Jadranske mikroploče s odlomljenim dijelom Europske ploče nastao je borano-navlačni pojas Dinarida (Handy i sur., 2015). Oni se pružaju od Helenida na jugoistoku do Južnih Alpa na sjeverozapadu. Dinaridi su konačno izdizanje imali u oligocenu i miocenu. Rasjedne i borane strukture u najvećem djelu Dinarida imaju jugozapadnu vergenciju s pružanjem sjeverozapad-jugoistok. U sjevernom djelu Dinarida te strukture imaju južnu vergenciju i pružanje zapad-istok što je svojstveno susjednim Južnim Alpama. U Dinaridima prevladavaju reversni rasjedi. Prema Šumanovac (2010) dva najznačajnija reversna rasjeda su: rasjed Čićarija i rasjed Velebit (Slika 2). Dinaridi se mogu podjeliti u Vanjske i Unutarnje Dinaride. Vanjski Dinaridi nastali su deformacijom sjeveroistočnog dijela Jadranske mikroploče te se uglavnom sastoje od stijena nekadašnje Jadranske karbonatne platforme (mezozojski karbonati: vapnenci, breče, dolomiti) (Šumanovac, 2010). U Unutarnjim Dinaridima nalazi se zona Bosanskog fliša, ofiolitna zona središnjih Dinarida i Savska suturna zona. Za zonu Bosanskog fliša pretpostavlja se tektonska aktivnost od gornje jure do krede, za ofiolitnu zonu središnjih Dinarida od srednje jure do starije krede, dok je Savska suturna zona bila aktivna u paleogenu i kredi.

Seizmičnost Dinarida je umjerena do jaka te se pojačava prema jugoistoku. Povremeno se pojavljuju jaki potresi te vrlo često slabi (Ivančić i sur., 2006). Većina potresa ima žarište u gornjoj kori (ne dublje od 30 km). U Vanjskim Dinaridima brzina pomaka po rasjedu na sjeverozapadu iznosi do 0.15 mm/god, a na jugoistoku 2.01 mm/god (Kastelic i Carafe, 2012). Po seizmičnosti se ističu: područje Banja Luke, Žumberak-Medvednica, rasjedna zona Ilirska Bistrica-Rijeka-Vinodol-Senj, te područje od Dinare prema jugu do Crne Gore. Najznačajniji potres na području Banja Luke dogodio se 1969. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII}^\circ$  MCS i magnitude  $M_L = 6$ ). U sjeverozapadnoj Hrvatskoj dominira kompresijska tektonika s napetostima uglavnom smjera sjever-jug i reversnim rasjedima pružanja zapad-istok te rasjedima po pružanju (eng. *strike-slip fault*) smjera sjeverozapad-jugoistok u zapadnom dijelu i sjeveroistok-jugozapad u istočnom djelu. Najznačajniji potresi u tom dijelu su se dogodili 1880. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII}^\circ$  MCS) 17 km sjeveroistočno od

Zagreba, 1909. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII}^\circ$  MCS i magnituda  $M_L = 6$ ) kod Pokupskog te snažni potresi u blizini Varaždina 1459. i 1738. godine (Herak i sur., 2009).

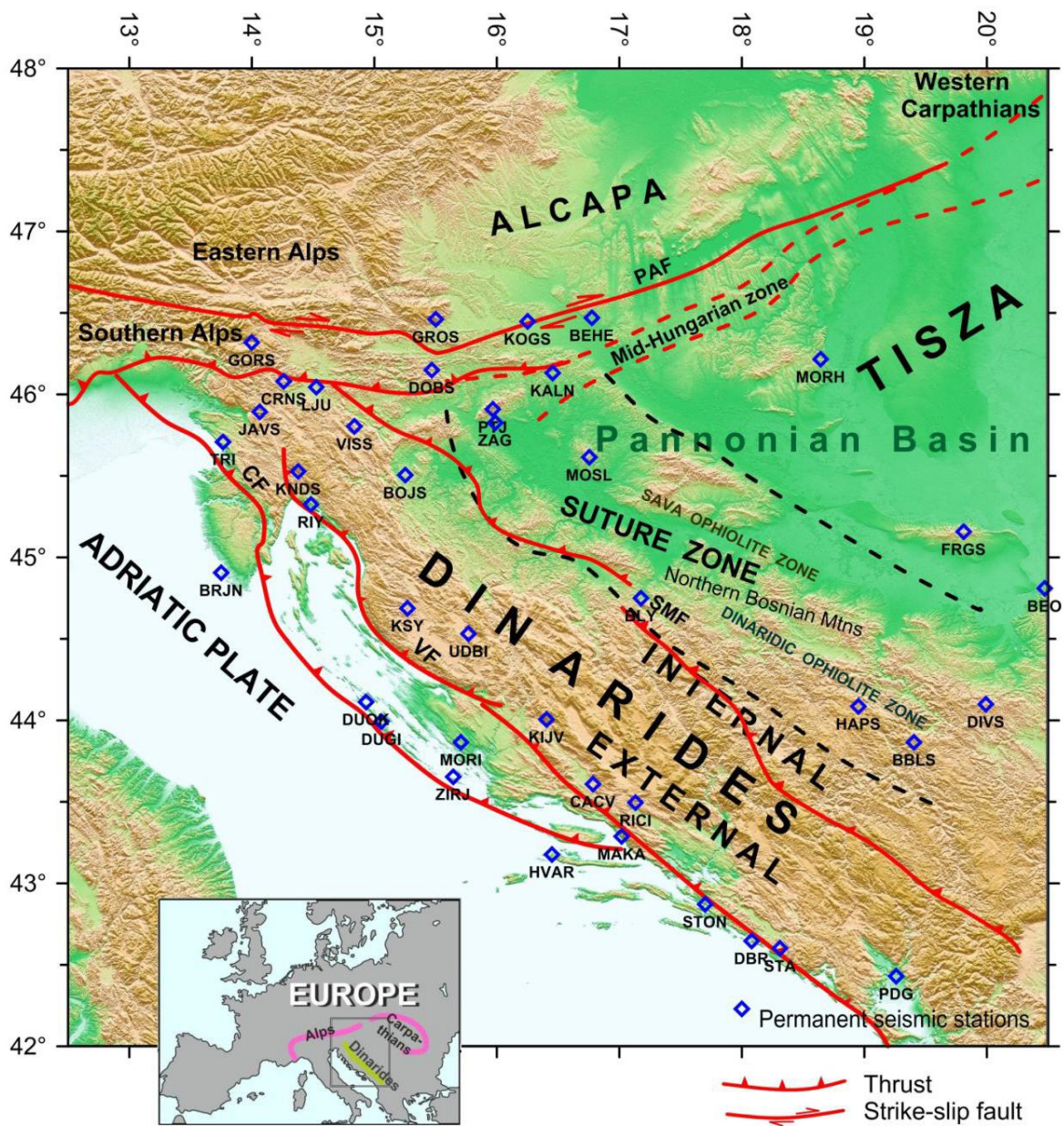
U rasjednoj zoni Ilirska Bistrica-Rijeka-Vinodol-Senj dominantno je reversno rasjedanje. Pružanje rasjeda je sjeverozapad-jugoistok sa žarištima dubine do 20 km (Markušić i Herak, 1999). Jaki potres dogodio se u Vinodolu 1916. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII}^\circ$  MCS) te su snažni potresi na senjskom području bili u 17. i 19. stoljeću, a na riječkom u 18. stoljeću.

U 20. stoljeću u Hrvatskoj najjači potres dogodio se kod Imotskog 1942. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII-IX}^\circ$  MCS i magnituda  $M_L = 6.2$ ). Na dubrovačkom području dogodili su se jaki potresi 1667. godine (intenziteta  $\text{IX}^\circ$  EMS) i 1996. godine (intenziteta  $I_0 = \text{VIII}^\circ$  MCS i magnituda  $M_L = 6$ ). U crnogorskom podmorju dogodio se 1979. godine potres momentne magnituda  $M_w = 6.94$ . I u južnom dijelu Vanjskih Dinarida dominira sustav reversnih rasjeda dinarskog smjera pružanja u kombinaciji s rasjedima s pomakom po pružanju.

Naziv Jadranska mikroploča uobičajeno se koristi za slabije deformirani dio Jadranske mikroploče koji je omeđen Apeninima na zapadu, Alpama na sjeveru i Dinaridima na istoku. Na nama interesantnom području ove seizmotektonske jedinice dogodila se serija potresa 2003. godine na području otoka Jabuke s glavnim potresom magnituda  $M_L = 5.5$ . Seizmički profili ukazuju na reversne strukture vezane uz rasjed Jabuka-Sv. Andrija (Herak i sur., 2005).

Za Panonski bazen su karakteristične ekstenzijske strukture (Posgay i sur., 1995). Mnoga istraživanja govore o lateralnoj ekstruziji (eng. *escape tectonics*) kao važnoj fazi u geodinamskom razvoju Panonskog bazena (npr. Brückl i sur., 2007, 2010; Ratschbacher i sur., 1991; Csontos i Vörös, 2004). Ova istraživanja nastoje objasniti transportni mehanizam alpskih fragmenata ugrađenih u sjeverni dio Panonskog bazena i Unutarnje Karpate. U jugozapadnom dijelu Panonskog bazena dominiraju mladi sedimenti (neogen, kvartar). Depresije su zapunjene neogenskim sedimentima koji variraju u dimenzijama i dubinama. Najveće i najdublje depresije u ovom dijelu Panonskog bazena su Savska i Dravska depresija. Na nekoliko planina (tzv. otočnih gora) se mogu naći paleozojsko-mezozojske stijene (Šumanovac i sur., 2017). Seizmičnost jugozapadnog dijela Panonskog bazena je većinom raspršena i slaba (Ivančić i sur., 2006).

Na Slici 2 prikazana je topografska i tektonska karta Panonsko-dinaridske regije s ucrtanim seizmološkim postajama i glavnim tektonskim jedinicama i rasjedima. Na karti su ucrtane samo one seizmološke postaje koje su korištene u radu Šumanovac i sur. (2017) od kuda je karta i preuzeta.



Slika 2: Topografska i tektonska karta Panonsko-dinaridske regije sa seizmološkim postajama. Ucrtane su glavne tektonske jedinice i rasjedi (PAF – Periadriatski rasjed, CF – rasjed Ćićarija, VF – rasjed Velebit, SMF – južni granični rasjed Panonskog bazena). Slika je preuzeta iz Šumanovac i sur. (2017).

### 3 Atenuacijske relacije gibanja tla

Atenuacijske relacije gibanja tla (GMPE) predviđaju gibanje tla na nekoj lokaciji na osnovi magnitude potresa, udaljenosti od potresa, lokalnim uvjetima tla, žarišnom mehanizmu... Najčešće mjere jakosti potresa koje se koriste u GMPE-u su vršna gibanja tla: vršna akceleracija gibanja tla (PGA), vršna brzina gibanja tla (PGV) i različite komponente spektara odziva akceleracije i brzine. U ovom istraživanju korištene su horizontalne komponente akceleracije gibanja. GMPE povezuje mjere intenziteta gibanja tla s varijablama koje opisuju potres. Važnost GMPE relacija se ogleda u mogućnosti poboljšanja probabilističke procjene potresne opasnosti (PSHA) za što bolje urbanističko planiranje te smanjenje seizmičke ugroženosti kako bi se doprinijelo sigurnosti građana. Za dobivanje nove GMPE relacije prvo se odabere funkcionalna forma samog modela s definiranim zavisnim i nezavisnim varijablama. Kako bi se pronašla prikladna funkcionalna forma koja dobro modelira opažena gibanja s obzirom na magnitudu potresa, udaljenost od žarišta potresa i uvjete tla, provode se brojne probne regresije koristeći proceduru opisanu u Abrahamson i Youngs (1992). Nakon toga se provodi regresija (s obzirom na odabrani skup podataka) kako bi se dobili koeficijenti relacije i standardne devijacije.

Velik broj regionalnih i globalnih atenuacijskih relacija gibanja tla primjenjiv na aktivna tektonska područja je razvijen zadnjih desetljeća. Već 2003. godine Douglas broji 120 studija u kojima su dobivene GMPE relacije za procjenu vršne akceleracije gibanja tla (PGA) i 80 studija u kojima su dobivene GMPE relacije za procjenu spektralne akceleracije (SA). Globalne GMPE su stabilnije od regionalnih, jer su izvedene na osnovi većih i statistički stabilnijih skupova podataka. S druge strane, GMPE relacije izvedene na osnovi regionalnih skupova podataka bolje reflektiraju regionalne tektonske karakteristike (Šalić i sur., 2016). Za područje Zapadnog Balkana izvedene su atenuacijske relacije gibanja tla sljedećih autora: Petrovski i Marcellini (1988), Stamatovska i Petrovski (1991, 1996), Herak i sur. (2001) i Manić (2002). Prema kriterijima u Cotton i sur. (2006) i Bommer i sur. (2010) ove relacije ne mogu biti uključene u konačnu analizu jer su izvedene na osnovi dosta limitiranog skupa podataka, predviđaju samo jednu mjeru gibanja tla (PGA) i ne uključuju momentnu magnitudu.

Bez obzira na velik broj izvedenih GMPE relacija, predodabir i odabir reprezentativnih za neko područje, u pravilu, nije jednostavan i jednoznačan. Kriteriji korišteni u predodabiru i odabiru atenuacijskih relacija gibanja tla opisani su u Cotton i sur. (2006) i Bommer i sur. (2010). Relacije koje su ispitivane u ovom istraživanju nastale su na osnovi globalnih skupova podataka. U početnom djelu istraživanja korištena je i relacija gibanja tla za područje Dinarida od Heraka i sur. (2001).

U okviru GEM projekta (eng. *Global Earthquake Model project*) (Stewart i sur., 2015) dobivene su NGA-W1 relacije. U ovom istraživanju su korištene novije verzije dobivene u okviru NGA-West 2 projekta: Abrahamson i sur. (2014, ASK14), Campbell i Bozorgnia (2014, CB14) i Chiou i Youngs (2014, CY14). Korištene su dvije Pan-Europske relacije

dobivene u okviru SIGMA projekta: Akkar i sur. (2014a, b, c, Aetal14) i Bindi i sur. (2014, Betal14). U istraživanje je uključena i relacija gibanja tla koju su predložili Cauzzi i sur. (2015, Cetal15) koja uključuje i veliku količinu zapisa s japanskih akcelerografa. Tih šest relacija pripadaju skupini Euro-mediteranskih relacija. Uključene su još dvije atenuacijske relacije gibanja tla koje se u Hrvatskoj koriste za procjenu seizmičkog hazarda, a to su Chiou i sur. (2008, AR3) i Zhao i sur. (2006, AR4) te u početnom djelu analize relacija koju su predložili Herak i sur. (2001, AR5). U Dodatku 1 navedene su korištene relacije i neke vrijednosti regresijom dobivenih koeficijenata.

Lokalni uvjeti tla su rezultat nekoliko fizikalnih procesa kada seizmički valovi prolaze kroz gornjih nekoliko stotina metara stijena i slojeva tla. Ti fizikalni procesi su višestruke refleksije, fokusiranje, rezonancija, pojava zarobljenih valova (eng. *trapped waves*)... Topografija i različita mehanička svojstva terena kao što su razina podzemne vode, prisutnost heterogenosti, diskontinuiteta i šupljina doprinosi lokalnom seizmičkom hazardu. Relacije dane u Dodatku 1 uključuju lokalne uvjete tla. Osim linearnih amplifikacijskih komponenti uključuju i nelinearne amplifikacijske komponente, jer nakon prelaska određenog praga trešnje tla dolazi do neelastičnih deformacija te se tlo ponaša nelinearno. Amplifikacijski faktor ( $AF$ ) je definiran kao omjer površinskog spektra odziva ( $Sa_{SURF}$ ) i spektra odziva osnovne stijene ( $Sa_{ROCK}$ ):

$$AF(T) = \frac{Sa_{SURF}(T)}{Sa_{ROCK}(T)}$$

Generalni parametar koji predstavlja uvjete tla je  $V_{S30}$ . Prvi nelinearni amplifikacijski model na osnovi Pan-europske baze akcelerograma su razvili Sandikkaya i sur. (2013). Njegova funkcionalna forma je sljedeća:

$$\ln(AF) = \begin{cases} a(T) \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) + b(T) \ln\left[\frac{PGA_{REF} + c\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}{(PGA_{REF} + c)\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}\right] & \text{za } V_{S30} \leq V_{REF} \\ a(T) \ln\left(\frac{\min(V_{S30}, V_{CON})}{V_{REF}}\right) & \text{za } V_{S30} > V_{REF}, \end{cases}$$

gdje je  $PGA_{REF}$  vršna akceleracija tla na referentnoj stijeni,  $V_{REF}$  je referentna brzina S-valova na osnovnoj stijeni ( $750 \text{ ms}^{-1}$  ili  $1100 \text{ ms}^{-1}$ , ovisno o definiciji),  $V_{CON} = 1100 \text{ ms}^{-1}$  je granični  $V_{S30}$  nakon kojeg je amplifikacija tla konstatna, koeficijenti  $c$  i  $n$  ne ovise o periodu. Koeficijent  $c$  govori o odnosu viših i nižih amplituda gibanja tla, a koeficijent  $n$  govori o nelinearnosti na nižim vrijednostima  $V_{S30}$ . Koeficijent  $a(T)$  predstavlja linearnu promjenu amplifikacije sa  $V_{S30}$  do  $V_{REF}$ , dok  $b(T)$  kontrolira nelinearno ponašanje tla.

Neki od autora čiji su linearni i nelinearni modeli uključivani u relacije su npr. Boore i sur. (1997), Abrahamson i Silva (1997), Choi i Stewart (2005), Walling i sur. (2008). Choi i Stewart (2005) i Boore i Atkinson (2008) su pokazali da je koeficijent  $b(T)$  negativan te da



se općenito povećava prema nuli kako tlo postaje kruće (kako raste  $V_{S30}$ ), jer nelinearnost postaje manje važna. Do deamplifikacije dolazi povećavanjem mjere intenziteta (npr. PGA) za manje kruta tla (s manjim  $V_{S30}$ ) te nelinearnosti postaju signifikantne (npr. Walling i sur., 2008; Abrahamson i Silva, 2008; Campbell i Bozorgnia, 2008 i dr.). Nelinearni efekti su istaknutiji za manje kruta tla na nižim spektralnim periodima (0.0 – 0.2 s) nego na višim spektralnim periodima. Amplifikacija teži konstantnoj vrijednosti za kruća tla, jer je po svojoj prilici ponašanje takvog tla linearno.

U relacijama navedenim u Dodatku 1  $M$  je momentna magnituda ( $M_w$ ),  $T$  je period,  $V_{S30}$  je srednja brzina S-valova u gornjih 30 m od površine,  $R_{rup}$  je najkraća udaljenost od postaje do rasjedne plohe (eng. *Rupture distance*),  $R_{JB}$  (Joyner-Booreova udaljenost) je najkraća udaljenost postaje do projekcije rasjedne plohe na površini,  $R_{hyp}$  je hipocentralna, a  $R_{epi}$  epicentralna udaljenost. U relacijama su u uporabi dubina do vrha rasjedne plohe (eng. *depth-to-top-of-rupture*,  $Z_{TOR}$ ) i dubina hipocentra ( $Z_{hyp}$ ). Inače, u samoj BSHAP-ovoj bazi je uzeto da je  $Z_{TOR} = Z_{hyp}$  za one događaje bez karakteriziranog žarišnog mehanizma (eng. *Fault Plane Solution*, FPS). Za svaku atenuacijsku relaciju gibanja tla je naš skup podataka dodatno filtriran ovisno o zahtjevima pojedine relacije (često:  $M > 3.5$ ,  $R_{rup}$ ,  $R_{JB} < 200$  km,  $V_{S30} < 1500$  ms<sup>-1</sup>,  $15^\circ < \delta < 90^\circ$ ,  $Z_{hyp}$ ,  $Z_{TOR} < 20$  km...) gdje je  $\delta$  kut nagiba rasjedne plohe (eng. *dip*).

## 4 Podaci

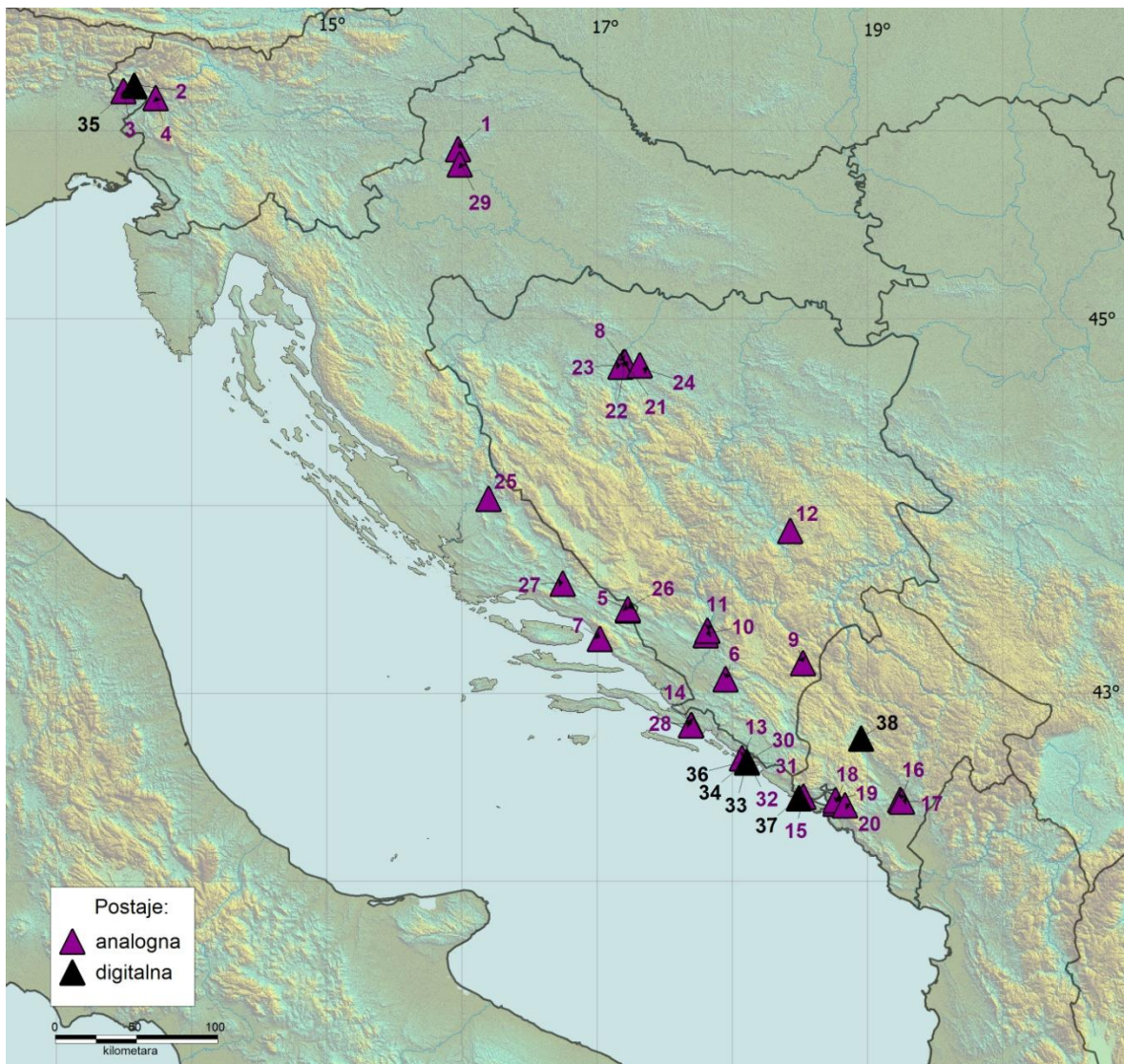
Od kvalitetnih akceleroograma sakupljenih u arhivima Albanije, Crne Gore, Srbije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine i Slovenije izdvojeni su akceleroگرامи u pravokutniku omeđenom koordinatama: 42.36 – 46.61° N, 13.48 – 19.55° E (kao na Slici 1). Od ukupno 672 akceleroograma u bazi po kriterijima navedenim u Akkar i Bommer (2006) izdvojeno je 507 akceleroograma (od 278 potresa) od kojih je 158 unutar navedenog pravokutniku. Radi se o zapisima 89 potresa registriranih na 38 postaja na širem području Hrvatske (Hrvatska, BiH, djelovi Slovenije i Crne Gore). Kod većine potresa ne postoje informacije o rasjednim parametrima. Način rasjedanja svakog događaja je određen korištenjem rješenja dvostrukog para sila (eng. *double-couple*) pomoću kuta nagiba P- i T-osi (Boore i Atkinson, 2007). Način klasifikacije rasjeda je predložen u Tablici 1.

Tablica 1: Definicije tipova rasjeda bazirane na kutovima nagiba P- i T-osi ( $pl$  u tablici je kut nagiba u odnosu na horizontalu) (preuzeto iz Boore i Atkinson, 2007).

Nagib P-osi	Nagib T-osi	Tip rasjeda
$pl \geq 52^\circ$	$pl \leq 35^\circ$	Normalni
$40^\circ \leq pl < 52^\circ; pl \leq 20^\circ$	$pl \leq 20^\circ; 40^\circ \leq pl < 52^\circ$	Rasjedi s dijagonalnim pomakom
$pl < 40^\circ; pl \leq 20^\circ$	$pl \leq 20^\circ; pl < 40^\circ$	Rasjedi sa pomakom po pružanju
$pl \leq 35^\circ$	$pl \geq 52^\circ$	Reversni

Najkraće udaljenosti postaje do rasjedne plohe ( $R_{rup}$ ), hipocentralne udaljenosti ( $R_{hyp}$ ), Joyner-Booreove udaljenosti ( $R_{JB}$ ) i epicentralne udaljenosti ( $R_{epi}$ ) su izračunate korištenjem procedure opisane u Akkar i sur. (2014a). Aproksimacija točkastog izvora je pretpostavljena za potrese do momentne magnitude  $M_w = 6.2$  te tada vrijedi:  $R_{rup} = R_{hyp}$  i  $R_{JB} = R_{epi}$ . Od 158 zapisa samo kod njih 12 (7.6 %) je  $R_{rup} \neq R_{hyp}$  i  $R_{JB} \neq R_{epi}$ . Na Slici 3 su prikazane analogne i digitalne postaje čiji su zapisi korišteni prilikom ovog istraživanja. Vidljiva je dominacija analognih nad digitalnim instrumentima. U bazu su dodane informacije o svakoj postaji (nadmorska visina, tip tla, geografske koordinate, informacije o senzoru...).

U testiranim GMPE relacijama se koristi momentna magnituda ( $M_w$ ) koja dobro opisuje veličinu potresa te je stoga izabrana i kao referentna magnituda u BSHAP katalogu (Markušić i sur., 2015). Inicijalno su korištene različite mjere (većinom lokalne) magnitude. Za povezivanje s momentnom magnitudom u BSHAP-u korištene su unaprijeđene empirijske relacije koje su predložili Duni i sur. (2010).

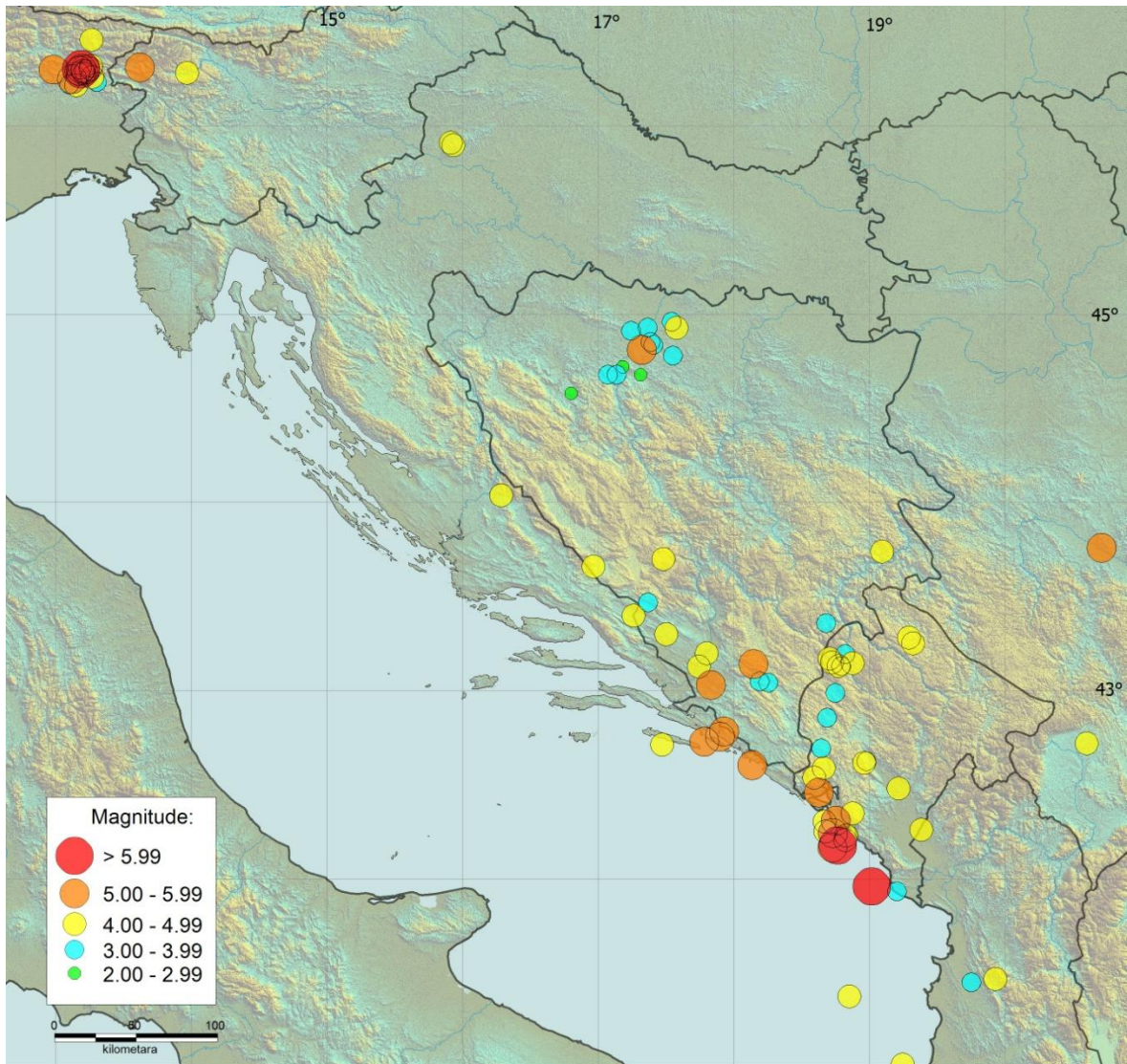


Slika 3: Prostorna razdioba analognih i digitalnih postaja čiji su zapisi korišteni u ovom radu. U Tablici 2 su dani nazivi postaja po brojevima označenim na slici.

Na Slici 4 su prikazane lokacije epicentara zabilježenih potresa. Velik dio potresa se dogodio na jugoistočnoj jadranskoj obali uključujući i po magnitudi najveći Crnogorski potres 1979. koji je zabilježen na velikom broju postaja. U Tablici 3 su dani relevantni podaci potresa korištenih u ovom istraživanju.

Tablica 2: Analogne i digitalne postaje čiji su zapisi korišteni u radu.

Broj postaje	Naziv postaje	Tip postaje	$V_{S30}$ (ms <sup>-1</sup> )	Tip tla
1	ZAGREB, SEIZMOLOŠKA STANICA	Analogna	1120	A
2	KOBARID, OSN. ŠKOLA	Analogna	511	B
3	ROBIČ	Analogna	1045	A
4	TOLMIN, ZGRADA OPĆINE	Analogna	580	B
5	IMOTSKI, ŠUMSKO GOSPODARSTVO	Analogna	439	B
6	STOLAC, P.P.D.	Analogna	580	B
7	MAKARSKA, FRANJEVAČKI SAMOSTAN	Analogna	1120	A
8	BANJA LUKA, BORIK 2	Analogna	624	B
9	GACKO, ZEMLJ. ZADRUGA	Analogna	699	B
10	MOSTAR, SEIZMOLOŠKA STANICA	Analogna	1120	A
11	MOSTAR, ZAVOD ZA URBANIZAM	Analogna	580	B
12	SARAJEVO, SEIZMOLOŠKA STANICA	Analogna	1120	A
13	DUBROVNIK, POMORSKA ŠKOLA	Analogna	861	A
14	VELIKI STON, SOLANA	Analogna	405	B
15	HERCEG NOVI, O.Š. D. PAVIČIĆ	Analogna	875	A
16	TITOGRAD, GEOLOŠKI ZAVOD	Analogna	730	B
17	TITOGRAD, SEIZMOLOŠKA STANICA	Analogna	1515	A
18	KOTOR, NASELJE RAKITE	Analogna	688	B
19	KOTOR, ZOVID ZA BIOLOGIJU MORA	Analogna	407	B
20	TIVAT, AERODROM	Analogna	622	B
21	BANJA LUKA, BORIK 9	Analogna	575	B
22	BANJA LUKA, INST. ZA ISPIT. MATERIJALA	Analogna	479	B
23	BANJA LUKA, SEIZMOLOŠKA STANICA	Analogna	1424	A
24	BANJA LUKA, OS. ŠKOLA STRBECE	Analogna	580	B
25	Knin	Analogna	429	B
26	Imotski	Analogna	439	B
27	Brana Djale	Analogna	480	B
28	Ston	Analogna	405	B
29	Zagreb, Horvatovac	Analogna	383	B
30	Dubrovnik, Zavod za obnovu - prizemlje	Analogna	860	A
31	Dubrovnik, Knežev Dvor	Analogna	860	A
32	Dubrovnik, Palača Sponza	Analogna	860	A
33	Dubrovnik, Knežev Dvor	Digitalna	860	A
34	Dubrovnik, Zavod za obnovu - prizemlje	Digitalna	860	A
35	Kobarid	Digitalna	511	B
36	Dubrovnik, Palača Sponza	Digitalna	860	A
37	Herceg Novi	Digitalna	2100	A
38	Nikšić	Digitalna	1820	A



Slika 4: Prostorna razdioba epicentara potresa korištenih u ovom istraživanju.

Tablica 3: Podaci o potresima koji su korišteni u ovom istraživanju.  $M_w$  predstavlja momentnu magnitudu,  $Z_{hyp}$  dubinu hipocentra.

Broj potresa	$M_w$	Godina	$Z_{hyp}$ (km)	Geografska širina epicentra (N °)	Geografska dužina epicentra (E °)	Država	Tip rasjeda
1	4.04	1975	14.6	45.898	15.931	Hrvatska	Rasjed s dijagonalnim pomakom
2	3.93	1976	10.0	46.220	13.100	Italija	Reversni
3	5.11	1976	9.6	46.293	13.176	Italija	Reversni
4	5.47	1976	23.9	46.304	13.189	Italija	Reversni
5	4.10	1976	10.0	46.260	13.270	Italija	Reversni
6	6.03	1976	1.9	46.303	13.187	Italija	Reversni
7	4.44	1976	10.0	46.310	13.180	Italija	Reversni
8	5.92	1976	0.0	46.250	13.120	Italija	Reversni
9	4.10	1976	7.2	46.216	13.151	Italija	Reversni
10	4.20	1976	9.2	46.320	13.261	Italija	Reversni
11	4.50	1976	7.2	46.292	13.225	Italija	Reversni
12	4.40	1976	8.2	46.277	13.210	Italija	Reversni
13	4.70	1976	12.7	46.294	13.200	Italija	Reversni
14	4.20	1976	11.8	46.305	13.257	Italija	Reversni
15	4.90	1976	9.1	46.278	13.163	Italija	Reversni
16	5.40	1977	0.0	46.300	12.983	Italija	Reversni
17	3.40	1977	33.0	46.234	13.304	Italija	Reversni
18	4.30	1977	9.3	46.282	13.968	Italija	Reversni
19	4.45	1978	9.0	43.300	17.500	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
20	4.71	1978	6.0	43.200	17.800	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
21	4.81	1978	10.0	43.400	17.260	Hrvatska	Rasjed s dijagonalnim pomakom
22	4.00	1978	5.7	46.459	13.265	Italija	Reversni
23	3.40	1979	5.0	44.679	17.071	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
24	6.94	1979	11.0	41.961	19.015	Crna Gora	Reversni
25	5.23	1979	7.0	42.167	18.727	Crna Gora	Reversni
26	4.51	1979	11.0	42.253	18.674	Crna Gora	Reversni
27	4.10	1979	0.3	42.305	18.667	Crna Gora	Reversni

(nastavak Tablice 3)

Broj potresa	$M_w$	Godina	$Z_{hyp}$ (km)	Geografska širina epicentra (N °)	Geografska dužina epicentra (E °)	Država	Tip rasjeda
28	5.79	1979	15.0	42.243	18.729	Crna Gora	Reversni
29	3.80	1979	0.7	43.044	18.253	Crna Gora	Reversni
30	4.20	1979	14.0	42.589	18.662	Crna Gora	Reversni
31	5.00	1979	10.5	42.458	18.624	Crna Gora	Reversni
32	5.04	1979	0.0	46.300	13.217	Italija	Reversni
33	5.00	1979	0.0	42.310	18.750	Crna Gora	Reversni
34	4.31	1979	12.6	42.231	18.826	Crna Gora	Reversni
35	6.17	1979	5.0	42.179	18.766	Crna Gora	Reversni
36	4.20	1979	7.6	42.349	18.876	Crna Gora	Reversni
37	4.62	1979	11.5	42.206	18.819	Crna Gora	Reversni
38	3.20	1979	9.5	44.837	17.405	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
39	3.60	1980	0.1	44.781	17.549	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
40	3.70	1981	0.0	43.360	18.680	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
41	5.67	1981	12.4	44.811	17.321	BiH	Rasjed s pomakom po pružanju
42	4.39	1981	6.0	44.927	17.576	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
43	3.20	1981	2.7	44.911	17.240	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
44	3.50	1981	10.9	44.930	17.364	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
45	3.00	1981	0.0	44.960	17.540	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom

(nastavak Tablice 3)

Broj potresa	$M_w$	Godina	$Z_{hyp}$ (km)	Geografska širina epicentra (N °)	Geografska dužina epicentra (E °)	Država	Tip rasjeda
46	2.60	1981	10.0	44.680	17.310	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
47	2.10	1981	0.0	44.720	17.180	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
48	2.90	1982	10.0	44.580	16.800	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
49	3.40	1982	0.0	44.679	17.134	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
50	3.70	1982	0.4	44.852	17.383	BiH	Rasjed s dijagonalnim pomakom
51	4.65	1986	7.4	44.037	16.285	Hrvatska	Reversni
52	4.80	1988	10.0	43.700	17.480	Hrvatska	Reversni
53	4.75	1989	9.1	43.661	16.965	Hrvatska	Normalni
54	5.00	1990	10.8	43.030	17.830	Hrvatska	Reversni
55	4.85	1990	13.6	45.911	15.913	Hrvatska	Reversni
56	4.92	1995	3.2	42.713	17.469	Hrvatska	Reversni
57	5.20	1995	4.6	42.604	18.134	Hrvatska	Reversni
58	5.99	1996	10.5	42.755	17.898	Hrvatska	Reversni
59	5.30	1996	7.5	42.729	17.782	Hrvatska	Normalni
60	5.40	1996	16.4	42.784	17.928	Hrvatska	Reversni
61	4.73	2003	5.2	43.128	17.740	Hrvatska	Reversni
62	5.20	2004	11.4	46.310	13.620	Slovenija	Reversni
63	5.10	2005	21.9	43.142	18.144	Hrvatska	Reversni
64	3.34	2009	7.9	43.470	17.367	BiH	Reversni
65	3.98	2009	27.1	41.450	19.750	Albanija	Reversni
66	4.29	2009	21.0	41.376	18.849	Jadran. more	Normalni
67	3.07	2009	11.0	41.934	19.200	Crna Gora	Normalni
68	4.71	2009	33.0	41.013	19.243	Albanija	Normalni
69	3.38	2009	16.0	42.857	18.685	Crna Gora	Reversni
70	3.38	2009	13.0	42.694	18.644	Crna Gora	Rasjed s pomakom po pružanju
71	4.60	2009	20.0	41.469	19.927	Albanija	Normalni
72	4.48	2009	6.0	43.740	19.090	BiH	Reversni

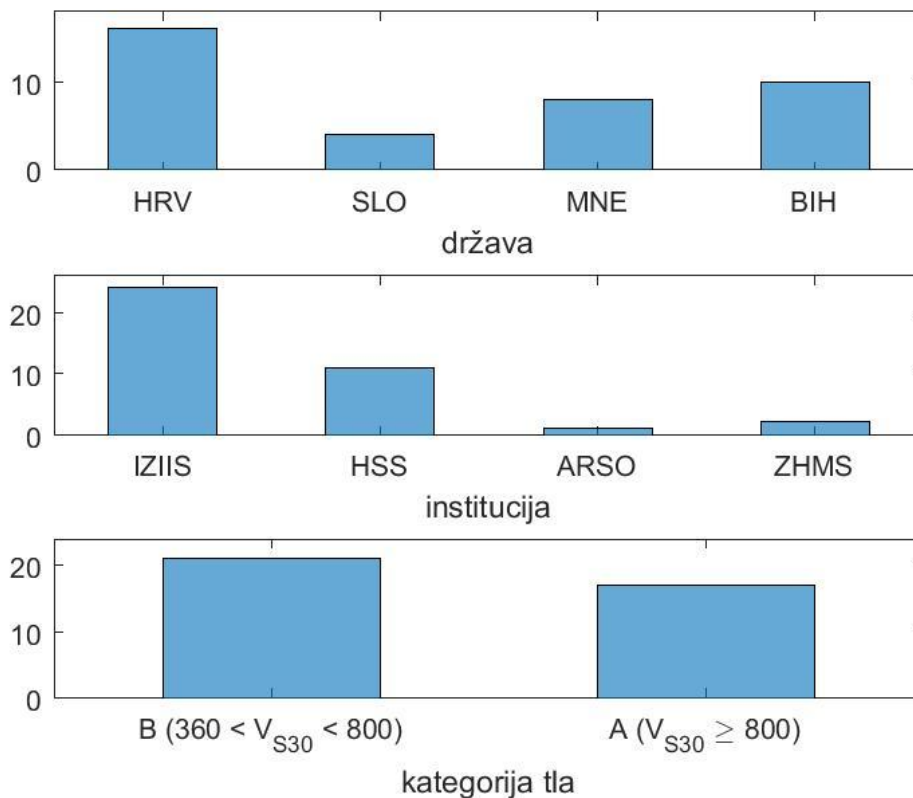


(nastavak Tablice 3)

Broj potresa	$M_w$	Godina	$Z_{hyp}$ (km)	Geografska širina epicentra (N °)	Geografska dužina epicentra (E °)	Država	Tip rasjeda
73	3.79	2010	15.0	42.625	18.975	Crna Gora	Reversni
74	4.00	2010	17.0	42.616	18.960	Crna Gora	Reversni
75	4.00	2010	11.0	43.253	19.320	Crna Gora	Reversni
76	4.60	2010	13.7	42.262	19.382	Crna Gora	Reversni
77	4.60	2010	5.0	42.720	20.600	Srbija	Rasjed s pomakom po pružanju
78	3.96	2010	6.0	43.050	18.190	BiH	Normalni
79	3.79	2010	5.0	42.987	18.746	Crna Gora	Reversni
80	5.50	2010	9.0	43.760	20.710	Srbija	Rasjed s pomakom po pružanju
81	3.85	2010	3.0	43.130	18.790	Crna Gora	Reversni
82	4.24	2010	4.0	43.130	18.770	Crna Gora	Reversni
83	4.33	2010	6.0	43.147	18.875	Crna Gora	Reversni
84	4.10	2011	9.0	43.171	18.704	Crna Gora	Normalni
85	4.69	2011	7.0	43.150	18.724	Crna Gora	Normalni
86	3.18	2011	11.0	43.195	18.821	Crna Gora	Rasjed s pomakom po pružanju
87	4.24	2011	8.0	42.538	18.591	Crna Gora	Reversni
88	4.53	2011	11.0	43.282	19.291	Crna Gora	Reversni
89	4.43	2012	17.0	42.481	19.212	Crna Gora	Reversni

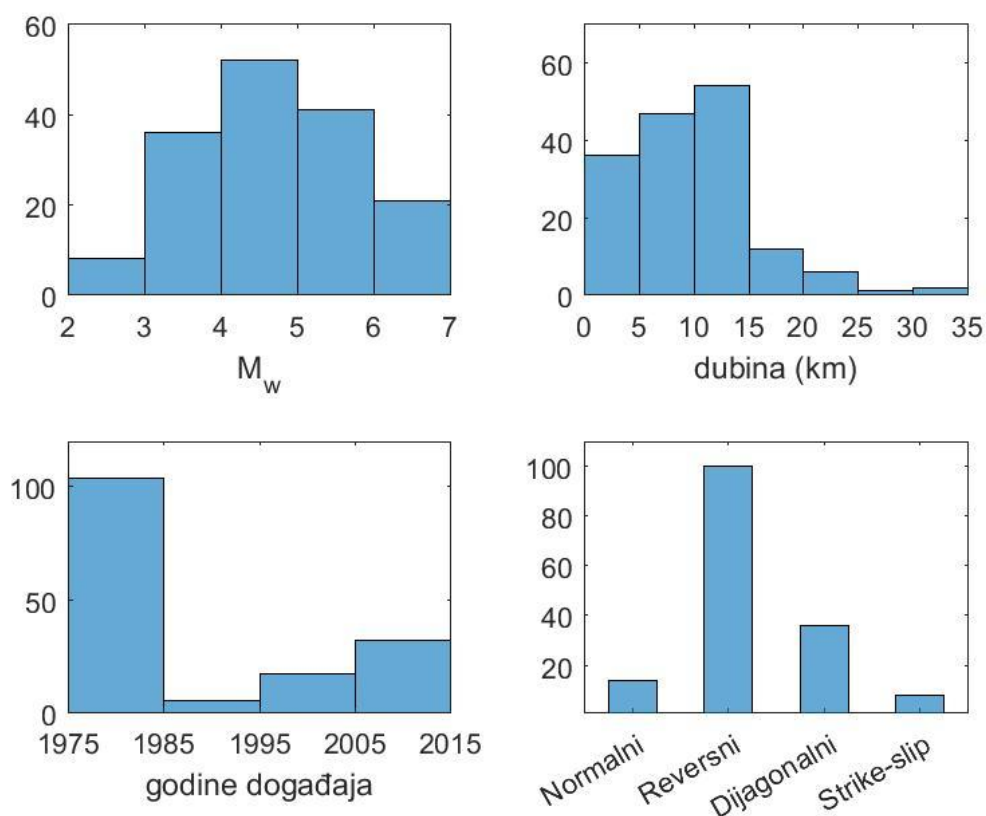
Od ukupno 38 postaja na kojima su zapisani akcelerogrami 32 su analogne (84%), a šest ih je digitalnih (16%). Na Slici 5 prikazan je broj postaja po državama, institucijama i kategoriji tla na kojoj se postaja nalazi. U Hrvatskoj se nalazi 16 postaja, Sloveniji četiri, Crnoj Gori osam i u Bosni i Hercegovini 10. Od toga analognih hrvatskih je 13, slovenskih tri, crnogorskih šest i bosanskohercegovačkih 10. Hrvatskoj seizmološkoj službi (HSS,

Zagreb) pripada 11 postaja, 24 postaje IZIIS-u (maked. *Institut za zemjotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija*, Skopje), jedna postaja ARSO-u (slov. *Agencija Republike Slovenije za okolje*, Ljubljana) i dvije postaje ZHMS-u (*Zavod za hidrometeorologiju i seizmologiju*, Podgorica). Na tlu kategorije A (brzina većih od  $800 \text{ ms}^{-1}$ ) po EC8 kategorizaciji tla (Pitilakis i sur., 2004) nalazi se 17 postaja, a na tlu kategorije B (brzina između  $360 \text{ ms}^{-1}$  i  $800 \text{ ms}^{-1}$ ) 21 postaja. Informacije o brzini S-valova u gornjih 30 m dubine ( $V_{S30}$ ) su dobivene ili geofizičkim mjerenjima (plitkom seizmičkom refrakcijom ili analizom površinskih valova) ili pomoću regionalne geologije. Većina analognih postaja u razdoblju 1975-1990 je bila pod monitoringom IZIIS-a kao dio jugoslavenske akcelerografske mreže (Mihailov, 1985). Digitalni zapisi se javljaju nakon 1998. godine.



Slika 5: Broj postaja po državama, institucijama i kategoriji tla na kojoj se postaje nalaze.

Razdioba zapisa akcelerograma po magnitudi, dubini žarišta, godini zapisa i načinu rasjedanja je dana na Slici 6. Naziv *Dijagonalni* na apscisi se odnosi na rasjede s dijagonalnim pomakom (eng. *oblique*).



Slika 6: Broj korištenih akceleroograma po magnitudi, dubini žarišta, godini i načinu rasjedanja.

Iz Slike 6 vidimo da većina zapisa pripada umjerenim potresima ( $4 < M_w < 6$ , 59 %). Za magnitude  $M_w$  u intervalima:  $M_w < 3$ ,  $3 \leq M_w < 4$ ,  $4 \leq M_w < 5$ ,  $5 \leq M_w < 6$  i  $6 \leq M_w < 7$  zabilježeno je po osam, 36, 52, 41 i 21 zapis. Najveća zapisana magnituda od 6.94 pripada potresu s epicentrom u Crnoj Gori iz 1979. godine. Prevladavaju dubine žarišta 5-15 km (64 %). Za dubine hipocentara  $Z_{hyp}$  u intervalima:  $Z_{hyp} < 5$  km,  $5 \leq Z_{hyp} < 10$  km,  $10 \leq Z_{hyp} < 15$  km,  $15 \leq Z_{hyp} < 20$  km,  $20 \leq Z_{hyp} < 25$  km,  $25 \leq Z_{hyp} < 30$  km i  $30 \leq Z_{hyp} < 35$  km zabilježena su po 36, 47, 54, 12, šest, jedan i dva zapisa. Prosječna dubina žarišta potresa je 8.72 km. Najviše zapisa je u razdoblju od 1975. do 1985. godine. U vremenskim intervalima 1975-1985, 1985-1995, 1995-2005 i 2005-2015 zabilježen je po 104 (66 %), 5, 17 i 31 zapis. Tu se, također, vidi da prevladava doprinos analognih zapisa. Prevladava kompresijski režim naprezanja – reversni rasjedi. Normalnih rasjedanja je 14, reversnih 100 (63%), 36 rasjeda sa dijagonalnim pomakom i osam rasjedanja po pružanju.

Od ukupno 158 zapisa, 123 je analognih (78 %), a 35 je digitalnih (22 %). Od analognih zapisa 31 je hrvatski (25 %), 41 bosanskohercegovački (33 %), 27 slovenski (22 %) i 24 crnogorski (20 %). Od digitalnih zapisa tri su hrvatska (9 %), jedan slovenski (3 %), 31 crnogorski (88 %) i nijedan bosanskohercegovački. Raspon godina kad su zabilježeni analogni zapisi je od 1975. do 1996., a digitalni su zabilježeni od 2003. do 2012. godine. Raspon Joyner-Boorevih, najkraćih udaljenosti od postaje do rasjedne plohe, epicentralnih udaljenosti, hipocentralnih udaljenosti i dubina žarišta potresa kod analognih zapisa je 3.5-

197.7 km, 5.9-197.8 km, 3.5-220.8 km, 5.9-221 km i 0-33 km, redom. Kod digitalnih su ti rasponi 7.7-180.1 km, 13.7-180.3 km, 7.7-180.1 km, 13.7-180.3 km i 2.5-31.9 km. Raspon magnituda kod analognih zapisa je 2.1-6.94, a kod digitalnih 3.07-5.5. U Tablicama 4 i 5 prikazana su statistička obilježja analognih i digitalnih zapisa.

Tablica 4: Statistička obilježja analognih zapisa korištenih u istraživanju.  $R_{JB}$  je Joyner-Booreova udaljenost,  $R_{rup}$  je najkraća udaljenost postaje od rasjedne plohe,  $R_{epi}$  je epicentralna udaljenost,  $R_{hyp}$  je hipocentralna udaljenost te  $M_w$  je momentna magnituda.

Država	Broj zapisa	Raspon $R_{JB}$ (km)	Raspon $R_{RUP}$ (km)	Raspon $R_{epi}$ (km)	Raspon $R_{hyp}$ (km)	Raspon $Z_{hyp}$ (km)	Raspon $M_w$	Raspon godina
Hrvatska	31	3.5-197.7	6.5-197.8	3.5-220.8	6.5-221	1.9-15	4.04-6.94	1975-1996
BiH	41	5.9-197	5.9-197.3	5.9-217.9	5.9-218.2	0-10.9	2.1-6.94	1978-1982
Slovenija	27	7.7-59.3	13.7-59.3	7.7-59.3	13.7-59.3	0-33	3.4-6.03	1976-1979
Crna Gora	24	8-46	12.2-46.6	8-68.9	12.2-69.2	0-15	3.8-6.94	1979

Tablica 5: Statistička obilježja digitalnih zapisa korištenih u istraživanju. Značenje oznaka je kao i u prethodnoj tablici.

Država	Broj zapisa	Raspon $R_{JB}$ (km)	Raspon $R_{RUP}$ (km)	Raspon $R_{epi}$ (km)	Raspon $R_{hyp}$ (km)	Raspon $Z_{hyp}$ (km)	Raspon $M_w$	Raspon godina
Hrvatska	3	59.9-62.1	59.9-62.3	59.9-62.1	59.9-62.3	4-20.4	4.73-5.1	2003-2005
BiH	0	-	-	-	-	-	-	-
Slovenija	1	7.7	13.7	7.7	13.7	9.4	5.2	2004
Crna Gora	31	21.9-180.1	21.9-180.3	21.9-180.1	21.9-180.3	2.5-31.9	3.07-5.5	2009-2012

Digitalizirani analogni zapisi su procesuirani koristeći standardni CALTECH postupak koji je modificiran u ovisnosti o opremi za procesuiranje podataka (Petrovski i Naumovski, 1979; Petrovski i sur., 1982). Postupak uključuje produkciju nekorigiranih i korigiranih podataka o akceleraciji, podatke o pomaku i brzini i Fourierov spektar. Granica niskopropusnog filtra je 0.7 Hz.

Procesuiranje digitalnih podataka je provedeno koristeći USDP (eng. *Utility Software for Data Processing*) (Boore i sur., 2011). Nakon provođenja korekcije nultog reda (oduzimanjem srednjaka od cijelog zapisa) provedeno je niskopropusno i visokopropusno filtriranje. Granične frekvencije određene su na način predložen u Douglas i Boore (2011) i u Akkar i Bommer (2006) za graničnu frekvenciju niskopropusnog filtra i visokopropusnog filtra, redom. Analognih zapisa je više te su kompletniji u vidu kategorizacije tipa tla na kojem se postaje nalaze i rješenja žarišnih mehanizama.

## 5 Metoda

Za dobivanje empirijske atenuacijske relacije uobičajeno se koristi općeniti model forme (Abrahamson i Youngs, 1992):

$$\ln(y_{ijk}) = f(M_{jk}, r_{ijk}, \theta) + \Delta_{Bjk} + \Delta_{Wijk},$$

gdje je  $y_{ijk}$  neka od mjera intenziteta gibanja tla (PGA, SA),  $f(M_{jk}, r_{ijk}, \theta)$  je atenuacijska relacija gibanja tla,  $r$  je neka od mjera udaljenosti od žarišta potresa,  $\theta$  je vektor parametara modela,  $\Delta_{Bjk}$  predstavlja varijacije između događaja (eng. *between-event residuals; inter-event variations*), a  $\Delta_{Wijk}$  predstavlja varijacije unutar događaja (eng. *within-event residuals; intra-event variations*). Pretpostavlja se da su  $\Delta_{Bjk}$  i  $\Delta_{Wijk}$  nezavisne varijable s normalnom razdiobom. Indeks  $i$  odnosi se na zapis, indeks  $j$  na potres, a indeks  $k$  na period. U novijim relacijama gibanja tla uvedeni su parametri koji karakteriziraju uvjete tla (većinom preko  $V_{S30}$ ).

Prilikom ispitivanja reprezentativnosti neke relacije gibanja tla za neko područje koristi se analiza modela reziduala kao metodologija za evaluaciju razlike između predviđanja modela, tj. onog što teorijski daju relacije gibanja tla i stvarnog gibanja tla. Stvarna spektralna akceleracija i predviđeno gibanja tla od strane modela za svaki zapis ( $i$ ), svaki potres ( $j$ ) i svaki period ( $k$ ) su označeni kao  $a_{ijk}$  i  $p_{ijk}$ . Kako bi se provjerila usklađenost GMPE relacija sa stvarnim podacima s obzirom na magnitudu potresa, udaljenost od potresa i uvjete tla reziduali su izračunati i odvojeni u tri komponente koristeći postupak opisan u Scassera i sur. (2009) i Gülerce i sur. (2016):

$$R_{ijk} = \ln(a_{ijk}) - \ln(p_{ijk}) = c_k + \Delta_{Bjk} + \Delta_{Wijk} \quad (*)$$

gdje je  $\Delta_{Bjk}$ :

$$\Delta_{Bjk} = \frac{\sum_1^{n_j} (R_{ijk} - c_k)}{n_j}, \quad (**)$$

$n_j$  predstavlja broj zapisa po potresu.

U izrazu (\*)  $c_k$  predstavlja prosječno odstupanje stvarnih podataka u odnosu na predviđanje modela,  $\Delta_{Bjk}$  se računa prema izrazu (\*\*) (varijabilnost među događajima) te se  $\Delta_{Wijk}$  (varijabilnost unutar pojedinih događaja) dobije nakon što se od svakog ukupnog reziduala za pojedini zapis odbiju pripadni  $c_k$  i  $\Delta_{Bjk}$  te zapravo predstavlja preostali rezidualni član.

$\Delta_{Bjk}$  predstavlja prosječno odstupanje opaženih gibanja tla jednog potresa od medijana gibanja tla predviđenog modelom. Pokazuje srednje utjecaje izvora (usrednjenih preko svih azimuta) i reflektira utjecaj pada napetosti i varijacija pomaka u prostoru i vremenu koji nisu obuhvaćeni članovima u relaciji koji uključuju magnitudu, način rasjedanja i dubinu žarišta (Al Atik i sur., 2010).

$\Delta_{Wijk}$  predstavlja azimutalne varijacije u izvoru, propagaciji valova i uvjetima tla reflektirajući utjecaj faktora kao što su heterogenost kore, duboke geološke strukture i plitka uslojenost koji nisu obuhvaćeni članovima u relaciji koji uključuju udaljenost od žarišta potresa i klasifikaciju tla baziranu na prosječnoj brzini transverzalnih valova (Al Atik i sur., 2010).

Za rangiranje atenuacijskih relacija gibanja tla predloženo je nekoliko metoda: metoda vjerodostojnosti (eng. *likelihood method*, LH) predložena od Scherbauma i sur. (2004) koja uvelike ovisi o veličini skupa podataka, metoda logaritamske vjerodostojnosti (eng. *log-likelihood method*, LLH) predložena od Scherbauma i sur. (2009) i rangiranje temeljeno na euklidskoj udaljenosti (eng. *Euclidean distance-based ranging*, EDR) predloženo od Kalea i Akkara (2013) koje ne ovise znatno o veličini skupa podataka. U ovom istraživanju korišteni su pokazatelji LLH i EDR za rangiranje atenuacijskih relacija gibanja tla.

Pokazatelj LLH je definiran na sljedeći način:

$$LLH = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2(u(|z_i|)),$$

Za ukupne rezidualne dobivene testirajući atenuacijsku relaciju vrijedi da podliježu log-normalnoj razdiobi. Vjerojatnost da opažanje  $x$  pada u interval  $(x, x + dx)$  je:

$$dF = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

gdje su  $\mu$  i  $\sigma$  srednja vrijednost relacijom predviđenog gibanja i pripadna standardna devijacija te ovise o magnitudi, udaljenosti postaje od potresa, tipu tla, periodu... Normalizirani rezidual se dobiva oduzimanjem prirodnog logaritma predviđenog gibanja od prirodnog logaritma stvarnog gibanja te dijeljenjem te razlike sa pripadnom standardnom devijacijom ( $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ ). Funkcija gustoće vjerojatnosti normaliziranog reziduala je:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}.$$

Dobra mjera prilagođenosti atenuacijske relacije testiranom skupu podataka je vjerojatnost da apsolutna vrijednost proizvoljnog uzorka iz standardne normalne razdiobe pada u interval između apsolutne vrijednosti promatranog normaliziranog reziduala ( $|z_i|$ ) i beskonačnosti. Za pozitivni  $z_i$  to je:

$$u(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_i}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{2} \left( \text{Erf}(\infty) - \text{Erf}\left(\frac{z_i}{\sqrt{2}}\right) \right) = \frac{1}{2} \text{Erf}\left(\frac{z_i}{\sqrt{2}}, \infty\right),$$

te je stoga

$$u(|z_i|) = \text{Erf}\left(\frac{|z_i|}{\sqrt{2}}, \infty\right),$$

gdje je funkcija pogreške definirana na sljedeći način:

$$\text{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

$u(|z_i|)$  je vjerodostojnost normaliziranog reziduala da će po apsolutnoj vrijednosti biti jednak ili veći od apsolutne vrijednosti promatranog normaliziranog reziduala  $|z_i|$ , a  $N$  je ukupan broj podataka. Manji LLH znači da je vjerojatnije da je model producirao opažene podatke (tj. manji LLH – bolji model). Ako bismo testirali isti skup podataka na temelju kojeg je izvedena sama GMPE dobili bismo vrijednosti LLH oko 1.4-1.5, dok vrijednosti LLH veće od četiri govore o znatnom odstupanju podataka od modela.

Pokazatelj EDR je definiran na sljedeći način:

$$EDR = \sqrt{\frac{\kappa}{N} \sum_{i=1}^N MDE_i^2}.$$

gdje je:

$$\kappa = \frac{DE_{original}}{DE_{corrected}},$$

$$DE_{original}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_i)^2,$$

$$DE_{corrected}^2 = \sum_{i=1}^N (a_i - Y_{c,i})^2,$$

pri čemu se  $DE_{original}$  odnosi na originalnu euklidsku udaljenost, a  $DE_{corrected}$  na korigiranu euklidsku udaljenost te je  $a_i$  prirodni logaritam opaženih podataka,  $Y_i$  prirodni logaritam procjenjenih podataka, a  $Y_{c,i}$  je definiran na sljedeći način:

$$Y_{c,i} = Y_i - (Y_{fit,i} - a_i),$$

gdje je  $Y_{fit,i}$  vrijednost predviđena regresijom  $Y_i$  i  $a_i$ .  $MDE$  je modificirana euklidska udaljenost koja je dobivena koristeći činjenicu da određeni promatrani ukupni rezidual podliježe normalnoj razdiobi. Za određenu magnitudu, udaljenosti postaje od potresa, tip tla, period... dobije se predviđeno gibanje i pripadna standardna devijacija  $\sigma$ . Ta standardna devijacija je standardna devijacija i pripadnog reziduala. Uzimajući u obzir navedeno  $MDE$  je definirana na sljedeći način:



$$MDE = \int_0^{|x|_{max}} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx + \int_0^{|x|_{max}} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(-x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

gdje je  $\mu$  vrijednost reziduala te je  $|x|_{max}$  definiran na sljedeći način:

$$|x|_{max} = \max(|\mu \pm p\sigma|).$$

Prilikom računanja korišteno je  $p = 3$  što znači da postupak približno pokriva 99.7 % razlika između opažanja i procjena koje daju relacije gibanja (99.7 % mogućih reziduala). *MDE* odražava utjecaj standardne devijacije prilikom testiranja relacija na korištenom skupu akcelerograma.  $N$  je ukupan broj podataka. Također, što je EDR manji model je prilagođeniji razmatranom skupu podataka.

Kako bi se dane relacije gibanja što bolje implementirale u analizu hazarda potrebno je izračunati njihove težinske faktore. Logičko stablo s težinskim faktorima GMPE relacija se direktno implementira u PSHA analizu. U izračun težinskih faktora uključene su obje mjere intenziteta (PGA i SA perioda od 1 s) za koje će se provoditi analiza hazarda, oba pokazatelja (LLH i EDR) i cijeli skup relacija (ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3 i AR4). Formula za računanje težina je (Šalić i sur., 2016):

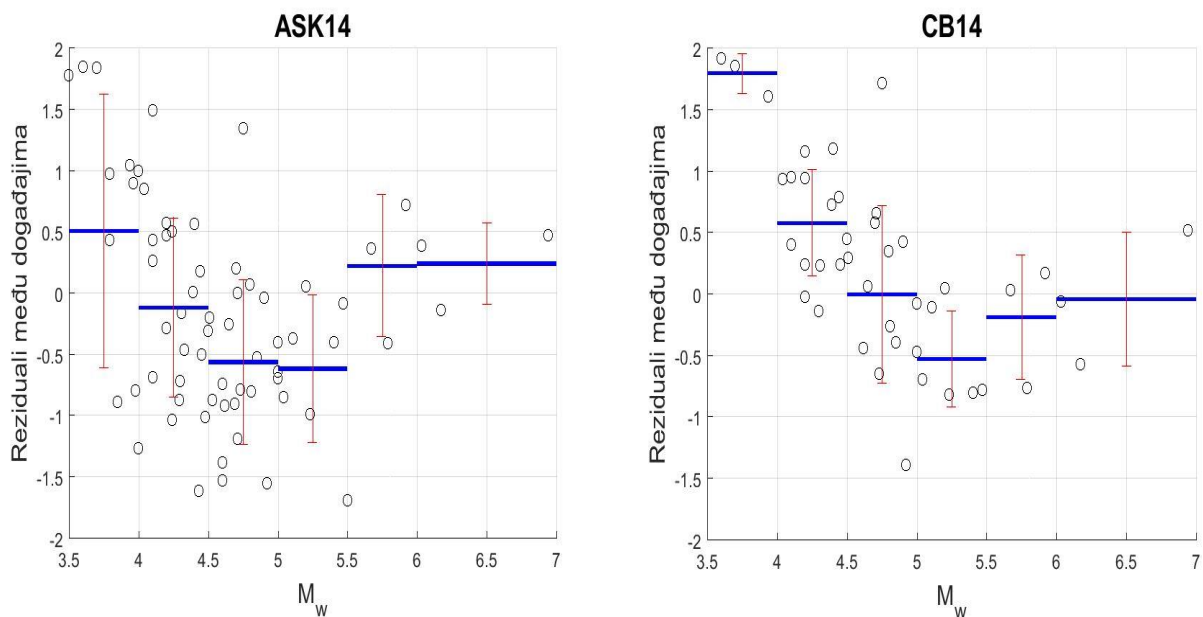
$$w_j = \frac{\frac{\max(SP)}{SP_j}}{\sum_{j=1}^{NGMPE} \left( \frac{\max(SP)}{SP_j} \right)},$$

$$SP_j = \sum_{i=1}^{NQNT} (EDR_i \times LLH_i),$$

gdje je NQNT broj parametara hazarda (PGA i SA od 1 s; 2), a NGMPE broj korištenih relacija gibanja tla (ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3 i AR4; 8).

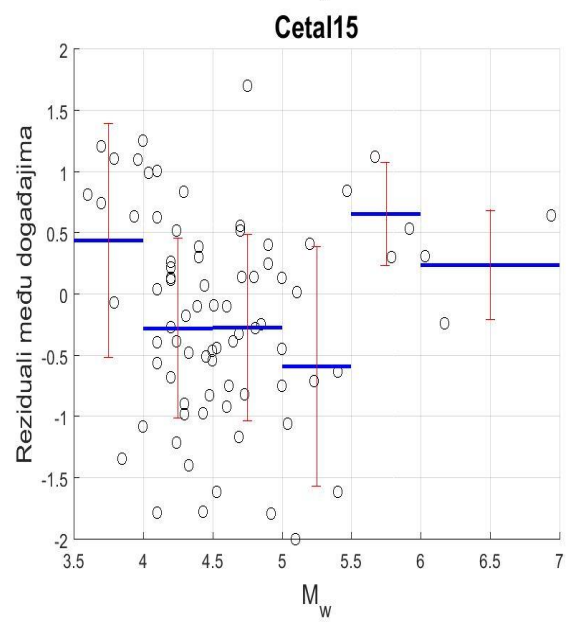
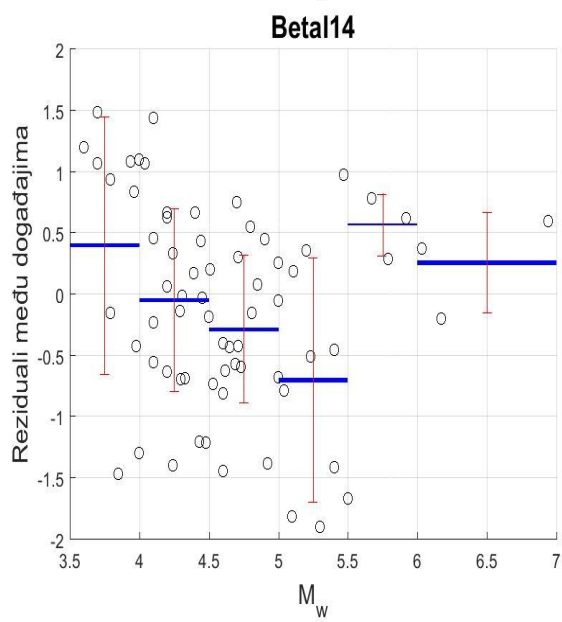
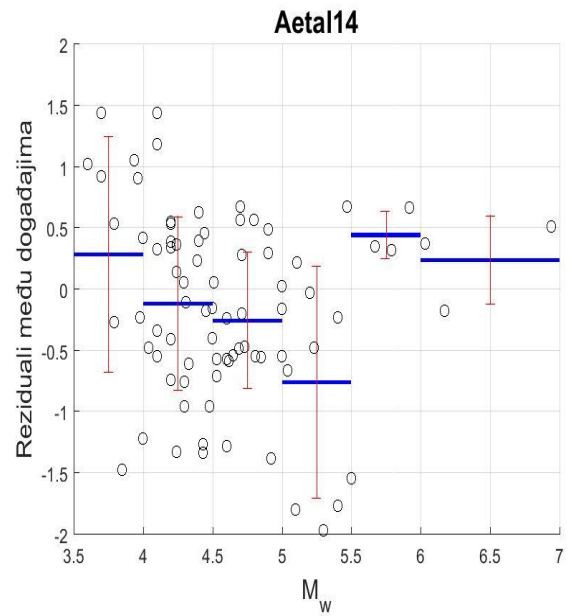
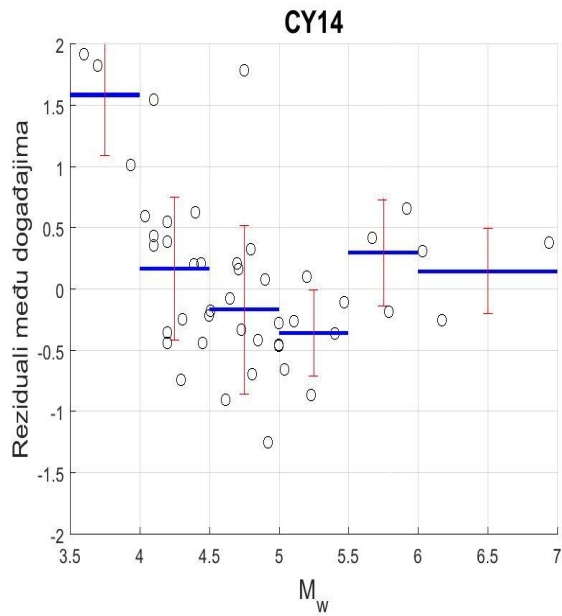
## 6 Rezultati i diskusija

Kako bi se provjerila usklađenost razmatranih relacija gibanja tla s korištenim skupom akceleroograma, prvo se crtaju reziduali među događajima  $\Delta_{Bjk}$  u ovisnosti o magnitudi za vršnu akceleraciju tla (PGA) (Slika 7) i spektralnu akceleraciju za period od 1 s (SA,  $T = 1$ s) (Slika 1D u Dodatku 2) za magnituda veće od 3.5 i manje od 7 za sve modele. Za donju granicu je uzeta magnituda 3.5, jer je primjenjivost većine GMPE relacija iznad te vrijednosti. Vlastiti periodi zgrada u Hrvatskoj su perioda manjih od 1 s te je stoga uzeta ta spektralna akceleracija. Vlastiti period od 1 s odgovara armirano-betonskoj zgradi visine 62.5 m. Slike reziduala za SA,  $T = 1$  s su stavljene u dodatak zbog preglednosti i izbjegavanja nagomilavanja slika u ovom poglavlju.

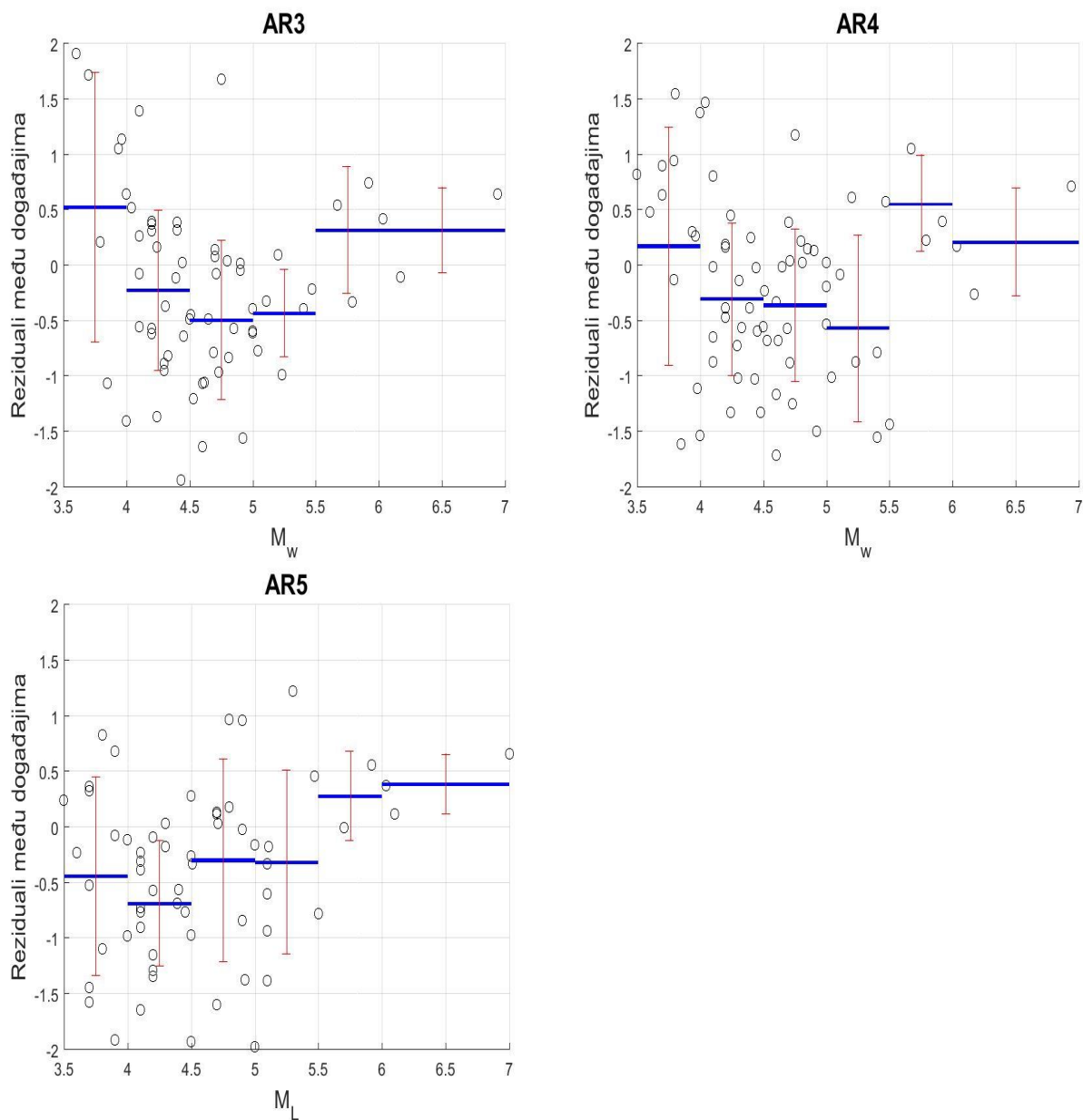


Slika 7: Distribucija reziduala među događajima za PGA u ovisnosti o magnitudi za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3, AR4, AR5 (crni prazni krugovi). Srednji reziduali za po 0.5 jedinica magnituda su prikazani punim plavim crtama, a crvene vertikalne linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka. Za magnituda od šest do sedam, zbog pomanjkanja podataka su uzeti srednji reziduali za jednu jedinicu magnituda.

(nastavak Slike 7)



(nastavak Slike 7)



Modeli podcjenjuju PGA za male magnitudo (3.5-4) (javlja se pozitivno odstupanje), osim atenuacijske relacije AR5. Za magnitudo 4-4.5 javlja se podcjenjivanje PGA za relacije CB14 i CY14, ostale relacije precjenjuju PGA (uočavamo negativno odstupanje). Za magnitudo 4.5-5.5 relacije precjenjuju PGA, a za magnitudo 5.5-7 relacije podcjenjuju PGA (osim relacije CB14). Kod magnituda između 5 i 5.5 uočava se značajno raspršenje podataka. Promatrajući standardne devijacije najmanje raspršenje je za CY14, a najveće za Cetal15 i AR4. Standardne devijacije su do oko 1.5 ln jedinicu.

Modeli podcjenjuju SA za period od 1 s (Slika 1D u Dodatku 2) za male magnitudo (3.5-4) za relacije CB14, CY14, Cetal15 i AR3, a precijenjuju za relacije Aetal14, Betal14 i AR4.

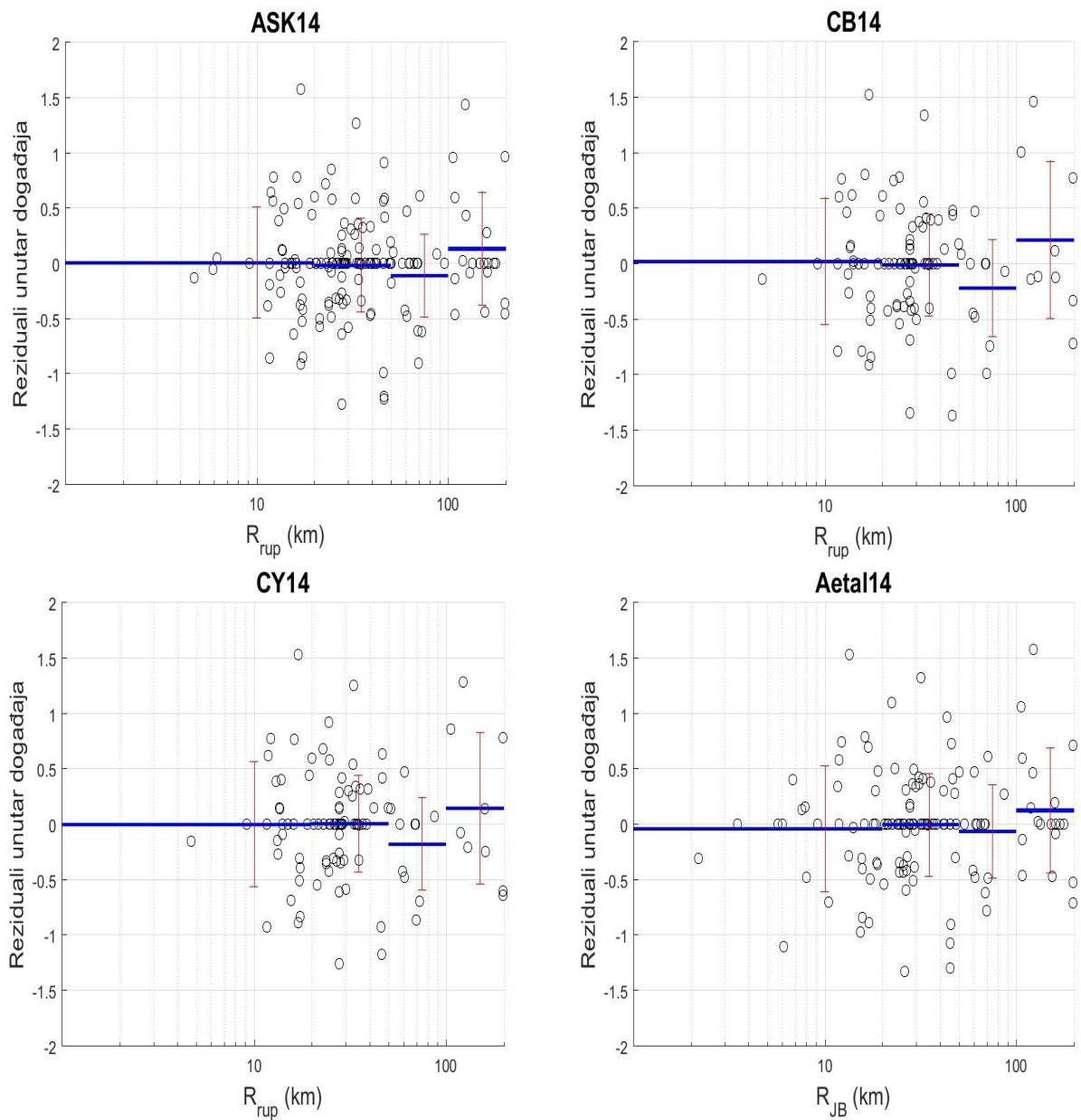
Za magnitude 4-4.5 javlja se podcjenjivanje SA na periodu od 1 s za sve atenuacijske relacije gibanja osim AR4 (koja precjenjuje komponentu akceleracije spektra odziva na periodu od 1 s). Za magnitude 4.5-5.5 relacije precjenjuju SA. Za magnitude 5.5-6 relacije podcjenjuju SA (osim relacija Aetal14 i AR3 koje precjenjuju SA), a za magnitude 6-7 relacije podcjenjuju SA (osim relacije CY14 koja precjenjuje SA od 1 s). Standardne devijacije su do oko 1.5 ln jedinicu. Najmanje raspršenje je za Aetal14. Kod magnituda do 5 kod svih relacija postoji znatno raspršenje podataka.

Promatrajući same rezidualne među događajima moglo bi se zaključiti da GMPE relacije najbolje opisuju korišteni skup podataka na magnitudama između 4 i 5 te da su Aetal14 i ASK14 najbolji modeli. Dobro su opisane i magnitude između 5.5 i 7, no raspoložemo s malim brojem podataka na tim magnitudama. Također, relacije CB14 i CY14 nisu prilagođene malim magnitudama (3.5-4). Relacija izvedena na osnovi dinaridskog skupa podataka (AR5) precjenjuje PGA na lokalnim magnitudama 3.5-5.5, a podcjenjuje na lokalnim magnitudama 5.5-7. Uočljiv je pozitivan trend reziduala kako se ide ka većim lokalnim magnitudama. Općenito, zbog malog broja podataka na velikim magnitudama (6-7) u našim bazama akceleroograma treba paziti prilikom računanja hazarda, jer i male promjene u parametrima koji skaliraju velike magnitude mogu imati signifikantan utjecaj na procjenu hazarda.

Kako bi se provjerila usklađenost razmatranih relacija gibanja tla s obzirom na udaljenost od potresa ( $R_{rup}$  za ASK14, CB14, CY14, Cetal15, AR3 i AR4,  $R_{JB}$  za Aetal14, Betal14 te  $R_{epi}$  za AR5) s našim skupom akceleroograma računati su i nacrtani reziduali unutar događaja  $\Delta_{Wijk}$  za vršnu akceleraciju tla (PGA) (Slika 8) i spektralnu akceleraciju za period od 1 s (SA,  $T = 1$  s) (Slika 2D u Dodatku 2) za udaljenosti do 200 km.

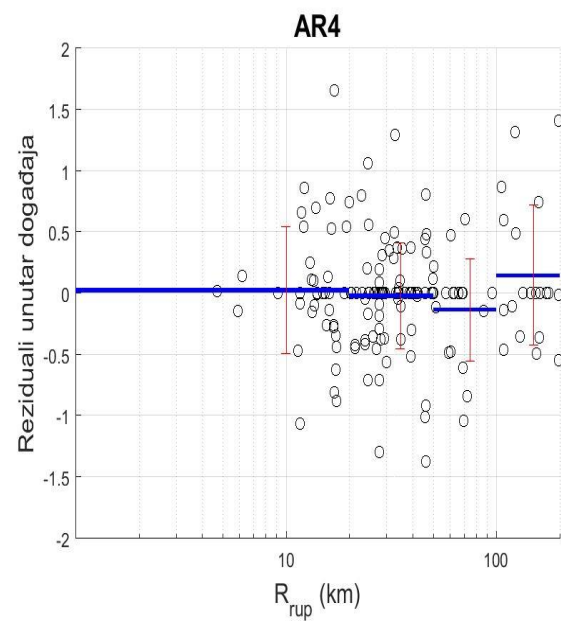
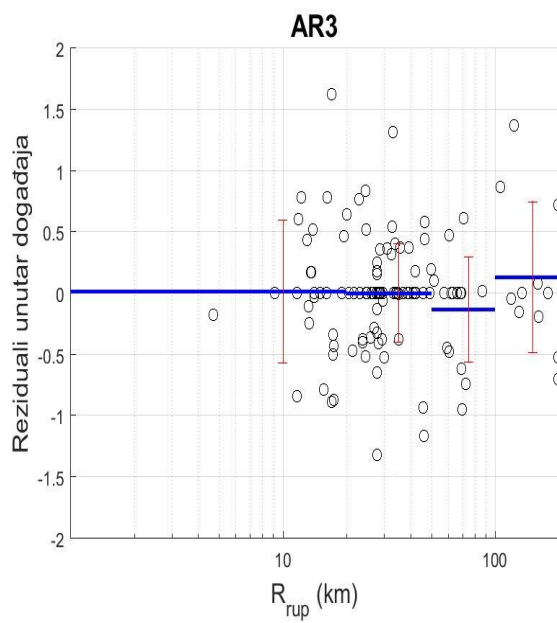
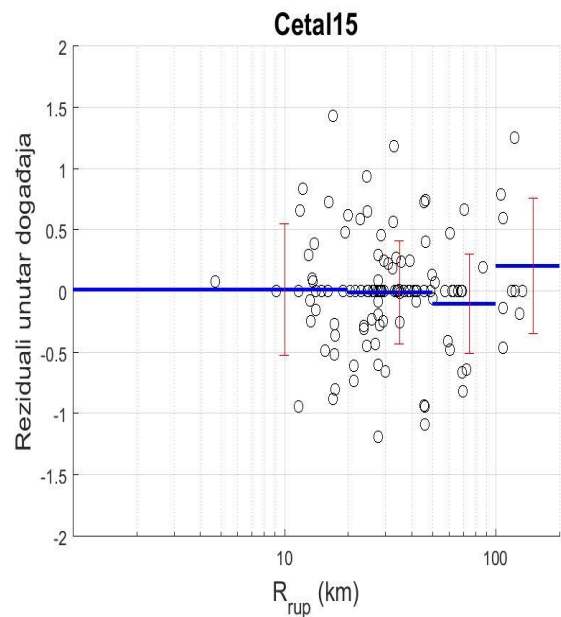
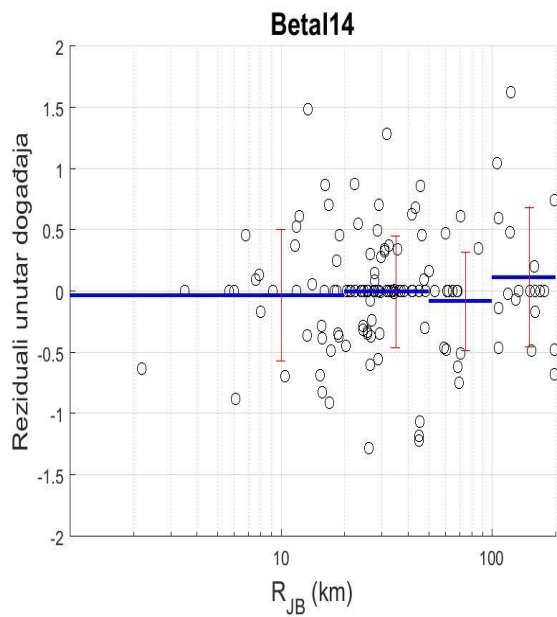
Na Slici 8 uočavamo da atenuacijske relacije gibanja tla dobro predviđaju PGA na udaljenosti do 20 km. Na udaljenostima od 20 do 50 km prisutna su blaga precjenjivanja i podcjenjivanja. Na udaljenostima od 50 do 100 km sve relacije precjenjuju, a na udaljenostima od 100 do 200 km podcjenjuju vršnu akceleraciju gibanja tla (PGA). Najmanja odstupanja od nule su kod Aetal14. Standardne devijacije su do oko jednu ln jedinicu.

Iz Slike 2D u Dodatku 2 uočavamo da se na spektralnoj akceleraciji na periodu od 1 s javlja blago precjenjivanje gibanja na udaljenostima do 20 km i na udaljenostima 50-100 km. Blago podcjenjivanje se javlja kod svih relacija gibanja na udaljenostima 20-50 km i 100-200 km (osim relacija gibanja Aetal14, Cetal15 i AR3 gdje je srednji rezidual, na tim udaljenostima, jednak nuli). Standardne devijacije su do oko jednu ln jedinicu. Precjenjivanja i podcjenjivanja stvarnih gibanja su tu nešto blaža nego kod PGA (posebno kod udaljenosti većih od 100 km).

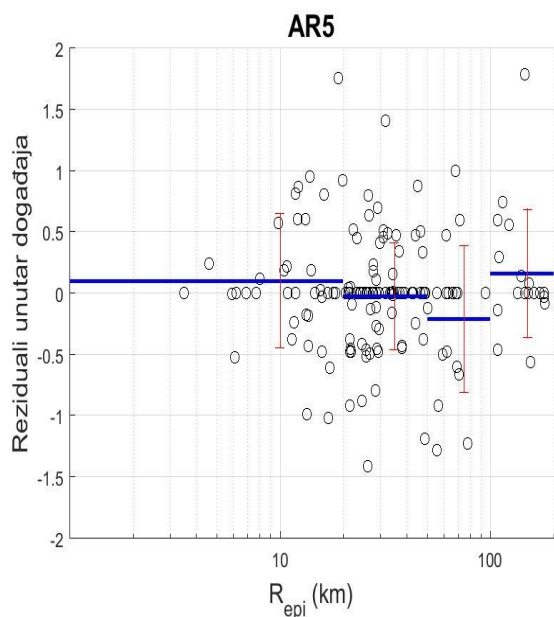


Slika 8: Distribucija reziduala unutar događaja za PGA u ovisnosti o udaljenosti od potresa za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14 ( $R_{rup}$ ), CB14 ( $R_{rup}$ ), CY14 ( $R_{rup}$ ), Aetal14 ( $R_{JB}$ ), Betal14 ( $R_{JB}$ ), Cetal15 ( $R_{rup}$ ), AR3 ( $R_{rup}$ ), AR4 ( $R_{rup}$ ), AR5 ( $R_{epi}$ ) (crni prazni krugovi). Srednji reziduali su prikazani za  $R = 0-20$  km,  $R = 20-50$  km,  $R = 50-100$  km i  $R = 100-200$  km s punim plavim crtama, a crvene vertikalne linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka.

(nastavak Slike 8)



(nastavak Slike 8)



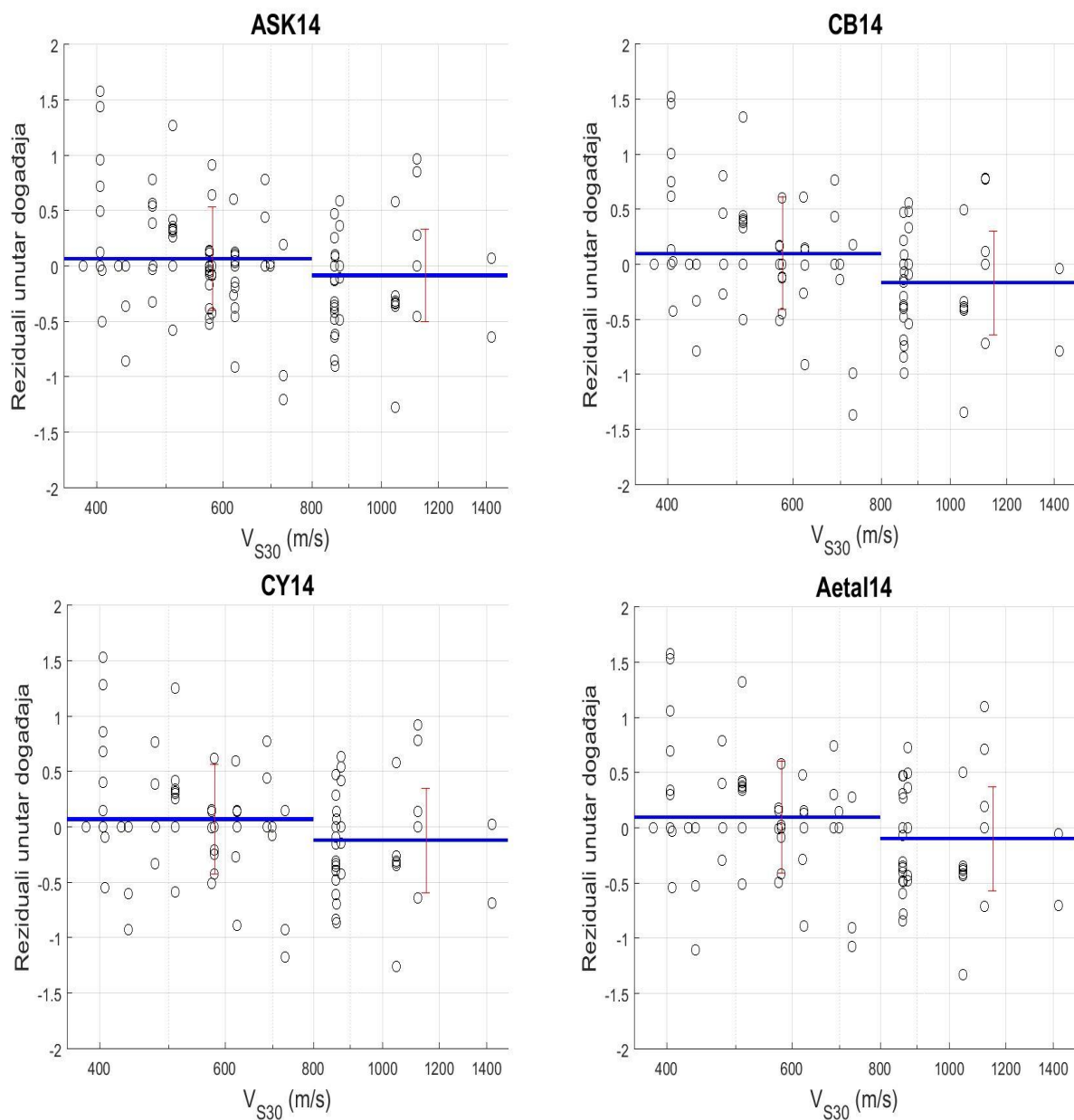
Općenito, razmatrane GMPE relacije su dobro usklađene s bazom akceleroograma na širem području Hrvatske s obzirom na neku od mjera udaljenosti od potresa. Problematične su udaljenosti do 10 km na kojima raspolažemo s jako malim brojem podataka. Općenito je za male udaljenosti (do 20 km), po rezidualima, najkraća udaljenost do rasjedne plohe bolja mjera udaljenosti od Joyner-Booreove udaljenosti i epicentralne udaljenosti.

Kako bi se provjerila usklađenost korištenih atenuacijskih relacija gibanja tla, s obzirom na kategoriju tla po EC8 kategorizaciji, s našim skupom akceleroograma izračunati su i nacrtani reziduali unutar događaja  $\Delta_{Wijk}$  za vršnu akceleraciju tla (PGA) (Slika 9) i spektralnu akceleraciju za period od 1 s (SA,  $T = 1$ s) (Slika 3D u Dodatku 2) s obzirom na srednju brzinu S-valova do dubine od 30 m ( $V_{S30}$ ). Reziduali su nacrtani intervalu 360-1500  $\text{ms}^{-1}$ . Uočavamo da se postaje, korištene u ovom istraživanju, na širem području Hrvatske, nalaze na tlu A i B kategorije po EC8 kategorizaciji.

Iz Slike 9 uočavamo da relacije gibanja tla za PGA podcjenjuju stvarno gibanje tla za brzine do 800  $\text{ms}^{-1}$ , a precjenjuju stvarno gibanje tla za brzine 800-1500  $\text{ms}^{-1}$ . Najveća odstupanja su kod modela AR3, a najmanja kod modela AR4. Generalno odstupanja reziduala od nule su jako mala. Standardne devijacije su do oko jednu ln jedinicu.

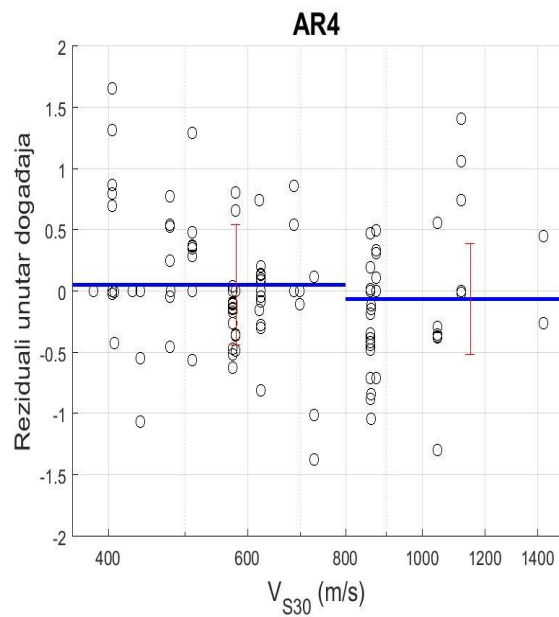
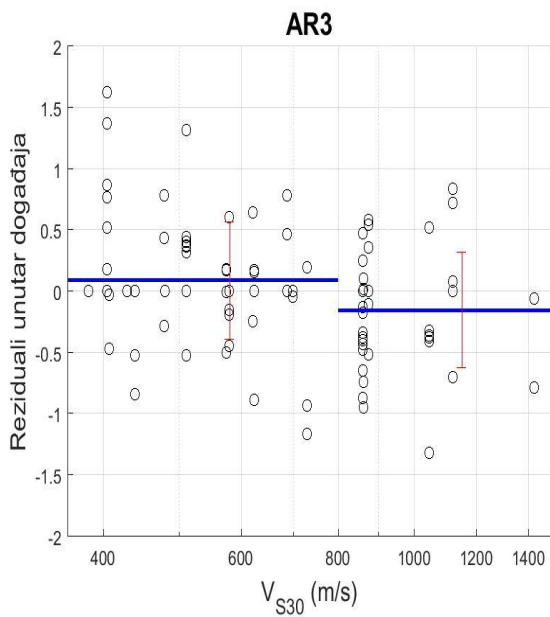
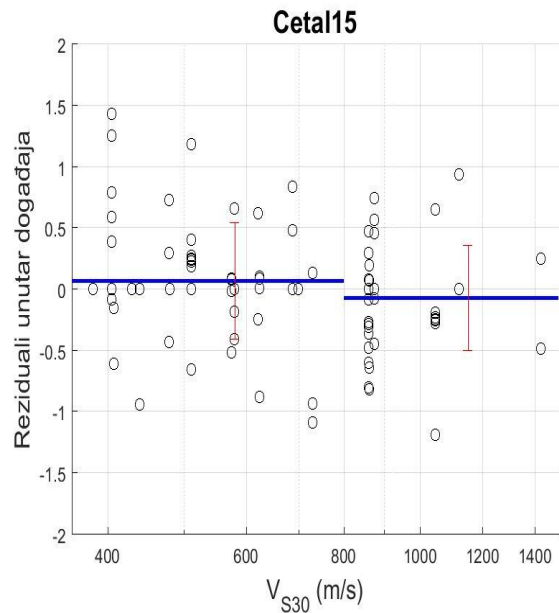
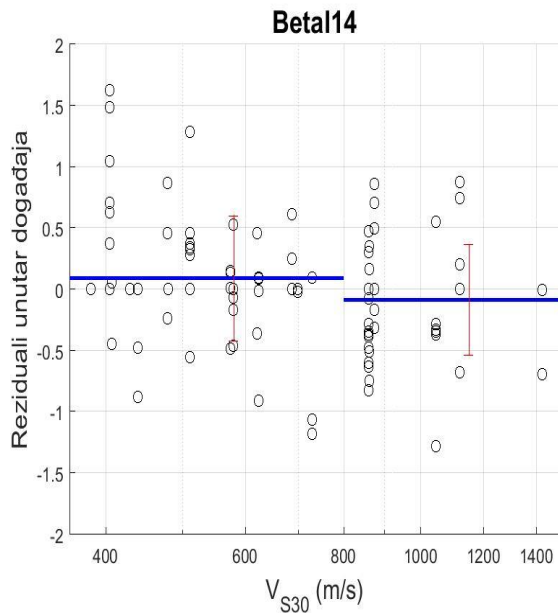
Iz Slike 3D u Dodatku 2 vidimo da relacije gibanja tla za SA za period od 1 s precjenjuju tu komponentu spektra odziva za brzine do 800  $\text{ms}^{-1}$  (osim Betal14 i AR4 koje podcjenjuju stvarno gibanje tla), a podcjenjuju za brzine 800-1500  $\text{ms}^{-1}$  (opet osim Betal14 i AR4). Odstupanja reziduala su manja nego u slučaju PGA (neznatno se razlikuju od nule). Najveća odstupanja su kod modela Betal14. Standardne devijacije su do oko jednu ln jedinicu.





Slika 9: Distribucija reziduala unutar događaja za PGA u ovisnosti o tipu tla po EC8 kategorizaciji (u ovisnosti o  $V_{S30}$ ) za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3, AR4 (crni prazni krugovi). Srednji reziduali su prikazani za  $V_{S30} = 360-800 \text{ ms}^{-1}$ ,  $V_{S30} = 800-1500 \text{ ms}^{-1}$  s punim plavim crtama, a crvene vertikalne linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka.

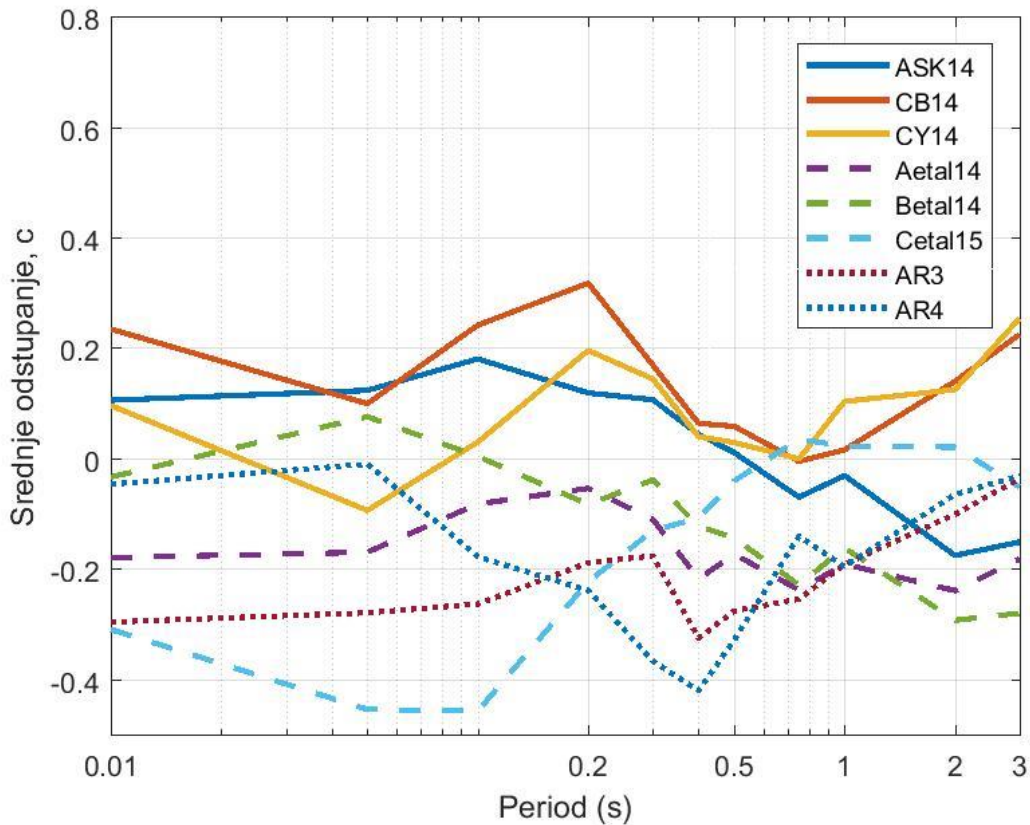
(nastavak Slike 9)



Općenito, razmatrane atenuacijske relacije su dobro usklađene s korištenom bazom akcelerograma s obzirom na tip tla. Problematične su  $V_{S30}$  veće od  $1200 \text{ ms}^{-1}$  na kojima raspolažemo s jako malim brojem podataka. Testirane relacije ne sadrže regionalne članove koji bi dodatno opisivali regionalne uvjete tla. Dodavanjem takvih članova postojećim relacijama bi se dodatno poboljšala usklađenost tih relacija s korištenom bazom podataka s obzirom na  $V_{S30}$ .

Analiza reziduala je pokazala da se razmatrane atenuacijske relacije gibanja tla dobro slažu sa stvarnim akceleracijama gibanja u odnosu na magnitudu, udaljenost od potresa i tip tla.

Testirane relacije najbolje opisuju korišteni skup podataka za momentne magnitudo između 4 i 5 te udaljenosti od žarišta potresa do 50 km. Veličina reziduala u ln jedinicama je mala te iznosi do oko 0.5 ln jedinica za rezidualne među događajima i do oko 0.15 ln jedinica za rezidualne unutar događaja (očekivano, oni su preostali rezidualni član).



Slika 10: Usporedba srednjih odstupanja testiranih atenuacijskih relacija gibanja tla u ovisnosti o periodu.

Na Slici 10 je prikazano srednje odstupanje atenuacijskih relacija gibanja tla ( $c_k$ ) u odnosu na stvarno gibanje za periode do 3 s. Ova granična vrijednost je uzeta, jer po proceduri Akkar i Bommer (2006), koja je provedena u Šalić i sur. (2016), broj kvalitetnih zapisa u bazi akcelerograma BSHAP naglo pada nakon SA za period od 3 s. Prosječno odstupanje svih osam razmatranih relacija je između -0.5 i 0.4 ln jedinica. Najveća amplituda odstupanja je kod Cetal15 i ona iznosi približno -0.5 ln jedinica na periodima od 0.05 s do 0.1 s. CB14 i CY14 imaju isti trend i uglavnom pozitivno srednje odstupanje. Ostale relacije, osim ASK14 do 0.5 s, imaju negativno srednje odstupanje. Sličan trend imaju ASK14 i Betal14. Također, slično ponašanje je i kod Aetal14, osim na periodima oko 0.2 s. Sličan trend i negativno srednje odstupanje za periode do 1 s imaju Aetal14 i AR3. AR4 do 0.2 s ima isti trend kao Betal14, a od 0.2 s dobro prati AR3.

Za rangiranje relacija izračunati su pokazatelji LLH i EDR za PGA i SA za  $T = 1$  s te su prikazani u Tablici 6.

Tablica 6: Pokazatelji LLH i EDR za PGA i SA za  $T = 1$  te težine atenuacijskih relacija gibanja tla.

Relacija gibanja tla	Mjera jakosti	Pokazatelj LLH	Težina prema LLH	Pokazatelj EDR	Težina prema EDR	Ukupna težina
<b>ASK14</b>	PGA	2.6628	0.138	1.4097	0.118	0.131
	SA, $T = 1$ s	2.4289		1.3844		
<b>CB14</b>	PGA	3.8472	0.104	1.4323	0.122	0.100
	SA, $T = 1$ s	2.9336		1.2883		
<b>CY14</b>	PGA	3.1230	0.123	1.3401	0.126	0.124
	SA, $T = 1$ s	2.5970		1.2767		
<b>Aetal14</b>	PGA	2.4692	0.150	1.2330	0.131	0.158
	SA, $T = 1$ s	2.2034		1.2946		
<b>Betal14</b>	PGA	2.9831	0.125	1.1633	0.132	0.132
	SA, $T = 1$ s	2.6428		1.3503		
<b>Cetal15</b>	PGA	3.1131	0.119	1.1953	0.128	0.123
	SA, $T = 1$ s	2.7831		1.3817		
<b>AR3</b>	PGA	3.1121	0.115	1.3009	0.128	0.118
	SA, $T = 1$ s	2.9918		1.2868		
<b>AR4</b>	PGA	2.5429	0.126	1.2577	0.115	0.114
	SA, $T = 1$ s	3.0351		1.6324		

Pokazatelj LLH se kreće između 2.20 i 3.85. Te su vrijednosti usporedive s onima u Beauval i sur. (2012) za japanske K-Net i KiK-Net mreže. Vrijednosti pokazatelja EDR se kreću između nešto nižih vrijednosti: 1.16 i 1.63.

Vrijednosti LLH za PGA su veće od onih za SA na periodu od 1 s (osim u slučaju AR4). To je vidljivo i u analizi reziduala – reziduali i standardne devijacije su nešto manje kod korištene spektralne akceleracije, nego kod vršne akceleracije tla. Kod EDR-a taj zaključak ne stoji (kod četiri relacije je EDR za PGA manji od EDR za SA od 1 s). Pokazatelji LLH i EDR se slažu pri rangiranju Aetal14, Betal14, CY14 i CB14 relacija, a što se tiče ostalih relacija gibanja postoji signifikantna razlika među njima. ASK14 i AR4 su po LLH među boljim relacijama, dok gledano po EDR lošije opisuju dani skup podataka. Cetal15 i AR3 su po LLH među lošijim relacijama, dok po EDR-u dosta bolje opisuju stvarne podatke.

Po EDR-u (poglavito za PGA) bliske i manje vrijednosti imaju Aetal14, Betal14 i Cetal15 na jednoj strani i ASK14, CB14 i CY14 koje imaju bliske i nešto veće vrijednosti, na drugoj strani. To se djelomično slaže sa stanjem na grafu srednjih odstupanja, s tim da Cetal15 ima nešto veće oscilacije. Za LLH ta usporedba sa stanjem na grafu srednjih odstupanja ne vrijedi. Za model AR5 pokazatelj LLH je 2.7952, a pokazatelj EDR je 1.3547.

Za implementiranje relacija gibanja u analizu hazarda izračunati su njihovi težinski faktori. Moguće je izračunati i samo težine za LLH i težine za EDR uzimajući  $EDR_i = 1$  odnosno  $LLH_i = 1$ . Tako izračunate težine s ukupnim težinama dane su u Tablici 6. Relacija koja najbolje opisuje korišteni skup podataka (sa najvećom težinom) je Aetal14 (Akkar i sur., 2014), a najlošija, od danih, za promatrano područje je relacija CB14 (Campbell i Bozorgnia, 2014). Za šire područje Hrvatske reprezentativne su još relacije ASK14 (Abrahamson i sur., 2014) i Betal14 (Bindi i sur., 2014). Šalić i sur. (2016) su dobili da su najreprezentativnije relacije za područje Zapadnog Balkana Aetal14, Betal14 i CY14. Gledajući amplitude i trendove srednjih odstupanja potkrijepljeno je ono dobiveno Tablici 6. Srednje odstupanje ( $c_k$ ) za tri najreprezentativnije relacije (Aetal14, ASK14 i Betal14) ima sličan trend te je malo po apsolutnoj vrijednosti. GMPE relacije s najmanjim težinama imaju najveća apsolutna srednja odstupanja na periodima do 3 s. Uspoređujući ukupne težine s težinama po LLH i težinama po EDR može se vidjeti da ukupne težine bolje slijede težine po LLH, nego težine po EDR.

## 7 Zaključak

Iz BSHAP baze akceleroograma izdvojeno je 158 akceleroograma na širem području Hrvatske. Ta baza je iskorištena za provjeru usklađenosti atenuacijskih relacija gibanja tla u odnosu na magnitudu potresa, udaljenost od potresa i vrstu tla za PGA i SA za period od 1 s. Testirane su sljedeće atenuacijske relacije: ASK14 (Abrahamson i sur., 2014), CB14 (Campbell i Bozorgnia., 2014), CY14 (Chiou i Youngs, 2014), Aetal14 (Akkar i sur., 2014), Betal14 (Bindi i sur., 2014), Cetal15 (Cauzzi i sur., 2015), AR3 (Chiou i sur., 2008) i AR4 (Zhao i sur., 2008). Pri testiranju su promatrane razlike prirodnih logaritama stvarnog gibanja i gibanja tla predviđenog atenuacijskom relacijom. Nakon toga je ukupni ostatak (rezidual) rastavljen na tri dijela. Prvi dio je srednje odstupanje, drugi dio ostatka dolazi od varijabilnosti među događajima (potresima), a treći od varijabilnosti unutar pojedinih događaja. Analizom reziduala dobiveni su pokazatelji LLH i EDR na osnovi kojih su računane težine atenuacijskih relacija gibanja tla.

Reziduali među događajima su prikazani u ovisnosti o magnitudi, dok su reziduali unutar događaja crtani u ovisnosti o nekoj od mjera udaljenosti od potresa i tipu tla ( $V_{S30}$ ). Testirane relacije podcjenjuju stvarno gibanje za male magnitudo (3.5-4), precijenjuju za srednje magnitudo (4-5.5) te ponovo podcjenjuju za veće magnitudo (5.5-7) (do oko 0.5 ln jedinica). Dobro procjenjuju gibanje na udaljenostima do 50 km od žarišta. Na udaljenostima 50-100 km blago precijenjuju stvarno gibanje, a na udaljenostima 100-200 km blago podcjenjuju stvarno gibanje (do oko 0.15 ln jedinica). Na tipu tla B blago podcjenjuju stvarno gibanje, dok na tipu tla A blago precijenjuju stvarno gibanje (do oko 0.15 ln jedinica). Atenuacijska relacija koja najbolje opisuje akceleroگرامe na širem području Hrvatske je ona predložena od Akkara i sur. (Aetal14) s težinom 0.16, dok su za naše područje još reprezentativne relacije predložene od Abrahamsona i sur. (ASK14) i Bindija i sur. (Betal14), obje s težinom 0.13.

Važnost odabira reprezentativnih GMPE relacija se ogleda u mogućnosti bolje procjene hazarda, samim time i rizika, što može pomoći nacionalnim vlastima, javnim i privatnim institucijama, civilnim agencijama za hitne slučajeve, za urbanističko planiranje, smanjenje seizmičke ugroženosti i pripremu za prirodne katastrofe, a kako bi se doprinijelo sigurnosti građana.

## Literatura

Abrahamson NA, Youngs RR (1992) A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bull Seismol Soc Am* 82(1): 505–510.

Abrahamson NA, Silva WJ (1997) Empirical response spectral attenuation relationships for shallow crustal earthquakes. *Seismol Res Let* 68: 94–127. Doi:10.1785/gssrl.68.1.94

Abrahamson NA, Silva WJ (2008) Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations. *Earthq Spectra* 24: 67–97. Doi:10.1193/1.2924360

Abrahamson NA, Silva WJ, Kamai R (2014) Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthq Spectra* 30(3): 1025–1055.

Akkar S, Bommer JJ (2006) Influence of long-period filter cut-off on elastic spectral displacements. *Earthq Eng Struct Dyn* 35(9): 1145–1165.

Akkar S, Sandikkaya MA, Senyurt M, Sisi AA, Ay BO, Traversa P, Douglas J, Cotton F, Luzi L, Hernandez B, Godey S (2014a) Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE), *B Earthq Eng* 12: 311–339.

Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ (2014b) Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal Earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *B Earthq Eng* 12: 359–387.

Akkar S, Sandikkaya MA, Bommer JJ (2014c) Erratum to: empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal Earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *B Earthq Eng* 12(1): 389–390.

Al Atik L, Abrahamson N, Bommer JJ, Scherbaum F, Cotton F, Kuehn N (2010) The variability of ground motion prediction models and its components. *Seismol Res Let* 81: 794–801.

Beauval C, Tasan H, Laurendeau A, Delavaud E, Cotton F, Guéguen Ph, Kuehn N (2012) On the testing of ground-motion prediction equations against small magnitude data. *Bull Seismol Soc Am* 102(5): 1994–2007.

Bindi D, Massa M, Luzi L, Ameri G, Pacor F, Puglia R, Augliera P (2014) 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. *B Earthq Eng* 12(1): 391–430. doi:[10.1007/s10518-013-9525-5](https://doi.org/10.1007/s10518-013-9525-5)

Bommer JJ, Douglas J, Scherbaum F, Cotton F, Bungum H, Fäh D (2010) On the selection of ground-motion prediction equations for seismic hazard analysis. *Seismol Res Let* 81: 783–793.

Boore DM, Joyner WB (1997) Site amplifications for generic rock sites. *Bull Seismol Soc Am* 87: 327–341.

Boore M, Atkinson GM (2007) Boore–Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters. In: PEER Report 2007/01. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Boore DM, Atkinson GM (2008) Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthq Spectra* 24: 99–138. Doi:10.1193/1.2830434

Boore DM, Kale O, Akkar S (2011) Utility software for data processing (USDP). <http://web.boun.edu.tr/sinan.akkar/usdp1.html>

Brückl E, Bleibinhaus F, Gosar A, Grad M, Guterch A, Hrubcová P, Keller GR, Šumanovac F, Tiira T, Yliniemi J, Hegedűs E, Thybo H, (2007) Crustal structure due to collisional and escape tectonics in the Eastern Alps region based on profiles Alp01 and Alp02 from the ALP 2002 seismic experiment. *J Geophys Res*, 112, B06308, doi: 10.1029/2006JB004687

Brückl E, Behm M, Decker K, Grad M, Guterch A, Keller GR, Thybo H, (2010) Crustal structure and active tectonics in the Eastern Alps. *Tectonics*, 29, TC2011, doi: 10.1029/2009TC002491

Campbell KW, Bozorgnia Y (2008) NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. *Earthq Spectra* 24: 139–171. Doi:10.1193/1.2857546

Campbell KW, Bozorgnia Y (2014) NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5 %-damped linear acceleration response spectra. *Earthq Spectra* 30(3): 1087–1115. doi:10.1193/062913EQS175M

Cauzzi C, Faccioli E, Vanini M, Bianchini A (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. *B Earthq Eng* 13(6): 1587–1612. doi:10.1007/s10518-014-9685-y

Chiou BS-J, Youngs RR (2008) An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthq Spectra* 24: 173–215.

Chiou BS-J, Youngs RR (2014) Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthq Spectra* 30(3): 1117–1153. doi:10.1193/072813EQS219M

Choi Y, Stewart JP (2005) Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity. *Earthq. Spectra* 21: 1–30. Doi:10.1193/1.1856535



- Cotton F, Scherbaum F, Bommer JJ, Bungum H (2006) Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: application to Central Europe and rock sites. *J Seismol* 10: 137–156.
- Csontos L, Vörös A (2004) Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 210: 1–56, doi: 10.1016/j.palaeo.2004.02.033.
- Douglas J (2003) Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates. *Earth Sci Rev* 61: 43–140.
- Douglas J (2011) Ground-motion prediction equations 1964–2010, PEER Report 2011/102. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, Berkeley.
- Douglas J, Boore DM (2011) High-frequency filtering of strong-motion records. *Bull Earthq Eng* 9: 395–409.
- Duni LI, Kuka Sh, Kuka N (2010) Local relations for converting  $M_L$  to  $M_W$  in Southern-Western Balkan region. *Acta Geod Geophys Hung* 45(3): 317–323
- Gülerce Z, Kargioğlu B, Abrahamson NA (2016) Turkey-adjusted NGA-W1 horizontal ground motion prediction models. *Earthq Spectra* 32(1): 75–100. doi:[10.1193/022714EQS034M](https://doi.org/10.1193/022714EQS034M)
- Handy MR, Ustaszewski K, Kissling E (2015) Reconstructing the Alps-Carpathians-Dinarides as a key to understanding switches in the subduction polarity, slab gaps and surface motion. *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)* 104: 1–26. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-014-1060-3>
- Herak D, Herak M, Prelogović E, Markušić S, Markulin Ž (2005) Jabuka island (Central Adriatic Sea) earthquakes of 2003. *Tectonophysics* 398: 167–180.
- Herak D, Herak M, Tomljenović B (2009) Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia. *Tectonophysics* 465: 212–220. Doi:10.1016/j.tecto.2008.12.005
- Herak M, Markusic S, Ivancic I (2001) Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the Dinarides area. *Stud Geophys Geod* 45: 383–394.
- Ivančić I, Herak D, Markušić S, Sović I, Herak M (2006) Seismicity of Croatia in the period 2002–2005. *Geofizika* 23: 87–103.
- Kale Ö, Akkar S (2013) A new perspective for selecting and ranking ground-motion prediction equations (GMPEs): the euclidian distance-based ranking method. *Bull Seismol Soc Am* 103(2A): 1069–1084.

- Kastelic V, Carafa MMC (2012) Fault slip rates for the active External Dinarides thrust-and-fold belt. *Tectonics* 31, TC3019. <http://dx.doi.org/10.1029/2011TC003022>
- Manic MI (2002) Empirical scaling of response spectra for the territory of north-western Balkan. In: Proceedings of 12th European conference on earthquake engineering. Paper reference #650.
- Markušić S, Herak M (1999) Seismic zoning of Croatia. *Nat Hazards* 18: 269–285.
- Markušić S, Gülerce Z, Kuka N, Duni L, Ivančić I, Radovanović S, Glavatović B, Milutinović Z, Akkar S, Kovačević S, Mihaljević J, Šalić R (2015) An updated and unified earthquake catalogue for the Western Balkan Region. *B Earthq Eng* 14(2): 321–343. doi:[10.1007/s10518-015-9833-z](https://doi.org/10.1007/s10518-015-9833-z)
- Mihailov V (1985) Yugoslav strong motion network. *Phys Earth Planet Inter* 38(2–3): 110–122. doi:[10.1016/0031-9201\(85\)90149-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(85)90149-9)
- Petrovski D, Marcellini A (1988) Prediction of seismic movement of a site: statistical approach. In: Proceeding UN Sem. on Predict. of Earthquakes. Lisbon, Portugal, 14–18 November 1988.
- Petrovski D, Naumovski N (1979) Processing of strong motion accelerograms, Part I- Analytical methods. IZIIS Publication No. 66. Skopje, November 1979.
- Petrovski D, Naumovski N, Stamatovska S (1982) Processing of strong motion accelerograms, Part II Computer programs. IZIIS Publication No. 69. Skopje, April 1982.
- Pitilakis K, Gazepis C, Anastasiadis A (2004) Design response spectra and soil classification for seismic code provisions, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C, Canada, August 1-6.
- Posgay K, Bodoky T, Hegedüs E, Kovácsvölgyi S, Lenkey L, Szafián P, Takács E, Tímár Z, Varga G (1995) Asthenospheric structure beneath a Neogene basin in southeast Hungary. *Tectonophysics*, 252: 467-484, doi: [10.1016/0040-1951\(95\)00098-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00098-4)
- Ratschbacher L, Frish W, Linzer HG, Merle O (1991) Lateral extrusion in the Eastern Alps, Part 2: Structural analysis. *Tectonics*: 2, 63-90, doi: [10.1029/90TC02623](https://doi.org/10.1029/90TC02623)
- Sandikkaya MA, Akkar S, Bard PY (2013) A nonlinear site-amplification model for the next pan-European ground-motion prediction equations. *Bull Seismol Soc Am* 103: 19–32. Doi:[10.1785/0120120008](https://doi.org/10.1785/0120120008)
- Scassera G, Stewart J, Bazzurro P, Lanzo G, Mollaioli F (2009) A comparison of NGA ground-motion prediction equations to Italian data. *Bull Seismol Soc Am* 99(5): 2961–2978.

- Scherbaum F, Cotton F, Smit P (2004) On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: the case of rock motion. *Bull Seismol Soc Am* 94(6): 2164–2185.
- Scherbaum F, Delavaud E, Riggelsen E (2009) Model selection in seismic hazard analysis: an information theoretic perspective. *Bull Seismol Soc Am* 99(6): 3234–3247.
- Schmid SM, Bernoulli D, Fügenschuh B, Manteco L, Schuster R, Schefer S, Tischler M, Ustaszewski K (2008) The Alpine–Carpathian–Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J Geosci*, 101: 139–183.
- Stamatovska S, Petrovski D (1991) Ground motion parameters based on data obtained from strong earthquake records. In: National progress report of Yugoslavia, UNDP/UNESCO Project Rep/88/004, Task Group 3, Second Meeting. Yugoslavia Geophysical Institute, Zagreb.
- Stamatovska S, Petrovski D (1996) Empirical attenuation acceleration laws for Vrancea intermediate Earthquakes. In: Proceedings of Eleventh World conference on Earthquake engineering. Paper no. 146.
- Stewart JP, Douglas J, Javanbarg M, Abrahamson NA, Bozorgnia Y, Boore DM, Campbell KW, Delavaud E, Erdik M, Stafford PJ (2015) Selection of ground motion prediction equations for the Global Earthquake Model. *Earthq Spectra* 31(1): 19–45. doi: [10.1193/013013EQS017M](https://doi.org/10.1193/013013EQS017M)
- Šalić R, Sandikkaya MA, Milutonović Z, Gülerce Z, Duni L, Kovačević V, Markušić S, Mihaljević J, Kuka N, Kaluđerović N, Kotur N, Krmpotić S, Kuk K, Stanko D (2016) BSHAP project strong ground motion database and selection of suitable ground motion models for the Western Balkan Region. *B Earthq Eng* 15: 1319–1343. DOI:10.1007/s10518-016-9950-3
- Šumanovac F (2010) Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling. *Tectonophysics* 485: 94–106.
- Šumanovac F, Markušić S, Engelsfeld T, Jurković K, Orešković J (2017) Shallow and deep lithosphere slabs beneath the Dinarides from teleseismic tomography as the result of the Adriatic lithosphere downwelling. *Tectonophysics* 712-713: 523-541.
- Ustaszewski K, Schmid SM, Fügenschuh B, Tischler M, Kissling E, Spakman W (2008) A map-view restoration of the Alpine–Carpathian–Dinaridic system for the Early Miocene. *Swiss J Geosci* 101: S273–S294. <http://dx.doi.org/10.1007/s00015-008-1288-7>
- Walling M, Silva W, Abrahamson N, Kramer SL (2008) Nonlinear site amplification factors for constraining the NGA models. *Earthq Spectra* 24: 243–255. Doi:10.1193/1.2934350

Zhao JX, Zhang J, Asano A, Ohno Y, Oouchi T, Takahashi T, Ogawa H, Irikura K, Thio HK, Somerville PG, Fukushima Y, Fukushima Y (2006) Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. Bull Seismol Soc Am 96(3): 898–913. doi:[10.1785/0120050122](https://doi.org/10.1785/0120050122)

## Dodatak 1

Kratki pregled korištenih atenuacijskih relacija gibanja tla i nekih vrijednosti regresijom dobivenih koeficijenata:

**ASK14** (Abrahamson i sur., 2014):

$$\ln(Sa(g)) = f_1(M, R_{rup}) + f_{RV}(M)f_7(M) + f_N(M)f_8(M) + f_5(Sa_{1180}, V_{S30}) + f_6(Z_{TOR}) + f_{10}(Z_1, V_{S30}),$$

gdje je

$$f_1(M, R_{RUP}) = \begin{cases} a_1 + a_5(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + (a_2 + a_3(M - M_1)) \ln(R) \\ \quad + a_{17}R_{rup} & \text{za } M > M_1 \\ a_1 + a_4(M - M_1) + a_8(8.5 - M)^2 + (a_2 + a_3(M - M_1)) \ln(R) \\ \quad + a_{17}R_{rup} & \text{za } M_2 \leq M \leq M_1 \\ a_1 + a_4(M_2 - M_1) + a_8(8.5 - M_2)^2 + a_6(M - M_2) + a_7(M - M_2)^2 \\ \quad + (a_2 + a_3(M_2 - M_1)) \ln(R) + a_{17}R_{rup} & \text{za } M > M_2, \end{cases}$$

$$R = \sqrt{R_{rup}^2 + c_{4M}^2},$$

$$f_7(M) = \begin{cases} a_{11} & \text{za } M > 5 \\ a_{11}(M - 4) & \text{za } 4 \leq M \leq 5 \\ 0 & \text{za } M < 4, \end{cases}$$

$$f_8(M) = \begin{cases} a_{12} & \text{za } M > 5 \\ a_{12}(M - 4) & \text{za } 4 \leq M \leq 5 \\ 0 & \text{za } M < 4, \end{cases}$$

$$f_5(Sa_{1180}, V_{S30}) = \begin{cases} (a_{10} + bn) \ln \frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}} & \text{za } V_{S30} \geq V_{Lin} \\ a_{10} \ln \frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}} - b \ln(Sa_{1180} + c) + b \ln \left( Sa_{1180} + c \left( \frac{V_{S30}^*}{V_{Lin}} \right)^n \right) & \text{za } V_{S30} < V_{Lin}, \end{cases}$$

$$V_{S30}^* = \begin{cases} V_{S30} & \text{za } V_{S30} < V_1 \\ V_1 & \text{za } V_{S30} \geq V_1, \end{cases}$$

$$V_1 = \begin{cases} 1500 & \text{za } T \leq 0.5 \text{ s} \\ e^{(-0.35 \ln(\frac{T}{0.5}) + \ln(1500))} & \text{za } 0.5 \text{ s} < T < 3 \text{ s} \\ 800 & \text{za } T \geq 3 \text{ s,} \end{cases}$$

$$f_6(Z_{TOR}) = \begin{cases} a_{15} \frac{Z_{TOR}}{20} & \text{za } Z_{TOR} < 20 \text{ km} \\ a_{15} & \text{za } Z_{TOR} \geq 20 \text{ km,} \end{cases}$$

$$f_{10}(Z_1, V_{S30}) = \begin{cases} a_{43} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1, ref} + 0.01}\right) & \text{za } V_{S30} \leq 200 \text{ ms}^{-1} \\ a_{44} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1, ref} + 0.01}\right) & \text{za } 200 < V_{S30} \leq 300 \text{ ms}^{-1} \\ a_{45} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1, ref} + 0.01}\right) & \text{za } 300 < V_{S30} \leq 500 \text{ ms}^{-1} \\ a_{46} \ln\left(\frac{Z_1 + 0.01}{Z_{1, ref} + 0.01}\right) & \text{za } V_{S30} > 500 \text{ ms}^{-1}, \end{cases}$$

$$Z_1 = \frac{1}{1000} e^{\left(\frac{-7.15}{4} \ln\left(\frac{V_{S30}^4 + 571^4}{1360^4 + 571^4}\right)\right)},$$

$$Z_{1, ref} = \frac{1}{1000} e^{\left(\frac{-7.67}{4} \ln\left(\frac{V_{S30}^4 + 610^4}{1360^4 + 610^4}\right)\right)}.$$

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{15}, a_{17}, a_{43}, a_{44}, a_{45}, a_{46}, b, n, c, c_{4M}$  su regresijom dobiveni koeficijenti.  $f_{RV}$  i  $f_N$  su jedan za reveresne i normale rasjede, a nula inače te je  $M_I = 6.75, M_2 = 5$  i  $V_{Lin} = 660 \text{ ms}^{-1}$ .  $Sa_{1180}$  je srednja vrijednost akceleracije tla za tlo karakterizirano s  $V_{S30} = 1180 \text{ ms}^{-1}$ .  $Sa$  (g) je spektralna akceleracija izražena u jedinicama akceleracije teže (g), PGA je približno SA za  $T = 0.01 \text{ s}$ .

**CB14** (Campbell i Bozorgnia, 2014):

$$\ln(Sa(g)) = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{site} + f_{sed} + f_{hyp} + f_{dip} + f_{atn},$$

gdje je

$$f_{mag} = \begin{cases} c_0 + c_1 M & \text{za } M \leq 4.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2(M - 4.5) & \text{za } 4.5 < M \leq 5.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5) & \text{za } 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_0 + c_1 M + c_2(M - 4.5) + c_3(M - 5.5) + c_4(M - 6.5) & \text{za } M > 6.5, \end{cases}$$

$$f_{dis} = (c_5 + c_6 M) \ln \left( \sqrt{R_{rup}^2 + c_7^2} \right),$$

$$f_{flt} = f_{flt,M} f_{flt,F},$$

$$f_{flt,F} = c_8 f_{RV} + c_9 f_{NM},$$

$$f_{flt,M} = \begin{cases} 0 & \text{za } M \leq 4.5 \\ M - 4.5 & \text{za } 4.5 < M \leq 5.5 \\ 1 & \text{za } M > 5.5, \end{cases}$$

$$f_{site} = \begin{cases} c_{11} \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right) + k_2 \left\{ \ln \left[ A_{1100} + c \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right)^n \right] - \ln [A_{1100} + c] \right\} & \text{za } V_{S30} \leq k_1 \\ (c_{11} + k_2 n) \ln \left( \frac{V_{S30}}{k_1} \right) & \text{za } V_{S30} > k_1, \end{cases}$$

$$f_{sed} = \begin{cases} c_{14}(Z_{2.5} - 1) & \text{za } Z_{2.5} \leq 1 \\ 0 & \text{za } 1 < Z_{2.5} \leq 3 \\ c_{16} k_3 e^{-0.75} [1 - e^{-0.25(Z_{2.5} - 3)}] & \text{za } Z_{2.5} > 3, \end{cases}$$

$$Z_{2.5} = e^{[7.089 - 1.144 \ln(V_{S30})]},$$

$$f_{hyp} = f_{hyp,H} f_{hyp,M},$$

$$f_{hyp,H} = \begin{cases} 0 & \text{za } Z_{hyp} \leq 7 \text{ km} \\ Z_{HYP} - 7 & \text{za } 7 \text{ km} < Z_{hyp} \leq 20 \text{ km} \\ 13 & \text{za } Z_{hyp} > 20 \text{ km,} \end{cases}$$

$$f_{hyp,M} = \begin{cases} c_{17} & \text{za } M \leq 5.5 \\ c_{17} + (c_{18} - c_{17})(M - 5.5) & \text{za } 5.5 < M \leq 6.5 \\ c_{18} & \text{za } M > 6.5, \end{cases}$$

$$f_{dip} = \begin{cases} c_{19}\delta & \text{za } M \leq 4.5 \\ c_{19}(5.5 - M)\delta & \text{za } 4.5 < M \leq 5.5 \\ 0 & \text{za } M > 5.5, \end{cases}$$

$$f_{atn} = \begin{cases} c_{20}(R_{rup} - 80) & \text{za } R_{rup} > 80 \text{ km} \\ 0 & \text{za } R_{rup} \leq 80 \text{ km.} \end{cases}$$

$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{11}, c_{14}, c_{17}, c_{18}, c_{19}, c_{20}, k_1, k_2, k_3, n$  su regresijom dobiveni koeficijenti.  $f_{RV}$  i  $f_N$  su jedan za reversne i normalne rasjede, inače nula,  $A_{1100}$  je srednja vrijednost akceleracije tla na  $V_{S30} = 1100 \text{ ms}^{-1}$ .  $\delta$  je kut nagiba rasjeda u stupnjevima,  $Z_{2.5}$  je dubina do brzine S-valova od  $2500 \text{ ms}^{-1}$  (dubina sedimenata) te je  $k_I = 865 \text{ ms}^{-1}$ .  $S_a$  (g) je spektralna akceleracija izražena u jedinicama akceleracije teže (g), a PGA je približno SA za  $T = 0.01 \text{ s}$ .



**CY14** (Chiou i Youngs, 2014):

$$\begin{aligned}
\ln(y_{ref}(g)) = & c_1 + \left\{ c_{1a} + \frac{c_{1c}}{\cosh(2 \max(M - 4.5, 0))} \right\} F_{RV} \\
& + \left\{ c_{1b} + \frac{c_{1d}}{\cosh(2 \max(M - 4.5, 0))} \right\} F_{NM} \\
& + \left\{ c_7 + \frac{c_{7b}}{\cosh(2 \max(M - 4.5, 0))} \right\} \Delta Z_{TOR} \\
& + \left\{ c_{11} + \frac{c_{11b}}{\cosh(2 \max(M - 4.5, 0))} \right\} (\cos(\delta))^2 + c_2(M - 6) \\
& + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M)}) \\
& + c_4 \ln(R_{rup} + c_5 \cosh(c_6 \max(M - c_{HM}, 0))) \\
& + (c_{4a} - c_4) \ln\left(\sqrt{R_{rup}^2 + c_{RB}^2}\right) \\
& + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{rup},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\ln(y(g)) = & \ln(y_{ref}(g)) + \varphi_1 \min\left(\ln\left(\frac{V_{S30}}{1130}\right), 0\right) \\
& + \varphi_2 (e^{\varphi_3(\min(V_{S30}, 1130) - 360)} - e^{\varphi_3(1130 - 360)}) \ln\left(\frac{y_{ref}(g) + \varphi_4}{\varphi_4}\right),
\end{aligned}$$

$$\Delta Z_{TOR} = Z_{TOR} - Z_{flt},$$

$Z_{flt}$

$$= \begin{cases} \max(2.704 - 1.226 \max(M - 5.849, 0))^2 & \text{za reversne i transformne rasjede} \\ \max(2.673 - 1.136 \max(M - 4.970, 0))^2 & \text{za normalne i rasjede po pružanju.} \end{cases}$$

$c_1, c_{1a}, c_{1b}, c_{1c}, c_{1d}, c_2, c_3, c_4, c_{4a}, c_5, c_6, c_7, c_{7b}, c_{11}, c_{11b}, c_n, c_M, c_{HM}, c_{RB}, c_{\gamma 1}, c_{\gamma 2}, c_{\gamma 3}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  su regresijom dobiveni koeficijenti.  $F_{RV}$  i  $F_{NM}$  su jedan za reversne i normalne rasjede, inače nula.  $\delta$  je kut nagiba rasjeda u stupnjevima.  $y(g)$  je mjera intenziteta (SA ili PGA) izražena u jedinicama akceleracije teže (g).

**Aetal14** (Akkar i sur., 2014a, b, c):

$$\ln(Y(g)) = \ln[Y_{REF}(M, R, SoF)] + \ln[S(V_{S30}, Y_{REF})],$$

$$\ln(Y_{REF}) = \begin{cases} a_1 + a_2(M - c_1) + a_3(8.5 - M)^2 + [a_4 + a_5(M - c_1)] \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) \\ \quad + a_8 F_N + a_9 F_R \quad \text{za } M \leq c_1 \\ a_1 + a_7(M - c_1) + a_3(8.5 - M)^2 + [a_4 + a_5(M - c_1)] \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) \\ \quad + a_8 F_N + a_9 F_R \quad \text{za } M > c_1, \end{cases}$$

$$\ln(S) = \begin{cases} b_1 \ln\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right) + b_2 \ln\left[\frac{Y_{REF} + c\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}{(Y_{REF} + c)\left(\frac{V_{S30}}{V_{REF}}\right)^n}\right] & \text{za } V_{S30} \leq V_{REF} \\ b_1 \ln\left(\frac{\min(V_{S30}, V_{CON})}{V_{REF}}\right) & \text{za } V_{S30} > V_{REF}. \end{cases}$$

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, b_1, b_2, c, c_1, n$  su regresijom dobiveni koeficijenti. *SoF* je član koji se odnosi na način rasjedanja.  $F_R$  i  $F_N$  su jedan za reversne i normalne rasjede, a inače nula te se  $R$  odnosi na Joyner-Booreovu udaljenost. Referentni  $V_{S30}$  je  $V_{REF} = 750 \text{ ms}^{-1}$ , a  $V_{CON} = 1000 \text{ ms}^{-1}$  je granični  $V_{S30}$  nakon kojeg je amplifikacija tla konstantna te je  $c_1 = 6.75$ .  $Y(g)$  je mjera intenziteta (PGA ili SA) izražena u jedinicama akceleracije teže (g).

**Betal14** (Bindi i sur., 2014):

$$\log(Y(\text{cms}^{-2})) = e_1 + F_D(R, M) + F_M(M) + F_S + F_{sof},$$

$$F_D(R, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \log\left(\frac{\sqrt{R^2 + h^2}}{R_{ref}}\right) - c_3(\sqrt{R^2 + h^2} - R_{ref}),$$

$$F_M(M) = \begin{cases} b_1(M - M_h) + b_2(M - M_h)^2 & \text{za } M \leq M_h \\ b_3(M - M_h) & \text{za } M > M_h, \end{cases}$$

$$F_S = \begin{cases} A & \text{za tip tla A} \\ B & \text{za tip tla B} \\ C & \text{za tip tla C} \\ D & \text{za tip tla D,} \end{cases}$$

$$F_{sof} = \begin{cases} N & \text{za normalne rasjede} \\ R & \text{za reversne rasjede} \\ S & \text{za rasjede po pružanju} \\ U & \text{za nedefinirane rasjede.} \end{cases}$$

$e_1, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, M_h, M_{ref}, R_{ref}, h, A, B, C, D, N, S, U$  su regresijom dobiveni koeficijenti,  $M_h = 6.75$ ,  $M_{ref} = 5.5$ ,  $R_{ref} = 1$ ,  $h = 6.14717$ ,  $A = 0$ ,  $B = 0.137715$ ,  $C = 0.233048$ ,  $D = 0.214227$ ,  $N = -0.03228$ ,  $S = -0.01943$  i  $U = 0$ .  $R$  se odnosi na Joyner-Booreovu udaljenost.  $Y(\text{cms}^{-2})$  je mjera intenziteta (PGA ili SA) izražena u  $\text{cms}^{-2}$ .

**Cetal15** (Cauzzi i sur., 2015):

$$\log(Y(\text{cms}^{-2})) = f_M + f_R + f_S + f_{sof},$$

$$f_M = c_1 + m_1 M + m_2 M^2,$$

$$f_R = (r_1 + r_2 M) \log(R_{rup} + r_3),$$

$$f_S = b_{V800} \log\left(\frac{V_{S30}}{800}\right),$$

$$F_{sof} = \begin{cases} F_N & \text{za normalne rasjede} \\ F_R & \text{za reversne rasjede} \\ F_{SS} & \text{za rasjede po pružanju,} \end{cases}$$

$$PSA = Y \frac{4\pi^2}{T^2}.$$

$c_1, m_1, m_2, r_1, r_2, r_3, b_{v800}, F_N, F_R, F_{SS}$  su regresijom dobiveni koeficijenti, a  $PGA = SA$  ( $T = 0.01$  s),  $F_N = -0.02411$ ,  $F_R = 0.07246$  i  $F_{SS} = -0.05632$ .  $Y$  ( $\text{cms}^{-2}$ ) je mjera intenziteta (PGA ili SA) izražena u  $\text{cms}^{-2}$ .

**AR3** (Chiou i sur., 2008):

$$\begin{aligned} \ln(y_{ref}(g)) = & c_1 + c_{1a}F_{RV} + c_{1b}F_{NM} + c_7(Z - 4) + c_2(M - 6) \\ & + \frac{c_2 - c_3}{c_n} \ln(1 + e^{c_n(c_M - M)}) \\ & + c_4 \ln(R_{rup} + c_5 \cosh(c_6 \max(M - c_{HM}, 0))) \\ & + (c_{4a} - c_4) \ln(\sqrt{R_{rup}^2 + c_{RB}^2}) \\ & + \left\{ c_{\gamma 1} + \frac{c_{\gamma 2}}{\cosh(\max(M - c_{\gamma 3}, 0))} \right\} R_{rup}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln(y(g)) = & \ln(y_{ref}(g)) + \varphi_1 \min\left(\ln\left(\frac{V_{S30}}{1130}\right), 0\right) \\ & + \varphi_2 \left( e^{\varphi_3(\min(V_{S30}, 1130) - 360)} - e^{\varphi_3(1130 - 360)} \right) \ln\left(\frac{y_{ref}(g) + \varphi_4}{\varphi_4}\right) \\ & + \varphi_5 \left( 1 - \frac{1}{\cosh[\varphi_6 \max(0, Z_{1.0} - \varphi_7)]} \right) \\ & + \frac{\varphi_8}{\cosh[0.15 \max(0, Z_{1.0} - 15)]}, \end{aligned}$$

$$Z_{1.0} = e^{\left[28.5 - \frac{3.82}{8} \ln(V_{S30}^8 + 378.7^8)\right]}.$$

$c_1, c_{1a}, c_{1b}, c_2, c_3, c_4, c_{4a}, c_5, c_6, c_7, c_n, c_M, c_{HM}, c_{RB}, c_{\gamma 1}, c_{\gamma 2}, c_{\gamma 3}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8$  su regresijom dobiveni koeficijenti.  $F_{RV}$  i  $F_{NM}$  su jedan za reversne i normalne rasjede, a inače nula.  $Z_{1.0}$  je dubina do brzine S-valova od  $1000 \text{ ms}^{-1}$  (u metrima).  $y_{ref}(g)$  je mjera intenziteta (PGA ili SA) izražena u jedinicama akceleracije teže (g).

**AR4** (Zhao i sur. 2006):

$$\ln(y(\text{cms}^{-2})) = aM + bR_{rup} - \ln(r) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + C_k,$$

$$r = R_{rup} + ce^{dM},$$

$$\delta_h = \begin{cases} 1 & \text{za } h \geq h_c \\ 0 & \text{za } h < h_c, \end{cases}$$

$$F_R = \begin{cases} 0.251 & \text{za reversne rasjede} \\ 0 & \text{za ostale vrste rasjeda,} \end{cases}$$

$$C_k = \begin{cases} c_H & \text{za } V_{S30} > 1100 \text{ ms}^{-1} \\ c_1 & \text{za } 600 < V_{S30} \leq 1100 \text{ ms}^{-1} \\ c_2 & \text{za } 300 < V_{S30} \leq 600 \text{ ms}^{-1} \\ c_3 & \text{za } 200 < V_{S30} \leq 300 \text{ ms}^{-1} \\ c_4 & \text{za } V_{S30} \leq 200 \text{ ms}^{-1}, \end{cases}$$

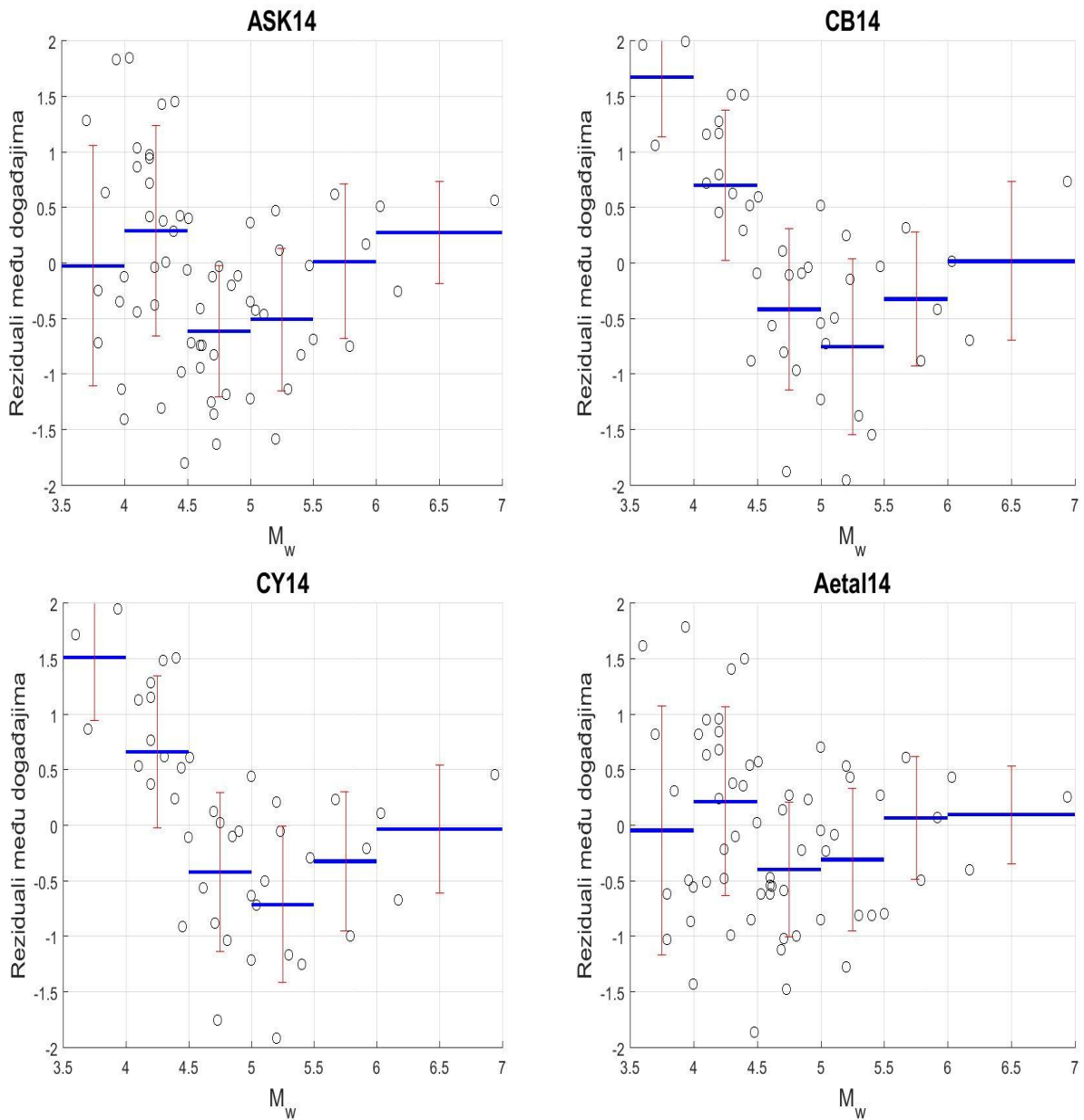
$a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $c_H$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $h_c$ ,  $d$ ,  $e$  su regresijom dobiveni koeficijenti,  $h$  dubina žarišta potresa, a  $c_H = 0.293$ ,  $c_1 = 1.111$ ,  $c_2 = 1.344$ ,  $c_3 = 1.355$ ,  $c_4 = 1.420$  i  $h_c = 15$  km.  $y(\text{cms}^{-2})$  je mjera intenziteta (PGA ili SA) izražena u  $\text{cms}^{-2}$ .

**AR5** (Herak i sur., 2001):

$$\log(PGA(g)) = c_1 + c_2M_L + c_3 \log\left(\sqrt{c_4^2 + R_{epi}^2}\right),$$

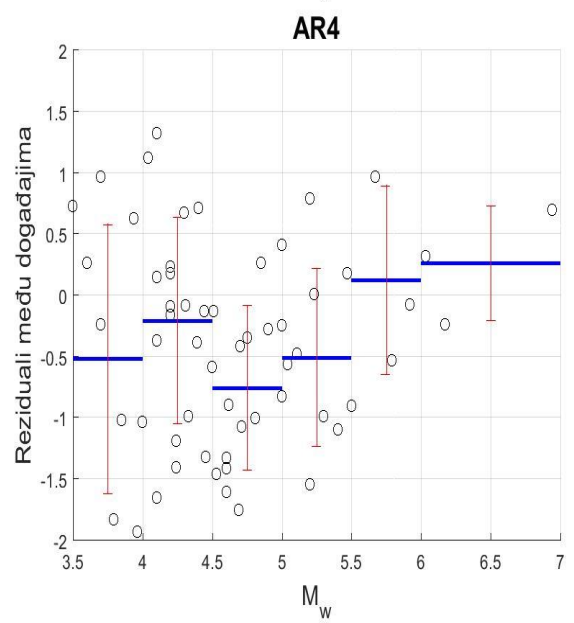
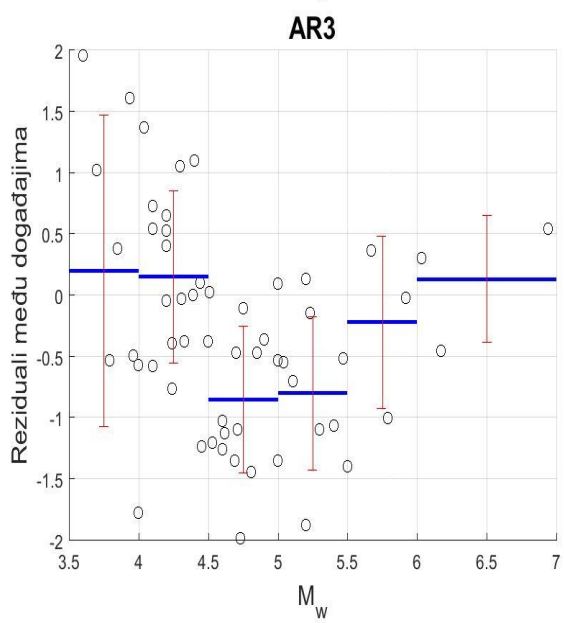
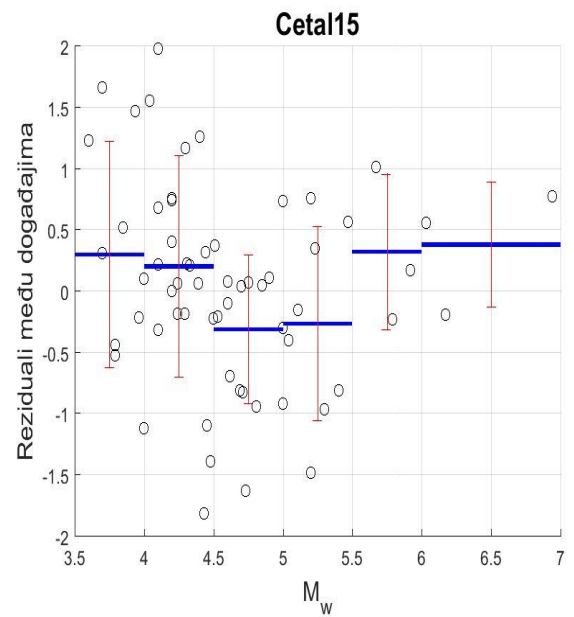
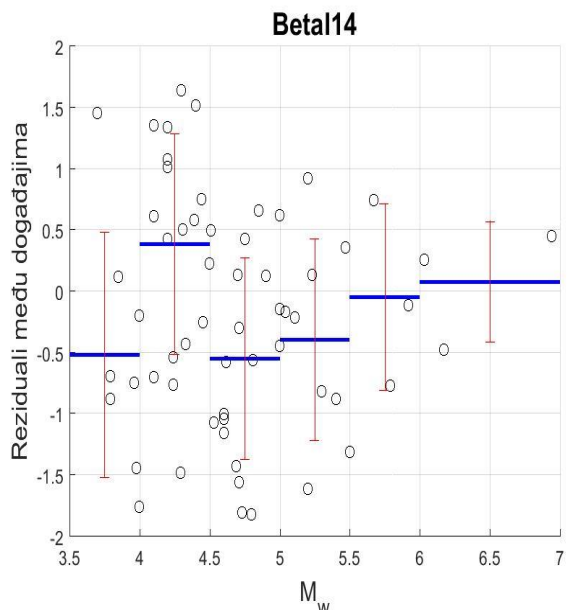
pri čemu je:  $M_L$  lokalna magnituda, a  $c_1 = -1.3$ ,  $c_2 = 0.331$ ,  $c_3 = -1.152$  i  $c_4 = 11.8$  su regresijom dobiveni koeficijenti.

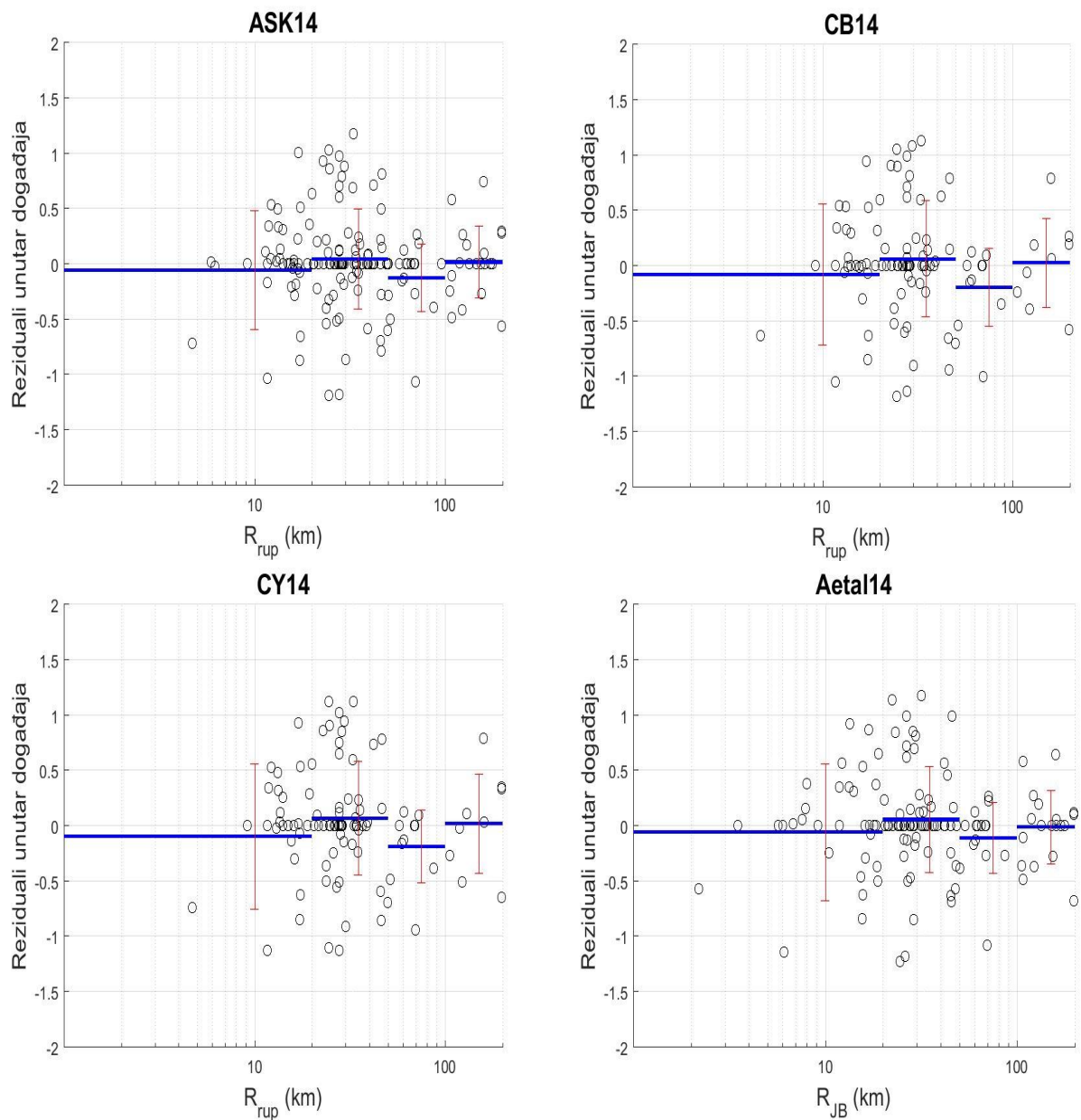
## Dodatak 2



Slika 1D: Distribucija reziduala među događajima za SA za period od 1 s u ovisnosti o magnitudi za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3, AR4 (crni prazni krugovi). Srednji reziduali za po 0.5 jedinica magnitude su prikazani punim plavim crtama, a crvene vertiklane linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka. Za magnitude od šest do sedam, zbog pomanjkanja podataka su uzeti srednji reziduali za jednu jedinicu magnitude.

(nastavak Slike 1D)

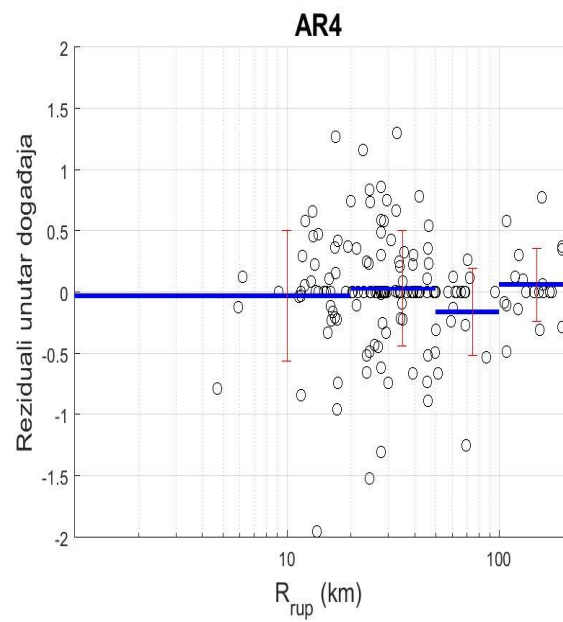
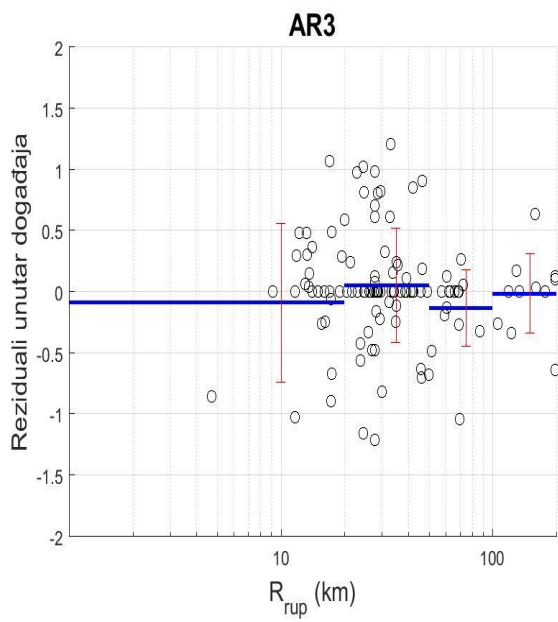
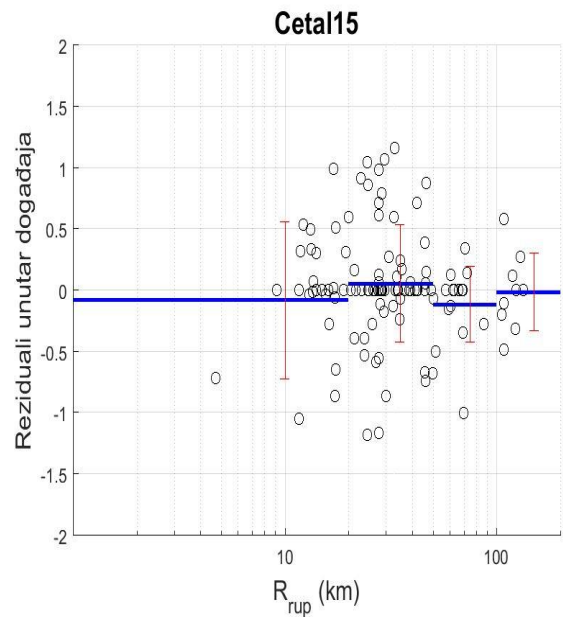
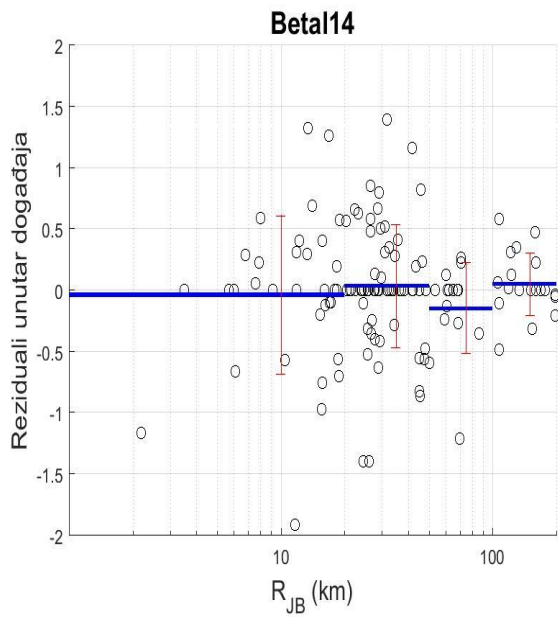


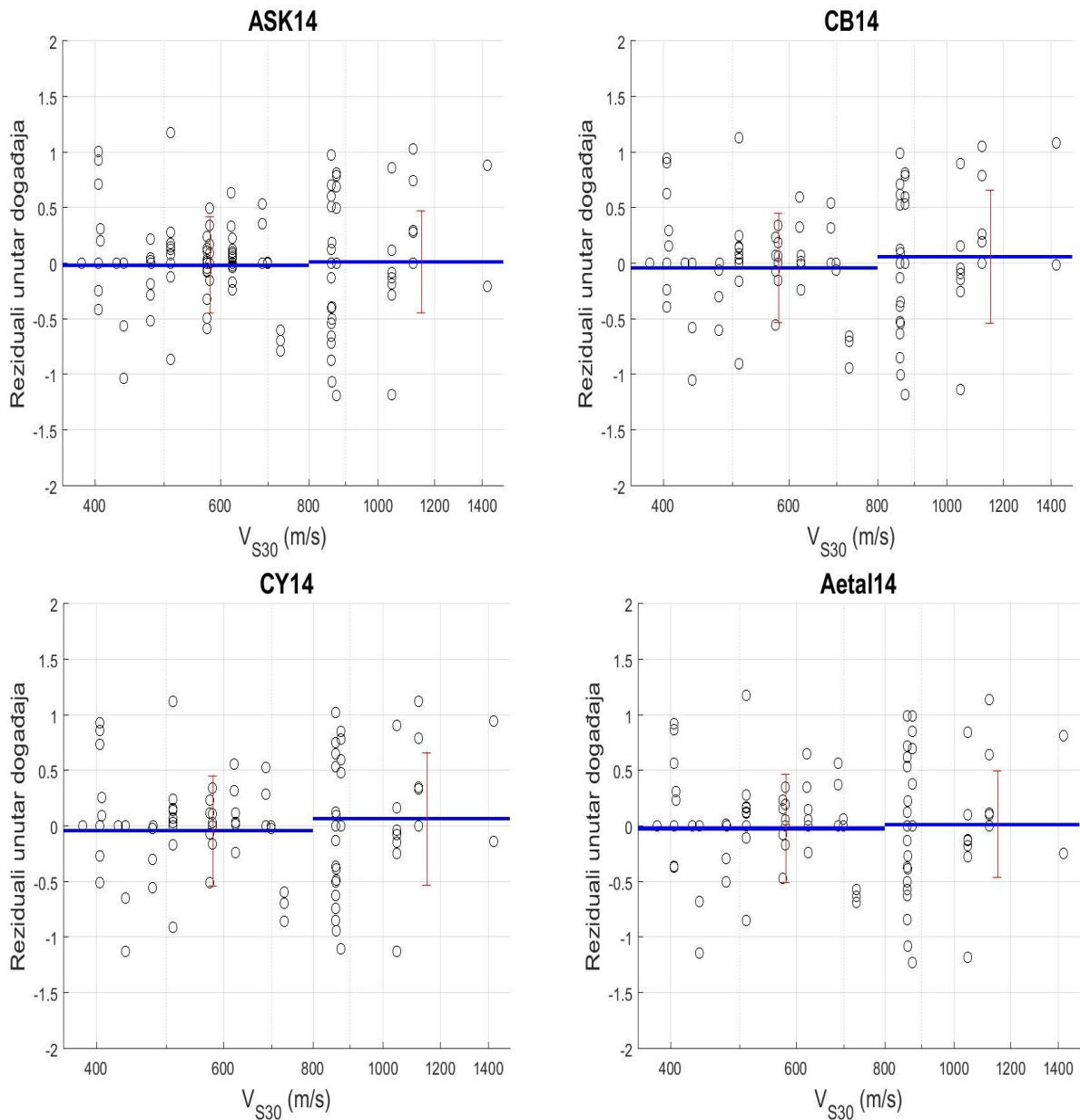


Slika 2D: Distribucija reziduala unutar događaja za SA za period od 1 s u ovisnosti o udaljenosti od potresa za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14 ( $R_{rup}$ ), CB14 ( $R_{rup}$ ), CY14 ( $R_{rup}$ ), Aetal14 ( $R_{JB}$ ), Betal14 ( $R_{JB}$ ), Cetal15 ( $R_{rup}$ ), AR3 ( $R_{rup}$ ), AR4 ( $R_{rup}$ ) (crni prazni krugovi). Srednji reziduali su prikazani za  $R = 0-20$  km,  $R = 20-50$  km,  $R = 50-100$  km i  $R = 100-200$  km s punim plavim crtama, a crvene vertikalne linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka.



(nastavak Slike 2D)





Slika 3D: Distribucija reziduala unutar događaja za SA za period od 1 s u ovisnosti o tipu tla po EC8 kategorizaciji (u ovisnosti o  $V_{S30}$ ) za atenuacijske relacije gibanja tla: ASK14, CB14, CY14, Aetal14, Betal14, Cetal15, AR3, AR4 (crni prazni krugovi). Srednji reziduali su prikazani za  $V_{S30} = 360-800 \text{ ms}^{-1}$ ,  $V_{S30} = 800-1500 \text{ ms}^{-1}$  s punim plavim crtama, a crvene vertiklane linije prikazuju jednu standardnu devijaciju podataka.

(nastavak Slike 3D)

