

# O vjerojatnosti prethodnih potresa u Hrvatskoj i susjednim područjima

---

**Dvornik, Lada**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:217:067866>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Lada Dvornik

O VJEROJATNOSTI PRETHODNIH  
POTRESA U HRVATSKOJ I SUSJEDNIM  
PODRUČJIMA

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Lada Dvornik

Diplomski rad

## **O vjerojatnosti prethodnih potresa u Hrvatskoj i susjednim područjima**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Marijan Herak

Zagreb, 2022.

Zahvaljujem mentoru, profesoru Heraku, na ideji za temu, strpljivom i mudrom vođenju rada, na mnogobrojnim savjetima te na odličnom prijedlogu za naslov s kojim sam presretna (kao i sa samom temom). Jedno veliko hvala i Jakovu na pomoći sa svim mojim "Python pitanjima", kao i na svim usputnim savjetima i podršci. Zahvale idu i Maši na lektoriranju prijevoda sažetka na engleski, kao i mojim roditeljima, Renati i Siniši, te svim prijateljima i obitelji, na podršci kako tokom cijelog studija, tako i za vrijeme ove posljednje godine i pisanja diplomskog rada. Hvala!

## Sažetak

Koliko je vjerojatno da je potres koji je upravo nastupio samo prethodni te da nakon njega slijedi još i jači, glavni potres je često postavljeno pitanje netom nakon što se potres dogodi. Odgovor na to pitanje leži u dosadašnjoj seizmičnosti područja od interesa: potrebno je provesti analizu kataloga potresa, što je upravo i tema ovog rada. Nakon što su potresi označeni kao prethodni, glavni ili naknadni, iz analize se izbacuju oni naknadni te se računa koji je postotak potresa neke magnitude  $M$  bio prethodni. Taj postotak ujedno predstavlja i traženu vjerojatnost za promatranu magnitudu. Ispituje se i kako odabir parametara za definiciju prethodnih i naknadnih potresa utječe na vjerojatnosti za različite magnitude te se računaju otežane vjerojatnosti kako bi se dobio što vjerodostojniji rezultat. Takva je analiza, osim za cijelo područje Hrvatske i okolice, provedena zasebno i za šire područje panonske Hrvatske te za područje Dinarida. Dobiveno je da u prosjeku ta vjerojatnost, za ukupno područje i za sve promatrane magnitude, iznosi 10.5%. Pritom najveću vjerojatnost da budu prethodni imaju potresi magnituda između 3.4 i 4.0 s vjerojatnošću oko 12%. Slični se rezultati dobivaju i kada se promatra područje Dinarida, s vjerojatnostima većima za oko 0.5%, dok su za šire područje panonske Hrvatske vjerojatnosti nešto manje (oko 8% za sve magnitude) s maksimumom za klasu magnituda od 4.5 do 5.0 koji iznosi oko 12%.

**Ključne riječi:** katalog potresa, prethodni potres, glavni potres, otežana vjerojatnost

# About foreshock probability in Croatia and nearby areas

## Abstract

A frequently asked question shortly after an earthquake occurs is "What is the probability of that earthquake being a foreshock of a stronger one?". The answer lies in the past seismicity of the area of interest, so it is necessary to analyze the earthquake catalogue. This in particular is the topic of this thesis. After the earthquakes are determined to be foreshocks, mainshocks or aftershocks, the aftershocks are disregarded in future analysis. Then, the percentage of foreshocks among earthquakes of magnitude  $M$  is calculated. This percentage represents the probability we are trying to determine for the earthquake of interest.

This thesis also studies the impact of the choice of parameters which define foreshocks and aftershocks on the probability for different magnitudes, and calculates weighted probabilities to get the most relevant results. In addition to the one for the whole of Croatia and nearby areas, a separate analysis was performed for the wider area of Pannonian Croatia and the Dinarides. Calculations show that, in general, for the whole area and for all the magnitudes, the probability is 10.5%. Earthquakes of magnitudes from 3.4 to 4.0 have the largest probability - approximately 12% - of being foreshocks. Results for the Dinarides are similar with probabilities that are around 0.5% larger, while they are somewhat lower when it comes to Pannonian Croatia - for all the magnitudes, the probabilities are around 8%, while the maximum probability of 12% occurs for the magnitudes from 4.5 to 5.0.

**Keywords:** earthquake catalogue, foreshock, mainshock, weighted probability

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Teorijska pozadina</i> . . . . .	1
1.2. <i>Pregled dosadašnjih istraživanja</i> . . . . .	2
1.3. <i>Motivacija za rad</i> . . . . .	3
<b>2. Podaci i metoda</b>	<b>5</b>
<b>3. Rezultati</b>	<b>12</b>
3.1. <i>Područje Hrvatske i okolice</i> . . . . .	12
3.2. <i>Šire područje panonske Hrvatske</i> . . . . .	15
3.3. <i>Područje Dinarida</i> . . . . .	19
<b>4. Diskusija</b>	<b>23</b>
<b>5. Zaključak</b>	<b>27</b>
<b>Literatura</b>	<b>29</b>

# 1. Uvod

## 1.1. Teorijska pozadina

Potresi su kaotične pojave koje se (još?) ne može predvidjeti. U pozadini te, na prvu, jednostavne izjave stoje godine pokušaja i promašaja u pronalasku odgovora na vječito pitanje "Kada će se dogoditi idući veliki potres na određenom području?".

Zasad rješenje nije pronađeno, možda nikada neće niti biti, ali svakako je korisno izučavati neke pravilnosti koje se javljaju u njihovom nastupu. Postoji više načina analize potresa, a oni se međusobno često razlikuju u početnim pretpostavkama. Na primjer, jedan od pristupa je da se kreće od pretpostavke da se radi o međusobno nezavisnim rijetkim događajima gdje pojava jednog potresa ne utječe na pojavu drugoga, odnosno da slijede Poissonovu razdiobu. Na ovaj se način može odrediti vjerojatnost nastupa određenog broja potresa unutar zatvorenog vremenskog ili prostornog intervala uz poznatu učestalost nastupa. Također, uz sličnu je pretpostavku o nezavisnim događajima izvedena i Gutenberg-Richterova relacija koja opisuje činjenicu da potresi manje magnitude nastupaju češće od onih veće magnitude. Ta se ovisnost može opisati sljedećom jednadžbom:

$$\log(N) = a - b M \quad (1.1.)$$

gdje je  $N$  broj potresa magnitude  $M$  ili veće, a  $a$  i  $b$  su koeficijenti koji određuju odsječak na  $y$  – osi i nagib pravca. Grafički, ta ovisnost izgleda kao što je prikazano na slici 1.1.

Opće je poznato, pogotovo ljudima koji su iz prve ruke iskusili jak potres, da potresi rijetko dolaze sami. Nakon jakog potresa se iščekuje idući "udar", savjetuje se da se ne boravi na prostorima gdje postoji opasnost od pada predmeta ili u zgradama i objektima kojima prijeti opasnost od urušavanja. Kako vrijeme nakon tog prvog jakog potresa prolazi, tako se i nastala panika pomalo smiruje, ali ipak ostaje prisutna prvih nekoliko dana. Time se dolazi do ideje za još jedan pristup analizi - naknadni potresi nisu nezavisni događaji već se može govoriti o povezanim događajima koji skupa čine jednu potresnu seriju.

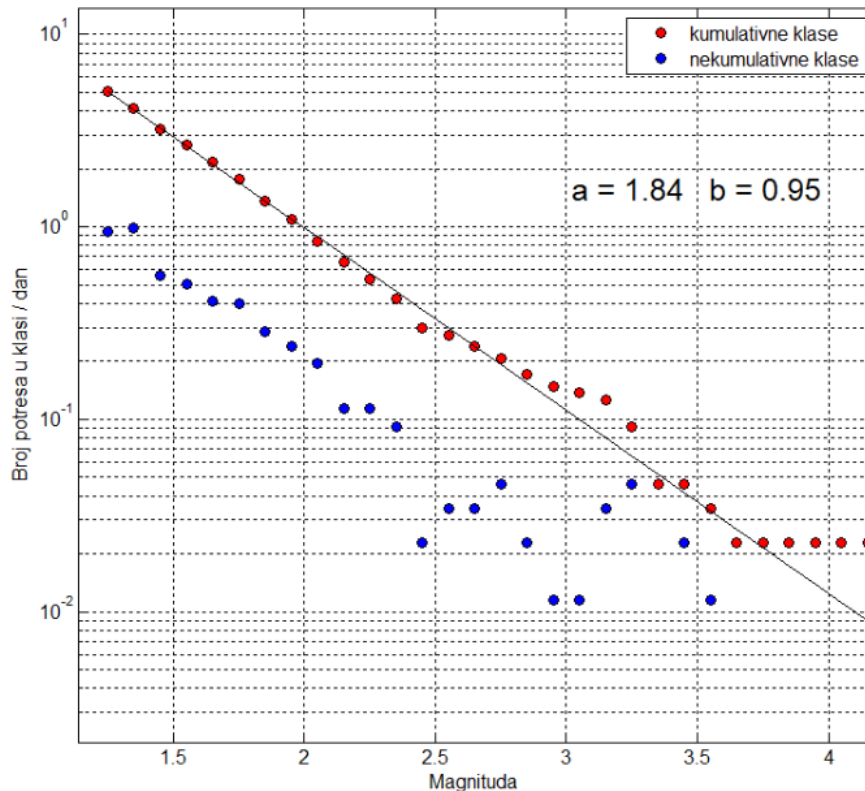
Modificirani Omorijev zakon (Omori, 1894a, Omori, 1894b; Utsu, 1957) je poznati zaključak proizašao iz ovakve perspektive izučavanja potresa: broj naknadnih potresa nakon glavnog potresa je obrnuto proporcionalan proteklom vremenu od glavnog potresa. Jednadžba koja opisuje taj zakon glasi:

$$n(t) = \frac{k}{(c + t)^p} \quad (1.2.)$$

gdje je  $n(t)$  broj potresa nakon proteklog vremena  $t$ , a  $k$ ,  $c$  i  $p$  su konstante. Njegov grafički prikaz, na primjeru zagrebačke serije potresa iz 2020. godine, je dan na slici 1.2.

U ovakvom pristupu, ne samo da potresi nisu nezavisni događaji nego se javlja i potreba za pronalaskom optimalnog načina za određivanje koji su potresi povezani u smislu da se mogu smatrati jednom potresnom serijom. Tu u igru, i kao važan faktor, dolazi iskustvo samih seizmologa. Nakon nastupa potresa, osim što se iščekuje kada će doći idući, javlja se i pitanje hoće li nastupiti još i jači potres. Dosadašnje nam iskustvo





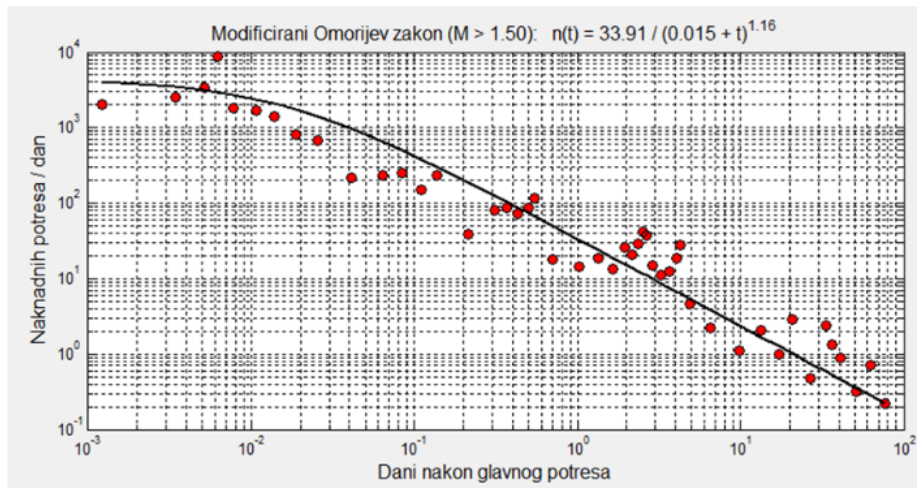
Slika 1.1. Gutenberg-Richterova relacija za zagrebačku seriju potresa (preuzeto iz Dasović et al., 2020).

govori da to nije nemoguće, a koliko je vjerojatno da će se upravo tako razviti događaji možemo znati jedino ako se provede statistička analiza dosadašnje seizmičke aktivnosti. Da bi se analizi prethodnih i glavnih potresa moglo pristupiti, najprije je potrebno definirati što uopće neki potres čini prethodnim ili glavnim, a što naknadnim.

Sama definicija koju ćemo ovdje koristiti je dosta jednostavna: glavni potres je onaj najjači u jednoj seriji, a prethodni potresi su svi oni koji su nastupili prije glavnog u određenom vremenu i radijusu od glavnog potresa. Naknadni potresi su potresi koji su nastupili nakon najjačeg, također unutar prethodno definiranog prostorno-vremenskog prozora (npr. Gardner i Knopoff, 1974; Herak, Herak i Tomljenović, 2009). Postoje i drugačiji pristupi, npr. pomoću analize prostorno-vremenskih grozdova (*clustera*, npr. Raesenberg, 1985; Tibi, Blanco i Fatehi, 2011).

## 1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Analiza prethodnih i glavnih potresa u smislu da se izračunala vjerojatnost da je potres koji je upravo nastupio samo prethodni, je provedena, među ostalim zemljama i područjima, u južnoj Kaliforniji i Italiji još u 20. stoljeću. Ni ne čudi da su za te dijelove svijeta provedene detaljnije analize tako rano (rano u usporedbi s tim da su se potresi počeli zapisivati instrumentalno tek koncem 19. stoljeća) s obzirom na to da se radi o izrazito seizmički aktivnim, seizmološkim stanicama dobro pokrivenim, a i gusto naseljenim dijelovima svijeta.



Slika 1.2. Modificirani Omorijev zakon za zagrebačku seriju potresa (preuzeto iz Dasić et al., 2020).

Za područje južne Kalifornije su najznačajniji radovi seizmologinje Lucy Jones koja je takvu analizu provela više puta i predstavila svoje rezultate u nekoliko članaka, kako sama tako i u suradnji s kolegama (Jones, 1984; Jones, 1985; Agnew i Jones, 1991).

U svojem radu iz 1985., računala je vjerojatnost da će u krugu od  $x$  kilometara i  $t$  dana od potresa koji je upravo nastupio nastupiti još i jači, tj. glavni potres. Pritom je također tražila optimalne vrijednosti za parametre  $x$  i  $t$  kako bi se maksimizirala korist te analize. Rezultat koji je dobila je idući: u krugu od 10 km i 5 dana nakon nastupa potresa magnitude veće ili jednake 3.0, vjerojatnost da će nastupiti jači potres približno iznosi  $(6 \pm 0.5)\%$ . Ovi se rezultati koriste kao službeni u USGS-u (United States Geological Survey) za procjenu hazarda nakon nastupa potresa magnitude veće ili jednake 3.0 (Jones, 1985).

U Italiji su sličnu analizu proveli R. Console, M. Murru i B. Alessandrini 1993. godine. Prije početka računa vjerojatnosti, istražili su u kojoj se talijanskoj regiji uopće javlja fenomen prethodnih potresa i za rezultat su dobili da se radi o središnjoj Italiji dok u sjevernoj prevladavaju potresi bez prethodnika, odnosno tzv. izolirani potresi. Potom su, koristeći podatke o nastupu potresa za to područje, zaključili da nakon nastupa potresa magnitude veće ili jednake 3.0, nakon razdoblja seizmičkog mirovanja od 80 dana u krugu od 140 km od tog potresa, vjerojatnost da će u idućih 48 sati i u krugu od 30 km nastupiti potres magnitude veće ili jednake 4.0 iznosi približno 10% (Console, Murru i Alessandrini, 1993).

### 1.3. Motivacija za rad

Spoznaja o tome koliko je vjerojatno da nakon potresa koji se upravo dogodio slijedi još i jači od izuzetne je važnosti kako široj struci tako i široj javnosti. Javnosti utoliko što ju se familijarizira s fenomenom potresa, približava joj se seizmologija te povećava znanje i razumijevanje čime se postiže to da se ne širi tolika panika kolika bi se širila da je suočena s "nepoznatim neprijateljem". Na ovaj način bi javnost bila pripremljena jer se zna kakvi se sve scenariji mogu dogoditi i koliko su oni vjerojatni. Što mirnije opasna situacija, poput elementarnih nepogoda, prođe, to je manje i žrtava i štete. Za širu struku je ovo također vrlo korisna informacija jer se sukladno njoj mogu

organizirati različiti načini pomoći i pripreme za moguće nadolazeće probleme, istovremeno minimizirajući negativne posljedice bilo kakvih poduzetih akcija. Na primjer, s informacijama koje dobiju od seizmologa o vjerojatnosti jačeg potresa od onoga koji se upravo dogodio, ekonomski i građevinski stručnjaci mogu procijeniti je li isplativo gasiti neke pogone i, ako da, na koliko dugo.

Analiziranje seizmičke aktivnosti nekog područja, otkad je instrumentalnih mjerenja, je uobičajena praksa među zemljama svijeta pa tako i u Hrvatskoj. Što se tiče detaljnije analize prethodnih potresa i vjerojatnosti njihovog nastupa, toga na našem području nedostaje, dok je u Italiji i južnoj Kaliforniji ona provedena još u 20. stoljeću, kao što je već opisano u dijelu *1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja*. Zasad postoje doticanja te teme u nekim našim radovima: na primjer, u radu koji su objavili Herak, Herak i Orlić (2021), se preispituje bi li se serija potresa koja se dogodila u siječnju 2020. godine nedaleko od epicentra glavnog zagrebačkog potresa (koji se dogodio 22. ožujka 2020.) možda trebala smatrati njegovim prethodnim potresima. Ima argumenata i za i protiv, ovisno gleda li se samo vremenska i prostorna udaljenost tih potresa ili se uzimaju u obzir i njihovi žarišni mehanizmi kao jedan od faktora. Ipak, do sada, nije postojao ni jedan rad za naše područje koji bi temu prethodnih potresa sustavno razradio. Ovaj rad valja smatrati preliminarnom analizom u kojoj će se predložiti pristup problemu, te ukazati na moguća buduća poboljšanja toga postupka.

## 2. Podaci i metoda

Za analizu je korišten Hrvatski katalog potresa (opisan u Herak, Herak i Markušić, 1996, te dopunjen novim podacima) s potresima zabilježenim u periodu od 1504. pa do kraja 2020. godine. Tako su u analizu ušli, uz instrumentalno zabilježene potrese, i oni povijesni, zapisani u arhivima. Potpunost takvoga kataloga nužno je ovisna i o vremenu i o prostoru - dok se za najranije razdoblje ona teško može procijeniti (često i za magnitude veće od 5.0 ili 6.0), u recentnim je godinama prag potpunosti kataloga i manji od magnitude 2.0. Na sreću, ta činjenica ovdje ne igra veliku ulogu, jer vjerojatnost da u katalogu nedostaje potres magnitude  $M$  ne ovisi o tome je li taj potres prethodni ili glavni, pa se može uzeti da je omjer glavnih i prethodnih potresa u katalogu približno konstantan. Ipak, valjat će u daljnjem radu i to pitanje pažljivo razmotriti jer prostorno-vremenska heterogenost potpunosti kataloga može utjecati na ishod klasifikacije potresa na prethodne, glavne i naknadne potrese. Za analizu podataka se koristio programski jezik *Python*.

Tema ovog rada je analiza prethodnih i glavnih potresa tako da je prvi korak bio podijeliti katalog na prethodne, glavne i naknadne potrese. To je provedeno tako da su potresi najprije sortirani po magnitudi od veće prema manjoj, umjesto po vremenu kako katalog u izvornom obliku inače bude. Naravno, u katalogu ima više potresa iste magnitude pa se, s ciljem da se postigne to da analiza bude što neutralnija i vjerodostojnija, na dvanaestu decimalu magnitude dodao nasumičan broj koristeći se funkcijom *random* iz paketa *NumPy*. Time se izbjegao preferirani poredak potresa iste magnitude. Ovakvim sortiranjem kataloga se osiguralo da će prvi potres sigurno biti glavni (jer ima najveću magnitudu) pa se onda redom svaki sljedeći uspoređuje s njime.

Usporedba se vrši tako da se gleda koliko je idući potres prostorno i vremenski udaljen od onog prvog, tj. glavnog. Ako promatrani potres zadovoljava nametnute uvjete za definiciju naknadnih ili prethodnih potresa, označava ga se takvim. Konkretno, glavne se potrese označava jedinicama (1), prethodne dvojkama (2), a naknadne nulama (0) pri čemu su prije početka analize svi potresi bili označeni jedinicama. Za prvi se potres takva usporedba provodi za svaki idući potres u katalogu, a nakon što prva iteracija prođe, sljedeći potres za koji se traže prethodni i naknadni potresi je prvi potres čija je oznaka i dalje 1 jer je on sada prvi i najjači, odnosno glavni, bez dodijeljenih drugih potresa s kojima bi činio potresnu seriju. Na taj se način prođe cijeli katalog, dok se svakom potresu ne odredi radi li se glavnim, prethodnim ili naknadnim potresu.

Je li neki potres ( $j$ ) u odnosu na trenutno analizirani potres ( $i$ ) prethodni ili naknadni (ili nijedno) se određuje na sljedeći način: računa se epicentralna udaljenost prvog (glavnog) i drugog (potencijalno prethodnog ili naknadnog) potresa, u kilometrima, prema formuli:

$$d = \arccos(\sin \phi_i \sin \phi_j + \cos \phi_i \cos \phi_j \cos(\lambda_j - \lambda_i)) \frac{2\pi R_Z}{360^\circ} \quad (2.1.)$$

gdje  $\phi_i$  i  $\lambda_i$  označavaju koordinate glavnog potresa, a  $\phi_j$  i  $\lambda_j$  koordinate potencijalno prethodnog ili naknadnog potresa.  $R_Z$  označava radijus Zemlje koji iznosi 6371 km. Dobivena se vrijednost za epicentralnu udaljenost uspoređuje s *a priori* definiranom udaljenosti za naknadne potrese  $d_{aft}$ :

$$d_{aft} = e^{\frac{\ln r_7 - \ln r_3}{4}(M-3) + \ln r_3} \quad (2.2.)$$

gdje  $r_7$  označava maksimalnu dozvoljenu udaljenost naknadnih potresa za potrese magnitude 7.0,  $r_3$  maksimalnu dozvoljenu udaljenost naknadnih potresa za potrese magnitude 3.0, a  $M$  magnitudu glavnog potresa. Pretpostavljeno je da vrijedi:

$$d_{for} = d_{aft}, \quad (2.3.)$$

tj. dozvoljena udaljenost prethodnih potresa je jednaka dozvoljenoj udaljenosti naknadnih potresa.

Slično vrijedi i za vrijeme - računa se razlika nastupnih vremena glavnog i potencijalno prethodnog, odnosno naknadnog potresa  $dt$  te se potom ta vrijednost uspoređuje s onom unaprijed određenom,  $t_{aft}$ :

$$t_{aft} = e^{\frac{\ln t_7 - \ln t_3}{4}(M-3) + \ln t_3} \quad (2.4.)$$

pri čemu  $t_7$  označava maksimalni dozvoljen vremenski razmak naknadnih potresa za potrese magnitude 7.0, a  $t_3$  maksimalni dozvoljen vremenski razmak naknadnih potresa za potrese magnitude 3.0.

Dozvoljeni vremenski razmak za prethodne potrese definira faktor  $facfor$  kao omjer:

$$facfor = \frac{t_{aft}}{t_{for}}, \quad (2.5.)$$

pa su prethodni potresi oni koji su unutar kruga polumjera  $d_{aft}$ , ako su se dogodili najviše

$$t_{for} = \frac{t_{aft}}{facfor} \quad (2.6.)$$

dana prije glavnog potresa.

Za male se magnitude može dogoditi da pridijeljeni iznosi  $d_{aft}$  i  $d_{for}$ , odnosno  $t_{aft}$  ili  $t_{for}$  budu nerealno mali, pa se zato definiraju vrijednosti  $r_{min}$  i  $t_{min}$  kao polovine varijabli  $r_3$  i  $t_3$ :

$$r_{min} = \frac{r_3}{2}, \quad t_{min} = \frac{t_3}{2}. \quad (2.7.)$$

Te veličine predstavljaju najmanje dozvoljene iznose za prostorne i vremenske udaljenosti prethodnih i naknadnih potresa od onog glavnog, neovisno o magnitudi glavnog potresa. Dobivena vrijednost za  $d_{aft}$  i  $d_{for}$ , odnosno za  $t_{aft}$  i  $t_{for}$  se uspoređuje s vrijednostima  $r_{min}$ , odnosno  $t_{min}$  i uzima se ona veća.

Uz izračunate granične vrijednosti, vrši se usporedba s ranije dobivenom epicentralnom udaljenosti  $d$  i razlikom nastupnih vremena  $dt$  kako bi se promatranom potresu dodijelila oznaka prethodnog ili naknadnog potresa ili kako bi se zaključilo da se radi o nevezanom događaju. Usporedba se provodi na sljedeći način:

- Ako je epicentralna udaljenost  $d$  manja ili jednaka izračunatoj vrijednosti za naknadne potrese  $d_{aft}$  i ako je apsolutni iznos razlike nastupnih vremena  $|dt|$  manji ili jednak izračunatoj vrijednosti vremenske razlike potresa  $t_{aft}$ , te se potres dogodio nakon glavnog, tada je promatrani potres naknadni i dodjeljuje mu se oznaka 0.
- Ako je epicentralna udaljenost  $d$  manja ili jednaka izračunatoj vrijednosti za prethodne potrese  $d_{for}$  i ako je apsolutni iznos razlike nastupnih vremena  $|dt|$  manji ili jednak izračunatoj vrijednosti vremenske razlike potresa  $t_{for}$ , te ako se potres dogodio prije glavnoga, tada je promatrani potres prethodni i dodjeljuje mu se oznaka 2.

Dakle, promatrani potres mora ulaziti u točno definirani prostorno-vremenski prozor kako bi bio smatran naknadnim, odnosno prethodnim potresom.

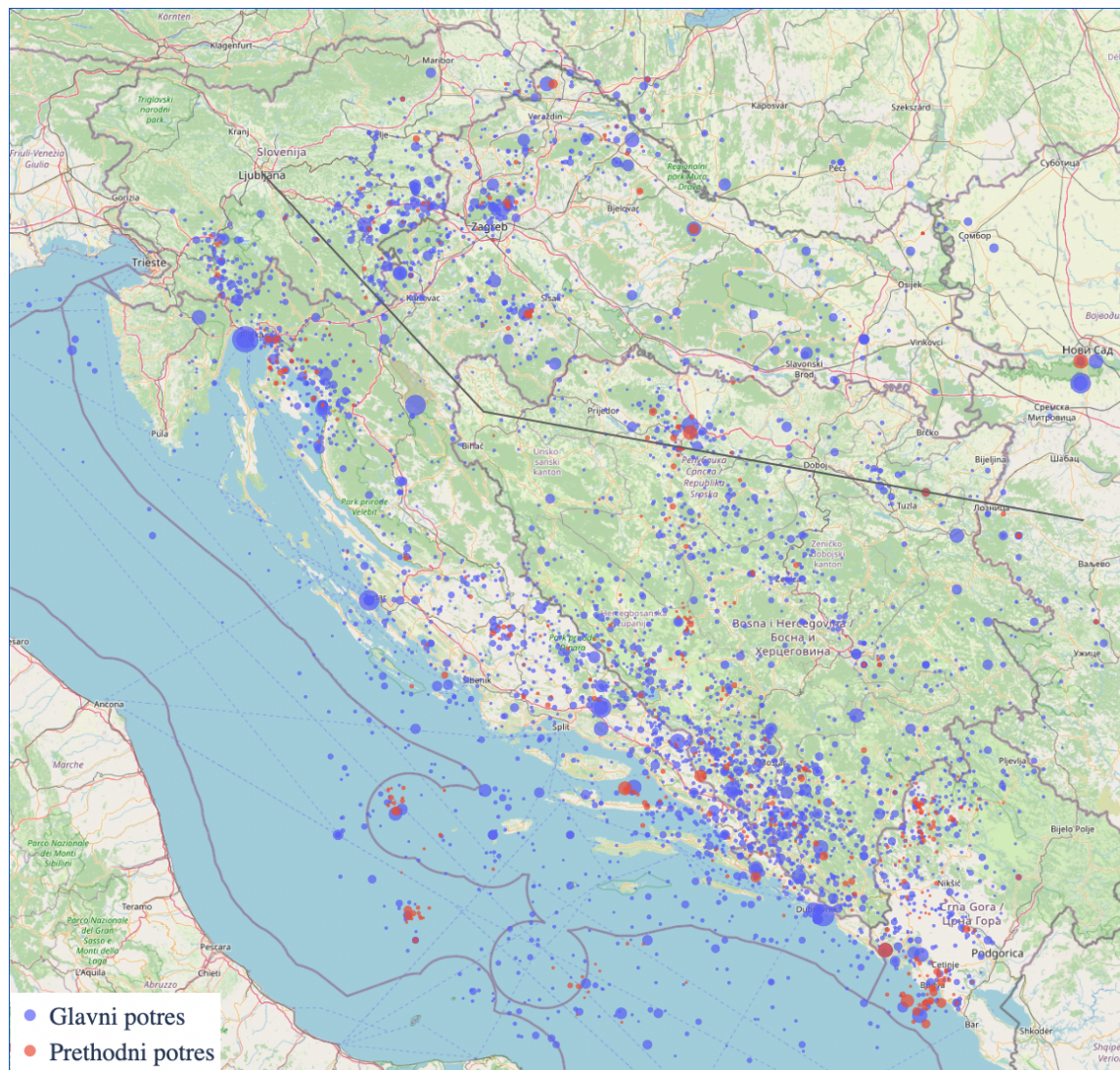
Postoji praksa da prethodni i naknadni potresi moraju zadovoljavati i uvjet za magnitudo. To znači da razlika magnituda glavnog i idućeg (ili idućih) najjačeg potresa mora biti veća ili jednaka nekom broju  $dM$ . U suprotnom, ako je razlika magnituda premala, serija potresa se naziva rojem, a ne nizom potresa s prethodnim i naknadnim potresima. U ovoj se analizi takav uvjet na magnitudo ne stavlja, već je jedino važno da postoji barem nekakva razlika među magnitudama što je osigurano pridjeljivanjem nasumičnih vrijednosti magnitudama na samom početku analize. Taj postupak pridjeljivanja nasumičnih vrijednosti se, u ovom radu, skraćeno naziva *randomizacija*.

Važno je i imati na umu da se potresi istih magnituda u katalogu *randomiziraju* pri svakom pokretanju programa, pa pri uzastopnim pokretanjima programa jedan potres jednom može biti jači od drugoga, a drugi puta slabiji - to je ujedno i razlog zašto podjela na prethodne, glavne i naknadne potrese nije uvijek posve jednaka. Svakim novim pokretanjem se i poredak potresa istih magnituda malo promijeni pa se tako ne smatra uvijek isti potres neke magnitudo najjačim što utječe i na konačni rezultat, ali ne značajno, jer je takvih slučajeva malo. *Randomizacijom* je eliminiran preferirani poredak potresa u kojem bi neki potres uvijek bio smatran glavnim ili uvijek smatran prethodnim, odnosno naknadnim. Hoće li se u takvom rijetkom slučaju roja potresa neki potres smatrati glavnim ili prethodnim, tj. naknadnim ovisi o tome je li u tom pokretanju programa nasumično uzet kao najjači ili ne.

Jednom kada su svi potresi u katalogu označeni kao prethodni, glavni ili naknadni, svi se naknadni potresi zanemare pošto je tema ovog rada analiza prethodnih i glavnih potresa. Kako izgleda kategoriziran i očišćen katalog potresa se može vidjeti na slici 2.1 na kojoj je prikazana karta svih, na opisani način određenih, glavnih (plava boja) i prethodnih potresa (crvena boja) u razdoblju od 1504. do kraja 2020. godine. Iz te se karte vidi da u našoj regiji nema područja gdje izostaje pojava prethodnih potresa kao što je to bio slučaj za sjevernu Italiju (Console, Murru i Alessandrini, 1993). Zaključuje se da analizu vjerojatnosti prethodnih potresa ima smisla provoditi za ukupno područje pokriveno Hrvatskim katalogom potresa.

Područje Hrvatske i okolice ugrubo se može podijeliti na dvije cjeline koje se razlikuju po svojim seizmotektonskim svojstvima: šire područje panonske Hrvatske i područje Dinarida. Prva od njih uključuje potrese u Panonskoj nizini, prijelaznoj zoni Panonske nizine prema Alpama, te rubne dijelove Unutrašnjih Dinarida prema Panonskoj nizini. Druga cjelina obuhvaća potrese u središnjem dijelu Vanjskih Dinarida, potrese u sjeverozapadnim Dinaridima, te one potrese koji se događaju unutar Jadranske mikroploče. Utoliko ima smisla analizu provesti, osim na ukupnom području, i na tim dvjema regijama zasebno kako bi se vidjelo koliko koji dio utječe na opću analizu i razlikuju li se i koliko dobivene vjerojatnosti za različita područja. Ta podjela na regije je napravljena ručno, a granica je na karti povučena tamnosivom crtom. Karte pojedinih regija s pripadnim glavnim i prethodnim potresima su prikazane na slikama 2.2 i 2.3.

Ulazni parametri u ovoj analizi su upravo oni koji služe za definiciju prethodnih i naknadnih potresa, tj.  $r_3$ ,  $r_7$ ,  $t_3$ ,  $t_7$  i *facfor*. Kako se mijenjaju parametri koji definiraju prethodne i naknadne potrese, mijenja se i broj potresa pojedinog tipa (koliko su se puta dogodili kroz povijest) jer o tim parametrima ovisi hoće li neki potres ući ili taman biti izvan prostorno-vremenskog prozora za prethodne, odnosno naknadne



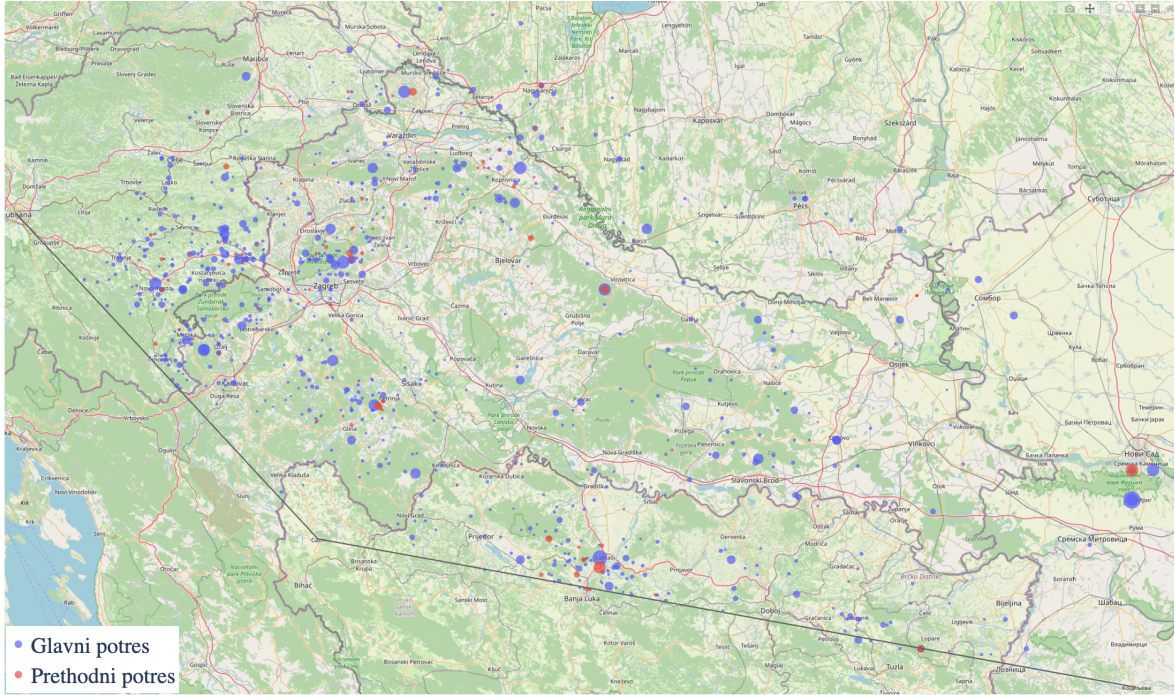
Slika 2.1. Prethodni i naknadni potresi na području Hrvatske i okolice. Karta u podlozi preuzeta je s *OpenStreetMap*.

potrese. Upravo je zato važno razmotriti utjecaj pojedinih parametara na rezultat. Standardni slučaj uključuje one vrijednosti parametara za koje se na temelju dosadašnjeg iskustva smatra da su optimalne. Odabir parametara koji će definirati prostorno-vremenske prozore nema čvrstu teorijsku podlogu, pa donekle ovisi o iskustvu te dobro dokumentiranim slučajevima pojedinih potresnih nizova. Primjer parametara koje su koristili Herak, Herak i Tomljenović (2009) pri analizi potresa u sjeverozapadnoj Hrvatskoj je:

$$r_3 = 10 \text{ km}, r_7 = 75 \text{ km}, t_3 = 15 \text{ dana}, t_7 = 730 \text{ dana},$$

$$r_{min} = 10 \text{ km}, t_{min} = 10 \text{ dana}, \text{ factor} = 5. \quad (2.8.)$$

U ovom radu su ovi parametri modificirani u skladu sa spoznajama o svojstvima potresnih serija u posljednjih 20-ak godina, posebice izvrsno dokumentiranih serija potresa kod Zagreba i Petrinje 2020. godine. Ti su nam potresi pokazali da su do tada uzimani prostorni parametri nešto preveliki, a oni vremenski premali. Sukladno tome su



Slika 2.2. Prethodni i naknadni potresi na području panonske Hrvatske. Karta u podlozi preuzeta je s *OpenStreetMap*.

se izmijenili i parametri za standardni slučaj, pa u ovom radu, kao referentni odabir, koristim:

$$r_3 = 10 \text{ km}, r_7 = 50 \text{ km}, t_3 = 40 \text{ dana}, t_7 = 1,400 \text{ dana}, facfor = 5. \quad (2.9.)$$

Na slikama 2.1, 2.2 i 2.3 su prikazane karte za standardni odabir parametara. Kako sam varirala parametre i koji su se sve slučajevi promatrali prikazano je u tablici 2.1.

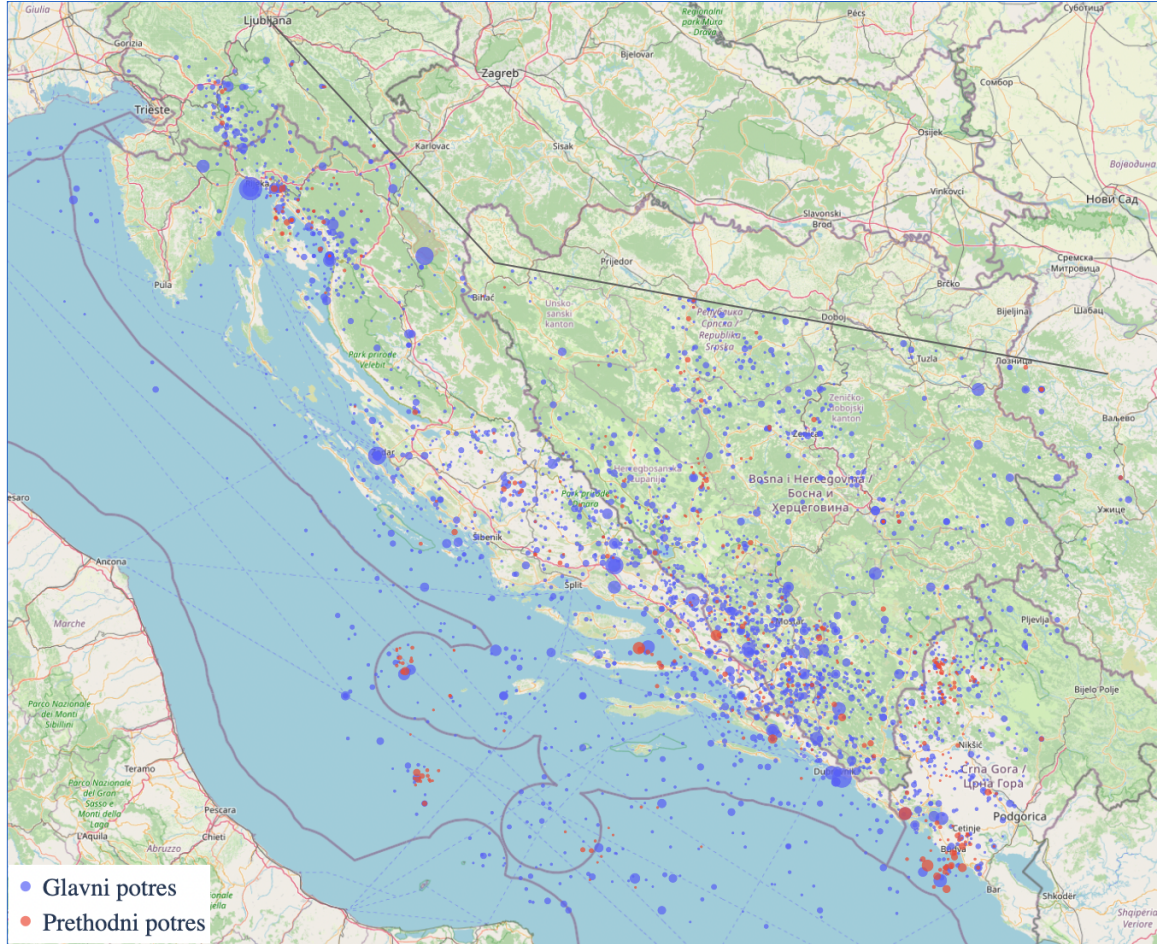
Tablica 2.1. Razmatrani slučajevi i pripadni ulazni parametri.

Slučajevi	$r_3$ [km]	$r_7$ [km]	$t_3$ [dan]	$t_7$ [dan]	$facfor$
Standardni	10	50	40	1,400	5
A	5	35	25	1,000	5
B	15	65	55	1,800	5
C	5	35	55	1,800	5
D	15	65	25	1,000	5
E	10	50	40	1,400	3
F	10	50	40	1,400	10
G	5	35	25	1,000	3
H	15	65	55	1,800	10

Nakon što je katalog podijeljen na glavne i prethodne potrese (i naknadne, ali oni u analizu ne ulaze pa se dalje više neće ni spominjati), preostaje još takav katalog i analizirati.

Zanima nas kolika je vjerojatnost da je potres koji se upravo dogodio ustvari prethodni





Slika 2.3. Prehodni i naknadni potresi na području Dinarida. Karta u podlozi preuzeta je s *OpenStreetMap*.

potres i da će nakon njega nastupiti, u određenom prostorno-vremenskom prozoru, još i jači. Tu nam informaciju može dati seizmička povijest područja koje proučavamo. Prvo se definira početna i najmanja magnituda za koju nas ta informacija zanima. U ovoj je analizi odabrano da ta magnituda iznosi 3.4 jer se potresi slabijih magnituda uglavnom ni ne osjete, a i ako se osjete, ne izazivaju veliku pozornost. Oko te se promatrane magnitude zatim uzima interval od  $\pm 0.2$  te se prebrojava koliko je potresa, unutar tog intervala s uključenim graničnim vrijednostima, koji su označeni kao prehodni i koji je ukupni broj glavnih i prehodnih potresa. Zatim se ta dva broja podijele kako bi se dobio postotak potresa promatrane magnitude koji je bio prehodni. Taj postotak predstavlja vjerojatnost da se, ako nastupi potres promatrane magnitude (u prvom slučaju potres magnitude  $3.4 \pm 0.2$ ), radi o prehodnom potresu te da slijedi još i jači:

$$P_{for}(M_i) = \frac{N_{for}(M_i)}{N_{tot}(M_i)}, \quad N_{tot}(M_i) = N_{for}(M_i) + N_{main}(M_i) \quad (2.10.)$$

gdje  $M_i$  označava potres promatrane magnitude,  $P_{for}$  vjerojatnost da je promatrani potres prehodni,  $N_{for}$  broj potresa te magnitude ( $\pm 0.2$ ) koji su u katalogu označeni kao prehodni, a  $N_{tot}$  ukupan broj potresa te magnitude ( $\pm 0.2$ ) koji su označeni bilo kao prehodni, bilo kao glavni.

Pritom treba imati na umu da se dobivena vjerojatnost odnosi na interval magnituda (u ovom slučaju od 3.2 do 3.6), a ne samo na jednu magnitudu, odnosno na magnitudu

3.4. Interval magnituda se uzima jer su magnituda realni brojevi (ovdje zaokruženi na prvu decimalu) pa magnituda npr. 3.4 uključuje sve magnituda između 3.35 i 3.44, ali i zbog toga što je potresa u Hrvatskom katalogu relativno malo pa je time i malo onih kojima su magnituda jednake na drugu decimalu. Također, ovakav se pristup analizi može opravdati i činjenicom da prve procjene magnituda nakon nastupa potresa nisu uvijek najpreciznije te da se često taj broj još nekoliko puta promijeni kako se objedinjuju podaci sa sve više stanica. Samim time, ne može se sa sigurnošću reći je li potres koji je upravo nastupio imao magnituda 3.4 ili možda 3.6.

Vjerojatnost se, na opisani način, potom računa za svaku magnituda za 0.1 veću od one prethodne i tako sve do maksimalne zabilježene magnituda u katalogu. Drugim riječima, račun vjerojatnosti se provodi za svaki član niza 3.4, 3.5, 3.6, ..., 7.2. Nakon provedenog računa, rezultat se za svaki od slučajeva prikazuje grafički.

Na kraju se još računa i prosječna vjerojatnost za niz magnituda uz ponderirane sume gdje je težinski faktor ukupan broj potresa za pojedinu klasu magnituda. Prosječna vjerojatnost se računa za sve magnituda, odnosno za magnituda od 3.4 do 7.2, te za klase magnituda od 3.4 do 4.0, od 4.0 do 4.5, od 4.5 do 5.0 i konačno za klasu magnituda većih ili jednakih 5.0. Formula korištena za račun prosječne vjerojatnosti je:

$$\bar{P} = \frac{\sum_i (P(M_i) N_{tot}(M_i))}{\sum_i (N_{tot}(M_i))} \quad (2.11.)$$

gdje  $P(M_i)$  predstavlja vjerojatnost da je potres magnituda  $M_i$  prethodni, a  $N_{tot}$  ukupan broj prethodnih i glavnih potresa magnituda  $M_i$ .

### 3. Rezultati

U ovome se radu izračunalo kolika je vjerojatnost da je, kada se dogodi potres magnitude  $M$ , riječ samo o prethodnom potresu i da nakon njega slijedi još jači, tj. glavni potres. Vjerojatnosti su dobivene analizom koliko se to puta dogodilo kroz povijest za pojedine magnitude (tj. za pojedine intervale magnituda kako je detaljnije objašnjeno u poglavlju 2. *Podaci i metoda*), koristeći se Hrvatskim katalogom potresa. Analiza je provedena za magnitude veće ili jednake 3.4 za ukupno tri područja: Hrvatska i okolica, šire područje panonske Hrvatske i područje Dinarida.

Rezultati su prikazani grafički za svaku od promatranih cjelina i za svaki od slučajeva. U gornjem lijevom dijelu svakog grafa su navedeni iznosi parametara koji definiraju prostorno-vremenske prozore za diskriminaciju prethodnih, glavnih i naknadnih potresa. Veličina kružića predstavlja ukupan broj prethodnih i glavnih potresa za svaki interval magnituda koji definira pripadne vjerojatnosti. O kojem se broju podataka radi je navedeno u gornjem desnom kutu. Boje kružića variraju od plave prema crvenoj kako i vjerojatnosti variraju od manjih do većih. Dakle, magnitude čije vjerojatnosti imaju veću težinu su prikazane većim kružićima, a one s većom vjerojatnosti da se radi o prethodnom potresu su prikazane nijansama u crvenom spektru boja.

Također, izračunate su i prosječne vjerojatnosti za sve magnitude te za klase magnituda od 3.4 do 4.0, od 4.0 do 4.5, od 4.5 do 5.0 i za magnitude veće ili jednake 5.0 (sve  $\pm 0.2$ ). Ti su rezultati prikazani tablično, za svako od područja i za svaki od slučajeva.

#### 3.1. Područje Hrvatske i okolice

Na slici 3.1 su grafički prikazani rezultati, po slučajevima, za sve potrese iz kataloga.

U standardnom slučaju, potresi magnitude od 5.9 do 6.1 imaju najveće vjerojatnosti da budu prethodni s vjerojatnosti između 15% i 20% pri čemu najveću vjerojatnost ima potres magnitude 5.9 s vjerojatnosti od 20%. Potresi magnituda 3.4 i 3.5 također imaju vjerojatnost oko 15%, ali sa znatno većom težinom: za najveće magnitude je ta vjerojatnost dobivena na malom ukupnom broju potresa (reda veličine 10), dok je za manje magnitude dobivena na ukupno više od 800 zabilježenih potresa. Uočava se i maksimum vjerojatnosti za magnitudu oko 5.1, a najizraženiji je u slučajevima B, D i H kada vjerojatnost također iznosi oko 15%, ali na ukupnom broju slučajeva manjem od 100. Prisutna su i tri lokalna minimuma: za magnitude 4.6, 5.5 (osim u slučajevima A, C i G kada se minimum javlja za magnitudu 5.4) i 6.2. Takva je razdioba vjerojatnosti prisutna u svim razmatranim slučajevima.

U varijacijama na standardni slučaj se jasno vidi da promjene parametara najviše utječu na manje magnitude, dok se vjerojatnosti za magnitude veće od 5.0 i manje ili jednake 6.2 minimalno mijenjaju. Za magnitude veće od 6.2 ta vjerojatnost uvijek iznosi 0 jer takvi slučajevi do sada nikada nisu bili zabilježeni.

Očekivano, smanjenjem vrijednosti ulaznih parametara (slučaj A) se smanjuju i vjerojatnosti, jer su uvjeti za deklariranje prethodnih potresa stroži. U suprotnom se slučaju (slučaj B) vjerojatnosti povećavaju s povećanjem vrijednosti ulaznih parametara, a maksimum vjerojatnosti se javlja za dvije magnitude: za magnitudu 3.5 i za magnitudu 5.9 te iznosi oko 18%.

Usporedbom slučajeva C i D se vidi da povećanje vremenskog prozora uz smanjenje prostornog smanjuje vjerojatnosti, dok povećanje prostornog prozora uz smanjenje vremenskog povećava vjerojatnosti.

Slučajevi E i F prikazuju utjecaj parametra *factor* dok se sve ostale vrijednosti drže kao u standardnom slučaju. Smanjenjem parametra *factor*, vjerojatnosti za skoro sve magnitude rastu (opet - jer se ublažava kriterij za klasifikaciju potresa kao prethodnoga), odnosno, njegovim povećanjem vjerojatnosti za skoro sve magnitude padaju, dok se magnitudama od 5.2 do 5.7 ne mijenja vjerojatnost.

Ako se svim parametrima skupa vrijednosti smanje (stroži uvjeti), vjerojatnosti se smanjuju (slučaj G), a ako im se vrijednosti povećavaju (blaži uvjeti), povećavaju se i vjerojatnosti (slučaj H).

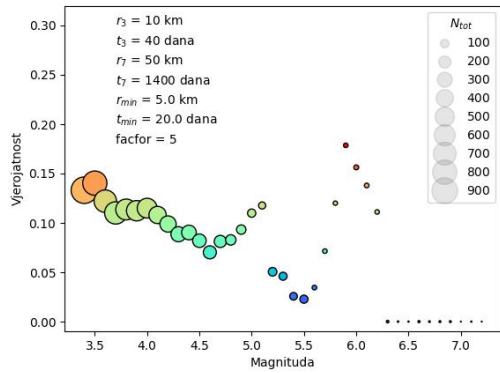
U tablici 3.1 su navedene otežane prosječne vjerojatnosti kako za sve magnitude, tako i za pojedine klase magnituda, za svaki od promatranih slučajeva.

Primjećuje se da je u svim slučajevima maksimalna prosječna vjerojatnost ona za klasu magnituda od 3.4 do 4.0, odnosno za najmanje magnitude za koje se analiza provodila. Taj se rezultat podudara s onim dobivenim u grafičkom prikazu, na slici 3.1. U svim slučajevima, prosječna vjerojatnost opada kako klase magnituda rastu, osim u slučaju D kada je vjerojatnost za klasu magnituda od 4.0 do 4.5 praktički jednaka onoj za klasu magnituda od 4.5 do 5.0.

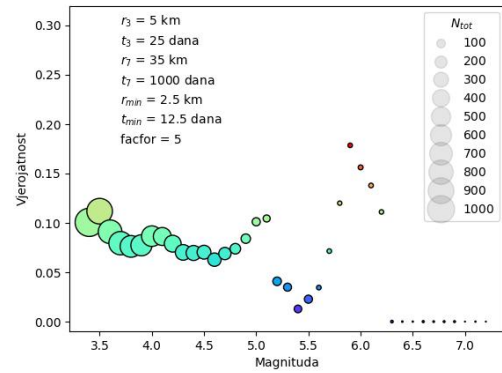
U slučaju B, prosječna vjerojatnost je najviša s iznosom od 15.30%. Slijede ga slučaj E i slučaj H pri čemu su, u slučaju H i u slučaju D, vjerojatnosti veće nego u slučaju E za magnitude od 4.5 do 5.0 i za magnitude veće od 5.0. Nakon njih, po iznosu vjerojatnosti, slijedi i standardni slučaj. U slučaju B su svi parametri imali veće vrijednosti od onih standardnih, osim *factor* faktora koji je ostao jednak kao u standardnom slučaju. U slučaju E su sve vrijednosti jednake standardnim osim faktora *factor* koji je manji, a u slučaju H su vrijednosti svih parametara veće naspram onih standardnih. U slučaju D su prostorni parametri veći, a vremenski manji nego u standardnom slučaju. Najmanje se prosječne vjerojatnosti dobiju za slučaj A kada su svi parametri manjeg iznosa nego u standardnom slučaju, osim faktora *factor* koji je ostao jednak.

Tablica 3.1. Prosječne vjerojatnosti da potres bude prethodni, za klase magnituda, za cijelo područje Hrvatske i okolice.

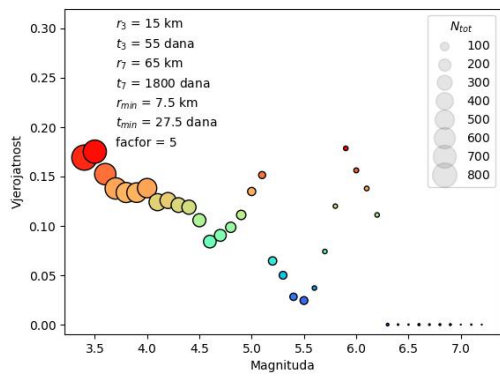
Slučajevi	$\bar{P}_{all}[\%]$	$\bar{P}_{3.4-4.0}[\%]$	$\bar{P}_{4.0-4.5}[\%]$	$\bar{P}_{4.5-5.0}[\%]$	$\bar{P}_{>5.0}[\%]$
Standardni	10.83	12.36	10.00	8.34	6.71
A	8.40	9.16	7.87	7.38	6.13
B	13.28	15.30	12.47	9.87	7.52
C	9.54	10.61	8.96	7.73	6.20
D	10.68	11.95	9.58	9.60	7.33
E	12.26	14.26	11.27	8.34	7.32
F	9.38	10.59	8.27	8.09	6.71
G	9.26	10.20	8.80	7.63	6.13
H	11.15	12.5	10.18	9.87	7.52
Srednjaci	10.53	11.88	9.71	8.54	6.84



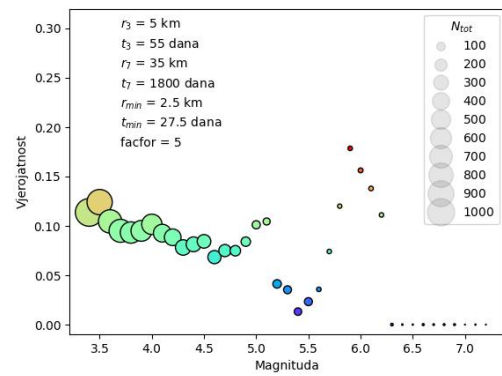
(a) Standardni slučaj



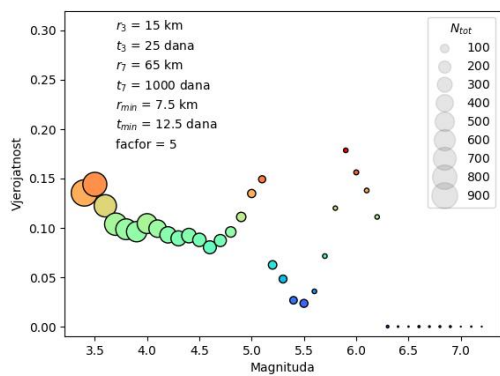
(b) Slučaj A



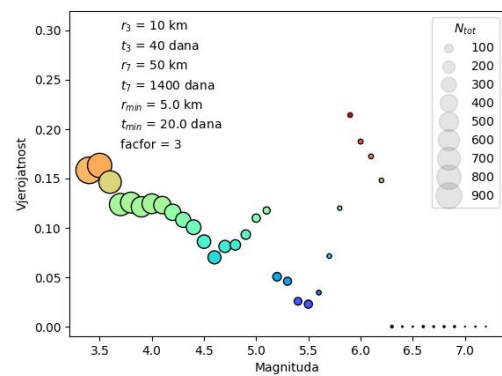
(c) Slučaj B



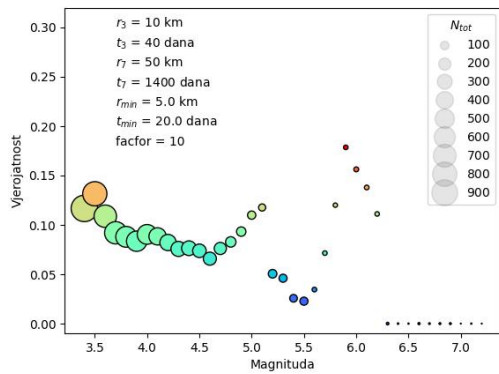
(d) Slučaj C



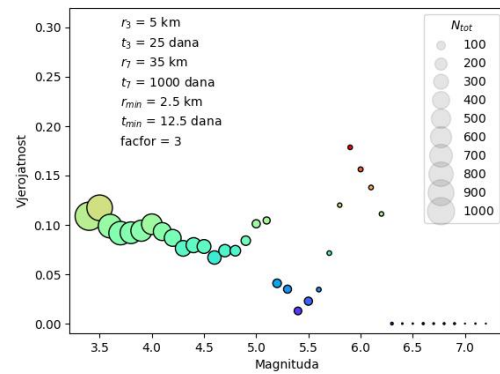
(e) Slučaj D



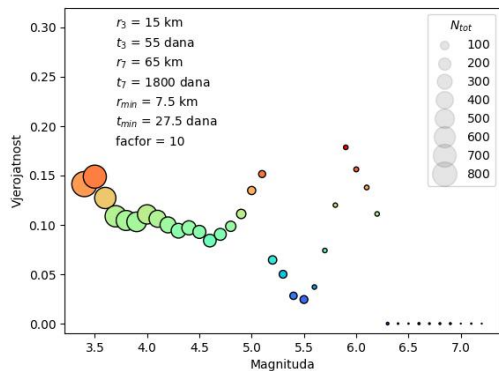
(f) Slučaj E



(g) Slučaj F



(h) Slučaj G



(i) Slučaj H

Slika 3.1. Vjerojatnosti da potres bude prethodni u području Hrvatske i okolice (za razne skupove ulaznih parametara, (a)-(i)).

### 3.2. Šire područje panonske Hrvatske

Na slici 3.2 su prikazani rezultati dobiveni za šire područje panonske Hrvatske. Primjećuje se značajno manji ukupni broj potresa koji je ušao u račun vjerojatnosti. Za razliku od cijelog područja Hrvatske i okolice, u panonskoj Hrvatskoj se maksimalna vjerojatnost postiže za magnitudu 6.2 na manje od ukupno 20 potresa, a ta vjerojatnost iznosi 20% u svim slučajevima osim u slučaju E kada iznosi 30%. Vjerojatnosti za magnitudo od 5.9 do 6.2 se ne mijenjaju s promjenom vrijednosti parametara osim u slučaju E, dok se vjerojatnosti za magnitudo od 4.9 do 5.5 mijenjaju vrlo malo. Za magnitudo od 5.6 do 5.8 te od 6.3 do 7.2 vjerojatnost iznosi nula jer slučajevi da potresi tih magnituda budu prethodni nisu zabilježeni. Za magnitudo manje od 5.6, vjerojatnosti i njihova razdioba dosta variraju od slučaja do slučaja, no postoje i neke pravilnosti.

U standardnom se slučaju mogu primijetiti tri lokalna maksimuma, za magnitudo 3.8, 5.0 i 6.2, kao i dva minimuma, za magnitudo 4.3 i 5.5.

Kada se, u slučaju A, sve vrijednosti parametara, osim faktora *factor*, smanje u odnosu na standardni slučaj, smanje se i vjerojatnosti te se maksimum za magnitudu 3.8 izgubi. Obrnuto, kada se sve vrijednosti parametara povećaju kao u slučaju B, tada i vjerojatnosti porastu te se istakne i lokalni maksimum za magnitudu

3.9, dok se maksimum za magnitudu 5.0 izgubi zbog toga što vjerojatnosti za bližnje magnituda porastu na slične vrijednosti te se taj dio razdiobe vjerojatnosti "izravna".

Smanjenjem prostornih parametara uz istovremeno povećanje vremenskih (slučaj C), dolazi do općenitog smanjenja vjerojatnosti te do male promjene rasporeda te vjerojatnosti (kao npr. kod magnituda od 4.1 do 4.3) u odnosu na standardni slučaj. Pritom maksimumi ostaju na istim magnitudama, dok se prvi minimum pomakne na magnitudu 4.1. U slučaju D, kada se smanje vremenski parametri, a povećaju prostorni, vjerojatnosti imaju razdiobu sličnu kao i u slučaju A u pogledu da se izgubi maksimum kod magnituda 3.8, dok sa slučajem B dijeli karakteristiku da su se vjerojatnosti približno izjednačile za magnitudu oko 5.0.

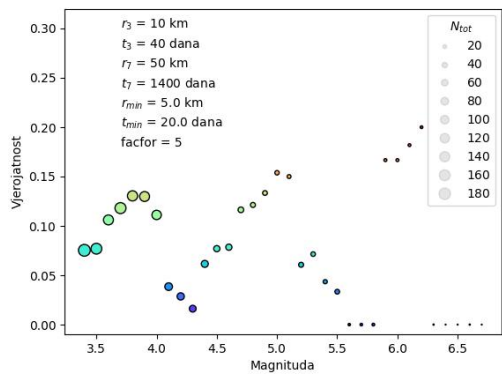
Smanjenje faktora *facfor*, dok su ostale vrijednosti kao i u standardnom slučaju (slučaj E), uzrokuje izrazito povećanje vjerojatnosti za magnitudu od 4.1 do 4.3 te za magnitudu od 5.9 do 6.2., dok se za ostale magnituda ta vjerojatnost minimalno ili ništa nije promijenila. Svi su maksimumi ostali vidljivi, kao i u standardnom slučaju, a od minimuma je ostao samo onaj za magnitudu 5.5. Povećanjem faktora *facfor* (slučaj F) su se vjerojatnosti za manje magnituda (do magnituda 4.0) smanjile te se pritom izgubio maksimum kod magnituda 3.8, a za ostale se magnituda vjerojatnosti nisu značajno promijenile.

Slučajevi G i H su usporedivi sa slučajevima C i D - pokazuju vrlo slične razdiobe vjerojatnosti.

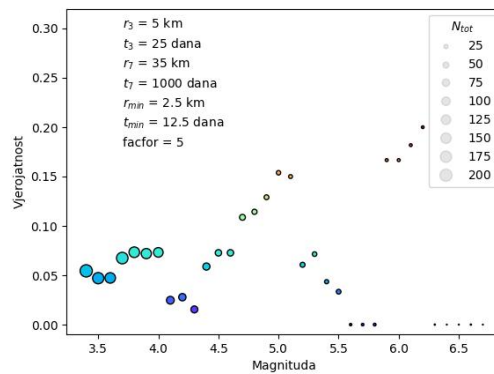
U tablici 3.2 se nalaze rezultati, po slučajevima, za otežane prosječne vjerojatnosti za različite klase magnituda.

Najveće prosječne vjerojatnosti se sada postižu za magnitudu od 4.5 do 5.0, a ne više za manje magnituda. Taj se rezultat vidi i na grafičkom prikazu (slika 3.2) - vjerojatnosti su veće za veće magnituda, a pritom se ukupni broj podataka na temelju kojih se vjerojatnost izračunala ne razlikuje toliko puno od broja podataka za manje magnituda, kao što je bio slučaj za područje cijele Hrvatske i okolice.

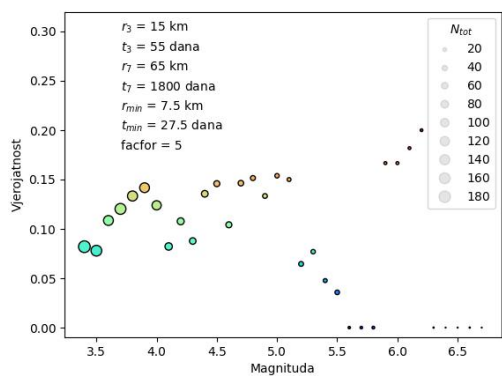
Kao i za ukupno područje, i ovdje su prosječne vjerojatnosti najviše u slučaju B, a potom i za slučaj E. Slijede ih standardni slučaj gdje su vjerojatnosti za sve magnituda i za magnitudu od 3.4 do 4.0 iduće najveće te slučaj H gdje su vjerojatnosti za magnitudu od 4.5 do 5.0 i za veće od 5.0 sljedeće najveće. Slučajevi s najnižim vjerojatnostima su slučaj A koji ima najmanje vjerojatnosti za sve magnituda i za magnitudu od 3.4 do 4.0 i od 4.0 do 4.5 te slučaj F koji ima najmanju vjerojatnost za magnitudu od 4.5 do 5.0.



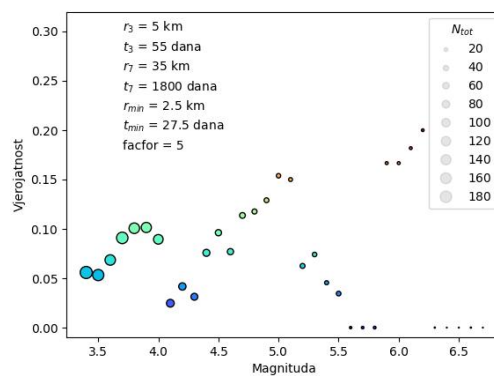
(a) Standardni slučaj



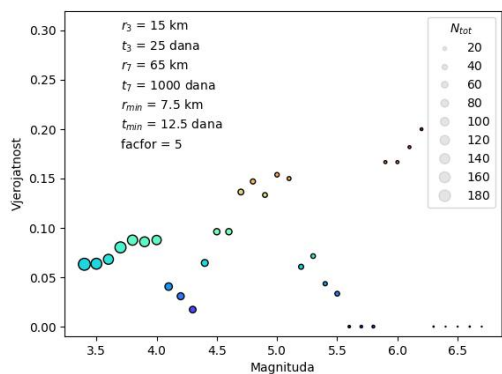
(b) Slučaj A



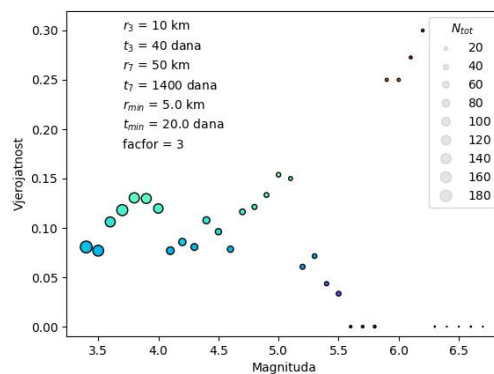
(c) Slučaj B



(d) Slučaj C

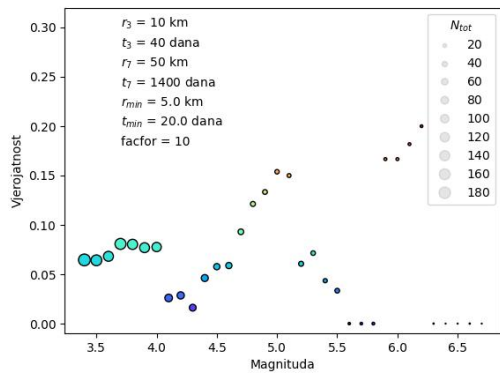


(e) Slučaj D

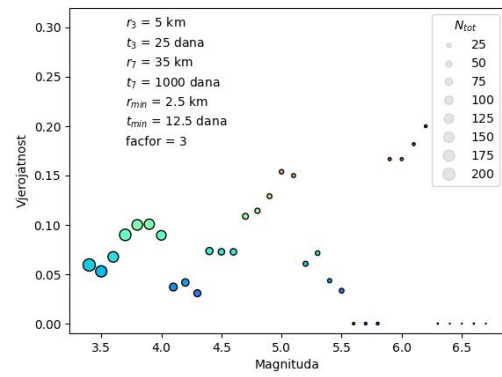


(f) Slučaj E

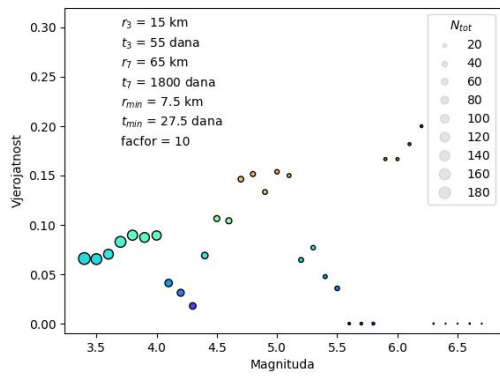




(g) Slučaj F



(h) Slučaj G



(i) Slučaj H

Slika 3.2. Vjerojatnosti da potres bude prethodni u širem području panonske Hrvatske (za razne skupove ulaznih parametara, (a)-(i)).

Tablica 3.2. Prosječne vjerojatnosti da potres bude prethodni, za klase magnituda, za šire područje panonske Hrvatske.

Slučajevi	$\bar{P}_{all}[\%]$	$\bar{P}_{3.4-4.0}[\%]$	$\bar{P}_{4.0-4.5}[\%]$	$\bar{P}_{4.5-5.0}[\%]$	$\bar{P}_{>5.0}[\%]$
Standardni	9.12	10.40	6.08	11.48	7.98
A	6.41	5.98	4.47	10.88	7.98
B	10.93	10.84	11.33	13.48	8.29
C	7.71	7.69	6.11	11.23	8.13
D	7.69	7.40	5.88	12.90	7.98
E	10.32	10.51	9.68	11.48	9.86
F	6.95	7.21	4.52	10.38	7.98
G	7.65	7.70	6.03	10.88	7.98
H	7.95	7.61	6.10	13.48	8.29
Srednjaci	8.30	8.37	6.69	11.80	8.27

### 3.3. Područje Dinarida

Za razliku od prostora panonske Hrvatske, rezultati za područje Dinarida, prikazani na slici 3.3, su slični onima za cijelu Hrvatsku i okolicu. To je i očekivano, jer se ovdje događa većina potresa. Ukupni broj potresa koji se koristio u računu vjerojatnosti je blizak onome za cijelo područje te su i distribucije vjerojatnosti slične.

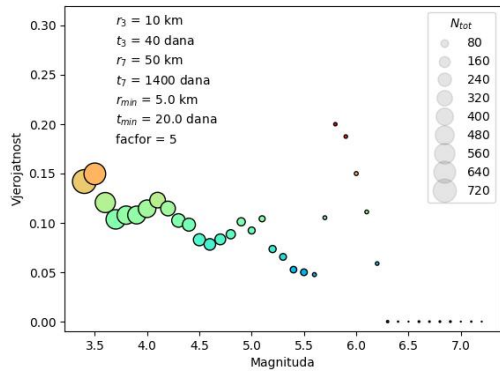
Maksimumi se javljaju za magnituda 3.5, 5.1 (osim u slučajevima A, C i G kada se javlja za 4.9) i za 5.8. Što se minimuma tiče, za područje Dinarida se ističe i jedan minimum više nego za slučaj ukupnog područja: uz minimume za magnituda između 4.5 i 4.7, za magnituda između 5.4 i 5.6 (kako za koji slučaj) i za magnitudu 6.2, sada se uočava i minimum oko magnituda 3.7.

Vjerojatnosti za manje magnituda nose veću težinu zbog većeg ukupnog broja podataka. Za magnituda veće ili jednake 5.8 se vjerojatnosti po slučajevima ne mijenjaju tako da se sve spomenute promjene odnose na magnituda manje od te.

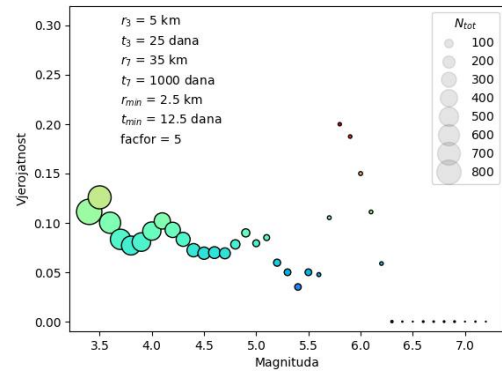
Ako se ulaznim parametrima smanje vrijednosti u odnosu na standardni slučaj, smanje se i vjerojatnosti (slučaj A), a ako im se vrijednosti povećaju onda se i vjerojatnosti povećaju (slučaj B) te potresi magnituda 3.4 i 3.5 postanu najvjerojatniji da su prethodni pošto imaju veću težinu vjerojatnosti nego potres magnituda 5.8.

Smanjenjem vrijednosti prostornih parametara uz istovremeno povećanje onih vremenskih, vjerojatnosti se također smanje (slučaj C), ali manje nego kada se svim parametrima (osim faktoru *facfor*) smanje vrijednosti. Obrnuto, kada se vrijednosti prostornih parametara povećaju, a vremenskih smanje, vjerojatnosti malo porastu (slučaj D). Smanjenjem faktora *facfor*, dok su ostale vrijednosti jednake onima u standardnom slučaju, vjerojatnosti se povećaju što je pogotovo vidljivo za magnituda manje od 4.4 (slučaj E). Povećanjem faktora *facfor* u slučaju F, vjerojatnosti se smanjuju.

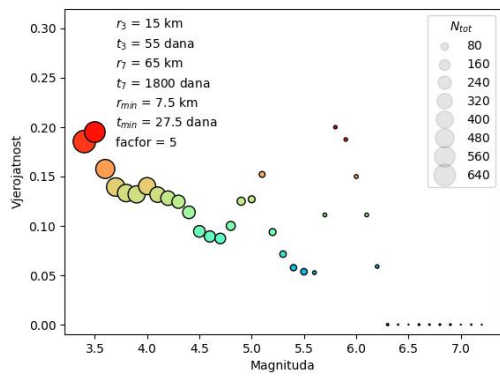
Kada se vrijednosti svih parametara skupa smanje, smanje se i vjerojatnosti (slučaj G), odnosno, kada se povećaju, povećaju se i vjerojatnosti (slučaj H).



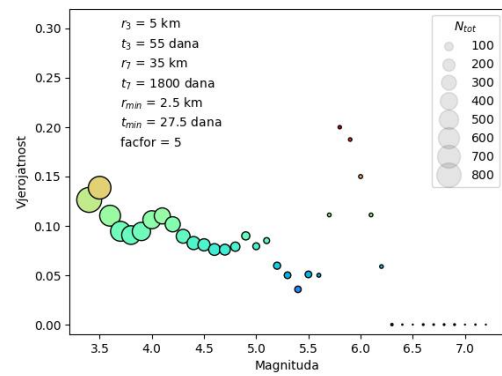
(a) Standardni slučaj



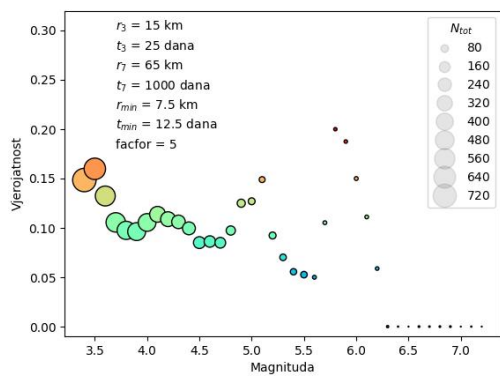
(b) Slučaj A



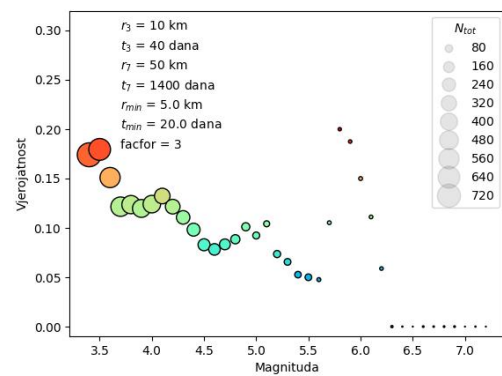
(c) Slučaj B



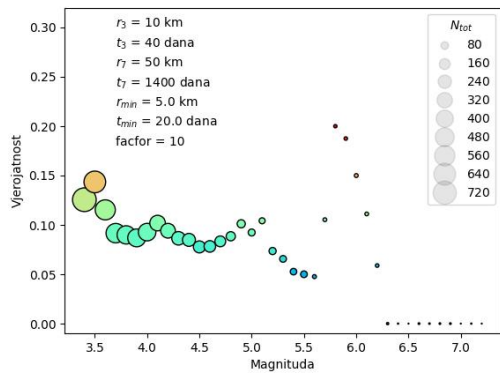
(d) Slučaj C



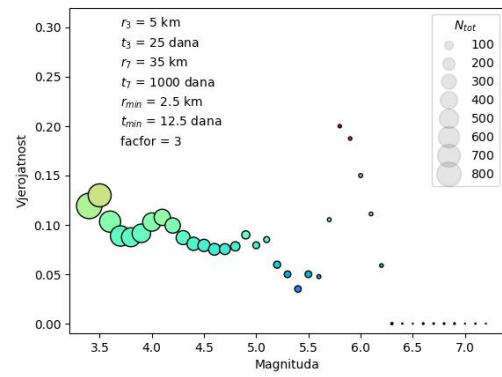
(e) Slučaj D



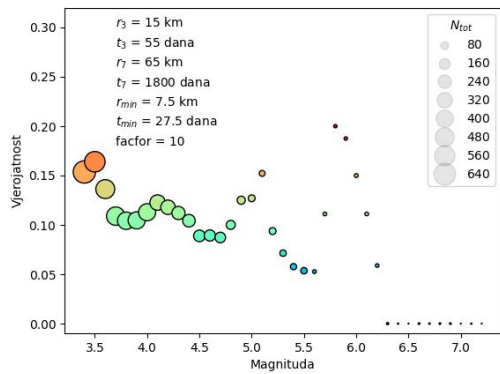
(f) Slučaj E



(g) Slučaj F



(h) Slučaj G



(i) Slučaj H

Slika 3.3. Vjerojatnosti da potres bude prethodni u području Dinarida (za razne skupove ulaznih parametara (a)-(i)).

U tablici otežanih prosječnih vjerojatnosti, tablica 3.3, se vidi da je najveća vjerojatnost upravo ona za magnituda između 3.4 i 4.0 i to u svim slučajevima. Isto se moglo primijetiti i na grafičkim prikazima pojedinih slučajeva na slici 3.3. Za svaku iduću klasu magnituda, ta vjerojatnost pada, dok je ona ukupna, za sve magnituda, iduća po veličini nakon vjerojatnosti za klasu najmanjih magnituda.

Ponovno su za slučaj B vjerojatnosti najviše, nakon čega slijede slučajevi E, H i D pa tek onda i standardni. Najmanje su vjerojatnosti za slučaj A.

Tablica 3.3. Prosječne vjerojatnosti da potres bude prethodni, za klase magnituda, za područje Dinarida.

Slučajevi	$\bar{P}_{all}[\%]$	$\bar{P}_{3.4-4.0}[\%]$	$\bar{P}_{4.0-4.5}[\%]$	$\bar{P}_{4.5-5.0}[\%]$	$\bar{P}_{>5.0}[\%]$
Standardni	11.31	12.51	10.86	8.64	7.80
A	9.20	9.97	8.77	7.52	6.95
B	13.94	16.16	12.56	10.03	8.92
C	10.23	11.27	9.79	7.89	7.01
D	11.53	12.76	10.48	9.81	8.76
E	12.84	14.96	11.51	8.64	7.80
F	10.12	11.23	9.10	8.64	7.80
G	9.83	10.65	9.54	7.84	6.95
H	11.99	13.27	11.17	10.03	8.92
Srednjaci	11.22	12.53	10.42	8.78	7.88

## 4. Diskusija

Analizom rezultata dobivenih za prostor cijele Hrvatske i okolice, šire područje panonske Hrvatske i područje Dinarida može se doći do nekih općenitih zaključaka.

Prije svega, jasno je vidljivo da se većina od ukupnog broja potresa dogodila u području Dinarida, a tek njihov manji dio u području panonske Hrvatske. To odgovara i dosadašnjim spoznajama o seizmičnosti našeg područja koja govore da su seizmički najaktivnija područja ona na južnom dijelu Hrvatske, ali i na cijelom Primorju, nakon kojih slijedi i Zagreb i njegova šira okolica te Pokuplje. Zato što su u područje panonske Hrvatske uklopljeni i vrlo slabo seizmički aktivni dijelovi te regije, poput Slavonije, došlo je do nesrazmjera u broju podataka pri analizi panonske Hrvatske i Dinarida. Može se reći da je u području panonske Hrvatske došlo do "razrjeđenja" podataka o potresima jer ih je, na ukupno relativno velikom području, razmjerno malo. Također, upravo su zato rezultati za područje Dinarida slični onima za cijelo područje Hrvatske i okolice, za razliku od opažanja za panonsku Hrvatsku.

Ako se gleda ukupno područje, vidljivo je da je težina opažanja veća za potrese manjih magnituda nego za one većih magnituda što odgovara Gutenberg-Richterovoj relaciji, tj. relaciji (1.1.), koja kaže da je više potresa manjih magnituda nego onih većih magnituda. To je vidljivo i u analizi dviju zasebnih regija, panonske Hrvatske i Dinarida, ali je za područje Dinarida to izraženije.

Mijenjanjem vrijednosti 5 ulaznih parametara ( $r_3$ ,  $r_7$ ,  $t_3$ ,  $t_7$  i *factor*) se mijenjalo i to kako se definiraju prethodni potresi. Sa svakom promjenom se mijenjao i broj potresa koji se mogu smatrati prethodnim.

Osim toga, u legendi na grafovima rezultata, se može primijetiti da se mijenja ukupan broj na osnovi kojeg se izračunala prikazana vjerojatnost, ovisno o slučajevima. To se događa zato što se mijenjanjem vrijednosti parametara, osim na broj prethodnih i naknadnih, indirektno utječe i na broj glavnih potresa koji su se dogodili relativno blizu jedan drugome.

Na primjer, ako promatramo prvi potres u nizu potresa magnitude  $M$  pri čemu ih je ukupno  $n$ , tada su svi sljedeći potresi kandidati da mu budu prethodni, naknadni ili pak novi glavni potres. Ako se prostorno-vremenski prozor za prethodne, odnosno naknadne potrese, dovoljno smanji, potres magnitude  $M$  koji je prije zadovoljavao uvjete da bude naknadni (uvjet da potres bude naknadni uključuje veći vremenski prozor nego da potres bude prethodni, prema formuli (2.5.)) sada više ne zadovoljava te uvjete i time postaje novi glavni s vlastitim prethodnim i naknadnim potresima. Time se, u tom slučaju, povećao broj glavnih potresa, a time i potencijalno povećao i broj prethodnih potresa što znači da se povećao i ukupan broj potresa s kojim se računa vjerojatnost jer bi prije taj potres ulazio u naknadne i ne bi se pribrajao ukupnom broju potresa. Što se različitih slučajeva tiče, slično je ponašanje u svim analiziranim područjima.

Očekivano, smanjenjem ulaznih vrijednosti svih parametara, osim parametra *factor*, (slučajevi A) se smanjuju i vjerojatnosti jer smo smanjili prostorno-vremenski prozor za prethodne potrese pa je samim time i manje potresa koji zadovoljavaju nametnute uvjete. Dobivene vjerojatnosti su izračunate na većem ukupnom broju glavnih i prethodnih potresa nego u standardnom slučaju. Veći broj potresa je moguće opravdati ranije opisanim razlogom, a vjerojatnosti su niže nego u standardnom slučaju jer je sada veći broj glavnih potresa pri čemu nemaju svi svoje prethodne potrese. U suprotnom slučaju (slučajevi B), kada su se svim parametrima, osim faktorom *factor*,

ulazne vrijednosti povećale, povećao se i broj potresa koji takve uvjete zadovoljavaju pa su i vjerojatnosti porasle. Ukupan broj potresa na kojem su vjerojatnosti dobivene je manji nego u standardnom slučaju jer potresi koji inače ne zadovoljavaju uvjete da budu naknadni, nego se smatraju glavnima, sada čine dio jedne serije kao naknadni potresi pa se više ne pribrajaju u ukupan broj potresa na kojem je provedena analiza. U ovim je slučajevima vjerojatnost viša nego u standardnim jer je na ukupno manjem broju glavnih potresa više onih koji imaju svoje prethodnike.

Usporedbom C i D slučajeva se vidi da smanjenjem prostornih parametara uz istovremeno povećanje vremenskih (slučajevi C) dolazi do smanjenja vjerojatnosti i povećanja ukupnog broja glavnih i prethodnih potresa (osim za područje Dinarida gdje taj broj ostaje jednak kao u standardnom slučaju), dok povećanjem prostornih, a smanjenjem vremenskih parametara (slučajevi D) dolazi do povećanja vjerojatnosti pri čemu ukupan broj potresa ostaje kao i u standardnom slučaju. U oba slučaja su te promjene vjerojatnosti manje nego u slučajevima A i B što je i očekivano jer smanjenje iznosa jedne varijable donekle neutralizira povećanje iznosa druge. Prema formulama (2.3.) i (2.5.), slijedi da su prostorni uvjeti jednaki za prethodne i naknadne potrese, dok se vremenski razlikuju. Zbog toga ukupni broj potresa u slučaju C naraste, a vjerojatnosti se smanje jer je sada radijus za naknadne i prethodne potrese manji čime se smanji i broj potresa usprkos povećanju vremenskog uvjeta koji bi taj broj trebao povećati, pa je više onih potresa koji su sada označeni kao glavni. Smanjenjem vremenskog uvjeta, a povećanjem prostornog se znatno ne mijenja ukupan broj potresa pa se može zaključiti da vremenski uvjeti praktički neutraliziraju one prostorne - koliko bi se potresa više smatralo prethodnima zbog vremena, toliko bi ih približno bilo manje zbog strožeg prostornog uvjeta. Ta dva slučaja skupa ukazuju na to da povećanje vrijednosti vremenskih parametara uz smanjenje prostornih podjednako utječu na vjerojatnost kao i povećanje prostornih uz smanjenje vremenskih. Iz toga se može zaključiti da je ovakvo uparivanje vrijednosti prostornih i vremenskih parametara u standardnom slučaju opravdano jer se njihovo naizmjenično mijenjanje neutralizira, ali bi se mogle naći i bolje vrijednosti jer bi se, pri idealnom izboru, ovi slučajevi podudarali sa standardnim.

U slučajevima E i F se promatrao utjecaj faktora *factor*. Primjećuje se da se njegovom promjenom nije mijenjao ukupan broj potresa u analizi, dok se vjerojatnosti jesu. Njegovim smanjenjem (slučajevi E), u odnosu na standardni slučaj, se povećao vremenski prozor za definiciju prethodnih potresa (prema formuli (2.5.), vremenski prozor je sada samo tri puta manji od onog za naknadne, dok je u standardnom slučaju bio pet puta manji). U takvim uvjetima, više potresa odgovara opisu prethodnih potresa pa i vjerojatnost naraste. Potresi koji su se sada počeli smatrati prethodnima su prije bili glavni jer su nastupili prije promatranog glavnog, a kojemu sada predstavljaju prethodni potres, ali na takvoj prostornoj udaljenosti da je samo povećanje vremenskog prozora bilo dovoljno kako bi upali među prethodne potrese. To istovremeno objašnjava i zašto se ukupan broj potresa nije promijenio; samo se ukupan broj glavnih i ukupan broj prethodnih potresa drugačije rasporedio. Povećanjem faktora *factor* (slučajevi F) se smanjio prozor za prethodne potrese (deset puta je manji od vremenskog prozora za naknadne potrese). Smanjenje vjerojatnosti u takvom slučaju se može interpretirati na sljedeći način: umjesto jednog glavnog potresa s više prethodnih, sada imamo nekoliko glavnih potresa s ukupno manje prethodnih potresa. Ponovno je ukupan broj glavnih i prethodnih potresa ostao jednak kao i u standardnom slučaju jer se samo njihova raspodjela promijenila.

Smanjenjem (slučajevi G), odnosno povećanjem (slučajevi H) svih parametara, vjerojatnosti se također smanje, odnosno povećaju. Iako se, u slučajevima G, faktor *factor* također smanji skupa s ostalim parametrima, to zapravo povećava vremenski prozor za definiciju prethodnih potresa. Vjerojatnosti se i dalje, općenito, smanje što ukazuje na to da utjecaj faktora *factor* nije dovoljan, u ovom slučaju, da poništi utjecaje ostalih parametara. Kada bi se taj faktor povećao, dok se svi ostali smanje, tada bi i dobivene vjerojatnosti bile još i veće. Slično vrijedi i za slučajeve H gdje se povećala vrijednost faktora *factor* skupa s vrijednostima svih drugih parametara pa se usprkos smanjenju vremenskog prozora za definiciju prethodnih potresa vjerojatnost općenito povećala. Što se rezultata za otežane prosječne vjerojatnosti tiče, rezultati za cijelo područje Hrvatske i okolice i za područje Dinarida se dobro slažu u smislu da najveću vjerojatnost da potres bude prethodni imaju potresi iz klase magnituda od 3.4 do 4.0. Panonska Hrvatska tu odskoče s rezultatom da potresi magnitude između 4.5 i 5.0 imaju najveću vjerojatnost biti prethodni. Za svaku regiju, vjerojatnosti su najveće u slučajevima B kada se vrijednosti svih ulaznih parametara povećaju (osim faktora *factor*), te ih slijede slučajevi E u kojemu su vrijednosti svih parametara jednake kao u standardnom slučaju osim faktora *factor* koji je sada manji. Slučajevi H, kada se povećaju vrijednosti svih parametara, također vode po iznosu vjerojatnosti. Također, vrijedi da su, za sve regije, slučajevi A oni s najmanjim vjerojatnostima, tj. ako se svim parametrima, osim faktoru *factor*, smanji vrijednost, onda će se i vjerojatnost da potres određene magnitude bude prethodni smanjiti.

Primjećuje se da vjerojatnost da potres bude prethodni generalno opada s porastom magnitude sve do magnituda oko 5.0 (slike 3.1-3.3) što nije bilo *a priori* očekivano. To, naime, znači da  $N_{for}$  (brojnik u (2.10.)) raste sporije od  $N_{tot}$  (nazivnik u (2.10.)) s porastom magnitude. Tome su moguća dva uzroka. Prvi je da se radi o efektu potresnog izvora te da rasjedi u Hrvatskoj i okolici relativno često svoje pucanje "javljaju" malim potresima. Iako ovo može biti svojstvo pojedinog rasjeda, teško je očekivati da vrijedi općenito. Drugi, i vjerojatniji, uzrok može biti da skup početnih parametara ( $r_3, r_7, t_3, t_7$  i *factor*) nije optimalno određen te time malim potresima daje neproporcionalno veće izgleda da budu prethodni nego većim potresima. Drugim riječima, ovo implicira da su  $r_3$  i  $t_3$  preveliki u odnosu na  $r_7$  i  $t_7$  - prostorni i/ili vremenski prozori presporo rastu s magnitudom. Da bi tome moglo biti tako ukazuje npr. usporedba slučajeva A i B sa slike 3.1. Vidi se da je ovisnost o magnitudi mnogo veća za slučaj B (slika 3.1.c) nego za slučaj A (slika 3.1.b). Usporedimo li omjere  $r_7/r_3$  i  $t_7/t_3$  za ta dva slučaja, dobijemo:

$$\left(\frac{r_7}{r_3}\right)_A = 7.0, \quad \left(\frac{t_7}{t_3}\right)_A = 40.0, \quad \left(\frac{r_7}{r_3}\right)_B = 4.3, \quad \left(\frac{t_7}{t_3}\right)_B = 32.7. \quad (4.1.)$$

Možemo, barem preliminarno, zaključiti da skup parametara u slučaju A rezultira vjerojatnostima koje mnogo slabije ovise o magnitudi nego u slučaju B, pa se čini da bi standardne iznose parametara valjalo dodatno revidirati. Pri tome bi bilo dobro prostorne parametre definirati uzimajući u obzir empirijske relacije koje povezuju veličinu potresnog izvora s magnitudom potresa (npr. Wells i Coppersmith, 1994), a vremenske prozore odrediti na temelju opažanja brzine opadanja broja naknadnih potresa prilagodbom modificiranog Omorijevog zakona većem broju dobro dokumentiranih potresnih nizova.

Opazeni maksimumi vjerojatnosti za magnitude veće od približno 5.0 određeni su na temelju relativno malog broja relevantnih događaja, pa je teško reći radi li se o reprezentivnim rezultatima. Ako je tome tako, moglo bi se zaključiti da se, u razmatranom



području, nezanemariva količina nakupljene energije (zbog deformacije stijena) relativno često oslobađa prije glavnog potresa putem razmjerno jakog prethodnog potresa. U tom slučaju, poremećaj napetosti na rasjednom sustavu uzrokovan jakim prethodnim potresom može biti i neposredan "okidač" glavnog potresa.

## 5. Zaključak

U ovome se radu analizirala dosadašnja seizmička aktivnost Hrvatske i susjednih područja u pogledu prethodnih i glavnih potresa. Preciznije, računala se vjerojatnost da je potres koji je upravo nastupio samo prethodni te da nakon njega slijedi još i jači, glavni potres. Da bi se takav račun proveo, bilo je potrebno katalog potresa kategorizirati tako da se svakom potresu dodijeli oznaka radi li se o glavnom, prethodnom ili o naknadnom potresu. Pokazano je kako je definicija parametara za naknadne potrese povezana s onom za prethodne i da se mijenjanjem tih parametara utječe na ukupni broj oba tipa potresa, a indirektno i na broj glavnih potresa. Grafičkim je prikazom pokazano kako se mijenjanjem ulaznih vrijednosti spomenutih parametara uvelike utječe i na vjerojatnost hoće li potres neke magnitude  $M$  biti samo prethodni ili se ipak radi o glavnom potresu. Ono što je bilo očekivano, a što se i potvrdilo u ovom radu, jest da se većina potresa u našem području dogodila na području Dinarida te da oni uvjetuju kako će izgledati vjerojatnosti i za cijelu Hrvatsku i okolicu. Također je potvrđeno da se najveći broj potresa koji su bili prethodni nalazi u klasi magnituda od 3.4 do 4.0 te da je za njih vjerojatnost zbog toga najviša s najvećom pripadnom težinom. Ta vjerojatnost iznosi u prosjeku 12.4% u standardnom slučaju. Ipak, od tog rezultata odskače šire područje panonske Hrvatske koje najveću vjerojatnost, i to s najvećom težinom, ima za potrese magnituda između 4.5 i 5.0 i koja iznosi 11.5% u standardnom slučaju. Ovakvi su rezultati zajednički svim slučajevima - mijenjanjem vrijednosti parametara za definiciju prethodnih (odnosno naknadnih) potresa se ne utječe na to za koju je klasu magnituda, za neko područje, vjerojatnost najviša, ali se utječe na sam iznos te vjerojatnosti koji odstupa za maksimalno  $\pm 3.6\%$  po slučajevima (maksimalno odstupanje se odnosi na područje Dinarida).

Provedenom se analizom dobilo više korisnih rezultata, ali se i ukazalo na potrebu za daljnjim radom. Bilo bi dobro napraviti sustavno i detaljno istraživanje koje su to optimalne vrijednosti parametara koji definiraju prethodne i naknadne potrese te također u tu definiciju uvesti i parametar žarišnih mehanizama. Na taj način bi se moglo smanjiti relativno jaku opaženu ovisnost vjerojatnosti da potres bude prethodni o njegovoj magnitudi.

Uz to, valjalo bi pri identificiranju prethodnih, glavnih i naknadnih potresa koristiti pristup koji se ne oslanja na kružne prostorne prozore (npr. identifikacije grozdova) za koje se zna da dobro ne opisuju prostornu razdiobu naknadnih potresa (posebno za velike glavne potrese kada su područja naknadnih potresa izduženog oblika).

Također, ova analiza ne pokriva važno pitanje o magnitudi mogućeg glavnog potresa – sve vjerojatnosti odnose se tek na pojavu potresa koji će biti makar malo veće magnitude od upravo dogođenoga. Jednako tako, vjerojatnost ne govori ništa o tome kada će se – ako se dogodi – dogoditi glavni potres. Sve što se može reći je da će biti unutar vremenskog prozora za prethodni potres, pa to vrijeme može varirati od nekoliko dana za budući glavni potres male magnitude, do više mjeseci za najveće moguće potrese. U skladu s time, može se govoriti o tome da svaki potres, svojim potencijalom da bude prethodni, na neko vrijeme znatno podiže potresnu opasnost nekog područja, ali će trajanje povećanog hazarda ovisiti o pretpostavljenoj magnitudi budućega glavnog potresa. Zbog toga bi se moglo pokušati napraviti analizu s konstantnim vremenskim prozorima (npr. 5, 10, 30, ... dana), pa bismo pripadnim vjerojatnostima mogli konkretnije procijeniti kratkoročno povećanje potresne opasnosti nakon svakog dogođenog potresa.

Najvažniji praktični zaključak koji proizlazi iz ovog rada je taj da se nastup glavnog potresa na temelju dogođenih potresa ne može deterministički predvidjeti, ali se može govoriti o vjerojatnosti nastupa većeg potresa pri čemu ona u Hrvatskoj i okolici iznosi oko 10.5%.

## Literatura

- Agnew, D. C., Jones, L. M. (1991): Prediction probabilities from foreshocks, *Journal of geophysical research*, 96(B7), 11959-11971, <https://doi.org/10.1029/91JB00191>.
- Console, R., Murru, M., Alessandrini, B. (1993): Foreshock statistics and their possible relationship to earthquake prediction in the Italian region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(4), 1248-1263.
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Mustać, M., Tomljenović, B. (2020): O potresima u Hrvatskoj. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, 57(1), 4-27.
- Gardner, J. K., Knopoff, L. (1974): Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363-1367.
- Herak, M., Herak, D., Markušić, S. (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1 992, *Terra Nova*, 8, 86-94.
- Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B. (2009): Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia, *Tectonophysics*, 465, 212-220.
- Herak, M., Herak, D., Orlić, N. (2021): Properties of the Zagreb 22 March 2020 earthquake sequence – analyses of the full year of aftershock recording. *Geofizika*, 38, 93-116, <https://doi.org/10.15233/gfz.2021.38.6>.
- Jones, L. M. (1984): Foreshocks (1966-1980) in the San Andreas system, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 1361-1380.
- Jones, L. M. (1985): Foreshocks and time-dependent earthquake hazard assessment in southern California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(6), 1669-1679.
- Omori, F. (1894a): On after-shocks, *Rep. Imp. Earthq. Inv. Corn.*, 2, 103-138, (na japanskom).
- Omori, F. (1894b): On after-shocks of earthquakes, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111-200.
- Raesenberg, P. (1985): Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982, *Journal of geophysical reshearch*, 90(B7), 5479-5495.
- Tibi, R., Blanco, J., Fatehi, A. (2011): An alternative and efficient cluster-link approach for declustering of earthquake catalogs, *Seismological reshearch letters*, 82(4), 509-518.
- Utsu, T. (1957): Magnitudes of earthquakes and occurrence of their aftershocks, *Zisin*, 2(10), 35-45, (na japanskom).
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.