

Seizmičnost na području Hrvatske u razdoblju 2016.-2020. godine

Švigir, Tereza

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:217:909518>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Tereza Švigir

SEIZMIČNOST NA PODRUČJU HRVATSKE U
RAZDOBLJU 2016. – 2020. GODINE

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

Tereza Švigir

Diplomski rad

**Seizmičnost na području Hrvatske u
razdoblju 2016. – 2020. godine**

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Iva Dasović

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2024.

Iskreno se zahvaljujem svojoj mentorici, doc. dr. sc. Ivi Dasović, na pruženom znanju, predloženoj temi, strpljenju te dragocjenim savjetima i podršci tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Mojoj obitelji, posebno mojim roditeljima, želim zahvaliti na beskrajnoj podršci i razumijevanju koje su mi pružali, potičući me da uvijek idem naprijed.

Veliko hvala i mome Jurju na bezuvjetnoj podršci i ohrabrivanju te svim prijateljima što su bili moja motivacija i snaga kroz sve izazove ovog puta.

Sažetak

Prema Hrvatskom katalogu potresa, tijekom petogodišnjeg razdoblja između 2016. i 2020. godine u Hrvatskoj i neposrednoj okolici lociran je 19721 potres, od čega je zabilježeno 20 glavnih potresa lokalne magnitude veće ili jednake 4.0. Seizmički najaktivnija bila je južna Hrvatska, na čijem je području locirano više od 11000 potresa, uz 17 potresa s $M_L \geq 4.0$. Drugi najaktivniji dio bilo je područje središnje i sjeverne Hrvatske, na kojem su zabilježena i dva najjača potresa u Hrvatskoj tijekom promatranog razdoblja. Najsnažniji potres, momentne magnitude $M_W = 6.4$ ($M_L = 6.2$), zabilježen je nedaleko grada Petrinje 29. prosinca 2020. godine. Drugi najsnažniji potres, magnitude $M_L = 5.3$, zabilježen je devet mjeseci ranije, u području Grada Zagreba, 22. ožujka 2020. godine. Uz prostornu analizu potresa, provedena je i vremenska analiza potresa, uključujući usporedbu pojavnosti glavnih potresa na području Hrvatske s Poissonovim procesom kojeg koristimo za opis rijetkih događaja. Magnituda potpunosti deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa, određena metodama MAXC i MBS za razdoblje 2016. – 2020. godine, za područje Hrvatske i njezine okolice iznosi $M_c = 1.2$. Pripadni koeficijent b (nagib pravca) Gutenberg-Richterovog zakona ima vrijednost 0.91. Za četiri područja u Hrvatskoj, istočna Hrvatska, središnja i sjeverna Hrvatska, zapadna Hrvatska i južna Hrvatska, provedena je i detaljnija analiza seizmičnosti, određena je magnituda potpunosti kataloga regije te su procijenjeni koeficijenti Gutenberg-Richterovog zakona.

Ključne riječi: seizmičnost, Hrvatska, katalog potresa, magnituda potpunosti, Gutenberg-Richterov zakon

Seismicity of Croatia in the period 2016 – 2020

Abstract

According to the Croatian Earthquake Catalog, during the five-year period from 2016 to 2020, a total of 19721 earthquakes occurred in Croatia and its immediate surrounding areas, with 20 main events with local magnitude $M_L \geq 4.0$. The most seismically active region was southern Croatia, where over 11000 events were located, including 17 events with magnitude $M_L \geq 4.0$. The second most active region was central and northern Croatia, where two of the strongest events in Croatia happened during the observed period. The strongest event, with moment magnitude $M_W = 6.4$ ($M_L = 6.2$), occurred near the town of Petrinja on December 29, 2020. The second strongest event, with magnitude $M_L = 5.3$, happened nine months earlier in the vicinity of Zagreb on March 22, 2020. In addition to spatial earthquake analysis, a temporal analysis of earthquakes was performed, including a comparison of the occurrence of main events in Croatia with a Poisson process used to describe rare events. The magnitude of completeness for the declustered Croatian earthquake catalog, determined using the MAXC and MBS methods for the period between 2016 and 2020, in the Croatia and its immediate vicinity, is $M_c = 1.2$. The associated coefficient b (slope of the curve) of the Gutenberg-Richter law is found to be 0.91. Furthermore, a detailed analysis of seismicity was conducted for regions of Croatia (eastern Croatia, northern and central Croatia, western Croatia and southern Croatia), determining the magnitude of completeness for each region's catalog and calculating the corresponding Gutenberg-Richter coefficients.

Keywords: seismicity, Croatia, earthquake catalog, magnitude of completeness, Gutenberg-Richter law

Sadržaj

1	Uvod.....	1
1.1	<i>Seizmotektonsko okruženje Hrvatske.....</i>	1
1.2	<i>Motivacija i ciljevi rada</i>	2
2	Teorijska podloga	4
2.1	<i>Katalog potresa</i>	5
2.2	<i>Gutenberg-Richterov zakon.....</i>	6
2.3	<i>Određivanje magnitude potpunosti</i>	9
2.4	<i>Deklasteriranje kataloga potresa</i>	11
2.5	<i>Pojava potresa kao Poissonov proces</i>	12
3	Podaci i metode.....	13
3.1	<i>Hrvatski katalog potresa</i>	13
3.2	<i>Određivanje magnitude potpunosti Hrvatskog kataloga potresa</i>	15
3.3	<i>Deklasteriranje Hrvatskog kataloga potresa</i>	17
3.4	<i>Pojava potresa kao Poissonov proces</i>	19
4	Rezultati i diskusija.....	20
4.1	<i>Prostorna i vremenska analiza seizmičnosti Hrvatske</i>	20
4.2	<i>Magnituda potpunosti kataloga</i>	28
4.3	<i>Istočna Hrvatska</i>	35
4.4	<i>Središnja i sjeverna Hrvatska.....</i>	38
4.5	<i>Zapadna Hrvatska</i>	43
4.6	<i>Južna Hrvatska</i>	46
4.7	<i>Usporedba rezultata s prethodnim istraživanjima.....</i>	51
5	Zaključak	52
	Dodaci.....	55
A	Poligon Hrvatske i neposredne okolice	55
B	Poligoni pojedinih regija Hrvatske	56
	Literatura.....	60

1. Uvod

1.1. Seizmotektonsko okruženje Hrvatske

Područje Hrvatske i okolice nalazi se u dijelu Sredozemlja s intenzivnim seizmičkim i tektonskim aktivnostima. Seizmičkoj aktivnosti Hrvatske primarno pridonosi konvergentno gibanje Afričke (Nubijske) ploče prema Euroazijskoj ploči između kojih se nalazi Jadranska mikroploča. Dio ovog kretanja konzumira se duž aktivnih subdukcijskih zona Helenskog i Kalabrijskog luka. Preostali dio kretanja prenosi se prema sjeveru do Alpa, Apenina i Dinarida te djelomice u Panonski bazen [4]. Geodinamska skica i brzina konvergentnih kretanja ploča prikazani su na slici 1.1.



Slika 1.1. Geodinamska skica područja istočnog Sredozemlja i brzine konvergentnih kretanja Afričke, Anatolijske i Jadranske mikroploče prema Euroazijskoj ploči (Preuzeto iz [4]).

Prema seizmotektonskim svojstvima, područje Hrvatske i njezine okolice ugrubo se može podijeliti na dvije cjeline: kontinentalnu Hrvatsku i priobalnu Hrvatsku. Kontinentalna Hrvatska obuhvaća teritorij sjeverozapadnih Dinarida i Alpa do jugozapadnog dijela Panonske nizine. Na tom području potresi se primarno događaju unutar ploče, dalje od granica međudjelovanja ploča, pa seizmičnost tog područja karakterizira manji broj jačih potresa. Najaktivnije područje kontinentalne Hrvatske je sjeverozapadni dio Hrvatske od Koprivnice preko gorja Kalnik, Ivanščice i Medvednice do Žumberka na zapadu i od Pokuplja do Zrinske gore na jugu. Znatno aktivnija priobalna Hrvatska obuhvaća teritorij Jadranskog mora, Dinarida i hrvatskog priobalja. Ovo područje je pod snažnim utjecajem međudjelovanja Jadranske mikroploče s Euroazijskom pločom. Upravo se na granicama tih ploča događa najviše potresa u Hrvatskoj i njezinoj okolini. Najaktivniji je jugoistočni dio obalne Hrvatske dok sjeverozapadni dio karakteriziraju česti slabiji potresi (lokalne magnitude $M_L < 4.0$) te povremeni srednji do jaki potresi ($M_L \geq 4.0$) [10], [11], [12].

1.2. Motivacija i ciljevi rada

Proučavanje seizmičke aktivnosti, osim što pruža bolje razumijevanje unutarnje strukture Zemlje, pomaže i u prepoznavanju potencijalnih prijetnji od potresa, procijeni rizika za građevinske objekte, infrastrukturu i ljudske živote te doprinosi sigurnosti i održivom urbanom planiranju i razvoju. Prva revizija za potrese na području Hrvatske, u kojoj je i Hrvatski katalog potresa poprimio današnji oblik, napravljena je za razdoblje od 1908. do 1992. godine [7]. Analize seizmičnosti za kasnija razdoblja, kao što su od 1993. – 1996., 1997. – 2001., 2002. – 2005. i 2006. – 2015. godine, dokumentirane su u odgovarajućim radovima (npr. Markušić i sur., 1998; Ivančić i sur., 2002; Ivančić i sur., 2006; Ivančić i sur., 2018). Ovaj rad je svojevrsni nastavak analize seizmičnosti na području Hrvatske, a u njemu će se razmatrati razdoblje od 2016. do 2020. godine.

Cilj rada je provesti prostornu i vremensku analizu potresa na području cijele Hrvatske i njezine okolice, provjeriti prati li pojava potresa Poissonovu razdiobu te procijeniti magnitudu potpunosti Hrvatskog kataloga potresa i parametre Gutenberg-Richterovog zakona za razmatrano razdoblje. U istraživačkom dijelu ovog rada primijenjene su dvije metode temeljene na analizi kataloga potresa za procjenu magnituda potpunosti. Obje metode primijenjene su na

originalnom (ne-deklasteriranom) i deklasteriranom katalogu kako bi se dodatno istražio njihov utjecaj na procjenu magnitude potpunosti. Na kraju, provedena je i detaljnija analiza pojedinih regija koje uključuju istočnu Hrvatsku, središnju i sjevernu Hrvatsku, zapadnu Hrvatsku i južnu Hrvatsku.

2. Teorijska podloga

Potres je iznenadno i naglo oslobađanje nakupljene potencijalne energije unutar nekog ograničenog područja u Zemljinoj unutrašnjosti. Oslobodena energija najvećim dijelom troši se na trenje i razne toplinske učinke, a svega otprilike 10 % energije oslobađa se u obliku prostornih (engl. *body waves*) seizmičkih valova. Najčešći potresi su tektonski potresi (> 90 %) u Zemljinoj kori koji nastaju u trenutku kad dugotrajno nakupljene tektonske napetosti nadjačaju čvrstoću deformiranih stijena na nekom području. Tada u stijenama dolazi do pucanja i pomaka po posmičnoj pukotini ili rasjedu pri čemu se oslobađa dotad akumulirana elastična potencijalna energija. Tektonski potresi, u pravilu, najčešće nastaju na granicama tektonskih ploča gdje one međudjeluju i gdje dolazi do nakupljanja tektonskih napetosti zbog njihovog sudaranja, razmicanja, podvlačenja jedne pod drugu ili pomicanja jedne uz drugu. U praksi, upravo nam lokacije tih potresa pomažu u određivanju granica tektonskih ili litosfernih ploča [5].

Gibanje tla konstantno se bilježi na seizmološkim postajama pomoću seizmografa koji bilježe i seizmičke valove uzrokovane potresom. Na temelju nastupnih vremena zabilježenih seizmičkih valova zaključuje se o njihovom mjestu izvora i vremenu nastanka. Izvor, odnosno točka na rasjednoj plohi u kojoj je došlo do početnog sloma i naglog oslobađanja dotad nakupljene energije u stijenama naziva se žarište potresa ili hipocentar. Epicentar potresa tada je točka na površini Zemlje koja se nalazi vertikalno iznad žarišta [5]. Vrijeme nastanka potresa određeno je godinom, mjesecom, danom, satom, minutom i sekundom u kojoj je nastupio potres [24], a uz navedene parametre, procjenjuje se i magnituda potresa – mjera koja opisuje količinu oslobođene elastične energije potresa [5]. Epicentri potresa mogu se locirati ako postoji zapis na barem tri seizmološke postaje uz primjenu modela unutrašnjosti Zemlje i numeričkih postupaka, dok je za određivanje dubine žarišta potrebno najmanje četiri seizmološke postaje. Određeni broj postaja čiji se podaci prikupljaju u realnom vremenu i analiziraju čine seizmološku mrežu. Preciznost zabilježenih položaja i vremena nastanka potresa ovisit će o gustoći seizmološke mreže i njezinom prostornom rasporedu, odnosno obliku i geometriji. Pouzdaniji parametri potresa mogu se postići uz dovoljno gustu mrežu kvalitetnih seizmografa i njezin povoljan oblik te uz primjenu odgovarajućeg modela Zemlje. Također, gušća mreža i osjetljiviji instrumenti omogućit će detekciju i lociranje i vrlo do izuzetno slabih potresa [5].

2.1. Katalog potresa

Katalog potresa jedan je od najvažnijih produkata seizmologije jer pruža sveobuhvatnu bazu podataka koja se koristi u istraživanjima seizmičke aktivnosti nekog područja, fizike potresa i ishodište je postupaka za određivanje seizmičkog hazarda. Katalog potresa sastoji se od osnovnih parametara i izbornih parametara važnih za određene upotrebe kataloga [24]. Osnovne parametre kataloga čine parametri potresa i , po potrebi, jedinstveni identifikacijski broj potresa koji omogućuje praćenje promjena vrijednosti parametara unutar kataloga. Tako se za svaki potres u katalog unosi vrijeme nastanka potresa s preciznošću od najmanje 0.01 sekunde, geografska širina i geografska duljina epicentra, dubina žarišta i magnituda potresa. Izborne parametre kataloga čine podaci koji opisuju dodatna svojstva potresa ili su na neki način povezani s potresom. Primjer su nepouzdanosti lokacije epicentra i dubine žarišta potresa koje značajno ovise o geometriji i obliku seizmološke mreže te nepouzdanost magnituda. Na svakoj postaji, iz prikupljenih podataka, određuje se magnituda, a u katalog ulazi srednja vrijednost ili medijan tih magnituda uz pripadnu nepouzdanost. Zatim, broj podataka o nastupnim vremenima faza potresa korištenih za lociranje potresa, najveći opaženi makroseizmički intenzitet I_m , intenzitet u epicentru I_0 i drugi parametri koji mogu biti važni u procjeni kvalitete podataka [24].

Iako su katalozi potresa ključni alati za proučavanje i razumijevanje seizmičke aktivnosti, oni imaju svoje probleme i ograničenja. Idealno, svaki katalog trebao bi biti potpun i homogen. Potpun katalog potresa točno i pouzdano predstavlja cjelokupnu raspodjelu magnituda potresa u određenom razdoblju na određenom geografskom području, dok je homogen katalog stvoren dosljednom primjenom metodologija i kriterija prikupljanja podataka te konzistentnom obradom istih [15]. No zbog različitih faktora, katalozi su vrlo često nepotpuni i nehomogeni. Važan utjecaj na potpunost kataloga ima osjetljivost seizmološke mreže. Mnogi potresi su preslabi da bi bili zabilježeni na dovoljnom broju postaja ili da bi se mogli razlikovati od tzv. seizmičkog nemira na seizmogramu. Stoga će područja pokrivena većim brojem postaja i osjetljivijim instrumentima te povoljnijim oblikom seizmološke mreže imati bolju mogućnost bilježenja slabijih potresa od područja pokrivenih manjim brojem postaja i nepovoljnim oblikom mreže. Ovo, osim potpunosti, doprinosi i homogenosti kataloga jer smanjuje varijacije u magnitudi potpunosti među različitim područjima. Mnogi drugi uzroci poput promjena i napretka u tehnologiji i obradi podataka, ratova i slično, nepovoljno utječu na homogenost kataloga smanjujući je u vremenu. Zbog toga, prije svake analize kataloga potresa važno je

odrediti magnitudu potpunosti kataloga M_c (engl. *completeness magnitude*). To je najmanja magnituda pri kojoj smo sigurni da su svi potresi magnitude veće ili jednake njoj zabilježeni u katalogu [15].

2.2. Gutenberg-Richterov zakon

Općenito, mnogim je istraživanjima uočeno da potresi manjih magnituda nastupaju češće od potresa većih magnituda. Odnos broja potresa i magnitude, odnosno učestalost ili frekvencija potresa, na nekom području u određenom vremenu iskazuje se Gutenberg-Richterovim zakonom (poznato i kao Gutenberg-Richterova relacija ili razdioba):

$$\log N = a - bM \quad (2.1)$$

gdje je N broj potresa magnitude veće ili jednake M , a a i b koeficijenti. Drugim riječima, ovaj zakon opisuje statističku učestalost potresa s obzirom na magnitudu. Koeficijent a predstavlja ukupan broj potresa ($M \geq 0$) u određenom razdoblju u zadanom geografskom području. Koeficijent b nešto je većeg znanstvenog interesa jer opisuje koliko se slabih potresa događa u odnosu na jake potrese. Vrijednost koeficijenta b ne varira značajno od regije do regije, a u seizmički aktivnim područjima nalazi se u rasponu između 0.6 i 1.4, pri čemu je najčešća vrijednost vrlo bliska jedinici [20]. To znači da ako je $b = 1.0$ da će za svaku jedinicu smanjenja magnitude potresa biti deset puta više [5]. Ponekad se Gutenberg-Richterov zakon iskazuje pomoću prirodnog logaritma:

$$\ln N = \alpha - \beta M \quad (2.2)$$

gdje N i M imaju jednako značenje kao i u izrazu 2.1. Koeficijenti α i β mogu se razlikovati od koeficijenata a i b , ali u osnovi, oba oblika prenose isti temeljni odnos broja potresa i magnitude. Odabir logaritamske baze često je stvar pogodnosti i matematičkih svojstava relevantnih za provedbu određene analize. U izrazima 2.1 i 2.2 broj potresa N još nazivamo i kumulativnom sumom potresa. Gutenberg-Richterov zakon može se računati i nekumulativno [5] gdje se umjesto kumulativne sume potresa koristi nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi koja govori koliko se potresa određene magnitude dogodilo u razmatranom razdoblju na razmatranom području.

Koeficijente Gutenberg-Richterovog zakona možemo izračunati iz kataloga potresa metodom najmanjih kvadrata. No, pokazalo se da primjena ove metode daje pristrane rezultate

i značajno podcjenjuje vrijednost parametra b . U razmatranim kraćim vremenskim razdobljima nije nužno da će se dogoditi snažniji potresi što će bitno utjecati na pravac prilagodbe. Broj potresa s povećanjem magnitude, u tim slučajevima, opada brže nego što pravac dobiven metodom najmanjih kvadrata sugerira [17]. Zbog toga, vrijednosti koeficijenata a i b procjenjujemo metodom najveće vjerodostojnosti (*engl. Maximum Likelihood Method*) koju je predložio Aki (1965), a koja daje veći značaj manjim magnitudama u odnosu na veće.

Pretpostavimo da je magnituda potpunosti M_c najmanja magnituda pri kojoj je katalog potresa potpun. Promatramo potrese magnitude veće ili jednake od magnitude potpunosti M_c . U analizi polazimo od Gutenberg-Richterovog zakona (izraz 2.2.) koji koristi prirodni logaritam i iz kojeg slijedi:

$$N = e^{\alpha - \beta M} \quad (2.3.)$$

$$N_0 = e^{\alpha - \beta M_c} \quad (2.4.)$$

gdje je N ukupni broj potresa većih ili jednakih M , a N_0 ukupni broj potresa većih ili jednakih od M_c . Vjerojatnost da se dogodi potres magnitude veće ili jednake od M_c i manje ili jednake od M dana je omjerom broja povoljnih događaja $N_0 - N$ i ukupnog broja svih događaja N_0 :

$$F(M) = \frac{e^{\alpha - \beta M_c} - e^{\alpha - \beta M}}{e^{\alpha - \beta M_c}} = 1 - e^{-\beta(M - M_c)} \quad (2.5.)$$

Vjerojatnost da kontinuirana slučajna varijabla, u ovom slučaju M , poprimi vrijednost u intervalu $M_c \leq M < \infty$ možemo odrediti i pomoću funkcije gustoće vjerojatnosti $f(M)$:

$$F(M) = \int_{M_c}^M f(M) dM \quad (2.6.)$$

Znajući funkciju razdiobe (izraz 2.5.), funkcija gustoće vjerojatnosti $f(M)$ određena je prvom derivacijom funkcije razdiobe po magnitudi:

$$f(M) = \frac{dF(M)}{dM} = \beta e^{-\beta(M - M_c)} \quad (2.7.)$$

gdje je β nepoznati parametar kojeg određujemo metodom najveće vjerodostojnosti.

Pretpostavimo uzorak od n potresa s magnitudama M_1, M_2, \dots, M_n većih ili jednakih M_c . Funkcija vjerodostojnosti L (*engl. likelihood function*) govori kolika je vjerojatnost opažanja pretpostavljenog uzorka od n potresa za različite vrijednosti parametra β , a definirana je kao umnožak funkcija gustoća vjerojatnosti (izraz 2.7.) za svako mjerenje:

$$L = \prod_i^n f(M_i) = \prod_i^n \beta e^{-\beta(M_i - M_c)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.8.)$$

Tražena vrijednost parametra β je ona najvjerojatnija vrijednost, odnosno ona za koju je funkcija vjerodostojnosti L najveća. Radi jednostavnijeg računa, na funkciju L primjenjuje se prirodni logaritam:

$$\ln L = \ln \prod_i^n \beta e^{-\beta(M_i - M_c)} \quad (2.9.)$$

Prirodni logaritam je monotona funkcija, pa određivanje maksimuma funkcije $\ln L$, umjesto L , ne utječe na konačnu procjenu parametra β . Pravilom logaritma umnoška, izraz se pojednostavljuje:

$$\ln L = n \ln \beta - \beta \sum_i^n (M_i - M_c) \quad (2.10.)$$

Maksimum funkcije $\ln L$ određuje se izjednačavanjem prve derivacije te funkcije po parametru β s nulom:

$$\frac{d \ln L}{d\beta} = 0 \quad (2.11.)$$

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{n} \sum_i^n M_i - \frac{1}{n} \sum_i^n M_c \quad (2.12.)$$

Prvi član s desne strane izraza 2.12. je suma svih magnituda podijeljena s ukupnim brojem magnituda što daje srednju magnitudu \bar{M} . Suma u drugom članu s desne strane izraza 2.12 jednaka je umnošku broja potresa n i pretpostavljene magnitude potpunosti M_c . Vrijednost parametra β , procijenjena metodom najveće vjerodostojnosti, tada je dana s

$$\beta = \frac{1}{\bar{M} - M_c} \quad (2.13.)$$

Veza parametara $\beta = b / \log_{10} e$ [1] daje procjenu parametra b metodom najveće vjerodostojnosti:

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_c} \approx \frac{0.43429}{\bar{M} - M_c} \quad (2.14.)$$

Posljedično, vrijednosti parametara α i a su:

$$\alpha = \ln N(M_c) - \beta M_c \quad (2.15.)$$

$$a = \ln N(M_c) - bM_c \quad (2.16.)$$

Ključna pretpostavka ove metode jest da je poznata magnituda potpunosti M_c koja izravno utječe na parametre Gutenberg-Richterovog zakona. No, u stvarnosti, ona nije poznata i potrebno ju je procijeniti.

2.3. Određivanje magnitude potpunosti

Prema Mignanu i Woessneru (2012) danas se u praksi koriste brojne metode za procjenu magnitude potpunosti, a možemo ih podijeliti u dvije osnovne skupine: metode temeljene na katalogu potresa (*engl. Catalog-based Methods*) i metode temeljene na mreži seizmoloških postaja (*engl. Network-based Methods*). Većina metoda temeljenih na katalogu baziraju se na valjanosti Gutenberg-Richterovog zakona, a dijele se na parametarske i ne-parametarske metode. Parametarske metode procjenjuju magnitudu potpunosti prilagodbom Gutenberg-Richterovog zakona na opaženu razdiobu broja potresa prema magnitudi. Ne-parametarske metode temeljene na katalogu potresa analiziraju promjene u razdiobi broja potresa prema magnitudi. U odnosu na metode temeljene na katalogu, glavna zadaća metoda temeljenih na seizmološkoj mreži nije procjena magnitude potpunosti, već određivanje vjerojatnosti opažanja potresa s obzirom na svojstva seizmološke mreže. Usprkos tome, rezultati ovih metoda mogu pomoći pri procjeni magnitude potpunosti kataloga. Treba naglasiti da u određivanju magnitude potpunosti veliku ulogu ima i iskustvo seizmologa, odnosno onog tko je određuje, jer ne postoji jedinstveni način, odnosno „najbolja“ metoda, kojom se određuje magnituda potpunosti kataloga te je preporučljivo oprezno koristiti više metoda kako bi se došlo do najbolje procjene.

Jedna od parametarskih metoda je metoda procjene prema stabilnosti koeficijenta b (*engl. M_c by b -value Stability*), u nastavku MBS [3]. Metoda analizira vrijednost koeficijenta b kao funkciju magnitude, a magnitudu potpunosti procjenjuje kao onu magnitudu iznad koje b poprima približno konstantnu vrijednost prema zadanom kriteriju: $|b_{sred} - b| \leq \delta b$. Drugim riječima, magnituda potpunosti je ona magnituda za koju se srednja vrijednost koeficijenta b prvi puta nalazi u granicama nepouzdanosti δb (detaljno pojašnjenje u poglavlju 3.2) [15]. Druga parametarska metoda je test dobrote prilagodbe (*engl. Goodness-of-Fit Test, GFT*) [3] koja uspoređuje opaženu razdiobu broja potresa prema magnitudi sa sintetičkom razdiobom izračunatom pomoću parametara a i b procijenjenih iz opaženog skupa podataka [15]. Treća

parametarska metoda je i metoda koja za procjenu magnitude potpunosti M_c uzima u obzir cijeli raspon magnituda potresa, uključujući i one potrese magnituda manjih od M_c (engl. *M_c from the Entire Magnitude Range, EMR*) [25]. Za magnitude veće od pretpostavljene magnitude potpunosti M_c , određuju se koeficijenti a i b Gutenberg-Richterovog zakona metodom najveće vjerodostojnosti, dok se za magnitude manje od M_c koristi statistički model temeljen na kumulativnoj normalnoj razdiobi potresa kako bi se procijenila vjerojatnost i brojnost slabijih potresa koji nisu u potpunosti zabilježeni u katalogu potresa [25].

Primjer ne-parametarske metode je metoda najveće zakrivljenosti (engl. *Maximum Curvature Method*, u nastavku MAXC) [22], [26] koja procjenjuje magnitudu potpunosti kao magnitudu kojoj odgovara točka najveće zakrivljenosti grafa razdiobe broja potresa prema magnitudi (detaljno pojašnjenje u poglavlju 3.2) [25]. Drugi primjer je metoda MBASS (engl. *the Median – Based Analysis of the Segment Slope*) [2] koja se temelji na iterativnom postupku određivanja nagiba segmenata krivulje nekumulativne razdiobe potresa prema magnitudi nakon čega se, za svaki segment, računa medijan njegovih nagiba. Metoda identificira magnitudu ispod koje krivulja nekumulativne sume naglo pada i koja se tumači kao granica ispod koje su potresi nepotpuno zabilježeni, odnosno kao magnituda potpunosti [15].

Za procjenu magnitude potpunosti M_c u ovom radu, odabrane su dvije metode temeljene na katalogu potresa – jedna ne-parametarska, metoda MAXC i jedna parametarska, metoda MBS. Metoda MAXC je odabrana jer je jednostavna za primjenu i interpretaciju. Procjena putem analize nagiba krivulje razdiobe broja potresa prema magnitudi pruža brzo određivanje i intuitivno razumijevanje granice ispod koje potresi mogu biti nepotpuno zabilježeni u katalogu potresa. Također, ova metoda ne zahtjeva pretpostavke o obliku razdiobe ili parametarsko modeliranje. S druge strane, metoda MBS upotrebljava parametarsko modeliranje procjenjujući M_c putem stabilnosti koeficijenta b Gutenberg-Richterovog zakona. Osim što ova metoda pruža statističko razumijevanje M_c i uvid u koeficijent b promatranog područja, ona je i jednostavna za primjenu. Odabir ovih metoda omogućuje bolje razumijevanje i precizniju procjenu M_c kombinirajući dva različita pristupa.

2.4. Deklasteriranje kataloga potresa

Prilikom analiziranja seizmičke aktivnosti nekog područja valja biti svjestan da svi potresi, zabilježeni u katalogu, nisu nužno međusobno nezavisni. Tektonske napetosti, koje uzrokuju potrese, ne otpuštaju se u cijelosti u jednom potresu, već je sustavu potrebno neko vrijeme da postigne novu ravnotežu. To uzrokuje pojavu nizova većih i manjih potresa koji mogu potrajati od nekoliko dana do nekoliko godina. Niz slabijih potresa koji slijedi glavni i najjači potres nazivamo naknadnim potresima (*engl. aftershocks*), a niz potresa koji ponekad prethode glavnom potresu nazivamo prethodnim potresima (*engl. foreshocks*) [5]. Deklasteriranje kataloga potresa je proces prepoznavanja i uklanjanja prethodnih i naknadnih potresa iz kataloga tako da on, u konačnici, sadrži samo glavne međusobno nezavisne potrese. Prepoznavanje naknadnih i prethodnih potresa nije nimalo jednostavan postupak. Ne postoji neko posebno obilježje koje bi razlikovalo njihove seizmograme od seizmograma glavnog potresa. No, možemo ih prepoznati na temelju njihovog prostornog i vremenskog odnosa s drugim potresima ili razmatranjem njihove učestalosti koja je znatno veća od prosječne učestalosti potresa u nekom razdoblju. Danas je razvijeno i dostupno nekoliko algoritama za deklasteriranje. Gardner i Knopoff (1972) predložili su algoritam koji upotrebljava takozvane vremensko-prostorne prozore. Za svaki potres magnitude M u katalogu, potresi koji ga slijede prepoznaju se kao naknadni ako su se dogodili u određenom vremenskom intervalu $T(M)$ i određenom intervalu udaljenosti $L(M)$ od tog potresa. Prethodni potresi prepoznaju se na jednak način. Nakon prolaska kroz katalog, vremensko-prostorni prozori modificiraju se prema magnitudi najvećeg potresa u nizu [21]. Brojni utjecaji, poput potresa koji su se dogodili izvan promatranog prostora i vremena, mogu uzrokovati pogrešno grupiranje potresa. Idealno, opisani algoritam kao i drugi dostupni algoritmi za deklasteriranje trebali bi se primjenjivati na potpunim i homogenim katalozima što u praksi nije moguće.

2.5. Pojava potresa kao Poissonov proces

Kada će se dogoditi sljedeći potres pitanje je na koje statistička analiza potresa u vremenu nastoji dati odgovor. Najjednostavniji model kojim možemo opisati pojavu potresa u vremenu je Poissonova razdioba:

$$p(n, t, \tau) = \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^n}{n!} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.17.)$$

gdje je $p(n, t, \tau)$ vjerojatnost da se dogodi n potresa u vremenu t , a τ prosječno vrijeme koje protekne između dva uzastopna potresa. Ključna pretpostavka ovog modela je da su potresi međusobno nezavisni, odnosno da pojava jednog ne utječe na pojavu drugog potresa te da se ne mogu dogoditi istovremeno [19]. Druga važna pretpostavka je da je očekivani broj potresa u razmatranom vremenu konstantan. Drugim riječima, pretpostavljamo da je srednja učestalost potresa, određena kao $\lambda = 1 / \tau$, konstantna u vremenu. Ako se pojava potresa pridržava Poissonove razdiobe, tada se vremenski intervali između uzastopnih potresa mogu opisati eksponencijalnom razdiobom. Vjerojatnost da će dva uzastopna potresa biti odvojena vremenskim intervalom δt tada je dana kao:

$$p(\delta t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{\delta t}{\tau}} \quad (2.18.)$$

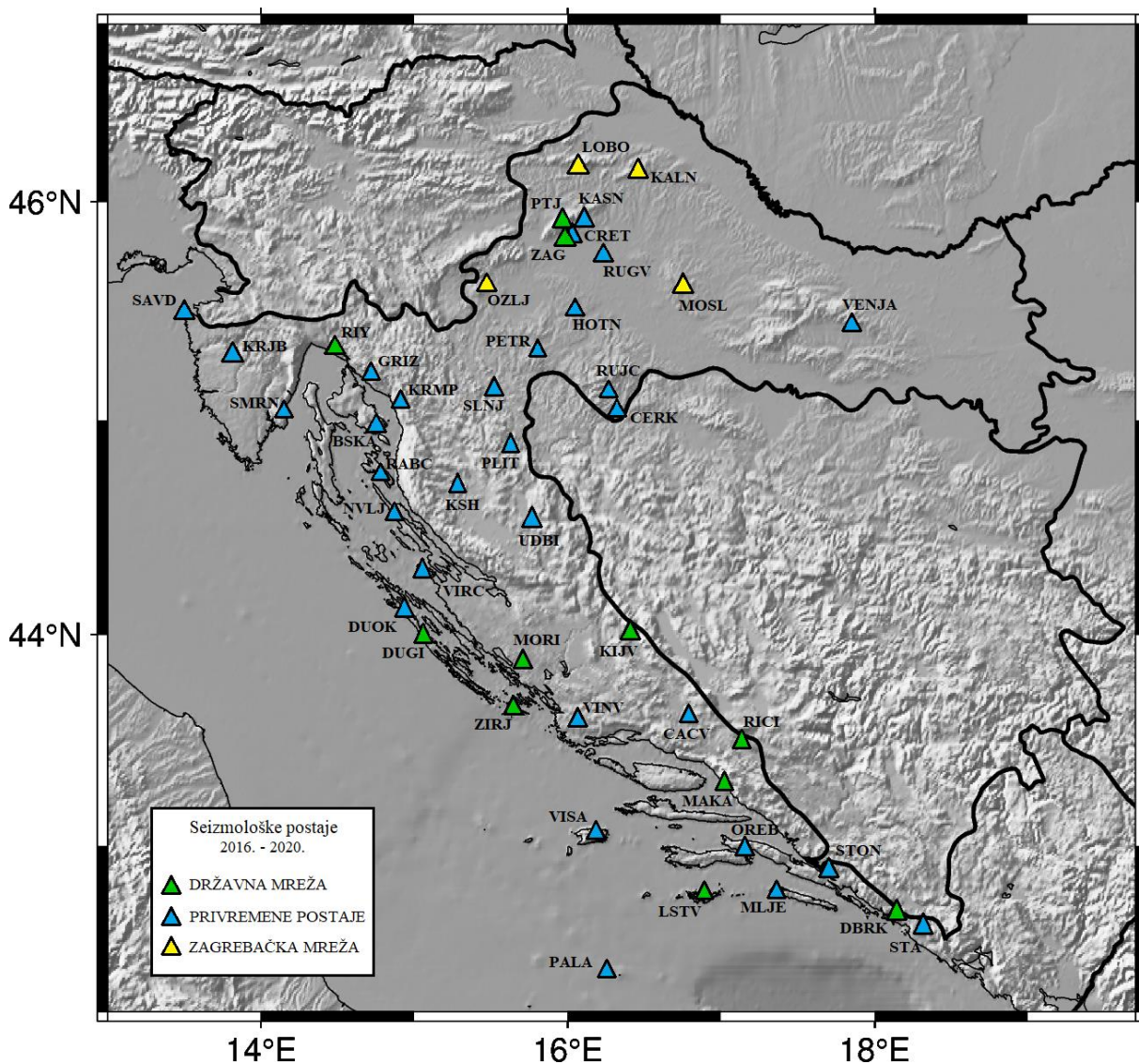
gdje je τ prosječno vrijeme koje protekne između dva uzastopna potresa.

Mnoga istraživanja pokazala su da Poissonov model vrlo dobro opisuje pojavu snažnih potresa. Međutim, kada je riječ o umjerenim i slabijim potresima te potresima koji se događaju na ograničenom geografskom području, Poissonova razdioba više nije tako dobar model. Jedan od ključnih razloga odstupanja leži u pretpostavci o neovisnosti događaja. U stvarnosti, potresi se vrlo često događaju u skupinama, kako u prostoru, tako i u vremenu. Na primjer, nakon snažnog potresa slijedi niz naknadnih potresa koji nisu neovisni od glavnog potresa. U takvim slučajevima, početna pretpostavka za primjenu ovog modela nije zadovoljena [20].

3. Podaci i metode

3.1. Hrvatski katalog potresa

Za analizu seizmičnosti na području Hrvatske u razdoblju 2016. – 2020. god., korišten je Hrvatski katalog potresa CEC2021A pohranjen u arhivu Geofizičkog odsjeka PMF-a. On sadrži potrese koji su locirani seizmogramima zabilježenim Hrvatskom mrežom seizmografa na slici 3.1 i seizmografima iz susjednih država s kojima je uspostavljena razmjena podataka.



Slika 3.1. Hrvatska mreža seizmoloških postaja u razdoblju 2016. - 2020. godine.

Lociranjem potresa bavi se Seizmološka služba Geofizičkog odsjeka PMF-a, te prema istraživačkim potrebama i interesu seizmolozi Geofizičkog zavoda Andrije Mohorovičića Geofizičkog odsjeka PMF-a. Današnji oblik katalog je poprimio tijekom analize za razdoblje 1908. – 1992. god. [7] te se redovito nadopunjuje novim podacima. Datoteka kataloga je ASCII numerički dokument s vrijednostima odvojenim zarezima (format .csv), a sadrži 25 stupaca. Za svaki potres koji se dogodio u Hrvatskoj i neposrednoj okolici, u prvom stupcu naveden je indeks s vrijednostima „01“ za standardni unos i „00“ za dvostruki unos. Stupci 2 – 7 navode datum natupa i hipocentralno vrijeme potresa prema UTC, a stupci 8 i 9 geografsku širinu i geografsku duljinu epicentra potresa u stupnjevima. U stupcu 11 zapisana je lokalna magnituda potresa M_L kao prosječna vrijednost magnituda zapisanih u stupcima 12 i 13, gdje se, u stupcu 12, za potrese nakon 2005. godine, navodi medijan magnituda sa svih seizmološkim postaja u Hrvatskoj, a u stupcu 13 magnituda potresa određena iz drugih izvora. Stupac 14 navodi makroseizmički intenzitet u epicentru, ako je određen, prema °EMS (°MSK prije 2018. godine). Nepouzdanosti epicentra i dubine žarišta u kilometrima zabilježene su u stupcima 15 i 16 redom, pri čemu vrijednost „99“ označava vrlo nepouzdanosti. Stupci 17 – 20 navode veliku i malu poluos te njihove pripadne azimute elipse neodređenosti. Lociranje potresa vrši se na temelju mjerenja nastupnih vremena faza potresa [5], pa je u stupcu 21 zabilježen broj faza uz pomoć kojih je lociran potres. Interval azimuta u kojem ne postoji ni jedan podatak o nastupnim vremenima (engl. *azimuthal gap*) naveden je u stupcu 22, a stupci 23 – 25 navode potrebne reference [7].

Za analizu seizmičnosti provedenu u ovom radu, prvo je bilo potrebno ukloniti dvostruke unose pomoću vrijednosti zapisanih u prvom stupcu Hrvatskog kataloga potresa. Kako je analiza rađena za razdoblje od 2016. do 2020. godine, za izdvajanje relevantnih potresa korišteni su stupci 2 – 4. Za prostornu i vremensku analizu seizmičnosti na području Hrvatske i neposredne okolice, uz datum nastupa potresa, korišteno je i hipocentralno vrijeme potresa, geografske koordinate epicentra i dubina žarišta potresa te magnituda, odnosno stupci 5 – 11. Dubina žarišta potresa često je manje precizno određena nego ostale karakteristike potresa jer se sva mjerenja provode na površini Zemlje [5], pa je u obzir uzet i stupac 16, odnosno nepreciznost dubine žarišta. Također, korišten je i stupac 21 u kojem je naveden broj faza pomoću kojih je lociran potres. Minimalni zahtjev za broj podataka o nastupnim vremenima faza potresa osigurao je da se u analizu uključe samo oni potresi za koje postoji dovoljno podataka za preciznije i

pouzdanije određivanje lokacije potresa. Područje Hrvatske i neposredne okolice razmatrano u ovoj analizi opisano je poligonom čije se geografske koordinate nalaze u Dodatku A. Poligon obuhvaća geografsko područje koje u potpunosti pokriva teritorij Republike Hrvatske te područje otprilike 40 km izvan njezinih administrativnih granica. U Dodatku B se nalaze geografske koordinate poligona razmatranih regija Hrvatske pri čemu njihove vanjske granice odgovaraju granicama poligona Hrvatske dok su unutarnje granice, na teritoriju Hrvatske, određene proizvoljno.

Unos, filtriranje i analiza podataka te potrebni izračuni provedeni su u programskom jeziku Python verzije 3.7.6. Za izradu geografskih karata korištena je biblioteka *PyGMT* koja omogućava uporabu funkcionalnosti biblioteke *Generic Mapping Tools* (GMT) kroz Python sintaksu.

3.2. Određivanje magnitude potpunosti Hrvatskog kataloga potresa

Prvi korak u analizi seizmičnosti bio je odrediti magnitudu potpunosti kataloga M_c . U tu svrhu korištene su dvije metode koje se temelje na katalogu potresa. Prva metoda je ne-parametarska metoda najveće zakrivljenosti (MAXC; [26], [22]) koja pruža izravan i brz način procjene magnitude potpunosti. Metoda razmatra frekvenciju potresa kao funkcija magnitude koja govori koliko se potresa određene magnitude dogodilo u razmatranom razdoblju na razmatranom području. Točka najveće zakrivljenosti funkcije, odnosno krivulje, određuje se računanjem najveće vrijednosti njezine prve derivacije. Magnituda koja odgovara toj točki definira se kao magnituda potpunosti kataloga M_c [25]. Kako bi se odredila frekvencija potresa (nekumulativna suma broja potresa) za razmatrani uzorak, raspon magnituda od 0.1 do 6.7 podijelio se na intervale veličine $dM = 0.1$, te se za svaki interval odredio pripadni broj potresa. Određivanje magnitude potpunosti kataloga tada se svelo na određivanje najveće vrijednosti nekumulativne sume, odnosno odabir intervala s najvećim brojem potresa.

Druga metoda je parametarska metoda kojom se magnituda potpunosti procjenjuje pomoću stabilnosti koeficijenta b Gutenberg-Richterovog zakona (MBS) kako su predložili Cao i Gao (2002). Vrijednost koeficijenta b izravno ovisi o odabiru magnitude potpunosti M_c što vidimo iz izraza dobivenog metodom najveće vjerodostojnosti:

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - (M_c - \frac{dM}{2})} \quad (3.1)$$

gdje je \bar{M} srednja vrijednost magnituda svih potresa u katalogu magnitude veće ili jednake M_c , a dM veličina intervala na koje je podijeljen raspon magnituda u katalogu [15]. Kao i kod metode MAXC, za veličinu intervala uzet je $dM = 0.1$. Metoda MBS pretpostavlja da će za magnitude M_c manje od stvarne magnitude potpunosti kataloga, vrijednost koeficijenta b s povećanjem M_c rasti prema svojoj stvarnoj vrijednosti, a da će za magnitude veće ili jednake stvarnoj magnitudi potpunosti, vrijednost koeficijenta b postići stabilnost – poprimiti približno konstantnu vrijednost. Prema tome, prvo je definiran interval mogućih magnituda potpunosti [0.0, 4.9] uz korak magnitude od 0.1, a zatim je za svaku M_c unutar tog intervala izračunata pripadna vrijednost koeficijenta b prema izrazu 3.1. Magnituda M_c nakon koje koeficijent b postigne stabilnost je prva magnituda u intervalu za koju vrijednost b zadovoljava kriterij [25]:

$$|b_{sred} - b| \leq \delta b \quad (3.2)$$

Pri čemu je b_{sred} srednja vrijednost koeficijenata b uzastopnih kandidata magnituda potpunosti za korak $dM = 0.5$ i veličinu intervala $\Delta m = 0.1$, definirana prema [15]:

$$b_{sred} = \sum_{M_c}^{M_c+dM} \frac{b(M_c)\Delta m}{dM}, \quad (3.3)$$

a δb nepouzdanost koeficijenta b određena kao [18]:

$$\delta b = 2.3 b^2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{N(N-1)}} \quad (3.4)$$

gdje je \bar{M} srednja magnituda i N broj potresa. Magnituda potpunosti kataloga je tada ona magnituda M_c za koju se vrijednost b_{sred} nalazi unutar granica nepouzdanosti koeficijenta b , odnosno u intervalu $[b - \delta b, b + \delta b]$.

3.3. Deklasteriranje Hrvatskog kataloga potresa

Deklasterirani katalog sadrži samo glavne, međusobno nezavisne potrese pa je iz originalnog kataloga bilo potrebno prvo prepoznati, a zatim ukloniti prethodne i naknadne potrese. Deklasteriranje kataloga provedeno je primjenom programa *Mainshock.exe* (Herak, 2022, osobna komunikacija) koji koristi metodu vremensko-prostornih prozora. Prozori se definiraju u odnosu na epicentar i vrijeme nastanka glavnog potresa magnitude M . Tako se prethodnim potresima smatraju svi potresi koji su se dogodili na epicentralnoj udaljenosti $R_{for}(M)$ [km] od glavnog potresa i najviše $T_{for}(M)$ dana prije glavnog potresa, dok se naknadnima smatraju svi potresi koji su se dogodili na epicentralnoj udaljenosti $R_{aft}(M)$ [km] od glavnog potresa i najviše $T_{aft}(M)$ dana nakon glavnog potresa. Parametri za radijus i vrijeme naknadnih potresa korišteni u programu prikazani su u tablici 3.1, uz pretpostavke $R_{for}(M) = R_{aft}(M)$, te $T_{for}(M) = T_{aft}(M) / 5$ [9]. Najmanji dozvoljeni iznosi prostornih i vremenskih udaljenosti za prethodne i naknadne potrese su 5 km i 15 dana. Program vraća katalog glavnih potresa u formatu *.csv* koji sadrži osnovne parametre potresa uz najveću magnitudu prethodnog i naknadnog potresa te broj prethodnih i naknadnih potresa magnitude veće od 1.0.

M	R_{aft} [km]	T_{aft} [dan]	T_{aft} [godina]
3.0	5.0	29.2	0.0799
3.2	5.0	34.9	0.0955
3.4	5.0	43.4	0.1187
3.6	5.0	55.2	0.1510
3.8	5.0	70.9	0.1942
4.0	5.0	91.3	0.2500
4.2	5.0	116.9	0.3201
4.4	5.0	148.4	0.4064
4.6	5.0	186.5	0.5107
4.8	5.0	231.8	0.6347
5.0	5.0	285.0	0.7803
5.2	5.0	346.7	0.9491
5.4	5.6	417.5	1.1430
5.6	7.4	498.0	1.3634
5.8	9.7	588.9	1.6122
6.0	12.8	690.6	1.8909
6.2	16.9	803.9	2.2010
6.4	22.3	929.2	2.5440
6.6	29.4	1067.0	2.9213
6.8	38.8	1217.9	3.3344
7.0	51.3	1382.3	3.7846

Tablica 3.1. Prostorni R_{aft} [km] i vremenski prozori T_{aft} [dani] te T_{aft} [godine] naknadnih potresa u ovisnosti o magnitudi M glavnog potresa.

3.4. Pojava potresa kao Poissonov proces

Kako bi provjerili prate li glavni potresi Poissonovu razdiobu, a vremena između dva uzastopna potresa pripadajuću eksponencijalnu razdiobu, bilo je potrebno odrediti empiričke razdiobe vjerojatnosti na temelju deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Za izračun je korišten programski jezik Python.

Za razdiobu vjerojatnosti broja potresa po danu, prvo je izračunat broj potresa koji su se dogodili svakog dana u razmatranom razdoblju. Zatim je određeno koliko je puta u uzorku opaženo k potresa u jednom danu za svaki k u rasponu od 0 do najvećeg opaženog broja potresa u danu. Empirička razdioba vjerojatnosti tada je dobivena kao omjer broja povoljnih događaja (koliko puta je opaženo k potresa u danu) i ukupnog broja događaja. Kako bi se odredila pripadajuća Poissonova razdioba, u Pythonu je kreirana funkcija prema izrazu 2.17. Kako empirička razdioba govori o vjerojatnosti po danu, za parametar t u Poissonovoj razdiobi također je uzet jedan dan. Parametar τ izračunat je kao prosječna vrijednost svih vremena između dva uzastopna potresa iz kataloga glavnih potresa, izražena u danima.

Empirička razdioba vjerojatnosti vremenskih intervala između dva potresa određena je na vrlo sličan način. Prvo, na temelju kataloga glavnih potresa, izračunata su vremena između dva uzastopna potresa u satima. Zatim je za svaki interval između dva potresa δt , u rasponu od nula sati do najveći opaženi broj sati između dva potresa, određeno koliko puta je opažen u uzorku. Razdioba vjerojatnosti ponovno je izračunata kao omjer povoljnih događaja (koliko puta su dva potresa bila vremenski udaljena za δt) i ukupnog broja događaja. Kako bi provjerili prati li dobivena empirička razdioba pripadajuću eksponencijalnu razdiobu temeljenu na Poissonovom modelu, u Pythonu je kreirana funkcija prema izrazu 2.18. Funkcija je zatim primijenjena na svakom intervalu δt kako bi dobili pripadajuću teorijsku vjerojatnost uz parametar τ , određen kao i u prethodnom slučaju, ali izražen u satima.

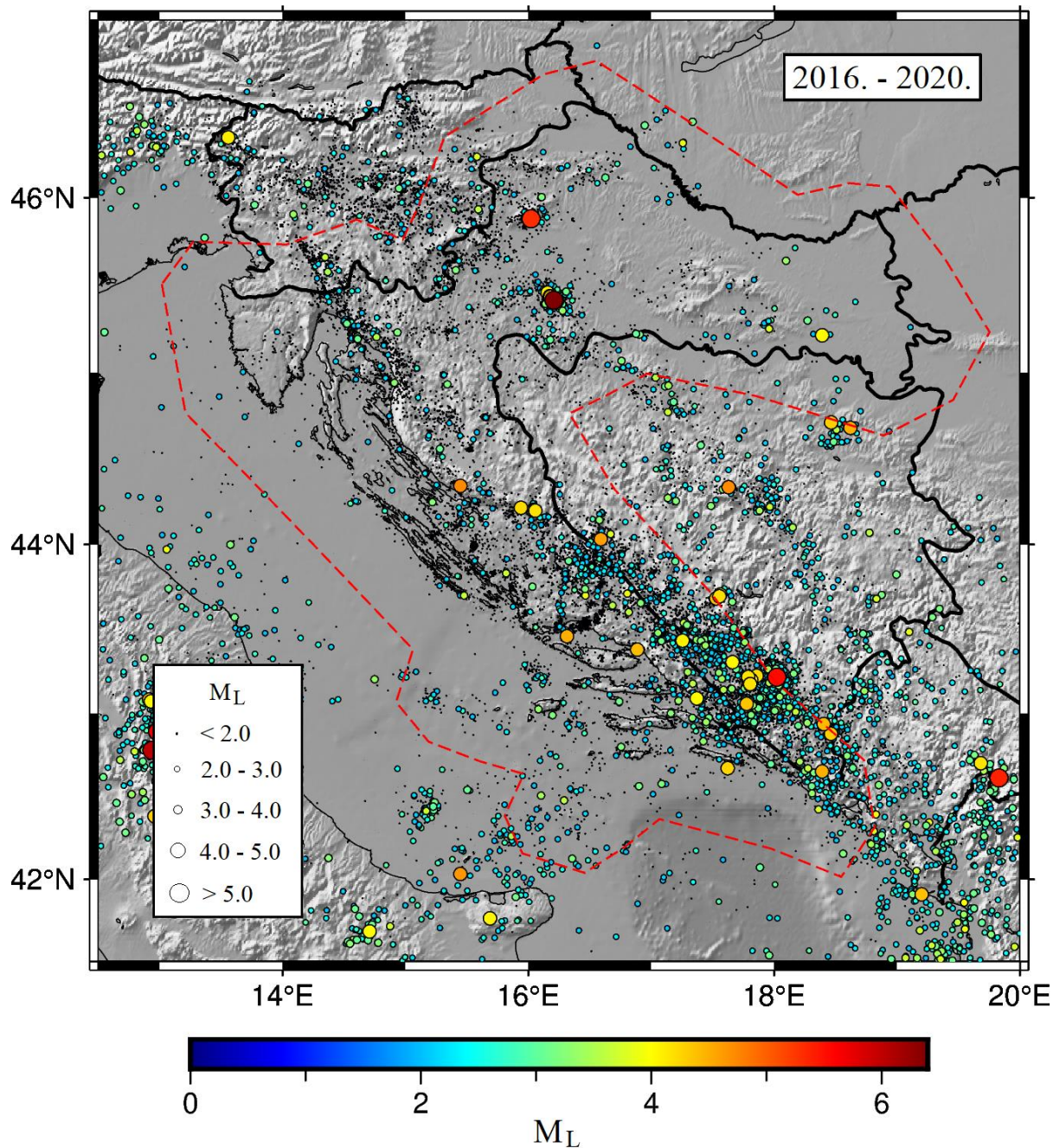
4. Rezultati i diskusija

4.1. Prostorna i vremenska analiza seizmičnosti Hrvatske

U razdoblju 2016. – 2020. godine zabilježen je ukupno 19721 potres, lociran s barem 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa, na području Hrvatske i njezine okolice označenom crvenom isprekidanom linijom na karti 4.1. Karta također prikazuje lokacije epicentara zabilježenih potresa, a na njoj se jasno ističu glavna seizmički aktivna područja: pojas na području Dalmacije i njezinog zaleđa, priobalni pojas od Ilirske Bistrice u Sloveniji do Senja, područja gorja Žumberka, Medvednice, Ivanšćice i Kalnika u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske te Petrove i Zrinske gore na jugu središnje Hrvatske. U ovom radu, posebna pažnja dana je potresima magnitude veće ili jednake 4.0. Popis od ukupno 20 glavnih potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ lociranih na području Hrvatske u razdoblju 2016. – 2020. godine, zajedno s njihovim osnovnim parametrima prikazan je u tablici 4.1. Najjači zabilježen potres u razmatranom razdoblju bio je lokalne magnitude 6.2 i dogodio se nedaleko od grada Petrinje u središnjoj Hrvatskoj 29. prosinca 2020. godine. Nešto ranije te godine, 22. ožujka 2020., u okolici grada Zagreba u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske zabilježen je i drugi najjači potres lokalne magnitude 5.3.

Žarišta zabilježenih potresa na području Hrvatske su plitka, a variraju između nekoliko kilometara do 40 kilometara dubine uz poneki zabilježeni dublji potres. Slika 4.2 prikazuje kartu epicentara svih potresa magnitude $M_L \geq 2.0$ na području Hrvatske i okolice u razdoblju 2016. – 2020. godine gdje boja kružića predstavlja dubinu žarišta dok je veličina kružića proporcionalna magnitudi potresa. Tako hladnije boje predstavljaju potrese s plićim žarištem, a toplije boje potrese s dubljim žarištem. Razmatranjem karte i prosječnih vrijednosti magnituda i dubina žarišta pojedinih regija nije pronađena jasna poveznica između magnitude potresa i njegove dubine žarišta. Najveći broj potresa dogodio se na dubini od 10 do 16 km. Raspodjela broja potresa prema dubini žarišta na području Hrvatske i okolice za razdoblje 2016. – 2020. godine prikazana je histogramom na slici 4.3. U obzir su uzeti svi potresi zabilježeni s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa i s nepouzdanošću dubine žarišta manjom od 4 km. Srednja dubina potresa na razmatranom području Hrvatske i okolice je 11.8 km, dok medijan iznosi 12.0 km. Prosječno, najplići potresi zabilježeni su u sjevernoj i središnjoj Hrvatskoj (8.2 km), dok su u južnoj Hrvatskoj, na području međudjelovanja Jadranske

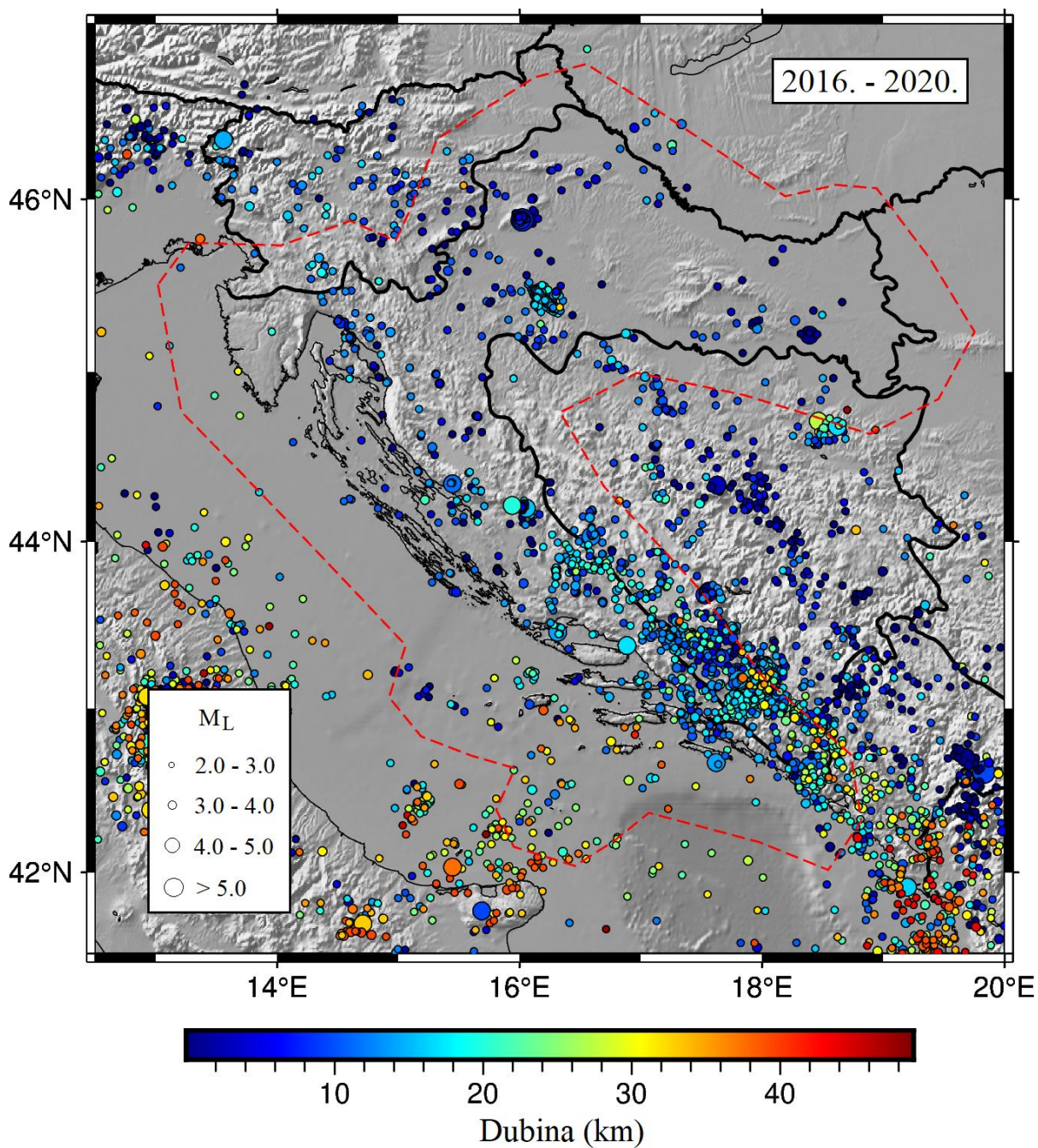
mikroploče s Euroazijskom pločom zabilježeni najdublji potresi (15.2 km) – tamo gdje je i kora najdeblja.



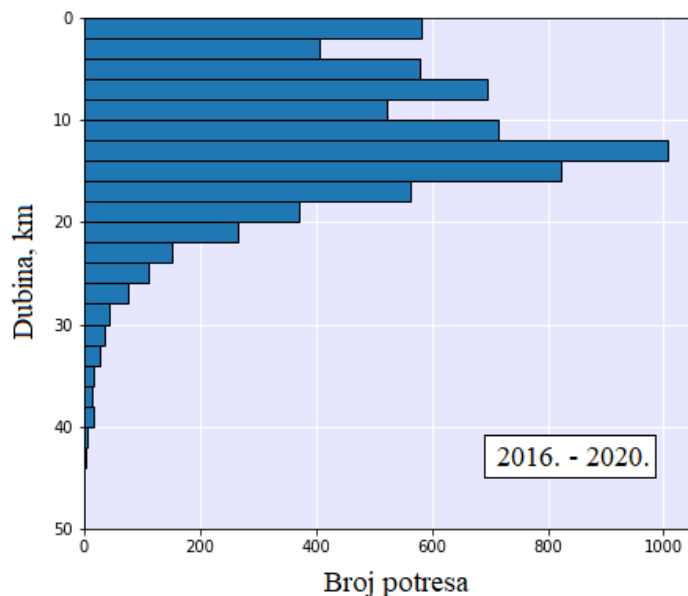
Slika 4.1. Epicentri potresa, 2016. – 2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Magnituda je označena bojom prema skali boja te je proporcionalna površini kruga. Crvena isprekidana linija označava razmatrano područje Hrvatske i okolice.

Datum	Vrijeme nastanka (UTC)	Epicentar		Dubina	M_L
		φ (°N)	λ (°E)	(km)	
8. siječnja 2016.	13:07:39.13	42.877	18.462	26.0	4.3
14. veljače 2016.	14:51:26.81	43.088	17.371	15.5	4.0
7. listopada 2016.	09:25:43.76	45.215	18.391	10.0	4.0
31. listopada 2016.	09:38:12.15	43.222	17.858	20.2	4.2
9. prosinca 2016.	12:56:58.32	43.458	16.314	13.9	4.5
23. prosinca 2016.	23:39:24.74	42.651	18.390	12.1	4.5
13. lipnja 2017.	22:29:09.37	43.199	17.812	11.2	4.1
28. kolovoza 2017.	04:01:49.87	43.304	17.661	8.5	4.0
3. studenog 2017.	12:59:29.72	43.216	17.789	11.0	4.2
3. veljače 2018.	12:53:08.67	43.378	16.886	17.1	4.4
30. kolovoza 2018.	03:33:01.88	44.030	16.590	12.8	4.6
7. rujna 2018.	20:35:03.38	43.432	17.254	12.4	4.1
8. studenog 2019.	01:26:03.61	42.671	17.622	14.0	4.3
6. veljače 2020.	04:10:11.62	44.197	16.057	15.4	4.2
22. ožujka 2020.	05:24:02.92	45.881	16.022	7.4	5.3
24. travnja 2020.	11:37:42.08	43.056	17.776	18.4	4.4
7. srpnja 2020.	09:45:06.69	43.174	17.805	14.5	4.2
20. rujna 2020.	10:59:02.92	44.214	15.939	20.0	4.2
1. studenog 2020.	13:15:41.57	44.342	15.447	11.4	4.7
29. prosinca 2020.	11:19:53.58	45.416	16.206	13.6	6.4

Tablica 4.1. Osnovni parametri glavnih potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ na području Hrvatske i njezine okolice u razdoblju 2016. – 2020. godine.



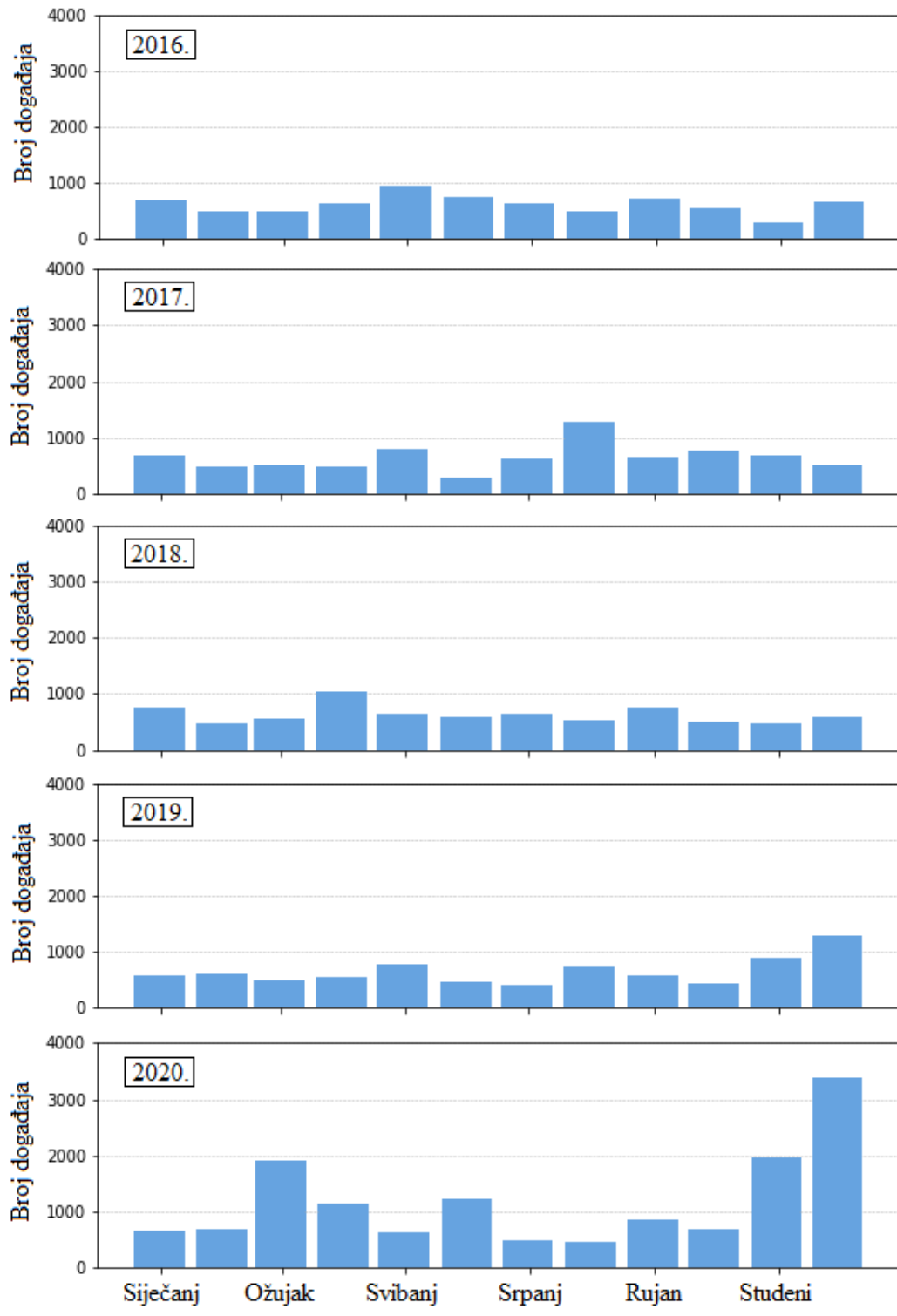
Slika 4.2. Epicentri potresa magnitude $M_L \geq 2.0$, 2016.-2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa u Hrvatskoj i okolici. Dubina žarišta označena je bojom simbola prema skali, a magnituda je proporcionalna površini simbola. Iz prikaza su isključeni svi potresi sa nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u katalogu).



Slika 4.3. Histogram dubina žarišta potresa na području Hrvatske i okolice, za razdoblje 2016.-2020. godine, lociranih s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa i s nepouzdanosću dubine žarišta manjom od 4 km.

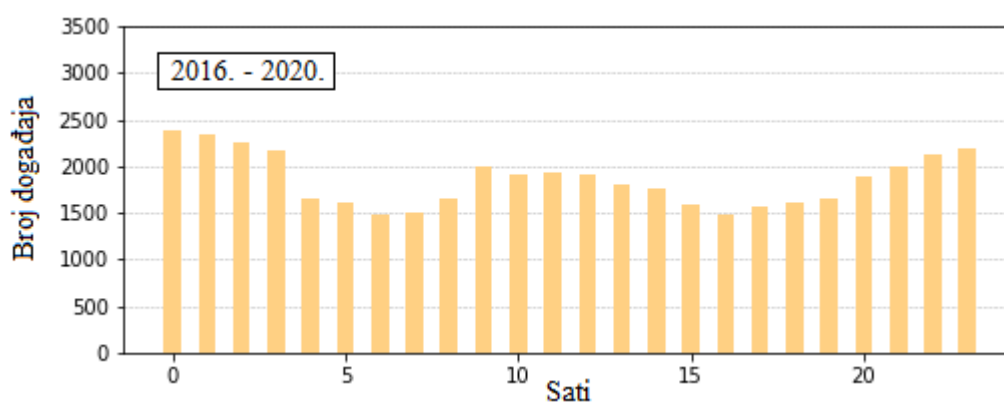
Vremenskom analizom potresa možemo dobiti dodatan uvid u seizmičnost kao i u promijene/razvoj seizmološke mreže na nekom području. Na slici 4.4 prikazana je raspodjela broja potresa po mjesecima za svaku godinu, zabilježenih u razdoblju od 2016. do 2020. godine na području Hrvatske i njezine okolice. Raspodjela za godine 2016. – 2019. ne pokazuje značajnu sezonsku varijabilnost broja potresa, odnosno ne može se izdvojiti mjesec u godini u kojem broj zabilježenih potresa značajno odstupa od ostatka godine. U 2020. godini zabilježeno je znatno više potresa od prethodnih godina. Izdvajaju se mjesec ožujak i prosinac što odgovara vremenima nastupa dva najjača zabilježena potresa u Hrvatskoj u razmatranom periodu (Zagrebački i Petrinjski potres). Jači potresi, u pravilu, rezultiraju jačim i češćim naknadnim potresima te duljim razdobljem pojačane seizmičke aktivnosti nakon potresa [5], pa je veći broj zabilježenih potresa u tim mjesecima, kao i susjednim mjesecima bio očekivan. Povećanje broja zabilježenih potresa s vremenom može biti i odraz bolje pokrivenosti područja seizmološkim postajama što omogućuje bilježenje većeg broja slabijih potresa.

Ne-tektonski događaji poput eksplozija u kamenolomima, potresa induciranih nuklearnim eksplozijama ili rudarenjem, mogu utjecati na kvalitetu analize provedene na katalogu i na općenito poznavanje seizmičnosti nekog prostora. Jedan od načina prepoznavanja



Slika 4.4. Histogram raspodjele broja potresa po mjesecu za svaku godinu u razdoblju od 2016. do 2020. godine, zabilježenih u Hrvatskom katalogu potresa na području Hrvatske i njezine okolice.

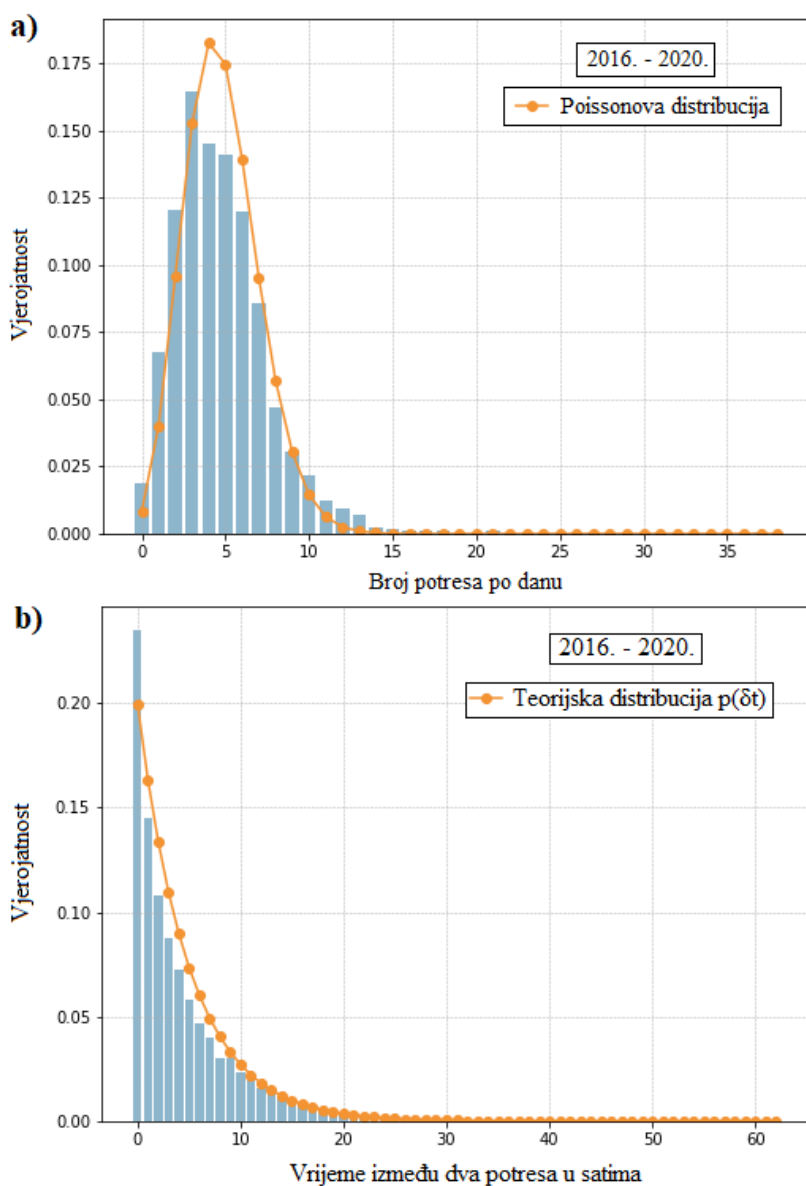
navedenih događaja je razmatranje broja potresa kao funkcije sata u danu kako je prikazano na slici 4.5. Najveći broj potresa na području Hrvatske i okolice u razdoblju 2016. – 2020. godine nastupio je u kasnim večernjim i ranim jutarnjim satima te u periodu od 9 h ujutro do 12 h (UTC). Tijekom tih dnevnih sati ljudska aktivnost je povećana, dok je tijekom noćnih sati ona smanjena što omogućava detekciju i bilježenje i onih slabijih potresa koji inače ne bi bili prepoznati od pozadinskog šuma na seizmogramu. Kako broj potresa u dnevnim satima nije izrazito velik, ovom jednostavnom analizom nije moguće zaključiti je li to blago povećanje broja potresa posljedica upravo ljudske aktivnosti ili se radi o prirodnoj varijabilnosti.



Slika 4.5. Histogram raspodjele broja potresa po satu u razdoblju od 2016. do 2020. godine, zabilježenih u Hrvatskom katalogu potresa na području Hrvatske i okolice.

Kako je već spomenuto u potpoglavlju 2.5 *Pojava potresa kao Poissonov proces*, najjednostavniji model kojim možemo opisati pojavu potresa u vremenu je Poissonov model. U cilju provjere usklađenosti potresa zabilježenih u Hrvatskom katalogu potresa (2016. – 2020. godine) s Poissonovom razdiobom, katalog je prvo bio deklasteriran, a zatim su određene empiričke razdiobe vjerojatnosti broja potresu po danu i vremenskih intervala između dva uzastopna potresa. Slika 4.6 a) prikazuje usporedbu empiričke razdiobe vjerojatnosti broja potresa po danu s teorijskom Poissonovom razdiobom. Empirička razdioba relativno dobro prati Poissonovu razdiobu što sugerira da su potresi u razmatranom katalogu glavnih potresa doista nasumični i međusobno nezavisni događaji te da se događaju konstantnom stopom u vremenu, prosječno 4.8 potresa po danu u razdoblju od 2016. – 2020. godine. Slika 4.6 b) prikazuje empiričku razdiobu vremenskih intervala između dva uzastopna potresa s eksponencijalnom razdiobom. Iz slike vidimo da je za prosječno vrijeme između dva potresa ($\tau = 5.01$ sat)

vjerojatnost znatno veća za manje intervale što se slaže s teorijskom razdiobom. Iako empiričke razdiobe dobro prate Poissonovu razdiobu, vidljiva su i jasna odstupanja jer model daje samo grubu aproksimaciju koja ne obuhvaća sveukupnu kompleksnost seizmičke aktivnosti na razmatranom području. No, koliko je uspješna sama prilagodba Poissonove razdiobe na empiričku može dati uvid koliko je dobro deklasteriran katalog potresa. Kao što je spomenuto



Slika 4.6. a) Usporedba empiričke i Poissonove razdiobe vjerojatnosti opažanja određenog broja potresa u danu; b) Usporedba empiričke i eksponencijalne razdiobe vjerojatnosti vremenskih intervala između dva uzastopna potresa. Razdiobe su određene na temelju deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa u razdoblju od 2016. – 2020. godine za područje Hrvatske i okolice.

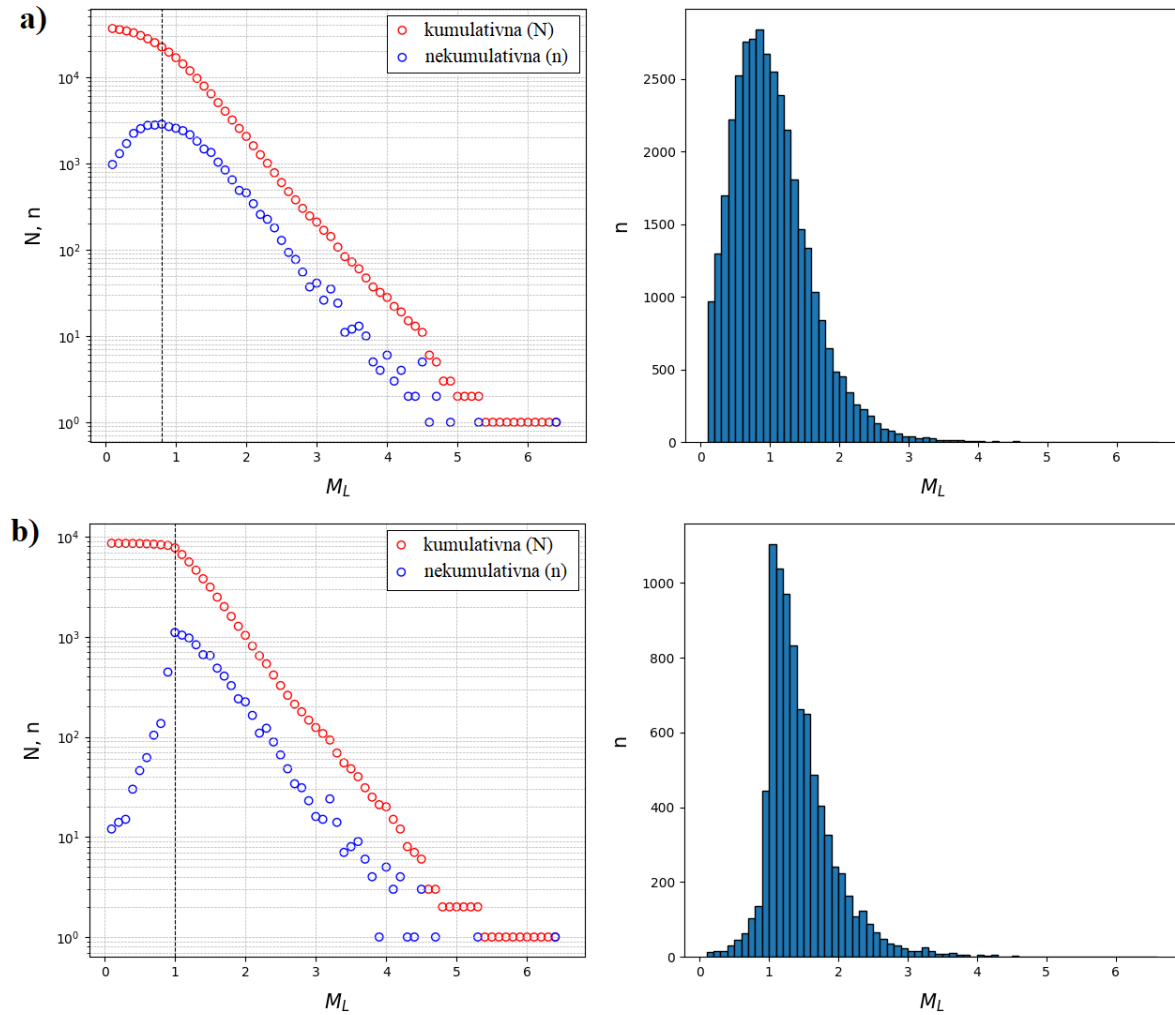
ranije, prepoznavanje i uklanjanje prethodnih i naknadnih potresa iz kataloga potresa vrlo je složen i nesavršen postupak. Na primjer, varijacijom parametara koji definiraju vremensko – prostorne prozore u korištenom programu za deklasteriranje (opisanom u poglavlju 3.3 *Deklasteriranje Hrvatskog kataloga potresa*) moguće je stvoriti inačice deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa koje će pokazivati različite razine odstupanja od Poissonove razdiobe ovisno o uspješnosti primijenjenog procesa deklasteriranja.

4.2. Magnituda potpunosti kataloga

Magnituda potpunosti kataloga M_c definira se kao najmanja magnituda pri kojoj su svi potresi magnitude veće ili jednake njoj pouzdano zabilježeni u katalogu [14]. Ispravna procjena magnitude potpunosti ključan je korak analize jer velika vrijednost M_c može rezultirati odbacivanjem korisnih podataka i nedostatnim uzorkom, dok mala vrijednost M_c može dovesti do pristrane analize i pogrešnog izračuna seizmičkih parametara zbog korištenja nepotpunih podataka. Današnje metode procjene M_c koriste različite pristupe i temelje se na različitim pretpostavkama te posljedično daju različite rezultate [15]. Zbog toga su u ovom radu, za što ispravniju procjenu, korištene dvije metode za određivanje magnitude potpunosti: metode MAXC i MBS (detaljnije opisane u poglavlju 3. *Podaci i metode*). Obje metode primijenjene su na originalnom i deklasteriranom Hrvatskom katalogu potresa u razdoblju od 2016. do 2020. godine.

Metoda MAXC procjenjuje magnitudu potpunosti kao onu kojoj odgovara točka najveće zakrivljenosti razdiobe broja potresa po magnitudi. U praksi, magnituda potpunosti odgovara intervalu magnitude s najvećom frekvencijom događaja [15]. Za originalni katalog, interval s najvećom frekvencijom događaja odgovara magnitudi $M_c = 0.8$ kako je prikazano na histogramu na slici 4.7 a) desno. Slika 4.7 a) lijevo prikazuje kumulativnu i nekumulativnu sumu za originalni katalog gdje je crnom vertikalnom, isprekidanom linijom označena procijenjena magnituda potpunosti. Vidimo da upravo njoj odgovara točka najveće zakrivljenosti nekumulativne sume potresa po magnitudi. Za deklasterirani katalog, procijenjena magnituda potpunosti je nešto veća. Interval s najvećom frekvencijom događaja odgovara magnitudi $M_c = 1.0$ kao što je prikazano na histogramu na slici 4.7 b) desno. Kao i kod originalnog kataloga,

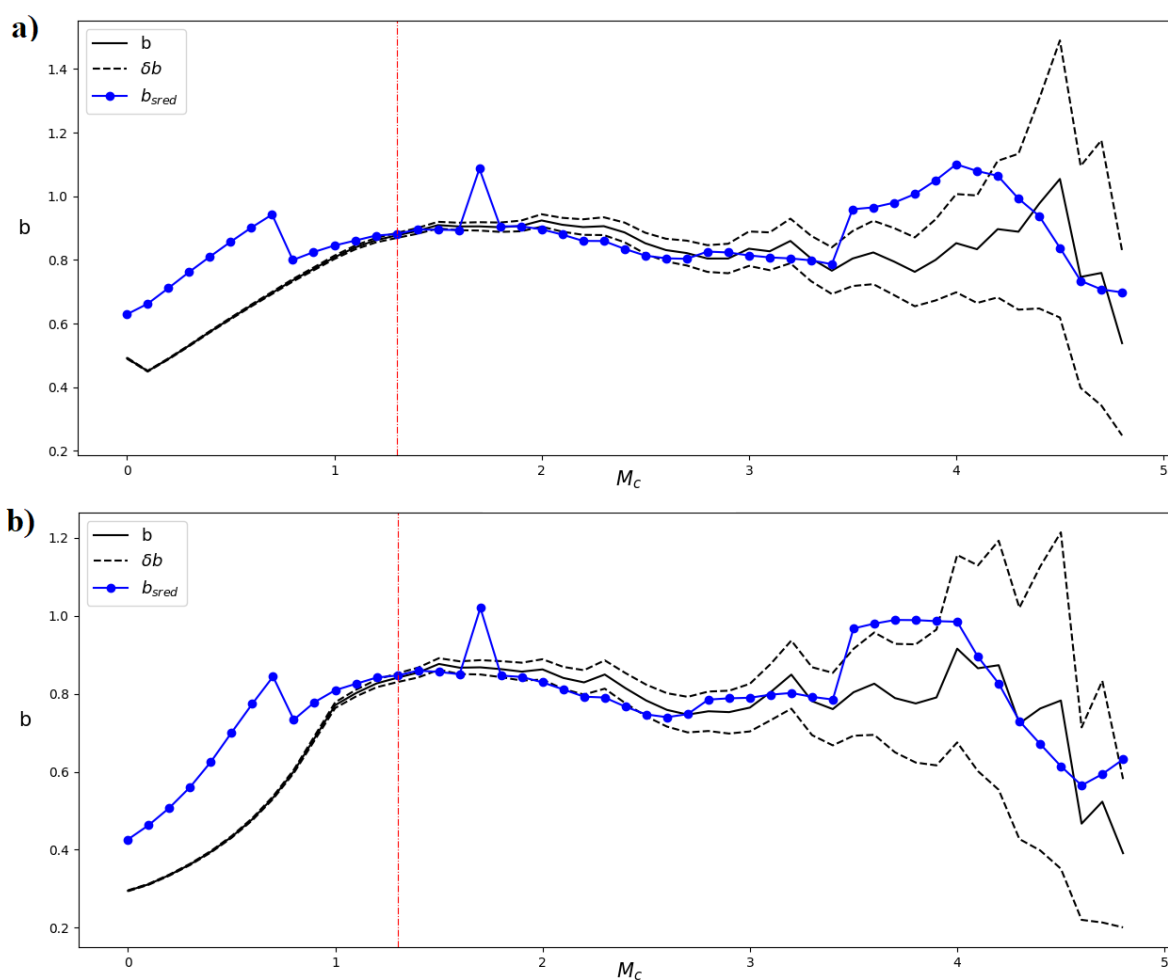
procijenjena magnituda potpunosti odgovara točki najveće zakrivljenosti nekumulativne sume deklasteriranog kataloga prikazane na slici 4.7. b) lijevo.



Slika 4.7. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa te histogram frekvencije broja potresa prema magnitudi za: a) originalni Hrvatski katalog potresa i b) deklasterirani Hrvatski katalog potresa za razdoblje 2016. – 2020. godine. Vertikalna isprekidana linija označava magnituda potpunosti procijenjene metodom MAXC.

Metoda MBS procjenjuje magnitudu potpunosti M_c razmatrajući promijene vrijednosti koeficijenta b Gutenberg-Richterovog zakona u ovisnosti o magnitudama kandidatima za M_c . Magnituda potpunosti tada je definirana kao prva magnituda za koju se pripadna srednja vrijednost parametra b nalazi unutar granica nepouzdanosti δb (izraz 3.4). Za magnitude veće od procijenjene M_c , koeficijent b poprima približno konstantnu vrijednost formirajući plato na b - M_c grafu [15]. Slika 4.8 prikazuje koeficijent b , njegovu srednju vrijednost b_{sred} i

nepouzdanost δb kao funkcije magnituda kandidata za M_c određene na originalnom katalogu potresa (a) i deklasteriranom katalogu potresa (b). Za originalni katalog srednja vrijednost b_{sred} prvi put se nalazi u granicama nepouzdanosti za magnitudu 1.3 (crvena, isprekidana vertikalna linija na slici 4.8a). Prema tome, magnituda potpunosti originalnog kataloga procijenjena MBS metodom iznosi $M_c = 1.3$.



Slika 4.8. Ovisnost koeficijenta b Gutenberg-Richterovog zakona, njegove nepouzdanosti δb i srednje vrijednosti b_{sred} o magnitudi potpunosti za: a) originalni Hrvatski katalog potresa i b) deklasterirani Hrvatski katalog potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Crvena, isprekidana vertikalna linija označava magnituda potpunosti procijenjene metodom MBS.

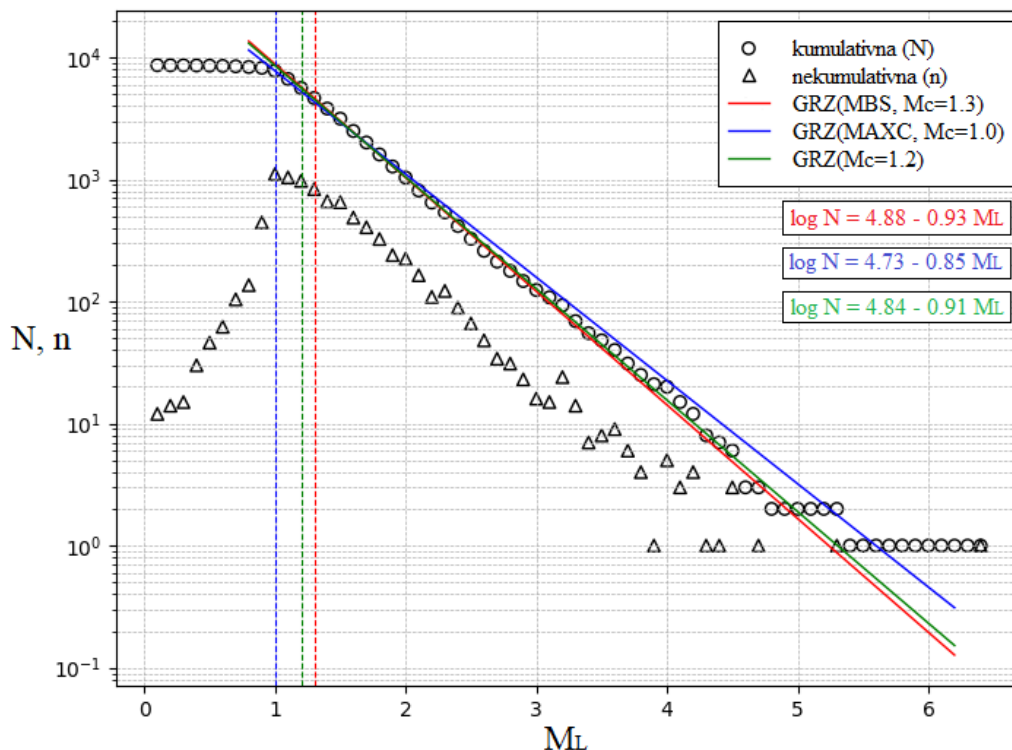
Analogno, za deklasterirani katalog potresa, magnituda potpunosti procijenjena metodom MBS je jednaka i iznosi $M_c = 1.3$ (crvena, isprekidana vertikalna linija na slici 4.8b). Oba grafa prikazuju porast vrijednosti koeficijenta b za magnituda manje od i plato za interval magnituda većih od procijenjene magnituda potpunosti što je u skladu s pretpostavkom ove metode. Za

magnituda veće od 3.5, dolazi do većih promjena u vrijednosti koeficijenta b jer se smanjuje broj potresa i procjena koeficijenta b postaje nestabilna [25].

U pravilu, metoda MAXC procjenjuje manju vrijednost magnituda potpunosti M_c , dok metoda MBS uglavnom daje nešto veću vrijednost, a vrlo često i stvarnu vrijednost M_c [15]. Prema rezultatima analize, provedene u ovom radu, možemo uočiti da je metodom MAXC zaista procijenjena manja vrijednost magnituda potpunosti, dok je metodom MBS procijenjena veća vrijednost magnituda potpunosti. Stoga se može zaključiti da stvarna vrijednost M_c leži u intervalu između dobivenih vrijednosti magnituda – za originalni katalog unutar [0.8, 1.3], a za deklasterirani katalog unutar [1.0, 1.3]. Također, iz rezultata se može vidjeti da je MAXC metoda dala veću procjenu magnituda potpunosti za deklasterirani katalog u odnosu na originalni katalog. Deklasterirani katalog sadrži samo glavne potrese koji u prosijeku imaju veće magnituda što rezultira i većom magnitudom potpunosti. Nadalje, korištenjem deklasteriranog kataloga uklanja se utjecaj manjih događaja kao i utjecaj prethodnih i naknadnih potresa što olakšava prepoznavanje seizmičkih obrazaca važnih za procjenu potresne opasnosti. Stoga, daljnja analiza u ovom radu provedena je na deklasteriranom katalogu potresa.

Metode MAXC i MBS temelje se na pretpostavci o samosličnosti, odnosno da statistička pojava potresa, koja uključuje i razdiobu broja potresa prema magnitudi, iskazuje relativno slična svojstva bez obzira na vrijeme i prostor u kojima je razmatrana. Ako potresi zabilježeni u razmatranom katalogu prate Gutenberg-Richterov zakon (izraz 2.1), magnituda potpunosti se može odrediti i kao najmanja magnituda za koju kumulativna suma potresa još uvijek prati pravac Gutenberg-Richterovog zakona [25]. Slika 4.9 prikazuje kumulativnu i nekumulativnu sumu broja potresa prema magnitudi te pravce Gutenberg-Richterovog zakona za tri procijenjene magnituda potpunosti na deklasteriranom Hrvatskom katalogu potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Plavi pravac odgovara $M_c = 1.0$ procijenjenoj metodom MAXC, crveni pravac $M_c = 1.3$ procijenjenoj metodom MBS, a zeleni pravac odgovara vlastitoj slobodnoj procijeni magnituda potpunosti $M_c = 1.2$. Gutenberg-Richterov pravac za magnituda potpunosti određenu metodom MAXC ne opisuje dobro točke kumulativne sume. Magnituda potpunosti je podcijenjena jer broj potresa s povećanjem magnituda opada znatno brže nego što pravac sugerira. Pravac za magnituda potpunosti određenu metodom MBS bolje prati točke kumulativne sume. No, ova metoda precjenjuje magnituda potpunosti [25] i pokazuje da broj potresa s povećanjem magnituda brže opada nego što je opaženo u analizi kataloga.

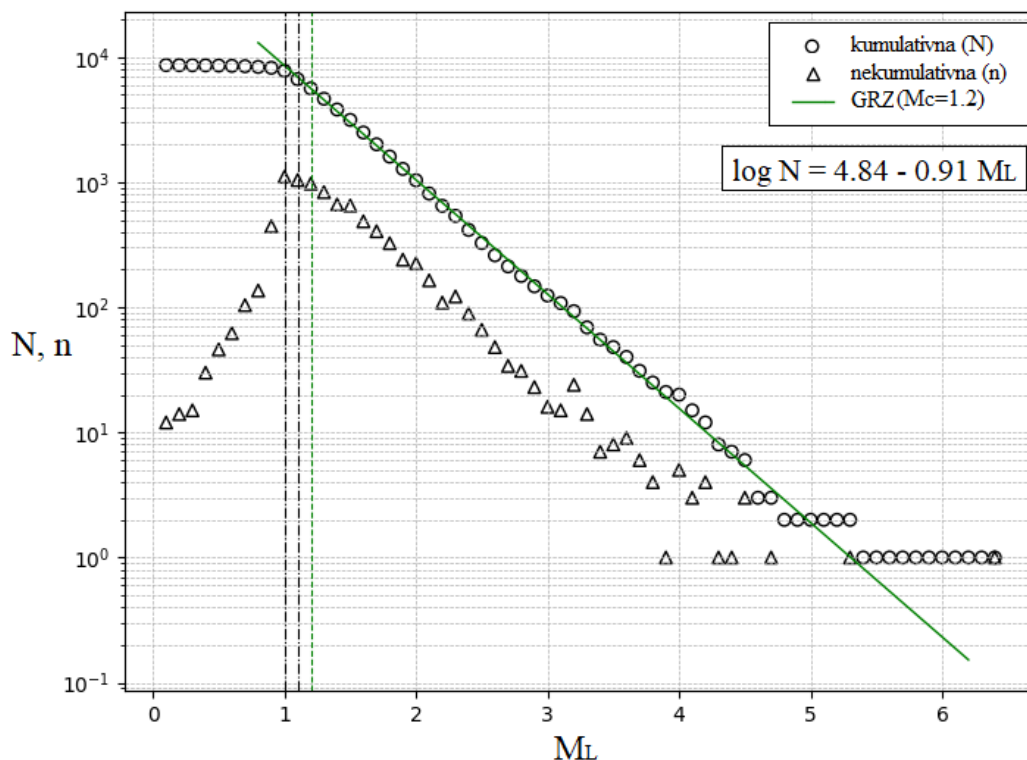
Prikazivanjem pravaca za različite magnitudo potpunosti, $M_c = 1.0, 1.2, 1.3$ određen je pravac koji najbolje opisuje kumulativnu sumu potresa i koji odgovara magnitudi 1.2. Stoga je za magnitudu potpunosti deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine uzeta $M_c = 1.2$.



Slika 4.9. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi na logaritamskoj skali za deklasterirani Hrvatski katalog potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Pravci prikazuju prilagodnu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ), a vertikalne linije magnitudo potpunosti: $M_c = 1.0$ (plavo), $M_c = 1.2$ (zeleno) i $M_c = 1.3$ (crveno).

Još uvijek ne postoji objektivna i standardizirana metoda za egzaktno određivanje magnitudo potpunosti kataloga potresa, a sama procjena često ovisi o iskustvu procjenitelja. Sama interpretacija magnitudo potpunosti također može predstavljati izazov u njezinoj procjeni jer postoje različiti pristupi, pri čemu neki smatraju da je M_c najmanja magnitudo koja prati Gutenberg-Richterov zakon [15], dok drugi smatraju da je ona najmanja magnitudo koja od njega odstupa [23]. Slika 4.10 prikazuje raspodjele broja potresa prema magnitudi u deklasteriranom Hrvatskom katalogu potresa za razdoblje od 2016. do 2020. godine. Na slici je prikazana i prilagodba Gutenberg-Richterovog zakona s procijenjenom magnitudom potpunosti kataloga od 1.2, uz vrijednosti parametara $b = 0.91$ i $a = 4.84$. Također, crnom vertikalnom

linijom označene su i druge moguće vrijednosti M_c : 1.1 kao najmanja magnituda koja prati Gutenberg-Richterov zakon i 1.0 kao najmanja magnituda koja od njega odstupa.



Slika 4.10. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi na logaritamskoj skali za deklasterirani Hrvatski katalog potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Zeleni pravac prikazuje prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ) za $M_c = 1.2$, dok crne vertikalne, isprekidane linije prikazuju moguće procijene M_c .

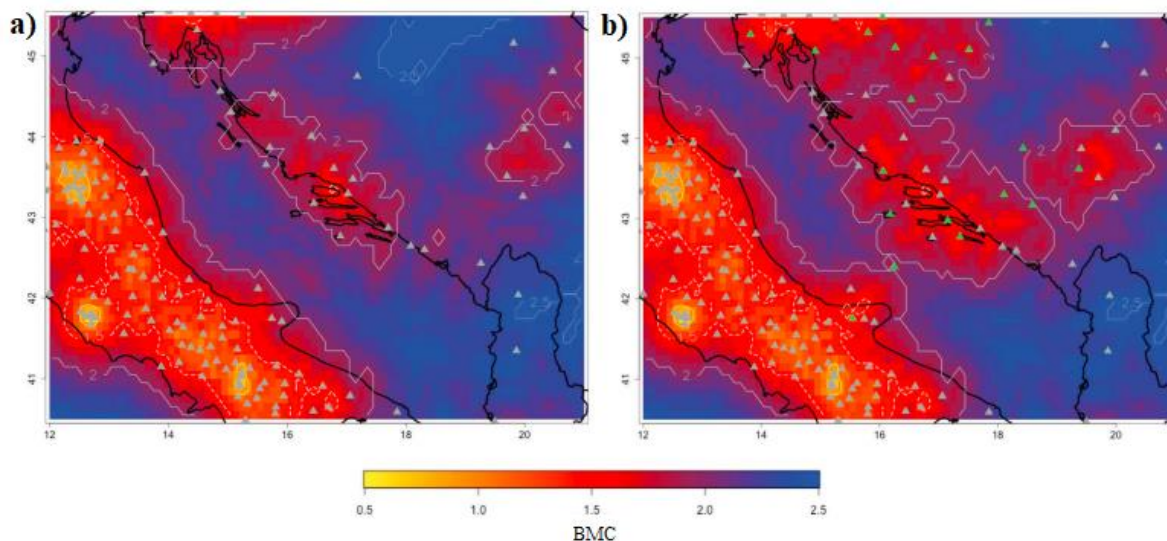
Pri usporedbi rezultata dobivenih metodama MAXC i MBS valja u obzir uzeti veličinu uzorka (broj događaja S u katalogu) na kojem su primijenjene te njihovo ponašanje u primjeni na realnim katalogima potresa. Slično istraživanje proveli su Woessner i Wiemer (2005). U njihovom istraživanju, analiza ovisnosti procijene magnitude potpunosti M_c o veličini uzorka provedena je na nekoliko sintetičkih kataloga. Rezultati su pokazali da metoda MBS snažno ovisi o veličini uzorka. Za male uzorke ($S \leq 250$) MBS metoda ima tendenciju podcijeniti M_c , dok se povećanjem uzorka nepouzdanost parametra b smanjuje što dovodi do strožeg kriterija (izraz 3.2) za procjenu M_c te i veće procijenjene vrijednosti M_c . S druge strane, MAXC metoda dosljedno daje nešto manje vrijednosti M_c od njezine stvarne vrijednosti bez obzira na veličinu uzorka što je čini pogodnijom za manje setove podataka. Nadalje, primjena ovih metoda na nekoliko realnih kataloga potresa, u istraživanju, pokazala je da MBS metoda vodi prema

najvećoj procijeni M_c u svim slučajevima dok MAXC metoda dosljedno podcjenjuje magnitudu potpunosti kataloga. Rezultati istraživanja provedenog u ovom radu vode do vrlo sličnih zaključaka. Obje metode primijenjene su na originalnom katalogu koji ukupno broji 44426 potresa i na deklasteriranom Hrvatskom katalogu potresa koji sadrži 8743 potresa na području Hrvatske. Metoda MAXC za originalni katalog daje procjenu $M_c = 0.8$, a za deklasterirani katalog $M_c = 1.3$. Procjena za originalni katalog nešto je manja, dok za deklasterirani katalog jednaka procjenama dobivenih metodom MBS, koje iznose 1.3 za originalni katalog i za deklasterirani katalog. Usporedbom pravaca Gutenberg-Richterovog zakona određenih za procijenjene magnitude potpunosti deklasteriranog kataloga, slika 4.9, vidimo da metoda MAXC podcjenjuje magnitudu potpunosti dok je metoda MBS malo precjenjuje.

Metoda MAXC može biti problematična kad se broj potresa postupno smanjuje kako se smanjuje magnituda [15]. Upravo takvo ponašanje pokazuje Hrvatski katalog potresa, a jedan od mogućih razloga je nehomogenost kataloga zbog obilježja seizmološke mreže. Zbog nepovoljnog oblika Hrvatske, neka su područja bolje „pokrivena“ seizmološkim postaja od drugih što u konačnici dovodi i do različitih magnituda potpunosti za različita područja. Dodavanjem seizmoloških postaja, koje bi seizmološku mrežu učinile gušćom i povoljnijom, nehomogenost kataloga može se smanjiti. U okviru međunarodnog projekta AlpArray-CASE, uz trajne i privremene seizmološke postaje institucija uključenih u ovaj projekt, na području središnjeg Jadrana i Dinarida na području Hrvatske i Bosne i Hercegovine, 2016. godine postavljeno je 10 privremenih seizmoloških postaja koje su bile aktivne 18 mjeseci [16]. Utjecaj dodatnih postaja na procjenu magnitude potpunosti, u sklopu ovog projekta, prikazan je na slici 4.11. Iz nje se jasno vidi kako unaprjeđivanje seizmološke mreže dovodi do manjih procjena magnituda potpunosti. Karte prikazuju očekivanu magnitudu potpunosti izračunatu metodom temeljenom na mreži seizmoloških postaja bez mreže AlpArray-CASE i sa mrežom AlpArray-CASE. Sa seizmološkom mrežom AlpArray-CASE u području južne Hrvatske očekuje se $M_c \approx 1.2 - 1.5$. U području zapadne Hrvatske, privremena seizmološka mreža postavljena u 2015. godini u okviru međunarodne inicijative AlpArray, smanjila je očekivanu vrijednost M_c ispod 1.5.

U detaljnijoj analizi pojedinih regija Hrvatske, za svaku od njih je procijenjena magnituda potpunosti pripadnog deklasteriranog kataloga potresa pomoću metode MBS. Odluka o primjeni metode MBS temeljila se na istraživanju opisanom u ovom poglavlju. Iako

se radi o manjim setovima podataka, oni su i dalje dovoljno veliki ($S > 200$) da metoda MBS ne podcjenjuje magnitudu potpunosti. Također, pravac prilagodbe Gutenberg-Richterovog zakona dobiven metodom MBS za cijelo područje Hrvatske puno bolje opisuje točke kumulativne sume broja potresa prema magnitudi u usporedbi s pravcem dobivenim pomoću metode MAXC.

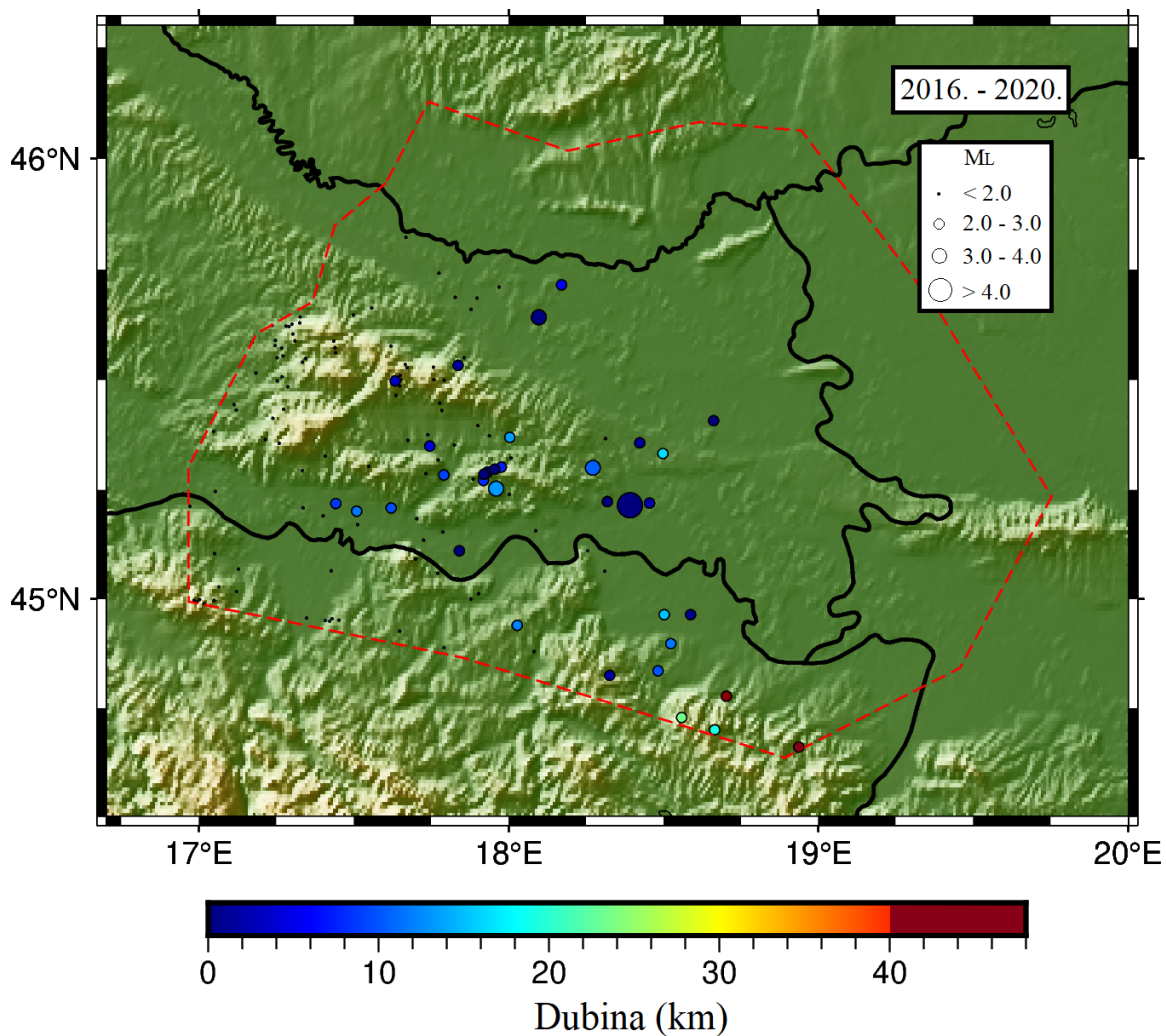


Slika 4.11. Karta Bayesove magnitude potpunosti za dio Hrvatske a) bez i b) sa postavljenim privremenim postajama AlpArray-CASE projekta u području južne Hrvatske i Bosne i Hercegovine. (Preuzeto iz [16].)

4.3. Istočna Hrvatska

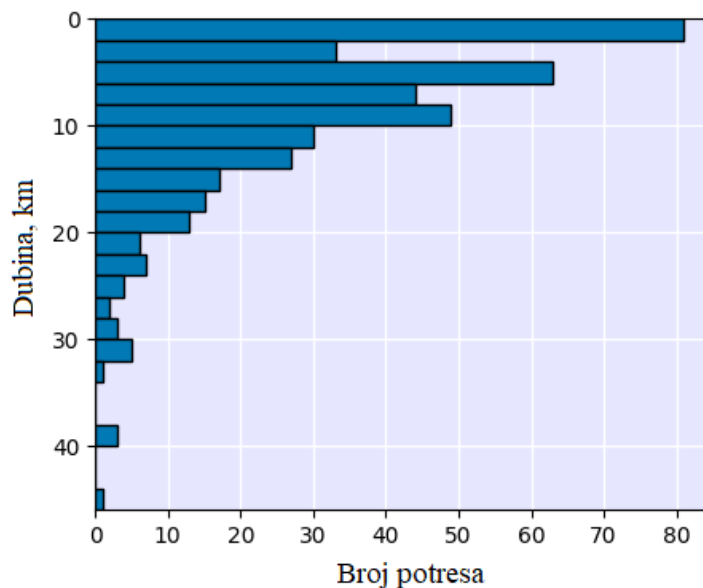
Istočna Hrvatska obuhvaća teritorij Slavonije, južnog dijela Baranje i zapadnog Srijema. Većim dijelom prostire se između rijeke Drave na sjeveru, Save na jugu, Dunava na istoku te planine Papuk i gorja Psunja na zapadu. Ovu regiju karakterizira difuzna i slaba do umjerena seizmička aktivnost. Potresi se događaju povremeno, unutar tektonske ploče i obično su manjih magnituda u usporedbi s drugim dijelovima Hrvatske [10]. Hrvatski katalog potresa u razdoblju od 2016. do 2020. godine na ovom području sadrži 406 potresa, od kojih je njih 140 locirano s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Epicentri lociranih potresa prikazani su na karti na slici 4.12, pri čemu površina kruga odražava magnitudu, a boja kruga dubinu žarišta potresa prema skali na dnu slike. Crvenom isprekidanom linijom označeno je razmatrano područje istočne Hrvatske i neposredne okolice. Općenito, seizmičnost istočne

Hrvatske u razmatranom razdoblju možemo opisati kao slabu do umjerenu s najaktivnijom zonom na području gora Psunj, Papuk, Dilj, Krndije i Požeške gore. Većina potresa je magnitude $M_L \leq 3.0$, četiri potresa zabilježeno je s magnitudom većom od 3.0, a samo je jedan potres magnitude $M_L \geq 4.0$. Najjači potres u razmatranom razdoblju na području istočne Hrvatske bio je magnitude 4.0, a dogodio se 7. listopada 2016. godine u blizini naselja Vrpolje, nedaleko grada Đakova. Potres je bio plitki s dubinom žarišta od svega 100 metara.



Slika 4.12. Epicentri potresa u istočnoj Hrvatskoj, 2016. – 2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Magnituda potresa označena je površinom simbola, a dubina žarišta bojom prema skali na dnu slike. Crvena isprekidana linija označava teritorij istočne Hrvatske.

Najveći broj potresa u istočnoj Hrvatskoj lociran je na dubini 1 – 10 km, sa srednjom dubinom žarišta od 8.8 kilometra. Slika 4.13 prikazuje razdiobu broja svih zabilježenih potresa prema dubini žarišta na razmatranom području za razdoblje od 2016. do 2020. godine.

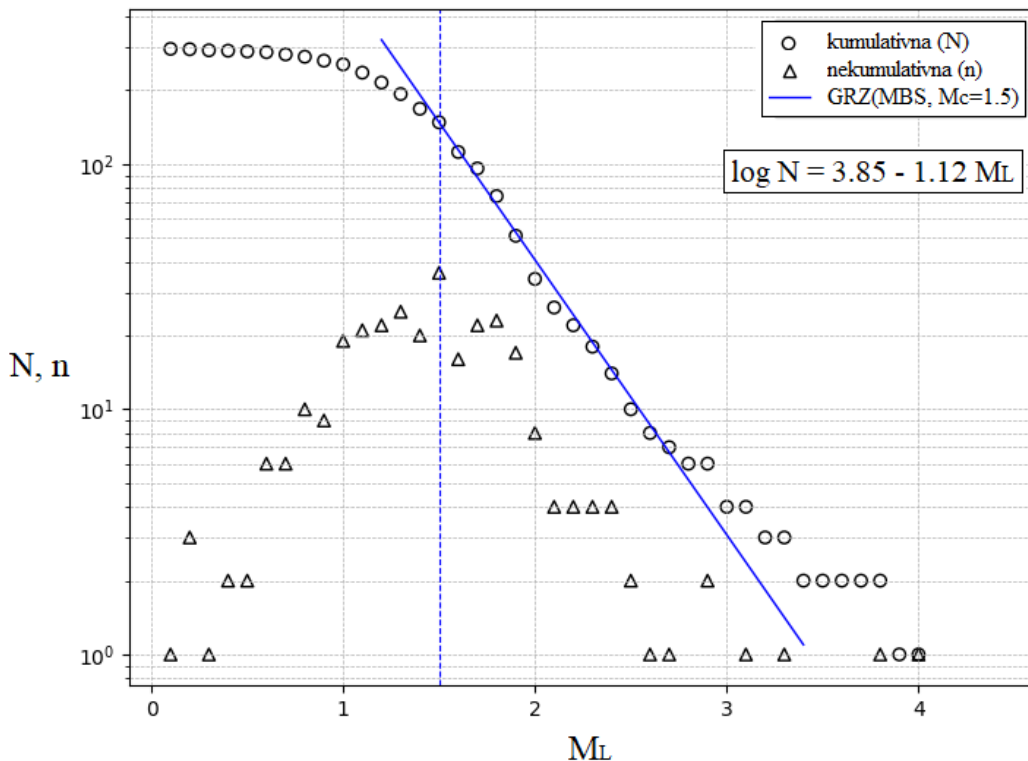


Slika 4.13. Histogram dubina žarišta svih lociranih potresa na području istočne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. U obzir nisu uzeti potresi s nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa).

Deklasterirani katalog potresa, u razdoblju od 2016. do 2020. godine, ukupno bilježi 309 glavnih potresa na području istočne Hrvatske. Magnituda potpunosti deklasteriranog kataloga za ovo područje, procijenjena metodom MBS, iznosi $M_c = 1.5$. Slika 4.14 prikazuje razdiobe broja glavnih potresa prema magnitudi, na logaritamskoj skali te prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona za pripadnu procijenjenu magnitudu potpunosti s procijenjenim iznosima parametara $b = 1.12$ i $a = 3.85$. Na slici vidimo da pravac Gutenberg-Richterovog zakona vrlo dobro prati točke kumulativne sume broja potresa za interval magnituda od 1.5 do 2.8. Također, procijenjena magnituda potpunosti je upravo ona za koju kumulativna suma još uvijek prati Gutenberg-Richterov zakon.

Procijenjena magnituda potpunosti istočne Hrvatske veća je od magnituda potpunosti za cijelu Hrvatsku ($M_c = 1.5$), a u usporedbi s drugim regijama Hrvatske, ona je ujedno i najveća procijenjena M_c . Ova je regija najmanje seizmički aktivna pa većoj procjeni M_c doprinosi manji broj lociranih potresa. Također, na veću procjenu M_c utječe i gustoća seizmološke mreže. Na području istočne Hrvatske postavljena je svega jedna postaja, postaja Venje nedaleko grada

Požege. Zbog toga, za lociranje potresa na ovom području Hrvatska značajno ovisi o seizmološkim postajama u susjednim državama pri čemu su najvažnije one u Bosni i Hercegovini i Mađarskoj, posebno blizu granice s Hrvatskom.

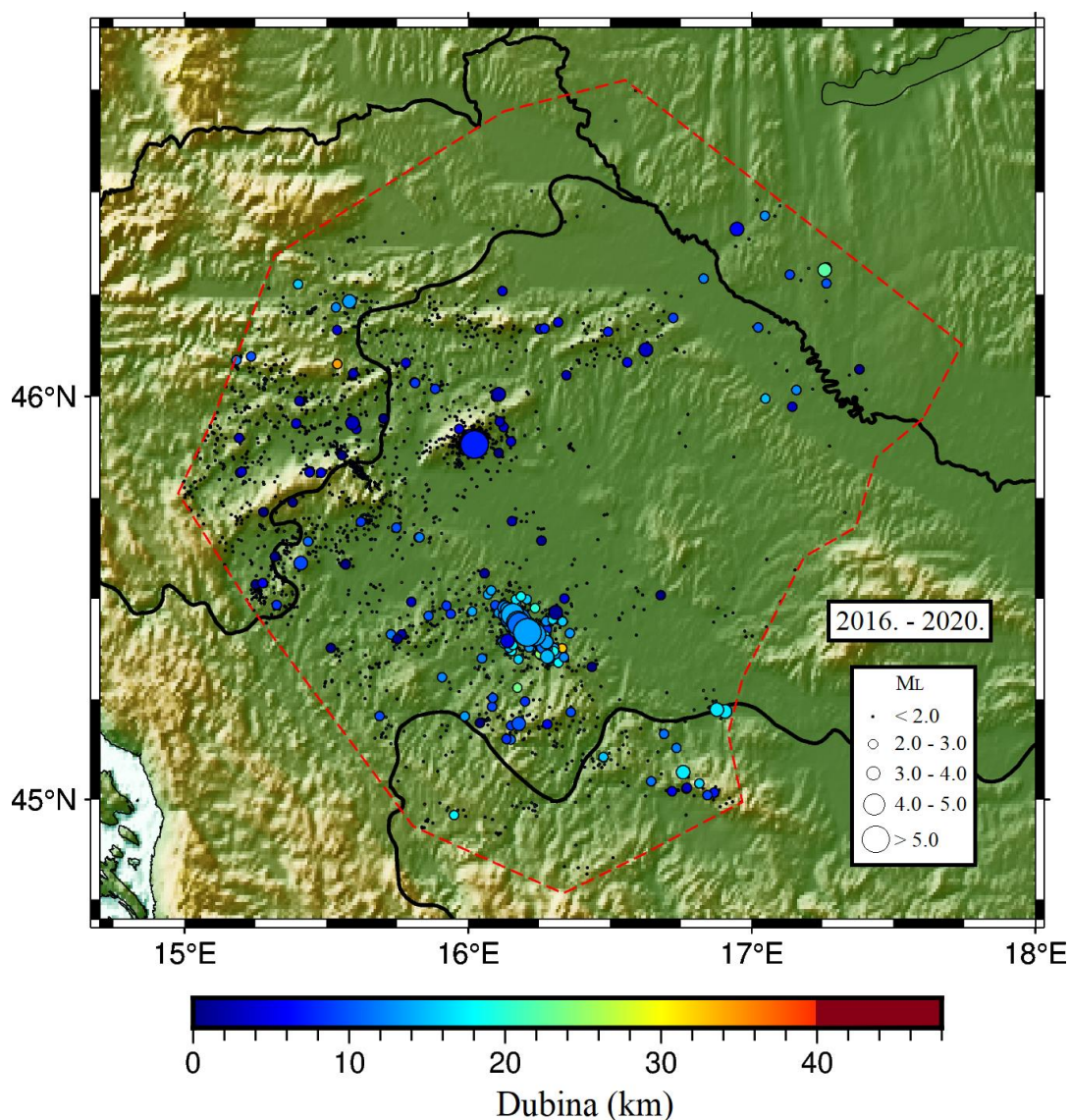


Slika 4.14. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi, na logaritamskoj skali, za deklasterirani Hrvatski katalog potresa na području istočne Hrvatske, u periodu 2016. – 2020. godine. Plavi pravac prikazuje prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ), a plava vertikalna, isprekidana linija magnitudu potpunosti $M_c = 1.5$.

4.4. Središnja i sjeverna Hrvatska

Središnja i sjeverna Hrvatska obuhvaća teritorij od sjeverozapadnih Dinarida i Hrvatskog zagorja na zapadu, Međimurja na sjeveru do Moslavine na istoku, Posavine i Banovine na jugu. Međudjelovanje Jadranske mikroploče s Dinaridima i Alpama na ovom području uzrokuje slabu do umjerenu seizmičnost s povremenom pojavom jačih potresa ($M_L \geq 4.0$) [10]. Kao i u istočnoj Hrvatskoj, potresi se događaju unutar tektonske ploče, no na dodiru Dinarida i Panonskog bazena. Seizmički najaktivniji dijelovi pokrivaju područja otočnih gora Ivanščice i Kalnika, Medvednice i Žumberačke gore na sjeverozapadu te područje Pokuplja i Zrinske gore na jugu [11], [12]. U Hrvatskom katalogu potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine,

na području središnje i sjeverne Hrvatske ukupno je zabilježeno 10498 potresa. Njih 4929 zabilježeno je s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Slika 4.15 prikazuje kartu epicentara lociranih potresa pri čemu crvena isprekidana linija označava razmatrani teritorij središnje i sjeverne Hrvatske te njezine okolice. Na karti se jasno ističu dobro poznata područja najveće seizmičke aktivnosti: epicentralno područje Brežice – Krško i Žumberačka gora kod granice Hrvatske i Slovenije, gora Ivanščica i Kalnik na sjeveru, Zagrebačko epicentralno područje kod Medvednice te vrlo aktivno epicentralno područje Petrinja – Zrinska



Slika 4.15. Epicentri potresa u središnjoj i sjevernoj Hrvatskoj, 2016. – 2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Magnituda potresa označena je površinom simbola, a dubina žarišta bojom prema skali na dnu slike. Crvena isprekidana linija označava teritorij središnje i sjeverne Hrvatske.

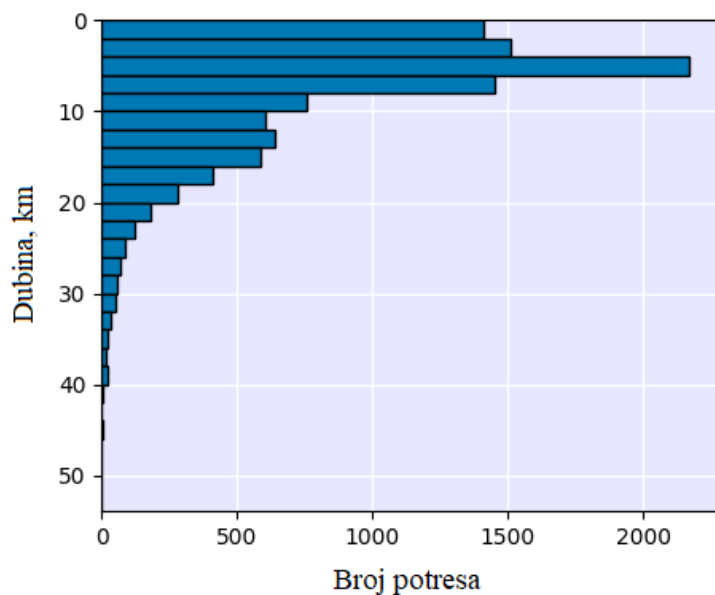
Datum	Vrijeme nastanka (UTC)	Epicentar		Dubina	M_L
		φ (°N)	λ (°E)	(km)	
22. ožujka 2020.	05:24:02.92	45.881	16.022	7.4	5.3
22. ožujka 2020.	06:01:19.49	45.882	16.017	8.1	4.7
28. prosinca 2020.	05:28:06.74	45.415	16.226	13.8	5.0
28. prosinca 2020.	06:49:55.50	45.411	16.232	13.7	4.4
29. prosinca 2020.	11:19:53.58	45.416	16.208	13.6	6.2
29. prosinca 2020.	11:22:36.35	45.429	16.201	14.3	4.5
29. prosinca 2020.	11:23:47.47	45.449	16.179	12.3	4.6
29. prosinca 2020.	11:25:38.37	45.460	16.157	14.3	4.1
30. prosinca 2020.	05:15:04.17	45.440	16.175	13.1	4.7
30. prosinca 2020.	05:26:40.20	45.436	16.180	11.2	4.4

Tablica 4.2. Osnovni parametri potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ na području središnje i sjeverne Hrvatske u razdoblju 2016. – 2020. godine. Glavni potresi istaknuti su podebljanim slovima.

gora. Na području središnje i sjeverne Hrvatske u razmatranom je razdoblju zabilježeno 10 potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ čiji se osnovni parametri, uz istaknute glavne potrese, nalaze u tablici 4.2. Najjači potres zabilježen na ovom području, a ujedno i u cijeloj Hrvatskoj, imao je momentnu magnitudu $M_W = 6.4$, a lokalnu magnitudu $M_L = 6.2$ te se dogodio 29. prosinca 2020. godine kod gore Hrastovice, šest kilometara jugozapadno od grada Petrinje i svega 48 km od Zagreba. Ovaj je glavni potres uzrokovao značajnu štetu u širem epicentralnom području koje uključuje i grad Petrinju, a podrhtavanje se osjetilo diljem Hrvatske, Slovenije, u dijelovima Bosne i Hercegovine, Srbije, Mađarske i Italije. Osim velike štete na građevinama i infrastrukturi, potres je prouzročio brojna klizišta i preko 100 otvorenih vrtača u području Mečenčana [6]. Potres lokalne magnitude 5.0, zabilježen na istom području samo dan prije, prethodio je ovom glavnom potresu, a nakon njega uslijedio je niz naknadnih potresa. Analiza naknadnih potresa u prvih šest mjeseci nakon glavnog potresa utvrdila je koeficijent b Gutenberg-Richterovog zakona od $b = 0.91$ i odgovarajuću magnitudu potpunosti $M_c = 1.2$ [6]. Drugi najjači potres u ovoj regiji, a i u cijeloj Hrvatskoj, lokalne magnitude $M_L = 5.3$ zabilježen je sedam kilometara sjeverno od centra grada Zagreba na epicentralnom području Zagreb – Markuševac, 22. ožujka 2020. godine. Samo 37 minuta nakon njega uslijedio je njegov najjači naknadni potres magnitude $M_L = 4.7$. Ovaj potres izazvao je značajnu štetu na zgradama i

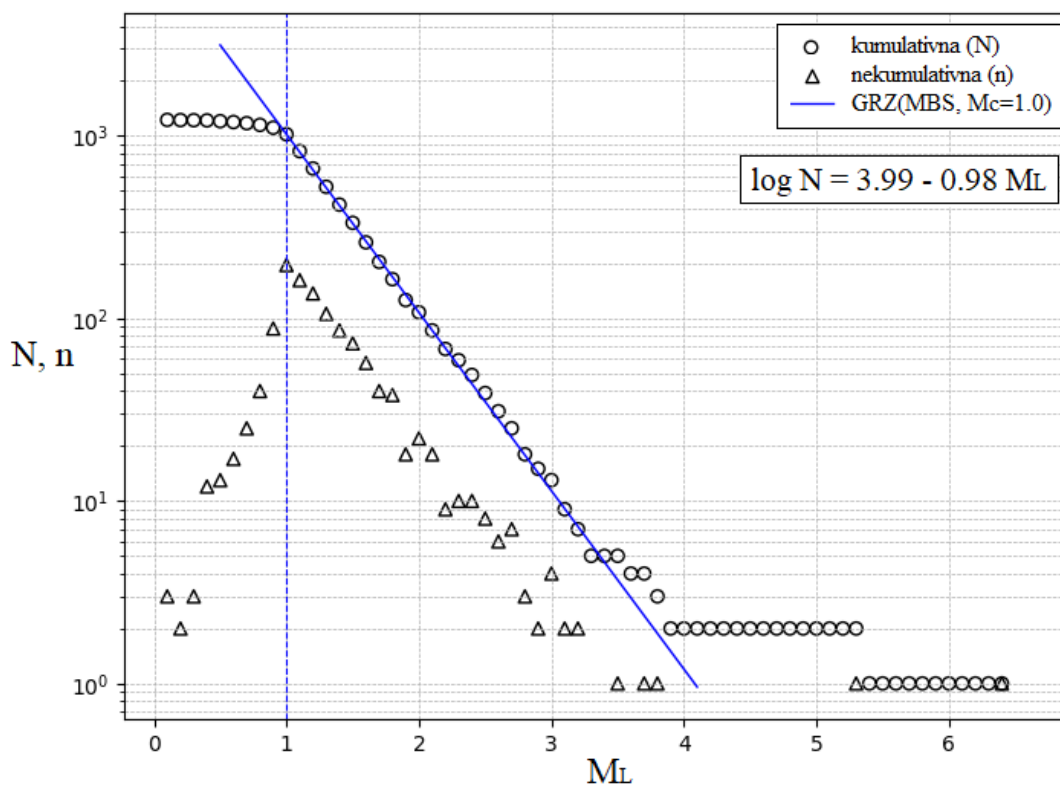
infrastrukturi na području Zagreba, prvenstveno u Markuševcu te središtu Zagreba i okolice. Koeficijent b Zagrebačke serije naknadnih potresa za prvih godinu dana nakon potresa iznosi $b = 1.03$ što je nešto više od uobičajene pretpostavljene vrijednosti u intervalu između 0.8 i 0.9 za glavne potrese na ovom području. Pripadna magnituda potpunosti iznosi $M_c = 1.0$ [8]. Usporedbom vrijednosti koeficijenta b i magnituda potpunosti Zagrebačke i Petrinjske serije naknadnih potresa može se uočiti da je koeficijent b Zagrebačke serije veći od Petrinjske serije, a magnituda potpunosti manja. Veća vrijednost b ukazuje da se u Zagrebačkoj seriji dogodilo više slabijih potresa u odnosu na jače nego u Petrinjskoj seriji. No, valja naglasiti da je analiza Zagrebačke serije napravljena za prvih godinu dana, a Petrinjske za prvih šest mjeseci nakon glavnog potresa.

Na području središnje i sjeverne Hrvatske najveći broj potresa je na dubini do devet kilometara s prosječnom dubinom žarišta 8.2 km. Raspodjela broja svih zabilježenih potresa prema dubini žarišta uz isključene potrese nepouzdanе dubine (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa) prikazana je histogramom na slici 4.16.



Slika 4.16. Histogram dubina žarišta svih potresa zabilježenih na području središnje i sjeverne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. U obzir nisu uzeti potresi s nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu).

U razdoblju od 2016. do 2020. godine, deklasterirani katalog potresa broji 1239 glavnih potresa zabilježenih na području središnje i sjeverne Hrvatske i njezine okolice što je znatno manje od ukupnog broja potresa lociranih na ovom području (10498). Većem ukupnom broju potresa pridonosi veliki broj naknadnih potresa u Zagrebačkoj seriji potresa. Prema metodi MBS, magnituda potpunosti deklasteriranog kataloga potresa za ovo područje iznosi $M_c = 1.0$. Na slici 4.17 prikazane su razdiobe broja glavnih potresa prema njihovoj magnitudi na logaritamskoj skali, zajedno s prilagodbom Gutenberg-Richterovog zakona za tu procijenjenu magnitudu potpunosti. Koeficijenti prilagodbe Gutenberg-Richterovog zakona iznose $b = 0.98$ i $a = 3.99$. Iz slike je vidljivo da pravac Gutenberg-Richterovog zakona vrlo dobro prati točke kumulativne sume broja glavnih potresa za interval magnituda od 1.0 do 3.3. Procijenjena magnituda potpunosti ujedno je i najmanja magnituda za koju vrijednost kumulativne sume prati



Slika 4.17. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi, na logaritamskoj skali, za deklasterirani Hrvatski katalog potresa na području središnje i sjeverne Hrvatske, u periodu 2016. – 2020. godine. Plavi pravac prikazuje prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ), a vertikalna, isprekidana linija magnitudu potpunosti $M_c = 1.0$.

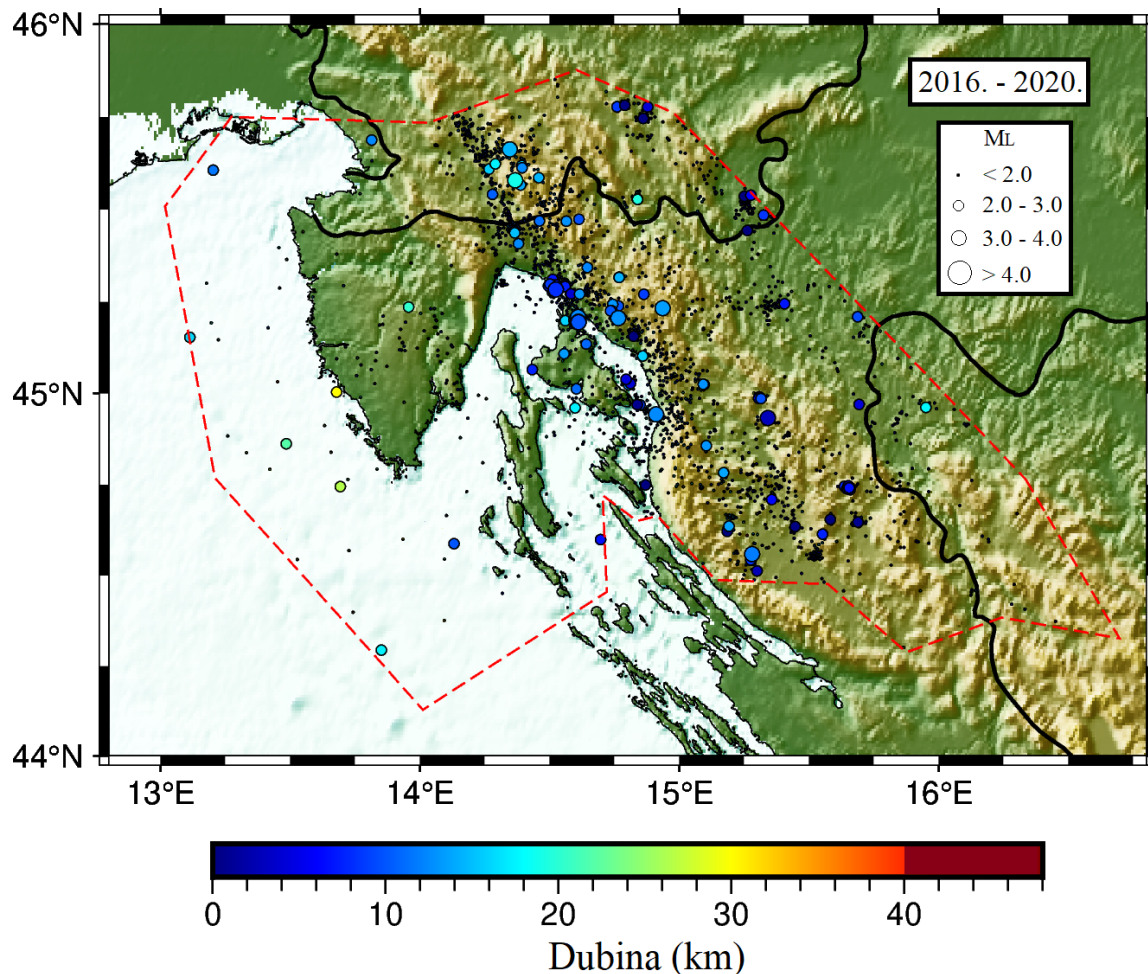
ovaj zakon. Također, vrijednost nekumulativne sume za $M_c = 1.0$ je najveća, pa bi jednaku procjenu magnitude potpunosti dobili i MAXC metodom. Vrijednosti koeficijenta b Zagrebačke i Petrinjske serije naknadnih potresa ne odstupaju značajno od dobivene vrijednosti za glavne potrese na ovom području. Koeficijent $b = 1.03$ [8] Zagrebačke serije nešto je veći, dok je koeficijent $b = 0.91$ [6] Petrinjske serije nešto manji od koeficijenta $b = 0.98$ za središnju i sjevernu Hrvatsku.

Procijenjena magnituda potpunosti središnje i sjeverne Hrvatske manja je od magnitude potpunosti za cijelu Hrvatsku ($M_c = 1.2$), a u usporedbi s drugim regijama Hrvatske, ona je ujedno i najmanja procijenjena M_c . Osim što je zabilježen veći broj potresa u ovoj regiji, što doprinosi preciznijoj procjeni, ova regija je i najrazvijeniji dio Hrvatske te je njezin teritorij pravilnijeg oblika što omogućava bolju „pokrivenost“ seizmološkim postajama.

4.5. Zapadna Hrvatska

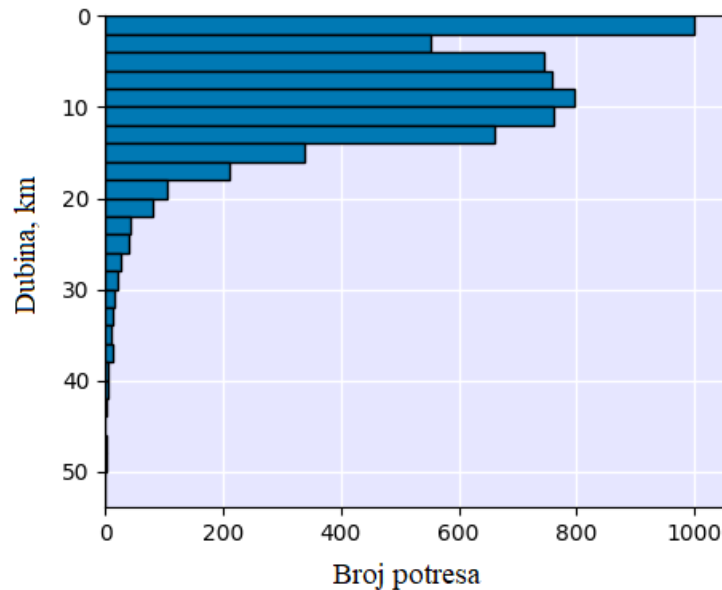
Teritorij zapadne Hrvatske obuhvaća područje Istre, Gorskog kotara, Like i Hrvatskog primorja. Jadranska mikroploča, potaknuta gibanjem Afričke (Nubijske) ploče, sudara se s Europskom pločom, što uzrokuje postupno oblikovanje Alpsko-Dinarskog orogenskog pojasa [12]. Dio tog pojasa nalazi se upravo u zapadnoj Hrvatskoj zbog čega ovo područje karakterizira relativno česta pojava slabijih potresa te povremeno srednji do jaki potres magnitude $M_L \geq 4.0$ [11]. U razdoblju od 2016. do 2020. godine, na području zapadne Hrvatske ukupno je locirano 6206 potresa, od kojih je 3253 potresa locirano s barem 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Karta epicentara zabilježenih potresa prikazana je na slici 4.18 gdje veličina kruga označava magnitudu, a boja dubinu žarišta potresa. Razmatrano područje zapadne Hrvatske i neposredne okolice označeno je crvenom isprekidanom linijom. Na karti se prepoznaje uski i seizmički vrlo aktivan pojas koji se proteže od Ilirske Bistrice u Sloveniji do grada Senja, poznat i kao veliko Riječko epicentralno područje. Iako seizmički umjereno do vrlo aktivno, na ovom području, kao i u cijeloj zapadnoj Hrvatskoj, u razdoblju 2016. – 2020. godine, nije se dogodio niti jedan potres magnitude $M_L \geq 4.0$. No, dogodila su se tri potresa magnitude veće ili jednake 3.5. Najjači potres u zapadnoj Hrvatskoj, magnitude 3.7, dogodio se 5. prosinca 2018. godine kod mjesta Bač u blizini Ilirske Bistrice u Sloveniji. Drugi najjači potres, magnitude 3.6, zabilježen je 8. kolovoza 2017. godine kod grada Omišlja na otoku Krku i dio je brojne skupine

vrlo slabih do slabih potresa, tzv. roja potresa, u području između sjeveroistočnog dijela otoka Krka i kopna. Treći potres, magnitude 3.6, imao je epicentar kod mjesta Bribira nedaleko grada Crikvenice, a dogodio se 13. svibnja 2020. godine.



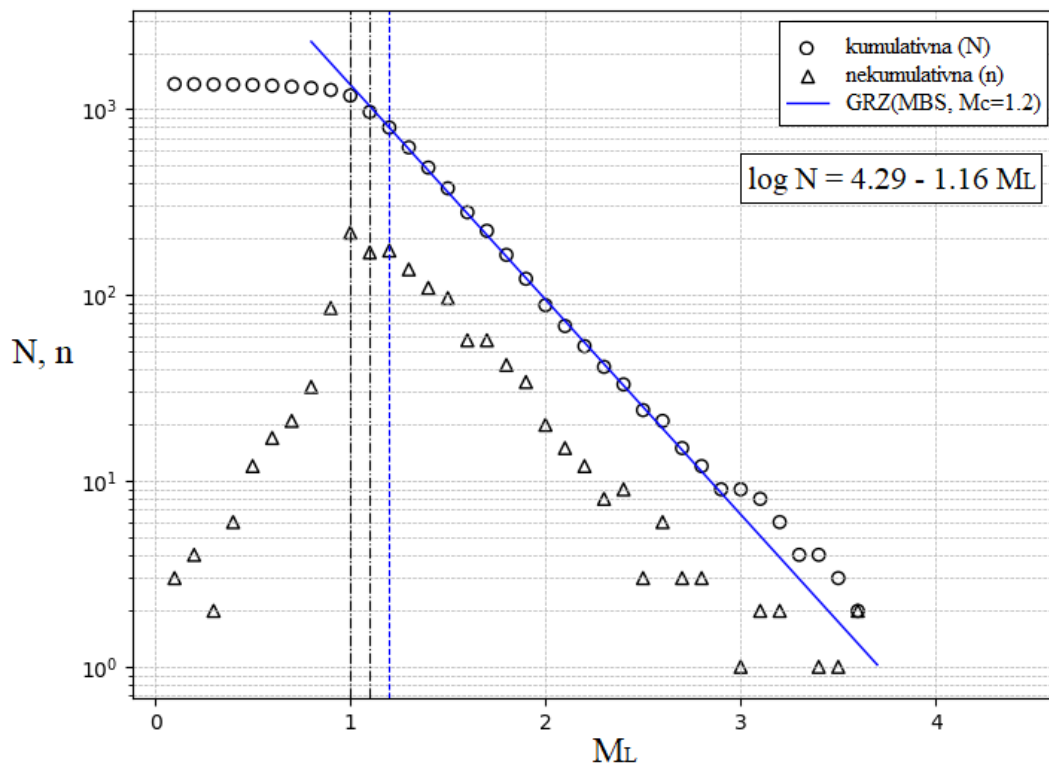
Slika 4.18. Karta epicentara potresa u zapadnoj Hrvatskoj, 2016. – 2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Magnituda potresa označena je površinom kruga, a dubina žarišta bojom prema skali na dnu slike. Crvena isprekidana linija označava teritorij zapadne Hrvatske i neposredne okolice.

U zapadnoj Hrvatskoj, većina potresa locirana je na dubini do 14 km, s prosječnom dubinom od 8.5 km. Najveći broj potresa zabilježen je na izuzetno plitkim dubinama, do dubine jednog kilometra. Raspodjela broja potresa prema njihovoj dubini žarišta prikazana je na slici 4.19. U analizu su uključeni svi zabilježeni potresi u razdoblju od 2016. do 2020. godine, a isključeni oni s nepouzdanom dubinom žarišta (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa).



Slika 4.19. Histogram dubina žarišta svih potresa zabilježenih na području zapadne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. U obzir nisu uzeti potresi s nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa).

Deklasterirani katalog potresa, u razdoblju od 2016. do 2020. godine, sadrži 1378 glavnih potresa na području zapadne Hrvatske i njezine okolice. Magnituda potpunosti, procijenjena metodom MBS, za deklasterirani katalog na ovom području iznosi $M_c = 1.2$ i jednaka je procijenjenoj magnitudi potpunosti za cijelu Hrvatsku. Raspodjele broja glavnih potresa prema magnitudi, zajedno s prilagodbom Gutenberg-Richterovog zakona za procijenjenu magnitudu potpunosti prikazane su na slici 4.20. Na slici vidimo da pravac Gutenberg-Richterovog zakona, s procijenjenim vrijednostima koeficijenta $b = 1.16$ i $a = 4.29$, izuzetno dobro prati točke kumulativne sume u intervalu magnituda od 1.1 do 2.9. Također, na slici možemo vidjeti i da procijenjena magnituda potpunosti nije najmanja magnituda koja prati Gutenberg-Richterov zakon. Najmanja magnituda, čija vrijednost kumulativne sume još uvijek prati ovaj zakon, iznosi 1.1. Najveća vrijednost nekumulativne sume broja glavnih potresa prema magnitudi odgovara magnitudi 1.0. Prema tome, magnituda 1.0 (prema MAXC metodi) i 1.1 predstavljaju druge moguće vrijednosti magnituda potpunosti kataloga glavnih potresa za zapadnu Hrvatsku.

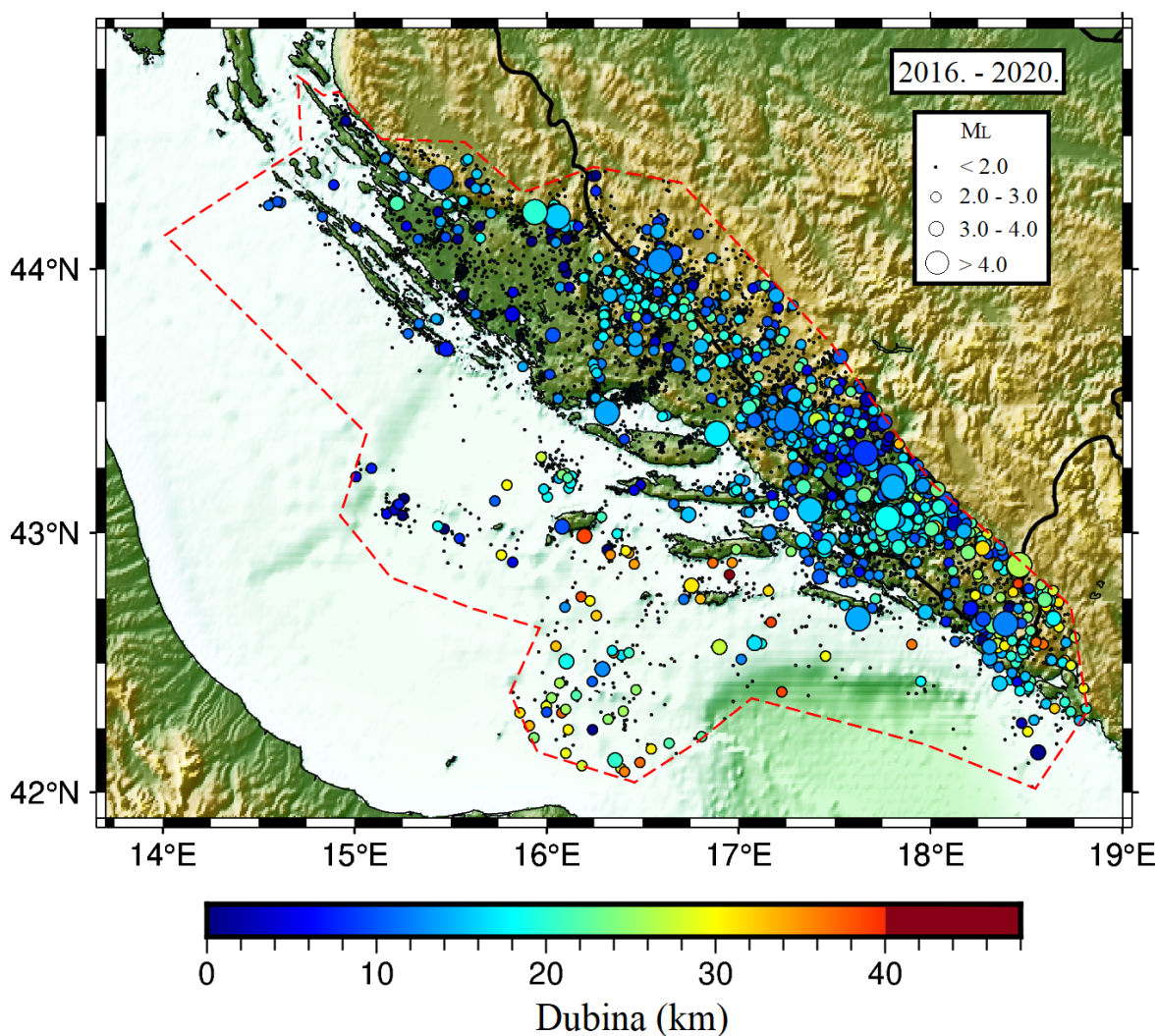


Slika 4.20. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi, na logaritamskoj skali, za deklasterirani Hrvatski katalog potresa na području zapadne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. Plavi pravac prikazuje prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ), a vertikalna plava, isprekidana linija magnitudu potpunosti $M_c = 1.2$, dok crne isprekidane linije prikazuju druge moguće procijene M_c .

4.6. Južna Hrvatska

Južna Hrvatska obuhvaća teritorij južnog Velebita, Dalmacije i Dalmatinskog zaleđa. Na ovom području konvergentno je gibanje Jadranske mikroploče u odnosu na Euroazijsku ploču najizraženije [4]. Široka zona kontakta (Alpsko-Dinarski orogenski pojas) ovih tektonskih jedinica čini ovo područje seizmički najaktivnijim u cijeloj Hrvatskoj [10]. U razdoblju od 2016. do 2020. godine, u Hrvatskom katalogu potresa, najviše potresa locirano je upravo na području južne Hrvatske i njezine okolice – ukupno njih 27449. S najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa locirano je njih 11493. Slika 4.21 prikazuje kartu epicentara lociranih potresa pri čemu boja kruga označava dubinu žarišta, površina kruga magnitudu potresa, a crvena isprekidana linija područje južne Hrvatske i neposredne okolice. Na slici vidimo da su potresi u južnom dijelu Hrvatske najvećim dijelom raspoređeni u širokom pojasu koji se proteže

od otoka, preko priobalja i zaleđa, prema području u Bosni i Hercegovini. U ovom, seizmički vrlo aktivnom pojasu ukupno se dogodilo 17 potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ čiji su osnovni parametri prikazani u tablici 4.3. Ovi potresi ujedno su i glavni potresi. Najjači potres u južnoj Hrvatskoj, magnitude $M_L = 4.7$, zabilježen je u epicentralnom području južnog Velebita nedaleko grada Starigrada, 1. studenog 2020. godine. Ranije te godine, na ovom epicentralnom području zabilježena su još dva jača potresa. Prvi, magnitude $M_L = 4.2$, sjeverno od grada Knina, a drugi, magnitude $M_L = 4.2$ istočno od grada Obrovca. Na seizmički aktivnom epicentralnom području Dinara – Kamešnica – Livno – Kupres dogodio se samo jedan jači potres, magnitude



Slika 4.21. Epicentri potresa u južnoj Hrvatskoj, 2016. – 2020. godine, locirani s najmanje 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa. Magnituda potresa označena je površinom kruga, a dubina žarišta bojom prema skali na dnu slike. Crvena isprekidana linija označava teritorij južne Hrvatske.

$M_L = 4.6$, na području Bosne i Hercegovine, 30. kolovoza 2020. godine. Seizmički najaktivnije područje u razdoblju 2016. – 2020. godine bilo je epicentralno područje Imotski – Grude – Mostar – Metković. Većina jačih potresa zabilježena je oko grada Mostara u Bosni i Hercegovini, a najjači potres, magnitude $M_L = 4.4$, dogodio se istočno od Metkovića, 24. travnja 2020. godine na teritoriju Bosne i Hercegovine. Najjači potres na ovom epicentralnom području, no na teritoriju Hrvatske, dogodio se 7. rujna 2018. godine s magnitudom $M_L = 4.1$.

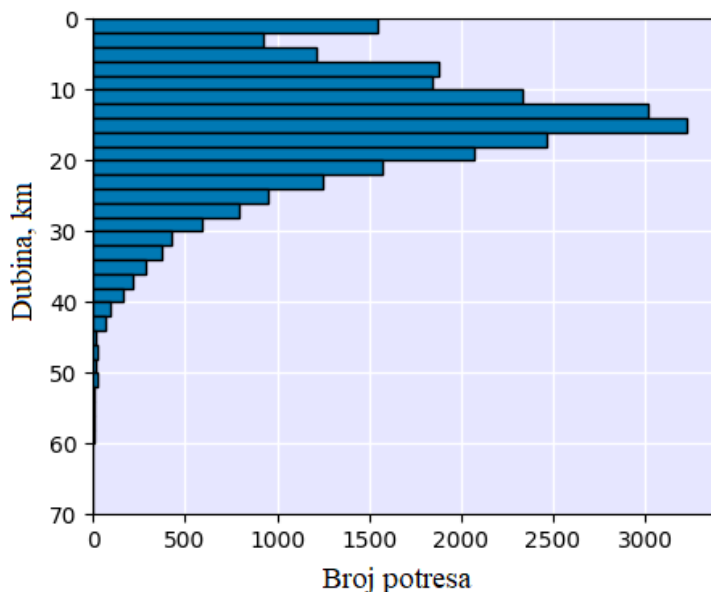
Datum	Vrijeme nastanka (UTC)	Epicentar		Dubina (km)	M_L
		φ (°N)	λ (°E)		
8. siječnja 2016.	13:07:39.13	42.877	18.462	26.0	4.3
14. veljače 2016.	14:51:26.81	43.088	17.371	15.5	4.0
31. listopada 2016.	09:38:12.15	43.222	17.858	20.2	4.2
9. prosinca 2016.	12:56:58.32	43.458	16.314	13.9	4.5
23. prosinca 2016.	23:39:24.74	42.651	18.390	12.1	4.5
13. lipnja 2017.	22:29:09.37	43.199	17.812	11.2	4.1
28. kolovoza 2017.	04:01:49.87	43.304	17.661	8.5	4.0
3. studenog 2017.	12:59:29.72	43.216	17.789	11.0	4.2
3. veljače 2018.	12:53:08.67	43.378	16.886	17.2	4.4
30. kolovoza 2018.	03:33:01.88	44.030	16.590	12.8	4.6
7. rujna 2018.	20:35:03.38	43.432	17.254	12.4	4.1
8. studenog 2019.	01:26:03.61	42.671	17.623	14.0	4.3
6. veljače 2020.	04:10:11.62	44.197	16.057	15.4	4.2
24. travnja 2020.	11:37:42.08	43.056	17.776	18.4	4.4
7. srpnja 2020.	09:45:06.69	43.174	17.805	14.5	4.2
20. rujna 2020.	10:59:02.92	44.214	15.939	20.0	4.2
1. studenog 2020.	13:15:41.57	44.342	15.447	11.4	4.7

Tablica 4.3. Osnovni parametri potresa magnitude $M_L \geq 4.0$ zabilježenih na području južne Hrvatske i okolice u razdoblju 2016.-2020. godine.

Seizmičnost Splitskog epicentralnog područja može se opisati kao slaba do umjerena s dva jača potresa. Prvi jači potres, magnitude $M_L = 4.5$, dogodio se kod otoka Čiova, 9. prosinca 2016. godine, a drugi, nešto manje magnitude $M_L = 4.4$, u blizini Brela, 3. veljače 2018. godine. Kod

grada Ploče, u razmatranom je razdoblju zabilježen samo jedan jači potres magnitude $M_L = 4.0$, a na epicentralnom području Ston – Dubrovnik tri jača potresa od kojih je samo jedan, magnitude $M_L = 4.3$, zabilježen unutar Hrvatske, kod otoka Mljeta, 8. studenog 2019. godine. Područja središnjeg i južnog Jadranskog mora te epicentralno područje kod otoka Visa bilježe slabiju aktivnost u razmatranom razdoblju s potresima magnitude $M_L < 4.0$.

Žarišta potresa lociranih na području južne Hrvatske i njezine okolice relativno su dublja u odnosu na druge regije Hrvatske, s prosječnom dubinom od 15.2 km. Najveći broj potresa imao je dubinu žarišta od 10 do 20 km. Detaljnija raspodjela broja potresa prema dubini žarišta za razdoblje od 2016. do 2020. godine prikazana je histogramom na slici 4.22. Iz analize su isključeni svi potresi zabilježeni s nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa).

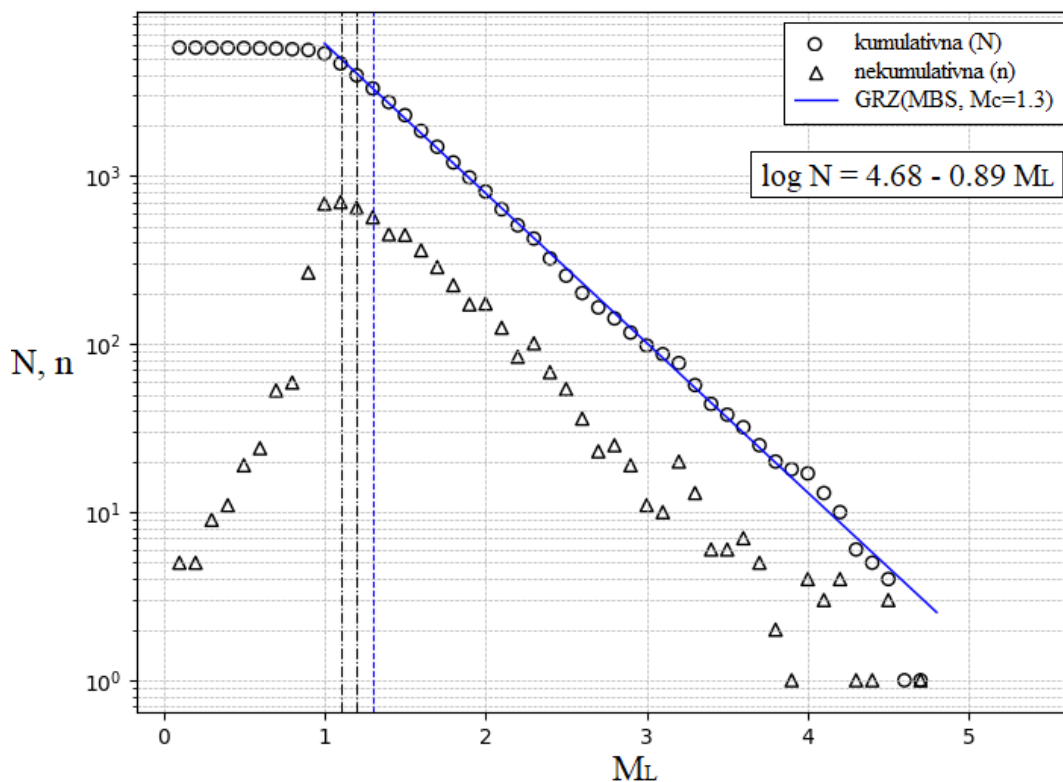


Slika 4.22. Histogram dubina žarišta svih potresa zabilježenih na području južne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. U obzir nisu uzeti potresi s nepouzdanom dubinom (oznaka 99 u Hrvatskom katalogu potresa).

Deklasterirani katalog potresa, u razdoblju od 2016. do 2020. godine, sadrži 5880 glavnih potresa lociranih na području južne Hrvatske i njezine okolice. Procijenjena metodom MBS, magnituda potpunosti ovog kataloga iznosi $M_c = 1.3$. Na slici 4.23 prikazane su pripadne raspodjele broja glavnih potresa prema njihovoj magnitudi i prilagodba Gutenberg-Richterovog zakona za procijenjenu magnitudu potpunosti. Procijenjeni koeficijenti Gutenberg-Richterovog zakona za južnu Hrvatsku iznose $b = 0.89$ i $a = 4.86$. Na slici vidimo da pravac prilagodbe

Gutenberg-Richterovog zakona dobro prati točke kumulativne sume za magnituda u rasponu od 1.2 do 3.8. Najmanja magnituda, za koju kumulativna suma broja potresa još uvijek prati pravac, iznosi 1.2, pa ova vrijednost predstavlja drugu moguću magnitudu potpunosti kataloga glavnih potresa. S druge strane, najveća vrijednost nekumulativne sume broja potresa odgovara magnitudi 1.1 te je ujedno i prva najmanja magnituda koja ne prati Gutenberg-Richterov zakon. Stoga, magnituda 1.1, prema MAXC metodi, predstavlja još jednu moguću vrijednost za magnitudu potpunosti deklasteriranog kataloga na području južne Hrvatske.

Procijenjena magnituda potpunosti južne Hrvatske nešto je veća od magnituda potpunosti za cijelu Hrvatsku ($M_c = 1.2$), ali ne odstupa značajno od nje. U usporedbi s drugim regijama Hrvatske, južna je Hrvatska najaktivnija i u njoj je lociran najveći broj potresa što doprinosi preciznijoj procjeni M_c . No zbog nepovoljnog oblika teritorija, u ovoj se regiji Hrvatska uvelike oslanja na suradnju sa susjednim državama i međunarodnu razmjenu podataka.



Slika 4.23. Kumulativna i nekumulativna suma broja potresa prema magnitudi, na logaritamskoj skali, za deklasterirani Hrvatski katalog potresa na području južne Hrvatske, u razdoblju 2016. – 2020. godine. Plavi pravac prikazuje prilagodbu Gutenberg-Richterovog zakona (GRZ), a vertikalna plava, isprekidana linija magnitudu potpunosti $M_c = 1.3$. Crne isprekidane linije prikazuju druge moguće procijenjene M_c .

4.7. Usporedba rezultata s prethodnim istraživanjima

Dobiveni rezultati analize seizmičnosti na području Hrvatske u razdoblju između 2016. i 2020. godine potvrđuju očekivanu prirodu seizmičnosti prema prethodnim analizama seizmičnosti Hrvatske provedenim za razdoblja 1908. – 1992. [7], 1993. – 1996. [13], 1997. – 2001. [11], 2002. – 2005. [12] i 2006. – 2015. [10]. Seizmička aktivnost ograničena je na poznata epicentralna područja već opisana u ovom radu pri čemu je znatno aktivnija obalna Hrvatska s dosljedno većim brojem zabilježenih potresa u odnosu na kontinentalnu Hrvatsku. Rezultati analize koeficijenta b pravca Gutenberg-Richterovog zakona također su konzistentni s prethodnim istraživanjima. Za razdoblje 2002. – 2005. procijenjena vrijednost koeficijenta b iznosi 0.93 [12], a za razdoblje 2006. – 2015. iznosi 0.95 [10] dok je analiza provedena u ovom radu utvrdila $b = 0.91$ za razdoblje 2016. – 2020. godine. Ranija istraživanja nisu eksplicitno odredila vrijednost koeficijenta b , ali analiza u Herak i sur. (1996) pokazala je vremensku promjenjivost koeficijenta b s razdobljima veće ili manje vrijednosti. Isto istraživanje procijenilo je i magnitudu potpunosti M_c revidiranog Hrvatskog kataloga potresa od 4.0 za cijelo razdoblje od 1908. do 1992. godine, $M_c = 3.8$ za razdoblje nakon 1940. godine te $M_c = 3.6$ nakon 1980. godine. U razdoblju od 1993. – 1996. procijenjena magnituda potpunosti Hrvatskog kataloga potresa iznosila je 2.9 [13], a zatim redom 3.0, 2.8 i 1.9 za razdoblja 1997. – 2001., 2002. – 2005. i 2006. – 2015. [11], [12], [10]. Ovdje se može uočiti trend smanjenja magnituda potpunosti Hrvatskog kataloga potresa tijekom vremena kojeg prati i magnituda potpunosti $M_c = 1.2$ procijenjena u ovom radu za razdoblje između 2016. do 2020. godine. Značajan pad magnituda potpunosti s 2.8 na 1.9 u razdoblju između 2006. i 2015. godine rezultat je značajnog porasta digitalnih seizmoloških postaja postavljenih na području Hrvatske i neposredne okolice [10]. Osim veće gustoće seizmološke mreže, prepoznatom trendu smanjenja magnituda potpunosti općenito doprinosi povoljniji oblik seizmološke mreže, napredak u tehnologiji i metodama analize, povećanje osjetljivosti instrumenata te međunarodna suradnja.

5. Zaključak

Seizmička aktivnost Hrvatske i neposredne okolice u razdoblju između 2016. i 2020. godine može se opisati kao slaba do umjerena te ograničena na dobro poznata epicentralna područja. Hrvatski katalog potresa sadrži ukupno 19721 potres (s barem 10 podataka o nastupnim vremenima faza potresa), a najveći broj potresa dogodio se u južnoj Hrvatskoj: 17 glavnih potresa lokalne magnitude veće ili jednake 4.0. Druga seizmički najaktivnija regija bila je središnja i sjeverna Hrvatska u kojoj su locirana i dva najjača potresa na području cijele Hrvatske u razmatranom razdoblju. Najjači potres lokalne magnitude $M_L = 6.2$ dogodio se 29. prosinca 2020. godine kod gore Hrastovice, šest kilometara od grada Petrinje. Drugi najjači potres lokalne magnitude $M_L = 5.3$ dogodio se 22. ožujka 2020. godine sedam kilometara od centra grada Zagreba na epicentralnom području Zagreb – Markuševac. U zapadnoj Hrvatskoj najjači potres imao je magnitudu $M_L = 3.7$, a najaktivniji je bio uski pojas poznat i kao veliko Riječko epicentralno područje. Najslabija aktivnost opažena je u istočnoj Hrvatskoj u kojoj je locirano najmanje potresa s četiri potresa lokalne magnitude veće od 3.0 i jednim potresom magnitude $M_L = 4.0$ koji se dogodio nedaleko grada Đakova 7. listopada 2016. godine. Žarišta zabilježenih potresa na području Hrvatske su plitka, do 40 km dubine, sa srednjom dubinom od 11.8 km i medijanom od 12.0 km. Prosječno, najplići potresi zabilježeni su u središnjoj i sjevernoj Hrvatskoj (8.2 km), a najdublji (15.2 km) u južnoj Hrvatskoj, tamo gdje je i kora najdeblja.

Usporedba empirički određene razdiobe vjerojatnosti broja potresa po danu s Poissonovom razdiobom sugerira da su glavni potresi u promatranom razdoblju nasumični i nezavisni događaji koji se prosječno događaju konstantnom stopom od 4.8 potresa dnevno. Prosječno vrijeme između dva uzastopna glavna potresa iznosi 5.01 h, a pripadajuća empirička razdioba vremenskih intervala pokazala je da su manji intervali vjerojatniji. Uočena manja odstupanja empiričke razdiobe od teorijske ukazuju na to da je jednostavan Poissonov model zapravo gruba aproksimacija kompleksne seizmičke aktivnosti na razmatranom području u razmatranom vremenu, ali i na (ne)uspješnost samog postupka deklasteriranja kataloga potresa.

Magnituda potpunosti M_c Hrvatskog kataloga potresa za razdoblje između 2016. i 2020. godine procijenjena je primjenom dvije metode temeljene na katalogu potresa: ne-parametarske metode MAXC i parametarske metode MBS, na originalnom i deklasteriranom katalogu potresa. Metodom MAXC procijenjene su $M_c = 0.8$ za originalni i $M_c = 1.0$ za deklasterirani

katalog, dok metodom MBS procijenjena je $M_c = 1.3$ za oba kataloga. Veća vrijednost M_c za deklasterirani katalog dobivena metodom MAXC u usporedbi s originalnim katalogom je zbog toga što deklasterirani katalog sadrži općenito manji broj potresa (obuhvaća samo glavne potrese) od originalnog, a velikim dijelom su izostavljeni upravo potresi vrlo malih magnituda. Analiza prilagodbe Gutenberg-Richterovoga zakona za deklasterirani katalog za dobivene M_c pokazala je da metoda MAXC podcjenjuje, a metoda MBS blago precjenjuje magnitudu potpunosti. Daljnjom analizom, vlastitom slobodnom procjenom, M_c je određen za pravac s koeficijentom $b = 0.91$ koji najbolje opisuje točke kumulativne sume broja potresa za pripadajuću vrijednost $M_c = 1.2$. To je konačna procijenjena magnituda potpunosti deklasteriranog Hrvatskog kataloga potresa u razdoblju 2016. – 2020. godine. Vrijednost koeficijenta b ne odstupa znatno od prethodno utvrđenih vrijednosti na ovom području, dok je procijenjena magnituda potpunosti manja. To je prvenstveno posljedica povećanja broja seizmoloških postaja, stalnih i privremenih, u Hrvatskoj i susjednim državama te bolje međunarodne suradnje.

Analiza seizmičnosti po regijama Hrvatske pokazala je varijabilnost u procijenjenim magnitudama potpunosti kataloga potresa. Istočna Hrvatska pokazuje najveću procijenjenu magnitudu potpunosti $M_c = 1.5$ u usporedbi s magnitudom potpunosti cijele Hrvatske. Ova je regija najmanje seizmički aktivna s malim brojem lociranih potresa te samo jednom seizmološkom postajom. Južna Hrvatska, kao najaktivnija regija s najvećim brojem potresa, također pokazuje nešto veću procijenjenu magnitudu potpunosti $M_c = 1.3$ u usporedbi s M_c cijele Hrvatske. Kod ove regije važan utjecaj ima nepovoljan oblik mreže seizmoloških postaja i upućuje na nužnu suradnju sa susjednim državama. Središnja i sjeverna Hrvatska imaju najmanju procijenjenu magnitudu potpunosti $M_c = 1.0$. Ova regija je aktivnija s većim brojem zabilježenih potresa te njen oblik omogućuje povoljniju geometriju seizmološke mreže. Za zapadnu Hrvatsku magnituda potpunosti procijenjena je kao $M_c = 1.2$, jednako onoj M_c za cijelu Hrvatsku. Određeni su i koeficijenti b Gutenberg-Richterovog zakona za odgovarajuće magnitode potpunosti. Najveće vrijednosti dobivene su za zapadnu Hrvatsku, $b = 1.16$, i istočnu Hrvatsku, $b = 1.12$, što ukazuje na veći broj slabijih potresa u odnosu na jače potrese. U zapadnoj Hrvatskoj nije zabilježen niti jedan potres $M_L \geq 4.0$, dok je u istočnoj Hrvatskoj zabilježen samo jedan potres lokalne magnitude $M_L = 4.0$. Koeficijent b za središnju i sjevernu Hrvatsku iznosi

$b = 0.98$, a za južnu Hrvatsku $b = 0.89$. U ovim regijama zabilježen je veći broj potresa uključujući i veći broj jačih potresa, lokalne magnitude veće ili jednake 4.0, u odnosu na slabije.

Dodaci

Dodatak A Poligon Hrvatske i neposredne okolice

λ (°E)	φ (°N)
13.017019	45.507971
13.208938	44.767882
15.060986	43.378789
14.923565	43.066568
15.187413	42.829338
15.605172	42.712399
15.962466	42.635664
15.808555	42.384606
15.951472	42.156977
16.457181	42.038775
16.781494	42.193616
17.067329	42.364315
17.974306	42.185476
18.545977	42.014292
18.818299	42.315591
18.730349	42.720471
18.004768	43.190847
17.488065	43.713239
16.696522	44.325506
16.334600	44.763982
16.614938	44.861405
16.966736	44.993637
17.851726	44.865299
18.890627	44.635131
19.456801	44.841934
19.752617	45.233981
19.389628	45.654068
18.944385	46.063405
18.614575	46.082459
18.191319	46.017648
16.553263	46.771556
16.125577	46.696257
15.317543	46.344735
15.097670	45.941302
14.976740	45.761475
14.602955	45.876326
14.031284	45.734643
13.272722	45.749977
13.017019	45.507971

Tablica A1 Geografske koordinate poligona Hrvatske i neposredne okolice.

Dodatak B Poligoni pojedinih regija Hrvatske

λ (°E)	φ (°N)
17.603316	45.945122
17.438411	45.849548
17.366952	45.677101
17.185556	45.604130
16.965683	45.299705
16.966736	44.993637
17.851726	44.865299
18.890627	44.635131
19.456801	44.841934
19.752617	45.233981
19.389628	45.654068
18.944385	46.063405
18.614575	46.082459
18.191319	46.017648
17.740861	46.127566

Tablica B1 Geografske koordinate poligona istočne Hrvatske i neposredne okolice.

λ (°E)	φ (°N)
17.603316	45.945122
17.438411	45.849548
17.366952	45.677101
17.185556	45.604130
16.965683	45.299705
16.916212	45.164308
16.966736	44.993637
16.614938	44.861405
16.334600	44.763982
15.805358	44.932572
15.236435	45.476353
14.976740	45.761475
15.097670	45.941302
15.317543	46.344735
16.125577	46.696257
16.553263	46.771556
17.740861	46.127566

Tablica B2 Geografske koordinate poligona središnje i sjeverne Hrvatske te neposredne okolice.

λ (°E)	φ (°N)
15.060986	43.378789
14.923565	43.066568
15.187413	42.829338
15.605172	42.712399
15.962466	42.635664
15.808555	42.384606
15.951472	42.156977
16.457181	42.038775
16.781494	42.193616
17.067329	42.364315
17.974306	42.185476
18.545977	42.014292
18.818299	42.315591
18.730349	42.720471
18.004768	43.190847
17.488065	43.713239
16.696522	44.325506
16.242891	44.383594
15.874603	44.287332
15.572278	44.475778
15.138028	44.487536
14.915406	44.663617
14.835702	44.649941
14.703778	44.720240
14.720269	44.454216
14.011177	44.127860

Tablica 1 Geografske koordinate poligona južne Hrvatske i neposredne okolice.

λ (°E)	φ (°N)
16.334600	44.763982
16.696522	44.325506
16.242891	44.383594
15.874603	44.287332
15.572278	44.475778
15.138028	44.487536
14.915406	44.663617
14.835702	44.649941
14.703778	44.720240
14.720269	44.454216
14.011177	44.127860
13.208938	44.767882
13.017019	45.507971
13.272722	45.749977
14.031284	45.734643
14.602955	45.876326
14.976740	45.761475

Tablica B4 Geografske koordinate poligona zapadne Hrvatske i neposredne okolice.

Literatura

- [1] Aki, K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. // Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., Vol. 43, (1965), str. 237–239.
- [2] Amorèse, D. Applying a Change-Point Detection Method on Frequency-Magnitude Distributions. // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97(5), (2007), str. 1742–1749.
- [3] Cao, A.; Gao, S. S. Temporal variation of seismic b -values beneath northeastern Japan island arc. // Geophysical Research Letters, Vol. 29(9), (2002), str. 48-1-48-3.
- [4] Dasović, I.; Herak, D.; Herak, M.; Latečki, H.; Mustać, M.; Tomljenović, B. O potresima u Hrvatskoj. // Vijesti Hrvatskoga Geološkog Društva, Vol. 57(1), (2020), str. 4–27.
- [5] Dasović, I.; Herak, M.; Prevolnik, S. Potresno inženjerstvo - Obnova zidanih zgrada. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [6] Herak, M.; Herak, D. Properties of the Petrinja (Croatia) earthquake sequence of 2020–2021 – Results of seismological research for the first six months of activity. // Tectonophysics, Vol. 858, (2023), 229885.
- [7] Herak, M.; Herak, D.; Markušić, S. Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992. // Terra Nova, Vol. 8, (1996), str. 86–94.
- [8] Herak, M.; Herak, D.; Orlić, N. Properties of the Zagreb 22 March 2020 earthquake sequence – analyses of the full year of aftershock recording. // Geofizika, Vol. 38, (1996), str. 93–116.
- [9] Herak, M.; Prevolnik, S.; Dasović, I.; Mustać Brčić, M.; Ivančić, I.; Stipčević, J.; Matsuno, N.; Sović, I.; Markušić, S.; Kuk, K.; Fiket, T.; Šariri, K.; Belinić Topić, T.; Ivančić, J.; Štih, D. Studija potresne opasnosti na lokaciji skladišta NSRAO iz NE

Krško u okviru Centra za zbrinjavanje RAO. Prirodoslovno matematički fakultet, Geofizički odsjek, 2022. Str. 34-39.

- [10] Ivančić, I.; Herak, D.; Herak, M.; Allegretti, I.; Fiket, T.; Kuk, K.; Markušić, S.; Prevolnik, S.; Sović, I.; Dasović, I.; Stipčević, J. Seismicity of Croatia in the period 2006–2015. // *Geofizika*, Vol. 35, (2018), str. 69–98.
- [11] Ivančić, I.; Herak, D.; Markušić, S.; Sović, I.; Herak, M. Seismicity of Croatia in the period 1997–2001. // *Geofizika*, Vol. 18–19, (2002), str. 17–29.
- [12] Ivančić, I.; Herak, D.; Markušić, S.; Sović, I.; Herak, M. Seismicity of Croatia in the period 2002–2005. // *Geofizika*, Vol. 23(2), (2006), str. 88–103.
- [13] Markušić, S.; Herak, D.; Ivančić, I.; Sović, I.; Herak, M.; Prelogović, E. Seismicity of Croatia in the period 1993–1996 and Ston–Slano earthquake of 1996. // *Geofizika*, Vol. 15, (1998), str. 83–102.
- [14] Mignan, A.; Werner, M. J.; Wiemer, S.; Chen, C. C.; Wu, Y.-M. Bayesian Estimation of the Spatially Varying Completeness Magnitude of Earthquake Catalogs. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 101(3), (2011), str. 1371–1385.
- [15] Mignan, A.; Woessner, J. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 2012.
- [16] Molinari, I.; Dasović, I.; Stipčević, J.; Šipka, V.; Jarić, D.; Kissling, E.; Clinton, J.; Salimbeni, S.; Prevolnik, S.; Giardini, D.; Terenski tim AlpArray-CASE; Radna skupina AlpArray-CASE. Investigation of the central Adriatic lithosphere structure with the AlpArray-CASE seismic experiment. // *Geofizika*, Vol. 35, (2018), str. 104–128.
- [17] Sandri, L.; Marzocchi, W. A technical note on the bias in the estimation of the b-value and its uncertainty through the Least Squares technique. // *Annals of Geophysics*, Vol. 50, (2007), str. 329–339.

- [18] Shi, Y.; Bolt, B. A. The standard error of the magnitude-frequency b-value. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72(5), (1982), str. 1677–1687.
- [19] Stein, S.; Wysession, M. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Blackwell Publishing, 2003. Str 274-281.
- [20] Udias, A. *Principles of Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. Str. 381-386.
- [21] van Stiphout, T.; Zhuang, J.; Marsan, D. *Seismicity declustering*. // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 2012.
- [22] Wiemer, S.; Wyss, M. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 90(4), (2000), str. 859–869.
- [23] What is magnitude of completeness?, (15.6.2020), *Alaska Earthquake Center*, <https://earthquake.alaska.edu/what-magnitude-completeness>, 12.11.2023.
- [24] Woessner, J.; Hardebeck, J. L.; Hauksson, E. What is an instrumental seismicity catalog? // *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, 2010.
- [25] Woessner, J.; Wiemer, S. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95(2), (2005), str. 684–698.
- [26] Wyss, M.; Hasegawa, A.; Wiemer, S.; Umino, N. Quantitative mapping of precursory quiescence before the 1989, M 7.1 off-Sanriku earthquake, Japan. // *Annali di Geofisica*, Vol. 42(5), (1999), str. 851-869.