

Primjena metode uparivanja predložaka na seriji potresa kod Berkovića (BiH)

Zonjić, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:217:252826>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ivana Zonjić

PRIMJENA METODE UPARIVANJA
PREDLOŽAKA NA SERIJI POTRESA
KOD BERKOVIĆA (BIH)

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Ivana Zonjić

Diplomski rad

**Primjena metode uparivanja predložaka na
seriji potresa kod Berkovića (BiH)**

Voditeljica diplomskog rada: dr. sc. Tena Belinić Topić

Zagreb, 2023.

Zahvaljujem se se dr. sc. Teni Belinić Topić na vodstvu, potpori, savjetima i strpljenju za sva moja pitanja tijekom pisanja rada. Hvala doc. dr. sc. Josipu Stipčeviću na prijedlogu ove zanimljive teme. Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Davorki Herak i Heleni Latečki, mag phys. – geophys. na ustupljenim podacima. Hvala mojim prijateljima koji su studiranje učinili lakšim, a najviše se zahvaljujem svojoj obitelji na beskrajnoj podršci tijekom cijelog studija.

Sažetak

Dana 22. travnja 2022. godine kod Berkovića u južnom dijelu Bosne i Hercegovine dogodio se potres lokalne magnitude $M_L = 6.0$ s procijenjenim maksimalnim intenzitetom $I_0 = VII$ °EMS. Serija potresa kod Berkovića uslijedila je nekoliko mjeseci nakon postavljanja seizmološke mreže u širem području koja se naknadno i proširila. Podaci prikupljeni na tim postajama omogućuju kvalitetniju analizu serije potresa te aktiviranog rasjednog sustava.

U ovom radu korištena je metoda uparivanja predložaka za proširenje kataloga potresa na temelju automatskih detekcija faza i događaja, a ideja metode je upotrijebiti poznate potrese kao predloške za traženje sličnih događaja na seizmogramima. Analiza obuhvaća razdoblje od tri mjeseca nakon početnog potresa i područje radijusa od 25 km od epicentra glavnog potresa serije kod Berkovića, ukupno 5 331 potres, a kao predlošci se koriste potresi magnituda $M \geq 2.0$. Rezultat procesa je popis detekcija s očitanim fazama za čije se lociranje koristio program koji nelinearnim metodama određuje hipocentar potresa.

Primjena metode uparivanja predložaka rezultira s 166 295 detekcija, 31 put više u odnosu na početni katalog. Lokacije se ne mogu dobiti za sve detekcije zbog manjka očitanih faza, ali dobivene za četiri puta više događaja nego u početnom katalogu (24 096). Međutim, katalog obuhvaća četiri puta manje događaja nego u popisu detekcija. Lokacije odgovaraju onima u početnom katalogu iako je izražen manji rasap oko epicentra u novom katalogu. Dubine žarišta potresa uglavnom su između 10 i 20 kilometara. Algoritam pokazuje najveću efikasnost u prvom mjesecu nakon potresa, no i u ostatku vremenskog razdoblja rezultira većim brojem potresa nego pri ručnom bilježenju što je jedna od prednosti ovakve automatizirane metode uz njenu brzinu obrade velike količine podataka. U daljnjim istraživanjima potrebno je izračunati magnitude potresa te ispitati različite verzije parametara u korištenoj metodi, odnosno programu za lociranje.

Ključne riječi: seizmičnost, Dinaridi, metoda uparivanja predložaka, lociranje potresa

Application of template matching to earthquake series in Berkovići (BiH)

Abstract

On April 22nd, 2022, an earthquake of local magnitude $M_L = 6.0$ occurred in the southern part of Bosnia and Herzegovina near Berkovići, with an estimated maximum intensity of $I_0 = VII$ °EMS. The earthquake series in Berkovići followed a few months after the installation of a seismic network in the wider area, which was subsequently expanded. The data collected from these stations enable a more comprehensive analysis of the earthquake series and the activated fault system.

In this study, template matching was employed to expand the earthquake catalog based on automatic phase and event detections. The idea behind the method is to use known earthquakes as templates to search for similar events in seismograms. The analysis covers a period of three months after the initial earthquake and an area with a radius of 25 km from the epicenter of the main earthquake series in Berkovići, totaling 5 331 earthquakes. Templates used for matching have magnitudes $M \geq 2.0$. The result is a list of detections with recorded phases, and their locations were determined using a program using nonlinear methods for hypocenter determination.

Application of template matching results in 166 295 detections, which is 31 times more compared to the initial catalog. Locations cannot be obtained for all detections due to a lack of recorded phases, but they are obtained for four times more events than in the initial catalog (24 096). However, the catalog encompasses four times fewer events than in the detection list. The locations correspond to those in the initial catalog, although there is a smaller dispersion around the epicenter in the new catalog. Depths of earthquake foci are mainly between 10 and 20 kilometers. The algorithm exhibits the highest efficiency in the first month after the earthquake, but throughout the entire time period, it leads to a higher number of detections compared to manual recording. This is one of the advantages of such an automated method, along with its speed in processing large amounts of data. Further research should involve calculating earthquake magnitudes and exploring different parameter versions in the used method or location program.

Keywords: seismicity, Dinarides, template matching, earthquake location

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. <i>Potres kod Berkovića 2022. godine</i>	1
1.2. <i>Seizmotektonika područja</i>	3
1.3. <i>Katalozi potresa</i>	6
2. Metode	8
2.1. <i>Uparivanje predložaka</i>	8
2.1.1. <i>EQcorrscan</i>	9
2.2. <i>Lociranje potresa</i>	12
2.2.1. <i>NonLinLoc</i>	13
3. Podaci	16
4. Rezultati i diskusija	20
4.1. <i>Detekcije pronađene metodom uparivanja predložaka</i>	20
4.2. <i>Relociranje početnog kataloga</i>	26
4.3. <i>Lociranje detekcija</i>	28
5. Zaključak	35
Literatura	37
Dodatak A Podaci o korištenim postajama	41
Dodatak B Kontrolna datoteka za NonLinLoc	42
Dodatak C Karte lokacija potresa po tjednima	44

1. Uvod

Sustavno bilježenje potresa od velike je važnosti za seizmologiju. Tako zabilježenim podacima prati se potresna aktivnost što može dovesti do spoznaja o unutarnjoj strukturi Zemlje, obrascima ponavljanja potresa u nekom području, kao i procjeni potresne opasnosti. Od samih začetaka ove grane znanosti, seizmolozi se oslanjaju na ručno stvarane kataloge potresa. Stručnjaci pregledavaju zapise seizmograma na kojima bilježe faze čija se vremena nailaska koriste pri lociranju događaja. Međutim, ljudska subjektivnost može rezultirati razlikama u označavanju vremena nailaska faza koje služe za identifikaciju potresa što u konačnici utječe na točnost kataloga potresa. Unatoč tome, katalogi predstavljaju dragocjen izvor informacija.

Povećanje količine podataka značajno utječe na utrošeno vrijeme za analizu seizmograma. Razvoj tehnologije i računalnih algoritama donio je značajan napredak te se počelo raditi na tehnikama kojima se proces detekcije potresa može automatizirati. Njihovom uporabom resursi se mogu rasporediti, a brzina obrade podataka znatno povećati. Osim toga, računala su dosljedna i neumorna što pomaže prilikom kontinuiranog praćenja seizmičnosti.

Kao jedna od najperspektivnijih metoda automatske detekcije potresa, istaknula se metoda uparivanja predložaka. Metoda koristi računalne algoritme za usporedbu i identifikaciju potresa na temelju karakterističnih uzoraka zapisa potresa što omogućuje brzo i pouzdano detektiranje potresa, čak i u slučajevima manjih potresa koje ljudsko oko možda ne bi zapazilo.

U ovome radu primijenjena je metoda uparivanja predložaka napravljena na temelju već postojećeg kataloga serije potresa u području Berkovića kako bi se ocijenila učinkovitost ovog algoritma.

1.1. *Potres kod Berkovića 2022. godine*

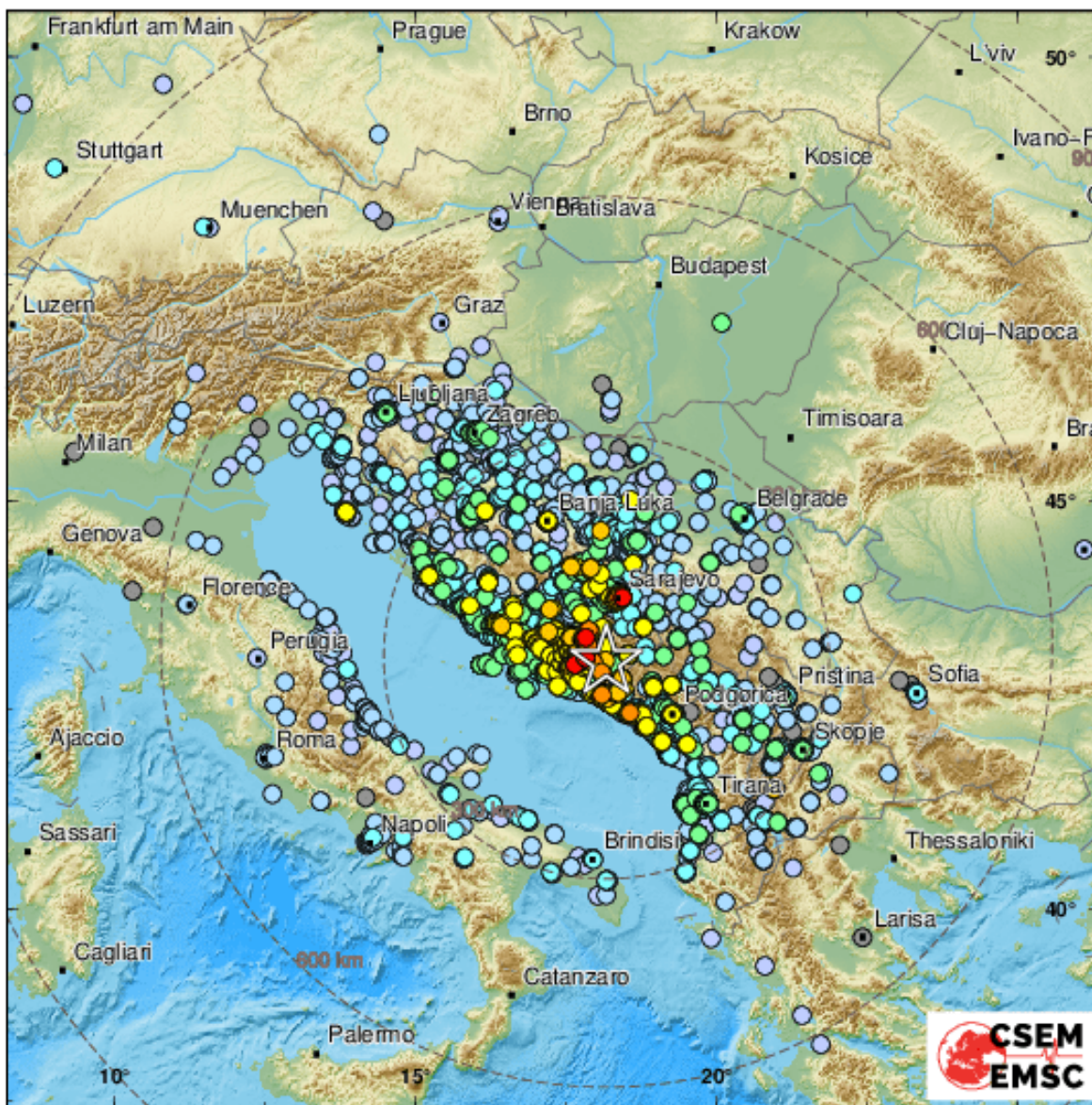
U večernjim satima dana 22. travnja 2022. godine, u 23:07 po lokalnom vremenu, jugoistočni dio Bosne i Hercegovine pogodio je jak potres lokalne magnitude $M_L=6.0$ (momentne magnitude $M_W=5.7$). Epicentar potresa nalazio se u blizini mjesta Berkovići, a žarište na dubini od 22 kilometra.

Potres se osjetio diljem Bosne i Hercegovine, Hrvatske i Crne Gore, ali i u Sloveniji, Italiji, Srbiji, Albaniji i Makedoniji (slika 1.1). Maksimalni intenzitet procijenjen je s VII °EMS¹ u Berkovićima, gdje je oštećeno 29% građevina (Dasović i sur., 2023). Prema priopćenjima (URL3), u širem epicentralnom području zabilježene su štete na građevinama, a radi se uglavnom o pukotinama na zidovima, oštećenjima fasade i dimnjaka te palim crijepovima. Usljed odrona stijene uzrokovanog potresom, smrtno je stradala jedna osoba u Stolcu, gdje je intenzitet procijenjen na VI-VII °EMS.

U razdoblju između 22. travnja 2022. i 22. siječnja 2023. godine ukupno je locirano 7217 naknadna potresa, od čega 900 unutar prvih 12 sati (Dasović i sur., 2022; 2023) dok je magnituda potpunosti kataloga $M_C = 1.3$. Od 4192 naknadna potresa locirana u prvom mjesecu nakon početka aktivnosti, njih 23 imali su lokalne magnitude $M_L \geq 3.0$. Dubine žarišta lociranih potresa većinom su između 15 i 30 kilometara što odgovara promatranom području iako su dubine veće od očekivanih za Dinarde u cijelosti.

¹Europska makroseizmička ljestvica (engl. *European macroseismic scale*), (Grünthal, 1998)

Felt reports received for M5.7 earthquake
in BOSNIA AND HERZEGOVINA
on 2022-04-22 21:07:49 UTC



14087 felt reports on this map

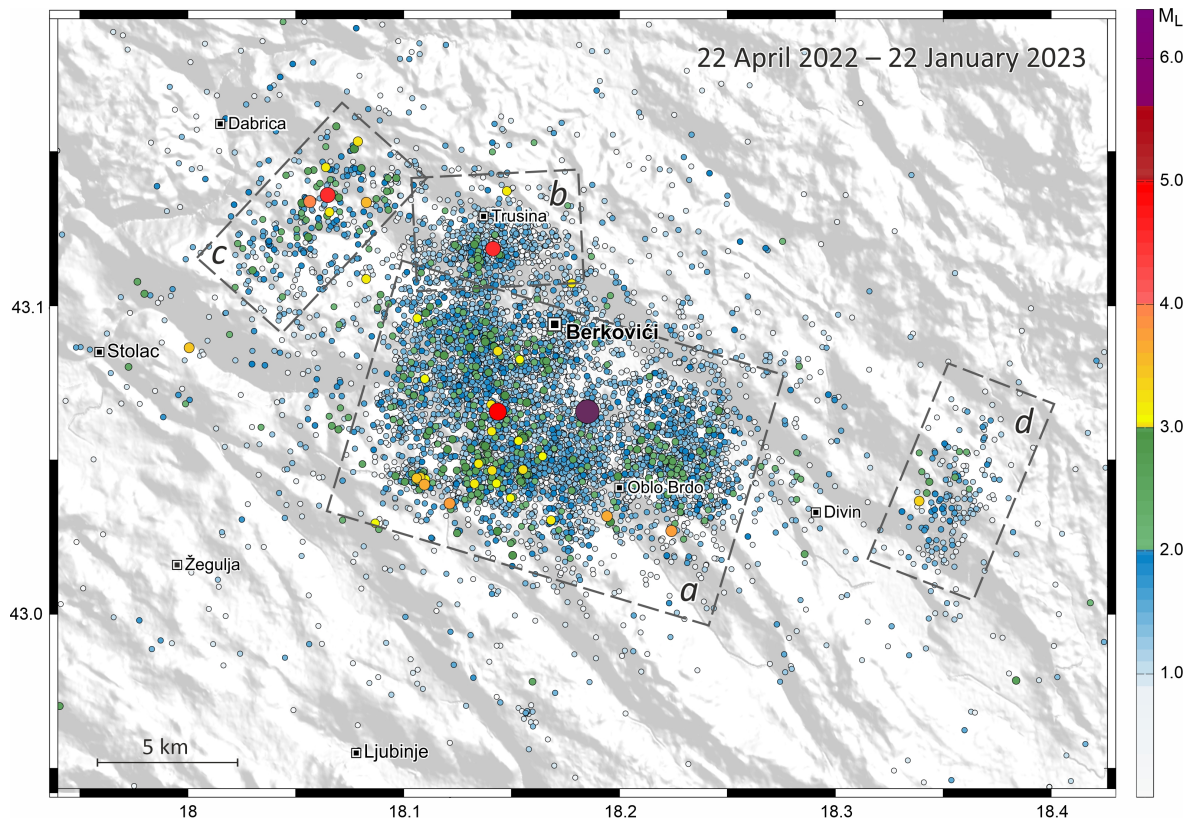
300 km

Updated on 30/01/2023 at 14:11 UTC

★ Epicentral location

Reported as:

Slika 1.1. Karta osjećenosti potresa u Berkovićima na temelju svjedočenja, preuzeta sa stranica Europskog mediteranskog seizmološkog centra (URL1).



Slika 1.2. Lokacije epicentara potresa zabilježenih u prvih devet mjeseci aktivnosti. Magnituda je označena skalom boja s desne strane. Slika je preuzeta iz rada Dasović i sur. (2023)

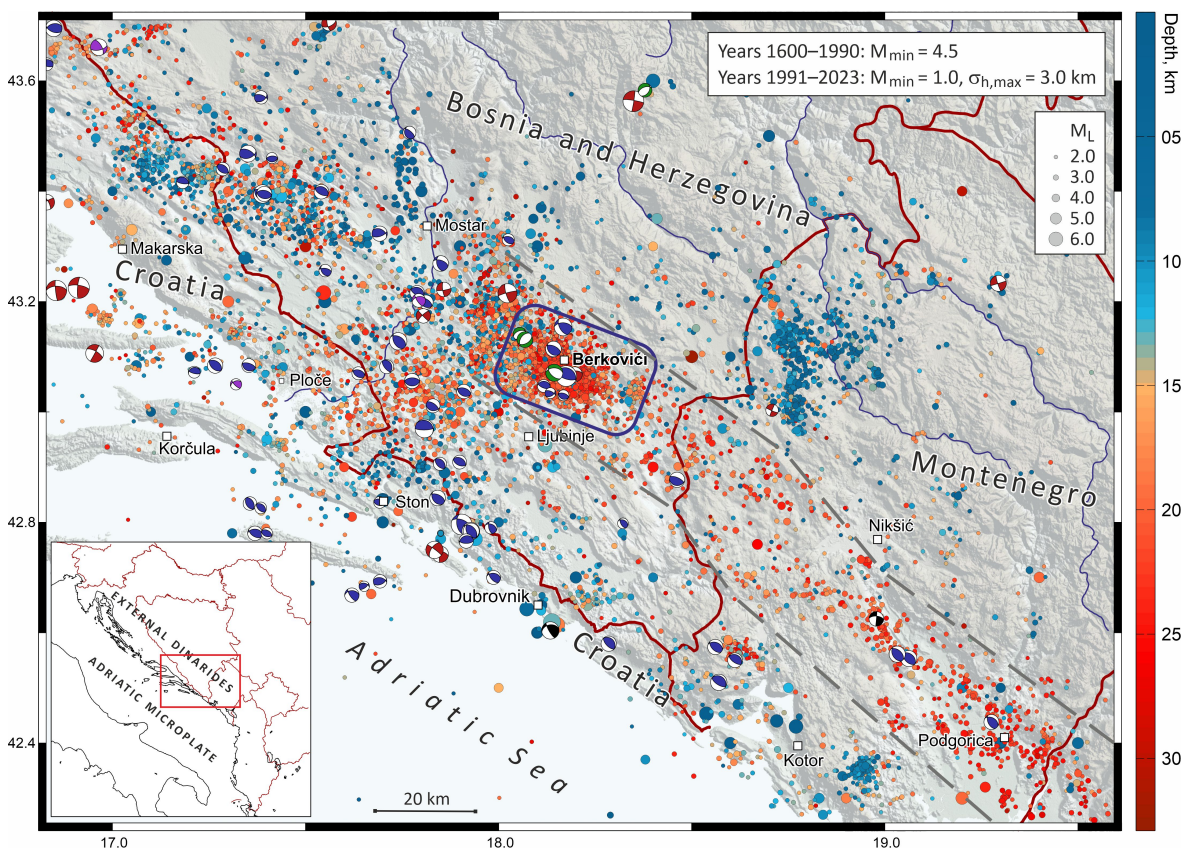
Mehanizam rasjedanja glavnog potresa je reversan s rasjednom plovom blago nagutoj prema sjeveroistoku. Najjači naknadni potres zabilježen je dan nakon glavnog potresa, 24. travnja 2022. 04:27 UTC s $M_L = 4.9$, ali s normalnim žarišnim mehanizmom čija je rasjedna ploha pružanja sjeveroistok-jugozapad, nagiba otprilike 45° , što se može objasniti preraspodjelom Coulombova stresa na potencijalne stare rasjede normalnog mehanizma i privremenom promjenom stresa nakon što se ukupna napetost smanjila.

Naknadna seizmičnost može se podijeliti u četiri grupe. Glavna podgrupa (označena s *a* na Slici 1.2) je u području oko glavnog potresa serije u Berkovićima. Većina naknadnih potresa magnitude $M \geq 3.0$ dogodila se u južnom dijelu te grupe. U skupini *a* većina potresa ima hipocentre dublje od 20 kilometara. Iako su se sve skupine aktivirale ubrzo nakon glavnog potresa, u podgrupi *b* na slici 1.2 u blizini sela Trusina većina je aktivnosti zabilježena u prosincu 2022. godine. U ostalim skupinama seizmička aktivnost vidljiva je kroz cijelo promatrano razdoblje.

1.2. Seizmotektonika područja

Područje oko Berkovića jedno je od seizmološki najaktivnijih područja južnog dijela Vanjskih Dinarida kao što je vidljivo na slici 1.3. Unutar radijusa udaljenosti od 25 kilometara oko Berkovića zabilježena su tri potresa magnitude $M_L \geq 5.5$ od početka 20. stoljeća do 2022. godine (Dasović i sur., 2023). Za potres iz 1907. godine procijenjena je magnituda $M_m = 5.7$, dok je intenzitet $I_0 = \text{VII} - \text{VIII}^\circ$ MCS u epicentru koji je 23 km od epicentra glavnog potresa promatrane serije kod Berkovića koja se dogodila 2022.

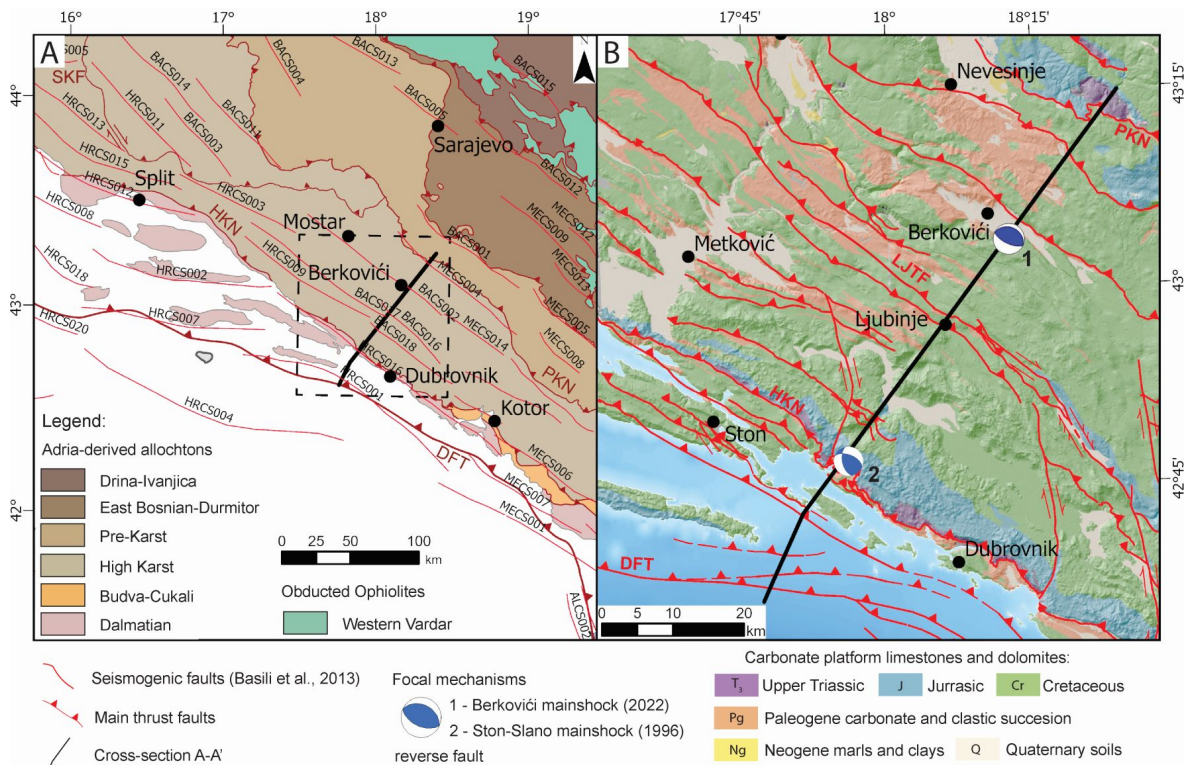
godine. Najjači zabilježen potres dogodio se 14. veljače 1927. u blizini Ljubinja s $M_L = 6.1$, na samo 15 kilometara udaljenosti od epicentra promatrane serije, a najrecentniji potres dogodio se 26. studenog 2019. godine s $M_L = 5.5$ lociran 21 km sjeveroistočno od epicentra glavnog događaja spomenute serije.



Slika 1.3. Seizmičnost šireg područja oko Berkovića, preuzeto iz rada Dasović i sur. (2023). Dubina žarišta je prema skali boja, a veličina simbola skalirana je prema magnitudi potresa. Žarišni mehanizmi su preuzeti iz baze podataka Herak i sur. (2016)

Posljednji jaki događaj u širem području je potres Ston-Slano iz 1996. godine ($M_L = 6.0$). Uzrokovao je jednu od većih materijalnih šteta u novijoj hrvatskoj povijesti. Većina povijesne jezgre grada Stona srušena je ili oštećena trešnjom, a tri sela u okolini Stona bila su uništena. Potres se dogodio na rasjedu s reversnim mehanizmom, pružanja sjeveroistok-jugozapad blago nagnutom prema sjeveroistoku, a Dasović i sur. (2023) pokazali su da postoji mogućnost da taj potres i potres kod Berkovića pripadaju istom kompozitnom seizmogenom izvoru tj. izvoru koji sadrži neodređen broj individualnih izvora (seizmogenih rasjeda), a čiji su parametri približno poznati iz geoloških izraživanja.

Dubine žarišta potresa rastu s udaljenošću od obale prema unutrašnjosti (slika 1.3). Potresi bliži obali imaju žarišta do 10 kilometara dubine, dok na udaljenostima unutar raspona od 30 – 60 kilometara od obale dubine žarišta prelaze i 20 kilometara, što je upravo područje obuhvaćeno ovim radom (dio označen na slici 1.3). Daljnjim udaljavanjem od obale (više od 60 km) hipocentri su ponovno plići, na dubinama oko deset kilometara.



Slika 1.4. (a) Karta tektonskih jedinica (Schmid i sur., 2020) i tragovi seizmogenih rasjeda na širem epicentralnom području (URL5; Basilić i sur., 2013) (b) Geološka karta šireg područja. Slika je preuzeta iz Dasović i sur. (2023).

Područje oko Berkovića je dio jugoistočnog dijela borano–navlačnog pojasa Vanjskih Dinarida koji je nastao jugozapadnim navlačenjem (engl. *thrusting*) na granici Jadranske mikroploče u eocenu i oligocenu (Schmid i sur., 2020; Balling i sur., 2021, s referencama). Epicentralno područje se nalazi u zoni Visokog krša na koju se na sjeveroistoku navlači predkrški dio Unutrašnjih Dinarida, dok se na jugozapadu ovo područje navlači preko Dalmatinske tektonske jedinice. Na površini (slika 1.4b) uglavnom prevladavaju karbonati mezozojske starosti te paleogenski karbonati, klastiti i fliš koji se smatraju sintektonskim depozitima predgorskog bazena (Vlahović i sur., 2005; Šumanovac, 2010, s referencama). To ukazuje da je glavna deformacijska faza u jugoistočnom dijelu Vanjskih Dinarida bila u eocenu i oligocenu koja je u širem području rezultirala boranim strukturama i sustavima reversnih rasjeda dominantnog smjera pružanja SZ-JI. U cijelom dinaridskom sustavu dogodilo se post-tektonsko uzdizanje u oligocenu i miocenu zbog postkolizijske delaminacije donjeg dijela litosfere ispod Dinarida (Belinić i sur., 2021; Balling i sur., 2021).

Rasjedi u ovom dijelu Dinarida prikazani su na slici 1.4a. Karakteriziraju ih pomaci po rasjedu između 0,15-2,01 mm/god i maksimalna očekivana magnituda (M_{max}) između 5.5-7.5 (Kastelić i Carafa, 2012; Kastelić i sur., 2013). Obzirom da u području vlada kompresijska tektonika, dominiraju reversni žarišni mehanizmi. Povremeno se aktiviraju rasjedi s pomakom u smjeru pružanja (engl. *strike-slip*). Normalno rasjedanje je izuzetno rijetko u ovom području, ali tri naknadna potresa promatrane serije potresa kod Berkovića imaju normalan žarišni mehanizam.

1.3. *Katalozi potresa*

Katalog potresa je osnovni i jedan od najvažnijih proizvoda seizmologije. Pruža bazu podataka koja koristi za proučavanje seizmičnosti, seizmotektonike i potresne opasnosti. Osnovne podatke o potresima koje katalozi moraju sadržavati su:

1. vrijeme nastanka potresa
2. lokacija (geografska dužina, geografska širina, dubina žarišta)
3. magnituda.

Moguće je navesti više vrsta magnituda u katalogu, primjerice u Hrvatskom katalogu potresa (Herak i sur., 1996) navode se lokalna magnituda (M_L) ili momentna magnituda (M_W) kao medijan magnituda sa svih hrvatskih seizmoloških postaja i lokalna magnituda iz drugih izvora (drugih službi). Za starije potrese često se zna navoditi i intenzitet potresa umjesto magnitude. Osim osnovnih informacija o potresu, katalozi mogu sadržavati i podatke o pogreškama tih mjerenja, broju korištenih podataka za lociranje potresa te reference na izvore podataka.

Podjela kataloga može se napraviti na više načina npr. s obzirom na način zapisivanja potresa ili s obzirom na način stvaranja kataloga. Woessner i sur. (2010) razlikuju tri osnovne vrste kataloga s obzirom na način zapisivanja potresa:

- pretpovijesni
- povijesni
- instrumentalni katalozi.

Katalozi s potresima iz pretpovijesnog razdoblja temelje se na geološkim i geotehničkim istraživanjima. Katalozi s povijesnim potresima, s druge strane, koriste makroseizmološke podatke o intenzitetu potresa kao mjeru veličine potresa. To su podaci prikupljeni iz svjedočanstava ljudi o doživljenim potresima, a oslanjaju se na opise šteta. Ove informacije pružaju uvid u potrese koji su se dogodili prije razvoja moderne instrumentalne tehnologije. Najdetaljniji i najprecizniji podaci nalaze se u katalozima s instrumentalno očitanim potresima koji sadrže zapise zabilježene na mreži seizmografa. Instrumentalni katalozi iznimno su korisni jer omogućavaju precizno lociranje potresa i pružaju numeričke podatke koji su temelj za daljnje analize.

Obzirom na način stvaranja kataloga potresa, kataloge možemo podijeliti na manualne i automatizirane. Manualne (ručno stvorene) kataloge stvaraju iskusni seizmolozi bilježeći faze nailaska P- i S-valova na zapisima seizmograma. Hipocentri se potom lociraju iz podataka o fazama i postajama na kojima su faze zabilježene. Takav posao zahtijeva visoku preciznost te je dugotrajan. Iako je u današnje vrijeme proces većinom manualan, postoji velika mogućnost da će se u budućnosti metodama strojnog učenja u potpunosti automatizirati stvaranje kataloga potresa.

Strojno učenje se u najširem smislu definira kao skup tehnika kojima se dobivaju informacije izravno iz podataka koristeći dobro definirana pravila. Iznimno je korisno za obradu velikog broja podataka pa su se metode počele implementirati i u seizmologiji. Prvi algoritmi automatizacije detekcije potresa i odabira faza razvijeni su u 70-im godinama prošlog stoljeća (Allen, 1978), a jedna od najranijih primjena strojnog učenja u seizmologiji bila je upravo na problemu diskriminacije i klasifikacije seizmičkih događaja (Dysart i Pulli, 1990; Musil i Plešinger, 1996; Wiszniowski i sur., 2014).

Danas se najviše koriste istrenirane konvolucijske neuronske mreže (CNN), npr. Perol i sur. (2018) koriste mreže za detekciju potresa na temelju sličnih događaja, dok ih Ross i sur. (2018) koriste za odabir faza na seizmogramima. Algoritmi su se pokazali iznimno učinkovitima zbog čega se još više napora ulaže u daljnje poboljšavanje metoda. Posebno korisna se pokazala upotreba seizmograma već poznatih potresa za detekciju novih događanja na temelju sličnosti zapisa (npr. Gibbons i Ringdal, 2006; Shelly i sur., 2007; Peng i Zhao, 2009). Osnovna pretpostavka ove tehnike je da slični potresi proizvode slične seizmičke zapise. Konkretno, ako postoji baza podataka s prethodno identificiranim i klasificiranim seizmičkim događajima, možemo usporediti nove seizmičke zapise s tim referentnim zapisima kako bismo identificirali i klasificirali nove događaje. Tehnika kao što je uparivanje predložaka (detaljnije o metodi u poglavlju 2) koristi se za dobivanje potpunijeg kataloga potresa jer se njima mogu otkriti događaji manjih magnituda koji se često previde koristeći konvencionalne metode. Osim toga, računala su dosljedna u svojim analizama te ne podliježu ljudskom faktoru čime se može standardizirati proces stvaranja kataloga.

2. Metode

U ovom radu će se na seriji potresa kod Berkovića koristiti metoda uparivanja predložaka uz paket EQcorrscan u Pythonu za detekciju novih događaja na temelju predložaka potresa detektiranih u ručno stvorenom katalogu, dok će se novootkrivene događaje locirati pomoću softvera NonLinLoc.

2.1. Uparivanje predložaka

Tehnika uparivanja predložaka (engl. *template matching*) se u seizmologiji koristi za detekciju i identifikaciju potresa i seizmičkih događaja. Ideja je usporediti obrasce (predloške, uzorke) seizmičkih signala sa zapisa seizmografa kako bi se pronašle sličnosti, određene nekom statističkom mjerom, a potom identificirali novi događaji.

Međukorelacija (engl. *cross-correlation*) se pokazala povoljnim alatom za detekciju i karakterizaciju seizmičkih signala. Definira se kao mjera sličnosti dviju varijabli tj. dva niza podataka preko funkcije odmaka jednog niza u odnosu na drugi. Međukorelacija dvije vremenske funkcije $x(t)$ i $y(t)$ s vremenskim razmakom τ definirana je kao:

$$R_{xy}(\tau) = \int y(t)x(t + \tau)dt, \quad (2.1.)$$

odnosno za diskretne podatke $t = 0, 1, \dots, 2N$

$$\begin{aligned} R_{xy}(\tau) &= \frac{1}{2N} \sum_{m=1}^{2N} y(t)x(t + \tau) \quad t = 0, 1, \dots, 2N - 1 \\ &= \frac{1}{2N} [y(t) * x(-t)], \end{aligned} \quad (2.2.)$$

gdje $*$ označava konvoluciju i N ukupan broj podataka. Najčešće se koristi normaliziranje kako bi se dobio normalizirani međukorelacijski koeficijent $cc(\tau)$ dan relacijom:

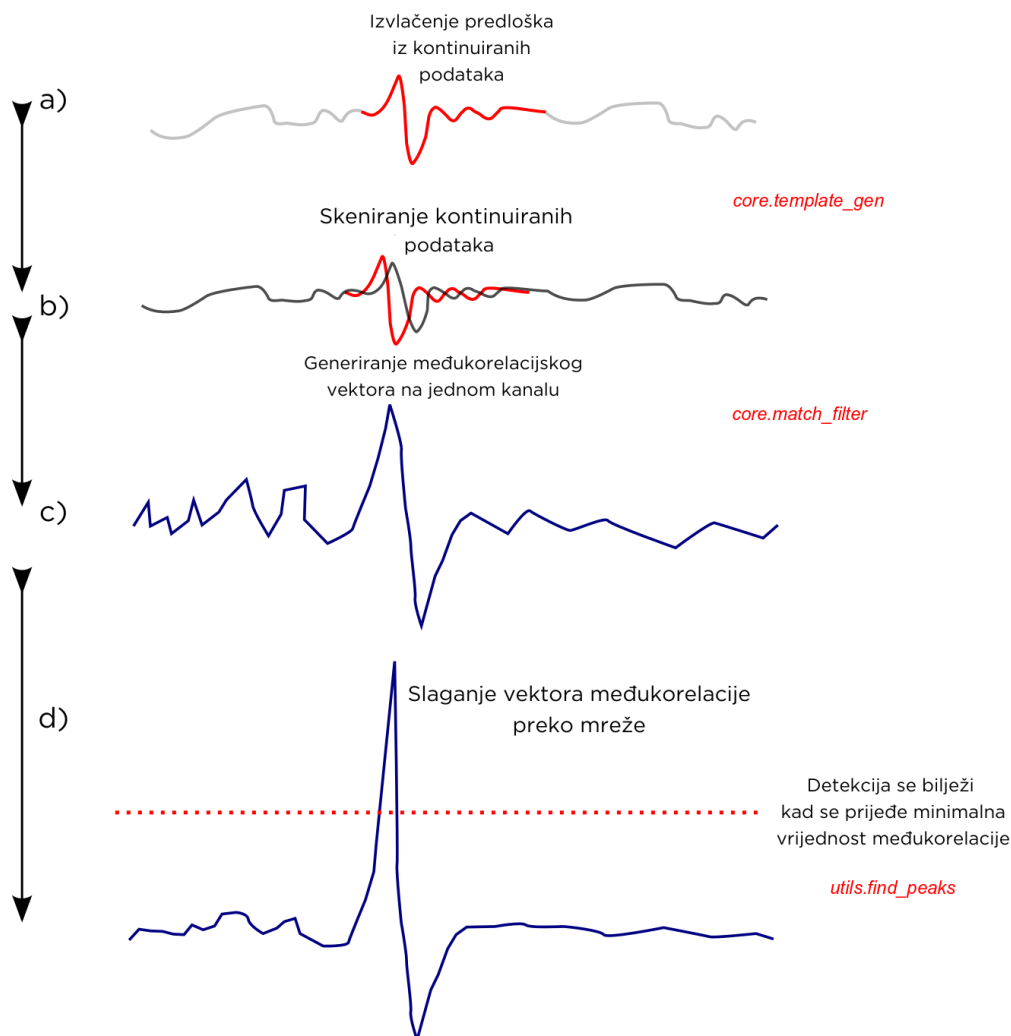
$$cc(\tau) = \frac{\sum_t^{t+\tau} y(t)x(t + \tau)}{\sqrt{\sigma(x(t))\sigma(y(t))}}. \quad (2.3.)$$

gdje je σ oznaka za standardnu devijaciju. Za dobro definiranu funkciju $cc(\tau)$ dobivene vrijednosti biti će između -1 i 1, gdje vrijednost 1 označava savršenu pozitivnu, a -1 označava savršenu negativnu korelaciju dva niza.

Za računanje međukorelacije prilikom poklapanja predložaka koriste se dijelovi seizmograma na kojima se nalazi zapis potresa (kojeg se onda naziva obrascem ili predloškom). Ti vremenski prozori su maleni, ali dovoljno veliki da obuhvate glavne značajke nailaska faze na postaju. Kontinuirani dugački seizmogrami koji se koriste u pretrazi za novim događajima režu se na manje nizove podataka i uspoređuju s prethodno definiranim obrascima tako da se računaju međukorelacijski koeficijenti.

2.1.1. *EQcorrscan*

U ovom radu alat koji se koristi za usporedbu uzoraka je Python paket *EQcorrscan* kojeg su razvili Chamberlain i sur. (2017).



Slika 2.1. Tok obrade podataka poklapanjem predložaka koristeći *EQcorrscan*, prilagođeno sa stranica URL4.

Osnova procesa prikazana je na slici 2.1. Prije svega, potrebno je stvoriti skup predložaka koji će ići u daljnji postupak (slika 2.1a). Za to se koristi već postojeći katalog potresa i pripadnih zapisa. Početni katalog najčešće je ručno stvoren i nalazi se u QuakeML formatu (Schorlemmer i sur., 2011). Predložci trebaju reprezentirati različite vrste potresa pa se pri stvaranju biraju željene karakteristike npr. veličina potresa. Predložak se izrezuje iz zapisa seizmografa na postajama za vremenske prozore P- i S-valova oko zabilježenih nailazaka faza. Veličinu prozora treba pomno izabrati kako bi obuhvatili dovoljan raspon frekvencija potresa. Predug ili prekratak vremenski prostor bit će osjetljiviji na šum i potencijalno rezultirati u lažno pozitivnim očitanjima u analizi. *EQcorrscan*-u treba jedan tip vala za svaki kanal pa se na vertikalnoj komponenti seizmograma reže vremenski prozor P-vala, a na horizontalnim komponentama prozor za S-val. Svaki predložak sadrži sve dostupne kanale zajedno s P- i S-valovima svake postaje postavljene na odgovarajući vremenski odmak, koji odgovara razlici vremena

putovanja između različitih seizmičkih faza i postaja (slika 2.2). Predložci također uključuju temeljne informacije o potresu (geografska širina i duljina, dubina žarišta, hipocentralno vrijeme i magnituda) iz kojeg se stvaraju te vrijeme detektiranih P– i S–faza na postajama.

Potreban je i skup zapisa koji će se pretraživati prilikom potrage za detekcijama, a koristi se metoda detekcije usklađenim filtrom (engl. *matched-filter detection*) za uspoređivanje uzorka i zapisa računanjem normalizirane međukorelacije prema jednadžbi:

$$cc(y) = \frac{\sum_{x=0}^n (t(x) - \bar{t})(d(x+y) - \bar{d}(y))}{\sqrt{\sum_{x=0}^n (t(x) - \bar{t})^2 \sum_{x=0}^n (d(x+y) - \bar{d}(y))^2}}, \quad (2.4.)$$

gdje je $cc(y)$ normalizirani međukorelacijski koeficijent za svaki primjer y , t je predložak, n je duljina predložka, d su kontinuirani podaci, $\bar{d}(y)$ lokalni srednjak podataka između primjera y i $y+n$ dok je \bar{t} srednjak predložka. Koeficijent $cc(y)$ računa se za svaki dostupni kanal na njihovim odgovarajućim relativnim vremenskim odmacima s obzirom na razliku vremena putovanja između njihovih P– i S–valova (slika 2.2c), a izlaz je suma svih međukorelacijskih koeficijenata koju označavamo s cc_{sum} . Primjer jednog rezultata prikazan je na slici 2.2.

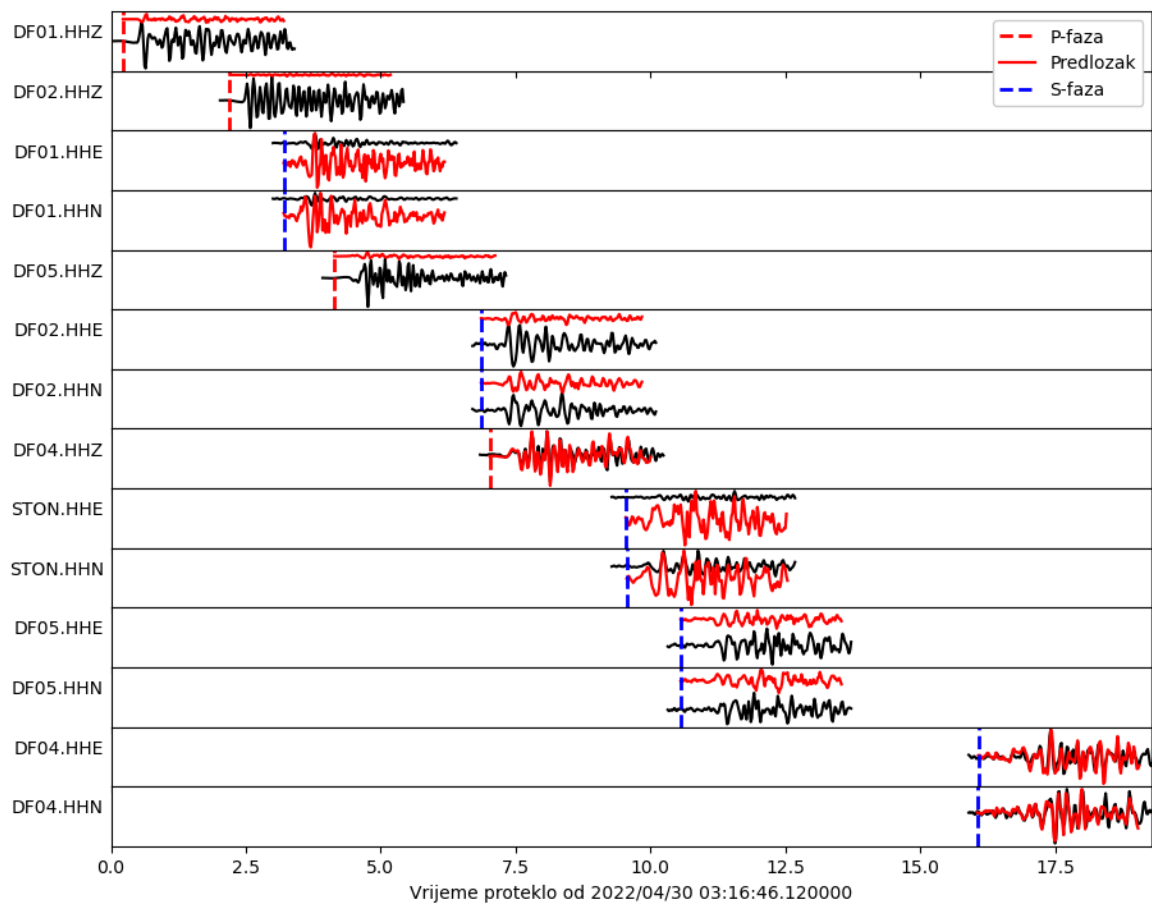
Medijan apsolutne devijacije (MAD) koristi kao metrika za određivanje sličnosti tako da mjeri prosječnu udaljenost između podataka i medijana, prema relaciji:

$$MAD = \text{median}|X_i - \widetilde{X}_i|, \quad (2.5.)$$

gdje su X_i podaci, a \widetilde{X}_i medijan tih podataka. Detekcija se bilježi samo kada vrijednost medijana premaši proizvoljno postavljen prag (slika 2.1 d). U ovom radu prag je postavljen na vrijednost 8, što znači da signal treba biti osam puta veći od razine šuma kako bi se registrirala detekcija.

Važno je da se svi zapisi uzorkuju i filtriraju jednako kao i podaci iz postojećeg kataloga potresa, odnosno kataloga predložaka. Svaki predložak prolazi kroz cijeli skup zapisa seizmograma, što može rezultirati u višestrukim detekcijama. One se uklanjaju, favorizirajući onu detekciju s najvećim koeficijentom međukorelacije.

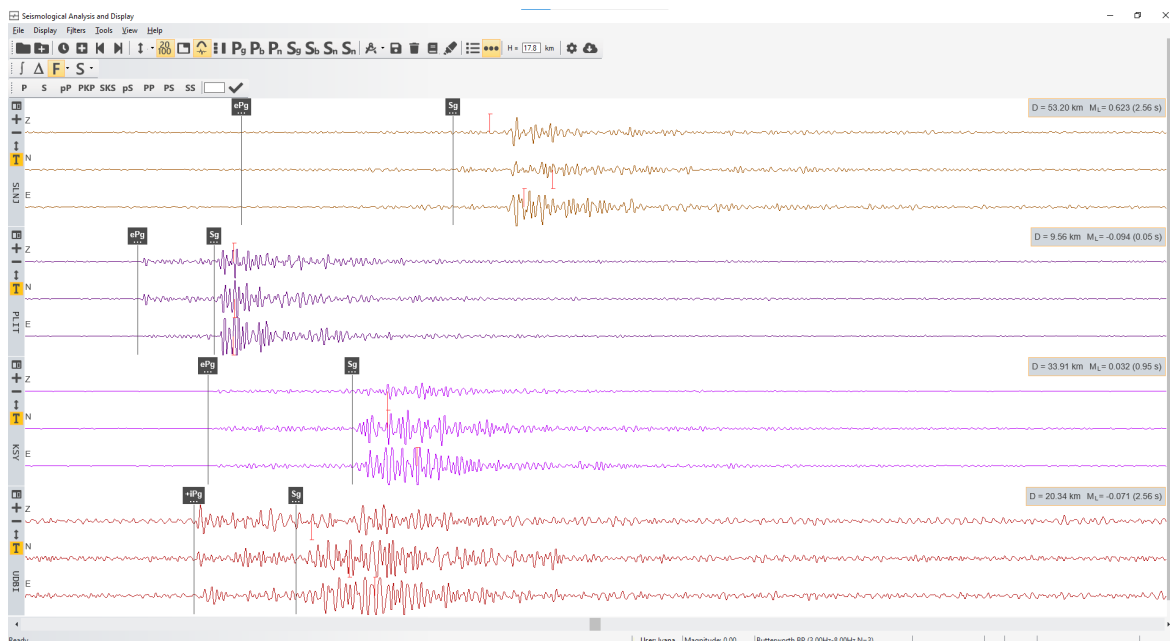
U posljednjem koraku, dobiveni skup detekcija prolazi postupak stvaranja kataloga s fazama detektiranih pomoću funkcija iz EQcorrscan paketa baziranih na radu Shelly i Hardebeck (2010). Podaci iz detekcija izrezuju se u vremenske prozore jednake veličine kao i u predlošcima uz vremenski dodatak na krajevima vremenskih prozora. Međukorelacijski koeficijent računa se za podatke iz detekcije i predložka, uspoređujući odgovarajuće postaje i kanale. Zatim se koeficijenti zbrajaju kako bi se dodatno povećao omjer signala i šuma, a kao rezultat se dobiva suma međukorelacijskih koeficijenata cc_{sum} . Faza se bilježi u trenutku maksimalne međukorelacijske vrijednosti koja je iznad izabrane minimalne vrijednosti ($cc \geq cc_{min}$).



Slika 2.2. Primjer poklapanja predložaka. Predložak je obojen crveno, zapisi s kojima se uspoređuje obojeni su crnom bojom. Crvene i plave vertikalne linije označavaju vrijeme nailaska P- odnosno S-faze.

2.2. Lociranje potresa

Energija oslobođena u potresu dijelom se prenosi u seizmičke valove koji se mogu uočiti na zapisima seizmografa. Kako bi se odredio epicentar događaja potrebno je događaj zabilježiti na barem tri različite lokacije. Primjer jednog takvog događaja je na slici 2.3. Za postaje na kojima se potres vidi očitaju se vremena nailaska P- i S- faze ako su vidljive. Iz razlike vremena nastupa P- i S- faze na postaji i hodokrona odredi se udaljenost potresa od postaje.



Slika 2.3. Primjer seizmograma s očitanim P- i S-fazama.

Iako se udaljenost od epicentra može utvrditi iz hodokrona, za određivanje lokacije potreban je i smjer. Potres se dogodio negdje na kružnici radijusa koji je jednak udaljenosti seizmološke postaje od epicentra, a točna lokacija dobije se triangulacijom kao na slici 2.4. Za svaku postaju na kojoj je potres vidljiv iscrtava se takva kružnica sa svojstvenim radijusom udaljenosti, a na presjecištu kružnica nalazi se epicentar potresa. Iz razlike vremena nastupa P- i S-valova određuje se i dubina žarišta.

Proces triangulacije nakon ručno detektiranih faza provode softveri, a hrvatski seizmolozi za lociranje potresa koriste interaktivni program SANDI (Orlić i sur., 2021). Detekcija faza vrlo je osjetljiv postupak u kojem je potrebna izuzetna preciznost jer proračuni ne mogu nadomjestiti krivo očitane faze.

Katalog potresa koji se generira EQcorrscan paketom ne sadrži lokacije događaja, već samo nailaske P- i S-faza na postaje pa se u ovom radu faza i njeno vrijeme nailaska automatski očitavaju koristeći alate iz EQcorrscan paketa, opisanog u prethodnom potpoglavlju.



Slika 2.4. Primjer triangulacije izrađen u aplikaciji Earthquake Triangulation (URL7).

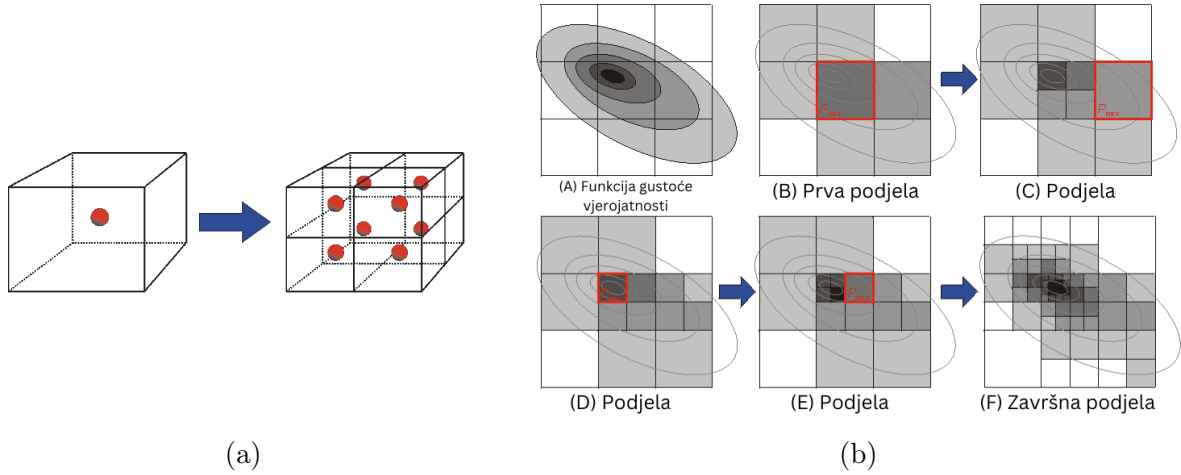
2.2.1. *NonLinLoc*

U ovom radu koristi se softver *NonLinLoc* u svrhu lociranja seizmičkih događaja koristeći nelinearne metode (Lomax i sur., 2000, 2009).

Teorijska vremena putovanja P- i S- valova između seizmoloških postaja i svih koordinata mreže računa se aproksimacijom konačnih razlika po Huygensovom principu (Podvin i Lecomte, 1991) i spremaju na računalo u obliku mreže točaka s vremenom putovanja. Princip izriče da svaka točka na valnoj fronti može predstavljati izvor vala, a korištena metoda omogućava procjenu vremena prvog nailaska na određenu točku mreže na temelju vremena prvog nailaska na susjednim točkama, bez globalne informacije o valnim frontama. Zamislimo trenutnu točku okruženu sekundarnim izvorima i lokalno izračunamo dolazna vremena, birajući najranije. Za procjenu vremena ovih izvora koristi se interpolacija. Algoritam je stabilan i za valove refraktirane na površinama s velikim razlikama u brzini.

Izračunata teoretskih vremena putovanja potom se koriste za procjenu kuteva emergencije. Računaju se dva gradijenta za svaki smjer (x, y, z) , jedan između trenutnog i prethodnog čvora na osi te drugi između trenutnog i idućeg čvora. Vektor gradijenta vremena putovanja određen je ukupnim gradijentom duž tri osi, a smjer suprotan vektoru daje kuteve emergencije za nagib i azimut.

NonLinLoc radi vjerojatnosnu pretragu lokacije hipocentra računajući vremena putovanja unutar 3D mreže. Metoda slijedi pristup Tarantola i Valette (1981) kojom se dobivaju a-posteri funkcije gustoće vjerojatnosti (*PDF*) za lokacije i nepouzdanosti. U procesu se pretpostavlja da su greške u mjerenjima (detekcijama faza) i teoretskom izračunu (račun vremena putovanja) gausijanske. Modelu je potrebno definirati veliki prostor pretrage unutar granica modela brzina.



Slika 2.5. Metoda kubnih slagalina (engl. *oct-tree sampling*), prilagođeno sa stranica NonLinLoc.

(a) Podjela na oktante (b) Metoda kubnih slagalina

Prostor se dijeli na manje dijelove koristeći metodu kubnih slagalina (engl. *oct-tree sampling*) zbog računalne efikasnosti prema principu prikazanom na slici 2.5b. Počinje od jedne ćelije koja se podijeli na osam jednakih oktanata (2.5a) i za svaki se određuje vrijednost pogreške (engl. *misfit value*) te vjerojatnost P_i u središtu oktanta oblika:

$$P_i = V_i PDF(x_i), \quad (2.6.)$$

gdje je V_i volumen, x_i koordinate središta ćelije i PDF funkcija gustoće vjerojatnosti. Za računanje tih funkcija koristi se metoda jednakog diferencijalnog vremena (engl. *equal differential time, EDT*). Funkcija vjerojatnosti zasniva se na generalizaciji (Font i sur., 2004), a zapravo je produžetak metode hiperbola (Milne, 1886). Funkcija PDF je u slučaju korištenja metode jednakog diferencijalnog vremena oblika:

$$PDF(x) \propto k \left[\sum_{o_a, o_b} \frac{1}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}} \exp \left(- \frac{\{[T_{o_a}(x) - T_{o_b}(x)] - [TT_a(x) - TT_b(x)]\}^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \right) \right]^N, \quad (2.7.)$$

gdje su T_o opažena vremena nailaska, TT izračunata (teorijska) vremena putovanja za dva opažanja o_a i o_b . N je ukupan broj opažanja, k normalizacijski faktor te σ pogreška opažanja. Izraz u brojniku eksponenta je nula kada su u točki x razlike u dva diferencijala (razlike opaženih i izračunatih vremena) jednake, od čega potječe naziv metode. Sumiranje opservacija je izvan eksponenta pa PDF ima najveću vrijednost za točke x u kojima je većina parova opažanja zadovoljeno i posljedično nije osjetljivo na netipične vrijednosti.

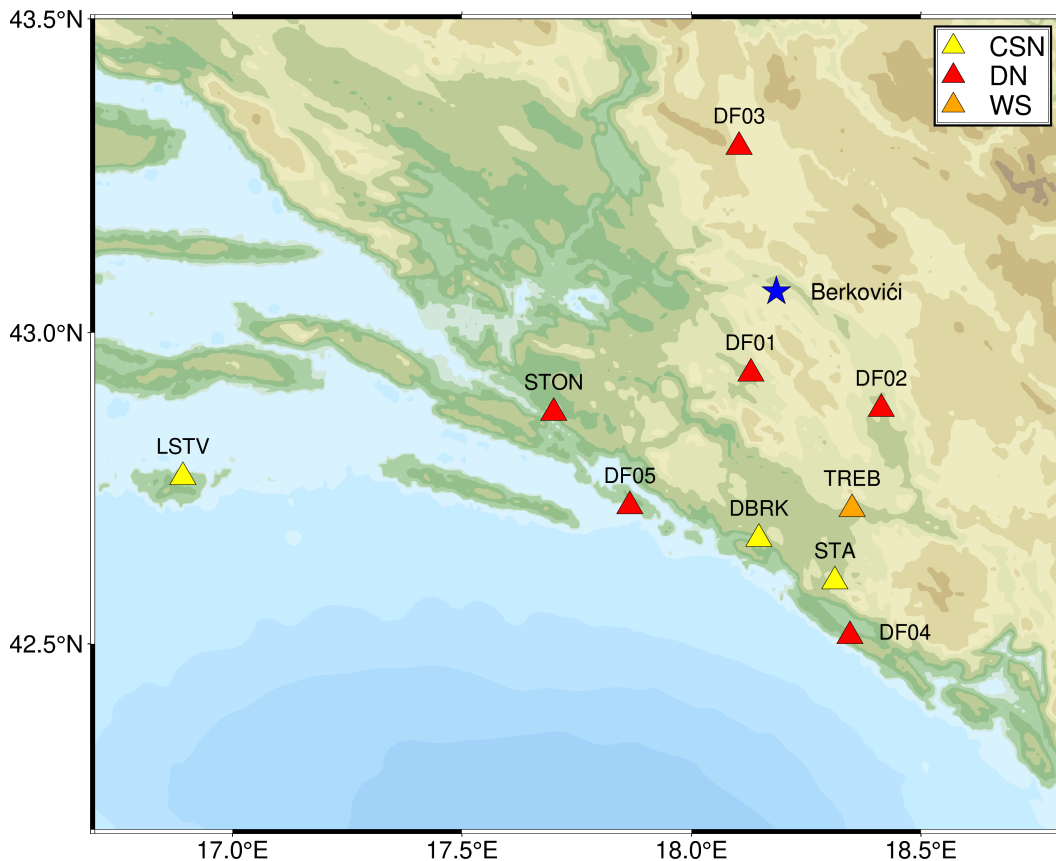
Izračunate vrijednosti vjerojatnosti P_i pohranjuje se u listu vjerojatnosti L_P . Onu ćeliju koja ima najveću vjerojatnost (P_{max}) unutar liste dalje se dijeli u 8 manjih ćelija te se za njih ponovno računaju nepouzdanost i vjerojatnost koje se spremaju u listu L_P . Početna ćelija mora se nalaziti unutar prethodno izračunate mreže vremena putovanja kako bi se opservacija koristila pri lociranju. Ugniježdene ćelije moraju biti unutar ćelije iz koje se dijele, a ako program pokuša premjestiti ugniježdenu ćeliju koja je na granici početne ćelije, proces lociranja se zaustavlja.

Program provodi ovaj postupak za svaki događaj i njegovu listu detektiranih faza na postajama. Rezultat su funkcije gustoće vjerojatnosti za kuteve emergencije i azi-mutne kuteve P- valova. S- valovi se uzimaju u obzir uz uvjet da je omjer brzina P-

i S-vala jednak $\sqrt{3} \approx 1,73$. Iz dobivenih funkcija gustoća vjerojatnosti računaju se dvije lokacije potresa – statistička (srednja vrijednost parametara u PDF-u) i maksimalna (maksimalne vrijednosti PDF), a koristi se maksimalna vjerojatnost za lokaciju. Krajnji rezultat postupka je katalog detektiranih potresa. Za svaki potres zapisana je lokacija hipocentra (geografska širina, geografska duljina, dubina), lista detektiranih faza i te nepouzdanosti određenih parametara.

3. Podaci

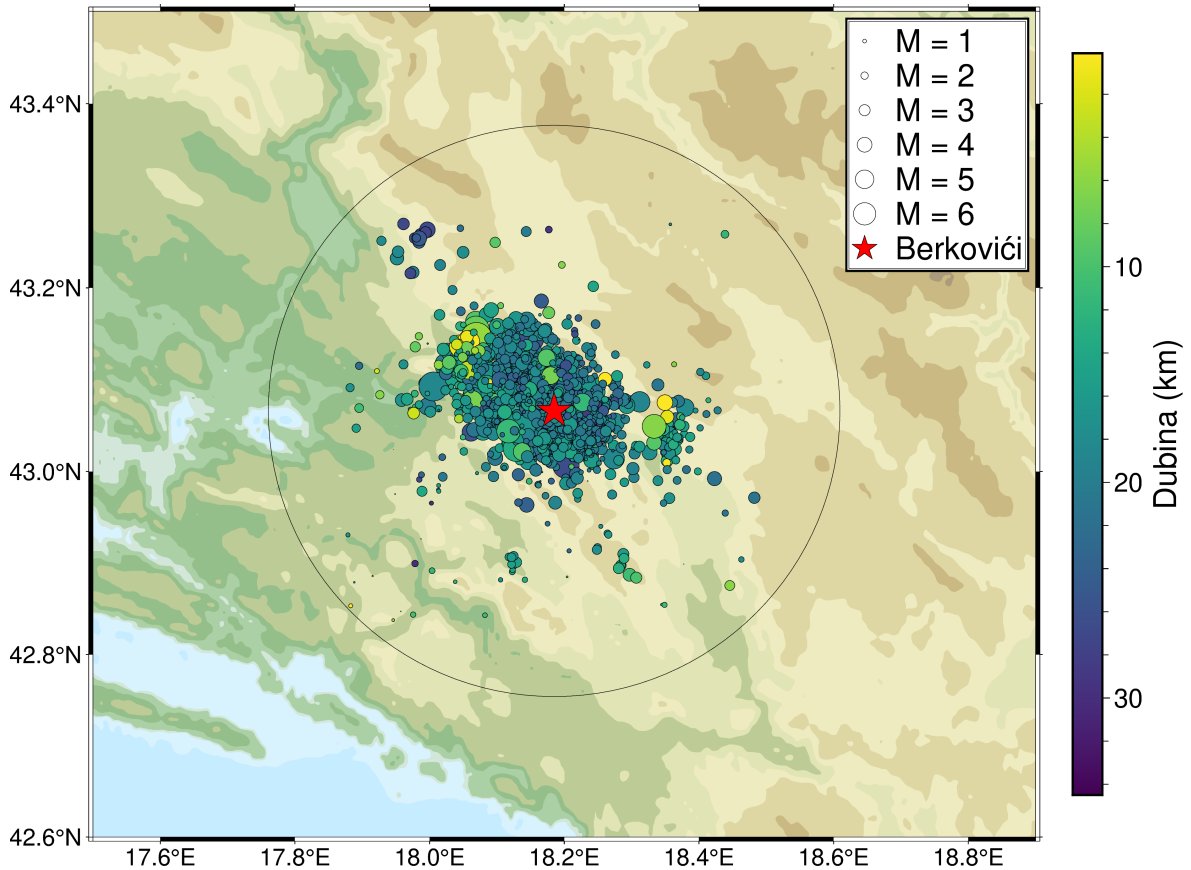
Serijski potresi kod Berkovića u BiH započela je potresom 22. travnja 2022. godine u 21:07 UTC lokalne magnitude $M_L = 6.0$ ($M_W = 5.7$). Jedna je od najbolje zapisanih serija potresa na ovim područjima jer je nekoliko mjeseci prije glavnog potresa u blizini epicentra postavljena privremena mreža postaja Du-Net (DN) u sklopu projekta DuFAULT prikazana na slici 3.1 (URL2).



Slika 3.1. Karta korištenih seizmoloških postaja zajedno s epicentrom glavnog potresa (označen plavom zvjezdicom).

Ukupno je postavljeno pet novih postaja, s time da su u trenutku glavnog potresa djelovale njih četiri, a 4. svibnja 2022. godine postavljena je i peta postaja kod Nevesinja (DF03) kako bi se smanjio azimutni razmak prema sjeveru čime je omogućeno pouzdanije lociranje potresa. Ovim postajama pridružena je i seizmološka postaja u Stonu postavljena u prethodnim projektima. Osim privremene mreže, u ovom radu koriste se podaci s tri seizmološke postaje trajne Hrvatske mreže seizmografa (CSN) koje održava Geofizički odsjek PMF-a te podaci seizmološke postaje u Trebinju koju vodi Republički zavod za hidrometeorologiju Republike Srpske (mreža WS). U Dodatku A dane su informacije o lokaciji i instrumentima postavljenim na korištenim seizmološkim postajama.

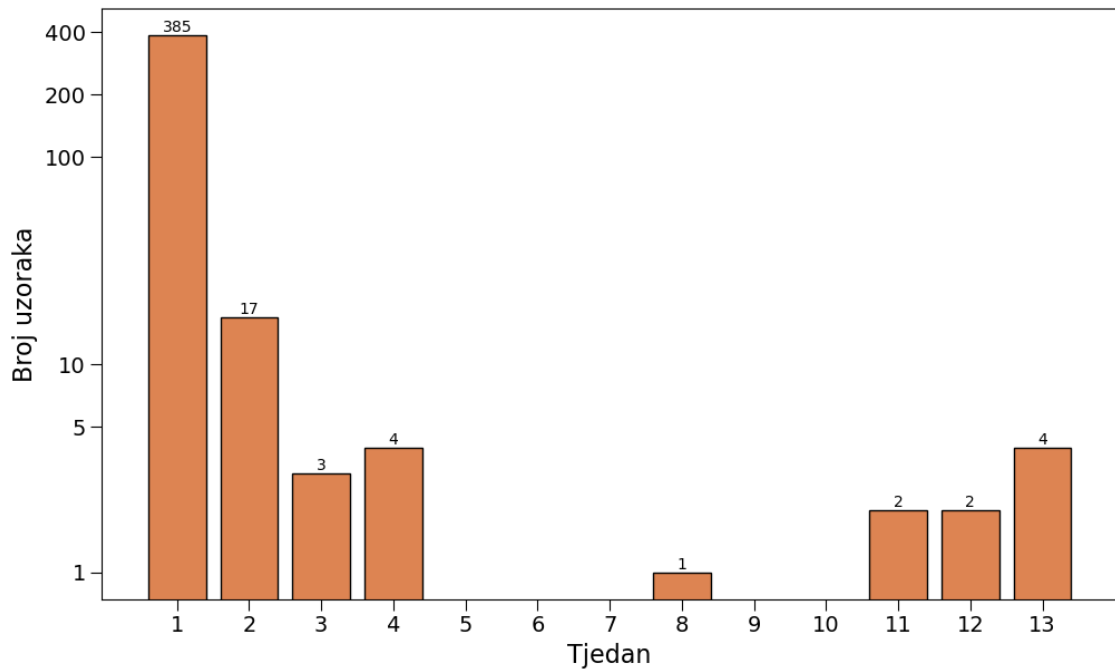
Za obradu podataka korišten je katalog s ručno analiziranim potresima za razdoblje između 22. travnja i 22. srpnja 2022. godine. Početni katalog ograničila sam na radijus od 25 km od epicentra (slika 3.2). U tom razdoblju je na izabranom području zabilježeno ukupno 5331 potresa koji pripadaju spomenutoj seriji.



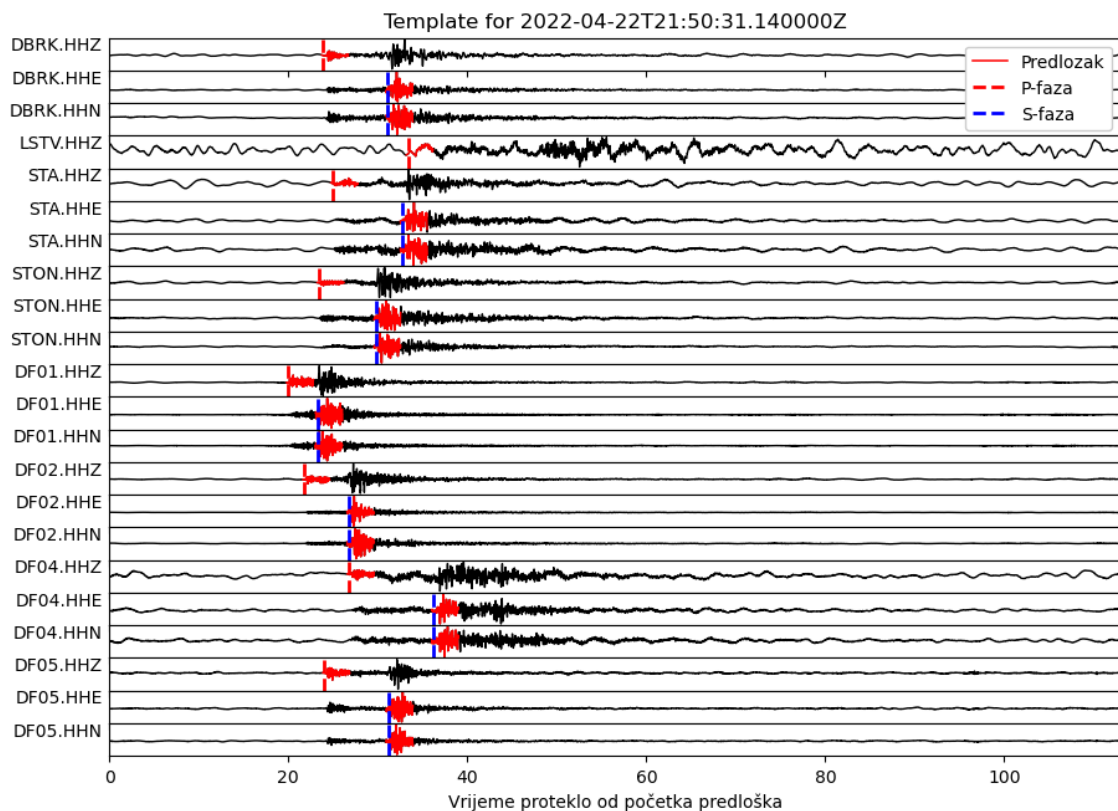
Slika 3.2. Početni katalog potresa u razdoblju između 22. travnja i 22. srpnja 2022. godine. Dimenzija kružića označava magnitudu, a boja dubinu potresa. Glavni potres označen je crvenom zvjezdicom. Kružnica omeđuje područje unutar radijusa 25 km oko glavnog potresa.

Prilikom obrade, zapise seizmograma uzorkovalo se na 50 uzoraka po sekundi kako bi se smanjilo vrijeme procesuiranja i primjenio Butterworth filter između 2 i 15 Hz. Takvim filtriranjem uklonjene su dugoperiodički signali te visokofrekventni šum (Kape-tanidis i sur., 2023). Za generiranje predložaka pomoću paketa EQcorrscan, koriste se potresi u radijusu 25 kilometara od epicentra glavnog događaja i magnituda $M \geq 2.0$. Od 5331 potresa u katalogu, uvjete zadovoljava njih 411. Na prikazu 3.3 je predstavljena distribucija potresa iz kojih su izvedeni predlošci, s obzirom na vrijeme njihovog nastanka. Gotovo 94% predložaka (potresa magnituda većih od $M \geq 2.0$) potječe iz prvog tjedna nakon potresa.

Jedan primjer predloška prikazan je na Slici 3.4. Svaki predložak dug je tri sekunde, započinje 0,2 sekunde prije detekcije faze i filtriran kao zapisi kroz koje će prolaziti u potrazi za događajima. Duljina obrasca od tri sekunde obuhvaća najbitnije značajke potresa, a osim toga je u početnom dijelu predloška omjer signala i šuma (SNR, engl. *signal to noise ratio*) najveći zbog čega se puno jače ističe nailazak faze. Kada bi vremenski prozor bio duži obuhvatio bi više šuma čime bi se povećala mogućnost lažne detekcije. Skup obuhvaća uzorke potresa magnituda većih od 2,0 što se pokazalo dovoljno velikim skupom za korištenje metode uparivanja predložaka, a koji neće oduzimati previše vremena u računu. P-faza se generira samo na vertikalnim, a S-faza na horizontalnim kanalima seizmograma. Prilikom pretraživanja seizmograma, potres se bilježi ako je minimalni međukorelacijski koeficijent veći od 0,5.



Slika 3.3. Razdioba broja predložaka po tjednima nakon glavnog potresa.

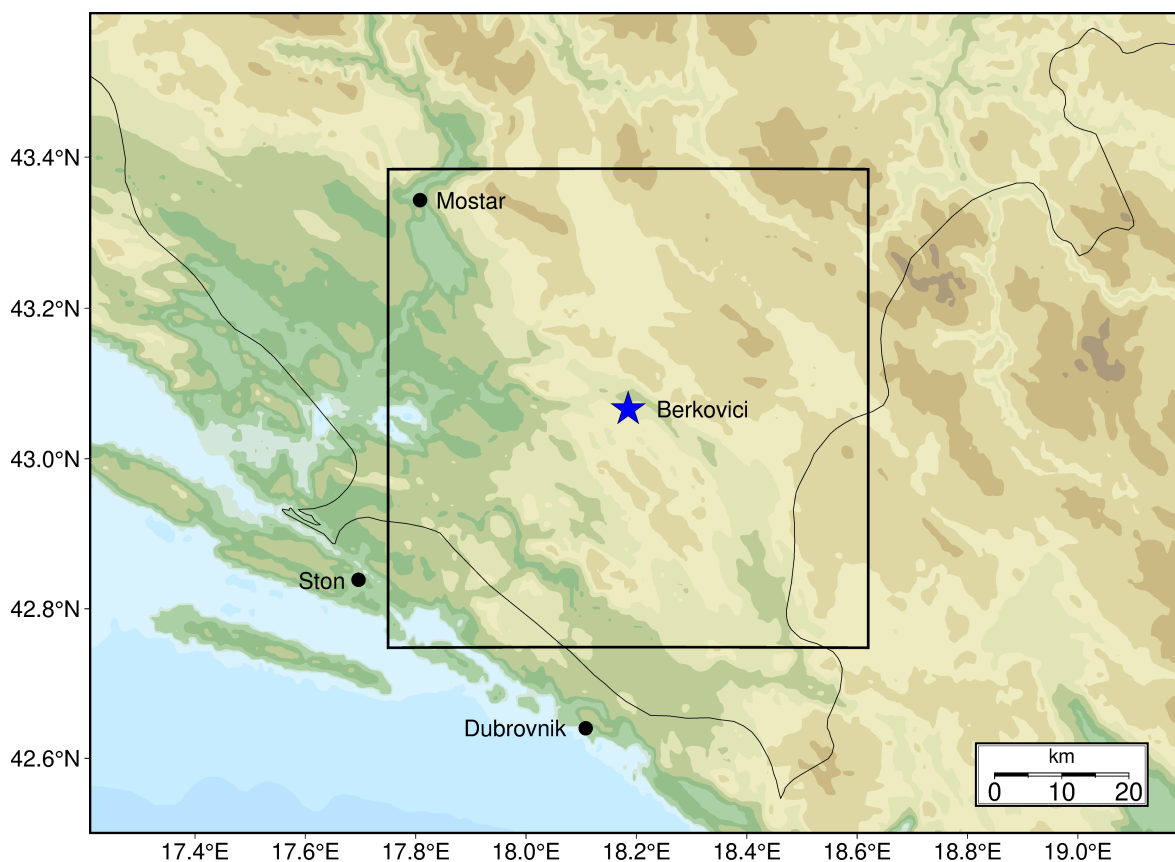


Slika 3.4. Primjer predložka generiranog EQcorrscan paketom. Crveno obojano je dio zapisa seizmograma koji je dio predložka, vertikalnim linijama označava se P (crveno) i S (plavo) faza.

NonLinLoc softver pokreće se kroz kontrolnu datoteku s izabranim parametrima (vidi Dodatak B). Prostor pretrage kontrolira se pomoću komandi TRANS i LOCGRID. Naredbom TRANS zadaje se referentna koordinata pomoću geografske duljine i širine epicentra glavnog potresa kako bi se prevela u Kartezijev koordinatni sustav koristeći azimutno ekvidistantnu konverziju iz WGS84 sustava (URL8). Dimenzija 3D mreže namješta se pomoću LOCGRID naredbe, a za koju je početna točka 50 kilometara jugozapadno od epicentra glavnog potresa serije na koordinatama ($\phi = 42.75^\circ\text{N}$, $\lambda = 17.75^\circ\text{E}$). Mreža u smjeru sjever-jug i istok-zapad sadrži 100 točaka međusobno udaljenih kilometar te 40 točaka u dubinu (unutar Zemlje). Vanjske granice mreže prikazane su na slici 3.5. U kontrolnoj datoteci zadan je i model brzina AK135 (Kennett i sur., 1995) do 120 kilometara dubine. Parametri modela predstavljeni su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Model AK135 do dubine 120 metara, preuzeto sa stranica URL6.

Dubina [km]	v_P [km/s]	v_S [km/s]	ρ [g/cm ³]	ρ_{old} [g/cm ³]
0	5.800	3.46	2.4490	2.7200
20	6.500	3.85	2.7142	2.9200
35	8.040	4.48	3.2976	3.3198
77.5	8.045	4.49	3.2994	3.3455
120	8.050	4.50	3.3013	3.3713



Slika 3.5. Područje pretrage za softver NonLinLoc. Plavom zvjezdicom označen je epicentar glavnog potresa serije.

4. Rezultati i diskusija

U ovom radu primjenjena je metoda uparivanja predložaka u svrhu proširenja kataloga potresa vezanog za seriju potresa oko Berkovića koja je počela 22. travnja 2022. godine. Za traženje događaja koristila sam seizmograme deset najbližih postaja u razdoblju od tri mjeseca. EQcorrscan događaji sadrže hipocentralno vrijeme i detektirane faze, a kako bih dobila i lokaciju svakog događaja koristila sam program NonLinLoc. Postupak je opisan u prethodnom poglavlju 2, a korišteni podaci u poglavlju 3.

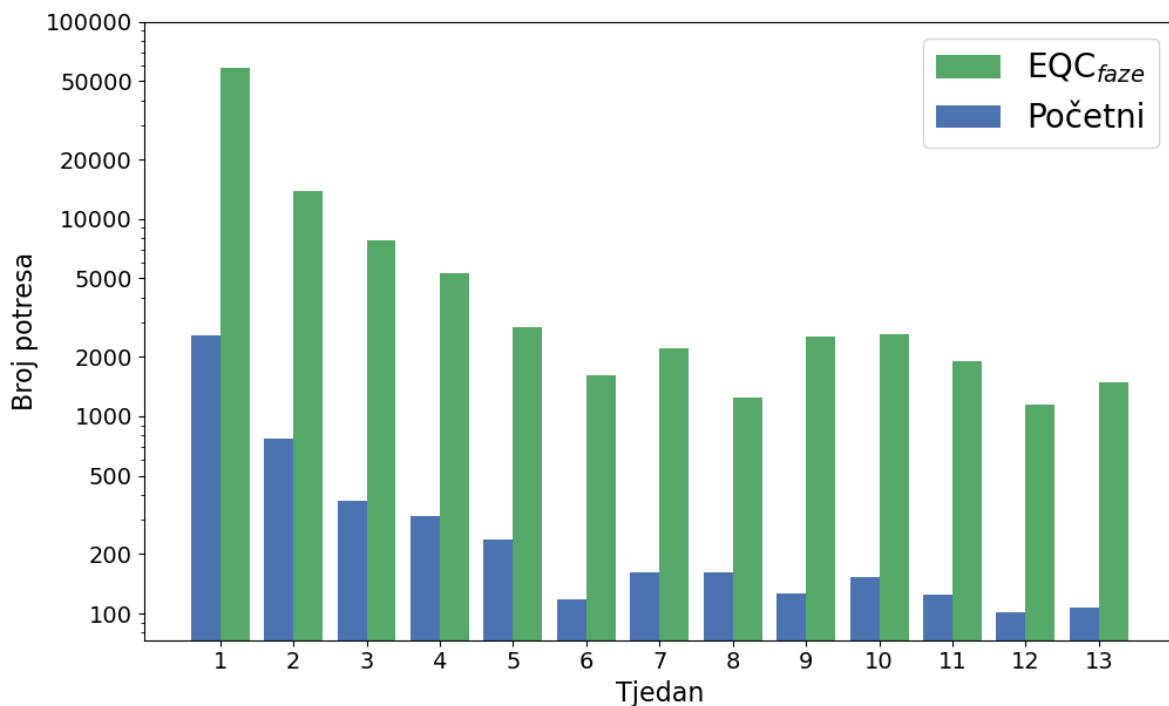
4.1. Detekcije pronađene metodom uparivanja predložaka

Pretraženi su seizmogrami koristeći predloške potresa magnitude $M \geq 2.0$ koji su se dogodili u radijusu 25 kilometara od epicentra glavnog događaja serije te unutar tri mjeseca nakon njega. Rezultat EQcorrscan pretrage po analiziranom tjednu prikazan je u tablici 4.1 i na slici 4.1. EQcorrscan popis detekcija podijelila sam na dva dijela, jedan koji se odnosi na početni izlaz (EQC_{svi}) algoritma i drugi (EQC_{faze}) u kojem se nalaze samo događaji za koje je zabilježena barem jedna faza na postajama.

Tablica 4.1. Broj događaja u katalogima po tjednima nakon glavnog potresa

Tjedan	Početni	EQC_{svi}	EQC_{faze}	$\frac{EQC_{svi}}{Početni}$	$\frac{EQC_{faze}}{Početni}$
1	2583	81043	58725	31.38	22.74
2	774	21337	13880	27.57	17.93
3	373	11776	7783	31.57	20.87
4	313	9245	5313	29.54	16.97
5	236	5052	2816	21.41	11.93
6	118	4696	1613	39.80	13.67
7	161	5453	2196	33.87	13.64
8	162	2730	1245	16.85	7.69
9	126	5251	2532	41.67	20.10
10	153	6456	2599	42.20	16.99
11	124	4285	1904	34.56	15.35
12	101	3850	1142	38.12	11.31
13	107	5121	1493	47.86	13.95
\sum	5331	166295	103241		
\bar{x}				33.57	15.63

Uspoređujući krajnje brojeve, u promatranom periodu pomoću metode uparivanja predložaka otkriveno je 166 295 događaja, što je 31 put više nego u originalnom katalogu. Njih 103 241 ima zabilježenu fazu, što je devetnaest puta više nego u početnom, ali 38% manje od ukupnog EQC_{svi} kataloga faza. U prosjeku je na tjednoj bazi algoritam pronašao 33 puta više događaja i 15 puta više događaja s očitanim fazom na temelju uzoraka generiranih EQCorrscan paketom.

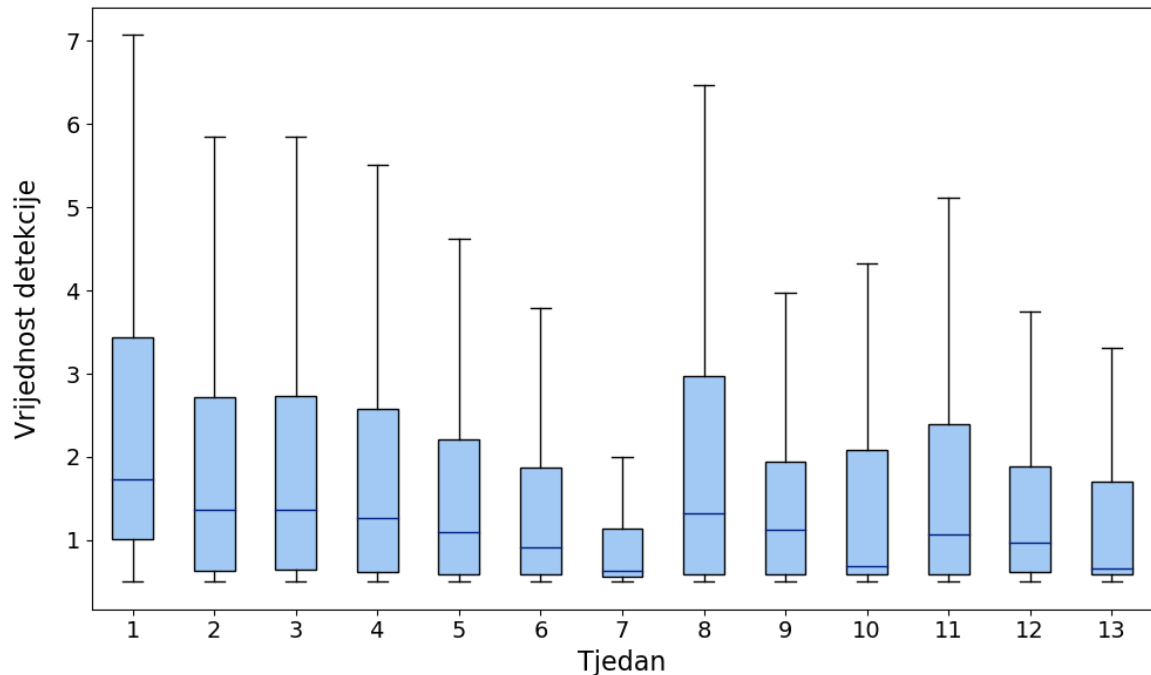


Slika 4.1. Razdioba broja potresa po tjednima nakon glavnog potresa. Zelenom bojom označeni su rezultati metode preklapanja predložaka, a plavom bojom su označeni potresi početnog kataloga.

Broj novopronađenih događaja znatno opada s vremenom, što je i očekivano zbog smanjenja seizmičnosti kako vrijeme prolazi pa je dijagram 4.1 postavljen u logaritamskoj skali. Efikasnost metode se može promatrati preko omjera $EQC_{faze}/Početni$ u Tablici 4.1. U posljednjem analiziranom tjednu (16. srpanj - 23. srpanj), pronađeno je gotovo 48 puta više događaja nego u početnom katalogu. Ako se gledaju samo događaji s detektiranim fazama, u prvom tjednu otkriveno je skoro 23 puta više događaja (58 725). U osmom tjednu nakon glavnog događaja (11. - 18. lipanj) omjer između EQC_{svi} i početnog kataloga je najmanji kao i omjer broja događaja s očitanim fazama (EQC_{faze}) i početnog kataloga, sa niti osam puta više događaja s detektiranom fazom.

Prilikom analize, za svaki događaj generiran EQcorrscan algoritmom u komentaru se zapisuje na temelju kojeg je predložka napravljena detekcija te vrijednost detekcije (cc_{sum}) tj. vrijednost sume međukorelacijskih vrijednosti između promatranih zapisa i predložka prema relaciji 2.4.. Na slici 4.2 prikazan je raspon vrijednosti detekcije po tjednima. Što su vrijednosti veće, poklapanje je bolje. Najveći medijan vrijednosti detekcije je u prvom tjednu i iznosi 1,73, što je i očekivano. Za prvi tjedan najviše je predložaka (slika 3.3), što znači i najviše potresa s magnitudom $M \geq 2.0$, a samim time i veća vjerojatnost da će algoritam pronaći sličan zapis na temelju uparivanja predložaka. Metoda se zasniva na pretpostavci da slični potresi generiraju slične seizmičke zapise. Osim toga, najviše je naknadne seizmičnosti koja može promaknuti zbog kompliciranosti seizmograma u tom razdoblju zbog čestine trešnje i mogućeg preklapanja potresa. Najmanja vrijednost medijana je u sedmom tjednu i iznosi 0,63. Centralna vrijednost svih medijana je 1,09, što je duplo veće od minimalne vrijednosti za koju se detektira događaj. Donja granica je 0,5 što se podudara s minimalnom vrijednošću detektiranog događaja, dok je gornja granica varijabilna. Valja napomenuti da na dijagramu radi preglednosti nisu prikazani izdanci čije vrijednosti znaju prijeći i 20 što

indicira vrlo visoku korelaciju podataka, to jest da se predložak dobro preklopio na većini seizmograma koje skenira.



Slika 4.2. Razdioba vrijednosti detekcije (cc_{sum}) po tjednima nakon glavnog potresa. Plave kutije predstavljaju interkvartilni raspon (IQR) i obuhvaćaju 50% srednjih vrijednosti. Plava vodoravna linija unutar kutije predstavlja medijan, dok vertikalne linije (engl. *whiskers*) predstavljaju raspon podataka unutar 1,5 IQR.

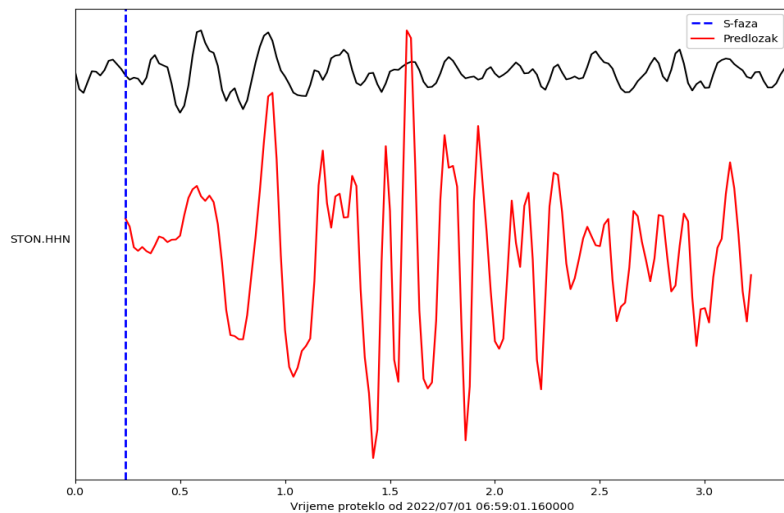
Za prvi tjedan najviše je predložaka (385) na temelju kojih se provodi EQcorrscan analiza te se očekuje i najveći broj sličnih događaja tim predlošcima u tom razdoblju. Kako vrijeme odmiče do sedmog tjedna, iznosi medijana i veličine kutija u kojima je sadržano 50% vrijednosti se smanjuju, a potom se vidi porast u osmom te manji rast u 11. tjednu nakon glavnog događaja. Ako se promotri dijagram vremena nastanka potresa koji se koriste za stvaranje predložaka (slika 3.3) vidi se da se porasti vrijednosti detekcije tj. koeficijenta detekcije podudaraju s tjednima u kojima postoje i predlošci.

Tablica 4.2. Tablica broja detektiranih faza i broja pripadajućih događaja EQC_{svi} katalogu

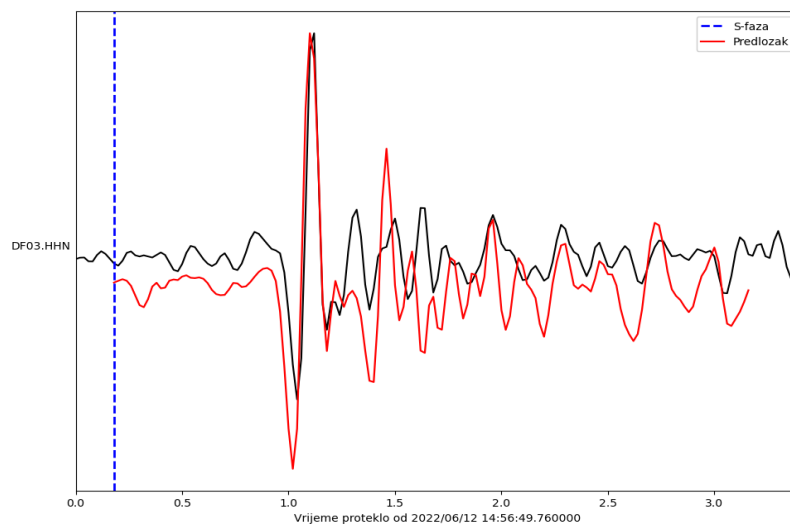
Broj detektiranih faza	Broj događaja
0	63 054
1	31 765
2	21 160
3	12 877
4	9 719
5 i više	27 720

Ako algoritam uspije detektirati fazu, zapisuju se i informacije o njoj kao što je

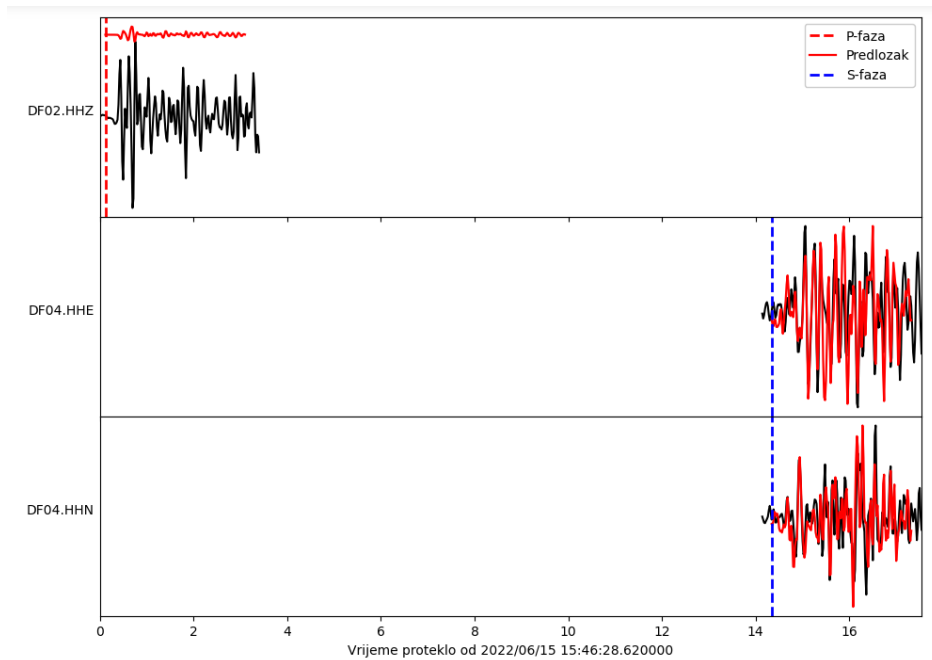
vrijeme očitavanja te ime faze. Iako popis EQC_{svi} sadrži preko 166 tisuća detekcija, ne znači da je u svakom događaju dovoljno detektiranih faza za određivanje lokacije. U Tablici 4.2 prikazala sam odnos broja detektiranih faza u usporedbi s brojem događaja u katalogu EQC_{svi} . Iako je već prije istaknuto, 63 tisuće događaja nema nijednu detektiranu fazu (38% ukupnog kataloga). Za te detekcije zapisana je informacija o vremenu registracije događaja i predložak na temelju kojeg je napravljena detekcija s vrijednošću detekcije $cc_{sum} = 0,0$. Vrlo je moguće da su ovo lažno pozitivni rezultati u kojima se predložak upari sa šumom ili šiljcima koji su prisutni u seizmogramima. Kako bi se događaj locirao potrebno je imati faze detektirane barem na tri različite lokacije, što znači da se za daljnju analizu sigurno mogu odbaciti događaji sa samo jednom ili dvije očitane faze, te nakon toga preostaje 50 316 detektiranih događaja s 3 ili više očitane faze, što je malo više od 30% ukupnog EQcorrscan kataloga. Treba napomenuti da su postoje i situacije u kojima za neki događaj postoji dovoljan broj zabilježenih faza, ali samo na jednoj ili dvije postaje (npr. zabilježene P-faze na dvije postaje i S-faza na jednoj od stanica) te je stoga vrlo moguća situacija daljnje redukcije prilikom lociranja.



(a)



(b)

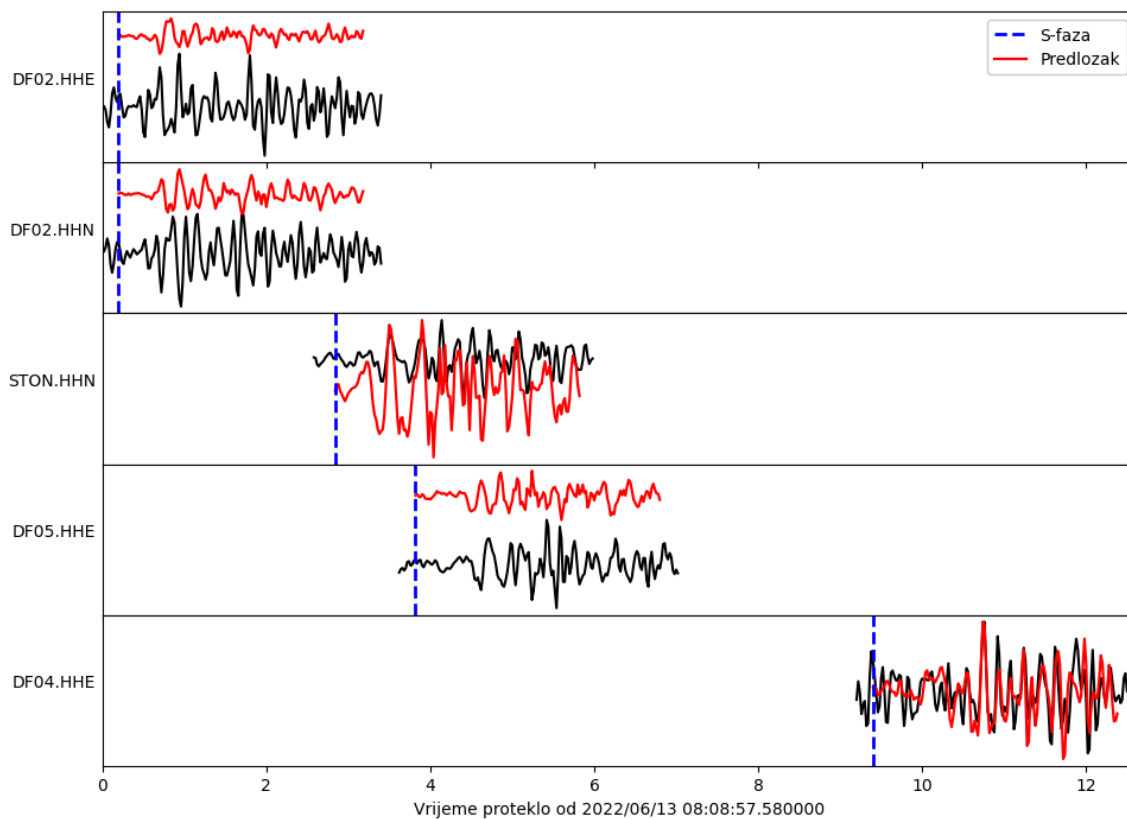


(c)

Slika 4.3. Primjer dobre (b, c) i loše (a) detekcije događaja metode usklađenim filtrom koristeći paket EQcorrscan. Predložak je označen crvenom bojom, zapis seizmograma crnom, dok su vertikalnim iscrtkanim linijama naznačene faze. (a) Događaj s vremenom nastanka 1. 7. 2022. 06:59:01 UTC, preklapa se s predloškom 23. 4. 2022. 5:36:34 UTC s $cc_{sum} = 0,50045$. (b) Događaj s vremenom nastanka 12. 6. 2022. 14:56:50 UTC, preklapa se s predloškom 5. 5. 2022. g. 22:27:20 UTC s $cc_{sum} = 0,7041$. (c) Događaj s vremenom nastanka 15. 6. 2022. 15:46:29 UTC, preklapa se s predloškom 29. 4. 2022. 6:31:44 UTC s $cc_{sum} = 1,79119$.

Unatoč tome što se neki detektirani događaji ne mogu locirati, takve se detekcije ne bi trebale u potpunosti odbaciti. Kada bi se proširio skup zapisa (odnosno korištenih postaja) koji se koriste u potrazi za događajima, moguće je da bi takvi događaji imali više detektiranih faza, ali postoji i mogućnost lažnog očitavanja osobito u slučajevima s niskom vrijednosti detekcije.

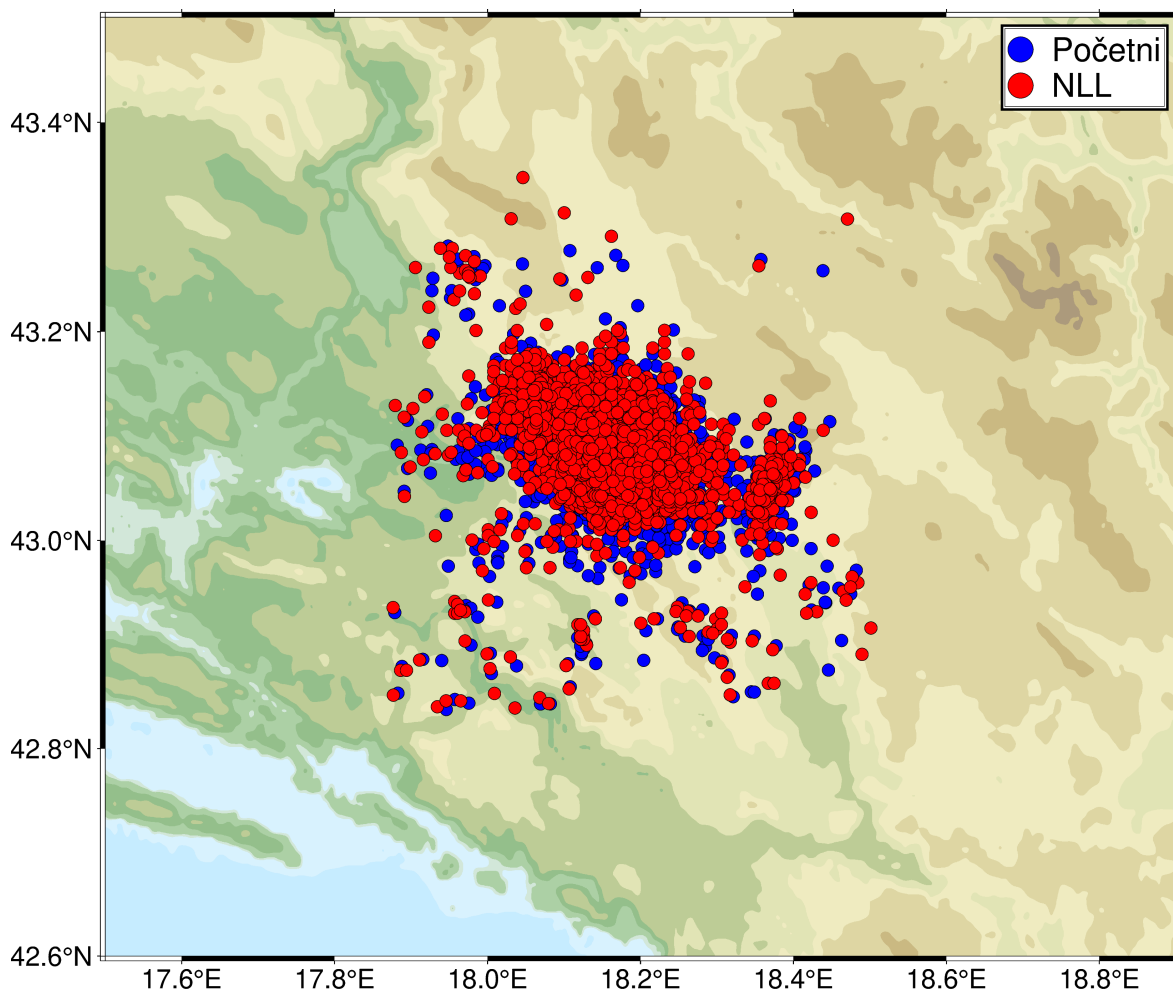
Primjer dobre i loše detekcije prikazan je na slici 4.3. Na podslikama 4.3 a i c puno je jasnije poklapanje predloška sa zapisom seizmograma za razliku od 4.3a kojem je međukorelacijska vrijednost jedva prešla minimalan prag ($cc_{sum} = 0,50045$) i koja bi se mogla smatrati lažno pozitivnim rezultatom. Sva tri događaja se odbacuju prilikom lociranja jer su faze određene na nedovoljno postaja pa se pojava lažnih događaja u konačnom katalogu s lokacijom smanjuje, ali se isto tako detekcije s većom korelacijom zanemaruju. Primjer detekcije koja se može locirati predstavljena je slikom 4.4.



Slika 4.4. Događaj s vremenom nastanka 13. 6. 2022. 08:08:57.58 UTC, preklapa se s predložkom 22. 4. 2022. 23:35:04 UTC s $cc_{sum} = 2,8078$. Predložak je označen crvenom bojom, zapis seizmograma crnom, dok su vertikalnim iscrtkanim linijama naznačene faze.

4.2. Relociranje početnog kataloga

Za lociranje potresa pomoću NonLinLoc programa potrebno je zadati parametre kao što su granice i način pretraživanja, model brzina i informacije o postajama. Osim toga, programu se zadaju događaji sa informacijama o zabilježenim fazama na postajama na temelju kojih program vrši pretragu i dobiva funkciju gustoće vjerojatnosti. Kako bi se provjerili izabrani parametri u kontrolnoj datoteci (Dodatak B), početni katalog potresa proveden je kroz NonLinLoc, a za lociranje su se koristila nastupna vremena ručno očitanih faza za potrese u početnom katalogu. Rezultat je na slici 4.5.

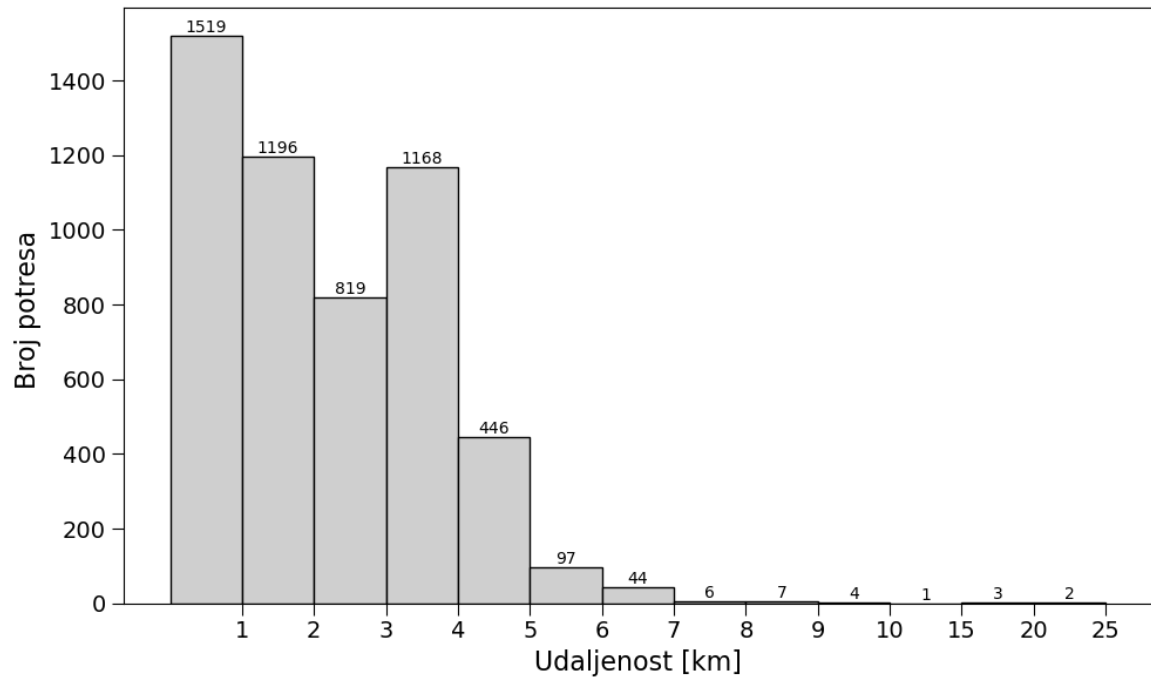


Slika 4.5. Karta početnog kataloga potresa relociranog u NonLinLoc-u. Potresi locirani ručno su označeni plavom, a potresi označeni crvenom bojom su locirani programom NonLinLoc.

Vidljivo je odstupanje preferiranih lokacija u NonLinLoc softveru. Za analizu je korišten model brzina AK135 koji je vrlo općenit i ne zahvaća lokalne anomalije u brzinama tj. lokalne uvjete tla, a promatra se vrlo malo područje. Osim toga, za lociranje se ne koriste sve postaje u seizmološkoj mreži, već samo postaje prikazane na slici 3.1. Usprokos tome, lokacije većine događaja ostale su unutar radijusa od 25 kilometara od glavnog potresa serije te su još više koncentrirane unutar promatranog područja.

Razlika udaljenosti za pojedine događaje u ručno očitanoj i relociranoj katalogu potresa prikazana je na slici 4.6. Za 97% potresa promjena udaljenosti epicentra ogra-

ničena je unutar pet kilometara od originalnog događaja što potvrđuje da su izabrani parametri kontrolne datoteke dovoljno dobri za lociranje novootkrivenih detekcija.



Slika 4.6. Distribucija udaljenosti između potresa u manualnom i relociranom katalogu potresa.

Početni katalog sadrži 5331 događaja, dok NonLinLoc nije uspio locirati samo tri potresa iz kataloga, odbacujući predloženu lokaciju koja je na granici ćelija. Proširenjem prostora pretrage ili povećanjem rezolucije ćelija mogli bi se dobiti pouzdaniji rezultati.

4.3. Lociranje detekcija

Rezultat poklapanja predložaka koristeći EQCorrscan paket i lociranja pomoću NonLinLoc softvera predstavljen u tablici 4.3. Uspoređuju se rezultati za ručno locirani katalog (Početni), EQcorrscan popis s događajima koji ima očitane faze (EQC_{faze}) i katalog uspješno lociranih događaja detektiranih EQcorrscan-om u programu NonLinLoc (NLL).

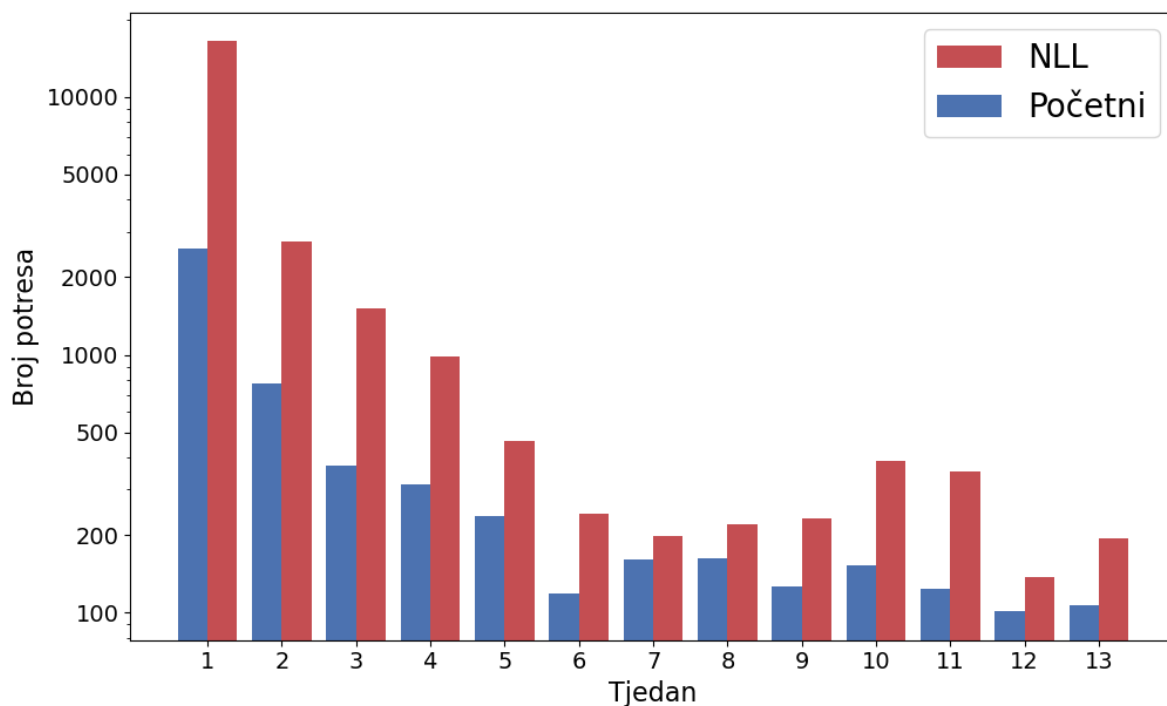
Tablica 4.3. Broj potresa u katalogima po tjednima nakon glavnog potresa

Tjedan	Početni	EQC _{faze}	NLL	$\frac{NLL}{Početni}$	$\frac{NLL}{EQC_{faze}}$
1	2583	58725	16434	6.36	0.28
2	774	13880	2743	3.54	0.20
3	373	7783	1510	4.05	0.19
4	313	5313	980	3.13	0.18
5	236	2816	462	1.96	0.16
6	118	1613	243	2.06	0.15
7	161	2196	199	1.24	0.09
8	162	1245	219	1.35	0.18
9	126	2532	233	1.85	0.09
10	153	2599	389	2.54	0.15
11	124	1904	354	2.85	0.19
12	101	1142	137	1.36	0.12
13	107	1493	193	1.80	0.13
\sum	5331	103241	24096		
\bar{x}				2.62	0.16

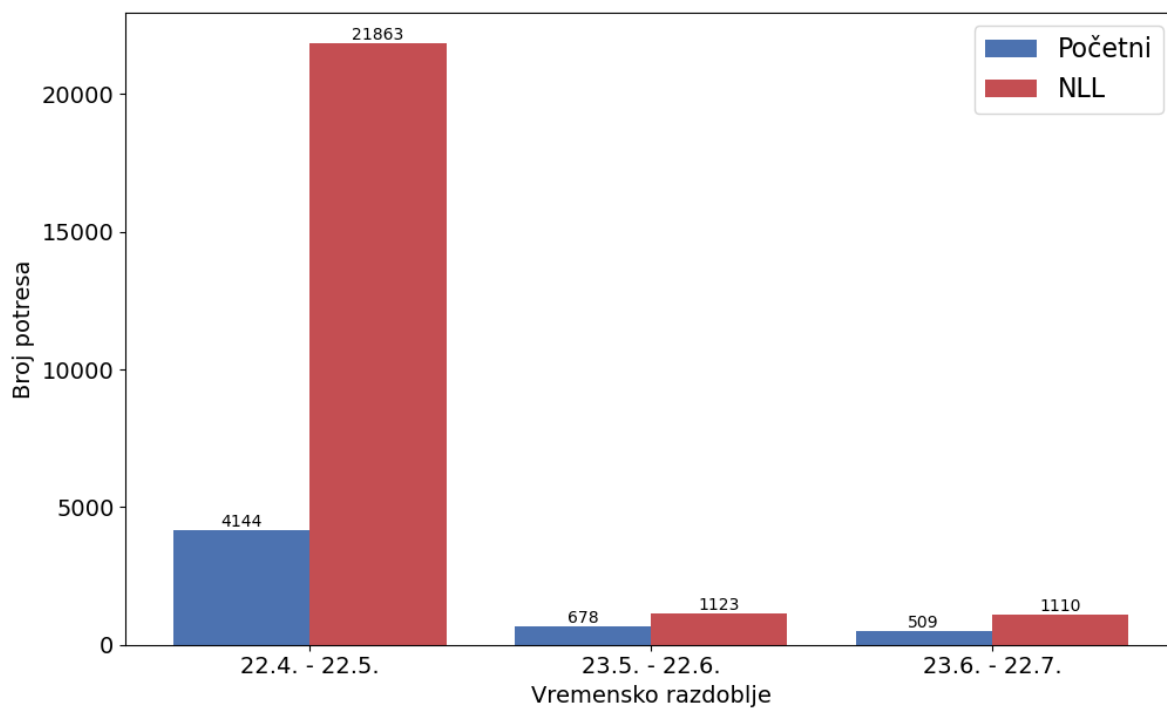
NonLinLoc program odredio je lokaciju za 24 096 događaja, 4,5 puta više nego u originalnom i 4,3 puta manje od broja događaja u EQC_{faze} čije su se detektirane faze koristile za određivanje lokacije. Prikaz razdiobe broja potresa u NLL i početnom katalogu kroz tjedne dan je na slici 4.7, a po mjesecima na slici 4.8.

Vidljiv je pad broja događaja kroz vrijeme, ali i određen porast broja događaja u desetom, jedanaestom i trinaestom tjednu nakon potresa što se podudara s time da su u tim tjednima zabilježeni potresi magnitude $M \geq 2.0$ (slika 3.3).

Najviše je određenih lokacija u prvom tjednu (16 434), a najmanje u dvanaestom tjednu nakon glavnog potresa. Promatrajući same omjere između ovih kataloga (stupac NLL/Početni tablice 4.3) pokazuje se da je efikasnost programa puno bolja u prva četiri tjedna dok opada kroz vrijeme iako postoji porast efikasnosti u desetom i jedanaestom tjednu. Omjeri su puno očitiji na slici 4.8. U prvom mjesecu pet je puta više potresa u NLL katalogu dok ih je u preostala dva mjeseca približno dvostruko više nego u početnom katalogu, a u prosjeku se tjedno uspije locirati 2,5 puta više događaja nego u ručno određenom katalogu.

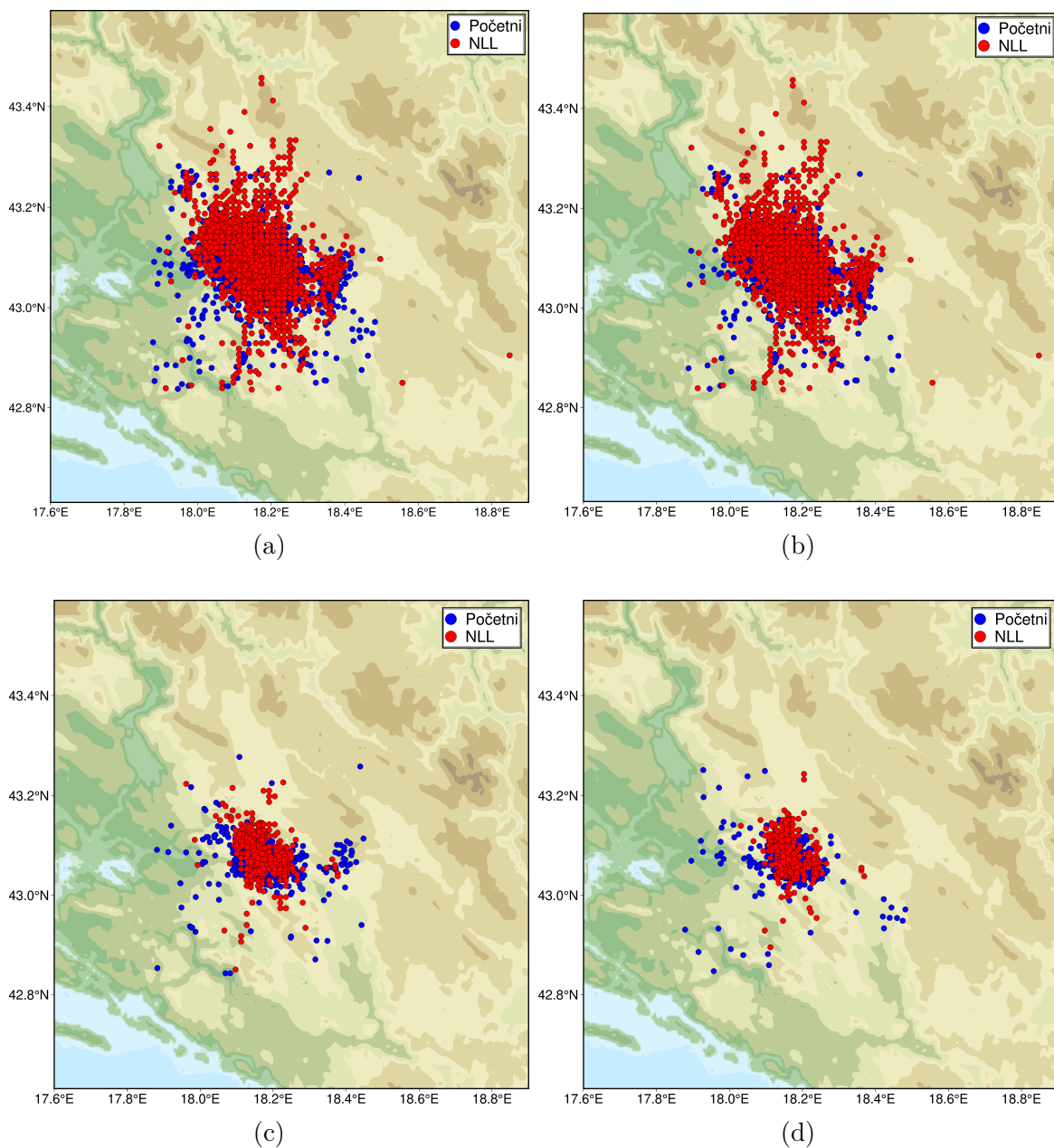


Slika 4.7. Razdioba broja potresa po tjednima nakon glavnog potresa. Plavom bojom označeni su potresi početnog kataloga, a crvenom bojom su označeni rezultati lociranja.



Slika 4.8. Razdioba broja potresa po mjesecima nakon glavnog potresa. Plavom bojom označeni su potresi početnog kataloga, a crvenom bojom su označeni rezultati lociranja.

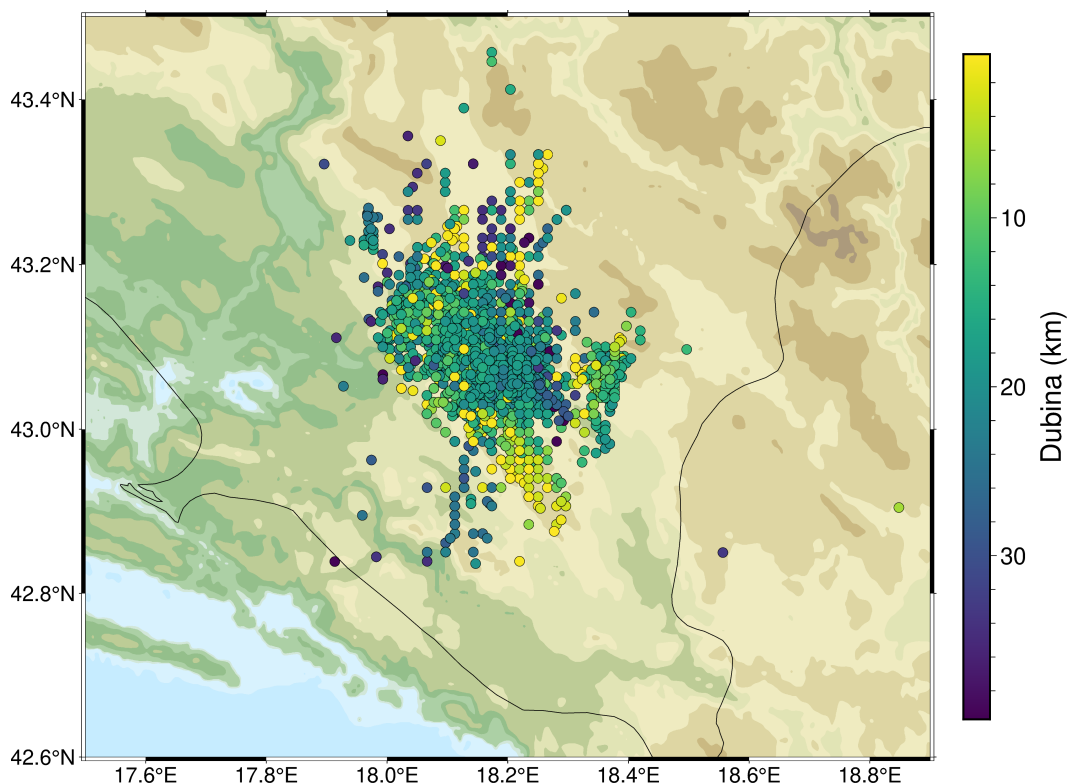
Karta lokacija novotkrivenih potresa u usporedbi s početnim katalogom za cijelo promatrano razdoblje dana je na slici 4.9a. Većina lokacija nalazi se unutar radijusa 25 kilometara od glavnog potresa serije. Karte lokacija po mjesecima u usporedbi s lokacijama početnog kataloga prikazane su na slikama 4.9 b-d. U prvom mjesecu velik je prostorni rasap potresa po razmatranom području, dok se u preostalim mjesecima rasap smanjuje te su epicentri potresa bliži epicentru glavnog događaja. Na primjer, na slici 4.9c u originalnim lokacijama vidi se određena grupa potresa odvojena od glavne grupe, također vidljiva i na slici 1.2, na njoj označena kao grupa *d*. Međutim u novostvorenom katalogu NLL tek je par potresa locirano u tom dijelu, a većina seizmičnosti te grupe primjećuje se u prvom mjesecu nakon potresa (slika 4.9b). Na slici 4.9d najjasnija je prostorna razlika između ova dva kataloga.



Slika 4.9. Karta lokacija potresa u početnom i NonLinLoc katalogu potresa
 (a) Cijelo razdoblje (22. 4. - 22.7.) (b) Prvi mjesec (22. 4. - 22.5.)
 (c) Drugi mjesec (23. 5. - 22. 6.) (d) Treći mjesec (23. 6. - 22. 7.)

Karte lokacija po tjednima prikazane su u Dodatku C, a u njima se još dobiva još detaljniji uvid u seizmičnost. Za spomenutu grupu potresa aktiviranu u prvom mjesecu nakon glavnog potresa istočno od glavne skupine vidi se aktivacija u prvom tjednu nakon glavnog potresa s puno jasnijim izdvajanjem grupe od drugog tjedna. Lokacije NLL kataloga pokazuju da se aktivnost te grupe se može pratiti do petog tjedna dok se u početnom katalogu aktivnost vidi sve do osmog tjedna nakon potresa. Najviše seizmičnosti u grupi vidljiva je u četvrtom tjednu (slika C1d). Najveći rasap je u prvom tjednu (slika C1a). U drugom tjednu vidljiva je i aktivacija grupe na sjeverozapadno od glavne skupine s nastavkom aktivnosti u trećem tjednu koja odgovara skupini *c* označenoj na slici 1.2.

Kako vrijeme protiče, lokacije pokazuju puno manji rasap nego u početnom katalogu. Osobito se ističu sedmi i jedanaesti tjedan (slike C1g,C1k) u kojima početni katalog sadrži skupinu potresa odvojenu od glavne, a koja se ne vidi u lokacijama određenim NonLinLoc-om.

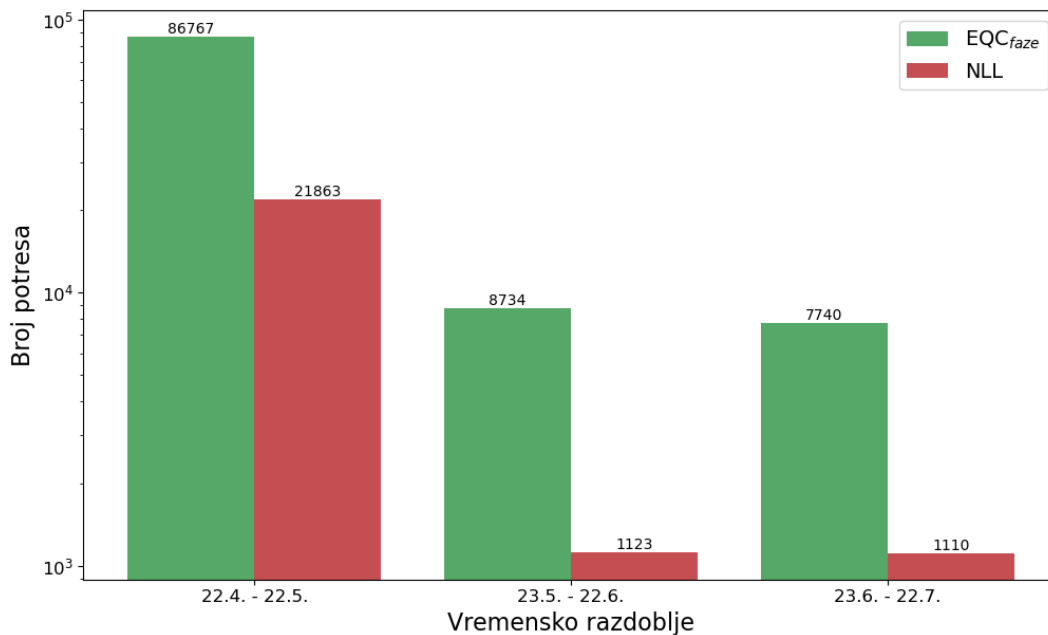


Slika 4.10. Lokacije potresa NLL kataloga u razdoblju između 22. travnja i 22. srpnja 2022. godine. Boja označava dubinu žarišta.

Za lociranje potresa iznimno je bitno precizno određivanje faza jer se bez precizne informacije ne mogu dobiti ni precizne lokacije što je osobito važno kada se promatraju manja područja kao u ovom radu. S druge strane, NonLinLoc je ograničen pretragom po ćelijama kojima su početna čvorišta međusobno udaljena jedan kilometar što bi u početnoj podjeli moglo dovesti do veće funkcije gustoće vjerojatnosti u krivoj ćeliji.

Slika 4.10 prikazuje kartu potresa lociranih NonLinLoc programom s naznačenim dubinama žarišta tih potresa. Pri zadavanju mreže za metodu kubnih slagalina u kontrolnoj datoteci zadala se dubina do 40 kilometara pri čemu su čvorišta udaljena za kilometar, vodeći se poznatom seizmotektonikom područja (slika 1.3). Gledajući od obale prema unutrašnjosti, potresima se povećava dubina, a potom žarišta postaju

plića što odgovara seizmotektonici područja, ali i dubinama potresa određenih u početnom katalogu. Prevladavaju dubine između 10 i 20 kilometara. Povećanjem rezolucije po dubinama dobili bi se precizniji rezultati, ali trenutna ograničenja NonLinLoc-a na kubične ćelije ne dopušta različite razmake u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini. Korištenje jednake rezolucije u obje ravnine stvorilo bi pretjerano velike rešetke vremena putovanja, ali dopuštenje računanja vremena putovanja koristeći nepravilne rešetke bi bilo korisnije. Povećanje broja razmatranih seizmičkih postaja i korištenje detaljnijeg modela brzina omogućilo bi točnije određivanje putanje vala čime bi se i lokacije hipocentara poboljšale.



Slika 4.11. Razdioba broja potresa po mjesecima nakon glavnog potresa. Zelenom bojom označeni su rezultati metode uparivanja predložaka, a crvenom bojom su označeni rezultati lociranja detekcija.

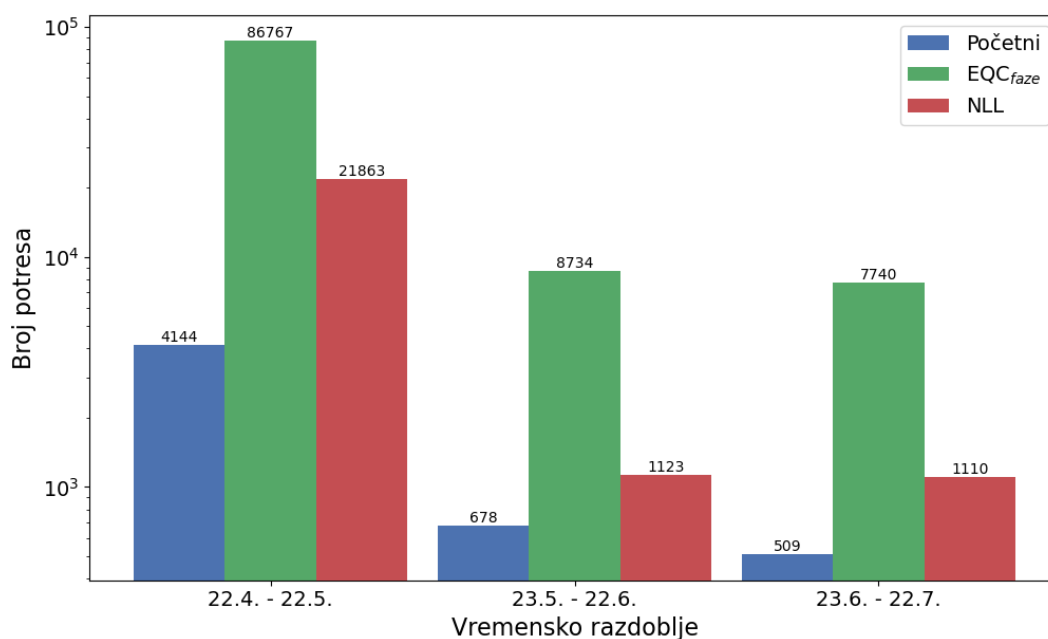
Usporedbom EQC_{faze} koji se koristi za dobivanje NLL kataloga i samog NLL (treći i četvrti stupac tablice 4.3) primjetan je znatno manji broj događaja u katalogu s lokacijama. U prosjeku se na tjednoj bazi uspješno locira samo petnaest posto detekcija u EQC_{faze}. Najefikasniji je prvi tjedan s 28%, a najmanje učinkovit je osmi tjedan nakon glavnog događaja s devet posto potresa s određenom lokacijom. Razlika je još primjetnija na dijagramu usporedbe tih kataloga po mjesecima (slika 4.11). Program će odbiti locirati događaj u slučaju premalo određenih faza to jest onih sa jednom, dvije ili tri očitane faze. Prema tablici 4.2 se može razlučiti da će program tada odbaciti 65 802 događaja (od njih 103 241, što čini 64% detekcija iz EQC_{faze}).

Konačan katalog sadrži 24 096 potresa što znači da se od preostalih 37 439 događaja u popisu detekcija s dovoljnim brojem očitanih faza, njih 13 343 ne može locirati (36% preostalog dijela). Proces triangulacije nije moguć kada faze nisu zabilježene na tri različite lokacije. Ovim uvjetom odbacilo se još 6 164 događaja.

Ukupno je 5 433 događaja čija se predložena lokacija odbacuje zbog prijedloga na granici ćelija, kao što je bio slučaj i za relociranje u originalnom katalogu potresa. Broj neuspješno lociranih potresa najveći je u početku te se smanjuje kroz promatrano razdoblje što ima smisla jer je i broj detekcija veći u početku. Ovakav se problem

rješava povećanjem granica područja pretrage ili povećanjem rezolucije rešetke. Za ostatak događaja koji se odbacuju (ukupno 1 746) odgovorni su parametri kontrolne datoteke. Uparivanje predložaka pomoću EQcorrscan-a rezultira popisom događaja s detektiranim fazama i njihovim osnovnim informacijama. Na vertikalnoj komponenti bilježi se P-faza, a na horizontalnim osima S-faza. Parametri funkcije LOCMETH postavljeni su na način da odbace dvostruke nailaske s istim imenima postaje i faze, što je slučaj s fazama detektiranim na obje horizontalne osi, bilo istovremene ili ne. Stoga, čak i ako su prethodni uvjeti dovoljnog broja zabilježenih faza i stanica zadovoljeni, ne jamči da u katalogu postoji dovoljno informacija za triangulaciju. Kao rezultat, NonLinLoc odbacuje određen broj događaja u preostalom dijelu EQC_{faze} te je konačan broj lociranih potresa 24 096.

Usporedba ova tri kataloga po mjesecima (slika 4.12), naglašava prednost korištenja metode uparivanja predložaka. Iako se dosta detekcija iz EQC_{faze} odbacuje tijekom procesa, u konačnici rezultira većim brojem događaja nego u početnom, ručno stvorenom, katalogu. Najveća je razlika u prvom mjesecu promatranog razdoblja kada se očekuje najviše seizmičnosti, a čije su informacije vrlo vrijedne. Ljudskom oku vrlo lako mogu promaknuti mali potresi, osobito u početku ovakvih serija potresa, dok su ovakvi modeli neumorni i precizni, sposobni detektirati i najmanje promjene u signalima.



Slika 4.12. Razdioba broja potresa po mjesecima nakon glavnog potresa. Plavom bojom označeni su potresi početnog kataloga, zelenom rezultati metode uparivanja predložaka, a crvenom bojom su označeni rezultati lociranja detekcija.

U daljnjem istraživanju potrebno je izračunati magnitudu novootkrivenih potresa kako bi se mogla provjeriti potpunost kataloga. Osim toga, mogu se istražiti različiti pragovi (MAD) za detekciju događaja i različite minimalne vrijednosti međukorelacije kako bi dobili optimalnu vrijednost koja izbacuje lažno pozitivne detekcije. Nadalje, može se proširiti početni katalog koji će koristiti više predložaka prilikom lociranja, tj. mogu se uzeti i potresi manjih magnituda. Mogu se u obzir uzeti i različite duljine predložaka. Proširivanjem područja pretraživanja i vremenskog razdoblja dobili još dublji uvid u naknadnu seizmičnost. Također bi bilo dobro usporediti različite verzije

kontrolne datoteke za lociranje. Najprije, proširenje područja pretrage može smanjiti broj odbačenih događaja na granicama. Povećanje rezolucije mreže također može doprinijeti preciznijim rezultatima kao i ispitivanje različitih varijanti modela brzina koji bolje odgovaraju promatranom području npr. Balkanski model (B.C.I.S., 1972) koji se koristi pri lociranju potresa u Hrvatskoj.

Osim programa NonLinLoc, potrebno je provesti katalog dobiven metodom uparivanja predložaka kroz neke druge programe za lociranje događaja kako bi se dobila dodatna perspektiva i uvid u točnost ovog programa.

5. Zaključak

Seriya potresa kod Berkovića započela je 22. travnja 2022. godine 21:07 UTC potresom magnitude $M_L = 6.0$ ($M_W = 5.7$). Šire je područje Berkovića jedno od seizmološko najaktivnijih u južnom dijelu Vanjskih Dinarida. Ova serija jedna je od najbolje zapisanih u ovom području zahvaljujući novopostavljenoj mreži postaja u sklopu projekta DuFAULT.

U radu sam upotrijebila metodu uparivanja predložka za dobivanje kataloga potresa na temelju automatskih detekcija faza i događaja. Koristila sam podatke iz kataloga sa ručno označenim fazama i potresima za vremensko razdoblje od tri mjeseca nakon glavnog događaja (22. travanj - 22. srpanj 2022.) s ukupno 5 331 potresa. Kao predlošci se koriste zapisi potresa čije su magnitude $M \geq 2.0$ i ukupno ih je 411. Za primjenu metode uparivanja predložaka koristila sam Python paket EQcorrscan. Analiza je dovela do 166 295 detekcija od kojih 103 241 ima zabilježenu barem jednu fazu, što je 31, odnosno 19 puta više nego u početnom katalogu potresa. Ako se promatraju tjedni prosjeci, u ukupnom EQcorrscan katalogu 33 je puta više događaja po tjednu, odnosno preko petnaest puta više događaja s barem jednom zabilježenom fazom. Najviše je novootkrivenih događaja u prvom tjednu (22 puta više). Raspon vrijednosti detekcije (tj. vrijednosti međukorelacijske sume) mijenja se kroz tjedne, a vrijednosti su veće za one tjedne u kojima postoje potresi na temelju kojih se stvaraju predlošci. Medijan vrijednosti detekcije za cijelo promatrano razdoblje je 1,09, što je dvostruko više od minimalne vrijednosti međukorelacijske sume za koju se bilježi detekcija.

Ova metoda daje informacije o fazama i vremenima događaja, međutim nedostaje informacija o lokaciji potresa. Za triangulaciju se koristio program NonLinLoc kojemu se zadaju osnovne informacije o području pretraživanja, korištenim postajama te modelu brzina potrebnom za dobivanje putanji seizmičkih valova. Odabrani parametri modela za lociranje provjereni su relociranjem manualnog kataloga, a razlika udaljenosti epicentara u manualnom i relociranom katalogu su za većinu događaja manje od pet kilometara. Provođenjem kataloga dobivenog EQcorrscan paketom kroz program NonLinLoc dobivene su lokacije za 24 096 događaja što je 4,5 puta više nego u katalogu s ručno očitanim fazama, ali 4,3 puta manje nego u EQcorrscan katalogu. U prosjeku, algoritam svaki tjedan locira 2,6 puta više događaja nego čovjek s time da je efikasnost bolja u tjednima za koje u originalnom katalogu postoje potresi magnitude $M \geq 2.0$, ali opada kroz vrijeme. Lokacije događaja u novom NonLinLoc katalogu odgovaraju onima u početnom katalogu, ali s manjim rasapom lokacija oko epicentra glavnog događaja. Uspoređujući lokacije potresa po tjednima dobiva se dodatna potvrda, a uočavaju se i aktivacije klastera istočno i sjeverozapadno od glavne skupine. Dubine žarišta uglavnom su između 10 i 20 kilometara što se uklapa u promatrano područje Dinarida.

U daljnjem istraživanju nužno je upotpuniti informaciju o detektiranim potresima, a za to nedostaje izračunata magnituda. Osim toga, bilo bi dobro provjeriti različite parametre za pokretanje EQcorrscan-a kao što je različita minimalna vrijednost detekcije ili korištenje većeg broja predložaka, a za program NonLinLoc usporediti više verzija kontrolne datoteke, koristiti različite rešetke i veličine područja pretraživanja te drugačije modele brzina kao glavne promjene u katalogu. Za oba dijela treba povećati promatrano vremensko razdoblje i koristiti više postaja (i podataka) za detekciju kako

bi se smanjio broj odbačenih detekcija.

Literatura

- Allen, R. V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bulletin of the Seismological Society of America* 68(5), 1521–1532.
- Balling, P., Grützner, C., Tomljenović, B., Spakman, W., i Ustaszewski, K. (2021). Post-collisional mantle delamination in the dinarides implied from staircases of oligo-miocene uplifted marine terraces. *Scientific Reports* 11(1), 2685.
- Balling, P., Tomljenović, B., Schmid, S. M., i Ustaszewski, K. (2021). Contrasting along-strike deformation styles in the central external Dinarides assessed by balanced cross-sections: Implications for the tectonic evolution of its Paleogene flexural foreland basin system. *Global and Planetary Change* 205, 103587.
- Basilic, R., Kastelic, V., Demircioglu, M., Garcia Moreno, D., Nemser, E., Petricca, P., Sboras, S., Besana-Ostman, G., Cabral, J., Camelbeeck, T., i sur. (2013). The european database of seismogenic faults (edsf) compiled in the framework of the project share.
- B.C.I.S. (1972). *Tables des temp de propagation des ondes séismiques (Hodochrones) pour la région des Balkans, Manuel d'utilisation*. Strasbourg: Bureau Central International de Séismologie.
- Belinić, T., Kolínský, P., i Stipčević, J. (2021). Shear-wave velocity structure beneath the dinarides from the inversion of rayleigh-wave dispersion. *Earth and Planetary Science Letters* 555, 116686.
- Chamberlain, C., Hopp, C., Boese, C., Warren-Smith, E., Chambers, D., Chu, S., Michailos, K., i Townend, J. (2017). EQcorrscan: Repeating and near-repeating earthquake detection and analysis in Python. *Seismological Research Letters* 89.
- Dasović, I., Herak, M., Herak, D., Latečki, H., Sećanj, M., Tomljenović, B., Cvijić-Amulić, S., i Stipčević, J. (2023). The Berkovići (BiH) $M_L = 6.0$ earthquake sequence of 22 April 2022 – seismological and seismotectonic analyses. u procesu recenzije.
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., i Latečki, H. (2022). Potres kod Berkovića (BiH) 22. travnja 2022. godine. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva* (59), 12–13.
- Dysart, P. S. i Pulli, J. J. (1990). Regional seismic event classification at the NORESS array: Seismological measurements and the use of trained neural networks. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80(6B), 1910–1933.
- Font, Y., Kao, H., Lallemand, S., Liu, C.-S., i Chiao, L.-Y. (2004). Hypocentre determination offshore of eastern Taiwan using the Maximum Intersection method. *Geophysical Journal International* 158(2), 655–675.
- Gibbons, S. J. i Ringdal, F. (2006). The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International* 165(1), 149–166.
- Grünthal, G. (1998). *European macroseismic scale 1998 (EMS-98)*. Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.

- Herak, M., Herak, D., i Dasović, I. (2016, September 5-8). Fault-plane solutions and stress orientation in the greater region of Northern and Central Dinarides. In *Book of Abstracts, 35th General Assembly of the European Seismological Commission*, Trieste, Italy.
- Herak, M., Herak, D., i Markušić, S. (1996). Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992. *Terra Nova* 8(1), 86–94.
- Kapetanidis, V., Michas, G., Spingos, I., Kaviris, G., i Vallianatos, F. (2023). Cluster analysis of seismicity in the eastern gulf of Corinth based on a waveform template matching catalog. *Sensors* 23(6), 2923.
- Kastelić, V. i Carafa, M. M. C. (2012). Fault slip rates for the active External Dinarides thrust-and-fold belt. *Tectonics* 31(3).
- Kastelić, V., Vannoli, P., Burrato, P., Fracassi, U., Tiberti, M. M., i Valensise, G. (2013). Seismogenic sources in the Adriatic domain. *Marine and Petroleum Geology* 42, 191–213. Special Issue: The Geology of the Periadriatic Basin and of the Adriatic Sea.
- Kennett, B. L. N., Engdahl, E. R., i Buland, R. (1995). Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International* 122(1), 108–124.
- Lomax, A., Michelini, A., i Curtis, A. (2009). *Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods*, pp. 1–33. New York, NY: Springer New York.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., i Berge-Thierry, C. (2000). *Probabilistic Earthquake Location in 3D and Layered Models*, pp. 101–134. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Milne, J. (1886). *Earthquakes and Other Earth Movements*. International scientific series. D. Appleton.
- Musil, M. i Plešinger, A. (1996). Discrimination between local microearthquakes and quarry blasts by multi-layer perceptrons and Kohonen maps. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(4), 1077–1090.
- Orlić, N., Herak, M., i Miklić, D. (2007-2021). SANDI – Seismogram ANalysis and DIspay. computer program.
- Peng, Z. i Zhao, P. (2009). Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nature Geoscience* 2(12), 877–881.
- Perol, T., Gharbi, M., i Denolle, M. (2018). Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances* 4(2), e1700578.
- Podvin, P. i Lecomte, I. (1991). Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools. *Geophysical Journal International* 105(1), 271–284.
- Ross, Z. E., Meier, M.-A., Hauksson, E., i Heaton, T. H. (2018). Generalized seismic phase detection with deep learning. *Bulletin of the Seismological Society of America* 108(5A), 2894–2901.

- Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Kounov, A., Maţenco, L., Nievergelt, P., Oberhänsli, R., Pleuger, J., Schefer, S., Schuster, R., Tomljenović, B., Ustaszewski, K., i van Hinsbergen, D. J. (2020). Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey. *Gondwana Research* 78, 308–374.
- Schorlemmer, D., Euchner, F., Kästli, P., i Saul, J. (2011). QuakeML: Status of the XML-based seismological data exchange format. *Annals of Geophysics* 54(1), 59–65.
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., i Ide, S. (2007). Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms. *Nature* 446(7133), 305–307.
- Shelly, D. R. i Hardebeck, J. L. (2010). Precise tremor source locations and amplitude variations along the lower-crustal central San Andreas fault. *Geophysical Research Letters* 37(14).
- Šumanovac, F. (2010). Lithosphere structure at the contact of the Adriatic microplate and the Pannonian segment based on the gravity modelling. *Tectonophysics* 485(1), 94–106.
- Tarantola, A. i Valette, B. (1981). Inverse Problems = Quest for Information. *Journal of Geophysics* 50(1), 159–170.
- Vlahović, I., Tišljarić, J., Velić, I., i Matičec, D. (2005). Evolution of the Adriatic carbonate platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220(3), 333–360.
- Wiszniowski, J., Plesiewicz, B. M., i Trojanowski, J. (2014). Application of real time recurrent neural network for detection of small natural earthquakes in Poland. *Acta Geophysica* 62(3), 469–485.
- Woessner, J., Hardebeck, J., i Hauksson, E. (2010). What is an instrumental seismicity catalog. *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*.
- URL1 (2022). EMSC. https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/earthquake_map.php?id=1121117. Zadnji pristup 16. srpnja 2023.
- URL2 (2023). DuFAULT. <https://projectdufault.geof.pmf.unizg.hr/>. Zadnji pristup 2023.
- URL3 (2022). Civilna zaštita RH. <https://civilna-zastita.gov.hr/vijesti/potros-u-bih-magnitude-6-1-po-richteru/5644>.
- URL4 (2023). EQcorrscan stranica. <https://eqcorrscan.readthedocs.io/en/>. Pristupljeno: 24.7.2023.
- URL5 (2023). SHARE. https://edsf13.ingv.it/SHARE_WP3.2_Database.html. Pristupljeno: 21.8.2023.
- URL6 (2023). AK135 model. <http://rses.anu.edu.au/seismology/ak135/ak135t.html>. Pristupljeno: 27.8.2023.
- URL7 (2023). Aplikacija Earthquake Triangulation, IRIS. <https://www.iris.edu/app/triangulation/>. Pristupljeno: 13.9.2023.

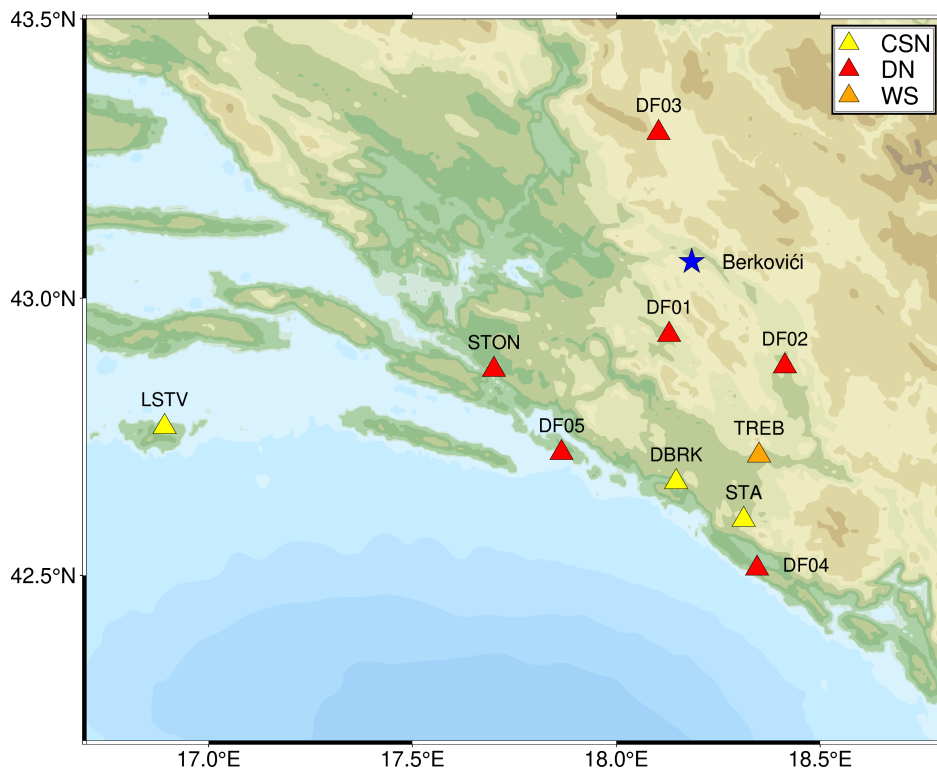
URL8 (2023). World Geodetic System 1984 (WGS84). <https://earth-info.nga.mil/?dir=wgs84&action=wgs84>. Pristupljeno: 12. 10. 2023.

Dodatak A Podaci o korištenim postajama

U ovom dodatku dan je popis korištenih postaja s informacijama o njihovoj lokaciji (tablica A1) i instrumentima te karta lokacija postaja (slika A1).

Tablica A1. Lokacija i instrumenti za svaku seizmološku postaju.

Mreža	Postaja	Longituda [°N]	Latituda [°E]	Instrument (senzor, digitizer)
DN	DF01	42.9345	18.1296	Güralp CMG-T40, CMG-DM24
	DF02	42.8778	18.4137	Güralp CMG-T40, CMG-DM24
	DF03	43.2966	18.1037	Güralp CMG-40T, CMG-DM24
	DF04	42.5125	18.3454	Güralp CMG-6TD, CMG-CD24
	DF05	42.7217	17.8657	Güralp CMG-40T, CMG-DM24
	STON	42.8716	17.6999	Güralp CMG-40TD, CMG-DM24
CR	DBRK	42.669080	18.146870	Güralp CMG-40T/30
	LSTV	42.768645	16.892010	Güralp CMG-40T
	STA	42.600814	18.312441	Güralp CMG-40T, CMG-DM24
WS	TREB	42.706	18.344	Kinematics Quanterra Q330, senzor SS-1



Slika A1. Karta korištenih seizmoloških postaja zajedno s epicentrom glavnog potresa (označen plavom zvjezdicom).

Dodatak B Kontrolna datoteka za NonLinLoc

U ovom dodatku dana je kontrolna datoteka kojom se pokreće program NonLinLoc. Datoteka sadrži parametre korištene prilikom lociranja.

```
#Generic
CONTROL 1 54321
TRANS AZIMUTHAL_EQUIDIST WGS-84 43.05812 18.18129 0.0
MAPLINE GMT_LONLAT ./data_geog/map.prov.line 0.0 0.0 0.0 SOLID

#Vel2Grid
VGOUT ./model/layer
VGTYPE P
VGGRID 2 301 44 0.0 0.0 -3.0 1.0 1.0 1.0 SLOW_LEN

LAYER 0.000 5.8000 0.00 3.4600 0.0 2.4490 0.0
LAYER 20.000 6.5000 0.00 3.8500 0.0 2.7142 0.0
LAYER 35.000 8.0400 0.00 4.4800 0.0 3.2976 0.0
LAYER 77.500 8.0450 0.00 4.4900 0.0 3.2994 0.0
LAYER 120.000 8.0500 0.00 4.5000 0.0 3.3013 0.0

#Grid2Time control file statements
GTFILES ./model/layer ./time/layer P

GTMODE GRID2D ANGLES_YES

GTSRCE DF01 LATLON 42.9345 18.1296 0.0 0.483
GTSRCE DF02 LATLON 42.877833 18.413667 0.0 0.431
GTSRCE DF03 LATLON 43.2966 18.1037 0.0 0.858
GTSRCE DF04 LATLON 42.5125 18.34535 0.0 0.218
GTSRCE DF05 LATLON 42.72173 17.86569 0.0 0.08
GTSRCE DBRK LATLON 42.669083 18.14687 0.0 0.293
GTSRCE LSTV LATLON 42.768552 16.891928 0.0 0.13
GTSRCE STA LATLON 42.600814 18.312441 0.0 0.462
GTSRCE STON LATLON 42.8716 17.6999 0.0 0.004
GTSRCE TREB LATLON 42.717 18.35 0.0 0.3

GT_PLFD 1.0e-3 0

#NLLoc Control File LOCSIG Anthony Lomax - ALomax Scientific

LOCCOM 2022 Berkovici Sequence (NonLinLoc Sample Location)
LOCFILES ./obs/pom_ver4.hyp NLLOC_OBS ./time/layer ./loc/ver5/Week13
LOCHYPOUT SAVE_NLLOC_ALL SAVE_HYPOINV_SUM
LOCSEARCH OCT 10 10 4 0.01 20000 5000 0 1
LOCGRID 101 101 21 -50.0 -50.0 0.0 1.0 1.0 1.0 PROB_DENSITY SAVE
```

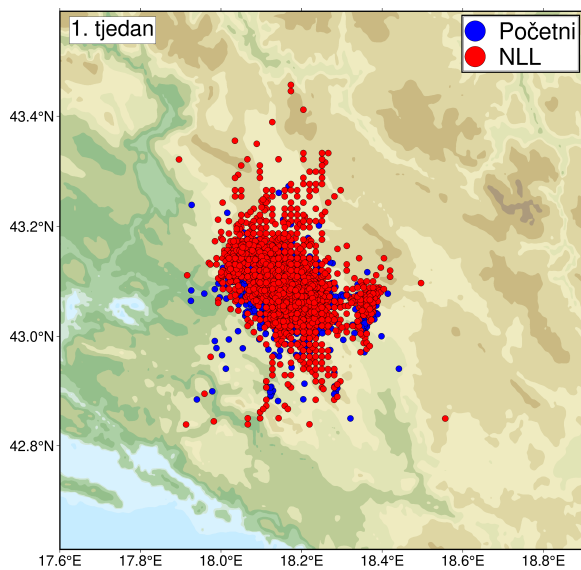
LOCMETH EDT_OT_WT 9999.0 4 -1 -1 1.73 6 -1.0 1
LOCGAU 0.2 0.0
LOCGAU2 0.01 0.05 2.0
LOCPHASEID P P p G PN PG Pn Pg
LOCPHASEID S S s G SN SG Sn Sg
LOCQUAL2ERR 0.1 0.5 1.0 2.0 99999.9
LOCANGLES ANGLES_YES 5
LOCMAG ML_HB 1.0 1.110 0.00189

LOCCMP DF01 ? ? 1.0 0.0
LOCCMP DF02 ? ? 1.0 0.0
LOCCMP DF03 ? ? 1.0 0.0
LOCCMP DF04 ? ? 1.0 0.0
LOCCMP DF05 ? ? 1.0 0.0
LOCCMP DBRK ? ? 1.0 0.0
LOCCMP LSTV ? ? 1.0 0.0
LOCCMP STA ? ? 1.0 0.0
LOCCMP STON ? ? 1.0 0.0
LOCCMP TREB ? ? 1.0 0.0

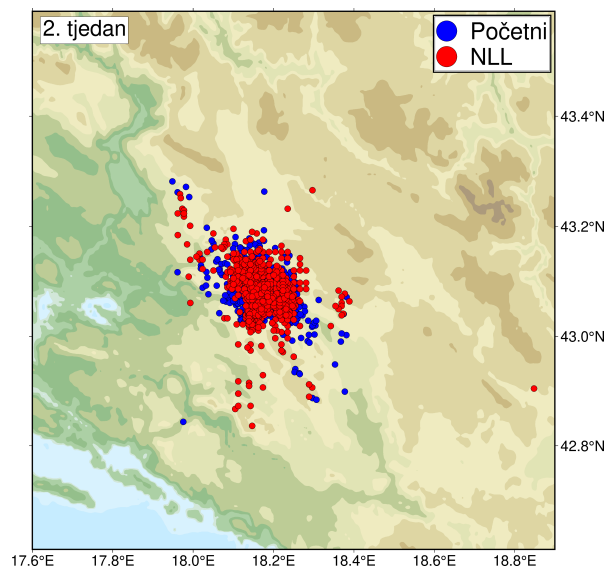
LOCPHSTAT 9999.0 -1 9999.0 1.0 1.0 9999.9 -9999.9 9999.9

Dodatak C Karte lokacija potresa po tjednima

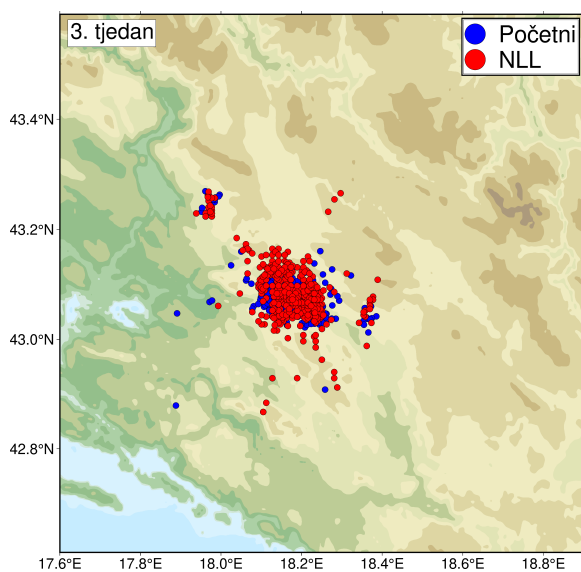
U ovom dodatku prikazane su karte lokacija potresa po tjednima. Plavom bojom označeni su potresi iz početnog, a crvenom bojom locirani potresi koji su detektirani metodom uparivanja predložaka. U gornjem lijevom kutu naznačen je broj tjedna nakon potresa.



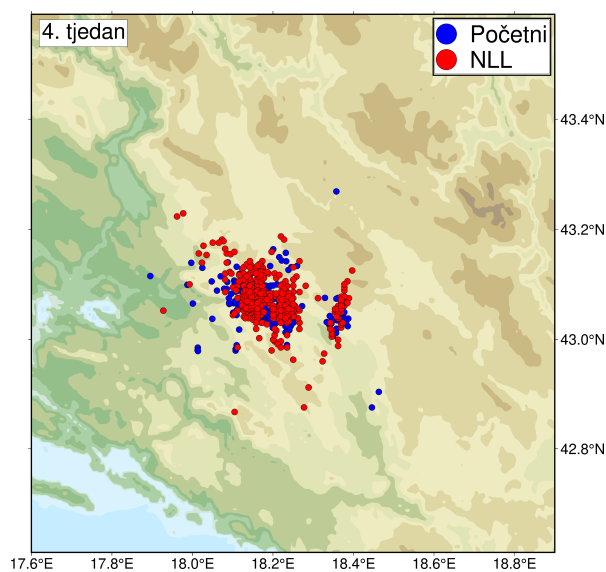
(a)



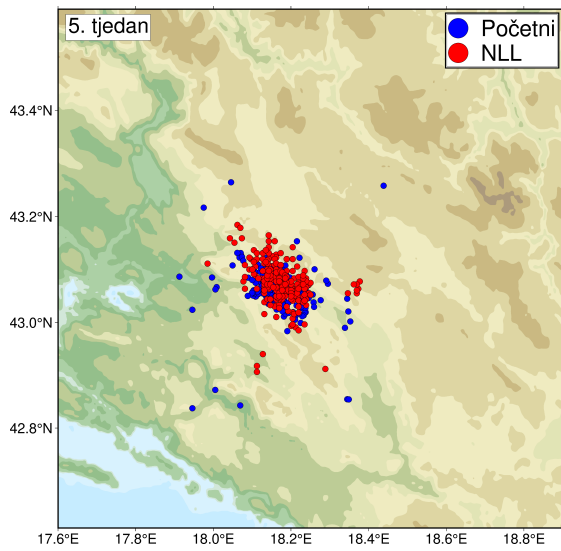
(b)



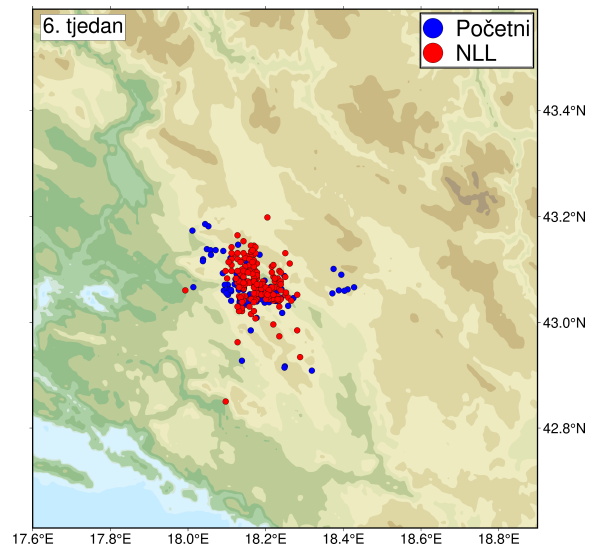
(c)



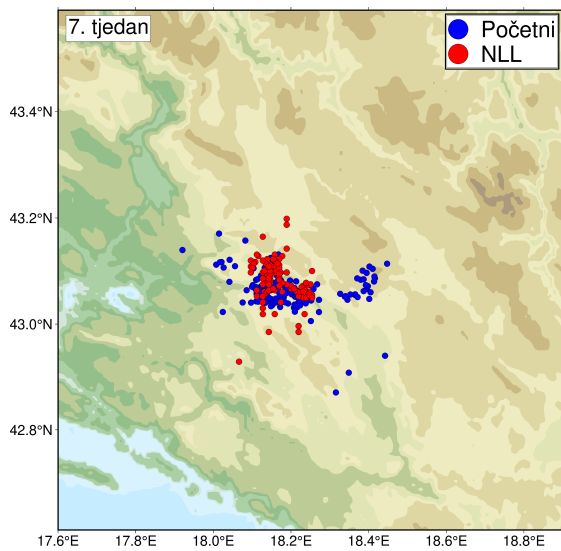
(d)



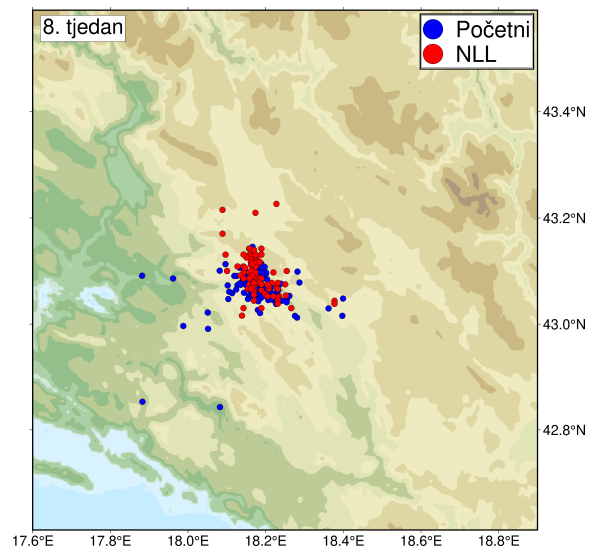
(e)



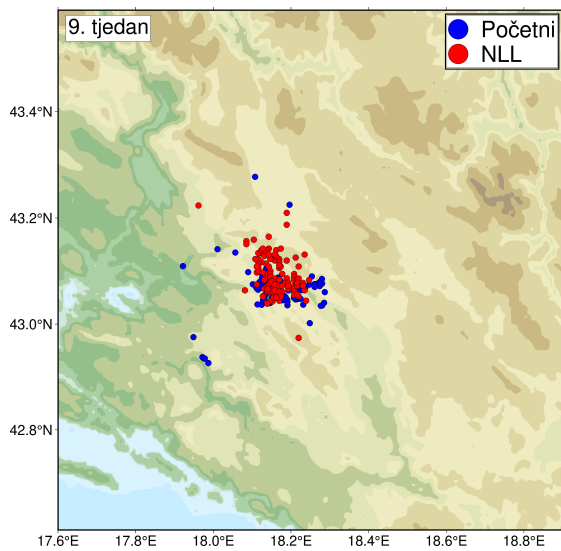
(f)



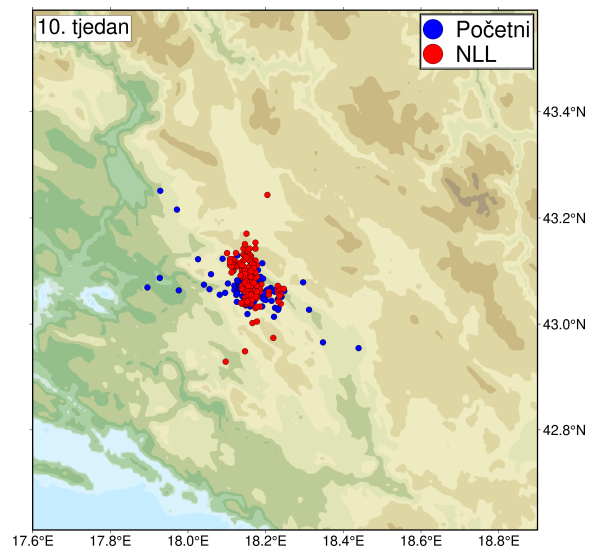
(g)



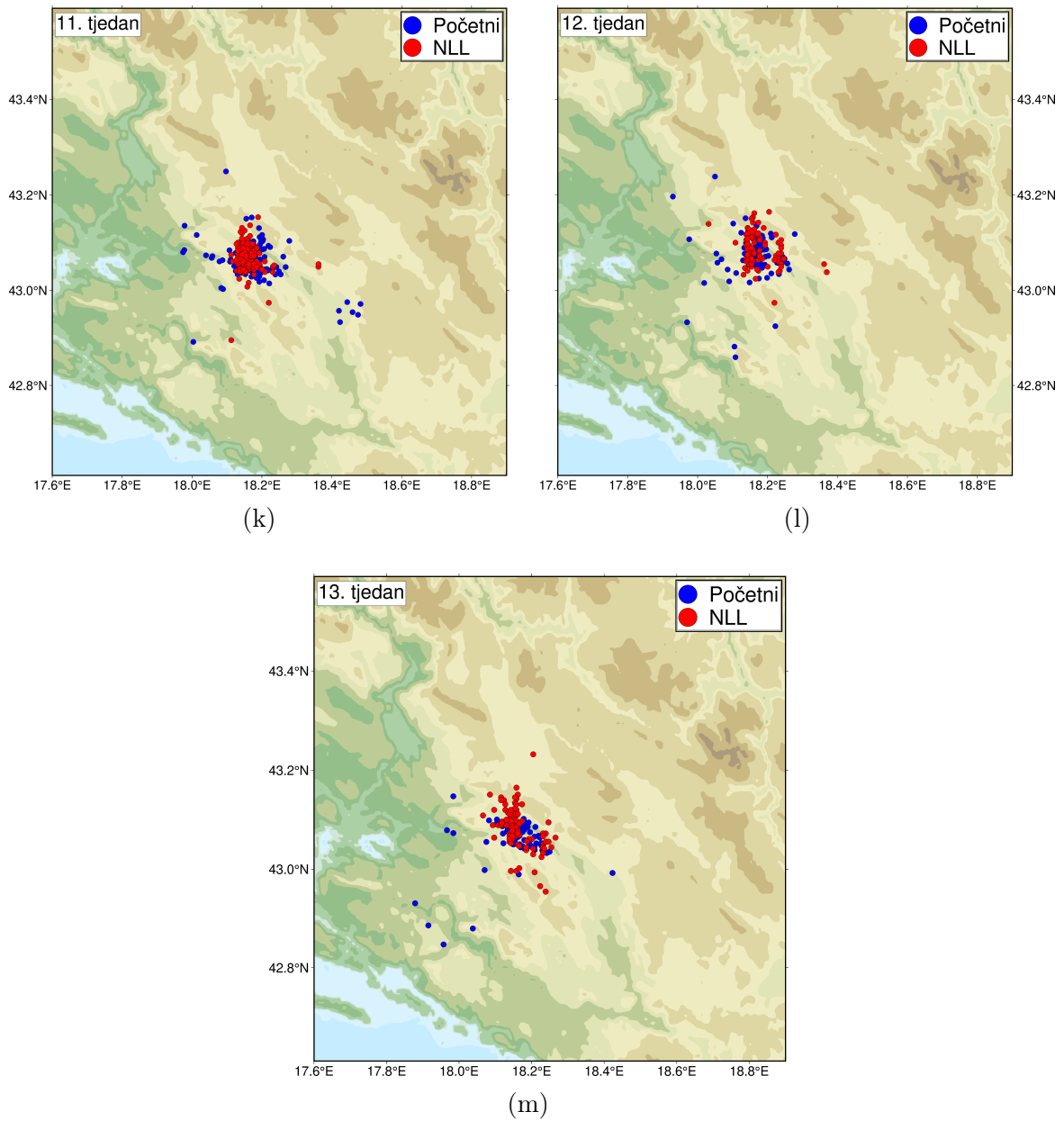
(h)



(i)



(j)



Slika C1. Karte lokacija potresa po tjednima u početnom (plavo) i NLL (crveno) katalogu.