

Zagrebačka serija potresa iz 2020. godine

Petrović, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:697265>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Mateo Petrović

**ZAGREBAČKA SERIJA POTRESA IZ 2020.
GODINE**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Mateo Petrović

**ZAGREBAČKA SERIJA POTRESA IZ 2020.
GODINE**

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistar geologije

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Zagreb, 2022.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

ZAGREBAČKA SERIJA POTRESA IZ 2020. GODINE

Mateo Petrović

Rad je izrađen u: Geološki odsjek, PMF, Zagreb, Horvatovac 102b; Geofizički odsjek, PMF, Horvatovac 95

Sažetak:

Precizno lociranje potresa vrlo je važno za određivanje bitnih informacija o potresu, značajki žarišta potresa, brzu procjenu seizmičke opasnosti te daljnja tektonska tumačenja, ali i buduće procjene seizmičkog hazarda. Međutim, kako bi se seizmički hazard mogao što bolje procijeniti potrebna su predznanja vezana uz geodinamiku i geologiju promatranog područja te njegove seizmičke povijesti.

Grad Zagreb i šire zagrebačko područje pripada seizmički aktivnom području, a potresnu povijest istraživanog područja moguće je pratiti od 16. stoljeća. Posljednji značajni potres magnitude 5,3 na ovom području dogodio se 22. ožujka 2020. godine. Nakon glavnog potresa 2020. godine na širem zagrebačkom području dogodila se serija potresa. U radu je napravljena analiza automatske detekcije potresa na osnovu kontinuiranih zapisa podrhtavanja tla na setu postaja, automatsko određivanje dolazaka P i S valova i maksimalne amplitude na pojedinoj fazi te automatska lokacija hipocentara zagrebačke serije potresa iz 2020. godine pomoću softverskog paketa SEISAN.

Temeljem provedenog istraživanja može se zaključiti kako automatska detekcija i lociranje hipocentara potresa uvelike smanjuje vrijeme obrade ogromnih količina podataka s nekoliko mjeseci na nekoliko dana.

Ključne riječi: zagrebačka serija potresa, 2020. godina, precizno lociranje potresa, automatska detekcija, SEISAN

Rad sadrži: 71+V stranica, 38 slika, 9 tablica i 53 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF

Mentor(i): izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić, prof. dr. sc. Marijan Kovačić, doc. dr. sc. Karmen Fio Firi

Datum završnog ispita: 26. rujna, 2022.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Graduate Thesis

ZAGREB 2020 EARTHQUAKE SEQUENCE

Mateo Petrović

Thesis completed in: Department of Geology, Faculty of Science, Zagreb, Horvatovac 102b; Department of Geophysics, Faculty of Science, Zagreb, Horvatovac 95

Abstract:

The precise location of earthquakes is very important for determining essential information about the earthquake, features of the earthquake focus, quick assessment of the seismic hazard and further tectonic interpretations, as well as future assessments of the seismic hazard. However, in order to assess the seismic hazard as well as possible, prior knowledge of the geodynamics and geology of the observed area and its seismic history is required.

The city of Zagreb and the wider Zagreb area belong to a seismically active area, and the seismic history of the researched area can be traced back to the 16th century. The last significant earthquake of magnitude 5.3 in this area occurred on March 22, 2020. After the main earthquake in 2020, a series of earthquakes occurred in the wider Zagreb area. In the paper, an analysis of automatic earthquake detection based on continuous records of ground shaking at a set of stations, automatic determination of P and S wave arrivals and maximum amplitude at a particular phase, and automatic location of hypocenters of the Zagreb series of earthquakes from 2020 using the SEISAN software package was made.

Based on the conducted research, it can be concluded that the automatic detection and location of earthquake hypocenters greatly reduces the processing time of huge amounts of data from a few months to a few days.

Keywords: Zagreb series of earthquakes, 2020, precise location of earthquakes, automatic detection, SEISAN

Thesis contains: 71+V pages, 38 figures, 9 tables and 53 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Library of Geology, Department of Geology, Faculty of Science

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Reviewers: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić, prof. dr. sc. Marijan Kovačić, doc. dr. sc. Karmen Fio Firi

Date of the final exam: September 26, 2022.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Teorijske osnove lociranja potresa | 2 |
| 2.1. Tehnike i metode lociranja potresa | 6 |
| 2.2. Važnost preciznog lociranja potresa | 8 |
| 2.3. Automatska detekcija i lociranje potresa | 10 |
| 3. Pregled dosadašnjih istraživanja..... | 13 |
| 4. Istraživano područje | 16 |
| 4.1. Geološke karakteristike zagrebačkog rasjednog sustava | 17 |
| 4.2. Seizmičke karakteristike zagrebačkog područja..... | 20 |
| 5. Podaci i metode istraživanja | 23 |
| 5.1. Prilagodba podataka sa seizmoloških postaja | 25 |
| 5.2. Automatska detekcija potresa iz kontinuirane arhive podataka..... | 28 |
| 5.3. Automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova..... | 31 |
| 5.4. Automatsko određivanje magnitude potresa..... | 34 |
| 5.5. Automatska lokacija hipocentra potresa | 38 |
| 6. Rezultati istraživanja | 42 |
| 7. Rasprava | 47 |
| 8. Zaključak | 62 |
| 9. Literatura | 63 |
| 10. Popis slika..... | 68 |
| 11. Popis tablica..... | 71 |

Zahvale

Prvo bih se zahvalio svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić koja me vodila kroz ovo istraživanje te bila dostupna u svakom trenutku za pomoć i savjete.

Isto tako, veliko hvala mom dragom profesoru Marijanu Kovačiću na uskakanju kad je najviše trebalo.

I za kraj, hvala mojim dragim kolegama sa Zavoda za paleontologiju i geologiju kvartara (Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti) što su me trpili, savjetovali i podupirali kroz sve godine studija i faze izrade ovog diplomskog rada.

1. Uvod

Seizmički hazard, odnosno seizmička opasnost odnosi se na intrinzičnu prirodnu vjerojatnost potresa te resultantnih kretanja tla i drugih efekata. Kao svojstvo potresa, seizmički hazard predstavlja veliku opasnost za živote ljudi i imovinu. Nadalje, seizmička opasnost se uslijed podrhtavanja tla može definirati kao spektar odgovora na ubrzanje ili kretanje tla specificirano na temelju probabilističke ili determinističke analize (REITER, 1990). Navedena opasnost ovisi o regionalnim i specifičnim geološkim te geotehničkim karakteristikama s obzirom na orijentaciju i aktivnost samih rasjeda, ali i određenim razinama seizmičkog hazarda.

Međutim, kako bi se što preciznije mogao procijeniti seizmički hazard potrebno je razumjeti važnost preciznog lociranja potresa, odnosno, poznavati osnove lociranja potresa – tehnike i metode lociranja potresa, automatsku detekciju. Također, vrlo je važno poznavati geološke i seizmotektonske karakteristike istraživanog područja, kao i njegovu potresnu povijest. Poznavanje potresne povijesti istraživanog područja pretpostavlja dostupnost preciznih i ažuriranih podataka o potresima iz kataloga potresa.

Grad Zagreb i šire zagrebačko područje imaju dugu potresnu povijest što je vidljivo i iz brojnih zapisa te dostupnih istraživanja. Posljednji značajni potres dogodio se 22. ožujka 2020. godine s epicentrom u blizini Markuševca. Nakon glavnog događaja, na zagrebačkom području zabilježen je niz potresa magnituda manjih od magnitude glavnog potresa. U radu je napravljena analiza zagrebačke serije potresa iz 2020. godine te su ispitane mogućnosti automatske detekcije potresa uz pomoć softverskog paketa SEISAN. Nakon provedene analize, rezultati istraživanja prikazani su kao dva segmenta. Prvi segment odnosi se na automatsku detekciju i registraciju potresa na temelju zapisa sa seizmoloških postaja, a drugi segment odnosi se na automatsko lociranje detektiranih potresa. Pri tome su zapisi sa seizmoloških postaja obrađeni uz pomoć dva algoritma, STA/LTA algoritam i Carl Johnson modificirani algoritam, te je napravljena usporedna analiza dobivenih rezultata.

2. Teorijske osnove lociranja potresa

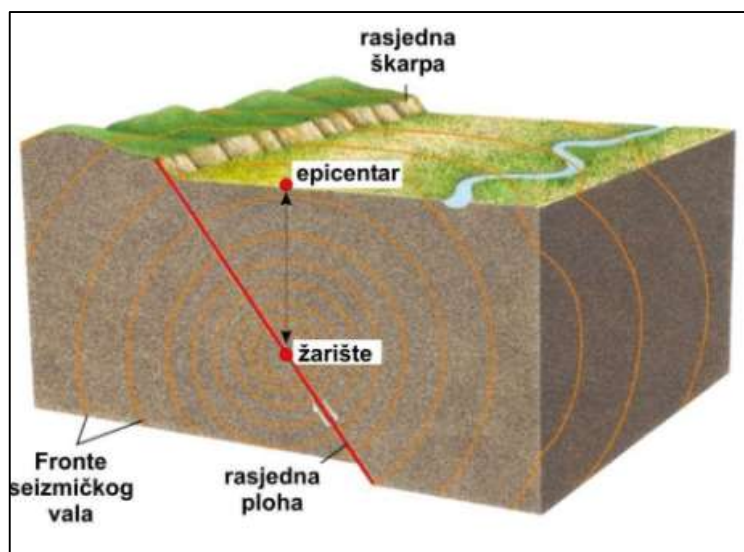
Potres se može definirati kao podrhtavanje Zemljine površine uslijed naglog oslobađanja energije u Zemljinoj litosferi, a koja se kroz unutrašnjost Zemlje rasprostire seizmičkim valovima (OHNAKA, 2013). Potresi mogu varirati u intenzitetu, a seizmička aktivnost određenog područja uključuje učestalost, vrstu i intenzitet potresa u određenom vremenskom razdoblju.

Lociranje potresa podrazumijeva određivanje mjesta i vremena nastanka potresa – trenutak oslobađanja energije u seizmičkom izvoru (LOMAX i sur., 2014). Lokacija se može odnositi na epicentar, hipocentar (žarište) ili centroid potresa, odnosno na neko drugo promatrano ili izračunato svojstvo potresa koje se može prostorno i/ili vremenski lokalizirati. Mjesto potresa može biti relativno ili apsolutno (HUSEN i HARDEBECK, 2010). Apsolutna lokacija potresa izračunava se ili specificira unutar fiksnog geografskog sustava i fiksne vremenske baze (npr. UTC – koordinirano univerzalno vrijeme). S druge strane, relativna lokacija potresa određena je ili navedena u odnosu na neki drugi prostorno-vremenski objekt (npr. eksplozija) koji sam može imati nepoznatu apsolutnu lokaciju. Općenito govoreći, u slučaju potresa, mjesto izvora definirano je njegovim hipocentrom (x_0, y_0, z_0) i vremenom nastanka t_0 (AMMON i sur., 2020). Hipocentar se obično smatra fizičkom lokacijom početne točke procesa rupture, obično prikazane geografskom dužinom (x_0), geografskom širinom (y_0) i dubinom (z_0 [km]). Pojednostavljeno, hipocentar određuju koordinate x_0, y_0 , i z_0 , a može se mjeriti na dva načina:

- zemljopisnim koordinatama te
- Kartezijevim koordinatama.

Kao što je već navedeno, hipocentar i vrijeme nastanka nisu jedine mjere za opisivanje i analizu lokacije potresa. Epicentar predstavlja mjesto na Zemljinoj površini koja se nalazi neposredno iznad hipocentra (horizontalna projekcija hipocentra na površinu Zemlje) te definira središte potresnog područja (područje na kojem su ljudi osjetili potres te gdje su vidljivi efekti/posljedice samog potresa). Druga mjera odnosi se na žarište, odnosno središte početnog loma ili pucanja. Žarište se uvijek nalazi na nekoj dubini ispod površine tla u Zemljinoj kori, a ne na površini te se odnosi na točku duž rasjedne ravnine iz koje se seizmički valovi šire prema van (slika 1). Kao što je već navedeno, od točke žarišta pomak se širi gore, dolje i bočno duž rasjedne duljine. Pomak proizvodi udarne valove stvarajući

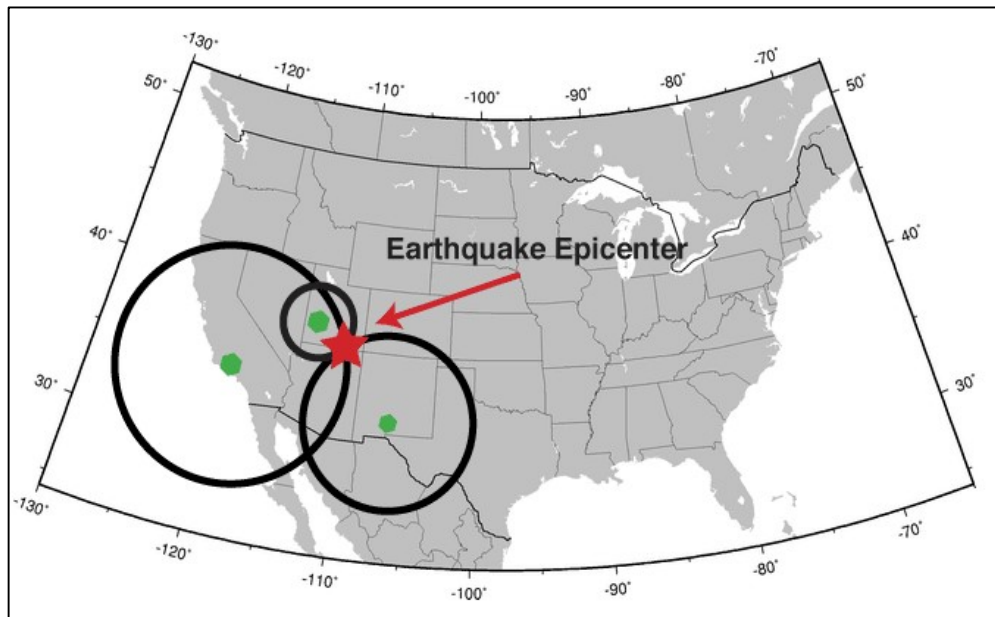
seizmičke valove – primarni (P) i sekundarni val (S). Što je veći pomak i što se dalje širi to su seizmički valovi i podrhtavanje tla značajniji. Jače podrhtavanje obično je rezultat veće količine oslobođene seizmičke energije.



Slika 1. Žarište i epicentar potresa (URL5)

Potresi se promatraju i lociraju mrežom seizmografa instaliranih na Zemljinoj površini. Gibanje tla na svakom seizmografu pojačava se i elektronički bilježi u realnom vremenu na središnjem serveru. Temeljna svrha seizmografa je da se na osnovi njihovih zapisa omogući lociranje početne žarišne točke. Prvi su seizmografi bili dizajnirani na način da detektiraju da se potres dogodio te samo definiraju azimut smjera prvih gibanja nakon potresa (zapravo se radilo o seizmoskopima). Prva preciznija lociranja lokacije potresa omogućena su instrumentima koji su upotrebljavali vremenske ljestvice uz pomoć satnog mehanizma kojim se moglo odrediti vrijeme prvog pomicanja tla i točno vremensko određivanje svakog idućeg pomaka. Kao što je već navedeno, svaki seizmograf daje udaljenost od postaje na kojoj je instaliran do epicentra, odnosno žarišta, potresa. Pri tome su potrebne minimalno tri postaje za lociranje epicentra pomoću triangulacije. Koristeći vremensku razliku dolaska primarnog longitudinalnog vala (P) do sekundarnog transverzalnog vala (S), moguće je odrediti udaljenost od epicentra. Udaljenost od epicentra do svake postaje može se iscrtati kao krug, a udaljenost je jednaka polumjeru kruga. Mjesto gdje se kružnice sijeku predstavlja epicentar potresa (slika 2). Navedena metoda, također funkcionira u tri dimenzije sa sferama i seizmografima s više osi kako bi se mogao locirati ne samo epicentar već i dubina žarišta potresa. Na slici 2 seizmografi su prikazani zelenim

točkama, a izračunata epicentralna udaljenost od svakog seizmografa definira kružnicu oko pojedinog seizmografa (postaje).



Slika 2. Lociranje potresa uz pomoć triangulacije (URL2)

Opisana triangulacija pruža procjenu lokacije epicentra, ali ne i informaciju o žarišnoj dubini ili vremenu nastanka. Prikupljanjem podataka s nekoliko postaja dostupnih, vrijeme nastanka potresa moguće je odrediti jednostavnom tehnikom koja se zove Wadati dijagram (AMMON i sur., 2020). Uz pomoć Wadatijevo dijagrama, vrijeme dolaska S i P faza (t_s i t_p) ucrtano je u odnosu na dolazak P vala, a može se prikazati sljedećom jednačinom:

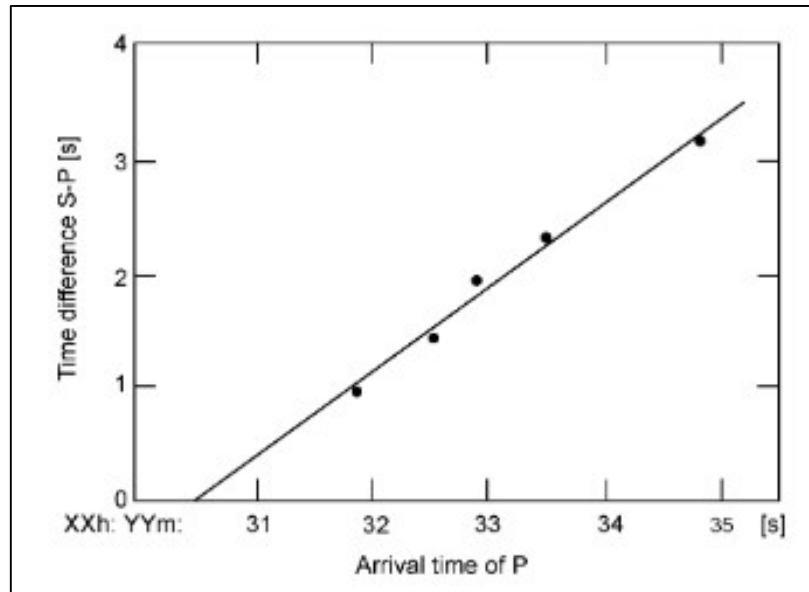
$$t_s - t_p = (V_p/V_s - 1) \times (t_p - t_o) \quad (1)$$

Opažene razlike S-P vremena prikazane su u odnosu na apsolutno vrijeme t_p dolaska longitudinalnog vala i apsolutno vrijeme t_s dolaska transverzalnog vala na seizmološku postaju. Budući da $t_s - t_p$ iznosi nula u hipocentru, ravna crta na Wadatijevom dijagramu (slika 3) daje vrijeme nastanka potresa (t_o) na presjeku osi vremena dolaska (P) i nagiba ($v_p/v_s - 1$) krivulje te se time dobiva omjer v_p/v_s (brzina dolaska P i S valova). Wadatijev dijagram često se koristi za lociranje lokalnih potresa u svrhu:

1. određivanja vremena nastanka potresa,
2. izračunavanja udaljenost hipocentra,

3. dobivanje omjera brzine dolaska P i S valova te

4. ispitivanja P i S očitavanja.



Slika 3. Primjer Wadatijevog dijagrama (HAVSKOV i sur., 2012)

(U prikazanom slučaju, nagib linije je 0,72, pa omjer v_p/v_s iznosi 1,72. Neusklađenost podataka s ravnom linijom ukazuje na odstupanja od konstantnog v_p/v_s omjera i/ili pogreške prilikom očitavanja podataka)

Kao što je vidljivo na prethodnoj slici, vrijednosti dobivene sa seizmoloških postaja Wadati je određivao grafički tvoreći dijagram u kojem je na os apscisu unosio vremena pojedinih postaja (t_p), a na os ordinatu pripadna vremena (T_{PS}).

Suvremene metode lociranja temelje se na optimiziranju prilagodbe promatranih vremena dolaska P i S valova korištenjem predviđenih vremena izračunatih za model Zemlje koji je prikladan za određeno potresno područje. Isti se pristup često generalizira za regionalne i globalne primjene, iako postoji mogućnost prilagodbe modela (AMMON i sur., 2020). Suvremeno lociranje potresa zahtjeva najmanje tri seizmografa (postaje), a uglavnom ih ima i više te međusobno tvore seizmički niz. Veći broj seizmografa rezultira preciznijim lociranjem potresa, što je bitno u modernim istraživanjima geodinamike, geometrije rasjeda i seizmičkog hazarda na određenom području. U tu svrhu, suvremeni računalni programi koriste ponavljajuće procese koji uključuju algoritme pogađanja i ispravljanja.

2.1. Tehnike i metode lociranja potresa

Tehnike lociranja potresa moguće je klasificirati u različite skupine na temelju (KARASÖZEN i KARASÖZEN, 2020):

- a) vrste lokacije potresa,
- b) broja potresa koje je potrebno locirati te
- c) metodologije koja se koristi prilikom lokacije potresa.

Dvije su glavne tehnike koje se koriste prilikom lociranja potresa:

1. linearna i
2. nelinearna.

Linearne metode proizvode jednu, najprikladniju, lokaciju hipocentra i vremena nastanka potresa. Međutim, ovakvo linearno rješenje može predstavljati loš prikaz cjelovitog rješenja (HUSEN i HARDEBECK, 2010). Jednadžba linearne tehnike lociranja potresa glasi:

$$Ax = d \quad (2)$$

gdje matrica A povezuje prilagodbe hipocentralnih parametara (x - vektor prostornih koordinata koje uzrokuju putanje zraka) na vektor neusklađenosti, d . Matrica A sadrži parcijalne derivacije vremena putovanja s obzirom na parametre modela te, prema tome, ovisi o preciznosti i točnosti sheme za izračunavanje vremena putovanja i putanje zraka. S druge strane, nelinearne tehnike lociranja potresa ne zahtijevaju izračunavanja parcijalnih derivacija. Umjesto toga, temelje se na determinističkim istraživanjima. Nadalje, nelinearna metoda lociranja potresa istražuje ili mapira funkcije koje mogu predstavljati neusklađenost srednje kvadratne sredine (engl. *Root Mean Square* - RMS), ali i sofisticiranije funkcijske vjerojatnosti. Zaključno, postoje dvije tehnike za rješavanje problema lociranja potresa (HUSEN i KISSLING, 2001). Linearne metode lociraju potrese korištenjem parcijalnih derivacija i inverzija matrice. Prednost linearne metode je što je računski brza i pruža pouzdana rješenja za ograničena potresna područja. Nedostatak je u tome što rješenja navedene metode ovise o kvaliteti početnog lociranja i mogu biti nestabilna. Nelinearne metode ili metode izravnog pretraživanja rješavaju probleme lociranja potresa uzrokovane pojedinačnim ili cjelokupnim prostornim rješenjima. Njihova prednost odnosi se na

dobivanje potpunijeg rješenja, međutim nelinearne tehnike mogu biti poprilično skupe. Postojeće tehnike lociranja potresa primjenjuju se na različite potrese diljem svijeta, a nove tehnike se još uvijek razvijaju. Ipak, prilikom odabira tehnike lociranja važnu ulogu ima točnost hipocentra potresa, procjena nesigurnosti koja proizlazi iz promatranih podataka, nepoznate strukture Zemlje o kojoj ovisi brzina širenja valova te računalna brzina algoritama.

Potresi se često lociraju jedan po jedan na temelju nastupnih vremena pojedinih valova zabilježenih na skupu postaja. Ova metoda lociranja često se naziva „lociranje jednog događaja“, prilikom čega je moguće koristiti i linearne i nelinearne tehnike lociranja. Rezultirajuća lokacija pri tome je apsolutna unutar fiksnog geografskog sustava i fiksne vremenske baze. Lokacija je neovisna o lokaciji drugih potresa te ovisi samo o promatranom vremenu nastanka i korištenim seizmičkim brzinama. Lociranje pojedinačnog događaja obično je poželjna metoda lociranja potresa obzirom na malo računsko opterećenje i poznato teorijsko shvaćanje navedene metode.

Druga metoda lociranja potresa odnosi se na skupno određivanje hipocentara (engl. *Joint Hypocenter Determination* - JHD). JHD metode obično su linearizirane obzirom da velika dimenzionalnost problema rješenja izravnog pretraživanja čini teškima i računalno zahtjevnima (PUJOL, 2000). Umjesto pojedinačnog lociranja potresa skup potresa može se locirati zajedno. Slično lociranju pojedinačnih događaja, JHD metoda koristi vrijeme dolaska faza seizmičkih valova utvrđenih na seizmičkim postajama. Kako bi se umanjile pogreške, JHD metoda dopušta korištenje staničkih korekcija postaja temeljenih na srednjim kvadratnim vrijednostima ostatka vremena putovanja valova ili eksplicitnim tretiranjem istih kao nepoznanica u inverznom problemu (PUJOL, 1992). Navedena korekcija postaje predstavlja konstantno vrijeme koje se dodaje svim modeliranim vremenima putovanja do te postaje, a to objašnjava nemodeliranu strukturu brzine duž putanje zajedničkih zraka ispod postaje. Za velike skupove podataka, JHD metoda može se koristiti za otkrivanje sustavnih pogrešaka povezanih s podacima o vremenu nastanka ili parametrima postaje (lokacija i vrijeme) istraživanjem raspodjele vremena putovanja specifičnih za određene postaje ili usporedbom korekcija postaja s geološkim karakteristikama lokalnog područja (MAURER i sur., 2010). Skup potresa moguće je locirati u odnosu na glavni događaj ili u odnosu jedan na drugi. Prvi način lociranja obično se naziva mjestom glavnog događaja, dok je drugi poznat kao mjesto potresa dvostruke razlike (engl. *Double difference* - DD)

(WALDHAUSER i ELLSWORTH, 2000). Rezultirajuće lokacije relativne su ili prema glavnom događaju, u slučaju lociranja glavnog događaja, ili jedna prema drugoj, u slučaju lociranja DD potresa. U slučaju lociranja glavnog događaja, informacije o apsolutnim lokacijama ovise o apsolutnoj lokaciji glavnog događaja. S druge strane, lociranje DD potresa može razriješiti apsolutne lokacije, međutim točnost lociranja ovisi o točnosti do koje su poznate stvarne seizmičke brzine, slično kao kod lociranja jednog događaja. Obje metode također su linearizirane zbog računalne zahtjevnosti i teškog dobivanja rješenja izravnog pretraživanja.

2.2. Važnost preciznog lociranja potresa

Nepreciznostima u lociranju potresa dominiraju tri čimbenika (PAVLIS, 1986):

1. pogreške u određivanju vremena nastanka potresa,
2. pogreške modeliranja izračunatih vremena putovanja te
3. nelinearnost problema lociranja potresa.

Određivanje točne lokacije bilo kojeg izvora koji zrači seizmičkom energijom jedan je od najvažnijih zadataka praktične seizmologije. Lokacija potresa nije samo važna za početnu karakterizaciju samog potresa, te brzu procjenu opasnosti i time odgovora na hitne slučajeve već je ključna i za daljnja tektonska tumačenja i buduće procjene seizmičkog hazarda (KARASÖZEN i KARASÖZEN, 2020). Također, precizno lociranje mjesta potresa predstavlja temelj za praćenje potresa, vulkana, ledenjaka, kao i za potrebe seizmoloških i geoloških istraživanja i interpretacija (LOMAX i SAVVAIDIAS, 2021).

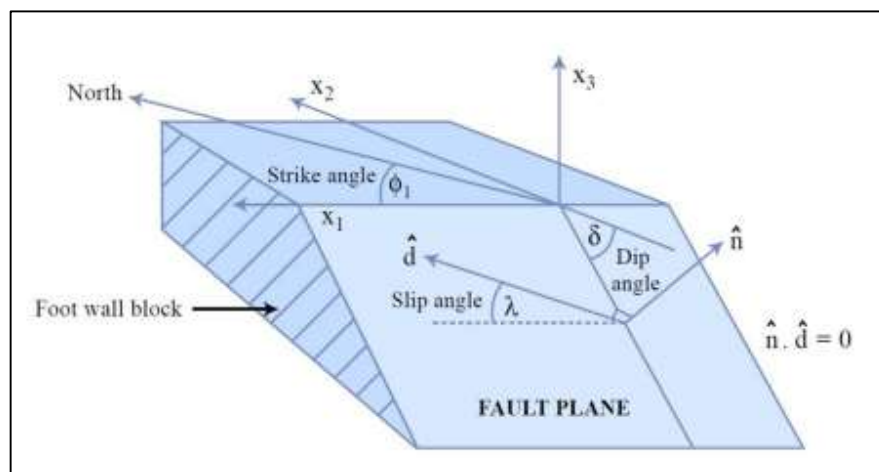
Nadalje, precizno lociranje potresa, točnije njegovog žarišta, vrlo je važno za određivanje stvarne geometrije rasjeda na određenom području (HAVSKOV i OTTEMÖLLER, 2010). Rasjedi su pomične pukotine duž kojih su stijene ili stjenka tijela pomaknuta s jedne stranu pukotine u odnosu na drugu, reda veličine par centimetara. Smjer i veličinu pomaka po rasjedu definira vektor pomaka rasjeda. Pomicanje koji uzrokuje potres definira se orijentacijom rasjeda i smjerom pomaka duž rasjedne plohe (slika 4). Smjer pružanja rasjeda (φ) je azimut pravca sjecišta rasjedne plohe i horizontalne ravnine. Kut nagiba rasjedne plohe δ (engl. *dip*) je kut koji zatvara rasjedna ploha s horizontalnom ravninom. Kut relativnog pomaka λ (engl. *rake* ili *slip*) mjeri se od pravca smjera pružanja

rasjeda u horizontalnoj ravnini prema gore i opisuje smjer gibanja krovine po rasjednoj plohi (OKAL, 2011). Sukladno navedenom, parametri rasjeda mogu poprimiti sljedeće vrijednosti:

$$0 \leq \varphi < 360^\circ$$

$$-180^\circ < \lambda < 180^\circ$$

$$0 < \sigma < 90^\circ$$



Slika 4. Geometrija rasjeda (HAVSKOV i OTTEMÖLLER, 2010)

Geometrija rasjeda određena je smjerom pružanja rasjeda, kutom nagiba i kutom relativnog pomaka. Smjer pomaka krovinskog krila (engl. *hanging wall*) u odnosu na podinsko (engl. *foot wall*) prikazan je vektorom \vec{d} .

Kao što je već navedeno, precizno lociranje potresa važno je za razumijevanje geodinamike određenog područja. Naprezanje Zemljine kore može biti netektonsko i tektonsko. Glavni izvor netektonskog naprezanja je gravitacijsko opterećenje. S druge strane, tektonsko naprezanje potječe od sila, koje utječu na procese pomicanja, guranja i podvlačenja tektonskih ploča, što rezultira njihovim sudarom i subdukcijom (ALI i sur., 2021). Vrste i orijentacije aktiviranih rasjeda i smjer klizanja duž tih rasjeda predstavljaju važan izvor informacija o naprezanju te njihovim prostornim i bočnim varijacijama unutar Zemljine kore.

Upravo zbog navedenih razloga vrlo je važno precizno lociranje potresa i dobra procjena potresnog hazarda. Obzirom da se utjecaj potresa može proširiti na velike udaljenosti od samog seizmičkog izvora, važno je dobro poznavanje geologije navedenoga

područja, njegove potresne povijesti, seizmotektonike te imati što detaljniju bazu podataka kako o samim zapisima potresa, tako i o svim podacima u vezi njih (lokacije, magnitude, intenziteti...).

2.3. Automatska detekcija i lociranje potresa

Velika količina energije oslobođena tijekom potresa može dovesti do značajnog gubitka ljudskih života i velike materijalne štete. Situacija se dodatno pogoršava ukoliko se potres dogodi na malim dubinama što rezultira većim intenzitetom i većom destruktivnošću (TAREEN i sur., 2019). Pojavu potresa kontinuirano prati globalna mreža od nekoliko tisuća seizmičkih postaja opremljenih visokoosjetljivim digitalnim seizmometrima. Postoje dva glavna načina lociranja potresa (KARAMZADEH i sur., 2012):

1. ručnim pregledom podataka od strane seizmologa te
2. automatskom metodom detekcije koja koristi računalni algoritam za analizu zapisa pomaka tla.

Uvođenjem digitalnog prikupljanja seizmičkih podataka, dugotrajno ručno i kontinuirano snimanje i arhiviranje seizmičkih signala postao je zahtjevan tehnički problem. Seizmička mreža ili jedna seizmička postaja koja neprestano radi na visokoj frekvenciji uzrokovanja, proizvodi ogromnu količinu podataka koje je vrlo često teško lokalno pohraniti i analizirati. Upravo je navedeno utjecalo na pojavu i daljnji razvoj automatske detekcije, prikupljanja i analize seizmičkih podataka (TRNKOCZY, 1999). Automatskom detekcijom seizmička postaja ili seizmička mreža obrađuje sve dolazne seizmičke signale u stvarnom vremenu. Prilikom automatske detekcije, koristi se softver za obradu podataka, odnosno algoritam za detekciju tipičnih seizmičkih signala (potresi, seizmički signali iz kontroliranih izvora, signali nuklearnih podzemnih eksplozija, itd.) u stalnom prisutnom signalu seizmičke buke. Nakon otkrivanja pretpostavljenog seizmičkog događaja, započinje snimanje i pohranjivanje svih dolaznih signala, a zaustavlja se nakon što algoritam proglašuje kraj seizmičkog signala (TRNKOCZY, 1999). Trenutno je poznato da se koristi nekoliko takvih algoritama – od vrlo jednostavnog okidača (engl. *trigger*) praga amplitude, pa sve do sofisticiranog prepoznavanja uzoraka, adaptivnih metoda i neuronskih mreža. Mnogi od ovih algoritama funkcioniraju zajedno s algoritmima za određivanje vremena dolaska P i S valova. Najjednostavniji algoritam „okidanja“ odnosi se na okidač praga amplitude koji jednostavno detektira bilo koju amplitudu seizmičkog signala, koji prelazi unaprijed

postavljeni prag. Navedeni algoritam vrlo se rijetko koristi u istraživanjima potresa malih i vrlo malih magnituda. Međutim, predstavlja standardni seizmički alat za istraživanje potresa većih magnituda, odnosno u sustavima gdje visoka osjetljivost ne predstavlja problem i gdje su, posljedično, amplitude šuma uzrokovane ljudskim djelovanjem zanemarive.

Nadalje, okidač praga RMS ili srednje kvadratne vrijednosti (engl. *root mean square*) vrlo je sličan algoritmu praga amplitude, osim što se koriste RMS vrijednosti amplitude u kratkom vremenskom prozoru umjesto „trenutne“ amplitude signala. Ovaj algoritam manje je osjetljiv na seizmičku buku koja je uzrokovana ljudskim djelovanjem (TRNKOCZY, 1999).

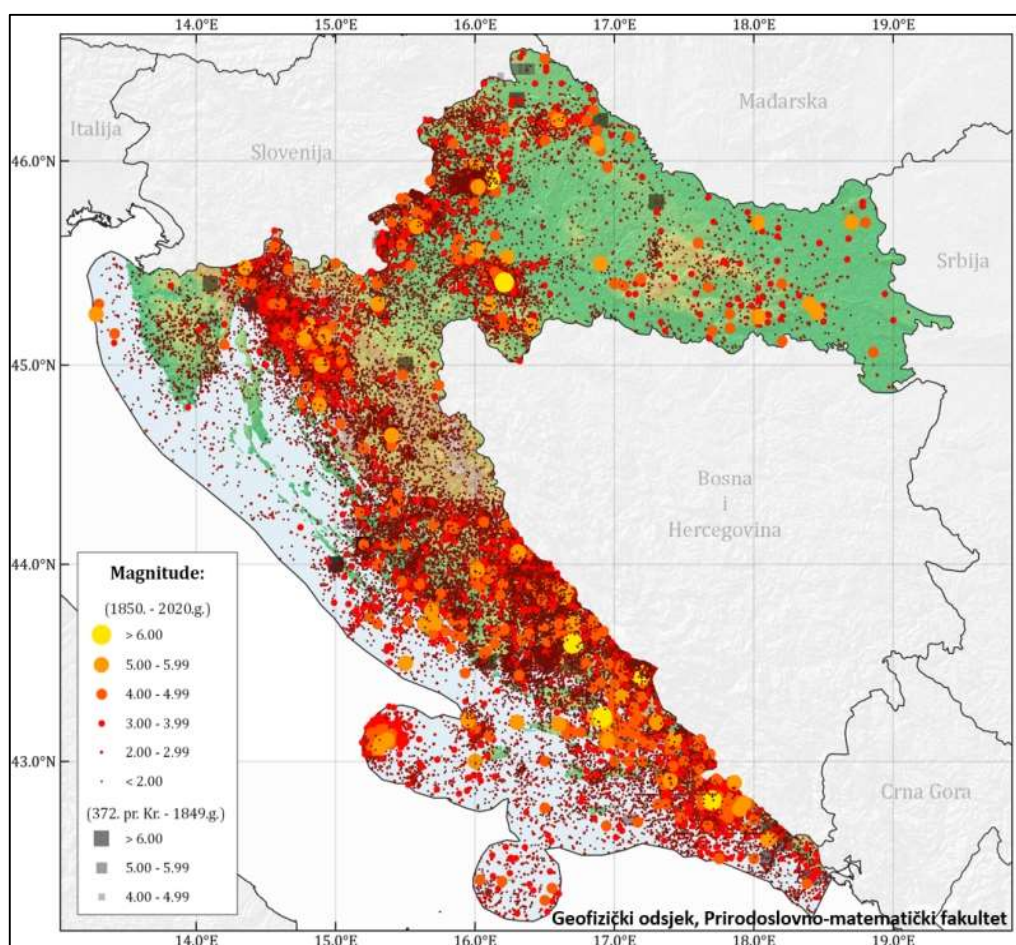
Danas se najčešće koristi okidač kratkoročnog prosjeka (engl. *Short Term Average*) u odnosu na dugoročni prosjek (engl. *Long Term Average*) (STA/LTA) (KARAMZADEH i sur., 2012). Osnova navedene metode su dva vremenska prozora koja oba izračunavaju prosječnu amplitudu signala – jednu s kratkim trajanjem i drugu s dugim trajanjem. Amplituda s dugim trajanjem predstavlja stabilnu razinu seizmičkih šumova, dok amplituda s kratkim trajanjem brzo poraste na početku seizmičkog signala. Nadalje, signal se često filtrira u pojasu kako bi se smanjila okolna buka. Potres je otkriven kada STA/LTA prijeđe unaprijed definiranu razinu praga. Postoje tri osnovna parametra navedene metode za STA/LTA automatsku detekciju koji se odnose na: pojasni filter, trajanje STA i LTA, te STA/LTA razina praga. Okidač STA/LTA obično se koristi u aplikacijama i bazama podataka s potresima malih i vrlo malih magnituda, koje pokušavaju zabilježiti što je više moguće seizmičkih događaja. To je gotovo standardni algoritam „okidanja“ u prijenosnim seizmičkim instrumentima, kao i u brojnim softverskim paketima za obradu seizmičkih signala u stvarnom vremenu. STA/LTA okidač značajno poboljšava bilježenje i detekciju potresa slabijih intenziteta te istovremeno smanjuje broj lažnih zapisa izazvanih prirodnim ili umjetnim seizmičkim šumovima. Također, navedeni algoritam u određenoj mjeri omogućuje razlikovanje različitih vrsta potresa. Nedostatak ove metode je da se aktivira sa svakim podrhtavanjem tla koje prelazi unaprijed definiranu razinu praga. Dakle, ukoliko je razina praga stavljena na nisku razinu za detekciju potresa, brojne detekcije odnosit će se na buku ili lažne signale, koji će dovesti do obrade dodatnih nepotrebnih podataka. Ipak, ukoliko se prag postavi na višu razinu, možda se neki važni potresi neće detektirati. U brojnim seizmičkim mrežama, automatska detekcija radi s niskom razinom praga STA/LTA kako bi se izbjegle naknadne ručne obrade detektiranih signala. Pri tome je detekcija potresa

valjana samo ukoliko je signal detektiran i na nizu drugih seizmoloških postaja unutar unaprijed definiranog vremenskog okvira. U suprotnom se detekcija zanemaruje kao seizmička buka. Međutim, kako bi se mogao upotrebljavati navedeni kriterij za detekciju potresa mreža mora uključivati velik broj seizmičkih postaja udaljenih manje od 100 km jedna od druge (KARAMZADEH i sur., 2012). Ukoliko su seizmičke postaje udaljene jedna od druge više od 100 km, primjenjuje se automatska metoda kratkotrajne Fourierove transformacije podataka (GIBBONS i sur., 2008).

U posljednjim desetljećima razvijeno je nekoliko metoda i programa za automatsko prikupljanje podataka i lociranje potresa s krajnjim ciljem implementacije algoritama prikupljanja podataka, čiji su rezultati usporedivi s podacima dobivenim ručnim prikupljanjem (ROMERO i sur., 2016). Jedan od navedenih programa je i SEISAN, sustav za seizmičku analizu koji predstavlja jednostavnu bazu podataka i kompletan skup programa za analizu potresa iz analognih i digitalnih podataka (OTTEMÖLLER i sur., 2013). Više informacija o načinima automatske detekcije potresa uz pomoć SEISAN baze podataka prikazat će se u istraživačkom dijelu rada.

3. Pregled dosadašnjih istraživanja

Grad Zagreb i šire zagrebačko područje zanimljivo je zbog svojih geoloških karakteristika te seizmo-tektonske aktivnosti. Sukladno navedenome, na slici 5 prikazani su epicentri potresa do 2020. godine prema podacima o potresima na temelju Hrvatskog kataloga potresa (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a) koji ukazuju na pojačanu seizmičku aktivnost navedenog područja.



Slika 5. Epicentri potresa na području Hrvatske od 372. pr. Kr. do 2020. godine prema Hrvatskom katalogu potresa (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a)

Kako se podaci o potresima na širem zagrebačkom području mogu prilično precizno pratiti od 16. stoljeća, tijekom posljednjih dvadesetak godina provedena su brojna istraživanja na navedenu temu. Vrlo značajno istraživanje proveli su Kuk i sur. (2000.) koji u svome radu opisuju seizmološke i seizmotektonske karakteristike zagrebačkog područja,

daju pregled potresnih aktivnosti tijekom povijesti, te manifestiranje potresa na zagrebačkom području.

Posljednji potres na području Grada Zagreba koji se dogodio 22. ožujka 2020. godine u 6:24 sati po lokalnom vremenu, magnitude $M_w = 5.5$ osjetio se na širem zagrebačkom području, sjevernoj Hrvatskoj, Sloveniji te Bosni i Hercegovini (DASOVIĆ i sur., 2020). Nakon razornog potresa iz 2020. godine na zagrebačkom području je provedeno nekoliko istraživanja vezana uz karakteristike zagrebačkog rasjednog sustava, seizmičku aktivnost te posljedice samog potresa.

Markušić i sur. (2020.) u svom radu opisuju oštećenja uzrokovana potresom, precizirajući karakteristike zgrada i njihovu korelaciju s lokalnim karakteristikama tla, odnosno pojačanim seizmičkim kretanjima. Također, procijenili su i ko-seizmički vertikalni pomak tla, a najugroženije područje identificirano je prema Sentinel-1 interferometrijskim podacima širokog pojasa. Na kraju, provedeno je preliminarno 3D strukturalno modeliranje niza potresa, a dva velika rasjeda modelirana su na osnovi lokacija hipocentara i njihovom vremenskom pojavljivanju. Prema procjenama seizmičkog pojačanja prvog reda na području Zagreba za potres $M_w 5.5$, pokazano je da su akceleracije tla od približno 0,16 - 0,19 g na čvrstoj stijeni pojačane najmanje dva puta na površini Zemlje. Također, promatranjem ko-seizmičke deformacije primijećeno je uzdizanje epicentralnog područja od gotovo 3 cm na području površine približno 20 km².

Atalić i sur. (2021.) objavili su istraživanje u kojem se istaknute glavne značajke zagrebačkog potresa, čiji se hipocentar nalazio unutar granica grada na dubini od 10 km, te je generirao vršnu akceleraciju veću od 0,2 g i maksimalnu spektralnu akceleraciju od oko 0,6 g na 0,1 s u povijesnom središtu grada. U svom radu, autori naglašavaju učinke razornog potresa s posebnim naglaskom na ekonomske troškove koji su potrebni za obnavljanje oštećenih zgrada i ostale infrastrukture u pogođenom području koji su procijenjeni na 10 milijardi eura. Isto tako, naglašavaju važnost značajki potresa kao osnovu za razumijevanje negativnih učinaka te identifikacije čimbenika i prepreka u procesu obnove koja još uvijek traje.

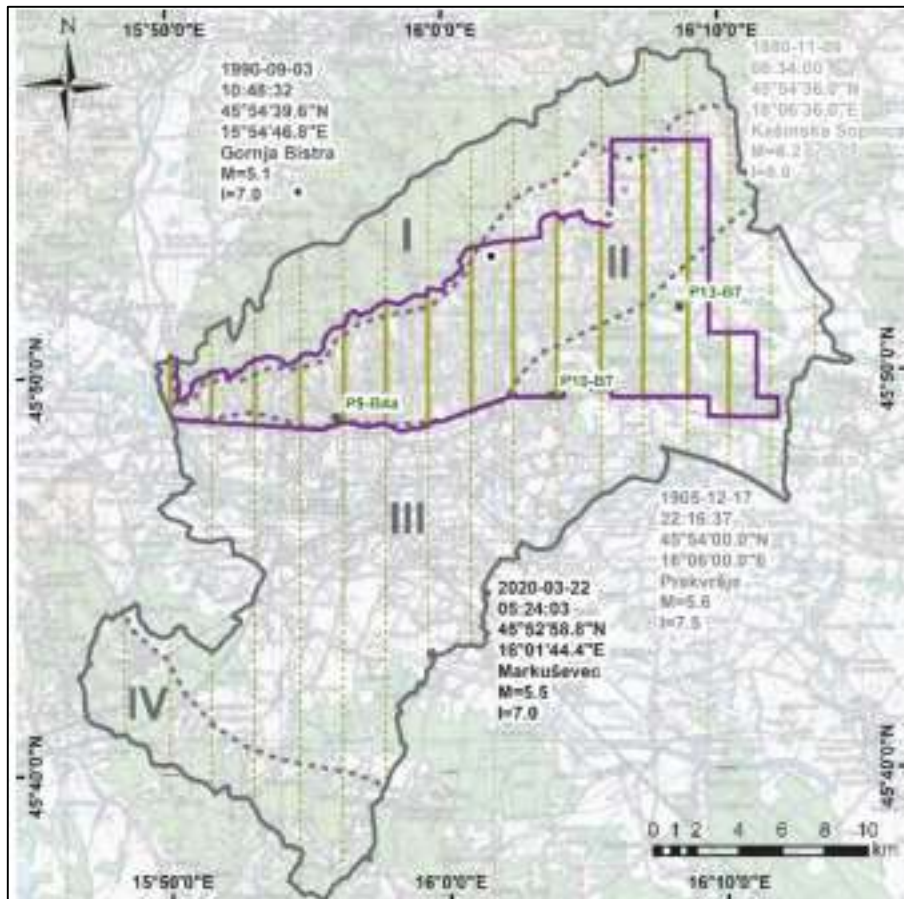
Nadalje, Herak i sur. (2021.) u svom radu proveli su analizu cjelogodišnjeg snimanja naknadnih potresa te njihova svojstva. U svrhu istraživanja, autori su koristili set od 3003 analiziranih i lociranih događaja iz prve godine slijeda naknadnih potresa, kako bi utvrdili opadanje stope naknadnih podrhtavanja, te saznali više informacija o njihovim žarišnim

mehanizmima, hipocentralnim lokacijama te magnitudnim distribucijama. Analizom je utvrđeno da su stope aktivnosti naknadnih potresa slijedile modificirani Omori zakon, a rješenja rasjedne razine za 10 događaja ukazale su na prevladavanje čistog rasjeda. Također, autori sugeriraju da je granični rasjed Sjeverne Medvednice bio uzročni rasjed, epicentralno područje bilo je trokutastog oblika, a hipocentri naknadnih potresa uglavnom su bili smješteni u visećem zidu rasjeda.

Dodatna vrlo značajna istraživanja proveli su Jakov Stanislav Uglešić i Iva Lončar za potrebe diplomskih radova. Uglešić (2021.) je proveo seizmičku analizu odziva tla za scenarij zagrebačkog potresa iz 2020. godine na profilima tla koji su dobiveni uz pomoć podataka iz seizmičke i geološke mikrozonacije dijela Zagreba, te dodatnim mjerenjima dobivenih višekanalnom analizom površinskih valova na tri profila. Uz pomoć provedenog istraživanja, autor je procijenio amplifikacijski faktor oko 2 za zagrebački potres Mw 5.5, vršnu akceleraciju tla od 0,35 g u epicentralnom području i 0,20 g na udaljenosti 12 km od epicentra potresa. Na temelju dobivenih rezultata, rad autora doprinosi boljem razumijevanju posljedica potresa iz 2020. godine u Zagrebu, te ukazuje na značajnost utjecaja karakteristika tla na štete uzrokovane potresom. Nadalje, u svom radu Lončar (2021.) analizira geodinamiku Zagrebačkog i Pokupskog rasjeda, odnosno dvije serije potresa koje su se dogodile tijekom 2020. godine u softveru MOVE uz pomoć IDW metode. Prva serija potresa započela je 22. ožujka 2020. godine na zagrebačkom području, a druga 28. prosinca 2020. godine na području Petrinje. Međutim, analiza je obuhvatila i naknadna podrhtavanja do 7. lipnja 2020. godine za područje Zagreba, odnosno do 14. veljače 2021. za područje Petrinje. Uz pomoć provedenog istraživanja autorica je razmatrala geologiju i seizmičnost navedenih područja te na temelju dobivenih podataka pokušala utvrditi da li su se u kasnijim fazama aktivirali ostali rasjedi ili manji fragmenti. Autorica je modelirane rasjede usporedila sa žarišnim mehanizmima naknadnog potresa najjačeg intenziteta te prodiskutirala geodinamiku istraživanih područja.

4. Istraživano područje

Zagrebačko područje relativno je veliko (slika 6) i obuhvaća oko 640 km², a broji preko 800.000 stanovnika (PADOVAN i sur., 2021). Grad Zagreb smješten je između južnih obronaka planine Medvednice te sjeverne i južne obale rijeke Save na nadmorskoj visini od oko 122 metra.

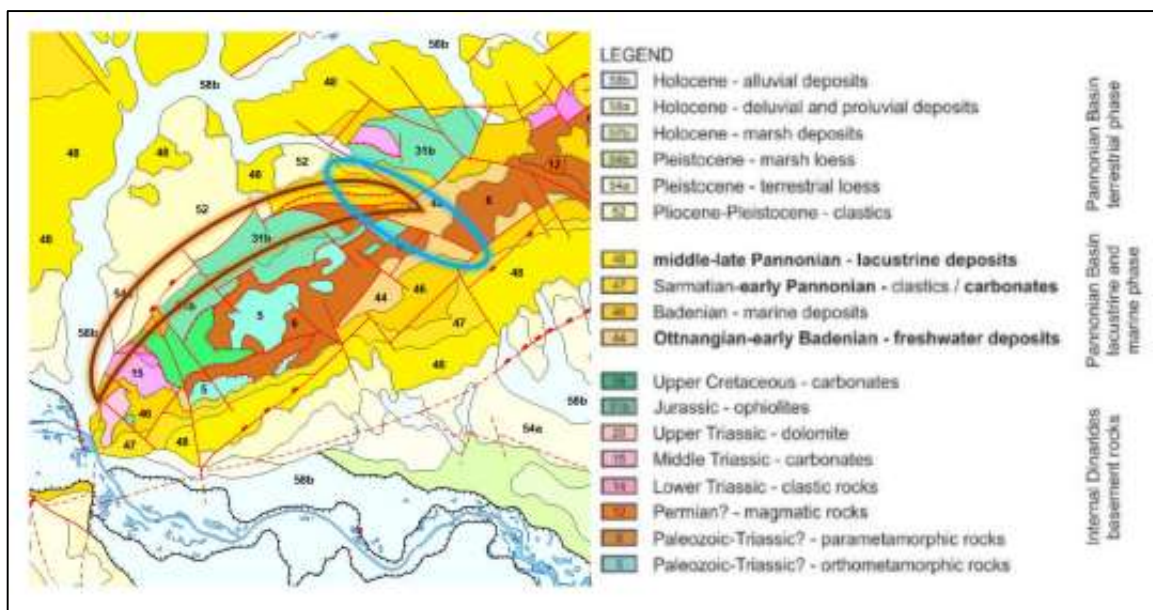


Slika 6. Karta zagrebačkog područja (zagrebačko područje sastoji se od četiri glavne geomorfološke jedinice: I – Planina Medvednica, II – Podsljemenska zona, tj. južna padina Medvednice, III – šire područje rijeke Save te IV – brdsko područje (Vukomeričke gorice). Ljubičasto označeno područje predstavlja područje seizmičkih istraživanja provedenih s ciljem mikrozonacije Grada, 14 žutih linija predstavlja poprečne presjeka u kojima su koncentrirana terenska mjerenja, a isprekidane žute linije preporučuju nastavak presjeka za cijelo zagrebačko područje. Na karti su označene lokacije četiri glavna potresa iz 1880. (svijetlo sivi tekst), 1905. (sivo), 1990. (tamno sivo) i 2020. (crno) godine (PADOVAN i sur., 2021)

4.1. Geološke karakteristike zagrebačkog rasjednog sustava

Šire zagrebačko područje karakteriziraju vrlo varijabilna litologija, pedološka obilježja i iskorištenost zemljišta te seizmička aktivnost (NAKIĆ i sur., 2013). Najstarije stijene na zagrebačkom području su paleozojske metamorfne stijene, odnosno škriljevci, mramorni vapnenci, filiti i sl., te dolomiti trijasko starosti. Međutim, dolomiti su dominantniji sjeverno od istraživačkog područja. Na južnim padinama Medvednice vrlo česti su miocenski sedimenti koji su zastupljeni u različitim laporima, vapnencima, glini te pijesku. Na ovom području česta su klizišta lapora, silta i gline. Kvarterni sedimenti uglavnom su zastupljeni pijescima i šljuncima s glinom i siltovima u različitim omjerima. Omjeri materijala mogu varirati i bočno i okomito tako da raspodjela veličine čestica, sukladno tome, može varirati u širokom rasponu. Nadalje, u glinama i muljevima mogu se pojaviti klizišta na padinama, dok su prema jugu navedeni sedimenti aluvijalni, odnosno rijeka Sava diktira njihovo ponašanje (PADOVAN i sur., 2021).

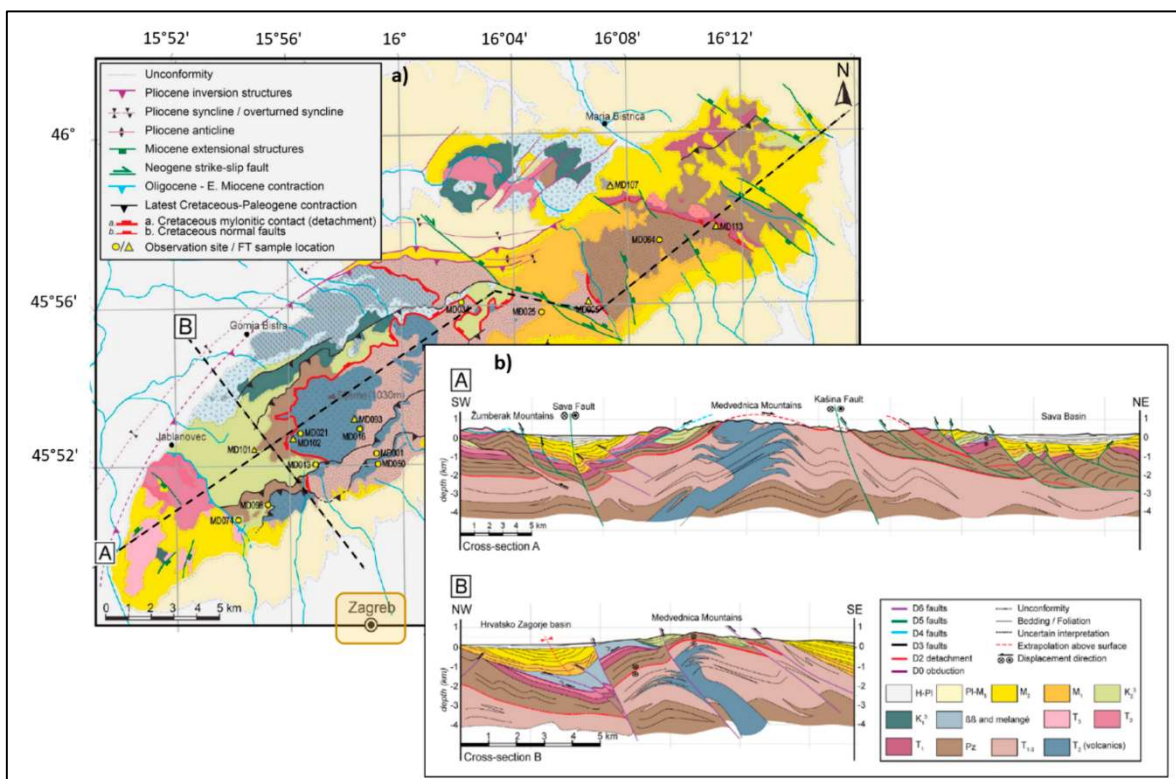
Središnjim dijelom zagrebačkog područja prevladava planina Medvednica, panonski inselberg, koja se nalazi na granici tri geotektonski zanimljive regije: Panonski bazen na istoku, Alpe na sjeverozapadu te Dinaridi na jugu gdje se uočavaju kinematičke interakcije susjednih orogena – Alpa i Dinarida (MARKUŠIĆ i sur., 2020). Alpe i Dinaridi predstavljaju orogene s različitim subdukcijskim polaritetima – gornja ploča Adria u Alpama i donja ploča Adria u Dinaridima. Ovakav složeni tektonski režim u prijelaznom području između jugoistočnih Alpa, sjeverozapadnih Dinarida i mega jedinice Tisza Panonskog bazena rezultat je interakcija tektonskih blokova gornje gore nastalih tijekom mezozojske i kenozojske evolucije područja (TOMLJENOVIĆ i sur., 2008). Zbog kontakta navedene dvije regije, vjeruje se kako je područje Medvednice ispucalo i prožeto brojnim, većim ili manjim rasjedima (fragmentima). Trenutni položaj Medvednice može se objasniti pomakom prema istoku i rotacijom tektonskog bloka Medvednice i lokalnih inselbergova za oko 130° u smjeru kazaljke na satu u razdoblju od najnovijeg paleogena do najranijeg neogena (MARKUŠIĆ i sur., 2020). Kao što je već navedeno, obzirom da se Medvednica nalazi na području različitih subdukcijskih polariteta, rasjedni sustav zagrebačkog područja prilično je kompleksan.



Slika 7. Geološka karta Medvednice. Smeđa boja predstavlja uokvireni sustav Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda, a plavo uokvireni sustav Kašinskog rasjeda (KOVAČIĆ i sur., 2016)

Kao što je prikazano na slici 7, geološka struktura Medvednice vrlo je raznolika. Brojevima 5 i 6 prikazane su paleozojske stijene, odnosno stijene metamorfnog kompleksa jezgre Medvednice (KOVAČIĆ i sur., 2006). Navedene paleozojske stijene na površini izdaju pri samom vrhu Medvednice i prate njezin hrbat. Na nižim dijelovima, starije i čvršće stijene sežu u dubinu, a prekrivaju ih mlađe, sedimentne i magmatske stijene iz mezozojskog i neogenskog doba. Nadalje, rubni dijelovi Medvednice, prema dolinama Krapine na sjeveru i rijeke Save na jugu, prekriveni su najmlađim pleistocenskim i aluvijalnim naslagama. Zbog svoje složene tektonske povijesti, Medvednica je prožeta brojnim rasjedima, odnosno fragmentima od kojih je najznačajniji i još uvijek aktivan sustav Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda (slika 7, uokvireno smeđe). Tirkiznom bojom (31b) označene su jurske ofiolitne naslage debele oko sto metara ispod kojih se nalazi jezgra paleozojskih čvrstih stijena. Navedene naslage sastavljene su od raznovrsnih sedimentnih stijena i vulkanita koje karakterizira elastičnost zbog koje ne pucaju prilikom rasjednih deformacija. Time se može objasniti postojanje isključivo slijepih rasjeda, odnosno onih rasjeda koji nemaju površinske manifestacije (KOVAČIĆ i sur., 2016). Na slici 7, brojevima 44, 46, 47 i 48 označene su puno mlađe, miocenske naslage čiji se postanak veže uz formiranje i razvoj Panonskog bazena. Miocenske naslage sastavljene su pretežito od raznovrsnih klastičnih sedimenata i lapora, a manjim dijelom od vapnenca. Navedene naslage koje se nalaze bliže jezgri Medvednice isklinjavaju, a debljina im raste prema rubnim

dijelovima gdje doseže i do nekoliko stotina metara. U najnižim rubnim dijelovima Medvednice, miocenske naslage prekrivene su najmlađim kvartarnim sedimentima pleistocenske (slika 7, broj 52) i holocenske starosti (slika 7, brojevi 54a i 58b). Plavom bojom uokvireno je područje Kašinskog rasjeda, gdje je vidljiv diskontinuitet površinskog rasprostiranja paleozojskih stijena koji ukazuje na desni rasjedni pomak. Kako je već navedeno, područje Medvednice smješteno je između Alpa i Dinarida te, stoga, ima složenu dvojaku tektonsku povijest.



Slika 8. Geološka karta Medvednice (MARKUŠIĆ i sur., 2020)

Na slici 8a. prikazana je geološka karta Medvednice (MARKUŠIĆ i sur., 2020), a na slici 8b. prikazan je položaj presjeka A i B, odnosno poprečni presjeci preko Medvednice: (A) uzdužni (JZ - SI) i (B) poprečni (SZ - JI). Najnoviju tektonsku fazu tektonske evolucije Medvednice karakterizira sustav pliocenskih do kvartarnih reverznih rasjeda jugoistočnog pada (rasjed D6 na slici 8b). Glavni rasjed Sjeverne Medvednice glavni je rasjed sustava i vjerojatno je još uvijek aktivan.

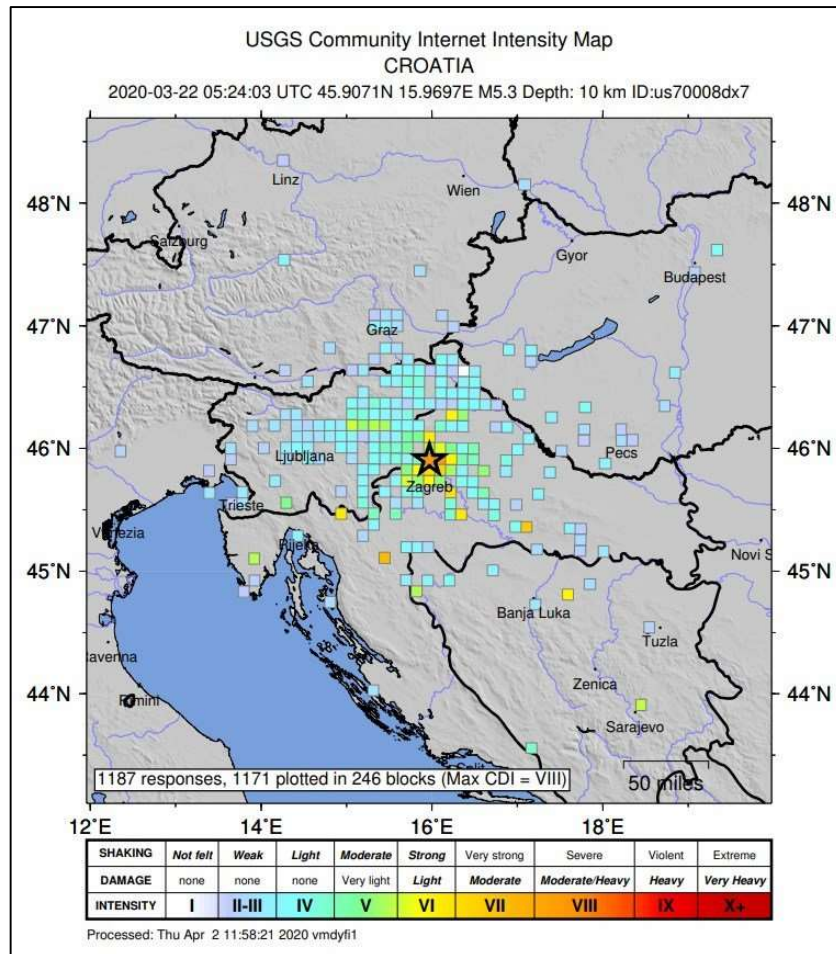
4.2. Seizmičke karakteristike zagrebačkog područja

Istraživano područje pripada seizmotektonski aktivnom području na što ponajviše utječe položaj grada Zagreba i Medvednice. Koncentracije i učestalo pojavljivanje potresa izdvajaju zapadni rubni dio Panonskog bazena čijom se granicom pruža Žumberačko-medvednički rasjed duljine oko 100 kilometara, orijentacije SI - JZ (KUK i sur., 2002).

Prema dostupnim povijesnim podacima, zagrebačko područje bilo je izloženo većem broju potresa tijekom posljednjih nekoliko stoljeća (KUK i sur., 2002). Međutim, najznačajniji potres dogodio se 1880. godine, procijenjene magnitude od M_w 6,3 koji je ošteti brojne građevine, ali i prouzročio smrt dvoje ljudi. Hipocentar ovog potresa nalazio se u Medvednici, pokraj mjesta Kašina i Planina. Nakon tog potresa, započela su značajnija seizmička istraživanja i sistemska proučavanja potresa na zagrebačkom području (HERAK i sur., 1996). Nakon *Velikog zagrebačkog potresa* iz 1880. godine, dogodilo se još nekoliko značajnijih potresa tijekom 20. stoljeća. Jaki potres magnitude 4,6 s epicentrom u Šestinama dogodio se 17. prosinca 1901. godine. Također, na gotovo identičnim mjestima dogodila su se još dva jača potresa: 17. prosinca 1905. godine te 2. siječnja 1906. godine (MARKUŠIĆ i sur., 2020). Sagledavanjem relativno nedavne seizmičke aktivnosti na zagrebačkom području, potres najjačeg intenziteta dogodio se 3. rujna 1990. godine s epicentrom kod Kraljevog Vrha, magnitude 5,0. Osim u navedenom epicentralnom području, potres je prouzročio manja oštećenja u zapadnim dijelovima grada Zagreba.

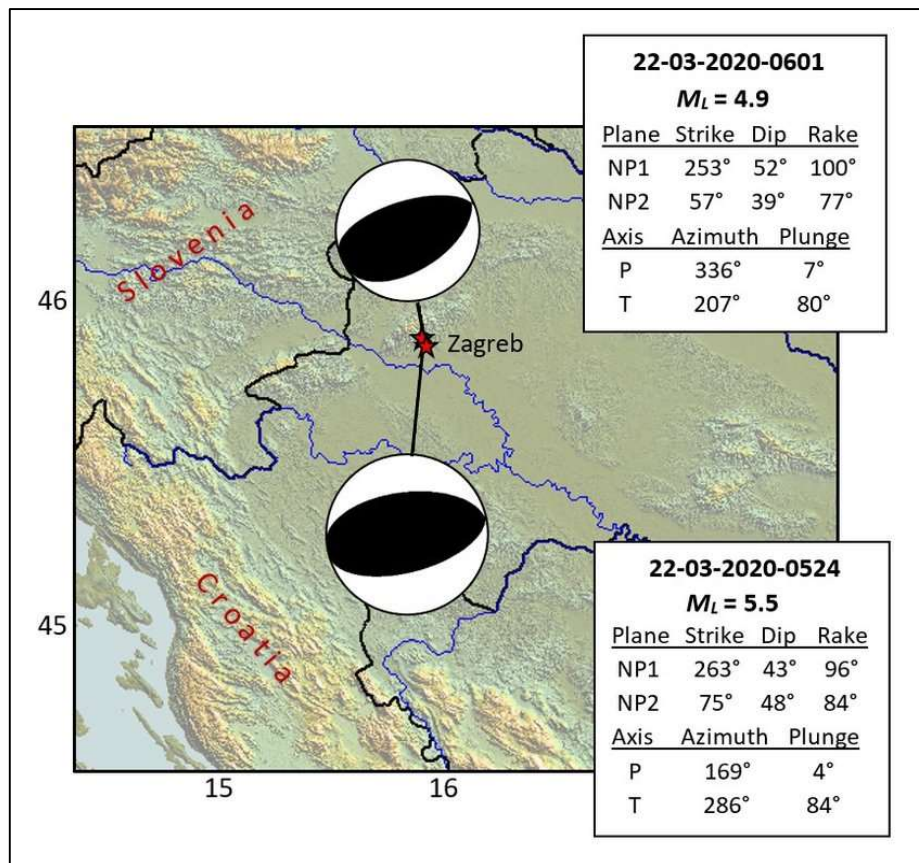
Posljednji značajni potres nakon *Velikog zagrebačkog potresa* iz 1880. godine, dogodio se 22. ožujka 2020. godine u 06:24 sati prema lokalnom vremenu. Epicentar potresa bio je 7 kilometara sjeverno od središta grada Zagreba u blizini Markuševca i Čučerja, a hipocentar je bio na dubini od oko 10 kilometara (MARKUŠIĆ i sur., 2020). Potres magnitude $M_L=5,5$ prema Richteru osjetio se maksimalnim intenzitetom od VII - VIII °MSC. Potres se osjetio diljem Hrvatske, pa čak i na udaljenostima većim od 1000 kilometara od epicentra potresa na području Slovenije, Bosne i Hercegovine, Srbije, Austrije, Italije, ali i Češke (slika 9).

Drugi jaki potres 22. ožujka 2020. godine jačine $M_L=4,9$ dogodio se u 07:01 sati, a treći potres jačine $M_L=3,7$ zabilježen je u 07:41 sati prema lokalnom vremenu. Nakon glavnog potresa koji je pogodio zagrebačko područje toga dana, u nešto više od 24 sata na području grada Zagreba dogodilo se 57 potresa magnitude veće ili jednake 2,0 (MARKUŠIĆ i sur., 2020).



Slika 9. Karta intenziteta zagrebačkog potresa 22. ožujka 2020. godine prema USGS (MARKUŠIĆ i sur., 2020)

Obzirom da je zagrebački potres 22. ožujka 2020. godine izazvao puno veću štetu na građevinama i infrastrukturi nego što je očekivano za potres tog intenziteta, provedeno je dodatno istraživanje te su izračunati žarišni mehanizmi glavnog potresa i najjačeg naknadnog potresa. Žarišne mehanizme potresa moguće je odrediti temeljem razmatranja predznaka prvih nailazaka P valova na seizmičke postaje pomoću modela dvostrukog para sila u žarištu (LONČAR, 2021). Žarišne mehanizme moguće je, za sada, izračunavati samo za potrese jačih intenziteta jer metoda izračuna podrazumijeva jasno prepoznavanje prvog nailaska P vala. Rezultat određivanja žarišnog mehanizma predstavljaju dvije konjugirane međusobno okomite rasjedne plohe prikazane na žarišnoj sferi (slika 10). Rasjedne plohe obično su prikazane na donjoj hemisferi.



Slika 10. Žarišni mehanizmi dva najjača zagrebačka potresa 22. ožujka 2020. (MARKUŠIĆ i sur., 2020)

Interpretacija rasjedne ravnine glavnog udara pokazuje da se potres dogodio na reversnom rasjedu čija rasjedna ploha pada pod kutom od 43° prema jugoistoku ili pod kutom od 48° na sjever-sjeverozapad. Os najvećeg tektonskog tlaka (P) bila je horizontalna, u smjeru JJI - SSZ, dok je os najvećeg napreznja (T) bila gotovo okomita. Obzirom na dobivene podatke, može se zaključiti kako su se oba potresa najjačeg intenziteta dogodila na rasjedu/rasjedima nagnutima prema jug-jugoistoku.

U zagrebačkom potresu iz 2020. godine oštećen je niz povijesnih i kulturnih građevina koje uključuju i Zagrebačku katedralu, zgradu Rektorata i Banske dvore te više od 26 000 stambenih objekata i spomenika od kojih je oko 1900 ostalo neupotrebljivo. Također, većina građevina sagrađenih početkom 19. stoljeća u samom centru grada Zagreba pretrpila je znatna oštećenja.

5. Podaci i metode istraživanja

Cilj ovog rada bio je ispitati mogućnosti automatske detekcije i analize zagrebačke serije potresa iz 2020. godine.

Dosadašnji preliminarni rezultati analize zagrebačke serije potresa iz 2020. godine ostvareni su ručnom obradom podataka. Takva obrada zahtijeva dugotrajan rad da bi se uspješno obradila velika količina podataka dobivena u periodu od više mjeseci nakon glavnog potresa. Automatska detekcija i lociranje potresa iz postojećih zapisa sa seizmoloških postaja uvelike bi ubrzalo i olakšalo ovaj proces. U tu svrhu odabran je softverski paket SEISAN Earthquake Analysis Software. SEISAN je softverski paket s nizom programa koji omogućuju analizu lokalnih i udaljenih potresa iz analognih i digitalnih zapisa. Sustav za seizmičku analizu omogućuje ručnu i automatsku obradu podataka sa seizmograma, a funkcionira na principu odgovarajuće baze podataka. Baza podataka služi kao „spremište“ detektiranih potresa u obliku individualnih zapisa, pomoću koje je potom moguća daljnja manipulacija istima (HAVSKOV i sur., 2020). Uz pomoć programa za pretraživanje moguće je koristiti različite kriterije za pretraživanje baze podataka za određene događaje, ali i pretraživati bazu bez izdvajanja konkretnih događaja. Većina programa može funkcionirati na konvencionalni način, odnosno upotrebom jedne datoteke s mnogo događaja ili na način baze podataka. Dodatno, SEISAN sadrži i određene programe integrirano-istraživačkog tipa, poput primjerice programa Coda Q, sintetičko modeliranje, ali i kompletan sustav za proračun seizmičkog hazarda (HAVSKOV i sur., 2020). SEISAN softverski paket moguće je instalirati na operativnim sustavima Linux, MacOS te Windows. Programi softverskog paketa mogu se izvršiti iz grafičkog sučelja (slika 11) ili putem terminala (slika 12).

| Row | Ac | Date and Time | Lat | Lon | Dep | Mod | Ag | RMS | Gap | ELat | ELon | EDep | DI | EI | MInt | NSL | M | MW | ML | MN |
|-----|-----|------------------------|---------|---------|------|-----|-----|-------|-----|-------|-------|-------|----|----|------|-----|-----|----|----|----|
| 1 | LOC | 2020-03-22 05:24:02.10 | 45.8380 | 16.0460 | 8.5 | | CRO | 0.60 | 76 | 2.7 | 3.8 | 7.6 | L | | | 18 | 3.1 | | | |
| 2 | LOC | 2020-03-22 05:35:36.80 | 45.8850 | 16.0480 | 11.0 | | CRO | 0.60 | 126 | 3.2 | 4.9 | 7.5 | L | | | 6 | 1.1 | | | |
| 3 | LOC | 2020-03-22 05:35:36.00 | 45.9090 | 15.9680 | 0.0 | | CRO | 1.40 | 188 | 11.1 | 48.2 | 24.8 | L | | | 5 | 1.2 | | | |
| 4 | LOC | 2020-03-22 05:41:32.50 | 45.9070 | 16.0050 | 0.0 | | CRO | 1.30 | 135 | 6.5 | 11.9 | 26.2 | L | | | 6 | 1.2 | | | |
| 5 | LOC | 2020-03-22 05:46:34.70 | 45.8760 | 16.0390 | 15.5 | | CRO | 1.20 | 69 | 8.6 | 11.0 | 7.7 | L | | | 11 | 0.9 | | | |
| 6 | LOC | 2020-03-22 05:53:30.50 | 45.8850 | 16.0280 | 14.5 | | CRO | 0.90 | 69 | 4.3 | 5.5 | 5.1 | L | | | 14 | 1.0 | | | |
| 7 | LOC | 2020-03-22 05:56:23.60 | 45.8990 | 16.0240 | 0.2 | | CRO | 1.40 | 112 | 17.0 | 31.6 | 86.9 | L | | | 5 | 0.2 | | | |
| 8 | LOC | 2020-03-22 06:01:19.10 | 45.8470 | 16.0580 | 10.0 | | CRO | 0.70 | 72 | 3.1 | 3.7 | 3.6 | L | | | 18 | 3.0 | | | |
| 9 | LOC | 2020-03-22 06:06:18.00 | 45.9410 | 15.9220 | 22.9 | | CRO | 0.40 | 161 | 5.4 | 8.8 | 5.4 | L | | | 9 | 0.8 | | | |
| 10 | LOC | 2020-03-22 06:06:17.80 | 45.8740 | 16.0550 | 8.3 | | CRO | 0.60 | 116 | 4.1 | 8.9 | 5.3 | L | | | 8 | 1.0 | | | |
| 11 | LOC | 2020-03-22 06:16:21.30 | 45.8900 | 16.1320 | 0.0 | | CRO | 0.60 | 132 | 4.2 | 4.0 | 14.3 | L | | | 6 | 0.4 | | | |
| 12 | UP | 2020-03-22 06:22:26.60 | 45.9880 | 16.0040 | 0.0 | | BER | 55.90 | 306 | 999.9 | 999.9 | 999.9 | L | | | 7 | | | | |
| 13 | LOC | 2020-03-22 06:31:55.20 | 45.8640 | 15.9120 | 1.9 | | CRO | 1.10 | 149 | 7.6 | 14.0 | 16.1 | L | | | 8 | 0.7 | | | |
| 14 | LOC | 2020-03-22 06:36:08.60 | 45.8040 | 15.5520 | 5.8 | | CRO | 1.60 | 192 | 636.9 | 286.4 | 369.1 | L | | | 3 | 0.9 | | | |
| 15 | LOC | 2020-03-22 06:41:04.70 | 45.8770 | 16.0370 | 11.0 | | CRO | 0.70 | 63 | 3.7 | 4.7 | 3.7 | L | | | 19 | 2.3 | | | |
| 16 | LOC | 2020-03-22 06:44:56.90 | 45.8740 | 15.8660 | 11.6 | | CRO | 0.60 | 267 | 9.3 | 19.3 | 7.4 | L | | | 4 | | | | |
| 17 | LOC | 2020-03-22 06:53:34.10 | 45.9530 | 17.7300 | 0.0 | | CRO | 21.30 | 251 | 383.7 | 492.5 | 470.1 | L | | | 12 | 0.8 | | | |
| 18 | LOC | 2020-03-22 06:54:04.20 | 45.8980 | 16.0510 | 4.0 | | CRO | 0.40 | 107 | 4.4 | 6.3 | 8.5 | L | | | 6 | 1.0 | | | |
| 19 | LOC | 2020-03-22 07:11:12.30 | 45.8780 | 16.0120 | 15.4 | | CRO | 2.90 | 77 | 12.3 | 19.6 | 12.5 | L | | | 12 | 1.3 | | | |
| 20 | LOC | 2020-03-22 07:13:02.30 | 45.8950 | 16.0320 | 5.1 | | CRO | 0.70 | 86 | 3.9 | 5.9 | 7.7 | L | | | 6 | 0.2 | | | |
| 21 | LOC | 2020-03-22 07:16:25.10 | 45.8840 | 16.0230 | 14.9 | | CRO | 0.70 | 111 | 2.5 | 4.6 | 5.2 | L | | | 8 | 0.9 | | | |
| 22 | LOC | 2020-03-22 07:16:25.90 | 45.8470 | 15.9570 | 8.1 | | CRO | 1.60 | 131 | 11.0 | 20.0 | 15.5 | L | | | 9 | 0.9 | | | |
| 23 | LOC | 2020-03-22 07:37:10.60 | 45.9420 | 16.0430 | 10.0 | | CRO | 1.40 | 128 | 7.4 | 13.3 | 12.8 | L | | | 11 | 0.4 | | | |
| 24 | LOC | 2020-03-22 07:49:14.20 | 45.8380 | 16.0510 | 2.2 | | CRO | 1.50 | 127 | 15.9 | 14.0 | 30.6 | L | | | 6 | 1.1 | | | |
| 25 | LOC | 2020-03-22 08:04:00.60 | 45.8890 | 16.0080 | 10.8 | | CRO | 1.00 | 69 | 5.5 | 8.0 | 4.2 | L | | | 18 | 0.8 | | | |
| 26 | LOC | 2020-03-22 08:04:00.70 | 45.8720 | 16.0380 | 12.7 | | CRO | 0.90 | 70 | 5.9 | 7.1 | 6.8 | L | | | 18 | 2.2 | | | |
| 27 | LOC | 2020-03-22 08:04:00.70 | 45.8730 | 16.0330 | 12.9 | | CRO | 0.80 | 70 | 5.5 | 6.9 | 5.4 | L | | | 18 | 2.2 | | | |
| 28 | LOC | 2020-03-22 08:26:54.00 | 45.9120 | 15.9910 | 4.8 | | CRO | 0.90 | 120 | 6.0 | 9.4 | 10.1 | L | | | 6 | 0.9 | | | |
| 29 | LOC | 2020-03-22 08:42:48.50 | 45.8950 | 16.0110 | 12.7 | | CRO | 0.80 | 76 | 4.7 | 5.8 | 4.5 | L | | | 10 | 1.4 | | | |
| 30 | LOC | 2020-03-22 08:42:48.40 | 45.8970 | 16.0040 | 10.0 | | CRO | 0.70 | 78 | 3.7 | 6.3 | 4.8 | L | | | 10 | 1.3 | | | |
| 31 | LOC | 2020-03-22 08:57:01.70 | 45.8790 | 15.9720 | 8.0 | | CRO | 1.10 | 121 | 6.5 | 11.8 | 6.6 | L | | | 10 | 1.4 | | | |
| 32 | LOC | 2020-03-22 09:11:56.30 | 45.8570 | 16.0760 | 11.4 | | CRO | 0.70 | 64 | 2.8 | 5.0 | 4.4 | L | | | 17 | 2.3 | | | |
| 33 | LOC | 2020-03-22 09:14:07.70 | 45.9270 | 15.9640 | 10.9 | | CRO | 1.10 | 149 | 7.4 | 12.3 | 10.1 | L | | | 10 | 1.0 | | | |
| 34 | LOC | 2020-03-22 09:43:01.20 | 45.6140 | 15.4670 | 0.1 | | CRO | 3.30 | 335 | 265.4 | 222.0 | 63.2 | L | | | 4 | 1.2 | | | |

Slika 11. Grafičko sučelje SEISAN baze podataka

Ovdje je potrebno napomenuti kako je grafičko sučelje SEISAN baze podataka prilagođeno isključivo za Windows i Linux operativne sustave.

```

diplom - "C:\Seismo\WOR\diplom" - eev 20200322 baza2
C:\Seismo\WOR\diplom
λ eev 20200322 baza2

Give operator code, max 3 characters
m
2020 3 Reading events from base baza2 363
# 1 22 Mar 2020 01:24 15 L 46.874 10.065 12.9 31.4 BER 3 ?
# 2 22 Mar 2020 05:24 2 L 45.838 16.046 8.50 .60 3.1CCRO 18 ?
# 3 22 Mar 2020 05:35 36 L 45.885 16.048 11.0 .60 1.1CCRO 6 ?
# 4 22 Mar 2020 05:35 36 L 45.909 15.968 0.00 1.4 1.2CCRO 5 ?
# 5 22 Mar 2020 05:41 32 L 45.907 16.005 0.00 1.3 1.2CCRO 6 ?
# 6 22 Mar 2020 05:46 34 L 45.876 16.039 15.5 1.2 0.9CCRO 11 ?
# 7 22 Mar 2020 05:53 30 L 45.885 16.028 14.5 .90 1.0CCRO 14 ?
# 8 22 Mar 2020 05:56 23 L 45.899 16.024 0.20 1.4 0.2CCRO 5 ?
# 9 22 Mar 2020 06:01 19 L 45.847 16.058 10.0 .70 3.0CCRO 18 ?
# 10 22 Mar 2020 06:06 18 L 45.941 15.922 22.9 .40 0.8CCRO 9 ?
# 11 22 Mar 2020 06:06 17 L 45.874 16.055 8.30 .60 1.0CCRO 8 ?
# 12 22 Mar 2020 06:16 21 L 45.890 16.132 0.00 .60 0.4CCRO 6 ?
# 13 22 Mar 2020 06:22 26 L 45.988 16.004 0.00 55.9 BER 7 ?
# 14 22 Mar 2020 06:31 55 L 45.864 15.912 1.90 1.1 0.7CCRO 8 ?
# 15 22 Mar 2020 06:36 8 L 45.804 15.552 5.80 1.6 0.9CCRO 3 ?
# 16 22 Mar 2020 06:41 4 L 45.877 16.037 11.0 .70 2.3CCRO 19 ?
# 17 22 Mar 2020 06:44 56 L 45.874 15.866 11.6 .60 CRO 4 ?
# 18 22 Mar 2020 06:53 34 L 45.953 17.750 0.00 21.3 0.8CCRO 12 ?
# 19 22 Mar 2020 06:54 4 L 45.898 16.051 4.00 .40 1.0CCRO 6 ?
# 20 22 Mar 2020 07:11 12 L 45.878 16.012 15.4 2.9 1.3CCRO 12 ?
# 21 22 Mar 2020 07:13 2 L 45.895 16.032 5.10 .70 0.2CCRO 6 ?
# 22 22 Mar 2020 07:16 25 L 45.884 16.023 14.9 .70 0.9CCRO 8 ?
# 23 22 Mar 2020 07:16 25 L 45.847 15.957 8.10 1.6 0.9CCRO 9 ?
# 24 22 Mar 2020 07:37 10 L 45.942 16.043 10.0 1.4 0.4CCRO 11 ?
# 25 22 Mar 2020 07:49 14 L 45.838 16.051 2.20 1.5 1.1CCRO 6 ?
# 26 22 Mar 2020 08:04 0 L 45.889 16.008 10.8 1.0 0.8CCRO 18 ?

```

Slika 12. Rad u SEISAN bazi podataka uz pomoć terminala

Program u instalacijskom paketu sadržava i set testnih podataka (zapisi sa seizmoloških postaja, podaci o seizmološkim postajama, model strukture unutrašnjosti, datoteke s odzivima seizmometara) pomoću kojih je moguće testirati softverski paket prije prilagodbe za određenu geološku/geotektonsku regiju i seizmološku mrežu.

U sklopu ovog diplomskog rada fokus je bio na dvije rutine: a) automatskoj detekciji potresa na temelju zapisa s više seizmoloških postaja te b) automatskom izračunu rješenja lokacije s osnovnim parametrima potresa (horizontalnoj lokaciji, dubini te lokalnoj magnitudi).

5.1. Prilagodba podataka sa seizmoloških postaja

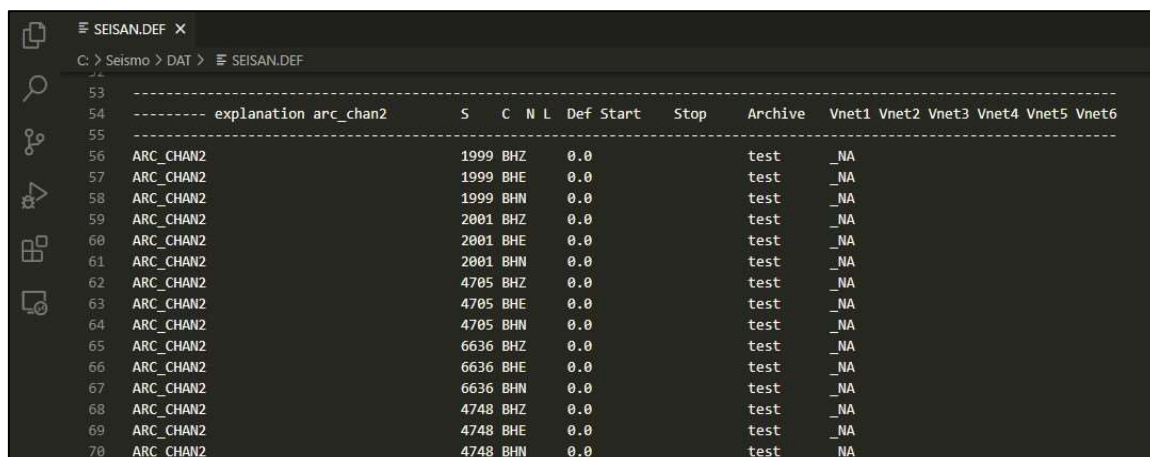
Podaci korišteni u sklopu ovog istraživanja dobiveni su u originalnom formatu zapisa sa seizmoloških postaja iz baze podataka Hrvatske seizmološke mreže. Radi se o satnim zapisima u Guralpovom .gcf formatu. Podaci su za potrebe istraživanja suženi na vremenski

period od 48 sati od glavnog potresa zagrebačke serije potresa iz 2020. godine, koji se dogodio u 5:24:02 UTC, 22. ožujka 2020. godine.

Obzirom da podaci iz hrvatske mreže seizmoloških postaja za promatrani period nisu pripremljeni za rad s rutinama, tj. s programima unutar softverskog paketa SEISAN, bilo ih je potrebno prvo prilagoditi u odgovarajući format.

SEISAN nudi nekoliko mogućnosti za rad s većom količinom podataka, a u ovom slučaju odabrana je opcija izrade BUD (engl. *Buffer of uniform data*) kontinuirane arhive podataka, pomoću koje je moguće manipulirati zapisima s više postaja za bilo koji trenutak unutar vremenskog raspona izrađene arhive. Kako bi se napravila takva arhiva, bilo je potrebno napraviti nekoliko manjih automatizacija obrade i pretvorbe podataka u odgovarajući format (mini-SEED), te onda i u samu arhivu. Da bi se to ostvarilo, napravljene su dvije skripte u programskom jeziku Python, koje su automatizirale pokretanje rutina pretvorbe i dodavanja u arhivu satnih zapisa sa seizmoloških postaja.

Nadalje, kako bi SEISAN mogao koristiti određenu kontinuiranu arhivu kao bazu za manipulaciju zapisima, potrebno je bilo prilagoditi parametre softverskog paketa kako bi program mogao prepoznati i učitati određenu arhivu, te postaje i kanale unutar same arhive (slika 13).



| 53 | ----- | ----- | S | C | N | L | Def | Start | Stop | Archive | Vnet1 | Vnet2 | Vnet3 | Vnet4 | Vnet5 | Vnet6 |
|----|-----------|-----------------------|------|-----|---|---|-----|-------|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 54 | ----- | explanation arc_chan2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 | ----- | | | | | | | | | | | | | | | |
| 56 | ARC_CHAN2 | | 1999 | BHZ | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 57 | ARC_CHAN2 | | 1999 | BHE | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 58 | ARC_CHAN2 | | 1999 | BHN | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 59 | ARC_CHAN2 | | 2001 | BHZ | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 60 | ARC_CHAN2 | | 2001 | BHE | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 61 | ARC_CHAN2 | | 2001 | BHN | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 62 | ARC_CHAN2 | | 4705 | BHZ | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 63 | ARC_CHAN2 | | 4705 | BHE | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 64 | ARC_CHAN2 | | 4705 | BHN | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 65 | ARC_CHAN2 | | 6636 | BHZ | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 66 | ARC_CHAN2 | | 6636 | BHE | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 67 | ARC_CHAN2 | | 6636 | BHN | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 68 | ARC_CHAN2 | | 4748 | BHZ | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 69 | ARC_CHAN2 | | 4748 | BHE | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |
| 70 | ARC_CHAN2 | | 4748 | BHN | | | 0.0 | | | test | _NA | | | | | |

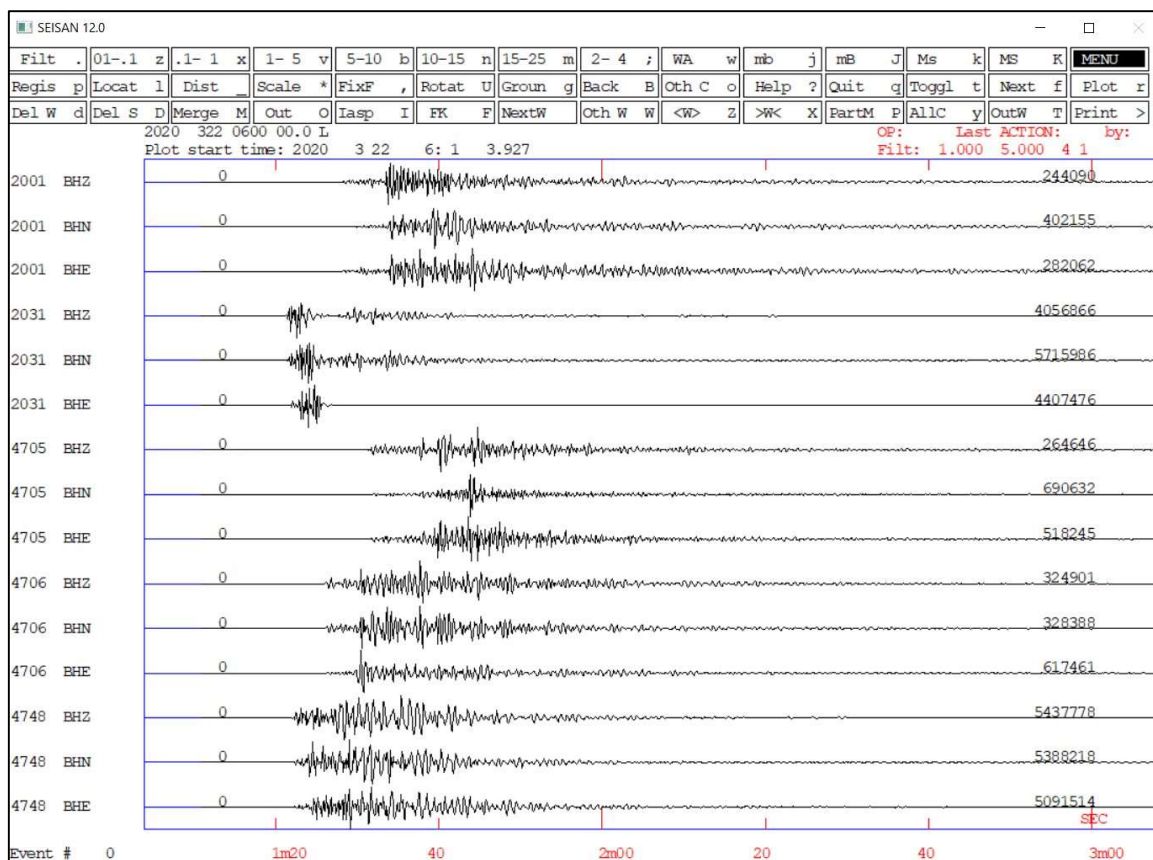
Slika 13. Prilagodba parametara SEISAN-a za korištenje testne kontinuirane arhive podataka sa seizmoloških postaja unutar hrvatske mreže

U parametarskoj datoteci dodaje se kompletna seizmološka mreža ili pojedini kanali koji se žele koristiti pri seizmičkoj analizi. Kao što je vidljivo na prethodnoj slici, u prikazanom slučaju dodani su pojedinačni kanali seizmoloških postaja.

Kada je softverski paket uspješno prilagođen za rad s kreiranom kontinuiranom arhivom podataka, moguć je pregled podataka s određenih postaja u određenom vremenskom periodu (slika 14). Koristeći ovu arhivu moguće je izvršavati operacije svih programa unutar softverskog paketa SEISAN, te ona predstavlja osnovu i nudi mogućnosti za daljnji rad na automatizaciji detekcije i lokacije potresa u budućim istraživanjima.

U sklopu ovog istraživanja korištena su ukupno četiri programa za automatizaciju softverskog paketa SEISAN:

1. CONDET – za automatsku detekciju i registraciju potresa iz kontinuirane arhive podataka,
2. AUTOPHASE – za automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova na selektiranim postajama,
3. AUTOMAG – za automatsko određivanje maksimalne amplitude na pojedinoj fazi te naposljetku
4. HYPOCENTER – za automatsku lokaciju hipocentra pojedinog potresa.



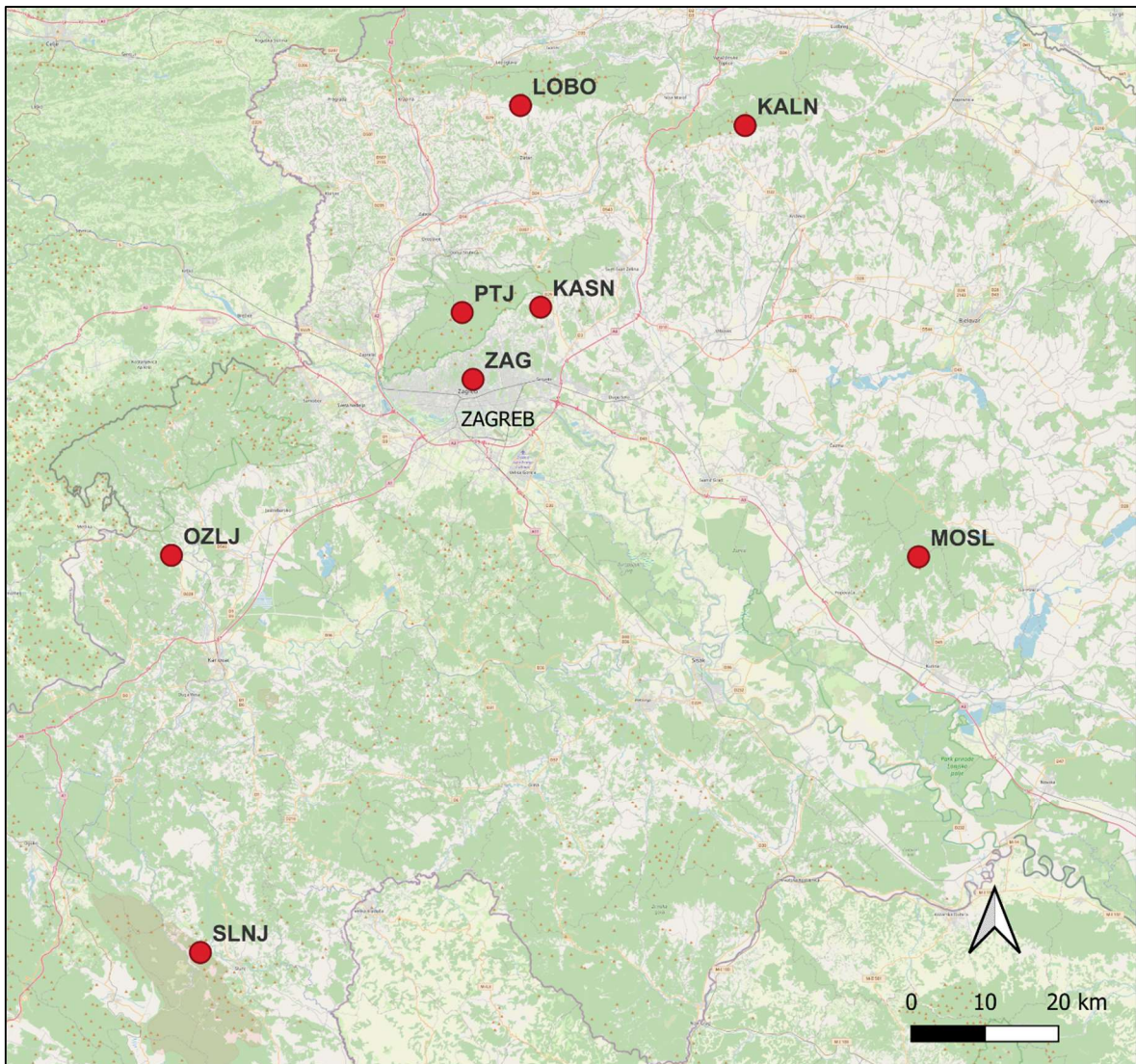
Slika 14. Primjer izdvojenih zapisa kontinuirane arhive s 4 seizmološke postaje u vremenskom periodu od 60 minuta

U nastavku rada prikazat će se i objasniti postupci za svaki od navedenih četiri programa SEISAN baze podataka koji su provedeni u svrhu istraživanja.

5.2. Automatska detekcija potresa iz kontinuirane arhive podataka

Automatska detekcija potresa iz kontinuirane arhive podataka izvršava se pomoću SEISAN-ovog programa CONDET. CONDET radi na podacima koji su organizirani u kontinuiranoj SEISAN bazi podataka, odnosno BUD ili SeisComp arhivu (OTTEMÖLLER i sur., 2021). Program radi u dva koraka, od kojih se prvi korak odnosi na pokretanje detektora na jednom kanalu, a drugi korak na otkrivanje događaja koji se nalaze na više od minimalno određenog broja postaja. Ovisno o izboru, detektirane događaje moguće je ekstrahirati, registrirati i kopirati u bazu podataka.

Program nudi nekoliko opcija automatske detekcije, a u sklopu ovog rada istražene su dvije mogućnosti detekcije – STA/LTA algoritam te Carl Johnsonov modificirani STA/LTA algoritam. Parametri algoritma traže odabir seizmoloških postaja na temelju čijih će zapisa algoritam detektirati potrese u određenom vremenskom periodu. Odabrano je ukupno 8 seizmoloških postaja (slika 15) u radijusu od 100 km od poznatog epicentra glavnog potresa zagrebačke serije iz 2020. godine.



Slika 15. Prostorna razdioba seizmoloških postaja čiji zapisi su uključeni u parametre algoritma za automatsku detekciju potresa

Uz to, za potrebe istraživanja trebalo je podesiti i parametre samog algoritma, poput vremenskog perioda kojeg će algoritam ekstrahirati iz zapisa, minimalnog broja detekcija na postajama za registraciju u bazu, vremenskog prozora za detekciju na svim postajama te parametara osjetljivosti samog algoritma (tablica 1). Automatska detekcija pomoću oba algoritma testirana je s identičnim parametrima detekcije u vidu vremenskog prozora detekcije te minimalnog broja postaja potrebnih za registraciju detekcije kao potresa u bazi podataka SEISAN-a.

Tablica 1. Parametri algoritma za detekciju

| | |
|--|------------|
| Minimalni broj postaja | 3 |
| Vremenski prozor detekcije | 25 sekundi |
| Vremenski prozor ekstrahiranog zapisa | 60 sekundi |
| Filter zapisa | 5 - 10 Hz |

Kao što je prikazano uz pomoć tablice 1 parametri su bili podešeni tako da su bile potrebne minimalno tri detekcije u vremenskom razdoblju od 25 sekundi na različitim postajama kako bi se određeni događaj mogao registrirati u SEISAN bazu podataka.

Nakon što su parametri podešeni, program se pokreće te automatski detektira i registrira događaje u odabranom vremenskom periodu. Registriranim događajima može se manipulirati uz pomoć terminala ili grafičkog sučelja softverskog paketa SEISAN (slika 16).

| Row | Ac | Date and Time | Lat | Lon | Dep | Mod | Ag | RMS | Gap | ELat | ELon | EDep | DI | EI | MInt | NSt | M | MW | ML | MN |
|-----|-----|------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|------|------|------|----|----|------|-----|---|----|----|----|
| 34 | ARG | 2020-03-22 07:10:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 35 | ARG | 2020-03-22 07:13:44.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 36 | ARG | 2020-03-22 07:16:00.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 37 | ARG | 2020-03-22 07:20:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 38 | ARG | 2020-03-22 07:23:44.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 39 | ARG | 2020-03-22 07:29:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 40 | ARG | 2020-03-22 07:31:00.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 41 | ARG | 2020-03-22 07:40:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 42 | ARG | 2020-03-22 07:43:45.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 43 | ARG | 2020-03-22 07:48:55.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 44 | ARG | 2020-03-22 07:50:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 45 | ARG | 2020-03-22 07:53:44.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 46 | ARG | 2020-03-22 08:00:48.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 47 | ARG | 2020-03-22 08:03:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 48 | ARG | 2020-03-22 08:09:51.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 49 | ARG | 2020-03-22 08:13:12.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 50 | ARG | 2020-03-22 08:20:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 51 | ARG | 2020-03-22 08:23:12.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 52 | ARG | 2020-03-22 08:30:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 53 | ARG | 2020-03-22 08:33:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 54 | ARG | 2020-03-22 08:41:00.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 55 | ARG | 2020-03-22 08:43:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 56 | ARG | 2020-03-22 08:50:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 57 | ARG | 2020-03-22 08:53:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 58 | ARG | 2020-03-22 08:56:00.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 59 | ARG | 2020-03-22 08:59:50.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 60 | ARG | 2020-03-22 09:01:00.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 61 | ARG | 2020-03-22 09:03:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 62 | ARG | 2020-03-22 09:10:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 63 | ARG | 2020-03-22 09:13:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 64 | ARG | 2020-03-22 09:14:54.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 65 | ARG | 2020-03-22 09:20:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 66 | ARG | 2020-03-22 09:23:43.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |
| 67 | ARG | 2020-03-22 09:30:47.00 | | | | | | | | | | | L | | | 0 | | | | |

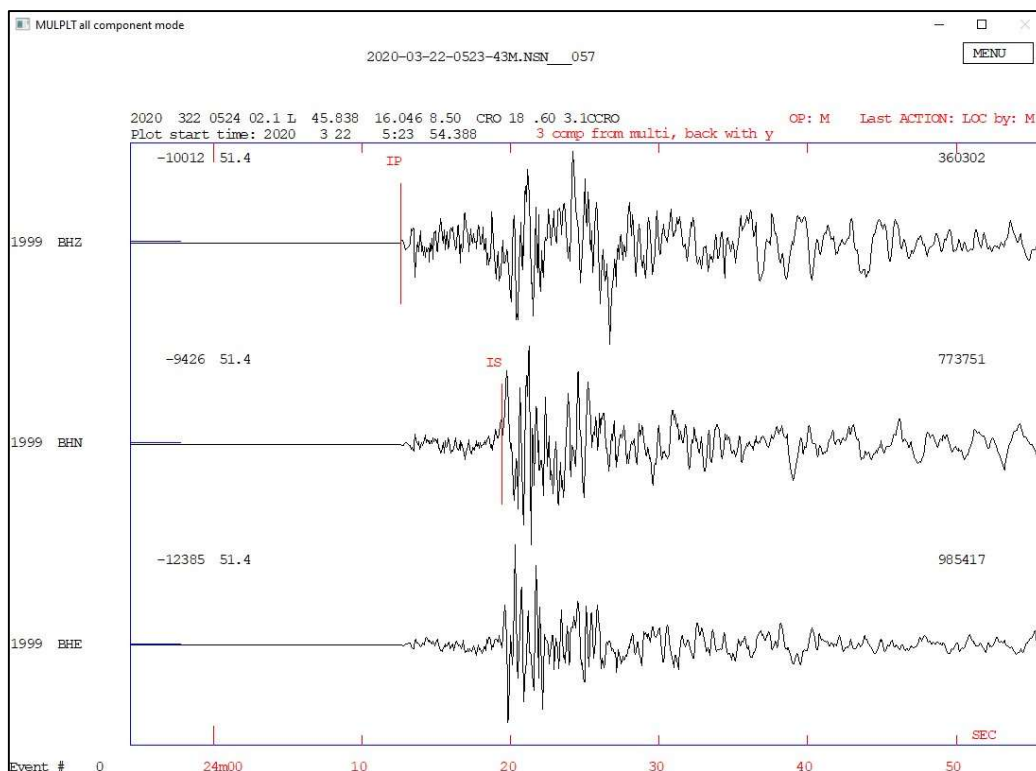
Slika 16. SEISAN baza podataka dobivena registracijom zapisa nakon automatske detekcije programa CONDET. Baza sadržava sve detektirane događaje, koji se mogu filtrirati i sortirati po parametrima poput vremena događaja, lokacije, magnitude te parametara točnosti lokacije hipocentra

5.3. Automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova

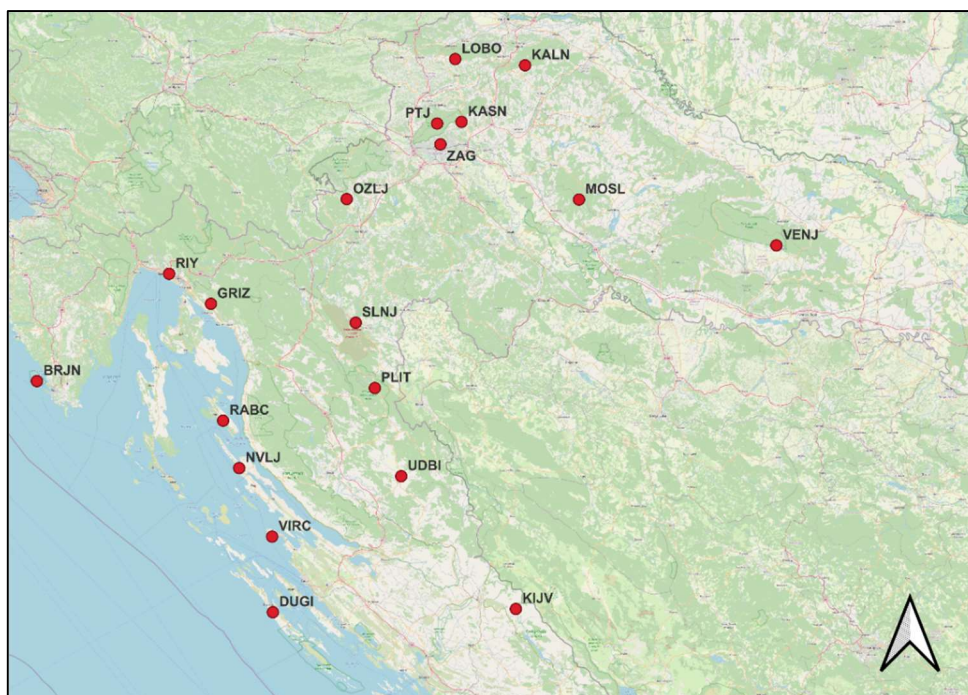
Točna identifikacija vremena dolaska P i S valova ključna je za precizno lociranje hipocentara potresa (CHI-DURAN i sur., 2017). Ručno određivanje vremena dolaska vrlo je skup i spor zadatak, stoga je automatizacija navedenog procesa znatno učinkovitija. Algoritmi za automatsko otkrivanje vremena dolaska P i S valova temelje se na identifikaciji promjena u energiji, frekvencijskom sadržaju, polarizaciji ili nekim drugim karakteristikama signala u odnosu na pozadinski zapis (LOMAX i sur., 2012). Vrlo često se navedeni algoritmi primjenjuju na unaprijed filtrirane zapise u svrhu smanjenja šumova ili povećavanja signala u unaprijed postavljenim ili dinamički određenim frekvencijskim pojasevima ili smjerovima polarizacije.

U softverskom paketu SEISAN, navedena rutina provodi se uz pomoć programa AUTOPHASE upotrebom algoritma FilterPicker (u daljnjem tekstu: FP). Program AUTOPHASE dio je RTQUAKE detekcije potresa u stvarnom vremenu, a može se koristiti i kao potprogram SEISAN baze podataka. Kao što je već napomenuto, rutina se temelji na algoritmu FP koji provjerava svaku komponentu seizmograma u svrhu mogućih izbora P i S faza. Svaka komponenta može imati nekoliko predloženih faza prema vremenu nastanka. FP algoritam radi na diskretiziranom vremenskom nizu signala $y(i)$ s intervalom uzrokovanja ΔT (LOMAX i sur., 2012). Navedeni signal može imati male ili gotovo nikakve pretprocesne aktivnosti, odnosno može predstavljati širokopojasni tok podataka kao izlaz iz digitalizatora bez filtriranja ili uklanjanja srednje vrijednosti. Nadalje, navedeni algoritam koristi isključivo logičke i aritmetičke operacije, odnosno koristi kvadratni korijen, ali ne i eksponencijale, logaritme ili algoritme transformacije te je, sukladno tome, računalno vrlo učinkovit. FP algoritam koristi konstante opadanja za akumuliranje statistike vremenskog prosjeka signala neovisno o proteklom vremenu od početka signala.

Nakon što je napravljena preliminarna obrada registriranih zapisa seizmičkih događaja dobivenih automatskom detekcijom programa CONDET, pokrenut je program AUTOPHASE za automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova za selektirani i prostorno ograničeni set seizmoloških postaja (primjer za postaju Ozalj prikazan na slici 17). U svrhu istraživanja zagrebačke serije potresa iz 2020. godine, set seizmoloških postaja ograničen je na radijus od 250 km od poznatog epicentra glavnog potresa (slika 18).



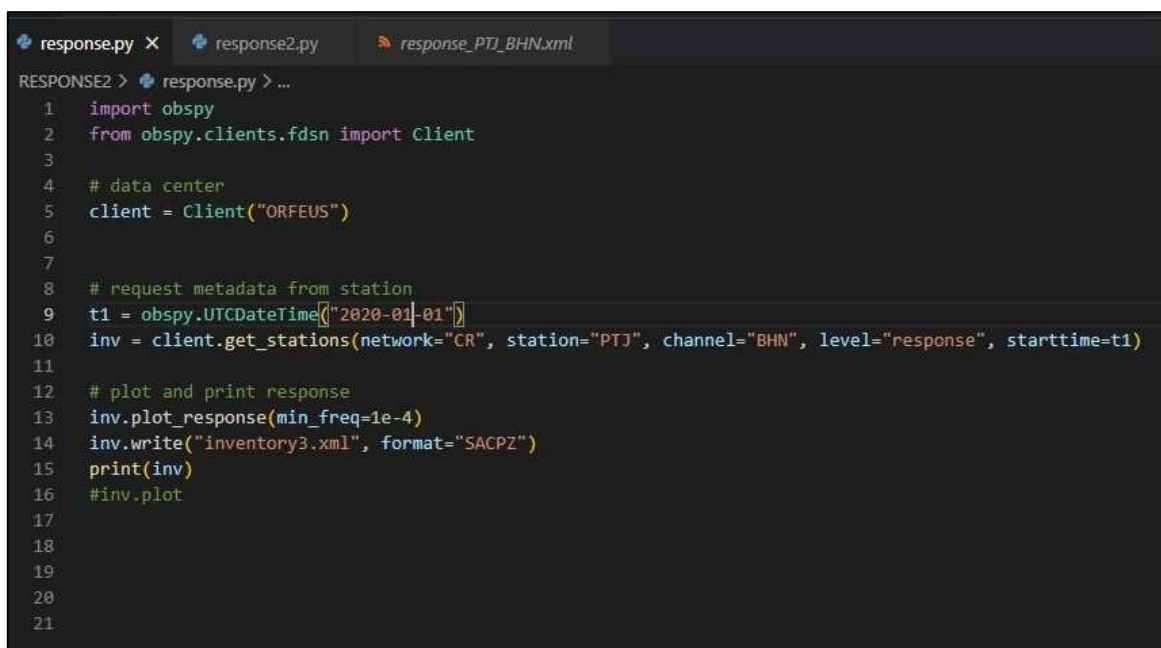
Slika 17. Detaljniji prikaz automatskog određivanja vremena dolaska P i S valova na trokomponentnom zapisu seizmološke postaje Ozalj za glavni potres zagrebačke serije potresa. Vrijeme dolaska P valova određeno je na vertikalnoj, a S na horizontalnoj komponenti



Slika 18. Seizmološke postaje na temelju čijih zapisa je napravljeno automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova te lokacija hipocentara potresa

5.4. Automatsko određivanje magnitude potresa

Kako bi se seizmički podaci mogli kvantitativno analizirati potrebno je uzeti u obzir izobličenja prirodnih vibracija od strane samih seizmografa (AMMON i sur., 2020). Unatoč tome što je moguće obraditi podatke o potresima bez puno znanja o instrumentima, svakako pomaže razumijevanje o tome kako podaci nastaju i na koji način instrumenti ograničavaju određenu analizu (HAVSKOV i OTTEMÖLLER, 2010). Važan dio analize predstavlja točan instrumentalni odziv (engl. *response*). Iako mnogi podatkovni centri pružaju navedene informacije, u pojedinim slučajevima potrebno ih je prikupiti te prilagoditi sustavu za obradu podataka, u ovom slučaju softverskom paketu SEISAN (slika 19). Seizmometri bilježe pomak tla u digitalnim jedinicama (engl. *counts*). Pojam digitalne jedinice se odnosi na veličinu koja predstavlja najmanju podjelu raspona napona koji se koristi za digitalizaciju analognog napona. Digitalni signali u takvim jedinicama mogu nalikovati gibanju tla, ali same jedinice nemaju značenje sve dok se ne primijene korekcije pojačanja. Općenito govoreći, izobličenja instrumenta ovise o frekvenciji te uključuju modifikaciju amplitude i fazni pomak.



```
response.py x response2.py response_PTJ_BHN.xml
RESPONSE2 > response.py > ...
1 import obspy
2 from obspy.clients.fdsn import Client
3
4 # data center
5 client = Client("ORFEUS")
6
7
8 # request metadata from station
9 t1 = obspy.UTCDateTime("2020-01-01")
10 inv = client.get_stations(network="CR", station="PTJ", channel="BHN", level="response", starttime=t1)
11
12 # plot and print response
13 inv.plot_response(min_freq=1e-4)
14 inv.write("inventory3.xml", format="SACPZ")
15 print(inv)
16 #inv.plot
17
18
19
20
21
```

Slika 19. Zahtjev poslužitelju ORFEUS pomoću programskog jezika Python za slanje podataka o seizmometru. ORFEUS poslužitelj sadrži podatke o seizmološkim mrežama na području Europe i Mediterana. U ovom slučaju zatražen je instrumentalni odziv za horizontalnu komponentu postaje Puntijarka, koji je spremljen u specifičnu lokalnu datoteku i spreman za implementaciju u softverski paket SEISAN

Neobrađeni digitalizirani seizmogrami povezani su s gibanjem tla pomoću konvolucije. U tom slučaju, $u(t)$ predstavlja pomak tla, $x_I(t)$ odziv instrumenta, a $x(t)$ predstavlja neobrađeni seizmogram. Veza se može prikazati kao:

$$x(t) = u(t) * x_I(t) \quad (3)$$

gdje $*$ predstavlja konvoluciju. Nadalje, u frekvencijskoj domeni, konvolucija postaje funkcija množenja:

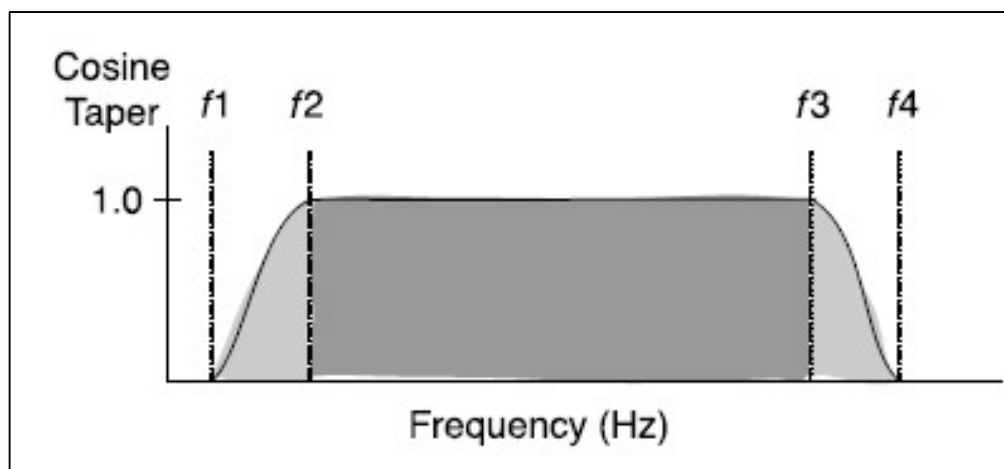
$$x(\omega) = u(\omega) * x_I(\omega) \quad (4)$$

Kvantitativno korištenje seizmičkih signala zahtijeva da se predviđeni signali konvoluiraju s istim odzivom instrumenta ili da se instrumentalni učinci uklone korištenjem dekonvolucije. Konvolucija je jednostavna ukoliko je $x_I(t)$ točno poznat. Pošto su instrumentalni učinci rezultat konvolucije, uklanjanje njihovih učinaka postiže se dekonvolucijom. Invertiranjem jednadžbe za gibanje tla dobiva se sljedeća jednadžba:

$$U(\omega) = \frac{x(\omega)}{x_I(\omega)} = \frac{x(\omega)x_I(\omega)}{x_I(\omega)x_I(\omega)} = \frac{x(\omega)x_I(\omega)}{|x_I(\omega)|^2} \quad (5)$$

Dekonvolucija uključuje spektralno dijeljenje koje može biti nestabilno kada je veličina kompleksnog broja u nazivniku blizu nule. Ukoliko je odziv nula, dekonvolucija nije moguća jer u tom slučaju instrument nije osjetljiv na pokrete. Ako podaci nemaju šum, odziv će biti povezan s preciznošću računalne aritmetike koja se koristi. Upotrebljiva širina pojasa ovisi o signalu zbog utjecaja seizmičkih pozadinskih kretanja i šumova. Za seizmičke instrumente, problem se općenito rješava ograničavanjem pojase širine gibanja tla. Navedeno se postiže primjenom filtra dekonvolucije, gdje filter može biti i bilo koji drugi seizmički instrument, ili primjenom filtra koji ograničava pojas, $F(\omega)$, na rezultat dekonvolucije. Seizmolozi koriste niz pristupa za stabilizaciju dekonvolucije, a uobičajeni pristup korekciji odziva instrumenata odnosi se na primjenu jednostavnog filtra za ograničavanje pojasa na rezultat dekonvolucije. Često korištena funkcija je sužavanje

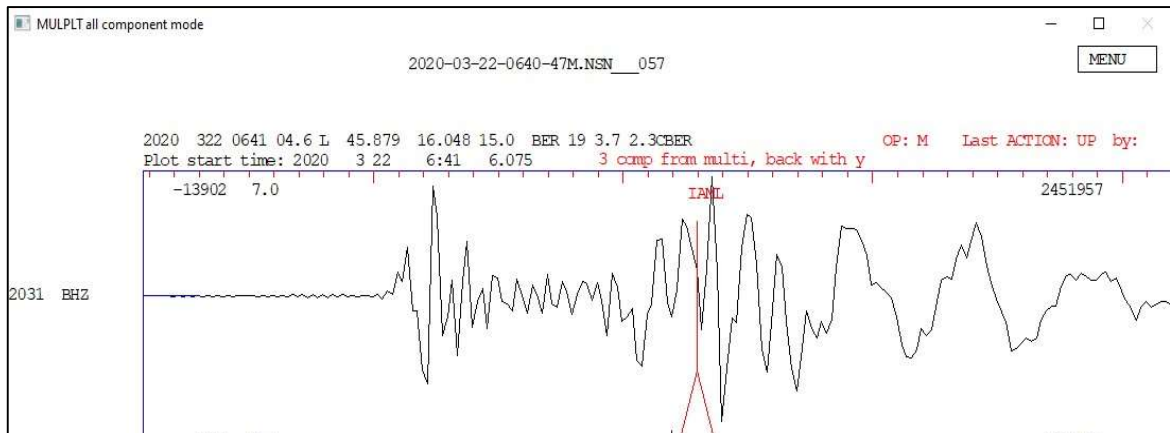
kosinusa koja je definirana frekvencijama, a koristi se za ograničavanje pojasa dekonvolucije instrumenata (slika 20).



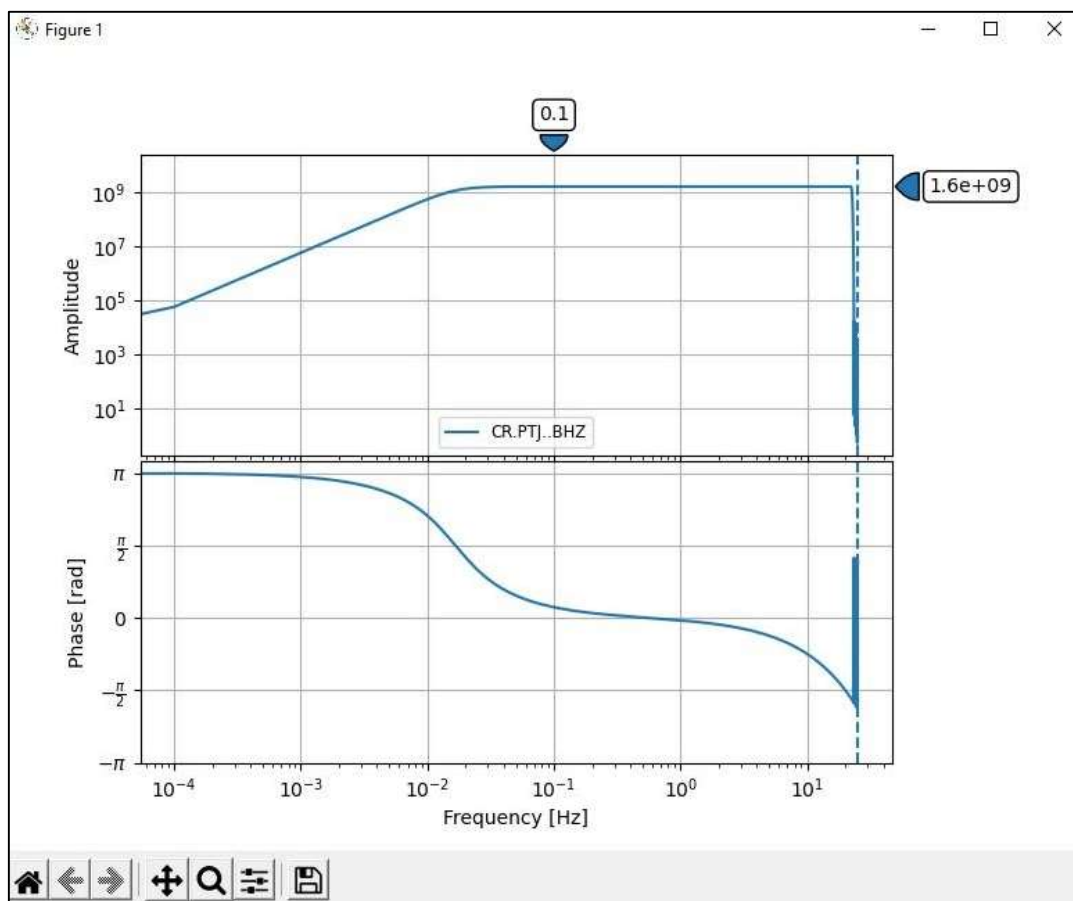
Slika 20. Definicija frekvencijskih parametara u jednostavnom suženju kosinusa koji se koristi za ograničavanje pojasa dekonvolucije instrumenata (AMMON i sur., 2020)

Filtar prikazan na slici 20 jednak je nuli za $f \leq f1$ i $f \geq f4$, jedinici za $f2 \leq f \leq f3$ te ima konusni oblik suženja za $f1 \leq f \leq f2$ i $f3 \leq f \leq f4$.

Automatsko određivanje magnitude, za potrebe istraživanja, provedeno je automatskim određivanjem maksimalnih amplituda na vertikalnim komponentama trokomponentnih zapisa sa seizmoloških postaja (slika 21) pomoću programa AUTOMAG. Program prema zadanim postavkama određuje amplitude samo na vertikalnim komponentama koje imaju P ili S očitavanje te koristi samo prozor koji slijedi nakon S-faze. S druge strane, ukoliko je dostupna samo P-faza, vrijeme S-faze izračunat će se na temelju dolaska P-faze. Kako bi program uspješno odredio i izračunao lokalnu magnitudu na temelju maksimalne amplitude, potrebno je za određenu komponentu ukloniti instrumentalni odziv seizmometra (slika 22). Ovime se dobiva stvarna brzina pomicanja tla u nm/s u odnosu na digitalne jedinice (engl. *counts*) koje se dobivaju s primarnim zapisom određene komponente.



Slika 21. Primjer automatskog određivanja maksimalne amplitude na vertikalnoj komponenti trokomponentnog zapisa sa seizmološke postaje Puntijarka



Slika 22. Grafički prikaz instrumentalnog odziva na vertikalnoj komponenti seizmološke postaje Puntijarka dobiven sa poslužitelja ORFEUS

Amplituda mora biti navedena u nm/s u ulaznoj datoteci. Općenita formula koja se koristi za izračunavanje lokalne magnitude glasi:

$$Ml = a * \log_{10}(amp) + b * \log_{10}(dist) + c * dist + d \quad (6)$$

gdje a , b , c i d predstavljaju konstante, \log_{10} logaritam na bazi 10, amp označava maksimalnu amplitudu tla u nm, a $dist$ je hipocentralna udaljenost u kilometrima. Lokalne magnitude izračunavaju se samo za epicentralne udaljenosti manje od 1500 kilometara. Međutim, na vrlo malim udaljenostima, tradicionalna relacija (7) možda neće biti važeća zbog čega je potrebno u formulu uključiti dodatne uvjete (LUCKETT i sur., 2018):

$$Ml = a * \log_{10}(amp) + b * \log_{10}(dist) + c * dist + e * \exp(-f * dist) + d \quad (7)$$

5.5. Automatska lokacija hipocentra potresa

Nakon što je napravljena automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova, lokacija se automatski može odrediti programom HYPOCENTER. HYPOCENTER predstavlja jedan od programa softverskog paketa SEISAN za automatsko određivanje hipocentara i magnituda lokalnih, globalnih i regionalnih potresa (LEINART, 1994). Program je prvenstveno dizajniran za obradu velikih količina podataka o potresima zabilježenim u neposrednoj blizini na gustoj mreži seizmografa, a ograničen je na automatsko određivanje lokacije potresa epicentralne udaljenosti manje od 1000 km, što je rezultat ograničenja pravokutnog koordinatnog sustava. Program je sposoban procesuirati veliki broj dolazaka P i S valova s različitih postaja, a ograničen je samo hardverskim sustavom.

HYPOCENTER prilikom automatske lokacije potresa kombinira značajke dvaju poznatih algoritama – HYPO71 i HYPOINVERSE s tehnikom koja je poznata pod nazivom adaptivno prigušivanje (BARRY i sur., 1986). Ova tehnika koristi metodu najmanjih kvadrata, standardnu metodu korištenu pri rješavanju inverznih problema u geofizici, poput lokacije hipocentra potresa. Ono što razlikuje ovaj algoritam od ranijih algoritama za lociranje hipocentra jest dodavanje faktora adaptivnog prigušivanja. Drugim riječima, svaki stupac linearizirane matrice stanja T , koji povezuje promjene u vremenu dolaska s promjenama u hipocentralnom položaju, skalira se i centrira tako da ima nultu srednju vrijednost. Pri tome se vrijeme nastanka definira kao srednje vrijeme dolaska minus srednje vrijeme putovanja. Algoritam iterativno rješava inverzni problem povećavajući faktor

adaptivnog prigušivanja, ukoliko rješenje u trenutnoj iteraciji ne zadovoljava zadane parametre rješenja. Ovakav princip, uz dodane principe centriranja i skaliranja, korištene u algoritmima HYPO71 te HYPOINVERSE u gotovo svim slučajevima rezultira boljim rješenjem lokacije hipocentra potresa.

SEISAN nudi niz parametara točnosti rješenja lokacije potresa, a u sklopu ovog istraživanja korištena su dva glavna parametra – pogreška lokacije u trodimenzionalnom prostoru te RMS (engl. *root mean square travel time residual*). Pogreška lokacije u trodimenzionalnom prostoru odnosi se na pogrešku koju program izračunava zasebno za latitudu, longitudu te dubinu lokacije, a izražena je u kilometrima. RMS označava srednju kvadratnu vrijednost putovanja valova u sekundama. Navedeni parametar daje mjeru usklađenosti opaženih vremena dolaska s predviđenim vremenima dolaska za određenu lokaciju. Manji RMS označava bolje poklapanje podataka. RMS ovisi o točnosti modela brzine koji se koristi za računanje lokacije potresa te preciznosti u određivanju vremena dolazaka P i S valova na postajama uključenim u rješenje lokacije hipocentra potresa. Zadovoljavajućom lokacijom u okviru ovog istraživanja smatra se rješenje lokacije hipocentra potresa s pogreškom lokacije manjom od 20 km te $RMS < 2$.

U prvom koraku ove faze testirane su mogućnosti potpuno automatiziranog lociranja nepročišćene baze podataka nakon provedene automatske detekcije i registracije zapisa potresa pomoću STA/LTA algoritama za detekciju (slika 23). Rezultati dobiveni u prvom koraku izloženi su i uspoređeni u narednim poglavljima.

Locator

File Edit

Locate Save Prev event Next event

Date: 2020-03-22 Time: 06:01:19.2 +/- 0.99 s Distance Indicator: L Event Indicator:

Latitude: 45.8520 +/- 3.1 km Longitude: 16.0410 +/- 4.3 km Depth: 10.00 +/- 3.2 km

Locality: Depth flag Epi flag

RMS: 0.70 Dx: -0.4 Dy: -0.8 Dz: -4.8 Dot: 0.1 Gap: 72 NSt: 18

Magnitudes Settings

| Value | Type | Agency |
|-------|------|--------|
| 3.0 | C | CRO |

| Phase (l) | Azimuth | Magnitude | Log | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|-----------|-----|----|------------------------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|
| # | Stat | Com | Nt | Lo | Date/Time | Dist | Azm | O | PhObs | WtObs | T-Obs | PhCal | Ain | WtCal | T-Cal | Res | Imp |
| 4 | 4706 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:25.80 | 33.8 | 3.0 | I | P | | 6.62 | PG | 103 | 1.0 | 6.24 | 0.38 | 14 |
| 5 | 4706 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:29.78 | 33.8 | 3.0 | I | S | 3 | 10.60 | SG | 103 | 0.3 | 10.86 | -0.26 | 2 |
| 6 | 2001 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:27.20 | 44.6 | 46.0 | I | P | | 8.02 | PG | 99 | 1.0 | 8.10 | -0.08 | 11 |
| 7 | 2001 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:33.60 | 44.6 | 46.0 | I | S | 3 | 14.42 | SG | 99 | 0.3 | 14.09 | 0.33 | 1 |
| 8 | 1999 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:29.16 | 51.8 | 240.0 | I | P | | 9.98 | PG | 98 | 1.0 | 9.30 | 0.68 | 3 |
| 9 | 1999 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:36.34 | 51.8 | 240.0 | I | S | 3 | 17.16 | SG | 98 | 0.3 | 16.17 | 0.98 | 1 |
| 10 | 4705 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:30.38 | 61.5 | 115.0 | I | P | | 11.20 | PG | 96 | 1.0 | 10.97 | 0.23 | 12 |
| 11 | 4705 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:39.12 | 61.5 | 115.0 | I | S | 3 | 19.94 | SG | 96 | 0.3 | 19.08 | 0.86 | 2 |
| 12 | DB68 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:35.46 | 89.7 | 207.0 | I | P | | 16.28 | PG | 94 | 1.0 | 15.81 | 0.47 | 2 |
| 13 | DB68 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:49.82 | 89.7 | 207.0 | I | S | 3 | 30.64 | SG | 94 | 0.3 | 27.50 | 3.14 | 1 |
| 14 | 3T15 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:39.18 | 113.0 | 197.0 | I | P | | 20.00 | PG | 93 | 1.0 | 19.84 | 0.16 | 3 |
| 15 | 3T15 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:55.60 | 113.0 | 197.0 | I | S | 3 | 36.42 | SG | 93 | 0.3 | 34.51 | 1.90 | 1 |
| 16 | 6636 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:41.20 | 126.0 | 236.0 | I | P | | 22.02 | PG | 93 | 1.0 | 22.04 | -0.02 | 3 |
| 17 | 6636 | BHE | | | 2020-03-22 06:01:58.68 | 126.0 | 236.0 | I | S | 3 | 39.50 | SG | 93 | 0.3 | 38.34 | 1.16 | 1 |
| 18 | B666 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:42.48 | 135.0 | 245.0 | I | P | | 23.30 | PG | 92 | 1.0 | 23.59 | -0.29 | 4 |
| 19 | B666 | BHN | | | 2020-03-22 06:02:01.14 | 135.0 | 245.0 | I | S | 3 | 41.96 | SG | 92 | 0.3 | 41.04 | 0.92 | 1 |
| 20 | 7523 | BHN | | | 2020-03-22 06:02:05.00 | 148.0 | 108.0 | I | S | 3 | 45.82 | SG | 92 | 0.3 | 45.05 | 0.77 | 2 |
| 21 | B792 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:44.86 | 148.0 | 188.0 | I | P | | 25.68 | PG | 92 | 1.0 | 25.92 | -0.24 | 4 |
| 22 | 6A04 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:46.40 | 157.0 | 219.0 | I | P | | 27.22 | PG | 92 | 1.0 | 27.42 | -0.20 | 2 |
| 23 | 6A04 | BHE | | | 2020-03-22 06:02:09.20 | 157.0 | 219.0 | I | S | 3 | 50.02 | SG | 92 | 0.3 | 47.71 | 2.30 | 0 |
| 24 | NVLJ | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:48.34 | 170.0 | 213.0 | I | P | | 29.16 | PN3 | 65 | 1.0 | 29.46 | -0.30 | 1 |
| 25 | NVLJ | BHE | | | 2020-03-22 06:02:10.56 | 170.0 | 213.0 | I | S | 3 | 51.38 | SN3 | 65 | 0.3 | 51.26 | 0.12 | 0 |
| 26 | 6772 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:50.96 | 190.0 | 205.0 | I | P | | 31.78 | PN3 | 65 | 1.0 | 32.55 | -0.77 | 3 |
| 27 | 6772 | BHE | | | 2020-03-22 06:02:14.80 | 190.0 | 205.0 | I | S | 3 | 55.62 | SN3 | 65 | 0.3 | 56.63 | -1.02 | 1 |
| 28 | B664 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:55.20 | 221.0 | 201.0 | I | P | | 36.02 | PN5 | 45 | 1.0 | 36.41 | -0.39 | 3 |
| 29 | B664 | BHE | | | 2020-03-22 06:02:24.16 | 221.0 | 201.0 | I | S | 3 | 64.98 | SN5 | 45 | 0.3 | 63.35 | 1.63 | 1 |
| 30 | A011 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:55.58 | 222.0 | 187.0 | I | P | | 36.40 | PN5 | 45 | 1.0 | 36.56 | -0.16 | 4 |
| 31 | 1307 | BHZ | | | 2020-03-22 06:01:58.58 | 246.0 | 187.0 | I | P | | 39.40 | PN5 | 45 | 1.0 | 39.46 | -0.06 | 3 |
| 32 | 1307 | BHE | | | 2020-03-22 06:02:28.60 | 246.0 | 187.0 | I | S | 3 | 69.42 | SN5 | 45 | 0.3 | 68.66 | 0.75 | 1 |

Slika 23. Rezultati automatske odredbe lokacije hipocentra u grafičkom sučelju softverskog paketa SEISAN. Prozor lokatora prikazuje uspješno automatski određene P i S komponente na temelju kojeg algoritam radi izračun lokacije hipocentra potresa. U ovom slučaju uspješno je određeno 32 komponente te je potres uspješno lociran s manjom pogreškom

U drugom koraku napravljena je preliminarna ručna obrada baza podataka dobivenih automatskom detekcijom dvaju algoritama. Za daljnju analizu izdvojeni su potresi koji su sadržavali minimalno 5 određenih vremena dolaska P i S valova na minimalno tri različite seizmološke postaje.

Nakon toga su pregledani svi zapisi čija je pogreška lokacije bila iznad 20 km te je izvršena minimalna ručna korekcija u vidu odbacivanja loše određenih faza za ponovni izračun rješenja lokacije hipocentra. Isto tako, pojedini zapisi sadržavali su mali broj određivanja (5 - 8), pa je u ovakvim situacijama bilo potrebno izvršiti ručnu korekciju

problematičnih automatskih određivanja kako bi se potres uspješno locirao s greškom lokacije ispod 20 km te $RMS < 2$. Obzirom da je cilj ovog istraživanja bio ispitati mogućnosti automatizacije detekcije i lociranja potresa iz zagrebačke serije potresa, ručna korekcija je svedena na minimum te su iste rađene isključivo na već određenim fazama u zapisima gdje nije bilo dovoljno određenih faza za odbacivanje loše određenih faza i uspješno lociranje potresa. Kod potresa koji su bili uspješno locirani potpuno automatski ili su sadržavali dovoljan broj automatski određenih nastupnih vremena nailazaka P i S valova za odbacivanje loših odredbi iz rješenja i uspješno lociranje, ručne korekcije vremena dolaska P i S valova za preciznije lociranje nisu provedene.

6. Rezultati istraživanja

Rezultati ovog istraživanja mogu se podijeliti i diskutirati u dva segmenta: 1) automatska detekcija i registracija potresa iz zapisa sa seizmoloških postaja te 2) automatsko lociranje detektiranih potresa. Prikazani su kao dva slučaja, tj. dva seta dobivenih podataka. Slučaj A odnosi se na detekciju i registraciju zapisa pomoću STA/LTA algoritma, a slučaj B pomoću Carl Johnsonovog modificiranog STA/LTA algoritma. Oba slučaja imaju iste vremenske parametre detekcije kako bi se osigurala istovjetnost uvjeta detekcije. Rezultati prikazani u tablicama odnose se na promatrani period od 22. do 24.ožujka 2020. godine.

1. Automatska detekcija i registracija potresa

Rezultati automatske detekcije i registracije zapisa potresa po danima prikazani su za oba algoritma u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz ukupnog broja detektiranih seizmičkih događaja za oba testirana algoritma detekcije

| Datum | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 22. 3. 2020. | 185 | 265 |
| 23. 3. 2020. | 93 | 421 |
| UKUPNO | 278 | 686 |

S obzirom da je predmet ovog istraživanja zagrebačko područje, ovdje je bitno napomenuti da se podaci obje baze podataka u ovom dijelu istraživanja, prikazani u tablici 2, odnose na ukupni, nelocirani broj detekcija, koji nije prostorno ograničen na zagrebačko područje.

2. Automatsko lociranje potresa

Kao što je ranije navedeno, u prvom koraku automatskog lociranja testirano je rješenje lokacije hipocentra potresa potpunom automatizacijom bez ručne korekcije. Prikaz rezultata za oba slučaja dan je u tablici 3. Rezultati su prikazani bez prostornog ograničenja na zagrebačko područje.

Tablica 3. Broj ukupno lociranih potresa potpunom automatizacijom

| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Broj potresa | 206 | 533 |

Nadalje, potresi locirani unutar prostornih ograničenja zagrebačkog područja prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Broj automatski lociranih potresa unutar prostornih ograničenja zagrebačkog područja

| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Broj potresa | 113 | 56 |

Konačno, prostorno ograničeni rezultati sa zadovoljavajućim rješenjem lokacije za oba slučaja (pogreška lokacije < 20 km te RMS < 2) prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Broj automatski lociranih potresa unutar prostornih ograničenja sa zadovoljavajućim rješenjima

| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Broj potresa | 35 | 23 |

2.1. Ručna korekcija

U drugom koraku automatskog lociranja potresa napravljene su minimalne ručne korekcije za izračun točnijeg rješenja lokacije hipocentra. U tablici 6 prikazan je ukupan broj zadovoljavajućih rješenja lokacije hipocentra potresa za slučajeve A i B nakon ručnih korekcija.

Tablica 6. Broj zadovoljavajućih rješenja lokacije potresa za slučajeve A i B nakon ručne korekcije

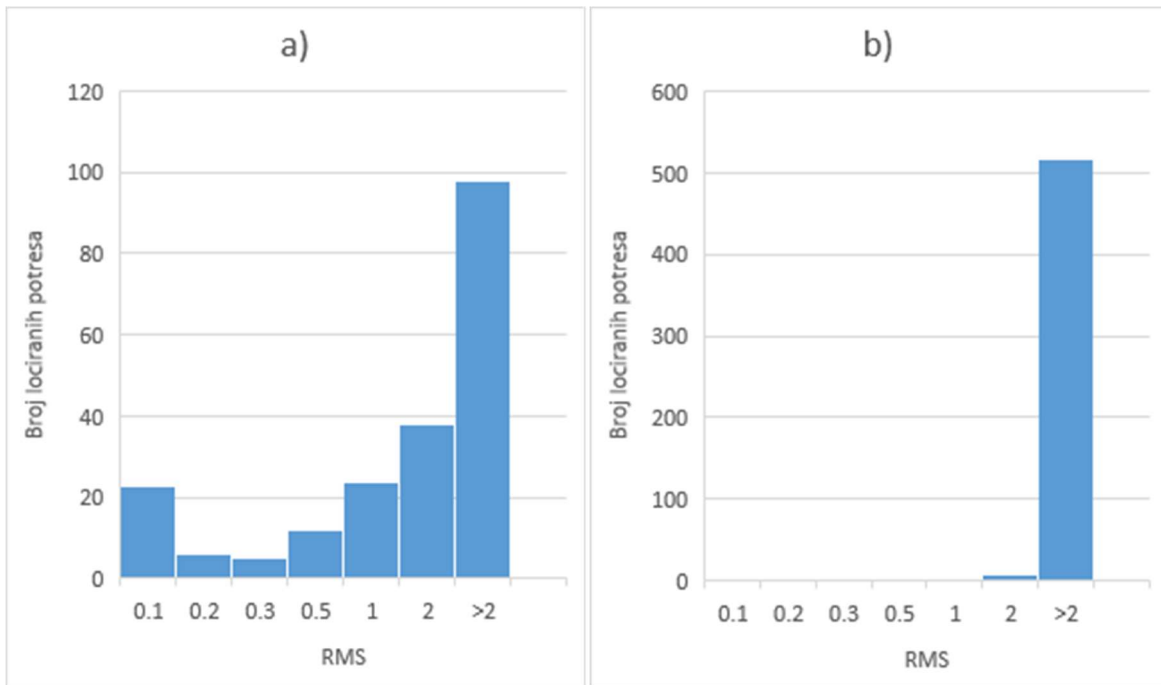
| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Broj potresa | 256 | 134 |

U tablici 7 prikazan je ukupni broj zadovoljavajućih rješenja prostorno ograničen na promatrano područje.

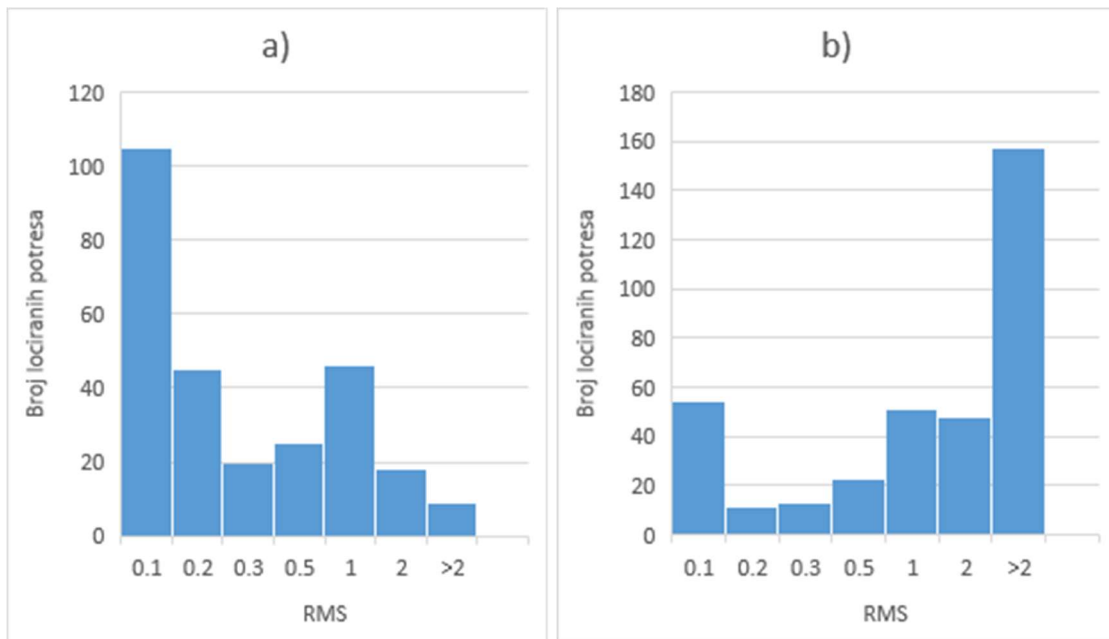
Tablica 7. Broj zadovoljavajućih rješenja lokacije hipocentra potresa ograničena na zagrebačko područje

| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) |
|---------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Broj potresa | 239 | 124 |

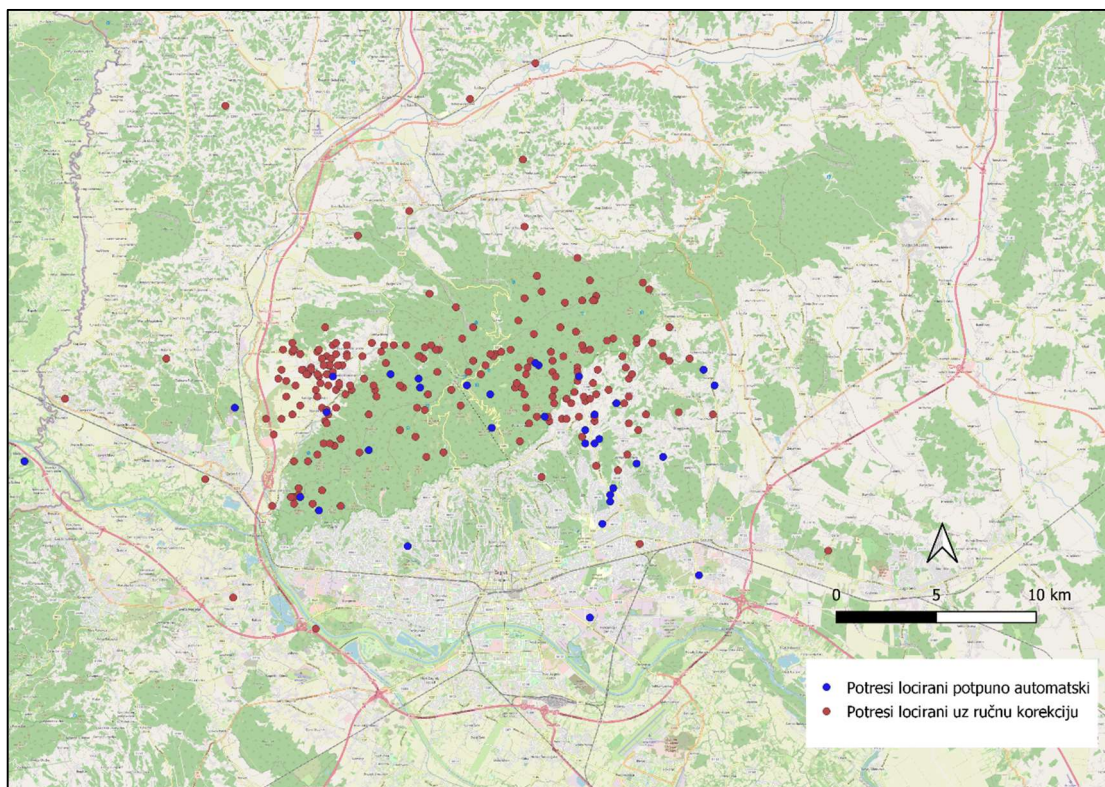
Na slikama 24. i 25. prikazani su histogrami s raspodjelama RMS u slučaju STA/LTA algoritma (slučaj A) i Carl Johnson STA/LTA algoritma (slučaj B). Slika 24 prikazuje raspodjelu RMS uz potpunu automatizaciju, a slika 25 raspodjelu RMS nakon ručne korekcije oba slučaja.



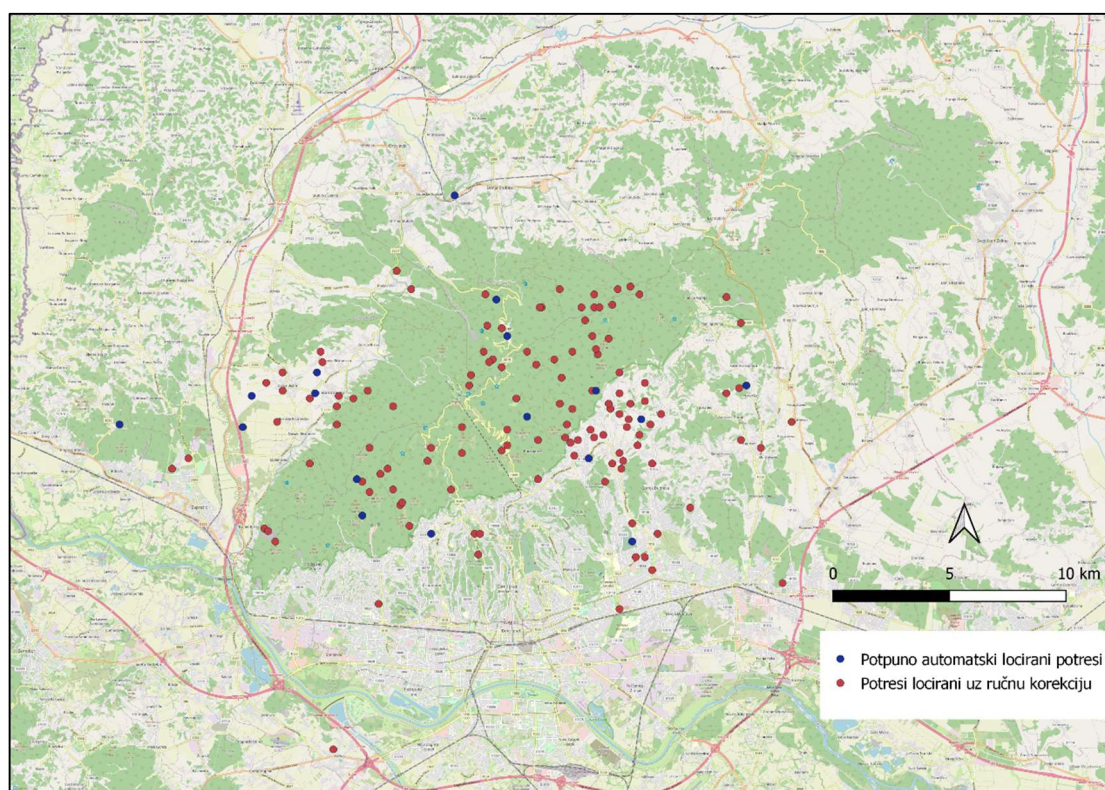
Slika 24. Histogram raspodjele RMS parametra za potpuno automatski locirane potrese pomoću oba algoritma. a) STA/LTA b) Carl Johnson modificirani STA/LTA



Slika 25. Histogram raspodjele RMS parametra za potrese locirane nakon ručnih korekcija. a) STA/LTA b) Carl Johnson modificirani STA/LTA



Slika 26. Karta lociranih potresa u slučaju A uz potpunu automatizaciju te ručnu korekciju



Slika 27. Karta lociranih potresa u slučaju B uz potpunu automatizaciju te ručnu korekciju

Slike 26 i 27 prikazuju prostornu raspodjelu rezultata lociranja potpunom automatizacijom procesa detekcije i lokacije hipocentra potresa te rezultata dobivenih nakon minimalne korekcije.

7. Rasprava

Slučajevi A i B razdvojeni su kao izdvojene baze podataka sa setovima podataka dobivenim automatskim detekcijama pomoću dva algoritma kako bismo dobili jasniju sliku o preciznosti i uspješnosti detekcija i kasnijeg lociranja potresa iz zagrebačke serije potresa za oba testirana algoritma iz softverskog paketa SEISAN. Vremenski parametri detekcije te algoritmi određivanja vremena dolaska P i S valova i izračuna rješenja lokacije hipocentra istovjetni su u oba slučaja, pa se ovime stavlja fokus na usporedbu preciznosti i uspješnosti pojedinog algoritma detekcije. Sposobnost algoritma detekcije da precizno detektira te registrira pojedini potres osnova je uspješne automatizacije lociranja hipocentra potresa.

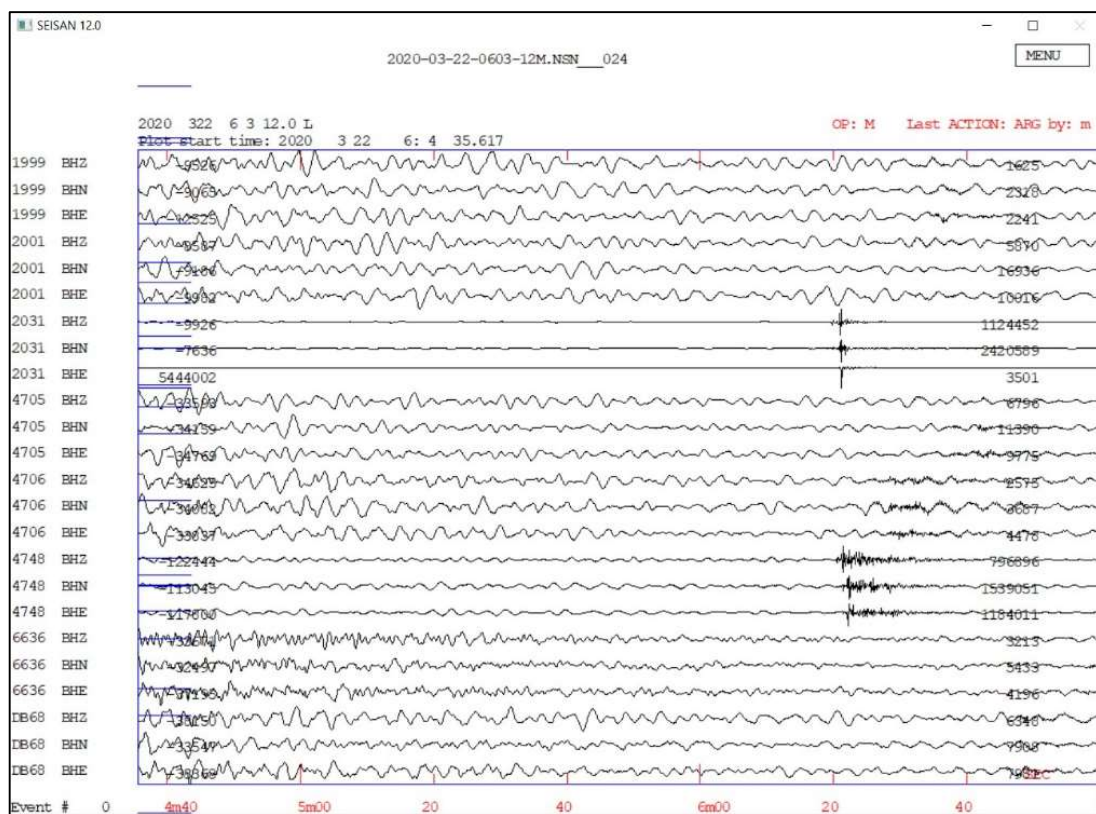
Tablica 8. Usporedba detekcija i registracija zapisa potresa dobivenih softverskim paketom SEISAN i postojećeg hrvatskog kataloga potresa

| Datum | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) | Hrvatski katalog potresa |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 22. 3. 2020. | 185 | 265 | 375 |
| 23. 3. 2020. | 93 | 421 | 303 |
| UKUPNO | 278 | 686 | 678 |

Iz tablice 8 vidljivo je da je brojka ukupno detektiranih seizmičkih događaja u promatranom vremenskom periodu bitno različita za dva testirana algoritma za automatsku detekciju. Isto tako, broj detekcija Carl Johnsonovim algoritmom je unutar 1% razlike s postojećim katalogom potresa, dok je STA/LTA algoritam detektirao i registrirao 60% manje zapisa od Carl Johnsonovog STA/LTA algoritma te postojećeg Hrvatskog kataloga potresa.

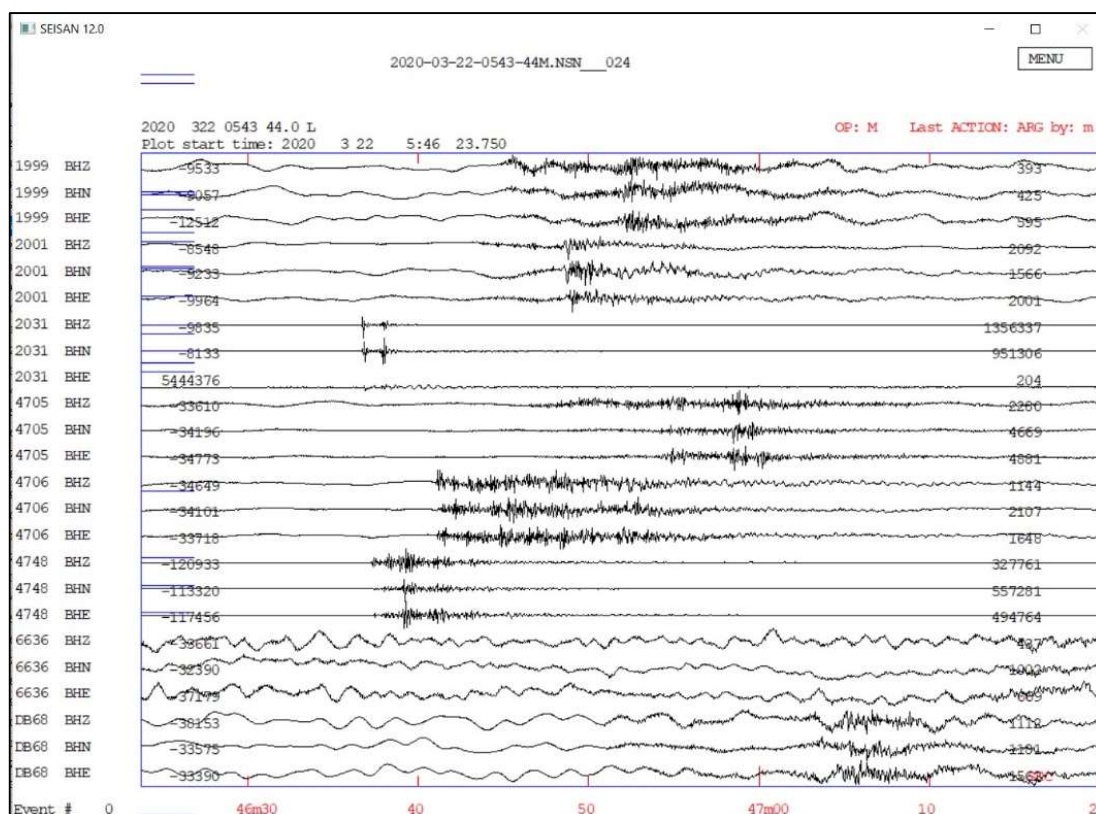
Razlozi za ovako drastičnu razliku mogu se jasno pronaći u osnovnim principima detekcije seizmičkih događaja STA/LTA algoritmima. Kako je u ranijim poglavljima objašnjeno, STA/LTA algoritmi funkcioniraju na principu razlike STA (kratkoročnog prosjeka) i LTA (dugoročnog prosjeka) te njihovog omjera, koji označava osjetljivost algoritma kao detektora seizmičkog događaja. Unatoč mogućnosti podešavanja parametara, osjetljivost Carl Johnsonovog STA/LTA algoritma pokazala se većom u odnosu na standardni STA/LTA algoritam. Osjetljivost algoritma za detekciju javlja se kao bitan faktor u situacijama kada se radi o potresu male ili vrlo male magnitude, koji je zabilježen s jasnom

amplitudom iznad šuma signala isključivo na najbližim postajama (slika 28). Ovdje je bitno napomenuti da su u većem dijelu promatranog vremenskog intervala aktivne bile samo dvije postaje unutar 20 km od epicentralnog područja zagrebačke serije potresa, a to su seizmološka postaja na Geofizičkom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, te postaja Puntijarka u vršnom dijelu Medvednice. Tek zadnjih sedam sati promatranog perioda postaja Kašina postaje aktivna. Ovo će se pokazati kao bitan faktor u lakšoj detekciji i kasnijem lociranju slabije zabilježenih potresa na udaljenijim postajama, s obzirom na činjenicu da aktivacijom postaje Kašina postoje tri aktivne seizmološke postaje u neposrednoj blizini promatranog epicentralnog područja.



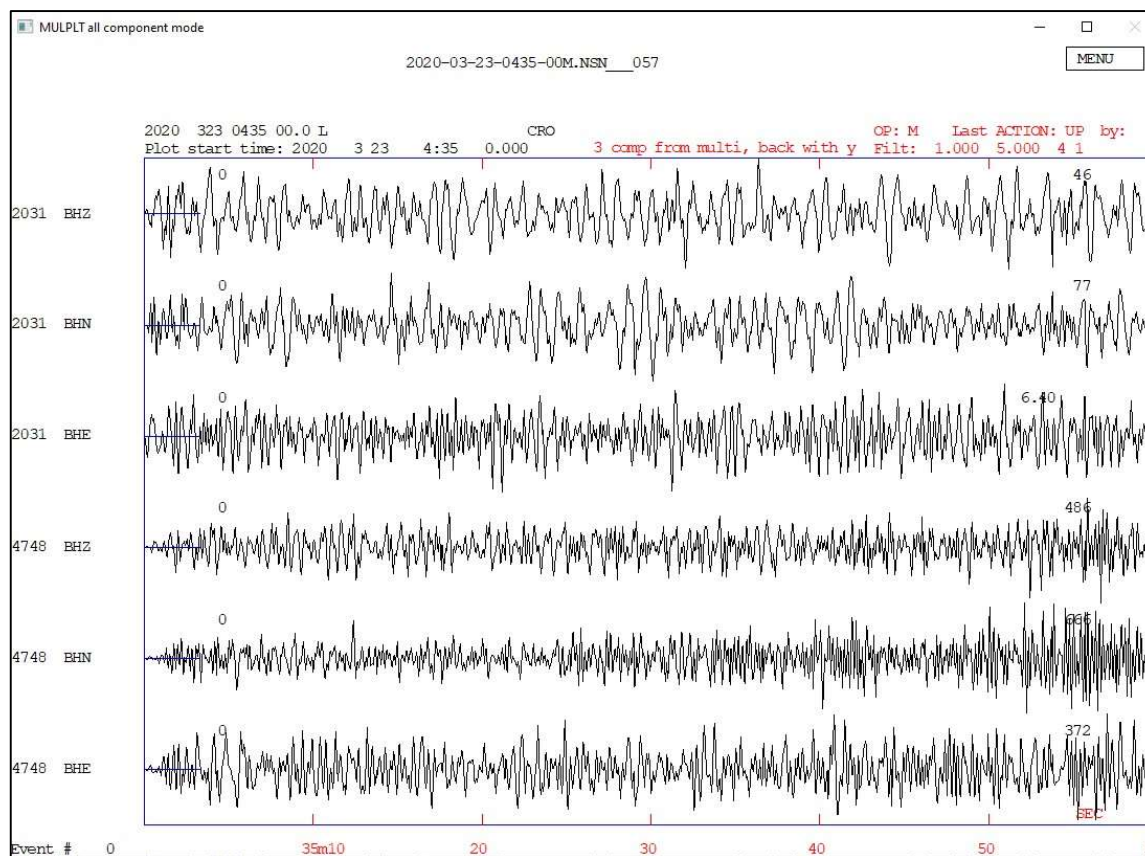
Slika 28. Primjer potresa s amplitudom jasno vidljivom iznad šuma signala samo na najbližim postajama. Ovakav potres uspješno je detektiran samo Carl Johnsonovim algoritmom

Suprotno tome, potresi većih magnituda (slika 29) jasnije su zabilježeni s većom amplitudom iznad šuma signala na većem broju seizmoloških postaja te se lakše detektiraju i s manje osjetljivim detektorom poput testiranog standardnog STA/LTA algoritma. Oba algoritma sposobna su detektirati i uredno registrirati ovakve potrese, ukoliko ne postoji neki dodatni otežavajući faktor koji utječe na uspješnost detekcije.



Slika 29. Primjer potresa jasno zabilježenog na većem broju seizmoloških postaja unutar selektirane mreže za detekciju. Ovakav potres uspješno je detektiran i registriran s oba testirana algoritma

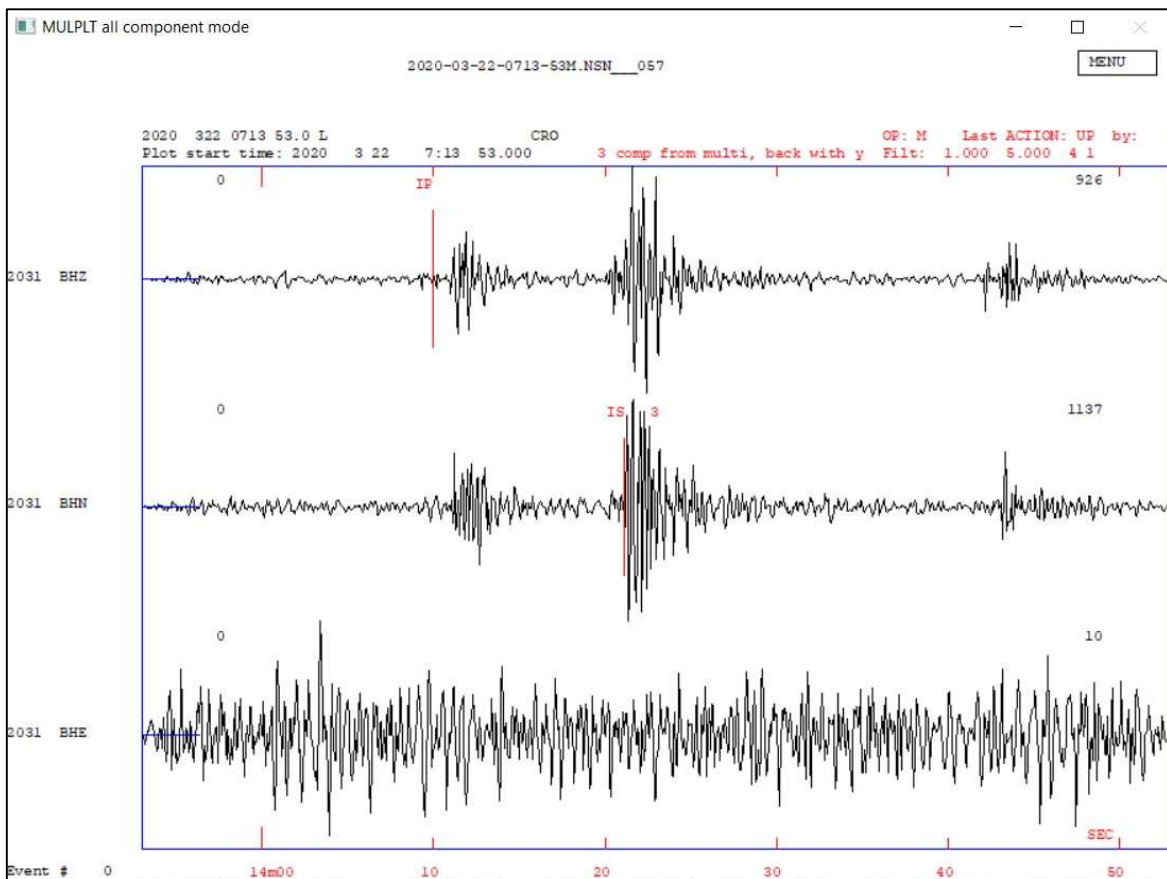
Negativna strana veće osjetljivosti algoritma za detekciju očituje se u situacijama kada takav algoritam zbog osjetljivosti okidanja pokrene detekciju kod seizmičkog šuma te registrira tzv. „lažno pozitivni“ rezultat u bazu podataka (slika 30). Isto tako, javljaju se situacije kada se isti potres detektira i registrira kao dva zapisa u bazi podataka. Ovakve situacije vrlo su rijetke u slučaju standardnog STA/LTA algoritma manje osjetljivosti, dok su kod Carl Johnsonovog modificiranog STA/LTA algoritma dosta izražene, što će se kasnije jasno odraziti u broju uspješnih lociranja hipocentara potresa.



Slika 30. Primjer situacije kada je seizmički šum registriran kao potres Carl Johnsonovim algoritmom detekcije. Ovaj trenutak nije registriran kao seizmički događaj od strane standardnog STA/LTA algoritma i Hrvatskog kataloga potresa

Jedan od otežavajućih faktora za uspješnu automatsku detekciju jest i relativno česta situacija kada u zapisima sa seizmoloških postaja postoje dva ili više vremenski vrlo bliska potresa (slika 31). Detaljnijom analizom detekcija te usporedbom s postojećim katalogom primijećen je cijeli niz vremenski vrlo bliskih potresa (u razmaku od 10 - 60 sekundi) koje su u većini slučajeva oba algoritma propustila uspješno detektirati. Vrlo finim podešavanjem parametara detekcije moguće je riješiti pojedine situacije ovog tipa, no kada bi se takav pristup primijenio na veći vremenski period, rezultat bi bio veliki broj „lažnih“ ili dvostruko registriranih detekcija. Iz tog razloga, ovakav pristup nije održiv za potrebe obrade velike količine podataka poput onih dobivenih promatranjem potresa iz zagrebačke serije potresa. Razlozi za neuspješnu detekciju vremenski vrlo bliskih seizmičkih događaja mogu se pronaći u nesavršenosti algoritama za automatsku detekciju STA/LTA tipa. Naime, ovi algoritmi, unatoč relativnoj sofisticiranosti, ipak pokazuju određene manjkavosti u odnosu na ručni pregled i detekciju seizmičkih događaja od strane čovjeka. Algoritam pregledava kontinuirani zapis s pojedine postaje te okida detektor kada naiđe na dovoljnu promjenu

amplitude. Detekcija završava kad amplituda padne ispod razine podešene parametrima. Ovakvim pristupom vremenski vrlo bliski potresi tretiraju se kao nailasci različitih valova istog seizmičkog događaja te ih detektori propuštaju registrirati kao zasebne događaje. Za razliku od toga, pristup ručne detekcije od strane čovjeka uglavnom se svodi na sagledavanje šire slike za određeni vremenski period umjesto da se fokusira na pojedini rast amplitude signala, koji se može okarakterizirati kao potres. Na taj način uspijevaju se razlučiti vremenski vrlo bliski seizmički događaji kao individualni potresi.



Slika 31. Primjer situacije s nekoliko vremenski vrlo bliskih potresa, zabilježenih na seizmološkoj postaji Puntijarka. Detektirani su i registrirani u baze podataka kao jedan seizmički događaj

Potencijalno rješenje ovakvih problema može se pronaći u najmodernijim metodama automatske detekcije poput modela za automatsku detekciju pomoću strojnog učenja. Ovakvi modeli imaju dvije prednosti pred nešto starijim STA/LTA algoritmima. Prva prednost nalazi se u činjenici da modeli simuliraju čovjekov princip rada te prvo sagledavaju širu sliku određenog zapisa, a onda se fokusiraju na pojedine seizmičke događaje za detekciju i određivanje vremena dolaska P i S valova. Druga prednost leži u samim

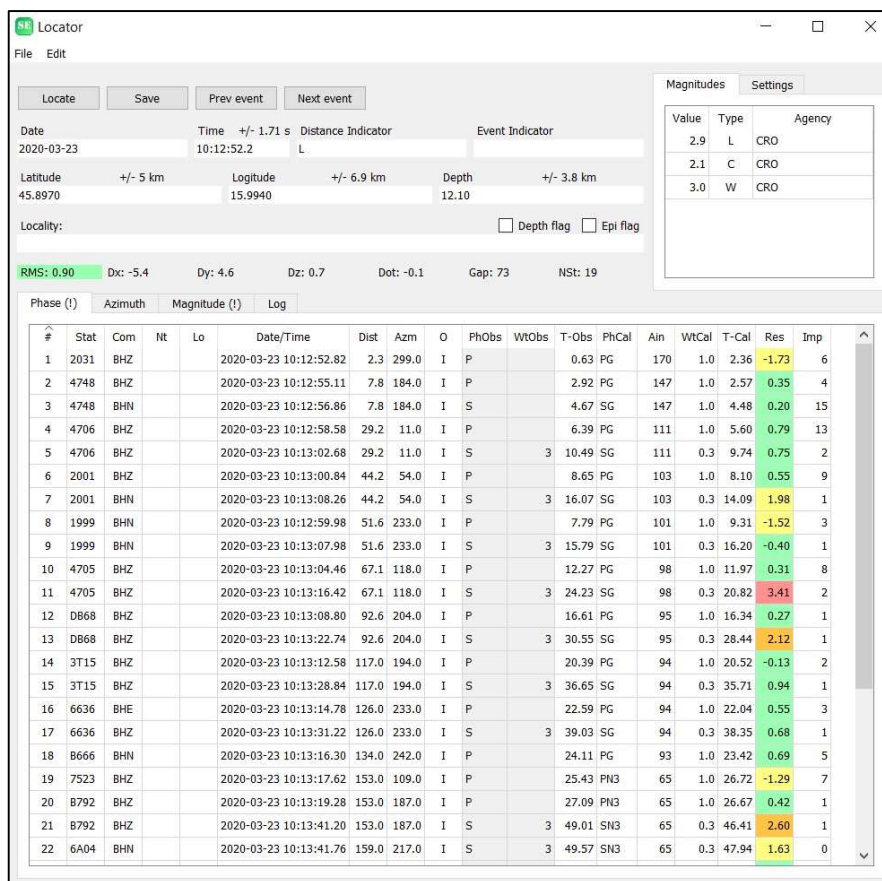
principima rada modela strojnog učenja. Naime, modeli strojnog učenja na temelju testnih podataka uče kako prepoznavati određene uzorke, u ovom slučaju promjene amplituda signala nailascima P i S valova. Ovo je ujedno i ključna razlika u odnosu na klasične algoritme. Klasični algoritmi okidanja reagiraju isključivo na promjenu amplitude signala, dok modeli strojnog učenja reagiraju na cjelokupne uzorke. Takvim principom rada, modeli strojnog učenja omogućuju automatsku detekciju vremenski vrlo bliskih potresa, a isto tako pokazuju i iznimno dobre rezultate u detekcija potresa malih i vrlo malih magnituda. Pojedini rezultati takvih istraživanja pokazuju i puno veći uspjeh detekcije u odnosu na ručnu detekciju od strane čovjeka. Primjer za to je istraživanje potresa Tottori sekvence na području Japana, gdje je pomoću modela strojnog učenja uspješno detektirano 2,5 puta više potresa u odnosu na ručnu detekciju (MOUSAVI, 2021). Jedna od mana ovakvog principa detekcije jest potrebna velika količina testnih podataka već detektiranih potresa, da bi model uspješno prepoznao uzorke i detektirao potrese iz zapisa. Što je veći broj testnih podataka, rezultati modela su bolji i precizniji. Model je najuspješniji ukoliko se strojno učenje radi na postojećim podacima iz promatranog područja. Isto tako, da bi se uspješno razvili ovakvi modeli strojnog učenja, potrebna je veća količina vremena i specifičnog tehničkog znanja u odnosu na standardne STA/LTA algoritme.

Problemi iz faze detekcije kao prve faze automatizacije obrade zapisa potresa uglavnom se prenose u drugu fazu i utječu na uspješnost i preciznost određivanja vremena dolaska P i S valova na pojedinom zapisu, te naposljetku i izračun rješenja hipocentra lokacije. Kako je pokazano u poglavlju Rezultati, potpuno automatizirano uspješno je locirano 35 potresa iz zagrebačke serije potresa u slučaju A, dok je u slučaju B uspješno locirano 22 potresa. Nakon minimalnih ručnih korekcija u slučaju A je uspješno locirano 239, dok je slučaju B uspješno locirano 124 potresa iz zagrebačke serije potresa. Iz ovih rezultata vrlo je jasno vidljivo da je teško ostvariv potpuno automatizirani princip korištenjem ranije navedenih metoda automatske detekcije i lociranja potresa sa zadovoljavajućim rezultatima. Minimalnim ručnim korekcijama, na način objašnjen u poglavlju Metode istraživanja, rezultati postaju zadovoljavajući. Ipak, kada se ovi rezultati usporede s postojećim katalogom potresa, vidimo razliku uspješno detektiranih i lociranih potresa preko 50% u korist postojećeg kataloga (tablica 9).

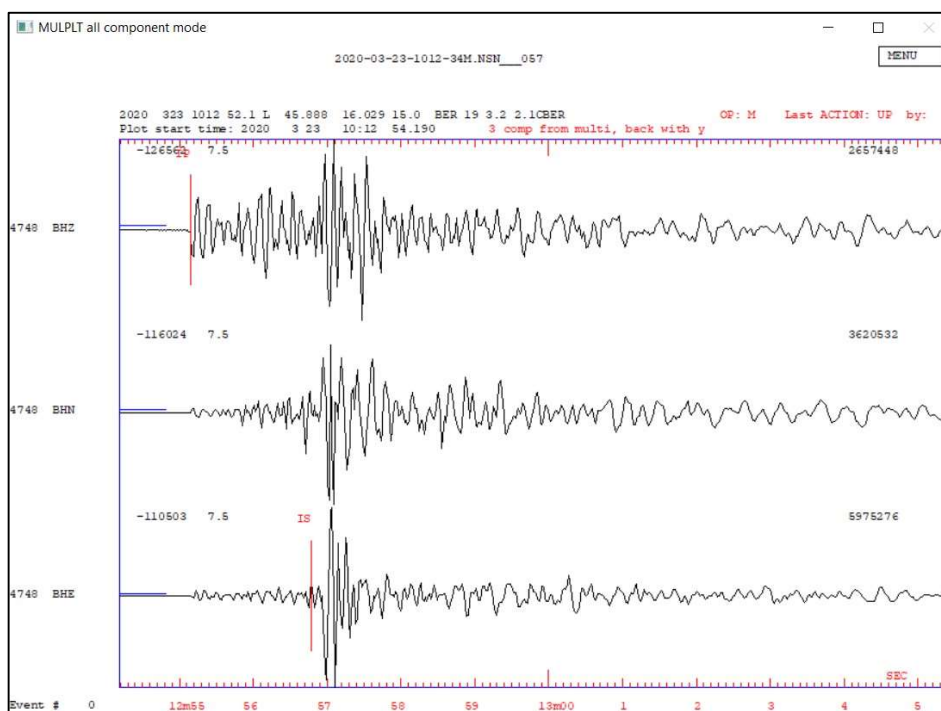
Tablica 9. Broj uspješno lociranih potresa iz zagrebačke serije potresa za dva testirana slučaja te iz hrvatskog kataloga potresa

| | STA/LTA algoritam (slučaj A) | Carl Johnson STA/LTA (slučaj B) | Hrvatski katalog potresa |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Broj potresa | 239 | 124 | 534 |

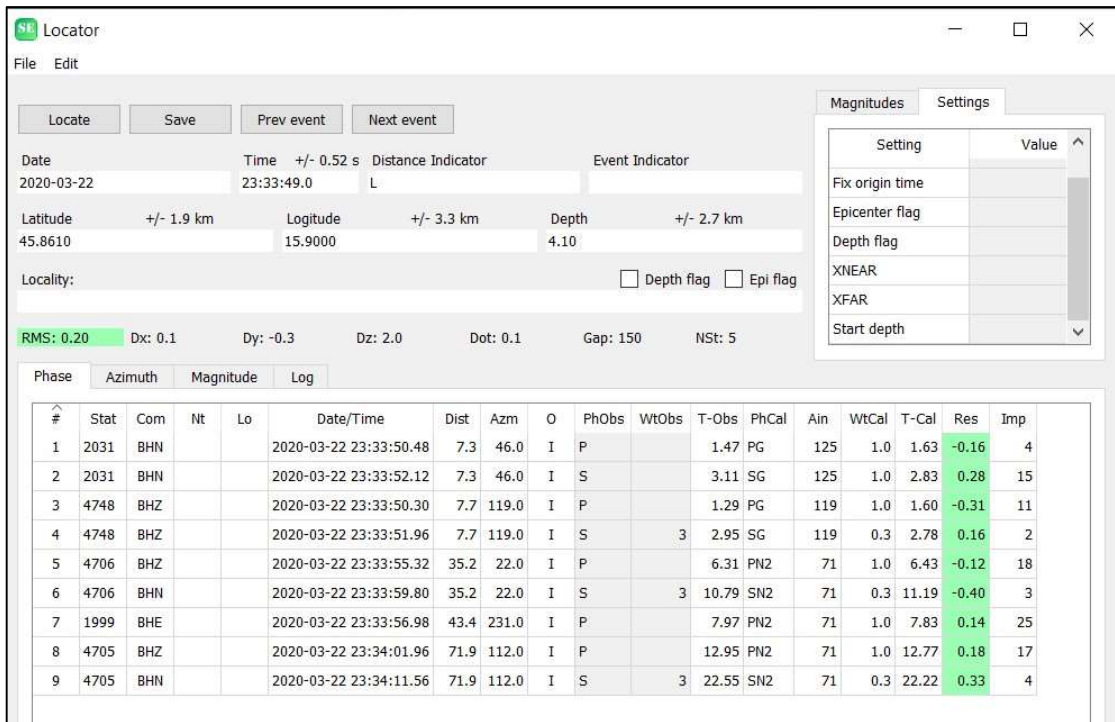
Sa zadovoljavajućim parametrima točnosti lokacije potresa uspješno su potpuno automatski locirani potresi uglavnom s magnitudom većom od 2. Takvi potresi su na seizmogramima karakterizirani jasnom amplitudom iznad šuma signala kako bi ih softver u prvoj fazi dobro detektirao i registrirao, a onda i dobro locirao pomoću algoritma za određivanje dolazaka P i S valova (slika 32), te algoritma za izračun rješenja lokacije hipocentra. Osim jasnih amplituda seizmičkih događaja iznad šuma signala, ovakvi potresi jasno su zabilježeni na dovoljnom broju postaja u radijusu obuhvaćenom ovim istraživanjem. Veći broj postaja i odabranih P i S faza omogućuje algoritmu automatskog lociranja izbacivanje faza koje odskaču te precizniji izračun rješenja hipocentra lokacije (slika 33). U slučaju potresa koji su jasno zabilježeni na manjem broju postaja, softver ne uspijeva automatski izračunati dobro rješenje lokacije. Ovdje se uglavnom radi o potresima manjih magnituda. Ipak, ovo nije nužno slučaj sa svakim seizmičkim događajem manje magnitude. Pojedini potresi magnitude manje od 2 uspješno su locirani s prihvatljivom pogreškom lociranja i $RMS < 2$ (slika 34). Isto tako postoje slučajevi gdje su potresi magnitude većih od 2 te zabilježeni na većem broju postaja locirani s velikom pogreškom. Do ovakvih slučajeva dolazi u situaciji kada postoji dovoljan broj određenih P i S faza (više od 10), no iste su neprecizno određene.



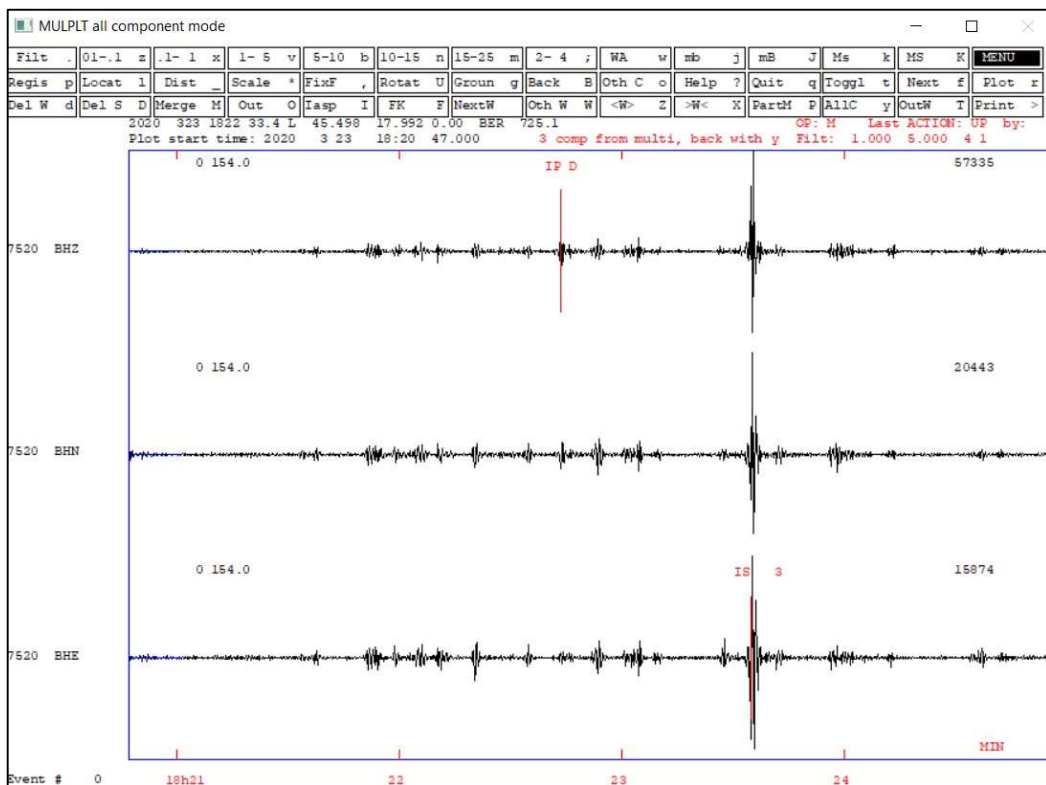
Slika 32. Primjer dobro lociranog potresa lokalne magnitude 2.9 potpunom automatizacijom softvera SEISAN



Slika 33. Detalj istog potresa u obliku trokomponentnog zapisa sa seizmološke postaje Zagreb. Na zapisu se dobro vide detektirani dolasci P i S faza



Slika 34. Primjer potresa magnitude 1.3 uspješno lociranog potpuno automatskim lociranjem softvera SEISAN



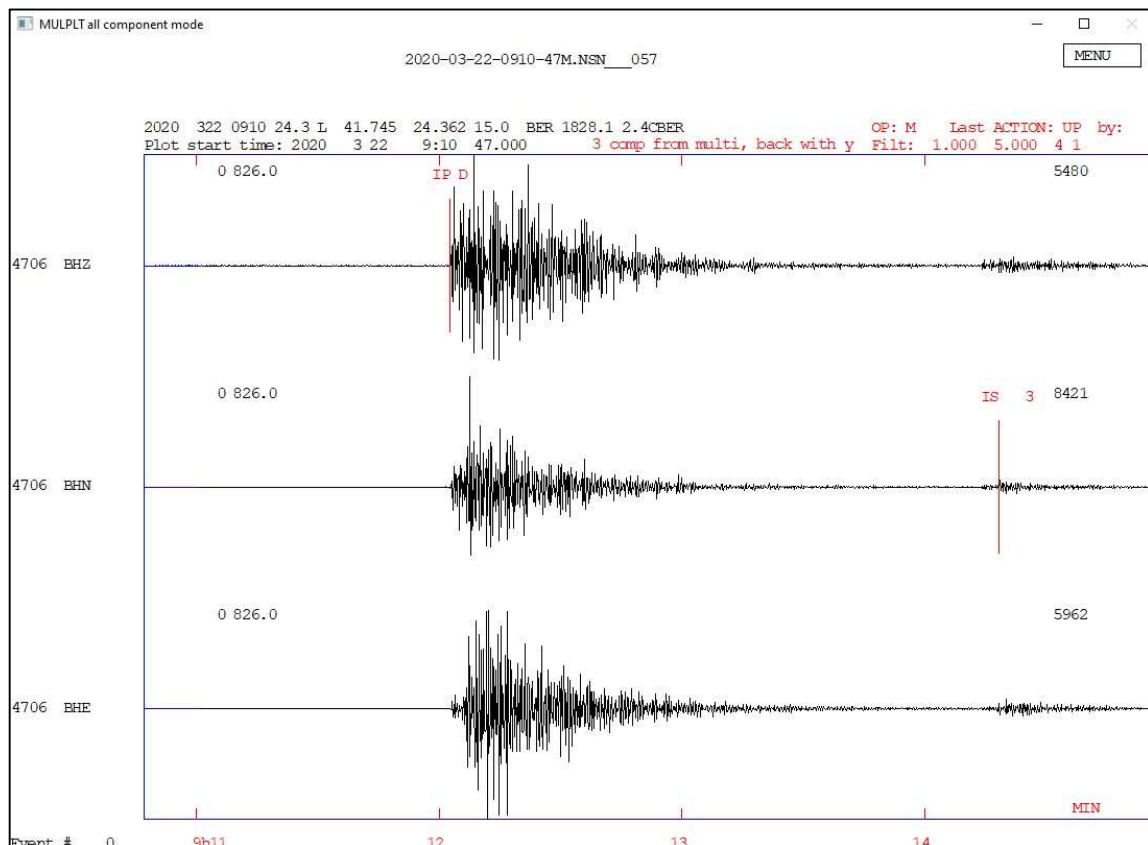
Slika 35. Pregled trokomponentnog zapisa postaje Kašina za potres koji se dogodio 23.ožujka u 18:20 UTC

Na slici 35 se jasno vidi pogrešna odredba vremena dolaska P i S valova, što uzrokuje neuspješno lociranje ili lociranje s velikom pogreškom. Zapis je filtriran pomoću filtera 1 - 5 Hz da bi se jasnije prikazao signal i pogreška pri odredbi.

Razloga za to može biti nekoliko, a analizom pojedinih krivo lociranih seizmičkih događaja, mogu se izvući dva glavna razloga:

1. Vrijeme dolaska pojedine faze jasno je vidljivo na zapisu iznad šuma signala, no algoritam zbog nesavršenosti radi nepreciznu odredbu faze;
2. U detektiranom i registriranom zapisu postoji više seizmičkih događaja, što uzrokuje pogrešnu odredbu pojedinih faza.

Ovakve potrese uglavnom je moguće uspješno locirati minimalnom ručnom korekcijom u obliku izbacivanja krivo određenih P i S faza ili korekcije krivo određenog vremena dolaska automatski određenih P i S faza.

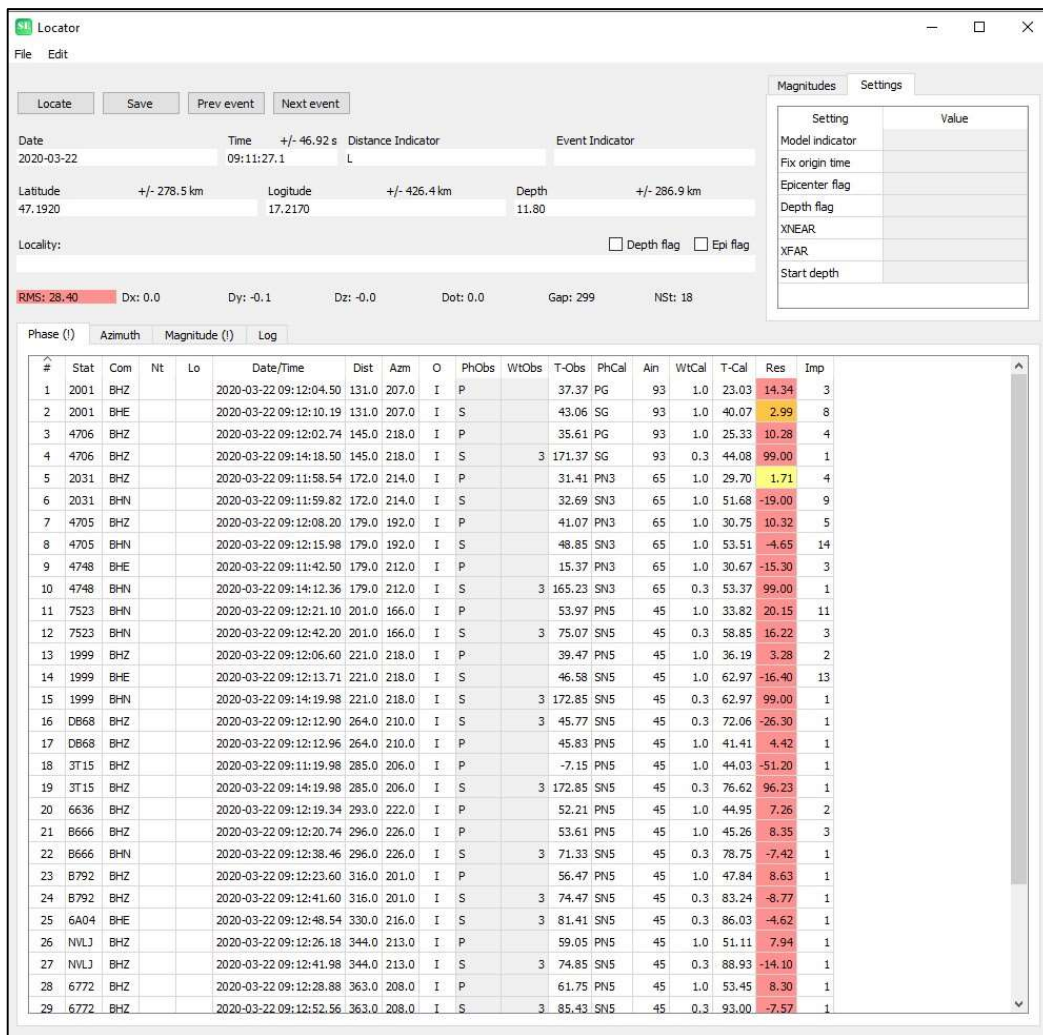


Slika 36. Primjer pogrešne odredbe dolaska S vala na horizontalnoj komponenti BHN trokomponentnog zapisa s jedne od seizmoloških postaja za potres UTC 22.03. 9:11:56

Na zapisu prikazanom na slici 36 vide se dva seizmička događaja, a algoritam odredbe pogrešno određuje drugi seizmički događaj kao nailazak S faze prethodnog događaja.

Slučaj kada je potres zabilježen na dovoljnom broju postaja no s nepreciznim rješenjem lokacije hipocentra, jednostavno se rješava na način da se ručnom korekcijom u programu Locator izbace faze na kojima su napravljene loše automatske odredbe vremena dolaska P i S valova. Izbacivanjem nepreciznih odredbi vremena dolaska P i S valova program radi novi izračun rješenja lokacije hipocentra te se u većini ovakvih slučajeva dobiva puno preciznija lokacija sa zadovoljavajućim parametrima točnosti.

Kao primjer može se izdvojiti ranije navedeni potres UTC 22.03. 9:11:56 magnitude $M_L = 3$ (slika 37). Ovaj potres zabilježen je na nizu postaja s više od 30 automatski određenih P i S faza. Unatoč tome, niz P i S faza je krivo određen, a kao posljedica je potres lociran s velikom pogreškom (pogreška koordinata lokacije > 400 km, $RMS = 28$).



Slika 37. Potres UTC 22.03. 9:11:56 zabilježen na nizu postaja s više od 30 odredbi vremena dolaska P i S valova. Potres je unatoč velikom broju odredbi lociran s velikom pogreškom lokacije te RMS = 28

Ručnom korekcijom, tj. izbacivanjem pogrešno određenih P i S faza, potres je uspješno lociran s malom pogreškom (lokacija +/- 4 km) te RMS = 0,6 (slika 38).

Locator

File Edit

Locate Save Prev event Next event

Date: 2020-03-22 Time: 09:11:56.5 +/- 1.34 s Distance Indicator: L Event Indicator:

Latitude: 45.8740 +/- 3.2 km Longitude: 16.0510 +/- 3.5 km Depth: 10.40 +/- 4.1 km

Locality: Depth flag Epi flag

RMS: 0.60 Dx: 0.0 Dy: 0.1 Dz: 0.4 Dot: -0.0 Gap: 69 NSt: 14

Magnitudes Settings

| Setting | Value |
|-----------------|-------|
| Model indicator | |
| Fix origin time | |
| Epicenter flag | |
| Depth flag | |
| XNEAR | |
| XFAR | |
| Start depth | |

| Phase | Azimuth | Magnitude (I) | Log | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|---------------|-----|----|------------------------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|
| # | Stat | Com | Nt | Lo | Date/Time | Dist | Azm | O | PhObs | WtObs | T-Obs | PhCal | Ain | WtCal | T-Cal | Res | Imp |
| 1 | 2031 | BHZ | | | 2020-03-22 09:11:58.54 | 7.4 | 300.0 | I | P | | 2.04 | PG | 146 | 1.0 | 2.42 | -0.38 | 4 |
| 2 | 2031 | BHN | | | 2020-03-22 09:11:59.82 | 7.4 | 300.0 | I | S | | 3.32 | SG | 146 | 1.0 | 4.21 | -0.89 | 14 |
| 3 | 4706 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:02.74 | 31.3 | 2.0 | I | P | | 6.24 | PG | 106 | 1.0 | 5.84 | 0.40 | 7 |
| 4 | 2001 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:04.50 | 42.4 | 47.0 | I | P | | 8.00 | PG | 101 | 1.0 | 7.73 | 0.27 | 5 |
| 5 | 2001 | BHE | | | 2020-03-22 09:12:10.19 | 42.4 | 47.0 | I | S | | 13.69 | SG | 101 | 1.0 | 13.45 | 0.24 | 10 |
| 6 | 1999 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:06.60 | 53.8 | 238.0 | I | P | | 10.10 | PG | 98 | 1.0 | 9.63 | 0.47 | 1 |
| 7 | 1999 | BHE | | | 2020-03-22 09:12:13.71 | 53.8 | 238.0 | I | S | | 17.21 | SG | 98 | 1.0 | 16.76 | 0.45 | 5 |
| 8 | 4705 | BHE | | | 2020-03-22 09:12:08.20 | 61.9 | 118.0 | I | P | | 11.70 | PG | 97 | 1.0 | 11.05 | 0.66 | 4 |
| 9 | 4705 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:15.98 | 61.9 | 118.0 | I | S | | 19.48 | SG | 97 | 1.0 | 19.22 | 0.26 | 14 |
| 10 | DB68 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:12.96 | 92.2 | 207.0 | I | P | | 16.46 | PG | 94 | 1.0 | 16.24 | 0.22 | 1 |
| 11 | DB68 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:24.31 | 92.2 | 207.0 | I | S | | 27.81 | SG | 94 | 1.0 | 28.26 | -0.45 | 7 |
| 12 | 6636 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:19.34 | 128.0 | 235.0 | I | P | | 22.84 | PG | 93 | 1.0 | 22.38 | 0.46 | 1 |
| 13 | B666 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:20.74 | 137.0 | 244.0 | I | P | | 24.24 | PG | 93 | 1.0 | 23.89 | 0.35 | 2 |
| 14 | B666 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:38.46 | 137.0 | 244.0 | I | S | 3 | 41.96 | SG | 93 | 0.3 | 41.57 | 0.40 | 0 |
| 15 | 7523 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:21.10 | 148.0 | 109.0 | I | P | | 24.60 | PG | 92 | 1.0 | 25.90 | -1.30 | 4 |
| 16 | 7523 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:42.20 | 148.0 | 109.0 | I | S | 3 | 45.70 | SG | 92 | 0.3 | 45.07 | 0.63 | 1 |
| 17 | B792 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:23.60 | 151.0 | 189.0 | I | P | | 27.10 | PG | 92 | 1.0 | 26.36 | 0.74 | 2 |
| 18 | B792 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:41.60 | 151.0 | 189.0 | I | S | 3 | 45.10 | SG | 92 | 0.3 | 45.86 | -0.76 | 1 |
| 19 | NVLJ | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:26.18 | 173.0 | 213.0 | I | P | | 29.68 | PN3 | 65 | 1.0 | 29.81 | -0.13 | 2 |
| 20 | 6772 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:28.88 | 192.0 | 204.0 | I | P | | 32.38 | PN5 | 45 | 1.0 | 32.89 | -0.50 | 5 |
| 21 | 6772 | BHN | | | 2020-03-22 09:12:52.56 | 192.0 | 204.0 | I | S | 3 | 56.06 | SN5 | 45 | 0.3 | 57.22 | -1.16 | 1 |
| 22 | B664 | BHZ | | | 2020-03-22 09:12:32.90 | 223.0 | 201.0 | I | P | | 36.40 | PN5 | 45 | 1.0 | 36.67 | -0.27 | 5 |
| 23 | A011 | BHE | | | 2020-03-22 09:12:32.80 | 225.0 | 187.0 | I | P | | 36.30 | PN5 | 45 | 1.0 | 36.81 | -0.51 | 4 |
| 24 | A011 | BHZ | | | 2020-03-22 09:13:00.22 | 225.0 | 187.0 | I | S | 3 | 63.72 | SN5 | 45 | 0.3 | 64.06 | -0.34 | 1 |

Slika 38. Izračun novog rješenja za lokaciju hipocentra potresa UTC 22.03. 9:11:56 nakon ručnih korekcija

Kod potresa magnituda $ML < 1.5$ situacija je nešto drugačija. Takvi potresi su bili zabilježeni na manjem broju postaja te je broj automatski određenih P i S faza bio manji od 10 (najčešće se radilo o pet do šest faza s najbližih postaja). Za ovakve potrese u većini slučajeva izbacivanje krivo određenih P i S faza rezultiralo bi s manje od pet određenih faza na manje od tri postaje, što bi rezultiralo s nemogućnosti izračuna rješenja lokacije. Ručna korekcija automatske odredbe pojedinih faza pokazala se kao dobro rješenje u navedenim situacijama te je u više od 90% slučajeva rezultiralo preciznijom lokacijom uz zadovoljavajuće parametre točnosti.

Analizirajući podatke dobivene u svim fazama istraživanja te uspoređujući potpuno automatizirane rezultate s rezultatima dobivenim manjim ručnim korekcijama te s postojećim podacima iz hrvatskog kataloga potresa može se izvući osnovni zaključak da za promatrani period algoritmi za automatizaciju lokacije hipocentra potresa funkcioniraju na

zadovoljavajućoj razini za potrese s magnitudama iznad 2. Kod potresa s magnitudom $ML < 2$, a pogotovo s magnitudom $ML < 1.5$ javljaju se problemi već prilikom detekcije kao prve faze automatizacije, a kasnije i kod odredbe P i S faza, te naposljetku kod izračuna rješenja lokacije hipocentra. Algoritam za odredbu P i S valova kod potresa malih i vrlo malih magnituda unatoč filterima teško razaznaje signal potresa od šuma signala, što u pojedinim situacijama rezultira pogrešnom odredbom ili potpunim izostankom iste. Kao što je ranije prikazano, ovakve slučajeve često se može uspješno riješiti i locirati s manjim ručnim korekcijama. No, kako je pokazano ranije u ovom poglavlju, pogrešna odredba vremena dolaska P i S valova nije isključivo vezana za potrese malih i vrlo malih magnituda već se javlja i kod potresa magnituda $ML > 2$. Isto tako, zabilježeni su slučajevi potresa magnituda $ML < 1,5$ koji su uspješno potpuno automatski locirani.

Analizom pojedinih slučajeva koji na temelju magnituda odskaku po uspješnosti lociranja od očekivanog, može se primijetiti uzorak koji se ponavlja. Uglavnom se radi o zapisu na kojem je zabilježeno više odvojenih, ali vremenski vrlo bliskih seizmičkih događaja. U ovakvim situacijama, algoritam zbog nesavršenosti može pogrešno odrediti vrijeme dolaska P i S valova za različite seizmičke događaje na istom zapisu te time uzrokovati pogrešku pri izračunu rješenja lokacije.

Temeljem takve analize može se izvući zaključak kako je automatska detekcija i registracija zapisa potresa kao prva faza automatizacije vrlo bitna za pravilno određivanje lokacije pojedinog potresa. Vrlo preciznom detekcijom i izoliranjem zapisa jednog seizmičkog događaja stvaraju se dobri preduvjeti za uspješno lociranje potresa s malom pogreškom, neovisno o magnitudi. U promatranom periodu od 22. ožujka 2020. godine do 17:00 sati 23. ožujka 2020. godine u radijusu od 20 km od epicentralnog područja bile su aktivne samo dvije seizmološke postaje. Postaja Kašina postaje aktivna od 17:00 sati 23. ožujka 2020. godine, što daje period od sedam sati unutar promatranog perioda za detekciju s tri postaje u neposrednoj blizini epicentralnog područja. Zbog malog broja postaja u blizini epicentralnog područja parametri vremenskog prozora za detekciju u sklopu ovog istraživanja podešeni su na period od 25 sekundi te su izolirani zapisi u periodu 60 sekundi. Ovakav pristup rezultirao je većim brojem uspješnih detekcija i lokacija potresa, no isto tako nizom zapisa koji sadržavaju više od jednog seizmičkog događaja. Potencijalno rješenje ovakvog problema detekcije nalazi se u gušćoj seizmološkoj mreži u blizini epicentralnog područja, što bi omogućilo smanjenje radijusa s postajama uključenim u detekciju, a time i

vremenski prozor detekcije. Nedugo nakon promatranog perioda u sklopu ovog istraživanja, u hrvatskoj seizmološkoj mreži postaje aktivno nekolicina novih postaja, od kojih su dvije u neposrednoj blizini epicentralnog područja zagrebačke serije potresa. Daljnje istraživanje mogućnosti automatizacije obrade velike količine podataka dobivenih zapisima potresa iz zagrebačke serije potresa svakako bi trebalo ići u smjeru ispitivanja mogućnosti SEISAN-a i njegovih algoritama u situaciji kada je aktivno pet ili više postaja u neposrednoj blizini promatranog područja. Ovime se ostvaruju uvjeti za preciznije podešavanje algoritama za detekciju, što bi teoretski trebalo rezultirati uspješnijim i preciznijim detekcijama kao osnovi za precizniju lokaciju hipocentara potresa.

Isto tako, kao što je navedeno ranije u ovom poglavlju, metode i modeli strojnog učenja za detekciju i određivanje vremena nailaska P i S valova potresa pokazali su se izuzetno korisnima za uspješnu i preciznu detekciju potresa malih i vrlo malih magnituda. Implementacija takvog modela, pored svih mogućnosti softverskog paketa SEISAN, mogla bi se pokazati kao iznimno dobro rješenje problema potpune automatizacije obrade zapisa potresa iz zagrebačke serije potresa iz 2020. godine.

8. Zaključak

Automatska detekcija i lociranje hipocentra potresa vrlo su korisne metode koje smanjuju vrijeme obrade ogromne količine podataka koji dolaze u serijama potresa poput zagrebačke serije potresa iz 2020. godine. Vrijeme potrebno za detekciju potresa, određivanje vremena dolaska P i S valova na pojedinim trokomponentnim zapisima seizmoloških postaja, te naposljetku i lociranje hipocentra na ovakav način smanjuje se s nekoliko mjeseci na nekoliko dana do tjedana.

Potpuno automatizirana detekcija i lociranje smanjili bi ovo vrijeme na svega nekoliko desetaka minuta do par sati, ovisno o dostupnim hardverskim resursima. Ipak, kako je prikazano u ovom radu, potpuno automatizirana detekcija koja upotrebljava algoritme unutar softverskog paketa SEISAN nije na potpuno dostatnoj razini da bi se mogla smatrati uspješnom metodom za detektiranje čitave serije potresa. U prvom koraku kada je testirana potpuna automatizacija ovog procesa, uspješno je locirano svega oko 10% potresa koji su naknadno uspješno locirani uz minimalne ručne korekcije. Usporedbom s postojećim katalogom, izrađenim na temelju ručnih detekcija i lociranja, ova brojka pada ispod 5%. Primjenom minimalnih ručnih korekcija automatskih odredbi na način opisan u poglavlju istraživanja, dobivaju se puno povoljniji rezultati te je uspješno locirano oko 50% potresa iz postojećeg hrvatskog kataloga potresa. Ovakva drastična razlika u postocima uspješnosti jasno ukazuje na činjenicu da algoritmi pojedinačno funkcioniraju na zadovoljavajućoj razini, no kada se proces kompletno automatizira, cijeli sustav ne funkcionira na zadovoljavajućoj razini. Daljnja istraživanja potpune automatizacije detekcije i lokacije potresa zagrebačkog područja svakako bi trebala ići u smjeru poboljšanja procesa automatskog lociranja potresa pomoću softverskog paketa SEISAN. Ovakva poboljšanja mogu se ostvariti prije svega u detaljnoj kalibraciji osjetljivosti algoritma detekcije te njegovih parametara. Vrlo precizno detektirani i izolirani seizmički događaji ostvarit će preduvjete za precizniju odredbu vremena dolaska P i S signala te naposljetku i rješenja lokacije hipocentra potresa. Osim toga, valja istražiti i mogućnosti implementacije najmodernijih metoda poput prepoznavanja uzoraka potresa pomoću strojnog učenja. Ovakve metode, implementirane uz softverski paket SEISAN potencijalno mogu dati iznimno dobre rezultate.

9. Literatura

- ALI, S. M., ABDELRAHMAN, K., AL-OTAIBI, N. (2021): Tectonic stress regime and stress patterns from the inversion of earthquake focal mechanisms in NW Himalaya and surrounding regions, *Journal of King Saud University – Science*, 33 (2),1–9.
- AMMON, C. J., VELASCO, A. A., LAY, T., WALLACE, T. C. (2020): An introduction to earthquake location. U: *Foundations of Modern Global Seismology*, Academic Press, Massachusetts, SAD,169–195.
- ATALIĆ, J., UROŠ, M., ŠAVOR NOVAK, M., DEMŠIĆ, M., NASTEV, M. (2021): The $M_w5.4$ Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19,3461–3489.
- BARRY, B., LIENERT, R., BERG, E., NEIL FRAZER, L. (1986): HYPOCENTER: An earthquake location method using centred, scaled and adaptively damped least squares, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76 (3),771–783.
- CHI-DURAN, R., COMTE, D., DIAZ, M., SILVA, J. F. (2017): Automatic detection of P- and S-wave arrival times: new strategies based on the modified fractal method and basic matching pursuit, *Journal of Seismology*, 21 (4),1–14.
- DASOVIĆ, I., HERAK, D., HERAK, M., LATEČKI, H., MUSTAĆ, M., TOMLJENOVIĆ, B. (2020): About earthquakes in Croatia, *Croatian Geological Society News* 57 (1), 4–27.
- GIBBONS, S. J ., RINGDAL, F., KVÆRNA, T (2008): Detection and characterization of seismic phases using continuous spectral estimation on incoherent and partially coherent arrays. *Geophysical Journal International* (172),405–421.
- HAVSKOV, J., OTTEMÖLLER, L. (2010): *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*, Berlin, Springer,101–282.
- HAVSKOV, J., OTTEMÖLLER, L., VOSS, P. H. (2020): *Seismological Observatory Software: 30 Yr of SEISAN*, *Seismological Research Letters*, 91 (3),1846–1852.
- HAVSKOV, J., BORMANN, P., SCHWEITZER, J. (2012): *Seismic source location. U: New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam,1–36.
- HERAK, D., HERAK, M., ORLIĆ, N. (2021): Properties of the Zagreb 22 March 2020 earthquake sequence – analyses of the full year of aftershock recording, *Geofizika*, 38 (2),93–116.

- HERAK, M., HERAK, D., MARKUŠIĆ, S. (1996): Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992., *Terra Nova* 8 (1),86–94.
- HUSEN, S., HARDEBECK, J. L. (2010): Earthquake location accuracy, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*. Dostupno na: <http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Husen-Hardebeck-2010-CORSSA-Eqk-location.pdf> (pristupljeno 20.6.2022.)
- HUSEN, S., KISSLING, E. (2011): Local earthquake tomography between rays and waves: fat ray tomography, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 125 (1-4),171–191.
- KARAMZADEH, N., VOSS, P. H., JAVAN, G. D. (2012): Testing of an automatic earthquake detection method on data from Station Nord, Greenland, *Geological Survey of Denmark and Greenland* 26 (26),77–80.
- KARASÖZEN, E., KARASÖZEN, B. (2020): Earthquake location methods, *International Journal of Geomathematics*, 11:13,1–28.
- KIM, W.-Y., OTTEMÖLLER, L. (2017): Regional Pn Body-Wave Magnitude Scale mb(Pn) for Earthquakes Along the Northern Mid-Atlantic Ridge, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (12):10,321–340.
- KOVAČIĆ, M., MANDIĆ, O., TOMLJENIĆ, B. (2016): Miocene paleo-lakes of the southwestern Pannonian Basin. U: *Field Trip Guidebook. Lake-Basin-Evolution, RCMNS Interim Colloquium 2016 & Croatian Geological Society Limnogeology Workshop, Zagreb (Croatian Geological Society)*,11–31.
- KUK, V., PRELOGOVIĆ, E., SOVIĆ, I., KUK, K., ŠARIRI, K. (2000): Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja, *Građevinar*, 52 (11),647–653.
- LIENERT, B. R. (1994): *Hypocenter 3.2.: A Computer Program for Locating Earthquakes Locally, Regionally and Globally*, Hawaii Institute of Geophysics & Planetology, Honolulu
- LOMAX, A., MICHELINI, A., CURTIS, A. (2014): Earthquake Location, Direct, Global - Search Methods. U: *Encyclopedia of Complexity and Systems Sciences*, Springer, New York. Dostupno na: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-27737-5_150-2 (pristupljeno 20.6.2022.)
- LOMAX, A., SAVVAIDIS, A. (2021): High-Precision Earthquake Location Using Source-Specific Station Terms and Inter-Event Waveform Similarity, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127,1–28.

- LOMAX, A., SATRIANO, C., VASSALLO, M. (2012): Automatic Picker Developments and Optimization: FilterPicker—a Robust, Broadband Picker for Real-Time Seismic Monitoring and Earthquake Early Warning, *Seismological Research Letters*, 83 (3),531–540.
- LONČAR, I. (2021): Geodinamika Zagrebačkog i Pokupskog sustava rasjeda, *Diplomski rad*, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb,3–48.
- LUCKETT, R., OTTEMÖLLER, L., BUTCHER, A., BAPTIE, B. (2018): Extending local magnitude M_l to short distances, *Geophysical Journal International*, 216 (2),1145–1156.
- MARKUŠIĆ, S. (2008): Seismicity of Croatia. U: *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*, Springer, Berlin,81–98.
- MARKUŠIĆ, S., STANKO, T., KORBAR, N., BELIĆ, N., PENAVALA, D., KORDIĆ, B. (2020): The Zagreb (Croatia) $M_{5.5}$ Earthquake on 22 March 2020, *Geosciences*, 10 (7),1–21.
- MAURER, V., KISSLING, E., HUSEN, S., QUINTERO, R. (2010): Detection of systematic errors in travel-time data using a minimum 1-D model: Application to Costa Rica seismic tomography, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (2),629–639.
- MOUSAVI, S. M., ELLSWORTH, W. L., ZHU, W., CHUANG, L. Y., BEROZA, G. C. (2020): Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking, *Nature Communications*, 11,1–12.
- NAKIĆ, Z., RUŽIČIĆ, S., POSAVEC, K., MILEUSNIĆ, M., PARLOV, J., BAČANI, A., DURN, G. (2013): Conceptual model for groundwater status and risk assessment – case study of the Zagreb aquifer system, *Geologia Croatica*, 66 (1),55–76.
- OHNAKA, M. (2013): *The Physics of Rock Failure and Earthquakes*, Cambridge University Press, Cambridge
- OKAL, E. A. (2011): Earthquake focal mechanisms. U: *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Springer, Berlin,194–199.
- OTTEMÖLLER, L., VOSS, P. H., HAVSKOV, J. (2013): SEISAN earthquake analysis software. Dostupno na: <https://web.mst.edu/~sgao/manuals/seisan.pdf> (pristupljeno 27.6.2022.)

- OTTEMÖLLER, L., VOSS, P. H., HAVSKOV, J. (2021): SEISAN Earthquake Analysis Software for Windows, Solaris, Linux and MacOSx, Version 12.0., University of Bergen, Bergen
- PADOVAN, B., PODOLSZKI, L., SOKOLIĆ, I., SOVIĆ, I., NOVOSEL, T., PIVČEVIĆ, N., KOSOVIĆ, I. (2021): Seismic and geological zonation of the part of the city of Zagreb area. U: 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering 1CroCEE, 22-24 March 2021, Zagreb. Dostupno na: https://crocee.grad.hr/event/1/contributions/45/attachments/49/85/002_CroCEE_ID_26.pdf (pristupljeno 30.6.2022.)
- PAVLIS, G. L. (1986): Appraising earthquake hypocenter location errors - a complete, practical approach for single-event locations, *Bulletin of the Seismological Society of America* 76 (6),1699–1717.
- PUJOL, J. (1992): Joint hypocentral location in media with lateral velocity variations and interpretation of the station corrections, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 75 (1-3),7–24.
- PUJOL, J. (2000): Joint event location - The JHD technique and applications to data from local seismic networks. U: *Advances in Seismic Event Location*, Kluwer Academic Publishes, Boston; London; Dordrecht,163–204.
- REITER, L. (1990): *Earthquake Hazard Analysis: issues and insights*, Columbia University Press, New York
- ROMERO, J. E., TITOS, M., BUENO, Á., ÁLVAREZ, I., GARCÍA, L., DE LA TORRE, Á. (2016): APASVO: A free software tool for automatic P-phase picking and event detection in seismic traces, *Computers & Geosciences*, 90,213–220.
- SHI, P., GRIGOLI, F., LANZA, F., BEROZA, G. C., SCARABELLO, L., WIEMER, S. (2022): MALMI: An Automated Earthquake Detection and Location Workflow Based on Machine Learning and Waveform Migration, *Seismological Research Letters*,1–10.
- STEIN, S., WYSESSION, M. (2009): *An introduction to seismology, earthquakes and structure*, John Wiley & Sons, New Jersey,104–256.
- TAREEN, A. D. K., ASIM, K. M., KEARFOTT, K. J., RAFIQUE, M., NADEEM, M. S. A., IQBAL, T., RAHMAN, S. U. (2019): Automated anomalous behaviour detection in soil radon gas prior to earthquakes using computational intelligence techniques, *Journal of Environmental Radioactivity*, 203,48–54.

- TOMLJENović, B., CSONTOS, L., MÄRTON, E., MÄRTON, P. (2008): Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia. Geological Society, London, Special Publications 298 (1),145–167.
- TRNKOCZY, T. (1999): Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. U: New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP), Deutsches GeoForschungZentrum,1–20. Dostupno na: https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_4097/component/file_4098/content (pristupljeno 1.7.2022.)
- UGLEŠIĆ, J. S. (2021): Procjena amplitudacije gibanja tla uslijed Zagrebačkog ML5.5 potresa (2020.) ekvivalentno-linearnom metodom, Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb,1–44.
- VAN GELDER I. E., WILLINGSHOFER, L. M. E., TOMLJENović, B., ANDRIESEN, P. A. M., DUCEA, M. N., BENIEST, A., GRUIĆ, A. (2015): The tectonic evolution of a critical segment of the Dinarides-Alps connection: Kinematic and geochronological inferences from the Medvednica Mountains, NE Croatia, Tectonics 34,1952–1978.
- WALDHAUSER, F., ELLSWORTH, W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California, Bulletin of the Seismological Society of America, 90 (6),1353–1368.

ELEKTRONIČKI IZVORI

- [1] <https://slcc.pressbooks.pub/physicalgeography/chapter/4-3/> (pristupljeno 26.6.2022.)
- [2] <https://www.usgs.gov/media/images/triangulation-locate-earthquake> (pristupljeno 26.6.2022.)
- [3] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7/dyfi/intensity> (pristupljeno 30.6.2022.)
- [4] https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/izvjesca_o_potresima (pristupljeno 30.7.2022.)
- [5] http://rgn.hr/~bmatos/nids_bmatos/Sumarstvo_nastavni_materijali_i_obavijesti/4_Potresi%20i%20klizanja%20na%20padinama.pdf (pristupljeno 7.8.2022.)

10. Popis slika

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 1. Žarište i epicentar potresa (URL5)</i> | <i>3</i> |
| <i>Slika 2. Lociranje potresa uz pomoć triangulacije (URL2)</i> | <i>4</i> |
| <i>Slika 3. Primjer Wadatijevog dijagrama (HAVSKOV i sur., 2012)</i> | <i>5</i> |
| <i>Slika 4. Geometrija rasjeda (HAVSKOV i OTTEMÖLLER, 2010)</i> | <i>9</i> |
| <i>Slika 5. Epicentri potresa na području Hrvatske od 372. pr. Kr. do 2020. godine prema Hrvatskom katalogu potresa (Arhiv Geofizičkog odsjeka PMF-a)</i> | <i>13</i> |
| <i>Slika 6. Karta zagrebačkog područja (PADOVAN i sur., 2021)</i> | <i>16</i> |
| <i>Slika 7. Geološka karta Medvednice. Smeđa boja predstavlja uokvireni sustav Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda, a plavo uokvireni sustav Kašinskog rasjeda (KOVAČIĆ i sur., 2016)</i> | <i>18</i> |
| <i>Slika 8. Geološka karta Medvednice (MARKUŠIĆ i sur., 2020)</i> | <i>19</i> |
| <i>Slika 9. Karta intenziteta zagrebačkog potresa 22. ožujka 2020. godine prema USGS (MARKUŠIĆ i sur., 2020)</i> | <i>21</i> |
| <i>Slika 10. Žarišni mehanizmi dva najjača zagrebačka potresa 22. ožujka 2020. (MARKUŠIĆ i sur., 2020)</i> | <i>22</i> |
| <i>Slika 11. Grafičko sučelje SEISAN baze podataka</i> | <i>24</i> |
| <i>Slika 12. Rad u SEISAN bazi podataka uz pomoć terminala</i> | <i>25</i> |
| <i>Slika 13. Prilagodba parametara SEISAN-a za korištenje testne kontinuirane arhive podataka sa seizmoloških postaja unutar hrvatske mreže</i> | <i>26</i> |
| <i>Slika 14. Primjer izdvojenih zapisa kontinuirane arhive s 4 seizmološke postaje u vremenskom periodu od 60 minuta</i> | <i>27</i> |
| <i>Slika 15. Prostorna razdioba seizmoloških postaja čiji zapisi su uključeni u parametre algoritma za automatsku detekciju potresa</i> | <i>29</i> |
| <i>Slika 16. SEISAN baza podataka dobivena registracijom zapisa nakon automatske detekcije programa CONDET. Baza sadržava sve detektirane događaje, koji se mogu filtrirati i sortirati po parametrima poput vremena događaja, lokacije, magnitude te parametara točnosti lokacije hipocentra</i> | <i>31</i> |
| <i>Slika 17. Detaljniji prikaz automatskog određivanja vremena dolaska P i S valova na trokomponentnom zapisu seizmološke postaje Ozalj za glavni potres zagrebačke serije potresa. Vrijeme dolaska P valova određeno je na vertikalnoj, a S na horizontalnoj komponenti</i> | <i>33</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 18. Seizmološke postaje na temelju čijih zapisa je napravljeno automatsko određivanje vremena dolaska P i S valova te lokacija hipocentara potresa.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Slika 19. Zahtjev poslužitelju ORFEUS pomoću programskog jezika Python za slanje podataka o seizmometru. ORFEUS poslužitelj sadrži podatke o seizmološkim mrežama na području Europe i Mediterana. U ovom slučaju zatražen je instrumentalni odziv za horizontalnu komponentu postaje Puntijarka, koji je spremljen u specifičnu lokalnu datoteku i spreman za implementaciju u softverski paket SEISAN.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Slika 20. Definicija frekvencijskih parametara u jednostavnom suženju kosinusa koji se koristi za ograničavanje pojasa dekonvolucije instrumenata (AMMON i sur., 2020).....</i> | <i>36</i> |
| <i>Slika 21. Primjer automatskog određivanje maksimalne amplitude na vertikalnoj komponenti trokomponentnog zapisa sa seizmološke postaje Puntijarka.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Slika 22. Grafički prikaz instrumentalnog odziva na vertikalnoj komponenti seizmološke postaje Puntijarka dobiven sa poslužitelja ORFEUS.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Slika 23. Rezultati automatske odredbe lokacije hipocentra u grafičkom sučelju softverskog paketa SEISAN. Prozor lokatora prikazuje uspješno automatski određene P i S komponente na temelju kojeg algoritam radi izračun lokacije hipocentra potresa. U ovom slučaju uspješno je određeno 32 komponente te je potres uspješno lociran s manjom pogreškom</i> | <i>40</i> |
| <i>Slika 24. Histogram raspodjele RMS parametra za potpuno automatski locirane potrese pomoću oba algoritma. a) STA/LTA b) Carl Johnson modificirani STA/LTA</i> | <i>44</i> |
| <i>Slika 25. Histogram raspodjele RMS parametra za potrese locirane nakon ručnih korekcija. a) STA/LTA b) Carl Johnson modificirani STA/LTA.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Slika 26. Karta lociranih potresa u slučaju A uz potpunu automatizaciju te ručnu korekciju</i> | <i>45</i> |
| <i>Slika 27. Karta lociranih potresa u slučaju B uz potpunu automatizaciju te ručnu korekciju</i> | <i>45</i> |
| <i>Slika 28. Primjer potresa s amplitudom jasno vidljivom iznad šuma signala samo na najbližim postajama. Ovakav potres uspješno je detektiran samo Carl Johnsonovim algoritmom</i> | <i>48</i> |
| <i>Slika 29. Primjer potresa jasno zabilježenog na većem broju seizmoloških postaja unutar selektirane mreže za detekciju. Ovakav potres uspješno je detektiran i registriran s oba testirana algoritma</i> | <i>49</i> |

| | |
|---|-----------|
| <i>Slika 30. Primjer situacije kada je seizmički šum registriran kao potres Carl Johnsonovim algoritmom detekcije. Ovaj trenutak nije registriran kao seizmički događaj od strane standardnog STA/LTA algoritma i Hrvatskog kataloga potresa.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Slika 31. Primjer situacije s nekoliko vremenski vrlo bliskih potresa, zabilježenih na seizmološkoj postaji Puntijarka. Detektirani su i registrirani u baze podataka kao jedan seizmički događaj</i> | <i>51</i> |
| <i>Slika 32. Primjer dobro lociranog potresa lokalne magnitude 2.9 potpunom automatizacijom softvera SEISAN</i> | <i>54</i> |
| <i>Slika 33. Detalj istog potresa u obliku trokomponentnog zapisa sa seizmološke postaje Zagreb. Na zapisu se dobro vide detektirani dolasci P i S faza</i> | <i>54</i> |
| <i>Slika 34. Primjer potresa magnitude 1.3 uspješno lociranog potpuno automatskim lociranjem softvera SEISAN.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Slika 35. Pregled trokomponentnog zapisa postaje Kašina za potres koji se dogodio 23.ožujka u 18:20 UTC.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Slika 36. Primjer pogrešne odredbe dolaska S vala na horizontalnoj komponenti BHN trokomponentnog zapisa s jedne od seizmoloških postaja za potres UTC 22.03. 9:11:56 .</i> | <i>56</i> |
| <i>Slika 37. Potres UTC 22.03. 9:11:56 zabilježen na nizu postaja s više od 30 odredbi vremena dolaska P i S valova. Potres je unatoč velikom broju odredbi lociran s velikom pogreškom lokacije te $RMS = 28$.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Slika 38. Izračun novog rješenja za lokaciju hipocentra potresa UTC 22.03. 9:11:56 nakon ručnih korekcija.....</i> | <i>59</i> |

11. Popis tablica

| | |
|--|-----------|
| <i>Tablica 1. Parametri algoritma za detekciju.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Tablica 2. Prikaz ukupnog broja detektiranih seizmičkih događaja za oba testirana algoritma detekcije</i> | <i>42</i> |
| <i>Tablica 3. Broj ukupno lociranih potresa potpunom automatizacijom.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Tablica 4. Broj automatski lociranih potresa unutar prostornih ograničenja zagrebačkog područja.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tablica 5. Broj automatski lociranih potresa unutar prostornih ograničenja sa zadovoljavajućim rješenjima</i> | <i>43</i> |
| <i>Tablica 6. Broj zadovoljavajućih rješenja lokacije potresa za slučajeve A i B nakon ručne korekcije.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Tablica 7. Broj zadovoljavajućih rješenja lokacije hipocentra potresa ograničena na zagrebačko područje</i> | <i>43</i> |
| <i>Tablica 8. Usporedba detekcija i registracija zapisa potresa dobivenih softverskim paketom SEISAN i postojećeg hrvatskog kataloga potresa</i> | <i>47</i> |
| <i>Tablica 9. Broj uspješno lociranih potresa iz zagrebačke serije potresa za dva testirana slučaja te iz hrvatskog kataloga potresa</i> | <i>53</i> |