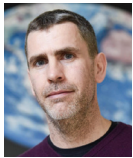


Primljen / Received: 30.10.2025.
 Ispravljen / Corrected: 3.5.2026.
 Prihvaćen / Accepted: 7.5.2026.
 Dostupno online / Available online: 10.6.2026.

Praćenje seizmičke aktivnosti nakon potresa u Petrinji 2020. godine

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Josip Stipčević**
jstipcevic.geof@pmf.hr

Autor za korespondenciju



Krešimir Kuk, mag.phys.-geophys.
kreso.kuk@gfz.hr



Izv.prof.dr.sc. **Iva Dasović**
iva.dasovic@gfz.hr



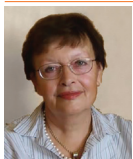
Dr.sc. **Dinko Šindija**
dsindija@gmail.com



Dr.sc. **Kristina Šariri**
ksariri@gfz.h



Dr.sc. **Marin Sečanj**
msecanj@gfz.hr



Prof.dr.sc. **Davorka Herak**
davorka.herak@gfz.hr



Akademik **Marijan Herak**
marijan.herak@gfz.hr

Sveučilište u Zagrebu
 Prirodoslovno-matematički fakultet
 Geofizički odsjek

Izvorni znanstveni rad

Josip Stipčević, Krešimir Kuk, Iva Dasović, Dinko Šindija, Kristina Šariri, Marin Sečanj, Davorka Herak, Marijan Herak

Praćenje seizmičke aktivnosti nakon potresa u Petrinji 2020. godine

Niz potresa na području Petrinje započeo je u ponedjeljak 28. prosinca 2020. u 6:28 po lokalnome vremenu (CET) potresom magnitude $M_L = 5,1$ ($M_W = 4,9$), koji se osjetio na većemu dijelu središnje Hrvatske. Epicentar se nalazio jugozapadno od Petrinje, u blizini sela Strašnika. Ubrzo su uslijedili potresi lokalne magnitude 4,6 u 7.49 te magnitude 3,8 u 7:51 u istome epicentralnom području, kao i niz slabijih potresa. Nažalost, ti relativno snažni potresi pokazali su se tek prethodnim potresima, jer je već sljedećeg dana, 29. prosinca 2020. u 12:19, zabilježen još jači potres lokalne magnitude 6,2 ($M_W = 6,4$), također s epicentrom u blizini Strašnika. Temelj ove studije čini velika količina prikupljenih seizmoloških podataka. Za analizu novoprikupljenog skupa podataka korišteni su klasični postupci analize te napredne metode strojnog učenja. Time je dobiven znatno proširen seizmički katalog s više od 50.000 potresa. Analiza seizmičnosti potvrđuje da su najveći potresi usklađeni s glavnim desnim Petrinjskim rasjedom, s pomakom po pružanju, no evolucija naknadnih potresa pokazala je da je preraspodjela naprezanja aktivirala brojne sekundarne rasjede, što je dovelo do složene prostorne i vremenske raspodjele seizmičnosti. Rezultati pružaju detaljan seizmološki uvid u procese u tome žarišnom području unutar tektonske ploče.

Ključne riječi:

Petrinja, potres, naknadni potresi, seizmička mreža, strojno učenje

Original research paper

Josip Stipčević, Krešimir Kuk, Iva Dasović, Dinko Šindija, Kristina Šariri, Marin Sečanj, Davorka Herak, Marijan Herak

Monitoring seismic activity following 2020 Petrinja earthquake

The series of earthquakes in the Petrinja area began on Monday, 28 December 2020, at 6:28 a.m. local time (CET), with an earthquake of magnitude $M_L = 5.1$ ($M_W = 4.9$), which was felt across most of central Croatia. Its epicentre was southwest of Petrinja, near Strašnik village. This was soon followed by earthquakes of local magnitude 4.6, 7:49 a.m. and magnitude 3.8 at 7:51 a.m. in the same epicentral area, as well as a series of weaker earthquakes. Unfortunately, these relatively strong earthquakes proved to be just foreshocks, as an even stronger earthquake of local magnitude 6.2 ($M_W = 6.4$) occurred the next day, 29 December 2020, at 12:19 p.m., also with an epicentre near Strašnik. The cornerstone of this study is the vast amount of seismological data collected. We used both manual and advanced machine learning techniques to analyse the newly collected dataset. This resulted in a substantially expanded seismic catalogue with over 50,000 events. Seismicity analysis confirms that the largest events align with the primary dextral strike-slip Petrinja Fault; however, the aftershock pattern evolved, revealing that stress redistribution activated numerous secondary faults, leading to a complex spatial and temporal distribution of seismicity. The findings provide a detailed seismological record and crucial insights into the tectonic processes of this intraplate region.

Key words:

Petrinja, earthquake, aftershock, seismic network, machine learning

1. Uvod

Potres kod Petrinje ($M_W = 6,4$; $M_L = 6,2$) od 29. prosinca 2020. jedan je od najvažnijih potresa koji su se dogodili u Hrvatskoj u posljednjih nekoliko stoljeća. Dan ranije glavnome potresu prethodio je snažan potres ($M_W = 4,9$; $M_L = 5,0$), dok se najveći naknadni potres ($M_W = 4,7$; $M_L = 4,9$) dogodio 6. siječnja 2021. Seizmičnost područja i detaljne analize poznatog potresa kod Pokupskog iz 1909. prikazane su, naprimjer, u [1, 2].

Prema [1], glavni potres prouzročio je velika razaranja u epicentralnome području. Podrhtavanje se osjetilo diljem Hrvatske i Slovenije te u velikome dijelu Bosne i Hercegovine, Srbije, Mađarske, Italije, Austrije i Slovačke, uz sedam smrtnih slučajeva. Trešnja tla izazvala je brojne sekundarne pojave, uključujući likvefakciju, erupcije mulja, pješčane vulkane, klizišta te više od stotinu vrtača u blizini sela Mečenčana, jugoistočno od epicentra (slika 1.). Dodatni podaci o utjecaju, štetama i povezanim pojavama navedeni su, naprimjer, u [3-9]. Taj veliki potres s pomakom po pružanju rasjeda unutar tektonske ploče privukao je znatnu pozornost međunarodne seizmološke zajednice. Preliminarna analiza ranih opažanja prikazana je u [10], dok su brojna kasnija istraživanja bila usredotočena na karakterizaciju seizmičkog izvora (npr. [11-16]). Promjene Coulombova naprezanja nakon glavnog potresa analizirane su u [1, 14, 15, 17]. Nekoliko studija analiziralo je i *InSAR* satelitske podatke radi interpretacije površinskih deformacija (npr. [14, 15, 18, 19]). Detaljna prostorno-vremenska analiza petrinjskoga potresnog niza tijekom prvih šest mjeseci, uključujući relokaciju više od 13.800 potresa uz primjenu prostorno varijabilnih staničnih korekcija, procjenu epistemičke nesigurnosti lokacija, izračun mehanizama žarišta te usporedbu različitih modela rasjeda, prikazana je u [1]. U ovome radu ukratko je prikazana tektonika područja i opisana brza uspostava privremenih seizmoloških postaja nakon glavnog potresa. Nadalje, prikazana je seizmičnost epicentralnog područja Petrinje u razdoblju 2020. – 2024. Za praćenje seizmičnosti primijenjene su dvije vrste identifikacije potresa u seizmogramima: klasične metode (osobna analiza iskusnog seizmologa) i metode strojnog učenja. Opći cilj ovog rada jest prikazati seizmološki rad koji se obavljao pet godina nakon petrinjskog potresa.

2. Tektonika i geološka građa

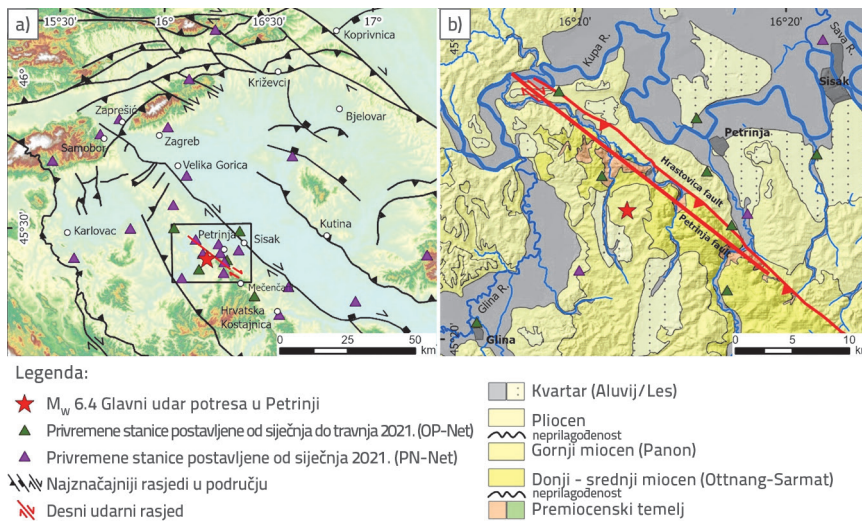
Područje središnje Hrvatske, uključujući područje Petrinje, nalazi se u prijelaznoj zoni između strukturnih jedinica Unutarnjih Dinarida i jugozapadnog dijela Panonskog bazena. To je područje od razdoblja kasne jure pa sve do danas bilo izloženo višestrukim tektonskim fazama, što je rezultiralo složenom geološkom građom i geodinamičkim okruženjem. Današnje suženje prostora između Jadranske mikroploče i Europe najvećim se dijelom događa unutar područja Vanjskih Dinarida, a djelomično se prenosi i na Unutarnje Dinaride te na prijelazno područje Dinaridi – Panonski bazen [20]. Aktivna kompresija, smjera SSI-JJZ, u istraživanome području

potvrđena je rješenjima žarišnih mehanizama potresa [21] te geodinamičkim modeliranjem. U razdoblju od kasne krede do ranog paleogena šire područje Petrinje bilo je dio sjevernog ogranka Neotethysa, poznatog kao Savski ocean, te je bilo podvrgnuto kontinuiranoj subdukciji preostale oceanske kore pod kontinentalnu koru Euroazijske ploče. Postupnim zatvaranjem Savskog oceana formirana je Savska suturna zona (SSZ) [22, 23]. Regionalno izdizanje, boranje i napredovanje navlaka Unutarnjih Dinarida prema JZ, uz taloženje sintektonskih naslaga, bilo je aktivno sve do srednjeg eocena [20, 22]. U nastavku formiranja navlaka prema JZ i predgorju započelo je formiranje borano-navlačnog pojasa Vanjskih Dinarida. Pretpostavlja se da je glavna tektonska faza u formiranju Vanjskih Dinarida trajala od sredine eocena i tijekom oligocena, kada su se u predgorskom bazenu taložile sintektonske flišne i prominske naslage.

U sjevernome dijelu Unutarnjih Dinarida tijekom miocena došlo je do prelaska iz kompresijskog u ekstenzijski režim naprezanja te je dio navlačnih rasjeda duž Savske suturne zone invertiran u normalne rasjede. U krovinskim krilima tih rasjeda formiran je niz tektonskih polugraba, koje su napredovanjem ekstenzije postupno formirale Savsku depresiju [22]. Savska depresija počela se otvarati tijekom ranog miocena (oko 18 Ma). Istodobno sa spuštanjem krovinskih krila normalnih rasjeda iz podinskih krila tih rasjeda dostupno su se prema površini izdigle starije stijene iz podloge, predmiocenske starosti, u obliku ekstenzijskih metamorfnihih doma na JZ rubu Savske depresije.

Otvaranje miocenskih bazena regionalnih i lokalnih razmjera bilo je praćeno taloženjem sintektonskih te posttektonskih sedimentnih jedinica koje se danas djelomično nalaze na površini duž rubova Savske depresije. U Savskoj depresiji rana miocenska sinriftna faza trajala je do srednjeg miocena (oko 13,5 mil. god., prema [24]). Njezinim završetkom, krajem sarmata, u JZ dijelu Panonskog bazena uslijedila je postriftna faza termalne subsidencije, koja je trajala do kraja panona (oko 11,6 – 4,5 mil. god.), tijekom koje su u Savskoj depresiji taloženi lapori i pješčenjaci velike debljine. Krajem panona u Panonskome bazenu uslijedila je promjena iz ekstenzijskog u kompresijski režim tektonskoga naprezanja (npr. [24]).

Završetak faze termalne subsidencije i početak naknadne faze suženja nisu bili jednoliki unutar panonskoga bazenskog sustava, ni prostorno ni vremenski. U sjeverozapadnome i središnjemu dijelu Savske depresije ta je faza započela krajem miocena ili u ranome pliocenu (oko 6 Ma; [24, 22]), djelomično tektonskom inverzijom brojnih normalnih rasjeda formiranih za ranog miocena, a djelomično formiranjem reversnih rasjeda tijekom pliocena i kvartara, pretežno s pružanjem SZ-JI u središnjemu dijelu Savske depresije [22] te SI-JZ u njezinu sjevernom dijelu, u blizini granice s bazenom Hrvatskog zagorja [25]. Ti su rasjedi lokalno povezani s rasjedima s pomakom po pružanju, desni rasjedi s pružanjem SZ-JI i lijevi rasjedi s pružanjem SI-JZ. Neki od njih i danas su aktivni, što potvrđuju korelacije geoloških i seizmoloških podataka [26].



Slika 1. Tragovi rasjeda preuzeti su iz [20, 23, 25]; Pojednostavljena geološka karta širega petrinjskog epicentralnog područja, temeljena na Osnovnoj geološkoj karti, listovi Sisak [27] i Bosanski Novi [28]

Šire epicentralno područje, tj. područje petrinjskog niza potresa 2020. – 2021. pruža se u smjeru SZ-JI u duljini od približno 20 km, na udaljenosti od oko 7 km JZ od grada Petrinje (slika 1.). To područje pripada Hravstovičkoj gori, najizraženijoj morfološkoj strukturi u okolici Petrinje, s najvišim vrhom Cepeliš (415 m n.m.). Prema podacima s geološke karte [27], ta struktura predstavlja asimetričnu antiklinalu s blagim nagibom JZ te strmim nagibom SI krila koje je omeđeno Hravstovičkim rasjedom, koja se pruža SZ-JI (slika 1.b). Iako se pomak po tome rasjedu smatrao normalnim [27], tijekom potresa 1909. i naknadnih potresa 2020. opažen je reversni pomak, što otvara pitanje predstavlja li dio reljefa od oko 300 m komponentu navlačenja kroz više seizmičkih ciklusa [21]. Jezgru i strmije SI krilo antiklinale mjestimično izgrađuju stijene gornjokredne i eocenske starosti, koje većim dijelom diskordantno prekrivaju mlađe naslage miocenske i pliocenske starosti koje su jasno izražene u blago nagnutom jugozapadnom krilu antiklinale (slika 1.b). Najmlađe naslage u istraživanome području čine kvartarni šljunci, pijesci, prahovi i gline taloženi u poplavnoj ravnici rijeke Kupe i duž njezinih pritoka, lokalno povezani s lesnim naslagama koje su uglavnom očuvane u dolinama, ali se pojavljuju i na većim nadmorskim visinama u blizini vrha Hravstovičke gore.

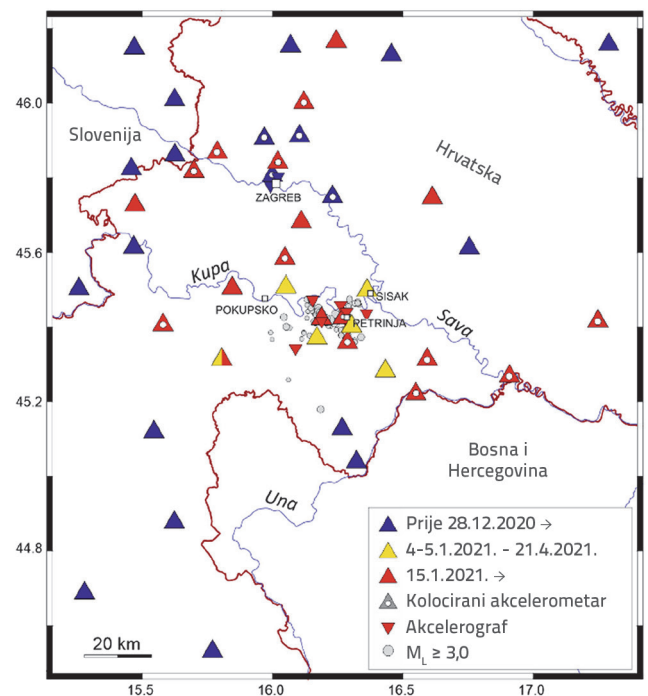
Zbog jačine potresa i specifične geološke građe u širem epicentralnom području uočen je velik broj sekundarnih učinaka potresa, odnosno koseizmičkih deformacija na površini kao što su likvefakcija, pukotine, klizišta i urušne vrtače (npr. [3, 29-31]).

3. Seizmografske mreže

Kada se dogodi snažan potres, od presudne je važnosti da seizmološka zajednica brzo reagira uspostavom guste mreže privremenih instrumenata za praćenje u širem epicentralnom području. Takva konfiguracija ključna je za detekciju i najslabijih

podrhtavanja, od kojih bi mnoga inače ostala nezabilježena. Mogućnost preciznog lociranja i vrlo malih potresa neophodna je za razumijevanje veličine i prostornog doseg aktiviranih rasjednih struktura. Točno određivanje dubine žarišta jedan je od najzahtjevnijih aspekata analize potresa, jer je riječ o parametru koji je najteže precizno odrediti. Taj se problem može ublažiti povećanjem gustoće i osjetljivosti mreže seizmografa, uz poseban naglasak na postavljanje postaja u neposrednoj blizini epicentralnog područja. Nadalje, kako se najveći broj naknadnih potresa javlja neposredno nakon glavnog udara, tako je brza instalacija instrumenata u pogođenome području ključna za njihovo odgovarajuće bilježenje.

Na početku petrinjskoga potresnog niza seizmička mreža u području rijeke Kupe bila je relativno rijetka, pri čemu su se dvije postaje najbliže glavnome potresu nalazile na udaljenostima od 32 i 36 km (plavi trokuti na slici 2.).



Slika 2. Seizmijske postaje u široj okolici epicentralnog područja petrinjskog potresa nakon instalacije mreža OP-Net (žuti trokuti) i PN-Net (crveni trokuti, širokopojasne postaje). Plavi trokuti označavaju širokopojasne postaje u sastavu hrvatske CR mreže, privremene zagrebačke mreže te slovenske (SL) i mađarske (HU) mreže. Mali obrtni trokuti označavaju akcelerografe. Bijeli krugovi unutar simbola označavaju postaje s kolociranim akcelerometrima. Prilagođeno prema [1]

Srećom, 4. i 5. siječnja 2021. u epicentralnome području postavljena je privremena mreža od šest postaja (OP-Net; žuti trokuti na slici 2.) u suradnji Nacionalnog instituta za oceanografiju i primijenjenu geofiziku – OGS (Italija) i Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, i to unatoč ograničenjima putovanja uzrokovanim pandemijom bolesti COVID-19. Ubrzo nakon toga, sredinom siječnja 2021., započela je instalacija petrinjske mreže (PN-Net; crveni simboli na slici 2.) korištenjem novonabavljenih instrumenata hrvatske Seizmološke službe (vidi poglavlje 3.2. i [1] za detalje). U nastavku ukratko su opisani postavljanje instrumenata i druge terenske aktivnosti nakon glavnoga petrinjskog potresa i u ranoj fazi niza naknadnih potresa.

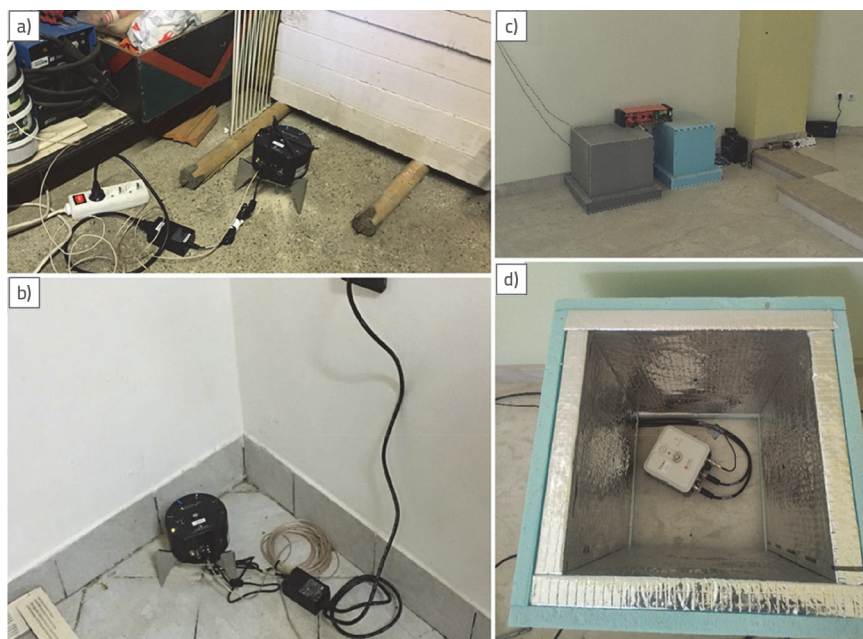
3.1. Brza instalacija instrumenata (OP-Net)

Zbog serije potresa u Zagrebu, koja je započela 22. ožujka 2020. glavnim potresom magnitude $M_w = 5,3$ ($M_L = 5,5$), i uspostave pripadajuće lokalne mreže seizmografa krajem 2020. hrvatski seizmolozi nisu raspolagali slobodnim instrumentima za postavljanje nakon potresa u području Banovine. Kako bi se taj problem riješio, seizmolozi s Geofizičkog odsjeka PMF-a u Zagrebu brzo su uspostavili suradnju s kolegama iz Nacionalnog instituta za oceanografiju i primijenjenu geofiziku – OGS (Italija). U sklopu te suradnje OGS je ustupio šest seizmografa, opremljenih integriranim akcelerometrom, za brzu instalaciju u epicentralnome području. Ta suradnja bila je ključna za osiguravanje žurne instalacije instrumenata za praćenje seizmičke aktivnosti.

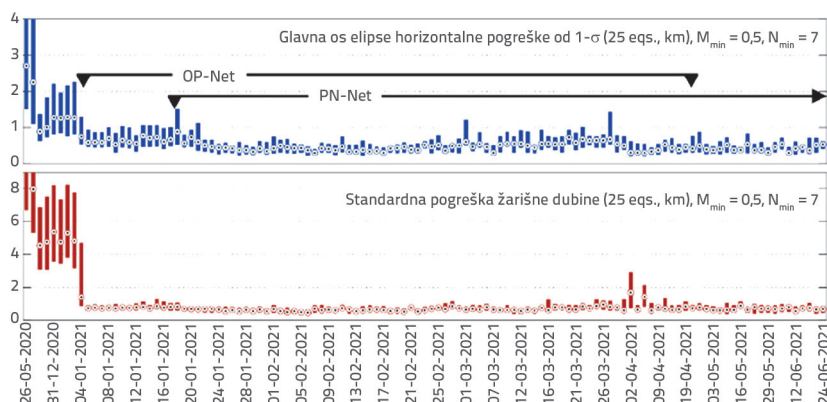
Samo šest dana nakon glavnog potresa i unatoč epidemiološkim ograničenjima, 4. i 5. siječnja 2021. pet od tih instrumenata postavljeno je na ključnim lokacijama u Banovini, i to u Hotnji, Sisku, Taborištu, Novome Selu Glinskom i Mečenčanima (slika 2., [32]). Osim toga jedan širokopojasni seizmometar postavljen je na Petrovoj gori 4. siječnja. Strateško raspoređivanje i brza instalacija te privremene mreže znatno su unaprijedili postojeću stalnu seizmičku mrežu u tome području, poboljšavajući azimutalnu pokrivenost i omogućujući dodatna opažanja lokalnih potresa. To je bilo osobito važno jer je smanjilo nesigurnost i nestabilnost u određivanju lokacije potresa, posebno dubine žarišta (vidi sliku 4.). Poboljšana pokrivenost omogućila je pouzdanije lociranje i manjih potresa, čime su dobiveni vrijedni podaci o seizmičkoj aktivnosti u regiji. Pet kratkoperiodičnih instrumenata OP-Net mreže radilo je do sredine travnja 2021., kada su deinstalirani i vraćeni u Italiju. Ta suradnja ne samo da je pridonijela boljemu razumijevanju seizmičnosti područja Banovine, već je naglasila važnost međunarodne suradnje u seizmologiji. Brzom uspostavom privremene mreže visokokvalitetnih seizmičkih postaja prikupljeni su ključni podaci o lokalnim potresima koji su neophodni za opisivanje svojstava naknadnih potresa i za buduće procjene seizmičke opasnosti u regiji.

3.2. Privremena seizmografska mreža Petrinja (PN-Net)

Nakon početne instalacije šest postaja mreže OP-Net, hrvatska Seizmološka služba pri Geofizičkome odsjeku PMF-a u Zagrebu primila je znatna financijska sredstva od Vlade Republike Hrvatske (putem Ministarstva znanosti i obrazovanja) za nabavu kompleta seizmoloških instrumenata. U vrlo kratkome roku nabavljeno je 20 modernih seizmometara s pripadajućim AD pretvornicima i jedinicama za pohranu podataka i 20 akcelerometara s potrebnom dodatnom opremom. Instrumenti su brzo nabavljeni i isporučeni kako bi se omogućilo pravodobno instrumentalno bilježenje naknadnih potresa u području Petrinjskog rasjeda. Oprema je promptno testirana i konfigurirana, a prvi instrumenti postavljeni su na teren već nekoliko tjedana nakon glavnog potresa. U početnoj fazi instrumenti su postavljeni uneposrednome epicentralnom području, u gradu Petrinji te u naseljima Brestu Pokupskom, Hrastovici, Mošćenici, Hrvatskom Čuntiću, Gori i Novom Farkašiću. U sljedećoj fazi privremene seizmološke postaje instalirane su u širemu epicentralnom području na pet lokacija (Pobrđani, Jasenovac, Lasinja,



Slika 3. Primjeri instaliranih privremenih postaja: a) Privremene postaje u Sisku i b) Taborištu opremljene kratkoperiodnim instrumentom (seizmograf s integriranim akcelerometrom *Lunitek Sentinel-Geo*) iz mreže OP-Net; c) Privremena postaja mreže PN-Net na petrinjskome groblju s kolociranim seizmometrom *Kinematics MBB-2* (siva izolacijska kutija) i akcelerometrom *Kinematics ETNA2* (ispod zelene izolacijske kutije); d) Akcelerometar u izolacijskoj kutiji prikazan izbliza



Slika 4. Vremenska evolucija radijusa pouzdanosti 1σ za lokacije žarišta, procijenjena pomoću nepreklopajućih kliznih prozora od 25 uzastopnih potresa tijekom prvih šest mjeseci petrinjskoga potresnog niza. Uključeni su jedino potresi lokalne magnitude $M_L \geq 0,5$, locirani s najmanje sedam nastupnih vremena potresnih faza. Zaokružene točke označavaju medijane, dok stupci prikazuju raspon između 25. i 75. percentila. Razdoblja rada privremenih mreža prikazana su u gornjemu dijagramu

Omanovac i Čazma) kako bi se osigurali podaci sa širega geografskog područja u odnosu na epicentre potresa. Nekoliko instrumenata postavljeno je i u širem području Zagreba (Marija Bistrica, Samobor, Žumberak, Ladvenjak i dr.) radi praćenja naknadnog niza zagrebačkog potresa od 22. ožujka 2020., koji je još uvijek bio aktivan. Tijekom sljedećih mjeseci redovito su se terenski obilazile mobilne mreže radi prikupljanja podataka i provjere ispravnosti rada postaja. U tome razdoblju prikupljene su stotine gigabajta vrijednih seizmoloških podataka. U kasnijoj fazi nabavljeni su novi serverski sustavi te je uspostavljena izravna veza za prijenos podataka sa svih privremenih postaja do operativnog centra u Zagrebu u stvarnome vremenu.

3.3. Učinkovitost privremenih seizmografskih mreža

Rad mreže OP-Net, a potom i PN-Net, imao je znatan utjecaj na pouzdanost određivanja lokacija naknadnih potresa. Kao što je to prikazano na slici 4., uspostava mreže OP-Net povećala je pouzdanost određivanja epicentara za približno 50 %, dok je prosječna nesigurnost dubine žarišta smanjena s oko ± 5 km na manje od ± 1 km. Pouzdanost lokacija dodatno je poboljšana uspostavom mreže PN-Net.

4. Praćenje seizmičnosti nakon glavnog potresa

Kao što je istaknuto u prethodnome poglavlju, brza i učinkovita reakcija na snažan potres od ključne je važnosti, što podrazumijeva žurnu uspostavu guste privremene seizmičke mreže u blizini aktivirane rasjedne zone. Takvo unapređenje mreže ključno je za detekciju vrlo slabih naknadnih potresa te predstavlja osnovnu strategiju za poboljšanje točnosti lociranja potresa, osobito dubine njegovog žarišta. Dobiveni podaci visoke razlučivosti neophodni su za razjašnjavanje složene tektonike potresnog niza. U slučaju petrinjskih potresa takvo unaprijeđeno praćenje bilo je ključno za kartiranje prostorne razdiobe seizmičnosti u tome području. Iako su

najveći potresi jasno povezani s glavnom seizmogenom strukturom – desnim Petrinjskim rasjedom s horizontalnim pomakom – pouzdano lociranje tisuća naknadnih potresa pokazalo je da se brojni manji potresi pojavljuju i duž više sekundarnih rasjeda aktiviranih preraspodjelom tektonskih napetosti. Zato su brza uspostava mreže OP-Net i poslije mreže PN-Net bile presudne za detaljno definiranje geometrije rasjeda i razumijevanje ukupnog doseg aktivirane zone.

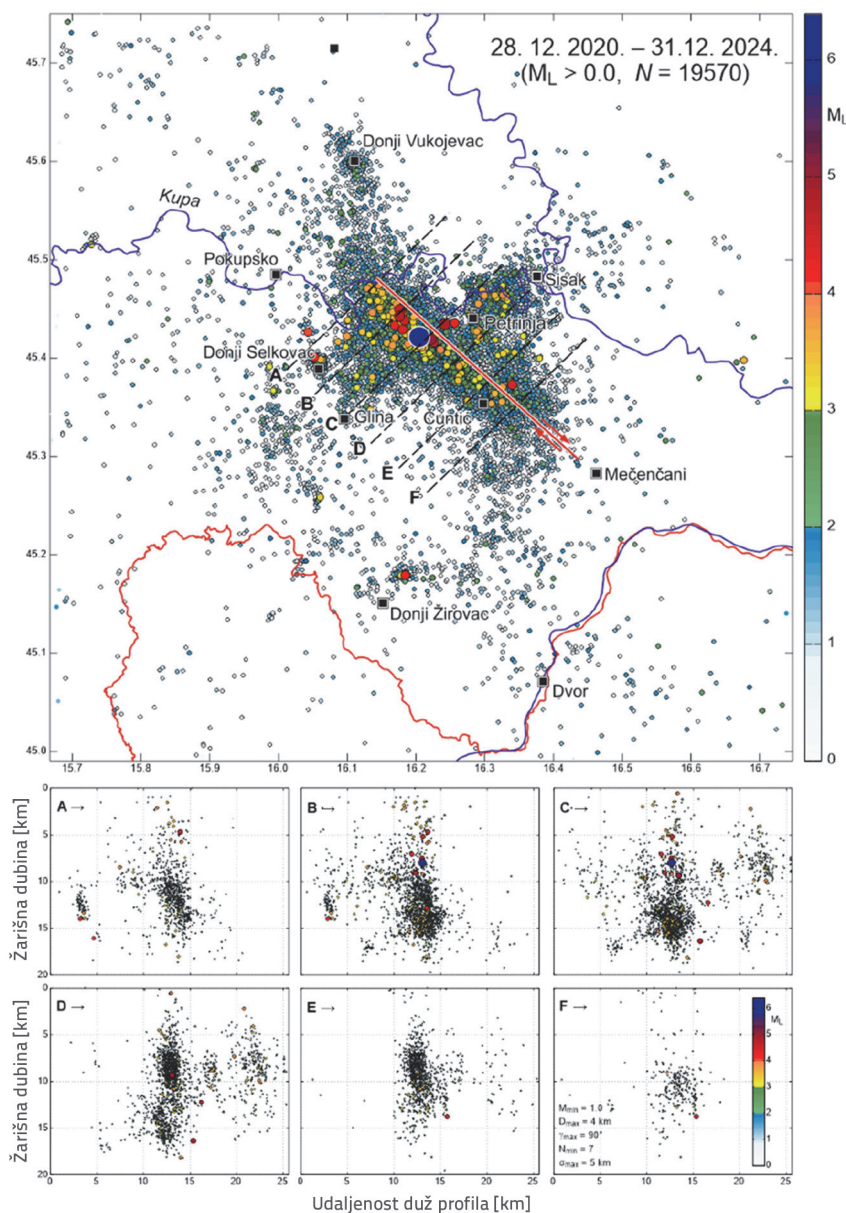
U nastavku prikazane su dvije komplementarne analize temeljene na bogatome skupu seizmičkih podataka prikupljenih tijekom nekoliko godina nakon glavnoga petrinjskog potresa. Prvo su opisani rezultati klasične, manualne

analize seizmograma prikupljenih sa stalnih i privremenih mreža, a zatim rezultati automatske analize primjenom dubokih neuronskih mreža za detekciju potresnih signala, uz naglasak na prednostima i nedostacima tog pristupa u odnosu na klasičnu analizu.

4.1. Katalog petrinjskoga potresnog niza na temelju klasične analize seizmograma

U ovome poglavlju prikazani su rezultati analize seizmograma prikupljenih u razdoblju od 28. prosinca 2020. do 31. prosinca 2024., a koju su obavili seizmolozi s dugogodišnjim iskustvom. U nastavku rada takva se analiza naziva klasičnom analizom. Tijekom tog razdoblja u širem epicentralnom području Petrinje locirano je 19.570 potresa (slika 5.). Lokacije iz prvih šest mjeseci aktivnosti preuzete su iz kataloga [1], dok su za kasnije razdoblje (srpanj 2021. – prosinac 2024.) korišteni podaci iz Hrvatskog kataloga potresa – CEC, prema [33]; posljednja revizija 2025.). Najveći potresi jasno su povezani s glavnom seizmogenom strukturom – desnim Petrinjskim rasjedom (crvena linija na slici 5., gore). Međutim, prostorna raspodjela seizmičnosti pokazuje da su se brojni naknadni potresi pojavljivali i duž sekundarnih rasjeda aktiviranih preraspodjelom naprezanja nakon glavnog potresa (vidi [1]). To uključuje potresne izvore između Siska i Petrinje, u blizini sela Donjeg Vukojevca, sjeveroistočno i zapadno od Gline, u području Donjeg Selkovca i Donjeg Žirovca te zapadno od Mečenčana.

Uvid u razdiobu hipocentara daje šest presjeka (A – F) prikazanih u donjem dijelu slike 5. Oni uključuju samo pouzdano locirane potrese koji zadovoljavaju kriterije navedene u opisu slike. Većina hipocentara koncentrirana je na dubinama između 5 i 15 km. Presjeci upućuju na nekoliko aktiviranih rasjeda, koji su svi subvertikalni ili strmo nagnuti prema sjeveroistoku. Presjek D dodatno sugerira postojanje strukturnog diskontinuiteta ili odvajanja unutar zone Petrinjskog rasjeda na dubini od približno 11 km. Detaljnija analiza tih značajki izlazi izvan okvira ovog rada.



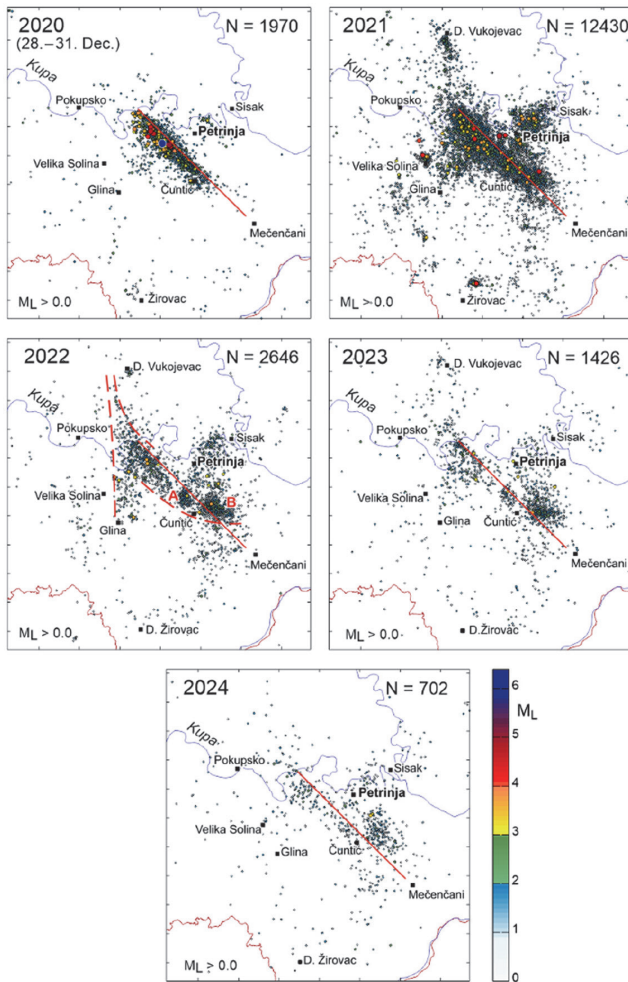
Slika 5. Gore: Epicentri svih 19.570 potresa magnituda $M_L > 0,0$ iz petrinjskoga potresnog niza (2020. – 2024.). Veličina simbola i boja skalirani su prema magnitudi. Crvena linija prikazuje pojednostavljeni površinski trag Petrinjskog rasjeda, a strelice označavaju relativno gibanje blokova. Isprekidane crne linije označavaju položaje presjeka A – F. Dolje: Presjeci A – F prikazuju vertikalne profile hipocentara potresa koji zadovoljavaju uvjete navedene u presjeku F (minimalna magnituda $M_{min} = 1,0$; maksimalna udaljenost od profila $D_{max} = 4$ km; maksimalni azimutni razmak postaja $\gamma_{max} = 90^\circ$; minimalni broj faza za lociranje $N_{min} = 7$; maksimalna dopuštena standardna pogreška hipocentra $\sigma_{max} = 5$ km)

Vremenska evolucija potresnog niza prikazana je na slici 6. U prva četiri dana (28. – 31. prosinca 2020.) seizmičnost je bila gotovo u cijelosti ograničena na Petrinjski rasjed, koji se aktivirao u duljini od približno 20 km, pružajući se jugozapadno od rijeke Kupe prema Čuntiću. Važno je napomenuti da su već u toj ranoj fazi bili aktivni i udaljeniji izvori, uključujući područja sjeveroistočno od Petrinje, istočno od Velike Soline

te u blizini Donjeg Žirovca, oko 25 km od Petrinjskog rasjeda. Najveći dio aktivnosti (oko 65 % svih lociranih potresa) zabilježen je tijekom 2021. Tijekom tog razdoblja naknadni potresi proširili su se preko Kupe, definirajući difuznu rasjednu zonu približno smjera S–J, obilježenu uglavnom potresima manjih magnituda, pretežno južno od Donjeg Vukojevca. Istodobno je pojačana aktivnost na jugoistočnome segmentu Petrinjskog rasjeda, s produženjem prema selu Mečenčanima, čime je ukupna duljina aktiviranoga rasjednog segmenta povećana na više od 30 km. Najjača aktivnost tijekom 2021., osim uz sam Petrinjski rasjed, zabilježena je između Siska i Petrinje, uz dodatne potrese magnituda $M_L \geq 4,0$ u blizini Velike Soline i Donjeg Žirovca.

U razdoblju od 2022. do 2024. seizmička aktivnost u sjeverozapadnome dijelu zone naknadnih potresa i na području Sisak – Petrinja postupno se smanjivala, dok se većina aktivnosti zadržala u jugoistočnome dijelu zone, istočno i sjeverozapadno od Čuntića (grozdovi A i B na slici 6.). Tijekom 2022. početno linearno poravnanje epicentara duž Petrinjskog rasjeda razvilo se u oblik konkavan prema sjeveroistoku. Ta promjena odražava kontinuiranu aktivnost unutar uskog pojasa između Gline i Donjeg Vukojevca te u grozdu označenome slovom "B" na slici 6., smještenome pretežno u sjeveroistočnome bloku zone Petrinjskog rasjeda. To je u suprotnosti s aktivnošću duž glavnog rasjeda (npr. grozd A i sjeverozapadni segment), gdje se većina hipocentara nalazi u jugozapadnome bloku.

Katalog potresa za petrinjski niz pokazuje potpunost za $M_L \geq 1,0$ (vidi sliku 7.a) počevši od 30. prosinca 2020., odnosno oko 13 sati nakon glavnog potresa kako bi se izbjeglo početno razdoblje u kojemu su brojni mali potresi bili prikriveni učestalim jačim događajima. Gutenberg-Richterov koeficijent $b = 0,96$ nešto je veći od vrijednosti $b = 0,91$ koja je navedena u radu [1] za prvih šest mjeseci i $M_L \geq 1,2$. Parametri modificiranoga Omorijeva zakona, koji opisuju opadanje učestalosti naknadnih potresa, ostali su stabilni tijekom cijelog niza, odnosno koeficijenti dobiveni za četverogodišnje razdoblje (slika 7.b) gotovo su jednaki onima

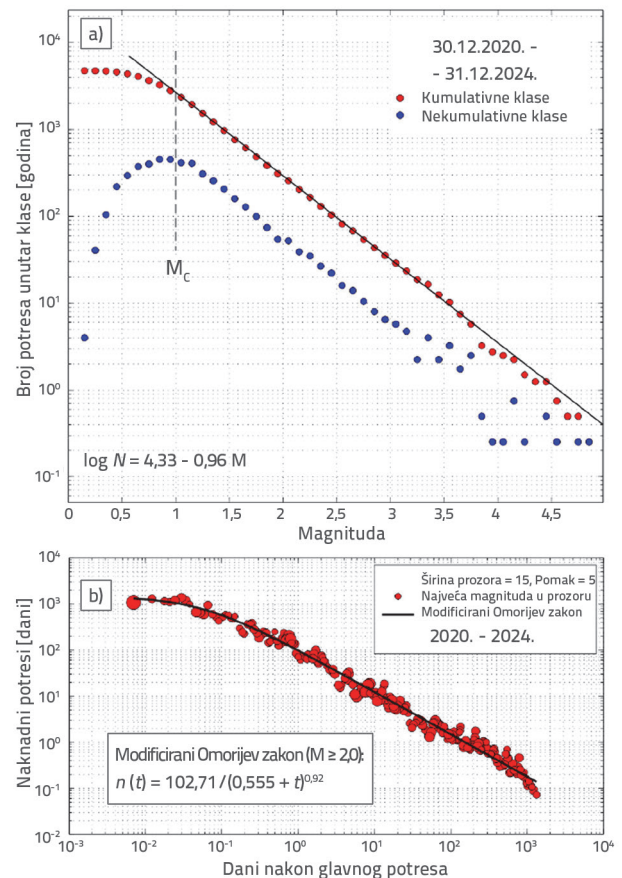


Slika 6. Epicentri potresa iz petrinjskoga potresnog niza prema godinama (2020. – 2024.). Ukupan broj lociranih potresa s $M_L > 0,0$ unutar svakog dijagrama prikazan je u gornjem desnom kutu. Puna crvena linija označava pojednostavljeni trag Petrinjskog rasjeda. Isprekidane linije označavaju uočene trendove

iz prvih šest mjeseci [1]. To upućuje na postupno smanjenje aktivnosti u nadolazećim godinama, pri čemu se povratak na približnu razinu prije 2020. očekuje tek oko 2038.

4.2. Automatska detekcija i lociranje potresa

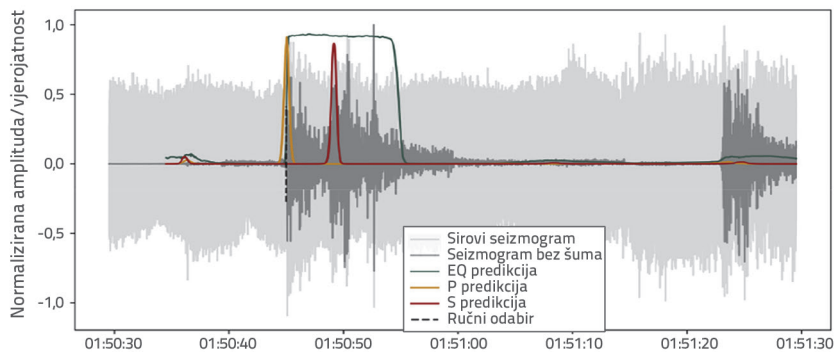
Povećanje gustoće seizmičkih mreža poput slučaja prikazanog u radu dovelo je do znatnog povećanja količine podataka, a time i vremena potrebnog za njihovu klasičnu stručnu obradu. Posljednjih godina metode strojnog učenja (ML) pokazale su se kao učinkovita i pouzdana alternativa tradicionalnim pristupima obradi podataka [34–36]. Glavni razlozi za to uključuju brzinu obrade, pri čemu se jedan dan kontinuiranih podataka može analizirati u samo nekoliko minuta, što je osobito važno za manje ili slabije financirane institucije. Osim toga ML metode omogućuju ujednačenu točnost i kvantifikaciju nesigurnosti u određivanju faza, detekciju potresa manjih magnituda te bolje



Slika 7. a) Razdioba frekvencije i magnituda za petrinjski potresni niz (2020. – 2024.), bez glavnog potresa; b) Modificirani Omorijev zakon – vremenska promjena aktivnosti naknadnih potresa ($M_L \geq 2,0$) petrinjskog niza (2020. – 2024.)

prepoznavanje nailazaka potresnih faza na seizmogramima s izraženim šumom.

U ovome radu prikazani su tijekom obrade i početni rezultati analize seizmičkih podataka iz gotovo dviju godina primjenom strojnog učenja, i to za razdoblje od početka potresnog niza do kraja studenoga 2022. [37]. Kontinuirani zapisi seizmograma iz mreža CR, OP-Net i PN-Net analizirani su pomoću duboke neuronske mreže za detekciju potresa *EQTransformer* [36], trenirane za detekciju potresa i određivanje dolazaka P-valova i S-valova na bazi podataka *INSTANCE* [38]. Detektirane faze potom su povezane s pojedinim potresom, a početne lokacije potresa određene su pomoću asocijatora *PyOcto* [39]. Te su lokacije dodatno poboljšane primjenom algoritma *NonLinLoc* [40], uz korekcije vremena putovanja specifične za pojedini izvor (SSST; [41]). Vjerojatnosti koje daje *EQTransformer* korištene su i za određivanje nepouzdanosti vremena nailazaka, pri čemu su fazama s većom vjerojatnošću pridijeljene manje nepouzdanosti. Početna analiza *EQTransformerom*, uz niski prag detekcije od 0,05 za P-valove i S-valove, rezultirala je s ukupno 8.953.730 detektiranih seizmičkih faza (6.588.039 P-faza i 2.365.691 S-faza). Nakon primjene kriterija za povezivanje faza, uključujući



Slika 8. Primjer detekcije i određivanja faza pomoću algoritma *EQTransformer* na seizmogramu s postaje PN03 (OP-Net) s jakim šumom. Prikazani su sirovi (sivo) i filtrirani (crno) seizmogram, vjerojatnost detekcije potresa (zeleno) te vjerojatnosti P-faze (žuto) i S-faze (crveno), zajedno s ručno određenim dolaskom (crna isprekidana linija). Potres se dogodio 20. siječnja 2021. u 01:50:38 UTC i smatra se novootkrivenim, jer nije uključen u Hrvatski katalog potresa

minimalni broj faza po potresu (pet prije instalacije OP-Net mreže odnosno sedam nakon 4. siječnja 2021.), dobivene su 943.844 valjane faze (53 % P-faza i 47 % S-faza). Time je formiran katalog od 50.305 potresa lociranih u istraživanome području. Većina tih potresa (68 %) dogodila se do kraja lipnja 2021.

Kako bi se osiguralo da novi katalog dobiven dubokim učenjem predstavlja stvarne potrese, provjeren je u odnosu na Hrvatski katalog potresa – CEC ([33]; najnovija revizija iz 2025.) za isto razdoblje istraživanja. Događaji su klasificirani kao "podudarni", ako su se njihova vremena nastanka razlikovala za manje od dvije sekunde od onih u CEC-u. Za događaje bez odgovarajućeg podudaranja u ručnome katalogu primijenjeni su dodatni kriteriji kvalitete: azimutalni razmak postaja manji od 150°, najmanje deset povezanih seizmičkih faza i glavna poluos elipsoida pouzdanosti (prema procjeni *NonLinLoca*) manja od 20 km.

Primjer takvog potresa i toga kako funkcioniraju detekcija i odabir faze pomoću *EQTransformer* prikazan je za stanicu PNO3 iz OP-Net mreže (slika 8.). Dvominutni seizmogram odgovara događaju s vremenom nastanka 20. siječnja 2021. u 01:50:38 UTC, klasificiranome kao novootkriveni jer ga nema u Hrvatskome katalogu potresa (ali je prisutan u manualno obrađenom skupu podataka samo s odabirom P-faze). Unatoč visokoj

razini šuma, *EQTransformer* uspješno je detektirao događaj i identificirao dolaske i P i S s vršnim vjerojatnostima od 0,93 odnosno 0,87. Za usporedbu prikazan je i seizmogram bez šuma dobiven metodom uklanjanja/dekompozicije na temelju duboke neuronske mreže [42], koji ilustrira temeljnu strukturu signala i sposobnost modela da prema zadanim postavkama izvuče korisne informacije iz podataka sa šumom.

Usporedbom s Hrvatskim katalogom potresa (CEC) utvrđeno je da je podudarno 86 % potresa. Od 50.305 događaja u novome ML katalogu i 22.386 događaja u CEC-u 19.225 ih je zajedničkih, dok 3161 CEC događaj nije

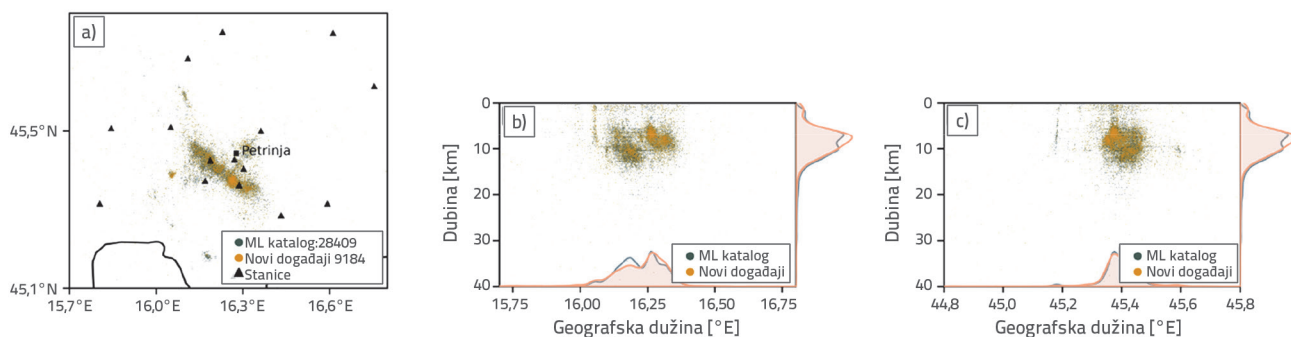
detektiran. Identificirano je i 31.080 novih potresa, od kojih 9184 zadovoljavaju stroge kriterije kvalitete i smatraju se pouzdanim detekcijama (slika 9.). Ti su potresi prostorno koncentrirani uz petrinjski rasjedni sustav i sukladni su s prostornom razdiobom naknadnih potresa. Većina hipocentara nalazi se u gornjih 15 km kore, s izraženim grupiranjem na dubinama od 5 do 10 km. Te su dubine u prosjeku nekoliko kilometara pliće nego u manualnome katalogu, što je trend koji je također uočen u prethodnim studijama strojnog učenja [42].

Rezultati pokazuju da pristup strojnim učenjem uspješno reproducira većinu klasično identificiranih potresa, uz znatno proširenje kataloga.

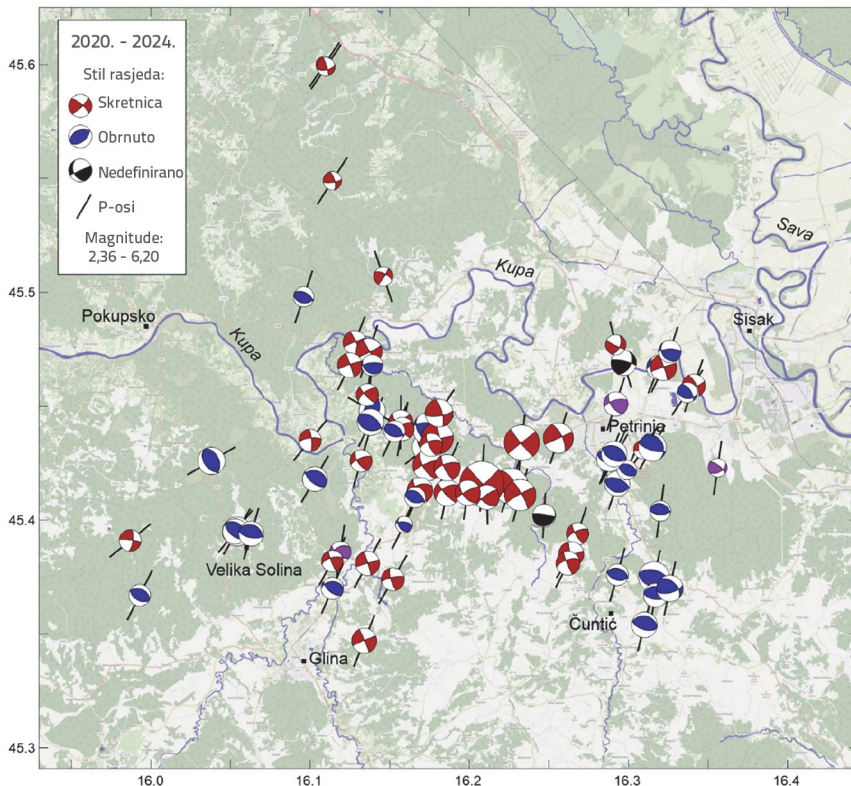
5. Žarišni mehanizmi

Kako bi se pružio uvid u složene tipove rasjedanja koji su povezani s petrinjskom rasjednom zonom nakon potresa 2020., u nastavku ukratko su prikazana dostupna rješenja žarišnih mehanizama dobivenih iz polariteta prvih pomaka do kraja 2024., kako su prikazani u katalogu CroFMS [21].

Kao što je to već uočeno u [1], najveći potresi duž Petrinjskog rasjeda pokazuju pretežno rasjedanje s pomakom po pružanju



Slika 9. a) Karta s 28.409 potresa iz kataloga dobivenog metodama strojnog učenja. Novi, visokopouzdana locirani potresi označeni su narančastom bojom; Vertikalni presjeci koji prikazuju razdiobu dubina potresa iz ML kataloga u ovisnosti o: b) geografskoj dužini; c) geografskoj širini, uz istaknute novootkrivene potrese



Slika 10. Rješenja žarišnih mehanizama (FMS) u razdoblju 2020. – 2024. iz kataloga CroFMS [21]. Rješenja su prikazana stereografskom projekcijom na donju hemisferu. Boja kompresijskih kvadranta označava tip rasjedanja (vidi legendu). Kratke crne linije označavaju orijentaciju P-osi. Veličina simbola *beach-ball* skalirana je prema magnitudi u rasponu prikazanom u legendi. Prikazana su samo rješenja kvalitete ≥ 2

(slika 10.). Međutim, gotovo jednak broj naknadnih potresa dogodio se na reversnim rasjedima, osobito u blizini Velike Soline te u grozdovima sjeveroistočno od Čuntića i jugoistočno od Petrinje. U radu [1] pokazano je i da je raspodjela rasjedanja s pomakom po pružanju i reversnog rasjedanja u skladu s promjenama Coulombove napetosti uzrokovanim glavnim potresom.

Smjer P-osi, koji je većinom orijentiran u pravcu JJZ–SSJ, usporediv je sa smjerom maksimalnoga horizontalnog napreznja (S_{Hmax}) u tome području [21]. Zanimljivo je da P-os glavnog potresa ima gotovo smjer S–J, što upućuje na prosječnu rotaciju P-osi u nizu naknadnih potresa od oko 16° u smjeru kazaljke na satu [1].

6. Rasprava i zaključci

Sveobuhvatna analiza petrinjskoga potresnog niza u razdoblju 2020. – 2024., potpomognuta klasičnim i naprednim metodama strojnog učenja, pruža znatno unaprijeđen uvid u seizmičke i tektonske procese aktivne u toj važnoj prijelaznoj zoni između Unutarnjih Dinarida i jugozapadnog dijela Panonskog bazena. Ključni element ovog istraživanja bila je brza i koordinirana uspostava privremenih seizmičkih mreža, posebno talijansko-

hrvatske mreže OP-Net te naknadno mreže PN-Net. Njihova uspostava nadopunila je nedovoljno gustu stalnu mrežu, što je rezultiralo znatnim povećanjem broja postaja i kvalitete podataka. Povećana gustoća mreže bila je presudna za smanjenje nepouzdanosti u lociranju žarišta potresa, osobito njihove dubine, što je ključno za pouzdano kartiranje rasjednih ploha (slika 4.).

Nažalost, potres je pogodio područje koje prethodno nije bilo dovoljno pokriveno seizmičkim mjerjenjima, ponajviše zbog ograničenih finansijskih sredstava. Posebno je nedostatak instrumenata za mjerenje jake trešnje tla (akceleroografa) označio propuštenu jedinstvenu priliku za prikupljanje podataka o ubrzanju tla u bliskome polju velikog potresa s pomakom po pružanju rasjeda. Takvi bi podaci predstavljali iznimno vrijedan doprinos bazi akceleroograma u Hrvatskoj. Ipak, postavljanje OP-Net mreže, koja uključuje i geofone i akceleroografe, a potom i PN-Net mreže, omogućilo je bilježenje ubrzanja tijekom najjačega naknadnog potresa 6. siječnja 2021. te tijekom svih kasnijih većih potresa.

Mogućnost brze instalacije instrumenata omogućila je bilježenje najintenzivnijeg razdoblja naknadnih potresa neposredno nakon glavnog udara. Nadalje, velika količina podataka učinkovito je obrađena primjenom metoda strojnog učenja, čime je seizmički katalog proširen za više od 50 %, uz uspješnu detekciju tisuća potresa male magnituda koji nisu bili identificirani klasičnom analizom. Time je potvrđena vrijednost naprednih metoda u praćenju potresne aktivnosti nakon glavnog potresa. Detaljna analiza gotovo 20.000 klasično lociranih i više od 50.000 potresa detektiranih metodama strojnog učenja (slike 5. i 9.) potvrđuje da su se najveći potresi dogodili duž Petrinjskog rasjeda, aktivne strukture u složenoj prijelaznoj zoni između Dinarida i Panonskog bazena. Međutim, razdioba seizmičnosti s vremenom je postajala sve složenija, pri čemu je preraspodjela napetosti nakon glavnog potresa aktivirala brojne sekundarne rasjede koji se protežu izvan neposredne zone glavnog rasjeda. Iako se potresna aktivnost općenito smanjuje u skladu s modificiranim Omorijevim zakonom (slika 7.b), što upućuje na postupni povratak na pozadinsku razinu oko 2038., neki grozdovi još su aktivni u jugoistočnim dijelovima zone.

Analiza žarišnih mehanizama (katalog CroFMS) upućuje na složenu interakciju različitih tipova rasjedanja (slika 10.). Dok najveći potresi pokazuju očekivano rasjedanje s pomakom po pružanju, znatan broj naknadnih potresa karakterizira reverzno rasjedanje. Ta heterogena raspodjela u skladu je s promjenama

Coulombove napetosti uzrokovanim glavnim potresom, čime se potvrđuju suvremeni modeli statičkog iniciranja rasjedanja. Dodatno, uočena je važna pojava rotacije P-osi: dok su P-osi naknadnih potresa usklađene s regionalnim maksimalnim horizontalnim naprezanjem (S_{Hmax}), one pokazuju zamjetnu rotaciju u odnosu na P-os glavnog potresa. Ta rotacija pruža važan uvid u svojstva lokalnog naprezanja i njegove varijabilnosti. Zaključno, pet godina intenzivnog praćenja seizmičnosti nakon petrinjskog potresa rezultiralo je iznimno detaljnim i pouzdanim razumijevanjem toga znatnog potresa s pomakom po pružanju koji se dogodio unutar tektonske ploče. Uspješna suradnja i brza uspostava seizmičkih mreža, uz primjenu naprednih metoda strojnog učenja, omogućile su stvaranje iznimno bogatog skupa podataka. On upućuje na primarne i sekundarne rasjede aktivirane tijekom potresnog niza te pruža snažne dokaze da je heterogeno rasjedanje povezano s naknadnim potresima izravna i predvidiva posljedica preraspodjele tektonskih napetosti. Dobiveni uvidi u geometriju i kinematiku petrinjskoga rasjednog sustava, produktivnost naknadnih potresa i kratkoročne varijacije tektonskih napetosti važni su za unaprjeđenje modela seizmičke opasnosti. Oni omogućuju pouzdaniju karakterizaciju glavnih seizmogennih rasjeda, uključujući parametre koji definiraju vjerojatnost da se na njima dogodi potres, maksimalne očekivane magnitude i tipične mehanizme žarišta. Time se stvara čvršća osnova za determinističko modeliranje realističnih scenarija potresa na području Banovine, što doprinosi razvoju dugoročnih strategija smanjenja seizmičkog rizika u središnjoj Hrvatskoj.

Zahvala

Seizmološka služba pri Geofizičkome odsjeku Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu zahvaljuje Vladi Republike Hrvatske i Ministarstvu znanosti i obrazovanja na financijskoj potpori za nabavu kompleta seizmoloških instrumenata za praćenje seizmičnosti: 20 modernih seizmometara i 20 akcelerometara s pripadajućom opremom. Seizmolozi iz Geofizičkog zavoda "Andrija Mohorovičić" zahvaljuju kolegama iz Nacionalnog instituta za oceanografiju i primijenjenu geofiziku – OGS (Italija) na pomoći i ustupanju šest seizmografa s integriranim akcelerometrima za brzu instalaciju. Postajama stalne hrvatske mreže i mobilnog fonda (PN-Net) upravljala je hrvatska Seizmološka služba. Ovaj rad podržala je Europska unija – NextGenerationEU putem Nacionalnog plana za oporavak i otpornost 2021. – 2026. Institucionalna potpora bila je od Prirodoslovno-matematičkoga fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (GIGA). Automatska detekcija i lociranje potresa provedeni su u sklopu projekta "Geofizičko-seizmološka istraživanja potresom ugroženih područja u RH i razvoj atenuacijskih relacija predviđanja seizmičkog gibanja tla – CRONOS", financiranog iz Norveškog financijskog mehanizma (2014. – 2021., projekt 04-UBS-U-0002/22-90). Privremenim postajama OP-Net mreže upravljali su seizmolozi Geofizičkog zavoda "Andrija Mohorovičić". Zahvaljujemo svim kolegama koji su sudjelovali u postavljanju i održavanju postaja te u analizi seizmograma i podataka.

LITERATURA

- [1] Herak, M., Herak, D.: Properties of the Petrinja (Croatia) earthquake sequence of 2020–2021—Results of seismological research for the first six months of activity. *Tectonophysics*, 858 (2023), Paper No. 229885, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229885>
- [2] Herak, D., Herak M.: The Kupa Valley (Croatia) Earthquake of 8 October 1909 - 100 Years Later, *Seismological Research Letters* 81 (2010), pp. 30–36, <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.1.30>
- [3] Pollak, D., Gulam, V., Novosel, T., Avanić, R., Tomljenović, B., Hećej, N., Terzić, J., Stipčević, J., Bačić, M., Kurečić, T., Dolić, M.: The preliminary inventory of coseismic ground failures related to December 2020–January 2021 Petrinja earthquake series, *Geologia Croatica*, 74(2) (2021), pp. 189–208, <https://doi.org/10.4154/gc.2021.08>
- [4] Tomac, I., Vlahović, I., Parlov, J., Matoš, B., Matešić, D., Kosović, I., Pavčić, I., Frangen, T., Terzić, J., Pavelić, D.: Geotechnical Reconnaissance and Engineering Effects of the December 29, 2020, M6.4 Petrinja, Croatia Earthquake, and Associated Seismic Sequence, Technical report of Geotechnical Extreme Event Reconnaissance (GEER) Association: Petrinja, Croatia, 2021, pp. 49–96, <https://doi.org/10.18118/G63T0>
- [5] Tomac, I., Kovačević Zelić, B., Perić, D., Domitrović, D., Štambuk Cvitanović, N., Vučenović, H., Parlov, J., Stipčević, J., Matešić, D., Matoš, B., Vlahović, I.: Geotechnical reconnaissance of an extensive cover-collapse sinkhole phenomena of 2020–2021 Petrinja earthquake sequence (Central Croatia), *Earthquake spectra*, 39 (2023) 1, pp. 653–686, <https://doi.org/10.1177/87552930221115759>
- [6] Atalić, J., Uroš, M., Šavor Novak, M., Demšić, M., Baniček, M., Kadić, A., Oreb, J.: The Croatian Centre for Earthquake Engineering: establishment, activities and future opportunities, in 3rd European Conference on Earthquake Engineering & Seismology (3ECEEES), (2022), pp. 2088–2097
- [7] Atalić, J., Demšić, M., Baniček, M., Uroš, M., Dasović, I., Prevolnik, S., Kadić, A., Šavor Novak, M., Nastev, M.: The December 2020 magnitude (Mw) 6.4 Petrinja earthquake, Croatia: seismological aspects, emergency response and impacts, *Bulletin of earthquake engineering*, 21 (2023) 13, pp. 5767–5808, <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01758-z>
- [8] Mihaljević, I., Zlatović, S.: Embankments damaged in the magnitude Mw 6.4 Petrinja earthquake and remediation, *Geosciences*, 13 (2023) 2, Paper No. 48, <https://doi.org/10.3390/geosciences13020048>

- [9] Mijić, Z., Zlatović, S., Montgomery, J., Ziotopoulou, K., Gjetvaj, V.: Liquefaction effects in the 2020 Mw 6.4 Petrinja, Croatia, earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 193 (2025), Paper No. 109262 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109262>
- [10] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V.: Destructive M6. 2 Petrinja earthquake (Croatia) in 2020 - Preliminary multidisciplinary research, *Remote Sensing*, 13 (2021) 6, Paper No. 1095, <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
- [11] Kastelic, V., Atzori, S., Carafa, M., Govorčin, M., Herak, D., Herak, M., Matoš, B., Stipčević, J., Tomljenović, B.: Petrinja Seismogenic Source and its 2020-2021 Earthquake Sequence (central Croatia). in EGU General Assembly Conference Abstracts (2021), Paper No. EGU21-16585
- [12] Baize, S., Amoroso, S., Belić, N., Benedetti, L., Boncio, P., Budić, M., Cinti, F.R., Henriquet, M., Jamšek Rupnik, P., Kordić, B., Markušić, S.: Environmental effects and seismogenic source characterization of the December 2020 earthquake sequence near Petrinja, Croatia, *Geophysical Journal International*, 230 (2022) 2, pp. 1394-1418, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac123>
- [13] Henriquet, M., Kordić, B., Métois, M., Lasserre, C., Baize, S., Benedetti, L., Spelić, M., Vukovski, M.: Rapid remeasurement of dense civilian networks as a game-changer tool for surface deformation monitoring: The case study of the Mw 6.4 2020 Petrinja Earthquake, Croatia, *Geophysical Research Letters*, 49 (2022) 24, Paper No. e2022GL100166, <https://doi.org/10.1029/2022GL100166>
- [14] Xiong, W., Yu, P., Chen, W., Liu, G., Zhao, B., Nie, Zh., Qiao, X.: The 2020 Mw 6.4 Petrinja earthquake: a dextral event with large coseismic slip highlights a complex fault system in northwestern Croatia, *Geophys. J. Int.*, 228 (2022), pp. 1935-1945, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab440>
- [15] Zhu, S., Wen, Y., Gong, X., Liu, J.: Coseismic and Early Postseismic Deformation of the 2020 Mw 6.4 Petrinja Earthquake (Croatia) Revealed by InSAR, *Remote Sensing*, 15(10) (2023), 2617. <https://doi.org/10.3390/rs15102617>
- [16] Žilić, I., Causse, M., Vallee, M., Markušić, S.: High Stress Drop and Slow Rupture During the 2020 MW6.4 Intraplate Petrinja Earthquake, Croatia, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 130 (2025) 1, [10.1029/2024JB029107](https://doi.org/10.1029/2024JB029107)
- [17] Sardeli, E., Michas, G., Pavlou, K., Zaccagnino, D., Vallianatos, F.: Spatiotemporal properties of the 2020-2021 Petrinja (Croatia) earthquake sequence, *Journal of Seismology*, 28 (2024) 4, pp. 899-920, <https://doi.org/10.1007/s10950-024-10228-1>
- [18] Bjelotomić Oršulić, O., Markovinović, D., Varga, M., Bašić, T.: Coseismic ground displacement after the M W 6.2 earthquake in NW Croatia determined from sentinel-1 and GNSS CORS data, *Geosciences*, 11 (2021) 4, Paper No. 170, <https://doi.org/10.3390/geosciences11040170>
- [19] Tondi, E., Blumetti, A. M., Cicala, M., Di Manna, P., Galli, P., Invernizzi, C., Mazzoli, S., Piccardi, L., Valentini, G., Vittori, E., Volatili, T.: 'Conjugate' coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak-Moslavina, Croatia), *Scientific Reports*, 11 (2021) 1, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88378-2>
- [20] Ustaszewski, K., Herak, M., Tomljenović, B., Herak, D., Matej, S.: Neotectonics of the Dinarides-Pannonian Basin transition and possible earthquake sources in the Banja Luka epicentral area, *J. Geodyn.*, 82 (2014), pp. 52-68, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.04.006>
- [21] Herak, M.: Croatian catalogue and database of focal mechanism solutions, characteristic mechanisms, and stress field properties in the Dinarides and the surrounding regions, *Geofizika*, 41 (2024) 2, pp. 79-123, <https://doi.org/10.15233/gfz.2024.4.1.5>
- [22] Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S.M., Schaltegger, U., Krenn, E., Frank, W., Fügenschuh, B.: Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: from continent-continent collision to back-arc extension, *Tectonics*, 29 (2010), TC6017, <https://doi.org/10.1029/2010TC002668>
- [23] Schmid, S., Fügenschuh, B., Kounov, A., Matenco, L., Nievergelt, P., Oberhänsli, R., Pleuger, J., Schefer, S., Schuster, R., Tomljenović, B., Ustaszewski, K., van Hinsbergen, D.J.J.: Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey, *Gondwana Res.*, 78 (2020), pp. 308-374, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.07.005>
- [24] Saftić, B., Velić, J., Sztanó, O., Juhász, G., Ivković, Ž.: Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (northern Croatia and southwestern Hungary). *Geologia Croatica*, 56 (2003), pp. 101-122, <https://hrcak.srce.hr/3793>
- [25] Tomljenović, B., Csontos, L.: Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia), *Int J Earth Sci*, 90 (2001), pp. 560-578, <https://doi.org/10.1007/s005310000176>
- [26] Herak, D., Herak, M., Tomljenović, B.: Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-Western Croatia, *Tectonophysics*, 465 (2009) 1-4, pp. 212-220, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.12.005>
- [27] Pikija, M.: Basic Geological Map of SFRY 1:100.000, Sisak sheet. Geol. Zavod, Zagreb, Savezni geol. Zavod, Beograd. (in Croatian), 1987
- [28] Šikić, K.: Osnovna geološka karta Republike Hrvatske 1: 100.000. Tumač za list Bosanski Novi 1: 100.000, L 33-70 [Basic Geological Map of Republic of Croatia 1: 100000, Geology of the Bosanski Novi sheet—in Croatian]. Hrvatski geološki institut Zagreb, 2014
- [29] Tomljenović, B., Stipčević, J., Sečanj, M.: Izvješće o zabilježenim pojavama koseizmičkih površinskih deformacija na području Pokuplja i Banovine nastalih potresnom serijom od 28.12. 2020 do 5.01.2021. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu 2021. (<https://www.rgn.unizg.hr/hr/izdvojeno/2790-izvjesce-o-zabiljezenim-pojavama-koseizmickih-povrsinskih-deformacija-na-podrucju-pokuplja-i-banovine-nastalih-potresnom-serijom-od-28-12-2020-do-5-01-2021>), 2021
- [30] Mihalić Arbanas, S., Arbanas, Ž., Bernat Gazibara, S., Krkač, M.: Preliminary engineering geological and geotechnical investigation of geological hazards induced by Petrinja Earthquake Series 2020-2021, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 11, pp. 1071-1082, <https://doi.org/10.14256/JCE.4422.2025>
- [31] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L., Jurić-Kačunić, D.: Liquefaction in Croatia: Risk assessment and rapid post-earthquake decision-making – five years later, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 11, pp. 1037-1055, <https://doi.org/10.14256/JCE.4419.2025>
- [32] Stipčević, J., Poggi, V., Herak, M., Parolai, S., Herak, D., Dasović, I., Bertoni, M., Barnaba, C., Pesaresi, D.: First results from temporary deployment of small seismic network following the Mw= 6.4 Petrinja earthquake, In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EGU21-16579), 2021
- [33] Herak, M., Herak, D., Markušić, S.: Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908-1992, *Terra Nova*, 8 (1996) 1, pp. 86-94, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1996.tb00728.x>

- [34] Ross, Z.E., Yue, Y., Meier, M.A., Hauksson, E., Heaton, T.H.: PhaseLink: A deep learning approach to seismic phase association, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124 (2019) 1, pp. 856-869, <https://doi.org/10.1029/2018JB016674>
- [35] Zhu, W., Beroza, G.C.: PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method, *Geophysical Journal International*, 216 (2019) 1, pp. 261-273, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy423>
- [36] Mousavi, S.M., Ellsworth, W.L., Zhu, W., Chuang, L.Y., Beroza, G.C.: Earthquake transformer - an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking, *Nature communications*, 11 (2020) 1, p.3952, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17591-w>
- [37] Šindija, D., Mustač-Brčić, M., Hetényi, G., Stipčević, J.: Enhanced view of the Mw 6.4 Petrinja earthquake sequence (2020-2022) using deep learning. *ESS Open Archive*. 2025, <https://doi.org/10.22541/essoar.174982734.45695605/v1>
- [38] Michelini, A., Cianetti, S., Gaviano, S., Giunchi, C., Jozinović, D., Lauciani, V.: INSTANCE—the Italian seismic dataset for machine learning, *Earth System Science Data*, 13 (2021) 12, pp. 5509-5544, <https://doi.org/10.5194/essd-13-5509-2021>
- [39] Münchmeyer, J.: PyOcto: A high-throughput seismic phase associator, *Seismica*, 3 (2024) 1, <https://doi.org/10.26443/seismica.v3i1.1130>
- [40] Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., Berge-Thierry, C.: Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations. In *Advances in seismic event location* (pp. 101-134). Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 101-134, 2000, https://doi.org/10.1007/978-94-015-9536-0_5
- [41] Lomax, A.: Mapping finite-fault slip with spatial correlation between seismicity and point-source Coulomb failure stress change, *arXiv preprint*, 2024, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.05437>
- [42] Zhu, W., Mousavi, S.M., Beroza, G.C.: Seismic signal denoising and decomposition using deep neural networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57 (2019) 11, pp. 9476-9488, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2926772>
- [43] Fonzetti, R., Buttinelli, M., Valoroso, L., De Gori, P., Chiarabba, C.: Fault interaction during large earthquakes as revealed by the L'Aquila 2009 sequence, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130 (2025) 8, Paper No. e2025JB031245, <https://doi.org/10.1029/2025JB031245>