

PRELOMNI PRETRGI POVRŠJA OB POTRESU IN NJIHOVE RAZISKAVE

Andrej Gosar¹

Povzetek

Prelomni pretrgi površja nastanejo ob zelo močnih potresih z razmeroma plitvim žariščem. So primarni učinek potresa, saj so površinska manifestacija zdrsa dveh tektonskih blokov, ki se pri večini potresov zgodi le v globini. Značilni so za območja sveta z veliko intenzivnostjo tektonskih deformacij, kot so Turčija, Kalifornija, Tajvan in Nova Zelandija. Največji prelomni pretrgi so več deset kilometrov dolgi, s premiki do več metrov in lahko močno poškodujejo stavbe, ceste, železnice in nasipe. Za objekte kritične infrastrukture, kot so jedrske elektrarne, vodne pregrade ali naftovodi, katerih poškodba ali porušitev bi imela uničujoče sekundarne posledice, je nujno z obsežnimi raziskavami dokazati, da je nevarnost površinskega prelomnega pretrga ob potresu zanemarljiva. Prelomni pretrgi se raziskujejo z geološkimi, geomorfološki, geodetskimi in geofizikalnimi raziskavami. Najbolj so se v zadnjih desetletjih razvile metode daljinskega zaznavanja, kot so satelitska radarska interferometrija in letalsko lasersko skeniranje površja. V Sloveniji še ni bil dokazan primer površinskega prelomnega pretrga, ki bi bil povezan z dokumentiranim potresom, čeprav so taki pretrgi zelo verjetno nastali pri najmočnejših zgodovinskih potresih. Se pa za objekte kritične infrastrukture izvajajo vse potrebne raziskave. V bližini Slovenije je potres s površinskim pretrgom, velikim do 0,5 m, nastal decembra 2020 v hrvaški Petrinji.

EARTHQUAKE SURFACE FAULT RUPTURES AND THEIR INVESTIGATIONS

Abstract

Surface fault ruptures occur during very strong earthquakes with rather shallow hypocentres. They are primary earthquake effects, because they are the surface manifestation of the slip of two tectonic blocks, which for most earthquakes occur only at depth. They are characteristic of areas of the world with large tectonic deformations, such as Turkey, California, Taiwan and New Zealand. The largest fault ruptures are several tens of kilometres long with displacements of up to several metres, and can severely damage buildings, roads, railways and embankments. For critical infrastructure such as nuclear power plants, water dams and oil pipelines, the damage or collapse of which would produce catastrophic secondary effects, it is mandatory to demonstrate, through extensive investigations, that the danger of surface rupture is negligible. Surface ruptures are studied by geological, geomorphological, geodetic and geophysical methods. Among them, remote sensing methods, such as satellite radar interferometry and airborne laser scanning methods, have made the greatest progress in the past few decades. In Slovenia no earthquake surface rupture associated with a documented earthquake has yet been proven, although it has very likely occurred in the largest historical earthquakes. For this reason all necessary investigations are being carried out for critical infrastructure. Near Slovenia, an earthquake occurred in Petrinja (Croatia) in December 2020 with surface rupture displacements of up to 0.5 m.

¹ dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

UVOD

Potres nastane, ko se dva bloka kamnine, ki ju loči tektonski prelom, nenadno premakneta zaradi nakopičene napetosti v Zemljini skorji, potem ko sta presežena trenje na prelomni ploskvi ali strižna trdnost kamnine. Tektonski prelomi se lahko jasno kažejo na površju in jih vidimo v naravi, na satelitskih in letalskih posnetkih ter predvsem v natančnih digitalnih modelih višin. Proučujemo jih z geomorfološki metodami raziskav. Še bolj pogosto pa prelomov v naravi ne vidimo dobro,

predvsem tam, kjer sta na površju debelejša preperina ali gozd, lahko pa raziščemo njihov potek z geološkim kartiranjem in strukturno-geološkimi metodami raziskav. Poznamo pa tudi *slepe prelome* (angl. *blind fault*), ki ne segajo do površja in tam niso vidni, se pa lahko kažejo v morfologiji kot značilne gube. Take prelome lahko zaznamo z geofizikalnimi metodami.

Velika večina potresov nastane ob že obstoječih prelomih, ki v Zemljini skorji pomenijo šibko območje z manjšo strižno trdnostjo. Izjemoma pa se ob

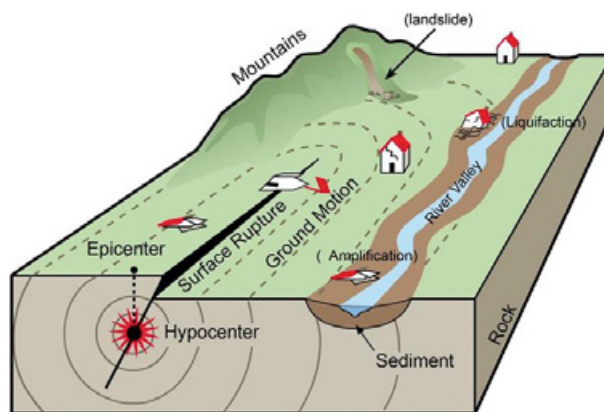
nekaterih močnih potresih zgodijo tudi povsem novi prelomni pretrgi, pa še pri teh se pogosto izkaže, da je v globini že obstajal slep prelom, ki pa ni bil znan. Čeprav je potek večine tektonskih prelomov znan in vrisan v geološke karte, se velika večina potresov zgodi s prelomnimi pretrgi le v globini in koseizmični zmiri kamnin ne segajo do površja. Prelomni pretrgi površja (angl. *surface fault rupture*) so značilni le za zelo močne potrese, njihov nastanek pa je odvisen od magnitude in globine žarišča potresa, vrste preloma in litološke sestave površja (Gosar, 2003).

Prelomni pretrg površja ob močnem potresu pomeni izjemno tveganje za stavbe ali infrastrukturo, zgrajeno na njem. Zato se oceni nevarnosti prelomnega pretrga v ocenjevanju potresne nevarnosti namenja veliko pozornosti (Dalguer in sod., 2021), posebno pri objektih kritične infrastrukture, kot so velike pregrade, jedrske elektrarne ali naftovodi. Pri objektih in strukturah torej, katerih poškodba ali porušitev bi imela uničujoče sekundarne učinke v obliki poplave zaradi porušitve jezusa, sevanja zaradi poškodbe jedrskega reaktorja ali velikega onesnaženja zaradi pretrganega naftovoda.

PRIMARNI IN SEKUNDARNI UČINKI POTRESOV

Pri intenzivnih potresnih lestvicah uporabljamo za določitev intenzitete predvsem učinke na ljudi, predmete in stavbe. Ker pa so učinki potresov v naravnem okolju pri višjih intenzitetah lahko prevladujoči, so uvedli dopolnilno lestvico učinkov potresov na okolje (angl. *Environmental Seismic Intensity scale* – ESI 2007), ki dopolnjuje druge 12-stopenjske lestvice, predvsem Evropsko potresno lestvico (EMS). Po ESI 2007 se učinki potresov v naravnem okolju delijo na primarne in sekundarne (Guerrieri in Vittori, 2007). Primarni učinki so površinski odraz seizmogenega preloma in se kažejo v površinskem prelomnem pretrgu ter dvigu ali spustu enega kamninskega bloka nasproti drugemu. Sekundarni učinki pa nastanejo zaradi močnega nihanja tal, ki ga povzročajo potresna valovanja, ki se širijo iz žarišča potresa, in obsegajo razpoke v tleh, skalne podore, zemeljske plazove, utekočinjenje (likvifikcijo) sedimentov, hidrološke anomalije, anomalno valovanje vode in skakanje kamnov (Guerrieri in Vittori, 2007). Pri številnih močnih potresih, ki se zgodijo v odmaknjenih, redko poseljenih območjih, so učinki v naravnem okolju prevladujoči in zato zelo pomembni za določitev intenzitete. Poleg tega večji učinki v naravnem okolju, kot so skalni podori, zemeljski

plazovi in prelomni pretrgi, edini omogočajo primerjavo zgodovinskih potresov, za katere ni instrumentalnih seizmoloških podatkov, z novejšimi. V Sloveniji so se obsežni učinki v naravnem okolju, predvsem v obliki skalnih podorov, zgodili ob potresu leta 1998 v Krnskem pogorju (Gosar, 2012a, 2014). Kljub zmerni magnitudi 5,6 in največji intenziteti VII–VIII EMS-98 je zaradi redke poseljenosti Julijskih Alp in Zgornjega Posočja analiza teh učinkov z uporabo ESI 2007 omogočala boljšo oceno intenzitet v ožjem nadzoriščnem območju, ki je dopolnila makroseizmične analize po Evropski potresni lestvici (Gosar, 2014).

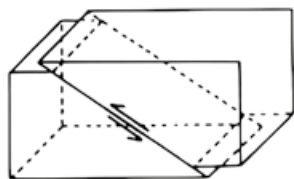


Slika 1: Nekateri vrste učinkov potresov v naravnem okolju (*fault rupture* – prelomni pretrg, *landslide* – zemeljski plaz, *liquefaction* – utekočinjenje ali likvifikacija, *ground motion* – gibanje tal, *amplification* – ojačenje) (Wang in sod., 2017)

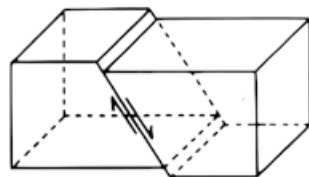
Figure 1: Some types of environmental earthquake effects

Oblika površinskega pretrga je odvisna od vrste preloma (slika 2), ki opredeljuje smer zmiri ob prelomu, in od vrste kamnin, ki so na površju najpogosteje sedimentne. Pri normalnih prelomih, kjer se krovinski blok ob potresu pogrezne glede na talninskega, nastane navadno stopnica v topografiji, ki je v mehkejših sedimentih v več segmentih ali pa jo spremljajo spremljajoči prelomi in se oblikuje tektonski jarek. Pri reverzih prelomih, pri čemer se krovinski blok narine na talninskega, je površinski pretrg bolj zapleten, saj se del krovine navadno poruši. Poleg tega pride tudi do gubanja površinskih sedimentov in vzratnega narivanja. Pri zmičnih prelomih bloka zdrsna v vodoravni smeri in je prelomni pretrg precej raven. Ker pa je veliko zmičnih prelomov segmentiranih, so tudi ti pretrgi lahko zapleteni in imajo številne prekrivajoče se odseke ali pa jih spremljajo ešalonirane razpoke. Poznamo tudi poševne prelome, pri katerih je premik kombinacija normalnega ali reverznega premika z zmičnim premikom. Prelomni pretrgi ob poševnih prelomih so bolj zapleteni, saj kažejo tako navpičen kot vodoraven medsebojen premik obeh kamninskih blokov (Moores in Twiss, 1995).

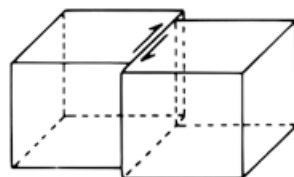
REVERZNI PRELOM



NORMALNI PRELOM



ZMIČNI PRELOM



Slika 2: Različne vrste tektonskih prelomov

Figure 2: Different types of tectonic faults

Če je na površini debelejša plast nevezanih sedimentov, bo površinski pretrg manj pravilen in pogosto prekinjen. Če pa je sedimentov le malo, je pretrg bolj raven, razen če je ob zelo močnem potresu pretrg zajel več med seboj povezanih prelomov.

PRIMERI POVRŠINSKIH PRELOMNIH PRETRGOV

Površinski prelomni pretrg so prvič dokumentirano opazovali ob potresu magnitude 7,9 leta 1906 v San Franciscu, ko so ob prelomnici svetega Andreja nastali do 6 m veliki vodoravni premiki. Dolžina površinskega pretrga je bila 477 km, kar kaže velikost tega potresa. Zelo znani so posnetki premaknjenih ograj in drugih linearnih struktur, ki so potrjevali velikost deformacij. Celoten transformni prelom svetega Andreja je dolg več kot 1300 km in poteka vzdolž večjega dela Kalifornije ter je del tektonske meje med Tihomorsko in Severnoameriško litosfersko ploščo (Moore in Twiss, 1995).

Eden najbolj zapletenih površinskih prelomnih pretrgov je nastal leta 2016 ob potresu Kaikoura z magnitudo 7,8 na Južnem otoku Nove Zelandije. Žarišče potresa, kjer se je prelomni pretrg začel, je bilo v globini 15 km. Od tu se je pretrg v globini širil vzdolž prelomnih ploskev proti severu s hitrostjo 2 km/s kar 200 km daleč (Wikipedia, 2016, Kaikoura

earthquake). Potres ni sprostil največ energije v nadžarišču, temveč 100 km severneje. Začetne raziskave so pokazale, da je ob potresu prišlo do pretrga vzdolž vsaj šestih prelomov, pozneje se je s podrobnejšimi raziskavami njihovo število dvignilo na 25, med katerimi številni prej niso bili znani. Zato se šteje, da je potres Kaikoura najbolj zapleten od vseh, ki so bili kadar koli raziskani. Površinski prelomni pretrg je bil dolg okoli 70 km, od tega je bilo 36 km pretrga na kopnem, 34 km pa na morskem dnu (Science Learning Hub, 2018). Premiki ob površinskem pretrgu so dosegli 10 m v vodoravni smeri in 4 m v navpični (slika 3).



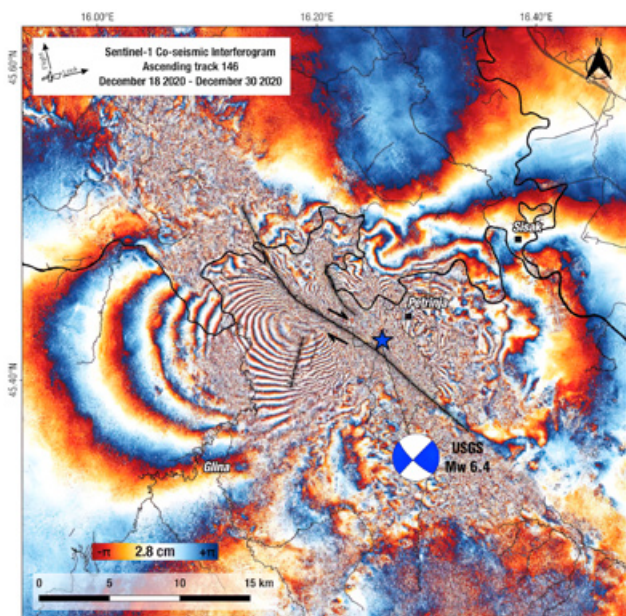
Slika 3: Ob potresu Kaikoura magnitude 7,8 na južnem otoku Nove Zelandije leta 2016 je na površju nastala 3,5 m visoka prelomna stopnica. (vir: Science Learning Hub)

Figure 3: During the Kaikoura magnitude 7.8 earthquake, which occurred in 2016 on New Zealand's South Island, a 3.5 m high fault scarp was created (Source: Science Learning Hub)

V Evropi, razen njenega sredozemskega dela, ni znanih veliko površinskih prelomnih pretrgov ob potresih, saj je intenzivnost deformacij manjša kot na območjih z večjo potresno dejavnostjo. Ob nedavnem potresu 29. decembra 2020 z navorno magnitudo 6,4 pri Petrinji na Hrvaškem (Dasović in sod., 2021; Vukovski, 2021) pa so nastali številni koseizmični pojavi, ki vključujejo površinske pretrge.

Potres je nastal v desnozmični petrinjski prelomni coni, ki poteka v smeri severozahod-jugovzhod. Žariščni mehanizem potresa (EMSC, 2021) je pokazal skoraj popoln desni zmik ob navpičnem prelomu z zanemarljivo navpično komponento premika. Ker sta satelita Sentinel z radarsko interferometrijo posnela to območje že en dan po potresu (30. decembra), podatki pa so javno dostopni, so raziskovalci zelo hitro izračunali InSAR interferogram (slika 4) iz razlike od predhodnega snemanja 18. decembra (metoda je opisana v poglavju o raziskavah prelomnih pretrgov). Ta je pokazal, da so bili največji premiki na površju

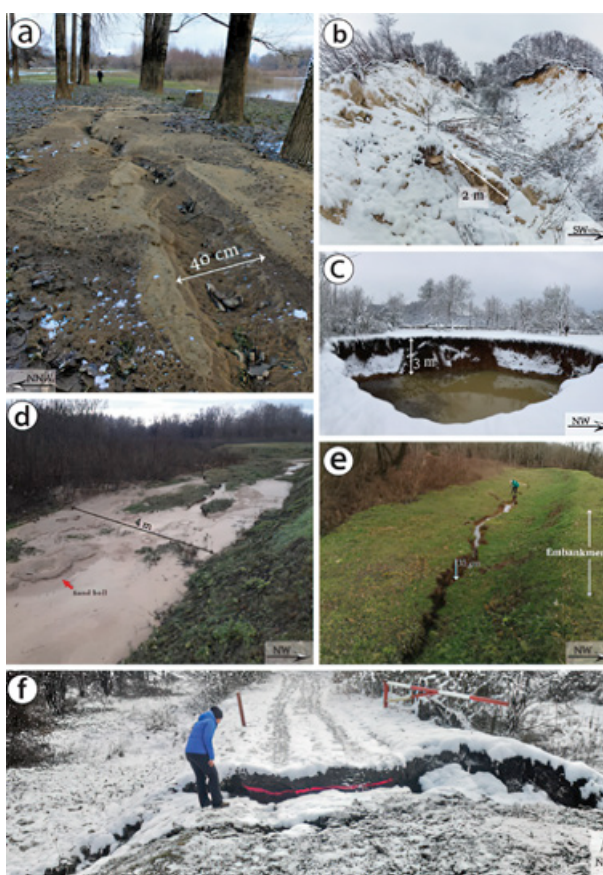
okoli 0,5 m (Ganas in sod., 2021). Raziskave so dopolnili z rezultati satelitskih geodetskih meritev (GNSS) na petih točkah omrežja EUREF in z žariščnim mehanizmom, izračunanim iz seizmoloških opazovanj. S skupnim modeliranjem vseh podatkov so izračunali, da je bil prelomni pretrg v globini dolg okoli 8 km, največji premik ob prelomu (v globini) pa je znašal okoli 3 m. Prelomna cona je razmeroma široka, zato je vzorec površinskih deformacij precej zapleten.



Slika 4: Interferogram satelitskega radarskega skeniranja InSAR je za potres magnitude 6,4 decembra 2020 pri Petrinji pokazal, da je vodoraven premik ob prelomnem pretrgu znašal okoli 0,5 m (Ganas in sod., 2021).

Figure 4: Interferogram of satellite radar scanning InSAR for the Petrinja December 2020 magnitude 6.4 earthquake showing a horizontal displacement of up to 0.5 m

Sledile so obsežne terenske geološke raziskave, pri katerih so sodelovali raziskovalci iz različnih držav, tudi Slovenije. Ugotovili so skoraj 2 km dolg, skoraj zvezan pretrg na površju s premiki okoli 20 cm. Največji lokalni premik (36 cm) so izmerili na lokaciji, kjer razpoka seka državno cesto št. 37 (Tondi in sod., 2021). Poleg primarnih učinkov v obliki pretrga in razpok je imel potres tudi številne sekundarne učinke v naravi, predvsem vzdolž Kolpskega preloma, ki je del Petrinjskega prelomnega sistema (slika 5). Zelo veliko je bilo primerov utekočinjenja tal z značilnimi izbruhi z vodo nasičenega peska vzdolž razpok ter zemeljskih plazov. Likvifikacija in plazenje sta resno poškodovala nasipe in jez na reki Kolpi, ki so jih morali hitro sanirati, da bi preprečili poplave. Nastali so tudi številni ugrezi s premerom od enega do dvajset metrov in globoki do šest metrov. Gre za kraško območje, za katerega so z analizo letalskih in satelitskih posnetkov ugotovili, da je zelo dovzetno za nastanek



Slika 5: Pri potresu v Petrinji decembra 2020 je nastalo več sekundarnih učinkov: likvifikacija (a) in (d) v obliki izbruhov peska, skalni podori (b), ugrezi (c), razpoke v rečni pregradi (e) in nasipih (f) (Tondi in sod., 2021).

Figure 5: The Petrinja earthquake of December 2020 caused many secondary effects: liquefaction (a) and (d) in the form of sand boils, rockfalls (b), sinkholes (c), fractures in the river dam (e), and an embankment (f)

takih ugrezov (Tondi in sod., 2021), močno potresno nihanje tal pa je procese le zelo pospešilo. Zanimiv sekundarni učinek je bil tudi izbruh vode v neki garaži, ki je povzročil 50–70 cm visok gejzir.

V knjigi Yeatsa in sodelavcev (1997) *Earthquake Geology* so sistematično zbrani podatki o vseh potresih z znanim površinskim pretrgom na svetu, ki navajajo datum in magnitudo potresa, lokacijo nadžarišča, vrsto in usmerjenost preloma, dolžino pretrga ter največji vodoravni in navpični premik ob prelomnem pretrgu ter vir podatkov. Vseh opisanih primerov je več kot 300. V Evropi je največ primerov koseizmičnih površinskih prelomnih pretrgov v Grčiji, sledijo Islandija, Italija, Bolgarija in Albanija s po nekaj primeri. Bistveno več takih primerov je v Turčiji, kjer se je ob 1500 km dolgem Severnoanatolskem prelomnem sistemu samo v 20. stoletju zgodilo več kot deset rušilnih potresov z magnitudo nad 7,0 z večmetrskimi koseizmičnimi površinskimi premiki

intenziteta	površinski pretrg		tektonski dvig ali spust	drugi učinki	morfologija
	dolžina	premik			
VIII	do nekaj 100 m	do nekaj cm	nekaj cm		
IX	do nekaj km	do 1 dm	nekaj dm		
X	nekaj 10 km	do nekaj m	nekaj m	gravitacijski jarek ali podolgovata depresija	
XI	nekaj 10 do 100 km	več m	več m	gravitacijski jarek, podolgovata depresija ali iztisnjen greben	spremenjena rečna mreža
XII	več 100 km	nekaj 10 m	več m	gravitacijski jarek, podolgovata depresija ali iztisnjen greben	spremenjena rečna mreža, nastanek slapov in jezer

Preglednica 1: Primarni učinki potresov po intenzitetni lestvici učinkov potresov na okolje ESI 2007 (*Environmental Seismic Intensity scale*) (Guerrieri in Vittori, 2007)

Table 1: Primary effects of earthquakes according to the Environmental Seismic Intensity Scale (ESI 2007) (Guerrieri in Vittori, 2007)

ob pretrgih, dolgih več deset kilometrov. Pozneje so za ocenjevanje potresne nevarnosti Baize in sodelavci (2019) izdelali novo podatkovno bazo površinskih prelomnih pretrgov SURE (SURface Ruptures due to Earthquakes), ki pa obsega le primere z izrazitejšimi koseizmičnimi pojavi za 45 potresov v magnitudnem razponu 5,0–7,9. So pa ti zelo podrobno analizirani, saj obsegajo 15.000 opazovanj za določitev vseh parametrov, vključno s premikom, ki je najpomembnejši, in določitev več ko 56.000 segmentov pretrgov.

Po *Environmental Seismic Intensity scale* (ESI 2007) so primarni učinki v obliki površinskega prelomnega pretrga značilni za intenzitete potresa med VIII in XII (Guerrieri in Vittori, 2007). Njihova velikost eksponentno narašča z intenziteto potresa (preglednica 1), ki je odvisna od magnitude in žariščne globine.



Slika 6: Hude poškodbe ceste in porušitev nadvoza zaradi do 5,7 m velikih vodoravnih premikov ob prelomnem pretrgu potresa Kocaeli v zahodni Turčiji leta 1999 (vir: www.koeri.boun.edu.tr)

Figure 6: Heavy damage to a road due to up to 5.7 m horizontal displacements in the surface rupture of the Kocaeli earthquake in West Turkey in 1999 (Source: www.koeri.boun.edu.tr)

Magnituda potresa je odvisna od celotne površine prelomnega pretrga in velikosti zmika ob prelomni ploskvi. Odnos med magnitudo potresa, površino in dolžino celotnega prelomnega pretrga (v globini) ter dolžino in premikom površinskega pretrga je eden najpomembnejših pri ocenjevanju potresne nevarnosti in zato predmet številnih raziskav. Največ se uporabljajo empirične enačbe Wellsa in Coppersmitha (1994).

Površinski prelomni pretrgi lahko zelo poškodujejo transportno infrastrukturo. Ob potresu Kocaeli magnitude 7,6, ki je leta 1999 prizadel zahodno Turčijo, so bile hudo poškodovane tako ceste (slika 6) kot železniške proge (slika 7). Dolžina prelomnega pretrga tega potresa ob Severnanatolskem prelomu je bila 150 km, največji vodoravni premiki pa do 5,7 m.



Slika 7: Močno zviti tiri železniške proge zaradi prelomnega pretrga potresa Kocaeli v zahodni Turčiji leta 1999 (vir: www.koeri.boun.edu.tr)

Figure 7: Heavily bent railway lines due to the surface rupture of the Kocaeli earthquake in West Turkey in 1999 (Source: www.koeri.boun.edu.tr)

POVRŠINSKI PRELOMNI PRETRGI IN KRITIČNA INFRASTRUKTURA

Potresno inženirstvo danes omogoča, da gradimo varne objekte tudi na območjih z zelo visoko potresno nevarnostjo, kot so Japonska, Turčija in Kalifornija. Pri tem pa velja, da se moramo pri gradnji nujno izogniti lokacijam, ki so neposredno na prelomu, na katerem lahko ob potresu nastane površinski pretrg. Kot je že opisano, so površinski pretrgi lahko precej zapleteni in ne vemo nujno vnaprej, kje vse lahko nastanejo. Znani so sicer redki primeri, ko se objekt, ki je stal na prelomnem pretrgu, ni porušil in žrtev ni bilo, vendar je to bolj srečno naključje, ko so bila tla dovolj mehka, da ni prišlo do pretrga temeljne konstrukcije in hkrati dovolj nosilna, da ni prišlo do večjega nagiba objekta in posledično porušitve (slika 8).



Slika 8: V izjemnih primerih lahko ustrezno zgrajena hiša zdrži celo prelomni pretrg, ki se zgodi pod njo. Potres Kaikoura leta 2016 na Novi Zelandiji (vir: www.stuff.co.nz/science)

Figure 8: In exceptional cases a properly built house can sustain a surface fault rupture directly under the building: the Kaikoura 2016 earthquake in New Zealand (Source: www.stuff.co.nz/science)



Slika 9: Vodna pregrada Ši-Kang na Tajvanu, ki se je delno porušila ob potresu Chi-Chi leta 1999 (vir: Wieland in Fan, 2004)

Figure 9: The Shi-Kang water dam in Taiwan, which was partially destroyed by the Chi-Chi earthquake of 1999 (Source: Wieland in Fan, 2004)

Pri objektih kritične infrastrukture je z obsežnimi raziskavami treba ugotoviti, da je nevarnost površinskega pretrga izključena ali zanemarljiva. Eden najbolj znanih primerov delne porušitve takega objekta je vodna pregrada Ši-Kang na Tajvanu, ki se je ob potresu Chi-Chi z magnitudo 7,7 leta 1999 delno porušila (slika 9), saj je bila zgrajena na poznejšem prelomnem pretrgu, ki je na tem mestu znašal v navpični smeri kar 5–6 m. Tudi sicer so pri tem naravnem potresu nastali izjemno veliki premiki, ki so dosegli 9 m v vodoravni in 8 m v navpični smeri. Na reki Tačja-Hi je zaradi pretrga zato nastal 8 m visok slap. Velikost navpičnih premikov površja ob prelomu uvršča ta potres med največje na svetu po tem kriteriju (Vidrih in Godec, 2000).

Za jedrske objekte še posebej velja, da mora biti zagotovljeno, da na območju objekta ni možnosti površinskega pretrga. Zato se na njihovih lokacijah predhodno izvedejo obsežne geološke in geofizikalne raziskave, ki jih predpisujeta in nadzorujeta IAEA in US NRC (Valentini in sod., 2021). Na svetu še ni znanega primera, da bi imel kateri koli jedrski objekt težave zaradi površinskega prelomnega pretrga. Pri znani nesreči v Fukušimi leta 2011 zaradi Tohokskega potresa je bila ta izključno posledica cunamija, saj je potres nastal daleč od kopnega pod morskim dnom (Gosar, 2012b).

Poseben izziv so naftovodi in plinovodi, ki so pogosto več tisoč kilometrov dolgi in se pri tem ni vedno mogoče izogniti prečkanju večjih aktivnih prelomov. Pretrg ali večja poškodba naftovoda bi povzročila veliko ekološko katastrofo in ogromno gmotno škodo. Aljaska je eno potresno najbolj dejavnih območij na svetu s potresi, ki lahko presežejo magnitudo 9,0. Potres leta 1964 je imel navorno magnitudo 9,2 in se uvršča med tri najmočnejše znane potrese v zgodovini (Yeats in sod., 1997). Aljaska pa je tudi največja proizvajalka nafte v severni Ameriki, zato so prek nje v sedemdesetih letih zgradili 1300 km dolg transaljaški naftovod, ki povezuje Arktični ocean z Aljaškim zalivom. Pri tem naftovod prečka pomemben prelom Denali, za katerega je bilo z geološkimi raziskavami ocenjeno, da so na 600 m dolgem odseku naftovoda mogoči premiki površja 6,1 m v vodoravni smeri in 1,5 m v navpični smeri, in sicer ob potresu z ocenjeno največjo magnitudo 8,0. Da bi toge naftne cevi premera 1,2 m zdržale tako velike premike, so jih na tem odseku zgradili v cik-cak obliki na nosilcih iz teflona, ki lahko prosto drsijo po vodoravnih podpor-nikih (slika 10). Leta 2002 se je nato zgodil potres z magnitudo 7,9, ob katerem je na tem odseku nastal

4,3 m velik vodoravni in 0,8 m velik navpični premik. Izjemna inženirska rešitev iz sedemdesetih let, ki je stala 3 milijone dolarjev, se je takrat večkratno obrestovala, saj je naftovod potres prestal brez poškodb glavne cevi, poškodovani so se le nekateri nosilci v bližini preloma (Fuis in Wald, 2003).



Slika 10: Transaljaški naftovod na območju preloma Denali za kompenzacijo premikov ob potresnem prelomnem pretrgu poteka v cik-cak obliki na teflonskih nosilcih. (vir: Wikipedia)

Figure 10: *Trans-Alaska oil pipeline zigzagging on Teflon supports, where it crossed the Denali fault to accommodate earthquake-related fault displacements* (Source: Wikipedia)

Opredelitev poteka pomembnih aktivnih prelomov na takih območjih, ki so geološko slabo raziskana, saj jih pokriva debela plast preperine in gozda, je bila dolgo časa skoraj nepredstavljiv izziv. Šele letalsko lasersko skeniranje površja (LiDAR), ki se je počasi uveljavilo po letu 2000, nam danes omogoča natančne digitalne modele višin tudi na z gozdom poraslih območjih (Gosar, 2007), kar omogoča geomorfološke analize površja za določitev poteka seizmogenih prelomov. To so pozneje obsežno uporabili tudi na Aljaski (McCalpin, 2009).

RAZISKAVE NEVARNOSTI POVRŠINSKEGA PRELOMNEGA PRETRGA

Raziskave nevarnosti površinskih pretrgov so povezane predvsem s kritično infrastrukturo, največkrat za potrebe jedrskih elektrarn. V smernicah in standardih (IAEA, US NRC), ki se pri tem uporabljajo (Valentini in sod., 2021), se je uveljavil pojem »zmožen prelom« (angl. *capable fault*), torej prelom, pri katerem je nevarnost (lahko tudi zelo majhna) za površinski pretrg. Na gradnjo takega objekta na znani lokaciji preloma s preteklim površinskim pretrgom

seveda sploh ne pomislimo. Pri zmožnem prelomu torej govorimo o prelomu, ki se konča nekje v globini ali poteka v bližini lokacije in je treba z raziskavami ugotoviti, ali bi lahko tudi po najbolj neugodnem scenariju (konzervativen pristop) prišlo do površinskega pretrga (Nurminen in sod., 2020). Znotraj obsežnega področja ocenjevanja potresne nevarnosti (Baker in sod., 2021), ki obsega verjetnostne (PSHA) in deterministične (DSHA) metode, se je tako razvilo posebno področje ocenjevanja nevarnosti površinskega prelomnega pretrga (angl. *Fault Displacement Hazard Assessment – FDHA*) (Dalguer in sod., 2021; Valentini in sod., 2021).

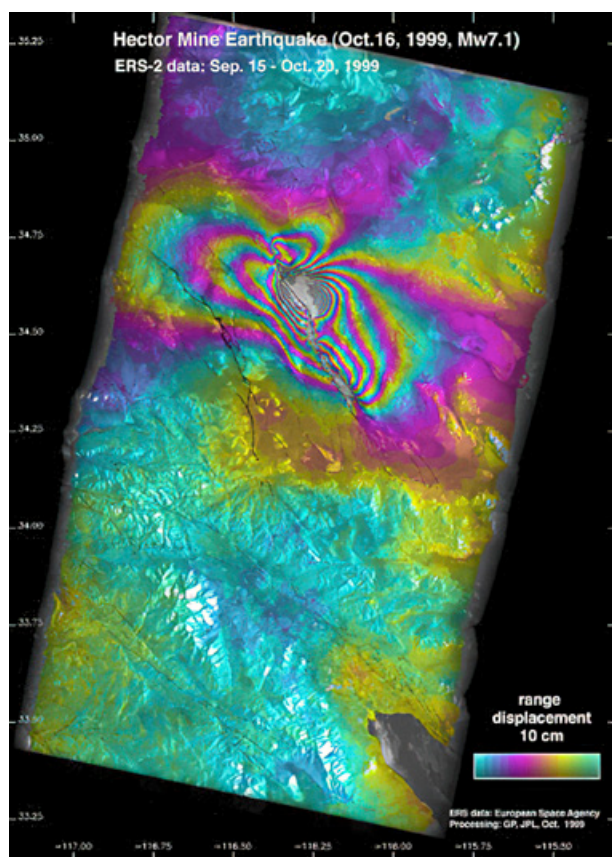
Koseizmične premike površja ob potresnem prelomnem pretrgu raziskujemo z različnimi geološkimi, geomorfološkimi in geodetskimi metodami ter metodami daljinskega zaznavanja iz letal, dronov ali satelitov. Ker so se v zadnjih tridesetih letih uveljavile številne nove metode daljinskega zaznavanja (Oštir, 2006), je tovrstno proučevanje doživelo velik napredek in razcvet. Osnovna metoda ostaja strukturno-geološko kartiranje ozemlja, s katerim in situ dokumentiramo in raziščemo prelomni pretrg in kvantitativno opredelimo ključne parametre, kot so dolžina in smer pretrga, premik v vodoravni in navpični smeri ter vpad prelomne ploskve. S terestično in satelitsko geodezijo lahko natančno izmerimo premike, če je bila ob prelomu že pred potresom vzpostavljena opazovalna mreža točk, med katerimi v rednih intervalih opravljamo izmere. Če predhodne mreže točk ni, izmerimo premike na podlagi značilnih markerjev naravnega ali umetnega izvora (Gosar, 2020). Geomorfološke raziskave so kombinacija terenskih opazovanj in rezultatov daljinskega zaznavanja.

Klasična aerofotogrametrija je lahko koristna podlaga za druge raziskave in se veliko uporablja v strukturni geologiji. Za primerjavo stanja pred potresom in po njem moramo počakati naslednjo ciklično izmero. Namensko snemanje površja z dronom je te metode znatno pocenilo in so postale dostopne za široko področje raziskav. Tako jih lahko precej preprosto izvedemo kmalu po potresu, ko so ob prelomnem pojavu še dobro vidni.

Satelitska radarska interferometrija InSAR (Synthetic Aperture Radar) se je uveljavila v devetdesetih letih s satelitoma Evropske vesoljske agencije ERS-1 in ERS-2, ki sta radarsko snemala površje z višine 770 km. Nad istim območjem površja Zemlje sta bila ponovno vsakih 35 dni. Po letu 2014 se je z novima

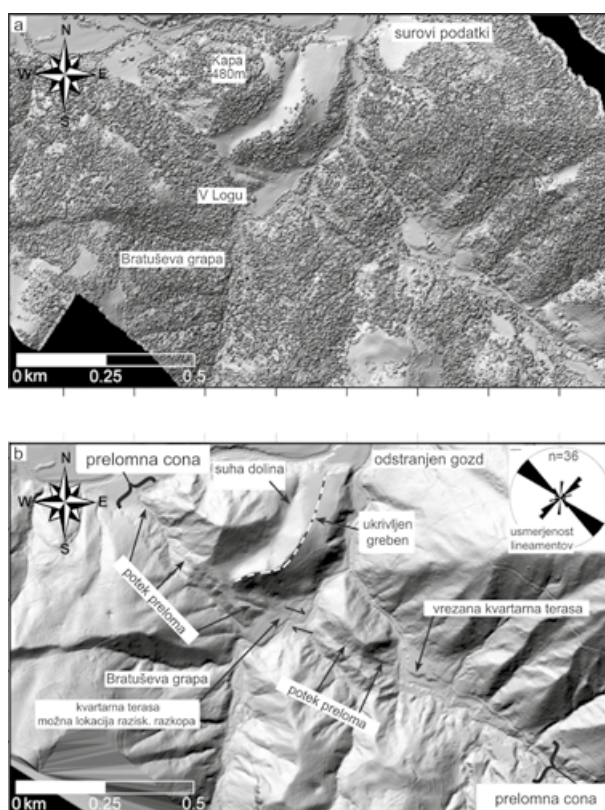
satelitoma Sentinel-1 A in B ta interval zmanjšal na 12 dni. Snemanje v paru omogoča izdelavo digitalnih modelov višin. Aktivni mikrovalovni instrument deluje s frekvenco 5,3 GHz oziroma valovno dolžino 5,6 cm in pod kotom 23° snema 100 km širok pas na Zemlji (Oštir, 2006). Pri metodi InSAR iz parov dveh zaporednih posnetkov pridobimo natančne podatke o premikih (spremembi reliefa) na Zemljinem površju, ki so se zgodili med prvim in drugim snemanjem. To so predvsem premiki zaradi močnih potresov, lahko pa tudi zaradi zemeljskih plazov in drugih erozijskih pojavov. Eno prvih uspešnih opazovanj so izvedli pri analizi premikov zaradi potresa Hector Mine v Kaliforniji leta 1999 z magnitudo 7,1 (Jonsson in sod, 2002). Potres je povzročil 50 km dolg površinski pretrg z do 6 m velikim premikom v vodoravni in 1,6 m v navpični smeri, ki se jasno kaže v interferogramu InSAR (slika 11).

Letalsko lasersko skeniranje (LiDAR) je po letu 2000 povzročilo pravo revolucijo v tektonski



Slika 11: Satelitska radarska interferometrija (InSAR) za potres Hector Mine v Kaliforniji leta 1999, ki je povzročil 50 km dolg površinski pretrg z do 6 m velikim premikom v vodoravni in 1,6 m v navpični smeri (vir: Wikimedia)

Figure 11: Satellite radar interferometry (InSAR) for the 1999 Hector Mine earthquake in California, which produced a 50 km surface rupture with up to a 6 m displacement in the horizontal and 1.6 m in the vertical direction (Source: Wikimedia)



Slika 12: Letalsko lasersko skeniranje površja (LiDAR) je eno najmočnejših orodij za analizo seizmogenih prelomov na z gozdom poraščenih območjih. Primer podrobnega digitalnega modela višin območja Idrijskega preloma v Srednji Kanomlji pred odstranitvijo gozda (a) in po njej (b) (Gosar, 2007)

Figure 12: Airborne laser scanning (LiDAR) is one of the most powerful tools for analyzing seismogenic faults in areas covered with forest: an example of a detailed digital elevation model in the Idrija fault area in Srednja Kanomlja before (a) and after (b) the removal of trees

geomorfologiji, saj smo z njim dobili orodje za izdelavo podrobnih (ločljivost pod 1 m) digitalnih modelov višin tudi na območjih, prekritih z gosto vegetacijo (gozd). Nekateri laserski žarki namreč skozi drevesne krošnje dosežejo tla in z napredno obdelavo podatkov lahko izdelamo modele višin golega površja ter tako vidimo podrobnosti v reliefu, ki so na letalskih posnetkih, ali iz njih izdelanih modelih višin zaradi gozda povsem nevidni (slika 12). Eno prvih takih raziskav v Evropi smo izvedli že leta 2006 v Sloveniji na območju Idrijskega in Ravenskega preloma (Gosar, 2007). S ponovitvijo laserskega snemanja (lahko tudi iz drona, kar je stroškovno ugodno) lahko po močnem potresu primerjamo dva visoko ločljiva modela površja in analiziramo ter kvantificiramo premike.

Pri ocenjevanju nevarnosti površinskega prelomnega pretrga (FDHA) se uporabljajo interdisciplinarne metode. Poleg že opisanih metod tektonske geomorfologije in strukturne geologije so pri tem ključne

še geofizikalne metode, ki poleg raziskovalnega vr-tanja edine omogočajo vpogled pod površje. Med njimi dajejo najbolj popolne strukturno-geološke podatke metoda refleksijske seizmike, ki se v najplivnejšem delu lahko dopolni z metodo georadarja. Pri raziskavah preteklih potresov, ki so povzročili prelomni pretrg površja, se uporablja širok nabor paleoseizmoloških metod, ki se po opravljenih predhodnih raziskavah izvajajo v posebnih raziskovalnih jarkih, v katerih se dokumentirajo morebitni pretrgi v geološki zgodovini (Gosar, 2003; McCalpin, 2009).

VERJETNOST POVRŠINSKEGA POTRESNEGA PRETRGA V SLOVENIJI

V Sloveniji še nismo ugotovili površinskega prelomnega pretrga ob kakšnem potresu. Paleoseizmološke raziskave kažejo, da so taki pretrgi verjetno nastali ob najmočnejših zgodovinskih potresih na Idrijskem, Raškem in Savskem prelomu. Potresi v Sloveniji v zadnjih 130 letih niso presegli ocenjene magnitude 6,1 (veliki Ljubljanski potres 1895) oziroma 5,6 (Brežiški potres 1917, potres v Krnskem pogorju 1998). Pri takih magnitudah potresov in globinah žarišča med 5 in 20 km verjetnost površinskega pretrga ni velika. Na to vpliva prevladujoči zmičen tektonski režim, pri katerem ob potresu nastane vodoraven premik in je površinski pretrg redkejši kot pri normalnih in reverznih prelomih z navpičnim premikom (slika 2). Površinske pretrge je tudi zelo težko videti v pretežno skalnem površju (Ravenski prelom v Krnskem pogorju) ali v zelo mehkih sedimentih (Želimejski prelom kot mogoč seizmogen vir Ljubljanskega potresa poteka prek Ljubljanskega Barja in Ljubljanskega polja).

Tudi v Sloveniji imamo kritično infrastrukturo, za katero je treba z raziskavami dokazati, da je ne ogroža morebiten površinski prelomni pretrg. Najobsežnejše raziskave so bile narejene v okolici jedrske elektrarne Krško. Z različnimi geološkimi, geofizikalnimi in seizmološkimi metodami raziskav je dokazano, da je verjetnost obstoja preloma, ki bi bil zmožen površinskega pretrga ob potresu pod elektrarno in v

njeni bližini, izključena (Gosar, 1998). Zaradi priprav na odločitev za gradnjo morebitnega drugega bloka jedrske elektrarne Krško nekatere raziskave na tem območju še vedno potekajo. Pri tem je nepogrešljiva geofizikalna metoda refleksijske seizmike, ki omogoča najpodrobnejši pogled v globinsko geološko zgradbo in zaznavo morebitnih slepih prelomov (Gosar, 1998).

Med drugimi objekti kritične infrastrukture so velike pregrade, za katerimi so vodne akumulacije (Godec in sod., 2003). To so objekti, ki so zgrajeni tako, da brez poškodb prenesejo zelo visoke intenzitete nihanja tal ob potresu. Z obsežnimi geološkimi in geotehničnimi raziskavami pred gradnjo je zagotovljeno, da na lokaciji ali v bližini ne poteka prelom z zmožnostjo površinskega pretrga. Ker pri tovrstnih objektih ne smemo zanemariti morebitne inducirane seizmičnosti, je s posebnim pravilnikom predpisano seizmično opazovanje velikih pregrad (UL, 2003). Morebiten pojav neobičajne seizmičnosti, katere zaznavanje tak monitoring omogoča, bi opozoril na spremembe napetostnega stanja v kamninah.

SKLEPNE MISLI

Več kilometrov dolg pretrg površja ob zelo močnem potresu je spektakularen primaren geološki pojav, ki pa navadno nima tako hudih posledic kot sekundarni učinki potresnega nihanja tal zaradi potresnih valov, ki imajo učinke tudi razmeroma daleč stran od žarišča potresa. Seveda je za objekte kritične infrastrukture treba zagotoviti, da niso na zmožnem prelomu ali v njegovi bližini, ob katerem bi se lahko zgodil površinski pretrg. Interdisciplinarne metode raziskav, ki vključujejo strukturno geologijo, geodezijo, geomorfologijo in paleoseizmologijo, omogočajo, da lahko kritične lokacije dobro raziščemo in to nevarnost izključimo. Med raziskovalnimi metodami so danes najpomembnejše tektonska geomorfologija na podlagi podrobnih digitalnih modelov višin, ki jih omogoča lasersko skeniranje površja, in geofizikalne metode, ki omogočajo tridimenzionalni vpogled v podpovršje.

Viri in literatura

- Baize, S., Nurminen, F., Sarmiento, A., in sod., 2019. A Worldwide and Unified Database of Surface Ruptures (SURE) for Fault Displacement Hazard Analyses. *Seismological Research Letters*, 91/1, 499–520. doi.org/10.1785/0220190144.
- Baker, J. W., Bradeley, B. A., Stafford, P. J., 2021. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge University Press, 581.
- Dalguer, L. A., Day, S. M., Atkinson, G. M., Chen, R., 2021. Introduction to the Special Section on Fault Displacement and Near-Source Ground-Motion Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111/5, 2271–2274. doi.org/10.1785/0120210204.
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Stipčević, J., 2021. Niz potresa na Baniji. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, 57/2, 4-7.
- European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC), 2021. M6.4 Croatia on December 29th 2020 at 11:19 UTC, Special report, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/264/M6-4-CROATIA-on-December-29th-2020-at-11-19-UTC>, 21. 3. 2022.
- Fuis, G. S., Wald, L. A., 2003. Rupture in South-Central Alaska – The Denali Fault Earthquake of 2002. *USGS Fact Sheet 014-03*, 4 str.
- Ganas, A., Elias, P., Valkaniotis, S., Tsironi, V., Karasante, I., Briole, P., 2021. Petrinja earthquake moved crust 10 feet, *Temblores*, 1-14. doi.org/10.32858/temblor.156.
- Godec, M., Vidrih, R., Sinčič, P., 2003. Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad. *Ujma* 17–18, 208–2017.
- Gosar, A., 1998. Seismic-reflection surveys of the Krško basin structure: Implications for earthquake hazard at the Krško nuclear power plant, southeast Slovenia. *Journal of Applied Geophysics*, 39/3, 131–153.
- Gosar, 2003. Paleoseizmologija – izziv pri ocenjevanju potresne nevarnosti v Sloveniji. *Ujma* 17–18, 257–264.
- Gosar, A., 2007. Letalsko lasersko skeniranje (LiDAR) Idrijskega in Ravenskega preloma v zahodni Sloveniji. *Ujma* 21, 139–144.
- Gosar, A., 2012a. Application of Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007) to Krn Mountains 1998 Mw = 5.6 earthquake (NW Slovenia) with emphasis on rockfalls. *Nat. hazards earth syst. sci.*, 12/5, 1659–1670.
- Gosar, A., 2012b. Veliki Tohokski potres na Japonskem 11. marca 2011. *Ujma* 26, 86–91.
- Gosar, A., 2014. Ocena intenzitet potresa leta 1998 v Krnskem pogorju z uporabo Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007). V: Zorn in sod. (ur.): (Ne)prilagojeni. Naravne nesreče 3. GIAM ZRC SAZU, 83–93.
- Gosar, A., 2020. Measurements of tectonic micro-displacements within the Idrija fault zone in the Učja valley (W Slovenia). *Acta geographica Slovenica*, 60–1, 79–93.
- Guerrieri, L., Vittori, E., 2007. Intensity Scale ESI 2007. *Memorie Descrittive della Carta Geologica D'Italia*, 74, 41 str.
- Jonsson, S., Zebker, H., Segall, P., Amelung, F., 2002. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 92/4, 1377–1389. doi.org/10.1785/0120000922.
- Nurminen, F., Boncio, P., Visini, F., Pace, B., Valentini, A., Baize, S., Scotti, O., 2020. Probability of Occurrence and Displacement Regression of Distributed Surface Rupturing for Reverse Earthquakes. *Frontiers Earth Sciences*, 8:581605. doi.org/10.3389/feart.2020.581605.
- McCalpin, J., 2009. *Paleoseismology*. Academic Press, 613 str.
- Moores, E. M., Twiss, R. J., 1995. *Tectonics*. Freeman and Company, 414 str.
- Oštir, K., 2006. *Daljinsko zaznavanje*. Založba ZRC SAZU, 250 str.
- Tondi, E., Blumetti, A. M., Čičak, M., in sod., 2021. Conjugate coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak-Moslavina, Croatia). *Scientific Reports* 11, 9150. doi.org/10.1038/s41598-021-88378-2.
- Valentini, A., Fukushima, Y., Contri, P., in sod., 2021. Probabilistic Fault Displacement Hazard Assessment (PFDHA) for Nuclear Installations According to IAEA Safety Standards. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111/5, 2661–2672. doi.org/10.1785/0120210083.
- Vidrih, R., Godec, M., 2000. Potres 20. septembra na Tajvanu. *Ujma* 14–15, 202–208.
- Vukovski, M., 2021. Kratki osvrt na potrese u Banovini. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, 57/2, 8–15.
- Wang, Z., Carpenter N. S., Zhang, L., Woolery E. W., 2017. Assessing Potential Ground-Motion Hazards from Induced Earthquake. *Nat. Hazards Rev.*, 18/44, 04017018.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture length, Rupture area, and Surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 84, 974–1002.
- Wieland, M., Fan, B. H., 2004. The Activities of the International Commission on Large Dams (ICOLD) in the Earthquake Safety of Large Dams. *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver*, 10 str.
- Yeats, R. S., Sieh, K., Allen, C. R., 1997. *The Geology of Earthquakes*. Oxford University Press, 568 str.
- Science Learning Hub, 2018. The Kaikoura earthquake and its consequences. <https://www.sciencelearn.org.nz/events/408-the-kaikoura-earthquake-and-its-consequences>, 2. 6. 2022.
- Wikipedia. Surface rupture. https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_rupture, 2. 6. 2022.
- Wikipedia, 2016. Kaikoura earthquake. https://en.wikipedia.org/wiki/2016_Kaik%C5%8Dura_earthquake, 2. 6. 2022.