

# ROTACIJSKI UČINKI POTRESOV

## Rotational effects of earthquakes

Andrej Gosar\* UDK 550.344.094:624.131.552

Povzetek Abstract

Rotacijski učinki potresov se kažejo kot zasuki odlomljenih delov dimnikov, spomenikov, obeliskov, nagrobnikov in drugih podolgovatih struktur. Tudi v Sloveniji so bili takšni pojavi dokumentirani ob brežiškem potresu leta 1917 in ob potresu leta 1998 v zgornjem Posočju. Mehanizem nastanka rotacijskih učinkov še ni enopomensko pojasnjen, saj je več razlag, ki temeljijo ali na klasični elastični teoriji ali pa na moderni mehaniki kontinuumov.

Največja težava je pomanjkanje ustreznih instrumentov za zanesljivo merjenje rotacijskih gibanj, s katerimi bi lahko potrdili teoretične modele. Šele razvoj novih instrumentov v zadnjem času je omogočil bolj poglobljene raziskave na tem področju.

The rotational effects of earthquakes can be seen in the twisted remains of broken chimneys, obelisks, monuments, gravestones and other such elongated structures. Such phenomena were documented in Slovenia after the earthquakes in Brežice in 1917 and in the Upper Soča Valley in 1998. The mechanics of these rotational effects still lacks a uniform explanation. Several hypotheses exist which are based on the classical elastic theory or on modern continuum mechanics. The main problem is related to the lack of suitable instruments for reliable measurements of rotational motions to be taken or for theoretical models to validate. The development of new instruments over the last decade has, however, enabled more detailed research into this field.

## Uvod

Ob potresu 12. aprila 1998 v zgornjem Posočju je prišlo na različnih objektih poleg drugih poškodb tudi do rotacijskih učinkov potresov. Najbolj izrazit primer je zasuk kamnitih blokov na spomeniku (obelisku) žrtvam prve svetovne vojne pri Bovcu (slika 1). Tudi na pokopališču v Bovcu se je ob potresu večina nagrobnikov zasukala v isto smer, zasukali pa so se tudi nekateri odlomljeni dimniki. To je zanimiv pojav, ki pomeni za seizmologijo precejšen izziv, saj mehanizem nastanka rotacijskih učinkov potresov še ni zadovoljivo pojasnjen. Šele v novejšem obdobju se z razvojem seizmoloških instrumentov temu področju, za katerega se je uveljavil izraz rotacijska seizmologija (ang. *rotational seismology*), namenja večja pozornost. Rotacijski učinki potresov so sicer znani že več stoletij. Najbolj značilni so zasuki dimnikov, obeliskov in drugih spomenikov ter nagrobnikov.

## Vrste gibanja tal ob potresih

Iz klasične mehanike sledi, da lahko v trdni snovi gibanje delcev ob prehodu potresnih valov razdelimo v dve vrsti:

- translacijsko gibanje – to je nihanje v smeri treh pravokotnih osi (x, y in z na sliki 2a),

- rotacijsko gibanje – to je sukanje okoli treh pravokotnih osi (slika 2b).

Če je telo prožno, opišemo premike delcev dodatno še s šestimi komponentami deformacije.

Največ seizmografov je zasnovanih tako, da so zelo občutljivi na translacijsko gibanje in ga zato dobro zapisujejo. Dolgo so seizmologi tudi verjeli, da je rotacijsko gibanje zanemarljivo. Richter (1958) je v svoji znameniti knjigi *Elementary Seismology* napisal: »Teorija kaže in opazovanja to potrjujejo, da je rotacijsko gibanje zanemarljivo.« Za svojo trditev sicer ni navedel virov. V resnici so rotacijska gibanja dovolj velika, da jih lahko zanesljivo izmerimo le blizu nadžarišča potresa, kjer v seizmologiji uporabljamo za meritve močnih gibanj tal tako imenovane instrumente za močne potrese ali akcelerografe. So pa seizmologi že v zelo zgodnjem obdobju instrumentalne seizmologije razmišljali o merjenju rotacijskega gibanja tal. Tako je Galitzin že leta 1912, torej pred skoraj sto leti, predlagal uporabo dveh enakih nihaj, nameščenih na različnih straneh iste osi rotacije za ločevanje rotacijskega in translacijskega gibanja tal. Njegovo zamisel sta uresničila Kharin in Simonov leta 1969, ko sta razvila seizmograf za merjenje močnega gibanja tal. Z uporabo mreže seizmografov sta Droste in Teisseyre leta 1976 izračunala rotacijske seizmograme za hribinske udare v bližnjem rudniku. Farrell pa je leta 1969 izdelal žiroskopski seizmometer in z njim izmeril statični premik, manjši od 1 cm, in nagib, manjši

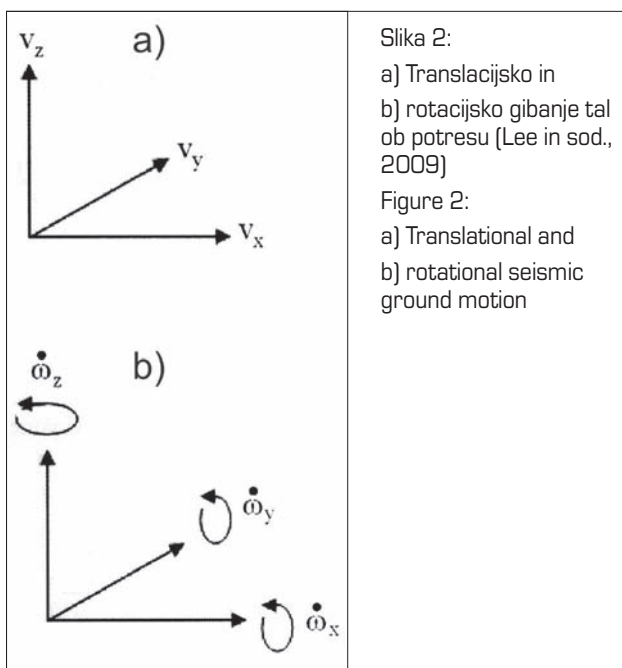
\* izr. prof. dr., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si



Slika 1: Spomenik žrtvam prve svetovne vojne pri Bovcu po potresu leta 1998 (foto: A. Gosar)

Figure 1: Monument to the victims of WWI near Bovec after the 1998 earthquake

od 0,5  $\mu$ rad ob potresu magnitude 6,5 v Kaliforniji na nadžariščni oddaljenosti 115 km (Farrell, 1969). Glavna težava pri merjenju rotacijskega gibanja tal ob potresu je torej ustrezen instrument. Aki in Richards sta še



Slika 2:  
a) Translacijsko in  
b) rotacijsko gibanje tal  
ob potresu (Lee in sod.,  
2009)  
Figure 2:  
a) Translational and  
b) rotational seismic  
ground motion

leta 2002 v drugi izdaji knjige Quantitative Seismology napisala, da »seizmologija še vedno čaka na ustrezen instrument za merjenje rotacijskih gibanj«.

Večina instrumentov za merjenje močnih gibanj tal v bližini nadžarišč potresov meri pospeške gibanja tal v treh med seboj pravokotnih smereh (akcelerometri). Iz pospeška lahko z integriranjem dobimo hitrost gibanja in z dvojn timer integriranjem premike tal. Ko pa so to naredili za akcelerograme, posnete v bližini nadžarišč močnih potresov, na primer za potres Chi-Chi z magnitudo  $M_w = 7,6$  leta 1999 na Tajvanu, in rezultate izračuna primerjali z opazovanimi premiki, se podatki med seboj niso ujemali. Zato so začeli raziskovati, kaj bi lahko bil vzrok. Pokazalo se je, da lahko zaradi Zemljinega težnostnega polja tudi majhna rotacijska gibanja znatno prispevajo k pospeškom, izmerjenim z akcelerometri. Nagib v ravnini velikosti le 1 mikroradian (1 radian je  $57,3^\circ$ ) povzroči na vodoravnem akcelerometru z aktivno osjo v isti ravnini pospešek okoli 1 mikrog ( $g$  – normalni težnostni pospešek Zemlje). Rotacijskega gibanja torej ne smemo zanemariti pri dvojn timer integriranju iz pospeška, da dobimo premik tal, če je zasuk tal velikosti mikroradiana ali več. Ker so rotacije večinoma zelo majhne, jih podajamo v miliradianih (mrad) ali mikroradianih ( $\mu$ rad).

V zgodnjem obdobju so pri poskusu pojasnitve rotacijskih učinkov potresov razmišljali o rotacijskem valovanju ali vsaj o vrtničastem gibanju. Pri tem so uporabljali zelo različno terminologijo. Angleški izraz rocking so uporabljali za opis rotacije okoli vodoravne osi, za katerega se uporablja tudi izraz nagib (angl. tilt). Maller je leta 1862 predlagal razlago, da je rotacija telesa na Zemljini površini posledica zaporedja prihoda različnih seizmičnih faz pod različnimi koti. Reid, ki je analiziral rotacijske učinke ob potresu leta 1906 v San Franciscu ( $M = 8,3$ ), pa je trdil, da opazovane rotacije objektov po klasični elastični teoriji ne morejo biti posledica širjenja rotacijskih komponent seizmičnega valovanja. Vsekakor je pri simetričnih objektih, kot so obeliski in drugi spomeniki, njihovo rotacijo ob potresu težko razložiti drugače, kot da obstaja neki lokalni rotacijski pospešek. Poleg tega pa ima verjetno pomemben vpliv tudi interakcija med tlemi in objektom. V naseljih, kjer so objekti blizu skupaj, ne smemo zanemariti njihovega medsebojnega vplivanja.

## Teorije, ki razlagajo rotacijsko gibanje

Rotacijsko gibanje tal ob potresu še vedno ni zadovoljivo pojasnjeno. To so sicer poskušali številni raziskovalci, vendar nobena razlaga še ni trdno podprta z opazovanji. To je posledica pomanjkanja ustreznih instrumentov za merjenje rotacijskih gibanj. Sedanje teorije lahko v grobem razdelimo na tiste, ki temeljijo na klasični elastičnosti, in tiste, ki izhajajo iz novejših teoretičnih spoznanj mehanike kontinuumov in nelinearne fizike. Analize v seizmologiji še vedno temeljijo predvsem na linearni

elastičnosti, ki predpostavlja bloke razmeroma preprostih homogenih kamnin. Rotacijska gibanja so v tej teoriji povezana s strižnim valovanjem.

V resnici so kamnine precej heterogene, anizotropne in nelinearne, predvsem v bližini prelomnih con, kjer nastajajo potresi, in v slabo utrjenih sedimentih plitvo pod površjem. V takih pogojih klasična linearna teorija elastičnosti ne velja in je treba uporabiti načela mehanike kontinuomov in nelinearne elastičnosti. Rotacije poskušajo pojasniti predvsem na dva načina: s klasično nelinearno teorijo in z neklasično linearno teorijo. V nelinearni teoriji lahko deformacijski tenzor pojasnimo kot produkt dveh tenzorjev, prvega, ki opisuje rotacijo, in drugega, ki opisuje translacijo. Nasprotno pa je v linearni teoriji deformacijski tenzor vsota rotacije in translacije. Linearna teorija, ki vključuje rotacije, ki jih ne upošteva klasična elastičnost, se imenuje mikropolarna teorija in obravnava snovi z mikrostrukuro. Za opis takšne snovi potrebujemo šest elastičnih modulov, v klasični elastični teoriji pa le dva (Lee in sod., 2009). Razširjanje seizmičnega valovanja v mikropolarni snovi je bolj zapleteno kot v linearni elastični snovi, zaradi česar nastanejo rotacijska gibanja. V taki snovi poznamo namreč poleg translacijskega tudi rotacijsko gibanje. Osnove tej teoriji sta postavila brata Cosserat leta 1909, zato se mikropolarna teorija imenuje tudi Cosseratova teorija (Lee in sod., 2009).

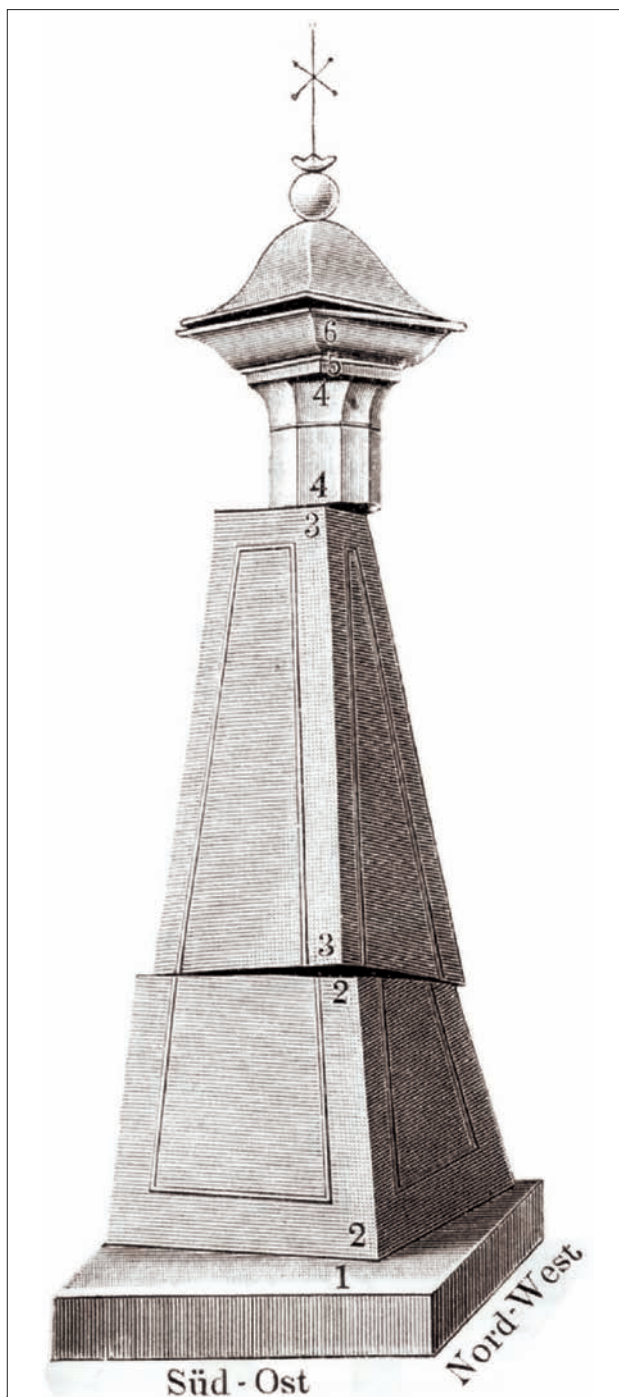
## Primeri rotacijskih poškodb objektov ob potresih

Rotacijske poškodbe, kot so zasukani dimniki, obeliski in drugi spomeniki ter nagrobniki, so opazovali ob številnih močnih potresih v zgodovini. Prvi dobro opisani primeri rotacijskih učinkov potresa se nanašajo na kalabrijski potres ( $M = 6,9$ ) leta 1783, ki je dosegel največjo intenziteto XI po lestvici MCS. V samostanu San Bruno je bilo več dekorativnih obeliskov zgrajeno iz štirih kamnitih blokov. Ob potresu so se vsi bloki zasukali drug glede na drugega v nasprotni smeri urinega kazalca (slika 3). Slika tega obeliska je postala vzorčen primer rotacijskih učinkov potresa, ki so ga povzele številne seizmološke knjige. Že leta 1830 je Leyell v knjigi *Principals of Geology* poskušal pojasniti ta pojav z vrtničastim gibanjem, ki pa mu ga ni uspelo povezati z znanimi vrstami potresnega valovanja. Slika obeliska iz San Bruna je sredi 19. stoletja pritegnila pozornost irskega inženirja Roberta Malleta, ki se ni strinjal z Leyellom. Postavil je teoretične temelje za fizikalno in mehansko razlago vodoravnih rotacijskih učinkov potresov. Zapisal je: »Trebaja poudariti, da torzijske deformacije (vrtinci) ne morejo povzročiti zasuka predmetov in objektov, kot so vaze, dimniki in obeliski glede na njihov podstavek.« In še: »Neprekinjeni nasprotni premiki, ki so sestavljeni iz hitro prihajajočega valovanja v vodoravni ravnini, lahko predvsem v visokih stavbah, kot so cerkve in stolpi, ko so torzijske vibracije objekta sočasne s valovanjem tal, povzročijo močno zvijanje.« Mallet je nadaljeval razvoj svoje teorije, ko je



Slika 3: Dekoracijski obelisk v samostanu San Bruno po kalabrijskem potresu leta 1783 (Kozak, 2009)

Figure 3: Decorative obelisk in the San Bruno Monastery after the 1783 earthquake in Calabria



Slika 4: Zasuk segmentov nagrobnega obeliska zaradi bellunskega potresa leta 1873 (Kozak, 2009)

Figure 4: Rotation of obelisk segments from the 1897 earthquake in Belluno

obravnaval rotacijske učinke potresa na spomenikih v Bazilikati ( $M = 7,0$ , največja intenziteta XI po lestvici MCS) leta 1857.

Lep primer večkratnega zasuka kamnitega nagrobnega obeliska (slika 4) so opisali ob bellunskem potresu leta 1873 ( $M = 6,3$ , največja intenziteta X po lestvici MSC). Oldham je dokumentiral rotacijske poškodbe po assamskem potresu ( $M = 8,3$ ) leta 1897 v severovzhodni Indiji. Spomenik Georgeu Inglisu, ki so ga postavili leta 1850, je imel obliko obeliska, visokega 19 metrov. Med potresom se je vrhni del, dolg 1,8 metra, odlomil in padel proti jugu, naslednjih 2,7 m pa je padlo proti vzhodu. Ostanek obeliska je prestriglo približno na polovici in zgornji del se je zasukal za približno  $15^\circ$  glede na spodnji del (slika 5).



Slika 5: Zasuk segmentov obeliska zaradi assamskega potresa leta 1897 (Lee in sod., 2009)

Figure 5: Rotation of obelisk segments from the 1897 earthquake in Assam

Kozak (2009) je analiziral rotacijske učinke potresov, opisanih v zgodovinskih virih med leti 1783 (kalabrijski potres) in 1914 (potres pri Lineri). Podroben pregled je pokazal nekatere skupne značilnosti:

- vsi opisani primeri (z eno samo izjemo) so z ožjega nadžariščnega območja potresa;
- devet od dvanajstih potresov je imelo razmeroma plitvo žarišče (med 2 in 13 km);
- v večini primerov so rotacijske učinke opazovali na navpičnih simetričnih objektih, kot so dimniki, obeliski in nagrobniki, ki so sestavljeni pretežno iz kamnitih blokov z vodoravnimi mejami med njimi, ob katerih je prišlo do medsebojnega zasuka.

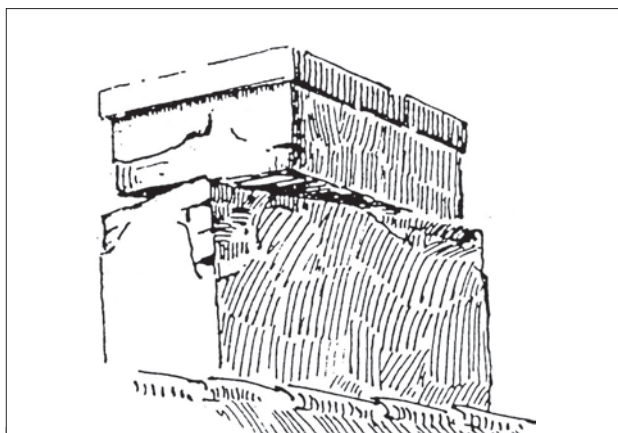
## Instrumenti za merjenje rotacijskega gibanja tal

Kot že omenjeno, običajni seizmološki instrumenti, torej seizmometri ali akcelerometri, dobro zaznavajo translacijska gibanja, ne pa rotacijskih, zato je bilo treba ustrezne instrumente šele razviti. Instrumente, ki hkrati zaznavajo rotacijska in translacijska gibanja, sicer rutinsko uporabljajo v inercialnih navigacijskih napravah na letalih in vesoljskih plovilih. Prvi instrumenti, ki so jih uporabili v seizmologiji, so bile izredno velike in drage naprave, ki se primarno uporabljajo v druge namene. Ena takih naprav je obročasti laserski žiroskop, ki ga uporabljajo za meritve Zemljine rotacije, dal pa je tudi zanimive podatke o rotacijskih gibanjih zaradi morebitnih oddaljenih potresov (teleseizmov). Dve glavni značilnosti, ki naredita instrument uporaben za seizmološke namene, sta dovolj nizek prag šuma in neobčutljivost za translacijska gibanja. Kotne hitrosti, ki jih merimo v seizmologiji, so velike od  $10^{-1}$  rad/s blizu žarišča potresa do  $10^{-11}$  rad/s na velikih razdaljah od potresa (teleseizmi). Zaradi razpona vrednosti vsaj deset velikostnih razredov seveda ne moremo pričakovati, da so za vse primere mogoče meritve le z eno vrsto instrumenta. Tehnologija obročastega laserja je sicer izredno občutljiva in zato ta trenutek najbolj obetavna, vendar je cena enega instrumenta kar približno milijon ameriških dolarjev, treba pa je zagotoviti tudi dobro izoliran prostor. Obročasti laserski žiroskop temelji na frekvenčnem deljenju dveh nasprotno usmerjenih laserskih žarkov in njihovi interferometriji pri triangulaciji znotraj zaprtega prostora (Sagnacov efekt). Zaradi rotacije Zemlje laserska žarka, ki potujeta po isti krožni poti, toda v različnih smereh, v istem času ne preideta enake razdalje. V krožnem optičnem resonatorju se zaradi rotacije Zemlje oba žarka, ki potujeta v nasprotnih smereh, komaj zaznavno razlikujeta med seboj v barvi. Razlika v barvi (Sagnacova frekvenca) je linearno odvisna od hitrosti rotacije. Če se instrument na merilni platformi zavrti glede na inercialni prostor, se efektivna dolžina prostora med laserjem v smeri rotacije in tistim v nasprotni smeri spremeni in opazimo frekvenčno deljenje. Ta frekvenca je neposredno sorazmerna hitrosti rotacije okoli normale na ploskev, ki jo določa obročasti laser (Lee in sod., 2009).

Od leta 2001 deluje takšen obročasti laser v Wetzllu na Bavarskem. Instrument je na granitni plošči, ki je sidrana z 90-tonskim temeljem na 10 metrov globoko podlago iz magmatskih kamnin. Obročasti laser ima obliko kvadrata s stranico, dolgo 4 metre, z zrcali na ogliščih kvadrata. Celoten sistem je pod zemljo in je izoliran pred zunanji vplivi. Instrument je sposoben izmeriti zelo majhne rotacije zaradi oddaljenih močnih potresov in je na primer izmeril rotacijo zaradi potresa 25. septembra 2003 na Japonskem z magnitudo 8,1.

Za splošnejšo uporabo v seizmologiji smo morali seveda razviti manjše in cenejše instrumente, podobne, kot jih poznamo pod imenom žiroskop v letalski in avto-

mobilske industriji. To so elektromehanske naprave, ki pa so sposobne zaznati rotacije, povezane z močnimi potresi na majhnih nadžariščnih razdaljah. Niso pa dovolj občutljive, da bi zaznale rotacije zaradi srednje močnih ( $M \approx 4,0$ ) potresov na oddaljenosti nekaj deset kilometrov (Lee in sod., 2009). Pozneje so zato v podjetju Eentec razvili rotacijski seizmometer R-1, ki je sposoben zaznati tudi rotacijska gibanja zaradi takšnih potresov. Seizmometer R-1 temelji na elektrokemični tehnologiji zaznavanja gibanja elektrolita v obroču z elektronskim vezjem. Izhodna napetost vezja je sorazmerna rotacijski hitrosti. Odziv instrumenta je približno enakomeren v frekvenčnem območju 0,1–20 Hz, lastni šum pa je v tem območju manjši od 10  $\mu\text{rad/s rms}$ . S tem seizmometrom so uspešno izmerili rotacijska gibanja zaradi številnih lokalnih potresov na Tajvanu. Največje kotne hitrosti rotacije so izmerili za potres leta 2007 ( $M_w = 5,1$ ) na nadžariščni oddaljenosti 51 km, in sicer 0,63  $\text{mrad/s}$  na navpični komponenti, medtem ko je bila kotna hitrost na vodoravnih komponentah veliko manjša. Vršni pospešek nihanja tal je bil 0,47  $\text{m/s}^2$ , pri čemer je bil na obeh vodoravnih komponentah znatno večji kot na navpični. To je razmeroma nov instrument, zato opozarjajo, da so potrebne še nadaljnje študije, ki bodo pokazale, kakšna sta dejanski odziv rotacijskega senzorja in njegova natančnost, tako fazna kot amplitudna, v primerjavi s standardnimi seizmometri (Lee in sod., 2009).



Slika 6: Zasuk odlomljenega dimnika ob potresu leta 1917 v Brežicah (Tornquist, 1919)

Figure 6: Rotation of a broken chimney segment from the 1917 earthquake in Brežice

## Rotacijske poškodbe ob potresih v Sloveniji

Tudi v Sloveniji poznamo rotacijske učinke, ki so nastali ob vsaj dveh potresih. 29. januarja 1917 je Brežice prizadel potres z lokalno magnitudo 5,7. Nadžarišče potresa je bilo le 4 km oddaljeno od središča Brežic, žarišče pa je bilo v globini 13,2 km. Potres je dosegel največjo intenziteto VIII. stopnje po lestvici MSK (Lapajne, 1990). Poleg drugih obsežnih poškodb stavb v Brežicah ter okoliških vaseh so poročali tudi o številnih podrtih dimnikih, nekateri pa so se le odlomili in zavrтели. Tornquist (1918) je v svoji študiji tega potresa objavil skico takšnega dimnika (slika 6), ki kaže, da se je zgornji del dimnika zavrteel v nasprotni smeri urinega kazalca (gledano od zgoraj), za okoli 20°.

Potres, ki je vsem v Sloveniji še v živem spominu, je 12. aprila 1998 prizadel zgornje Posočje. Žarišče potresa je bilo v Krnskem pogorju na globini 7,6 km. Nadžarišče potresa je bilo od Bovca oddaljeno 7 km. Najbolj značilen primer rotacijskega učinka tega potresa je spomenik žrtvam prve svetovne vojne, ki stoji ob križišču cest iz Bovca za Trento in Log pod Mangartom, približno 1 km vzhodno od Bovca. Spomenik ima obliko obeliska (slika 1), ki je visok okoli 6 metrov in zgrajen iz kamnitih blokov. Obelisk ima kvadratni presek in ima v vznožju stranico dolgo okoli 1,5 m, proti vrhu pa se postopoma oži. Ob

potresu se je obelisk trikrat prelomil. Spodnji prelom je nastal na približno 60 odstotkih njegove višine, zgornja dva pa eno vrsto kamnitih blokov pod vrhom. Tam je nekaj kamnitih blokov tudi odpadlo. Na vseh prelomih se je obelisk zavrteel v smeri urinega kazalca. Na spodnjem prelomu znaša zasuk okoli 10°, premikov ob zgornjih dveh pa zaradi izpadlih blokov ni mogoče ločiti. Skupaj znašata okoli 20°. Rotacijske poškodbe tega spomenika so zelo podobne nekaterim poškodbam obeliskov, opisanih v zgodovinskih virih, ki so opisane zgoraj (slike 3, 4 in 5), kar kaže, da gre za enak pojav.

Na pokopališču v Bovcu je potres povzročil precejšnje razdejanje. Del kamnite ograje se je popolnoma porušil, nekaj nagrobnikov je bilo prevrnjeno, večina pa zavrtena, vendar se niso podrli (sliki 7 in 8). Navpični nagrobniki v obliki plošč so večinoma povezani z vodoravno podlago tako, da so nataknjeni na nekaj centimetrov visoke železne zatiče. Sila navpičnega sunka je bila ob potresu tolikšna, da je dvignila navpične plošče, ker so se šele nato lahko zavrtele. Vsi nagrobniki so se zavrтели v smeri urinega kazalca, kot zasuka pa je bil od 10° do 30°.

Tudi v Lepeni, ki je le nekaj kilometrov oddaljena od nadžarišča potresa, so na nekaterih dimnikih vidni rotacijski učinki. Ohranjena je slika dimnika (Godec in sod., 1999), ki se je zasukal za okoli 45°. Ker je imel dimnik kvadraten presek, iz slike ni mogoče ugotoviti smeri zasuka.

Vsi opisani primeri iz Slovenije (Brežice in zgornje Posočje) se ujemajo z ugotovitvijo Kozaka (2009), ki je analiziral primere rotacijskih učinkov v zgodovinskih virih, da so ti pojavi značilni le za kraje zelo blizu nadžarišča potresa in pri razmeroma majhni globini žarišča potresa. Res pa je, da se večina njegovih primerov nanaša na zelo močne ali rušilne potrese z intenzitetami IX. stopnje in več. Avtor tudi ugotavlja, da so rotacijski učinki značilni predvsem za objekte in strukture, ki so razmeroma visoki v primerjavi z njihovo širino in praviloma simetričnega preseka, kar se ujema z opazovanji v Sloveniji.



Slika 7: Zasuk nagrobnika na pokopališču v Bovcu ob potresu leta 1998 (foto: A. Gosar)

Figure 7: Rotation of a grave monument at Bovec cemetery from the 1998 earthquake

## Sklepne misli

Rotacijski učinki potresov so zanimiv pojav, ki je sicer znan že dolgo časa, vendar še vedno ni popolnoma pojasnjen. Vzrok za to je predvsem v pomanjkanju ustreznih instrumentov za merjenje rotacijskih gibanj tal, s katerimi bi podprli teoretične razlage. Z razvojem instrumentov se rotacijskim gibanjem v seizmologiji namenja v zadnjem času vedno večja pozornost. Tudi v Sloveniji poznamo več primerov rotacijskih učinkov potresov. Skupna značilnost teh pojavov je, da so se zgodili zelo blizu žarišča potresa, ki je bilo razmeroma plitvo. Za nadaljnje proučevanje rotacijskih učinkov potresov je pomembno, da se



Slika 8: Zasuk nagrobnikov na pokopališču v Bovcu ob potresu leta 1998 (foto: A. Gosar)

Figure 8: Rotation of grave monuments at Bovec cemetery from the 1998 earthquake

dokumentira čim več takšnih primerov, preden utonejo v pozabo, kar je tudi eden izmed namenov tega članka.

## Viri in literatura

1. Aki, K., Richards P. G., 2002. Quantitative Seismology. University Science Books, 704 str.
2. Farrell, W. E., 1969. A gyroscope seismometer. Measurements during the Borrego earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 59, 1239-1245.
3. Kozak, J. T., 2009. Earthquake rotational effects: historical examples. Bulletin of the Seismological Society of America, 99/2B, 998-1010.
4. Lapajne, J., 1990. Veliki potresi na Slovenskem – IV, Brežiški potres leta 1917. Ujma, 4, 72-75.
5. Lee, W. H. K., Igel, H., Trifunac, M. D., 2009. Recent advances in rotational seismology. Seismological Research Letters, 80/3, 479-490.
6. Richter, C. F., 1958. Elementary Seismology. Freeman and Co., 768 str.
7. Tornquist, A., 1918. Das Erdbeben von Rann an der Sava vom 29. Janner 1917. Mitteilungen der Erdbeben Kommission Nr. 52, 117 str.
8. Godec, M., Vidrih, R., Ribičič, M., 1999. Potres 12. aprila v Zgornjem Posočju – inženirsko-geološka zgradba tal in poškodbe objektov. Potresi v letu 2008, 145-168.