

TEHNOLOŠKE ZABILJEŠKE

Uređuje: Marin Kovačić

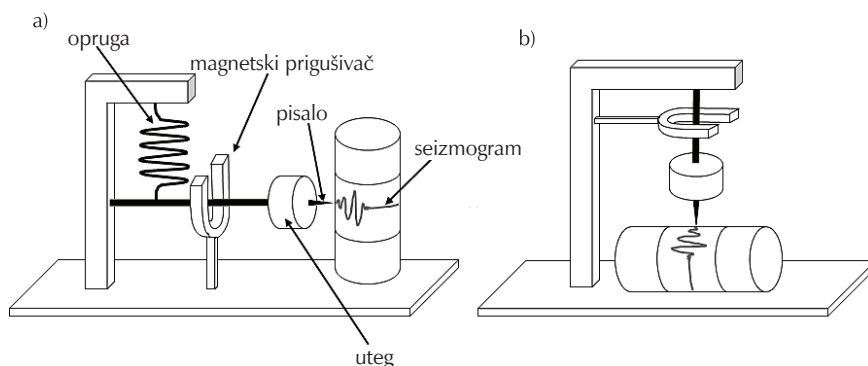


M. Kovačić*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku
kemijsku tehnologiju procesa, Savska cesta 16
10 000 Zagreb

Razmjeri energije oslobođene tijekom potresa

Tijekom 2020. tri jaka potresa zatre-
sla su središnju Hrvatsku. Najprije je
22. ožujka potres magnitude 5,5 po
Richteru izazvao znatnu štetu u Zagrebu,
zatim je 28. prosinca uslijedio potres ma-
gnitude 5,0 kod Petrinje, koji je prethodio
najjačem i izuzetno razornom udaru ma-
gnitude 6,2 po Richteru sljedećeg dana.^{1,2}
Do pojave tih destruktivnih prirodnih fe-
nomena dolazi uslijed naglog oslobađanja
energije akumulirane djelovanjem smičnih
naprezanja na dodirnim plohamu formaci-
ja stijena koje nazivamo rasjedima. Kada
naprezanja premaše kritičnu čvrstoću sti-
jena, dolazi do njihova naglog pomaka.
Akumulirana energija tada se troši za lom i
promjenu gravitacijske potencijalne ene-
rgije stijena, pri čemu se u okolnu litosferu
oslobađaju seizmički valovi te toplina kao
rezultat trenja. Među navedenim, najveći doprinos u ukupno
oslobođenoj energiji ima promjena gravitacijske potencijalne
energije.³ Udio oslobođene toplinske energije kod potresa velike
magnitude gotovo je zanemariv, međutim dovoljan je za taljenje
stijena na dodirnoj površini rasjeda. Primjerice, trenje i posljedič-
no taljenje stijena rasjeda tijekom potresa "Chi-Chi" 1999. na Taj-
vanu rezultiralo je drastičnim smanjenjem koeficijenta trenja, što
je doprinijelo lokalnim pomacima tla od gotovo 12 m.⁴ Razorna
moć potresa rezultat je djelovanja mehaničkih (potresnih) valova
koji se šire radialno iz hipocentra, odnosno izvora potresa. Postoji
više tipova seizmičkih valova, a dijelimo ih na: (i) longitudinalne
(*P*), (ii) transverzne (*S*), (iii) Loveove te Rayleighove valove. Longi-
tudinalni i transverzalni valovi su prostorni valovi te se šire kroz
unutrašnjost Zemlje, dok su Loveovi i Rayleighovi valovi površin-
ski a nastaju kao posljedica interferencije i međudjelovanja *P* i *S*
valova. U epicentru, odnosno površinskoj točki iznad hipocentra,
prevladavaju transverzalni valovi, koje ujedno karakterizira najve-
ća rušilačka moć. Brzina širenja valova kroz Zemlju ovisi ponaj-
prije o sastavu i gustoći tla, pri čemu se seizmički valovi najbrže
gibaju kroz čvrste stijene, a brzina širenja valova raste s dubinom.
U slučaju *P* valova brzina širenja kreće se između 1 i 14 km s⁻¹,
dok je u slučaju *S* valova riječ o brzinama od 0,5 do 8 km s⁻¹. *P*
valovi sporiji su od *S* valova jer je titranje čestica okomito na smjer
gibanja vala. Nadalje, *P* valove jakih potresa mogu detektirati sei-
zmografi na dijametralno suprotnom kraju Zemlje, budući da se
radi o tlačnom valu koji nesmetano prolazi kroz plašt i jezgru. *S*
valovi, s obzirom na to da se radi o smičnim valovima, ne mogu
se širiti kroz rastaljenu vanjsku jezgru, stoga ne dopiru do uda-
ljenih seizmoloških postaja. Upravo je na temelju tog opažanja



Slika 1 – Pojednostavljeni shematski prikaz seizmografa u: a) vertikalnoj i b) horizontalnoj izvedbi. Upravo se seizmogram bilježi fotonskim zapisom na foto-osjetljivom papiru.

slavni geofizičar Andrija Mohorovičić otkrio postojanje granice između Zemljine kore i plašta, tzv. "Moho diskontinuitet".^{5,6}

Energija seizmičkih valova oslobođena tijekom potresa može se aproksimirati prema izrazu (1):

$$\log E = 11,8 + 1,5 M_w \quad (1)$$

pri čemu *E* predstavlja energiju oslobođenu u žarištu, odnosno hipocentru, a *M_w* momentnu magnitudu potresa koju zabilježi Woods-Andersonov torzijski seizmograf.

Magnituda potresa predstavlja izravnu mjeru oslobođene energije, jer je magnituda proporcionalna pružanju, nagibu i pomaku stijena na rasjedu. Na osnovi analize zabilježenih seizmičkih valova te procjenom geoloških svojstava stijena, seizmolozi mogu izračunati seizmički moment (*M₀*); prema izrazu (2):

$$M_0 = \mu S \bar{d} \quad (2)$$

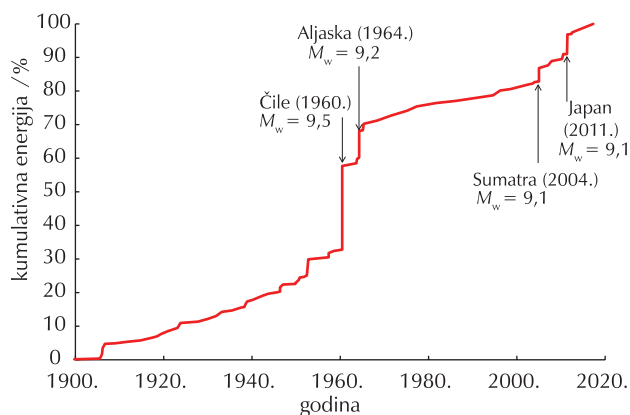
gdje μ predstavlja modul elastičnosti stijenske mase, *S* je površina rasjednih ploha, a \bar{d} srednja vrijednost pomaka duž rasjeda. Japanski seizmolog Hiroo Kanamori razvio je koncept standardizirane momentne magnitudu, koji je funkcija seizmičkog momenta.^{6,7}

$$M_w = (\log M_0 - 9,1)/1,5. \quad (3)$$

Tipična površina rasjeda zahvaćena potresom magnitude *M_w* = 4 iznosi oko 1 km² te se udeseostrukuje za svaki daljnji jedinični porast momentne magnitudu, kao i amplituda valova.⁸ Primjera radi, hipotetski potres *M_w* = 8,47 moguć je ako bi došlo do prosječnog pomaka stijena od 10 m na rasjedu duljine oko 1400 km. Međutim, jedinično povećanje magnitudu potresa odgovara povećanju oslobođene energije od čak 32 puta. Logaritamsku prirodu povećanja oslobođene energije najbolje predočuje graf ku-

* Doc. dr. sc. Marin Kovačić
e-pošta: mkovacic@fkit.hr

mulativne energije oslobođene potresima u razdoblju od 1900. do 2020. na slici 2.



Slika 2 – Prikaz oslobođene energije potresima u razdoblju od 1900. do 2017. Ukupni moment sile u tom razdoblju iznosi $9,2 \cdot 10^{23}$ Nm.⁸

Energiju oslobođenu potresom možemo možda zornije predložiti tzv. *Kelly Kiloton Index* (KKI) ljestvicom, u kojoj se energija oslobođena potresom uspoređuje s energijom oslobođenom eksplozijom 1000 t trinitrotoluena (kT). Usporedba Richterove i KKI ljestvice dana je u tablici 1.⁹ Tako je energija oslobođena detonacijom najrazornijeg termonuklearnog oružja koje je čovjek ikad napravio ekvivalentna potresu magnitude oko 7,1 prema Richteru.

U potrazi za alternativom energijom iz fosilnih izvora čovjek je upregnuo brojne sile prirode. Bi li mogao iskoristiti i razornu energiju potresa u konstruktivne svrhe? Potresi se itekako često događaju na Zemlji, u što smo se uvjerali u proteklih godinu dana na ovim prostorima. U prosjeku, na dnevnoj se razini događa više stotina potresa magnitude oko 2 po Richteru, a mjesečno jedan magnitude oko 7. Shodno tome, možemo reći da se velike količine tektonske energije oslobađaju gotovo konstantno.¹⁰ Hipotetski, postavljanjem mreže piezo-kristala oko rasjeda, pomoću piezoelektričnog efekta seizmička energija potresa mogla bi se pretvoriti u električnu energiju. Međutim, potrese je teško predvidjeti, stoga bi proizvodnja električne energije bila uvelike diskontinuirana. Primjerice, novozelandski rasjed *Alpine Fault* poznat je kao jedan od velikih rasjeda s razmjerno točnim intervalima, pri čemu se značajni potresi događaju u prosjeku svakih 330 godina, a posljednji potres bio je 1717. godine. Seizmolozi predviđaju kako vjerojatnost potresa velike magnitude ($>7,0$) na tom rasjedu tijekom sljedećih 50 godina iznosi gotovo 30 %. Uzevši u obzir njihovu geografsku dislociranost te da se većina tektonskih poremećaja odvija ispod mora i oceana, eksploataciju seizmičke energije možemo smatrati gotovo nemogućom. Ipak, uzevši u obzir da u slučajevima katastrofalnih potresa dolazi do prekida opskrbe električnom energijom, potencijalno su zanimljiva rješenja za pretvorbu seizmičke u električnu energiju, barem za potrebe tzv. panik- i evakuacijske rasvjete, ako ne i za potrebe telefonskih centrala i repetitora mobilne mreže, mrežne infrastrukture i slično. S tom mišlju su studenti Sveučilišta u Leicesteru predložili idejno rješenje u kojem bi jednostavni električni generatori s pomičnim magnetom u zavojnici mogli proizvesti dovoljno energije za rad evakuacijske rasvjete.¹¹ Simultani napredak piezoelektričnih pretvornika i elektronike omogućio je razvoj nosivih senzora koji se napajaju kretanjem. Stoga su piezoelek-

trični pretvornici dosegli tehnološku zrelost za pretvorbu vibracija građevina u električnu energiju. *Dal Bo i Gardonio*¹² konstruirali su i ispitali seizmički pretvornik, koji je mogao proizvesti nekoliko stotina mW pri ubrzanju od 1 g, što doduše nije dovoljno za samostalno pokretanje trošila. No s obzirom na ukupan obujam uređaja od svega 50 cm³ moguće ga je ugraditi u veliku površinu i pri tome generirati korisnu količinu električne energije.

Nedavni nemili događaji možda daju impuls daljnjem razvoju geologije i seizmologije u Hrvatskoj, kako je to bio slučaj slavnog Mohorovičića 1909. godine.

Tablica 1 – Energija oslobođena potresom izražena prema kilotonskom ekvivalentu trinitrotoluena

Intenzitet prema Richteru	Kelly Kiloton Index (KKI)
6,0	1 000
6,5	5 600
7,0	32 000
7,5	180 000
8,0	1 040 000

Literatura

- URL: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_zagrebacom_potresu_2020 (28. 2. 2021.).
- URL: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/potresi_kod_petrinje (28. 2. 2021.).
- C.-L. Lo, S.-K. Hsu, Earthquake-induced gravitational potential energy change in the active Taiwan orogenic belt, *Geophys. J. Int.* **162** (2005) 169–176, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02634.x>.
- W.-H. Li, C.-H. Lee, M.-H. Ma, P.J. Huang, S.Y. Wu, Fault dynamics of the 1999 Chi-Chi earthquake: clues from nanometric geochemical analysis of fault gouges, *Sci. Rep.* **9** (2019) 5683, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42028-w>.
- M. Herak, Andrija Mohorovičić: 2010 – centennial discovery of the Moho, *Studia Geophys. et Geod.* **56** (2012) 293–298, doi: <https://doi.org/10.1007/s11200-011-0076-4>.
- URL: http://eqseis.geosc.psu.edu/cammon/HTML/Classes/IntroQuakes/Notes/waves_and_interior.html (3. 3. 2021.).
- H. Kanamori, The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.* **82** (1977) 2981–2987, doi: <https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>.
- P. Bormann, D. Di Giacomo, The moment magnitude M_W and the energy magnitude M_e : common roots and differences, *J. Seismol.* **15** (2011) 411–427, doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9219-2>.
- URL: <https://www.usgs.gov/media/images/eq-magnitude-energy-release-and-shaking-intensity> (3. 3. 2021.).
- URL: <https://english.ucla.edu/wp-content/uploads/Kiloton.pdf> (3. 3. 2021.).
- URL: https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/how_often_do_earthquakes_occur (3.3.2021.).
- URL: <https://www2.le.ac.uk/offices/press/press-releases/2016/july/student-research-examines-how-to-generate-energy-during-earthquakes> (3. 3. 2021.).
- L. Dal Bo, P. Gardonio, Energy harvesting with electromagnetic and piezoelectric seismic transducers: Unified theory and experimental validation, *J. Sound Vib.* **433** (2018) 385–424, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.034>.