

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
VARAŽDIN

Tomislav Ostroški

**Potresi i utjecaj
na okoliš**

Završni rad

Varaždin, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET
VARAŽDIN



Završni rad

Potresi i utjecaj na okoliš

Kandidat:
Tomislav Ostroški

Mentor:
Doc. dr. sc. Mario Gazdek

Neposredni voditelj:
Dr. sc. Davor Stanko

Varaždin, 2019.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: TOMISLAV OSTROŠKI

Matični broj: 2448 - 2014./2015.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

POTRESI I UTJECAJ NA OKOLIŠ

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Što su potresi
3. Učinci potresa na okoliš i njihova podjela
4. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 13.03.2019.

Rok predaje: 05.07.2019.

Mentor:

M. Gazdek

Doc.dr.sc. Mario Gazdek

Neposredni voditelj:

Stanko Davor

Dr.sc. Davor Stanko

Predsjednik Odbora za nastavu:

Igor Petrović

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

POTRESI I UTJECAJ NA OKOLIŠ

(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom ***akademska titula i ime i prezime mentora i/ili komentora***.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 01.07.2019.

TOMISLAV OSTROŠKI

(Ime i prezime)

83903966964

(OIB)

Tomislav Ostroški

(Vlastoručni potpis)

Prilog 3. Izjava o akademskoj čestitosti

Sažetak rada i ključne riječi

Potres je iznenadni događaj naglog oslobađanja elastične potencijalne energije u unutrašnjosti Zemlje, koji se na površini manifestira kao potresanje tla. Osnovne veličine za opisivanje potresa su intenzitet i magnituda. Intenzitet predstavlja grubi i kvalitativni opis učinaka ili posljedica djelovanja potresa na određenoj lokaciji, dok magnituda predstavlja kvantitativnu dimenziju s obzirom na izmjerene amplitude pomaka pri potresanju tla. Iako su potresi nepredvidivi, mogu se odrediti lokacije kojima prijete rizik od pojave potresa određivanjem seizmičnosti područja. Učinak potresa na određenu sredinu ovisi o dinamičkim svojstvima tla, ovisno o sredini koju zahvaća potres gibanje tla može biti „jače“ ili „manje“ izraženije. Učinci potresa se općenito i uobičajeno nazivaju seizmički hazardi. Hazard je pojam koji opisuje potencijalnu štetu ili gubitak života i zdravlja ljudi, štete na materijalnim dobrima i inženjerskim konstrukcijama te štete u okolišu. Seizmički hazardi se dijele na primarne i sekundarne. Primarni seizmički hazardi obuhvaćaju izravne posljedice poremećaja i pomaka u litosferi. Sekundarni hazardi se definiraju kao posljedice primarnih djelovanja, a odnose se na lokalne učinke na određenom prostoru.

Ključne riječi: potres, intenzitet, magnituda, seizmičnost, dinamička svojstva tla, primarni i sekundarni seizmički hazardi

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. Što su to potresi ?	3
2.1. Intenzitet, magnituda i energija potresa	6
2.2. Skale intenziteta te veza između magnitude i intenziteta	9
2.3. Seizmičnost	14
2.4. Dinamička svojstva tla	16
3. Učinci potresa na okoliš i njihova podjela	20
3.1. Primarni seizmički hazardi	21
3.1.1. Izdignuće i potonuće reljefa	21
3.1.2. Rasjedanje reljefa	23
3.1.3. Tsunami	24
3.2. Sekundarni seizmički hazardi	26
3.2.1. Likvefakcija	26
3.2.2. Klizišta	28
3.2.3. Slijeganje	33
3.2.4. Rasjedanje trošne zone	34
4. Zaključak	36
5. Literatura	37
5.1. Popis slika	42
5.2. Popis tablica	43

1. UVOD

Potresanje Zemljine kore se doživljava, ali i istražuje kao pojava zemljo-tresa. Planeta Zemlja se nalazi u stalnim ciklusima gibanja i kretanja, a jedan takav nemir se na površini Zemlje ostvaruje kao stalno podrhtavanje i potresanje. Zato se potres može definirati kao mjerljivo potresanje Zemljine kore, koje nastaje kao posljedica iznenadnog oslobađanja energije gibanja dijelova njene mase. Ta se energija rasprostire kroz njeno tijelo i dolazi do površine u obliku seizmičkih (potresnih) valova. Razine oslobođene energije mogu biti takve da na površini, u prostoru kojim se bavi inženjerstvo okoliša, mijenjaju izgled terena, izazivaju strukturne promjene u oblicima i građi geoloških formacija, razaraju inženjerske konstrukcije i građevine te u konačnici predstavljaju opasnu prijetnju po zdravlje i život ljudi.

Važno je imati na umu da je gibanje dijelova mase Zemlje neprestani i nezaustavljivi proces, pa se na površini dnevno može zabilježiti nekoliko tisuća takvih mini-podrhtavanja (procjenjuje se oko 500 000 događaja godišnje). Ta se aktivnost naziva seizmička aktivnost. Na nekom prostoru ona se može „dimenzionirati“ analizom svih potresa koji su u nekom razdoblju zabilježeni i to na temelju učestalosti (frekvencije) njihove pojave, njihove magnitude (veličine) i porijekla (vrsta prema kategoriji izvora potresa).

Općenito se učinci potresa promatraju kao njihove posljedice na ljude (broj ozlijeđenih i smrtno stradalih) te na ljudske tvorevine (vrijednost štete nastale na svim vrstama građevina). Međutim, treba primijetiti da se vrlo često previđa učinak potresa koji se manifestira kao „pomak u vremenu“ svih ljudskih djelatnosti i aktivnosti, koje su zbog posljedica potresa zaustavljene, odgođene ili usporene. Također se zaboravlja da je veličina tog vremenskog pomaka obrnuto razmjerna kvaliteti dimenzioniranja seizmičke aktivnosti na nekom području. Upravo ta kvaliteta ovisi o istraživanju i razumijevanju učinaka koje potres može imati na okoliš. Konačno se može zaključiti

da se učinci potresa, kao i istraživanje njegovog djelovanja, smisleno mogu proučavati jedino u polju-prostoru: ljudi-građevine-okoliš.

Djelovanje potresa na okoliš može biti različito, ali je uvijek vezano uz njegov izvor i porijeklo te uz gibanje površine izazvano seizmičkim valovima. Tako se učinci i dijele na primarne i sekundarne. Primarni se uglavnom analiziraju u blizini epicentra, a odnose se na „globalne“ događaje kao što su rasjedanje, izdignuće ili potonuće površine (tektonske deformacije geoloških struktura i formacija koje dosežu do površine) ili bilo koja druga aktivnost koja se zbiva i manifestira na površini (i uglavnom je znatnih prostornih dimenzija, kao tsunami primjerice). Sekundarni su učinci uglavnom posljedice potresanja, odnosno djelovanja seizmičkih valova na strukture i konstrukcije na površini, u njihovoj interakciji s temeljnim tlom ili stijenom. Njihov učinak ima „karakter“ lokalnog, neposrednog i „mrežnog“ djelovanja kako na građevine tako i na ljude. Razvidno je da primarni učinci imaju razmjere prirodne katastrofe, dok nam se sekundarni čine kao događaji u prostoru ljudi-građevine-okoliš koji mogu imati razorne posljedice, ali se isto tako mogu „izbjeći ili minimizirati“. Suvremena istraživanja učinaka potresa potvrđuju ovakav koncept podjele, jer se sekundarne pojave, posljedice ili učinci odnose na ono što ljudi doživljavaju kao svoj neposredni okoliš. Stoga se u ovom radu analiziraju sljedeći učinci potresa: likvefakcija, lokalna slijeganja ili izdizanja tla, mikrorasjedanja trošnih stijenskih masa, klizišta i odroni.

2. Što su to potresi?

Najčešća sadržajna definicija potresa glasi: potresi predstavljaju iznenadno i slučajno, naglo oslobođenje elastične energije u unutrašnjosti Zemlje koje se na površini manifestira u obliku potresanja ili ljuljanja tla. Uz tumačenje ove prirodne pojave uvijek se postavlja glavno pitanje: Kako se potres kao proces inicira? Ono što prethodi inicijaciji potresa su pomaci duž tektonskih ploča, gdje dolazi do akumulacije elastične energije, zbog povećanja posmičnog naprezanja u materijalu na granicama tektonskih ploča, (Kramer, 1996). Kada posmično naprezanje premaši posmičnu čvrstoću stijene onda dolazi do sloma stijenske mase, a to izaziva oslobađanje „uskладиštene“ količine elastične energije, (Kramer, 1996). Navedene se tvrdnje odnose na nastajanje tektonskih potresa. Prema porijeklu i mjestu nastanka, odnosno prema njihovoj genezi, još postoje i potresi izazvani vulkanskim erupcijama, urušni potresi (gorski udari) koji su posljedica prekomjerne eksploatacije mineralnih sirovina te potresi izazvani podzemnim testiranjem nuklearnih eksplozija.

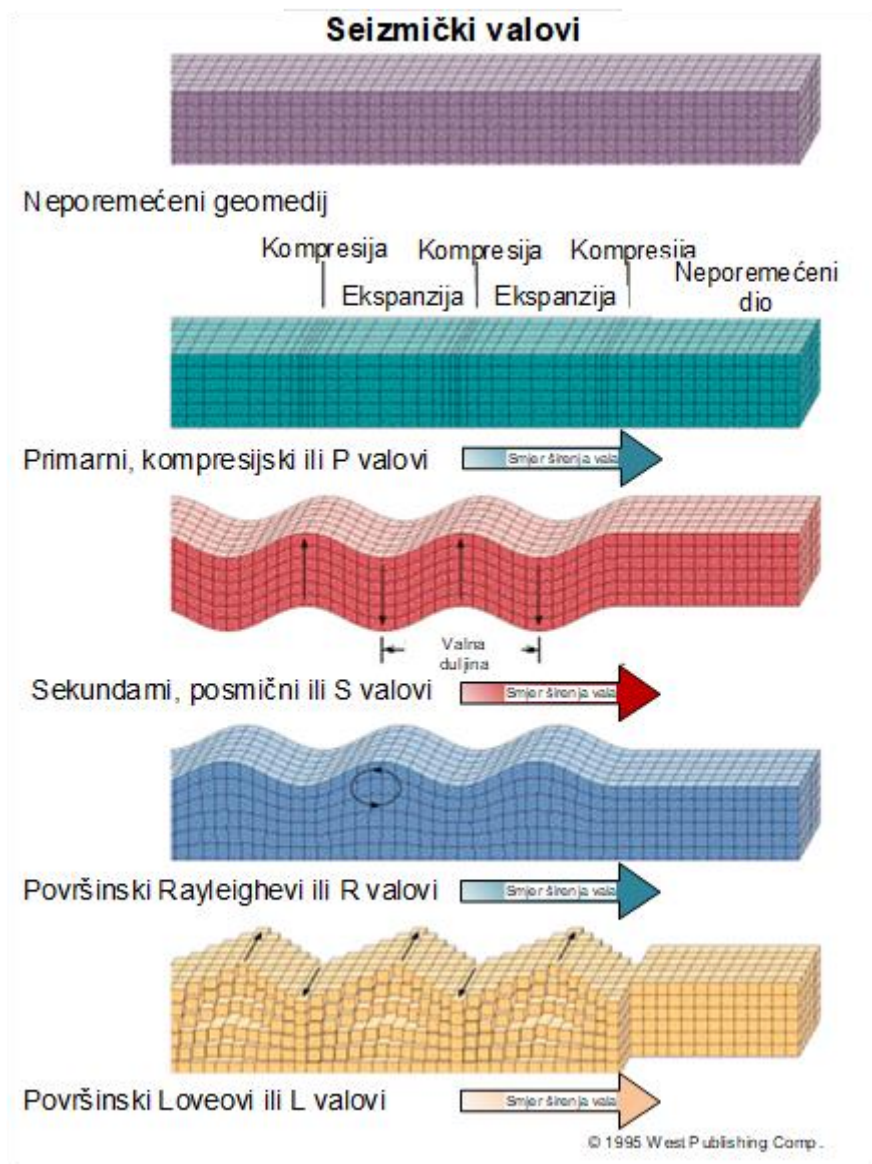
Potresi tektonskog tipa su najčešće pojave, a energija potresa koja se oslobađa pri slomu stijenske mase ovisi o mehaničkim svojstvima geomedija (odnosno „geološkog materijala“ u inženjerskom smislu) duž rasjeda. Kod materijala koji je slab i duktilan (popustljiv), u smislu da može primiti znatnu plastičnu deformaciju, uskladištena energija je znatno manja od energije uskladištene u materijalu koji je čvrst i krt (materijal koji ne može primiti znatnu plastičnu deformaciju bez sloma). Zbog toga se kod slabog i duktilnog materijala oslobađa mala količina energije, sporo i aseizmično (bez nastanka impulsa potrebnog za prijenos i širenje seizmičke energije), dok se kod čvrstog i krtog materijala energija oslobađa brzo i u obliku seizmičkih valova, (Kramer, 1996).

Manifestacija potresa na površini, bez obzira na njihovo porijeklo, se prepoznaje upravo kao djelovanje seizmičkih valova na okoliš, reljef i građevine.

Valovi koji se šire iz hipocentra potresa nazivaju se prostorni valovi. Razlikuju se dva tipa prostornih valova: primarni ili kompresijski (P valovi) koji izazivaju normalna (tlačna i vlačna) naprezanja, odnosno deformacije te sekundarni ili posmični (S valovi) koji izazivaju posmične deformacije pri širenju kroz geomedij. S val se razlaže na dvije komponente: SV ili vertikalna komponenta i SH ili horizontalna komponenta. Brzina prostornih valova ovisi o elastičnim svojstvima geomedija kroz koji prolaze, odnosno o „kompetentnosti“ stijene ili zbijenosti tla. U kompetentnim stijenama i zbijenijim tlima (solidni inženjerski materijali) brzina valova je to veća što su elastična svojstva bolja.

Brzina širenja elastičnih P valova kroz geomedij (zapravo kroz bilo kakvu supstancu) ovisi o njegovom „masenom“ modulu M (engl. mass modulus, De Beer, 2008). U teoriji elastičnosti, veličina tog modula jednaka je zbroju modula kompresije K i modula posmika G ($M = K + 4/3 G$). To zapravo znači da u čvrstim tijelima (kojima je svojstven modul G), brzina S valova ne može biti veća od brzine P valova. Modul M se može shvatiti i kao omjer naprezanja i deformacije u jednoosnom stanju naprezanja (De Beer, 2008).

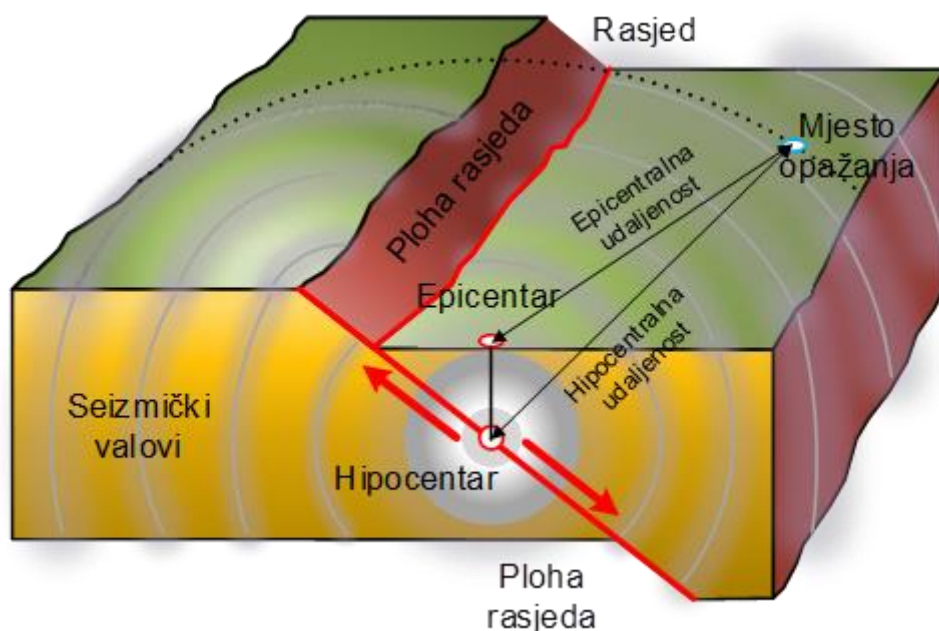
Osim prostornih valova, postoje i valovi koji nastaju interakcijom prostornih valova s površinom na kontaktu geomedij-zrak (litosfera-atmosfera). Ti se valovi nazivaju površinski valovi, a razlikuju se Rayleighovi i Loveovi valovi. Rayleighovi valovi nastaju kao proizvod primarnih P valova i vertikalne komponente sekundarnog SV vala (Das i Ramana, 2010). Loveovi valovi su posljedica interakcije horizontalne komponente SH vala s površinom i nemaju vertikalnu komponentu (Das i Ramana, 2010). Površinski valovi su sporiji od prostornih valova. Iako im amplitude značajno opadaju s dubinom, njihova veličina na površini može biti značajna (za red veličine veća od amplitude primjerice S vala). Budući da je energija koju nose razmjerna kvadratu amplitude ($E \sim A^2$), očito je da ti valovi mogu izazvati velike štete tijekom potresa. Slika 1. prikazuje vrste i način širenja seizmičkih valova.



Slika 1. Vrste i način širenja seizmičkih valova (Sciury, 2019)

Za lakše opisivanje izvora potresa (i dimenzioniranje kao fizičke pojave) koriste se geometrijske notacije poput: fokus ili hipocentar, epicentar, epicentralna udaljenost i hipocentralna udaljenost. Hipocentar ili fokus je mjesto u unutrašnjosti Zemlje gdje dolazi do inicijacije potresa, odnosno oslobađanja uskladištene energije. Epicentar potresa predstavlja vertikalnu projekciju hipocentra na površinu Zemlje. U epicentru potresa djelovanje potresa je najjače (Kasumović i Skoko, 1969). Udaljenost između epicentra i promatrača/mjesta-opažanja se naziva epicentralna udaljenost, a

udaljenost između hipocentra i promatrača/mjesta-opažanja naziva se hipocentralna udaljenost. Slika 2. prikazuje geometrijsku notaciju izvora potresa i osnovne pojmove za opis potresa.



Slika 2. Geometrijska notacija potresa (Wood D., 2019)

2.1. Intenzitet, magnituda i energija potresa

Veličina (magnituda) potresa prije razvoja modernih instrumenata opisivala se samo grubo i kvalitativno kao intenzitet (stupanj) potresa na određenoj lokaciji. Intenzitet zapravo predstavlja mjeru jakosti potresa koja se očitava na temelju nastale štete na samoj lokaciji potresa ili s obzirom na reakciju ljudi na učinke potresa (reakcije osoba koje su se zatekle usred samog događaja).

Proces prikupljanja kvalitativnih (opisnih) podataka o intenzitetu potresa na nekoj lokaciji se naziva makroseizmička metoda. Podaci se pronalaze u povijesnim izvorima u kojima su potresi opisani. Da bi se mogla odrediti prostorna raspodjela jačine potresa na temelju zabilježenih podataka koriste se empirijski skale intenziteta (Kasumović i Skoko, 1969). Skale intenziteta potresa sastoje se od kategorija, gdje svaka kategorija opisuje djelovanje potresa, koje može biti blago do razorno. Na temelju identifikacije intenziteta djelovanja nekog pojedinačnog potresa može se odrediti i epicentar potresa. Makroseizmičkom metodom (Kasumović i Skoko, 1969) se određuju intenziteti potresa na nekom promatranom području (prostoru), a potom se njihove vrijednosti unose na topografsku kartu te se točke (lokacije, zone ili područja) istog intenziteta spajaju linijama koje se nazivaju izoseiste (Kasumović i Skoko, 1969). Tako nastaju izoseizmičke karte koje služe za određivanje epicentra potresa, jer prikazuju kako se intenzitet potresa smanjuje s epicentralnom udaljenošću. Intenzitet potresa je najveći u blizini epicentra potresa, pa da se za grubo određivanje veličine (magnituda) potresa može koristiti epicentralni intenzitet (Kramer, 1996).

Kvantitativno određivanje značajki potresa omogućeno je razvojem modernih instrumenata za mjerenje jakog gibanja (potresanja) tla tijekom potresa. Ti uređaji omogućuju numeričko skaliranje veličine potresa u obliku magnituda potresa nekog mjenog dinamičkog parametra (pomak tla, brzina gibanja ili akceleracija). Magnituda potresa definira se određivanjem parametara gibanja tla. Uređaj za mjerenje dinamičkih veličina se naziva seizmograf. Metoda za istraživanje djelovanja potresa u kojoj se koriste seizmički instrumenti poput seizmografa, naziva se mikrosezmička metoda.

Počeci primjene mikrosezmičke metode vezani su za istraživanje Charlesa Richtera, koji je 1935. godine definirao magnitudnu skalu za plitke, lokalne potrese u sjevernoj Kaliforniji. Lokalna magnituda (M_L) definirana je kao logaritam po bazi 10 od maksimalne zabilježene amplitude A , (Kramer, 1996):

$$M_L = \log(A)$$

Lokalna magnituda je ograničena na manja područja, odnosno na epicentralne udaljenosti manje od 600 km. S obzirom da Richterovalokalna magnituda prikazuje ukupno djelovanje seizmičkih valova (djelovanje različitih vrsta valova, prostornih i površinskih, nije razdvojeno), naknadno su razvijeni izrazi za proračun magnitude površinskih i prostornih valova.

Na većim epicentralnim udaljenostima djelovanje prostornih valova je uglavnom „ublaženo“ i „raspršeno“, pa prevladavaju površinski valovi. Tako se onda može izračunati magnituda M_s površinskih (Rayleighovih) valova prema Gutenbergovom i Richtеровom izrazu (Kramer, 1996):

$$M_s = \log(A) + 1.66 \cdot \log(\Delta) + 2$$

A je maksimalni pomak tla u mikrometrima, a Δ je kutna epicentralna udaljenost seizmometra izražena u stupnjevima (kut između tetive koja spaja epicentar i mjesto opažanja te tangente u epicentru na kružnom presjeku Zemlje). Ovaj izraz se koristi kod plitkih potresa s dubinom fokusa manjom od 70 km te na udaljenostima većim od 1000 km, za srednje do jake potrese.

Još jedan od načina „dimenzioniranja“ veličine djelovanja potresa je određivanje energije koja se oslobađa tijekom potresa. Ukupnu energiju E oslobođenu tijekom potresa izrazili su Gutenberg i Richter u obliku:

$$\log(E) = 11.8 + 1.5 M_s$$

Energija E je izražena u ergima ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$), dok je M_s magnituda površinskih valova određena Gutenberg-Richtеровim izrazom za magnitudu površinskih valova. Važno je spomenuti da za svaku jediničnu razliku magnitude, omjeri oslobođenih energija iznose približno 32. To znači da razlika od 2 magnitude iznosi oko 1 000 puta

više energije, dok magnitudna razlika od 4 magnitute iznosi oko 1 000 000 puta više energije. (Kramer, 1996).

2.2. Skale intenziteta te veza između magnitute i intenziteta

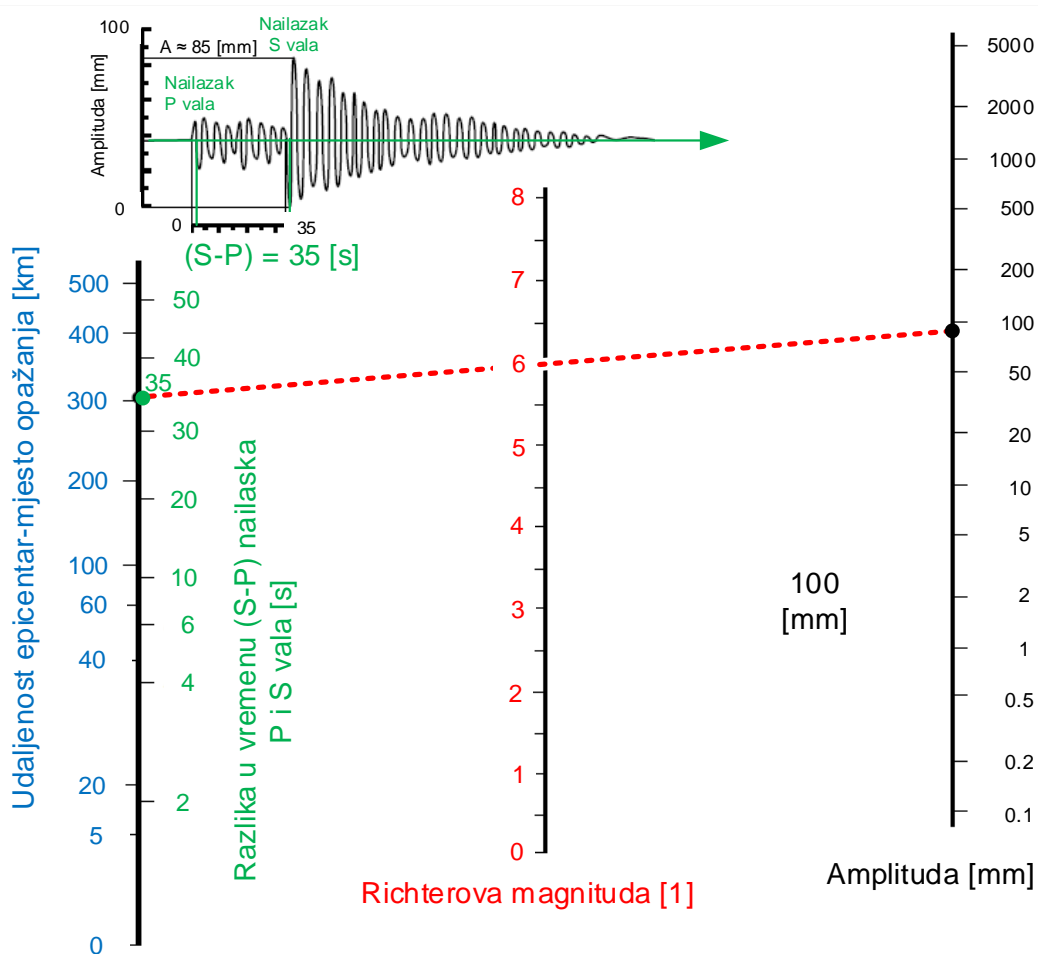
U seizmologiji skale intenziteta i magnitute služe za kategorizaciju učinka potresa na lokaciji blizu epicentra potresa. Brojne skale intenziteta se koriste kod opisivanja djelovanja potresa na ljude, konstrukcije i okoliš. U Republici Hrvatskoj je prihvaćena Mercallijeva ljestvica intenziteta (MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg), dok se za magnitudu koristi Richterova ljestvica. Osim Mercallijeve ljestvice, postoje još i modificirana Mercallijeva ljestvica (MM), Medvedev-Sponheuer-Karnik ljestvica (MSK), Europska makroseizmička skala (EMS) te druge ljestvice koje su uglavnom definirane za specifična potresna područja (kao primjerice japanska ljestvica JMA).

Veličina i učinak potresa opisuju su pomoću magnitute i intenziteta potresa. Magnituda i intenzitet potresa se mjere na drugačije načine. Kod mjerenja magnitute mjere se karakteristike jakog gibanja tla i dobivamo brojčani iznos koji označava jačinu potresa, dok se intenzitet određuje opisno na temelju opažanja štete na lokaciji potresa ili ljudskom reakcijom na potres koja se dobiva kasnijim razgovorom sa osobama koje su se zatekle u toj situaciji.

Richterova skala magnituda ili Richterova ljestvica kategorizira djelovanje, odnosno štetne učinke potresa s obzirom na razine određene minimalnim i maksimalnim lokalnim magnitudama. Autor te skale je Charles F. Richter, a predložena je 1935. godine. Kod njene izrade Richter je koristio Wood-Andersonov seizmograf za određivanje lokalne magnitute (M_L). Ta ljestvica prikazuje razmjere mogućih šteta (na nekoj lokaciji) za određene razine magnitute potresa (Tablica 1.). Bitno je napomenuti da se razlika za jednu magnitudu očituje u promjeni amplitude potresa 10 puta, primjerice potres magnitute 3 ima 10 puta veću amplitudu od potresa magnitute 2.

Tablica 1. Richterova ljestvica (Richterove magnitude potresa, Encyclopaedia Britannica)

Razina	Richterove magnitude			Opis potresa	Šteta kao mjera posljedica djelovanja potresa
1	> 1 - 2,9			Mikro	Uglavnom ih se ne osjeti, ali bilježe ih seizmografi.
2	3,0 - 3,9			Manji	Osjeti ih mnogo ljudi, ne uzrokuju štetu.
3	4,0 - 4,9			Lagani	Osjete ih svi ljudi, manja šteta koja uključuje predmete.
4	5,0 - 5,9			Umjereni	Šteta na slabijim građevinama.
5	6,0 - 6,9			Jaki	Umjerena šteta na naseljenim područjima.
6	7,0 - 7,9			Veliki	Velike štete na velikim područjima, uključuje i gubitak života.
7	8 i više			Razarajući	Ogromne šteta i znatan broj gubitaka života na velikim područjima.



Slika 3. Nomogram za određivanje Richterove magnitude potresa (Lee, 2019)

Mercallijeva ljestvica, čije puno ime je Meraclli-Cancani-Siebergova ljestvica (MCS), opisuje intenzitet potresa na nekoj određenoj lokaciji. Treba napomenuti da je intenzitet potresa u epicentru (očekivano) uvijek veći od intenziteta tog istog potresa na lokaciji udaljenoj nekoliko stotina kilometara. Intenzitet potresa se mjeri stupnjem, a on je kao i naziv potresa, definiram prema utvrđenim kategorijama šteta koje djelovanje potresa može izazvati. Tablica 2. prikazuje sam učinak potresa na temelju njegovog intenziteta.

Tablica 2. Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica intenziteta potresa
(Enciklopedija)

Stupanj potresa	Naziv potresa	Opis šteta kao mjera učinka potresa
I.	Nezamjetljiv potres	Bilježe ga jedino seizmografi.
II.	Vrlo lagan potres	U višim katovima stambenih zgrada osjete ga vrlo senzibilni ljudi.
III.	Lagan potres	Podrhtavanje tla kao pri prolazu automobila. U unutrašnjosti zgrada osjeti ga više ljudi.
IV.	Umjeren potres	U zgradama ga osjeti više ljudi, a na otvorenome samo pojedinci. Budi neke spavače. Trese vrata i pokućstvo. Prozori, staklenina i posude zveče kao pri prolazu teških kamiona.
V.	Prilično jak potres	Osjeti ga više ljudi na otvorenom prostoru. Budi spavače; pojedinci bježe iz kuća. Njišu se predmeti koji slobodno vise, zaustavljaju se ure njihovice.
VI.	Jak potres	Ljudi bježe iz zgrada. Sa zidova padaju slike, ruše se predmeti, razbija se posuđe, pomiče ili prevrće pokućstvo. Zvone manja crkvena zvona. Lagano se oštećuju pojedine dobro građene kuće.
VII.	Vrlo jak potres	Crjepovi se lome i kližu s krova, ruše se dimnjaci. Oštećuje se pokućstvo u zgradama. Ruše se slabije građene zgrade, a na jačima nastaju oštećenja.
VIII.	Razoran potres	Znatno oštećuje do 25% zgrada. Pojedine se kuće ruše do temelja, a velik ih je broj neprikladan za stanovanje. U tlu nastaju pukotine, a na padinama klizišta.
IX.	Pustošan potres	Oštećuje 50% zgrada. Mnoge se zgrade ruše, a većina ih je neupotrebljiva. U tlu se javljaju velike pukotine, a na padinama klizišta i odroni.
X.	Uništavajući potres	Teško oštećuje 75% zgrada. Velik broj dobro građenih kuća ruši se do temelja. Ruše se mostovi, pucaju brane, savijaju željezničke tračnice, oštećuju putevi. Pukotine u tlu široke su nekoliko decimetara. Urušavaju se špilje, pojavljuje se podzemna voda.
XI.	Katastrofalan potres	Gotovo sve zgrade ruše se do temelja. Iz širokih pukotina u tlu izbija podzemna voda noseći mulj i pijesak. Tlo se odronjava, stijene se otkidaju i ruše.
XII.	Velik katastrofalan potres	Sve što je izgrađeno ljudskom rukom ruši se do temelja. Reljef mijenja izgled, zatrpavaju se jezera, rijeke mijenjaju korito.

Da bi se Richterova magnituda M (ljestvica šteta određenih prema izmjerenim amplitudama potresa) mogla povezati s intenzitetom potresa I_0 (štete određene na temelju pregleda građevina i opisa njihovih stanja), mnogi su znanstvenici predložili empirijske izraze koji povezuju magnitudu s intenzitetom na određenom području. Primjerice:

$$M = -1.682 + 0.654 I_0 + 1.868 \log(H) \text{ (orthogonal regression)}$$

$$M = 0.5 I_0 + \log(H) + 0.35 \text{ (Kárník – za plitke potrese)}$$

gdje je I_0 epicentralni intenzitet potresa, a H predstavlja udaljenost žarišta od površine Zemlje izražena u km.

Tablica 3. Aproximativni odnos intenziteta MCS ljestvice i Richterove magnitude (Oluić, 2015)

MCS intenzitet [°]		Richterova magnituda [1]
I.		0,0 - 1,5
II. - III.		1,5 – 2,5
III. - IV.		2,5 - 3,0
IV. - V.		3,0 - 3,5
V. - VI.		3,5 - 4,5
VI. - VII.		4,5 - 5,0
VII. - VIII.		5,0 - 5,5
VIII. - IX.		5,5 - 6,0
IX. - X.		6,0 - 6,5
X. - XI.		6,5 - 7,0
XI. - XII		7,0 - 7,5
XII.		7,5 - 10,0

2.3. Seizmičnost

Pojam „seizmičnost“ se uvijek odnosi na neko područje na kojem se istražuje ili se definira ukupna (zabilježena) seizmička aktivnost. Seizmička aktivnost predstavlja važan parametar za procjenu djelovanja potresa, a odnosi se na: učestalost pojave potresa na nekom području, odnosno broj ponavljanja potresa u nekom vremenu (razdoblju). Seizmička aktivnost međutim ne obuhvaća mjeru jačine (magnitudu ili intenzitet) potresa na tom području.

Podaci koji su potrebni za određivanje seizmičnosti nekog područja (prostora) jesu: i) učestalost potresa u određenom razdoblju, ii) površina područja zahvaćena potresom, iii) magnituda potresa.

Uz poznatu magnitudu potresa, može se odrediti dio energije koji dolazi do površine promatranog područja. Ta se energija naziva površinska energija (e_i). Prema tome, izraz za seizmičnost S nekog područja površine F , na kojem se prosječno godišnje pojavi P potresa iste magnitude, glasi:

$$S = \sum e_i \cdot (F \cdot P)^{-1}$$

Površinska energija se može dobiti iz magnitude prema izrazu:

$$e_i = e_0 \cdot 10^{1.8 \cdot M_i}$$

Tako određena seizmičnost S ima numeričku vrijednost, jer su i sve njene komponente također numerički određene. Seizmičnost se dakle ne može odrediti iz makroseizmičkih podataka koji su deskriptivni (ne-numerički). Kod određivanja seizmičnosti pomoću makroseizmičkih podataka, potrebno je definirati maksimalni intenzitet (I_m) i površinu koju obuhvaća izoseista intenziteta (F_I). Tako da se tada može odrediti površinska energija e_i :

$$e_i = c \cdot I_m \cdot F_j = c \cdot w_i$$

Konstanta c se određuje uspoređivanjem intenziteta onih potresa za koje je bila određena magnituda. Dakle, iz izmjerenih amplituda odrede se magnitude, a potom se pomoću empirijskih korelacija te magnitude transformiraju u intenzitete.

Na taj način konstanta c postaje svojevrsni „kalibracijski faktor“ za definirani maksimalni intenzitet.

Na temelju makroseizmičkih podataka može se odrediti relativnu i apsolutnu seizmičnost nekog područja. Relativna seizmičnost se određuje izrazom:

$$s = \sum w_i \cdot (F \cdot P)^{-1}$$

Dok je apsolutna vrijednost jednaka umnošku relativne seizmičnosti područja i konstante c :

$$S = c \cdot s$$

Seizmičnost definirana ovim izrazima je višeznačna, jer suma energije može predstavljati mali broj (n) potresa veće energije ili više potresa manje energije. To se uklanja određivanjem učestalosti potresa N ili prosječnim intenzitetom \bar{I} :

$$\bar{I} = \sum I_i \cdot P^{-1}$$

$$N = n \cdot P^{-1}$$

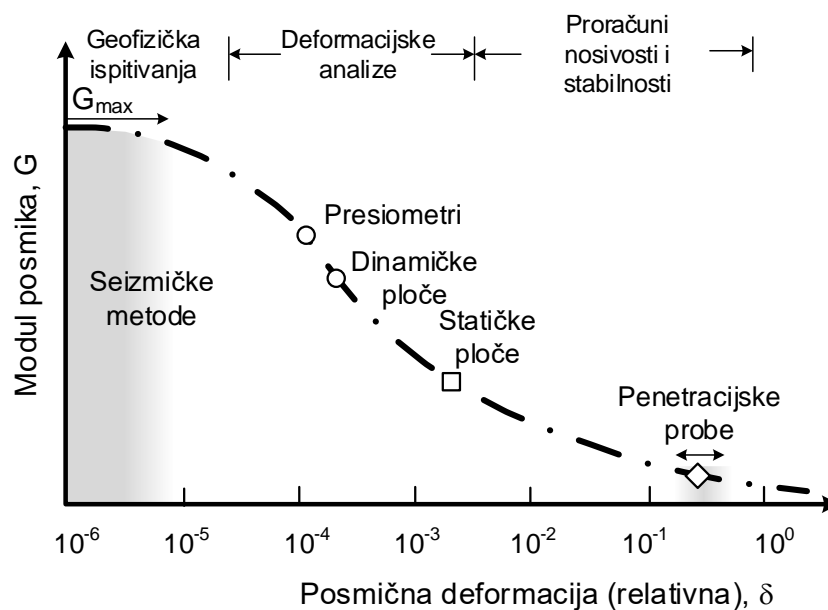
2.4. Dinamička svojstva tla

Površina terena može biti stjenovita, u različitom stanju trošnosti, ili površinske slojeve mogu formirati različite vrste tla. Tradicionalno se geomedij na površini, u analizama dinamičkih svojstava naziva „tlo“ bez obzira radi li se stvarno o glinama, prahovima, pijescima i šljuncima ili se radi o stijenama u inženjerskom smislu.

Dakle, kod opisivanja jakog gibanja tla potrebno je uzeti u obzir (mehaničko) stanje lokalnog tla. Utjecaj stanja lokalnog tla na parametre gibanja tla se nazivaju „učinci lokalnog tla“, odnosno ono se mjeri su dinamička svojstva tla. Cijeli proces određivanja parametara tla povezan je s brojnim disciplinama poput inženjerske seizmologije, strukturne geologije, geofizike i geotehničkog potresnog inženjerstva. Kod lokalnih učinaka tla uzima se u obzir tlo koje se proteže od površine do dubine prvih 50 metara (Presti D. i Pallara O., 2007).

Parametri tla koji utječu na širenje valova i deformacije tla se mogu podijeliti na parametre kod velikih i malih deformacija. Parametri malih deformacija se odnose na deformacije tijekom prolaska valova visoke frekvencije (10 Hz – 200 Hz) odnosno kraćeg perioda, dok se parametri za velike deformacije odnose na deformacije tijekom prolaska valova niske frekvencije (0,1 Hz – 2 Hz) odnosno duljeg perioda (Sachan A., 2015).

Parametri vezani uz male deformacije i širenje valova su: krutost tla, prigušenje valova, Poissonov koeficijent i gustoća tla. Krutost i prigušenje valova ne samo da su bitni kod malih deformacija, već su bitni parametri kod srednjih do velikih deformacija (Slika 4.). Mjera za krutost je modul posmika G koji se pokazao kao naročito važno dinamičko svojstvo tla.



Slika 4. Odnos modula posmika G ovisno o deformaciji (Acta Geotechnica Slovenica)

Postoji broj raznih in-situ (terenskih) i laboratorijskih postupaka za određivanje dinamičkih svojstava tla, od kojih su neki namijenjeni za određivanje svojstava tla za male deformacije i za velike deformacije. Kod malih deformacija terenski pokusi koji se koriste su: seizmička refleksija i refrakcija, analize spektra površinskih valova, „crosshole“ i „downhole“ metoda (metode seizmičke karotaže). Dok su laboratorijski: „resonant column test“, „ultrasonic pulse test“ i „piezoelectric bender test“. Kod većih deformacija, terenski pokusi se dijele na: standardni penetracijski test (SPT), statički penetracijski test (CPT), dilatometar i presiometar. Dok su laboratorijski pokusi za veće deformacije: triaksijalna čvrstoća, ciklički test izravnog posmika, posmični torzijski ciklički test.

Kriteriji sloma tla ili stijena (čvrste supstance geomedija) uvijek su neposredno vezani uz definicije posmične čvrstoće i parametre koji ju definiraju. Kada razina posmičnog naprezanja dosegne vrijednosti posmične čvrstoće, postaje upitno samo kada i kako će se slom dogoditi. Zato problem predstavlja posmično naprezanje izazvano potresnim valovima i posmična deformacija koja se tada razvija. Kada su relativne

deformacije vrlo male, manje od $3 \cdot 10^{-4}$ [%], smatra se da je odnos naprezanje-deformacija u području elastičnosti pa se kao parametar za definiranje posmične čvrstoće može uzeti maksimalni modul posmika G_{\max} . Vrijednost tog modula može se odrediti iz primjerice seizmičkih metoda određivanjem brzine S vala:

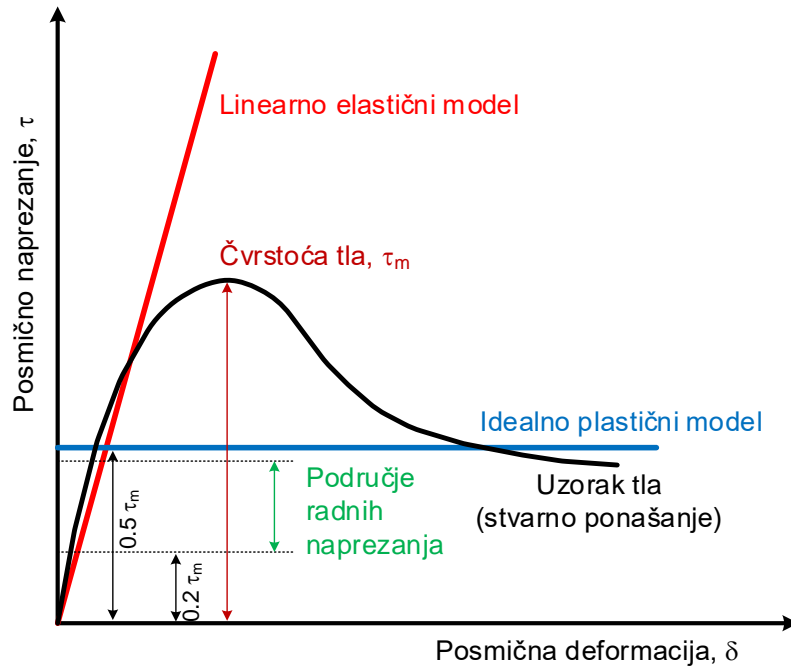
$$G_{\text{dyn}} = \rho \cdot V_s^2 \equiv G_{\max}$$

G_{dyn} označava dinamički modul posmika pri vrlo malim deformacijama koji se najčešće određuje in-situ seizmičkim metodama. U tom je izrazu ρ gustoća geomedija, a V_s brzina posmičnih SH valova.

U takvim se analizama pretpostavlja da je geomedij homogen, elastičan i izotropan (HEI) što najčešće zadovoljava inženjersku praksu.

Tla pokazuju nelinearna svojstva u smislu odnosa naprezanja i deformacija i ne ponašaju se elastično već plastično (Slika 5.). Kod manjih deformacija, krutost tla je najveća, a prigušivanje valova je najmanje. Kod većih deformacija, ta pojava je obrnuta, jer kod većih deformacija dolazi do smanjenja zbijenosti, odnosno krutost tla pada pa tada raste prigušenje valova. Postoje tri modela odnosa naprezanje-deformacija, a to su: linearno elastičan modeli, idealno plastičan modeli i konstitucijski modeli (Kramer, 1996).

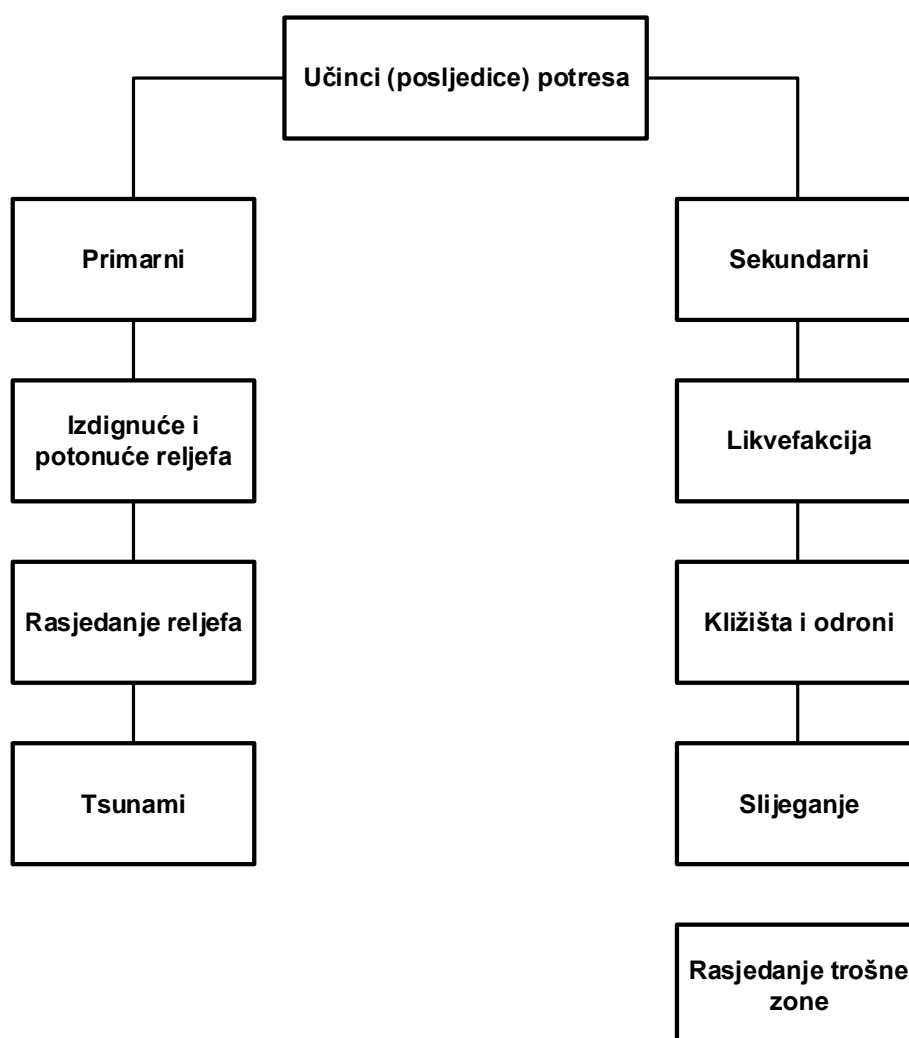
Prigušivanje valova predstavlja disipaciju energije tijekom prolaska seizmičkih valova kroz geomedij. Ponašanje prigušivanja se određuje omjerom prigušenja, koji raste s porastom deformacije. Omjer prigušenja ovisi o već navedenoj deformaciji, frekvenciji seizmičkih valova i broju ponavljanja cikličkog opterećenja.



Slika 5. Stvarno ponašanje tla (Roje-Bonacci, 2007)

3. Učinci potresa na okoliš i njihova podjela

Učinci potresa se općenito i uobičajeno nazivaju seizmički hazardi. Hazard je pojam koji opisuje potencijalnu štetu ili gubitak života i zdravlja ljudi, štete na materijalnim dobrima i inženjerskim konstrukcijama te štete u okolišu. Seizmički hazard je pojam vezan uz hazarde koje uzrokuje (ili može uzrokovati) potres. S obzirom na rastuće potrebe da se procjenjuju i učinci potresa, odnosno njihovo djelovanje na okoliš, pokazalo se praktično seizmičke hazarde podijeliti na primarne i sekundarne.



Slika 6. Osnovni učinci potresa na okoliš

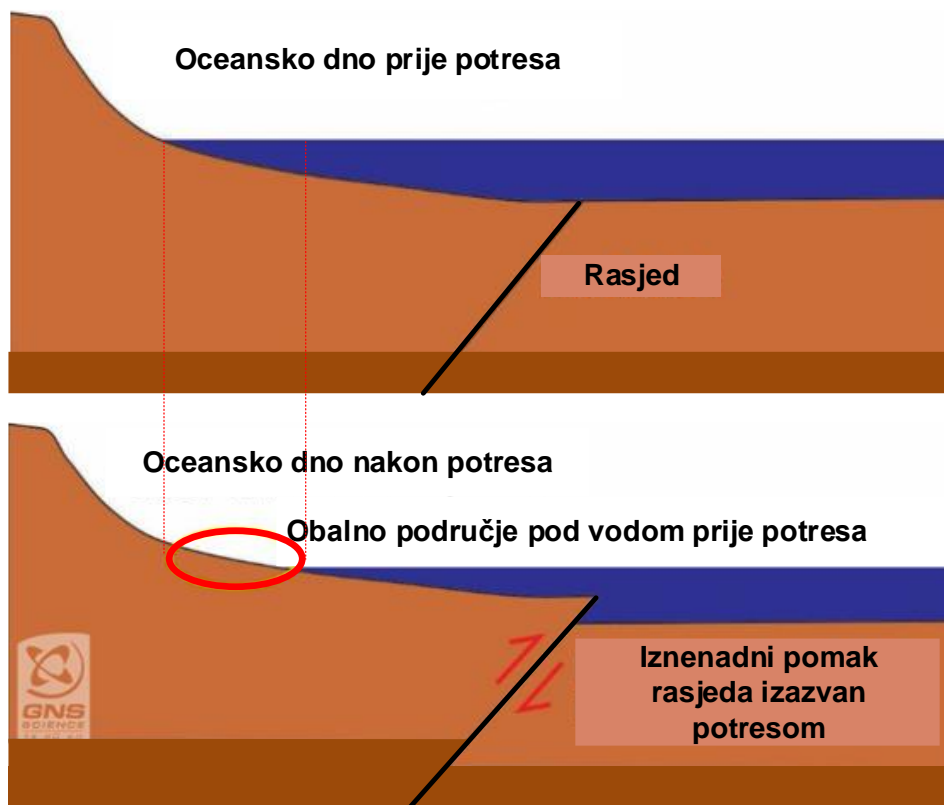
3.1. Primarni seizmički hazardi

Primarni seizmički hazardi su oni koji su izravne posljedice poremećaja i pomaka u litosferi. Te posljedice imaju velike razmjere pa se mogu smatrati regionalnim ili čak globalnim, a razlikuju se: izdignuća i potonuća reljefa (površine), rasjedanja reljefa (površine) i tsunamiji.

3.1.1. Izdignuće i potonuće reljefa

Izdignuće i potonuće površine predstavlja vertikalni pomak litosfere te kontinentalne (i oceanske) kore izazvan interakcijom tektonskih i površinskih procesa. U površinske procese ubrajaju se erozija, transport i sedimentacija materijala. To su procesi koji troše postojeće stijene, transportiraju rastrošen materijal i stvaraju slojeve sedimenata.

Proces izdignuća površine najjednostavnije se objašnjava na primjeru nastajanja planinskih lanaca. Kada tektonske ploče konvergiraju, jedna ploča se podvlači pod drugu zbog čega dolazi do izdignuća stijenske mase. Kako se stijenska masa uzdiže, povećava se strmina izdignute stijenske mase, radi čega dolazi do povećanja broja i ubrzavanja erozijskih procesa. Uslijed povećane erozije dolazi do daljnjeg izdizanja stijenske mase zbog izostazije i konvergencije tektonskih ploča. Proces izdizanja stijenske mase prestaje kada stijenska masa dosegne određenu kritičnu visinu, jer tada zbog gravitacijskog djelovanja stijenska masa dođe u ravnotežu sa silama koje guraju stijensku masu prema gore.



Slika 7. Izdignuće reljefa morskoga dna (The Spinoff)

Potonuće površine terena, odnosno slijeganje terena u općem smislu, je jedan od učinka koji se odvija tijekom potresa zbog deformacija koje se zbivaju u stijenskim masama litosfere. Takve su pojave karakteristične u vulkanski aktivnim zonama u kojima seizmički inducirani lateralni pomaci stijenske mase (horizontalna ekspanzija) mogu posljedično izazvati sub-vertikalne pomake nadslojeva, a time i površine terena, prema zoni ekspanzije. Takve zone mogu zahvatiti vrlo velike površine pa potonuće reljefa može biti znatno. U slabo konsolidiranom geomediju, naprezanja uzrokovana potresom mogu izazvati istiskivanje tekućina (podzemne vode ili nafte) iz formacija pa će se kao posljedica ubrzane konsolidacije praznih pornih prostora dogoditi slijeganje nadslojeva, odnosno potonuće površine terena.

3.1.2. Rasjedanje reljefa

Kod pomicanja tektonskih ploča dolazi do sloma stijenske mase pri čemu se oslobađa u njoj akumulirana energija. Kada se slom (trag loma) produlji do površine terena, dolazi do trajne deformacije, odnosno do rasjedanja površine. Ova pojava se odvija kod potresa s plitkim fokusom te kod potresa većih magnituda (više od 6,5 Richterove magnituda). Međutim, ona nije ograničena samo na potrese velikih magnituda, već se također može pojaviti i kod potresa magnituda manjih od 5,5 po Richteru. Pomaci koji pri tome nastaju mogu biti vertikalni i horizontalni.

Slom se odvija po glavnom rasjedu te se istovremeno s njim razvijaju manje pukotine rasjedanja. S obje strane rasjeda tako nastaje mreža pukotina koja se grana kao neuralna mreža. Iako se najveći pomaci pojavljuju na glavnome rasjedu, pomaci na „sporednim“ rasjedima u udaljenijim dijelovima mreže, također mogu biti znatni (i više od 1 metar). Iako štete nastale rasjedanjem površine čak i kod malih pomaka mogu znatne, rasjedanje površine uglavnom ne stvara tolike štete kao samo potresanje tla, jer je površina terena zahvaćena rasjedanjem nekoliko reda veličine manja od one koju zahvaća djelovanje seizmičkih valova.

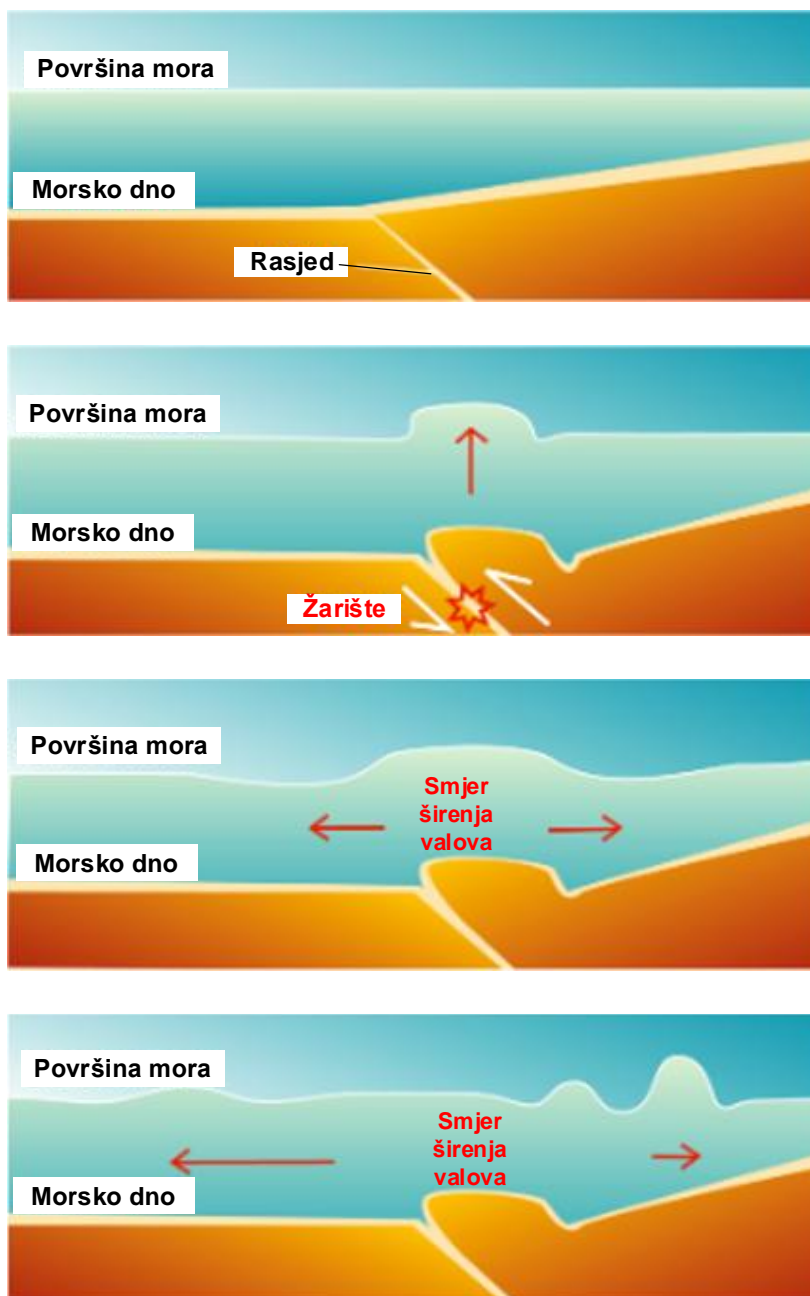


Slika 8. Rasjedanje površine reljefa (University of Canterbury)

3.1.3. Tsunami

Tsunami je niz (serija) vodenih valova koji nastaju u oceanima, a čiji uzročnik može biti potres, vulkanska aktivnost i klizišta na oceanskom dnu. Visina vodenih valova može biti i veća od 30 metara. Energija tih serija je ogromna, usporediva s energijom potresa magnitude $M_L = 9$, pa razara sve što se nađe na putu. Potresi su najčešći uzročnici tsunamija na tektonskim granicama iz Pacifičkog vatrene prstena. To područje Pacifičkog oceana je poznato po seizmičkoj i vulkanskoj aktivnosti. Kada se oceansko dno na tektonskim granicama uzdiže ili spušta, dolazi do pomaka golemih masa oceanske vode zbog čega dolazi do nastajanja serije visokih vodenih valova. Tsunamiji su specifični po tome što se kreću brzinama od oko 800 kilometara na sat (radi usporedbe: brzina većih putničkih zrakoplova je 900 km/h) te gube malu količinu energije tijekom svojeg putovanja (zbog toga što su dugih valnih duljina). Na pučini visina valova nije naročito velika, međutim kako se približavaju obali valovi usporavaju,

a visina im raste, pa izgleda kao da ogromno vodeno tijelo, koje se gibalo u oceanu, konačno izlazi na kopno. Potrebno je navesti da ne proizvode svi potresi, valove tsunamija. Za stvaranje razornog vala tsunamija potreban je potres magnitude $M = 7,5$ ili više.



Slika 9. Inicijacija tsunamija (Unesco)

3.2. Sekundarni seizmički hazardi

Sekundarne hazarde možemo okarakterizirati kao sekundarne posljedice izazvane potresanjem tla. Obično se smatraju kao lokalni učinci na određenom prostoru. U sekundarne seizmičke hazarde spadaju: likvefakcija, klizišta i odroni, slijeganje i rasjedanje trošne zone.

3.2.1. Likvefakcija

Pojam likvefakcija povezuje veliki broj različitih inženjerskih fenomena u rahlim i saturiranim pijescima, ali su svi vezani uz pojave tečenja. Te se pojave dijele u tri osnovne grupe: tečenje likveficiranog tla (engl. flow liquefaction), ciklička mobilnost (engl. cyclic mobility) i površinska likvefakcija (engl. level-ground liquefaction).

Tečenje likveficiranog tla se može pojaviti u tekućinom zasićenim naslagama tla kada statičko posmično naprezanje premaši statičku posmičnu čvrstoću. Pri tome odnosi naprezanja i deformacija ne ovise o vremenu ili brzini njihovog razvoja, pa se takvo stanje općenito naziva „statičko“ (engl. steady state).

Ciklička mobilnost nastaje kada je statičko posmično naprezanje manje od statičke posmične čvrstoće, ali je cikličko posmično naprezanje dovoljno veliko da trenutačno i povremeno premaši vrijednost statičke posmične čvrstoće. Deformacije se razvijaju inkrementalno, ali mogu postati značajne na kraju gibanja tla koje može uzrokovati (jaki i dugotrajni) potres. Ta je pojava svojstvena i za rahle i zbijene pijeske, ali veličina deformacije se bitno smanjuje s povećanjem gustoće, odnosno zbijenosti.

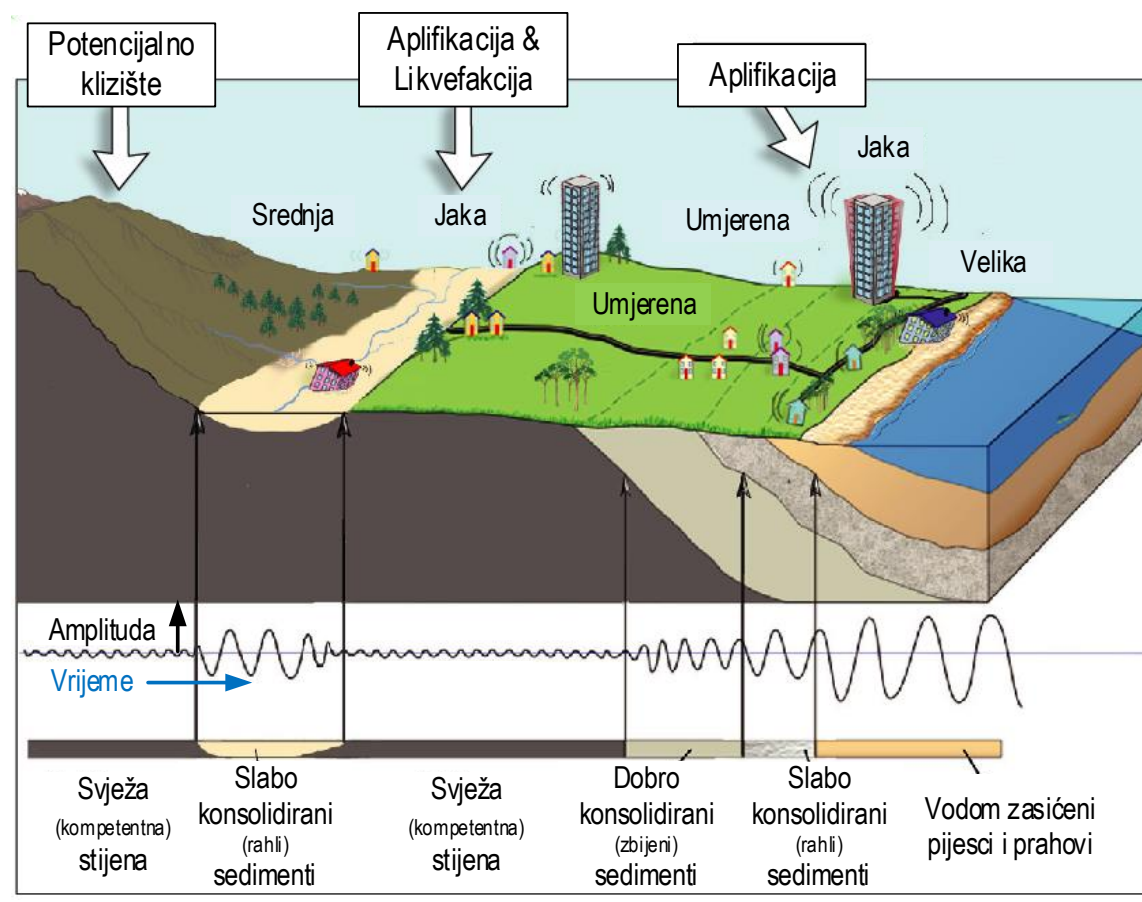
Površinska likvefakcija se pojavljuje kada je cikličko opterećenje (naprezanje) dovoljno veliko da se razvije dodatni tlak porne vode (engl. excess pore water pressure), čak i u odsutnosti drugih vanjskih statičkih opterećenja. Ta pojava se manifestira kao gibanje tla, post-potresnog slijeganje i hidraulički slom u pijescima („vrenje pijeska“).

Dominantni pomaci u tlu su sub-vertikalni pa su lateralni pomaci relativno mali. I ta je pojava svojstvena za rahla i zbijena tla.

U inženjerskoj praksi se nastoji definirati susceptibilnost (sklonost) neke vrste tla prema pojedinoj pojavi likvefakcije. Susceptibilnost nekog tla likvefakciji ovisi primarno o njegovom geotehničkom stanju (stanje naprezanja i zbijenosti, odnosno uvjeti gustoće) u vrijeme pojave potresa. Osim toga, vrlo je važna i definicija i procjena potencijala likvefakcije koja obuhvaća potresno opterećenje zajedno s rezistencijom nekog tla prema stvaranju stanja za tečenje tla, odnosno prema likvefakciji. Taj se otpor definira brojem ciklusa dinamičkog opterećenja u obliku određene razine cikličkog posmičnog naprezanja potrebnog za slom tla određene gustoće i zbijenosti. Osim laboratorijskih ispitivanja, za određivanje otpora likvefakciji su vrlo važni in-situ testovi kao što su SPT i CPT dinamičke geotehničke probe te geofizičke metode za određivanje brzine posmičnih valova.

U praksi je važno uočiti da likvefakcija može značajno promijeniti amplitudu i frekventni sadržaj gibanja površinskog tla (odziv) tijekom potresa. S porastom dodatnog tlaka porne vode dolazi do razmekšavanja tla pa se pomaci na površini tla mogu ozbiljno povećati čak i kada se akceleracija na površini smanjuje (Kramer, str.419). U saturiranim, ali i suhim pijescima takvi ciklički pomaci dovode do zbijanja (denzifikacije) površinskog sloja pa se očekuju slijeganja. Ona se mogu razviti gotovo odmah, tijekom djelovanja potresa, no u saturiranim se pijescima slijeganje može pojaviti i dosta kasnije, nakon potresa. Veličina slijeganja ovisi o gustoći i zbijenosti geomedija, ali i o amplitudi pomaka te trajanju potresanja.

Površinska likvefakcija uzrokuje slom tla i također može nastati i nakon potresa. Važno je uočiti potencijalni efekt razrahljenja pijeska, zbog tečenja porene vode, na reduciranje posmične čvrstoće što je bitan preduvjet sloma. Slom može nastati i zbog lateralne ekspanzije tla, koja se najčešće razvija postupno tijekom potresanja. Pri velikim amplitudama i/ili duljem trajanju potresa takav slom može izazvati znatne konačne pomake te uzrokovati velike štete.



Slika 10. Djelovanje seizmičkih valova u različitim tipovima geomedija (Earthscope ANGLE)

3.2.2. Klizišta

Klizišta predstavljaju jednu od ozbiljnih geološko-geotehničkih opasnosti, čije pojave mogu znatno promijeniti reljef okoline u kojoj živimo. Klizišta tla i odroni stijena su najrašireniji oblik destabilizacije prirodnih ili umjetnih kosina. Rasprostranjena su diljem svijeta te stvaraju značajne materijalne štete, ali su i stalna prijetnja i opasnost po život ljudi. Većina klizišta se stvara na prirodnim kosinama, u uvjetima kada posmične sile trenja na kliznoj plohi postanu nedostatne da spriječe klizanje mase tla niz padinu. Vrlo čest okidač aktivacije klizišta su promjene razine i tokova podzemne vode, odnosno promjene stanja na kontaktima dvaju geomedija vrlo različitih geotehničkih svojstava. Često međutim okidač može biti i djelovanje seizmičkih (posebno horizontalnih) sila,

odnosno značajno gibanje tla uzrokovano potresom. Učinak potresa na kosine koje su uvjetno (faktor sigurnosti blizu jedinične vrijednosti) do umjereno stabilne može kao posljedicu imati aktiviranje i razvoj klizišta. U velikom broju potresa koji su dokumentirani od 1789. godine prije Krista do danas, šteta koju su izazvala klizišta inicirana potresima, veća je od štete izazvane svim ostalim seizmičkim hazardima zajedno (Kramer, 1996).

Potresom na Aljaski 1964. godine, šteta nastala od klizišta se procijenila na oko 56% ukupne štete izazvane tijekom cijelog potresa.“ (Youd, 1978.; Wilson and Keefer, 1985, preuzeto iz Kramer, 1996). “1920. godine u Ningxiji, jednoj od provincija Kine potres pod nazvan Haiyuan, magnitude 8,5, prouzročio je stotine velikih klizišta čija je posljedica bila smrt više od 100 000 ljudi.“ (Close i McCormick, 1922, preuzeto iz Kramer, 1996).

Brojni principi i terminologija kojom se opisuju „prirodna“ klizišta mogu se koristiti i za klasifikaciju klizišta aktivirana potresom, primjerice: i) vrsta geomedija (tlo ili stijena), ii) karakter pomaka (isprekidani ili kontinuirani, engl. disrupted or coherent), iii) brzina klizanja, iv) dubina do klizne plohe, v) položaj procjedne linije i zasićenost vodom.

Klizišta izazvana potresima mogu se podijeliti u tri kategorije:

1. Isprekidana klizanja i parcijalni odroni (engl. disrupted slides and falls): događaju se na strmim padinama u geomediju koji je vrlo heterogene građe, diskontinuiran, fragmentiran i trošan. Brzine klizanja ili odrona su ekstremno velike i stvaraju značajne štete.
2. Koherentna ili kontinuirana klizanja (engl. coherent slides): nastaju na strmim do srednje strmim padinama, mase kliznog tijela ili stijenski blokovi se transliraju ili rotiraju na dubljim kliznim plohama. Brzine klizanja su manje nego kod isprekidanih klizanja.

3. Bočno širenje i tečenje (engl. lateral spreads and flows): odvija se na likveficiranom tlu zbog male rezidualne čvrstoće materijala. Klizanje se može razviti na skoro ravnim kosinama, a brzine klizanja i tada mogu biti prilično velike.

Pomoću povijesnih zapisa potresa te izdvojenih parametara (magnituda i udaljenost od izvora potresa), može se ustanoviti „potencijal“ pojave klizišta i odrona koje neki potres može aktivirati. Studijom iz 300 zabilježenih potresa u SAD-u, između 1958. i 1977. godine, ustanovljeno je da minimalna magnituda potresa koja će „pokrenuti“ klizište iznosi oko $M = 4$. (Keffer, 1984, preuzeto iz Kramer, 1996). Tablice (4. i 5.) prikazuju odnos između magnitude i potencijalnog klizišta do kojeg može doći tijekom potresa. S obzirom da se na hrvatskom području koriste drugi pojmovi za opisivanje klizišta, tablica 5. prikazuje grubi prijevod pojmova danih tablicom 4.

Tablica 4. Procjena magnitude potresa koja bi mogla izazvati klizanja tla (Keffer, 1984.)

M_L	Description
4,0	Rock falls, rock slides, soil falls, disrupted soil slides
4,5	Soil slumps, soil block slides
5,0	Rock slumps, rock block slides, slow earth flow, soil lateral spreads, rapid soil flows, subaqueous landslides
6,0	Rock avalanches
6,5	Soil avalanches

Tablica 5. Procjena magnitude potresa koja bi mogla izazvati klizanja tla (grubi prijevod na hrvatski)

M_L	Opis
4,0	Odroni kamenja, klizanje stijenskih blokova, odroni tla, parcijalna klizanja tla
4,5	Slom tla (kolaps), klizanje masa tla
5,0	Slom stijene (kolaps), klizanje stijenske mase i/ili stijenskih blokova, tečenje tla, blatni tokovi, lateralno širenje tla, klizišta na jezerskom i morskom dnu
6,0	Lavina kamenja
6,5	Lavina tla

Međutim, iako ova empirijska povezanost između magnitude potresa i mogućnosti nastanka klizišta daje procjenu stabilnosti kosine ovisno o jačini potresa, postoje i drugi parametri koji se trebaju uzeti u obzir. Oni se uglavnom odnose na trenutno geotehničko stanje kosine, primjerice ako je stanje na kliznoj plohi na granici sloma tada i veoma slabi potres može uzrokovati aktiviranje klizišta na toj lokaciji.

Udaljenost izvora potresa do kosine na kojoj se može razviti potencijalno klizište značajno ovisi o magnitudi i različita je za različite tipove klizišta. Na primjer, dezintegrirana klizanja i parcijalni odroni se teško mogu pojaviti na udaljenosti većoj od 15 km od izvora potresa kod potresa magnitude $M = 5$. Međutim kod potresa magnitude $M = 7$ ona se mogu pojaviti i na udaljenostima čak do 200 km (Kramer, 1996).

Do pojave klizišta dolazi kada posmična naprezanja dostignu ili prekorače posmičnu čvrstoću tla na kliznoj plohi. Kada su posmična naprezanja u nekoj kosini toliko velika da se približavaju posmičnoj čvrstoći tla na kliznoj plohi, dovoljno je veoma malo dinamičko naprezanje da bi došlo do pojave klizišta. To govori da je seizmička stabilnost kosine uvjetovana statičkom stabilnosti kosine te da se seizmička stabilnost

kosine određuje iz statičke stabilnosti kosine uz dodatak dinamičkog naprezanja izazvanog potresom. Utjecaj dinamičkog djelovanja potresa neminovno mijenja odnos naprezanje-deformacija geomedija u tijelu kosine.

Seizmička nestabilnost se može grupirati u dvije kategorije:

1. Inercijske nestabilnosti nastaju tamo gdje je posmična čvrstoća približno konstantna, međutim deformacije su izazvane kratkotrajnim i lokalnim dinamičkim naprezanjima izazvanim potresom te premašuju posmičnu čvrstoću geomedija.

2. Oslabljujuće nestabilnosti su one kod kojih potres svojim djelovanjem smanjuje mehanička svojstva geomedija zbog čega je tada smanjena i njegova sposobnost „otpora“ nadolazećim naprezanjima uzrokovanih potresnim valovima.

Kod pojave potresa dolazi do deformacija u kosinama. Njihov dinamički odziv (engl. dynamic response) ovisi o geometriji i krutosti geomedija u tijelu kosine, te o amplitudi i frekvenciji gibanja tla u temeljnom tlu ispod klizne plohe. Kod veoma krutih tala i/ili kod tala koja su zahvaćena potresom niske frekvencije (duga valna duljina), lateralni pomaci partikularnih masa u tijelu kosine će biti gotovo u fazi. Kod mekanih tala i/ili tala podvrgnutim potresom visoke frekvencije, lateralni pomaci će biti izvan faze, tako da će inercijske sile na različitim točkama potencijalne klizne mase djelovati u suprotnom smjeru, pa će inercijske sile biti mnogo manje.

Posljedice djelovanja inercijskih sila na potencijalnoj kliznoj masi mogu se računati pomoću dinamičke analize odnosa naprezanje-deformacija (Chopra, 1966, preuzeto iz Kramer, 1996). Horizontalna komponenta seizmičkog naprezanja se integrira na potencijalnu plohu sloma da bi se odredile resultantne sile koja ovise o vremenu i koje djeluju na potencijalnu plohu sloma. Ako se suma tih sila podijeli s masom tla iznad plohe sloma, može se odrediti prosječna akceleracija te mase, odnosno tijela klizišta (Kramer, 1996)



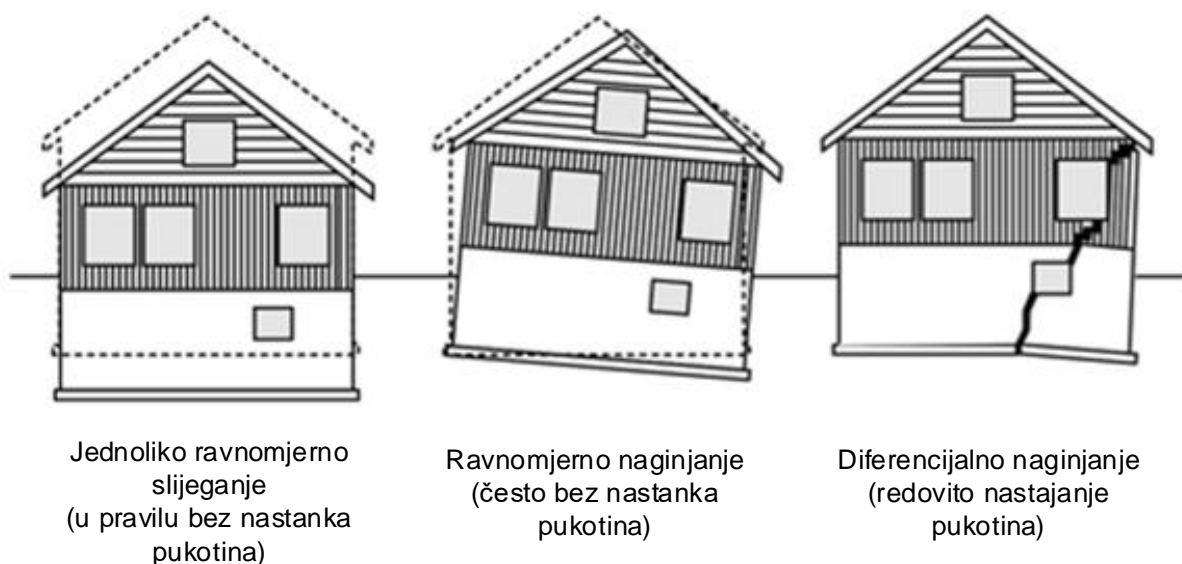
Slika 11. Prikaz klizišta (LiveScience)

3.2.3. Slijeganje

Potonuće površine terena ili drugom riječju slijeganje je jedan od učinka koji se odvija tijekom potresa zbog vibracija koje izaziva potres. Samo slijeganje može biti uniformno i diferencijalno. Uniformno slijeganje je ono kod kojeg se cijela površina ispod građevine sliježe jednoliko, dok je diferencijalno slijeganje kada pojedini dijelovi površine ispod građevine slijegaju različito. Sam proces slijeganja može uzrokovati značajne materijalne štete na građevinama i konstrukcijama. Međutim diferencijalno slijeganje je slijeganje koje može izazvati veću štetu od uniformnog slijeganja s obzirom da jedan dio građevine-konstrukcije sliježe znatnije od drugog dijela.

Slijeganje se odvija na područjima s rahlim tлом, odnosno u tlu koje nije dovoljno konsolidirano (koherentna tla) i u tlu koje nije dostatno zbijeno (nekoherentna tla).

Stoga uzroci slijeganja tijekom potresa mogu biti: konsolidacija tla ili slom tla, zbijanje pijeska i šljunka zbog trešnje tla ili zbog učinka likvefakcije.



Slika 12. Osnovne vrste slijeganja objekta (Civil Engineers forum)

3.2.4. Rasjedanje trošne zone

Trošna zona je općenito pojam kojim se opisuje i označava površinski geomedij čija su fizičko-mehanička svojstva značajno slabija u odnosu na svojstva izvorne stijene (u geološkom smislu svježije stijene) od koje su te površinske formacije nastale. U užem smislu se to odnosi na nadsloj iznad kompetentne stijene (engl. bedrock). U inženjerskoj praksi se razlikuju formacije trošne (razlomljene i diskontinuirane) stijenske mase i tla koja su krajnji produkti dezintegracije izvorne stijene. U inženjerskoj seizmologije se uobičajeno ta zona naziva „sedimenti“, iako taj naziv ne odražava osnovni smisao te zone: slaba fizičko-mehanička svojstva, heterogenost, anizotropnost, složeni odnosi naprezanje-deformacija.

Trošna zona ili trošni sloj se još naziva „zona niskih brzina“ (engl. low velocity layer). Zašto se tako naziva? U toj zoni dolazi do smanjenja brzina širenja seizmičkih valova zbog disipacije i apsorpcije seizmičke energije. Znatno dio energije se „utroši“ na gibanje supstance geomedija, jer su svojstva za prijenos te mehaničke energije znatno manja nego u dobro konsolidiranim sredinama. Bitna stavka zone niske brzine je ta da je primjerice apsorpcija seizmičkih valova 4 puta veća od apsorpcije u dobro konsolidiranim tlima, a to značajno utječe na vrijeme prolaska seizmičkih valova i amplifikaciju potresnog djelovanja.

Osnovni seizmički parametri trošne zone su brzina širenja seizmičkih valova, oblik uslojavanja te debljina tih slojeva. Slojevi se promatraju kao seizmičke sredine, a najčešće metode za istraživanje i određivanje tih parametara su seizmička karotaža (engl. uphole, downhole, crosshole), seizmička refrakcija i višekanalna analiza površinskih valova (engl. multichannel analysis of surface waves, MASW). Vrijednosti tih parametara su lokalno specifične, jer je svaka lokacija „jedinstvena“ po svojoj građi, sastavu i rasporedu geomedija. Zato je potrebno za svaku lokaciju zasebno odrediti svojstva, odnosno seizmičke parametre tla.

4. Zaključak

Potresi kao i svaki drugi geohazard mogu imati štetan učinak na ljudsko zdravlje (život), okoliš i materijalno dobro. Glavna osobina potresa je ta što su oni nepredvidivi, te se ne može ustanoviti da li će neko područje zahvatiti potres danas, za mjesec dana ili godinu dana. S druge strane geotehničko-potresno inženjerstvo danas raspolaže dostatnim znanjem o potresima i u mogućnosti je ustanoviti područja kojima prijeti potres i kojim bi intenzitetom ili magnitudom on mogao „udariti“.

Osim što potres negativno utječe na urbane sredine u vidu potresanja tla, on sa okolinom do koje dopijuju seizmički valovi može izazvati niz učinaka koji se najvjerojatnije ne bi javili da nije bilo potresa. Te učinke, dijelimo na: primarne i sekundarne učinke potresa.

Primarni učinci potresa, su učinci direktno izazvani poremećajima ili pomakom stijenske mase tijekom kojeg dolazi do stvaranja potresnog vala. S obzirom na njihov veliki razmjor mogu se smatrati regionalnim ili globalnim učincima, dok su sekundarni učinci ograničeni na lokalno područje na kojem učinci potresa ovise o lokalnim parametrima tla.

Razvojem geotehničkog potresnog inženjerstva, unaprijedilo se znanje o prirodi potresa, kako oni nanose štetu i kako smanjiti njihov učinak. Vrlo je bitno i u budućnosti unaprjeđivati područje potresnog inženjerstva kako bi se štete nastale potresima minimizirale na najmanju moguću razinu.

5. Literatura

[1] Agoha C.C., Opara A.I., Okereke C.N., Onwubuariri C.N., Emberga T.T., Inyang G.E., Ugwuegbu I.E., Chilaka J.C (2015). Weathered Layer Determination and Its Effects on Engineering Structures: Case Study of Parts of the Niger. World Journal of Environmental Engineering. 3(2), pp. 40-51.

[2] Chopra A. K. (1966), Earthquake effects on dams, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley

[3] Close U. i McCormick E. (1922), Where the mountains walked, National Geographic, 41(5), pp 445-464

[4] Das, B. M., Ramana, G. V. (2010). Principles of Soil Dynamics, Cengage Learning; 002 edition.

[5] Gutdeutsch R., Kaiser D., Jentzsch G. (2002). Estimation of earthquake magnitudes from epicentral intensities and other focal parameters in Central and Southern Europe. Geophysical Journal International. 151(3), pp. 824–834.

[6] Halif M.N.A., Sabki S.N. (2005). The Physics of Tsunami: Basic understanding of the Indian Ocean disaster. American Journal of Applied Sciences. 2 (8), pp. 1188-1193.

[7] Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice Hall.

[8] Kasumović, M., Skoko, D., (1969), Seizmologija, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Zagreb

[9] Keefer D. K. (1984), Landslides caused by earthquakes, Geologic Society of America Bulletin, 95(2), pp 406-421

[10] Kurfeß D. (2008), Crustal uplift and subsidence due to the interaction between tectonic and surface processes – an integrated 3D numerical approach for spatial quantification (Disertacija), Geophysikalisches Institut, Universit at Karlsruhe

[11] Lee S. J. et al. (2011), Earthquake Magnitude [Online]. Dostupno na: https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc256/feb1_2012_magnitude

[12] Martin P.L. (1987). Geological investigations of the Vermillion Creek coal bed in the Eocene Niland Tongue of the Wasatch Formation, Sweetwater County, Wyoming. Washington : U.S. G.P.O.

[13] Oluić M., (2015), POTRESI: uzroci nastanka i posljedice, s posebnim osvrtom na Hrvatsku i susjedna područja. Zagreb : Prosvjeta

[13] Presti D., Oronzio P., Mesni E. (2006). Characterization of soil deposits for seismic response analysis. U: Koseki J., Callisto L. ur: Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis: A Collection of Papers of the Geotechnical Symposium in Rome. New York: Springer-Verlag New York Inc. str. 109-157.

[14] Roje-Bonacci T. (2007), Mehanika tla, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet

[15] Takada Y., Fukushima Y. (2013). Volcanic subsidence triggered by the 2011 Tohoku earthquake in Japan. Nature Geoscience. 6(8), pp. 637–641.

[16] Sachan A. (2015). Dynamic Properties of soils: High Strain & Low Strain Amplitude Testing. Dostupno na:

https://www.researchgate.net/publication/283496134_Dynamic_Properties_of_soils_High_Strain_Low_Strain_Amplitude_Testing [25.05.2019.]

[17] Strelec S., Stanko D., Gazdek M., (2016), Empirical correlation between the shear-wave velocity and the dynamic probing heavy test: case study, Varaždin, Croatia, Acta Geotechnica Slovenica,13(1) , pp 1-15

[18] Wilson R. C.i Keefer D. K. (1985), Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, Evaluating Earthquake Hazard sin Los Angeles Region, Professional Paper 1360, pp 317-345

[19] Wood D. (2019), What is the Epicenter of an Earthquake? - Definition & Location [Online]. Dostupno na: <https://study.com/academy/lesson/what-is-the-epicenter-of-an-earthquake-definition-location.html#/lesson>

[20] Youd T. L. (1978), Major cause of earthquake damage is ground failure, Civil Engineering, 48(4), pp 47-51

[21] Association of Environmental and Engineering Geologists (2019), Land Subsidence [Online]. Dostupno na: <https://www.aegweb.org/page/LandSubsidence> [20.05.2019.]

[22] Differential Settlement of Soil – Factors To Consider in Foundation Design, Civil Engineers Forum [Online], Dostupno na: <https://civilengineersforum.com/soil-settlement-foundation-design-factors/> [20.05.2019.]

[23] National Geographic Society (2019) , TSUNAMIS 101 [Online]. Dostupno na: <https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/tsunamis/> [20.05.2019.]

[24] Potres, Hrvatska Enciklopedija [Online], Dostupno na:

<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49792> [20.05.2019]

[25] Richter scale, Encyclopaedia Britannica [Online], Dostupno na:

<https://www.britannica.com/science/Richter-scale> [20.05.2019.]

[26] Richter Scale vs Mercalli Scale, Difference Between | Descriptive Analysis and Comparisons [Online], Dostupno na: <http://www.differencebetween.info/difference-between-richter-scale-and-mercalli-scale> [20.05.2019.]

[27] Sciury. S., Earthquakes and Waves [Online], Dostupno na:

<https://suesciury.wixsite.com/tvscience8/copy-of-plate-tectonics> [20.05.2019.]

[28] Seismic Geohazards & Earthquake Hazard Maps: Alaska emphasis, Earthscope ANGLE [Online], Dostupno na:

https://serc.carleton.edu/ANGLE/educational_materials/activities/205530.html

[20.05.2019]

[29] The causes of Tsunamis, North-Eastern And Mediterranean Tsunami Information Center [Online], Dostupno na:

[http://neamtic.ioc-](http://neamtic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=208&Itemid=441)

[unesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=208&Itemid=441](http://neamtic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=208&Itemid=441)

[20.05.2019.]

[30] UC geologists investigate surface faulting from Kaikoura earthquake, UC Science [Online], Dostupno na:

<https://www.canterbury.ac.nz/science/science-news/archive/2017/uc-geologists-investigate-surface-faulting-from-kaikoura-earthquake.html> [20.05.2019.]

[31] What is a Landslide?, LiveScience [Online], Dostupno na:

<https://www.livescience.com/32373-what-is-a-landslide.html> [20.05.2019.]

[32] When the seafloor surges out of the ocean – coastal uplift explained, The Spinoff [Online], Dostupno na:

<https://thespinoff.co.nz/featured/17-11-2016/when-the-seafloor-surges-out-of-the-ocean-coastal-uplift-explained/> [20.05.2019.]

5.1. Popis slika

Slika 1. Vrste i način širenja seizmičkih valova.....	5
Slika 2. Geometrijska notacija potresa.....	6
Slika 3. Nomogram za određivanje Richterove magnitude potresa.....	11
Slika 4. Odnos modula posmika G ovisno o deformaciji.....	17
Slika 5. Stvarno ponašanje tla.....	19
Slika 6. Osnovni učinci potresa na okoliš	20
Slika 7. Izdignuće reljefa morskoga dna	22
Slika 8. Rasjedanje površine reljefa	24
Slika 9. Inicijacija tsunamija	25
Slika 10. Djelovanje seizmičkih valova u različitim tipovima geomedija	28
Slika 11. Prikaz klizišta	32
Slika 12. Osnovne vrste slijeganja objekta.....	33

5.2. Popis tablica

Tablica 1. Richterova ljestvica (Richterove magnitude potresa).....	10
Tablica 2. Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS) ljestvica intenziteta potresa.....	12
Tablica 3. Aproximativni odnos intenziteta MCS ljestvice i Richterove magnitude.....	13
Tablica.4 Procjena magnitude potresa koja bi mogla izazvati klizanja tla.....	30
Tablica 5. Procjena magnitude potresa koja bi mogla izazvati klizanja tla (grubi prijevod na hrvatski).....	31