

Primljen / Received: 23.6.2020.

Ispravljen / Corrected: 30.10.2020.

Prihvaćen / Accepted: 3.11.2020.

Dostupno online / Available online: 10.11.2020.

Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva

Autori:

Doc.dr.sc. **Mario Bačić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

mario.bacic@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Tomislav Ivšić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

tomislav.ivsic@grad.unizg.hrProf.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Pregledni rad

Mario Bačić, Tomislav Ivšić, Meho Saša Kovačević

Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva

Ovaj rad daje širi pregled uloge geotehnike u potresnom inženjerstvu te obuhvaća niz praktičnih primjera kvantifikacije geotehničkih seizmičkih pokazatelja za potrebe izgradnje pojedinih objekata, kao i osvrt na nadolazeće promjene u sadašnjim projektnim normama koje evaluiraju utjecaj tla na građevine u potresnim uvjetima. S obzirom na seizmičku aktivnost područja Hrvatske, istaknuta je nužnost sveobuhvatnog pristupa seizmičkom mikrozoniranju koji uzima u obzir čitav niz pokazatelja, od litoloških, inženjerskogeoloških i hidrogeoloških karakteristika te položaja aktivnih rasjeda, do identifikacije nestabilnih padina i zona izraženog likvefakcijskog potencijala, za što je potrebna provedba opsežnih geofizičkih i geotehničkih istraživanja.

Ključne riječi:

geotehnika, amplifikacija seizmičke pobude, likvefakcija, klizanje tla, seizmičko mikrozoniranje

Subject review

Mario Bačić, Tomislav Ivšić, Meho Saša Kovačević

Geotechnics as an unavoidable segment of earthquake engineering

A broader overview of the role of geotechnics in earthquake engineering is given, and a set of practical examples of the quantification of geotechnical seismic indicators for construction of individual buildings is provided. An overview of oncoming changes to the current design standards for evaluating the effect the soil has on buildings in earthquake conditions is also given. Considering the level of seismic activity in Croatia, the need for adopting a comprehensive approach to seismic microzoning is emphasized, which involves a whole array of indicators, from lithological, engineering geological, and hydrogeological properties, and position of active faults, to identification of unstable slopes and zones of pronounced liquefaction potential, for which extensive geophysical and geotechnical investigations are required.

Key words:

geotechnics, amplification of seismic excitation, liquefaction, landslide, seismic microzoning

Übersichtsarbeit

Mario Bačić, Tomislav Ivšić, Meho Saša Kovačević

Geotechnik als unvermeidliches Segment der Erdbebentechnik

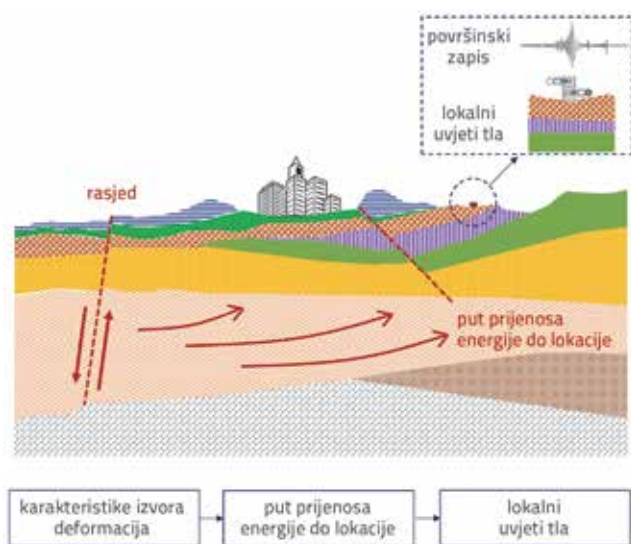
Diese Arbeit bietet einen umfassenden Überblick über die Rolle der Geotechnik in der seismischen Technik und enthält eine Reihe praktischer Beispiele für die Quantifizierung geotechnischer seismischer Indikatoren für den Bau einzelner Objekte sowie einen kurzen Einblick in die bevorstehenden Änderungen der aktuellen Planungsnormen, mit denen die Auswirkungen des Bodens auf Gebäude unter seismischen Bedingungen bewertet werden. In Anbetracht der seismischen Aktivität in Kroatien wird die Notwendigkeit eines umfassenden Ansatzes für die seismische Mikrozonierung hervorgehoben, der eine Reihe von Indikatoren berücksichtigt, von lithologischen, technisch-geologischen und hydrogeologischen Merkmalen sowie der Position aktiver Verwerfungen bis hin zur Identifizierung instabiler Hänge und Zonen mit ausgeprägtem Verflüssigungspotential, wofür umfangreiche geophysikalische und geotechnische Untersuchungen notwendig sind.

Schlüsselwörter:

Geotechnik, Verstärkung der seismischen Anregung, Verflüssigung, Erdbeben, seismische Mikrozonierung

1. Uvod

Potres je posljedica oslobađanja velike količine energije uslijed pomicanja ploča Zemljine kore na većim dubinama i predstavlja geohazard velike razorne snage, s teškim posljedicama za ljude i građevine na površini [1]. Unatoč brojnoj literaturi koja se bavi genezom potresa [2, 3], kao i geotehničkom ulogom u potresnom inženjerstvu [4, 5], činjenica je da se potresi stavlja u fokus najčešće tek nakon značajnijih potresnih događaja. Međutim, kako je potresno inženjerstvo, zajedno sa svojim geotehničkim dijelom, disciplina koja "još uvijek uči", svaki novi jači svjetski potres donosi nove spoznaje, a često i promjene u inženjerskoj praksi i propisima [6]. Jednako tako, povećani broj zapisa potresa i razvoj uređaja poboljšavaju baze podataka za određivanje seizmičnosti, te omogućuju objektivnije određivanje seizmičkog inputa za inženjerske aplikacije. Posljednji jači potres u Zagrebu, iz ožujka 2020. godine [7], je pokazao da, unatoč znanju i kapacitetima znanstvene i stručne zajednice, praktična implementacija znanja najčešće izostaje, ponajviše zbog nedovoljno reguliranih zakona i propisa. To je u najvećoj mjeri posljedica viđenja potresa kao "apstraktnog" hazarda, suprotno "realnim / vidljivim" hazardima kao što su poplave, klizišta, požari, itd. Zbog toga integrirani pristup suočavanja s potresom, njegovim uzrocima i njegovim posljedicama, u pravilu izostaje, iako procjena potresne opasnosti i djelovanja na građevine, uključivo i njegov geotehnički dio, predstavlja obvezni dio građevinskog projektiranja što je u Hrvatskoj obuhvaćeno Eurokodom 8 [8]. U toj normi, kao i ranijim seizmičkim propisima (posebice za građevine s izraženim sigurnosnim aspektima i važnosti kao što su energetske objekte npr. nuklearne elektrane ili LNG terminali, velike brane ili mostovi), ističe se nužnost razvoja seizmičkih projektnih kriterija karakterističnih za predmetnu lokaciju izgradnje, koji moraju uzeti u obzir i lokalnu geologiju, seizmičnost, geotehničke uvjete i prirodu projekta.



Slika 1. Put potresnih valova od žarišta do lokacije građevine

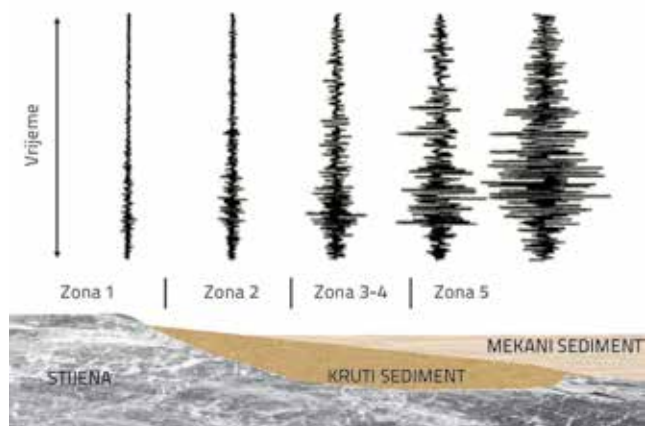
Na slici 1. je shematski prikazan put potresnih valova od žarišta (izvora) u dubini Zemljine kore, kroz geološke formacije u podzemlju i temeljno tlo na lokaciji građevine do površine terena na kojoj se pomaci tla manifestiraju kao djelovanja na građevine i infrastrukturu. Pomaci na površini terena su posljedica prolaska i modifikacija valova duž cijelog navedenog puta.

Određivanje karakteristika izvora i puta do određene razmatrane lokacije obično su u domeni seizmologije i strukturne geologije, a lokalni uvjeti tla predmet su inženjerske geologije i geotehnike. Geotehnika promatra naslage tla iznad osnovne stijene kao "konstrukciju" koja pri potresnoj pobudi iz dubine ima svoj odziv i dominantna gibanja, i koju čine materijali prepoznatljivih mehaničkih (krutost, čvrstoća, prigušenje) i hidrauličkih svojstava. I oblik spektra odziva gibanja tla određen je relativnim utjecajima spektralnih značajki izvora potresa u regiji i atenuacijskih značajki geoloških materijala koji prenose seizmičke valove od osnovne stijene do lokacije. Geotehničke okolnosti na pojedinoj građevinskoj lokaciji koje tijekom istražnih radova treba odrediti ili ocijeniti su sljedeće:

- profil temeljnog tla:
 - odziv lokalnog tla pri širenju seizmičkih valova od osnovne stijene do površine terena (amplifikacija i modifikacija spektra odziva)
 - pojave dinamičke nestabilnosti tla (likvefakcija) i prekomjernih slijeganja
- globalna stabilnost lokacije: pojava aktivnih rasjeda i nestabilne padine
- povećanje zemljanih pritisaka na temeljne, potporne, nasute i ukopane konstrukcije zbog djelovanja potresa.

2. Amplifikacija seizmičkog odziva kao posljedica lokalnih uvjeta u tlu

Seizmičke vibracije na svojem putu od žarišta prema površini terena mogu značajno promijeniti svoju amplitudu i spektralni sastav, što je prije svega uvjetovano lokalnim inženjerskogeološkim uvjetima u tlu, uključivo debljinu sedimenata i razinu podzemne vode, slika 2.



Slika 2. Amplifikacija seizmičke pobude ovisno o uvjetima lokalnog tla, modificirano iz [9]

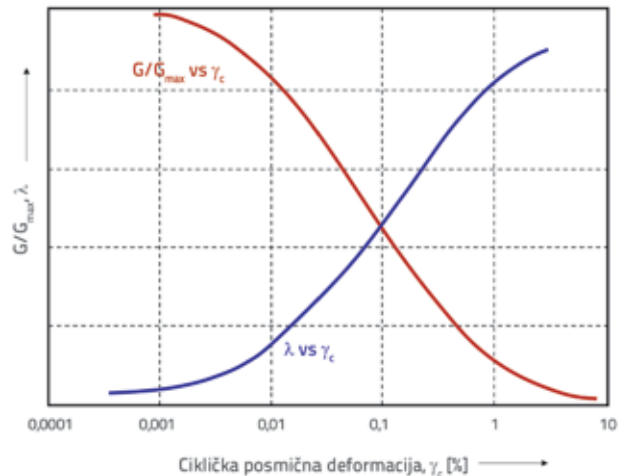
Amplifikacija (povećanje) seizmičke pobude na površini terena je posljedica razlike u impedanciji između površinskih slojeva tla i osnovne stijene, koja predstavlja otpor titranju čestica tla. Na amplifikaciju seizmičke pobude utječe i prigušenje amplitude valova uzrokovano neelastičnošću i heterogenošću sustava.

Da bi se mogla procijeniti veličina amplifikacije seizmičkog vala uslijed njegovog puta od žarišta prema površini terena, potrebno je adekvatno definirati geotehnički seizmički model, što zahtijeva poznavanje brzine posmičnih valova karakterističnih slojeva, gustoće tla u slojevima i nelinearnih odnosa modula posmika i prigušenja s posmičnom deformacijom. Također treba odrediti dubinu profila do osnovne stijene (karakterizirane brzinama posmičnih valova većih od 800 m/s). Određivanje ovih veličina zahtijeva opsežan program geotehničkih istraživanja s raznovrsnim geofizičkim mjerenjima do većih dubina te primjerena laboratorijska ispitivanja.

Modul posmika tla pri vrlo malim deformacijama (G_0 ili G_{max}) određuje se kao umnožak kvadrata brzine posmičnih valova (v_s) i gustoće tla (ρ). Slika 3. prikazuje tipične nelinearnosti normaliziranog modula posmika i prigušenja materijala tla ovisno o razini cikličkih posmičnih deformacija koje se određuju u laboratoriju. Umjereni i jači potresi induciraju u tlu posmične deformacije veće od 10^{-2} %, pa su u području jače izražene nelinearnosti i porasta pornog tlaka.

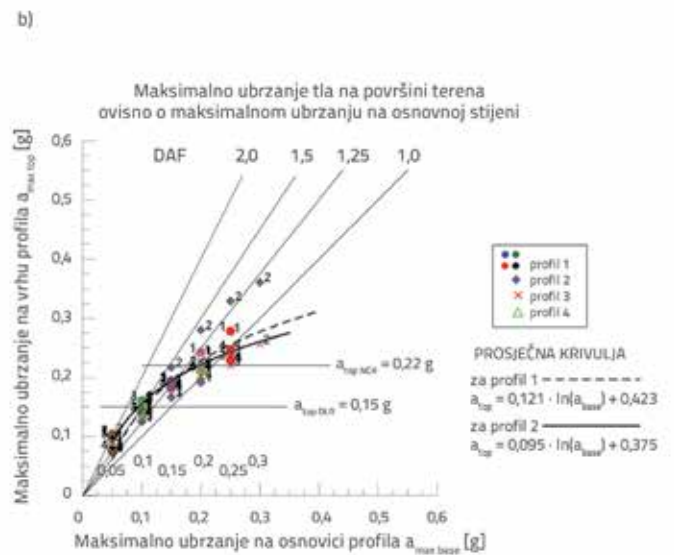
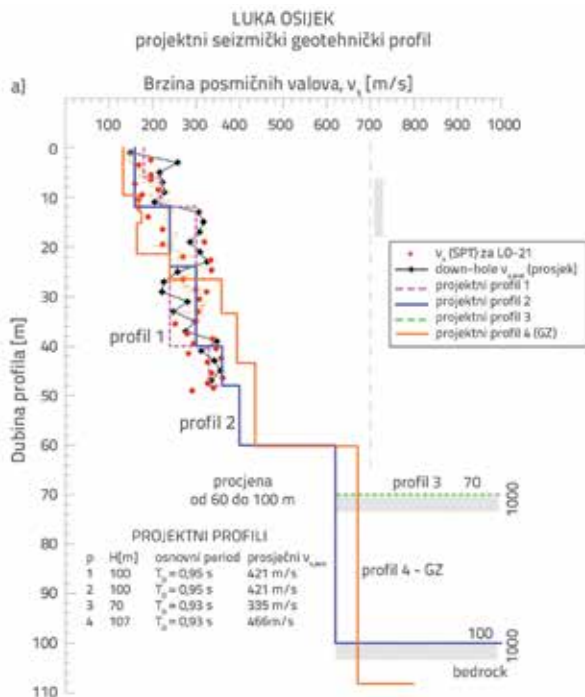
Jednom kada je geotehnički model tla formiran, uz određenu seizmičku pobudu te primjenom jednodimenzionalne analize rasprostiranja posmičnih valova, može se odrediti dinamički amplifikacijski faktor (DAF) kao omjer vršnog ubrzanja tla na površini tla te ulaznog vršnog ubrzanja tla. Mnogi komercijalno dostupni programi koji se zasnivaju na jednodimenzionalnoj

analizi rasprostiranja posmičnih valova, kao što su npr. SHAKE [11] ili DEEPSOIL [12], omogućavaju provedbu postupka konvolucije, kao konvencionalne analize seizmičkog odziva tla. Međutim, ograničenja navedenih programa u simulaciji složenijih uvjeta u tlu onemogućuju provođenje naprednijih analiza amplifikacije seizmičke pobude.



Slika 3. Nelinearni odnosi modula posmika i prigušenja tla ovisno o cikličkoj posmičnoj deformaciji (G – modul posmika, λ – prigušenje), modificirano iz [10]

Ovdje se donosi primjer ocjene seizmičke amplifikacije za potrebe projektiranja i izgradnje budućeg terminala za rasute terete u Luci Osijek. Na slici 4.a je prikazano više pretpostavljenih projektnih profila brzina posmičnih valova



Slika 4. Dinamička ispitivanja na lokaciji Luke Osijek: a) projektni seizmički geotehnički profili; b) analiza seizmičkog odziva s izračunom DAF, preuzeto iz [6]

Tablica 1. Tipovi tla prema sadašnjoj verziji norme EN 1998-1, prema [14]

Tip tla	Opis geotehničkog profila	$v_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT} (n / 30cm)	c_u [kPa]	Amp. faktor S
A	Stijena ili druga geološka formacija, uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini.	> 800	-	-	1,00
B	Nanosi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo krute gline debljine najmanje nekoliko desetaka metara, sa svojstvom postupnog povećanja mehaničkih svojstava s dubinom.	360 - 800	> 50	> 250	1,20
C	Debeli nanosi srednje zbijenoga pijeska, šljunka ili srednje krute gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.	180 - 360	15 - 50	70 - 250	1,15
D	Nanosi slabo do srednje koherentni (s mekim koherentnim slojevima ili bez njih) ili s predominantno mekim do srednje krutim koherentnim tlima.	< 180	< 15	< 70	1,35
E	Profili koji sadrže površinski sloj koji karakterizira brzina v_s tzv. tipove tla C i D i debljine od 5 m do 20 m, a ispod njih je kruti materijal s brzinom većom od 800 m/s.				1,40
S1	Nanosi koji sadrže najmanje 10 m debeli sloj mekane gline s visokom plastičnim indeksom ($PI > 40$) i visokim udjelom vode.	< 100		10 - 20	
S2	Nanosi likvefakcijski osjetljivog tla pijeska i gline ili bilo koji tip tla koji nije opisan od A do E i pod S1.				

(v_s) na promatranoj lokaciji. Veći broj pretpostavljenih profila je rezultat primjene različitih geofizičkih metoda ispitivanja (ReMi, downhole), te korelacija s *in situ* terenskim ispitivanjima SPT i CPT, kao i činjenice da dubina bušenja (50 m) nije dosegla dubinu krutih slojeva tla ($v_s > 800$ m/s). Na temelju ovako uspostavljenih procijenjenih projektnih profila, na slici 4.b su prikazani rezultati izračuna DAF-a programom SHAKE, gdje je zbog nelinearnog ponašanja tla, DAF za viša početna ubrzanja osnovice profila manji nego za manja početna seizmička ubrzanja. Nelinearnost prikazanih prosječnih krivulja je u skladu s rezultatima analize amplifikacije za brojne potresne događaje u svijetu, vidi [13].

Utjecaj lokalnih uvjeta u tlu na amplifikaciju seizmičke pobude obuhvaćen je i u sadašnjoj normi za projektiranje građevina, Eurokod 8 - dio 1 [14], u kojoj se definiraju različiti tipovi tla, na temelju kojih se dalje određuju relevantni linearni spektri odziva kao ulazni podatak za seizmičke proračune konstrukcija. Tipu tla su pridruženi amplifikacijski faktori, tablica 1, koji su uglavnom mjerodavni za mala seizmička ubrzanja.

Izbor odgovarajućeg spektra provodi se za različite tipove tla koji se "kompromisno" ocjenjuju na osnovi podataka u gornjih 30 m profila, a koji najčešće obuhvaćaju prosjek brzina posmičnih valova određenih geofizičkim metodama, ili alternativno podatke o nedreniranoj čvrstoći tla ili o broju udaraca na mjestu SPT ispitivanja. Sadašnja verzija norme predlaže $v_{s,30}$ brzinu koja se definira kao:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (1)$$

gdje su: h_i [m] i v_i [m/s] debljina sloja, odnosno brzina posmičnih valova (pri posmičnoj deformaciji od 10^{-5} ili manjoj) za i -ti sloj, a N je ukupan broj slojeva u gornjih 30 m tla.

Međutim, u trenutno važećoj verziji norme, neki od opisa tipova tla su nedovoljno precizni, primjerice glede ukupne dubine slojeva tla ili za profile koji imaju izmjene vrsta tla po dubini. Standardna praksa to uglavnom ignorira i najčešće se koristi samo prosjek brzina posmičnih valova u prvih 30 m. Takav pojednostavljeni formalni pristup ne ostvaruje potpunu geotehničku karakterizaciju slojeva tla na lokaciji u dinamičkim uvjetima, posebice kad su prisutni slojevi rahlih ili mekših tala. Primjerice, sadašnja definicija tla A kategorije obuhvaća "stijenu ili drugu geološku formaciju uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini", bez definiranja što podrazumijeva termin "slabijeg materijala". Tlo koje se sastoji od vrlo mekih depozita debljine do 5 m ispod kojih se nalazi stijenski materijal obično se neće ponašati jednako kao i krući sloj, što će rezultirati različitim linearnim spektrima. Potrebu za poboljšanjem karakterizacije tipa tla, u odnosu na onu danu u normi, prikazali su Ptilakis i dr. [15] koji u svom istraživanju koriste više od 3.000 zapisa pomaka tla s 536 lokacija diljem svijeta. Kako bi predložili nove elastične spektre odziva i amplifikacijske faktore, osim klasičnih geotehničkih parametara, kao što su nedrenirana čvrstoća, broj udaraca SPT-a ili indeks plastičnosti, autori koriste osnovni period lokacije, debljinu depozita na lokaciji, kao i prosječnu brzinu posmičnih valova. Na tragu kritika postojeće kategorizacije tla, nova generacija Eurokoda 8, koja je sada u fazi intenzivne izrade i čija se implementacija očekuje sljedećih godina, problemu karakterizacije kategorije tla pristupa na ponešto drugačiji način gdje se umjesto $v_{s,30}$ brzine, primjenjuje $v_{s,H}$ brzina koja se definira kao:

$$v_{s,H} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}} \quad (2)$$

gdje je sada N ukupan broj slojeva od površine tla do dubine H , a sama dubina H se definira kao:

Tablica 2. Predložena promjena kategorizacije tipova tla prema novoj verziji norme EN 1998-1, prema [16]

	Tip tla	kruto	srednje	mekano
Dubina	$v_{s,H}$ raspon H_{800} raspon	$800 \text{ m/s} > v_{s,H} \geq 400 \text{ m/s}$	$400 \text{ m/s} > v_{s,H} \geq 250 \text{ m/s}$	$250 \text{ m/s} > v_{s,H} \geq 150 \text{ m/s}$
vrlo plitko	$H_{800} \leq 5 \text{ m}$	A	A	E
plitko	$5 \text{ m} < H_{800} \leq 30 \text{ m}$	B	E	E
srednje	$30 \text{ m} < H_{800} \leq 100 \text{ m}$	B	C	D
duboko	$H_{800} > 100 \text{ m}$	B	F	F

$H = 30$ ako je $H_{800} \geq 30 \text{ m}$ (kada $v_{s,H}$ postaje $v_{s,30}$)

$H = H_{800}$ ako je $H_{800} < 30 \text{ m}$,

pri čemu je H_{800} dubina stijene koja je identificirana sa v_s koji je veći od 800 m/s. Ako se informacija o H_{800} nije odredila izravnim mjerenjima, ona se može procijeniti iz vrijednosti rezonantne vlastite (osnovne) frekvencije tla f_0 , određene primjenom metode mjerenja mikrosezmičkog nemira, tzv. HVSR metoda (eng. Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio).

Na temelju navedenog se predlaže, prema [16], kategorizacija tipa tla dana u tablici 2.

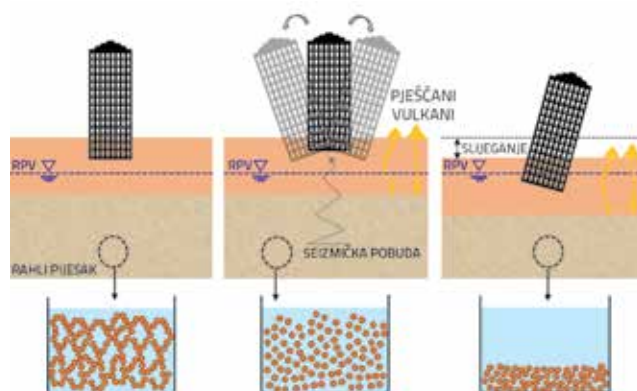
Primjerice, iz tablice 2. je vidljivo da za vrlo plitki položaj stijene (kao materijala koji ima $v_s > 800 \text{ m/s}$) i slučaj mekih depozita u gornjih 5 m, tlo se klasificira kao tip E, za razliku od tipa A kako bi se klasificirao po sadašnjoj verziji, čime je i amplifikacijski faktor S značajno veći. Ostaje pitanje je hoće li se u prikazanom obliku (tablica 2.), ili nešto izmijenjenom obliku, ove promjene implementirati u konačnoj verziji nove generacije Eurokoda 8, ali navedeno je svakako pokazatelj da će se problematika karakterizacije tipova tla, kao "amplifikatora" seizmičke pobude, preciznije razraditi.

3. Nestabilnosti tla u seizmičkim uvjetima i njihova evaluacija

Osim određivanja relevantnog linearnog spektra na temelju tipa tla, koji služi kao input za seizmičke analize konstrukcije, jednako je važno evaluirati potencijal pojave nestabilnosti tla nastalih kao posljedica potresa, uključivo likvefakciju tla i nestabilnosti u obliku formiranja klizišta i odrona.

3.1. Likvefakcija tla

Likvefakcija tla je prirodni fenomen koji se pojavljuje u vodom zasićenim zrnatim materijalima tijekom jake trešnje, obično pri jakim potresima. Popularno govoreći, pijesci ispod razine podzemne vode odjednom se i privremeno pretvaraju u gustu tekućinu ("likvefiraju"), gubeći pritom svoju posmičnu čvrstoću te sposobnost da podupru temelje građevina, slika 5. Uslijed djelovanja potresa kao brzog cikličnog opterećenja, tlo nema mogućnost dreniranja vode, čime dolazi u nedrenirano stanje koje karakterizira porast pornih tlakova kao posljedica spriječene promjene volumena [17].



Slika 5. Ilustrativni prikaz tri karakteristične faze pojave likvefakcije uslijed cikličnog potresnog djelovanja

Fenomen likvefakcije tla stoga podrazumijeva istodobnu pojavu dva faktora:

- Materijal tla podložan likvefakciji zasićen podzemnom vodom. Najpodložniji materijal je rahli, čisti, sitni pijesak, dok su pojave likvefakcije u šljuncima vrlo rijetke, praktički nevjerojatne, a nisu ni poznate u koherentnim materijalima kao što su prahovi i gline. Dapače, prisutnost sitnijih čestica u pijesku donekle povećava otpornost na likvefakciju. Također, likvefakcija je najčešća u gornjih 12-15 m profila tla;
- Potres odgovarajuće magnitude predstavljen maksimalnim (vršnim) seizmičkim ubrzanjem.

Iz zabilježenih slučajeva likvefakcije po svijetu pokazuje se da je njena pojava na istoj lokaciji vrlo nepravilna, te vjerojatno ovisi i o drugim detaljima u profilu temeljnog tla. Na terenu se likvefakcija manifestira kao gubitak nosivosti temelja, prekomjerne horizontalne i vertikalne deformacije te prevrtanje ili naginjanje građevina. Bočni pomaci, odnosno širenje tla, utječu i na potporne (najčešće - priobalne) konstrukcije, a u nagnutim terenima mogu se pojaviti klizišta. U svjetskoj literaturi je poznata slika o potresu u Niigati, Japan, iz 1964. godine na kojoj se vide nagnute zgrade na likvefiranom tlu, slika 6. Same konstrukcije zgrada bile su solidno dimenzionirane i ostale su praktički neoštećene prilikom gubitka nosivosti tla, no funkcionalnost zgrada je svejedno izgubljena zbog nestabilnog temeljnog tla.

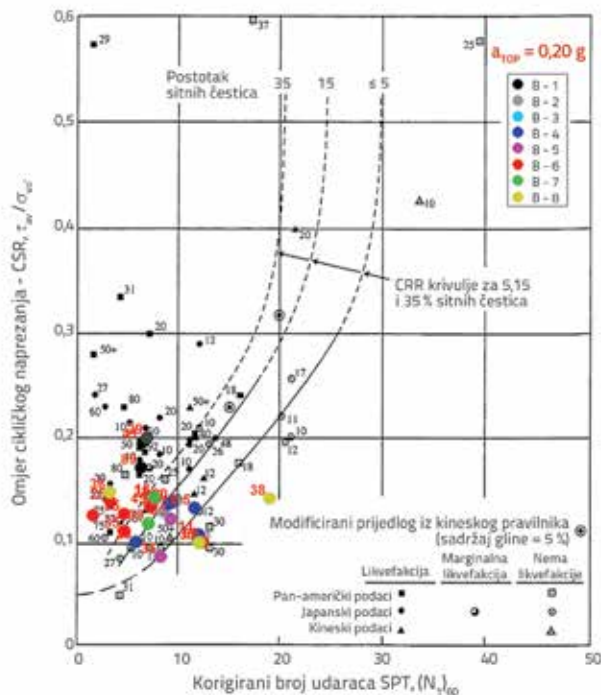


Slika 6. Nagnute zgrade na likvefiranom tlu u Niigati (Japan) u potresu 1964. godine, preuzeto iz [18]

Laboratorijska ispitivanja mogu ponuditi detaljniji uvid u likvefakcijski potencijal nekog materijala, odnosno u njegovo ciklično nedrenirano ponašanje, čime se mogu dobiti adekvatni podaci o parametrima tla za složene numeričke modele u efektivnim naprezanjima. Zbijanje tla pri cikličnom opterećenju, kao i porast pornog tlaka, određuju se eksperimentalno u cikličnim dreniranim ili nedreniranim pokusima s kontroliranom posmičnom deformacijom (γ) ili kontroliranim posmičnim naprezanjem koji se izražava kroz omjer primijenjenog posmičnog i srednjeg naprezanja, tzv. CSR (eng. cyclic stress ratio). Kako složeni numerički modeli imaju ograničenu praktičnu upotrebu, u rutinskim evaluacijama likvefabilnosti tla koristi se pojednostavljena metoda zasnovana terenskim ispitivanjima (SPT ili CPT), i empirijski tzv. likvefakcijski dijagrami [19] koji se povremeno ažuriraju.

Primjena takvih likvefakcijskih dijagrama je dana i u primjeru ocjene likvefakcijskog potencijala za lokaciju terminala za rasute terete u Luci Ploče [6]. Osnovni cilj ove ocjene je bio, na temelju izmjerenog broja udara SPT-a iz osam istražnih bušotina, utvrditi koje je to površinsko ubrzanje kritično, odnosno za koje je ubrzanje većina profila tla na granici pojave likvefakcije. Na slici 7. su prikazani rezultati za ubrzanje od 0.2g, gdje je vidljivo da je većina rezultata s lijeve strane granične linije što znači da je faktor sigurnosti manji od 1, tj. tlo je podložno likvefakciji. Za rezultate s desne strane prikazanih krivulja, tlo je stabilno na likvefakciju. Za projektno ubrzanje od 0.3g, kakvo se može očekivati na predmetnoj lokaciji, praktički cijeli profil tla likvefira. Analizirajući mogućnost pojave likvefakcije na većoj skali, za šire zagrebačko područje, Veinović i dr. [20] zaključili su na temelju analiziranih podataka da je moguća pojava likvefakcije za potres magnitude veće od 6,3. Za ovakvu makrozonaciju potencijala likvefakcije primjenjeni su pojednostavljeni kriteriji zoniranja prema ISSMGE-u (eng. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) [21]. Autori navode da pri procjeni mogućnosti likvefakcije važnu ulogu ima uspostavljanje korelacije između likvefakcije u prošlosti i geološko–geotehničkih karakteristika promatrane lokacije. Rezultat istraživanja je preliminarna kvalitativna karta zoniranja zagrebačkog područja prema potencijalu likvefakcije, međutim

sami autori [20] navode da se ona može koristiti tek kao grubi orijentir te predlažu smjernice koje bi trebalo provesti za precizniju sliku potencijala likvefakcije.



Slika 7. Ocjena likvefakcijskog potencijala za Luku Ploče na temelju broja udara SPT-a, za površinsko ubrzanje od 0,2g, prema [6]

Iako je zacijelo najsigurnija opcija izbjegavanje gradnje objekata na tlu za koje se ustanovi potencijal likvefakcije, postoje mnoga inženjerska rješenja kojima bi se spriječile negativne posljedice za građevine u slučaju potresa. Navedeno obuhvaća adekvatno temeljenje objekta prilagođeno tlu podložnom likvefakciji, najčešće u vidu dubokog temeljenja, ili sve češće primjenjivanih metoda poboljšanja tla (povećanje zbijenosti i dreniranje). U potonjem slučaju prednjači metoda šljunčanih stupnjaka [22] gdje se stupnjaci ugrađuju vibriranjem čime se povećava zbijenost temeljnog tla, a sami stupnjaci radi svoje visoke vodopropusnosti omogućuju i brže dreniranje vode te smanjenje potencijala likvefakcije.

3.2. Aktiviranje klizišta

Jedan od možebitnih uzroka aktiviranja klizišta jesu i potresna djelovanja. Sama stabilnost padine je uvjetovana nizom faktora kao što su njezina geometrija, vrsta tla, razina podzemne vode, stalna i prolazna djelovanja itd. Ocjena stabilnosti padina je zahtjevan zadatak već i u statičkim uvjetima, dok se u dinamičkim uvjetima povećavaju inercijska opterećenja, a moguć je i gubitak posmične čvrstoće materijala uslijed cikličnog opterećenja. U novije vrijeme klimatskih promjena, klizišta postaju sve izraženiji problem. Duži sušni periodi mogu uzrokovati pojavu

vlačnih pukotina na površini, a oborine koje slijede, a za koje se predviđa manje događaja ali većeg intenziteta, mogu time lakše saturirati tlo [23]. Relativno manji broj pokrenutih, ili bar registriranih, klizišta nakon zagrebačkog potresa u ožujku 2020. donekle se može objasniti relativno niskom saturacijom tla na lokacijama većeg potencijala klizanja. Ilustrativan primjer razorne moći potresa koji je pokrenuo gotovo 3.500 klizišta [24] jest Kumamoto potres magnitude 7,0, iz travnja 2016. godine, koji je zadesio Japan. Velika masa klizućeg tla na lokaciji Aso Bridge, slika 8, pokrenuta uslijed seizmičkog djelovanja, prouzročila je veliku štetu na objektima i infrastrukturi u podnožju padine.



Slika 8. Klizište pokrenuto uslijed Kumamoto potresa magnitude 7,0, iz travnja 2016., preuzeto iz [25]

Geotehničke analize stabilnosti kosina u seizmičkim uvjetima obuhvaćaju dva moguća pristupa, pseudostatičku analizu stabilnosti temeljenu na konceptu faktora sigurnosti te analizu trajne deformacije primjenom Newmarkovog pristupa klizućeg bloka.

U slučaju pseudostatičke analize se složena trešnja tla uglavnom zamjenjuje konstantnom pseudo-statičkom akceleracijom koja djeluje u jednom smjeru [26]. Kao uobičajena inženjerska mjera stabilnosti kosina definira se faktor sigurnosti (FS) koji predstavlja omjer posmične čvrstoće i djelujućih posmičnih naprezanja na razini klizne plohe. U dinamičkim uvjetima, seizmičko ubrzanje tla koje odgovarajućom inercijalnom silom dovodi kliznu masu tla u ravnotežno stanje ($FS = 1$) naziva se kritičnim ubrzanjem (eng. yielding acceleration), te bi se ono trebalo odrediti za svaku lokaciju zasebno. Pri tome se kao osnovna nepoznanica definira primijenjena vrijednost koeficijenta seizmičkog ubrzanja, kao i traženog faktora sigurnosti na klizanje. Sadašnji pristup proračuna stabilnosti pokosa prema Eurokodu 7 [27] obuhvaća faktorizaciju (redukciju) parametara materijala tla/stijene (tzv. "PP3 pristup"), pri čemu sama norma ne razlikuje parcijalne faktore materijala u statičkim i seizmičkim uvjetima, što nerijetko rezultira konzervativnim projektnim rješenjima, naročito u područjima visoke seizmičnosti. Indicije su da će nova generacija Eurokoda 7 razdvojiti parcijalne faktore materijala za statičke kao i za seizmičke uvjete. Seco e Pinto [28] ističe da se

pseudostatičke metode ne bi trebale primijeniti za tla u kojima se mogu razviti visoke vrijednosti pornih tlakova, kao ni za tla kod kojih se očekuje značajna degradacija krutosti pod cikličnim opterećenjem.

S druge strane, Newmarkova [29] teorija, razvijena za evaluaciju seizmičke stabilnosti kosina, postavlja pitanje što ako je FS manji od 1 te hoće li u tom slučaju doći do potpunog kolapsa pokosa. Ako je trajna deformacija, nastala kao posljedica potresnog djelovanja, unutar granica prihvatljivosti, neće doći do navedenog kolapsa, pri čemu brojni autori daju načine za izračun navedene trajne deformacije [30-32]. Biondi i Maugeri [33] razvili su modificirani Newmarkov model izračuna trajnih pomaka prirodnih kosina koji uključuje mogućnost generiranja pornih tlakova, vremenski interval, izračun ciklusa koji utječu na cikličnu degradaciju tla i izračun puteva degradacije kritične akceleracije.

4. Seizmička mikrozonacija: nužnost sveobuhvatnog pristupa

Mikrozoniranje je izdvajanje područja istih ili sličnih svojstava, na kartama detaljnijeg mjerila, koje omogućuje lokalno razlikovanje specifičnog utjecaja ili razmatranog kriterija izdvajanja [34]. Mikrozoniranje geohazarda služi racionalnom gospodarenju prostorom s ovog aspekta te omogućuje usmjeravanje razvika prema područjima manjeg rizika, ili osigurava da će se u rizičnijim područjima poduzeti odgovarajuće inženjerske mjere za postizanje zadovoljavajuće sigurnosti ljudi i imovine. Kartiranje ili zoniranje seizmičkog hazarda u lokalnom mjerilu (npr. 1:25.000 – 1:5.000), kako bi se uključili i efekti lokalnih uvjeta tla i vremenske komponente, može se prikazati na kartama seizmičkih mikrozonacija.

Jedan od ilustrativnih primjera "seizmičke mikrozonacije u pravom mjerilu", gdje se vidi vrlo dobro poklapanje uvjeta lokalnog tla s brojem i intenzitetom oštećenja objekata nakon potresa iz 1979. godine, dan je na slici 9. za staru jezgru grada Dubrovnika.



Slika 9. Izolinije debljine nasipa (od 1 m do 7 m debljine) u Starom gradu u Dubrovniku, preklopljene s prikazom oštećenja građevina za potres iz 1979. godine, modificirano iz [35]

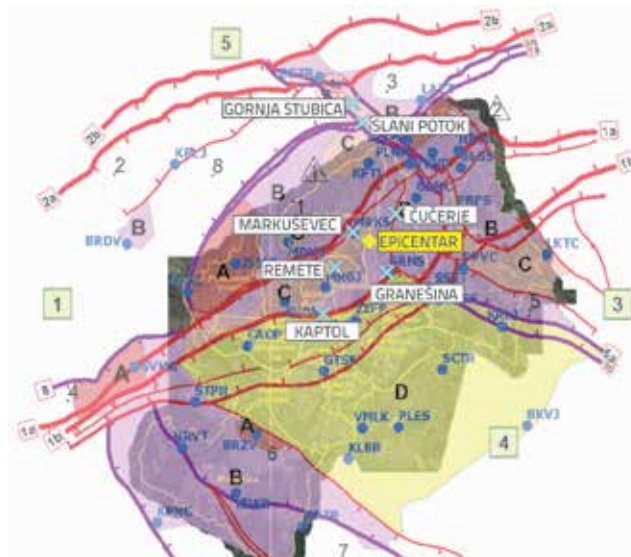
Ovdje se, na relativno maloj površini, nalazi velik broj zgrada približno iste konstrukcije, visine i starosti, a razlikuju se uvjeti temeljnog tla; od nasipa promjenljive debljine (od 1 m do 7 m debljine) južno od Straduna do osnovne stijene na sjevernoj strani. Kao posljedica različitih lokalnih uvjeta u tlu, pri istom seizmičkom djelovanju na osnovnoj stijeni, došlo je do različite razine štete na zgradama, pri čemu su najveća oštećenja onih zgrada koje se nalaze na depositima nasipanog materijala najveće debljine.

U državama povećane seizmičnosti postoji snažna potreba sveobuhvatne seizmičke mikrozonacije, pa se nastoji formalizirati standardni pristup seizmičkom mikrozoniranju [21, 36, 37]. Pritom se zoniranje prije svega fokusira na geotehničke fenomene uzrokovane seizmičkim djelovanjem na lokaciji i u temeljnom tlu kao što su amplifikacija i pomaci tla, klizišta i likvefakcija tla [38]. Kao osnovu za izradu karata seizmičke mikrozonacije najveće rezolucije smjernice ISSMGE [21] navode detaljna geotehnička ispitivanja tla. Tako razvijene karte seizmičkog mikrozoniranja se zatim mogu koristiti kao čimbenik za kreiranje politike projektiranja i izgradnje, kao i za izradu planova u slučaju nužde [39].

Geotehničko i seizmičko mikrozoniranje grada Zagreba ima dugačku povijest [40]. Projekt geozoniranja po suvremenim principima započet je još 2004. godine izradom Detaljne inženjerskegeološke karte podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5.000, faza I (DIGK-faza I) [41], a DIGK-faza II završena je 2018. godine [42, 43]. Za potrebe tog kartiranja obavljena su opsežna geofizička i geotehnička istraživanja. Ovim projektima obuhvaćeno je približno 175 km² podsljemenske urbanizirane zone, dok je ukupna površina grada Zagreba ≈ 640 km² [41-45]. U sklopu kartiranja toga dijela grada, u mjerilu 1:5.000, posebno su izdvojena klizišta i nestabilne padine, a prikazane su i preliminarne zone tipova tla (A-D) prema aktualnoj normi Eurokod 8 [46]. Budući da nisu posebno izdvajane ili preklapane zone potencijalnih nestabilnosti uslijed seizmičkog djelovanja (potencijal likvefakcije, ocjena seizmičke stabilnosti padina) ovo zoniranje ne predstavlja potpunu seizmičku mikrozonaciju prema navedenim normama, a kad nastupi nova verzija Eurokoda 8 i te postojeće obrade trebat će revidirati. Navedeni napori u izradi DIGK koji su provedeni u gradu Zagrebu rezultirali su objavom dijela ovih istraživanja i na web-stranicama [47] grada Zagreba (npr. karta tektonskih aktivnosti, pojednostavljena karta klizišta za podsljemensku zonu grada). Grad Zagreb je ujedno i jedini grad u Hrvatskoj koji posjeduje katastar klizišta, a koji je dio geotehničkog katastra grada Zagreba, kao središnje baze podataka vezane uz tlo i njegove karakteristike [44]. Geozoniranje preostalih, pretežno ravničarskih dijelova Zagreba, zasad je u dugoročnim planovima.

Specifičan indikator stanja pojedinih istaknutih lokacija u našim krajevima su i crkve koje se, nakon rušenja ili velikih oštećenja od raznih uzroka (požara, potresa, ratnih djelovanja, itd.), tradicionalno ponovno grade na bliskim mikrolokacijama ili čak "na temeljima" prethodnih. U Zagrebu i okolici postoji više crkvi koje se nalaze na istim lokacijama po nekoliko

stoljeća i pretrpjele su u svojoj povijesti više puta rušenja ili velika oštećenja upravo od potresa. Na slici 10 prikazane su lokacije nekih jače oštećenih crkvi u potresu od ožujka 2020. godine, na karti tektonskih aktivnosti i recentnog strukturnog sklopa Medvednice i Zagreba. Područje južnog dijela Medvednice nalazi se u zoni tzv. zagrebačkog rasjeda u kojoj su žarišta većine potresa, a rubovi zone (linije 1a i 1b) idu kroz podsljemensku urbanu zonu (sjeverni krak) i podnožjima brda (južni krak) iznad Illice, Maksimirske ceste i u gornjoj Dubravi [48]. Na karti su prikazani i drugi važniji rasjedi tektonskog sklopa (i izvan grada Zagreba), a bojama su predočeni tektonski aktivni dijelovi struktura i rasjeda. Prikazani rasjedi nisu uvijek "vidljive pukotine ili crte" na terenu, i (uglavnom) nisu potpuno verificirani dubinskim istraživanjima nego predstavljaju prognoznu usku zonu procijenjenu na osnovi geoloških pokazatelja na terenu, topografije, aerosnimaka i sporadičnih dubinskih istraživanja.



Slika 10. Prikaz lokacija nekih oštećenih crkvi u potresu 2020. godine na karti tektonskih aktivnosti, podloga preuzeta iz [47]

Vidljivo je, na slici 10., da su oštećene crkve u neposrednoj blizini prikazanih važnijih rasjeda i u Zagrebu, ali i sjeverno, u stubičkom području. Crkve u Markuševcu i Čučerju su praktički u epicentru potresa. U središtu Zagreba oštećena je katedrala na Kaptolu, ali i druge crkve na brdima (crkve Sv. Marije, Sv. Franje i Sv. Ivana na Kaptolu i Novoj Vesi, te crkve Sv. Marka i Sv. Katarine na Griču). Južno, u ravnijem dijelu (ali još u zoni "iličkog rasjeda") oštećene su crkve u Palmotićevoj i Frankopanskoj ulici.

Većina prikazanih crkvi je doživjela nekoliko rušenja i oštećenja od potresa u svojoj povijesti što je zabilježeno u njihovim analima, npr. [49, 50]. Na primjer, za crkvu u Granešini spominju se rušenja od potresa više puta još od 16. stoljeća. Teško je oštećena u zagrebačkom potresu 1880. godine, te je ponovo izgrađena praktički na istom mjestu. Toranj je stradao u potresu 1906. godine, a znatno je oštećena u zadnjem potresu 2020. godine. U međuvremenu su se na crkvi, i na



Slika 11. Lokacije oštećenih crkvi: a) crkva u Granešini na detaljnoj inženjerskogeološkoj podlozi preuzetoj iz [42]; b) prikaz crkve u Remetama i nestabilnih padina u okruženju na podlozi preuzetoj iz [47]

drugim zgradama u blizini, pojavile pukotine od tektonskih pomaka koje su predmet novijih geodetskih mjerenja u sklopu geodinamičke studije prostora grada Zagreba [51]. Na slici 11.a prikazana je lokacija crkve u Granešini na novoj detaljnoj inženjerskogeološkoj karti [42], gdje se vidi da je lokacija crkve na nestabilnoj padini (oznake 1019), a u blizini se nalazi "mreža" manjih rasjeda. Slika 11b prikazuje lokaciju oštećene crkve u Remetama, koja je također u području više nestabilnih padina – oznake 603, 608, 30029, itd. Sličan slučaj opisanim zagrebačkim crkvama je i lokacija crkve u Gorici Svetojanskoj, gdje je u povijesti sagrađeno i srušeno nekoliko crkvi. Tek novijim detaljnijim istraživanjima [52] otkriven je rasjed koji generira pomake u temeljnom tlu, a izazvao je i nestabilnosti na padinama.

Opakvi prikazi upućuju na vjerojatne uzroke oštećenja građevina koji se nalaze u geološkim fenomenima unutar temeljnog tla, a ne samo u konstrukcijskim slabostima zgrade. Ponavljanje grešaka pri izboru lokacije u prošlosti može se opravdati nedostatkom spoznaja, no u današnje vrijeme to ne bi bilo prihvatljivo ni dopustivo.

Za karakterizaciju i točnije identificiranje stanja u dubini tla na nestabilnim padinama ili aktivnim rasjedima potrebna su opsežnija inženjerskogeološka, geofizička i geotehnička istraživanja. Ovi podaci, zajedno s podacima o litologiji te inženjerskogeološkim i hidrogeološkim karakteristikama, poslužili bi kao osnova za izradu karte seizmičkog mikrozoniranja. Stupanj istraženosti pojava aktivnosti rasjeda nije jednak na svim lokacijama, pa te pojave treba sustavno istraživati i bilježiti pri svim većim istraživanjima širih područja primjerice za potrebe mikrozoniranja ili infrastrukturnih objekata. Za građevine veće važnosti ili kulturne baštine treba lokaciju detaljno istražiti te, ako se pronađu opisane geološke pojave, locirati objekte dalje od eventualnih većih pukotina/rasjeda i, prema potrebi, provesti sanacijske mjere potencijalno nestabilnih padina.

5. Utjecaj potresa na geotehničke konstrukcije

S obzirom na to da trešnja inducira inercijske sile koje mogu rezultirati prekoračenjem nekih od graničnih stanja geotehničke konstrukcije, adekvatno uvažavanje ovih djelovanja u fazi projektiranja preduvjet je za seizmički sigurnu geotehničku konstrukciju (temelji građevina, nasipi, potporne konstrukcije, tuneli). U protivnom, uslijed potresa može doći do negativnih posljedica na temeljni sustav građevine, kao što je primjerice slom temeljnog tla ispod temelja ili prevelike deformacije tla koje mogu prouzročiti relativni pomak temelja u odnosu na gornju konstrukciju. Kod potpornih konstrukcija bočni seizmički pritisci mogu prouzročiti slom konstrukcije ili njezine prevelike pomake, a kod nasipa se pojavljuju pukotine na kruni i lokalna klizanja. Naravno, oštećenja geotehničkih konstrukcija mogu nastati i kao izravna posljedica prethodno navedenih nestabilnosti, gdje pojave poput likvefakcije ili klizanja tla mogu uzrokovati prekoračenje graničnog stanja geotehničke konstrukcije.

5.1. Temelji građevina

Ponašanje temelja u seizmičkim uvjetima ovisi o vrsti temelja, načinu cikličnog opterećenja, kao i o vrsti tla te uvjetima u njemu. Kod sitnozrnih tala uslijed cikličnog opterećenja u pravilu ne dolazi do prevelikog gubitka čvrstoće, što za posljedicu ima manja dodatna slijeganja, bočne pomake ili rotaciju samih temelja. Međutim, kod temelja samaca i kod temeljnih traka izvedenih na sitnozrnom tlu, izrazito je važno odrediti nosivost temeljnog tla u nedreniranim uvjetima, uz opreznu kvantifikaciju nedrenirane kohezije kao mjerodavnog parametra. S druge strane, uslijed cikličnog posmičnog opterećenja suhe vrste pijeska, smanjuje im se volumen što može rezultirati značajnim slijeganjem plitke temeljne konstrukcije, pogotovo ako je temelj izveden u slabo zbijenim i rahlim pijescima. U saturiranim pijescima je moguća pojava likvefakcije koja rezultira značajnim

slijeganjima tla nakon disipacije dodatnog porednog tlaka, a znakovito je da do likvefakcije može doći i nakon same trešnje, u poslijepotresnom razdoblju.

Prilikom projektiranja za seizmičke uvjete često se zanemaruju učinci dinamičke interakcije tlo-konstrukcija. To zanemarivanje se uglavnom opravdava time da su za većinu uobičajenih građevinskih konstrukcija učinci dinamičke interakcije povoljni, pa je njihovo zanemarivanje "na strani sigurnosti". Međutim, u pojedinim slučajevima [8], kao što je temeljenje na mekanom tlu, plitko temeljenje visokih konstrukcija, ili duboko temeljenje, nužno je provesti analizu seizmičke interakcije tla i konstrukcije, jer njeni učinci mogu biti nepovoljni.

Posebice, duboki temelji moraju biti projektirani na način da pružaju otpornost djelovanju inercijskih sila gornje konstrukcije, ali i djelovanju kinematičkih sila koje su posljedica deformacije okolnog tla [28, 53]. Iako se uobičajeno razmatra linearno ponašanje tla pri analizi seizmičke interakcije, u pojedinim slučajevima je nužno obuhvatiti geometrijske i materijalne nelinearne sustava. Nelinearne analize, kao i složenost trodimenzionalnih analiza interakcije sustava dubokog temeljenja i tla, otežavaju njihovu praktičnu implementaciju, pa su na raspolaganju neke od metoda dekompozicije problematike u više jednostavnijih koraka, kao primjerice metoda koju su predložili Gazetas i Mylonakis [54]. Nadalje, uslijed cikličnog seizmičkog djelovanja potresa može doći do otvaranja pukotine (eng. gap) u blizini površine terena uz sami pilot, a ovaj su učinak je analizirali brojni autori [55]. Zanimljiv prikaz tog učinka dali su Pender i Pranjoto [56] za pilote željezničkog mosta nakon potresa Loma Prieta iz 1989. godine, slika 12.

Vrlo je izazovno u nekim slučajevima, čak i iskusnim geotehničarima, detektirati uzroke pojave deformacija i sloma konstrukcije nakon potresa, tj. ustanoviti jesu li oštećenja nastala kao posljedica prekoračenja graničnih stanja temeljne konstrukcije ili pak kao posljedica prekoračenja graničnih stanja

elemenata same konstrukcije. Često se prekoračenja graničnih stanja temeljnog sustava pripisuju elementima konstrukcije, i to naročito kada se procjena uzroka oštećenja izvodi domipretežnonantno vizualnim putem. Čitatelji se upućuju na relevantnu literaturu [57] gdje se detaljno prikazuju forenzičke procedure za vizualnu detekciju pukotina na objektima nastalim kao posljedica problema povezanih s temeljnim tlom ili temeljnim sustavom. Pri tome se korisne informacije o ponašanju geotehničke konstrukcije u seizmičkim uvjetima mogu dobiti ugradnjom opreme za monitoring, gdje promjene u mjerenim rezultatima (pomaka, deformacija, naprezanja, porednih tlakova itd.) mogu upozoriti na mehanizam prekoračenja graničnog stanja. U novije vrijeme je sve više izražena korist naprednih geodetskih metoda [58] gdje se daljinskim opažanjima i mjerenjima, s visokom preciznošću, može ustanoviti veličina deformacije / pomaka temeljnog tla na većim površinama nastalima kao posljedica potresnog djelovanja.

5.2. Nasute građevine

Sherard i dr. [59] navode da se u većini nasutih građevina, kao što su brane ili nasipi, koje su podvrgnute jačem potresu razlikuju u pravilu dvije vrste oštećenja:

- uzdužne pukotine na vrhu brane
- slijeganje krune.

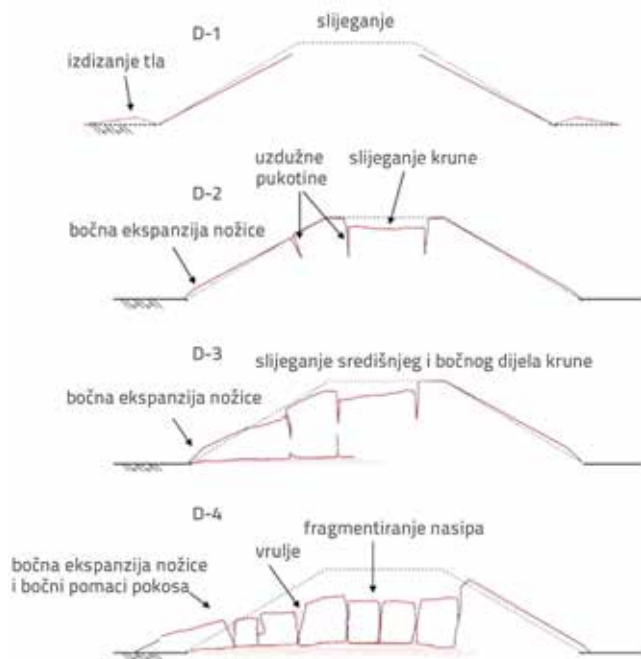
Navedeno potvrđuje i istraživanje Oka i dr. [60], koji su tražili obrasce oštećenja niza riječnih nasipa kao posljedice Tohoku potresa koji je 2011. godine zadesio Japan. Potres magnitude 9,0 ošteti je brojnu infrastrukturu, a na zemljanim riječnim nasipima registrirana su oštećenja na čak 2.115 lokacija. Tipični obrazac oštećenja je prikazan na slici 13., gdje uslijed potresnog opterećenja najprije dolazi do slijeganja krune uz izdizanje tla uz nožicu nasipa, nakon toga dolazi do stvaranja uzdužnih pukotina

na kruni i konačno iz svega proizlazi fragmentiranje nasipa i njegov slom.

Da bi se ustanovilo je li došlo do oštećenja nasipa na području grada Zagreba i Zagrebačke županije, kao posljedice potresa iz ožujka 2020. godine, djelatnici Zavoda za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu proveli su nerazorna specijalistička ispitivanja na 141 km savskih i uspornih zemljanih nasipa sektora C sustava zaštite od poplava (gornja Sava), na 21 retenciji šire okolice grada Zagreba te na maksimirskom nasipu. Osim specijalističkih ispitivanja djelatnici Hrvatskih voda proveli su i detaljne vizualne kontrole nasipa. Za brzu ocjenu stanja nasipa primjenjena je metoda georadara (eng. *Ground Penetrating Radar*).



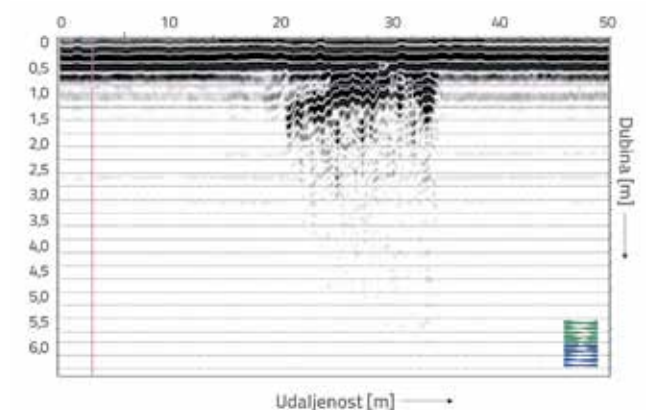
Slika 12. Pukotina uz vrh pilota kao posljedica cikličnog opterećenja pilota u glini, prema [56]



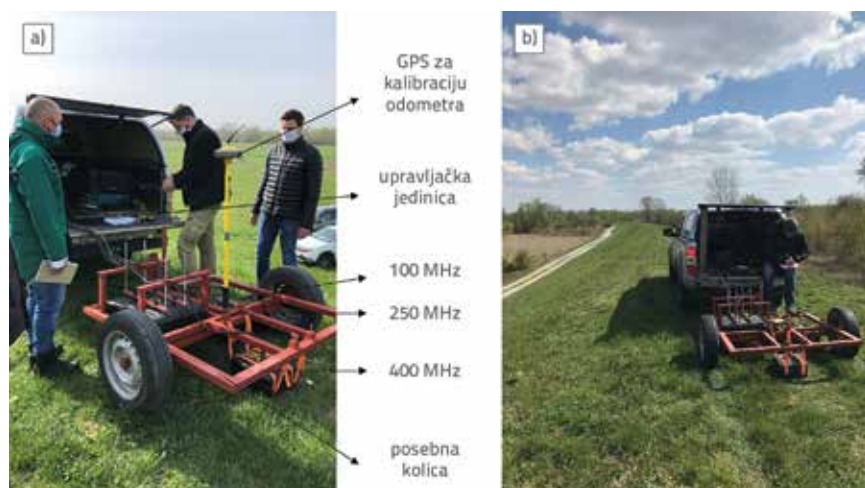
Slika 13. Faze sloma riječnih nasipa kao posljedica cikličnog djelovanja potresa, modificirano iz [60]

Ta se metoda uspješno koristi u domaćoj i svjetskoj praksi za procjenu stanja niza infrastrukturnih objekata, među kojima su i nasipi za obranu od poplava. Metoda se kontinuirano usavršava u sklopu tekućeg međunarodnog znanstvenog projekta oVERFLOW [61] iz programa civilne zaštite Europske Unije, a čiji je koordinator upravo Zavod za geotehniku. Temelji se na emitiranju elektromagnetnih valova u tijelo nasipa sustavom antena te zaprimanjem povratnih reflektiranih valova, što nakon obrade prikupljenih podataka omogućuje izradu radargrama [23]. To dalje omogućuje detekciju potencijalnih oštećenja koja se ne mogu detektirati vizualnim pregledom. Kako frekvencija

primijenjenih antena uvjetuje dubinu ispitivanja i rezoluciju ispitivanja, koje su obrnuto proporcionalne (veća dubina – manja rezolucija, manja dubina – veća rezolucija), za potrebe predmetnog ispitivanja je odabran višekanalni sustav s tri (3) antene centralnih frekvencija 100 MHz (dubine ispitivanja do 15 m i rezolucije 0,5 m), 250 MHz (dubine ispitivanja do 5 m i rezolucije 0,2 m) te 400 MHz (dubine ispitivanja do 4 m i rezolucije 0,125 m). Za potrebe ispitivanja izrađena su i posebna kolica koja su povezana s automobilom radi bržeg prikupljanja podataka, slika 14. Uzimajući u obzir mogućnosti metode u detekciji strukture nasipa (prijelaze slojeva, dno nasipa), lokalizaciji poremećenja (zone rahlog materijala), identifikaciji anomalija i nehomogenosti u obliku šupljina i diskontinuiteta, kao i u evaluaciji integriteta kontakta tla i betonskih galerija retencija, GPR je odabran kao optimalna metoda prvog prolaska (eng. *first-pass method*) [62], koja služi za preliminarnu ocjenu oštećenja.



Slika 15. Prikaz jednog radargrama ispitivanja oštećenja retencije nakon potresa u ožujku 2020. – vidljivi refleksi po sredini profila označava prisutnost galerije retencije



Slika 14. Ispitivanje oštećenja savskih i uspornih nasipa u gradu Zagrebu i okolici nakon potresa u ožujku 2020.: a) prikaz opreme za prikupljanje podataka, b) provedba prikupljanja podataka

Međutim, jednako tako je potrebno uzeti u obzir ograničenja metode gdje materijali visoke saturiranosti uzrokuju veće prigušenje elektromagnetnog signala. Uzimajući u obzir nejednoznačnost prikupljenih podataka, prije provedbe samih ispitivanja provedene su brojne numeričke simulacije ponašanja elektromagnetnog vala pri nailasku na anomalije koje su vizualno registrirane na nizu nasipa u post-potresnom razdoblju na svjetskoj razini i koje su dane u brojnoj literaturi na tu temu [63]. Ovo je omogućilo evaluaciju interpretiranih radargrama, kao primjerice danog na slici 15., s aspekta detekcije oštećenja nastalih zbog potresa. Duž ispitnih profila nije ustanovljena značajnija refleksija

emitiranih elektromagnetnih valova koja bi upozoravala na anomalije u tijelu nasipa, retencija i brana duž njihovih duljina, kao ni na kontaktu galerija i tijela retencija, nastalih kao posljedica seizmičkog djelovanja.

6. Zaključak

U radu je dan širi pregled uloge geotehnike u potresnom inženjerstvu kroz niz praktičnih primjera evaluacije utjecaja fizikalno-mehaničkih karakteristika tla na ponašanje seizmičke pobude, ali i utjecaja pobude na likvefakciju tla, klizanje tla te na druge oblike nestabilnosti i prekoračenja graničnih stanja geotehničkih konstrukcija. Navedeni aspekti zahtijevaju detaljniju karakterizaciju i ocjenu geotehničkih okolnosti na pojedinim lokacijama, i to provedbom opsežnijih geotehničkih i geofizičkih istraživanja, kao i odgovarajućih terenskih i laboratorijskih pokusa. Ova istraživanja će, zajedno s povećanjem baze seizmičkih podataka, zasigurno povećati pouzdanost seizmičkih analiza. Time bi se uvelike izbjegla neracionalna tehnička rješenja nastala zbog primjene pojednostavljenih projektnih postupaka. U isto vrijeme, prepoznajući nedostatke u karakterizaciji tipova tla na način obuhvaćen sadašnjom normom za projektiranje

seizmički otpornih građevina, i europska inženjerska zajednica poduzima napore u revidiranju i poboljšavanju normi, sve s ciljem kvalitetnijeg i racionalnijeg opisa ponašanja tla kao "konstrukcije" koja pri potresnoj pobudi iz dubine ima svoj odziv i dominantna gibanja.

Uzimajući u obzir posljedice nedavnog potresa u gradu Zagrebu, ovaj rad u središte pozornosti stavlja nužnost sveobuhvatnog pristupa seizmičkom mikrozoniranju. Takav pristup obuhvaća čitav niz pokazatelja, od litoloških, inženjerskogeoloških i hidrogeoloških karakteristika te položaja aktivnih rasjeda, do identifikacije nestabilnih padina i zona izraženog likvefakcijskog potencijala. Ovakvo seizmičko mikrozoniranje, koje je u skladu sa smjernicama razvijenim i implementiranim u nizu država povećane seizmičnosti u kojima postoji naglašena svijest o potresu kao "realnom" i "sveprisutnom" hazardu, predstavlja korak naprijed od sadašnjih, hvalevrijednih, napora u seizmičkoj mikrozonaciji grada Zagreba. Sveobuhvatan pristup seizmičkom mikrozoniranju, koji se svakako mora implementirati na razini cijele Hrvatske s obzirom na njezinu izrazitu seizmičku aktivnost, omogućio bi pouzdane podloge za daljnje oblikovanje dugoročne politike projektiranja i izgradnje.

LITERATURA

- [1] Bell, F.G.: Geological hazards: Their assessments, avoidance and mitigation. E&FN Spon Press, London, pp. 648, 2003.
- [2] Elnashai, A.S., Di Sarno, L.: Fundamentals of Earthquake Engineering: From Source to Fragility, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Harris, R.A.: Earthquake stress triggers, stress shadows, and seismic hazard, Journal of geophysical research, 103 (1998) B10, pp. 24347 - 24358, <https://doi.org/10.1029/98JB01576>
- [4] Ishihara, K.: Soil Behavior in Earthquake Engineering, Clarendon Press, Oxford, UK, 350 p., 1996.
- [5] Towhata, I.: Geotechnical earthquake engineering, Berlin Heidelberg: SpringerVerlag, 698 p., 2008.
- [6] Ivšić, T.: Potresno djelovanje i geotehnika, 7. savjetovanje Hrvatskog geotehničkog društva, Varaždin, pp. 29-37, 2016.
- [7] Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić, N., Penava, D., Kordić, B.: The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020, Geosciences, 10 (2020) 7, ID 252, doi: 10.3390/geosciences10070252
- [8] EN 1998-5: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, European Standard, CEN, Brussels, 2004.
- [9] Seville, E., Metcalfe, J.: Developing Hazard Risk Assessment Framework for the New Zealand State Highway Network, Land Transport New Zealand, Report no. 276., 80 p., 2005.
- [10] Vucetic, M., Dobry, R.: Effect of soil plasticity on cyclic response, J. Geotech. Eng., 117 (1991) 1, pp. 89-107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410)
- [11] Ordóñez, G.A.: SHAKE - A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, GeoMotions, LLC, Lacey, USA, 2012.
- [12] Hashash, Y., Park, D., Tsai, C.C., Phillips, C., Groholski, D.R.: DEEPSOIL - 1-D Wave Propagation Analysis Program for Geotechnical Site Response Analysis of Deep Soil Deposits, Tutorial and User Manual, University of Illinois, USA, 2016.
- [13] Idriss, I.M.: Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, Proceedings of the H. Bolton Seed Memorial Symp., Vol. 2, BiTech Publishers, Vancouver, pp. 273-290, 1990.
- [14] EN 1998-1. Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Standard, CEN, Brussels, 2004.
- [15] Pitilakis, K., Riga, E., Anastasiadis, A.: Design spectra and amplification factors for Eurocode 8, Bulletin of Earthquake Engineering, 10(2012) 5, pp. 1377-1400, <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9367-6>
- [16] Labbe, P.: Outlines of the revision of the Eurocode 8, part 1 - generic clauses, 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece, 12 p., 2018.
- [17] Seed, H.B., Idriss, I.M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J Soil Mech Found Div, 97 (1971) SM9, pp. 1249-1273
- [18] Seed, H.B., Idriss, I.M.: Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 93 (1967) 3, pp. 83-108
- [19] Idriss, I., Boulanger, R.: 2nd Ishihara Lecture: SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 68 (2015), pp. 57-68

- [20] Veinović, Ž., Dimitrović, D., Lovrić, T.: Pojava likvefakcije na području Zagreba u prošlosti i procjena mogućnosti ponovne pojave tijekom jačeg potresa, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 19 (2007), pp. 111-120.
- [21] ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering): Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. The Japanese Geotechnical Study, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 209 p., 1999.
- [22] Ranjbar, N., Choobbasti, A.J.: Mitigation of Liquefaction Using Stone Columns, Journal of Geotechnical Engineering, 13 (2008), Bund. F, 9 p.
- [23] Kovačević, M.S., Bačić, M., Stipanović, I., Gavin, K.: Categorization of the Condition of Railway Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory, Applied Sciences-Basel, 9 (2019) 23, ID 5089, doi:10.3390/app9235089
- [24] Xu, C., Ma, S., Tan, Z., Xie, C., Toda, S., Huang, X.: Landslides triggered by the 2016 7.3 Kumamoto, Japan, earthquake, Landslides, 15 (2018) 3, pp. 551-564, <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0929-1>
- [25] URL: www.mainichi.jp, 09.09.2020.
- [26] Terzhagi, K.: Mechanism of landslides, Application of Geology to Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, S. Paige (Ed.), New York, pp. 83-123, 1950.
- [27] EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules, European Standard, CEN, Brussels, 2004.
- [28] Seco e Pinto, P.S.: Interaction between Eurocode 7 – geotechnical design and Eurocode 8 – design for earthquake resistance of foundations, Proceedings of 2nd International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, (Eds.: Liu, H.L., Deng, A., Chu, J.), Springer, Beijing, pp. 37 – 65. 2008.
- [29] Newmark, N.M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, Geotechnique, 15 (1965), pp. 139–159
- [30] Makdisi, F.I., Seed, H.B.: Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104 (1978), pp. 849-86
- [31] Ambraseys, N.N., Menu, J.M.: Earthquake-induced ground displacements, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 16 (1988), pp. 985-1006
- [32] Yegian, M.K., Marciano, E.A., Ghahraman, V.G.: Earthquake-induced permanent deformations: probabilistic approach, Journal of Geotechnical Engineering, 117 (1991), pp. 35-50
- [33] Biondi, G., Maugeri, M.: Seismic response analysis of Monte Po hill (Catania), Advances in Earthquake Engineering, 14 (2005), pp. 177–195. <https://doi.org/10.2495/1-84564-004-7/10>
- [34] Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z.: Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, Engineering Geology, 102 (2008) 3-4, pp. 85-98, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- [35] Zavod za obnovu Dubrovnika: I. faza plana upravljanja - metodologija i baze podataka, www.zod.hr, 12.09.2020.
- [36] GDDA (General Directorate of Disaster Affairs): Seismic Microzonation for Municipalities – Manual, Republic of Turkey, Ministry of Public Works and Settlement, General Directorate of Disaster Affairs, pp. 137., 2004.
- [37] SM Working Group: Guidelines for Seismic Microzonation, Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy – Civil Protection Department, Rome, 2015.
- [38] Mihalić, S., Oštrić, M., Krkač, M.: Seismic microzonation: A review of principles and practice, Geofizika, 28 (2011), pp. 5-20.
- [39] Levson, V.M., Monahan, P.A., Meldrum, D.G., Watts, B.D., Sy, A., Yan, L.: Seismic microzonation in the Pacific Northwest, with an example of earthquake hazard mapping in Southwest British Columbia, in A paradox of power; voices of warning and reason in the geosciences, (Eds.: Welby, C.W., Gowan, M.E.), Reviews in Engineering Geology, 12 (1998), pp. 75-88.
- [40] Jurak, V., Ortolan, Ž., Ivšić, T., Herak, M., Šumanovac, F., Vukelić, I., Jukić, M.: Geotehničko i seizmičko mikrozoniranje grada Zagreba - pokušaji i ostvarenje, Zbornik radova konf. Razvitak Zagreba, (ur. Radić, J.), Zagreb: SECON HDGK, pp.99-108, 2008.
- [41] Miklin, Ž., Mlinar, Ž., Brkić, Ž., Hećimović, I.: Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5000 (DIGK-Faza I), Hrvatski geološki institut, Knjige 1-4, Zagreb, 2007.
- [42] Miklin, Ž., Podolszki, L., Novosel, T., Sokolić, Ž., Sokolić, I., Ofak, J., Padovan, B., Zailac, K.: Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone mjerila 1:5000 (DIGK-Faza II), Hrvatski geološki institut, Knjige 1-6, Zagreb, 2018.
- [43] Ofak, J., Podolszki, L., Miklin, Ž., Sokolić, Ž.: Detaljna inženjerskogeološka karta Podsljemenske urbanizirane zone Grada Zagreba, Zbornik 7. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva s međunarodnim sudjelovanjem: Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama (Geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena), (ur. Sokolić, I., Zlatović, S.), Zagreb: Hrvatsko geotehničko društvo, pp. 141-145, 2016.
- [44] Tomašić, E., Mazija, G.: Uloga geotehničkog katastra kod zahvata na području Grada Zagreba, Zbornik 7. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva s međunarodnim sudjelovanjem: Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama (Geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena), (ur. Sokolić, I., Zlatović, S.), Zagreb: Hrvatsko geotehničko društvo, pp. 135-140, 2016.
- [45] Pivčević, N., Jukić, M.: Analiza pojavljivanja klizišta i odrona na području Grada Zagreba u razdoblju od 2012-2016 godine. Zbornik 7. Savjetovanja Hrvatskog geotehničkog društva s međunarodnim sudjelovanjem: Geotehnički aspekti nestabilnosti građevina uzrokovanih prirodnim pojavama (Geotechnical aspects of damages caused by natural phenomena), (ur. Sokolić, I., Zlatović, S.), Zagreb: Hrvatsko geotehničko društvo, pp.115-120, 2016.
- [46] Miklin, Ž., Podolszki, L., Novosel, T., Sokolić, I., Ofak, J., Padovan, B., Sović, I.: Studija Seizmička i geološka mikrozonacija dijela Grada Zagreba.- Hrvatski geološki institut, Knjige 1-4, 1 karta, Zagreb, 2019.
- [47] URL: <https://geoportal.zagreb.hr/Karta>, 19.09.2020.
- [48] Kuk, V., Prelogović, E., Sović, I., Kuk, K., Šariri, K.: Seizmološke i seizmotektonske značajke šireg zagrebačkog područja, Građevinar 52 (2000) 11, pp. 647-653
- [49] Simović, V.: Potresi na zagrebačkom području, Građevinar, 52 (2000) 11, pp. 637-645.
- [50] Aničić, D.: Zagrebačka katedrala u potresu 1880. i njena današnja obnova, Građevinar, 52 (2000) 11, pp. 655-661.
- [51] Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E., Đapo, A.: Utjecaj geodinamičkih procesa na izgradnju objekata i infrastrukture na području grada Zagreba, Zbornik radova konferencije Razvitak Zagreba, SECON HDGK, Zagreb, pp. 109-115, 2008.

- [52] Ivšić, T., Ortolan, Ž., Kavur, B.: Applicability of the RNK-method for geotechnical 3D-modelling in soft rocks. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 1 (2013), pp. 551-554.
- [53] Seco e Pinto, P.: Seismic behaviour of geotechnical structures, Inaugural lecture, *Proceedings 13th Regional African Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Marrakech, pp. 3-24, 2003.
- [54] Gazetas, G., Mylonakis, G.: Seismic soil structure interaction: new evidence and emerging issues, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE II, 1998, pp. 1119-1174
- [55] Swane, I.C., Poulos, H.G.: Shakedown analysis of a laterally loaded pile tested in stiff clay, *Proceedings of the Fourth Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Perth, Western Australia, pp. 165-169, 1984.
- [56] Pender, M.J., Pranjoto, S.: Gapping effects during cyclic lateral loading of piles in clay, *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1007, 1996.
- [57] Holland, M.: *Practical Guide to Diagnosing Structural Movement in Buildings*, 1st Edition, Wiley-Blackwell, New Jersey, USA, 2012.
- [58] Kader, M.A., Jahan, I.: A Review of the Application of Remote Sensing Technologies in Earthquake Disaster Management: Potentialities and Challenges, *Proceedings of the International Conference on Disaster Risk Management*, 6p, 2019.
- [59] Sherard, J.L., Woodward, R.J., Gizienski, S.F., Clevenger, W.A.: *Earth and earth rock dams*, John Wiley & Sons, 1963.
- [60] Oka, F., Tsai, P., Kimoto, S., Kato, R.: Damage patterns of river embankments due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake and a numerical modelling of the deformation of river embankments with a clayey subsoil layer, *Soils and Foundations*, 52 (2005) 5, pp. 890-909, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.010>
- [61] oVERFLOW project, URL: www.projectoverflow.eu, 16.09.2020.
- [62] Jarzyna, J.A., Dec, J., Karczewski, J., Porzucek, S., Tomecka-Suchoń, S., Wojas, A., Ziętek, J.: *Geophysics in near-surface investigations, New achievements in geoscience*, (ed. Hwee-San L), InTech, pp. 46-80, 2012, <https://doi.org/10.5772/37067>. ISBN: 978-953-51-0263-2
- [63] Mejia, L., Dawson, E.: Evaluation of Earthquake-Induced Cracking of Embankment Dams, *Proceedings of the 2019 USSD Annual Conference*, Chicago, USA, 20 p., 2019.