

Primljen / Received: 15.11.2025.

Ispravljen / Corrected: 5.12.2025.

Prihvaćen / Accepted: 8.12.2025.

Dostupno online / Available online: 15.12.2025.

# Likvefakcija u Hrvatskoj: procjena rizika i brze postpotresne odluke – pet godina poslije

## Autori:



Prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr](mailto:meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Mario Bačić**, mag.ing.aedif  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[mario.bacic@grad.unizg.hr](mailto:mario.bacic@grad.unizg.hr)



Izv.prof.dr.sc. **Lovorka Librić**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[lovorka.libric@grad.unizg.hr](mailto:lovorka.libric@grad.unizg.hr)



Prof.dr.sc. **Danijela Jurić-Kačunić**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr](mailto:danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr)

Izvorni znanstveni rad

**Meho Saša Kovačević, Mario Bačić, Lovorka Librić, Danijela Jurić Kačunić**

## Likvefakcija u Hrvatskoj: procjena rizika i brze postpotresne odluke – pet godina poslije

Nakon petrinjskog potresa iz 2020. godine, područje Sisačko-moslavačke županije postalo je središte intenzivnih znanstvenoistraživačkih i stručnih aktivnosti vezanih uz likvefakciju. Rad daje pregled evidentiranja i kvantifikacije pojave likvefakcije u razdoblju od pet godina, uključujući terenska opažanja, izradu preliminarnih karata podložnosti te primjenu različitih in-situ i laboratorijskih metoda za procjenu otpornosti tla. Poseban naglasak stavljen je na primjenu različitih geotehničkih metoda ispitivanja tla za procjenu cikličkog otpora tla i identifikaciju područja s povećanim rizikom od likvefakcije, što je omogućilo brzo donošenje odluka u postpotresnoj obnovi i sanaciji infrastrukture. Rad ističe važnost kombiniranja preliminarnih procjena s detaljnim geotehničkim istraživanjima za podršku postpotresnoj obnovi. Dodatno, dane su preporuke za buduće aktivnosti, uključujući detaljnu mikrozonaciju likvefakcijskog potencijala za područje Sisačko-moslavačke županije, definiranje smjernica za buduće istražne radove u sklopu konkretnih projekata, osobito onih koji se odnose na linijsku infrastrukturu gdje je varijabilnost tla izrazito naglašena te uvrštavanje istraženih lokacija u međunarodne baze podataka radi doprinosa globalnoj kalibraciji dijagrama za procjenu likvefakcije.

### Ključne riječi:

petrinjski potres, likvefakcija, geotehnička istraživanja, postpotresna obnova

Original research paper

**Meho Saša Kovačević, Mario Bačić, Lovorka Librić, Danijela Jurić Kačunić**

## Liquefaction in Croatia: Risk assessment and rapid post-earthquake decision-making – five years later

After the 2020 Petrinja earthquake, the area of Sisak-Moslavina County became the focus of intensive scientific research and professional activities related to liquefaction. This paper provides an overview of the documentation and quantification of liquefaction occurrences over a five-year period, including field observations, the development of preliminary susceptibility maps, and the application of various in-situ and laboratory methods to assess soil resistance. Particular emphasis is placed on the use of different geotechnical investigation methods to evaluate cyclic soil resistance and identify areas with increased liquefaction risk, which enabled rapid decision-making in post-earthquake recovery and infrastructure rehabilitation. The study highlights the importance of combining preliminary assessments with detailed geotechnical investigations to support post-earthquake reconstruction. Additionally, recommendations are provided for future activities, including detailed liquefaction microzonation for Sisak-Moslavina County, the definition of guidelines for future investigation work within specific projects, especially those related to linear infrastructure, where soil variability is highly pronounced, and the integration of investigated locations into international databases to contribute to the global calibration of liquefaction assessment charts.

### Key words:

Petrinja earthquake, liquefaction, geotechnical investigations, post-earthquake reconstruction

## 1. Uvod

Tijekom posljednjih stotinu godina potresi su u Europi uzrokovali goleme ljudske i materijalne gubitke, gdje procjene govore o više od 200 tisuća poginulih i stotinama milijardi eura šteta [1]. Iako se seizmički rizik najčešće povezuje s otpornošću građevina i infrastrukture, iskustva iz niza nedavnih potresa pokazuju da tlom uvjetovani fenomeni, među kojima je likvefakcija najistaknutija, mogu biti jednako ili čak više razorni. Brojne analize pokazuju da se znatan udio ukupnih ekonomskih gubitaka može pripisati upravo pojavama likvefakcije, posebice na područjima s visokom razinom podzemne vode i rasprostranjenim aluvijalnim sedimentima [2].

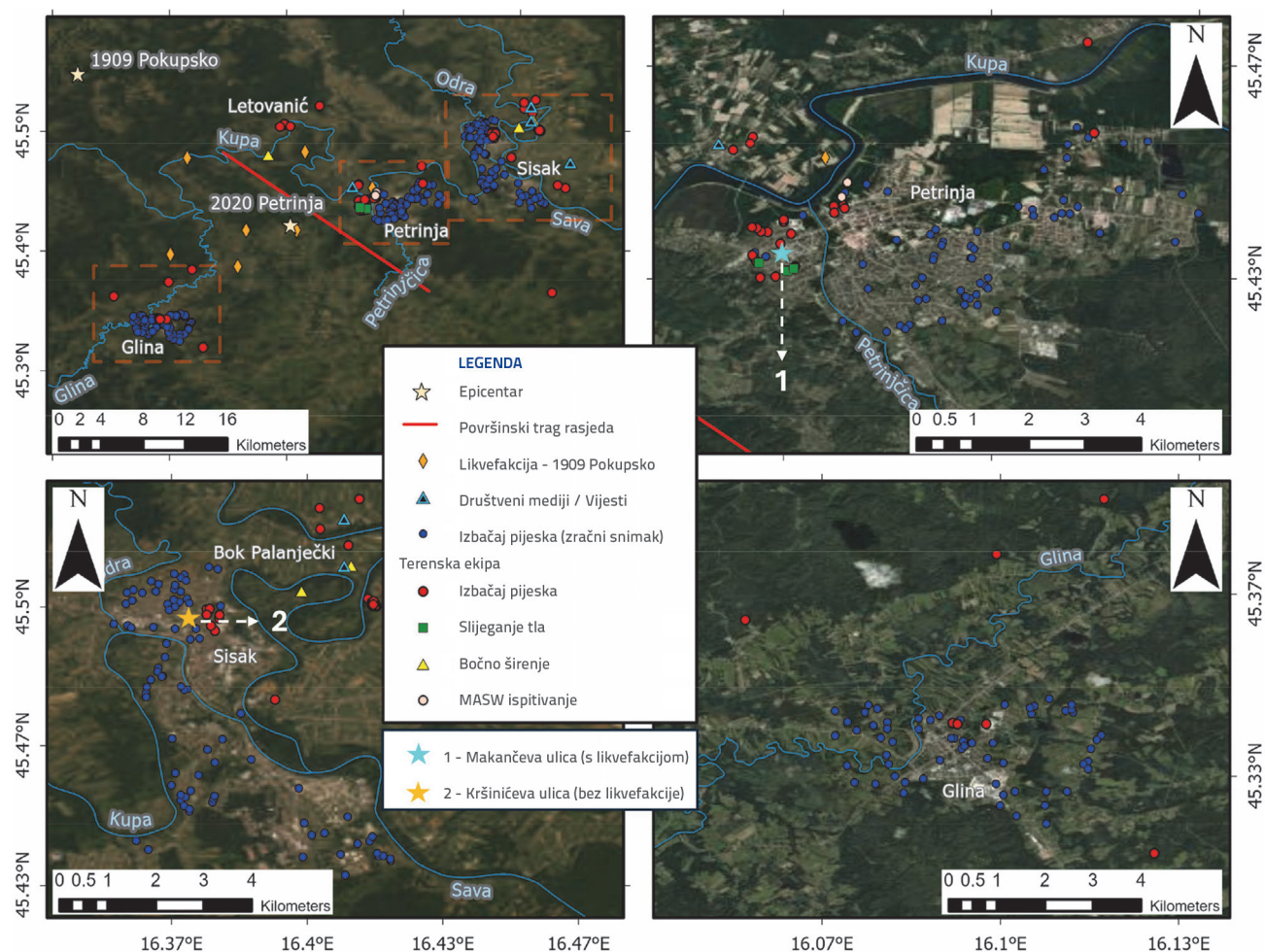
Likvefakcija je geotehnički proces pri kojem zasićeni, slabo vezani pijesci i prašinski pijesci tijekom jakog potresnog podrhtavanja gube dio ili gotovo svu svoju posmičnu čvrstoću [3]. U kratkom vremenu takvi se slojevi ponašaju poput viskozne tekućine, čime privremeno prestaju djelovati kao nosivi medij. Posljedice uključuju prekoračenja graničnih stanja uporabivosti i nosivosti podzemne i površinske infrastrukture. Unatoč napretku u eksperimentalnim, numeričkim i terenskim istraživanjima, likvefakcija i danas predstavlja jedan od najizazovnijih potresnih mehanizama zbog svoje izrazite prostorne varijabilnosti i iznenadnosti pojave. Znanstvena zajednica kontinuirano ulaže napore u poboljšanje razumijevanja ponašanja tla tijekom dinamičkog opterećenja, kao i u napore u razvoju odgovarajućih mjera mitigacije [4]. Pri tome svakako treba naglasiti da tlo koje je jednom likvefiralo nije nužno steklo dovoljnu otpornost na likvefakciju, tj. ponovna likvefakcija može se pojaviti tijekom naknadnih seizmičkih događaja. Štoviše, brojna istraživanja [5–8] ukazuju na to da tlo koje jednom likvefira ne mora postati otpornije te ponovna likvefakcija tijekom naknadnih potresa nije rijetkost.

Sustavna istraživanja likvefakcije razvila su se nakon potresa u Niigati 1964. godine [9], koji je pružio prve detaljne dokumentacije ovog fenomena i potaknuo razvoj današnjih empirijskih metoda i inženjerskih kriterija. Od tada su teorijska znanja i prakse mitigacije znatno napredovale, no pojava likvefakcije i dalje snažno ovisi o lokalnim uvjetima tla, geološkom kontekstu i intenzitetu potresnog pobuđivanja. Iako se u modernoj znanstvenoj i stručnoj literaturi likvefakcija u Hrvatskoj rijetko spominjala sve do 2020. godine, povijesni zapisi ukazuju da se ovaj fenomen događao i ranije, posebice u Panonskom bazenu. Presjek ovih događaja daju Veinović [10] i Mijić i sur. [11]. Zabilježene su likvefakcijske manifestacije tijekom potresa u Virovitici 1757., Zagrebu 1880. i Pokupskom 1909., pa čak i tijekom potresa u široj dubrovačkoj regiji (potresi iz 1667. i 1979. godine). U kontinentalnom području Hrvatske likvefakcija se uglavnom javljala u aluvijalnim ravnica uz velike rijeke, Dravu, Savu i Kupu, gdje dominiraju rahli, vodom zasićeni sedimenti pogodni za razvoj likvefakcije. U slučaju potresa kod Virovitice 1757. kronike navode pucanje tla i izbijanje vode pomiješane sa žutim pijeskom na više lokacija, uključujući i punjenje dubokih bunara sedimentom. Tijekom

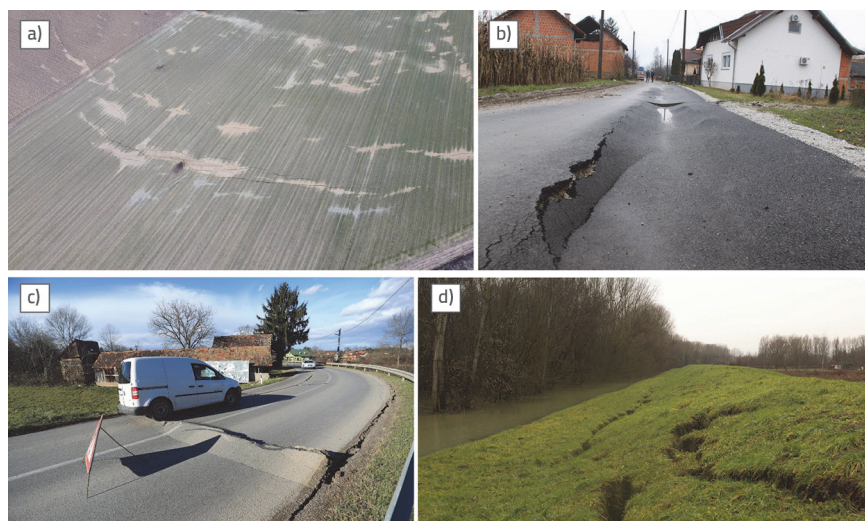
zagrebačkog potresa 1880. godine, koji je svojom magnitudom bio znatno veći od zagrebačkog potresa 2020., na više mjesta prijavljeno je izbijanje sivkastog pijeska iz pukotina te formiranje stožastih nakupina pijeska, povremeno i impresivnih dimenzija [12]. Slične manifestacije dokumentirane su i nakon potresa kod Pokupskog 1909., gdje je napuknulo tlo uz rijeku Kupu ponovno ukazivalo na osjetljivost plitkih aluvijalnih naslaga na dinamičko opterećenje. Ovi povijesni zapisi potvrđuju da su hrvatske aluvijalne ravnice višekratno pokazale sklonost likvefakciji te predstavljaju dragocjen kontekst za razumijevanje suvremenih događaja.

Za razliku od povijesno dokumentiranih, ali prostorno ograničenih pojava, likvefakcija zabilježena nakon potresa magnitude  $M_w$  6,4 iz 2020. godine, s epicentrom kod Petrinje, predstavlja najveći dosad potvrđeni slučaj velikih razmjera (eng. *large-scale*) ovog fenomena u Hrvatskoj. Autori su u radu objavljenom neposredno nakon zagrebačkog potresa [3], u kojem nije zabilježena likvefakcija primarno zbog relativno niske potresne magnitude, prikazali ključne elemente kojima se bavi geotehničko potresno inženjerstvo, a nedugo nakon toga dogodio se petrinjski potres. Intenzitet podrhtavanja tla, povišena razina podzemne vode te široko rasprostranjeni aluvijalni sedimenti u dolinama Kupe, Save, Gline i Maje stvorili su povoljne uvjete za pojavu likvefakcije na području procijenjene površine od približno 600 km<sup>2</sup>, unutar otprilike 20 km radijusa od epicentra. Detaljan prikaz lokacija kod kojih je došlo do likvefakcije, snimljenih zračnim snimkama i evidentiranim od strane terenskih ekipa, dali su Mijić i sur. [11], kako je prikazano na slici 1.

Manifestacije likvefakcije na području Sisačko-moslavačke županije bile su prostorno vrlo jasno izražene, ponajprije kroz niz linearno poredanih pojava izbačenog pijeska koje su pratile pravocrtna pukotina na površini tla. Šire područje županije prekriveno je neogenskim i kvartarnim naslagama. Neogenske naslage predstavljene su grubim i sitnim klastitima – konglomerati, šljunci i pijesci te lapori, gline i pješčenjaci ( $M_2$ ). Sličan je sastav badenskih ( $M_4$ ) i sarmatskih ( $M_5$ ) naslaga. Panonske ( $M_6$ ) naslage predstavljaju vapnenci i lapori, a njih sijede pontske ( $M_7$ ) taložine (lapori i glinjac i pijescima). Međutim, najveća koncentracija likvefakcijskih pojava zabilježena je u područjima uz Savu, Kupu i Glinu, gdje recentni aluvij sadrži dominantno čiste pijeske, povremeno i prašinate ili šljunkovite pijeske, kao i pojedinačne leće krupnijeg šljunka [13]. Aluvijalni sedimenti sastoje se prvenstveno od pijesaka, mjestimično pomiješanih s prašinastim i glinovitim frakcijama, te pokazuju promjenjiv mineralni sastav, uključujući kvarc, stijenske fragmente i povremene karbonate. Poplavni sedimenti pretežno su glinoviti i pjeskoviti prahovi, nastali taloženjem sitnozrnatog materijala tijekom poplavnih događaja. Ovi sedimenti odražavaju dinamično okolišno okruženje rijeka i njihovih poplavnih zona, s lokalnim debljinama sedimenata koje dosežu nekoliko metara. Na površini su se likvefakcijski procesi manifestirali nizom geomorfni i infrastrukturnih oštećenja: od navedene pojave prostranih pukotinskih zona (slika 2. a), preko slijeganja i deformacija transportne infrastrukture



Slika 1. Satelitska karta Petrinje, Siska i Gline s označenim lokacijama dokumentiranih pojava likvefakcije tijekom petrinjskog potresa 2020. godine, preuzeto i prevedeno iz Mijić i sur. [11], s naznačenim lokacijama (1 i 2) za koje će se u okviru ovog rada provoditi analiza potencijala likvefakcije



Slika 2. Manifestacije likvefakcije povezane s temeljnim tlom i infrastrukturom tijekom petrinjskog potresa: (a) uzdužne pukotine s izbačenom pijeskom, (b) (c) deformirane prometnice (c – fotografija: Slavko Midzor/Edina Zuko/PIXSELL), (d) pukotine na nasipu za obranu od poplava (fotografija: Tomislav Novosel / Hrvatske Vode)

(slike 2.b i 2.c), do značajnih oštećenja na nasipima za obranu od poplava (slika 2.d), gdje je zabilježeno pucanje i bočno pomicanje nasipa uslijed gubitka nosivosti temeljnog tla. I na ostaloj linijskoj infrastrukturi, kao što je vodovodna i kanalizacijska mreža, zabilježene su deformacije i slomovi. Nadalje, identificirani su i problemi s mostovima i njihovim upornjacima, gdje je djelomična destabilizacija tla dovela do pomaka i deformacija konstrukcije mosta te privremenog ograničavanja prometa.

Navedeni geotehnički problemi koji su uslijedili tijekom i nakon petrinjskog potresa čine temelj za detaljniji prikaz u nastavku rada. Cilj je ovoga članka pružiti sažet, ali obuhvatan pregled ključnih

spoznaja, aktivnosti i postupaka razvijenih i primijenjenih u pet godina nakon petrinjskog potresa, s naglaskom na razumijevanje i upravljanje rizikom od likvefakcije. U prvom se dijelu daje pregled najvažnijih znanstvenoistraživačkih i stručnih aktivnosti provedenih u Sisačko-moslavačkoj županiji, uključujući izradu inventara likvefakcijskih pojava i prikupljanje podataka potrebnih za daljnje analize. Nakon toga slijedi prikaz pristupa procjeni likvefakcijskog potencijala u uvjetima ubrzane postpotresne obnove, uz naglasak na razloge zbog kojih su određeni postupci, prije svega metoda cikličkog naprezanja, postali dominantni u domaćoj praksi. Metodologija je potom prikazana na dvije reprezentativne lokacije, od kojih je jedna doživjela likvefakciju, a druga nije, s ciljem da se naglase razlike u svojstvima aluvijalnih naslaga te da se ilustrira praktična primjena postupka u realnim uvjetima terenskog odlučivanja. Na kraju se donosi kratak pregled tehnologija sanacije temeljnog tla primijenjenih tijekom obnove te preporuke za daljnje unaprjeđenje procjena i postupaka, s posebnim naglaskom na važnost sustavnog prikupljanja podataka i integracije više metoda ispitivanja.

## 2. Znanstvenoistraživačke i stručne aktivnosti na području Sisačko-moslavačke županije

Nakon petrinjskog potresa iz 2020. godine, područje Sisačko-moslavačke županije postalo je središte izrazito intenzivnih znanstvenih i stručnih aktivnosti usmjerenih na dokumentiranje, razumijevanje i kvantifikaciju pojava likvefakcije. U prvim mjesecima nakon potresa fokus je bio na sustavnom evidentiranju površinskih manifestacija i preliminarnim procjenama prostorne rasprostranjenosti ovog fenomena, a naknadna su istraživanja uključivala napredna geotehnička i geofizička ispitivanja s ciljem određivanja svojstava tla i procjene otpornosti na cikličko opterećenje.

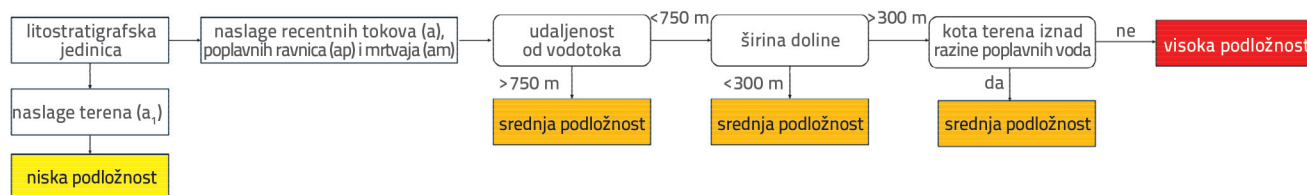
Jedna od ključnih ranih i vrlo vrijednih inicijativa bila je izrada preliminarnih karata podložnosti likvefakciji za šire potresom pogođeno područje [14]. U tu svrhu primijenjena je heuristička metoda temeljena na poznatim preduvjetima za pojavu likvefakcije: prisutnosti rahlih granuliranih slojeva ispod razine podzemne vode, visokoj razini podzemne vode te seizmičkom pobuđivanju jačine  $a_g \geq 0,10 g$ , kao i na lokacijama na kojima je likvefakcija zabilježena tijekom petrinjskog potresa. Za potonje je izrađena karta površinske manifestacije pojave likvefakcije identificirane terenskim pregledom kao što su pješčani stošci na površini, zapunjavanje bunara pijeskom i/ili izbacivanje pijeska iz bunara, izbacivanje pijeska uz temelje građevina unutar i izvan građevina, a na većim je površinama izvršeno fotogrametrijsko

snimanje iz bespilotne letjelice. Ulazni podaci metodologije obuhvaćali su:

1. navedeni preliminarni inventar likvefakcije,
2. geološku građu, gdje su stratigrafske jedinice holocenskih aluvijalnih naslaga preuzete s Osnovne geološke karte (OGK),
3. topografiju iz digitalnog modela terena te
4. položaje vodotoka mrtvaja digitalizirane s topografske karte i satelitskih snimaka.

Pri tome je dostupnost podataka uvelike određivala rezoluciju i pouzdanost konačnog modela. Rezultati metodologije, prikazane na slici 3., objedinjeni su u preliminarnu kartu podložnosti na likvefakciju. Međutim, autori naglašavaju da je riječ o inicijalnoj procjeni budući da ključni geotehnički parametri, poput debljine nadsloja, geotehničkih svojstava podložnih slojeva i detaljnih karata podzemne vode, u tom trenutku nisu bili dostupni. Naglašava se i nužnost provedbe sustavnih i detaljnih geotehničkih istraživanja, jer tek s preciznim podacima o geološkoj građi, geotehničkim značajkama naslaga i razinama podzemne vode bit će moguće izraditi visoko rezolucijske karte podložnosti prilagođene potrebama lokalnih zajednica i prostorno-planskih dokumenata. Važan dio predstavljaju posebni uvjeti za potrebe rekonstrukcije ili nove gradnje, koji za sve razine podložnosti na likvefakciju, od niske do visoke, naglašavaju obavezno provođenje geotehničkih istraživanja koja uključuju i procjenu potencijala likvefakcije. Navedena karta integrirana je u interaktivni ISPU portal [15] Ministarstva graditeljstva, prostornog uređenja i državne imovine.

Doprinos ranim preglednim radovima dan je u izvještaju GEER-a [16], u kojem su prikazane odabrane manifestacije potresa, uključujući i likvefakciju na poljoprivrednim, sportskim i drugim otvorenim površinama, u većini slučajeva smještenim u neposrednoj blizini vodotoka. Lokacije su mapirane na temelju terenskih opažanja, izvješća lokalnih suradnika i obavijesti stanovništva. Rani pregledni radovi imali su važnu ulogu u uspostavi početnog razumijevanja prostorne raspodjele likvefakcije, ali i u identificiranju lokacija za detaljna geotehnička i geofizička istraživanja koja su uslijedila. Jedan od prvih radova koji je ponudio inventar nastalih površinskih deformacija bio je rad Pollak i sur. [17] u kojem su autori prikupili i sistematizirali velik broj ulaznih podataka te izradili preliminarnu bazu kritičnih zona oštećenja i deformacija tla. U trenutku objave baza je obuhvaćala 85 lokacija s manifestacijama likvefakcije. Analiza udaljenosti pojava pješčanih izbačaja (eng. *boiling sand*) od rijeka Kupe, Save i Gline pokazala je snažnu vezu između pojave likvefakcije i aluvijalnih tijela, pri čemu su udaljenosti tipično bile



Slika 3. Metodologija za izradu preliminarne karte podložnosti na likvefakciju u Sisačko-moslavačkoj županiji, prilagođeno iz [14]

do 1 km od riječnih korita. Kao preliminarni zaključak istaknuto je da su likvefakcijske pojave gotovo isključivo zabilježene u širokim aluvijalnim nanosima s izraženim slojevima rastresitog pijeska. U sličnom razdoblju objavljen je rad Tondi i sur. [18], čiji je fokus bio na cjelovitom opisu primarnih i sekundarnih potresnih efekata. Iako likvefakcija nije bila središnja tema rada, autori su dokumentirali niz likvefakcijski induciranih pukotina i drugih sekundarnih geomorfoloških efekata. Treća važna rana studija jest pregledni rad Baize i sur. [19], u kojem je europski interdisciplinarni tim geologa i inženjera mapirao više od 700 različitih deformacijskih obilježja, uključujući pukotine, rasjedne zone, klizišta i likvefakcijske fenomene, na temelju triju terenskih kampanja provedenih početkom 2021. godine. Likvefakcijske pojave dokumentirane su kombinacijom terenskog kartiranja i daljinske detekcije, pri čemu je prikupljeno oko 200 fenomenoloških zapisa na području od približno 600 km<sup>2</sup> između riječnih dolina Kupe, Gline i Save. Autori ističu da preliminarni nalazi dobro korespondiraju s postojećim empirijskim odnosima za udaljenost i intenzitet likvefakcije [20–22], ali da veliki obujam novih podataka ima potencijal za nadogradnju tih metoda te razvoj preciznijih mikrolokacijskih kriterija. Najnoviji i najobuhvatniji prikaz izrade inventara likvefakcije daju Amoroso i sur. [23], koji analiziraju ukupno 61 lokaciju na području Petrinje, kombinirajući terenska opažanja s laboratorijskim ispitivanjima za klasifikaciju tla i određivanje sedimentnog sastava. Primijenjeni postupak omogućio je detaljnu geološku i geotehničku karakterizaciju svih lokacija na kojima je zabilježena likvefakcija. Podaci prikupljeni tijekom postpotresnih terenskih pregleda, zajedno sa sedimentološkim i geotehničkim analizama, sustavno su organizirani u standardizirane obrasce za svaku lokaciju, čime je izrađen vrijedan alat za daljnja seizmološka, geološka i geotehnička istraživanja.

Svi prethodno navedeni radovi predstavljaju temeljne napore u izradi preliminarnih baza podataka i inventara likvefakcije za Sisačko-moslavačku županiju, pri čemu se oslanjaju na velik broj terenskih opažanja, daljinsku detekciju i široko prostorno pokrivanje. Time su postavljeni početni okviri za razumijevanje prostorne raspodjele likvefakcijskih pojava na razini cijelog pogođenog područja. Nasuprot tome, provedena su i brojna istraživanja koja se fokusiraju na ciljano geotehnička i/ili geofizička istraživanja na pojedinačnim lokacijama. Riječ je o istraživanjima koja primjenjuju različite *in-situ* i laboratorijske metode, često u kombinaciji, kako bi se dobio precizniji uvid u lokalne strukturne, geotehničke i seizmičke karakteristike tla. Rezultati ovih istraživanja, iako lokalno usmjereni, iznimno su važni jer nadopunjuju regionalne baze podataka te omogućuju njihovu validaciju, kalibraciju i buduće unaprjeđenje.

Prvi rad u ovom nizu jest Bačić i sur. [24], koji analizira likvefakcijski potencijal kao uzrok deformacije i slijeganja prometnice na lokaciji naselja Nova Drenčina. Usporedba rezultata CPT i MASW ispitivanja na četirima lokacijama pokazala je da unatoč lokalnim neusklađenostima u rezultatima procijenjeni faktori sigurnosti na likvefakciju prema dvjema

metodama pokazuju relativno konzistentne trendove. Ovaj rad pokazao je važnost kombiniranja različitih metoda ispitivanja tla pri procjeni likvefakcijskog potencijala. Nadovezujući se na to istraživanje, Bačić i sur. [25] usmjerili su se na područje nasipa za obranu od poplava kod naselja Krnjica, koji je pretrpio znatna oštećenja uslijed likvefakcije. Autori su razvili metodologiju za generiranje sintetičkih (umjetnih) CPT profila na temelju izmjerenih brzina posmičnih valova, čime su omogućili procjenu likvefakcije i na lokacijama gdje nisu provedena CPT sondiranja. Unatoč tome što je sintetički pristup u pravilu podcjenjivao vrijednosti otpora na šiljku CPT-a ( $q_c$ ), procjene faktora sigurnosti i prostorna distribucija zona potencijalne likvefakcije dobro su se podudarale s rezultatima dobivenima iz provedenih CPT ispitivanja. Daljnje istraživanje [26] iste grupe autora fokusiralo se na nasip za obranu od poplava u Galdovu, gdje su primijenjene tri *in-situ* metode ispitivanja temeljnog tla CPT, SPT i MASW. Usporedba procjena cikličke otpornosti pokazala je da CPT metoda daje višu vjerojatnost likvefakcije, dok SPT i  $v_s$  temeljene metode uglavnom daju niže, međusobno usporedive rezultate. Autori naglašavaju da potpuna prostorna procjena zahtijeva uključivanje vertikalne i horizontalne heterogenosti tla, što je predmet njihovih daljnjih istraživanja. Uz hrvatske istraživačke skupine, značajan doprinos dali su i autori iz međunarodnih istraživačkih konzorcija. Amoroso i sur. [27] proveli su integriranu geološko-geotehničku i geofizičku kampanju na deset lokacija duž Kupe, Gline i Save. U istraživanje su uključena *in-situ* ispitivanja poput dinamičkog DPT sondiranja i Medusa DMT dilatometra, kombinirana s opsežnim geofizičkim profiliranjima, što je pružilo detaljne uvide u svojstva slojeva koji su likvefirali i onih koji nisu. Nastavno, Moiriat i sur. [28] fokusirali su se na strukturalnu karakterizaciju i mehanička svojstva aluvijalnih naslaga duž rijeke Kupe. Primijenjena su dinamička CPT sondiranja (DCPT), lagano (DPL) i teško (DPSH) sondiranje te električna tomografija (ERT) i georadarska (GPR) geofizička metoda. Za potrebe kalibracije uzimani su i uzorci bušotinske jezgre. Autori su prikazali preliminarne interpretacije podataka i naglasili potencijal kombiniranih metoda za preciznu identifikaciju slojeva podložnih likvefakciji.

Osim brojnih znanstvenoistraživačkih aktivnosti, iznimno važan segment u postpotresnom razdoblju činila su geotehnička te geofizička istraživanja provedena za potrebe obnove postojećih i izgradnje novih stambenih i infrastrukturnih objekata. Posebno se ističe opsežna i ciljano planirana istražna kampanja koja je obuhvatila bušotine, CPT ispitivanja i primjenu više geofizičkih metoda radi detaljne karakterizacije geotehničko-geoloških uvjeta ispod niza nasipa za obranu od poplava. Ti su nasipi tijekom potresa pretrpjeli značajne deformacije i lokalne slomove, a rezultati istraživanja predstavljaju temelj za njihovu sanaciju [29, 30]. Najveći stručni angažman geotehničke zajednice ipak je bio vezan uz izradu geotehničkih elaborata za zamjenske kuće i zgrade u okviru postpotresne obnove koju provodi Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine. Zbog velikog broja lokacija i potrebe za brzim, ali pouzdanim inženjerskim prosudbama, uspostavljena

je standardizirana metodologija temeljena na kombinaciji CPT ispitivanja i geofizičke SASW metode. Ovaj pristup omogućio je dovoljno brzu i preciznu procjenu ključnih parametara: nosivosti temeljnog tla, tipa tla u smislu lokalnog amplifikacijskog učinka, preliminarne podločnosti lokacija likvefakcije te potrebe za dodatnim istraživanjima na terenima s mogućim klizanjem. Do danas je na ovaj način ispitano približno 400 lokacija, što predstavlja dosad najveći skup sustavno prikupljenih podataka o geotehničkim svojstvima tla u Sisačko-moslavačkoj županiji. Osim neposredne primjene u obnovi, ovi će podaci imati trajnu vrijednost te mogu poslužiti kao čvrsta osnova za buduće inicijative usmjerene na sveobuhvatnu procjenu likvefakcijskog potencijala i detaljnije mikrozonacijske analize na razini županije.

### 3. Pristupi procjeni likvefakcijskog potencijala u uvjetima postpotresne obnove

U praksi postoji širok raspon metoda za određivanje likvefakcijskog potencijala tla. Laboratorijska ispitivanja omogućuju detaljan uvid u cikličko nedrenirano ponašanje materijala te pružaju vrlo vrijedne podatke za analize u efektivnim naprezanjima i izgradnju složenih numeričkih modela. Zbijanje tla pri cikličkom opterećenju i porast pornog tlaka određuju se eksperimentalno u dreniranim i nedreniranim cikličkim pokusima s kontroliranom posmičnom deformacijom ili kontroliranim posmičnim naprezanjem, najčešće izraženim kao omjer posmičnog i srednjeg naprezanja. Međutim, laboratorijski pristupi imaju niz praktičnih ograničenja, među kojima se ističe teškoća pripreme neporemećenih uzoraka dovoljno visoke kvalitete. Uz to, laboratorijska ispitivanja zahtijevaju značajno vrijeme za pripremu i provedbu, što je u kontekstu postpotresne obnove predstavljao ograničavajući faktor.

Zbog navedenih razloga tijekom posljednjih pet godina istraživanja na području Sisačko-moslavačke županije snažno su se usmjerila prema *in-situ* metodama ispitivanja, što je ujedno u skladu s međunarodnim trendovima primjene terenskih ispitivanja za evaluaciju potencijala likvefakcije. Terenski pokusi poput statičkog penetracijskog pokusa (CPT), standardnog penetracijskog pokusa (SPT) i geofizičkih metoda određivanja posmičnih brzina pokazali su se vrlo pogodnima zbog svoje pouzdanosti, dostupnosti te činjenice da se redovito primjenjuju u hrvatskoj inženjerskoj praksi. No možda najvažnije, navedeni veliki broj lokacija zahtijevao je brzu, pouzdanu i operativnu procjenu likvefakcijskog potencijala kako bi se donijele odluke o sanaciji i tretmanu temeljnog tla u sklopu postpotresne obnove. U tim okolnostima kao ključno rješenje nametnula se pojednostavljena metoda cikličkog naprezanja (eng. *Cyclic Stress Approach*) [31], kao i primjena empirijskih likvefakcijskih dijagrama (tzv. *triggering liquefaction charts*) koji se u praksi povremeno ažuriraju [32, 33]. Ove metode omogućuju relativno brzu procjenu faktora sigurnosti i vjerojatnosti pojave likvefakcije uz korištenje standardnih *in-situ* podataka, što ih čini izrazito prikladnima u hitnim tehničkim intervencijama. U nastavku se daje pregled navedene metode, postupak

određivanja ulaznih i izlaznih parametara te analiza rezultata na dvjema reprezentativnim lokacijama na području Petrinje: jednoj na kojoj je likvefakcija dokumentirana te drugoj na kojoj do likvefakcije nije došlo.

#### 3.1. Metoda cikličkog naprezanja

Pojednostavljeni pristup temeljen na cikličkom naprezanju se često naziva "pojednostavljena metoda" i najčešće je primijenjena metoda u praktičnom geotehničkom inženjerstvu za ocjenu aktivacije (eng. *triggering*) likvefakcije. Za analizu je potreban izračun ili procjena dviju glavnih varijabli – omjer cikličkog naprezanja (CSR) kao djelovanje koje će biti izazvano potresom te otpornost tla na likvefakciju (CRR) kao varijabla potrebna za procjenu sposobnosti tla da se odupre likvefakciji. Za karakterizaciju opterećenja CSR-a intenzitet potresnog djelovanja kvantificiran je omjerom primijenjenog posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\sigma_{v0}} \quad (1)$$

Dok je prilikom laboratorijskog ispitivanja vrijednost  $\tau_c$  konstantna, na terenu je promjenjiva. Zbog navedenog posmično je naprezanje potrebno aproksimirati brojem ciklusa i konstantnim posmičnim naprezanjem:

$$\tau_c = 0,65 \cdot \tau_{max} \quad (2)$$

Najveće posmično naprezanje sloja tla  $\tau_{max}$  pri površini (površinski sloj debljine " $h$ ") može se procijeniti uzimanjem u obzir pretpostavke da se stupac tla ponaša kao kruti blok tijekom djelovanja potresa:

$$\tau_{max} = \frac{a_{max}}{g} \cdot \sigma_{v0} \quad (3)$$

Budući da se maksimalno posmično naprezanje smanjuje s dubinom (stupac tla ispod površinskog sloja debljine " $h$ ") ne ponaša se kao kruti blok) izraz se množi faktorom redukcije  $r_d$ , nakon čega se dobije konačan izraz:

$$CSR = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}} \cdot r_d \quad (4)$$

Za karakterizaciju otpornosti tla, CRR, potrebno je odrediti otpor tla u odnosu na gubitak posmične čvrstoće, tj. aktivaciju likvefakcije. Otpor tla može se odrediti na osnovi laboratorijskih testova ili, češće u praksi, procijeniti s pomoću *in-situ* ispitivanja. Parametar CRR vrijednost je CSR-a potrebna kako bi se aktivirala likvefakcija. Do aktivacije likvefakcije dolazi kada je:

$$CSR \geq CRR \quad (5)$$

Odnos parametara CRR i CSR daje faktor sigurnosti:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (6)$$

gdje faktor sigurnosti od  $FS = 1$  označava stanje "labilne ravnoteže", vrijednosti  $FS < 1$  definiraju pojavu likvefakcije, a vrijednosti  $FS > 1$  podrazumijevaju da tlo još uvijek ima dovoljno otpornosti, odnosno da neće doći do pojave likvefakcije.

### 3.1.1. Određivanje reprezentativnog vršnog ubrzanja tla za izračun CSR-a

Za potrebe određivanja ulaznih vrijednosti vršnog horizontalnog ubrzanja tla ( $a_{\max}$ ) u izrazu (4) u projektantskoj se praksi uobičajeno primjenjuju preporuke norme EN 1998-1 [34] i pripadajuće karte projektnih horizontalnih vršnih ubrzanja tla tipa A za povratna razdoblja  $T_p = 95$  i 475 godina, koje je izradio Geofizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, a koje su uključene u hrvatski nacionalni dodatak navedenoj normi [35]. Pri određivanju vršnog ubrzanja tla na površini potrebno je uzeti u obzir i tip tla na promatranoj lokaciji. Utjecaj lokalnih uvjeta tla na amplifikaciju seizmičke pobude obuhvaćen je u navedenoj normi, gdje Bačić i sur. [3] daju kritički prikaz navedenog.

Vršna horizontalna ubrzanja tla prvenstveno su kalibrirana za manja povratna razdoblja, odnosno za uobičajene projektne razine potresnog djelovanja. Međutim, potres koji je pogodio Petrinju 2020. godine rezultirao je značajno većim vrijednostima vršnog horizontalnog ubrzanja tla od onih prikazanih navedenim kartama hazarda danim u normi. Najčešće korišteni podatak za određivanje horizontalnog ubrzanja tla za petrinjski potres dan je u USGS ShakeMap sustavu [36]. Ovakvo je odstupanje očekivano jer ShakeMap prikazuje posljedice stvarnog potresa (instrumentalna mjerenja, makroseizmička opažanja, numerička interpolacija), a hazardne karte iz norme prikazuju dugoročnu vjerojatnost prekoračenja. Drugim riječima, vršna horizontalna ubrzanja tla iz ShakeMapa ne moraju biti jednaka vrijednostima iz navedenih karata, jer radi se o dvama konceptualno različitim prikazima seizmičkog djelovanja. S obzirom na to da dosadašnja istraživanja procjene potencijala likvefakcije u Petrinji dominantno uzimaju kao relevantan podatak vršno ubrzanje tla primjenom USGS metodologije, u nastavku se ista prikazuje na temelju izračuna vrijednosti horizontalnog vršnog ubrzanja tla koji procjenjuje na temelju triju osnovnih komponenti: modificiranog Mercalli intenziteta (MMI), "Did You Feel It?" makroseizmičkih opažanja (DYFI) te empirijskih modela predikcije gibanja tla (GMPE). Ovaj kombinirani pristup omogućuje formiranje prostorne raspodjele površinskog ubrzanja tla i predstavlja prihvatljiv ulaz za procjenu CSR-a.

#### 3.1.1.1. Modified Mercalli Intensity (MMI)

*Modified Mercalli Intensity* (MMI) opisna je ljestvica intenziteta potresa koja rangira opažene učinke na ljude, građevine i okoliš rimskim brojevima I – XII: od neprimjetnog do razornog. Ljestvica

nema "matematičku" definiciju poput magnitude. Umjesto toga predstavlja sustavno sažete makroseizmičke efekte zabilježene na određenoj lokaciji. Iako je MMI kvalitativan, višegodišnja empirijska istraživanja uspostavila su kvantitativne veze između MMI i instrumentalnih mjerenja gibanja tla, posebno vršnog horizontalnog ubrzanja ( $a_{\max}$  ili češće korištene kratice PGA) i maksimalne brzine (PGV). Wald i sur. [37] usporedili su opažene intenzitete s izmjerenim vršnim vrijednostima u nizu kalifornijskih potresa i dobili logaritamsko-linearnu relaciju. Za relevantan raspon intenziteta autori navode, primjerice, za PGA ( $V \leq I \leq VIII$ ):

$$I = 3,66 \log_{10} PGA - 1,66 \quad (7)$$

Ove relacije omogućuju dobivanje očekivane PGA iz određenog intenziteta  $I$ :

$$PGA = 10^{\frac{I+1,66}{3,66}} \quad (8)$$

MMI raste približno linearno s logaritmom PGA, gdje povećanje intenziteta za oko 1 stupanj tipično implicira višestruki porast PGA-e, pri čemu točan faktor ovisi o koeficijentima odabrane regresije.

Istraživanja pokazuju da se veze  $MMI \rightarrow PGA/PGV$  razlikuju po regijama (različit građevinski fond, uvjeti u tlu, način procjene intenziteta) te da PGV često bolje korelira s višim stupnjevima oštećenja. Atkinson i Kaka [38] izvode za središnji dio SAD-a relacije  $MMI \rightarrow PGA/PGV$  i zaključuju da su PGV temeljene metrike robusnije za više intenzitete, a da su relacije s PGA-om dobro upotrebljive, osobito kad je cilj iz opaženog intenziteta procijeniti ubrzanje. U konačnici,  $MMI \rightarrow PGA$  treba shvatiti kao statističku procjenu s poznatom raspršenosti. Suvremeni radovi proširuju pristup uvođenjem konverzijskih jednadžbi gibanje  $\rightarrow$  intenzitet GMICE (eng. *Ground Motion to Intensity Conversion Equation*) koje često imaju segmentirane logaritamske forme i eksplicitno tretiraju nesigurnosti (standardne devijacije). Caprio i sur. [39] sintetiziraju globalne i regionalno osjetljive relacije te pokazuju koliko regionalnost utječe na koeficijente i raspon primjenjivosti. Praktična je posljedica da pri pretvorbi  $MMI \rightarrow PGA$  (ili obratno) treba koristiti regionalno primjenjive koeficijente i uvijek prikazivati medijan i raspon (npr.  $\pm\sigma$ ), a ne samo jednu "točnu" vrijednost.

Za konzistentnu primjenu važni su definicija komponente i jedinice u kojima je PGA izražena (npr. veća od dviju horizontalnih komponenti; g ili  $\text{cm/s}^2$ ) te protokol obrade vršnih vrijednosti. Odstupanje od pretpostavki pod kojima su relacije izvedene može dati sustavno pomaknut rezultat. Stoga je preporuka u izvještavanju uz procijenjenu PGA navesti i korištenu definiciju komponente/jedinica te raspon pouzdanosti.

#### 3.1.1.2. Did You Feel It? (DYFI)

*Did You Feel It?* (DYFI) sustav je USGS-a za brzo prikupljanje makroseizmičkih podataka od građana putem mrežnih upitnika

i mobilnih platformi, kako bi se neposredno nakon potresa izradile karte intenziteta. Obrasci bilježe opažene učinke na ljude, predmete i zgrade (npr. osjećaj trešnje, padanje predmeta, manja/veća oštećenja) zajedno s lokacijom prijave. Pojedinačni odgovori najprije se pretvaraju u numeričke vrijednosti po pitanjima, zatim se na lokalnoj razini agregiraju u tzv. *Community Weighted Sum* (CWS), a iz CWS-a izračuna se tzv. *Community Decimal Intensity* (CDI), kontinuirani (decimalni) intenzitet usklađen s MMI ljestvicom, prema standardnoj logaritamskoj funkciji:

$$CDI = 3,40 \ln(CWS) - 4,38 \quad (9)$$

koja se zaokružuje na jednu decimalu. Ako je CWS > 0 postavlja se minimalni CDI = 2,0, a ukupni CDI ograničen je na najviše 9,0. Ovaj je postupak kalibriran tako da CDI na razini lokalne zajednice u prosjeku odgovara MMI dobivenom klasičnom makroseizmičkom procjenom. Ovaj postupak omogućava da se iz velikog broja heterogenih opisa dobije kvantificirani intenzitet po naseljima odnosno područjima.

CDI → MMI mapiranje dovodi do intervalnog rezultata (npr. približno 2,5 – 3,4 → MMI III, 3,5 – 4,4 → MMI IV, 4,5 – 5,4 → MMI V). Iako pragovi ovise o odabranoj konvenciji zaokruživanja, svrha je zadržati kompatibilnost s postojećim protokolima i praksom intenzitetnih karata. Ključno je naglasiti da CDI i "tradicionalni" MMI nisu identični postupci, pa su izvjesna odstupanja očekivana u zonama s malo prijava ili atipičnim učincima. Iako su pojedinačne prijave neuniformne kvalitete (npr. različito razumijevanje pitanja, pristranost sudionika, različiti digitalni dometi), vrijedi pravilo da "količina nadoknađuje kvalitetu". Agregirani CDI pokazuje konzistentnost s instrumentalnim mjerama gibanja. Ograničenja uključuju neujednačenu prostornu pokrivenost (ovisno o gustoći stanovništva i pristupu internetu) te potrebu za minimalnim brojem prijava po prostornoj jedinici za koju se skupljaju podaci.

Pouzdanost ovakvog pristupa proizlazi iz statistike velikih brojeva. Pojedinačna prijava može biti šumovita, ali agregirani uzorak na razini lokalne zajednice daje stabilan i reprezentativan pokazatelj lokalne jakosti trešnje. Usporedbe s instrumentiranim mjerama potresnog gibanja pokazuju da DYFI-intenziteti dobro koreliraju s PGA-om/PGV-om i pružaju korisnu kvantitativnu osnovu za analize i odluke [40]. Time DYFI djeluje kao most između opaženih učinaka i inženjerskih metrika. Za inženjersku primjenu ključan je slijed: *odgovori* → CWS → CDI → MMI → PGA. Najprije se iz odgovora dobiva CDI te se po potrebi CDI prevodi u cjelobrojni MMI. Iz MMI-ja se procjenjuje maksimalno ubrzanje tla (PGA) primjenom empirijskih relacija intenzitet-gibanje. Te su relacije logaritamske i izvedene na velikim skupovima zapisa i opažanja [37], a noviji pregledi nude globalne i regionalno osjetljive inačice [39].

Pregled dvadeset godina rada sustava naglašava njegovu brzinu, široku prostornu pokrivenost i korisnost za komunikaciju rizika i znanstvenu analizu. Pritom se ističe razvoj metodologije (npr. poboljšanja upitnika, filtriranja i prikaza) te međunarodne

implementacije. Nedavna istraživanja dodatno koriste višegodišnje CDI zapise potvrđujući da su CDI i MMI usporedivi i konzistentni u statističkom smislu. DYFI pruža operativno brz i znanstveno upotrebljiv izvor makroseizmičkih podataka. Ključ je standardizirana pretvorba heterogenih odgovora u CDI preko CWS-a i logaritamske formule, uz razuman tretman nesigurnosti i pristranosti kvalitete podataka.

### 3.1.1.3. GMPE model (Ground-Motion Prediction Equation)

GMPE (eng. *Ground-Motion Prediction Equation*) statistički je model koji za neki potres i lokaciju daje očekivanu jačinu gibanja tla (npr. PGA, PGV ili PSA) i pripadnu varijabilnost oko tog očekivanja. Matematički, model računa srednju vrijednost u logaritamskom prostoru te standardnu devijaciju, jer zapisi su gibanja približno log-normalno raspodijeljeni. Za zadane ulaze (npr.  $M_w = 6,5$ ,  $R_{rup} = 15$  km, *strike-slip*,  $v_{s30} = 360$  m/s) GMPE definira medijan  $\ln Y$  i  $\sigma$ .

Svaki GMPE koristi: magnitudu  $M_w$ , jednu ili više udaljenosti do rasjeda (npr.  $R_{rup}$ ,  $R_{jb}$ ,  $R_x$ ) koje obilježavaju geometriju izvora, tip rasjeda (*strike-slip*/normalni/reverzni), moguće *hanging-wall* učinke (asimetrija gibanja iznad/ispod rasjeda), uvjete tla preko  $v_{s30}$  s nelinearnom amplifikacijom pri jačim gibanjima te po potrebi parametre poput  $Z_{1,0}$  ili  $Z_{2,5}$ , koji utječu na dulje periode. Ovi elementi standard su u tzv. "NGA-West2" grupi relacija za aktivnu plitku koru (ASK14, BSSA14, CB14, CY14), razvijenih na velikim bazama zapisa i dokumentiranih s jasnim domenama valjanosti. Gibanja tla usljed potresa nisu ista u različitim tektonskim okolinama: aktivna kora (npr. Kalifornija, Apenini), stabilne kontinentalne unutrašnjosti i subdukcijske zone imaju drukčiju atenuaciju i lokalne učinke tla. Zato postoje regionalne grupe (npr. NGA-West2 za aktivnu koru; paneuropske relacije temeljene na RESORCE bazi), a u primjeni se često radi težinsko kombiniranje više prikladnih modela kako bi se pokrila nesigurnost i osigurali glatki prijelazi među regijama [41].

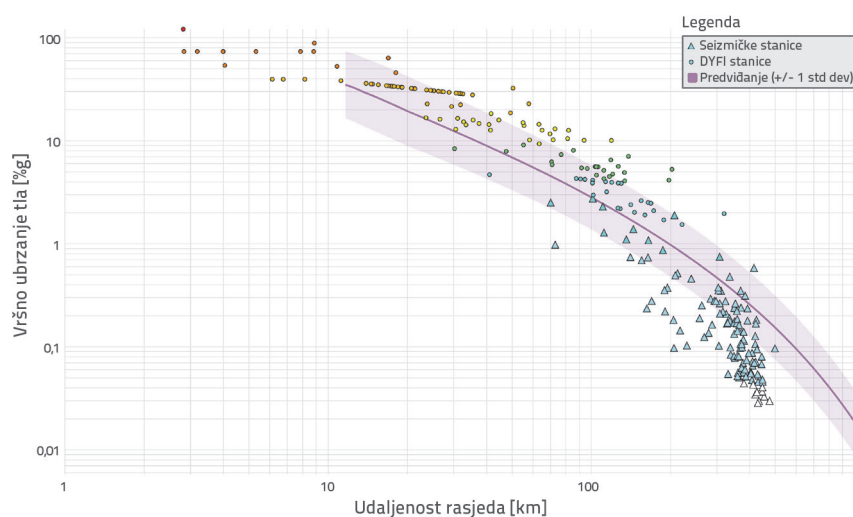
Bez ijedne mjerne stanice GMPE (ili njihova kombinacija) već daje početnu (eng. *a-priori*) kartu medijana i nesigurnosti gibanja tla, uz uvažene lokalne učinke tla. Kad pristignu potresni zapisi, ta se karta statistički podešava prema mjerenjima (blizu stanica prevladava instrument, dalje ostaje model). U probablističnom hazardu GMPE je temelj koji spaja seizmotehniku i inženjerske veličine potrebne za donošenje odluka [42].

### 3.1.1.4. USGS ShakeMap sustav

ShakeMap je USGS-ov sustav koji odmah nakon potresa izrađuje prostorne karte jakosti gibanja tla (PGA/PGV/PSA i MMI) tako što izračuna početnog (eng. *a-priori*) polja gibanja iz GMPE-ova, uz korekcije na lokalne uvjete tla, npr. preko  $V_{s30}$ , "usidri" to polje na mjerene vrijednosti sa stanica i po potrebi uključi intenzitetne točke (*MMI* → *PGA/PGV* preko GMICE), a sve to spoji statističkim modelom u ažurirano (eng. *posterior*) polje (medijan i nesigurnost).

Petrinjski potres je plitki potres u aktivnoj kori euro-mediteranske zone. U ShakeMap konfiguraciji za takve događaje standardno se koristi grupa GMPE-ova za aktivnu plitku koru, tipično kombinacija četiriju NGA-West2 modela (razvijenih na velikoj bazi zapisa) i nekoliko paneuropskih relacija. U praksi to je sedam modela: NGA-West2 (aktivna plitka kora): ASK14 [43], BSSA14 [44], CB14 [45], CY14 [46] te regionalno kalibrirani Euro-Med [47–49], razvijeni na RESORCE/ESM bazi, ciljano za Europu i Bliski istok. Ova kombinacija odgovara onome što ShakeMap opisuje kao GMPE set za aktivnu plitku koru izvan SAD-a: miješaju se "globalni" NGA-West2 i regionalni euro-mediteranski modeli kako bi se uhvatila i široka baza podataka i regionalna nijansa (efekti lokalnog tla i atenuacija).

Visoke težine od 0,35 idu regionalnim euro-mediteranskim modelima [48, 49], koji su razvijeni na RESORCE/ESM euro-mediteranskim bazama i ciljano opisuju aktivnu plitku koru Europe i Bliskog istoka, pa su najrelevantniji za Hrvatsku i okolicu. Umjerena težina ide neovisnom ASC modelu iz Japana [47] radi pokrića epistemičke, koji dobiva 0,10 kao neovisna ASC linija temeljena na vrlo bogatoj japanskoj bazi plitkih potresa. Uvrštavanje "vanregijskog" ASC modela s umjerenom težinom služi za pokriće epistemičke nesigurnosti, bez da takav model dominira medijanom. Male težine od po 0,05 raspoređene su na četiri NGA-West2 relacije [43–46] kao globalno prihvaćeni modeli. Ovakvo davanje težine "lokalnim" modelima u potpunosti je u duhu preporuka za sastavljanje grupa GMPE-a izvan SAD-a, gdje regionalni modeli trebaju dominirati u zajedničkim setovima. Time se osigurava da grupa modela zadrži "most" prema globalno prihvaćenim modelima, ali da ne potisne regionalne euro-mediteranske relacije. Prikaz GMPE krivulje i pripadajućih standardnih devijacija za petrinjski potres, zajedno s prikazom mjerenih podataka i DYFI indikatora, dan je na slici 4.



Slika 4. Predviđanja ubrzanja tla (PGA) prema USGS-u: GMPE (deblja ljubičasta linija) i opažanja (seizmičke stanice – plavi trokuti, Did You Feel It DYFI – obojeni krugovi) uzimajući u obzir lokalne uvjete tla [36]

### 3.1.1.5. Određivanje PGA-e iz ShakeMap sustava

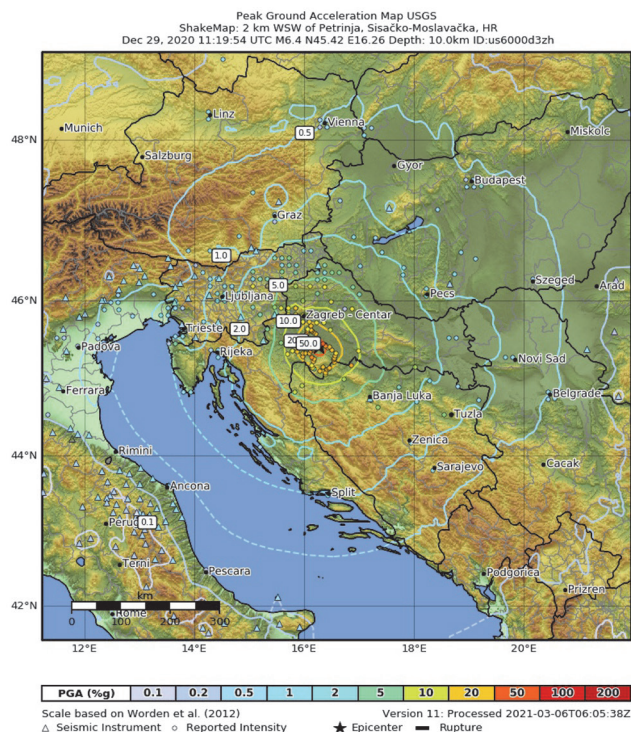
Za svaki potres ShakeMap sustav uzima magnitudu, lokaciju i (po mogućnosti) geometriju rasjeda te sve dostupne instrumentalne podatke (PGA/PGV/PSA sa stanica). Sustav je spojen na operativne seizmičke platforme (Antelope, SeisComp3, AQMS), pa mjerne točke stižu automatski s identitetom stanice i standardnim metapodacima.

Prvi je korak izgradnja početnog polja gibanja pomoću GMPE-ova, pri čemu se događaj klasificira u tektonski režim, odabere se odgovarajući GMPE set i njihove težine, čime se definira grupa relacija koja će davati medijan i disperziju gibanja izvan mjernih točaka. Sva predviđanja i stanični podaci normaliziraju se na lokalne uvjete tla korištenjem brzine posmičnih valova u gornjih 30 m tla ( $v_{s30}$ ). Za određivanje  $v_{s30}$  vrijednosti najčešće se koriste USGS topografske karte i modeli [50], iako je moguće koristiti i lokalno izmjerene brzine posmičnih valova tamo gdje su dostupne. Gdje je potrebno, mogu se koristiti i dodatni parametri (npr.  $Z_{1,0}/Z_{2,5}$  – dubine na kojima  $V_s$  iznosi 1,0 odnosno 2,5 km/s). Za karte vršnih gibanja ShakeMap eksplicitno prikazuje veću od dviju horizontalnih komponenti (eng. "larger of the two horizontals"), a ne vektorski zbroj ili geometrijsku sredinu. Ova definicija dosljedno se primjenjuje i pri čitanju staničnih vrijednosti i pri izračunu iz GMPE-ova. Iz odabranog seta modela ShakeMap formira težinski prosjek u logaritamskom prostoru: za svaku mrežnu točku kombinira medijane i disperzije pojedinih GMPE-ova u jedan početni (eng. *a-priori*) medijan (PGA) i pripadnu standardnu devijaciju ( $\sigma$ ). Tako se istodobno oslanja na regionalno prikladne relacije i na globalne referentne modele, što smanjuje epistemičku nesigurnost prije nego što se uzmu u obzir mjerenja s mjernih stanica.

Mjereni PGA sa stanica ulazi kao točkasta mjerenja s malom nesigurnošću. Paralelno, MMI/DYFI i terenske procjene se, gdje su dostupne, pretvaraju u PGA preko GMICE i ulaze u sustav s većom nesigurnošću od instrumenata. Time ShakeMap integrira i "što je zabilježeno" i "što je osjetio teren/ljudi", uz jasno hijerarhijsko ponderiranje kvalitete podataka.

U završnom koraku ShakeMap "pomiri" sve izvore tako da kartu PGA iz grupe GMPE-ova (*a-priori*) uvjetuje stvarnim opažanjima: točkastim staničnim PGA vrijednostima (velika težina) i, gdje ih ima, MMI/DYFI točkama pretvorenima u PGA preko GMICE (manja težina). Pri tome se pretpostavlja glatka prostorna povezanost (susjedne su točke sličnije od udaljenih), a prostorna polja dobivaju se Gaussovskim, Krigingu sličnim interpoliranjem: karta se lokalno prilagodi tako da prolazi kroz izmjerene vršne vrijednosti, dok se područja između mjernih točaka razumno popunjavaju

prema početnom prostornom modelu. Rezultat je ažurirano (eng. *posterior*) polje s dvjema informacijama u svakoj mrežnoj točki: medijan (PGA) kao najbolja procjena i standardna devijacija ( $\sigma$ ) kao pripadajuća nesigurnost. Uz stanice, procjena se "prilijepi" na mjerenja i standardna je devijacija mala, a s udaljavanjem od podataka vrijednosti glatko se vraćaju na početni GMPE i standardna devijacija raste. Rezultat su karte PGA/PGV/PSA/MMI i karte nesigurnosti te digitalni rasteri/vektorski formati za GIS i analize. Karta vršnog ubrzanja tla za petrinjski potres, određena navedenom metodom, prikazana je na slici 5.



Slika 5. Karta vršnog ubrzanja tla uslijed Petrinjskog potresa prema ShakeMap sustavu, preuzeto iz [36]

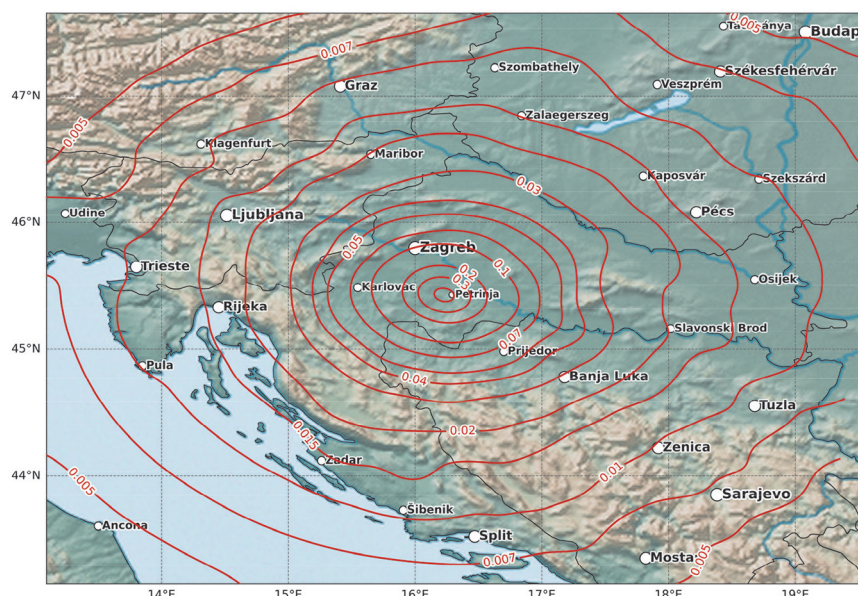
### 3.1.1.6. Preporuka za određivanje vršnog ubrzanja tla iz Petrinjskog potresa

Za vrijeme potresa u Petrinji najbliže stanice bile su udaljene oko 50 km od epicentra i na tim se lokacijama ShakeMap već slaže s mjerenjima. U takvoj geometriji spajanja ažurirano (eng. *posterior*) polje u središtu događaja nužno slično početno (eng. *a-priori*) polje iz grupe GMPE-ova. Ako se tome pridodaju vrlo visoke MMI/DYFI točke pretvorene u PGA (preko GMICE postupka), njihov kumulativni učinak lako može dovesti do nerealno visokih vrhova na karti u epicentralnoj zoni. Zbog velike i nelinearne nesigurnosti GMICE upravo pri jakim intenzitetima (VIII – IX) i malim udaljenostima, razumnije je za inženjerske procjene u Petrinji izostaviti MMI/DYFI i osloniti se na GMPE polje.

Grupa regionalno prikladnih GMPE-ova (euro-mediteranski zajedno s referentnim NGA-West2) daje stabilan medijan s

realističnom saturacijom u bliskom polju i jasno definiranim nesigurnostima ( $\sigma$ ). No kvaliteta tog polja presudno ovisi o lokalnim uvjetima: generički određeni  $v_{s30}$  iz topografije terena [50] često je grubo aproksimiran u ravničarskim, naplavnim ili nasipnim zonama poput Petrinje. Korištenje lokalno izmjerenog  $v_{s30}$ , primjerice primjenom geofizičkih metoda spektralne analize površinskih valova (SASW), multikanalne analize površinskih valova (MASW) ili tzv. *downhole* geofizičkih mjerenja, zamjenjuje generičku informaciju stvarnim geotehničkim/geofizičkim podatkom i uklanja sistematske pogreške amplifikacije koje vode k precjenjivanju vršnog ubrzanja tla na mekim naslagama. Kombinacija GMPE-a i lokalno mjerene  $v_{s30}$  vrijednosti zato je najrobustnija dostupna osnova – poštuje fiziku bliskog polja kroz validirane funkcionalne oblike i saturaciju, dosljedna je u definiciji komponente koju ShakeMap prikazuje ("veća od dviju horizontalnih") te prostorno varira u skladu s mjerljivim svojstvima tla, a ne s pristranostima prijava. Tako dobivena karta vršnog ubrzanja tla ima transparentno kvantificiranu nesigurnost i izbjegava umjetne nepravilnosti koji u centru stvaraju mnogobrojne intenzitetne točke bez instrumenta u blizini. Za inženjerske primjene, osobito pri brzom procjeni potencijala likvefakcije, tako određena vrijednost vršnog ubrzanja tla predstavlja upravo odgovarajući ulazni parametar: medijan i kvantili iz GMPE-a, lokalno korigirani izmjenjenim ili pouzdano procijenjenim vrijednostima  $v_{s30}$ , osiguravaju konzervativne i stabilne procjene za izračun omjera cikličkog naprezanja (CSR). Odabir odgovarajuće GMPE u kombinaciji s lokalnim  $v_{s30}$  uvjetima u slučaju Petrinje minimizira metodološke pristranosti i maksimizira uporabu stvarno raspoloživih podataka. Na slici 6. prikazana je karta vršnog ubrzanja tla uslijed petrinjskog potresa primjenom određene medijalne vrijednosti vršnog ubrzanja tla, uvećane za jednu standardnu devijaciju. Pri tome je za izračun amplifikacije korištena globalno dostupna  $v_{s30}$  karta [50], koja bi se u budućim aktivnostima trebala ažurirati lokalno dostupnim  $v_{s30}$  vrijednostima, dobivenim brojnim geofizičkim ispitivanjima u Sisačko-moslavačkoj županiji. Doprinos razumijevanju lokalnih uvjeta tla dodatno pruža i istraživanje Stanka i Markušića [51], koji su razvili nelinearni model amplifikacije za Hrvatsku, temeljen na parametrima  $v_{s30}$ ,  $T_0$  (dominantni period tla) i  $H_{800}$  (dubina stijene) te intenzitetu ulaznog gibanja stijene usklađenog s klasifikacijom tla prema Eurokodu 8 i njegovim revidiranim odredbama. Predloženi model predstavlja značajan iskorak za procjene seizmičke opasnosti u područjima s oskudnim podacima o jakim podrhtavanjima, kakav je slučaj i u Hrvatskoj, te otvara pitanje utjecaja petrinjskog potresa na buduće hazardne izračune.

U kontekstu određivanja relevantnih vrijednosti vršnog ubrzanja tla petrinjskog potresa posebno se ističe istraživanje Markušića i sur. [52], koji su ispitali USGS ShakeMap koristeći atenuaciju vršnog horizontalnog ubrzanja u području Dinarida prema relacijama Heraka i sur. [53] te Markušića i sur. [54], prilagođenima uvjetima stijene ili vrlo krutog tla. Uz to su odabrane i tri globalna empirijska izraza gibanja tla (GMPE) koji bi se mogle primijeniti na



Slika 6. Karta rasprostriranja PGA uslijed Petrinjskog potresa primjenom GMPE modela za medijan vršnog ubrzanja tla uvećan za standardnu devijaciju

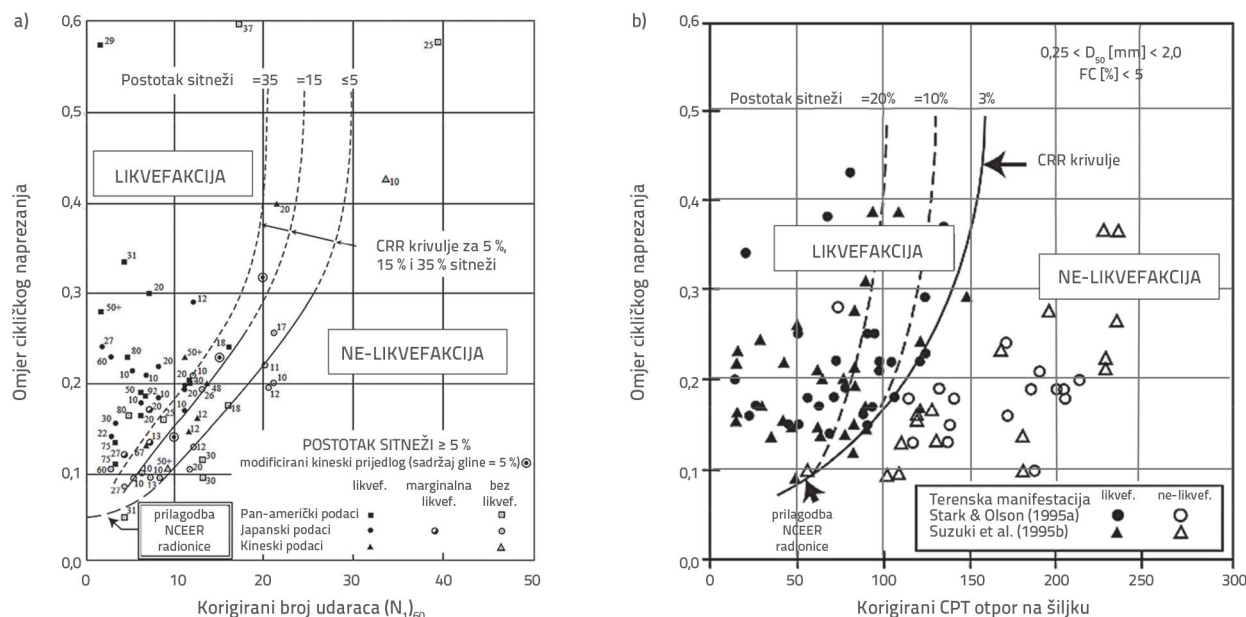
ovo područje. Autori zaključuju da procijenjene vrijednosti PGA za potres magnitude Mw 6,4 u bliskoj epicentralnoj zoni (do 10 km) znatno nadmašuju seizmička hazardna očekivanja za povratne periode od 95 i 475 godina, a usporedive su s vrijednostima za povratni period od 1000 godina. Takvi rezultati potvrđuju iznimnu važnost ovog potresa u kontekstu poznate povijesne seizmičnosti regije, ali i otvaraju ključno pitanje o njegovu utjecaju na buduće proračune seizmičke opasnosti, ne samo za epicentralno područje, nego i za šire zagrebačko područje u kojem živi više od milijun stanovnika.

### 3.1.2. Određivanje otpornosti tla CRR iz terenskih ispitivanja

U pristupu cikličkog naprezanja procjena otpornosti tla na likvefakciju temelji se na njegovoj sposobnosti da zadrži posmičnu čvrstoću tijekom cikličkog opterećenja. Ta se otpornost, odnosno CRR (eng. *Cyclic Resistance Ratio*), u praksi najčešće određuje na temelju terenskih *in-situ* ispitivanja. Najvažnija su ispitivanja među njima standardni penetracijski pokus (SPT), ispitivanje statičkom penetracijom (CPT), mjerenje brzine posmičnih valova ( $v_s$ ) te alternativno dilatometarska ispitivanja (DMT) ili dinamička penetracijska ispitivanja (DPL/H). Ovi podaci služe kao temelj za primjenu empirijskih korelacija s pomoću kojih se određuje otpornost tla na cikličko opterećenje.

Prema važećoj normi EN 1998-5 [55],

istraživanja za procjenu likvefakcijskog potencijala moraju minimalno obuhvatiti provedbu SPT-a ili CPT-a te laboratorijsko određivanje granulometrijskog sastava uzoraka. Norma također jasno propisuje situacije u kojima se likvefakcija može zanemariti u slučaju SPT ispitivanja: ako pijesak sadrži više od 20 % gline i pri tome ima indeks plastičnosti veći od 10, ako sadržaj praha u pijesku prelazi 35 % i korigirani broj udaraca SPT-a  $(N_1)_{60}$  iznosi više od 20, ili ako se radi o čistom pijesku s korigiranim brojem udaraca  $(N_1)_{60}$  većim od 30. U takvim je slučajevima razvoj pornih tlakova tijekom potresa znatno ograničen, a posmična čvrstoća zadržava se na razinama koje onemogućuju pojavu likvefakcije.



**Slika 7. Primjer dijagrama aktivacije likvefakcije temeljenih na rezultatima SPT (a) i CPT (b) ispitivanja, modificirano prema [59]**

Na temelju značajke da povećanje relativne gustoće tla povećava otpornost na prodiranje SPT-a kao i likvefakcijsku otpornost tla, Seed i sur. [56] po prvi put predlažu empirijski odnos broja udaraca SPT-a i vrijednosti CSR, što je poslužilo kao podloga za formiranje prvih likvefakcijskih dijagrama [57], odnosno metodologije za ocjenu likvefakcijske otpornosti, slika 7.a. Na navedenoj slici dane su krivulje likvefakcijske otpornosti za čisti pijesak i dijele domenu na područje u kojoj je likvefakcija moguća (iznad krivulje) te područje u kojoj neće doći do likvefakcije (ispod krivulje). Pri tome je definirana familija likvefakcijskih krivulja ovisno o postotku sitneži u nekoherentnom tlu. Niz autora dao je prijedloge modifikacije navedenih krivulja [58, 59].

Kod primjene CPT ispitivanja za ocjenu likvefakcijskog potencijala, slika 7.b, najčešće se koristi otpornost na šiljku sonde CPT-a, odnosno izvedeni parametar ekvivalentne otpornost penetraciji u čistom pijesku ( $q_{c1Ncs}$ ). Treba napomenuti da se u današnjoj praksi najčešće koriste tri različita CPT postupka za ocjenu likvefakcijske otpornosti iz CPT pokusa, redom Moss i sur. [60], Robertson [61], i Boulanger i Idriss [33]. Detalji svakog postupka su dani u literaturi, a sami se postupci povremeno ažuriraju.

Alternativni pristup u procjeni likvefakcijskog potencijala tla jest korištenje podataka o brzini posmičnih valova ( $v_s$ ) za izradu dijagrama aktivacije likvefakcije [62]. Ova je metoda u praksi rjeđe primjenjivana u odnosu na konvencionalne pristupe temeljene na SPT ili CPT ispitivanjima. Pouzdane vrijednosti brzina posmičnih valova mogu se dobiti iz detaljnih, ali skupljih i dugotrajnih bušotinskih ispitivanja (eng. *downhole*) ispitivanja, a površinska MASW ispitivanja nude bržu i ekonomičniju alternativu. Iako površinska seizmička mjerenja zahtijevaju kalibraciju u odnosu na laboratorijske i SPT/CPT podatke, ona omogućuju procjenu likvefakcijskog potencijala na većim područjima, što je osobito korisno kada je cilj preliminarna identifikacija širih zona rizika.

### 3.2. Izračun likvefakcijskog potencijala na dvjema reprezentativnim lokacijama u Sisačko-moslavačkoj županiji

Kako bi se ilustrirao postupak određivanja likvefakcijskog potencijala na području Sisačko-moslavačke županije, u ovom su radu analizirane dvije reprezentativne lokacije. Prva se nalazi u Mankančevoj ulici u Petrinji, približno 750 m udaljenoj od rijeke Petrinjčice i oko 1000 m od rijeke Kupe. Na toj je lokaciji tijekom Petrinjskog potresa 2020. godine došlo do izraženih pojava likvefakcije, koje su se manifestirale izbačajima pijeska i zabilježenim površinskim deformacijama. Druga odabrana lokacija nalazi se u Ulici Frana Kršinića u Sisku, na području predviđenom za izgradnju višestambene zgrade, udaljenom oko 800 m od rijeke Kupe, gdje tijekom potresa nije bilo opažene likvefakcije. Obje lokacije naznačene su na slici 1. Odabir ovih dviju lokacija temelji se na činjenici da se na objema pojavljuju slojevi pješčanog materijala ispod razine podzemne vode, ali uz bitnu razliku u njihovoj relativnoj zbijenosti. Time se omogućuje

uvjerljiva usporedba uvjeta koji su doveli do razvoja likvefakcije u Petrinji s onima u Sisku, gdje do aktivacije procesa nije došlo, i pruža argumentirani uvid u ključne parametre koji određuju likvefakcijski odgovor tla.

Na objema lokacijama provedena su istražna bušenja te je napravljeno ispitivanje statičkim penetracijskim pokusom (CPT) do dubine od 10 metara. Rezultantni profili otpora na šiljku CPT-a ( $q_c$ ) te trenja po plaštu sonde CPT-a ( $f_s$ ) za Mankančevu ulicu su dani na slici 8. te za Kršinićevu ulicu na slici 9. Na istim je slikama dan klasifikacijski profil tla određen prema Roberstonu [63] i temeljen na indeksu ponašanja tla ( $SBT_n$ ). Na profilima otpora na šiljku CPT-a su vidljive relativno niže vrijednosti otpornosti do dubine od 3 do 4 m, koje odgovaraju izmjenama glinovitim slojeva i slojeva prašinih mješavina. Ispod se do većih dubina (8 m u slučaju Mankančeve ulice te do 10 m u slučaju Kršinićeve ulice) nalaze pjeskoviti depoziti s lokalno većim otporima na šiljku CPT-a (Mankančeva ulica) i konzistentno većim otporima na šiljku CPT-a (Kršinićeva ulica). Pri tome treba naglasiti da je korištenjem prosječne vrijednosti  $q_c$  za sloj pijeska izračunata vrijednost ekvivalentne otpornosti na šiljku za čisti pijesak  $q_{c1Ncs}$ , primjenom sljedećeg izraza:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (10)$$

gdje je:

$$q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_c}{p_a} \quad (11)$$

pri čemu je  $C_N$  faktor korekcije zbog nadsloja, a  $p_a$  je atmosferski tlak. Ekvivalentna korekcija za čisti pijesak  $\Delta q_{c1N}$  izračunava se koristeći:

$$\Delta q_{c1N} = \left( 11,9 + \frac{q_{c1N}}{14,6} \right) \exp \left( 1,63 - \frac{9,7}{FC + 2} - \left( \frac{15,7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (12)$$

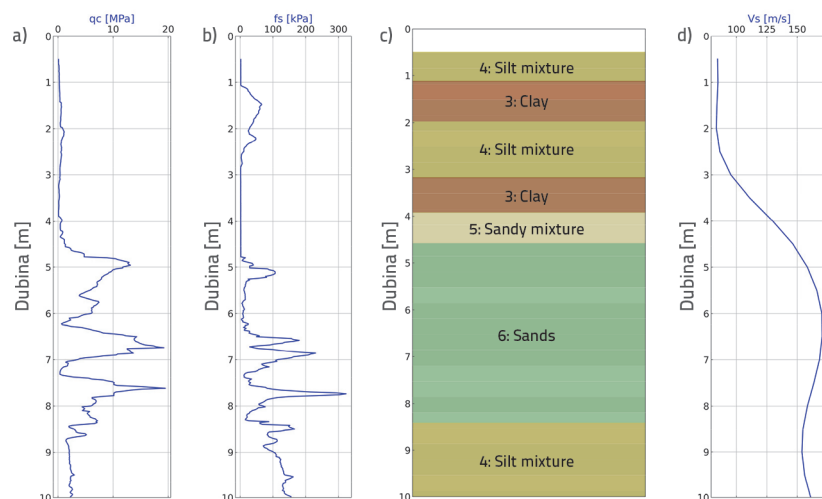
Pri tome je FC sadržaj sitneži koji se u navedenom primjeru računa primjenom izraza Kovačevića i sur. [64]:

$$FC = 17,45 \cdot I_c^{1,662} - 35,42 \quad (13)$$

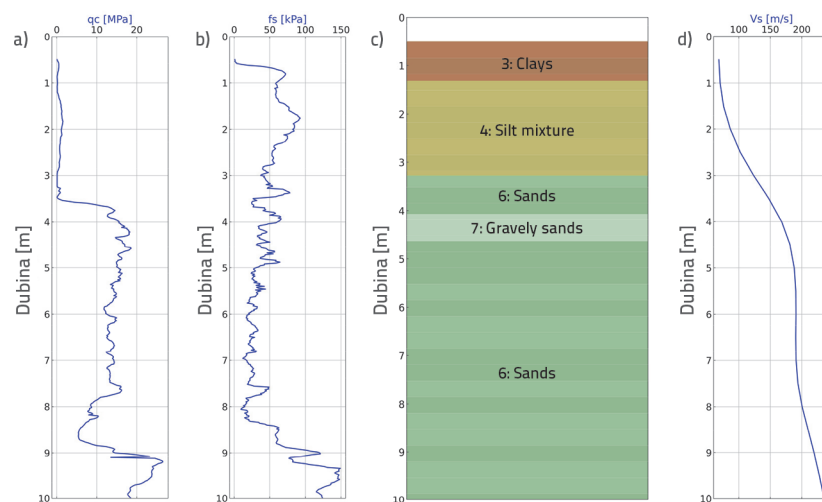
gdje je  $I_c$  indeks ponašanja tla, a jednadžba vrijedi u rasponu  $1,40 \leq I_c \leq 3,42$ .

Kod izračuna CSR-a korištena je vrijednost vršnog horizontalnog ubrzanja tla, pri čemu su razmatrane dvije varijante:

- vrijednosti određene temeljem ShakeMap USGS-a [36] za pojedinu lokaciju, pri čemu je amplifikacija radi lokalnih uvjeta tla definirana globalnim modelom [50] te
- vrijednosti dobivene primjenom empirijskog GMPE modela kako je dano u ovom radu uz amplifikaciju radi lokalnih uvjeta tla određenu iz mjerenih vrijednosti pomičnih valova prikazanih na slikama 8. d i 9. d.



Slika 8. Sirovi CPT podaci: a) otpora na šiljku; b) trenja na plaštu; c) CPT sonde za lokaciju Makančeve ulice u Petrinji, s pripadajućim SBT<sub>n</sub> profilom tla; d) profilom posmičnih brzina

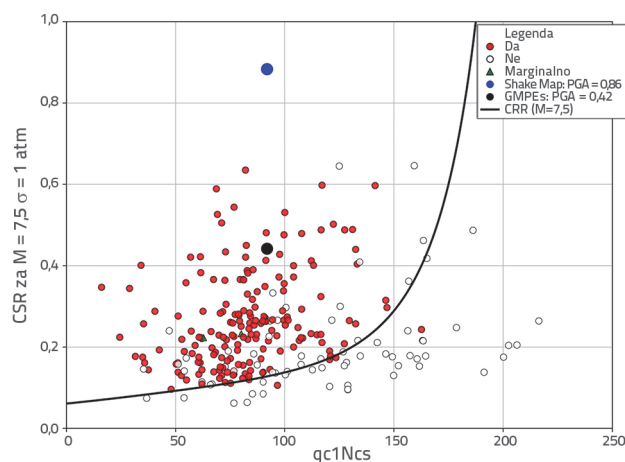


Slika 8. Sirovi CPT podaci: a) otpora na šiljku; b) trenja na plaštu; c) CPT sonde za lokaciju Kršiničeve ulice u Sisku, s pripadajućim SBT<sub>n</sub> profilom tla; d) profilom posmičnih brzina

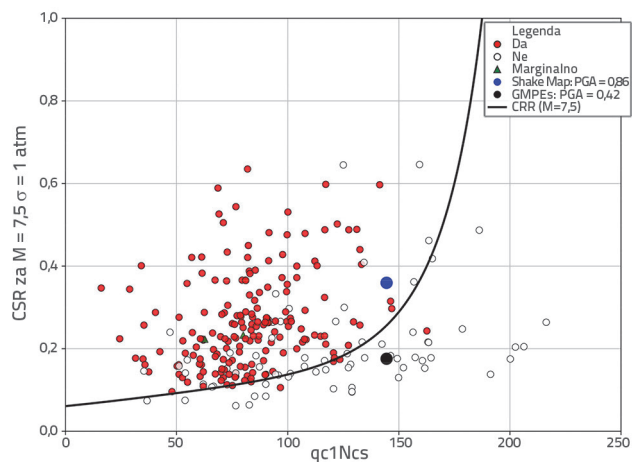
Pri tome izračunati  $v_{s,30}$  za lokaciju Makančeve ulice iznosi 187 m/s, čime se prema EN 1998-1 [34] tlo svrstava u prijelaz tipa D u C, a za lokaciju Kršiničeve ulice  $v_{s,30}$  iznosi 282 m/s, čime se tlo svrstava u tlo tipa C. Kao što je prethodno objašnjeno, GMPE model obično daje niže vrijednosti horizontalnog ubrzanja tla u odnosu na vrijednosti predložene ShakeMap sustavom.

Analiza potencijala likvefakcije za lokaciju Makančeve ulice, slika 10., prikazana na likvefakcijskom dijagramu po Boulangeru i Idrissu [59], pokazuje značajne razlike u interpretaciji CSR-a ovisno o odabranoj metodi određivanja vršnog ubrzanja. Primjena ShakeMap podataka rezultira izrazito visokim vrijednostima CSR-a, što implicira snažan potencijal likvefakcije. S druge strane, vrijednosti definirane korištenjem GMPE modela također ukazuju na moguću likvefakciju, ali s nižim izračunatim CSR-om, što bolje odgovara iskustvima iz globalnih baza evidentiranih likvefakcijskih pojava na drugim lokacijama diljem svijeta.

Za lokaciju Kršiničeve ulice, slika 11., na kojoj tijekom petrinjskog potresa nije zabilježena likvefakcija, situacija je analogna: ShakeMap vrijednosti vršnog ubrzanja tla smještaju lokaciju u područje potencijalne likvefakcije, a primjena GMPE modela s lokalnom vrijednošću  $v_{s,30}$  svrstava lokaciju u nelikvefabilnu zonu. Ovaj primjer naglašava da korištenje GMPE modela u kombinaciji s lokalno mjerenim vrijednostima  $v_{s,30}$



Slika 10. Likvefakcijski dijagram CPT ispitivanja za Makančevu ulicu u Petrinji gdje je došlo do likvefakcije



Slika 11. Likvefakcijski dijagram CPT ispitivanja za Kršiničevu ulicu u Sisku gdje je došlo do likvefakcije

pruža realističniju i konzistentniju procjenu likvefakcijskog potencijala tla u skladu s empirijskim evidencijama te smanjuje rizik procjenjivanja opasnosti u kontekstu lokalnih geotehničkih uvjeta.

#### 4. Primijenjene tehnologije sanacije tla u sklopu postpotresne obnove

Odluka o potrebi sanacije temeljnog tla nakon Petrinjskog potresa iz 2020. godine u najvećoj je mjeri bila uvjetovana procjenom likvefakcijskog potencijala pojedine lokacije u postpotresnoj fazi.

Za većinu zamjenskih (novih) obiteljskih kuća i zgrada provedenim geotehničkim ispitivanjima utvrđeno je da je rizik od likvefakcije relativno nizak, što je bilo očekivano s obzirom na to da su zamjenske lokacije birane tako da se izbjegnu područja s poznatom pojavnošću rahlih aluvijalnih sedimenata, visoke razine podzemne vode ili ranije zabilježenih likvefakcijskih manifestacija. Stoga je u najvećem broju slučajeva bilo moguće projektirati temeljenje na prirodnom tlu bez potrebe za posebnim mjerama poboljšanja.

Suprotna je situacija zabilježena kod postojećih stambenih objekata gdje se likvefakcija tijekom potresa manifestirala denivelacijama, slijeganjima, bočnim pomacima, pukotinama i lokalnim gubitkom nosivosti. Budući da je za takve objekte u sklopu konstruktivne obnove bilo nužno provesti i sanaciju temeljnog tla, primijenjen je niz tehnologija poboljšanja tla, s naglaskom na injektiranje pod niskim tlakom. Dominantno su korištene metode kompaktiranja injektiranja cementnih suspenzija ili ekspanzirajućih kemijskih smola, s ciljem povećanja zbijenosti i smanjenja deformabilnosti rahlih slojeva uz minimalno narušavanje postojećih konstrukcija i priključne infrastrukture. Takve su se tehnologije pokazale prikladnima zbog mogućnosti preciznog, lokaliziranog djelovanja i dobrog stupnja kontrole tijekom izvođenja. Međutim, važno je naglasiti da, unatoč jasnim upozorenjima geotehničke struke da bez sanacije temeljnog tla nema ni kvalitetne potresne obnove, dio objekata na lokacijama s potvrđenom likvefakcijom ipak nije prošao odgovarajuće zahvate sanacije temeljnog tla – i to pretežito odlukom samih vlasnika.

Kod infrastrukturnih objekata situacija je bila znatno složenija. Nasipi za obranu od poplava uz Kupu, Savu, Glinu i Maju, koji

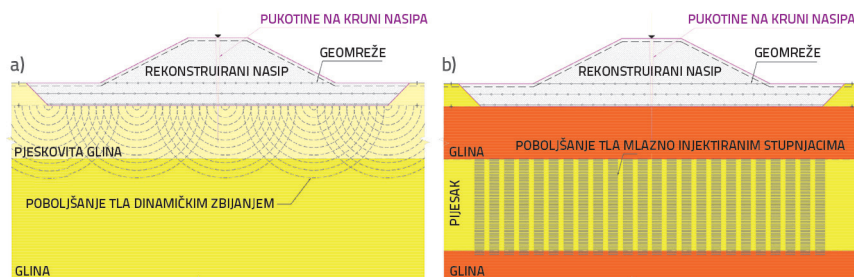
su u potresu pretrpjeli značajne deformacije i lokalne slomove, nalaze se na širokim aluvijalnim ravninama gdje su duboki i kontinuirani slojevi potencijalno likvefabilnih tala prirodna geološka odrednica. Za takve linijske građevine ne postoji mogućnost izmještanja, a funkcija zaštite od poplava nalaže visoku razinu sigurnosti. Zbog toga je, na temelju opsežnih geotehničkih i geofizičkih istražnih radova, potvrđeno da je likvefakcijski potencijal i dalje visok te da su potrebne mjere poboljšanja temeljnog tla. Metode poboljšanja odabrane su prema dubini i karakteristikama likvefabilnog sloja, slika 12. U slučajevima kada su likvefabilni slojevi smješteni na većim dubinama, primijenjeni su mlazno injektirani stupnjaci, koji omogućuju stvaranje kontinuiranih cilindričnih zona poboljšanog tla i značajno povećanje posmične čvrstoće. Za plitko locirane likvefabilne rahle slojeve primijenjene su metode dinamičkog udarnog zbijanja, čime se omogućilo učinkovito povećanje zbijenosti i smanjenje potencijala za razvoj pornih tlakova. Detaljni prikaz izazova i specifičnosti sanacije ovakvih infrastrukturnih sustava daju Mihaljević i Zlatović [29] te Bačić i sur. [65].

U literaturi se daje i prikaz pojedinih metoda sanacije temeljnog tla u postpotresnom razdoblju kao što je sanacija temeljnog tla ispod mosta Gromova na državnoj cesti oznake DC37, dionica 1 u km 0+126 preko rijeke Kupe [66], koja je obuhvatila primjenu mlazno injektiranih stupnjaka. U radu Bago i sur. [67] navode se benefiti ranije izvedenih šljunčanih stupnjaka ispod rezervoarskog prostora Terminala Sisak koji su tijekom potresa omogućili i relaksaciju generiranih pornih tlakova te je time vjerojatno spriječena likvefakcija tla koja bi se inače realizirala zbog prisustva rahlih pješčanih depozita na lokaciji.

#### 5. Strateški pravci budućih istraživanja u području likvefakcije za područje Sisačko-moslavačke županije

Prema AASHTO smjernicama [68], potvrđena pojava likvefakcije u neposrednoj blizini nekog područja predstavlja jasan indikator potrebe za provedbom detaljne analize cijelog zahvaćenog područja. Upravo su takve pojave nakon petrinjskog potresa potaknule sustavno prikupljanje velike količine geoloških, geotehničkih i geofizičkih podataka, dobivenih putem znanstvenih projekata te inženjerskih i stručnih aktivnosti.

Takva baza znanja i podataka pruža iznimnu priliku za uvođenje jedinstvene, standardizirane metodologije mapiranja likvefakcijskog potencijala, primjenjive ne samo na području Sisačko-moslavačke županije, nego i na razini cijeloga teritorija Republike Hrvatske, koja treba biti sastavni dio sveobuhvatne seizmičke mikrozonacije. Temeljni cilj likvefakcijskog mikrozoniranja jest objedinjavanje postojećih spoznaja i optimizacija budućih terenskih



Slika 12. Poprečni presjeci nasipa za obranu od poplava s mjerama sanacije temeljnog tla: a) udarno dinamičko zbijanje; b) mlazno injektirani stupnjaci

istraživanja putem višestupanjskog sustava ocjenjivanja – od preliminarnih procjena podložnosti niže rezolucije do detaljnih analiza pojedinačnih lokacija. Pri tome se koncept likvefakcijskog mikrozoniranja treba temeljiti na principu postupnog sužavanja neizvjesnosti, gdje se s povećanjem razine detalja smanjuje raspon mogućih interpretacija te povećava pouzdanost procjene rizika. S obzirom na razinu detalja i potrebe projekta, metodologija se može podijeliti u tri razine:

- Na razini najniže rezolucije, razina 1, poželjno je nadopuniti karte opće podložnosti koristeći podatke dobivene iz geoloških karata, geomorfoloških analiza, modela reljefa visoke rezolucije, hidroloških podloga te svih dostupnih informacija o razini podzemne vode. Posebno je važno naglasiti da preliminarna karta likvefakcije [14], izrađena neposredno nakon potresa, predstavlja vrijedan temelj koji je nužno metodološki proširiti i nadograditi uključivanjem novih dostupnih podataka. Takve karte služe kao početni orijentacijski alat i definiraju područja u kojima su ispunjeni osnovni uvjeti za pojavu likvefakcije te gdje je potrebno provesti detaljnija ispitivanja.
- Na detaljnoj (razina 2) metodološkoj razini provodi se integracija guste mreže geotehničkih istraživanja, ponajprije CPT sondiranja te bušotinskih ispitivanja uključujući SPT, zajedno s podacima površinskih geofizičkih metoda, s posebnim naglaskom na seizmička istraživanja. Smjernice ISSMGE-a [65] ističu da su upravo takva detaljna geotehnička ispitivanja temelj za izradu karte seizmičke mikrozonacije visoke rezolucije. Dobivena razina prostorne razlučivosti prikladna je za potrebe prostorno-planskih dokumenata i strateškog upravljanja rizikom. U ovoj se fazi uobičajeno koriste i karte dubine podzemne vode, koje predstavljaju ključan ulazni podatak za izračun potencijala likvefakcije, stoga se preporučuje uspostava piezometarske mreže i programa kontinuiranog monitoringa razina podzemne vode kako bi se u budućnosti osigurali pouzdani i dugoročni hidrogeološki trendovi. Za potrebe izrade karata ove razine potrebno je definirati i mjerodavne detaljne karte potresne opasnosti, a klasifikacija zona može se provesti izračunom faktora sigurnosti na likvefakciju primjenom, primjerice, metode cikličkog naprezanja ili na temelju probabilističke procjene vjerojatnosti pojave likvefakcije.
- Najkompleksnija razina mapiranja, razina 3, primjenjiva je za pojedine inženjerske zahvate i projekte. Obuhvaća ciljane inženjerske istraživanja koja su potrebna za donošenje sigurnih projektantskih odluka, osobito na lokacijama infrastrukturnih objekata, građevina od važnosti za funkcioniranje zajednice i kritičnih segmenata linijskih infrastrukturnih sustava. U ovoj razini neophodno je provesti kombinaciju terenskih i primijenjenih dinamičkih laboratorijskih ispitivanja, a za ocjenu potresne opasnosti poželjno se koristiti nelinearnim dinamičkim analizama. Tek na ovoj razini moguće je s dovoljno pouzdanosti donositi odluke o projektiranju mjera za ublažavanje posljedica likvefakcije. Poseban izazov predstavlja linijska

infrastruktura poput nasipa, cesta i željezničkih pruga, gdje je prostorna varijabilnost tla izrazito velika. Literatura ukazuje da točkasta ispitivanja često ne mogu adekvatno opisati inherentnu prostornu heterogenost tla. U tom kontekstu vrijedan doprinos predstavlja pristup razvijen u LeveeLiq [70] projektu, koji se temelji na procjeni prostorne distribucije likvefakcijskog potencijala na razini samog infrastrukturnog objekta. Ovaj pristup uzima u obzir vertikalnu i horizontalnu varijabilnost tla te povezuje rezultate različitih *in-situ* metoda, prvenstveno CPT-a i MASW-a, uz korištenje sporadičnih podataka iz bušotina. LeveeLiq pristup razvija algoritme za automatsko određivanje prostorne vjerojatnosti likvefakcije, uključujući detrendiranje prikupljenih podataka, statističku obradu, definiranje parametara prostorne varijabilnosti i generiranje log-normalnih prostorno koreliranih slučajnih polja (eng. *random field*). Time se dobiva realistična slika prostorne (linijske) raspodjele likvefakcijskog potencijala, a mogućnosti sanacije mogu se optimalno prilagoditi stvarnim uvjetima u tlu.

U razvoju navedene višerazinske metodologije valja uzeti u obzir međunarodna iskustva i postojeće formalizirane standardne pristupe seizmičkom mikrozoniranju u državama s povećanom seizmičnošću [69, 71–74]. Ova iskustva jasno ukazuju da pouzdano mapiranje visoke rezolucije mora uključiti geološke podloge, geotehničke i geofizičke informacije, osnovne hidrogeološke parametre i konzistentan seizmički ulaz. Izuzetno vrijedan primjer europske prakse predstavlja H2020 projekt LIQUEFACT [2], čiji je holistički pristup usmjeren na višekriterijsko vrednovanje rizika i izradu geoprostornih karata osjetljivosti na likvefakciju. Istraživači na projektu navode [75] potrebu višerazinskog pristupa mapiranju likvefakcijskog potencijala, koji se u osnovi može povezati s navedenim konceptom terozinske metodologije. Iako je projekt pokazao potencijal za mapiranje u krupnom mjerilu, istaknuto je da je likvefakcija izrazito lokalna pojava te da regionalne karte ne mogu zamijeniti detaljna geotehnička istraživanja na razini pojedinačnog objekta, stoga se takve karte trebaju promatrati kao strateški alat za podršku odlukama, a ne kao konačnu podlogu za projektiranje.

Daljnja istraživanja likvefakcije svakako trebaju uključivati i sistematizaciju baza podataka koje služe za kalibraciju postojećih globalnih empirijskih likvefakcijskih dijagrama (tzv. *triggering liquefaction charts*) i modela za procjenu otpornosti na likvefakciju. Za pouzdanu primjenu takvih dijagrama neophodni su kvalitetni podaci o vršnom ubrzanju tla, granulometriji, relativnoj gustoći materijala, dubini podzemne vode te rezultatima CPT/SPT/ $v_s$  ispitivanja. Sustavna i standardizirana struktura podataka omogućila bi dugoročno ažuriranje karata. Pri tome je jedan od ključnih elemenata za pouzdanu procjenu likvefakcijskog potencijala korištenje konzistentnih seizmičkih ulaznih veličina. Za slučaj petrinjskog potresa najprimjerenije su vrijednosti vršnog ubrzanja dobivene iz GMPE modela, pri čemu se koriste median i kvantili, lokalno korigirani stvarnim  $v_{s,30}$  vrijednostima. Takav pristup daje konzervativne i stabilne ulaze

za izračune cikličkog naprezanja (CSR), minimizira pristranosti te omogućuje maksimalno korištenje pouzdanih dostupnih informacija.

## 6. Zaključak

Petrinjski potres iz 2020. godine predstavlja najveći dosad potvrđeni događaj likvefakcije velikog razmjera u Hrvatskoj, zahvativši područje od približno 600 km<sup>2</sup> unutar radijusa od oko 20 km od epicentra. Manifestacije likvefakcije bile su prostorno jasno izražene, uglavnom kroz linearne pojave izbačenog pijeska praćene pravocrtno postavljenim pukotinama tla, deformacijama i slijeganjem prometnica, oštećenja nasipa za obranu od poplava te destabilizaciju mostova i druge infrastrukture. Najveća koncentracija fenomena zabilježena je uz rijeke Kupu, Savu i Glinu, gdje recentni aluvijalni nanos sadrži dominantno čiste pijeske, povremeno prašinate ili šljunkovite pijeske, kao i pojedinačne leće krupnijeg šljunka.

U razdoblju nakon potresa provedena su brojna znanstvena i stručna istraživanja s ciljem dokumentiranja, razumijevanja i kvantifikacije pojava likvefakcije te razvoja metoda procjene i sanacije. Prvi korak obuhvaćao je izradu inventara likvefakcijskih pojava i preliminaranih karata podložnosti, temeljenih na heurističkim pristupima i dostupnim podacima o geološkoj građi, razinama podzemne vode i seizmičkom pobuđivanju. Naknadna istraživanja uključivala su napredna geotehnička i geofizička ispitivanja na pojedinim reprezentativnim lokacijama, s ciljem određivanja svojstava tla, debljine slojeva i otpornosti na ciklička opterećenja. Rezultati ovih istraživanja omogućili su kalibraciju empirijskih metoda i preciznu interpretaciju lokalnih uvjeta tla. Uz znanstvena istraživanja, provedene su i opsežne stručne aktivnosti za potrebe obnove postojećih i izgradnje novih stambenih i infrastrukturnih objekata. Zbog velikog broja lokacija primijenjena je brza i pojednostavljena metoda cikličkog naprezanja u kombinaciji s empirijskim likvefakcijskim dijagramima, što je omogućilo pouzdanu procjenu faktora sigurnosti i vjerojatnosti pojave likvefakcije. Kao nužan parametar za određivanje potresnog opterećenja preporučuje se korištenje GMPE modela u kombinaciji s lokalno mjerenim vrijednostima posmičnih brzina ( $v_{s30}$ ) kao

metoda za osiguravanje konzervativnih, stabilnih i fizikalno utemeljenih ulaznih podataka pri izračunu CSR-a.

Mapiranje likvefakcijskog potencijala, kao sastavni dio seizmičkog mikrozoniranja, trebalo bi se razvijati na više razina, uzimajući u obzir i smjernice već razvijenih međunarodnih pristupa. Na osnovnoj razini niske rezolucije preporučuje se korištenje geoloških karata, geomorfoloških analiza, topografskih modela i dostupnih podataka o razini podzemne vode kako bi se identificirala potencijalno kritična područja. Na detaljnijoj razini, gdje su podaci gušći, potrebno je integrirati CPT, SPT i geofizička ispitivanja radi poboljšanja prostorne razlučivosti i pouzdanosti procjena. Na lokalnoj, najsloženijoj, razini, posebno za infrastrukturne objekte, potrebno je analizirati vertikalnu i horizontalnu varijabilnost tla i primijeniti kombinaciju terenskih i laboratorijskih metoda za donošenje sigurnih projektantskih odluka. Uspješna implementacija terozinske metodologije mapiranja likvefakcijskog potencijala zahtijeva jasno definirane standarde, jedinstvenu formatizaciju podataka i uspostavu nacionalne baze terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Takva baza omogućila bi dugoročnu održivost sustava i kontinuirano poboljšavanje karata kako se prikupljaju novi podaci. Sve navedeno upućuje na potrebu za sustavnim, višerazinskim pristupom koji kombinira široku geoprostornu analizu s detaljnim *in-situ* istraživanjima. Takva metodologija omogućila bi racionalno upravljanje rizikom, povećala pouzdanost procjene likvefakcijskog potencijala i pridonijela otpornosti hrvatskog izgrađenog prostora na buduće potrese.

Dodatno, preporučuje se korištenje lokalno prikupljenih podataka o geološkoj građi, granulometriji, razini podzemne vode i rezultatima *in-situ* ispitivanja za kalibraciju i validaciju globalnih empirijskih likvefakcijskih dijagrama. Takav pristup omogućava uključivanje domaćih iskustava i zabilježenih lokacija pojave likvefakcije u međunarodne baze podataka, čime doprinosi njihovom kontinuiranom unaprjeđenju.

## Zahvala

Ovo istraživanje financirala je Hrvatska zaklada za znanost (HRZZ), projekt IP-2022-10-7608, projekt LeveeLiq (Mapiranje prostorne varijabilnosti potencijala likvefakcije ispod nasipa i modeliranje optimalnih mitigacijskih mjera).

## LITERATURA

- [1] EM-DAT: The International Disasters Database, URL: [www.emdat.be](http://www.emdat.be) (accessed on September 15<sup>th</sup>, 2025)
- [2] LIQUEFACT Project, HORIZON 2020 GA 700748, URL: [www.liquefact.eu](http://www.liquefact.eu) (accessed on September 17<sup>th</sup>, 2025)
- [3] Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M.S.: Geotechnics as an unavoidable segment of earthquake engineering, Građevinar, 70 (2020) 12; pp. 923–936, <https://doi.org/10.14256/JCE.2968.2020>
- [4] Towhata, I.: Liquefaction Mitigation Measures: A Historical Review, in: Sitharam, T. G., Jakka, R., Kolathayar, S. (Eds.), Latest Developments in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 2021, pp. 41–86, <https://doi.org/10.1007/978-981-16-1468-2>
- [5] Ishihara, K., Okada, S.: Effects of stress history on cyclic behavior of sand, Soils and Foundations, 18 (1978), pp. 31–45, [https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.4\\_31](https://doi.org/10.3208/sandf1972.18.4_31)

- [6] Suzuki, T., Toki, S.: Effects of preshearing on liquefaction characteristics of saturated sand subjected to cyclic loading, *Soils and Foundations*, 24 (1984), pp. 16–28, [https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.2\\_16](https://doi.org/10.3208/sandf1972.24.2_16)
- [7] Olson, S.M., Green, R.A., Obermeier, S.F.: Geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction features: a major updating, *Engineering Geology*, 76 (2005), pp. 235–261, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.07.008>
- [8] Wang, S., Yang, J., Onyejekwe, S.: Effect of previous cyclic shearing on liquefaction resistance of Mississippi River Valley silt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (2013), pp. 1415–1423, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000069
- [9] 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, 10.1061/JSEFAQ.0000981
- [10] Veinović, Ž.: Ocjena mogućnosti pojave likvefakcije i definiranje osnove za likvefakcijsko zoniranje na teritoriju Republike Hrvatske, dissertation, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2007, 332 pp.
- [11] Mijic, Z., Zlatović, S., Montgomery, J., Mijić, Z., Gjetvaj, V.: Liquefaction effects in the 2020 Mw 6.4 Petrinja, Croatia Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 193 (2025), Article 109262, 10.1016/j.soildyn.2025.109262
- [12] Torbar, J.: Izvješće o zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880., *Djela JAZU*, knj. 1, VIII+141 str., 1882, Zagreb
- [13] Pikija, M.: Basic Geological Map of SFRJ 1:100 000 scale, Sisak sheet, Federal Geological Survey of Yugoslavia, 1987
- [14] Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu: Studija o seizmički induciranim efektima Petrinjske potresne serije 2020–2021 – preliminarna identifikacija rizika, *Knjiga: Kartografski podaci o likvefakciji, klizištima, podzemnoj vodi i urušnim vrtačama u GIS-u kao tematski slojevi prirodnih ograničenja vezanih uz tlo za primjenu u prostornom planiranju*, Zagreb, 2021.
- [15] Ministarstvo graditeljstva, prostornoga urednja i državne imovine: Informacijski sustav prostornog uređenja (ISPU), <https://ispu.mgipu.hr/>
- [16] Tomac, I., Zlatović, S., Athanasopoulos-Zekkos, A., Bleiziffer, J., Domitrović, D., Frangen, T., Gjetvaj, V., Govorčin, M., Grilliot, M., Gukov, I., Herak, M., Hrženjak, P., Hutchinson, T., et al.: Geotechnical Reconnaissance and Engineering Effects of the December 29, 2020, M6.4 Petrinja, Croatia Earthquake, and Associated Seismic Sequence, *GEER Association Report No. GEER-070*, 2021, 10.4154/gc.2021.08
- [17] Pollak, D., Gulam, V., Novosel, T., Avanić, R., Tomljenović, B., Hećej, N., Terzić, J., Stipčević, J., Bačić, M., Kurečić, T., Dolić, M., Bostjančić, I., Wacha, L., Kosović, I., Budić, M., Vukovski, M., Belić, N., Špelić, M., Brčić, V., Barbača, J., Kordić, B., Palenik, D., Filjak, R., Frangen, T., Pavić, M., Urumović, K., Sečanj, M., Matoš, B., Govorčin, M., Kovačević, M.S. i Librić, L.: The preliminary inventory of coseismic ground failures related to December 2020 – January 2021 Petrinja earthquake series, *Geologia Croatica*, 74 (2021), 2, pp. 189–208, <https://doi.org/10.4154/gc.2021.08>
- [18] Tondi, R.E., Blumetti, A.M., Čičak, M. et al.: 'Conjugate' coseismic surface faulting related with the 29 December 2020, Mw 6.4, Petrinja earthquake (Sisak-Moslavina, Croatia). *Sci Rep* 11, 9150 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88378-2>
- [19] Baize, S., Amoroso, S., Belić, N., Benedetti, L., Boncio, P., Budić, M., Cinti, F.R., Henriquet, M., Jamšek Rupnik, P., Kordić, B., Markušić, S., Minarelli, L., Pantosti, D., Pucci, S., Špelić, M., Testa, A., Valkaniotis, S., Vukovski, M., Atanackov, J., Barbača, J., Bavec, M., Brajković, R., Brčić, V., Caciagli, M., Celarc, B., Civico, R., De Martini, P. M., Filjak, R., Iezzi, F., Kurečić, T., Métois, M., Nappi, R., Novak, A., Novak, M., Pace, B., Palenik, D., Ricci, T.: Environmental effects and seismogenic source characterization of the December 2020 earthquake sequence near Petrinja, Croatia, *Geophysical Journal International*, 230 (2022), 2, pp. 1394–1418, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac123>
- [20] Ambraseys, N.N., Jackson, J.A.: Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, *Geophys. J. Int.*, 133 (1998), pp. 390–406, <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x>
- [21] Galli, P.: New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction, *Tectonophysics*, 324 (2000), pp. 169–187, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00118-9)
- [22] Maurer, B.W., Green, R.A., Cubrinovski, M., Bradley, B.A.: Assessment of CPT-based methods for liquefaction evaluation in a liquefaction potential index framework, *Geotechnique*, 65 (2015), pp. 328–336, <https://doi.org/10.1680/geot.SIP.15.P.007>
- [23] Amoroso, S., Fontana, D., Valvano, C., Wacha, L., Belić, N., Budić, M., Cinti, F.R., Civico, R., De Martini, P.M., Kordić, B., et al.: The liquefaction evidences following the 2020 Petrinja earthquake (Pannonian Basin, Croatia): A full database and insights for phenomena comprehension, *Earthquake Spectra*, 41(3), pp. 2651–2672, <https://doi.org/10.1177/87552930251326561>
- [24] Bačić, M., Kovačević, M.S., Rossi, N., Librić, L.: Assessing the soil liquefaction susceptibility: a comparative study of CPT and MASW techniques in the aftermath of road failure, in: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2024) / Lakušić, S. (ed.)*, University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, Zagreb, 2024, pp. 783–790, <https://doi.org/10.5592/CO/CETRA.2024.1540>
- [25] Bačić, M., Librić, L., Kovačević, M.S.: Liquefaction assessment using a synthetic CPT derived from correlation with shear wave velocity, in: *Proceedings of the 3rd Croatian Conference on Earthquake Engineering – 3CroCEE*, Split, 19–22 March 2025, pp. 135–145, <https://doi.org/10.5592/CO/3CroCEE.2025.148>
- [26] Bačić, M., Librić, L., Kovačević, M.S.: Comprehensive Multi-Method Assessment of Liquefaction Potential along the levee, in: *GeoVadis – Advances in Geotechnical Engineering*, CRC Press / Taylor & Francis, pp. 375–380, 2025, <https://doi.org/10.1201/9781003645917-57>
- [27] Amoroso, S., Rollins, K.M., Di Giulio, G., Wacha, L., Urumović, K., Filjak, R., Budić, M., Kordić, B., Palenik, D., Testa, A., Valkaniotis, S., Pucci, S., Benedetti, L., Novosel, T., Bačić, M., Nappi, R.: Geotechnical and geophysical tests following the 2020 earthquake-induced liquefaction phenomena, in: *Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering (2CroCEE 2023)*, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Zagreb, pp. 46–56, <https://doi.org/10.5592/CO/2CroCEE.2023.21>
- [28] Moiriat, D., Maslac, J., Luong, A.T., Louis, K.J., Kordić, B., et al.: Preliminary results of geotechnical and geophysical investigations on sites with liquefaction occurrences in the greater Petrinja area after the 2020 earthquake, 9th Conference of Croatian Geotechnical Society with International Participation and under the Auspices of ISSMGE, May 2023, Sisak, Croatia, pp. 121–131
- [29] Mihaljević, I., Zlatović, S.: Embankments Damaged in the Magnitude Mw 6.4 Petrinja Earthquake and Remediation, *Geosciences*, 2023, 13(2):48. <https://doi.org/10.3390/geosciences13020048>
- [30] Mihaljević, I., Rupčić, B., Kaić, M., Grget, G., Matešić, L.: Design and construction for rehabilitation of earthquake-damaged water protection levees – methodology and solutions, in: *Proceedings of the 4th European Regional Conference of IAEG (EUROENGE 2024)*, IAEG / University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, Dubrovnik, pp. 587–594, <https://doi.org/10.5592/CO/EUROENGE.2024.245>
- [31] Seed, H.B., Idriss, I.M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (1971), SM9, pp. 1249–1273, <https://doi.org/10.1061/JSEFAQ.0001662>
- [32] Boulanger, R., Wilson, D., Idriss, I.: Examination and Re-evaluation of SPT-Based Liquefaction Triggering Case Histories, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (2012), 8, pp. 898–909, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000668](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000668)

- [33] Idriss, I., Boulanger, R.: 2<sup>nd</sup> 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, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.09.010>
- [34] HRN EN 1998-1:2011: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Hrvatski Zavod za Norme, 2011.
- [35] HRN EN 1998-1:2011/NA:2011/A1:2021 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings – National Annex, Hrvatski Zavod za Norme, 2011.
- [36] USGS: M6.4–2 km WSW of Petrinja, Croatia, ShakeMap, URL:<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/shakemap/intensity> (accessed 8 October 8th 2025)
- [37] Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H.: Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, 15 (1999), 3, pp. 557–564, <https://doi.org/10.1193/1.1586058>
- [38] Atkinson, G.M., Kaka, S.I.: Relationships between felt intensity and instrumental ground motion in the Central United States and California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (2007), 2, pp. 497–510, <https://doi.org/10.1785/0120060154>
- [39] Caprio, M., Tarigan, B., Worden, C.B., Wiemer, S., Wald, D.J.: Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105 (2015), 3, pp. 1476–1490, <https://doi.org/10.1785/0120140286>
- [40] Atkinson, G.M., Wald, D.J.: “Did You Feel It?” Intensity Data: A Surprisingly Good Measure of Earthquake Ground Motion, *Seismological Research Letters*, 78 (2007), 3, pp. 362–368, <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.3.362>
- [41] Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Atik L.A., et al. NGA-West2 Research Project, *Earthquake Spectra*, 2014;30(3), pp. 973–987. <https://doi.org/10.1193/072113EQS209M>
- [42] Douglas, J.: Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: a review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates, *Earth-Science Reviews*, 61 (2003), 1–2, pp. 43–104, [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00112-5)
- [43] Abrahamson, N.A., Silva, W.J., Kamai, R.: Summary of the ASK14 ground-motion relation for active crustal regions, *Earthquake Spectra*, 30 (2014), 3, pp. 1025–1055, <https://doi.org/10.1193/070913EQS198M>
- [44] Boore, D.M., Stewart, J.P., Seyhan, E., Atkinson, G.M.: NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra*, 30 (2014), 3, pp. 1057–1085, <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- [45] Campbell, K.W., Bozorgnia, Y.: NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped linear acceleration response spectra, *Earthquake Spectra*, 30 (2014), 3, pp. 1087–1115, <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- [46] Chiou, B.S.J., Youngs, R.R.: Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthquake Spectra*, 30 (2014), 3, pp. 1117–1153, <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- [47] Zhao, J.X., Zhou, S., Zhou, J., Zhao, C., Zhang, H., Zhang, Y., Gao, P., Lan, X., Rhoades, D.A., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Irikura, K.: Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (2016), 4, pp. 1552–1569, <https://doi.org/10.1785/0120150063>
- [48] Akkar, S., Sandikkaya, M.A., Bommer, J.J.: Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12 (2014), pp. 359–387, <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9461-4>
- [49] Cauzzi, C., Faccioli, E., Vanini, M., Bianchini, A.: Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (2015), pp. 1587–1612, <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9685-y>
- [50] USGS,  $V_{s30}$  Models and Data—Earthquake Hazards Program, URL: <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/> (accessed September 7th 2025)
- [51] Stanko, D., Markušić, S.: Site amplification model for Croatia estimated by random vibration theory-based site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179 (2024), 108547. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108547>
- [52] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., Sarhosis, V.: Destructive M6.2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020 – Preliminary Multidisciplinary Research. *Remote Sens.* 13 (2021), 1095. <https://doi.org/10.3390/rs13061095>
- [53] Herak, M., Markušić, S., Ivančić, I.: Attenuation of Peak Horizontal and Vertical Acceleration in the Dinarides Area. *Studia Geophys. Geod.* 45 (2001), pp. 383–394.
- [54] Markušić, S., Herak, M., Herak, D., Ivančić, I.: Peak Horizontal-to-Vertical Acceleration Ratio and Local Amplification of Strong Ground Motion. *Studia Geophys. Geod.* 46 (2002), pp. 83–92.
- [55] HRN EN 1998-5:2011 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, Hrvatski Zavod za Norme, 2011.
- [56] Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I.: Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109 (1983), 3, pp. 458–482, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(458))
- [57] Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M.: Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111 (1985), 12, pp. 1425–1445, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:12\(1425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:12(1425))
- [58] Youd, T.L., Idriss, I.M.: Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (2001), 10, pp. 817–833, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(817))
- [59] Boulanger, R.W., Idriss, I.M.: CPT and SPT based liquefaction triggering procedures, Rep. No. UCD/CGM-14/01, University of California, Davis, California, 2014., 138 pp.
- [60] Moss, R.E.S., Seed, R.B., Olsen, R.S.: Normalizing the CPT for overburden stress, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (2006), 3, pp. 378–387, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:3\(378\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(378))
- [61] Robertson, P.K.: Discussion of ‘CPT-based probabilistic soil characterization and classification’ by K. Onder Cetin and Cem Ozan, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2009), 1, pp. 84–107, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000120](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000120)
- [62] Andrus, R.D., Stokoe, K.H.: Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 126 (2000), 11, pp. 1015–1025, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:11\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015))
- [63] Robertson, P.K.: Interpretation of cone penetration tests — a unified approach, *Canadian Geotechnical Journal*, 46 (2009), 11, pp. 1337–1355, <https://doi.org/10.1139/T09-065>

- [64] Kovačević, M.S., Gavin, K., Reale, C., Librić, L., Jurić Kačunić, D.: Developing correlations between the soil fines content and CPT results using neural networks, in: Sigursteinsson, H., Erlingsson, S., Bessason, B. (Eds.), Proceedings of the XVII ECSMGE-2019, Reykjavik: Icelandic Geotechnical Society, 2019, pp. 1-8, <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0244>
- [65] Bačić, M., Andačić, K., Gavin, K., Urumović, K.: Soil investigations as a cornerstone for geotechnical design of liquefaction mitigation measures below levees, in: Proceedings of the 4th European Regional Conference of IAEG (EUROENGEO 2024), University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, Zagreb, 2024, pp. 218-227, <https://doi.org/10.5592/CO/EUROENGEO.2024.257>
- [66] Grget, G., Matešić, L., Pečina, I., Šindler, D., Šuto, I.: Sanacija temelja Mosta Gromova u Sisku, 9<sup>th</sup> Conference of Croatian Geotechnical Society with International Participation and under the Auspices of ISSMGE, May 2023, Sisak, Croatia
- [67] Bago, M., Matešić, L., Mlinarić, I.: Osvrt na pregled spremnika sirove nafte terminala Sisak nakon potresa 2020. godine, 9th Conference of Croatian Geotechnical Society with International Participation and under the Auspices of ISSMGE, May 2023, Sisak, Croatia
- [68] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO): Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, AASHTO, 2009, 258
- [69] 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.
- [70] URL: <https://leveeliq.eu/> (accessed October 28th 2025)
- [71] 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, 137 p., 2004.
- [72] SM Working Group: Guidelines for Seismic Microzonation, Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy – Civil Protection Department, Rome, 2015.
- [73] California Geological Survey: Special Publication 117A: Guidelines for Evaluating and Mitigating Seismic Hazards in California, California Department of Conservation, 2012.
- [74] New Zealand Geotechnical Society: Earthquake geotechnical engineering practice – Module 3: Identification, assessment and mitigation of liquefaction hazards, New Zealand Geotechnical Society, 2016.
- [75] Lai, C.G., Conca, D., Famà, A., Özcebe, A.G., Zuccolo, E., Bozzoni, F., Meisina, C., Boni, R., Poggi, V., Cosentini, R.M.: Mapping the liquefaction hazard at different geographical scales. In Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions, CRC Press, 14 p., 2019.