

Primljen / Received: 16.2.2021.

Ispravljen / Corrected: 30.6.2021.

Prihvaćen / Accepted: 17.7.2021.

Dostupno online / Available online: 10.8.2021.

## Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti

### Autori:

Doc.dr.sc. **Ivan Halkijević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[ivan.halkijevic@grad.unizg.hr](mailto:ivan.halkijevic@grad.unizg.hr)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Dražen Vouk**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[drazen.vouk@grad.unizg.hr](mailto:drazen.vouk@grad.unizg.hr)**Hana Posavčić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[hana.posavcic@grad.unizg.hr](mailto:hana.posavcic@grad.unizg.hr)**Hrvoje Mostečak**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

[hrvoje.mostecak@grad.unizg.hr](mailto:hrvoje.mostecak@grad.unizg.hr)

Stručni rad

**Ivan Halkijević, Dražen Vouk, Hana Posavčić, Hrvoje Mostečak**

### Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti

U radu se izlaže najčešće korištena metodologija procjene oštećenja nastalih na vodoopskrbnoj mreži nakon seizmičkog događaja, a koja se temelji na definiranju i primjeni takozvanih funkcija ranjivosti. Daje se pregled postojećih funkcija ranjivosti s navodnom utjecajnih parametara, prije svega deformacija tla, te kritičkim osvrtom na mogućnost njihove primjene. U konačnici je primjenom dvaju pristupa procijenjen broj oštećenja i pripadnih materijalnih šteta na vodoopskrbnoj mreži vodovoda grada Petrinje nakon potresa 29. prosinca 2020. godine. S ukupno 3 800 novih oštećenja procjenjuje se da ukupna direktna materijalna šteta iznosi oko 28 milijuna kuna. Točnost navedenih procjena treba, sukladno s danim smjernicama, verificirati nakon detaljnog prikupljanja i obrade relevantnih podataka.

#### Ključne riječi:

potres, oštećenje vodoopskrbne mreže, funkcija ranjivosti, deformacije tla, grad Petrinja

Professional paper

**Ivan Halkijević, Dražen Vouk, Hana Posavčić, Hrvoje Mostečak**

### Damage assessment of water supply networks due to seismic events using vulnerability functions

The paper presents commonly used methodology for assessing damage of water supply networks after a seismic event. The methodology relies on deriving and applying so-called vulnerability function. An overview of the existing vulnerability functions is given together with parameters, primarily related to soil deformations, which are influencing the assessment. Also, a critical review of the possibility of their use is given. Finally, by using two approaches, the estimated number of damages, with associated repair costs, is given for the water supply network of the City of Petrinja after the earthquake on December 29, 2020. With a total of 3 800 new damages, it is estimated that the total repair costs are around HRK 28 million. The accuracy of these estimates should be verified after detailed collection and processing of relevant data in accordance with the given guidelines.

#### Key words:

earthquake, water supply network damage, vulnerability functions, soil deformation, City of Petrinja

## 1. Uvod

Oštećenja na vodoopskrbnom sustavu nakon jakih, velikih ili razarajućih seizmičkih događaja rezultiraju smanjenjem ili potpunim gubitkom funkcionalnosti vodoopskrbe. Time se javljaju i rizici od posrednih šteta, primjerice, ekonomski gubici isporučitelja vodnih usluga uslijed nemogućnosti isporuke vode, ekonomski gubici u gospodarstvu uslijed nemogućnosti provedbe tehnoloških procesa ovisnih o vodi, moguća širenja hidričnih bolesti zbog izostanka zdravstvene ispravnosti vode, nemogućnosti osiguranja protupožarnih količina i sl. Uz sve to, funkcioniranje vodoopskrbnog sustava jest i nužan preduvjet opstojnosti potresom pogođene sredine.

U domaćoj praksi projektiranja vodoopskrbnih sustava se, u pravilu, ne analizira utjecaj seizmičkog događaja na samu vodoopskrbnu mrežu, iako se na njoj nakon seizmičkih događaja javljaju veća, vizualno uočljiva oštećenja, ali i ona neuočljiva, bilo u obliku puknuća, uzdužnog i posmičnog odvajanja spojeva, tj. diferencijalnih pomaka na mjestu spajanja cijevi, oblikovnih komada i vodovodnih armatura, ili nekog drugog mehanizma gubitka funkcionalnosti.

Štete na vodoopskrbnoj mreži uslijed seizmičkog događaja ne ovise samo o jakosti seizmičkog događaja, već i o tehničkim karakteristikama cjevovodne mreže te uvjetima okolnog tla, pri čemu se, ovisno o usvojenoj metodologiji, najčešće razmatraju: starost cjevovoda, cijevni materijal, vrsta spoja i brtvenog sredstva, promjer cjevovoda, tehnologija gradnje, geomehaničke karakteristike okolnog tla, kemijska agresivnost okolnog tla, razina podzemne vode, uvjeti ležišta (posteljice) cjevovoda, izvedba uporišta na horizontalnim i vertikalnim zavojima, prodori na zidovima okana i komora i izvedba potpornih blokova u njima [1-7].

Najčešće korištena metodologija procjene oštećenja na vodoopskrbnoj mreži temelji se na objavljenim znanstvenim radovima autora koji su, uz veći ili manji opseg podataka, koji se osobito odnose na vrstu cijevnog materijala i pripadne vrste spoja te promjer cjevovoda, kvalitativno i kvantitativno analizirali utjecaje seizmičkog događaja na pojavu oštećenja (puknuća i/ili curenja na spojevima) na vodoopskrbnoj mreži, poglavito na temelju podataka nakon seizmičkih događaja s područja Sjedinjenih Američkih Država i Japana [1-7].

Bitno je napomenuti da je ovdje riječ isključivo o procjeni oštećenja budući da se uvid u cjelokupno stvarno stanje oštećenosti vodoopskrbne mreže ne može pouzdano utvrditi zbog oštećenja koja ostanu neprimijećena, kao i činjenice da stanje oštećenosti vodoopskrbnog sustava prije seizmičkog događaja također nije u potpunosti poznato.

U ovom radu izložit će se najčešće korištena metodologija koja se isključivo odnosi na procjenu oštećenja same cjevovodne, tj. vodoopskrbne mreže (uključujući procjenu oštećenja cjevovoda unutar zasunskih okana i procjenu oštećenja na kućnim priključcima) te ne uključuje druge nadzemne građevine vodoopskrbnog sustava koji su dostupni za vizualan pregled (kao što su vodospreme, građevine vodozahvata, crpne stanice i sl.). Osim toga, dat će se i

primjer primjene spomenute metodologije na procjene oštećenja vodoopskrbne mreže za vodoopskrbni sustav grada Petrinje nakon seizmičkog događaja 29. prosinca 2020.

## 2. Metodologija procjene oštećenja na vodoopskrbnim mrežama

### 2.1. Općenito

Najčešći metodološki postupak procjene oštećenja na vodoopskrbnoj mreži uključuje primjenu vlastito razvijenih ili literaturno preuzetih "funkcija ranjivosti". Funkcija ranjivosti (također i "funkcija štete" ili "funkcija krhkosti") podrazumijeva metodologiju kojom se pomoću empirijski utvrđenog izraza procjenjuje stupanj oštećenosti ili vjerojatnost prekoračenja nekog graničnog stanja vodoopskrbne mreže (npr. dopuštene vertikalne deformacije cijevi). Obično se funkcijom ranjivosti iskazuje broj oštećenja (puknuća i prekomjernih deformacija koje ne omogućuju ispravno funkcioniranje cjevovoda te zahtijevaju sanaciju, tj. popravak) po jedinici duljine cjevovodne mreže. Pri tome se funkcijom ranjivosti uspostavlja funkcijski odnos između broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži i vrijednosti parametra pobude tla uslijed seizmičkog događaja, najčešće putem vršne horizontalne brzine tla (engl. *Peak Ground Velocity - PGV*), vršnog horizontalnog ubrzanja tla (engl. *Peak Ground Acceleration - PGA*) te iznosa trajnih deformacija (nepovratnih pomaka) tla (eng. *Peak Ground Displacement - PGD*) [1-4].

Metodologija procjene oštećenja sastoji se od dva osnovna postupka koji podrazumijevaju izvod, tj. definiranje same funkcije ranjivosti te njenu primjenu za procjenu nastalih oštećenja. Dodatno, sama se procjena oštećenja primjenom izvedene funkcije ranjivosti razlikuje ovisno o namjeni analize, tj. broju analiziranih seizmičkih scenarija, pri čemu se u okviru protupotresnog projektiranja vodoopskrbne mreže razmatra više scenarija (seizmičkih događaja s različitim vrijednostima parametra pobude tla), a procjena se nastalih oštećenja nakon konkretnog seizmičkog događaja provodi prema izmjerenim parametrima seizmičke pobude [5, 6].

Razmatranjem više seizmičkih događaja nastoji se, s obzirom na projektom predviđene karakteristike vodoopskrbne mreže, kroz procjenu javljanja broja oštećenja, ocijeniti seizmičku otpornost projektirane mreže. Tako se u slučaju nedostatno ocijenjene otpornosti predlažu drukčija rješenja u smislu tlocrtno konfiguracije trasa koja povećavaju sigurnost i funkcionalnost vodoopskrbe, ili se za istu tlocrtnu konfiguraciju razmatraju drukčiji tehnički parametri same mreže (drukčiji cijevni materijal, drukčija debljina stijenke cijevnog materijala, drukčije vrste spojeva, drukčiji promjeri i dr.).

Procjenom oštećenja nakon konkretnog seizmičkog događaja nastoji se primjenom izvedenih funkcija ranjivosti ustanoviti broj novonastalih oštećenja, tj. dobiti uvid u opseg oštećenosti mreže kako bi se procijenile štete i planirale aktivnosti za sanaciju.

Spomenuti metodološki postupak izrade funkcije ranjivosti sukcesivno podrazumijeva:

- prikupljanje osnovnih tehničkih podataka o vodoopskrbnoj (transportnoj i opskrbenj) mreži, prije svega o cijevnim materijalima, promjerima, trasama, starosti te drugim postojećim građevinama na trasama analiziranog vodoopskrbnog sustava,
- prikupljanje parametara (*PGV*, *PGA*, *PGD*) prethodnih relevantnih seizmičkih događaja i s njima povezanih stvarno evidentiranih oštećenja na vodoopskrbnoj mreži,
- statističku analizu utjecaja vrijednosti parametara seizmičke pobude na javljanje evidentiranih oštećenja,
- definiranje funkcija ranjivosti u ovisnosti "privremenih" (*PGV* i *PGA*) i "dugotrajnih" (*PGD*) deformacija tla, pri čemu se u funkcionalnu vezu stavljaju osnovne tehničke karakteristike vodoopskrbne mreže s parametrima deformacija tla,
- definiranje oblika i parametara funkcija ranjivosti za one tehničke karakteristike za koje je utvrđena statistička značajnost.

U svakom od navedenih koraka se, osim statističkih metoda, primjenjuju i različite grafičke, računске ili računalne metode (npr. hidrauličko matematičko modeliranje, primjena GIS alata, neuronske mreže, druge metode rudarenja podataka i sl.) i postupci čija primjena ovisi o dostupnosti i kakvoći relevantnih podataka. Postupak procjene oštećenja sastoji se od:

- procjene srednjeg stupnja, tj. specifičnog (po duljini mreže) srednjeg broja (ili medijana) oštećenja vodoopskrbne mreže funkcijama ranjivosti kroz jedan ili više scenarija seizmičkog događaja, s procjenom stupnja gubitka funkcionalnosti opskrbe, a ponekad i procjene nesigurnosti u procjeni srednjeg stupnja (ili medijana) oštećenosti s obzirom na korištene funkcije ranjivosti,
- procjene ukupne štete na vodoopskrbnoj mreži, tj. procjene troškova sanacije ili zamjene dijela vodoopskrbne mreže, a ponekad i procjene trajanja provedbe sanacija do uspostavljanja potpune funkcionalnosti vodoopskrbne mreže.

Pri tome je potrebno napomenuti da procjena vremena obnove vodoopskrbne infrastrukture ovisi ujedno i o stanju oštećenosti druge javne infrastrukture, prije svega o dostupnosti električne energije, telekomunikacijske infrastrukture i oštećenosti prometnica, ali i razmjerima štete koju su pretrpjele pravne osobe usko vezane za graditeljsku djelatnost (npr. dostupnost odgovarajućeg građevinskog materijala, dostupnost izvođača radova odgovarajuće struke i sl.), a što direktno utječe na vrijeme odgovora u sanaciji oštećenja na vodoopskrbnoj mreži. Ovakva sveobuhvatna procjena oštećenja, kao i procjena vremena obnove (sanacije) vodoopskrbnog sustava, uzimajući u obzir utjecaj drugih usko vezanih infrastrukturnih sustava, često nije moguća zbog nepostojanja svih relevantnih podataka, ali je predmet istraživanja u definiranju sveobuhvatnih metodologija ocjene hazarda od prirodnih katastrofa. Ujedno, pojedini računalni programi, kao što su *MAE Viz* (razvila su ga američke istraživačke institucije *National Center for Supercomputing*

*Applications* i *Mid-America Earthquake (MAE) Center*) i *UILLIS (Urban Infrastructure and Lifelines Interactions of Systems* (razvila ga je američka istraživačka institucija *Pacific Earthquake Engineering Research Center*) omogućuju modeliranje ovakvih scenarija [7, 8].

## 2.2. Funkcije ranjivosti vodoopskrbne mreže

Općenito se oštećenja na vodoopskrbnoj mreži uslijed seizmičkog događaja mogu pripisati takozvanim privremenim (kratkotrajnim, tj. tranzijentnim) deformacijama tla te trajnim deformacijama tla.

Privremene deformacije nastaju kao posljedica širenja različitih vrsta seizmičkih valova, a oštećenja cjevovoda koreliraju s relativnim pomakom između tla i cjevovoda, tj. mjerenim ili procijenjenim seizmičkim parametrima kao što su modificirani Mercallijev intenzitet, *PGA*, *PGV*, vršno pomicanje tla, odnosno spektri odgovora tla, tj. spektar ubrzanja, brzina te pomaka. Trajne deformacija tla najčešće se ogledaju kroz pojavu klizišta, rasjeda, slijeganja i likvefakcije tla [3, 9].

Relativni odnos tih deformacija određuje koja će deformacija tla imati prevladavajući utjecaj na oštećenja cjevovoda. Privremene deformacije općenito uzrokuju mnogo manje razine naprezanja i deformacija cjevovoda. Međutim, budući da obuhvaćaju šire područje, oštećenja na cjevovodima uslijed ovih deformacija mogu biti dominantna (npr. polovica oštećenja na vodoopskrbnoj mreži u San Fernandu, Kalifornija, SAD, u potresu 1971. godine pripisana je privremenim deformacijama). Takva oštećenja opažaju se kada se javljaju pulsacije vršnih brzina tla ili gdje karakteristike tla uzrokuju interferenciju valova s rezultirajućim većim pomacima tla, tj. cjevovoda [10].

Obično se za vodoopskrbne mreže uslijed širenja seizmičkih valova, tj. privremenih deformacija, može očekivati da će se 15-20 % oštećenja javiti kao nova puknuća, a ostatak kao curenja nastala zbog diferencijalnih pomaka na spojevima između cijevi, oblikovnih komada i vodovodnih armatura. Zbog trajnih deformacija, može se očekivati da će se 80-85 % novih oštećenja javiti kao puknuća, a ostatak oštećenja javiti će se kao curenja na spojevima. Međutim, navedeno treba uzeti sa znatnom rezervom jer pojedine studije navode i drukčije (neke čak i podjednake) omjere javljanja oštećenja [11].

Empirijski izraz funkcije ranjivosti obično se definira na temelju statističke obrade podataka o provedenim sanacijama nakon seizmičkog događaja, primarno u funkciji duljine mreže (npr. broj sanacija po km<sup>2</sup>), načinu spajanja te materijalu vodoopskrbne mreže, a ovisno o parametrima seizmičke pobude. Često ih se definira log-normalnom funkcijom raspodjele vjerojatnosti, iako takva raspodjela ne mora uvijek najbolje odgovarati stvarnom stanju. Drukčijim oblicima funkcija ranjivosti mogu se odrediti i vjerojatnosti postizanja ili prekoračenja nekog nepoželjnog stanja uvjetovanog stupnjem pobude tla [12, 13].

Katayama i suradnici su 1975. godine izveli jednu od najranijih korelacija između seizmičkih parametara, konkretno *PGA* i

oštećenja cjevovoda, a pri čemu se nisu razlikovala oštećenja nastala od privremenih i trajnih deformacija tla [14]. Eguchi i suradnici su između 1981. i 1983. godine korelirali stupanj oštećenosti cjevovoda sa stupnjem Mercallijevog intenziteta te preporučili da se vrednuju samo oštećenja od propagacije seizmičkih valova. Nadalje, njihove su funkcije ranjivosti razvijene za lijevano željezne i zavarene čelične cijevi. Također, pod pretpostavkom da će prevladavati kvarovi na spojevima, usvojeno je i to da će azbestocementni cjevovodi i zavareni čelični cjevovodi imati sličan stupanj oštećenosti kao cjevovodi od sivog lijeva [15, 16].

Barenberg je 1989. godine predložio da oštećenja cjevovoda budu u korelaciji s privremenim deformacijama tla u potresnom području niskog intenziteta, konkretno s vršnom horizontalnom brzinom tla, te u korelaciji s trajnim deformacijama u potresnom području s izraženim trajnim deformacijama, tj. vidljivim površinskim rasjedima, likvefakcijom i drugim rezultirajućim pojavama [17]. O'Rourke i Ayala su 1993. godine proširili Barenbergove rezultate s cjevovodima većih profila (DN 500 - DN 1800) od sivog lijeva, azbestocementnim cjevovodima te armiranobetonskim (čelični cilindar) cjevovodima. Ova istraživanja usvojila je 1999. godine i američka Savezna agencija za upravljanje u krizama (*Federal Emergency Management Agency - FEMA*) u okviru Metodologije za procjenu šteta od katastrofa (engl. *Methodology for Estimating Potential Losses from Disasters - HAZUS*) kao metodu procjene nastalih oštećenja uslijed potresa [18].

Honegger i Eguchi su 1992. godine na temelju analize podataka četiriju potresa definirali utjecaj trajnih deformacija tla na javljanje oštećenja na vodoopskrbnoj mreži, pri čemu su kroz deformacijsko ponašanje cijevnog materijala uzete u obzir krute (sivi lijev, beton, azbestocement) i elastične cijevi (nodularni lijev, polivin klorid, čelik) [19].

Toprak i O'Rourke su u radovima iz 1998. godine na temelju obrade većeg broja seizmičkih podataka i gotovo 12.000 km vodoopskrbne mreže na području Los Angelesa, utvrdili statistički najznačajnije korelacije između broja oštećenja i vršne horizontalne brzine tla. Izrazi su razvijeni prije svega za oštećenja cjevovoda od sivog lijeva, iako je napravljena i ograničena usporedba s oštećenjima za druge vrste cijevnih materijala. Također su uzeli u obzir i utjecaj promjera pa su izrazi grupirani za promjere  $\leq$  DN 600, tj. za promjere  $>$  DN 600 [20].

Autori O'Rourke i Jeon su 1999. i 2000. godine definirali pojedinačne funkcije ranjivosti za cjevovode od sivog lijeva, nodularnog lijeva te azbestocementne i čelične cjevovode. Njihovi izrazi, uz PGV, uzimajući u obzir i promjer cijevi, tj. sam utjecaj promjera na javljanje oštećenja [21].

Eidinger, J. je 2001. godine predložio dvije funkcije ranjivosti: jednu za utjecaj prolaska seizmičkih valova i drugu za utjecaj trajnih deformacija tla na pojavu novih oštećenja na mreži. Navedene funkcije ranjivosti dane su za prosječan broj oštećenja na 100 [m] vodoopskrbne mreže za različite cijevne materijale te male ( $\leq$  DN 300) i velike ( $\geq$  DN 400) promjere [22].

U okviru projekta smanjenja rizika za komunalne i transportne sustave uslijed prirodnih opasnosti (engl. *The American Lifelines Alliance - ALA*), američki *National Institute of Building Sciences* je preuzimanjem Eidingerovih rezultata te analizom podataka seizmičkih događaja iz SAD-a, Japana i Meksika, razvio funkcije ranjivosti u ovisnosti vršne brzine tla, trajne deformacije tla, cijevnog materijala, promjera te korozivnosti tla. Te funkcije ranjivosti koristi i računalni program *HAZUS-MH* koji se za ovakve procjene uobičajeno koristi na području SAD-a. Ujedno, izrađivači preporučuju razvijene funkcije ranjivosti kada nisu poznati tehnički podaci o materijalu cijevi, načinu spajanja, promjerima, stanju korozije i sl.

Pineda i Ordaz su analizirajući podatke seizmičkih događaja za vodoopskrbni sustav Mexico Citya 2003. godine zaključili da *PGV* daje precijenjeni broj oštećenja za potrese magnitude 8 i manje, te su predložili korigirajući parametar  $PGV^2/PGA$  [23].

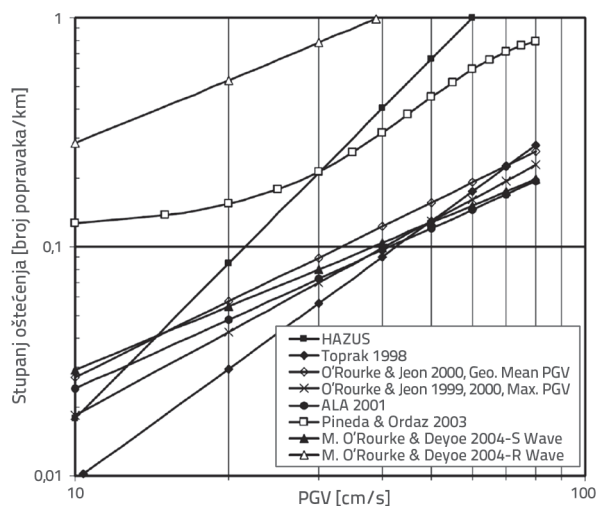
O'Rourke i Deyoe su 2004. godine istraživali razlike između funkcija ranjivosti koje su osmislili *FEMA (HAZUS)* i drugi autori, pri čemu su zaključili da su najznačajnije razlike rezultat korištenih skupova podataka koji se odnose na vrstu seizmičkog vala, konkretno na razlike između utjecaja sekundarnih (transverzalnih valova kod kojih čestice tla vibriraju okomito na smjer širenja vala) i Rayleighjevih valova (kod kojih se čestice gibaju u vertikalnoj ravnini, po eliptičnoj putanji u smjeru obrnutom od smjera širenja seizmičkog vala) [24].

O'Rourke i suradnici su 2014. godine definirali funkcije ranjivosti za median potrebni popravak po 1 [km] azbestocementnih i lijevanoželjeznih cijevi izloženih privremenim deformacijama tla, a u zavisnosti srednje vrijednosti od dvije vršne horizontalne brzine tla svih relevantnih mjerenja [25].

Halfaya i suradnici su predložili indeks ranjivosti vodoopskrbne mreže na temelju proširenja bilo koje funkcije ranjivosti korekcijskim koeficijentima kojima se u obzir uzimaju promjeri cijevi od DN  $<$ 75 do DN  $>$ 1100, različite vrste materijala i pripadajuće vrste spoja te postojanja likvefakcije tla [2]. Lee i suradnici su 2020. godine predložili proširenu ALA metodu dodatnim koeficijentima kojima su uzeli u obzir vrstu cijevnog materijala, promjer cijevi, uvjete ugradnje te također postojanje likvefakcije tla [26].

Ako se uspoređi procjena oštećenja navedenih najčešće korištenih funkcija ranjivosti s obzirom na privremene deformacije tla, dobiva se odnos prikazan na slici 1.

Iz priloženog dijagrama vidi se da dvije funkcije ranjivosti (prema Pinedi i Ordazu te O'Rourkeu i Deyoeu za Rayleighjeve valove) znatno odstupaju u procjenama već za početne vrijednosti *PGV*, dok funkcija ranjivosti prema Topraku predviđa izrazito visoke vrijednosti oštećenja za veće vrijednosti *PGV*. Ostale funkcije ranjivosti u najvećem rasponu vrijednosti za *PGV* poprimaju relativno slične stupnjeve oštećenosti, a što implicira na veću sigurnost u izradi procjene oštećenja kada nije moguće definirati funkcije ranjivosti za konkretan vodoopskrbni sustav.



Slika 1. Grafički prikaz relativne usporedbe broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži prema najčešće korištenim funkcijama ranjivosti [10]

### 2.3. Mogućnost primjene izloženih funkcija ranjivosti za slučaj seizmičkih događaja na uslužnom području sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje

Izložene funkcije ranjivosti primarno su izvedene za konkretne seizmičke događaje, tj. konkretne magnitude, lokalne geografske/geološke/geotehničke prilike, kao i konkretne tehničke karakteristike vodoopskrbne mreže, te se ne mogu nekritički preuzeti za procjenu štete za svaki seizmički događaj. Pri tome je bitno naglasiti da su dostupne informacije u vezi s izloženim funkcijama ranjivosti bile ograničene ponajviše u smislu relativno malog broja analiziranih potresa i pripadajućih oštećenja na vodoopskrbnoj mreži, te postojanja mjerenih seizmičkih parametara.

Uspostava korelacije između broja nastalih oštećenja, tj. broja potrebnih popravaka i procijenjenih seizmičkih parametara, kao što je intenzitet prema Mercalli-Cancani-Siebergovoj (MCS) ljestvici, uključuje znatne nesigurnosti. Intenzitet prema MCS ljestvici ne samo da je subjektivna mjera seizmičkog događaja, već je i opseg obuhvata područja na kojem je primijećen određen intenzitet predmet subjektivne prosudbe. Stoga, funkcije ranjivosti s inherentnim nesigurnostima koje su rezultat procjene iznosa intenziteta i opsega područja obuhvaćenog jednom vrijednosti intenziteta, nisu ovdje razmatrane.

Među različitim zabilježenim seizmičkim parametrima statistički najznačajnije korelacije pronađene su za vršne horizontalne brzine tla, *PGV*, zbog nastanka aksijalnih deformacija u tlu uslijed širenja seizmičkih valova, pri čemu se, ovisno o nastalom relativnom pomaku između cjevovoda i okolnog tla, deformira i sam cjevovod. Bitno je napomenuti da različiti autori različito definiraju *PGV*. Tako se *PGV* definira kao veća od dvije horizontalne komponente brzine zabilježene tijekom potresa, zatim kao geometrijska sredina najvećih horizontalnih komponenti brzine,

te kao najveća pojedinačno zabilježena horizontalna vrijednost brzine.

Glavni razlog zašto je *PGV* bolji pokazatelj oštećenja cjevovoda u odnosu na *PGA* jest njegov odnos prema deformaciji tla. *PGV* pokazuje bolji odziv tla od *PGA* kada se promatra u funkciji vremena, što ga čini prihvatljivijim za determinističke modele. Stoga je *PGV* i najčešće korišten seizmički parametar za procjenu šteta na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkog djelovanja, pa će se za procjenu oštećenja na razmatranom području analizirati samo funkcije ranjivosti koje uključuju procjenu na osnovi *PGV*.

Drugi relevantni parametri koje treba uzeti u obzir, a koji najčešće figuriraju u izvedenim funkcijama ranjivosti, odnose se na vrstu cijevnog materijala, vrstu spoja i promjere cijevi. Naime, pojedine funkcije ranjivosti, osobito one razvijene u okviru *ALA* i *HAZUS* metoda (metoda O'Rourke i Ayala iz 1993. godine), uzimajući u obzir procjenu oštećenja i na temelju ovih kriterija [2, 18, 20, 21, 22, 25]. Za druge relevantne parametre, kao što su starost, tj. fizičko stanje vodoopskrbne mreže, uvjeti tla (mehanički i kemijski), tlačni uvjeti i dr., postoje odgovarajuće pojedinačne funkcije ranjivosti, međutim za razmatrano područje nisu dostupni odgovarajući podaci, pa se takve funkcije ranjivosti niti neće razmatrati.

S druge strane, unatrag dvadesetak godina izgradnja novih, kao i sanacija ili rekonstrukcija postojećih vodoopskrbnih mreža temelji se na primjeni plastičnih cijevnih materijala, ponajviše polietilena (PE), i to visoke gustoće (PEHD), koji polako preuzima primat upotrebe nad poli(vinil-kloridom) (PVC). Do danas, zapravo ne postoje empirijski dokazi o seizmičkim performansama plastičnih PE cijevnih materijala u vodoopskrbnim sustavima, ali ograničena iskustva pokazuju dobre rezultate u distribucijskim sustavima plina. Ograničena ispitivanja PE cijevi pod tlakom pokazala su da deformacijski kapaciteti prije puknuća prelaze nominalne vrijednosti za 25 % za vlačno i 10 % za tlačno naprezanje, a što upućuje na relativno povoljniju seizmičku robusnost [7, 27]. Također, samo nekoliko istraživanja o utjecaju seizmičkih događaja procjenjivalo je seizmičku otpornost na oštećenja PE cijevi u odnosu na druge cijevne materijale, pri čemu je utvrđeno da stupanj oštećenosti za PE iznosi < 0,5 [1/km], a primjerice za nodularni lijev iznosi 1,0 [1/km], čelik 2,4-2,6 [1/km], PVC 2,6 [1/km], sivi lijev 3,3 [1/km] te 4,5 [1/km] za azbestcement [7, 27]. Također, pojedini autori navode i drukčije odnose.

Nadalje, PE nije osjetljiv na koroziju, ali postoji određena zabrinutost zbog zdravstvenih učinaka dugotrajne upotrebe. Stoga, eventualna preporuka primjene PE cijevi u područjima sklonim seizmičkim aktivnostima treba uslijediti nakon utvrđivanja stvarnog učinka dugotrajne primjene polietilena kao cijevnog materijala na ljudsko zdravlje.

Navedene *ALA*, *HAZUS* te Honegger - Eguchijeva metoda ujedno su metode procjene oštećenja na komunalnim građevinama, plinovodima, naftovodima te vodoopskrbnoj mreži, koje za sustavnu analizu seizmičke ranjivosti i rizika komunalnih građevina, uzimajući u obzir interakcije između različitih

komponenta i sustava (npr. prometni sustav), preporučuje Europska komisija u skladu s dokumentima *Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain* [28], te prema dokumentu *Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities* proizašlim iz istraživačkog znanstvenog projekta SYNER-G [28, 29]. Pri tome se za procjenu oštećenja na naftovodima preporučuje primjena ALA metode, a za procjenu oštećenja na vodoopskrbnim mrežama preporučuje se HAZUS metoda te Honegger - Eguchijeva metoda.

Navedenim znanstvenim projektom razvio se inovativni metodološki okvir za procjenu fizičke kao i socioekonomske seizmičke ranjivosti i rizika na urbanoj razini. Izgrađeno okruženje modelirano je prema detaljnoj taksonomiji grupiranoj u sljedeće kategorije: zgrade, prometne i komunalne mreže te kritično važne građevine. Svaka kategorija ima nekoliko vrsta komponenata i podsustava, a razvijeni okvir integrirano povezuje sve aspekte, od procjene hazarda, do procjene ranjivosti komponenata, podsustava i sustava, kao i socioekonomskih učinaka potresa, uzimajući u obzir i nesigurnosti kvantitativne simulacijske sheme i modeliranja interakcije između sustava.

Zaključno se može reći da se za razmatrano područje, prema dostupnim podacima, prethodno izloženom te preporukama Europske komisije, mogu koristiti ALA i HAZUS metode te Honegger -Eguchijeva metoda procjene oštećenja, pa će se pobliže ovdje izložiti.

### 2.3.1. ALA metoda

Funkcije ranjivosti se prema ALA metodi definiraju izrazima (1) i (2):

$$R_p = K_1 \cdot 0,002416 \cdot PGV \quad (1)$$

$$R_t = K_2 \cdot 2,5831 \cdot PGD^{0,309} \quad (2)$$

gdje su:  $R_p$  prosječan broj oštećenja uslijed privremenih deformacija tla na 1 [km] vodoopskrbne mreže,  $R_t$  prosječan broj oštećenja uslijed trajnih deformacija tla na 1 [km] vodoopskrbne mreže,  $PGV$  vršna horizontalna brzina tla u [cm/s],  $PGD$  trajno pomicanje tla nakon potresa u [m],  $K_1$  i  $K_2$  su koeficijenti koji u obzir uzimaju vrstu cijevnog materijala, spojeva, korozivnost tla i promjer cijevi (tablica 1.).

### 2.3.2. HAZUS (O'Rourke i Ayala) metoda

Ovom se metodom za procjenu oštećenja nastalih uslijed privremenih deformacija tla,  $R_p$  [1/km], upotrebljava funkcija ranjivosti, izraz (3):

$$R_p = K_3 \cdot 0,0001 \cdot PGV^{2,25} \quad (3)$$

gdje je:  $PGV$  vršna horizontalna brzina tla u [cm/s], a  $K_3$  koeficijent ovisan o deformacijskom ponašanju cijevnog materijala koji prima vrijednost 1,0 [1] za krute cijevne materijale (sivi lijev,

Tablica 1. Vrijednosti koeficijenata  $K_1$  i  $K_2$  prema Eidingeru uz dopunu prema drugim autorima [22, 27, 29]

Materijal	Spoj	Tlo	Promjer	$K_1$	$K_2$
Sivi lijev	cement	sva tla	≤ DN 300	1,0	1,0
	cement	korozivno	≤ DN 300	1,4	1,0
	cement	nekorozivno	≤ DN 300	0,7	1,0
	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,8	0,8
	mehaničke spojnice	sva tla	≤ DN 300	0,7	0,7
Čelik	zavareni preklop	sva tla	≤ DN 300	0,6	0,15
	zavareni preklop	korozivno	≤ DN 300	0,9	0,15
	zavareni preklop	nekorozivno	≤ DN 300	0,3	
	zavareni preklop	sva tla	≥ DN 400	0,15	0,15
	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,7	0,7
	vijčani spoj	sva tla	≤ DN 300	1,3	
	zakovice	sva tla	≤ DN 300	1,3	
Azbest cement	cement	sva tla	≤ DN 300	1,0	1,0
	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,8	0,8
Armirani beton (čelič. cilindar)	zavareni preklop	sva tla	≥ DN 400	0,7	0,6
	cement	sva tla	≥ DN 400	1,0	1,0
	gumena brtva	sva tla	≥ DN 400	0,8	0,7
PVC	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,5	0,8
Nodularni lijev (duktil)	gumena brtva	sva tla	≤ DN 300	0,5	0,5

Tablica 2. Podaci seizmičkih mjernih stanica Grada Zagreba s vrijednostima korigiranih parametara  $PGA$ ,  $PGV$  i  $PGD$  na temelju zapisa akcelorograma za seizmički događaj magnitude  $M_L = 6,2$  od 29. prosinca 2020. (internetske stranice seizmološke službe pri Geofizičkom odsjeku PMF-a, [https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska\\_sluzba/potresi\\_kod\\_petrinje\\_2020](https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/potresi_kod_petrinje_2020), posjećeno 12. veljače 2021. godine)

Mjerna stanica	Geo. širina j [°N]	Geo. dužina I [°E]	Nadmorska visina [km]	Epicentralna udaljenost [km]	Komponenta zapisa (smjer gibanja tla) gore-dolje (Z), sjever-jug (N) i istok-zapad (E)	$PGA_{corr}$ [cm/s <sup>2</sup> ]	$PGV_{corr}$ [cm/s]	$PGD_{corr}$ [cm]
Zagreb 1	45,777	15,993	0,1	45,462	Z	45,482	2,160	0,859
					N	93,358	7,792	2,768
					E	79,973	<b>8,490</b>	<b>4,214</b>
Zagreb 2	45,827	15,987	0,179	50,775	Z	57,450	2,664	0,796
					N	97,696	5,240	1,791
					E	106,458	<b>6,399</b>	<b>2,954</b>
Zagreb 3	45,914	16,103	0,264	57,795	Z	122,490	3,574	0,664
					N	243,165	<b>9,586</b>	1,021
					E	162,763	6,072	0,937
Zagreb 4	45,808	15,999	0,115	48,503	Z	42,681	2,427	0,862
					N	124,275	5,960	2,309
					E	95,777	<b>6,234</b>	<b>2,870</b>
Zagreb 5	45,811	15,879	0,122	52,754	Z	36,999	1,743	0,500
					N	112,538	6,728	1,372
					E	127,554	<b>7,483</b>	<b>2,508</b>
Zagreb 6	45,907	15,968	0,994	59,654	Z	19,697	1,244	0,549
					N	38,826	1,776	0,797
					E	27,842	2,340	1,247

beton, azbestcement) te 0,3 [1] za elastične cijevne materijale (nodularni lijev, polivinil-klorid, čelik).

### 2.3.3. Honegger - Eguchijeva metoda

Ova metoda primjenjuje se za procjenu oštećenja nastalih uslijed trajnih deformacija tla,  $R_t$  [1/km], prema izrazu (4):

$$R_t = K_3 \cdot 7,821 \cdot PGD^{0,56} \quad (4)$$

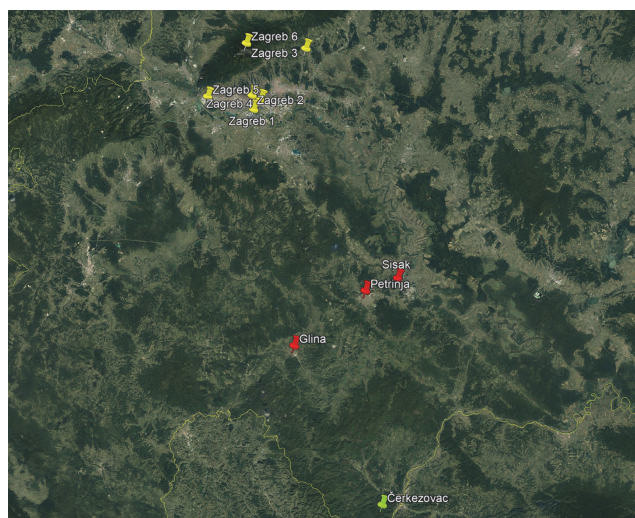
pri čemu je  $PGD$  trajno pomicanje tla nakon potresa u [cm], a koeficijent  $K_3$  poprima vrijednosti kao u HAZUS metodi.

## 3. Parametri seizmičke pobude na uslužnom području sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje

Za potrebe izrade ovog rada korištena su izvješća o potresima, koji su se dogodili 28. i 29. prosinca 2020., a objavila ih je od seizmološka služba pri Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno - matematičkog fakulteta (skr. PMF) Sveučilišta u Zagrebu.

Vrijednosti parametara seizmičke pobude zabilježene su na lokaciji mjerne stanice Čerkezovac (slika 2.) te na akcelorografima šest mjernih stanica lociranih na području grada Zagreba.

Vrijednosti maksimalnih horizontalnih akceleracija i brzina na području epicentra potresa te gradova Petrinje, Siska i Gline u isto vrijeme nisu zabilježene jer na navedenim područjima ne postoje mjerne stanice. Udaljenosti spomenutih mjernih stanica od epicentra seizmičkih događaja na tom području navedene su u tablici 2.



Slika 2. Lokacija mjerne stanice Čerkezovac u odnosu na grad Zagreb i analizirano područje grada Petrinje

Za izradu procjene oštećenja vodoopskrbne mreže korištene su izmjerene vrijednosti potresa od 29. prosinca 2020. godine, tj. potresa magnitude 6,2. Svi podaci prikupljeni na mjernim stanicama su za potrebe izrade izvješća Geofizičkog odsjeka PMF-a obrađeni za svaku komponentu te su u konačnici, radi eliminacije šuma u zapisu te pogrešaka u samom bilježenju, izrađeni korigirani zapisi vrijednosti najvećih ubrzanja ( $PGA_{corr}$ ), brzina ( $PGV_{corr}$ ) i pomaka ( $PGD_{corr}$ ) koji su prikazani u tablici 2. U nastavku teksta će se ove korigirane vrijednosti, kao i do sada, navoditi kao  $PGA$ ,  $PGV$  i  $PGD$ .

Na mjernoj stanici Čerkezovac najveća vrijednost  $PGA$  na površini je zabilježena za komponentu istok - zapad u iznosu 0,5 [ $m/s^2$ ], tj. oko 5 % akceleracije sile teže, a što je višestruko manje zabilježeno ubrzanje nego ubrzanje zabilježeno na području grada Zagreba (mjerna stanica Zagreb 3 s iznosom  $PGA$  od 2,4 [ $m/s^2$ ]).

Kako za prostornu razdiobu navedenih vrijednosti općenito vrijedi da one opadaju s epicentralnom udaljenošću, može se pretpostaviti da su vršne vrijednosti  $PGA$  i  $PGV$  na promatranom području, bliže epicentru, bile veće od izmjerenih. Naime, postoji veći broj istraživanja utjecaja epicentralne udaljenosti na smanjenje intenziteta seizmičkog događaja prema kojima se za prosječnu udaljenost od 50 [km], kao u promatranom slučaju, može očekivati smanjenje intenziteta za 2 do 3 stupnja, ovisno o autorima, tj. istraženim seizmičkim događajima [30, 31]. Također, sukladno s izvješćima Hrvatskog geološkog instituta te Geofizičkog odsjeka PMF-a, intenzitet potresa od 29. prosinca 2020. iznosio je u epicentru između VIII. i IX. stupnja MCS ljestvice, a istovremeno za Zagreb intenzitet ocijenjen i izračunan s vrijednosti VI. To je potvrđeno i u izvješćima statičkih pregleda građevina poslije, prema kojima su u blizini epicentra potresa utvrđene nepopravljive štete na obiteljskim kućama s izvedenim omeđenim zidom.

S obzirom na to da autorima ovog rada nisu dostupni podatci o prostornom rasporedu vrsta tla analiziranog područja i njegovog utjecaja na širenje i deformacije seizmičkih valova, a na temelju čega bi se moglo s većom sigurnošću odrediti vrijednosti  $PGV$  i  $PGD$  za to područje, tijekom procijenjivanja koristit će se maksimalno zabilježena, tj. izmjerena vrijednost sa šest mjernih stanica na području Zagreba. Pritom će se uzimati

dvostruko veća vrijednost, pod pretpostavkom da treba veća vrijednost  $PGV$  i  $PGD$  za predmetno područje odražava veće vrijednosti intenziteta na tom području. Navedeno ne mora nužno odgovarati stvarnom događaju, tj. ne može se potvrditi relevantnim mjerenjima. Međutim, na osnovi objavljenih radova koji su analizirali odnos između vršnog ubrzanja tla i intenziteta, pretpostavlja se da za razlike intenziteta od dva do tri stupnja postoji najmanje dvostruka razlika u vrijednosti  $PGA$  [32-34].

Pod takvom računskom pretpostavkom može se smatrati da oštećenja na vodoopskrbnoj mreži odgovaraju donjoj i gornjoj granici oštećenja, tj. konzervativnoj procjeni i procjeni najvećega broja oštećenja. Takav pristup je usvojen kako bi se sagledao raspon mogućeg broja oštećenja te dala, što realnija procjena. S obzirom na navedeno, procjena oštećenja temeljit će se na najvećoj zabilježenoj vrijednosti  $PGV$  od 9,6 [cm/s] te pretpostavljenoj vrijednosti od 19,2 [cm/s], tj. na najvećoj zabilježenoj vrijednosti  $PGD$  od 4,2 [cm], tj. 8,4 [cm].

#### 4. Procjena oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje

U ovom se poglavlju daje procjena broja oštećenja na postojećoj, tj. izgrađenoj vodoopskrbnoj mreži vodoopskrbnog sustava grada Petrinje, uključujući i općinu Lekenik, sukladno s utvrđenim odgovarajućim funkcijama ranjivosti prema najvećim izmjerenim vrijednostima parametara seizmičke pobude,  $PGV$  i  $PGD$ , na mjernim stanicama na području grada Zagreba, tablice 3., 5. i 7., ali i prema pretpostavljenim vrijednostima  $PGV$  i  $PGD$  na samom razmatranom području, tablice 4., 6., i 8.

Rezultati koji se odnose na procjenu broja oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži prema pretpostavljenim vrijednostima  $PGV$  i  $PGD$  na razmatranom području imaju oznaku zvjezdice (\*) pored naziva metode procjene oštećenja. U navedenim tablicama procjena broja oštećenja dana je prema vrsti cijevnog materijala i pripadnim duljinama vodoopskrbne mreže.

Za  $ALA$  metodu su koeficijenti  $K_1$  i  $K_2$  za PEHD cjevovode preuzeti s obzirom na vrijednosti kojima se koriste drugi autori istražujući utjecaj seizmičkih događaja na pojavu oštećenja

Tablica 3. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih i trajnih deformacija tla prema  $ALA$  metodi za najveće izmjerene vrijednosti  $PGV$  i  $PGD$

Materijal	Duljina [km]	$ALA$					
		$K_1$ [1]	$K_2$ [1]	$R_p$ [1/km]	$R_t$ [1/km]	$R_p$ [1]	$R_t$ [1]
Polietilen visoke gustoće (PEHD)	210,5	0,5	0,8	0,012	3,266	2	688
Polivinil-klorid (PVC)	38,1	0,5	0,8	0,012	3,266	0	124
Azbestcement (AC)	50,5	1,0	1,0	0,023	4,083	1	206
Lijevano željezo – sivi lijev (SL)	21,8	0,8	0,8	0,019	3,266	0	71
Lijevano željezo – nodularni lijev (NL)	20,0	0,5	0,5	0,012	2,041	0	41
					$\Sigma =$	<b>3</b>	<b>1 130</b>



Tablica 4. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih i trajnih deformacija tla prema ALA metodi za procijenjene vrijednosti *PGV* i *PGD* na razmatranom području

Materijal	Duljina [km]	ALA*					
		$K_1$ [1]	$K_2$ [1]	$R_p$ [1/km]	$R_t$ [1/km]	$R_p$ [1]	$R_t$ [1]
Polietilen visoke gustoće (PEHD)	210,5	0,5	0,8	0,023	3,756	5	791
Polivinil-klorid (PVC)	38,1	0,5	0,8	0,023	3,756	1	143
Azbestcement (AC)	50,5	1,0	1,0	0,046	4,695	2	237
Lijeivano željezo – sivi lijev (SL)	21,8	0,8	0,8	0,037	3,756	1	82
Lijeivano željezo – nodularni lijev (NL)	20,0	0,5	0,5	0,023	2,347	0	47
					$\Sigma =$	<b>9</b>	<b>1 299</b>

na vodoopskrbnim cjevovodima, a koje praktično odgovaraju vrijednostima koeficijenta za PVC. Iako se ALA metoda, prema preporukama dokumenata Europske komisije, koristi za procjenu oštećenja na naftovodima i plinovima, ovdje je ona poslužila da se sagleda raspon mogućeg broja oštećenja, jer se prema američkim smjernicama, tj. preporukama metoda koristi za procjenu oštećenja na vodoopskrbnim mrežama.

Procjena broja oštećenja primjenom pretpostavljenih dvostruko većih vrijednosti *PGV* i *PGA* u odnosu na izmjerene vrijednosti pokazuje da se povećanje broja oštećenja, u odnosu na konzervativnu procjenu, može očekivati podjednako za "krute" i "elastične" cjevovode te da dvostruko veće pretpostavljene vrijednosti *PGV* i *PGD* imaju manji utjecaj na povećanje ukupnog broja oštećenja. Vidljivo je da je razlika broja oštećenja dobivena na temelju pretpostavljenih vrijednosti *PGV* i *PGD*, u odnosu na iste mjerene vrijednosti, oko 15 %.

Rezultati dobiveni na temelju usvojenih metoda procjene oštećenja uslijed privremenih deformacija tla pokazuju da prolaskom seizmičkih valova ne treba očekivati značajnija oštećenja na vodoopskrbnoj mreži, odnosno da privremene deformacije tla na ukupan broj oštećenja postojeće vodoopskrbne mreže utječu izrazito malo. Dobiveni rezultati pokazuju manji broj oštećenja od očekivanih literaturnih vrijednosti utjecaja privremenih

deformacija na pojavu broja oštećenja. Međutim, takav rezultat može se pripisati činjenici da je većina postojeće vodoopskrbne mreže izgrađena od cijevnih materijala koji se, prema usvojenim metoda procjene oštećenja, smatraju elastičnim te time pokazuju bolji odziv na privremene deformacije tla.

Naime, na tom vodoopskrbnom sustavu najveći dio postojeće vodoopskrbne mreže izgrađen je upravo od PE cijevi koje prema vrijednosti koeficijenta  $K_3$  pokazuju trostruko veću seizmičku otpornost od sivog lijeva ili azbestcementnih cijevi. Osim toga, ovdje se dane procjene temelje isključivo na prethodno usvojenim funkcijama ranjivosti. Međutim, preciznija ocjena utjecaja širenja seizmičkih valova na novonastala oštećenja treba uslijediti pošto se detaljno prostorno obrade mjereni seizmički parametri pobude tla u odnosu na vrstu tla, stvarno utvrđen mehanizam oštećenja cijevi i spojeva, a prema vrstama cijevnih materijala. Takav pristup u trenutku pisanja ovog rada nije moguće primijeniti zbog nedostatka relevantnih podataka, a prije svega zbog nedostatka terenskih istraživanja stvarno utvrđenog broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži cijeloga vodoopskrbnog sustava. Preporuke o prikupljanju podataka za izradu budućih relevantnih procjena oštećenja uslijed seizmičkih događaja daju se u zaključku ovog rada.

Tablica 5. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla (prolaska seizmičkih valova) prema HAZUS (O'Rourke i Ayala) metodi za najveće izmjerene vrijednosti *PGV*

Materijal	Duljina [km]	HAZUS (O'Rourke - Ayala)		
		$K_3$ [1]	$R_p$ [1/km]	$R_p$ [1]
PEHD	210.5	0.3	0.005	1
PVC	38.1	0.3	0.005	0
AC	50.5	1.0	0.016	1
L.Ž (SL)	21.8	1.0	0.016	0
L.Ž. (NL)	20.0	0.3	0.005	0
			$\Sigma =$	<b>2</b>

Tablica 6. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed privremenih deformacija tla (prolaska seizmičkih valova) prema HAZUS (O'Rourke i Ayala) metodi za procijenjene vrijednosti *PGV* na tom području

Materijal	Duljina [km]	HAZUS (O'Rourke - Ayala)*		
		$K_3$ [1]	$R_p$ [1/km]	$R_p$ [1]
PEHD	210.5	0.3	0.023	5
PVC	38.1	0.3	0.023	1
AC	50.5	1.0	0.077	4
L.Ž (SL)	21.8	1.0	0.077	2
L.Ž. (NL)	20.0	0.3	0.023	0
			$\Sigma =$	<b>12</b>

Tablica 7. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed trajnih deformacija tla prema Honegger - Eguchijevoj metodi za najveće izmjerene vrijednosti *PGD*

Materijal	Duljina [km]	Honegger - Eguchi		
		$K_3$ [1]	$R_t$ [1/km]	$R_t$ [1]
PEHD	210.5	0.3	5.241	1103
PVC	38.1	0.3	5.241	199
AC	50.5	1.0	17.470	882
L.Ž (SL)	21.8	1.0	17.470	380
L.Ž. (NL)	20.0	0.3	5.241	105
			$\Sigma =$	<b>2,670</b>

Na osnovi procjene broja novonastalih oštećenja prema Honegger - Eguchijevoj metodi može se ustvrditi da su trajne deformacije tla uzrokovale glavninu oštećenja na predmetnoj vodoopskrbnoj mreži. Pri tome se, uzimajući u obzir konzervativni pristup s najvećim izmjerenim vrijednostima deformacije tla, procjenjuje da je na vodoopskrbnoj mreži nastalo oko 2 600 novih oštećenja od kojih se, prema procjeni autora, oko 85-90 %, odnosi na intervencije koje zahtijevaju zemljane radove. Naime, procjenjuje se da će se približno 10-15 % oštećenja moći sanirati izravno pomoću zasunskih okana ili drugih komora kao što su regulacijska okna, mjerna okna i sl. Procjena o oblicima očekivanih sanacija dana je kasnije u tekstu.

Uzme li se u obzir prostorno uvećanje vrijednosti parametara seizmičke pobude, tj. *PGD*, prema epicentru analiziranog seizmičkog događaja, može se očekivati povećanje broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži za približno 50 % u odnosu na konzervativnu procjenu.

Dodatno, za razliku od *ALA* metode, Honegger - Eguchijeva metoda pokazuje znatno veći odziv u povećanju broja oštećenja za povećanje vrijednosti *PGD*, a što je u skladu s očekivanjima. Naime, poznato je da između dviju vrijednosti magnitude potresa postoji logaritamski odnos tako da se sa svakim povećanjem magnitude oslobađaju višestruko veće količine elastične energije potresa koje dovode i do povećanja oštećenja na cjevovodnoj mreži.

S druge strane, raspon svih vrijednosti između analiziranih metoda pokazuje da razlika između očekivanog broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži može biti i veća od 350 %, tj. najkonzervativnija procjena prema *ALA* metodi rezultira s oko 1 100 novonastalih oštećenja nakon analiziranog potresa, dok gornja granica očekivanih oštećenja iznosi oko 4 000. Ako se uzme u obzir stanje oštećenosti vodoopskrbne mreže prije potresa, a prema kojemu su gubici vode, ovisno o uspješnosti provedbe aktivnosti smanjenja gubitaka, iznosili između 60 % (neposredno prije potresa) i 75 % od zahvaćenih količina (neposredno nakon potresa), kao i činjenica da je analiziranom potresu od 29. prosinca prethodio 28. prosinca još jedan značajan

Tablica 8. Procjena broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik uslijed trajnih deformacija tla prema Honegger - Eguchijevoj metodi za procijenjene vrijednosti *PGD* na promatranom području

Materijal	Duljina [km]	Honegger - Eguchi*		
		$K_3$ [1]	$R_t$ [1/km]	$R_t$ [1]
PEHD	210.5	0.3	7.726	1627
PVC	38.1	0.3	7.726	294
AC	50.5	1.0	25.755	1300
L.Ž (SL)	21.8	1.0	25.755	560
L.Ž. (NL)	20.0	0.3	7.726	155
			$\Sigma =$	<b>3,936</b>

potres magnitude 5,0 s epicentrom kod Petrinje, te isti dan dva potresa magnituda 4,7 i 4,1, može se opravdano pretpostaviti da je ukupnost seizmičkih događaja rezultirala brojem oštećenja koji teži prema gornjoj granici izvršenih procjena. Dodatno, kako su se u izradi ovog rada usvojile smjernice iz dokumenata Europske komisije, broj oštećenja prema konzervativnoj procjeni koji odgovaraju *ALA* metodi dalje nije razmatran.

Pri tome je bitno istaknuti da se sva novonastala oštećenja ne odnose isključivo na puknuća u vodoopskrbnoj mreži. Uzimaju se u obzir sva oštećenja koja se na njoj javljaju, a uključuju i diferencijalne pomake na mjestu spoja, manja puknuća koja rezultiraju pozadinskim istjecanjima koja je teško detektirati uobičajenim akustičnim metodama (po intenzitetu istjecanja ne moraju imati ekonomsko opravdanje za provedbu sanacije), oštećenja na kućnim priključcima te oštećenja na zasunskim oknima i u njima. Stoga, može se ustvrditi da se na vodoopskrbnom sustavu nakon potresa 29. prosinca 2020. javilo oko 3 800 novih oštećenja na postojećoj vodoopskrbnoj mreži.

Od navedenog broja oštećenja, imajući na umu zaključke s terenskih uvida u vrste oštećenja na građevinama vodoopskrbnog sustava te uzimajući u obzir prikupljene informacije javnog isporučitelja vodnih usluga o interventno provedenim sanacijama na vodoopskrbnoj mreži, procjenjuje se da će oko 90 % oštećenja (3 420 oštećenja) zahtijevati sanaciju koja uključuje i zemljane radove, tj. iskop radi pristupa oštećenju, a da će se oko 10 % oštećenja (380 oštećenja) moći popraviti unutar postojećih zasunskih okana u vidu saniranja pukotina, pomaka ili izmjene vodovodnih armatura i fasonskih komada. Osim toga, procjenjuje se da oko 40 % od svih oštećenja otpada na oštećenja opskrbnih i tranzitnih cjevovoda i pripadnih zasunskih okana (ukupno 1 520 oštećenja, od čega 1 368 na mreži te 152 oštećenja zasunskih okana), a oko 60 % oštećenja (2280 oštećenja) odnosi se na kućne priključke. Nadalje, procjenjuje se da 15 % od oštećenja na opskrbnim i tranzitnim cjevovodima (205 manjih oštećenja) odgovara javljanju malih (pozadinskih) istjecanja kod kojih u ovom trenutku ne postoji ekonomska

Tablica 9. Raspodjela procijenjenog broja oštećenja na vodoopskrbnoj mreži sustava javne vodoopskrbe grada Petrinje i općine Lekenik s procjenom ukupnog troška sanacije

Kategorija oštećenja	Broj oštećenja	Procjena jediničnog troška sanacije [kn] (1 EUR ≈ 7,5 kn)	Ukupno procijenjen trošak sanacije [kn] (1 EUR ≈ 7,5 kn)
Opskrbni i transportni cjevovodi	1 163	8 000	9 302 400
Manja oštećenja na mreži (pozadinska istjecanja)	205	/	/
Zasunska okna s mogućnošću sanacije	114	8 000	912 000
Zasunska okna bez mogućnosti sanacije - izgradnja novih okana s opremom	38	80 000	3 040 000
Kućni priključci	2 280	6 500	14 820 000
<b>Σ =</b>	<b>3 800</b>		<b>28 074 400</b>

opravdanost izvođenja sanacija. Također, procjenjuje se i da se oko 10 % oštećenja od oštećenja na mreži odnosi na oštećenja zasunskih okana (152 oštećenja), a od čega će 25 % oštećenih zasunskih okana biti izvan funkcioniranja te će zahtijevati potpuno novu izgradnju (38 oštećenja), a 75 % oštećenih zasunskih okana bit će moguće sanirati unutar okna (114 oštećenja). Sistematizacija oštećenja s procjenom pripadajućih šteta prikazana je u tablici 9.

Određena verifikacija navedenih procjena može se pronaći u broju prijava kvarova na vodoopskrbnoj mreži nakon potresa 29. prosinca. Naime, u danima koji su slijedili nakon potresa djelatnici isporučitelja vodnih usluga (Privreda d.o.o., Petrinja) zaprimili su velik broj prijava o oštećenju vodoopskrbnoj mreži (vidljivo i s površine terena) te velik broj prijava o oštećenju na kućnim priključcima. Brojnost prijava oštećenja bila je takva da je premašila kapacitete koje može evidentirati isporučitelj pa je evidentiranje nakratko bilo i prekinuto.

Napominje se da je procjena oštećenja data isključivo radi primjene prethodno izložene metodologije i odnosi se isključivo na pojedinačna točkasta oštećenja vodoopskrbne (opskrbne i tranzitne) mreže uslijed seizmičkog događaja krajem 2020. godine. Dakle, procjena ne uključuje oštećenja na drugim pripadajućim građevinama vodoopskrbnog sustava (npr. vodozahvati, hidrotehnički tunel, crpne stanice i dr.) koji su također oštećeni tijekom tih potresa, a ne obuhvaća niti rekonstrukcije ili sanacije onih dionica mreže na kojima je naknadnim pregledom i prethodnim poznavanjem stanja oštećenosti utvrđena potreba cjelovite sanacije ili rekonstrukcije.

## 5. Zaključak

Primjenom takozvanih funkcija ranjivosti izvršena je procjena oštećenja i pripadnih šteta na vodoopskrbnoj mreži, s pripadnim zasunskim oknima te kućnim priključcima, vodovoda grada Petrinje nakon potresa 29. prosinca 2020. Primjenom funkcija ranjivosti procjenjuje se broj oštećenja na temelju privremenih i trajnih deformacija tla izazvanih seizmičkim događajem, pri čemu se od tehničkih karakteristika vodoopskrbne mreže, kao

utjecajni parametar, uzima u obzir prije svega vrsta cijevnog materijala. Uzimajući u obzir izmjerene parametre seizmičke pobude na mjernim stanicama grada Zagreba, kao i na temelju prethodnih istraživanja procijenjene vrijednosti deformacija tla na razmatranom području, procjenjuje se da je nakon analiziranog seizmičkog događaja nastalo oko 3 800 novih oštećenja s ukupnom štetom od 28 milijuna kuna. Ovdje dane procjene treba shvatiti kao najbolje moguće empirijski zasnovane procjene oštećenja i pripadnih šteta, kod kojih postoji određen stupanj nesigurnosti koji se odnosi na neuzimanje u obzir, tj. na djelomično uzimanje u obzir (rezultat statističke obrade izvedenih funkcija ranjivosti) i drugih relevantnih tehničkih karakteristika vodoopskrbne mreže te nepoznavanje detaljnog stanja oštećenosti vodoopskrbne mreže prije analiziranog seizmičkog događaja.

S obzirom na to, iskazane procjene broja novonastalih oštećenja na vodoopskrbnoj mreži treba u iterativnom postupku verificirati u skladu s obradom prikupljenih podataka terenskih istraživanja, lociranja i sanacije nastalih puknuća na vodoopskrbnoj mreži te prostornoj obradi parametara seizmičke pobude (PGV i PGA). Sve prikupljene podatke kasnije treba sistematizirati s obzirom na vrstu cijevnog materijala, vrstu spoja te druge relevantne tehničke parametre kao što su promjer, starost, vrsta cijevnih spojeva, vrsta materijala zasunskih okana i način izvedbe prodora (prolaza) cijevi na oknima, vrste i agresivnost tla, geomehničke karakteristike tla, nivo podzemnih voda i dr. Potrebno je, dakle, izvršiti i detaljna geomehnička istraživanja tla na tom području kako bi se utvrdila ispravnost primijenjenih metoda procjene broja oštećenja za to područje, tj. utvrdilo treba li uzeti u obzir i druge deformacije tla. Pri tome je iznimno važno da se kod svake provedene sanacije, tj. utvrđenog mjesta oštećenja, prikupe podaci koji se odnose na detaljan opis (uz fotografiju) uočenog oštećenja i lokacije oštećenja, načina sanacije, trajanja sanacije, kao i procijenjeni te stvarni trošak sanacije.

Osim navedenih tehničkih parametara, a vezano za uvjete ležišta cjevovoda, potrebno je pobliže ispitati utjecaj postojanja betonskih uporišnih blokova pri djelovanju potresa. Naime, nije

rijedak slučaj da se uporišni blokovi projektirani na mjestima horizontalnih i vertikalnih promjena smjera trasa cjevovoda ne izvode, pa se gubitkom adekvatnog uporišta rezultantna sila hidrodinamičkog i hidrostatskog djelovanja direktno prenosi na spojeve na mjestima promjene smjera trasa. To povećava mogućnost kidanja spojeva, a naročito dolazi do izražaja kod trešnje tla uslijed seizmičkog događaja. Stoga je potrebno utvrditi može li se dovoljnim brojem uporišnih blokova povećati

seizmička otpornost vodoopskrbne mreže te ujedno smanjiti ranjivost cjevovoda.

Uz rezultat svih navedenih analiza, u konačnici, trebaju biti izvedene funkcije ranjivosti za konkretan vodoopskrbni sustav koje će s većim stupnjem sigurnosti poslužiti za određivanje oštećenja u nekom budućem seizmičkom događaju ili za ispitivanje različitih scenarija utvrđivanja protupotresne otpornosti vodoopskrbne mreže prilikom njenog projektiranja.

## LITERATURA

- [1] Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K., Shirozu, T.: Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines, *Water supply*, (2000) 18, pp. 63–68.
- [2] Halfaya, F.Z., Bensaibi, M., Davenne, L.: Vulnerability assessment of water supply network, *Energy Procedia*, (2012) 18, pp. 772–783, doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.093.
- [3] Nagata, S., Yamamoto, K., Ishida, H., Kusaka, A.: Estimation of Fragility Curve of Sewerage Pipes due to Seismic Damaged Data, *Procedia Engineering*, (2011) 14, pp. 1887–1896., doi: 10.1016/j.proeng.2011.07.237.
- [4] Fragiadakis, M., Christodoulou, S., Vamvatsikos, D.: Reliability Assessment of Urban Water Distribution Networks Under Seismic Loads, *Water Resources Management*, 27 (2013) 10, pp. 3739–3764, doi: 10.1007/s11269-013-0378-0.
- [5] Wang, Y.: Seismic risk assessment of water supply systems, *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, Woodhead Publishing in Materials, 2013.
- [6] Choi, J., Yoo, D.G., Kang, D.: Post-Earthquake Restoration Simulation Model for Water Supply Networks, *Sustainability*, 10 (2018) 10, 3618, doi: <https://doi.org/10.3390/su10103618>
- [7] Porter, K.A.: Damage and Restoration of Water Supply Systems in an Earthquake Sequence, Report SESM 16-02, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 2016, [https://www.colorado.edu/ceae/sites/default/files/attached-files/porter\\_27\\_jul\\_2016\\_cu\\_water\\_model.pdf](https://www.colorado.edu/ceae/sites/default/files/attached-files/porter_27_jul_2016_cu_water_model.pdf), 11.02.2021.
- [8] Javanbarg, M.B., Scawthorn, C.: ULLIS: Urban Infrastructure and Lifelines Interactions of Systems, 15th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 10358–10364, 2012.
- [9] Faccioli E., Callerio, A; Ameri, G. et al.: Prediction of Ground Motion and Loss Scenarios for Selected Infrastructures Systems in European Urban Environments, LESSLOSS Report 2007/08; 2007. <https://www.earth-prints.org/handle/2122/3227>, 11.02.2021.
- [10] Toprak, S., Taskin, F.: Estimation of Earthquake Damage to Buried Pipelines Caused by Ground Shaking, *Nat Hazards*, 40 (2007), pp. 1–24, doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-006-0002-1>
- [11] Tromans, I: Behaviour of buried water supply pipelines in earthquake zones; A thesis; University of London; Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2004.
- [12] Baker, J.W.: Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis, *Earthquake Spectra*, 31 (2015) 1, pp. 579–599. doi: 10.1193/021113eqs025m
- [13] Pitilakis, K., Alexoudi, M., Argyroudis, S. et al.: Earthquake risk assessment of lifelines. *Bull Earthquake Eng*, 4 (2006), pp. 365–390, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9022-1>
- [14] Katayama, T., Kubo, K., Sato, N.: Earthquake damage to water and gas distribution systems, U.S. National Conference on Earthquake Engineering, pp. 396–405, 1975.
- [15] Eguchi, R.T., Philipson, L.L., Legg, M.R., Wiggins, J.H., Slosson, J.E.: Earthquake vulnerability of water supply systems. Technical Report No. 80-1396-3, J.H. Wiggins Company, Redondo Beach, CA, 1981.
- [16] Eguchi, R.T., Taylor, C., Hasselman, T.K.: Seismic component vulnerability models for lifeline risk analysis, Technical Report No. 82-1396-2c, J.H. Wiggins Company, Redondo Beach, CA, 1983.
- [17] Barenberg, M.E.: Correlations of pipeline damage with ground motions, *J. Geotechnic. Eng*, 114 (1989), pp. 706–711, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:6(706)
- [18] Federal Emergency Management Agency (FEMA): Earthquake loss estimation methodology HAZUS Service Release 5: technical manual, FEMA, Washington, DC., 2001 <http://www.fema.gov/hazus>, 11.02.2021.
- [19] Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de M.F., Fabbrocino, G.: Vulnerability of Pipelines Subjected to Permanent Deformation Due to Geotechnical Co-seismic Effects, *Chemical Engineering Transactions*, 32 (2013), pp. 415–420, doi: 10.3303/CET1332070.
- [20] O'Rourke, T.D., Toprak, S., Sano, Y.: Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake, 6th US National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, pp. 1–12, 1998.
- [21] O'Rourke, T.D., Jeon, S.S.: Factors affecting the earthquake damage of water distribution systems, Optimizing post-earthquake lifeline system reliability, Fifth U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, pp. 379–388, 1999.
- [22] Eidinger, J.: Seismic Fragility Formulations for Water Systems – part 1. American Lifelines Alliance, G&E Engineering Systems Inc., 2001, [www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part\\_1\\_Guideline.pdf](http://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part_1_Guideline.pdf), 11.02.2021.
- [23] Pineda, O., Ordaz, M.: Seismic Vulnerability Function for High-Diameter Buried Pipelines: Mexico City's Primary Water System Case, *Pipeline Engineering and Construction International Conference*, pp. 1145–1154, 2003, doi: 10.1061/40690(2003)131.
- [24] O'Rourke, M., Deyoe, E.: Seismic Damage to Segmented Buried Pipe, *Earthquake Spectra*, 20 (2004) 4, pp. 1167–1183, doi:10.1193/1.1808143
- [25] O'Rourke, T.D., Jeon, S.S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., van Ballegooy, S., Bouziou, D.: Earthquake response of underground pipeline networks in Christchurch, NZ. *Earthquake Spectra*, 30 (2014) 1, pp. 183–204, doi: 10.1193/030413EQS062M

- [26] Lee, C.W., Kwon, H.J., Yoo, D.G.: Seismic Reliability Assessment of Water Supply Systems Considering Critical Paths, *Applied Sciences*, 10 (2020) 22, 8056, pp. 1-16, doi:10.3390/app.10228056
- [27] Eidinger, J.: Seismic Fragility Formulations for Water Systems – part 2. American Lifelines Alliance, G&E Engineering Systems Inc., 2001, [https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part\\_2\\_Appendices.pdf](https://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part_2_Appendices.pdf), 11.02.2021.
- [28] Pitalakis, K., Franchin, P., Khazai, B., Wenzel, H.: SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Complex Urban, Utility, Lifeline Systems and Critical Facilities - Methodology and Applications, Springer, 2014.
- [29] Cavalieri, F. et al.: SYNER-G Reference Report-4: Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities, 2013, [www.vce.at/SYNER-G/pdf/deliverables/D8.10\\_RR4-LB-NA-25880-EN-N.pdf](http://www.vce.at/SYNER-G/pdf/deliverables/D8.10_RR4-LB-NA-25880-EN-N.pdf), 11.02.2021.
- [30] Musson, R.M.W.: Intensity attenuation in the U.K., *Journal of Seismology*, 9 (2005) 1, pp. 73–86, doi:10.1007/s10950-005-2979-4
- [31] Kaila, K.L., Dipankar, S.: Earthquake intensity attenuation pattern in the United States, *Geophysical Journal International*, 70 (1982) 1, pp. 31–39, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06389.x>
- [32] Gomez-Capera, A.A., D'Amico, M., Lanzano, G. et al.: Relationships between ground motion parameters and macroseismic intensity for Italy, *Bull Earthquake Eng*, 18 (2020), pp. 5143-5164 <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00905-0>
- [33] Strelec, S., Jug, J., Stanko, D.: Određivanje projektnih vrijednosti maksimalnog potresa (EUROCODE 8) primjenom višekanalne analize površinskih valova (MASW), *Mineral*, 3/2014 (2014), pp. 24-30
- [34] Tselentis, G., Danciu, L.: Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Engineering Ground-Motion Parameters in Greece, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (2008), pp. 1863-1875, doi:10.1785/0120070172.